公益

珍惜呵护生命中的

每一滴水

期刊基本参数：CN 10-1326/TV＊2015＊m＊A4＊84＊zh＊P＊¥20.00＊14000＊18＊2022-8

水资源开发与管理

二〇二二年 第八卷 第八期

Vol.8 No.8 2022

《中国核心期刊（遴选）数据库》收录期刊
《中文科技期刊数据库》收录期刊
《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
《中国知识资源总库》收录期刊

ISSN 2096－0131
CN 10－1326/TV

2022.8
第8卷

水资源开发与管理

Water Resources Development and Management

ISSN 2096-0131

08>

9 772096 013226

中国水利工程协会主管
Directed by China Water Engineering Association
中国水利工程协会主办
Sponsored by China Water Engineering Association

《中国河流泥沙公报》

近日，水利部发布 2021 年《中国河流泥沙公报》。

2021 年《中国河流泥沙公报》编报范围包括长江、黄河、淮河、海河、珠江、松花江、辽河、钱塘江、闽江、塔里木河、黑河和疏勒河等 12 条主要河流及青海湖区。内容包括河流主要水文控制站年实测径流量、年实测输沙量及其年内分布和洪水泥沙特征，重点河段冲淤变化，重要水库及湖泊冲淤变化和重要泥沙事件等。

2021 年我国主要河流代表站实测总径流量为 14270 亿立方米，与多年平均年径流量基本持平，较 2020 年径流量减小 14%；代表站年总输沙量为 3.31 亿吨，较多年平均年输沙量偏小 77%，较 2020 年输沙量减小 29%。其中，2021 年长江和珠江代表站的径流量分别占主要河流代表站年总径流量的 68% 和 13%；长江和黄河代表站的年输沙量分别占主要河流代表站年总输沙量的 31% 和 52%；2021 年黄河、塔里木河和疏勒河代表站平均含沙量较大，分别为 4.33 千克 / 立方米、1.98 千克 / 立方米和 2.80 千克 / 立方米，其他河流代表站平均含沙量均小于 0.680 千克 / 立方米。

2021 年长江干流代表站实测水沙特征值与多年平均值比较，直门达、宜昌、沙市、汉口和大通年径流量偏大 7% ～ 48%，向家坝站和朱沱站偏小 14% 和 9%，其他站基本持平；年输沙量除直门达站偏大 35%，其他站偏小 20% ～ 99%。2021 年度重庆主城区河段泥沙淤积量为 154.1 万立方米，三峡水库库区泥沙淤积量为 7160 万吨，丹江口水库库区泥沙淤积量为 2560 万吨。

2021 年黄河干流代表站实测水沙特征值与多年平均值比较，头道拐站年径流量基本持平，龙门站偏小 8%，其他站偏大 9% ～ 53%；各站年输沙量偏小 20% ～ 91%。内蒙古河段石嘴山、三湖河口和头道拐各断面表现为淤积，巴彦高勒断面表现为冲刷；黄河下游河道冲刷量为 1.514 亿立方米。三门峡水库干流冲刷量为 0.878 亿立方米；小浪底水库淤积量为 1.151 亿立方米。

2021 年主要泥沙事件包括：长江干流及主要支流河道发生崩岸，金沙江干、支流多座重要水库进行初期蓄水；黄河中下游发生严重秋汛，黄河通过水库联合调度实施汛前调水调沙；海河流域卫河发生洪水导致左堤出现漫溢决口。

（来源：水利部 2020 年 7 月 4 日 http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202207/t20220704_1583153.html）

以专业求生存　以服务谋发展

——安徽安兆工程技术咨询服务有限公司

安徽安兆工程技术咨询服务有限公司是以招标代理、造价咨询、安全评价、专题研究、政策咨询为主的咨询公司，成立于 2004 年 8 月，注册资金 1000 万元。

公司以水利行业发展为主线，业务范围涉及房屋建筑、市政、公路、水运等多个行业。公司严格遵守国家法律法规，努力为客户实现综合效益最大化，真诚的服务赢得了社会各方的高度认可，荣获“全国水利建设与管理先进集体”“双满意工程招标代理机构”“安徽省公共资源交易领域诚实守信优质服务单位”“安徽省工程招标代理机构会员 30 强”等荣誉称号，并取得了水利建设市场主体信用评价 AAA 级。

体系建设

公司建立内部诚信自律管理体系。成立法人负总责的诚信管理和工作机构，配备专职或兼职诚信管理人员，制定企业诚信方针和目标；从业人员诚信教育及考核、关键岗位人员诚信信息等相关记录档案管理制度，诚信内部核查、诚信风险信息收集评估、诚信危机处理和预警制度等，加强各环节和各岗位诚信管理。

文化建设

加强企业的诚信文化宣传教育，增强企业法制意识、责任意识、诚信意识和安全意识，逐步形成以守法、履责、诚信为核心的企业诚信文化。

诚信经营

在市场竞争中，依法执业，廉洁自律。认真履行各类经济、劳动等合同、协议，无违法违规欺诈行为；无骗取贷款、借贷不还、恶意欠贷等银行信用失信行为；依法签订用工合同，为员工按时、足额缴纳养老、医疗、工伤、失业、生育保险；积极参加行业自律活动，公开发布企业信用承诺书。

社会责任

依法按时申报和足额纳税，不偷税漏税。参加脱贫攻坚、防汛救灾、慈善公益等活动，积极履行国企义务，承担社会责任。

水资源开发与管理

Shuiziyuan Kaifa Yu Guanli

（月刊）

2015 年创刊

2022 年第 8 卷第 8 期

总第 79 期

出版日期：2022 年 8 月 25 日

主管单位　中国水利工程协会
主办单位　中国水利工程协会

主　　编　安中仁
副 主 编　任京梅　吴香菊
编辑部主任　杨　燕
编　　辑　王宁昕　季雪威

编辑出版　《水利建设与管理》杂志社有限公司
通信地址　北京市西城区南滨河路 27 号小区 7 号楼 11 层 1116 号（贵都国际中心 B 座 1116 室编 1105）
邮　　编　100055
网　　址　http://www.sljsygl.com
在线投稿　http://szy.sljsygl.com/home/login
联系电话　010-63305220（发行）
010-63305233（投稿）
010-63305258（广告）

印刷单位　北京博海升彩色印刷有限公司
发行范围　公开发行
国内发行　中国邮政集团公司北京市报刊发行局
本刊发行部
邮发代号　82-389
国外发行　中国国际图书贸易集团有限公司
国外发行代号　MO9525
中国标准连续出版物号　ISSN 2096－0131 / CN 10－1326/TV
广告发布登记　京西市监广登字 20170082 号
国内定价　20.00 元

水利建设与管理杂志社官方微信公众号二维码，欢迎扫描加关注，随时检索协会会刊论文发表情况。

目次 CONTENTS 2022年第8期

本期特稿

1　坚持系统观念　强化流域治理管理
水利部党组书记、部长　李国英

3　建设数字孪生流域　推动新阶段水利高质量发展
水利部党组书记、部长　李国英

6　2022 年推进智慧水利建设水资源管理工作要点

水资源管理

8　南疆地区水资源保障问题和对策分析　刘建军

12　基于综合指数法的城市水安全评价　周　双　何怀光　李　娜

17　晋城市非常规水源利用浅析　钟　强

25　地下水水位水量双控管理研究综述　孙雪峰　孙春峰

水文

30　非一致性条件下输沙对降水与径流的响应变化研究
陈　凯　吴彦昭　王巧娟

36　太子河流域本溪段降水径流特征分析　张　炎

42　泾河流域红河水文站泥沙测验方式优化研究　蒙雅雯　崔建和

48　近 50 年石羊河蔡旗站径流长期演变特征及趋势研究　康建瑛

水生态保护

53　新时期水土保持工作新模式探讨　张宜清　张琳英　郝旭乾

56　晋城地区农村饮水水质安全评价体系研究
郭　宁　王晓静　王卫华

61　基于模糊综合评价法评价引黄灌区供水水质　房本岩　魏守民

65　颍河干流阜阳段水质时空变化特征及影响分析　应　玉

70　浅析“十三五”期间辽宁省近岸海域水资源质量　孙　鹏　谢　轶

75　不同土质条件下植被护坡对河岸稳定性的影响　何文华
81　生态文明视角下水利工程占地空间规划与利用研究
赵子杰　丁　玉　刘烨华

公益：广告

封一　安徽佛子岭水库(摄影：崔德密)

封二　《中国河流泥沙公报》

封三　水利诚信单位风采展示(安徽安兆工程技术咨询服务有限公司)

封底　珍惜呵护生命中的每一滴水

编　委　会

名 誉 主 任：王　浩
主　　任：安中仁
副　主　任：任京梅　董红元
编委会成员（按姓氏笔画排列）
王国庆　王新才　石玉波
杨金春　张文鸽　张淑玲
张新玉　罗益信　姜广田

版权声明：本刊刊出的内容，未经本刊许可，不得转载。所有在本刊刊发的文字、图片，本刊拥有网络电子版版权。如果作者有异议，请在来稿时向本刊声明。

CONTENTS WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT
Vol.8 NO.8 2022

Special Report

1 Adhere to the concept of systemstrengthening river basin governance and management
LI Guoying, Party Secretary and Minister of MWR

3 Constructing Digital Twin River Basins to Promote the High-Quality Water Development in the New Stage
LI Guoying, Party Secretary and Minister of MWR

6 Key Points of water resources management to promote intelligent water conservancy construction in 2022

Water Resources Management

8 Problems and countermeasures of water resources guarantee in South Xinjiang LIU Jianjun

12 Evaluation of urban water security based on comprehensive index method
ZHOU Shuang, HE Huaiguang, LI Na

17 Analysis on utilization of unconventional water sources in Jincheng City ZHONG Qiang

25 Summary of research on dual control management of groundwater level and quantity
SUN Xuefeng, SUN Chunfeng

Hydrology

30 Response of sediment transport to precipitation and runoff under inconsistent conditions
CHEN Kai, WU Yanzhao, WANG Qiaojuan

36 Analysis of precipitation and runoff characteristics in Benxi Section of Taizi River basin ZHANG Yan

42 Study on optimization of sediment measurement mode of Honghe hydrological station in Jinghe River basin
MENG Yawen, CUI Jianhe

48 Long-term evolution characteristics and trend of runoff at Caiqi station of Shiyang River in recent 50 years
KANG Jianying

Water Ecological Protection

53 Discussion on the new model of soil and water conservation in the new period
ZHANG Yiqing, ZHANG Linying, HAO Xuqian

56 Safety evaluation system of rural drinking water quality in Jincheng area
GUO Ning, WANG Xiaojing, WANG Weihua

61 Evaluation of water supply quality in Yellow River irrigation area based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method FANG Benyan, WEI Shoumin

65 Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Fuyang section of the main stream of Yinghe River and its impact analysis YING Yu

70 Analysis on the quality of water resources in Liaoning coastal waters during the 13th five-year plan period SUN Peng, XIE Yi

75 Influence of vegetation slope protection on bank stability under different soil conditions HE Wenhua

81 Study on planning and utilization of water conservancy project covering space from the perspective of ecological civilization ZHAO Zijie, DING Yu, LIU Yehua

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.01

坚持系统观念　强化流域治理管理

水利部党组书记、部长　李国英

习近平总书记强调，“坚持系统观念，从生态系统整体性出发，推进山水林田湖草沙一体化保护和修复，更加注重综合治理、系统治理、源头治理”“保障水安全，关键要转变治水思路，按照‘节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力’的方针治水，统筹做好水灾害防治、水资源节约、水生态保护修复、水环境治理”“要从生态系统整体性和流域系统性出发，追根溯源、系统治疗”“上下游、干支流、左右岸统筹谋划，共同抓好大保护，协同推进大治理”。我们要深入贯彻落实习近平总书记的重要讲话精神，坚持系统观念，强化流域治理管理，打造幸福河湖，为建设人与自然和谐共生的美丽中国作出更大贡献。

流域性是江河湖泊最根本、最鲜明的特性。坚持系统观念治水，关键是要以流域为单元，用系统思维统筹水的全过程治理，强化流域治理管理。流域是降水自然形成的以分水岭为边界、以江河湖泊为纽带的独立空间单元，流域内自然要素、经济要素、社会要素、文化要素紧密关联，共同构成了复合大系统。治水只有立足于流域的系统性、水流的规律性，正确处理系统与要素、要素与要素、结构与层次、系统与环境的关系，才能有效提升流域水安全保障能力。

强化流域统一规划。要以流域为单元，一体化谋划流域保护治理全局，为推进流域保护治理提供重要依据。在完善流域综合规划上，立足流域整体，科学把握流域自然本底特征、经济社会发展需要、生态环境保护要求，正确处理需要与可能、除害与兴利、开发与保护、上下游、左右岸、干支流、近远期的关系，对流域的开发利用、水资源节约集约利用、水旱灾害防御作出总体部署，构建流域保护治理的整体格局。流域综合规划具有战略性、宏观性、基础性，流域范围内的区域规划应当服从流域规划。在完善流域专业规划体系上，以流域综合规划为遵循，细化深化实化有关要求，形成定位准确、边界清晰、功能互补、统一衔接的流域专业规划体系。完善流域防洪规划，系统部署流域内水库、河道及堤防、蓄滞洪区建设，统筹安排洪水出路。立足流域水资源时空分布，研判把握水资源长远供求趋势，完善流域水资源规划，增强流域水资源统筹调配能力、供水保障能力、战略储备能力。在强化规划权威性上，规划一经批准，必须严格执行。建立健全流域规划实施责任制，完善流域规划相关指标监测、统计、评估、考核制度，强化结果运用，确保流域规划目标任务全面落实。严格依据相关法律法规和流域规划开展水工程建设规划同意书、河道管理范围内建设项目工程建设方案、建设项目水土保持方案、工程建设影响水文监测等许可审批，对不符合法律法规和流域规划要求的，不予行政审批。

强化流域统一治理。要充分发挥流域规划的引领、指导、约束作用，推进流域协同保护治理，做到目标一致、布局一体、步调有序。统筹工程布局。坚持区域服从流域的基本原则，统筹协调上下游、左右岸、干支流关系，综合考虑工程功能定位、区域分布，科学确定工程布局、规模、标准，着力完善流域防洪工程体系和水资源配置体系。流域内水利工程建设要算系统账、算长远账、算整体账，每个单点工程的论证和方案比选，都要充分考虑对全流域的影响，

在流域规划的总体框架下进行。特别是防洪工程，要根据流域上下游防洪保护对象的不同，科学确定防洪标准、工程规模、运行方式等，防止因建设不当而产生系统性不利影响。统筹项目实施。从流域全局着眼，更加注重工程项目的关联性和耦合性，防止畸轻畸重、单兵突进、顾此失彼。合理区分轻重缓急，统筹安排工程实施优先序，做到流域和区域相匹配、骨干和配套相衔接、保护和治理相统筹，坚决避免出现上下游相互掣肘、干支流系统割裂、左右岸以邻为壑的现象。

强化流域统一调度。要充分发挥流域级平台的牵头作用，强化多目标统筹协调调度，建立健全各方利益协调统一的调度体制机制，更好保障流域水安全，实现流域涉水效益的“帕累托最优”。强化流域防洪统一调度。始终把保障人民群众生命财产安全放在第一位，按照洪水发生和演进规律，以流域为单元，综合分析洪水行进路径、洪峰、洪量、过程，系统考虑上下游、左右岸、干支流的来水、泄水、蓄水、分水，全面考虑不同防洪保护对象的实际需求，精细落实预报、预警、预演、预案措施，精准确定拦、排、分、滞措施，以系统性调度应对流域性洪水。强化流域水资源统一调度。以流域为单元，统筹供水、灌溉、生态、发电、航运等需求，根据雨情、水情、旱情、水库蓄水量等，按照节水优先、保护生态、统一调度、分级负责的原则，加强区域间、行业间不同调度需求统筹，构建目标科学、配置合理、调度优化、监管有力的流域水资源管理体系，实现流域水资源统一调度。强化流域生态统一调度。从全流域出发，依据生态保护对象确定生态调度目标，优化调度方案，保障河流生态功能用水需求。加强生态流量管理，保障河湖生态流量，坚决遏制河道断流和湖泊萎缩干涸态势，维护河湖健康生命。

强化流域统一管理。要打破区域行业壁垒，加强流域综合执法，构建流域统筹、区域协同、部门联动的管理格局，一体提升流域水利管理能力和水平。强化河湖统一管理。充分发挥河湖长制作用，发挥流域层面河湖长制工作协作机制作用，构建目标统一、任务协同、措施衔接、行动同步的流域河湖长制工作机制，推进上下游、左右岸、干支流联防联控联治。完善水行政执法跨区域联动机制、跨部门联合机制、与刑事司法衔接机制、与检察公益诉讼协作机制，严厉打击河道乱占、乱采、乱堆、乱建等违法违规行为，严肃查处非法围垦河湖、人为水土流失等问题，坚决遏制侵占河湖躯体的行为，实现河湖功能永续利用。强化水权水资源统一管理。做好流域初始水权分配，把流域水资源量逐级分解到流域内的行政区域和河流控制断面。强化水资源刚性约束，落实用水总量和强度双控，严格水资源用途管制，对流域内水资源超载地区暂停新增取水许可，及时制止和纠正无证取水、超许可取水、超计划取水、超采地下水、擅自改变取水用途等行为。建立完善流域用水权市场化交易平台和相关制度，培育和发展用水权交易市场，引导推进流域地区间、行业间、用水户间开展多种形式的用水权交易。

在实现第二个百年奋斗目标的新征程上，我们要深入学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想，善用系统思维统筹水的全过程治理，保持定力、久久为功，大力实施流域统一规划、统一治理、统一调度、统一管理，奋力开拓流域治理管理新局面，为全面建设社会主义现代化国家提供强有力的水安全保障。

（来源：《人民日报》2022年6月28日）

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.02

建设数字孪生流域 推动新阶段水利高质量发展

水利部党组书记、部长　李国英

习近平总书记强调，要全面贯彻网络强国战略，把数字技术广泛应用于政府管理服务，推动政府数字化、智能化运行，为推进国家治理体系和治理能力现代化提供有力支撑，并提出了提升流域设施数字化、网络化、智能化水平的明确要求。我们要深入学习贯彻习近平总书记重要讲话精神和重要指示批示精神，加快建设数字孪生流域，构建智慧水利体系，推动新阶段水利高质量发展。

建设数字孪生流域是提升国家水安全保障能力的重要支撑

习近平总书记强调，保护江河湖泊，事关人民群众福祉，事关中华民族长远发展。我国江河水系众多，保护治理是一个庞大复杂的系统工程，必须坚持数字赋能，依托现代信息技术变革治理理念和治理手段。建设数字孪生流域，就是要以物理流域为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动，对物理流域全要素和水利治理管理全过程的数字化映射、智能化模拟，实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化。

党中央、国务院作出了明确部署。国家“十四五”规划纲要明确要求，构建智慧水利体系，以流域为单元提升水情测报和智能调度能力。国家“十四五”新型基础设施建设规划明确提出，要推动大江大河大湖数字孪生、智慧化模拟和智能业务应用建设。黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要、长江三角洲区域一体化发展规划纲要等，都对数字孪生流域建设提出了更加具体明确的要求。落实党中央、国务院重大决策部署，必须大力推进数字孪生流域建设。

现代信息技术发展提供了支撑条件。进入新发展阶段，云计算、大数据、人工智能技术快速发展，推动水利发展向数字化、网络化、智能化转变的技术条件已经具备。近年来，水利信息化建设取得积极成效，但流域透彻感知算据仍有不足，模型算法距高保真目标尚有差距，计算存储能力亦不足需，网络安全防护能力偏弱，运行和管理智能水平亟待提升。要加强数字孪生、大数据、人工智能等新一代信息技术与水利业务的深度融合，充分发挥信息技术支撑驱动作用，大力提升水利决策与管理的数字化、网络化、智能化水平。

强化流域治理管理提出了迫切要求。流域性是江河湖泊最根本、最鲜明的特性，治水管水必须以流域为单元，实施统一规划、统一治理、统一调度、统一管理。这就要求数字孪生流域提供强大技术支撑。统一规划方面，通过在数字孪生流域中对规划各要素进行预演分析，全面、快速比对不同规划方案的目标、效果和影响，确定最优规划方案。统一治理方面，通过在数字孪生流域中预演治理工程布局及建设方案，评估治理工程与规划方案的符合性，分析治理工程对周边环境和流域的整体影响，辅助确定治理工程布局、规模标准、运行方式、实施优先序等。统一调度方面，通过在数字孪生流域中综合分析比对各要素，预演防洪、供水、发电、航运、生态等调度过程，动态调整优化调度方案。统一管理方面，通过数字孪生

流域动态掌握河湖全貌，实现权威存证、精准定位、影响分析，更好支撑上下游、左右岸、干支流联防联控联治。

加强数字孪生流域算据、算法、算力建设

建设数字孪生流域，原则是坚持需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力，目标是实现数字化场景、智慧化模拟、精准化决策，核心任务是加强算据、算法、算力建设。

夯实算据基础。算据是物理流域及其影响区域的数字化表达，是构建数字孪生流域的数据基础，包括自然地理、干支流水系、河道流场、水利工程、经济社会等信息。要锚定数字化场景目标，构建天、空、地一体化水利感知网，通过优化提档水文、水资源、河床演变、水利工程等地面监测，进一步完善地下水监测站网，加强卫星、无人机、无人船等载体遥感监测，提升应急监测能力，推进物理流域监测系统的科学建设和高频乃至在线运行，为数字孪生流域提供精准物理参数和现实约束条件，保持数字孪生流域与物理流域的精准性、同步性、及时性。按照全国、流域、重要水利工程，分级构建全国统一、及时更新的数据底板，为水利治理管理提供详实的基础底图。

优化算法模型。算法是构建数字孪生流域的关键性技术，是物理流域自然规律的数学表达，包括水利专业模型、智能分析模型、仿真可视化模型等内容。要锚定智慧化模拟目标，深入研究流域自然规律，充分利用大数据、人工智能等新一代信息技术，融合流域多源信息，升级改造流域产汇流、土壤侵蚀、水沙输移、水资源调配、工程调度等模型，研发新一代高保真水利专业模型，统筹运用好基于机理揭示和规律把握的数学模型，以及基于数理统计和数据挖掘技术的数学模型，确保数字孪生流域模拟过程和流域物理过程实现高保真。建设水利业务智能仿真模型，构建水利业务遥感和视频人工智能识别模型，实现水利工程运行和安全监测、应急突发水事件等自动化精准识别。

提升算力水平。算力是数字孪生流域高效稳定运行的重要支撑，包括计算、通信、会商等硬件资源。要扩展计算资源，按照“集约高效、共享开放、按需服务”的原则，提升物理分布、逻辑集中、协同工作的高性能算力，满足数据处理、模型计算的需要。要升级通信网络，实现水利系统网络无盲区无死角互联，满足各类信息及时高效传输，并充分利用北斗、5G等新一代网络技术，保障监测站网在极端恶劣环境下的安全可靠传输。

强化预报预警预演预案能力

习近平总书记强调，要实施自然灾害监测预警信息化工程，提高风险早期识别和预报预警能力；要切实加强重大风险预测预警能力，有切实管用的应对预案及具体可操作的举措。要在数字孪生流域中强化预报、预警、预演、预案能力，实现风险提前发现、预警提前发布、方案提前制定、措施提前实施，确保水利决策精准安全有效。

精准超前预报。预报是基础，通过预报为预警工作赢得先机。要坚持遵循自然规律，以流域为单元，构建下垫面动态变化的数字流场，在总结分析典型历史事件和掌握现状的基础上，以扩展预报内容、提高预报精度、延长预见期为目标，通过机理分析和数据驱动等方法，综合运用气象水文、水文水力学耦合预报以及预报调度一体化等技术，构建多维多时空预报体系，实现洪水、枯季径流、地下水位、墒情、咸潮、泥沙、冰情、台风暴潮、水质等各类水安全要素全覆盖，短期预报、中期预测、长期展望等多尺度无缝衔接，监测站点、水系沿线、流域区域“点线面”相结合的多维展示。

快速直达预警。预警是前哨，通过预警为预演工作提供指引。科学设置风险阈值指标，完善预警发布机制，以预警信息及时精准、预警对象全面覆盖、预警渠道直达一线为目标，构建多种类多渠道的水灾害预警体系。在数字流场内，聚焦未来可能发生的江河洪水、山洪灾害、渍涝灾害、工程灾害、干旱灾害、

冰凌灾害、供水危机、水生态损害等各类水灾害，确定降雨量、水位、流量、水量等预警要素。根据预警不同量级、发展态势以及可能造成的危害程度，明确预警等级，依托预警发布平台，及时发布预警信息。结合地区实际，利用各种有效手段，实现预警信息直达一线、直达社会公众，提醒及时采取应急处置措施，做好防灾避险准备，做到防患于未然。

前瞻科学预演。预演是关键，通过预演为预案制定提供支撑。要集成耦合水工程预报信息与流域防洪调度、水资源管理调配、水工程调度运用、突发水事件处置、水生态过程调节等运行信息和其他边界条件，设定不同情景目标，实时分析水利工作面临的风险形势，以贴近实战、发现问题为目标，构建全过程多情景模拟仿真的水利预演体系。在数字孪生流域和数字孪生水利工程基础上，对规划、设计或未来预测预报的场景进行前瞻预演，既可以根据预报预警结果，“正向”预演出风险形势和影响，及时发现问题，以在萌芽之时、成灾之前发现问题、提出措施；也可以根据调度目标，“逆向”推演出水利工程安全运行限制条件，制定和优化调度方案，实现预报与调度的动态交互和耦合模拟。

细化实化预案。预案是目的，通过“四预”环环相扣、层层递进，提升流域治理管理的数字化、网络化、智能化水平，为增强国家水安全保障能力提供信息快速感知、智能分析研判、科学高效决策的强大技术驱动。要结合水工程运行状况、经济社会发展现状等，在预演结果基础上进行分析评估，滚动调整水工程运行、应急调度、人员防灾避险等应对措施，迭代优化运行调度方案，有效提高预案的科学性和可操作性。工程措施要考虑最新工况、经济社会情况，明确规定各类水利工程的具体运用方式。非工程措施要明确值班值守、物料设备配置、查险抢险人员配备、技术专家队伍组建、人员转移避险方案等。组织实施要全面落实工作责任，明确各类措施的执行机构、权限和职责，进一步增强预案的科学性、实用性和可操作性。

（来源：《学习时报》第一版 2022 年 6 月 29 日）

（上接第 11 页）多用、梯级利用”，污水处理后“应用必用，能用尽用”，实现工业园区“近零排放”。

3 结 语

水资源短缺是南疆基本水情，在立足当地水资源条件的情况下，遵循蓄水是基础、调水是补充、节水是关键的基本原则，依据南疆水资源的特点和开发利用中存在的主要问题，结合新时期南疆经济社会发展和生态环境保护的要求，初步提出了南疆水资源配置的总体思路，形成了蓄水、减水、节水、调水、配水、回水的六水统筹水资源保障对策措施，为构建与南疆水资源配置和经济社会发展布局相匹配的格局提供参考。

参考文献

[1] 胡立刚. 构建黔南州水安全保障体系的对策探讨[J]. 水资源开发与管理，2020(10)：8-11.

[2] 闫俊霞. 新时期构建新疆水安全保障体系的对策及建议[J]. 建筑工程技术与设计，2021(12)：1467.

[3] 李尚盈，董晔. 新疆人口、用水量与经济三者间关系研究与预测[J]. 水资源开发与管理，2020(3)：35-43.

[4] 张程程. 塔里木河源流和干流径流特征及其相关性分析[J]. 水利规划与设计，2016(1)：50-53.

[5] 杨昕馨. 新疆和田河流域 1990—2015 年景观动态变化研究[J]. 水资源开发与管理，2018(8)：15-18.

[6] 宋建. 2011 年与 2016 年新疆水资源配置公平性比较研究[J]. 水资源开发与管理，2018(8)：47-52.

[7] 王新. 新疆南疆绿洲区水资源开发利用方案分析[J]. 水利规划与设计，2014(5)：23-26.

[8] 艾力江·沙吾提. 南疆水资源分布现状及开发利用对策[J]. 水利规划与设计，2015(1)：31-33.

[9] 吕文新. 新时期新疆水资源管理新思路[J]. 吉林农业，2018(6)：76.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.03

2022年推进智慧水利建设水资源管理工作要点

2022年智慧水利建设水资源管理工作要全面落实水利部党组关于大力推动智慧水利建设的部署，按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”的总体要求，在指导做好数字孪生流域建设先行先试的同时，根据水资源管理工作实际，着重加强用水量统计与分析、水资源监管、地下水超采治理等重点业务应用，强化算据、算法、算力，统筹推进水资源管理信息系统建设，不断提升水资源管理数字化、网络化、智能化水平，从严从细管好水资源，为推进水利高质量发展提供有力支撑。

一、强化业务应用

按照需求牵引、应用至上的原则，重点加强用水总量统计与分析、取用水监管、河湖生态流量管理、水量分配方案落实、取水许可证照管理、地下水超采区水位变化通报、华北地区河湖生态补水、水污染事件应对等方面业务应用。

1. 用水量统计与分析。利用用水统计直报系统，按季度统计大中型灌区、重点公共供水企业、重点工业企业、重点服务业等取用水户用水量数据；按年度统计小型灌区、非重点公共供水企业、非重点工业企业、非重点服务业、河湖补水工程等用水量，汇总形成年度用水总量数据；按流域、区域、水源等进行季度、年度用水量情况分析。

2. 支撑取用水监管。一是利用国家水资源信息管理系统、用水统计直报系统和取水许可电子证照系统，定期排查重点监控取水单位、直报取用户等取水量超许可水量等违法取水疑似问题线索，反馈流域管理机构、省级水行政主管部门，进行复核和认定，督促问题整改，有针对性开展监督检查。二是利用水利“一张图”中水资源管理相关数据、水资源调查评价成果、取水许可电子证照系统等，开展流域、区域超取水总量指标分析，对超取水总量控制指标的地区，暂停新增取水许可。

3. 支撑河湖生态流量监管。利用水利部水雨情系统、全国省界断面水文水资源监测信息系统等，及时掌握重点河湖生态流量控制断面实时监测和整编监测数据。根据生态流量保障实施方案确定的预警阈值，及时预警响应，采取会商、约谈、通报等方式，落实水量调度和河道外取水管控措施。组织开展重点河湖生态流量控制断面下泄流量、水量年度考核评价。

4. 支撑江河水量分配方案落实监管。利用全国省界断面水文水资源监测信息系统，全面掌握跨省江河流域省界和重要控制断面流量、水量整编监测数据，结合年度水量分配方案或调度计划定期分析跨省江河省界和重要控制断面下泄流量、水量达标情况。开展跨省江河流域省界和控制断面下泄流量、水量年度考核评价。

5. 取水许可证照管理。利用取水许可电子证照系统，分流域、区域、行业、水源等不同类型，汇总统计取水权人、许可水量、取水地点、取水用途等取水许可信息，分析流域、区域取水许可量变化情况。定期排查取水许可证到期延续、过期、注销等证照信息，及时反馈取水户和管理人员。组织开展取水许可电子证照数据治理，切实提高证照数据质量。

6. 地下水超采区地下水水位变化通报。利用国家地下水监测工程等信息系统，按季度分析地下水超采区各市（地）浅层、深层地下水超采区水位（埋深）及变幅情况。对超采区各市（地）地下水水位变幅进行排名，并将结果印发省级水行政主管部门和地方政府。对地下水水位下降幅度较大的地市，采用点名、会商、约谈和检查考核等方式予以督促。

7. 支撑华北地区河湖生态补水效果评估。根据补水河湖地表水水量水位、地下水水位等监测数据，利用卫星遥感、无人机航测、视频监控等技术手段，对补水量与补水过程、地表水水质变化、河道入渗情况、地下水水位变化、地下水水质变化、水生态变化、社会影响等进行全面评估。

8. 支撑应对水污染事件。利用全国水利“一张图”河流水系、水库、水电站、水源取水口等信息，开展重大水污染事件影响范围分析，推演污染团或污染物质迁移变化情况，对涉及的饮用水水源地、应急备用水源地、各类水源取水口进行监测预警，开展水库、闸坝调度和取用水管控，增强重大水污染事件应急处置能力。

二、统筹推进水资源管理信息系统建设

以水资源管理业务应用为牵引，制定水资源管理与调配系统建设实施方案，不断强化取水监测计量和用水统计调查管理，推进取用水管理相关系统和信息资源整合，搭建水资源管控“一张图”，为水资源管理提供信息化支撑。

9. 编制“十四五”水资源管理与调配系统建设实施方案。对标中央要求和水利部“三定”规定，全面梳理国家水资源信息管理系统建设现状、存在问题以及水资源管理与调配业务“四预”需求、系统功能应用需求等，理清工作思路，制定《“十四五”水资源管理与调配系统建设实施方案》，明确“十四五”平台建设的总体思路、主要任务和实施安排。

10. 推进取水口取水监测计量体系建设。落实水利部关于强化取水监测计量的意见，强化取水户取水计量设施安装主体责任，加快推进工业、生活和服务业取水计量全覆盖。整合取水户水量在线监控设施和在线计量设施，确定符合计量标准的一个在线计量设施作为法定水量计量依据，实现取用水户和水行政主管部门数据共享互认。2022 年底前，推动工业、生活、服务业等规模以上取水户和 5 万亩以上的大中型灌区渠首取水口实现在线计量。加强取水在线计量设施运行管理，提高数据到报率和准确率。

11. 切实提高用水统计调查数据质量。出台《用水统计调查基本单位名录库管理办法》，规范名录库管理。充分利用行政登记等资料及时更新维护名录库。健全统计数据质量核查制度，严格落实基层水利部门对源头统计数据的审核责任。建立常态化统计执法机制，完善“双随机、一公开”抽查制度，严厉查处统计造假、弄虚作假，提高统计报表填报率和数据准确率。开展用水统计调查制度修订。

12. 推进取用水管理相关系统和信息资源整合。依托全国一体化政务服务平台，整合各层级取水许可审批、电子证照、取用水监管、用水统计直报等取用水管理相关业务系统，搭建取用水管理平台，推进管理事项“一网通办”，监管数据统一归集和信息共享，加快实现“一网统管”、数据监管和智慧监管。

13. 搭建水资源管控“一张图”。基于“水利一张图”，将全面采集水资源调查评价、取用水管控指标、水资源开发利用、取水许可（含取水口核查登记）、遥感监测等各类基础数据，建成水资源管控“一张图”基础数据库，搭建综合信息平台，形成综合电子地图操作、监管综合信息应用等功能，全面支撑取用水动态监管。

14. 探索农业灌溉遥感卫片取用水监管。利用遥感影像等技术手段，获取实际灌溉面积、种植结构、取水工程等信息，组织开展农业灌溉遥感卫片图斑复核认定，加强农业取用水监管，开展农业用水统计调查，提升农业用水统计完整性和准确性。建立遥感卫片农业取用水监管机制，支撑取用水监管能力提升。

15. 推动跨部门数据信息共享与应用。深化与国家统计主管部门合作，推进用水统计调查数据共享。加强与国家电网有限公司合作，推进电力大数据在农业灌溉机井“以电折水”取水计量、大数据监管等领域合作。

16. 强化数据和系统安全。严格规范数据采集和安全防护，强化电子证照、用水统计、监测计量等数据安全管理。推进网络安全等级保护定级备案、等级测评、安全建设和检查，切实保障水资源管理相关业务系统安全平稳高效运行。

（来源：水利部水资源管理司 2022 年 6 月 16 日 http://syz.mwr.gov.cn/tzgg/202206/t20220616_1579697.html）

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.04

南疆地区水资源保障问题和对策分析

刘建军

(新疆水利水电勘测设计研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

【摘 要】 水资源短缺是南疆的基本水情,也是经济社会发展的制约因素之一,在分析南疆水资源特点和开发利用存在的问题基础上,结合水资源保障面临的形势,提出了"蓄水调控、节水提效、调水补源、退水还绿、配水优用、污水回用"的水资源配置总体思路,进而提出"增蓄水、强节水、外调水、退减水、优配水、回污水"的水资源保障对策措施,可为南疆水资源优化配置和提高供水保障能力提供参考。

【关键词】 南疆地区;水资源保障;水资源配置;水资源开发

中图分类号:TV213.2 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-008-04

Problems and countermeasures of water resources guarantee in South Xinjiang

LIU Jianjun

(*Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute*, *Urumqi* 830000, *China*)

Abstract: Water shortage is the basic water situation in South Xinjiang, and it is also one of the restrictive factors of economic and social development. Based on the analysis of the characteristics of water resources in South Xinjiang and the existing problems in its development and utilization, combined with the situation of water resources guarantee, this paper puts forward the general idea of water resources allocation of "water storage regulation, water saving and efficiency improvement, water diversion and replenishment, returning water to green, water distribution and optimal use, and sewage reuse", and then puts forward "increasing water storage, strengthening water conservation, transferring water from outside, returning and reducing water".

Key words: South Xinjiang; water resources guarantee; water resources allocation; water resources development

南疆地处亚洲大陆腹地,我国西北边陲,天山以南、昆仑山以北的广阔区域,包括新疆维吾尔自治区5个地州和新疆生产建设兵团4个师,面积为103.22万km^2,占新疆总面积的63%,总人口1254万,其中少数民族人口占78%。气候干旱,降水稀少,水资源短缺,自然环境恶劣。受地理位置、气候特征、民族结构等多种因素影响,经济发展基础薄弱,主要以第一产业农牧业为主,人民生活水平偏低。要做好南疆工作,水资源是根本,是统领经济发展和生态环境保护的关键。南疆水资源的开发、利用、节约和保护工作显得尤为重要,而提高水资源保障能力是开展南疆工作的基础。

收稿日期:2022-03-21

作者简介:刘建军(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程规划工作。

1 水资源保障存在的问题

1.1 南疆水资源特点

“有水则为绿洲,无水则为荒漠”是南疆真实的写照,水资源是南疆绿洲和经济发展的基础。受自然禀赋条件的影响,南疆具有鲜明的水资源特点。

a. 降水量少、蒸发量大。南疆多年平均降水量为130mm,山区降水量约占全区的84%,盆地降水量极少,沙漠腹地几乎无降水;平原区年蒸发量在1600~3000mm之间,干旱指数达到7以上,由于降水稀少,蒸发强烈,对作物生长几乎为无效降水。

b. 人均水资源多、地均水资源少。南疆自产水资源量为403亿m^3,入境水量为72亿m^3,水资源总量为475亿m^3,人均水资源量为3788m^3,是全国平均水平的1.9倍;地均水资源量为4.6万m^3/km^2,仅为全国平均水平的1/7,是南疆沙漠、戈壁广布的主要原因。

c. 空间分布不均,年内分布集中。以巴州的焉耆县至和田地区的策勒县为界,将南疆总体划分为西北和东南两区,土地面积相当,但西北的水资源量是东南的3.8倍。从流域来看,塔里木河源流区土地面积占南疆的35%,而水资源量占南疆的80%。南疆河流发源于塔里木盆地周围中高山区的冰雪融水,受气温影响,径流年内分布集中,6—8月径流量占全年径流量的70%左右。

1.2 水资源开发存在的主要问题

南疆的沙漠、戈壁面积占比达62%,河流径流主要来源于盆地周围中高山区的冰川和积雪融水,河流水系呈向心式分布,最终消失在沙漠腹地。干旱荒漠的自然地理环境决定了南疆地区水资源的禀赋条件较差,是典型的“灌溉农业、绿洲经济”,导致南疆地区经济社会用水紧张、生态环境较为脆弱。经过多年的水资源开发利用,呈现出以下问题:

a. 水资源开发利用程度高、节约用水水平低。按第三次国土资源调查成果测算,南疆实际用水量为381亿m^3,占人类活动区水资源总量(441亿m^3)的比值达86%,远超一般流域40%的生态警戒线。根据相关研究成果,维持南疆生态环境的稳定健康,生态所需耗水量为200亿~210亿m^3,可供经济社会发展的耗水量约为230亿~240亿m^3(折合用水量为310亿~320亿m^3),现状实际用水量已超经济社会可利用水量,处于严重超载状态。农田水利基础设施配套尚不完善,农田灌溉水有效利用系数为0.54,渠系衬砌率为45%,城镇公共供水节水器具普及率不足40%,与严重缺水地区的节水要求相比还存在一定的差距。

b. 农业用水占比高,用水产出效益低。南疆经济社会用水结构失衡,农业用水占比高达97%(同为干旱区的以色列农业用水比重保持在40%左右);农业每方水产出效益为3.5元,仅为全国平均水平的18%;每方水GDP产出效益为10.7元,仅为全国平均水平的7%和黄河流域的6%,为西北其他五省区的4%~20%。

c. 过度依赖农牧业的经济发展格局导致水资源利用整体超载,主要原因是产业结构与水资源承载能力不匹配。南疆工业发展基础薄弱,经济发展过度依赖农业,而农业灌溉未能落实以水定地要求,近几十年来土地无序开发,农业灌溉面积呈扩张式发展,且用水方式较为粗放。根据第三次国土资源调查成果分析,南疆地区现状灌溉总面积达到6202万亩,农业用水量达到369亿m^3,总用水量为381亿m^3,超用水总量控制指标93亿m^3。

d. 水资源统一管理与监控能力不足。塔里木河流域管理局针对“四源一干”的地表水统一管理体制基本形成,但地下水和其他河流尚未纳入流域水资源统一管理。主要河流控制性工程的防洪、发电、供水与生态环境保护之间的矛盾较为突出,区域之间、城乡之间、兵地之间、行业之间供用水统筹协调较差。水价、水市场改革进展缓慢,水利投资主要依靠财政拨款。涉水生态空间管控、水利信息化建设整体滞后,依法治水管水能力不足。

1.3 水资源保障面临的形势

第二次中央新疆工作座谈会以来,经过多方面努力,南疆经济发展持续向好,人民生活明显改善,脱贫

攻坚取得决定性成就。进入新的发展阶段,经济社会高质量发展、新时期治水新思路、兵地融合发展等新形势对水资源安全保障提出了新的要求。

a. 促进南疆经济社会高质量发展,要求全面提高水资源安全保障能力。南疆油气资源与煤炭资源丰富,是国家西气东输的主气源地,是重要的石油化工基地和煤炭基地,也是国家农产品主产区。水资源短缺、供需矛盾突出成为制约南疆经济发展的最大瓶颈,需要以节水扩大发展空间,通过外区域调水提高水资源承载能力与安全保障能力。

b. 保障兵团向南和兵地融合发展,要求实施深度节水控水行动,实行水资源再配置。兵团向南发展是治疆方略的战略部署,充分发挥兵团集聚人口作用,促进民族交流交往交融,而水是集聚人口促进发展不可或缺的首要条件。目前,南疆实际用水量已超过用水总量红线指标,在短期内外区域调水难以实现的情况下,立足当地水资源条件,实施深度节水控水措施,重点加强农业节水,提高用水效率,将节余水量用于支撑兵团向南发展战略。

c. 构建结构稳定的流域生态系统,要求节约经济社会用水,退还生态用水。受特殊的自然地理条件和气候特点影响,南疆生态环境极其脆弱,对水资源依存度极高。人工绿洲是在天然绿洲的基础上发展起来的,天然绿洲是人工绿洲的天然屏障,稳定的天然绿洲是人工绿洲可持续发展的基础。南疆地区人工绿洲与天然绿洲的比例已由2000年的46∶54演变为2018年的59∶41,因此需要统筹协调人工绿洲与天然绿洲的用水需求,通过农业节水减水,降低农业用水占比,退还被挤占的生态用水。

d. 应对气候变化对水资源的不确定性影响,需要提高水资源风险防范能力。南疆是全球气候变化较为敏感和脆弱的区域,近20年来呈现变暖增湿态势,降水增多21%,径流偏丰14%。研究表明,气温升高导致冰川积雪融化、水量增多,是不可持续的,到21世纪中叶,南疆水资源总量极有可能呈现逐步衰减趋势,且年际变化将会进一步加大,年内季节性分布更加不均。一旦南疆出现水资源衰减尤其是连续枯水年,将对目前形成的经济发展布局和生态环境格局产生严重影响。因此,需要增强忧患意识,未雨绸缪,提高水资源风险防范能力,以主动适应和有效应对气候变化可能造成的水风险问题。

2 水资源配置总体思路和保障对策分析

2.1 水资源配置总体思路

根据南疆水资源特点和开发利用存在的问题,结合新形势水资源保障提出的新要求,立足南疆水资源条件,坚持节水优先,确保生态安全,保障经济用水,实现水资源优化配置,形成蓄水调控、节水提效、调水补源、退水还绿、配水优用、污水回用的南疆水资源总体配置思路。

a. 蓄水调控。基于南疆水文情势时空分布不均的现状,6—8月径流量占全年径流量的70%左右,丰水年与枯水年径流比为1.8~3.8,可利用控制性调蓄工程对天然径流进行蓄水调控,“留住”丰水期水量,解决枯水期水量不足的问题,改变径流时空分布,增强供水保障能力。

b. 节水提效。基于南疆用水较为粗放的现状,加强节约用水,把节水作为经济社会发展的根本出路,持续强化水资源刚性约束,落实水资源消耗总量和强度双控,做好农业节水改造,建设节水型社会,推动用水方式由粗放低效向节约集约高效转变,提高水资源利用效率和效益。

c. 调水补源。基于南疆水资源总量有限,与可利用的土地资源相比,水资源承载能力不足的现状,通过外区域调水,增加南疆水资源量,有效提高经济社会发展和生态环境保护的水资源承载能力,支撑国家重大战略实施和促进经济社会发展。

d. 退水还绿。基于南疆生态用水挤占严重的现状,逐步调整绿洲结构比例,实现人工绿洲与天然绿洲的耗水各占50%;统筹南疆经济社会发展和生态环境保护用水关系,有序退还被挤占的河湖湿地生态水量,限采压采地下水,还水于天然绿洲生态。

e. 配水优用。基于南疆现状农业用水占比高,用水结构尚不合理,用水效益偏低的现状,发挥水资源的战略引领作用,以水资源优化配置促进产业结构调整,将低效的用水转化为高效的用水,实现水资源在行业间或区域间的合理流转,提高水资源的效率和效益。

f. 污水回用。基于南疆污水处理不足,回用量少,污水外排带来水环境污染的现状,推进污水资源化利用,纳入水资源统一配置,提高污水再生利用率,逐年提高再生水源在水资源配置中的比例,缓解水资源供需矛盾,改善水生态环境质量。

2.2 水资源保障对策分析

贯彻南疆水资源配置总体思路,立足以水而定、节水优先、生态安全,优化水资源空间均衡配置,多措并举,提出增蓄水、退减水、强节水、外调水、优配水、回污水的南疆水资源保障总体对策措施。

a. 增蓄水。在加强已建山区水库科学调度的前提下,在现状水资源开发利用程度较小的中小河流和调蓄能力不足的流域,新建控制性山区调蓄水库,提高流域水资源调蓄能力。如在策勒河建设昆仑水库(中型)、阳霞河建设阳霞水库(中型)、瓦石峡河建设瓦石峡水库(中型)、二八台河建设二八台水库(中型)、卡拉苏河建设卡拉苏水库(中型)、吐米亚河建设吐米亚水库(中型)、杜瓦河建设杜瓦水库(中型)、尼雅河建设尼雅水库(中型)、塔什萨依河建设塔什萨依水库(中型)、克孜河建设玛尔坎恰提水库(大型)、喀拉喀什河建设庞纳孜水库(大型)等流域建设控制性调蓄工程。

b. 强节水。推进南疆17处大型和67处中型灌区续建配套与现代化(节水)改造,南疆共有骨干渠系4.5km,渠系防渗率为67%,尚有0.8万km骨干渠系需进一步采取防渗措施;结合高标准农田建设,推广高效节水灌溉技术,现状南疆高效节灌率仅为35%,仍需规模化推广膜下滴灌、低压管道灌、喷灌等农业节水技术;结合水源和地形条件,选择25处自流输水灌溉工程,运用骨干渠系"全地下"输配水方式,将灌溉系统进行"明改暗"改造,建设新时代"坎儿井"输水模式,并进行进一步推广;对下游24座平原水库进行废弃或改造,减少或降低平原水库的无效蒸发渗漏损失水量,通过多种节水措施,提高水资源集约节约利用水平。

c. 外调水。与南疆一山之隔的伊犁河,是新疆的第一大河,但水资源开发利用程度较低,因此考虑将伊犁河流域的水资源调至南疆地区,补充其水资源量。遵循确有需要、生态安全、可以持续的重大水利工程论证原则,充分考虑调出区生态安全、经济社会发展用水需求和合理下泄出境水量,科学论证调水规模和工程布局,使技术可行、经济合理。以塔里木河干流和四大源流的空间水系关系为基础,通过直供和置换方式,通过外流域调水撬动整个南疆地区的水资源再配置,盘活水资源存量,提升水资源承载能力。

d. 退减水。农业灌溉面积偏大是造成南疆用水超载的主要原因,自治区制定了退地减水方案,逐年退减部分灌溉面积,至2030年南疆退地610万亩(其中自治区514万亩,兵团96万亩),主要将无序开发和位于生态红线敏感区的不合法或不合规的耕地进行退减;将沙漠边缘无水源保证和盐碱化较重的劣等地适度调减;根据水源条件,部分灌区采用休耕轮作的方式,逐步退还挤占的生态水量。减少农业用水量,降低农业用水比重。

e. 优配水。完善水权交易制度,建立健全统一的水权交易系统,引导推进多种形式的水权交易(如成立喀什、和田、阿克苏等水权交易所),制定统一的交易规则和技术标准等,引导推进区域水权、行业水权、用水户水权等交易。根据南疆推进新型城镇化和工业化建设要求,将用水占比高且承载能力较低的农业用水逐步调整为承载能力较高的工业和生活用水,实现水资源的"农转非"转化,优化水资源配置,提高用水效益。

f. 回污水。根据城镇和工业园区发展,以现有污水处理厂为基础,结合污水处理设施提标升级扩能改造,根据实际需要建设再生水生产设施,提升再生水生产能力。工业园区发展清洁生产和循环经济,做到企业间串联用水、分质用水,实现"一水 (下转第5页)

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.05

基于综合指数法的城市水安全评价

周 双 何怀光 李 娜

(湖南省水利水电科学研究院,湖南 长沙 410007)

【摘 要】 为客观衡量和评价城市水安全状况,综合考虑水安全概念及内涵、城市发展现状及趋势、水安全相关规划研究,建立了包括防洪安全、饮水安全、用水安全、河湖生态安全、涉水事务监管安全5个准则层、31项指标的城市水安全评价指标体系,采用指数型功效函数实现了评价指标的标准化,构建了城市水安全评价模型,并以湖南邵阳市为例开展了实证研究。结果表明,邵阳市水安全综合指数为0.6562,处于"基本安全"状态,与实际情况基本相符。

【关键词】 城市水安全;水安全评价;综合指数;指标体系

中图分类号:TV213.4 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-012-05

Evaluation of urban water security based on comprehensive index method

ZHOU Shuang, HE Huaiguang, LI Na

(*Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Changsha* 410007, *China*)

Abstract: In order to objectively measure and evaluate the status of urban water security, taking into account the concept and connotation of water security, the present situation and trend of urban development, and the related planning and research of water security, an evaluation index system of urban water security was established, which included 31 indexes and five criteria layers, including flood control safety, drinking water safety, river and lake ecological safety, and wading affairs supervision safety. The index function was adopted to standardize the evaluation indexes, and an evaluation model of urban water security was constructed. Taking Shaoyang City, Hunan Province as an example, the empirical study shows that its comprehensive index of water security is 0.6562, which is in a "basic security" state, basically consistent with the actual situation.

Key words: urban water safety; water safety evaluation; comprehensive index; index system

20世纪70年代,水安全问题开始受到关注。90年代以来,世界水资源论坛等[1]呼吁关注水资源保护和管理、水与可持续发展,水安全问题逐渐成为研究热点。"水安全"一词来源于可持续发展理论、"社会-经济-自然复合生态系统"理论、资源环境承载力原理、危机管理理论等[2-3],体现的是人口、经济、自然、社会之间的协调发展关系。城市水安全体现的是城市涉水综合系统的健康或可持续状态。

水安全评价研究是"水安全"问题研究的热点,其中水安全评价指标体系构建最为关键[4-5]。目前,水安

收稿日期:2022-04-18

基金项目:湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-21)

作者简介:周双(1989—),女,助理研究员,硕士,主要从事水资源、水生态相关研究工作。

全评价指标体系多基于水贫困指数[6]（资源、途径、利用、能力、环境）和 DPSIR 概念模型[7]（驱动力、压力、状态、影响、响应）确定。也有部分学者进行了创新，如史正涛等[8]将水安全分为水安全支持子系统、水安全协调子系统、防洪子系统；邵东国等[9]从城市重要性、防洪安全、供水安全、水环境安全等维度建立了水安全评价指标体系；张蕾等[10]从资源、社会、经济、环境 4 个方面构建了南京市水安全评价指标体系。但随着城市发展变化，这些指标体系研究存在指标体系冗杂、指标不全或代表性不够等问题，影响了评价结果的客观性。基于此，本文将综合考虑水安全概念内涵、当前经济社会现状及发展趋势、民众关注焦点及国内水安全相关规划，从城市涉水综合系统中梳理、筛选出最能表征城市水安全状况的指标，并采用综合指数法开展城市水安全评价，为城市水安全管理提供参考。

1　城市水安全评价方法

基于综合指数法的城市水安全评价基本思路为：首先选取合适的评价指标，建立水安全评价指标体系，同时征求专家意见确定不同层次的指标权重和分级阈值，再利用指数型函数实现指标值的标准化，最后根据水安全指数模型计算地区水安全指数，同时确定水安全指数分级标准，对水安全的评价结果进行直观判断。

1.1　指标体系构建及权重确定

城市水安全指标体系包括目标层、准则层和指标层。目标层即区域城市水安全；结合水安全概念内涵，参考国内水安全相关规划，聚焦水灾害规避、水源供给保障、水资源高效利用、水生态环境保护、水监管服务等影响城市水安全的核心要素，将城市水安全分为防洪安全、饮水安全、用水安全、河湖生态安全、涉水事务监管安全 5 个准则层，利用频度统计、理论分析、专家咨询等方法，将准则层进一步细化为 31 项具体指标，其中正向指标 25 项，反向指标 6 项；指标层具体包括防洪安全指标 5 项，饮水安全指标 6 项，用水安全指标 7 项，河湖生态安全指标 7 项，涉水事务监管安全指标 6 项。

指标权重指单项指标对总目标的贡献程度，是反映各指标在评价体系中地位的重要系数。目前，确定指标权重的常见方法有德尔菲法（专家打分法）、熵值法、因子分析法、层次分析法（AHP）等。由于本研究评价指标数量较多，且指标大多贴近涉水管理实际情况，权重赋值需要在有经验的专家指导下进行，因此本文选取德尔菲法（专家打分法）确定各个指标权重。根据经验并参考国内外相关研究，分析提出对于指标权重的初步意见，并征求相关专家意见最终确定指标权重。城市水安全评价指标体系见表 1。

表 1　城市水安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标性质	单位	权重	上限值	下限值
城市水安全 A	防洪安全 B_1	堤防达标率 C_1	正向	%	0.35	100	0
		水库病险率 C_2	反向	%	0.25	100	0
		山洪沟达标治理率 C_3	正向	%	0.15	85	0
		除涝能力指数 C_4	正向	%	0.15	40	0
		洪涝灾害年均损失率 C_5	反向	%	0.10	6	0
	饮水安全 B_2	供水安全系数 C_6	正向		0.20	1.30	0.70
		集中式饮用水水源地水质达标率 C_7	正向	%	0.20	100	50
		规模化工程服务人口比例 C_8	正向	%	0.20	85	0
		优质水源覆盖人口比例 C_9	正向	%	0.15	80	0
		公共供水末梢水达标率 C_{10}	正向	%	0.15	100	50
		城市管网漏损率 C_{11}	反向	%	0.10	30	8

续表

目标层	准则层	指标层	指标性质	单位	权重	上限值	下限值
城市水安全A	用水安全 B_3	水资源开发利用程度 C_{12}	反向	%	0.20	40	20
		万元GDP用水量 C_{13}	反向	m^3	0.20	67.30	—
		万元工业增加值用水量 C_{14}	反向	m^3	0.15	45	—
		农田灌溉水有效利用系数 C_{15}	正向		0.15	0.60	—
		工业用水重复利用率 C_{16}	正向	%	0.10	100	0
		有效灌溉面积比例 C_{17}	正向	%	0.10	95	20
		大中型灌区现代化灌区建成比例 C_{18}	正向	%	0.10	80	25
	河湖生态安全 B_4	水土保持率 C_{19}	正向	%	0.20	100	0
		河湖水域空间保有率 C_{20}	正向	%	0.15	5	0
		河湖重要断面生态流量满足程度 C_{21}	正向	%	0.15	100	30
		重要江河湖泊水功能区水质达标率 C_{22}	正向	%	0.15	100	40
		河湖岸线保护率 C_{23}	正向	%	0.15	100	0
		绿色小水电建成比例 C_{24}	正向	%	0.10	80	0
		城镇污水处理率 C_{25}	正向	%	0.10	95	40
	涉水事务监管安全 B_5	水量计量率 C_{26}	正向	%	0.15	85	0
		重要水管理事项有效实施率 C_{27}	正向	%	0.25	80	0
		水利投资占财政投入比例 C_{28}	正向	%	0.15	4	0
		水利投资社会资本比例 C_{29}	正向	%	0.15	40	0
		水利人才结构达标率 C_{30}	正向	%	0.15	80	0
		公众满意度 C_{31}	正向	%	0.15	100	0

1.2 指标标准化及阈值确定

为消除指标不同量纲对指数计算的影响，须对指标进行归一化处理（即指标标准化）。指标标准化的常用方法为直线型功效系数法，即将指标数值变化和指标评价值的关系作直线关系处理。但实际上指标数值变化对城市水安全影响的规律并非简单的线性关系，而是存在与边际效益递减原理相似的特点。因此，本研究借鉴边际效益递减原理，对两者关系作出更为客观与符合实际的处理，即采用指数型功效函数实现指标的标准化处理，以便更好地反映客观实际，提高评价结果的准确性。

标准化计算公式：

$$I_s = \frac{I_m - \frac{1}{e}}{1 - \frac{1}{e}}$$

$$I_m = e^{-f(x)} \tag{1}$$

对于正向指标：

$$f(x) = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \tag{2}$$

对于逆向指标：

$$f(x) = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{3}$$

式中：x_{max} 和 x_{min} 分别为指标数据在合理范围内可达到的最大值（上限值）和最小值（下限值），也称为指标参考值；I_s 为标准化后的指标值，取值在0～1之间；I_m 为标准化过程中的中间变量，取值在 $\frac{1}{e}$～1之间；x 为待标准化的指标值。

本研究指标阈值分为上限值、下限值和控制值。绝大部分指标设置上限值和下限值，对于正向指标，指标值越大越好，反向指标反之。对于万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、灌溉水有效利用系数指标则只设置相对控制值，其中万元GDP用水量和万元工业增加值用水量测算值低于控制值为优，灌溉水有效

利用系数测算值高于控制值为优。参考国际、国家相关标准,结合国家或地区相关规划,并咨询相关专家,确定了评价指标阈值(见表1)。根据指标上限值和下限值,利用式(1)~式(3),实现指标标准化。

1.3　水安全指数评价标准

水安全综合指数由防洪安全、饮水安全、用水安全、河湖生态安全、涉水事务监管安全5个分指数组成。首先对单项指标权重和无量纲数值进行加权计算得出各分指数,然后将分指数进行加权求和得出水安全综合指数,具体公式为

$$X_i = \sum_{i=1}^{N} W_i I_s \tag{4}$$

$$\mathrm{WSI} = \sum_{i=1}^{N} W_j X_i \tag{5}$$

式中:WSI为区域水安全指数;W_i 和 W_j 分别为单个指标权重及WSI分指数 X_i 的权重;X_i 为防洪、饮水、用水、河湖生态、涉水事务监管各项分指数。

参考省内外相关研究成果,提出水安全评价标准,将指标得分按0~1分为5个等级。水安全综合指数和分指数评分值大于0.8的为"安全";在0.7~0.8(含)之间的为"较安全";在0.6~0.7(含)之间的为"基本安全";在0.4~0.6(含)之间的为"较不安全";小于等于0.4的为"不安全"。城市水安全评价标准见表2。

表2　城市水安全评价标准

水安全等级	安全	较安全	基本安全	较不安全	不安全
取值范围	(0.8,1]	(0.7,0.8]	(0.6,0.7]	(0.4,0.6]	(0,0.4]

2　城市水安全评价实例

2.1　研究区概况

邵阳市位于湘中偏西南、资江上游,属于衡邵干旱走廊湘资分水岭核心地带。总面积20824km^2,下辖3个市辖区、6个县、1个自治县,代管2个县级市。全市分属湘江、资水、沅江和柳江流域,其中资水流域面积占全市总面积的70.8%。2019年常住人口730.24万,地区生产总值2152.48亿元。全市多年平均地表水资源量为160.60亿m^3,2019年降水量为1566.5mm,重要江河湖泊水功能区水质达标率为94.12%,污水处理率为94.64%。

2.2　实例计算

本研究采用2019年基础数据,数据主要来源《湖南省统计年鉴》《湖南省水利统计年鉴》《湖南省水资源公报》《邵阳市水资源公报》《湖南省水安全战略规划(2020—2035年)》以及水利、生态环境等部门的基础资料。运用所建立的指标体系和水安全指数模型,对2019年邵阳市水安全状况进行评价,利用指标标准化值和式(4)、式(5)进行计算。邵阳市水安全评价结果见表3。

表3　邵阳市水安全评价结果

准则层	指标层	指标标准化(I_s)	分指数	权重	综合指数
B_1	C_1	0.8374	0.6019	0.10	0.6562
	C_2	0.5232			
	C_3	0.7873			
	C_4	0.6501			
	C_5	0.6084			
B_2	C_6	0.4220			
	C_7	1.0000			
	C_8	0.2886			
	C_9	0.7259			
	C_{10}	1.0000			
	C_{11}	0.2942			
B_3	C_{12}	1.0000			
	C_{13}	0.5100			
	C_{14}	0.6293			
	C_{15}	0.4957			
	C_{16}	0.3872			
	C_{17}	0.4841			
	C_{18}	0.4639			
B_4	C_{19}	0.7516			
	C_{20}	0.5239			
	C_{21}	0.6987			
	C_{22}	0.8523			
	C_{23}	0.6218			
	C_{24}	0.6246			
	C_{25}	0.9896			

续表

准则层	指标层	指标标准化（I_s）	分指数	权重	综合指数
B_5	C_{26}	0.6160	0.6019	0.10	0.6562
	C_{27}	0.5107			
	C_{28}	0.0976			
	C_{29}	1.0000			
	C_{30}	0.4826			
	C_{31}	0.9650			

2.3 结果分析

评价结果显示，2019年邵阳市水安全综合指数为0.6562，处于“基本安全”状态，反映出全市水安全形势不太乐观，特别是用水安全、饮水安全和涉水事务监管安全方面还存在一定的短板。具体分析如下：

a. 防洪安全分指数为0.7004，处于“较安全”状态。该指数在各分指数中排名靠前，主要是由于堤防达标率（0.8374）、山洪沟达标治理率（0.7873）指标表现较好，主要短板是水库病险率（0.5232），原因为全市小型水库数量众多，建设时间较早、技术标准偏低，水库运行存在较大安全隐患，急需加强病险水库综合治理，增强水库抵御各类自然灾害的能力。

b. 饮水安全分指数为0.6304，处于“基本安全”状态。其中供水安全系数（0.4220）、城市管网漏损率（0.2942）和规模化工程服务人口比例（0.2886）得分较低，原因是随着城镇化的推进，饮水需求不断增大，而相应的供水工程及配套管网未及时跟进，导致供水能力相对不足，此外，城市管网明显老化、漏损问题突出。建议加快推进规模化供水工程建设，加强供水管网维护，增强城市供水保障能力。

c. 用水安全分指数为0.6043，处于“基本安全”状态。其中万元GDP用水量（0.5100）、农田灌溉水有效利用系数（0.4957）、大中型灌区骨干工程完好率（0.4639）、工业用水重复利用率（0.3872）等得分较低，反映出全市农业用水和工业用水效率水平较低，节水意识相对较弱，节水措施不够完善，需加强各行业节水力度，提升全市整体用水效率。

d. 河湖生态安全分指数为0.7163，处于“较安全”状态。在各项分指数中表现较优，表明全市较为重视河湖生态保护和治理，且取得了初步成效。各项指标中，河湖水域空间保有率（0.5239）得分较低，下一步需严格落实河湖管控要求，加强水域岸线保护，提升河湖生态安全水平。

e. 涉水事务监管安全分指数为0.6019，处于“基本安全”状态。其中水利投资占财政投入比例（0.0976）得分最低，表明当地财政对水利建设重视程度不够；水利人才结构达标率（0.4826）、重要水管理事项有效实施率（0.5107）等指标表现也较差，反映出部分县（区）人员老化现象突出、专业性人才紧缺，监管能力相对薄弱。需进一步加大财政资金投入力度，加强人才引进和培养，提升基层监管能力和水平。

邵阳市地处湖南省西南部，属于衡邵干旱走廊地区，水资源相对紧缺，经济欠发达，水资源监管能力相对薄弱，评价结果“基本安全”状态与实际情况基本相符。

3 结 语

本文基于水安全概念及内涵，聚焦影响城市水安全的核心要素，建立了包括防洪安全、饮水安全、用水安全、河湖生态安全、涉水事务监管安全的城市水安全评价指标体系，并以邵阳市为例进行评价研究。结果表明，邵阳市水安全处于“基本安全”状态，其中饮水安全、用水安全和涉水事务监管安全方面短板突出，需加强病险水库治理、推进规模化供水工程建设、加强各行业节水力度、强化资金和人才保障等；该指标体系能有效反映城市管理现状，且与已有指标体系相比，指标代表性和有效性显著增强，其评价结果与实际情况基本相符。

但该研究也存在一定问题：权重设计采用德尔菲法，存在一定主观性；实证研究缺乏多年数据支撑，结果预警性不足。后续可结合系统动力学仿真模型，利用历史数据开展水安全趋势分析和预判，提高模型应用价值。◈

参考文献

[1] 陈筠婷，徐建刚，许有鹏. 非传统安全视角下的城市水安全概念辨析[J]. 水科学进展，2015，26(3)：443-450.

（下转第41页）

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.06

晋城市非常规水源利用浅析

钟　强

(晋城市水文水资源事务中心,山西 晋城　048000)

【摘　要】 非常规水源的开发利用可以缓解区域水资源供需矛盾、治理水环境污染以及提高水资源的综合利用效益,对于城市的可持续发展具有重要意义。本文以晋城市为例,分析全市再生水、矿坑水、雨水3类非常规水源的利用现状,通过计算城市污水排放系数、矿井涌水系数、综合雨量径流系数,预测了全市2025年再生水、矿坑水、雨水的可利用量,阐述了3类非常规水源的利用措施,并针对非常规水源利用中存在的问题提出了相应建议,可为资源型城市开展非常规水源利用提供参考和思路。

【关键词】 非常规水源;再生水;矿坑水;雨水;可利用量

中图分类号:TV213.9　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-017-08

Analysis on utilization of unconventional water sources in Jincheng City

ZHONG Qiang

(*Jincheng Hydrology and Water Resources Affairs Center*, *Jincheng* 048000, *China*)

Abstract: The development and utilization of unconventional water sources can alleviate the contradiction between supply and demand of regional water resources, control water pollution and improve the comprehensive utilization efficiency of water resources, which is of great significance to the sustainable development of cities. Taking Jincheng as an example, this paper analyzes the utilization status of three kinds of unconventional water sources in the city. By using the calculation methods of urban sewage discharge coefficient, mine water gushing coefficient and comprehensive rainfall runoff coefficient, it predicts the available amount of reclaimed water, mine water and rainwater in the city in 2025, expounds the utilization measures of the three kinds of unconventional water sources, and puts forward corresponding suggestions on the problems existing in the utilization of unconventional water sources, so as to provide references for the utilization of unconventional water sources in inland resource-based cities.

Key words: unconventional water source; reclaimed water; mine water; rainwater; available quantity

非常规水源是常规水源的重要补充,被誉为保障经济社会发展的城市第二水源。广义的非常规水源涵盖常规水源以外的一切其他水源。根据水利部办公厅《关于进一步加强和规范非常规水源统计工作的通知》,明确了非常规水源和其利用量的统计口径,非常规水源指经处理后可以利用或在一定条件下可直接利用的再生水、集蓄雨水、淡化海水、微咸水、矿坑水等;非常规水源利用量主要统计再生水、集蓄雨水、淡化海水、微咸水和矿坑水5部分。

利用非常规水源不仅可以缓解水资源供需矛盾,

收稿日期:2022-04-21

作者简介:钟强(1988—),男,工程师,硕士,主要从事水文水资源管理工作。

提高区域水资源配置效率和利用效益,同时在减少污染排放、从灾害化向资源化转变等方面具有重要作用。2015年,国务院印发《水污染防治行动计划》,要求将再生水、雨水和微咸水等非常规水源纳入水资源统一配置。2019年,国家发展改革委、水利部联合印发《国家节水行动方案》,要求在缺水地区加强非常规水源利用,到2020年缺水城市再生水利用率达到20%以上。2021年,水利部印发《关于实施黄河流域深度节水控水行动的意见》,提出2025年黄河流域非常规水源利用量目标,并要求通过开发利用再生水、优化利用矿坑水、推进雨水集蓄等措施加快非常规水源利用。2021年,国家发展改革委、水利部、住房城乡建设部、工业和信息化部、农业农村部联合印发《"十四五"节水型社会建设规划》,提出"十四五"末全国非常规水源利用量目标。2022年,水利部、国家发展改革委联合印发《"十四五"用水总量和强度双控目标的通知》,首次将非常规水源最低利用量作为控制目标分解下达到各省、自治区、直辖市。由此可以看出,"十四五"期间国家层面越来越重视非常规水源开发利用,将此作为缓解水资源短缺、置换常规水源的重要举措。因此,本文以山西省晋城市为例,分析该市的非常规水源利用潜力,对该市开展非常规水源利用具有一定的指导意义。

1 晋城市水资源利用现状

晋城市位于山西省东南部,下辖城区、泽州、高平、阳城、陵川和沁水6个县(市、区),是典型的煤炭资源型城市,基于地质条件形成了煤水共存的基本环境特征。根据2020年《晋城市水资源公报》,全市水资源总量为9.284亿m^3,其中地表水资源量为7.143亿m^3,地下水资源量为6.773亿m^3,二者重复计算量为4.632亿m^3,人均水资源量为424m^3,仅占全国人均水资源量的19%[1]。全市10处地表水水质监测站中有3处为Ⅴ类水质;根据2020年《晋城市生态环境状况公报》,全市14个地下水监测点位中有8个点位水质类别为Ⅳ类或Ⅴ类[2]。同时,根据水利部《关于黄河流域水资源超载地区暂停新增取水许可的通知》,晋城市城区、泽州和高平3个县区属地下水超载地区,暂停新增取水许可。全市水资源极度短缺,地下水超采严重,水环境污染问题依然存在。

2 晋城市非常规水源利用现状及分析

近年来,为缓解水资源供需矛盾和治理水环境污染,晋城市十分重视非常规水源利用。2016年,《晋城市水污染防治行动计划》提出,要强化城镇生活水污染治理;2020年,《晋城市水污染治理攻坚方案》提出,要推进城镇生活污水全收集,加快生活污水处理厂扩建、提标改造;2020年,《国家节水行动晋城实施细则》提出,全市再生水利用率要达到20%以上,非常规水源利用占比提高2%;《晋城市水资源综合规划》将中水和矿坑水等非常规水源纳入水资源供需平衡分析和配置体系[3];《晋城市水利发展"十四五"规划》规划了近年来要实施的非常规水源利用项目[4]。在各种政策和规划的支持下,全市非常规水源利用稳步提升,再生水、矿坑水利用快速增长,雨水利用保持稳定。根据2020年《晋城市水资源公报》,2020年全市废污水利用量为2792.45万m^3,占年供水总量的6.7%,全市无微咸水和淡化海水利用量。由于《晋城市水资源公报》只统计了全市废污水利用量,包括工业企业内部废水处理利用量,且将矿坑水利用量中采矿企业自身利用部分计入地下水量,统计口径与非常规水源利用量定义不同,因此目前尚无权威的非常规水源利用量统计数据。

2.1 再生水

2.1.1 再生水利用现状

再生水为污水经过适当处理后,水质符合工业用水、城市非饮用水、景观环境用水等不同用途回用标准的水。本文所指再生水主要是经污水处理厂处理后直接加以利用或通过专用供水管线等输送方式引入用水企业再处理利用的水,不包含工业企业内部废水处理利用的水量。近年来,晋城市大力推进实施《水污染防治行动计划》《国家节水行动晋城实施细则》等政策,多行业多部门协调配合,齐管共抓,全市污水处理水平

与再生水利用量稳步提升。目前,晋城市已建成并正常运行的县市级污水处理厂有 5 座,总设计规模为 17.8 万 m^3/d,实际处理规模为 16.4 万 m^3/d,部分污水处理厂已超负荷运行,总配套管网 106.8km,2020 年县市级污水处理厂总处理量为 5945.3 万 m^3,总利用量为 1165.8 万 m^3,再生水利用率为 19.6%,目前所有污水处理厂均具有污水二级、三级处理能力,出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》规定的一级 A 标准限值,已达到再生水利用的基本要求,晋城市县市级污水处理厂基本情况见表 1。晋城市再生水利用方式主要为工业企业回用(冷却用水或工业生产)、生态补水、市政回用和农业灌溉等。其中,工业企业回用为 196.4 万 m^3,占总利用量的 16.9%,主要用于晋城市国投电厂、阳城晋煤能源有限责任公司生产冷却用水。生态补水为 842.2 万 m^3,占总利用量的 72.3%,主要用于城区的白马寺山森林公园、龙湾公园,高平的南湖公园、牛山森林公园,陵川的菊巘山公园等河湖补水。市政回用和农业灌溉为 126.0 万 m^3,占总利用量的 10.8%,主要用于市县区城镇道路、绿化用水和陵川上郊蔬菜大棚及周边灌溉用水。污水处理达标后排放到河道中的水量为 4779.5 万 m^3,占总处理量的 80.4%,这部分再生水没有利用对象,利用潜力依然很大。

除县市级污水处理厂外,晋城市还有金匠工业园区污水处理厂一期、阳城清源北留污水处理有限公司、泽州县高都镇污水处理厂、山西兰花工业污水处理有限公司等乡镇污水处理设施,处理规模合计为 2.6 万 m^3/d,乡镇级污水处理设施年总处理量为 936.0 万 m^3,因此,2020 年晋城市污水总处理量为 6881.3 万 m^3。

表 1　晋城市县市级污水处理厂基本情况

厂　名	设计规模/(万 m^3/d)	实际日处理规模/万 m^3	配套管网/km	2020 年处理量/万 m^3	2020 年利用量/万 m^3	利用方式	处理标准	主要出水水质指标/(mg/L)		
								化学需氧量	氨氮	总磷
晋城市正源水务发展有限公司	12.0	10.2	1.7	3725.6	781.2	工业企业(国投电厂)回用和生态补水	一级 A	16.80	1.27	0.22
高平市第二污水处理厂	2.0	2.2(超负荷)	2.7	808.6	160.2	市政回用和生态补水	一级 A	16.38	0.08	0.15
阳城县安阳污水处理厂	2.2	2.5(超负荷)	34.4	904.6	119.4	工业企业(阳城晋煤能源有限责任公司)回用	一级 A	15.35	0.87	0.24
陵川县中威污水处理厂	0.6	0.4	37.0	142.9	24.0	市政回用和农业灌溉	一级 A	11.62	0.14	0.11
沁水县中科久泰污水处理厂	1.0	1.1(超负荷)	31.0	363.6	81.0	市政回用和农业灌溉	一级 A	25.21	0.78	0.30

2.1.2　再生水可利用量预测

由于 2020 年《晋城市生态环境状况公报》不再统计污水排放量,污水处理率依据相关规划方法进行估算。根据《城市排水工程规划规范》,城市污水排放量包括城市综合生活污水排放量和工业废水排放量。城市综合生活污水排放量根据城市综合生活用水量乘以城市污水排放系数确定,城市污水排放系数一般取 0.80~0.90[5],结合晋城市公共设施水平,城市污水排放系数取 0.85。根据 2020 年《晋城市水资源公报》,城市综合生活用水量由城镇居民用水和公共用水(包括服务业、餐饮业及建筑业等用水)组成,2020 年城市综合生活用水量为 8511.9 万 m^3,计算得出城市综合生活污水排放量约为 7235.1 万 m^3。根据 2020 年《晋城统计年鉴》,工业废水排入污水处理厂的排放量为 157.0 万 m^3,因此,2020 年晋城市污水排放量约为 7392.1 万 m^3,而全市 2020 年污水总处理量为 6881.3

万 m^3,污水处理率为93.1%。

根据《晋城市水资源综合规划》和《晋城统计年鉴》,2020年全市城镇人口为137.62万[6],以2020年为现状水平年,2010—2020年全市城镇人口年均增长率1.70%,2020—2025年城镇人口年均增长率取1.75%,预计2025年晋城市城镇人口为150.09万。根据《山西省用水定额》,城镇居民生活综合用水定额为180L/(人·d),估算2025年晋城市城市综合生活用水量为9860.9万 m^3,城市综合生活污水排放量为8381.8万 m^3,城市污水排放量为8538.8万 m^3。随着"十四五"期间晋城市城镇生活污水收集处理能力的提升,污水处理率取95.0%,预计2025年晋城市污水总处理量为8111.9万 m^3,日处理规模将提升至21.8万 m^3。根据《"十四五"节水型社会建设规划》要求,晋城市2025年再生水利用率取25.0%,因此2025年全市再生水可利用量为2027.9万 m^3。再生水可利用量统计情况见表2。

表2 再生水可利用量统计情况

项　目	2020年(基准年)	2025年(规划年)
城市综合生活用水量/万 m^3	8511.9	9860.9
城市综合生活污水排放量/万 m^3	7235.1	8381.8
城市污水排放量/万 m^3	7392.1	8538.8
污水处理率/%	93.1	95.0
污水总处理量/万 m^3	6881.3	8111.9
再生水可利用量/万 m^3		2027.9

2.1.3 再生水利用措施

a. 加强再生水利用布局和配置。2021年,国家发展改革委等十部门印发的《关于推进污水资源化利用的指导意见》和国家发展改革委等五部门印发的《"十四五"节水型社会建设规划》中均提出到2025年,全国地级及以上缺水城市再生水利用率要达到25%以上。2021年,水利部等六部门印发《典型地区再生水利用配置试点方案》,要求"十四五"期间缺水地区试点城市再生水利用率达到35%以上。目前,晋城市要达到以上目标还有一定难度,应继续加大再生水布局力度,逐年扩大其利用规模和比例。近年来,晋城市已将再生水纳入水资源配置,并实行非常规水源配额管理,在对全市各县区下达的年度用水计划中明确了再生水等非常规水源最低利用量目标。同时,工业冷却、服务业非接触性用水(如洗车等)、市政杂用和景观用水应优先使用再生水,农业灌溉鼓励使用水质符合条件的再生水。开展规划和建设项目水资源论证和节水评价审查时,应充分论证再生水利用的可行性和合理性,对再生水管网覆盖范围内水量水质满足要求的工业和服务业项目,新建的要严格审批新增取水许可,已建的要核减新鲜水用水计划。

b. 推进污水资源化利用[7]。以现有污水处理厂为基础,坚持集中与分布相结合,合理布局建设污水资源化利用设施,逐步以再生水替代部分新鲜水,以缓解区域地表水短缺和地下水超采局面。城镇应集中推进污水处理厂提标升级扩能改造,提高污水处理能力和出水水质。加大配套管网等基础设施建设,完善城镇供水管网,使再生水接入供水网络体系。"十四五"期间,晋城市应积极推进市区正源污水处理厂、高平第一生活污水处理厂提标扩容改造,阳城、沁水2个县第二污水处理厂的新建投产。工业园区应将再生水作为生产用水的重要水源,推动开发区金匠工业园区污水处理厂二期工程投产运行。农村地区应因地制宜地推广分布式、小型化的污水处理再生利用设施,建设分布式污水处理再生利用设施,推动城区钟家庄,泽州县周村、李寨、大箕、南岭、犁川,高平市原村、寺庄、北诗、石末、陈区,阳城县町店二期,沁水县端氏、中村等乡镇污水处理设施建成投运。同时,配合人工湿地等污水深度处理工程,以丹河人工湿地为中心,重点推进巴公河薛庄、北石店河背荫2个人工湿地建设,使水环境质量持续改善。

c. 完善优惠激励政策,营造开放市场环境。推动工业园区、用水大户与再生水生产运营单位合作,建设"点对点"再生水生产输配设施,鼓励供需双方按照优质优价原则自主协商确定再生水水价。政府出台倾斜

激励政策,对再生水用户给予管网建设资金支持和水价优惠补偿,对再生水生产运营单位给予用地、用电、贷款贴息等优惠补贴。财政部门要加大水利发展资金、节能减排专项资金对再生水利用的支持力度[8]。税务部门可依据山西省人民政府《关于印发山西省水资源税改革试点实施办法的通知》,对再生水用户依法免征水资源税。同时,创新服务模式,政府可将再生水处理设施作为基础设施及公共服务类 PPP 项目,采用政府购买服务或特许经营等模式引导社会资本参与建设运营。开展再生水水权交易,发挥市场机制在水资源配置中的重要作用。

2.2　矿坑水

2.2.1　矿坑水利用现状

矿坑水利用量指在煤矿等矿产资源开发过程中,直接利用或进行净化处理后利用的露天矿坑水、矿井水或疏干水量。晋城市煤炭资源丰富,全市含煤面积 4654.4km^2,占全市总面积的 49.4%[9],采煤业是全市主要支柱产业,煤炭产量约占山西省煤炭总产量的 8.0%。晋城市煤炭开采方式主要为井工开采,含煤地层一般在地下含水层之下,开采过程中会排出大量矿井水,因此,晋城市矿坑水主要为煤矿井下矿井水。矿坑水利用不仅可以有效缓解矿区水资源短缺问题,提高水资源循环利用效率,还能有效改善矿区周围生态环境,对于推进煤矿企业的清洁生产和节能减排具有重要意义。通过对晋能控股煤业集团寺河煤矿(2020 年产量 800 万 t)、晋能控股煤业集团成庄煤矿(2020 年产量 600 万 t)、晋能控股煤业集团长平煤业(2020 年产量 500 万 t)、山西亚美大宁能源有限公司晋城市大宁煤矿(2020 年产量 320 万 t)等 80 余座全市规模较大的煤矿企业进行抽样调研,抽样煤矿 2020 年煤炭年产量总计 9326 万 t,矿坑水涌水量总计 2927.0 万 m^3,涌水系数为 0.31m^3/t。晋城市矿井水主要为含悬浮物(煤粒、煤粉等)矿井水,感官性状、一般性化学指标和细菌性指标超标,总体水质较好[10],一般采用“预沉调节—混凝—沉淀—过滤—消毒”的组合处理工艺去除水中悬浮物[11],原水处理成本较低。部分为酸性矿井水,SO_4^{2-}(硫酸根)、Cd^{2+}(镉离子)、Pb^{2+}(铅离子)含量超标[12],根据《酸性矿井水处理与回用技术导则》,采用中和法进行处理,加入碱性试剂(一般多采用石灰或石灰石)和高浓度泥浆,与原水发生中和反应,同时底泥回流到中和池减少石灰消耗,平衡水体酸碱度、降低金属离子浓度。晋城市煤矿矿坑水处理后主要用于:ⓐ煤矿工业生产用水,包括井下生产、黄泥灌浆、喷雾降尘、地面洗选煤厂及锅炉房等,同时还有少量供给煤矿周边的煤化工等工业企业;ⓑ矿区生活用水与杂用水,经过深度处理达到相应标准后,用于矿区及周边居民日常生活用水,包括职工澡堂用水等;ⓒ矿区环境用水,主要用于植被绿化、景观用水、地面洒水等。抽样煤矿矿坑水可利用量总计 1798.0 万 m^3,其中煤矿自身利用(包括附属洗选煤厂)量为 1673.0 万 m^3,供周边农业灌溉和工业企业利用量总计 125.0 万 m^3。根据 2020 年《晋城统计年鉴》,煤炭年产量为 12048 万 t,估算 2020 年全市矿坑水涌水量为 3735.0 万 m^3,矿坑水可利用量为 2278.0 万 m^3。

2.2.2　矿坑水可利用量预测

晋城市由于煤水共存的地质条件,使水资源与煤炭资源开发互相制约。矿坑水涌水系数将随开采阶段的变化而变化,煤矿开采初期,揭露含水层较多,矿坑水涌水量相对较大;开采中期,含水层水位降落漏斗趋于稳定,涌水量也趋于稳定;开采后期,含水层部分被疏干,地表产汇流条件发生改变,上部补给量、地表水渗漏量逐步减少,涌水量将逐年衰减[13]。由于全市规模较大煤矿均已正常投产十几年,因此,2025 年矿坑水涌水系数取 0.26m^3/t,根据《国家节水行动晋城实施细则》要求,2025 年矿坑水利用率取 75.0%。同时,《晋城市打造全省能源革命排头兵领跑者实施方案》提出,煤炭产量峰值年份为 2020 年,要求 2020 年以后产量只减不增,倒逼能源革命推进。规划 2025 年煤炭年产量为 12000 万 t,估算 2025 年全市矿坑水可利用量为 2340.0 万 m^3,矿坑水可利用量统计结果见表 3。

表3 矿坑水可利用量统计结果

项　目	2020年（基准年抽样）	2020年（基准年）	2025年（规划年）
煤炭产量/万t	9413	12048	12000
矿坑水涌水系数/(m^3/t)	0.31	0.31	0.26
矿坑水涌水量/万m^3	2927	3735	3120
矿坑水利用率/%	61.0	6.0	75.0
矿坑水可利用量/万m^3	1798	2278	2340

2.2.3 矿坑水利用措施

a. 将矿坑水纳入水资源配置。在晋城市城市专项规划中推动将矿坑水纳入地方供水规划，向周边城镇居民和工业企业供水。采矿企业在办理取水许可时，优先考虑配置矿坑水，对未充分合理利用矿坑水的企业，核减其下年度常规水源计划用水指标。“十四五”期间，晋城市下辖高平市将建设煤矿矿坑水利用工程，对13处外排水量较大的矿坑排水点，统一纳入县域水网统筹考虑，能排入水库的优先考虑排水入库，不能排入水库的配建调蓄工程，就近利用。

b. 分级处理、优化利用。全市重要采矿区、重大涌水矿区应建设矿坑水处理设施，实现矿坑水规模化综合利用。晋城市煤矿矿坑水利用主要为井下矿井水利用，利用方式有两种，一种是利用废弃巷道的空间建立矿井水处理站和“地下水库”，将其与井下用水点有机结合，矿井水在井下完成沉淀、过滤处理后直接输送到综采、机掘等工作面用水部位，实现矿井水处理不出井；另一种是在井底建设水仓及提水泵房，煤矿开采过程中，将井下涌水集中排至井底水仓，再由提升泵提至地面，通过地面矿井水处理站对其进行处理[14]。根据地面和返回井下的各个用水点对水量、水质的不同要求采取不同的处理工艺，配合建设一定容量的调节工程（调节池等），提高煤矿用水保证率。矿井水应按照不同的用水场景和用水需求，分级处理，分质供应，对于附属洗选煤厂、黄泥灌浆站等生产用水采用混凝、沉淀、过滤等常规处理技术，对于锅炉补水、矿区职工洗浴等生活用水采用超滤、反渗透、消毒等深度处理技术，避免不必要的附加处理成本和企业负担，确保矿区生产充分使用矿井水、矿区生活优先使用矿井水，综合提高矿井水利用率，推进晋城市煤矿企业高效清洁生产和绿色矿山建设。

2.3 雨水

2.3.1 雨水利用现状

雨水利用量指采用集雨场地或微型集雨工程（水窖、水柜、雨水罐、水池等）进行收集、存储，满足相关技术标准后加以利用的天然降水（大气降水）量。雨水具有笼罩面积大、时间分布不均、污染较轻以及可就地利用的特点。目前，晋城市尚无雨水利用的权威统计数据。农村地区雨水集蓄利用量主要指农村集雨工程的集雨量，主要利用对象为农村饮水、作物和果树灌溉。2020年，晋城市农村地区共有塘坝198座，水窖、水池4008座，因水窖、水池规模较小，利用量不便统计，故本文雨水利用量主要指塘坝蓄水利用量。根据《晋城统计年鉴》，塘坝容量总计1065.9万m^3，总灌溉面积2440hm^2，依据《山西省用水定额》和作物灌溉经验折算，雨水可利用量约为500.0万m^3。城镇地区雨水集蓄利用主要以典型示范工程为例，雨水利用量较少。晋城市水务局在节水机关建设中利用地下雨水集蓄池收集雨水进行绿化喷灌，同时将雨水引至各楼层卫生间进行冲厕，实现分质供水，年可利用水量约900.0m^3。晋城市实验中学在教学楼立墙旁设置了5个集雨樽，总收集容量为7.5m^3，用于校园绿化喷灌，年可利用水量约50.0m^3。

2.3.2 雨水可利用量预测

根据《海绵城市建设技术指南》[15]，城市雨水可利用量约为雨水设计调蓄容积。计算公式为

$$V = 10H\varphi F$$

式中：V为设计调蓄容积，m^3；H为设计降水量，mm；φ为综合雨量径流系数；F为汇水面积，hm^2。

市区的综合雨量径流系数与市区土地下垫面类型有关，可采用加权平均法计算。晋城市市区总面积为14259hm^2，2020年绿地面积为6530hm^2，市区绿地覆盖率达45.8%，水域面积为71hm^2，其他面积为7658hm^2。

2025 年假设市区总面积不变,水域面积稍有增加,根据《晋城市城市绿地系统专项规划》,绿地覆盖率将达到 48.0% 以上,估算 2025 年绿地面积达 6845hm^2。通过计算,综合雨量径流系数为 0.33,综合雨量径流系数计算结果见表 4。

表 4　综合雨量径流系数计算结果

土地下垫面类型	2020 年面积/hm^2（基准年）	2025 年面积/hm^2（规划年）	综合雨量径流系数(φ)
绿地面积	6530	6845	0.15
水域面积	71	80	1.00
其他面积	7658	7334	0.50
市区面积	14259	14259	0.33

晋城市位于年径流总量控制率分区的 III 区,根据《晋城市中心城市海绵城市专项规划》要求,年径流总量控制率取 75.0%,对应的设计降水量取 23.1mm,计算可得雨水设计调蓄容积为 108.7 万 m^3,因此 2025 年晋城市城市雨水可利用量约为 108.7 万 m^3。而农村地区雨水利用量变化不大,雨水可利用量仍以 500.0 万 m^3 计算,2025 年全市雨水可利用量约为 608.7 万 m^3。

2.3.3　雨水利用措施

a. 农村地区应结合地形地貌建设水池、水窖和坑塘等设施集蓄雨水,用于农业灌溉、畜禽养殖等。

b. 城市规划建设中应融入海绵城市建设理念,各类建筑项目在总体规划上应包含雨水利用设施,与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用[16],提升水源涵养能力和雨水综合利用水平,基本消除城市易涝点,将汛期雨水从灾害化向资源化转变。在城市公园、绿地、公共建筑、道路广场等新改扩建过程中推广透水铺装,合理建设屋顶绿化、植草沟、下沉式绿地、地下调蓄池等设施,减少雨水地表径流外排,有效控制径流污染,提升城市防洪排涝能力。同时,收集雨水用于绿地灌溉、城市环卫、景观用水等,有条件的社区还可通过建设雨水花园、屋顶蓄水系统等实现雨水集蓄利用与园艺水景观协调统一。《晋城市中心城市海绵城市专项规划》中划分了海绵生态涵养区等 6 大功能区,系统规划了全域推进海绵城市建设项目清单,包括建成区道路雨污分流管道建设和下凹式绿地等低影响开发措施,打造青山环城、曲水营城的城市空间格局。近期,晋城市正在起草《晋城市海绵城市建设管理办法》,总结雨水高效收集和利用模式,加强雨水集蓄利用技术创新与示范推广。

c. 重点用水企业因地制宜配套建设雨水集蓄利用设施,积极推动高耗水企业开展雨水收集系统工程。“十四五”期间,晋城市持续推进工业园区雨水资源化利用试点,鼓励工业园区建设雨水收集、储蓄、处理、回用设施,深入推动煤矿等工业厂区初期雨水收集治理回用,推进厂区雨污分流管网改造,工业雨水排口实施非汛期封堵等措施。

3　非常规水源利用存在的问题及建议

近年来,晋城市非常规水源利用发展较快,取得了一定成效,但与发达省份城市相比,非常规水源利用占比仍偏低,同时也存在一定的问题,具体表现在以下方面:

a. 在管理制度方面,非常规水源利用没有专项的法律法规和完善的规范标准,法律责任规定不明确,政策强制性不够,缺乏操作性强的奖惩制度,价格、财税等配套扶持政策不够成熟。应推动立法部门或政府部门出台适合本地区的非常规水源利用条例或管理办法,通过法制方式引领和规范行业健康发展。

b. 在体制机制方面,非常规水源利用涉及水务、住建、城管、生态等多个部门,职权分工不明确,管理实施难度大,应设置牵头部门或成立组织机构,统筹全市非常规水源利用规划和实施,并将非常规水源利用量或占比纳入各级政府及相关部门考核中。

c. 在工程建设方面,非常规水源利用项目的配套管网设施投资大,现阶段主要以政府投资为主,市场投融资机制不成熟,融资渠道单一。政府部门应会同财政、金融管理部门和各类银行出台相关倾斜政策,推出非常规水源利用专项金融产品或授信贷款,拓宽社会融资渠道。利用合同治污、合同节水等管理模式引导

更多金融资本和社会资本进入该领域,激发行业内生动力。

d. 在推广普及方面,不同类型的非常规水源均有一定的使用限制和风险。如不同河湖水质对应的再生水补水标准尚需进一步完善[17]。矿坑水处理设备自动化运行程度不高,人工操作环节存在管理风险[18],应加大产学研结合,提高矿坑水处理智能化程度。中小型煤矿矿坑水回收利用资金投入占比过高,应争取更多政府财税支持,提高企业矿坑水利用意愿。城市雨水蓄排系统设施应对汛期暴雨能力不足,应结合海绵城市建设,优化城市雨水收集系统。

4 结 语

晋城市2020年非常规水源利用量为3943.8万m^3,其中再生水可利用量1165.8万m^3,矿坑水可利用量2278.0万m^3,雨水可利用量500.0万m^3,比重分别为29.6%、57.7%和12.7%。受晋城市产业结构影响,非常规水源利用主要以矿坑水为主,其次是再生水,雨水利用因降水条件限制,利用量相对较少。

预计到2025年,晋城市非常规水源利用量约为4976.6万m^3,其中再生水可利用量2027.9万m^3,矿坑水可利用量2340.0万m^3,雨水可利用量608.7万m^3,比重分别为40.8%、47.0%和12.2%。由于晋城市在"十四五"期间能源供给结构将逐步转型,矿坑水利用量基本不变,再生水因其量大而集中、水质水量相对稳定的特点,利用潜力将逐步突显。

根据水利部、国家发展改革委《"十四五"用水总量和强度双控目标的通知》相关要求,非常规水源最低利用量将作为地区用水总量和强度双控考核的控制目标。因此,晋城市应加快编制非常规水源开发利用专项规划,通过实施再生水开发利用、矿坑水优化利用、雨水集蓄利用等具体措施,提升全市非常规水源利用水平,有效缓解水资源短缺对经济社会发展的限制,在全市水资源配置中发挥重要作用,为晋城市经济社会高质量转型和可持续发展提供坚实的水支撑和水保障。

参考文献

[1] 晋城市水文水资源事务中心,晋城市水务局.2020年度晋城市水资源公报[R].晋城:晋城市水文水资源事务中心,2021.

[2] 晋城市生态环境局.2020年晋城市生态环境状况公报[R].晋城:晋城市生态环境局,2021.

[3] 晋城市水务局,太原碧蓝水利工程设计有限公司.晋城市水资源综合规划[R].晋城:晋城市水务局,2017.

[4] 晋城市水务局.晋城市水利发展"十四五"规划[R].晋城:晋城市水务局,2021.

[5] 住房和城乡建设部.城市排水工程规划规范:GB 50318—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[6] 晋城市统计局.晋城统计年鉴(2021)[M].北京:中国统计出版社,2021.

[7] 刘杨梅,黄英,王杰.云南省城市非常规水资源综合利用设想——以昆明市为例[J].安徽农业科学,2013,41(19):8265-8267.

[8] 王建华,柳长顺.非常规水源利用现状、问题与对策[J].中国水利,2019(17):21-24.

[9] 晋城市人民政府.晋城市矿产资源总体规划[R].晋城:晋城市人民政府,2017.

[10] 郭晓燕.晋城市采煤排水利用浅析[J].山西水利,2016,32(3):14-15.

[11] 何超.矿井中污水处理与再利用探讨[J].煤炭工程,2018(S1):40-41.

[12] 冯裕华.煤矿开采对晋城市水资源的影响及治理对策[J].山西水利,2013(5):18-19.

[13] 刘爱萍.晋城市中水利用研究[J].地下水,2013,35(3):110-112,114.

[14] 王秉涛.谈矿井污水及废水的利用[J].山西建筑,2016,42(17):206-207.

[15] 住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)[R].北京:住房和城乡建设部,2014.

[16] 赵博,朱梅,赵家祥,等.2020年安徽省非常规水源可利用量预测[J].安徽农业科学,2016(3):192-193,197.

[17] 穆莹,王金丽.几种非常规水资源应用现状及利用前景[J].科技视界,2020(11):222-224.

[18] 曹庆一,任文颖,陈思瑶,等.煤矿矿井水处理技术与利用现状[J].能源与环保,2020,42(3):100-104.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.07

地下水水位水量双控管理研究综述

孙雪峰[1]　孙春峰[2]

(1. 河北省水资源研究与水利技术试验推广中心,河北 石家庄　050061;
2. 石家庄市农林科学研究院,河北 石家庄　050041)

【摘　要】 本文以2010年以来高等院校、科研院所关于地下水水位水量控制的研究成果为依据,整理分析了目前关于地下水水位水量双控管理的研究内容及进展、问题与不足。结果表明,目前针对地下水水位水量双控管理的研究,基础理论研究多,从概念到概念的推理多,从理论走向实际应用的研究较少,今后的研究工作仍需加强。

【关键词】 地下水水位;地下水水量;双控管理

中图分类号:TV213.4　　文献标志码:A　　文章编号:2096-0131(2022)07-025-05

Summary of research on dual control management of groundwater level and quantity

SUN Xuefeng[1], SUN Chunfeng[2]

(1. *Hebei Water Resources Research and Water Conservancy Technology Experiment and Extension Center*, *Shijiazhuang* 050061, *China*;
2. *Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Shijiazhuang* 050041, *China*)

Abstract: Based on the research results of groundwater level and quantity control in universities and research institutes since 2010, this paper collates and analyzes the current research contents, progress, problems and shortcomings of dual control management of groundwater level and quantity. The results show that at present, there are many researches on basic theory, many inferences from concept to concept, and few researches from theory to practical application, which need to be strengthened in the future.

Key words: groundwater level; groundwater quantity; double control management

2011年,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》提出实行地下水取水总量与水位预警双重管理后,2012年,出台了《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》,要求严格地下水的管理和保护,加强地下水动态监测,实行地下水取用水总量控制和水位控制;2021年,国务院颁发《地下水管理条例》,实行地下水总量控制制度,各省在总量控制指标下,制定县级行政区的地下水取水总量控制指标和地下水水位控制指标。落实地下水水位水量双控管理工作,离不开各方面技术研究成果的支持,为了解目前地下水水位水量双控技术研究状况,本文通过分析与地下水水位水量双控相关的340篇文献,将地下水

收稿日期:2022-03-23

作者简介:孙雪峰(1965—),男,正高级工程师,学士,主要从事水资源研究、智慧水利、节水型社会建设等研究工作。

水位水量研究成果进行分类综述,可为同行业技术人员提供一定参考。

1 地下水水位水量双控管理区研究

地下水泛指地表以下的重力水,因地质条件不同,重力水存在的方式也不同,研究地下水水位水量需要按照一定的标准划定边界范围形成具体的区域,以便定量描述水量的多少和水位的高低。这就涉及到地下水水位水量双控管理区域划分问题,本文经过分类汇总文献内容,总结出以下3种分区方法。

1.1 分区分类划分

陈文芳[1]是较早系统研究地下水位控制的研究人员,虽然仅得到了从概念到理论推理的结论,但从全国范围对地下水的分布特点进行了分析,在地下水水位水量双控管理方面具有较强的启发性。在其《中国典型地区地下水位控制管理研究》一文中,得出了地下水管理分区是地下水位控制管理的基础的结论。中国地下水分布范围很广,受水文地质条件的复杂性、地下水开发利用类型以及开采程度差异性的影响,不同区域地下水开发利用产生的生态环境效应是不同的,导致的环境地质问题也有较大差异。因此,地下水位控制研究应分区域、分地下水类型,针对不同的地下水开采程度以及引起的环境问题选取典型地区进行研究。从全国地下水区域特点进行划分,可分为华北平原、西北地区和沿海地区3个类型区;结合地下水水位的发展趋势,可分为抬升型和下降型两种;结合地貌类型,可分为平原和山区两类。

1.2 分区分级划分

叶勇等[2]认为合理地进行管理分区划分是进行地下水资源管理的先决条件。但根据我国水资源分级管理特点,划分地下水控制性管理分区时需从流域分区、行政区划、水文地质单元、地下水资源开发利用特点和管理目标等方面予以考虑。结合我国水资源行政主管部门的实际情况,为了便于管理,将划分的管理分区与流域管理区及行政管理区相结合。即流域级管理分区下嵌套水资源二级分区、省级行政管理区和地下水一级水功能;省级管理分区下嵌套水资源三级分区、地(市)级行政管理区和地下水二级功能区;地级管理分区下嵌套水资源四级分区、县级行政区。

1.3 独立功能区划分

各级科研机构结合各自管理范围内的行政区和流域特点,探索了更细致的地下水双控管理分区方法,大部分是根据地下水开发利用问题导向结合功能进行划分的。

王金哲等[3]强调了地下水功能区划的重要性,以我国西北内陆平原区为例,把地下水分为生态功能保护区、基本农田质量保护区和可开采资源功能区,增强了最严格水资源“水位、水量”双控管理的针对性。闫学军等[4]以天津市地下水开发利用为例,以地面沉降为约束条件建立了地下水水位-水量数值模型。于璐等[5]专门研究了海水入侵区地下水管理控制水位划定方法,在对海水入侵区地下水管理控制水位概念界定的基础上,提出了地下水管理控制水位红线、黄线、蓝线分级模式。严格来说,管理分区与功能分区是不完全一致的,管理分区可能有很多功能区,但一个功能区只能有一个功能。

2 地下水总量控制与水位控制及其关系

地下水作为水资源的一部分,具有明显的特殊性。地下水储存于岩土空隙之中,与所依存的岩土构成一个有机整体。因此,地下水既具有水资源的属性,又具有水文地质构造的属性。地下水的地质属性与岩土不同,并没有固定的结构形态,受自然降水、蒸发蒸腾、土壤质地、地质构造、地形地貌的影响,地下水存储量、地下水水位埋深随季节变化而变化。地下水水位与水量都是表征地下水的指标,两者具有孪生性,一个水位对应着一个水量,地下水水位相当于地下水的开关,水位的高低决定着水资源量的多少。不仅如此,过高的地下水水位将造成土壤盐渍化,影响地面植被生长,产生的浮力使建筑物地基不稳;过低的地下水水位将产生地下水漏斗,引发地面沉降、诱发地震、土壤沙化等生

态环境问题,对经济社会环境产生一系列的影响。从地下水水位具有的水量属性、环境属性特点来看,在研究地下水时,地下水水位埋深及其变化是一个重要课题。

2.1 地下水由水量管理到水位水量双控管理的历史演变

为了控制地下水超采问题,最初的设想是控制地下水开采量,即把地下水开采量保持在一个合理的水平,即不超过地下水的最大允许开采量。最早具有普遍性的研究地下水合理开采量的是全国各级水行政主管部门开展的地下水资源评价,其中最主要的内容就是确定地下水允许开采量,并作为区域地下水的合理开采量。但是由于地下水开采没有计量,因此,允许开采量就无法得到具体落实,也就是说通过允许开采量来控制地下水超采的方法未起到作用。随着地下水超采引发的环境地质灾害问题越来越严重,与之密切相关的地下水水位越来越受到重视。许一川[6]认为由于地下水位易于监测的特点,相对于总量控制,水位变化能更直观、更真实地反映地下水资源变化状况,更能体现管理者在地下水管理中的绩效。超采地下水引起的环境地质问题,其实是地下水水位下降引起的,地下水漏斗、地面沉降、海水入侵、湿地和泉水消失,都直接或间接地与地下水水位变化有关,可通过合理调整地下水水位下降幅度进行改善,最终归结为地下水水位控制的问题。因此,地下水管理从水量管理逐步向水位水量双控管理转变。

2.2 地下水水量和地下水水位对应关系探索

地下水水位作为地下水的一个重要指标,对地下水水量的利用有控制与指示作用。本文仅就地下水水位下降问题进行讨论研究。在水量向水位水量双控管理转变初期,主要是在地下水水量与水位的对应关系上进行了探索,如李春俊[7]以平度市北胶莱河地下水水源地地质单元为例,把可开采量与最严格水资源管理制度中最小值作为总量控制的标准,用含水层厚度疏干率计算水量对应的基准水位,在此基础上利用均衡法划定警戒水位,按照供水保证时间划分为黄色警戒水位(保证供水 3 个月)、橙色警戒水位(保证供水 2 个月)、红色警戒水位(保证供水 1 个月);孙才志等[8]以辽河平原为研究对象,构建了两套地下水生态水位标准,利用生态水位标准反算需水量,再进行平衡分析;闫学军等[4]针对传统地下水资源管理以“可开采量”作为地下水开发利用控制指标导致的环境问题,以天津市为例,建立以地面沉降为约束条件的地下水水位-水量数值模型,利用 GMS 软件模拟不同时期各含水层的控制水位,提出了地下水水位、水量“二元”指标管理新模式。

2.3 地下水控制水位的研究

随着水量与水位对应关系研究的深入,专家学者开始专门就地下水控制水位进行探索,结合研究范围提出各自的观点。

2.3.1 地下水控制水位概念的提出

马小雷等[9]对地下水控制性水位进行了定义,指出:地下水控制性水位是指为了保护地下水,促进地下水可持续利用,合理有效地开发利用地下水资源,在考虑地下水综合功能的条件下,确定的水位值的总称。叶勇等[2]也提出了类似的观点,即地下水控制性水位是指具有明确物理概念的一系列水位值的总称,对应地下水不同开发利用状态的一系列水位值,或对应地下水不同可开采量的一系列水位值。并进一步提出,地下水控制性水位并不是静态数值或阈值,而是由受年内水文气象和地下水开发利用状况等影响的一组数值或阈值构成。地下水控制性水位是为了实施地下水目标管理而设定的一些期望(目标)水位值或阈值,是一个反映水行政主管部门不同时期管理目标、理念、意志和偏好的表征指标,具有鲜明的时代特色,不同地区不同发展阶段所制定的控制性水位可能不同。

2.3.2 控制性水位的划分

目前,已有专家学者在地下水控制管理水位划分方面进行了积极探索,提出了将警戒水位、限采水位、禁采水位、水位控制黄线与红线理论、临界水位等作为

控制性水位。

张海涛等[10]认为控制性地下水水位一般包括地下水红线水位和地下水管理水位,地下水红线水位包括地下水红线水位上限和下限。红线上限水位限制地下水水位过高或地下水埋深过浅,红线下限水位保护水文地质环境。

唐克旺等[11]认为确定地下水控制水位之前首先要明确控制水位的目的,地下水具有资源供给、环境地质灾害预防、生态系统维系3方面的功能,因此地下水控制水位指标可分为资源型水位、环境型水位和生态型水位。不同的类型选用的指标也不同,资源型控制水位指标采用地下水红线下限水位,计算方法主要有开采设计参数法、含水层厚度法,也可采用历史资料法和含水层厚度法相结合的方法;环境型地下水控制下限水位是地下水水位下降引发地面沉降、海水入侵、地面塌陷等环境地质问题的临界深度;生态型控制水位是为了维系与地下水系统紧密相关的地表生态系统(包括湖泊、沼泽、河道基流、泉水、干旱区植被等)而设定的地下水水位阈值。

陈文芳[1]根据地下水水位的抬升或下降对地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能等造成的影响程度,选择适宜水位和危急水位作为地下水水位的控制指标。适宜水位指地下水处于良性循环,即地下水处于多年平均采补均衡状态或者准均衡状态的一系列水位值或水位阈值;危急水位指地下水良性循环被打破,即地下水处于多年平均采补负均衡状态(下降型)或者多年处于过渡补充状态(上升型)的一系列水位值或水位阈值。

2.3.3 控制水位的计算方法

陈文芳[1]提出山前平原区危急水位的确定方法主要有地下水开采系数法、临界水位埋深法和综合指数法3种。胡琪坤等[12]在地下水功能区划的基础上,利用ArcGIS软件将各指标值在空间上进行分布,结合层次分析法建立了地下水开发利用风险与地下水控制性关键水位对应的关系,从而确定了不同含水层不同规划期的控制性关键水位,为地下水资源管理、水生态修复提供了依据。于璐等[5]针对地下水不同阶段的管理需求,构建了基于人工神经网络方法的地下水合理水位计算方法和基于水资源调控模型的地下水管理控制水位计算方法。

3 存在问题

3.1 研究仍停留在从概念到理论的阶段

虽然提出了要实行地下水水位水量双控,但是由于地下水的复杂性和不可见性,在实践中大部分还停留在从概念到理论的阶段。如陈文芳[1]认为由于地下水的管理主要偏重于对地下水可开采量的控制,对地下水位的控制和管理程度不够,且未建立起地下水管理分区域与地下水位控制之间的关系,使我国地下水资源管理尚未实现量化管理、动态管理和科学管理;许一川[6]认为针对不同区域如何科学合理划定水位控制线、如何与今后的水位控制管理相结合,还未形成较为成熟的理论和做法,深入研究水位管理是难点之一。

3.2 地下水控制水位的参照标准不明确

通过对目前研究成果进行全面分析,发现了一个基础性问题,即地下水控制水位的参照标准不明确。地下水及地下水水位的概念源于水文地质、地质勘探等行业,在长期的实践中形成了比较完整的体系,因此水利行业涉及地下水内容的,以地质行业的勘察成果为主要依据。地下水资源开发利用过程中涉及地下水的开采量、地下水水位、潜水和承压水、地下水下降漏斗等概念。地下水水位是一个常用的概念,但是不同的行业,如水文地质、土木工程设计、水资源开发利用等使用的目的不同。由于使用地下水的目的不同,有些概念各行业在表述上会有所不同,在实行地下水水位水量双控管理制度后,有必要对地下水水位的相关概念进行统一,以便各行业各部门更好地开展工作。

3.3 从供水侧计算水位的研究较多,从需水侧计算水位的研究较少

在采用地下水水量反算水位时,通常把资源、环境、生态的可供水水量或允许开采量作为约束条件,计

算控制水位,从经济生产用水量的角度对地下水水位进行控制的研究较少。地下水开发利用的目的是促进经济社会环境协调发展,在控制地下水开采时,应充分考虑经济社会发展用水,如是否能保证粮食安全,如不能满足,有什么补救措施。研究经济发展用水是保证水位水量双控设计落实的基础,因此应详细研究经济发展对地下水水位的约束条件和影响。

3.4 研究直接控制水位的实用技术较少

建立地下水控制水位的目的是控制地下水超采以及由此引发的环境地质灾害问题。为达到此目的,需要能够直接实现在控制水位停泵或预警的技术。目前,恢复地下水水位的措施主要是补水。从目前的成果来看,主要分为两类,一类是实证分析,分析河道补水间接提升地下水水位、减轻环境地质灾害问题等,如王槿妍等[13]通过对永定河春季生态补水期间的实测数据进行分析,证明了河道补水对地下水水位恢复有明显效果;李丽君等[14]分析了我国自 2000 年起向塔里木河下游实施了 18 次以生态建设和环境保护为目的的生态输水,可发现持续性输水是保证下游脆弱的生态环境稳定好转的根本途径,输水使下游生态环境得到明显改善,生态植被得到恢复,地下水位逐步抬升,地下水水质明显好转,采用汛期输水和间歇机动式调度可使输水效益达到最大化。从严格意义上说,补水措施并不是控制水位的技术,但从研究的成果中可看出,与控制水位最相关的论文基本为补水类,几乎没有具体的控制水位技术。另一类是理论分析,提出了控制水位的原则和原理、控制方法和控制目标,但是没有进一步研究可操作的水位控制技术,如文献[1]、文献[2]等。综合来看,能够直接使用水泵控制水位停止开采地下水的技术仍较少。

4 结 语

通过分析,可以看出地下水水位水量双控研究正在成为地下水资源研究的热点,2010 年以来的研究已经取得了较多成果。且从 2021 年的学位论文数量来看,专门研究地下水水位水量控制的文献明显增加,说明地下水水位水量控制研究是当前研究的热点。但总的来看,目前基础理论研究多,从概念到概念的推理多,从理论走向实际应用的研究较少,在今后的研究工作中仍需加强。

参考文献

[1] 陈文芳. 中国典型地区地下水位控制管理研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.

[2] 叶勇,谢新民. 地下水控制性水位管理分区研究[J]. 黑龙江水专学报,2009,36(1):116-119.

[3] 王金哲,张光辉,崔浩浩,等. 适宜西北内陆区地下水功能区划的体系指标属性与应用[J]. 水利学报,2020,51(7):796-804.

[4] 闫学军,周亚萍,张伟,等. 地下水开发利用水位-水量"二元"指标管理模式研究[J]. 河北工业大学学报,2012,41(2):65-68.

[5] 于璐,窦明,赵辉,等. 海水入侵区地下水管理控制水位划定方法研究[J]. 水电能源科学,2015,33(12):143-147.

[6] 许一川. 地下水总量控制和水位控制管理模式研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2013.

[7] 李春俊. 地下水双控指标体系构建研究[J]. 治淮,2020(8):6-7.

[8] 孙才志,刘玉兰,杨俊. 辽河流域平原区地下水生态水位及水量调控研究[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):15-19.

[9] 马小雷,孟军省,付丹平. 华北平原中部典型区地下水控制水位划定方法对比研究[J]. 地下水,2020,42(1):59-62.

[10] 张海涛,谢新民,谷军方,等. 邯郸市东风湖泉域用水总量控制研究[J]. 水电能源科学,2011,29(2):17-20.

[11] 唐克旺,侯杰,于丽丽. 基于功能的地下水控制水位确定方法[J]. 中国水利,2015(9):30-32.

[12] 胡琪坤,戴鹏礼,杨晓涵. 地下水控制性水位确定研究[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(0):239-240.

[13] 王槿妍,王材源,刘翠珠,等. 永定河生态补水水文要素变化分析[J]. 北京水务,2020(4):28-31,39.

[14] 李丽君,张小清,陈长清,等. 近 20a 塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理,2018,41(2):238-247.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.08

非一致性条件下输沙对降水与径流的响应变化研究

陈　凯[1]　吴彦昭[2]　王巧娟[3]

(1. 甘肃省庆阳水文站,甘肃 庆阳　745000;
2. 甘肃省水文站,甘肃 兰州　730000;
3. 甘肃省陇南水文站,甘肃 陇南　742500)

【摘　要】 为深入研究降水、径流与输沙变化之间的响应关系,选取长江上游主要输沙河流西汉水,采用该流域1960—2019年降水、径流、输沙系列资料,利用双累积曲线法找出突变年份,确定一致性时段;采用Pearson、Correl相关系数对输沙率与降水量、流量进行相关性分析,找出与同输沙率相关程度较大的影响因素,并分时段建立输沙对降水、径流响应变化的线性和非线性回归方程,以SSE、RMSE、R-square值分析拟合度。结果表明,西汉水流域降水、径流对输沙的影响程度在1993年发生突变,表明流域下垫面条件在1993年以后得到明显改善;流量与输沙率的相关程度高于降水量与输沙率的相关程度。

【关键词】 水沙关系;双累积曲线法;Pearson相关系数;水土保持;西汉水

中图分类号:P333.4　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-030-06

Response of sediment transport to precipitation and runoff under inconsistent conditions

CHEN Kai[1], WU Yanzhao[2], WANG Qiaojuan[3]

(1. *Qingyang Hydrological Station*, *Gansu Province*, *Qingyang* 745000, *China*;
2. *Gansu Province Hydrological Station*, *Lanzhou* 730000, *China*;
3. *Longnan Hydrological Station*, *Gansu Province*, *Longnan* 742500, *China*)

Abstract: In order to deeply study the response relationship between precipitation, runoff and sediment transport changes, Xihanshui, the main sediment transport river in the upper reaches of the Yangtze River, was selected. Based on the series data of precipitation, runoff and sediment transport in this basin from 1960 to 2019, the double cumulative curve method was used to find out the abrupt change year and determine the consistent period. Pearson and Correl correlation coefficients were used to analyze the correlation between sediment transport rate, precipitation and discharge, and the influencing factors related to the same sediment transport rate were found out. The linear and nonlinear regression equations of sediment transport response to precipitation and runoff were established in different periods, and the fitting degree was analyzed by SSE, RMSE and R-square values. The results show that the influence degree of precipitation and runoff on sediment

收稿日期:2022-04-11
基金项目:甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目
作者简介:陈凯(1974—),男,高级工程师,学士,主要从事水文水资源分析研究工作。

transport in the West Han River Basin suddenly changed in 1993, which indicates that the underlying surface conditions of the basin have been obviously improved since 1993. The correlation degree between discharge and sediment transport rate is higher than that between precipitation and sediment transport rate.

Key words: water-sediment relationship; double cumulative curve method; pearson correlation coefficient; soil and water conservation; Xihanshui River

河流水沙关系是河流生态环境研究的一个永恒课题,是河流生态治理保护与高质量发展的一项基础性研究。近40年来,由于我国经济高速发展,影响水沙关系的人类活动越来越频繁,主要体现在水土保持工程的大量实施、土地利用类型的改变等方面[1-2]。目前,国内学者对于河流泥沙的研究成果较多,如连秋晗等[3]对黄河佳芦河在生态治理影响下的水沙关系变化进行了研究,结果表明,与基准期(1957—1972年)相比,治理期(1973—2014年)的径流与输沙之间的关系在年尺度和次洪水尺度上均发生了显著变化,且径流输沙均显著减少;姚文艺等[4]、王鸿翔等[5]对黄河干流水沙长期关系进行了分析研究,结果表明,自20世纪60年代以来,黄河水沙变化经历了一个由"渐变"到"剧变"的过程,径流量、泥沙量大幅减少,且多数支流降水天然径流关系发生改变,而实测径流泥沙关系却未发生明显变化,即部分支流存在径流泥沙减少的"量"变与径流输沙关系"质"变之间的不协同现象;谢梦瑶[6]采用年值对黄河皇甫川流域水沙演变进行分析,对输沙量的减少量与同期降水量和径流量减少量进行了分析,结果表明,受气候变化及人类活动影响,皇甫川流域全时期(1954—2015年)水文要素平稳性受到破坏;赵阳等[7]对极端降水条件下水沙关系进行了分析,采用雨洪过程资料从短历时上进行分析,结果表明,相似极端降水条件下,水土流失治理后,韭园沟流域的径流模数和输沙模数较未治理的裴家峁沟流域明显减小,水土流失治理成效十分显著。但在水沙关系非一致性条件下流域内长期和短时均发生了变化,长期分析缺少输沙在雨洪过程中对降水和径流的响应分析,短时分析缺少对前期的降水和土壤状况进行考虑,因此在非一致性条件下研究输沙对降水与径流的响应变化关系十分必要。本文以长江西汉水流域为研究对象,在非一致性条件下研究输沙对降水、径流的响应变化,资料采用年、汛期、非汛期、月最大、日最大数据值,能够较全面、客观地进行综合分析。

1　研究区域概况

西汉水流域主要位于甘肃省西南部,在陕西省略阳县入嘉陵江,流域面积10178km^2,甘肃省境内流域面积9785km^2,河长212km。流域地貌上游主要以黄土丘陵为主,下游植被较好,以石山为主,是长江流域上游区的水土流失严重区、水资源短缺区,同时也是含沙量最大的区域。近年来,随着生态环境的改善、水土保持工程的实施,水土流失规模逐渐减少。

2　资料与方法

西汉水流域内有4处水文站,均有输沙、降水、径流等监测,西汉水流域水系及水文站点分布情况图1。本文收集了流域内水文站点近60年(1960—2019年)系列资料,选用西汉水干流下游控制站镡家坝水文站的输沙、径流,以及集水面积形心临近点平洛雨量站降

图1　西汉水流域水系及水文站点分布情况

水资料进行分析研究,对缺测资料进行插补延长处理。

对西汉水流域近60年来的输沙、降水、径流进行多年变化分析,采用线性回归方程进行趋势分析,利用坎德尔秩次相关法进行变化趋势显著性水平分析,选用置信水平 $\alpha=0.5$,则 $U_{\frac{\alpha}{2}}=1.96$;一致性时段划分使用双累积曲线法,查找出明显变异点,以变异点为界进行划分;相关分析采用Pearson相关系数、Correl相关系数进行分析;响应研究采用多元回归方程构建数学模型进行。

3 水沙关系分析

3.1 多年变化分析

为了直观反映西汉水流域近60年的降水、径流、输沙变化过程,采用年降水量、年平均流量、年平均输沙率,作变率时序变化过程图,见图2。由图2可以看出,从整体上看,水沙变化具有一致性;年降水量、年平均流量和年平均输沙率均呈现减少趋势[8]。其中,1984年是建站以来洪水最大、年径流量最大、年平均输沙率较大的年份。从线性回归函数可以看出,年平均输沙率斜率(-3.0666)为负的最大值,其次为年平均流量(-1.2724)。采用坎德尔秩次相关法进行减少趋势显著性分析可知,年降水量显著性水平为1.332,减少趋势不显著;年平均流量显著性水平为3.014,减少趋势显著;年平均输沙率显著性水平为5.339,减少趋势显著。

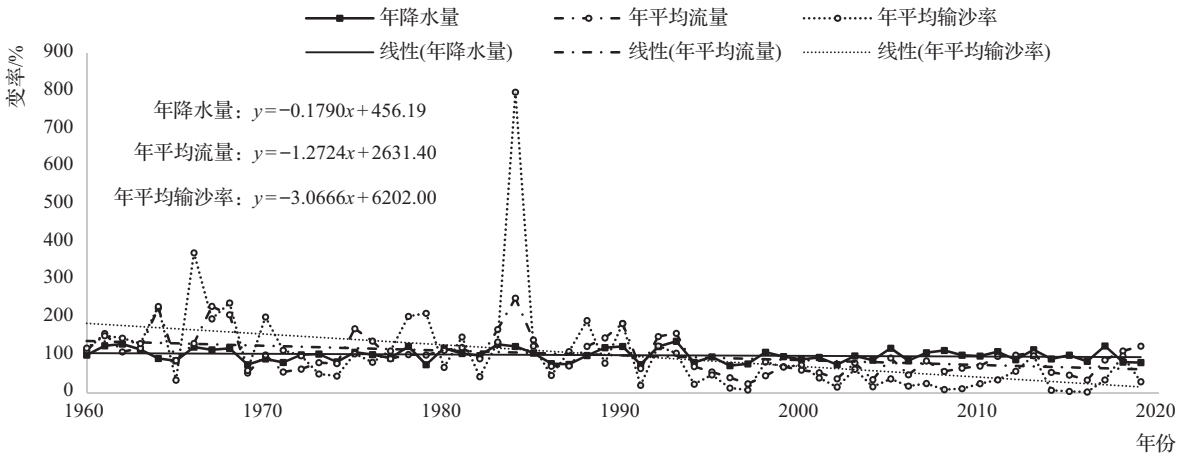


图2 相关要素变率时序变化过程

进一步对降水量、平均流量、平均输沙率的汛期(5—10月)、非汛期(11—4月)、全年、最大月值、最大日值分年代进行统计分析,结果见表1。从表1中可看出,1960—1969年的年降水量、年平均流量最大,1970—1979年的年平均输沙率最大,2000—2009年的年平均流量、年平均输沙率最小。从整体上看,1960—2019年的年降水量、年平均流量、年平均输沙率均呈逐渐减小趋势。降水量汛期、非汛期、最大月、最大日的

表1 相关要素不同特征值统计情况

年份	降水量/mm					平均流量/(m^3/s)					平均输沙率/(kg/s)				
	汛期	非汛期	全年	最大月值	最大日值	汛期	非汛期	全年	最大月值	最大日值	汛期	非汛期	全年	最大月值	最大日值
1960—1969年	81.9	16.4	594.2	165.7	46.6	82.6	30.1	56.5	153.0	962	1536	41.1	793	4832	49038
1970—1979年	58.5	10.6	414.2	139.7	39.0	62.6	15.9	39.6	143.0	1340	1967	1.36	1000	10700	134000
1980—1989年	81.0	15.5	581.5	137.9	42.6	78.3	23.7	51.2	143.0	1136	1610	25.0	824	5017	79173
1990—1999年	75.8	15.0	546.0	142.1	41.1	49.7	18.2	34.0	102.0	722	618	15.8	319	2097	66440
2000—2009年	73.9	14.9	533.5	128.4	41.2	34.5	13.9	24.2	74.7	372	268	21.7	145	808	10837
2010—2019年	74.1	15.2	535.9	123.0	47.6	47.9	17.6	32.9	96.3	623	302	9.95	184	1288	25006

均值最大值均出现在 1960—1969 年;平均流量汛期、非汛期、最大月的均值最大值均出现在 1960—1969 年,最大日的均值最大值出现在 1970—1979 年,其次为 1980—1989 年,均大于 1000m³/s,可知极端洪水出现在这两个时段;平均输沙率汛期、最大月、最大日的均值最大值均出现在 1970—1979 年,非汛期的均值最大值出现在 1960—1969 年。

3.2　一致性时段划分

受下垫面和全球气候变化的影响,输沙同其影响因素降水、径流系列发生突变,以突变点确定非一致性时间节点,划分一致性时段,是响应变化分析的基础[9]。因全年和最大月值具有一定的代表性,因此,对突变年份的确定,采用年降水量-年平均输沙率、最大月降水量-最大月平均输沙率、年平均流量-年平均输沙率、最大月平均流量-最大月平均输沙率双累积曲线进行分析[10],汛期、最大日值不再作具体分析,降水、径流与输沙要素值双累积曲线见图 3。由图 3 可知,突变年份出现在 1993 年,1960—1992 年、1993—2019 年为两个一致性时段,1960—1992 年累积曲线的斜率远大于 1993—2019 年,说明西汉水在 1993 年以前输沙量较大,平均输沙率也较大。

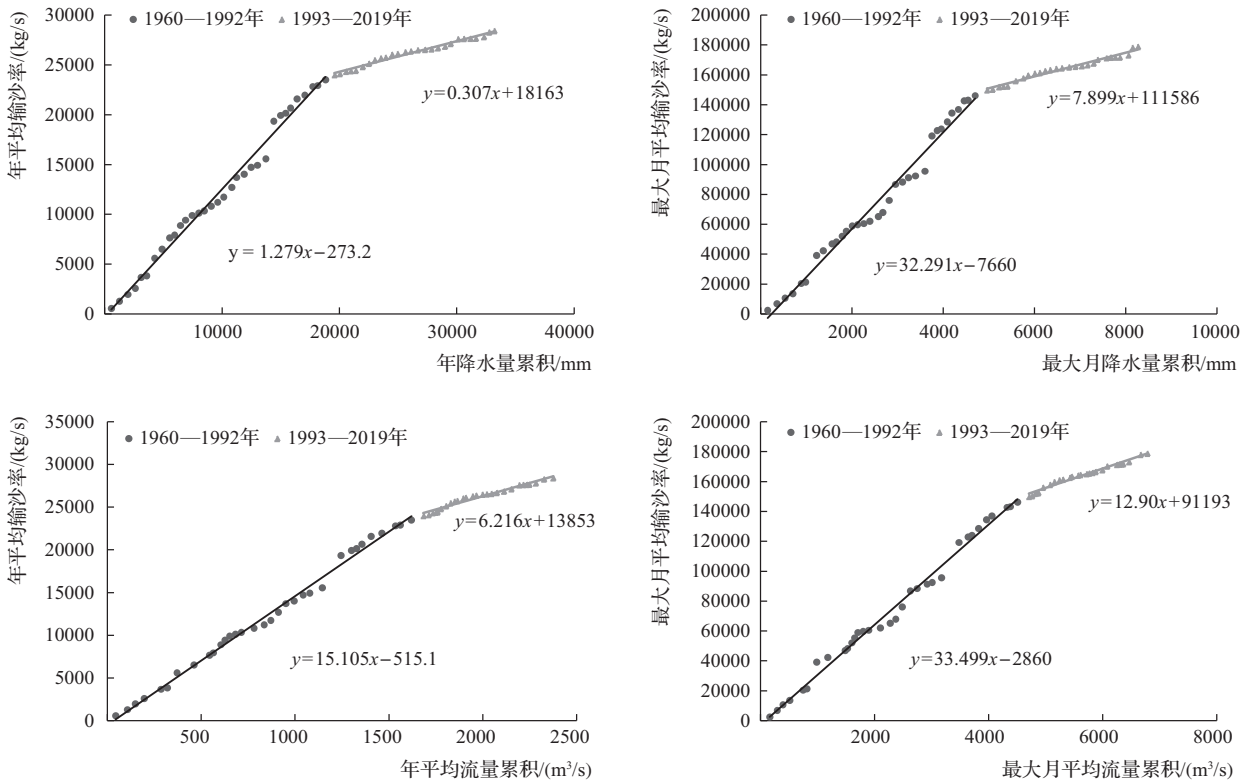


图 3　降水、径流与输沙要素值双累积曲线

3.3　相关性分析

水文分析中,在天然状况条件较好的情况下,降水量-输沙率、平均流量-输沙率关系视为线性关系。本文采用 Pearson 相关系数[11]、Correl 相关系数对其进行相关性分析,相关要素不同特征值统计情况见表 2。由表 2 可知,两种方法计算成果完全相同,降水量与输沙率的相关系数值较低,在 0.28 ~ 0.41 之间,其中最大日降水量与最大日输沙率相关系数最低,为 0.28,

表 2　相关要素不同特征值统计情况

时　段	Pearson 相关系数		Correl 相关系数	
	降水量	平均流量	降水量	平均流量
汛　期	0.41	0.73	0.41	0.73
非汛期	0.41	0.40	0.41	0.40
全　年	0.38	0.70	0.38	0.70
最大月值	0.35	0.60	0.35	0.60
最大日值	0.28	0.67	0.28	0.67

说明降水量与输沙率直接相关关系较低;平均流量与输沙率的相关系数值较高,在0.40~0.73之间,其中非汛期相关系数最低,为0.40,说明平均流量与输沙率直接相关关系较高。

3.4 输沙响应研究

如果在下垫面和气候条件一致的情况下,可视为水沙关系是相对稳定的,以这个思路建立输沙对降水、径流响应的数学模型[12]:

$$W = f(P,Q) \tag{1}$$

式中:W为输沙率,kg/s;P为降水量,mm;Q为流量,m^3/s。

根据复相关3个变量以上存在线性和非线性相关两种形式,探究输沙对降水、径流两个因素共同变动的响应关系,同样假设两种数学模型,其中非线性变量最高取2次方,设计方程为

$$W = aP + bQ + m \tag{2}$$

$$W = a_1P + b_1Q + cP^2 + dQ^2 + ePQ + m \tag{3}$$

式中:a、b、a_1、b_1、c、d、e、m为常数参数。

假定不同的参数,将输沙、降水、径流按照年、汛期、最大月、最大日分别代入上述式中,求出最优参数。为了简化分析,选取时间长度具有代表性的年、最大月资料进行分析(一般汛期同年值基本相差不大,日值由于受前期水情影响较大,故不采用)。根据突变年份将系列分成1960—1992年、1993—2019年两个系列,分别建立方程式。

a. 按照年值进行分析,利用线性相关性回归函数分析得出公式:

1960—1992年:

$$W = -0.1092P + 11.930Q + 77.94 \tag{4}$$

1993—2019年:

$$W = -0.2983P + 9.212Q + 50.46 \tag{5}$$

利用非线性相关性二次方回归函数求得公式:

1960—1992年:

$$W = 0.6428P - 2.607Q + 0.0011P^2 + 0.0186Q^2 + 0.1953PQ - 62.51 \tag{6}$$

1993—2019年:

$$W = 2.893P - 6.645Q - 0.0036P^2 + 0.0024Q^2 + 0.0724PQ - 582.80 \tag{7}$$

根据线性和非线性数学模型,对1960—2019年的年数据进行分析计算,将每年计算的年输沙率成果同原始数据进行对比分析,见图4。由图4可以看出,变化趋势基本一致,在特大值处模型值同实测值相差较大,相比线性相关数学模型,非线性相关数学模型同实测值变化峰型吻合度更高。

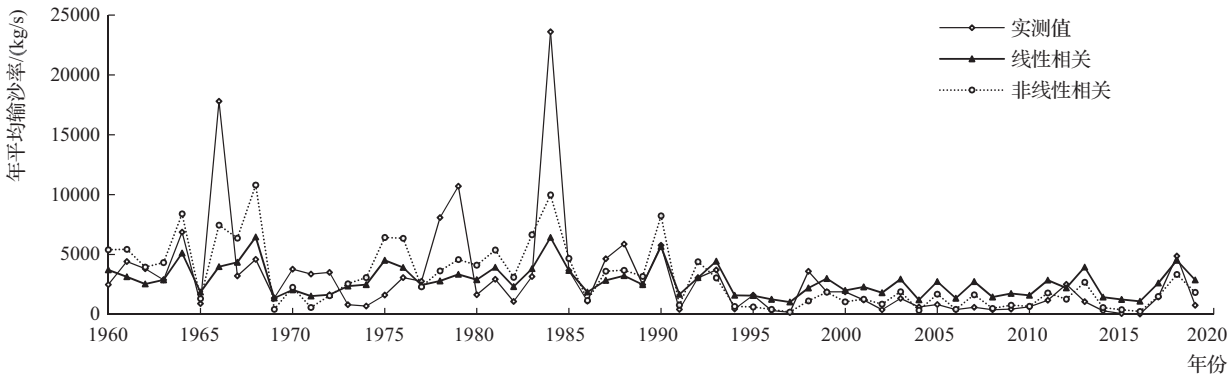


图4 年值数学模型分析值同实测值多年变化情况

为了进一步判断年平均输沙率对降水、径流响应关系模型拟合度,采用SSE(方差)、RMSE(标准差)、R-square(确定系数)3个参数进行分析,统计成果见表3。由表3可以看出,SSE、RMSE统计值远大于0,说明模拟成果较差;从R-square可以看出,1960—1992年数值更接近于1,说明该段的模型表征拟合度较好,1993—2019年数值与1偏离较大,说明该段的模型表征拟合度较差,但从整体上能够说明影响泥沙的因素较多,降水、径流是影响泥沙的部分因素,特别是在1993年以后,降水、径流影响程度减弱。

表 3　年值数学模型分析值同实测值拟合度判别参数统计情况

模型方式	1960—1992 年			1993—2019 年		
	SSE	RMSE	R-square	SSE	RMSE	R-square
非线性回归	3353000	352.4	0.7544	393300	136.9	0.3141
线性回归	1787000	244.1	0.8691	405000	129.9	0.2937

b. 按照最大月值进行分析，利用线性相关性回归函数分析得出公式：

1960—1992 年：

$$W = 0.4641P + 19.22Q + 530.5 \quad (8)$$

1993—2019 年：

$$W = 4.968P + 11.56Q - 674.5 \quad (9)$$

利用非线性相关性二次方回归函数求得公式：

1960—1992 年：

$$W = -23.73P + 35.89Q + 0.3461P^2 - 0.4866Q^2 + 0.1441PQ + 690.3 \quad (10)$$

1993—2019 年：

$$W = -97.45P + 67.18Q + 0.5543P^2 - 0.5197Q^2 + 0.0378PQ + 3798.0 \quad (11)$$

根据线性和非线性数学模型，对 1960—2019 年的最大月数据进行分析计算，将每年计算的最大月输沙率成果同原始数据进行对比分析，见图 5。由图 5 可以看出，变化趋势基本一致，在特大值处模型值同实测值相差较大，相比线性相关数学模型，非线性相关数学模型同实测值变化峰型吻合度更高。

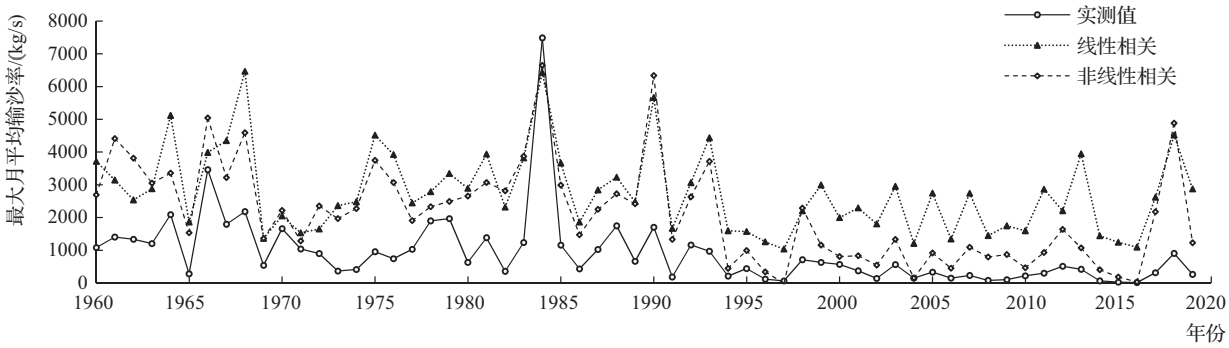


图 5　最大月值数学模型分析值同实测值多年变化情况

最大月平均输沙率与最大月降水量、最大月平均流量响应关系模型分析值，同实测值判别拟合度 3 个参数成果统计情况见表 4。由表 4 可以看出，SSE、RMSE 值远大于 0，同年值情况基本相同；从 R-square 可以看出，最大月值 1960—2019 年均较接近于 1，说明该段的模型表征拟合度较好，较年值拟合度更好。

表 4　最大月值数学模型分析值同实测值拟合度判别参数统计情况

模型方式	1960—1992 年			1993—2019 年		
	SSE	RMSE	R-square	SSE	RMSE	R-square
非线性回归	207800000	2774.0	0.7181	644700000	554.1	0.8315
线性回归	110200000	1916.0	0.8505	479200000	446.8	0.8748

4　结　语

本文选取长江上游输沙量较大河流（西汉水流域）进行非一致性条件下输沙对降水与径流的响应变化分析研究，通过对降水量、输沙率、流量的年值，汛期、非汛期、最大月值、最大日值的多年变化情况进行分析，表明该流域水沙整体呈减少趋势，降水减少趋势不显著，径流、输沙减少趋势显著；突变年份为 1993 年；流量同输沙率相关程度高于降水量同输沙率相关程度；相比线性相关数学模型，非线性相关数学模型与实测值变化峰型吻合度更高，因此今后宜用非线性数学模型对输沙响应变化进行研究。

受下垫面和全球气候变化的影响，区域内水沙关系发生了改变。对水沙关系的研究方法较多[13-14]，水文监测数据分析是一种比较传统的方法，输沙情况受到的影响因素较多，仅通过对降水、径流的响应变化进行分析研究，还存在一定的局限性，后续可加入植被覆盖、水利工程等相关资料进行更加　（下转第 47 页）

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.09

太子河流域本溪段降水径流特征分析

张 炎

(辽宁省大伙房水库管理局有限责任公司,辽宁 抚顺 113000)

【摘 要】 掌握区域降水和径流的演变特征对区域水资源的规划和管理有着十分重要的作用。本文基于实测降水径流资料,采用 Mann-Kendal 分析、小波分析等方法对太子河流域本溪段降水和径流的趋势和周期特征进行了分析。结果表明,太子河流域本溪段降水、径流的年际分配不均匀,但演变趋势具有一致性,径流变化受降水的影响显著,二者均呈现振荡下降趋势,径流下降趋势显著;降水和径流序列的突变时间基本吻合,有3个明显的突变点,分别为1977年(1978年)、2011年、2016年;降水和径流主要存在3个时间尺度上的变化周期。该研究可为太子河流域本溪段水资源的规划、合理开发利用及防洪减灾提供依据。

【关键词】 降水;径流;Mann-Kendal 分析法;小波分析

中图分类号:TV121+.1 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-036-06

Analysis of precipitation and runoff characteristics in Benxi Section of Taizi River basin

ZHANG Yan

(*Liaoning Dahuofang Reservoir Management Bureau Co., Ltd., Fushun* 113000, *China*)

Abstract: Mastering the evolution characteristics of regional precipitation and runoff plays a very important role in the planning and management of regional water resources. Based on the measured data of precipitation and runoff, Mann-Kendal analysis method and wavelet analysis method were used to analyze the trend and periodic characteristics of precipitation and runoff in Benxi section of Taizi River basin. The results show that the interannual distribution of precipitation and runoff in Benxi section of Taizihe River basin is uneven, but the evolution trends are consistent, and the runoff changes are significantly affected by precipitation, both of which show an oscillating downward trend, and the runoff decreases significantly. It is basically consistent with the abrupt change time of precipitation and runoff series, with three obvious abrupt changes, namely, 1977 (1978), 2011 and 2016; and rainfall and runoff mainly have periodic changes in three time scales. This study can provide a basis for the planning, rational development and utilization of water resources and flood control and disaster reduction in Benxi section of Taizi River basin.

Key words: rainfall; runoff; Mann-Kendal method; wavelet analysis

揭示降水和径流的周期特征是水资源合理开发利用的基础。近年来,很多学者对降水、径流变化趋势及其影响因素进行了深入地分析和研究,如潘娅英等[1]采用 Mann-Kendal 检验法、小波分析法对新安江流域

收稿日期:2022-03-15

作者简介:张炎(1989—),男,工程师,学士,主要从事工程管理、人事管理等工作。

降水、径流数据进行了统计和分析，得出结论：降水、径流的年际变化均呈明显增多趋势，二者的突变异常时间基本吻合，降水是影响该流域径流最主要的因子；徐俏等[2]、刘星根[3]、刘易文等[4]对白洋淀上游、赣江流域、汉江流域径流及降水的年际变化趋势、突变点、周期变化特征等演变规律进行了分析，同时加入了 R/S 分析法研究了其持续性，并探讨了径流对降水、气温的响应关系；张钰荃等[5]、张坤等[6]利用滑动平均、Mann-Kendal 检验、小波分析、R/S 分析等方法探讨了西江上游流域、桑园河流域降水和径流变化特征，在此基础上，采用 Spearman 相关分析法分析了降水因子与下垫面各结构因子对径流系数变化的影响，结果表明降水因子的影响更为显著。从已有的研究来看，径流量的变化与降水的关系十分密切。

本文利用太子河流域本溪段 1966—2019 年的年降水、径流资料，采用 Mann-Kendall 检验法、小波分析法等对降水和径流的趋势和周期特征进行分析，为该流域合理利用水资源提供一定的参考。

1　研究区概况

太子河位于辽宁省东部，是辽宁省重要河流之一。太子河是辽河的左岸支流，主要流经本溪、辽阳、鞍山等城市，于营口市注入渤海[7]。本溪水文站位于太子河干流，是太子河流域主要控制站之一，上游建有观音阁水库。本文以太子河流域本溪段为研究区，研究区内河长 168km，流域面积 4364km^2，属于温带半湿润季风气候，降水较为丰富，主要集中在 6—8 月[8]。

本文以本溪水文站为控制断面，选取 1966—2019 年的实测径流数据及流域内具有代表性的平顶山、苇子峪、羊胡子沟、南孤山、南甸、清河城、久才峪、偏岭、本溪 9 个雨量站的实测降水数据对流域降水和径流的趋势和周期特征进行分析。降水、径流数据来源于《水文年鉴》，流域面雨量采用算术平均得到，太子河本溪段水系及测站分布情况见图 1。

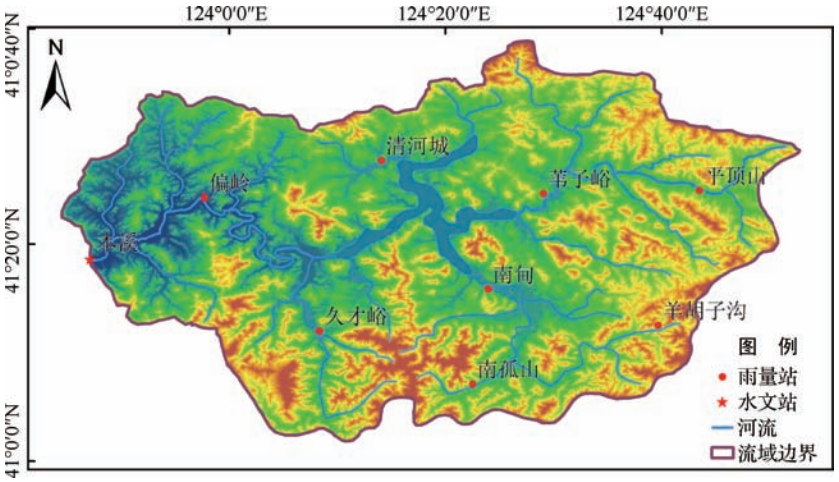


图 1　太子河本溪段水系及测站分布情况

2　研究方法

2.1　Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是非参数统计检验方法[9]，能很好地揭示时间序列的趋势变化。目前，Mann-Kendall 趋势及突变检验法已被广泛应用于气候与径流的时间序列变化检验中[10-11]。

2.1.1　Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法其原理为：对于一时间序列 $x_1, x_2, \cdots, x_n$（n 为时间序列的长度），定义统计量 S：

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^{n} \mathrm{sgn}(x_k - x_j) \tag{1}$$

$$\mathrm{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：sgn( )为符号函数；x_k、x_j 分别为 k、j 年的相应测量值，且 $k>j$。则

$$U=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & S<0\end{cases} \tag{3}$$

式中：U 为一个正态分布的统计量；$\mathrm{Var}(S)$ 为方差，计算 $\mathrm{Var}(S)=\dfrac{n(n-1)(2n+5)}{18}$。当 $U>0$ 时，表明有上升趋势；当 $U<0$ 时，表明有下降趋势；当 $U>U_{0.05/2}=1.96$ 时，表明序列趋势变化显著。

2.1.2 Mann-Kendall 突变检验法

Mann-Kendall 突变检验法具有不需要观测值服从一定的分布，也不受个别异常值干扰的优点，且计算简便[12-13]。对于具有 n 个样本量的时间序列 x，构造一秩序列：

$$S_k=\sum_{i=1}^{k}r_i \quad (k=2,3,\cdots,n) \tag{4}$$

其中

$$r_i=\begin{cases}+1 & x_i>x_j\\ 0 & \text{否则}\end{cases} \quad (j=1,2,\cdots,i) \tag{5}$$

可见，秩序列 S_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数，定义统计量：

$$UF_k=\frac{S_k-E(S_k)}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}} \quad (k=1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

其中，$UF_1=0$，$E(S_k)$、$\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}$ 为 S_k 的均值和方差，其计算公式为

$$E(S_k)=\frac{n(n-1)}{4} \tag{7}$$

$$\mathrm{Var}(S_k)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{8}$$

统计量序列 UF_i 为标准正态分布，给定显著性水平 α，若 $|UF_i|>U_\alpha$，则表明序列存在显著的趋势变化。将序列 x 的逆序列 $x_n,x_{n-1},\cdots,x_1$ 重复上述过程，同时使 $UB_k=-UF_k(k=n,n-1,\cdots,1)$，$UB_k=0$。绘制 UF_k 和 UB_k 曲线图分析变化趋势，若 $UF_k>0$，说明序列呈上升趋势；若 $UF_k<0$，说明序列呈下降趋势；超过显著性水平 $\alpha=0.05$ 时，说明上升或下降的趋势显著，其中在临界区域内的 UF_k 和 UB_k 线交点对应的时刻即为突变开始的时间。

2.2 小波分析

小波分析法[14-16]能够揭示隐藏在时间序列中的多种变化周期，已被广泛应用于大气、水文等领域，且取得了显著成果。采用 Morlet 小波可以得到小波系数实部的时频结构图和小波方差，由此可确定序列的主要周期。其计算原理如下：

a. 给定小波函数 $\varphi(t)$：

$$\varphi(t)=(1-t^2)\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{\frac{-t^2}{2}} \quad (-\infty\leqslant t\leqslant\infty) \tag{9}$$

b. 对给定的函数 $\varphi(t)$ 作连续小波变换：

$$\overline{\omega}_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_R f(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{10}$$

c. 对变换后的函数进行离散：

$$\overline{\omega}_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\Delta t\sum_{i=1}^{n}f(i\Delta t)\varphi\left(\frac{i\Delta t-b}{a}\right) \tag{11}$$

式中：$\overline{\omega}_f$ 为小波变换系数；a、b 分别为尺度因子和时间因子；Δt 为时间间隔。

3 结果与分析

3.1 降水和径流的趋势性分析

太子河流域本溪段 1966—2019 年降水、径流年际变化曲线见图2。由图2可以看出，太子河流域本溪段降水、径流演变趋势是一致的，均呈现波动下降趋势，其中径流下降趋势大于降水。此外，降水和径流年际分配不均匀，流域多年平均降水量为 813mm，极值比为

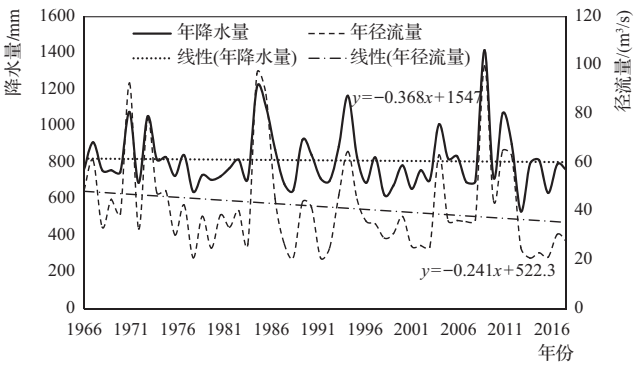


图2 太子河流域本溪段降水、径流年际变化曲线

2.7,多年平均径流量为 41.9m³/s,丰枯比为 4.8。研究期内降水、径流极大值均出现在 2010 年,流域平均降水量达 1417mm,径流量为 99.8m³/s,二者具有较好的相关性。

为了更好地探究径流的年际演变趋势,对径流量数据进行距平处理,并在此基础上进行 5 年滑动平均,以此消除高频分量,突显年际变化规律,太子河流域本溪段年降水和径流距平曲线见图 3。由图 3 可以看出,在研究期内流域径流的丰枯变化主要以枯水年为主,年径流量小于均值的年份有 34 年,占 63%。1975 年以前,年径流量偏大,属于丰水段;1976—1984 年进入一个连续的干旱期;1985—1987 年,进入一个较短的丰水期,但径流量明显增多;1988—2009 年,径流量虽有波动起伏,但总体偏小;2009—2013 年,径流量明显增大,进入丰水期;2014 年以后,又进入一个干旱期。流域径流年际变化大,丰枯循环交替,从整体趋势来看,呈下降趋势。

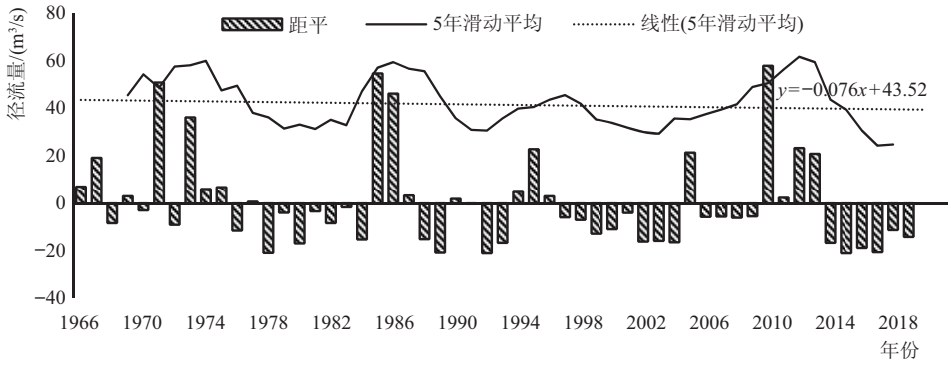


图 3　太子河流域本溪段年降水和径流距平曲线

此外,为了进一步分析降水和径流变化的趋势性,采用 Mann-Kendall 趋势检验法对降水和径流系列进行趋势性分析。经计算,$U_{降水} = -0.798$,$U_{径流} = -2.132$,说明降水、径流系列呈现减少趋势,且 $|U_{径流}| > U_{0.05/2}$,说明径流序列下降趋势变化显著,与前面的结论相印证。

3.2　降水和径流的突变性分析

采用 Mann-Kendal 突变检验法分别对太子河流域本溪段年降水量、年径流量序列进行突变检验,降水和径流的 M-K 统计量时程变化见图 4、图 5。从整体上看,降水和径流呈下降趋势。由图 4 可以看出,降水在研究期内,上升和下降趋势均未超过显著水平,1975 年之前振荡上升,上升趋势不显著;在 1977 年 UF_k 与 UB_k 相交发生突变,之后降水量开始下降;1985—1987 年降水量呈现短暂的上升趋势;1988—2011 年呈振荡下降趋势,期间 1995—1996 年的 $UF_k > 0$,降水呈增多趋势;2011 年 UF_k 与 UB_k 相交发生突变,降水量开始增多;2016 年再次发生突变,降水量下降。

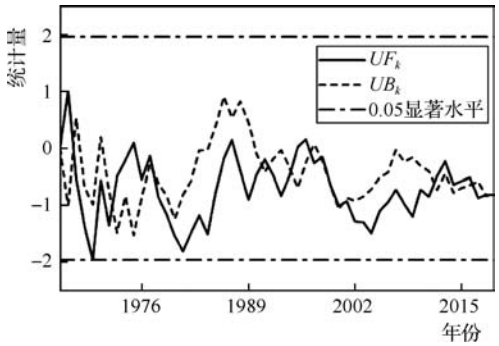


图 4　降水 M-K 统计量的时程变化

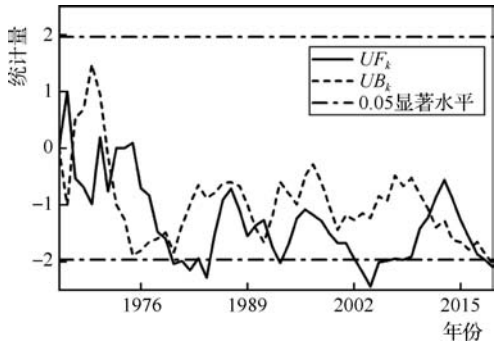


图 5　径流 M-K 统计量的时程变化

由图 5 可以看出,1975 年之前,UF_k 基本大于 0,且

与 UB_k 交替上下，未超过临界值，说明径流处于丰水期，有缓慢上升趋势，但变化不显著；1975 年之后，UF_k 均小于 0，说明径流整体趋势是处于一个长期的枯水期。1978 年 UF_k 与 UB_k 相交发生突变，径流开始由丰转枯；1978—2019 年间有 11 年超过临界值，分别为 1980—1982 年、1984 年、1993 年、2003—2006 年、2018—2019 年，下降趋势显著；1985—1987 年，UF_k 呈上升趋势，说明由枯转丰，随后开始振荡下降，期间虽然在 1994—1996 年有不明显的上升趋势，但整体上呈下降趋势；2009—2013 年 UF_k 呈上升趋势，且在 2011 年 UF_k 与 UB_k 出现交点，由枯转丰；2013 年以后，UF_k 呈下降趋势，在 2016 年 UF_k 与 UB_k 出现交点，由丰转枯，且在 2018—2019 年呈显著下降趋势。

3.3 降水和径流的周期性分析

采用 Morlet 小波对太子河流域本溪段的年降水量、径流量进行周期分析，降水和径流小波实部时频图见图 6、图 7，图 6、图 7 显示了不同年份下多尺度的小波信号强弱，反映了周期与振幅大小。降水、径流偏多，小波系数为正值；降水、径流偏少，小波系数为负值。小波方差体现了不同时间尺度上小波能量的强弱，小波系数方差的极大值对应着降水、径流的周期。

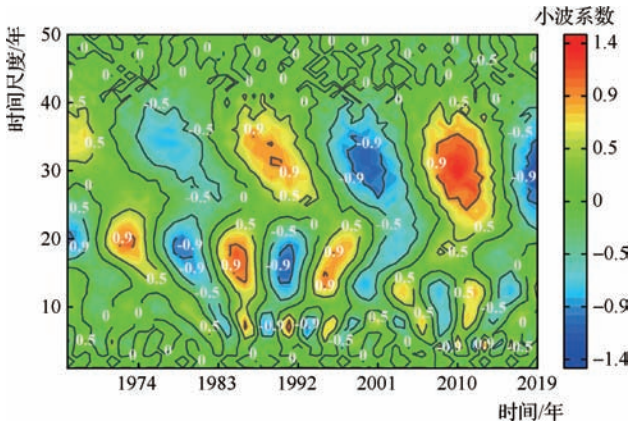


图 6 太子河流域本溪段降水小波实部时频图

由图 6 可知，太子河流域本溪段年降水量的年际变化主要存在 7～8 年、17～19 年、31～34 年 3 个尺度上的变化周期。7～8 年的周期变化主要发生在 1986—1998 年，先后共经历了 3 个丰枯循环交替过程。17～19 年的周期变化主要发生在 1970—2005 年，先后共经历了 3 个丰枯循环交替过程。31～34 年的周期变化主要发生在 1974 年至今，先后共经历了 2 个丰枯循环交替过程，目前正处于枯水年周期。

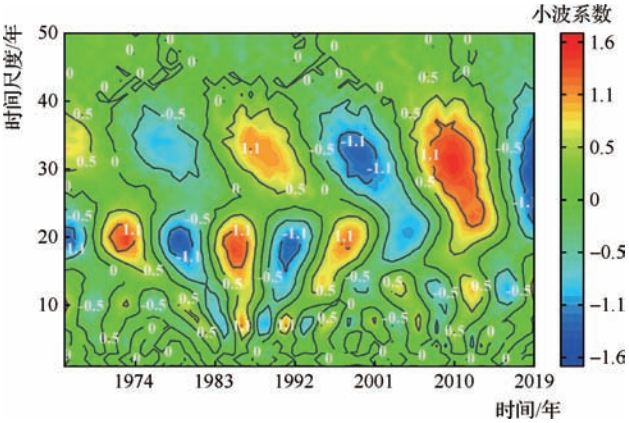


图 7 太子河流域本溪段径流小波实部时频图

由图 7 可知，太子河流域本溪段年径流量的年际变化主要存在 7～8 年、18～20 年、31～34 年 3 个尺度上的变化周期。7～8 年的周期变化主要发生在 1983—1995 年，先后共经历了 2.5 个丰枯循环交替过程。18～20 年的周期变化主要发生在 1966—2000 年，先后共经历了 3 个丰枯循环交替过程。31～34 年的周期变化主要发生在 1973 年至今，先后共经历了 2 个丰枯循环交替过程，目前正处于枯水年周期。

小波方差分析反映了降水、径流波动能量随着时间尺度的变化情况，以及小波变换系数在不同周期内方差贡献的相对极大值，据此可以准确判断出流域降水和径流变化过程中存在的主周期。太子河流域本溪段降水、径流小波系数方差图见图 8。由图 8 可以看出，降水、径流小波系数方差图形态基本一致，具有相似的周期振荡规律；流域年降水的第一主周期为 32

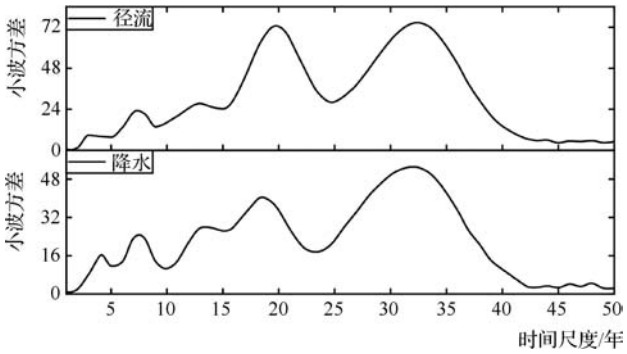


图 8 太子河流域本溪段径流、降水小波系数方差图

年,第二、三主周期依次为 19 年和 7 年;流域年径流的第一主周期为 32 年,第二、三主周期依次为 20 年和 7 年,说明径流的振荡周期很大程度上是由降水的振荡周期引起的。

4　结　语

本文采用 Mann-Kendal 分析、小波分析等方法对太子河流域本溪段降水和径流的趋势性及周期性进行分析,结果表明,太子河流域本溪段降水、径流的年际分配不均匀,但演变趋势具有一致性,径流变化受降水的影响显著,二者均呈现振荡下降趋势,径流下降趋势显著;降水和径流序列的突变时间基本吻合,有 3 个明显的突变点,分别为 1977 年(1978 年)、2011 年、2016 年。研究揭示了该流域降水和径流变化特征、变化趋势及变化周期等,为合理开发利用太子河流域水资源提供了基本的水文依据。因流域径流与降水变化有着较为同步的特征,径流变化受降水的影响显著,建议在日常工作中加强对降水的预测预报,结合中长期水文预报,做好流域水资源调配,对防洪减灾、合理开发利用水资源及区域可持续发展具有重要意义。

参考文献

[1] 潘娅英,骆月珍,王亚男,等. 新安江流域降水、径流演变特征分析[J]. 水土保持研究,2018,25(6):121-125.

[2] 徐俏,程伍群,孙童,等. 气候因素对白洋淀上游主要河流径流的影响[J]. 河北农业大学学报,2019,42(2):110-115,121.

[3] 刘星根. 赣江流域年降水和径流量的周期特征分析[J]. 人民珠江,2019,40(6):54-60.

[4] 刘易文,李家科,丁强,等. 汉江流域安康段降水径流特征分析及预测[J]. 人民珠江,2021,42(6):59-69.

[5] 张钰荃,高成,陈旭东,等. 西江上游流域年径流系数变化规律及其影响因素分析[J]. 水电能源科学,2021,39(5):37-41.

[6] 张坤,李婕,熊江兰,等. 桑园河流域降水时空分布与径流趋势变化研究[J]. 人民长江,2017(S2):76-80.

[7] 敬正书,顾浩,郑连第,等. 中国河湖大典:黑龙江、辽河卷[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

[8] 刘鸣彦,孙凤华,侯依玲,等. 基于 HBV 模型的太子河流域径流变化情景预估[J]. 地球科学进展,2019,34(6):650-659.

[9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.

[10] 慕丹丹,褚金镝,高博. 基于小波变换的黄河宁夏段水沙变化趋势研究[J]. 人民黄河,2021,43(11):65-68,75.

[11] 马骏,朱国平,李焰. 基于 Mann-Kendall 法的房山区降水量时空分布变化趋势分析[J]. 水资源开发与管理,2021,60(1):47-51,56.

[12] 胡琦,马雪晴,胡莉婷,等. Matlab 在气象专业教学中的应用——气象要素的 M-K 检验突变分析[J]. 实验室研究与探索,2019,38(12):48-51,107.

[13] 王现领. 天津市降水量及蒸发量变化趋势研究[J]. 水资源开发与管理,2018,30(7):8-11.

[14] 刘贵忠,邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995.

[15] 谢智博,穆兴民,高鹏,等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征研究[J]. 水土保持研究,2022,29(2):139-144.

[16] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究,2012,31(5):811-820.

(上接第 16 页)

[2] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2011.

[3] 杨薇. 昆明市水资源安全保障体系建设问题研究[D]. 昆明:云南大学,2013.

[4] 吴凡. 基于水贫困指数的安徽省水资源安全评价[J]. 水资源开发与管理,2021,68(9):60-63.

[5] 褚桂红. 基于层次分析法的山西省水安全综合评价[J]. 水资源开发与管理,2020,57(10):76-80.

[6] 刘钢,周翔南,彭少明,等. 基于水贫乏指数的区域水安全评价研究[J]. 人民黄河,2017,39(5):51-54,59.

[7] 曹琦,陈兴鹏,师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学,2012,34(8):1591-1599.

[8] 史正涛,刘新有,黄英,等. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法[J]. 水利学报,2010,41(5):545-552.

[9] 邵东国,杨丰顺,刘玉龙,等. 城市水安全指数及其评价标准[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(1):122-126.

[10] 张蕾,韩雪冰,范兴华. 基于层次分析法的南京市水安全评价[J]. 水电能源科学,2012,30(12):30-33.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.10

泾河流域红河水文站泥沙测验方式优化研究

蒙雅雯　崔建和

(黄河水利委员会西峰水文水资源勘测局,甘肃 庆阳　745000)

【摘　要】 根据泾河流域红河水文站发生洪水时流量与含沙量涨落变化基本相对应的特性,选用洪水过程中流量、含沙量对应点的增减变幅比例建立相关关系,对红河水文站泥沙测验方式进行研究,以期达到利用少数含沙量测次推求其变化过程的目的。结果表明,径流量与输沙量两者的变化相对独立,用输沙量与径流量相关关系法分析不可行;流量与含沙量涨水段、落水段比例系数相关性均不够理想;流量、含沙量增长率具有一定的相关性,但尚未达到使用标准。本研究对促进水文测站测报能力提升、开展水文巡测具有一定的参考价值。

【关键词】 流量;泥沙;相关性;水文测验

中图分类号:TV149　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-042-06

Study on optimization of sediment measurement mode of Honghe hydrological station in Jinghe River basin

MENG Yawen, CUI Jianhe

(*Xifeng Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Yellow River Conservancy Commission*, *Qingyang* 745000, *China*)

Abstract: According to the characteristics of the fluctuation of discharge and sediment concentration at Honghe Hydrological Station in Jinghe River basin, the increase and decrease ratio of corresponding points of discharge and sediment concentration in the flood process is selected to establish the correlation, and the sediment measurement mode of Honghe Hydrological Station is studied, so as to achieve the purpose of using a few sediment concentration measurements to calculate the change process. The results show that the changes of runoff and sediment transport are relatively independent, so it is not feasible to analyze the relationship between sediment transport and runoff. The proportional coefficient of flow-sediment concentration in rising and falling water sections is not ideal. The growth rate of discharge and sediment concentration has a strong correlation, but it has not yet reached the use standard. This research has certain reference value for promoting the forecasting ability of hydrological stations and carrying out hydrological survey.

Key words: flow; sediment; relevance; hydrological test

收稿日期:2022-03-18

作者简介:蒙雅雯(1986—),女,工程师,学士,主要从事水文测验工作。

1 研究背景

基层水文站基本处于偏远地区,在站驻测存在诸多不便。随着经济社会的发展,常规的水文测验方式已经不能满足社会需要。为了更好地解放人力,提升测报能力,不断探索新的测验技术及方式,是时代发展的需要。泥沙是表征河道冲淤变化、水土保持情况的主要元素,在水文测验工作中占很大比例,泥沙测验方式的优化,可以在很大程度上达到解放人力、提高工作效率的目的。祁向荣[1]通过分析单断沙关系稳定性,对泥沙监测方式的改革进行了探讨,从而大大减少了测验工作中人力的投入;刘东生等[2]对长江流域水文站测验方案进行了创新设计,研究认为应积极倡导新仪器、新设备,实现水文站测验方式现代化,该方案通过几年的实践证明是可行的,为水文测验工作方法的创新提供了技术支撑;王俊[3]认为水位、流量已经实现了现代化测验,如何提高泥沙测验技术将是难点,并通过大量的探索与实践,不断对泥沙测验方式进行优化,取得了较好的效果;田瀛莉[4]通过分析茹河开边站的水文系列资料,依据《水文巡测规范》(SL 195—2015)[5]对水文测验改革提出了新的方式,但在泥沙测验方式、新设备使用方面的研究有所欠缺;王晶娥[6]对彰武水文站的测沙垂线进行了分析精简,从原来的 15 条垂线精简为 6 条,通过实践证明,精度能达到《河流悬移质泥沙测验规范》(GB/T 50179—2015)[7]要求;部分学者[8-13]对泾河流域及其支流的径流、降水量、蒸发量、水资源量进行了研究,但在泥沙测验方式优化方面的分析较少。因此,本文在红河水文站流量资料及前述学者研究的基础上,对泥沙测验次数进行精简,推算方法进行改进,并提出新的优化方案,推动该站在水文测验中由传统的常年驻测逐步向巡测方向转变。

2 测站概况

红河水文站位于甘肃省平凉市泾川县红河乡龙王桥村,集水面积 1272km^2,是国家三类精度水文站,设于泾河一级支流洪河下游,距河口(泾河)12km。区域内洪水主要来源于洪河干支流,主要由上游暴雨形成,且多发生在每年 7—8 月。水系形状狭长,类似羽形,属山溪性河流,河道纵比降大。

2.1 断面情况

测验河段为岩石河床,上覆较浅一层淤泥,冲淤变化较小。左岸为岩石陡坡,坡上是公路和黄土台地,右岸为土质斜坡。主流居中且稳定,中高水受河槽控制,总体来说,断面相对稳定。基本断面上游 110m 处左岸有一干沟,上游 345m 处右岸有种籽沟汇入,暴雨时两沟洪水凶猛,对该断面测验构成威胁。

2.2 水沙特性

红河水文站 6—9 月径流量占年径流量的 61.7%,受径流分布不均匀影响,91.9% 的泥沙分布在 6—9 月。流向基本顺直,洪水时流急浪大,涨落急剧且漂浮物较多,沙峰滞后于洪峰。水位流量关系曲线受附加比降影响,含沙量横向分布均匀,垂向变化很小,近似直线,单断沙关系为历年综合线,系数为 $k=1.00$。

3 泥沙测验方式优化研究

3.1 资料的选用

由于红河水文站 2008 年以前没有测流缆道,洪水期基本采用均匀浮标和中泓浮标测流,由于基本断面下游 700m 处修建的一小型涵洞水坝对水流有顶托作用,水位流量关系发生改变,以此为界限,红河水文站水位流量关系可以综合为两个系列的单一线。由于受涵洞水坝影响,非洪水畅流期断面呈逐年淤积状态,相同水位下断面面积逐渐减小,河底高程增大,并于 2009 年以后淤积减缓,趋于稳定。

近年来,通过植树造林,水土保持状况良好,因此选用 2009—2018 年的资料进行泥沙测验方式优化分析,对选定的流量系列资料进行一致性分析,保证集水区域内下垫面、人类活动对河道断面的影响、测站控制条件基本一致,并进行可靠性分析。所使用的资料均为经过水文资料整编刊印的资料,具有一定的代表性。

3.2 水文要素相关性分析

3.2.1 流量与含沙量相关性分析

3.2.1.1 流量的年内变化

点绘红河水文站2009—2018年流量的年内变化图,见图1。由图1可以看出,4—9月的流量明显大于其他月份流量。资料显示,红河水文站的洪水期一般为每年的4—9月,其他月份是枯水期,洪水期流量明显大于枯水期流量,全年径流主要产生于洪水期。

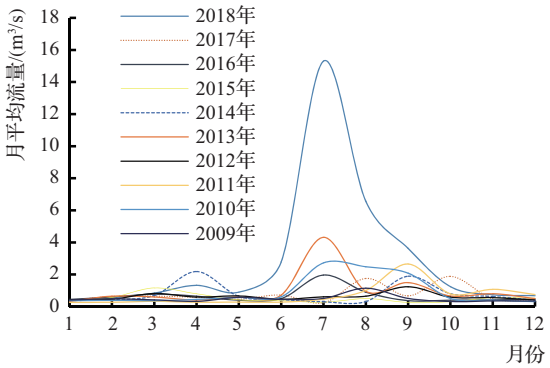


图1 红河水文站2009—2018年的流量年内变化

3.2.1.2 含沙量的年内变化

点绘红河水文站2009—2018年含沙量的年内变化见图2。由图2可以看出,含沙量与流量年内变化基本一致,泥沙主要产生于洪水期。其中4—6月平均含沙量小于10kg/m³,7—9月平均含沙量大于10kg/m³,夏季含沙量大于春季含沙量。

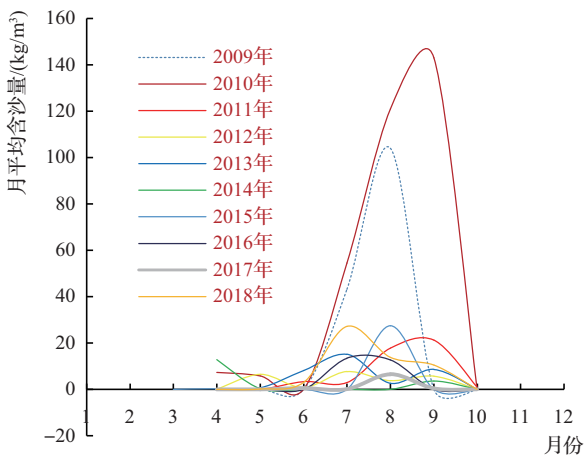


图2 红河站2009—2018年含沙量的年内变化

3.2.2 径流量、输沙量相关性分析

由于流量、含沙量年内变化基本一致,可从径流量、输沙量之间的关系切入,分析在一场洪水过程中径流量与输沙量之间的关系。根据洪峰划分标准[14],结合资料实际情况,对节选的洪水场次进行划分,小洪水:$Q<50m^3/s$;中洪水:$50m^3/s\leqslant Q<300m^3/s$;大洪水:$Q\geqslant 300m^3/s$。

因近年来一直属于枯水年,流量较小,因此,只有小洪水和中洪水。对选取的洪水场次进行径流量及输沙量的计算,并分别点绘小洪水、中洪水节选场次中洪水量与输沙量之间的关系见图3、图4。

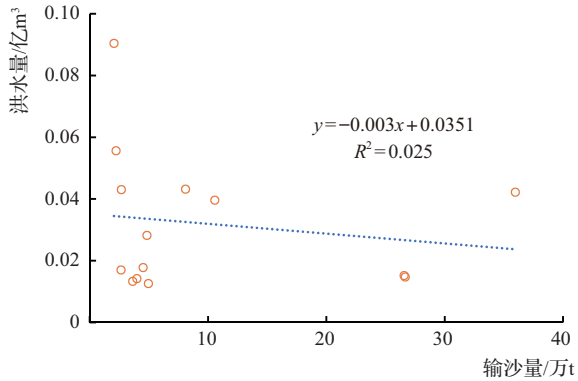


图3 红河站小洪水洪水量与输沙量关系

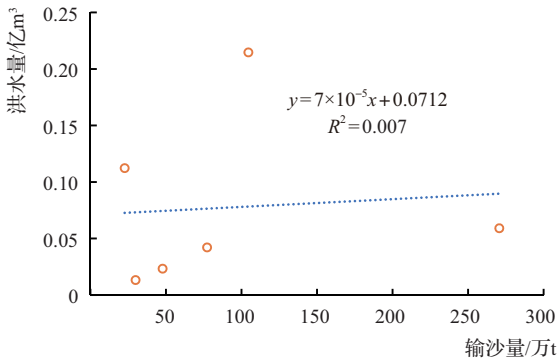


图4 红河站中洪水洪水量与输沙量关系

由图3、图4可以看出,小洪水、中洪水径流量与输沙量关系点据散乱,相关关系不好,无明显规律可循。从流量大小上看,$Q<50m^3/s$时,输沙量大部分小于10万t,由于流量较小,对流域的冲刷作用小,泥沙大部分来自河床;$50m^3/s\leqslant Q<300m^3/s$时,流量增大,水流挟沙能力增大,泥沙来自流域冲刷和河床,输沙量相对增大。河流中泥沙的多少还与产沙区域、土质情况、植被覆盖率、地势、人类活动等因素有关,由于各因素的综

合影响,径流量与输沙量两者的变化相对独立,有时径流量小输沙量反而大,有时径流量大输沙量反而小。综上所述,一场洪水过程中仅用径流量单一因素推求输沙量不可行。

3.2.3 沙峰与洪峰相关性分析

泾河属于黄河流域主要河流,是黄河的二级支流。在水沙特性方面与黄河具有高度的一致性。研究认为[15],黄河流域在洪水演进过程中洪峰与沙峰的相对关系一般可分为 3 种情况:ⓐ洪峰在前沙峰在后,在 2009—2018 年的 45 场洪水中,有 8 场是洪峰先于沙峰进入泾河河道,占总数的 17.8%,在这种情况下,洪水演进过程中沙峰的传播时间远大于洪峰的传播时间;ⓑ洪峰在后沙峰在前,在所统计的洪水中,沙峰先于洪峰汇入泾河河道的有 5 场,占 11.1%,在洪水演进过程中洪峰与沙峰的时差会逐步缩小;ⓒ沙峰与洪峰同步(水峰、沙峰相差 2h 以内),在所统计的洪水中共有 32 场洪水沙峰与洪峰同时到达,占 71.1%。2009—2018 年红河水文站水沙过程统计情况见表 1。

表 1 2009—2018 年红河水文站水沙过程统计情况

水沙过程	水沙同步	水沙峰不同步	
		沙峰滞后	沙峰提前
场 次	32	8	5
占比/%	71.1	17.8	11.1

注 沙峰滞后最少 2.0h,最大 13.0h;沙峰提前最少 3.2h,最大 18.0h。

由表 1 可以看出,洪峰与沙峰出现时间一致的场次占统计总场次的 71.1%,不同步的为 28.9%,二者不一致主要是由黄河上游地区产流产沙本身的规律所决定的,以及洪峰与沙峰的传播速度不同所致。从理论上讲,河道洪水的流动属于不稳定流,洪峰是以波的形式传播,而泥沙运动则与水流平均流速有关,泥沙沿程传播的规律受水沙特性和河道边界条件共同作用,其规律极为复杂,因此本文选取洪峰与沙峰同步的场次进行分析研究。

3.2.4 流量与含沙量比例系数相关关系分析

选取红河水文站 2009—2018 年洪水水文要素摘录表,通过资料分析,发现涨水时流量与含沙量涨落变化过程基本对应,水流挟沙能力与降水强度、雨量分布、产沙区域有关,每次洪水含沙量大小与流量的大小有所不同,但变化过程的增减率基本一致,因而理论上利用流量的比例系数与含沙量比例系数建立相关关系来推求计算洪水含沙量,能反映含沙量的变化过程。构造流量、含沙量比例系数统计量:

$$Y_Q = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \tag{1}$$

$$Y_{CS} = \frac{CS_t - CS_{\min}}{CS_{\max} - CS_{\min}} \tag{2}$$

式中:Y_Q 为涨水段流量比例系数;Q_i 为涨水段某瞬时流量;CS_t 为某瞬时实测断面平均含沙量;Y_{CS} 为涨水段含沙量比例系数。

将复式洪峰区分开,分别计算流量、含沙量的比例系数,峰前最小值相同,两峰峰谷点原则上按前峰落水计算。

洪水过程流量、含沙量比例系数相关关系见图 5、图 6,由图 5、图 6 可知,其相关性均不够理想。由于水流的运动方式与泥沙的运动方式不完全一样,所以每一场水沙涨落过程中流量与含沙量的增减幅度不完全

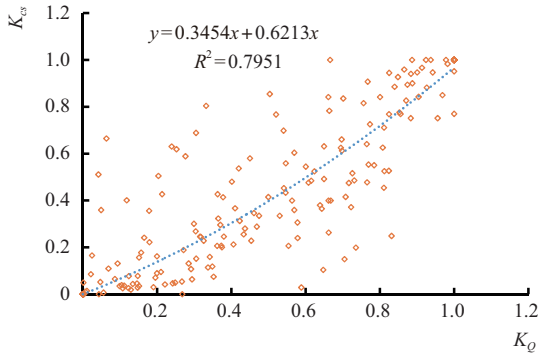


图 5 洪水过程涨水段流量、含沙量比例系数相关关系

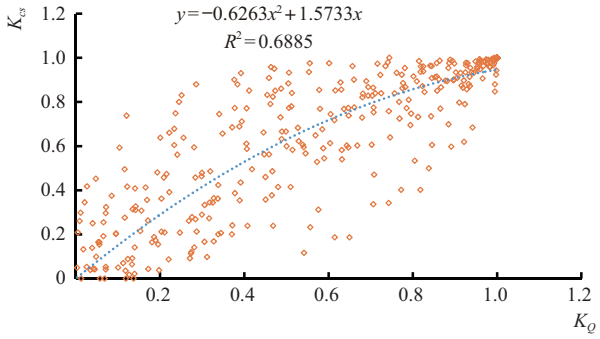


图 6 洪水过程落水段流量、含沙量比例系数相关关系

一致，故用流量、含沙量比例系数相关法推求一场洪水过程中的含沙量变化过程不可行。

红河水文站径流量与泥沙主要产生于4—9月，因此将4—9月中有明显水沙过程变化且同步的流量、含沙量过程摘出，计算各个水沙过程中同步的流量、含沙量由起涨到峰顶的平均增长率，建立流量、含沙量平均增长率关系，见图7。

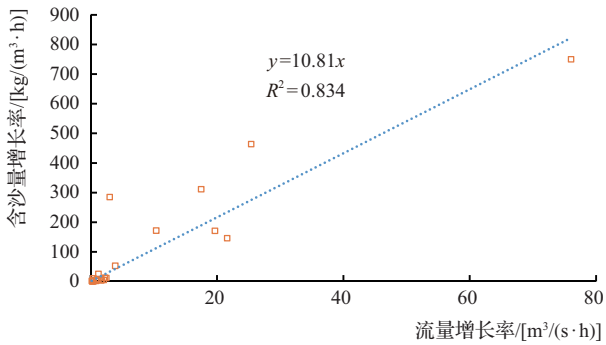


图7　红河站流量、含沙量增长率关系

由图7可知，红河水文站流量、含沙量增长率存在一定相关关系，其相关性 $R^2=0.834$，主要原因是河流中含沙量的增长与水流流速有一定关系，一般来说，流量增长越快，流速越大，含沙量增长越快。但其相关性仍未达到使用标准。

对红河水文站上游小岘子、平泉、红河3个雨量站的各个场次洪水相对应的降水量和本次洪水的径流量、输沙量分别建立相关关系，分析降水对红河水文站上游产流产沙的影响，回归分析结果见表2～表4。

表2　红河水文站多参数综合数据

输沙量/万t	径流量/万m³	降水量/mm			水峰/(m³/s)	沙峰/(kg/m³)
		小岘子	平泉	红河		
5.978	47.5575	22.6	68.4	12.4	15.70	371.0
26.567	151.7786	71.0	92.6	42.2	30.50	451.0
5.396	71.9455	40.0	49.8	36.0	8.51	202.0
35.970	421.8480	135.4	73.8	176.0	45.20	303.0
26.666	146.7427	13.4	12.4	56.4	31.10	370.0
47.761	233.1365	42.0	41.6	66.0	63.60	347.0
4.970	125.6148	59.2	84.8	90.8	11.80	70.4
77.235	421.3247	92.8	69.8	75.4	79.30	439.0
0.787	26.1270	43.1	43.2	51.2	3.94	76.0
3.991	141.5054	78.9	79.2	74.4	21.40	46.2
4.513	178.3206	80.6	79.6	69.0	12.60	39.2
1.050	37.3048	16.2	11.6	10.6	5.83	53.7
8.101	432.4464	138.0	122.8	74.8	25.70	36.3
2.674	430.0668	34.4	51.6	136.4	6.57	59.4
4.844	281.5884	43.4	62.4	21.8	18.80	56.8
0.597	29.4534	14.2	16.0	20.8	6.02	53.3
3.613	82.4670	20.4	17.6	79.2	17.70	74.1
0.534	15.8337	5.0	12.2	38.2	10.30	55.9
0.625	78.9610	65.4	107.2	117.0	5.59	40.5
3.635	132.6223	73.2	10.8	24.6	18.80	58.5

表3　降水量与径流量回归统计情况

多元回归	R^2	拟合系数	标准误差	观测值
0.733	0.538	0.451	108.360	20

表4　红河站上游雨量站回归参数统计

项　目	系　数	标准误差	统　计	P值	检验下限95%	检验上限95%	下限95%	上限95%
截　距	6.8389	51.86	0.132	0.897	-103.1	116.78	-103.1	116.79
小岘子雨量站	2.2144	1.008	2.196	0.043	0.0766	4.352	0.0766	4.3523
平泉雨量站	-0.468	1.043	-0.448	0.660	-2.679	1.744	-2.679	1.7436
红河雨量站	1.1434	0.688	1.663	0.116	-0.314	2.601	-0.314	2.6009

由表2～表4可以得出红河水文站降水量与径流量相关方程为

$$Y = 2.21x_1 - 0.47x_2 + 1.14x_3 \tag{3}$$

式中：Y为红河站径流量，万m³；x_1为小岘子降水量，mm；x_2为平泉降水量，mm；x_3为红河降水量，mm。

其相关系数 $R^2=0.538$，相关性较差，说明降水量与径流量没有较好的相关关系。同理，计算得出的降水量与输沙量相关系数 $R^2=0.160$，无相关关系。

4　结　语

本文基于泾河流域红河水文站发生洪水时流量与

含沙量涨落变化基本相对应的特性进行研究，选用洪水过程中流量、含沙量对应点的增减变幅比例建立相关关系，对红河水文站泥沙测验方式进行分析。结果表明，红河水文站小洪水、中洪水径流量与输沙量关系点据散乱，相关关系不好，用径流量单一因素推求输沙量不可行；流量与含沙量涨水段、落水段比例系数相关性均不够理想，故用流量、含沙量比例系数相关法推求一场洪水过程中的含沙量变化过程不可行；红河水文站流量、含沙量增长率存在一定的相关性，但尚未达到使用标准，其具有一定相关关系的原因是河流中含沙量的增长与水流流速有一定关系，一般来说流量增长越快，流速越大，含沙量增长越快，且流速与降水强度一般成正比，降水强度越大，流速越大。因此，建议在下一步研究中加入降水参数，从降水强度方面再作进一步的分析，研究是否可以建立更好的相关性。

参考文献

[1] 祁向荣. 潘家庄水文站泥沙测验方式探讨[J]. 地下水，2021，43(3)：195-196.

[2] 刘东生，陈守荣，李海源，等. 长江水文测验方式方法创新方案设计[J]. 水文，2011，31(S1)：4-7.

[3] 王俊. 长江水文测验方式方法技术创新的探索与实践[J]. 水文，2011，31(S1)：1-3.

[4] 田瀛莉. 茹河开边水文站巡测方案论证分析[J]. 农业科技与信息，2018(17)：36-39.

[5] 中华人民共和国水利部. 水文巡测规范：SL 195—2015[S]. 北京：中国水利水电出版社，2016.

[6] 王晶娥. 彰武水文站测沙垂线精简分析探讨[J]. 黑龙江水利科技，2021，49(3)：106-108.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流悬移质泥沙测验规范：GB/T 50179—2015[S]. 北京：中国计划出版社，2016.

[8] 陈沛源，李金文，俞巧，等. 基于 SWAT 模型的泾河流域地下水分布特征与水资源评价[J]. 灌溉排水学报，2021，40(12)：102-109，126.

[9] 刘宇，管子隆，田济扬，等. 近 70a 泾河流域径流变化及其驱动因素研究[J]. 干旱区地理，2022，45(1)：17-26.

[10] 于昊含，李超超，包淑萍，等. 基于多种水文学法的泾河生态基流估算[J]. 甘肃科技，2021，37(19)：34-40.

[11] 艾明乐，赵强，王奎峰，等. 1957—2017 年泾河流域降水量及降水侵蚀力时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报，2021，32(4)：93-100.

[12] 张淑兰，吴光，张海军，等. 1966—2005 年泾河流域径流系数的变化特征[J]. 水电能源科学，2021，39(5)：33-36.

[13] 张珈玮. 泾河流域水文过程模拟预测及生态环境需水研究[D]. 西安：长安大学，2021.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流流量测验规范：GB/T 50179—2015[S]. 北京：中国计划出版社，2016.

[15] 李雅娟. 黄河下游水沙未来变化趋势研究[D]. 西宁：青海大学，2021.

(上接第 35 页) 全面地分析研究。

参考文献

[1] 马梓策，于红博，曹聪明，等. 中国植被覆盖度时空特征及其影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境，2020，29(6)：1310-1321.

[2] 闫霞，周银军，姚仕明，等. 长江源区不同地表覆盖类型对河流径流输沙的影响[J]. 泥沙研究，2020，45(4)：45-51.

[3] 连秋晗，田鹏，赵广举，等. 佳芦河流域生态治理影响下的水沙关系变化[J]. 中国水土保持科学，2020，18(4)：53-61.

[4] 姚文艺，高亚军，张晓华. 黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J]. 中国水土保持科学，2020，18(4)：1-11.

[5] 王鸿翔，赵颖异，刘静航，等. 近 50 年黄河下游水沙情势演变及其影响因素分析[J]. 水力发电，2020，46(9)：48-54.

[6] 谢梦瑶. 变化环境下皇甫川流域水沙演变及其影响因素[D]. 西安：西安理工大学，2020.

[7] 赵阳，刘冰，张晓明，等. 极端降水条件下黄河典型流域水沙变化特性研究[J]. 泥沙研究，2020，45(6)：47-52.

[8] 王涛，王进，吴彦昭. 60 年来西汉水流域降水径流演变特征及影响分析[J]. 人民长江，2020，51(6)：89-94.

[9] 郑晓霞. 变化环境下水文资料序列一致性探析[J]. 水利规划与设计，2020(4)：20-22，152.

[10] 王毓森，张德栋，陈学林，等. 人类活动和气候变化对白龙江径流的影响研究[J]. 地下水，2018，40(4)：191-193.

[11] 黎清霞，李佩怡，何艳虎，等. 澜沧江流域中下游主要水文气象要素变化相关性分析[J]. 灌溉排水学报，2018，37(9)：100-107.

[12] 金泉，吴彦昭. 西汉水流域降水径流对水土流失的影响分析[J]. 陕西水利，2019(3)：32-34，37.

[13] 陈晖，张红，徐高洪，等. 基于遥感、DEM 技术的西汉水水土流失变化分析[J]. 人民长江，2006，37(12)：12-15.

[14] 张英豪，赖锡军，唐彩红. 单向明渠流与波浪作用下植被对水沙运动影响研究综述[J]. 水科学进展，2021，32(2)：309-319.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.11

近50年石羊河蔡旗站径流长期演变特征及趋势研究

康建瑛

(甘肃省武威水文站,甘肃 武威 733000)

【摘 要】 为了能更好地掌握石羊河流域水资源量的变化特征,在收集蔡旗站实测径流资料的基础上,采用不均匀系数法、线性回归法、滑动平均法、Spearman秩次相关法、累积滤波器法对该站径流量从年内分配、年际变化、趋势演变方面进行研究;采用有序聚类法、Mann-Kendall检验法对年径流的变化显著性进行检验。结果表明,径流量年内分配不均,主要集中在1—4月、7—9月;径流量整体呈现逐年减少的趋势且变化不显著,1973年序列呈现显著性跳跃趋势;丰枯情况未出现明显的周期性规律。本次研究可为蔡旗断面水资源量监管提供依据,为石羊河流域调水及水利工程建设提供数据支持。

【关键词】 径流量;变化特征;趋势研究;石羊河

中图分类号:TV121 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-048-05

Long-term evolution characteristics and trend of runoff at Caiqi station of Shiyang River in recent 50 years

KANG Jianying

(*Gansu Wuwei Hydrological Station*, *Wuwei* 733000, *China*)

Abstract: In order to better grasp the variation characteristics of water resources in Shiyang River basin, on the basis of collecting the measured runoff data of Caiqi Station, the distribution, inter-annual variation and trend evolution of the runoff in this station from year to year were studied by using the methods of uneven coefficient, linear regression, moving average, Spearman rank correlation and cumulative filter. Ordered clustering method and Mann-Kendall method are used to test the significance of annual runoff change. The results show that the annual runoff distribution is uneven, mainly from January to April and July to September; overall, the runoff decreased year by year with no significant change, and the 1973 series showed a significant jumping trend; there is no obvious periodic law in the wet and dry situation. This study can be used as the basis of water resources supervision in Caiqi section, and provide data support for water transfer and water conservancy project construction in Shiyang River basin.

Key words: runoff; change characteristics; trend research; Shiyang River

水资源是人类生产、生活的基础性自然资源,是实现可持续发展的重要基础。甘肃省河西内陆河流域有三大水系,分别是疏勒河、黑河、石羊河,河川径流量主要来自祁连山脉的高山融雪。受干旱气候影响,该地

收稿日期:2022-03-01

作者简介:康建瑛(1986—),女,工程师,学士,主要从事水文测验、水资源评价及水文预报等工作。

区水资源量极度短缺。研究表明,河西内陆河流域三大水系蕴藏水资源总量约为 61.4 亿 m^3,其中疏勒河水系 21.2 亿 m^3,占比 34.5%;黑河水系 23.1 亿 m^3,占比 37.6%;石羊河水系 17.1 亿 m^3,占比 27.9%,石羊河水系水资源量最小。为研究石羊河流域径流的演变趋势及规律,郝强[1]根据石羊河水系各支流 1956—2016 年的实测径流资料,采用相似年对比法,结合 2001 年以来景电、西营河调水资料,对蔡旗站 2018 年的断面来水量进行了分析及预测,为该站在水资源量监测、防汛抗旱方面提供了重要的数据支撑,取得了较好的效果。卢书超等[2]采用 MIKE BASIN 模型研究了蔡旗断面下泄水量变化特征,认为建立的水资源管理模型是正确的,总体上能反映出蔡旗断面水资源量的变化过程。

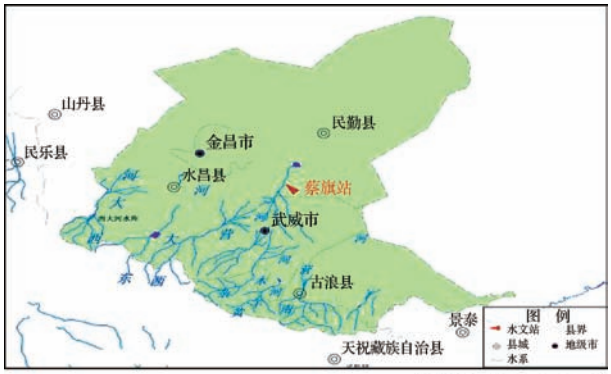
为了能够进一步分析蔡旗站降水径流的时序变化特征,使水文监测在水资源监管中更好地发挥作用,本文在上述学者研究的基础上,对蔡旗站的降水、径流量时序变化特征进行研究,可为当地水资源管理提供技术指导与数据支撑。

1 流域概况

石羊河流域是我国河西内陆河流中人口最集中、水资源开发程度最高、用水矛盾最突出的地区之一。石羊河发源于祁连山东端冷龙岭北侧的牛头山,流域面积 13.02 万 km^2,出山口以上河长 60km,主要支流有西大河、东大河、西营河、黄羊河、金塔河、大靖河、古浪河等,流域内多年平均径流量为 15.6 亿 m^3[3]。蔡旗水文站位于石羊河下游,始建于 1967 年,下游 25km 处有一座水库,集水面积 10209km^2。石羊河流域水系及蔡旗站位置见图 1。

2 资料与方法

本次研究采用蔡旗站实测长系列逐月、逐年径流资料,分析年际径流变化时,将资料采用线性相关法展延至 1956 年。经过分析对比,延展方法合理,资料系列经过一致性修正,已经整编为成果资料,可靠度较高,可以使用。采用滑动平均法、Spearman 秩次相关法、累积滤波器法对年际径流变化进行趋势分析;采用累积距平法对年径流的丰枯情况及周期变化进行分析;采用有序聚类法、Mann-Kendall 检验法检验趋势变化显著性。



审图号:甘S(2021)91号

图 1 石羊河流域水系及蔡旗站位置

2.1 滑动平均法

假设有一水文序列,计算几个前期值和后期值去平均[4],通过计算可以求得一个新的水文序列 y_t,该方法一般应用在时间序列周期性变化趋势分析中,其结果具有一定的统计性,构造统计量为

$$y_t = \frac{1}{2k+1}\sum_{i=-k}^{k} x_{t+1} \tag{1}$$

当 $k = 2$ 时,其为 5 年滑动平均,依次往下计算,但首先要假设原序列具有趋势性,在处理后的 y_t 中能够显示。

2.2 Spearman 秩次相关法

Spearman 秩次相关法主要是通过分析水文序列 X_i 及序列 i 的相关性来检验水文时间序列变化趋势[4],在计算时,时间序列 X_i 用其秩次 R_i 代表,可以构造统计量:

$$r = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n^3 - n} \tag{2}$$

式中:n 为时间序列长度;$d_i = R_i - i$。如果秩次 R_i 与时间序列相近,则 d_i 较小,秩次相关系数较大,则趋势性显著。

2.3 累积滤波器法

累积滤波器法能够充分显示出时间序列定性的变

化趋势,统计量为

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n'\bar{P}} \tag{3}$$

式中:$\bar{S}$ 为累积平均值;P_i 为时间序列;$\bar{P}$ 为时间序列平均值;n 为序列长度;$n' = 1,2,3,4,\cdots,n$。

检验原理为:当 $\bar{S} < 1$ 时,表明时间序列为增长趋势;当 $\bar{S} > 1$ 时,表明时间序列为减小趋势;$\bar{S} = 1$ 时,表明时间序列平稳。

2.4 有序聚类法

有序聚类法是以有序分类来估计序列最有可能存在的突变点,原理为:对于系列 $X_t(t = 1,2,3,\cdots,n)$ 假设具有最优分割点 τ,可使同类之间的离差平方和较小,而类与类之间的平方和较大,其计算公式为

$$V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \tag{4}$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^{n} (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \tag{5}$$

$$S = \min_{2\leqslant\tau\leqslant n-1} S_n(\tau) = \min_{2\leqslant\tau\leqslant n-1} (V_\tau + V_{n-\tau}) \tag{6}$$

式中:$\bar{x}_\tau$ 和 $\bar{x}_{n-\tau}$ 分别为分割点 τ 前后的两个平均值,计算时 min 取极小值。S 取极小值时对应的 τ 为最优分割点,这个分割点即为序列的突变点。

2.5 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法简称 M-K 检验法[5],是一种非参数统计检验法,也被称为无分布检验,优点在于不需要样本遵从一定的分布规律,也不受异常值的限制,更适用于类型变量及顺序变量,计算也比较简单。主要用于一组序列的变化趋势显著性检验,但前提条件是假设需要检验的序列变化趋势不显著,其计算公式为

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_k)}} \quad (k = 1,2,3,\cdots,n) \tag{7}$$

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad (k = 1,2,3,\cdots,n) \tag{8}$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leqslant x_j \end{cases} \tag{9}$$

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \tag{10}$$

$$\mathrm{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{11}$$

式中:UF_k 为检验统计量;S_k 为样本统计量;$\mathrm{Var}(S_k)$ 为 S_k 的方差。

给定显著性水平 $\alpha = 5\%$,计算径流量的 UF_k 值,如 $|UF_k| > U_{\frac{\alpha}{2}}$,则原假设不成立;反之,原假设成立。$U_{\frac{\alpha}{2}}$ 可在正态分布临界值表中查得。

3 径流长期演变特征及趋势研究

3.1 径流的年内分配特征

胡彩霞等[6]利用基尼系数法对水文年内分配进行了分析,取得了较好的效果,但计算复杂,过程烦琐。本文采用不均匀系数法、完全调节系数法[7-11]对蔡旗站的径流年内分配特征进行研究,其计算过程为

$$C_u = \frac{\sigma}{\bar{R}} \tag{12}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2} \tag{13}$$

$$\bar{R} = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12} R_i \tag{14}$$

$$C_r = \sum_{i=1}^{12} \frac{\Phi_i(R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^{12} R_i} \tag{15}$$

$$\Phi_i = \begin{cases} 0 & R_i < \bar{R} \\ 1 & R_i > \bar{R} \end{cases} \tag{16}$$

式中:R_i 为逐月径流量,亿 m^3;$\bar{R}$ 为月平均径流量,亿 m^3;不均匀系数 C_u 值越大,说明径流年内分配越不均匀;C_r 值越大,说明径流年内分配越集中。

经统计,月最大径流量为 0.300 亿 m^3,出现在每年的 3 月,最小值为 0.136 亿 m^3,出现在每年的 9 月;连续 4 个月径流量最大值为 1.115 亿 m^3,出现在 1—4 月,平均值为 0.279 亿 m^3;连续 4 个月最小值为 0.811 亿 m^3,出现在 9—12 月,平均值为 0.203 亿 m^3,连续 4 个月极值比为 1.37,变化基本稳定。点绘逐月径流量年内分布情况,见图 2。流量集中期与汛期出现时间相反,主要原因是蔡旗站处于石羊河下游,受上游灌区调水影响。

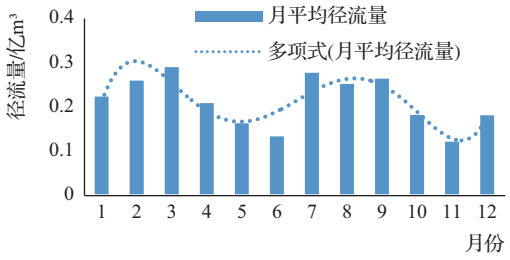


图 2　径流量年内分布情况

将蔡旗站的逐月径流量代入式(12)~式(16)中,计算可得该站径流量年内不均匀系数(变差系数),逐月径流量不均匀系数变化曲线见图 3。由图 3 可以看出,不均匀系数最大值为 1.54,出现在 1988 年;最小值为 0.29,出现在 1985 年;多年平均值为 0.28;说明 1988 年径流量的年内分配最不均匀,1985 年分配最均匀。计算可得该站逐月完全调节系数 C_r 值,点绘逐月径流量 C_r 值变化曲线,见图 4,由图 4 可以看出,C_r 最大值为 0.419,出现在 1988 年;最小值为 0.002,出现在 1989 年;多年平均值为 0.940。

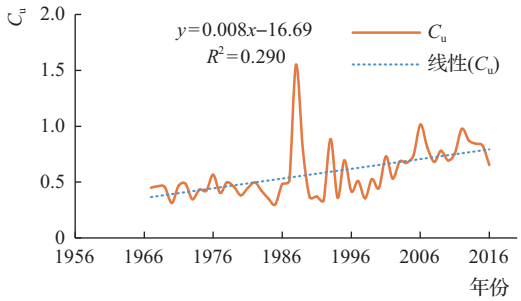


图 3　逐月径流量不均匀系数变化曲线

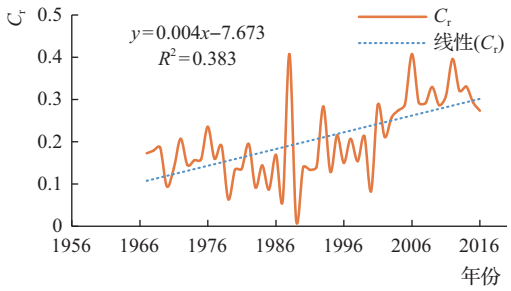


图 4　逐月径流量 C_r 值变化曲线

由图 2、图 3、图 4 可以看出,径流量年内分配集中在 1—4 月、7—9 月,进一步证实了上述分析结论;1988 年径流量年内分配极不均匀,不均匀系数呈现逐年增大趋势,年内分配逐年不均匀化,但变化不明显;径流量年内分配变得集中,1988 年径流最为集中,导致年内分配极不均匀,C_r 值出现逐年增大趋势,说明年内分配在逐年集中,进一步验证了径流年内分配不均的结论。造成径流年内分配不均匀的原因主要是大型灌区及水利工程建设导致径流在一定程度上受到影响。

3.2　径流的年际变化特征

径流的年际变化表征水资源量的周期变化,年际径流是水资源量的主要来源。石羊河流域径流量主要靠上游祁连山脉冰雪融水补给。近 50 年来,该流域共有水资源量 176.200 亿 m^3,水资源量比较短缺。经统计,年最大径流量为 6.200 亿 m^3,出现在 1958 年;最小值为 0.845 亿 m^3,出现在 2002 年;多年平均值为 2.908 亿 m^3,统计值与《甘肃省第三次水资源评价报告》数据一致。

点绘蔡旗站径流年际变化曲线,见图 5。由图 5 可以看出,该站径流年际变化过程共经历 4 个阶段:1956—1964 年,径流逐年减小;1965—1970 年,径流逐年增加;1971—2002 年,径流长期处于减小趋势;2003—2016 年,径流呈逐年增加趋势;从整体上看,径流量呈逐年减小趋势。牛最荣[3]研究表明,河西内陆河流域径流随流程和年份的增长呈现径流量减小趋势,并计算出了径流定量变化规律,与本次研究结果基本吻合。

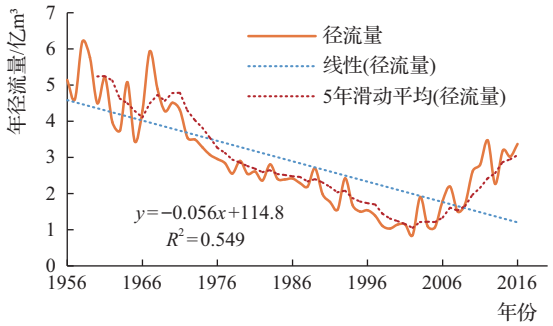


图 5　蔡旗站径流量年际变化曲线

为了进一步验证该站径流量的演变趋势,采用上述提到的 Spearman 秩次相关法、累积滤波器法进行趋势分析。经计算,发现两种方法均显示径流呈逐年减小趋势,结果与线性回归法及 5 年滑动平均法分析一致。采用有序聚类法和 Mann-Kendall 检验法对径流量

序列变化趋势进行显著性及突变检验，变化趋势均表现为不显著。有序聚类法计算显示，$|T| = 11.9 > T_{0.05/2} = 1.64$，序列在1973年出现显著性跳跃；Mann-Kendall检验法计算的$|UF| = 2.43 > T_{0.05/2} = 1.96$，突变年份也出现在1973年，且变化显著。点绘两种检验方法的统计曲线，见图6、图7，由图6、图7可以看出，二者检验结果基本一致。

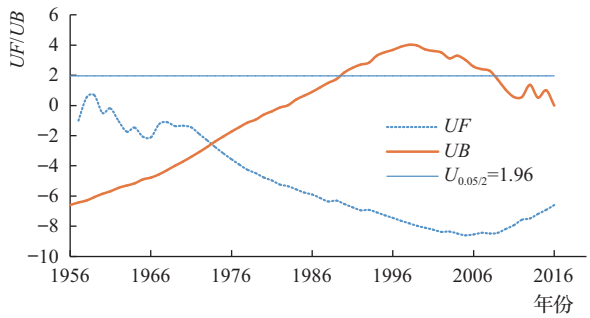


图6　Mann-Kendall检验法趋势检验统计曲线

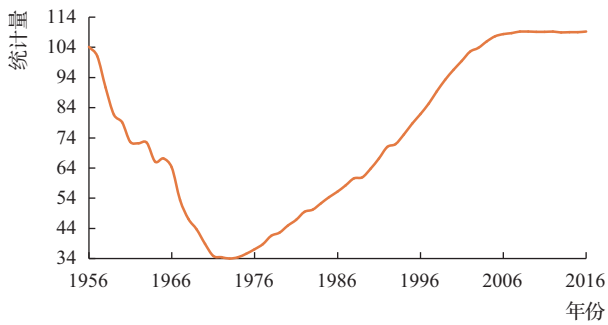


图7　有序聚类法趋势检验统计曲线

3.3　径流丰枯变化特征

采用累积距平法对蔡旗站径流丰枯情况进行分析，计算其P值（距平百分比），按照径流丰枯划分标准[12]：$P > 20\%$，为丰水；$10\% < P \leqslant 20\%$，为偏丰；$-10\% < P \leqslant 10\%$，为平水；$-20\% < P \leqslant -10\%$，为偏枯；$P < -20\%$，为枯水。结果显示，1956—1973年$P$值均大于20%，均为丰水年；1974—1976年为平水期；1977—2011年为枯水年，与这一时期径流量逐年减少的结果相对应；2012年以后均为偏丰年份。研究发现，丰枯变化情况没有明显的变化特征，主要受河西内陆河特有的地理气候条件影响，径流随着流程在逐渐减少，加之中途调水等水工建筑物影响，导致丰枯周期很难辨别。

4　结　语

本文在收集石羊河蔡旗水文站实测资料的基础上，采用不均匀系数法、线性回归法、滑动平均法、Spearman秩次相关法、累积滤波器法对该站径流量年内分配、年际变化、趋势演变进行了研究；采用有序聚类法、Mann-Kendall检验法对年径流的变化显著性进行了检验。结果表明，径流量年内分配集中在1—4月、7—9月，径流量年内分配逐年不均匀化、逐年集中；径流量整体呈现逐年减少趋势，趋势整体变化不显著，1973年序列出现显著性跳跃；丰枯情况没有很明显的变化特征。受资料系列限制及人类活动影响，本研究稍有欠缺，建议在以后的测验工作中，可将实测来水量进行细致的修正后再进行分析。

参考文献

[1] 郝强. 石羊河蔡旗断面过水量预测及合理性分析[J]. 甘肃科技纵横，2018，47(9)：17-19，54.

[2] 卢书超，孙栋元，李元红，等. 基于MIKE BASIN的石羊河流域蔡旗断面下泄水量模拟与分析[J]. 中国农村水利水电，2014(9)：83-86.

[3] 牛最荣. 气候变化对祁连山区水文循环的影响研究[M]. 兰州：甘肃人民出版社，2013.

[4] 王文圣，丁晶，金菊良. 随机水文学[M]. 北京：中国水利水电出版社，2016.

[5] 杨大文，杨汉波，雷慧闽. 流域水文学[M]. 北京：清华大学出版社，2014.

[6] 胡彩霞，谢平，许斌，等. 基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法——以东江流域龙川站径流序列为例[J]. 水力发电学报，2012，31(6)：7-13.

[7] 张钰，唐颖丰，韩克明，等. 洮河流域径流年内分配变化规律分析[J]. 干旱区资源与环境，2011，25(9)：71-74.

[8] 何梅芳. 近60年杂木河流域径流长期演变规律及趋势研究[J]. 水资源开发与管理，2022，8(4)：43-47，54.

[9] 焦晓东. 基于集中度的南水水库径流年内分配探讨[J]. 水资源开发与管理，2018，26(3)：65-69，72.

[10] 张跃华，徐刚，张忠训，等. 嘉陵江年径流量时间序列趋势分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版)，2011，28(5)：33-36.

[11] 田黎明，齐识，马金珠，等. 白龙江流域上游径流年内分配变化规律分析[J]. 水文，2012，32(4)：82-87.

[12] 胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及演变趋势分析[J]. 地球科学进展，2000(5)：516-521.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.12

新时期水土保持工作新模式探讨

张宜清[1]　张琳英[2]　郝旭乾[2]

(1. 水利部水利水电规划设计总院,北京　100120;
2. 北京市昌平区水务局,北京　102200)

【摘　要】 新时期做好水土保持工作对改善生态环境、推进生态文明建设和建设美丽中国具有重要意义,我国已经迈入经济社会高质量发展的新阶段,对水土保持工作提出了新的更高要求。本文从水土保持高质量发展视角出发,分析了现阶段水土保持工作呈现出的新特征,梳理了近年来水土保持工作衍生出的"生态+"的治理模式、科技赋能的智慧模式、一站化的服务模式、全方位的监管模式等典型模式,可为进一步探索新时期水土保持工作的新路径提供参考。

【关键词】 水土保持;新模式;高质量发展;生态环境;智慧模式

中图分类号:S157　　文献标志码:A　　文章编号:2096-0131(2022)08-053-03

Discussion on the new model of soil and water conservation in the new period

ZHANG Yiqing[1], ZHANG Linying[2], HAO Xuqian[2]

(1. *General Institute of Water Conservation and Hydropower Planning and Design*, *Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100120, *China*;
2. *Beijing Changping District Water Affairs Bureau*, *Beijing* 102200, *China*)

Abstract: Doing a good job in soil and water conservation in the new period is of great significance to improving the ecological environment, promoting the construction of ecological civilization and building a beautiful China. China has entered a new stage of high-quality economic and social development, which puts forward new and higher requirements for soil and water conservation. From the perspective of high-quality development of soil and water conservation, this paper analyzes the new characteristics of soil and water conservation work at present, and sorts out the typical models derived from soil and water conservation work in recent years, such as "ecological +" governance model, intelligent model of science and technology empowerment, one-stop service model and all-round supervision model, which can provide reference for further exploring new paths of soil and water conservation work in the new period.

Key words: soil and water conservation; new mode; high quality development; ecological environment; wisdom mode

我国水土流失分布范围广、面积大、类型多,水土流失面积占总面积的28%。按照预防为主、保护优先的思路,经长期综合治理和强化监督管理,我国水土流失得到了有效控制,实现了水土流失面积由增到减、强

收稿日期:2022-03-16

作者简介:张宜清(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水利规划与设计、水土保持研究等工作。

度由重到轻的转变,有力保护了水土资源和林草植被,黄河等重点治理区生态环境得到了明显改善。新发展阶段,水土保持工作事关乡村振兴战略实施、美丽中国建设和民生福祉,水土保持率已被纳入美丽中国建设评估指标体系,因此需要进一步创新水土保持工作模式,提升水土保持工作质量和水平。

1 水土保持工作新特征

水土保持工作的理念和手段与我国经济社会发展水平密切相关。当前,我国迈向高质量发展的新阶段,需要保护好、治理好生态环境,提供更公平、更普惠的公共产品,不断提升人民群众的获得感和幸福感。水土保持工作从单一治理到综合治理,从事后补救到全过程监管,从被动服务到主动服务,从传统水保到智慧水保,新时期主要呈现以下特征。

1.1 注重系统化治理管理

系统推进水土流失治理,通过面向整体生态空间,统筹水生态、水环境、水资源治理,将山、田、林、湖、草等要素一体考虑,采用生态化措施,一体化保护、治理和修复,促进经济社会发展全面绿色转型。监管过程中,更加注重从全过程、闭环管理角度考虑,加强事中、事后全方位监管,将监管工作贯穿设计、审查、审批、施工、验收、监督和执法等各个流程,提升了监管水平。

1.2 注重资源集约节约利用

水土资源是国土空间开发利用的载体,有效整合好、维持好和利用好水土资源,有助于提高资源环境承载力和拓展生存发展空间。当前水土保持工作在治理好水土流失的同时,部分地区适度发展了有助于涵养水土的特色经济型产业,起到了改善民生的作用;不断加强弃土石、弃渣无害化、资源化处理,实现资源高效利用和循环利用,促进了经济社会可持续发展。

1.3 注重协同融合发展

农村地区水土保持工作与扶贫开发、农林业发展、旅游业发展、水美乡村建设相融合,城市水土保持工作与城镇环境基础设施建设、景观设计相融合,从而推进了水土保持高质量发展,促进了以水土为核心的各类要素交汇融合,破解了单一治理存在的局部性和沟通机制障碍,形成了强大发展合力,取得了更好的生态效益、经济效益和社会效益。

1.4 注重科技智慧赋能

新一代科学技术为水土保持这项传统工作注入了强劲动力,促使其向智慧化方向发展。当前水土保持工作在监测感知、数据交汇、模拟演算、治理评估和监督管理等过程中越来越注重采取更加科学化、精细化、精准化的手段,通过不断完善相关标准和制度规范,加强各层级和各部门间资源共享与更新,大幅提升了治理和管理效率。

1.5 注重提升服务水平

水土保持工作坚持“两手发力”,一方面不断夯实政府监管主体责任,建立健全水土保持监管体系,强化水土保持执法监督效能;另一方面利用好市场机制,维护市场竞争秩序,鼓励社会资本参与水土保持治理,开放水土保持技术服务市场,培育专业化技术支撑服务队伍,促进市场充分竞争,水土保持服务水平和质量得以不断提升。

2 水土保持工作新模式

随着我国生态文明建设的不断深入,新的理念、思路和手段不断融入水土保持工作中,激发了水土保持工作持续不断创新。目前,水土保持工作已衍生出许多新的治理和管理模式,起到了很好的示范效果,发挥了显著的生态效益、经济效益和社会效益,以下是较为典型的4类模式。

2.1 面向“生态+”的治理模式

在理念上尊重自然、顺应自然、保护自然,坚持一体推进山水林田湖草沙系统治理,在治理好水土流失的同时,更好地维持了生态稳定性,并发挥了生态系统服务功能和价值。如以生态保护为主,实施江河源头区、饮用水水源保护区和水源涵养区水土流失的预防和治理,加强林草植被封育保护[1],严守了生态安全底线;以生态综合治理为主,实施生态清洁小流域治理[2-3],将水土资源保护、面源污染防治、农村垃圾及污

水处理等相结合进行综合治理,促进了人口、资源和环境协调发展;水土流失治理与资源再利用、生态景观建设相结合,将废土、弃渣、石料场等融入景观设计理念[4],打造独特的生态景观;水土流失治理与生态经济相结合,种植生态经济型花卉、牧草、果蔬和水土保持林,有助于发展田园经济,培育生态旅游等特色产业,助力水美乡村建设和乡村振兴[5-6],实现山更青、水更净、村更美。

2.2 面向一站化的服务模式

在国家"放管服"改革的背景下,更好地发挥政府主导作用和市场在资源优化配置中的决定性作用,是水土保持的重点工作之一。更便捷、更高效的水土保持工作方式,有助于实现服务型政府的落地生根,宗旨是提高服务质量和水平。有些地区水土保持工作采用一站化的管理服务模式,如一体设计、一个指南、一个平台、一套机制等,使工作流程更加标准化、规范化;有些政府通过向社会购买公共服务,完善市场机制,推出水土保持管家服务[7-8],有效整合了水土保持工作上下游资源,理顺工作机制,既能使工作高效开展、节约人力和资金成本,又有助于企业参与市场竞争,树立品牌,提高市场占有率,从而进一步提高市场竞争力和服务质量。

2.3 面向科技赋能的智慧模式

大数据、物联网、云计算、人工智能等新一代科学技术,助力智慧水土保持发展[9]。相比传统水土保持,科技赋能将使水土保持在监测、感知、模拟、分析和决策等方面的能力得到大幅提高。如"天空地一体化"水土保持动态监管模式[10],采用卫星、遥感、无人机等技术手段,获取更大范围的高分辨率、高频率可视化影像,自动精确定位、快速提取要素、精细比对图斑,对疑似违规项目及时向监管部门发出预警,增强了治理的针对性和时效性;以数字孪生流域[11]为载体,通过打造具有预报、预警、预演、预案功能的智慧水土保持业务应用体系,全面加强算据、算法和算力建设,推进实现智慧化模拟、精准化决策,可为流域水土流失综合治理提供支撑。

2.4 面向全链条的监管模式

水土保持监管理念正在实现从"被动管理"到"主动监管"的转变,在此过程中需要不断完善水土保持法制体制机制,建立完善的水土保持事前、事中、事后全链条全流程监管体系,特别是对生产建设项目的监管工作尤为重要。如推出"查认改罚"全链条闭环管理模式,健全审批、监管、执法衔接工作机制,发现一处、查处一处、销号一处,有效遏制了人为水土流失;全面推行水土保持告知承诺制,完善信用约束机制,进一步优化了审批和验收以及报备等手续,提升了工作效率;部分地区将水土保持工作与河湖长制相结合[12],坚持以流域为单元实施系统治理,进一步强化了河道范围内生产建设项目水土保持监督检查,提升了河湖治理能力,推进了美丽河湖建设。

3 结 语

我国已经进入以推动高质量发展为主旋律的新发展阶段,发展中的矛盾和问题集中体现在发展质量上。长期以来的水土保持工作已经积累了大量的实践经验,形成了相对成熟的治理和管理模式。而新时期为推动经济社会发展全面绿色转型、更好地满足人民日益增长的美好生活需要,需要水土保持工作主动融入我国国土空间治理和生态环境治理的新格局,找准新时期水土保持工作的定位和重心,坚持问题导向、目标导向,持续增强内生动力,激发创新活力,进一步深入探索新的治理和管理模式。各地区之间应加强交流和借鉴,加快破解水土保持工作中的难题,继续守住生态环境底线,不断改善生活生产条件,营造宜居条件,为推动经济社会高质量发展作出贡献。

参考文献

[1] 谭小平. 推进黄河流域水土流失治理打造生态维护水源涵养区——四川黄河流域水土保持工作概述[J]. 中国水土保持,2020(9):13-14.

[2] 李建华,袁利,于兴修,等. 生态清洁小流域建设现状与研究展望[J]. 中国水土保持,2012(6):11-13.

[3] 毕小刚,杨进怀,李永贵,等. 北京市建设生态清洁型小流域的思路与实践[J]. 中国水土保持,2005(1):22-24,55.

(下转第 64 页)

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.13

晋城地区农村饮水水质安全评价体系研究

郭　宁　王晓静　王卫华

(晋城市供水保障中心,山西 晋城　048000)

【摘　要】 本文以晋城地区为例,对当地25处农村供水工程的50个水样进行了水质监测分析和健康风险评估。结果表明,该地区农村饮水水质总体达标率为72%;影响该地区农村饮水水质的主要因素是硫酸盐超标,其次是总大肠菌群超标,部分地区存在氟化物和硝酸盐(N)等毒理指标超标;农村饮水中硫酸盐和氟化物超标存在地域性特征,硝酸盐(N)和微生物指标超标则无特定规律;该地区农村饮水总体上不存在明显的健康风险,水质安全水平较高。该研究可为农村饮水水质安全评价提供新思路。

【关键词】 农村饮水;水质监测;地域分布;健康风险评估

中图分类号:X824　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-056-05

Safety evaluation system of rural drinking water quality in Jincheng area

GUO Ning, WANG Xiaojing, WANG Weihua

(*Jincheng Water Supply Guarantee Center*, *Jincheng* 048000, *China*)

Abstract: Taking Jincheng area as an example, 50 water samples from 25 local rural water supply projects were monitored and analyzed for water quality and health risk assessment. The results showed that the overall qualified rate of rural drinking water quality in this area was 72%. The main reason affecting the drinking water quality in rural areas in this area is that sulfate exceeds the standard, followed by total coliform bacteria, and some areas have toxic indicators such as fluoride and nitrate (N) exceeding the standard. Excessive sulfate and fluoride in rural drinking water are regional, while excessive nitrate (N) and microbial indicators have no specific rules. Generally speaking, there is no obvious health risk in rural drinking water in this area, and the water quality is safe. This study can provide new ideas for rural drinking water quality safety evaluation.

Key words: rural drinking water; water quality monitoring; geographical distribution; health risk assessment

农业在我国具有重要地位,2020年我国农村常住人口超过5亿,保障农村饮水安全,是维护社会稳定发展和全面实现乡村振兴战略的重要条件。农村饮水水质健康风险评价与农村特定的自然地理条件和经济社会条件关系密切,与城市饮水存在明显区别,其水质安全评价不宜完全参照城市体系。本文以晋城地区为

收稿日期:2022-03-21

作者简介:郭宁(1984—),男,工程师,硕士,主要从事农村饮水安全研究工作。

例,对25处具有代表性的农村供水工程进行研究,采集50个水样进行检测,通过对检测结果进行指标评价、地域分布分析和健康风险评估,为探索适宜农村实际情况的农村饮水安全评价体系提供了新思路。

1　材料和方法

1.1　样品来源

晋城市位于山西省东南部,是典型的北方城市。本次研究对象为当地25处农村集中供水工程的水质,采集2021年10—11月的水样进行检测,包括出厂水和管网末梢水,共采集50个水样,涉及供水人口35.77万,各供水工程均以地下水为水源。

1.2　方法

1.2.1　检测方法

水样的采集、保存、运输、检测、质量控制均依据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006)。

1.2.2　检测项目

结合当地实际情况,确定检测指标为生活饮用水常规指标23项,其中感官性状和一般化学指标14项:色度、浑浊度、臭和味、肉眼可见物、pH值、铜、铁、锰、锌、氯化物、硫酸盐、溶解性总固体、总硬度、耗氧量;毒理指标8项:砷、汞、硒、镉、铬(六价)、铅、氟化物、硝酸盐(N);微生物指标1项:总大肠菌群。

1.2.3　指标评价标准

指标评价标准为《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),其中色度、浑浊度、pH值、耗氧量、铁、锰、砷、氟化物、硝酸盐、总硬度、溶解性总固体、氯化物、硫酸盐根据表4进行评价,其余指标根据表1进行评价。

1.2.4　地域分布分析

筛选水样中硫酸盐超过250mg/L、氟化物超过1mg/L、硝酸盐(N)超过10mg/L的监测数据,利用地理信息系统QGIS(3.16)进行聚类分析,分析晋城市农村饮水超标地区分布特点。

1.2.5　健康风险评估方法

健康风险评估过程主要分为毒性评估、剂量-反应关系、暴露评估、风险表征等阶段[1]。非致癌性物质通过饮水途径所致的健康风险计算模型[2]为

$$R_{ig}^{n} = \left(\frac{1 \times 10^{-6} D_{ig}}{R_f D_{ig}}\right) \div AT \qquad (1)$$

式中:R_{ig}^{n}为物质i通过饮水途径所致的个人年均健康风险度,a^{-1};D_{ig}为物质i通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量,mg/(kg·d);1×10^{-6}为物质i的可接受风险水平;$R_f D_{ig}$为非致癌性物质i通过饮水途径的参考剂量,mg/(kg·d);AT为平均寿命,a。

非致癌性物质i通过饮水途径的单位体重日均暴露剂量计算模型为

$$D_{ig} = \frac{IRC_i}{BW} \qquad (2)$$

式中:IR为每人每日平均饮水量,L/d;C_i为物质i的质量浓度,mg/L;BW为平均体重,kg。

2　结果与讨论

2.1　总体水质

本次研究的25处农村集中供水工程中采集的50个水样,共有14个不达标,总体达标率为72%。其中,25个出厂水中有5个水样不达标,达标率为80%;25个管网末梢水中有9个水样不达标,达标率为64%。末梢水达标率低于出厂水达标率,说明导致农村饮用水超标的主要原因可能是农村供水设施和管网老化以及储水池和输水管网老化、渗漏,导致供水管线残损腐蚀,管内壁生锈、脱落,造成微生物超标等现象,从而影响饮用水水质。

不达标指标情况以及不符合指标类型分析情况见表1、表2。

表1　不达标指标情况

指　标	不达标样品数/个	不达标率/%
浑浊度	1	2
总硬度	2	4
溶解性总固体	1	2
氟化物	3	6
硝酸盐(N)	2	4
硫酸盐	10	20
总大肠菌群	6	12

表2　不符合指标类型分析情况

不达标指标类型	不达标样品数/个	不达标率/%
感官性状和一般化学指标	11	22
毒理指标	5	10
微生物指标	6	12

由表1和表2可知,该地区农村饮水存在的不符合指标类型主要是感官性状和一般化学指标,其中硫酸盐超标是影响饮水水质不达标的主要原因;其次为微生物指标,总大肠菌群不达标率为12%;此外少部分样品毒理指标不达标,主要是氟化物和硝酸盐(N)。

浑浊度、总硬度、溶解性总固体及硝酸盐(N)超标水样较少,无特定分布规律。总大肠菌群为随机散布,是该地区农村饮水水质的重要影响因素,不达标率为12%,涉及总大肠菌群超标的供水工程共5处,其中80%都是管网末梢水总大肠菌群超标。造成微生物指标超标的原因主要有历史原因以及农村地区客观条件的限制,如管网分布比城市分散,难以集中维护保养等,但最主要的原因是农村饮水消毒设施的配备情况和运行条件与城市相比相差较多。有条件的农村地区一般是通过建设集中联片供水工程的方式解决饮水问题,规模较大的集中联片供水工程一般具有完善的饮用水消毒设施和工艺,但由于管网限制,距离较远、较分散的供水末端地区不得不采用二次供水的方式解决饮水问题,这些地区存在管网末梢管理不合理、放水频次过低、水体流动性差,有的储水池和输水管网未做到定期清洗,消毒设施的配备和运行工艺存在潜在风险等问题。

2.2　地域分布分析

2.2.1　硫酸盐

农村饮水中硫酸盐地域分布情况见图1。由图1可知,硫酸盐含量偏高的地区主要是市域西部(下村、大东沟、李寨、南村、大箕、犁川)和阳城县东部(东冶),总体位于沁水煤田南部边缘地带[3],为城区盆地和阳城盆地接壤地区,是由南北走向的山脉挤压形成的褶皱地带,有利于煤炭聚集,是晋城市主要的产煤区,成庄煤矿、寺河煤矿等均位于此。该区域煤层多伴生硫铁矿等矿产资源,导致地下水中硫酸盐含量偏高,这可能是该地区饮水中硫酸盐偏高的主要原因。

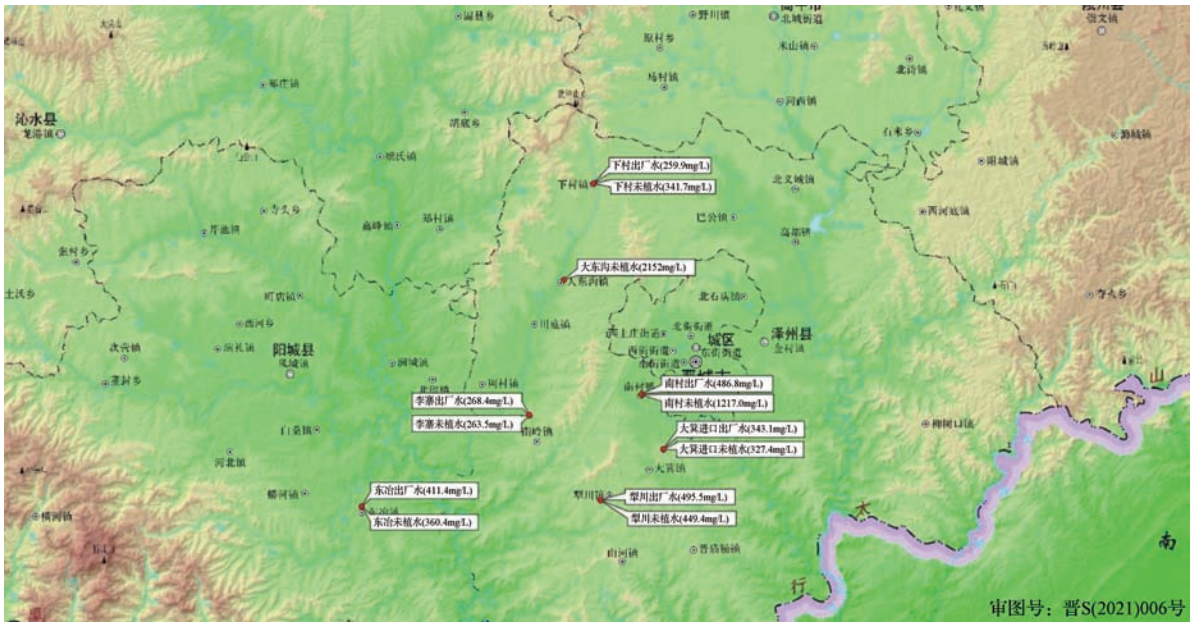


图1　农村饮水中硫酸盐地域分布情况

2.2.2　氟化物

农村饮水中氟化物地域分布情况见图2。由图2可知,农村饮水中氟化物含量偏高的地区主要是泽州县西北部下村、陈沟一带,这里同样是主要的产煤区,加之正处于长河等河流上游地区,地下水层较浅,蒸发作用较强,煤炭的开采导致太行山含氟较高的岩石和

土壤中的氟极易进入地下水进行浓缩富集[4],这可能是该地区饮水中氟化物偏高的主要原因。

图 2　农村饮水中氟化物地域分布情况

2.3　健康风险评估

2.3.1　评估指标

本次研究的化学指标中,所有水样检测数据全部低于检出限的有铜、锰、砷、汞、硒、铬(六价),讨论其导致的健康风险无统计学意义,故不对其进行健康风险评估;硫酸盐、氯化物、铁在 IRIS 系统中查询不到饮食途径的毒理学数据,故也不对其进行健康风险评估。综合各方面信息,确定硝酸盐(N)、氟化物、镉、铅、锌为本次研究的健康风险评估指标。

2.3.2　毒性评估

硝酸盐(N)可转化为亚硝酸盐或亚硝胺类物质,具有一定的致癌、致畸、致突变风险;氟是人体需要的微量元素,可以降低龋齿患病率,但是摄入过高剂量的氟,则会对牙齿、骨骼发育造成影响,出现氟斑牙、氟骨病;镉对肠胃黏膜具有刺激作用,还会导致肝、肾症状;铅会对消化、神经、免疫和呼吸等系统产生急性或慢性毒性影响,特别是对儿童智力发育造成危害;锌是人体必需的微量元素,一般来说毒性较低,但摄入过高会刺激肠胃和产生恶心呕吐。

2.3.3　暴露评估

本次研究的暴露人群为农村供水工程所覆盖的农村常住人口,考虑到暴露途径为饮水,因此只取末梢水检测数据进行健康风险评估。每人每日平均饮水量参考满足正常生理需要的平均值 3L,平均体重则参考一般成人平均体重 60kg,人均平均寿命取 2019 年我国居民人均预期寿命 77.3 年,参考剂量则参考美国 EPA 发布的资料以及 IRIS 系统查询信息,见表 3。

表 3　参考剂量

指　　标	硝酸盐(N)	氟化物	镉	铅	锌
参考剂量 R_fD/[mg/(kg·d)]	1.6	6×10^{-2}	5×10^{-4}	1.4×10^{-3}	3×10^{-1}

2.3.4　风险表征

根据式(1)、式(2)计算非致癌物的平均健康风险度,结果见表 4。

由表 4 可以看出,所有指标的健康风险均低于最大可接受健康风险水平($1\times10^{-6}a^{-1}$),说明该地区农村饮水虽部分存在氟化物、硝酸盐(N)等指标超标情况,但总体上不存在明显的健康风险,水质安全水平较高。其中,陈沟村的氟化物($1.54\times10^{-8}a^{-1}$)、下村的氟化物($1.33\times10^{-8}a^{-1}$)和南村的硝酸盐(N)($1.26\times10^{-8}a^{-1}$)的健康风险超过了可忽略健康风险水平($1\times$

表4 非致癌物饮水途径的年健康风险

单位：a^{-1}

指 标	氟化物	硝酸盐(N)	锌	铅	镉
浙水村	$<2.70\times10^{-9}$	5.22×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
塔水河村	$<2.70\times10^{-9}$	1.09×10^{-9}	6.68×10^{-10}	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
台北村	4.42×10^{-9}	9.30×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
东闸水村	$<2.70\times10^{-9}$	1.05×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
前贯沟村	4.10×10^{-9}	1.62×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
驾岭村	2.70×10^{-9}	9.70×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	2.03×10^{-9}	$<2.59\times10^{-10}$
封头村	3.45×10^{-9}	1.09×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
河北村	3.56×10^{-9}	6.06×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
南留村	5.93×10^{-9}	1.25×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
柴凹村	5.07×10^{-9}	4.85×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
上孔村	3.45×10^{-9}	1.21×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
风门村	$<2.70\times10^{-9}$	8.49×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
东冶村	3.13×10^{-9}	2.51×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
洪上村	4.64×10^{-9}	1.90×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
南 村	3.02×10^{-9}	1.26×10^{-8}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
道口村	5.50×10^{-9}	2.95×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
晋庙铺村	2.70×10^{-9}	3.92×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
犁川村	7.01×10^{-9}	1.13×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
国坨沟村	5.17×10^{-9}	1.94×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
高都村	7.44×10^{-9}	2.63×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
陈沟村	1.54×10^{-8}	7.68×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
二分街村	3.99×10^{-9}	7.16×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
下 村	1.33×10^{-8}	5.66×10^{-10}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
东沟村	4.10×10^{-9}	4.00×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$
半坡村	5.93×10^{-9}	3.68×10^{-9}	$<2.16\times10^{-10}$	$<1.85\times10^{-9}$	$<2.59\times10^{-10}$

$10^{-8}a^{-1}$)[5]，说明这3处的农村饮水水质存在引起健康风险的可能性，即使风险较低，也不能忽略，应注意饮用水中有毒物质长期积累的总体风险，积极采取相关的治理措施，降低健康风险。其余指标健康风险均低于$1\times10^{-8}a^{-1}$，这个数量级可能引起的健康风险可以忽略，一般不需要采取特定的应对措施。

3 结 语

由于特殊的自然地理条件和经济社会条件，农村地区饮水与城市饮水往往存在较大的差异性，如何科学合理有效地管理农村饮水水质，一直是农村供水安全的重要课题。本次研究以晋城地区农村饮水水质监测为例，针对农村饮水进行指标评价、地域分布分析和健康风险评估，构建符合农村实际的评价体系，可为农村供水管理政策的制定提供可量化的参考标准。目前国内农村饮水安全评价体系研究还不够完善，未来有必要结合实际情况开展体系研究，以此提高我国农村饮水水质安全保障的能力和管理水平，实现农村供水可持续发展。

参考文献

[1] NAS(National Academy of Sciences). Risk Assessment in the Federal Government: Managing The Process[M]. Washington, D. C: National Academy Press, 1983.

[2] 赵金辉，郭欣，孙庆华. 环境健康风险评估在某市居民生活饮用水中的应用[J]. 环境卫生学杂志，2018，8(3)：221-225.

[3] 杨向敏. 晋城煤矿区地质构造特征及其控煤规律探析[J]. 能源与节能，2013(9)：15-17.

[4] 赵印英，孟国霞，杨丽霞. 山西农村饮水高氟水问题及处理措施分析[J]. 山西水利科技，2010(3)：16-17，19.

[5] 李洁，李红岩，于志勇，等. 北方某市农村饮用水水质状况及分布特征分析[J]. 净水技术，2021，40(12)：32-37，155.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.14

基于模糊综合评价法评价引黄灌区供水水质

房本岩　魏守民

(滨州市引黄灌溉服务中心,山东 滨州　256600)

【摘　要】 水环境质量中污染程度的界线是模糊的,人为用特定分级标准去评价是不确切的。因此,本文以簸箕李引黄灌区为例,选择了对水质有较大影响的10种污染指标作为评价依据,充分考虑了各种因素的影响程度,利用改进的模糊数学综合评价法,较为客观地反映了灌区的水质状况,经评价,簸箕李引黄灌区供水水质为Ⅲ类。该研究可为其他地区的水质评价提供参考。

【关键词】 水质评价;隶属度;权重;模糊综合评价

中图分类号:TV213.4　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-061-04

Evaluation of water supply quality in Yellow River irrigation area based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

FANG Benyan, WEI Shoumin

(*Binzhou Yellow River Diversion Irrigation Service Center*, *Binzhou* 256600, *China*)

Abstract: The boundary of pollution degree in water quality is fuzzy, and it is inaccurate to artificially evaluate it with a specific grading standard. Therefore, taking Bojili Yellow River Diversion Irrigation District as an example, 10 kinds of pollution indicators which have great influence on water quality were selected as the evaluation basis, and the influence degree of various factors was fully considered. The improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method was used to objectively reflect the water quality of the irrigation district, and the water quality of Bojili Yellow River Diversion Irrigation District was evaluated as Class III. This study can provide reference for water quality evaluation in other areas.

Key words: evaluation of water quality; membership degree; weight; Fuzzy Comprehensive Evaluation

水质评价是对人类所处的水环境要素进行的定量描述。在已往的水质评价中,大多采用单因子评价法或综合指数法[1],而水环境质量中污染程度的界线是模糊的,人为用特定分级标准去评价是不确切的,且在水质监测中,水质评价指标往往有多项,各项指标的分级也有所不同,难以用确定的方式界定该水质属于哪类。模糊数学中的综合评价法,可解决以上问题,可把定性评价转化为定量评价,打破以往仅用一个水质指标来进行评判的弊端。本文以簸箕李引黄灌区为例,利用改进的模糊数学综合评价法对供水的水质优劣情

收稿日期:2022-03-03

作者简介:房本岩(1969—),男,高级工程师,学士,主要从事供水管理、水文观测等工作。

况进行评判,可为其他地区的水质评价提供参考。

1 灌区概况及指标选择

簸箕李引黄灌区位于山东省北部,黄河下游左岸,工程规模为大(1)型,属国家大型灌区,担负着滨州市的惠民县、阳信县、无棣县共计24个镇(街道办)的工业及农业生产供水任务,并兼顾108万城乡居民饮水保障。引黄闸设计流量为75m³/s,设计灌溉面积7.87万hm²。2019年对簸箕李引黄灌区的供水水质共进行了5次采样监测,选择了对水质有较大影响的10种污染指标,将监测结果进行加权平均,结果见表1。

表1 2019年簸箕李引黄灌区供水水质监测结果 单位:mg/L

污染指标	化学需氧量	高锰酸盐指数	氨氮	总氮	总磷	铬(六价)	挥发酚	氰化物	石油类	pH值
结　果	26.21	5.05	0.78	0.87	0.21	0.043	0.001	0.004	0.036	7.15

2 模糊综合评价法评价灌区水质

2.1 评价因子集 U 和评判集 V 的确定

设定污染因子集为 U,$U=\{U_1,U_2,\cdots,U_i\}$,其中 U_i 为影响评价的各因子[2]。此次评价的因子为表1中所列的10个污染因子,即 $U=\{$化学需氧量,高锰酸盐指数,氨氮,总氮,总磷,铬(六价),挥发酚,氰化物,石油类,pH值$\}$。

评判集 V 根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的5个级别进行分级,评判集 $V=\{$Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ$\}$[3],水质标准分级限值见表2。

表2 水质标准分级限值 单位:mg/L

级别	化学需氧量	高锰酸盐指数	氨氮	总氮	总磷	铬(六价)	挥发酚	氰化物	石油类	pH值
Ⅰ	15	2	0.15	0.2	0.02	0.01	0.002	0.005	0.05	6~9
Ⅱ	15	4	0.50	0.5	0.10	0.05	0.002	0.050	0.05	6~9
Ⅲ	20	6	1.00	1.0	0.20	0.05	0.005	0.200	0.05	6~9
Ⅳ	30	10	1.50	1.5	0.30	0.05	0.010	0.200	0.50	6~9
Ⅴ	40	15	2.00	2.0	0.40	0.10	0.100	0.200	1.00	6~9

2.2 建立隶属函数

水质的污染程度及水环境质量标准划分较为模糊,如在《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中,化学需氧量Ⅱ类水质标准为不大于15.0mg/L,如果监测值为15.1mg/L,则为Ⅲ类水质,监测值为15.0mg/L,则为Ⅱ类水质,测量值仅相差0.1mg/L,水质等级则完全不同。因此,利用隶属度对分级界限进行描述更为客观。隶属度是指各污染因子隶属水环境质量界限标准的程度,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中各级界限值,分别建立不同分级界限的评价因子隶属函数[2]:

Ⅰ类水,$j=1$ 时:

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & C_i>S_{i(j+1)}\\ \dfrac{C_i-S_{i(j+1)}}{S_{ij}-S_{i(j+1)}} & S_{ij}<C_i\leqslant S_{i(j+1)}\\ 1 & C_i\leqslant S_{ij}\end{cases}$$

Ⅱ~Ⅳ类水,$j=2,3,4$ 时:

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & C_i\geqslant S_{i(j+1)};\ C_i\leqslant S_{i(j-1)}\\ \dfrac{C_i-S_{i(j+1)}}{S_{ij}-S_{i(j+1)}} & S_{ij}<C_i<S_{i(j+1)}\\ \dfrac{C_i-S_{i(j-1)}}{S_{ij}-S_{i(j-1)}} & S_{i(j-1)}<C_i<S_{ij}\end{cases}$$

Ⅴ类水,$j=5$ 时:

$$r_{ij}=\begin{cases}0 & C_i\leqslant S_{i(j-1)}\\ \dfrac{C_i-S_{i(j-1)}}{S_{ij}-S_{i(j-1)}} & S_{i(j-1)}<C_i<S_{ij}\\ 1 & C_i\geqslant S_{ij}\end{cases}$$

式中：r_{ij} 为评价矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的元素；C_i 为实测第 i 种污染因子的数值；S_{ij} 为第 i 种污染因子第 j 类水的分级界限标准值[4]。

2.3 建立单因子评价矩阵 $\boldsymbol{R}$

以评价集中单因子 U_i 的水环境质量情况，确定每一个 U_i 对评判集中元素 V_j 的隶属程度 r_{ij}，从而得到评价矩阵 $\boldsymbol{R}$[5]：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij}\end{bmatrix}$$

因污染因子集 U 中有 10 个污染因子，评判集 V 中有 5 个级别，因此 $i=10$，$j=5$。

根据上述的隶属函数，进行单因子 r_{ij} 评价，把污染因子的 10 个实测值和 5 个分级标准值代入隶属函数中，可求出每一个 r_{ij} 的值，即

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.38 & 0.62 & 0\\ 0 & 0.47 & 0.53 & 0 & 0\\ 0 & 0.44 & 0.56 & 0 & 0\\ 0 & 0.26 & 0.74 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0\\ 0.18 & 0.82 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

2.4 计算权重集 A

由于评价因子集 U 中各污染因子影响水环境质量的程度不同，需对各污染因子 U_i 赋予不同的权重 a_i，使评价结果更客观实际[6]。各污染因子权重计算结果见表 3。表 3 中以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)分类中的Ⅲ类水标准值为基准，利用各污染因子对该标准值的偏离程度进行度量，各实测污染因子数值越大，赋予的权重越大，其对水质污染影响程度越大。

表 3 各污染因子权重计算结果

数学模型	化学需氧量	高锰酸盐指数	氨氮	总氮	总磷	铬(六价)	挥发酚	氰化物	石油类	pH 值
C_i/(mg/L)	26.21	5.05	0.78	0.87	0.21	0.043	0.001	0.004	0.036	7.150
S_i/(mg/L)	20.00	6.00	1.00	1.00	0.20	0.050	0.005	0.200	0.050	6.00~9.00
$\frac{C_i}{S_i}$	1.311	0.842	0.780	0.870	1.050	0.860	0.200	0.020	0.720	0.117
$\sum\frac{C_i}{S_i}$	6.77									
$\boldsymbol{a}_i$	0.194	0.124	0.115	0.129	0.155	0.127	0.030	0.003	0.106	0.017

注 $\frac{C_i}{S_i}=\frac{7.5-C_{pH}}{9-6}$；$\boldsymbol{a}_i=\frac{\frac{C_i}{S_i}}{\sum\frac{C_i}{S_i}}$；$S_i$ 为水质分级标准中的Ⅲ类水标准值[7]。

由表 3 可知，权重集 A = (0.194，0.124，0.115，0.129，0.155，0.127，0.030，0.003，0.106，0.017)。

2.5 模糊综合评价

根据上述的评价矩阵和权重集，可得出模糊综合评价集 B：

$$B=A\boldsymbol{R}$$

式中：B 为综合判别结果；A 为因素的权重集；$\boldsymbol{R}$ 为单因子评价矩阵[8]。

其中

$$b_j=\sum_{i=1}^{10}(a_ir_{ij})\quad(j=1,2,3,4,5)$$

式中：b_j 为评价集 B 中第 j 级水的计算值。

评价集综合考虑了各种因素的影响和各项参数在

评价中的作用,既体现了污染指标浓度因素所占权重大小,又考虑了隶属度在复合运算中的地位,因此根据评判结果能够相对准确地判定水质状况[9]。经两个模糊矩阵复合运算可得出:

$$B = (0.179, 0.247, 0.439, 0.136, 0)$$

评价集运算结果表明,簸箕李引黄灌区供水水质对Ⅰ类水的隶属度为0.179,对Ⅱ类水的隶属度为0.247,对Ⅲ类水的隶属度为0.439,对Ⅳ类水的隶属度为0.136,对Ⅴ类水的隶属度为0。因对Ⅲ类水的隶属度最大,故簸箕李引黄灌区供水水质为Ⅲ类。

黄河水是簸箕李引黄灌区的唯一引水水源,黄河来水量与水质状况对灌区至关重要,特别是灌区下游的无棣县,其北临渤海,因地下水含盐量高而无法利用,当地居民唯一的饮用水源就是灌区供给的黄河水,且当地工农业生产也主要依赖黄河水。近年来,随着黄河流域水土保持综合治理和污染防治工作的深入开展,生态环境呈逐步改善趋势[10],与当地的水质监测数据一致。黄河水质的逐步改善,对引黄灌区影响较大,能够提高灌溉农作物的产量和品质,居民供水处理成本进一步降低,居民饮水质量明显提升。

3 结 语

水环境质量中污染程度的界线是模糊的,人为用特定分级标准去评价是不确切的,而模糊数学综合评价法是一种比较科学合理的水质评价方法,克服了以往单因子评价法和综合指数法的弊端。本文针对簸箕李引黄灌区,选择了对水质有较大影响的10种监测指标作为评价依据,充分考虑了各种因素的影响程度,利用改进的模糊数学综合评价法,客观准确地判定出簸箕李引黄灌区供水水质为Ⅲ类。

参考文献

[1] 田海兰,程林,刘西汉,等. 基于水质标识指数法的秦皇岛市河流水质评价[J]. 中国农村水利水电,2019(9):100-105.

[2] 秦聪. 汾河水质的模糊综合评价与分析[J]. 水资源开发与管理,2021(5):21-25,30.

[3] 安堃达,程继雄,嵇晓燕,等. 湖北省地表水水质评价指标及监测方式研究[J]. 中国环境监测,2021,37(2):142-147.

[4] 戴明宏,王腊春,魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):193-199.

[5] 侯立颖. 改进的模糊综合评价法在大凌河流域地下水水质评价中的应用[J]. 水资源开发与管理,2018(7):27-30.

[6] 柴蕴栩,肖长来,梁秀娟,等. 改进AHP法灰色关联和模糊综合评价在地下水质评价中的适用性[J]. 水利水电技术,2019,50(4):146-152.

[7] 张倩,李国强,诸葛亦斯,等. 改进的模糊综合评价法在洱海水质评价中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2019,17(3):226-232.

[8] 侯玉婷,周忠发,王历,等. 基于改进模糊综合评价法的喀斯特山区水质评价研究[J]. 水利水电技术,2018,49(7):129-135.

[9] 黄瑞,韩龙喜,张防修,等. 模糊区间型综合决策方法在水质评价中的应用[J]. 人民黄河,2021,43(5):104-109.

[10] 任保平,豆渊博. 黄河流域生态保护和高质量发展研究综述[J]. 人民黄河,2021,43(10):30-34.

(上接第55页)

[4] 宁杨,阮正,吴晓辉. 山区水利工程水土保持与生态景观设计初探[J]. 水利技术监督,2020(5):250-254.

[5] 赵志豪,王冠依. 淮安清江浦区“水美乡村”试点建设分析与思考[J]. 水资源开发与管理,2022,8(4):80-84.

[6] 刘烈浓. 县域水土保持助推乡村振兴的路径探讨[J]. 中国水土保持,2021(3):60-62.

[7] 高国庆,易仲强,张峻玮,等. “水土保持管家”服务模式实践与思考[J]. 中国水土保持,2021(9):26-29.

[8] 姜德文. 生产建设项目水土保持管家之策[J]. 中国水土保持,2021(12):20-22.

[9] 乔殿新. 高质量发展视角下智慧水土保持发展探讨[J]. 中国水土保持,2020(7):1-3,64.

[10] 孙娜,王治国,张超,等. “空-天-地”一体化技术在水土保持规划评估中的应用[J]. 水利规划与设计,2021(4):127-132.

[11] 水利部部署数字孪生流域建设工作[J]. 中国水利,2022(1):前插3.

[12] 宋月君,刘荃,王凌云,等. 河长制背景下的水土保持多部门联动监测机制研究[J]. 水土保持应用技术,2018(6):37-39.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.15

颍河干流阜阳段水质时空变化特征及影响分析

应　玉

(安徽省阜阳水文水资源局,安徽 阜阳　236000)

【摘　要】 根据2012—2021年颍河干流阜阳段3个水质代表性断面数据,选取氨氮、高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷水质指标,采用综合污染指数法、季节性Kendall检验法、皮尔逊相关系数法,对颍河干流阜阳段进行水质变化特征和影响因素分析。结果表明,颍河干流阜阳段3个断面主要水质指标均呈高度显著下降趋势,水质综合情况有显著改善;上游断面综合污染指数高于下游断面;颍河干流阜阳段主要污染物从氨氮、高锰酸盐指数、化学需氧量逐渐转变为总磷,控制农业面源污染仍是颍河干流阜阳段改善水环境质量的重要任务。

【关键词】 季节性Kendall检验;皮尔逊相关系数;水质;变化特征;颍河

中图分类号:X824　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-065-05

Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Fuyang section of the main stream of Yinghe River and its impact analysis

YING Yu

(*Anhui Fuyang Hydrology and Water Resources Bureau*, *Fuyang* 236000, *China*)

Abstract: According to the data of three water quality representative sections in Fuyang section of the main stream of Yinghe River from 2012 to 2021, ammonia nitrogen, permanganate index, chemical oxygen demand and total phosphorus water quality indicators were selected, and comprehensive pollution index method, seasonal Kendall test method and Pearson correlation coefficient method were used to analyze the water quality change characteristics and influencing factors of Fuyang section of the main stream of Yinghe River. The results show that the main water quality indexes of three sections in Fuyang section of the main stream of Yinghe River show a highly significant downward trend, and the comprehensive situation of water quality has been significantly improved. The comprehensive pollution index of upstream section is higher than that of downstream section. The main pollutants in Fuyang section of the main stream of Yinghe River gradually changed from ammonia nitrogen, permanganate index and chemical oxygen demand to total phosphorus. Controlling agricultural non-point source pollution is still an important task to improve water environment quality in Fuyang section of the main stream of Yinghe River.

Key words: seasonal Kendall test; Pearson correlation coefficient; water quality; change characteristics; Yinghe River

颍河位于淮河左岸,是淮河最大的支流,源于河南省嵩山,流经豫、皖两省,在安徽省颍上县沫河口入淮,

收稿日期:2022-03-15

作者简介:应玉(1989—),女,工程师,学士,主要从事水资源监测及评价工作。

干流全长620km,流域面积36651km²[1],其中安徽省境内208km,流域面积4010km²。安徽省境内主要支流有万福沟、柳河、茨淮新河、济河、泉河等,涉及界首、太和、阜阳城区、颍上、临泉等地。颍河安徽段人口稠密,工农业发达,资源丰富,是安徽省重要的粮、棉、油生产基地,颍河水环境质量状况直接影响两岸居民生活生产以及下游淮河水环境质量。为此,本文选取颍河安徽河南省界至颍河入淮河段为典型性分析河段,探讨分析2012—2021年颍河干流阜阳段水质时空变化特征,进一步了解污染物的变化特征及来源,为区域水环境管理和保护提供科学依据。颍河阜阳段示意图见图1。

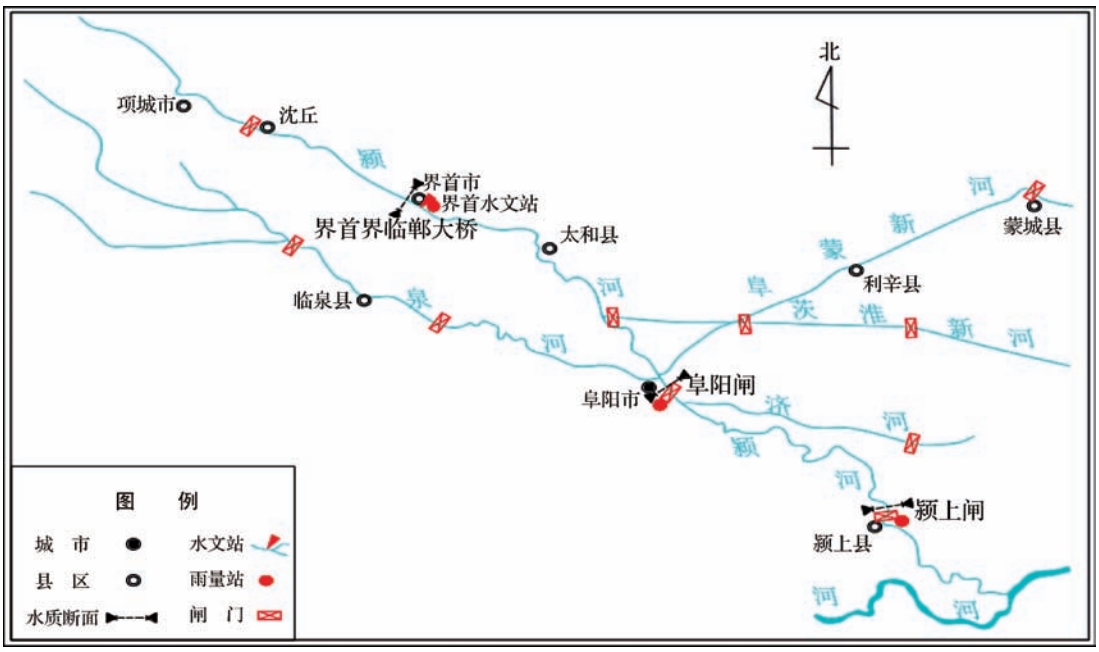


图1 颍河阜阳段示意图

1 研究方法和数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 综合污染指数法

综合污染指数法[2]是评价水环境质量的重要方法之一。该方法将各项污染因子与选定的水质等级标准浓度比值加和平均。依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准,采用下式计算综合污染指数:

$$R_i = \frac{\rho_i}{\rho_{si}} \tag{1}$$

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i \tag{2}$$

式中:R_i 为水质因子 i 的污染指数;R 为综合污染指数;ρ_i 为水质因子 i 的实测质量浓度,mg/L;ρ_{si} 为水质因子 i 的Ⅲ类水标准质量浓度,mg/L;n 为水质因子个数。

1.1.2 季节性Kendall检验方法

季节性Kendall检验方法[3-5]是一种非参数趋势检验法,将历年相同月或相同季的数据进行比较,可避免季节性影响,且此检验方法只考虑相对排列不考虑大小,可避免漏测、指标数值未检出等因素的影响。数据系列一般选取5~12年为宜,数据系列过长会隐藏当前趋势,过短则不能准确确定趋势。

1.1.3 皮尔逊相关系数法

皮尔逊相关系数法[6-7]用于度量两个变量(X 和 Y)之间的线性相关程度,其值介于-1~1之间。当二者分布在一条直线上时,皮尔逊相关系数等于1或-1;当相关系数小于0时,称为负相关,大于0时称为正相关;两个变量之间没有线性关系时,皮尔逊相关系数为0。相关系数计算公式为

$$\rho_{(X,Y)} = \frac{\mathrm{Cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} = \frac{E[(X-EX)(Y-EY)]}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \tag{3}$$

式中：E 为数学期望；D 为方差；$\mathrm{Cov}(X,Y)$ 为 X 与 Y 的协方差，即 $\mathrm{Cov}(X,Y) = E[(X - EX)(Y - EY)]$；$\sqrt{D(X)}$ 为 X 的标准差；$\sqrt{D(Y)}$ 为 Y 的标准差。

一般情况下，根据经验可将相关程度分为：$0.8 < |\rho_{(X,Y)}| \leq 1.0$ 为极强相关；$0.6 < |\rho_{(X,Y)}| \leq 0.8$ 为强相关；$0.4 < |\rho_{(X,Y)}| \leq 0.6$ 为中等程度相关；$0.2 < |\rho_{(X,Y)}| \leq 0.4$ 为弱相关；$0 < |\rho_{(X,Y)}| \leq 0.2$ 为极弱相关或无相关。

1.2　数据来源

水质数据主要来源于安徽省水环境监测中心阜阳分中心，采用水质代表性断面界首界临郸大桥、阜阳闸、颍上闸 2012—2021 年氨氮（NH_3-N）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、化学需氧量（COD_{Cr}）、总磷（TP）重要参数检测数据；降水量、过境水量来源于 2012—2020 年《阜阳市水资源公报》；社会经济数据来源于 2012—2020 年《阜阳市国民经济和社会发展统计公报》。

2　结果与分析

2.1　空间变化特征

采用箱形图方法分析颍河干流阜阳段各断面主要污染指标 NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP 的变化特征，结果见图 2。由图 2 可知，各断面 NH_3-N 中位值差异明显，变化幅度大，其中界首界临郸大桥断面中位值和变化幅度均较大，数值变化高于其他两个断面；COD_{Mn} 中位值差异较大，中位值排序依次为：界首界临郸大桥 > 阜阳闸 > 颍上闸，变化幅度较接近；COD_{Cr} 中位值差异较小，阜阳闸断面变化幅度最大；TP 中位值接近，界首界临郸大桥断面变化幅度最大。

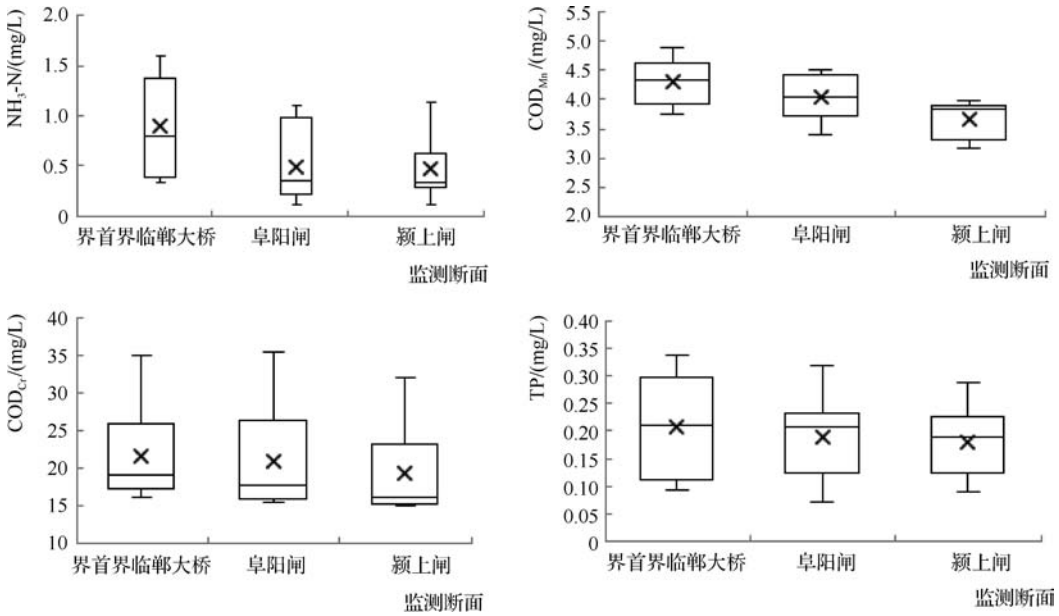


图 2　颍河干流阜阳段水质指标浓度变化情况

颍河干流阜阳段各断面综合污染指数变化情况见图 3。由图 3 可知，界首界临郸大桥断面中位值和变化幅度最大，阜阳闸断面次之，颍上闸断面最小。从空间上分析，上游界首界临郸大桥因其位于豫皖省界，上游河南来水由此进入安徽境内，综合污染指数相对较高，年际变化幅度最大，仍是水污染的重点防治断面。

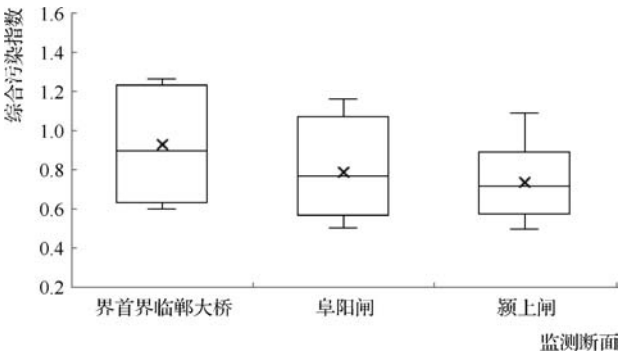


图 3　颍河干流阜阳段各断面综合污染指数变化情况

2.2　年内变化特征

将颍河干流阜阳段 2012—2021 年逐月水质数据

按汛期(5—9月)、非汛期(1—4月、10—12月)进行划分,采用箱形图对颍河干流阜阳段汛期与非汛期主要水质指标进行年内变化特征分析,见图4。由图4可知,NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}非汛期变化幅度均大于汛期,NH_3-N非汛期中位值明显高于汛期,以NH_3-N指标评价水质,汛期优于非汛期;COD_{Mn}和COD_{Cr}汛期和非汛期中位值接近;TP汛期的中位值略高于非汛期,汛期与非汛期波动幅度相近,以TP指标评价水质,非汛期优于汛期。

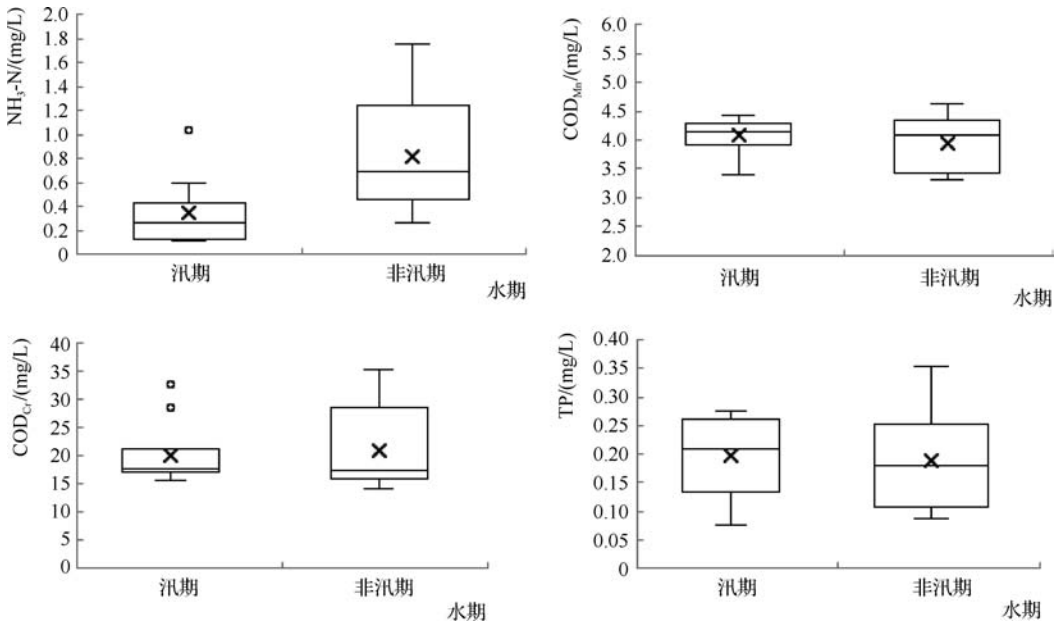


图4 颍河干流阜阳段年内水质指标浓度变化情况

对各断面汛期、非汛期、全年期综合污染指数进行进一步分析,结果见表1。由表1可知,不同水期综合污染指数总体呈下降趋势,表明水质情况总体向好。除2012年3个断面、2014年阜阳闸以及2015年阜阳闸、颍上闸断面综合污染指数相近外,2013—2016年断面汛期、非汛期综合污染指数差异均较大,非汛期综合污染指数大于汛期综合污染指数,表明汛期水质情况优于非汛期。2017—2021年汛期、非汛期、全年期综合污染指数差异均较小,界首界临郭大桥断面非汛期综合污染指数均大于汛期,颍上闸和阜阳闸有个别年份汛期综合污染指数大于非汛期,主要原因是受TP影响,河流的主要污染物从NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}逐渐转变为TP,这与孔令键等[8]研究结果一致。

表1 监测断面不同水期综合污染指数

断面名称	水 期	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
界首界临郭大桥	汛 期	1.32	0.90	0.99	0.81	0.93	0.80	0.59	0.59	0.58	0.68
	非汛期	1.23	1.49	1.39	1.13	1.44	0.81	0.66	0.60	0.67	0.69
	全年期	1.27	1.20	1.19	0.97	1.18	0.80	0.63	0.60	0.62	0.68
阜阳闸	汛 期	1.23	0.85	0.83	0.73	0.80	0.73	0.57	0.62	0.50	0.57
	非汛期	1.12	1.27	0.83	0.86	1.25	0.72	0.55	0.54	0.49	0.59
	全年期	1.17	1.06	0.83	0.80	1.03	0.73	0.56	0.58	0.50	0.58
颍上闸	汛 期	1.05	0.96	0.55	0.60	0.45	0.61	0.48	0.45	0.50	0.57
	非汛期	1.04	1.18	0.79	0.63	0.98	0.77	0.59	0.63	0.52	0.55
	全年期	1.05	1.07	0.67	0.61	0.71	0.69	0.53	0.54	0.51	0.56

2.3　年际变化特征

采用 PWQTrend2010 水质分析软件对颍河干流阜阳段进行季节性 Kendall 检验(无流量调节),对区域水质变化趋势进行分析,结果见表 2。由表 2 可知,界首界临郸大桥、阜阳闸、颍上闸断面 NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP 均呈高度显著下降趋势,浓度中值均为Ⅲ类水限值以下,表明水质综合情况有显著改善,其中 NH_3-N 的下降幅度最大,TP 次之,COD_{Mn}最小。

表 2　颍河干流阜阳段水质变化趋势分析结果

断面名称	指　标	浓度中值/(mg/L)	浓度变化趋势/[mg/(L·a)]	变化率/%	评价结论
界首界临郸大桥	NH_3-N	0.540	-0.063	-11.84	高度显著下降
	COD_{Mn}	4.200	-0.100	-2.38	高度显著下降
	COD_{Cr}	18.800	-1.232	-6.56	高度显著下降
	TP	0.168	-0.021	-12.50	高度显著下降
阜阳闸	NH_3-N	0.250	-0.035	-14.00	高度显著下降
	COD_{Mn}	3.900	-0.100	-2.56	高度显著下降
	COD_{Cr}	17.900	-1.506	-8.41	高度显著下降
	TP	0.170	-0.016	-9.61	高度显著下降
颍上闸	NH_3-N	0.280	-0.026	-9.32	高度显著下降
	COD_{Mn}	3.600	-0.088	-2.44	高度显著下降
	COD_{Cr}	17.200	-1.257	-7.33	高度显著下降
	TP	0.176	-0.014	-7.69	高度显著下降

2.4　水质变化影响因素分析

选取时间系列 2012—2020 年进行影响因素分析,选择降水量、过境水量 2 项自然因素,生产总值、粮食种植面积、常住人口、化肥施用量 4 项社会因素,采用皮尔逊相关系数对颍河干流阜阳段水质指标综合污染指数与影响因素的相关性进行分析。

2.4.1　自然因素影响

根据变化特征将颍河干流阜阳段划分为 2012—2016 年和 2017—2020 年 2 个时间段进行分析,结果见表 3。由表 3 可知,2012—2016 年,NH_3-N、COD_{Cr}与降水量呈中等程度以上负相关,说明降水量对水质 NH_3-N、COD_{Cr}有改善作用,TP 与降水量呈正强相关,说明降水量会增加 TP 的污染;NH_3-N、COD_{Cr}与过境水量呈中等程度以上正相关,说明过境水量会加重 NH_3-N、COD_{Cr}污染,TP 与过境水量呈中等程度负相关,说明过境水量对 TP 起到改善作用。2017—2020 年,降水量与 COD_{Mn}、COD_{Cr}呈中等程度正相关,其他水质指标与降水量呈弱的正相关;过境水量与水质指标呈弱相关、极弱质相关或无相关。

表 3　颍河干流阜阳段水质指标与降水量、过境水量的皮尔逊相关系数

自然因素	时间阶段	NH_3-N	COD_{Mn}	COD_{Cr}	TP
降水量	2012—2016	-0.51	0.16	-0.68	0.74
	2017—2020	0.22	0.41	0.47	0.33
过境水量	2012—2016	0.45	0.11	0.73	-0.54
	2017—2020	-0.01	-0.09	-0.03	0.36

综上分析,2012—2016 年颍河干流阜阳段水体污染受点源和面源的综合作用,2017—2020 年受点源污染作用较小,面源污染相对较大。

2.4.2　经济社会发展因素影响

对 NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP 年浓度与 4 项社会因素进行相关性分析,结果见表 4。由表 4 可知,水质指

表 4　颍河干流阜阳段水质指标与社会经济发展指标的相关系数

水质指标	生产总值	粮食种植面积	常住人口	化肥施用量
NH_3-N	-0.76	0.67	-0.87	0.77
COD_{Mn}	-0.80	0.91	-0.86	0.82
COD_{Cr}	-0.56	0.35	-0.77	0.67
TP	-0.81	0.87	-0.70	0.71

(下转第 84 页)

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.16

浅析“十三五”期间辽宁省近岸海域水资源质量

孙 鹏[1] 谢 轶[2]

(1. 辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,辽宁 沈阳 110006;
2. 辽宁省生态环境监测中心,辽宁 沈阳 110031)

【摘 要】 基于2016—2020年辽宁省近岸海域及直排海污染源生态环境质量监测数据,结合污水排放量、各污染因子入海量变化情况等,对近岸海域环境质量时空变化趋势进行综合分析,得出近5年污染物入海量的变化和趋势,探讨近岸海域污染因素与防治对策,为掌握辽宁省重点直排海污染源情况,以及未来更好地保护与管理辽宁省海洋环境提供参考。

【关键词】 直排海;污染指标;近岸海域;变化趋势

中图分类号:TV213.4 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-070-05

Analysis on the quality of water resources in Liaoning coastal waters during the 13th five-year plan period

SUN Peng[1], XIE Yi[2]

(1. *Liaoning Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shenyang* 110006, *China*;
2. *Liaoning Ecological Environment Monitoring Center, Shenyang* 110031, *China*)

Abstract: Based on the monitoring data of eco-environmental quality of coastal waters and direct-discharged sea pollution sources in Liaoning Province from 2016 to 2020, combined with the sewage discharge and the changes of various pollution factors, the temporal and spatial variation trend of environmental quality in coastal waters was comprehensively analyzed, and the changes and trends of pollutant inflow in recent five years were obtained. The pollution factors and prevention measures in coastal waters were discussed, which provided a reference for mastering the key direct-discharged sea pollution sources in Liaoning Province and better protecting and managing the marine environment in Liaoning Province in the future.

Key words: straight to the sea; pollution index; coastal waters; variation tendency

辽宁省是我国沿海省份,濒临黄海与渤海,海域广阔,海岸带东起鸭绿江口,西止辽冀海岸分界点,大陆海岸线长2110km,占全国大陆海岸线总长的12%,海洋功能区划面积4.13万km^2[1]。沿海水深较浅,水温受气象条件影响较大,海水盐度近岸低于外海,年均盐度为30.84。潮汐类型复杂,海浪以风浪为主,冬季盛

收稿日期:2022-03-14

作者简介:孙鹏(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程环境影响评价、水土保持、水资源论证等工作。

行偏北浪,夏季多偏南浪,春、秋两季浪向多变,海流主要是黄海暖流形成的辽东湾环流和北黄海沿岸流。

随着辽宁省海洋经济体系的逐步完善,沿海城市工业生产活动日渐频繁,由此产生的污水及污染物排放导致近岸海域自然生态环境遭到严重破坏,海水资源环境污染治理与保护愈加紧要,已成为海洋经济可持续发展的第一要务[2]。

1　近岸海域水环境质量现状

1.1　近岸海域水质情况

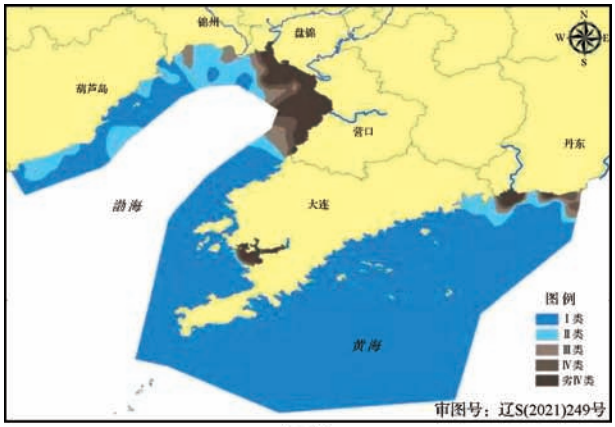
“十三五”期间,辽宁省近岸海域优良水质面积平均比例为88.0%,到2020年近岸海域优良水质面积比例达92.3%,海水水质以Ⅰ类为主,其面积占比为80.0%,Ⅱ类、Ⅲ类、Ⅳ类和劣Ⅳ类海水面积占比分别为12.3%、2.7%、2.0%和3.0%。Ⅲ类以上海水主要分布在大连普兰店湾和长兴岛北部海域、丹东大洋河口和丹东港、盘锦辽东湾开发区以及营口大辽河口海域。近岸海域水质类别分布情况见图1。

2020年,辽宁省内6个沿海城市中,大连、丹东、葫芦岛近岸海域水质状况均为优,海水水质均以Ⅰ类为主,Ⅰ类、Ⅱ类海水面积之和占比均在90.0%以上;锦州近岸海域水质状况一般,Ⅰ类、Ⅱ类海水面积之和占比为65.9%,劣Ⅳ类海水面积占比为0.5%;盘锦和营口近岸海域水质状况均较差,Ⅰ类、Ⅱ类海水面积之和占比分别为18.6%和37.4%,劣Ⅳ类海水面积占比分别为35.0%和31.1%。2020年各沿海城市近岸海域水质类别比例分布情况见图2。

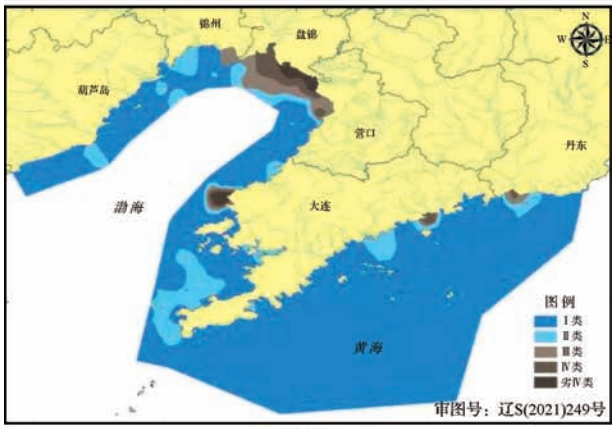
“十三五”期间,辽宁省近岸海域水质总体较好,以Ⅰ类、Ⅱ类水质为主,2017年以来,其面积占比均在80.0%以上。在各沿海城市中,葫芦岛近岸海域水质持续良好,大连近岸海域水质有所改善,丹东和锦州近岸海域水质有所下降,营口和盘锦近岸海域水质无明显变化。

1.2　近岸海域主要污染指标

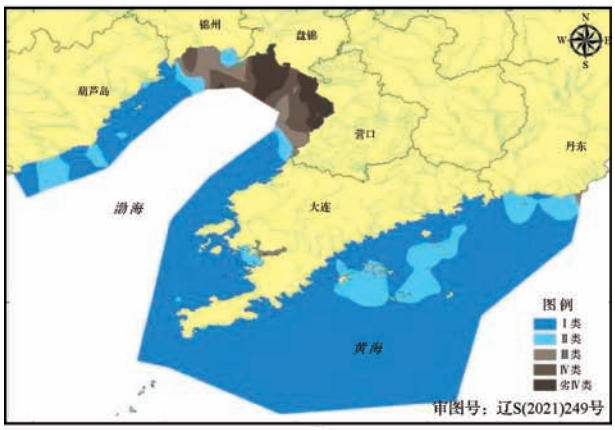
辽宁省近岸海域主要污染指标为无机氮,2020年点位年均超标率为14.6%,超标海域主要分布在盘锦辽东湾开发区和营口大辽河口海域。



(a) 春



(b) 夏



(c) 秋

图1　辽宁省2020年春、夏、秋季近岸海域水质类别分布情况

监测数据显示,盘锦和营口近岸海域无机氮年均浓度分别为0.477mg/L和0.436mg/L,分别超Ⅱ类海水水质标准0.6倍和0.5倍,其他城市海域无机氮年均浓度均符合Ⅱ类海水水质标准(不大于0.300mg/L)。2020年各沿海城市近岸海域无机氮年均浓度对比情况见图3。

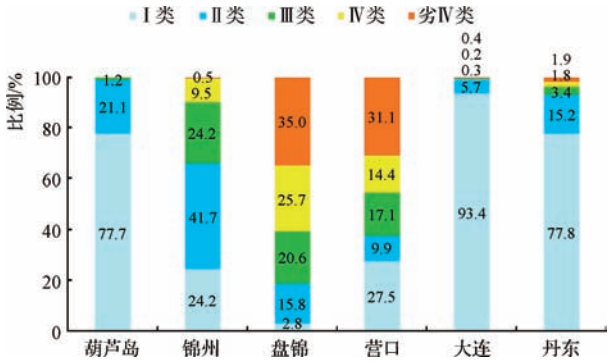


图2　辽宁省2020年各沿海城市近岸海域水质类别比例分布情况

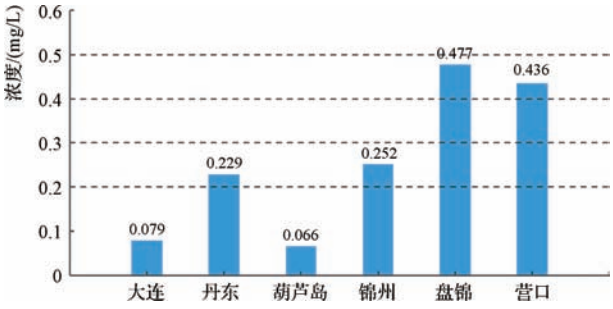


图3　2020年各沿海城市近岸海域无机氮年均浓度对比情况

2　近岸海域污染趋势

通过对辽宁省各沿海城市直排海污染源排污口进行监测可知,“十三五”期间,污染源污水及主要污染物排放量连续5年呈现下降趋势,但2020年污水排放量相比2019年变化不显著,仍然在4亿t以上,而主要污染指标COD、氨氮、总氮、总磷排放量相比2016年呈现较为明显的下降趋势[3]。2016—2020年辽宁省直排海污染源污水排放量和主要污染指标排放量变化情况见图4和图5。

3　近岸海域污染因素探讨

3.1　陆源污染

陆源污染包括入海河流、城镇工业和生活废污水、畜禽养殖排污及农业面源污染等,是近岸海域污染的最主要因素之一。据统计,陆源污染物占海洋接纳污染物总量的80.0%以上,污染物通过河流入海口、直排口、混排口等排入海域。

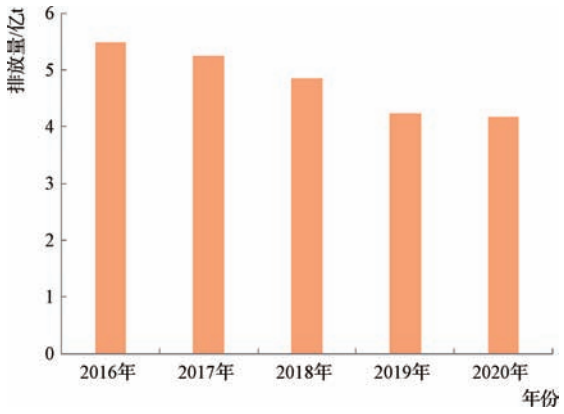


图4　2016—2020年辽宁省直排海污染源污水排放量变化情况

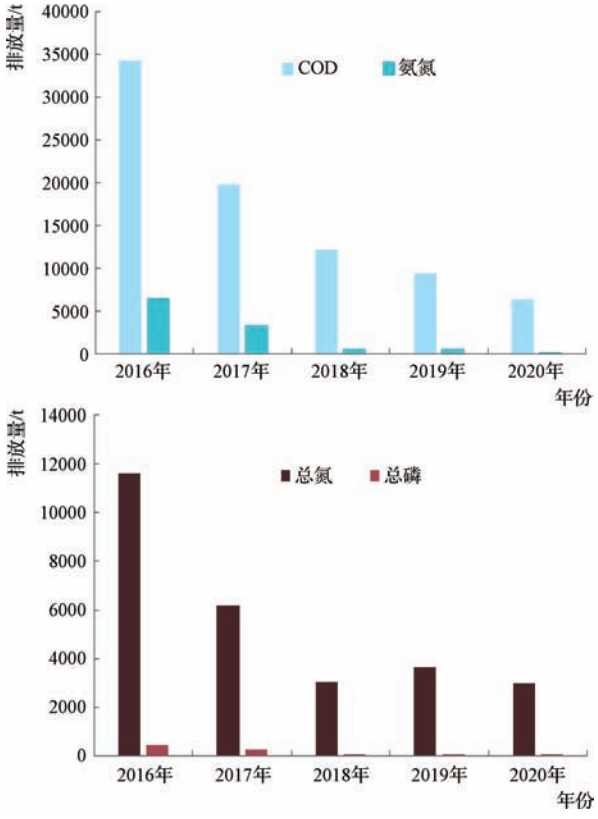


图5　2016—2020年辽宁省直排海污染源主要污染指标排放量变化情况

3.2　海岸和海洋工程及港口运输污染

随着对海洋资源的进一步开发,围海造地、海岸防护、海上疏浚、海洋农牧场等工程建设,以及海上运输船只、油轮等由于搁浅或沉没事故而产生的污染物泄漏均会给海洋带来污染,使海洋水质质量下降,破坏海洋生物栖息环境。

3.3　涉海环境保护法规不完善

有关涉海环境保护法律法规、规章制度等不完善，导致缺乏海域环境保护执法的依据与力度，与《中华人民共和国海洋环境保护法》配套的地方性法规、规章及规范性文件等仍需进一步完善。

3.4　海洋环境监测监管能力较弱

近年来，沿海地区开发规模不断扩大，近岸海域水动力条件、污染物扩散能力等随之发生变化，现有海洋环境监测监管能力逐渐不能满足新型污染物的监测监管要求，应对突发环境污染事件的处理能力亦相对薄弱。

3.5　海洋环境保护意识欠缺

沿海地区依然存在向海要地、向海要利、向海排污等问题，重开发、轻保护，对保护海洋环境认识不清、重视不足、态度不够坚决，对海洋环境保护法律法规学习宣传力度不够，群众保护海洋环境、维护海洋生态健康的意识有待加强。

4　近岸海域污染防治对策建议

4.1　加强陆源污染物的管控

4.1.1　实施入海河流综合整治

对入海河流实施综合管控，制定并实施“一河一策”综合治理水质达标方案，切实采取有效措施，开展综合整治和入海断面水质监测，并逐年对入海河流水质状况、治理成效、环境监督管理等情况进行总结，确保入海河流达到国家考核要求。

4.1.2　削减沿海陆域工业和城镇污染排放

根据近岸海域水质改善需求，结合水域纳污能力，围绕无机氮等首要污染物，因地制宜地确定污染物排放控制指标，并纳入污染物排放总量约束性指标体系。同时，通过严格落实工业企业排污许可管理制度，严控工业污染源排放。

加快现有城镇污水处理设施升级改造，创新脱氮、脱磷处理工艺，提高污水处理厂出水水质。推进城市建成区雨污分流配套管网建设和生活污水全收集、全处理；实施城中村、老旧城区和城乡接合部的污水截流、收集、纳管。城镇化程度较高的乡镇建设生活污水处理设施和配套收集管网，因地制宜地选择集中或分散处理模式开展污水治理，有效削减污染物排放。

开展入海排污口综合治理，排查和清理整治非法及设置不合理排污口，规范排污行为，提升达标排放率[4-5]。

4.1.3　加强畜禽养殖与农村面源污染控制

根据养殖规模和污染防治需要，在畜禽养殖场配套建设粪便污水贮存处理设施。在养殖密集区域建立粪污集中处理中心，形成规模化、专业化、社会化运营机制。鼓励建立粪污无害化处理后资源化还田利用模式，降低养殖业污染治理成本，促进畜禽粪便产业化利用与资源化进程，控制畜禽养殖面源污染负荷。

通过推进、拓展测土施肥范围，探索有机养分资源利用模式，减少农作物化肥与农药使用量，有效控制农业面源污染。

4.2　加快海洋生态修复

4.2.1　开展海洋生态保护修复

通过建立实施海洋生态红线制度，将海洋保护区、生态敏感区、脆弱区、入海河口、滨海湿地等海域的大陆自然岸线划入生态保护红线，实施严格管控[6-7]，辽宁省海域海洋生态红线区控制范围见图6。通过实施海洋系统修复工程和综合整治工程，加快修复滨海湿地、自然岸线等。

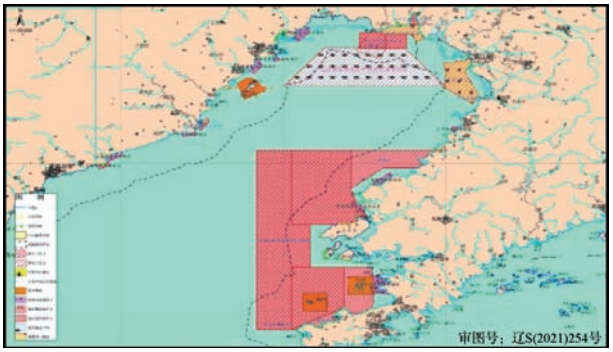


图6　辽宁省海域海洋生态红线区控制范围

4.2.2　实施围填海管控

全面暂停围填海项目，严格实施海洋环境影响评价，将海洋生态红线、海洋保护区、海洋功能区划纳入评价的重要内容，并实施一票否决制，从根本上遏制海洋无序、无度开发的乱象。

4.2.3 实施海洋渔业资源养护

严格实施海洋伏季休渔制度[8-9]，加强伏休管理。加快恢复海洋渔业资源，开展海洋牧场建设，推进海洋捕捞渔船转型转产，实现海洋渔业资源可持续利用，保持水域生态稳定，保护水生生物多样性。

4.2.4 开展海水养殖污染治理

推进海水养殖水域滩涂规划，依法划定养殖区、限制养殖区、禁止养殖区[10]。加强海水养殖污染管控，规范海水养殖尾水排放行为，升级改造养殖环保浮球。

4.2.5 开展港口码头和船舶污染治理

创建绿色港口，清理整治渔港，推动港口、船舶修造船厂、渔港等的船舶含油污水、化学品洗舱水、生活污水和垃圾等各项污染物接收处置设施建设。

4.3 完善海洋生态环境保护法律法规

为防治近岸海域环境污染，完善海洋环境保护相关地方性法规、规章及规范性文件等，使整治海洋污染行为有法可依，有效加强监管与执法力度。

加强海洋工程、海洋倾废、海砂开采、海洋生态保护区等巡查力度，针对不同用海方式，运用无人机、无人艇等从海陆空各个角度全方位监管各类用海行为，依法严厉打击破坏海洋生态环境的违法行为。

4.4 提升海洋环境保护能力

通过建立完善的海洋监测及预警系统，全面提升海洋环境保护能力。依托网络通信资源，调动数据采集、传输、存储及处理系统，科学预警监测，精准判断污染源位置、源强、扩散情况等，及时采取应对措施。

推动建立“海上环卫”工作机制，增强海上垃圾打捞、处理处置能力，实现近岸海域垃圾常态化防治，依法排查、清理海岸线向陆一侧违法建筑和设施。

4.5 强化海洋环境保护意识

加大海洋环境保护法等相关法规的普法力度，充分利用世界海洋日、世界环境日等开展海洋环境保护专题宣传，提升全社会关心、关爱、保护海洋的意识，自觉营造守护蓝色家园的浓厚氛围。

5 结 语

“十三五”期间，辽宁省近岸海域水质总体良好，以Ⅰ类、Ⅱ类水质为主，优良水质面积平均比例为88.0%，劣Ⅳ类水质面积大量减少，海洋生态环境质量得到明显改善，海洋生态系统功能得以逐步恢复。但部分地区的海域仍存在不同程度的污染问题，应积极采取相应措施加以治理，在“十四五”期间更加深入贯彻落实党中央国务院关于建设海洋强国、海洋命运共同体的决策部署，实现2035年和21世纪中叶美丽中国建设的战略目标和总体要求。

参考文献

[1] 国家统计局. 辽宁统计年鉴2020[M]. 北京：中国统计出版社，2020.

[2] 王利明，马蕾，杨晓飞，等. 渤海环境污染的治理与保护对策[J]. 中国资源综合利用，2020，38(3)：109-111.

[3] 张盼，闫吉顺，赵博，等. 渤海直排海污染源排放特征及管理对策研究[J]. 海洋环境科学，2021，40(6)：814-822.

[4] 曾容，刘捷，许艳，等. 海洋生态保护红线存在问题及评估调整建议[J]. 海洋环境科学，2021，40(4)：576-581，590.

[5] 高月鑫，曾江宁，黄伟，等. 海洋功能区划与海洋生态红线关系探讨[J]. 海洋开发与管理，2018，35(1)：33-39.

[6] 杨莹，王秋莲，韩龙，等. 我国近岸海域入海排污口现状及监管对策研究[C]//2020中国环境科学学会科学技术年会论文集：第一卷，2020：61-64.

[7] 肖磊，苏洞美，于健. 海河入海水量问题探讨[J]. 水资源开发与管理，2018(5)：21-24.

[8] 李琛，胡恒，姚瑞华，等. 我国海水资源利用制度存在的问题及完善路径[J]. 环境保护，2021，49(11)：28-33.

[9] 姜祖岩. 我国海水利用产业发展形势与存在问题分析[J]. 海洋经济，2019，9(1)：20-28.

[10] 张灿，孟庆辉，初佳兰，等. 我国海水养殖状况及渤海养殖治理成效分析[J]. 海洋环境科学，2021，40(6)：887-894.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.17

不同土质条件下植被护坡对河岸稳定性的影响

何文华

(塔里木河流域干流管理局,新疆 库尔勒 841000)

【摘 要】 为了探究植被护坡在不同土质下对河岸稳定性的影响,对2种不同土质进行植被护坡试验,收集相关试验数据,对比分析不同工况下河岸侵蚀情况。结果表明,扦插红柳可以有效提高河道护岸的稳定性和护坡抗冲刷能力,但就侵蚀和沉积现象而言,黏土试验地点的保护效果优于砾石试验地点,该研究成果可为修复河流生态功能提供一定参考。

【关键词】 土壤生物工程;河岸稳定;植被护坡

中图分类号:TV213.4 文献标志码:B 文章编号:2096-0131(2022)08-075-06

Influence of vegetation slope protection on bank stability under different soil conditions

HE Wenhua

(*Tarim River Basin Main Stream Administration*, *Korla* 841000, *China*)

Abstract: In order to explore the influence of vegetation slope protection on bank stability under different soil conditions, vegetation slope protection experiments were carried out on two different soil conditions, and relevant experimental data were collected to compare and analyze the bank erosion under different working conditions. The results show that cutting red willow can effectively improve the stability and erosion resistance of river bank protection, but in terms of erosion and deposition, the protection effect of clay test site is better than that of gravel test site. The research results can provide some reference for restoring river ecological function.

Key words: soil bioengineering; riparian stability; vegetation slope protection

对防洪效益和水资源分配日益增长的需求,导致了工程干预的增加,虽然这些工程提高了河道容量和输送能力,但也引发了一些侵蚀和沉积问题。如修建河道或清除河岸植被等措施,导致部分河岸易受侵蚀,加快河岸侵蚀速率。因此,专家学者开始应用“软工程”来改善河流生态状况,保持河岸稳定性,如采用扦插柳树、木桩护岸等生态措施。程莉等[1]利用二维有限元数学模型对植被护岸条件下河道的水流特性进行模拟分析,发现植被护岸可减小河道局部过流能力;吉红香等[2]提出在堤外滩地上种植适合当地生长的植

收稿日期:2022-03-10

作者简介:何文华(1983—),女,高级工程师,学士,主要从事水利信息化、水利工程管理、水量调度、水闸运行管理等工作。

物,能起到保护岸滩、消减波浪的作用,是一种有效的生物护岸形式;冯明等[3]提出仿木桩护岸能充分发挥河道综合功能,极大地提高了水体的生态功能。综上可发现,生物工程有助于改善河流生态状况,增强河岸抵御洪涝变化影响的能力[4-9]。因此,本文以塔里木河流域为研究背景,探究生物工程对河岸稳定性的影响。

1 概 况

塔里木河位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地北部,发源于天山山脉及喀喇昆仑山,流域面积102万km^2,全长2179km,是中国最长的内陆河。流域水资源总量为429.0亿m^3,流域多年平均天然径流量为398.3亿m^3,主要以冰川融雪补给为主,地下水资源量为30.7亿m^3。由于塔里木河流域远离海洋,地处中纬度欧亚大陆腹地,四周高山环绕,东南部是塔克拉玛干沙漠,形成了典型的大陆性气候,具有降水稀少,蒸发强烈,四季气候悬殊,温差大,多风沙、浮尘天气,日照时间长,光热资源丰富等特点。由于长期以来塔里木河流域水资源受到不合理的开发利用,盲目开垦、乱砍滥伐、超载放牧等活动使塔里木河流域河岸稳定性下降,出现河岸侵蚀、坍塌等现象。为了改善塔里木河河岸水土侵蚀现象,本文研究利用生物工程对河岸进行防护的效果。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

为研究不同土质下植被护坡对河岸稳定性的影响,本文试验植被选择红柳,主要原因是其容易繁殖、成长迅速,茎干长而柔韧,适用于编织(见图1),且在相对贫瘠的土壤或污染过的土质上也可自然生长,还能抵御一定的洪涝影响。对河流生态系统而言,红柳护岸是一个实用的、可持续的生态措施,既可以绿化环境,又可以增加收入,提升社会效益。

2.2 试验地点

为对比不同土质下红柳护岸的可行性,在塔里木河流域选择两个侵蚀较严重的地点进行试验研究,见图2。

图1 红柳护岸

图2 试验测试地点

第一个试验测试点位于阿拉尔大桥附近,土壤地质主要为黏土(C),由黏性黏土和淤泥组成,颗粒间的作用力可抵抗河岸侵蚀,故堤岸每年侵蚀速度为0.3m左右。场地弯曲度为1.15,河岸角度为35°,宽深比为13.68,岸坡流量为34.10m^3/s。

第二个试验测试点位于沙雅大桥附近,土壤地质主要为砾石(G),由河流夹带的非黏性砂和砾石组成,位于凹岸外侧,堤岸每年侵蚀速度高达1.3m。场地弯曲度为1.71,河岸角度为27°,宽深比为9.57,岸坡流量为38.77m^3/s。

水面坡度和岸坡流量决定总水流功率,计算黏土总水流功率为2.01kW/m,砾石总水流功率为0.88kW/m。总水流功率与河道宽度之比为特定水流功率,黏土和砾石的特定水流功率分别为0.08kW/m^2和0.04kW/m^2。

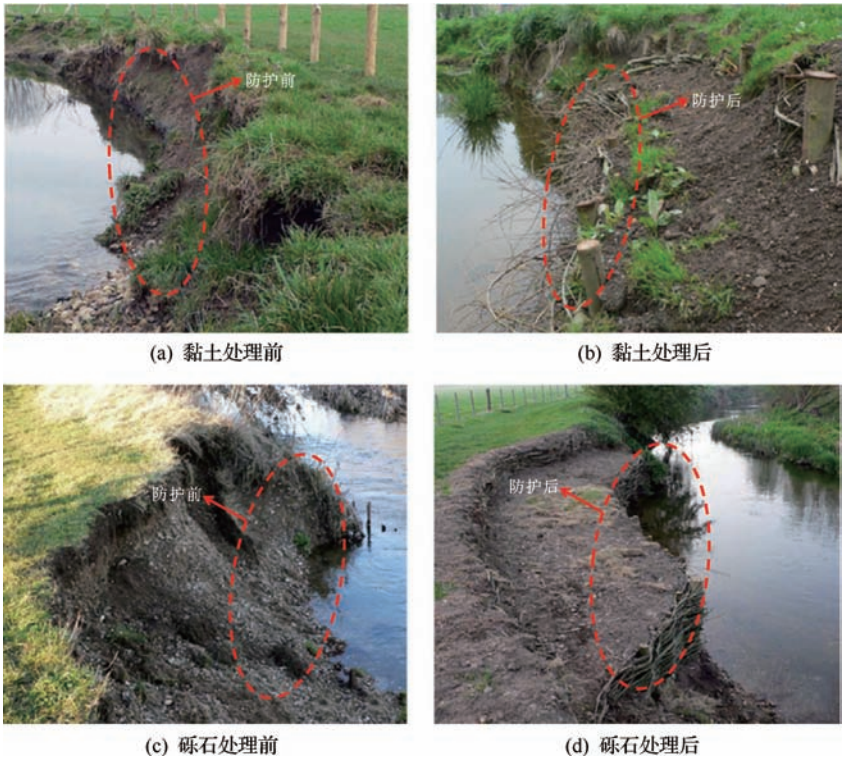
2.3 试验设计

黏土和砾石试验地点的红柳护岸设计特点见表1。

表 1　项目设计特点

特　　征	黏土地点(C)	砾石地点(G)
护岸长度/m	6.0(上层),7.0(下层)	45.5(上层), 13.5(下层)
层　数	2	2
桩的数量	22	141
桩的长度/m	2.0	2.0~2.5
平均桩径/cm	6.3±0.92	6.5±2.30

按照表 1 布置黏土和砾石试验场地,其中图 3(a)、(b)为黏土试验地点布置前后现场,图 3(c)、(d)为砾石试验地点布置前后现场。图中两个树桩栽种间距约 0.5m,栽种时需要将至少三分之二的树桩嵌入土壤,以保证红柳树根在干旱时期也可存活。



(a) 黏土处理前　(b) 黏土处理后

(c) 砾石处理前　(d) 砾石处理后

图 3　黏土、砾石试验地点布置现场前后

3　结果和讨论

3.1　生物性能

初期红柳生长状况是判断护岸能否长期有效的关键指标之一,因此需要测量、记录试验区红柳枝条的生长状态。随机选择黏土和砾石试验地点范围内的木桩,并对木桩上枝条长度增加的部分和枝条数量进行取样。通过精确测量取样木桩上所有可见嫩枝的长度可知,测量误差在±0.1cm 内的嫩枝最长可达 1.0cm,误差在±0.5cm 内的嫩枝长度均超过 1.0cm。大部分木桩在安装 4~8 周内开始发芽,1 个月后所有木桩均顺利成活。

树桩存活率见表 2,由表 2 可知,5—10 月,黏土试验地点树桩存活率均在 90.91% 以上,具有较高成活率;砾石试验地点 5—8 月的树桩成活率较高,9 月树桩成活率开始下降,到 10 月树桩存活率仅在 17.00% 左右,死亡的树桩大部分位于砾石上层。

表 2　5—10 月树桩存活率　　单位:%

地　　点	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
黏土试验地点(C)	96.50	100	100	100	100	90.91
砾石试验地点(G)	97.80	100	100	98.60	82.30	17.02

在黏土试验地点,下层枝条的生长速度大于上层枝条。砾石试验地点初期上层枝条生长较快,主要原

因是下层树桩种植较晚,且上层枝条在生长季节早期获得了足够光照。但在6月时开始发生变化,到10月时下层枝条的平均长度已经是上层枝条的9.5倍,长达98.0cm。利用监测期间的实验数据绘出两组试验地点的枝条长度和数量,见图4。通过比较图4中两个试验地点的相同土层可知,砾石上层的枝条长度比黏土上层的枝条长度平均短15cm,砾石下层枝条长度比黏土下层枝条长度平均长8cm。

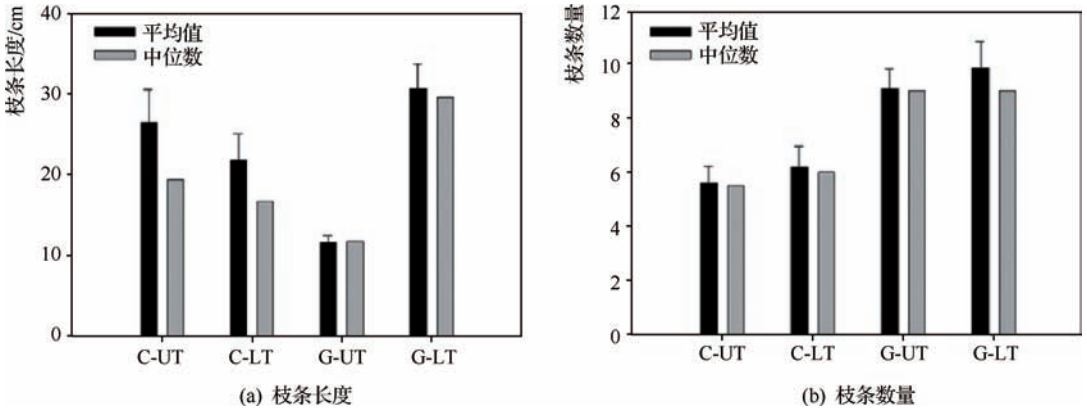


图4 两组试验地点的枝条长度和数量

注 竖线表示平均值的标准误差,横坐标C-UT、C-LT分别为阿拉尔大桥处的黏土上、下层;G-UT、G-LT分别为沙雅大桥处的砾石上、下层。

就枝条数量而言,所有取样树桩上最初的发芽数量均较多,但随着时间增长,活芽数量开始减少,位于树桩顶部的枝芽开始出现大面积死亡。在黏土试验地点,5月的枝芽数量最多,每个树桩上层平均(7.0±7.1)枝,下层平均(11.7±6.7)枝,7月的枝芽数量减少了43.75%,虽有一些可再生枝芽,但随着生长季节结束,整体数量仍在下降。在砾石试验地点,枝芽数量变化更为明显,5月和6月的活芽数量增幅最大,每个树桩上层平均(12.1±7.0)枝,下层平均(13.6±5.7)枝,然而在生长季节结束时,活芽数量减少了92.40%。

从统计学角度进行分析,当试验地点相同、层数不同时,枝芽数量的差异并不显著;当试验地点不同、层数相同时,黏土上、下层的枝芽数量均比砾石上、下层少。

根据实测数据,计算并绘出两个试验地点的枝条总长度,见图5。由图5可知,5—8月砾石试验地点的枝芽生长状态比黏土试验地点好,但9—11月砾石试验地点的枝芽出现了较高的死亡率。9—11月砾石上层总枝条长度比黏土上层总枝条长度少约45倍,砾石下层总枝条长度比黏土下层总枝条长度少约2倍。

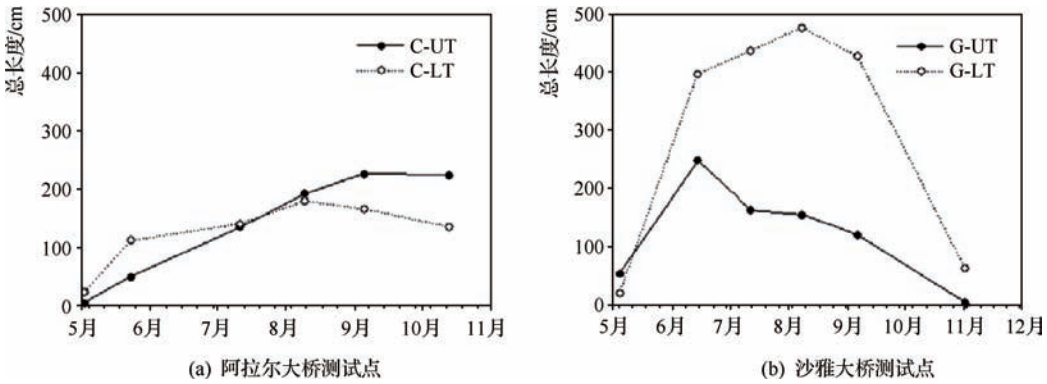


图5 试验地点枝条长度

3.2 侵蚀沉积现象

为了评估树桩的地貌功能并预测其潜力,记录种植后第一个冬季(2018 年 11 月至 2019 年 3 月)河岸侵蚀和回填物状况。

首先在野外收集基本点高程数据,然后应用 Surfer 计算机中的 Multi-Quadric 选项软件对径向基函数进行网格化,这种网格化功能可以将随机分布数据的位置匹配到均匀分布的网格节点。径向基函数技术可根据数据点构造平滑的表面,随后获取数据“切片”绘制横截面轮廓图,见图 6,该图表明随着时间的增长,砾石实验地点不同横截面均发生了不同程度的侵蚀。图中 CS1 ~ CS4 为沿下游横截面方向的编号代码,黑色实心曲线为 2018 年 11 月收集的数据,黑色空心曲线为 2019 年 3 月收集的数据。

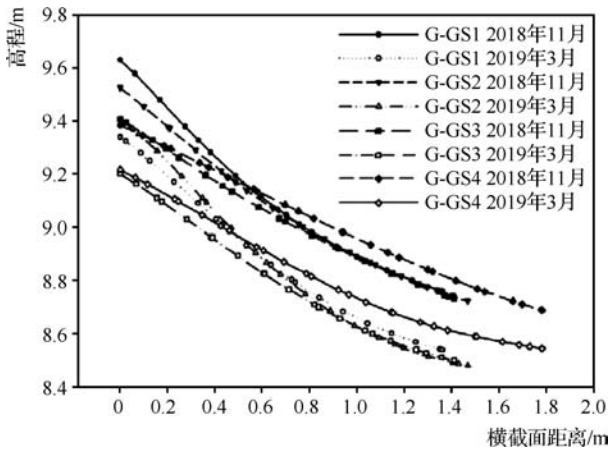


图 6 砾石试验地点的横截面示意图

与黏土试验地点相比,砾石试验地点发生的侵蚀和沉积现象更为明显,这是因为砾石颗粒不均匀,颗粒间孔隙较多,容易受水流影响而改变自身状态。在两个试验地点,上游树桩受到的侵蚀普遍较高,下游侵蚀率减小。因为上游受到的剪切应力较大,导致上游出现了较严重的侵蚀现象,而下游树桩整体较稳定。在砾石试验地点,河床和回填物上出现了较明显的沉积现象,勘测区域内沉积的物质明显多于侵蚀的物质。

检查河床剖面时,发现树桩底部有明显下陷情况,在砾石试验处长达 29.14cm。当树桩的根无法弥补该缺陷时,说明床料出现了损失,此时若无人为干预,该树桩护岸结构可能会失效。2 个试验地点横截面积的变化百分比见表 3。

表 3 试验地点横截面积的变化百分比

横截面积	黏土河床面积/m^2			砾石河床面积/m^2		
	2018.11	2019.3	Δ/%	2018.11	2019.3	Δ/%
CS1	0.2005	0.1671	-16.66	0.7743	0.4524	-41.57
CS2	0.3681	0.3180	-13.60	0.8503	0.5359	-36.98
CS3	0.3737	0.3084	-17.49	0.7555	0.4222	-44.12
CS4	0.3754	0.3376	-10.06	0.8344	0.4838	-42.02
CS5	0.3618	0.3363	-7.05	0.6713	0.5029	-25.09
CS6	0.3134	0.3052	-2.62	0.8255	0.9434	14.28
CS7	0.2979	0.3226	8.27	1.1072	1.3774	24.40
CS8	0.1095	0.4791	-3.36	1.0547	1.3530	28.28

由表 3 可知,该段时间内各个横截面上均发生了不同程度的侵蚀和沉积现象。根据每根桩上记录的回填物相对树桩的高度,可知黏土上层材料平均损失(-3.0±4.6)cm,下层材料平均损失(-6.2±2.9)cm,回填材料中出现 -14.5cm 的侵蚀现象和 1.0cm 的沉积现象。黏土上层 27.00% 的树桩回填物被侵蚀,降低了至少 5cm,黏土下层中 63.00% 的树桩也出现了侵蚀现象。砾石上层材料平均损失(-0.7±2.6)cm,下层材料平均损失(-5.9±9.6)cm,砾石试验地点也出现 -35.0cm 的侵蚀现象和 9.5cm 的沉积现象。

3.3 护岸模型

通过本文试验可知,在扦插树桩时,应尽可能深入土壤,以减少干燥和开裂。对于黏性较低的土壤,如砾石堤岸,需要将树桩放置在河岸下方深处,确保干旱时期木桩也可吸水。冬季来临之前,如果土壤中的植物生长不良,可以补种或用土工布覆盖,部分死桩需用新材料替换。在种植早期应避免遮阴,因为新芽生长和发育需要光合作用。具体可采用以下 3 种护岸形式:

a. 形式 1(见图 7),适用于急流河段,河流有中高河岸,同时堤岸上有大量巨石掩护,从而保护堤岸,因此只需要锚定岸上区域。因上游岸边植被部分被耕地破坏,需要在上游河岸种植木本植物,以此达到锚固、造林、改善环境的作用。

b. 形式 2(见图 8),适用于河岸高度相对较高、缺

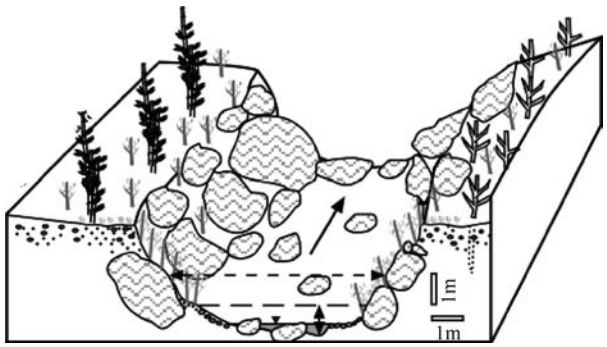


图7　形式1

乏护面层天然保护的河段。岸上需要锚固,可植树或种植红柳,底层种植灌木,土壤保护层种植非木本植物。岸滩由于河流的高坡度,受到的侵蚀力显著,应采用种植根系发达的植物和放置大块石相结合的方法控制和保护水土流失。

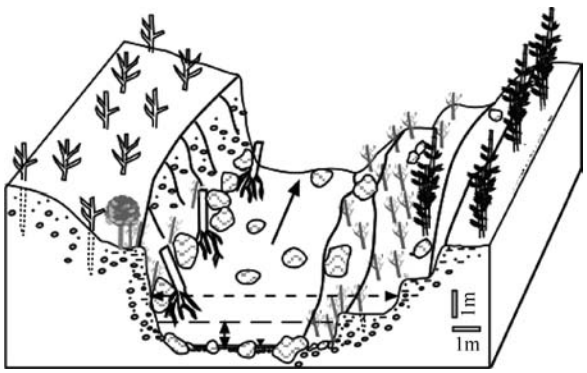


图8　形式2

c. 形式3(见图9),适用于支流河段,河床和浅滩高度适中。河岸由黑色黏土覆盖的砂砾构成,在支流河段中,应重点关注冲刷现象。在河岸较低处,可用活木桩处理,以重新固定土壤,并生成植被覆盖保护河岸。

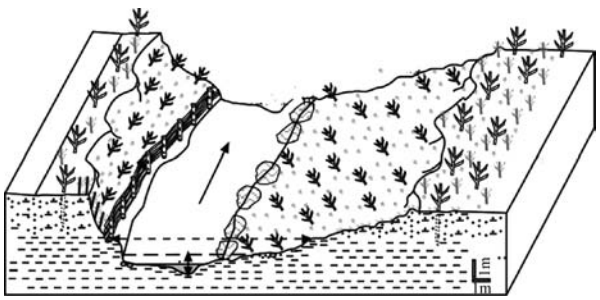


图9　形式3

4　结　语

通过长期监测试验地点扦插红柳试验变化情况,对试验数据进行对比分析可知,扦插红柳可以减少侵蚀、降低近岸水流速度和剪切应力,达到提高河岸稳定性,对河岸提供长期、有效保护的目的。采用扦插红柳保护河岸稳定性时,黏土试验地点保护效果要优于砾石试验地点。现阶段除科学开发利用河流外,还要防止地表水和地下水状况恶化,因此利用生物工程保护、改善和恢复水资源有利于水资源的可持续发展。

参考文献

[1] 程莉,赵振兴,黄本胜. 植树护岸对河道水流影响的数值模拟[J]. 水资源保护,2010,26(2):24-27,31.

[2] 吉红香,黄本胜,邱秀云,等. 植物护岸对波压力的影响试验研究[J]. 广东水利水电,2006(2):17-19.

[3] 冯明,罗国豪,黄斌. 河道治理中仿木桩护岸施工技术浅析[J]. 科学技术创新,2021(1):151-153.

[4] 杨洪宁. 基于生物基质的河道护岸护坡生态修复技术在辽宁地区的应用[J]. 水利技术监督,2021(1):141-145.

[5] 严小菊,王彧,崔小爱,等. 基于河流生态系统健康的生态修复技术应用分析[J]. 节能与环保,2019(12):103-104.

[6] 林立清. 小河道水生态修复技术探讨[J]. 资源节约与环保,2020(4):21.

[7] 申俊. 塔里木河河岸土工织物袋防护措施性能实例研究[J]. 水资源开发与管理,2021,66(7):44-48.

[8] 龚玉锋,张茂林,樊仕宝. 金龟河小流域综合整治策略研究[J]. 水资源开发与管理,2020,58(11):1-8.

[9] 顾鹏. 上海市乡村河湖生态治理技术体系研究[J]. 水资源开发与管理,2022,8(6):79-84.

DOI:10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2022.08.18

生态文明视角下水利工程占地空间规划与利用研究

赵子杰　丁　玉　刘烨华

(北京市水利规划设计研究院,北京　100048)

【摘　要】 本文基于“五位一体”总体布局生态文明建设和“山水林田湖草”生命共同体理念,结合水利工程中引调水工程案例,针对现有用地模式存在的建成后难以复垦、土地规划利用局限以及管护难等问题进行分析,从共享视角出发,提出与土地所有者利益共享、与土地总体规划衔接融合、与周边居民利益分享等对策措施,为占地空间规划及高效利用提供了可行的思路和方法。

【关键词】 国土空间;水利工程;临时用地;保护范围;高效利用

中图分类号:TV212　　文献标志码:B　　文章编号:2096-0131(2022)08-081-04

Study on planning and utilization of water conservancy project covering space from the perspective of ecological civilization

ZHAO Zijie, DING Yu, LIU Yehua

(*Beijing Institute of Water*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Based on the “five-in-one” overall layout of ecological civilization construction and the concept of “landscape, forest, fields, lakes and grass” life community, combined with water diversion projects in water conservancy projects, this paper analyzes the problems existing in the existing land use patterns, such as difficulties in reclamation after completion, limitations in land planning and utilization, and difficulties in management and protection. From the perspective of sharing, some countermeasures are put forward, such as sharing interests with landowners, linking with the overall land planning, and sharing interests with surrounding residents, so as to provide feasible ideas and methods for the planning and efficient utilization of occupied space.

Key words: land space; water conservancy project; temporary land use; scope of protection; efficient utilization

2015 年,中共中央国务院发布了《生态文明体制改革总体方案》,核心要义是推进“山水林田湖草”生命共同体理念构建,在此指引下开展各类国土综合整治和生态保护修复,落实统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责,是统筹推进“五位一体”总体布局和协调推进“四个全面”战略布局,贯彻落实生态文明建设的重点内容,同时,对探索有效模式及实践应用提出了明确要求。水利工程施工用地,通常包含山水林田湖草等各类国土类型,基于整体保护、系统修复、综合治理等原则,对水利工程施工用地提出相应的

收稿日期:2022-02-23

作者简介:赵子杰(1979—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利工程施工组织设计及研究工作。

国土空间规划方案与思路,有助于实现国土空间综合整治与生态修复空间合理规划。

1 现状及存在问题

近年来,国家实施了一大批重大水利工程建设,其中一些大型的区域性、跨流域引调水工程,采用明挖或暗挖方式铺设管线,工程线路长、投资大、用地面积大。如何以“山水林田湖草”生命共同体理念为指引,提出有益可行的思路和方法,更好地规划利用、保护和管理好国土资源,保护好产权所有者的利益和优化维护管理方式,是一个具有现实意义的重要课题。

1.1 临时占地使用模式

1.1.1 明挖管线工程

调水工程管线若采用明挖方式铺设,一般需布置开挖上口、临时道路、管道吊装及临时堆土区等,因此占地宽度普遍较大,导致拆迁占地投资高、征地难度较大。如南水北调中线北京段 PCCP 工程,管线施工占地宽度 150 ~ 188m;吉林省中部城市引松供水工程 4 号管线施工占地宽度约 80m。在施工过程中,由于大中型调水工程工期长,采用明挖管线施工的临时用地,经过施工机械长时间的碾压,土质不适宜复垦,导致临时用地征用期限过长以致届满未复垦现象普遍存在,使临时用地成为建设用地,在严重侵害产权所有者利益的同时也浪费了国家的土地资源。

1.1.2 暗挖管线工程

管线工程在城市区域内一般不适宜采用明挖方式,目前普遍采用盾构、顶管或浅埋暗挖等暗挖工法施工,具有拆迁少、安全性高、施工成本高等特点。对土地资源的占用主要为各类工作井等“点状”占地,一处顶管或浅埋暗挖工作井占地面积一般为 800 ~ 1500m^2,盾构井施工区占地面积为 3500 ~ 5500m^2,从全线来看,暗挖方式一般不占用连续的大面积土地空间。在前期规划设计时,可依据地上地下建筑物及管线的分布情况,避开重要建筑物并尽量布置在绿化带等区域,做到拆迁量最少。

但同明挖管线一样,在工程投入运行后,管线工程均需设置一定的管理和保护范围,以确保工程正常运行。以万家寨引黄入晋工程管线为例,管理范围为前期临时占地范围,并在两侧向外延伸 20m 作为保护范围,在此范围内的土地所有权和使用权不变,不得从事爆破、打井、钻探、采石、采矿、取土、挖砂等危害工程安全的活动,可从事农业生产等活动,但不得影响工程设施的安全及水质。由于地下空间铺设了管线,为确保运行安全和正常维护管理,上方及邻近保护范围内的土地用途、承载量均将受到严格限制,不适宜用于堆存,以及建筑和各类工厂设施建设,导致今后该区域规划受到掣肘,土地资源难以得到合理有效的利用。另一方面,运行管理单位没有管理和保护范围内的土地使用权和所有权,在此范围内的建设、施工及生产活动时有发生,而管理单位维护和监管困难,有时直至破坏已有输水管线才能采取措施,工作被动。管理单位是管线的所有者,但不享有管线所在土地的使用权,因此无法保证可随时进入管理范围进行日常巡查,因此无法实现及时检修和应急抢修,使调水工程的安全运行存在潜在风险。

1.2 永久占地管理模式

从保证管线的安全运行出发,在管线施工临时占地范围的基础上,直接将管理运行所需的管理和保护范围进行永久征地,按照永久占地计入工程投资,工程实施后相应变更土地的属性,管理单位拥有管理和保护范围内的土地使用权和所有权,可以进行管线的日常巡查和维护、检修工作,强化了管理单位的权限,但同时带来了新的问题。

首先,管理单位一般级别不高、人员较少、力量薄弱,而管线工程的长度较长、范围较大,目前主要集中对阀井、连接站等节点进行管理,而对于管线工程划定的管理和保护范围,一般的管理单位权责不对等,未能实现有效管理。其次,工程建设已经使用了国有和集体的大量土地,在建成后如复垦,则能实现原用地功能,农民或农村集体可以此谋生或扩大再生产,但如果全部按永久征地征收,不仅原土地所有者的利益被侵占,也加大了工程建设的拆迁占地投资,不利于工程前期审批及落地实施。而永久占地面积的加大,将使未来的用地规划面临更多的限制和困难。

2 空间利用对策研究

基于“山水林田湖草”生命共同体理念,按照生态系统的整体性、系统性及其内在规律,统筹考虑自然生态各要素:山上山下、地上地下、陆地海洋以及流域上下游,进行整体保护、系统修复、综合治理。工程征地涉及民众切身利益,所有国土空间的保护、开发和利用活动,应按照规划确定的区域、边界、用途和使用条件等进行统筹考虑。在土地资源紧缺、人口密集的地区,单一和固化的模式已经不能满足和谐社会发展的需要。

在新形势下,可从国土统筹、利益共享的广度视角出发,以更新的理念、更高的站位来理解和思考面临的困境,将同一土地上的不同使用者通过搭建一种利益共享的机制进行联结绑定,打破各方利益固化的模式,以共享的思路进行分配和协调,形成合作共赢、相对平衡的利益共同体和责任共同体。

2.1 土地产权与所有者利益共享

目前,农村土地按照“土地确权、两权(所有权和使用权)分离、价值显化、市场运作、利益共享”方针,依据土地有偿使用的原则,在保证所有者利益的同时也确保了工程的管理及安全运行。对于明挖管线施工期的临时占地,以及建设完成后管顶上部划定的保护范围的土地,可明确土地所有权归农民或农村集体所有,而不同位置、用途和价值的土地使用权,在管理单位、土地所有者和第三方之间,建立长期收益与生态保护补偿机制,通过合理协商确定利益分配模式,达到一种动态的利益平衡,形成一种比临时占地享用更高权限的“临时占地+”的协作机制。

农业用地的所有者拥有土地,可进行原始用途和一定限制范围内的生产,但需保证管理单位进出、日常巡检及应急抢修,将各方权利、义务、期限、费用及罚责在协议中予以明确约定,同时,政府或第三方通过设置相应年限的补贴作为补充。

此方案可以避免征用土地的长时间闲置,工程投资也未增加。对于愿意拆迁且能达成协议,具备拆迁条件的临时性或永久性建筑物,也可在工程中实施拆迁,并在计列投资时纳入该部分拆迁补偿费用。

2.2 工程用地与总体规划衔接融合

工程占地一般为条带状占地,如不与区域的土地总体规划和产业导向相衔接,将使国土资源形成严重的条块分割,同一行政区不能实现整体统一的规划。基于此,在工程线路走向确定的前提下,管线可与不同的功能区边界平行布置,由此产生的占地范围与今后的功能区划相匹配,可在一定程度上减少工程对总体规划的掣肘。

目前,城市综合管廊即为这种理念在现实中落地的一种集中体现。传统的城市管道设置随意度较高,对城市地下空间的占有率较大,综合管廊是建于城市地下用于容纳两类及以上城市工程管线的构筑物及附属设施,是城市市政基础设施管线敷设的形式之一,将电力、通信、燃气、给水、热力、排水等多种管线集约化铺设在隧道空间中,与地铁建设、河道改造、老区改造和道路建设等相结合,能有效地利用城市地下空间和促进城市规划,在很大程度上节约了土地资源,属于国家层面大力推行的重点建设工程。引调水管线进入城市区域,应尽可能地形成或纳入综合管廊,共同分担建设费用。

2.3 工程建设与周边居民利益共享

当工程占地主要为郊区及近郊区集体土地时,就土地性质而言,工程完工后将改变土地的性质,管线上部及其一定范围的土地使用实质上转变为“限制使用”。工程建成后,在管线及其保护范围内土地的开发使用,均应以保证工程安全为首要条件。以集体土地特点来说,限制了其土地使用性质及今后增值幅度,加大了集体在该范围内使用固有土地的成本,该部分土地实质上已经具有市政公共用地特点,对该部分土地永久征用存在客观的合理性。

随着人们对美好生活向往的需求不断提升,需要从公众利益和现实获得感出发进行重新考量,如管道上部的用地可结合居民的日常生活需求,通过布置休闲公园、避难场所、绿化带等,将这类有所限制的用地转变成功能类用地,使工程建设成果更多地惠及工程沿线居民,与周边居民利益共享。

3 结 语

本文结合水利工程中的引调水工程案例及实践，对现有用地模式存在的建成后难以复垦、土地规划利用限制及管护难等诸多问题进行了分析，以“山水林田湖草”生命共同体理念为指引，从利益共享视角出发对空间利用对策进行梳理分析，以更新的理念、更高的站位解构当前面临的困境，提出工程用地与总体规划衔接融合、工程用地与总体规划衔接融合、工程建设与周边居民利益共享等对策措施，探索了水利工程占地的国土保护修复有效模式，为占地空间规划及高效利用提供了有益可行的思路和方法。今后需配套相应的政策和规划，协调各级政府部门和利益相关方，在工程实践中积极推动落实。◈

参考文献

[1] 北京市水利规划设计研究院. 南水北调中线京石段应急供水工程(北京段)惠南庄～大宁段初步设计报告[R]. 2004.

[2] 汪燕衍. 临时用地管理现状分析与对策建议[J]. 上海国土资源,2013(1):69-72.

[3] 杨壮壮,袁源,王亚华,等. 生态文明背景下的国土空间用途管制:内涵认知与体系构建[J]. 中国土地科学,2020,34(11):1-9.

[4] 王一波. 生态文明建设背景下的大河流域国土空间用途规划[J]. 测绘通报,2021(8):135-139.

[5] 汪翼. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究[J]. 环境与生活,2014(22):65,67.

[6] 杨随柱. 水利水电工程建设临时用地问题的探讨[J]. 水利建设与管理,2015(12):1-3.

[7] 刘烨华,杨玉锋,杨进新. 南水北调北京段停水检修施工组织及工期优化[J]. 水利建设与管理,2021(7):16-20.

[8] 李向,胡业翠,郑新奇,等. 生态文明理念下我国农村国土综合整治分区及实施路径[J]. 中国农业大学学报,2020,25(12):161-172.

[9] 黄莹,叶新霞,朱祥,等. 淮河入海水道二期工程征占地优化路径探讨[J]. 江苏水利,2021(7):1-4.

[10] 大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例[J]. 陕西政报,1991(6):7-9.

(上接第69页) 标与生产总值、常住人口均呈负相关关系，说明经济发展、城镇化发展并未以牺牲水环境为代价，这与张彩丽等[9]研究结果一致；粮食种植面积、化肥施用量与水质指标成呈相关关系，考虑农田化肥流失导致水质污染。

3 结 语

通过对2012—2021年颍河干流界首界临郸大桥、阜阳闸、颍上闸3个断面水质变化特征和影响因素进行分析可发现，NH_3-N、COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP浓度均呈高度显著下降趋势，表明颍河干流阜阳段水质显著向好。从空间变化特征分析来看，上游界首界临郸大桥断面与下游断面相比，综合污染指数相对较高，持续加强省界断面的污染防控工作仍是今后污染防治的重点。由于水环境综合治理、居民环保意识的提高，经济和城镇化的发展对水质产生了促进作用，河流污染由点源和面源污染逐步转化为面源污染，农业面源污染控制成为改善颍河干流水环境质量的重要任务。建议进一步加大对区域内农业种植面源污染的管理力度，不断推进绿色农业推广力度，降低面源污染对河流水质的影响，为颍河干流阜阳段的水质提供安全保障。◈

参考文献

[1] 王园欣,左其亭. 沙颍河河南段水质变化及成因分析[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(4):47-50.

[2] 曾凤连,杨刚,王萍,等. 淮河干流水环境质量时空变化特征及污染趋势分析[J]. 水生态学杂志,2021,42(5):86-94.

[3] 曾庆慧,秦丽欢,程鹏,等. 1990年以来北京密云水库主要水环境因子时空分布特征[J]. 湖泊科学,2016,28(6):1204-1216.

[4] 岳杨. 大连市2012—2016年地表水功能区水质变化趋势分析[J]. 水资源开发与管理,2020,48(1):18-22.

[5] 王胜艳,陈小丽,刘国钧. 新通扬运河(泰州段)水质变化趋势分析[J]. 水资源开发与管理,2020,54(7):12-15.

[6] 张家权. 辽河汛期水质水量相关性分析[J]. 陕西水利,2021(10):107-109.

[7] 周玮,高渐飞,丁琼. 赤水河流域水质时空变化特征与趋势[J]. 环境保护科学,2021,47(2):101-106.

[8] 孔令健,王振龙,王兵. 阜阳市主要河流水质评价及污染源解析[J]. 人民长江,2019,50(9):42-47.

[9] 张彩丽,林琳,江懿,等. 淮河流域(阜阳段)2009—2018年水质变化特征及影响因素研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(23):95-100,107.