

我国现代治水研究进展与展望

左其亭^{1,2}, 张志卓¹, 马军霞^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:治水历来是治国安邦的大事,我国现代治水事业已进入新的历史方位,对治水研究也提出了更高要求,梳理总结我国现代治水研究进展,准确把握未来治水重点研究任务,对推进水利现代化建设具有重要意义。本文概述了我国古代和近代治水发展主要脉络,从重要理论、关键方法、代表性实践三方面总结了我国现代治水研究进展;面向未来治水发展需求,展望了我国现代治水研究热点方向,涵盖国家宏观水战略、微观水科学问题、一体化监测体系、智慧模拟系统、智慧服务体系、生态相关的水科学研究、水灾害防控、水高效利用等重点研究领域。

关键词:现代治水;治水历史;水利现代化;研究进展

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)05-0102-10

Progress and prospects of modern water control research in China//ZUO Qiting^{1,2}, ZHANG Zhizhuo¹, MA Junxia^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protect, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Water control has always been a critical aspect of national governance and stability. China's modern water control efforts have entered a new historical phase, requiring more advanced research. Summarizing the research progress on China's modern water control and accurately identifying key future research tasks are crucial for advancing the water conservancy modernization. By outlining the main development of ancient and modern water control in China, the research progress on modern water control was summarized in terms of significant theories, key methods, and representative practices. Addressing future development needs in water control, this paper identifies key research frontiers for modern water control in China, including national macro water strategies, micro water scientific issues, integrated monitoring systems, smart simulation systems, intelligent service systems, water science research related to ecology, water disaster prevention and control, and efficient water utilization.

Key words: modern water control; water control history; water conservancy modernization; research progress

“水利”是中国特有词汇,早在2000多年前,《史记·河渠书》就对“水利”进行了内涵解析。现代以来,我国水利事业快速发展,在多个治水领域取得显著成就,对国民经济提供了基础性支撑作用。现阶段,我国正处于全面高质量发展转型的关键时期,水利事业发展亦处于新的历史方位,对各项治水工作提出了更高要求^[1]。因此,梳理我国古代和近代治水发展主线和治水经验,总结现代治水研究进展并提出研究展望,对推动新阶段水利高质量发展具有重要意义。

我国学者对中国古代和近代治水历史开展过系统性探讨,涵盖了黄河、淮河、海河、长江、太湖等重要河湖的治理历程,形成的代表性成果为现代治水事业发展提供了重要参考^[2-3]。治水研究综述方面,

大多数文献聚焦于水循环^[4]、水沙调控^[5]、水文遥感^[6]、水灾害模拟^[7]、生态水工技术^[8]、水资源优化配置^[9]、水资源可持续利用^[10]等特定治水领域研究成果的总结梳理,少有文献从理论、方法和应用实践方面对我国现代治水研究进展展开论述。我国几千年的古代治水历史和快速的现代治水发展历程,其中有经验也有教训。本文基于大量文献调研,在水利高质量发展新阶段背景下,通过对我国现代治水研究进展的总结,凝练治水发展规律、积累治水技术经验、展望治水研究需求,以期为我国当前及未来一段时期治水事业的战略性规划提供借鉴。

1 历史治水发展脉络

我国自古以来重视水利,源远流长的治水历史

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211301);国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn

是中华文明的瑰宝,在世界水利史上享有独特地位。中华民族至今从未中断过对治水事业的探索,在治水理论方法和应用实践方面取得了显著成就,很多历史治水经验在现代治水研究中仍发挥着重要参考价值。梳理古代和近代治水发展主要脉络和代表性治水事件,可为我国现代治水研究工作的开展提供历史借鉴。

规模性水事活动的出现最早可追溯至夏商周时期,主要聚焦于洪灾治理、农田水利、航运工程三方面。大禹“疏而不堵、因势利导”的治水理念是中国洪灾治理的早期典范,也标志着中国古代治水历史的开端;农田水利发展体现为西周井田沟洫制度、春秋孙叔敖修筑期思陂引灌工程、战国西门豹修通引漳十二渠等;航运事业的代表则是春秋的邗沟、战国的鸿沟等人工运渠。秦、汉及三国两晋南北朝时期,治水理论与实践得以较快发展,从黄河流域至江淮流域,在防洪治河、灌溉排水、水运交通等方面均取得了卓越成就。都江堰、郑国渠和灵渠体现了古代杰出水利工程建设理念和技术水平;西汉贾让提出“治河三策”,为后世治黄工作提供了借鉴;西汉关中诸渠和宁蒙灌区的出现、东汉淮河水利和鉴湖水利的发展、曹魏时期江淮屯田水利的兴盛,是农田水利快速发展的体现;长安漕渠、洛阳漕渠、淮泗水道等多条通往政治中心的水运路线畅达相通,共同构成秦汉东西大运河,是水运事业发展的代表。此外,两汉和魏晋时期出现了《史记·河渠书》《汉书·沟洫志》《水经注》等代表性水利著作,为后代治水提供了重要参考。隋、唐、宋、元、明时期,治水理论和技术不断推陈出新。隋唐大运河是隋唐时期水利工程的代表,发挥了显著的南北通航效益;宋代对黄河水患治理、农田水利灌溉和城市供水技术进行了广泛讨论和实践,一些重要河工技术得以发展并延续至今;元明时期京杭大运河的修建是人类水利史的奇迹,奠定了中国南北水运线路的基本格局。该时期涌现了郭守敬、贾鲁、潘季驯等著名治水专家,“疏塞并举,先疏后塞”“筑堤束水,以水攻沙”等经典的治黄方略沿用至今。清朝和民国时期,治水事业有所衰落,但该时期也不乏著名水利人物出现,清初有靳辅、陈潢主持对黄、淮、运三河的协同治理,治河功绩卓越;民国李仪祉提出“上中下游并重”的黄河治水新方向,是近代黄河系统治理思想的开拓者。

2 现代治水研究进展

2.1 现代治水理论研究

a. 水循环理论。水循环是人水系统的纽带,也

是一切治水活动的基本遵循^[11]。自然界的水始终处于周而复始的循环过程,我国对水循环现象的记载最早可追溯到战国时期的《黄帝内经·素问》,即“地气上为云,天气下为雨”。经过数千年的持续探索,现代对水循环过程和机理已有较为清晰的认知,不再局限于单一的自然水循环,社会水循环相关理论也在逐渐发展^[12]。现阶段对水循环的探讨大多聚焦于气候变化、人类活动等变化环境对水循环过程的影响,水循环基本理论和模拟方法得以持续完善。

b. 水沙调控理论。水沙调控理论起源于我国对黄河的治理,明朝潘季驯面对黄河下游河道泥沙淤积难题,扭转了“疏水为主”的基本治黄策略,提出了“束水攻沙”的治黄思想,直至现代依然是黄河下游水沙调控的基本策略。近几十年来黄河水沙条件发生了很大变化,现代水利科技工作者对河流水沙调控理论、模式和策略开展了深入研究^[13-14],黄河水沙关系得到明显改善。现阶段我国黄河水沙调控整体布局已基本完成,但水沙调控理论体系仍需持续完善以适应动态变化的河流水沙关系^[15]。

c. 水资源可持续利用理论。该理论促进了我国从工程水利向资源水利的转变,对我国现代治水事业发展作出了突出贡献。对水资源可持续利用的探讨起源于20世纪90年代,1987年“可持续发展”的概念被正式提出,1996年联合国教科文组织对可持续水资源管理进行了定义^[16]。2000年前后,可持续发展思想被纳入我国治水实践,我国学者对水资源可持续利用开展了深入研究^[17-18]。2010年之后,针对基本原理的研究逐渐减少,但理论探讨范围显著扩大^[19]。面向我国现代治水发展需求,水资源可持续利用理论派生出了最严格水资源管理、水资源刚性约束等重要治水制度,对水资源规划和管理工作产生了深远影响。

d. 人水和谐理论。“人水和谐”理念自21世纪初开始出现在我国现代治水实践中,2005年成为新时期治水思路的核心内容后,我国学者围绕“人水和谐”的治水思想开展了广泛探讨^[20],2019年人水和谐论体系基本建成^[21]。人水和谐论作为研究复杂人水关系以实现人水和谐目标的知识体系,现阶段已发展较为成熟,但对其基本原理和数学基础的探讨仍在持续扩展,这是对人水和谐理论体系的进一步深入和完善。

e. 水旱灾害防御理论。水旱灾害防御长久以来是我国治水的重要主题。20世纪80年代之前,我国水灾害治理基本遵循“工程防御为主”的理念^[22]。20世纪80年代至21世纪初期,水旱灾害防

御理论研究向“工程措施与非工程措施相结合”转变^[23],颁布实施了《中华人民共和国防汛条例》《中华人民共和国防洪法》等系列法规制度。21 世纪以来,我国先后提出防汛抗旱“两个转变”和“两个坚持、三个转变”防灾减灾救灾理念,确立了“以水利工程防洪抗旱调度为核心,强化水旱灾害防御行业管理”的系统治理思路^[24],形成了具有中国特色的水旱灾害防御理论研究成果。

f. 水生态文明建设理论。“河流近自然治理”“河流生态修复”等与水生态文明紧密相关的理论探讨最早出现在 20 世纪 30 年代,几十年来一直是备受关注的话题^[25]。“水生态文明”的正式提出则是在 2013 年水利部发布的《关于加快推进水生态文明建设的意见》中。此后,水生态文明建设成为我国现代治水工作的重要内容^[26],标志着我国治水事业进入“生态水利”阶段。有关学者对水生态文明建设的探讨涉及理论基础、关键问题、技术框架、实施路径等诸多方面,研究成果为我国现代治水发展提供了重要参考。近几年相关研究的侧重点逐渐从理论探讨向实际应用转变,以适应未来治水事业的智慧发展需求。

g. 区域水平衡理论。实现健康的区域水平衡是我国现代治水事业的关键目标和需求。现阶段区域水平衡相关理论探讨大多聚焦于水量平衡和水资源配置^[27]。在此基础上,部分学者开始从水收支、供需水、人水关系等多维视角对区域水平衡理论进行系统阐释^[28-29],提出了区域水平衡的基本原理,构建了理论体系框架,并设计了区域水平衡度量方法^[30]。区域水平衡理论体系虽已初步形成,但其理论基础和基本理论仍需不断发展以支撑国家水网布局、智慧水利建设等现代治水需求。

h. 水经济学理论。水经济研究水系统与经济系统的价值转换规律,是对水资源和涉水空间潜在价值的创造、转化与实现。水经济学理论在 21 世纪以来得以快速发展完善,2021 年联合国《世界水发展报告》主题即为“水的价值”,对水经济相关的理论方法进行了系统归纳^[31]。我国对水经济理论的探讨起步较晚,现有文献大多聚焦于水经济价值评估、调水效益分析、水资源定价策略等方面^[32-33],相关成果对发展我国水经济新业态具有参考价值。

i. 水利高质量发展理论。水利高质量发展是现阶段我国水利事业所处的历史方位,近几年我国学者已对水利高质量发展的定义内涵、判别准则、战略思路、实施路径等进行了深入探讨^[34-35],相关成果对现代治水工作的开展提供了重要理论参考。特别地,南水北调后续工程高质量发展受到广泛关

注^[36],这是水利高质量发展理论在水利工程规划设计和调度管理研究中的具体体现。

2.2 现代治水方法研究

a. 模拟模型方法。模拟模型作为探索人水系统复杂过程的有效手段,在我国现代治水研究中得到快速发展,已自主研发了分布式水文模型、水动力学模型、水质模型、河流泥沙模型等多领域的模型。其中,新安江模型是我国在流域产流机制和概念性水文模型领域的原始创新,随着 3S 技术的发展应用,基于新安江模型的分布式模拟也成为后续探索和发展的重要方向^[37];流溪河模型作为国内代表性水文模型之一,近年来在典型河流水文过程模拟、入库洪水预报、城市化流域洪水预报、山洪地质灾害预报等领域得到了适应性发展和应用^[38];分布式水文模型 WEP-L 经过不断发展,现已耦合了水质、水沙、生态水文、冰川水文等一系列功能模块^[39];此外,在分布式水文模型中嵌入物质循环过程方程、生物过程方程和人文过程方程的分布式人水关系模型(DHWR 模型)也在持续发展完善,以适应复杂人水系统的动态模拟需求^[40]。

b. 系统分析方法。时间序列分析、空间相关分析、多变量回归分析、综合评估分析以及系统动力学等系统科学和统计学领域的经典分析方法在我国治水研究中应用广泛,逐渐发展衍生出了水文序列预测模型、水污染源解析模型、降雨-径流关系分析模型、人水和谐评估模型等系统分析方法,有力推动了水科学多学科交叉融合研究^[12]。此外,近年来以人工神经网络、支持向量机、随机森林、贝叶斯网络等机器学习模型为代表的驱动驱动分析方法在治水研究中得以大规模开发运用^[41],在径流模拟、水质预测、洪水预警、风险评估等方面对传统物理机制模型形成了有效补充^[42-43]。

c. 优化调控方法。水资源优化配置是优化调控方法在我国现代治水研究中的重要体现。我国水资源配置方法在几十年间实现了从水量为主的单目标优化到集成“量-质-效”的多目标优化的转变,配置范围也从以水利工程为单元发展为区域、流域、跨流域配置等不同空间尺度^[27]。遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等智能优化算法在近几年的快速应用拓展为复杂系统的优化求解提供了有效支持,也为未来更大规模、更高精度的水资源优化配置模型构建提供了可能。此外,人水关系和谐调控也是优化调控的代表性方法,在跨界河流分水方案制定、水库群联合调度、抗洪抗旱应急调度等治水实践中得以发展^[11]。

d. 治水工艺方法。现代水工程建设技术、工农业

生产节水工艺、水生态修复技术、水污染治理技术等重要工艺技术方法在我国治水中得到显著发展。经过几十年研究探索,我国在高坝施工技术、大体积混凝土温控工艺、巨型水轮机组发电工艺等方面已处于世界领先水平。节水技术升级改造是现阶段工业节水补短板的首要途径,高水效农业是我国农业发展的重点研究方向^[44]。生态水利工程主导的人工修复和生物生态治理主导的自然修复在我国已是相对成熟的两类水生态修复技术,水污染治理技术已涵盖了物理作用、化学反应、生物治理以及集成治理等多种治理方式^[11]。

e. 信息技术方法。21 世纪以来我国水利信息技术发展迅速,为智慧水利建设提供了必要的科技支撑。近几年我国水利科技工作者对以物联网、云计算、区块链、数据挖掘为代表的新一代信息通信技术进行了大量优化和应用探索,研发了水信息立体感知、数据同化和信息融合、数据推演和智能决策等重要水利信息技术,在水循环精准模拟、水灾害风险评估、水工程安全检测、水行政智慧管理等现代治水工作中得到应用^[45],促进了信息技术和水科学研究的深度融合,显著提升了治水业务的智慧化水平。

2.3 现代治水应用实践

a. 水资源规划管理。全国及各省区市水资源规划编制、跨流域调水工程论证、跨界河流分水方案研制、节水型社会建设等均是现代治水在水资源规划管理方面的代表性应用实践。现阶段对大型跨流域调水工程的研讨主要集中于南水北调西线工程论证^[46],从人水关系学的视角开展调水工程的系统论证是该问题的合理解决途径。跨界河流分水方案制定问题同样得到广泛研究,比如黄河分水方案^[47]。

b. 水生态保护修复。一系列生态保护修复工程的设计论证和效益评估也是相关学者关注的焦点。黄河下游综合治理^[48]、白洋淀生态补水工程、太湖流域综合治理、深圳城市水体治理、盘锦湿地保护与修复、华北平原地下水超采治理、三江源水源地保护、黄土高原淤地坝建设等都是我国现代治水在水生态保护修复方面的应用实践典型案例。

c. 水灾害科学防控。三峡、小浪底、南水北调等重要水利工程建设运营极大缓解了洪涝干旱发生风险,长江上游水库群、黄河干流水库群、珠江流域水库群等代表性联合调度案例,已成为水旱灾害防御的代表性应用实践^[49],我国学者对上述工程的防灾策略、调度方案、综合效益、生态影响等方面开展了广泛探讨。尤其进入智慧水利阶段以来,依托于流域和城市防灾减灾体系相关研究成果^[50-51],针

对洪涝灾害的预报、预警、预演、预案“四预”业务体系在各级水利部门逐渐应用并发展完善,水灾害科学防控能力显著提升。

d. 水利现代化建设。我国水利现代化进程体现在智慧水利建设、现代化灌区建设、农村供水体系建设等多个方面。国内学者对智慧水利的发展路径、建设重点、技术体系等内容开展了广泛探讨^[52],部分研究成果已应用于智慧水利建设具体实践。内蒙古河套灌区、新疆石河子灌区、黑龙江三江平原灌区的现代化改造在灌溉技术和智能系统升级等方面已取得显著成效。近几年我国农村供水工程建设成效斐然,但受条件限制,农村供水问题仍然是现代治水应用实践研究的难点。

e. 水文化科普教育。对优秀水文化的保护、传承和弘扬是现代治水事业的关键内容,近年来我国治水实践对水文化科普教育的重视程度持续提升。水利风景区和水利主题公园的建设是水文化保护传承的有效途径,截至目前水利部已公布了 972 处国家水利风景区,已有学者从水文化的角度对水利风景区建设开展了针对性研究^[53]。此外,“世界水日·中国水周”主题宣传、水文化主题展览、水灾害安全知识普及等活动也是现阶段我国水文化科普教育的重要应用实践,相关学者从宏观和微观尺度对水文化科普教育的传播途径进行了专门论述^[54]。

3 现代治水研究展望

基于对我国古代和近代治水发展历程的总结,结合对现代治水理论方法研究和实践应用进展的梳理,面向 21 世纪中叶前我国治水发展趋势和需求,提出现代治水研究展望框架如图 1 所示。

3.1 国家水战略宏观研究

国家重大战略是我国现代治水事业发展的基本遵循,治水工作只有与现阶段国家宏观战略积极对接才能更充分地发挥治水效益。

a. 人与自然和谐共生的水利现代化建设研究。人与自然和谐共生是中国式现代化的基本特征,新时期我国水利现代化建设需坚持人与自然和谐共生理念。理论上,研究人与自然和谐共生理论体系,形成人与自然和谐共生的水利现代化建设框架。方法上,开展特定领域技术方法的科学攻关和优化改良,形成水利现代化建设技术方法体系,回答人与自然和谐共生理念如何指导未来水利现代化建设。实践上,从工程建设、投资融资、政策设计、管理机制、服务体系等具体方面开展水利现代化建设研究,回答人与自然和谐共生理念如何融入水利现代化建设具体实践。

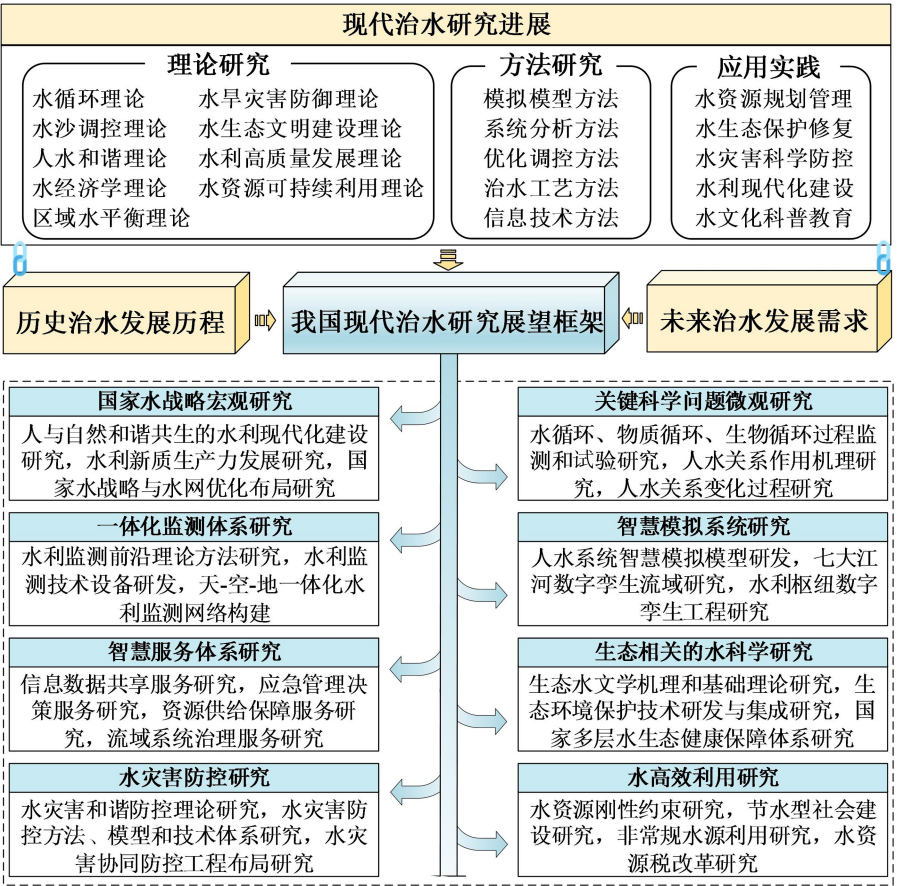


图1 我国现代治水研究展望框架

b. 水利新质生产力发展研究。水利新质生产力是符合新发展理念的先进水利生产力质态,发展水利新质生产力是现阶段我国水利高质量发展的内在要求。在进一步完善水利新质生产力理论框架和方法体系基础上,从水资源开发与利用、水生态修复与治理、水安全保障与管控、水工程建设与运维、水信息监测与模拟、水文化保护与传承等方面研究部署水利新质生产力具体实施路径,把发展水利新质生产力真正落实到我国现代治水事业的全过程各个领域。

c. 国家水战略与水网优化布局研究。结合国家重大规划,持续开展国家水战略宏观研究,重点开展南水北调西线工程方案论证、黄河流域生态保护和高质量发展、“双碳”目标下水系统碳减排调控等关键领域研究。此外,综合考虑国家水网骨干工程在跨区域调水、供水灌溉、防洪减灾等方面的建设需求,以统筹解决水资源、水生态、水灾害问题为导向,需要从理论基础、方法技术和支撑体系等方面开展国家水网优化布局的系统研究。理论基础研究包括国家水网建设的指导性、基础性和应用性理论;方法技术研究包括水网优化布局方法、水网运行维护方法、工程施工技术和非工程预测预报技术等;支撑体系研究包括供水保障体系、防洪减灾体系、水生态保

护体系等重点内容。

3.2 关键科学问题微观研究

开展关键科学问题的微观研究和针对性突破是现代治水事业发展的推动力,我国现代治水面临着不同领域的具体科学问题需进一步研究。

a. 水循环过程、物质循环过程、生物循环过程监测和试验研究。主要包括气候-生态-水文耦合机理、全球变化下降水-蒸发-径流演变机制和可预测性、污染物迁移转化机制和生态毒理效应、生物地球化学循环过程监测与模拟等关键科学问题的科技攻关。

b. 人水关系作用机理研究。明确的作用机理是研究人水关系的基础,也是所有治水活动开展的先决条件。关键科学问题包括用水行为对地区水资源承载的影响机理、水利工程布局对河流水量水质的影响机理、水环境对人体健康的影响机理、气候变化对粮食产量的影响机理等。

c. 人水关系变化过程研究。清晰的人水关系变化过程是开展治水研究的重要切入点,关键科学问题包括城市化与水循环过程变化,水利工程修建伴随的天然径流、水质、水生态过程变化,干旱区绿洲面积与水资源关系变化,生态修复措施伴随的水文过程变化等。

3.3 一体化监测体系研究

完善的水利监测体系是一系列现代治水活动开展的前提,也是我国智慧水利和水利现代化建设的重要基础条件。

a. 水利监测前沿理论方法研究。传统的水利基础监测理论方法已难以适应近年来我国快速扩张的水利现代化建设需求,需深化水利监测领域科技攻关,扩展水利监测前沿理论方法。重点开展水利监测在实时感知、数据传输、图像处理、风险识别等方面的前沿理论创新和方法突破。

b. 水利监测技术设备研发。重点包括监测技术推广应用、监测设备自主研发两方面。充分利用卫星、雷达、无人机、水下机器人等监测手段增强水利遥感数据的获取和处理能力,推动水利监测技术应用便捷化、水利监测数据服务公益化发展。结合3S技术、人工智能、5G通信等高新技术,加大自主知识产权水利监测设备研发力度,为我国现代化水利监测网络构建提供设备支持。

c. 天-空-地一体化水利监测网络构建。基于水利监测前沿理论方法,结合配套技术设备支持,在现有监测站网基础上扩展构建涵盖高空、低空、地表、水下4个空间维度的天-空-地一体化水利监测网络,为我国治水活动的开展提供自主信息源保障。重点开展高空全天候监测研究、低空定期巡查监测研究、地表多方位实时监测研究以及水下多介质传感监测研究。

3.4 智慧模拟系统研究

智慧模拟系统是水利数字孪生的中枢,开展现代化水利智慧模拟系统研究能够为我国智慧水利建设提供强力驱动。

a. 人水系统智慧模拟模型研发。以人水系统精细化数字场景为底板,以干支流水系和全覆盖交通网为脉络,以大中型水利枢纽和建筑聚集区为节点,研发人水系统智慧模拟模型,实现对人水系统的多维度精准仿真模拟。具体模拟功能包括但不限于水循环模拟(降雨径流、水沙输移、土壤侵蚀、配置调度等)、灾害模拟(自然灾害、工程灾害、突发事件等)、污染模拟(水污染、土壤污染、大气污染等)以及城市化模拟(人口增长、城市扩张、土地利用等)。

b. 七大江河数字孪生流域研究。在现有数字孪生流域建设成果基础上,继续深化长江、黄河、淮河、海河、珠江、松辽、太湖流域的数字孪生流域研究,重点研究智能基础设施布局、七大江河数据底板扩展、数字孪生模型平台升级等关键问题。此外,集成水文、水资源、水工程、泥沙动力学等专业模型,提高数字孪生流域对防洪调度、水资源调配、水生态调

节等现实过程的模拟精度,在数字孪生流域建设中突出七大江河特色和实用价值,真正提升新阶段我国治水业务的智能化水平。

c. 水利枢纽数字孪生工程研究。持续推动BIM技术在水利工程全生命周期的应用研究,开展三峡、小浪底、南水北调、万家寨、丹江口等大型水利枢纽的数字孪生工程模型开发和升级。重点研究防洪发电、调水调沙、跨域调水、引水灌溉、航运养殖等功能的可视化模拟,将上述实体工程的治水业务功能在数字孪生工程中进行全面、精确、动态体现,全面推动重大水利枢纽运行和管理的数字化转型。

3.5 智慧服务体系研究

智慧服务体系是智慧水利建设的具体业务落脚点,各项智慧水利建设任务离不开智慧服务体系提供的目标导向。

a. 信息数据共享服务研究。应将其定位为智慧服务体系的基础性业务,重点研究信息数据共享服务平台搭建方法,涵盖数据查询、信息共享、模型调用、数据分析等具体服务内容。水利科技工作者可通过该平台获取多源数据、运行模拟模型、分析结果信息,提升水科学研究效率。

b. 应急管理决策服务研究。智慧服务体系是面向防灾减灾需求的重要工具,应涵盖实时监控、风险预警、应急决策等核心服务,重点研究如何完善对暴雨、山洪、干旱、污染、地震、泥石流、山体滑坡、工程坍塌等灾害的科学预报、预警、预演、预案,全面提升业务覆盖区域的防灾能力。

c. 资源供给保障服务研究。核心服务内容为城乡智慧供水,兼顾业务覆盖区域的资源-能源-粮食安全保障。研究应聚焦民生改善和生产保障,制定偏远农村供水难题的智慧化解决方案,优化农村供水工程布局,有效推动我国城乡供水一体化建设进程。

d. 流域系统治理服务研究。涵盖水源涵养、水沙调控、生态修复、污染防控等流域治理基本服务,重点研究如何面向流域高质量发展目标、“双碳”战略目标等重大需求,提供科学治理策略和技术方案,通过系统治理服务改善流域人水关系。

3.6 生态相关的水科学研究

生态文明建设是关系中华民族永续发展的根本大计,治水事业在我国生态文明建设大局中具有先导地位,开展与生态文明建设紧密相关的水科学研究对我国现代治水发展意义重大。

a. 生态水文学机理和基础理论研究。全面解析生态水文过程是深入开展生态相关水科学研究的基础。应重点研究陆地-水生生态水文过程互馈机

理、生态水文要素对变化环境的响应机制、环境要素在水生态系统中的迁移转化规律等关键内容,进一步发展形成适用于多尺度多要素生态水文过程研究的理论体系。

b. 生态环境保护技术研发与集成研究。科学的技术方法是连接理论和实践的桥梁,应重点关注水土流失治理、面源污染治理、环境影响评估、生物多样性恢复等生态保护与修复关键技术方法的研发升级和集成应用,以现代技术革新克服传统水生态难题。

c. 国家多层水生态健康保障体系研究。水生态健康保障是国家水安全的重要组成部分,构建水生态健康保障体系也是生态相关水科学研究的重点任务。应根据水生态健康保障需求研判一级流域、流域等不同层级的水生态健康准则,诊断水生态健康关键问题,探索集监测、评估、调控、管理等功能为一体的国家多层水生态健康保障体系。

3.7 水灾害防控研究

精准有效地防控极端水旱灾害是新阶段水利高质量发展的重要需求,如何科学应对新时期水灾害防控面临的新机遇和挑战是我国现代治水研究需要回答的问题。

a. 水灾害和谐防控理论研究。水灾害防控是一项系统性治水活动,需融合多学科知识开展理论研究。可以结合人水和谐论、人水系统论、人水控制论等理论,从人水关系学的视角审视水灾害,探讨新时期水灾害和谐防控战略思路,实现洪涝干旱防御、生态环境保护、经济社会发展之间的和谐平衡。

b. 水灾害防控方法、模型和技术体系研究。方法方面,开展水科学领域方法交叉研究,完善水灾害和谐防控方法体系。模型方面,面向水灾害模拟需求开展物理机制模型、数据驱动模型、风险评估模型的集成研发。技术方面,开展雷达、遥感、物联网、空间信息、大数据推演等关键技术在水灾害防控领域的适应性改进研究。通过持续深化水灾害模拟模型和方法技术体系,尽可能降低极端水旱灾害的不确定性。

c. 水灾害协同防控工程布局研究。科学合理的工程布局是实现水灾害协同防控的关键。基于水灾害和谐防控理论,结合水灾害防控方法模型和技术体系,着重开展流域和城市防洪工程总体规划、控制性枢纽工程建设论证、蓄滞洪区优化布局等研究,形成水灾害协同防控工程布局,以提升重点区域对极端水灾害的风险化解能力。

3.8 水高效利用研究

我国特殊的国情水情决定了现代治水工作要始

终坚持以节水为优先,全面提高资源利用效率。开展水高效利用研究仍然是我国治水发展最基本、最核心的研究需求。

a. 水资源刚性约束研究。水资源刚性约束制度是对“节水优先”治水思路的有效落实,也是水资源节约集约利用的具体体现。河流断面的基本生态流量研判、地表水和地下水可开采量指标划定、水资源约束下的产业结构布局等关键研究任务仍需持续开展。此外,根据不同区域主体功能定位和水资源禀赋条件,制定水资源分区管理方案也是水资源刚性约束研究需重点解决的问题。

b. 节水型社会建设研究。我国节水型社会建设已初见成效,但仍需针对工农业节水增效、城镇节水降损、灌区现代化改造等关键问题开展集中研究。重点研究领域应包括高标准农田建设、农业种植结构优化、现代化灌区建设、工业节水改造、节水型城市规划、水循环梯级利用、节水监管机制探索等。

c. 非常规水源利用研究。强化非常规水源利用有助于缺水地区节水开源,提升水安全保障能力。在对污水资源化利用前沿技术方法进行研发突破和应用推广的基础上,应重点研究雨水、海水、再生水、苦咸水等非常规水源的多元利用模式,制定包含非常规水源的水资源统一配置方案。

d. 水资源税改革研究。合理的水资源税改革措施能够充分发挥税收调节和价格杠杆优势,助力节水目标实现。应结合经济学原理持续深入开展水资源税改革研究,完善水资源计税制度,通过税收措施建立水资源产品价值实现机制。此外,水权市场化交易制度仍需探索完善,以充分利用市场机制促进水资源高效利用。

4 结 语

本文从理论研究、方法研究、应用实践三方面总结了我国现代治水研究进展,面向现阶段我国治水发展趋势和需求,从国家宏观水战略、微观科学问题、一体化监测体系、智慧模拟系统、智慧服务体系、生态相关的水科学研究、水灾害防控、水高效利用等方面对未来治水研究的若干热点方向进行了研判,可为我国后续治水研究工作提供参考。

我国治水历史源远流长,现代治水成绩斐然,本文对古代和近代治水发展历程的总结梳理只是浅析其发展主线,对现代治水丰富的研究进展总结也难以全部涵盖治水理论方法和应用实践的代表性成果。最后,笔者基于对我国未来治水的思考和理解提出了研究展望,敬请广大学者提出宝贵意见,共同推动我国现代治水事业高质量发展。

参考文献:

[1] 左其亭,秦西,马军霞. 水利新质生产力:内涵解读、理论框架与实施路径[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 1-8. (ZUO Qiting, QIN Xi, MA Junxia. New quality productivity of water conservancy: connotation interpretation, theoretical framework and implementation path[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 1-8. (in Chinese))

[2] 姚汉源. 中国水利史纲要[M]. 北京:水利电力出版社, 1987.

[3] 程晓陶. 解读治水历史 把握发展趋向[J]. 中国防汛抗旱, 2007(2): 8-15. (CHENG Xiaotao. Interpreting the history of water control and grasping development trends [J]. China Flood & Drought Management, 2007(2): 8-15. (in Chinese))

[4] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))

[5] 胡春宏. 我国泥沙研究进展与发展趋向[J]. 泥沙研究, 2014(6): 1-5. (HU Chunhong. Advancement and tendency of sediment research in China [J]. Journal of Sediment Research, 2014(6): 1-5. (in Chinese))

[6] 傅国斌,刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 547-559. (FU Guobin, LIU Changming. Advances in applications of remote sensing data to hydrology [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 547-559. (in Chinese))

[7] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))

[8] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等. 生态水工学进展与展望[J]. 水利学报, 2014, 45(12): 1419-1426. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Progress and prospect of eco-hydraulic engineering [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(12): 1419-1426. (in Chinese))

[9] 王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123-128. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 123-128. (in Chinese))

[10] 左其亭. 水资源可持续利用研究历程及其对我国现代治水的贡献[J]. 地球科学进展, 2023, 38(1): 1-8. (ZUO Qiting. Research on sustainable utilization of water resources and its contribution to modern water control in China [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(1): 1-8. (in Chinese))

[11] 左其亭. 人水关系学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2023.

[12] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1219-1226. (in Chinese))

[13] 胡春宏,张双虎,张晓明. 新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 122-130. (HU Chunhong, ZHANG Shuanghu, ZHANG Xiaoming. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 122-130. (in Chinese))

[14] 王远见,江恩慧,张翎,等. 黄河流域全河水沙调控的可行性与模式探索[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 46-51. (WANG Yuanjian, JIANG Enhui, ZHANG Ling, et al. Exploration on the feasibility and mode of the whole river water and sediment regulation in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2020, 42(9): 46-51. (in Chinese))

[15] 王光谦,钟德钰,吴保生. 黄河泥沙未来变化趋势[J]. 中国水利, 2020(1): 9-12. (WANG Guangqian, ZHONG Deyu, WU Baosheng. Future trend of Yellow River sediment changes [J]. China Water Resources, 2020(1): 9-12. (in Chinese))

[16] LOUCKS D P. Quantifying trends in system sustainability [J]. Hydrological Sciences Journal, 1997, 42(4): 513-530.

[17] 夏军. 可持续水资源系统管理研究与展望[J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 370-376. (XIA Jun. Advances in management of sustainable water resource systems [J]. Advances in Water Science, 1997, 8(4): 370-376. (in Chinese))

[18] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论[J]. 水利水电技术, 2002, 33(1): 15-19. (LIU Changming. Discussion on some problems of China's water resources in 21st century [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(1): 15-19. (in Chinese))

[19] WANG Mengru, JANSSEN A B G, BAZIN J, et al. Accounting for interactions between sustainable development goals is essential for water pollution control in China [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 730.

[20] 邓铭江. 干旱区人水和谐治水思想的探讨[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 163-169. (DENG Mingjiang. Water control thoughts based on man-water harmony at inland

- river basins in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(2):163-169. (in Chinese))
- [21] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1):135-144. (ZUO Qiting. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1):135-144. (in Chinese))
- [22] 左其亭,程琰,马军霞. 水灾害和谐防控与智慧模拟研究框架与展望[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2):15-21. (ZUO Qiting, CHENG Yan, MA Junxia. Research framework and prospect of harmonious prevention and control and intelligent simulation of water disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):15-21. (in Chinese))
- [23] 程晓陶. 加强水旱灾害管理的战略需求与治水方略的探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(10):1197-1203. (CHENG Xiaotao. Strategic demand for enhancing flood and drought management and investigation on policies of water governance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10):1197-1203. (in Chinese))
- [24] 田以堂. 我国水旱灾害防御工作成就辉煌[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10):1-5. (TIAN Yitang. Great achievements in the prevention of flood and drought disasters in China [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10):1-5. (in Chinese))
- [25] 倪晋仁,刘元元. 论河流生态修复[J]. 水利学报, 2006, 37(9):1029-1037. (NI Jinren, LIU Yuanyuan. Ecological rehabilitation of damaged river system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(9):1029-1037. (in Chinese))
- [26] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. 中国水利, 2013(4):1-3. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. China Water Resources, 2013(4):1-3. (in Chinese))
- [27] 王浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016, 47(3):265-271. (WANG Hao, YOU Jinjun. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):265-271. (in Chinese))
- [28] 张建云,胡庆芳,王银堂,等. 区域水平衡与健康水平衡实现路径[J]. 水科学进展, 2023, 34(3):323-335. (ZHANG Jianyun, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Regional water balance and the path to healthy water balance[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(3):323-335. (in Chinese))
- [29] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2):165-173. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JIN Junliang, et al. The basic principle and theoretical system of regional water balance [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2):165-173. (in Chinese))
- [30] 左其亭,吴青松,纪义虎,等. 区域水平衡及失衡程度度量方法[J]. 水利学报, 2024, 55(1):1-12. (ZUO Qiting, WU Qingsong, JI Yihu, et al. Methods for measuring regional water balance and imbalance degree [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(1):1-12. (in Chinese))
- [31] UNESCO. The United Nations world water development report 2021:valuing water[R]. Paris:UNESCO, 2021.
- [32] 赵建世,王忠静,翁文斌. 水资源系统整体模型研究[J]. 中国科学:E 辑 技术科学, 2004, 34(增刊1):60-73. (ZHAO Jianshi, WANG Zhongjing, WENG Wenbin. Research on the holistic model of water resources systems [J]. Science in China:Series E Technological Sciences, 2004, 34(Sup1):60-73. (in Chinese))
- [33] 甘泓,秦长海,汪林,等. 水资源定价方法与实践研究 I:水资源价值内涵浅析[J]. 水利学报, 2012, 43(3):289-295. (GAN Hong, QIN Changhai, WANG Lin, et al. Study on water pricing method and practice I: discussion on the connotation of water resources value[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3):289-295. (in Chinese))
- [34] 左其亭,钟涛,张志卓,等. 水利高质量发展的判别准则及评价体系[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5):109-117. (ZUO Qiting, ZHONG Tao, ZHANG Zhizhuo, et al. Discriminant criteria and evaluation system of high-quality development of water conservancy [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022, 33(5):109-117. (in Chinese))
- [35] 赵钟楠,姜大川,李原园,等. 流域层面水利高质量发展的战略思路[J]. 水利规划与设计, 2020(10):18-21. (ZHAO Zhongnan, JIANG Dachuan, LI Yuanyuan, et al. Strategic thinking on high quality development of water resources at river basin level [J]. Water Resources Planning and Design, 2020(10):18-21. (in Chinese))
- [36] 许继军,曾子悦. 适应高质量发展的南水北调工程水资源配置思路与对策建议[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10):27-32. (XU Jijun, ZENG Ziyue. Towards high-quality development: ideas, strategies and suggestions for water resources allocation of the South-to-North Water diversion project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10):27-32. (in Chinese))
- [37] 芮孝芳,凌哲,刘宁宁,等. 新安江模型的起源及对其进一步发展的建议[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):1-5. (RUI Xiaofang, LING Zhe, LIU Ningning, et al. Origin of Xin' anjiang model and its further development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4):1-5. (in Chinese))
- [38] 陈洋波,覃建明,王幻宇,等. 基于流溪河模型的中小河流洪水预报方法[J]. 水利水电技术, 2017, 48(7):12-19. (CHEN Yangbo, QIN Jianming, WANG Huanyu, et al. Liuxihe model-based method for flood forecast of medium

- and small-sized river [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (7): 12-19. (in Chinese))
- [39] 周祖昊,刘扬李,李玉庆,等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: I. “积雪-土壤-砂砾石层”连续体水热耦合模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 20-32. (ZHOU Zuhao, LIU Yangli, LI Yuqing, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: I. hydrothermal coupling simulation of “snow-soil-sand gravel layer” continuum [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 20-32. (in Chinese))
- [40] 左其亭. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 1-12. (ZUO Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 1-12. (in Chinese))
- [41] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science[J]. Nature, 2019, 566(7743): 195-204.
- [42] HUANG Ruixing, MA Chengxue, MA Jun, et al. Machine learning in natural and engineered water systems [J]. Water Research, 2021, 205: 117666.
- [43] ZHI Wei, APPLING A P, GOLDEN H E, et al. Deep learning for water quality[J]. Nature Water, 2024, 2(3): 228-241.
- [44] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技: 发展高水效农业 保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5. (KANG Shaozhong. Store grain in water and technology: development of highly-efficient agricultural water use for ensuring national food security [J]. China Water Resources, 2022(13): 1-5. (in Chinese))
- [45] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 1-7. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang. Understanding and thinking of smart water conservancy [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 1-7. (in Chinese))
- [46] 赵勇,王浩,邓铭江,等. 黄河几字弯水网: 南水北调西线配套东延工程构想[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1015-1024. (ZHAO Yong, WANG Hao, DENG Mingjiang, et al. Jiziwan water network in the Yellow River Basin: conceptualizing the east extension project of the west route of the South-to-North Water Diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(9): 1015-1024. (in Chinese))
- [47] 左其亭,吴滨滨,张伟,等. 跨界河流分水理论方法及黄河分水新方案计算[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 37-45. (ZUO Qiting, WU Binbin, ZHANG Wei, et al. A method of water distribution in transboundary rivers and the new calculation scheme of the Yellow River water distribution [J]. Resources Science, 2020, 42(1): 37-45. (in Chinese))
- [48] 张金良,仝亮,王卿,等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 41-49. (ZHANG Jinliang, TONG Liang, WANG Qing, et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 41-49. (in Chinese))
- [49] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 496-503. (GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 496-503. (in Chinese))
- [50] 夏军,占车生,曾思栋,等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505-514. (XIA Jun, ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505-514. (in Chinese))
- [51] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [52] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 智慧水利解析[J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1355-1368. (JIANG Yunzhong, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Analysis of smart water conservancy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1355-1368. (in Chinese))
- [53] 周波,谭徐明,王茂林. 水利风景区水文化遗产保护利用现状、问题及对策[J]. 水利发展研究, 2013, 13(12): 86-90. (ZHOU Bo, TAN Xuming, WANG Maolin. Status, problems and countermeasures of protection and utilization of water culture heritage in water conservancy scenic areas [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(12): 86-90. (in Chinese))
- [54] 贾兵强. 新常态下我国水文化研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 201-208. (JIA Bingqiang. Review of the new normal research on water culture [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 201-208. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-05-14 编辑: 熊水斌)