

“双碳”背景下生态水文学的研究与展望

夏 军^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072, 武汉;

2. 武汉大学水安全研究院, 430072, 武汉)

摘要:在“双碳”目标背景下,全球气候变化与碳减排已成为时代的核心议题。碳中和进程涉及陆地—海洋—大气之间以及与流域尺度密切相关的水循环和碳循环。作为水文学与生态学的交叉学科,生态水文学为实现碳达峰、碳中和目标提供了重要的水科学支撑。系统总结和论述了生态水文学在植被生态水文、河湖生态水文及流域生态水文等多个分支领域的主要进展。基于生态水文学的关键科学问题,提出在“双碳”目标下,生态水文学研究应聚焦于自然生态系统碳汇技术创新,包括陆地生态系统与气候相互作用、农业化与城市化的“双碳”挑战、河流水库群建设及其运行的“双碳”议题,以及面向循环经济的生态水文解决方案与基于自然的解决方案的结合。为进一步推动生态水文学交叉学科的发展,建议加强河流健康和循环经济方向的生态水文研究,建设融合自然生态系统和循环经济的城市与区域发展模式。最后,结合生态水文学学科发展战略与现实需求,展望了其未来研究方向与重点。

关键词:生态水文学;“双碳”目标;水循环与碳循环;基于自然的解决方案;循环经济

Research and prospects of ecohydrology under the “dual carbon” goals//Xia Jun

Abstract: Under the “dual carbon” goals, global climate change and carbon reduction have become central issues of our era. Achieving carbon neutrality requires addressing the interconnections of terrestrial, marine, and atmospheric water and carbon cycles, particularly at the watershed scale. As an interdisciplinary field combining hydrology and ecology, ecohydrology provides critical water science support for achieving carbon peaking and carbon neutrality. This study systematically summarizes key advancements in ecohydrology across its subfields, including vegetation ecohydrology, river and lake ecohydrology, and watershed ecohydrology. Focusing on core scientific challenges, it is proposed that future ecohydrology research within the framework of “dual carbon” goals should emphasize innovative carbon sink technologies for natural ecosystems. Key areas include land-climate interactions, the “dual carbon” challenges posed by urbanization and agricultural intensification, carbon issues related to river and reservoir construction and operations, and integrating ecohydrological approaches with circular economy and nature-based solutions. To further the development of ecohydrology as a cross-disciplinary field, the study recommends prioritizing research on river health and circular economy-oriented ecohydrology and advancing urban and regional development models that integrate natural ecosystems with circular economy principles. Finally, the paper highlights future research directions and priorities for ecohydrology, aligning with its strategic significance and practical needs.

Keywords: ecohydrology; “dual carbon” goals; water and carbon cycles; nature-based solutions; circular economy

中图分类号: P33+X143 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)01-0001-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.01.001

收稿日期: 2025-01-04

作者简介: 夏军, 中国科学院院士, 教授, 主要从事水文学及水资源研究。

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2340213)。

全球变化与碳减排是当今世界面临的两大关键议题,影响深远且复杂。全球变化不仅涉及气候变化,还涵盖土地利用和植被变化(LUCC)等多方面的环境变化。据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的系列评估报告,全球气候变化呈现出前所未有的广泛性、快速性和加强性,这不仅反映了自然因素的作用,更凸显了人为活动,特别是二氧化碳排放的显著影响。化石燃料使用和土地利用已成为主要碳源,分别贡献了86%和14%的碳排放;而大气、陆地和海洋则承担了碳汇的主要功能,吸收比例分别为46%、31%和23%。

在此背景下,中国提出了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的“双碳”目标。这一目标不仅是对全球气候治理的积极回应,也为全球环境可持续发展提供了中国方案。碳中和的实现过程高度依赖于自然过程和人为努力的协同作用,包括通过自然生态系统的固碳作用(如森林蓄积量和土壤有机碳增加)以及工程技术(如碳捕集与封存)实现净零排放。然而,碳中和不仅涉及单一碳循环过程,还贯穿于陆地、海洋和大气之间复杂而相互作用的水循环和碳循环问题中。

水循环作为联系地球多圈层的关键纽带,其过程和格局深受气候变化的影响。在全球变化的驱动下,陆地、海洋和大气间的水循环发生了显著的变化与变异,由此引发的水安全问题已成为当前国内外关注的前沿领域。这些变化对生态系统、经济社会发展以及人类生存环境的可持续性提出了巨大挑战。在此背景下,生态水文学作为生态学与水文学交叉的综合学科,不仅为揭示水循环与碳循环之间的相互作用提供了科学依据,也为实现“双碳”目标提供了创新性的技术路径与实践方案。

本文旨在通过分析生态水文学在“双碳”背景下的研究现状与发展方向,总结生态水文学在植被、河湖、流域等分支领域的最新进展,探讨其在自然碳汇技术创新、气候-生态相互作用机制及循环经济建设中的应用潜力,为推动生态水文学进一步发展、实现“双碳”目标下的河湖及陆地生态保护提供理论支持与实践参考。

一、生态水文学的发展

1. 生态水文学的内涵

生态水文学是水文学与生态学交叉的一门学科,

其学术内涵是探索与揭示形成生态格局和过程的水文学机制,目标是研究水循环过程与陆地生态系统结构和功能之间的相互作用关系,并为水资源管理和生态系统保护提供理论依据、方法和途径。

联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO-IHP)专门设立了面向全球水与生态问题的国际生态水文学计划(Ecohydrology Programme)。生态水文学被定义为一门研究水文学与生物群落及不同尺度生态系统之间相互作用的交叉性学科。生态水文学基于自然过程,致力于研发管理和解决问题的工具与途径,以增强广义景观的生态服务功能与价值,包括海岸、城市和农村等多种类型的生态环境联系的流域、区域和全球系统的可持续性。

随着生态水文学理论和方法的不断发展与完善,其应用领域日益拓展,逐渐形成了多个具有鲜明特色的研究分支。这些内容涵盖了流域生态水文过程模拟、生态需水评估、河流湿地保护与恢复、水资源管理中的生态规划与管理优化等多个方面,致力于解决特定的或系统性的生态与水文互馈问题以及相互影响与后果评价等,为应对全球气候变化、水资源短缺和生态系统退化等挑战提供了重要的理论支撑和实践指导。

2. 生态水文学的研究内容

陆地生态水文学的主要分支包括森林和植被生态水文、河湖生态水文、流域和区域生态水文、湿地生态水文、滨海生态水文、城市和农村生态水文等。以植被生态水文、河湖生态水文、流域生态水文为例进行具体阐述。

(1) 植被生态水文

植被生态水文研究“大气-植被-土壤(SPAC)”系统中的水分转化与调控机制,涵盖降水补给、植物蒸腾耗水、土壤蒸发耗水等过程。核心问题包括蒸散发与作物产量的非线性关系、植被对区域水分平衡的调节作用等。刘昌明等提出的“四水转化”“五水转化”理论,为理解一维垂向水与植被的生态水文过程相互联系与作用提供了系统框架,尤其强调了大气水、地表水、土壤水、地下水和植被水之间的动态耦合机制。

(2) 河湖生态水文

河湖生态系统是与人类居住环境关系最为密切的载体,河湖水文过程是维系生态系统的关键。河湖水文过程包括非生物过程(如沉积、输送和再悬浮,水下光环境,水化学特性,温度分层等)和生物过程(如湿地植物、藻类、底栖植物、两栖类动物、鱼类、水鸟等的

生物过程)。流域水循环联系的“水-土-气-生”以及“人-地”关系是相关联的,水循环与河湖、流域的生境及生态系统有千丝万缕的联系。例如,鱼类等水生生物的繁衍对水面宽度、水深、水体流速等河湖水文过程有特定需求,相应的,可能会与防洪工程蓄泄、灌溉、供水等需求产生矛盾。陈求稳和夏军对满足淮河流域干支流不同河流指示性鱼类和河流生态需水目标的生态水文过程进行了分析和估算,为淮河生态保护的生态需水过程提供了系统的认识和依据。

近年,在中国科学院支持下,笔者团队研发了长江模拟器,并开发了长江模拟器耦合的“江-湖关系”互动模拟与“生态调控”新技术。核心成果如下:

①研发了与长江模拟器耦合的三峡水库水流-泥沙-水质-水生态耦合模型,可分析不同调度方式下长江干流水文情势变化和三峡水库调蓄对水沙的影响。

②研发了与长江模拟器耦合的三峡调控联系的湖泊水动力水质模型和湖泊水文连通性评估模型,可分析三峡工程运行后鄱阳湖、洞庭湖两湖面积变化特征,识别气候变化及人类活动(包括三峡工程运行)对两湖湖泊面积、季节性洲滩面积变化的影响。

③研发了长江模拟器耦合的鄱阳湖鸟类栖息地评估模型,揭示了旗舰物种之一——雁类的栖息地水文特征,为精准实施鸟类栖息地保护提供了科学依据。

④研发了长江模拟器耦合的长江岸线变化及生态调控新技术,监测和识别长江岸线河漫滩及植被指数34年(1984—2018年)的演变特征;分析了长江中游河漫滩变化与江豚种群动态变化的直接关系,发现2006—2012年长江中游河漫滩的萎缩最多;建立和揭示长江干流旗舰物种——江豚的能流食物网生态水文模型和变化机理;通过长江模拟器耦合三峡水库调度等措施,提出了长江岸线河漫滩生态修复对策建议。

(3) 流域生态水文

流域生态水文以揭示生态系统内多要素的互动机理为核心,研究水文过程与植被、土壤、生物多样性等的耦合关系。程国栋等以黑河流域为典型案例,通过研究上游冰冻圈与森林、中游农田、下游荒漠之间的关联,揭示了水文过程对区域生态系统的系统性影响,为西部内陆流域的生态水文研究提供了示范。由此例可见,生态水文学通过整合多学科知识,可为解决生态保护与水资源利用的矛盾提供创新路径。

在“双碳”目标背景下,生态水文学的研究成果可为碳汇优化、流域管理和生态恢复等领域提供科学

依据,推动自然资源的可持续利用,但也仍需探索和解决几个关键问题:一是变化环境下水循环与碳循环互连的陆地生态系统碳源与碳汇变化过程与机理;二是如何通过科学管理及工程与非工程措施,达到陆地生态系统保育、保护与建设的“双碳”目标。科学基础是掌握水与生态的关系,生态水文学的研究、发展与应用非常重要。

二、生态水文学面临的挑战

1. 陆地生态系统与气候相互作用的研究挑战

生态水文学的核心之一是揭示“陆地生态系统-气候”相互作用关系。然而,在气候变化加剧的背景下,陆地生态系统碳汇功能的动态演化规律尚未被完全理解。一方面,植被通过碳固定和蒸散作用等响应气候变化;另一方面,植被和土壤通过碳循环对气候系统产生反馈。例如,朴世龙等的研究表明,陆地生态系统在温室气体平衡中具有双向互馈作用。

当前的挑战在于如何量化不同生态系统(如森林、草原、湿地)的碳汇潜力,明确植被、土壤与气候因子的耦合作用机理。同时,需要针对极端气候事件(如干旱、洪水)对陆地生态系统碳汇功能的影响开展深入研究。这些研究将为应对全球气候变化和优化生态系统管理提供重要科学依据。

2. 农业化与城市化“双碳”问题的复杂性

农业化和城市化快速发展带来了碳源与碳汇的复杂动态变化。城市地区的二氧化碳排放约占全球总量的75%~80%,主要来源包括交通运输、工业生产、建筑能耗、农业活动和废弃物处理等。然而,城市系统内的碳循环路径复杂多样,既存在高密度的碳排放,也可能通过植被绿地和城市湿地发挥碳汇功能。

农业化的主要挑战则在于如何平衡农业生产的碳排放与碳汇作用。一方面,农业活动增加了土壤碳损失和温室气体排放;另一方面,合理管理农业废弃物和农田土壤可增强其碳汇能力。因此,需要发展精细化的碳排放监测与管理,结合区域特点优化城市和农业碳中和策略。这是实现“双碳”目标的重要实践路径。

3. 河流水库群建设与运行的“双碳”问题

水库的碳源碳汇功能研究是生态水文学的重要挑战之一。在全生命周期内,水库对碳循环产生“淹没—阻隔—重建—消纳”四大效应。例如,大型水库在短期内可能成为碳源,但长期运行下具备转化为碳汇的

潜力。

李哲团队的研究发现,大型水库的碳汇功能受水位波动、入库流量、水温和水质等关键因素影响。减少水位波动频率和优化调度策略,是减少温室气体(如 CO_2 和 CH_4 等)排放的有效措施。未来需要进一步发展基于生态系统管理的增汇技术,同时评估大型水库的“净碳汇”能力和经济效益。通过跨学科研究和集成,有望为流域碳中和目标提供科学支持和实践路径。

4. 基于自然解决方案的生态水文途径挑战

基于自然解决方案(Nature-based Solutions, NbS)的生态水文路径为实现碳中和目标提供了新的机遇,但其实施面临多重挑战。例如,湿地恢复、植被修复和生态系统功能增强需要在复杂的自然环境和经济社会背景下平衡生态效益与成本投入。同时,如何整合生态水文学模型与循环经济理念,发展适应性强的生态工程方案,仍是技术创新的重要方向。

此外,加强生态系统碳汇功能的监测与评估能力,构建区域性、国家级的碳汇工程实施框架,需要政策支持和多学科协作。这些措施将为从生态保护到碳中和目标的实现提供全面保障。

三、生态水文学的发展建议与思考

1. 加强河流健康的生态水文研究

健康的河流应保持自然的水文连通性和生态动态平衡,其生态水文研究需要从以下几个方面入手:重视流域环境保护与生态治理并重的系统性策略;强化河流及水库碳循环与氮循环过程的定量化研究,重点控制和减缓水库温室气体(如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等)排放;通过优化水资源调度和生态修复措施,维护流域内物种多样性和生态服务功能。同时,应结合气候变化适应性研究,增强流域生态系统的韧性与应对能力,从而实现河流健康与流域可持续发展的双赢。

2. 加强面向循环经济的生态水文学研究

水循环利用与生态循环经济密切相关,其核心是通过优化资源利用效率,促进能源、物质和生态服务的闭环循环。在工业、农业和生活用水领域,需探索高效水循环技术,推动以提高水的生产率(Water Productivity)为目标的节水战略与废水资源化利用。同时,注重生物经济循环研究,包括代谢营养物质的再利用、微生物对土壤功能的调控等过程的耦合研究。此外,面向循环经济的生态水文学研究应强调节能减

排,通过开发和应用先进技术,以最小的能源和资源消耗实现最大的经济和生态效益。建议结合流域管理与生态修复,加强对水资源循环利用模式、关键技术及其对区域生态经济系统贡献的综合评估,进一步推动基于自然解决方案的新型生态循环经济实践。

3. 建设融合自然生态系统解决方案和循环经济的城市-区域生态

在未来城市和区域生态系统建设中,要进一步推动融合自然生态系统解决方案和循环经济的实践。例如,可通过提升城市与农村河流的自净能力,降低水体污染负荷;广泛应用生物技术处理污染排放中的残留营养物质,从源头减少环境压力;充分利用湖泊的调蓄功能,缓解城市内涝问题;在关键流域建设氮、磷污染缓冲地带,有效阻隔面源污染对水体的影响。此外,应积极增加城市绿地面积与透水地面覆盖比例,以提升雨水渗透与城市微气候调节功能,促进生态可持续发展。

近年来,基于对城市水循环系统的深刻认识,笔者提出了城市水循环系统5.0版本,其核心是建立多尺度水循环联系的城市水系统科学体系。建议进一步深化这一体系,围绕“双碳”目标,系统开展城市水循环及其水碳耦合与碳中和的研究。重点应关注不同水循环过程的碳排放与吸收机理,量化水系统对城市碳中和的贡献率,并探索在水循环管理中实现碳减排的创新途径。这不仅是城市可持续发展的重要内容,也是应对全球气候变化的一项重大挑战。

4. 生态水文学发展的趋势

生态水文学这一学科正在发展,其发展战略与目标是推动我国地学领域生态水文学科学基础与学科战略研究,推动国家生态文明建设的战略发展,服务于国家生态文明建设的重大需求。

当前生态水文学的关注内容:一是生态水文监测与机理研究方向,包括生态水文监测与评估、生态水文关键要素格局及其演变特征、生态水文过程驱动机制的尺度差异、关键带生态过程对水资源利用的方向;二是生态水文过程定量化模型方向,包括陆面生态水文过程模型、河流湖泊生态水文过程模型、生态水文模型及系统综合;三是多学科交融下的生态水文学研究应用方向,包括生态-水文-经济的集成决策系统研究、气候变化/人类活动对生态水文过程的影响、生态水文功能评估和调控。

展望生态水文学的未来发展方向:一是生态水文综合检测技术与方法,系统综合观测;二是生态水文

学基础理论,多尺度融合机理、范式与模型;三是陆域和河湖生态水文过程综合研究;四是生态水文与社会学、“双碳”目标联合研究;五是全球生态水文学综合性研究。

四、结论

①全球变化与碳减排既是国际科学研究的前沿热点,也是满足国家“双碳”战略目标的重要需求。水循环是地球多圈层间的纽带,水-碳耦合过程在揭示陆地生态系统碳源与碳汇的动态变化及其驱动机制方面具有重要的科学意义,是制定碳减排与碳增汇对策的重要理论基础。

②生态水文学作为一门交叉学科,通过整合生态学与水文学的理论与方法,为揭示水循环与陆地生态系统的相互作用提供了新的科学视角。其应用范围涵盖森林、植被、河湖、湿地、滨海区域、城市与农业生态系统以及流域尺度的碳减排评估与工程措施研究。然而,生态水文学尚处于发展阶段,其学科体系仍需进一步完善,理论与方法的创新将是未来发展的关键方向。

③生态水文学的研究应进一步纳入流域系统与地球系统科学的框架中,以流域作为核心研究单元,全面分析其水文、生态及气候相互作用的复杂性。未来的发展方向应紧密围绕“双碳”战略目标,以数字化生态技术为驱动,推进水利工程与生态水文学的深度融合,构建“智慧生态水利”的理论与实践体系,进一步完善流域减碳增汇措施与技术,加强环境伦理相关研究,助力国家生态文明建设目标的实现。

参考文献:

- [1] 汤秋鸿.全球变化水文学:陆地水循环与全球变化[J].中国科学:地球科学,2020,50(3):436-438.
- [2] 夏军,张永勇,穆兴民,等.中国生态水文学发展趋势与重点方向[J].地理学报,2020,75(3):445-457.
- [3] XIA J, ZHANG Y Y, MU X M, et al.A review of the ecohydrology discipline: Progress, challenges, and future directions in China[J].Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(8):1085-1101.
- [4] XIA J, LI Z, ZENG S D, et al.Perspectives on eco-water security and sustainable development in the Yangtze River Basin[J].Geoscience Letters, 2021, 8(1):18-27.
- [5] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等.IPCC AR6报告解读:未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息[J].气候变化研究进展,2021,17(6):652-663.
- [6] WANG H Q, WEI W X.Coordinating technological progress and environmental regulation in CO₂ mitigation: The optimal levels for OECD countries & emerging economies[J].Energy Economics, 2020, 87: 104510.
- [7] GUO W B, CHEN Y.Assessing the efficiency of China's environmental regulation on carbon emissions based on Tapio decoupling models and GMM models[J].Energy Reports, 2018, 4:713-723.
- [8] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N].人民日报,2020-09-23(3).
- [9] 李佳佳,王鹏鑫,杨婉童.“双碳”背景下制度安排对碳排放的影响[J].生态经济,2025,41(1):60-69.
- [10] 赵荣钦,吴微,姚双胜,等.“双碳”目标下的水资源节约集约利用:机理、路径与政策启示[J/OL].水利发展研究,1-7.http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4655.TV.20240826.1516.002.html.
- [11] 李嘉欣,朱永楠,彭少明,等.社会水循环碳排放综合测算模型——以黄河流域为例[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(4):626-637.
- [12] 王建华,朱永楠,李玲慧,等.社会水循环系统水—能—碳纽带关系及低碳调控策略研究[J].水利发展研究,2023,23(9):56-65.
- [13] 郭旭宁,李云玲,闫佳铭,等.“双碳”战略下水循环响应与需水情势变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):22-28+38.
- [14] XIA J.Enhancing water security in a changing world: experiences and perspectives in China and implications for the world[J].Water International, 2023, 48(7):901-908.
- [15] XIA J, WANG L F, YU J J, et al.Impact of environmental factors on water quality at multiple spatial scales and its spatial variation in Huai River Basin, China[J].Science China(Earth Sciences), 2018, 61(1):82-92.
- [16] XIA J, SHI W.Perspective on water security issue of changing environment in China[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 41-50.
- [17] XIA J.Impact of water diversion project a cross basins on land water cycle and water security[J].Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17

- (6):831-842.
- [18] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617.
- [19] 夏军, 张永勇, 穆兴民, 等. 中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. 地理学报, 2020, 75(3):445-457.
- [20] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 生态水文学研究进展[J]. 地理科学, 2001, 21(5):467-473.
- [21] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics[J]. Water resources research, 2000, 36(1): 3-9.
- [22] ZALEWSKI M, JANAUER G A, JOLANKAJ G. Ecohydrology: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resource[A]. In: Conceptual Background Working Hypothesis. Rational and Scientific Guidelines for the Implementation of IHP-V Project 2.32.4. Technical Document in Hydrology No.7[C]. Paris: UNESCO, 1997:55-80.
- [23] 夏军, 李天生. 生态水文学的进展与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(6):1-5+21.
- [24] 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究[J]. 地理学报, 1997, 52(4):366-373.
- [25] 谭志强, 李云良, 张奇, 等. 湖泊湿地水文过程研究进展[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1):18-37.
- [26] CHEN J X, XIA J, ZHAO Z F, et al. Using the RESC Model and Diversity Indexes to Assess the Cross-Scale Water Resource Vulnerability and Spatial Heterogeneity in the Huai River Basin, China[J]. Water, 2016, 8(10):431.
- [27] 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.
- [28] 王根绪, 钱翰, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. 地球科学进展, 2001(3):314-323.
- [29] 程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态-水文过程集成研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 431-437.
- [30] 朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(6):1010-1020.
- [31] 王锴, 朴世龙, 何悦, 等. 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制[J]. 中国科学:地球科学, 2023, 53(2):216-226.
- [32] 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(7):1419-1426.
- [33] 康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金, 2016, 30(3):208-212.
- [34] MO X G, LIU S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(3):203-222.
- [35] 高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1381-1393.
- [36] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 390-397.
- [37] TANG Q, LU L H, LUO F, et al. Terrigenous organic carbon contributes to reservoir carbon emissions: Potential role of the microbial community along a trophic gradient[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129601.
- [38] 杨崇曜, 王军, 张骁, 等. 基于自然的解决方案的生态保护修复前沿进展与实践路径研究[J]. 自然资源学报, 2024, 39(12):2753-2767.
- [39] 张天扬. 基于自然的解决方案在滨水规划建设中的发展[J]. 建设科技, 2024(14):78-80.
- [40] YU Q, XU S H, WANG J, et al. Influence of leaf water potential on diurnal changes in CO₂ and water vapour fluxes[J]. Boundary-layer Meteorology, 2007, 124(2):161-181.
- [41] XIA J, ZHANG Y Y, SHE D X, et al. Urban water system theory and its model development and application[J]. Science China Earth Sciences, 2024, 67(3):704-724.

责任编辑 王 慧