

流域水资源保护与生态流量调控机制研究

姚封佳

江苏金宁达房地产评估规划测绘咨询有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年12月17日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

研究聚焦江苏省流域水资源保护与生态流量调控机制, 旨在应对水资源时空异质性及生态环境压力。通过构建水文地质模型并结合SWAT工具对水文过程进行定量模拟与情景预测, 提出结构性与非结构性调控措施协同作用的方案。在水资源调度方面, 采用非劣排序遗传算法优化供水效益与生态流量偏离度, 结合生态学方法制定水文变化指标, 进而制定动态生态闸门调度规则。研究还通过建立“天空地”一体化监测网络, 实施周期性评估与反馈调整机制, 确保水资源可持续管理与生态修复。研究结果表明, 实施后水文环境、生态质量与水质均显著改善, 调控措施有效恢复了河流生态流量与水质。

关键词

生态流量调控, 水文地质模型, 水资源管理, 调控措施

Research on the Mechanism of Watershed Water Resources Protection and Ecological Flow Regulation

Fengjia Yao

Jiangsu Jinningda Real Estate Appraisal Planning Surveying and Mapping Consulting Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: December 17, 2025; accepted: January 26, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

This study focuses on the mechanism of water resource protection and ecological flow regulation in river basins in Jiangsu Province, aiming to address the spatiotemporal heterogeneity of water resources and ecological environmental pressure. By constructing a hydrogeological model and combining it with SWAT tools for quantitative simulation and scenario prediction of hydrological processes, a scheme for the synergistic effect of structural and non structural control measures is

proposed. In terms of water resource scheduling, non inferiority sorting genetic algorithm is used to optimize the deviation between water supply efficiency and ecological flow, combined with ecological methods to develop hydrological change indicators, and then dynamic ecological gate scheduling rules are formulated. The study also established an integrated monitoring network of “sky ground” and implemented a periodic evaluation and feedback adjustment mechanism to ensure sustainable management of water resources and ecological restoration. The research results indicate that the hydrological environment, ecological quality, and water quality have significantly improved after implementation, and the control measures have effectively restored the ecological flow and water quality of the river.

Keywords

Ecological Flow Regulation, Hydrogeological Model, Water Resource Management, Regulatory Measures

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着流域内水资源的逐年紧张及水环境质量的不断恶化, 如何实现流域水资源的高效利用与生态保护成为亟待解决的重要课题。江苏省流域作为我国重要的水资源承载区, 其水资源分布不均与季节性极端变化, 加剧了生态流量保障的难度。为应对这一挑战, 本研究以江苏省典型的平原感潮河网区——秦淮河流域为研究对象, 系统分析其水文地质特征与水资源时空分布特点, 提出了基于水文地质模型的生态流量调控机制。该机制结合结构性水利工程调度与非结构性水资源需求管理, 旨在通过精准的水文模拟与生态流量保障, 促进流域内水资源的可持续管理, 缓解生态缺水问题。

2. 流域水文地质特征分析

2.1. 水文地质条件

江苏省流域的水文地质结构主要由第四纪松散沉积物构成, 其厚度自苏北至苏南由 50~100 m 递增至 150~300 m。该沉积系统在垂向上表现为典型的多层结构, 通常包含 2~4 个主要的含水层组。上部的潜水含水层(I 层)以粉砂、细砂为主, 渗透系数(K)通常在 5~20 m/d, 直接接受大气降水的垂直入渗补给, 补给模数约为 $10\sim15 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a}\cdot\text{km}^2)$ 。该层与地表河网存在紧密的水力联系, 在汛期, 河道水位高于两岸潜水位, 河水以侧向入渗方式补给地下水, 形成“河水倒灌”现象; 而在枯水期, 水力梯度反转, 潜水向河道排泄, 成为维持河道基流的重要来源, 此时的排泄通量可占河道总流量的 10%~30%。中下部的承压含水层(II、III 层)由中粗砂或砂砾石构成, 富水性更强(K 值可达 30~60 m/d), 但其上覆的粉质粘土或粘土层(厚度 5~20 m)作为弱透水层, 使其与地表水的直接交换受到限制。然而, 在古河道或构造活动影响区域, 弱透水层可能减薄甚至缺失, 形成“天窗”, 构成承压水与潜水、地表水发生垂向交换的优势通道。流域内的断裂构造, 如郯庐断裂带的次级断裂, 对局部地下水流场产生明显的束缚或导通效应, 影响着区域地下水的径流与排泄模式。

2.2. 水资源分布

江苏省流域水资源在时空维度上呈现高度异质性。研究区地理位置如图 1 所示。时间上, 年内降水

分布极不均匀, 年均降水量约 1000 mm, 但汛期(5~9 月)降水量集中, 形成的径流占全年径流量的 70%以上, 导致年径流过程线呈现单峰或双峰型尖瘦形态, 年径流变差系数(Cv)普遍在 0.6~0.9 之间, 远高于水资源丰沛区。这种季节性差异造成了汛期的洪涝风险与枯水期的生态缺水并存。空间上, 受过境水系影响, 水资源分布呈现明显的带状特征[1]。长江、淮河两大水系的过境客水是本省水资源的主体, 年均过境水量近 $10,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全省水资源总量的 95%以上, 导致沿江、沿淮地区水资源相对丰富, 而远离主干河道的苏北腹地及岗地区域则成为相对贫水区。地表水资源主要赋存于河网与湖泊(如洪泽湖、太湖)中, 调蓄能力有限。地下水方面, 虽然总储量较大, 但浅层地下水已在徐州、宿迁等部分地区形成区域性超采漏斗, 中心水位埋深超过 30 m。这种对过境客水的高度依赖性和本地水资源时空分布的不均衡性, 是制定水资源调控策略必须面对的基本约束条件。

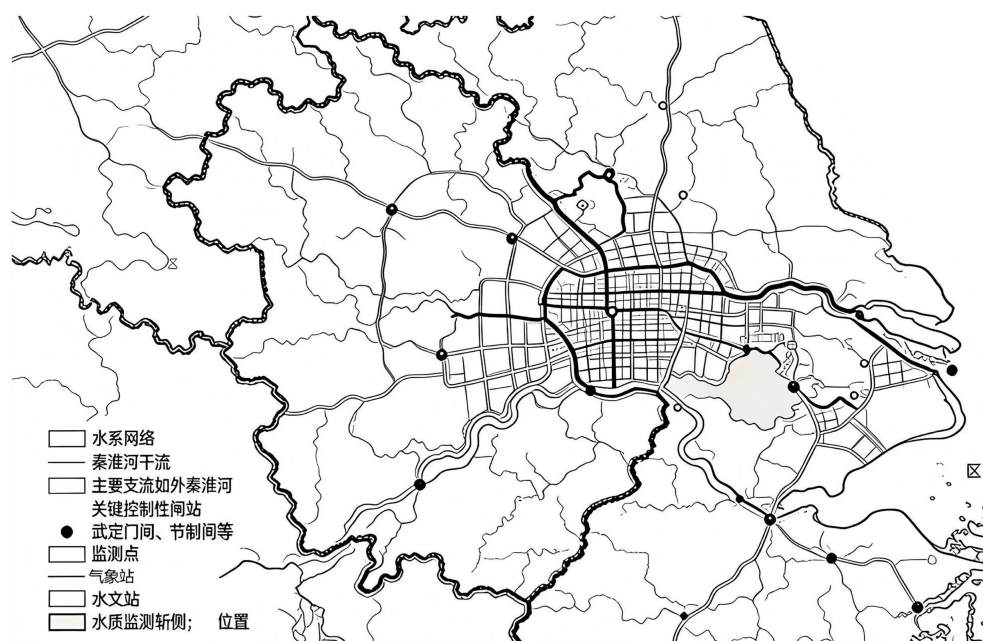


Figure 1. Geographical location map of the research area

图 1. 研究区地理位置图

3. 水资源保护与生态流量调控机制

3.1. 水文地质模型预测

为实现对流域水文过程的定量模拟与情景预测, 采用了土壤与水评估工具(SWAT)模型[2]。该模型基于物理机制, 能够精细刻画不同下垫面条件下水循环各环节的动态过程。模型的核心驱动为水量平衡方程, 如公式(1)所示, 它在每个水文响应单元(HRU)内进行日步长的水量核算。

$$SW_t = SW_0 + \sum_i (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

其中, SW_t 为模拟期末的土壤水含量(单位: mm); SW_0 为期初土壤水含量(单位: mm); t 为模拟时长(单位: d); R_{day} 为第 i 天的降水量(单位: mm); Q_{surf} 为地表径流量(单位: mm), 采用修正的 SCS 径流曲线数法计算; E_a 为蒸散发量(单位: mm), 通过 Penman-Monteith 方法计算; W_{seep} 为土壤剖面的渗透量(单位: mm); Q_{gw} 为地下水流量(单位: mm), 由一个线性水库模型模拟基流退水过程。

该公式集成了流域产流、汇流与地下水交互的关键物理过程, 为生态流量评估提供了基础。模型的

构建输入了 30 m 分辨率的 DEM 数据(源自地理空间数据云的 30 米分辨率 ASTER GDEM V3 产品)、1:50,000 土地利用数据(采用中国科学院资源环境科学与数据中心发布的 2020 年 30 米分辨率土地利用遥感监测数据)及土壤类型分布图(基于南京土壤研究所 2018 年编制的 1:50,000 土壤图,并关联世界土壤数据库属性构建)。气象数据采用了 1980~2020 年共 15 个国家级气象站点的逐日观测序列。在模型率定与验证阶段,选取了流域内 3 个主要水文站的实测日径流数据,采用 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2)算法进行参数优化[3]。率定结果显示,各站点在率定期(2000~2010)与验证期(2011~2020)的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)均大于 0.70,决定系数 R^2 大于 0.75,百分比偏差(PBIAS)在 $\pm 15\%$ 以内,表明模型能够准确复现流域的水文响应特征。

在模型率定与验证阶段,通过 SUFI-2 算法,针对 15 个潜在敏感参数进行了优化。结果表明,对本研究区径流模拟影响最大的 5 个关键参数为:基流衰减系数(ALPHA_BF)、土壤有效水容量(SOL_AWC)、SCS 径流曲线数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)和地下水延迟时间(GW_DELAY)。这些参数分别反映了流域的退水特性、土壤持水能力、产流潜力等关键物理过程。各参数的最终取值范围见表 1。

Table 1. The five key parameters that have the greatest impact on runoff simulation
表 1. 对径流模拟影响最大的五个关键参数

参数名称	参数代码	含义说明	取值范围	单位
基流衰减系数	ALPHA_BF	控制基流退水速率	0.1~0.5	无量纲
土壤有效水容量	SOL_AWC	土壤单位深度可用水量	0.12~0.25	mm H ₂ O/mm 土壤
SCS 径流曲线数	CN2	产流潜力参数	65~85	无量纲
土壤蒸发补偿系数	ESCO	控制土壤蒸发速率	0.8~1.0	无量纲
地下水延迟时间	GW_DELAY	地下水进入主河道的延迟时间	20~60	天

3.2. 生态流量调控措施的综合设计

基于模型的预测结果,生态流量调控采取了结构性与非结构性措施协同作用的策略[4]。结构性措施的核心是对现有水利工程体系进行生态化调度改造。通过引入非劣排序遗传算法(NSGA-II),构建了以“供水效益最大化”和“生态流量偏离度最小化”为双目标的优化调度模型。其目标函数可表示为:
最大化供水效益:

$$\max F_1 = \sum_t [W_{agr}(t) + W_{ind}(t) + W_{dom}(t)] \quad (2)$$

其中, $W_{agr}(t)$, $W_{ind}(t)$, $W_{dom}(t)$ 分别代表在 t 时段内满足的农业、工业和生活供水量。

最小化生态流量偏离度:

$$\min F_2 = \sum_t \left(\frac{Q_{sim}(t) - Q_{eco}(t)}{Q_{eco}(t)} \right)^2 \quad (3)$$

其中, $Q_{sim}(t)$ 为调度后的模拟流量, $Q_{eco}(t)$ 为该时段的目标生态流量。

主要约束条件为:水量平衡约束: $V(t+1) = V(t) + I(t) - O(t) - E(t)$; 水库/闸站库容约束: $V_{min} \leq V(t) \leq V_{max}$; 最小生态流量约束: $Q_{sim}(t) \geq Q_{ecom}(t)$ 。

研究综合多种方法以科学设定生态流量目标。首先,采用 Tennant 法确定保障水生生物基本生存的最小生态流量,作为调度中的硬性约束。其次,基于逐月频率法,选取 75%频率下的流量值作为适宜生态流量,作为优化目标参考。最后,引入 RVA/IHA 方法识别高流量脉冲等关键水文过程,将其作为生态

调度方案的评价指标, 兼顾水量保障与水文节律模拟, 提升调度生态合理性与系统韧性[5]。

结合生态学方法(如 RVA 法)确定的 32 个水文变化指标(IHA)作为生态约束, 生成 Pareto 最优解集供决策者选择, 如图 2 所示。对于平原河网区的控制闸, 废除了固定的汛限水位和枯期控制水位, 代之以动态的生态闸门调度规则, 在枯水期实施脉冲放流, 模拟自然涨水过程, 促进水体复氧和生境改善。非结构性措施聚焦于水资源需求侧管理, 严格执行“三条红线”控制指标, 将用水总量和效率控制目标分解至各行政区和产业[6]。

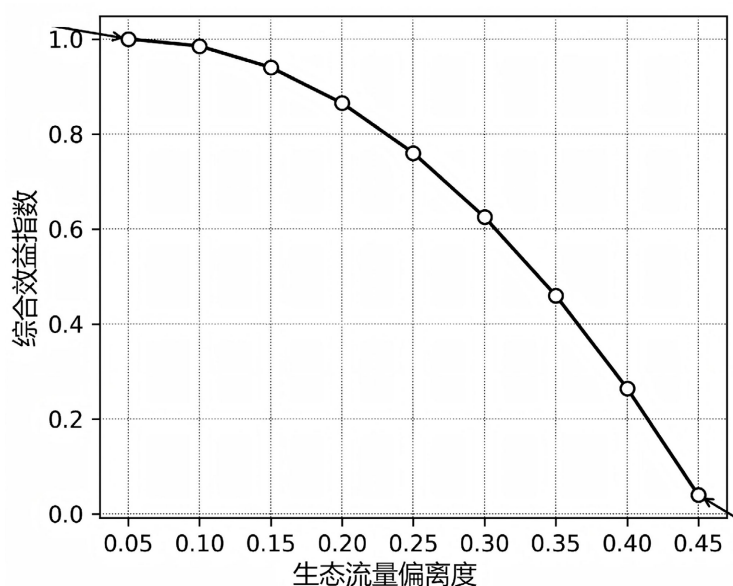


Figure 2. Ecological scheduling optimization objective diagram
图 2. 生态调度优化目标图

在灌区, 通过渠道衬砌、低压管道输水等工程, 推广滴灌、喷灌技术, 计划将灌溉水有效利用系数提升至 0.62 以上, 每年节约农业用水约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。工业领域实行高耗水企业超定额累进加价制度, 推动节水技术改造。同时, 探索流域上下游间的横向生态补偿机制, 通过财政转移支付等方式补偿上游地区为保障下游生态流量而产生的机会成本, 构建保护者受益、使用者付费的良性循环[7]。

3.3. 水资源保护管理框架

为保障调控机制的长效性和科学性, 设计了一个基于“目标-实施-监测-评估-调整”(PDCA 循环)理念的适应性管理框架[8]。该框架是一个动态、闭环的系统, 确保了管理决策能够根据系统反馈持续优化。框架的起始点是生态流量目标的科学厘定[9]。采用“Tennant 法”确定维持水生生物基本生存的最小流量, 采用“逐月频率法”计算适宜流量, 并结合“湿周法”进行校核, 为不同河段、不同生态功能区制定了差异化的、包含多层次指标(最小、适宜、高流量脉冲)的生态流量管理目标。调控措施实施后, 一个集成了物联网、遥感和自动化监测技术的“天空地”一体化监测网络开始运作[10]。

该网络包括: 使用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)对关键断面进行流量在线监测; 布设多参数水质自动监测站, 实时传输 pH、DO、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等数据; 利用无人机搭载高光谱成像仪, 定期监测沿岸带植被恢复状况; 并引入环境 DNA (eDNA) 技术, 通过采集水样分析物种 DNA 片段, 高效评估鱼类及底栖动物群落多样性的变化。所有数据汇入流域智慧水务平台, 形成决策支持数据库[11]。每年进行一次周期性评估, 将监测数据与预设的生态流量目标及生态健康基线进行对比, 采用综合评价模型量化调控成效。

若评估结果显示关键指标未达标或出现负面效应，则启动反馈调整程序，重新审校模型参数、优化调度规则或调整水权分配额度，从而开启新一轮的管理循环。水资源保护管理框架如图 3 所示。

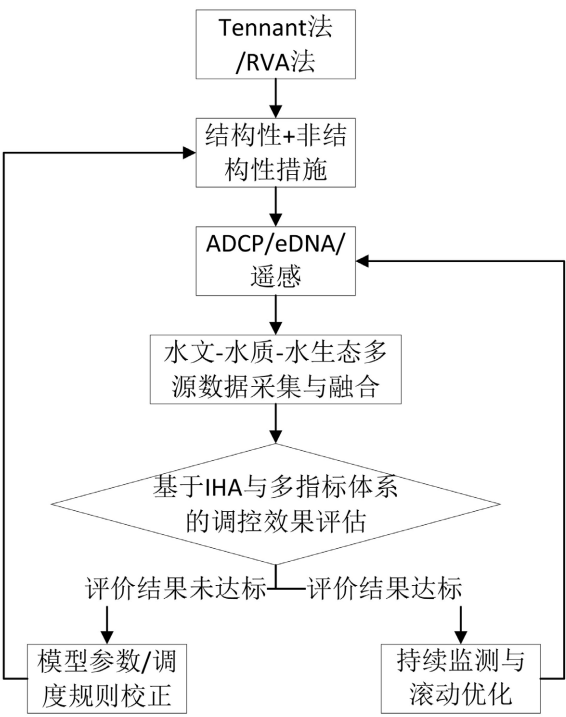


Figure 3. Water resources protection and management framework
图 3. 水资源保护管理框架

4. 调控效果分析

为定量评估所设计调控机制的潜在成效，本研究设置了两种情景：1) 基准情景：采用 2015~2020 年的实测水文气象数据，模拟在该时段内未实施优化调度的现状条件；2) 调控情景：采用相同的水文气象输入，但应用本文构建的生态流量调控方案进行模拟。通过对比两种情景的模拟输出结果，分析调控措施对恢复河流水文情势和改善水生态环境的效果。水文学分析使用 IHA 指标体系，各项指标的量化对比如表 2 所示。

Table 2. Comprehensive evaluation of regulatory effects
表 2. 调控效果综合评价表

指标类别	具体指标	单位	调控前	调控后	变化率
水文	枯水期生态流量保障率	%	65	92	41.50%
水文	流量年内变异系数	-	0.85	0.62	-27.10%
水文	高流量脉冲次数	次/年	2	5	150%
水质	干流 COD 平均浓度	mg/L	28.5	19.8	-30.50%
水质	干流氨氮平均浓度	mg/L	1.8	0.9	-50.00%
水生态	关键断面叶绿素 a 浓度	μg/L	45.3	21.7	-52.10%
水生态	鱼类多样性指数(Shannon)	-	1.2	1.9	58.30%

枯水期月均流量由 15 m³/s 提升至 25 m³/s, 生态流量保障率从 65%提升至 92%, 低流量脉冲持续时间缩短。人工脉冲放流后, 高流量脉冲年发生次数从 2 次增至 5 次, 更接近天然状态的 4~6 次, 增强了物质输运与生境更新。流量年内变异系数(Cv)从 0.85 降至 0.62, 季节性波动更平稳, 极端枯水风险降低。水质改善显著, 如图 4 所示, 干流 COD 年均浓度由 28.5 mg/L 降至 19.8 mg/L, 氨氮浓度由 1.8 mg/L 降至 0.9 mg/L, 符合地表水 III 类标准。水生态方面, 浮游植物叶绿素 a 浓度由 45.3 μg/L 降至 21.7 μg/L, 水体富营养化得到缓解。eDNA 监测与渔业资源调查显示, 指示性鱼类种群回升, 香农-维纳多样性指数从 1.2 增至 1.9。

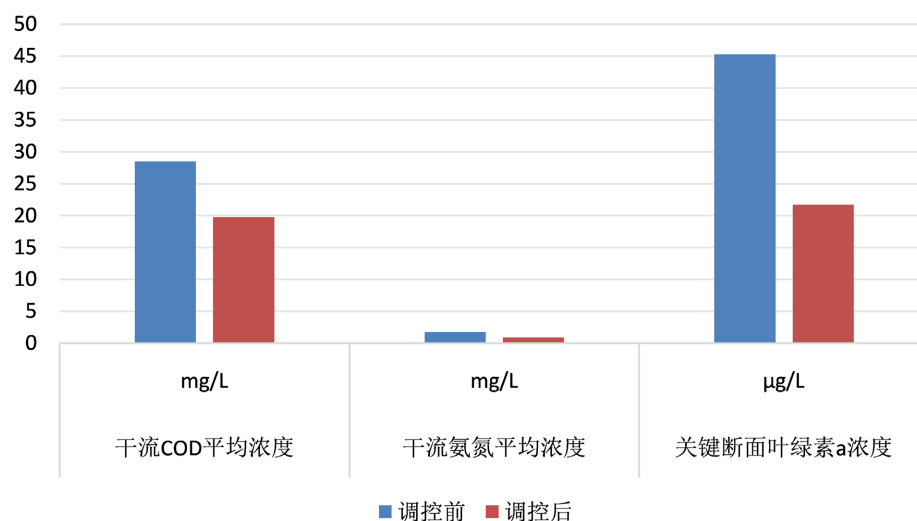


Figure 4. Comparison of water quality control effects

图 4. 水质调控效果对比图

5. 讨论

本研究的模拟结果清晰揭示了生态流量调控对水生态系统产生的正向级联效应。枯水期流量的提升与人工脉冲放流是关键驱动力, 前者通过增强水体稀释自净能力显著改善了水质、抑制了水华; 后者则模拟了自然水文节律, 有效恢复了生境多样性, 共同促进了鱼类群落的恢复。与已有研究相比, 本研究的特色在于将 eDNA 等新型监测技术融入调控效果的评价中, 提升了生态响应评估的综合性。但本研究在聚焦水文-生态过程的同时, 简化了社会经济因素的考量, 这与部分将多主体模型与水资源配置相结合的研究相比存在一定局限。此外, 研究的局限性还体现在 SWAT 模型对平原感潮河网复杂水动力过程模拟的不确定性, 以及未将未来气候变化情景纳入调控方案的风险评估中。因此, 未来研究应致力于多模型耦合、融入社会经济反馈机制, 并考虑气候变化影响, 以制定更为稳健和可持续的水资源管理策略。

6. 结语

研究通过水文地质模型的预测与生态流量调控措施的实施, 显著提高了江苏省流域的水资源管理水平。采用优化的生态流量调度方案后, 枯水期生态流量保障率大幅提升, 水质与水生态状况得到有效改善。研究还证明, 集成“天空地”监测网络与 PDCA 管理框架, 能够为水资源保护提供科学的决策支持与动态调整机制。未来的研究将进一步优化流量调控策略, 并结合气候变化等因素, 持续推进流域水资源的可持续利用与生态保护。

参考文献

- [1] 盖永伟, 蒋咏, 胡晓雨. 江苏省平原水网区河湖生态水位确定探索与实践[J]. 水资源开发与管理, 2024, 10(1): 30-34.
- [2] 陈华鑫, 尚钊仪, 胡晓雨, 等. 江苏省水资源管理与保护的一些认识[J]. 江苏水利, 2023(8): 22-26.
- [3] 徐建. 南京长江漫滩某深基坑工程水文参数分析及选用[J]. 生态与资源, 2024(11): 93-95.
- [4] 杨震东, 唐兵. 复苏河湖生态环境背景下生态流量保障相关问题的思考[J]. 水利水电工程设计, 2025, 44(4): 73-78.
- [5] 王龙, 张丽, 许昕鹏. 水文地质勘查在工程建设中的应用分析[J]. 工程与建设, 2022, 36(6): 1607-1608.
- [6] 张宁, 孙冬敏, 石磊. 黄河流域水资源节约集约利用研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(S2): 57+59.
- [7] 王晓艳, 雒海潮, 王文豪. 珠三角城市群水资源承载力评价及协调发展分析[J]. 给水排水, 2024, 60(S2): 22-29.
- [8] 王占海, 何梁, 王保华. 基于 Dagum 基尼系数的广东省水资源空间均衡程度研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 49-55.
- [9] 韩会玲, 张剑, 朱晓娟, 等. 面向生态环境复苏的生态流量优化计算研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(S1): 235-247.
- [10] 王小帆, 苗磊, 翟城武. 基于无定河生态流量保障的水资源调度研究[J]. 陕西水利, 2024(4): 32-35.
- [11] 徐长江, 熊明, 杜涛, 等. 面向水资源及水生态的并联水库联合调控研究[J]. 人民长江, 2023, 54(6): 73-79.