

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0434

靳雅心, 刘斌, 马龙矫, 等. 2026. 不同生态修复措施对水环境季节变异的影响研究—以沂蒙山生态修复为例[J]. 环境科学学报, 46(4): 335-345
JIN Yaxin, LIU Bin, MA Longjiao, et al. 2026. Effects of different ecological restoration measures on seasonal variability of water quality: A case study of Yimeng Mountain restoration[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 46(4): 335-345

不同生态修复措施对水环境季节变异的影响研究—以沂蒙山生态修复为例

靳雅心^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 马龙矫^{1,2}, 李凯¹, 朱恒华^{3,*}, 孙然好^{1,2,*}

1. 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 山东省国土空间生态修复中心, 济南 250014

摘要: 实施山水林田湖草一体化保护与修复工程对改善区域地表水质具有重要意义。然而, 不同生态修复措施对地表水质的时空影响机制尚不清晰。本研究以沂蒙山区为例, 在不同水期采集分析 49 个水质监测点的 21 项理化指标, 构建了区域水质综合指数(WQI)评价体系, 采用 LASSO 回归模型筛选关键水质指标, 并结合双因子方差分析和变异系数法, 解析不同生态修复工程对区域水质的时空影响规律及其主控因子。结果表明: ①平水期水质最差, 丰水期水质最佳, 空间分布呈现“上游优、下游劣”的梯度特征, 这与平水期污染物积累效应和丰水期稀释作用密切相关; ②总磷(TP)、总氮(TN)、五日生化需氧量(BOD₅)为主控因子, WQI-LASSO 回归模型拟合精度较高($R^2 = 0.99$), 其中 TP 的权重修正至 4 显著提升了模型区域适应性; ③高锰酸盐指数(COD_{Mn})和氨氮(NH₃-N)受水期影响较大, 而五日生化需氧量(BOD₅)和化学需氧量(COD)对修复工程措施更为敏感, 反映出有机污染治理措施的有效性; ④8 个修复单元中, 森林提质和水源保护单元水质稳定性显著优于其他单元(CV<2% vs 全域平均 CV=6.3%), 其生态缓冲容量指数较矿山修复单元高 4.8 倍, 证实植被覆盖对水文波动的调控优势。研究结果为沂蒙山区水污染防治和水质综合管理提供了重要参考, 特别是为多水期差异化管控策略的制定提供了量化依据。

关键词: 水质综合指数; 水质稳定性; 生态修复; 多水期; LASSO 回归

文章编号: 0253-2468(2026)04-0335-11 中图分类号: X17, X824 文献标识码: A

Effects of different ecological restoration measures on seasonal variability of water quality: A case study of Yimeng Mountain restoration

JIN Yaxin^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, MA Longjiao^{1,2}, LI Kai¹, ZHU Henghua^{3,*}, SUN Ranhao^{1,2,*}

1. State Key Laboratory of Regional and Urban Ecological Security, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
3. Shandong Provincial Center for Territorial Space Ecological Restoration, Jinan 250014

Abstract: Integrated “mountains-rivers-forests-farmland-lakes-grasslands” protection and restoration projects play a critical role in improving regional surface water quality. However, the spatiotemporal mechanisms through which different ecological restoration measures influence surface water quality remain insufficiently understood. Taking the Yimeng Mountains region as a case study, we sampled and assessed 21 physico-chemical water quality indicators at 49 sites across distinct hydrological periods. On this basis, we developed a regional Water Quality Index (WQI) evaluation framework, using a least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression model to identify key water quality variables, and combined two-way analysis of variance and the coefficient of variation method to elucidate the spatiotemporal effects and dominant controls of different ecological restoration projects on regional water quality. The results show that ① water quality was poorest during the normal-flow period and best during the high-flow period, with a spatial pattern characterized by a gradient from relatively good conditions upstream to degraded conditions downstream. This pattern was closely related to pollutant accumulation during the normal-flow period and dilution effects during high flows. ② Total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and 5-day biochemical oxygen demand (BOD₅) were the dominant controlling factors. The WQI-LASSO model exhibited high goodness of fit ($R^2 = 0.99$), and adjusting the weight of TP to 4 substantially enhanced the regional applicability of the model. ③ Permanganate index (COD_{Mn})

收稿日期: 2025-10-10 修回日期: 2025-11-24 录用日期: 2025-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2022YFF1303101); 山东省沂蒙山水技术咨询项目(No.SDGP371300000202302000152)

作者简介: 靳雅心(1997—), 女, E-mail: 15848174450@163.com; *责任作者, E-mail: rhsun@rcees.ac.cn; hhzhu2008@sina.com

and ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) were strongly influenced by hydrological period, whereas BOD_5 and chemical oxygen demand (COD) were more sensitive to restoration measures. Those indicated the effectiveness of organic pollution control interventions.④ Among the eight restoration units, the forest quality improvement and water-source protection units showed markedly higher water-quality stability than the other units (coefficient of variation, $\text{CV} < 2\%$ vs. regional mean $\text{CV} = 6.3\%$), and their ecological buffering capacity index was 4.8 times higher than that of the mining restoration unit, demonstrating the advantage of vegetation cover in regulating hydrological fluctuations. These findings provide an important reference for water pollution control and integrated water-quality management in the Yimeng Mountains, particularly by offering quantitative evidence to support differentiated management strategies across multiple hydrological periods.

Keywords: water quality index; water quality stability; ecological restoration; multiple hydrological periods; LASSO regression

1 引言(Introduction)

近年来,我国地表水环境在快速城镇化与高强度农业开发下面临严峻挑战(龚芯磊等,2025).2015—2024年全国地表水监测数据显示,约28%的河流断面仍存在氮、磷超标问题(解鑫等,2023),流域复合污染治理成为生态文明建设的核心议题(范泽宇等,2021).在此背景下,“山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”作为系统性解决方案被提出,其通过生态要素的协同治理,已在太湖流域、洱海流域等区域实现水质明显改善当前生态(Hilton *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2021).然而,现有研究多聚焦单一工程措施的局部效果(马庆等,2025),对丘陵山区不同修复单元在水文节律调控下的水质响应机制缺乏系统认知(杨峰霖等,2025).特别是沂蒙山这类生态敏感区,亟待建立适配强季节性水文特征的“工程措施-水质效应”评估框架(万军芳等,2022;陈慧等,2025).

修复的水质效应研究存在3方面方法论局限:一是传统指标分析法难以量化多因素的协同/拮抗作用(Giri *et al.*, 2016);二是常规统计模型对高维度水质参数的共线性问题处理不足(Lumb *et al.*, 2011);三是现有评估多忽略水文期转换对工程效益的调制效应(Pan *et al.*, 2016).这导致难以回答两个关键科学问题:①在流域尺度上,哪些修复单元对水质改善具有显著性贡献?②不同水文背景下,工程措施与水质的响应关系呈现何种分异特征?

为解决上述问题,水质综合指数(WQI)与机器学习方法的融合展现出独特优势(耿姣等,2023).WQI通过多参数聚合可客观反映水体整体状态(Lumb *et al.*, 2011; Koçer *et al.*, 2014; 邹霞,2024),而LASSO回归能有效筛选关键驱动因子并消除指标冗余(Uddin *et al.*, 2022).近期研究表明,基于该方法构建的WQI_{min}模型在干旱区河流(张胜楠等,2025)和丘陵流域(唐琦等,2022)均表现出良好的适应性.特别是LASSO回归的L1正则化特性,可克服传统主成分分析在解释性上的不足(王少华,2013;徐若诗等,2024),为厘清多修复措施的水质影响优先级提供新思路.

本研究以沂蒙山生态修复区为对象,创新性地将WQI-LASSO回归模型与双因子方差分析相结合,旨在:①构建考虑水文期特异性的区域WQI评价体系;②量化不同修复单元对水质的时空影响强度;③揭示“工程措施-水文过程-水质响应”的耦合机制.研究成果可为山水工程成效评估提供方法论示范,并为丘陵山区流域的精准化生态管理提供科学依据.

2 研究区概况与采样设计(Study area and sampling design)

2.1 研究区概况

沂蒙山区具有典型的北方山区地貌与复杂水文过程.研究区如图1a所示,年内降水集中于7—9月的丰水期,径流响应快、水位波动大;而枯水期和平水期呈现较稳定的水动力条件.临沂市2024年年降水量达1141.9 mm,丰水期占比近80%,为典型的水文强季节性地区.

沂蒙山区工程实施后,流域同时存在水源涵养提升、水土流失治理、面源负荷削减与点源管控协同推进的复合情境,迫切需要构建兼顾“区域适配-多水文期-工程单元差异”的水质综合评价体系.沂河发源于实施区北部,自北至南纵贯全区,河长333 km,流域面积11820 km².其中,山东省境内河长287.5 km,流域面积10772 km²;临沂市境内河长226 km,流域面积为9383 km².工程实施将加大沂河流域生态治理力度,入河泥沙得到控制,沂河沿线生态环境得到改善,资源环境承载能力得到提升,为南水北调东线工程供水安全提供

更加有力的生态保障.

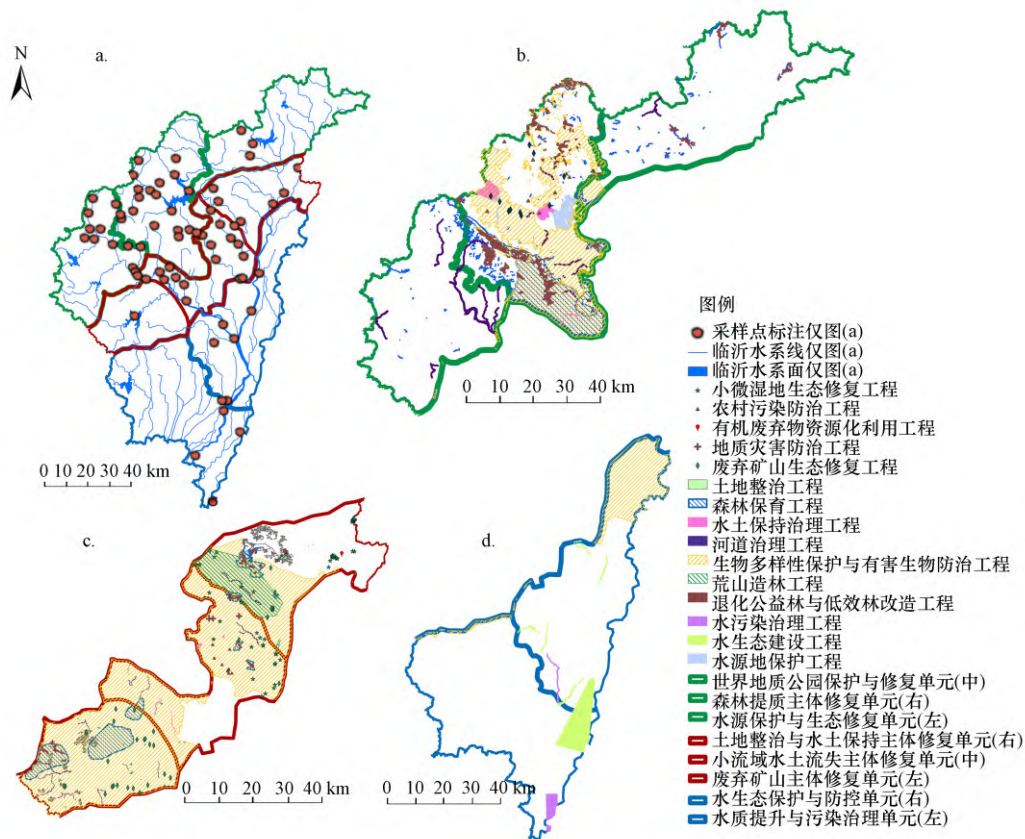


图1 研究区水质采样点(a)与治理工程分布(b.水源涵养生态修复区,c.水土保持生态修复区,d.水安全水生态修复区)

Fig.1 Spatial distribution of water quality sampling sites (a) and remediation projects in the study area (b~d)

2.2 生态修复工程总体规划与特征

沂蒙山区域山水林田湖草沙一体化保护修复工程围绕“山水林田湖草生命共同体”理念,采取“分区施策、分类治理”策略,总投资超54.94亿元,实施范围覆盖临沂市10个区县,总面积13794.85 km².工程布局基于三大功能分区、8个修复单元形成系统性修复网络.根据流域生态系统完整性、主导生态问题差异性,将工程区划分为:水源涵养生态修复区(5631.86 km²,占40.8%),位于沂河上游核心区,重点解决公益林退化问题;水土保持生态修复区(3325.15 km²,24.1%),位于沂河中游水土流失区,水安全水生态修复区(4838.26 km²,35.1%),位于沂河下游平原水质敏感区,重点进行水生态保护与污染治理.

工程共包含75个工程项目区,191个子项目,形成“分区-单元-项目”三级实施体系.主要修复类型包括森林提质、生态水源保护、矿山修复、水土保持和水质提升等措施.在具体修复工作中,已经完成森林提质面积10069.86 hm²,生物多样性保护面积298599.9 hm²,增加生态覆绿面积647.4 hm²,水土流失有效治理面积达35400 hm²,河道治理长度232.88 km,修复湿地面积180.15 hm²等.

2.3 采样设计

本研究于2024年枯水期(3月)、平水期(6月)与丰水期(9月)在研究区开展现场监测.采样点的布设遵循代表性、覆盖性与可比性原则:一方面,根据工程实施的空间分布及功能定位,3个工程区8个修复单元,水源涵养生态修复区见图1b(森林提质主题修复单元、世界地质公园保护与修复、水源保护与生态修复单元)、水土保持生态修复区见图1c(土地整治与水土保持修复单元、小流域水土流失治理修复单元、废弃矿山主体修复单元)、水安全水生态修复区见图1d(水生态保护与防控单元以及水质提升与污染治理单元等8类修复单元)内分别设置49个监测点,确保各单元均有充分的观测样本;另一方面,通过在枯水期、平水期与丰水期

开展采样,覆盖不同水文背景下的径流量变化、补水条件及污染负荷差异,以揭示水质的季节性波动特征.此外,采样点选取还兼顾了上游-中游-下游的位置分布、支流与干流的水文特征以及不同工程类型的组合,形成覆盖面广且结构合理的水质时空观测网络.全年共获取202组水质样本如图1a所示.

3 材料与方法 (Materials and methods)

3.1 水质指标监测

依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)和国家环境监测技术规范,选取有机物、营养盐、重金属及生态响应类指标共21项进行分析,其中高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、氟化物(F⁻)、石油类(Oil)、阴离子表面活性剂(LAS)及叶绿素a(Chl-a)等为WQI计算核心参数.检测采用ICP-MS、紫外分光光度计、离子色谱仪等仪器,确保数据的准确性与可比性.参考标准方法和检出限见表1.

表1 水体样品各项指标检测信息表
Table 1 The analytical methods for different water sample

检测项目	检测方法依据	检出限	检验仪器
镉(Cd)	《水质65个元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ700-2014)	0.00005 mg·L ⁻¹	电感耦合等离子体质谱仪
六价铬(Cr ⁶⁺)		0.0041 mg·L ⁻¹	
铅(Pb)		0.00009 mg·L ⁻¹	
铜(Cu)		0.00008 mg·L ⁻¹	
锌(Zn)		0.00067 mg·L ⁻¹	
总磷(TP)	《水质32种元素的测定电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ776-2015)	0.06 mg·L ⁻¹	
氟化物(F ⁻)	《水质:氯化物、氟化物、溴化物、硝酸盐和硫酸盐量的测定离子色谱法》(HJ84-2014)	0.05 mg·L ⁻¹	离子色谱仪
总氮(TN)	《水质总氮的测定水杨酸分光光度法》(HJ536-2009)	0.05 mg·g ⁻¹	
氨氮(NH ₃ -N)	《水质氨氮的测定水杨酸分光光度法》(HJ536-2009)	0.025 mg·L ⁻¹	
硫化物(S ²⁻)	《水质硫化物的测定亚甲基蓝分光光度法》(HJ1226-2021)	0.01 mg·L ⁻¹	
氰化物(CN ⁻)	《水质氰化物的测定容量法和分光光度法异烟酸-巴比妥酸光度法》(HJ484-2009)	0.002 mg·L ⁻¹	紫外可见分光光度计
阴离子表面活性剂(LAS)	《水质阴离子表面活性剂的测定亚甲基蓝分光光度法》(GB/T 7494-1987)	0.05 mg·L ⁻¹	
高锰酸盐指数(COD _{Mn})	《水质高锰酸盐指数的测定》(GB/T11892-1989)	0.5 mg·g ⁻¹	滴定管
汞(Hg)	《水质汞、砷、硒、铋和锑的测定原子荧光法》(HJ694-2014)	0.00004 mg·L ⁻¹	原子荧光光谱仪
砷(As)		0.003 μg·L ⁻¹	
硒(Se)		0.0004 mg·L ⁻¹	
化学需氧量(COD)	《水质化学需氧量的测定重铬酸盐法》(HJ 828-2017)	0.4 mg·L ⁻¹	COD消解仪 + 分光光度计
生物需氧量(BOD ₅)	《水质五日生化需氧量(BOD ₅)的测定稀释与接种法》(HJ 505-2009)	0.5 μg·L ⁻¹	BOD培养箱 + 溶解氧测定仪
石油类(Oil)	《水质石油类物质的测定红外分光光度法》(HJ 637-2018)	0.01 mg·L ⁻¹	红外分光光度计
叶绿素(Chl-a)	《水质叶绿素a的测定分光光度法》(HJ 897-2017)	2 μg·L ⁻¹	分光光度计 + 离心萃取装置

3.2 综合水质评价方法

为综合评估研究区水质,本文采用了水质综合指数(WQI)的方法.WQI通过对多项水质指标进行加权平均,能够有效反映水体的总体状态.公式如式(1)所示.

$$WQI = \left(\sum_{i=1}^n C_i P_i \right) / \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中, n 为评价的水质参数总项数; C_i 为归一化后分配给参数 i 的值, P_i 为分配给各参数的相对权重,初始权重.

权重的设置是 WQI 模型中的关键环节. 根据前人研究 (Şener *et al.*, 2017; 朱长军等, 2021; 唐琦等, 2022), 本文初步设定了各指标的权重, 并结合本地水质调查和污染源分析进行了权重调整. 基于沂蒙山区的水质特点和污染来源 (农业面源污染、城市面源污染等), 本文对主要水质因子的权重进行了本地化优化. 具体地, 总磷 (TP) 的权重被更改为 4 (郝婕, 2024), 这反映了它们在本地区水质污染中的重要性. 根据水质监测数据和当地的水污染源特征, 其他水质指标如氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 和化学需氧量 (COD) 也进行了适当的权重调整 (表 2).

表 2 参与 WQI 计算的各指标相对权重与标准化值
Table 2 Relative weights and standardized values of parameters in WQI computation

指标	单位	权重	标准化常数 (C_i)				
			100	80	60	40	20
高锰酸盐指数 (COD_{Mn})	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3	2	4	6	10	15
化学需氧量 (COD)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3	10	30	50	80	150
生物需氧量 (BOD_5)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3	3	3	4	6	10
氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4	0.05	0.2	0.4	0.75	1.25
总磷 (TP)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
总氮 (TN)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	0.2	0.5	1	1.5	2
石油类 (Oil)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	0.02	0.08	0.3	1.0	3.0
阴离子表面活性剂 (LAS)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
叶绿素 (Chl-a)	$\text{ug}\cdot\text{L}^{-1}$	3	1	7	15	30	50
氟化物 (F^-)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	1	1	1	1.5	1.5
镉 (Cd)	$\text{ug}\cdot\text{L}^{-1}$	1	5	5	5	5	10
铅 (Pb)	$\text{ug}\cdot\text{L}^{-1}$	4	10	10	50	50	100
铜 (Cu)	$\text{ug}\cdot\text{L}^{-1}$	2	10	1000	1000	1000	1000
锌 (Zn)	$\text{ug}\cdot\text{L}^{-1}$	2	50	1000	1000	2000	2000

评价等级划分为 4 个级别: ① $\text{WQI} \leq 40$, 水质等级为差; ② $40 < \text{WQI} \leq 60$, 水质等级为一般; ③ $60 < \text{WQI} \leq 80$, 水质等级为良好; ④ $\text{WQI} > 80$, 水质等级为优秀.

3.3 LASSO 回归模型构建

在本研究中, 选择了最小绝对收缩与选择算子回归模型 (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, LASSO 回归) 来筛选关键水质因子, 并优化 WQI 模型的参数. LASSO 模型尤其适用于处理多变量共线性问题和变量选择 (万颖等, 2025), 并能够从众多潜在水质因子中筛选出最具影响力的因素.

LASSO 回归的主要优点包括: 首先, 高维数据处理, 处理高维数据与多重共线性: 尽管样本量较大, 但数据中包含的多个水质因子可能存在冗余和共线性问题. LASSO 回归通过 L1 正则化, 能够有效地从 21 个因子中筛选出最具显著性和影响力的变量, 避免冗余因子的干扰, 确保模型的简洁性和准确性; 其次, 变量选择与降维: LASSO 回归能够自动将不重要的水质因子系数收缩为零, 进而从高维数据中选出对水质变化影响最大的因子. 这使得 LASSO 非常适合处理具有多个监测因子的大样本数据, 能够有效进行因子筛选并提升模型的预测性能; 最后, 较强的预测能力和泛化能力: LASSO 回归不仅能在当前的数据集上进行高效训练, 还具有较强的泛化能力, 能够在不同的水文条件和修复单元下应用, 确保水质变化的预测具有较高的稳定性和可靠性. 其涉及的函数如式 (2) 所示.

具体操作流程为: 首先对所有候选水质指标进行初步筛选, 剔除全零、近零方差等无区分度的无效指标, 保留具备潜在解释力的指标; 随后通过 K 折交叉验证遍历不同正则化参数 λ , 计算各 λ 对应的模型平均均方误差 (MSE), 选择使 MSE 最小的作为最终正则化参数; 最后基于最优 λ 训练 LASSO 模型, 通过系数 β 的稀疏性特性完成核心水质指标筛选. 具体的, 当 $\beta \neq 0$ 时, 这些指标则被认定为“对目标变量 (如水质评分) 有显著影响”的核心指标; 那当 $\beta = 0$ 时, 则说明这些指标对水质变化无贡献, 属于冗余指标, 无需纳入后续分析.

其优化目标函数见式 (2).

$$\min_{\beta} \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j)^2 + \lambda \sum_{j=1}^p |\beta_j| \right) \quad (2)$$

式中, y_i 为第 i 个初步计算的水质综合指数(WQI); x_{ij} 为第 i 个样本在第 j 个指标(如TP、TN等)上的值; β_j 为回归系数,表示每个水质因子对WQI的贡献程度; λ 为正则化强度参数,控制L1正则化对回归系数的约束程度; n 为样本量, p 为初始水质指标数.

3.4 变异系数

为评价修复单元在全年及各水期的水质稳定性,计算各单元WQI的变异系数(CV).CV值小表明水质波动小、工程稳态性强;反之则表示系统易受干扰.公式表达如(3)所示.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (3)$$

式中, σ 为标准差,表征数据绝对波动性; μ 为数据集均值,代表平均水平.

3.5 双因子方差分析

在这里为识别水文期与修复单元对水质变化的主导作用及交互效应,文章采用双因子方差分析(Two-Way ANOVA)对WQI及关键单项指标进行显著性检验.因子设置为“修复单元类型”(8类)与“水文期”(3类),响应变量为WQI及主要单项指标,显著性水平设为0.05.此方法可揭示工程效应的空间差异性及其水文驱动特征,为优化生态修复方案提供数据支撑.

4 结果(Results)

4.1 基于LASSO回归的指标筛选与WQI重构

本研究借助RStudio 4.3.2软件,依据3.3.3节的研究步骤,对表2中参与分析的14项指标的水质指数(WQI)计算结果开展LASSO回归分析(图2),旨在筛选对区域水质存在显著影响的关键水质因子.结果表明:首先,该模型的拟合优度(R^2)达0.999,均方根误差(RMSE)为0.262,说明模型具备较高的统计学预测精度,由此构建了高精度的WQI-LASSO模型.其次,图2中10项指标的 β 系数值均大于0,表明这些指标均为对水质产生显著影响的关键因子;而Cu、Zn、As和Cd这4项指标的系数被收缩至0,因此被剔除出关键因子范畴.此外,为进一步明晰各因子的影响程度,本研究依据系数绝对值大小对其影响效力进行排序,其中TP、TN、BOD₅、COD_{Mn}、NH₃-N、Chl-a为影响WQI的核心因子;COD、Oil及F等指标的影响效力则相对较弱.

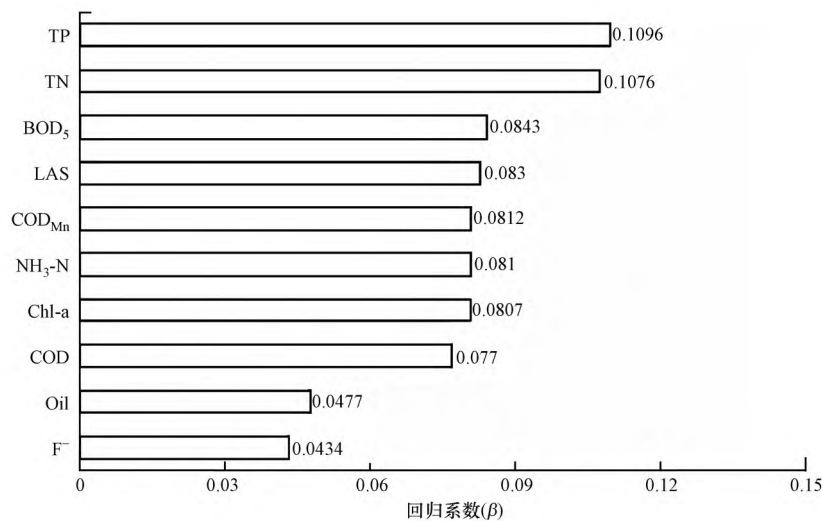


图2 LASSO回归模型中纳入指标的回归系数(β)排序

Fig.2 Ranking of standardized coefficients (β) in LASSO regression model for water quality feature selection

4.2 WQI时空变化特征

用LASSO回归模型筛选出的关键因子进行WQI计算,并将计算结果在矢量地图上进行空间可视化表达(图3),能够直观反映不同修复单元及水文期的水质分布格局和梯度变化特征.如图3所示,各区在不同水文期水质均值整体处于良好和优秀之间,水生态保护与防控单元水质明显较差,均值处于一般水平.枯水期整体水质较优,站点分布较为分散,主要集中在上游及部分中游区域;中等水质站点占比较高,分布于流域各段;水质较差站点数量有限,但集中出现在下游局部断面.平水期低WQI站点明显增多,尤其在中下游及部分修复单元内水质劣化较为突出;高WQI站点虽仍分布于上游,但比例下降.丰水期整体水质明显改善,WQI≥80的优质水站点占比提升,低WQI站点消失,良好WQI站点主要集中于极少数下游断面.

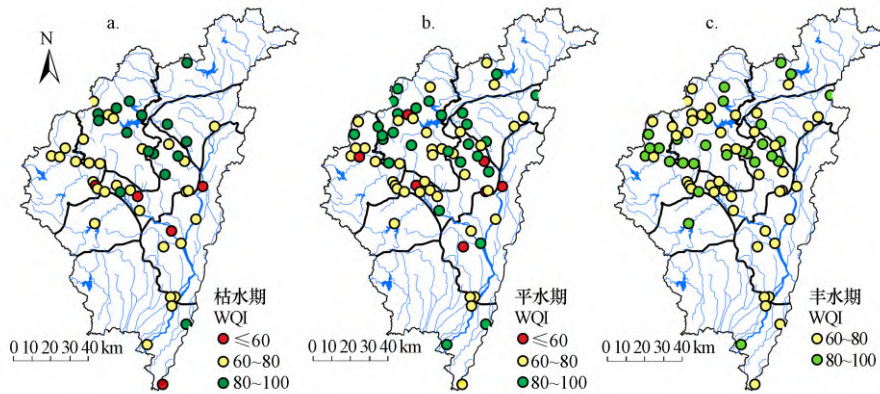


图3 不同水文期WQI空间分布(a.枯水期,b.平水期,c.丰水期)

Fig.3 Spatiotemporal distribution of WQI across hydrological periods(a. dry season, b.normal season, c. wet season)

计算不同修复单元在不同水期WQI均值与年内变异系数(CV),如图4所示差异显著:各工程单元的年内变异系数介于0.89%~9.35%,表明不同工程属性对应的季节敏感性差异显著.按CV的数量级可归纳为3类:

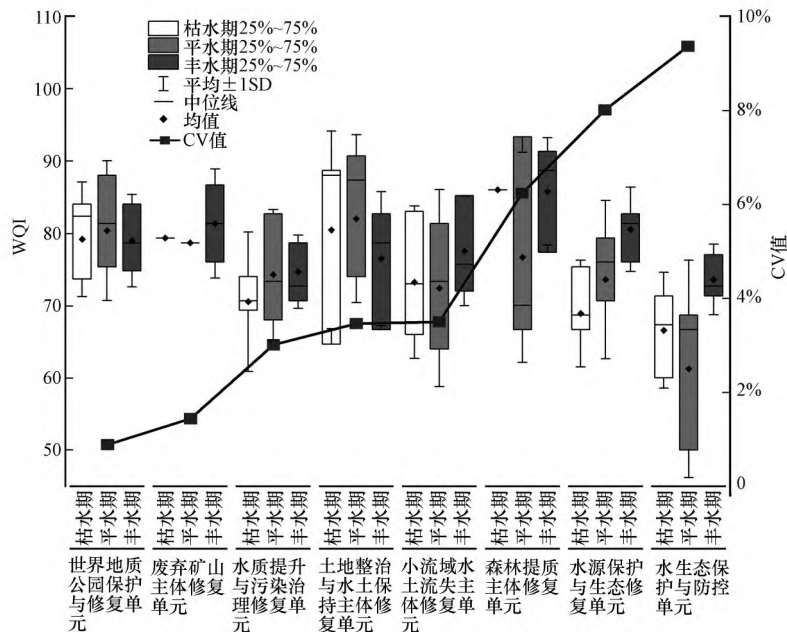


图4 8个生态修复单元在3个水期下的WQI表现与变异系数CV

Fig.4 The water quality index (WQI) performance and coefficient of variation CV of the eight ecological restoration units during the three-month period

①低波动/稳健型($CV < 2\%$):世界地质公园保护与修复单元、废弃矿山主体修复单元在3个水期内均维持“高稳定性-低波动”格局,表现出跨季节的高度稳定性.

②中等波动($2\% \leq CV < 5\%$):水质提升与污染治理、土地整治与水土保持主体修复单元、小流域水土流失主体修复单元整体表现平稳.

③高波动/季节敏感型($CV \geq 5\%$):森林提质主体修复单元、水源保护与生态修复单元与水生态保护与防控单元对水文过程极为敏感.

4.3 不同水文期的驱动因子解析

通过皮尔逊相关性分析(图5),不同水文期水质因子之间的关系表现出显著差异.在平水期,有机污染物(COD_{Mn} 、 BOD_5)和氨氮(NH_3-N)对水质有显著的负面影响;而在丰水期,水文稀释效应显著,有机污染物和氨氮的负相关性增强.此外,营养盐(TP、TN)与有机物和藻类生长(Chl-a)之间存在较强的正相关关系,尤其在丰水期,藻类生长对水质影响较大.

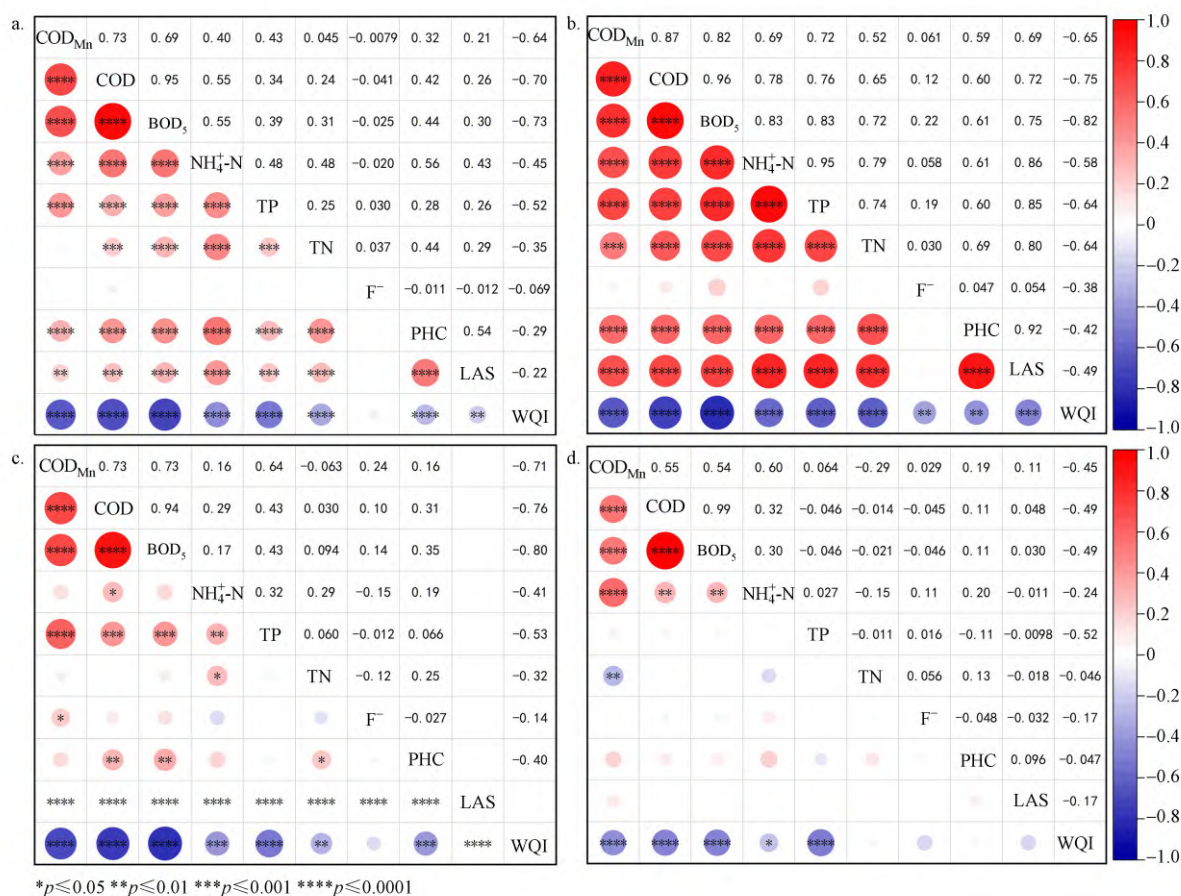


图5 主要水质因子与WQI的皮尔逊相关性分析(a.整体相关性,b.枯水期相关性,c.平水期相关性,d.丰水期相关性)

Fig.5 Pearson correlation analysis between key water quality parameters and WQI (a. overall, b. dry season, c. normal season, d. wet season)

4.4 不同生态修复单元的水质差异

通过双因子方差分析(表3),本文分析了水文期和修复单元对水质指标(如 COD 、 TN 、 BOD_5 、 NH_3-N 等)的主效应和交互效应(仅保留相关关系较大8项).结果显示: COD 与 TN 指标在修复单元和水期的主效应下均显著,表明它们受到空间配置与水文条件的双重影响. TN 则在丰水期变化较大,水期对 COD_{Mn} 、 NH_3-N 与 Cu 等指标的影响显著. Zn 受水期影响较小,但在暴雨后可能出现浓度上升,说明其时空响应受降雨和土壤流失的综合影响. TP 等水期因素边缘显著,表明磷素迁移过程受到复杂扰动.

5 讨论(Discussion)

本研究通过系统评估沂蒙山区的生态修复工程,揭示了不同修复单元和水文期对水质的不同影响机制.在结果部分中,本文通过LASSO回归模型筛选了影响水质的关键因子,并结合水文期的时空变化,深入探讨了不同水文期对水质变化的控制作用.研究表明,水质在不同水文期和不同修复单元下的表现存在显著差异.

5.1 水文期对水质影响的空间与时间变化

从水文期来看,研究发现,水质在不同水文期的表现有明显的时间和空间差异.具体而言,平水期水质最差,丰水期水质最好.这一现象与平水期的污染物积累效应和丰水期的稀释效应密切相关.枯水期的水质表现较为优越,且站点主要集中在上游及部分中游区域,水质较好;而在丰水期,水质显著改善,特别是在上游水域,但低WQI站点在中下游断面消失.这表明,水文期的变化对水质的影响不仅表现为水质的总体波动,还在不同区域的水质水平上产生了不同的梯度效应.

5.2 不同水文期影响因子的变化与作用

根据LASSO回归模型筛选出的关键因子,平水期、丰水期和枯水期的水质控制因子各不相同.在平水期,由于水体交换能力较低,污染物表现出强烈的累积效应.此时,COD_{Mn}、COD和BOD₅与氨氮(NH₃-N)的相关性最强,表明有机污染物和氨氮是影响水质的主要因子.尤其是COD_{Mn}和BOD₅,它们在平水期表现出显著的负相关关系,提示这一时期生活污水和工业污水的排放对水质造成了显著影响,这也进一步验证了生活和工业面源污染的阶段性累积效应.

在丰水期,水体的稀释效应显著,虽然有机污染物的浓度降低,但随着降水量的增加,大量面源污染物进入水体,尤其是农田径流.此时,氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)对水质的影响仍然较大,且与BOD₅、COD等指标的正相关性增强,表明水质恶化主要与农业面源污染物的输入及藻类生长(Chl-a)相关.因此,在丰水期,除了考虑污染物的稀释作用外,还需关注农业面源污染和藻类生长的控制.

在枯水期,水体流量较低,污染物的稀释效应最小.此时,水质的变化受水文梯度的控制,主要体现在上游和下游之间的水质差异.在枯水期,由于径流量减少,水质较为优越,主要集中在上游区域,而下游局部区域的水质较差,可能与地表径流、污染物积累及地形影响有关.

5.3 修复措施对水质变化的影响

不同修复单元对水质的影响表现出显著的差异,尤其在在不同水文期下.森林提质和水源保护单元在3个水文期中展现出较高的水质稳定性,变异系数(CV)较低(<2%).这些单元能够有效调节水质波动,尤其是在枯水期和丰水期,通过植被恢复和水源保护增强了生态系统的水质维持能力.相较之下,矿山修复单元在水质波动方面表现出较大的敏感性,尤其在丰水期受到外源污染物的冲刷影响较大,因此其水质波动较为剧烈.

水生态保护与防控单元、水源保护单元在不同水文期的表现差异也较为显著.尤其在丰水期,这些单元由于面源污染物输入的增加,水质波动较大,表明水文条件的变化会对这些修复单元的稳定性产生较强的影响.这一结果表明,不同修复单元需要根据水文期特征制定针对性的管理策略.

5.4 生态修复措施的长期与短期效应

本研究还揭示了不同生态修复措施的长期与短期效应,特别是修复时间对水质稳定性的影响.森林提质和水源保护单元在长期恢复后表现出较高的水质稳定性,而矿山修复单元则表现出滞后效应,水质稳定性在初期较低,随着修复的深入逐渐得到改善.这表明生态修复的时间效应对水质的改善至关重要,尤其是在修复初期,水质可能并不立即得到改善,需要较长时间的生态恢复才能显现其调节作用.

表3 双因子方差分析结果

Table 3 The results of the two-factor variance analysis

指标	修复单元F统计值	水期F统计值	交互作用F统计值
COD _{Mn}	1.99	10.43***	1.11
COD	3.36**	6.43**	1.18
BOD ₅	4.12***	1.04	1.32
NH ₃ -N	1.53	5.95**	1.21
TP	1.15	2.91	0.66
TN	2.47*	6.19**	1.35
Cu	1.15	9.37***	1.01
Zn	5.81***	1.28	2.18*

注:*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

5.5 未来研究方向与管理建议

未来的研究可以进一步探讨修复时间对水质的影响,尤其是在不同阶段的水质变化以及生态系统恢复的时间延迟效应.针对不同水文期的水质变化,管理策略应根据水文期的特征进行灵活调整.在丰水期,应重点加强农业面源污染的控制和藻类防控措施;在平水期,应强化对生活 and 工业污水的监管,减少有机污染物的积累;而在枯水期,应注重上游污染物的控制,保障生态基流和水体的自净能力.

然而,研究中也存在一些局限性.首先,本研究的水质监测数据主要来自2024年3个不同水文期的监测点,尽管已经涵盖了枯水期、平水期和丰水期,但生态修复措施的时间效应尚未被深入探讨.因此,未来的研究可以考虑对不同修复时间阶段的水质变化进行长期监测,尤其是在修复初期和生态系统稳定后的不同阶段,进一步揭示时间效应对水质的影响.其次,本研究采用的WQI-LASSO回归模型虽然在筛选关键因子方面具有较高精度,但仍需验证其在不同流域和环境条件下的适用性和稳定性.未来可以结合机器学习等更多方法,对水质变化进行动态预测和模拟.最后,虽然本研究为沂蒙山区提供了水质管理的定量依据,但生态修复的长期效果与社会经济变化的互动作用尚未充分考虑,未来的研究可以扩展到社会经济因素的评估,形成更全面的流域水环境管理框架.

6 结论(Conclusions)

1)水质在时间尺度上呈现显著差异,平水期水质最差,丰水期最佳;在空间尺度上表现为“上游优、下游劣”的分布格局.

2)TP、TN与BOD₅等是区域水质的关键控制因子,基于LASSO回归优化的WQI模型在拟合精度上表现突出,验证了指标约简与权重优化对提升评价灵敏度和适应性的有效性.

3)COD_{Mn}和NH₃-N主要受水文期调控,而BOD₅和COD对生态修复工程措施更为敏感,表明自然水文学节律与工程干预在水质形成机制上具有协同作用.不同修复单元中,森林提质和水源保护单元展现出更高的水质稳定性,体现了其在流域水质维持中的重要作用.

4)不同修复单元的水质改善效果受修复时间的影响,尤其在修复初期和长时间恢复阶段,水质改善效果表现出显著的阶段性差异.森林提质和水源保护单元在修复后期展现出较高的水质稳定性.然而,考虑到植被恢复过程中可能需要进行砍伐、间伐等操作以引入新物种,植被生态的稳定性往往表现为滞后效应,表明其在调节水文波动中的作用需要一定时间才能显现.

5)基于不同水文期和修复单元对水质的影响,建议在平水期强化污水处理和点源管控,在丰水期加强农业面源污染治理,并优化生态补水策略.考虑到修复时间对水质的影响,未来的管理策略应充分考虑生态恢复的时效性和阶段性效应.

本研究不仅为沂蒙山区的生态修复与水环境保护提供了定量依据,也为类似丘陵山区的流域水环境治理提供了方法学参考.未来的研究应进一步加强对生态修复时间效应的探索,并考虑社会经济变化对水质管理的影响.

参考文献(References):

- 陈慧,黎小红,谢建枝,等.2025.基于WQI和多元统计分析的官厅水库水质评价[J].环境科学与技术,48(6):185-197
- 范泽宇,袁林,周亦,等.2021.基于WQI法的滴水湖及入湖河道水质研究[J].上海海洋大学学报,30(2):276-283
- 耿皎,王洋,胡木刚,等.2023.基于WQI的平原河网地区河流水质评价与时空变化分析[J].环境工程,41(6):187-193,209
- 龚芯磊,梁龙,严中富,等.2025.山水林田湖草生命共同体背景下的小流域生态保护修复——以挽澜河流域为例[J].贵州地质,42(2):178-188,215
- Giri S, Qiu Z. 2016. Understanding the relationship of land uses and water quality in twenty first century: A review[J]. Journal of Environmental Management, 173: 41-48
- Guo J, Zhang C, Zheng G, et al. 2018. The establishment of season-specific eutrophication assessment standards for a water-supply reservoir located in northeast China based on chlorophyll-a levels[J]. Ecological Indicators, 85: 11-20
- 郝婕. 2024. 山东省流域水体的水质时空分异规律与氮污染归因分析[D]. 济南: 山东大学
- Hilton J, O'Hare M, Bowes M J, et al. 2006. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. Science of the Total Environment,

365(1/3): 66-83

- Huang J, Zhang Y, Bing H, *et al.* 2021. Characterizing the river water quality in China: recent progress and on-going challenges[J]. *Water Research*, 201: 117309
- 解鑫, 尤佳艺, 李文攀, 等. 2023. 2011—2021年全国地表水环境质量评价与变化分析[J]. *中国环境监测*, 39(4): 23-32
- Koçer M A T, Sevgili H. 2014. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms[J]. *Ecological Indicators*, 36: 672-681
- Lumb A, Sharma T C, Bibeault J F. 2011. A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions[J]. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(1): 11-24
- 马庆, 苏香燕, 周妍, 等. 2025. 基于居民生计变化的区域生态修复社会效益研究[J]. *生态学报*, 45(11): 5101-5112
- Pan B, Yuan J, Zhang X, *et al.* 2016. A review of ecological restoration techniques in fluvial rivers[J]. *International Journal of Sediment Research*, 31(2): 110-119
- Şener Ş, Şener E, Davraz A. 2017. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in aksu river (SW-turkey)[J]. *Science of the Total Environment*, 584-585: 131-144
- 汤世豪, 朱建强, 章叶飞, 等. 2025. 四湖流域营养盐时空分布特征及来源分析[J]. *长江科学院院报*: 1-11[2025-11-28].<https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20250401.1524.021>.
- 唐琦, 刘兵, 王璞, 等. 2022. 改进WQI在川中丘陵地区典型流域水质评价中的应用——以琼江流域上游段为例[J]. *环境工程技术学报*, 12(2): 615-623
- Uddin M G, Nash S, Rahman A, *et al.* 2022. A comprehensive method for improvement of water quality index (WQI) models for coastal water quality assessment[J]. *Water Research*, 219: 118532
- 万军芳, 郭新超, 胡恩, 等. 2022. 基于WQI和TLI的渭河关中流域城市典型坝控景观河道水质评价[J]. *环境工程*, 40(2): 66-70
- 万颖, 杜明普, 郭艳敏, 等. 2025. 基于WQImin模型的贵州草海水质评价分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 53(4): 107-118
- 王少华. 2013. 临沂市生态环境系统评价及区域划分研究[D]. 青岛: 中国海洋大学
- 徐若诗, 逢勇, 罗缙, 等. 2024. 基于WQI的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J]. *环境科学*, 45(9): 5227-5234
- 徐晓林, 柳强, 杨珺, 等. 2025. 沱江流域主要水质污染指标变化及驱动因子分析[J]. *人民长江*, 56(5): 39-47
- 杨峰霖, 闫强, 王金满, 等. 2025. 国土空间生态修复中的水平衡研究进展[J]. *生态学杂志*, 44(3): 1002-1009
- 张胜楠, 李发永, 刘松江, 等. 2025. 塔里木河上游水质评价多元统计方法比较研究[J]. *环境科学与技术*: 1-17
- 朱长军, 赵方星, 李步东, 等. 2021. 基于主成分分析及WQImin的大黑汀水库水质评价[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 49(3): 52-58, 124
- 邹霞. 2024. 基于WQI的河网水系水质评价及时空特性分析[J]. *水电能源科学*, 42(4): 53-56, 88