陈晴空,黄秦森,况 力,等.基于 PSRB 模型的农村黑臭水体整治效果和影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(10):5671-5681.
Chen Q K, Huang Q S, Kuang L, et al. Study on the remediation effect and influencing factors of rural black and odorous water based on the PSRB model [J]. China Environmental Science, 2025,45(10):5671-5681.

基于 PSRB 模型的农村黑臭水体整治效果和影响因素研究

陈晴空[1,2*],黄秦森[1,2],况 力[2,3],杨肃博[2,3],范剑平[4] (1.重庆交通大学,环境水利工程重庆市工程实验室,重庆 400074；2.重庆交通大学-重庆港力环保股份有限公司资源与环境研究生联合培养基地,重庆 400074；3.重庆港力环保股份有限公司,重庆 400042；4.重庆文理学院,重金属废水资源利用重庆市重点实验室,重庆 402160)

摘要：基于对重庆市 50 处农村黑臭水体整治项目调查的基础上,构建了“压力-状态-响应-效益”(PSRB)框架模型,从压力、状态、响应、效益四个维度筛选确定评价指标,形成了评价指标体系.对已整治完成 6 个月以上的堰塘、沟渠和河流 3 种类型黑臭水体的 11 个典型案例进行了评价,并跟踪评价了其中堰塘型黑臭水体在 2023 年 6、8、10 月的整治效果.结果表明,压力、状态、响应、效益各维度权重分别为 0.27,0.21,0.36,0.16,权重较高的负向指标(C_{11}、C_{14}、C_{24}、C_{36})多于权重较高的正向指标(C_{31}、C_{41}),即农村黑臭水体整治虽然得到了积极响应,但整治完成的水体仍存在较大压力,获得效益有限.11 个典型案例中,10 个案例的整治效果等级为“有效”,1 个案例为“合格”.压力维度中“水域人口负荷较大”、“截污纳管破损”、“黑臭底泥残留”以及响应维度中“水体整治投资较高”、“运维管护执行力度不足”是对整治效果带来不利影响的主要因素.

关键词：农村黑臭水体；影响因素；压力-状态-响应-效益(PSRB)模型；评价指标体系；整治效果
中图分类号：X52 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)10-5671-11

Remediation effect and influencing factors of rural black and odorous water based on the PSRB model. CHEN Qing-kong[1,2*], HUANG Qin-sen[1,2], KUANG Li[2,3], YANG Su-bo[2,3], FAN Jian-ping[4] (1.Chongqing Engineering Laboratory of Environmental & Hydraulic Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China；2.Joint Graduate Training Base of Resources and Environment Between Chongqing Jiaotong University and Chongqing Gangli Environmental Protection Co. , Ltd. , Chongqing 400074, China；3.Chongqing Gangli Environmental Protection Co., Ltd., Chongqing 400042, China；4.Chongqing Key Laboratory for Resource Utilization of Heavy Metal Wastewater, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China). *China Environmental Science*, 2025,45(10)：5671~5681

Abstract：Based on the investigation of 50 rural black and odorous water remediation projects in Chongqing, this study constructed a "Pressure-State-Response-Benefit" (PSRB) framework model, screened and determined the evaluation index from the four dimensions of Pressure, State, Response and Benefit, and formed an evaluation index system. Based on the investigation of 11 typical cases of black and odorous water specifically ponds, ditches, and rivers that had been remediated for over six months, an evaluation was conducted. Among these, the remediation effect of pond-type black and odorous water was tracked and evaluated in June, August, and October 2023. The results indicate that the weights of the four dimensions Pressure, State, Response and Benefit were 0.27, 0.21, 0.36, and 0.16, respectively. The negative indexes with higher weights (C_{11}, C_{14}, C_{24}, C_{36}) outnumber the positive indexes with higher weights (C_{31}, C_{41}). This suggests that although the remediation of rural black and odorous water has received a positive response, the water that have been remediated still face significant pressure and have limited benefits. Among them, the remediation effect of 10cases was rated as "Effective," while 1case was rated as "Passing." In the Pressure dimension, factors such as "high population load in the water area," "damage to sewage interception and pipe networks," and "residual black and odorous sludge," as well as in the Response dimension, "the investment in water body remediation is relatively high" and "insufficient implementation of operation and maintenance management" were the main adverse influencing factors of the remediation effect.

Key words：rural black and odorous water；influencing factors；pressure-state-response-benefit (PSRB) model; evaluation index system；remediation effect

---

收稿日期：2025-02-24
基金项目：重庆市生态环境局项目“农村黑臭水体清单及治理过程动态管理”(CQS23C00122);国家自然科学基金项目(42007352);重庆市研究生联合培养基地项目(JDLHPYJD2022005)

* 责任作者, 副教授, chenqingkong@cqjtu.edu.cn

消除农村黑臭水体是改善农村人居环境,建设美丽宜居乡村的重要途径之一[1-2].“十四五”规划期间,重庆市积极组织开展农村黑臭水体“清零”攻坚行动[3],农村黑臭水体整治后,水体污染得到缓解、农村环境明显改善[4-6].但我国农村黑臭水体整治总体起步较晚[7-9],整治效果评价方法暂不统一,需要建立系统的、全面的评价指标体系,对农村黑臭水体的整治效果进行评价,得出影响整治效果的主要因素,总结整治经验.

城市和农村黑臭水体整治效果评价的相关研究总结了黑臭水体整治工程案例、《城市黑臭水体整治工作指南》(建城〔2015〕130 号)等规范标准,得出水质指数[10]、截污减排率[11]、植被覆盖指数、清淤工程完成效果[12]、截污管网铺设率和公众满意度[13]等凸显黑臭水体整治效果的重要指标.但未开展实际的跟踪评价,对整治效果的评价尚不全面,不同指标因素对整治效果的影响仍不明确.

“压力-状态-响应(PSR)模型”是 HJ 130—2019 推荐的评价指标确定方法[14],具有较强的通用性和灵活性且广泛应用于环境影响评价[15]、生态健康评价[16]等领域的指标体系构建,但缺少对整治完成水体的持续效益的评价分析.“状态-响应-效益(SRB)模型[17]”在 PSR 模型基础上去除了压力维度,增加了效益维度,重点反应人类应对环境变化而做出响应行动带来的社会、环境、经济等效益.基于 SRB 模型建立黑臭水体整治效果的评价指标体系的研究[18]虽然分析了公众评议满意度、水体环境改善等效益维度因素,但未探究造成水体返黑返臭的压力维度因素.基于重庆市生态环境局“农村黑臭水体清单及治理过程动态管理”项目,本课题组在 2023 年 4 月~2024 年 1 月对永川、荣昌、涪陵、梁平、万州和开州等区县内已完成的 50 处农村黑臭水体整治项目的现场调查中发现,部分整治完成的水体存在截污纳管破损、黑臭底泥残留等不可忽视的返黑返臭“压力”.

因此,本文结合 PSR 模型和 SRB 模型的共性和特性,构建“压力-状态-响应-效益(PSRB)”模型,用于建立合理的指标体系,根据现场调查筛选评价指标,应用“熵权法-层次分析法(EW-AHP)”确定指标权重.应用此体系评价了 11 个典型案例在 2023 年 8 月的整治效果,同时跟踪评价了其中的堰塘型案例在 2023 年 6、8、10 月的整治效果,得出了对整治效果带来不利影响的主要因素,以期为科学制定农村黑臭水体整治方案并实现长制久清提供支撑.

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

项目组通过现场采样测定、走访居民、公众评议问卷等方法,于 2023 年 4 月~2024 年 1 月调查收集了 50 处农村黑臭水体整治项目(图 1)的基础资料,包括人口、水域面积、水质参数、污染来源、管理现状等.其中,堰塘、河流、沟渠三种类型水体数量分别为 22 处、16 处和 12 处,堰塘类占比最高为 44%,并回收有效公众评议问卷 903 份.选择已整治完成 6 个月以上的 11 个典型案例(堰塘、河流、沟渠类型数量分别为 5 个、3 个和 3 个)作为评价对象,收集了 11 个典型案例 2023 年 8 月以及其中堰塘型案例 2023 年 6、10 月的资料,调查概况见表 1.

1.2 整治效果评价指标体系的构建

1.2.1 PSRB 框架模型 典型的 PSR 模型包括压力、状态和响应 3 个维度,基于因果关系和相互影响总结衡量不同维度[19].以人类活动对环境施加压力为因,引起环境原本自然状态或资源的变化,人类又针对这些变化做出响应,以求恢复环境状态[20-21].SRB 模型在 PSR 模型基础上去除了压力要素,增加了效益要素,因调查发现整治完成的农村黑臭水体存在黑臭底泥残留、截污纳管破损等“压力”,并为更全面的评价农村黑臭水体整治效果,本文在 PSR 模型和 SRB 模型的基础上,构建了 PSRB 框架模型,强调“压力-状态-响应-效益”四维度的因果逻辑.如图 2,基于 PSRB 模型的评价指标体系框架包括 3 个层次,分别为目标层 A(农村黑臭水体整治效果评价)、准则层 B(压力、状态、响应、效益四维度)、指标层 C(对应准则层选择适宜指标).其中压力 (Pressure)描述可能诱发水体返黑返臭的因素,状态(State)描述水体环境现状,响应(Response)描述综合整治内容的具体情况,效益 (Benefit)描述水体整治完成后的治理效益.

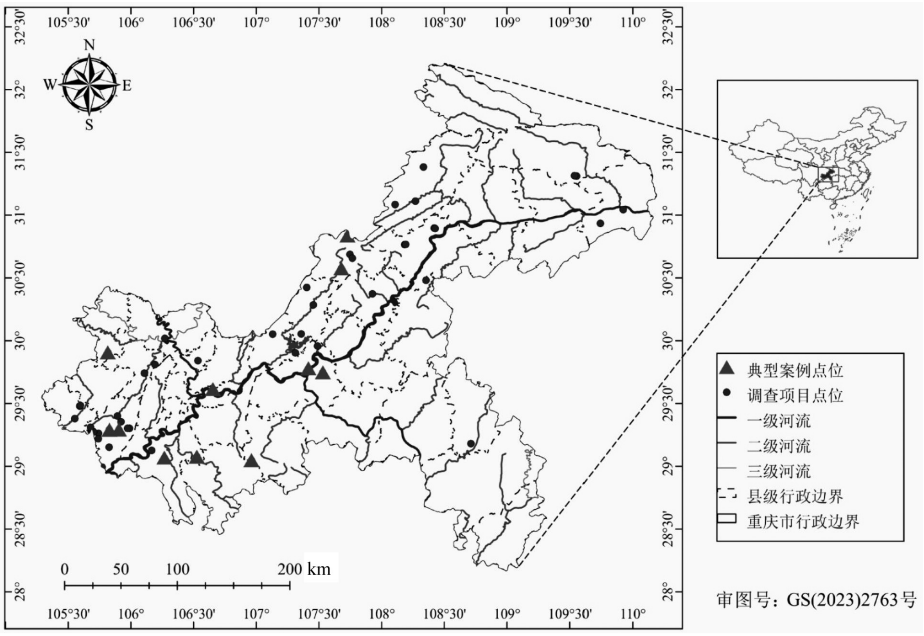


图 1　农村黑臭水体整治项目点位示意

Fig.1　Schematic diagram of the locations of rural black and odorous water remediation projects

表 1　2023 年 8 月典型案例调查概况

Table 1　Overview of typical case investigations in August 2023

案例	监管级别	污染来源	人口	水域面积(m^2)	公众评议问卷(份)	水质参数			水体状态
						透明度(cm)	溶解氧浓度(mg/L)	氨氮浓度(mg/L)	
堰塘 1	国家级	农村生活污染和内源污染	534	4500	10	27	3.78	6.58	管网破损,污水直排,氨氮浓度较高,有明显异味
堰塘 2	市级	农村生活污染和内源污染	5	300	10	32	2.67	0.26	水质检测达标,无异味,环境整洁
堰塘 3	国家级	农村生活污染、内源污染和养殖污染	120	600	10	63	5.39	0.16	水质检测达标,无异味,有少量白色垃圾
堰塘 4	国家级	农村生活污染、内源污染和养殖污染	300	1075	11	37	7.96	0.87	水质检测达标,无异味,环境整洁
堰塘 5	国家级	农村生活污染、内源污染和种植源污染	30	2000	9	32	8.63	0.27	水质检测达标,无异味,环境整洁
河流 1	国家级	农村生活污染和内源污染	14250	72000	11	1(水浅见底)	4.35	5.13	水质检测达标,但有黑色淤泥及污水排放痕迹
河流 2	国家级	农村生活污染、内源污染和养殖污染	80	700	12	32	1	1.98	溶解氧浓度<2mg/L,水质检测不达标
河流 3	国家级	农村生活污染、内源污染和种植源污染	100	3750	18	34	5.39	2.35	水质检测达标,无异味,环境整洁
沟渠 1	市级	农村生活污染和内源污染	24	600	11	43	2.61	2.08	水质检测达标,但上游段局部有黑臭底泥,有污水溢流痕迹
沟渠 2	国家级	农村生活污染、内源污染和种植源污染	100	2500	14	5(水浅见底)	5.44	0.5	水质检测达标,无异味,环境整洁
沟渠 3	国家级	内源污染和养殖污染	130	3240	10	40	4.88	0.94	水质检测达标,无异味,环境整洁

1.2.2　指标选取和评价指标体系构建　根据 PSRB 模型体系框架和科学性、层次性、代表性和可操作性 4 个原则[22],对应准则层各维度初步选取指标.B_1 压力维度:农村黑臭水体整治完成后,大量的污染物

得到收集处理,仍有部分进入水体,继而诱发水体返黑返臭.例如水体周边居民数量较多则总排污量较大、农村居民环保意识淡薄随意丢弃垃圾[7]、截污纳管破损导致的污水泄漏[12]等外源压力.黑臭底泥因清理不彻底、处置不当而残留,水生植物腐败等内源压力.因此选取 C_{11} 水域人口负荷[9]、C_{12} 水体周边垃圾、C_{13} 截污纳管破损率、C_{14} 残留黑臭底泥厚度[23]、C_{15} 水生植物腐败程度为压力指标.B_2 状态维度:农村黑臭水体整治完成后,周边环境整洁,水体状态明显改善,满足《农村黑臭水体治理工作指南》(环办土壤〔2023〕23 号) (以下简称《指南》)中水体感官、水质基本要求.参考《指南》和《幸福河湖建设成效评估工作方案(试行)》(办河湖〔2023〕33 号)[24],选取 C_{21} 水体感官、C_{22} 透明度、C_{23} 溶解氧浓度、C_{24} 氨氮浓度、C_{25} 岸线自然状况、C_{26} 水体周边环境整洁为状态指标.B_3 响应维度:通过对已完成黑臭水体整治的 50 处整治项目进行资料收集和现场调查发现,治理管理等资料较为完备,水体周边的污染物已得到收集处理,村镇已建立方案和维护队伍等非工程措施对水体进行定期运维.根据《指南》中的经济适用原则,工程投资同样影响整治力度和维护力度.因此,选取 C_{31} 截污纳管铺设率、C_{32} 污水收集处理率[13]、C_{33} 水生植物覆盖率、C_{34} 整治工程管理控制难易程度、C_{35} 运维管护执行力度[10-12]、C_{36} 单位水体投资强度、C_{37} 综合整治实施时长为响应指标.B_4 效益维度:整治项目主要是以改善农村生活环境、消减污染物进入水体、保护村庄相关流域水质为主要目的,是政府主导的提升农村人居环境的基础项目,具有很强的公益性[25].结合现场调查和公众评议问卷,选取 C_{41} 居民满意度[2,18]、C_{42} 整治工程服务人口数量、C_{43} 污水减排率[13]、C_{44} 污染拦截率为效益指标.

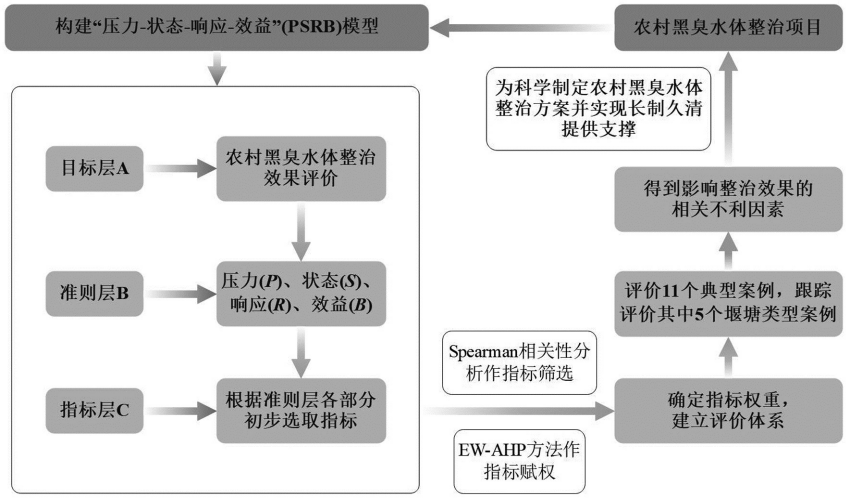


图 2 研究思路

Fig.2 The research approach

上述 22 个指标中包含 C_{12}、C_{15}、C_{21}、C_{25}、C_{35}、C_{36}等定性指标,利用 Spearman 相关性分析将信息出现冗余的指标予以剔除,降低指标间的信息重叠程度对评价结果的影响[26],设置相关系数$|r|>0.60$ 为阈值[27],筛选出相互独立的指标,相关性系数ρ_s 计算公式如下:

$$\rho_s=\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i-\overline{R})(S_i-\overline{S})}{[\sum_{i=1}^{n}(R_i-\overline{R})^2\sum_{i=1}^{n}(S_i-\overline{S})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中:R_i,S_i 分别为指标取值的排序位次;$\overline{R}$,$\overline{S}$ 分别为指标的平均位次.

相关性分析结果见图 3,其中红色、正系数表示正相关性,绿色、负系数表示负相关性;系数绝对值越大代表相关性越强,反之相关性越弱[26].指标 C_{12} 与 C_{21},C_{15} 与 C_{26}、C_{43},C_{26} 与 C_{25}、C_{43},C_{32} 与 C_{44},C_{37} 与 C_{14},C_{42} 与 C_{11} 的相关性系数较高,故剔除 C_{12}、C_{15}、C_{26}、C_{32}、C_{37}、C_{42}.农村黑臭水体整治效果评价指标体系见表 2,并给出相应量化方法.

1.2.3 指标权重确定 常用主观赋权方法包括层次分析法(AHP)[28-29]、专家咨询法[30]、模糊综合评

判法[31]等;常用客观赋权方法包括熵权法(EW)[32]、灰色关联度分析法[33]等,为减小客观判断与真实情况的偏差,削弱主观判断的干扰,本文采用“熵权法-层次分析法(EW-AHP)”进行各层面指标的客观融入主观赋权[34-35],结合 50 处农村黑臭水体整治项目调查所得基础数据计算确定各指标权重.

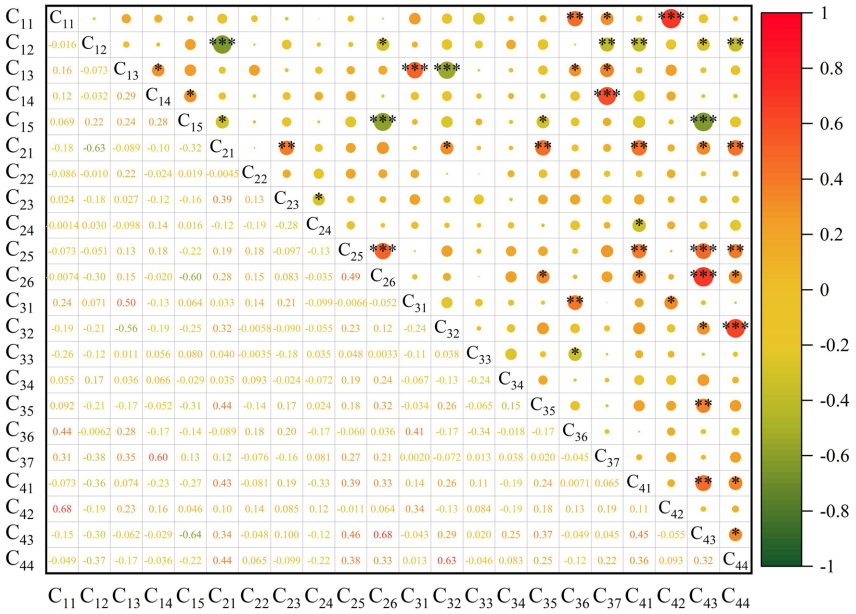


图 3　相关性分析热力图

Fig.3　Correlation analysis heat map

***、**、*分别代表 0.001、0.01、0.05 的显著性水平

表 2　农村黑臭水体整治效果评价指标体系

Table 2　Evaluation index system for the remediation effect of rural black and odorous water

目标层 A	准则层 B	指标层 C	量化方法	指标属性
A 农村黑臭水体整治效果评价	B_1 压力维度	C_{11} 水域人口负荷	定量, 水域人口负荷=水域人口数量/水域面积(%)	负向
		C_{13} 截污纳管破损率	定量, 截污纳管破损率=破损截污纳管长度/截污纳管总长度(%)	负向
		C_{14} 残留黑臭底泥厚度	定量, 调查记录水体底部残留黑臭污泥的厚度(cm)	负向
	B_2 状态维度	C_{21} 水体感官	定性, 调查记录水体气味、颜色, 参考《农村黑臭水体治理工作指南》	正向
		C_{22} 透明度	定量, 《农村黑臭水体治理工作指南》中指标阈值要求透明度≥25cm, 溶解氧>2mg/L, 氨氮<15mg/L。调查期间快速检测记录水质情况。	正向
		C_{23} 溶解氧浓度		正向
		C_{24} 氨氮浓度		负向
		C_{25} 岸线自然状况	定性, 主要评价岸线自然状况, 包括河(湖)岸稳定性和岸线植被覆盖度两个方面, 参考《幸福河湖建设成效评估工作方案(试行)》	正向
	B_3 响应维度	C_{31} 截污纳管铺设率	定量, 截污纳管铺设率=实际铺设长度/设计铺设长度(%)	正向
		C_{33} 水生植物覆盖率	定量, 水生植物覆盖率=生态修复工程水生植物种植面积/水域面积(%)	正向
		C_{34} 整治工程管理控制难易程度	定性, 管理控制难易即运行设施自动化程度及后续是否利于操作人员管理	正向
		C_{35} 运维管护执行力度	定性, 以制度方案建设、运维队伍、经费落实情况表征	正向
		C_{36} 单位水体工程投资强度	定量, 单位水体工程投资强度=投资总金额/水域总面积(元/m^2)	负向
	B_4 效益维度	C_{41} 居民满意度	定量, 满意度=满意项总人数/有效问卷总数量(%)	正向
		C_{43} 污水减排率	定量, 污水减排率等于水体整治前后污水排放量的比值(%)	正向
		C_{44} 污染物拦截率	定量, 污染拦截率=1-(整治后污染物量/整治前污染物量)(%)	正向

(1)正向指标与负向指标数据标准化(均值标准化法)

由于各个指标分别代表不同的内涵,有着不同的单位量纲,在对数值进行比较计算时量纲不统一,无法进行准确的计算[35],因此需要对指标数据进行标准化.指标按属性分为正向指标和负向指标两大类,正向指标突出的是水体改善、利好方面,代表的内涵是指标数值越大越优.而负向指标则表示指标

数值越小越好.记农村黑臭水体整治项目为 $i(i=1,2,\cdots,m)$,评价指标为 $j(j=1,2,\cdots,n)$,x_{ij} 为指标的原始数据,y_{ij}、y'_{ij} 为指标标准化后的数据.用于权重确定的整治项目个数为 $m=50$,指标个数为 $n=16$.计算如式(2)、式(3).

$$\text{均值标准化: } y_{ij}=\frac{x_{ij}}{\overline{x}} \tag{2}$$

$$\text{负向指标正向化: } y'_{ij}=-y_{ij} \tag{3}$$

式中:$\overline{x}=\frac{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}}{m}$.

(2)指标信息熵值 e_j 和熵权法指标权重 w_j 的计算[28]

记 e_j 为第 j 个指标的熵,计算如式(4)、式(5).

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}q_{ij}\ln(q_{ij})\geqslant 0 \tag{4}$$

$$W_j=\frac{t_j}{\sum_{j=1}^{n}t_j},\sum_{j=1}^{n}W_j=1 \tag{5}$$

式中:q_{ij} 表示同一指标下,各整治项目标准化值所占的比重,$q_{ij}=y_{ij}/\sum_{i=1}^{m}y_{ij}$;当 q_{ij} 为 0 时,令 $q_{ij}\ln(q_{ij})=0$;t_j 为各个指标间的差异度,$t_j=1-e_j$.准则层各维度熵权法权重值计算结果见表 3.

表 3 准则层各维度的熵权法权重值

Table 3 The Entropy Weight method weight values for each dimension of the criterion layer

准则层维度	B_1 压力	B_2 状态	B_3 响应	B_4 效益
W_j	0.295	0.157	0.442	0.106

(3)判断矩阵的设立

鉴于传统的基于 1~9 标度的层次分析法计算出的权重值粗略不准确,本文根据指标体系结构及客观熵权法权重 w_j 大小,采用指数标度法来确定两两指标的重要程度 u_{ab}[34],构建判断矩阵,形如 $\boldsymbol{A}=(u_{ab})_{n\times n}$.权重指数标度见表 4.

表 4 指数标度赋值[34]

Table 4 Index scale assignment

k	0	2	4	6	8
标度 u_{ab}	1.000	1.732	3.000	5.194	9.000
评 语	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
中间插值	需要做折中处理时($k=1,3,5,7$)按照公式 1.316^k 计算				

注:若元素 a 与元素 b 的重要性之比为 u_{ab},那么元素 b 与元素 a 的重要性之比为 $u_{ba}=1/u_{ab}$.

(4)层次指标权重值

求判断矩阵的特征值和特征向量,找出最大特征值 λ_{max} 进行随机一致性检验.由最大特征值对应的特征向量归一化求得层次指标权重值 W_j[35-37].

$$\alpha=(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n)^t \tag{6}$$

$$W_j=\frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i} \tag{7}$$

式中:α 为最大特征值对应的特征向量.

判断矩阵随机一致性检验:

$$\mathrm{CI}=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{8}$$

$$\mathrm{CR}=\frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} \tag{9}$$

式中:CI 为一致性指标;n 为判断矩阵的阶数;随机一致性检验指标 RI 查表 5;当矩阵随机一致性比例 CR<0.10 时,认为该判断矩阵的一致性是可以接受的.准则层判断矩阵、一致性检验及权重见表 6,同理计算指标层权重见图 4.

表 5 指数标度随机一致性检验指标

Table 5 Random consistency index of exponential scale

指数标度阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.36	0.58	0.72	0.82	0.88	0.93	0.97

表 6 准则层判断矩阵

Table 6 The criterion layer judgment matrix

准则层维度	B_1 压力	B_2 状态	B_3 响应	B_4 效益
B_1 压力	1.000	1.316	1/1.316	1.732
B_2 状态	1/1.316	1.000	1/1.732	1.316
B_3 响应	1.316	1.732	1.000	1.316
B_4 效益	1/1.732	1/1.316	1/1.316	1.000
W_j	0.27	0.21	0.36	0.16

λ_{max}=4.003,CI=(4.003-4)/3=0.001,CR=0.001/0.58=0.0017<0.10,一致性检验通过.

1.2.4 整治效果评价标准 采用线性加权法计算整治效果评价值,计算如式(10).

$$V=\sum_{j=1}^{n}(q_{ij}\cdot\overline{W_j}),(i=1,2,\cdots,m)\ [18,38] \tag{10}$$

式中:V 为整治效果评价值; W_j、q_{ij} 分别由式(4)、式(7)计算所得.

本文对比四分法将评价值由低到高划分为(0,0.1]、(0.1,0.2]、(0.2,0.3]、(0.3,0.4]、(0.4,0.5] 5 个区间, 并以此区间确定评价标准,将整治效果分为

5 个等级,依次对应为无效、不合格、合格、有效、显著.

2　结果与分析

2.1　指标及相应整治内容分析

由式(2)~(7)和判断矩阵计算得各维度、指标权重,W_B=[0.27, 0.21, 0.36, 0.16] (表 6),16 项指标权重见图 4,其中权重较高的负向指标(C_{11}、C_{14}、C_{24}、C_{36})多于权重较高的正向指标(C_{31}、C_{41}).可见为整治农村黑臭水体重庆市做出了积极响应,但压力权重仅次于响应权重,水体整治完成后仍存在较大黑臭压力,且效益部分权重最低,整治项目得到的效益不明显.结合调查和指标分析,可能是受 C_{11}、C_{14}、C_{34}、C_{35} 等指标因素的影响,效益指标 C_{43}、C_{44} 权重较低,效益逐渐减弱.

控源截污、内源治理、生态修复等主体工程措施投入使用,农村黑臭水体整治完成后仍面临较大的压力,由压力维度指标权重可知,以水域人口负荷和残留黑臭底泥厚度为主(W_{C11}=0.15、W_{C14}=0.08).状态维度指标中氨氮浓度的权重最大(W_{C24}=0.08),说明氨氮是农村黑臭水体主要的污染因子之一[8],与黑臭水体的形成关系密切.

响应维度指标中 C_{31} 截污纳管铺设率、C_{36} 单位水体投资强度两项指标权重较高(W_{C31}=0.10、W_{C36}=0.07),结合现场调查可知,新建、增补纳污管网是截污控源的通用且较有效手段,但建设纳污管网的成本总体较高,不适合在农村地区普遍推广应用.指标 C_{34}、C_{35} 权重较低,表明总体整治管理难度较大,运维管护执行力度不足.由调查资料分析,少部分黑臭水体治理工程技术选择未能有效解决污染问题,个别整治项目对水体黑臭底泥处置技术实践,总结出黑臭底泥微生物菌剂原位处置的方法,受专业能力限制,需专业人员指导实施,管理控制难度较大.50 处整治项目中 17 处水体整治完成后运维管护落实不到位,14 处水体治理完成后缺失《指南》要求的管护机制文件,5 处水体治理前后对比照片资料缺失,主要是不同属地管理考核要求不一致导致,未能将运维管护相关制度落到实处.存在设施运行异常,植物枯萎未及时收割处置,出现水绵、浮萍、藻类泛滥等现象,其中少量水体由于运维管护落实不到位已出现了返黑返臭现象.个别沟渠类型整治项目在沟渠内种植水生植物,由于沟渠宽度较窄,不利于水生植物的长期存活,阻碍了沟渠行洪,存在水生植物雨季被冲毁的风险.总体表明农村黑臭水体运维管护执行力度不足,运维管护需进一步完善优化.

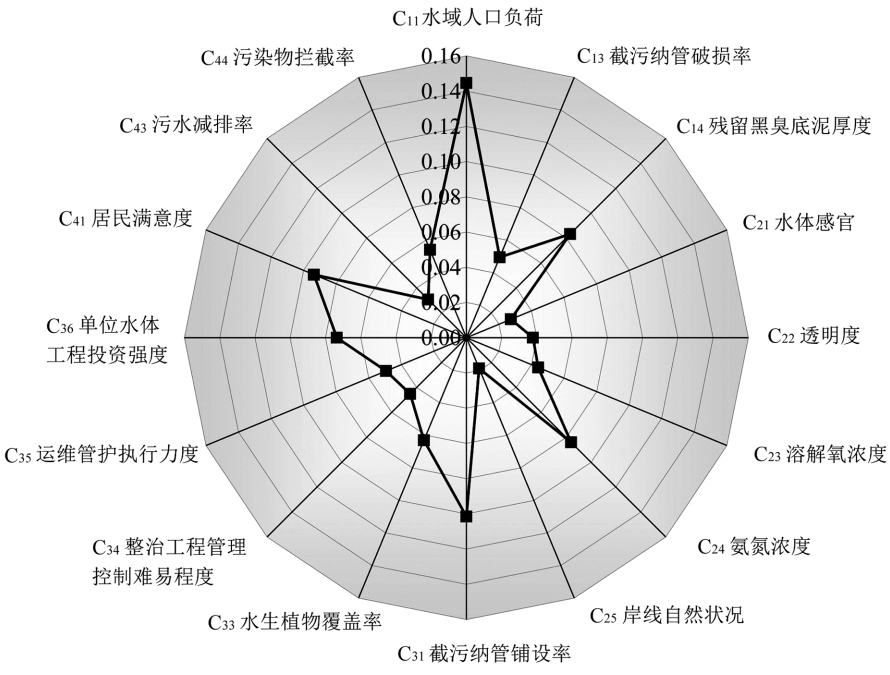


图 4　各评价指标权重

Fig.4　The weight chart of each evaluation index

效益维度指标中 C_{41} 居民满意度权重较高,黑臭水体整治完成后当地居民基本满意,公众评议问卷所得平均居民满意度为 81.84%;C_{43} 污水减排率、C_{44} 污染拦截率权重明显较低.结合调查资料分析原因可能为以下两点(图 5):一是农村生活污染控制管网中,现行使用较多的 PVC 管道易受风化破损,导致污水渗漏;同时,由于农村生活水平的提升,生活污水中油污含量较高导致污水管道堵塞断裂,污水渗漏.二是部分水体清淤后,底泥堆放于水体岸边或附近区域等待干化,未能及时外运处置,容易受雨水冲刷再次汇入水体内淤积;同时,在调查中与部分管理人员沟通了解到,少数项目底泥清淤后处置成本占工程投资中的比例较高,导致部分水体在资金有限的情况下,清淤工程实施不彻底,即指标 C_{14} 权重较高.

综合分析可知,当前农村黑臭水体整治存在技术选择的不适宜现象,暴露出整治技术论证不够全面的问题;结合调查和指标权重得出,由于截污纳管破损、污水渗漏(压力指标 C_{13}),清淤工程不彻底、黑臭底泥残留(压力指标 C_{14})和运维管护不足(响应指标 C_{35})三类因素的影响,水体返黑返臭压力逐渐增大,造成了水体整体状态不佳、整治效益逐渐减弱,对整治效果带来不利影响.

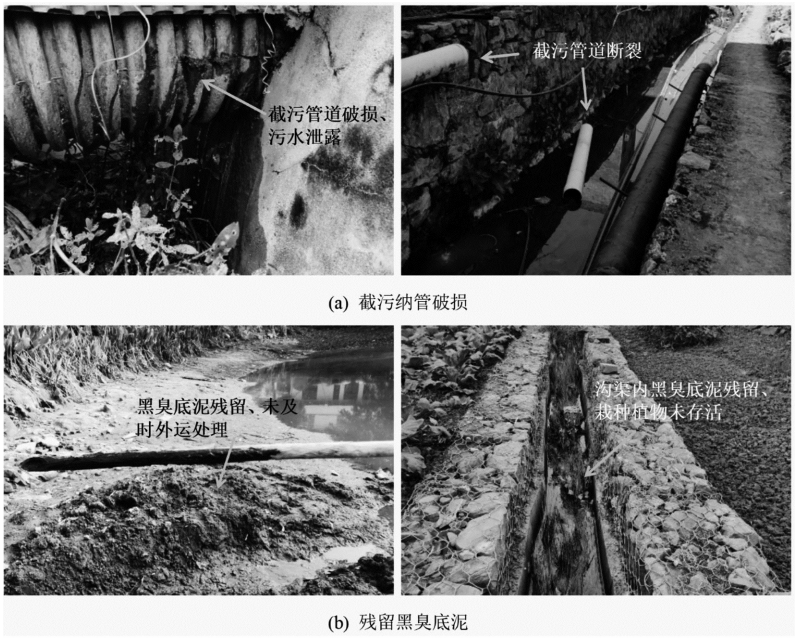


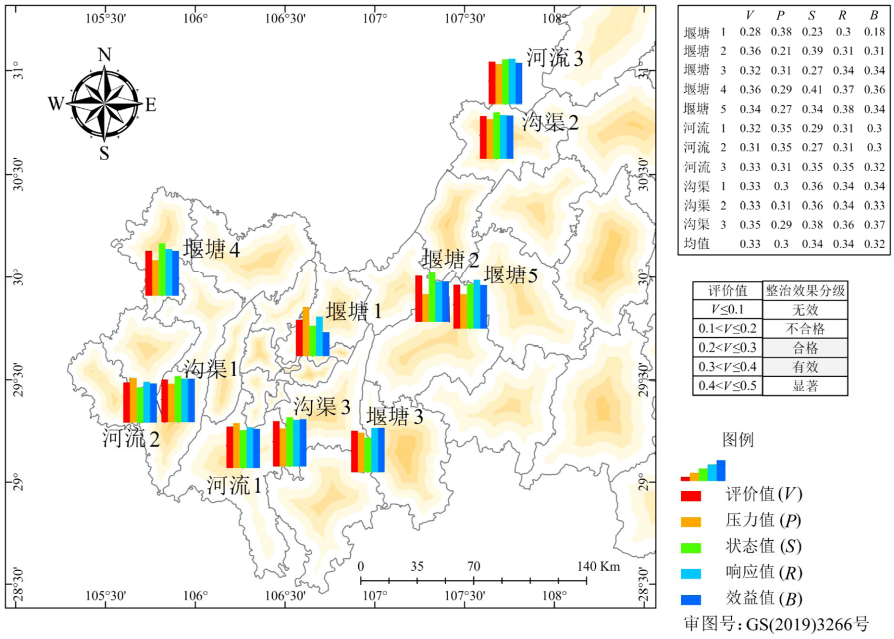
图 5 现场调查照片

Fig.5 Field investigation photos

2.2 典型案例评价结果与分析

对 2023 年 8 月调查收集到各案例评价指标赋值、数据标准化,评价结果见图 6.依据 1.2.4 中整治效果评价标准,11 个典型案例的整治效果评价平均值为 V=0.33,表明重庆市农村黑臭水体整治效果总体“有效”;其中的堰塘 1 评价值最低,V=0.28,整治效果等级仅为“合格”,压力值 P=0.38,返黑返臭压力较大,结合调查可知,这与水体靠近农村居民小区、女子中学,水域人口负荷较大,污染物排放较多以及 8 月周边截污纳管破损,污水泄露进入水体密切有关;其余 10 个案例的等级为“有效”,其中堰塘 2、4 评价值最高,评价值为 V=0.36.河流 1、2 评价值略低于均值的可能原因在于黑臭水体整治结合《指南》中经济适用原则,应合理选择低成本治理模式,指标 C_{36} 单位水体工程投资强度即为负向指标,两条河流的投资强度分别为 1041.67 元/m^2、604.65 元/m^2 高于平均投资强度 362.58 元/m^2,响应值均为 R=0.31,低于多数案例;同时,调查核实河流 1、2 因截污纳管出现泄露、污水从检查井溢出的原因,返黑返臭压力同样较高,压力评价值均为 P=0.35,造成水体环境状态低于其他水体,状态值分别为 $S_{河流\,1}$=0.29,$S_{河流\,2}$=0.27,进而共同造成河流 1、2 整治效果等级虽为“有效”但评价值偏低的情况.结合评价结果分析,水域人口负荷较大(压力指标 C_{11})进一步加重了水体返黑返臭压力,以及较高的水体整治投资(响应指标

C_{36})不适于当前农村地区的经济现状,因此,这两方面因素对黑臭水体整治效果带来不利影响.



	V	P	S	R	B
堰塘 1	0.28	0.38	0.23	0.3	0.18
堰塘 2	0.36	0.21	0.39	0.31	0.31
堰塘 3	0.32	0.31	0.27	0.34	0.34
堰塘 4	0.36	0.29	0.41	0.37	0.36
堰塘 5	0.34	0.27	0.34	0.38	0.34
河流 1	0.32	0.35	0.29	0.31	0.3
河流 2	0.31	0.35	0.27	0.31	0.3
河流 3	0.33	0.31	0.35	0.35	0.32
沟渠 1	0.33	0.3	0.36	0.34	0.34
沟渠 2	0.33	0.31	0.36	0.34	0.33
沟渠 3	0.35	0.29	0.38	0.36	0.37
均值	0.33	0.3	0.34	0.34	0.32

评价值	整治效果分级
V≤0.1	无效
0.1<V≤0.2	不合格
0.2<V≤0.3	合格
0.3<V≤0.4	有效
0.4<V≤0.5	显著

图 6　典型案例整治效果评价

Fig.6　Evaluation of the remediation effect for typical cases

2.3　堰塘类案例跟踪评价

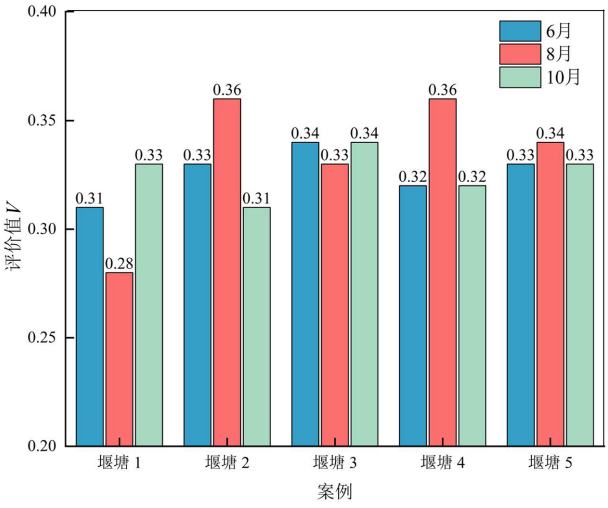


图 7　6、8、10 月堰塘类型案例跟踪评价

Fig.7　Tracking evaluation of pond-type cases in June, August, and October

2023 年 6、8、10 月对堰塘类案例的跟踪评价结果如图 7,除堰塘 1 外,总体案例整治效果等级均为“有效”.2023 年 8 月堰塘 1 截污管网破损,等级为“合格”,运维人员发现情况并上报;10 月,截污管网已修补完成,现场调查透明度、溶解氧浓度、氨氮浓度三项指标合格,居民满意度较 8 月有所提高,评价值恢复到 6 月水平.堰塘 2、堰塘 4 评价值于 10 月降低,分析可能原因是塘内水生植物(荷花)、滨水植物带因重庆已进入秋季而逐渐枯萎,未及时采收,运维管护不到位,影响水体整体状态.堰塘 3、堰塘 5 评价值相对平稳,整治效果较好,现场调查中发现其运维管护措施到位,例如雇佣保洁公司对堰塘 3 保洁区域每天上午完成普扫一次,然后日常巡查保洁;在堰塘 5 就近指定了垃圾投放站点,由村镇拨付运维资金,雇用专人每月定期清理堰塘周边垃圾和枯枝落叶.由此可见,运维管护的执行力度(响应指标 C_{35})是否到位对黑臭水体整治效果等级的高低具有重要影响.

3　结论

3.1　应用(EW-AHP)方法,计算得压力、状态、响应、效益各维度权重分别为 0.27、0.21、0.36、0.16,16 项指标中权重较高的负向指标(C_{11} 水域人口负荷、C_{14} 残留黑臭底泥厚度、C_{24} 氨氮浓度、C_{36} 单位水体工程投资强度)多于权重较高的正向指标(C_{31} 截污纳管铺设率、C_{41} 居民满意度).表明农村黑臭水体整治虽然得到了积极响应,但整治完成的水体仍存在较大压力,整治效益有限.可能是受 C_{11} 水域人口

负荷、C_{14} 残留黑臭底泥厚度、C_{34} 整治工程管理控制难易程度、C_{35} 运维管护执行力度指标因素的影响,效益指标 C_{43} 污水减排率、C_{44} 污染物拦截率权重较低、效益逐渐减弱.

3.2 根据评价结果,11 个典型案例整治效果评价平均值为 0.33,表明重庆市农村黑臭水体整治效果总体“有效”;其中,除堰塘 1 的整治效果等级为“合格”外,其余 10 个案例的等级为“有效”.对整治效果带来不利影响的主要因素包括以下两方面,即压力维度:水域人口负荷较大、截污纳管破损和黑臭底泥残留,分别对应指标 C_{11}、C_{13}、C_{14} 以及响应维度:水体整治投资较高、运维管护执行力度不足,分别对应指标 C_{35}、C_{36}.

参考文献:

[1] 生态环境部、水利部、农业农村部等.关于推进农村黑臭水体治理工作的指导意见(环办土壤〔2019〕47 号) [EB/OL]. [2019-07-08]. https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehf/202004/P020200423624830659986.pdf
Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Areas, etc. Guiding opinions on promoting the governance of rural black and odorous water bodies of China (Huanban Turang [2019] No.47)[EB/OL]. [2019-07-08]. https://sthjt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/zcwj/sthjt/ehf/202004/P020200423624830659986.pdf.

[2] 生态环境部、水利部、农业农村部.农村黑臭水体治理工作指南(环办土壤〔2023〕23 号) [EB/OL]. [2024-01-12].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202401/W020240122342876384155.pdf.
Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Areas. Guidelines for the treatment of rural black and odorous water bodies of China (Huanban Turang [2023] No. 23) [EB/OL]. [2024-01-12]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202401/W020240122342876384155.pdf.

[3] 重庆市生态环境局.重庆市水生态环境保护“十四五”规划(2021—2025 年)(渝环函〔2022〕347 号) [EB/OL].[2022-06-10].https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202206/t20220614_10812955.html.
Bureau of Ecological Environment of Chongqing Municipality. The 14th Five-Year Plan for water ecological environment protection of Chongqing, China (2021-2025) (Yu Huan Han [2022] No.347) [EB/OL]. [2022-06-10]. https://sthjj.cq.gov.cn/zwgk_249/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202206/t20220614_10812955.

[4] 陈维灯.重庆农村黑臭水体治理见实效 [N]. 重庆日报, 2022-12-24(002).
Chen Weideng. Effective treatment of black and odorous water in rural areas of Chongqing [N]. Chongqing Daily, 2022-12-24 (002).

[5] 谭 伟,纪发达,李 明,等.安徽省农村黑臭水体成因及治理对策研究 [J]. 环境科技, 2023,36(6):70-74.
Tan Wei, Ji Fa-da, Li Ming, et al. Research on the causes and control measures of black and odorous water bodies in rural areas of anhui province [J]. Environmental Science and Technology, 2023,36(6):70-74.

[6] 孙 莹.沈阳市农村黑臭水体治理效果及对策研究 [J]. 环境保护科学, 2023,49(2):98-104.
Sun Ying. Treatment effect and countermeasures of rural black-odorous water in Shenyang [J]. Environmental Protection Science, 2023,49(2):98-104.

[7] 杨纪新,程珊珊,刘玲花,等.我国农村黑臭水体污染成因及治理现状[J].首都师范大学学报(自然科学版), 2025,46(2):52-60.
Yang J X, Cheng S S, Liu L H, et al. Causes and governance status of black and odorous water bodies in rural areas of China [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2025,46(2):52-60.

[8] 王 莉,刘萌硕,李亭亭,等.河南省农村黑臭水体污染现状及污染特征研究 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022,50(6):52-61.
Wang Li, Liu Meng-shuo, Li Ting-ting, et al. Study on pollution status and characteristics of black and odorous water in rural areas of Henan Province [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022,50(6):52-61.

[9] 韩 冰,杨 婷,李小虎.农村黑臭水体治理工程投资估算及经济指标分析 [J/OL]. 环境工程技术学报. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20241217.1935.002.
Han Bing, Yang Ting, Li Xiao-hu. Investment estimation and economic index analysis of black and odorous water body treatment project in rural areas [J/OL]. Journal of Environmental Engineering Technology. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20241217.1935.002.

[10] Liu M, Li T, Liu Y, et al. Grading identification and pollution source determination of rural water based on the black-odorous water quality index model [J]. Journal of Water Process Engineering, 2025,75:108076.

[11] 杜 鼎.湘潭市典型黑臭水体整治效果及评价体系研究 [D]. 湘潭:湖南科技大学, 2018.
Du Ding. Study on remediation effect and evaluation system of typical black odor water in Xiangtan [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.

[12] 王世玮.城市黑臭水体生态治理效果评价指标体系研究 [D]. 南京:南京林业大学, 2023.
Wang Shi-wei. Study on the evaluation index system of urban black and smelly water ecological control effect. [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.

[13] 刘苏港,黄 羽,倪庆国,等.农村黑臭水体治理效果评估指标体系[J]. 长江科学院院报, 2023,40(12):52-58.
Liu Su-gang, Huang Yu, Ni Qing-guo, et al. Evaluation index system for the effectiveness of rural black and odorous water remediation [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(12):52-58.

[14] HJ 130—2019 规划环境影响评价技术导则总纲 [S].
HJ 130—2019 Technical guideline for planning environmental impact assessment—General principles [S].

[15] Cheng B , Chang R , Yin Q ,et al. A PSR-AHP-GE model for evaluating environmental impacts of spoil disposal areas in high-speed railway engineering [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,388:135970.

[16] Tavosi M, Vafakhah M, Sadeghi H S, et al. Comparative assessment of Watershed Hydrological Health (WHH) using multi-criteria decision-making approach based on PSR framework [J]. Journal of Environmental Management, 2025,373:123833.

[17] 郭丽峰,张 辉,刘明喆,等.农村河道综合整治生态环境效益评估体系研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2018,34(5):474-480.

Guo Li-feng, Zhang Hui, Liu Ming-zhe, et al. Research on evaluation system of ecological benefits for rural river regulation [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(5): 474-480.

[18] 余乙民.重庆市黑臭水体整治效果分析及评估体系优化研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
Yu Yi-min. Study on the effect analysis and the evaluation system optimization of black odorous water body renovation in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[19] 麦少芝,徐颂军,潘颖君.PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用 [J]. 热带地理, 2005,(4):317-321.
Mai Shao-zhi, Xu Song-jun, Pan Ying-jun. Application of the Psr Model to the evaluation of wetland ecosystem health [J]. Tropical Geography, 2005,(4):317-321.

[20] Whitall D, Bricker S, Ferreira J, et al. Assessment of eutrophication in Estuaries: Pressure–State–Response and nitrogen source apportionment [J]. Environmental Management, 2007, 40(4):678-690.

[21] 罗　鹏,谈存峰,齐婷婷.基于 PSR 模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价及预测 [J]. 水土保持通报, 2024,44(3):180-189.
Luo Peng, Tan Cunfeng, Qi Tingting. Evaluation and prediction of ecosystem health in Gansu section of Yellow River basin based on PSR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(3): 180-189.

[22] 韩灵新,王雨春,包宇飞,等.基于 PSR 模型的长江流域生态系统健康评价 [J]. 环境科学学报, 2025,45(5):503-514.
Han Lingxin, Wang Yuchun, Bao Yufei, et al. Assessment of ecosystem health of the Yangtze River basin based on the pressure-state-response model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025,45(5): 503-514.

[23] 陈汉杰.基于模糊综合评价的黑臭水体底泥处理处置评估模型构建与应用 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.
Chen Hanjie. Construction and application of the evaluation model for the treatment and disposal of black and smelly water sediment based on fuzzy comprehensive evaluation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[24] 水利部河长办.水利部河长办关于印发《幸福河湖建设成效评估工作方案(试行)》(办河湖〔2023〕33 号)的通知 (mwr.gov.cn). [EB/OL].[2023-08-15].http://hhs.mwr.gov.cn/tzgg/202308/t20230821_1708622.html.
Ministry of Water Resources River Chief Office. “Work plan for the evaluation of the effectiveness of happy rivers and lakes construction of China (Trial)” (Ban Hehu [2023] No. 33). [EB/OL]. [2023-08-15]. http://hhs.mwr.gov.cn/tzgg/202308/t20230821_1708622. html.

[25] 张　诗.基于 AHP-模糊综合评价法的农村生活污水处理技术评价研究 [D]. 昆明:云南师范大学, 2022.
Zhang Shi. Research on the evaluation of rural domestic wastewater treatment technology based on AHP—fuzzy comprehensive evaluation method [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.

[26] 路　嘉,王　丽,米国新,等.长江上游典型深潭生境健康评价研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024,(1):180-188,196.
Lu J,Wang L,Mi G X, et al. Ecological health assessment of typical deep pool habitat in the upper reaches of the Yangtze River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024,(1):180-188,196.

[27] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996,15(2): 185-211.

[28] 田家华,李万亨,朱　明.区域矿产资源综合经济评价指标权重确定的几种新方法 [J]. 地球科学, 1997,(5):114-115.
Tian Jia-hua, Li Wan-heng, Zhu Ming. Several new methods for determining the weight of comprehensive economic evaluation index of regional mineral resources [J]. Earth Sciences, 1997,(5): 114-115.

[29] Hu X, Ma C, Huang P, et al. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China [J]. Ecological Indicators, 2021,125:107464.

[30] 古雄杰,邓建明,曾　剑,等.活力海岸概念辨析及评价指标体系构建 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3387-3394.
Gu X J, Deng J M, Zeng J, et al. Conceptual identification and evaluation index system for living shorelines [J]. China Environment Science, 2024,44(6):3387-3394.

[31] Zhong J, Li Z, Zhang D, et al. An evaluation framework for urban ecological compensation priority in China based on meta- analysis and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Ecological Indicators, 2024,158: 111284.

[32] 米鑫豪.基于熵权法的城市水体修复技术评估研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2021.
Mi Xinhao. Study on technology evaluation of urban water remediation based on entropy weight method [D]. Xi’an: Xi’an University of Architecture and Technology, 2021.

[33] Zhang Y, Shang K. Evaluation of mine ecological environment based on fuzzy hierarchical analysis and grey relational degree. [J]. Environmental research, 2024,257:119370.

[34] 孙东生,朱　懿,周水兴.基于指数标度的层次分析法在桥梁评定中的应用 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010,29(6):867-870.
Sun Dong-sheng, Zhu Yi, Zhou Shui-xing. Application of exponential scale of AHP in bridge evaluation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010,29(6):867-870.

[35] 王　佩.水资源合理配置指标权重研究 [D]. 邯郸:河北工程大学, 2015.
Wang Pei. Study on the index weight of rational allocation of water resources [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2015.

[36] Gong J, Jin T, Cao E J, et al. Is ecological vulnerability assessment based on the VSD model and AHP-Entropy method useful for loessial forest landscape protection and adaptative management? A case study of Ziwuling Mountain Region, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 143:109379.

[37] Wang Z, Xiong H, Zhang F, et al. Sustainable development assessment of ecological vulnerability in arid areas under the influence of multiple indicators [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,436:140629.

[38] Di W, Yuman L, Xiaodi Y, et al. Evaluating urban ecological civilization and its obstacle factors based on integrated model of PSR-EVW-TOPSIS: A case study of 13cities in Jiangsu Province, China [J]. Ecological Indicators, 2021,133:108431.

致谢：本研究的现场调查工作由重庆港力环保股份有限公司的严定波、张文科、唐琪琪等工程师协助完成,在此表示诚挚感谢.

作者简介：陈晴空(1983-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事环境水利工程研究.发表论文 34 篇.chenqingkong@cqjtu.edu.cn.