

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.008

基于博弈论组合赋权法的生态护岸对河流生态系统影响评价

廖迎娣^{1,2}, 顾 忙¹, 崔泽凯¹, 梁恒东¹, 李 柱³

(1. 河海大学港口航道与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 为提高生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系权重的准确性, 提出了一种基于博弈论组合赋权的方法, 该方法将层次分析法和熵权法计算所得权重进行最优组合得到综合权重, 兼顾了专家的主观判断和数据的客观性。江苏省新孟河界牌枢纽工程的实例验证结果表明, 博弈论组合赋权法能够体现不同赋权方法的特性, 得到更加合理的评价结果。

关键词: 生态护岸; 河流生态系统; 评价指标体系; 博弈论; 组合赋权法; 界牌枢纽工程

中图分类号: TV861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)04-0065-07

Evaluation of ecological revetment's impact on river ecosystem by combinatorial weighting method based on game theory

LIAO Yingdi^{1,2}, GU Mang¹, CUI Zekai¹, LIANG Hengdong¹, LI Zhu³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Hanghai Investigation Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of weights in the evaluation index system for the ecological revetment's impact on river ecosystems, a combinatorial weighting method based on game theory was proposed. This method optimally combined the weights calculated by the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method to obtain comprehensive weights, taking into account both the subjective judgments of experts and the objectivity of data. The case study of the Jiepai Water Conservancy Project of Xinmeng River in Jiangsu Province shows that the combinatorial weighting method based on game theory can reflect the characteristics of different weighting methods and obtain more reasonable evaluation results.

Key words: ecological revetment; river ecosystem; evaluation index system; game theory; combinatorial weighting method; the Jiepai Water Conservancy Project

河流生态系统具有调节水资源、维护生物多样性以及净化河流生态环境等多重功能^[1]。由于人口增长、工农业发展以及河流过度开发等原因, 河流的生态系统正逐渐遭到破坏, 加强改善河流生态环境已成为河流可持续发展的当务之急^[2]。生态护岸作为一种新型的护岸形式, 是修复河流生态系统的重要途径, 其不仅兼顾了传统硬质护岸在防止水土流失、维护岸坡稳定以及防洪排涝等方面的作用, 还在河流生物多样性保护和水质环境修复等方面扮演着重要的角色^[3-5]。

生态护岸在国内外已得到广泛应用, 但生态护岸影响评价研究仍处于初步阶段。目前, 已有部分学者^[6-9]尝试进行生态护岸影响评价, 评价过程中多采用层次分析法或熵权法确定权重。层次分析法在确定权重时依赖于决策者的主观判断, 导致结果会受个人偏好的影响, 客观性不足; 熵权法在确定权重时具有较强的数学理论依据, 但难以充分考虑决策者的评价需求和意向, 导致评价结果与实际需求存在差异^[10]。2 种

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103320)

作者简介: 廖迎娣(1977—), 女, 副教授, 博士, 主要从事港口航道工程研究。E-mail: liaoyingdi@hhu.edu.cn

引用本文: 廖迎娣, 顾忙, 崔泽凯, 等. 基于博弈论组合赋权法的生态护岸对河流生态系统影响评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 65-71.

LIAO Yingdi, GU Mang, CUI Zekai, et al. Evaluation of ecological revetment's impact on river ecosystem by combinatorial weighting method based on game theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 65-71.

赋权法在确定权重时各有利弊,为提高权重的准确性,在廖迎娣等^[11]提出的生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系的基础上,引入博弈论组合赋权法,根据博弈论原理将层次分析法和熵权法赋权结果进行最优组合得到综合权重,弥补了该评价体系中权重计算方法的缺陷,并将上述评价体系应用于江苏省新孟河界牌枢纽工程,取得了较好的效果,可为长江下游平原河网地区的生态护岸建设提供借鉴与理论基础。

1 评价指标体系

1.1 评价指标体系的构建

参考廖迎娣等^[11]的研究成果,结合层级划分原则和生态护岸对河流生态系统的影响方式,从水质状况、生物状况、水文特征、地貌特征以及社会经济 5 个方面选择了 18 项评价指标构建了生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系,其中包含 14 项定量指标和 4 项定性指标,如图 1 所示。



图 1 生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system for ecological revetment's impact on river ecosystem

1.2 权重的确定

1.2.1 层次分析法确定主观权重

a. 构建判断矩阵。邀请多名专家对各层次内各元素进行两两比较,判断矩阵中元素的相对重要程度,根据 1~9 标度法^[12]对判断矩阵进行赋值,最终得到判断矩阵 A。

b. 确定各指标权重。将构建的判断矩阵 A 按行相加得到矩阵的特征向量,对特征向量归一化处理,计算出各评价指标的主观权重^[13]。

c. 进行一致性检验。由于判断矩阵 A 具有较强的主观性,因此要进行一致性检验。引入检验系数,当检验系数小于 0.1 时,判断矩阵通过一致性检验,否则需要重新调整判断矩阵,直到一致性检验合格^[14]。

值得注意的是,当有多个专家进行打分时,往往会出现意见分歧,因此为了考虑得更加全面,需要构建一个综合判断矩阵 $\bar{A}$ 。本文利用刘万里等^[15]提出的方法构建综合判断矩阵 $\bar{A}$,根据综合判断矩阵确定各指标的权重值。

1.2.2 熵权法确定客观权重

a. 原始数据的标准化。收集原始数据,假设有 n 个评价对象, m 个评价指标,建立原始评价矩阵 $X=(x_{ij})_{n \times m}$ 。由于各个指标量纲和正负向存在差异(正向指标越大越优,负向指标越小越优^[16]),因此要对原始矩阵进行标准化处理,得到标准化后的矩阵 $Z=(z_{ij})_{n \times m}$ 。

b. 确定评价指标熵值。评价指标的熵值计算公式为

$$e_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \tag{1}$$

其中

$$P_{ij}=z_{ij}/\sum_{i=1}^nz_{ij}$$

式中: e_j 为评价指标 j 的熵值; P_{ij} 评价对象 i 的评价指标 j 的比重。

c. 计算各评价指标的熵权。指标熵权 w_j 的计算公式为

$$w_j=(1-e_j)/\sum_{j=1}^m(1-e_j) \tag{2}$$

1.2.3 博弈论组合赋权法确定综合权重

博弈论是运筹学领域的一门重要学科,可用于分析多个决策主体行为相互影响时的理性行为及其决策均衡的问题。在决策过程中,当博弈各方为寻找共同利益最大化时,不得不出现妥协,使各决策方权重与组合权重之间偏差之和最小,从而实现共同利益最大化^[17-18]。基于博弈论思想的权重融合步骤如下。

a. 一致性检验。为避免不同赋权方法所得权重相互矛盾,需要进行一致性检验。引入距离函数 $d(w^*,w^{**})$ 刻画一致性程度:

$$d(w^*,w^{**})=\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^m(w_j^*-w_j^{**})^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

式中 w^*,w^{**} 分别为层次分析法和熵权法计算的权重。当距离函数满足 $0\leq d(w^*,w^{**})\leq 1$ 时,2 种赋权方法通过一致性检验。

b. 建立基本权重向量。对层次分析法和熵权法得到的各级指标权重分别组成向量 $W_1=(w_1^*,w_2^*,\cdots,w_n^*)$ 和 $W_2=(w_1^{**},w_2^{**},\cdots,w_n^{**})$,引入权重分配系数 α_1,α_2 ,得到 2 种权重的线性组合:

$$W=\alpha_1W_1^T+\alpha_2W_2^T \tag{4}$$

c. 求解最优权重分配系数。为求得最优组合权重,需要使得博弈论组合赋权结果与其他赋权方法求得权重向量离差最小,即

$$\min\|W-W_k\|_2 \quad (k=1,2) \tag{5}$$

根据矩阵微分性质,式(5)的一阶导数为

$$\sum_{g=1}^2\alpha_gW_kW_g^T=W_kW_k^T \quad (k=1,2) \tag{6}$$

式(6)可转化为线性方程组(7),求解可得 α_1,α_2 。

$$\begin{bmatrix} W_1W_1^T & W_1W_2^T \\ W_2W_1^T & W_2W_2^T \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} W_1W_1^T \\ W_2W_2^T \end{bmatrix} \tag{7}$$

d. 对求得的 α_1,α_2 进行归一化处理($\alpha_k^*=|\alpha_k|/(|\alpha_1|+|\alpha_2|)$, α_k^* 为归一化后的系数),得到最优权重向量:

$$W^*=\alpha_1^*W_1^T+\alpha_2^*W_2^T \tag{8}$$

1.3 评价标准

综合河流特征和其他学者的研究成果^[19-20],划分指标等级赋分标准,评价标准可分为病态(0~1 分)、不健康(>1~2 分)、亚健康(>2~3 分)、健康(>3~4 分)和理想状态(>4~5 分)5 个等级,评价标准见表 1。

1.4 评价方法

目前,模糊数学法、灰色聚类法和综合评价指数法等评价方法已得到广泛应用^[21-23]。前两者在应用时分别涉及到隶属度函数和白化函数,这些函数在建立时受到主观因素影响较大,实际操作也较为复杂^[24]。因此,本文选择操作简单的综合评价指数法定量评价生态护岸对河流生态系统的影响。根据生态护岸综合影响指数等级(I 级:>4.0~5.0,II 级:>3.0~4.0,III 级:>2.0~3.0,IV 级:>1.0~2.0,V 级:0~1.0)评价生态护岸对河流生态系统的影响程度。生态护岸综合影响指数的计算公式如下:

$$N_i=\sum_{j=1}^mw'_jF_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{9}$$

式中: N_i 为评价对象 i 的生态护岸综合影响指数; w'_j 为评价指标 j 权重; F_{ij} 为评价对象 i 的评价指标 j 的赋分值。

2.2 指标数据来源

根据生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系,分别在春季、夏季、秋季和冬季对原生态护岸和新型生态护岸河流水生生物群落中的浮游生物和底栖动物以及水质、水文和河道底泥沉积物等环境指标进行监测,以此获得指标数据。

评价体系中存在流速分布、护岸形式、河床稳定性和社会公共认可度 4 项定性指标,可依据表 1 的打分结果对其进行量化,以获得定性指标相关数据。

2.3 权重的确定

利用层次分析法得到主观权重,以准则层为例,结合刘万里等^[15]提出的方法得到准则层综合判断矩阵:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2.168\,94 & 5.334\,54 & 3.519\,48 & 6.544\,44 \\ 0.161\,05 & 1 & 4.042\,82 & 2.297\,40 & 5.884\,53 \\ 0.187\,46 & 0.247\,35 & 1 & 0.300\,96 & 3.727\,92 \\ 0.284\,13 & 0.435\,28 & 3.322\,70 & 1 & 5.501\,56 \\ 0.152\,80 & 0.169\,94 & 0.268\,25 & 0.181\,77 & 1 \end{bmatrix}$$

根据 $\bar{A}$ 可以得到准则层权重 $W_B=(0.4343,0.2667,0.0857,0.1724,0.0408)$,同理,可以计算得到指标层权重 W_C ,由 $W_B、W_C$ 得到指标层相对目标层权重(即主观权重,表 2)。利用熵权法计算可得客观权重。根据式(3)计算得 $d(w^*,w^{**})=0.188$,因此 2 种赋权方法所得权重满足一致性检验,可按照博弈论组合赋权法进行融合。计算的权重分配系数为 $\alpha_1=0.396\,19,\alpha_2=0.603\,81$,由此可得组合权重,结果见表 2。

表 2 生态护岸对河流生态系统影响评价指标权重

Table 2 Weights of evaluation indexes for ecological revetment's impact on river ecosystem

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	主观权重	客观权重	组合权重
B_1	0.4343	C_1	0.2710	0.11769530	0.030715	0.065176
		C_2	0.2219	0.09637117	0.050733	0.068815
		C_3	0.1443	0.06266949	0.036663	0.046967
		C_4	0.0979	0.04251797	0.053371	0.049071
		C_5	0.1718	0.07461274	0.038828	0.053006
		C_6	0.0931	0.04043333	0.081447	0.065198
B_2	0.2667	C_7	0.5352	0.14273784	0.041161	0.081405
		C_8	0.3632	0.09686544	0.033062	0.058340
		C_9	0.1016	0.02709672	0.031722	0.029890
B_3	0.0857	C_{10}	0.4718	0.04043326	0.051352	0.047026
		C_{11}	0.5282	0.04526674	0	0.017934
B_4	0.1724	C_{12}	0.3583	0.06177092	0.081504	0.073686
		C_{13}	0.1492	0.02572208	0	0.010191
		C_{14}	0.1160	0.01999840	0.11736	0.078786
		C_{15}	0.1258	0.02168792	0.11736	0.079456
		C_{16}	0.2507	0.04322068	0	0.017124
B_5	0.0408	C_{17}	0.6981	0.02848248	0.11736	0.082148
		C_{18}	0.3019	0.01231752	0.11736	0.075743

2.4 结果分析

根据表 1 和表 2,利用式(9)计算得到生态护岸结合影响指数,结果如表 3 所示。

a. 层次分析法。原生态护岸综合影响指数从大到小排序为春季、冬季、秋季、夏季,对应生态护岸影响等级春、秋、冬为Ⅱ级,夏季为Ⅲ级;新型生态护岸综合影响指数从大到小排序为冬季、春季、秋季、夏季,对应生态护岸影响等级四季均为Ⅱ级。

b. 熵权法。原生态护岸综合影响指数从大到小排序为春季、冬季、秋季、夏季,对应生态护岸影响等级四季均为Ⅲ级;新型生态护岸综合影响指数从大到小排序为春季、冬季、秋季、夏季,对应生态护岸影响等级

表 3 生态护岸综合影响指数

Table 3 Comprehensive impact index of ecological revetment

方法	原生态护岸				新型生态护岸			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
层次分析法	3.08	2.86	3.01	3.04	3.24	3.05	3.19	3.29
熵权法	2.82	2.72	2.79	2.79	3.20	3.09	3.13	3.19
组合赋权法	2.92	2.78	2.88	2.89	3.21	3.07	3.15	3.23

四季均为Ⅱ级。层次分析法和熵权法所得计算结果及生态护岸影响等级均出现了偏差。

c. 博弈论组合赋权法。原生态护岸综合影响指数从大到小排序为春季、冬季、秋季、夏季;新型生态护岸综合影响指数从大到小排序为冬季、春季、秋季、夏季。无论是原生态护岸还是新型生态护岸,夏季综合影响指数均为最低,主要原因是夏季相较于其他3个季节水质状况最差,各评价指标评分最低,且水质状况在各指标中所占权重较大,最终导致夏季的综合影响指数最低。因此,博弈论组合赋权法能够体现不同赋权方法的特性,得到更加合理的评价结果。同时,原生态护岸影响等级四季均为Ⅲ级,而新型生态护岸的影响等级四季均为Ⅱ级,相比于原生态护岸影响等级均有提高。此结果说明了新型生态护岸相比于原生态护岸对本河段河流生态系统的修复程度更好,可进行推广应用。

3 结 论

a. 新型生态护岸四季综合影响指数均高于原生态护岸四季综合影响指数,且影响等级较原生态护岸也均有提高,这表明新型生态护岸对该河段河流生态系统的修复效果明显优于原生态护岸,值得进行推广。

b. 实例评价结果验证了本文中生态护岸对河流生态系统影响评价指标体系及评价方法的正确性和可操作性,可为长江下游平原河网地区的生态护岸建设提供相关指导作用。

参考文献:

[1] 李欣桐,王远铭,梁瑞峰,等. 河流系统生态完整性评估的回顾与展望[J]. 中国环境科学,2024,44(4):2256-2272. (LI Xintong,WANG Yuanming,LIANG Ruifeng,et al. A review and prospect for ecological integrity assessment of river systems[J]. China Environmental Science,2024,44(4):2256-2272. (in Chinese))

[2] 孟祥永,陈星,陈栋一,等. 城市水系连通性评价体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):24-28. (MENG Xiangyong,CHEN Xing,CHEN Dongyi,et al. Evaluation system of urban water system connectivity[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2014,42(1):24-28. (in Chinese))

[3] 陈勇,朱丽丽,张浩,等. 生态护岸研究综述[J]. 中国水运,2024,24(6):82-84. (CHEN Yong,ZHU Lili,ZHANG Hao,et al. Summary of research on ecological revetment[J]. China Water Transport,2024,24(6):82-84. (in Chinese))

[4] 程铁军,张俊,李善奇,等. 生态护岸在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程,2012(10):128-131. (CHEN Tiejun,ZHANG Jun,LI Shanqi,et al. Application of ecological revetment technology in waterway regulation project[J]. Port & Waterway Engineering,2012(10):128-131. (in Chinese))

[5] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):61-68. (XIE Yajun,GU Hao,SU Yuchen,et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):61-68. (in Chinese))

[6] 周思思,王冬梅,谭会国. 漓江桂林:阳朔段不同护岸措施的功能对比评价[J]. 中国水土保持科学,2015,13(4):58-66. (ZHOU Sisi,WANG Dongmei,TAN Huiguo. Comparative assessment on functions of different revetments along the Guilin-Yangshuo section of Lijiang River southern China[J]. Science of Soil and Water Conservation,2015,13(4):58-66. (in Chinese))

[7] 李兵,庄文化,孙海龙. 改进熵权法在岩石边坡生态护坡效果综合评价中的应用[J]. 中国水土保持,2019(9):58-63. (LI Bing,ZHUANG Wenhua,SUN Hailong. Application of improved entropy weight method in comprehensive evaluation of eco-engineering protection for rock slope[J]. Soil and Water Conservation in China,2019(9):58-63. (in Chinese))

[8] 张舒静. 上海市典型河道生态护岸效果综合评价[J]. 人民长江,2021,52(4):75-80. (ZHANG Shujing. Comprehensive evaluation on ecological revetment effect of typical rivers in Shanghai City[J]. Yangtze River,2021,52(4):75-80. (in Chinese))

[9] 李晋鹏,宣昊,王学霞,等. 长江深水航道整治生态护岸工程实施效果综合评估[J]. 人民长江,2022,53(10):211-217. (LI Jinpeng,XUAN Hao,WANG Xuexia,et al. Comprehensive evaluation on implement effect of ecological riverbank project in deep waterway regulation of Yangtze River[J]. Yangtze River,2022,53(10):211-217. (in Chinese))

[10] 山成菊,董增川,樊孔明,等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(6):622-628. (SHAN Chengju,DONG Zengchuan,FAN Kongming,et al. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2012,40(6):622-628. (in Chinese))

[11] 廖迎娣,范俊浩,张欢,等. 长江下游平原河网地区生态护岸对河流生态系统影响的评价指标体系[J]. 水资源保护,2022,38(4):189-194. (LIAO Yingdi,FAN Junhao,ZHANG Huan,et al. Evaluation index system for ecological revetment impact on

river ecosystem in plain river network at lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):189-194. (in Chinese))

[12] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng,GAO Min,LI Yu,et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):1-8. (in Chinese))

[13] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):22-29. (GAO Yuqin,WANG Jian,GAO Jian,et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):22-29. (in Chinese))

[14] 廖迎娣,张欢,张诗敏,等. 江苏长江岸线生态修复评价指标体系的应用[J]. 水运工程,2022(8):141-147. (LIAO Yingdi,ZHANG Huan,ZHANG Shimin,et al. Application of the evaluation index system for ecological remediation of the Yangtze River shoreline in Jiangsu Province[J]. Port & Waterway Engineering,2022(8):141-147. (in Chinese))

[15] 刘万里,刘三阳. AHP 中群决策判断矩阵的构造[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(11):1907-1908. (LIU Wanli,LIU Sanyang. Construction of the judgement matrix of group decision-making in AHP[J]. Systems Engineering and Electronics,2005,27(11):1907-1908. (in Chinese))

[16] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (ZHANG Xiaofeng,SHI Yongjie,LIU Jun,et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[17] 李洪波,王成文,吴瑞,等. 基于博弈论法的银川市地下水资源承载力评价[J]. 人民黄河,2023,45(增刊1):42-43. (LI Hongbo,WANG Chengwen,WU Rui,et al. Evaluation of groundwater resource carrying capacity in Yinchuan City based on game theory[J]. Yellow River,2023,45(Sup1):42-43. (in Chinese))

[18] 黄耀惊,许拴梅,姜苗苗,等. 基于博弈论组合赋权的航道水域通航安全评价[J]. 安全与环境学报,2021,21(6):2430-2437. (HUANG Yaoliang,XU Shuanmei,JIANG Miaomiao,et al. Evaluation for the channel waters navigation safety based on the synthetic weighing of the game theory[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(6):2430-2437. (in Chinese))

[19] 席浩郡,袁一斌,咎晓辉,等. 基于生态完整性和社会服务功能的柏条河:府河河流健康评价[J]. 北京大学学报(自然科学版),2022,58(6):1111-1120. (XI Haojun,YUAN Yibin,ZAN Xiaohui,et al. Health assessment of the Baitiao: Fu River based on ecological integrity and social service functions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2022,58(6):1111-1120. (in Chinese))

[20] 方国华,张文慧,郭枫,等. 基于云模型的平原河流生态系统健康评价[J]. 长江科学院院报,2023,40(4):9-16. (FANG Guohua,ZHANG Wenhui,GUO Feng,et al. Assessment of river ecosystem health in Plain River network using cloud model with improved order relation analysis[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(4):9-16. (in Chinese))

[21] 吕卓然,丁爽,王凌青. 基于改进模糊数学法的河流水环境质量评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):317-324. (LYU Zhuoran,DING Shuang,WANG Lingqing. River water environmental quality assessment based on improved fuzzy mathematics[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(2):317-324. (in Chinese))

[22] 李亚松,张兆吉,费宇红,等. 改进的灰色聚类法在地下水质量评价中的应用[J]. 水资源保护,2012,28(5):25-28. (LI Yasong,ZHANG Zhaoji,FEI Yuhong,et al. Application of an improved grey clustering method to groundwater quality evaluation[J]. Water Resources Protection,2012,28(5):25-28. (in Chinese))

[23] 周密,陈龙赞,马振. 基于变权重的水质综合评价体系[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):20-25. (ZHOU Mi,CHEN Longzan,MA Zhen. Study on the comprehensive evaluating system of water quality based on variable weight[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):20-25. (in Chinese))

[24] 王兵,高甲荣,王越,等. 北京市永定河生态护岸效果评价[J]. 中国水土保持,2014(4):10-13. (WANG Bing,GAO Jiarong,WANG Yue,et al. Evaluation of the ecological revetment effect of Yongding River in Beijing[J]. Soil and Water Conservation in China,2014(4):10-13. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-01 编辑:刘晓艳)