

# 长江经济带水生态环境综合评价及区域差异

徐悦, 杨力, 张驰, 朱俊奇

(安徽理工大学 经济与管理学院 安徽 淮南 232001)

**摘要:** [目的] 对长江经济带水生态环境状态进行评价, 为该区域制定相应的生态保护政策提供科学依据。[方法] 以 DCSM 模型和质性分析结果为框架, 选取包含“驱动力—承载源—承载状态—管理”4 个子系统的 22 个水生态环境指标。利用随机森林降维, 确定 12 个高相关指标作为综合评价体系, 结合加权秩和比模型和对抗解释结构模型对长江经济带 11 个省份 2010—2019 年水生态环境定级, 并依据优劣程度确定排名。[结果] ①就整体而言, 长江经济带各区域水生态环境差异明显, 呈现下游优, 上游次之, 中游较差的非对称“U”型特征分布。②就空间分布而言, 浙江水生态状态排名靠前, 江苏、云南、贵州、安徽、江西、四川、重庆、湖北水生态状态排名呈“阶梯状”递减, 湖南、上海排名靠后。③就分类指标而言, 工业废水重复利用率、万元农业生产总值耗水量、万元工业增加值废水排放量等对水生态环境具有显著影响。[结论] 长江经济带总体水生态环境仍未达到安全稳态, 因地制宜从多方面提升水生态环境质量, 是推动长江经济带高水平可持续发展的重要动力。

**关键词:** 水生态环境; 随机森林; 加权秩和比; 对抗解释结构模型; 长江经济带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0253-10

中图分类号: F124, X826

**文献参数:** 徐悦, 杨力, 张驰, 等. 长江经济带水生态环境综合评价及区域差异[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 253-262. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.029; Xu Yue, Yang Li, Zhang Chi, et al. Comprehensive evaluation of water eco-environment and regional differences in Yangtze River Economic Belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 253-262.

## Comprehensive Evaluation of Water Eco-environment and Regional Differences in Yangtze River Economic Belt

Xu Yue, Yang Li, Zhang Chi, Zhu Junqi

(School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** [Objective] The state of the water ecological environment in the Yangtze River Economic Belt was evaluated in order to provide a scientific basis for the formulation of ecological protection policies in the region. [Methods] Based on the DCSM model and qualitative analysis, 22 water ecological environment indicators were selected which included the four subsystems of driving force, carrying source, state, and management. By using random forest dimensionality reduction, 12 highly correlated indicators were identified as a comprehensive evaluation system. The water ecological environment of 11 provinces in the Yangtze River Economic Belt was ranked from 2010 to 2019 by combining the weighted rank sum ratio model and the adversarial interpretative structure model. The ranking was determined according to the degree of superiority and inferiority. [Results] ① In general, the water ecological environment of the Yangtze River Economic Belt differed significantly among regions, showing an asymmetric U-shaped distribution with the downstream region being superior, the upstream region being second, and the midstream region being worst. ② In terms of spatial distribution, the water ecological status of Zhejiang Province ranked first, while that of Jiangsu, Yunnan, Guizhou, Anhui, Jiangxi, Sichuan Province, Chongqing City, and Hubei Province decreased in a “steplike” descending manner, and that of Hunan Province and Shanghai City ranked low. ③ In terms of

收稿日期: 2022-04-07

修回日期: 2022-06-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“深部煤矿多灾种安全评价方法与应用研究”(71971003); 国家社科基金重大项目(20ZDA084); 安徽省教育厅人文社科重点项目(SK2020A0209); 安徽省社会科学创新发展研究攻关项目(2020CX174)

第一作者: 徐悦(1997—), 女(汉族), 安徽省淮南人, 博士研究生, 研究方向为管理决策、可持续发展。Email: 136160042@qq.com。

通信作者: 杨力(1972—), 男(汉族), 安徽省淮南人, 博士, 教授, 从事区域经济、能源经济、管理决策分析研究。Email: y321212@163.com。

classification indexes, industrial wastewater reuse rate, water consumption of 10 000 yuan of agricultural GDP, and wastewater discharge of 10 000 yuan of industrial value added had significant impacts on the water ecological environment. [Conclusion] The overall water ecological environment of the Yangtze River Economic Belt has still not reached a safe and stable state. Improving the quality of the water ecological environment from various aspects according to local conditions is an important driving force for promoting high-level sustainable development of the Yangtze River Economic Belt.

**Keywords:** water ecological environment; random forest; weighted rank sum ratio; adversarial interpretive structure model; Yangtze River Economic Belt

水生态环境的良好状态是支持地区经济和社会可持续发展的重要基础<sup>[1]</sup>。对水生态环境的解读大致可分为以下两类:①在保持水生态环境稳态的前提下,能够支持最大的人类活动压力;②对区域内水污染进行有效干预,对水资源进行合理配置,达到生态环境、经济活动、水体安全的动态平衡<sup>[2-3]</sup>。随着城市加速扩张,工业化进程加快,中国水生态环境愈发脆弱,往往表现为不同时、空尺度下的交叉综合效应,使水生态环境问题的形成机制更加复杂。现阶段,提升水生态环境的重点是人为干预下水生态环境向良性循环方向的回归,其核心是重构水资源的可持续利用状态。近年来,“三水”共治成效显著,保护和修复水生态环境已成为环保工作的重点内容。2016年,生态环境部发布《重点流域水污染防治专项规划》,要求对全国重点河流进行水污染综合治理,并指出水生态环境安全是生态保护和高质量发展的核心要素。因此,进行科学合理的水生态环境评价,对提高生态稳定性具有重要的现实意义。

国内外对于水生态环境的研究最早开始于 20 世纪 90 年代,主要集中于对水质评价和保护对策的探讨。随着水生态研究理论逐渐发展与丰富,如何对区域内水生态环境进行量化评价,恢复水域生态功能等成为热点话题<sup>[4-5]</sup>。研究内容上,Eiseler<sup>[6]</sup>基于 Constanza 的生态系统健康理论,将水文参数引入水生态环境评价,将笼统的水域生态评价转变成可靠计量的功能性方法。Ghazavi<sup>[7]</sup>使用 7 个环境参数表征伊朗地区水文地质环境,识别不同区域内水污染风险。柯志成等<sup>[8]</sup>将生态足迹与 ESDA 结合,对福建城镇水生态能力进行评价,识别时空分异特征。现如今,水生态环境已从单一系统测算发展为考虑多重影响的定量复合评价,研究角度也从单指标框架演变为包含若干层次的多元复杂体系。研究方法上,陈雨霖等<sup>[9]</sup>考虑农业面源污染和用水结构,利用加权秩和比法构建了四川灌区生态综合评价模型。王晶等<sup>[10]</sup>基于社会、经济等子系统的综合影响构建目标函数,通过遗传算法预测京津冀水环境发展。Leeuwen<sup>[11]</sup>考虑城市水循环服务的发展可持续性,进行水资源管理评

价,为城市水环境优化创造空间。除上述方法以外,主成分分析<sup>[12]</sup>、随机森林<sup>[13]</sup>,灰色关联度<sup>[14]</sup>等也被广泛应用于水生态环境评价工作中。评价体系上,Men 等<sup>[15]</sup>采用 PSR(压力—状态—响应)模型开展水生态环境评价,并测算 2003—2010 年黑河水资源脆弱性指数。许杨等<sup>[16]</sup>以 DPSR(驱动力—压力—状态—响应)模型为基础,对淮安市水环境承载力进行综合评价。万生新等<sup>[17]</sup>建立 DPSIR(驱动力—压力—状态—影响—响应)模型,确定沂河流域 2015 年水生态安全状况。

综上所述,现有水生态环境的研究成果较多,虽在一定程度上完善了评价内容,但仍存在以下不足之处:计算指标权重易受主观因素影响,导致评价结果客观性不足,如主成分分析法、层次分析法;现有模型易限制指标选取范围,难以涵盖社会、管理、自然资源等方面的综合影响,如 PSR, DPSR, DPSIR;研究尺度主要为单个地区或小型流域,鲜见对经济带区域的水生态环境综合性评价。基于此,本文以 2010—2019 年为研究时段,长江经济带 11 个省份为研究对象,综合衡量流域内工业生产、社会活动、生态管理等对水生态环境的影响,提出包含驱动力(D)、承载源(C)、承载状态(S)、管理(M)4 个子系统的 DCSM 模型,将质性分析结果和随机森林模型结合,增强所选取指标的客观科学性,并根据重要度合理降维,利用加权秩和比模型和对抗解释结构模型对研究对象定级,明确各省份水生态环境优劣差异,并提出改善建议,以期为长江经济带制定水生态环境提升策略提供理论参考。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

长江经济带横跨中国东、中、西部,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 个省市,是中国人口最密集,综合实力最强的巨型经济带(图 1)。《2020 年中国统计年鉴》显示,长江经济带人口和经济总量均超过全国的 40%,其水资源总量约占全国总量的 36%,保障沿江 4 亿人的

生产生活用水,是我国重要的生态功能区和战略水源地。然而,该区域一方面因资源要素分散,地形地貌差异,降水南多北少,水资源分布不均;另一方面,因人口集聚,重工业化围江,中下游污水排放和水质型缺水问题严重;此外,上中下游产业同构现象突出,高耗能发展模式造成的水资源供需矛盾对水生态环境稳态造成严重影响。因此,在新时代“生态优先”战略下,深入探讨水生态环境差异成因,对提升可持续发展能力,促进长江经济带生态协同保护具有重要意义。

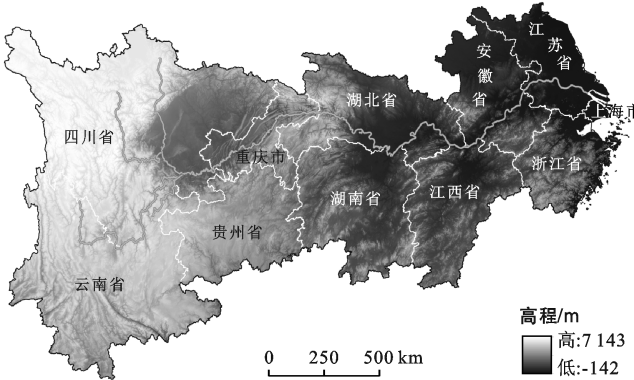


图 1 长江经济带区域地形图

Fig.1 Topography of the Yangtze River Economic Belt region

### 1.2 初始指标选取

1.2.1 指标框架构建 水生态环境评价的重点是探讨区域内人类社会活动与水环境的相互作用机制和反馈调节能力。其中,流域内水质、量、分布特征等为水生态环境的自然属性,以水生态环境为支撑的社会经济,行业生产等子系统的集合则为社会属性<sup>[18]</sup>。在确定指标框架时,需遵循整体性、客观性等原则,结合定性、定量的方法综合研判。目前,构建水生态环境评价指标体系主要以指标类别进行划分,虽操作简便,但无法准确反映各子系统要素间的相互影响,在揭示人类活动与水生态环境间因果关系方面仍有不足。本文对长江经济带各流域的社会经济,生态承载压力,水环境状态等方面特点进行综合探讨,并参考相关文献<sup>[19-21]</sup>,提出包含 4 个子系统的 DCSM(驱动力—承载源—承载状态—管理能力)指标框架(图 2),创新性地加入水生态管理要素,衡量社会及政府对水生态污染的调控治理能力。其中,驱动力子系统主要为社会活动因素对水生态环境的作用;承载源子系统受驱动力子系统的影响,反映水生态环境压力;管理子系统代表生态管理对水生态保护的响应能力;承载状态子系统受前述 3 个子系统的综合影响,体现区域水生态环境的优劣程度。

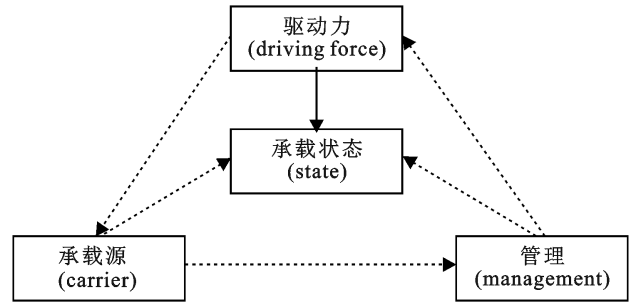


图 2 DCSM 结构框架图

Fig.2 DCSM structural framework diagram

1.2.2 质性分析 鉴于现有研究在选取指标时主观性较强,本文以扎根理论为基础,对原始资料进行质性分析,凝练为理论概念体系。检索 2015—2019 年中国知网 CSCD 库相关文献,主题为“水生态环境”,“长江经济带”等,最终遴选出 60 篇高度相关的研究论文。搜集省级政府“水生态环境”资料,获得政策文本 13 项。借助 NVivo 12 软件,以 DCSM 框架确定 4 个一级节点(驱动力、承载源、承载状态、管理),对论文和政策文本逐句阅读,得到开放编码点 630 个;再合并归纳同类属性语句的编码,整理其主要内容,形成三级节点;凝练各三级节点主旨,形成二级节点;最后按照 DCSM 一级节点归类,得到 4 类共 22 项评价指标,具体内容见表 1。

### 1.3 研究方法

1.3.1 随机森林模型 随机森林模型由 Breiman 于 2001 年提出,是一种将 CART 树与 Bagging 结合形成的联合模型,常用于解决回归预测,重要性判别等问题<sup>[22]</sup>。从原始数据集中抽取  $N$  个训练集,建立  $n$  颗分类树的森林,未被抽取的数据定义为袋外数据(out-of-bag, OOB),对其进行误差估计,得到 OOB 误差。设数据量为  $k$ , 指标变量数为  $a$ , 每个 OOB 的分类树均方误差分别为  $MSE_1, MSE_2 \dots MSE_k$ , 标准误差为  $SE$ 。对 OOB 中各变量随机置换,得到 OOB 均方误差矩阵  $Q$ :

$$Q = \begin{bmatrix} MSE_{11} & \dots & MSE_{1k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ MSE_{a1} & \dots & MSE_{ak} \end{bmatrix} \quad (1)$$

将  $MSE_1, MSE_2 \dots MSE_k$  与  $Q$  中对应的列向量作差,以平均值除以标准误差  $SE$ , 得到重要度公式:

$$IM_i = \frac{[\sum_{j=1}^k MSE - MSE_{ij}]/k}{SE} \quad (1 \leq i \leq a) \quad (2)$$

重要度  $IM$  越大,该指标对整体指标体系重要程度越高。研究显示<sup>[23]</sup>,与 SVN,主成分分析等模型相比,随机森林可避免丢失重要的变量,构建可靠性更高的评价体系。

表 1 水生态环境文本内容编码  
Table 1 Codes of water ecology text content

一级节点	材料来源数量	二级节点	三级节点	开放编码点数量
驱动力	41	行业用水	农业生产耗水量	19
			工业生产耗水量	22
			第三产业生产耗水量	20
		社会经济	人均生产总值	27
			城镇化程度	23
			工业压力	工业产业废水排放量
承载源	53	工业压力	工业固体废弃物产量	16
			农业压力	农田用水量
		城市生产生活压力	农业污染排放	15
			城镇人均用水量	22
			人均生活垃圾污染	24
			水资源开发利用	44
承载状态	47	水资源状态	人均水资源	32
			工业废水重复利用率	40
			水质达标率	38
		环境状态	绿化覆盖率	27
			森林覆盖率	42
			人均公园面积	25
管 理	43	治理投资	水环境保护投资	50
			水利基础设施建设	42
		法规建设	“三废”治理投资	37
			生态法规体系健全水平	26

1.3.2 加权秩和比模型 秩和比(rank sum ratio, RSR)多应用于统计分析的综合评级,通过秩变换,获得无量纲统计量 RSR,RSR 越大则综合评价越优。加权秩和比(WRSR)在 RSR 基础上考虑指标权重,相较于 TOPSIS,DEA 等,评价结果更为客观<sup>[24]</sup>。

对于正向指标,秩次越大,表现越优,负向指标则反之。对原始数据矩阵  $O=[o_{ij}]_{n \times m}$  进行标准化处理,消除量纲影响。其中, $n$  为样本数量, $m$  为指标数量。为保证结果客观,采用熵值法求权重。

对正向指标有:

$$u_{ij} = \frac{o_{ij} - \min(o_j)}{\max(o_j) - \min(o_j)} \quad (3)$$

$(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$

对负向指标有:

$$u_{ij} = \frac{\max(o_j) - o_{ij}}{\max(o_j) - \min(o_j)} \quad (4)$$

$(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m)$

求得标准化矩阵: $U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$

由矩阵  $U$  求熵值:

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (6)$$

其中, $e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$ ,  $p_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{j=1}^m u_{ij}}$ ,  $\ln 0 = 0$ 。

求得权重矩阵  $W = (\omega_1, \omega_2 \cdots \omega_m)$ 。

求得加权秩和比:

$$WRSR_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot R_{ij} \quad (7)$$

其中, $R_{ij}$  表示第  $i$  个样本第  $j$  个指标的秩次,将 WRSR 从小到大排列,计算向下累计频率。以 Probit 为自变量,WRSR<sub>*i*</sub> 为因变量,依据最小二乘法,可得回归方程及线性拟合图像,实现样本分档。

1.3.3 对抗解释结构模型 对抗解释结构模型在传统的解释结构模型中融合生成对抗网络 GAN 思想,按对立层级抽取原则,建立对抗的层次化拓扑图<sup>[25]</sup>。

对于含有  $m$  列的决策矩阵  $D$ ,有  $m$  个不同的指标维度。正向指标记做  $p_1, p_2 \cdots p_m$ ; 负向指标记做  $q_1, q_2 \cdots q_m$ 。对于决策矩阵  $D$  中的任意两行  $x, y$  有:

负向指标: $d_{(x,p1)} \geq d_{(y,p1)}$  且  $d_{(x,p2)} \geq d_{(y,p2)}$  且...  
且  $d_{(x,pm)} \geq d_{(y,pm)}$  ,

正向指标: $d_{(x,q1)} \leq d_{(y,q1)}$  且  $d_{(x,q2)} \leq d_{(y,q2)}$  且...  
且  $d_{(x,qm)} \leq d_{(y,qm)}$  。

$x$  和  $y$  的偏序关系记做: $x < y$ , 表示要素  $y$  优于要素  $x$ 。即给定偏序集  $(D, <)$ , 有  $\forall d_i, d_j \in D$ , 若  $d_j < d_i$ , 记  $a_{ij} = 1$ ; 若  $d_i < d_j$ , 记  $a_{ij} = 0$ 。决策矩阵  $D$  按偏序规则可求得关系矩阵  $A = (a)_{n \times n}$ , 其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{当 } x < y) \\ 0 & (\text{当 } x \text{ 与 } y \text{ 无完全优劣关系或 } x \text{ 优于 } y) \end{cases}$$

对于关系矩阵  $A$  的可达矩阵计算, 如公式 (8) 所示,

$$B = A + I \tag{8}$$

$$B^k = B^{k+1} = R \tag{9}$$

层级图由先行集合  $Q$ , 共同集合  $T$  和可达集合  $R$  判定。其要素满足: $e_i$  的先行集合为  $Q(e_i)$ , 为对列为 1 的要素。 $e_i$  的可达集合为  $R(e_i)$ , 为对应行为

1 的要素。 $e_i$  的共同集合为  $T(e_i)$ , 为  $Q(e_i)$  和  $R(e_i)$  的交集部分。按照结果优先,  $R(e_i) = T(e_i)$ , 由上至下放置抽取样本, 得 UP 型层级图; 按照原因优先:  $Q(e_i) = T(e_i)$ , 由下至上放置抽取样本, 得 DOWN 型层级图。Pareto 最优的样本处在最上级, 最劣的样本处在最下级, 由此对评价样本可视化排序。

## 2 结果与分析

### 2.1 指标量化

考虑水生态环境评价指标的科学性和可操作性原则, 选取长江经济带 11 个省份为研究样本, 参考质性分析文本中使用频率较高的指标, 对表 1 中的 22 个三级节点进行量化, 定义其属性。数据来源于 2010—2019 年的《长江经济带发展统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《水资源公报》等, 部分指标值经二次计算得到。以此构建长江经济带水生态环境评价初始指标体系(表 2)。

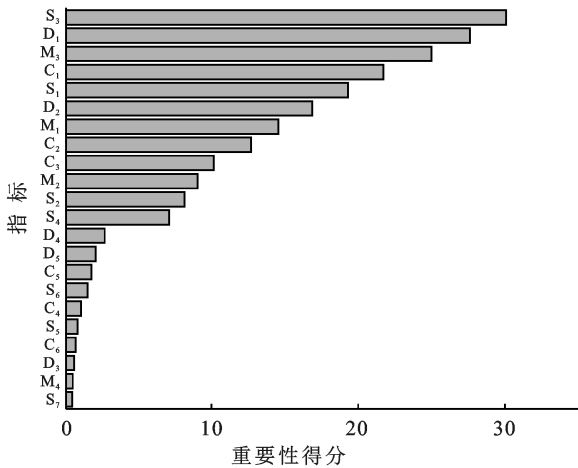
表 2 长江经济带水生态环境评价初始指标体系

Table 2 Initial index system for water ecology evaluation in the Yangtze River Economic Belt

准则层	编号	指标层	属性	指标释义
驱动力(D)	D <sub>1</sub>	万元农业生产总值耗水量	-	第一产业用水量/第一产业 GDP
	D <sub>2</sub>	万元工业生产总值耗水量	-	第二产业用水量/第二产业 GDP
	D <sub>3</sub>	万元第三产业生产总值耗水量	-	第三产业用水量/第三产业 GDP
	D <sub>4</sub>	人均生产总值	+	地区 GDP/常住人口数
	D <sub>5</sub>	城镇化率	-	城镇人口数/常住人口数
承载源(C)	C <sub>1</sub>	万元工业产业增加值废水排放量	-	工业废水量/工业增加值
	C <sub>2</sub>	工业固体废弃物产量	+	工业固体废弃物年产量
	C <sub>3</sub>	地区单位面积农田用水量	-	农业用水/农田面积
	C <sub>4</sub>	农产总值平均农业污染排放	-	农业污染量/农业产值增加量
	C <sub>5</sub>	城镇人均用水量	-	城镇用水量/地区总人口数
	C <sub>6</sub>	人均生活垃圾污染排放量	-	生活垃圾污染排放量/地区总人口数
承载状态(S)	S <sub>1</sub>	水资源开发利用率	-	用水总量/多年平均水资源量
	S <sub>2</sub>	人均水资源	+	水资源总量/地区总人口数
	S <sub>3</sub>	工业废水重复利用率	+	可利用废水量/总废水量
	S <sub>4</sub>	水质监测断面达标率	+	水质达标断面数/水质监测断面总数
	S <sub>5</sub>	区域绿化覆盖率	+	绿地面积/区域面积
	S <sub>6</sub>	区域森林覆盖率	+	森林覆盖面积/区域面积
	S <sub>7</sub>	人均公园面积	+	区域公园面积/地区总人口数
管理(M)	M <sub>1</sub>	水生态保护投资占地区 GDP 比重	+	水生态保护投资/地区 GDP
	M <sub>2</sub>	水利基础设施建设占固定资产比重	+	水利基础设施投资/城镇固定资产投资
	M <sub>3</sub>	“三废”治理投资	+	区域“三废”治理年投资额
	M <sub>4</sub>	生态法规体系健全水平	+	水生态保护政策文件数量

2.2 指标筛选

参照本文研究方法部分的内容,对初始指标进行重要度评分,结果见图 3。前 12 项指标包含 4 个水生态承载状态指标 ( $S_3, S_1, S_2, S_4$ ), 2 个驱动力指标 ( $D_1, D_2$ ), 3 个水生态管理指标 ( $M_3, M_1, M_2$ ), 3 个水生态承载源指标 ( $C_1, C_2, C_3$ ), 单项指标对初始评价体系贡献度均超过 3%, 累计贡献度大于 90%, 以此作为长江经济带水生态环境综合评价指标体系<sup>[26]</sup>。



注:纵坐标为生态环境综合评价指标,详见表 2。下同。

图 3 水生态环境指标重要性评分

Fig.3 Importance score of water ecological indicators

2.3 评价结果与分析

2.3.1 指标权重分析 采用加权平均法对 2010—2019 年各省指标数据进行预处理。评价对象为上

海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南共 11 个长江经济带省份。对原始数据矩阵无量纲化处理,得到标准化矩阵  $U=[u_{ij}]_{11 \times 12}$ , 按熵权法求得各指标权重排序,得矩阵  $W=[\omega_{ij}]_{2 \times 12}$  (见表 3)。

在 12 项指标层中,驱动力层级(D)包含 2 个指标,其中万元农业生产总值耗水量权重占比达 72.16%,表明农业用水对长江经济带水生态环境驱动力影响较大;承载源(C)3 个指标中,万元工业增加值废水排放量权重比例为 61.88%,表明工业废水污染是威胁水生态安全的重要因素。现阶段工业绿色转型虽在一定程度上遏制了废水排放强度,但因产业转移,地方经济需求、工业污染历史欠账等产生的废水排放影响仍不容忽视;承载状态(S)的 4 个指标中,水资源开发利用率和工业废水重复利用率的权重较大,表明驱动力和承载源的变化会对水生态环境承载状态产生较大影响,而这种影响会直接表现在水资源利用和工业废水循环利用能力等方面;水生态管理层级(M)的 3 个指标中,“三废”治理投资权重最高,说明水生态治理对专项资金的投入需求仍处于高位。准则层中,承载状态权重最大,为 0.377,说明驱动力和承载源要素的变化可对承载状态产生直接影响。上述结果表明,区域水资源禀赋对水生态环境状态的的决定性作用具有一定上限,各指标间的权重差异也可反映长江经济带水生态环境状态的不稳定性,承载状态准则层指标对整体评价结果具有重要意义。长江经济带可通过提升废水重复利用率、促进农业节水,增加水生态治理专项投资等手段优化水生态环境状态。

表 3 水生态环境评价指标权重

Table 3 Weights of water ecological environment evaluation indicator

$W_{2 \times 12}$	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
权重	0.138 7	0.053 5	0.106 5	0.039 2	0.026 4	0.134 7	0.001 2	0.241 0	0.000 1	0.038 6	0.011 5	0.208 5
排序	3	6	5	7	9	4	11	1	12	8	10	2

2.3.2 水生态环境分档 参照公式(7)计算 WRSR。向下累计频率  $p$  如公式(10)所示。

$$p = \frac{N_R}{n} \times 100\% \quad (10)$$

其中,  $n=11$ ,  $N_R$  为 WRSR 值对应的省份样本数。根据向下累计频率可求得标准正态离差  $\mu$ , 单位概率  $\text{Probit}=\mu+5$ 。相应参数见表 4。

基于最小二乘法求得回归方程:

$$\overline{\text{WRSR}}=0.044+0.097\text{Probit} \quad (11)$$

对回归方程参数检验可知,相关系数  $r^2=0.896 8$ ,  $\overline{\text{WRSR}}$ 与  $\text{Probit}$  之间呈线性正相关。  $F=78.19$ ,  $p$  显著小于 0.01, 回归方程具有统计学意义。

表 4 向下累计频率、Probit 及回归方程参数

Table 4 Downward cumulative frequency, Probit and regression equation parameters

省份	WRSR	向下累计频率 $p/\%$	Probit	$\overline{\text{WRSR}}$
上海	0.401 5	9.09	3.659 2	0.398 9
湖南	0.438 7	18.18	4.088 4	0.440 6
湖北	0.482 6	27.27	4.393 2	0.470 1
重庆	0.489 0	36.36	4.649 5	0.495 0
四川	0.529 6	45.45	4.884 4	0.517 8
江西	0.561 4	54.55	5.113 0	0.540 0
安徽	0.563 5	63.64	5.347 8	0.562 7
贵州	0.571 7	72.73	5.603 8	0.587 6
云南	0.576 7	81.82	5.907 8	0.617 1
江苏	0.597 5	90.91	6.334 6	0.658 5
浙江	0.787 9	97.73	6.995 4	0.722 6

依据前人研究结果<sup>[27]</sup>,可将评价结果划分为 4 档。为保证可靠性,进行 Kendall 和谐系数检验,如公式(12)所示:

$$W_k = \frac{12 \times n \left[ \sum_{i=1}^n WRSR_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n WRSR_i \right)^2 \right]}{n^2 - 1} \quad (12)$$

对结果进行假设检验:

①原假设为  $H_0$ :评价结果不相关,各评价指标与分档结果互相独立。

②备择假设  $H_1$ :评价结果相关,各评价指标与分档结果不独立。

式中: $n$  代表省份样本数量,此处  $n=11$ 。可求得  $W_k=0.1137, D(n-1) \cdot W_k \sim \chi^2(n-1)$ ,通过计算  $p > 0.1137$ ,接受原假设,分档结果互相独立,具有统计意义。线性拟合图像见图 4,分档结果见表 5。

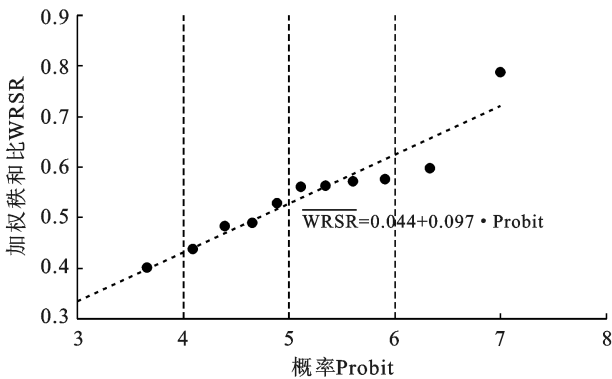


图 4 Probit, WRSR 线性回归拟合效果

Fig.4 Probit, WRSR linear regression fitted effect

从分档结果和空间分布来看,长江经济带水生态环境状态不尽相同,各省份样本点较为分散,近半数省份为“中等”及以下水平,具有明显的区域异质性。其中,浙江、江苏处于水生态环境“优秀”等级,位于长江下游,水生态环境基础扎实,共建共治成果丰硕。浙江自 2014 年出台《浙江省水污染防治行动计划》,实行“五水共治”,加之江苏省于 2020 年施行《江苏省长江水污染防治条例》,首创“河长制”,实现了区域内末端治理向集中控制转变,极大缓解因工业化、城镇化带来的水生态环境压力。云南、贵州、安徽、江西处于水生态环境“良好”等级,位于长江上游生态屏障和中下游水系发达区域,其依靠自然禀赋形成的客观优势推动水生态环境稳定向好。水生态环境“中等”、“较差”的区域为四川、湖南、重庆、湖北、上海,大部分位于长江中游,其面临生态结构失衡,水环境状态失调等问题,虽自 2015 年起积极策应《长江中游城市群发展规划》和“一带一路”倡议,但产业结构仍以传统工业为主导,未进行实质性更新,缺乏生态活力,动能不足。上海水生态状态不容乐观,地处长江下游入海

口,多承载中上游水污染压力,治水任务繁重,短时间内难以对水环境进行有效减负。因此,现阶段长江经济带水生态环境整体仍未达到安全协调稳态,呈现下游优,上游次之,中游较差的非对称“U”型格局。

表 5 长江经济带水生态环境等级划分结果

Table 5 Results of the classification of water ecological environment in the Yangtze River Economic Belt

水生态环境等级	Probit	WRSR	结果
较差	(0,4]	(0.044,0.432]	上海
中等	(4,5]	(0.432,0.529]	四川、湖南、重庆、湖北
良好	(5,6]	(0.529,0.626]	云南、贵州、安徽、江西
优秀	(6,+∞)	(0.626,+∞)	浙江、江苏

2.3.3 水生态环境排名 加权秩和比模型将长江经济带水生态环境划分为 4 个等级,但无法对各省进行更细致地排序,故引入对抗解释结构模型(AISM),确定长江经济带省份水生态环境优劣排名。各省份对应的 Probit 作为决策矩阵  $D=[d_{ij}]_{11 \times 1}$ ,得到对抗层级拓扑图(图 5)。

由图 5 可知,UP 型、DOWN 型层级图将长江经济带水生态环境划分为 8 个层级。其中,浙江是唯一位于  $L_1$  层级的省份样本,水生态环境最优。安徽、湖北分别横跨一个层级,为拓扑评价结构中的活动要素。江苏、云南、贵州、安徽、江西、四川、重庆、湖北 8 个省份水生态环境优劣程度呈“阶梯状”递减,对最末层级  $L_8$ 。取交集可知,上海、湖南 2 个省份水生态环境状态最劣。

综上所述,同样位于长江下游生态优势区,浙江、江苏分别位于  $L_1, L_2$  层级,水生态环境明显优于  $L_8$  层级的上海,此结果与袁汝华等<sup>[28]</sup>认为长三角地区上海水生态环境较差的空间分布结果一致。究其原因可知,江浙两地的高权重指标值均位居前列,在水生态保护工作中,注重全方位协调治理,依靠其雄厚的产业基础和绿色高质量发展路径能积极有效的应对各种水生态压力。上海作为首批沿海开放地区,城镇化率较高,需水强度过大和面源污染问题严重,承载能力、承载状态子系统指标表现滞后,排名几近末尾,虽大量吸收长三角地区的生态红利,但现阶段无法满足经济社会的可持续发展需要。由于工业企业逐利性,“先污染,后治理”的思路造成的水污染严重,实行控源截污等举措虽可短期改善区域水生态环境,但对提升水污染治理能力缺乏积极响应,水生态恢复缓慢。后期应注重水生态管理,逐步满足人口集聚下的基础设施和生态服务的需求增量,缩小长江下游水生态环境差异。

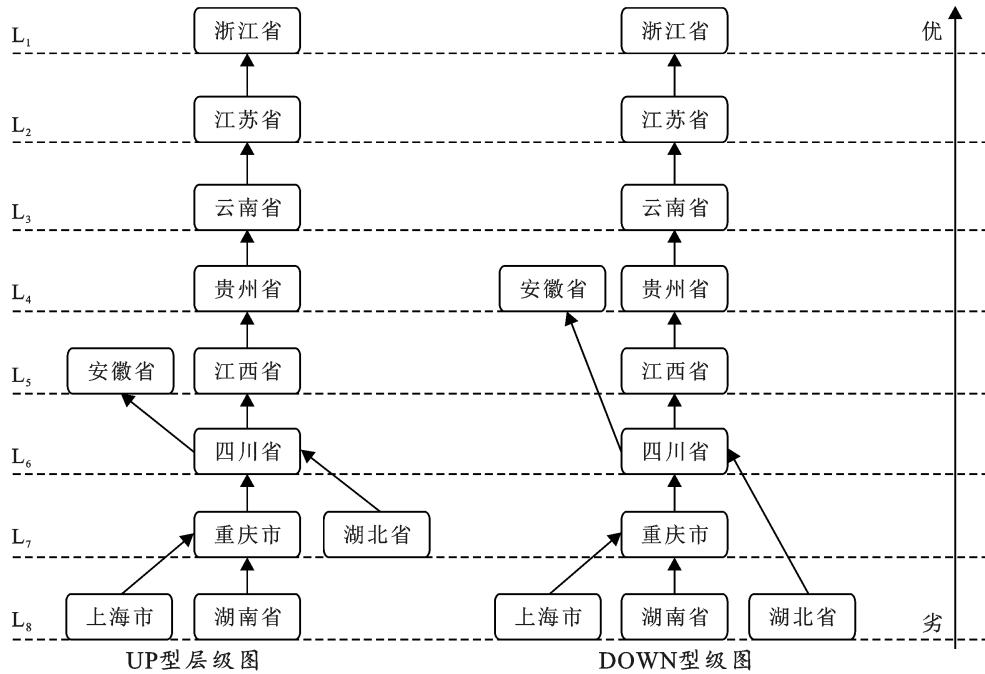


图 5 区域水生态环境排名对抗层级拓扑图

Fig.5 Topology map of the regional water ecological ranking adversarial hierarchy

中间和末位层级的省份多数位于长江中游和上游区域,水生态环境质量呈明显的阶梯状分层。其中,云南、贵州“优势”明显,分别位于 $L_3$ 、 $L_4$ 层级。在“共抓大保护,不搞大开发”的政策背景下,着力改进水生态环境质量,推进传统产业升级改造。但由于其位于长江经济带上游边疆及贫困连绵带,空间辐射吸收效应薄弱,生态经济发展缓慢,故与江浙地区仍有差距。因此,云贵两省在今后的发展需重视水生态驱动力因子投入,给予更多政策、水生态治理投入等支撑要素。

处于中游枢纽区的安徽、江西、四川、重庆、湖北、湖南位于 $L_5$ — $L_8$ 层级,多数位于长江中下游平原,承接东部沿海省份重化工业的转移,工业化进程的加快,使四川、重庆、湖北、湖南四省经济发展与水资源污染和过度开发间的矛盾愈突出,水生态环境较为脆弱;安徽、江西作为国内商品粮基地,因耕种所需的农业水资源消耗及农药化肥带来的水源污染难以避免,水资源短缺和不安全现象明显,此结果与吕府红<sup>[29]</sup>测算的长江经济带省域水环境影响因素基本一致,但略有偏差。中下层级的省份水生态稳定性较差,短板较多,在今后的水环境调控中应切实规划,缓解承载源压力,着重进行整体发展与子系统间的协调治理,逐渐形成标本兼治,综合施策的动态水环境保护体系。

### 3 结论

本文通过构建DCSM模型,结合质性分析结果,

利用随机森林选取高相关指标,基于加权秩和比模型和对抗解释结构模型对2010—2019年长江经济带水生态环境进行优劣分级,并探究各省份水生态环境差异成因。

(1)从整体水平来看,长江经济带上游水生态总体较优,中下游两极分化情况较为突出,区域间差异较大,优劣程度呈“阶梯状”递减,流域内总体水生态环境仍未达到稳态,形成不对称“U”型分布格局。水生态“优秀”及“良好”地区多位于开发较少的生态示范区与绿色产业发展区域,“中等”区域集中于传统产业转型省份,而“较差”区域呈现围绕粗放式工业聚集的特点,生态开发程度较高。

(2)从影响因素来看,长江经济带流域内产业结构仍以第一、第二产业为主,加之发展模式较为粗放,导致工业废水重复利用率、万元农业生产总值耗水量、万元工业产业增加值废水排放量等成为影响水生态环境的主要因素。上游地区水污染程度轻且资源丰富,中下游地区产业发展进程不一,水环境污染集聚及水资源短缺现象较上游严重。进一步证实了生产活动污染对水生态可持续发展有较强的抑制作用,但在不同区域内,显著因素与作用程度不尽相同,关系较为复杂。

(3)从子系统差异来看,长江经济带各流域水生态保护重点各不相同。针对下游区域,应着力于承载源子系统的提升。针对中游区域,在提升驱动力子系统的同时需对承载状态进行优化,并进一步削弱承载



源带来的水生态压力。针对经济发展较弱的上游区域,驱动力要素是关键。水生态环境显示出更多政府管理调控效应,但现阶段政府生态职能水平较低,缺乏综合性、深层次的治理。同时,值得关注的是《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》明确,到“十四五”末长江经济带中部地区经济总量占全国比重将进一步提高,城镇化率突破 67%<sup>[30]</sup>,人口聚集,产业集群是否会加剧水生态环境压力值得深入研究。

## 4 讨论

本文所得的评价结果基本符合长江经济带水生态环境实际状态,不同流域间具有显著差异,在水生态环境协同治理过程中仍存在亟待解决的问题<sup>[31-32]</sup>。因此,长江经济带应注重经济转型,加强工业污染控制,关注水污染溯源和循环利用工作,着力防范水生态环境风险;强化生态管理,建立健全法治体系,整改长江流域内突出问题,协同推进水环境综合治理;优化区域生产力布局,促进生产要素跨区域合理流动和优化配置,引领开展绿色工业,实现上中下游产业良性互动。

研究考虑已有模型的局限性<sup>[33-35]</sup>,利用 DCSM 模型构造评价指标框架,综合反映多种社会活动与水生态环境间的作用关系。质性分析使指标选取及量化有据可依,与其他方法相比避免了主观选择带来的评价偏差<sup>[36]</sup>。引入随机森林模型对指标进行降维,依据重要性筛选关键指标组成评价体系,提高运算精度<sup>[37]</sup>。加权秩和比和对抗解释结构模型的联用实现了长江经济带水生态环境分级评价,结合指标特征可客观且明确地反映区域水生态环境差异成因。

全面系统的指标体系和合理有效的评价模型是水生态环境评价的基础。本文由于研究尺度、资料收集等多方面因素的制约,指标选取的广度有待提升,数理方法与模型的运用仍有优化空间。本文只对长江经济带水生态环境空间优劣分布进行评估,对未来趋势的预测较为薄弱。今后的研究可深入探索以上问题,细化评价要素,丰富研究尺度,结合实际情况对未来趋势做出科学预测,以期改善水生态环境质量提供有效决策支持。

### [参 考 文 献]

- [1] 赵钟楠,张越,黄火键,等.基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J].水资源保护,2019,35(3):84-88.
- [2] 于冰,徐琳瑜.城市水生态系统可持续发展评价:以大连市为例[J].资源科学,2014,36(12):2578-2583.
- [3] 左其亭.水资源承载力研究方法总结与再思考[J].水利水电科技进展,2017,37(3):1-6.
- [4] 崔文彦,刘得银,梁舒汀,等.永定河流域水生态环境质量综合评价[J].水生态学杂志,2020,41(2):23-28.
- [5] 田培,王瑾钰,花威,等.长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J].湖泊科学,2021,33(6):1871-1884.
- [6] Eisele M, Steinbrich A, Hildebrand A, et al. The significance of hydrological criteria for the assessment of the ecological quality in river basins [J]. Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C), 2003, 28 (12/13): 529-536.
- [7] Ghazavi R, Ebrahimi Z. Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12 (9): 2909-2918.
- [8] 柯志成,连海峰,陈奕,等.福建省 2009—2018 年人均生态足迹和人均生态承载力的时空动态[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(5):677-685.
- [9] 陈雨霖,朱斌,魏俊,等.基于加权秩和比法的灌区运行水平综合评价:以四川省典型灌区为例[J].中国农村水利水电,2018(6):122-127.
- [10] 王晶,胡贵隆,张良.京津冀地区水资源承载力评价与预测[J].中国农村水利水电,2022(3):69-74.
- [11] Van Leeuwen C J. City blueprints: Baseline assessments of sustainable water management in 11 cities of the future [J]. Water Resources Management, 2013, 27 (15): 5191-5206.
- [12] 王雪松,张鸽,李颖,等.常州市典型水生态环境功能区河流水环境质量评价[J].人民珠江,2022,43(1):64-73.
- [13] 张颖,高倩倩.基于随机森林分类算法的巢湖水质评价[J].环境工程学报,2016,10(2):992-998.
- [14] 张静,唐莲,刘子西,等.宁夏水环境承载力变化趋势及影响因素研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2019, 40(3):281-285.
- [15] Men Baohui, Liu Haoyue. Water resource system vulnerability assessment of the Heihe River Basin based on pressure-state-response (PSR) model under the changing environment [J]. Water Supply, 2018, 18 (6): 1956-1967.
- [16] 许杨,陈菁,夏欢,等.基于 DPSIR-改进 TOPSIS 模型的淮安市水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 47-52.
- [17] 万生新,王悦泰.基于 DPSIR 模型的沂河流域水生态安全评价方法[J].山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 502-508.
- [18] 阳斌成,张家其,罗伟聪,等.基于 TOPSIS 及耦合协调度的湖南省 2009—2018 年水资源承载力综合评价[J].水土保持通报,2021,41(5):357-364.

- [19] 陈雯,孙伟,吴加伟,等.长江经济带开发与保护空间格局构建及其分析路径[J].地理科学进展,2015,34(11):1388-1397.
- [20] 李建新,梁曼,钟业喜.长江经济带经济与环境协调发展的时空格局及问题区域识别[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2584-2596.
- [21] 孙斌,徐渭,薛建春,等.黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测[J].地球科学与环境学报,2021,43(5):887-896.
- [22] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.
- [23] 马玥,姜琦刚,孟治国,等.基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J].农业机械学报,2016,47(1):297-303.
- [24] 王建军,代宗利,侯晓文.跨科室资源共享模式下择期病人手术室调度研究[J].系统工程理论与实践,2021,41(11):2947-2962.
- [25] Tan Tan, Chen Ke, Xue Fan, et al. Barriers to Building Information Modeling (BIM) implementation in China's prefabricated construction: An interpretive structural modeling (ISM) approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,219:949-959.
- [26] Strobl C, Boulesteix A L, Kneib T, et al. Conditional variable importance for random forests [J]. BMC Bioinformatics, 2008,9:307.
- [27] Chen Faan, Wang Jianjun, Deng Yajuan. Road safety risk evaluation by means of improved entropy TOPSIS-RSR [J]. Safety Science, 2015,79:39-54.
- [28] 袁汝华,王霄汉.基于 Pythagoras-TOPSIS 法的长三角水资源承载力综合评价分析[J].科技管理研究,2020,40(15):71-79.
- [29] 吕府红.长江经济带省域水环境安全评估与比较研究[D].湖北 武汉:中南财经政法大学,2019.
- [30] 中华人民共和国中央人民政府.国家发展改革委关于印发长江中游城市群发展“十四五”实施方案的通知[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/16/content\\_5679303.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/16/content_5679303.htm), 2022-02-15.
- [31] 薄立明,魏伟,尹力,等.2000—2020年长江经济带水生态空间格局变化及其影响要素[J].中国环境科学,2023,43(2):874-885.
- [32] 田泽,徐志鹏,任阳军.长江经济带新型城镇化对水资源与经济协调发展的影响[J].水利经济,2022,40(5):14-22,93.
- [33] 胡阿芹,谢乃明.流域水环境承载力动态演化机制研究[J].生态经济,2022,38(8):146-152.
- [34] 傅晓华,杨欣欣,宋心语.基于 DPSIR-TOPSIS 模型长江经济带资源环境承载力评价[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2022,16(6):38-47.
- [35] 王保乾,杨晖,竺运.长江经济带水资源承载力综合评价研究[J].资源与产业,2020,22(1):1-11.
- [36] 范芹.灰色关联模型下长江经济带生态环境评价[J].统计与决策,2018,34(24):117-119.
- [37] 林娜,张迪,潘建平,等.长寿区长时序生态质量评价及影响因素分析[J/OL].长江科学院院报:1-7[2023-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20221223.1559.009.html>.

(上接第 243 页)

- [15] 刘建华,黄亮朝.黄河下游水资源利用与高质量发展关联评估[J].水资源保护,2020,36(5):24-30.
- [16] 张育林,程星,王恒松,等.贵阳市乌当区北部地下水资源特征与开发利用研究[J].贵州科学,2018,36(6):74-80.
- [17] 许国钰,杨振华,任晓冬,等.水环境脆弱性背景下人口—经济—生态空间格局优化:以贵阳市为例[J].生态经济,2018,34(9):172-178.
- [18] 谢小飞,马亚飞,焦琳惠.生态保护与经济高质量发展的影响因素分析[J].开发研究,2021(6):26-33.
- [19] Zhang Qian, Shen Juqin, Sun Fuhua. Spatiotemporal differentiation of coupling coordination degree between economic development and water environment and its influencing factors using GWR in China's Province [J]. Ecological Modelling, 2021,462:109794.
- [20] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.