

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.017.

吕添贵, 邱蓉, 赵巧, 等. 基于 DPSIRM 模型的长江中游城市群生态安全时空特征及障碍因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 379-388.

Lü Tianguì, Qiu Rong, Zhao Qiao, et al. Temporal-Spatial Evaluation of Regional Ecological Security and Obstacle Diagnosis of the Urban Agglomerations in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on DPSIRM Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 379-388.

# 基于 DPSIRM 模型的长江中游城市群 生态安全时空特征及障碍因素

吕添贵<sup>1</sup>, 邱蓉<sup>1</sup>, 赵巧<sup>1</sup>, 李锐<sup>1</sup>, 陈安莹<sup>1</sup>, 肖佳<sup>2</sup>

(1.江西财经大学 财税与公共管理学院, 南昌 330013; 2.江西省科技事务中心, 南昌 330046)

**摘要:** [目的] 客观识别长江中游城市群生态安全时空演化特征并诊断其影响因素, 为构建区域生态安全格局提供参考。 [方法] 以长江中游城市群 31 个市级行政单元为研究对象, 基于 DPSIRM 模型构建生态安全评价指标体系, 运用探索性空间方法剖析了研究区 2006—2020 年生态安全时空演化特征, 采用障碍度模型识别其生态安全主要障碍因素, 并提出了对应提升路径。 [结果] (1) 在 2006—2020 年长江中游城市群各地市生态安全水平总体不断提升, 生态安全等级存在空间差异, 但总体差距不大; (2) 长江中游城市群生态安全障碍度排序结果为管理因素 > 影响因素 > 压力因素 > 响应因素 > 驱动力因素 > 状态因素。其生态安全水平受固定资产投资额比重、人均水资源量、地方财政一般预算内教育支出、绿地与广场用地面积、水土流失治理面积和人均 GDP 共同制约; (3) 长江中游城市群生态安全水平存在空间自相关性, 江西省中部形成高值集聚区, 而在湖北省中部形成低值集聚区; (4) 长江中游城市群各地市多处于临界安全等级 (III), 距离整体达到安全等级 (V) 状态仍有较大差距。 [结论] 长江中游城市群生态安全水平呈整体向好态势, 需要多关注经济对策响应、生态资源利用以及生态制度建设管理方面, 助力构建长江中游城市群生态安全屏障。

**关键词:** 生态安全; 时空演化; 障碍模型; DPSIRM 模型; 长江中游城市群

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0379-10

## Temporal-Spatial Evaluation of Regional Ecological Security and Obstacle Diagnosis of the Urban Agglomerations in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on DPSIRM Model

Lü Tianguì<sup>1</sup>, Qiu Rong<sup>1</sup>, Zhao Qiao<sup>1</sup>, Li Rui<sup>1</sup>, Chen Anying<sup>1</sup>, Xiao Jia<sup>2</sup>

(1. School of Public Finance and Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Provincial Science and Technology Affairs Center, Nanchang 330046, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to objectively identify the spatial and temporal evolutionary characteristics of ecological security in the middle reaches of Yangtze River urban agglomeration, to evaluate its ecological security level and diagnose its influencing factors, and to provide a reference for the construction of the regional ecological security pattern. [Methods] The 31 municipal administrative units in the middle reaches of Yangtze River urban agglomeration were used as research samples, and an ecological security evaluation index system was constructed based on the DPSIRM model. The spatial and temporal evolution characteristics of ecological safety in the study area were evaluated using exploratory spatial data analysis, and the factors impeding ecological safety were analyzed in conjunction with the barrier degree model. Finally, based on the evaluation and diagnosis results, the optimization path was proposed. [Results] (1) The

收稿日期: 2023-03-27

修回日期: 2023-05-07

资助项目: 国家自然科学基金(42261049); 江西省自然科学基金(20232BAB203061, 20213BAA10W31)

第一作者: 吕添贵(1986—), 男, 福建龙岩人, 博士, 副教授, 主要从事城乡发展与土地利用研究。E-mail: lvtianguì@163.com

通信作者: 肖佳(1988—), 女, 江西吉安人, 硕士, 助理研究员, 主要从事生态环境科技创新研究。E-mail: xiaojia0925@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

ecological safety level of cities in the study area had generally been improving from 2006 to 2020, and the ecological safety level varied spatially, but the overall difference was not large. (2) The results of the ranking of the ecological safety barrier degree of the study area were management factors > influence factors > pressure factors > response factors > driving factors > state factors. The improvement of its ecological safety level was mainly governed by six specific indicators, namely, the proportion of investment in fixed assets, the amount of water resources per capita, education expenditure within the general budget of local finance, the area of green areas and squares, the area of soil erosion control, and GDP per capita. (3) There was a certain positive spatial autocorrelation in the ecological safety level of the study area, with the formation of a high-value agglomeration area in central Jiangxi Province and a low-value agglomeration area in central Hubei Province. (4) It suggested that the most cities in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River were at the critical safety level (Ⅲ), and there was still a large gap from reaching the overall safety level (Ⅴ). [Conclusion] The ecological security level of the city cluster in the middle reaches of the Yangtze River showed an overall positive trend, and more attention should be paid to the response of economic countermeasures, the utilization of ecological resources as well as the construction and management of ecological systems, so as to help build an ecological security barrier for the city cluster in the middle reaches of the Yangtze River.

**Keywords:** ecological security; spatiotemporal evolution; obstacle model; DPSIRM model; urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River

城市群作为社会经济发展的重要载体,构建其生态安全屏障是实现区域高质量发展的重要保障。随着中国城市化与工业化进程的不断推进,土地利用覆被变化所产生的城市污水排放、空气污染、水土流失等问题,对区域生态资源环境产生巨大压力,导致城市群生态安全问题日渐突出<sup>[1-2]</sup>。为应对城市群区域生态安全,中央政府先后推动城市群生态绿色一体化生态文明建设,以响应城市群与生态环境间协同发展关系<sup>[3-4]</sup>。为此,如何科学合理评价城市群生态安全状态,已成为城市群生态安全屏障建设的研究热点之一。

围绕生态安全评价主题,学者们从不同角度开展诸多探讨。在概念内涵上,强调生态系统的健康和完整程度<sup>[5]</sup>;在研究尺度上,以国域、省市域、流域生态以及特定景观生态系统为研究范围;在研究视角上,由单一要素向“自然环境-社会经济”为整体要素转变;在理论分析框架层面,包含 PSR, SPSIR, DPSIR 等体现因果关系的模型<sup>[6]</sup>。由于生态环境问题的空间关联性、复杂性与差异性,有关生态安全评价指标体系与测算方法尚未统一,主要有综合评价法、生态足迹法和景观格局分析法等<sup>[7-8]</sup>;在时空格局研究上,多采用探索性时空数据分析方法实现时间与空间的良性耦合<sup>[9]</sup>;在影响因素方面,主要聚焦遗传算法投影寻踪模型、障碍度模型、OLS 模型及 GWR 模型等<sup>[6,10]</sup>。综上,已有研究为确定区域生态安全评价尺度、理论框架和研究方法等提供了理论借鉴,为后续

研究奠定良好基础。近年来,生态安全研究主题逐渐深化,研究单元由宏观转为中观和微观,多聚焦于区域生态安全的时空格局,而对区域发展至成熟阶段的空间组织形式的城市群研究相对较少;在理论框架方面,由于缺少因果链条之间协调管理部分,而使整体系统联动性较低。长江中游城市群作为长江经济带的重要组成部分,在区域发展格局中扮演重要作用,亟需解决生态价值高和生态问题频发之间的矛盾<sup>[11]</sup>。鉴于此,本研究以长江中游城市群 31 个市级行政单元为研究对象,基于 DPSIRM 模型构建长江中游城市群生态安全评价体系并揭示其时空演化格局,采用障碍度模型识别其生态安全障碍因素和提出相应提升路径,旨在为其他城市群与生态环境协同发展提供借鉴参考。

## 1 研究区概况与研究框架

### 1.1 研究区概况

长江中游城市群位于北纬 26°03′—32°38′,东经 110°45′—118°21′,是以环鄱阳湖城市群、环长株潭城市群、武汉城市圈为主体形成的中部地区特大城市群,跨江西、湖南、湖北三省,共包括 31 个城市,国土面积约 32.6 万 km<sup>2</sup>。作为长江经济带的重要组成部分,其战略定位是成为具有重要影响力的生态型城市群,研究区域涵盖“一江两湖”,区域湿地资源和动植物资源丰富,也是重要的生态安全屏障区。然而,作为赣鄂湘三省的人

口聚集区以及社会经济重点地区,近年来伴随着城镇化和工业化迅速发展,由于重化工业污染的过度排放和资源低效粗放利用导致了水土流失等系列环境问题。而这些已成为遏制长江中游城市群经济社会可持续发展的重要因素。欣喜的是,2022 年国家发改委公布《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》,提出生态优先和绿色发展原则,强调推动绿色低碳转型,共同筑牢区域生态安全屏障<sup>[12]</sup>。为此,如何评价长江中游城市群生态安全时空演变特征并诊断其影响因素,并将丰富生态价值转化为发展优势,已成为构建其生态安全格局的必然选择。

## 1.2 研究框架

在“十四五”时期,从国家层面推进长江经济带全域生态环境保护和全面绿色转型,为长江中游城市群发展带来战略机遇。而“驱动力-压力-状态-影响-响应-管理”(driving force-pressure-state-impact-response-management, DPSIRM)模型,强调社会、经济和生态环境各系统间“因果”联系,适用于水资源安全、湖泊生态系统健康和人居环境安全等,契合生态安全治理特征<sup>[13-14]</sup>。由于传统上 DPSIR 模型中将社会预防、适应或改善措施均纳入为响应模块,无法充分凸显政府在改善保护生态环境的重要性。而在 DPSIRM 模型中将

政府采取的干预和恢复措施,单独作为管理模块链条因果关系,能够更加突出自然环境、资源与人类活动的耦合协同作用,保障管理区域生态系统健康和系统完整性<sup>[15]</sup>。为此,本研究将生态系统驱动因素( $D$ )分为人口、经济和社会发展三部分。其中,在驱动力作用下,对生态系统产生生态资源压力和生态环境压力( $P$ ),而在压力作用下导致植被覆盖、水质污染和土地利用等生态状态改变( $S$ ),进而对生态系统内人类安全、经济发展和社会进步方面造成影响( $I$ )。此外,为应对生态安全状态变化以及生态系统的改变影响,需要在经济对策和技术治理方面做出响应( $R$ ),在此基础上,基于组织制度建设和生态修复政策对其进行综合治理( $M$ )。鉴于此,基于 DPSIRM 模型形成了长江中游城市群生态安全循环模式。

## 2 指标选取与研究方法

### 2.1 指标选取与数据来源

2.1.1 评价指标选取 在参考生态安全评价已有研究基础上<sup>[16-17]</sup>,结合长江中游城市群生态环境以及社会经济发展现状特征,基于 DPSIRM 模型的生态安全评价指标体系,综合考虑科学性和数据可获性,共选取评价因子(表 1)。

表 1 长江中游城市群生态安全评价因子及其权重

Table 1 Ecological safety assessment factors and their weights for urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

目标层	因素层	指标层	单位	效应	熵权法	AHP 法	综合权重
生态安全评价	驱动力	人口密度	人/km <sup>2</sup>	-	0.0321	0.0517	0.0419
		城镇化率	%	+	0.0281	0.0430	0.0355
		第二产业增加值占 GDP 比重	%	-	0.0303	0.0352	0.0328
	压力	人均水资源量	m <sup>2</sup> /人	+	0.1558	0.0549	0.1053
		工业二氧化碳排放量	t	-	0.0044	0.0620	0.0332
		单位耕地面积化肥使用量	kg/hm <sup>2</sup>	-	0.0070	0.0541	0.0306
		单位 GDP 能耗	万 t 标准煤	-	0.0110	0.0553	0.0331
	状态	森林覆盖率	%	+	0.0538	0.0762	0.0650
		城市污水排放量	万 t	-	0.0052	0.0587	0.0320
	影响	城市建设用地面积比重	%	-	0.0199	0.0385	0.0292
		人均 GDP	元	+	0.0914	0.0390	0.0652
		第三产业增加值占 GDP 指数	%	+	0.0080	0.0427	0.0253
	响应	绿地与广场用地面积	%	+	0.1089	0.0487	0.0788
		固定资产投资额比重	%	+	0.1690	0.0445	0.1067
		污水处理率	万 t/d	+	0.0118	0.0595	0.0356
		生活垃圾无害处理率	万 t/d	+	0.0135	0.0586	0.0361
		地方财政一般预算内教育支出	万元	+	0.1437	0.0494	0.0966
	管理	水土流失治理面积	10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup>	+	0.0986	0.0774	0.0880
建成区绿化覆盖率		%	+	0.0074	0.0508	0.0291	

(1) 驱动力因子。体现为人口社会经济因素共同作用区域生态安全水平。其中人口密度表征人口

驱动;城镇化率表征社会驱动;第二产业增加值占 GDP 比重表征经济驱动,反映经济结构以农业经济

为主转向以工业经济为支撑的程度<sup>[18]</sup>。

(2) 压力因子。体现为人类行为活动作用于生态环境压力,体现为生态资源压力和生态环境压力。其中,人均水资源量、单位 GDP 能耗表征对生态资源产生供给与需求矛盾压力;工业二氧化碳排放量和单位耕地面积化肥使用量,表征人类活动对生态环境污染压力。

(3) 状态因子。体现为植被覆盖、土质污染和土地利用层面的区域资源环境状态。其中,森林覆盖率表征生态系统植被覆盖状态;城市污水排放量表征生产对生活对水质造成污染状态;城市建设用地面积比重表征人类社会土地利用状态。

(4) 影响因子。体现区域生态安全水平产生的影响分为对经济发展、产业结构和社会进步影响。其中人均 GDP 表征在生活水平方面的经济发展影响;第三产业增加值占 GDP 指数表征在产业结构方面影响;绿地与广场用地面积表征在用地安排的社会空间进步影响。

(5) 响应因子。体现为区域生态安全受到威胁的应对措施,包含经济对策和技术治理两部分。其中固定资产投资促进资源利用和产出效率的可持续提升,表征经济对策方面响应措施;污水处理率和生活垃圾无害处理率,表征技术治理方面的响应措施。

(6) 管理因子。表征政府为了减少人类活动对区域生态造成的破坏,而主动采取的干预和恢复措施,包含制度建设和生态修复两方面。其中。地方财政一般预算内教育支出间接促进资源利用效率的提升,表征生态环境保护的制度建设和;水土流失治理面积和建成区绿化覆盖度,体现政府推动区域生态系统治理,表征减小人类行为影响的生态修复过程。

2.1.2 数据来源 本研究使用的社会经济数据和水资源数据主要来源于湖北省、湖南省和江西省三省的《统计年鉴(2007—2021年)》《中国城市统计年鉴(2007—2021年)》<sup>[19]</sup>、三省各地市《国民经济和社会发展统计公报(2007—2021年)》《水资源公报(2007—2021年)》等。此外,部分缺失数据采用综合评估,根据相邻年份的数据计算获取。同时基于数据的统一性和可获性,对于长江中游城市群内的抚州市、吉安市的部分县(区),采用抚州市和吉安市全域数据作为统计口径。

## 2.2 研究方法

2.2.1 生态安全评价指标权重确定 区域生态系统是一个复杂体系,故本研究采用组合赋权法,结合主客观方法共同确定指标权重,可更科学地评价其生态安全水平<sup>[20]</sup>。其中,运用层次分析法进行生态安全

主观解析,并判断各指标相对权重。而生态安全客观赋权方法则采用熵权法,修正主观认知的不准确性,依据各指标信息熵的多少更客观地反映各个指标在评价中的重要性,以此确定权重大小<sup>[21]</sup>。基于主客观赋权方法同等重要,通过平均加权计算得出最终综合权重(表 1)。

(1) 数据极差标准化处理。本文对研究区的  $n$  个市  $m$  个评价指标构成的原始矩阵  $X$  运用极差标准化法进行处理,公式如下:

正向指标:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (1)$$

负向指标:

$$r_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \quad (2)$$

由此得到标准化数据  $r_{ij}$ ,并构成标准化矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 定义熵以及熵权。本文将第  $i$  个评价指标定义熵  $P_i$  定义为:

$$P_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}, k = \frac{1}{\ln n} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (4)$$

其中,当  $f_{ij}=0$ ,则  $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ ,

即可确定第  $i$  个指标的定义熵权  $W_i$  为:

$$W_i = \frac{1 - P_i}{m - \sum_{i=1}^n P_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1) \quad (5)$$

(3) 组合赋值法确定生态安全评价指标权重。根据标准化值和指标层的组合权重进行加权求和,计算得出长江中游城市群生态安全评价价值,其计算公式为:

$$E = \sum_{j=1}^n r_{ij} \times N_j \quad (6)$$

式中: $E$  为综合评价价值; $r_{ij}$  为第  $i$  个指标的标准值; $N_j$  为第  $j$  个指标的组合权重; $n$  为指标个数,本文取  $n=19$ 。

2.2.2 生态安全划分标准 参考借鉴生态安全划分标准<sup>[22-23]</sup>,并结合长江中游城市群生态安全实际状况,采用等距法将研究区生态安全评价价值划分为 5 个等级,即为不安全(I)、较不安全(II)、临界安全(III)、基本安全(IV)和安全(V),其中,生态安全评价价值越接近于 1,表示该区域生态系统服务功能越好,即生态安全水平越高;反之越接近于 0,则表示越差(表 2)。

2.2.3 空间自相关 探索性空间数据分析是揭示不同区域数据的结构性和规律性的数据分析方法。其中,全局自相关分析能反映区域内研究对象的总联系程度和空间关联格局,通过 Moran's  $I$  指数反映该变

量样本在区域空间内的时空演变规律,计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (7)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ;  $x_i$  和  $x_j$  分别为  $i$  区域和  $j$  区域的生态安全评价价值; $M_{ij}$  为邻接空间权重矩阵。

表 2 长江中游城市群生态安全评价等级

Table 2 Ecological security assessment levels of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze river

等级	评价得分范围	生态安全特征描述
不安全(I)	[0,0.20]	生态系统服务功能受到极大破坏,存在严重生态环境问题
较不安全(II)	(0.20,0.40]	生态系统服务功能显著退化,生态问题突出
临界安全(III)	(0.40,0.60]	生态系统服务功能受到一定破坏,存在明显干扰胁迫
基本安全(IV)	(0.60,0.80]	生态系统服务功能基本完整,经济发展和生态保护共同推进,但仍存在一定限制因素
安全(V)	(0.80,1]	生态系统服务功能完善,经济发展与生态保护协同促进,生态污染和生态灾害少

局部空间自相关分析能表现某研究单元与邻近空间地域单元空间特征的相关程度,反映其局部区域空间集聚特征。公式如下:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (8)$$

式中: $Z$  为研究区域空间单元属性值的标准处理形式。指数值为正表示研究单元  $i$  与其相邻空间单元属性值之间空间差异性小;反之,则表示存在较大差异。

2.2.4 障碍因素诊断模型 通过障碍度模型对各因素进行诊断分析,主要依据因子贡献度( $M_i$ ),指标偏离度( $S_i$ )和障碍度( $N_i$ )3 个指标确定障碍度大小并进行排序。在此基础上,比较各因子的主次关系,以及对长江中游城市群生态安全状况提升的阻碍程度,寻找制约研究区生态安全的主要障碍因素,并提出生态应对策略<sup>[24-25]</sup>。

$$N_i = \frac{S_i \times M_i}{\sum_{i=1}^{19} S_i \times M_i} \quad (9)$$

式中: $N_i$  为指标障碍度; $M_i$  为指标贡献度,值为第  $i$  项指标综合权重; $S_i$  为指标偏离度; $X_i$  为第  $i$  项指标归一化值,其中  $S_i = 1 - X_i$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态安全时空演变

3.1.1 生态安全时序变化特征 由表 3 可知,长江中游城市群生态安全得分从 2006 年的 0.353 5 增长到了 2020 年的 0.519 8,年均增长 0.011 9,均值呈稳步上升态势。其中,2011—2017 年,生态安全评价价值增加最快,年平均增加值达到 0.014 2。然而,江西省 10 市在 2011 年,湖南省 8 市在 2013 年、2018 年出现小幅降低并未出现持续下降状态。相应的是,2006—2020 年长江中游城市群 31 个城市生态安全等级均实现了从较不安全(II)等级到临界安全(III)等级的提升。从 2006 年仅有抚州、吉安、宜春和宜春,共 4

个城市达到临界安全(III)等级,提升到在 2020 年有九江、吉安、上饶、武汉、宜昌和长沙,共 6 个市达到了生态安全评价价值 0.6 以上,即达到基本安全(IV)等级。其中长沙市在 2016 年最先达到基本安全(IV)等级,且成为研究期内长江中游城市群生态安全评价价值最高的城市。

表 3 长江中游城市群生态安全评价价值(2006—2020 年)

Table 3 Ecological safety assessment value of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River (2006—2020)

年份	江西省 10 市	湖北省 13 市	湖南省 8 市	综合 均值
2006	0.3699	0.3354	0.3625	0.3535
2007	0.3815	0.3431	0.3635	0.3608
2008	0.3967	0.3557	0.3700	0.3726
2009	0.4124	0.3612	0.3951	0.3865
2010	0.4354	0.3695	0.4016	0.3990
2011	0.4218	0.3708	0.4327	0.4032
2012	0.4480	0.3882	0.4704	0.4287
2013	0.4496	0.3968	0.4624	0.4307
2014	0.4599	0.4068	0.4827	0.4435
2015	0.4753	0.4183	0.5018	0.4582
2016	0.4844	0.4354	0.5200	0.4730
2017	0.5052	0.4471	0.5357	0.4887
2018	0.5070	0.4523	0.5317	0.4904
2019	0.5307	0.4621	0.5481	0.5064
2020	0.5426	0.4839	0.5497	0.5198
年均增值	0.0123	0.0106	0.0134	0.0119

3.1.2 生态安全空间变化特征 为了更加直观展示长江中游城市群生态安全水平时空动态演化过程,选取 2006 年、2013 年和 2020 年为典型年份,分析长江中游城市群生态安全水平空间分布格局(图 1)。

由图 1 可知,研究区内部各地市在生态安全空间上存在差异,其中,江西省 10 市的总体生态安全评价

等级高于湖北 13 市和湖南 8 市。总体而言,长江中游城市群生态安全水平较低,其中多处于临界安全等

级(Ⅲ),距离整体达到基本安全等级(Ⅳ)状态仍有较大差距,还需较长时间提升至安全状态等级(Ⅴ)。

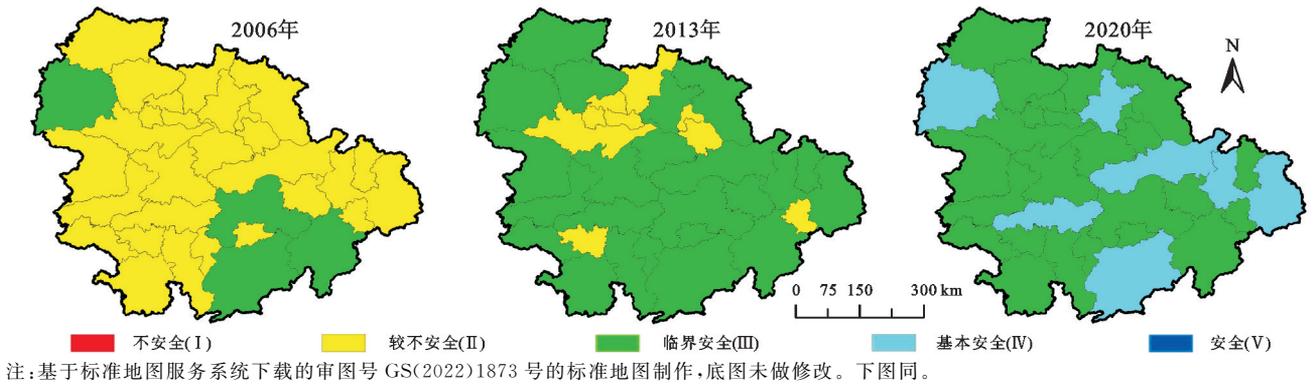


图 1 长江中游城市群生态安全水平典型年份空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution pattern of ecological security level of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

(1) 在 2006 年,长江中游城市群生态安全等级普遍为较不安全等级(Ⅱ),仅有江西省宜春市、抚州市、吉安市和湖北省的宜昌市为临界安全等级(Ⅲ)。究其原因,2006 年正处于城镇化和工业化高速发展时期,忽视了经济社会发展过程中带来的生态污染和破坏,暴露出来一系列生态安全相关的问题。表明生态安全水平普遍不高,有较大提升空间。

(2) 在 2013 年,长江中游城市群生态安全等级大多转为临界安全等级(Ⅲ),仍有江西省的鹰潭市、湖北省的荆州市、天门市、潜江市、仙桃市、孝感市、鄂州市、黄石市和湖南省的湘潭市为较不安全等级(Ⅱ)。究其原因,面对资源约束趋紧和生态系统退化日益严峻形势,江西省、湖北省和湖南省积极响应“大力推进生态文明建设”的战略决策,形成了长株潭城市群循环经济试验区、武汉都市圈和鄱阳湖生态经济区等绿色发展绿色循环低碳战略,有效提升了区域生态安全水平。

(3) 在 2020 年,长江中游城市群生态安全等级为临界安全等级(Ⅲ),已无地市为较不安全等级(Ⅱ),其中有江西省的九江市、上饶市、吉安市和湖北省的武汉市、宜昌市和湖南省的长沙市已经上升为基

本安全等级(Ⅳ)。究其原因,武汉市和长沙市作为省会城市,固定资产投资额和地方政府一般公共预算内教育支出相对其他城市较高,且单位 GDP 能耗受产业结构转移升级影响逐年降低,使之生态安全水平得到进一步提升。

### 3.2 生态安全空间相关性

为进一步揭示长江中游城市群生态安全水平空间关联性,借助 Geoda 软件,运用探索性空间数据分析方法,对研究区生态安全水平进行全局自相关分析和局部自相关分析。

3.2.1 全局自相关分析 基于 Geoda 软件进行全局自相关分析,测度全局空间相关系数 Global Moran's  $I$ (表 4)。结果表明,Global Moran's  $I$  指数值介于 0.035~0.214 波动变化,且大多通过 1% 的显著性检验,表明长江中游城市群生态安全水平存在空间自相关性,但呈“随机—聚集”两种状态变化。2020 年 Moran's  $I$  值呈降低趋势,是 15 a 内的最低值,空间相关性与之前相比有所减弱。究其原因,2020 年是污染防治关键年份,区域内多个城市生态安全水平进一步提升,缩小了与生态安全高值区的差距,尚未形成显著正相关,表明生态安全高值区的辐射带动作用仍需加强。

表 4 长江中游城市群生态安全水平 Global Moran's  $I$  指数

Table 4 Global Moran's  $I$  index of ecological security level of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Moran's $I$	0.134	0.098	0.117	0.166	0.214	0.163	0.194	0.104	0.129	0.138	0.134	0.117	0.065	0.130	0.035
$p$ -value	0.063	0.113	0.088	0.033	0.016	0.034	0.027	0.107	0.073	0.060	0.061	0.085	0.171	0.068	0.244

3.2.2 局部自相关分析 由于 Moran's  $I$  指数无法揭示长江中游城市群生态安全水平的局部空间自相关特征,引入 Local Moran 值来研究长江中游城市群生态安全水平的局部空间自相关分布格局。为此,选择 2006 年、2013 年和 2020 年典型年份进行局部空

间自相关分析,得到长江中游城市群生态安全水平的 LISA 集聚图(图 2)。

(1) 整体特征。长江中游城市群生态水平具有空间集聚效应,其中,高一高集聚区(HH)大多位于江西省域中部,这些区域城市降水充沛,拥有丰富的水资源和

森林覆盖率高,自然保护区众多且经济发展水平相对较低,能够产生正向空间溢出效应。低—低聚集区(LL)则位于湖北省的中部地区,该类型地区自然环境条件较差,主要体现在年均降水较少且森林覆盖率较低,但人口密度大,尤其是环境友好型发展驱动力相对匮乏。而武汉和周边城市多为高一低集聚区(HL),萍乡市和新余市常为低—高聚集区(LH),表明空间上存在两极分

化现象。究其原因,武汉市作为湖北省会城市,经济基础较雄厚和科技实力相对领先,以此积极推进生态文明建设,以及支持集约节能减排工作的进行;而萍乡和新余市存在矿山开采破坏的历史生态问题,且受社会经济条件制约,生态整治和修复工作滞后。而湖南省域生态安全水平集聚效应一直呈不显著特征,表明其他地区的空间带动效应作用不明显。

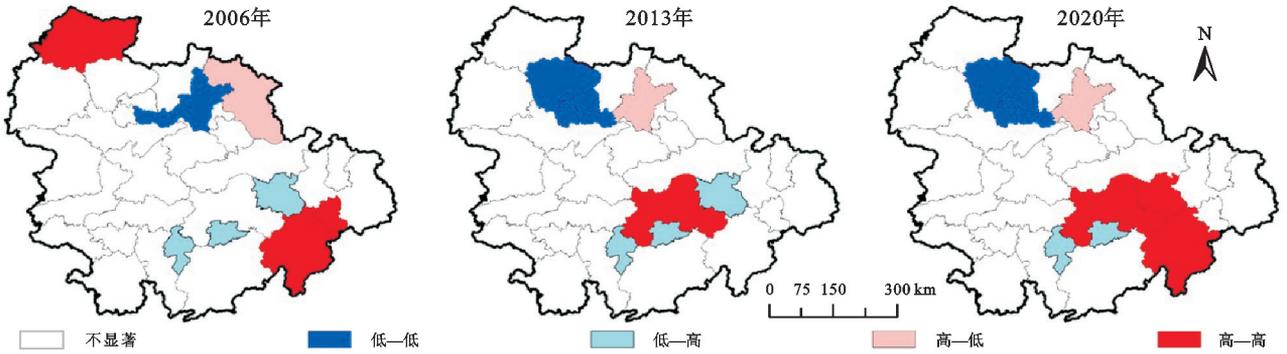


图 2 长江中游城市群生态安全水平 LISA

Fig. 2 LISA chart of ecological security level of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

(2) 局部特征。在 2006 年,江西省的抚州市、鹰潭市和湖北省的襄阳市为高一高聚集区(HH)。其中抚州和鹰潭市靠近武夷山脉,森林覆盖率较高;襄阳市则位于长江最大支流汉江中游,水资源充沛和河流、库塘众多;该类型区域生态系统基础普遍较好,有较强环境净化能力。除了自然因素先天优势,该区域地市政府不断加大生态文明建设力度,建立了流域水生态补偿机制和重点生态功能区财政转移支付制度,同时将降污减排和节能降耗完成情况纳入到地方发展综合评价体系,这些因素共同促进了区域生态安全水平达到区域较高水平且具有良好扩散效应,持续带动周边区域提升生态安全状态。而相应的是,湖北省的武汉市和仙桃市为低—低聚集区(LL)。

在 2013 年,高一高聚集区(HH)城市减少为江西省的宜春市。低—低聚集区(LL)增加为湖北省的 4 个城市,包括荆门市、潜江市、仙桃市和天门市。究其原因,该类型受到传统的资源开发模式影响,如荆门市粗放开发挖掘石料资源,使生态受到了较大影响。此外,随着武汉市污染产业转移承接,但未获得合理的生态环境补偿。而武汉市则逐渐实现产业的绿色转型升级,由低—低聚集区(LL)转变为高一低聚集区(HL)。可见,从粗放低效发展模式转变为集约绿色是区域生态安全水平提升重要方向。

在 2020 年,江西省抚州市由不显著再次成为高一高聚集区(HH)。南昌市由低—高聚集区(LH)转为高一高聚集区(HH)。究其原因,作为江西省省会城市,南昌市工业水平相对较高,尤其体现在工业二氧化碳排

放量和城市污水排放量指标上,与周边城市生态安全水平存在明显空间差异,通过采用循环利用技术以及和提升环境污染治理力度,如降低单位 GDP 能耗、提高建成区绿化覆盖度等举措,极大提升了区域生态安全水平,低—高集聚现象消失,转而成为高一高聚集区(HH)。低—低聚集区(LL)仍为湖北省四市。

### 3.3 生态安全保障度诊断

3.3.1 因素层障碍度诊断 由表 5 可知,2006—2020 年长江中游城市群的驱动力、压力、状态、影响、响应和管理障碍度均值分为 8.46%,18.17%,6.37%,22.09%,17.80%,27.11%。由此可知,研究区生态安全因素层指标障碍度的综合排序为:管理因素>影响因素>压力因素>响应因素>驱动力因素>状态因素。研究期间,6 个子系统对长江中游城市群生态安全水平障碍度存在差异变化。其中驱动力子系统、状态子系统障碍度持续上升;响应子系统障碍度则呈连续下降趋势,从 2006 年 21.14%下降至 2020 年的 15.66%;而压力子系统、影响子系统和管子系统障碍度有小幅上下波动,但总体变化相对平稳。

3.3.2 指标层障碍度诊断 为进一步分析指标层的影响程度,选择 2006 年、2013 年、2020 年作为典型年份,对指标层各因素障碍度进行大小排序(表 6)。由结果可知,固定资产投资额比重、人均水资源量、地方财政一般公共预算内教育支出、绿地与广场用地面积、水土流失治理面积、人均 GDP 以及城镇建设用地面积比重是影响长江中游城市群生态安全的主要障碍因素。其中,一是固定资产投资额比重、人均水资源障

碍度一直位列前列;其次,地方财政一般预算内教育支出和水土流失治理面积障碍度居高不下;三是绿地与广场用地面积和人均GDP障碍度排名较靠前。研究发现固定资产投资额比重、人均水资源量和地方财政一般预算内教育支出将稳定成为影响长江中游城市群生态安全的首要因素。对比分析发现,固定资产投资额比重表明投资力度不足对生态安全水平起抑制作用,未来应加大投入环境治理和保护力度;其次,人均水资源表示水资源的丰寡对其生态环境具有显著影响;人均GDP障碍度连续下降,表明生活水平方面经济发展影响有所改善,绿地与广场用地面积障碍度排序靠前,表示在国土空间规划布局方面的社会空间进步影响仍有较大改善空间。

### 3.4 长江中游城市群生态安全水平提升路径

结合研究区生态安全障碍度诊断结果及其发展趋势,要提升长江中游城市群生态安全水平,优化其空间格局,未来还应从经济对策响应、生态资源有效利用以及生态制度建设管理方面加以完善。

3.4.1 强化固定资产投资引领响应,推动产业结构优化升级 固定资产投资额比重是抑制长江中游城市群生态安全水平提升的首要障碍因素,一方面支持景德镇市、鄂州市、益阳市等固定资产投资较低城市发展,可以维持因折旧和技术落后而淘汰的生产力,另一方面重视长沙制造业、武汉空间数据产业和南昌

VR数字产业等城市自身的特色产业和优势产业,尤其是实现绿色产业的融入,以固定资产投资促循环、低碳和绿色经济发展,直接提高未来社会财富的创造潜力,进而提升区域生态安全产出水平。

表5 长江中游城市群生态安全因素层障碍度演变 (2006—2020年)

Table 5 Evolution of ecological security factor layer barriers in urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River (2006—2020)

年份	驱动力	压力	状态	影响	响应	管理
2006年	5.66	18.36	5.77	22.12	21.14	26.95
2007年	5.90	18.70	5.74	22.13	20.29	27.24
2008年	6.56	18.63	5.77	22.27	19.90	26.86
2009年	6.96	18.74	5.79	22.53	19.03	26.95
2010年	7.67	18.07	5.92	22.72	18.49	27.13
2011年	8.29	18.21	5.94	22.38	18.41	26.77
2012年	8.98	16.89	6.25	22.69	18.20	26.99
2013年	9.15	18.27	6.27	22.09	17.32	26.90
2014年	9.30	17.82	6.50	22.25	17.04	27.09
2015年	9.45	17.65	6.52	22.33	16.92	27.13
2016年	9.57	17.25	6.76	22.41	16.73	27.28
2017年	9.86	17.71	6.91	21.55	16.46	27.51
2018年	9.72	19.38	6.98	20.95	15.78	27.19
2019年	9.87	18.56	7.23	21.27	15.64	27.43
2020年	9.99	18.29	7.20	21.69	15.66	27.16
均值	8.46	18.17	6.37	22.09	17.80	27.11

表6 长江中游城市群生态安全评价指标障碍度及其排序

Table 6 Obstacles and ranking of ecological security assessment indicators for urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River

序号	2006年		2013年		2020年	
	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度
1	固定资产投资额比重	16.21	固定资产投资额比重	16.08	人均水资源量	16.76
2	人均水资源量	14.88	人均水资源量	15.41	固定资产投资额比重	15.43
3	地方财政一般预算内教育支出	14.60	地方财政一般预算内教育支出	14.50	地方财政一般预算内教育支出	14.53
4	绿地与广场用地面积	10.64	绿地与广场用地面积	11.22	绿地与广场用地面积	12.49
5	水土流失治理面积	10.24	水土流失治理面积	10.52	水土流失治理面积	10.69
6	人均GDP	9.52	人均GDP	8.47	人均GDP	7.51
7	其他	23.92	其他	23.79	其他	22.59

3.4.2 重视水资源综合利用,提升全要素资源环境绩效 长江中游城市群汇集多个水系,将生态价值与生态安全紧密结合是促进区域城市群生态安全水平的有效路径。一是基于洞庭湖、鄱阳湖以及东湖等水资源本底,节约集约利用资源是保护生态环境、提高资源环境承载能力;二是降低区域城镇化与工业降低污染物排放,结合亚热带季风气候下降水年际变化特征,在武汉市、长沙市和南昌市着力打造长江中游城市群湿地、山林等生态资源共同体,以带动全域实现山水林田湖草沙高效利用。

3.4.3 提高生态安全预算支出,推进生态系统公众参与治理 长江中游城市群的萍乡市、衡阳市、娄底市等地区生态安全管理水平受到地方财政一般预算内教育支出和水土流失治理面积等因素综合影响。一是积极发挥长江中游地方政府生态安全监管职能,在水土流失问题严重地区加大长江中游生态治理项目投入,并且强化污染整治力度;二是加大以生态文明为核心的生态安全教育宣传支出,提升公众生态文明意识,形成绿色生产生活方式,实现生态文明治理的公众参与。

## 4 结论

(1) 2006—2020年,长江中游城市群生态安全水平从2006年0.3535增长到2020年0.5198,年均增0.0119,生态安全评价水平呈稳步上升态势,其生态安全等级实现了从较不安全(Ⅱ)等级到临界安全(Ⅲ)等级的提升。但区域内地市生态安全等级差距明显,多处于临界安全等级(Ⅱ),距离全面达到基本安全等级(Ⅲ)状态仍有较大差距。

(2) 从空间演变规律来看,长江中游城市群生态安全水平存正空间自相关性,Global Moran's *I* 指数值介于0.035~0.214,且大多通过1%的显著性检验。高一高聚集区(HH)大多位于江西省域的中部,而低—低聚集区(LL)都位于湖北省的中部地区。

(3) 长江中游城市群生态安全的障碍因素综合排序为管理因素>影响因素>压力因素>响应因素>驱动力因素>状态因素。其中,生态安全水平受到固定资产投资额比重、人均水资源量、地方财政一般预算内教育支出、绿地与广场用地面积、水土流失治理面积、人均GDP和城镇建设用地面积综合影响。

(4) 长江中游城市群生态安全应从固定资产投资引领响应、生态资源合理有效利用以及推进生态系统公众参与治理方面加以完善,以构建区域生态安全屏障。

### 参考文献(References):

- [1] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等.生态安全研究进展[J].生态学报,2005,25(4):861-868.  
Cui S H, Hong H S, Huang Y F, et al. Progress of the ecological security research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(4):861-868.
- [2] 王耕,王利,吴伟.区域生态安全概念及评价体系的再认识[J].生态学报,2007,27(4):1627-1637.  
Wang G, Wang L, Wu W. Recognition on regional ecological security definition and assessment system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(4):1627-1637.
- [3] 王振波,梁龙武,方创琳,等.京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素[J].生态学报,2018,38(12):4132-4144.  
Wang Z B, Liang L W, Fang C L, et al. Study of the evolution and factors influencing ecological security of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4132-4144.
- [4] 黄志红.长江中游城市群生态文明建设评价研究[D].武汉:中国地质大学,2016.  
Huang Z H. Study on the Evaluation to the Construction of Ecological Civilization of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River [D]. Wuhan: China University of Geosciences,2016.
- [5] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment [J]. Journal of Environmental Management, 2004,70(1):85-93.
- [6] 庞雅颂,王琳.区域生态安全评价方法综述[J].中国人口·资源与环境,2014,24(S1):340-344.  
Pang Y S, Wang L. A review of regional ecological security evaluation[J]. China Population, Resources and Environment, 2014,24(S1):340-344.
- [7] 肖荣波,欧阳志云,韩艺师,等.海南岛生态安全评价[J].自然资源学报,2004,19(6):769-775.  
Xiao R B, Ouyang Z Y, Han Y S, et al. Ecological security assessment of Hainan Island [J]. Journal of Natural Resources, 2004,19(6):769-775.
- [8] Alcamo J, Endejan M B, Kaspar F, et al. The GLASS model: a strategy for quantifying global environmental security[J]. Environmental Science & Policy, 2001,4(1):1-12.
- [9] Rey S J, Janikas M V. STARS: Space-time analysis of regional systems [J] Geographical Analysis, 2010,38(1):67-86.
- [10] 谢花林,李波.城市生态安全评价指标体系与评价方法研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(5):705-710.  
Xie H L, Li B. A study on indices system and assessment criterion of ecological security for city[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2004,40(5):705-710.
- [11] 崔馨月,方雷,王祥荣,等.基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(1):302-319.  
Cui X Y, Fang L, Wang X R, et al. Urban eco-security assessment in the urban agglomerations based on DPSIR model: A case study of Yangtze River Delta, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(1):302-319.
- [12] 黄烈佳,杨鹏.长江经济带土地生态安全时空演化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1780-1790.  
Huang L J, Yang P. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of land ecological security in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(8):1780-1790.
- [13] 向丽,周伟,任君,等.基于 DPSIRM 模型的高原城市湿

- 地生态安全评价:以湟水流域西宁段为例[J].生态学报,2022,41(10):2064-2071.
- Xiang L, Zhou W, Ren J, et al. Ecological security evaluation of plateau urban wetland based on DPSIRM model: With Xining section of Huangshui Basin as an example[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(10): 2064-2071.
- [14] 郭倩,汪嘉杨,张碧.基于 DPSIRM 框架的区域水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,2017,32(3):484-493.
- Guo Q, Wang J Y, Zhang B. Comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity based on DPSIRM[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 484-493.
- [15] 董媛媛.基于“生态要素-DPSIRM”生态安全评价体系的构建[J].水土保持研究,2020,27(5):333-339.
- Dong Y Y. Construction of ecological safety evaluation system based on ‘ecological elements-DPSIRM’ [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 333-339.
- [16] 张峰,杨俊,席建超,等.基于 DPSIRM 健康距离法的南四湖湖泊生态系统健康评价[J].资源科学,2014,36(4):831-839.
- Zhang F, Yang J, Xi J C, et al. Ecosystem health assessment of Nansihu Lake based on DPSIRM and health distance model[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 831-839.
- [17] 马勇,黄智洵.长江中游城市群生态文明水平测度及时空演变[J].生态学报,2016,36(23):7778-7791.
- Ma Y, Huang Z X. Research on the state and spatiotemporal evolution of ecological civilization in the urban agglomeration on the middle reaches of the Yangtze River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7778-7791.
- [18] 鲁钰,赵银娣,董霁红.西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J].生态学报,2022,42(4):1354-1367.
- Lu Y, Zhao Y D, Dong J H. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in Northwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1354-1367.
- [19] 国家统计局.中国城市统计年鉴(2007—2021)[Z].北京:中国统计出版社.
- National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Chinese Cities(2007—2021)[Z]. Beijing: China Statistics Press.
- [20] 司锦锦,王世东.基于组合赋权法的焦作矿区生态安全评价与时空分异[J].水土保持研究,2021,28(3):348-354.
- Si J J, Wang S D. Ecological security evaluation and spatiotemporal differentiation of Jiaozuo Mining Area based on combined weighting method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 348-354.
- [21] 吕添贵,孔安妮,汪立.基于 PSR 模型的生态文明示范区生态安全评价及其障碍诊断[J].水土保持研究,2021,28(2):343-350.
- Lü T G, Kong A N, Wang L. Evaluation of regional ecological security and obstacle diagnosis of ecological civilization demonstration area based on PSR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 343-350.
- [22] 张艳芳,任志远.区域生态安全定量评价与阈值确定的方法探讨[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):11-16.
- Zhang Y F, Ren Z Y. Discussion of the ways to quantitative evaluation and threshold value of regional ecological security[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 11-16.
- [23] 吕添贵,孔安妮,汪立.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的区域生态安全时空演化及影响因素研究[J].资源与产业,2022,24(2):30-41.
- Lü T G, Kong A N, Wang L. Temporal-spatial evolution and factors of regional ecological security based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Resources & Industries, 2022, 24(2): 30-41.
- [24] 陈维肖,毕雪薇,梁流涛.国家中心城市土地集约利用评价及障碍因素诊断[J].地域研究与开发,2019,38(3):113-118.
- Chen W X, Bi X W, Liang L T. Evaluation of land intensive use and diagnosis of obstacle factors in national central cities [J]. Areal Research and Development, 2019, 38(3): 113-118.
- [25] 孙茜,张捍卫,张小虎.河南省资源环境承载力测度及障碍因素诊断[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):33-38.
- Sun Q, Zhang H W, Zhang X H. Resources and environment carrying capacity estimation and the obstacle factors diagnosis for Henan Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 33-38.