

基于PSR-GM(1, 1)模型的土地生态安全时空演化分析及预测

——以环长株潭“3 + 5”城市群为例

刘朝君, 李丹

湖南科技大学建筑与设计学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年5月20日; 录用日期: 2025年6月25日; 发布日期: 2025年7月31日

摘要

土地生态安全评价是保障土地资源可持续利用的重要基础, 对于识别潜在风险、评估当前生态安全状况及指导区域国土空间规划有着不可或缺的意义。环长株潭城市群作为长江中游城市群重要组成部分与湖南省经济活动的核心区域, 深入剖析其土地生态安全时空演变特征及预测其未来趋势, 对推动城市群生态文明建设进程具有显著的促进作用。本研究基于2012~2022年统计数据, 以环长株潭城市群8个地级市为研究对象, 通过PSR模型建立土地生态安全评价指标, 运用熵权TOPSIS对其土地生态安全进行综合评价, 并运用灰色预测模型GM(1, 1)探究其未来趋势。研究结果表明: (1) 在时间序列演化上, 2012~2022年间, 环长株潭城市群的土地生态安全水平实现了显著提升, 其中2020年达到了11年来的最佳状态; (2) 在空间序列上, 环长株潭城市群在生态安全空间上存在差异, 主要表现为“北部高、南部低”的空间分布特征, 土地生态安全整体格局呈现出由低水平向高水平演变的轨迹。(3) 在预测结果上, 2023~2026年环长株潭城市群土地生态安全值将呈上升趋势, 土地生态安全状态等级由“良好级”上升为“安全级”。

关键词

土地生态安全评价, 环长株潭城市群, 生态文明建设

Spatiotemporal Evolution Analysis and Prediction of Land Ecological Security Based on PSR-GM(1, 1) Model

—Taking the “3 + 5” Urban Agglomeration Around Changzhutan as an Example

Zhaojun Liu, Dan Li

Abstract

Land ecological security assessment is an important basis for ensuring the sustainable use of land resources, and is of indispensable significance for identifying potential risks, assessing the current ecological security status, and guiding regional territorial spatial planning. As an important part of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River and the core area of economic activities in Hunan Province, the urban agglomeration around Changzhou-Zhuzhou-Zhutan has a significant role in promoting the construction of ecological civilization in the urban agglomeration by deeply analyzing the spatiotemporal evolution characteristics of land ecological security and predicting its future trend. Based on the statistical data from 2012 to 2022, this study took 8 prefecture-level cities in the urban agglomeration around Changzhou-Zhuzhou-Zhuhai-Tan as the research object, established the evaluation index of land ecological security through the PSR model, comprehensively evaluated the land ecological security by using the entropy weight TOPSIS, and explored its future trend by using the gray prediction model GM(1, 1). The results show that: (1) In terms of time series evolution, the level of land ecological security in the Changzhou-Zhuzhou-Zhuzhou-Tan urban agglomeration has been significantly improved from 2012 to 2022, and the 2020 year has reached the best state in 11 years; (2) In terms of spatial sequence, there are differences in the spatial security of the urban agglomeration around Changzhou-Zhuzhou-Zhuhai-Tan, which is mainly characterized by the spatial distribution characteristics of “high in the north and low in the south”, and the overall pattern of land ecological security shows a trajectory of evolution from low level to high level. (3) In terms of the prediction results, the land ecological security value of the urban agglomeration around Changzhou-Zhuzhou-Zhutan will show an upward trend from 2023 to 2026, and the land ecological security status level will be increased from “good level” to “safe level”.

Keywords

Land Ecological Security Assessment, Urban Agglomeration Around Changzhou-Zhuzhou-Tan Area, and Ecological Civilization Construction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地是人类生存与发展的重要基础和最主要的自然资源之一[1]。土地生态安全是指一定时空范围内,土地生态系统能够保持自身结构、功能稳定或不受干扰的状态。其安全问题是区域可持续发展的核心问题之一,是中国生态文明建设的重要内容[2][3]。然而近年来,伴随着我国经济的高速发展、人口的快速增长以及城市的急剧扩张,人与土地之间的矛盾愈发显著,生态空间遭受持续挤压,水土流失、土壤沙化、草场退化及森林减少等土地生态问题日益突出,保障土地的生态安全成为人类社会亟待解决的难题[4]。进行土地生态安全评价对于精准识别当前土地生态系统的健康状况、揭露人类土地利用活动中对土地生态系统健康平衡构成威胁的行为,及科学制定并实施旨在保障土地生态安全的策略和措施,具有至关重要的意义与作用[5][6]。

国外学者对于生态安全的关注较早,其早期萌芽来源于卡尔曼诺夫和费里耶夫据农业生产专门化和集约化的要求,提出了对土壤、气候和其他自然条件进行全面的比较评价的方法[7]。至1977年,美国环境学家Brown在其著作《建设一个持续发展的社会》中首次明确提出了“环境安全”的概念,并在1989年,国际应用系统分析所(IASA)正式提出生态安全概念,并将其定义为人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会次序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态[8][9]。在此基础上,国外学者展开了一系列关于生态风险与生态系统健康方面的研究[10]。国内学者对于土地生态安全的研究起步较晚,目前仍处于探索阶段[11]。在研究区域上,包括省[12]、市[13]、县[14]等尺度的行政区域,京津冀城市群[15]、关中平原城市群[16]、北部湾城市群[17]等尺度的经济区域,及河流流域[18]、绿洲[19]等尺度的自然区域;在研究指标模型上,多采用PSR[20]、PSR-EES[21]等模型构建生态安全评价指标;在研究方法上,常采用TOPSIS法[12]、主成分聚类法[22]、SPSS法[23]。目前来说,学术界对于对于预测方法暂时处于研究探索阶段,较成熟的预测方法有无偏GM(1,1)模型、灰色GM(1,1)模型、灰色马尔可夫预测模型等[24],对于环长株潭城市群土地生态安全研究相对缺乏。

鉴于此,本研究以环长株潭城市群8个地级市为案例地,基于SPR模型构建环长株潭城市群土地生态安全评价体系,采用熵权-TOPSIS模型计算土地生态安全综合值,分析揭示其时空演化特征,并采用灰色GM(1,1)模型对其外来发展趋势进行预测,以期揭示环长株潭城市群土地生态安全演绎规律。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

环长株潭“3+5”城市群位于中国湖南省中东部,是长江中游城市群重要组成部分,以长株潭都市圈为核心,外围涵盖岳阳、衡阳、益阳、常德、娄底5个次级都市圈。地形平坦开阔,水网密布,水源充足,其水系属于湘、资、沅、澧四大水系,拥有洞庭湖、东江湖等淡水资源。截至2022年,环长株潭城市群拥有常住人口4135.6万人,实现生产总值37392.86亿元,占全省的76.8%,第一、二、三产业增加值占比为7.83:41.48:50.69。

作为湖南省经济活动中心,环长株潭“3+5”城市群是实施促进中部地区崛起战略、全方位深化改革开放及推进新型城镇化的重点区域,同时也是保障长江下游城市群生态安全、水资源供给和粮食安全的重要屏障。近年来,环长株潭城市群积极响应国家政策与战略,先进装备制造业、汽车及零部件产业、轨道交通装备产业等成为支柱产业,经济社会不断发展、人民收入水平不断提高、城镇化进程不断加速。但在大量开展经济建设活动的同时,生态空间受挤压,人地矛盾加剧,继而出现了水土流失、土地重金属污染、湘江部分水质恶化、洞庭湖生物多样性减少、全国空气污染排名居高不下等生态破坏现象,生态安全水平下滑。近年来,政府虽多措并举出台多项环境保护政策,取得了一定成效,但环长株潭城市群生态安全状况依旧严峻,评价其生态安全水平意义重大。

2.2. 数据来源

研究数据主要来源于2012~2022年《中国统计年鉴》《湖南省统计年鉴》、各市《统计年鉴》及各市《统计公报》,对于个别缺失数据利用插值法与拟合回归法补齐。制图所使用的地理信息基础数据源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)。

3. 评价指标体系及研究方法

3.1. 评价指标体系构建

PSR (Pressure-State-Response)概念模型是由联合国经济合作开发署(OECD)提出的一种用于研究生态

环境、承载力评价的框架体系, 具有“经济及社会活动等驱动对环境施加的压力——当前自然资源、生态环境质量的状态——针对状态变化采取优化措施与对策的响应”[25]的因果关系。该模型从人与自然环境相互作用的关系出发, 对经济与环境之间的内在逻辑进行解读, 客观诠释了人与自然生态环境之间的相互依存、相互制约的关系[26] [27], 目前已得到了学术界普遍的认可与运用。

本文在充分参考借鉴相关研究成果的基础[28] [29]上, 结合环长株潭城市群土地生态安全实际情况, 遵循权威性、完备性、针对性、可操作性原则, 紧扣经济发展、环境保护、产业升级等关键领域, 最终选取 16 项指标形成环长株潭城市群土地生态安全评价指标体系(表 1)。

Table 1. Evaluation index system of land ecological security

表 1. 土地生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标示意	指标性质	指标权重
环长株潭城市群土地生态安全评价指标体系	压力	人口密度	表征土地承载人口压力	-	0.072
		城镇化率	表征城市扩张压力	-	0.086
		化肥施用量	表征农业污染压力	-	0.017
		污水年排放量	表征土地污染压力	-	0.064
		建成区面积	表征土地扩张压力	-	0.043
		人均拥有道路面积	表征交通对土地压力	-	0.063
	状态	人均地区生产总值	表征经济发展水平	+	0.038
		第一产业从业人员	表征劳动力结构	-	0.170
		建成区绿地覆盖率	表征城市土地覆盖情况	+	0.032
		年降水量	表征水资源状况	+	0.056
		每公顷粮食面积产量	表征粮食安全产量状况	+	0.070
		响应	第三产业占比	表征良好产业发展条件	+
	农林水利事务支出占比		表征对自然资源的投入	+	0.030
	污水处理率		表征环境保护维护水平	+	0.040
	机耕面积		表征农业科技水平	+	0.086
			造林面积	表征对环境恢复的成效	+

(1) 压力因子。主要反映了人类活动对生态环境的压力, 这种压力分为生态资源压力和生态环境压力。人口密度、城镇化率、建成区面积以及人均拥有道路面积等指标体现了人口增长和城市用地扩张所带来的生态资源供需矛盾压力。而化肥施用量和污水年排放量等指标则表征了人类活动对生态环境造成的污染压力。

(2) 状态因子。体现为当前区域生态状态, 主要为当前经济社会状态及生态环境质量状态。其中, 人均地区生产总值、第一产业从业人员、建成区绿地覆盖率代表区域再生态环境压力下所呈现的经济发展水平、劳动力结构、土地覆盖情况等状态, 年降水量、每公顷粮食面积产量等因子表征区域生态压力下的生态环境质量状态。

(3) 响应因子。体现为区域生态安全收到威胁时采取的优化措施与对策响应, 主要分为主动干预及恢复措施两个部分。其中第三产业占比间接通过产业结构优化影响土地生态安全, 农林水利事务支出占比

及污水处理率直接表征区域对于土地生态安全的投入；机耕面积及造林面积体现了政府积极推动区域生态系统治理，减少人类行为影响的恢复措施。

3.2. 基于熵权法的评价指标计算

熵权法源自热力学第二定律，其基于信息熵和权重熵来确定指标的权重，是一种客观赋权的方法[30][31]。土地生态安全评价是多指标定量的综合评价过程，因此为消除人为主观判断所带来的偏差，采用熵权法计算指标权重，其具体计算步骤为：

- (1) 计算第 i 个城市在第 j 项指标中的相对重要性或贡献比例：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^n x_{ij}'}, i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

- (2) 计算各指标熵值：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln(p_{ij}) (0 \leq e_j \leq 1) \quad (2)$$

- (3) 计算各项指标熵值：

$$d_j = 1 - e_j \quad (3)$$

- (4) 计算各项指标权重，公式为：

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, 0 \leq w_j \leq 1 \quad (4)$$

$$z_{ij} = w_j \times x_{ij}' \quad (5)$$

式中 w_j 为权重矩阵； X_{ij} 为标准化后矩阵。

3.3. 基于 TOPSIS 的土地生态安全评价模型构建

TOPSIS 法是系统工程中有限方案多目标决策分析方法，其基本原理是通过测度被评级对象与正理想解和负理想解的相对距离来进行排序，能充分利用原始数据，精确反映评价方案之间的差距，得出良好的可比性评价排序结果[32]。因此本文采用该方法对土地生态安全进行综合评价，其具体计算步骤为：

- (1) 计算最优解 I^+ 和最劣解 I^- ：

$$I^+ = (\max\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{m1}\}, \{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{m2}\}, \dots, \{z_{1n}, z_{2n}, \dots, z_{mn}\}) = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \quad (6)$$

$$I^- = (\min\{z_{11}, z_{21}, \dots, z_{m1}\}, \{z_{12}, z_{22}, \dots, z_{m2}\}, \dots, \{z_{1n}, z_{2n}, \dots, z_{mn}\}) = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \quad (7)$$

式中最优解 I^+ 和最劣解 I^- 分别为最大与最小值。

- (2) 计算各评价指标与最优、最劣解的欧氏距离 D_i^+ 和 D_i^- ：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^+ - z_{ij})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^- - z_{ij})^2} \quad (9)$$

式中： i_j^+ 为所有评价城市的针对第 j 个评价指标所能达到的最大值； i_j^- 为全部评价城市的针对第 j 个评价指标所能达到的最小值

(3) 计算城市的第 j 个评价指标所呈现的最小程度:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ - D_i^-} \quad (10)$$

式中 C_i 为第 i 个城市综合韧性最优水平。 C_i 取 $[0, 1]$, C_i 的大小与城市韧性水平呈正比关系。

3.4. 基于灰色预测模型 GM(1, 1) 的土地生态安全预测

灰色系统理论由邓聚龙教授于 1982 年提出并加以发展, 灰色预测模型是灰色系统理论中应用最为广泛与核心的动态预测模型, 其基本思想是采用依次累加的方法实现时间序列数据由非线性转为线性, 从而弱化序列随机性, 增强其规律性[33]-[35], 能够较好地适用于土地生态安全问题的预测[36]-[38], 其具体建模步骤为:

构建原始数据序列 $X^{(0)}$, 并对原始数列进行累加生成, 得到 $X^{(1)}$ 。

基于累加生成的数据序列 $X^{(1)}$, 建立微分方程模型:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (11)$$

式中: a , u ——辨识参数, 通过最小二乘法拟合得到。

建立矩阵 B Y_N , 计算:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N = [a, u] \quad (12)$$

得到预测模型:

$$x^{(1)}(t+1) = [X^{(0)}(1) - u/a] e^{-at} + u/a \quad (13)$$

采用后验比检验法对模型精确性进行检验, 根据后验比 C 及小概率误差 P 范围分析模型的可靠性。当 $C < 0.35$ 和 $P > 0.8$ 时, 认为该模型有较高的预测的精度[39] [40] (表 2)。

Table 2. The test table of GM(1, 1) model accuracy

表 2. GM(1, 1)模型精度检验表

检验指标	优	合格	勉强合格	不合格
小残差概率 P	>0.95	>0.80	>0.70	>0.70
方差比 C	<0.35	<0.50	<0.65	<0.65

3.5. 土地生态安全评判标准

Table 3. Criteria for judging land ecological security

表 3. 土地生态安全评判标准

安全等级	安全值区间	安全程度
I	[0.58, 0.73)	安全级
II	[0.44, 0.58)	良好级
III	[0.29, 0.44)	邻界级
IV	[0.15, 0.29)	敏感级
V	[0, 0.15)	危险级

依据环长株潭城市群计算结果及土地生态特点, 结合相关文献[41]-[43], 运用 Arcgis 软件中自然断点法将时间序列中期 2017 年环长株潭城市群土地生态安全评价标准划分为 5 个等级, 见表 3。

4. 结果与分析

4.1. 土地生态安全评价结果与分析

4.1.1. 生态安全时序变化特征

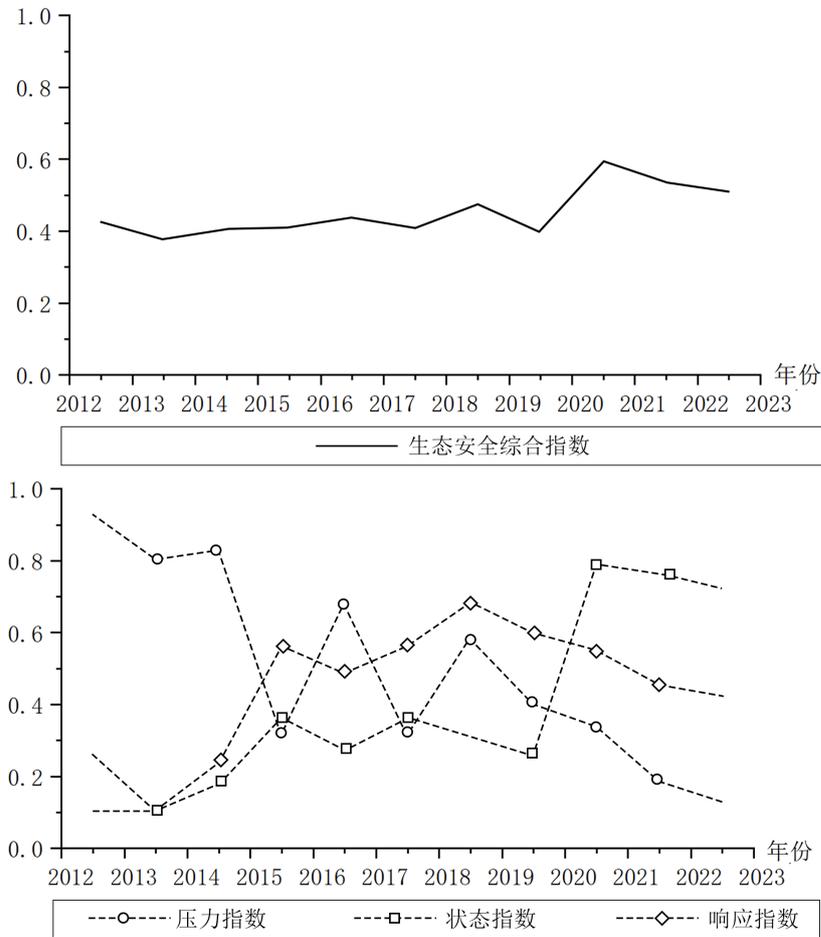


Figure 1. Comprehensive evaluation results of ecological security in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration area
图 1. 环长株潭城市群生态安全综合评价结果

在 2012~2022 年间, 环长株潭城市群 8 个市州土地生态安全指数在[0.153, 0.727]区间内, 整体生态安全得分实现了从 0.424 到 0.510 的显著提升, 增长率为 20.28%。在此期间, 生态安全状态由“临界级”提升为“安全级”。至 2022 年底, 除株洲市生态安全水平仍处于邻界级, 湘潭、衡阳两市达到良好级外, 其余各市均已成功迈入安全级行列(表 4), 这标志着环长株潭城市群整体土地生态安全状况正朝着积极的方向稳步发展。具体而言, 其变化趋势可分为三个阶段: (1) 2012~2017 年间生态安全水平相对稳定并略有上升, 其内在机制可能在于: 一方面, 该时期正处于环长株潭城市群概念提出后的快速发展初期, 城镇化、工业化带来的压力开始显现并持续累积; 另一方面, 国家和湖南省层面开始加强生态文明建设,

地方政府也开始采取初步的响应措施,如逐步增加环保投入、开始产业结构调整。这两股力量的拉锯导致整体生态安全水平处于动态平衡的“临界级”状态,响应措施的初步效果抵消了部分新增压力,使得安全指数呈现微弱上升趋势。(2) 2017~2020年生态安全水平显著提升并达到峰值,这主要归功于响应层面的强力驱动:1) 政策法规体系完善:2016年《土十条》《环境保护税法》《河长制》以及2018年生态文明正式入宪等国家顶层设计密集出台,湖南省也配套制定了相应《湖南省污染防治攻坚战三年计划》,形成了强大的政策合力;2) 具体措施成效显著:如表4所示,该阶段响应指数整体处于较高水平,具体体现在造林面积大幅增加、污水处理率显著提高、机耕面积扩大以及第三产业占比提升等。这些措施有效缓解了前期累积的压力,并显著改善了生态环境状态,特别是对水污染治理、生态空间保护和农业集约化生产产生了积极影响。同时,产业结构优化也减轻了资源环境压力。;(3) 2020~2022年生态安全水平出现回落,其核心机制在于压力的快速反弹与部分响应措施的边际效应减弱或执行力度波动:1) 经济与基建加速带来的压力剧增:后疫情时代经济复苏需求迫切,城市建设加速推进导致人口密度、城镇化率、建成区面积扩张压力以及伴随的污水排放量短期内显著增加;2) 响应措施的部分弱化:如表5分析指出,株洲、湘潭、衡阳等市在该时期造林面积减少、污水处理率下降、农林水利支出占比降低,表明部分关键响应措施的持续性或强度出现波动,未能完全抵消新增压力。此外,重大工程项目在短期内对局部区域生态空间造成的直接占用和扰动也是不可忽视的因素。压力因素的快速上升叠加响应措施的部分弱化,最终导致状态指数从2020年的峰值0.790回落至2022年的0.724,拖累综合安全指数下降。

Table 4. The results of the ecological security composite index and the index of each subsystem
表 4. 生态安全综合指数及各子系统指数结果

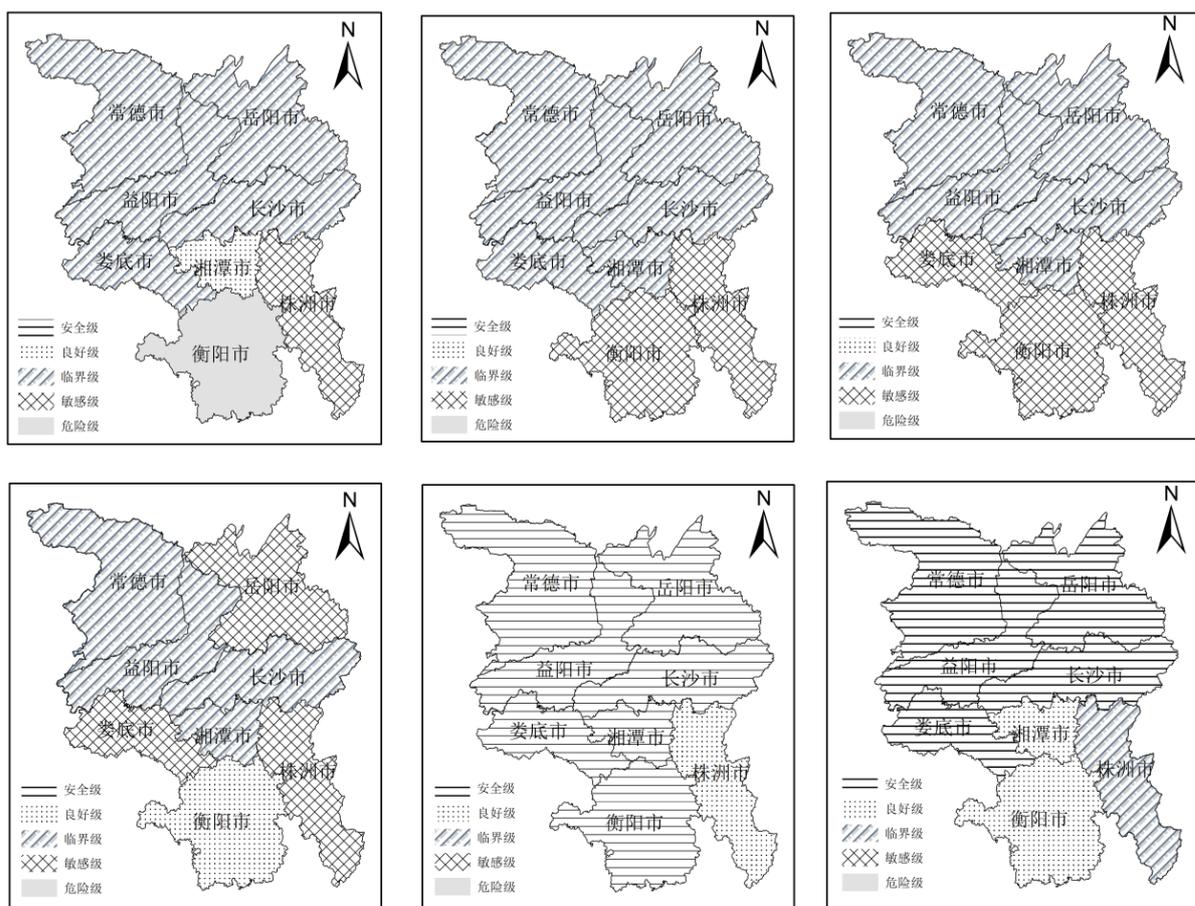
年份	生态安全综合指数	压力指数	状态指数	响应指数	评价等级
2012	0.424	0.928	0.262	0.102	临界级
2013	0.378	0.803	0.108	0.104	临界级
2014	0.402	0.828	0.182	0.236	临界级
2015	0.408	0.315	0.363	0.559	临界级
2016	0.435	0.680	0.273	0.485	临界级
2017	0.408	0.315	0.363	0.559	临界级
2018	0.475	0.585	0.310	0.682	良好级
2019	0.397	0.404	0.259	0.599	临界级
2020	0.595	0.339	0.790	0.550	安全级
2021	0.535	0.188	0.763	0.455	良好级
2022	0.510	0.131	0.724	0.426	良好级

4.1.2. 生态安全空间变化特征

依据土地生态安全评价标准,运用 Arcgis 软件绘制环长株潭城市群 2012 年、2014 年、2016 年、2018 年、2020 年、2022 年土地生态安全时空格局分布图(图 2)。由图可知,研究区内各地级市在生态安全空间上存在差异,主要表现为“北部高、南部低”的空间分布特征,土地生态安全整体格局呈现出由低水平向高水平演变的轨迹。

2012 年,环长株潭城市群中土地生态安全等级未有达到“安全级”的城市,仅有湘潭市达到“良好级”,长沙、岳阳、益阳、常德、娄底 5 个城市被测评为“临界级”,且呈片状分布,株洲市为“敏感

级”，衡阳市为“危险级”。究其原因，在该阶段环长株潭城市群概念刚被正式提出，多数地级市均在进行快速城镇化建设，对土地生态安全产生的压力较大，其中长沙、株洲、湘潭作为该区域的核心城市，其城镇化进程尤为迅速，对土地生态的压力也相应增大，且这三座城市在压力与状态值上呈现出高度的一致性，然而湘潭市针对土地生态问题所做出的生态保护响应高于长沙，远高于株洲，因而其生态安全等级最高；衡阳市虽未对土地生态安全造成较大的压力，但相比其他城市，其经济发展状况较差，人均地区生产总值、绿地覆盖率等偏低，第一产业从业人员比重偏高等，从而表现出较低的生态安全等级。2016年，除娄底市、衡阳市、株洲市为“敏感级”外，其余城市均为“临界级”；2020年，处于安全级的城市已达到城市群的88%，仅株洲市处于“良好级”，具体来说，8年来，环长株潭城市群生态治理与保护全面加强，积极响应各级政府政策，以“两型”为导向，创新驱动，统筹协调发展，积极培育战略性新兴产业，抓紧淘汰高消耗、高排放、高污染、低效益传统产业，该年累计造林面积27万公顷，机耕面积3987千公顷，污水处理了达86%，土地生态安全水平达到较高水平。至2022年，湘潭市、株洲市、衡阳市的土地生态安全水平出现下滑，其中湘潭市和衡阳市降至“良好级”，株洲市则降至“临界级”。这一变化主要是由于这些城市对土地生态安全治理的响应减弱，具体表现为造林面积相比前一年有所减少，株洲市的污水处理率从98.04%下降至92.88%，农林水利事务支出占公共财政支出的比例也从8.70%降至7.68%。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Spatiotemporal pattern changes of land ecological security
图 2. 土地生态安全时空格局变化

Table 5. Comprehensive evaluation values and grades of land ecological security
表 5. 环长株潭城市群土地生态安全综合评价值及等级

	长沙市		株洲市		湘潭市		衡阳市		岳阳市		常德市		益阳市		娄底市	
	评价 值	等级														
2022 年	0.604	安全 级	0.436	邻界 级	0.570	良好 级	0.525	良好 级	0.639	安全 级	0.593	安全 级	0.620	安全 级	0.656	安全 级
2021 年	0.610	安全 级	0.445	安全 级	0.575	良好 级	0.542	良好 级	0.654	安全 级	0.603	安全 级	0.668	安全 级	0.665	安全 级
2020 年	0.586	安全 级	0.470	良好 级	0.591	安全 级	0.640	安全 级	0.660	安全 级	0.723	安全 级	0.727	安全 级	0.713	安全 级
2019 年	0.321	邻界 级	0.239	敏感 级	0.238	敏感 级	0.408	邻界 级	0.281	敏感 级	0.352	邻界 级	0.345	邻界 级	0.291	邻界 级
2018 年	0.314	邻界 级	0.239	敏感 级	0.317	邻界 级	0.491	良好 级	0.268	敏感 级	0.365	邻界 级	0.340	邻界 级	0.288	敏感 级
2017 年	0.303	邻界 级	0.555	良好 级	0.310	邻界 级	0.405	邻界 级	0.272	敏感 级	0.364	邻界 级	0.286	敏感 级	0.284	敏感 级
2016 年	0.404	邻界 级	0.263	敏感 级	0.371	邻界 级	0.203	敏感 级	0.324	邻界 级	0.344	邻界 级	0.306	邻界 级	0.283	敏感 级
2015 年	0.421	邻界 级	0.249	敏感 级	0.360	邻界 级	0.289	敏感 级	0.368	邻界 级	0.340	邻界 级	0.288	敏感 级	0.340	邻界 级
2014 年	0.395	邻界 级	0.259	敏感 级	0.347	邻界 级	0.224	敏感 级	0.333	邻界 级	0.325	邻界 级	0.300	邻界 级	0.340	邻界 级
2013 年	0.369	邻界 级	0.246	敏感 级	0.385	邻界 级	0.179	敏感 级	0.320	邻界 级	0.321	邻界 级	0.310	邻界 级	0.341	邻界 级
2012 年	0.355	邻界 级	0.272	敏感 级	0.478	良好 级	0.153	危险 级	0.348	邻界 级	0.327	邻界 级	0.342	邻界 级	0.345	邻界 级

4.2. 灰色预测 GM(1, 1)预测结果分析

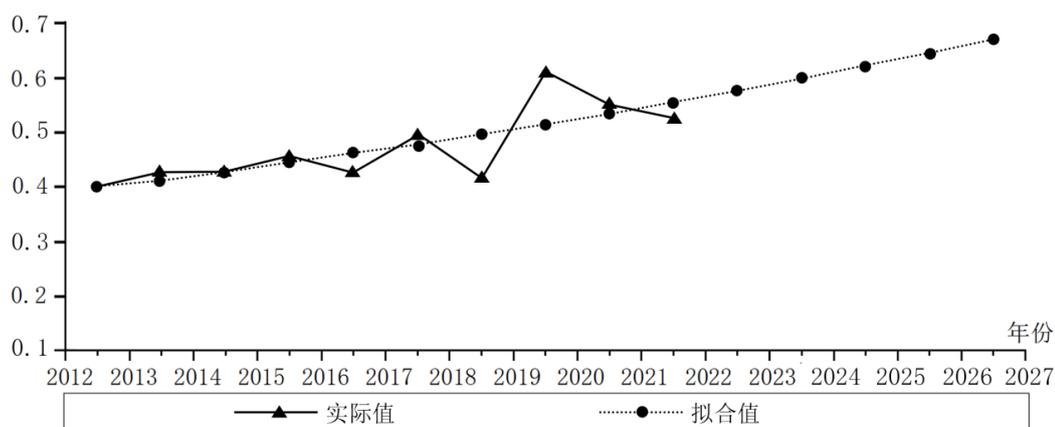


Figure 3. Dynamic evolution trend of land ecological security based on GM(1, 1) model

图 3. 基于 GM(1, 1)模型的土地生态安全动态演变趋势

以 2023~2022 年环长株潭城市群土地生态安全综合值为原始数据进行处理, 预测结果为: $C = 0.1552, P = 0.8000$, 预测精度等级为合格, 故 2023~2026 年土地生态安全拟合值符合标准(表 6)。预测结果: 2023~2026 年预测结果呈上升阶段, 土地生态安全预测值由 0.541 上升至 0.637, 状态等级由“良好级”上升为“安全级”(图 3)。

Table 6. Dynamic prediction results of land ecological security based on GM(1, 1) model

表 6. 基于 GM(1, 1)模型的土地生态安全动态预测结果

年份	实际值	拟合值	相对误差	等级	状态
2013	0.378	0.378	0.00%	III	临界级
2014	0.402	0.391	2.73%	III	临界级
2015	0.408	0.407	0.11%	III	临界级
2016	0.435	0.424	2.48%	III	临界级
2017	0.408	0.442	8.36%	II	良好级
2018	0.475	0.460	3.16%	II	良好级
2019	0.397	0.479	20.69%	II	良好级
2020	0.595	0.499	16.18%	II	良好级
2021	0.535	0.520	2.80%	II	良好级
2022	0.510	0.541	6.17%	II	良好级
2023	—	0.564		II	良好级
2024	—	0.587		I	安全级
2025	—	0.612		I	安全级
2026	—	0.637		I	安全级

4.3. 结论与讨论

4.3.1. 结论

基于 2012~2022 年环长株潭城市群 8 个市的统计数据, 对环长株潭城市群 8 个地级市进行土地生态安全评价与预测, 得出了以下结论: (1) 在时间序列上, 2012~2022 年, 环长株潭城市群土地生态安全水平都得到了较大水平的提升。其中 2020 年是环长株潭城市群 11 年间生态安全状况最好的阶段, 该阶段各地级市积极响应各级政府生态文明政策, 不断采取增加造林面积、机耕面积, 提高污水处理率等措施缓解城市发展压力, 土地生态安全位于[0.470~0.723]区间, 其中评价大小排序为: 益阳市 > 常德市 > 娄底市 > 岳阳市 > 衡阳市 > 株洲市 > 长沙市 > 湘潭市。(2) 在空间序列上, 研究区内各地级市在生态安全空间上存在差异, 主要表现为“北部高、南部低”的空间分布特征, 土地生态安全整体格局呈现出由低水平向高水平演变的轨迹。2020 年, 处于安全级的城市已达到城市群的 88%, 仅株洲市处于“良好级”。(3) 灰色系统 GM(1, 1)预测结果显示: 2023~2026 年环长株潭城市群土地生态安全值将呈上升阶段, 土地生态安全预测值由 0.541 上升至 0.637, 状态等级由“良好级”上升为“安全级”。

因此, 为了进一步提升环长株潭城市群生态服务功能, 推动土地资源的健康发展与区域的可持续利用, 本文提出以下建议: 应当持续强化城市群对农林水利事业的投入、加大污水处理力度、扩大造林面积及机耕面积, 并大力发展第三产业, 确保其主导地位不动摇。同时, 在宏观把控的基础上, 需特别关

注衡阳、湘潭、株洲这三个波动较为显著的城市的生态安全状态,以期更有效地实现城市群土地生态安全的可持续发展目标。

然而,本研究尚存在若干局限性,具体阐述如下:(1)由于环长株潭城市群在统计年鉴中缺乏独立的统计数据,仅提供了基本数据的概览,导致统计资料未能全面覆盖。因此,在选取评估指标时,舍弃了部分在土地生态安全研究中至关重要的指标,例如水土流失率、人均水资源量以及万元GDP能耗等。(2)本研究在完成生态安全评估后,仅对未来的发展趋势进行了预测,而对于各地级市及不同年份间变化的具体原因,仅停留在表面数据的观察层面,未能深入剖析并准确识别出真正的障碍因素。为了弥补这一不足,未来的研究可运用障碍度模型进行测算,以期精准找出阻碍生态安全提升的主要因子,为制定更为有效的策略提供科学依据。

4.3.2. 讨论

综上,环长株潭城市群土地生态安全的时空演化是复杂的“压力-状态-响应”(PSR)相互作用的结果。时间维度上,政策驱动的强力响应是提升安全水平的关键,而经济快速发展与城市扩张带来的压力反弹以及响应措施的持续性不足则是安全水平波动或下降的主因;空间维度上,“北高南低”的格局深刻反映了区域内部经济发展水平、产业结构、历史环境负担、以及地方政府环保投入与治理能力的均衡性。核心城市的辐射效应和自然本底条件的差异也起到了塑造空间格局的作用。

本研究结果强调了在快速城市化区域,平衡经济发展与生态保护的极端重要性。短期看,强化响应措施的持续性和执行力是关键,特别是在面临经济提速压力时,需严防环保投入和监管的松懈。长期看,根本之策在于优化产业结构(推动绿色低碳发展模式,从源头上减轻环境压力。空间协同上,需特别关注衡阳、湘潭、株洲等南部城市的生态安全状况,通过财政转移支付、技术援助、产业合作等方式,弥合区域差距,提升整体韧性。

致 谢

在本研究得以顺利完成之际,我衷心地对在研究过程中向我伸出援手、给予我坚定支持的每一个人表示感谢。

首先,我要向我的指导老师表达深深的谢意。正是他专业的引领和耐心地释疑,使我在研究过程中避免了许多不必要的曲折。他对待科研的严谨态度和精湛的学术造诣,对我产生了深远的影响,帮助我在土地生态安全领域的研究中取得了实质性的进展。

同时,我非常感谢在研究数据收集与整理过程中,给予我无私帮助的各地统计局及相关部门的工作人员。他们提供的数据资料为我的研究提供了坚实的基础,使得分析结果更具说服力和可信度。

参考文献

- [1] 刘彦随. 保障我国土地资源安全的若干战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2006(5): 379-384.
- [2] 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260-266.
- [3] 王鹏, 王亚娟, 刘小鹏, 等. 基于PSR模型的青铜峡市土地生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 148-153, 159.
- [4] 张利, 陈影, 王树涛, 等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2445-2454.
- [5] 赖其力孟格, 张金亭, 牛蓓蓓. 基于文献计量学的中国土地生态研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 333-338.
- [6] 李建春, 袁文华. 基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 988-1001.

- [7] 郭冬艳. 京津冀土地生态安全与经济高质量发展耦合协调研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 吉林大学, 2022.
- [8] 曲衍波. 基于 GIS 的山区县域土地生态安全评价与土地利用优化调控研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [9] 刘凌冰. 甘肃省土地生态安全评价研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [10] Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., *et al.* (1998) The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Ecological Economics*, **25**, 3-15.
[https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(98\)00020-2](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(98)00020-2)
- [11] 余文波, 蔡海生, 张莹, 等. 基于 RS 及 GIS 的南昌市土地生态安全动态评价及分区[J]. 水土保持研究, 2018, 25(0): 244-249, 256.
- [12] 王博. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的四川省土地生态安全时空格局演变及其障碍因子诊断[J]. 国土与自然资源研究, 2023(5): 30-35.
- [13] 王高, 田建林, 曾婷, 等. 张家界市土地利用变化及生态安全评价[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(9): 60-67.
- [14] 张嘉玉. 莒南县土地利用变化与土地生态安全评价研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [15] 李红涛. 基于 SD 模型的京津冀土地生态安全评价及预警研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2024.
- [16] 吴艳霞, 邱乐. 关中平原城市群土地生态安全评价[J]. 中国水土保持, 2024(2): 52-56.
- [17] 贾艳红, 刘欢慧. 北部湾城市群土地生态安全评价[J]. 开发研究, 2022(6): 106-114.
- [18] 韩磊, 陶德鑫, 史鲁彦. 黄河流域两大区域的土地生态安全动态评价及比较[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 255-266, 277.
- [19] 王娟, 秦建成, 周伟, 等. 干旱区绿洲城市土地生态安全评价: 以嘉峪关市为例[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会论文集(三). 中国地质大学(北京)土地科学技术学院; 重庆理工大学管理学院; 自然资源部土地整治重点实验室; 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心; 青海大学研究生院, 2021: 7.
- [20] 黄良伟. 基于 PSR 模型的 A 市土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(9): 70-76.
- [21] 赵淑娟, 刘海英, 江涌起. 基于 PSR-EES 模型的绥化市土地生态安全评价及影响因素分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(6): 46-53.
- [22] 侯小宇, 何刚, 王晓东, 等. 基于主成分聚类法的安徽省土地生态安全评价[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 505-512.
- [23] 刘泳昕. 基于 SPSS 分析的土地生态安全评价[J]. 农业与技术, 2022, 42(13): 131-136.
- [24] 王秀. 灰色组合预测模型应用研究[J]. 长沙大学学报, 2010, 24(2): 24-27.
- [25] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 叶尔羌河平原绿洲土地生态安全预警演变与时空格局分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(7): 75-84.
- [26] 张驰宇, 周波, 成受明. 基于 PSR 模型的我国生态旅游区景观承载力评价研究[J]. 生态经济, 2020, 36(8): 128-132.
- [27] 吴艳霞, 邱乐. 黄河流域土地生态安全时空演化分析及预测[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 258-265.
- [28] 郭锦, 危小建, 张福庆, 等. 生态系统健康遥感评估及关键驱动因素: 以长江中游城市群为例[J/OL]. 环境科学: 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202406285>, 2024-11-17.
- [29] 刘沁萍, 戚梦豪, 田洪阵. 土地生态安全的时空动态: 环渤海地区的实证研究[J/OL]. 安全与环境学报: 1-11. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1079>, 2024-11-29.
- [30] 陈翔, 骆公志. 基于熵权法的闻泰科技财务绩效评价研究[J]. 生产力研究, 2024(10): 149-153.
- [31] 傅为忠, 刘思蔚. 熵权-TOPSIS 评价模型下 A 公司环境会计信息披露评价研究[J]. 中国市场, 2024(33): 151-154.
- [32] 卢长娥, 王勇. 基于熵权 TOPSIS 法的中国学前教育资源配置水平评价研究[J]. 成都师范学院学报, 2021, 37(5): 1-7.
- [33] 平建华, 李升, 钦丽娟, 等. 地下水动态预测模型的回顾与展望[J]. 水资源保护, 2006(4): 11-15.
- [34] 刘天, 王芸, 姚梦雷, 等. GM(1, 1)灰色模型、马尔可夫链模型及其组合模型和 SARIMA 模型在甲肝发病数预测中的应用效果比较[J]. 华南预防医学, 2019, 45(2): 128-132.
- [35] 韩磊, 潘玉君, 高庆彦, 等. 基于 PSR 和无偏 GM(1, 1)模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J]. 生态经济, 2019, 35(2): 148-154.

-
- [36] 向文, 涂建军, 李琪, 等. 基于灰色预测模型的长江经济带城市土地生态安全预警[J]. 生态科学, 2018, 37(2): 78-88.
- [37] 李悦, 张合兵, 张小虎, 等. 基于熵值法和灰色预测模型的城市土地生态安全评价[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 242-247.
- [38] 马艳, 钟春兰. 灰色预测模型在土地生态安全预警中的应用[J]. 统计与决策, 2018, 34(12): 82-85.
- [39] 顿耀龙, 王军, 白中科, 等. 基于灰色模型预测的矿区生态系统服务价值变化研究——以山西省平朔露天矿区为例[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 494-502.
- [40] 张楠楠, 石水莲, 李博, 等. 基于“压力-状态-响应”模型的土地生态安全评价及预测——以沈阳市为例[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 28-35.
- [41] 郑华伟, 张锐, 杨兴典, 等. 基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(9): 1099-1105.
- [42] 廖成浩, 姚昆, 曾艳. 安宁河流域土地生态安全动态评价与预测[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 27-31, 37.
- [43] 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.