

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.023; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.023.

李瑞发, 崔旺来. 长三角城市群生态安全的时空演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 377-386.

Li Ruifa, Cui Wanglai. Temporal-spatial evolution and influencing factors of ecological security in the city cluster of Yangtze River Delta [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 377-386.

长三角城市群生态安全的时空演变及影响因素

李瑞发, 崔旺来

(浙江海洋大学 经济与管理学院, 浙江 舟山 316022)

摘要:[目的]探究长三角城市群生态安全的变化状况,阐明长三角城市群生态安全的影响机制,进而为长三角城市群生态安全的调控和管理提供科学支撑。[方法]构建“健康-风险-服务”框架对 2005—2020 年长三角城市群的生态安全状况进行综合评价,并利用地理探测器和地理加权回归模型对其影响因素的相对重要性及空间异质性进行了深入探讨。[结果](1) 2005—2020 年长三角城市群的生态安全状况逐步改善,综合生态安全指数从 0.528 上升至 0.568;空间上总体呈西高东低的格局,莫兰指数从 0.292 变化为 0.322,区域间的空间相关性有所加强。(2) 归一化植被指数是影响长三角城市群生态安全的主导因素,影响程度高达 0.753,因素间交互作用比单一因素作用的影响程度更强。(3) 各因素对长三角城市群生态安全的影响存在空间异质性,自然因素和景观因素对西南地区的影响较大,人类因素的影响集中于中部平原及东部沿海地区。[结论]长三角城市群生态安全水平呈整体向好态势,各城市间存在显著的空间效应,生态治理时需关注污染源防治、国土规划利用以及跨区域共保联治等方面,助力绿色美丽长三角建设。

关键词:生态安全; 时空演变; 长三角城市群

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)02-0377-10

Temporal-spatial evolution and influencing factors of ecological security in the city cluster of Yangtze River Delta

Li Ruifa, Cui Wanglai

(College of Economics and Management, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract:[Objective] The aims of this study are to explore the changing situation of ecological security in the city cluster of Yangtze River Delta, to elucidate the impact mechanism of ecological security in the city cluster of Yangtze River Delta, and to provide scientific support for the regulation and management of ecological security in the city cluster Yangtze River Delta. [Methods] A ‘health-risk-service’ framework was constructed to comprehensively evaluate the ecological security status of the Yangtze River Delta city cluster from 2005 to 2020. Geographic detector and geographic weighted regression models were utilized to explore the relative importance and spatial heterogeneity of influencing factors. [Results] (1) The ecological security status of the city cluster in Yangtze River Delta gradually improved from 2005 to 2020, with the comprehensive ecological security index increasing from 0.528 to 0.568. Spatially, it generally presented a pattern of higher security in the west and lower security in the east, with the Moran’s Index changing from 0.292 to 0.322, indicating a strengthened spatial correlation between regions. (2) The Normalized Difference Vegetation Index was the dominant factor influencing the ecological security of the city cluster in Yangtze River Delta, with a high impact level of 0.753. The interactive effects among factors were stronger than the individual effects of a single factor. (3) The influences of various factors on the ecological security of the city

收稿日期:2024-06-14

修回日期:2024-06-30

接受日期:2024-07-21

资助项目:国家自然科学基金重大项目“我国海洋战略科技力量体系化建设研究”(22&ZD152)

第一作者:李瑞发(2000—),男,山西太原人,在读硕士生,研究方向为城市生态安全评价。E-mail:3061976130@qq.com

通信作者:崔旺来(1964—),男,甘肃通渭人,硕士,教授,研究方向为城市生态安全评价研究。E-mail:cwl1018@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

cluster in Yangtze River Delta exhibited spatial heterogeneity. Natural factors and landscape factors had a greater impact on the southwest region, while human factors were concentrated in the central plains and eastern coastal areas. [Conclusion] The ecological security level of the city cluster in Yangtze River Delta had shown an overall good trend, and there were significant spatial effects among cities. Attention should be paid to the prevention and control of pollution sources, land planning and utilization, and cross-regional co-insurance and joint governance to help build a green and beautiful Yangtze River Delta.

Keywords: ecological security; temporal-spatial evolution; Yangtze River Delta city cluster

城市群作为国民经济的战略核心和连接地区与世界经济体系的控制中心^[1],其生态安全不仅是区域和国家可持续发展的必要前提,也是全球经济体系的重要支撑^[2]。近年来,城市群高密度集聚和高速度扩张引发了用地结构失衡、生态空间蚕食、碳排放量激增等一系列生态问题^[3],城市群的生态安全成为制约其高质量发展的关键^[4]。习近平总书记指出,必须把保护城市群生态安全摆在更加突出位置。如何保障城市群的生态安全与健康发展成为各界关注的重点问题,对其生态安全的时空变化及影响因素进行分析具有非常强的现实需求和研究的紧迫性。

生态安全评价作为生态安全研究的关键一环,是生态学和区域可持续发展的研究热点^[5]。学者基于生态健康、生态风险、生态服务、生态系统承载能力、生态资源要素等^[6-8]多维度视角,利用 DPSIR 模型、空间主成分分析法、模糊物元模型、生态足迹模型等^[9-12]方法对流域、城市、森林等各类生态系统^[13-14]进行了生态安全评价研究。在生态安全评价结果基础之上,通过空间自相关、核密度分析、标准差椭圆等方法揭示其时空演变规律^[2,4,11-12],并利用灰色关联度分析、障碍度模型、随机森林算法、空间误差模型等方法对影响因素进行了探讨^[15-17]。这些研究为区域生态保护决策提供了有效支持,但仍然存在局限:一是评价方法层面,现有成果停滞于对“数量”的测度^[1],忽略了生态系统内部的相互作用^[18]。二是影响因素的作用机制层面,忽视了不同城市资源禀赋和经济社会发展阶段的差异,仅对影响因素的平均作用方向及程度进行了分析。因此,本文的边际贡献如下:一是充分考虑到生态系统结构与功能的健康状态、面临的生态风险以及为人类提供产品和服务的能力,构建了“健康-风险-服务”的综合评价框架,评价结果更为全面、科学。二是对影响因素间的相对重要性及空间异质性进行探讨,对区域精细化生态治理尤为重要。

长三角城市群是我国经济最发达、创新最活跃、城市化和开放程度最高的经济区,但同时又是生态环境问题高度集中且激化的典型地区,其生态安全直接影响到长三角高质量发展和国家整体城市群发展战

略的实现^[19]。习近平总书记在扎实推进长三角一体化发展座谈会上明确提出,要不断夯实长三角城市群绿色发展基础^[20]。伴随着长三角城市群急速发展,城市大量人口迁入、生态空间被不断侵蚀、跨区域生态风险突出等问题愈加严重^[21],对其生态安全状况及影响因素进行研究有助于明晰区域生态安全现状,并厘清生态安全变化的影响机理,为制定区域生态管理策略提供科学支撑。因此,本文基于“健康-风险-服务”框架,对长三角城市群 2005—2020 年的生态安全状况进行评价,进一步利用地理探测器和地理加权回归模型对影响因素的作用机制展开分析,并基于现状和关键因素提出针对性提升建议。研究可为长三角城市群生态安全的调控和管理提供重要参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

长三角城市群介于北纬 27°12′—35°20′,东经 114°54′—122°12′,地处我国东部沿海,位于“一带一路”与长江经济带的重要交汇地带,包括以上海为核心、南京与杭州为次核心的 27 个市。区域占地面积约为 $2.25 \times 10^5 \text{ km}^2$,地势南高北低,北部与中部地区多为建设用地与耕地,南部地区多为林地。属亚热带季风气候,光照充裕,气温适宜,雨量丰沛。截至 2022 年底,长三角城市群以全国 12.51% 的人口和 2.34% 的面积产生了 20.5% 的 GDP,是我国经济社会发展的重要引擎,在国家现代化建设大局和开放格局中具有举足轻重的战略地位。然而,经济的高速发展和人口的急剧增长给长三角城市群生态安全带来了严重威胁。据报道,长三角城市群的碳排放量在全国城市群中占比最大,高达 16%;农业用地面积减少了 2.3%,远高于同期全国水平 1.86%;湖泊等生态用地面积缩减了 5.39%,导致重要生物栖息地受到破坏等,这些都严重影响到长三角城市群的绿色可持续发展^[22-23]。

1.2 研究方法

1.2.1 生态安全综合评价 生态安全是指生态系统完整性和健康的总体水平,由生态系统健康、生态风险、生态系统服务共同构成^[18]。其中,生态系统健康

是指生态系统及其组成部分的安全和健康,是生态安全的基础和前提;生态风险是指生态系统结构及其功能面临的威胁,对生态安全有着不利影响;生态安全的生态系统不仅能够维持自身健康,还可以为人类社会经济发展提供各类生态系统服务,三者从生态系统自身健康状况、外界干扰和功能服务三方面共同构成了生态安全。本文参考刘陈立^[24],Li 等^[25]的做法,利用“健康-风险-服务”评价框架,对区域生态安全状况进行综合评价。综合生态安全指数的计算公式如下:

$$CESI = \sqrt[3]{EHI \times (1 - ERI) \times ESI} \quad (1)$$

式中:CESI 为综合生态安全指数;EHI 为生态系统健康指数;ERI 为生态风险指数;ESI 为生态系统服务指数。

此外,为使结果更具可比性,本文利用 ArcGIS 软件的自然断裂法将长三角城市群生态安全评价结果分为 4 个安全等级:低等水平(综合生态安全 ≤ 0.403)、中等水平($0.403 < \text{综合生态安全} \leq 0.481$)、较高水平($0.481 < \text{综合生态安全} \leq 0.609$)和高等水平($0.609 < \text{综合生态安全} \leq 1$)。

(1) 为准确衡量长三角城市群的生态系统健康状况,本文基于 PSR 模型,在参考相关文献^[2,4-5,8-9,17]和专家意见的基础上,从自然、经济、生态等维度选定 15 个指标构建长三角城市群生态系统健康评价指标体系(表 1)。因评价指标涉及多个维度,本采用最大差异标准化方法对数据进行归一化处理,采用客观性较强的熵值法确定各指标权重,最后采用多层次加权综合指数法计算得出生态系统健康指数。计算公式如下:

$$EHI = \sum_{j=1}^n X_j \times W_j \quad (2)$$

式中: X_j 为指标 j 的标准值; W_j 为指标 j 的权重; n 为指标个数。

(2) 生态风险是指生态系统受外部因素威胁和破坏而导致的生态系统稳定性下降、结构和功能受损,生态风险评价对区域生态安全管理实践具有重要意义。本文参考相关研究^[26-27],选定景观干扰度指数和景观脆弱性指数来表征长三角城市群的生态风险。其中,景观干扰度指数用以表征不同景观受到外部干扰的程度,景观脆弱性指数用以衡量景观对外部干扰的敏感性,具体计算过程见文献^[27]。

(3) 本文参考前人研究并结合长三角城市群实际面临的粮食短缺、生物多样性较差、碳排放量过度等突出生态问题^[28-29],选定粮食生产、生境质量、碳储存量 3 项关键的生态系统服务进行评估。首先,基于土地利用和社会经济数据,利用 ArcGIS 10.8 和 InVEST 模型对 3 项生态系统服务进行计算,具体计

算过程见文献^[29]。其次,采用最大差异标准化方法对 3 项生态系统服务结果进行归一化处理。再次,由于三项生态系统服务在长三角城市群的可持续发展中都发挥着关键作用,本文在参考相关文献^[24]和听取专家意见的基础上将权重均设置为 1/3。最后,采用多层次加权综合指数法计算得出生态系统服务指数(ESI)。计算公式如下:

$$ESI = \sum_{i=1}^n W_i \times ES_i \quad (3)$$

式中: ES_i 为 i 类生态系统服务的标准化值; W_i 为指标 i 的权重; n 为生态系统服务指标个数。

表 1 生态系统健康评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecosystem health

准则层	指标层	权重	性质
压力	人口密度	0.2291	—
	工业产值占 GDP 比重	0.0148	—
	工业废水排放量	0.1701	—
	人口自然增长率	0.0238	—
	城镇化率	0.0270	—
状态	归一化植被指数	0.0179	+
	年平均温度	0.0353	—
	年降水量	0.0327	+
	建成区绿化覆盖率	0.0689	+
	国民生产总值	0.0815	+
响应	政府科技投入	0.0929	+
	城市污水处理率	0.0251	+
	人均可支配收入	0.0408	+
	第三产业占 GDP 比重	0.0461	+
	政府环保投资	0.0940	+

1.2.2 空间自相关分析 空间自相关分析用以研究区域内地理单元与其相邻地理单元间是否具有显著相关性。全局空间自相关分析用以确定整体的某个属性是否具有空间相关性或空间集聚性,通常用莫兰指数(Moran's I)来描述,莫兰指数的范围为 $[-1, 1]$,正值和负值表示属性分布分别具有正负空间自相关,并且存在空间聚类,零值表示属性分布没有空间自相关。计算公式^[30]如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} [\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]} \quad (4)$$

式中: n 为单元格总数; w_{ij} 为空间权重矩阵; x_i, x_j 为 x, j 所在单元格属性的值。

1.2.3 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性并揭示其影响因素的统计学方法,不仅可以定量给出每个影响因素的影响程度,还可以检测两个影响因素间是否存在交互作用以及交互作用的性质和影响程度。影响程度使用 q 值来表示,其范围为 $[0, 1]$,值越

高表明该因素的影响程度越大。计算公式^[30]如下：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{5}$$

式中： h 为变量 Y 或因子 X 的分层； N_h 为 h 层的单位个数； N 为全部区域的单位个数； σ_h^2 为 h 层 Y 值的方差； σ^2 为全部区域 Y 值的方差。

1.2.4 地理加权回归模型 地理加权回归模型是普通线性回归模型的扩展，考虑到了空间对象的局部效应。该模型以曲线拟合、平滑等局部加权回归的非参数方法为理论基础，将数据的地理位置信息通过权重嵌入到回归参数中，从而实现数据的局部空间变化估计，因此结果更为准确。计算公式^[25]如下：

$$y_i=\beta_0(U_i,V_i)+\sum_{k=1}^n\beta_k(U_i,V_i)x_k(U_i,V_i)+\epsilon_i \tag{6}$$

式中： (U_i,V_i) 为 i 的空间坐标； k 为独立变量个数； $\beta_0(U_i,V_i)$ 为 (U_i,V_i) 的地理加权回归截距； $\beta_k(U_i,V_i)$ 和 $x_k(U_i,V_i)$ 分别为 (U_i,V_i) 中 k 的地理加权回归系数和变量值； ϵ_i 为算法残差。

1.2.5 影响因素 生态安全的变化受自然因素、人为因素、景观因素等多个维度的复杂影响，探究这些影响因素对区域生态安全与可持续发展至关重要。本文在参考相关研究^[10-11,21-22]及专家意见的基础上，选定 10 个影响因素进行分析，具体见表 2。进行影响因素分析之前，通过相关分析来检测指标间的共线性以消除冗余，利用方差膨胀因子检验(VIF)进一步检查和选择自变量。经检验，表中所列 10 个影响因素的 VIF 系数均小于 10，共线性很弱，可以作为独立变量进行研究。

表 2 生态安全的影响因素

Table 2 Influencing factors of ecological security

类型	代码	影响因素	VIF
自然因素	X_1	年平均温度	3.030
	X_2	年降水量	2.767
	X_3	归一化植被指数	4.597
	X_4	人口密度	3.366
人为因素	X_5	城镇化率	3.497
	X_6	工业废水排放量	4.536
	X_7	政府环保投资	5.932
	X_8	最大斑块指数	5.448
景观因素	X_9	凝聚度指数	2.819
	X_{10}	香农多样性指数	8.288

1.3 数据来源

2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年长三角城市群土地利用类型数据(30 m×30 m)来自武汉大学遥感信息处理研究所公开数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>)。归一化植被指数数据(30 m×30 m)来自

国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>)。气象数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。统计数据来自区域内各省、市统计年鉴。

2 结果与分析

2.1 生态安全指标的时空分布格局

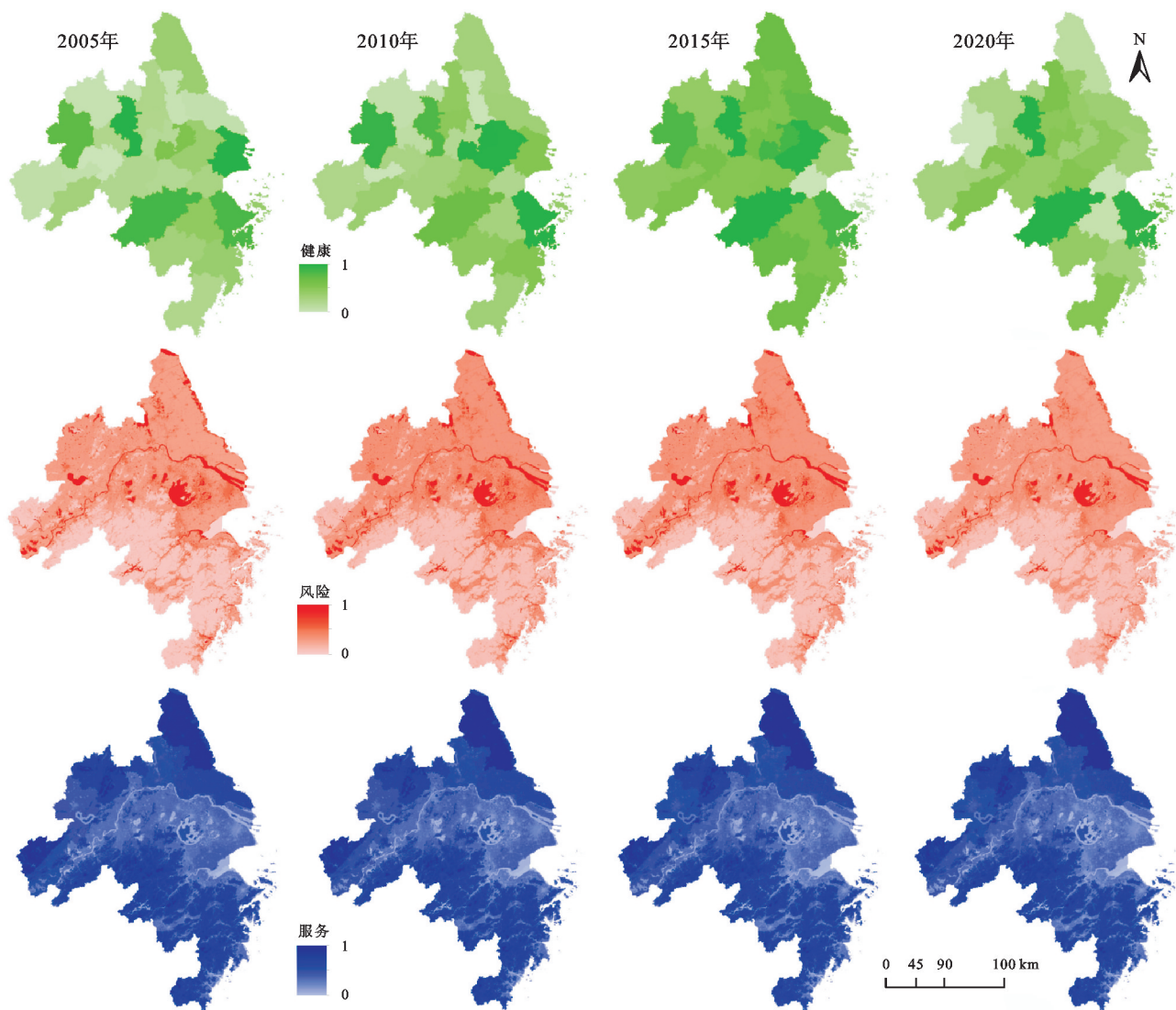
由图 1 可知，长三角城市群综合生态安全 3 个部分中变化最为显著的是生态系统健康，2005—2020 年长三角城市群的生态系统健康呈先升后降的趋势，但整体而言是有所改善的。高值主要位于南京、杭州等经济较为发达的城市，这些城市的生态安全保护意识更强，在生态安全方面的投入及相关措施更为完善。但值得注意的是上海作为我国经济实力领先的城市，其生态系统健康却处于较低水平，从指标层数据来看主要是上海市的归一化植被指数、建成区绿化覆盖率等指标都相对较低，加之人口密度过大导致其生态系统健康表现较差。生态风险方面，2005—2020 年长三角城市群生态风险的平均值呈不断上升的趋势，空间上从西南向东北逐渐增加。高风险地区主要分布于核心城市的周围，快速的城市化发展严重干扰了原有的生态格局，加剧了生态风险。低风险地区集中于西南地区，这里土地利用主要以林地为主，景观脆弱性较低，抵御外部干扰的能力更强。生态系统服务方面，2005—2020 年长三角城市群生态系统服务的综合水平总体呈下降趋势，东北地区 and 西南山区是生态系统服务的主要供应区，山区在生物多样性保护、水源保持、温度调节和文化服务方面具有优势，而东北平原地区以粮食生产为主。中部地区由于建筑用地的逐年扩大导致生态空间被不断蚕食，从而降低了生态系统服务的供应水平。

2.2 综合生态安全的时空分布格局

如图 2 所示，2005 年、2010 年、2015 年、2020 年长三角城市群的平均综合生态安全分别为 0.528，0.57，0.566，0.568，整体呈波动上升的趋势，这表明近年来长三角城市群的生态安全水平有所提升，这主要得益于各地的响应措施，在发展社会经济的同时兼顾生态安全保护，通过转变经济发展方式、加大生态保护投入等措施极大地改善了当地的生态安全水平。长三角城市群对装备制造等传统产业实行了绿色化智能化改造，有效降低了传统产业所带来的环境污染问题；并加快推动信息服务业绿色转型，发展了一批高性能绿色数据中心，为城市群生态治理提供技术支撑；此外，还通过协同开展湿地生态修复，积极推进淮河、新安江等 4 个生态廊道和皖西、皖南生态屏障建设，积极恢复生态系统的活力，推动城市群生态安全

水平的提升。但上升的趋势不太稳定,在 2010—2015 年有所降低,这表明长三角城市群的生态安全水平仍有较大的提升空间。这主要是由于区域的煤炭型能源结构、重化型产业结构、开发密集型空间结构尚未完全改变,污染减排的压力依然突出,此外在协同生态治理方面,各地短期内难以形成一盘棋,因此长三角城市群在推动解决生态重点问题、提升生态系统能力等方面还有待提升。从空间上看,区域间的综合生态安全水平存在差异,综合生态安全较高的

区域主要集中在长三角城市群的西南和北部地区:西南地区是由于该区域多为林地,生态环境基础较好且人类活动较少,北部地区则得益于天然的地理气候导致粮食产量较高,因此所创造的生态系统价值较大,此外,政府的相关举措也有力地改善了当地生态水平。综合生态安全落后的区域主要集中在长三角城市群的中部及东南沿海地区,这部分区域近年来发展迅速,城市的快速扩张以及人类的高强度活动导致这部分区域生态安全较差。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)1873 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 生态安全各指标的时空分布格局

Fig. 1 Temporal-spatial distribution pattern of ecological security indicators

此外,由表 3 看出,2005 年、2010 年、2015 年、2020 年的 Moran's I 指数在 $p=0.05$ 的显著性水平下均为正值,这表明长三角城市群生态安全存在显著的空间相关性。Moran's I 指数变化呈 U 型变化,自 2015 年后快速上升,这主要是因为长三角一体化发展战略实施之后,长三角城市群区域间关于生态保护的联系得到进一步加强。如在水环境保护方面形

成了跨省流域上下游突发事件联防联控机制,新安江-千岛湖生态保护补偿机制得到持续推广;探索出了跨区域投入共担、利益共享的财税分享管理制度等,这些举措都有力推动了研究区各城市间的沟通与合作。因此,长三角城市群未来的生态治理应打破行政区划界限,协同抓好区域内绿色发展,深入推动生态保护一体化与联防联控。

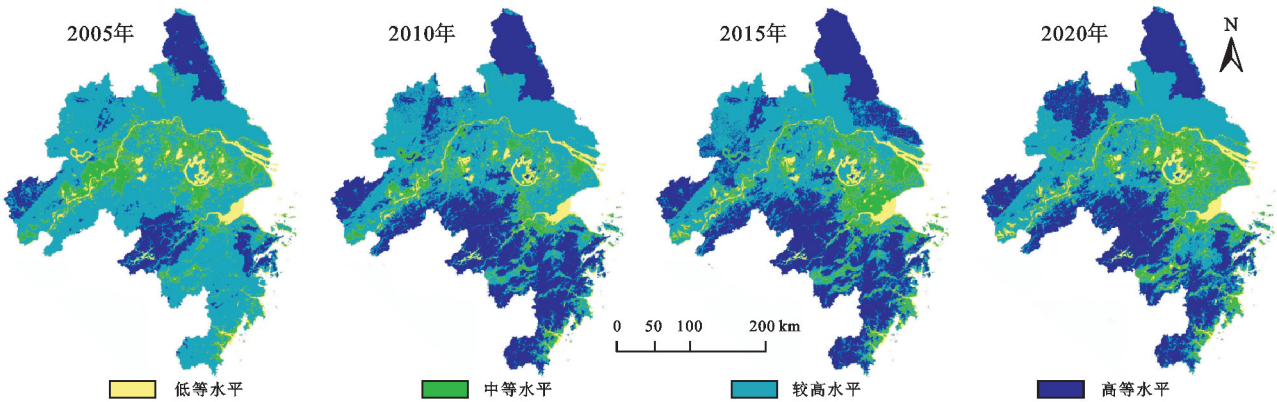


图 2 综合生态安全的时空分布格局

Fig. 2 Temporal-spatial distribution pattern of comprehensive ecological security

表 3 莫兰指数结果

Table 3 Results of Moran's *I*

年份	Moran's <i>I</i>	<i>p</i>
2005	0.2922	0.0089
2010	0.2396	0.0268
2015	0.1951	0.0296
2020	0.3218	0.0041

2.3 生态安全影响因素的相对重要性

据表 4 和图 3,自然因素方面,归一化植被指数的贡献率最高,其 q 值高达 0.753,是影响综合生态安全变化的主要因子;年降水量是次要影响因子, q 值为 0.435;气温对综合生态安全影响力最弱, q 值仅为 0.047。气温和降水变化直接关系到植物生长和生物多样性变化,而区域植被覆盖的增长能够有效增强自然生态系统结构的稳定性,从而改善生态环境的质量。人为因素方面,人口密度的贡献率最高,其 q 值为 0.435,长三角城市群的人口规模为全国城市群之首,且近年来仍在不断增加,过多的人口数量一方面增加了对各类资源的消耗压力,同时也导致大量的生活垃圾被排放到环境中,直接威胁到生态安全。城镇化率和工业废水排放量的 q 值分别为 0.229、0.162,对综合生态安全的影响较大,长三角城市群作为全国发展最为强劲的增长极,城镇化和工业化发展十分迅速,近年来建设用地的急剧扩张大量挤占了原有的生态空间,工业发展过程中所产生的废水排放直接加剧生态污染,导致长三角城市群所面临的生态挑战愈发突出。政府环保投资对综合生态安全的影响力最弱, q 值为 0.073。在严峻的生态形势之下,各地政府纷纷增加对生态治理方面的投资力度,以期生态安全水平有所改善,但目前囿于总量不足、效率不高等原因,改善作用十分有限。景观因素方面,最大斑块指数、香农多样性指数、凝聚度的 q 值分别为 0.553、0.475、0.454,表明其变化对综合生态安全的影响都比较明显。城镇化过程中多样化的土地利用形式会干扰原

有的景观生态格局,改变其连通性、多样性状态,进而影响到区域生态安全。此外,结果显示任意两个影响因素交互作用的 q 值均大于单一影响因素的 q 值,且大多数影响因素的交互作用都呈非线性增强,这表明长三角城市群生态安全的变化不是由单一影响因素所造成的,而是多种影响因素综合作用的结果。其中,归一化植被指数与香农多样性指数、归一化植被指数与工业废水排放量之间交互作用的影响程度均超过了 0.9,这表明城镇化建设、环境污染治理与生态多样性保护的协调发展对区域生态安全至关重要。

表 4 生态安全影响因素的地理探测结果

Table 4 Detection results of impact factors on ecological security

代码	指标	<i>q</i>
X_1	年平均气温	0.047 **
X_2	年降水量	0.435 ***
X_3	归一化植被指数	0.753 ***
X_4	人口密度	0.435 ***
X_5	城镇化率	0.229 ***
X_6	工业废水排放量	0.162 **
X_7	政府环保投资	0.073 **
X_8	最大斑块指数	0.553 ***
X_9	凝聚度指数	0.454 ***
X_{10}	香农多样性指数	0.475 ***

注:** 代表在 0.05 的显著性水平下显著;*** 代表在 0.01 的显著性水平下显著。

2.4 生态安全影响因素的空间异质性

自然因素的主导作用集中于西南地区,这些地区独特的地形和气候条件使自然生态系统对气温、降水和归一化植被指数的变化更加敏感。如图 4 所示,年平均气温对综合生态安全的驱动效应呈明显的负相关性且影响程度由北向南逐渐增加。年降水量对综合生态安全的驱动效应整体上呈正向影响,充足的降水不仅有利于植物生长,还为区域生产和生活提供了重要保障;负向影响集中于长三角城市群的东北区

域,这部分地区主要以种植粮食作物为主,适宜的降水有助于粮食产量的增加,但如遇台风等灾害会带来过多的降水量,从而导致粮食产量减少进而降低生态系统服务能力以影响其生态安全。归一化植被指数对综合生态安全的驱动效应呈明显的正相关性且影响程度自东北向西南逐渐增加,植被覆盖率的增加提高了生态系统服务的供应能力,并逐渐成为保障区域生态系统稳定性和可持续性的重要基础。

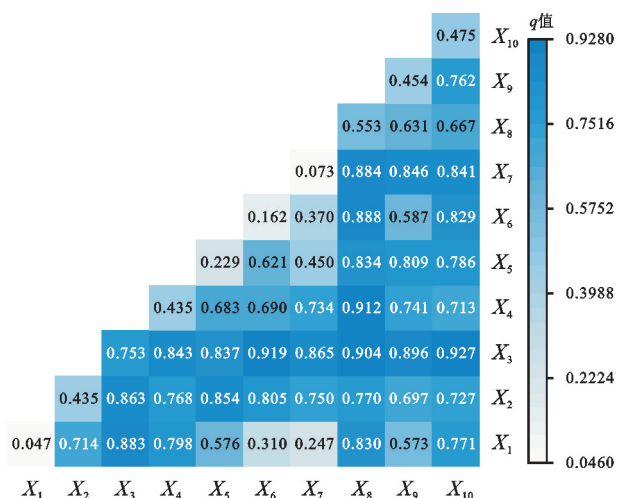


图 3 生态安全交互作用的地理探测结果

Fig. 3 Detection results of interaction affecting ecological security

人为因素对综合生态安全的影响主要分布在长三角城市群的中部和东部,尤其是上海、南京、杭州等核心城市周围,这些地区人口和产业高度聚集,生态压力较大,加之城市的持续扩张与污染排放,严重威胁区域生态安全。如图 5 所示,人口密度对综合生态安全的驱动影响最大,且表现出明显的负相关性,影响程度从西向东逐渐增加,沿海东部地区经济最为发达,从而吸引了大量的人口迁入,人口的急剧膨胀使得当地所面临的生态压力更为突出。城镇化率对综合生态安全的负面影响集中于西部部分城市,这些地区的城镇化进程正处于加速增长的阶段,城市的快速扩张给当地生态安全造成了很大影响;正面影响集中于中东部地区,这部分地区的城镇化进程已处于较高水平,增速较为缓慢且在发展的过程中对于生态保护的意识更为成熟,因此其城镇化率的上升对生态安全也起到一定的正面影响。工业废水排放量对综合生态安全的驱动影响呈明显的负相关性,且影响程度从西南向东北不断减弱,这主要受当地产业结构的影响,西南地区工业分布较多,东部地区以第三产业为主,因此工业数量较少。政府环保投资对综合生态安全的驱动影响呈明显的正相关性,且影响程度自西向东逐渐增加,经济发展水平较高的地区对于环保方面的投资力度往往更大。

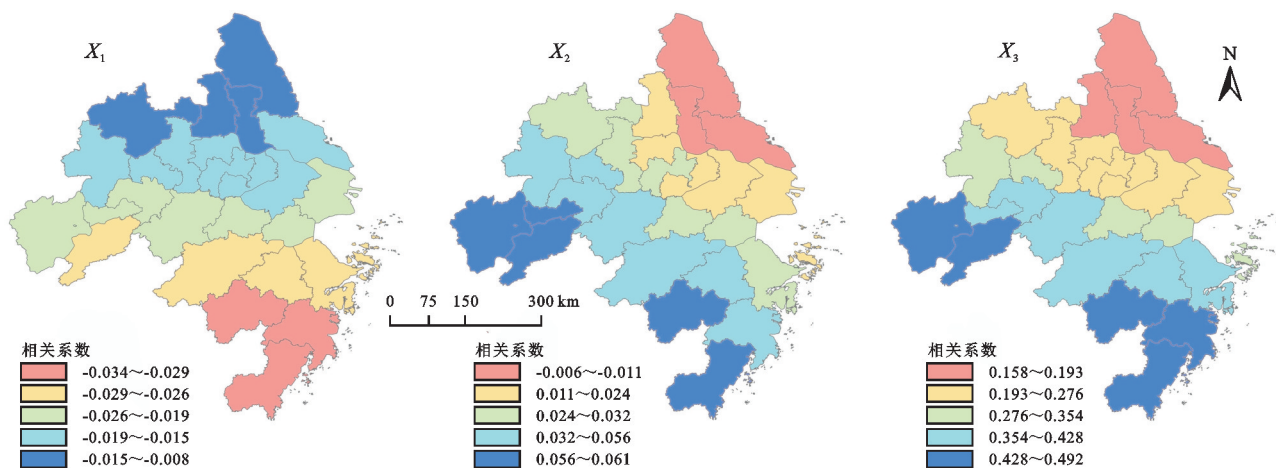


图 4 自然因子回归系数

Fig. 4 Regression coefficient of natural factors

景观因素对综合生态安全的影响与人类活动息息相关,长三角城市群东部地区人类活动频繁,使得景观格局向复杂、异质和不连续的混合斑块镶嵌体的趋势演变,西南地区人口密度较低,多为耕地、林地,景观格局呈均质、连续的特征,总体来看,景观因素在区域西南地区的影响更为明显。如图 6 所示,最大斑块指数和凝聚度对综合生态安全的影响程度趋势基本一致,均显示为从东北向西南不断增加,这主要是受到城镇化过程中土地利用变化的影响,西南地区由

于地形复杂使得土地开发强度受限,原有景观格局所受影响较小,正向作用更为显著。香农多样性指数对综合生态安全的驱动影响高值位于区域的东北及西南地区,这是由于地形的原因所致,西南地区分布有大量的林地,东北地区拥有较大面积的湿地,这对区域多样性有着有益的作用。其余地区显示为从西北向东南不断增加的趋势,这是受东南地区人类活动的影响,丰富的土地利用方式使得多样性指数较高,此外,虽然人类活动虽然对当地生态造成一定压力,但

通过对生态的人为干预,如植树造林等,对区域生态安全也有着积极的作用。因此,在规划建设时应将经

济社会发展与生态环境保护统筹考虑,最大化发挥其正向作用。

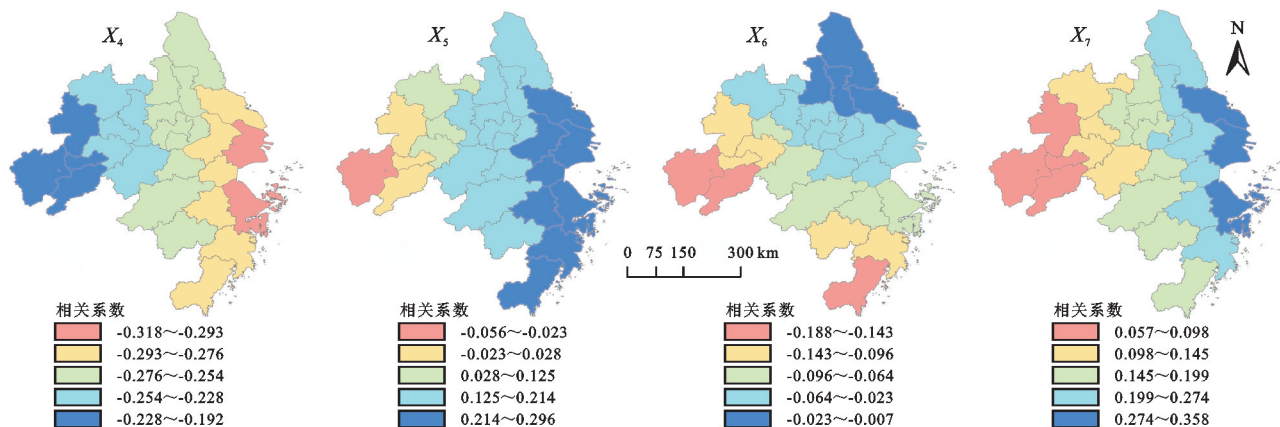


图 5 人类活动因子回归系数

Fig. 5 Regression coefficient of human activity factors

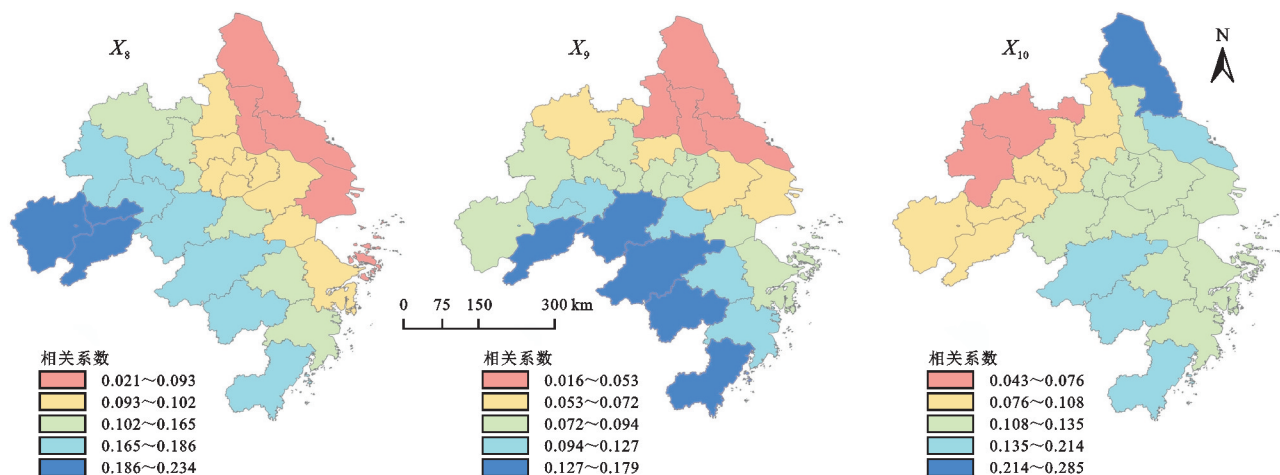


图 6 景观生态因子回归系数

Fig. 6 Regression coefficient of landscape ecology factors

3 结论与建议

3.1 结论

生态安全是区域高质量发展和生态文明建设的基础。研究通过对长三角城市群生态安全进行综合评价和影响因素分析,揭示了生态安全时空演变的发展规律,厘清了生态安全影响因素的作用机制,将有助于长三角城市群的生态保护和可持续管理。研究结果如下:(1) 2005—2020 年长三角城市群的生态安全水平从 0.528 增长到 0.568,生态安全水平呈现波动上升态势;但在空间分布上存在差异,总体呈西高东低的格局,且区域间生态安全水平有着显著的空间相关性,莫兰指数从 0.292 变化为 0.322。(2) 归一化植被指数是生态安全变化的主导性因素,影响程度高达 0.753,与单一因素相比,因素间的相互作用对长三角城市群生态安全变化的影响程度更大。(3) 各因素对综合生态安全的影响存在空间异质性,自然因素和景观因素对长三角城市群的西南地区影响较大,人类因素的影响

集中于中部平原及东部沿海地区。然而,尚有部分研究有待完善。一方面是本文对生态安全综合评价指标与影响因素的选取范围有限,未来可进一步丰富选取范围,结合更多维度的因素对生态安全的评价体系及驱动机制进行探索。另一方面是对于矢量数据本研究采用 ArcGIS 软件中矢量转栅格工具进行叠加分析,对评价结果的精确性有一定程度影响。

3.2 建议

作为全国高质量发展的排头兵,长三角城市群不仅要在经济发展上走在前列,也要在生态保护和建设上带好头。首先,要高标准攻坚污染防治。一方面要严格把控工业废水排放过量的作业项目,从源头上消除重大污染隐患,有效防范生态风险问题;另一方面要加大政府环保投资力度、注重政府环保投资方向,充分落实政府环保投资的实际效益,通过“防”和“治”双向发力,全面提升长三角城市群生态安全质量。再次,要高境界谋划土地利用。采取有针对性的生态资源和空间控制优化策略,如东部的上海、南京、杭州等

核心城市应通过疏通非必要社会功能来控制人口聚集和城市扩张,尽可能降低城镇化对生态安全所带来的负面影响。而西南一带的山区应持续开展生态修复工程,通过增加植被覆盖度等措施推进生态系统和生物多样性恢复。最后,要高水平加强共保联治。研究区各城市的生态安全水平有着显著的空间关联,因此在展开生态治理时应加强与周边城市的合作,通过学习生态安全高水平地区的先进经验进一步提升自身的生态治理能力,此外,对于跨区域的生态环境问题可以通过政策协同与工作联动予以有效解决,为我国生态环境保护区域协作做出良好示范。

参考文献(References):

- [1] Peng C C, Li B, Nan B. An analysis framework for the ecological security of urban agglomeration: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,315:128111.
- [2] 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 T G, Qiu R, Zhao Q, 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.
- [3] Lu Z Y, Li W, Yue R W. Investigation of the long-term supply-demand relationships of ecosystem services at multiple scales under SSP-RCP scenarios to promote ecological sustainability in China's largest city cluster[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024,104:105295.
- [4] 祁强强,徐占军.生态安全格局时空演变分析:以太原城市群为例[J].*中国环境科学*,2023,43(11):5987-5997.
- Qi Q Q, Xu Z J. Analysis on the spatio-temporal evolution of ecological security patterns: a case study over Taiyuan Urban Agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2023,43(11):5987-5997.
- [5] 邹永德,兰安军,范泽孟,等.“三生空间”视角下贵州省景观生态安全评价及其耦合特征分析[J].*水土保持研究*,2024,31(3):432-442.
- Zou Y C, Lan A J, Fan Z M, et al. Evaluation of landscape ecological security and its coupling characteristics analysis in Guizhou Province from the perspective of production-living-ecology space[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):432-442.
- [6] 万世龙,杨海楠,马丽,等.黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系[J].*资源科学*,2024,46(3):505-523.
- Wan S L, Yang H N, Ma L, et al. Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization in the Yellow River Basin urban agglomeration[J]. *Resources Science*, 2024,46(3):505-523.
- [7] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*,2022,77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.
- [8] 朱青,蔡永立.生态风险与生态系统健康对生态系统服务的影响[J].*地理学报*,2024,79(5):1303-1317.
- Zhu Q, Cai Y L. Impact of ecological risk and ecosystem health on ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024,79(5):1303-1317.
- [9] Zhang R, Wang C L, Xiong Y C. Ecological security assessment of China based on the Pressure-State-Response framework[J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110647.
- [10] 王梓洋,石培基,张学斌,等.基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复:以酒泉市肃州区为例[J].*自然资源学报*,2022,37(10):2736-2749.
- Wang Z Y, Shi P J, Zhang X B, et al. Grid-scale-based ecological security assessment and ecological restoration: a case study of Suzhou District, Jiuquan[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(10):2736-2749.
- [11] 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.
- Wu Y X, Qiu L. Analysis and prediction of temporal and spatial evolution of land ecological security in Yellow River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(4):258-265.
- [12] Zhang J J, Hao X M, Li X W, et al. Evaluation and regulation strategy for ecological security in the Tarim River Basin based on the ecological footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,435:140488.
- [13] Jing P R, Sheng J B, Wang Y, et al. Assessing the ecological security of the Three Gorges reservoir complex ecosystem based on the improved three-dimensional emergy ecological footprint model[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,933:173086.
- [14] Bian H N, Li M R, Deng Y L, et al. Identification of ecological restoration areas based on the ecological safety security assessment of wetland-hydrological ecological corridors: a case study of the Han River Basin in China[J]. *Ecological Indicators*, 2024,160:111780.
- [15] Chen J Y, Huang X H, Jing Y, et al. Spatial and temporal variation and driving factors of ecological carrying capacity in the Pan-Pearl River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023,151:110318.
- [16] 李瑞发,崔旺来,司凌涵,等.浙江大湾区生态安全预警及障碍因子分析[J].*生态环境学报*,2023,32(10):1861-1872.
- Li R F, Cui W L, Si L H, et al. Ecological security early warning and obstacle factor analysis in the Zhe-

- jiang Greater Bay Area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023,32(10):1861-1872.
- [17] Huang F X, Zuo L Y, Gao J B, et al. Exploring the driving factors of trade-offs and synergies among ecological functional zones based on ecosystem service bundles[J]. *Ecological Indicators*, 2023,146:109827.
- [18] Liu C L, Li W L, Xu J, et al. Temporal and spatial variations of ecological security on the northeastern Tibetan Plateau integrating ecosystem health-risk-services framework[J]. *Ecological Indicators*, 2024,158:111365.
- [19] 徐小鹰,田焱焱.长三角城市群科技创新、经济增长与生态环境的时空耦合及趋势预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2023,32(4):706-720.
- Xu X Y, Tian Y Y. Spatial-temporal evolution and trend prediction of coupling coordination among technology innovation, economic growth and ecological environment in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023,32(4):706-720.
- [20] 中华人民共和国中央人民政府.习近平在扎实推进长三角一体化发展座谈会上强调:紧扣一体化和高质量抓好重点工作推动长三角一体化发展不断取得成效[EB/OL]. (2020-08-22)[2024-06-05]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-08/22/content_5536613.htm.
- The Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping emphasized at the symposium on solidly promoting the integrated development of the Yangtze River Delta: focus on integration and high-quality advancement of key tasks to continuously achieve results in promoting the integrated development of the Yangtze River Delta[EB/OL]. (2020-08-22)[2024-06-05]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-08/22/content_5536613.htm.
- [21] 张中浩,聂甜甜,高阳,等.长三角城市群生态安全评价与时空跃迁特征分析[J]. *地理科学*, 2022,42(11):1923-1931.
- Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. Ecological security assessment and spatio-temporal transition characteristics in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022,42(11):1923-1931.
- [22] 王祥荣.长三角生态安全保障研究已成重大战略需求[EB/OL]. (2022-11-16)[2024-06-05]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_20759567.
- Wang X R. Research on ecological security guarantee in the Yangtze River Delta has become a major strategic requirement[EB/OL]. (2022-11-16)[2024-06-05]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_20759567.
- [23] 申罡.中国城市群的环境品质和挑战:中国城市综合发展指标 2022 环境大项[EB/OL]. (2023-12-22)[2024-06-05]. http://www.china.com.cn/opinion/think/2023-12/22/content_116897480.shtml.
- Shen G. Environmental quality and challenges of Chinese urban agglomerations: comprehensive development index of Chinese cities in 2022 environmental category[EB/OL]. (2023-12-22)[2024-06-05]. http://www.china.com.cn/opinion/think/2023-12/22/content_116897480.shtml.
- [24] 刘陈立.基于生态系统健康-风险-服务的甘南高寒牧区生态安全评价[D].兰州:兰州大学,2022.
- Liu C L. Integrating ecosystem health, ecological risk and ecosystem services to assess ecological security in Gannan alpine pastoral region, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [25] Li W J, Kang J W, Wang Y. Spatiotemporal changes and driving forces of ecological security in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration, China: quantification using health-services-risk framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,389:136135.
- [26] Shen W C, Zhang J J, Wang K, et al. Identifying the spatio-temporal dynamics of regional ecological risk based on Google Earth Engine: a case study from Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,873:162346.
- [27] 王玲,汪森.成渝城市群景观生态风险演变分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2023,32(3):626-637.
- Wang L, Wang M. Chengdu-chongqing urban landscape ecological risk evolution analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023,32(3):626-637.
- [28] 中华人民共和国生态环境部.生态环境部有关负责人就《长江三角洲区域生态环境共同保护规划》答记者问[EB/OL]. (2021-01-14)[2024-06-05]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202101/t20210114_817431.shtml.
- Ministry of Ecology and Environment of the people's Republic of China. Officials from the ministry of ecology and environment answer questions from reporters on the 'Planning for joint protection of the ecological environment in the Yangtze River Delta region'[EB/OL]. (2021-01-14)[2024-06-05]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202101/t20210114_817431.shtml.
- [29] 李成,赵洁,庄智程,等.长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素[J]. *生态学报*, 2022,42(14):5708-5720.
- Li C, Zhao J, Zhuang Z C, et al. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of ecosystem service trade-offs in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(14):5708-5720.
- [30] 朱丹丹,安睿,刘艳芳,等.湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2024,33(4):799-809.
- Zhu D D, An R, Liu Y F, et al. Analysis of spatial-temporal difference in synergistic trade-offs of ecosystem services in Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024,33(4):799-809.