

DOI: 10.5846/stxb202112073467

崔旺来, 陈梦圆, 钟海玥. 基于探索性空间数据分析和地统计分析的湾区生态安全空间分异及差异化管理——以浙江大湾区为例. 生态学报, 2023, 43(5): 2074-2087.

Cui W L, Chen M Y, Zhong H Y. Spatial differentiation and differentiated management of ecological security in the Bay Area based on ESDA and GA: A case study of the Zhejiang Greater Bay Area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2074-2087.

基于探索性空间数据分析和地统计分析的湾区生态安全空间分异及差异化管理 ——以浙江大湾区为例

崔旺来, 陈梦圆, 钟海玥*

浙江海洋大学经济与管理学院, 舟山 316022

摘要: 湾区是世界一流滨海城市的显著标志, 生态安全是湾区可持续发展的基本保障。以浙江大湾区为研究区域, 基于生态安全评价, 采用探索性空间数据分析(ESDA)和地统计分析(GA)方法揭示生态安全的空间相关性与异质性。结合大湾区生态安全空间特征、未来土地利用管理和行政单元的空间分布提出生态保护的差异化管理策略, 为大湾区经济社会发展及生态安全保障提供理论支撑。结果表明: ①生态安全呈现出“北低南高”的分布格局, 生态安全区占比 71.7%, 生态系统整体较安全。②生态安全莫兰指数 Moran'I 值达 0.878, “热点”区域占比 50.65%, 空间正相关性显著。结构性变异在生态安全空间分布中占据主导, 宁波、绍兴受结构性变异和随机性变异的综合影响, 人口密度、产业布局是影响生态安全空间异质性的主要随机因素。③城市发展类型分为优先发展区、综合开发区和生态保护区, 其中优先发展区和综合开发区是大湾区经济发展重点区域, 生态保护区是保障大湾区生态安全的关键区域, 未来城市管理者应对生态环境分区管理, 落实差异化管控措施。

关键词: 探索性空间数据分析(ESDA); 地统计分析(GA); 空间分异; 生态安全; 浙江大湾区

Spatial differentiation and differentiated management of ecological security in the Bay Area based on ESDA and GA: A case study of the Zhejiang Greater Bay Area

CUI Wanglai, CHEN Mengyuan, ZHONG Haiyue*

School of Economics and Management, Zhejiang Ocean university, Zhoushan 316022, China

Abstract: Bay Area is a prominent symbol of world-class coastal cities, and ecological security is the basic guarantee of sustainable development of the Bay Area. This paper takes the Zhejiang Greater Bay Area as the research object, based on the ecological security evaluation results using Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) and Geostatistical Analysis (GA) to reveal the spatial correlation and heterogeneity of ecological security. Combining with the spatial characteristics of ecological security and the spatial distribution of land use management in the future and administrative units in Bay Area, the paper offers the differentiation strategy of ecological protection for the Zhejiang Greater Bay Area's economic and social development and ecological security to provide scientific support. The results showed that: (1) the spatial pattern of ecological security was “north-low and south-high”, and the proportion of ecological security area was 71.7%. Overall ecosystem was safe. (2) The Moran'I value of ecological security reached 0.878, and the proportion of hot spot area was

基金项目: 国家社会科学基金项目(20BZZ063)

收稿日期: 2021-12-07; 网络出版日期: 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhonghaiyue_zjou@163.com

50.65%, indicating the significantly positively spatial correlation. Structural variation dominated the spatial distribution of ecological security. Ningbo and Shaoxing were influenced by structural variation and random variation. Population density and industrial layout were the main random factors affecting the spatial heterogeneity of ecological security. (3) The urban development types were divided into optimization development zones, comprehensive development zones and ecological conservation development zones, among which the optimization development zones and comprehensive development zones were the vital areas for the economic development, and ecological conservation development area was the key area to ensure the ecological security of the Zhejiang Greater Bay Area. In the future, governments should adopt and implement the differentiated measures for ecological protection.

Key Words: ESDA; GA; spatial differentiation; ecological security; the Zhejiang Greater Bay Area

生态文明的核心是人与自然和谐发展^[1],而城市已成为人与自然冲突的主要单元^[2]。建设生态城市是人类探索与自然和谐相处聚居模式的智慧选择^[3],区域生态安全是现代城市健康发展的重要内容^[4],保障区域生态安全需依托科学合理的城市生态安全格局^[5]。中国城镇化已进入高速增长期,《中国农村发展报告2020》预计,到2025年中国城镇化率将达65.5%。作为人类生存的重要栖息场所,城市发展离不开土地资源的开发^[6],城市人口集聚、经济增长及产业发展需要更多的城市建设用地^[7],如何平衡城市生态用地与建设用地的关系已成为广泛关注且亟待解决的重要科学问题。

生态安全已被各国政府提升到国家战略高度,是构建国土空间安全的重要一环^[8]。现有文献从全球^[9]、跨国^[10]、国家^[11]、区域^[12]和城市^[13]等空间尺度对林地、草地、耕地、水域和城市建设用地的生态安全展开研究,主要集中在时空格局^[14-15]、驱动因素^[16-17]、演化机制^[18-19]、模拟预警^[20-21]等方面。从研究视角来看,主要侧重于生态系统内部要素的优化探索,尚没有从生态安全角度对城市国土空间开发格局优化做出充分解释,尤其是针对湾区城市群生态安全的研究较少^[18]。

生态安全评价是生态安全研究的核心^[21],评价方法包括指标赋权和评价模型两方面,指标赋权包括层次分析法^[22-23]、熵权法^[24-25]、灰色关联度^[26-27]等;评价模型包括压力-状态-响应(PSR)及其扩展模型^[28-29]、景观与景观生态模型^[30-31]和地理信息系统(GIS)模型模拟^[21,32]等,为区域生态安全研究提供了量化技术手段。随着城市化程度的加深,土地需求激增和资源约束趋紧的矛盾使人类剧烈地改变着城市的地表形态和景观格局,城市生态系统由原本单一、均质、整体和连续逐渐趋向于复杂、异质和不连续^[33]。探索性空间数据分析(ESDA)和地统计分析(GA)是探索空间相关性和异质性的常用方法,用于描述和显示地理变量的空间异质分布模式,揭示地理变量的空间分布特征、规律及趋势等,对生态系统结构和功能优化具有重要作用^[34]。

湾区是世界一流滨海城市的显著标志,推动湾区发展已然成为世界各国发展开放型经济、确立战略优势的重要经验^[35]。浙江大湾区作为我国城市化进程最为猛烈、过程最为剧烈的地区,多重国家战略叠加实施,建设用地特征与空间形态变化极具典型性。《浙江省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》明确提出要“建设引领未来的现代化大湾区”。伴随着浙江大湾区人口快速增长和资源消耗剧增,造成土地用养矛盾加剧、结构性用地矛盾凸显、生态效应不断减弱等严重生态环境问题,生态安全风险明显增加。本文基于土地利用数据借助遥感(RS)和GIS技术,建立生态安全评价指标体系,评价浙江大湾区生态安全状况,采用ESDA和GA方法揭示区域整体生态安全空间分异特征及区域间的依赖关系即空间自相关关系,旨在从国土空间规划角度提出湾区生态安全的差异化应对策略,以期为湾区生态保护及可持续发展的相关决策制定提供科学参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

浙江大湾区地处中国东海岸,位于长三角南翼,以环杭州湾经济区为核心,涵盖杭州、湖州、嘉兴、绍兴、宁

波、舟山、温州、台州 8 个市,包括 65 个县(市、区),属亚热带季风气候。浙江大湾区介于 $27^{\circ}03'N$ 至 $31^{\circ}11'N$, $119^{\circ}14'E$ 至 $123^{\circ}25'E$ 之间,土地总面积约为 $6.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,占浙江省总面积的 64%(图 1)。海岸线长度为 6696km,居我国首位。拥有海岛 4350 个,约占全国总数的 40%。渔业、旅游、港口、油气四大资源得天独厚,其中渔业资源年蕴藏量达到 $4 \times 10^6 \text{ t}$ 。凭借其最佳地缘区位、最为活跃市场、最高开放水平等多重优势,浙江大湾区成为我国现代化进程最快的区域。2000—2020 年间,浙江大湾区城镇人口从 830.85 万增至 3892.89 万,常住人口城镇化率从 24% 增至 73%。2020 年浙江大湾区 23 城入选中国百强县,其 GDP 达 56871.62 亿元,约占长三角国内生产总值(GDP)的 24%,约占全国 GDP 的 5.60%。浙江大湾区建设的快速推进,也造成了土地资源供需矛盾激增、土地利用结构失衡、生态系统服务功能下降等严重的生态环境问题,给大湾区生态安全和可持续发展带来了巨大挑战。

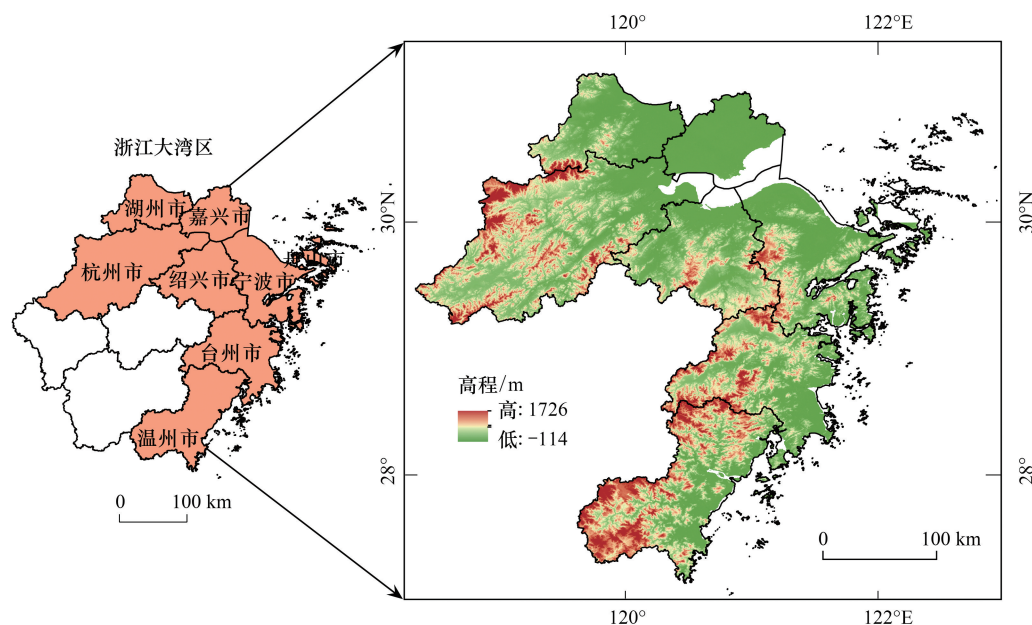


图 1 浙江大湾区范围

Fig.1 Spatial schematic diagram of the Zhejiang Greater Bay Area

1.2 数据来源

2018 年浙江大湾区 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 土地利用类型、植被归一化指数(NDVI)数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。30m $\times$ 30m 高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。土壤特征数据来自统一的世界土壤数据库(<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>)。降雨侵蚀力数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。降水和气温数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)。浙江大湾区社会经济数据来自《2020 年浙江统计年鉴》(<http://tjj.zj.gov.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态安全评估指标体系

生态系统安全受控于自然环境要素、生物要素和社会经济要素等多种因素^[36],反映生态系统结构、功能、服务等健康和稳定。本文梳理浙江大湾区近年的生态环境问题,参考前人研究成果^[37–39]构建指标体系(表 1),指标选择遵循科学性、可获得性等原则,以期能够科学评价和综合分析大湾区的生态安全状况。

评价指标对不同地域有不同的适用性,大湾区经济活动频繁,更突出外界干扰对生态环境的压力。因此,生态安全评估除考虑生态系统结构、功能等外,还须考虑人类活动对生态安全的影响。本文选取地形与景观、

景观活力、生态系统服务价值、水土保持、人为干扰 5 项一级指标和 9 项二级指标,由层次分析法计算权重^[34]。地形与景观格局反映城市生态系统的结构和空间特征^[40],基于景观格局指数是评估生态系统质量的主要方法,景观格局指数利用 Fragstats 4.2 提取。景观活力是衡量生态系统生物丰度必不可少的因素,植被是生态系统的主体和构造基础^[41],对维持和恢复生态系统功能发挥重要作用。生态系统服务价值反映生态系统质量,城市作为生态系统服务的重点区域,生态系统服务价值直接影响城市生态安全。水土保持能力是衡量生态系统功能的指标之一,水土流失是各类生态退化的集中反映^[38]。浙江大湾区地面沉降、水土流失和突发性地质灾害问题日益严重,严重影响了区域生态安全。人类活动是生态系统退化的主要触发因子^[39],影响生态系统的稳定性和恢复力。一般来说城市化程度越高,生态安全值越低,对其反向归一计算^[42]。

表 1 浙江大湾区生态安全评估指标体系

Table 1 Suitable ES assessment indicators in three layers for the Zhejiang Greater Bay Area

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标释义 Interpretation of indicators	公式 Formula	权重 Weight
地形与景观 Topography and landscape	坡度(S)	衡量地形对景观分异的影响	高程数据提取坡度	0.1396
	景观分形维数(D)	衡量景观斑块边界的不规则性、复杂性; P 指斑块周长, A 指斑块面积	$D_i = 2\ln\left(\frac{P}{4}\right) / \ln A$	0.0267
	景观破碎度(C)	衡量景观空间结构复杂程度; N_i 指第 <i>i</i> 类景观的斑块数量, A_i 指第 <i>i</i> 类景观的斑块面积	$C_i = N_i / A_i$	0.0882
	景观脆弱性(V)	衡量景观的脆弱程度;按其程度将裸地、水域、农田、草地、森林和建筑区分别赋值 6、5、4、3、2 和 1; X_i 指各土地利用类型所赋值, $X_{\max}$ 指土地利用类型所赋最大值, $X_{\min}$ 指土地利用类型所赋最小值	$V_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - V_{\min}}$	0.0512
景观活力 Landscape vigor	植被归一化指数(NDVI)	衡量地区植被面积占有情况以及植被资源丰富程度	最大值合成处理 MODIS 遥感数据	0.1893
生态系统服务 Ecosystem service	生态系统服务价值(ESV)	衡量生态系统服务功能; X_1 指耕地面积、 X_2 指林地面积、 X_3 指草地面积、 X_4 指水域面积 ^[20—21]	$ESV = 820260.95 \times X_1 + 3940320.9 \times X_2 + 1787961.33 \times X_3 + 5971781.53 \times X_4$	0.0996
水土保持能力 Soil conservation	水土保持量(A_c)	衡量土壤的水保能力; A_p 单位面积年均土壤流失量, A_r 指实际侵蚀量, R 指降雨侵蚀力, K 指土壤可蚀性, L 和 S 指坡长和坡度, C 指植被覆盖, P 指水土保持措施无量纲	$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	0.0553
人为干扰 Human interference	人均 GDP(G)	衡量地区经济发展状况; D 指 GDP 总额, P 指人口总量	$G = \frac{D}{P}$	0.1431
	城市化水平(U)	衡量人口结构; B 指城市人口数量, P 指城市人口总量	$U = \frac{B}{P}$	0.2068

NDVI:植被归一化指数 Normalized difference vegetation index;ESV:生态系统服务价值 Ecosystem service value;MODIS:中分辨率成像光谱仪 Moderate-resolution imaging spectroradiometer;GDP:国内生产总值 Gross domestic product

2.2 生态安全

湾区自然资源和环境状况、经济社会发展水平等存在巨大差异,导致湾区生态安全在空间结构上呈现非均衡性、在空间分布上呈现异质性。由于指标数据像元大小不统一,考虑数据叠加和软件处理的可获得性,利用 ArcGIS 以 1km×1km 为单位进行网格化处理。另外,由于指标数据单位不同,数据之间缺乏可比性,对各指标数据分别进行归一化处理,数据值均在[0,1]之间,将归一化后的指标图层加权叠加生成生态安全^[32],公式如下:

$$ES = \sum_{i=1}^9 W_i \times Y_i \tag{1}$$

ES 表示生态安全, W_i 表示第 i 个指标的权重, Y_i 是第 i 个指标的归一化值。

2.3 空间统计

2.3.1 探索性空间数据分析

ESDA 基于空间样本值之间的相关性及其程度分析来探索空间对象的分布特征^[43],包括全局自相关和局部自相关分析。本文用全局莫兰指数 Moran'*I* 系数和局部自相关统计量 (LISA) 分析浙江大湾区生态安全的空间相关性,公式如下:

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

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_j (x_i - \bar{x})^2$$

式中, Moran'*I* 表示全局自相关, *n* 表示空间单元个数, x_i 和 x_j 表示在空间位置 *i* 和 *j* 的 ES 值, W_{ij} 表示空间权重矩阵。 Moran'*I* 值在 $[-1, 1]$ 之间, 若 Moran'*I* 在 $[0, 1]$ 之间, 则为空间正相关; 若 Moran'*I* 在 $[-1, 0]$ 之间, 则为空间负相关。 Moran'*I* 的绝对值越小, 空间随机性越大, 即空间相关性越小。

全局自相关表示研究区域整体上的相关性, 而局部自相关则表示空间上具体范围的相关性, 公式如下:

$$\text{LISA}_i = \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S^2} \sum_j W_{ij} (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

式中, LISA_i 表示局部自相关, x_i 、 x_j 和 W_{ij} 的含义如前。一般 LISA_i 值大于 0 表示该区域单元周围相似值在空间上的集聚, LISA_i 值小于 0 表示非相似在空间上的聚集。

2.3.2 地统计分析

半方差分析是 GA 特有的工具, 能够识别空间异质性规律, 反映生态安全的空间结构特点。区域化变量是地统计分析的理论基础之一, 具有随机性和结构性两个显著特征。随机性因素指使区域变量具有局部、随机、异常的特征的影响因素^[44], 如人口集聚活动、城市规划开发区、产业园建设等社会经济因素, 其引起的空间变异称为随机性变异。结构性因素指使区域变量在空间位置上具有某种程度的相似性即自相关的影响因素, 如气候、水源、地形和景观等自然因素, 其引起的空间变异称为结构性变异。生态安全是典型的区域化变量, 本文采用该方法分析其空间特征, 计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

式中, $\gamma(h)$ 表示半方差值, $i = 1, 2, \dots, N(h)$, *h* 表示配对取样的空间距离, $N(h)$ 表示抽样间距为 *h* 时样点对应的总数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别表示随机函数 *Z* 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的值。

3 结果分析

3.1 生态安全指标评估

地形与景观、植被覆盖率、生态系统服务、水土保持能力和人类活动都是影响区域生态安全的重要因素。本文利用 ArcGIS 采用自然断点法 (Jenks) 将 2018 年指标图层分为 5 个等级^[42] (图 2), 等级越高对生态安全的贡献度越大。

地形与景观格局是维系区域生态系统安全稳定的重要因素。浙江大湾区地形与景观格局 1—3 等级占比超过 64%, 4—5 等级占比约 36%, 总体呈低水平。宁波北部的土地利用类型是农田, 该区域地势平坦景观破碎度较低、水土涵养能力强; 杭州千岛湖流域高值区林地保有率高, 自然生态环境良好。

植被具有涵养水源、改善局地小气候等作用, 植被覆盖度及其变化是反映生态系统变化的重要指标^[41]。2018 年 NDVI 年均值达 0.74, 浙江大湾区城市绿地率高。杭州西部、台州等林草地是植被覆盖高值区, 杭嘉宁城建成区由于地面硬化植被覆盖率普遍偏低, 其中杭州、宁波和嘉兴建成区绿化覆盖率均在 40% 以下。

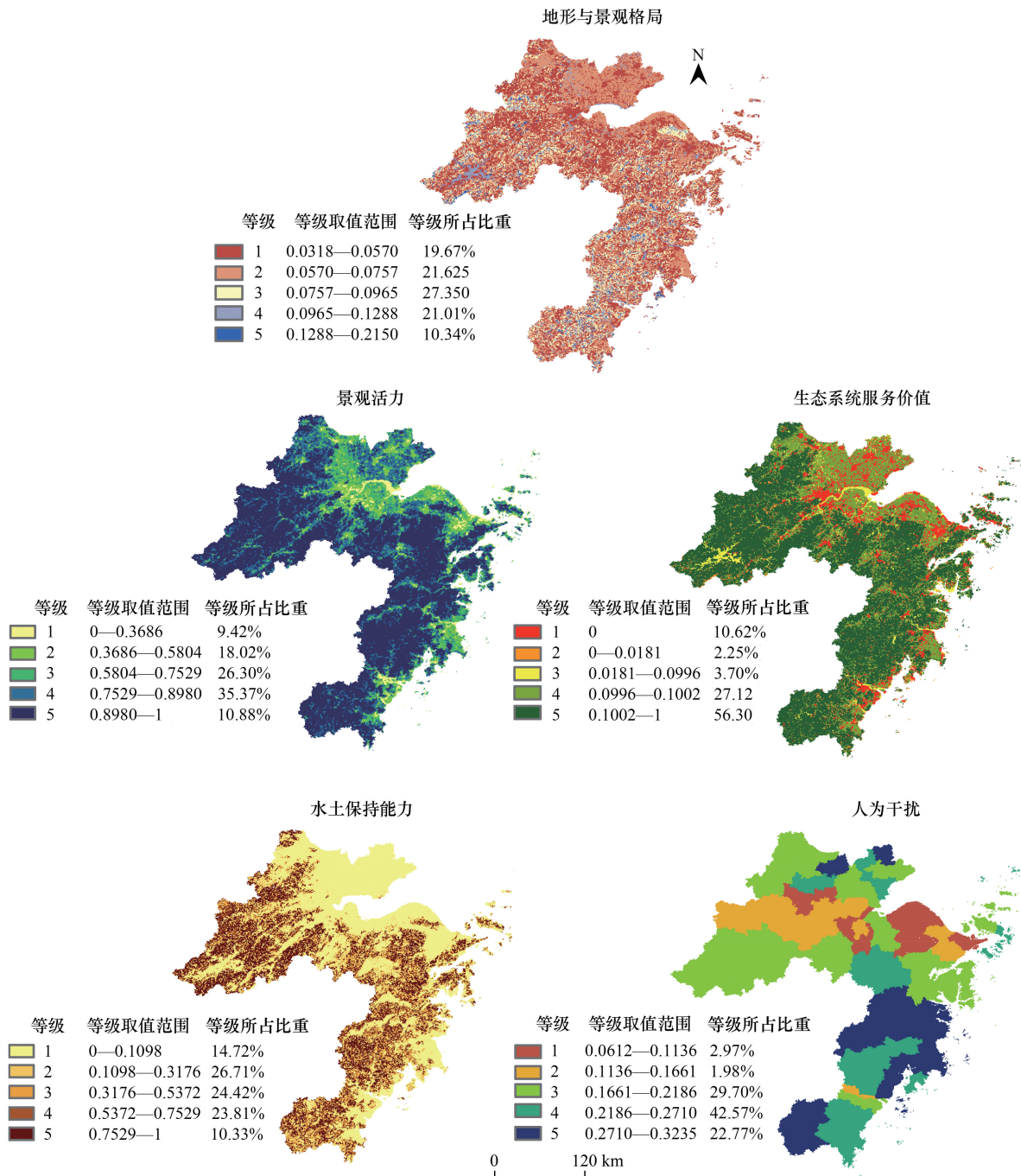


图2 生态安全指标空间分布图

Fig.2 The spatial distribution maps of ES indicators

生态系统服务价值反映生态系统的功能和状态,包括食物供给、能量产出、固碳释氧和生境维持等方面^[37]。浙江大湾区半数以上地区的生态系统服务价值为高等级,整体上生态系统能满足区域发展所需。高值区集中在杭州、台州和温州林地集中的山地地区。城市是生态系统服务的重点地区,但低值区呈斑块状零散分布于杭嘉宁和东南滨海岸地区,与城建用地大致重合,说明城市生态系统服务价值供给与需求不相适配。

土壤保持量反映地区的水土保持能力,综合来看浙江大湾区总体呈西高东低、南高北低分布。舟山和嘉兴因森林生态系统较少,土壤保持量最低;杭州、温州土壤保持量较高。另外土地利用类型也影响土壤侵蚀强度,林地、建筑用地和水域为轻度侵蚀,草地和农田程度侵蚀程度较明显。2019年浙江大湾区水土流失面积

4973.25m²,按水土流失强度分,剧烈、极强烈、强烈、中度、轻度分别占水土流失总面积的 0.26%、1.6%、2.61%、5.97%和 89.56%。

人为干扰反映浙江大湾区社会经济活动强度,图 2 中等级越低表示人口越密集、工业活动越频繁,对生态环境破坏的可能性越大。2000—2020 年,浙江大湾区发展迅速,高度城市化带来人口大量涌入,常驻人口增加了 1540.89 万人,年均增速高达 2.06%,人口密度增加至 769 人/km²,较原来增加 41%,人口吸引力强,但人口集聚对生态安全的压力与日俱增。

3.2 生态安全空间特征

目前,国内外对生态安全评价结果分级标准的界定尚未统一,分级依据通常以定性方法为主。有研究显示,生态安全空间自相关系数对 5 级分类响应程度较高^[45],本文利用自然断点法(Jenks)将生态安全从低到高分 5 级(图 3),并统计生态安全分级标准和占比情况(表 2)。1—2 级称生态不安全,包括不安全、相对不安全;3—5 级称生态安全,包括一般安全、相对安全和安全。生态安全 1—5 等分别占比 6.62%、21.69%、33.05%、23.55%和 6.62%,其中一般安全等级占比最大,不安全等级占比最小。

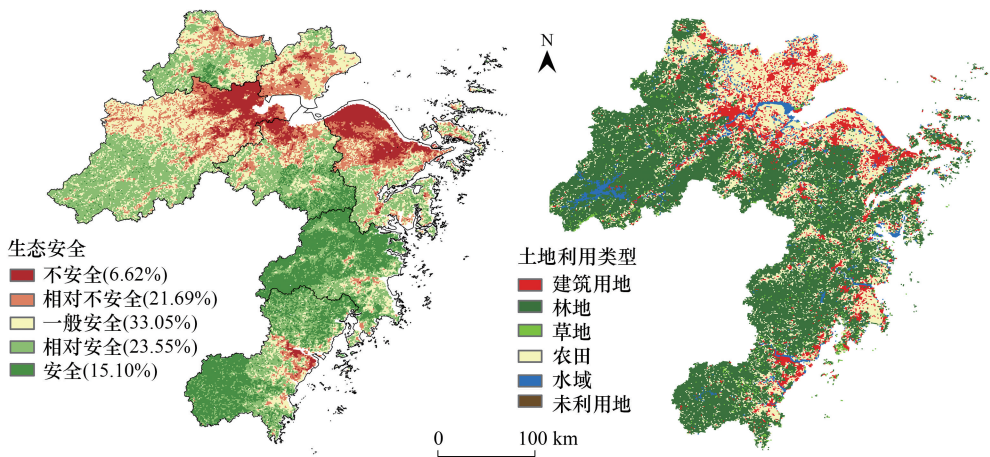


图 3 浙江大湾区生态安全和土地利用类型

Fig.3 ES and types of land use in the Zhejiang Greater Bay Area

表 2 浙江大湾区生态安全分级标准

Table 2 ES grading standards of Zhejiang Greater Bay Area

等级 Grades	分级标准 Grading standard	比例 Proportion	安全特征描述 Description of safety features
不安全 Unsafety	<0.4716	6.62%	生态系统结构遭到破坏,生态系统功能下降,生态环境勉强满足发展需求
相对不安全 Relative unsafety	0.4716—0.5572	21.69%	生态系统结构发生重大变化,出现生态环境问题,生态环境基本满足发展需求
一般安全 General safety	0.5572—0.6282	33.05%	生态系统结构发生可逆变化,生态系统功能基本正常,比较满足发展需求
相对安全 Relative safety	0.6282—0.6991	23.55%	生态系统结构较稳定,生态系统功能良好,几乎满足发展需求
安全 Safety	0.6991—0.8306	15.10%	生态系统结构稳定,生态系统功能优越,满足发展需求

浙江大湾区生态安全呈现出“北低南高”的分布格局,生态安全区占比 71.7% 超过浙江大湾总面积的 2/3,表明生态系统处于健康安全状态,集中分布在浙中东和浙东南地区,该区域以自然生态用地为主,土地利用类型是森林和草地。生态不安全集中在杭嘉宁和东南滨海岸,土地利用类型以农田和建筑用地为主,从图 3 可以看出,生态安全与土地利用类型高度相关,未来城市空间规划要重视土地利用方式和开发强度。湾区是区

域发展的高端形态,需要更高质量的生态产品及服务,良好的生态环境作为一种生产力^[46],成为提高区域总体竞争力的关键。优质生态环境更有利于吸引和凝聚创新要素,在新发展阶段中高水平的创新人才对良好生态环境的需求是必需的^[47]。综上,未来开发的热门区域趋向生态安全区,更能满足未来人类物质的、特别是精神的更高发展需求。

3.3 探索性空间数据分析

3.3.1 全局自相关分析

借助空间计量软件 GeoDa 对生态安全进行全局自相关分析,生成 Moran 散点图(图 4)。散点图第一象限(H-H)是高值聚集区,表示该区域及临近区域均为高值;第三象限(L-L)是低值聚集区,表示该区域及临近区域均为低值;第二象限(L-H)和第四象限(H-L)表示周边区域分别高于和低于该区域的生态安全水平^[43]。其中第一象限和第三象限相邻区域单元呈高度的空间正相关,空间格局呈现集聚性,称为空间“热点”地区。第二象限和第四象限相邻区域单元呈高度的空间负相关,空间格局呈现离散性,称为空间“冷点”地区。

图 4 中生态安全集中分布在第一象限和第三象限,且 Moran' I 为 0.878 接近 1,呈现出高度空间正相关,表明浙江大湾区相邻区域间生态安全具有明显的空间集聚性。

3.3.2 局部自相关分析

借助 GeoDa 软件生成局部自相关(LISA)聚类图,共有 5 种集聚模式(图 5),分别是 H-H 集聚、L-L 集聚、L-H 集聚、H-L 集聚和不显著。

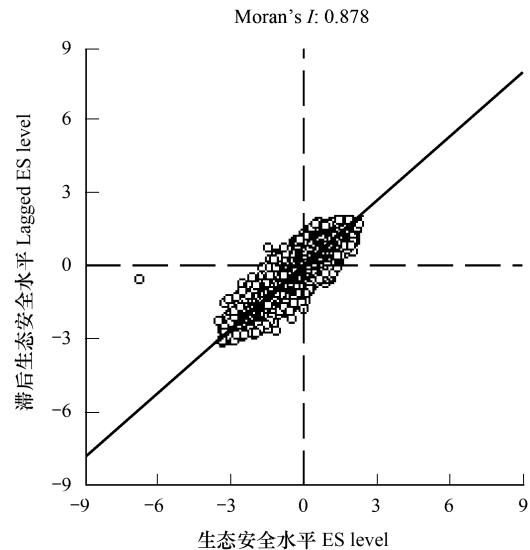


图 4 生态安全 Moran' I 散点图

Fig.4 Moran scatter plot of ES level

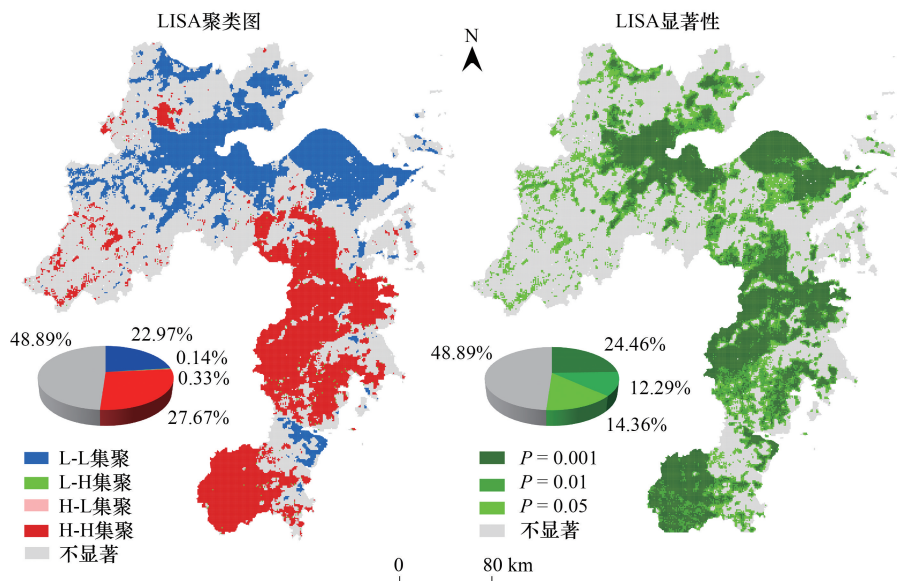


图 5 局部自相关(LISA)聚类图和显著性图

Fig.5 LISA cluster map and significance map

浙江大湾区南北集聚模式差异大,生态安全“热点”区域呈空间正相关分布,H-H 集聚和 L-L 集聚占总面

积的 50.5%。其中 H-H 集聚分布在浙中东、浙南和浙西北部分地区,与地形地势密切相关,该区域以山地、丘陵为主,植被覆盖率高,生态安全值较高;L-L 集聚集中分布在经济发展水平高的杭嘉宁地区,主要由于城市人口集聚、产业发展以及道路网建设导致绿地破碎化,与图 2(E)人类活动强度分布情况基本契合。生态安全“冷点”区域呈空间负相关分布,H-L 和 L-H 集聚占总面积的 0.47%。

3.4 地统计分析

半方差函数是半方差与分离距离的关系图^[48],用于揭示生态安全的空间变异特征,涉及变程(A_0)、基台值(C_+)、块金值(C_0)和偏基台值(C)等参数。块基比 $C_0/(C+C_0)$ 是衡量要素空间变异程度的重要指标,反映随机因素引起的空间异质性占全部空间异质性的比重。 $C_0/(C+C_0)$ 在 $[0,0.25]$ 之间,生态安全以结构性变异为主,表明生态安全空间相关性显著; $C_0/(C+C_0)$ 在 $[0.25,0.75]$ 之间,表明生态安全空间相关程度适中; $C_0/(C+C_0)$ 在 $[0.75,1]$ 之间,表明生态安全以随机性变异为主,空间相关性较弱^[49]。本文利用 GS+9.0 分析各市生态安全空间变异情况(图 6)。

表 3 显示湖州、嘉兴符合球形模型;绍兴、台州和温州符合指数模型;杭州、宁波和舟山符合高斯模型。除舟山、嘉兴和台州外,其他市的决定系数(R^2)均接近于 1,表明浙江大湾区生态安全模型拟合精度较高,能够反映生态安全空间分异特征。

绍兴和宁波 $C_0/(C+C_0)$ 为 0.4123、0.2652,介于 $[0.25,0.75]$ 之间,空间相关性为中等程度,空间变异受随机性变异和结构性变异的综合作用,除受结构性因素即自然因素影响外,也受随机因素即社会经济因素影响。宁波、绍兴北邻杭州湾工业区,宁波作为长三角南翼的经济和制造中心,临港型工业是其优势产业,石油、电力和钢铁等产业对生态环境负荷大,生态安全等级低。绍兴产业升级转型较缓慢,传统印染产业造成的高强度水体、土壤污染影响深远,生态环境较恶劣,未来城市发展的可利用生态空间不足。

除绍兴和宁波外,其他各市的 $C_0/(C+C_0)$ 均小于 0.25,表明其他各市具有强烈的空间相关性,结构性变异仍占据生态安全空间分异的主导地位,空间变异受植被覆盖率、森林保有率、地质景观等自然因素的影响。其土地利用类型基本为林地和草地,生态系统服务水平高,浙西北地区森林覆盖率高,尤其千岛湖流域生态安全处于高水平,中和了城市开发对生态系统的破坏性,整体生态环境质量较高。浙东南人口活跃度较低,人类活动对于资源消耗和环境损害程度低。舟山半方差函数 R^2 最小,拟合精度不高,实际舟山人均公园绿地面积达 14.28m^2 ,森林每年植被固碳达 $2.97\times 10^4\text{t}$,具有“海上花园城市”之称,生态环境状况良好,与分析结果一致。

表 3 浙江大湾区各市生态安全半方差模型参数

Table 3 Parameter of variance function of ES at the municipal level in the Zhejiang Greater Bay Area

地市 City	模型 Mode	块金值 Nugget	基台值 Sill	块基比 Nugget/Sill	决定系数 Determination coefficient
杭州	高斯模型	0.003140	0.018480	0.1699	0.991
湖州	球形模型	0.000116	0.001442	0.0804	0.665
嘉兴	球形模型	0.000170	0.002540	0.0669	0.346
宁波	高斯模型	0.002400	0.009050	0.2652	0.971
绍兴	指数模型	0.001364	0.003308	0.4123	0.825
台州	指数模型	0.000450	0.003750	0.1200	0.438
温州	指数模型	0.003270	0.013280	0.2462	0.937
舟山	球形模型	0.000694	0.003608	0.1924	0.166

3.5 城市开发与保护策略

由于浙江大湾区生态安全状况存在地域差异,城市发展的重点及其与生态系统的主要矛盾也各不相同,因此有必要充分考虑大湾区生态安全空间特征、未来土地利用管理和行政单元的空间分布情况。本文对标国土空间规划四类主体功能区进一步讨论,计算各市生态安全 5 个等级的占比情况,按照占比最大的等级将城

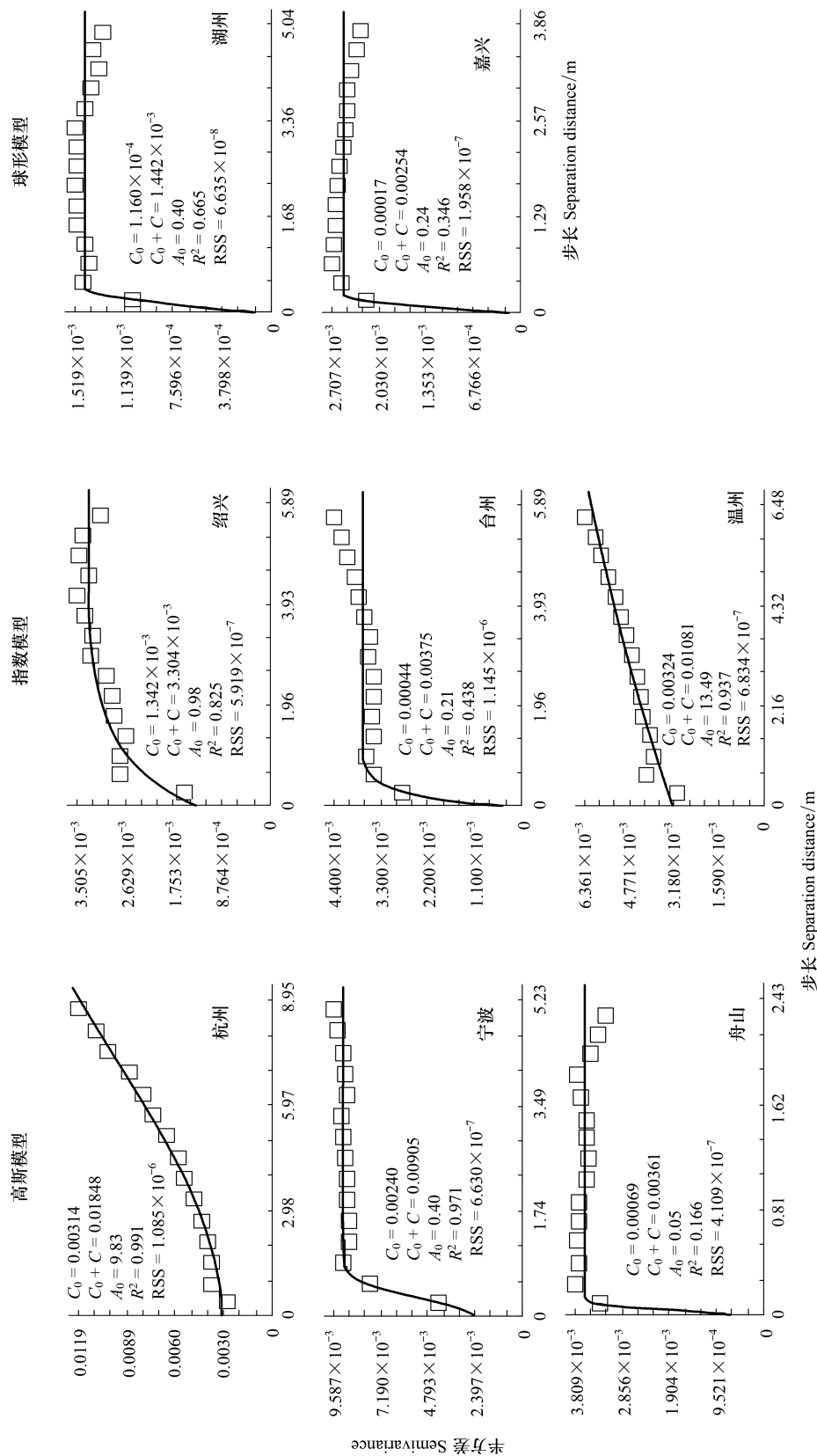


图6 浙江大湾区各市ES半方差分析曲线
Fig.6 Variance function curve of ES at the municipal level in the Zhejiang Greater Bay Area
C0表示块金值; C0+C表示基台值; A0表示变程; R2表示决定系数; RSS表示残差

市发展类型划分为三类(表4),分别是优先发展区(ODZ)、综合开发区(CDZ)和生态保护区(ECDA) [42]。

表4 浙江大湾区城市发展类型
Table 4 Development types at the city level in the Zhejiang Greater Bay Area

发展类型 Development types	城市 city	等级 Grade				
		1	2	3	4	5
优先发展区	嘉兴	4.82%	36.99%	48.83%	9.16%	0.21%
Optimization development zones	宁波	26.98%	24.55%	24.05%	23.86%	0.56%
	舟山	4.42%	22.42%	43.21%	28.97%	0.98%
综合开发区	杭州	12.05%	17.66%	34.03%	35.27%	0.98%
Comprehensive development zones	湖州	1.58%	16.56%	38.37%	39.23%	4.26%
	绍兴	6.33%	13.97%	24.23%	39.05%	16.43%
生态保护区	台州	0.03%	1.98%	11.30%	30.13%	56.56%
Ecological conservation development area	温州	1.76%	4.98%	13.57%	34.60%	45.10%

优先发展区指生态安全值最大比例为1、2和3等级的城市,包括嘉兴、宁波、舟山。优先发展区具有经济发展水平高、发展速度快、人口密度大等特点,拥有强劲的发展需求和动力。这类城市产业结构对土地的依赖性不高,应保持经济高速稳定增长,促进产业向高精尖方向转型升级,优先发展第三产业尤其是滨海旅游业。同时要坚定绿色低碳发展方向,落实生态环境保护工作,抑制经济过快增长对环境产生负面影响,注重提高城市效率和生态效率。

综合开发区指生态安全最大比例为4等级的城市,包括杭州、湖州和绍兴,生态环境质量较适合人类生存发展,经济发展潜力和后劲十足。2020年杭州GDP和常驻人口占浙江大湾区总量的28.31%和22.64%,是大湾区经济发展的主要贡献者。此类城市应寻求生态保护与经济发展平衡点,结合生态环境质量和自然资源状况,优化城市生态系统的结构和功能,促进三大产业一体化发展,推动区域高质量和可持续发展。

生态保护区指生态安全最大比例为5等级的城市,包括台州和温州,生态系统“安全”等级占比56.56%、45.10%。该类城市植被覆盖率高,生态系统稳定且生态效益高,生态安全状况优于其他两种城市类型,社会经济发展尚未对生态系统产生显著的破坏作用。第三产业是该区域的支柱产业,生态系统质量会直接影响产业发展,应建立生态安全保护区和生态控制区,提高生态环境保护力度;对于已遭到破坏的生态用地,应加强治理和修复工作以恢复生态功能。

3.6 景观格局与空间治理策略

为了描述生态系统结构和空间配置特征,确定人类活动的强度和方向,本文利用Fragstats 4.2计算不同集聚模式下的景观指数,共选用5个常用的景观格局指数(表5),景观格局指数的具体含义和研究方法参见相关文献[50]。

H-H集聚最大斑块类型指数(LPI)和聚集度指数(AI)最高,分离度指数(SPLIT)为低值,表明该类集聚区中景观类型如森林和草地斑块面积大且斑块优势明显,集中分布在生态系统功能优越的区域。H-H集聚以生态用地为主,生态用地对保护生物多样性、提高生境质量、维持生态系统功能有着重要作用,未来城市规

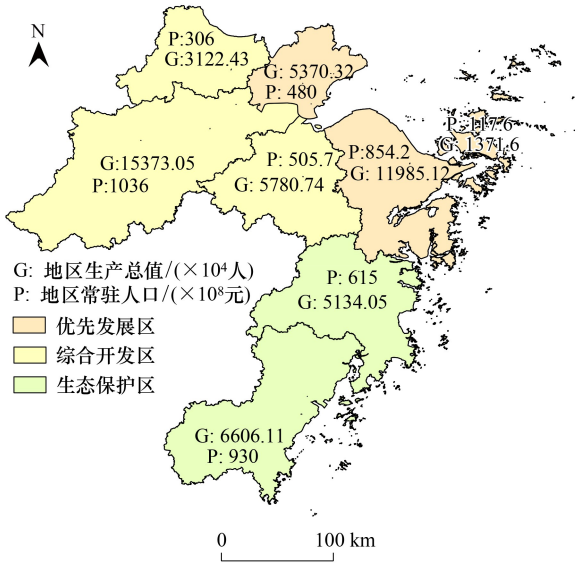


图7 浙江大湾区发展功能区的空间分布
Fig.7 Spatial pattern of development function zones in the Zhejiang Greater Bay Area

划应重视规避自然生态景观,定期监测评估生态景观质量。L-H 和 H-L 集聚斑块数量指数(NP)较小、SPLIT 偏高,表明区域内景观斑块分散分布、破碎化程度高、景观之间连通性差,生态系统易受人类活动的影响。L-L 集聚平均形状指数(MSI)较高,区域景观斑块形状复杂、异质,景观类型以城市建筑用地和生产设施用地为主,未来应大力推动城市土地利用由横向扩张转向纵向开发,提高土地利用效率以缓解城市用地压力。

表 5 局部自相关聚类图的景观格局指数
Table 5 Landscape pattern indices of LISA cluster map

模式 Pattern	斑块数量 NP	最大斑块类型 LPI	平均形状 MSI	聚集度 AI	分离度 SPLIT
高-高 High-High	1659	47.4814	1.135	68.534	3.6969
低-低 Low-Low	1660	11.3097	1.2374	54.1916	31.0734
低-高 Low-High	197	0.9901	1.0051	0.5533	192.4717
高-低 High-Low	81	2.4096	1.0041	0.6915	79.1839
不显著 Not significant	3495	25.4016	1.1855	59.1562	11.4705

4 讨论与结论

4.1 讨论

生态安全关乎国民经济的平稳运行,是国家生态环境研究领域的热点,成为人类经济社会可持续发展的新主题^[15]。湾区是城市经济发展的高能级形态和城市发展形态的陆海融合形式^[51],生态安全是湾区可持续发展的基本保障。定量评价湾区生态安全问题是顺应国家生态系统保护的迫切需要,对提升生态系统质量和稳定性、推动经济社会高质量与可持续发展具有至关重要的作用。本文对浙江大湾区生态安全评价及空间分异特征进行案例研究,与以往的生态安全研究相比,基于 ESDA 和 GA 方法更清晰地揭示了生态安全的空间分异特征、趋势规律等,有助于城市管理者整体把握区域生态安全,一体化推进大湾区生态环境保护治理。研究结果显示,浙江大湾区生态安全区占总面积的 71.7%,生态安全状况良好且呈北低南高的空间格局,人口集聚、港口规划、工业建设是影响大湾区生态安全的重要因素,该研究结果与前人研究结果^[20,28]一致。由于数据收集的局限性,人口和 GDP 数据以行政区为单位矢量栅格化,加之土地利用数据精度限制,大湾区生态安全定量分析有待细致完善。

本文基于空间网格尺度评估生态安全状况,基于市级行政单元提出浙江大湾区生态系统保护的对策建议,旨在为湾区国土空间治理提供探索思路。未来在自然资源管理中,以自然单元来评估、以行政单元来实施,在行政空间管治中统筹自然生态要素更有利于国土空间治理的落地实践^[52]。国土空间规划、生态安全格局构建与实现“双碳”战略有机协同,湾区生态安全指标设计考虑“低碳”“碳达峰、碳中和”相关内容以及“滨海”城市特色,将成为后续研究的重点方向。

4.2 结论

本文基于空间网格尺度评价浙江大湾区的生态安全,通过 ESDA 和 GA 方法揭示浙江大湾区的空间分异特征,平衡城市生态用地保护与建设用地开发的关系,厘清大湾区的发展定位与发展方向,解析城市化进程中无序扩张的棘手问题,为大湾区开发建设提供理论基础和决策支持。本研究结论如下:

(1)综合考虑地形与景观、景观生态活力、生态系统服务价值、土壤保持量和人为干扰 5 个方面,构建生态安全评估指标体系,评价结果显示浙江大湾区生态安全呈现“北低南高”分布格局。浙江大湾区生态安全区域占总面积的 70%以上,表明浙江大湾区生态安全水平整体良好且生态系统处于健康状态;生态不安全区域集中在杭嘉宁的人口活动和工业生产集聚区,基于经济社会与生态系统的依存关系,该区域生态安全状况需引起重视。

(2)通过空间统计方法探究浙江大湾区生态安全空间分布的“热点”和“冷点”及其空间差异特征。空间自相关显示全局 Moran'I 为 0.878 接近于 1,呈现出高度空间正相关性;局部自相关中 H-H 集聚和 L-L 集聚占

浙江大湾区总面积的 50.65%,H-H 集聚均集中在城市核心区,L-L 集聚则集中在森林保有率较高的山区。半方差分析显示结构性因素仍是浙江大湾区空间分异的主导因素,空间分异受植被覆盖率、森林保有率、地质景观等自然因素的影响。宁波、绍兴受随机性因素和结构性因素的双重影响,表明人口集聚活动、城市规划开发等随机因素已经影响生态安全空间分异。

(3)通过自然断点法,基于浙江大湾区生态安全状况设置三种城市发展类型,即优先发展区、综合开发区和生态保护区。其中优先发展区和综合开发区是大湾区经济发展重点区域,生态保护区是保障浙江大湾区生态安全的关键区域。优先发展区包括嘉兴、宁波和舟山,应加快产业转型以缓解区域生态压力,协调城建空间和绿地空间的用地矛盾,提高用地规模效益;综合开发区包括杭州、湖州和绍兴,应积极寻求经济发展和生态保护的平衡点,优化城市生态系统的结构和功能;生态保护区包括台州和温州,应建立和完善生态保护区和生态修复区,严守生态底线以释放生态红利。

参考文献(References):

- [1] 杨兆青,陆兆华,刘丹,袁明扬,王菲,荣正阳,黄玉凯.煤炭资源型城市生态安全评价——以锡林浩特市为例.生态学报,2021,41(1):280-289.
- [2] 中国科学技术协会.上海市科协与市生态环境局联合举办环保主题讲座.中国科学技术协会.(2020-07-28)[2021-12-05].https://www.cast.org.cn/art/2020/7/28/art_187_128958.html
- [3] 赵红红,杨阳.加快打造生态城市的“软实力”.经济日报,2018-12-27(016).
- [4] 于婧,汤昇,陈艳红,张蕾,聂艳,邓文胜.山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例.生态学报,2022,42(4):1290-1299.
- [5] 孙枫,章锦河,王培家,魏国恩,储光,曹禹.城市生态安全格局构建与评价研究:以苏州市区为例.地理研究,2021,40(9):2476-2493.
- [6] 王海鹰,秦奋,张新长.广州市城市生态用地空间冲突与生态安全隐患情景分析.自然资源学报,2015,30(8):1304-1318.
- [7] 周艳,黄贤金,徐国良,李建豹.长三角城市土地扩张与人口增长耦合态势及其驱动机制.地理研究,2016,35(2):313-324.
- [8] 杨培峰,焦泽飞.生态—社会经济系统耦合方法在县域国土空间生态修复规划中的运用——以四川威远县为例.自然资源学报,2021,36(9):2308-2319.
- [9] Huang J P, Yu H P, Han D L, Zhang G L, Wei Y, Huang J P, An L L, Liu X Y, Ren Y. Declines in global ecological security under climate change. Ecological Indicators, 2020, 117: 106651.
- [10] 侯婉,侯西勇,孙敏,宋百媛.2000—2010年亚欧大陆中低纬度海岸带土地利用/覆盖变化及驱动力分析.世界地理研究,2021,30(4):813-825.
- [11] 刘纪远,张增祥,张树文,颜长珍,吴世新,李仁东,匡文慧,史文娇,黄麟,宁佳,董金玮.中国土地利用变化遥感研究的回顾与展望——基于陈述彭学术思想的引领.地球信息科学学报,2020,22(4):680-687.
- [12] 刘丹,李琳娜.1995—2015年中国北方边境样带土地利用时空格局演变及驱动因素.资源科学,2021,43(6):1208-1221.
- [13] Ke X L, Wang X Y, Guo H X, Yang C, Zhou Q, Mougharbel A. Urban ecological security evaluation and spatial correlation research----based on data analysis of 16 cities in Hubei Province of China. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127613.
- [14] 汤旭,宋璇,曾玉林,张大红.长江经济带森林生态安全评价及时空演变研究.生态学报,2021,41(5):1693-1704.
- [15] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419.
- [16] 王振波,梁龙武,方创琳,庄汝龙.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.生态学报,2018,38(12):4132-4144.
- [17] Li Z T, Yuan M J, Hu M M, Wang Y F, Xia B C. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMATEL model: a case study of the Pearl River Delta urban agglomeration. Ecological Indicators, 2019, 101: 595-602.
- [18] 杨清可,段学军,王磊,王雅竹.长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究.地理科学进展,2021,40(2):220-231.
- [19] 韩美,孔祥伦,李云龙,魏帆,孔凡彪,黄淑萍.黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制.地理科学,2021,41(6):1009-1018.
- [20] 崔旺来,蔡莉,奚恒辉,杨帆,陈梦圆.基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析.生态学报,2022,42(6):2136-2148.
- [21] Li Z T, Li M, Xia B C. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation. Ecological Indicators, 2020, 114: 106319.
- [22] 张满满,于鲁冀,张慧,靖中秋.基于PSR模型的河南省水生态安全综合评价研究.生态科学,2017,36(5):49-54.

- [23] Kaya T, Kahraman C. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: the case of Istanbul. *Energy*, 2010, 35(6): 2517-2527.
- [24] 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. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(8): 1780-1790.
- [25] 刘海龙, 谢亚林, 贾文毓, 石培基. 山西省生态安全综合评价及时空演化. *经济地理*, 2018, 38(5): 161-169.
- [26] 赵敏敏, 何志斌, 蔺鹏飞, 韩双宝, 王思源. 基于压力-状态-响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价. *生态学报*, 2021, 41(22): 9039-9049.
- [27] Li B, Wu Q, Zhang W P, Liu Z J. Water resources security evaluation model based on grey relational analysis and analytic network process: a case study of Guizhou Province. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101429.
- [28] 周介元, 孟丽红, 吴绍雄, 王青芸. 浙江省生态安全格局时空演变特征及其影响因素. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 266-272, 287-287.
- [29] Cheng H R, Zhu L K, Meng J J. Fuzzy evaluation of the ecological security of land resources in mainland China based on the Pressure-State-Response framework. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150053.
- [30] Bi M L, Xie G D, Yao C Y. Ecological security assessment based on the renewable ecological footprint in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106432.
- [31] Liu Y, Qu Y, Cang Y D, Ding X A. Ecological security assessment for megacities in the Yangtze River basin: applying improved emergy-ecological footprint and DEA-SBM model. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108481.
- [32] Jiao M Y, Hu M M, Xia B C. Spatiotemporal dynamic simulation of land-use and landscape-pattern in the Pearl River Delta, China. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101581.
- [33] 仇江啸, 王效科, 逯非, 欧阳志云, 郑华. 城市景观破碎化格局与城市化及社会经济发展水平的关系——以北京城区为例. *生态学报*, 2012, 32(9): 2659-2669.
- [34] Hu M M, Li Z T, Yuan M J, Fan C, Xia B C. Spatial differentiation of ecological security and differentiated management of ecological conservation in the Pearl River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 439-448.
- [35] 潘毅刚. 大湾区战略的本质、规律和浙江的应对. *浙江经济*, 2017, (20): 32-34.
- [36] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 张红星, 孙旭, 欧阳志云. 城市生态系统: 高度空间异质性. *生态学报*, 2020, 40(15): 5103-5112.
- [37] 左伟, 王桥, 王文杰, 刘建军, 杨一鹏. 区域生态安全评价指标与标准研究. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 67-71.
- [38] 姜德文. 保护水土资源改善生态环境推进生态文明建设. *中国水土保持*, 2017, (11): 3-10.
- [39] 修晨, 肖荣波, 陈三雄, 张晖. 国内外主要湾区生态系统特征、修复理论与技术模式. *生态学报*, 2020, 40(23): 8377-8391.
- [40] 马帅, 程浩, 林晨, 王良杰. 江淮生态经济区土地利用景观格局时空变化. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 292-299.
- [41] 崔旺来, 奚恒辉, 蔡莉, 陈梦圆, 徐成磊. 基于 NDVI 的中国海岛县生态系统服务价值时空变化. *经济地理*, 2021, 41(9): 184-192, 224-224.
- [42] Peng J, Ma J, Du Y Y, Zhang L Q, Hu X X. Ecological suitability evaluation for mountainous area development based on conceptual model of landscape structure, function, and dynamics. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 500-511.
- [43] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及其优化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 771-784.
- [44] 董霁红, 房阿曼, 戴文婷, 许吉仁, 安英莉. 矿区复垦土壤重金属光谱解析与迁移特征研究. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.
- [45] 龚建周, 夏北成, 刘彦随. 基于空间统计学方法的广州市生态安全空间异质性研究. *生态学报*, 2010, 30(20): 5626-5634.
- [46] 周杨. 党的十八大以来习近平生态文明思想研究述评. *毛泽东邓小平理论研究*, 2018, (12): 13-19.
- [47] 林先扬, 谈华丽. 粤港澳大湾区知识读本. 广州: 广东人民出版社, 2018.
- [48] Hu X S, Hong W, Qiu R Z, Hong T, Chen C, Wu C Z. Geographic variations of ecosystem service intensity in Fuzhou City, China. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 215-226.
- [49] 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 陈自然, 李健, 李霞. 冀北承德地区土壤生源要素生态化学计量与空间分异特征. *生态学报*, 2022, 42(5): 1750-1765.
- [50] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 121-125.
- [51] 牟盛辰. 湾区演进逻辑与浙江大湾区发展策略. *科学发展*, 2019, (12): 59-67.
- [52] 郝庆, 彭建, 魏冶, 王丰龙, 姚华松, 李祚, 王伟, 张书海, 邓玲, 赵雲泰, 马学广, 戈大专, 戴俊卿, 朱鹤, 张茂鑫. “国土空间”内涵辨析与国土空间规划编制建议. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2219-2247.