

# 环鄱阳湖城市群生态保护重要性评价及其空间格局

张海铃, 叶长盛

(东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 分析环鄱阳湖城市群生态保护重要区域的空间变化特征和空间聚集特征, 为区域划定“三区三线”、合理规划国土空间提供基础依据, 为促进大湖流域地区经济高质量发展和生态保护之间的协同发展提供理论参考。[方法] 以环鄱阳湖城市群为例, 2000, 2010, 2020年土地利用数据为基础, 借助InVEST模型、修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和GIS空间分析方法, 选取水源涵养、土壤保持、生物多样性和水质净化等生态服务类型以及水土流失敏感性和水环境敏感性识别研究区生态保护重要区域, 分析其空间变化特征。[结果] ①2000, 2010, 2020年, 研究区生态保护重要区域面积分别为  $6.34 \times 10^4$ ,  $6.35 \times 10^4$ ,  $6.28 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 地类以林地和水域为主, 呈现“两边高, 中间低”分布特征; ②在2 km×2 km格网尺度下, 环鄱阳湖城市群生态保护重要性在空间上显著聚集, 高高聚集区主要分布在东西部山区等人为活动较少、生态保护良好的区域; 低低聚集区主要分布在环鄱阳湖平原区, 该区人类活动密集, 经济发展的同时生态系统本身的某些功能与结构受损; ③2000—2020年, 生态保护重要性变化稳定区位于怀玉山区和鄱阳湖平原, 增强区位于浮梁县、婺源县和鄱阳湖区, 减弱区位于宜春市、萍乡市和鹰潭市。[结论] 对于极重要和高度重要区域, 稳定森林覆盖率和提升森林质量是首要任务, 其次, 应采取措施有效促进湿地恢复和自然保护区建设, 以达到遏制生境退化的目的。对于中等重要、一般重要和不太重要区域, 应处理好经济高质量发展和生态保护之间的关系, 尤其是在人类活动较为密集的区域, 应提高城市绿地覆盖率, 在城市周边建立生态缓冲区, 以此缓解生态空间生存压力。

**关键词:** InVEST模型; 生态保护重要性; 空间自相关; 环鄱阳湖城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0224-11

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 张海铃, 叶长盛. 环鄱阳湖城市群生态保护重要性评价及其空间格局[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 224-234. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230224.002; Zhang Hailing, Ye Changsheng. Importance evaluation of ecological protection and spatial pattern of urban agglomeration around Poyang Lake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 224-234.

## Importance Evaluation of Ecological Protection and Spatial Pattern of Urban Agglomeration Around Poyang Lake

Zhang Hailing, Ye Changsheng

(East China University of Technology, College of Earth Sciences, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial change characteristics and spatial aggregation characteristics of important ecological protection areas in the Poyang Lake urban agglomeration were analyzed in order to provide a basis for delineating “three districts and three lines” and rational planning of territorial space, and to provide a theoretical reference for promoting the coordinated development between high-quality economic development and ecological protection in the Great Lake Basin. [Methods] The study area was the urban agglomeration around Poyang Lake. Land use data for 2000, 2010, and 2020 were used with the InVEST model, the revised universal soil loss equation (RUSLE), and a GIS spatial analysis method to select types of ecological services (such as water conservation, soil conservation, biodiversity conservation, water purification, soil erosion sensitivity, and water environment sensitivity) to identify the important areas of ecological protection in the study area, and to analyze their spatial variation characteristics. [Results] ① In 2000, 2010, and 2020, the

收稿日期: 2022-05-04

修回日期: 2022-06-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“环鄱阳湖城市群城镇化生态风险综合评价与预警研究”(42061041)

第一作者: 张海铃(1999—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化与规划。Email: zhanghailing316@163.com。

通信作者: 叶长盛(1977—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 教授, 博士, 主要从事城乡发展、土地资源利用与保护研究。Email: ycs519@163.com。

areas of important ecological protection in the urban agglomeration around Poyang Lake were  $6.34 \times 10^4$ ,  $6.35 \times 10^4$ , and  $6.28 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, respectively. The land use types were dominated by forest land and water areas, showing the distribution characteristics of “high on both sides and low in the middle”. ② At a grid scale of 2 km $\times$ 2 km, the importance of ecological protection in the urban agglomeration around Poyang Lake was significantly clustered in space, and the high and high clustering areas were mainly located in the eastern and western mountainous areas with fewer anthropogenic activities and good ecological protection. Low and low agglomeration areas were mainly located in the plain area around the Poyang Lake (where human activities are intensive), and some functions and structures of the ecosystem itself were damaged during economic development. ③ From 2000 to 2020, the changing and stable areas of ecological protection importance were located in the Huaiyu mountain area and the Poyang Lake Plain, and the enhanced areas were located in Fuliang County, Wuyuan County, and the Poyang Lake District; and the weakened areas were located in Yichun City, Pingxiang City, and Yingtan City. [Conclusion] For extremely important and highly important areas, stabilizing forest coverage and improving forest quality is the first task. Secondly, measures should be taken to effectively promote wetland restoration and the construction of nature reserves in order to curb habitat degradation. For medium-important, moderately important, and less important areas, the relationship between high-quality economic development and ecological protection should be properly handled. Especially in areas with intensive human activities, urban green space coverage should be increased, and ecological buffer zones should be established around cities to alleviate the pressure of ecological space survival.

**Keywords: InVEST model; importance of ecological protection; spatial autocorrelation; urban agglomeration around Poyang Lake**

生态文明建设的提出推动生态保护工作迈入新征程<sup>[1]</sup>。2008年,《全国生态功能区划》指出,基于生态敏感性和生态服务功能评价划分生态功能区,是科学开展生态保护工作的重要手段。2020年,《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》明确了生态保护重要性评价是开展农业生产适宜性评价和城镇建设适宜性评价的前提<sup>[2]</sup>,其对于国土空间规划编制、国土空间开发保护格局规划利用和“三区三线”划定具有重要的理论指导意义<sup>[3]</sup>。以生态文明引领高质量发展是贯穿区域发展的主题,这也对生态保护工作提出了更高挑战与要求,开展生态保护重要性评价研究,不仅能为合理划分主体功能区提供依据,也能为生态保护红线和生态空间划定范围提供重要参考<sup>[4]</sup>。

生态保护重要性主要包括生态系统服务功能重要性评价和生态敏感性评价两部分内容<sup>[2,5]</sup>,其中,生态服务功能重要性多是从水源涵养、土壤保持、防风固沙和生物多样性保护等方面展开研究,所用方法主要包括参数法<sup>[6]</sup>、模型法<sup>[7]</sup>和定量指标评估法等<sup>[8]</sup>;而生态敏感性研究多是从水土流失、土壤沙化和土壤石漠化角度展开分析<sup>[2]</sup>,各地根据其现实情况选择不同的敏感性因子进行研究。目前国内对生态保护重要性评价主要从两个角度展开研究:①少数学者主要是对某一区域的生态保护重要性及其空间

分布特征进行研究<sup>[9-10]</sup>,在此基础上探索生态系统服务功能与生态敏感性各指标之间的相互关系<sup>[11]</sup>;②国内更多学者多是将生态保护重要性评价结果作为初步研究结果,在此基础上,开展如主导生态功能区划分<sup>[12]</sup>、生态空间划定<sup>[13]</sup>、生态安全格局构建<sup>[14]</sup>和生态保护红线划定等<sup>[15]</sup>相关研究,目的在于合理规划生态空间,保护生态功能重点区域,以提高区域整体生态承载能力,进而维护生态系统的完整性。整体来看,目前针对生态保护重要性的单一性研究较少,且多从生态系统服务重要性、价值评估等方面展开分析,同时较多研究也仅基于单一年份进行分析,针对生态保护重要性的多年份变化研究也较少。

环鄱阳湖城市群是江西省生态保护先行区,随着近年来经济的快速发展,城市建设用地快速扩张,不合理的开发利用活动严重挤压了生态空间,破坏了生态系统结构的功能性和完整性,生态保护面临较大压力。本文主要借助 InVEST 模型、修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和 GIS 空间分析方法识别环鄱阳湖城市群生态系统服务功能重要区和生态敏感区,在此基础上,基于最大值法确定生态保护重要区域,借助空间自相关分析方法中的 Moran's *I* 指数和 LISA 图探究研究区生态保护重要区域的空间变化特征和空间聚集特征,旨在为区域划定“三区三线”、合理规划国土空间提供基础依据,为促进大湖流域地区经济高质量发展和生态保护之间的协同发展提供理论参考。

## 1 研究区概况

依据《环鄱阳湖生态城市群规划(2015—2030)》，环鄱阳湖城市群位于江西省北部，主要包括南昌、九江、景德镇、上饶、鹰潭、宜春、新余、萍乡等地级市全部行政辖区和抚州市临川区、东乡区、金溪县、崇仁县以及吉安市新干县、峡江县，面积  $9.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全省土地总面积的 55.30%。该区地处亚热带季风区，地形多以平原、丘陵为主，土地利用类型以林地为主，生态公益林总面积约  $4.75 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。区内鄱阳湖作为中国第一大淡水湖，水网密集，水资源丰富，在调节长江水位和维护湖区生态平衡方面发挥了重要作用，对于维护长江中下游地区的生态安全具有重要意义。该区省级以上自然保护区共 25 处，重要水源涵养区总面积  $9.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，二级以上生态廊道 11 条，是江西省生态安全保护的重要区域。2019 年，环鄱阳湖城市群地区生产总值  $1.88 \times 10^{12}$  元，占全省的 75.92%。认识环鄱阳湖城市群生态环境存在的主要问题，精准识别生态保护重要性区域，可为后续规划工作提供依据。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 数据来源

本文涉及到的数据包括环鄱阳湖城市群 2000, 2010, 2020 年土地利用数据、降雨数据、DEM 数据、NDVI 数据、土壤数据、潜在蒸散量数据和土壤可蚀性数据等。其中，江西省土地利用数据来自地理空间数据云；降雨数据来源于中国气象科学数据共享服务网和国家地球系统科学数据中心；NDVI 数据采用中国科学院资源环境科学与数据中心提供的中国年度 1 km 植被指数 (NDVI) 空间分布数据集。DEM 数据来自地理空间数据云平台，空间分辨率为 30 m；土壤数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 构建的世界土壤数据库 (HWSD)；潜在蒸散量数据和土壤可蚀性数据均来源于国家地球系统科学数据中心 (表 1)。为了便于模型运算，本文将所有数据都统一为通用横轴墨卡托投影 (UTM 投影)，并重采样至  $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$  分辨率。

表 1 数据来源及其用途

Table 1 Data sources and its uses

数据类型	数据用途	数据格式	数据来源
土地利用数据	土地利用类型	矢量数据	地理空间数据云
气象数据	降雨侵蚀力因子	文本数据	中国气象科学数据共享服务网
	多年平均降雨量	栅格数据	国家地球系统科学数据中心
	年潜在蒸散量		
DEM 数据	地形因子	栅格数据	地理空间数据云
	流域数据		
土壤数据	土壤可蚀性因子	栅格数据	国家地球系统科学数据中心
	植物可利用水量	栅格数据	世界土壤数据库
归一化植被指数数据	植被覆盖度因子	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 生态系统服务功能重要性评价

(1) 水源涵养服务。InVEST 模型中的 Water Yield 模块是基于 Fu<sup>[16]</sup> 和 Zhang 等<sup>[17]</sup> 提出的水量平衡估算方法，考虑到土地利用类型、土壤最大根系埋藏深度、年降水量、植物可利用水量 (PAWC)、年潜在蒸散发以及流域等因素，计算得出研究区产水量<sup>[18]</sup>。公式如下：

$$Y_{xj} = \left( 1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (1)$$

式中： $Y_{xj}$  为土地利用类型  $j$  在栅格  $x$  上的年产水量 (mm)； $P_x$  为栅格单元  $x$  年降雨量 (mm)； $\text{AET}_{xj}$  为土地利用类型  $j$  在栅格  $x$  上的年实际蒸散量 (mm)。其中，考虑到降雨量年际变化较大，故选取 2000,

2010, 2020 的 3 个年份各自临近 5 a 的降雨量，以其平均值代替年降雨量数据；年潜在蒸散发量根据国家地球系统科学数据中心提供的逐月潜在蒸散发数据计算得到；土壤最大根系埋藏深度和植被蒸散系数主要参考他人文献和 InVEST 模型官方手册得到<sup>[19-20]</sup>；PAWC 数据通过计算土壤中沙粒、粉粒、黏粒以及有机碳的含量 (%) 得到，公式如下，流域数据通过 ArcGIS 水文分析模块，利用 DEM 数据提取获得。

$$\begin{aligned} \text{PAWC}_x = & 54.509 - 0.132 \times \text{sand} \% - \\ & 0.003 \times [\text{sand} \%]^2 - 0.055 \times \text{silt} \% - \\ & 0.006 \times [\text{silt} \%]^2 - 0.738 \times \text{clay} \% + \\ & 0.007 \times [\text{clay} \%]^2 - 2.638 \times \text{OC} \% + \\ & 0.501 \times [\text{OC} \%]^2 \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 土壤保持服务。土壤保持主要是为了减少侵蚀,防止养分流失,以达到防止区域生态退化的目的<sup>[21-22]</sup>。基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE)是目前应用最为广泛的遥感定量模型,主要通过计算土壤潜在侵蚀量与土壤实际侵蚀量之差,得出研究区土

壤保持能力<sup>[23-25]</sup>。

$$A_c = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (3)$$

式中: $A_c$  为土壤保持量,其中  $R$  为降雨量侵蚀因子; $K$  为土壤可蚀性因子; $LS$  为地形因子; $C$  为植被覆盖因子; $P$  为水土保持措施因子,各因子计算方法见表 2。

表 2 土壤保持服务各因子计算方法

Table 2 Calculation method for each factor of soil conservation service

因子	因子含义	计算方法
$R$	降雨量侵蚀因子	见公式(4)–(5)
$K$	土壤可蚀性因子	数据由国家地球系统科学数据中心提供
$LS$	地形因子	根据《生态保护红线划定指南》,利用 DEM 数据,计算地形起伏度,获得地形因子栅格图
$C$	植被覆盖因子	见公式(6)–(7)
$P$	水土保持措施因子	参考陆建忠等的研究,对 $p$ 值进行赋值

$$F_{\text{mod}} = \sum_{i=1}^{12} r_i^2 / P \quad (4)$$

$$R = a \times F_{\text{mod}} + b \quad (5)$$

式中: $F_{\text{mod}}$  为改进的傅里叶指数; $r_i$  为第  $i$  月降雨量; $P$  为年降雨量, $a, b$  分别取值为 4.17 和 -152。

$$V_c = 108.49I_c + 0.717 \quad (6)$$

$$\begin{cases} C = 1 & (c = 0) \\ C = 0.6508 - 0.3436 \lg c & (0 < c < 78.3\%) \\ C = 0 & (c > 78.3\%) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V_c$  为植被覆盖度(%); $I_c$  为归一化植被指数值。

(3) 生物多样性服务。生物多样性保护是生态保护的目标之一,江西省境内森林覆盖率较高,湿地资源丰富,物种多样,故本文基于 InVEST 模型 Habitat Quality 模块评估研究区生物多样性分布特征及其生态系统健康状况<sup>[26]</sup>。公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \{1 - [D_{xj}^z / (D_{xj}^z + k^z)]\} \quad (8)$$

式中: $Q_{xj}$  为 LULC 类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量; $D_{xj}$  为 LULC 类型  $j$  中栅格  $x$  所受胁迫水平; $H_j$  表示 LULC 类型  $j$  的生境适宜性; $k$  为半饱和参数,通常为  $D_{xj}$  最大值的一半,本文取值 0.24, $Z$  值取值为 0.5。参考前人研究及 InVEST 模型官方手册<sup>[19,27]</sup>,对各土地利用类型的最大影响距离、权重以及威胁因子的敏感性赋值(表 3)。

(4) 水质净化服务。InVEST 模型的水质净化模块基本原理是,通过研究植被和土壤对径流中氮磷污染物的清除能力来估算其水质净化能力,氮磷输出量越高,其水质净化服务能力越强<sup>[28-29]</sup>。考虑到氮磷输出的空间分布特征较为一致,故本文仅考虑以单位面积氮输出衡量研究区水质净化服务功能。公式如下:

$$ALV_x = HSS_x \times \text{pol}_x \quad (9)$$

式中: $ALV_x$  是栅格  $x$  的污染负荷值; $\text{pol}_x$  是栅格  $x$

的输出系数; $HSS_x$  是栅格  $x$  的水文敏感性分值,该模块所需的部分数据,如年降雨量、潜在蒸散发量和流域数据等已在产水模块进行收集,各地类氮磷负荷系数、植被去除效率以及氮磷滞留临界距离等参数,主要参考鄱阳湖流域区他人的相关研究<sup>[30]</sup>和 InVEST 模型官方手册得到,经多次验证,确定流域累积阈值取值为 10 000, Borselli  $K$  参数默认为 2。

表 3 威胁因子权重及各土地利用类型对威胁因子的敏感性

Table 3 Threat factor weights and sensitivity of each land use type to threat factors

威胁因子	耕地	建设用地
最大影响距离	1	5
权重	0.60	0.70
衰退类型	线性	线性
敏感性	耕地	0.30
	林地	0.35
	草地	0.50
	水域	0.70
	建设用地	0
未利用地	0.10	0.20

综上所述,得出各模型结果,基于叠加分析和自然断点法将生态系统服务功能重要性结果分为 5 类,由低到高分别表示不太重要、一般重要、中等重要、高度重要、极重要。

2.2.2 生态敏感性评价 敏感性程度越高的区域,越容易受到破坏。故针对生态敏感的区域,应更加注重对生态环境的保护,尽可能减少人类活动轨迹。同时将各结果按自然断点法分为 5 级,由低到高分别表示不太敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极度敏感。

(1) 水环境敏感性。鄱阳湖作为中国境内第一大淡水湖,湖区生物多样性丰富,但其地处平原,人类

干扰活动也较为强烈,经济的发展和城市用地的扩张在一定程度上影响了水域环境的生态系统结构与功能,故本文参考相关研究<sup>[31-32]</sup>,结合环鄱阳湖城市群实际情况,对水域进行多环缓冲区分析,将水体本身赋值为极度敏感区,距水体 1 000 m 为高度敏感区,距水体 3 000 m 为中度敏感区,距水体 5 000 m 为一般敏感区,大于 5 000 m 为不太敏感区。

(2) 水土流失敏感性。江西省森林覆盖率居全国第二,但由于地势多山地丘陵和人类前期不合理的利用导致其水土流失问题依然存在。以 2017 年环境保护部印发的《生态保护红线划定指南》为依据,进行水土流失敏感性评价,公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (10)$$

式中:  $SS_i$  为水土流失敏感性指数;  $R_i$  为降雨侵蚀力;  $K_i$  为土壤可蚀性;  $LS_i$  为坡长坡度;  $C_i$  为植被覆盖度。其中,  $R_i, K_i, LS_i$  计算方式与土壤保持服务一致,  $R_i$  主要是基于 2000, 2010, 2020 年各个年份的月降雨量和年降雨量数据进行计算,  $C_i$  用 2000, 2010, 2020 年的归一化植被指数数据进行计算。

2.2.3 空间自相关分析 空间自相关分析主要用于衡量事物空间变量的聚合和离散程度,它包括全局空间自相关和局部空间自相关<sup>[33-34]</sup>,两者都能较好的描述地理事物之间的联系。

(1) 全局空间自相关分析。全局空间自相关可以较好的描述区域整体之间的空间关联与差异程度<sup>[35]</sup>,其中最常用的统计量为 Global Moran's  $I$  (全局莫兰指数),它主要是用来描述所有的空间单元在整个区域上与周边地区的平均关联程度。Moran's  $I$

指数取值范围为  $[-1, 1]$ , 当 Moran's  $I$  值为正值时,表示该变量呈现空间正相关性;当 Moran's  $I$  值为负值时,表示变量呈现空间负相关性; Moran's  $I$  值为 0 时,则表示变量在空间上不存在相关性<sup>[36-37]</sup>。故本文基于 Moran's  $I$  指数值对环鄱阳湖城市群生态保护重要性在空间上的相关关系进行探究。

(2) 局部空间自相关分析。局部空间自相关分析主要研究的是局部区域单元与邻近单元的聚集程度及其分布情况,主要包括两种关系,空间协同关系(高高聚集、低低聚集)和空间权衡关系(高低聚集、低高聚集),其中,高高聚集区表示研究单元与邻近单元的功能性都较强,低低聚集区则表示研究单元与邻近单元的功能性都较弱,高低聚集区表示研究单元自身功能性较强而邻近单元功能性较弱,低高聚集区则与之相反<sup>[38-40]</sup>。基于 LISA 图可有效识别变量高值区和低值区的分布特征,进而反演局部空间异常值<sup>[41]</sup>。本文基于  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  网格尺度,识别环鄱阳湖城市群生态保护重要性在空间上的局部集聚情况。

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态保护重要性评价

3.1.1 生态系统服务功能重要性分析 基于 InVEST 模型和 RUSLE 模型得到研究区 20 a 间水源涵养、土壤保持、生物多样性保护和水质净化服务的分布特征和变化情况,将各结果利用自然断点法进行分级,然后再将 4 项服务进行叠加分析,得到研究区生态系统服务功能重要性评价结果(图 1 和表 4)。

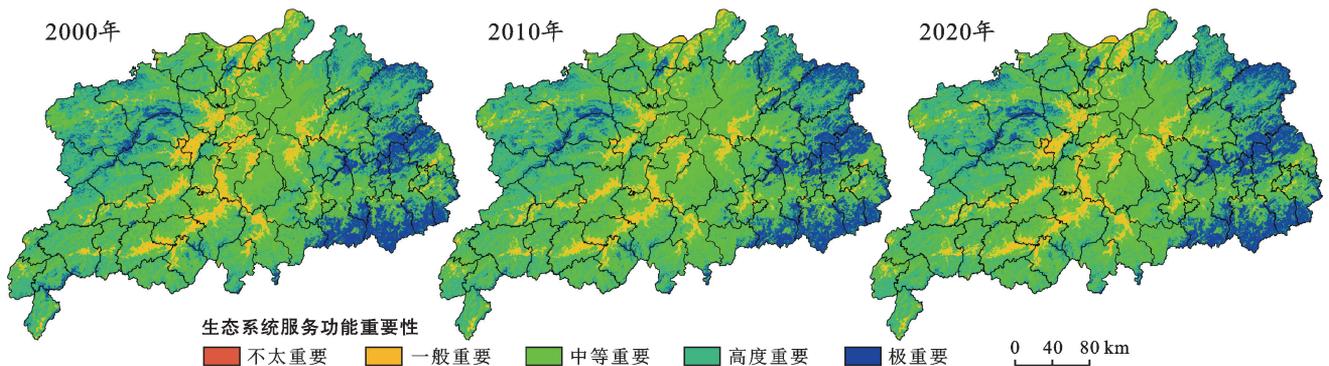


图 1 2000—2020 年环鄱阳湖城市群生态系统服务功能重要性

Fig.1 Importance of ecosystem service function of Poyang Lake urban cluster from 2000 to 2020

由图 1 可知,环鄱阳湖城市群生态系统服务功能区以高度重要区和中等重要区为主,其次为极重要区、一般重要区和不太重要区,分布主要呈两边高,中间低的特征。

从时间变化特征来看,2000—2010 年,生态系统服务极重要区面积有所增加,由  $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$  增加至  $1.09 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,新增区域主要位于婺源县和浮梁县,降雨量增多,同时新增区域地类以林地为主,故该区水

源涵养量与土壤保持量均有所增加,2010—2020年,极重要区面积约减少了 2 000 km<sup>2</sup>;高度重要区域 20 a 间面积变化一直呈下降趋势,约减少了 2 700 km<sup>2</sup>,主要是浮梁县和婺源县极重要区域增加,使得县域范围内生态系统服务高度重要区等级提升,故面积有所减少;20 a 间,中等重要区面积先增后减,整体呈增长趋势,一般重要区面积先减后增,整体呈下降趋势,不太重要区面积变化不明显。

从空间分布特征来看,极重要区主要分布在东部怀玉山区、武夷山区和西部的九岭山区,该区域降雨量充足,森林资源丰富,生境质量较好,人为干扰活动也较少;高度重要区域主要集中分布在极重要区周围,以及北部的彭泽县、浮梁县和南部的萍乡市等区域,这些区域地类以林地为主,森林具有良好的水源涵养和土壤保持能力,故生态系统的供给能力较强;中等重要区和一般重要区均分布在鄱阳湖平原及其周围区域,平原区地势平坦,人类开发建设活动较为密集;不太重要区面积较少,空间分布特征并不明显。

从生态系统服务各类型来看,水源涵养服务主要呈现东高西低的分布特征,20 a 间,水源涵养服务极重要区面积先增后减,整体呈增加趋势,主要集中分布在东部山区,西部九岭山区附近有零星分布,这些区域降雨量较多,植被丰富,故水源涵养能力较强;高度重要区域主要分布在极重要区域四周和鄱阳湖平

原南部区域。土壤保持服务空间分布呈两边高,中间低的特征,20 a 间面积整体变化幅度较小,高值区主要分布在山区,受地形影响较大。生物多样性保护服务和水质净化服务极重要区均分布在东西部山区和鄱阳湖区范围内,其中,生物多样性服务极重要区 20 a 间面积一直减少,不太重要区面积持续增加,主要是由于经济发展,人类建设活动加快,使得区域内生境质量有所下降;水质净化服务极重要区面积呈增加趋势,共增长了约 500 km<sup>2</sup>,说明环鄱阳湖城市群 20 a 间水质净化能力有所提升。

将生态系统服务极重要区和高度重要区均归入生态系统服务重要区域,进而得到研究区其 2000—2020 年面积分别为  $5.41 \times 10^4$ ,  $5.24 \times 10^4$ ,  $5.20 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。与土地利用数据叠加,20 a 间,该区林地不断减少,建设用地面积不断增加,耕地面积先减后增,整体呈减少趋势,人类活动在一定程度上影响了生态系统服务供给能力。

3.1.2 生态敏感性分析 考虑到环鄱阳湖城市群大多属于鄱阳湖平原区,将水环境敏感性结果与水土流失敏感性结果进行分权重叠加,分别赋值为 0.7, 0.3, 得到研究区生态敏感性结果(图 2 和表 4)。由图 2 可知,环鄱阳湖城市群生态敏感区以高度敏感和中度敏感为主,分布情况与生态系统服务功能重要性恰好相反,呈中间高,两边低的分布特征。

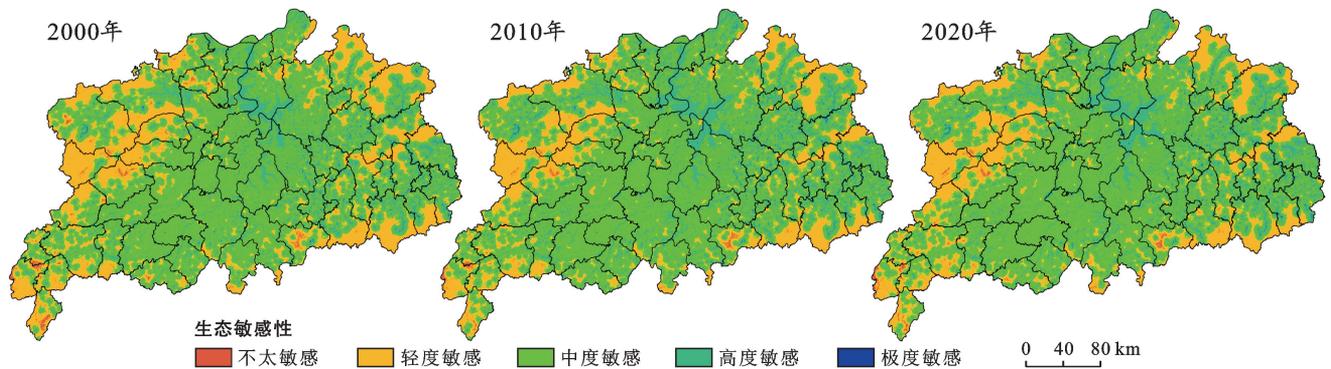


图 2 2000—2020 年环鄱阳湖城市群生态敏感性

Fig.2 Ecological sensitivity of Poyang Lake urban cluster from 2000 to 2020

从时间变化特征来看,2000—2020年,环鄱阳湖城市群生态极敏感区面积整体较少,变化幅度较小;高度敏感区整体增幅明显,新增区域主要分布在鄱阳湖区附近及东部山区,从土地利用变化角度来看,20 a 间,水域面积增加使湖区范围内的敏感区面积扩大;中度敏感区和一般敏感区面积均先增后减,不太敏感面积一直呈减少趋势。

从空间分布特征来看,极敏感区主要零星分布在

东西部山区,既邻近河流,又依靠山区,且降水较多,故敏感性较强;高度敏感区主要集中分布在鄱阳湖区、西北部柘林水库及上饶市南部区域,河流湖区周围适宜人类居住耕种,受人类干扰较大,上饶市南部区域地势较高,且降雨量丰富,易诱发水土流失问题;中度敏感区分布在鄱阳湖平原西南部;一般敏感区分布在研究区四周;不太敏感区零星分布于萍乡市区、莲花县和金溪县等区域。

从生态敏感性各因子来看,水环境敏感性分布特征与河流水域的分布密切相关,研究区内以中度敏感区和高度敏感区分布最多,2000—2020年,中度敏感区面积不断增加,共增长了约 800 km<sup>2</sup>,高度敏感区和极度敏感区面积先增后减,整体呈增长趋势,主要是由于“退耕还湖”政策的实施,20 a 间水域面积呈增长状态,故研究区整体的水环境敏感性有所提升,一般敏感区和不太敏感区面积整体呈减少趋势。水土流失敏感性分布呈两边高,中间低的特征,其多受降雨和地形影响,高值区域主要分布在东西部山区,低值区域多分布在鄱阳湖平原,20 a 间,极敏感区面积先增后减,但依旧呈增长趋势,增幅较小。

将生态极敏感区和高度敏感区均归入生态敏感区域,进而得到研究区其 2000—2020 年面积分别为  $2.05 \times 10^4$ ,  $2.48 \times 10^4$ ,  $2.41 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。

与土地利用数据叠加,20 a 间,环鄱阳湖城市群林地、水域和耕地面积均呈增长趋势,河湖流域地区极易受人为活动影响,降水较多的高海拔山区极易发生水土流失,这些都是未来应进行重点保护与治理的区域。

3.1.3 生态保护重要性分析 基于最大值法,识别研究区生态保护重要区域,其分布呈现“两边高、中间低”的空间特征,与环鄱阳湖城市群“三山一平原”的地形特征较为一致(图 3 和表 4)。

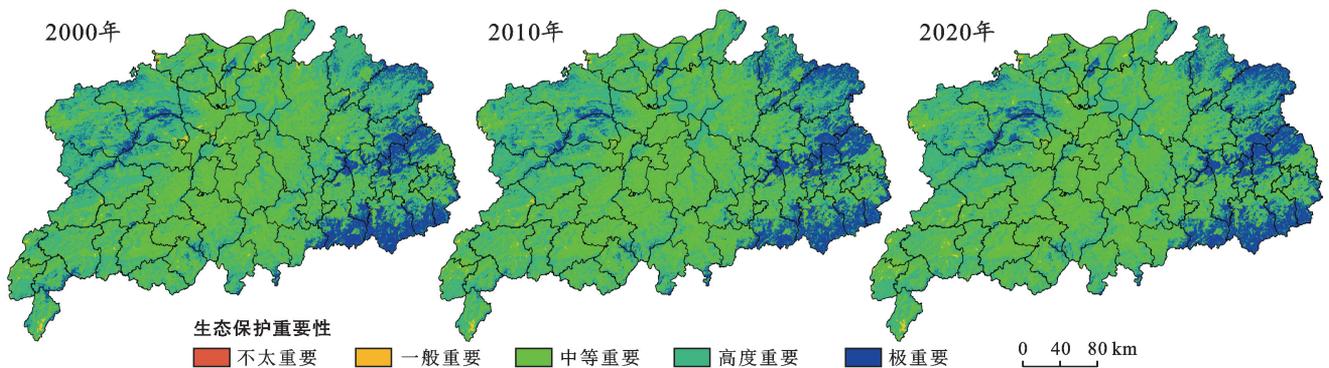


图 3 2000—2020 年环鄱阳湖城市群生态保护重要性

Fig.3 Ecological protection importance of Poyang Lake city cluster from 2000 to 2020

2000 年,环鄱阳湖城市群生态保护极重要区域面积为  $1.03 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占区域总面积的 11.16%,主要集中在怀玉山区和武夷山区,婺源县、浮梁县和九岭山区也有零星分布。该区地形多以山地为主,林地资源丰富,生境质量较好。生态保护高度重要区域面积为  $5.31 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,在研究区四周均有分布,中部区域主要分布在鄱阳湖区和南昌市梅岭山区附近。中等重要区图斑主要分布在鄱阳湖平原,一般重要区和不太重要区域面积较少。

2010 年,环鄱阳湖城市群生态保护极重要区域面积为  $1.12 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占区域总面积的 12.13%,较 2000 年面积有所增加,新增部分主要集中在景德镇市区、浮梁县和婺源县等区域,该区 2010 年降水较多,森林水源涵养能力有所提升,生态系统服务供给能力增强。生态保护高度重要区域面积  $5.23 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,分布情况未发生太大变化,婺源县和浮梁县范围内高度重要区面积减少,主要是由于其极重要区面积有所增加。生态保护中等重要区和不太重要区面积无太大变化,一般重要区面积略有减少。

2020 年,环鄱阳湖城市群生态保护极重要区域面积为  $1.10 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占区域总面积的 11.92%,分布在东部山区的范围有所减少,但西部武宁县的面积有所增加,20 a 间,莲花县、芦溪县、宜春市区范围内极重要区面积不断减少。生态保护高度重要区域面积为  $5.18 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,主要分布在极重要区域周围,面积 2010 年有所减少。中等重要区面积较 2010 年增加了 700 km<sup>2</sup>,该区位于鄱阳湖平原,地类以农田和建设用地为主,人类建设活动较为频繁。

将生态保护极重要区和高度重要区均划入生态保护重要区域,进而得到研究区 2000,2010,2020 年面积分别为  $6.34 \times 10^4$ ,  $6.35 \times 10^4$ ,  $6.28 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,主要分布在东西部山区生境质量较好的区域,该区地类均以林地和水域为主,两者的生态系统服务价值均较高,对于后续生态保护工作开展具有重要意义,故应加以重点保护。一方面在全域范围推行“林长制”的实施,创新林业生态绿色共享机制,另一方面要严格执行《江西省耕地草地河湖休养生息规划(2016—2030)》,大力保护研究区的林业资源与水资源。

表 4 2000—2020 年环鄱阳湖城市群生态保护重要性评价结果

生态功能	年份	不太重要/ 敏感	一般重要/ 轻度敏感	中等重要/ 中度敏感	高度重要/ 敏感	极重要/ 极度敏感
水源涵养	2000	0.28	0.35	3.13	3.95	1.52
	2010	0.30	0.38	3.03	3.45	2.07
	2020	0.34	0.34	3.15	3.52	1.88
土壤保持	2000	4.28	2.45	1.54	0.75	0.21
	2010	4.47	2.21	1.52	0.79	0.24
	2020	4.53	2.26	1.44	0.77	0.23
生物多样性保护	2000	0.26	1.56	1.56	0.52	5.33
	2010	0.37	1.38	1.75	0.57	5.16
	2020	0.46	1.42	1.66	0.58	5.11
水质净化	2000	0.28	0.52	1.02	1.18	6.23
	2010	0.23	0.52	1.15	1.09	6.24
	2020	0.24	0.49	1.08	1.14	6.28
生态系统服务重要性结果	2000	0.01	0.67	3.14	4.40	1.01
	2010	0.01	0.54	3.44	4.15	1.09
	2020	0.01	0.62	3.40	4.13	1.07
水土流失敏感性	2000	0.45	2.63	2.46	2.34	1.35
	2010	0.44	2.53	2.49	2.30	1.47
	2020	0.42	2.66	2.48	2.30	1.37
水环境敏感性	2000	1.62	1.37	3.20	2.47	0.57
	2010	1.33	1.22	3.25	2.81	0.62
	2020	1.33	1.26	3.28	2.75	0.61
生态敏感性结果	2000	0.09	2.09	5.00	2.03	0.02
	2010	0.07	1.70	4.98	2.45	0.03
	2020	0.06	1.75	5.01	2.38	0.03
生态保护重要性结果	2000	0.01	0.04	2.84	5.31	1.03
	2010	0.01	0.03	2.84	5.23	1.12
	2020	0.01	0.03	2.91	5.18	1.10

### 3.2 生态保护重要性空间格局

3.2.1 全局空间自相关分析 基于 GeoDa 软件对生态保护重要性结果的空间分布情况进行分析。由于该软件不能直接以栅格数据进行处理,故本文基于 ArcGIS 软件,创建  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  的格网并赋值,输入 GeoDa 软件运行,得到研究区生态保护重要性的 Moran's  $I$  值(表 5)。结果表明,2000,2010,2020 年 Moran's  $I$  指数均为正值,分别为 0.71,0.72,0.73, $Z$  值得分分别为 221.83,228.36,230.12, $p$  值均为 0.001,这表明环鄱阳湖城市群生态保护重要性结果在空间上具有显著的正相关性。故借助局部空间自相关分析中的 LISA 图进一步探索生态保护重要性结果在局部空间上的聚集情况。

表 5 不同年份生态保护重要性空间自相关分析结果

Table 5 Results of spatial autocorrelation analysis of ecological protection importance in different years

年份	Moran's $I$ 值	$Z$ 得分	$p$ 值
2000	0.71	221.83	0.001
2010	0.72	228.36	0.001
2020	0.73	230.12	0.001

3.2.2 局部空间自相关分析 基于 GeoDa 软件中单变量局部 Moran's  $I$  模块得到研究区生态保护重要性结果的 LISA 图(图 4),并将其分为 4 种类型:高高聚集、低低聚集、低高聚集和高低聚集。研究区 20 a 间空间聚集特征均以高高聚集和低低聚集为主,高低聚集和低高聚集分布零散且斑块较少。

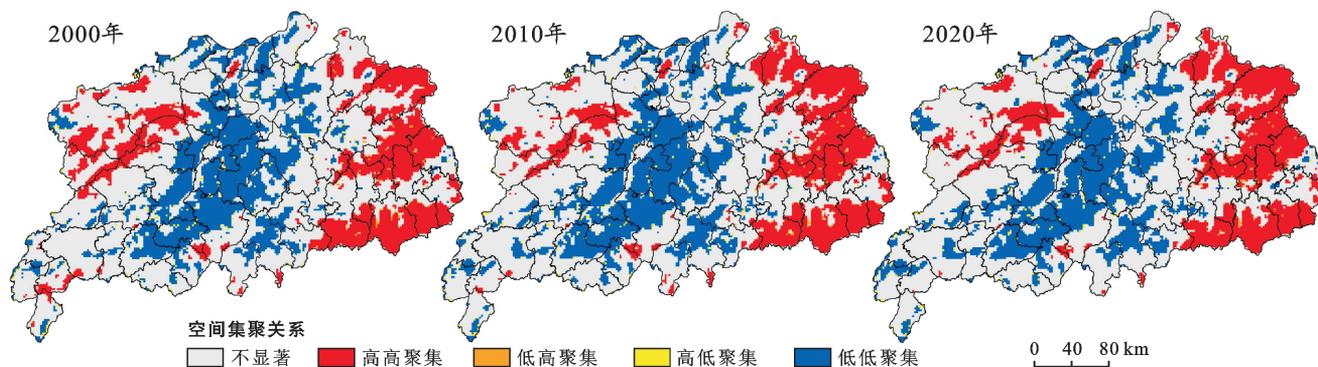


图 4 2000—2020 年环鄱阳湖城市群生态保护重要性空间集聚关系

Fig.4 Spatial clustering relationship of ecological protection importance in Poyang Lake city cluster from 2000 to 2020

(1) 高高聚集区。环鄱阳湖城市群生态保护重要性高高聚集区主要分布在东西部丘陵山区,呈块状分布。2000—2020 年,高高聚集区面积不断减少,前 10 a 间,西部丘陵山区的高高聚集区明显减少,具体位于修水县和芦溪县等区域,生态保护重要性在空间上的集聚效应有所下降,从自然角度来看,降雨量的变化在一定程度上影响了县域生态系统服务供给能力,从土地利用变化情况来看,该区林地面积减少,建设用地面积增加,人为建设活动使区域生境质量受到破坏,东北部丘陵山区的高高聚集区面积有所增加,具体位于婺源县和浮梁县;后 10 a 间,高高聚集区变化情况并不明显。整体来看,生态保护重要性高高聚集区主要分布在怀玉山区、武夷山区和九岭山区等生境质量较好、人类干扰较少的区域,这些区域森林覆盖率较高,是未来重要的生态保护区和生态红线划定范围。

(2) 低低聚集区。研究区生态保护重要性低低聚集区主要分布在鄱阳湖平原区域。20 a 间,低低聚集区面积不断增加,前 10 a 间,鄱阳湖平原东北部的低低聚集区面积有所减少,具体位于鄱阳县和余干县等区域,主要是由于该区域 2010 年生态保护重要性区域面积有明显增长,增长区域皆位于鄱阳湖区东部和南部区域,从土地利用类型角度来看,2010 年环鄱阳湖城市群水域面积增长了 8.13%,两者均对生态保护重要性的提高具有重要意义。同期政府为迎合鄱阳湖生态经济区建设,对区域内“五河一湖”进行立法保护,极大地促进了生态保护工作的有效开展,故生态保护重要性低低聚集区的空间集聚效应减弱。后 10 a 间,宜春市区、抚州市区、萍乡市区和鹰潭市区范围内的低低聚集区面积都有不同程度的增加,主要是由于平原区经济建设速度加快,人类活动干扰增加,在一定程度上破坏了生境质量,进而加剧了低低聚集区的空间集聚效应。整体来看,低低聚集区主要分布在人类生产生活区,大量的人为开发建设活动破坏了生态系统结构,挤压了生态空间,进而减弱了生态系

统的供给能力。

(3) 高低聚集区和低高聚集区。这两个聚集区面积整体较小,且在整个研究区范围内分布较为零星散乱。高低聚集区主要分布在进贤县、鄱阳县和九江市东部区域的低低聚集区附近,地类以林地和耕地为主,其次为水域,该区域生态保护重要性等级明显高于周围区域。低高聚集区主要分布在武宁县、瑞昌市、弋阳县和铅山县的高高聚集区附近,地类以耕地和林地为主,其次为建设用地,该区域生态保护重要性等级明显低于周围区域。

3.2.3 生态保护重要性空间变化 基于生态保护重要性评价结果,1—5 分别表示由不太重要到极重要,将 2000 年数据与 2020 年数据进行叠加分析,得到环鄱阳湖城市群 20 a 间生态保护重要性变化情况(图 5),其取值范围为 $[-4, 4]$ ,将其分为 3 类: $[-4, -0.1]$ ,生态保护重要性减弱区; $[-0.1, 0.1]$ ,生态保护重要性稳定区; $(0.1, 4]$ ,生态保护重要性增强区。

2000—2020 年,怀玉山区和鄱阳湖平原的生态保护重要性程度一直维持较为稳定的状态,面积为  $6.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。生态保护重要性减弱区面积为  $1.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要集中分布在萍乡市区、宜春市区、鹰潭市区和南昌市区及其周边区域,同时在九江市西部也有零星分布,一方面由于武夷山区 20 a 来生态系统服务功能重要性有所下降,另一方面则是因为市区范围内建设用地的快速扩张以及人类不合理的开发利用活动,使区域生态系统结构受损,进而导致生态保护重要性等级有所下降。生态保护重要性增强区面积为  $1.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要集中分布在鄱阳县、浮梁县和婺源县以及鄱阳湖区周围区域,一方面这些区域主要分布在生态保护重要性高高聚集区附近,其正向空间溢出效应影响较大,带动周边区域生境质量不断提升;另一方面,受“退耕还湖”政策影响,20 a 间,水域面积有所增加,故生态系统服务价值有所提升,生态保护工作取得一定成效。

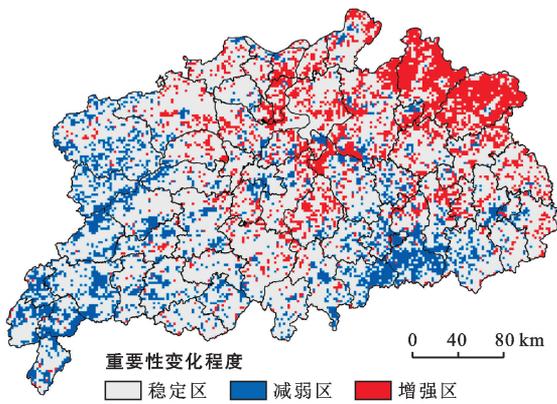


图 5 生态保护重要性变化

Fig. 5 Changes in ecological protection importance

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

江西省生态本底较好,森林覆盖率居全国第二,但自然生态系统整体质量不高,经济发展和生态保护之间的矛盾依然存在。从生态保护重要性结果来看,2000—2020年,鄱阳湖区、婺源县和浮梁县的生态保护重要区面积均有增加,考虑到鄱阳湖在维护区域生物多样性以及缓解长江中下游汛期洪水压力等方面的作用,故实行“退耕还湖”政策,水域面积有所增加,湖区生态系统功能有所提,婺源县和浮梁县多受降雨影响,后10a间区域生态系统服务功能重要性增加。从生态保护重要性变化结果来看,生态保护重要性减弱区均分布在各城市市区范围内,说明城市化进程对生态环境的影响较为显著,大湖流域研究区是一个复合的生态系统,如何协调经济发展与生态保护的关系以实现其城镇的高质量发展仍是未来应探索的重点问题。

本文基于生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价对环鄱阳湖城市群20a间的生态保护重要性评价结果及其空间分布特征展开研究,在此基础上对不同等级的生态保护重要性区域提出不同的保护建议,具有一定的理论意义和实践意义。但本文仍存在以下不足:在选取评价因子时,应对人为因素对生态保护重要性评价结果的影响进行更深入的思考;其次,除自然断点法外,可尝试选择其他方法划定各生态服务功能和敏感性因子的重要性等级。在未来的研究中,一方面,可进一步对生态系统服务功能重要性与生态系统稳定性之间的关系进行深入思考,同时也可将生态红线数据与研究结果进行叠加,以验证生态保护重要性评价研究结果的科学性和合理性;另一方面,可基于生态保护重要性评价结果,因地制宜在不同区域开展“双评价”和生态安全格局研究,大力推进研究结果实践化。

### 4.2 结论

基于生态系统服务功能重要性和生态敏感性评价识别环鄱阳湖城市群生态保护重要性结果,在2 km×2 km 格网尺度下,借助 GeoDa 软件中 Moran's I 指数和 LISA 图,进一步探索研究区生态保护重要性结果的空间分布特征。

(1) 2000—2020年,环鄱阳湖城市群生态系统服务功能重要区域面积分别为  $5.41 \times 10^4$ ,  $5.24 \times 10^4$ ,  $5.20 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,呈逐年减少趋势;生态敏感区域面积分别为  $2.05 \times 10^4$ ,  $2.48 \times 10^4$ ,  $2.41 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,呈先增后减趋势;生态保护重要区域面积分别为  $6.34 \times 10^4$ ,  $6.35 \times 10^4$ ,  $6.28 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,地类均以林地和水域为主。

(2) 在2 km×2 km 格网尺度下,环鄱阳湖城市群生态保护重要性的 Moran's I 指数分别为 0.71, 0.72, 0.73, *p* 值均为 0.001,说明研究区生态保护重要性在空间上显著聚集,其高高聚集区主要分布在九岭山区、武夷山区和怀玉山区等人为活动较少、生态保护良好的区域,形状多呈块状分布;低低聚集区则主要分布在环鄱阳湖平原区,主要是由于平原区适宜人类生存和开发建设,人类活动密集,经济发展的同时生态系统本身的某些功能与结构受损;高低聚集区和低高聚集区在整个研究区范围内零星分布,高低聚集区主要分布在低低聚集区附近,低高聚集区主要分布在高高聚集区附近。

(3) 2000—2020年,浮梁县、婺源县和鄱阳湖区周围区域的生态保护重要性呈现增强状态,怀玉山区和鄱阳湖平原区域重要性主要呈现稳定状态,宜春市、萍乡市和鹰潭市及周围区域生态保护重要性程度有所减弱。

(4) 对于极重要和高度重要区域,稳定森林覆盖率和提升森林质量是首要任务,其次,应采取有效措施促进湿地恢复和自然保护区建设,以达到遏制生境退化的目的。对于中等重要、一般重要和不太重要区域,应处理好经济高质量发展和生态保护之间的关系,尤其是在南昌市、九江市和抚州市等人类活动较为密集的区域,提高城市绿地覆盖率,在城市周边建立生态缓冲区,以此缓解生态空间生存压力。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 谷树忠,胡咏君,周洪.生态文明建设的科学内涵与基本路径[J].资源科学,2013,35(1):2-13.
- [2] 李杰,贾坤,张宁,等.基于遥感与生态服务模型的青岛市生态保护重要性评价[J].遥感技术与应用,2021,36(6):1329-1338.
- [3] 自然资源部办公厅.自然资源部办公厅关于印发《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》的

- 函自然资办函[2020]127号[J].自然资源通讯,2020(4):41-54.
- [4] 方一舒,祖健,艾东,等.面向国土空间规划的昆明市生态保护重要性评价[J].中国农业大学学报,2021,26(3):152-163.
- [5] 熊善高,秦昌波,于雷,等.基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究:以南宁市为例[J].生态学报,2018,38(22):7899-7911.
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [7] 赵予爽,刘春霞,李月臣,等.重庆市生态系统服务功能重要性评价[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2017,34(3):44-53.
- [8] 吕一河,张立伟,王江磊.生态系统及其服务保护评估:指标与方法[J].应用生态学报,2013,24(5):1237-1243.
- [9] 徐卫华,欧阳志云,王学志,等.汶川地震重灾区生态保护重要性评价与对策[J].生态学报,2008,28(12):5820-5825.
- [10] 李晖,杨树华,姚文璟,等.基于GIS的怒江流域中段生态保护重要性评价[J].中国生态农业学报,2011,19(4):947-953.
- [11] 牛晓楠,倪欢,陈国光,等.福建省生态保护重要性评价[J].生态学报,2022,42(3):1130-1141.
- [12] 李晶,王媛,殷守强,等.张家口市生态保护重要性评价及主导生态功能分区研究[J].土壤通报,2020,51(2):280-288.
- [13] 张雪飞,王传胜,李萌.国土空间规划中生态空间和生态保护红线的划定[J].地理研究,2019,38(10):2430-2446.
- [14] 严政,王壮壮,周成杰,等.基于生态保护重要性的江西省瑞金市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2021,41(1):260-266.
- [15] 冯宇.呼伦贝尔草原生态红线区划定的方法研究[D].北京:中国环境科学研究院,2013.
- [16] Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1981,5(1):23-31.
- [17] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 2004,40(2).
- [18] 杨蕾.基于InVEST模型的三江源主要生态系统服务权衡与协同研究[D].上海:上海师范大学,2020.
- [19] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
- [20] 张慧.基于生态服务功能的南京市生态安全格局研究[D].江苏南京:南京师范大学,2016.
- [21] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.
- [22] 丁玲.基于InVEST模型的宁安市土壤保持服务功能研究[D].黑龙江哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [23] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于GIS/RS和USLE鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [24] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [25] 马超飞,马建文,布和敖斯尔.USLE模型中植被覆盖因子的遥感数据定量估算[J].水土保持通报,2001,21(4):6-9.
- [26] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].地理学报,2020,75(1):160-178.
- [27] 傅春,王乐志,邓俊鹏,等.不同影响因素对鄱阳湖流域生境质量变化特征分析[J].中国农村水利水电,2021(11):1-8.
- [28] 王大尚,李屹峰,郑华,等.密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系[J].生态学报,2014,34(1):70-81.
- [29] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,等.汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析[J].生态经济,2022,38(4):193-200.
- [30] 傅春,康晚英.环鄱阳湖区农业面源污染TN/TP时空变化与分布特征[J].长江流域资源与环境,2012,21(7):864-868.
- [31] 李益敏,管成文,郭丽琴,等.基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J].农业工程学报,2018,34(20):267-276.
- [32] 王丽婧,席春燕,郑丙辉.三峡库区流域水环境保护分区[J].应用生态学报,2011,22(4):1039-1044.
- [33] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.
- [34] 姚小微,曾杰,李旺君.武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J].农业工程学报,2015,31(9):249-256.
- [35] 王博,黄晓军,刘萌萌.区域建设用地开发强度格局演化及影响因素分析:以陕西省为例[J].干旱区地理,2020,43(6):1635-1647.
- [36] 黄飞飞,张小林,余华,等.基于空间自相关的江苏省县域经济实力空间差异研究[J].人文地理,2009,24(2):84-89.
- [37] 张翠菊,张宗益.中国省域产业结构升级影响因素的空间计量分析[J].统计研究,2015,32(10):32-37.
- [38] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [39] 李欣,方斌,殷如梦,等.江苏省县域“三生”功能时空变化及协同/权衡关系[J].自然资源学报,2019,34(11):2363-2377.
- [40] 郭方圆.湘潭县“三生”功能空间分异特征及影响因素分析[D].湖南长沙:湖南师范大学,2021.
- [41] 任金铜,杨可明,陈群利,等.草海湿地区域景观生态脆弱性时空变化特征[J].生态与农村环境学报,2018,34(3):232-239.