

DOI: 10.20103/j.stxb.202405151100

周航,赵先超.基于网格尺度的长株潭城市群土地利用碳排放与生态风险空间关系.生态学报,2025,45(22): - .

Zhou H, Zhao X C. Spatial relationships between land use carbon emissions and ecological risk in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on Grid Scale. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

基于网格尺度的长株潭城市群土地利用碳排放与生态风险空间关系

周 航,赵先超*

湖南工业大学城市与环境学院, 株洲 412007

摘要:厘清基于网格尺度的土地利用碳排放与生态风险的空间分布特征,可为微观尺度生态环境的可持续发展提供新视角。以长株潭城市群为研究对象,基于 2012—2022 年土地利用、夜间灯光和经济社会等数据,测算和分析城市群碳排放风险与生态风险的时空演变特征,在此基础上运用双变量空间自相关模型探究二者的空间集聚规律。结果表明:(1)2012—2022 年土地利用总转化面积为 $81.322 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中,建设用地面积扩张最多,水域面积缩减最多。(2)2012—2022 年,净碳排放量减少 $1101.869 \times 10^4 \text{ t}$;碳排放风险呈减弱态势,空间分布呈多“核心-边缘”圈层结构。(3)2012—2022 年生态风险总体呈微弱下降趋势,空间分布格局以洞庭湖和湘江流域为中心向四周递减。(4)研究期间 Moran's I 由 0.256 变化为 0.309,碳风险与生态风险之间具有显著的正相关,且正向效应增强。空间上高-低集聚区和高-高集聚区呈减弱态势,低-低集聚区和低-高集聚区呈上升态势,碳风险高(低)值区与生态风险高(低)值区呈现空间同质性,这进一步证明碳风险对生态风险具有正向驱动作用。

关键词:土地利用碳排放风险;生态风险;夜间灯光;双变量空间自相关;长株潭城市群

Spatial relationships between land use carbon emissions and ecological risk in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on Grid Scale

ZHOU Hang, ZHAO Xianchao*

College of Urban and Environment, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China

Abstract: Clarifying the spatial distribution characteristics of land use carbon emissions and ecological risk at a grid-scale can provide a new perspective for the sustainable development of local ecosystems. Focusing on the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (CZT) urban agglomeration, this study examined the spatial and temporal dynamics of carbon and ecological risks using land use, night light, and socioeconomic data from 2012 to 2022. Furthermore, this study investigated how these risks were spatially clustered using a bivariate spatial autocorrelation model. The results showed that: (1) From 2012 to 2022, the total area of land use conversion reached $81.322 \times 10^4 \text{ hm}^2$. Construction land expanded the most, while water area shrank the most. (2) Net carbon emissions decreased by $1101.869 \times 10^4 \text{ t}$. The risk of carbon emissions (CR) has been diminishing, and the spatial distribution exhibits a multi-"core-edge" circle structure. (3) Ecological risk (ER) showed a slight overall downward trend, with the spatial distribution pattern characterized by a gradient of decreasing intensity radiating outward from the center, which is focused around Dongting Lake and the Xiang River basin. (4) Moran's I changed from 0.256 to 0.309 during the study duration. There was a significant positive correlation between carbon and ecological risks, and the positive effect was further strengthened. Spatially, high-low and high-high cluster showed a

基金项目:湖南省自然资源科技项目(20230108GH);湖南省教育科学规划重点课题(XJK23AGD007);湖南工业大学研究生科研创新项目(CX2428)

收稿日期:2024-05-15; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

weakening trend. The low-low and low-high cluster showed an increasing trend. The spatial homogeneity between areas of high (low) carbon risk and areas of high (low) ecological risk was further evidence of the positive driving effect of carbon risk on ecological risk.

Key Words: land use carbon emissions risk; ecological risk; night lighting; bivariate spatial autocorrelation; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

生态风险是指人类活动和自然环境变化对生态系统及其组成部分造成负面效应的可能性^[1-3]。随着经济社会的发展,人类活动的加剧导致生态系统风险频发^[4]。土地作为社会经济活动的载体^[5],生态系统的重要组成部分,几乎承载着所有的人类活动,土地利用变化产生的直接碳排放约占同期碳排放总量的三分之一^[6],其碳排放量仅次于化石燃料^[7]。当前,因土地利用碳排放增多引发的全球气温上升、冰川积雪融化、生物多样性减少及生态脆弱性增加等问题,既是当今世界面临的主要生态环境问题,也加剧了生态系统风险。因此,研究土地利用变化下碳排放增多引发的生态风险问题,亟须重点关注、深入探讨。党的二十大报告也明确提出,注重绿色发展,把生态文明建设融入经济社会发展各方面、全过程;促进人与自然和谐共生,推动构建人类命运共同体,创造人类文明新形态。目前,我国正处于城镇化建设的重要时期,经济的快速发展和建设用地的扩张必然会导致碳排放过度增长、城市热岛效应加剧,生态环境与人类发展间的矛盾将进一步尖锐。因此,面向双碳战略深入研究碳排放风险与生态风险的时空变化及集聚规律,对促进区域经济高质量发展与土地资源可持续发展具有重要意义。

目前,世界范围内土地利用及其变化造成的陆地生态系统碳储量损失是第二大碳排放源^[8]。有研究表明,碳排放的增加会导致生态系统服务价值下降^[9]、生态风险加剧^[10],威胁区域生态安全。因此,为客观清晰评估碳排放对区域生态环境的影响,本研究通过构建土地利用碳排放风险指数进行评估,以表征研究区碳排放风险的相对大小^[11-12]。目前,关于土地利用碳排放风险的研究对象多为行政区^[13]、城市地域单元^[14]等区域,在此基础上,引入碳排放风险指数和碳足迹^[15]对区域碳排放风险进行分析,然而,较大研究尺度的碳排放风险评估增加了评价结果的不确定性,一定程度上削弱了研究成果的转化与实际应用。值得重点关注的是,土地变化不仅会影响区域的碳排放风险,也会导致生态风险产生相应变化。近年来,随着人地矛盾日益凸显,学界对生态风险的评估对象由重金属^[16]、水环境^[17]等向土地利用^[18]延展,有学者通过 RRM 模型^[19]或景观格局指数^[20]对生态脆弱区进行风险评价。在此基础上,为全面客观、精细刻画区域生态风险的活动态势,学者们进一步对生态风险的时空格局^[21]和影响因素^[22]等方面展开讨论,研究发现自然因子对生态风险的影响具有较为显著的空间分异特征^[23]。随着我国社会的主要矛盾转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾^[24],研究视角开始从人类活动^[25]、生态系统服务和生态系统健康^[26]、命运共同体^[27]等领域切入,为制定更为全面、综合的政策及措施提供多层次、多领域的的数据支撑和理论依据。然而,前述研究在研究尺度上多基于省、市等中宏观尺度,对县、网格等微观尺度的土地利用碳排放风险研究十分有限,而关于生态风险的研究对象也多聚焦于生态脆弱区,对人类活动强度较大的城市群研究相对较少,特别是现有关于碳排放风险或生态风险的研究内容多从不同角度或尺度对二者单独展开研究,鲜有揭露二者空间关系。因此,以碳减排为目标,开展基于土地利用变化的碳排放与生态风险二者空间关系分析,特别是聚焦碳排放对区域生态风险影响研究,既在一定程度上厘清土地利用碳排放与生态风险之间存在的复杂作用机制,还在一定程度上拓展了碳排放风险与生态风险的研究范畴以及丰富了传统地理学学科视角下的生态风险研究成果。

长沙、株洲、湘潭三市均入选了全国低碳试点城市,长沙、株洲、湘潭城市群(长株潭城市群)不仅是长江经济带重要经济增长极之一,也是我国新型城镇化重点培育的对象,其战略地位不容忽视。然而,随着经济的迅猛发展,工业化进程加快、城市建成区面积增加,城市建设用地扩张同生态用地保护之间胁迫程度不断加剧,如何实现区域经济平稳增长的同时保证城市群生态环境低碳、可持续发展是当前面临的重大课题^[28]。本

研究选取长株潭城市群为研究对象,运用网格分析和双变量空间自相关模型,明晰土地利用碳排放风险与生态风险的空间关联及集聚特征,旨在:(1)以土地利用为切入点,进而探索研究土地利用碳排放风险与生态风险的空间关联,可为双碳目标导向下区域生态风险识别及评估提供新的研究视角和风险评估指标;(2)目前,国内外鲜有基于土地利用碳排放风险与生态风险空间关系视角对区域生态保护提出相应建议,本研究则在探索开展二者空间关系的基础上,进一步基于空间集聚特征提出相关政策建议,为城市群区域高质量绿色低碳转型、高标准生境质量向优发展提供参考路径。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长株潭城市群是以长沙、株洲和湘潭为中心,1.5 小时通勤为半径,包括岳阳、益阳、娄底、常德和衡阳在内的城市聚集区(图 1),属亚热带季风湿润气候,地形以低山丘陵和冲积平原为主,中间地势较低,两边地势较高;域内河网密布,湘江、资江和沅江贯穿长株潭城市群,是域内主要的 3 条河流,此外,浏阳河、捞刀河、涟水等支流共同构成密集的湘江水网系统,以支撑区域农业灌溉与城市用水;矿产资源以有色金属、黑色金属和稀土金属为主,主要集中在株洲、湘潭等地;土壤类型以红壤及水稻土为主;植被类型为中亚热带常绿阔叶林。2012—2022 年,域内常住人口由 4047.01 万人增至 4135.60 万人,房屋建筑施工面积由 16188.21hm² 增至 28019.26hm²,地区经济生产总值由 17662.68 亿元增至 37392.86 亿元,第二产业增加值由 9611.49 亿元升至 15510.22 亿元,城镇化率由 51.00% 升至 64.90%,工业能源消费量由 5176.98 万 t 标准煤减至 5044.05 万 t 标准煤,城市群各市年均气温范围由 16.20—17.90℃ 升至 18.10—19.80℃。

1.2 数据来源与预处理

土地利用数据来源于武汉大学 2012—2022 年中国逐年土地利用数据集(annual China Land Cover Dataset, CLCD)(<https://zenodo.org/>);NPP-VIIRS 夜间灯光数据来源于 Earth Observation Group(https://eogdata.mines.edu/products/vnl/#annual_v2);DEM 数据地理空间云平台(<https://www.gscloud.cn/>);经济社会数据来源于 2013—2023 年《湖南统计年鉴》以及长沙、株洲、湘潭、岳阳、益阳、娄底、常德和衡阳 8 市的统计年鉴。为便于研究,本研究使用 ArcGIS10.7 软件对所用栅格数据重采样为 30m×30m,坐标统一至 WGS_1984_UTM_Zone_49N,综合考虑研究区面积及样本计算量,本研究通过 ArcGIS 10.7 的渔网工具将长株潭城市群划分为 5km×5km 大小的网格,共得到有效评价单元 4180 个。

2 研究思路与研究方法

本研究结合多源数据构建了 2012—2022 年长株潭城市群土地利用碳排放风险与生态风险的时空变化及空间关系分析路径(图 2),主要分为以下四个步骤:①运用 ArcGIS 10.7 对 2012—2022 年对长株潭城市群土地数据进行叠加分析,得到土地利用转移数据,在此基础上借助 Origin 2022 软件对 2012—2022 年不同土地类型间的转化关系进行可视化;②通过夜间灯光、土地利用和能源数据计算出各格网碳排放量,运用土地利用碳排放风险模型测算并分析 2012—2022 年城市群土地利用碳排放风险时空演变趋势;③通过景观格局指数,计

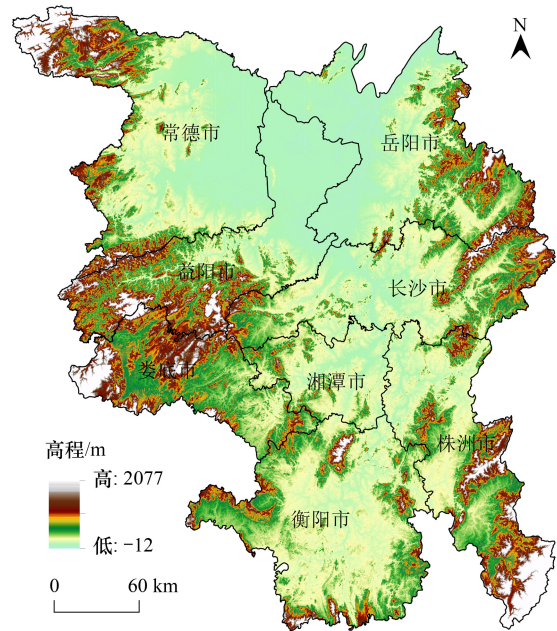


图 1 研究区位图

Fig.1 Study area

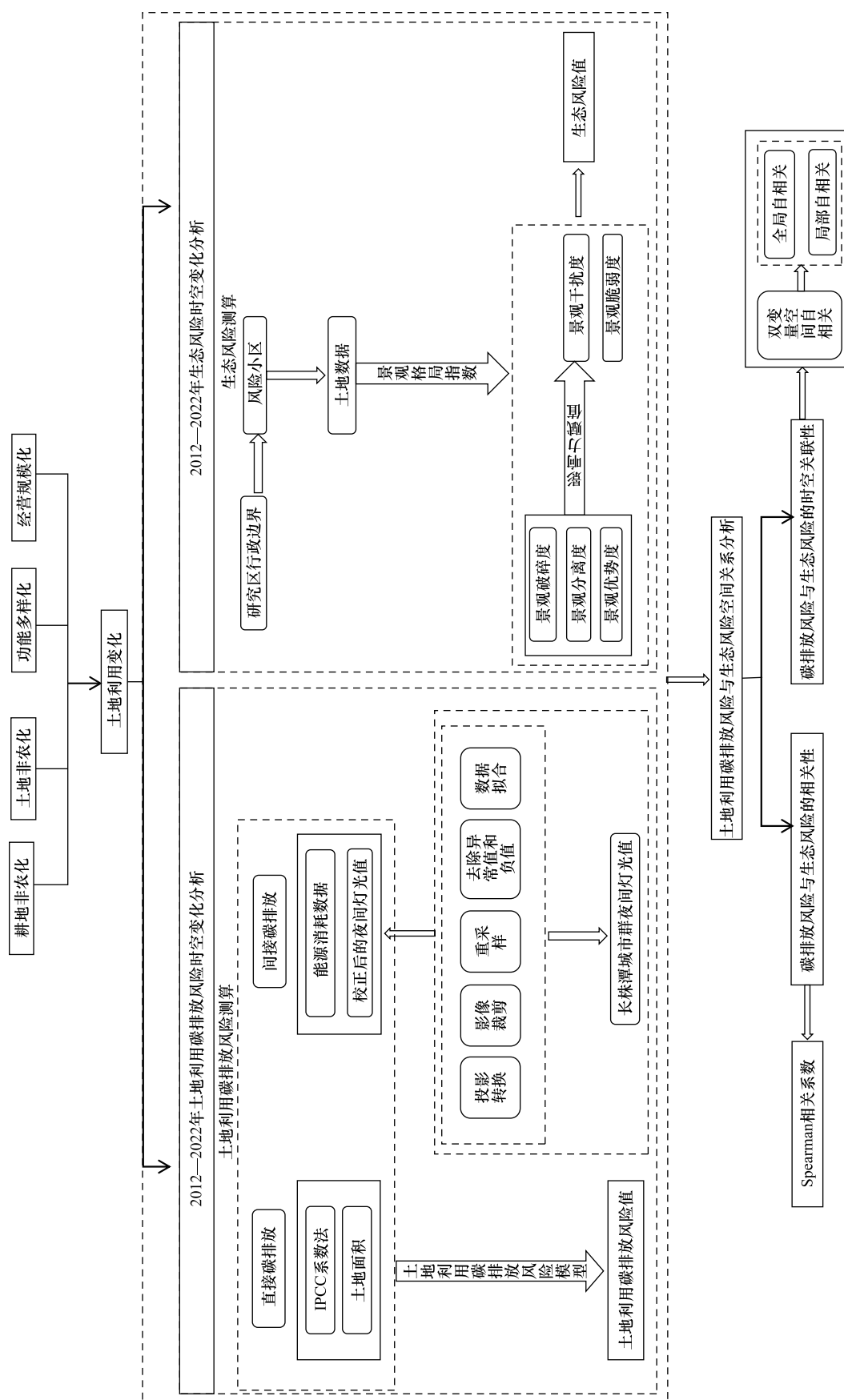


图 2 技术路线

Fig.2 Technology roadmap

算并分析生态风险的时空演变趋势;④考虑到数据非正态分布,本研究首先运用 SPSS27.0 软件对城市群 4180 个网格的碳排放风险与生态风险进行 Spearman 相关性分析;再运用双变量空间自相关模型分析两者的空间关系。

2.1 土地利用碳排放估算方法

土地利用碳排放测算分为直接碳排放估算和间接碳排放估算^[29-30]。其中,直接碳排放估算指土地利用结构其自身变化带来的碳排放量^[6],一般通过碳排放系数法进行估算。公式如下:

$$C_d = \sum L_i = \sum U_i \delta_i$$

式中, C_d 为直接碳排放量; L_i 为第 i 种土地类型产生的碳排放量; U_i 为第 i 种土地类型面积; δ_i 为第 i 种土地类型的碳排放系数;本研究据已有文献成果结合研究区实际情况^[31-32],对碳汇地类林地、草地、水域和未利用地的碳排放系数分别取值为 -0.6440 、 -0.0205 、 -0.0230 、 -0.0050t/hm^2 ,碳源地类耕地的碳排放系数取值为 0.4970t/hm^2 。

间接碳排放估算即建设用地的碳排放则是指土地利用过程中由于人类活动所产生的碳排放,结合 IPCC《国家温室气体排放清单指南》提供的能源消耗碳排放测算方法进行测算。由于网格尺度能源消耗数据获取困难,本研究参考杜海波等^[33]的研究方法,通过夜间灯光数据间接估算研究单元的建设用地碳排放量,为验证夜间灯光数据与城市群碳排放量二者的关联性与数据的有效性,通过线性方程对 2012—2022 年长株潭城市群夜间灯光总亮度值与能耗碳排放量进行拟合,拟合判定系数($R^2 = 0.785$),显著性 $P < 0.001$,据此,夜间灯光数据与能源消耗碳排放具有较强相关性,可用来开展网格尺度的碳排放量测算。基于此,参考现有研究成果^[30],得到土地利用碳排放计算公式:

$$C_l = \sum C_n = \sum E_n \times \alpha_n \times \beta_n$$

式中, C_l 指建设用地碳排放量; C_n 第 n 种能源类型产生的碳排放量; E_n 表示第 n 类能源的消耗量; β_n 表示第 n 类能源的折算标准煤系数; α_n 表示第 n 类能源的碳排放系数。

土地利用净碳排放公式如下:

$$C = C_d + C_l$$

2.2 土地利用碳排放风险指数

土地利用变化会影响区域的生态系统稳定性,进而影响区域的生态风险,本研究参考有关研究成果^[34],构建土地利用碳排放风险指数,以表征长株潭城市群各网格的碳排放风险,公式为:

$$CR = \sum_{j=1}^n \frac{S_j K_j}{S}$$

式中, CR 为土地利用碳排放风险指数, S_j 和 K_j 分别指第 j 类土地的面积及碳排放系数, S 为区域土地总面积。

2.3 生态风险指数

为探测各评价单元生态风险的相对大小,本研究参考有关文献^[35],构建生态风险指数模型(表 1)对有效评价单元进行风险评估。公式如下:

$$ER = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} R_i$$

式中, ER 指生态风险指数; A_i 为土地类型 i 的面积, A 表示区域总面积, R_i 表示景观损失度。

2.4 土地利用碳排放风险和生态风险分级标准

为直观、清晰地展示 2012—2022 年长株潭城市群土地利用碳排放风险与生态风险时空演化特征,采用 Jenks 自然断点法,将土地利用碳排放风险与生态风险分别划分为 5 个等级。土地利用碳排放风险等级划分标准:低风险($CR \leq 0.497$)、较低风险($0.497 < CR \leq 8.316$)、中风险($8.316 < CR \leq 17.034$)、较高风险($17.034 < CR \leq 31.959$)、高风险($CR > 31.959$);生态风险等级划分标准:低风险($ER \leq 0.026$)、较低风险($0.026 < ER \leq 0.$

038)、中风险($0.038 < ER \leq 0.056$)、较高风险($0.056 < ER \leq 0.093$)、高风险($ER > 0.093$)。

表 1 景观格局指数计算公式
Table 1 Landscape pattern index and calculation formula

指数 Index	公式符号 Formula symbols	含义 Implications
景观破碎度 Landscape fragmentation	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	n_i 为土地类型 <i>i</i> 的斑块数目; A_i 为土地类型 <i>i</i> 的总面积
景观分离度 Landscape separation	$S_i = \frac{A}{2 A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$	A 表示区域总面积
景观优势度 Landscape dominance	$K_i = \frac{(Q_i + M_i)}{4} + \frac{L_i}{2}$	Q_i 指斑块 <i>i</i> 出现的格网数与总格网数之比; M_i 指斑块 <i>i</i> 的数目与斑块总数目之比; L_i 指斑块 <i>i</i> 的面积与样方总面积之比
景观干扰度 Landscape interference	$F_i = a \times C_i + b \times S_i + c \times K_i$	C_i 代表 <i>i</i> 类土地类型的景观破碎度, S_i 代表 <i>i</i> 类土地类型的景观分离度, K_i 代表 <i>i</i> 类土地类型的景观优势度, C_i 、 S_i 、 K_i 对应权重 <i>a</i> 、 <i>b</i> 、 <i>c</i> 的权重值分别为0.5、0.3、0.2
景观脆弱度 Landscape fragility	E_i	对排序后的土地利用类型进行归一化处理,从而得到景观脆弱度指数;耕地为0.1905;林地为0.0952;草地为0.1429;水体为0.2381;未利用地为0.2857;建设用地为0.0476
景观损失度 Landscape loss degree	$R_i = F_i \times E_i$	F_i 代表景观干扰度, E_i 表示景观脆弱度

2.5 双变量空间自相关

双变量空间自相关基于已有研究成果进行延伸与拓展^[36],从空间上表征不同属性变量间的集聚程度及特征。全局 Moran's *I* 用于研究城市群土地利用碳排放风险与生态风险之间的空间关系及关联程度,局部 Moran's *I* 反映两者的空间集聚特征。全局空间自相关公式为:

$$M = \frac{\sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m W_{ab} \times (x_a - \bar{x}) \times (y_b - \bar{y})}{S^2 \times \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m W_{ab}}$$

式中, M 为双变量全局空间自相关指数; m 为网格总数; W_{ab} 是空间权重矩阵; x_a 和 y_b 分别为自变量和因变量在网格单元*a*和*b*的观测值; S^2 为样本方差。

双变量局部空间自相关公式为:

$$M_a = Z_a \sum_{b=1}^m W_{ab} Z_b$$

式中, M_a 指双变量局部 Moran's *I*; m 为网格总数; W_{ab} 是空间连接矩阵; Z_a 、 Z_b 是网格单元*a*、*b*属性值的方差标准化值。

3 结果分析

3.1 土地利用变化分析

通过桑基图(图 3)对长株潭城市群土地利用变化进行分析,从转出角度分析,耕地、林地和水域是主要转出面积,转出率分别为 48.360%、41.732%和 9.405%。林地是耕地的主要转出类型,占比达 74.350%,其次是建设用地和水域,转出面积占比分别为 20.447%、5.052%,草地和未利用地占耕地转出面积较少,分别为 0.056×10^4 和 $0.003 \times 10^4 \text{hm}^2$;林地转出类型有耕地、草地、水域和建设用地,主要的转出类型为耕地,占林地转出面积的 97.897%;草地的转出类型为耕地、林地、水域、未利用地和建设用地,总转出面积为 $0.107 \times 10^4 \text{hm}^2$;水域的转出类型为耕地,占比达 91.994%,其次是建设用地,占比达 7.379%,林地、草地和未利用地占水域的转出面积较少,分别为 0.046×10^4 、 0.001×10^4 和 $0.001 \times 10^4 \text{hm}^2$;未利用地的转出类型为耕地和建设用地,总转出面积较少,仅 $0.003 \times 10^4 \text{hm}^2$;建设用地的转出类型为耕地和水域,总转出面积为 $0.298 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。

从转入角度分析,耕地、林地和建设用地是主要转入面积,转入率分别 49.638%、36.029%、11.453%,耕地转入面积的主要来源为林地和水域,分别占转入面积的 82.306%、17.431%;耕地、草地和水域是林地转入面积的主要来源,其中,耕地是其主要来源,转入面积为 $29.240\times 10^4\text{hm}^2$;草地转入量较少,总转入面积为 $0.083\times 10^4\text{hm}^2$;水域转入面积的 88.176%为耕地,11.193%来源于建设用地;耕地、草地和水域是未利用地转入面积的主要来源,总转入面积为 $0.005\times 10^4\text{hm}^2$;建设用地转入量的 86.333%为耕地,7.291%为林地,6.060%为水域,剩余部分转入面积来源于草地和未利用地。

总体来看,研究区 2012—2022 年总转化面积为 $81.322\times 10^4\text{hm}^2$,其中耕地、未利用地和建设用地的转入量大于转出量,面积分别增加 1.040×10^4 、 0.002×10^4 和 $9.016\times 10^4\text{hm}^2$,林地、草地和水域转出量大于转入量,面积分别减少 4.638×10^4 、 0.025×10^4 和 $5.395\times 10^4\text{hm}^2$,建设用地扩张、林地和水域等生态用地减少,区域内人地矛盾凸显,经济社会发展与生态环境保护矛盾不断加剧。

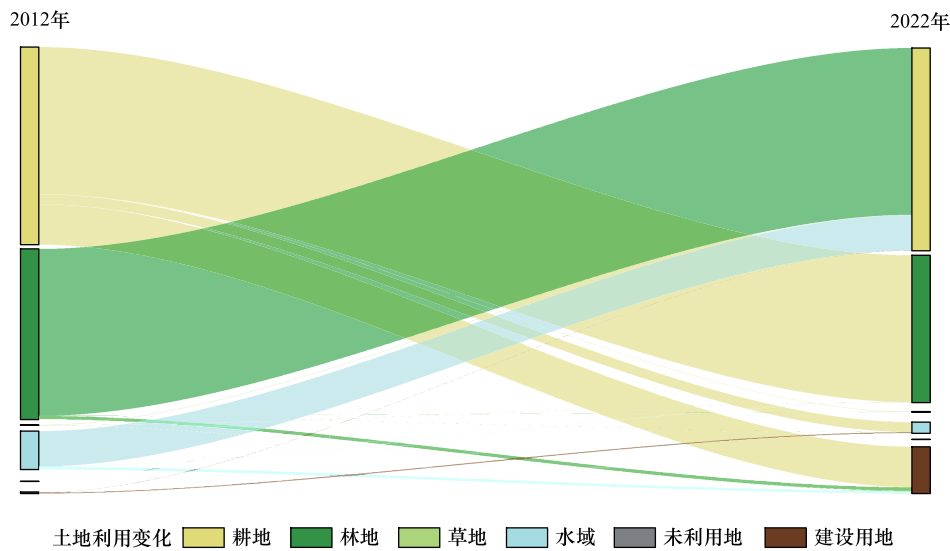


图 3 2012—2022 年土地利用转移桑基图/ 10^4hm^2

Fig.3 Sankey diagram of land use conversion from 2012 to 2022

3.2 土地利用碳排放风险时空演变分析

3.2.1 碳源与碳汇分析

由土地利用碳排放量核算表(表 2)可知,2012—2022 年碳源占碳排放总量比由 95.081%降至 94.065%,碳汇占碳排放总量比由 4.919%增至 5.935%,净碳排放呈下降态势。

表 2 2012—2022 年土地利用碳排放核算

Table 2 Land use carbon emissions accounting from 2012 to 2022									
年份 Years	建设用地 Construction land/ 10^4t	耕地 Cultivated land/ 10^4t	碳源 Carbon source/ 10^4t	林地 Forest land/ 10^4t	草地 Grassland / 10^4t	水域 Water / 10^4t	未利用地 Utilized land/ 10^4t	碳汇 Carbon sink/ 10^4t	净碳排放量 Net carbon emission/ 10^4t
2012	5644.061	216.992	5861.053	-302.355	-0.003	-0.844	0.000	-303.201	5557.852
2017	4850.054	216.606	5066.660	-298.532	-0.003	-0.879	0.000	-299.413	4767.247
2022	4538.564	217.509	4756.073	-299.368	-0.002	-0.720	0.000	-300.090	4455.983

从碳源构成来看,建设用地碳排放量由 $5644.061\times 10^4\text{t}$ 降至 $4538.564\times 10^4\text{t}$,呈下降态势。耕地的碳排放量由 $216.992\times 10^4\text{t}$ 增至 $217.509\times 10^4\text{t}$,耕地碳排放量出现小幅上升,表明随着经济的快速发展,生产、生活水平的提高,推动了种养殖业等产业发展,2022 年化肥施用量达 $133.710\times 10^4\text{t}$,农业碳排放处于较高排放水平;

从碳汇构成来看,林地碳吸收量减少,由 $302.355\times10^4\text{t}$ 减至 $299.368\times10^4\text{t}$,草地和未利用地碳吸收量基本保持不变,水域用地的碳吸收量呈先增后减的倒“U”型态势。

3.2.2 土地利用碳排放风险时空演变分析

从时间维度来看(表 3),2012—2022 年长株潭城市群土地利用碳排放风险呈减弱趋势,其风险均值由 5.496 降至 4.640,土地利用碳排放风险等级主要以较低风险区为主,说明“绿色税制”等政策、“三高四新”等战略和“生态修复”等措施助推区域减污增汇降碳协同发展,在一定程度上使区域碳排放风险得到有效控制。低碳排放风险区面积占比呈下降态势,由 7.830%减至 0.004%;较低碳排放风险区面积占比先增后减,三期面积占比分别为 86.152%、93.895%和 93.093%;中碳排放风险面积占比先减后增,总体呈上升态势,年均增幅为 $0.292\times10^4\text{hm}^2$;较高碳排放风险区面积持续上升,由 $11.500\times10^4\text{hm}^2$ 增至 $19.139\times10^4\text{hm}^2$;高碳排放风险面积出现小幅萎缩,风险面积由 $5.745\times10^4\text{hm}^2$ 减至 $3.752\times10^4\text{hm}^2$ 。

从空间维度来看(图 4),土地利用碳排放风险空间分布总体呈多“核心-边缘”圈层的空间分布结构。碳排放风险较高区主要集中分布长沙市的芙蓉区、开福区、天心区、岳麓区,株洲的天元区、石峰区,湘潭的岳塘区等地;碳排放风险较低区域主要分布在城市群四周,其地形主要为湘中丘陵、幕阜山和连云山等,地势崎岖多山地丘陵环绕。

表 3 2012—2022 年土地利用碳排放风险面积变化
Table 3 Changes in the area of land use carbon emissions risk from 2012 to 2022

土地利用碳排放风险等级 Land use carbon emission risk level	2012 年		2017 年		2022 年	
	面积 Area/ $\times10^4\text{hm}^2$	占比 Proportion/%	面积 Area/ $\times10^4\text{hm}^2$	占比 Proportion/%	面积 Area/ $\times10^4\text{hm}^2$	占比 Proportion/%
低风险 Lowest risk	75.767	7.830	0.036	0.004	0.036	0.004
较低风险 Lower risk	833.679	86.152	908.600	93.895	900.847	93.093
中风险 Medium risk	40.991	4.236	39.404	4.072	43.908	4.537
较高风险 Higher risk	11.500	1.188	13.898	1.436	19.139	1.978
高风险 Highest risk	5.745	0.594	5.743	0.593	3.752	0.388

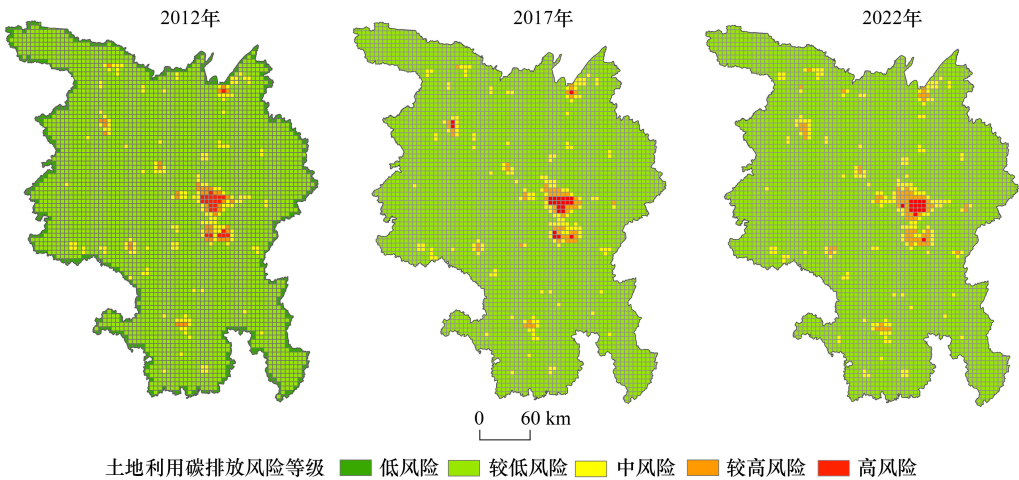


图 4 2012—2022 年土地利用碳排放风险空间格局

Fig.4 Spatial pattern of land use carbon emissions risk from 2012 to 2022

3.3 生态风险时空演变分析

从时间维度来看(表 4),2012—2022 年长株潭城市群生态风险呈缓慢降低趋势,其风险均值由 0.031 降至 0.030,生态环境保护、山水田园修复等政策有利于降低区域的景观破碎度、提高生态福祉。低生态风险区

面积占比由 40.712% 增至 44.685%, 年均增幅为 $3.889 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 较低和高生态风险区面积均呈倒“U”型变化, 较低生态风险区三期面积占比分别为 37.535%、38.835% 和 38.124%, 高生态风险区三期面积占比分别为 0.384%、0.618% 和 0.411%; 中风险和较高生态风险区面积均呈持续下降态势, 中风险区面积占比由 17.021% 降至 13.388%, 风险面积年均减少 $3.503 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 较高生态风险区面积占比由 4.348% 减至 3.393%。

从生态风险空间分布来看(图 5), 长株潭城市群生态风险以洞庭湖流域和湘江流域为中心, 向四周逐渐递减。低风险和较低生态风险区是生态风险的主要来源, 二者空间分布由城市群四周向中间集聚。中风险和较高生态风险区主要分布洞庭湖平原及湘江流域, 空间分布格局大体呈“Y”型分布, 高风险区固定分布在南县、岳阳县、湘阴县、临湘市等区域。

表 4 2012—2022 年生态风险面积变化

Table 4 Ecological risk area changes from 2012 to 2022

生态风险等级 Ecological risk level	2012 年		2017 年		2022 年	
	面积	占比	面积	占比	面积	占比
	Area/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	Proportion/%	Area/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	Proportion/%	Area/ $\times 10^4 \text{ hm}^2$	Proportion/%
低风险 Lowest risk	393.966	40.712	396.879	41.013	432.852	44.685
较低风险 Lower risk	363.219	37.535	375.799	38.835	368.297	38.124
中风险 Medium risk	164.713	17.021	149.027	15.400	129.687	13.388
较高风险 Higher risk	42.071	4.348	39.997	4.133	32.867	3.393
高风险 Highest risk	3.712	0.384	5.979	0.618	3.978	0.411

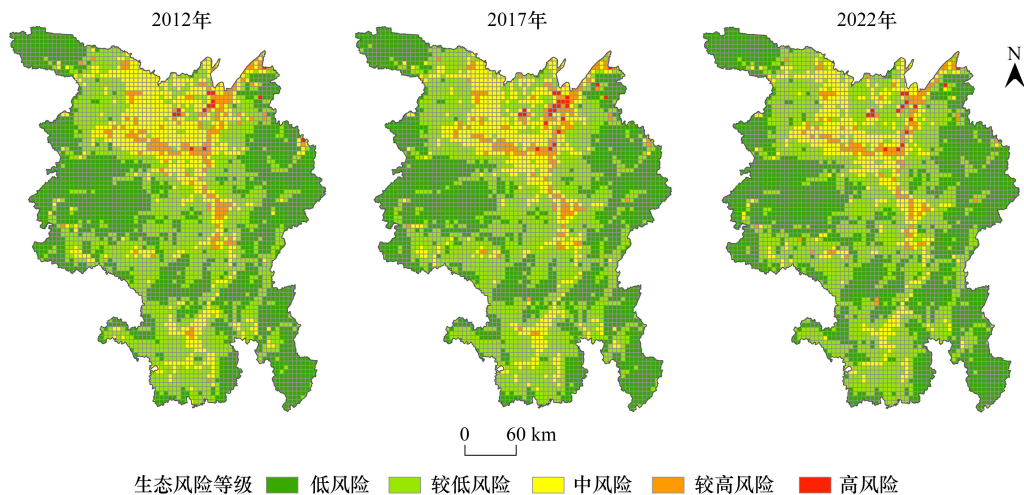


图 5 2012—2022 年生态风险空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological risk from 2012 to 2022

3.4 土地利用碳排放与生态风险相关性分析

2012、2017 和 2022 年的相关性系数分别为 0.747、0.802 和 0.790, 且在 0.01 水平上呈现双侧显著相关; 通过 Geodál.22 软件运行得到 Moran's I 分别为 0.256、0.284 和 0.309, 均在 99.9% 的置信度下通过显著性检验, 表明长株潭城市群碳排放风险对生态风险的影响不断增强, 并且该趋势在未来或将长期存续并增强。

为进一步分析格网尺度下碳排放风险同生态风险二者内部空间位置上的关联关系, 本研究依次选取 2012、2017 和 2022 年三期数据, 对网格尺度下的碳排放风险与生态风险进行双变量空间自相关分析。由 LISA 集聚图(图 6)可知, 长株潭城市群碳风险和生态风险之间的空间相关性可分为低-低集聚、高-高集聚、高-低集聚和低-高集聚 4 种集聚类型: 低-低集聚区稳定分布在城市群外围林地分布密集区, 是研究区主要空间分布类型, 其空间分布格局呈持续上升。高-高集聚空间分布态势呈下降态势, 研究早期主要集中在洞庭湖

区、湘潭的雨湖区和岳塘区、娄底市的娄星区以及长沙、株洲和衡阳的部分市区;研究后期,随着洞庭湖区生产效率提高,农户绿色种植意识的增强,氮、磷等生产要素和重金属冗余率降低,该区域碳排放风险下降,洞庭湖区的沅江市、华容县、君山区等县区由高-高集聚向低-高集聚区转移。因此,低-高集聚的主要分布区域由城市群北部边缘区向洞庭湖平原扩张,其空间分布数量呈上升态势,空间分布格局也由研究区北部向南延申。高-低集聚区零星分布于研究区内,其空间分布呈减弱态势,固定分布在安化县、新化县、炎陵县、宁乡市、临湘市和平江县。

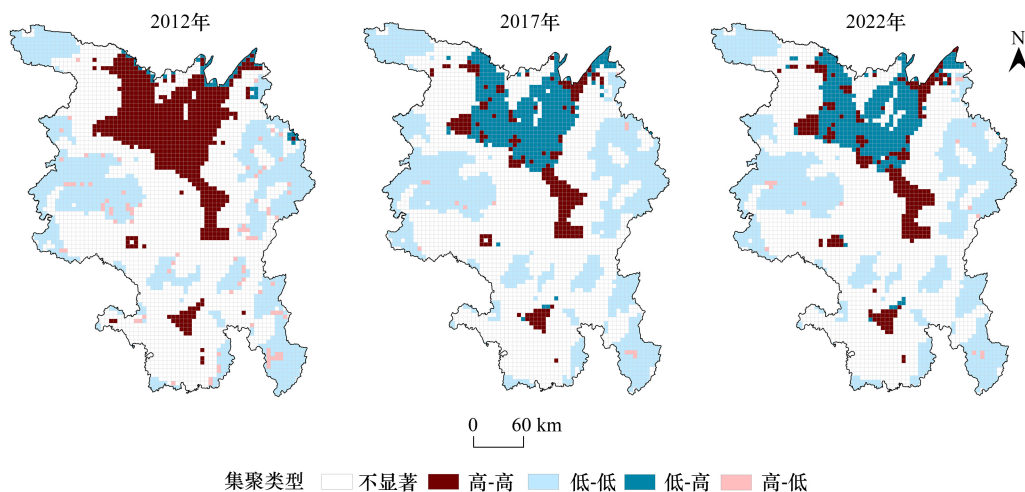


图 6 2012—2022 年土地利用碳排放与生态风险 LISA 集聚图

Fig.6 LISA cluster map of land use carbon emissions and ecological risk from 2012 to 2022

LISA 聚类:局部空间自相关 Local Indicators of Spatial Association

4 讨论

4.1 碳排放风险与生态风险时空演变特征

现有的研究成果多从省、市、县等层面单独对碳排放风险或生态风险开展有关研究^[10,13,37],本研究从微观角度入手,以网格作为研究尺度,探究土地利用碳排放风险同生态风险的时空演变。研究发现,2012—2022 年,城市群建设用地和耕地面积增加,但能源利用效率的提升、产业结构的优化升级对于区域碳源和碳风险指数下降具有显著作用,较高碳排放风险始终分布在城市群各市的中心城区,各市中心城区是地方政府经济、文化发展的重心,在政策、人口的推动下区域住宅、交通和教育等城市职能不断完善,人口向心性效应显著,生产、生活能源需求量居高不下。2012—2022 年,长株潭城市群生态风险呈现下降态势,与王彬等以珠三角^[38]、韩雨非等以武汉市^[10]为研究区的研究结论一致,其中洞庭湖平原和湘江流域是生态风险高值区,这与杨伶等^[35]以洞庭湖流域为研究区的研究结果一致,这主要是由于这些地区产业结构主要以资源密集型产业为主,工业废水废气、农业污水的不合理排放,弱化了生态系统供给、调节、支持和文化功能;湖泊、湿地被建设用地、耕地侵占改变了区域原始自然景观、减少生物多样性,破坏了区域生态系统平衡。

4.2 碳排放风险与生态风险空间关联

研究结果表明土地利用碳排放风险与生态风险之间存在显著的正向效应,侧面说明了不合理的土地利用会对区域生态安全具有负面影响,不仅弱化土地的碳储存能力,还会导致区域碳风险和生态风险增加。其中,低-低集聚区分布在城市群四周,高海拔、高植被覆盖率和人类活动较为稀疏的优势为区域生境质量的稳定提供便利。高-高集聚区主要分布在城市中心城区、洞庭湖水系附近,一方面城镇化和工业化的较快发展促使城市住宅、工矿用地增加;另一方面,耕地的过度开发和土地资源的非合理利用使得区域地质安全问题凸显,从而导致该区域土地利用碳排放和生态风险较为严峻。低-高集聚区主要分布在“鱼米之乡”的洞庭湖平原,伴

随着产业结构优化升级、生产要素的集约化使用、农户绿色种养意识的增强和“退耕还林、退田还湖还湿”等方针,区域能源利用效率显著提高,但现代农业的发展、交通干线和水利工程等基建的修缮使区域出现湿地面积减少、水土流失和泥沙淤积,加剧了区域景观破碎度,降低了区域生态效率。高-低集聚区主要分布在安化县、新化县、炎陵县、宁乡市、临湘市和平江县,这些地区森林等自然资源丰富,主要以资源开采和初加工为主,矿山开采、冶炼过程中植被碳减少、碳排放的大量产生致使区域碳排放较高,而矿山周围林地、草地的环绕,土地结构的合理分布降低了碳排放风险对区域生态安全的影响,但长期按此情形发展,易弱化区域生态系统调节能力、碳平衡能力。

4.3 政策建议

本研究基于空间集聚特征,提出以下四点建议:①低-低集聚区生境质量较高,主要以生态环境保护和监测为重心,严格控制城市发展对生产、生态用地的侵占;其次,加强地方政府同地区高校科研合作,开展气候变化、生物保护、水土资源保持等研究,提供专区、专项、专业的“三专”生态治理方案;②高-高集聚区位于城市中心城区及水系附近,产业结构多以工业和能源为主,碳排放和生态风险均位于高值区,通过转变经济发展模式,优先发展“低能耗—高技术—高创收”等知识密集型产业提高能源效率,发挥长株潭生态绿心辐射作用,以推动城市更新、城市生态基础设施建设,优化城市蓝绿空间格局;③低-高集聚区主要以农产品种养殖业和初加工为主,区域耕地低效化、破碎化问题突出使其生态效应较为显著,牢守资源开发底线,严守资源利用上线,坚守“三区三线”,集中整治和保护洞庭湖湿地,发展绿色、有机、智慧农业,对提高区域碳汇潜能、加强区域生态韧性及抗风险能力具有重要作用;④高-低集聚区主要以资源开采为主,域内新化县、宁乡市等区域是中国铅、锌、锑等矿山的重要来源,通过转变高-低集聚区矿业经营、发展模式,以“转”赋能、以“升”聚力对助推城市群矿产企业跨区高效优质联动、矿区减污降碳高质量协同发展具有现实意义。与此同时,基于区域自然规律种植乡土树种对矿区进行生态防护与修复,以帮助矿区恢复生态功能,提高矿区及周围地区碳汇功能。

4.4 研究不足与展望

有关碳排放风险和生态风险的评估方法有待进一步完善,首先,由于数据限制,建设用地碳排放仅考虑能源消耗数据,未能将建筑、交通等能源部门的数据进行测算,关于耕地碳排放测算,未能结合研究区化肥、农药、农膜等生产要素数据对区域耕地碳排放进行更为精确评估,在今后研究中如何精确、科学评估微观尺度碳排放仍有待进一步深入;最后,对于生态风险的评估未能从人类活动强度和生态系统服务等多维度进行量化分析,在下一步研究中需进一步完善。

5 结论

(1) 2012—2022 年长株潭城市群土地转化面积占土地总面积的 8.404%。土地利用转变方向主要为生态用地向生活、生产用地转移。

(2) 研究期间,建设用地碳排放作为碳源的主要来源,10a 以来共下降 $1105.497 \times 10^4 \text{ t}$ 。土地利用碳排放风险空间分布特征多“核心-边缘”圈层结构,较高值区分布与研究区主要城镇用地相契合,其空间分布呈扩展态势;低碳排放风险主要分布在城市群四周,空间分布占比呈减少态势。

(3) 2012—2022 年研究区生态风险微弱下降,空间分布格局大体呈“Y”型分布,高风险区主要分布在耕地和水系周围,低风险区主要分布在城市群两侧的山地丘陵地带。

(4) 研究期间,城市群土地利用碳排放与生态风险的 Moran's I 由 0.256 增至 0.309,说明二者存在正相关且关联性增强,在日后研究中可考虑将土地利用碳排放风险引入生态风险评价体系,以便更为客观、全面地评估“双碳”目标导向下区域生态风险境况。由 LISA 聚类可知,城市中心城区的碳风险和生态风险均处于高值,而多山地、丘陵分布的较高海拔区二者均为低值,洞庭湖平原由于生态脆弱性较高,虽然区域碳风险较低但该区域生态风险仍处于较高风险,矿区受地形优势影响虽碳风险较高但对区域生态风险影响较小,为防止生态阈值到达临界点,增加区域生态风险程度,需及时采取相应措施降低区域碳风险程度。

参考文献 (References):

- [1] Tang L N, Wang L, Li Q Y, Zhao J Z. A framework designation for the assessment of urban ecological risks. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 387-395.
- [2] US Environmental Protection Agency. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. Washington (DC): US Environmental Protection Agency, 1998: 1-3.
- [3] 林梦婧, 石龙宇, 陈丁楷, 和思楠. 区域综合生态风险评价框架——以雄安新区为例. *生态学报*, 2023, 43(18): 7566-7584.
- [4] Wang L J, Luo G Y, Ma S, Wang H Y, Jiang J, Zhang J G. Integrating landscape ecological risk into ecosystem service value assessment: a case study of Nanjing City, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110625.
- [5] 边振兴, 刘彬, 管德阳. 基于土地利用变化的东北黑土区景观生态风险评价. *沈阳农业大学学报*, 2025, 56(1): 140-155.
- [6] 韩骥, 周翔, 象伟宁. 土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展. *生态学报*, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [7] Tian S Q, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Li Q, Yang Y J, Hu Z Y, Li C J, Deng Y H. Global patterns and changes of carbon emissions from land use during 1992—2015. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2021, 7: 100108.
- [8] 曲福田, 卢娜, 冯淑怡. 土地利用变化对碳排放的影响. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 76-83.
- [9] 赵先超, 田一豆, 张潇湘. 长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 215-225.
- [10] 韩雨非, 刘艳中, 陈勇, 汪樱, 张祚, 陈弘映, 谭玉川. 碳排放视角下武汉市土地生态风险时空格局演变. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 331-341.
- [11] 臧淑英, 梁欣, 张思冲. 基于 GIS 的大庆市土地利用生态风险分析. *自然灾害学报*, 2005, 14(4): 141-145.
- [12] 宋洪磊. 铜陵县土地利用碳排放效应及空间格局分析. *安徽农业科学*, 2015, 43(12): 299-302.
- [13] 郑永超, 文琦. 宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 207-212.
- [14] 袁壮壮, 叶长盛, 李辉丹. 基于土地利用变化的南昌市碳排放效应分析. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(5): 30-39.
- [15] 贾科利, 李小雨, 魏慧敏, 刘瑞亮, 李浩宇, 杨思雨. 宁夏县域土地利用碳排放空间分异与风险研究. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1757-1767.
- [16] Lv Y T, Kabanda G, Chen Y R, Wu C, Li W. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in manganese (Mn) contaminated site. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 942544.
- [17] 张雷, 李雪梅, 魏源, 冯承莲, 苏海磊, 刘玉贤, 赵亚男, 李飞龙, 郭芬, 张远, 薛靖川. 东江流域水环境中对羟基苯甲酸酯及其代谢物的赋存特征及生态风险评估. *环境工程*, 2024, 42(4): 91-99.
- [18] Omar H, Cabral P. Ecological risk assessment based on land cover changes: a case of Zanzibar (Tanzania). *Remote Sensing*, 2020, 12(19): 3114.
- [19] 乔蕻强, 程文仕, 乔伟栋, 刘学录. 基于相对风险模型的土地利用变化生态风险定量评价——以石羊河流域为例. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 198-204.
- [20] Gong J, Yang J X, Tang W W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(11): 14192-14215.
- [21] Wang H, Liu X M, Zhao C Y, Chang Y P, Liu Y Y, Zang F. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107454.
- [22] Lin X, Wang Z T. Landscape ecological risk assessment and its driving factors of multi-mountainous city. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109823.
- [23] 梅子钰, 张雅茹, 黄心言, 刘志成. 基于生态系统服务的青海湖流域生态风险评估及其空间异质性影响因素分析. *生态学报*, 2024, 44(12): 4973-4986.
- [24] 习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利. *人民日报* 2017-10-28(001) [2024-05-10].
- [25] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 胡维银. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(3): 290-299.
- [26] 欧阳晓, 宋翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478-5489.
- [27] 梁发超, 胡其玉, 赵晓星. 基于生命共同体的景观生态风险评价与管控策略——以成渝城市群为例. *经济地理*, 2021, 41(8): 152-159.
- [28] 陈义忠, 乔友凤, 郝灿, 卢宏伟, 彭贺, 夏军. 长江中游城市群生态足迹指标与社会经济发展的适配性. *资源科学*, 2022, 44(10): 2137-2152.
- [29] 杨静媛, 张明, 多玲花, 肖圣, 赵昱茜. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区. *环境科学研究*, 2022, 35(10): 2312-2321.
- [30] 王丹, 荆延德, 韩善梅, 高明秀. 基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9604-9614.
- [31] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [32] 方林, 李灿锋, 李浩杰, 刘艳晓. 长江经济带土地利用碳排放时空效应及驱动力. *草业科学*, 2022, 39(12): 2539-2553.
- [33] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据. *地理研究*, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [34] 张杰, 陈海, 刘迪, 史琴琴, 耿甜伟. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究. *西北大学学报: 自然科学版*, 2022, 52(1): 21-31.
- [35] 杨伶, 邓敏, 王金龙, 阙华斐. 近 40 年来洞庭湖流域土地利用及生态风险时空演变分析. *生态学报*, 2021, 41(10): 3929-3939.
- [36] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [37] 吴楠, 张永福, 李瑞. 基于景观指数的干旱区河谷县域土地利用生态风险分析及预测. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 207-212.
- [38] 王彬, 梅志雄, 魏俊超, 马杰. 基于空间统计的珠三角地区土地利用生态风险时空特征. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 423-431, 440.