

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.009.

韩雨非, 刘艳中, 陈勇, 等. 碳排放视角下武汉市土地生态风险时空格局演变[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 331-341.

Han Yufei, Liu Yanzhong, Chen Yong, et al. Spatiotemporal Evolution of Land Ecological Risk in Wuhan from the Perspective of Carbon Emission[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 331-341.

# 碳排放视角下武汉市土地生态风险时空格局演变

韩雨非<sup>1</sup>, 刘艳中<sup>1,2</sup>, 陈勇<sup>1,3</sup>, 陈弘映<sup>1,6</sup>, 谭玉川<sup>1,7</sup>, 汪樱<sup>2,4</sup>, 张祚<sup>3,5</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081;

2. 中国地质大学 公共管理学院, 武汉 430074; 3. 华中师范大学 公共管理学院, 武汉 430079)

**摘要:** [目的] 探究土地利用碳排放对土地生态安全的不利影响, 揭示不同因素的演变情况。[方法] 引入碳足迹压力指数, 并结合植被覆盖度、降水距平百分比指数、土壤侵蚀程度和土地利用混合度一同构建土地生态风险评价模型。使用熵权法确定风险指标权重并计算了综合风险指数。最后, 利用空间分析方法, 探究了武汉市 2010 年、2015 年、2020 年土地生态风险及空间集聚效应的时空演化规律。[结果] 武汉市生态风险整体呈降低态势但幅度较小, 各行政区风险指数差值大, 中心城区植被覆盖度低、土地利用混合度低、碳排放压力高、土地生态安全状况堪忧; 土地生态风险指数呈较强的空间集聚状态, 冷热点集聚程度先增强后减弱, 热点主要集中在中心城区和汉南区。[结论] 土地利用碳排放量的激增造成了土地生态风险的进一步加剧和风险来源的多样化, 引入碳足迹压力指数能更全面地评估区域土地生态风险情况, 为降低土地生态风险提供依据。

**关键词:** 土地生态风险; 碳排放; 空间数据分析; 武汉市

中图分类号: X821

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0331-11

## Spatiotemporal Evolution of Land Ecological Risk in Wuhan from the Perspective of Carbon Emission

Han Yufei<sup>1</sup>, Liu Yanzhong<sup>1,2</sup>, Chen Yong<sup>1,3</sup>, Chen Hongyi<sup>1,6</sup>,

Tan Yuchuan<sup>1,7</sup>, Wang Ying<sup>2,4</sup>, Zhang Zuo<sup>3,5</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and

Technology, Wuhan 430081, China; 2. School of Public Administration, China University of Geosciences,

Wuhan 430074, China; 3. School of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the adverse effects of land use carbon emissions on land ecological security, and to reveal the evolution of different factors. [Methods] The carbon footprint pressure index in combination vegetation cover, precipitation distance level percentage index, soil erosion degree and land use mixing degree together was introduced to construct a land ecological risk evaluation model. The entropy weighting method was used to determine the weight of risk indicators and calculate the comprehensive risk index. Finally, the spatial analysis was used to investigate the spatial and temporal evolution patterns of land ecological risk and spatial agglomeration effects in Wuhan in 2010, 2015 and 2020. [Results] The overall ecological risk in Wuhan City was decreasing but the magnitude was small, the difference of risk indices among administrative districts was large, the vegetation coverage in the central city was low, the land use mix was low, the carbon emission pressure was high, and the land ecological security was worrying. The land ecological risk index showed a strong spatial agglomeration state, and the degree of cold and hot spot agglomeration first increased and then weakened, and the hot spots mainly concentrated in the

收稿日期: 2023-02-22

修回日期: 2023-04-02

资助项目: 国家自然科学基金(41971237, 72174071)

第一作者: 韩雨非(1998—), 女, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全。E-mail: 1459206131@qq.com

通信作者: 刘艳中(1979—), 男, 山西吕梁人, 博士, 教授, 主要从事生态安全研究。E-mail: liuyanzhong@wust.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

central urban area and Hannan District. [Conclusion] The surge in land-use carbon emissions has led to the further aggravation of land ecological risks and the diversification of risk sources, and the introduction of carbon footprint pressure index can more comprehensively assess regional land ecological risks and provide a basis for reducing land ecological risks.

**Keywords:** land ecological risk; carbon emissions; spatial data analysis; Wuhan City

国际能源局(IEA)<sup>[1]</sup>报告显示,到2030年全球温室气体排放量将增加57%,会导致地表温度升高3℃。过高的碳排放会导致极端天气、干旱、海平面上升、空气污染及饥荒等灾害,对人们的生产生活造成极大危害,是影响土地生态安全的重要因素。1850年以来,土地利用变化产生的直接碳排放约占同期碳排放总量的1/3,成为仅次于化石能源消耗的第二大碳排放源<sup>[2]</sup>,由此引发的土地生态风险问题越来越得到重视。为适应国际发展新形势,我国提出“双碳”战略,承诺二氧化碳排放2030年左右达到峰值。因此,考虑土地利用碳排放对土地生态安全产生的影响,将碳足迹压力指数引入土地生态风险评价中具有现实意义。

1992年,美国环境保护署<sup>[3]</sup>(USEPA)提出了生态风险评价的概念,即评估生态系统受一个或多个胁迫因素影响后,可能导致不利生态后果的可能性。21世纪以来,随着生态安全研究的拓展深入,土地生态风险评价逐渐兴起并快速发展,形成了3个方面的研究。一是基于土地利用变化对土地生态风险进行分析研究,如Omar等<sup>[4]</sup>基于土地利用变化评估了桑给巴尔的生态风险指数,并模拟不同情景下2027年的土地利用变化情况。Mao等<sup>[5]</sup>建立单元网格计算综合生态风险指数,并揭示金石市土地生态风险的空间分异特征和成因。二是从风险形成机制出发的土地生态风险评价,如Kayumba等<sup>[6]</sup>采用CA-Markov模型模拟景观变化,并利用遥感数据建立易感性-灾害指数关系的生态风险评价模型,评估了巴音布鲁克湿地的生态风险。虞燕娜等<sup>[7]</sup>基于多源风险的发生概率、风险受体的抵御和自我恢复能力,建立了土地生态风险评价模型。三是基于景观结构指数的土地生态风险研究,如Yao等<sup>[8]</sup>基于生态系统脆弱性和对生态系统的干扰,评估了陆地生态系统提供的生境服务因景观格局变化而退化的风险。郝守宁等<sup>[9]</sup>以尼洋河流域为研究对象,评价分析了景观生态风险的时空动态演变特征。土地利用碳排放的研究则在1992年《联合国气候变化框架公约》通过后展开。迄今为止,土地利用碳排放的研究主要集中在碳排放核算、影响因素与驱动机制及碳排放量趋势预测<sup>[10]</sup>这3个方面。除此之外,徐泽等<sup>[11]</sup>利用信息熵和Tapio模型揭示了呼包鄂榆城市群土地利用混合度和碳排放的时空演变情况。檀斯园<sup>[12]</sup>划分网格单

元分析土地利用碳排放风险的时空变化,拓宽了土地利用碳排放的研究范围。上述研究从不同角度出發,对土地生态风险、土地利用碳排放进行了综合全面的评估研究,为土地生态安全研究提供了重要参考和借鉴。然而,目前国内外土地生态风险评价忽视了土地利用碳排放对土地生态安全产生的影响,导致土地生态风险评价体系构建不完善,评价结果理想化的问题。因此,开展考虑碳排放因素的土地生态风险评价,对评估区域土地生态安全状况至关重要,有利于掌握土地利用碳排放量、控制土地生态风险,为制定科学的土地生态保护政策提供参考,为实现生态文明建设和碳中和目标提供科学依据。

武汉市作为长江流域生态保护和经济发展的中心城市,经济发展迅猛,人口总数增速较快,建设用地扩张迅速,城市化水平提高的同时,人类对土地生态系统的干预愈发频繁,造成土地资源稀缺、土地利用不合理、碳排放量激增、生态风险上升等一系列环境问题。2017年,武汉市人民政府为加快推进城市绿色低碳发展,实现碳达峰,制定碳排放达峰行动计划。2018年,针对长江经济带生态环境保护问题,政府出台《长江经济带生态环境保护规划》。因此,在生态环境保护建设及碳达峰、碳中和背景下,将土地利用碳排放引入武汉市土地生态风险评价尤为重要。

## 1 研究区概况

武汉市位于湖北省东部、长江与汉水交汇处,是长江经济带核心城市,是我国著名的两型社会建设试验区的中心。地理位置为北纬29°58′—31°22′,东经113°41′—115°05′。全市下辖13个行政区,总面积8 569.15 km<sup>2</sup>。该市属于北亚热带季风性气候,年均温度为17.1℃,年降水量大约1 300 mm。武汉市地形地貌以丘陵为主,中间低平,北部低山林立,平均海拔约为16 m。区内植被种类丰富多样,且兼具南北方植物种类。2010—2020年,耕地面积减少88 340 hm<sup>2</sup>,建成区面积增加385.11 km<sup>2</sup>,常住人口增加266.23万人,地区生产总值增加10 050.13亿元。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 数据来源

本研究中涉及的人口、能源消耗数据来源于《武汉

统计年鉴》(2010—2020 年)。土地利用数据来自 OpenAIRE 和 CERN 创建的数据知识库 Zenodo(<https://zenodo.org/>)。植被覆盖度(vegetation fraction coverage,VFC)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。气象数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据来自 ASTER GDEM 数据(<https://www.nasa.gov/>)。土壤数据来自世界土壤数据库的中国土壤数据集。能源碳排放系数来源于《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

2.2 土地生态风险指数测算与分级

参考韧性城市理念,从土地生态系统的稳定性、脆弱性、恢复性特征出发,考虑武汉市生态基础、气候条件、土地结构、人类活动的影响,选取植被覆盖度指数(VFC)表征土地生态系统的基础风险;使用土壤

侵蚀程度指数(A)、降水距平百分比指数( $S_i$ )来表征土地生态系统的灾害风险;选取土地利用混合度( $T_h$ )、碳足迹压力指数( $C_p$ )表征土地生态系统的人类活动干扰风险。最终,以上述风险指标构建土地生态风险评价模型<sup>[13]</sup>,即

$$ERA = \sum_{i=1}^n W_i \cdot P_i$$

(1)

式中:ERA 为土地生态风险指数,取值范围为[0,1]; $W_i$ 为第  $i$  类指标风险权重,借助 SPSS 软件,采用熵权法(the entropy weight method,EWM),计算得到植被覆盖度、降水距平百分比指数、土地利用混合度、土壤侵蚀程度及碳足迹压力指数因子权重分别为 0.162,0.098,0.185,0.127,0.428; $P_i$ 为第  $i$  类单项生态风险标准化值,运用极值标准化方法进行标准化处理,其值介于[0,1]。风险评价指标及标准值获取方法见表 1。

表 1 风险评价指标的选择及标准化方法

Table 1 Selection of risk evaluation indicators and standardization methods

风险指标	计算公式或模型	注释	标准化公式
植被覆盖度	$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$	VFC 为植被覆盖度 <sup>[14]</sup> ;NDVI <sub>min</sub> 和 NDVI <sub>max</sub> 分别为归一化植被指数的最小和最大值	逆向标准化 $P_{VFC} = \frac{VFC_{\max} - VFC}{VFC_{\max} - VFC_{\min}}$
降水距平百分比指数	$S_i = \frac{R_i - \bar{R}_{a-b}}{\bar{R}_{a-b}} \times 100\%$	$S_i$ 为第 $i$ 年降水距平百分比指数 <sup>[15]</sup> ; $R_i$ 为第 $i$ 年年降水量; $R_{a-b}$ 为多年平均降水量	逆向标准化 $P_S = \frac{S_{\max} - S}{S_{\max} - S_{\min}}$
土地利用混合度	$T_h = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b_i}{m} \right) \ln \left( \frac{b_i}{m} \right)$	$T_h$ 为土地利用混合度 <sup>[11]</sup> ; $n$ 为土地利用类型的数量; $b_i$ 为某个县级单元内第 $i$ 类土地利用类型的面积; $m$ 为某个县级单元内全部土地利用类型的面积	逆向标准化 $P_T = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}$
土壤侵蚀程度指数	$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$	$A$ 为年平均土壤侵蚀量 <sup>[16]</sup> ; $R$ 为降雨侵蚀力因子; $K$ 为土壤可蚀性因子; $L$ 为坡长因子; $S$ 为坡度因子; $C$ 为植被覆盖与管理因子; $P$ 为水土保持措施因子	正向标准化 $P_A = \frac{A - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$
碳足迹压力指数	$C_p = C_m / C_s$	$C_p$ 为碳足迹压力指数 <sup>[17]</sup> ; $C_m$ 为不同土地利用方式的碳排放( $10^4$ t); $C_s$ 为不同的土地利用方式的碳吸收( $10^4$ t)。	正向标准化 $P_C = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}$

为确定武汉市的土地生态风险等级和状态,根据武汉市生态环境特点,使用自然断点法并参考环境、国土、气象等相关部门的综合评价方法,同时结合已有研究<sup>[13]</sup>,将土地生态风险划分为 5 个等级,见表 2。

表 2 土地生态风险等级划分标准

Table 2 Land ecological risk classification criteria

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
风险指数	(0,0.22]	(0.22,0.35]	(0.35,0.5]	(0.5,0.65]	(0.65,1]
风险状态	低	较低	中等	较高	高

2.3 碳排放量计算

由于耕地、园地、林地、草地、水域和未利用地 5 种用地类型的固碳能力相对比较稳定,通过碳排放系数直接估算碳排放量,而建设用地碳排放受多种因素影响,间接计算得到碳排放量。

2.3.1 直接碳排放计算 本文采用直接碳排放系数法进行估算,计算公式<sup>[18]</sup>如下:

$$C_n = \sum_n S_n \times f_n$$

(2)

式中: $C_n$ 为  $n$  种土地利用类型的年均碳排放量; $S_n$ 为第  $n$  种土地利用类型当年的面积; $f_n$ 为第  $n$  种土地利用类型的年均碳排放系数。根据孙赫<sup>[19]</sup>、方精云<sup>[20]</sup>、石洪听<sup>[21]</sup>等的研究成果,确定耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放系数分别为 0.042 2,−0.644,−0.002 1,−0.025 3,−0.000 5 t/hm<sup>2</sup>。

2.3.2 间接碳排放计算 由于建设用地内包含大量住宅区,因此建设用地碳排放量的计算中应包括能源消费和人类呼吸产生的碳排放<sup>[22]</sup>。考虑到数据的可获取性和能源消耗量等因素,选取表 3 中列举的能源类型,各区的能源消费量数据采用该区第二产业 GDP 与武汉市第二产业 GDP 比值来间接测算。计算公式<sup>[22]</sup>如下:

$$C_i = \lambda P + \sum_i E_i \times e_i$$

(3)



式中:  $C_i$  为建设用地碳排放量;  $\lambda$  为个体平均的碳排放系数, 取 0.079 t/a<sup>[23]</sup>;  $P$  为研究区常住人口数量;

$E_i$  为第  $i$  种能源消费的标准煤折算量;  $e_i$  为第  $i$  种能源的碳排放系数。能源碳排放系数见表 3。

表 3 能源碳排放系数

Table 3 Energy carbon emission factor table

能源种类	煤炭	焦炭	原油	燃料油	汽油	柴油	煤油	液化石油气	电力
碳排放系数/(kg/kgce)	0.7559	0.8550	0.5857	0.6185	0.5538	0.5921	0.5714	0.5042	0.2132

## 2.4 全局空间自相关

2.4.1 全局空间自相关 空间自相关是一种反映区域中某现象与邻近区域单元同一现象的相关程度的空间分析工具<sup>[24]</sup>, 可分为全局自相关和局部自相关两个方面。全局 Moran 指数(Global Moran's  $I$ ) 可从整体上揭示生态环境质量空间布局的集聚情况, 公式如下<sup>[25]</sup>:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中:  $n$  为样本数量;  $x_i$  与  $x_j$  为属性  $x$  在空间位置  $i$  和  $j$  的观测值;  $\bar{x}$  为属性  $x_i$  的平均值;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵。本文采用邻接性的权重矩阵, 若第  $i$  个地区和第  $j$  个地区相邻, 则  $W_{ij}$  取 1, 否则为 0。

本文使用 ArcGIS 软件中的 Global Moran's  $I$  探索土地综合生态风险格网尺度上的整体分布状况, 判断其是否存在空间集聚性。空间关系选择反距离插值, 距离方法选择欧几里得距离。Moran's  $I$  指数取值范围为  $[-1, 1]$ , 正值表示要素集聚, 负值表示要素离散; 数值为 0 无空间相关性, 随机分布<sup>[26]</sup>。

2.4.2 冷热点分析 热点分析作为一种常见的空间聚集特征分析方法, 可以有效识别出在不同置信区间内统计特征显著的空间集聚区, 高值区与低值区分别表现为空间集聚程度的热点和冷点<sup>[27]</sup>。本文运用 ArcGIS 10.2 中的热点分析工具, 分析武汉市土地生态风险的分布特点, 用以表征土地生态安全提升或降低的集中区域, 并采用 Standard Deviation 法进行分类。具体计算公式如下<sup>[28]</sup>:

$$G_i^*(d) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (5)$$

$$Z(G_i^*) = [G_i^*(G_i^*)] / \sqrt{\text{var}(G_i^*)} \quad (6)$$

式中:  $G_i^*(d)$  为具有显著统计意义的  $Z$  得分;  $W_{ij}(d)$  为空间权重, 相邻为 1, 不相邻为 0;  $X_{ij}$  为对应  $i$  行  $j$  列空间位置上的要素值;  $n$  为要素总数;  $Z(G_i^*)$  为对  $G_i^*$  值的统计检验值;  $E(G_i^*)$  和  $\text{var}(G_i^*)$  分别为空间不集聚的原假设下的期望值和方差。

## 3 结果与分析

### 3.1 单因子风险评价

3.1.1 植被覆盖度 根据 2010—2020 年植被覆盖数据, 使用自然断点法将其分为低  $[0 \sim 0.1]$ 、较低  $(0.1 \sim 0.3]$ 、中  $(0.3 \sim 0.5]$ 、较高  $(0.5 \sim 0.7]$ 、高  $(0.7 \sim 1]$  5 个等级, 见图 1。武汉市的平均植被覆盖度相对较高, 在过去 10 a 间整体呈现下降趋势, 但降幅并不明显, 中值区由中心向四周不断扩张。2010—2015 年, 武汉市植被覆盖度总体变化较小, 但中心城区尤其是江岸区和江汉区植被覆盖状况有明显改善。环境保护建设初见成效, 低植被覆盖度区域面积缩小 29.14%, 较高植被覆盖度区域面积扩张 29.01%, 建成区绿化覆盖率由 37.48% 提升至 39.65%, 森林覆盖率由 26.63% 提升至 28.01%。2015—2020 年, 植被覆盖度总体略微下降, 中值区持续由中心城区向四周扩展, 除北部黄陂区和新洲区植被覆盖度略有提高外, 其他区县无明显改善。截至 2020 年底, 全市建成区绿化覆盖率 42.07%, 森林面积达到 11.947 万  $\text{hm}^2$ 。

3.1.2 降水距平百分比指数 如图 2 所示, 2010 年、2015 年、2020 年均均为丰年, 空间上高值区由东南部逐渐向东北部转移, 且降水量逐年攀升, 年降水总量在 2020 年达近 30 a 峰值。2010 年全市年均降水量 1 494.8 mm, 相比上年增加 33.2%, 高于多年平均值 17.8%。降水距平百分比指数空间上呈东南高西北低的特征, 降水分布不均衡。2015 年全市年均降水量 1 401.2 mm, 较 2010 年降低 6.26%, 降水距平百分比指数空间上呈东高西低的特征, 高值区范围有所缩小。2020 年全市年均降水量 1 928.3 mm, 相比 2015 年增加 37.62%, 比多年平均值偏多 52.0%, 降水距平百分比指数空间上呈东北高西南低的特征, 全市区域年降水量均大于多年平均降水量。

3.1.3 土壤侵蚀程度指数 由图 3 可知, 2010—2020 年武汉市土壤侵蚀程度指数高值区由东南部向北部转移, 且总体呈先增加后降低的趋势。2010 年武汉市平均土壤侵蚀程度指数为 2.66 t/ $\text{hm}^2$ , 东南部土壤侵蚀较严重。其中青山区平均土壤侵蚀程度指数最高为 2.87 t/ $\text{hm}^2$ , 东西湖区平均土壤侵蚀程度指数最低为 2.48 t/ $\text{hm}^2$ 。2015 年武汉市平均土壤侵蚀程度指数为 2.62 t/ $\text{hm}^2$ , 较

2010 年略有下降,但最高侵蚀指数略微上涨。东北部和中部地区土壤侵蚀程度加剧,青山区、新洲区土壤侵蚀程度较严重,其中新洲区平均土壤侵蚀程度指数增长  $0.10\text{ t/hm}^2$ 。2020 年武汉市平均土壤侵蚀程度指数

为  $2.38\text{ t/hm}^2$ ,较 2015 年土壤侵蚀程度指数整体降低,空间上土壤侵蚀程度高值区向北方转移。各区土壤侵蚀程度好转,其中江汉区和青山区平均土壤侵蚀程度指数分别降低  $0.56,0.58\text{ t/hm}^2$ 。

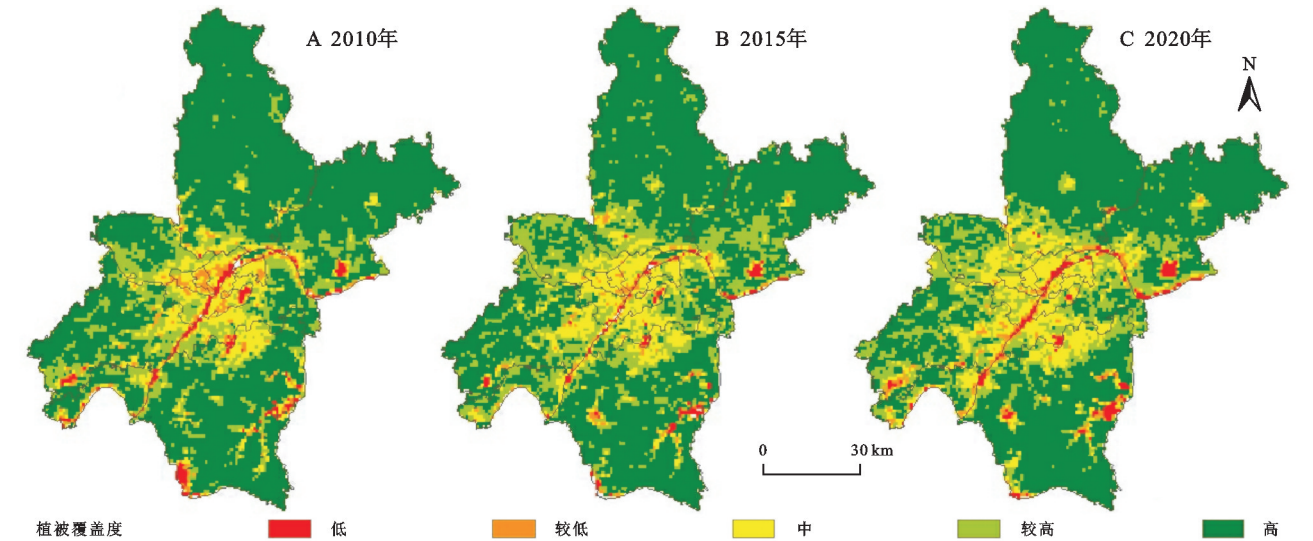


图 1 不同时期植被覆盖度空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation cover in different periods

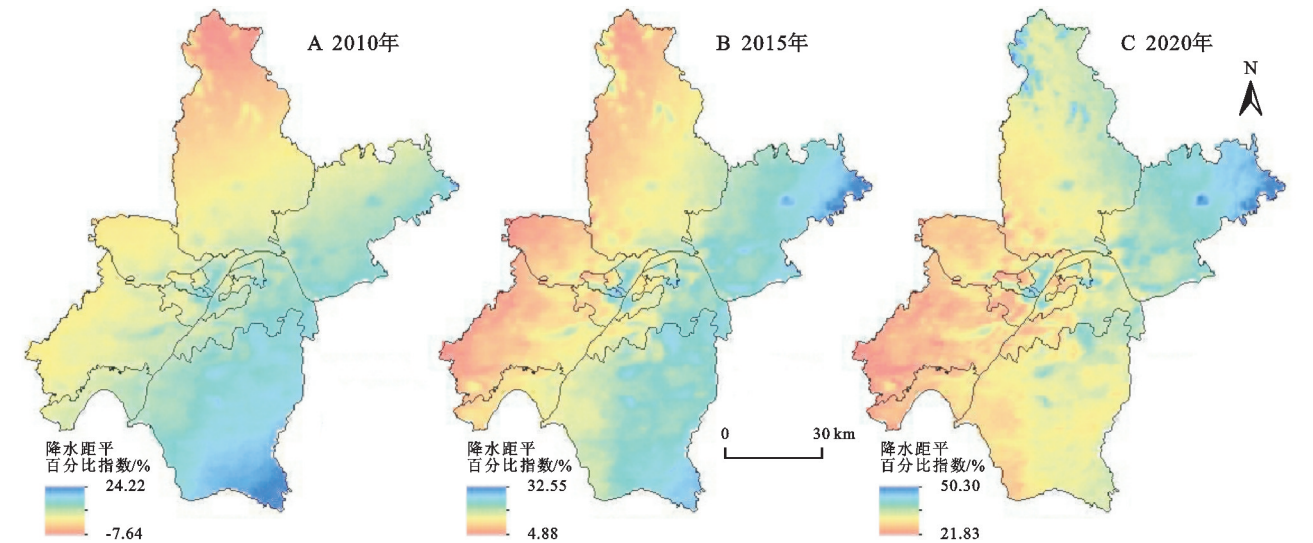


图 2 不同时期降水距平百分比指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of precipitation distance level percentages in different periods

3.1.4 土地利用混合度 2010—2020 年,武汉市土地利用混合度呈现缓慢上升趋势,但多数行政区的土地利用混合度有所下降,见表 4。2010—2015 年,武汉市土地利用混合度为 1.145,除汉阳区、东西湖区、汉南区和新洲区升高,其余 9 个行政区土地利用混合度下降,其中江汉区下降幅度最大,下降 0.431,可能原因是辖区面积小,土地资源有限,绿化面积小,土地类型以建设用地为主;汉阳区增幅最大,上升 0.064。2015—2020 年,武汉市土地利用混合度为 1.151,除东西湖区、汉南区、蔡甸区、江夏区、黄陂区和新洲区升高,其余 7 个行政区土地利用混合度下降,硚口区由于大量耕地转化为建设用

地降幅最大,下降 0.098,汉南区因用地效率提升,土地利用混合度上升 0.114。

3.1.5 碳足迹压力指数 2010—2020 年,武汉市碳足迹压力指数呈先升后降的趋势,各行政区碳足迹压力指数以上升趋势为主,见表 5。2010 年武汉市碳足迹压力指数为 4.83,各行政区差异较大。江汉区碳足迹压力指数最大,达到 525.31,黄陂区碳足迹压力指数最小,仅 0.58。2015 年武汉市碳足迹压力指数为 5.20,除汉南区和新洲区以外,其余行政区的碳足迹压力指数均有所上涨,其中江汉区碳足迹压力指数较 2010 年上涨 71.77%,达到 902.31。2020 年由于新冠

疫情的影响,武汉市碳足迹压力指数降至 4.51,较 2010 年、2015 年分别下降 0.32,0.69;江汉区碳足迹压力指数相较于 2015 年有所降低,但仍为全市最高,黄陂区碳足迹压力指数未发生明显变化,仍是全市最低值。

除江汉区之外,2010—2020 年硚口区、汉阳区、

汉南区碳足迹压力指数变化较大,其中硚口区碳足迹压力指数在 10 年间不断增加,且增长趋势加快;汉阳区则是在高碳排放压力下锐减;由于 2020 年武汉市统计年鉴中没有汉南区的能源消耗量,因此使用武汉经济技术开发区的能源消耗量来代替,从而导致 2020 年汉南区碳足迹压力指数激增。

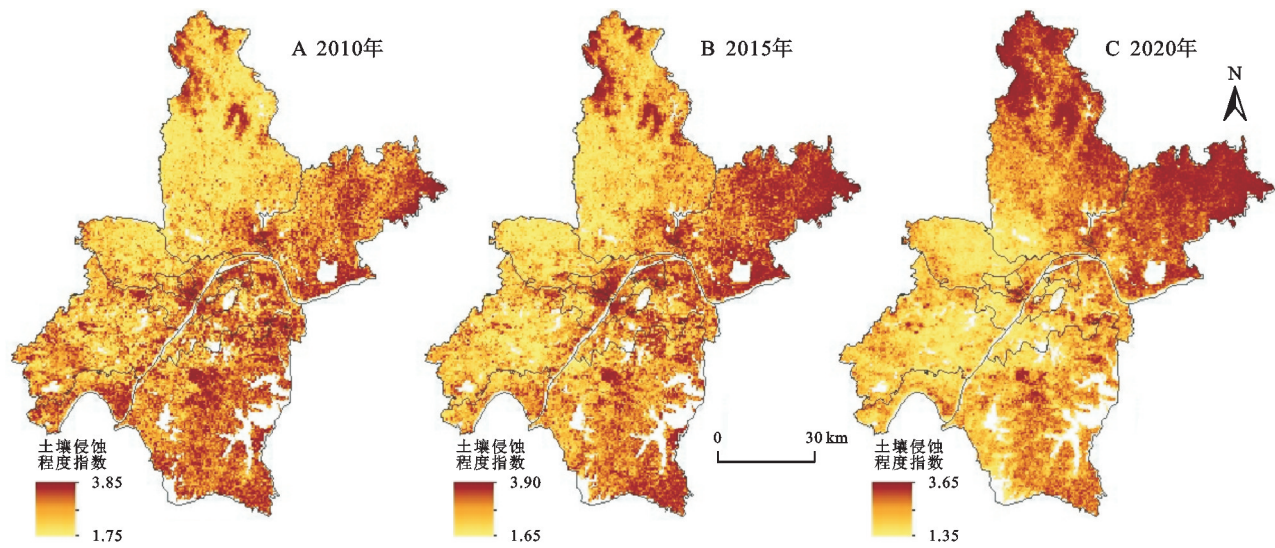


图 3 不同时期土壤侵蚀程度指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil erosion degree index in different periods

表 4 不同时期土地利用混合度及其变化

Table 4 Land use mix and its changes in different periods

区/市	土地利用混合度			土地利用混合度变化		
	2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2010—2020 年
江岸区	1.068	1.004	0.973	−0.064	−0.032	−0.095
江汉区	0.643	0.212	0.193	−0.431	−0.020	−0.451
硚口区	1.023	0.675	0.577	−0.348	−0.098	−0.446
汉阳区	1.158	1.222	1.194	0.064	−0.028	0.036
武昌区	1.002	0.932	0.902	−0.070	−0.030	−0.100
青山区	0.825	0.614	0.541	−0.211	−0.073	−0.284
洪山区	1.343	1.332	1.330	−0.012	−0.002	−0.013
东西湖区	1.049	1.083	1.160	0.035	0.077	0.111
汉南区	0.966	0.981	1.095	0.015	0.114	0.129
蔡甸区	1.201	1.196	1.249	−0.005	0.053	0.048
江夏区	1.173	1.148	1.219	−0.024	0.071	0.047
黄陂区	1.059	1.058	1.107	−0.001	0.049	0.048
新洲区	1.048	1.084	1.107	0.036	0.023	0.059
武汉市	1.145	1.151	1.187	0.006	0.036	0.042

3.2 土地生态综合风险评价

3.2.1 土地生态风险评价 如图 4 所示,2010—2020 年武汉市土地生态状况整体较好,土地生态风险较低,且呈现出逐渐下降的演变趋势。Ⅰ级风险区向北扩展明显,Ⅱ级风险区主要分布在西部及西南部并逐渐向Ⅰ级风险区转变,Ⅲ级风险区在中部逐步缩小,Ⅳ级和Ⅴ级风险区整体变化不大。2010 年,武汉

市土地生态风险指数为 0.199,以Ⅰ级和Ⅱ级风险为主,二者占区域总面积的 96.07%;2015 年,武汉市土地生态风险指数为 0.176,46.20%的Ⅱ级风险区下降为Ⅰ级风险区,Ⅰ级风险区面积由 3 752.28 km<sup>2</sup>增至 5 429.11 km<sup>2</sup>,Ⅳ级风险区面积增加 14.52 km<sup>2</sup>,Ⅲ级风险区和Ⅴ级风险区范围均有所减小,其中Ⅴ级风险



区降至 44.38 km<sup>2</sup>;2020 年,武汉市土地生态风险指数为 0.172,仍以 I 级和 II 级风险为主,Ⅲ级风险区面积减少 50.83 km<sup>2</sup>,Ⅳ级风险区面积逐年上升并达到 75.05 km<sup>2</sup>,V 级风险区无明显改变。

表 5 不同时期碳足迹压力指数及其变化

Table 5 Carbon footprint pressure index and its changes in different periods

区/市	碳足迹压力指数			碳足迹压力指数变化		
	2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2010—2020 年
江岸区	78.49	109.73	77.87	31.24	—31.86	—0.62
江汉区	525.31	902.31	758.94	377.00	—143.37	233.63
硚口区	204.46	262.86	378.16	58.40	115.30	173.70
汉阳区	137.41	148.19	28.70	10.78	—119.49	—108.71
武昌区	20.23	21.39	22.86	1.16	1.47	2.63
青山区	136.32	171.51	178.30	35.19	6.79	41.98
洪山区	5.06	5.07	5.82	0.01	0.75	0.76
东西湖区	35.43	42.21	51.83	6.78	9.62	16.40
汉南区	10.65	12.07	81.44	1.42	69.37	70.79
蔡甸区	3.41	3.68	2.28	0.27	—1.40	—1.13
江夏区	2.54	2.55	1.94	0.01	—0.61	—0.60
黄陂区	0.58	0.64	0.65	0.06	0.01	0.07
新洲区	3.29	3.63	3.78	0.34	0.15	0.49
武汉市	4.83	5.20	4.51	0.37	—0.69	—0.32

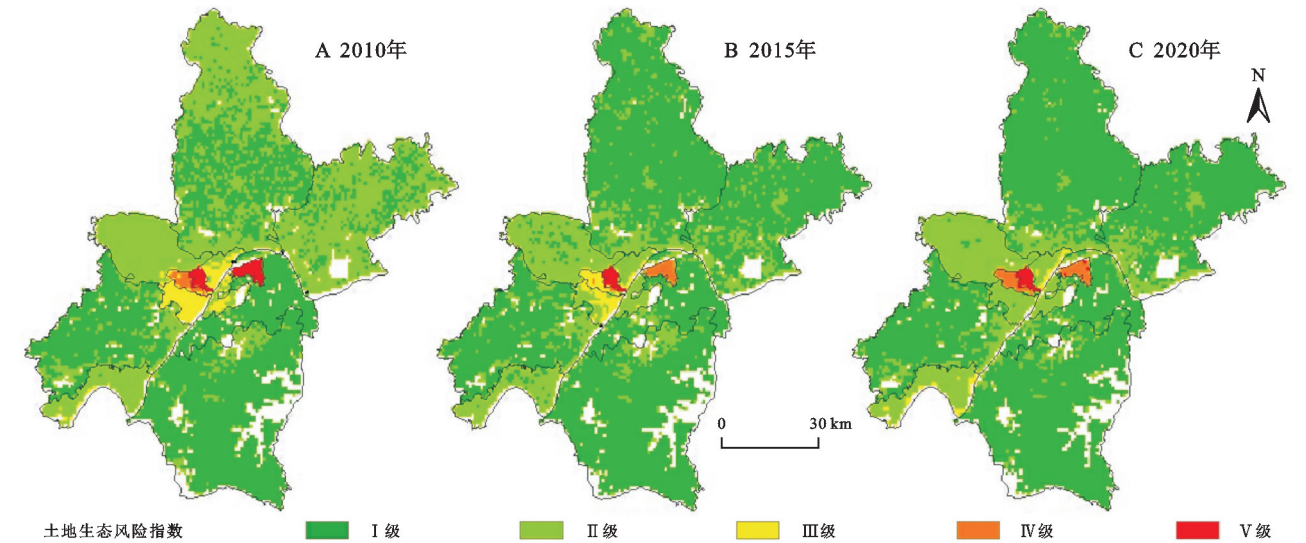


图 4 不同时期土地生态风险等级空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land ecological risk levels in different periods

对武汉市各区进行土地生态风险指数及等级统计,见表 6。结果表明,武汉市各区生态风险等级跨度大,中心城区土地生态风险高,周边区域土地生态安全状况良好。2010—2015 年,武汉市生态环境质量不断优化,东西湖区、新洲区生态风险等级由 II 级降为 I 级,汉阳区生态风险等级由 III 级降为 II 级,青山区由 V 级降为 IV 级,但江汉区土地生态风险等级为 V 级且风险指数有所升高,需要重点关注。2015—2020 年,武汉市生态环境质量维持较好,江岸区、武昌区生态风险等级由 III 级降为 II 级,江汉区生态风险

等级未变但生态风险指数略微下降,生态安全状况有所缓解,硚口区和青山区生态风险指数略微上升,其中青山区生态风险等级由 IV 级升为 V 级。由此可见,中心城区生态状况依然严峻,仍需稳步推进碳减排等各项生态治理措施。

3.2.2 土地生态风险等级对比 在同一土地生态风险等级划分标准下,引入碳足迹压力指数对行政区的风险等级结果影响较大,结果见图 5。引入碳足迹压力指数之前,各区土地生态风险等级均呈现出由高风险等级向低风险等级过渡的态势;而引入碳足迹压

力指数后,各区土地生态风险等级明显上升,且呈现出区域性变化趋势,可分为 3 种变化形式:保持不变、好转、先好转后恶化。江汉区、硚口区、洪山区、汉南区、蔡甸区、江夏区、黄陂区三期土地生态风险等级保持不变,其中江汉区、硚口区生态风险较大,且 2020 年土地生态风险等级高于未引入碳足迹压力指数的土地生态风险等级,原因在于这两个区经济增速较快,建设用地碳排放量大,碳排放压力大,碳足迹压力指数的引入对土地生态风险等级影响很大。江岸区、汉阳区、武昌区、新洲区三期土地生态风险等级降低,且低于未引入碳足迹压力指数的土地生态风险等级,原因在于碳足迹压力指数的引入中和了其他 4 项指标对土地生态风险评价的影响。青山区、东西湖区三期土地生态风险等级则呈现出先好转后恶化的趋势但变化幅度较小,与未引入碳足迹压力指数的土地生态风险等级差异较小。由此可见,在土地生态风险评价中引入碳足迹压力指数对土地生态风险等级影响较大,且对于不同行政区的影响力不同。因此,应当在土地生态风险评价中引入能表征土地利用碳排放风险的指数,才能全面反映土地生态风险来源,为制定土地生态保护和碳达峰计划提供科学依据。

表 6 各区土地生态风险指数及等级

Table 6 Land ecological risk index and grade by district

区/市	2010 年		2015 年		2020 年	
	指数	等级	指数	等级	指数	等级
江岸区	0.399	Ⅲ级	0.369	Ⅲ级	0.344	Ⅱ级
江汉区	0.917	V级	0.924	V级	0.846	V级
硚口区	0.564	Ⅳ级	0.507	Ⅳ级	0.571	Ⅳ级
汉阳区	0.451	Ⅲ级	0.346	Ⅱ级	0.255	Ⅱ级
武昌区	0.43	Ⅲ级	0.394	Ⅲ级	0.329	Ⅱ级
青山区	0.837	V级	0.643	Ⅳ级	0.656	V级
洪山区	0.204	I级	0.191	I级	0.183	I级
东西湖区	0.235	Ⅱ级	0.216	I级	0.221	Ⅱ级
汉南区	0.297	Ⅱ级	0.238	Ⅱ级	0.296	Ⅱ级
蔡甸区	0.193	I级	0.185	I级	0.183	I级
江夏区	0.18	I级	0.148	I级	0.153	I级
黄陂区	0.177	I级	0.164	I级	0.172	I级
新洲区	0.254	Ⅱ级	0.188	I级	0.192	I级
武汉市	0.199	I级	0.176	I级	0.172	I级

### 3.3 综合风险时空格局演变

3.3.1 全局空间自相关分析 2010—2020 年武汉市土地综合生态风险的空间集聚状态较集中,具有明确的全局空间正相关特征。2010 年、2015 年和 2020 年全局 Moran's  $I$  指数分别为 0.787 3、0.777 2、0.777 5,可以得出 2010—2020 年武汉市土地综合生态风险集聚状态呈先减弱后增强的态势,且变化幅度较小。

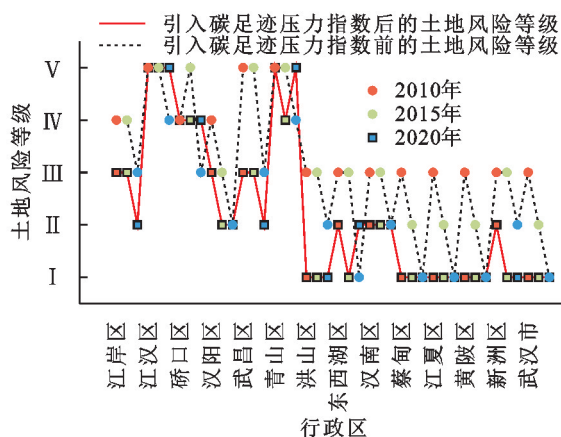


图 5 是否引入碳足迹压力指数的土地生态风险等级对比

Fig. 5 Comparison of ecological risk levels of land with and without the introduction of carbon footprint pressure index

3.3.2 冷热点分析 由图 6 分析可知,2010—2020 年,武汉市土地综合生态风险热点集聚程度呈先降后升的趋势,冷点集聚程度逐年降低,次冷点区与临界冷点区面积增长较快。2010 年热点区主要集中在武汉中心城区以及东西湖区和汉南区,中心热点区由于植被覆盖度低,土地利用混合度低,建设用地占比高,土地综合生态风险较大而形成热点区,西南部热点区由于包含武汉临空港经济技术开发区和武汉经济技术开发区,第二产业增速快,碳排放压力大,导致土地综合生态风险较大。冷点区分布在蔡甸区、江夏区以及洪山区,上述区域地表水资源丰富,大小湖泊共 207 座,森林覆盖率高,从而形成冷点区。次热点和临界热点较少,均分布在热点区周围。次冷点区和临界冷点区主集中在蔡甸区。

与 2010 年相比,2015 年西部热点区、次热点区范围明显缩小,面积共缩减 38.80%,主要体现在东西湖区和汉南区的热点及次热点区转变为临界热点区与不显著区。冷点区范围缩小 37.26%,蔡甸区内大部分的次冷点区转变为不显著区,洪山区部分冷点区转变为次冷点区或不显著区,并且在新洲区与黄陂区内出现小范围的次冷点区与临界冷点区,致使次冷点区、临界冷点区面积分别上涨 11.37%,31.00%。说明这 5 年间通过实施双碳政策以及退耕还林、封山育林工程,生态状况好转,土地利用混合度升高,土地生态风险程度降低。

相较于 2015 年,2020 年热点区总面积上涨 37.91%,15.87%的临界热点区及 0.71%的次热点区转变为热点区。除建设用地扩张和植被覆盖度降低之外,还与洪涝灾害所造成的水土流失有关,土地综合生态风险集聚程度明显上升,主要体现在东西湖区的热点范围扩张;而汉南区热点范围扩张主要受经济技术开发区工业发展以及碳排放量增加的双重影响。冷点区范



围变化较小,临界冷点区范围扩张明显,面积较 2015 年上涨 65.43%。受生态环境保护政策影响,新洲区中部与黄陂区东北部植被覆盖度升高,土地利用混合度上升,冷点区面积增幅明显。

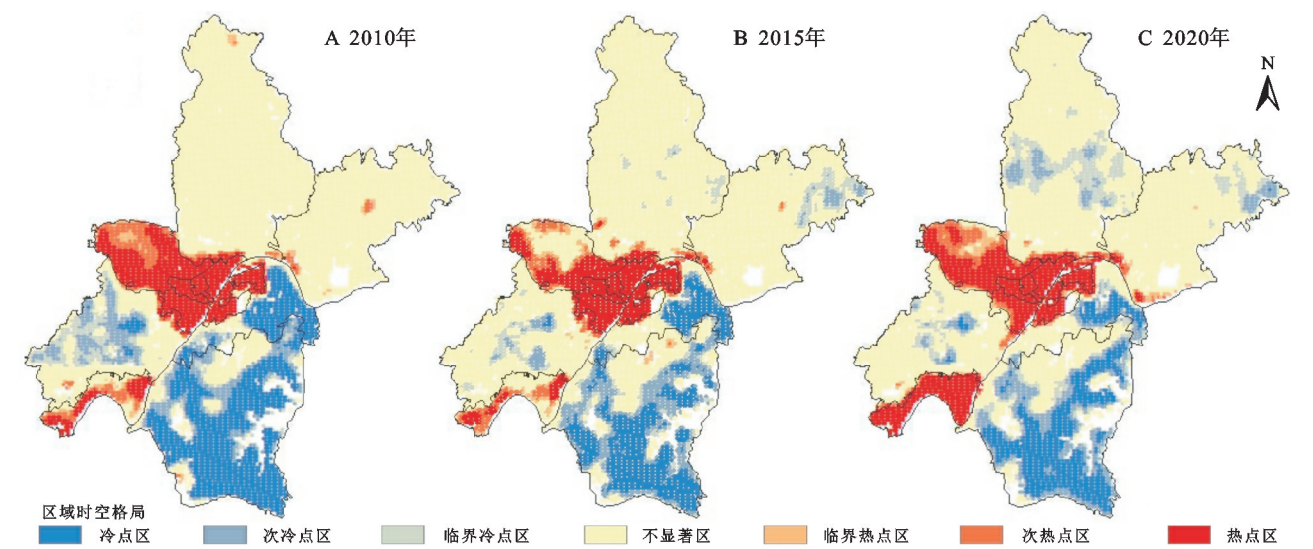


图 6 不同时期土地综合生态风险冷热点空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of cold hot spots of integrated land ecological risk in different periods

4 讨论

武汉市 2010—2020 年各风险指标总体呈区域性分布。植被覆盖度均值先升高后降低,空间上呈现由中心向四周递增的趋势,其低值区集中在中心城区,应增加绿地面积,限制建设用地扩张,高值区与低值区植被覆盖程度差距较大;土壤侵蚀程度指数均值逐年降低,主要以土壤水力侵蚀为主,高值区由东南部向北部转移,应注意北部林地的水土流失情况,加强水土保持监督管理;土地利用混合度总体呈现出低值区不断降低高值区不断升高的态势,应注意低值区土地利用情况,合理分配土地资源;碳足迹压力指数各区差值较大,以江汉区为代表的高碳排放压力区指数波动较大,以黄陂区为主的低碳排放压力区指数浮动较小,高碳排放压力地区主要集中在经济增长快和以第二产业为主的行政区。因此,应对不同地区应提出不同的环境保护方案,以青山区为例,不仅要调整第二产业发展方式与产业结构,还要加强清洁能源和可再生能源的使用。

武汉市土地综合生态风险整体处于较低风险等级并逐步优化,但区域差异明显。北部生态状况明显优化,Ⅰ级风险区面积快速增长,但Ⅳ级和Ⅴ级风险区生态状况无明显改善。由于低植被覆盖度、土地利用混合度低以及碳排放压力较大等原因,高风险区主要集中在中心商业区及工业区,江汉区情况最为明显,因此需要加快建设绿色低碳循环经济,加强土地生态保护,促进经济与环境保护协调发展。

武汉市土地生态风险呈现全局正相关特性,空间集

聚程度较强且变化幅度小。冷热点区范围变动较明显,热点区域面积先缩小后扩大,主要分布在中心城区及汉南区内,冷点区域面积逐渐缩小,集中分布在生态环境良好的蔡甸区、洪山区、江夏区境内。应注意汉南区热点区面积扩张较快,要及时调整各区生态安全建设工作的重点。同时,次冷点区在新洲中部及黄陂东北部逐渐显现,说明生态建设取得了良好成效。

武汉是长江经济带的核心城市,地区生产总值增速快,发展迅速,建设用地扩张明显,碳排放量显著上升,土地生态风险状况需持续关注。在双碳政策背景下,本文从生态基础、自然条件、土地结构、人类活动出发,结合碳足迹压力指数,构建基于碳排放量的土地生态风险评价模型,对土地生态风险进行多因子多尺度综合评价,在一定程度上拓宽了影响土地生态安全的风险来源和土地生态风险评价体系。但土地利用碳排放的研究方法和模型仍然存在着不确定性,比如在计算各区建设用地碳源时,由于数据限制,未考虑由交通运输产生的碳排放;其次获取的土地利用数据精度较低,并且利用栅格计算器进行土地综合生态风险指数计算时,指标像元尺度不同,对评价结果产生一定影响。后续研究将以此为出发点,完善土地利用碳排放量的计算模型,并细化指标数据尺度,从而提高土地生态风险评价的精确性与科学性,为土地生态环境保护、土地资源管理规划和降低土地利用碳排放提供参考依据。

5 结论

(1) 武汉市各风险指标时空差异较大且变化明

显。植被覆盖度空间上呈现由中心向四周递增的趋势,低值区集中在中心城区,高值区与低值区植被覆盖程度差距较大;土壤侵蚀程度指数均值逐年降低,主要以土壤水力侵蚀为主,高值区由东南部向北部转移;土地利用混合度总体呈现出低值区不断降低高值区不断升高的态势;碳足迹压力指数各区差值较大,高碳排放压力地区主要集中在经济增长快和以第二产业为主的行政区。

(2) 武汉市土地综合生态风险指数由 0.199 降至 0.172,生态环境质量总体向好,中心商业区及工业区土地生态状况堪忧。Ⅰ级风险区面积快速增长,但Ⅳ级和Ⅴ级风险区生态状况无明显改善。中心城区植被覆盖度低、土地利用混合度低、碳排放压力大,但水土流失情况较弱且无洪涝灾害风险。北部及南部地区水土流失面积较大,并存在洪涝灾害风险,但植被覆盖度高、土地利用混合度高、碳排放压力小。

(3) 武汉市三期全局 Moran's *I* 指数均较高,空间集聚程度较强且变化幅度小,表明土地生态风险指数的空间分布呈现全局正相关特性。以不显著区分布为主,热点区和冷点区较为集中,而次冷热点和临界冷热点分布较少且比较分散。冷热点区范围变动较明显,热点区域面积先缩小后扩大,冷点区域面积逐渐缩小。

(4) 在土地生态风险评价模型中引入碳足迹压力指数后,扩充了土地生态安全的影响因子,对土地生态风险评价结果影响较大,江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、青山区土地生态风险等级明显上升,不同区域土地生态风险等级呈现不同的变化趋势,为降低土地利用碳排放、提升土地生态安全提供理论依据。

#### 参考文献(References):

- [1] International Energy Agency. World Energy Outlook 2022 [R]. Paris: OECD Publishing, 2022.
- [2] 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[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.  
Han J, Zhou X, Xiang W N. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1152-1161.
- [3] United States Environmental Protection Agency's. Framework for Ecological Risk Assessment[Z]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1992.
- [4] Omar H, Cabral P. Ecological risk assessment based on land cover changes: A case of Zanzibar(Tanzania)[J]. Remote Sensing, 2020,12(19):3114.
- [5] Mao D H, Wu F, Guo R Z. Assessment and Analysis on Land Ecological Risk of Jinshi City in Hunan Province[C]// Huang C F, Wang C J. 8th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention(RAC 2018). Xi'an: Atlantis Press, 2018.
- [6] Kayumba P M, Chen Y, Mind'Je R, et al. Geospatial land surface-based thermal scenarios for wetland ecological risk assessment and its landscape dynamics simulation in Bayanbulak Wetland, Northwestern China [J]. Landscape Ecology, 2021,36(6):1699-1723.
- [7] 虞燕娜,朱江,吴绍华,等.多风险源驱动下的土地生态风险评价:以江苏省射阳县为例[J].自然资源学报,2016,31(8):1264-1274.  
Yu Y N, Zhu J, Wu S H, et al. Assessment of land ecological risks driven by multi-sources: A case study of Sheyang County, Jiangsu Province[J]. Journal of Natural Resources, 2016,31(8):1264-1274.
- [8] Qian Y, Dong Z, Yan Y, et al. Ecological risk assessment models for simulating impacts of land use and landscape pattern on ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2022,833(11):155-218.
- [9] 郝守宁,董飞,刘晓波,等.西藏尼洋河流域土地景观格局演变的生态风险分析[J].水土保持研究,2023,30(2):378-383,430.  
Hao S N, Dong F, Liu X B, et al. Analysis on ecological risk of the evolution of land landscape pattern in the Nyang River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):378-383,430.
- [10] 邓楚雄,卢涛,李忠武,等.长沙市农地利用净碳排放变化趋势及驱动因素分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(3):9-17.  
Deng C X, Lu T, Li Z W, et al. Analysis of trend and driving factors of net carbon emissions in Changsha's agricultural land utilization[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2021,44(3):9-17.
- [11] 徐泽,李储,牛陆,呼包鄂榆城市群土地混合利用与碳排放的脱钩关系[J].环境科学研究,2022,35(1):299-308.  
Xu Z, Li C, Niu L. Decoupling relationship between land mixed use and carbon emissions in Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration[J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(1):299-308.
- [12] 檀斯园.九江市土地利用碳排放风险时空分异及影响因素研究[D].南昌:江西财经大学,2022.  
Tan S Y. Spatial-temporal Variation and Influencing Factors of Land Use Carbon Emission Risk in Jiujiang City[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2022.
- [13] 段艺芳,任志远,周晓,等.延安市土地生态风险时空格局演变研究[J].国土资源遥感,2020,32(1):120-129.  
Duan Y F, Ren Z Y, Zhou X, et al. Spatio-temporal varia-

- tion in the land ecological risk of Yan'an City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2020,32(1):120-129.
- [14] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.
- Zhao S Y, Gong Z N, Liu X Y. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001—2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(5):717-729.
- [15] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951—2010[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(3):545-558.
- [16] Renard K G, Foster R, Weesies G, et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington D C: Agricultural Handbook, 1997.
- [17] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].生态学报,2016,36(22):7244-7259.
- Peng W F, Zhou J M, Xu X L, et al. Effect of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China, from 1990 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(22):7244-7259.
- [18] 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[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(5):30-39.
- Yuan Z Z, Ye C S, Li H D. Impacts of land use changes in Nanchang on carbon emission[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021,44(5):30-39.
- [19] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3):154-162.
- Sun H, Liang H M, Chang X L, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China[J]. Economic Geography, 2015,35(3):154-162.
- [20] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(6):804-812.
- Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000[J]. Scientia Sinica(Terrae),2007,37(6):804-812.
- [21] 石洪听,穆兴民,张应龙,等.四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J].水土保持通报,2012,32(3):101-106.
- Shi H X, Mu X M, Zhang Y L, et al. Effects of different land use patterns on carbon emission in Guangyuan City of Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(3):101-106.
- [22] 邓宣凯.武汉市土地利用碳排放的影响因素研究:基于扩展的 Kaya 等式和 LMDI 分解方法[J].农业与技术,2021,41(20):104-109.
- Deng X K. Study on influencing factors of land use carbon emissions in Wuhan City: Based on the extended kaya equation and LMDI decomposition method[J]. Agriculture and Technology, 2021,41(20):104-109.
- [23] Murphy F, Sosa A, McDonnell K, et al. Life cycle assessment of biomass-to-energy systems in Ireland modelled with biomass supply chain optimisation based on greenhouse gas emission reduction[J]. Energy, 2016, 109:1040-1055.
- [24] 陈培阳,朱喜钢.基于不同尺度的中国区域经济差异[J].地理学报,2012,67(8):1085-1097.
- Chen P Y, Zhu X G. Regional inequalities in China at different scales[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(8):1085-1097.
- [25] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].生态学报,2023,43(5):2114-2127.
- Zhang J, Yang L P, Gong E J, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(5):2114-2127.
- [26] 万华伟,李灏欣,高吉喜,等.我国植被生态系统固碳能力提升潜力空间格局研究[J].生态学报,2022,42(21):8568-8580.
- Wan H W, Li H X, Gao J X, et al. Spatial pattern analysis of carbon sequestration potential of vegetation ecosystem in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(21):8568-8580.
- [27] 彭建,刘志聪,刘焱序,等.京津冀地区县域耕地景观多功能性评价[J].生态学报,2016,36(8):2274-2285.
- Peng J, Liu Z C, Liu Y X, et al. Assessment of farmland landscape multifunctionality at county level in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(8):2274-2285.
- [28] 马世五,谢德体,张孝成,等.三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J].生态学报,2018,38(23):8512-8525.
- Ma S W, Xie D T, Zhang X C, et al. Spatiotemporal variation in the ecological status of the Three Gorges Reservoir area in Chongqing, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(23):8512-8525.