

土地利用隐性形态对碳排放的影响研究

——以长江中游城市群为例

刘春英, 曹 依, 王骏博, 李嘉薇, 龚丽萍, 肖长江*

(江西财经大学财税与公共管理学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 【目的】探究土地利用隐性形态及其对碳排放的影响, 为面向“双碳”目标的土地利用空间优化提供实践指导。【方法】以长江中游城市群为研究区, 基于土地利用数据, 构建土地利用隐性形态指标体系, 采用碳排放系数法和地理探测器模型, 分析 2010~2020 年长江中游城市群土地利用隐性形态和土地利用碳排放时空变化特征, 揭示土地利用隐性形态与碳排放的相互关系。【结果】①长江中游城市群土地利用隐性形态水平持续升高, 并呈现以省会城市单核集聚的“中三角”向省会城市相连的“中三轴”空间格局演变。②建设用地是研究区最主要土地利用碳源, 占碳排放量的 96% 以上。林地是碳汇的主要来源, 占碳吸收能力的 89%。土地利用净碳排放呈不断上升趋势, 增长率达 11.59%。高值区主要集中在武汉、南昌、荆门、宜昌、九江市等长江沿岸带以及萍乡、新余、湘潭市等老工业基地城市。③地理探测器结果显示, 第二产业产值、第三产业产值、地均用电量以及土地城镇化率是影响土地利用净碳排放量的关键驱动因子, q 值为 0.6 以上。【结论】土地利用隐性形态向高阶转型促进了土地利用碳排放, 净碳排放的空间分布是由多因子交互作用形成的, 土地城镇化率对各指标层碳排放解释力最高。

关键词: 土地利用隐性形态; 碳排放; 时空变化; 地理探测器; 长江中游城市群

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)06-1543-12

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2024020701

刘春英, 曹 依, 王骏博, 李嘉薇, 龚丽萍, 肖长江. 土地利用隐性形态对碳排放的影响研究——以长江中游城市群为例 [J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1543-1554

LIU Chun-ying, CAO Yi, WANG Jun-bo, LI Jia-wei, GONG Li-ping, XIAO Chang-jiang. Influence of Land Use Recessive Morphology on Carbon Emission in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(6): 1543-1554

【研究意义】CO₂ 等温室气体引起的全球气候变化是人类社会面临的最严峻挑战之一^[1]。《联合国气候变化框架公约》第 28 次缔约方大会再一次敲响“气候警钟”, 减排任务极为紧迫。我国在 2020 年 9 月 22 日的第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标^[2]。二十大报告中强调要积极稳妥地推动碳达峰碳中和, 实现碳排放减量^[3]。这既是中国向国际社会的庄严承诺, 也是中国未来高质量发展的迫切需求^[4]。土地是人类活动与陆地生态系统碳源汇的主要载体, 土地利用引起的碳排放仅次于化石能源产生的碳排放^[5]。2024 年是实现“十四五”规划目标任务的关键一年, 也是全面推进美丽中国建设的重要一年。土地利用结构、土地投入和产出的变化对能源消费格局变迁、碳排放、区域碳循环速率都会产生显著影

响^[6]。因此, 基于“双碳”目标, 从土地利用的视角探究碳排放的影响因素, 能为未来土地利用管理决策提供科学参考, 对制定碳减排策略具有深远意义。

【研究进展】国内外学者对土地利用碳排放进行了大量的研究, 成果主要集中在土地利用类型、空间结构等显性变化过程碳排放的测算^[7-8]、碳排放的效应^[9-10]、碳排放的影响因素以及碳排放与经济增长的关系等^[11-12]。研究者主要通过遥感解译的土地利用类型数据, 利用碳排放系数法或夜间灯光数据等方法测算土地利用碳排放^[13-14], 并在此基础上探讨省域^[15-16]、市域^[17]及县域^[18]碳排放的时空变化特征。随后研究者引进 STIRPAT^[19]、LMDI 模型^[20-21]、地理加权回归模型^[22]等进一步分析经济发展、人类活动、环境变化等对土地利用碳排放的影响。但此前

收稿日期: 2024-02-07; 修订日期: 2024-06-16

基金项目: 江西省教育厅科技项目 (GJJ190256)、国家自然科学基金项目 (42261045) 资助

作者简介: 刘春英 (1976-), 女, 江西赣州, 博士, 副教授, 主要从事土地利用碳排放及生态效应研究。E-mail: jxcdley@126.com

*通讯作者: E-mail: xiaochangjiang@jxufe.edu.cn

的研究大多基于土地利用显性形态的视角,对土地利用隐性形态的考虑较少。土地利用形态是指某一区域某一时期内由主要土地利用类型构成的结构,随着研究的深入,土地利用形态进一步拓展为土地利用显性形态(具有数量和空间结构两重属性)和土地利用隐性形态(具有质量、产权、经营方式、投入、产出和功能等多重属性)^[23-24]。土地利用隐性形态是土地利用转型“质”的层面,体现了社会经济系统与土地利用系统关联互馈作用,是土地利用碳排放的内在驱动机制^[25-26]。张玥等^[27]采用双变量空间自相关定量解析土地利用隐性转型与碳排放的空间关联及分异特征,但各土地利用隐性形态对碳排放的内在作用机理尚不清楚。另外,大部分学者在探讨土地利用碳排放影响机理时主要选取人口规模、产业结构、城市化水平、经济发展等传统因素^[28-29]。张茹倩等^[30]进一步分析经济发展与环境的关系,也有学者采用 EKC 模型^[31]、脱钩模型^[32]等来探究经济发展与土地利用碳排放关系,认为经济发展与土地利用碳排放呈倒“U”型曲线关系^[33]。但鲜有从土地利用隐性形态的视角,细化哪些土地经济属性主导了土地利用碳排放。【研究切入点】长江中游城市群是由武汉城市群、环鄱阳湖城市群和环长株潭城市群组成的重要战略区域,涵盖了江西、湖北、湖南三省 31 个地市,是中国经济发展的重要支柱^[34]。“共抓大保护,不搞大开发”是习近平总书记对长江经济带发展方向的重要指示,“十四五”时期长江经济带成为我国生态优先绿色发展主战场、引领经济高质量发展主力军。长江中游城市群如何建设成为人与自然和谐共生的绿色发展示范带、美丽中国建设的先行区,是当前亟待解决的重大课题。【拟解决的问题】本研究从土地利用隐性形态的产权、经营方式、投入和产出的变化出发,在分析土地利用碳排放时空变化特征的基础上,采用地理探测器模型探讨土地利用隐性形态对碳排放的主要影响及交互作用,以期“双碳”目标的实现及绿色低碳高质量发展策略的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究范围包括江西省 10 市(包括南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、吉安、宜春、抚州、上饶),湖北省 12 市(包括武汉、黄石、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、潜江、仙

桃,由于缺乏天门市的数据未将其纳入本次研究的范围),湖南省 8 市(包括长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、常德、益阳、娄底),共计 30 个地级市。

研究区面积约 $3.17 \times 10^6 \text{ km}^2$,是我国面积最大的城市群,占长江经济带总面积的 15.44%,占全国总面积的 3.4%。地形多以平原、丘陵为主,地势相对平缓,森林覆盖率达 60%,多为亚热带季风气候,自然资源丰富。截至 2020 年末,长江中游城市群常住人口数超 1.3×10^8 人,约占全国总人口的 9.1%,城镇化率为 63.3%。地区生产总值约为 9.4×10^{12} 元,占长江经济带地区生产总值的 19.92%,约占全国的 9.3%。能源消耗量约为 $2.74 \times 10^8 \text{ t}$ 标准煤,占全国的 5.5%,碳排放达 $1.65 \times 10^8 \text{ t}$,占全国的 1.67%。

1.2 数据来源

长江中游城市群 2010、2015、2018 和 2020 年共 4 期土地利用栅格数据取自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)开发的土地覆被分类数据集,空间分辨率为 1 km。结合国家土地利用现状分类(GB/T 21010—2017),将土地利用类型分为 6 大类:耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地。

社会经济数据、土地利用隐性形态指标数据来自于 2011、2016、2019 和 2021 年《江西省统计年鉴》、《湖北省统计年鉴》、《湖南省统计年鉴》。碳排放量系数主要来源于《中国能源统计年鉴》和《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用隐性形态评价 根据土地利用隐性形态内涵^[23,27],从土地利用投入、土地利用产出、土地利用强度和土地产权变化 4 个维度解析土地利用隐性形态。选取地均固定资产投资额、地均财政支出和地均从业人员数予以表征土地利用投入,反映土地利用的资本投入水平;选取地均 GDP、地均第二产业产值和地均第三产业产值予以表征土地利用,反应土地利用的产出水平;选取人口密度和地均用电量予以表征土地利用强度,反应土地利用的能源消耗水平;选取土地城镇化率予以表征土地产权变化,反应土地利用结构水平。依据上述指标选取说明与数据可获取性原则,参考前人的研究成果^[24,27],构建土地利用隐性形态评价指标体系(表 1)。

根据土地利用隐性形态指标体系,并采用极差标准化法和熵值法分别对原始数据进行标准化处理和确定指标权重,再采用线性加权法计算得到各地

表 1 土地利用隐性形态指标体系

Table 1 Index system of land use recessive morphology

要素层 Element layer	指标层 Index level	指标含义 Meaning of index	指标性质 Index property	指标权重 Index weight
土地利用投入	地均固定资产投资额	区域的土地投资强度	+	0.11
	地均财政支出	投入的资本要素水平	+	0.08
	地均从业人员量	反映劳动力要素水平	+	0.13
土地利用产出	地均 GDP	反映综合效益水平	+	0.12
	地均第二产业产值	反映内部产业结构	+	0.11
	地均第三产业产值	反映内部产业结构	+	0.14
土地利用强度	人口密度	反映人口聚集程度	+	0.06
	地均用电量	反映能源消费水平	+	0.18
土地产权变化	土地城镇化率	反映城乡用地属性转化	+	0.04

市土地利用隐性形态指数^[27]。计算见公式(1)。

$$Z_i = \sum_{j=1}^n w_j X'_{ij} \quad (1)$$

式中: X'_{ij} 为第 i 地市第 j 项评价指标标准化数值; w_j 为第 j 项评价指标权重; Z_i 为第 i 个地市的土地利用隐性形态指数, 取值区间为 $[0,1]$, 指数值越大, 则土地利用隐性形态越高阶。

1.3.2 土地利用碳排放的测算 土地利用碳排放量包括直接和间接碳排放量两大类, 直接碳排放主要是耕地、林地、草地、水域和未利用地等植被及土壤生态系统呼吸产生的碳排放, 耕地主要起碳源的作用, 林地、草地、水域、未利用地承担碳汇作用^[35]。采用《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》估算直接排放^[21], 见公式(2)。

$$E_{bn} = \sum e_i = \sum S_i \times a_i \quad (2)$$

式中: E_{bn} 代表耕地碳源量和林地、草地、水域、未利用地碳汇量的总和; e_i 代表第 i 种土地利用类型产生的碳排放量; S_i 代表第 i 种土地利用类型的面积; a_i 代表了第 i 类土地的碳排放(碳吸收)系数, “+”表示碳排放, “-”表示碳吸收。根据前人的研究结果^[5,21,36] 及研究区的实际情况, 本研究的耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放(吸收)系数分别为 $0.4595 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.6125 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.022 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.0253 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-0.0005 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

间接碳排放主要是建设用地所承载的人类活动能源消耗所产生碳排放量, 如原煤、原油、天然气、电力等消耗而产生的碳排放量。因此, 参考相关研究^[37-38], 对能源消费的碳排放估算选取统计年鉴中各类能源的消费量, 使其与标准煤的碳排放系数的乘积作为能源消费碳排放的总量, 以便于准确分析不同地区间的能源消费碳排放总量及其差异^[39], 计算

见公式(3)。

$$E_{cn} = \sum e_i = \sum C_i \cdot \theta_i \cdot f_i \quad (3)$$

式中: E_{cn} 表示能源消费总量碳排放; e_i 表示 i 类能源消耗所产生的碳排放; C_i 表示 i 类能源的消耗量; θ_i 为 i 类能源的折标煤系数; f_i 为 i 类能源碳排放系数(表 2)。

表 2 各类能源标准煤换算系数和碳排放系数

Table 2 Standard coal conversion coefficient of energy and coefficient of carbon emission

能源类型 Energy type	折标准煤系数 ¹⁾ Conversion coefficient for standard coal	碳排放系数 ²⁾ Coefficient of carbon emission
原煤	0.7143	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
原油	1.4286	0.5857
汽油	1.4714	0.5538
煤油	1.4714	0.5714
柴油	1.4571	0.5921
燃料油	1.4286	0.6185
天然气	1.7143	0.5042

注: 1) 来自《中国能源统计年鉴》; 2) 来自《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》。

土地利用净碳排放量(E)为直接碳排放量(E_{bn})和间接碳排放量(E_{cn})之和, 计算见公式(4)。

$$E = E_{bn} + E_{cn} \quad (4)$$

1.3.3 地理探测器模型 地理探测器是一种有效的空间分析方法^[40], 可用来研究自然或社会经济过程中的空间分异性, 从而更好地理解自变量和因变量之间的关系。在解释因变量的空间分异和驱动机制方面具有独特优势。本研究采用因子探测和交互作用探测, 因子探测可以通过 q 值来衡量单一影响因素对土地利用碳排放空间分布特征的解释力大小, q 的取值范围为 $[0,1]$, q 值越大表明影响因子对碳排放效应的影响越大, 反之越小。交互因子探测则可

进一步识别不同因子间对土地利用碳排放的交互作用^[41-42], 计算见公式 (5)。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (5)$$

式中: q 为影响因素对土地利用碳排放的驱动力大小; $h = 1, 2, 3, \dots, L$, L 为土地利用碳排放的影响因素; N_h 和 N 分别为要素层 h 和研究区样本数; δ_h^2 和 δ^2 分别是层 h 和全区 Y 值的方差。

2 结果与分析

2.1 土地利用隐性形态变化分析

由图 1 可知, 2010~2020 年长江中游城市群土地利用隐性形态指数总体呈增长趋势, 由 2010 年的 0.09 增长至 2020 年的 0.20。武汉、长沙和南昌的土

地利用隐性形态指数一直处于领先地位, 特别是武汉市从 2010 年的 0.46 上升到 2020 年的 0.99, 长沙市从 2010 年的 0.20 上升到 2020 年的 0.52, 南昌市从 2010 年的 0.21 上升到 2020 年的 0.51。这主要是得益于武汉市、长沙市和南昌市凭借区位优势社会经济领先发展。翁异静等^[43]的研究也表明, 城市间的经济发展水平不同从而导致区域间的土地利用隐性形态指数差距不断扩大, 东部地区高级形态对中部地区有“溢出效应”^[24-25]。另外, 长江中游城市群土地利用隐性形态指数低值区域逐渐减少, 从 2010 年的 13 个城市下降到 2020 年的 2 个城市, 这是因为各个地区大力发展经济使土地利用隐性形态指数不断上升。显然, 长江中游城市群土地利用隐性形态正在向更高级别的形态转变, 但因经济社会发展与土地利用活动水平和程度并非均质状态, 市域间土地利用隐性形态极化现象不断加剧。

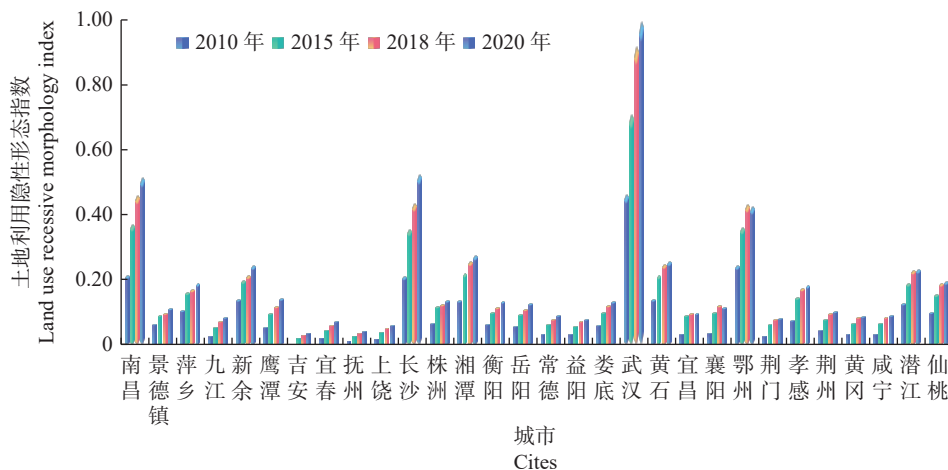


图 1 长江中游城市群土地利用隐性形态指数

Fig.1 Land use recessive morphology index in the Middle Triangle of Yangtze River

根据 30 个地市土地利用隐性形态计算结果, 采用 ArcGIS 中的自然断点法将土地利用隐性形态水平分为 5 个等级, 分别为低值 (< 0.05)、中低值 ($0.05 \sim 0.10$)、中值 ($0.10 \sim 0.20$)、中高值 ($0.20 \sim 0.30$)、高值 (> 0.30)。由图 2 可知, 近 10 年, 长江中游城市群土地利用隐性形态由以武汉、长沙和南昌市单核集聚的“中三角”格局向两两相连的“中三轴”空间格局演变, 呈现“中三轴”中心高周边低的空间分布特征。2010~2015 年, 土地利用隐性形态呈现以武汉、长沙和南昌市单核集聚的“中三角”空间格局, 中高值区只有武汉、南昌、长沙以及临近武汉的鄂州, 成为空间格局的三个单核。黄石、新余、湘潭、潜江及萍乡市处于中值, 其它市都处

于中值以下的范围。到 2015 年, 三核从中高值上升到高值, 并逐渐向周边扩散发展, 进而带动周边地区逐步提升。黄石、仙桃、孝感、湘潭、株洲市依托紧邻三核的地理位置优势经济发展水平不断攀升, 土地利用隐性形态指数从中值上升到中高值, 总体分布特征还是呈现单核集聚的“中三角”空间格局。2018~2020 年, 土地利用隐性形态呈现“中三轴”空间格局, 中高值城市已经从 2015 年的 2 个增加到 4 个, 中值城市从 2015 年的 6 个增加到 9 个, 空间格局发展成以武汉、长沙、南昌市为中心核逐渐形成“中三轴”, 到 2020 年土地利用的隐性形态向高阶转变, 朝着稳固的“中三轴”不断发展, 且在空间上也表现出了一定的趋同性。

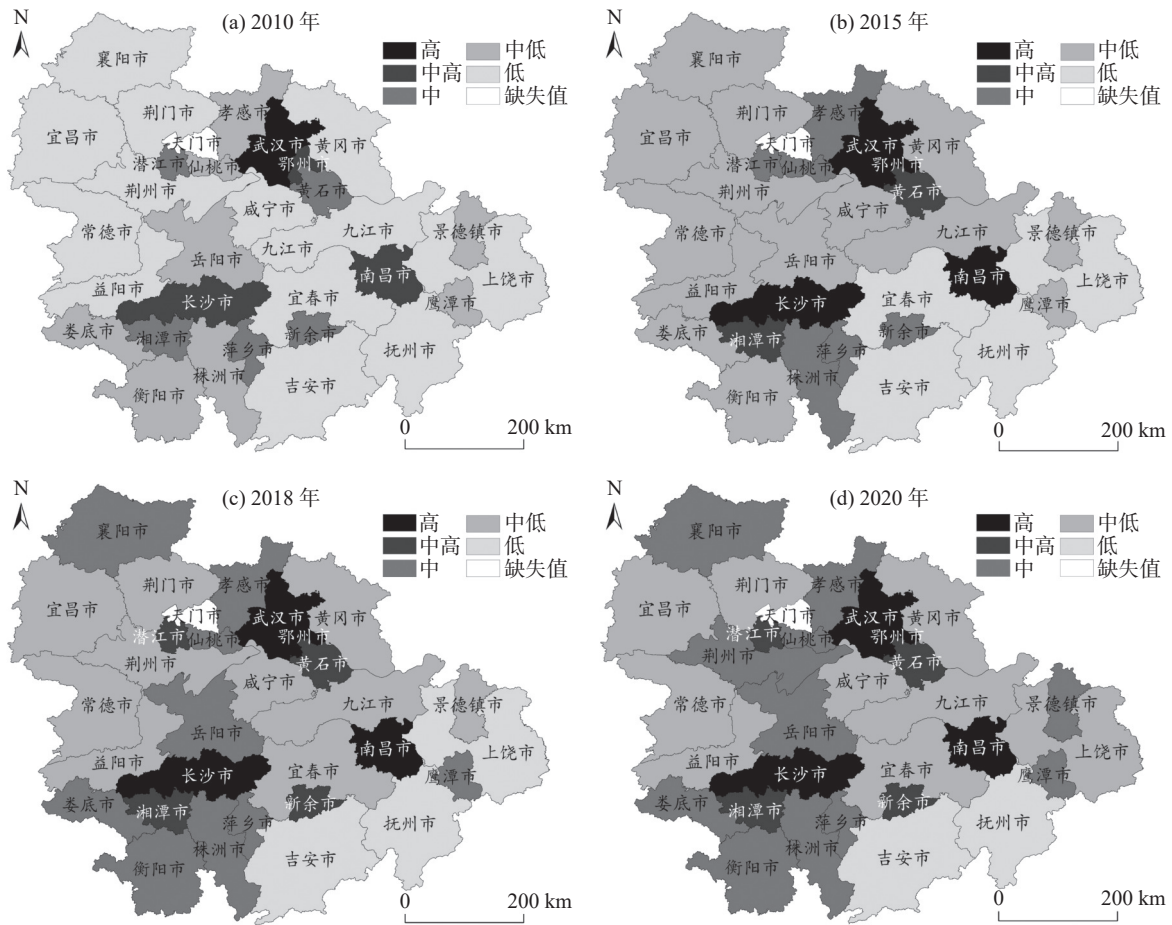


图2 长江中游城市群土地利用隐性形态指数空间格局演变特征

Fig.2 Spatial pattern of land use recessive morphology index in the Middle Triangle of Yangtze River

2.2 土地利用碳排放变化分析

长江中游城市群土地利用碳排放量总体呈上升趋势(图3),由2010年的 1.60×10^8 t增长至2020年的 1.77×10^8 t,增长了 1.71×10^7 t,增长率达到10.65%,中部地区经济形成集聚效应,导致土地利用碳排放持续升高。净碳排放量从2000年的 1.48×10^8 t增至2020年的 1.65×10^8 t,增速为11.59%,年均增长率为1.16%。特别是2010年到2018年,增速为12.87%,年均增长率为1.61%,从2018年以后,净碳排放量呈下降趋势。湖北省对长江中游城市群土地利用碳排放量的贡献最大,占49.14%以上,其次是江西省,占比为31.92%,湖南省只占18.94%,湖北省是湖南省的2.59倍。湖北省在2010~2018年间碳排放处于增长的状态,2018~2020年呈下降的趋势,虽然碳吸收量下降了0.5%,但由于碳排放下降的幅度大,因此,净碳排放量呈下降趋势。江西省土地利用碳排放与净碳排放均呈现不断增长的趋势,碳排放量增长了13.54%,碳汇

的量下降了2.48%,导致净碳排放量增加了15.33%。而湖南省土地利用碳排放从2010年的 3.68×10^7 t下降到 3.34×10^7 t,碳排放量减少了 3.41×10^6 t,同时碳吸收量增加了 9.36×10^4 t,2020年与2010年相比净碳排放量下降了8.08%。

在碳源方面,建设用地是主要碳源,对碳排放量的贡献率大于96%,且与碳排放量的增长趋势一致。由2010年的 1.54×10^8 t增长到2020年的 1.71×10^8 t,增加了 1.72×10^7 t,增长率为11.18%。耕地对碳排放量的贡献率只占3.48%~3.97%,且呈不断下降趋势,从2010年的 6.37×10^6 t下降至2020年的 6.22×10^6 t,下降幅度达到了2.31%。耕地面积的减少是导致碳排放量逐渐减少的主要原因,近10年耕地面积减少了 2.89×10^4 km²(图4)。在碳汇方面,森林对碳汇贡献率处于88.9%~89.5%,呈现出明显的碳汇效应。未利用地对碳汇的贡献只有5.62%~6.14%,水域和草地的碳汇贡献率处于4.84%~4.88%,水域、草地和未利用地只发挥微弱的作用。

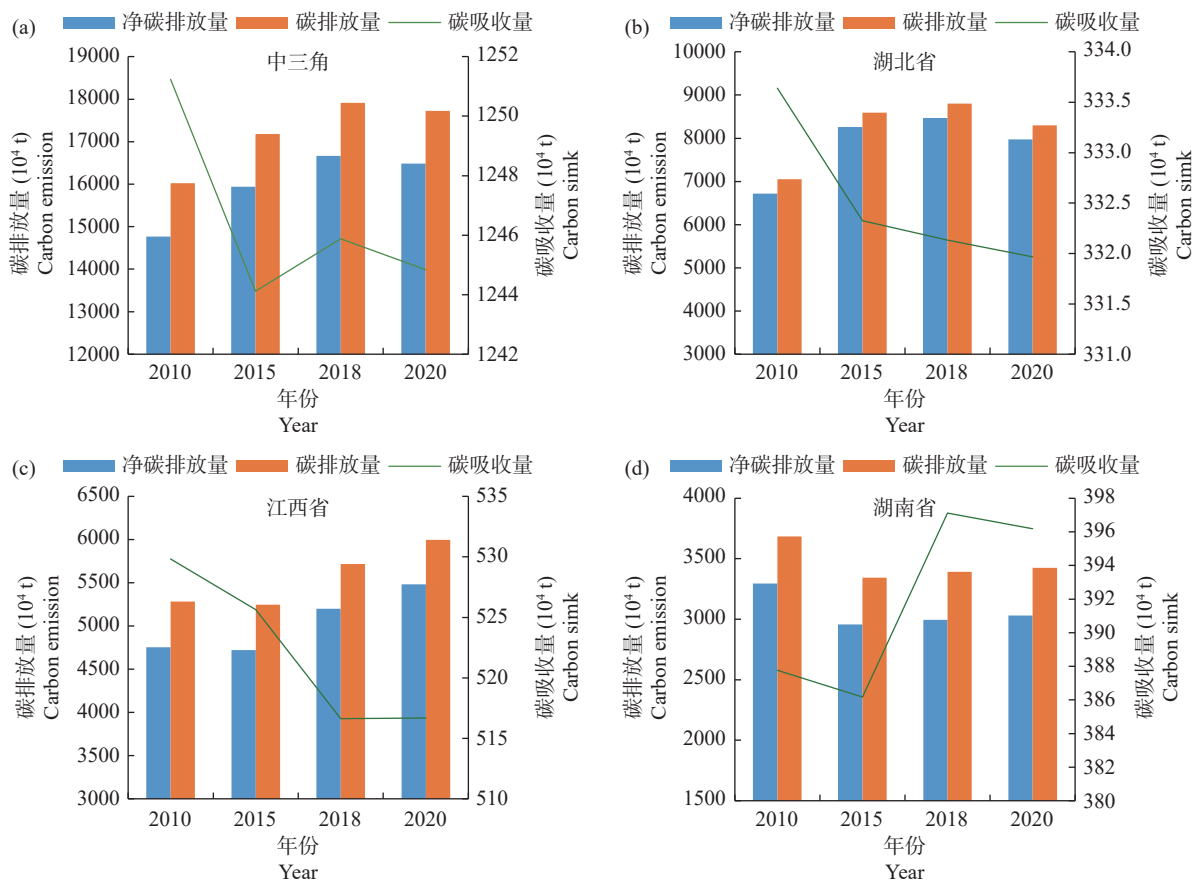


图 3 长江中游城市群 2010~2020 年土地利用碳排放

Fig.3 Carbon emission of land use from 2010~2020 in the Middle Triangle of Yangtze River

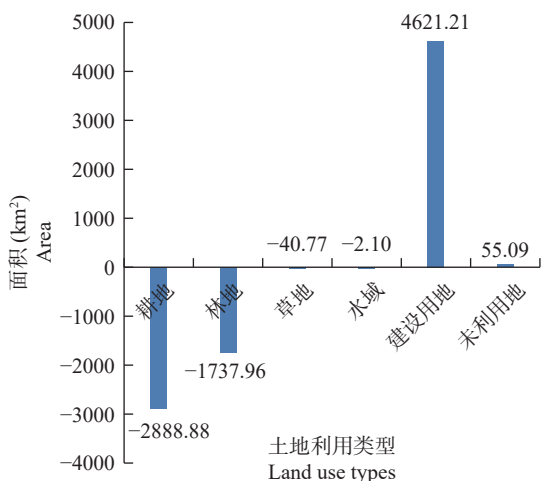


图 4 长江中游城市群 2010~2020 年土地利用变化

Fig.4 Changes of land use from 2010~2020 in the Middle Triangle of Yangtze River

根据前人的研究成果^[1,21], 结合长江中游城市群的实际情况, 采用 ArcGIS 10.2 中的自然间断法将净碳排放量划分为 4 个等级, 分别为轻度排放区 (< 3.00 × 10⁶ t)、中度排放区 (3.00 × 10⁶ ~ 6.00 × 10⁶ t)、高度排放区 (6.00 × 10⁶ ~ 8.00 × 10⁶ t)、重

度排放区 (> 8.00 × 10⁶ t) (图 5)。

净碳排放高值区主要集中在以武汉、南昌市为代表的长江沿岸带城市, 这些地区的土地利用隐性形态已达到高阶水平, 土地利用碳排放量普遍较高。2010 年, 处于重度排放区的有武汉、南昌和荆门市, 武汉市的碳排放量达到了 2.75 × 10⁷ t, 是南昌市碳排放量的 2.42 倍, 是荆门市的 2.90 倍。处于高度排放区的城市有萍乡、新余、岳阳和娄底市, 这些城市的碳排放量分别为 7.09 × 10⁶ t、6.52 × 10⁶ t、6.01 × 10⁶ t 和 6.33 × 10⁶ t, 武汉市的碳排放量比这四个高度排放区城市的碳排放量之和还高, 中度排放区的城市有 12 个, 碳排放量均低于 5.0 × 10⁶ t。2015 年, 宜昌、九江和湘潭市由中度排放区上升到高度排放区, 宜昌市的碳排放量由 2010 年的 5.64 × 10⁶ t 上升到 2015 年的 9.58 × 10⁶ t, 增长了 69.86%; 九江市由 4.87 × 10⁶ t 增长至 7.24 × 10⁶ t, 增长了 48.67%。湘潭市也由 4.95 × 10⁶ t 增长至 7.07 × 10⁶ t, 增长了 22.63%。2015~2020 年间九江、萍乡市由高度排放区进入重度排放区, 九江市相比于 2015 年, 碳排放量增长了 28.59%。孝感、黄石市从中度排放区进入

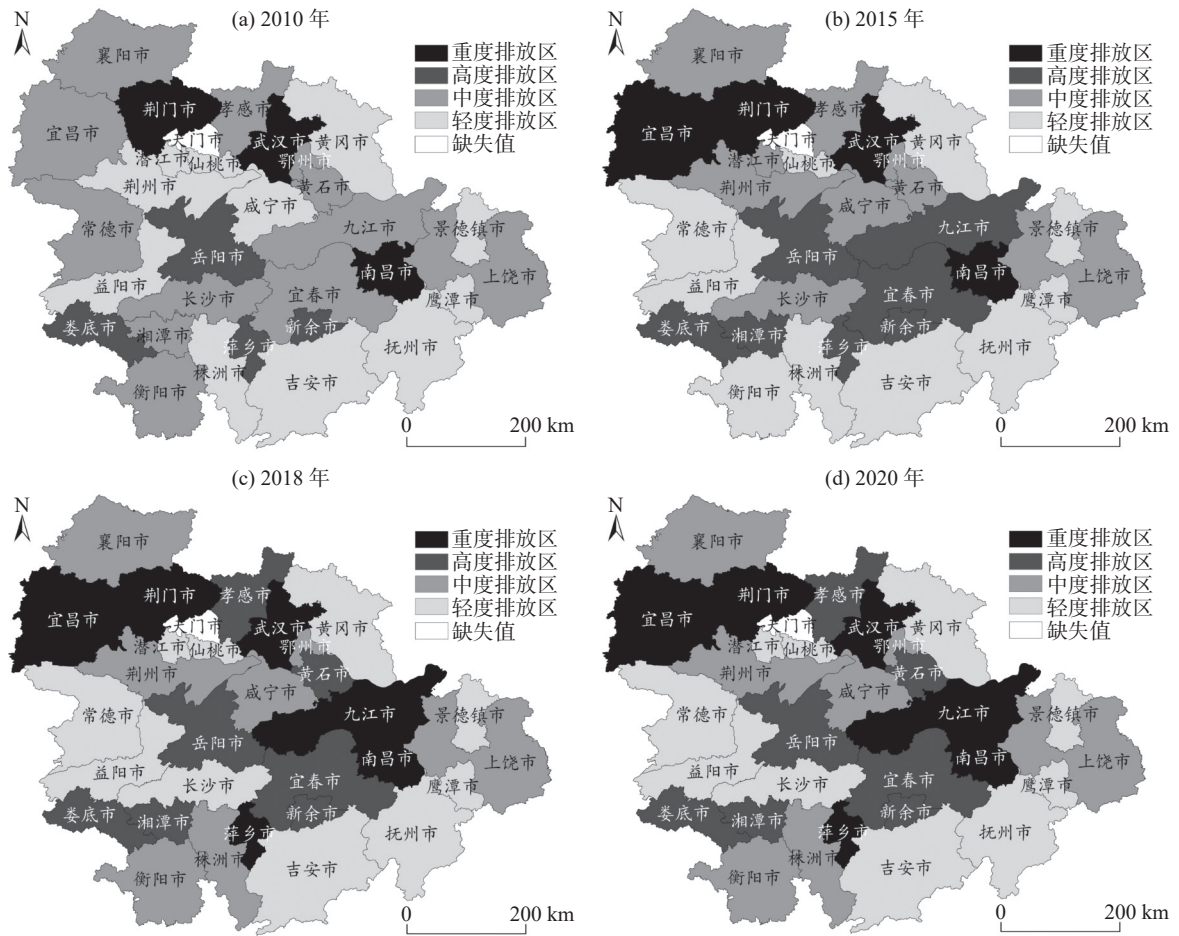


图 5 长江中游城市群 2010~2020 年土地利用净碳排放空间格局

Fig.5 Spatial pattern of land use net carbon emissions from 2010~2020 in the Middle Triangle of Yangtze River

高度排放区。净碳排放量除鹰潭、景德镇、长沙、常德、黄冈、益阳、仙桃市外都超过 3.00×10^6 t, 中度排放量以上城市达到 23 个, 占比为 76.67%。高重度排放区的城市有 13 个, 碳排放量占到长江中游城市群的碳排放量的 71.86%。土地利用碳排放的高值区不断扩散, 高重度碳排放区主要分布在武汉、南昌省会城市周边, 而且沿长江经济带高度城市化、经济发达的地方扩散。

2.3 土地利用隐性形态对碳排放的影响分析

采用地理探测器的因子探测量分析土地利用隐性形态 9 个驱动因子对土地利用碳排放空间分异的影响, 结果如表 3。驱动因子解释力从大到小依次为地均第三产业产值 (0.684) > 地均用电量 (0.676) > 地均第二产业产值 (0.647) > 地均固定资产投资额 (0.634) > 土地城镇化率 (0.606) > 人口密度 (0.578) > 地均 GDP (0.368) > 地均从业人员量 (0.334) > 地均财政支出 (0.317)。其中地均第二产业产值、地均第三产业产值、城镇化率、地均用

电量、地均投资额、人口密度对土地利用碳排放空间分异的解释力度较强, q 值大于 0.5 以上。2010 年地均固定资产投资额、地均第二产业产值、地均用电量、地均第三产业产值的解释力均值达到 0.604, 占据驱动因子总解释力的 55.86%。2015 年地均第二产业产值、地均固定资产投资额、地均第三产业产值、地均用电量的总解释力均值达到 0.674, 占据驱动因子总体解释力的 55.53%。2018 年地均第三产业产值、土地城镇化率、地均用电量、地均第二产业产值的总解释能力均值达到 0.686, 占据驱动因子总解释力的 57.38%。2020 年土地城镇化率、地均用电量、地均第三产业产值、地均固定资产投资额的总解释力均值达到 0.762, 占据驱动因子总解释力的 56.38%。

运用地理探测器中的交互探测分析各影响因素对净碳排放的交互作用 (图 6), 结果显示, 不同驱动因子交互作用对长江中游城市群土地利用碳排放的影响远大于单因子的作用力, 说明各因子间形成

表 3 土地利用隐性形态对碳排放解释力

Table 3 Explanatory power of land use recessive morphology on carbon emissions in the Middle Triangle of Yangtze River

要素层 Element layer	指标层 Index level	解释力 Explanatory power				综合值 Comprehensive value
		2010年	2015年	2018年	2020年	
土地利用投入	X1: 地均固定资产投资额	0.638	0.694	0.540	0.664	0.634
	X2: 地均财政支出	0.336	0.246	0.324	0.360	0.317
	X3: 地均从业人员量	0.359	0.307	0.299	0.369	0.334
土地利用产出	X4: 地均 GDP	0.394	0.475	0.238	0.364	0.368
	X5: 地均第二产业产值	0.614	0.711	0.646	0.616	0.647
	X6: 地均第三产业产值	0.581	0.656	0.711	0.787	0.684
土地利用强度	X7: 人口密度	0.418	0.608	0.636	0.648	0.578
	X8: 地均用电量	0.584	0.636	0.689	0.793	0.676
土地产权变化	X9: 土地城镇化率	0.403	0.524	0.696	0.802	0.606

了互动机制，共同影响了土地利用碳排放的空间分异。2010 和 2015 年，地均固定资产投资额 (X1) 与人口密度 (X7) 之间的交互作用均为最高，达 0.905 和 0.901，2018 年交互作用 q 值最大的为地均第三产业产值 (X6) 与地均用电量 (X8) 的 0.990，2020 年最大的为人口密度 (X7) 与地均用电量 (X8) 的 0.959，其他各因子之间的交互作用也均为增强关系。以 2020 年为例，交互类型为双因子增强的有 25 对 (占 69.44%，平均 q 值为 0.811)，交互解释

力最大值为 0.959 (人口密度 X7∩地均用电量 X8)。非线性增强的有 11 对 (占 30.56%，平均 q 值为 0.765)，交互解释力最大为 0.958 (地均第二产业产值 X5∩地均用电量 X8)。此外，地均第三产业产值 (X6)、地均用电量 (X8)、土地城镇化率 (X9) 与各因子交互作用的平均 q 值均在 0.8 以上，验证了这三个因子是土地利用碳排放空间分异的主导影响因子，且与其他因子的交互作用能较程度地解释土地利用碳排放空间分异。

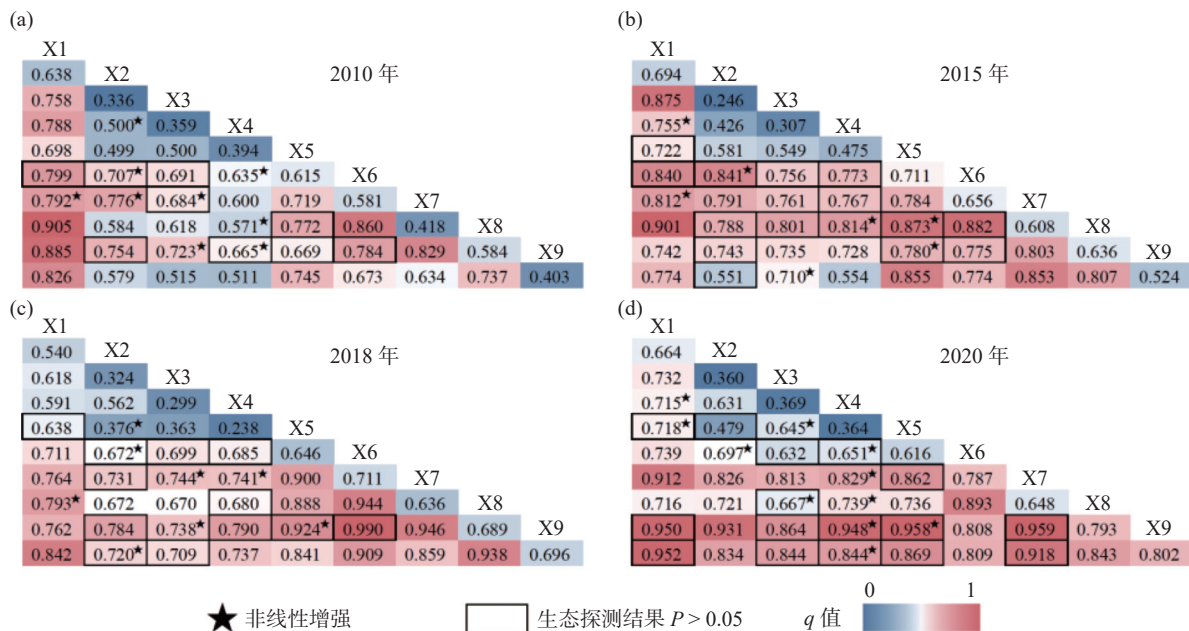


图 6 长江中游城市群土地利用碳排放双因子交互热力图

Fig.6 Two-factor interactive heat map of land use carbon emissions in the Middle Triangle of Yangtse River

3 讨论

3.1 土地利用碳排放

本研究采用碳排放系数法对长江中游城市群土

地利用碳排放进行测算，根据结果分析得出碳源量和净碳排放量呈现增长的态势，增长率均达 10% 以上，这与张玥等^[27]的研究一致。张杰等^[18]的研究也表明陕西省土地利用碳排放呈不断增加趋势，年均

增长率为 13.20%。张余等^[12]的研究也表明,东北地区整体土地利用净碳排放量的增长率高达 31.3%。建设用地的扩张是造成碳排放量不断增加的主要原因^[12,21]。长江中游城市群的碳排放量 90% 以上来源于建设用地,建设用地面积每年以 5.29% 的速率增长(图 4),近 10 年增量达到了 $4.62 \times 10^4 \text{ km}^2$,建设用地产生的碳排放量也由 2010 年的 $1.54 \times 10^8 \text{ t}$ 增长到 2020 年的 $1.71 \times 10^8 \text{ t}$,这是导致长江中游城市群碳排放量增长的直接原因。有研究表明,建设用地的占比每增加 1%,净碳排放量就会上升 3.99%^[44]。主要因为建设用地承载的能源消费量和人口的不断增加,使其碳排放呈增长趋势^[45-46]。林地的碳汇占到碳汇量的 88% 以上,这与前人的研究结果一致^[47-48],表明森林的碳吸收能力占据了碳汇的主导地位。但是长江中游城市群碳源与碳汇比达到了 12~14 之间,廖祥等^[49]对成渝城市群的研究也表明碳源与碳汇之比总体在 4~14 之间,说明林地碳汇远不足以抵消建设用地产生的碳排放。土地利用净碳排放量与各地的一次能源结构尤其是煤炭消耗量密切相关^[13]。随着工业化、城镇化的迅猛发展,以及人口的持续增加,建设用地以及农业用地的过度开发,高能耗燃料的消费,导致净碳排放量急剧上升。为了实现碳减排的目标,长江中游城市群应该因地制宜,根据本地的发展条件和当地的特点,控制建设用地的扩张有利于抑制碳排放的增长。

3.2 碳排放时空演变

本研究计算得出土地利用碳排放量和净碳排放量随时间的变化呈先增加后递减的趋势。从 2018 年以后,碳排放量开始呈下降的趋势,说明各地的减排政策具有一定的成效。湖北省 2018~2020 年碳排放量呈下降的趋势,这主要与湖北省的节能降碳政策有关,政府采取“退二进三”模式调整产业结构以降低碳排放,提升能源利用效率,三次产业结构由 2012 年的 12.8:50.3:36.9 调整为 2021 年的 9.3:37.9:52.8。2020 年全省新能源装机发电量比 2015 年增长 4.3 倍,2019 年单位 GDP 能耗降低率达 7.18%。江西省土地利用碳排放与净碳排放均呈现不断增长的趋势,江西省 2010 年之后林地面积开始减少,导致碳吸收总量持续下降,净碳排放量持续上升。另一方面,江西省城镇化、工业化快速发展,近 10 年城镇化率由 44.06% 提升至 60.44%,导致能耗速度增加,碳排放总量持续升高。而湖南省土地利用碳排放从 2015 年开始呈现下降趋势,湖南省集

中力量整治“化工围江”“化工围湖”以及淘汰过剩产能。过去 10 年单位 GDP 能耗累计下降 20.1%,一次性能源的比重由 2015 年的 61.97% 下降到 2019 年的 39.95%,电力比重由 38.03% 提高到 2019 年的 60.05%。另外,大力推行“林长制”、“国土绿化行动”等,森林覆盖率由 2010 年的 57.01% 提升到 2020 年的 59.96%。湖南省节能减排取得的成效对长江中游城市群的碳排放的减缓具有一定的贡献。

在空间分布特征上,因各地市经济发展水平差异较大,碳排放空间差异也很显著。处于高重度排放区的武汉、南昌、荆门、岳阳、宜昌、九江和黄石市均分布于长江沿岸,说明近 10 年间武汉—南昌发展轴经济快速提升,主要受“长三角”经济发展的辐射作用。武汉市利用区位优势大力发展经济,重工业企业不断增加,经济快速发展也带来了建设用地的增长以及建设用地承载的人类活动能源消耗量的增长。吴萌等^[50]的研究也表明,目前武汉市经济发展重心还是第二产业,高能耗、高污染的经济发展方式是造成土地利用碳排放增长的重要原因。南昌市的 GDP 近 10 年增长了 169.55%,2020 年 GDP 达到 5.75×10^{11} 元,是 2015 年的 1.5 倍,年均增长 7.6%。省会城市引领作用凸显,九江市也从高度排放区上升到重度排放区,九江市净碳排放量一直稳居江西省首位,且持续不断增长的原因在于它是江西省的第二大工业基地,拥有全省唯一的炼油企业,高耗能行业占比较高,高耗能企业也逐年增加^[21]。另外,萍乡、新余和湘潭市等重工业区域也属于碳排放高值区,这些城市工业行业大类是黑色金属冶炼和压延加工业,如新余市钢铁产业实现营业收入过千亿、锂电产业过 5.00×10^{10} 元。萍乡、新余、湘潭市等城市在老工业基地转型升级方面的协同合作,产业发展规模效应导致其邻域地区碳排放强度提升。

3.3 碳排放的影响因素

本研究从土地利用隐性形态的角度出发研究土地利用碳排放的影响因素,弥补了以往只从土地利用显性视角研究碳排放,未能深入分析土地利用变化过程要素对碳排放影响的不足。根据分析结果得出,农用地转为建设用地的过程中,伴随着第二产业的快速发展,人口密度、城镇化、固定资产投资等与建设用地面积呈显著的正相关,基础设施建设、产业集聚、资源消耗多,促进地方经济增长的同时导致碳排放量的增加。牛亚文等^[51]也提出第二产业

产值的不断增加会显著地增加碳的排放量。Shi 等^[28]进一步解释了城市第二产业占比导致建设用地的扩张是影响碳排放的主要因素^[12]。增加第一产业和第三产业的投资有助于提高重工业快速扩张所消除的碳密度^[52]。随着长江经济带的发展,沿江城市产业集聚进一步形成,另外,萍乡、新余、湘潭市属于资源型城市,以钢铁、煤炭等为主导的第二产业具有一定的规模,但产业发展以高耗能工业为主,能源使用效率较低,对土地利用碳排放产生了较大的影响。同样,能源结构特别是地均用电量与土地利用净碳排放密切相关^[13]。长江中游城市群地均用电量已经从 2010 年的 2.1×10^9 kWh 增加到 2020 年的 4.3×10^9 kWh,已经成为影响碳排放量的主要因素之一。除上述三个主导因子之外,长江中游城市群的土地城镇化率已经从 2010 年的 33.64% 增长到 2020 年的 51.47%,土地城镇化逐渐成为长江中游城市群土地利用碳排放的主导因子,在 2020 年 q 值排在第一位,达到 0.802。张杰等^[18]的研究也表明城市化水平是影响陕西省县域土地利用碳排放的主要因素。张余等^[12]的研究则表明土地利用强度对东北三省土地利用碳排放空间差异影响程度作用最大。城镇扩张的背后伴随着土地产权的嬗变,城镇的无序增长侵蚀了大量农用地和生态用地,带来了区域碳汇用地萎缩、土地固碳功能降低、土地生态系统脆弱等问题,从而导致土地利用碳排放问题恶化^[27,48]。因此,在碳排放治理中更需要关注因子交互对碳排放的增强效应,通过削弱多因子的共同作用可以促进长江中游城市群的碳减排。

4 结论

本研究以长江中游城市群为研究对象,选取土地利用隐性形态指标体系,分析土地利用隐性形态指数和土地利用碳排放的时空特征,采用地理探测器模型探讨土地利用隐性形态对碳排放的影响,主要结论如下:

(1) 长江中游城市群土地利用隐性形态指数从时间维度上逐渐升高,从 2010 年的 0.09 增长到 2020 年的 0.20;在空间维度上从单核聚集的“中三角”转变为“中三轴”的空间格局。武汉市的土地利用隐性形态指数显著优于其他地市,鄂州市、南昌市、长沙市土地利用隐性形态指数达到 0.5 以上,属于高值区域。随着经济的发展,武汉、长沙、南昌高级形态区对周边城市具有显著的辐射作用,在空

间上也表现出了一定的趋同性。

(2) 2010~2020 年,长江中游城市群的碳排放量增长了 1.71×10^7 t,增长率达到 11.59%。建设用地是研究区最主要碳源,占碳排放量的 96% 以上。林地是碳汇的主要来源,其占碳吸收能力的 89%,而水域、草地和未利用只发挥微弱的碳汇作用。湖北省对碳排放的贡献率达到 45.5% 以上,在市域层面上,随着长江经济带的发展以及长三角产业转移,沿江城市武汉、南昌、荆门、宜昌、岳阳、九江、黄石市等成为碳排放高值区。另外,萍乡、新余、湘潭市等城市在老工业基地转型升级方面的协同合作,产业发展规模效应导致其邻域地区碳排放强度显著提升。

(3) 基于地理探测器模型分析各影响因素对碳排放的作用强度,第二产业产值、第三产业产值、地均用电量以及土地城镇化率这四个因素一直是影响土地利用净碳排放量的关键影响因子,其 q 值均大于 0.6,占驱动因子总解释率的 50% 以上。土地城镇化率在 2020 年是影响碳排放的主导因子, q 值达到 0.802。各驱动因子交互作用对长江中游城市群土地利用碳排放的影响远大于单因子的作用,其中,第二产业产值、地均第三产业产值(X6)、地均用电量(X8)、土地城镇化率(X9)与各因子交互作用的平均 q 值均在 0.8 以上,表明这四个因子是土地利用碳排放空间分异的主导影响因子。

参考文献:

- [1] 景勇,左玲丽,彭文甫.四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析:以绵阳市为例[J].环境科学与技术,2021,44(6):172-185.
- [2] 孙兴,刘熙.中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素——基于异质性空间随机前沿模型[J].地理研究,2023,42(12):3182-3201.
- [3] 杨静媛,张明,多玲花,等.江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J].环境科学研究,2022,35(10):2312-2321.
- [4] 苑韶峰,唐奕钰.低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J].经济地理,2019,39(2):190-198.
- [5] 黄汉志,贾俊松,张振旭.江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J].生态学报,2023,43(20):8390-8403.
- [6] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J].自然资源学报,2021,36(12):2995-3006.
- [7] 向书江,杨春梅,谢雨琦,等.近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移[J].环境科学,2023,44(1):560-571.
- [8] 李璐,张斌,夏秋月,等.土地资源错配碳排放效率的空间效应与影响路径——来自长江经济带 108 个城市的经验证据[J].资源科学,2023,45(5):1059-1073.
- [9] 徐聪宝,谢明希,刘丹,等.土地利用碳排放空间关联性及其碳平衡

- 分区——以关中平原城市群为例[J]. 江西农业学报, 2023, 35(4): 122-133.
- [10] 阳 凯, 王奕文, 黄春华, 等. 洞庭湖区域土地利用变化的碳排放效应研究[J]. 生态科学, 2023, 42(2): 193-201.
- [11] 周璟茹, 赵华甫, 吴金华. 关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究[J]. 中国土地科学, 2017, 31(11): 55-61, 72.
- [12] 张 余, 姜 博, 赵映慧, 等. 东北地区城市土地利用碳排放效应研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(7): 209-217.
- [13] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 基于土地利用和夜间灯光数据的京津冀区域碳排放时空分异研究[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(6): 36-42.
- [14] 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 414-428.
- [15] 周 嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [16] 张 苗, 刘 璇, 彭山桂, 等. 中国省域土地利用碳排放效率的空间关联网络演变特征与形成机制[J]. 中国土地科学, 2023, 37(10): 91-101.
- [17] Li S, Lan Y W, Guo L J. Analysis of Carbon Emission and Its Temporal and Spatial Distribution in County-Level: A Case Study of Henan Province, China[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2022, 21(2): 447-456.
- [18] 张 杰, 陈 海, 刘 迪, 等. 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[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21-31.
- [19] 朱嘉豪, 许章华, 李诗涵, 等. 福州都市圈能源消费碳排放空间网络结构演化及其影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(6): 75-83.
- [20] 李玉玲, 李世平, 祁静静. 陕西省土地利用碳排放影响因素及脱钩效应分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 382-390.
- [21] 刘春英, 檀斯园, 王骏博, 等. 长江中下游典型区域土地利用碳排放风险——以江西省九江市为例[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 341-349.
- [22] 陈梦涵, 唐 莹. 中国耕地利用碳排放时空特征与影响因素分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 236-243.
- [23] 龙花楼. 论土地利用转型与乡村转型发展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(2): 131-138.
- [24] 曲 艺, 龙花楼. 基于开发利用与产出视角的区域土地利用隐性形态综合研究——以黄淮海地区为例[J]. 地理研究, 2017(1): 61-73.
- [25] 程 建, 程久苗. 中国省际土地利用隐性形态时空格局、驱动力与转型模式[J]. 中国土地科学, 2017, 31(12): 60-68.
- [26] 龙花楼. 土地利用转型的解释[J]. 中国土地科学, 2022, 36(4): 1-7.
- [27] 张 玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(6): 100-112.
- [28] Shi K F, Yu B L, Zhou Y Y, et al. Spatio-temporal variations of CO₂ emissions and their impact factors in China: a comparative analysis between the provincial and prefectural levels[J]. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 170-181.
- [29] Zhao J C, Ji G X, Yue Y L, et al. Spatio-temporal dynamics of urban residential CO₂ emissions and their driving forces in China using the integrated two nighttime light datasets[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 612-624.
- [30] 张茹倩, 李鹏辉, 徐丽萍. 城镇化对新疆土地利用碳排放的影响及其耦合关系[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5226-5242.
- [31] 张中秋, 劳燕玲, 赵宁俊, 等. 广东省土地利用—碳减排—经济增长的脱钩关系[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 250-258.
- [32] 黄 鑫, 邢秀为, 程文仕. 土地利用碳排放与 GDP 含金量的脱钩关系及驱动因素[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(3): 156-161.
- [33] 赖德琳, 胡 燕, 王玉贵. 成渝城市群土地利用碳排放时空异质性及影响因素分析[J]. 绵阳师范学院学报, 2023, 42(11): 97-105.
- [34] 邝嫦娥, 李文意, 黄小丝. 长江中游城市群碳排放强度与经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 30-40.
- [35] 冯 源, 朱建华, 刘华妍, 等. 基于土地利用变化的县域碳收支空间格局预测[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(4): 852-862.
- [36] 禹康康, 王延华, 孙 恬, 等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406-414.
- [37] 杨皓然, 吴 群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 121-126.
- [38] Wang M J, Wang Y J, Teng F, et al. The spatio-temporal evolution and impact mechanism of energy consumption carbon emissions in China from 2010 to 2020 by integrating multisource remote sensing data[J]. *Journal of environmental management*, 2023, 346.
- [39] 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.
- [40] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [41] 方 林, 李灿锋, 李浩杰, 等. 长江经济带土地利用碳排放时空效应及驱动力[J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2539-2553.
- [42] 侯文兵, 李开明, 黄 卓. 近 20 a 河西地区绿洲效应时空变化特征及归因分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 2031-2042.
- [43] 翁静静, 周祥祥, 陈思静. 长江经济带发展战略的影响效应及作用机制的异质性分析[J]. 统计与决策, 2023, 39(1): 136-141.
- [44] 李小康, 王晓鸣, 华 虹. 土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J]. 生态经济, 2018, 34(1): 14-19.
- [45] 唐承丽, 郭夏爽, 周国华, 等. 长江中游城市群创新平台空间分布及其影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 531-541.
- [46] 邵红娟, 韩会庆, 张朝琼, 等. 乌江流域贵州段 2000-2010 年土地利用变化对碳储量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2016, 34(1): 48-53, 84.
- [47] 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 等. 珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6643-6652.
- [48] 李彦彦, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 182-188.
- [49] 廖 祥, 杨 鑫, 牛振生. 成渝城市群陆地碳排放时空变化及效应研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(1): 211-225.
- [50] 吴 萌, 任 立, 陈银蓉. 城市土地利用碳排放系统动力学仿真研

- 究——以武汉市为例 [J]. *中国土地科学*, 2017, 31(2): 29 – 39.
- [51] 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 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847 – 3856.
- [52] Wu W H, Xu L Y, Zheng H Z, et al. How much carbon storage will the ecological space leave in a rapid urbanization area ? Scenario analysis from Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106774.

Influence of Land Use Recessive Morphology on Carbon Emission in the Middle Reaches of Yangtze River

LIU Chun-ying, CAO Yi, WANG Jun-bo, LI Jia-wei, GONG Li-ping, XIAO Chang-jiang*

(School of Public Finance and Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China)

Abstract: **[Objective]** The purpose of this study was to explore land use recessive morphology and its impact on land use carbon emissions, to provide practical guidance for spatial optimization of land use based on the "dual carbon" goals. **[Method]** The Middle reaches of Yangtze River was taken as the research area, land use recessive form indicators were selected, spatial-temporal variation characteristics of land use recessive morphology and land use carbon emission were analyzed using carbon emission coefficient method and geographic detector model, based on land use data from 2010 to 2020, and revealed the correlations of land use recessive morphology and carbon emission. **[Result]** ① The level of land use recessive morphology in the Middle Reaches of Yangtze River continued to increase, and the spatial pattern evolved from the "Middle triangle" with single provincial capital to the "Middle three-axis" with connected provincial capital. ② Construction land was the most important carbon source in the study area, accounting for more than 96% of carbon emissions. Forest land was the main source of carbon sink, accounting for 89% of carbon absorption capacity, and the net carbon emission from land use showed a rising trend, with an annual growth rate of 11.56%. High value areas of carbon emissions were mainly concentrated in Wuhan, Nanchang, Jingmen, Yichang, Jiujiang cities along the Yangtze River and Pingxiang, Xinyu, Xiangtan cities in the old industrial base. ③Geographic detector showed that the output value of secondary industry, the output value of tertiary industry, the average power consumption of land and the urbanization rate of land were the key driving factors affecting the net carbon emissions of land use. The q value of driving factors was above 0.6. **[Conclusion]** The hidden recessive morphology of land use increased land use carbon emissions. The spatial distribution of net carbon emissions was formed by the interaction of multiple factors, and the urbanization rate of land had the highest explanatory power for carbon emissions in each index layer.

Key words: Land use recessive morphology; Carbon emission; Spatial-temporal variation; Geographic Detector model; the Middle Reaches of Yangtze River

[责任编辑：韩春兰]