

不同空间尺度耕地利用转型碳排放及其影响因素

——以湖南省为例

杨君¹, 刘畅¹, 袁淑君², 魏雨彤¹, 王义博¹, 谢佳轩¹, 孟媛媛¹, 余德³

(1.湖南农业大学 资源学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南工程职业技术学院,
湖南 长沙 410000; 3.湖南农业大学 风景园林与艺术设计学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: [目的] 分析耕地利用转型特征和碳排放时空分布差异, 探究各影响因素在耕地利用转型碳排放过程中的作用机制, 为耕地低碳化利用提供科学依据。[方法] 基于土地利用数据结合碳排放系数, 从县区与5 km 网格尺度揭示湖南省2000—2020年耕地利用转型及其产生的碳排放的时间演化特征, 借助空间自相关方法识别和分析碳排放空间分布特征, 最后运用最优参数地理探测器探究因子影响与因子间的相互作用程度。[结果] ①研究期内湖南省的耕地面积缩减, 伴随耕地与林地、水域以及建设用地之间转化, 碳排放量呈现波动增加趋势。②空间自相关分析显示耕地利用转型碳排放放在两种尺度上皆存在显著的高—高集聚和低—低集聚现象, 表明耕地利用转型碳排放放在时空维度均具有较强的集中分布特征。③各影响因子间的交互作用对碳排放的解释力皆强于单因子作用强度, 社会经济因素和区位条件因素的交互作用在两种尺度下均有显著的解释力。[结论] 湖南省耕地利用转型对碳排放的影响显著, 不同空间尺度下碳排放特征和驱动因素存在明显差异, 未来应当更科学合理制定耕地利用减排降碳措施。

关键词: 耕地利用转型; 碳排放; 空间自相关; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0264-12

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 杨君, 刘畅, 袁淑君, 等. 不同空间尺度耕地利用转型碳排放及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 264-275. Yang Jun, Liu Chang, Yuan Shujun, et al. Carbon emissions of cultivated land use transformation and influencing factors at different spatial scales [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 264-275. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.028; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.028.

Carbon emissions of cultivated land use transformation and influencing factors at different spatial scales —A case study in Hunan Province

Yang Jun¹, Liu Chang¹, Yuan Shujun², Wei Yutong¹,
Wang Yibo¹, Xie Jiakuan¹, Meng Yuanyuan¹, Yu De³

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Hunan Vocational College of Engineering, Changsha, Hunan 410000, China; 3. College of

Landscape Architecture and Art Design, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of cultivated land use transformation and the differences in spatial and temporal distribution of carbon emissions were analyzed to explore the mechanisms of influencing factors in the process of cultivated land use transformation carbon emissions, in order to provide scientific basis for the low-carbonization of cultivated land use. [Methods] Using land use data and the carbon emission coefficients, the temporal evolution characteristics of cultivated land use transformation and its carbon emissions from 2000 to 2020 in Hunan Province were shown at the county and 5 km grid scales. The spatial distribution characteristics of carbon emissions were identified and analyzed using the spatial autocorrelation method. The depth of the influence of factors and the degree of interaction between them were assessed using

收稿日期: 2024-08-28

修回日期: 2024-11-06

采用日期: 2024-11-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“多维安全视域下耕地非粮化对耕地质量的影响机理及效应研究”(42301301); 湖南省自然科学基金部门联合基金项目“基于GWR的洞庭湖区土地利用碳排放时空演变及其影响因素分析”(2023JJ60190)

第一作者: 杨君(1976—), 女(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: yangjun_ly@163.com。

通信作者: 袁淑君(1983—), 女(汉族), 湖南省邵阳市人, 硕士, 副教授, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: 393544284@qq.com。

the optimal parameter Geodetector model. [Results] ① Throughout the study period, the area of cultivated land in Hunan Province decreased continuously. With frequent conversions between cultivated land and forest land, water areas, and construction land, carbon emissions showed a fluctuating and increasing dynamic change trend. ② A spatial autocorrelation analysis showed significant high-high and low-low concentration phenomena at both scales, indicating strong concentration distribution characteristics in both spatial and temporal dimensions. ③ The interactions among factors were stronger than those of single factors, with socioeconomic factors and locational conditions having significant explanatory power at both scales. [Conclusion] The effect of cultivated land use transformation on carbon emissions in Hunan Province is significant, with clear differences in carbon emission characteristics and drivers at different spatial scales. Future measures for carbon emission reduction measures and cultivated land use planning should be formulated both scientifically and rationally.

Keywords: cultivated land use transformation; carbon emissions; spatial autocorrelation; Geodetector model

耕地是维系国家粮食安全与社会稳定的宝贵资源,是人类存续与发展的基石^[1]。在城镇化与工业化加速进程中,耕地作为土地资源中不可或缺的部分,面临着极大挑战^[2]。作为碳循环的重要环节,耕地在转型过程中既能强化植被、土壤及水域碳汇功能,又作为碳源,产生大量碳排放。当前全球气候变化面临严峻态势,能否处理好碳排放问题已成为关系人类生存与发展的重大挑战。在新时代背景下,促进耕地资源低碳化利用是践行可持续发展战略的基石,是农业结构优化升级与高质量发展的核心动力,更是中国达成碳达峰、碳中和目标的战略任务^[3]。

国内学者在进行相关研究后,将耕地利用转型的概念界定为耕地利用空间形态和耕地利用功能形态在时序上的变化^[4]。作为土地利用转型研究的重要核心议题,耕地利用转型研究与土地利用转型研究共同推动着土地资源的优化配置与可持续利用,其发展与土地利用转型的整体发展紧密相连^[5]。随着土地可持续发展路径的深入探索,耕地利用转型的研究视角也随之拓展。中国耕地利用转型的研究焦点主要在于:①耕地利用转型形态特征研究。既涵盖耕地数量动态变化和空间结构优化^[6],又包括耕地质量^[7]、投入产出效率等^[8]。②耕地利用转型驱动机制剖析。耕地利用转型的结果源于自然生态与人文因素的双重综合作用^[9]。夏春华等^[10]以山区坡耕地为例,通过综合定量分析方法揭示了坡耕地利用转型对区域社会经济结构和生态环境的影响,并探究驱动其复杂变化过程的内在机理。③探索耕地利用转型途径。当前研究聚焦于全面科学的耕地功能评估与指标系统的构建,是耕地利用转型途径探索的重点^[4]。张玥^[11]针对中国 30 个省级行政区开展“生产—生活—生态”三维耕地多功能评价,揭示了耕地多功能时空演进的复杂性与规律性,并探讨了多功能间的耦

合协调关系及其动态演变趋势。国内外学者对土地利用碳排放的相关研究成果层出不穷,广泛涵盖了多个维度,主要集中在土地利用碳排放强度^[12]、土地利用碳排放时空分异特征^[13]、碳排放多重驱动因素分析^[14]等。基于土地利用碳排放研究成果和模式,耕地利用转型碳排放研究进一步细化,如探究耕地利用转型碳储量损失与粮食生产的脱钩效应^[15]、耕地利用转型碳排放的时间与空间分异特征及其驱动因素^[16]。学者广泛利用 LMDI 分解方法^[17]、GWR^[18]、STIRPAT 模型^[19]、最优参数地理探测器等^[20],对不同区域土地利用碳排放的复杂机制进行了探究,丰富了碳排放驱动机制的理论与实践认知。

综合来看,多数研究聚焦于土地利用静态规模变动所产生的碳排放效应,忽视了复杂碳循环关系中耕地利用转型对于碳源、碳汇影响的研究。此外,当前学者多聚焦于土地利用变化视角探讨碳排放变化,鲜有从不同空间尺度对耕地利用转型与碳排放进行融合、系统分析碳排放效应及其空间集聚特征的研究。为此,本研究从不同空间尺度分析湖南省耕地利用转型时空分异特征及变化趋势,掌握碳效应影响因素,旨在为土地利用管理、耕地可持续利用及城乡转型提供理论支撑和科学参考,以期达到社会经济低碳转型和可持续发展目的。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖南省位于中国中部、长江中游南岸,经纬度跨越东经 108°47′—114°15′,北纬 24°38′—30°08′,东临江西省,南接广东省和广西壮族自治区,西邻贵州省,北靠湖北省,辖区包含 14 个市州,122 个区县。地形复杂多样,山地、丘陵占省域总面积的 80% 以上,湘江、资江、沅江、澧水 4 大水系贯穿全省,河网密布。地处亚热

带季风气候区,年平均气温在 16~18℃,降水丰沛,年平均降水量为 1 300~1 800 mm,耕作条件良好。据第 3 次全国国土调查数据显示,湖南省耕地面积为 $3.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省土地总面积的 17.13%, 耕地整体位于国家划定的一年两熟制区域。至 2020 年末,城镇化率达 58.76%, 在区域城镇化推进的背景下,耕地资源的可持续利用与有效管理遭遇严峻考验。

表 1 耕地利用转型驱动因素指标体系

Table 1 Indicator system for drivers of cropland utilization transformation

一级指标	表征类型	驱动因子	数据来源	
自然环境	地形	高程(X_1)	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	
		坡度(X_2)		
	气候	年均温度(X_3)		国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn)
		年均降水量(X_4)		
社会经济	人口与经济	人口密度(X_5)	美国国家橡树岭实验室 Landscan 数据(https://www.ornl.gov/)	
		GDP 密度(X_6)	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)	
		与水域的距离(X_7)	国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/)	
区位条件	距离条件	与铁路的距离(X_8)	Open Street Map(http://www.openstreetmap.org)	
		与主要公路的距离(X_9)		

2 研究方法

2.1 碳效应系数法

土地利用变化所引发的碳排放效应本质上是指人类通过对土地资源的利用与管理活动直接或间接作用于陆地生态系统,进而对碳循环过程产生影响,其具体量化依据为碳汇增加量与碳排放增长量之间的差值^[21]。在各地类转化中,耕地同时作为碳源和碳汇,但碳汇功能相比作用较小,相关研究在计算耕地碳排放时系数为碳源系数与碳汇系数之差,因此本研究中耕地只计算碳源功能;建设用地因碳排放产生量较大,只考虑碳源功能;而具有较强的碳吸收能力的林地、草地、水域、未利用地在碳排放效应评估中主要被视为碳汇。碳排放效应测算公式为:

$$T = \sum e_i = \sum s_i \cdot \sigma_i \quad (1)$$

式中: T 表示碳排放总量; e_i 为耕地与某土地利用类型相互转换产生的碳排放量(t); s_i 为耕地与某土地利用类型相互转换的面积(hm^2); σ_i 为对应的碳排放系数(t/hm^2)。

参考以往研究成果^[22-23],结合湖南省自身特点,确定各地类碳效应系数(表 2)。其中建设用地碳排放系数参考联合国政府间气候变化专门委员会《2006 年 IPCC 清单》的计算方法,基于湖南省各种化石能源的实际消耗量,结合化石能源标准煤的转换系数和能源碳排放系数进行间接估算。

1.2 数据来源与处理

湖南省土地利用现状数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),选取 2000—2020 年每 5 a 间共 5 期土地利用现状数据,空间分辨率为 30 m。将研究区的土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地 6 类。表 1 详细列出了影响因素指标及数据来源。

表 2 不同土地利用类型碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients of different land use types

土地利用类型	碳排放系数	数据来源
耕地	0.497	盖兆雪 ^[15]
林地	-0.581	方精云等 ^[24]
草地	-0.021	方精云等 ^[24]
水域	-0.253	段晓男等 ^[25]
建设用地	11.87	统计年鉴计算
未利用地	-0.005	赖力等 ^[26]

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析作为空间统计学领域的重要工具,常用于衡量相邻观测值之间的相似度,深入剖析空间变量的地域结构特性。依据不同分析视角,该方法细分为全局和局部空间自相关两个维度^[27]。本研究利用全局空间自相关 Moran's I 指数来描述研究区域所有对象间的空间分布格局、相互关联程度以及显著性,以测度是否存在空间上的集聚效应。计算公式为:

$$I(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X}) / S^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (2)$$

式中: n 表示研究对象空间的区域数; X_i 表示第 i 个区域内的属性值; X_j 表示第 j 个区域内的属性值; \bar{X} 表示所有属性值的平均数; W_{ij} 表示空间权重矩阵。

全局空间自相关虽能展示区域内同属性单元的整体聚集态势,却无法反映单元内部的空间特性细

节。相比之下,局部空间自相关分析既能精确定位并界定集聚区的空间位置和范围,又能深刻揭示空间异质性,为理解复杂空间模式提供微观视角,同时也能揭示空间异质^[22]。局部 Moran's I 可表达为:

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{s^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (3)$$

式中: s 为各单元观测值的标准差。

2.3 最优参数地理探测器

地理探测器是用于探测空间异质性并精准揭示其驱动因素的高效统计方法,被广泛用于探究各种现象的影响因素的驱动程度及因素间的交互作用^[28]。传统地理探测器的参数由研究者手动设定,而最优参数地理探测器则通过优化目标函数来自动寻找最优参数。参考现有研究的基础上^[29],运用相等间隔、自然断点、分位数分类方法计算每个连续变量在 4~6 类分类等级下的 q 值(交互作用系数),筛选出 q 值最大的参数组合即该自变量最优离散组合进行空间离散化,进一步深入探讨并解析各个驱动因素在耕地利用转型过程中对碳排放效应所产生的作用程度。参数寻优过程借助 R 4.3.2 语言中地理探测器“GD”包。

3 结果与分析

3.1 耕地利用转型结构演化特征

表 3 为湖南省 2000—2020 年耕地利用转型的时间序列演变特征。由表 3 可知,湖南省的耕地面积整体呈现减少趋势,不同年份间耕地与林地、水域以及建设用地之间的转型现象尤为显著。2000—2005 年林地向耕地的大规模转变尤为突出,48 017.52 hm^2 的林地转为耕地,贡献率高达 85.22%,有面积为 52 242.75 hm^2 的耕地转为林地,贡献率 56.25%;水域的转耕比例虽较低,但仍达到 6.21%,与草地及建设用地向耕地的转化比例相近,耕地与未利用地之间的转换现象最为微弱。2005—2010 年林地向耕地的转化规模虽有缩减,但仍保持较高比例(56.32%),面积达到 75 513.33 hm^2 ,而耕地向林地的转化则显著增加,面积为 178 323.3 hm^2 ;水域与建设用地成为耕地转入的重要来源,分别占 30.65%与 8.01%,同时也有相当比例的耕地转变为这两类用地。耕地与草地、未利用地间的转换依旧不显著。2010—2015 年林地向耕地的转化面积仍达到 55 066.41 hm^2 ,而耕地向林地的转化贡献率保持在 59%左右;建设用地与水域向耕地的转化面积较小,但耕地向建设用地的转换贡献率高达 33.39%;草地与未利用地向耕地的转化比例极低。2015—2020 年土地类型转换规模进一步

扩大,有 325 107.45 hm^2 其他类型的土地转换为耕地,耕地转为其他类型土地的面积为 378 540.99 hm^2 。林地与耕地间的双向转换尤为剧烈,分别占比 82.09%与 71.42%,有 266 868.54 hm^2 的林地转换为耕地,耕地转为林地的面积达到 270 363.15 hm^2 。建设用地与水域的转换过程也较显著,但草地与未利用地向耕地的转换依旧微弱,比例为 3.23%与 0.35%。

3.2 耕地利用转型碳排放空间格局动态演变

根据碳排放系数计算县区和 5 km 网格两个尺度下各个时序各单元耕地利用转型的碳排放量,采用自然断裂点法将其分为负碳排放、轻度碳排放、中度碳排放、重度碳排放 4 级,据此得到 4 个时段耕地利用转型碳排放的空间分异图(图 1),进行空间分布分析。①从县区尺度上看,负碳排放区数量稀少,分布在湖南省西部和西北部的山地区,用地类型主要为林地,经济活动不密集。研究期内,表现为负碳排放的武陵源区、绥宁县,分别在 2005 和 2010 年转为轻度碳排放区,古丈县在 2015 年转为负碳排放区;轻度碳排放区占据湖南省大部分县区,主要分布在西北部及西部的山地区、南部边陲的山丘区,以及东北部的洞庭湖平原,主要地类为林地和耕地,这些区域呈收缩趋势,可能与耕地、林地、建设用地之间的转换有关,产生大量碳排放;中度和重度碳排放区主要位于长株潭城市群及周边地区,地形为平原区和较缓的丘陵地区,建设用地占地面积较大。重度碳排放区范围及数量在不同时期波动增加,主要涉及长沙市和常德市辖区以及株洲市部分地区。中度碳排放区域呈现出从核心向外辐射扩展的态势,主要分布在常德市、岳阳市、邵阳市、娄底市、衡阳市和株洲市。中、高度碳排放区的扩张表明,伴随区域经济活力的增强与人口密度的提升,对非耕地类如建设用地的需求急剧上升,耕地资源被挤占,碳排放水平增长。②从 5 km 网格尺度上,负碳排放区分布较广,呈现分散和不连续成片的特征。主要集中在湘西、湘西北山地丘陵地区、湘南山区以及东部边陲地带,集中在有大量林地聚集的区域,研究期内,因林地面积的增加,该区呈扩张趋势;轻度碳排放区分布最广,主要位于湘北洞庭湖平原、湘江流域南部,主要地类为耕地和林地,但由于耕地利用转型,耕地减少、建设用地增加,轻度碳排放区面积有所缩小;中、重度碳排放区总体呈现零散分布特征,但以长沙市为中心聚集较明显,研究期内其分布范围呈现由中心点向外不断扩散的态势。中、重度碳排放区的分布地区以建设用地为主,部分耕地、林地和草地转为建设用地,导致碳排放量不断增加,这与经济发展的特征相一致。

表 3 湖南省 2000—2020 年耕地利用转型情况

Table 3 Transformation of cropland utilization in Hu'nan Province form 2000 to 2020

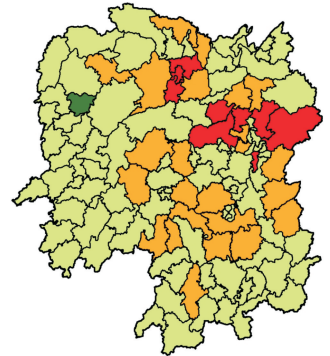
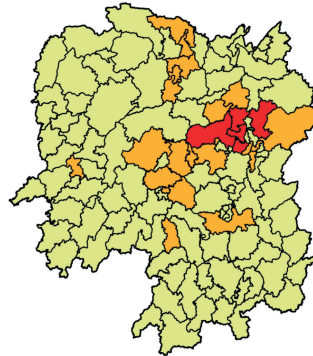
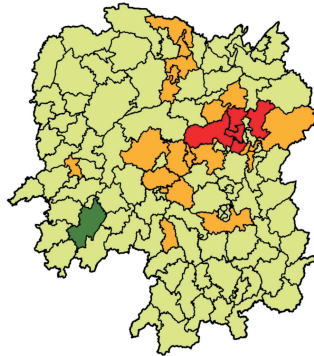
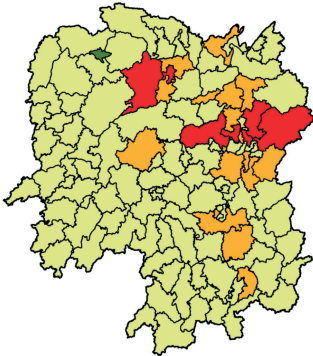
时期	用地类型	其他类型转化为耕地		耕地转化为其他类型		变化情况
		转化面积/hm ²	贡献率/%	转化面积/hm ²	贡献率/%	转化净面积/hm ²
2000—2005 年	林地	48 017.52	85.22	52 242.75	56.25	-4 225.23
	草地	2 443.68	4.34	2 541.60	2.74	-97.92
	水域	3 496.59	6.21	16 086.96	17.32	-12 590.40
	建设用地	2 338.29	4.15	21 870	23.55	-19 531.70
	未利用地	46.80	0.08	130.41	0.14	-83.61
	总计	56 342.88	100.00	92 871.72	100.00	-36 528.8
2005—2010 年	林地	75 513.33	56.32	178 323.3	59.00	-102 810
	草地	5 916.24	4.41	5 681.16	1.88	235.08
	水域	41 098.68	30.65	45 567.09	15.08	-4 468.41
	建设用地	10 746.18	8.01	70 079.22	23.19	-59 333
	未利用地	816.48	0.61	2 596.14	0.86	-1 779.66
	总计	134 090.91	100.00	302 246.91	100.00	-168 156
2010—2015 年	林地	55 066.41	82.18	61 133.49	59.00	-6 067.08
	草地	2 488.5	3.71	2 294.01	2.21	194.49
	水域	3 520.98	5.25	5 539.77	5.35	-2 018.79
	建设用地	5 849.46	8.73	34 599.42	33.39	-28 750
	未利用地	84.60	0.13	56.97	0.05	27.63
	总计	67 009.95	100.00	103 623.66	100.00	-36 613.70
2015—2020 年	林地	266 868.54	82.09	270 363.15	71.42	-3 494.61
	草地	10 504.35	3.23	10 575.45	2.79	-71.10
	水域	19 016.82	5.85	22 293.27	5.89	-3 276.45
	建设用地	27 582.84	8.48	74 914.20	19.79	-47 331.40
	未利用地	1 134.90	0.35	394.92	0.10	739.98
	总计	325 107.45	100.00	378 540.99	100.00	-53 433.50

a 2000—2005年县区尺度

b 2005—2010年县区尺度

c 2010—2015年县区尺度

d 2015—2020年县区尺度

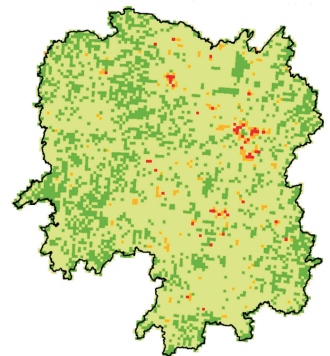
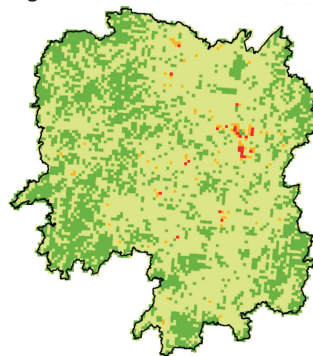
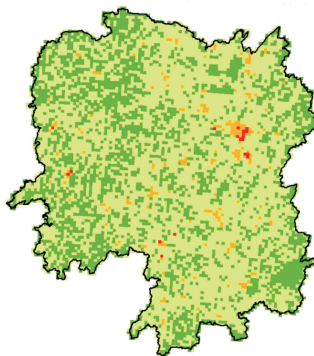
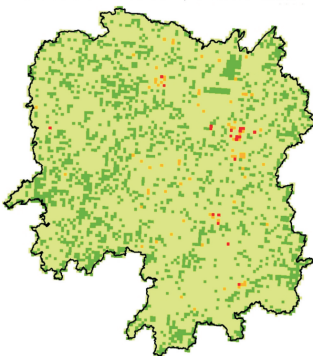


e 2000—2005年5 km尺度

f 2005—2010年5 km尺度

g 2010—2015年5 km尺度

h 2015—2020年5 km尺度



■ 负碳排放区 ■ 轻度碳排放区 ■ 中度碳排放区 ■ 重度碳排放区

0 100 200 km

图 1 两个尺度下耕地利用转型碳排放空间格局

Fig.1 Spatial pattern of carbon emissions from cropland utilization transition at two scales in Hu'nan Province

3.3 耕地利用转型碳排放的空间自相关性分析

3.3.1 全局空间自相关分析 通过计算得到各年份两个尺度下耕地利用转型碳排放量的全局 Moran's I 值和统计指标(表 4)。结果显示,两个空间尺度下各研究期内 Moran's I 值均显著为正,且都通过了 $p < 0.001$, Z 的绝对值大于 1.65 的显著性水平检验,说明 2000—2020 年湖南省耕地利用转型碳排放整体

呈现显著的正相关关系,具体表现为高值区域相互邻近(高一高集聚)与低值区域彼此毗邻(低—低集聚);相较于县区级尺度,5 km 格网尺度下全局空间正相关性更为显著。研究期内两种尺度下的 Moran's I 值均出现波动,说明受耕地利用在不同年间出现不同程度转型的影响,各单元的碳排放量也呈现相应的波动,导致空间聚集程度有所变化。

表 4 两个尺度下的全局莫兰指数和相关指标

Table 4 Global Moran's index and related indicators at two scales

尺度	统计量	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
县区尺度	Moran's I	0.471 633	0.327 579	0.324 939	0.375 399
	Z-score	7.689 858	5.454 806	5.413 116	6.144 045
	p -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
5 km 网格尺度	Moran's I	0.336 361	0.455 726	0.441 282	0.430 328
	Z-score	44.880 062	62.090 582	58.740 045	57.072 458
	p -value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

3.3.2 局部空间自相关分析 对两个尺度下各单元土地利用碳排放量的局部 Moran's I 值进行计算,得到局部空间集聚演化图(图 2)。结果显示,两个尺度下高一高集聚和低—低集聚单元均较多且聚集明显,高一低集聚和低—高集聚单元数量少,分布零散且各研究期内分布不同,表明研究区域内耕地利用转型所产生的碳排放量总体上呈现出正向空间集聚的特性。高一高集聚区主要集中在湖南省中东部及北部,从碳排放量来看,基本位于中、重度碳排放区,用地类型以建设用地和耕地以及林地为主;低—低集聚区主要分布在负碳排放和轻度碳排放区,多为林地,也有少量草地和耕地;低—高集聚与高一低集聚单元数量较少。高一低集聚区临近低—低集聚区分布,以林地为主;低—高集聚区围绕高一高集聚区零星分布,数量变化不大,主要地类为耕地。研究期内区域耕地利用转型碳排放的空间异质性有所变动但不剧烈,耕地利用转型现象导致的碳排放不均衡性虽总体不显著但仍存在。从图 2 可以看出,县区尺度下高一高集聚分布表现出持续的空间集聚现象,尤其在湖南省的中部和北部经济相对发达区域,说明这些区域对于建设用地的需求持续增加,耕地不断被挤占,导致碳排放量上升,耕地利用转型碳排放量的空间差异增大;低—低集聚区在 2000—2020 年不断增加,整体向湖南省边远山地区转移。2000—2015 年,低—低集聚区分散分布在湘西北、湘西、湘东南地区;2015—2020 年在湖南省西部扩展形成了集中连片的低—低集聚区,可能与退耕还林还草及生态文明建设有关,耕地转为林地,碳汇量增加。5 km 格网尺度空间聚集特征与全局空间自相关分析结果基本一致。高一高集聚区

不断扩散扩大,整体呈现不均匀的分散分布;长株潭地区的聚集程度高且范围不断增大,省内其他县区也出现明显聚集,与建设用地的扩张趋势基本相符;低—低集聚区明显扩大,表明这些区域的耕地利用转型碳排放量的空间分布差异有所缩小。湖南省耕地利用转型现象在区域内各地均较明显,对于碳排放呈现出两极化影响。在经济发达区以及周围辐射区,受生产生活影响,耕地大量转变为建设用地,碳排放量不断增加;地势起伏较大的山地丘陵区不适宜进行建设活动,耕地利用转型幅度较小,且土地利用类型相对稳定,茂密的林地能够产生大量碳汇。

3.4 耕地利用转型碳排放空间分异影响因素分析

3.4.1 影响因素单因子探测分析 耕地利用转型进程中伴随的碳排放效应受多维度因素的影响,既包括自然环境要素,同时也有社会经济活动的复杂变化。本研究选择 9 个因素为自变量(表 1),以县区尺度和 5 km 网格尺度下耕地利用转型所产生的碳排放量为因变量,借助最优参数地理探测器探测湖南省耕地利用转型过程中影响碳排放空间分异的主要驱动因子(图 3),各因子的 q 值存在波动,反映了不同年份因子对碳排放的影响程度。

县区尺度单因子探测结果如图 3a 所示。高程与坡度在各年份间的解释力相对较高且波动较大,高程在 2010 年解释力达到最高(0.361);坡度在 2005(0.308)与 2015 年(0.301)的解释力最高。年均温度在各年份间解释力较小;年均降水量在 2010 年的解释力最高(0.352),其余年份相对较低。人口密度与 GDP 密度分别在 2020 年(0.248)和 2005 年(0.302)的解释力显著高于其他年份,其他年份差异不明显。

与水域距离、与铁路距离、与主要公路距离各年份的解释力较低。整体看来,GDP 密度和人口密度等社会经济因子的解释力更强,尤其是在 2010 年,这可能与该时期湖南省的快速城镇化和经济发展相关。自然环境因素影响也较为明显,区位条件作用有限。图 3b 为 5 km 网格尺度单因子探测结果。其中高程和坡度在各年份相对稳定,在 2020 年解释力最高,分别为 0.068,0.075。年均温度与年均降水量各年份间解释力较稳定,年均降水量解释力高于年均温度。人口密度与 GDP 密度在 2005 年解释力偏低,其余年份均显著,分别在 2020 和 2010 年解释力度最大 0.142,

0.210。区位条件各因子在各年份间变化小且解释力弱。5 km 网格尺度下各因子年份间波动小但解释力相对较低,其中 GDP 密度的解释力最高,均值达到 0.143;其次是人口密度。自然因子的解释力稍有提升。但总体来说,说明社会经济因素和自然因素仍然起着主导作用。在县区尺度上,不同年份间各因子的解释力展现出较大的差异性,说明各因子对耕地利用转型碳排放的影响在不同时间存在差异性和动态性。而在 5 km 网格尺度上各因子的解释力较为稳定且 q 值普遍较低,说明在更精细的尺度上各因子的影响减弱且更为均匀。

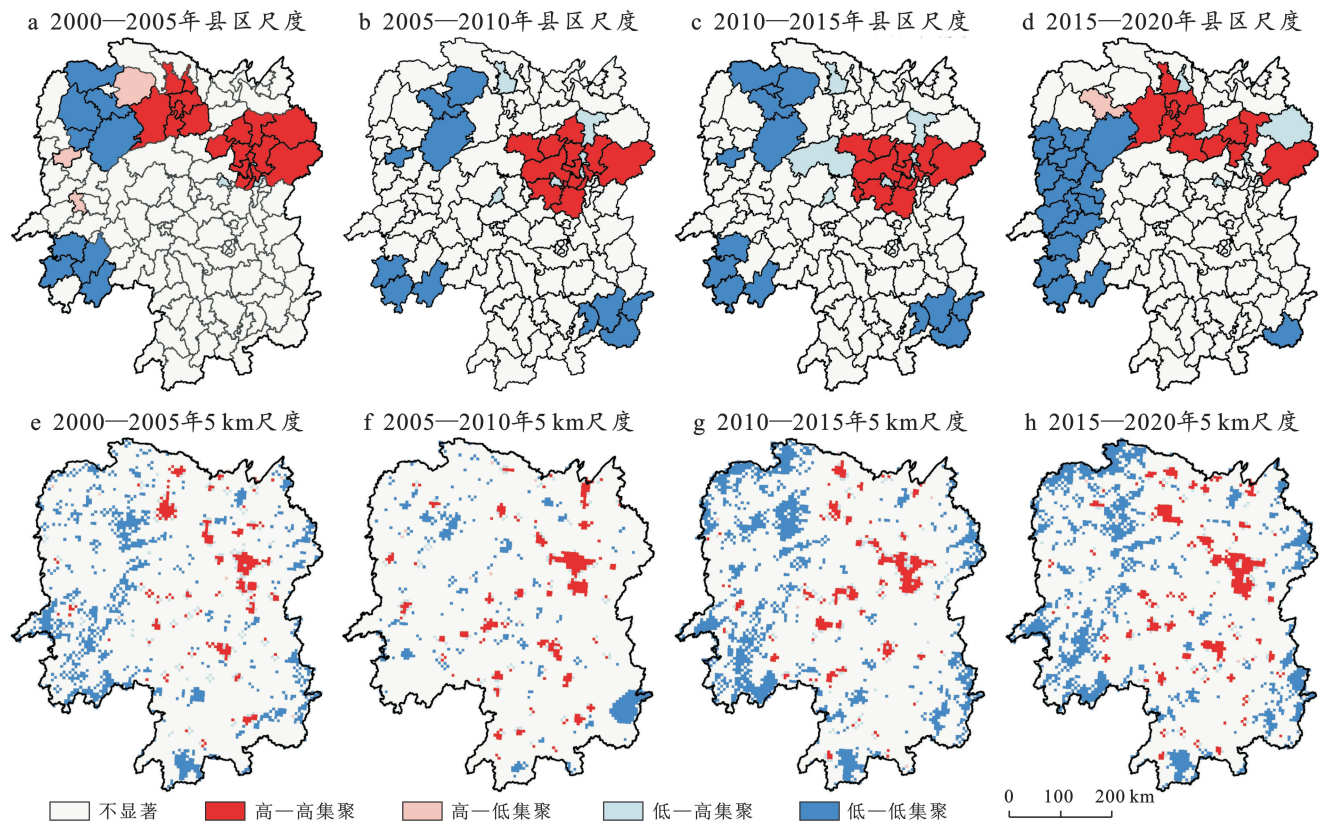


图 2 湖南省两个尺度下耕地利用转型碳排放的局部空间集聚格局演化

Fig.2 Evolution of local spatial clustering patterns of carbon emissions from cropland use transition at two scales in Hu'nan Province

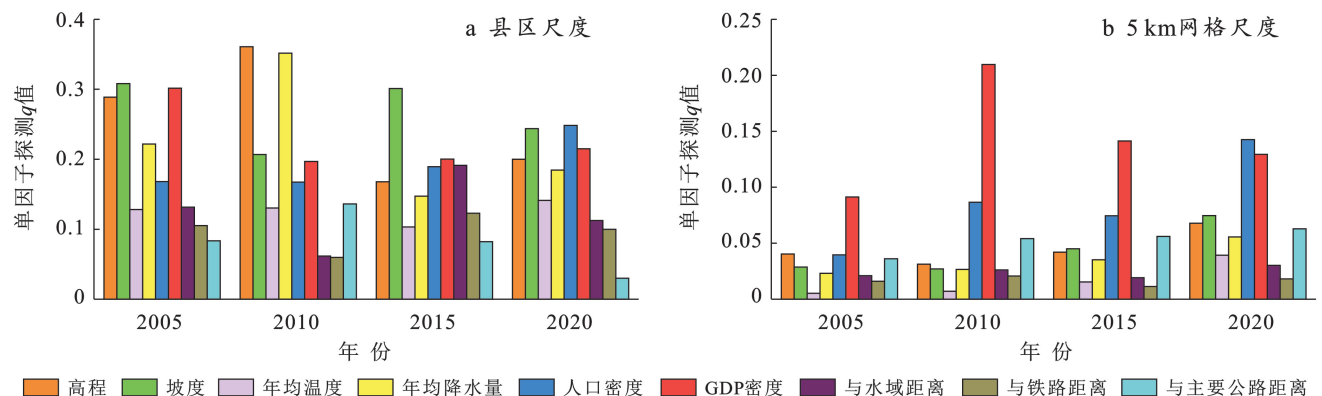


图 3 湖南省两个尺度下影响因素的单因子探测结果

Fig.3 Results of single factor detection of influencing factors at two scales in Hu'nan Province

3.4.2 影响因素交互作用探测分析 图 4 为湖南省不同年份在县尺度上和 5 km 网格两个尺度上的多因子交互探测结果。由图 4 可知,影响因子间的交互作用皆呈增强效应。2000—2005 年解释力较强的交互因子为坡度 X_2 与主要公路的距离 X_9 (0.569)、坡度 X_2 与年均温度 X_3 (0.496)、GDP 密度 X_6 与主要公路的距离 X_9 (0.492)、年均降水量 X_4 与 GDP 密度 X_6 (0.467)。2005—2010 年解释力较强的交互因子为坡度 X_2 与年均温度 X_3 (0.539)、坡度 X_2 与年均降水量 X_4 (0.518)、年均温度 X_3 与 GDP 密度 X_6 (0.461)、高程 X_1 与坡度 X_2 (0.446)。2010—2015 年解释力较强的交互因子为坡度 X_2 与年均降水量 X_4 (0.554)、年均降水量 X_4 与 GDP 密度 X_6 (0.501)、坡度 X_2 与年均温度 X_3 (0.499)、坡度 X_2 与铁路的距离 X_8 (0.490)、坡度 X_2 与主要公路的距离 X_9 (0.472)。2015—2020 年解释力较强的交互因子为年均降水量 X_4 与人口密度 X_5 (0.486)、坡度 X_2 与铁路的距离 X_8 (0.481)、坡度 X_2 与主要公路的距离 X_9 (0.444)、坡度 X_2 与人口密度 X_5 (0.411)。5 km 网格尺度各年份的多因子交互探测结果显示,2000—2005 年 GDP 密度 (X_6) 的解释力相对较高,GDP 密度 X_6 与水域距离 X_7 (0.134)、GDP 密度 X_6 与铁路距离 X_8 (0.126) 以及人口密度 X_5 与 GDP 密度 X_6 (0.122) 的交互作用显著。2005—2010 年人口密度 X_5 与 GDP 密度 X_6 (0.316) 相互作用最明显,其他解释力较强的交互因子有人口密度 X_5 与水域距离 X_7 (0.262)、年均降水量 X_4 与 GDP 密度 X_6 (0.260) 等,GDP 密度 (X_6) 与其他因子的交互作用解释力均较高。2010—2015 年,解释力较强的交互因子有 GDP 密度 X_6 与年均温度 X_3 (0.203)、GDP 密度 X_6 与铁路的距离 X_8 (0.181)、GDP 密度 X_6 与主要公路的距离 X_9 (0.180)、高程 X_1 与 GDP 密度 X_6 (0.179) 等;2015—2020 年 GDP 密度 X_6 与主要公路的距离 X_9 (0.143)、坡度 X_2 与 GDP 密度 X_6 (0.135)、GDP 密度 X_6 与水域距离 X_7 以及 GDP 密度 X_6 与铁路的距离 X_8 解释力(均为 0.134)解释力较高。总体来看,县区尺度上因子交互作用更为显著,表明较大尺度上土地利用变化受多种因素综合影响。自然环境因素在县尺度上对耕地利用转型碳排放的影响较大,而社会经济因素在网格尺度上作用更为明显。区位条件因素在两种尺度下影响均不显著。交互因子解释力的变化,体现了不同年份和尺度下驱动因素的差异性。

4 讨论

耕地利用转型为耕地利用空间形态和耕地利用

功能形态在时序上的变化^[4]。在快速城镇化和经济发展背景下,建设用地扩张和耕地利用效益低是耕地转变为其他地类的主要驱动力,耕地向建设用地的转变导致碳排放增加。开展耕地利用转型碳排放研究,对科学持续利用耕地资源、维护国家和区域粮食及生态安全、推进城乡统筹发展具有重要意义。

基于数据的可获取性和研究需要,本研究对耕地利用转型碳排放进行计算时,参考相关研究并结合湖南省实际情况选择了耕地碳排放系数,并利用年鉴的能源数据计算得到建设用地碳排放系数^[21]。研究发现不同尺度下的耕地利用转型碳排放有不同时空分布规律,且存在较大的差异性,与魏俊超等^[30]的研究结果相似。耕地利用转型对于碳排放有着较明显的直接影响,赵映慧等^[16]研究发现耕地利用转型规律与碳排放规律存在一致性,相关性结果分析显示碳排放存在空间聚集效应。盖兆雪等^[15]在进行耕地利用碳排放驱动机制研究时,考虑了距离条件因素,结果显示与水域及道路距离条件对于耕地利用转型碳排放的影响强度较低。说明本研究能反映湖南省耕地利用转型碳排放的时空规律,能综合各层次的因素进行影响因素分析。

本研究从县区尺度和 5 km 网格尺度计算湖南省耕地利用转型碳排放量,分析时空分异特征并探究其影响因素。研究结果显示耕地利用转型碳排放量的变化趋势为先减后增,这与城镇化加速和新型工业化背景下人口膨胀与经济发展趋势相关,同时建设用地需求量激增。

5 结论

(1) 研究期内耕地面积减少,碳排放量波动增加,空间上表现出明显的分异特征:高碳排放区集中于中部经济较发达地区,如长沙、株洲等地,而边缘地区的碳排放相对较低,说明耕地利用转型与碳排放量呈现正向关联性。

(2) 县区尺度和 5 km 网格尺度下,中部地区的高一高集聚现象均逐渐增强,表明该地区耕地利用转型所导致的碳排放现象在时间与空间维度上均展现出显著的集聚效应;低一低集聚区域主要集中在湖南省的西北部和东南部,这一趋势在两个尺度下均有所体现。县区尺度比 5 km 网格尺度下集聚现象更为明显。

(3) 单因子探测显示县区尺度下自然因素和社会经济因素对碳排放影响较大,5 km 网格尺度下社会经济因素的影响明显,不同时间段内所受影响程度有显著差异。交互探测结果揭示因子间的交互作用对碳排放的解释力更强,社会经济因素和区位条件因素的交互作用在两种尺度下均有显著的解释力。

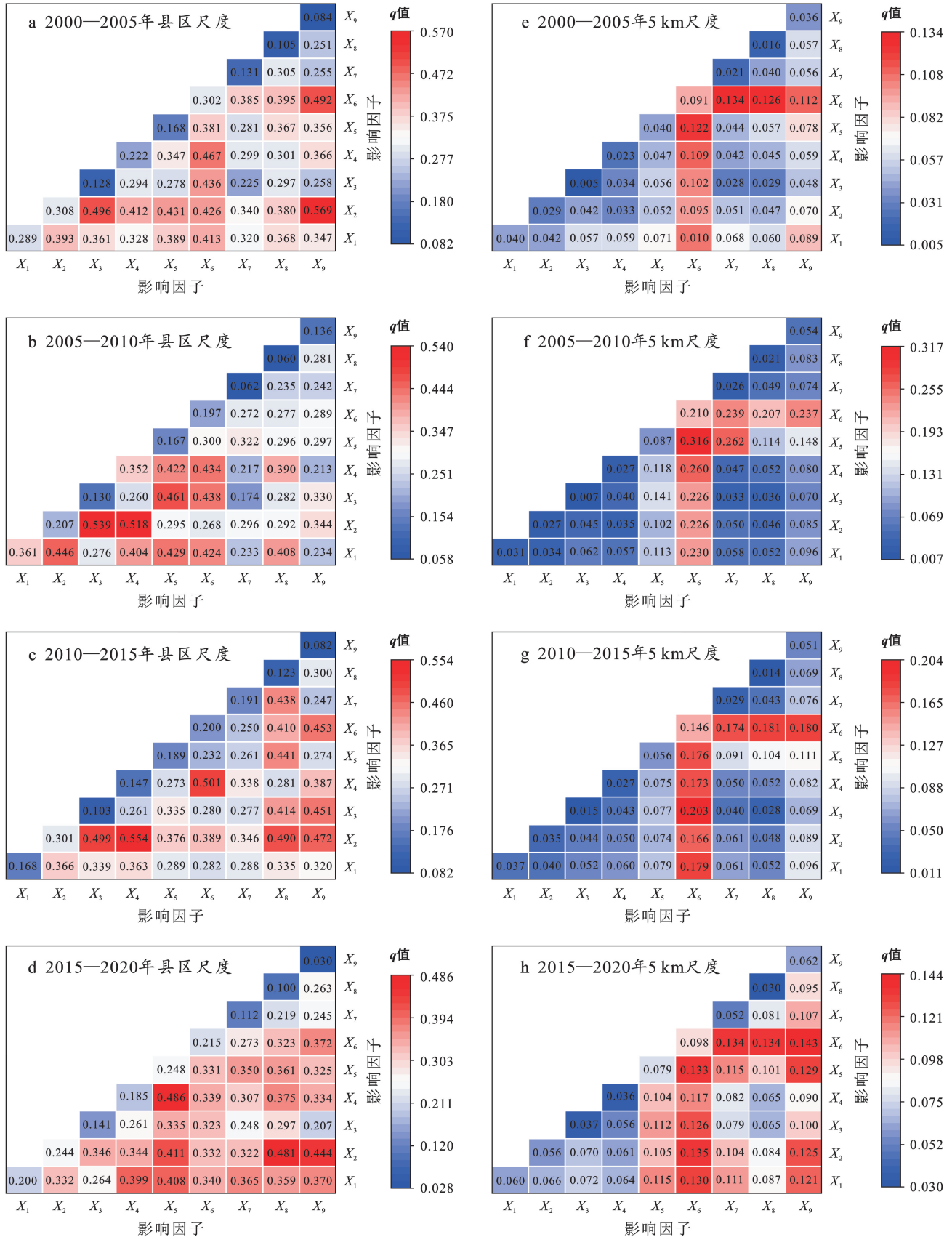


图 4 湖南省 2000—2020 年两个尺度下影响因子交互探测结果

Fig.4 Interaction detection results of impact factors at two scales in Hu'nan Province

在不同空间尺度上,耕地利用转型的碳排放表现出显著的区域差异。县区尺度下,碳排放集聚效应与

经济发达区域相关,耕地向建设用地的转型速度较快,导致碳排放量持续增加。在 5 km 网格尺度下,碳

排放分布更加零散且变化复杂,反映了微观区域内土地利用模式的多样性。对影响因素进行探究分析发现,县区尺度下有多个因素在不同时间段有较高 q 值,而 5 km 网格尺度下 q 值均较低,说明在更精细的尺度上各因子解释力减弱且较分散。从具体因素类别来看,县区尺度更能反映社会经济因素(如 GDP、人口密度)的集聚效应,这表明在较大尺度下,社会经济活动对碳排放的驱动作用更为显著。而 5 km 网格尺度更适合揭示自然条件因素如地形因素对碳排放的影响。因此,研究不同尺度下的影响因素有助于全面理解耕地利用转型碳排放的驱动机制。

耕地利用转型是一个多维度、多因素交织的动态复杂过程,本研究在探讨耕地利用转型时,仅从其显性形态的时空变化特性进行研究,今后可以考虑地方政策差异及土壤特性等关键因素对转型过程可能产生的影响来进行研究,以期全面揭示耕地利用转型的深层规律。其次,在利用碳排放系数进行计算时,主要参考了前人的研究成果,但目前对于不同土地类型的碳排放的计算标准各异,未来应当进行改进,以达到高效准确计算结果。利用最优参数地理探测器模型分析耕地利用转型碳排放的影响因素时,未深入剖析自然环境变化、社会经济活动与人口流动间交织的复杂交互作用,未来需加强对多因子交互作用的研究,从而更全面剖析碳排放的形成机制和更精准地揭示碳排放的驱动因素。在研究尺度上,本研究选择湖南省 122 个县区以及 5 km 网格尺度进行研究分析,相较于市域尺度研究相对更为详细,但解释力度仍显不足,未来研究应进一步细化尺度分析,尝试不同尺度的研究空间范围,并从分区角度进行研究和分析,以期为土地利用规划与管理、耕地资源可持续保护策略制定及城乡一体化转型路径探索提供理论支撑与参考依据。

参考文献 (References)

[1] 宋小青,吴志峰,欧阳竹.1949 年以来中国耕地功能变化[J].地理学报,2014,69(4):435-447.
Song Xiaoqing, Wu Zhifeng, Ouyang Zhu. Changes of cultivated land function in China since 1949 [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(4):435-447.

[2] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
Liu Jiyuan, Ning Jia, Kuang Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):789-802.

[3] 丁宝根,杨树旺,赵玉,等.中国耕地资源利用的碳排放时空特征及脱钩效应研究[J].中国土地科学,2019,33(12):45-54.
Ding Baogen, Yang Shuwang, Zhao Yu, et al. Study on spatio-temporal characteristics and decoupling effect of carbon emission from cultivated land resource utilization in China [J]. China Land Science, 2019,33(12):45-54.

[4] 谭智元,黄玉莉,曹银贵,等.中国耕地利用转型研究:热点与前沿[J].农业资源与环境学报,2023,40(6):1400-1414.
Tan Zhiyuan, Huang Yuli, Cao Yingui, et al. Research on the transformation of cultivated land use in China: Hotspots and frontiers [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023,40(6):1400-1414.

[5] 龙花楼.论土地利用转型与土地资源管理[J].地理研究,2015,34(9):1607-1618.
Long Hualou. Land use transition and land management [J]. Geographical Research, 2015,34(9):1607-1618.

[6] 李全峰,胡守庚,瞿诗进.1990—2015 年长江中游地区耕地利用转型时空特征[J].地理研究,2017,36(8):1489-1502.
Li Quanfeng, Hu Shougeng, Qu Shijin. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in the Middle Yangtze River from 1990 to 2015 [J]. Geographical Research, 2017,36(8):1489-1502.

[7] 杨君,邵劲松,周鹏全,等.基于地块尺度的耕地质量级别变化及农业空间保护:以岳阳市岳阳楼区为例[J].经济地理,2021,41(11):185-192.
Yang Jun, Shao Jinsong, Zhou Pengquan, et al. Change of cultivated land quality level and agricultural space protection based on the scale: Taking Yueyanglou district of Yueyang City as an example [J]. Economic Geography, 2021,41(11):185-192.

[8] 宋小青,李心怡.区域耕地利用功能转型的理论解释与实证[J].地理学报,2019,74(5):992-1010.
Song Xiaoqing, Li Xinyi. Theoretical explanation and case study of regional cultivated land use function transition [J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(5):992-1010.

[9] 金一诺,王枫.珠三角耕地利用转型的时空演化特征及其影响因素分析[J].水土保持研究,2022,29(4):352-361.
Jin Yinu, Wang Feng. Spatiotemporal evolution characteristics of cultivated land use transition and its influence factors in the Pearl River Delta [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):352-361.

[10] 夏春华,李阳兵,曾晨岑,等.三峡库区坡耕地利用转型及其社会经济-生态环境影响:以奉节县为例[J].生态学报,2023,43(7):2688-2702.
Xia Chunhua, Li Yangbing, Zeng Chencen, et al.

- Transformation of sloping farmland use and its socio-economic and eco-environment impact in the Three Gorges Reservoir Area: Taking Fengjie County as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2688-2702.
- [11] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 中国耕地多功能耦合协调时空演变及其驱动因素[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 244-255.
- Zhang Yue, Dai Yaqiang, Chen Yuanyuan, et al. Spatial-temporal evolution and driving factors of cultivated land multifunctional coupling coordination development in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(7): 244-255.
- [12] Ali G, Pumijumnong N, Cui Shenghui. Valuation and validation of carbon sources and sinks through land cover/use change analysis: The case of Bangkok metropolitan area [J]. *Land Use Policy*, 2018, 70: 471-478.
- [13] 冯新惠, 李艳, 余迹, 等. 江苏省城市土地开发与碳排放绩效耦合关系[J]. *经济地理*, 2024, 44(5): 161-171.
- Feng Xinhui, Li Yan, Yu Er, et al. Coupling relationship between urban land development and carbon emission performance in Jiangsu Province [J]. *Economic Geography*, 2024, 44(5): 161-171.
- [14] Hutrya L R, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: A study of the Seattle, WA region [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 783-797.
- [15] 盖兆雪, 詹汶羲, 王洪彦, 等. 耕地利用转型碳排放时空分异特征与形成机理研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 187-196.
- Gai Zhaoxue, Zhan Wenxi, Wang Hongyan, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and formation mechanism of carbon emission from cultivated land use transformation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 187-196.
- [16] 赵映慧, 王子彤, 詹汶羲, 等. 黑龙江省耕地利用转型碳排放的时空分异特征与影响因素[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(10): 2247-2255.
- Zhao Yinghui, Wang Zitong, Zhan Wenxi, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of carbon emission from cultivated land use transformation in Heilongjiang Province [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(10): 2247-2255.
- [17] 谭洁, 刘琴, 唐晓佩, 等. 基于 LMDI 模型的土地利用碳排放时空差异及影响因素研究: 以洞庭湖区为例[J]. *地域研究与开发*, 2024, 43(1): 160-166.
- Tan Jie, Liu Qin, Tang Xiaopei, et al. Spatial and temporal evolution of carbon emissions from land use and its influencing factors based on LMDI model: A case study of the Dongting Lake area [J]. *Areal Research and Development*, 2024, 43(1): 160-166.
- [18] 张余, 姜博, 赵映慧, 等. 东北三省土地利用碳排放时空格局及影响因素研究[J]. *地域研究与开发*, 2022, 41(4): 150-156.
- Zhang Yu, Jiang Bo, Zhao Yinghui, et al. Temporal and spatial pattern changes and influencing factors of land use carbon emissions in the three provinces of Northeast China [J]. *Areal Research and Development*, 2022, 41(4): 150-156.
- [19] 郑欣, 程久苗, 郑硕. 基于土地利用结构变化的芜湖市碳排放及其影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 259-262.
- Zheng Xin, Cheng Jiumiao, Zheng Shuo. Research on carbon emissions and influence factors in Wuhu City based on the change of land use structure [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 259-262.
- [20] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [21] 杨扬, 周浩, 文高辉, 等. 1980—2020 年洞庭湖流域土地利用变化及其碳效应[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 390-397.
- Yang Yang, Zhou Hao, Wen Gaohui, et al. Land use change and its carbon effect in Dongting Lake Basin during 1980—2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3): 390-397.
- [22] 华轩轲. 河南省耕地利用转型碳排放效应及驱动机制研究[D]. 河南 郑州: 河南农业大学, 2023.
- Hua Kexuan. Carbon emission effect and driving mechanism of cultivated land use transition in Henan Province [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2023.
- [23] 张文斌, 张志斌, 董建红, 等. 多尺度视角下耕地利用功能转型及驱动力分析: 以甘肃省为例[J]. *地理科学*, 2021, 41(5): 900-910.
- Zhang Wenbin, Zhang Zhibin, Dong Jianhong, et al. Transformation and driving forces of cultivated land utilization function from a multi-scale perspective in Gansu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(5): 900-910.
- [24] 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 Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007,37(6):804-812.
- [25] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].*生态学报*,2008,28(2):463-469.
- Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Lu Fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (2): 463-469.
- [26] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].江苏 南京: 南京大学,2010.
- Lai Li. Carbon emission effect of land use in China [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University, 2010.
- [27] 魏心雨,王雁杰,孙梦媛,等.基于土地利用结构变化的河南省碳排放时空格局及驱动力分析[J].*农业现代化研究*,2023,44(5):881-891.
- Wei Xinyu, Wang Yanjie, Sun Mengyuan, et al. Spatial-temporal patterns and driving forces of carbon emissions in Henan Province based on land use structure changes [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023,44(5):881-891.
- [28] 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.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72 (1):116-134.
- [29] 杨君,唐兴隆,袁淑君,等.湖南省多尺度生态系统服务供需关系及影响因素[J].*水土保持通报*,2023,43(6):272-281.
- Yang Jun, Tang Xinglong, Yuan Shujun, et al. Supply and demand of multi-scale ecosystem services and their influencing factors in Hu'nan Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(6):272-281.
- [30] 魏俊超,梅志雄,马君杰,等.广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素[J].*水土保持研究*,2024,31(4):298-307.
- Wei Junchao, Mei Zhixiong, Ma Junjie, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in Guangzhou [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(4):298-307.

(上接第 243 页)

- [27] 李子旭,李建华,张强,等.不同复垦措施下土壤微生物群落的响应及组装过程[J].*环境科学*,2024,45(12):7326-7336.
- Li Zixu, Li Jianhua, Zhang Qiang, et al. Response and assembly process of soil microbial communities under different reclamation measures [J]. *Environmental Science*, 2024,45(12):7326-7336.
- [28] Campbell B J, Stein J L, Cary S C. Evidence of chemolithoautotrophy in the bacterial community associated with *Alvinella pompejana*, a hydrothermal vent polychaete [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003,69(9):5070-5078.
- [29] Paula F S, Rodrigues J L M, Zhou Jizhong, et al. Land use change alters functional gene diversity, composition and abundance in Amazon forest soil microbial communities [J]. *Molecular Ecology*, 2014, 23 (12): 2988-2999.
- [30] 赵皎,马静,朱燕峰,等.植被类型对黄土高原露采矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响[J].*环境科学*,2023,44(6):3386-3395.
- Zhao Jiao, Ma Jing, Zhu Yanfeng, et al. Effects of vegetation types on carbon cycle functional genes in reclaimed soil from open pit mines in the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2023,44(6):3386-3395.