

赵丹丹, 任晓莹, 武潇健, 等. 长江经济带建设用碳排放时空分异与驱动力探究 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2025, 20 (2): xx-xx.
ZHAO D D, REN X Y, WU X J, et al. Spatial-temporal differences and driving forces of carbon emissions from construction land in the Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2025, 20 (2): xx-xx. DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2025.01.00x.

长江经济带建设用碳排放时空分异与驱动力探究

赵丹丹^{1*}, 任晓莹², 武潇健¹, 张培¹, 张红娟¹, 赵青恩¹, 刘猛¹, 张媛¹

(1. 保定理工学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省地质工程勘察院, 河北 保定 071000)

摘要: 研究建设用地碳排放的区域异质性及影响因素对推进长江经济带高质量协调发展具有重要意义。基于 2009—2021 年的建设用地和能源消费数据, 本研究从空间自相关性、重心迁移、 α 收敛性方面分析时空特征并探讨区域异质性, 通过地理探测器分析其驱动力。结果表明: ① 长江经济带建设用地碳排放总量增加, 中下游区域增幅分别高达 17.17% 和 22.66%, 碳排放强度下降。碳排放总量、碳排放强度均表现为下游>中游>上游的格局, 具有显著正向空间集聚性, 且相对稳定。高值中心集中在下游, 低值中心集中在上游。每万人碳排放量下降, 表现为上游>中游>下游分布。② 上游、中游与下游建设用地碳排放量变异系数降幅分别为 37.04%、37.93%、41.94%, 表现出较为明显的 α 收敛特征。③ 经济发展、人口总量的影响程度增幅分别为 1.50%、5.66%, 建设用地规模扩张的影响程度降幅为 32.82%。因此, 中下游需以产业生态化为目标, 消解其碳排放效应; 上游应以生态产业化为导向, 实现空间生态资源价值化。

关键词: 碳排放; 时空分异; 驱动力; 长江经济带

中图分类号: F299.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-7105 (2025) 01-00xx-xx

Spatial-temporal Differences and Driving Forces of Carbon Emissions from Construction Land in the Yangtze River Economic Belt

ZHAO Dandan^{1*}, REN Xiaoying², WU Xiaojian¹, ZHANG Pei¹, ZHANG Hongjuan¹,
ZHAO Qingen¹, LIU Meng¹, ZHANG Yuan¹

(1. Baoding University of Technology, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Hebei Engineering Investigation Institute, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: Investigating the regional heterogeneity of carbon emissions from construction land and its influencing factors is of great significance for promoting the high-quality and coordinated development of the Yangtze River Economic Belt. Using data on construction land and energy consumption from 2009 to 2021, this study analyzes the spatiotemporal characteristics, regional heterogeneity, and driving forces through spatial autocorrelation, center of gravity migration, and α -convergence, complemented by a geographic detector analysis. The results indicate that, ① the total carbon emissions from construction land in the Yangtze River Economic Belt have increased, with growth rates of 17.17% and 22.66% in the middle and lower reaches, respectively, alongside a decline in carbon emission intensity. Carbon emissions and intensity follow the pattern of downstream > midstream > upstream, showing significant positive spatial agglomeration and relative stability. High-value emission centers are concentrated downstream, while low-value centers are located upstream. Per capita carbon emissions have decreased, displaying a pattern of upstream > midstream > downstream. ② The coefficients of variation in construction land carbon emissions decreased by 37.04%, 37.93%, and 41.94% in

收稿日期: 2024-06-08

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (D2015403033)

* 通信作者: 赵丹丹 (1997—), 女, 河北保定人, 硕士, 研究方向为土地资源利用与可持续发展, 1446542925@qq.com。

the upstream, midstream, and downstream regions, respectively, indicating a notable α -convergence trend. ③ The influence of economic development and total population increased by 1.50% and 5.66%, respectively, while the impact of construction land expansion decreased by 32.82%. Therefore, the middle and lower reaches should focus on industrial ecological transformation to mitigate carbon emissions, while the upstream regions should prioritize ecological industrialization to enhance the value of spatial ecological resources.

Key words: carbon emissions; temporal and spatial differentiation; motivating factor; the Yangtze River Economic Belt

城镇化和工业化使建设用地扩幅明显，建设用地作为面状碳源，在经济发展中的碳排放效应不容小觑。众多学者从土地利用碳排放时空差异分析^[1-2]、碳排放核算^[3]、城市碳排放与经济发展关联性^[2]、碳排放驱动及影响因素^[4]、碳排放与经济增长^[5]等方面展开分析。研究尺度多集中在某一区域^[6-7]、省级行政单元^[8-9]或某一个城市^[10]，但基于宏观站位，贴合长江经济带协调发展战略，从上中下游区域分析建设用地碳排放效应的研究较少；同时研究对象多从整体土地利用结构出发，而专门针对建设用地碳排放效应的分析较少；另外，已有研究在分析碳排放影响因素时较少考虑空间差异性因素，使用地理探测器可涵盖空间效应进行分析。

长江经济带上中下游地区的土地利用、生态建设与经济发展具有突出的互补性。鉴于此，本研究借助空间自相关模型与 α 收敛模型分析其建设用地碳排放效应时空变化特征，依托重心迁移模型探讨其迁移轨迹，采用脱钩系数反映碳排放与人口总量、经济发展、建设用地面积的关联性，在此基础上通过地理探测器寻找碳排放效应分异因子，拟尝试发现不同区域碳排放效应空间异质性及其驱动力，为进一步探索上中下游区域间与区域内的碳排放空间溢出效应及构建空间关联网络奠定基础，从而为优化长江经济带国土空间开发格局，实现区域协调发展提供一定参考借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

建设用地面积数据、社会经济数据及能源数据源于 2010—2022 年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 碳排放量估算

依据 IPCC 清单法，土地利用碳排放包括直接碳排放和间接碳排放。耕地、林草地、水域的碳排放为直接碳排放。建设用地碳排放为间接碳排放^[11]：

$$C_e = \sum_{i=1}^N B_i \times D_i \times E_i \tag{1}$$

式（1）中： C_e 为建设用地碳排放量（t）； B_i 为化石能源消耗量（t）； D_i 为化石能源折标准煤系数（kg · kg⁻¹）； E_i 为化石能源碳排放系数（t · t⁻¹），折标准煤系数、碳排放系数参考《中国能源统计年鉴》（表 1）。

1.2.2 探索性空间数据分析

1) 全局空间自相关

全局空间自相关用于分析研究对象在整个区域的空间聚集程度，最常用的是 Moran's I 指数^[7]：

$$Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \tag{2}$$

式（2）中： n 为研究区的省级区域单元数量； X_i 和 X_j 分别为区域 i 和 j 的建设用地碳排放量； $\bar{X}$ 为平

表 1 不同能源类型折标准煤系数和碳排放系数
Table 1 Conversion factors to standard coal and carbon emission factors for different energy types

能源类型	折标准煤系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
洗精煤	0.900 0	0.755 9
其他洗煤	0.285 7	0.755 9
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5

均值； W_{ij} 为空间权重矩阵。

2) 局部空间自相关

局部空间自相关用于分析研究对象在局部地区的空间聚集程度，采用 Local Moran's I 指数来衡量^[7]：

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \tag{3}$$

式 (3) 中： Z_i 和 Z_j 分别为区域 i 和 j 的建设用地碳排放量方差标准化值； n 、 W_{ij} 同式 (2)。

1.2.3 重心迁移分析

通过 ArcGIS 来反映建设用地碳排放量重心迁移轨迹^[12]：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i X_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i Y_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \tag{4}$$

式 (4) 中： $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为某一属性中心坐标经纬度值； n 为单元个数； X_i 、 Y_i 为第 i 个单元地理中心坐标； T_i 为建设用地碳排放量。

1.2.4 脱钩关联分析

脱钩理论最早出现在物理学中，用来分析联系较为密切的两个变量间的关系，即由逐渐淡化至完全脱离的动态过程。经济合作与发展组织（Organization for Economic Cooperation and Development, OECD）最早将脱钩模型引入环境经济领域^[13]，并构建了 OECD 脱钩指数^[14]。OECD 脱钩模型虽然易于应用，但其缺点也很明显：第一，其对基准年的选择高度敏感，导致计算结果的稳定性较差^[15]；第二，模型只能大致揭示两种状态：脱钩和不脱钩，无法解释微小的变化^[16]。Tapio 脱钩模型弥补了上述缺陷，能够全面反映研究时期内变量间脱钩动态关系，脱钩指数可反映两个不同变量变化速率关系^[17]，脱钩程度划分标准见表 2。

表 2 脱钩状态划分标准

Table 2 Decoupling status classification standards			
D 值	ΔCL	ΔIS	脱钩状态
$D < 0$	> 0	< 0	强负脱钩
	< 0	> 0	强脱钩
	< 0	< 0	弱负脱钩
$0 < D < 0.8$	> 0	> 0	弱脱钩
	< 0	< 0	衰退连结
$0.8 < D < 1.2$	> 0	> 0	增长连结
	< 0	< 0	衰退脱钩
$D > 1.2$	> 0	> 0	增长负脱钩

1.2.5 地理探测器分析

地理探测器是探测空间分异性及揭示其背后驱动力的空间分析方法，被广泛用于进行驱动力分析和因子分析。其核心思想基于如下假设：若某个自变量对某个因变量有重要影响，则自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。地理探测器在分析空间分层异质性规律方面有其独特性：①分析地理要素间的空间关联性；②评估多个因子对地理要素的影响；③表达地理要素的空间分异性。地理探测器通过 q 值来反映因变量的空间分层异质性，以及自变量对因变量的影响程度， q 值越大表示自变量和因变量的空间分布越一致，自变量的解释力越强，反之则越弱^[10]。

2 结果与分析

2.1 建设用地碳排放量时序变化特征

从碳排放总量来看，2009—2021 年长江经济带碳排放总量呈现增加趋势，增长率为 14.16%。上游、中游、下游地区碳排放总量均增加，增幅分别为 0.20%、17.17%、22.66%，中下游地区增幅明显高于上游。下游对长江经济带碳排放总量的贡献率明显高于中游和上游地区。从碳排放强度来看，长江经济带碳排放强度总体呈现下降趋势，降幅为 16.31%。上游、中游、下游地区碳排放强度均下降，降幅分别为 33.38%、8.56%、5.35%。结合碳排放总量和强度分析可知，上游、中游、下游地区城市建设用地面积均有所增加，但近年来增幅表现为上游>中游>下游的趋势。从每万人碳排放量来看，长江经济带每万人碳排放量表现为下游>中游>上游。碳排放强度和每万人碳排放量均表现出区域范围内由东向西方向的递减趋势，说明建设用地扩张与人口总量变化的空间异质性均弱于碳排放的空间异质性；同时除了中部地区在后期因制造业基地建设和能源基地建设可能附加的建设用地扩张需求而导致碳排放强度差距与东部地区拉大外，碳排放强度区域差异的时序变化性不明显。长江经济带每万人碳排放

量呈现下降趋势，降幅达 71.27%。上游、中游、下游地区每万人碳排放量均下降，降幅分别为 79.59%、74.36%、53.17%。每亿元 GDP 碳排放量呈现出上游>中游>下游的空间格局，自西向东递减变化的可能原因在于上中下游 GDP 的空间差异明显强于碳排放差异（图 1）。

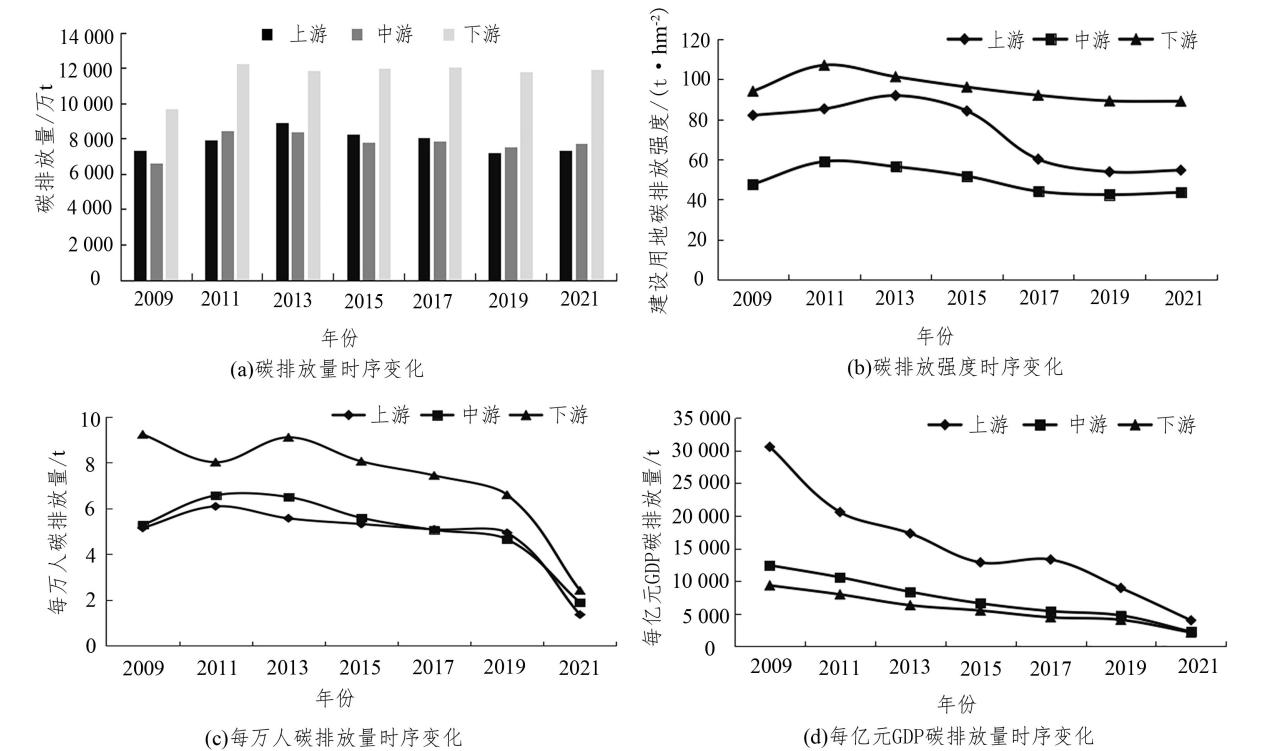


图 1 长江经济带建设用 地碳排放时序特征

Figure 1 Temporal characteristics of carbon emission from construction land in Yangtze River Economic Belt

2.2 碳排放收敛性分析

由 2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放量 α 收敛分析可知（表 3），长江经济带、长江经济带上游区域、中游区域与下游区域建设用 地碳排放量的变异系数均呈现小幅波动下降的变化特征。长江经济带建设用 地碳排放量的变异系数由 2009 年的 0.33 下降至 2021 年的 0.17，上游区域由 2009 年的 0.27 变化到 2021 年的 0.17，中游区域由 2009 年的 0.29 变化到 2021 年的 0.18，下游区域由 2009 年的 0.31 变化到 2021 年的 0.18，由此表明建设用 地碳排放量的差距有所缩小，表现出较为明显的 α 收敛特征。

表 3 2009—2021 年长江经济带建设用 地碳排放变异系数

Table 3 Variation coefficient of carbon emission from construction land in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2021

区域	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
上游	0.27	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.27	0.25	0.25	0.24	0.21	0.19	0.17
中游	0.29	0.29	0.28	0.29	0.26	0.28	0.25	0.24	0.26	0.25	0.22	0.22	0.18
下游	0.31	0.33	0.32	0.29	0.33	0.29	0.29	0.28	0.26	0.23	0.21	0.19	0.18
全域	0.33	0.32	0.33	0.32	0.28	0.25	0.27	0.23	0.24	0.20	0.17	0.18	0.17

2.3 建设用 地碳排放空间效应分析

2.3.1 碳排放空间变化分析

2.3.1.1 碳排放总量空间分布格局

2009—2021 年长江经济带碳排放总量呈现出明显的自东向西逐渐递减的分布趋势，表现为下游>中游>上游的空间分布格局（图 2）。其可能原因有两方面：一是长江经济带下游地区的上海、江苏和浙江为传统的长三角地带，其经济发展的极化作用明显，以往长三角区域经济发展对要素的集聚效应异常明显，建设用 地承载了高度饱和甚至过饱和的人口与产业规模，使得其社会经济发展过程的累积碳排放效应明显强于中游和上游地带，下游区域碳排放量与中游、上游区域碳排放量的空间差距逐渐拉大。二是其上游地带为四川、重庆、贵州与云南，基本属于中国一级阶梯地形单元，先天的地理位置与地形地貌

特征在一定程度上制约了该区域的建设用地发展进程，明显滞后于中游和下游地带，同时这些地区大部分为人口外流区域，人口密度与产业发展密度相对偏低，随之带来的碳排放总量相对低于中游和下游地带。

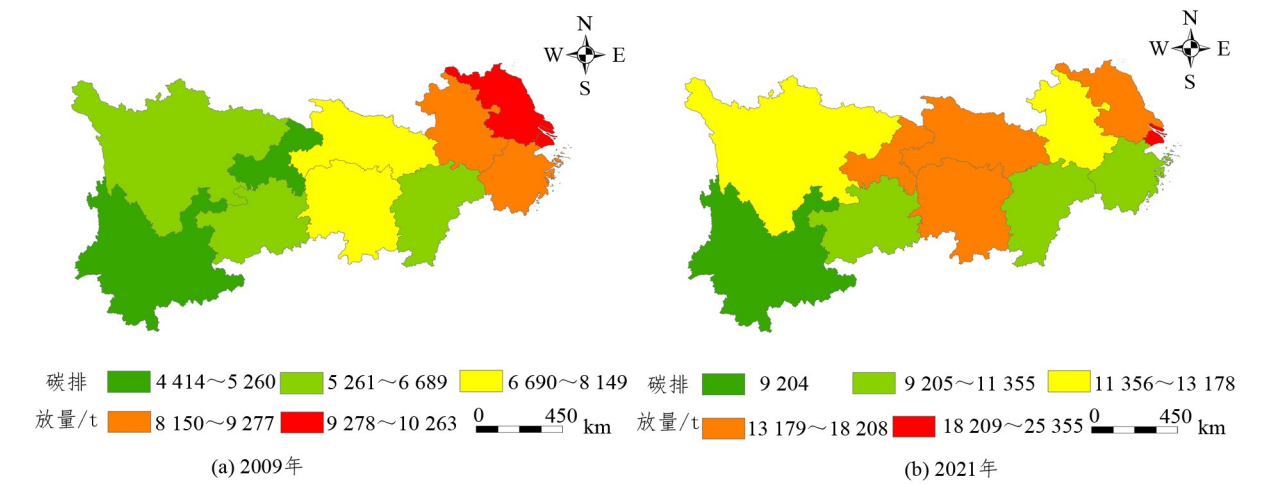


图2 2009—2021年长江经济带建设用地碳排放量空间分布特征

Figure 2 Spatial distribution of carbon emissions from construction land in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2021

2.3.1.2 碳排放强度空间分布格局

与碳排放量空间分布格局类似，2009—2021年长江经济带碳排放强度也表现为明显的自东向西逐渐递减的分布趋势，即下游>中游>上游的空间分布格局（图3），原因可能与土地利用强度与效率有关。长江经济带下游地区分布有较多的特大城市、超大城市，其发展模式为城市群叠加产业带，人口、产业高度密集，同时由于过快的城市化与工业化进程使得建设用地规模扩张迅速，可开发、转换的新增建设用地来源较缺乏，因而在城市建设用地外延扩张路径不通的情况下，转向建设用地内部挖潜，即建设用地开发利用强度与效率大幅增强，从而导致下游区域建设用地碳排放强度远远高于中游和上游区域。相比于下游区域，长江经济带上游和中游区域碳排放强度偏低，这与其建设用地较快扩张有关。中游和上游区域城市化、工业化发展进程偏慢，经济发展空间较大，建设用地扩张与经济发展之间尚未实现脱钩，因此，作为其经济发展的重要支撑，中游和上游区域可供开发利用与转换的建设用地相对较为充足，建设用地规模的扩张导致其在城市发展进程中建设用地碳排放强度相对偏低。

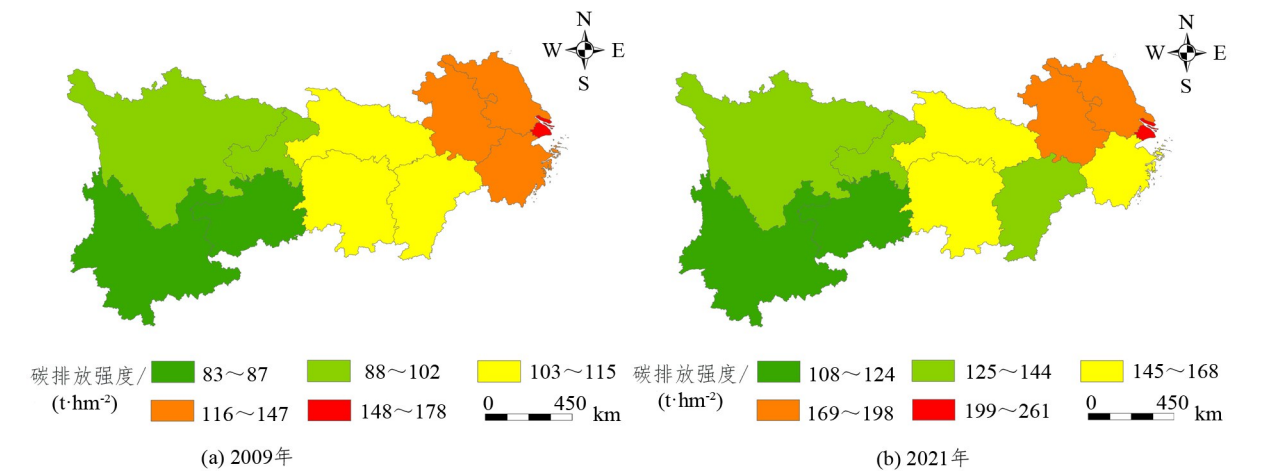


图3 2009—2021年长江经济带建设用地碳排放强度空间分布特征

Figure 3 Spatial distribution characteristics of carbon emission intensity of construction land in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2021

2.3.2 碳排放空间自相关分析

2.3.2.1 全局自相关分析

基于 ArcGIS 中的空间自相关工具计算汇总 2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放量的全局

Moran’s *I*，从整体空间角度探究其碳排放量的空间自相关性及集聚程度（表 4）。

2009—2021 年全球 Moran’s *I* 均大于 0，且均在 10% 及以上水平显著，表明长江经济带建设用地碳排放量在空间分布上具有显著的正向空间集聚性。2009—2021 年全球 Moran’s *I* 基本集中在 0.3~0.5，即长江经济带建设用地碳排放量的空间集聚性相对稳定，年际变化较小。

2.3.2.2 局部自相关分析

为了进一步探究长江经济带建设用地碳排放量的空间集聚特征，分别对 2009 年和 2021 年长江经济带建设用地碳排放量展开局部自相关分析，其 LISA 聚类分布情况如图 4 所示。2009 年上海、江苏为 HH 型，即为建设用地碳排放量高值集聚区域；四川和贵州为 LL 型，即为建设用地碳排放量低值集聚区域。2021 年上海、江苏、浙江为 HH 型，四川、贵州、湖南为 LL 型。2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放量高值中心和低值中心分布均较为稳定。

2.3.3 碳排放重心迁移变化分析

通过对长江经济带建设用地碳排放量的重心迁移分析可知，2009—2021 年碳排放量的中心在湖北省范围内，同时逐年向西部迁移，12 年间重心经向移动 0.55°，纬向移动 0.07°（图 5）。其可能的原因如下：随着中国中部崛起战略不断深入实施，中部地区制造业基地的功能定位日益突出。湖北省作为中部地区的核心发展区域，其制造业领域与相应的能源消费领域发展较快，支撑作用明显，从而使得湖北省建设用地碳排放量增速较为明显，成为碳排放量迁移重心。

表 4 2009—2021 年长江经济带全局 Moran’s *I*
Table 4 Overall Moran’s *I* in the Yangtze River Economic Belt during 2009—2021

年份	Moran’s <i>I</i>	Z 值	P 值
2009	0.533	3.131	0.002**
2010	0.469	2.844	0.004**
2011	0.407	2.533	0.011**
2012	0.477	2.851	0.004**
2013	0.478	2.869	0.004**
2014	0.466	2.830	0.005**
2015	0.479	2.941	0.002**
2016	0.393	2.529	0.011**
2017	0.406	2.621	0.009**
2018	0.352	2.146	0.065*
2019	0.281	2.008	0.004**
2020	0.328	2.786	0.004**
2021	0.321	2.667	0.005**

注：*** 为 0.001 显著性水平，
** 为 0.05 显著性水平，
* 为 0.1 显著性水平。

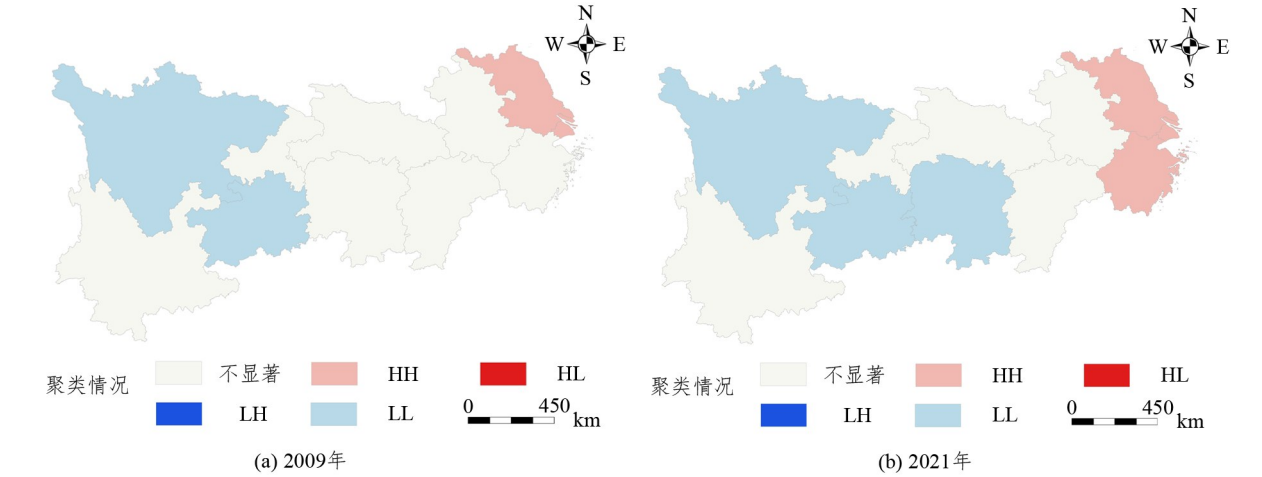


图 4 2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放 LISA 聚类图

Figure 4 LISA cluster map of carbon emissions from construction land in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2021

2.4 建设用地碳排放驱动因素分析

基于上述分析，将人口、经济发展、建设用地扩张作为建设用地碳排放的影响因素，首先通过脱钩系数来反映建设用地碳排放与人口总量、经济发展（二三产值占比）、建设用地面积扩张之间的脱钩关联性（表 5），在此基础上经 ArcGIS 与 GeoDetector 运行，得出 2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放影响力探测结果（表 6、表 7）。

碳排放量与人口总量方面，上中下游地区碳排放量与人口总量均增加，碳排放量增加速度均慢于人口总量增加速度，处于弱脱钩状态，表明上游地区人口总量增加，人的生产、生活活动使得碳排放量有所增加，两者之间存在一定关联。

碳排放量与经济发展方面，上游地区碳排放量与二三产值占比均增加，碳排放量增加速度慢于二三产值占比增加速度，处于弱脱钩状态，表明上游地区近年来经济发展增速明显，同时衍生附带了碳排放

的负外部效应，两者之间可能存在一定关联。中下游地区碳排放量与二三产值占比均增加，碳排放量增加速度明显快于二三产值占比增加速度，处于扩张型负脱钩状态，即经济发展与碳排放之间存在明显的关联性，现有的经济发展模式附带有非常突出的碳排放效应，且因经济发展并未转型实现高质量发展，因此引发的碳排放效应日益扩大化。由此表明，上游和中下游地区应分别通过生态产业化、产业生态化来实现区域经济与碳排放效应的脱钩式高质量发展。

碳排放量与建设用地扩张方面，中上游地区碳排放量与建设用地面积均增加，碳排放量增加速度慢于建设用地扩张速度，处于弱脱钩状态，表明中上游地区近年来建设用地扩张一定程度上使得区域人口与产业密度增加，也因此衍生附带了碳排放的负外部效应，两者之间可能存在一定关联。下游地区碳排放量与建设用地面积均增加，碳排放量增加速度明显快于建设用地扩张速度，处于扩张型负脱钩状态，即由建设用地扩张与碳排放之间存在直接明显的关联性。

地理探测器分析结果表明，2009 年经济发展、建设用地规模扩张、人口规模增加对长江经济带建设用地碳排放量产生了一定影响，且对下游区域的影响程度明显强于中游和上游区域，尤其是经济发展水平的影响差异更为明显。2021 年经济发展与人口规模依然在发挥较为明显的影响作用，但与 2009 年显著不同的是，2021 年建设用地规模的影响程度出现明显下降态势，且下游区域下降更为明显，这与国家实施高质量发展战略与国土空间开发格局优化有关。

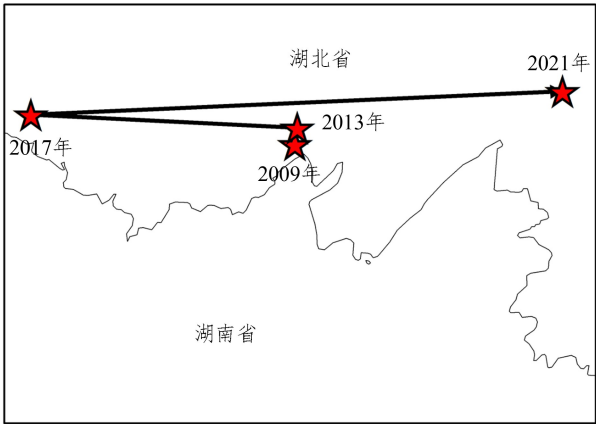


图 5 2009—2021 年长江经济带建设用地碳排放量重心迁移轨迹

Figure 5 Migration trajectory of carbon emission center of gravity of construction land in the Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2021

表 5 建设用地碳排放因素脱钩关联分析
Table 5 Decoupling and correlation analysis of factors of carbon emission from construction land

区域	人口总量	二三产业产值占比	建设用地面积
上游	0.028	0.259	0.069
中游	0.046	7.762	0.575
下游	0.119	12.218	1.413
全域	0.201	7.802	0.894

表 6 2009 年长江经济带建设用地碳排放影响力探测结果
Table 6 Impact detection results of national land use carbon emissions in 2009

区域	人口总量	二三产业产值占比	建设用地面积
上游	0.532	0.776	0.769
中游	0.627	0.781	0.775
下游	0.651	0.813	0.791
全域	0.601	0.802	0.783

表 7 2021 年长江经济带建设用地碳排放影响力探测结果
Table 7 Impact detection results of national land use carbon emissions in 2021

区域	人口总量	二三产业产值占比	建设用地面积
上游	0.624	0.781	0.613
中游	0.637	0.792	0.646
下游	0.716	0.823	0.499
全域	0.635	0.814	0.526

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 从碳排放总量来看，长江经济带建设用地碳排放总量呈现增加趋势，中下游区域增幅明显高于上游区域。从碳排放强度来看，长江经济带碳排放强度呈现下降趋势。从每万人碳排放量来看，长江经济带每万人碳排放量呈现下降趋势，每万人碳排放量表现为上游>中游>下游，可能的原因在于中游和上游地区人口向下游集聚的流动性非常明显，下游地区的地理位置优势、政策优势以及强大的极化作用使其常住人口总量始终保持高位，因而出现了下游地区每万人碳排放量反而偏低的局势。

2) 长江经济带、长江经济带上游区域、中游区域与下游区域建设用地碳排放量的变异系数均呈现小幅波动下降的变化特征，表明建设用地碳排放量的差距有所缩小，表现出较为明显的 α 收敛特征。

3) 长江经济带碳排放总量、碳排放强度均表现为明显的自东向西逐渐递减的分布趋势,即下游>中游>上游的空间分布格局。长江经济带建设用地区域碳排放量在空间分布上具有显著的正向空间集聚性,且相对稳定。建设用地碳排放量高值中心集中分布在下游区域,低值中心集中分布在上游区域。

4) 经济发展(GDP、二三产值占比)、建设用地规模扩张、人口规模增加均对长江经济带建设用地碳排放量产生了一定影响,且对下游区域的影响程度明显强于中游和上游区域,尤其是经济发展水平的影响差异更为明显。建设用地规模的影响程度出现明显下降态势,且下游区域下降更为明显。

3.2 讨论

基于上述分析,长江经济带下游区域应侧重于实现产业生态化:下游区域经济发展基础雄厚,具有极强的人口、产业集聚力,过度饱和的发展状态要求其需要通过以产业生态化为目标调整完善目前已有产业结构,以生态化方向为倒逼准则,清洁其产业发展方式,从而消解其建设用地碳排放效应;中游区域“制造业基地”“能源基地”的发展定位,更需要抓稳产业生态化朝向,在发挥自身优势的同时最大化地减少建设用地碳排放。上游区域应侧重于实现生态产业化,因其自然资源相对丰富,自然本底环境相对脆弱而又干扰较少,因而应立足于自身具有不可替代的优势地位的空间生态资源,最大化地发挥空间生态资源服务价值。

既有研究多从土地利用结构角度出发,估算多功能土地利用复合体的碳排放效应,鉴于耕地作为部分碳源的释放效应与建设用地这种集中碳源相比较为弱化,故本研究将城市建设用地作为主体地类,针对性地分析长江经济带建设用地空间布局区域碳排放效应时空分异特征,这对于经济发展飞速而建设用地需求旺盛且扩张明显的长江经济带而言是非常必要的。另外,在具体探讨碳排放空间异质性及影响因素时,本研究尝试引入收敛性模型与脱钩模型,在广度方面分析空间异质性特征更为全面,在逻辑关联上思考碳排放效应影响因素时更为紧密。但由于数据有限性,今后还需要从深度上再扩展收敛分析内容,同时在现有基础上还需要从长江经济带建设用地碳排放空间关联网络角度深化研究,加入碳排放空间溢入溢出效应分析,更深入地从上中下游区域间相互作用角度来探究建设用地碳排放空间分异效应。

参考文献 (References):

[1] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区 [J]. 环境科学, 2023, 44 (3): 1267-1276. [LI Y Y, WEI W, ZHOU J J, et al. Land use carbon emission change and harmonized zoning in China [J]. Environmental Science, 2023, 44 (3): 1267-1276.]

[2] 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. [YUAN S F, TANG Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt from the perspective of low carbon [J]. Economic Geography, 2019, 39 (2): 190-198.]

[3] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 [J]. 环境科学, 2022, 43 (11): 5253-5262. [HOU J K, CHEN J J, ZHANG K Q, et al. Temporal and spatial changes of carbon stocks in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and their responses to different future scenarios [J]. Environmental Science, 2022, 43 (11): 5253-5262.]

[4] 韩方红,高凡,何兵,等. 1990—2020 年阿克苏河流域土地利用碳排放时空轨迹与影响因素 [J]. 环境科学, 2024, 45 (6): 3297-3307. [HAN F H, GAO F, HE B, et al. Spatial-temporal trajectory and influencing factors of land use carbon emissions in Aksu River Basin from 1990 to 2020 [J]. Environmental Science, 2024, 45 (6): 3297-3307.]

[5] 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. [GUANG C E, LI W Y, HUANG X S. Spatio-temporal evolution and driving factors of coupling and coordination between carbon emission intensity and high-quality economic development in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Economic Geography, 2022, 42 (8): 30-40.]

[6] 张娜,孙芳城,胡钰苓,等. 长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性 [J]. 环境科学, 2024, 45 (8): 4656-4669. [ZHANG N, SUN F C, HU Y L, et al. Regional differences and spatial convergence of land use carbon emissions in the three major urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2024, 45 (8): 4656-4669.]

[7] 郭安宁,牛陆,刘霏珈,等. 黄河流域城市群土地利用的碳排放效应 [J]. 经济地理, 2023, 43 (9): 172-178+240. [GUO A N, NIU L, LIU P J, et al. Carbon emission effect of land use in urban agglomerations in the Yellow River Ba-

sin [J]. *Economic Geography*, 2023, 43 (9): 172-178+240.]

[8] 武爱彬, 赵艳霞, 郭小平, 等. 碳中和目标下河北省土地利用碳排放格局演变与多情景模拟 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39 (14): 261-270+293. [WU A B, ZHAO Y X, GUO X P, et al. Evolution and multi-scenario simulation of land use carbon emission pattern in Hebei Province under carbon neutral goal [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39 (14): 261-270+293.]

[9] 李效顺, 李志鑫, 谢晓彤, 等. 河南省城镇化、碳排放与“三生”空间交互机制分析 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39 (11): 256-265. [LI X S, LI Z X, XIE X T, et al. Spatial interaction mechanism analysis of urbanization, carbon emission and “three kinds of production” in Henan Province [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2023, 39 (11): 256-265.]

[10] 胡冉再琪, 孔雪松, 文高辉, 等. 武汉城市圈“三生”功能与土地利用碳排放耦合测度及协同分区 [J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45 (5): 209-221. [HU R Z Q, KONG X S, WEN G H, et al. Coupling measurement and collaborative zoning of “three generation” function and land use carbon emission in Wuhan metropolitan area [J]. *Agricultural Resources and Regionalization of China*, 2024, 45 (5): 209-221.]

[11] 张敏, 伍世代, 叶尚钰, 等. 低碳视角下福建省土地利用碳排放生态与经济耦合发展 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2023, 18 (3): 11-18. [ZHANG M, WU S D, YE S Y, et al. Ecological and economic coupling development of carbon emission from land use in Fujian Province from the perspective of low carbon [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2023, 18 (3): 11-18.]

[12] 刘书畅, 叶艳妹, 钟水清. 中国城市建设用地扩张与经济增长重心迁移与脱钩关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29 (12): 2563-2571. [LIU S C, YE Y S, ZHONG S Q. Study on the relationship between urban construction land expansion and economic growth focus migration and decoupling in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 29 (12): 2563-2571.]

[13] 邵志国, 李可心, 李梦笛. “双碳”背景下中国交通运输业碳排放驱动因素及脱钩效应研究 [J/OL]. *中国环境科学*, 1-13. [2025-1-25] [SHAO Z G, LI K X, LI M D. Research on driving factors and decoupling effect of carbon emissions in China's transportation industry under the background of “dual carbon” [J/OL]. *China Environmental Science*, 1-13. [2025-1-25.]

[14] 田泽源, 董治, 董治宇, 等. 基于面板数据模型关中平原城市群交通碳排放峰值预测与脱钩分析 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44 (10): 5901-5911. [TIAN Z Y, DONG Z, DONG Z Y, et al. Predicting and decoupling analysis of transportation peak carbon emissions in Guanzhong Plain urban agglomeration based on panel data modeling [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44 (10): 5901-5911.]

[15] ZHU S, SUN H, XIA X, et al. Decoupling analysis of carbon emissions and forest area in China from 2004 to 2020 [J]. *Land*, 2023, 12 (7): 1458.

[16] MAGAZZINO C, MELE M. On the relationship between transportation infrastructure and economic development in China [J]. *Research in Transportation Economics*, 2021, 88: 100947.

[17] 张勇, 高羽洁. 淮河生态经济带城市用地扩张与经济增长的脱钩关系研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32 (8): 1573-1582. [ZHANG Y, GAO Y J. Study on decoupling relationship between urban land expansion and economic growth in Huaihe River Eco-economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32 (8): 1573-1582.]

(责任编辑：徐玲琳)