

浙江省土地利用碳排放时空特征及影响因素^①

杨丽霞^{1,2}, 徐萌¹, 潘艺¹, 祝锦霞^{1*}, 陈佳奇¹, 苑韶峰³, 凌恺³

(1 浙江财经大学公共管理学院, 杭州 310018; 2 浙江财经大学东方学院, 浙江海宁 314408; 3 浙江工商大学公共管理学院, 杭州 310018)

摘要: 以浙江省为研究区域, 利用碳排放系数法对土地利用的直接和间接碳排放进行了核算, 研究了土地利用的碳排放时空特征及影响因素。结果表明: ① 2005—2022 年, 浙江省土地利用变化主要表现为建设用地的转入和耕地与林地的转出; ② 浙江省土地利用净碳排放量增加迅速, 不同地类碳排放差异较大, 碳排放的主要来源是建设用地; ③ 浙江省北部地区土地利用净碳排放量明显高于南部地区, 各地市净碳排放量差异明显, 局部存在一定的聚集特征, 主要表现为以绍兴为代表的“高-高聚集区”和以温州为代表的“高-低聚集区”; ④ 能源消费强度、能源消费密度、建设用地规模、经济发展水平以及人口规模, 这 5 种因素推动了浙江省土地利用净碳排放量的上升。相反, 碳排放强度和土地利用经济效率则对浙江省的土地利用净碳排放产生了抑制作用。因此, 建议从土地利用、能源利用、经济发展和人口规模 4 个方面入手, 制定旨在减少土地利用过程中碳排放的政策, 进一步促进浙江省土地利用低碳发展。

关键词: 浙江省; 土地利用; 碳排放; 时空特征; 影响因素

中图分类号: F301.24 **文献标志码:** A

Spatial and Temporal Patterns and Determinants of Land Use-related Carbon Emissions in Zhejiang Province

YANG Lixia^{1,2}, XU Meng¹, PAN Yi¹, ZHU Jinxia^{1*}, CHEN Jiaqi¹, YUAN Shaofeng³, LING Kai³

(1 School of Public Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China; 2 Zhejiang University of Finance & Economics Dongfang College, Haining, Zhejiang 314408, China; 3 School of Public Administration, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Using Zhejiang Province as the primary research area, we utilized the carbon emission coefficient method to quantify both direct and indirect carbon emissions arising from land use activities, their spatial and temporal patterns, and the underlying influential factors. The results showed that: 1) From 2005 to 2022, the primary trend in the land use change was the increase of construction land coupled with the decreases of both cultivated and forested lands. 2) The net carbon emissions from land use were experiencing a rapid surge. There were significant differences in the carbon emissions associated with different land use types. Notably, the carbon emissions originating from construction land constituted the primary source. 3) The net carbon emission of land use in northern Zhejiang was significantly higher than that in southern Zhejiang, and there were obvious differences in net carbon emissions among different cities. There were certain aggregation characteristics locally, mainly manifested as the “high-high aggregation area” represented by Shaoxing and the “high-low aggregation area” represented by Wenzhou. 4) Five factors, specifically energy consumption intensity and density, the scale of construction land, the level of economic development, and population size, contributed to the rise in net carbon emissions from land use. Conversely, the factors of carbon emission intensity and land use economic efficiency act as inhibitors of net carbon emissions from land use. Thus, it is advisable to devise policies aimed at reducing carbon emissions from land use, taking into account the land use patterns, energy consumption, economic growth, and population size, in order to further advance the low-carbon development of land use in Zhejiang Province.

Key words: Zhejiang Province; Land use; Carbon emissions; Spatiotemporal characteristics; Influencing factor

①基金项目: 教育部人文社会科学规划基金项目(24YJA630123)资助。

* 通信作者(jxzhuzufe@zufe.edu.cn)

作者简介: 杨丽霞(1976—), 女, 山西原平人, 博士, 教授, 主要从事城乡资源可持续发展研究。E-mail: yanglixianj2001@163.com

由温室气体排放引起的全球变暖问题已受到公众的广泛关注^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental panel on climate change, IPCC)于 2023 年 3 月发布的《气候变化 2023: 第六次评估综合报告》^[2]指出,与 1850—1900 年相比,2011—2020 年全球地表温度上升达 1.1℃。根据 2021 年发布的国家自主贡献(nationally determined contributions, NDCs)数据预测,若不采取有效措施,到 2030 年全球平均气温上升幅度可能突破 1.5℃ 的安全阈值^[3]。在过去的半个世纪,土地利用相关的碳排放在全球人为温室气体排放总量中占据了相当大的比例。根据 IPCC 的报告,土地利用碳排放约占全球人为温室气体排放总量的 27%^[4]。Houghton^[5]的研究结果显示,1850—1990 年土地利用变迁所导致的温室气体排放量相当于化石燃料燃烧产生碳排放量的 1/2,约占人类活动所产生的碳排放总量的 1/3,土地利用所产生的碳排放是碳排放重要的碳源。土地资源的不合理利用,不仅导致土地利用效率低下,还会降低土地的碳汇功能。在 2020 年的联合国大会上,中国国家主席习近平向国际社会郑重宣告,中国将采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。中国正积极推进绿色低碳发展,以履行这一庄严承诺。浙江省作为碳排放大省,其碳排放问题备受关注。开展浙江省土地利用碳排放时空特征和空间相关性的研究,对其碳排放差异及影响因素进行分析,可为浙江省制定和实施差异化碳减排政策提供数据支撑与决策参考。在保障浙江省经济社会发展需要的同时,合理配置土地资源,推动浙江省生态文明建设向前迈进一大步,对实现国家“双碳”目标以及缓解全球气候变化至关重要^[6]。

目前,国内外关于土地利用碳排放的研究和探索主要集中在两个方面:一是测定由土地利用引发的碳排放量;二是深入剖析影响这一过程的主要驱动因素。在测算土地利用过程中的碳排放量时,主要包括两个关键环节:一是直接碳排放核算;二是间接碳排放核算。直接碳排放核算广泛采用的 3 种方法分别是基于实地调查的样地清查法、遥感技术驱动的遥感估算法和模型估算法。例如,方精云等^[7]根据相关森林和草场等自然资源的调查资料,对我国 1981—2000 年陆地生态系统中的植被碳吸收能力进行了评估和量化。杨坤等^[8]以拉萨地区 2000 年和 2010 年土地利用遥感数据为依据,计算了拉萨地区这两期的碳排放量。对于模型估算法,学者普遍采纳以 IPCC 清单为

基础的模型来估计土地利用活动的直接碳排放,即用各地类的面积乘以相应地类的碳排放系数。张娜等^[9]以长江经济带的三大城市群——长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群为研究对象,采用直接系数法核算了林地、草地、水域和未利用地所产生的碳排放。陈靖松等^[10]通过直接碳排放系数法,评估了 2005—2020 年京津冀地区城市的耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放总量。间接碳排放核算采用的方法主要包括物料衡算法、实测法以及碳排放系数法。例如,谭超^[11]通过碳平衡法对排放因子和碳氧化率进行了转换性评估,研究表明,这种方法得到的结果与实际发电厂的排放状况高度吻合,显示了其作为衡量工具的有效性。苟鹏等^[12]选取了一个特定的城市作为研究对象,参考固定污染源排放清单,通过实测法(包含自动化和人工双重监测)对市内 10 家工业企业的污染排放量进行了精确的量化评估。肖磊等^[13]根据重庆市实际,选取包括原煤、汽油、天然气等在内的多种能源,用碳排放系数法准确评估了能源消耗所产生的碳排放,间接估算了建设用地的碳排放量。赵先超等^[14]在计算长株潭城市群建设用地碳排放时采用碳排放系数法,参考已有研究成果,利用第二、三产业产值与单位 GDP 能耗间接计算了建设用地的碳排放量。在核算土地利用碳排放量的基础上研究土地利用碳排放的影响因素时,使用的研究方法有对数平均迪氏指数(Logarithmic mean division index, LMDI)模型、STIRPAT 模型等。Akboostanci 等^[15]运用 LMDI 分解方法分析了土耳其碳排放驱动因素,指出除了经济活动,能源强度是二氧化碳排放量变化的决定性因素之一。邹秀清等^[16]基于 STIRPAT 拓展模型,采用岭回归方法探究了长三角各省(市)碳排放的影响因素及机理,结果表明,人口数量、城镇化水平、人均 GDP、能源强度均显著影响长三角各省(市)的碳排放。

综上所述,众多学者针对土地利用与碳排放的关联性进行了广泛而深入的研究,这些研究不仅覆盖了不同国家和地区,还涉及多种土地类型和利用模式。从研究尺度来看,国际学者的视角往往聚焦于全球范畴以及国家级别的广阔地理领域;而国内学者则更加侧重于对省级及以上尺度的区域进行研究,如长三角地区、黄河流域、京津冀地区等。然而,对东部沿海地区的研究,特别是以浙江省为对象的研究相对缺乏。由此,本文以浙江省为研究对象,对其 11 个地级市不同时间(2005 年、2015 年和 2022 年)的土地利用碳排放量进行了量化分析,探讨了浙江省土地利用

碳排放时空特征、空间相关性和影响碳排放的关键因素，并以低碳减排发展为目标提出了一些政策建议。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文所使用的浙江省土地利用数据来源于《30 m annual land cover and its dynamics in China from 1985 to 2022》^[17]。本文遵循中国科学院提出的土地利用分类体系^[18]，对研究区土地利用类型进行了重分类，结果如表 1 所示。

表 1 土地利用分类
Table 1 land-use classification

分类编码	名称	二级类型描述
1	耕地	包括农用地、灌溉水田、菜地、轮歇地、农桑地等
2	林地	包括有林地、灌木林地、其他林地等
3	草地	包括天然草地、改良草地和人工草地等
4	水域	包括河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂和滩地
5	建设用地	包括城镇用地、农村居民点、工业区、矿场等其他建设用地
6	未利用地	包括沼泽地、裸土地、沙地等

关于人口、国内生产总值(GDP)、能源消费状况等社会经济数据,主要来源于 2005 年、2015 年和 2022 年《浙江省统计年鉴》^[19]、《中国能源统计年鉴》^[20]以及浙江省各地级市统计年鉴,碳排放系数的来源包括《2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories》^[21]以及相关的文献资料。

1.2 研究方法

1.2.1 土地利用碳排放测算 本研究土地利用碳排放测算包括直接碳排放测算和间接碳排放测算。在评估耕地、林地、草地、水域以及未利用地的碳排放时,采取了直接碳排放系数法来进行量化分析,计算公式如下:

$$E_a = \sum \alpha_i \times S_i \quad (1)$$

式中: E_a 为特定土地类型(包括耕地、林地、草地、水域、未利用地)的碳排放量; α_i 为第 i 种地类的碳排放系数; S_i 为第 i 种地类的面积。

结合已有的研究成果^[22-26],本研究选择的各土地利用类型碳排放系数如表 2 所示。

对于建设用地,其碳排放主要是人类生产活动消耗能源所产生的,无法直接进行估算。因此,本文在测算浙江省建设用地的碳排放量时选择使用间接估算法,即通过评估能源消耗产生的碳排放来进行推算,从而间接得到浙江省 2005 年、2015 年和 2022

年建设用地的碳排放量。能源消耗类碳源估算方法的核心是采用能源消耗总量和化石燃料系数或碳排放因子来计算碳排放量^[27]。计算公式如下:

$$E_b = \sum \beta_j \times A_j \times B_j \quad (2)$$

式中: E_b 是建设用地碳排放量; β_j 是第 j 种化石能源的碳排放系数; A_j 是第 j 种化石能源消费量; B_j 是第 j 种能源的标准煤折算系数。各能源标准煤折算系数及碳排放系数见表 3。

表 2 各土地利用类型的碳排放系数
Table 2 Carbon emission coefficients of various land use types

土地利用类型	碳排放系数(t/(km ² ·a))	参考文献
耕地	42.2	[22]
林地	-64.4	[24]
草地	-2.1	[24, 26]
水域	-25.3	[23, 25]
未利用地	-0.5	[23, 26]

表 3 能源标准煤折算系数与碳排放系数
Table 3 Conversion coefficient and carbon emission coefficient of standard coal for energy

能源种类	标准煤折算系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
原油	1.428 6	0.585 7
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
液化石油气	1.714 3	0.504 2
炼厂干气	1.571 4	0.460 2
其他石油制品	1.200 0	0.585 7
天然气	1.330 0	0.448 3

注:能源标准煤折算系数与碳排放系数分别参考《中国能源统计年鉴》^[20]和 IPCC《2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories》^[21];原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油和燃料油的标准煤折算单位为 tce/t,天然气标准煤折算单位为 tce/(10⁴m³),tce 表示吨(标准煤);碳排放系数的单位为 t/tce^[28]。

建设用地的碳排放主要通过煤、石油、天然气等能源的消耗来间接反映。但由于市级尺度能源消费数据可获得性限制,本文在计算各市建设用地碳排放时,借鉴了朱巧娟等^[29]的研究方法,即考虑到第二、三产业产值主要由建设用地贡献,对于建设用地的碳排放量采用基于单位 GDP 能耗与第二、三产业产值乘积的方法来估算。具体计算公式如下:

$$C_i = \frac{S_i}{S} \times E_b \quad (3)$$

式中： C_i 为*i*市建设用地碳排放量； S_i 为*i*市第二、三产业产值； S 为浙江省第二、三产业产值； E_0 为浙江省建设用地碳排放量。

1.2.2 空间自相关分析 空间自相关性的测度包括全局和局部空间自相关两大类。本文运用 ArcGIS 软件，对浙江省 2005 年、2015 年、2022 年土地利用净碳排放全局 Moran's I 指数进行计算。

全局自相关分析可揭示各市之间的总体相关性，而局部自相关可进一步细化研究，探究每个市与其周围地区在土地利用净碳排放上的相关性，准确识别高值聚集区和低值聚集区，从而为更清晰地理解各市之间的空间分异特征提供有力支持，弥补全局自相关的不足。本文利用 LISA (Local indicators of spatial association)，即空间关联局部指标进行局部自相关分析，以深入了解浙江省各市土地利用净碳排放量的空间异质性。其中，“高-高”和“低-低”集聚表示局部空间存在相似属性集聚现象，“高-低”“低-高”集聚表示局部空间存在非相似属性集聚现象或离散现象^[30]。

1.2.3 土地利用碳排放影响因素分解模型 参考已有研究成果，依据 kaya 恒等式对影响土地利用碳排放的因素进行变形，并经过 LMDI 分解，可以有效探究各因素的影响特征，有助于靶向对标、精准施策。

根据浙江省土地利用碳排放特征，本文将影响因素分解为 7 个关键维度：碳排放强度、能源消费强度、能源消费密度、建设用地规模、土地利用经济效率、经济发展水平和人口规模。

分解模型如下所示：

$$C = \frac{C}{GDP} \times \frac{GDP}{E} \times \frac{E}{L_c} \times \frac{L_c}{L} \times \frac{L}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \quad (4)$$

式中： C 表示土地利用碳排放总量； GDP 为国内生产总值； E 为能源消耗总量； L_c 表示建设用地的面积； L 为土地面积； P 为人口总量。

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{C}{GDP} \\ q = \frac{GDP}{E} \\ g = \frac{E}{L_c} \\ l = \frac{L_c}{L} \\ d = \frac{L}{GDP} \\ e = \frac{GDP}{P} \\ p = P \end{array} \right. \quad (5)$$

式中： f 为单位 GDP 碳排放量，代表碳排放强度； q 为单位能源所产生的 GDP，代表能源消费强度； g 为单位建设用地所消耗的能源量，代表能源消费密度； l 为建设用地地类占比，代表建设用地规模； d 为土地利用总量与地区生产总值的比值，代表土地利用经济效率； e 为人均 GDP，代表经济发展水平； p 为常住人口数量，代表人口规模。

根据表 4 结果，7 种因素的 VIF (Variance inflation factor) 均小于 2，表明变量之间不存在显著的多重共线性问题。

目前，LMDI 分解法有“加和形式”和“乘积形式”两种，计算结果均较为科学，是国际上进行影响因素分解研究的主流方法。本文采用“加和形式”的因素分解。

假设 C^0 表示基期土地利用碳排放量， C^t 表示 t 时期土地利用碳排放量， ΔC_M 表示变化量，则有如下表达式：

$$\Delta C_M = C^t - C^0 = \Delta C_f + \Delta C_q + \Delta C_g + \Delta C_l + \Delta C_d + \Delta C_e + \Delta C_p \quad (6)$$

加和分解模式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_f = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{f^t}{f^0} \\ \Delta C_q = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{q^t}{q^0} \\ \Delta C_g = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{g^t}{g^0} \\ \Delta C_l = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{l^t}{l^0} \\ \Delta C_d = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{d^t}{d^0} \\ \Delta C_e = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{e^t}{e^0} \\ \Delta C_p = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \frac{p^t}{p^0} \end{array} \right. \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 浙江省土地利用状况

2.1.1 土地利用结构 2005 年、2015 年、2022 年浙江省各土地利用类型面积及其占比如表 5 所示，其空间分布如图 1 所示。

从表 5 和图 1 可以看出，浙江省不同土地利用类型面积差异较大，且分布不均匀。浙江省的土地利用主要以林地和耕地为主，分别占浙江省土地利用总面积的约 64% 和 23%。其中，林地的面积超过了研究

表 4 变量 VIF 检验
Table 4 VIF Test for variables

变量	碳排放强度	能源消费强度	能源消费密度	建设用地规模	土地利用经济效率因素	经济发展水平	人口规模
VIF	1.18	1.33	1.11	1.25	1.22	1.43	1.14

表 5 浙江省 2005 年、2015 年和 2022 年土地利用结构
Table 5 Land use patterns of Zhejiang Province in 2005, 2015, and 2022

年份	单位	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2005	面积(km ²)	27 761.76	77 814.92	27.71	8 400.06	5 826.75	0.37	11 9831.57
	比例(%)	23.17	64.94	0.02	7.01	4.86	0.00	100
2015	面积(km ²)	27 102.77	75 470.75	17.64	8 301.11	8 937.92	1.39	11 9831.57
	比例(%)	22.62	62.98	0.01	6.93	7.46	0.00	100
2022	面积(km ²)	24 607.86	66 736.69	9.15	3 377.04	9 316.01	5.86	10 4052.60
	比例(%)	23.65	64.14	0.01	3.25	8.95	0.01	100
2005—2022	面积变化(km ²)	-3 153.90	-11 078.22	-18.57	-5 023.02	3 489.26	5.49	-
	面积变化率(%)	-11.36	-14.24	-66.99	-59.80	59.88	1 465.63	-

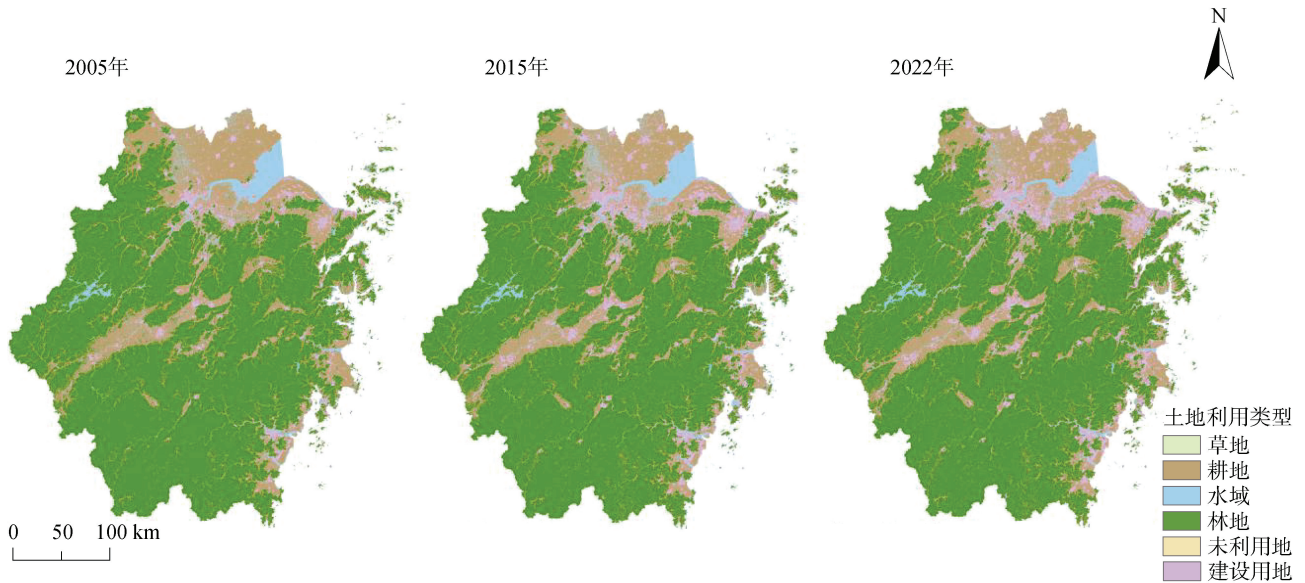


图 1 2005 年、2015 年及 2022 年浙江省土地利用分类图
Fig. 1 Land use classification maps of Zhejiang Province in 2005, 2015, and 2022

区总面积的一半,除零星分布在浙北地区的少数地方外,林地遍布于浙江省的绝大多数地区,这主要归因于浙江省地形多山,适宜于林地的发展;耕地主要分布在浙江省北部和东部沿海一带的杭嘉湖平原及宁绍平原。2005—2022 年 17 年间,建设用地变化较大,各地均有分布;水域面积减少较多,减少后仅占约 3%,主要分布于浙江省北部和东部地区;草地和未利用地均较少,共占 0.02% 左右,在浙江省内零星分布。

2.1.2 土地利用转移矩阵 本文以 2005—2022 年浙江省土地利用变化数据为基础,制作土地利用转移矩阵进行分析(图 2、表 6)。

从图 2 和表 6 可以看出,2005—2022 年浙江省

土地利用经历了显著变迁,17 年间发生转化的土地面积共有 104 040.9 km²。地类转出按面积递减依次为耕地、林地、水域、建设用地、草地和未利用地;相反,地类转入面积从大到小依次为耕地、建设用地、林地、水域、草地和未利用地。由净增量可知,浙江省土地利用变化特征为建设用地和未利用地面积增加,耕地、林地、草地和水域均有所减少。

2005—2022 年,浙江省的建设用地转入面积达 4 613.89 km²,净增加 4 149.48 km²,主要来源于耕地,占建设用地总转入面积的 79.85%。耕地在 17 年间主要转变为建设用地和林地,分别占耕地总转出面积的 71.51% 和 22.30%,耕地转变为草地、水域和未利用地三类的面积仅占转出总面积的 6.19%;转入耕地的

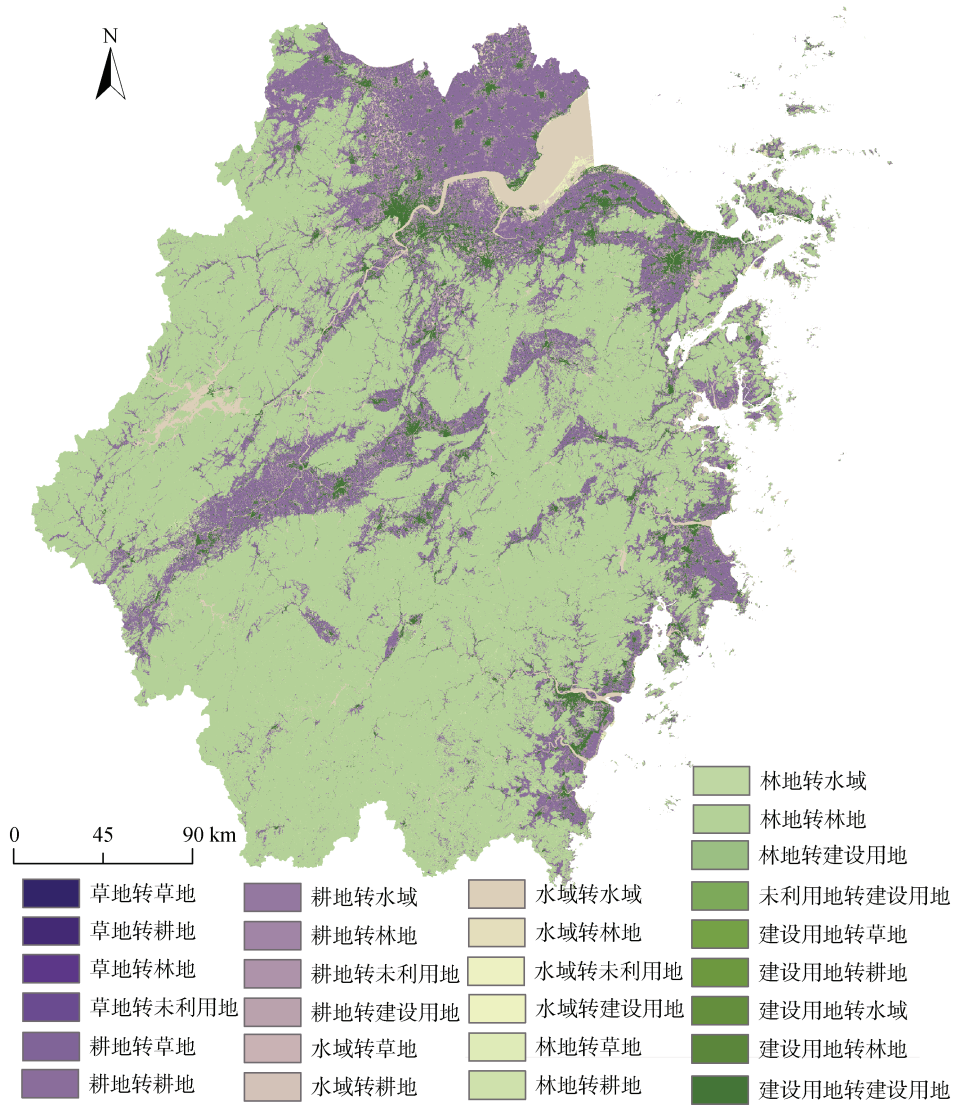


图 2 2005—2022 年土地利用转移矩阵图

Fig. 2 Map of land use transition matrix from 2005 to 2022

表 6 2005—2022 年土地利用转移矩阵表 (km²)

Table 6 Table of land use transfer matrix from 2005 to 2022

时间	土地利用类型	2022 年							总计	减少
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地			
2005 年	耕地	19 622.99	1 148.96	1.4	317.23	3 684	0.3	24 774.88	5 151.89	
	林地	3 773.83	65 370	4.33	60.36	346.94	0.05	69 555.52	4 185.52	
	草地	4.78	4.94	2.9	0.24	11.67	0.13	24.68	21.78	
	水域	863.44	174.01	0.31	2 905.44	571.03	5.3	4 519.53	1 614.09	
	建设用地	341.11	32.37	0.2	90.67	4701.59	0.05	5166	464.41	
	未利用地	0.01	0	0	0	0.25	0.03	0.29	0.04	
	总计	24 606.17	66 730.29	9.14	3 373.95	9 315.48	5.86	104 040.9		
新增	4 983.18	1 360.29	6.24	468.51	4 613.89	5.83				
净增量	-168.71	-2 825.23	-15.54	-1 145.58	4 149.48	5.79				

面积共有 4 983.18 km², 林地是耕地的最大转换来源, 17 年间共有 3 773.83 km² 的林地转变为耕地, 占转入

总面积的 75.73%, 其余地类转变为耕地的面积仅有 1 209.35 km²。林地在 17 年间转入面积共有 1 360.29 km²,

其中耕地转变为林地是主要来源,耕地转入林地的面积为 1 148.96 km²,大面积的耕地变为林地与国家的退耕还林政策有关,其余来源从大到小依次是水域、建设用地、草地和未利用地。草地增加的主要来源是林地,占草地转入总面积的 46.47%。水域主要向耕地转变,同时,未利用地增加的面积中有 90.9% 来自水域。

2.2 浙江省土地利用碳排放时间特征

2.2.1 土地利用碳排放 由表 7 可知,2005—2022 年,浙江省土地利用碳排放变化总体上呈上升趋势,至 2022 年,浙江省土地利用碳排放总量为 17 209.34 万 t,相比 2005 年增长了 94.95%,净增量高达 8 365.27 万 t,涨幅显著。将研究时期划分为 2005—2015 年和 2015—2022 年两个阶段,前一阶段浙江省碳排放总量年均增幅为 3.93%,后一阶段年均增幅为 4.10%。因此,从时间尺度上看,浙江省土地利用碳排放增幅较为稳定,接近 4%,其碳排放量逐年稳定增长。

从地级市角度看,浙江省土地利用碳排放总量最大的是杭州市,其次是宁波市,2022 年相较于 2005 年的增幅分别达到 115.56% 和 116.52%;丽水市土地利用碳排放量在 3 个时期均是最小,但其 2022 年的碳排放量与 2005 年相比也增长了 113.58%(表 8)。在这 17 年间,浙江省建设用地碳排放呈现出显著的增长,增幅高达 96%,与整体土地利用碳排放趋势相吻合。这一数据充分表明,在浙江省,建设用地碳排放是碳排放的重要来源,它的变化对整体土地利用碳排放的波动起到重要作用。因此,通过采取相关措施限制建设用地的扩张在很大程度上有助于抑制土地利用碳排放的增长。

2.2.2 土地利用碳吸收 由表 7 可知,2005—2022

年,浙江省土地利用碳吸收呈现下降趋势,17 年间碳吸收量共计减少了 84.06 万 t,从 2005 年的 522.39 万 t 下降至 2022 年的 438.33 万 t,降幅为 16.09%。林地、草地、水域、未利用地等土地利用类型能够吸收碳,其中以林地为主要吸收源。2005—2022 年,浙江省林地、草地和水域的碳吸收能力均出现了下降趋势,与此同时,未利用地的碳吸收量则呈现上升趋势,但吸收量相对较小。

从各地级市(表 8)来看,浙江省每个地级市的碳吸收能力均有不同程度的降低,其中宁波市土地利用碳吸收减少量最大,2005—2022 年共计减少 5.29 万 t;舟山市土地利用碳吸收下降最为显著,碳吸收下降率达 22.50%,这一变化主要是由于该市具有较强碳吸收作用的林地面积持续缩减所致。

总体上,鉴于土地利用产生的大量碳排放,林地、草地等土地利用类型的碳吸收微不足道。仅仅维持或提升林地、草地、水域以及未利用地的碳吸收能力不足以有效实现碳减排。因此,在保护具有碳吸收能力的土地利用类型的同时,还需限制建设用地的无限扩张,以减少其造成的大量碳排放。

表 7 浙江省土地利用碳排放状况(万 t)

Table 7 Carbon emission status of land use in Zhejiang Province

土地利用类型	2005 年	2015 年	2022 年
耕地	117.15	114.37	103.85
林地	-501.13	-486.03	-429.78
草地	-0.01	0.00	0.00
水域	-21.25	-21.00	-8.54
建设用地	8 726.92	12 885.23	17 105.49
未利用地	0.00	0.00	0.00
碳吸收	-522.39	-507.04	-438.33
碳排放	8 844.07	12 999.61	17 209.34
净碳排放	8 321.69	12 492.57	16 771.01

表 8 2005—2022 年各地级市碳排放/吸收情况(万 t)

Table 8 Carbon emission/absorption situations of various cities from 2005 to 2022

地级市	2005 年			2015 年			2022 年		
	碳排放	碳吸收	净碳排放	碳排放	碳吸收	净碳排放	碳排放	碳吸收	净碳排放
杭州	1 947.18	81.03	1 866.15	3 024.39	79.24	2 945.16	4 197.33	78.39	4 118.94
宁波	1 614.95	33.8	1 581.15	2 487.44	32.21	2 455.23	3 496.66	28.51	3 468.15
温州	1 068.07	58.41	1 009.65	1 412.03	56.66	1 355.37	1 794.86	53.56	1 741.3
嘉兴	758.14	2.08	756.06	1 116.7	2.09	1 114.61	1 512.87	1.81	1 511.05
湖州	413.75	16.4	397.35	659.38	15.7	643.68	850	15.35	834.64
绍兴	957.27	32.79	924.48	1 317.49	31.63	1 285.86	1 626.34	30.86	1 595.48
金华	708.28	47.32	660.96	1 045.52	45.67	999.86	1 240.13	44.84	1 195.29
衢州	201.51	42.62	158.89	333.11	40.52	292.59	443.22	40.24	402.98
舟山	170.14	4.92	165.22	257.6	4.75	252.85	406.49	3.81	402.68
台州	807.74	43.04	764.7	1 035.66	42.08	993.58	1 247.11	39.32	1 207.79
丽水	184.63	104.61	80.03	298.2	102.76	195.44	394.34	101.61	292.73

2.2.3 土地利用净碳排放 表 7 的数据显示, 2005—2022 年, 浙江省土地利用净碳排放总体呈上升趋势, 从 2005 年的 8 321.69 万 t 增至 2022 年的 16 771.01 万 t, 净增长量 8 449.32 万 t, 增长率高达 101.53%。

从各地级市来看, 3 个研究时期净碳排放量的排名较为固定, 排在前 5 位的城市依次为杭州市、宁波市、温州市、绍兴市和嘉兴市; 同时, 2022 年土地利用净碳排放量较 2005 年增幅超过 100% 的地级市增幅由大到小依次为丽水市、衢州市、舟山市、杭州市、宁波市以及湖州市, 其他城市土地利用净碳排放增幅均在 50%~100%。其中, 杭州市是土地利用净碳排放变化量最大的城市, 其净碳排放量在 17 年间增长了 2 252.79 万 t, 在 2022 年达到 4 118.94 万 t; 丽水市在这 3 个研究时期的土地利用净碳排放量均在浙江省垫底, 但其 2022 年的土地利用净碳排放量较 2005 年的变化幅度最大, 达到 265.80%。

2.3 浙江省土地利用碳排放空间特征

2.3.1 空间分布特征 使用 ArcGIS 软件将浙江省各地市按土地利用净碳排放量划分为不同等级, 如图 3 所示。各市的净碳排放增长与全省趋势保持一致, 普遍呈现上升趋势。不同城市由于经济发展水平和自

然资源条件的差异, 导致土地利用净碳排放量在空间分布上存在显著的不均衡性。具体来看, 北部地区的净碳排放量普遍高于南部地区, 这可能与北部地区更集中的工业活动和城市化发展有关。此外, 北部地区可能拥有更多的建设用地和工业用地, 而南部地区则可能有更多的农业用地和森林, 后者作为一种碳汇, 有助于减少净碳排放量。因此, 浙江省内土地利用净碳排放的空间分布特征反映了经济发展和自然资源条件对碳排放的影响。具体来看, 经济较为发达的杭州和宁波两地, 其土地利用净碳排放量在 2005 年、2015 年和 2022 年 3 期均大于 1 500 万 t, 大幅领先于其他城市; 与北部相比, 南部的丽水市和衢州市经济发展较为滞后, 且这些区域的地形特征以丘陵和山地为主, 人口密度较低, 因此人类活动对环境的影响相对较小, 碳排放量也相应较低。此外, 这些地区拥有较高的森林覆盖率, 增强了其碳汇功能, 有效吸收了大气中的二氧化碳, 进一步降低了净碳排放量。在 3 个不同研究时期, 丽水市和衢州市的净碳排放量均未超过 500 万 t, 排名在省内较为靠后, 显示出这些地区在碳排放方面的低强度特征; 而在浙江北部的海岛舟山市, 由于其地域面积较小, 相应产生的碳排放也相对较少。

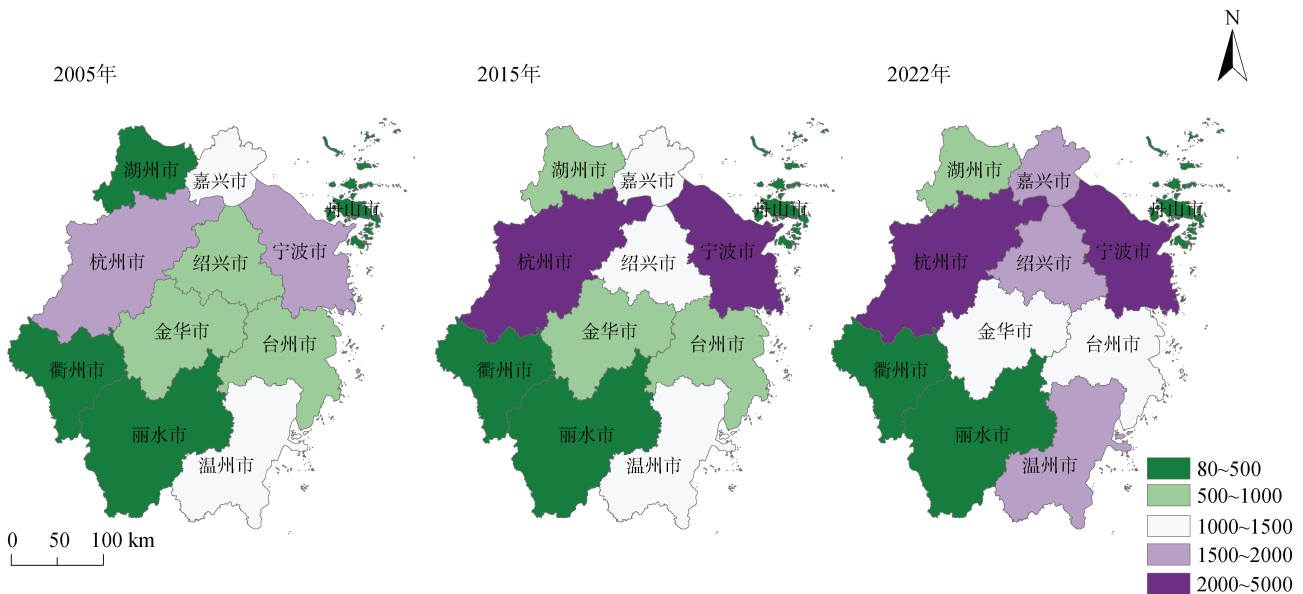


图 3 2005 年、2015 年及 2022 年浙江省土地利用净碳排放量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of net carbon emissions from land use in Zhejiang Province in 2005, 2015, and 2022

2.3.2 空间自相关特征 本文运用 ArcGIS 软件, 对浙江省 2005 年、2015 年、2022 年土地利用净碳排放全局 Moran's I 指数进行计算, 其空间集聚情况如表 9 所示。可见, Moran's I 指数持续呈现负的稳定趋势, 然而相关检验的 P 值和 z 值并未达到统计显著的

标准, 表明全省碳排放的总体空间关联性较弱。但 z 值的趋势表明, 未来可能会达到统计显著性。出现这一现象可能是因为北部杭州、宁波等市以工业为主导, 2022 年碳排放量占全省 44.7%; 而南部丽水、衢州以生态保护为主, 2022 年碳排放量仅占全省 4.9%。

表 9 2005—2022 年浙江省碳排放 Moran's I 指数
Table 9 Moran's I index of carbon emissions in Zhejiang Province from 2005 to 2022

年份	Moran's I 指数	z 值	P 值
2005	-0.196 26	-0.383 825	0.701 108
2015	-0.237 734	-0.564 026	0.572 737
2022	-0.289 026	-0.785 132	0.432 376

局部自相关分析结果(图 4)显示,浙江省大部分地级市土地利用净碳排放的空间分布上未显示出明显的相关性,且这种状况在研究期间保持稳定,没有发生显著变化。集聚区空间分布一致,每个时期均有两个集聚区,分别为高-高值集聚区和高-低集聚区。其中,高-高值集聚区为绍兴市,绍兴市位于净碳排放量最大的两个城市(杭州市和宁波市)之间,其经济活动与这两座城市高度关联,工业发展和城市化进程较快,导致建设用地规模不断扩大,进而推动碳排放量增加,区际空间差异程度小。并且绍兴的产业结构

以工业为主,尤其是纺织、化工等高能耗产业占比较大,这些产业的能源需求主要依赖于化石燃料,导致能源消费强度和碳排放强度较高。在研究期间,绍兴市的建设用地规模显著扩张,大量耕地和林地被转化为建设用地,这一过程不仅直接增加了碳排放,还减少了碳汇。

高-低集聚区位于浙江省南部的温州市。温州市碳排放水平高,而周边的丽水市和台州市经济发展水平相对较低,且以农业和生态保护为主,这些地区的碳排放量较低,与温州形成鲜明对比,区际空间差异程度也因此较大。温州的经济发展以制造业和民营经济为主,虽然经济活动较为活跃,但产业结构相对分散,缺乏大规模的工业集聚区。这种分散的产业结构使得能源利用效率较低,单位 GDP 的碳排放量较高。这种区域经济差异导致了温州在碳排放上的高-低集聚特征。

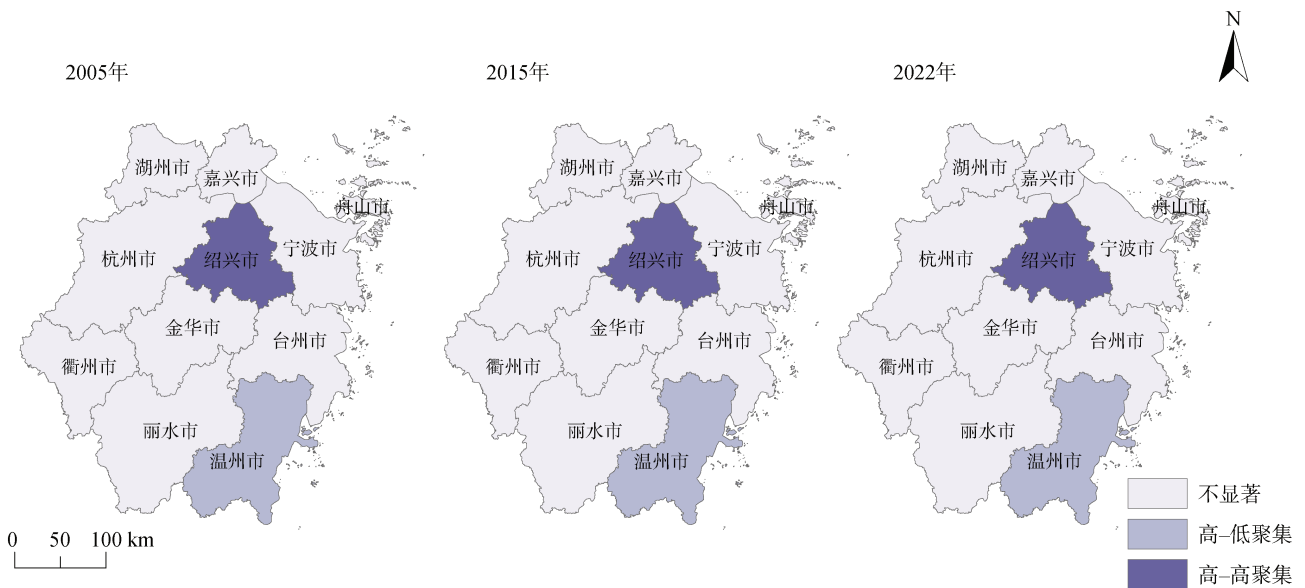


图 4 2005 年、2015 年、2022 年浙江省土地利用净碳排放 LISA 分布图

Fig. 4 LISA distribution map of net carbon emission from land use in Zhejiang Province in 2005, 2015, and 2022

2.4 浙江省土地利用碳排放经济效率时空变化

为了进一步探讨浙江省土地利用碳排放的经济效率,本文引入了土地利用碳排放经济效率指数(Economic efficiency index, EEI)进行分析。

$$EEI = \frac{G_i / E_i}{G / E} \quad (8)$$

式中:EEI 为碳排放经济效率指数;G、G_i分别为某年浙江省及其各地级市的 GDP;E、E_i分别为全省和各市的净碳排放量。

总体来看,大部分地级市的 EEI 值在研究期内有所下降,表明随着经济的快速发展,碳排放的增长

速度逐渐超过了经济增长速度(表 10)。这一现象与浙江省工业化进程的加速和城市化水平的提升密切相关。在 2005—2015 年,浙江省的经济增长迅速,年均增速高达 22.2%。然而,随着经济的快速增长,碳排放量也急剧增加。杭州市的 EEI 值从 2005 年的 1.023 下降至 2015 年的 0.983,表明其经济增长对碳排放的贡献率逐渐增加。类似地,宁波市的 EEI 值也从 0.995 下降至 0.939,反映出其经济发展过程中碳排放的增长速度超过了经济增长速度。2015—2022 年,浙江省的经济增速有所放缓,年均增速降至 11.27%,但是碳排放量的增长速度仍然较快。杭州市

的 EEI 值进一步下降至 0.978, 绍兴市的 EEI 值下降至 1 以下。这表明尽管经济增速放缓, 但碳排放的增长速度仍然较快, 反映出浙江省在经济发展过程中产生大量碳排放。

表 10 2005—2022 年浙江省各地级市土地利用碳排放经济效率指数

Table 10 Economic efficiency index of land use carbon emission of each city in Zhejiang Province from 2005 to 2022

地级市	2005 年	2015 年	2022 年
杭州	1.023	0.983	0.978
嘉兴	0.990	0.909	0.958
绍兴	1.016	1.001	0.990
台州	1.055	1.030	1.075
温州	1.016	0.982	0.991
湖州	1.041	0.933	0.991
金华	1.041	0.980	0.999
丽水	2.559	1.626	1.344
衢州	1.330	1.129	1.068
宁波	0.995	0.939	0.973
舟山	1.102	1.245	1.041

从空间上来看, 丽水市和衢州市的 EEI 值在 2005—2022 年间始终保持在较高水平。丽水市的 EEI 值虽然从 2005 年的 2.559 下降至 2022 年的 1.344, 但仍高于 1, 表明其经济贡献率仍然高于碳排放贡献率。这一现象可能与这些地区的产业结构以生态保护和农业为主, 碳排放量相对较低有关。此外, 这些地

区的森林覆盖率较高, 增强了其碳汇功能, 进一步降低了净碳排放量。然而全省从 2005 年的 2 个地级市(嘉兴市和宁波市)的 EEI 值小于 1, 发展至 2022 年的 7 个地级市的 EEI 值小于 1, 说明浙江省总体的经济发展中伴随着大量的碳排放。

2.5 浙江省土地利用碳排放影响因素

2.5.1 不同时期土地利用碳排放影响因素 总体来看, 2005—2022 年浙江省土地利用碳排放量的增长与若干关键因素紧密相连(表 11)。其中, 经济发展水平、能源消费强度、能源消费密度、建设用地规模及人口规模构成了主要的推动力。按影响力排序, 经济发展水平影响最大, 其次依次是能源消费强度、建设用地规模、能源消费密度和人口规模。经济增长往往伴随着能源消耗的增加, 特别是在工业与交通领域, 这一趋势直接促成了碳排放量的增长。经济增长对土地利用碳排放增长的贡献率尤为突出, 凸显了其在碳排放增长中的主导作用。这一点揭示了经济增长与能源消耗之间的密切联系, 特别是在能源密集型产业中。能源消费强度和密度的提升, 是推动碳排放增长的另一重要因素。随着工业化和城市化的深入发展, 能源需求不断攀升, 特别是在城市区域, 能源消耗密度的增加直接推动了碳排放量的上升。建设用地规模的扩张, 特别是在工业和商业用途上的增加, 不仅改变了土地的利用类型, 也加剧了碳排放问题, 从而直接体现了土地利用变化对碳排放的影响。

表 11 2005—2022 年浙江省土地利用碳排放影响因素分解结果(万 t)

Table 11 Decomposition results of influencing factors on land use carbon emissions in Zhejiang Province from 2005 to 2022

影响因素	2005—2015 年	2015—2022 年	2005—2022 年	2005—2022 年贡献率(%)
碳排放强度 ΔC_f	-7 836.69	-4 172.09	-12 008.78	-142.13
能源消费强度 ΔC_q	7 826.33	3 834.95	11 661.28	138.01
能源消费密度 ΔC_g	-211.12	4 013.70	3 802.59	45.00
建设用地规模 ΔC_l	4 392.37	601.87	4 994.24	59.11
土地利用经济效率 ΔC_d	-12 007.58	-8 450.52	-20 458.10	-242.13
经济发展水平 ΔC_e	10 768.35	6 160.78	16 929.12	200.36
人口规模 ΔC_p	1 239.23	2 289.75	3 528.98	41.77
总和	4 170.88	4 278.44	8 449.32	100.00

与此同时, 碳排放强度和土地利用经济效率的提升在一定程度上对碳排放增长起到了抑制作用。碳排放强度的下降反映出每单位 GDP 的碳排放量有所降低, 这与能源效率的提升、能源结构的优化以及清洁能源技术的应用密切相关。土地利用经济效率的提升则表明土地资源的使用变得更加集约和高效, 这有助于降低单位产出的碳排放量。在抑制土地利用碳排放增长的负面因素中, 土地利用经济效率和碳

排放强度起到了关键作用, 有效遏制了碳排放量的上升。具体来说, 土地利用经济效率对碳吸收量的贡献值为 20 458.10 万 t, 贡献率为 -242.13%; 而碳排放强度对碳吸收量的贡献值为 12 008.78 万 t, 贡献率为 -142.13%。

但不同时期, 土地利用碳排放各影响因素的表现不同。2005—2015 年, 经济发展水平、能源消费强度、建设用地规模和人口规模是推动浙江省土地利用

碳排放增长的主要正向因素,其对碳排放的贡献值分别为 10 768.35、7 826.33、4 392.37、1 239.23 万 t。经济发展水平的提升直接增加了能源消耗,尤其是在工业和交通领域,这导致了碳排放量的显著增加。能源消费强度的提高反映了单位能源消耗所产生的经济产出增加,这可能与能源利用效率的提高有关,但也意味着更多的能源被消耗,从而增加了碳排放。建设用地规模的扩大,尤其是工业和商业用地的增加,改变了土地利用类型,导致了碳排放的增加。人口规模的增长也对碳排放产生了影响,尤其是在城市化进程中,人口向城市集中,增加了对能源和土地的需求,从而增加了碳排放量。

相反,碳排放强度、能源消费密度和土地利用经济效率对碳排放的增长显示出负向作用。在碳吸收方面,土地利用经济效率贡献值最大,为 12 007.58 万 t,贡献率为 -287.89%;碳排放强度对碳吸收的贡献值为 7 836.69 万 t,贡献率为 -187.89%;能源消费密度对碳吸收的贡献值最小,为 211.12 万 t,贡献率为 -5.06%。在碳吸收方面,土地利用经济效率的贡献值最大,这表明通过提高土地利用效率,可以有效减少碳排放。碳排放强度和能源消费密度的负贡献值也表明,通过优化能源结构和提高能源利用效率,可以减少碳排放。这些负向因素的分析结果表明,在经济发展的同时,通过提高能源使用效率和优化土地利用结构,可以有效控制碳排放量的增加。

与上一时期相比,2015—2022 年能源消费密度对土地利用碳排放增长的作用由抑制转为推动,其余因素则保持不变。这可能与能源消耗模式的变化和能源效率的提升有关。这种转变表明,随着经济的发展和能源需求的增加,能源消费密度对碳排放的贡献变得更加显著。在所有正向影响因子中,经济发展水平的贡献值仍是最大,贡献值为 6 160.78 万 t,贡献率为 144.00%,但相比之前有所降低,这反映了浙江省在推动经济增长的同时,也在努力提高能源效率和优化产业结构,但经济活动的增加仍然是碳排放增长的主要驱动力。能源消费密度的推动作用显著增强,成为仅次于经济发展水平的第二大正向因素,贡献值为 4 013.70 万 t,贡献率为 93.81%,这可能与城市化进程中能源使用的集中和能源消费模式的变化有关,尤其是在城市地区,能源消费密度的增加直接导致了碳排放量的增加。能源消费强度、建设用地规模的正向作用降幅较大,贡献值分别降至 3 834.95 万 t 和 601.87 万 t,贡献率分别为 89.63% 和 14.07%。能源消费强度的降低表明,尽管能源消费总量在增加,但

单位能源消费所产生的经济产出在提高,这反映了能源效率的提升。建设用地规模的降低则可能与土地利用规划和管理的优化有关,减少了对土地资源的过度开发。人口规模的正向作用有所提升,贡献值为 2 289.75 万 t,贡献率达到 53.52%。人口规模的增加不仅增加了对能源的需求,也加剧了土地资源的压力,从而对碳排放产生了影响。在负向因子中,土地利用经济效率和碳排放强度的抑制作用均在减弱,贡献值分别降至 8 450.52 万 t 和 4 172.09 万 t,贡献率分别为 -197.51% 和 -97.51%。这意味着尽管这些因素在一定程度上有助于减少碳排放,但其效果正在逐渐降低。

2.5.2 各因素对土地利用碳排放的影响 由上文可知,不同研究时段,土地利用碳排放量有所差异,各影响因子对碳排放的作用程度也不尽相同。

土地利用碳排放强度对碳排放起抑制作用,2005—2015 年、2015—2022 年两个时期抑制碳排放增长的贡献值分别为 7 836.69 万 t 和 4 172.09 万 t,共计减少碳排放 12 008.78 万 t。浙江省的碳排放强度呈现下降趋势,这一现象表明该地区政策推动的效果显著。浙江省积极响应国家关于碳达峰和碳中和的目标,通过制定和实施具体的政策措施,推动了碳排放强度的降低。能源配置与产业结构的持续优化调整、技术创新的推动在无形中增强了控制土地利用过程中碳排放的能力。碳排放强度的降低意味着在创造相同经济产出的情况下,碳排放量减少,这通常与能源使用效率的提高和清洁能源技术的应用有关。浙江省在能源结构调整和产业升级方面采取了积极措施,减少了对高碳能源的依赖,增加了清洁能源的使用比例,从而有效降低了碳排放强度。此外,通过推广节能减排技术和提高能源利用效率,浙江省在经济发展的同时,实现了碳排放强度的下降,为实现更为绿色的发展模式提供了关键驱动力。

在研究期内,能源消费强度始终对浙江省碳排放量的增长起到了显著的正向推动作用,成为仅次于经济发展水平的第二大影响因素,2005—2015 年、2015—2022 年贡献率分别达到 189.64%、89.63%,在 2005—2022 年浙江省土地利用碳排放量中累计贡献 11 661.28 万 t。从本文所采用的能源消费强度计算公式来看,它指的是单位能源消耗所承载的 GDP,其数值与单位 GDP 所消耗的能源量互为倒数。因此,若能源消费强度数值增大,则单位 GDP 所消耗的能源量减少,即能源消费效率提高。浙江省在能源消费强度上的持续增长,表明浙江省在追求低

碳发展转型的过程中,对能源结构和产业结构进行了有效的调整。通过优化能源结构和提高能源利用效率,浙江省成功降低了单位 GDP 的能耗,这是其能源消费强度提升的直接结果。这种转变不仅减少了对传统高碳能源的依赖,还促进了清洁能源和可再生能源的使用,从而在推动经济增长的同时,有效控制了碳排放量的增长。浙江省的这一成就,是其在能源效率提升、产业结构优化和技术进步等方面共同努力的结果,为实现可持续发展目标奠定了坚实的基础。未来,政府可以制定政策,鼓励和支持企业和居民采用清洁能源替代传统的化石能源。通过提供补贴、减免税收等措施,促进清洁能源在能源消费中的比例逐渐增加。其次,还应提高能源利用效率,加强政策引领,完善碳核算方法体系,促进碳减排监测管理^[31],推广节能技术和设备,优化能源利用结构,降低单位能源消耗,鼓励企业采取节能措施,提高生产过程的能效,减少能源浪费。

能源消费密度在研究期内对土地利用碳排放的影响出现了显著的变化。2005—2015 年,能源消费密度对碳排放起到了抑制作用,尽管这一效应相对较弱(吸收碳排放量 211.12 万 t),但仍有助于减少碳排放量。然而,2015—2022 年,该效应发生了转变,成为正向效应,造成土地利用碳排放增加 4 013.7 万 t。纵观整个研究期,能源消费密度呈现出显著的正向效应,其贡献率达到 45.00%,表明其在碳排放增长中扮演了重要角色。能源消费密度代表单位建设用地所承载的能源消耗量,能源消费密度的降低能够有效抑制碳排放量的增长。但社会经济发展需要更多的能源供给提供动力,而建设用地规模并未无限制地扩张。因此,浙江省 2022 年能源消费密度相比 2005 年和 2015 年有所提高。这一现象表明在城市化和工业化进程中,能源消费模式和土地利用规划对碳排放具有重要影响。为了实现可持续发展,需要在保障经济增长的同时,通过提高能源利用效率、优化能源结构和合理规划土地利用,来控制能源消费密度的增长,从而减少碳排放。浙江省的案例为其他地区提供了宝贵的经验,即在经济发展与环境保护之间寻求平衡,通过综合措施实现低碳发展。

在研究期内,建设用地规模对浙江省土地利用碳排放的影响呈现出明显的正向拉动作用。2005—2015 年,随着浙江省经济的快速发展,对建设用地的需求量不断增加,迅速扩大的建设用地规模使得碳排放增长 4 392.27 万 t,贡献率达到 105.31%。这一阶段,建设用地的扩张成为碳排放增长的主要驱动力之

一,反映了经济增长与土地利用之间的紧密联系。2015—2022 年,浙江省建设用地扩张速度放缓,对碳排放的正向拉动效应有所降低,贡献率降至 14.07%。这一变化趋势表明,随着建设用地增量的减少,其对土地利用碳排放增长的影响也在减弱。建设用地增量的减少对土地利用碳排放增量的影响呈现出减弱的趋势,因此,通过制定和执行严格的土地利用计划,合理管控建设用地增长,控制城市建设用地总量,避免无限制扩张,对于有效削减土地利用过程中的碳排放具有重要意义。对于闲置的建设用地,土地管理部门应严格监管,同时应充分利用未利用的土地资源,例如在未利用的土地上种植绿色植被,使其能够通过光合作用吸收大气中的二氧化碳。此外,在确保粮食安全的同时,应适当推行退耕还林政策,扩大碳汇面积,增强土地的碳吸收能力。

土地利用经济效率在抑制碳排放方面发挥了关键作用,对减少土地利用过程中的碳排放起到了显著的负向影响。在 2005—2015 年和 2015—2022 年两个阶段,土地利用经济效率的负向效应贡献率分别为 -287.89%、-197.57%。总体来看,在这连续的两个阶段共同作用下,总计减少了浙江省高达 20 458.1 万 t 的土地利用碳排放,约占碳吸收总量的 2/3,显示出土地利用经济效率在实现碳减排中的实质性意义。这一显著的减排效果表明,通过优化土地资源配和提高单位土地面积的经济效益,可以有效降低土地利用的碳排放总量。提高土地利用经济效率不仅减少了单位 GDP 的用地需求,而且反映了浙江省经济发展质量和水平的提升。这种效率的提升意味着在相同或更少的土地资源消耗下,经济产出得以增加,从而在推动经济增长的同时,减少了对环境的影响。由此可见,优化土地资源的集约利用,提升单位土地面积的经济效益对减少土地利用碳排放总量效果明显,对于构建低碳社会和实现绿色增长具有深远的影响。若能提升土地利用经济效率,这不仅反映出单位 GDP 的用地需求有所降低,还反映出该地区经济发展程度与质量有了较大的改善。

经济发展水平对浙江省土地利用碳排放起到了显著促进作用,2005—2015 年、2015—2022 年两个阶段经济增长对土地利用碳排放增加的贡献率分别达 258.18%、144%,对浙江省 17 年间土地利用碳排放的增长贡献了 16 929.12 万 t,占正向拉动效应的 70.58%,是引起土地利用碳排放增加的主要推动因素。在 2005—2015 年的 10 年间,浙江省经济发展迅速,年均增速高达 22.2%,在此影响下,浙江省的碳

排放量急剧增长；而在 2015—2022 年的 7 年间，浙江省经济增速较前一阶段有所放缓，年均增速由 22.2% 降至 11.27%，由经济发展造成碳排放量的增长也趋于减速。这一变化趋势表明，在研究期间，浙江省社会经济的增长在很大程度上依赖于能源消耗，进而导致了碳排放量的持续增加。随着经济增速的放缓，碳排放量的增长速度也有所下降，这表明经济增长与能源消耗之间存在密切的关联性。为了应对这一挑战，浙江省不应仅仅通过减少第一、第二产业的产值，而应依据经济发展水平和人口规模来调整产业规模，确保其他产业能够持续发展。其次，浙江省第二产业比例仍然较高，应逐步淘汰高耗能、高污染企业，改造升级落后生产技术，引导企业产业升级，发展绿色低碳产业，走向新型工业化道路。最后，在未来的发展蓝图中，浙江省需要着力提升物流、信息技术、金融、科技服务、文化教育等第三产业在国内生产总值中的占比，挖掘现有经济潜力，推动产业升级，使产业结构向第三产业倾斜。

人口规模对碳排放的影响作用从 2005—2015 年的 1 239.23 万 t 上升至 2015—2022 年间的 2 289.75 万 t，提升较为明显，作用不容忽视。浙江省是中国的经济大省，也正是由于其经济发展快，就业机会多，社会环境优良，每年吸引大量劳动力进入，年均人口净流入达数十万人。浙江省庞大的人口规模对其生态环境造成了较大压力，也加速了城市化进程，随之增加了对能源的需求，进而推动了土地利用碳排放量的增长。人口规模的增加直接关联到能源消耗和碳排放的增加。随着人口的增长，人们对住房、交通和公共服务的需求也随之上升，这些需求的满足往往伴随着能源的消耗和碳排放的增加。特别是在城市地区，人口密度的增加导致了能源消耗的集中，从而加剧了碳排放问题。但是，与能源消费强度和经济发展水平所造成的正向推动效应相比，人口因素对碳排放量的影响较为有限。尽管如此，人口规模的增长仍然是影响碳排放的重要因素之一。为了有效控制和减少碳排放，浙江省政府应重视社会低碳环保理念的建设和认可，通过开展宣传教育活动，加强绿色节能宣传，培养人们的绿色环保意识，利用各种形式和渠道向社会公众传播低碳生活方式和消费模式，提高公众参与度，充分发挥社会共治的优势。此外，推动公共交通和低碳出行，支持和鼓励公共交通建设，提升公共交通服务质量和覆盖范围，鼓励步行、骑行等低碳出行方式，减少私人汽车的使用，也能一定程度上减少碳排放。

3 结论

1) 林地和耕地是浙江省主要的土地利用类型，研究期内浙江省土地利用变化活跃，地类间转换过程丰富，主要表现为建设用地的转入和耕地与林地的转出。

2) 2005—2022 年，浙江省净碳排放量增加迅速，不同地类碳排放差异较大，建设用地产生的碳排放是主要来源。

3) 浙江北部地区净碳排放量明显高于南部地区，各地市净碳排放量差异明显，局部上存在一定的聚集特征，主要表现为以绍兴为代表的“高-高聚集区”和以温州为代表的“高-低聚集区”。

4) 能源消费强度、能源消费密度、建设用地规模、经济发展水平和人口规模 5 种因素对浙江省净碳排放量的增加具有促进作用，碳排放强度和土地利用经济效率则对浙江省净碳排放起到了抑制作用。

参考文献：

- [1] 季国军, 纪洪亭, 程琨, 等. 江苏水稻种植方式碳足迹和经济效益综合评价[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1042-1054.
- [2] IPCC. Climate change 2023: Synthesis report [R/OL]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
- [3] 陆春晖, 袁佳双, 黄磊, 等. 从 IPCC 看全球盘点中的关键科学问题及其对中国的启示[J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(6): 736-746.
- [4] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[R/OL]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [5] Houghton R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy[J]. Climate Policy, 2002, 2(1): 71-88.
- [6] 夏龙龙, 遆超普, 朱春梧, 等. 中国粮食生产的温室气体减排策略以及碳中和实现路径[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1277-1288.
- [7] 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.
- [8] 杨坤, 胡馨, 石越. 基于 RS 和 GIS 的土地利用变化碳排放现状及预测分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(7): 137-141.
- [9] 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.
- [10] 陈靖松, 张建军, 李金龙, 等. 京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2024, 44(6): 2270-2283.
- [11] 谭超. 燃煤电厂碳排放监测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [12] 苟鹏, 谭铃, 卜兴兵. 工业污染源排放总量核算分析[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(8): 179-181.

- [13] 肖磊, 孙贵艳. 基于土地利用变化的重庆碳排放时空格局研究[J]. 国土与自然资源研究, 2023(3): 28–32.
- [14] 赵先超, 田一豆, 张潇湘. 长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 215–225.
- [15] Akbostancı E, Tunç G İ, Türüt-Aşık S. Drivers of fuel based carbon dioxide emissions: The case of Turkey[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2599–2608.
- [16] 邹秀清, 孙学成, 葛天越, 等. 长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 548–557.
- [17] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [18] 徐勇, 赵桑, 段健. 国土空间规划的土地利用分类方案研究[J]. 地理研究, 2019, 38(10): 2388–2401.
- [19] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴(2005, 2015, 2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005, 2015, 2022.
- [20] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2005, 2015, 2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005, 2015, 2022.
- [21] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>.
- [22] 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.
- [23] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [24] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学(生命科学), 2010, 40(7): 566–576.
- [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.
- [26] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S2): 102–107.
- [27] 陶勤, 王世航, 徐胜祥, 等. 基于碳承载力对河南省能源消费碳排放及其驱动因素的研究[J]. 土壤, 2024, 56(2): 439–447.
- [28] 张江艳. 基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 1888–1897.
- [29] 朱巧娴, 梅昀, 陈银蓉, 等. 基于碳排放测算的湖北省土地利用结构效率的 DEA 模型分析与空间分异研究[J]. 经济地理, 2015, 35(12): 176–184.
- [30] 邱冬冬, 毛德华. 长株潭城市群中小尺度下的土地利用碳排放强度时空分布格局分析[J]. 生态科学, 2025, 44(5): 163–174.
- [31] 肖萌, 刘鹏, 孟豪, 等. 基于绿色可持续理念的污染场地修复碳足迹研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(4): 708–717.

(责任编辑: 于 飞)