

# 第一批低碳试点城市土地利用碳排放的 脱钩效应与影响因素

谢甜甜, 吴雅, 黄棕翰, 李贤瑶, 刘九畅

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** [目的] 探究土地利用碳排放与经济的脱钩关系及其影响因素, 为协调城市土地利用碳减排与经济发展的关系提供理论依据。[方法] 以8个中国第一批低碳试点城市(天津、重庆、深圳、厦门、杭州、南昌、贵阳、保定)为研究区, 分析2005—2020年试点城市土地利用碳排放的演变趋势, 运用Tapio脱钩模型刻画土地利用净碳排放与经济发展的脱钩关系, 采用LMDI分解法剖析土地利用净碳排放的影响因素。[结果] ①2005—2020年第一批低碳试点城市整体上土地利用净碳排放量呈现逐年快速增长的趋势, 由2005年的 $7.74 \times 10^8$  t增长至2020年的 $1.80 \times 10^9$  t。②试点城市整体脱钩指数在研究期内逐步减小, 表明经济发展水平的提高对于土地利用碳排放的依赖性呈下降趋势。2015—2020年, 天津市土地利用碳排放与经济呈现理想的强脱钩状态, 而保定市则呈现不理想的扩张性负脱钩, 其余6个城市表现为弱脱钩。由此反映出协调试点城市土地利用碳排放与经济的关系仍有较大的发展空间。③影响土地利用碳排放的正向因素依次为: 经济发展水平>土地利用结构>人口密度>土地总面积; 负向因素依次为: 土地利用经济效率>地类碳排放强度。[结论] 试点城市经济与土地利用碳排放的脱钩状态区域差异较大, 且土地利用碳排放的影响因素也有所不同, 建议结合影响因素制定差异化的低碳经济发展方案。

**关键词:** 土地利用碳排放; Tapio脱钩模型; LMDI分解法; 第一批试点城市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0294-10

中图分类号: F301.2, X24

**文献参数:** 谢甜甜, 吴雅, 黄棕翰, 等. 第一批低碳试点城市土地利用碳排放的脱钩效应与影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 294-303. Xie Tiantian, Wu Ya, Huang Zonghan, et al. Decoupling effects and influencing factors of land-use carbon emissions in first batch of low-carbon pilot cities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 294-303. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.010; CSTR: 32312.14. stbctb. 2025.04.010.

## Decoupling effects and influencing factors of land-use carbon emissions in first batch of low-carbon pilot cities

Xie Tiantian, Wu Ya, Huang Zonghan, Li Xian Yao, Liu Jiuchang

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** [Objective] The decoupling relationship between land-use carbon emissions and economic development, and the influencing factors were explored, in order to provide a theoretical basis for better aligning urban carbon reduction strategies with economic growth in the first batch of low-carbon pilot cities in China. [Methods] Taking the first batch of 8 low-carbon pilot cities (namely Tianjin, Chongqing, Shenzhen, Xiamen, Hangzhou, Nanchang, Guiyang and Baoding cities) as the study area, the evolution trend of land-use carbon emissions in the pilot cities from 2005 to 2020 were analyzed. Based on the Tapio decoupling model, the decoupling relationship between land-use net carbon emissions and economic development was explored, and the influencing factors of net carbon emissions from land use were investigated by employing the logarithmic mean division index (LMDI) method. [Results] ① The net carbon emissions of the first batch of low-carbon pilot cities

收稿日期: 2025-01-03

修回日期: 2025-03-24

采用日期: 2025-03-25

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“‘低碳’与‘集约’双重约束下我国城市建设用地利用效率研究: 测度与优化”(72004187); 国家级大学生创新创业训练计划项目“双碳背景下土地利用碳达峰与碳中和情景预测研究—以低碳试点城市为例”(202310635118); 重庆市大学生创新创业训练计划项目“土地利用视角下西南地区城市碳排放时空演变与影响因素研究”(S202410635120)

第一作者: 谢甜甜(2001—), 女(汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 研究方向为土地经济与政策研究。Email: crescent77@163.com。

通信作者: 吴雅(1990—), 女(汉族), 湖北省天门市人, 博士, 副教授, 主要从事低碳城市、可持续城镇化的研究。Email: msyu@swu.edu.cn。

during 2005—2020 showed a rapid growth trend, increasing from  $7.74 \times 10^8$  tons in 2005 to  $1.80 \times 10^9$  tons in 2020. ② The overall decoupling index of the pilot cities gradually decreased during the study period, indicating that the dependence of economic development on land-use carbon emissions was on a downward trend. During the period from 2015 to 2020, the land-use carbon emissions of Tianjin City presented a desirable strong decoupling state from the economic development, while Baoding City showed an undesirable expansive negative decoupling state, and the remaining six cities showed a weak decoupling state. This reflected that there were still considerable potential for improvement in coordinating the relationship between land-use carbon emissions and economic development in the pilot cities. ③ Positive factors affecting land-use carbon emissions in descending order were: economic development level > land use structure > population density > total land area; negative factors were ranked as follows: economic efficiency of land use > carbon emission intensity of land type. [Conclusion] The decoupling status and the influencing factors of land-use carbon emissions in pilot cities varied significantly across regions, thus regionally differentiated low-carbon economic development strategies should be formulated in combination with the influencing factors.

**Keywords: land-use carbon emissions; Tapio decoupling model; logarithmic mean divisia index method (LMDI); first batch of pilot cities**

温室气体排放主导的气候变暖导致极端天气频发,对人类的生产、生活和生态环境带来严峻挑战。2020年9月,中国在第75届联合国大会一般性辩论上提出,中国碳排放量力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。土地作为社会经济活动的空间载体和生态系统碳汇功能的自然载体,其低碳利用是推进“双碳”目标的重要环节。已有文献表明,土地利用变化是全球第二大碳排放源,其直接碳排放占全球人为温室气体排放总量的27%<sup>[1]</sup>。

城市经济发展和快速城镇化带来的土地利用变化是拉动碳排放和影响生态系统碳循环的重要原因。一方面,城镇化的发展伴随着建设用地的扩张,由此拉动了工业生产、能源交通和居住生活的能源需求,带来了碳排放的急剧攀升;另一方面,建设用地的扩张会导致林地、草地等生态用地面积减少,从而显著降低区域碳汇能力<sup>[2]</sup>。因此,如何在发展经济的同时降低土地利用碳排放,也就是厘清经济发展与土地利用碳排放的脱钩关系,剖析土地利用碳排放影响因素,对于实现土地资源优化配置和推进低碳经济具有重要的现实意义。

针对土地利用碳排放与经济发展之间的关系,现有文献主要聚焦于经济对土地利用碳排放的潜在影响<sup>[3]</sup>,以及土地利用碳排放与经济的环境库兹涅茨曲线关系<sup>[4]</sup>、因果关系<sup>[5]</sup>、脱钩关系等<sup>[6-7]</sup>。其中,“脱钩(decoupling)”源自物理学,指消除系统或变量间的相互作用。20世纪初,经济合作与发展组织(OECD)首次引入这一概念探讨经济增长与资源消耗及环境污染之间关系的阻断机制,为资源环境领域的脱钩理论奠定了重要基础。脱钩方法可以根据研究目的需要,构建变量间变化率的对比关系,反映

变量间的关联性减弱或消失<sup>[8]</sup>。相较于环境库兹涅茨曲线关系和因果关系,脱钩关系计算简便,且能逐年反映研究对象关系的演变态势<sup>[7]</sup>,已被广泛应用于耕地碳排放、建设用地碳排放与经济发展的关系研究。目前也有学者围绕土地利用碳排放与经济的脱钩关系展开研究,但其研究对象主要涉及单个城市、单个省份、城市圈和城市群等<sup>[6,9-10]</sup>,鲜有研究以地理不相邻的国家低碳试点城市为对象展开脱钩分析。此外,现有土地利用碳排放与经济的脱钩关系研究大多仅着重刻画脱钩演变态势,而未进一步剖析土地利用碳排放影响因素,以探究推进二者脱钩的具体手段。事实上,影响因素剖析是降低土地利用碳排放的重要环节,亦受到学者的广泛关注,现有研究主要采用对数平均迪氏指数分解法(logarithmic mean divisia index method, LMDI method)展开土地利用碳排放影响因素分析。例如,基于LMDI法,有学者测度了土地利用碳排放强度、土地利用结构、人均GDP、人口数量、单位GDP用地强度等因素对土地利用碳排放的影响<sup>[11-12]</sup>。孙彩凤等<sup>[13]</sup>、李玉玲等<sup>[6]</sup>从能源结构和能源效率、土地利用结构方面探讨了土地利用碳排放的影响因素。值得注意的是,不同土地利用结构会形成不同的用地模式,从而产生不同程度的土地利用碳排放<sup>[6]</sup>,而鲜有研究综合考虑土地利用结构、总面积、经济效率等因素对土地利用碳排放的影响。

综上所述,土地利用碳排放与经济发展关系的相关研究已取得了丰硕成果,但尚未有研究以国家低碳试点城市为对象展开土地利用碳排放与经济的脱钩分析,且鲜有研究聚焦土地利用特征(如土地利用结构、规模、经济效率等)探讨土地利用碳排放影



(2) 土地利用碳排放量测算。化肥、农膜、机械以及灌溉使用过程中产生二氧化碳,耕地碳排放量计算公式为

$$C_b = \sum C_j = \sum B_j \delta_j \quad (4)$$

式中: $C_b$ 为耕地总碳排放量(t); $C_j$ 为耕地内不同碳排放类型投入和消耗的总碳排放量(t); $B_j$ 为第 $j$ 种投入和消耗的碳排放量(t); $\delta_j$ 为第 $j$ 种投入和消耗碳源类型的碳排放系数。根据前人研究<sup>[20]</sup>,农用地各指标碳排放转换系数如表2所示。

表2 农用地各指标碳排放转换系数

Table 2 Conversion coefficients of carbon emissions for agricultural land index

指标	化肥使用折纯量	农作物播种面积	农业机械总动力	有效灌溉面积	农用塑料薄膜使用量
碳排放转换系数	895.6 kg/t	16.47 kg/hm <sup>2</sup>	0.18 kg/kW	266.48 kg/hm <sup>2</sup>	5.18 kg/kg

2.2.2 Tapio 模型

Tapio<sup>[21]</sup>于2005年为了研究欧盟交通运输二氧化碳排放量与GDP的关联,构建了相应的脱钩模型,将其细化为8种状态。参考Tapio模型及相关研究<sup>[5,22]</sup>,本文选取土地利用净碳排放和GDP两个指标,脱钩指数的计算公式为

$$\omega = \frac{CP}{DP} = \frac{\Delta C/C_n}{\Delta GDP/GDP_n} \quad (7)$$

式中: $\omega$ 是土地利用与经济脱钩弹性指数; $CP$ 是一定

能源消耗是建设用地碳排放的主要来源,建设用地碳排放量计算公式为

$$C_d = E_a \times \alpha \quad (5)$$

式中: $C_d$ 为建设用地碳排放量(t); $E_a$ 为用标准煤折算的能源消耗总量(t); $\alpha$ 为标准煤的碳排放系数。

(3) 土地利用净碳排放测算。计算不同类型土地利用碳吸收量、耕地和建设用地碳排放量后,土地利用净碳排放量 $C$ 的计算公式为

$$C = C_a + C_b + C_d \quad (6)$$

时期内区域土地利用碳排放变化率; $\Delta C$ 是前一阶段与该阶段土地利用碳排放差值; $C_n$ 是该阶段土地利用所导致的净碳排放总量; $DP$ 是一定时期内区域生产总值变化率; $\Delta GDP$ 是前一阶段与该阶段地区生产总值差值; $GDP_n$ 是该阶段的地区生产总值。

根据脱钩弹性指数范围、碳排放变化率以及GDP变化率,将脱钩状态分为强脱钩、弱脱钩、衰退性脱钩、扩张连接、衰退连接、强负脱钩、弱负脱钩、扩张性负脱钩8种脱钩类型<sup>[23]</sup>(如表3所示)。

表3 脱钩状态类型

Table 3 Types of decoupling status

脱钩状态	脱钩类型	碳排放增长	GDP增长	脱钩弹性指数( $\omega$ )	指数含义
脱钩	强脱钩	<0	>0	$\omega < 0$	最理想状态,经济与碳排放间的关联性消失
	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq \omega < 0.8$	较理想,碳排放上升的速度小于经济增长的速度
	衰退性脱钩	<0	<0	$\omega > 1.2$	不理想,碳排放下降的速度大于经济衰退的速度
连接	扩张连接	>0	>0	$0.8 \leq \omega \leq 1.2$	不理想,碳排放上升的速度大于或相当于经济增长的速度
	衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq \omega \leq 1.2$	不理想,碳排放下降的速度小于或相当于经济衰退的速度
负脱钩	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq \omega < 0.8$	不理想,碳排放下降的速度小于经济衰退的速度
	强负脱钩	>0	<0	$\omega < 0$	最不理想状态,经济负增长而碳排放持续增加
	扩张性负脱钩	>0	>0	$\omega > 1.2$	不理想,碳排放上升的速度大于经济增长速度

2.2.3 LMDI分解法

本文利用LMDI分解土地利用碳排放影响因素,其具体表达式为

$$C = \sum \frac{B_i}{A_i} \times \frac{A_i}{S} \times \frac{GDP}{P} \times \frac{P}{S} \times \frac{S}{GDP} \times r \quad (8)$$

$$S = k \times l \times m \times e \times q \times r \quad (9)$$

式中: $B_i$ 表示各土地利用类型碳排放量; $S$ 表示各试点城市土地总面积; $P$ 表示各试点城市常住人口数量。 $k=B_i/A_i$ ,即各土地利用类型碳排放量与其面积之比,表征地类碳排放强度因素; $l=A_i/s$ ,即各地类

面积占土地利用总面积的比例,表征土地利用结构因素; $m=GDP/P$ ,即人均地区生产总值,表征经济发展水平因素; $e=P/S$ ,即单位面积土地所承载人口数量,表征人口密度因素; $q=S/GDP$ ,即生产单位GDP所需要的土地面积,表征土地利用经济效率因素; $r=S$ ,即各试点城市土地总面积,表征土地总面积因素。

采用LMDI分解法加法形式对土地利用碳排放效应 $\Delta C$ 进行因素分解,其具体表达式为:

$$\Delta C = \Delta C_k + \Delta C_l + \Delta C_m + \Delta C_e + \Delta C_q + \Delta C_r \quad (10)$$

式中： $\Delta C_k, \Delta C_l, \Delta C_m, \Delta C_e, \Delta C_q, \Delta C_r$ 分别表示地类碳排放强度、土地利用结构等不同因素对于试点城市土地利用碳排放的影响，以 $\Delta C_k$ 为例，各因素贡献值计算公式为

$$\Delta C_k = \sum \frac{C_{it} - C_{i0}}{\ln C_{it} - \ln C_{i0}} \times \ln \frac{k_t}{k_0} \quad (11)$$

式中： $C_{i0}$ 为第*i*种土地利用类型基期的土地利用碳排放量； $C_{it}$ 为第*i*种土地利用类型第*t*年的土地利用碳排放量； $k_t$ 为第*t*年地类碳排放强度； $k_0$ 基期年地类碳排放强度。

地类碳排放强度因素贡献率 $\Delta R_k$ 计算公式为

$$\Delta R_k = \frac{\Delta C_k}{\Delta C} \times 100\% \quad (12)$$

### 3 结果与讨论

#### 3.1 土地利用净碳排放量变化趋势分析

基于土地利用碳排放测算公式(1)–(6)得到第一批低碳试点城市土地利用净碳排放量变化趋势(图1)。

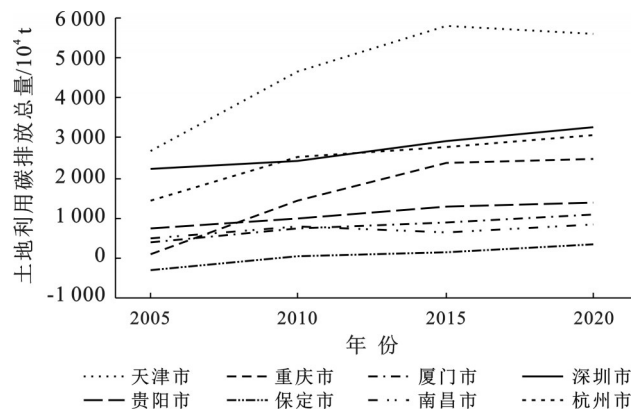


图1 第一批低碳试点城市土地利用碳排放总量

Fig.1 Total carbon emissions from land use in first batch of low carbon pilot cities

时间序列上,各低碳试点城市土地利用净碳排放量整体呈现逐渐上升的趋势,从2005年的 $7.74 \times 10^8$  t增长至2020年的 $1.80 \times 10^9$  t。其中天津市净碳排放量最高,保定市净排放量最低。重庆、深圳、厦门、杭州、贵阳、保定6个城市的碳排放总量在2005—2010,2010—2015,2015—2020年3个研究阶段均表现为增长。天津市碳排放总量在前两个阶段均在增长,其工业发展迅猛,工业用地碳排放量逐年上升,但在2015—2020年减少了 $1.99 \times 10^7$  t,出现该状况的原因可能是产业结构调整,进而向低碳经济发展<sup>[25]</sup>。南昌市碳排放总量在2005—2010年上升,在2010年成为第一批低碳试点城市后,通过实施节能减排政策在一定时期内实现了碳排放量下降;2015

—2020年出现下降后的波动上升,其经济发展加快,净碳排放总量增加<sup>[25-26]</sup>。

对比各城市净碳排放量变化发现,天津市净碳排放量最大且变化幅度明显:2005—2015年逐年上升,年均增长率9.08%,2015—2020年呈现下降趋势,年均增长率-0.87%。深圳、杭州市净碳排放量相近且变化趋势相似,在2010—2020年几乎稳定在 $3.00 \times 10^8$  t。重庆市的净碳排放量变化幅度大且逐年上升,从2005年的 $1.14 \times 10^7$  t增长到2020年的 $2.49 \times 10^8$  t,年均增长率40.26%。厦门、贵阳、南昌市净排放量变化幅度较小,2005—2020年几乎稳定在 $5.00 \times 10^8 \sim 1.00 \times 10^9$  t。保定市净碳排放量一直保持在最低水平,2005—2010年净碳排放量为负数,说明在此期间碳吸收量大于碳排放量,这主要是由于保定市耕地比重高,未利用地占比大;而2010年以来,保定市第一产业经济全面发展,第二、三产业规模增幅明显<sup>[27]</sup>,从而导致净碳排放量逐渐增加。

#### 3.2 土地利用碳排放与经济发展的脱钩分析

根据公式(7),测算得到第一批低碳试点城市2005—2020年土地利用碳排放与经济发展之间的脱钩系数,通过脱钩理论以及划分标准判断脱钩状态(表4)。

2005—2010年处于弱脱钩状态的试点城市有深圳、天津、贵阳和南昌市,除深圳市(0.18)外,其他城市脱钩弹性值较高(0.4~0.8),表明该阶段这些城市生产总值提升速度大于土地利用净碳排放增长速度。由此说明其经济发展对土地利用碳排放的依赖程度较弱。其中,深圳在该阶段GDP增速明显大于土地利用碳排放增速,出现这种状态的原因可能是其在2005年坚持深化经济体制改革创新,同时实行了最严格的耕地保护制度<sup>[7]</sup>。厦门市(0.82)和杭州市(0.84)在该时期呈现扩张连接状态,表明在该阶段碳排放和GDP都在增长且增长速率趋于一致,环境压力与经济发展速度相近。重庆市(1.60)和保定市(18.30)在该时期处于扩张性负脱钩状态,即其碳排放增长率远高于GDP增长率,表明经济发展较大程度依赖于土地利用碳排放,这对于推进低碳经济而言属于较不理想状态。

2010—2015年,厦门市(0.36)和杭州市(0.23)由前一阶段的扩张连接状态转变为弱脱钩状态。这说明厦门和杭州市积极响应低碳试点工作所采取的产业结构调整、“主体功能区”战略和低碳示范区建设等在碳减排方面取得了一定成效。重庆市(0.81)由上一阶段的扩张性负脱钩状态转变为扩张连接状态。这是由于重庆市在2010年之后加快落实“退二进三”

发展战略,减少第二产业(即工业企业)用地占比,提高第三产业(即服务业)用地比重,从而优化产业结构<sup>[24]</sup>。保定市(2.36)在该期间虽仍处于扩张性负脱钩状态,但土地利用碳排放增长率大幅降低,脱钩弹性指数大幅减小。出现这种状态的原因可能是“一线

两厢”战略的深入发展,致使第二、三产业发展势头良好<sup>[24]</sup>,经济结构不断优化。南昌市(-0.66)呈现强脱钩状态,即该阶段GDP的增长伴随着土地利用碳排放总量减少,表明经济增长暂时克服了对土地利用净碳排放的依赖。

表 4 第一批低碳试点城市 2005—2020 年土地利用碳排放与经济脱钩状态  
Table 4 Decoupling status between land-use carbon emissions and economic development in first batch of low carbon pilot cities from 2005 to 2020

城市	2005—2010 年				2010—2015 年				2015—2020 年			
	$\Delta C$	$\Delta GDP$	脱钩弹性指数( $\omega$ )	脱钩状态	$\Delta C$	$\Delta GDP$	脱钩弹性指数( $\omega$ )	脱钩状态	$\Delta C$	$\Delta GDP$	脱钩弹性指数( $\omega$ )	脱钩状态
天津	0.43	0.55	0.79	弱脱钩	0.20	0.36	0.56	弱脱钩	-0.04	0.23	-0.16	强脱钩
重庆	0.92	0.57	1.60	扩张性负	0.40	0.50	0.81	扩张连接	0.04	0.36	0.10	弱脱钩
厦门	0.46	0.55	0.82	扩张连接	0.15	0.42	0.36	弱脱钩	0.18	0.39	0.47	弱脱钩
深圳	0.09	0.50	0.18	弱脱钩	0.17	0.46	0.36	弱脱钩	0.11	0.32	0.35	弱脱钩
贵阳	0.26	0.52	0.49	弱脱钩	0.23	0.57	0.40	弱脱钩	0.06	0.40	0.15	弱脱钩
保定	8.80	0.48	18.30	扩张性负	0.74	0.31	2.36	扩张性负	0.54	0.05	10.73	扩张性负
南昌	0.39	0.56	0.69	弱脱钩	-0.29	0.44	-0.66	强脱钩	0.24	0.34	0.69	弱脱钩
杭州	0.43	0.51	0.84	扩张连接	0.09	0.40	0.23	弱脱钩	0.09	0.38	0.23	弱脱钩

2015—2020 年,天津市(-0.16)呈现强脱钩状态,说明该阶段土地利用碳排放总量减少,低碳经济发展态势良好。除南昌市脱钩系数接近 0.8,重庆、厦门、深圳、贵阳、杭州市都处于较明显的弱脱钩状态(0~0.4),即土地利用净碳排放量增长幅度明显小于 GDP,经济增长与土地利用净碳排放的关联性减弱。保定(10.73)在该期间由于经济增速出现较大幅度下滑,因此土地利用净碳排放与经济发展呈现不理想的扩张性负脱钩状态。

按脱钩弹性值来看,2005—2010 年时期弹性值多集中于 0.4~0.8,经济发展水平有赖于土地利用碳排放。自 2010 年确立第一批低碳试点城市以来,各城市积极响应低碳建设政策号召,使得 2010—2020 年期间弹性值多集中于 0~0.4,且 2015—2020 年期间的弹性值更小。这表明试点城市经济发展水平的提高对于土地利用碳排放的依赖程度正在逐步减小,反映出二者的脱钩态势正趋于变好。但仅有少数试点表现为理想的脱钩状态,而大部分试点呈现弱脱钩甚至是不理想的扩张性负脱钩,表明试点城市土地利用碳排放与经济的关系距离理想的强脱钩仍存在一定发展空间,故而对全国其他城市低碳建设的示范作用和引领作用有限。因此,十分有必要进一步结合地区土地利用特征探讨土地利用碳排放的影响因素,从而推进经济发展与土地利用碳排放的脱钩进程。

### 3.3 土地利用净碳排放量影响因素分析

根据公式(8)~(12)得到地类碳排放强度、土地利用结构、经济发展水平、人口密度、土地利用经济效率、土地总面积等各因素对试点城市土地利用净碳排放量的贡献值与贡献率(如图 2 和图 3 所示)。

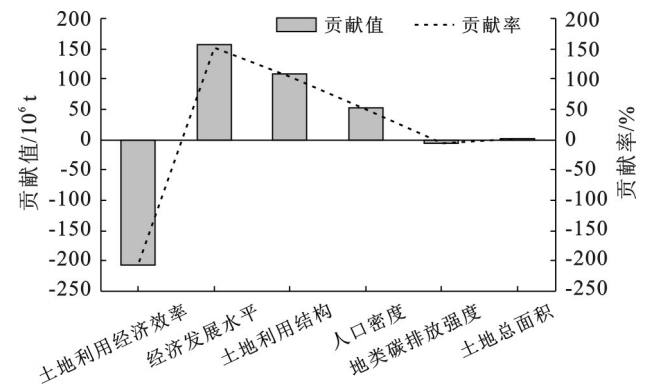


图 2 2005—2020 年第一批低碳试点城市土地利用碳排放各因素贡献值

Fig.2 Contribution values of various factors on land-use carbon emissions in first batch of low carbon pilot cities from 2005 to 2020

观察图 2 可以发现,土地利用结构、经济发展水平、人口密度和土地总面积均是土地利用碳排放的正向因素,其中经济发展水平和土地利用结构为关键驱动因素,而土地总面积的影响程度最低,贡献率仅为 1.83%;地类碳排放强度和土地利用经济效率是土地利用碳排放的负向因素,其中土地利用经济效率

的抑制作用最为显著,贡献率达-201.70%。此外,土地利用结构和土地利用经济效率等土地利用特征指标是推进土地利用碳减排的重要抓手,这从侧面反映了本文的因素分解模式对于现有土地利用碳排放影响因素研究具有一定的理论意义。

由图3可知,地类碳排放强度即各地类单位面积土地上产生的碳排放,对不同城市的土地利用净碳排放量呈现正向或负向影响,这与王亚娟等<sup>[11]</sup>人的研究发现一致。这是由于重庆和贵阳的碳吸收地类面积较大,其碳吸收量大于碳排放量,因此地类碳排放强度呈现负向影响;而其余6个城市的碳排放地类较多,碳吸收地类面积较小,且能源消耗总量大,产生的碳吸收量小于碳排放量,因此地类碳排放强度呈现正向作用。

土地利用结构对不同城市的土地利用净碳排放量均呈现正向影响。这是由于不同类型的土地所具

备的碳排放和碳吸收功能不同<sup>[29]</sup>,而研究期内各城市的土地利用结构变化均表现为碳吸收地类面积减少、碳排放地类面积增加(表5)。其中重庆和保定的碳吸收地类面积减少和碳排放地类面积增加最多,因而土地利用结构的影响最为显著。

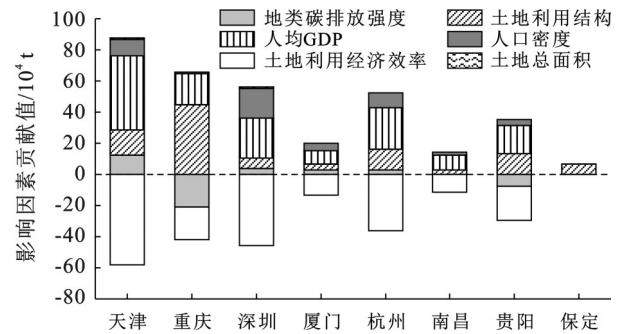


图3 2005—2020年不同城市土地利用碳排放各因素贡献值

Fig.3 Contribution values of various factors on land-use carbon emissions in different cities from 2005 to 2020

表5 第一批低碳试点城市2005—2020年碳吸收\碳排放地类变化  
Table 5 Changes of carbon sink/carbon source category in first batch of low carbon pilot cities from 2005 to 2020

项目	天津市	重庆市	深圳市	厦门市	杭州市	南昌市	贵阳市	保定市
碳吸收地类	-70 761.24	-167 971.78	-18 217.87	-15 787.86	-48 701.28	-19 532.68	-35 432.27	-109 483.88
碳排放地类	103 469.93	165 708.32	22 385.86	20 637.26	48 632.46	19 533.08	35 426.29	109 330.47

单位:hm<sup>2</sup>

经济发展水平在天津市、重庆市、深圳、厦门、杭州、南昌、贵阳7个城市是土地利用碳排放增长的正向因素。这是由于经济的快速发展会吸引劳动力、资金等要素的大量流入,从而增加人类生产及生活消耗,最终导致碳排放总量增长<sup>[12,29]</sup>。然而,保定市在研究期内相比其他试点城市经济发展较慢,工业和服务业水平相对落后,加之一定程度的人口外流,人类活动所带来的碳排放增速较慢;同时,保定市在15 a间第一产业占比始终在10%以上,碳吸收量较大,因此经济发展水平因素对该市土地利用净碳排放的作用最微弱。

人口密度是土地利用碳排放的正向因素。人口密度的增加意味着人类的生产生活活动随之增加,由此会带来能源消耗和碳排放的增强<sup>[30]</sup>。研究期内除保定市以外,其他试点城市的人口密度均在增加,因而人口密度对于各城市土地利用碳排放均发挥了促进作用,其中深圳市受该因素影响最为显著。尽管保定市的人口密度在减小,但居民生产生活活动产生的社会消费和能源消耗仍然在增加,其社会消费品零售额从2005年的 $3.85 \times 10^{11}$ 元增长至2020年的 $1.36 \times 10^{12}$ 元,能源消耗总量从2005年的 $1.29 \times 10^8$  t标准煤增长至2020年的 $2.08 \times 10^8$  t标准煤,因而人

口密度也呈现为促进作用。

土地利用经济效率对除保定外其他7个城市的土地利用碳排放增长均表现为抑制作用。研究期内,除保定外其余7个低碳试点城市的土地利用经济效率显著提高。当生产力发展到一定阶段时,土地利用经济效率越高意味着产出单位GDP所需要的资源投入就越少,由此带来的碳排放随之变小,因此土地利用经济效率对上述城市的土地利用碳排放起到了抑制作用<sup>[11]</sup>。不同的是,保定市作为工业城市,产业转型较慢,且其研究与试验发展经费内部支出相对较少,导致土地利用经济效率对土地利用碳排放呈现出促进作用。

土地总面积对各试点城市土地利用碳排放贡献率绝对值均在5.5%以下,且表现为促进或抑制作用。这一研究结论与李玉玲等<sup>[6]</sup>人得出的观点一致。土地总面积增大意味着用地规模的扩大,从而造成碳排放量增加,反之则抑制。研究期内,天津、深圳、厦门和南昌的土地总面积在增加,而除保定外其余3个城市的土地总面积在减小,由土地总面积带来的碳排放随之增加或减少,最终表现为促进或抑制作用。比较特殊的是保定市,虽然土地总面积减少,但由于其建设用地规模大幅增加,因而土地总面积对

土地利用净碳排放表现为促进作用。

### 3.4 政策建议

(1) 优化产业结构。研究结果显示经济发展水平是驱动土地利用碳排放增长的主要因素之一,为此城市应着力升级产业结构、调整经济增长模式,逐步淘汰高能耗、低产出的工业,积极发展智慧农业、低碳农业,减少化肥、农膜等的使用量。

(2) 提高能源利用效率。建设用地作为主要的碳排放地类,能源消耗产生较大的碳排放量,应引入新技术于能源利用,致力于技术改造和节能减排,逐步实现从粗放型向集约型的转变,实现经济与环保的双赢。

(3) 严格调控土地利用结构。各低碳试点城市土地利用净碳排放量整体呈现逐渐上升的趋势,与各城市碳吸收地类面积减少和碳排放地类面积增加相关,应坚持土地用途管制,制止耕地非农化和非粮化,控制碳吸收地类向碳排放地类的转变,确保耕地占补平衡,在保障国家粮食安全的同时抑制碳排放增长。

(4) 提高土地利用经济效率。在达到一定的生产力时,土地利用经济效率提升对于碳减排的促进作用显著。因此,应通过引入新技术提升作物产出与生产效率,实施土地整治以优化土地功能布局,提升集约利用水平,逐步降低产出单位GDP所需要的资源投入。

## 4 结论

(1) 2005—2020年第一批低碳试点城市的碳排放总量增加,由2005年的 $7.74 \times 10^8$  t增长至2020年的 $1.80 \times 10^9$  t,年均增长6.23%。其中,天津的增长幅度最大,厦门、贵阳、南昌的净排放量变化幅度较小。

(2) 2005—2010年第一批低碳试点城市呈现弱脱钩、扩张性连接或扩张性负脱钩状态,表明试点城市的经济发展较大程度依赖于土地利用碳排放。2010—2015年、2015—2020年两个时期大部分城市都呈现弱脱钩状态,且后期脱钩指数明显小于前期,表明经济发展水平的提高对于土地利用碳排放的依赖程度正在逐步减小,二者的脱钩态势有一定进步。但2015—2020年天津呈现理想的强脱钩状态,重庆和贵阳呈现弱脱钩状态,保定呈现不理想的扩张性负脱钩状况,反映出协调试点城市土地利用碳排放与经济的关系仍有较大的发展空间。

(3) 土地利用结构、经济发展水平、人口密度和土地总面积均是土地利用碳排放的正向因素,其中经济发展水平为关键驱动因素,而土地总面积的影响程度最低;地类碳排放强度和土地利用经济效率

是土地利用碳排放的负向因素,其中土地利用经济效率的抑制作用最为明显。

(4) 本文仅以第一批试点城市作为研究对象,样本量相对较少,未来可围绕三批次共81个试点城市展开更全面的研究,以期提出更契合本土的低碳城市建设意见。其次,今后可将政策因素纳入分析框架,探讨政策对土地利用碳排放的影响。最后,基于“五年计划”政策的考量以及数据的可获取性,本文仅选择2005—2020年为研究期,研究时段相对较短,未来有望借助更加全面的数据库获取更多连续年份的相关数据,更深入刻画土地利用碳排放的脱钩效应和影响因素。

### 参考文献(References)

- [1] 刘康,张寒,王玲,等.新型城镇化对土地利用碳排放效率的影响机制研究:以黄土高原为例[J].中国土地科学,2024,38(7):109-119.  
Liu Kang, Zhang Han, Wang Ling, et al. Research on the influencing mechanism of new-type urbanization on land use carbon emission efficiency: Taking the Loess Plateau as an example [J]. China Land Science, 2024, 38(7): 109-119.
- [2] 武爱彬,陈辅国,赵艳霞,等.京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响[J].环境科学,2024,45(5):2828-2839.  
Wu Aibin, Chen Fuguo, Zhao Yanxia, et al. Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2828-2839.
- [3] 王宇.土地利用碳排放与经济高质量发展关系研究:以武汉城市圈为例[D].湖北武汉:中南财经政法大学,2022.  
Wang Yu. Relationship between land use carbon emissions and high-quality economic development [D]. Wuhan, Hubei: Zhongnan University of Economics and Law, 2022.
- [4] 樊高源,杨俊孝.土地利用结构、经济发展与土地碳排放影响效应研究:以乌鲁木齐市为例[J].中国农业资源与区划,2017,38(10):177-184.  
Fan Gaoyuan, Yang Junxiao. Study on effect of land use structure, economic development and land carbon emission: A case study of Urumqi [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(10): 177-184.
- [5] 薛建春,侯思杰,吴彤.基于VECM模型的内蒙古土地利用碳排放与经济增长、产业结构的动态关系分析[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2020,51(2):129-134.  
Xue Jianchun, Hou Sijie, Wu Tong. A dynamic analysis of carbon emission, economic growth and industrial struc-

- ture of Inner Mongolia based on VECM model [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2020, 51(2):129-134.
- [6] 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.  
Li Yuling, Li Shiping, Qi Jingjing. Influencing factors on carbon emissions of land uses and analysis of their decoupling effects in Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1):382-390.
- [7] 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.  
Zhang Zhongqiu, Lao Yanling, Zhao Ningjun, et al. Decoupling relationship of land use carbon emission reduction and economic growth in Guangdong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1):250-258.
- [8] 李效顺,曲福田,郭忠兴,等.城乡建设用地变化的脱钩研究[J].中国人口·资源与环境, 2008, 18(5):179-184.  
Li Xiaoshun, Qu Futian, Guo Zhongxing, et al. Decoupling between urban and rural construction land [J]. China Population Resources and Environment, 2008, 18(5):179-184.
- [9] 聂芳.襄阳市土地利用碳排放测算及与经济增长的脱钩关系分析[J].农村经济与科技, 2023, 34(7):48-50.  
Nie Fang. Calculation of carbon emissions from land use and analysis of decoupling relationship with economic growth in Xiangyang City [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2023, 34(7):48-50.
- [10] 田港陆.陕西关中平原城市群土地利用碳排放效应研究[D].陕西西安:长安大学, 2023.  
Tian Ganglu. Study on carbon emission effect of land use in Guanzhong plain urban agglomeration of Shaanxi Province [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [11] 王亚娟,翟晨曦,刘彩玉,等.宁夏土地利用碳排放时空差异及影响因素分析[J].环境科学, 2024, 45(9): 5049-5059.  
Wang Yajuan, Zhai Chenxi, Liu Caiyu, et al. Analysis of spatiotemporal differences and influencing factors of land use carbon emissions in Ningxia [J]. Environmental Science, 2024, 45(9):5049-5059.
- [12] 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.
- [13] 孙彩凤,姜巍,高卫东.山东省土地利用碳排放变化的时空特征及影响因素分析[J].环境科学, 2025, 46(1): 30-40.  
Sun Caifeng, Jiang Wei, Gao Weidong. Spatial-temporal evolution and influencing factors of land use carbon emissions in Shandong Province [J]. Environmental Science, 2025, 46(1):30-40.
- [14] Muneer T, Celik A N, Caliskan N. Sustainable transport solution for a medium-sized town in Turkey: A case study [J]. Sustainable Cities and Society, 2011, 1(1):29-37.
- [15] 邓荣荣.我国首批低碳试点城市建设绩效评价及启示[J].经济纵横, 2016(8):41-46.  
Deng Rongrong. Performance evaluation and enlightenment of the first batch of low-carbon pilot cities in China [J]. Economic Review, 2016(8):41-46.
- [16] 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(增刊2): 102-107.  
Li Ying, Huang Xianjin, Zhen Feng. Effects of land use patterns on carbon emission in Jiangsu Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(Suppl.2):102-107.
- [17] 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 terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000 [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(6):804-812.
- [18] 赖力,黄贤金,刘伟良,等.基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析:以2002年江苏省经济为例[J].生态学报, 2006, 26(4):1285-1292.  
Lai Li, Huang Xianjin, Liu Weiliang, et al. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: A case study of Jiangsu Province in 2002 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4):1285-1292.
- [19] 汤李琛,曾贤刚,陈慧,等.中国省际农作物生产碳公平及其驱动因素[J].中国环境科学, 2024, 44(12):7063-7078.  
Tang Lichen, Zeng Xiangang, Chen Hui, et al. Carbon fairness in inter provincial crop production and its driving factors in China [J]. China Environmental Science, 2024, 44(12):7063-7078.
- [20] 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.  
Zhu Qiaoxian, Mei Yun, Chen Yinrong, et al. Regional

- differentiation characteristics and optimization of the structural efficiency of land use in Hubei Province based on the carbon emissions [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(12):176-184.
- [21] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2):137-151.
- [22] 赵鑫宇,张庭婷,谢晓敏,等.长三角地区碳排放驱动因素及脱钩分析[J].*环境科学研究*,2025,38(4):767-776. Zhao Xinyu, Zhang Tingting, Xie Xiaomin, et al. Analysis of the driving factors of carbon emissions and decoupling in the Yangtze River delta region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(4):767-776.
- [23] 张赫,黄雅哲,王睿,等.中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J].*资源科学*,2022,44(4):744-755. Zhang He, Huang Yazhe, Wang Rui, et al. Decoupling and spatiotemporal change of carbon emissions at the county level in China [J]. *Resources Science*, 2022, 44(4):744-755.
- [24] 黄元生,刘佳婕.低碳试点城市工业碳排放脱钩状态及驱动因素研究[J].*生态经济*,2024,40(4):13-19. Huang Yuansheng, Liu Jiajie. Study on decoupling status and driving factors of industrial carbon emissions in low-carbon pilot cities [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(4):13-19.
- [25] 罗志军,史想松,韩林婕,等.鄱阳湖区土地利用变化的碳排放效应研究[J].*江西农业大学学报*,2013,35(5):1074-1081. Luo Zhijun, Shi Xiangsong, Han Linjie, et al. A study on carbon emission effects of changes in land use in Poyang Lake region [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35(5):1074-1081.
- [26] 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. Huang Hanzhi, Jia Junsong, Zhang Zhenxu. Spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in counties, Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8390-8403.
- [27] 马建辉,冯静璇,常锦涛,等.保定市碳达峰预测研究[J].*价值工程*,2024,43(14):156-158. Ma Jianhui, Feng Jingxuan, Chang Jintao, et al. Research on carbon peak prediction in Baoding City [J]. *Value Engineering*, 2024, 43(14):156-158.
- [28] 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 Na, Sun Fangcheng, Hu Yuling, et al. Regional difference and spatial convergence of land use carbon emissions in three urban agglomerations of Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4656-4669.
- [29] 张俊峰,张安录,董捷.武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J].*长江流域资源与环境*,2014,23(5):595-602. Zhang Junfeng, Zhang Anlu, Dong Jie. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5):595-602.
- [30] 郭安宁,牛陆,刘需珈,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. Guo Anning, Niu Lu, Liu Peijia, et al. Carbon emission from land use in urban agglomeration of the Yellow River basin [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(9):172-178.
- [31] 董捷,张安录,张俊峰.武汉城市圈土地利用碳排放的稳定性及其机制:一个综述[J].*Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):528-540.
- [32] 吕志伟,罗春红,李冬梅,等.热解温度对生物炭物理及化学吸附能力的影响[J].*中国农学通报*,2024,40(32):68-76. Lv Zhiwei, Luo Chunhong, Li Dongmei, et al. Effect of pyrolysis temperature on physical and chemical adsorption capacity of biochar [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(32):68-76.
- [33] 汪景宽,徐英德,丁凡,等.植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J].*土壤学报*,2019,56(3):528-540. Wang Jingkuan, Xu Yingde, Ding Fan, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3):528-540.
- [34] Maestrini B, Herrmann A M, Nannipieri P, et al. Ryegrass-derived pyrogenic organic matter changes organic carbon and nitrogen mineralization in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69:291-301.
- [35] 苏兴雷,渠晨晨,康杰,等.微生物驱动土壤矿物结合态有机碳的形成[J].*科学通报*,2024,69(22):3327-3338. Su Xinglei, Qu Chenchen, Kang Jie, et al. Microorganisms drive the formation of mineral-associated organic carbon in soils [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(22):3327-3338.

(上接第293页)