

建设用地碳排放驱动因子及脱钩效应贡献分析 ——以安徽省为例

刘芳¹ 吕宁^{2,31}

(1. 安徽工程大学 经济与管理学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 石河子大学 经济与管理学院, 新疆 石河 子 832003;

3. 新疆农垦科学院, 新疆 石河 子 832000)

【摘要】: 基于安徽省统计数据, 对建设用地碳排放量进行测度, 然后运用扩展的 Kaya 等式和 LMDI 法对建设用地碳排放驱动因素进行分解, 进一步对脱钩效应及其贡献因子进行分析。结果表明: 自 2000 年以来, 安徽省建设用地规模以年均 4.8% 的速度不断扩张, 同时, 建设用地碳排放以年均 12.87% 的速度激增, 到 2019 年达到 747.23 万吨。建设用地碳排放增加的驱动因素按贡献大小排序依次是能源强度、建设用地规模、经济增长和城市人口密度, 促进建设用地碳排放减少的因素是产业结构和能源结构。建设用地碳排放与经济增长呈现弱脱钩, 对脱钩经济增长努力有效的五大因素按贡献大小排序依次是能源结构、产业结构、建设用地规模、能源强度和城市人口密度。调整能源结构、优化产业结构和调控建设用地规模等可成为未来安徽省抑制建设用地碳排放应优先考虑并重点采取的有效措施。

【关键词】: 建设用地 碳排放 LMDI 模型 Tapio 脱钩模型 安徽省

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)06-035-06

随着“双碳”目标的确立, 国内产业布局、经济结构、生产生活方式以及土地利用规划等将迎来重大转型。碳排放与土地利用方式紧密相关。承载工业生产、交通运输、电力运行和建筑活动的建设用地碳排放占全球碳排放总量的三分之二, 城市建设用地碳排放强度是农业土地利用的数百倍^[1,2]。如何规划建设用地, 减少碳排放已成为全球学者和科学家关注的热点问题。按照《城市用地分类与规划建设用地标准》规定, 建设用地主要为建设商业服务设施、道路与交通设施, 发展工业、物流和仓储, 满足公民居住、绿化和广场活动需求而提供土地这一基本要素, 为第二、第三产业发展和居民生活营造地理空间, 是城市经济社会活动和城镇化发展水平的映射^[3]。

聚焦建设用地碳排放, 有利于理解城镇化过程与生态环境演变的内在联系, 明确国土开发的环境影响, 并有利于国土资源的

¹作者简介: 刘芳, 博士, 讲师, 研究方向为低碳经济和资源环境管理。E-mail: 819164865@qq.com

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目“多源数据融合下生活垃圾全过程治理绩效及纠偏机制研究”(2108085QG301); 安徽省社会科学创新发展研究课题攻关项目“合肥都市圈高质量发展研究”(2020CX062)

合理配置，为构建国土开发保护新格局和最终实现可持续发展提供借鉴。

自 20 世纪 70 年代以来，国内外学者对土地利用碳排放进行了广泛深入的探讨，归纳起来有以下几个方面的内容和特点：(1) 对多个国家不同类别土地碳排放进行时空差异对比。如 Tubiello 等^[4]运用遥感数据对全球 200 个国家在 1990—2011 年间耕地、草地和林地碳排放的时空差异特征进行对比研究；Ali^[5]对 27 个欧盟成员国在 2005—2050 年期间生产用地和水利设施用地碳排放做了实测和预测，并提出优化生产用地空间布局的政策建议。范建双等^[6]、李波等^[7]、苑韶峰和唐奕钰^[8]分别对湖北农地利用、南京土地利用和长江经济带土地利用碳排放进行测度和分析，揭示了区域碳排放异质性。(2) 以土地碳排放为基础，对碳排放与经济增长或生产要素的关系进行关联分析。如 Fattah 等^[9]基于土地影像发现孟加拉国库尔纳市无计划的城市扩张，导致土地覆被 (LUCC) 发生显著改变，引发碳排放增加和地表温度的上升，对协调经济增长和营造宜人城市居住环境关系带来重大挑战。Zhang & Liu^[10]、丁宝根等^[11]分别考察新疆和全国耕地利用的碳排放，发现化肥施用是耕地碳排放增加的最主要因素；刘琼和肖海峰^[12]研究发现中国农地经营规模与农业碳排放之间呈现“U”型关系，调整种植结构、加大农业机械投入力度可以抑制碳排放；杨欣和谢向向^[13]以武汉市土地数据为基础，验证了碳排放强度与建设用地扩张之间存在倒“U”型库兹涅茨曲线关系。(3) 对土地碳排放的驱动机理或影响因素进行识别。如 Carpio 等^[14]研究发现墨西哥蒙特雷都市的扩张导致大量碳排放，关键变量锁定为人口数量、机动车存量、城郊植被位移以及住宅和商业部门能源使用数量。Li 等^[15]、Yang 等^[16]的研究均表明区域碳排放与城市建设用地扩张和城市化发展阶段密切相关。高艳丽等^[17]研究发现碳排放权交易机制可以促进企业提高能源利用效率，有效降低能源强度，进而抑制建设用地碳排放强度。(4) 在研究方法上，因学科差异呈现聚类特征。如资源环境管理学科、人文地理学科等的研究通常运用土地影像或遥感数据，辅助 ArcGIS 软件对土地覆被等信息进行提取^[18,19]；经济类学科多用回归分析、空间计量、LMDI 等方法对土地碳排放区域特征或影响因素进行探索^[20,21]；管理学科的研究善用仿真系统动力学、灰色关联等对土地碳排放的未来情景进行预测，并提出优化管理的措施^[22,23]。

通过文献归类分析发现，已有研究依然存在可拓展的空间：从土地类型看，多数聚焦耕地、园地、水域、林地、草地和未利用地几种土地的对比，或者对农地利用和农业生产方式引发的碳排放进行系统的测算和分析，较少研究聚焦建设用地碳排放。本质上，建设用地承载着发展新型城镇化、布局现代非农产业、提供人居环境、建设交通基础设施以及服务城镇人口生活等多种功能，建设用地规模的扩大必定会对农地和未利用地等生态功能用地形成挤压，造成不可逆的环境影响。从碳排放的驱动因素看，很多学者证实经济增长、人口变动、能源效率、能源强度、城镇化过程以及化肥农药等生产要素的过量投入对碳排放有正向效应；很少研究检验建设用地规模与碳排放之间的联动。从研究区域看，多数研究关注中国整体情况或区域情况，如以长三角、黄河流域或长江经济带为例，少有研究重点关注中部单一省区。安徽省既是中部崛起战略的省份之一，也是长三角地区的重要成员。随着美丽长江经济带和长三角绿色示范区建设的推进，安徽省逐步成为中部地区生态文明战略建设成效的展示窗口，而专门研究安徽省碳排放情况的文献较少。鉴于此，本文拟从以下几点做出贡献：首先，在研究方法上，将建设用地面积和城市人口密度引入 Kaya 恒等式，把传统的四个因素扩展为六个因素，构建扩展的 Kaya 等式。其次，在区域选择上，以安徽省为研究对象，弥补现有研究对长三角地区薄弱单元关注较少的不足。第三，在研究内容上，明确安徽省建设用地碳排放的驱动因素、与经济增长的脱钩关系以及对这种脱钩努力有贡献的因子，以期将为安徽省打造成全国重要的社会经济发展低碳转型示范区提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 建设用地碳排放测算

建设用地承载着居民日常生活、工业生产和交通运输等社会经济活动，因此建设用地碳排放主要是各类社会生产活动所消耗能源引发的碳排放，即通过能源消耗量间接估算碳排放量，其计算公式如下：

$$C = \sum E_m \times \phi_m \quad (1)$$

式中：C 是建设用地碳排放总量，单位为万吨； E_m 和 φ_m 分别表示第 m 种能源的消耗数量（单位为万吨标准煤）和相应的碳排放系数。本文计算安徽省建设用地碳排放涉及的 7 种能源为原煤、焦炭、原油、燃料油、柴油、汽油和天然气，各种能源的碳排放系数参照 IPCC《国家温室气体清单指南》2016 版的标准进行核算。

1.2 LMDI 模型

LMDI 方法采用对数平均函数对聚合体进行分解^[24]，

具有以下优点：一是该方法可以应用于任何聚合水平的数据，不需要投入产出系数；二是该方法不依赖路径，不会留存无法解释的残差；三是该方法具备高聚合一致性，使得一个部门的输出等于其所有子部门输出的总和。本文在原有 Kaya 恒等式基础上^[25]，构建能表现能源结构、能源强度、产业结构、人口密度、经济增长和建设用地规模与碳排放关系的扩展 Kaya 等式，形式如下：

$$C = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{E_i}{G_i} \times \frac{G_i}{G} \times \frac{G}{P} \times \frac{P}{A} \times A \quad (2)$$

式中： E_{ij} 、 C_{ij} 分别表示第 i 类产业消耗第 j 类能源的活动量及其产生的碳排放， E_i 、 G_i 分别表示第 i 类产业的能源消耗量和生产总值，G 表示国民生产总值，P 表示城市人口，A 表示建设用地规模。将建设用地规模引入公式（2）中，探讨建设用地扩张

对碳排放的影响。令 $CQ = \frac{C_{ij}}{E_{ij}}$, $EG = \frac{E_{ij}}{E_i}$, $EQ = \frac{E_i}{G_i}$, $IG = \frac{G_i}{G}$, $IE = \frac{G}{P}$, $PA = \frac{P}{A}$,

则公式（2）转换成公式（3）：

$$C = \sum_i \sum_j (CQ \times EG \times EQ \times IG \times IE \times PA \times A) \quad (3)$$

式中：CQ 是第 i 类产业所消耗第 j 类能源的碳排系数，EG 表示能源结构，EQ 表示能源强度，IG 表示产业结构，IE 表示经济增长，PA 表示城市人口密度，A 表示建设用地规模。

在 LMDI 方法下，从第 0 期到第 t 期碳排放变化量的各驱动因素效应可以表达为以下相应的公式：

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta EG + \Delta EQ + \Delta IG + \Delta IE + \Delta PA + \Delta A \quad (4)$$

$$\Delta EQ = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{EQ_{ij}^t}{EQ_{ij}^0} \right) \quad (5)$$

$$\Delta EG = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{EG_{ij}^t}{EG_{ij}^0} \right) \quad (6)$$

$$\Delta IG = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{IG_{ij}^t}{IG_{ij}^0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta E = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{IE_{ij}^t}{IE_{ij}^0} \right) \quad (8)$$

$$\Delta PA = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{PA_{ij}^t}{PA_{ij}^0} \right) \quad (9)$$

$$\Delta A = \sum_i \sum_j \frac{C_{ij}^t - C_{ij}^0}{\ln C_{ij}^t - \ln C_{ij}^0} \ln \left(\frac{A_{ij}^t}{A_{ij}^0} \right) \quad (10)$$

式中： ΔC 代表建设用地碳排放变化量， ΔEG 、 ΔEQ 、 ΔIG 、 ΔIE 、 ΔPA 、 ΔA 分别代表能源结构、能源强度、产业结构、经济增长、城市人口密度和建设用地规模六大因素对建设用地碳排放的贡献。

1.3 Tapio 脱钩模型

Tapio 脱钩模型被广泛用于诊断环境污染与经济增长的相互关系。脱钩弹性指数是一定时期内环境污染变量变动率与经济增长变动率的比值，反映经济增长背后付出的环境污染代价。本文构建建设用地碳排放的脱钩弹性指数如公式(11)所示：

$$I = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta GDP / GDP_0} = \Delta C \times \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} \quad (11)$$

为更清晰地识别建设用地碳排放与每项驱动因素的脱钩程度，基于 Tapio 脱钩模型与 LMDI 方法结合思路，将脱钩弹性指数转换为公式(12)的形式：

$$\begin{aligned} I &= \Delta EG \times \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} + \Delta EQ \times \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} + \Delta IG \times \\ &\quad \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} + \Delta IE \times \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} + \Delta PA \times \\ &\quad \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} + \Delta A \times \frac{GDP_0}{\Delta GDP \times C_0} \\ &= I_{EG} + I_{EQ} + I_{IG} + I_{IE} + I_{PA} + I_A \end{aligned} \quad (12)$$

式中： I_{EG} 、 I_{EQ} 、 I_{IG} 、 I_{IE} 、 I_{PA} 和 I_A 分别代表能源结构脱钩指数、能源强度脱钩指数、产业结构脱钩指数、经济增长脱钩指数、城市人口密度脱钩指数和建设用地规模脱钩指数。参考已有研究^[26]，脱钩类型标准界定如表 1 所示。

表 1 脱钩分类

脱钩类型	脱钩程度	ΔC	ΔGDP	I
负脱钩	扩张性负脱钩	>0	>0	$I > 1.2$
	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq I < 0.8$
	强负脱钩	>0	<0	$I < 0$
脱钩	衰退脱钩	<0	<0	$I > 1.2$

	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq I < 0.8$
	强脱钩	<0	>0	$I < 0$
耦合	扩张耦合	>0	>0	$0.8 \leq I < 1.2$
	衰退耦合	<0	<0	$0.8 \leq I < 1.2$

1.4 剔除经济增长因素后的建设用地碳排放贡献分析

基于现有的碳排放驱动因素，本文拟进一步识别对于碳减排政策制定和优化有显著效果的影响因子，并指出每个因子在碳减排方面的贡献。具体操作是剔除经济增长因素的影响，原因主要有两点：一是经济增长对碳排放的作用效应很可能会抑制其他因素的影响，从而阻碍我们对其他五个因素作用的正确认知；二是经济增长是衡量一个地区发展与否的重要指标，也是维护人民社会福利，确保生活幸福的物质基础，为减少碳排放而停止发展经济也是不可取的。因此，无法从干预经济增长的方式来提供可行的碳减排政策。当剔除经济增长对建设用地碳减排的影响后，其他五个因素在碳减排方面的贡献可以通过以下公式来表达：

$$\Delta F = \Delta C - \Delta IE = \Delta EG + \Delta EQ + \Delta IG + \Delta PA + \Delta A \quad (13)$$

$$D = -\frac{\Delta F}{\Delta IE} = -\frac{\Delta EG + \Delta EQ + \Delta IG + \Delta PA + \Delta A}{\Delta IE}$$

$$= D_{EG} + D_{EQ} + D_{IG} + D_{PA} + D_A \quad (14)$$

式中： ΔF 表示当剔除经济增长因素后，建设用地碳排放的增量； D 表示建设用地碳排放与经济增长脱钩努力的有效性。其中， D_{EG} 、 D_{EQ} 、 D_{IG} 、 D_{PA} 和 D_A 分别表示以优化能源结构、降低能源强度、升级产业结构、降低城市人口密度和控制建设用地规模五种方式实现碳排放与经济增长脱钩所发挥的作用。 $D \geq 1$ 表示强脱钩努力是有效的； $0 < D < 1$ 表示存在脱钩效果但是效度较低； $D \leq 0$ 表示脱钩努力是无效的。

1.5 数据来源

本文所需各产业能源消费数据来自历年《安徽能源统计年鉴》，建设用地面积、城镇人口、国内生产总值以及各产业生产总值等社会经济数据来自历年《安徽统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和《中国国土统计年鉴》。为消除价格波动的影响，将 GDP 换算成以 2000 年为基期的不变价格。

2 结果与分析

2.1 安徽省建设用地碳排放总体趋势

基于安徽省能源、土地等数据，本文测算了安徽省近 20 年的建设用地碳排放。由图 1 可知，建设用地面积从 2000 年的 824.76km² 增加到 2019 年的 2111.13km²，年均增长 4.8%。与此同时，相应的碳排放量从 70.95 万吨增长到 747.23 万吨，年均增长 12.78%。建设用地碳排放总体变化趋势可分为两个阶段。第一阶段为 2000—2006 年，特点是缓慢增长，年均增长率为 11.1%。第二阶段为 2007—2019 年，碳排放量进入快速增长阶段，到 2019 年达到峰值，为 747.23 万吨，这 13 年间的年均增长率达到 17.23%。与此同时，建设用地面积呈现不断增长的趋势。据统计数据显示，安徽省城镇化率由 2000 年的 28% 连续增长为 2019 年的 55.81%，第二、第三产业产值由 2000 年的 2383.56 亿元增长到 2019 年的 34198.3 亿元，第二、第三产业能源消耗量从 3699.19

万吨标准煤增加到 13610.25 万吨标准煤，年均增幅为 4.88%。数据表明安徽省城市化发展过程中建设用地规模的扩大与能源消耗增加之间存在紧密的相关性。

2.2 建设用地碳排放驱动因素分解

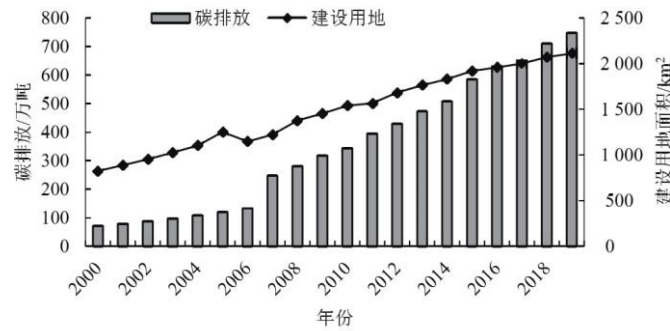


图 1 2000—2019 年安徽省建设用地和碳排放变化趋势

利用 LMDI 方法，将安徽省建设用地碳排放增量分解为能源结构、能源强度、产业结构、经济增长、城市人口密度和建设用地规模六大驱动因素，每年各因素对碳排放增量的贡献力如表 2 所示。

表 2 2001—2019 年安徽省建设用地碳排放驱动因素分解

年份	ΔEG	ΔEQ	ΔIG	ΔIE	ΔPA	ΔA	ΔC
2001	256.74	-12.01	13.56	41.38	-30.98	-260.81	7.88
2002	117.91	-34.65	20.63	25.50	-10.76	-109.87	8.76
2003	109.45	-189.45	79.03	100.65	-2.30	-87.65	9.73
2004	61.09	-51.29	25.75	24.79	4.69	-54.22	10.81
2005	13.44	-32.06	-17.92	56.77	15.87	-24.08	12.02
2006	-78.95	-8.75	12.74	85.87	10.65	-8.21	13.35
2007	-110.71	13.09	57.99	84.80	12.33	56.44	113.94
2008	-57.81	9.07	13.81	-36.87	19.87	112.98	33.43
2009	-70.77	26.98	-56.22	-25.83	12.61	149.76	36.53
2010	-30.71	65.02	-64.21	-40.55	-10.83	107.21	25.93
2011	-68.65	41.08	-30.82	-8.84	14.45	103.73	50.95
2012	-70.64	99.77	-187.66	89.93	-23.11	126.77	35.06
2013	-101.33	178.9	-321.67	188.11	-10.83	110.12	43.3

2014	-121.87	234.87	-245.72	86.14	-5.66	87.79	35.55
2015	-99.82	102.98	-93.55	2.24	7.41	156.87	77.13
2016	-42.13	99.76	-32.00	-86.72	8.35	97.56	44.82
2017	-17.58	110.87	-46.12	-152.64	17.94	107.6	20.22
2018	3.01	90.88	-75.91	-57.88	31.04	68.65	59.79
2019	10.37	46.19	-89.98	30.70	7.00	32.81	37.09
累计效应	-298.96	791.25	-1038.27	381.08	67.74	773.45	676.29
累计贡献率	-44.21%	117.00%	-153.52%	56.35%	10.02%	114.37%	—

注：以 2000 年为基期，碳排放的单位为万吨。

(1)从多年累计数据看，能源强度、经济增长、城市人口密度和建设用地规模对建设用地碳排放发挥正向推动作用，四个要素促进建设用地碳排放分别增加了 791.25 万吨、381.08 万吨、67.74 万吨和 773.45 万吨，累积贡献率分别达到 117.00%、56.35%、10.02%和 114.37%。显然，最强的驱动因素是能源强度，其次是建设用地规模。而能源结构和产业结构分别使得建设用地碳排放减少了 298.96 万吨和 1038.27 万吨，累积贡献率分别为-44.21%和-153.52%，即调整能源结构和产业结构有利于安徽省建设用地碳排放的减少，而且调整产业结构的效果更明显。六个因素综合发挥作用，使得安徽省建设用地碳排放量净增加了 676.29 万吨。

(2)从每年数据看，六要素在不同年份发挥的作用差异显著，呈现阶段性波动的特征。2001—2005 年间，能源结构、产业结构和经济增长对安徽省建设用地碳排放主要发挥正向的驱动作用，而能源强度、城市人口密度和建设用地规模主要发挥负向的减排作用。这一阶段，安徽省第二、第三产业占比由 2000 年的 75.9%调整到 2005 年的 82%，城镇化率同期也提高了 9.1%，城市人口也不断增加，经济发展主要是以能源的规模化投入为驱动，因此也引发碳排放的不断增加。随着时间的推移，每个要素的角色开始转变。能源结构自 2006 年对建设用地碳排放发挥抑制作用，而能源强度自 2007 年开始由原来的负向作用转为正向作用。产业结构则经历了“正向—负向—正向—负向”的波动状态，相比而言，城市人口密度则呈现先负向再正向两次交叉的动态演化特点，建设用地规模自 2007 年开始，由负向作用转向正向作用，而且正向效应于 2015 年达到最大，使碳排放增加了 156.87 万吨。

2.3 建设用地碳排放脱钩分析

根据公式(11)和(12)计算六大驱动因素的年度脱钩弹性指数和建设用地碳排放脱钩指数，结果如表 3 和图 2 所示。研究期间，安徽省建设用地碳排放脱钩弹性指数一直为正，且均呈现负脱钩，即第二、第三产业产值增长率要高于建设用地碳排放增长率。2007 年脱钩弹性指数达到最大值，为 0.69，即第二、第三产业产值增长了 19.58%，碳排放增长了 13.51%。而六大要素的脱钩弹性指数则由前期的发散状态逐渐转向收敛状态，2008 年之后基本在零附近波动，对脱钩的影响既有正的，也有负的。具体而言：(1)能源结构脱钩弹性指数在 2005 年之前和 2018 年之后两个阶段内均为正，而且由扩张性负脱钩转为弱脱钩；2006—2017 年间，能源结构脱钩弹性指数变为负数，这表明优化能源结构有助于降低建设用地碳排放并保持经济增长。(2)能源强度脱钩弹性指数 2006 年之前为负，且表现为强负脱钩，自 2007 年开始转为正，表现为弱脱钩，并且在 2014 年达到最大值。能源强度弹性脱钩指数与综合效应的趋势相似，表明能源强度在建设用地碳排放与经济增长的脱钩过程中发挥积极作用，这意味着提高能源利用效率是减少碳排放的有效途径之一。(3)产业结构脱钩弹性指数 2008 年之前为正，之后为负，这表明产业结构对安徽省建设用地碳排放与经济增长脱钩关系发挥正向作用。因此，调整产业结构，特别是不断提升第三产业的比重，加强信息技术产业、

生物医药产业等可以发挥增强经济实体同时减少碳排放的双赢效果。(4)经济增长脱钩弹性指数波动比较频繁,呈现“正七年—负四年—正四年—负三年”的变动状态,表明人均 GDP 对建设用地碳排放与经济增长脱钩关系具有不确定性。(5)城市人口密度脱钩弹性指数与经济增长的脱钩弹性指数变动呈现类似相反的特征,以正向年份居多,表明建设用地承载的人口越多,社会生产和消费等活动越多,最终导致碳排放的增加。(6)建设用地规模脱钩弹性指数 2001—2006 年均为负,2007 年后连续为正且呈现弱脱钩,表明建设用地的不断扩张导致碳排放的持续性增加,因此适当控制建设用地规模,多增加建成区绿地面积,有利于碳排放的减少。

表 3 安徽省建设用地碳排放脱钩类型及驱动因素脱钩弹性

年份	I_{EG}	I_{EQ}	I_{IG}	I_{IE}	I_{PA}	I_A	I	脱钩程度
2001	3.15	-0.15	0.17	0.51	-0.38	-3.20	0.10	弱脱钩
2002	1.35	-0.40	0.24	0.29	-0.12	-1.26	0.10	弱脱钩
2003	1.07	-1.85	0.77	0.98	-0.02	-0.86	0.10	弱脱钩
2004	0.53	-0.45	0.23	0.22	0.04	-0.47	0.09	弱脱钩
2005	0.10	-0.23	-0.13	0.41	0.11	-0.17	0.09	弱脱钩
2006	-0.97	-0.11	0.16	1.05	0.13	-0.10	0.16	弱脱钩
2007	-0.67	0.08	0.35	0.51	0.07	0.34	0.69	弱脱钩
2008	-0.19	0.03	0.05	-0.12	0.07	0.38	0.21	弱脱钩
2009	-0.22	0.08	-0.17	-0.08	0.04	0.46	0.11	弱脱钩
2010	-0.08	0.17	-0.16	-0.10	-0.03	0.27	0.07	弱脱钩
2011	-0.16	0.10	-0.07	-0.02	0.03	0.24	0.12	弱脱钩
2012	-0.16	0.22	-0.42	0.20	-0.05	0.28	0.08	弱脱钩
2013	-0.23	0.41	-0.73	0.43	-0.02	0.25	0.10	弱脱钩
2014	-0.21	0.41	-0.43	0.15	-0.01	0.15	0.06	弱脱钩
2015	-0.19	0.19	-0.17	0.00	0.01	0.29	0.14	弱脱钩
2016	-0.07	0.17	-0.05	-0.15	0.01	0.17	0.08	弱脱钩
2017	-0.02	0.15	-0.06	-0.21	0.02	0.15	0.03	弱脱钩
2018	0.00	0.13	-0.11	-0.08	0.04	0.10	0.08	弱脱钩
2019	0.01	0.06	-0.12	0.04	0.01	0.04	0.05	弱脱钩

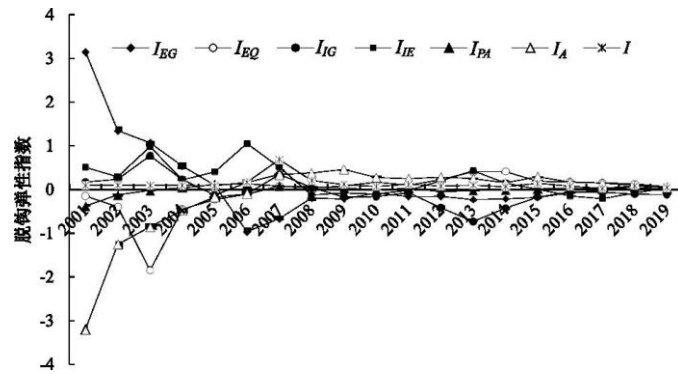


图 2 安徽省建设用地碳排放驱动因素脱钩弹性指数

2.4 建设用地碳排放脱钩经济增长的努力分析

根据公式(13)和(14)，本文计算了剔除经济增长因素后，其他因素对建设用地碳排放脱钩的贡献程度，结果如表 4 所示。数据表明，2008—2011 年、2016 年、2017 年和 2019 年的脱钩努力都是有效的，这意味五大因素的脱钩努力带来的碳减排大于经济增长带来的碳排放增量。但是，在 2007 年和 2015 年，脱钩努力无效，其余年份属于低效水平。根据每个因素对脱钩的贡献程度，对其进行排名发现，调整能源结构对碳排放脱钩经济增长的贡献最大，其次是产业结构，建设用地规模，能源强度和城市人口密度。可见，调控建设用地规模是一种潜在有效的政策工具。

表 4 建设用地碳排放脱钩经济增长的努力分解

年份	D_{EG}	D_{EQ}	D_{IG}	D_{PA}	D_A	D	脱钩努力
2001	6.20	-0.29	0.33	-0.75	-6.30	0.81	低效
2002	4.62	-1.36	0.81	-0.42	-4.31	0.66	低效
2003	1.09	-1.88	0.79	-0.02	-0.87	0.9	低效
2004	2.46	-2.07	1.04	0.19	-2.19	0.56	低效
2005	0.24	-0.56	-0.32	0.28	-0.42	0.79	低效
2006	-0.92	-0.10	0.15	0.12	-0.1	0.84	低效
2007	-1.31	0.15	0.68	0.15	0.67	-0.34	无效
2008	1.57	-0.25	-0.37	-0.54	-3.06	1.91	高效
2009	2.74	-1.04	2.18	-0.49	-5.8	2.41	高效
2010	0.76	-1.6	1.58	0.27	-2.64	1.64	高效
2011	7.77	-4.65	3.49	-1.63	-11.73	6.76	高效
2012	-0.79	1.11	-2.09	-0.26	1.41	0.61	低效
2013	-0.54	0.95	-1.71	-0.06	0.59	0.77	低效

2014	-1.41	2.73	-2.85	-0.07	1.02	0.59	低效
2015	-44.56	45.97	-41.76	3.31	70.03	-33.43	无效
2016	0.49	-1.15	0.37	-0.10	-1.13	1.52	高效
2017	0.12	-0.73	0.30	-0.12	-0.70	1.13	高效
2018	-0.05	-1.57	1.31	-0.54	-1.19	0.31	低效
2019	0.34	1.50	-2.93	0.23	1.07	1.97	高效

3 结论和政策启示

首先，研究期间，安徽省建设用地规模不断扩大，19年间增加了1286.37km²，年均增幅达到4.8%。同期，建设用地碳排放累计增加了676.29万吨，年均增幅达到12.78%。安徽省建设用地碳排放尚未达到峰值，即还处于库兹涅茨曲线上升阶段，拐点还未到来。

其次，从六个驱动因素的累计效应来看，能源强度、经济增长、城市人口密度和建设用地规模总体促进了建设用地碳排放的增长，而且能源强度的促进作用最强。能源结构和产业结构对建设用地碳排放的增加具有减缓作用。结果表明，优化能源结构、提高能源效率、降低城市人口密度、调整产业结构、控制建设用地扩张是降低碳排放的可行途径。

最后，脱钩分析结果表明，19年间建设用地碳排放与经济增长之间呈现弱脱钩。五大因素中，对建设用地碳排放脱钩经济增长贡献最大的是能源结构，其次是产业结构。

基于以上研究结论，得到如下政策启示：

(1) 鉴于能源结构成为安徽省建设用地碳排放最具决定性的脱钩因素，因此，未来五年内，省政府要通过有力财税政策支持太阳能、氢能等清洁能源产业项目落地安徽，促进各类清洁能源的广泛应用；鼓励企业不断创新节能技术，提高能源利用效率。

(2) 持续优化产业结构，进一步提升第三产业比重，淘汰高能耗产业。抓住国家级实验室落户合肥的机遇，加大创新要素聚集，建立创新生态产业链；集中优势着力发展人工智能、生物医药、电子信息技术和机器人等产业；高质量建设皖江城市带承接产业转移示范区，培育一批世界级先进制造业集群。

(3) 随着城市化的进一步推进，可以预见城市人口总量和人口密度将继续增加，这就需要适度扩展建设用地规模，优化建设用地空间布局，加强绿色生活方式宣传，提升人们的环保素养，促进其养成节能低碳的生活习惯。

(4) 加强建设用地标准控制，严格执行第二、第三产业项目用地审批制度。积极探索并推广节地模式和节地技术，建立健全集约用地评价考核体系，推动城镇低效用地再开发，避免建设用地无序增长。

(5) 建设用地碳排放的减少不会以牺牲经济增长的方式进行，但可以充分发挥市场机制，通过碳排放权交易机制，倒逼高能耗企业以低碳生产方式为导向进行技术创新或管理改革。

参考文献：

-
- [1]Li L,Huang X J,Yang H,et al.Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010[J]. Science Advances,2016,2(11):e1601063.
- [2]Li Y N,Cai M M,Wu K Y,et al.Decoupling analysis of carbon emission from construction land in Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production,2018,210:25-34.
- [3]马远,刘真真.黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J].生态经济,2021(7):35-43.
- [4]Tubiello F N,Salvatore M,Golec R D C,et al.Agriculture,forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks:1990-2011 analysis[J].Acta Otolaryngol,2014,4(7):375-376.
- [5]Ali Y.Carbon,Water and land use accounting:Consumption vs production perspectives[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews,2017,67:921-934.
- [6]范建双,虞晓芬,周琳.南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J].地理研究,2018(11):2177-2192.
- [7]李波,刘雪琪,梅倩,等.湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异[J].中国人口·资源与环境,2018(10):62-70.
- [8]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(2):190-198.
- [9]Fattah M A,Morshed S R,Morshed S Y. Impacts of land use-based carbon emission pattern on surface temperature dynamics:Experience from the urban and suburban areas of Khulna,Bangladesh[J].Remote Sensing Applications:Society and Environment,2021,22:100508.
- [10]Zhang H L,Liu F.Spatial and temporal disparities in agricultural carbon emissions in Xinjiang and decomposition of impact factors[J].Chemical Engineering Transactions,2018,66:553-558.
- [11]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(12):45-54.
- [12]刘琼,肖海峰.农地经营规模与财政支农政策对农业碳排放的影响[J].资源科学,2020(6):1063-1073.
- [13]杨欣,谢向向.武汉市建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线分析[J].华中农业大学学报(社会科学版),2020(4):158-165,181-182.
- [14]Carpio A,Ponce-Lopez R,Lozano-García D F. Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area,Mexico[J].Urban Climate,2021,39:100947.
- [15]Li J,Huang X,Chuai X,et al.The impact of land urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta,China:A multiscale perspective[J].Cities,2021,116:103275.
- [16]Yang B,Chen X,Wang Z Q,et al.Analyzing land use structure efficiency with carbon emissions:A case study in the Middle Reaches of the Yangtze River,China[J]. Journal of Cleaner Production,2020,274:123076.

-
- [17]高艳丽,董捷,李璐,等.碳排放权交易政策的有效性及其作用机制研究——基于建设用地碳排放强度省际差异视角[J].长江流域资源与环境,2019(4):783-793.
- [18]Chuai X W,Huang X J,Wang W J,et al.Land use,total carbon emissions change and low carbon land management in Coastal Jiangsu,China[J].Journal of Cleaner Production,2015,103:77-86.
- [19]江文渊,曾珍香,张征云,等.城市水土资源利用碳排放系统动力学仿真研究——以天津市为例[J].安全与环境学报,2021(2):882-892.
- [20]田泽,黄萌萌.长江经济带终端能源消费碳减排效率与产业结构耦合分析[J].安徽师范大学学报(人文社会科学版),2018(1):92-100.
- [21]Wu S,Hu S G,Frazier A E.Spatiotemporal variation and driving factors of carbon emissions in three industrial land spaces in China from 1997 to 2016[J].Technological Forecasting and Social Change,2021,169(21):120837.
- [22]黄鑫,邢秀为,程文仕.土地利用碳排放与 GDP 含金量的脱钩关系及驱动因素[J].地域研究与开发,2020(3):156-161.
- [23]田志会,刘瑞涵.基于京津冀一体化的农田生态系统碳足迹年际变化规律研究[J].农业资源与环境学报,2018(2):167-173.
- [24]Ang B W.LMDI decomposition approach:A guide for implementation[J].Energy Policy,2015,86:233-238.
- [25]Jiang S,Zhu Y N,He G H,et al.Factors influencing China's non-residential power consumption:Estimation using the Kaya-LMDI methods[J].Energy,2020,201:117719.
- [26]周璟茹,赵华甫,吴金华.关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究[J].中国土地科学,2017(11):55-61,72.
- [27]王杰,李治国,谷继建.金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的分析[J].世界地理研究,2021(3):501-508.