

长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究¹

李键, 毛德华, 蒋子良, 李科

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

【摘要】 文章基于全生命周期的碳源—碳汇模型, 测算并分析了长林潭城市群 2007—2017 年土地利用的碳收支量, 并在此基础上应用 LMDI 分解模型与 Tapio 脱钩模型对土地利用碳排放变化的影响因素及其与经济增长间的内在关系进行了定量分析。主要结论如下: (1) 2007—2017 年, 长林潭城市群土地利用的净碳排放量呈逐年上升趋势, 年均增长率为 9.79%; (2) 经济发展水平与建设用地规模是促进长林潭城市群土地利用碳排放量增长的正效应因素, 碳排放强度与土地利用效率是抑制长林潭城市群土地利用碳排放量增长的负效应因素; (3) 10 年间, 长林潭城市群土地利用碳排放与经济增长除 2009—2010 年、2015—2016 年呈现扩展连接外, 其余年份处于弱脱钩状态。最后, 从碳减排与碳增汇视角提出土地低碳利用的政策建议。

【关键词】 土地利用碳排放; 因素分解; 脱钩效应; 长林潭城市群

【中图分类号】 F062.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-4407(2019)08-028-07

面对温室效应引起的全球气候变暖、极端天气频发等环境问题的日益严峻, 发展低碳经济、降低人为温室气体排放成为世界各国推动经济社会低碳转型与可持续发展的重要战略举措^[1]。党的十九大报告明确提出, 新时代背景下应加快生态文明体制改革, 建立健全绿色低碳循环发展的现代化经济体系, 努力形成人与自然和谐共生的新发展格局。越来越多的证据表明, 土地利用通过改变地表自然覆被与人类活动强度影响陆地生态系统所承载的碳循环过程, 是造成温室效应的主要人为因素之一^[2]。据世界资源组织公布的数据显示, 过去的 150 年间由土地利用所产生的碳排放约占同期人类活动总碳排放的 1/3, 土地利用已经成为仅次于化石能源消耗的第二大温室气体排放源^[3]。因此, 从土地利用视角开展碳排放研究, 对区域探索实现“资源—经济—环境”的耦合协调发展具有重要的现实意义。

目前, 我国的碳排放量已跃居世界首位^[4], 面对日益严峻的碳减排形势, 国内学者围绕土地利用碳排放问题展开了系统深入的研究, 主要集中在土地利用的碳排放机制、碳足迹评价、碳收支核算及碳排放效应等方面^[5-6]。周嘉等^[7]、唐洪松等^[8]依据碳源—碳汇模型对区域不同土地利用类型的碳排放与碳吸收进行了定量分析; 张俊峰等^[9]、张勇等^[10]利用 LMDI 模型及 STIRPAT 模型对土地利用碳排放变化的影响因素进行了分解; 袁凯华等^[11]采用空间计量和空间相关性方法探索了建设用地集约利用对碳排放效率的内在影响机制; 李波等^[12]运用聚类分析法对湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异进行了研究; 陈芷君等^[13]、程子腾等^[14]应用 Tapio 脱钩模型深入分析了土地利用碳排放与经济增长间的脱钩关系。虽然相关文献资料丰富, 但现有研究仍存在以下不足: 一是目前国内基于土地利用碳排放的研究大多集中在宏观(国家、省域)与微观(城市)尺度上, 对于中观(城

¹**基金项目:** 国家一流学科培育项目“地理学”(810006-1213); 湖南省国土资源科技项目“城市土地低碳利用研究”(2012-43); 湖南省重点研发计划项目“湘江流域水生态保护与修复生态补偿技术体系与机制研究”(2017SK2301)

第一作者简介: 李键(1995—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用规划与管理。E-mail: 1432272159@qq.com

通讯作者简介: 毛德华(1963—), 男, 湖南益阳人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为土地利用规划与管理、流域水资源与水环境。E-mail: 850276407@qq.com

市群、经济圈)尺度的相关问题关注较少,还有待加强研究;二是大多数学者在土地利用碳收支核算研究中,通常只考虑耕地、林地、园地、草地、建设用地等主要碳源—碳汇类型,忽略了其他农用地上的碳排放及水域和未利用地上的碳吸收,致使研究结果与现实情况不符,缺乏实践应用价值;三是不少学者开展了土地利用碳排放与经济增长的脱钩研究,但现有研究主要集中在探讨了两者的总体脱钩关系,对于土地利用碳排放各影响因素在脱钩关系中的内在作用机理的定量分析尚未涉及。

长株潭城市群作为我国首批“两型社会”建设试验区,新时代背景下如何保持足够的土地空间走绿色低碳循环发展道路,是综合配套改革步入深水区面临的巨大挑战。据此,本文以长株潭城市群为研究区域,通过构建基于全生命周期的碳源—碳汇模型,在测算分析城市群 2007—2017 年土地利用碳收支量的基础上,结合 Kaya 碳排放恒等式,应用 LMDI 分解模型与 Tapio 脱钩模型对土地利用碳排放变化的影响因素及其与经济增长间的内在关系进行了定量分析,研究成果旨在为长株潭城市群土地低碳利用政策、措施的制定提供借鉴参考。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 土地利用碳源—碳汇模型

土地利用兼具碳源—碳汇双重功能^[2]。以长株潭城市群土地利用现状为依据,将碳源分为农用地和建设用地,其碳排放量采用清单编制法进行核算。碳汇分为耕地和其他土地,其碳吸收量结合间接估算法与直接系数法进行核算。

农用地上的碳排放量主要是在农业生产活动、农作物生长及畜牧养殖过程中产生。其中,农业生产活动与农作物生长涉及的碳排放包括化肥、农药、农膜、农机使用,农田翻耕,农业灌溉,农作物呼吸等,其估算公式如下所示:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n G_i = \sum_{i=1}^n E_i \times \zeta_i \quad (1)$$

式中: C_1 为农业生产活动与农作物生长碳排放量; G_i 为各类碳源碳排放量; E_i 、 ζ_i 为各类碳源的数量或面积、碳排放系数。相关碳排放系数综合其他学者的研究成果^[5,9],并考虑区域性差异,分别取 0.895 6 kg/kg (化肥)、4.9341 kg/kg (农药)、5.18 kg/kg (农膜)、0.18 kg/kW (农机)、312.6 kg/hm² (农田翻耕)、266.48 kg/hm² (农业灌溉)、16.47 kg/hm² (农作物呼吸)。

畜牧养殖涉及的碳排放包括各类牲畜呼吸、排泄以及肠胃发酵等,其估算公式如下所示:

$$C_2 = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n Q_i \times \omega_i \quad (2)$$

式中: C_2 为畜牧养殖碳排放量; D_i 、 Q_i 、 ω_i 叫为各类牲畜的碳排放量、数量、碳排放系数(表 1)。

表 1 主要牲畜的碳排放系数

牲畜类型	碳排放系数/(kg/头)	牲畜类型	碳排放系数/(kg/匹)
猪	4.50	马	19.64
牛	48.80	驴	10.90
羊	5.16	骡	10.90

注：主要牲畜的碳排放系数来源于《ipcc 国家温室气体排放清单指南》。

建设用地上的碳排放量主要由能源消耗、人类活动及废弃物处理过程中产生。其中，能源消耗涉及的碳排放包括各类一、二次能源(如原煤、原油、天然气、电力等)在生产生活中的消费等，其估算公式如下所示：

$$C_3 = \sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n M_i \times N_i \times Y_i \quad (3)$$

式中： C_3 为能源消耗碳排放量； H_i 为各类能源碳排放量； M_i 、 N_i 、 Y_i 为各类能源的消耗量、标准煤折算系数及碳排放系数(表 2)。

表 2 主要能源的标准煤折算系数与碳排放系数

能源种类	标准煤折算系数	碳排放系数/(kg/kgce)	能源种类	标准煤折算系数	碳排放系数/(kg/kgce)
原煤	0.714 3	0.755 9	煤油	1.471 4	0.571 4
焦炭	0.971 4	0.855 0	柴油	1.457 1	0.592 1
天然气	1.330 0	0.448 3	燃料油	1.428 6	0.618 5
原油	1.428 6	0.585 7	液化石油气	1.714 3	0.504 2
汽油	1.471 4	0.553 8	电力	0.122 9	0.747 6

注：主要能源的标准煤折算系数与碳排放系数来源于《IPCC 国家温室气体排放清单指南》。标准煤折算系数中，天然气、液化石油气的单位是 kgce/m³，电力的单位是 kgce/kW，其余的单位是 kgce/kg。

人类活动与废弃物处理涉及的碳排放包括人类新陈代谢、废弃物(主要是城市生活垃圾)处理等，其估算公式如下所示：

$$C_4 = P \times \beta \quad (4)$$

$$C_5 = IW \times CW \times IF \times CF \times 44/12 \quad (5)$$

式中： C_4 为人类活动碳排放量； C_5 为废弃物处理碳排放量； P 、 β 为人口数量、人均碳排放系数(79 kg/a)^[15]； IW 为废弃物焚烧量； CW 、 IF 、 CF 为废弃物的碳含量比例(20%)、矿物碳比例(39%)、燃烧效率(95%)。

耕地上的碳吸收量主要由各类农作物在生长发育期间通过光合作用产生，其估算公式如下所示：

$$CI_a = \sum_{i=1}^n S_i \times K_i = \sum_{i=1}^n S_i \times \frac{B_i}{T_i} \quad (6)$$

式中：CI_a为耕地碳吸收量；S_i、K_i为农作物的碳吸收率、生物产量；B_i、T_i为农作物的经济产量、经济系数(表 3)。

表 3 主要农作物的碳吸收率与经济系数

粮食作物	碳吸收率	经济系数	经济作物	碳吸收率	经济系数
水稻	0.414 4	0.489	油菜	0.45	0.271
小麦	0.485 3	0.434	麻类	0.45	0.830
玉米	0.470 9	0.438	烟草	0.45	0.830
大豆	0.450 0	0.425	茶叶	0.45	0.830
薯类	0.422 6	0.667	棉花	0.45	0.100

注：主要农作物的碳吸收率与经济系数来源于毛德华^[16]以及《省级温室气体清单编制指南》。

其他土地主要包括园地、林地、草地、水域及未利用地等，其碳吸收量的估算公式如下所示：

$$CI_b = \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n A_i \times \varepsilon_i \quad (7)$$

式中：CI_b为其他土地碳吸收量；X_i为不同地类碳吸收量；A_i、ε_i为不同地类的面积、碳吸收系数。相关碳吸收系数综合其他学者^[4-5, 8, 17-18]的研究成果并考虑区域性差异，分别取-0.524 吨/公顷（园地）、-0.644 吨/公顷(林地)、-0.390 吨/公顷(草地)、-0.218 吨/公顷(水域)、-0.005 吨/公顷（未利用地）。

1.1.2 碳排放因素分解模型

对数均值迪氏指数分解法(logarithmic mean divisiaindex, LMDI)由 Ang^[19]首次提出，该法在对目标变量进行因素分解过程中由于具有消除残差项、处理数据零值等优点，因此分解结果的适用性更强^[17]。本文在现有研究的基础上^[18, 20]，结合 Kaya 碳排放恒等式，应用 LMDI 分解模型将长株潭城市群土地利用碳排放分解成碳排放强度、经济发展水平、土地利用效率、建设用地规模 4 个影响因素的乘积形式，其表达式如下所示：

$$C = \frac{C}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times \frac{P}{S} \times S = e \times f \times g \times h \quad (8)$$

式中：C 为土地利用碳排放量；GDP 为地区生产总值；P 为人口数量；S 为建设用地面积。定义 $e = \frac{C}{GDP}$ 即单位碳排放量，表征碳排放强度因素； $f = \frac{GDP}{P}$ 即人均 GDP，表征经济发展水平因素； $g = \frac{P}{S}$ 即城市人口密度，表征土地利用效率因素；h=s 即建设用地面积，表征建设用地规模因素。采用 LMDI 模型中的加和分解方式对公式(8)进行因素分解，结果如下所示：

$$\Delta C = C^t - C^0 = \Delta C_e + \Delta C_f + \Delta C_g + \Delta C_h \quad (9)$$

式中：\$C^0\$、\$C^t\$ 为基期、\$t\$ 期的土地利用碳排放量；\$\Delta C\$ 为土地利用碳排放的变化量即综合效应；\$\Delta C_e\$、\$\Delta C_f\$、\$\Delta C_g\$、\$\Delta C_h\$ 为各影响因素的分效应，其表达式为：

$$\Delta C_e = L(C^t, C^0) \times \ln \frac{e^t}{e^0}, \quad \Delta C_f = L(C^t, C^0) \times \ln \frac{f^t}{f^0},$$

$$\Delta C_g = L(C^t, C^0) \times \ln \frac{g^t}{g^0}, \quad \Delta C_h = L(C^t, C^0) \times \ln \frac{h^t}{h^0}$$

对式中的 \$L(C^t, C^0)\$ 做出如下定义：

$$L(C^t, C^0) = \begin{cases} (C^t - C^0) / \ln C^t - \ln C^0, & C^t \neq C^0 \\ C^t, & C^t = C^0 \neq 0 \\ 0, & C^t = C^0 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

为了深入了解各影响因素对长株潭城市群土地利用碳排放变化的贡献大小，定义各分效应的贡献率为：

$$\eta_e = \frac{\Delta C_e}{\Delta C}, \quad \eta_f = \frac{\Delta C_f}{\Delta C}, \quad \eta_g = \frac{\Delta C_g}{\Delta C}, \quad \eta_h = \frac{\Delta C_h}{\Delta C},$$

其中，\$\eta_e\$、\$\eta_f\$、\$\eta_g\$、\$\eta_h\$ 为各分效应对长株潭城市群土地利用碳排放变化的贡献率。

1.1.3 脱钩效应量化模型

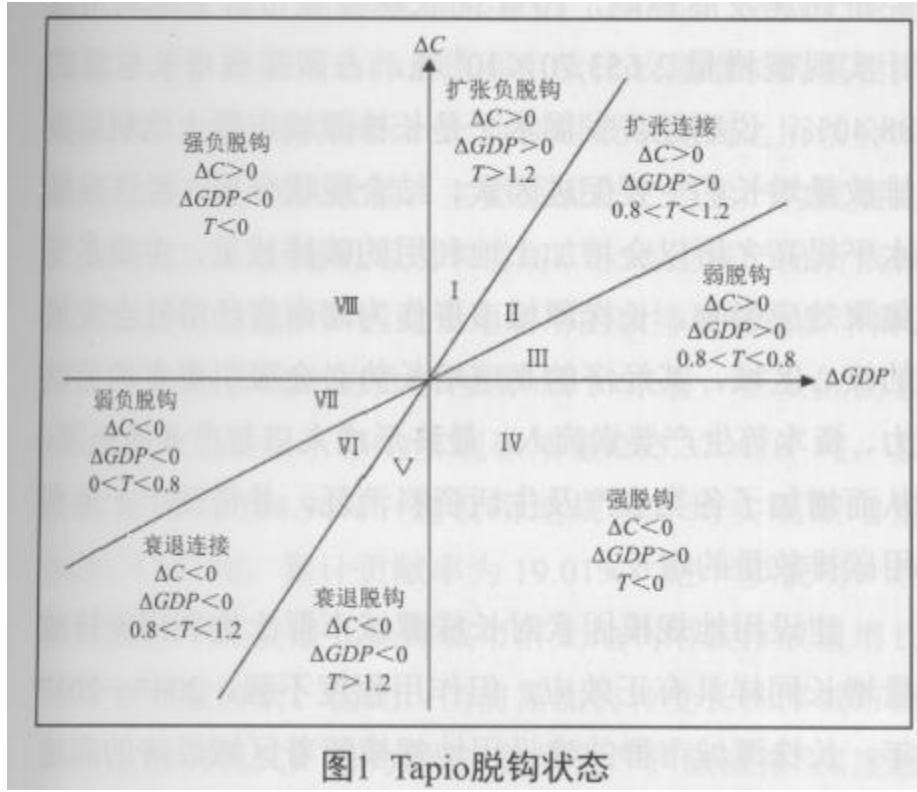
目前，脱钩指标的构建主要有基于期初一期末值的 OECD 脱钩指数模型和基于增长弹性变化的 Tapio 脱钩状态分析模型两种主流模式^[13]。与 OECD 脱钩指数模型相比，Tapio 脱钩状态分析模型在稳定性和精确性方面更具优势^[14]。因此，本文应用 Tapio 脱钩状态分析模型对长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长间的脱钩效应进行定量分析，其表达式如下所示：

$$\begin{aligned} T_{(C, GDP)} &= \frac{\% \Delta C}{\% \Delta GDP} = \frac{(C^t - C^0) / C^0}{(GDP^t - GDP^0) / GDP^0} \\ &= \frac{\Delta C}{C^0} \times \frac{GDP^0}{\Delta GDP} = \Delta C \times \frac{GDP^0}{C^0 \times \Delta GDP} \end{aligned} \quad (11)$$

式中：\$T_{(C, GDP)}\$ 为脱钩弹性值；\$\% \Delta C\$、\$\% \Delta GDP\$ 为土地利用碳排放量与地区生产总值的变化率；\$GDP^0\$、\$GDP^t\$ 为基期、\$t\$ 期的地

区生产总值； ΔGDP 为地区生产总值的变化量。

Tapio 根据弹性值大小将脱钩状态划分为 8 种类型(图 1)，其中强脱钩是最理想的脱钩状态，表明城市经济实现了低碳可持续性增长；强负脱钩则是最不理想的脱钩状态，表明城市经济增长还未能摆脱对能源消耗的过度依赖^[21]。



结合因素分解结果，将长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长间的脱钩效应进一步分解量化，得到各影响因素的脱钩弹性分值，其表达式如下所示：

$$\begin{aligned}
 T_{(C, GDP)} &= \Delta C \times \frac{GDP^0}{C^0 \times \Delta GDP} \\
 &= (\Delta C_e + \Delta C_f + \Delta C_g + \Delta C_h) \times \frac{GDP^0}{C^0 \times \Delta GDP} \\
 &= \frac{\Delta C_e}{C^0} \times \frac{GDP^0}{\Delta GDP} + \frac{\Delta C_f}{C^0} \times \frac{GDP^0}{\Delta GDP} + \frac{\Delta C_g}{C^0} \\
 &\quad \times \frac{GDP^0}{\Delta GDP} + \frac{\Delta C_h}{C^0} \times \frac{GDP^0}{\Delta GDP} \\
 &= S_e + S_f + S_g + S_h
 \end{aligned} \tag{12}$$

式中： S_e 、 S_f 、 S_g 、 S_h 为各影响因素的脱钩弹性分值。

1.2 数据来源

研究涉及的基础数据主要包括土地利用变更数据、社会经济数据及其他数据三类。其中，长株潭城市群 2007—2017 年的土地利用变更数据由湖南省自然资源厅提供，社会经济数据（包括地区生产总值、人口数量、各类能源消耗量等）来源于长沙、株洲、湘潭三市 2007-2017 年的相关《统计年鉴》，其他数据（包括能源碳排放系数与标准煤折算系数、农作物碳吸收率与经济系数、其他土地碳吸收系数等）来源于相关标准及其他学者的研究成果。

2 结果与分析

2.1 长株潭城市群土地利用碳排放与碳吸收分析

依据碳源—碳汇模型，基于相关研究数据，测算出长株潭城市群 2007—2017 年土地利用的碳排放与碳吸收量（表 4）。

表 4 长株潭城市群 2007—2017 年土地利用的碳排放与碳吸收量

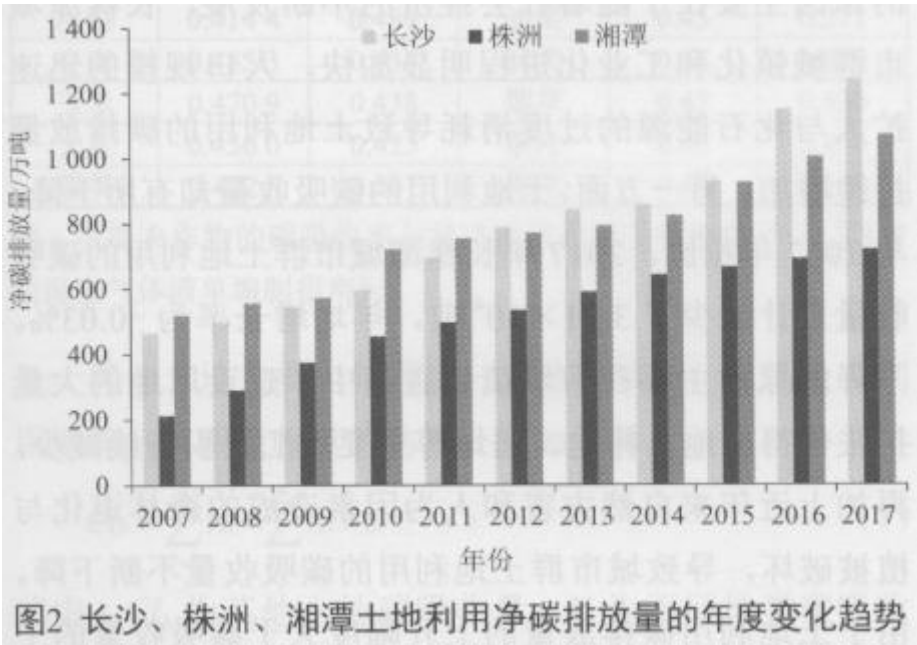
单位：10⁴吨

年份	土地利用碳排放量			土地利用碳吸收量			土地利用净碳排放量
	农用地	建设用地	总计	耕地	其他土地	总计	
2007	96.94	1 737.25	1 834.18	-533.40	-103.82	-637.23	1 196.96
2008	98.13	1 854.07	1 952.19	-506.34	-103.56	-609.90	1 342.29
2009	99.75	2 007.97	2 107.72	-516.26	103.30	-619.56	1 488.16
2010	101.34	2 293.50	2 394.85	-522.77	-102.83	-625.60	1 769.25
2011	103.05	2 453.61	2 556.67	-511.10	-102.53	-613.63	1 943.03
2012	108.16	2 602.70	2 710.86	-519.80	-102.35	-622.15	2 088.71
2013	109.76	2 730.61	2 840.36	-516.42	-101.97	-618.39	2 221.98
2014	113.37	2 837.99	2 951.36	-529.75	-101.80	-631.55	2 319.81
2015	115.87	3 043.23	3 159.10	-537.48	-101.61	-639.09	2 520.01
2016	116.72	3 357.61	3 474.33	-530.18	-101.40	-631.58	2 842.75
2017	117.76	3 544.09	3 661.84	-532.82	-101.20	-634.01	3 027.83

总体来看，2007—2017 年，长株潭城市群土地利用的碳排放与碳吸收量之间呈现不同的变化趋势。一方面，土地利用的碳排放量逐年上升，从 1 834.18×10⁴吨增加到 3 661.84×10⁴吨，10 年间土地利用累计增加碳排放 1 827.66×10⁴吨，年均增长率为 7.19%。上升的原因主要在于随着社会经济的不断发展，长株潭城市群城镇化和工业化进程明显加快，人口规模的迅速扩大与化石能源的过度消耗导致土地利用的碳排放量持续增加。另一方面，土地利用的碳吸收量却有所下降，与 2007 年相比，2017 年长株潭城市群土地利用的碳吸收量累计减少了 3.21×10⁴吨，年均增长率为-0.03%。下降的原因主要在于城镇化进程中，建设用地的大量扩张使得耕地、林地、园地等主要碳汇面积持续减少，再加上近年来自然灾害和人为因素造成的森林退化与植被破坏，导致城市群土地利用的碳吸收量不断下降。由于土地利用碳排放量的上升幅度大于碳吸收量的下降幅度，使得长株潭城市群 2007—2017 年土地利用的净碳排放量同样呈现逐年上升态势，由 1 196.96×10⁴吨增加到 3 027.83×10⁴吨，10 年间土地利用累计增加净碳排放 1 830.88×10⁴吨，年均增长率为 9.79%。因此，现阶段长株潭城市群节能减排的各项工作仍有待进一步加强。

各类碳源中，农用地与建设用地的碳排放量分别占碳排放总量的 4.11%、95.89%，说明建设用地是长株潭城市群土地利用的主要碳源。研究期间，农用地与建设用地的碳排放量均呈上升趋势。其中：建设用地上升幅度较大，从 1 737.25×10⁴吨增加到 3 544.09×10⁴吨，年均增长率为 7.43%；农用地上升幅度相对较小，10 年间共增加了 20.82×10⁴吨碳排放，年均增长率为 1.97%。为此，今后应严格控制建设用地所承载的各项碳排放活动。各类碳汇中，耕地与其他土地的碳吸收量分别占碳吸收总量的 83.63%、

16.37%,说明耕地是长株潭城市群土地利用的主要碳汇。研究期间,耕地与其他土地的碳吸收量均呈下降趋势。其中:耕地表现为波动下降,10年间的最大值为 $5\,37.48\times 10^4$ 吨,最小值为 506.34×10^4 吨;其他土地表现为逐年下降,从 103.82×10^4 吨减少到 101.2×10^4 吨,年均下降率为0.26%。为此,今后应加强植树造林,适当增加林地、园地、草地等碳汇面积。从各城市土地利用净碳排放量的变化趋势来看(图2),2007—2017年长沙、株洲、湘潭三市土地利用的净碳排放量均有所上升。其中,株洲市的上升幅度最大,从 213.38×10^4 吨增加到 718.51×10^4 吨,年均增长率为13.39%;长沙市的上升幅度次之,从 465.23×10^4 吨增长到 $1\,239.06\times 10^4$ 吨,年均增长率为10.44%;湘潭市的上升幅度最小,从 518.34×10^4 吨增长到 $1\,070.26\times 10^4$ 吨,年均增长率为7.72%。因此,株洲市作为传统老工业基地,今后应加快推进经济社会的低碳转型发展,努力实现城市土地的低碳利用。



2.2 长株潭城市群土地利用碳排放影响因素分析

依据 LMDI 模型,基于因素分解公式(8)~(10),计算出各影响因素对长株潭城市群土地利用碳排放变化的年度效应与累计效应(表5)。

表5 长株潭城市群土地利用碳排放影响因素分解结果

单位: 10^4 吨

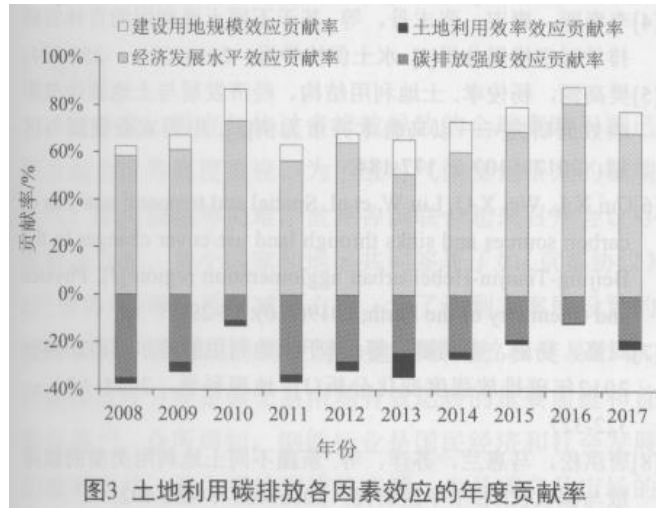
年份	碳排放强度效应	经济发展水平效应	土地利用效率效应	建设用地规模效应	综合效应
2007—2008	-203.20	338.58	-14.66	24.62	145.33
2008—2009	-119.23	255.10	-16.92	26.92	145.87
2009—2010	-41.57	280.03	-8.97	51.59	281.09
2010—2011	-220.57	369.25	-20.27	45.37	173.79
2011—2012	-112.55	258.49	-15.96	15.70	145.67
2012—2013	-104.54	219.00	-43.22	62.03	133.27
2013—2014	-50.26	127.09	-6.05	27.06	97.83
2014—2015	-62.58	233.63	-6.17	35.32	200.20

2015—2016	-48.14	344.09	-2.06	28.85	322.73
2016—2017	-62.10	228.44	-11.85	30.60	185.09
累计效应	-1 024.75	2 653.70	-146.14	348.06	1 830.88

经济发展水平因素对长株潭城市群土地利用碳排放量增长具有显著的正效应。2007—2017 年，长株潭城市群的经济增速位于全省前列，地区生产总值从 3 468.32 亿元增加到 15 678.84 亿元，年均增长率为 16.51%。受经济高速发展影响，10 年间长株潭城市群土地利用累计实现碳增量 $2\,653.70 \times 10^4$ 吨，占碳排放增长总量的 88.40%，说明经济发展水平是长株潭城市群土地利用碳排放量增长的主要促进因素。结合现状分析，经济发展水平提高之所以会增加土地利用的碳排放量，主要是受集聚效应影响。长株潭城市群作为湖南省经济社会发展的核心区域，其经济的高速增长势必会吸引更多的劳动力、资本等生产要素流入，最终形成人口与产业的集聚，从而增加了各类生产及生活资料消耗，并带动了土地利用碳排放量的增长。

建设用地规模因素对长株潭城市群土地利用碳排放量增长同样具有正效应，但作用程度不强。2007—2017 年，长株潭城市群的建设用地规模随着区域经济的快速发展不断扩大，建设用地面积从 31.89×10^4 公顷增加到 38.14×10^4 公顷，年均增长率为 1.81%。受建设用地扩张影响，与 2007 年相比，2017 年长株潭城市群土地利用累计实现碳增量 348.06×10^4 吨，占碳排放增长总量的 11.60%，说明建设用地规模是长株潭城市群土地利用碳排放量增长的重要促进因素。结合现状分析，建设用地规模扩大之所以会增加土地利用的碳排放量，主要原因在于建设用地规模扩大后，其所承载的各项人类活动如工业生产、生活消费、能源消耗等有所增加，从而导致土地利用的碳排放量的大幅增长。

碳排放强度因素对长株潭城市群土地利用碳排放量增长具有显著的负效应。2007—2017 年，长株潭城市群的碳排放强度从 0.35×10^4 吨/万元减少到 0.19×10^4 吨/万元，年均增长率为 -5.54%。受碳排放强度降低影响，10 年间长株潭城市群土地利用累计实现碳减量 $1\,024.75 \times 10^4$ 吨，占碳减排总量的 87.52%，说明碳排放强度是长株潭城市群土地利用碳排放量增长的主要抑制因素。结合现状分析，碳排放强度主要与能源结构、产业结构、能源利用效率、单位 GDP 能耗等指标相关，碳排放强度降低则说明在低碳转型发展的目标要求下，长株潭城市群的能源与产业结构不断得到优化，同时新能源技术的发展又使能源利用效率得到普遍提高，从而降低了单位 GDP 能耗，因此土地利用的碳排放量有所减少。土地利用效率因素对长株潭城市群土地利用碳排放量增长同样具有负效应，但影响程度相对较弱。2007—2017 年，土地利用效率因素的年度效应均为负值，其计算结果位于 $-43.22 \times 10^4 \sim -2.06 \times 10^4$ 吨之间，平均值为 -14.61×10^4 吨，即土地利用效率因素变动年均减少碳排放 14.61×10^4 吨。受土地利用效率提高影响，与 2007 年相比，2017 年长株潭城市群土地利用累计实现碳减量 146.14×10^4 吨，占碳减排总量的 12.48%，说明土地利用效率是长株潭城市群土地利用碳排放量增长的重要抑制因素。结合现状分析，土地利用效率提高之所以会减少土地利用的碳排放量，主要原因在于当生产力发展到一定程度时，土地利用效率越高，土地经济产出所依赖的资源投入就越少，因此土地利用的碳排放量逐步下降。从各因素效应的贡献程度（图 3）来看，正效应因素中，经济发展水平年均实现碳增量 265.37×10^4 吨，累计贡献率为 144.94%；建设用地规模年均实现碳增量 34.81×10^4 吨，累计贡献率为 19.01%。进一步说明，经济发展水平是促进长株潭城市群土地利用碳排放量增长的主要贡献因素。因此，当前需加快转变长株潭城市群经济发展的模式，努力形成“稳增长”与“碳减排”深度融合的新发展格局。负效应因素中，碳排放强度年均实现碳减量 102.47×10^4 吨，累计贡献率为 -55.97%；土地利用效率年均实现碳减量 14.61×10^4 吨，累计贡献率为 7.98%。进一步说明，碳排放强度是抑制长株潭城市群土地利用碳排放量增长的主要贡献因素。因此，今后应充分挖掘降低碳排放强度、优化能源消费结构在实现长株潭城市群土地利用碳减排中的潜力。



2.3 土地利用碳排放与经济增长的脱钩效应分析

依据 Tapio 模型，基于脱钩公式（11）～（12），计算出长株潭城市群 2007—2017 年土地利用碳排放与经济增长间的脱钩弹性值及分值（表 6），对计算结果进行分析发现：

表 6 长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长的脱钩弹性值与分值

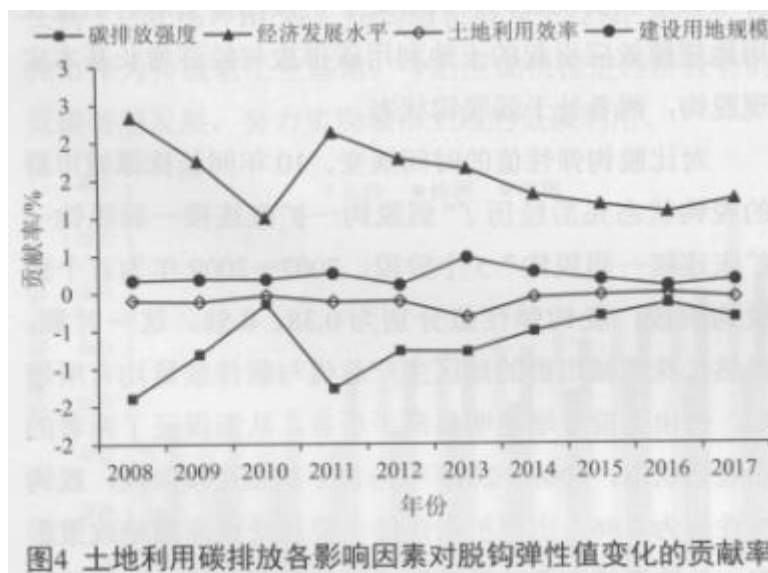
年份	碳排放强度脱钩弹性	经济发展水平脱钩弹性	土地利用效率脱钩弹性	建设用地规模脱钩弹性	脱钩弹性	脱钩状态
2007—2008	-0.54	0.89	-0.04	0.07	0.38	弱脱钩
2008—2009	-0.43	0.92	-0.06	0.10	0.53	弱脱钩
2009—2010	-0.13	0.86	-0.03	0.16	0.86	扩张连接
2010—2011	-0.53	0.88	-0.05	0.11	0.41	弱脱钩
2011—2012	-0.42	0.97	-0.06	0.06	0.55	弱脱钩
2012—2013	-0.43	0.90	-0.18	0.25	0.55	弱脱钩
2013—2014	-0.34	0.85	-0.04	0.18	0.65	弱脱钩
2014—2015	-0.24	0.88	-0.02	0.13	0.75	弱脱钩
2015—2016	-0.13	0.92	-0.01	0.08	0.86	扩张连接
2016—2017	-0.25	0.91	-0.05	0.12	0.74	弱脱钩

2007—2017 年，长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长除个别年份（2009—2010 年、2015—2016 年）呈现扩张连接外，其余年份整体处于弱脱钩状态。各影响因素中，由碳排放强度与土地利用效率效应引起的土地利用碳排放与经济增长实现了脱钩，两者处于强脱钩状态。由经济发展水平效应引起的土地利用碳排放与经济增长未能实现脱钩，两者处于扩张连接状态。由建设用地规模效应引起的土地利用碳排放与经济增长基本实现脱钩，两者处于弱脱钩状态。

对比脱钩弹性值的时间演变，10 年间长株潭城市群的脱钩状态先后经历了“弱脱钩—扩张连接—弱脱钩—扩张连接—弱脱钩”5 个阶段。2007—2009 年为首个弱脱钩阶段，脱钩弹性值分别为 0.38、0.53。这一时期，虽然长株潭城市群的地区生产总值与碳排放量均有所增加，但由于前者增速明显高于后者，从而保证了两者的弱脱钩状态。2009—2010 年为首个扩张连接阶段，脱钩弹性值为 0.86。出现扩张连接主要是受国家激励政策影响，长株潭城市群的经济形式明显得到好转，能源消耗的不断增加

导致碳排放量出现大幅增长。2010—2015 年为第二个弱脱钩阶段,脱钩弹性值位于 0.41~0.75 之间。这一时期为主动适应经济发展新常态,长株潭城市群加快转变高能耗的经济发展模式,各项节能降耗措施使土地高碳利用的趋势得到了有效控制,因此经济增长处于弱脱钩状态。2015—2016 年为第二个扩张连接阶段,脱钩弹性值为 0.86。再次出现扩张连接主要原因在于为积极响应国家“中部崛起”战略,长株潭城市群的基础设施建设和固定资产投资持续加强,从而增加了土地利用的碳排放量。2016—2017 年为第三个弱脱钩阶段,脱钩弹性值为 0.74。这一时期在“创新驱动”战略的影响下,长株潭城市群地区生产总值与碳排放量的增速明显放缓,所以脱钩弹性值出现下降。

从各影响因素对脱钩弹性值变化的贡献程度来看(图 4),10 年间碳排放强度效应的脱钩弹性分值基本稳定在-0.54~-0.13 之间,其对脱钩弹性值变化的年度贡献率位于-139.81%~-14.79%之间,累计贡献率为-54.40%。经济发展水平效应的脱钩弹性分值基本稳定在 0.86~0.97,其对脱钩弹性值变化的年度贡献率位于 99.62%~232.97%之间,累计贡献率为 142.87%。土地利用效率效应的脱钩弹性分值基本稳定在-0.18~-0.01,其对脱钩弹性值变化的年度贡献率位于-32.43%~-0.64%之间,累计贡献率为-8.42%。建设用地规模效应的脱钩弹性分值基本稳定在 0.07~0.25,其对脱钩弹性值变化的年度贡献率位于 8.94%~46.55%之间,累计贡献率为 19.95%。上述结果说明,经济发展水平是长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长实现脱钩的主要限制因素,主要原因在于经济的高速发展势必会增加各类物质资料消耗,从而带动了土地利用碳排放量的增长。为此,长株潭城市群应积极推动经济社会的低碳转型,努力健全绿色低碳循环发展的现代化经济体系。



3 结论与建议

通过测算长株潭城市群 2007—2017 年土地利用的净碳排放量,并对其变化的影响因素及脱钩效应进行了分析,主要结论如下:(1) 2007—2017 年,长株潭城市群土地利用的净碳排放量呈现逐年上升趋势,从 $1\,196.96 \times 10^4$ 吨增加到 $3\,027.83 \times 10^4$ 吨,10 年间土地利用累计增加净碳排放 $1\,830.88 \times 10^4$ 吨,年均增长率为 9.79%。(2) 经济发展水平与建设用地规模对土地利用碳排放量增长具有正效应,其中经济发展水平是主要的促进因素。碳排放强度与土地利用效率对土地利用碳排放量增长具有负效应,其中碳排放强度是主要的抑制因素。(3) 10 年间,长株潭城市群土地利用碳排放与经济增长除个别年份(2009—2010 年、2015—2016 年)呈现扩张连接外,其余年份整体处于弱脱钩状态。各影响因素中,碳排放强度与土地利用效率效应引起的碳排放与经济增长实现了脱钩,两者处于强脱钩状态。经济发展水平效应引起的碳排放与经济增长未能实现脱钩,两者处于扩张连接状态。建设用地规模效应引起的碳排放与经济增长基本实现脱钩,两者处于弱脱钩状态。

基于上述研究结论,从碳减排与碳增汇视角提出以下土地低碳利用的政策建议:一是调整产业结构,转变经济发展模式。

长株潭城市群应抓住“中国制造 2025”示范区建设机遇，着力推进产业结构优化升级，努力形成稳增长与碳减排深度融合的新发展格局。二是改善能源消费结构，提升经济增长动力。要加快构建清洁、低碳、绿色、环保的新能源体系，努力推进能源消费结构由煤炭为主向多元化的转变，经济增长动力由传统能源向新能源的转变。三是优化土地利用结构，增强土地碳汇功能。在新一轮国土空间规划编制的过程中，应严格控制建设用地扩张，保护并适当增加碳汇面积，以结构调整的方式实现土地利用的“增汇降源”。四是保护土地生态空间，加大生态建设力度。应尽快完成“三区三线”的划定工作，合理安排“三生”空间，同时加强植树造林，努力推进国土绿化与森林城市建设。

参考文献：

- [1]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.
- [2]赵荣钦，黄贤金，揣小伟.中国土地利用碳排放的研究误区和未来趋向[J].中国土地科学,2016（12）： 83-92.
- [3]韩骥，周翔，象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报，2016（4）： 1152-1161.
- [4]李春丽，唐宏，张志丹，等.基于不同土地利用的吉林省碳排放时空格局分析[J].水土保持学根，2016（1）： 250-254.
- [5]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（10）： 177-184.
- [6]Cui X L, Wei X Q, Liu W, et al. Spatial and temporal analysis of carbon sources and sinks through land use/cover changes in the Beiyang-Tianjin-Hebei urban agglomeration region [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2019(110): 17-29.
- [7]周嘉，杨琳，童美娜，等.基于土地利用的哈尔滨市 2004—2012 年碳排放强度变化分析[J].地理科学，2015（3）： 322-327.
- [8]唐洪松，马惠兰，苏洋，等.新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J].干旱区研究，2016（3）： 486-492.
- [9]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（5）： 595-602.
- [10]张勇，张乐勤，汪应宏，等.安徽省池州市土地利用碳排放演变及其影响因素[J].中国农业大学学报，2014（2）： 216-223.
- [11]袁凯华，梅昀，陈银蓉，等.中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制[J].资源科学，2017（10）： 1882-1895.
- [12]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.
- [13]陈芷君，刘毅华，林华荣.广东省土地利用碳排放与经济增长之间的脱钩分析[J].生态经济，2018（5）： 26-32.
- [14]程子腾，严金明，高峰.土地利用碳排放与经济增长研究——以柳州市为例[J].生态经济，2016（8）： 87-89.

-
- [15]匡耀求, 欧阳婷萍, 邹毅, 等. 广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010 (12) : 56-61.
- [16]毛德华. 城市土地低碳利用研究——以长沙市为例[M]. 北京: 经济日报出版社, 2018.
- [17]王亮. 盐城市土地利用变化碳排放效益及影响因素分解研究[J]. 生态科学, 2015 (5) : 122-128.
- [18]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 (1) : 382-390.
- [19]Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.
- [20]邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 2014 (2) : 189-200.
- [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.