

城市紧凑度与碳排放强度的时空

互动关系及驱动因素

——以长株潭城市群为例

杨浩¹ 卢新海^{1, 2} 匡兵¹ 侯娇¹¹

(1. 华中师范大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430079;

2. 华中科技大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430074)

【摘要】: 探索城市建设与低碳经济发展之间的互动规律对实现区域高质量可持续发展有着重要意义。基于此, 本文以长株潭城市群为研究区, 综合运用脱钩发展模型和灰色关联度等方法分析城市紧凑度和碳排放强度两者之间的互动关系及驱动因素。结果表明: (1) 2005~2017 年长株潭城市群 UC 指数以及各类功能紧凑度的耦合协调度总体呈上升趋势, 但各市区仍存有较大提升空间; (2) 研究期长株潭城市群 CEI 值呈逐年下降趋势, 且各市区 CEI 值变化速率略有差异; 总体来看大致可划分为高碳排放(2005~2007 年)、持续减排(2008~2011 年)和低碳优化(2011~2017 年)3 个阶段; (3) 长株潭城市群 UC 和 CEI 多数年份处于强脱钩关系, 少数年份表现为衰退脱钩及其他状态, 各市区历年的脱钩状态和程度略有差异; (4) 长株潭城市群 UC 和 CEI 的脱钩状态与各驱动因素的时空关联度表现不尽相同; 整体来看, 影响程度由弱到强依次表现为政府参与<科技创新<人口素质<城镇化水平<产业结构。未来城市建设过程中应注重各运行系统的耦合协调, 在重视高品质城市开发的同时亦需结合自身资源禀赋创新打造城市的低碳发展模式。

【关键词】: 城市紧凑度 碳排放强度 脱钩模型 长株潭城市群

【中图分类号】: F205;F293.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)11-2618-12

城市是社会经济发展的主要空间载体, 其经济密度远超其他区域, 因而城市发展的质量直接影响着区域土地利用综合效益^[1]。城市粗放蔓延式的发展往往会引发一系列问题, 从而使得构建一种高效和资源节约型的城市发展模式成为公众的共识。1973 年西方学者丹尼兹格(Dantzig)等首次提出紧凑城市概念, 认为缩短交通距离能显著减少污染物排放并促进城市的可持续发展。至此紧凑城市理论被学界广泛关注^[2,3], 并被证实是一种缓解能源紧缺和环境污染行之有效的大型城市发展模式^[4]。与此同时随着低碳经济理论的发展和碳减排意愿的加强, 涉及碳排放方面的研究成为近年来关注的热点^[5]。众多学者对发展中国家的国情进行考量后, 认为基于碳排放强度的温室气体减排方案更加公平^[6]。碳排放强度即单位产值的碳排放量, 是衡量低碳经济发展的重要参考。通过提高碳排放强度以间接达到减排目的, 能有效解决经济发展与碳排放强度持续增加所产生的困扰。而城市用地是碳排

作者简介: 杨浩(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地碳排放和城乡规划。E-mail:chucaifengyun@163.com;卢新海, E-mail:xinhailu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41901256);国家自然科学基金项目(71673096)

放最主要的来源地，因而从土地利用的视角开展城市碳排放效率研究亦有助于了解区域的碳排放规律^[7]。由此可知，城市紧凑度和城市碳排放强度是表征城市空间高质量开发利用的两个重要指标。那么城市空间紧凑度和以生态效益为考量的城市用地碳排放强度在时空格局上呈现怎样的一种演化特征关系？影响两者关系发生变化的驱动因素有哪些，以及驱动强度有何差异？本文将围绕以上问题展开研究，以进一步揭示城市紧凑性与碳排放强度的互动关系及其驱动因素。

国内外学者关于城市紧凑度方面的研究较为丰富。研究方法上可大致归为两类：一类使用城市空间形态紧凑度模型等对城市用地状况进行物理指标测量^[8]；另一类则更注重城市功能上的紧凑性，使用综合评价指标体系对城市紧凑程度进行度量^[9,10]。虽然现有研究普遍认为紧凑城市建设在提高城市效率、防止城市无序蔓延和控制温室气体排放等方面能起到重要作用^[9]，但是由高密度的城市发展所带来的城市拥堵和城市热岛效应等问题亦不容忽视，因此寻求适度的紧凑才是城市高质量发展的最优选择。国内外关于碳排放方面的研究则可从测算方法、影响因素和耦合关系等三个方面进行梳理。从测算方法来看，部分学者将单位GDP碳排放量、单位能源碳排放量或者人均碳排放量等作为衡量碳排放特征的指标。也有部分学者运用改进后的DEA^[11]或SFA^[12]等方法衡量碳排放的产出效率。从影响因素来看，学者们的研究表明影响碳排放强度和效率的因素主要包括：环境规制强度^[13]、政府干预^[14]、产业结构^[15]以及科技水平^[16]等；且不同因素的变化对碳排放强度和效率的影响程度不同。耦合关系方面的研究，主要探讨碳排放效率与产业结构的关系^[17]、碳排放-经济发展-环境保护的耦合协调^[18]以及碳排放与城镇化的耦合关系^[19,20]等。此外，也有不少学者从产业部门的角度对交通^[22]、出口贸易^[21]、工业和农业^[22,23]等方面碳排放强度和效率展开过研究。

随着关于城市问题的系统性研究不断增强，对城市紧凑性和低碳经济之间的互动关系研究也成为当下急需探讨的课题。然而现有文献中关于两者之间的关系研究较少且规律总结相对欠缺。现有文献主要涉及城市紧凑度与能源使用效率方面的互动机制^[24]，以及城市的空间紧凑度与碳排放强度之间的关系研究等^[25]。上述研究结果皆表明不同阶段的城市特征与同时期的城市碳排放强度存在某种互动关联特征。总体来看，现阶段虽对城市紧凑度和碳排放等分领域皆有较深入的探讨，但在城市功能紧凑度与碳排放强度的互动关系研究方面却略显单薄。因此，本文认为还可从以下几方面进一步完善：一是目前文献对城市紧凑度和碳排放强度的研究多关注其总量变化上，然而刻量区域人地关系的紧张程度和产出水平使用人均、地均和单位产出效率等指标往往更为科学；二是现有文献在城市紧凑度与碳排放强度的关系研究中内容深度不够，其机理还有待进一步解释；三是已有文献多侧重于宏观尺度，对区域城市群层面的地级城市尺度关注较少。

综上所述，探讨城市紧凑度(UC)与碳排放强度(CEI)之间的整体演进趋势和局部差异对区域的低碳可持续发展至关重要。长株潭城市群作为中部地区重要的经济增长极，于2005年被纳入国家发展战略，此后其城市化水平和一体化进程进入快速发展阶段。由此，本文以长株潭城市群为例，尝试构建UC与CEI的测算指标体系，以揭示二者的时序演变特征及其互动关系。首先利用熵值法计算UC指标的权重，通过加权求和得到长株潭UC指数历年变化情况；并进一步探讨各功能紧凑度的耦合协调发展特征。然后对测算长株潭市区历年碳排放量和碳排放强度，分析其历年的碳排放波动情况及背景。最后，通过探讨长株潭城市群UC与CEI之间的脱钩关系及驱动因素，提出提升城市高质量发展水平的可行策略。本文旨在揭示中国中部城市群UC与CEI之间的发展规律和互动关系，以期为区域可持续发展提供相关政策建议。

1 研究区概况与数据来源

长株潭城市群行政面积约2.81万km²，2005~2017年GDP由2410.88亿元增加到14745.39亿元，增长511.62%；全域总人口从1289.50万人增加到1479.20万人，增长14.71%。鉴于探讨的是市辖区的UC与CEI值，因此关注的是长株潭城市群各市辖区范围内的城市建设和能源消耗碳排放情况。至2017年长株潭区域市辖区总面积约3666km²，建成区总面积约653km²，总人口约524万人，GDP总量达8798.61亿元。为了考察UC与CEI的动态时空互动关系，本文以2005~2017年长株潭城市群的面板数据为样本。指标中涉及的市辖区面积统一采用2017年的行政区划范围；市区人口指市辖区年均常住人口；固定资产投资不含农户固定资产投资；GDP值以2005为基期年进行平整处理。由于统计口径和其他客观原因所造成的数据误差和缺失，通过数据平差法和比例推算法进行修正和补充。其中能源消耗量来自历年的《湖南省统计年鉴》和各地市年鉴，其他数据来自对应年份的《中国城市统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 城市紧凑度测算

根据已有研究成果，城市紧凑度测算多从城市空间物理紧凑和城市空间功能紧凑两方面考量。但相对于单纯物理形态上的紧凑，城市功能紧凑性更能凸显城市的舒适性和持续性特点。本文在参照相关代表性文献的基础上^[10,26]，针对本区域特点进行适当修正，从城市土地利用、经济发展水平、常住人口和交通运转等四个方面构建紧凑度指标体系，见表1。为消除不同量纲带来的影响，对二级指标数据进行离差标准化。采用熵值法计算紧凑度指标的权重系数。熵值法能很好地克服多指标变量间信息的重叠和人为确定权重的主观性，从而客观地反映各指标要素之间的内部变化^[27]。

表1 城市紧凑度测算指标体系

	指标	二级指标	二级指标说明	单位	权重
城市紧凑度	土地利用紧凑	市区开发利用强度(+)	建成区面积/市区面积 X_1	%	0.052
		建成区硬化率(+)	建成区建设用地面积/建成区面积 X_2	%	0.112
		人均建设用地(-)	市区建设用地面积/市区人口 X_3	km ² /万人	0.050
	经济紧凑	人口经济密度(+)	GDP/市区人口 X_4	万元/万人	0.101
		土地投入强度(+)	固定资产投资总额/市区面积 X_5	万元/km ²	0.117
		土地产出强度(+)	GDP/市区面积 X_6	万元/km ²	0.121
	人口紧凑	市区人口密度(+)	市区人口/市区面积 X_7	万人/km ²	0.103
		人口就业密度(+)	总从业人数/市区面积 X_8	人/km ²	0.106
		住宅人口密度(+)	市区人口/居住用地面积 X_9	万人/km ²	0.138
	交通紧凑	人均道路交通设施面积(-)	市区道路面积/市区人口 X_{10}	m ² /人	0.030
		每万人拥有公共汽车数(-)	年末公共营运汽电车/市区人口 X_{11}	辆/万人	0.026
		每万人拥有出租车数量(-)	年末出租车数/市区人口 X_{12}	辆/万人	0.044

2.2 碳排放强度测算

城市碳排放强度是指城市区域范围内单位经济产出所释放出的CO₂排放量，是衡量国家经济发展质量以及经济与环境关系的重要指标。该值的升降表征区域在实现低碳发展水平上的优劣情况。鉴于此，本研究采用相对直观的单位二三产值的碳排放量表征城市CEI。即碳排放强度Y=能源消耗碳排放E_j(t)/二三产业增加值Y₂(亿元)。其中市辖区的碳排放当量是以全市总碳排放量为基础，通过其行政区范围内生产总值贡献率进行折算而来。目前碳排放量核算的方法主要有物料平衡法、生命周期法、碳足迹估算法和碳排放系数法等^[28]。此处采用较为普遍的碳排放系数法核算长株潭城市群的碳排放量，计算公式如下：

$$E_j = \sum e_j \alpha_j \beta_j \quad (1)$$

式中： j 为消费能源的品种； E_j 为城市净碳排放总量； e_j 为第 j 种能源消耗量； α_j 为第 j 种能源消费量折标准煤的系数； β_j 为第 j 种能源的碳排放系数。各能源品种的碳排放系数主要参照国家环保局温室气体控制项目、日本能源经济研究所、国家科委气候变化项目以及 IPCC 碳排放计算指南等公布的参考系数；折标准煤系数则来源于《中国能源统计年鉴》（表 2）。

表 2 能源消耗的折标准煤系数和碳排放系数

能源品种	原煤 (t)	洗精煤 (t)	焦炭 (t)	原油 (t)	燃料油 (t)	汽油 (t)	柴油 (t)	煤油 (t)	液化石油 气(t)	气态天然气 (万 m ³)	电力(万 kW·h)
折标准煤 系数	0.71	0.90	0.97	1.43	1.43	1.47	1.46	1.47	1.71	1.22	0.12
碳排放系 数	0.73	0.75	0.86	0.59	0.62	0.55	0.59	0.57	0.50	0.44	0.29

2.3 模型构建

2.3.1 耦合协调度模型

运用耦合协调模型计算城市各功能紧凑性的耦合协调度，分值按 0.1 的间隔划分为失调类(极度失调、严重失调、中度失调和轻微失调)、过渡类(濒临失调和勉强协调)和协调类(初级协调、一般协调、中等协调和高度协调)三大类。公式如下：

$$C = \left\{ \frac{[L(x) * E(x) * P(x) * T(x)]}{\left[\frac{L(x) + E(x) + P(x) + T(x)}{4} \right]^4} \right\}^{1/k} \quad (2)$$

$$T = \alpha * L(x) + \beta * E(x) + \theta * P(x) + \lambda * T(x) \quad (3)$$

$$D = \sqrt{C * T} \quad (4)$$

式中： $L(x)$ 、 $E(x)$ 、 $P(x)$ 和 $T(x)$ 分别为城市土地、经济、人口和交通紧凑度数值。 C 为各类城市紧凑性的耦合度，表示城市高质量发展过程中各方面之间的耦合程度。 k 为调节系数，一般取值范围为 $2 \leq k \leq 5$ ，本文取值为 4。 T 是城市化高质量利用的协调程度，代表城市发展的韧度和整体水平。 α 、 β 、 θ 和 λ 分别表示各 UC 指数在城市高质量发展中的权重系数，此处认为其重要性程度相当，取 0.25。 D 为耦合协调发展度，综合反映各方面之间的协调度和发展度的水平，代表城市高质量紧凑发展的总体水平与程度。该模型可以有效观察在城市化发展过程中各功能紧凑度是否存在协同现象和耦合协调特征。

2.3.2 Tapio 脱钩模型

脱钩引自物理学的动力概念，指相互作用的多个物理主体间存在的相互关系发生减弱或趋近于零的过程。OECD 和 Tapio 先后所构建的脱钩模型是两种较为熟悉的模式。前者最初用来描述环境压力与驱动力变化关系；后者在此基础上引入中间变量分

解因果链，并根据脱钩弹性值的大小将结果划分为 8 种脱钩状态，见表 2。其中 OECD 脱钩模型存在较明显的缺陷：一是对变量的基期和末期取值比较敏感，容易造成结果偏差；二是过于笼统地划分脱钩类型，无法区分环境压力与经济增长之间的具体关系类型^[29]。相比 OECD 脱钩，TAPIO 脱钩模型克服了数据的敏感特征，其采用的“弹性概念”可对变量之间的脱钩关系进行动态反映。该模型在城市规划、环境科学和土地科学等领域均有广泛应用。据此，本文选用 TAPIO 脱钩模型对长株潭城市群 UC 与 CEI 的脱钩关系进行分析。

$$T(\text{CO}_2, U) = \frac{\Delta \text{CO}_2 / \text{CO}_2}{\Delta U / U} \quad (5)$$

式中： $T(\text{CO}_2, U)$ 表示脱钩弹性指数； ΔCO_2 表示城市现期相对于基期的 CEI 变化值； U 表示城市的紧凑度指数； ΔU 表示 UC 的变化情况。

2.3.3 灰色关联度模型

系统变量与不同因子之间随时间发生变化的关联性大小，称为关联度。在系统发展过程中，若两个因素变化的趋势具有一致性，即同步变化程度或关联程度较高；反之，则较低。灰色关联分析模型即是根据各因素发展趋势的相异或相似程度，作为刻量各因素间关联程度的一种定量方法。该方法可根据数据序列曲线的形状相似程度判断序列间联系是否紧密，其与相关分析和回归分析相比能较真实地反映出系统的主要影响因素及差异^[30]。目前常用的灰色关联度计算方法主要有斜率关联度、邓氏关联度、灰色 B 型关联度以及 T 型关联度等。其中邓聚龙教授提出的邓氏关联度模型是运用较广的主流方法之一。本文采用该模型对长株潭城市群 UC 与 CEI 脱钩指数变动的驱动因素和关联程度进行分析。步骤参见相关文献[31]。

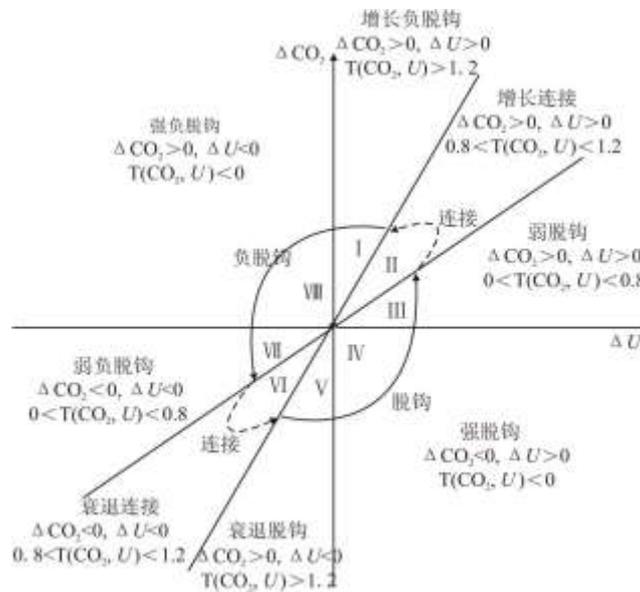


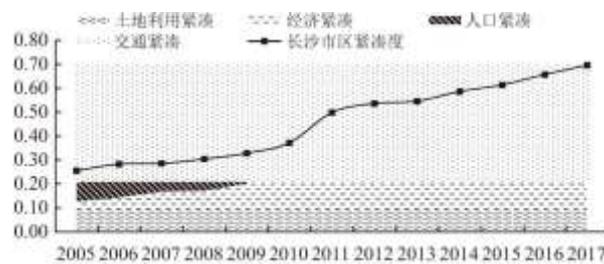
图 1 城市紧凑度与碳排放强度的 Tapio 脱钩弹性指数与状态度量模型

3 城市紧凑度与碳排放强度的测算结果

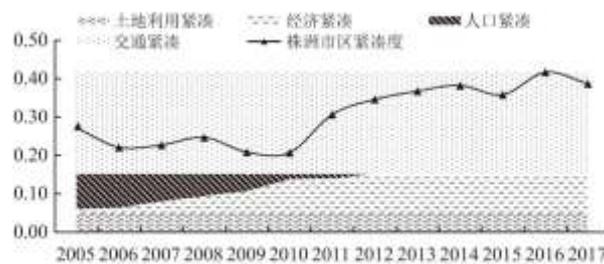
3.1 城市紧凑度的变化趋势及耦合特征

从各市区 UC 指数动态变化情况来看, 2005~2017 年长沙市表现为稳步上升态势, 且上升势头很强; 株洲市则总体表现为先降后升; 湘潭市表现为波动上升趋势, 但至 2017 年似有回缓态势。计算可知, 2005~2017 年长株潭三市平均 UC 指数分别为 0.46、0.31 和 0.43。分解出各市 UC 的单项指标, 以进一步解释造成 UC 指数具有明显差异的原因。从图 2(a) 不难看出, 长沙市区早期以土地紧凑和人口紧凑为主; 后期随着经济总量的不断攀升, 经济紧凑和人口紧凑成为造成 UC 显著提升的主要贡献因子。从图 2(b) 可知株洲市区中间年份的紧凑度下降幅度较大。其可能原因是由于 2009~2010 年期间株洲城区扩增大量住宅用地面积, 致使人均住宅用地面积显著提高, 人口紧凑度有所缓解; 但随着后续常住人口的持续增加和经济形势持续向好, 人口紧凑和经济紧凑的快速增加使得株洲的 UC 指数亦迅速提升。湘潭市作为长株潭城市群经济体量最小的地市, 其市区经济发展长期滞后。从图 2(c) 也能看出湘潭市区的经济紧凑度在早期占比较小, 但自 2013 年后经济紧凑度持续性增加, 并超过其他紧凑性指标成为造成城市紧凑的主要表现特征。从图 2(d) 可知, 长株潭城市群平均 UC 指数总体呈上升趋势, 但不同时间段上升幅度略有不同。2005~2010 年 UC 指数变化较小, 处于 0.26~0.30 之间。2011~2017 年 UC 指数增长迅速, 从 0.40 增长到 0.55, 增长幅度达 39.25%。

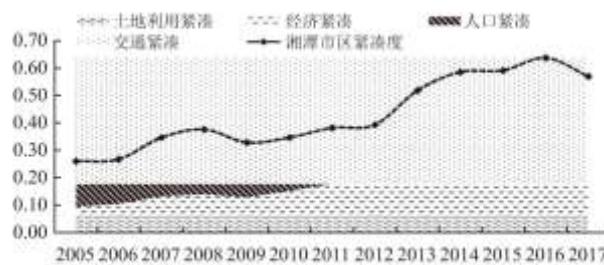
基于耦合协调度模型计算可得 2005~2017 年长株潭城市各类功能紧凑性的耦合协调度, 依据其耦合协调度等级可分析 UC 耦合协调发展的时空演变特征。从长株潭城市群整体的时序演变来看(表 3), 区域耦合协调水平基本呈逐年上升趋势, 中间年份略有停滞。2005 年长株潭平均耦合协调度为 0.34, 为轻度失调水平; 2011 年耦合协调度约为 0.53, 首次跨进勉强协调类; 2016 年耦合协调度上升到 0.60, 勉强进入初级协调类。由此可知长株潭总体耦合协调度仍较低, 提升潜力较大; 研究时段其耦合协调度的年均增长率仅为 4.46%, 说明在城市群未完全发育成熟的背景下, 城市建设不可避免的存在某些短板效应。分城市来看, 研究期长株潭三地耦合协调发展指数年均增速分别为 3.83%、5.28%和 4.55%; 长沙平均协调度和耦合协调发展度分别为 0.88 和 0.54, 株洲分别为 0.83 和 0.43, 湘潭分别为 0.88 和 0.53。结合前文 UC 指数动态变化情况可知, 株洲和湘潭前期表现较差是由于经济短板较为突出, 而后期提升普遍较慢则可能是由于城市土地利用长期处于紧平衡状态, 土地节约集约利用现状还有待进一步改善。



(a) 长沙城市紧凑度变化趋势



(b) 株洲城市紧凑度变化趋势



(c) 湘潭城市紧凑度变化趋势

图 2 2005~2017 年长株潭城市群城市紧凑度变化趋势

表 3 长株潭城市群各类功能紧凑性的耦合协调度指数

年份	C-长沙	D-长沙	C-株洲	D-株洲	C-湘潭	D-湘潭	D-长株潭 平均
2005	0.864	0.405	0.311	0.252	0.627	0.350	0.336
2006	0.895	0.435	0.701	0.341	0.792	0.399	0.392
2007	0.896	0.437	0.903	0.392	0.815	0.462	0.430
2008	0.958	0.466	0.953	0.420	0.858	0.495	0.460
2009	0.959	0.486	0.991	0.393	0.952	0.486	0.455
2010	0.935	0.512	0.925	0.379	0.970	0.504	0.465
2011	0.931	0.594	0.920	0.461	0.969	0.530	0.528
2012	0.929	0.615	0.918	0.490	0.949	0.532	0.546
2013	0.908	0.614	0.925	0.508	0.943	0.610	0.577
2014	0.841	0.612	0.893	0.509	0.939	0.647	0.589
2015	0.820	0.619	0.817	0.471	0.919	0.643	0.578
2016	0.796	0.631	0.856	0.521	0.910	0.665	0.606
2017	0.762	0.636	0.745	0.467	0.822	0.597	0.567

3.2 城市碳排放量与碳排放强度的演变趋势

将历年各能源品种的消耗量转换成标准煤当量，结合碳排放系数计算区域能源消耗碳排放总量和市辖区碳排放量，结果见图 3。能源消耗碳排放量数据表明：2005~2017 年长沙和株洲的全市碳排放总量呈下降态势，中间年份略有起伏。湘潭的全市碳排放总量明显高于其他两市，总体表现为先升后降的趋势。进一步分析湘潭市的产业结构特征后发现，湘潭钢铁集团公司和大唐发电厂是湘潭市能源消耗大户，其历年综合能源消耗量占全市总消耗量的比例较高，2018 年两家企业甚至占比达到 85%以上，是导致湘潭市的碳排放总量较大的主要原因。湘潭市的能源消耗于 2011 年后呈现为下降趋势，主要是由于湘潭市 2011 年后围绕“十二五”节能降耗的目标持续控制增量和消减存量，大力提升了能源的使用效率，因而全市的碳排放量也显著降低。2005~2017 年长株潭市区碳排放量变化与全市碳排放总量变化趋势总体相似，但峰值点略有不同。长沙市总体碳排放量和市区碳排放量基本表现为逐年下降态势，至 2017 年排放量下降为约 132.30 万吨，说明长沙市在优化能源结构和节能减排方面表现优异。株洲市碳排放总量和市区碳排放量较为波动，但总体仍以下降为主。值得注意的是，2015 年以后株洲市区碳排放量表现为上升趋势，并于 2017 年达到与长沙相近的水平；此转折可能与近年来株洲市积极承接外部产业转移和加快主导产业发展步伐密切相关。而湘潭市在扣除了外围两家主要耗能企业的排放量后，在区域的占比相对较低。湘潭市区碳排放量高峰期出现在 2011 年，当年达到 188.34 万吨的排放量，此后总体也以下降为主。

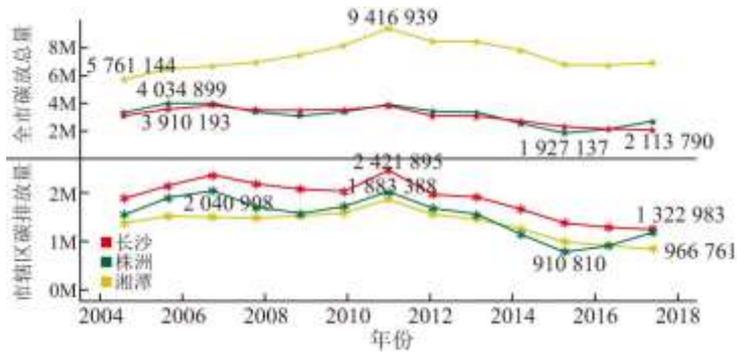


图 3 2005~2017 年长株潭城市群碳排放总量和市区碳排放量变化趋势 (t)

通过计算各市区历年 CEI 值，可以从图 4 中明显看出长株潭市区 CEI 总体皆呈逐年下降趋势。从长株潭城市群 CEI 的平均数值从 2005 年的 365.65t/亿元降到 40.84t/亿元，低碳生产取得显著的实际功效。从分区来看，长沙 CEI 值最低，株洲其次，湘潭 CEI 值相对较高。但由于株洲市区从 2015 年起 CEI 值表现出微弱的上升态势，至 2017 年超越湘潭成为区域之最。2005~2017 年长沙市区 CEI 值从 210.95t/亿元下降到 20.89t/亿元，下降比率约 90.10%；株洲市区至 2017 年降到 109.77t/亿元，下降比率约 83.28%；而湘潭市区下降幅度高达 620.45t/亿元，下降比率约为 88.64%。根据长株潭城市群 CEI 值综合变化速率，大致可将其划分为 3 个阶段：第一阶段为 2005~2007 年(高碳排放阶段)，在该阶段区域总体经济实力较弱，能源利用效率较低，CEI 值较大；第二阶段为 2008~2011 年(持续减排阶段)，该阶段经济增长速率较高，能源结构和能源效率显著改善，CEI 值持续减弱；第三阶段为 2012~2017 年(低碳优化阶段)，此阶段经济发展质量较高，能源供给侧结构更为科学合理，CEI 值总体处于较优阶段。

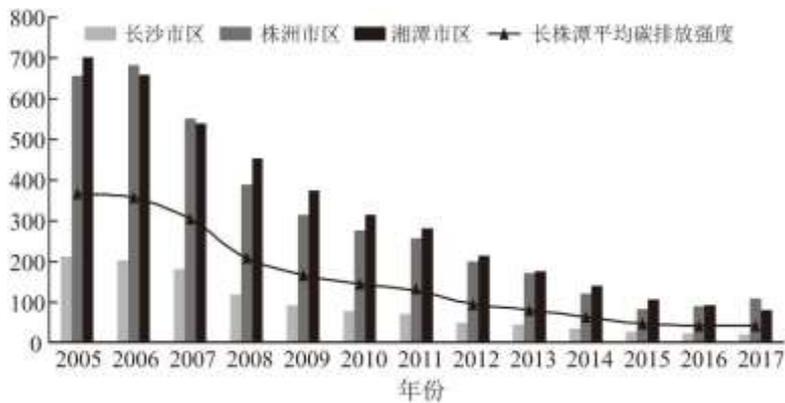


图 4 2005~2017 年长株潭市区碳排放强度的波动情况 (t/亿元)

4 城市紧凑度与碳排放强度的互动关系

4.1 城市紧凑度与碳排放强度的脱钩关系

通过测算，长株潭城市群 UC 与 CEI 之间的脱钩状态如表 4 所示。从城市群整体的 UC 与 CEI 指数脱钩关系表现看，大部分年份处于强脱钩关系，少数年份表现为衰退脱钩及其他状态，说明区域 UC 与 CEI 总体呈现出往反向方向发展的态势。从各市区的表现看，长沙各阶段均表现为强脱钩特征，但是脱钩程度依旧有较大的差异性；其中 2006~2007 年脱钩指数绝对值最大为-14.21，说明该阶段以 CEI 指数下降速度相对于 UC 指数增长速度更快。2010~2011 年脱钩指数绝对值最小为-0.31，说明此阶段长

沙市区的 UC 发展较为迅速，反之 CEI 值减少的较为平缓。株洲的脱钩类型表现较为多元，在研究阶段内出现 6 个强脱钩期、3 个衰退脱钩期、2 个强负脱钩期和 1 个弱脱钩期，整体仍表现为以较明显的脱钩特征为主。湘潭大部分阶段呈现强脱钩特征，仅 2008~2009 年和 2016~2017 年呈现为衰退脱钩的特征；其说明湘潭市的城市建设与碳排放也表现出较好的脱钩关系。

表 4 长株潭城市群紧凑度与碳排放强度的脱钩指数及脱钩状态

年份	T(CO2, U)- 长沙	脱钩状态	T(CO2, U)- 株洲	脱钩状态	T(CO2, U)- 湘潭	脱钩状态	T(CO2, U)- 长株潭	脱钩状态
2005~2006	-0.387	强脱钩	-0.214	强负脱钩	-2.104	强脱钩	1.269	衰退脱钩
2006~2007	-14.214	强脱钩	-6.866	强脱钩	-0.619	强脱钩	-1.298	强脱钩
2007~2008	-5.242	强脱钩	-3.442	强脱钩	-1.836	强脱钩	-4.030	强脱钩
2008~2009	-2.560	强脱钩	1.222	衰退脱钩	1.357	衰退脱钩	3.040	衰退脱钩
2009~2010	-1.209	强脱钩	19.319	衰退脱钩	-2.830	强脱钩	-2.798	强脱钩
2010~2011	-0.315	强脱钩	-0.150	强脱钩	-1.066	强脱钩	-0.370	强脱钩
2011~2012	-3.805	强脱钩	-1.700	强脱钩	-8.409	强脱钩	-4.388	强脱钩
2012~2013	-7.332	强脱钩	-2.335	强脱钩	-0.549	强脱钩	-1.073	强脱钩
2013~2014	-2.652	强脱钩	-7.550	强脱钩	-1.574	强脱钩	-2.696	强脱钩
2014~2015	-4.666	强脱钩	5.046	衰退脱钩	-23.111	强脱钩	-36.463	强脱钩
2015~2016	-1.903	强脱钩	0.539	弱脱钩	-1.772	强脱钩	-0.917	强脱钩
2016~2017	-1.814	强脱钩	-3.042	强负脱钩	1.305	衰退脱钩	1.083	衰退连接

4.2 城市紧凑度与碳排放强度脱钩关系的驱动因素

UC 与 CEI 两者之间出现的脱钩现象和脱钩程度是受双方变化的共同影响因子作用后的结果。其结果的变化虽由直接因素的变化所引起，但其本质上是各影响因子博弈协同后的综合结果。其中既有对两者都产生作用的公有因子，也可能有对某一方相对影响较剧烈的私有因子，以上因子或直接或间接地对脱钩状态产生作用。本文结合相关文献，首先运用理论模型(图 5)重点分析 UC 与 CEI 脱钩关系中与社会经济发展相关的驱动因素的作用机制，并结合灰色关联度模型探讨各集合因子与脱钩发展系统的关联程度。

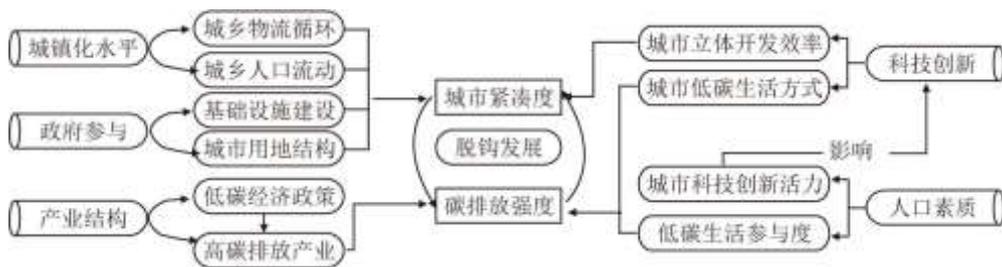


图 5 城市紧凑度与碳排放强度脱钩发展的驱动因素作用机制

综合考虑当地实际情况及专家意见，选取的驱动因素如下：(1)产业结构。产业是城市生产生活有序运行的基础，不同产业用地上的 CEI 值存在显著不同，是 UC 与 CEI 发生脱钩的直接推力因子，本文采用第三产业比重 (%) 进行度量。(2)城镇化水平。城市的发展不仅受内部因素的变化影响，也有区域城乡协同发展的作用。城镇化水平是区域发展过程中的重要显性表达，通过影响地区经济发展规模和模式对其脱钩关系进行作用，本文采用城镇人口比重 (%) 衡量。(3)科技创新。科技研究与开发促进生产力水平的提升，其不仅能加速改变城市的生产生活方式，也对城市的形态和用地效率产生深刻影响；此外，技术进步也是促进产业转型升级和低碳生活的主要驱动力。本文具体以 R&D 内部支出占生产总值比重 (%) 指标衡量。(4)政府参与。政府担任城市建设和管理的主要角色，其政策行为能对 UC 与 CEI 脱钩产生直接作用。本文使用人均公共财政支出 (万元/人) 表征政府的调控。(5)人口素质。劳动力是城市存在和发展的基础，高端人才是提升城市品质和发展质量的有力支撑。长株潭三地均设有一定数量高校，且大学生在城市经济生活中发挥着巨大影响作用。此处选取每万人大学生数 (人) 为具体指标。驱动因素作用机制见图 5。

基于此，运用灰色关联度模型计算 UC 与 CEI 脱钩程度与驱动因子的关联度 (表 5)，关联度越高表示该因子对两者变动方向有着更高的影响力。从结果可知，产业结构、城镇化水平、科技创新、政府参与和人口素质等驱动因素与脱钩指数变化的关联度普遍在 0.7 以上，关联程度较强，充分说明 UC 与 CEI 脱钩特征与各驱动因素具有密切关联。从城市群整体平均来看，其联系程度按弱到强顺序依次为：政府参与<科技创新<人口素质<城镇化水平<产业结构。将单个驱动因素进行分解，可以看出各驱动因子在不同地区的影响程度具有显著差异：(1)产业结构。株洲市区的产业结构变化与脱钩指数关联性最强，达到 0.842；而长沙和湘潭相对来说关联性较弱。从株洲的产业结构变化来看，2005~2017 年其第三产业比重从 40.91% 提升到 52.97%，总体提升幅度最高。这表明相比于其他两地，株洲的产业结构转型在提升城市紧凑度和碳减排方面发挥了更大的作用。(2)城镇化水平。长株潭城市群城镇化水平总体较高，其中长沙市的城镇化水平甚至超过 77%。从关联度指数得知，积极推动城镇化达到较高水平能够有效促进 UC 与 CEI 的脱钩发展，如株洲的城镇化变动对两者脱钩发展的影响就较为敏感。(3)科技创新。科技水平的提升对城市的高质量建设和清洁能源的使用具有巨大促进作用，能有效调节城市建设用地扩张与 CEI 之间的关系。从表可知长沙市的科技创新能力变动对脱钩发展的敏感最高，表明长沙在加大科学技术投入确实能对缓解城市问题带来立竿见影的效果。(4)政府参与。相比于其他驱动因素，政府干预对脱钩发展的影响相对较小，且各地市的关联度指数的差异较小。说明政府作为公共服务的供给方，虽然对城市建设有着不可替代的功能，但是这种作用产生的效应在区域间的差异并不大。(5)人口素质。城市的竞争其本质就是人才的竞争，人才的集聚对城市环境的改造和城市品质的提升具有较高支撑力。关联度指数表明株洲市区的大学生数量变化对 UC 与 CEI 的脱钩发展具有较强关联特征，达 0.848；其原因在于株洲市区的每万人大学生数和大学综合实力在城市群范围长期处于相对弱势的地位，人才的稀缺也凸显了高素质人才在城市建设发展中的重要地位，因而导致 UC 与 CEI 脱钩发展与人口素质变动之间的关联指数值远超其他两地。

表 5 长株潭城市紧凑度与碳排放强度脱钩发展程度的驱动因素关联度

地区	产业结构	城镇化水平	科技创新	政府参与	人口素质
长沙	0.805	0.815	0.838	0.795	0.809
株洲	0.842	0.822	0.818	0.798	0.848
湘潭	0.802	0.806	0.770	0.798	0.780
长株潭	0.816	0.814	0.809	0.797	0.812

5 结论与讨论

(1)长株潭城市群平均紧凑度总体呈上升趋势，其中长沙市区总体表现为稳步上升态势，且上升势头很强；株洲市区总体表现为先降后升；湘潭市区表现为波动上升趋势，但近年来似有微弱的回缓态势。各地区城市紧凑度的功能紧凑分解因子贡献程度差异较大，但后期基本皆以经济紧凑加剧为主要表现特征。此外，2005~2017年长株潭城市各类功能紧凑性的耦合协调度基本呈逐年上升趋势，中间年份略有停滞；至2017年长株潭各市区紧凑度分别表现为初级协调、勉强协调和濒临失调的水平。

(2)从全市的总碳排放量来看，湘潭市排放总量远超长沙市和株洲市；但在长株潭市区的碳排放量中，长沙市碳排放量相对较高，且长株潭市区总碳排放呈现波动下降的情况。此外，长株潭市区CEI也总体皆呈逐年下降趋势。长株潭城市群的CEI平均数值从2005年的365.65t/亿元降到40.84t/亿元，低碳经济的推广取得显著的成效。本文根据研究期长株潭城市群的CEI变化速率，将其大致划分为3个阶段：即高碳排放阶段(2005~2007年)、持续减排阶段(2008~2011年)和低碳优化阶段(2012~2017年)。

(3)整体来看，长株潭城市群UC与CEI大部分年份处于强脱钩关系，少数年份表现为衰退脱钩及其他状态。其中长沙各阶段均表现为强脱钩关系，但不同年份脱钩程度有较大的差异；株洲历年的脱钩类型仍以强脱钩和衰退脱钩为主；湘潭市区的UC与CEI也表现出较明显的脱钩关系。

(4)UC与CEI脱钩的驱动因素分析结果表明，产业结构、城镇化水平、科技创新、政府参与和人口素质等驱动因素与脱钩指数变化的关联程度普遍较强。从城市群整体数据来看，各驱动因素的影响程度按弱到强依次呈现为政府参与<科技创新<人口素质<城镇化水平<产业结构。此外，根据各驱动因子在各地区的影响程度差异情况可知：株洲市区UC与CEI脱钩指数的变动与其产业结构、城镇化水平和人口素质的变动都有较强关联性；长沙市的科技创新能力变动对UC与CEI脱钩发展的敏感性较高；政府干预对脱钩发展的影响普遍相对较小。

(5)结合以上结果，本文认为长株潭城市群未来可从以下几方面采取措施，以促进城市和经济的高质量发展：①重视城市各方面的功能紧凑性协调发展。在优化产业结构和扩大城市规模的同时，注重各城市功能区的产城融合发展以及公共交通基础设施的均衡布局，注重人口、土地和经济城镇三者耦合协调，注重城市土地高质量利用以及地下空间的合理开发。②加大技术研发以提升能源使用效率，加强对重点碳排放大户企业和重点行业的能源使用监管和技术投入补贴。加快产业结构转型升级，提升第三产业在国民经济中的比重。推动清洁能源在能源消耗中的重要支撑作用，增强城市居民在低碳生活和环保建设方面的意识和参与度。③大力引进高素质人才和科研团队，深刻认识人才在城市建设和经济发展中的中流砥柱作用。优化营商环境和人才培养晋升制度体系，为人才和高新技术产业集聚提供坚实的软硬件基础。④逐步弱化政府在应由市场支配领域的干预作用，加强地方政府的治理能力和服务水平，突出长株潭城市群一体化发展方面的政策工具运用和规划引导。

综上，客观掌握城市开发建设与低碳经济发展之间的互动规律和演化特征对城市土地高质量利用有着重要意义，着力补齐城市短板和提升经济发展质量将是未来城市建设过程中重要内容。本文以长株潭城市群为例，以此揭示中国中部城市群城市建设与低碳经济之间的互动关系特征。从结果可知，两者之间确实存在较为明显的脱钩发展现象，具有一定代表性。但由于部分数据获取较为困难，本文仅考虑市区能源碳排放这单一来源，忽视了城市运行过程中其他诸多方面的碳排放量。虽所忽视部分占比较小，但是对研究结果的科学性依然有一定的影响。再者，本文对城市紧凑度的衡量忽视了城市空间形态的影响以及城市轨道交通对缓解城市紧凑性的作用功能；使得城市总体紧凑度计算会出现一定误差。此外，本文可能在选取UC与CEI脱钩发展的驱动因素时较为主观和片面，研究结果具有一定局限性。鉴于此，本文认为未来还可从这几方面进行改善：一是碳排放测算考虑城市生活垃圾碳排放和汽车等交通工具的尾气碳排放等；二是紧凑度计算需将城市布局形状和轨道交通对城市紧凑性的影响纳入考量；三是从理论层面建立一套完整的互动机理逻辑分析框架，进一步探讨其驱动因素的作用机制，为后续研究打下理论基础。

参考文献:

[1]吕晓, 史洋洋. 江苏省城乡建设用地经济密度的时空格局演变研究[J]. 中国土地科学, 2018, 32(2):27-33.

-
- [2] SALVATI L. From sprawl to compactness and back: Population dynamics (1848-2011) and the economic structure of a Mediterranean city[J]. *GeoJournal*, 2016 (No. 2) :319-332.
- [3] BALLEEN ZAMORA S A. Housing and Compact City. concepts and debates on eco urbanism in Spain[J]. *Cuadernos de Vivienda Y Urbanismo*, 2017 (No. 19) :68-85.
- [4] 田成诗, 李金. 大型城市紧凑度与能源效率的关系研究[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(10) :1781-1795.
- [5] 吴立军, 李文秀. 基于公平视角下的中国地区碳生态补偿研究[J]. *中国软科学*, 2019 (4) :184-192.
- [6] 梁雪石, 郑福云, 郭文栋. 我国关于碳排放效率的研究进展[J]. *黑龙江科学*, 2016, 7 (12) :30-32.
- [7] 郭施宏, 高明. 城市土地经济密度与碳排放的 EKC 假说与验证——基于省际静态与动态面板数据的对比分析[J]. *南京农业大学学报(社会科学版)*, 2017, 17 (1) :80-90.
- [8] XU C, HAASE D, SU M, et al. The impact of urban compactness on energy-related greenhouse gas emissions across EU member states: Population density vs physical compactness(Article) [J]. *Applied Energy*, 2019.
- [9] 荣培君, 刘慧, 吕连琴, 等. 基于进化树模型的河南省城市紧凑度综合评价[J]. *地域研究与开发*, 2019, 38(3) :48-53.
- [10] 贾梦圆, 刘晓阳, 陈天, 等. 中国地级及以上城市紧凑度测度[J]. *城市问题*, 2019(11) :4-12.
- [11] 李慧, 李玮, 姚西龙. 中国省域全要素碳排放效率空间特征与动态收敛性研究[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(19) :98-103.
- [12] 蒋自然, 金环环, 王成金, 等. 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)[J]. *环境科学*, 2020:1-13.
- [13] 平智毅, 吴学兵, 吴雪莲. 长江经济带碳排放效率的时空差异及其影响因素分析[J]. *生态经济*, 2020(3) :31-37.
- [14] ZHANG W, LI J, LI G, et al. Emission reduction effect and carbon market efficiency of carbon emissions trading policy in China[J]. *Energy*, 2020, 196:117117.
- [15] ZHANG H, GUO S, QIAN Y, et al. Dynamic analysis of agricultural carbon emissions efficiency in Chinese provinces along the Belt and Road[J]. *PLOS ONE*, 2020, 15(2) :e228223.
- [16] 曾冰. 长江经济带渔业经济碳排放效率空间格局及影响因素研究[J]. *当代经济管理*, 2019, 41 (2) :44-48.
- [17] 周迪, 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. *自然资源学报*, 2019, 34 (11) :2305-2316.
- [18] 盖美, 张福祥. 辽宁省区域碳排放-经济发展-环境保护耦合协调分析[J]. *地理科学*, 2018, 38 (5) :764-772.
- [19] 焦高乐, 严明义. 中国城镇化水平与碳生产率耦合度测度[J]. *城市问题*, 2016(8) :32-38.
- [20] 任亚文, 曹卫东, 张宇, 等. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征[J]. *长江流域资源与环境*,

2019, 28(11):2586-2600.

[21]刘爱东, 曾辉祥, 刘文静. 中国碳排放与出口贸易间脱钩关系实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7):73-81.

[22]何慧爽, 付帮杰. 我国粮食主产区农业碳排放测度与减排压力研究[J]. 生态经济, 2019, 35(11):99-104.

[23]KUANG B, LU X, ZHOU M, et al. Provincial cultivated land use efficiency in China: Empirical analysis based on the SBM-DEA model with carbon emissions considered[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 151:119874.

[24]YE H, HE X, SONG Y, et al. A sustainable urban form: The challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission[J]. Energy & Buildings, 2015:90-98.

[25]李明峰, 云国梁, 何原荣. 基于城市空间紧凑度与碳排放强度关系分析——以厦门岛为例[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2016, 10(6):10-14.

[26]刘润佳, 把多勋. 中国省会城市紧凑度与城镇化水平关系[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3):586-600.

[27]杨国梁, 刘文斌, 郑海军. 数据包络分析方法(DEA)综述[J]. 系统工程学报, 2013, 28(6):840-860.

[28]齐绍洲, 付坤. 低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2013, 66(2):85-92.

[29]孙耀华, 李忠民. 中国各省区经济发展与碳排放脱钩关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(5):87-92.

[30]盛彦文, 马延吉. 区域产学研创新系统耦合协调度评价及影响因素[J]. 经济地理, 2017, 37(11):10-18.

[31]任喜萍, 殷仲义. 中国省域人口集聚、公共资源配置与服务业发展时空耦合及驱动因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12):77-86.