

# 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度时空格局及协调发展特征

冯新惠, 李艳\*, 余迩, 杨佳钰, 王诗逸, 马嘉艺

(浙江大学公共管理学院土地科学与不动产研究所, 杭州 310058)

**摘要:** 科学探索城市碳排放绩效与土地利用的协调发展特征, 是在基础层面推动碳中和目标实现的必经之路。该研究在分析碳排放绩效与土地利用强度协调发展机理的基础上, 以长三角城市群为例, 利用超效率 slacks-based measure (SBM) 模型测度 2003—2018 年各市碳排放绩效, 基于连续土地利用数据评估各市土地利用强度, 并分析其时空演变格局; 借助协调度模型揭示碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征与动态演化趋势。研究结果表明: 1) 长三角城市群碳排放绩效在时空上均呈现两阶段变化, 2003—2013 年区域碳排放绩效均值由 0.63 逐渐上升至 0.77, 高值区集中在浙江、江苏沿海地区, 低值区零散分布在淮安、连云港, 淮南等地。2013—2018 年区域碳排放绩效均值小幅下降至 0.68, 高值区城市数量有所减少。2) 区域土地利用强度均值由 349.74 逐渐上升至 356.63, 低值区主要集中在研究区南部的浙江部分城市, 高值区主要分布在研究区北部, 以江苏徐州、安徽淮北、亳州为代表。3) 碳排放绩效与土地利用强度的协调度在 16 a 间波动上升, 低值区主要分布在研究区西南部的浙江、安徽部分城市, 高值区集中在江苏沿海城市如盐城、南通等以及上海市。长三角城市群在 2003—2007 年虽处于磨合过渡阶段, 但年均增速较快, 在 2008—2018 年逐渐迈入协调发展阶段, 但受多种因素影响, 增速有所减缓, 区域土地利用低碳调整进入平台期。长三角城市群各市应根据其所属的协调发展类型, 将土地利用强度与碳排放绩效的协调发展机制纳入土地利用规划范畴以实现城市低碳发展目标。

**关键词:** 土地利用; 碳; 时空格局; 协调度; 长三角城市群

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211009

中图分类号: F301.24; F205

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-03-0208-11

冯新惠, 李艳, 余迩, 等. 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度时空格局及协调发展特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 208-218. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211009 <http://www.tcsae.org>

FENG Xinhui, LI Yan, YU Er, et al. Spatiotemporal pattern and coordinating development characteristics of carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(3): 208-218. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211009 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

气候变化因其危害的极端严重性, 已成为当前全球学界最为关注的焦点问题<sup>[1]</sup>。占全球总土地面积约 2% 的城市地区贡献了全球约 75% 的碳排放, 是造成全球气候变化的重要原因之一<sup>[2]</sup>。21 世纪以来, 中国经历了快速的城镇化与工业化过程, 同时引发了土地利用的深刻转型与空间重构<sup>[3]</sup>。土地作为人类基本的生产要素, 其利用方式和结构的改变不仅反映了城市空间布局和产业结构的转变, 也同时造成了城市碳源与碳汇的变化<sup>[4]</sup>, 继而显著影响城市系统的碳平衡。为实现《巴黎协定》的承诺, 中国政府提出 CO<sub>2</sub> 排放量在 2030 年达到最高值, 在 2060 年前实现碳中和的愿景<sup>[5]</sup>。城市作为碳减排的关键地域单元<sup>[6]</sup>, 科学探索城市碳排放绩效与土地利用的内在关联与

协调发展特征, 寻求土地资源合理利用与城市低碳减排的并行路径<sup>[7]</sup>, 是在基础层面推动碳中和目标实现的重要抓手与必经之路, 具有重要的理论与现实意义。

碳排放绩效作为城市低碳发展的重要指标, 与碳减排目标的实现及经济低碳发展有密切联系, 能够准确反映经济的投入产出关系<sup>[8]</sup>。目前对于碳排放绩效的研究主要聚焦于评估不同尺度、不同地区的碳排放绩效水平, 主要包括以碳排放强度<sup>[9]</sup>、人均碳排放量<sup>[10]</sup>等为代表的单要素评价指标, 和以劳动力、能源消费、资本投资等作为投入, 以 GDP 等作为期望产出, 碳排放量作为非期望产出的全要素评价<sup>[11-12]</sup>两种思路, 前者测算难度较低便于操作, 但单要素评价指标过于片面, 忽视了投入产出要素间的关联性, 后者考虑了要素间的替代效应, 可以更加准确地测度碳排放绩效水平, 更为符合实际<sup>[13]</sup>。在测度方法上, 以数据包络模型 (data envelopment analysis, DEA) 最为常见, 如张华等<sup>[14]</sup>基于 DEA 方法测度了中国 285 个城市的多年碳排放绩效, 并探究了创新型城市建设对于城市碳绩效的影响。随着研究的深入, 由于传统的 DEA 模型缺乏对于非期望产出的考量, 同时无法解决投入产出变量具有的松弛性问题<sup>[15]</sup>, 逐渐难以满足实际研

收稿日期: 2022-11-01 修订日期: 2022-01-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42271261); 教育部人文社会科学研究项目 (22YJAZH055)

作者简介: 冯新惠, 博士生, 主要研究方向为低碳土地利用。

Email: fxh@njau.edu.cn

\*通信作者: 李艳, 教授, 博士生导师。主要研究方向为低碳土地利用、耕地健康和污染治理。Email: liyan522@zju.edu.cn

究的需要,学者们开始运用诸如 DEA-Malmquist 指数<sup>[16]</sup>、超效率 slacks-based measure (SBM) 模型<sup>[17]</sup>等改进的方法测度碳排放绩效,提高了测度的精确性。在测度方法不断创新与改进的基础上,学者们开始逐渐关注碳排放绩效的空间特征以及影响因素,希望借识别碳排放绩效演变的主要驱动因素以促进城市碳减排。如 LIN 等<sup>[18]</sup>基于 STIRPAT 模型在省级层面探究了人口密度、城市化发展等指标对于区域碳排放绩效的影响;邓荣荣等<sup>[19]</sup>基于面板回归等计量模型在城市层面发现了数字金融的发展能够显著改善城市碳排放绩效等。作为关联人类社会经济和自然生态环境的耦合系统,土地利用管理在国家或城市的碳减排过程中发挥的作用不言而喻<sup>[20]</sup>。随着多源数据的广泛运用,越来越多的学者尝试从土地利用集约化<sup>[21]</sup>、土地利用规模<sup>[22]</sup>等视角解析土地利用对于区域碳排放强度的影响,为从土地利用角度开展全球环境变化特别是人为碳排放相关研究提供了新的思路。

总体而言,目前关于碳排放绩效与土地利用的研究在逐渐丰富的同时,仍然存在一些不足:在碳排放绩效测度方面,现存的研究大量关注国家、省域层面的碳排放绩效,研究范围过大且不够聚焦,鲜有针对城市群层面碳排放绩效的研究;在碳排放绩效与土地利用研究方面,学者们大多以碳排放强度等单要素评价衡量区域碳排放绩效水平,且都集中于土地利用对于区域碳排放的单向影响,忽视了二者之间的内在关联,较少从协调发展的视角出发<sup>[23]</sup>,研究全要素碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征。此外,在所用数据方面,现有研究大多基于具有时间间隔的土地利用数据或遥感数据(多为 5 a)测度土地利用强度<sup>[24]</sup>,难以准确表征连续时间序列的土地利用状况。因此,本文在分析碳排放绩效与土地利用强度协调发展机理的基础上,以长三角城市群为案例,利用超效率 SBM 模型测度 2003—2018 年长三角城市群 41 个地级市的全要素碳排放绩效,基于连续土地

利用数据评估各城市土地利用强度,并分析其时空演变格局;在此基础上,借助协调度模型揭示城市碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征及其动态演化趋势,并针对不同类型城市提出相应政策建议,以期为优化区域土地利用模式、促进城市土地低碳利用提供科学参考。

## 1 协调发展机理

土地系统发展的基础是各类土地资源(耕地、建设用地、水域等)。土地利用强度反映了人类对各用地类型开发和利用的程度,是衡量土地系统发展的重要指标之一,体现了由社会经济发展需求增长引致的土地资源开发规模与承载能力<sup>[7]</sup>。本文参考韩博等<sup>[25]</sup>的理论成果,从建设用地、耕地、生态用地 3 个维度出发分析土地利用强度的变化机理。碳排放绩效是城市发展过程中各类社会经济要素投入与期望经济产出以及非期望碳排放产出间关系变化的结果,能够有效评估城市经济系统低碳发展的水平。

土地不仅是陆地生态系统碳源/汇的自然载体,更是人类生产生活碳排放的社会经济空间载体<sup>[20]</sup>。土地利用强度的本质是各用地类型在一定空间尺度上的比例关系,其对于碳排放绩效的影响一方面主要体现在土地利用变化所引起的间接碳排放量的变化, ALI 等<sup>[26]</sup>研究表明土地利用,尤其是建设用地的扩张(土地利用强度提升)与城市碳排放有着显著的正相关性。另一方面,土地利用强度的变化也会影响城市或区域的能源消费量<sup>[27]</sup>,建设用地的扩张一定程度上能够为工业生产提供更大的空间承载,从而产生大量的能源消耗<sup>[28]</sup>。而伴随着土地利用强度的优化与调控,建设用地扩张受到限制,只能在有限空间内开展生产活动的工业企业不得不优化能源结构,以提高生产效益。所以土地利用强度对于碳排放绩效的影响不是固定的,而是阶段性的。二者在时空尺度上的不断协同体现了土地系统与城市经济系统由无序地各自发展向相互促进地协调发展演变的过程(图 1)。

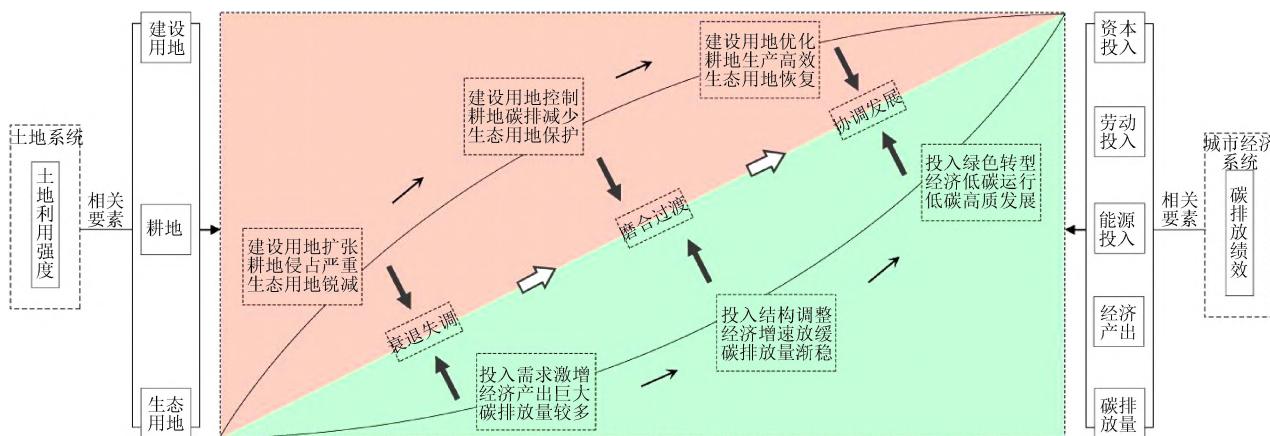


图 1 碳排放绩效与土地利用强度协调发展机理概念图

Fig.1 Concept map of coordinating development mechanism between carbon emission performance and land use intensity

在社会经济发展初期,土地利用强度与碳排放绩效均处于一种无序的发展模式。由于城镇化推进的需求,建设用地迅速扩张,耕地被侵占现象较为严重,生态用

地面积锐减,区域土地利用强度快速提升。同时,由于建设用地规模的扩大,耕地非农化现象频发,产生了更大的投入端需求。以工业为主导的产业结构,虽然会产

生较大的碳排放量，但短期内产生的巨大经济产出足以使得碳排放绩效显著提升。但这种粗放的经济模式并不利于区域的可持续发展。随着城镇化的进一步深入，建设用地需求不断饱和，低碳城市建设的理念也逐渐得到重视，国家和地区开始通过一系列的国土空间优化方案以调控碳排放，包括控制建设用地的规模；减少耕地碳排；保护具有碳汇功能的生态用地等，土地利用强度增速因此减缓。而在社会经济层面，建设用地规模的限制使得企业不得不优化投入端结构，经济增速有所放缓，年碳排放量逐渐稳定，与之相关的碳排放绩效在该阶段提升有限，甚至会出现轻微下降现象。而当区域城镇化逐渐进入后期阶段时，各用地类型空间占比趋于稳定，建设用地布局不断优化；耕地生产效率进一步提高；生态用地在得到保护的同时通过长期的治理与恢复，固碳能力有所提升。而在社会经济方面，由于建设用地的布局调整，高碳排的企业逐渐退出市场，能源绿色转型成效显著，低碳经济模式日益形成，土地系统和城市经济系统协调发展，共同助力区域“双碳”目标的实现。

## 2 研究区与研究方法

### 2.1 研究区概况

长三角城市群位于长江入海之前的冲积平原，是中国经济发展最活跃的区域之一。2019 年颁布的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》将长三角城市群的规划范围确定为上海、江苏、浙江、安徽的全域，包括南京、苏州、杭州等 41 个地级市，总面积约为 35.8 万 km<sup>2</sup>，占中国面积的约 4%。2021 年，长三角城市群的 GDP 高达 27.61 万亿元，占中国 GDP 总量的 24.14%，是推动中国经济发展的重要增长极之一。然而，巨大的经济产出和快速提高的土地利用强度给该区域的生态环境带来了诸多负面影响。大量化石能源的消耗，使得区域碳排放量逐年增加，特别是在“十三五”期间，长三角地区碳排放年均增长率高达 2.4%<sup>[29]</sup>，经济增长与碳减排的矛盾日益突出。如何在保障科学发展的前提下优化土地利用结构，探索长期深度减排路径成为其实现低碳转型的关键。

### 2.2 研究方法

#### 1) 纳入非期望产出的超效率 SBM 模型

SBM 模型能够度量纳入非期望产出后的整体效率，同时弥补传统 DEA 模型难以处理变量松弛性的缺陷，相比于其他模型更能体现生产率评价的本质<sup>[30]</sup>。但经典的 SBM 模型计算所得的决策单元效率值最高为 1，在多个决策单元均处于 100% 的效率状态时，无法对其有效排序。因此，本文引入 TONE 等<sup>[31]</sup>在 SBM 模型基础上提出的超效率 SBM 模型来评估长三角城市群 41 个地级市的全要素碳排放绩效。该模型所计算的决策单元效率值可以超过 1，能够处理多个决策单元的效率差异。具体计算参考王少剑等<sup>[17]</sup>的研究。

科学确定投入与产出指标，是计算各个城市碳排放绩效的基础。在投入端，本文将先前研究中大量使用的

劳动力、资本、能源作为投入要素<sup>[11-12,19]</sup>。其中，劳动力投入以各城市年初与年末就业人数的平均值计算<sup>[32]</sup>；资本投入以各城市的资本存量进行测度，由于城市年鉴中未能直接提供资本存量数据，本文参考张军等<sup>[33]</sup>的研究成果，利用永续盘存法进行计算，并将其平减为 2000 年不变价的可比序列；在能源投入方面，由于各城市在能源消费统计数据方面存在出入与部分缺失，因此无法直接将能源消耗作为能源投入指标。但在林伯强等<sup>[34-35]</sup>的研究中指出中国的电力消费与产业发展具有长期的相关性，同时中国城市化所表现的工业化特征将推动电力消费的增长。因此，本文选择各城市全年用电总量作为能源投入，相似的做法在王少剑等<sup>[17]</sup>的研究中也曾出现，印证了该指标的选择具有一定的科学性。在产出端，期望产出用各城市的 GDP 表示，为了兼顾数据的可比性和削弱价格波动的影响，同样将 GDP 折算为 2000 年不变价；非期望产出则用各城市的碳排放量来表示。

#### 2) 土地利用强度

土地利用强度的概念可以解释为人为活动的干扰程度，其不仅反映不同土地利用类型本身的自然属性，也体现了人类利用土地的深度和广度，进而揭示在人类社会系统干扰下土地资源自然综合体自然平衡的保持状态<sup>[36]</sup>。本文参考韩增林等<sup>[37]</sup>的计算方式，将土地利用强度分为五级并进行赋值。本文在协调发展机理部分从建设用地、耕地、生态用地 3 个维度进行概括性的理论分析，但在实际计算时，为了突显研究区特征和提高计算精度，本文对这 3 个大类进行部分细化：未利用地（生态用地）难以承载社会经济活动，赋值为 1；林地、草地（生态用地）具备固碳功能，人类只能有限制地开发，赋值为 2；水运是长三角地区重要的运输方式，水域（生态用地）开发强度相对较高，赋值为 3；耕地兼具社会经济与自然双重属性，同时承担城市系统中的碳源、碳汇功能，赋值为 4；建设用地承载了人类大量社会经济活动，是产生碳排放的主要用地类型，赋值为 5。在实际状态下这 5 种类型均混合存在于同一区域，各自占据不同的面积比例，并对区域土地利用强度按其自身的权重做出贡献。因此，本文以市域为空间尺度计算土地利用强度，其表达式为

$$I_{LUI} = \sum_{i=1}^n (A_i / A) \times 100 \times C_i \quad (1)$$

式中  $I_{LUI}$  为土地利用强度； $A$  为城市各土地类型的总面积，km<sup>2</sup>； $n$  为土地利用类型数，本文中  $n=6$ ； $A_i$  为各土地利用类型的面积，km<sup>2</sup>； $C_i$  为第  $i$  种用地类型的土地利用强度赋值。

#### 3) 核密度估计

核密度估计是一种非参数估计方法，其基于频率分布图直观地描述目标变量的演进规律及其阶段分布特征。因此，本文采用核密度估计方法中常用的高斯核函数来分析 2003—2018 年长三角城市群各市碳排放绩效和土地利用强度的演变趋势以及时序特征。具体计算式参考李强等<sup>[38]</sup>的研究。核密度曲线的波峰高度体现了样本的差异特征，波峰数量表征了样本的极化特征，波峰在  $x$

轴方向上的移动,代表了数据值的整体上升或下降。

#### 4) 协调度模型

本文致力于研究土地系统中的土地利用强度与城市经济系统中经济投入产出所形成碳排放绩效的协调发展特征。因此,本文引入协调度模型测度城市土地利用强度与碳排放绩效在变化过程中的协调性<sup>[39]</sup>,其表达式为

$$C_i = 2 \sqrt{\frac{K_1 \cdot K_2}{(K_1 + K_2)^2}} \quad (2)$$

$$D_i = \sqrt{C_i \cdot T_i} \quad (3)$$

$$T_i = \alpha K_1 + \beta K_2 \quad (4)$$

式中  $D_i$  为第  $i$  年城市碳排放绩效与土地利用强度的协调度;  $T_i$  为综合协调指数;  $C_i$  为耦合度;  $K_1$  和  $K_2$  分别为碳排放绩效和土地利用强度的标准化值;  $\alpha$  和  $\beta$  为待定系数,在中国社会经济发展的过程中土地开发与城市碳排放水平密切联系、相互影响,因此,本文取  $\alpha=\beta=0.5$ 。协调度越高,代表二者协调发展程度越高,越呈现一种良性循环关系。参考文献[40],结合研究区特征,本文将计算所得的协调度划分为3个阶段、8种基本类型(表1)。

表1 碳排放绩效与土地利用强度的协调发展阶段与基本类型

Table 1 Stages and basic types of coordinating development of carbon emission performance and land use intensity

发展阶段 Stages of development	基本类型 Basic types	协调度 Coordination degree $D$
失调衰退阶段 Disorder decline stage	严重失调型(I-1)	0~0.2
	中度失调型(I-2)	>0.2~0.4
	轻微失调型(I-3)	>0.4~0.5
磨合过渡阶段 Transitional stage	勉强协调型(II-1)	>0.5~0.6
	初级协调型(II-2)	>0.6~0.7
协调发展阶段 Coordinating development stage	中度协调型(III-1)	>0.7~0.8
	高度协调型(III-2)	>0.8~0.9
	优质协调型(III-3)	>0.9~1.0

### 2.3 数据来源与处理

本文所使用的数据主要分为两部分:在碳排放绩效测度方面,投入要素与期望产出数据均来源于相应年份的《中国城市统计年鉴》以及各市统计年鉴。作为非期望产出的碳排放数据来源于中国碳核算数据库(<https://www.ceads.net.cn/>)。在土地利用强度评估方面,本文所使用的2003—2018年逐年土地利用数据(分辨率30 m)来源于YANG等<sup>[41]</sup>的研究成果,该数据集通过多种方法进行检验,精度与延续性优越。本文进一步归并该数据集中的用地类型,将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地六类。

## 3 结果与分析

### 3.1 碳排放绩效时空格局

#### 3.1.1 时间序列演变特征

2003—2018年长三角城市群各市碳排放绩效呈现较为明显的两阶段变化(图2)。2003—2013年间,核密度曲线的波峰在x轴方向上不断右移,表明区域碳排放绩

效整体有所提高,曲线波峰的持续上升表明该阶段各市碳排放绩效差异逐渐减少,而曲线左拖尾的右移则代表了碳排放绩效处于低值的城市不断减少。主要原因是中国自21世纪以来,开始逐步重视低碳城市的建设,“十二五”规划纲要更是直接将“碳强度”作为约束性指标纳入国民经济与社会发展规划中。长三角地区落实了一系列强制措施使得各城市在该时段的碳排放绩效提升显著。2013—2018年间,各市碳排放绩效核密度曲线的波峰在x轴方向上有所左移,区域整体碳排放绩效有所下降,曲线左拖尾的左移则表明碳排放绩效处于低值的城市有所增多。原因是中国经济逐渐进入新常态,发展速度放缓,长三角地区土地利用结构调整迎来关键期,节能减排陷入短暂瓶颈。

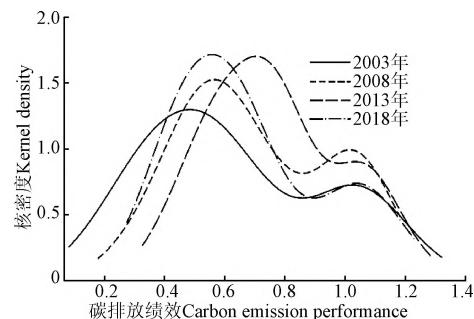


图2 2003—2018年长三角城市群碳排放绩效时间序列演变特征

Fig.2 Evolution characteristics of carbon emission performance in time series in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

#### 3.1.2 空间格局变化

2003—2018年长三角城市群各市碳排放绩效空间分布如图3所示。与核密度估计结果相似,研究区碳排放绩效在空间分布上同样呈现两阶段变化。2003—2013年,碳排放绩效均值由0.63逐渐上升至0.77,高值区主要集中在浙江、江苏沿海地区,其中浙江湖州、宁波、杭州等地碳排放绩效提升显著,后两者在2013年碳排放绩效超过1,呈现一种较为低碳的城市发展模式。此外,上海碳排放绩效在此期间大幅度提升,由2003年的0.36升至2013年的1.04,主要是因为上海作为特大城市,城镇化已达到较高水平,城市规模稳定,能源结构调整迅速,城市碳排放增速得到有效控制。低值区在该时段呈现一种零散分布格局,主要分布在淮安、连云港,淮南等地。这些城市经济基础相对较弱,工业结构较为单一,第一、二产业仍然是推动经济的主要力量,在发展过程中不可避免地带来了大量碳排放,但随着社会经济结构的不断调整,其碳排放绩效也得到了不同程度的改善。2013—2018年,碳排放绩效均值由0.77小幅下降至0.68,高值区的城市数量有所减少,浙江南部城市碳排放绩效出现了不同程度的下降,这是因为在2012年前后,浙江开始推进低碳发展方式,虽然降低了碳排放总量,但在节能减排硬性指标的限制下,也短暂影响了这些城市的经济投入产出效率。

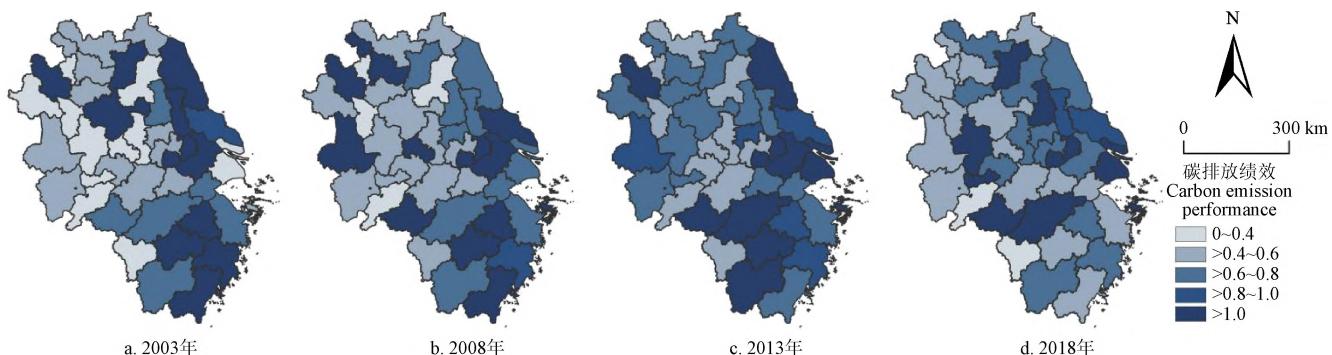


Fig.3 Spatial distribution pattern of carbon emission performance in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

### 3.2 土地利用强度时空格局

#### 3.2.1 时间序列演变特征

2003—2018 年长三角城市群土地利用强度均值由 2003 年的 349.74 逐渐上升至 2018 年的 356.63 (图 4)。核密度曲线的波峰在 x 轴方向上不断右移,且右拖尾有所加长,表明区域土地利用强度整体有所提高,高值区城市比例小幅增加。曲线波峰呈现先下降后上升的变化趋势,反映了长三角城市群土地利用强度差异先增加后缩小的波动变化过程。从曲线波峰的数量来看,2003—2018 年始终为单一波峰,表明研究时段内区域土地利用强度始终处于极化状态。长三角城市群是中国城镇化最迅速的区域之一,国家战略资源的倾斜,促进了区域经济的快速发展,带来了建设用地需求的不断增加,但由于自然、社会基础条件的差异,各市城镇扩张的规模和速度不同,使得区域土地利用强度差异逐渐加大。随着区域经济的进一步发展,发达城市建设用地规模总量逐渐稳定,各市土地利用强度的差异开始缩小。

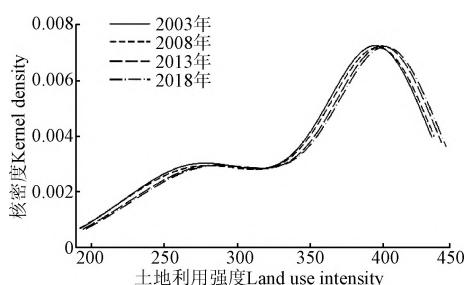


图 4 2003—2018 年长三角城市群土地利用强度时间序列演变特征

Fig.4 Evolution characteristics of land use intensity in time series in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

#### 3.2.2 空间格局变化

研究区土地利用强度整体呈南低北高的空间分布格局,且在空间上具有区域集聚特征(图 5)。南部的浙江省由于地理环境的限制,能够进行开发利用的土地面积较少,土地利用强度相对偏低,但浙北的嘉兴、杭州等地处平原,土地开发潜力较高,随着杭州都市圈的不断拓展,建设用地有序扩张,使得该区域土地利用强度不断提高。土地利用强度高值区主要集中在研究区北部,以江苏徐州、安徽淮北、亳州为代表,前者作为中国重

要的综合交通枢纽,在此期间完成了多个交通基础设施的建设,土地开发深度进一步加强。后两者属于典型的资源型城市,通过相关政策的落实,在耕地非农化的同时提高了耕地的生产效率,使得土地利用强度和耕地质量协同发展。

### 3.3 城市碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征

#### 3.3.1 总体协调发展特征

2003—2018 年研究区群碳排放绩效与土地利用强度的协调度整体呈波动上升趋势,二者的协调程度不断加强(表 2)。从整体来看,长三角城市群协调度在 2003—2007 年间处于磨合过渡阶段,在区域城镇化高速发展带来土地利用强度不断提升的同时,国家和地区已经开始有意识地通过控制建设用地特别是工业用地的规模,来促进区域碳减排与碳增汇,这也使得协调度虽然仍处于磨合过渡阶段,但却以年均 5.12% 的增速不断提高。在所占比例方面,处于磨合过渡阶段的城市占比也由 2003 年的 53.65% 降低至 2008 年 31.71%,而处于协调发展阶段的城市占比由 19.51% 提高至 58.53%。2008—2018 年间,研究区协调度逐渐迈入协调发展阶段,但由于多种因素的影响,协调度增长态势有所衰退,转而表现为在 0.70 左右波动变化。在所占比例方面,处于失调衰退阶段的城市进一步减少,占比稳定在 15.18%,处于磨合过渡阶段的城市占比稳定在 30.35%,处于协调发展阶段的城市占比稳定在 54.47%,区域土地利用低碳调整进入平台期。2008 年国务院审议并通过了《进一步推进长江三角洲地区改革开放和经济社会发展的指导意见》,提出长三角地区应当大力发展战略资源和环保产业,大力推进循环经济模式,实现清洁发展,从而落实节能减排目标责任制。长三角多数城市的城镇化扩张已经基本稳定,尽管低碳的理念进一步融入各级的土地利用规划,但在城市空间布局逐渐饱和的大背景之下,通过国土空间优化的方式来提升城市碳排放绩效需要一个较为漫长的时间周期。在土地利用强度逐渐达到峰值的同时,更需要通过提高土地利用效率、优化能源消费结构、推进绿色低碳产业建设等方式,降低城市能源消费投入与碳排放非期望产出,从而提高城市碳排放绩效,使得区域协调度越过平台期,达到协调发展的高阶形态。

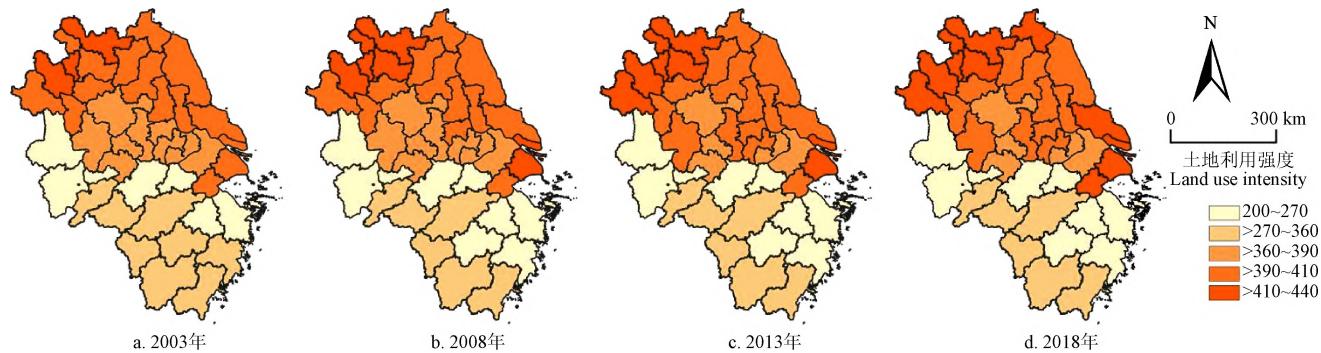


图 5 2003—2018 年长三角城市群土地利用强度空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution pattern of land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

表 2 2003—2018 年长三角城市群协调度及各协调类型所占比例

Table 2 Coordination degree and proportion of each coordination type in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

年份 Year	区域协调度 Regional coordination degree	协调类型占比 Proportion of each coordination type/%							
		I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	III-1	III-2	III-3
2003	0.55	0	14.63	12.20	39.02	14.63	19.51	0	0
2004	0.54	0	14.63	19.51	26.83	19.51	19.51	0	0
2005	0.63	0	12.20	2.44	34.15	19.51	14.63	14.63	2.44
2006	0.67	0	4.88	9.76	14.63	24.39	24.39	7.32	14.63
2007	0.67	0	12.20	2.44	14.63	24.39	24.39	14.63	7.32
2008	0.72	0	4.88	4.88	9.76	21.95	26.83	17.07	14.63
2009	0.70	0	4.88	7.32	19.51	14.63	21.95	17.07	14.63
2010	0.72	0	4.88	9.76	2.44	21.95	29.27	9.76	21.95
2011	0.69	0	4.88	12.20	2.44	29.27	21.95	12.20	17.07
2012	0.69	0	7.32	9.76	4.88	26.83	24.39	7.32	19.51
2013	0.68	0	7.32	9.76	4.88	29.27	24.39	17.07	7.32
2014	0.68	0	9.76	7.32	9.76	21.95	24.39	14.63	12.20
2015	0.71	0	4.88	9.76	12.20	14.63	21.95	19.51	17.07
2016	0.71	0	4.88	12.20	9.76	17.07	21.95	14.63	19.51
2017	0.70	0	7.32	12.20	7.32	12.20	31.71	14.63	14.63
2018	0.72	0	4.88	7.32	14.63	12.20	24.39	21.95	14.63

## 3.3.2 空间格局变化

2003—2018 年长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度的协调度空间分布如图 6 所示。2003 年, 26.83% 的城市处于失调衰退阶段(表 2), 主要聚集在研究区西南部的浙江、安徽部分城市。这些城市发展以粗放式发展为主, 土地利用强度的提高带来了能源投入的增加, 对于城市碳排放绩效的负向作用明显。而东北部的江苏沿海城市如盐城、南通等协调度相对较高, 已经迈入中度协调型的协调发展阶段。2008 年, 各市协调度均有所提升, 14.63% 的城市属于优质协调型, 主要分布在研究区西部的苏州、南通等城市, 同时江苏整体协调度也达到 0.81, 属于高度协调型。处于失调衰退阶段的城市占比减少至 9.76%, 达到 16 a 来的最低值。2013—2018 年, 研究区中西部城市协调度进一步提升, 其中上海协调度稳定在 0.99, 位列长三角城市群第一位。上海近十年来不断推进高耗能企业外迁, 逐渐摆脱了对于原有“土地财政”发展路径的依赖, 以第三产业和高新技术为主导的产业形态极大地提高了单位土地面积的经济产出, 导致上海虽然在投入端有着巨大基数, 但 GDP 在增速方面远高于非期望碳排放, 使得上海实现了土地开发与碳排放绩效提升的双赢局面。协调度低值区依然分布在研究区西南部, 但相比于 2003 年, 这些城市的协调程度均有上升, 处于失调衰退阶段的城市进一步减少, 部分城市如金华、杭州等已属于高度协调发展模式。

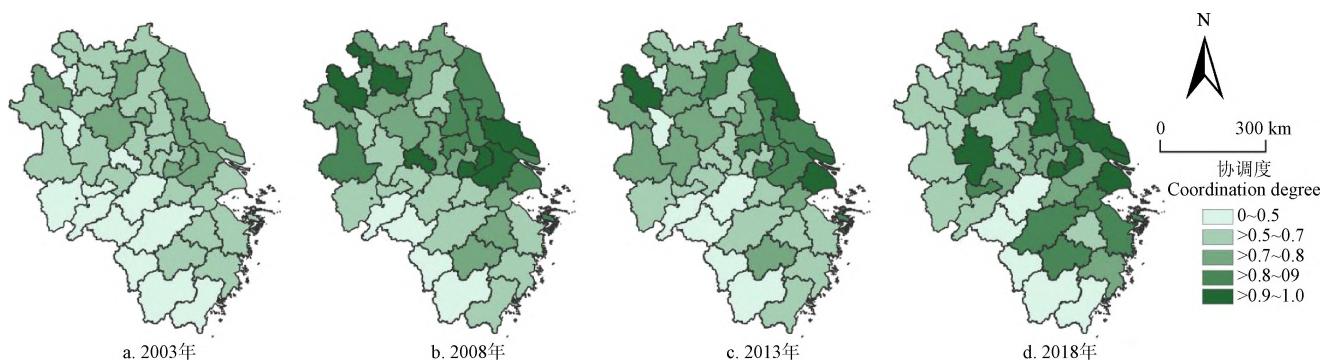


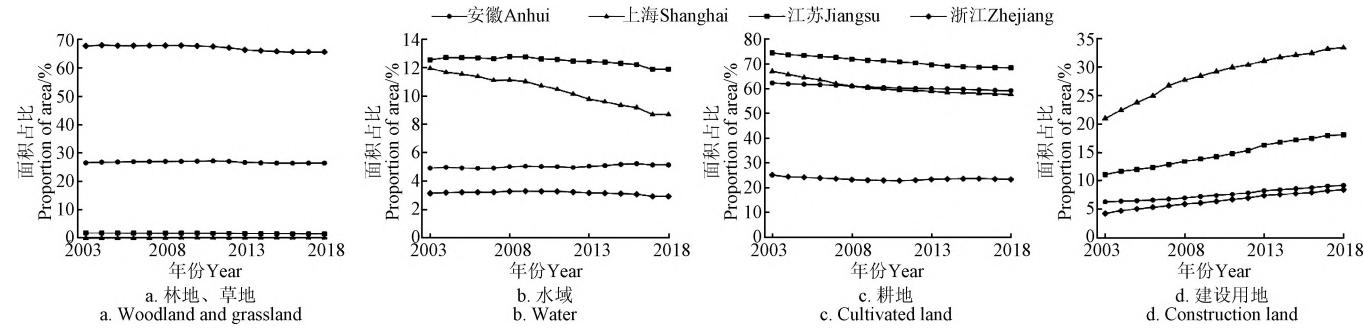
图 6 2003—2018 年长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度协调度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of coordination degree between carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

## 4 讨 论

尽管本文所使用的土地利用强度测度方法在学界得到了广泛认可，但在实际计算过程中依然存在一定的缺陷：本文延续前人的做法对不同土地利用类型进行土地利用强度赋值，但在行政尺度展开计算时，这样的赋值方法容易造成计算结果的偏差。具体而言，若某市耕地面积占比较大，建设用地面积占比较小，可能会产生与建设用地面积占比较大城市相近的土地利用强度，但其实际土地利用状况则截然不同，这是以往研究均忽视的地方。为了弥补该缺陷，本文以省（直辖市）为单位进一步统计了长三角城市群各省市各土地利用类型的面积占比（图 7），以作为土地利用强度计算的补充。江苏和安徽北部土地利用强度虽然均处于高位，但在实际

土地利用类型构成方面仍有差异。二者的耕地面积占比均较多，是土地利用强度较高的主要推力，但安徽土地利用强度的提升更为受到自然因素的限制，其有着 26.77% 的林地和草地面积，抑制了建设用地扩张的规模，这也造成了安徽土地利用强度虽高，但随着建设用地的逐渐饱和，其提升潜力有限。而江苏地处平原，建设用地的扩张有着更为广阔的空间。2018 年江苏建设用地面积占比为 18.09%，远高于安徽的 9.18%，是江苏土地利用强度快速提升的核心原因之一。而上海作为研究区最为重要的核心城市，33.41% 的建设用地面积占比则是其土地利用强度处于领先地位的关键因素。所以，在行政尺度计算和分析土地利用强度时，必须将各土地利用类型面积占比纳入考虑，以提升分析结果的科学性、实际性和可靠性。



注：未利用地因占比过小，图中并未呈现。

Note: The proportion of unused land is so small that it is not shown in this figure.

图 7 2003—2018 年长三角城市群各土地利用类型面积占比

Fig.7 Proportion of each land use type area in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from 2003 to 2018

城市碳排放绩效的实质是一种经济活动过程中的投入产出效率，是资本、劳动力、能源等经济投入共同作用的结果，而碳排放绩效的改变受到社会、自然和经济等多种要素的驱动。本文重点研究城市碳排放绩效与土地利用强度的协调发展机制，根据长三角城市群不同城市所属的协调发展阶段，从土地利用规划的视角提出引导城市低碳发展，有效改善城市碳排放绩效的合理政策建议：1) 对于已经步入协调发展阶段的城市（如上海、苏州、合肥、杭州等），由于这些城市经济基础较好，城镇化水平较高，在建设用地指标逐渐饱和的背景下，应当进一步调整产业结构，发展绿色低碳产业，从而降低能源投入，同时发挥大城市的辐射作用，向周边发展相对落后的城市提供技术、经济、政策支持，促进长三角城市群低碳一体化发展。2) 对于处于磨合过渡阶段的城市（如六安、亳州、淮北等），由于这些城市发展相对落后，依然处于快速城镇化阶段，土地利用强度还有很大的上升空间，应当在发展城镇化的同时，合理布局建设用地，增强资本存量使用效率，同时加强对耕地、林地等碳汇用地的保护，尤其注意减缓耕地面积占比下降的趋势，以促进碳减排/增汇，从而提高城市协调度。3) 对于仍处于失调衰退阶段的城市（如丽水、温州、衢州等），由于这些城市受到自然条件的约束，建设用地开发受限，面积占比整体较低，土地利用强度上

升潜力有限，应当统筹考虑建设用地的存量和增量，进一步优化产业结构，发展具有城市特色的低能耗、低污染产业，吸引优质劳动力资源，从而提高碳排放绩效，实现土地利用与碳减排的协调发展。

## 5 结 论

本文在分析碳排放绩效与土地利用强度协调发展机理的基础上，以长三角城市群为案例，基于超效率 slacks-based measure (SBM) 模型评估 2003—2018 年长三角城市群 41 个地级市的全要素碳排放绩效，根据逐年土地利用数据测度各市土地利用强度，并分析其时空演变格局；进而通过协调度模型阐释城市碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征及其动态演化态势，同时针对处于不同协调发展阶段的城市提出相应政策建议。主要结论有：

1) 长三角城市群碳排放绩效在时空上均呈现较为明显的两阶段变化，2003—2013 年碳排放绩效整体提高，各市碳排放绩效差异逐渐减少，高值区主要集中在浙江、江苏沿海地区，低值区分布零散，主要分布在淮安、连云港，淮南等地。2013—2018 年区域整体碳排放绩效均值由 0.77 小幅下降至 0.68，高值区的城市数量有所减少，区域节能减排陷入短暂瓶颈。

2) 2003—2018 年长三角城市群土地利用强度整体持

续增长, 各市土地利用强度差异表现为先增加后缩小的波动变化, 在空间上则呈现南低北高的集聚式分布格局, 低值区主要集中在研究区南部的浙江部分城市, 高值区主要分布在北部, 以江苏徐州、安徽淮北、亳州为代表。

3) 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度的协调度整体呈波动上升趋势, 低值区主要分布在研究区西南部的浙江、安徽部分城市, 高值区主要集中在东北部的江苏沿海城市如盐城、南通等以及上海。研究区在2003—2007年间虽处于磨合过渡阶段, 但年均增速较快, 处于协调发展阶段的城市占比不断增多, 在2008—2018年逐渐迈入协调发展阶段, 但由于多种因素的影响, 其增长态势有所减缓, 在0.70左右波动变化, 处于失调衰退阶段的城市进一步减少, 区域土地利用低碳调整进入平台期。

本文从协调发展的视角探究了碳排放绩效与土地利用强度的内在关系, 并基于分析结果针对不同类型城市提出相应政策建议, 为从土地利用视角促进城市碳减排提供了一种新的研究思路, 同时可为调整区域土地利用模式, 实现城市土地低碳利用提供科学参考。但仍受到数据获取的限制, 在一些方面存在进一步探究的空间: 本文仅在城市宏观尺度重点探讨了碳排放绩效与土地利用强度的协调发展特征, 没有考虑诸如具体工业企业能耗、科技创新能力等更为微观尺度下的碳排放绩效影响因素, 在未来的研究中, 应进一步结合多源研究数据, 探索二者在不同尺度所具有的协调发展关系; 此外, 由于数据的缺失, 本文以各城市全年用电总量作为能源投入, 尽管相关做法在前人的研究中得到多次实践, 但城市用电量可能有不少来自于外界输入(为间接能源使用), 并不能完全代表城市的能源投入总量, 容易造成投入端和产出端计算的误差。因此, 在未来的研究中应该进一步纳入包括原煤、天然气等化石燃料的投入, 以提高碳排放绩效计算的精度。

#### [参 考 文 献]

- [1] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J]. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [2] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [3] LIU Y, HUANG X J, YANG H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. *Habitat International*, 2014, 44: 339-348.
- [4] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区: 以武汉城市圈为例[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1003-1015.  
LI Lu, DONG Jie, XU Lei, et al. Spatial variation of land use carbon budget and carbon compensation zoning in functional areas: A case study of Wuhan Urban Agglomeration[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 1003-1015. (in Chinese with English abstract)
- [5] 汪开英, 李鑫, 陆建定, 等. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 230-238.  
WANG Kaiying, LI Xin, LU Jianding, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(1): 230-238. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 城市能源消费碳排放核算方法[J]. *资源科学*, 2011, 33(7): 1325-1330.  
LIU Zhu, GENG Yong, XUE Bing, et al. A calculation method of CO<sub>2</sub> emission from urban energy consumption[J]. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1325-1330. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(6): 100-112.  
ZHANG Yue, DAI Yaqiang, CHEN Yuanyuan, et al. The study on spatial correlation of recessive land use transformation and land use carbon emission[J]. *China Land Science*, 2022, 36(6): 100-112. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1486-1496.  
LI Jianbao, HUANG Xianjin, CHUAI Xiaowei, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions efficiency in the Yangtze River Delta region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7): 1486-1496. (in Chinese with English abstract)
- [9] 周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析[J]. *资源科学*, 2019, 41(3): 546-556.  
ZHOU Di, ZHOU Fengnian, WANG Xueqin. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 546-556. (in Chinese with English abstract)
- [10] STRETESKY P B, LYNCH M J. A cross-national study of the association between per capita carbon dioxide emissions and exports to the United States[J]. *Social Science Research*, 2009, 38(1): 239-250.
- [11] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展: 基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. *管理世界*, 2022, 38(2): 46-69.  
SHAO Shuai, FAN Meiting, YANG Lili. Economic restructuring, green technical progress, and low-carbon

- transition development in China: An empirical investigation based on the overall technology frontier and spatial spillover effect[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(2): 46-69. (in Chinese with English abstract)
- [12] 曹珂, 屈小娥. 中国区域碳排放绩效评估及减碳潜力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 24-32.
- CAO Ke, QU Xiaoe. Research on regional carbon emissions performance evaluation and carbon reduction potential in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 24-32. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO<sub>2</sub> 排放研究综述[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 151-164.
- WANG Shaojian, LIU Yanyan, FANG Chuanglin. Review of energy-related CO<sub>2</sub> emission in response to climate change[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 151-164. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张华, 丰超. 创新低碳之城: 创新型城市建设的碳排放绩效评估[J]. *南方经济*, 2021(3): 36-53.
- ZHANG Hua, FENG Chao. Innovative and low-carbon city: The impact of innovative city construction on carbon emission performance[J]. *South China Journal of Economics*, 2021(3): 36-53. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(3): 72-85.
- LIU Qiang, MA Yanrui, XU Shengxia. Has the development of digital economy improved the efficiency of China's green economy?[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(3): 72-85. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩晶, 王赟, 陈超凡. 中国工业碳排放绩效的区域差异及影响因素研究: 基于省域数据的空间计量分析[J]. *经济社会体制比较*, 2015(1): 113-124.
- HAN Jing, WANG Yun, CHEN Chaofan. A study on regional differences of industrial carbon emissions performance and its factors in China spatial econometric analysis based on provincial data[J]. *Comparative Economic & Social Systems*, 2015(1): 113-124. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. *地理学报*, 2020, 75(6): 1316-1330.
- WANG Shaojian, GAO Shuang, HUANG Yongyuan, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1316-1330. (in Chinese with English abstract)
- [18] LIN B Q, ZHOU Y C. Does the Internet development affect energy and carbon emission performance?[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 28: 1-10.
- [19] 邓荣荣, 张翱祥. 中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J]. *资源科学*, 2021, 43(11): 2316-2330.
- DENG Rongrong, ZHANG Aoxiang. The impact of urban digital finance development on carbon emission performance in China and mechanism[J]. *Resources Science*, 2021, 43(11): 2316-2330. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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, 36(4): 1152-1161.
- HAN Ji, ZHOU Xiang, XIANG Weining. Progress in research on land use effects on carbon emissions and low carbon management[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1152-1161. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张苗, 甘臣林, 陈银蓉. 基于 SBM 模型的土地集约利用碳排放效率分析与低碳优化[J]. *中国土地科学*, 2016, 30(3): 37-45.
- ZHANG Miao, GAN Chenlin, CHEN Yinrong. Carbon emission efficiency analysis and low carbon optimization for urban land intensive use based on SBM model[J]. *China Land Science*, 2016, 30(3): 37-45. (in Chinese with English abstract)
- [22] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 2995-3006.
- HUANG Xianjin, ZHANG Xiuying, LU Xuehe, et al. Land development and utilization for carbon neutralization[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 2995-3006. (in Chinese with English abstract)
- [23] 卫新东, 林良国, 罗平平, 等. 耕地多功能耦合协调发展时空格局与驱动力分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(4): 260-269.
- WEI Xindong, LIN Liangguo, LUO Pingping, et al. Spatiotemporal pattern and driving force analysis of multi-functional coupling coordinated development of cultivated land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(4): 260-269. (in Chinese with English abstract)
- [24] 路中, 雷国平, 郭一洋, 等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1894-1906.
- LU Zhong, LEI Guoping, GUO Yiyang, et al. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1894-1906. (in Chinese with English abstract)
- [25] 韩博, 金晓斌, 孙瑞, 等. 基于冲突—适配视角的土地利用可持续性评价[J]. *地理学报*, 2021, 76(7): 1763-1777.
- HAN Bo, JIN Xiaobin, SUN Rui, et al. Land use sustainability evaluation based on conflict-adaptation

- perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1763-1777. (in Chinese with English abstract)
- [26] ALI G, NITIVATTANANON V. Exercising multidisciplinary approach to assess interrelationship between energy use, carbon emission and land use change in a metropolitan city of Pakistan[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 775-786.
- [27] OU J P, LIU X P, LI X, et al. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1889-1907.
- [28] 钟顺昌. 中国省域城市建设用地规模分布对能源效率的影响[J]. *中国土地科学*, 2021, 35(3): 58-68.  
ZHONG Shunchang. The impact of urban construction land scale distribution on energy efficiency in China's provincial level[J]. *China Land Science*, 2021, 35(3): 58-68. (in Chinese with English abstract)
- [29] LIU C G, SUN W, LI P X. Characteristics of spatiotemporal variations in coupling coordination between integrated carbon emission and sequestration index: A case study of the Yangtze River Delta, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108520.
- [30] 尹传斌, 朱方明, 邓玲. 西部大开发十五年环境效率评价及其影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(3): 82-89.  
YIN Chuanbin, ZHU Fangming, DENG Ling. Analysis of environmental efficiency and its determinants in the development of the western regions in China during the past fifteen years[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(3): 82-89. (in Chinese with English abstract)
- [31] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 498-509.
- [32] 刘军航, 杨涓鸿. 基于混合方向性距离函数的长三角地区碳排放绩效评价[J]. *工业技术经济*, 2020, 39(11): 54-61.  
LIU Junhang, YANG Juanhong. Evaluation of carbon emission performance in the Yangtze river Delta based on hybrid directional distance function[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2020, 39(11): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. *经济研究*, 2004(10): 35-44.  
ZHANG Jun, WU Guiying, ZHANG Jipeng. The Estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000[J]. *Economic Research Journal*, 2004(10): 35-44. (in Chinese with English abstract)
- [34] 林伯强. 电力消费与中国经济增长: 基于生产函数的研究[J]. *管理世界*, 2003(11): 18-27.  
LIN Boqiang. Electricity consumption and China's economic growth: A study based on production function[J]. *Management World*, 2003(11): 18-27. (in Chinese with English abstract)
- [35] 何晓萍, 刘希颖, 林艳萍. 中国城市化进程中的电力需求预测[J]. *经济研究*, 2009, 44(1): 118-130.  
HE Xiaoping, LIU Xiying, LIN Yanping. China's electricity demand forecast under urbanization process[J]. *Economic Research Journal*, 2009, 44(1): 118-130. (in Chinese with English abstract)
- [36] 陈万旭, 曾杰. 中国土地利用程度与生态系统服务强度脱钩分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(11): 2853-2864.  
CHEN Wanxu, ZENG Jie. Decoupling analysis of land use intensity and ecosystem services intensity in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(11): 2853-2864. (in Chinese with English abstract)
- [37] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 等. 近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2555-2566.  
HAN Zenglin, MENG Qiqi, YAN Xiaolu, et al. Spatial and temporal relationships between land use intensity and the value of ecosystem services in northern Liaodong Bay over the past 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2555-2566. (in Chinese with English abstract)
- [38] 李强, 高威, 魏建飞, 等. 中国耕地利用净碳汇时空演进及综合分区[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(11): 239-249.  
LI Qiang, GAO Wei, WEI Jianfei, et al. Spatiotemporal evolution and comprehensive zoning of net carbon sink in cultivated land use in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(11): 239-249. (in Chinese with English abstract)
- [39] 朱庆莹, 涂涛, 陈银蓉, 等. 长江经济带产业结构与土地利用效率协调度的时空格局分析[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 235-246.  
ZHU Qingying, TU Tao, CHEN Yinrong, et al. Spatio-temporal pattern for the coordination degree between industrial structure and land use efficiency of Yangtze River Economic Zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(23): 235-246. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 793-810.  
WANG Shujia, KONG Wei, REN Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 793-810. (in Chinese with English abstract)
- [41] 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.

# Spatiotemporal pattern and coordinating development characteristics of carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

FENG Xinhui, LI Yan<sup>\*</sup>, YU Er, YANG Jiayu, WANG Shiyi, MA Jiayi

(School of Public Affairs, Institute of Land Science and Property, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Urban areas contribute about 75% of global carbon emissions in only about 2% of the world's total land area. A significant contributor of urban areas accounts for global climate change. It is necessary to scientifically explore the coordinating development characteristics between urban carbon emission and land use in recent years. An important way is seeking to determine the parallel path between rational land resource use and low carbon & emission reduction in cities, in order to promote the carbon neutrality goals at the basic level. Taking the Yangtze River Delta Urban Agglomeration as the study area, this study aims to analyze the coordinating development mechanism between carbon emission performance and land use intensity. The super-efficient slacks-based measure (SBM) model was also used to measure the carbon emission performance of each city from 2003 to 2018. The land use intensity of each city was then assessed to determine the spatial-temporal evolution pattern using continuous data on land use. The coordination model was utilized to reveal the coordinating development characteristics and dynamic evolution trend of carbon emission performance and land use intensity. The results showed that: 1) There was a two-stage change in the carbon emission performance in both space and time. The average value of carbon emission performance gradually increased from 0.63 to 0.77 from 2003 to 2013. Specifically, the high-value regions were concentrated in the coastal areas of Zhejiang and Jiangsu Province, whereas, the low-value regions were scattered in Huai'an, Lianyungang, and Huainan Province. By contrast, the average value of the carbon emission performance decreased slightly to 0.68 from 2013 to 2018, where there was a decreasing number of cities in the high-value regions. It infers that the regional energy saving and emission reduction fell into a short-lived bottleneck. 2) The average value of the regional land use intensity gradually increased from 349.74 to 356.63, with a clustered distribution pattern of the higher value in the north than in the south part of space. The low-value areas were mainly concentrated in some cities of Zhejiang Province in the south of the study area, while the high ones were located in the north, represented by Xuzhou in Jiangsu, Huabei and Haozhou in Anhui Province. 3) A fluctuating upward trend was found in the coordination degree between carbon emission performance and land use intensity from 2003 to 2018. Among them, the low-value regions were mainly distributed in some cities of Zhejiang and Anhui Province in the southwestern part of the study area, whereas, the high ones were concentrated in Shanghai and coastal cities in Jiangsu Province, such as Yancheng and Nantong. There were also a higher average annual growth rate and an ever-increasing proportion of cities in the coordinating development, even in the transitional stage from 2003 to 2007. A plateau period was observed during low-carbon adjustment in the regional land use, particularly in the coordinating development stage from 2008 to 2018, but the growth rate gradually slowed down. In conclusion, the coordinating development between land use intensity and carbon emission performance can be expected as the land use planning for the low-carbon urban development in each city.

**Keywords:** land use; carbon; spatiotemporal pattern; coordination degree; the Yangtze River Delta Urban Agglomeration