

# 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性

范建双<sup>1,2</sup>, 虞晓芬<sup>1,2</sup>, 周琳<sup>1,2</sup>

(1. 浙江工业大学经贸管理学院, 杭州 310023;

2. 浙江工业大学技术创新与企业国际化研究中心, 杭州 310023)

**摘要:** 采用南京市11个区2005-2014年的相关数据, 首先对不同类型土地的碳排放量进行核算, 进一步将其作为非期望产出引入DEA模型并采用Hicks-Moorsteen指数对南京市各区的土地利用结构碳排放效率增长进行估算、比较和分析。研究表明: ①碳排放的主要来源是建设用地的间接碳排放, 研究期内的土地利用碳排放量呈现出持续增长的发展态势。②全要素碳排放效率增长及其分解要素均低于传统全要素生产率增长, 即不考虑碳排放约束的全要素生产率增长高估了实际的土地利用效率增长水平。全要素碳排放效率增长在研究期内表现出收敛态势和区域之间均衡性的发展特征, 源于“低碳和高效”发展理念的深入人心, 单位GDP能耗不断降低。③南京市各区的技术效率值较低, “技术追赶”效应不明显, 开始出现土地利用的规模经济效应, 但是范围经济效应不显著。④全要素碳排放效率增长在南京市范围内具有空间正相关性, 且表现出空间集聚特征。基于此, 提出了一些有益的建议。

**关键词:** 南京; 土地利用结构; 碳排放; 全要素碳排放效率增长; Hicks-Moorsteen指数

DOI: 10.11821/dlj201811005

## 1 引言

碳排放量的增加对极端天气灾害和全球变暖有直接影响, 因此控制和减少碳排放是促进生态平衡和区域可持续发展的重要途径之一。城市土地利用方式的不同, 城市经济的发展速度和水平不同, 所引起的碳排放量也存在差异。土地利用的碳排放量大小及其效率的高低将直接影响城市经济的可持续发展, 因此引起了学术界的重视。目前对土地利用碳排放效率的相关研究主要集中在以下几个方面: 一是对某一区域的整体土地利用或者一类土地的碳排放效率进行测度, 并将碳排放作为投入指标处理<sup>[1-3]</sup>, 也有学者将碳排放作为非期望产出<sup>[4]</sup>。二是从土地集约利用的角度来测度土地利用碳排放效率, 如有学者分析农业用地、建设用地和土地总量集约利用度与相应集约用地碳排放效率之间的关系, 发现二者间并不保持普遍一致, 存在一定的区域差异<sup>[5-8]</sup>。三是从土地利用结构的角度分析区域土地碳排放效率<sup>[9,10]</sup>。

从现有文献来看, 学者们从不同的视角对土地的碳排放效率进行测度, 并取得了丰硕的成果。尽管有学者试图将碳排放作为非期望产出引入效率测度模型来测度土地利用结构碳排放效率, 并普遍采用基于SBM的DEA模型进行测度, 测度的结果仅反映了土

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(71774142); 教育部人文社科项目(17YJAZH022); 浙江省哲学社会科学重点研究基地项目(16JDGH045); 浙江省自然科学基金项目(LY16G030029); 杭州市科技计划软科学研究重点项目(20160834M23)

作者简介: 范建双(1980-), 男, 辽宁盖州人, 博士, 副教授, 研究方向为土地经济与政策、城镇化与碳排放。

E-mail: fjshmy@zjut.edu.cn

地利用结构的碳排放技术效率和规模效率,很少有学者关注范围效率、混合效率和残余规模效率的影响,因此也就无法反映土地利用结构碳排放全要素生产率的变化。碳排放是经济发展中的一种非期望产出,本文尝试采用基于Hicks-Moorsteen TFP指数的DEA方法来估算和分析南京市各区的碳排放约束下的土地利用结构的全要素生产率增长,本文称之为全要素碳排放效率增长,是指一个地区内部在碳排放约束下各类用途土地的比例关系和构成变化所引起的全要素生产率变化,即不同时期的碳排放约束下的实际全要素生产率的比值。包括技术进步和综合效率变动。全要素碳排放效率增长与传统的全要素生产率增长(不考虑碳排放约束)有何不同?南京市各区的土地利用结构的全要素碳排放效率增长水平如何?本文试图通过研究来回答上述问题,并为城市经济的可持续发展与土地的集约、低碳化利用提供政策参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 指标选取与数据来源

**2.1.1 研究单元选择** 本文以南京市的市辖区为研究对象。由于2005-2014年期间南京市的行政区划有所调整,2012年之前南京市包括玄武区、白下区、秦淮区、建邺区、鼓楼区、下关区、栖霞区、雨花台区、江宁区、浦口区、六合区、溧水县和高淳县11个区2个县;南京市2013年进行区划调整,合并了原秦淮、白下两区,设立了新的秦淮区;合并了原鼓楼、下关两区,设立了新的鼓楼区;将溧水县和高淳县分别在原区划范围内撤县建区,变为11个区。为了保持数据的一致性,本文按照新的区划调整对2005-2012年的数据进行了合并处理,即研究对象为玄武区、秦淮区、建邺区、鼓楼区、栖霞区、雨花台区、江宁区、浦口区、六合区、溧水区和高淳区11个区。

**2.1.2 数据来源和处理** 本文涉及到投入和产出两类指标,投入指标选取农用地、建设用地和未利用地面积,产出指标选取第一、二、三产业增加值之和来表征经济产出,选取净碳排放量作为非期望产出。土地利用数据来源于南京市2005-2014年的土地利用变更调查数据,并依据《土地利用现状分类》(GB/T21010-2007)统一口径,归并土地利用现状分类,得到了三大类土地的利用面积数据;社会经济数据来源于《南京市统计年鉴》;净碳排放量数据通过相关理论和方法进行间接测算。由于用Hicks-Moorsteen指数进行效率估算时仅考虑期望产出,因此本文对非期望产出净碳排放量取倒数处理,即用1除以净碳排放量的百分比来表示该变量。百分比越高说明碳排放量越小,对环境的负面影响越小,经济发展的环境绩效越好,反之则意味着经济发展的环境绩效越差。

### 2.2 碳排放量的测算

**2.2.1 直接碳排放量测算** 耕地、园地、林地、草地、水域用地和未利用地均属于非建设用地,其碳排放主要来自农业机械耗能、化肥施用、生物呼吸和土壤有机质分解等<sup>[13]</sup>。借鉴已有研究成果<sup>[10]</sup>,本文采用直接估算方法对上述用地的碳排放量进行测算:

$$E_k = \sum e_i = \sum T_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中:  $E_k$  表示直接碳排放量;  $i$  表示土地类型,  $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ , 分别对应耕地、园地、林地、草地、水域用地和未利用地;  $e_i$  表示第  $i$  种类型土地产生的碳排放量;  $T_i$  表示第  $i$  种类型土地的面积;  $\delta_i$  表示第  $i$  种类型土地的碳排放(吸收)系数,其中排放为正,吸收为负。本文根据用地类型的碳排放特征对土地调查分类体系进行了微调,结合南京的实际情况来综合确定土地利用分类及其碳排放系数(表1)。首先,耕地的碳排放系数。由于耕地兼有碳源和碳汇的功能,碳源主要是农业生产、灌溉过程中机械、农药、化肥等的

表1 土地利用分类与碳排放系数表

Tab. 1 The table of carbon emissions coefficients of different land use types

土地利用分类	碳排放系数值	单位	数据来源
耕地（包括灌溉水田、望天田、水浇地、旱地、菜地）	0.0422	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	孙赫等 <sup>[12]</sup> ；孙贤斌 <sup>[14]</sup>
园地（包括果园、桑园、茶园、橡胶园及其他园地）	-0.0730	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	孙赫等 <sup>[12]</sup> ；赵荣钦等 <sup>[15]</sup>
林地（包括有林地、灌木林、疏林地、未成林造林地、迹地以及苗圃）	-0.0613	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	方精云等 <sup>[16]</sup> ；王刚等 <sup>[17]</sup> ；石洪昕等 <sup>[18]</sup>
草地（即牧草地，包括天然牧草地、改良牧草地和人工牧草地）	-0.0021	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	孙赫等 <sup>[12]</sup> ；石洪昕等 <sup>[18]</sup>
建设用地（包括居民点及工矿用地和交通运输用地）	间接测算	—	
水域用地（包括未利用地类型中的其他用地（河流水面、湖泊水面、苇地和滩涂）以及建设用地中的水利设施用地）	-0.0253	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	孙赫等 <sup>[12]</sup> ；石洪昕等 <sup>[18]</sup>
未利用地（包括荒草地、盐碱地、沼泽地、沙地、裸土地、裸岩石砾地）	-0.0005	kg C / (m <sup>2</sup> · a)	孙赫等 <sup>[12]</sup> ；石洪昕等 <sup>[18]</sup>

注：\*表示建设用地中的水利设施用地很大比例为水库，在此考虑水库作为水域的碳排放，将其从建设用地中划出；“—”表示无单位。

使用过程中二氧化碳排放；碳汇则主要来自农作物生长发育过程中光合作用所吸收的二氧化碳。二者的差值即为耕地的净碳排放量。参考相关的研究成果<sup>[12,14]</sup>，并结合南京市的地理位置和气候条件，本文取0.0422 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。第二，园地的碳排放系数。园地的碳排放系数主要参照已有文献<sup>[12,15]</sup>，取-0.0730 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。第三，林地的碳排放系数。中国林地范围广阔且生长条件不同，因此固碳能力也不同。并有学者<sup>[16,17]</sup>将其取值为-0.0644 kg C / (m<sup>2</sup> · a)，也有学者<sup>[18]</sup>取值-0.0581 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。综合上述研究成果，并且考虑到南京市地处北亚热带，林地资源种类丰富，本文取这两个系数的均值，即-0.0613 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。第四，草地的碳排放系数。南京市的草地以牧草地居多，本文采用大多数学者对牧草地的碳排放系数估值，即-0.0021 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。第五，水域用地的碳排放系数。通常情况下水域用地被认为是碳汇。由于南京的水域用地中既包括河流、湖泊等用地，也包括苇地、滩涂和水利设施用地。有研究表明，在积水条件下，苇地、滩涂是碳汇，当这些区域被排干围垦后，土壤中有有机物分解速率大于积累速率，则变为碳源<sup>[18]</sup>。而水利设施用地的开发建设和施工也会影响碳排放和吸收速度。综合考虑，本文取水域用地的碳排放系数为-0.0253 kg C / (m<sup>2</sup> · a)。最后，未利用地的碳排放系数确定。学者们普遍认为未利用地是有微弱碳吸收能力的碳源，南京市未利用地主要包括荒草地、盐碱地、沼泽地、沙地、裸土地、裸岩石砾地等难以利用的土地类型，这类土地的碳源和碳汇交错，但均较弱，本文取碳排放系数为-0.0005 kg / (m<sup>2</sup> · a)。

**2.2.2 间接碳排放量估算** 这里主要指建设用地的碳排放量，主要通过煤、石油、天然气等能源消耗产生的碳排放来间接估算。选取的能源有原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、焦炉煤气、高炉煤气、其他煤气、天然气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、炼厂干气、其他石油制品、热力和电力，能源数据来源于2006-2015年的《南京统计年鉴》。由于《南京统计年鉴》中仅公布了南京市全市的能源消费总量，南京市分区县的能源消费量数据结合该区县的GDP数据处理和获取：根据南京市的GDP和能源消费总量（吨标准煤）计算全市的单位GDP能耗系数（吨标准煤/万元），然后根据各区县的GDP和能耗系数来间接测算各区县的能源消费总量。由于本文中涉及到的能源种类众多，包括原煤、石油、天然气等化石能源终端消费的碳排放量和电力、热力等二次能源消费碳排放量两部分，因此，借鉴已有文献的思路<sup>[19,20]</sup>，本文采用如下的公式对建设用地

的碳排放量进行测算：

$$E_t = \sum (E_t^1 + E_t^2)$$
 (2)

式中： $E_t$ 表示建设用地的间接碳排放总量； $E_t^1$ 和 $E_t^2$ 分别表示化石能源终端消费和二次能源消费产生的碳排放量。化石能源终端消费量 $E_t^1$ 可以根据 IPCC 国家温室气体清单指南中提供的相关碳排放指数，并结合南京市能源统计数据的特点，采用如下公式进行计算：

$$E_t^1 = \sum_{i=1}^{16} E_{ti}^1 = \sum_{i=1}^{16} (E_{ti}^1 \times \theta_i \times f_i)$$
 (3)

式中： $E_t^1$ 表示化石能源终端消费产生的碳排放总量； $E_{ti}^1$ 表示第*i*类化石能源终端消费的碳排放量；*i*=1, 2, …, 16, 是指 16 类能源类型（表 2）； $E_{ti}^1$ 表示各类化石能源终端消耗量； $\theta_i$ 表示各类化石能源的折算标准煤系数； $f_i$ 表示各类能源的碳排放系数。本文中各类化石能源终端消费的碳排放系数主要考虑到南京市能源利用方式与效率的实际情况，结合《IPCC 国家温室气体清单指南》中的能源分类，确定符合南京实际的碳排放系数。

表 2 不同能源的碳排放系数表  
Tab. 2 The table of carbon emissions coefficients in different types of energy

能源名称	折标准煤系数	碳排放系数(t C/t)	能源名称	折标准煤系数	碳排放系数(t C/t)
原煤	0.7143 (kgce/kg)	0.7559	原油	1.4286 (kgce/kg)	0.5857
洗精煤	0.9000 (kgce/kg)	0.7559	汽油	1.4714 (kgce/kg)	0.5538
其他洗煤	0.2857 (kgce/kg)	0.7559	煤油	1.4714 (kgce/kg)	0.5714
焦炭	0.9714 (kgce/kg)	0.8550	柴油	1.4571 (kgce/kg)	0.5921
焦炉煤气	0.5714 (kgce/m³)	0.3548	燃料油	1.4286 (kgce/kg)	0.6185
高炉煤气	0.1286 (kgce/m³)	0.4602	液化石油气	1.7143 (kgce/kg)	0.5042
其他煤气	0.1786 (kgce/m³)	0.3548	炼厂干气	1.5714 (kgce/kg)	0.4602
天然气	1.2143 (kgce/m³)	0.4483	其他石油制品	1.4286 (kgce/kg)	0.5860

注：表中能源折标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴》（2015）；能源碳排放系数来源于 IPCC 国家温室气体清单指南。

电力、热力等二次能源消费本身并不直接产生碳排放，产生的碳排放主要来自二次能源本身生产过程中对化石能源的消耗<sup>[20]</sup>。考虑到南京市电力和供热主要以火力发电和原煤燃烧为主，因此二次能源消费的碳排放可以按照煤炭的排放系数进行折算，具体公式如下：

$$E_t^2 = \sum_{j=1}^2 E_{tj}^2 \times f_c$$
 (4)

式中： $E_t^2$ 表示二次能源消费产生的碳排放总量； $E_{tj}^2$ 表示第*j*种二次能源消费量（按照标准煤计，其中热力的折标准煤系数为 0.0341 kgce/百万 J，电力的折标准煤系数为 0.1229 kgce/kW h）；*j*=1, 2 表示热力和电力两种二次能源类型； $f_c$ 表示煤炭的碳排放系数（借鉴已有文献<sup>[14]</sup>，取值 0.7330 t C/t）。化石能源终端消费和二次能源消费产生的碳排放量汇总求和即得到建设用地的间接碳排放总量。

2.3 碳排放量估计结果分析

2.3.1 时间变化分析 首先测算出 2005-2014 年南京市不同类型土地的碳排放量，如表 3 所示。不难看出，南京市土地利用的碳排放量在研究期内呈现出持续增长的发展态势，其发展过程经历了两个阶段。2005-2008 年为缓慢增长阶段，中间有小幅波动，碳排放量稳定在 4000×10<sup>4</sup>~4600×10<sup>4</sup> t 之间；2008-2014 年为持续稳定增长阶段，从 2008 年的 4510.7272×10<sup>4</sup> t 增长到 2014 年的 6485.4970×10<sup>4</sup> t。对净排放量贡献最大的是建设用地，



表3 南京市2005-2014年不同类型土地的碳排放量测算结果

Tab. 3 Carbon emissions estimation from different types of lands in Nanjing from 2005-2014

年份	碳排放量 (10 <sup>4</sup> t)							净排放量
	耕地	园地	林地	牧草地	建设用地	水域用地	未利用地	
2005	10.3640	-0.6865	-4.5318	-0.0001	4075.0797	-1.7377	-0.0062	4078.4814
2006	10.2836	-0.6933	-4.5333	-0.0001	4339.4383	-1.7354	-0.0060	4342.7537
2007	10.2466	-0.7136	-4.5222	-0.0001	4605.3409	-1.7306	-0.0058	4608.6152
2008	10.2164	-0.7105	-4.5045	-0.0001	4507.4599	-1.7286	-0.0055	4510.7272
2009	10.1751	-1.0120	-4.5610	0.0000	4841.6786	-1.6501	-0.0051	4844.6255
2010	10.1243	-0.9086	-4.4931	0.0000	5284.3428	-1.6487	-0.0049	5287.4118
2011	10.0898	-0.8721	-4.4704	0.0000	5825.1302	-1.6450	-0.0048	5828.2276
2012	10.0506	-0.8486	-4.4324	0.0000	5931.8022	-1.6400	-0.0047	5934.9270
2013	10.0239	-0.8291	-4.4207	0.0000	6323.4984	-1.6359	-0.0046	6326.6319
2014	10.0096	-0.8102	-4.4041	0.0000	6482.3413	-1.6349	-0.0045	6485.4970

即间接碳排放。建设用地作为主要的碳源，其碳排放量所占比例最大，年均超过95%，并呈逐年增长态势；耕地作为碳源之一，其碳排放量所占比例很小（研究期内基本维持在10×10<sup>4</sup> t左右），并且呈现逐年减少的态势，这是南京市耕地面积逐年减少所致；从碳汇来看，林地、水域用地和未利用地碳吸收量呈现轻微的下趋势；而园地的碳吸收量则在波动中略有上升。牧草地由于面积较小，其碳吸收效应不明显。五类碳汇用地中，林地是主要的碳汇，其次依次是水域用地、园地、未利用地和牧草地。

**2.3.2 空间变化分析** 为了能够更好的对各区之间的差异进行比较分析，本文对其进行标准化处理，分为三级：轻度排放、中度排放和重度排放（图1）。

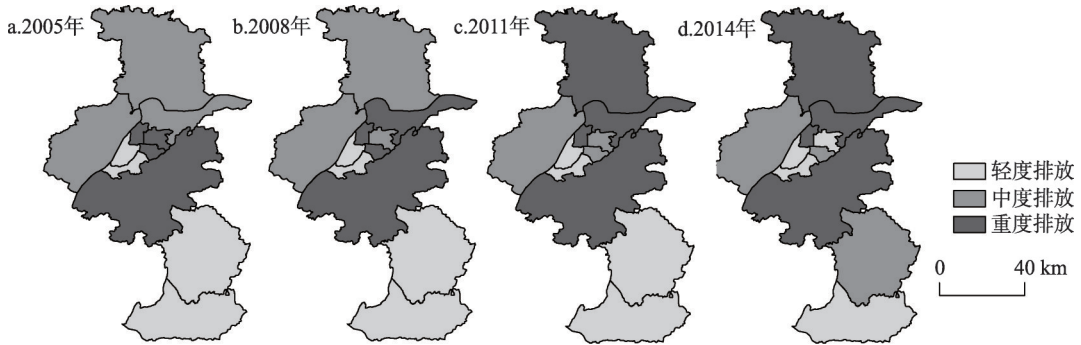


图1 2005-2014年南京市土地利用碳排放量空间变化  
Fig. 1 Spatial patterns of carbon emissions of land use in Nanjing from 2005-2014

从不同时期碳排放量的空间分布来看，其差异十分明显。重度排放区主要集中在中部地区，并且具有向北转移的趋势，平均碳排放量从454.21×10<sup>4</sup> t上升到868.02×10<sup>4</sup> t。拥有便利交通、雄厚经济实力的江宁区和作为南京市行政中心的鼓楼区一直处于重度排放区，2005-2014年间碳排放量一直持续增长，年均增长率分别为12.66%和5.18%。中度排放区主要集中在西北地区，并且具有向东南转移的趋势，平均碳排放量从240.43×10<sup>4</sup> t上升到523.82×10<sup>4</sup> t，分别占当年碳排放总量的22.69%和24.23%。浦口区一直处于中度碳排放区，六合区和栖霞区从2005年的中度排放区变为重度排放区，这主要是因为这两

个地区近年来城市建设用地扩张,工业化发展迅速。轻度排放区主要集中在东南地区和中部部分地区,平均碳排放量从 $152.50 \times 10^4$  t上升到 $360.48 \times 10^4$  t,分别占当年碳排放总量的19.43%和22.23%。建邺区、雨花台区和高淳区一直处于轻度排放区,值得注意的是玄武区从2005年的重度排放区变为2014年的轻度排放区,这主要得益于该地区环境的改善和高新技术产业、服务业的快速发展。

### 3 实证测度与空间相关性分析

#### 3.1 测度模型的构建

测度效率的方法主要有参数方法<sup>[21]</sup>(如随机前沿分析,简称SFA)和非参数方法(数据包络分析,简称DEA)。由于DEA方法可以解决多投入、多产出、多决策单元等问题,且不受输入输出数据量纲的影响,并避免了预先设定函数形式所带来的主观性问题,因此本文将采用DEA方法进行测算。考虑到需要将净碳排放量作为非期望产出引入到模型中,有学者采用基于Malmquist-Luenberger指数方法进行测度<sup>[22]</sup>。本文采用基于Hicks-Moorsteen TFP指数的DEA方法<sup>[23]</sup>。源于该方法被认为是唯一不需要价格信息的具有乘积特征的一种理性化TFP指数,在生产率指数分解的完整性以及分解后指数经济意义的清晰度等方面均优于Malmquist生产率指数<sup>[24]</sup>。Hicks-Moorsteen指数的构建需要借助Shephard距离函数:

$$D_o(x, y) = \min\{\delta > 0: (x, y/\delta) \in P\}; D_i(x, y) = \max\{\rho > 0: (x/\rho, y) \in P\} \quad (5)$$

式中:  $x$ 、 $y$ 表示投入和产出数据的向量;并有 $x_{it} = (x_{i1t}, \dots, x_{kit})'$ 和 $y_{it} = (y_{i1t}, \dots, y_{jit})'$ ;  $i$ 和 $t$ 分别表示区域和时间;其中投入向量包括农用地面积、建设用地面积和未利用地面积;产出向量包括第一、二和三产业增加值之和以及净碳排放量; $P$ 表示时间的生产可能性集合; $D_o(x, y)$ 和 $D_i(x, y)$ 分别表示产出和投入距离函数,即Shephard距离函数。并有:

$$X(x) = [D_i(x, y_{hs}, s) D_i(x, y_{it}, t)]^{1/2} D_i(x, y) = \max\{\rho > 0: (x/\rho, y) \in P\} Y(y) = [D_o(x_{hs}, y, s) D_o(x_{it}, y, t)]^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $s$ 、 $t$ 表示时间;其他参数同式(5)。Hicks-Moorsteen TFP指数可以表达为:

$$TFP_{hs, it} = \left\{ \frac{D_o(x_{hs}, y_{it}, s) D_i(x_{hs}, y_{hs}, s) D_o(x_{it}, y_{it}, t) D_i(x_{hs}, y_{it}, t)}{D_o(x_{hs}, y_{hs}, s) D_i(x_{it}, y_{hs}, s) D_o(x_{it}, y_{hs}, t) D_i(x_{it}, y_{it}, t)} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中:  $TFP_{hs, it}$ 即为全要素碳排放效率增长,亦称为TFP指数。本文采用产出导向的DEA模型,即为在投入不变的情况下产出最大的效率评价。首先是综合效率( $E$ )的测度,即该区域的实际TFP与同一时期TFP最大值之比:

$$E_{it} = \frac{TFP_{it}}{TFP_{it}^*} = \frac{Y_{it}/X_{it}}{Y_{it}^*/X_{it}^*} \leq 1 \quad (8)$$

式中:  $TFP_{it}$ 表示 $i$ 区域在 $t$ 时期的TFP;  $TFP_{it}^*$ 表示在 $t$ 时期TFP的最大可能值,有 $TFP_{it}^* = \max Y_{it}/X_{it}$ ;  $X_{it}^*$ 和 $Y_{it}^*$ 分别表示使得TFP取得最大值时的投入和产出向量。则在产出导向下,  $E$ 可以有两种分解方式:  $E = OTE \times OSE \times OSC$ 或者 $E = OTE \times ROSE \times OME$ ,并有:

$$OTE_{it} = \frac{Y_{it}/X_{it}}{\bar{Y}_{it}/\bar{X}_{it}} = \frac{Y_{it}}{\bar{Y}_{it}} = D_o(x_{it}, y_{it}, t) \leq 1 \quad (9)$$

$$OSE_{it} = \frac{\bar{Y}_{it}/X_{it}}{\bar{Y}_{it}/\bar{X}_{it}} \leq 1 \quad (10)$$

$$OSC_{it} = \frac{\bar{Y}_{it}/\bar{X}_{it}}{TFP_t^*} \leq 1 \quad (11)$$

$$ROSE_{it} = \frac{\bar{Y}_{it}/X_{it}}{TFP_t^*} \leq 1 \quad (12)$$

$$OME_{it} = \frac{\bar{Y}_{it}/X_{it}}{\bar{Y}_{it}/\bar{X}_{it}} = \frac{\bar{Y}_{it}}{\bar{Y}_{it}} \leq 1 \quad (13)$$

式中:  $OTE$ 、 $OSE$ 、 $OSC$ 、 $ROSE$ 和 $OME$ 分别表示产出技术效率、产出规模效率、产出范围效率、产出残余规模效率和产出混合效率。其中,  $OSE$ 和 $ROSE$ 用来衡量规模经济效应;  $OSC$ 用来衡量范围经济效应;  $OME$ 用来衡量资源配置效应;  $\bar{Y}_{it} = Y_{it} D_o(x_{it}, y_{it}, t)^{-1}$ 表示投入向量 $x_{it}$ 固定情况下 $y_{it}$ 的最大可能产出;  $\bar{X}_{it}$ 和 $\bar{Y}_{it}$ 分别表示当 $TFP$ 在投入和产出向量分别是 $x_{it}$ 和 $y_{it}$ 时被最大化所取得的总投入和总产出;  $\bar{Y}_{it}$ 表示采用投入变量 $x_{it}$ 进行生产时的最大可能产出。对 $TFP$ 进行跨期比较, 即用区域 $i$ 在 $t$ 时期的 $TFP$ 除以区域 $h$ 在 $s$ 时期 $TFP$ 可求取 $TFP_{hs,it}$ 如下:

$$TFP_{hs,it} = \frac{TFP_{it}}{TFP_{hs}} = \frac{Y_{it}/X_{it}}{\bar{Y}_{hs}/\bar{X}_{hs}} = \frac{Y_{hs,it}}{X_{hs,it}} \quad (14)$$

式中:  $Y_{hs,it} = Y_{it}/Y_{hs}$ 表示产出量指数;  $X_{hs,it} = X_{it}/X_{hs}$ 表示投入量指数。因此,  $TFP_{hs,it}$ 可以表示为产出与投入量指数的比值。将式(8)进一步变形为 $TFP_{it} = E_{it} \times TFP_t^*$ , 同理有:  $TFP_{hs} = E_{hs} \times TFP_s^*$ 。结合 $E$ 的两种分解方式, 则公式(13)可以被分解为:

$$TFP_{hs,it} = \left( \frac{TFP_{it}^*}{TFP_s^*} \right) \times \left( \frac{E_{it}}{E_{hs}} \right) = \left( \frac{TFP_{it}^*}{TFP_s^*} \right) \times \left( \frac{OTE_{it}}{OTE_{hs}} \times \frac{OSE_{it}}{OSE_{hs}} \times \frac{OSC_{it}}{OSC_{hs}} \right) \quad (15)$$

$$= \Delta TFP \times \Delta E = \Delta TFP \times (\Delta OTE \times \Delta OSE \times \Delta OSC)$$

$$TFP_{hs,it} = \left( \frac{TFP_{it}^*}{TFP_s^*} \right) \times \left( \frac{E_{it}}{E_{hs}} \right) = \left( \frac{TFP_{it}^*}{TFP_s^*} \right) \times \left( \frac{OTE_{it}}{OTE_{hs}} \times \frac{OME_{it}}{OME_{hs}} \times \frac{ROSE_{it}}{ROSE_{hs}} \right) \quad (16)$$

$$= \Delta TFP \times \Delta E = \Delta TFP \times (\Delta OTE \times \Delta OME \times \Delta ROSE)$$

式中:  $\Delta TFP$ 表示技术进步;  $\Delta E$ 表示综合效率变化;  $\Delta OTE$ 、 $\Delta OSE$ 、 $\Delta OSC$ 、 $\Delta OME$ 和 $\Delta ROSE$ 分别表示技术效率、规模效率、范围效率、混合效率和残余规模效率的增长率。同时, 本文还估算了传统全要素生产率增长。

## 3.2 实证结果及分析

### 3.2.1 全要素碳排放效率增长的时间演进趋势

本文用基于Hicks-Moorsteen  $TFP$ 指数的DEA方法对南京市土地利用结构的传统全要素生产率增长和全要素碳排放效率增长进行估算。同时得到两个模型 $TFP$ 指数的分解要素 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ , 结果如表4所示。模型(1)估算的传统全要素生产率年均增长18.06%, 平均 $TFP$ 指数为1.1806, 而模型(2)估算的全要素碳排放效率发生了年均3.98%的增幅, 平均 $TFP$ 指数为1.0398。两个模型中对 $TFP$ 指数贡献最大的均是 $\Delta TFP$ 的大幅提升,  $\Delta TFP$ 均值分别达到1.1656和1.0312;  $\Delta E$ 在两个模型中均对 $TFP$ 指数有正影响, 贡献率分别为1.28%和0.83%, 但其贡献度远低于 $\Delta TFP$ 。不难看出, 全要素碳排放效率增长及其分解要素均小于传统全要素生产率增长及其分解要素。源于考虑碳排放约束后, 投入要素除了用于促进城市经济增长外, 还要用于治理环境污染和碳排放, 在投入相同的情况下, 不考虑碳排放的产出比考虑碳排放的产出更多, 所以前者效率更高, 技术进步和效率变动也会受影响。换言之, 不考虑碳排放高估了土地利用的实际生产率。全要素碳排放效率增长水平偏低, 说明南京市目前的经济发展对碳排放依赖度较高, 尽管经济总量增长较迅速, 但却是建立在碳排放量逐年

表 4 两类模型估算的历年 Hicks-Moorsteen *TFP* 指数及其分解均值

Tab. 4 Average levels of Hicks-Moorsteen *TFP* index and its decomposition for two models over the years

年度	模型 (1)			模型 (2)		
	<i>TFP</i> 指数	$\Delta TFP$	$\Delta E$	<i>TFP</i> 指数	$\Delta TFP$	$\Delta E$
2005-2006	1.2094	1.2407	0.9747	1.0609	1.0835	0.9791
2006-2007	1.1858	1.1615	1.0209	1.0355	1.0983	0.9428
2007-2008	1.2204	0.9872	1.2363	0.9365	0.8139	1.1507
2008-2009	1.1068	1.2897	0.8582	0.9948	1.0511	0.9464
2009-2010	1.2040	1.1777	1.0223	1.0764	1.0291	1.0459
2010-2011	1.1850	1.1926	0.9937	1.0717	1.0745	0.9973
2011-2012	1.2161	1.1943	1.0183	1.1039	1.0988	1.0046
2012-2013	1.1504	1.1435	1.0060	1.0397	1.0204	1.0189
2013-2014	1.1524	1.1287	1.0210	1.0488	1.0444	1.0041
均值	1.1806	1.1656	1.0128	1.0398	1.0312	1.0083

数据来源：作者计算后整理。注：由于 Hicks-Moorsteen *TFP* 指数是乘数型指数，故各行历年平均值为几何平均。

增加基础上的，要实现经济可持续发展和土地集约高效利用还有很长的路要走。从两个模型的对比分析来看，除了个别年份外，模型（1）的 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 均高于模型（2），这说明碳排放对技术进步和效率变动有显著影响，特别是近年来随着碳排放的不断增加，使得土地要素的投入不能全部转化为有效产出，从而降低了生产效率，碳排放的持续增加还影响了产业转型升级，企业的有限资源不能全部用于代表创新的技术进步投入，降低了土地利用的整体效率水平。

进一步得到全要素碳排放效率增长及其分解要素在研究期内的变动情况，如图2所示。从图2可以总结以下几点：一是全要素碳排放效率增长在研究期内呈现出了“一降、二升、三降”的波动态势，其波动性表现出了收敛态势和区域之间均衡性的发展特征。2005-2008年，南京市的全要素碳排放效率增长呈显著下降趋势，并且由正变负，在2008年达到了最低值（0.9365）。其主要原因在于 $\Delta TFP$ 在此期间出现了显著的下滑，尽管 $\Delta E$ 在研究期内呈现出了一定的增长，但是其增长速度远不及 $\Delta TFP$ 的下降速度。更深层次原因在于尽管南京市经济增长逐年提高，但同时碳排放量也逐年上升。南京市碳排放量的增加不仅抵消了经济增长水平的提高而且一定程度上阻碍了经济发展。2008-2010年出现了上升趋势，原因在于 $\Delta TFP$ 的显著提升，而 $\Delta E$ 的波动性下滑则起到了相反作用。这一

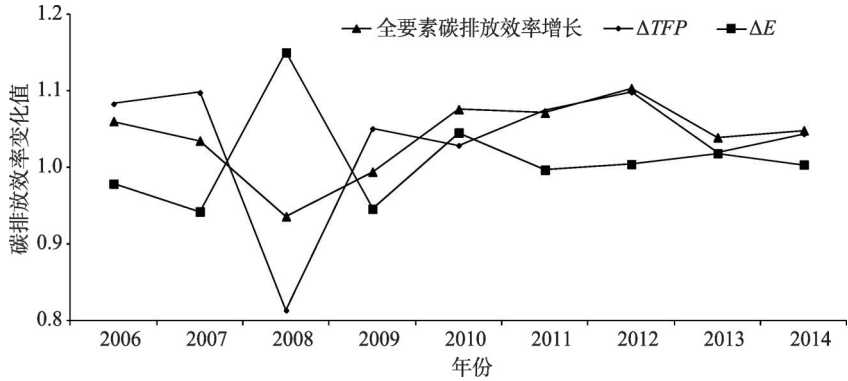


图2 全要素碳排放效率增长、技术进步和效率变动（2005-2014年）

Fig. 2 Total factor carbon emission productivity growth, technical progress and efficiency change (2005-2014)



时期主要受金融危机的影响，整体经济效率低下，导致2008-2009年的全要素碳排放效率出现了负增长。之后由负转正，对于这一现象的解释，有学者提出与应对全球金融危机我国采取的刺激经济政策所带来的建设用地提前和集中供应有关<sup>[10]</sup>。2010-2011年全要素碳排放效率增长略有下降，主要原因在于 $\Delta E$ 的下降（取值小于1）。2011-2014年全要素碳排放效率转为正增长并趋于稳定，其主要原因在于 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 在该时期内的取值均大于1。 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 的正向增长，源于经过多轮经济刺激政策的运用，宏观经济环境不断好转，金融危机的负面影响逐渐消散，同时，“低碳和高效”发展理念不断深入人心，单位GDP能耗逐年下降（由2005年的0.2636 kgce/元下降到2014年的0.1421 kgce/元）。二是 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 在研究期内呈现出明显的负向关系。如2006年、2007年、2009年和2011年， $\Delta TFP$ 均正增长，而同时期的 $\Delta E$ 均为负增长；2008年 $\Delta TFP$ 出现负增长，而同时期的 $\Delta E$ 为正增长。2012年之后 $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 取值均大于1，这导致全要素碳排放效率增长始终为正。

**3.2.2 全要素碳排放效率增长的区域特征分析** 按照土地利用结构的传统TFP指数值由高至低的顺序排列得到研究期内南京市各区的TFP指数及其分解均值如表5所示。在模型（1）中，所有11个区的TFP指数值均大于1。玄武区的指数值最高，年均增长24.75%。玄武区作为南京市的中心城区，2014年的地区生产总值为482.51亿元，第三产业增加值占比94.62%。第三产业多以高端金融服务业为主，经济附加值高，土地利用效率较高，全要素生产率增长迅速；排名第二和第三的依次是栖霞区和江宁区。栖霞区作为南京的重要航运中心和物流基地，其经济发展迅速，土地利用强度和集约度较高，第二产业所占比例为64.78%，仍占主导。江宁区作为南京市对外交通的重要枢纽，土地投入多，综合产出也较高。2014年，江宁区国内生产总值1405.58亿元，保持了经济的高增长，2014年地区生产总值稳居全市第一。排名最低的是鼓楼区。尽管鼓楼区目前正在形成以现代服务业为主导的现代产业体系，但是作为南京市的老城区之一，其土地利用规模和结构等方面还有诸多不合理之处。各区之间TFP指数变动的驱动因素也不同。其中，玄武区、江宁区 and 秦淮区的TFP增长主要来自 $\Delta TFP$ ，而 $\Delta E$ 则起到抑制作用；其余八个区

表5 两类模型估算的南京市各区Hicks-Moorsteen TFP指数及其分解均值  
Tab. 5 Average levels of Hicks-Moorsteen TFP index and its decomposition for two models over the districts in Nanjing

区域	模型（1）				模型（2）			
	排序	TFP指数	$\Delta TFP$	$\Delta E$	排序	TFP指数	$\Delta TFP$	$\Delta E$
玄武区	1	1.2475	1.3141	0.9493	2	1.1396	1.2302	0.9263
栖霞区	2	1.2326	1.1368	1.0843	4	1.0701	1.0786	0.9921
江宁区	3	1.2148	1.2832	0.9467	1	1.1739	1.2416	0.9455
溧水区	4	1.2074	1.1368	1.0622	8	1.0129	1.0387	0.9751
建邺区	5	1.2047	1.1365	1.0601	10	0.9353	0.9228	1.0136
高淳区	6	1.1852	1.1368	1.0425	7	1.0239	1.0669	0.9597
六合区	7	1.1765	1.1368	1.0349	3	1.0870	1.0135	1.0725
浦口区	8	1.1666	1.1368	1.0262	6	1.0429	1.0619	0.9822
雨花台区	9	1.1617	1.1368	1.0219	11	0.9339	1.0395	0.8985
秦淮区	10	1.1315	1.2982	0.8716	5	1.0696	1.0184	1.0503
鼓楼区	11	1.0689	1.0050	1.0636	9	0.9768	0.7303	1.3375
均值	—	1.1806	1.1656	1.0129	—	1.0398	1.0312	1.0084

数据来源：作者计算后整理。注：由于Hicks-Moorsteen TFP指数是乘数型指数，故各行历年平均值为几何平均。

的  $TFP$  增长同时来源于  $\Delta TFP$  和  $\Delta E$ 。11 个区中  $\Delta TFP$  取值均大于 1, 说明南京市的技术日益成熟, 技术进步水平稳步提升。其中,  $\Delta TFP$  取值最大的是玄武区, 年均增长率达到 31.41%。尽管玄武区的  $\Delta E$  出现了负增长, 但是在技术进步的强有力推动下, 第三产业为主导的高效土地利用模式仍然推动了其全要素生产率的高增长。 $\Delta TFP$  取值最低的是鼓楼区 (1.0050), 尽管鼓楼区的  $\Delta E$  也为正增长, 但是由于增长速度缓慢 (年均增长率 6.36%), 二者的叠加效应导致了土地利用效率总体不高。而  $\Delta TFP$  和  $\Delta E$  的低增长源于作为老城区的鼓楼区土地利用模式固化, 旧城改造难度大, 产业升级困难。除了玄武区、江宁区和秦淮区以外, 其余 8 个区的  $\Delta E$  取值均大于 1。其中,  $\Delta E$  取值最大的是栖霞区 (1.0843), 最低的是秦淮区 (0.8716)。尽管秦淮区作为国家东部地区重要的金融商务中心, 其土地利用结构不断优化, 第三产业用地比例的上升势必会带来技术进步的提升, 但作为老城区有诸多历史遗留问题如旧城改造难度大、容积率低等原因导致土地利用效率不高。 $\Delta E$  取值小于 1 的玄武区面临同样的问题。

模型 (2) 中, 建邺区、雨花台区和鼓楼区的  $TFP$  指数值由大于 1 变为小于 1 (由增长变为下降), 即除了建邺区、雨花台区和鼓楼区以外的 8 个区的  $TFP$  指数值均大于 1。考虑碳排放约束后,  $TFP$  指数取值最高的是江宁区, 年均增长率为 17.39%。尽管江宁区的产业结构仍然以第二产业为主 (2014 年第二产业占比 55.41%), 但同时江宁区也是南京市最为重要的旅游度假区之一, 优越的自然条件和生态环境为低碳经济发展提供了保障;  $TFP$  指数最低的是雨花台区 (0.9339);  $TFP$  指数次低的是建邺区 (0.9353)。建邺区和雨花台区的产业结构尽管均以第三产业为主, 但是经济发展速度相对缓慢, 2014 年两个区的产值在全市 11 个区中分别排在第 11 和第 10 位。除了建邺区和鼓楼区以外, 其余 9 个区的  $\Delta TFP$  取值均大于 1。其中,  $\Delta TFP$  取值最高的是江宁区 (1.2416), 最低的是鼓楼区 (0.7303)。 $\Delta E$  方面, 除了建邺区、六合区、秦淮区和鼓楼区以外, 其余 7 个区的  $\Delta E$  取值均小于 1。 $\Delta E$  取值最高的是鼓楼区 (33.75%), 最低的是雨花台区 (-10.15%)。从各区  $TFP$  指数的驱动因素来看, 建邺区和鼓楼区的  $TFP$  增长动力主要来自  $\Delta E$ , 而  $\Delta TFP$  则起到了相反作用; 六合区和秦淮区则是  $\Delta E$  和  $\Delta TFP$  共同促进了  $TFP$  增长; 其余 7 个区的  $TFP$  增长动力均来自于  $\Delta TFP$ , 而  $\Delta E$  则起到了抑制作用。

对比分析来看, 模型 (2) 各区的  $TFP$  指数的排序与模型 (1) 均发生了一定变化。其中, 排名上升明显的有秦淮区和六合区。模型 (1) 中排名第 10 的秦淮区变成模型 (2) 中排名第 5, 上升五个位次。模型 (1) 中排名第 7 的六合区在模型 (2) 中排名第 3, 上升四个位次; 排名下降明显的有溧水区和建邺区。模型 (1) 中排名第 4 的溧水区在模型 (2) 中排名第 8, 下降四个位次。建邺区排名发生变化最大, 由模型 (1) 中排名第 5 变成模型 (2) 中排名第 10, 下降了五个位次。排名下降的主要原因在于这些区的经济快速发展是以高污染、高排放和高消耗为代价的, 尽管短期内促进了经济增长, 但是也对环境产生了负面影响, 从而导致全要素碳排放效率下降; 排名上升的区域则重视产业结构优化升级和环保项目的投入, 通过科技进步来提高碳排放治理水平, 兼顾了经济发展与环境保护, 从而促使全要素碳排放效率的提升。从  $\Delta TFP$  来看, 两个模型估算的结果表现出了较高的一致性, 除了建邺区和鼓楼区以外, 其余 9 个区的  $\Delta TFP$  取值均大于 1; 建邺区和鼓楼区则为模型 (1) 大于 1 而模型 (2) 小于 1, 即考虑了碳排放的非期望产出后, 这两个区域的技术进步水平由增长变为下降。从  $\Delta E$  取值来看, 两个模型估算的结果则表现出了一定的差异性。 $\Delta E$  取值均小于 1 的有玄武区和江宁区; 取值均大于 1 的有建邺区、六合区和鼓楼区; 栖霞区、溧水区、浦口区、高淳区和雨花台区均为模型 (1) 大于 1 而模型 (2) 小于 1; 秦淮区为模型 (1) 小于 1 而模型 (2) 大于 1。上述对比分析

表明使用单一的经济产出来衡量土地利用结构效率容易造成效率值的高估或者低估。部分区经济高速发展的代价是土地资源的高消耗和污染物的高排放，高投入、高增长的发展模式有待进一步优化。而对比分析土地利用的投入和产出，在考虑经济产出的同时，更应该将环境产出纳入评价体系，这才能够反映真实的土地利用结构效率。

**3.2.3 全要素碳排放效率增长的分解** 为进一步分析全要素碳排放效率增长的驱动因素，对模型（2）估算的 *TFP* 指数进行完全分解。表 6 中的 *TFP* 指数、 $\Delta TFP$ 、 $\Delta OTE$ 、 $\Delta OSE$ 、 $\Delta OME$ 、 $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  均为 2005-2014 年的均值，反映近 10 年来南京市各区的技术效率、规模效率、范围效率、混合效率和残余规模效率的变动情况。首先从  $\Delta OTE$  取值来看，江宁区、玄武区、栖霞区和溧水区的技术效率保持不变，说明“追赶效应”不明显，即各区并没有表现出向生产前沿面靠近的趋势；其他七个区的取值均大于 1，说明这些区的技术效率出现正增长，“追赶效应”最明显的是高淳区（年均增长率为 2.69%）。从  $\Delta OSE$  的取值来看，经过多年的发展，南京市的部分区已经摆脱土地利用规模不经济的发展模式，秦淮区和鼓楼区已经开始出现土地利用的规模经济。这主要源于两个区不失时机的进行了深入的结构调整和资源整，产业集聚能力进一步增强。但是浦口区、高淳区、六合区、雨花台区和建邺区仍然存在规模不经济现象。而江宁区、玄武区、栖霞区和溧水区的规模效率保持不变，说明规模经济效应尚未凸显。从  $\Delta OME$  取值来看，取值大于 1 的有浦口区、高淳区和秦淮区，说明这三个区经过多年的发展和建设，通过对优势产业进行低成本扩张和资源优化配置，淘汰高能耗、高排放和低效益的产业，土地利用结构和产业结构不断优化，土地资源的配置效率不断提高。而栖霞区、六合区、雨花台区和建邺区则出现土地资源无效配置的现象。从  $\Delta ROSE$  取值结果来看，有八个区的取值小于 1，说明目前南京市大部分区域仍然存在一定的残余规模不经济。仅有玄武、栖霞区和溧水区三个区的取值大于 1，说明这三个区的残余规模经济效应已经凸显。取值最高的是溧水区（1.3375），取值最低的是秦淮区（0.8340）。从  $\Delta OSC$  取值来看，仅有玄武区、栖霞区、溧水区和鼓楼区的指数值大于 1，说明这四个区的土地利用结构不断优化，形成了多元化的产业发展格局，并且产业之间优势互补，上下游产业链条分工明确，范围经济效应凸显。其余 7 个区的取值小于 1，说明仍然存在范围不经济

表 6 全要素碳排放效率指数效率变动的分解

Tab. 6 Decomposition of efficiency change for total factor carbon emissions performance index

区域	<i>TFP</i> 指数	$\Delta TFP$	$\Delta OTE$	$\Delta OSE$	$\Delta OME$	$\Delta ROSE$	$\Delta OSC$
玄武区	1.1396	1.2302	1.0000	1.0000	1.0000	0.9263	0.9263
秦淮区	1.0696	1.0184	1.0000	1.0000	1.0000	1.0503	1.0503
建邺区	0.9353	0.9228	1.0000	1.0000	0.8619	1.1759	1.0136
鼓楼区	0.9768	0.7303	1.0000	1.0000	1.0000	1.3375	1.3375
浦口区	1.0429	1.0619	1.0081	0.9912	1.0127	0.9621	0.9830
栖霞区	1.0701	1.0786	1.0269	0.9755	1.0435	0.9258	0.9904
雨花台区	0.9339	1.0395	1.0167	0.9707	0.9814	0.9005	0.9104
江宁区	1.1739	1.2416	1.0189	1.0187	1.1127	0.8340	0.9110
六合区	1.0870	1.0135	1.0054	1.0073	1.0690	0.9980	1.0591
溧水区	1.0129	1.0387	1.0031	0.9982	0.9907	0.9812	0.9738
高淳区	1.0239	1.0669	1.0126	0.9960	0.9928	0.9546	0.9516
均值	1.0398	1.0312	1.0083	0.9961	1.0041	0.9960	1.0040

数据来源：作者计算后整理。注：由于 Hicks-Moorsteen *TFP* 指数是乘数型指数，故各行历年平均值为几何平均。

济。取值最高的是潭水区 (1.3375), 取值最低的是六合区 (0.9104)。

从 *TFP* 指数的驱动因素来看, 11 个区表现出较大的差异性。玄武区的  $\Delta TFP$  是促进 *TFP* 指数提高的主要动力,  $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  则起到相反的作用; 秦淮区的 *TFP* 指数提高则是  $\Delta TFP$ 、 $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  三者共同作用的结果; 建邺区的 *TFP* 指数出现下降则是受到  $\Delta TFP$  和  $\Delta OME$  的拖累, 尽管  $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  起到一定促进作用; 鼓楼区 *TFP* 指数的下降是  $\Delta TFP$  大幅下降导致的, 尽管同时  $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  起的促进作用同样显著; 浦口区 and 栖霞区比较类似, 二者的 *TFP* 指数增长均是  $\Delta TFP$ 、 $\Delta OTE$  和  $\Delta OME$  共同推动的结果, 而  $\Delta OSE$ 、 $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  则起到相反的作用; 雨花台区的 *TFP* 指数下降主要受到  $\Delta OSE$ 、 $\Delta OME$ 、 $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  的拖累, 尽管  $\Delta TFP$  和  $\Delta OTE$  有正向促进作用; 江宁区的 *TFP* 指数增长是  $\Delta TFP$ 、 $\Delta OTE$ 、 $\Delta OSE$  和  $\Delta OME$  共同作用的结果, 而  $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  则起到了抑制作用; 除了  $\Delta ROSE$  以外, 其他分解要素均是推动六合区 *TFP* 指数增长的动力; 溧水区和高淳区的 *TFP* 指数增长均主要受到  $\Delta TFP$  和  $\Delta OTE$  的推动, 而  $\Delta OSE$ 、 $\Delta OME$ 、 $\Delta ROSE$  和  $\Delta OSC$  则起到一定抑制作用; 从 *TFP* 指数增长的均值来看, 整体上南京市的全要素碳排放效率增长的驱动因素包括  $\Delta TFP$ 、 $\Delta OTE$ 、 $\Delta OME$  和  $\Delta OSC$ , 而  $\Delta OSE$  和  $\Delta ROSE$  则起到一定的抑制作用。

### 3.3 空间自相关分析

常用的空间自相关分析方法主要是指探索性空间数据分析 (简称 ESDA), 包括全局空间自相关分析和局部空间自相关两种方法。其中全局空间自相关分析通常采用 Moran's *I*, 其计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (17)$$

式中:  $Y_i$  和  $Y_j$  分别表示地区 *i* 和地区 *j* 的观测值; *n* 表示样本总数;  $w_{ij}$  代表空间权重矩阵;  $\bar{Y}$  表示观测变量的均值;  $S^2$  表示观测变量的方差。Moran's *I* 的取值范围为  $[-1, 1]$ , 如果 Moran's *I* > 0, 说明各区域的观测值存在空间正相关性 (即取值高的区域之间邻接, 取值低的区域之间邻接); 如果 Moran's *I* < 0, 说明各区域的观测值存在空间负相关性 (即高取值区域与低取值区域邻接, 低取值区域与高取值区域邻接); 如果 Moran's *I* = 0, 则说明各区域的观测值不存在空间相关性。

根据 2006-2014 年南京市全要素碳排放效率增长全局空间自相关分析可知 (表 7), Moran's *I* 大部分年份为正, 且在 5% 显著性水平下显著, 表明各市辖区全要素碳排放效率增长在南京市范围内具有空间正相关性。

表 7 2006-2014 年南京市全要素碳排放效率增长全局自相关 Moran's *I* 值

Tab.7 Global Moran's *I* of total factor carbon emissions productivity in Nanjing from 2006-2014

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Moran's <i>I</i>	0.2352	-1.1175	0.1978	0.2343	-0.3621	-0.0516	0.1876	0.1030	0.0487
<i>P</i>	0.06	0.37	0.08	0.04	0.03	0.36	0.05	0.07	0.23

数据来源: 作者计算后整理。注:  $P < 0.01$  表明在 1% 的显著性水平下显著,  $P < 0.05$  表明在 5% 的显著性水平下显著,  $P < 0.1$  表明在 10% 的显著性水平下显著。

为了进一步探索南京市不同区域全要素碳排放效率增长的空间关联情况, 对数据进行了局部空间自相关分析。LISA 图直观地反映了各年份南京市 11 个区的全要素碳排放效率增长局部空间差异及其演变趋势 (图 3)。从图 3 可以看出, HH 关联类型数量有所增



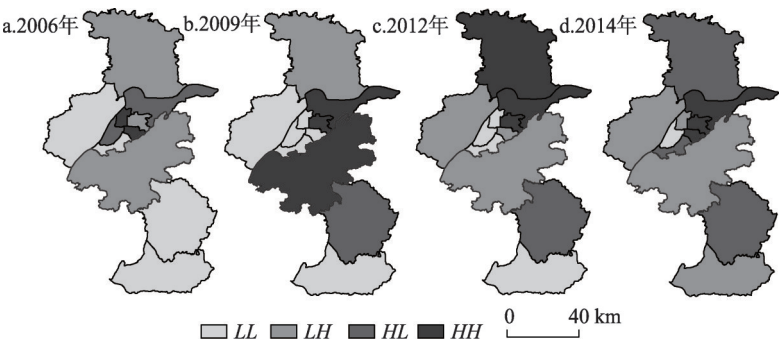


图3 2006-2014年南京市全要素碳排放效率增长LISA图

Fig. 3 LISA results of total factor carbon emissions productivity growth in Nanjing from 2006-2014

加，主要分布在中北部地区，集聚趋势先由北往南，最后又往中部集中，玄武区和栖霞区为高值集聚中心；LL关联类型逐渐减少，2014年建邺区成为唯一的低值集聚中心，浦口区、高淳区从2006年的低值集聚中心变为2014年的低值孤立点，雨花台区、溧水区从2006年低值集聚中心变为2014年的高值孤立点；HL高值孤立点主要分布在溧水区、雨花台区、六合区；LH低值孤立点主要分布在江宁区、浦口区。

4 结论与讨论

本文在对土地利用碳排放量进行测度的基础上，将其作为非期望产出，进而采用基于Hicks-Moorsteen *TFP* 指数的DEA方法对南京市11个区的土地利用结构碳排放效率进行测度和分解，并与传统不考虑碳排放约束的全要素生产率进行对比分析，得出以下几点结论：一是南京市土地利用结构碳排放量的主要来源是建设用地产生的间接碳排放，并且在研究期内呈现出持续上升的发展趋势。各区的土地利用结构碳排放量空间差异明显，重度排放区主要集中在中部地区，并且具有向北转移的趋势。二是考虑碳排放约束的全要素碳排放效率增长、技术进步和效率变动均小于传统全要素生产率增长的估算结果，表明使用单一的经济产出来衡量土地利用结构效率容易造成效率值的高估或者低估。全要素碳排放效率增长在研究期内呈现出了“一降、二升、三降”的波动态势，其波动性表现出了收敛态势和区域之间均衡性的发展特征， $\Delta TFP$ 和 $\Delta E$ 在研究期内呈现出明显的负向关系。三是两类模型测算的结果均表明玄武区、江宁区效率较高，雨花台区、鼓楼区效率较低。部分区经济高速发展的代价是土地资源的高消耗和污染物的高排放，高投入、高增长的发展模式有待进一步优化。四是全要素碳排放效率的分解结果表明，南京市各区的技术效率值较低，“技术追赶”效应并不明显，开始出现了土地利用的规模经济效应，但是范围经济效应不显著。五是全要素碳排放效率在南京市范围内具有空间正相关性，且具有空间集聚特征。研究期内南京市HH关联类型数量有所增加，LL关联类型数量有所减少，说明南京市全要素碳排放效率的正向空间集聚性增强；玄武区和栖霞区为高值集聚中心，建邺区为低值集聚中心。

从以上研究结果可以得到一些启示：近年来南京市经济发展迅速，土地利用结构不断优化，土地集约利用水平不断提高。但是，南京市经济发展是以土地资源的高投入和高排放为代价的。即忽视了碳排放约束下的经济增长是某种程度的“虚高”。因此，加快转变经济发展方式，推进南京市土地资源的低碳和可持续利用势在必行。从研究的

实证结果来看, 本文认为: 一是应该进一步控制建设用地规模。鉴于碳排放的主要来源是建设用地, 因此各区应该根据自身的功能定位和比较优势来确定未来的土地利用结构和格局, 对现有存量用地进行充分挖潜, 避免盲目扩张, 如在产业园区内集中建设标准厂房出租给企业, 而不再是直接出售工业用地的使用权, 避免工业用地的闲置和浪费。二是从全市范围统筹产业布局, 避免各区之间的同质化竞争。各区之间应该注重协调与分工, 充分利用自身的比较优势来发展优势产业和引导产业布局, 淘汰过剩和落后产能, 尤其是高污染、高排放的落后产业。如将关停的旧厂房进行改造, 发展2.5产业。三是创新供地方式。鉴于现有工业用地出让50年产权存在的种种弊端, 建议推行产业用地的弹性出让制度, 如两阶段出让等。四是强化产业用地出让的批前、批中和批后的全过程监管。切实加强产业用地政策调控和履约管理, 严格土地使用事前、事中、事后的监管, 加大批少占多、批而不用、擅自改变用途、改变开发利用强度、闲置不用现象的处置力度, 确保建设用地按规定或约定开发与生产经营。同时通过对高碳排放产业用地用途的转化和整治, 或腾笼换鸟, 将其发展为低碳型第三产业。五是探索产业园区的市场化运作。推进园区建设模式市场化改革创新, 拓宽资金投入渠道, 积极引入社会资本参与园区建设。

## 参考文献(References)

- [1] 游和远, 吴次芳. 土地利用的碳排放效率及其低碳优化: 基于能源消耗的视角. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1875-1886. [You Heyuan, Wu Cifang. Carbon emission efficiency and low carbon optimization of land use: Based on the perspective of energy consumption. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1875-1886.]
- [2] 余光英, 员开奇. 湖南省土地利用碳排放动态效率研究: 基于 Malmquist 指数模型. 环境科学与技术, 2015, 38(2): 189-194. [Yu Guangying, Yuan Kaiqi. Dynamic efficiency of land use carbon emissions in Hunan: Based on Malmquist index model. Environmental Science & Technology, 2015, 38(2): 189-194.]
- [3] 董捷, 员开奇. 湖北省土地利用碳排放总量及其效率. 水土保持通报, 2016, 36(2): 337-342. [Dong Jie, Yuan Kaiqi. Carbon emission from land use and its efficiency in Hubei province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 337-342.]
- [4] 崔玮, 苗建军, 杨晶. 基于碳排放约束的城市非农用地生态效率及影响因素分析. 中国人口资源与环境, 2013, 23(7): 63-69. [Cui Wei, Miao Jianjun, Yang Jing. Urban non-agricultural eco-efficiency and affecting factors based on carbon emission. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(7): 63-69.]
- [5] 游和远, 吴次芳. 农地集约利用的碳排放效率分析与低碳优化. 农业工程学报, 2014, 30(2): 224-234. [You Heyuan, Wu Cifang. Analysis of carbon emission efficiency and optimization of low carbon for agricultural land intensive use. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 224-234.]
- [6] 朱志远, 苗建军, 崔玮. 城市建设用地集约利用的碳排放效率分析. 地域研究与开发, 2016, 35(3): 98-103. [Zhu Zhiyuan, Miao Jianjun, Cui Wei. Analysis of carbon emission efficiency for urban construction land intensive use. Areal Research and Development, 2016, 35(3): 98-103.]
- [7] 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. 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. China Land Sciences, 2016, 30(3): 37-45.]
- [8] 张苗, 甘臣林, 陈银蓉, 等. 中国城市建设用地开发强度的碳排放效率分析与低碳优化. 资源科学, 2016, 38(2): 265-275. [Zhang Miao, Gan Chenlin, Chen Yinrong, et al. Carbon emission efficiency and optimization of low carbon for construction land development intensity in China according to provincial panel data. Resources Science, 2016, 38(2): 265-275.]
- [9] 王佳丽, 黄贤金, 郑泽庆. 区域规划土地利用结构的相对碳效率评价. 农业工程学报, 2010, 26(7): 302-306. [Wang Jiali, Huang Xianjin, Zheng Zeqing. Evaluation on relative carbon efficiency of regional planning land use structure. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 302-306.]
- [10] 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. 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. Economic Geogra-

- phy, 2015, 35(12): 176-184.]
- [11] 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. 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. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 1152-1161.]
- [12] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162. [Sun He, Liang Hongmei, Chang Xueli, et al. Land use patterns on carbon emission and spatial association in China. Economic Geography, 2015, 35(3): 154-162.]
- [13] 王慧敏, 曾永年. 青海高原东部土地利用的低碳优化模拟: 以海东市为例. 地理研究, 2015, 34(7): 1270-1284. [Wang Huimin, Zeng Yongnian. Land use optimization simulation based on low-carbon emissions in eastern part of Qinghai Plateau. Geographical Research, 2015, 34(7): 1270-1284.]
- [14] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益. 自然资源学报, 2012, 27(3): 394-401. [Sun Xianbin. Effects of carbon emission by land use patterns in Hefei's economic circle of Anhui province. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 394-401.]
- [15] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220-229. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang, et al. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17): 220-229.]
- [16] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812. [Fang Jingyun, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981-2000. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(6): 804-812.]
- [17] 王刚, 张华兵, 薛菲, 等. 成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1170-1182. [Wang Gang, Zhang Huabing, Xue Fei, et al. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu city. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1170-1182.]
- [18] 石洪听, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究. 水土保持通报, 2010, 32(3): 101-106. [Shi Hongxin, Mu Xingmin, Zhang Yinglong, et al. Effects of different land use patterns on carbon emission in Guangyuan city of Sichuan province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 32(3): 101-106.]
- [19] 赵荣钦, 黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹. 地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649. [Zhao Rongqin, Huang Xianjin. Carbon emission and carbon footprint of different land use types based on energy consumption of Jiangsu province. Geographical Research, 2010, 29(9): 1639-1649.]
- [20] 张兰, 刘友兆, 郑华伟. 江苏省土地承载碳排放及其脱钩效应分析. 资源科学, 2012, 34(6): 1108-1118. [Zhang Lan, Liu Youzhao, Zheng Huawei. Land carrying carbon emissions and the analysis of its decoupling effects in Jiangsu province. Resources Science, 2012, 34(6): 1108-1118.]
- [21] 揭懋汕, 郭洁, 陈罗焯, 等. 碳约束下中国县域尺度农业全要素生产率比较研究. 地理研究, 2016, 35(5): 898-908. [Jie Maoshan, Guo Jie, Chen Luoye, et al. Spatial and temporal changes of total factor productivity in agriculture: A stochastic frontier analysis of China at county level, 1991-2011. Geographical Research, 2016, 35(5): 898-908.]
- [22] 李博, 张文忠, 余建辉. 服务业发展、信息化水平与全要素碳生产率增长: 基于门限效应的实证研究. 地理研究, 2016, 35(5): 953-965. [Li Bo, Zhang Wenzhong, Yu Jianhui. Development of service industry, level of informatization and growth of total factor carbon productivity: An empirical study based on threshold effect. Geographical Research, 2016, 35(5): 953-965.]
- [23] O'Donnell C J. An aggregate quantity-price framework for measuring and decomposing productivity and profitability change. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Working Papers, University of Queensland, 2008.
- [24] 姜永宏, 蒋伟杰. 中国上市商业银行效率和全要素生产率研究: 基于 Hicks-Moorsteen TFP 指数的一个分析框架. 中国工业经济, 2014, (9): 109-121. [Jiang Yonghong, Jiang Weijie. Study on efficiency and productivity of the listed commercial banks in China: Based on Hicks-Moorsteen TFP index. China Industrial Economics, 2014, (9): 109-121.]

## Carbon emission efficiency growth of land use structure and its spatial correlation: A case study of Nanjing city

FAN Jianshuang<sup>1,2</sup>, YU Xiaofen<sup>1,2</sup>, ZHOU Lin<sup>1,2</sup>

(1. College of Economics and Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Research Center of Technological Innovation and Enterprise Internationalization, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The increase of carbon emissions has a direct impact on extreme weather disasters and global warming. Therefore, controlling and reducing carbon emissions is one of the important ways to promote ecological balance and regional sustainable development. The difference in urban land use patterns and the different speeds and levels of urban economic development will, of no doubt, lead to the differences in carbon emissions. The amount of carbon emissions from different land use structures and the levels of its efficiency will directly affect the sustainable development of the urban economy, which has aroused the attention of academics. This paper estimated the quantities of carbon emissions of different land types by using the land use structure data from 11 districts in Nanjing from 2005 to 2014, and further introduced the estimated carbon emissions into the DEA model as an undesirable output variable to estimate, compare and analyze the total factor carbon emissions productivity growth of land use structure in Nanjing by using the Hicks-Moorsteen index method. The major results were shown as follows. First, the main sources of carbon emissions for land use structure in Nanjing were the indirect carbon emissions from the construction lands. During the study period, the carbon emissions of land use structure showed a continuous growth trend and certain degree of spatial heterogeneity in the districts of Nanjing city. The severe emission areas were mainly concentrated in the central regions and there was a tendency to shift to the northern regions. Second, the total factor carbon emission productivity growth and its decomposition factors were lower than the traditional total factor productivity (*TFP*) growth, which means that the traditional *TFP* growth without considering the constraints of carbon emissions overestimated the actual productivity growth level of land use structure. The total factor carbon emission productivity growth showed a convergence trend with the characteristic of equilibrium development between regions during 2006-2014, due to the fact that the development concept of "low carbon and high efficiency" were deeply rooted in people's mind and the energy consumption per unit of GDP was continuously decreasing. The calculation results of model 2 showed that the total factor carbon emission productivity growth level of Jiangning district was the highest and that of Yuhuatai district was the lowest. Third, the decomposition results of total factor carbon emission productivity growth indicated that the technical efficiencies of all the districts in Nanjing were relatively low, the "technology catch-up" effects were not obvious, and the scale economy effects of land use began to appear, but the scope economy effects were not very significant. Fourth, total factor carbon emission productivity growth presented a positive spatial correlation and the characteristics of spatial agglomeration in all the districts of Nanjing. The districts of high and high (*HH*) agglomeration were increasing and the districts of low and low (*LL*) agglomeration were decreasing. Finally, some suggestions were put forward.

**Keywords:** Nanjing; land use structure; carbon emissions; total factor carbon emission productivity growth; Hicks-Moorsteen index