

长江经济带城市碳排放及其影响因素的时空异质性研究¹

李子杰¹ 徐进亮⁴ 王 健¹ 冯雨豪¹ 吴 群^{2,3*}

(1. 南京农业大学公共管理学院, 江苏 南京 210095;

2. 南京农业大学中国资源环境与发展研究院, 江苏 南京 210095;

3. 南京农业大学不动产研究中心, 江苏 南京 210095;

4. 东南大学建筑学院, 江苏 南京 210096)

【摘要】：长江经济带作为国家生态文明建设的先行示范带，肩负着率先实现“碳达峰”“碳中和”的重大使命。掌握长江经济带城市碳排放及其影响因素，对长江经济带实现“双碳”目标具有重大意义。基于 IPCC 系数计算 2008 ~ 2018 年长江经济带 110 个地级及以上城市的碳排放情况，利用空间自相关对其进行时空格局分布的研究，构建地理加权回归模型探究不同区位城市碳排放影响因素的时空异质性并揭示原因。结果显示：2008~2018 年碳排总量呈放缓态势，其重心逐年向中西部迁移；10a 间长江经济带城市的碳排放在空间上呈现显著正相关性及集聚性，且相关性呈波动下降趋势；碳排放影响因素差异明显，影响大小为：人均用电量<人口数量<建设用地<产业结构，在空间格局上，建设用地和人均用电量的影响程度均向东偏移，产业结构和人口数量的空间格局基本稳定。研究表明，应从产业结构低碳转型、合理规划建设用地、优化人口空间格局和谋划新能源发电等领域进一步加快实现长江经济带的“双碳”目标。

【关键词】：长江经济带；碳排放；影响因素；地理加权回归；时空异质性

【中图分类号】：X321; F127 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004- 8227(2023)03- 0525- 12

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj202303008

气候变化是全人类面临的严峻挑战。以习近平同志为核心的党中央提出“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”这个重大战略目标。长江经济带作为实现“双碳”目标的重点区域，其碳排放量占全国碳排放量的比重在 40%以上^[1]，占据了全国大部分的碳排放量，但随着最近几年生态文明思想的推进，上升趋势得到了控制。同时由于长江经济带的工业产能较高，是最

¹ **【收稿日期】**：2022- 05- 05；**【修回日期】**：2022- 06- 23

【基金项目】：国家自然科学基金面上项目(42071247)；国家自然科学基金重点项目(71233004)

【作者简介】：李子杰(1995 ~)，男，博士研究生，主要研究方向为资源环境经济与可持续发展。E-mail: 458060783@qq

【* 通讯作者 E-mail】：wuqun@njau

直接的碳排放源，短时间内很难改变其产业结构的高碳性，因此研究长江经济带的碳排放及其影响因素对我国尽早实现“双碳”目标有着重要影响，同时能够为政府制定和完善长江经济带高质量发展政策提供决策参考，具有重要的现实意义^[2]。

近年来，特别是在 2009 年哥本哈根世界气候大会顺利召开后，“绿色低碳”的概念不断融入国家发展要求中，有关于碳排放的研究也在不断深入^[3]。目前国内外关于碳排放的及其影响因素的研究主要集中在两个方面：(1)碳排放量的测算方法。关于碳排放量测度的研究，主要包括实测法、投入产出法(质量平衡法)、生命周期法估算和排放因子法(IPCC 系数)。其中，实测法是通过采集的二氧化碳的浓度、流速等计算其排放量，吕丽汀等^[4]通过对比实测法与其他碳排放测算方法，计算大型商用建筑的碳排放量情况，此方法通常适用于环境监测站等需要高精度的气体浓度的数据，不适合进行大尺度的碳排放量测算。投入产出法是通过生产过程中产生的消耗进行定量分析的方法，这种方法一般适用于实测法没有办法计算时的一种估算。部分学者在充分掌握了行业数据后，会用这种方法去估算行业部门的碳排放量，为提高中国国民经济各部门的低碳化水平提供科学依据^[5]。生命周期评估法(LCA)主要采用“自上而下”的计算模型，通过产品整个服务生命周期的数据，估算出总的排放量^[6]，该方法主要基于微观层面，对产品或服务进行碳足迹的测算。基于 IPCC^[7]的排放因子的碳排放量的测算目前采用的最多的方法。该方法是联合国政府间气候变化专门委员会根据煤炭、石油、天然气等能源燃烧过程 CO₂ 排放的系数乘以排放源的用量，最终得到碳排放量。国内外学者广泛应用该方法测算碳排放并研究其对工业^[8]、农业^[9]及土地利用^[10]之间的关系等。(2)碳排放量的影响因素研究。现今碳达峰，碳中和的话题愈来愈热，如何实现“双碳”的前提就是需要进行碳排放的影响因素分析。目前关于影响因素的研究主要是研究方法和尺度的差异，研究方法上多数学者以 IPAT 方程^[11]、STIRPAT 方程^[12]、Kaya 方程^[13]等构建分析模型的方法分析碳排放的影响因素。这些研究多数只是数据的直接处理，很多结果停留在繁杂的数字形式，没有体现空间上的分布特征。对于碳排放影响因素的研究尺度而言，研究多数只考虑国家和省级层面，如 Shi A^[14]探究了 1975~1996 年 93 个国家碳排放与人口变化之间的关系，张诗卉等^[15]通过研究 31 个省份的碳排放，探究中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径。由于研究方法有限，数据规模较小，市县级层面的研究很少。

基于前人研究可以发现碳排放及其影响因素之间的关系却不是一个常数，而是有时间和空间的异质性，决定这种异质性的因素是天气过程的时间异质性和气象气候特征及自然地理条件的空间异质性，因此研究碳排放及其影响因素的关系是应充分考虑时间的变化和空间上的差异。但现有研究多数是基于时间序列的全局分析，研究尺度较为粗糙，忽略了地域单元之间的时空异质性^[16]。城市域作为中国最基本的政府单位，更能捕捉地域的时空异质性，可用于因地制宜的战略政策制定。

鉴于此，本文综合了前人研究的基础，在研究尺度上，因自治州数据获取不连续，且考虑到管理体制的差异，选择长江经济带的 110 个地级及以上城市为研究范围，该尺度在中国实施自上而下的二氧化碳减排战略时弥补了流域范围内城市碳排放研究的空白。并且在研究方法上选取空间自相关的方法分析其时空变异情况，利用 GWR 模型^[17]分析长江经济带城市碳排放的影响因素及其影响大小，能够很好地探究长江经济带的碳排放影响因素的时空异质性，揭示时空分布特征和影响规律，针对性地提出政策建议，共同促进长江经济带生态价值实现。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域概况

长江经济带覆盖省份：上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省市。长江经济带作为国家生态文明建设的先行示范带，肩负着率先实现“碳达峰”“碳中和”的重大使命。早在 2018 年，中共中央、国务院明确要求充分发挥长江经济带横跨东中西三大板块的区位优势，以共抓大保护、不搞大开发为导向，以生态优先、绿色发展为引领，依托长江黄金水道，推动长江上中下游地区协调发展和沿江地区高质量发展。因此选择长江经济带作为研究区，为推进全国实现区域“双碳”目标提供研究样本。

1.2 数据来源

2008~2018 年长江经济带 11 个省市能源统计年鉴，依据 2008~2018 年长江经济带 11 个省市统计年鉴整理长江经济带 110 个地级及以上城市面板数据。省、市界线的矢量数据来源于全国地理信息资源系统(www.webmap.cn)公布的全国 1：100 万基础地理数据库，空间坐标系统为 2000 年国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000)。

1.3 研究方法

1.3.1 能源消耗碳排放

碳排放量计算主要依据 2006 年 IPCC 提出的碳排放量计算方法。IPCC 对能源碳排放的计算如下：

$$A = \sum_{i=1}^N B_i C_i \tag{1}$$

式中：A 为碳排放量(百万 t)；Bi 为第 i 种能源的折标准煤量(百万 t)，折标准煤量=实物量×折标系数，其中实物量为第 i 种能源的终端能源消费量；Ci 为能源 i 的碳排放系数；N 为能源种类。碳排放系数来源于 IPCC 碳排放计算指南缺省值并经过计算获得(表 1)。标煤折算系数来自于《中国能源统计年鉴 2008-2018 年》。

表 1 IPCC 碳排放系数

能源种类	碳排放系数	能源种类	碳排放系数
原煤	0.755 9	燃料油	0.618 5
洗精煤	0.755 9	其他石油制品	0.585 7
焦炭	0.855 0	液化石油气	0.504 2
其他焦化产品	0.644 9	天然气	0.448 3
原油	0.585 7	焦炉煤气	0.354 8
汽油	0.553 8	炼厂干气	0.460 2
煤油	0.571 4	其他煤气	0.354 8
柴油	0.592 1	水电、核电	0

说明：1. 能源的碳排放系数采用 IPCC 碳排放计算指南缺省值。2. 原始数据以 J 为单位，为与统计数据单位一致，将能量单位转化成标准煤，转化系数为 1×10^4 t 标准煤等于 219.3×10^5 GJ。

1.3.2 空间自相关

空间自相关的方法多用于分析空间某位置上的数据与其他位置数据之间的相互依赖程度^[18]，为了定量地描述长江经济带城市碳排放在全局空间上的依赖关系以及各城市内部之间正负相关性，分别对长江经济带城市碳排放进行全局自相关分析和局部自相关分析。Moran’ s I 作为空间自相关分析中的一项重要指标，通过其研究空间上的相关性，全局 Moran’ s I 是经过方差归一化后的值为 -1.0~1.0 之间的有理数，该指标可以判断出区域内属性值的分布是聚类、离散还是随机模型。在进行局

部莫兰指数时会出现高值和低值两种类型，研究单元内有相似成分在空间集聚(LISA 值)可以用高值表示，相反研究单元有不相似的成分在空间集聚，则用低值来表示。Moran' s I 计算公式：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中：n 是研究区域空间单元样本的研究，总和 W_{ij} 表示的是研究范围内每个空间单位 i 与空间单位 j 的权重矩阵；碳排放在 i, j 处的表示分别记作 x_i 与 x_j , 关于研究区域内的碳排放的平均值表示为 $\bar{x}$ 。

1.3.3 地理加权回归模型

地理加权回归模型(GWR)是在回归参数中考虑空间位置影响，利用邻域的子样本数据进行局部回归估计，其参数变化与空间上的地理位置有关，有利于揭示碳排放与影响因素的空间关系，其模型结构为：

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, \nu_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中： y_i 是 $n \times 1$ 维解释变量向量即长江经济带 110 个城市碳排放量； x_{ik} 是 $n \times k$ 维解释变量矩阵即 110 个城市的 k 个影响因素； $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 代表影响因素 k 在回归点 i 的回归系数； (μ_i, ν_i) 代表第 i 个观察点的空间位置； ε 是 $n \times 1$ 维向量，它服从方差为常数的正态分布。GWR 模型通过使用加权最小二乘法对每一个观测点上参数向量进行估计，基于邻近观察值的子样本的距离加权构成整个参数估计的集合，大多采用高斯函数来构建加权函数，带宽的估算多用信息准则(AIC)法与核密度求得，最后进行地理加权回归计算。

1.3.4 影响因素选择

长江经济带城市区域范围较大，碳排放的影响机制复杂，影响因素众多，主要可以划分为人口、能源、产业和土地 4 个方面[19]。结合长江经济带实际发展情况选取年碳排放量(C_i)为因变量，针对影响碳排放的主要因素分别选择年末人口总数(TP)、人均 GDP(PG)、人均固定资产投资(PI)、人均用电量(PE)、供气总量(TG)、产业结构(IS)、规模工业总值(IV)、建成区绿化覆盖率(GC)、市辖区建设用地面积(LU)、城镇化水平(UL) 10 个因子作为自变量进行回归分析，筛选出影响程度较大的影响因素。考虑到地理加权回归模型对变量多重共线性的要求较高，固需要精简模型，基于前人研究的基础，最终选取以人均用电量^[20]($k \cdot Wh/人$)(PE), 年末人口总数^[21](万人)(TP), 市辖区建设用地面积^[22](km^2)(LU), 产业结构^[23](市辖区二三产比重)(IS) 4 个影响因素，考察其对长江经济带城市 2008~2018 年碳排放的影响，对变量进行归一化处理，构建模型如下。

$$C_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \beta_1(\mu_i, \nu_i)TP + \beta_2(\mu_i, \nu_i)PE + \beta_3(\mu_i, \nu_i)LU + \beta_4(\mu_i, \nu_i)IS + \varepsilon_i \quad (4)$$

2 长江经济带城市碳排放空间分布情况

2.1 长江经济带城市碳排放量分布

为了更加直观的观察长江经济带 110 个城市在 2008~2018 年间碳排放量的变化情况,选取 2008、2013 和 2018 年,每五年一个跨度的时间点进行碳排放空间差异化研究。根据前人研究的经验^[24],并结合区域情况,利用自然断点法将各市的碳排放量区间固定在 5 个区域范围内。

从空间分布情况来看,由图 1 可知,2008 年长江经济带大部分城市都处于低排放状态,除了经济高度发达的上海市、苏州市、武汉市和重庆市碳排放量高(>65 百万 t)。碳排放量中等水平(30~65 百万 t)的区域主要集中在经济发达东部沿海地区,包括江苏省的徐州市、南通市、盐城市、南京市、无锡市和常州市,浙江省的嘉兴市、杭州市、舟山市、宁波市和温州市;长江中上游只有各省省会如长沙市、贵阳市和成都市的碳排放量较高。2013 年后,整个的长江经济带的碳排放量有了明显的增加,通过碳排放量可以看到,重庆市已经突破 115 百万 t 的碳排放量,成都市、武汉市、南京市、无锡市、杭州市、宁波市和舟山市都已经增加到 65~115 百万 t 的范围。碳排放量中等水平(30~65 百万 t)已由 2013 年的集聚在东部沿海地区和省会城市的分布趋势转为集中分布于江苏省和浙江省,中上游的增加了如昆明市、襄阳市等城市。2018 年,长江经济带城市碳排放量排放水平在城市数量上没有太大的变化,但是可以明显看到,江苏省全省的碳排放都在 30 百万 t 以上。此外,浙江省的杭州市等地减排效果显著。

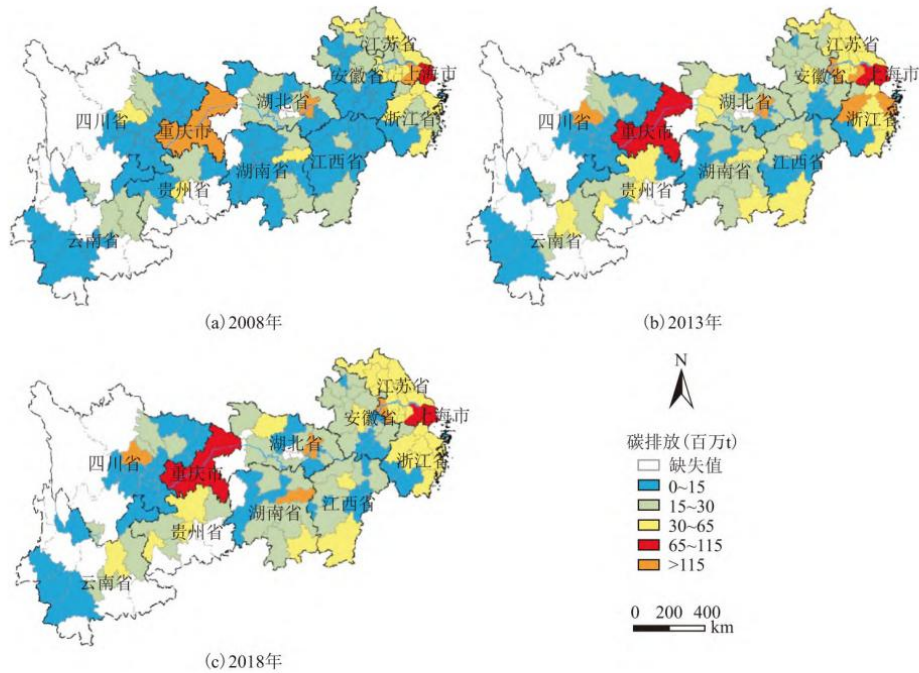


图 1 2008~2018 年长江经济带城市碳排放量分布图

Fig. 1 Distribution of carbon emissions of cities in Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2018

通过图 2 对碳排放的重心迁移分析^[25], 2008~2018 年的碳排放总量的重心在湖北省荆州市和黄石市的范围内, 但其重心逐年向中西部偏移, 10 年重心经向移动 0.38° , 纬向移动 0.12° , 总体偏移 38.86 km。对比前文碳排放量空间分布格局的研究, 形成这样的变化趋势, 究其原因是由于 2006 年开始国家开始实施“西部大开发”战略计划, 其目标是努力促进西部地区的发展, 积极建设基础设施, 大量建设工程势必造成碳排放量增加, 碳排放重心迁移。到 2012 年国务院批复《西部大开发“十二五”规划》, 西部大开发已经取得显著成效, 同年伴随党的十八大召开, “习近平生态文明思想”提出, 绿色发展逐步推广, 碳排放量在 2013 年后增幅得到有效控制。

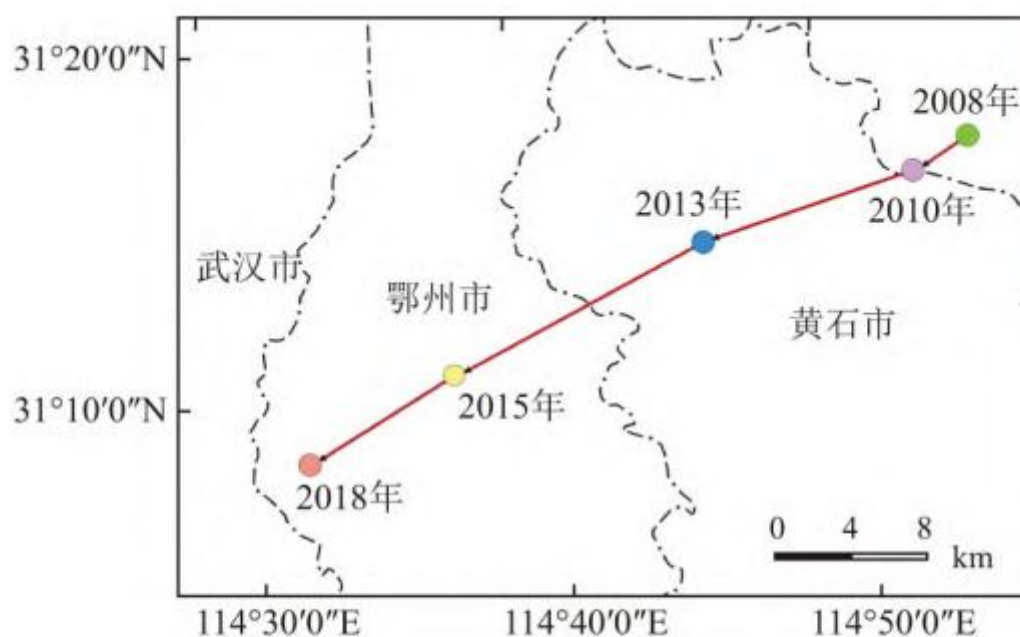


图 2 2008~2018 年长江经济带城市
碳排放量重心迁移图

Fig. 2 Shift of carbon emission center of cities in
Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2018

2.2 长江经济带城市碳排放空间自相关分析

2.2.1 全局自相关分析

利用 ArcGIS10.6 中的空间自相关工具计算 2008~2018 年逐年的长江经济带城市的全局 Moran' s I, 从全局角度观察其碳排放量的空间相关性及聚集情况, 其结果如表 2 所示:

表 2 长江经济带 2008~2018 年 Moran' s I 及其检验结果

年份	Moran' s I	Z 值	P 值
2008	0.197 6	3.610 7	0.000 3***
2009	0.206 8	3.733 2	0.000 1***
2010	0.196 7	3.577 0	0.000 3***
2011	0.197 9	3.563 4	0.000 3***
2012	0.204 3	3.558 8	0.000 3***
2013	0.203 3	3.549 8	0.000 3***
2014	0.194 4	3.334 9	0.000 8***
2015	0.188 5	3.237 3	0.001 2**
2016	0.200 6	3.425 0	0.000 6***
2017	0.197 7	3.378 4	0.000 7***
2018	0.172 8	2.959 9	0.003 0**

注：***为 0.001 显著性水平，**为 0.05 显著性水平，*为 0.1 显著性水平，下同。

结果表明，2008~2018 年的全局 Moran' s I 均大于 0，且均在 5%水平上显著，说明长江经济带城市的碳排放在空间上呈现显著正相关及空间集聚性，并且各城市之间具有相互联系趋于临近分布。从研究期内的全局 Moran' s I 来看，整体成波动下降态势。2008~2012 年呈波动上升趋势，2013~2015 年逐年下降，2016 年短暂上升后继续呈下降趋势，2018 年达到最小值 (0.172 8)。总体的 Moran' s I 早 0.17~0.21 之间保持相对稳定，表明这种相似性区域空间集聚趋势的年际变化较小。

2.2.2 局部自相关分析

为探究长江经济带城市之间碳排放的聚类关系，分别对 2008 和 2018 年长江经济带城市的碳排放量做局部自相关分析，计算 LISA 值，如图 3 所示。可以看出，2008 年碳排放量的高值区域还是集中在上海市、泰州市、南通市、苏州市、嘉兴市和湖州市，到 2018 年减少了湖州市，高值集聚区域的分布空间格局基本稳定。从碳排放量的低值区域来看，2008 年低值区域主要包括临沧市、乐山市、自贡市、宜宾市、南充市、怀化市、池州市和上饶市，到 2018 年这一空间分布格局没有发生改变。总体来看，长江经济带城市 10 年的碳排放量在空间分布上存在一定的集聚性。

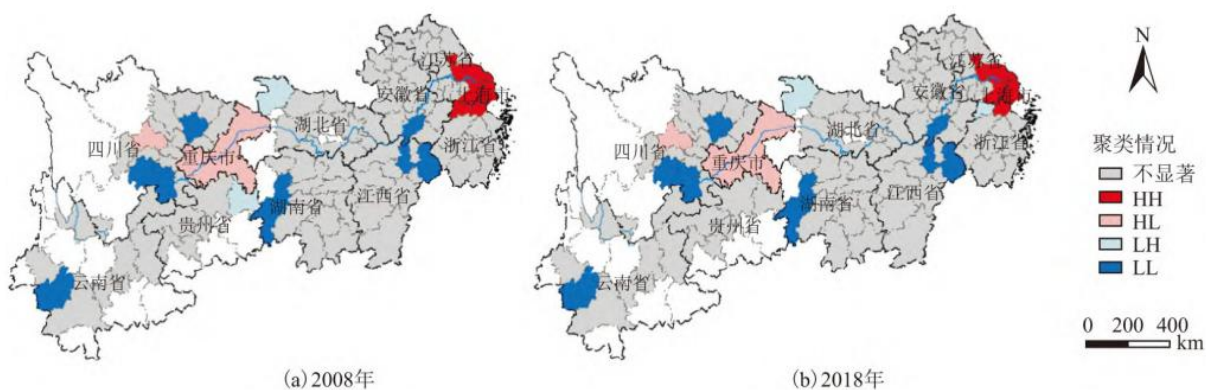


图 3 2008~2018 年长江经济带城市碳排放量 LISA 聚类图

Fig. 3 LISA cluster diagram of carbon emissions of cities in Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2018

3 长江经济带城市碳排放影响因素时空异质性分析

3.1 OLS 回归分析

为探究影响因素时空异质性,对碳排放的影响大小并对比 OLS 模型与 GWR 模型,进一步验证 GWR 模型合理性。首先分别对长江经济带城市的 2008 和 2018 年的各影响因素进行 OLS(最小二乘法)回归分析,模型的 VIF 值均小于 7.5,表明模型不存在共线性问题。分析结果如下表所示。

如表 3 所示,2008 年的 OLS(最小二乘法)模型拟合优度(R²)为 0.854 6,调整后 R²为 0.849 1,年末人口总数、市辖区建设用地面积、人均用电量均通过 5%水平的显著性检验,产业结构未能通过 5%的显著性检验。从弹性系数看,产业结构弹性系数为 -0.146 0,表明碳排放量每增加 1%的同时产业结构下降 14.60%,其对碳排放的影响程度最大。其他影响因素按照弹性系数,影响权重依次为市辖区建设用地面积(0.051 8),年末人口总数(0.027 9),人均用电量(0.004 4)。其 K 值显著,适宜用 GWR 模型对各影响因素做回归分析。

表 3 2008 年 OLS 估计结果

指标	弹性系数	标准误差	T 值	P 值	VIF 值
PE	0.004 4	0.000 8	5.324 1	0.000 0***	1.809 8
TP	0.027 9	0.003 1	8.948 9	0.000 0***	1.529 9
LU	0.051 8	0.005 2	9.855 4	0.000 0***	2.043 4
IS	-0.146 0	0.068 3	-0.428 6	0.669 0	1.209 5
R ²	0.854 6				
调整后 R ²	0.849 1				
K 值	0.012 9**				
AICc	813.343 8				

同样 2018 年 OLS 模型如表 4 所示, R^2 为 0.807 3, 调整后 R^2 为 0.800 1, 四项影响因素均能通过 5% 的显著性检验。从弹性系数看影响因素最大的依旧是产业结构, 弹性系数为 0.493 5。K 值显著, 同样适用于 GWR 模型做进一步的分析。

表 4 2018 年 OLS 估计结果

指标	弹性系数	标准误差	T 值	P 值	VIF 值
PE	0.005 3	0.001 0	5.052 0	0.000 0***	1.600 6
TP	0.052 8	0.005 2	10.011 9	0.000 0***	2.406 2
LU	0.037 1	0.007 1	5.206 9	0.000 0***	2.066 5
IS	0.493 5	0.166 5	2.962 8	0.003 7**	1.885 2
R2	0.807 3				
调整后 R2	0.800 1				
K 值	0.033 2**				
AICc	878.934 3				

3.2 地理加权回归模型分析

OLS 模型作为一种全局回归模型, 只能得到全域范围内平均的回归系数估计值, 不能从空间层面反映回归参数的特征。考虑用 AICc 的方法, 选择高斯模型计算 GWR 模型的最优带宽, 分别对长江经济带城市的 2008 和 2018 年的各影响因素做 GWR 模型分析。GWR 估计结果如表 5 所示, 2008 年 R^2 为 0.979 6, 调整后 R^2 为 0.960 3; 2018 年 R^2 为 0.960 3, 调整后 R^2 为 0.9499。由 R^2 的空间变异性来看, GWR 模型的拟合效果远比 OLS 回归更好。通过对比 AICc 的值, 2008 年由 OLS 回归的 813.343 8 降到 670.226 9, 2018 年的值由 878.934 3 降到 741.287 3, 进一步证明 GWR 模型对各影响因素的拟合效果要优于 OLS 回归分析。

表 5 2008~2018 年 GWR 估计结果

指标	2008 年		2018 年	
回归方法	OLS 回归	GWR 模型	OLS 回归	GWR 模型
R2	0.854 6	0.979 6	0.807 3	0.960 3
调整后 R2	0.849 1	0.969 3	0.800 1	0.949 9
AICc	813.343 8	670.226 9	878.934 3	741.287 3

3.2.1 人均用电量对碳排放影响

从人均用电量的角度来看,如图4所示,相邻城市各年份的回归系数差异较小,因此人均用电量对二氧化碳排放的影响有明显的空间依赖效应。2008年人均用电量的回归系数在 $-0.0042\sim-0.0029$ 之间波动,表明长江经济带部分区域的人均用电量与碳排放呈负相关。长江中下游东部较发达地区的城市人均用电量和碳排放之间均为负相关,而人均用电量增加引起碳排放增加的区域主要集中在西南部的贵州省、云南省、四川省和重庆市。2018年,人均用电量的回归系数在 $0.0019\sim0.0039$ 之间波动,整体数值减小,说明人均用电量对于长江经济带城市的碳排放影响在逐渐减小,但值得一提的是所有城市的人均用电量与碳排放的回归系数均为正数,且影响较大的区域主要分布在东部的上海市、江苏省、浙江省和西部的云南省、贵州省部分城市,说明人均用电量的增加在长江经济带全域范围都引起了碳排放的增加。

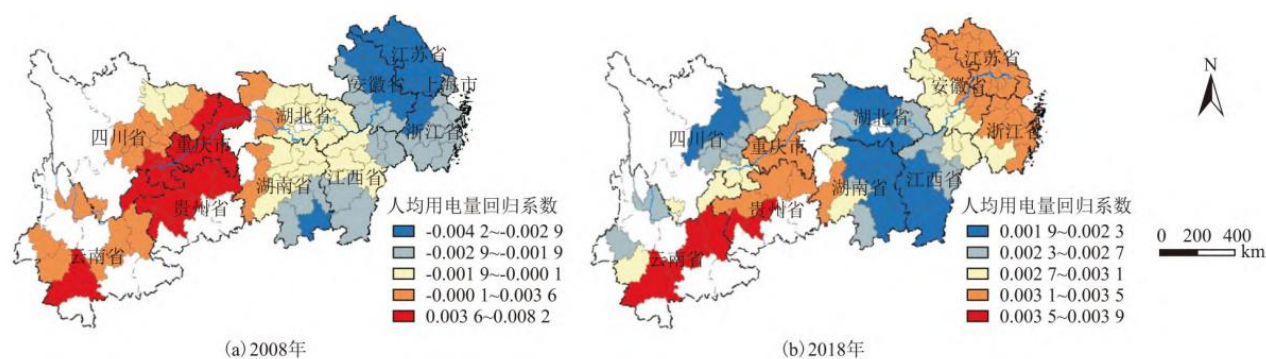


图4 2008~2018年长江经济带城市人均用电量对碳排放驱动影响图

Fig. 4 Impact of per capita electricity consumption on carbon emissions in cities along Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2018

究其原因,长江经济带上游是西电东送工程的重要源头,特别是“中线”由四川、重庆等省市向华中、华东电网输电。研究表明,长江经济带各省市常住人口数每增加1%,域内电力行业碳排放就会下降 0.1355% 和 0.1050% ^[26],说明长江经济带人口数量与电力行业的碳排放负相关。这也是2010年之前一直以来的现象,但随着东部城市城镇化建设的日益完善,西部人口流失逐渐减小,导致人均用电量对碳排放的影响也在逐渐向东部转移,整体的影响也转呈正相关关系。

3.2.2 人口数量对碳排放影响

从人口数量的角度来看,如图5所示,人口数量对于长江经济带城市的碳排放影响较大且都为正相关关系。2008年的回归系数在 $0.0039\sim0.0480$ 之间波动,人口影响较大的区域集中在东部的人口较多、经济较发达的上海市、江苏省和浙江省的城市。由于西部人口较少,其大部分城市人口对于碳排放的影响很小。2018年人口数量对碳排放的影响略有增加,回归系数在 $0.0192\sim0.0531$ 之间波动,除了东部人口较多的省市,之前西部影响较小的重庆市、四川省和贵州省等地的影响增幅十分明显。

人口数量与产业、土地等联动协调趋势较强,长江中下游地区的土地非农化水平和城镇化高速发展使得该地区经济较为发达,人口和经济水平远高于中上游地区,土地非农化过程促进了产业结构的转型升级,产业的转型是影响中下游地区碳排放量增加的重要原因。上游地区虽然经济发展水平相对落后,但政府以较低土地价格吸引招商引资,促进产业的发展,这种产业模式伴随着上游“城乡双漂”两栖农民工持续增加,这种人口回流是导致上游碳排放增加的直接原因^[27]。

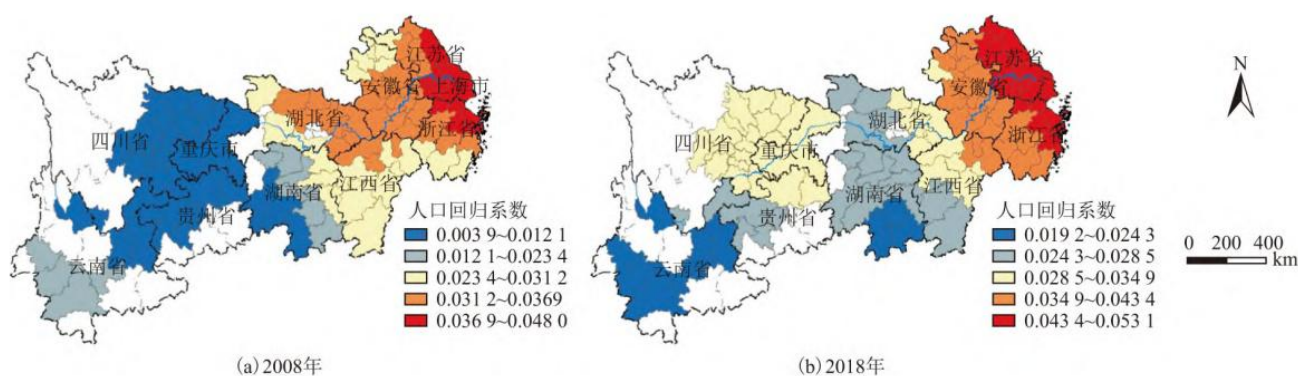


图 5 2008~2018 年长江经济带城市人口数量对碳排放驱动影响图

Fig. 5 Impact of urban population in Yangtze River Economic Belt on carbon emission drive from 2008 to 2018

3.2.3 建设用地对碳排放影响

从建设用地的角度来看,如图 6 所示,建设用地的影响在 2008 年还存在负相关(回归系数在 $-0.0218 \sim 0.1426$),但在 2018 年对于碳排放的影响转为正相关。2008 年长江经济带的建设用地对于碳排放的影响较大且整个区域城市之间差异明显,对于经济较发达的东部而言影响较小,中游地区的部分城市甚至出现了负相关。影响最大的区域主要集中在中西部以重庆市为中心的四川省、贵州省和湖南省的部分城市。这种现象在 2018 年呈现向东部转移的现象,之前影响较大的重庆市周围影响程度已大幅下降,建设用地影响最大的区域主要集中在中游的江西省和湖南省的部分区域。

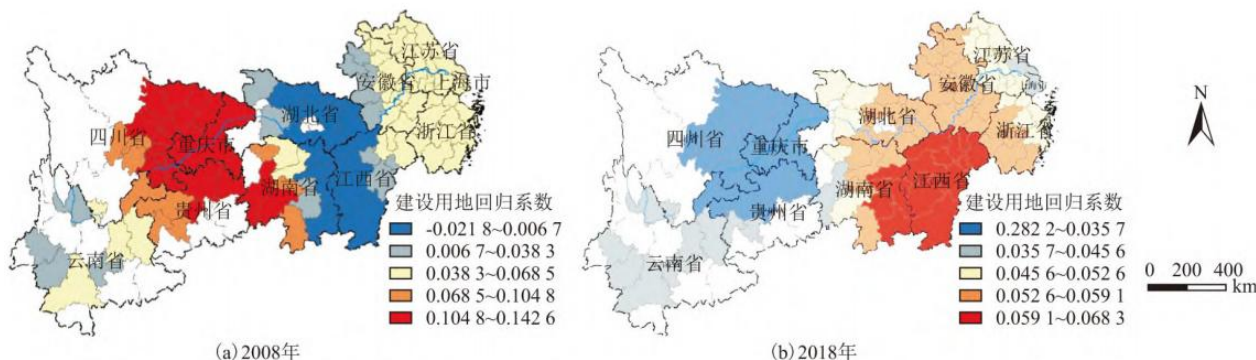


图 6 2008~2018 年长江经济带城市建设用地对碳排放驱动影响图

Fig. 6 Impact of urban construction land on carbon emissions in Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2018

建设用地对于碳排放的影响一直以来都是学者们研究的热门话题^[28, 29]。研究表明截止到 2015 年,建设用地的碳排放量占碳源总量的 97.94%,且其比例在不断增加^[30],说明建设用地一直是主要碳排放来源。但是其对长江经济带碳排放的影响出现反转的重要原因是 2008 年国家整体的政策还是以高速经济发展为主旋律,在土地利用上避免不了建设用地的增加。整个长江经济带城市的各项建设发展不断促进其发展速度,基础设施建设得到了极大程度的改善,西部大开发也进入了关键时期,重庆、贵州省、云南省等西部区域经济发展显著提高,因此长江经济带的整体的建设用地与碳排放间的关系呈正相关且影响较大。到了 2018 年,随着党的十九大胜利召开,习近平生态文明思想深入人心,由于政策的滞后性,纵观此时的建设用地与碳排放的影响,虽然整体的建设用地与碳排放之间还是正相关的关系,但是整个长江经济带的城市建设用地的增加对碳排放的增加造成影响的大小已不足 10 年前的一半。

3.2.4 产业结构对碳排放影响

产业结构对碳排放的影响如图 7 所示,在此次选取的对于长江经济带城市的碳排放影响因素中,产业结构的影响是最大的。2008~2018 年之间的产业结构影响在空间格局上差异不大,影响较大的区域集中在东部的上海市、江苏省和浙江省的大部分城市,影响较小的主要集中在西南部的重庆市、云南省、贵州省和四川省所有城市且影响大小自西向东逐渐递减。但从影响的具体情况看,2008 年的回归系数在 0.160 3~1.895 3 之间,2018 年的回归系数在 -1.003 2~0.295 0 之间。说明产业结构对于长江经济带城市碳排放的影响从 2008 年强烈的正相关转变到 2018 年几乎全部区域的负相关,可见产业结构的低碳转型得到取得一定成效。

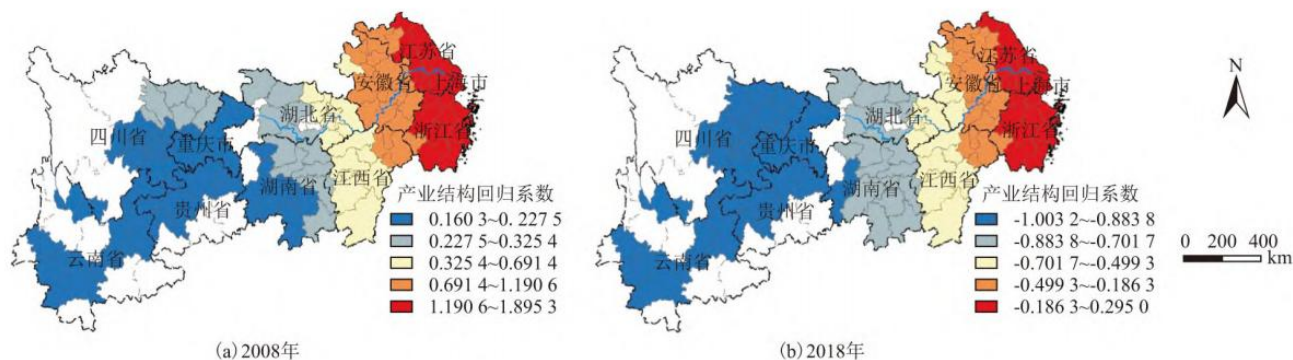


图 7 2008~2018 年长江经济带城市产业结构对碳排放驱动影响图

Fig. 7 Impact of urban industrial structure of Yangtze River Economic Belt on carbon emissions from 2008 to 2018

产业结构对于碳排放的增加起到了极为关键的作用^[31],经济发展初期的碳排放变动主要受第二产业的影响,其较高的能耗水平促使碳排放抬升,这也是在 2008 年整体的产业结构对碳排放的影响都为正相关的原因。随着经济发展阶段的推进,产业结构的升级转型,能耗较高的第二产业逐渐被淘汰或转移,服务业为主的第三产业逐步对碳排放产生主导作用,促使碳排放增速放缓乃至逐步降低^[32]。这也导致了长江经济带区域范围内,虽然影响程度总体空间布局变化不大,但是除了部分经济高度发达城市,产业结构与碳排放之间还存在正相关关系,其余的绝大多数城市产业结构对碳排放的影响已经呈负相关了。造成这样现象的最主要原因还是国家大力推动绿色低碳发展、确保总体改善生态环境质量。国家强调坚决遏制高耗能、高排放项目盲目发展,鼓励发展绿色低碳产业,这才导致产业结构的顺利改革,低碳化的产业格局愈加鲜明。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文根据 IPCC 提出的碳排放量计算方法计算了长江经济带范围内 110 个城市的碳排放量,基于该数据,初步探讨了城市之间碳排放量的时空格局的变化及空间相关性。通过引入地理加权回归模型探讨影响长江经济带城市碳排放的影响因素的时空异质性,得到了以下结论:

(1)2008~2018 年,长江经济带低碳排放区域的城市数量明显下降,碳排放量有了明显提升。其中在 2013 年后,东部沿海的部分城市的减排效果明显,碳排放量有了一定程度的控制,没有呈现继续上升的趋势。通过重心迁移分析,发现 2008~2018 年阶段长江经济带碳排放量的空间布局逐渐向中西部转移。

(2)通过空间自相关分析,可以看出 2008~2018 年的全局 Moran' s I 均大于 0,且均在 5%水平上显著,说明长江经济带

城市的碳排放在空间上呈现显著正相关及空间集聚性,10年间其相关性及空间集聚性呈波动下降的演变态势。总体的Moran's I在0.17~0.21之间保持相对稳定,表明这种相似性区域空间集聚趋势的年际变化较小。

(3)GWR模型表明2008~2018年期间,长江经济带城市的影响因素存在明显的时空异质性。在影响程度上,产业结构>建设用地>人口数量>人均用电量,其中,人均用电量和人口数量对于碳排放的影响程度在增加,建设用地和产业结构对于碳排放的影响程度在减少。在时空格局上,人均用电量的影响逐渐向东部转移,且整体影响程度由负相关转为全域正相关;人口数量的影响除了东部人口较多的省市,之前西部影响较小的城市增幅也十分明显;建设用地的影响城市之间差异性较大,并在2018年呈现向东部转移的现象;产业结构的影响空间分布格局差异不大,影响程度呈现自东向西逐渐递减的趋势。

4.2 讨论

结合前文研究的影响因素的基础上,为推进长江经济带的低碳绿色的高质量发展,根据各个影响因素的影响大小,分别对产业结构、建设用地、人口数量和用电量方面提出优化政策建议,具体建议如下:

(1)产业结构升级和技术进步,实现低碳路径。

探索低碳生产方式,培育新的现代化发展动力,加快产业结构的低碳升级转型。同时加快长江经济带城市间跨区域合作,提高不同城市之间产业的协同程度和关联度,促进上下游之间企业的合作,在合作中积极探索合作减排的路径,进一步提高产业结构的合理化程度,充分挖掘产业部门潜在的减排空间。

(2)合理规划建设用地,推广低碳节约的建筑用能模式。

防止建设用地的无序、盲目扩张,合理控制建设用地的增加量,以修缮的方式替代大拆大建。积极推广低碳节约的建筑用能模式、发展适宜的建筑节能技术、大力推广光伏建筑、提升对绿电的消纳能力。

(3)优化人口空间格局,缓解人口碳排放压力。

通过区域合作,优化城市和人口的空间布局。对于人口压力较大的东部沿海地区,应积极发展清洁能源,促进城市发展向绿色低碳转型,缓解人口对碳排放带来的压力,实现长江经济带城市的分工合作与资源优化组合,促进长江经济带高质量发展,实现区域人口与碳排放压力的平衡。

(4)探索谋划新能源发电路径,早日实现电力部门碳达峰。

由于发展阶段不同,长江经济带的少数可开发基础较好的城市应该积极推动新能源发电建设,推动构建清洁低碳、安全高效的能源体系。积极探索核电、生物质发电的发展,让可再生能源分担电力对碳排放的压力,努力实现长江经济带区域电力行业在2030年碳排放达峰。

参考文献

[1] 庞庆华,李涵,杨田田.长江经济带碳排放的空间关联性及其影响因素[J].科技管理研究,2019,39(15):246-251.PANG Q H,LI H,YANG T T.Spatial correlation of carbon emissions in Yangtze River economic zone and its influencing factors[J].Science and Technology Management Research,2019,39(15):246-251.

-
- [2] 黄国华, 刘传江, 赵晓梦. 长江经济带碳排放现状及未来碳减排[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4):638-644. HUANG G H, LIU C J, ZHAO X M. Status quo of carbon emission and future carbon emission reduction for the Yangtze River economic zone[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4):638-644.
- [3] 郑国光. 对哥本哈根气候变化大会之后我国应对气候变化新形势和新任务的思考[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(2):79-82. ZHENG G G. Thinking on new situation and tasks of addressing climate change for China after Copenhagen climate change conference 2009[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(2):79-82.
- [4] 吕丽汀, 王龙, 李静. 对大型商用建筑碳排放审计的研究[J]. 环境工程, 2014, 32(10):142-144. LV L T, WANG L, LI J. Study on audit of carbon emissions from large commercial buildings[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(10):142-144.
- [5] 王丽萍, 刘明浩. 基于投入产出法的中国物流业碳排放测算及影响因素研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1):195-206. WANG L P, LIU M H. Carbon emission measurement for China's logistics industry and its influence factors based on input-output method[J]. Resources Science, 2018, 40(1):195-206.
- [6] 邓朝晖, 吕黎曙, 符亚辉, 等. 机床零部件生命周期碳排放评估与减排策略研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11):144-156. DENG Z H, LÜ L S, FU Y H, et al. Assessing carbon emission of machine tool parts from life cycle perspective and emission reduction strategy research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11):144-156.
- [7] PACHAURI R. Intergovernmental panel on climate change (IPCC):Keynote address[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2002, 9:436-438.
- [8] FRIEDL B, GETZNER M. Determinants of CO₂ emissions in a small open economy[J]. Ecological Economics, 2003, 45(1):133-148.
- [9] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3):596-608. XIA S Y, ZHAO Y, XU X, et al. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997-2016[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(3):596-608.
- [10] 张思齐, 陈银蓉. 城市建设用地扩张与能源消耗碳排放相关效应[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1):244-249. ZHANG S Q, CHEN Y R. Correlation effect of city construction land expansion and energy consumption carbon emission[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1):244-249.
- [11] 王云. 低碳经济“脱钩”量化分解模型研究——基于 IPAT 方程的分析[J]. 经济问题, 2012(5):8-13. WANG Y. The study of the decomposition model to quantify low-carbon economy “decoupling” based on Kaya identity[J]. On Economic Problems, 2012(5):8-13.
- [12] LIDDLE B. What are the carbon emissions elasticities for income and population? Bridging STIRPAT and EKC via robust heterogeneous panel estimates[J]. Global Environmental Change, 2015, 31:62-73.
- [13] 於冉, 黄贤金. 碳排放峰值控制下的建设用地扩展规模研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7):66-72. YU R, HUANG X J. Research on the expansion scale of construction land under the restriction of carbon emission peak[J]. China

Population, Resources and Environment, 2019, 29(7):66-72.

[14] SHI A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975-1996: Evidence from pooled cross-country data[J]. Ecological Economics, 2003, 44(1):29-42.

[15] 张诗卉, 李明煜, 王灿, 等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9):45-54. ZHANG S H, LI M Y, WANG C, et al. Carbon emission trend analysis of China's Provinces and their differentiated peak strategy design[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9):45-54.

[16] 王梓瑛, 王兆峰. 环境规制对旅游生态效率影响的时空异质性研究——以长江三角洲城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4):750-758. WANG Z Y, WANG Z F. A study on spatial-temporal heterogeneity of environmental regulation on tourism eco-efficiency: Taking Yangtze River Delta urban agglomeration as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(4):750-758.

[17] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. 地理研究, 2020, 39(3):651-668. WANG S J, GAO S, CHEN J. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model[J]. Geographical Research, 2020, 39(3):651-668.

[18] 陈彦光. 基于 Moran 统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, 28(6):1449-1463. CHEN Y G. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics[J]. Geographical Research, 2009, 28(6):1449-1463.

[19] 程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10):1418-1431. CHENG Y Q, WANG Z Y, ZHANG S Z, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10):1418-1431.

[20] 李媛芳, 张晓平. 中国城市居民生活用电碳排放差异及时空演变[J]. 热带地理, 2015, 35(2):250-257. LI Y F, ZHANG X P. Regional disparities and spatial-temporal evolution of carbon emissions of domestic electricity consumption in urban China[J]. Tropical Geography, 2015, 35(2):250-257.

[21] 宫倩楠, 王莹莹, 童玉芬. 京津冀人口对碳排放的压力: 空间格局及变动分析[J]. 首都经济贸易大学学报, 2020, 22(2):56-67. GONG Q N, WANG Y Y, TONG Y F. Population's pressure on carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region: Spatial pattern and change analysis[J]. Journal of Capital University of Economics and Business, 2020, 22(2):56-67.

[22] LI Y N, CAI M, WU K, et al. Decoupling analysis of carbon emission from construction land in Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210:25-34.

[23] DONG B, MA X, ZHANG Z, et al. Carbon emissions, the industrial structure and economic growth: Evidence from heterogeneous industries in China[J]. Environmental Pollution, 2020, 262:114322.

[24] 李子杰, 高沪宁, 丁琪洵, 等. 基于 Moran's I 的安徽省太湖县耕地质量时空格局分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3):350-356. LI Z J, GAO H N, DING Q X, et al. Analysis on temporal and spatial patterns of cultivated land quality

based on Moran' s I in Taihu County, Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3):350-356.

[25] 刘书畅, 叶艳妹, 钟水清. 中国城市建设用地扩张与经济增长重心迁移与脱钩关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12):2563-2571. LIU S C, YE Y M, ZHONG S Q. Research on shift route of gravity center and decoupling relationship between urban land expansion and economic growth in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12):2563-2571.

[26] 齐绍洲, 林岫. 电力行业碳排放的影响因素——基于长江经济带空间动态面板的实证研究[J]. 环境经济研究, 2016, 1(1):91-105. QI S Z, LIN S. The influencing factors on the carbon emission of electric power industry: An empirical study based on Yangtze economic belt spatial dynamic panel[J]. Journal of Environmental Economics, 2016, 1(1):91-105.

[27] 郑理, 徐雷, 李军艳. 长江经济带人口城镇化的时空特征及动态演进[J]. 统计与决策, 2021, 37(14):70-74. ZHENG L, XU L, LI J Y. Temporal and spatial characteristics and dynamic evolution of population urbanization in Yangtze River economic belt[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(14):70-74.

[28] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 胡焕庸线两侧城镇建设用地变化及其碳排放差异[J]. 资源科学, 2019, 41(7):1262-1273. ZHANG M, HUANG X J, CHUAI X W, et al. Urban construction lands and their carbon emission differences east and west of the Hu Huanyong Line[J]. Resources Science, 2019, 41(7):1262-1273.

[29] ZHANG L, CHEN S, WANG W. Measurement and trend analysis of carbon emissions from construction land changes in Anhui in the recent 15 years: Based on STIRPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013.

[30] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J]. 经济地理, 2019, 39(2):190-198. YUAN S F, TANG Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emission in the Yangtze River economic belt based on low carbon perspective[J]. Economic Geography, 2019, 39(2):190-198.

[31] 谭飞燕, 张雯. 中国产业结构变动的碳排放效应分析——基于省际数据的实证研究[J]. 经济问题, 2011(9):4. TAN F Y, ZHANG W. Industrial structure and carbon emissions in China: Evidence from province level data[J]. On Economic Problems, 2011(9):4.

[32] 原媛, 席强敏, 孙铁山, 等. 产业结构对区域碳排放的影响——基于多国数据的实证分析[J]. 地理研究, 2016, 35(1):82-94. YUAN Y, XI Q M, SUN T S, et al. The impact of the industrial structure on regional carbon emission: Empirical evidence across countries[J]. Geographical Research, 2016, 35(1):82-94.