

基于时空地理加权回归模型的浙江省碳排放时空格局及驱动因素分析

李泽坤^{1,2,3}, 任丽燕^{1,2,3*}, 马仁锋^{1,2,3}, 刘永强^{1,2,3}, 姚丹^{1,2,3}

(1. 宁波大学 人文地理与城乡规划研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 测算并分析浙江省 1995—2015 年碳排放量的动态变化特征, 通过时空地理加权回归模型分析各影响因素对碳排放总量影响的时空异质性。结果表明: (1) 1995—2015 年浙江省碳排放总量总体上呈上升趋势, 年均增长率为 6.69%; 能源活动碳排放是浙江省碳排放的主要来源, 工业碳排放是能源活动碳排放的主要来源; 非能源活动碳排放是浙江省碳排放的次要来源, 水泥生产和水稻种植是非能源活动碳排放的主要来源; (2) 浙江省碳排放重心大致落在绍兴市西南部, 浙江省碳排放重心经历了西北向—西北向—东南向—东向的转移; (3) 各主成分因素对碳排放的影响方向和强度具有明显的时空异质性。

关键词: 碳排放; 重心转移; 时空地理加权回归模型; 影响因素

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 06-0105-09

温室气体的排放使得以气候变暖为主要特征的全球气候变化受到广泛关注^[1]。中国是世界上最大的发展中国家, 同时也是世界上最大的能源消耗国和温室气体排放国^[2]。因此, 限制温室气体排放, 促进经济发展低碳化已成为当前亟待解决的问题。因而研究碳排放的影响因素, 有效抑制碳排放的增长变得尤为重要^[3]。严志瀚等^[4]运用空间自相关对浙江省碳排放进行时空格局分析, 结果表明浙北和浙东呈现高高集聚, 浙西南呈现低低集聚。陈翊等^[5]研究发现, 浙江省县域经济呈现从西南到东北逐渐增强的格局, 这与严志瀚等^[4]的浙江省碳排放空间格局具有很大相似性。邓吉祥等^[6]运用 LMDI 法对中国能源消耗碳排放进行因素分解研究, 结果发现经济发展因素对碳排放具有最强正效应, 能源强度因素对碳排放具有最强负效应。刘晴川等^[7]运用 LMDI 法将重庆市能源消耗碳排放分解为人口、人均 GDP、产业结构、能源结构、能源强度和碳排放系数等 6 个因素进行研究。王立

平等^[8]基于 EBA 模型对中国能源消耗碳排放的稳健性影响因素进行研究, 结果发现地方财政决算支出、产业结构、能源效率、能源消费结构、能源价格、客运量等 6 个因素对中国人均碳排放量具有稳健性的显著影响。张乐勤等^[9]基于 STIRPAT 模型对安徽省建设用地变化对碳排放的效应进行研究, 结果表明建设用地与碳排放存在显著的正向效应, 其对碳排放的边际弹性系数为 0.119 4。王凯等^[10]基于 STIRPAT 模型对中国旅游业碳排放的影响因素进行分析, 结果表明旅游业碳排放强度是抑制碳排放的关键因素。唐志鹏等^[11]运用混合地理加权回归对中国省域碳生产率影响因素进行分析, 结果表明能源结构对碳生产率呈负向影响, 产业结构、技术进步、劳动生产率对碳生产率具有正向影响。

上述研究主要考虑的是工业化石能源消费造成的碳排放, 忽略了工业生产过程、废弃物处理、农牧业活动等部门造成的碳排放, 并且对于碳排

收稿日期: 2020-04-24.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41601171); 宁波市软科学项目(2017A10053).

第一作者: 李泽坤(1997-), 男, 山西临汾人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 碳排放. E-mail: 1872119530@qq.com

*通信作者: 任丽燕(1976-), 女, 浙江宁波人, 副教授, 主要研究方向: 碳排放. E-mail: renliyan@nbu.edu.cn

放影响因素的空间异质性的研究多使用地理加权回归模型。地理加权回归模型主要使用截面数据进行研究,其截面数据样本量有限,常常影响模型结果。为此,本文系统计算了浙江省各市能源活动、工业生产、废弃物处理、农业活动4个部门碳排放,分析其时空演变特征,构建时空地理加权回归模型,分析浙江省碳排放影响因素的时空异质性。

1 研究方法与数据来源

1.1 碳排放的测算

碳排放测算参考《浙江省市县温室气体清单编制指南(2015年修订版)》的测算方法,包括能源活动的碳排放、工业生产过程的碳排放、废弃物处理的碳排放、农业活动的碳排放4个部分。

1.1.1 能源活动的碳排放测算

能源活动碳排放是碳排放的主要组成部分,其主要碳排放项目包括工业、建筑业、服务业、居民生活、农林牧渔业、交通系统和石油、天然气系统逃逸等总计7个项目,计算公式如下^[10-11]:

$$E_e = \sum_j (A_j \times N_j \times E_j \times O_j \times 44/12), \quad (1)$$

式中: E_e 为能源活动部门碳排放量; A_j 为燃料 j 的消耗量; N_j 为燃料 j 的低位热值; E_j 为燃料 j 的单位热量含碳量; O_j 为燃料 j 的碳氧化率; 44 和 12 分别为 CO_2 与 C 的摩尔质量。

石油和天然气系统逃逸项目所产生碳排放气体为 CH_4 , 计算方法是将各过程活动数据与其对应的排放因子相乘后相加汇总。根据相关指南,原油储运过程的甲烷排放因子选取为 753×10^{-8} ^[12-13]。

1.1.2 工业生产过程中的碳排放测算

由于浙江省工业部门中只有水泥生产产业符合工业生产过程碳排放测算,因此本文只考虑水泥生产过程中的碳排放,其碳排放气体为 CO_2 。根据相关指南,水泥产量熟料比选推荐值 0.63,水泥生产过程排放因子选 $0.538 \text{ t}(\text{CO}_2) \cdot \text{t}^{-1}$ (熟料)^[12-13]。

1.1.3 废弃物处理的碳排放测算

废弃物处理碳排放包括废水处理氧化亚氮、城市固体废弃物填埋甲烷排放和焚烧处理碳排放,计算公式如下^[12-13]。

$$E_d = (M \times L_0 - R) \times (1 - O), E_f = I \times E, \\ E_N = N_E \times G_E \times 44/28, \quad (2)$$

式中: E_d 为填埋城市废弃物所产生的 CH_4 排放总量; M 、 L_0 、 R 、 O 分别为填埋的固体废弃物总量、管理类型垃圾填埋场的甲烷产生潜力、甲烷回收量和氧化因子; E_f 为焚烧城市废弃物所产生的 CO_2 排放总量; I 、 E 分别为焚烧的固体废弃物总量和焚烧产生 CO_2 的排放因子; E_N 为废水处理产生的 N_2O 排放量; N_E 、 G_E 分别为废水中氮含量和废水的氧化亚氮排放因子; 44/28 表示氮到氧化亚氮的转化系数。

1.1.4 农业活动的碳排放测算

农业活动包括稻田甲烷排放、动物肠道发酵甲烷排放、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放4项,其碳排放气体包括 CH_4 、 N_2O , 计算公式如下^[12-13]:

$$E_r = \sum A_i \times D_i, E_a = \sum P_i \times (C_i + F_i), \\ E_i = m_i \times n_i \times 10^{-7}, \quad (3)$$

式中: E_r 为稻田的 CH_4 排放总量; A_i 和 D_i 分别为第 i 类稻田的播种面积和稻田 CH_4 排放因子; E_a 为动物肠道发酵和粪便管理所产生的 CH_4 排放总量; P_i 为第 i 类动物的数量; C_i 和 F_i 分别为第 i 类动物的肠道产生 CH_4 排放因子和粪便产生 CH_4 排放因子; E_i 为动物粪便管理所产生的 N_2O 排放量; m_i 和 n_i 分别为特定种群粪便管理氧化亚氮排放因子和第 i 类动物的数量。

1.2 碳排放重心转移模型

碳排放重心概念参考人口重心的概念,重心分析可以借助重心点的位置、移动方向和移动距离等指标来研究区域地理现象的空间差异及其动态演化规律^[14-15]。设该地区包含若干单元,某个单元的中心坐标为 (X_i, Y_i) , E_i 为该单元的碳排放量,则该地区的碳排放重心坐标计算公式为^[16-17]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i X_i}{\sum_{i=1}^n E_i}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i Y_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (4)$$

式中: $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为该地区的碳排放重心的经纬坐标; n 为该地区包含的单元个数; E_i 为第 i 单元某年的碳排放量。

1.3 时空地理加权回归模型及数据处理

1.3.1 时空地理加权回归模型

地理加权回归模型是空间异质性研究的经典模型,但是其只能使用截面数据,因此经常使用一个指标的多年平均值作为变量来构建地理加权回归模型。地理加权回归模型对样本有一定数量要

求,但现实中截面数据样本量有限,常常影响模型结果。而时空地理加权模型将时间维度引入地理加权回归模型,能够得到时间和空间的双重信息,使得估计结果更为有效^[18-19]。时空地理加权回归模型表达式为^[20]:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i, \quad (5)$$

式中: u_i 和 v_i 分别为重心点经纬坐标; (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个样本点的时空坐标; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为 i 点的回归常数,即时空地理加权回归中的常数项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为 i 点的第 k 个回归参数; x_{ik} 为独立变量 x_k 在 i 点的值,即时空地理加权回归模型指标体系中各量化指标的值; ε_i 为模型的残差项。

1.3.2 影响因素选择及预处理

本文主要从人口、经济和技术三个角度考虑其对碳排放的影响。人口因素选取总人口和人口城市化率,经济因素选取人均 GDP、第二产业比重、第三产业比重、全社会固定资产投资、社会消费品零售总额,技术因素选取万元 GDP 能耗、煤类能源占比。

为排除影响因素之间的多重共线性,首先对影响因素进行相关性分析,检查影响因素间的共线性,结果表明影响因素间存在明显的相关性。因此,采用主成分分析法对 9 个变量提取主成分,得到主成分载荷矩阵和成分得分系数矩阵。根据主成分载荷矩阵中各影响因素对应系数绝对值的大小来判断各主成分的主导因素;根据成分得分系数矩阵中各主成分对应的各影响因素系数,通过回归计算可得各主成分的综合得分^[21]。主成分分析得到的各主成分主导因子见表 1。

表 1 主成分变量主导因子

成分	主成分主导因素	主成分名称
主成分 1	人口城市化率、人均 GDP、第三产业占比、全社会固定资产投资、社会消费品零售总额、万元 GDP 能耗	经济及能源效率
主成分 2	第二产业占比、煤类能源占比	第二产业及能源结构
主成分 3	总人口	总人口

通过上述操作排除影响因素的多重共线性后,

以各主成分的综合得分为自变量,以碳排放为因变量进行时空地理加权回归。

1.4 数据来源及处理

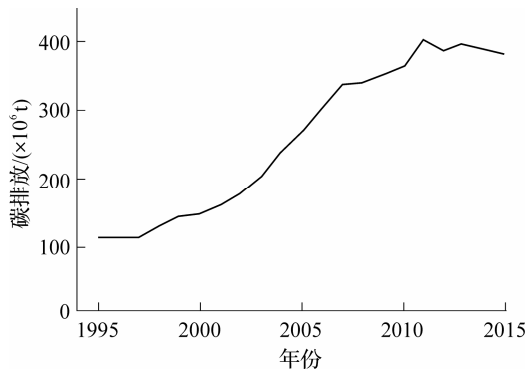
能源消耗数据来自《中国能源统计年鉴》和《浙江统计年鉴》。水泥产量数据、农业活动水平数据、总人口、人口城市化率、GDP、第二产业比重、第三产业比重、全社会固定资产投资、社会消费品零售总额来自《浙江统计年鉴》。废弃物填埋焚烧数据来自于《中国城市建设统计年鉴》。各类能源折算标准煤系数使用《中国能源统计年鉴》中的各种能源折标准煤参考系数表^[22]。

2 结果与分析

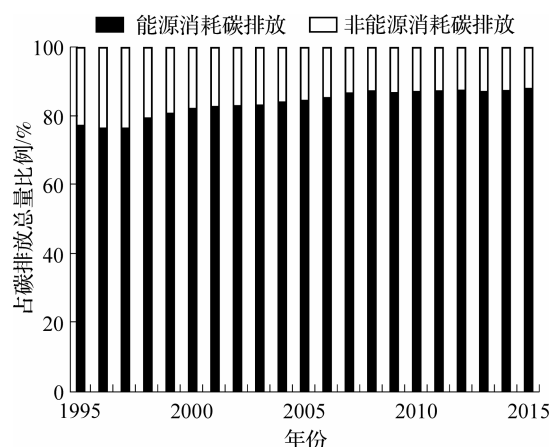
2.1 碳排放动态分析

计算浙江省各市各部门碳排放,汇总为浙江省各部门碳排放,绘制浙江省碳排放总量动态变化图。根据《浙江省市县温室气体清单编制指南(2015 年修订版)》将浙江省各部门碳排放分为能源活动碳排放和非能源活动碳排放。其中,能源活动碳排放包括工业、建筑业、服务业、居民生活、农林牧渔水利业、交通仓储碳排放、石油系统逃逸碳排放共计 7 个项目,非能源活动碳排放包括工业生产过程(水泥生产)、废弃物处理、水稻种植(稻田甲烷排放)、牲畜管理(动物肠道发酵甲烷排放、动物粪便管理甲烷和氧化亚氮排放)碳排放。由此绘制浙江省碳排放结构变化图(图 1)。

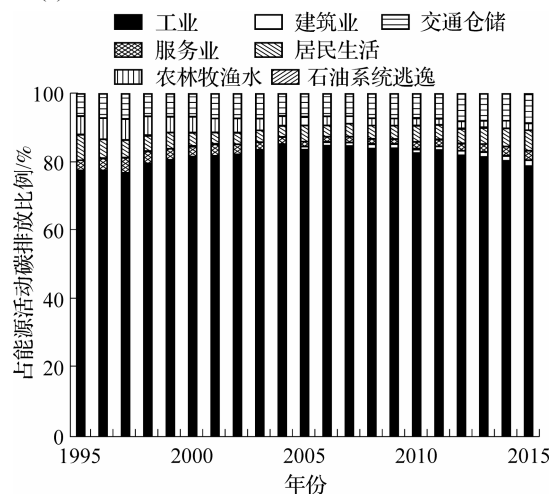
由图 1(a)可知,1995—2015 年浙江省碳排放量总体上呈现上升趋势,由 1995 年的 $107.76 \times 10^6 \text{ t}$ 增长到 2015 年的 $379.15 \times 10^6 \text{ t}$,年均增长率达 6.69%。根据碳排放动态变化特征可以将总体阶段划分为 4 个阶段。第 1 阶段是 1995—2000 年,主要特征表现



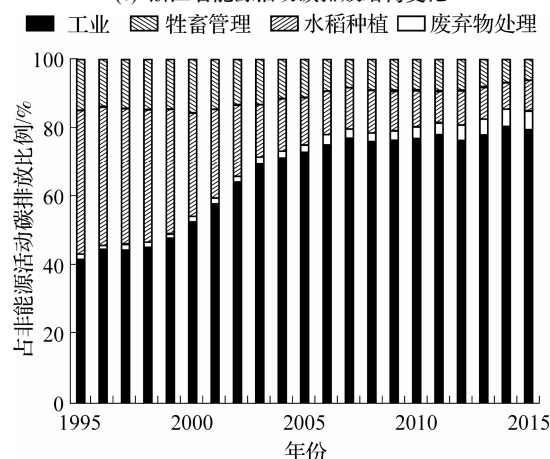
(a) 浙江省碳排放总量动态变化



(b) 浙江省能源活动碳排放与非能源活动碳排放比例



(c) 浙江省能源活动碳排放结构变化



(d) 浙江省非能源活动碳排放结构变化

图1 浙江省碳排放总量及结构动态变化

为碳排放量小, 增长速度慢, 碳排放量由 1995 年的 107.76×10^6 t 增加到 2000 年的 142.71×10^6 t, 年均增长率为 5.93%。第 2 阶段是 2000—2007 年, 碳排放增长速度明显加快, 由 2000 年的 142.71×10^6 t

增加到 2007 年的 334.29×10^6 t, 年均增长率达 12.97%。第 3 阶段是 2007—2011 年, 碳排放增长速度有所放缓, 由 2007 年的 334.29×10^6 t 增长到 2011 年的 399.37×10^6 t, 年均增长率为 4.6%。2011 年浙江省碳排放量达到最多。第 4 阶段是 2011—2015 年, 碳排放出现波动减少的趋势, 由 2011 年的 399.37×10^6 t 减少到 2015 年的 379.15×10^6 t, 年均减少率为 -2.07%。

由图 1(b) 可知, 能源活动碳排放是浙江省碳排放的主要来源, 能源活动碳排放占碳排放总量的 75.94%~87.71%, 非能源活动碳排放占碳排放总量的 12.29%~24.06%。研究期内, 能源活动碳排放占碳排放的比例总体上呈现增加趋势, 而 2006 年后增加的速度明显放缓。

由图 1(c) 可知, 工业碳排放是浙江省能源活动碳排放的主要来源, 占能源活动碳排放的 76.24%~85.24%; 1995—2007 年, 工业碳排放占能源活动碳排放的比例总体上呈上升趋势, 2007 年后总体上呈下降趋势。建筑业、交通仓储业碳排放占能源活动碳排放的比例总体呈上升趋势, 分别由 1995 年的 0.28%、6.46% 上升到 2015 年的 1.75%、8.84%。农林牧渔水利业碳排放占能源活动碳排放的比例总体呈下降的趋势, 由 1995 年的 5.34% 下降到 2015 年的 2.19%。服务业、居民生活碳排放占能源活动碳排放的比例呈现先下降后上升的变化特征, 分别于 2006 年和 2007 年由下降趋势转变为上升趋势, 研究期内占能源活动碳排放的比例分别为 1.34%~4.36%、2.78%~7.71%。石油系统逃逸碳排放占非能源活动碳排放的比例很小, 研究期内基本维持在 0.1% 以下。

由图 1(d) 可知, 水泥生产和水稻种植碳排放是浙江省非能源活动碳排放的主要来源, 两者合计占非能源碳排放的 83.24%~89.06%。水泥生产、废弃物处理碳排放占非能源活动碳排放的比例总体上呈上升的趋势, 分别由 1995 年的 41.83%、1.35% 上升到 2015 年的 79.58%、5.85%。水稻种植、牲畜管理碳排放占非能源活动碳排放的比例总体呈下降趋势, 分别由 1995 年的 42.19%、14.63% 下降到 2015 年的 8.55%、6.02%。

2.2 浙江省碳排放重心转移分析

根据式(4)计算得到 1995、2000、2005、2010、

2015年浙江省碳排放总量重心坐标及浙江省几何重心,并通过ArcGIS 10.5得到浙江省碳排放重心转移图,具体结果如图2所示。

由图2可知,研究期内,浙江省碳排放重心大致落在绍兴市西南部,且一直位于浙江省几何重心的东北方向,说明浙江省东部和北部的碳排放量要大于西部和南部。总体来看,浙江省碳排放重心向东南转移了11.7 km。1995—2015年,浙江省碳排放重心经历了西北向—西北向—东南向—东向的转移。

碳排放重心的转移方向和距离与相应时期各市经济发展和产业结构调整相关联。分时段看,1995—2000年,浙江省碳排放重心向西北移动了5.81 km,这主要是杭州、湖州碳排放总量增加迅速,其他市碳排放总量增加相对缓慢的结果。1995—2000年,杭州市碳排放总量增加了 $1\,251.24\times 10^4$ t,年均增长率达15.48%;其中,工业能源消费碳排放是碳排放总量增加的主要原因,由于公用电力与热力、建材、纺织等行业迅速发展,能源消耗急剧增加。1995—2000年,湖州市碳排放总量增加了 392.98×10^4 t,年均增长率为7.54%;其中,工业能源消费碳排放是碳排放总量增加的主要原因,能源消耗量由 354.53×10^4 t增加到了 395.13×10^4 t。2000—2005年,浙江省碳排放重心向西北移动了1.19 km,这主要是由于嘉兴市碳排放迅速增加的结果。2000—2005年,嘉兴市碳排放增加 $1\,911.88\times 10^4$ t,年均增长率为18.21%。工业能源消费碳排放中的公用电力与热力、化工、纺织等部门迅速发展,

能源消耗急剧增加。总体来看,2000—2005年碳排放重心移动距离较短,说明此时期浙江省碳排放空间格局较为稳定。2005—2010年,浙江省碳排放重心向东南移动了14.34 km,这主要是宁波、台州碳排放迅速增加,而杭州、湖州、嘉兴等市碳排放增加缓慢的结果。2005—2010年,宁波市碳排放增加了 $4\,184.43\times 10^4$ t,年均增长率为12%;在工业部门中,石油天然气加工业和电力热力部门迅速发展,能源消耗急剧增加。台州市达到了阶段性碳峰值,这主要是电力与热力部门能源消耗量增加的结果。2005—2010年,台州市能源消耗量由 455.5×10^4 t标准煤增加到 $1\,027.3\times 10^4$ t标准煤;其中,电力与热力部门能源消耗量约占80%~90%。2010—2015年,浙江省碳排放重心向东移动了4.47 km,这主要是舟山、温州碳排放增长较快,而其他市碳排放总量增幅较小甚至在减少的结果。2010—2015年,舟山市碳排放增加了 $1\,269.65\times 10^4$ t,年均增长率达35.64%。舟山群岛新区的建立使得舟山市海洋产业、物流业等产业得到迅速发展,对能源的需求和消耗也在迅速增加。2010—2015年,温州市碳排放增加了 700.35×10^4 t,年均增长率为5.45%,这主要是能源加工和转化部门能源消耗量迅速增加的结果。杭州、湖州、嘉兴、丽水的碳排放增幅相对较小,金华、宁波、衢州、绍兴、台州碳排放总量出现负增长。

2.3 时空地理加权回归模型结果分析

利用ArcGIS 10.5中属性表计算几何的功能,计算得到浙江省各市的几何重心X、Y坐标为空间

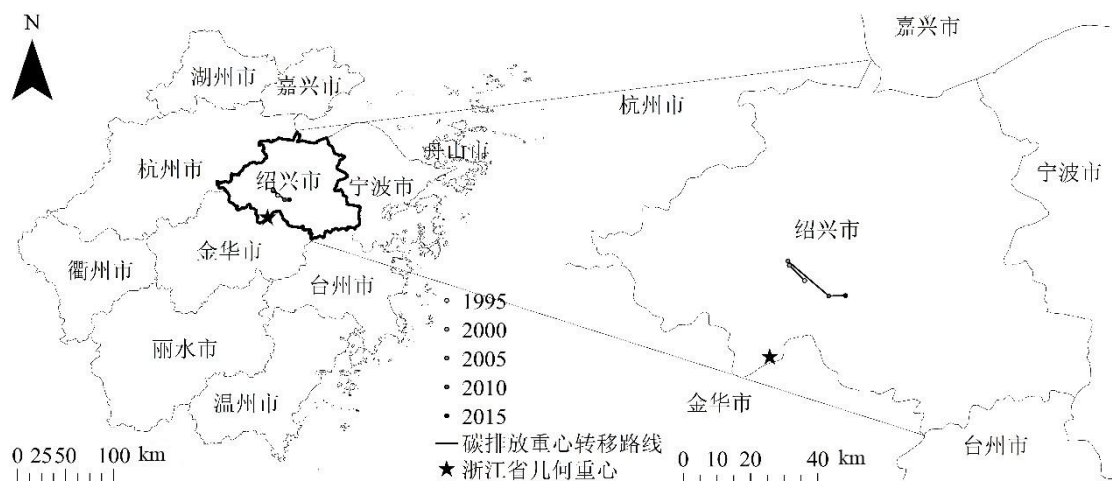


图2 1995—2015年浙江省碳排放重心转移

坐标, 设时间坐标 t 值的最小步长单位为年. 利用 Huang 等^[20]制作的时空地理加权回归中的 ArcGIS 10.5 的插件(带宽采用自动最优设置), 分析各主成分综合得分对碳排放的影响参数. 参数大于 0 表示解释变量对碳排放起促进作用, 参数越大表明促进作用越强, 参数小于 0 表明解释变量对碳排放起抑制作用, 参数绝对值越大表明抑制作用越强. 计算 1995—2001 年、2002—2008 年、2009—2015 年的 3 个时间段内各主成分参数的平均值, 根据各主成分参数平均值的大小, 运用等分法将各主成分对碳排放的作用分为强正向驱动、中正向驱动、弱正向驱动、强负向驱动、中负向驱动、弱负向驱动 6 种, 并由此绘制如图 3~5 所示的时空变化图.

由图 3 可知, 研究期内, 经济及能源效率因素对各市碳排放均为驱动作用, 时空演变由北强南弱转变为东北强西南弱, 最后又转变为北强南弱. 1995—2001 年, 经济及能源效率因素对碳排放的促进作用呈北强南弱的空间格局, 杭州、宁波、湖州、绍兴经济及能源效率因素对碳排放呈强正向促

进作用, 嘉兴、金华、台州呈中正向驱动作用, 舟山、温州、衢州、丽水呈弱正向驱动作用. 2002—2008 年, 经济及能源效率因素对碳排放的促进作用转变为东北强西南弱的空间格局, 杭州由强正向驱动作用转变为中正向驱动作用, 嘉兴、台州由中正向驱动作用转变为强正向驱动作用, 舟山、衢州由弱正向促进作用分别转变为中正向驱动作用、强正向驱动作用. 2009—2015 年, 经济及能源效率因素对碳排放的促进作用转变为北强南弱的空间格局, 北部市域经济及能源效率因素对碳排放的驱动作用明显减弱, 说明北部市域经济发展造成的碳排放减少, 经济发展对能源消耗的依赖在降低, 能源效率在提高. 宁波、湖州经济及能源效率因素对碳排放由强正向驱动作用转变为中正向驱动作用, 嘉兴、台州由强正向驱动作用转变为弱正向驱动作用, 湖州由强正向驱动作用转变为中正向驱动作用, 衢州由中正向驱动作用转变为弱正向驱动作用.

由图 4 可知, 研究期内, 第二产业及能源结构

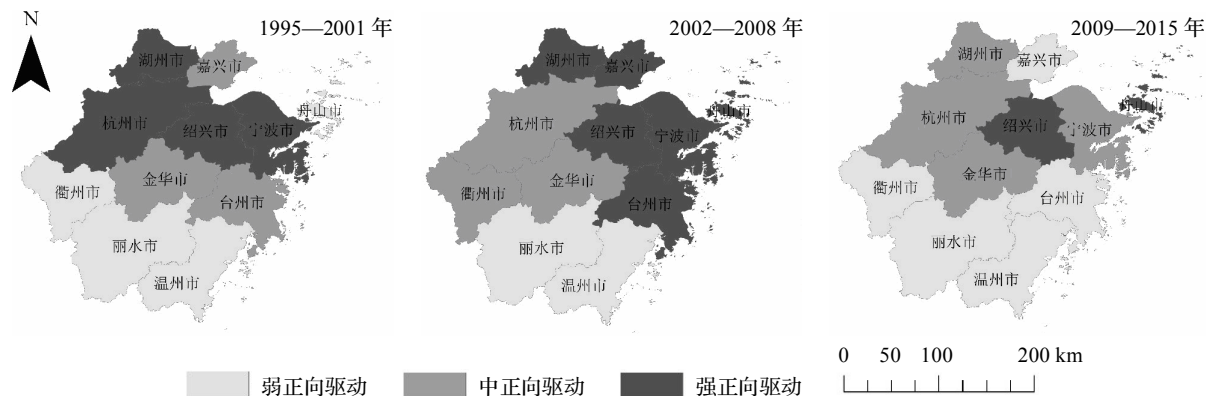


图 3 经济及能源效率因素对碳排放影响的时空变化

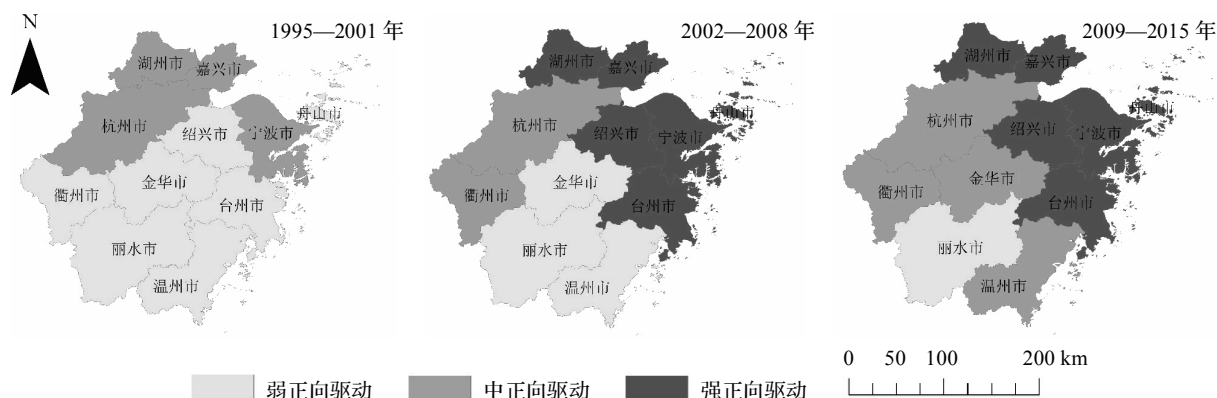


图 4 第二产业及能源结构因素对碳排放影响的时空变化

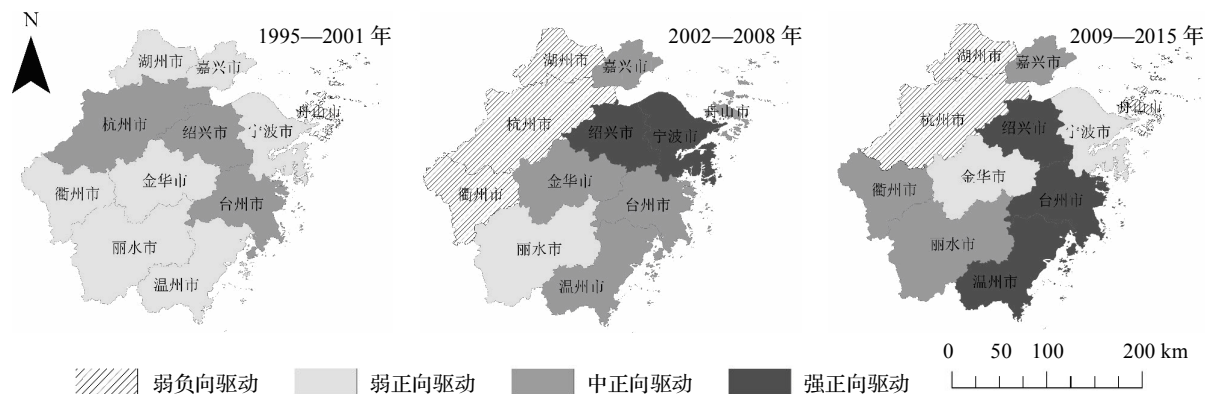


图5 总人口对碳排放影响的时空变化

因素对各市碳排放均为驱动作用,由北强南弱的空间格局转变为东强西南弱的空间格局.1995—2001年,杭州、宁波、嘉兴、湖州第二产业及能源结构因素对碳排放呈中正向驱动作用,其他市域为弱正向驱动作用.2002—2008年,东北部的市域第二产业及能源结构因素对碳排放的驱动作用显著增强,宁波、嘉兴、湖州第二产业及能源结构因素对碳排放由中正向驱动作用转变为强正向驱动作用,绍兴、舟山、台州由弱正向驱动作用转变为强正向驱动作用,衢州由弱正向驱动作用转变为中正向驱动作用,基本呈东强西南弱的空间格局.2009—2015年,第二产业及能源结构因素对各市碳排放驱动作用的空间格局相较2002—2008年总体差别不大,仍然呈现东强西南弱的空间格局,金华、温州第二产业及能源结构因素对碳排放由弱正向驱动作用转变为中正向驱动作用.浙江省第二产业及能源结构因素对碳排放的促进作用整体呈东强西南弱的空间格局,这主要是由于浙江省东北部市域第二产业相对发达,第二产业规模相对较大.2015年,浙江省东北部的杭州、宁波、湖州、嘉兴、绍兴、舟山的第二产业生产总值占全省第二产业生产总值的68.73%,西南各市合计仅占全省第二产业生产总值的31.27%,第二产业的发展对能源消耗的依赖较大,因此东北部市域的第二产业的发展 and 能源结构的变化对其碳排放的正向驱动作用较大.

由图5可知,研究期内,总人口对碳排放的驱动作用的空间格局由北强南弱转变为东强西弱.1995—2001年,杭州、绍兴、台州总人口对碳排放呈中正向驱动作用,宁波、嘉兴、湖州、金华、温

州、衢州、丽水为弱正向驱动作用,舟山为弱负向驱动作用.2002—2008年,总人口对碳排放的驱动作用转变为东强西弱的空间格局.杭州总人口对碳排放由中正向驱动作用转变为弱负向驱动作用,湖州、衢州由弱正向驱动作用转变为弱负向驱动作用,嘉兴、金华、温州由弱正向驱动作用转变为中正向驱动作用,宁波、绍兴分别由弱正向驱动、中正向驱动作用转变为强正向驱动作用,舟山由弱负向驱动作用转变为中正向驱动作用.2009—2015年,南部市域的总人口对碳排放的促进作用明显增强.台州、温州总人口对碳排放由中正向驱动作用转变为强正向驱动作用,衢州、丽水分别由弱负向驱动作用、弱正向驱动作用转变为中正向驱动作用,金华由中正向驱动作用转变为弱正向驱动作用,舟山由中正向驱动作用转变为弱负向驱动作用.

3 结论及建议

3.1 结论

本文系统测算了1995—2015年浙江省各部门碳排放,分析了浙江省碳排放时空演变,从人口、经济、技术三方面选取指标,通过时空地理加权回归模型分析各影响因素对碳排放总量影响的时空异质性.主要结论如下:

(1)研究期内,浙江省碳排放总体上呈增长趋势,年均增长率为6.69%.根据浙江省碳排放动态变化特征可将其分为4个阶段,第1阶段是1995—2000年,主要特征是碳排放量小,增长缓慢;第2阶段是2000—2007年,主要特征是碳排放增长迅速;第3阶段是2007—2011年,相比第2阶段碳排

放增长有所放缓;第4阶段是2011—2015年,碳排放呈现波动下降的趋势。

能源活动碳排放是浙江省碳排放的主要来源,占碳排放总量的75.93%~87.70%,工业碳排放是能源活动碳排放的主要来源。非能源活动碳排放是浙江省碳排放的次要来源,水泥生产和水稻种植是非能源活动碳排放的主要来源。

(2)碳排放重心转移结果表明,浙江省碳排放重心大致落在绍兴市西南部,且一直位于浙江省几何重心的东北方向,说明浙江省东部和北部的碳排放量要大于西部和南部。总体来看,浙江省碳排放重心向东南转移了11.7 km,1995—2015年,浙江省碳排放重心经历了西北向—西北向—东南向—东向的转移,碳排放重心的转移方向和距离与相应时期各市经济发展和产业结构调整相关。

(3)研究期内,经济及能源效率因素对各市碳排放均为驱动作用,时空演变由北强南弱转变为东北强西南弱,最后又转变为北强南弱。第二产业及能源结构因素对各市碳排放均为驱动作用,由北强南弱的空间格局转变为东北强西南弱的空间格局。总人口对碳排放驱动作用的空间格局由北强南弱转变为东强西弱。

3.2 建议

研究期内,浙江省碳排放总量达到了阶段性峰值,碳排放增长速度明显放缓,但碳排放总量很大,2011—2015年的年均碳排放在 3.5×10^8 t以上,减排压力依然很大。能源消耗碳排放是浙江省碳排放的主要来源,且其占碳排放总量的比例在不断上升,因此应重点控制能源消耗碳排放。工业碳排放是能源消耗碳排放的主要来源,2007年后,工业碳排放占能源消耗碳排放的比例逐渐下降,因此既要减少工业碳排放,也要重视建筑业、服务业、交通仓储业等碳排放的增长。对于能源消耗碳排放的控制,一方面要提高能源利用率,另一方面要改善能源结构,扩大清洁能源的比例,减少煤炭等化石能源的比例。水泥生产是非能源消耗碳排放的主要来源,且增长速度较快,因此应通过提高生产技术,限制水泥产量等措施控制水泥生产碳排放的增长。

经济及能源效率和第二产业及能源结构因素对浙江东北部市域的正向驱动作用较强,因此浙

江东北部的市域采取调整产业结构,提高能源效率,优化能源结构等措施来控制碳排放的增长会取得较为明显的效果。绍兴、台州、温州等市域的人口因素对碳排放具有较强的正向驱动作用,因此,绍兴、台州、温州等应提倡绿色低碳的生活方式、扩大公共交通等城市公共服务的范围,提高城市公共服务的效率。

参考文献:

- [1] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Urbanization impact on carbon emissions in the Pearl River Delta region: Kuznets curve relationships[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180:514-523.
- [2] 董聪,董秀成,蒋庆哲,等.《巴黎协定》背景下中国碳排放情景预测——基于BP神经网络模型[J].生态经济,2018,34(2):18-23.
- [3] 燕华,郭运功,林逢春.基于STIRPAT模型分析CO₂控制下上海城市发展模式[J].地理学报,2010,65(8):983-990.
- [4] 严志瀚,任丽燕,刘永强,等.浙江省碳排放时空格局及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1427-1435.
- [5] 陈翊,冯云廷,俞杨安安.浙江省县域经济格局的空间演化分析[J].地域研究与开发,2017,36(3):16-21.
- [6] 邓吉祥,刘晓,王铮.中国碳排放的区域差异和演变分析分析与因素分解[J].自然资源学报,2014,29(2):189-200.
- [7] 刘晴川,李强,郑旭煦.基于化石能源消耗的重庆市二氧化碳排放峰值预测[J].环境科学学报,2017,37(4):1582-1593.
- [8] 王立平,张海波,刘云.基于EBA模型的中国碳排放稳健性影响因素研究[J].地理科学,2014,34(1):47-53.
- [9] 张乐勤,陈素平,王文琴,等.安徽省近15年建设用地变化对碳排放效应测度及趋势预测——基于STIRPAT模型[J].环境科学学报,2013,33(3):950-958.
- [10] 王凯,邵海琴,周婷婷,等.基于STIRPAT模型的中国旅游业碳排放影响因素分析[J].环境科学学报,2017,37(3):1185-1192.
- [11] 唐志鹏,刘卫东,宋涛.基于混合地理加权回归的中国省域碳生产率影响因素分析[J].资源科学,2017,39(12):2223-2232.
- [12] 浙江省发展改革委员会.浙江省市县温室气体清单编制指南(2015年修订版)[R].
- [13] IPCC. Climate change 2014 synthesis report[R]. 2015.
- [14] 高军波,谢文全,韩勇,等.1990~2013年河南省县域人口、经济和粮食生产重心的迁移轨迹与耦合特征——兼

- 议与社会剥夺的关系[J]. 地理科学, 2018, 36(6):919-926.
- [15] 乔伟峰, 刘彦随. 城市三维重心算法与实验分析——以南京市为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(3):268-273.
- [16] 舒心, 夏楚瑜, 李艳, 等. 长三角城市群碳排放与城市用地增长及形态的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(17):6302-6313.
- [17] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于能源消费的中国省际区域碳足迹时空演变分析[J]. 地理研究, 2013, 32(2):326-366.
- [18] 肖宏伟, 易丹辉. 基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究[J]. 统计与信息论坛, 2014, 29(2):83-89.
- [19] 王海军, 张彬, 刘耀林, 等. 基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维解析[J]. 地理学报, 2018, 27(6):1076-1092.
- [20] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3):383-401.
- [21] 宋金平, 赵西君, 王倩. 北京市丰台区土地利用变化及社会经济驱动力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(2):171-175.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1995-2017.

Analysis of spatial-temporal pattern and driving factors of carbon emissions in Zhejiang Province based on spatial-temporal geographic weighted regression model

LI Zekun^{1,2,3}, REN Liyan^{1,2,3*}, MA Renfeng^{1,2,3}, LIU Yongqiang^{1,2,3}, YAO Dan^{1,2,3}

(1.Institute of Geography and Urban-rural Planning, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2.Ningbo Land and Marine Spatial Utilization and Governance Collaborative Innovation Center, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3.Institute of East China Sea, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this study, the dynamic changes of carbon emissions from 1995 to 2015 in Zhejiang Province are calculated and analyzed. Also analyzed is the spatio-temporal heterogeneity of the impact of various influencing factors on total carbon emissions through a GTWR model. The results show that: (1) From 1995 to 2015, the total carbon emission of Zhejiang Province shows an overall upward trend, with an average annual growth rate of 6.69%. Carbon emission from energy activities proves to be the main source of carbon emission in Zhejiang Province, and industrial carbon emission is found to be the main source of carbon emission from energy activities. Non-energy activity carbon emissions act as the secondary source of carbon emission in Zhejiang Province. Cement production and rice cultivation turn out to be the main source of non-energy activity carbon emissions; (2) The carbon emission center of Zhejiang Province is located roughly in the southwest of Shaoxing City. The center is noted for having been shifting in order of from northwest to northwest to southeast to east; (3) The direction and intensity of the main component factors on carbon emissions exhibit obvious spatial and temporal heterogeneity.

Key words: carbon emissions; shift of center of gravity; GTWR model; influencing factors

(责任编辑 章践立)