

浙江省碳排放时空格局及影响因素研究^{*1}

严志翰 任丽燕^{*} 刘永强 宋俊星

(宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江宁波 315211)

【摘要】:利用 2005~2010 年浙江省各县市区的社会经济数据和能耗数据, 测算了各县市区的碳排放总量、人均碳排放量和地均碳排放量, 采用空间自相关方法揭示了县域尺度下相邻县市区碳排放指标的空间关联性, 运用地理加权回归模型定量描述了各县市区碳排放总量影响因素的空间异质性。研究结果表明:(1)研究期内, 浙江省的碳排放总量从 30486 万 t 增加到 49559 万 t。人均碳排放量和地均碳排放量也均呈增长趋势, 且空间差异显著。(2)各县市区碳排放总量、人均碳排放量和地均碳排放量均存在较强的空间自相关性, 总体上浙北浙东呈高高集聚, 浙西南呈低低集聚。(3)人口和投资是影响碳排放总量的重要因素, 且存在空间异质性。投资对浙西南碳排放的影响逐渐增大。

【关键词】:碳排放; 时空格局; 影响因素; 空间自相关; 地理加权回归; 浙江省

【中图分类号】号:X321 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**号:1004-8227(2017)09-1427-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201709015

随着中国经济持续高速增长, 大量的能源消费使中国成为目前世界碳排放总量最大的国家。1950 年, 中国碳排放总量仅有 546 万 t, 到 2012 年中国的碳排放量已占全球总量四分之一, 达 85 亿 t, 且同期增长速率远高于世界其他主要经济体^[1]。对此, 我国“十三五”规划纲要将积极应对全球气候变化单列一章, 提出“主动控制碳排放, 落实减排承诺”^[2]。浙江省作为经济强省、能源消费大省, 面临着艰巨的控碳减排任务^[3]。

以往学界对于碳排放的研究一般采用经验参数根据各土地利用类型的数量变化数据、化石能源消耗数据来估算碳排放量、碳吸收量和碳通量^[4], 或利用数学模型分解碳排放因素来探讨不同影响因素的驱动效应^[5], 或通过对碳排放总量的增长预测来对土地利用结构的进行优化^[6]。现在学界则普遍认为, 土地利用碳排放会受到相邻单元的人口规模、经济规模、社会产业结构、区域贸易结构等因素的影响^[7-9]。不少学者结合空间统计方法, 通过分析不同碳排放指标的时空格局特征, 探讨了碳排放空间相关性、异质性及其驱动因素的变异规律^[10-12]。现阶段已有相关土地利用碳排放研究采用空间自相关方法主要对全国尺度碳排放进行分析, 却鲜有基于县域尺度的碳排放测算和县域单元的空间联系研究。本研究在浙江省 2005~2010 年各县市区碳排放测算的基础上, 采用空间自相关方法、地理加权回归模型对其碳排放总量、人均碳排放量、地均碳排放量进行分析。研究结果有助于深入理解小尺度下县域单元碳排放及其影响因素的空间关联, 揭示人类经济活动与自然系统的交互格局及其空间环境效应,

¹ 收稿日期:2016-12-29; 修回日期:2017-05-12

基金项目:宁波市软科学项目(2017A10053) [Soft Science Project of Ningbo(2017A10053)]; 国家自然科学基金(41601171) [National Natural Science Foundation of China(41601171)]; 浙江省社科规划课题成果(11JCGL13YB) [Philosophy and Social Science Program of Zhejiang Province(11JCGL13YB)]

作者简介:严志翰(1993~), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源环境保护与利用. E-mail:yzhiaan93@gmail.com

***通讯作者** E-mail:renliyan@nbu.edu.cn

为制定区域碳减排政策提供借鉴。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源及处理

以当前行政区划作为基准，将浙江省各地级市市辖区、县级市和县作为同一级别研究对象，总计 65 个研究单元。由于浙江省部分县市区若干年份的能耗数据缺失，出于数据可得性和研究连续性考虑，选择数据齐全的 2005~2010 年为研究时段。以各研究单元 2005~2010 年的 GDP 及能耗数据为基础，采用标准煤算法^[13]测算区域碳排放指标，包括区域碳排放总量、人均碳排放量和地均碳排放量。其中人均碳排放量表示单位人口的碳排放量，地均碳排放量表示单位土地面积的碳排放量。各指标计算公式如下：

$$C_{ij} = GDP_{ij} \times \theta_{ij} \times EF \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

碳排放总量：

$$M_{ij} = C_{ij} \div P_{ij} \quad (2)$$

人均碳排放量：

$$N_{ij} = C_{ij} \div L_{ij} \quad (3)$$

地均碳排放量：

式中： C_{ij} 、 GDP_{ij} 、 θ_{ij} 分别是第 i 个研究单元第 j 年的碳排放总量、GDP 总量和 GDP 能耗系数； M_{ij} 、 N_{ij} 分别是第 i 个研究单元第 j 年的人均碳排放量与地均碳排放量； P_{ij} 、 L_{ij} 分别是第 i 个研究单元第 j 年的人口数量和土地面积。

本研究中浙江省各县市区的 GDP、人口数量、土地面积、全社会固定资产投资等数据均来自 2005~2010 年浙江统计年鉴和各县市区统计年鉴；GDP 能耗数据来自 2005~2010 年浙江省及各地市统计公报，以及浙江省统计局、浙江省经贸委、浙江省发改委联合发布的《2005 年各市单位 GDP 能耗等指标公报》、《2006 年各市单位 GDP 能耗等指标公报》、《2007 年全省及各市单位 GDP 能耗等指标公报》、《关于 2008 年浙江省及各市单位 GDP 能耗等指标的通报》等；EF 值采用国家发改委能源研究所的推荐值 0.67t/tce；44 和 12 分别为 CO_2 和 ^{12}C 的摩尔质量。

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析

空间自相关分析假定研究样本间地理位置相联系，通过特征区识别揭示地理元素在空间演化过程中的关联性，包括全局空间自相关和局部空间自相关两部分内容^[14, 15]。全局 Moran' I 指数是揭示相邻空间内区域单元属性值相似程度的重要指标^[16]。本研究借助 Arc GIS 软件计算浙江省各县市区的 Moran' I 指数，Moran' I 指数小于 0 表示负相关，大于 0 表示正相关。公式如下：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

标准化 Z 值用于检测全局 Moran' I 指数的显著性水平，公式如下：

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (5)$$

E(I)、VAR(I)分别表示 Moran' I 指数的期望值与方差。

局部空间自相关分析采用空间联系的局域指标(local indicator of spatial association, LISA)来度量每个区域单元与其周边地区的属性值之间的显著空间聚集程度^[17]。作为 LISA 的局域 Moran' s I 是全局 Moran' s I 统计量的局部化版本。公式如下：

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (6)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中：；n 是研究单元总数； w_{ij} 是空间权重； x_i 、 x_j 分别是研究单元 i 和 j 的碳排放指标；

\bar{x} 是研究单元碳排放指标的平均值。在 LISA 空间格局中存在“低低集聚、高低集聚、低高集聚、高高集聚”4 种集聚情况，其中高高集聚和低低集聚表明该局域碳排放指标的观测值存在较强的空间正相关，空间单元具有均质性；高低集聚和低高集聚表示该局域碳排放指标存在较强的空间负相关，空间单元存在异质性。

1.2.2 地理加权回归模型

地理加权回归模型相对于传统计量方法考虑了驱动因素的空间性质，可以更好控制传统回归模型等相关计量模型残差中的空间自相关性，有助于揭示局域研究单元的因素差异对整体的影响^[18, 19]。本研究借助 Arc GIS 软件的空间关系建模工具完成地理加权回归分析。地理加权回归模型定义为：

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中： y_i 代表碳排放量； x_{ij} 是第 i 个单元碳排放量的第 j 个影响因素； (u_i, v_i) 是第 i 个单元的空间坐标； $\beta_j(u_i, v_i)$ 是影响因素 j 在第 i 个单元的回归系数； ε_i 是随机误差。

2 碳排放的时空特征

2.1 碳排放总量

2005~2010年浙江省各地级市碳排放总量见图1。研究期间内,全省碳排放整体呈现稳步增长态势,碳排放总量从30486.00万t增加到49559.00万t,增速约为3815.00万t/a;不同区域的地级市碳排放总量增量和增速有所差异,碳排放增量较大的是宁波市和杭州市,分别从5656.13万t增长到10020.18万t、6289.32万t增长到9938.28万t,碳排放增速较快的是丽水市和舟山市,分别为86.90%和78.80%;2009年由于区域GDP的下降,包括杭州、宁波在内大部分地级市的碳排放总量相对2008年都出现不同程度的下降,其中宁波市2009年相对2008年碳排放减少288.00万t,降幅最大。湖州市、绍兴市和舟山市的碳排放总量虽然保持增长趋势,但增速降低。

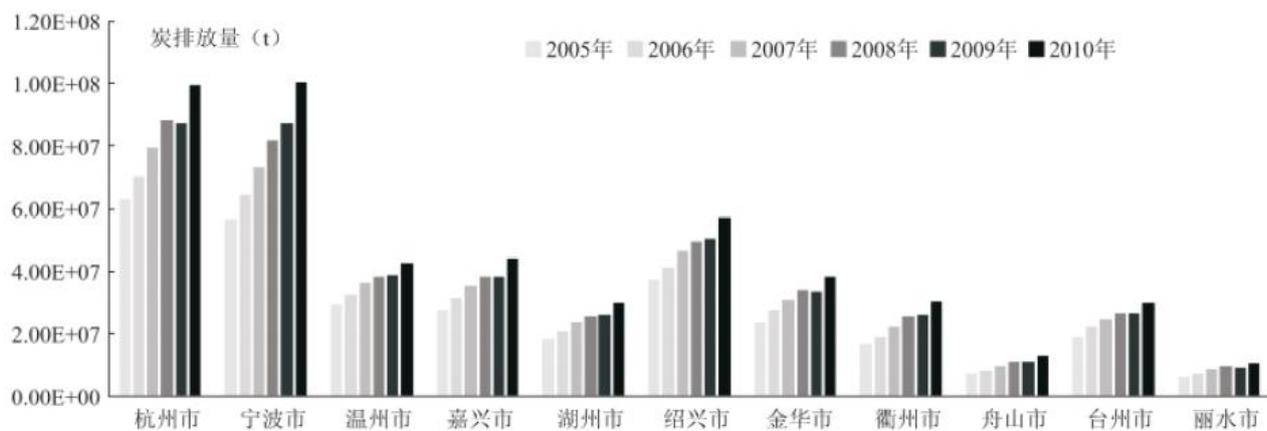


图1 2005~2010年浙江省各地级市碳排放总量

Fig. 1 City Carbon Emission from 2005 to 2010

2.2 地均碳排放量

2005~2010年间浙江省各县市区的单位土地面积的地均碳排放量差异巨大(表1)。研究期内,宁波市区的地均碳排放量一直为全省最大值,且从2005年的12490.97t/km²逐渐增加到2010年的23214.60t/km²,其中2008年到2009年出现一定程度下降;景宁县的地均碳排放量一直为全省最小值,从2005年的142.41t/km²缓慢增加到2010年的222.00t/km²;全省地均碳排放平均值从2005年的3197.56t/km²稳步增加到2010年的5143.80t/km²。

表1 2005 ~ 2010年地均碳排放变化(t/km²)

	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
最大值	12 490.97	13 954.74	16 084.02	18 148.56	16 693.00	2 3214.60
最小值	142.41	159.70	181.11	199.79	201.06	222.00
平均值	3 197.56	3 624.05	4 088.30	4 479.61	4 426.36	5 143.80

2.3 人均碳排放量

2005~2010年浙江省内多数县市区的人均碳排放量呈现稳定增长态势(表2)。受GDP下降影响,2009年能源消费大幅度减少,部分县市区人均碳排放量出现增速放缓乃至总量下降。研究期内,宁波市区的人均碳排放一直为全省各县市区中的最大值,从2005年的14.98t/人持续增加到2008年的21.11t/人,2009年下降到19.26t/人,2010年又上升到26.61t/人;而文成县历年排放量均为全省各县市区的最小值,在整个研究期间人均碳排放量从1.01t/人缓慢增加到1.56t/人;全省平均值则从2005年的5.37t/人增加到2010年的8.60t/人。

表2 2005 ~ 2010 年人均碳排放变化(单位: t/人)

	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
最大值	14.98	16.55	18.87	21.11	19.26	26.61
最小值	1.01	1.11	1.23	1.33	1.37	1.56
平均值	5.37	6.06	6.86	7.52	7.44	8.60

3 碳排放的空间关联特征

3.1 全局空间自相关特征

从全局空间自相关特征来看(表3),研究期内浙江省碳排放总量、地均碳排放量、人均碳排放量的Moran's I值均为正值,全部年份Z值均通过95%的显著性检验,说明2005~2010年之间浙江省内的碳排放总量、地均碳排放量、人均碳排放量都存在显著的空间正自相关性,碳排放强度水平相似的县市区在省区内集中分布。研究期内Moran's I指数值波动不大,空间集聚态势稳定。

表3 2005 ~ 2010 年浙江省碳排放全局Moran's I 及 Z 值

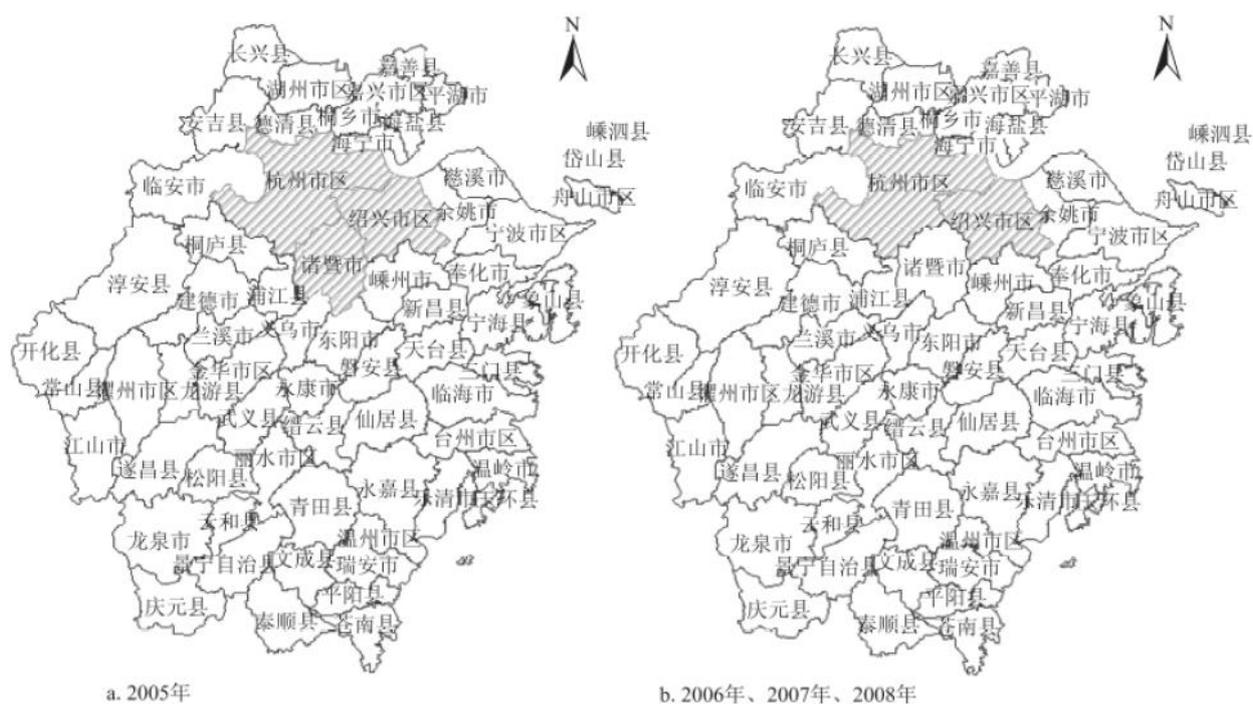
	碳排放总量		地均碳排放		人均碳排放	
	Moran 担 I 指数	z 得分	Moran 担 I 指数	z 得分	Moran 担 I 指数	z 得分
2005	0.15	2.49	0.44	5.82	0.57	6.86
2006	0.15	2.54	0.44	5.83	0.58	7.05
2007	0.15	2.47	0.45	5.95	0.57	6.88
2008	0.14	2.40	0.45	5.88	0.56	6.77 ?
2009	0.13	2.26	0.45	5.97	0.57	6.88
2010	0.14	2.33	0.45	5.92	0.55	6.68

注: $Z(I) > 1.96$, 表明在 5% 的显著性水平下; $Z(I) > 2.58$, 表明在 1% 的显著性水平下。

3.2 局部空间自相关特征

3.2.1 碳排放总量的局部空间自相关特征

如图2, 2005~2010年, 浙江省内未出现碳排放总量低低集聚、高低集聚和低高集聚。2005年, 绍兴市区、杭州市区和诸暨市呈现碳排放总量高高集聚, 2006、2007和2008年的碳排放总量高高集聚区为杭州市区和绍兴市区, 2009年和2010年为杭州市区、绍兴市区和慈溪市。高高集聚区稳定分布在杭州市区和绍兴市区一带, 符合经济学“极化——扩散”效应: 杭州市区与绍兴市区作为碳排放总量的中心区域, 更容易集中和消耗更多的资源, 产生并带动周边县市的碳排放活动。



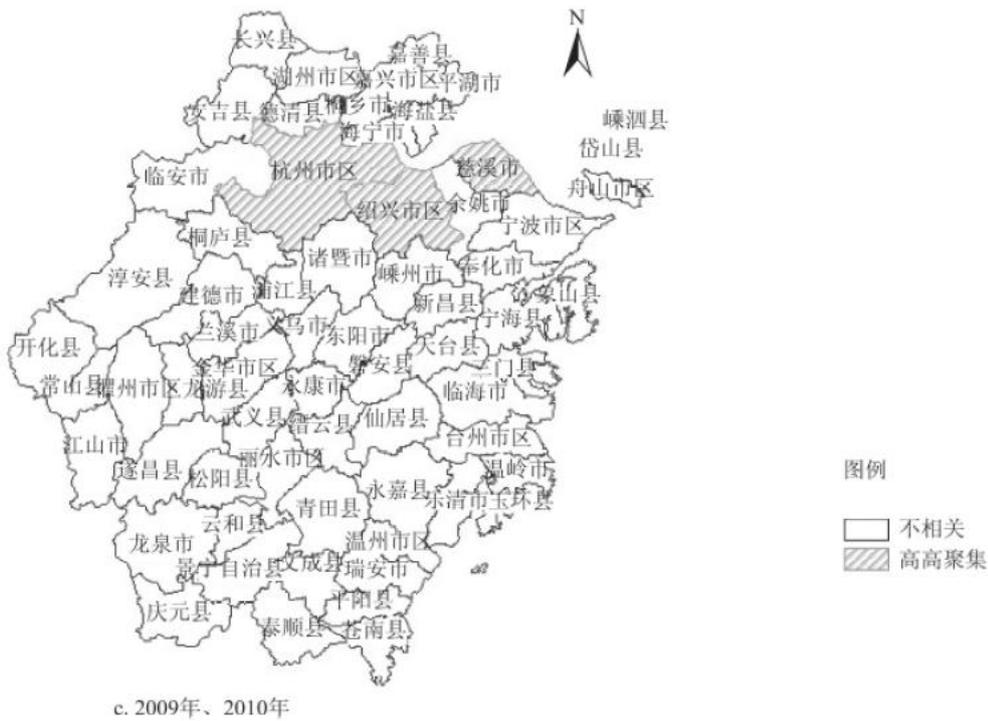
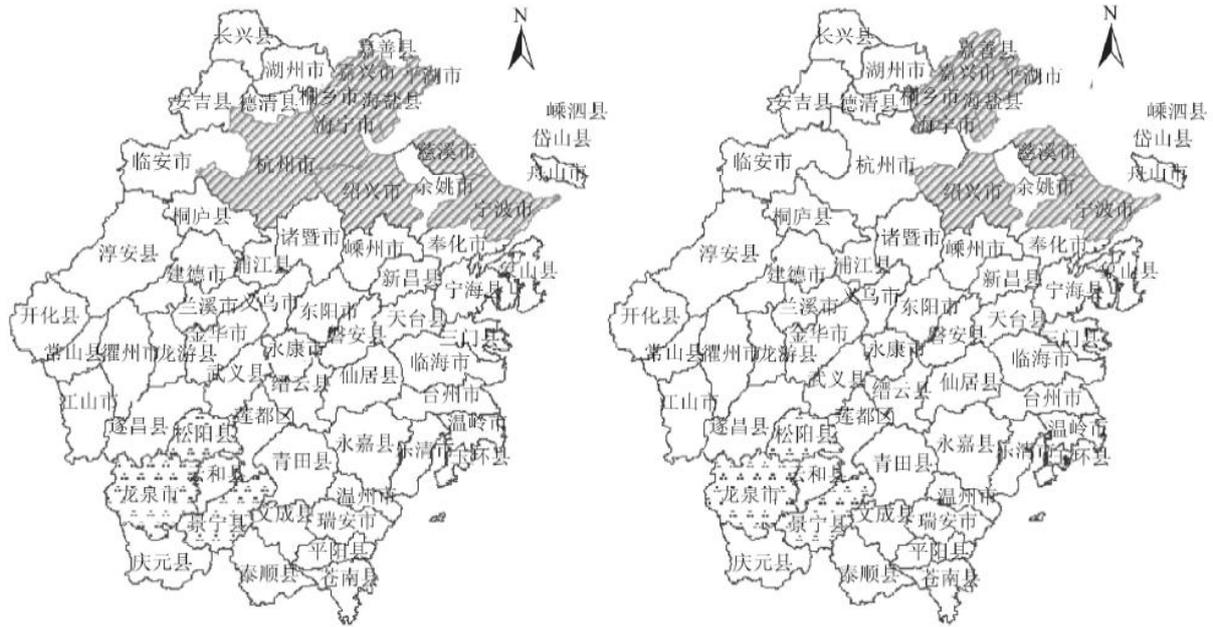


图2 2005~2010年碳排放总量的LISA空间格局

Fig. 2 LISA Spatial Agglomeration Pattern of Carbon Emission from 2005 to 2010

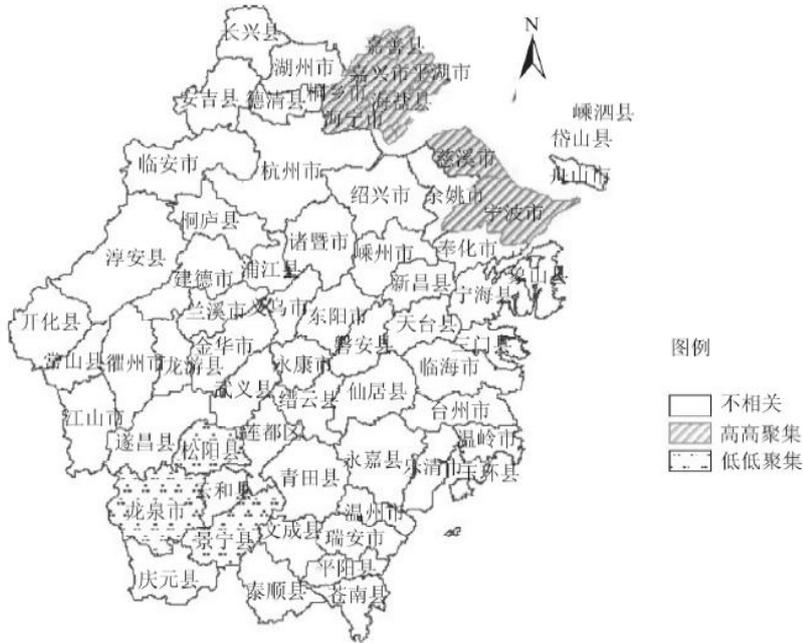
3.2.2 地均碳排放量的局部空间自相关特征

由图3可以看出, 2005~2010年间, 浙江省内未出现显著的地均碳排放量高低集聚和低高集聚。浙东北地区的高高集聚和浙西南地区的低低集聚对浙江地均碳排放量的全局空间自相关贡献较大。高高集聚空间格局比较稳定, 包括嘉兴市区、嘉善县、平湖市、海盐县、海宁市、桐乡市、杭州市区、绍兴市区、慈溪市、宁波市区。稳定的低值集聚区包括遂昌县、龙泉市、景宁县。高高集聚和低低集聚两个地均碳排放特征区空间分异特征显著且覆盖范围稳定。



a. 2005年

b. 2006年、2007年、2008年、2010年



c. 2009年

图3 2005~2010年地均碳排放的空间格局

Fig. 3 LISA Spatial Agglomeration Pattern of Carbon Emission per Unit Area of Land from 2005 to 2010

3.2.3 人均碳排放量的局部空间自相关特征

由图4可知, 2005~2010年间浙江省内未出现显著的人均碳排放量高低集聚和低高集聚。2005~2007年, 嘉兴市区、平湖

市、海盐县、海宁市、杭州市区、绍兴市区、余姚市、慈溪市和宁波市9地呈现出高高集聚。2008年，海盐县从高高集聚区剔除。2009年，高高集聚区继续减少平湖市和绍兴市区两个县市区。2010年高高集聚区增加绍兴市区。低低集聚区则主要集中在浙西南和浙中部分地区。2005年至2009年，临海市、天台县、仙居县、缙云县、松阳县、青田县、龙泉市、景宁县、文成县、庆元县、泰顺县、苍南县12个研究对象呈现出低低集聚。2010年，缙云县被排除出低低集聚区。

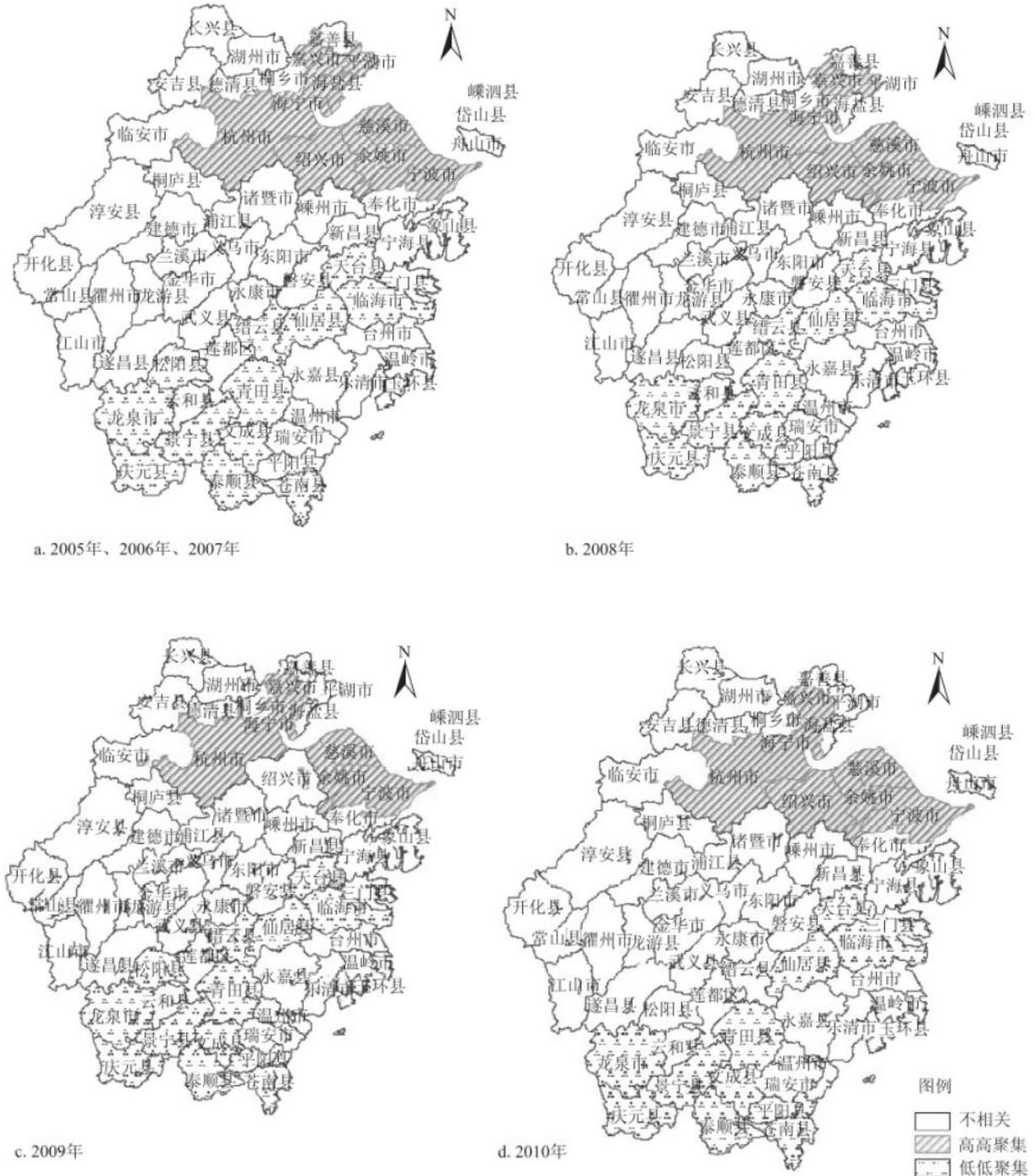


图4 2005~2010年人均碳排放的空间格局

Fig. 4 LISA Spatial Agglomeration Pattern of Carbon Emission per Capita from 2005 to 2010

4 碳排放总量影响因素的空间异质性

我国现阶段经济增长最主要的因素为投资、消费和出口，它们在不同程度上影响了我国碳排放水平。本文选取各研究单元的全社会固定资产投资、人口数量、城镇居民可支配收入、全社会零售总额及消费水平等作为待检核的驱动因素。由于研究范围内各研究单元的产业结构各异，出口情况难以统计，暂未选出口解释变量。先通过最小二乘法将有可能存在影响的驱动因素进行多次组合实践，根据地理加权回归需要解释变量的高方差膨胀因子(VIF)值均小于7.5的要求，逐个删除较高方差膨胀因子(VIF)值的解释变量，直到可以进行下一步计算。最终选取地区人口数量(下文简称人口)与全社会固定资产投资(下文简称投资)作为解释变量。计算结果见表4。

表4 碳排放总量影响因素最小二乘法分析结果

变量	系数(a)	标准差	t 统计量	概率(b)	VIF[c]
截距	10.06	0.237	43.39	0.000 000*	—
In 人口	0.37	0.097	3.97	0.000 192*	2.75
In 固定投资	0.81	0.067	13.26	0.000 000 *	2.75

2005~2010年浙江省各县市区碳排放总量的人口影响因素和投资影响因素的驱动系数见图5。由图可知，首先，人口和投资是各县市区碳排放总量的重要影响因素，且碳排放人口系数位于0.10~0.60区间，投资系数位于0.50~1.10区间，说明对于同一研究单元，投资影响因素对碳排放总量的贡献度大于人口的贡献度。其次，从碳排放投资系数曲线来看，研究期初各县市区投资系数差别不大，至研究期末浙北浙东地区投资系数减小，浙西南地区投资系数增大；从碳排放人口系数曲线来看，期初浙北浙东地区人口系数小于浙西南，至期末浙北浙东地区人口系数增大，浙西南地区减小，浙北浙东地区人口系数大于浙西南。再次，从区域上来看，2005~2010年浙北浙东地区投资系数小幅下降，人口系数大幅上升，但投资系数总体上仍略高于人口系数；浙西南地区则相反，投资系数小幅上升，人口系数大幅下降，投资系数更加明显的高于人口系数；浙中地区的投资系数和人口系数介于浙北浙东和浙西南之间，也是投资系数和人口系数曲线变动的中轴，在2005~2010年期间两者变动都不大。

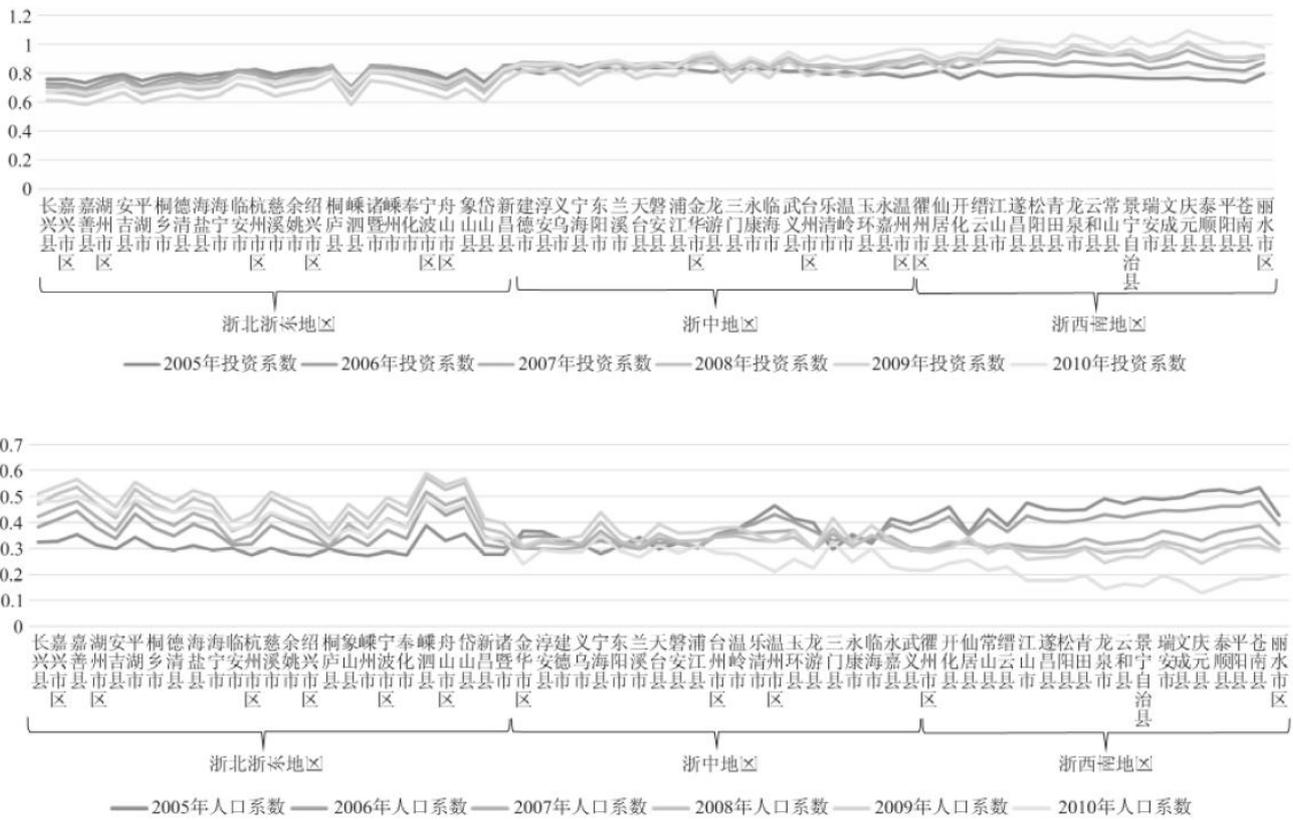


图 5 2005~2010 年碳排放人口系数、投资系数

Fig. 5 Population Coefficient and Investment Coefficient of Carbon Emission from 2005 to 2010

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 2005~2010 年间，浙江省碳排放总量表现出持续增长趋势，从 30486.00 万 t 稳步增加到 49559.00 万 t；人均碳排放量和地均碳排放量存在增长趋势，前者增长幅度大于后者；人均碳排放量和地均碳排放量均存在显著的区域差异。

(2) 空间自相关分析表明，浙江省各地碳排放总量、人均碳排放量和地均碳排放量均存在较强的空间自相关性。碳排放总量在浙北浙东地区呈现高高集聚，地均碳排放量和人均碳排放量呈现出显著和稳定的南北差异，浙北浙东和浙西南地区分别形成明显的高高集聚和低低集聚。

(3) 碳排放影响因素的地理加权回归分析表明，人口和投资因素是影响碳排放总量的重要因素，且投资的影响大于人口，但人口影响力的变化大于投资。碳排放的投资系数和人口系数均存在空间异质性。浙北浙东地区投资的影响逐渐减小，人口的影响增大，浙西南地区则相反，投资的影响增大，人口的影响减小。而人口和投资因素对浙中地区碳排放总量的影响变化不大。

5.2 讨论

根据本文研究结果，2005~2010 年间，浙江省碳排放总量、人均碳排放和地均碳排放均呈增长趋势，碳减排压力大，特别是浙北浙东地区。投资增长对浙西南地区碳排放总量增长的影响逐渐增大。本文采用县市区小尺度研究表明，浙江省内的碳排

放活动异常值集聚区域打破了现有市域界限，应通过上一级部门协调不同县市区之间的经济活动，建立统一而有效的碳减排应对策略。浙北浙东地区作为传统碳排放高值特征区，应限制并转移相关石油化工、生物医药等高能耗行业以调整工业产业结构，抑制区域碳排放过高的集聚效应，促进省内不同功能的县市区之间分工合作和资源优化配置。此外，要促进生产生活方式的转变，增加非化石能源消费的比重，降低人均碳排放。作为碳排放低值特征区的浙西南和部分浙中县市区正处于快速发展阶段，应适度放宽政策限制承接产业转移，并利用碳排放指标等相关监控手段，密切关注产业投资活动所引发的碳排放增长趋势，如通过测算各县市区的碳排放总量的投资驱动系数，统筹安排产业布局。对于部分投资驱动系数增长过快的县市区，应加强投资审核，吸收高科技产业和采用先进管理手段以提高能源利用效率，在实现社会经济效应的同时，合理控制碳排放增长。

参考文献:

- [1] LIU Z. China's carbon emissions report 2015 [J]. Harvard Kennedy School: Cambridge, UK, 2015.
- [2] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [N]. 人民日报, 2016-03-18001.
- [3] 《浙江概述》编撰委员会, 浙江概览(经济卷) [M]. 浙江:浙江人民出版社, 2010: 8-9.
- [4] 刘英, 赵荣钦, 焦士兴. 河南省土地利用碳源/汇及其变化分析 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 154-157.
- 【LIU Y, ZHAO R Q, JIAO S X. Research on carbon sources /sinks of land use of He'nan province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 154-157.】
- [5] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.
- 【DENG J X, LIU Z, WANG Z. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO₂ emission [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(2): 189-200.】
- [6] 孙昌龙, 靳诺, 张小雷, 等. 城市化不同演化阶段对碳排放的影响差异 [J]. 地理科学, 2013, 33(3): 266-272.
- 【SUN C L, JIN N, ZHANG X L, et al. The impact of urbanization on the CO₂ emission in the various development stages [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3): 266-272.】
- [7] KUIK O, GERLAGH R. Trade liberalization and carbon leakage [J]. Energy Journal, 2003, 24(3): 97-120.
- [8] TUNG I, T-R-T-AS'IKS, AKBOSTANCI E. CO₂ emissions vs. CO₂ responsibility: an input-output approach for the Turkish economy [J]. Energy Policy, 2007, 35(2): 855-868.
- [9] BABIKER M H. Climate change policy, market structure, and carbon leakage [J]. Journal of International Economics, 2005, 65: 421-445.
- [10] 李建豹, 黄贤金, 吴常艳, 等. 中国省域碳排放影响因素的空间异质性分析 [J]. 经济地理, 2015, 35(11):

【LI J B, HUANG X J, WU C Y, et al. Analysis of spatial heterogeneity impact factors on carbon emissions in China [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(11) : 21-28. 】

[11] 刘佳骏, 史丹, 汪川. 中国碳排放空间相关与空间溢出效应研究 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30 (8) : 1289 - 1303.

【LIU J J, SHI D, WANG C. A Study on spatial spillover and correlation effect of carbon emissions across 30 provinces in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8) : 1289-1303. 】

[12] 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. Spatiotemporal dynamics of carbon intensity from energy consumption in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 68(10) : 1418-1431. 】

[13] 丛建辉, 朱婧, 陈楠, 等. 中国城市能源消费碳排放核算方法比较及案例分析——基于“排放因子”与“活动水平数据”选取的视角 [J]. *城市问题*, 2014, (3) : 5-11.

【CONG J H, ZHU J, CHEN N, et al. Comparison and case analysis of accounting calculation methods for urban energy consumption in China——based on the perspective of “emission factor” and “activity level data” [J]. *Urban Problems*, 2014, 03: 5-11. 】

[14] 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. 】

[15] 徐建华. 地理建模方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010:84-104.

【XU J H. Geography modeling method [M]. Beijing: Science Press, 2010: 84-104. 】

[16] 陈江平, 张瑶, 余远剑. 空间自相关的可塑性面积单元问题效应 [J]. *地理学报*, 2011, 66(12) : 1597-1606.

【CHEN J P, ZHANG Y, YU Y J. Effect of MAUP in spatial autocorrelation [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 66(12) : 1597-1606. 】

[17] 沈体雁. 空间计量经济学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.

【SHEN T Y. Space econometrics [M]. Beijing: Peking University Press, 2010: 25-59. 】

[18] 武红. 中国省域碳减排: 时空格局、演变机理及政策建议——基于空间计量经济学的理论与方法 [J]. *管理*

世界, 2015(11) : 3—10.

【WU H. Carbon emission reduction in China: spatiotemporal patterns, evolution mechanism and policy advice ——theory and method based on spatial econometrics [J]. Management World, 2015(11) : 3—10. 】

[19] 吴玉鸣, 李建霞. 基于地理加权回归模型的省域工业全要素生产率分析 [J]. 经济地理, 2006, 26(5) : 748—752.

【WU Y M, LI J X. Factor productivity based on geographical weighted regression model [J]. Economic Geography, 2006, 26(5) : 748—752. 】