

1990-2014年泛长三角地区能源利用碳排放时空格局及影响因素

陈江龙^{1,2}, 李平星^{1,2*}, 高金龙^{1,2,3}

(1. 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:区域碳排放时空格局及其关键影响因素是近年来学者们关注的热点。本文以中国经济发达、经济关联密切、产业格局变化剧烈的泛长三角地区为案例,分析1990年以来典型年份碳排放的空间分异、时间演变,解析碳排放空间分异的关键影响因素。结果表明:①区域碳排放总量快速增长,总体格局稳中有变,核心区16个城市排放量占比大都超过50%。②以2005年为拐点,之前外围城市增长幅度较低,之后外围城市碳排放量快速增长;外围地区碳排放量占比从2005年的33%快速增加至2014年的47%,区域碳排放量的空间集聚度呈现先增后减的态势。③碳排放格局变化受多种因素影响,不同变量对碳排放的影响各异。其中,工业生产、城镇化建设及人口集聚仍是现阶段泛长三角地区最主要的碳排放来源;固定资产与外商投资对区域碳排放的作用呈增强趋势,但其作用强度较工业生产、城镇化建设、人口集聚要小。地区生产总值对碳排放影响存在倒U型关系,随着经济发展水平的提高,碳排放与经济发展呈现脱钩趋势。研究结果可为揭示经济发展格局变化的环境效应、制定节能减排政策提供参考。

关键词:碳排放;空间分异;时间演变;影响因素;泛长三角

1 引言

随着人类活动范围和强度的不断增加,人为因素对全球环境变化的重要影响也越来越受重视(Messerli et al, 2000; 陆大道, 2011)。人类活动导致的能源消费量和碳排放量的不断增加被认为是近年来全球变暖的重要原因,受到政府管理人员、公众和研究者的普遍关注(张雷, 2003; 王锋等, 2010; 郝珍珍等, 2013; 高长春等, 2016; 王喜等, 2016)。其中,对于碳排放格局的区域差异、时间演变和影响因素等问题的研究,是当前学术界关注的重点和热点之一(张雷等, 2010; 邓吉祥等, 2014)。目前,学者们对碳排放区域差异和时间演变的关注主要集中在跨国、国家及区域尺度,特别是跨国尺度的研

究是国际社会关注的重要领域,成为全球气候变化和碳排放权分配的重要依据(丁仲礼等, 2009)。研究普遍认为,早期的碳排放主要来源于西方发达国家,近年来以“金砖国家”为代表的发展中国家占据了全球碳排放的主要新增份额(Boden et al, 2010; IEA, 2013)。因此,经济快速增长的发展中国家受到学者们的广泛关注,中国就是其中之一。学者们以不同类型的分区或省份为研究对象,通过碳排放总量、强度、人均排放量、排放密度等指标,揭示了中国不同地区之间的碳排放格局及其时间变化。其中,省域层面数据更易获取,对区域差异的揭示也更加深入,为学者持续关注的重点(曲建升等, 2010; Zhang et al, 2011; 舒娱琴, 2012; 宋德勇等, 2013)。在此基础上,还开展了针对不同区域的研

收稿日期:2016-09;修订日期:2016-11。

基金项目:国家自然科学基金项目(41130750, 41401187) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41130750, No.41401187]。

作者简介:陈江龙(1974-),男,福建厦门人,博士,副研,硕导,主要从事区域发展与土地利用研究,E-mail: jlchen@niglas.ac.cn。

通讯作者:李平星(1982-),男,山东泰安人,博士,副研,主要从事生态评价与区域可持续发展研究,E-mail: pxli@niglas.ac.cn。

引用格式:陈江龙, 李平星, 高金龙. 1990-2014年泛长三角地区能源利用碳排放时空格局及影响因素[J]. 地理科学进展, 35(12): 1472-1482. [Chen J L, Li P X, Gao J L. 2016. Spatiotemporal patterns and influencing factors of carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990-2014[J]. Progress in Geography, 35(12): 1472-1482.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.12.004

究,如东中西部(徐大丰, 2010; Clarke-Sather et al, 2011)、八大经济区域(邓吉祥等, 2014)等。近年来,以典型区域或省份为对象的研究也受到关注,如长江经济带、长三角等地区(李平星等, 2013; Song et al, 2015; 黄国华等, 2016)或河南、湖南等省份(王喜等, 2016; 刘贤赵等, 2017)。在碳排放时空格局演变研究的基础上,学者从自然地理条件、资源禀赋、经济社会等视角对影响因素开展研究。通常认为,经济发展水平、产业结构以及能源消费强度与结构等是影响区域综合碳排放格局的关键所在(曲建升, 2010; 康文星等, 2012; 杨骞等, 2012; 李建豹等, 2015; 黄蕊等, 2016)。

从已有研究看,针对中国碳排放的研究主要集中于省级或以省域数据为基础的大区域研究,所揭示的格局较为宏观(邓吉祥等, 2014)。城市作为经济增长和产业发展的空间载体,其对碳排放水平的影响也同样值得关注(Stern, 2007; 李平星等, 2013; Su et al, 2014)。城市间碳排放的时空格局及影响因素是研究的重点,如张秀梅等(2010)、王喜等(2016)、刘贤赵等(2017)对江苏、河南、湖南等特定省份内各市碳排放开展了比较研究。此外,全国或典型区域内城市碳排放的比较研究也受到关注,如李平星等(2013)研究了泛长三角地区城市能源消费碳排放的时空格局,但仅以工业能源消费为对象,未涵盖全部的能源消费;Su等(2014)研究了全国范围内城市碳排放的时空差异,但采用的是间接数据。可见,大区域内的城市比较研究仍然较少,有待深入。

泛长三角地区包括上海、江苏、浙江、安徽、江西四省一市,面积51.96万km²,设区市53个,为长江三角洲核心区及其直接辐射带动的区域,也是全国经济社会发展水平最高的地区之一。近年来,长三角核心区^①资源环境压力趋大、产业转型升级需求日渐迫切,产业转移的速度和规模越来越大,部分产业向空间邻近、劳动力丰富的安徽、江西及苏北、浙西等省区转移。随着产业转移范围的不断扩大、转移量不断增加、区域发展的空间格局不断变化,能源消费及碳排放格局也发生相应的变化。本文以泛长三角地区为案例区,以市为研究单元,分析全部能源利用碳排放的时空差异及其演变规律,定量解析关键影响因素,为制定相应的能源消费与碳减排政策提供科学依据,进而服务未来产业转型

与区域发展格局优化。

2 研究思路与主要方法

2.1 研究思路与数据核算

为准确把握各城市能源消费导致的碳排放时空演变特征,以泛长三角地区的设区市为基本研究单元,运用ESDA分析方法,计算1990年以来典型年份各市全部能源消费导致的碳排放总量,核算各市碳排放量及其占区域总量的比重,分析碳排放时空格局演变,并解析关键的影响因素。以4-5年为时间段,选择1990、1995、2000、2005、2010和2014年为6个典型年份;主要能源包括原煤、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油、其他石油制品等。鉴于电力、热力生产导致的能源消费已基本包含在上述主要能源消费中,外来电力导致的能源消费和碳排放不在本地发生,故暂不考虑电力和热力消费导致的碳排放。各市碳排放根据IPCC(2006)确定的各类能源的碳排放系数和各市全部能源消费量进行核算(表1)。

由于历史年份能源消费数据的可获得性不同,故根据数据的实际情况进行方法调整,核算各市能源消费和碳排放。数据获取和碳排放计算借鉴了李平星等(2013)的研究方法。需要指出的是,其研究侧重于解析工业产业转移对工业领域能源消费和碳排放的影响,而本文则全面地分析包含工业消费在内的全社会能源消费及其碳排放。

2.2 碳排放格局分析方法

2.2.1 碳排放及其变化

碳排放量是指各市不同年份碳排放的绝对量,

表1 各种能源的碳排放系数
Tab.1 Coefficient of carbon emission of different kinds of energy

能源类型	碳排放量/ (kg·C/kg标准煤)	能源类型	碳排放量/ (kg·C/kg标准煤)
原煤	0.7559	柴油	0.5714
洗精煤	0.7559	燃料油	0.6185
焦炭	0.8550	液化石油气	0.5042
焦炉煤气	0.3548	炼厂干气	0.4602
其他煤气	0.3548	天然气	0.4483
原油	0.6449	其他石油制品	0.5857
汽油	0.5538	其他焦化产品	0.6449

①长三角核心区包括上海,江苏的南京、镇江、常州、无锡、苏州、扬州、泰州、南通,浙江的杭州、嘉兴、湖州、宁波、绍兴、台州、舟山,共16个城市。

以变化速度表征各城市的碳排放变化,即各市相邻年份之间碳排放变化的幅度(S),计算公式为:

$$S=(E_t-E_0)/(E_0 \times t) \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_t 指某城市 t 年份的碳排放量; E_0 指相应城市初始年份的碳排放量; t 是指从0到 t 的年份跨度。

2.2.2 空间集中度

借鉴基尼系数概念构建空间集中度指标,用以衡量区域尺度碳排放总量及其变化的空间分布特征(马荣华等, 2007)。以各年份为对象进行评价,计算公式为:

$$G_j = \sum_{i=1}^n \left| D_{ij} - \frac{D_j}{n} \right| \left/ \left[\sum_{i=1}^n D_{ij} + (n-2) \frac{D_j}{n} \right] \right. \quad (2)$$

式中: G_j 表示 j 年份的基尼系数; D_{ij} 表示第 i 个城市 j 年份的碳排放量; D_j 表示全区 j 年份的碳排放总量; $j=1\sim 6$,分别表示1990、1995、2000、2005、2010和2014年6个典型年份; n 表示城市数量, $n=53$ 。 G_j 值介于0~1之间,越大说明集中度越高。

2.2.3 空间自相关指数

为进一步揭示区域碳排放总量的空间依赖、空间关联或空间自相关特征,引入空间自相关指数,其计算公式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: I_i 为Moran's I 指数,常被用于度量区域 i 与其周边地区之间的空间差异程度及其显著性。 I_i 的取值范围为 $[-1, 1]$,小于0表示负相关,值越小,相关性越高;等于0表示不相关;大于0表示正相关,值越大,相关性越高; x_i 和 x_j 分别是位置 i 和 j 处的观测值(本文指各市的碳排放量); \bar{x} 为观测值 x_i 在所有位置处的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵($n \times n$); n 为城市数量。

进一步借助Geoda 095i软件,采用Moran散点图区分某一区域碳排放总量与其相邻区域之间的相对高低关联关系;同时结合散点图与LISA显著性水平,得到Moran显著性水平图。

3 泛长三角地区碳排放时空格局

3.1 碳排放总量及其区域差异

1990年以来,泛长三角地区碳排放总量持续增加,从1990年的1.39亿t增加到2014年的8.44亿t,增长了5.07倍。除上海外,其余4个省份的碳排放

量均明显增加,江苏、浙江、安徽、江西分别增长了2.59、1.48、1.70和0.75亿t。2010年前,上海呈现增长态势,2010年的排放量较1990年增长了2.15倍;但2014年碳排放量略有下降,从2010年的8221万t下降至8058万t。从比重情况看,上海所占比重持续下降,江苏、浙江先增后减,而安徽和江西则先减后增。其中安徽变化最为明显,2010年碳排放总量超过浙江,仅次于江苏,成为泛长三角地区排放总量第二大省(图1)。

从区域层面分析,长三角核心区16个城市碳排放总量占研究区域比重一直维持在一半以上,是区域碳排放总量的最主要来源(表2、图2)。2005年以前,核心区城市碳排放增量较大,占全地区碳排放的比重持续增加,2005达到峰值(67%);之后外围区域城市碳排放增速加快,从2005年的33%增长至2014年的47%(表2)。对城市而言,上海及其周边城市碳排放量最高,尤其是上海、苏州、宁波等,2014年的排放量在4000万t以上,但与2010年相比,上海、宁波的排放量有所下降。外围城市的碳排放量较低,大部分城市的排放量在1000万t以下(图2),但其增速较快,呈现快速增长的态势。1990-2014年6个典型年份的集中度系数分别为0.39、0.40、0.42、0.45、0.39和0.33,呈现先增后减的态势,表明2005年以前,碳排放高值区的增量更大,使得集中度系数进一步增加;2005年后,外围低值区的增量较大,导致空间集中度有所下降。

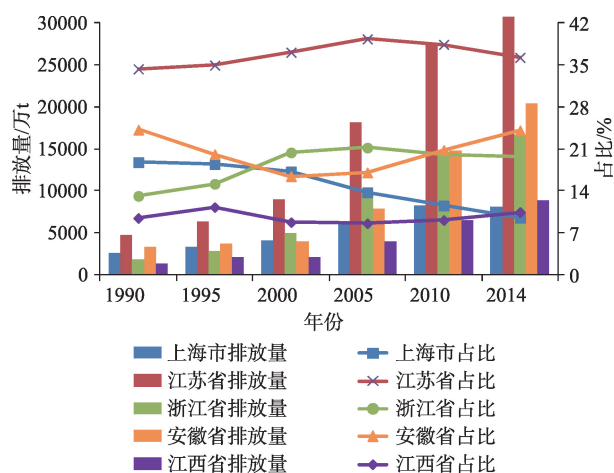


图1 典型年份泛长三角地区碳排放量及占比变化

Fig.1 Total amount and proportion of carbon emissions of the four provinces and Shanghai Municipality in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014

表2 典型年份泛长三角地区核心区和外围区碳排放量及占比变化

Tab.2 Total amount and proportion of carbon emissions of the core and the peripheral areas in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014

项目		1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	2014年
核心区	总量/万t	8115.51	11206.87	15751.26	30915.65	43018.76	45176.17
	占比/%	58.41	61.16	65.39	66.76	60.41	53.38
外围区	总量/万t	5778.77	7115.84	8335.69	15396.11	28192.70	39461.95
	占比/%	41.59	38.84	34.61	33.24	39.59	46.62

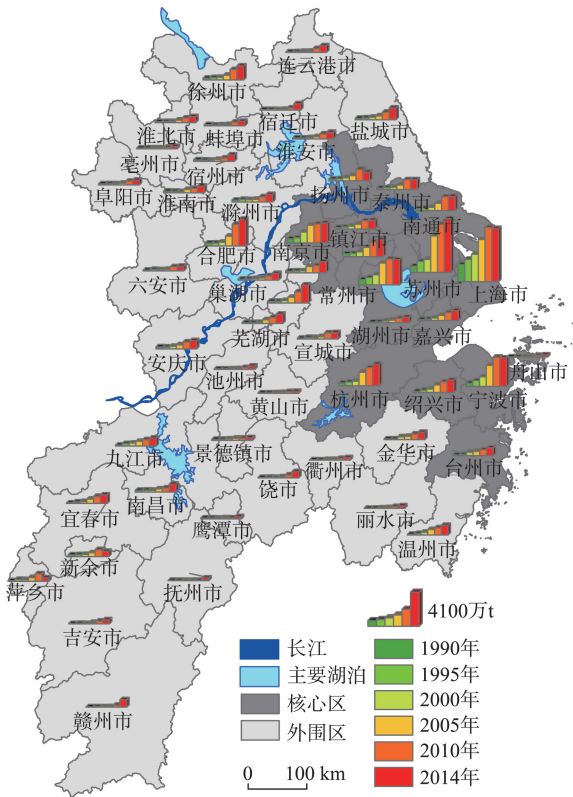


图2 典型年份泛长三角地区各市碳排放量
Fig.2 Total amount of carbon emissions of all cities in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014

3.2 碳排放量变化的格局演变

为进一步揭示碳排放量变化的时空演化规律,采用ArcGIS软件中的自然断裂(natural breaks)法对各市的变化速率进行分类,结果表明:1990-1995年,高变化散布在核心区和外围区,但以浙江沿海和江苏、江西的沿江地区较为集中;1995年以后,高变化区开始逐渐向外围地区蔓延。但是,各阶段高变化区的分布不同,1995-2000年主要集中在浙南地区,2000-2005年转向更外围的赣南、赣东北和皖中地区,2005-2010年主要集中在苏北和皖北,2010年后向更加外围的赣南地区转移(图3)。这与城市碳排放变化速率的空间自相关分析结果类似,高一

高集聚区基本上在外围地区移动,而低—低集聚区稳定分布于外围地区,表明外围城市的变化速度分异明显(图4)。

4 泛长三角地区碳排放的影响因素

4.1 变量选择与模型构建

已有研究普遍认为,碳排放总量受经济社会发展水平、能源消费总量和结构、产业结构、人口、投资等因素的影响(张雷, 2003; 王锋等, 2010; 赵欣等, 2010; 刘晓燕等, 2012; 黄蕊等, 2016)。基于此,本文选用直接或间接与上述因素相关的指标,主要涉及经济总量与投资规模、工业化与城镇化发展阶段、能源消耗等3个方面,包括:地区生产总值(GDP)、工业增加值(IND)、重工业增加值(HEA)、能源消费总量(ENE)、常住人口总量(POP)、城镇化率(URB)、外商直接投资(FDI)、固定资产投资(FIX)等8项具体指标。其中,常住人口总量来源于2010年全国第六次人口普查数据,其他指标数据均根据各地2011年统计年鉴整理。考虑数据可获性,以2010年为例,采用定量分析方法揭示各因素对区域碳排放总量的影响机制。

首先通过各变量与碳排放之间相互关系的可视化分析,确定单变量的预测模型;然后借鉴统计学中的Stacking非线性组合模型对全部变量的综合影响进行模拟。非线性组合模型实质就是建立各单项模拟结果与实际值之间非线性关系函数 Φ ,通过集成各单一模型的优点,有效提高综合模型的模拟精度(Collobert et al, 2002; 张豪等, 2010),同时普通线性组合权重难确定、模型失效等问题也迎刃而解。非线性组合模型的具体数学表达形式为:

$$\hat{y} = \Phi(f_1(x), f_2(x), \dots, f(c)), \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

式中: \hat{y} 为组合模型模拟值; $f_i(x)$ 为第*i*个单项模拟模型; Φ 为非线性函数,是对各单项模拟值与实际输出值之间依赖关系的逼近。

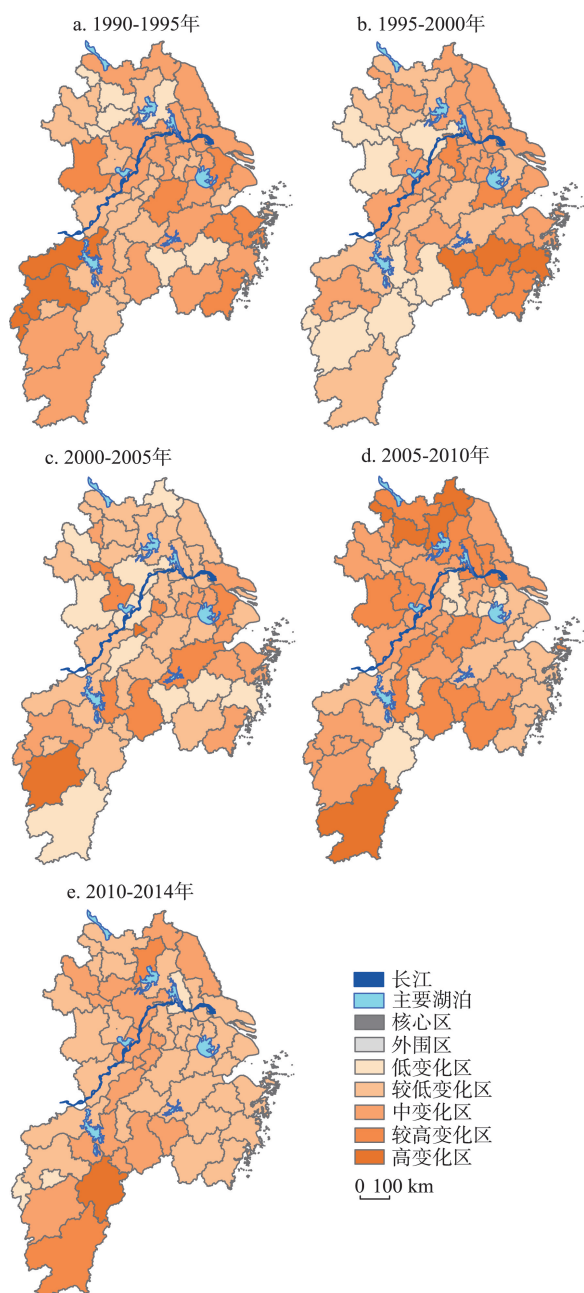


图3 典型年份间泛长三角地区各市碳排放变化速率分类

Fig.3 Classification of the change rate of carbon emissions for cities in the Pan-Yangtze River Delta region between 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014

4.2 模型结果分析

首先,由各影响因素与碳排放总量的全局空间自相关分析可知,碳排放总量与经济总量和产业结构之间的相关性最高,地区生产总值、工业增加值、重工业增加值因素 Moran's I 指数均为 0.40,表明经济发展是导致区域能源消费和碳排放量的关键因素(表3)。由于各影响因素与碳排放量具有较高的

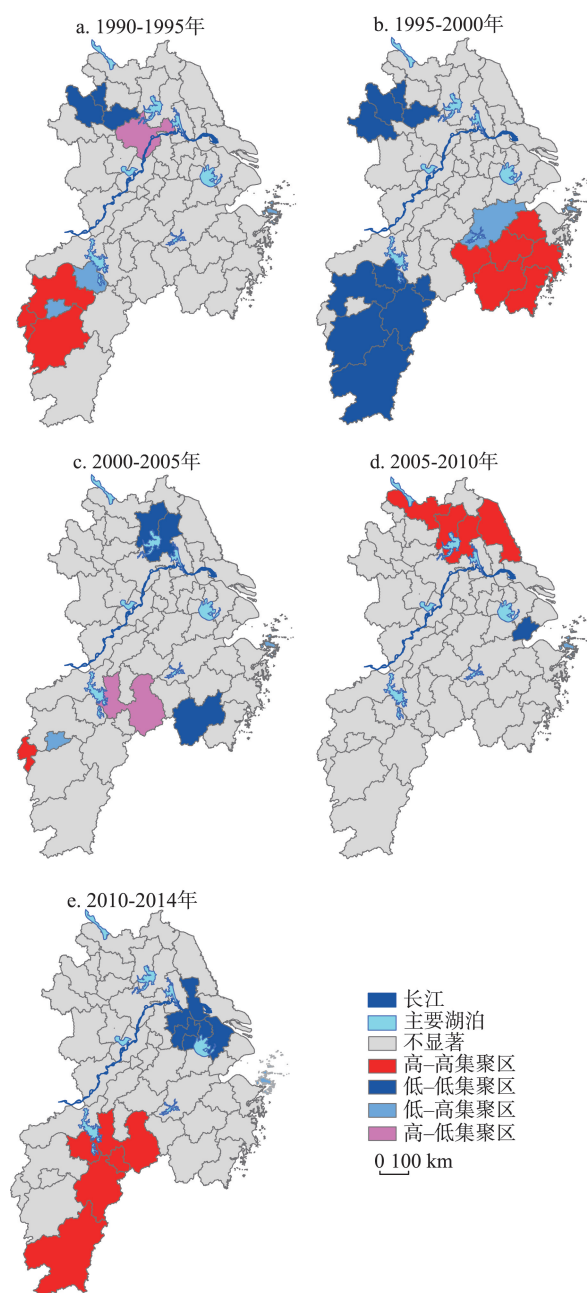


图4 典型年份间泛长三角地区各市碳排放变化速度 LISA 聚类图

Fig.4 LISA cluster maps of city-level carbon emission change rate in the Pan-Yangtze River Delta region between 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014

正相关性,因此大部分集聚特征比较明显的区域表现为高—高集聚和低—低集聚(图5)。其中,经济社会发展水平较高的长三角核心区是高—高值区的主要分布区域,表明这些城市经济发达、人口密集、能源消费量大,碳排放量较高;而皖南、江西等地区的城市则相反,是低—低值区的主要分布区域。另外2种类型区中,高—低值区的特征为碳排放量高

表3 2010年泛长三角地区碳排放量与各影响因素的全局Moran's I指数

因素	地区生产总值	工业增加值	重工业增加值	能源消费总量	常住人口总量	城镇化率	外商直接投资	固定资产投资
指数值	0.40	0.40	0.40	0.39	0.28	0.30	0.39	0.33

而经济社会发展水平较低,零星分布于外围地区,这些城市碳排放值较高,能源的消耗量较大,能源利用效率不高,产业发展较为粗放;低—高值区的特征为碳排放量低而经济发展水平较高,主要分布于高一高值区外围,这些城市能源与产业结构均较轻、利用效率较高。

其次,通过分析各影响因素与碳排放总量关系的散点图发现,不同变量对区域碳排放影响所呈现出的阶段特征各异(图6)。其中,地区生产总值与碳排放总量之间呈明显的倒U型关系,即随着经济持续发展,区域碳排放呈“先增后减”的脱钩趋势,这可能因为地区生产总值增加的同时,产业结构有所优化,使得对能源消费和碳排放依赖性较低的服务业占比稳步提升;工业生产对碳排放的贡献基本呈线性增长,尤其重工业发展仍是泛长三角地区碳排放的最主要来源;能源消费对碳排放的影响也类似,表明工业发展和能源消费仍然是导致碳排放增加的最主要原因;常住人口对碳排放的影响表现为

S型,可能的原因是当人口规模较小时,人口增长的外部性会使得碳排放降低,而当人口规模达到一定水平后,继续增长又会导致碳排放增加,直至拐点;城镇化率的影响呈指数型,表明当城镇化率达到一定水平后,继续提高城镇化水平将导致碳排放的加速增长,这与城镇化带来高质量生活和较多的能源消费有关;外商直接投资对碳排放的影响呈直线型,意味着未来外资增加对碳排放影响仍会加大;固定资产的影响呈平方型,较高的固定资产投资带来较快的经济发展,导致能源需求和碳排放增加。

最后,采用组合模型将各影响因素根据图6所呈现出的函数关系进行变换,将变换后的变量与碳排放总量构建模型,并与逐步回归OLS模型结果进行比较(表4)。首先,3个逐步回归模型对区域碳排放总量的解释均超过65%。尤其是能源消费与投资(模型II),能解释近80%的碳排放总量;其次为工业化和城镇化水平(模型III),解释力也超过70%,社会经济发展(模型I)对碳排放总量的影响相对较弱,

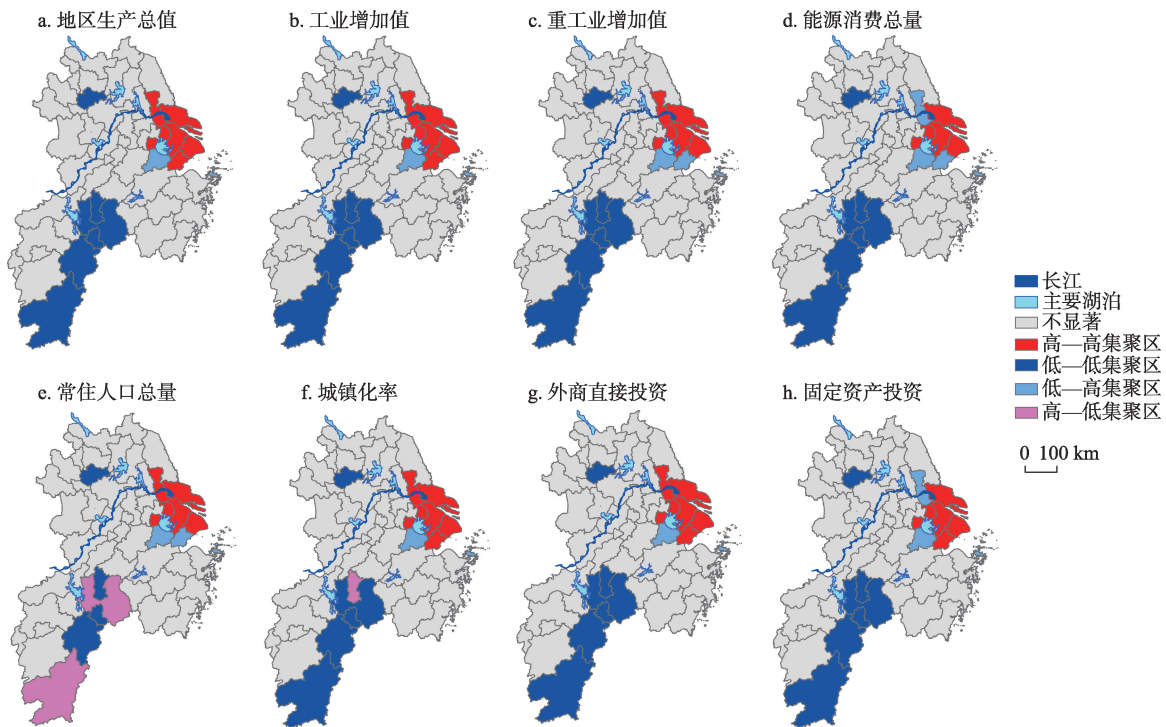


图5 2010年泛长三角地区各市碳排放量与各影响因素的LISA聚类图

Fig.5 LISA cluster maps of the influencing factors of carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region in 2010

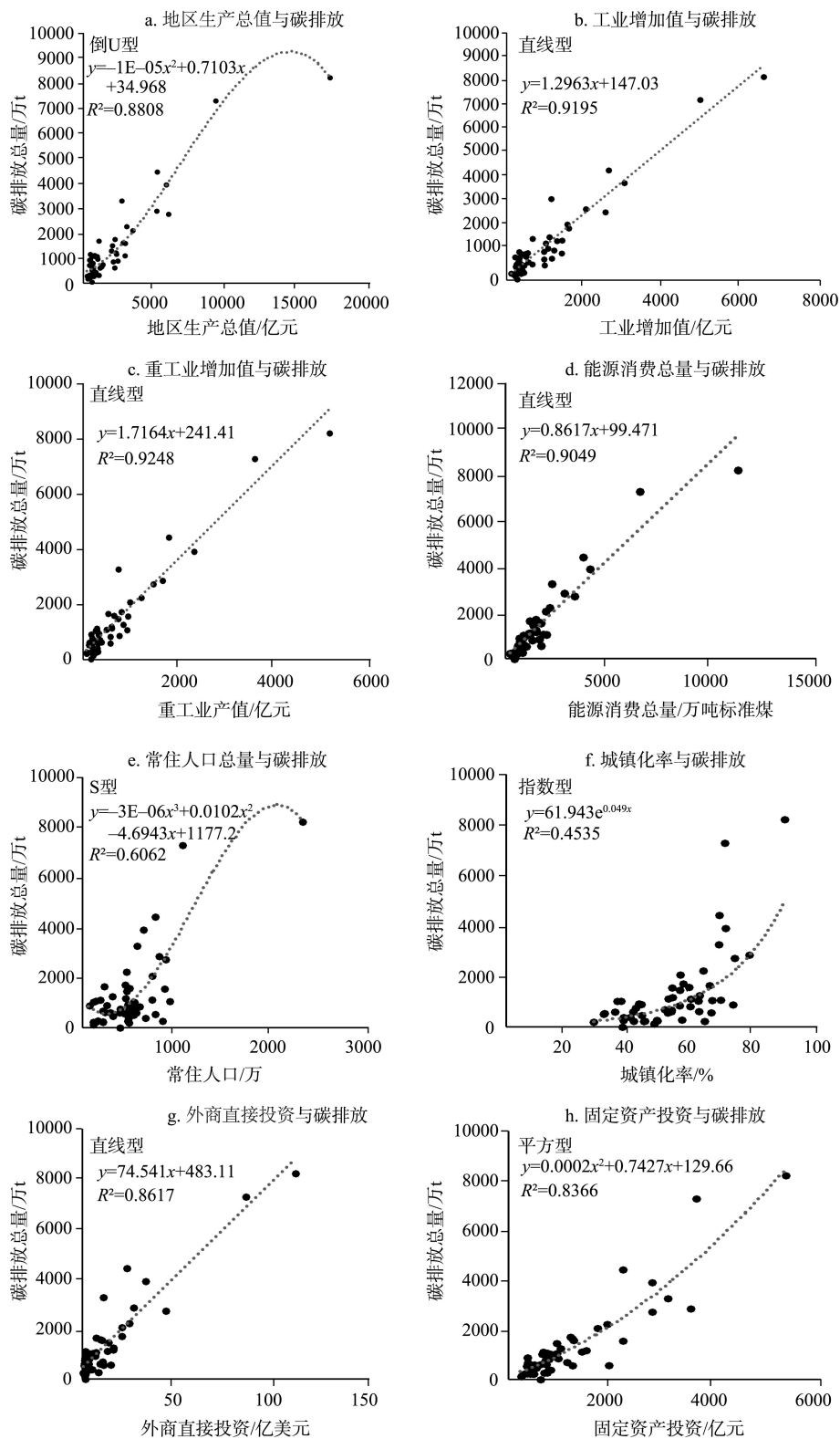


图6 2010年泛长三角地区碳排放总量与影响因素关系的碎石图

Fig.6 Scree plot of the relations between carbon emissions and the influencing factors in the Pan-Yangtze River Delta region in 2010

因为目前泛长三角地区的能源消耗和产业发展仍然是碳排放的最直接来源。从投资结构看,外商直接投资对碳排放总量的影响较为显著,而固定资产

投资的影响并不显著,可能原因是泛长三角地区外商投资以产业投资为主,而固定资产则主要投向城市实体空间的建设与维护,对碳排放的贡献也较产

表 4 2010 年泛长三角地区碳排放总量影响因素回归结果

Tab.4 Results of regression analysis between the influencing factors and carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region in 2010

变量	OLS 逐步回归模型			Stacking 法非线性组合模型		
	模型 I	模型 II	模型 III	估计值	标准误	95%置信区间
地区生产总值	0.586**			-0.291	0.181	-0.657~-0.074
工业增加值			0.071	0.001	0.000	0.001~0.001
重工业增加值			0.526***	0.318	0.244	-0.173~-0.809
能源消费总量		0.927***		1.182	0.229	0.722~1.642
外商直接投资		0.104**		0.002	0.113	-0.226~-0.229
固定资产投资	0.480**	0.026		0.322	0.095	0.130~0.514
常住人口总量	0.699**		0.406**	-0.222	0.073	-0.370~-0.074
城镇化率			1.099**	-0.061	0.016	-0.093~-0.028
调整 R ²	0.681	0.798	0.719	0.963		

注: *、**、*** 分别表示 $P<0.10$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

业投资弱。从产业结构分析,工业增加值对碳排放总量的影响不显著,而重工业则具有极显著影响,可能原因是轻工业与重工业相比能源消耗较小,从而使全部工业总产值对碳排放的影响减弱。

进一步采用 Stacking 法非线性组合模型进行拟合得到的调整后决定系数为 0.963,明显优于逐步回归模型。根据组合模型结果可以发现,全部变量均在 95%置信区间显著,而且工业增加值的拟合标准误差最小,其他依次为城镇化率、常住人口总量、固定资产投资、外商直接投资、地区生产总值、能源消费总量和重工业增加值。表明工业生产、城镇化建设、人口集聚是泛长三角地区碳排放最主要的驱动要素。固定资产与外商投资则分别通过促进生产与建设间接影响碳排放,预测误差也较前三者稍大;地区生产总值对碳排放影响本身存在倒 U 型趋势,因此据此得到的预测标准误差会高于其他变量;而重工业预测误差最大,可能原因是由于泛长三角地区的城市产业结构存在较大差异,虽然重工业是苏北和浙江沿海等地重要的碳排放来源,但在其他内陆城市,重工业占工业总产值比重偏小,不能成为主要碳源。

5 结论与讨论

本文以经济发展水平高、经济活动关联度大的泛长三角地区为案例,从区域尺度出发,分析 1990 年以来全部能源消费导致的碳排放空间格局时空演变,定量解析关键影响因素,主要结论与建议如下:

(1) 近 20 年来,泛长三角地区碳排放总体格局稳中有变。其中,稳定性表现为:碳排放高值区集中在核心区 16 个城市,核心区碳排放量占整个区域碳排放量的比重虽先增后降,但是各年份的占比大都保持在 50% 以上;而变化性则主要体现在:2005 年以后,外围区城市碳排放量增速明显高于核心区城市,导致外围区各城市占整个区域碳排放量的比重基本均增加,而核心区各城市以减少为主。虽然核心区大部分城市的占比有所下降,但排放量下降的不多,上海、无锡等市除外。以上海为例,虽然工业领域碳排放量在 2010 年出现下降(李平星等, 2013),但是全部能源消费碳排放量直到 2014 年才出现下降。这种演变趋势可能与产业结构优化、能源利用效率提升等有关,但具体原因还需针对性研究。

(2) 长三角核心区经济总量和人口规模大,能源消费多,是碳排放的主要区域。近年来,外围地区大量承接核心区产业转移,经济增长快速,与之相关的能源消费也向外围地区倾斜,使得外围地区能源消费和碳排放量集聚增加。在这种情况下,外围地区工业能源消费对碳排放的贡献越来越大,而核心区碳排放的主要来源将会由工业能源消费逐步转向与生活直接或间接相关的能源消费。不同区域碳排放来源的空间异质性日益明显,需要采取差别化的调控政策。

(3) 泛长三角地区碳排放格局受到多种因素的影响,而且不同变量对碳排放的影响各异。从 2010 年解析结果看,工业生产、城镇化建设及人口集聚仍是现阶段泛长三角地区最主要的碳排放来源;固

定资产与外商投资对区域碳排放的作用关系呈增加趋势,但其作用强度较前三者要小;地区生产总值对碳排放影响本身存在倒U型趋势,尤其随着上海等经济发达地区的产业结构向服务化转型,由于经济结构优化对碳排放的影响也随着经济发展水平的提高而逐渐减弱,呈现脱钩趋势。

基于上述结论,本文提出以下泛长三角地区推进节能减排的政策建议:推进产业结构的优化升级是降低碳排放的重要方向,尤其服务业的快速发展有助于加速经济产出与碳排放的脱钩;在产业转移过程中,要将产业升级与产业转移紧密结合,同时推进技术升级,提高能源利用效率,避免出现产业承接区能源消费和碳排放相应快速增长的局面。

在未来的研究中仍有一些方面需要进行深化:各市、各地区之间由于经济联系、能源输送等导致的碳排放跨区域转移问题,如本区域所需的大量电力是通过输电线从中西部输送来的,电力的生产地和消费地的空间分离导致了碳排放的跨区域转移;生产和生活领域的能源消费和碳排放各自呈现什么样的格局,仍需要在计算碳排放清单的基础上进行针对性分析,以便更加清晰地揭示碳排放格局和影响因素,推动中国和各地区有针对性地制定减排政策等。

参考文献(References)

邓吉祥, 刘晓, 王铮. 2014. 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, 29(2): 189-200. [Deng J X, Liu X, Wang Z. 2014. Characteristics analysis and factor decomposition based on the regional difference changes in China's CO₂ emissions[J]. Journal of Natural Resources, 29(2): 189-200.]

丁仲礼, 段晓男, 葛全胜, 等. 2009. 2050年大气CO₂浓度控制: 各国排放权计算[J]. 中国科学: 地球科学, 39(8): 1009-1027. [Ding Z L, Duan X N, Ge Q S, et al. 2009. Control of atmospheric CO₂ concentrations by 2050: A calculation on the emission rights of different countries[J]. Science in China: Earth Sciences, 52(10): 1447-1469.]

高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 等. 2016. 近20年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展, 35(6): 747-757. [Gao C C, Liu X Z, Li C K, et al. 2016. Spatiotemporal dynamics of carbon emissions by energy consumption in China from 1995 to 2014[J]. Progress in Geography, 35(6): 747-757.]

郝珍珍, 李健. 2013. 我国碳排放增长的驱动因素及贡献度

分析[J]. 自然资源学报, 28(10): 1664-1673. [Hao Z Z, Li J. 2013. Analysis of China's carbon emission growth: Drive factors and its contribution[J]. Journal of Natural Resources, 28(10): 1664-1673.]

黄国华, 刘传江, 赵晓梦. 2016. 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, 25(4): 638-644. [Huang G H, Liu C J, Zhao X M. 2016. Status quo of carbon emission and future carbon emission reduction for the Yangtze River Economic Zone[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 25(4): 638-644.]

黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 2016. 基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. 地理研究, 35(4): 781-789. [Huang R, Wang Z, Ding G Q, et al. 2016. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu Province based on STIRPAT model[J]. Geographical Research, 35(4): 781-789.]

康文星, 姚利辉, 何介南, 等. 2012. 辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系[J]. 生态学报, 32(19): 6168-6175. [Kang W X, Yao L H, He J N, et al. 2012. The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(19): 6168-6175.]

李建豹, 黄贤金. 2015. 基于空间面板模型的碳排放影响因素分析: 以长江经济带为例[J]. 长江流域资源与环境, 24(10): 1665-1671. [Li J B, Huang X J. 2015. Analysis of influential factors of carbon emission based on spatial panel models: A case study for Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 24(10): 1665-1671.]

李平星, 曹有挥. 2013. 产业转移背景下区域工业碳排放时空格局演变: 以泛长三角为例[J]. 地球科学进展, 28(8): 939-947. [Li P X, Cao Y H. 2013. Spatial and temporal changes of industrial carbon emissions under regional industrial transfer: The case of Pan-Yangtze River Delta[J]. Advances in Earth Science, 28(8): 939-947.]

刘贤赵, 高长春, 宋炎, 等. 2017. 湖南省域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素[J]. 生态学报, 37(7): doi: 10.5846/stxb201511212362. [Liu X Z, Gao C C, Song Y, et al. 2017. Temporal-spatial carbon emission patterns caused by fossil energy consumption at the city level in Hunan Province, China and the factors driving their composition[J]. Acta Ecologica Sinica, 37(7): doi: 10.5846/stxb201511212362.] (in Press)

刘晓燕, 董锋. 2012. 基于协整检验的江苏省碳排放强度影响因素分析[J]. 华东经济管理, 26(9): 16-19. [Liu X Y, Dong F. 2012. An analysis of influence factors on carbon

- intensity of Jiangsu Province based on co-integration test [J]. *East China Economic Management*, 26(9): 16-19.]
- 陆大道. 2011. 中国地理学的发展与全球变化研究[J]. *地理学报*, 66(2): 147-156. [Lu D D. 2011. Development of geographical sciences and research on global change in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(2): 147-156.]
- 马荣华, 蒲英霞, 马晓冬. 2007. GIS空间关联模式发现[M]. 北京: 科学出版社: 97. [Ma R H, Pu Y X, Ma X D. 2007. Mining spatial association patterns from GIS database[M]. Beijing, China: Science Press: 97.]
- 曲建升, 王琴, 陈发虎, 等. 2010. 我国二氧化碳排放的区域分析[J]. *第四纪研究*, 30(3): 466-472. [Qu J S, Wang Q, Chen F H, et al. 2010. Provincial analysis of carbon dioxide emission in China[J]. *Quaternary Sciences*, 30(3): 466-472.]
- 舒娱琴. 2012. 中国能源消费碳排放的时空特征[J]. *生态学报*, 32(16): 4950-4960. [Shu Y Q. 2012. Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(16): 4950-4960.]
- 宋德勇, 刘习平. 2013. 中国省际碳排放空间分配研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 23(5): 7-13. [Song D Y, Liu X P. 2013. Spatial distribution of provincial carbon emissions [J]. *China Population, Resources and Environment*, 23(5): 7-13.]
- 王锋, 吴丽华, 杨超. 2010. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. *经济研究*, (2): 123-136. [Wang F, Wu L H, Yang C. 2010. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions during economic development in China [J]. *Economic Research Journal*, (2): 123-136.]
- 王喜, 鲁丰先, 秦耀辰, 等. 2016. 河南省碳源碳汇的时空变化研究[J]. *地理科学进展*, 35(8): 941-951. [Wang X, Lu F X, Qin Y C, et al. 2016. Spatial and temporal changes of carbon sources and sinks in Henan Province[J]. *Progress in Geography*, 35(8): 941-951.]
- 徐大丰. 2010. 我国碳排放结构的区域差异分析[J]. *江西社会科学*, (4): 79-82. [Xu D F. 2010. An analysis of regional differences of China's carbon emission structure[J]. *Jiangxi Social Sciences*, (4): 79-82.]
- 杨骞, 刘华军. 2012. 中国二氧化碳排放的区域差异分解及影响因素: 基于1995-2009年省际面板数据的研究[J]. *数量经济技术经济研究*, (5): 36-49, 148. [Yang Q, Liu H J. 2012. Regional difference decomposition and influence factors of China's carbon dioxide emissions[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, (5): 36-49, 148.]
- 张豪, 罗亦泳, 张立亭. 2010. 基于遗传支持向量机的城市扩张非线性组合模型[J]. *地理学报*, 65(6): 656-664. [Zhang H, Luo Y Y, Zhang L T. 2010. A nonlinear polynomial model for urban expansion incorporating genetic algorithm and support vector machines[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(6): 656-664.]
- 张雷. 2003. 经济发展对碳排放的影响[J]. *地理学报*, 58(4): 629-637. [Zhang L. 2003. Economic development and its bearing on CO₂ emissions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 58(4): 629-637.]
- 张雷, 黄园浙, 李艳梅, 等. 2010. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. *资源科学*, 32(2): 211-217. [Zhang L, Huang Y X, Li Y M, et al. 2010. An investigation on spatial changing pattern of CO₂ emissions in China[J]. *Resources Science*, 32(2): 211-217.]
- 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 2010. 江苏省1996年至2007年碳排放效应及时空格局分析[J]. *资源科学*, 32(4): 768-775. [Zhang X M, Li S F, Huang X J, et al. 2010. Effects of carbon emissions and their spatio-temporal patterns in Jiangsu Province from 1996 to 2007[J]. *Resources Science*, 32(4): 768-775.]
- 赵欣, 龙如银. 2010. 江苏省碳排放现状及因素分解实证分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 20(7): 25-30. [Zhao X, Long R Y. 2010. The status and decomposition model of carbon emissions for Jiangsu Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 20(7): 25-30.]
- Clarke-Sather A, Qu J S, Wang Q, et al. 2011. Carbon inequality at the sub-national scale: A case study of provincial-level inequality in CO₂ emissions in China 1997-2007[J]. *Energy Policy*, 39(9): 5420-5428.
- Collobert R, Bengio S, Bengio Y. 2002. A parallel mixture of SVMs for very large scale problems[J]. *Neural Computation*, 14(5): 1105-1114.
- IEA (International Energy Agency). 2013. Key world energy STATISTICS 2013[R]. Paris, France: SOREGRAPH.
- IPCC. 2008. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume II[EB/OL]. 2008-7-30[2016-7-30]. <http://ipcc.ch/ipccreports/Methodology-reports.htm>.
- Marland G, Boden T A, Andres R J. 2010. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions[R]. Oak Ridge, TN: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, doi: 10.3334/CDIAC/00001_V2010.
- Messerli B, Grosjean M, Hofer T, et al. 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes[J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5): 459-479.

- Song M L, Guo X, Wu K Y, et al. 2015. Driving effect analysis of energy-consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 103: 620-628.
- Stern N. 2007. The economics of climate change: The stern review[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Su Y X, Chen X Z, Li Y, et al. 2014. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35: 231-243.
- Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F, et al. 2011. Regional differences in the factors that influence China's energy-related carbon emissions, and potential mitigation strategies[J]. *Energy Policy*, 39(12): 7712-7718.

Spatiotemporal patterns and influencing factors of carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region, 1990–2014

CHEN Jianglong^{1,2}, LI Pingxing^{1,2*}, GAO Jinlong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, CAS, Nanjing 210008, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In recent years, the spatial and temporal patterns of regional carbon emissions and their influencing factors were a key research focus by researchers from various fields. Taking the Pan-Yangtze River Delta region—one of the most economically developed and fast changing regions in China—as case area, we analyzed the spatiotemporal patterns of carbon emissions in six representative years of 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, and 2014. Employing scree plot analysis and a nonlinear polynomial model, we also investigated the major influencing factors of carbon emissions in 2010. Results indicate that the total amount of carbon emissions has increased rapidly, but the spatial pattern has been largely stable since 1990. Sixteen cities of the core area dominated the carbon emissions in the Pan-Yangtze River Delta region, and they accounted for more than 50% of the total at most stages. However, the amount and rate of growth of the carbon emissions of all cities showed significant spatial differences. With 2005 as the turning point, the share of carbon emissions of most peripheral cities declined gradually before, but grew faster than the core cities after this point. The total share of the peripheral cities increased to 47% in 2014 from 33% in 2005. The spatial agglomeration degree first increased and then decreased. The spatial heterogeneity of regional carbon emissions was affected by various factors including economic development and energy consumption. Industrialization, urbanization, and population agglomeration are the major factors of carbon emissions. Fixed asset investment and foreign direct investment also had effects on carbon emissions. The relationship between economic development and carbon emissions shows an inverted U shape. The results indicate the environmental effect of change in economic development pattern and can provide some reference for energy saving and carbon emission reduction policy making.

Key words: carbon emission; spatial heterogeneity; temporal change; influencing factor; Pan-Yangtze River Delta