

1999 ~ 2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征

赵雲泰¹, 黄贤金^{1,2*}, 钟太洋^{1,2}, 彭佳雯¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2. 江苏省土地开发整理工程技术中心, 南京 210093)

摘要:采用 Theil 指数和空间自相关分析方法, 研究 1999 ~ 2007 年国家、区域和省际层面能源碳排放强度特征、区域差异水平和空间格局演变. 结果表明, ①1999 ~ 2007 年, 全国能源碳排放总量从 0.91 Gt 逐年上升至 1.83 Gt, 碳排放强度从 0.83 t·万元⁻¹震荡下降至 0.79 t·万元⁻¹; ②八大经济区域碳排放强度呈现三级分化趋势, 东北、黄河中游和大西北地区历年碳排放强度均在 1.0 t·万元⁻¹以上; 北部沿海、长江中游和大西南地区碳排放强度在 0.7 ~ 1.0 t·万元⁻¹之间; 东部和南部地区碳排放强度在 0.32 ~ 0.51 t·万元⁻¹之间; ③Theil 指数分析表明区域内部碳排放强度水平相近, 区域之间的碳强度分化是全国总体差异扩大的主要原因; ④全局自相关 Moran's I 值从 0.19 上升至 0.25, 表明省域之间碳排放强度呈现正相关的空间集聚分布; 碳强度的“冷点”区相对稳定, 主要集中在东部和南部沿海地区; “热点”区从大西北转至黄河中游和东北地区. ⑤碳排放强度的空间差异与区域资源禀赋、经济发展、产业结构和能源利用效率等因素密切相关. 区域差异和空间自相关关系的探讨有助于深入了解我国能源碳排放强度的空间异质性和格局演变, 也为国家制定差异化的区域碳减排目标和碳排放调控政策提供有益参考.

关键词:能源碳排放; 碳排放强度; Theil 指数; 空间自相关; 格局演变

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3145-08

Spatial Pattern Evolution of Carbon Emission Intensity from Energy Consumption in China

ZHAO Yun-tai¹, HUANG Xian-jin^{1,2}, ZHONG Tai-yang^{1,2}, PENG Jia-wen¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Jiangsu Engineering Research Center of Land Consolidation and Rehabilitation, Nanjing 210093, China)

Abstract: Using Theil index and spatial autocorrelation analysis methods, the characteristics, regional disparity and spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption were analyzed on national, regional and provincial level from 1999 to 2007 in China. The results indicate that: ① total energy carbon emission in China has increased from 0.91 Gt in 1999 to 1.83 Gt in 2007, while carbon emission intensity has decreased from 0.83 t·(10⁴ yuan)⁻¹ to 0.79 t·(10⁴ yuan)⁻¹; ② carbon emission intensity of eight major economic blocks showed the trend of three-level differentiation, with that of northeast regions, the middle reaches of Yellow River regions and northwest regions above 1.0 t·(10⁴ yuan)⁻¹; northern coastal regions, the middle reaches of Yangtze River regions and southwest regions 0.7-1.0 t·(10⁴ yuan)⁻¹; eastern and northern regions 0.32-0.51 t·(10⁴ yuan)⁻¹; ③ Theil index analysis indicates that the within-region carbon emission intensities were similar, and the expanding total disparity of carbon emission intensity was primarily due to between-region inequalities. ④ spatial autocorrelation analysis shows that Global Moran's I has increased from 0.19 to 0.25, indicating that there were positive spatial correlations among provincial regions in China, and regions of similar carbon emission intensity agglomerated in space. The “cold spot” areas of carbon emission intensity were relatively stable, while the “hot spot” areas has gradually shifted from northwest regions to the middle reaches of Yellow River regions and northeast regions. ⑤ spatial disparity of carbon emission intensity is closely related to factors such as regional resources endowment, economic development, industrial structure and energy utilization efficiency. The study of regional disparity and spatial autocorrelation provides insight into spatial heterogeneity and spatial pattern evolution of carbon emission intensity in China, and also provides references for the development of differential regional objectives of carbon emission reduction and related regulation policies.

Key words: energy carbon emission; carbon emission intensity; Theil index; spatial autocorrelation; spatial pattern evolution

区域能源碳排放引起的全球环境变化是对人类社会持续发展的挑战^[1-3], 已成为科学界关注的焦点. 我国提出 2020 年单位 GDP 碳排放较 2005 年降低 40% ~ 50% 的目标, 这不仅需要从全局考虑碳排放的影响, 还应从区域格局变化把握^[4]. 当前国内外关于能源碳排放强度的研究主要集中在演变机制和区域特征等方面, 前者如 Barnali 等^[5]采用 Divisia

指数研究 1980 年以来印度能源碳排放强度变化时发现人均收入的增长是提升碳强度的主要原因,

收稿日期: 2010-12-30; 修订日期: 2011-03-25

基金项目: 国家社科基金重大项目(10ZD&030); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200811033); 江苏省高校哲学社会科学重大项目(2010ZDAXM008); 江苏省环保科技基金项目(2009037)

作者简介: 赵雲泰(1985 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用变化与低碳经济, E-mail: andy_nju@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hxj369@nju.edu.cn

Obas 等^[6]采用 Laspeyres 模型研究表明碳强度与能源消耗强度、能源类型和经济结构相关,孙建卫等^[7]对 1995~2005 年中国碳排放分解研究发现技术进步是碳强度变化的主要因素;后者如岳超和谭丹等^[8,9]基于橡树岭国家实验室数据分析表明我国中西部地区碳排放强度远高于东部地区,且西部地区的碳强度高于相同发展阶段的其他地区^[10],王金南、杜官印等^[11,12]基于全国各省能源消费测算,发现大多数省份碳排放强度呈下降趋势^[11],经济增长和碳排放处于弱脱钩状态.以上关于碳排放强度空间格局演变的研究多基于计量经济学的视角,将研究单元视为相互独立且均质的个体,分析其碳排放强度在空间分布上的规律性;实际上,空间单元并不是独立和随机采样的,而是往往表现出显著的相互依赖性,即空间依赖(spatial dependence)^[13].从地理学的角度看,现有研究缺乏对能源碳排放强度的空间依赖性和异质性的探讨,借鉴地理学中成熟的空间分析理论及方法加强对碳排放强度的空间格局及演变研究不失为有益的尝试.作为度量空间依赖影响数量的空间统计分析模型^[13],空间自相关已广泛应用于经济格局^[14,15]、环境演化^[16,17]和社会问题^[18,19]等领域,成为分析空间格局特征及其演变的有效手段,但当前运用空间自相关的方法对区域碳排放强度的研究尚不多见.本研究采用 Theil 指数和空间自相关模型,探讨 1999~2007 年国家、区域和省际层面能源碳排放强度特征、区域差异水平和空间格局演变,以期为国家制订差异化的区域碳减排目标和碳排放调控政策提供参考.

1 研究方法与数据处理

1.1 研究方法

采用 Theil 指数分析省际和区域碳排放强度的空间差异水平,由于 Theil 系数反映的是统计数据之间的关系,未结合地理空间探讨,因而通过空间自相关模型进一步分析区域碳排放强度的空间依赖关系和空间演变特征.

1.1.1 Theil 指数

Theil 指数作为衡量变量相对差异的指标,由信息理论中熵概念演化而来.Theil 指数的突出优点是可将区域总体差异分解为区域内部差异(T_{WR})和区域之间差异(T_{BR}),从而便于考察和揭示它们对研究单元整体差异的影响和贡献.

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \frac{\bar{y}}{y_i} = T_{WR} + T_{BR}$$

$$\begin{aligned} T_{WR} &= \sum_{i=1}^n v_i \left[\sum_{j=1}^m v_{ij} \ln \frac{v_{ij}}{d_{ij}} \right] \\ T_{BR} &= \sum_{i=1}^n v_i \ln \frac{v_i}{d_i} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, n 和 m 为区域个数和区域内省市个数, v_i 和 v_{ij} 分别代表 i 区域和区域内 j 省市的碳排放量占全国碳排放总量的比例, d_i 和 d_{ij} 为 i 区域和区域内 j 省 GDP 占全国 GDP 的比例.Theil 值越高,表示区域或省市间碳排放强度水平的差异越大.

1.1.2 空间自相关

空间自相关指数以空间权重为基础,通过测度能源碳排放强度在空间上的聚集或者分散程度,反映区域碳排放强度的空间格局及变化特征.根据研究范围的大小,可具体划分为全局空间自相关和局部空间自相关.其中全局指标用于探测整个区域的空间模式,使用单一数值反映该区域的空间自相关程度;局部指标用于计算每一个空间单元与邻近单元中某一属性的相关程度^[20].

(1) 全局空间自相关

本研究采用 Moran's I 系数来衡量全局空间自相关性,可用公式(2)表示:

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

式中, n 为研究区域的空间样本个数, x_i 和 x_j 表示空间样本单元的相应属性值, W_{ij} 是空间权重系数矩阵,表示空间单元的邻近关系,本研究采用基于共同边界的一阶 Rook 权重矩阵.Moran's I 系数值属于 $[-1, 1]$ 之间,值愈接近 1,表明具有相似属性的空间单元产生集聚;值愈接近 -1 时表明具有相异属性的空间单元产生集聚.如果 Moran's I 接近或等于 0,表明空间单元属性属于随机分布状态^[13].同时,对全局空间自相关分析的结果需进行 Z 值显著性检验,根据 Z 值大小,在设定显著性水平下做出接受或拒绝零假设的判断.

(2) 局部空间自相关

全局自相关可较好的描述研究区域整体的综合指标,但整体空间中可能存在部分正的空间自相关与负的空间自相关共存,因此采用局部空间自相关测度揭示可能的空间变异性.研究采用 Getis-Ord G_i^* 模型检验局部地区是否存在统计显著的高值或者低值.为了便于解释和比较,对 $G_i^*(d)$ 进行标准化处理,则对于某个空间 i ,其定义为:

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G_i^*)] / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (3)$$

同全局自相关检验一样,如果 $Z(G_i^*)$ 为正,且 Z 值显著,表明位置 i 周围的值相对较高,属高值空间集聚,即“热点”区;反之,如果 $Z(G_i^*)$ 为负, Z 值显著,表明位置 i 周围的值相对较低,属低值空间集聚,即“冷点”区。

1.2 数据来源与处理

通过构建能源消费碳排放测算模型计算各年度国家、地区和省域主要能源消费的碳排放量:

$$\text{Ch} = \sum Qh_i \times \text{NCV}_i \times \left(\text{Cf}_i \times \frac{12}{44} + \text{Mf}_i \times \frac{12}{16} \right) \quad (4)$$

式中,Ch 为化石能源消费碳排放总量, Qh_i 表示第 i 种能源消费量,NCV_{*i*} 为能源净发热值,Cf_{*i*} 为缺省 CO₂ 排放因子,Mf_{*i*} 为缺省 CH₄ 排放因子,NCV_{*i*}、Cf_{*i*}、Mf_{*i*} 均采用 IPCC 的给定值,12/44、12/16 分别为 CO₂ 和 CH₄ 所含碳量的转化系数。

上述能源数据均来自《中国能源统计年鉴》(2000~2008 年)中的地区能源消费平衡表;经济数据来源于《中国统计年鉴》(2000~2008 年);碳排放系数来源于 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》;供电标准煤耗取自中经网产业数据库。同时根据国务院发展研究中心《地区协调发展的战略和政策》,八大经济区域分别为:东北综合经济区(辽宁、吉林、黑龙江);北部沿海综合经济区(北京、天津、河北和山东);东部沿海综合经济区(上海、江苏、浙江);南部沿海经济区(福建、广东、海南);黄河中游综合经济区(陕西、山西、河南和内蒙古);长江中游综合经济区(湖北、湖南、江西和安徽);大西南综合经济区(云南、贵州、四川、重庆和广西);大西北综合经济区(甘肃、青海、宁夏和新疆)。由于西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区的相关数据缺失,因此本研究所有源数据和计算结果均不包括这些地区。

2 结果与分析

2.1 能源碳排放强度总体特征

从全国层面来看,1999~2007 年全国能源碳排放总量从 0.91 Gt 逐年上升至 1.84 Gt(1Gt=10⁹t),年均碳排放量增速为 9.19%,同期全国 GDP 增速为 10.12%(按 2005 年可比价计算,以下数据同上),GDP 增速略高于碳排放量增速。时间序列上碳排放强度总体有所降低,但趋势线并不规则,在 2002 年下降到最低水平(0.74 t·万元⁻¹)之后,碳排放强度

呈现震荡变化,2005 年出现峰值(0.83 t·万元⁻¹),2007 降至 0.79 t·万元⁻¹(图 1)。碳排放强度产生波动,从宏观环境分析,主要是由于 2002 年节点之前亚洲金融危机的影响限制了我国工业等产业的发展,同时国家关闭淘汰了部分高能耗高污染企业,使得碳排放强度水平相应有所下降;2002 年之后随着国际经济形势好转以及国家扩大内需和增加投资的宏观调控政策等影响,大批高耗能、重复性的基础设施项目和工业项目集中上位,能源碳排放的增速超过同期经济的发展,造成碳排放强度在 2005 年到达顶峰;伴随经济平稳增长以及国家稳步实施能源低碳化战略,碳排放强度开始回落。

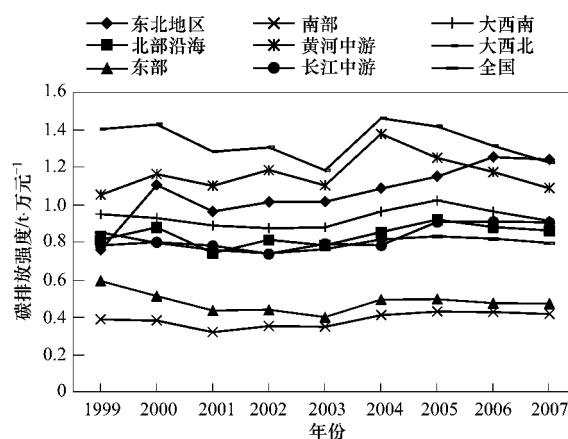


图 1 全国及八大经济区域 1999~2007 年
能源碳排放强度变化趋势

Fig. 1 Trends of energy carbon emission intensity in China and eight major economic blocks from 1999 to 2007

从区域层面来看,八大经济区域的碳排放强度分化明显,基本呈现三级趋势。东北、黄河中游和大西北地区为第一层级,历年碳排放强度均在 1.0 t·万元⁻¹以上(除 1999 年东北地区略低);北部沿海、长江中游和大西南地区位于第二层级,历年碳排放强度在 0.7~1.0 t·万元⁻¹之间;东部地区和南部地区为第三层级,历年碳排放强度在 0.32~0.51 t·万元⁻¹之间。

从省域层面来看,1999~2007 年省域碳排放总量和碳排放强度的极化现象明显。碳排放总量上,历年来均居全国首位的河北省在 2007 年达到了 0.165 Gt,而处于碳排放总量极低值区的海南省,2007 年仅为 0.004 9 Gt;2007 年碳排放强度最高的贵州省为 1.72 t·万元⁻¹,最低的广东省为 0.38 t·万元⁻¹。历年高低极值区与低极值区的碳排放总量和碳排放强度差异均在 4~5 倍之间。

2.2 能源碳排放强度区域差异

本研究将国家碳排放强度的总体差异分解为八大经济区域之间和区域内部省际之间的差异. 从表 1 中可以看出, 1999 ~ 2007 年, 我国碳排放强度的 Theil、 T_{BR} 、 T_{WR} 指数均呈现两时期的变化, 1999 ~ 2005 年 Theil 指数不断上升, 碳排放强度的区域总体差异水平不断扩大; 2005 ~ 2007 年 Theil 指数有所下降, 降幅远低于前期的增幅, 表明碳排放强度的区域差异水平后期略有缩减, 但总体仍高于 1999 年水平.

1999 ~ 2007 年区域之间的碳排放强度水平分

化显著, 区域之间的差异分化对总体差异水平贡献率基本达到 90%, 其中贡献比例较高的主要为东北、东部、南部和黄河中游地区, 区域间差异的贡献比例达 70% 以上, 这也印证了前文碳排放强度层级的划分. 相较于区域之间, 区域内部省际之间的碳排放强度水平接近, 对总体差异的贡献率仅为 10% 左右, 且历年区域内部差异呈现逐渐缩小的趋势. Theil 指数的结果表明, 全国碳排放强度的差异主要是源于八大区域之间的碳强度水平分化, 这同时也反映了我国碳排放强度的空间格局特征与地区经济发展的集聚格局之间存在一定的关联性.

表 1 中国主要年份 (1999、2001、2003、2005、2007 年) 能源碳排放强度区域差异及分解¹⁾

Table 1 Regional disparity and decomposition of energy carbon emission intensity in China (1999, 2001, 2003, 2005, 2007)

项目	1999 年		2001 年		2003 年		2005 年		2007 年	
	指数值	贡献比例/%	指数值	贡献比例/%	指数值	贡献比例/%	指数值	贡献比例/%	指数值	贡献比例/%
Theil	0.21	100.00	0.29	100.00	0.30	100.00	0.36	100.00	0.34	100.00
T_{WR}	0.02	9.55	0.03	11.40	0.04	12.22	0.05	12.92	0.04	12.56
八大区 T_{BR}	0.19	90.45	0.26	88.60	0.26	87.78	0.31	87.08	0.29	87.44
东北	0.01	3.44	0.03	10.12	0.03	11.88	0.04	13.37	0.06	20.19
北部	0.01	2.72	0.00	1.29	0.01	1.75	0.02	7.66	0.02	5.95
东部	0.05	16.69	0.06	21.53	0.07	23.88	0.06	21.67	0.06	21.65
南部	0.05	17.34	0.06	19.03	0.06	18.82	0.05	17.49	0.05	17.25
黄河中游	0.03	9.06	0.06	19.21	0.06	19.22	0.07	23.67	0.05	17.19
长江中游	0.01	3.57	0.00	1.26	0.00	1.49	0.01	3.78	0.02	5.75
大西南	0.01	4.65	0.02	6.92	0.02	5.81	0.03	8.83	0.02	5.57
大西北	0.02	8.23	0.03	9.08	0.02	6.86	0.03	8.91	0.02	6.46

1) 八大经济区域的指数值和贡献比例均对应 T_{BR}

2.3 能源碳排放强度空间格局特征

根据 1999 ~ 2007 年中国碳排放强度的空间自相关分析可知 (表 2), 各年 Moran's I 值均为正, 且除 1999 年通过 95% 的 Z 值检验外, 其余均在 99% 的可置信水平以上, 检验结果显著, 表明全国碳排放强度具有空间正相关关系; 1999 年以来, 碳排放强

度水平相似的省区在空间上呈现集中分布, 集聚态势明显, 且“十五规划”之后, Moran's I 值变化不大, 空间“集中”的趋势较为稳定.

在此基础上进一步研究碳排放强度在局部区域的集聚分散趋势, 识别碳排放强度的“冷点”和“热点”区域.

表 2 中国 1999 ~ 2007 年能源碳排放强度全局自相关 Moran's I 值及检验值

Table 2 Global Moran's I of energy carbon emission intensity and test values in China from 1999 to 2007

项目	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
Moran's I	0.19	0.26	0.25	0.23	0.22	0.25	0.27	0.26	0.25
$Z(I)^{1)}$	2.06	2.75	2.88	2.46	2.62	2.58	2.93	2.68	2.59

1) $Z(I) > 1.96$ 表明在 5% 的显著性水平, $Z(I) > 2.58$ 表明在 1% 的显著性水平

(1) Moran 散点图中 (图 2) 的“高-高” (HH) 和“低-低” (LL) 象限表明碳排放强度的观测值存在较强的空间正相关, 即具有均质性; “高-低” (HL) 关联和“低-高” (LH) 关联表示存在较强的空间负相关, 即空间单元存在异质性. 从全国 1999、2003

和 2007 这 3 a 的 Moran 散点图来看, 各年份中位于 HH 和 LL 象限的样本数分别占总量的 60%、53% 和 50%; 相应位于 HL 和 LH 象限的样本比例分别为 40%、47% 和 50%. 这表明研究时段内碳排放强度的空间异质性 (离散分布格局) 略有上

升,但总体而言碳排放强度在局部范围内仍具有较高的空间相关性,局部集聚格局显著。“高-低”关联(HL)显著区是局部高值离群点类型,指碳排放强度相对高于周围的省份,主要分布于长江中

游地区;“低-高”关联(LH)区是局部低值离群点类型,主要分布于靠近东部和南部沿海地区的内陆,但统计检验显著区较少,表明这些区域显现的“凹点”现象可能是概率事件。

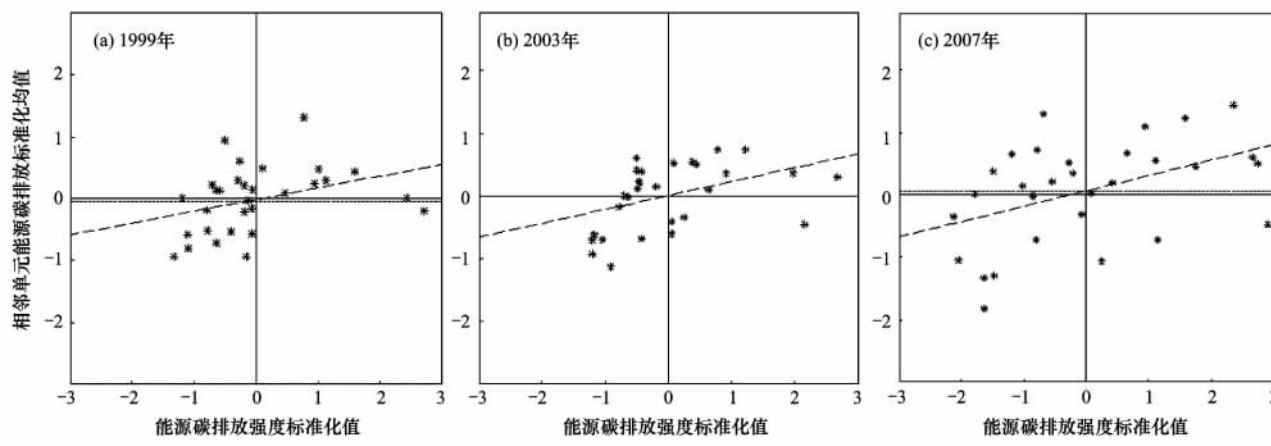


图2 中国主要年份(1999、2003、2007年)能源碳排放强度 Moran 散点图

Fig. 2 Moran scatter plot of energy carbon emission intensity in China (1999, 2003, 2007)

(2)1999~2007年,全国碳排放强度的“冷点”区(低值集聚区)空间格局相对较为稳定,除2007年外,其余年份均分布于东部地区(长三角)和南部地区(珠三角);碳排放强度的“热点”区分布(高值集聚区)变化较大,大西北、黄河中游和东北地区均有分布,其中黄河中游地区作为“热点”区的稳定度较高;此外,历年“热点”区在数量上呈现先增后减

的变化趋势(图3)。1999年碳排放强度的热点区域主要集中在新疆、甘肃、陕西和青海等省,而2003年大西北地区的热点区域分布减少,主要集中在内蒙、陕西和山西等省,这主要因为长期以来西北地区作为我国重要的油气和煤炭基地,能源资源等原材料的开采消费比例较高,但伴随近年鄂尔多斯盆地地区油气资源的开发,能源消耗的重心逐渐向内

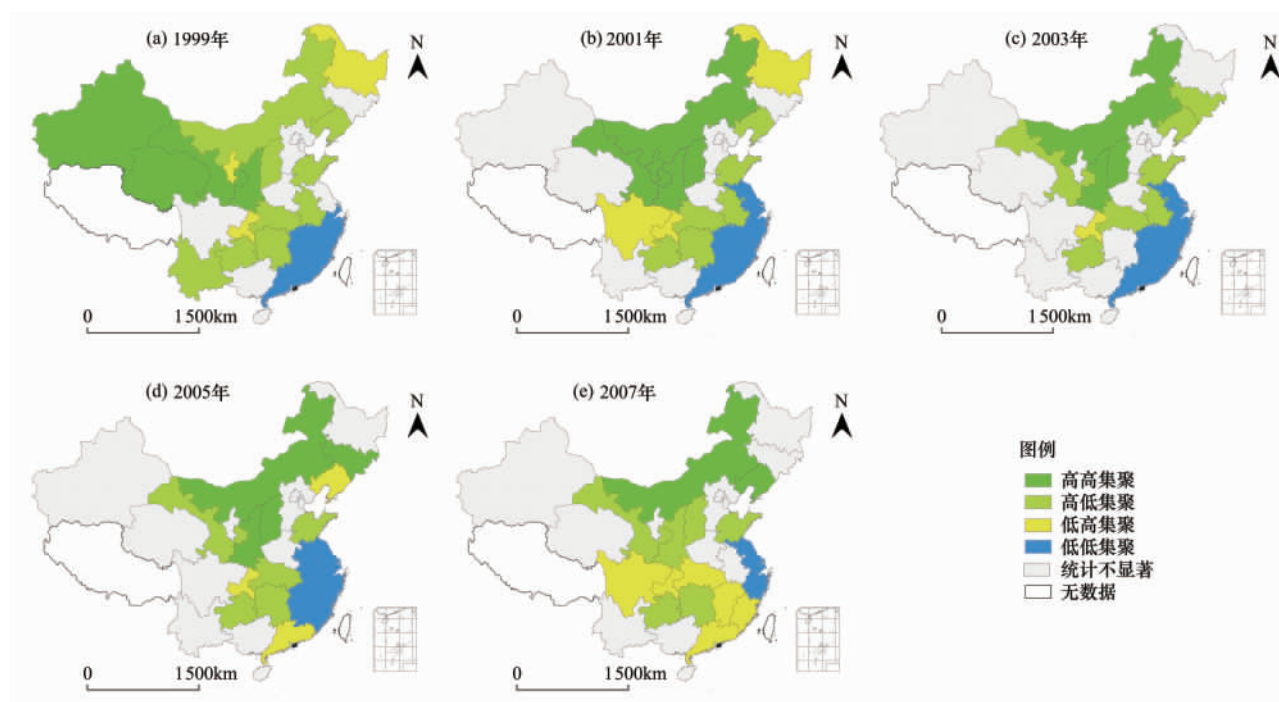


图3 中国主要年份(1999、2001、2003、2005、2007年)能源碳排放强度空间集聚格局

Fig. 3 Spatial agglomeration pattern of energy carbon emission intensity in China (1999, 2001, 2003, 2005, 2007)

蒙古等地区转移;同时,2003 年国家提出振兴东北战略后,促进了东北地区的重工业和基础设施建设等耗能产业的发展,致使 2005 年东北地区的吉林也呈现“热点”区分布,至 2007 年全国“热点”区集中分布在内蒙和辽宁两省。

(3)从“冷点”和“热点”的空间格局来看,与 Theil 指数计算结果中区域层级分化基本一致,碳排放强度水平极化现象显著。虽然 2007 年东南沿海地区碳排放总量达到 0.22 Gt,但由于同期的经济产出总量较高,碳排放强度仅为 $0.47 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$;内蒙和辽宁碳排放总量与东部地区持平,但由于经济产出的差距,碳排放强度为 $1.50 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。研究时段内,全国碳排放强度低值区一直集聚于东南沿海区域,沿海地区的碳排放强度明显低于东北和内陆地区。“十五规划”期间,黄河中游地区四省均处于碳排放和 GDP 的高排放高增长阶段^[8],经济增长对能源消耗的依赖性较强。同期东南沿海地区在保持经济高速增长的同时,通过节能减排、产业结构升级等从而推动产业耗能结构调整和能源效率提高,使得区域碳排放强度的逐步下降;此外,受沿海经济发展的辐射和产业承接转移的作用,长江中游的部分省区如江西、安徽等碳排放强度水平也呈现低值发展的态势。1999~2007 年,空间集聚效应未发生变化的共有 11 个省份,占全国总量的 35.48%,主要分布在长江中游和北部沿海地区,其余地区也有零星分布。表明同其他区域相比,1999 年以来这些地区的碳排放总量和碳排放强度变化的绝对量、增减幅度均处于相对稳定阶段。省域碳排放强度仍然保持原有的碳排放强度格局,未发生质的改变。

2.4 区域碳排放强度时空差异驱动力分析

结合碳排放强度“冷热点”集中区域,探讨碳排放强度非均衡差异的驱动力。具体而言,主要有地区资源禀赋、经济发展水平、产业结构和能源利用效率等方面的影响。①西北和黄河中游地区作为我国重要的原材料基地,能源资源丰度高,基于比较优势的原理,这些地区更易于发展能源资源密集型产业,侧重对石油和煤炭等资源的开采利用。长期形成的经济结构对能源依赖水平较高,造成了研究时段内地区的碳排放强度呈现“热点”(高值集聚)集中。②区域经济发展水平不平衡是造成碳排放强度差异分化的重要影响因素。在经历了快速工业化的积累后,东南沿海地区已经处于后工业化时期,产业发展呈现多元化,已逐步过渡至外向型工业化为主导的经济结构,低耗能的第三产业逐渐成为经济增长的主

要拉动力量。经济发展水平较高的东南沿海地区虽然碳排放总量占全国总排放量的 20.12%,却贡献了 35.58% 的经济份额(2007 年),因此成为碳排放强度的“冷点”集聚区。需要说明的是,经济水平的高低并非与碳排放强度高低之间呈现一一对应的反比关系,如 2007 年黄河中游地区的碳排放强度水平最高,但其经济水平在八大区域中位居中游。③碳排放强度与高耗能产业比重相关。从工业行业耗能结构来看,中、西部地区的高耗能行业占工业产值比重远远高于东部地区(2007 年差值为 10%)^[21]。以内蒙古为例,虽然近年经济发展较快,增速位居全国前列,但工业产业结构以重、化、能源工业为主导,经济增长十分依赖能源和原材料的消耗,而东部地区则以现代服务业、先进制造业和电子加工业等产品附加值高、耗能少的产业为主导,低耗能行业的发展规模相对较大。值得注意的是,中西部地区有一定比例的能源消费用于支持东部地区的发展,如“西气东输”、“西电东送”等,虽然能源消耗和碳排放计算在中西部地区,但消费主体是东部地区^[9],这也是导致“热点”集中在中西部地区的不可忽略的原因。④支撑经济发展的能源利用水平差异也是影响碳排放强度空间格局的重要因素。“十五”期间,东南沿海地区能源利用效率(以标准煤计,下同)约为 $0.79 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$,而黄河中游地区为 $2.91 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$,二者相差 3 倍以上。这主要因为相对于黄河中游地区,东南沿海地区拥有更具优势的区位条件、投资环境和经济基础,有利于产业的集聚,而集聚有利于企业的竞争和技术的革新,同时投资行为往往伴随设备更新、技术进步而成为提高能源利用效率的物质载体^[22]。

3 讨论

(1)与国内外已有的研究成果(表 3)相比,本研究中能源碳排放的测算结果虽然在绝对量上有所差别,但总体而言较为接近。研究过程中由于数据采用而可能产生的误差影响有限。

表 3 碳排放计算结果对比分析/Gt

Table 1 Comparison of the results of carbon emission calculation/Gt					
项目	2007 年	2005 年	2003 年	2001 年	1999 年
本研究	1.84	1.52	1.15	0.95	0.91
橡树岭 ^[23]	1.78	1.53	1.19	0.95	0.90
其它研究		1.51 ^[24]	1.13 ^[25]		

(2)中国能源碳排放强度区域差异和空间格局的形成与演变,是资源禀赋、经济发展、产业结构

以及技术效率等多种因素共同作用的结果,这些因素对碳排放强度空间格局影响的机制还需要进一步深入研究;同时,区域驱动力因素自身的差异对碳排放强度空间格局的影响还有待进一步探讨。

(3)碳排放是一个长期、连续的过程,短时期的区域能源碳排放可能受到突发的外界环境因素影响(如经济危机等),从而导致使用短时期数据在分析长期趋势上可能存在一定误差。若采用长时间序列的碳排放数据进行分析,可以更为准确地反映其某一阶段的空间特征,并有助于分析和预测未来的时空演变趋势。

4 结论

(1)1999~2007年,我国能源碳排放总量从0.91 Gt逐年上升至2007年的1.84 Gt,碳排放强度从 $0.83 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 震荡下降至 $0.79 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。区域间碳排放强度呈现三级分化趋势,碳强度由西北至东南逐渐降低;省际之间碳强度差异极化现象明显。

(2)Theil指数分析表明研究时段内中国碳排放强度的区域总体差异水平有所扩大;造成全国总体差异的主要原因是八大区域之间的碳排放强度差异,区域内部差异较小。

(3)全国省域之间碳排放强度表现出空间正相关性,排放强度相似的地区在空间上集聚分布。碳强度的“冷点”区相对稳定,主要分布在东部和南部地区;“热点”区从大西北地区逐步转向黄河中游和东北地区。区域碳排放强度水平的分化主要与区域资源禀赋、经济发展水平、产业结构和能源利用效率等因素相关。

(4)当前开展差异化的区域碳减排调控,可采用如下政策:①对能源依赖程度较高的省区,通过加强推进产业结构优化等降低高耗能产业比重,重视能源科技的应用推广,提高能源资源利用效率,加强碳汇能力建设;②对碳排放强度相对稳定的省区,应优化产业、行业结构,侧重发展现代服务业和高新技术产业,构建循环型的经济发展方式,实现经济集聚区内产业间的生态链接;③对碳排放强度呈现“冷点”的区域开展传统产业的改造和替代能源科技的革新,推进可再生能源的利用,构建安全清洁的能源供应和消费体系。

参考文献:

- [1] Zahn R. Beyond the CO_2 connection[J]. *Nature*, 2009, **460** (16):335-336.

- [2] Soon W. Implications of the secondary role of carbon dioxide and methane forcing in climate change: Past, present, and future[J]. *Physical Geography*, 2007, **28**(2):97-125.
- [3] 丁仲礼,段晓田,葛全胜,等. 2050年大气 CO_2 浓度控制:各国排放权计算[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2009, **39** (8): 1009-1027.
- [4] 张雷,黄园渐,李艳梅,等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. *资源科学*, 2010, **32**(2): 211-217.
- [5] Nag B, Parikh J. Indicators of carbon emission intensity from commercial energy use in India[J]. *Energy Economics*, 2000, **22**(4): 441-461.
- [6] Obas J E, Anthony J I. Decomposition analysis of CO_2 emission intensity between oil-producing and non-oil-producing sub-Saharan African countries[J]. *Energy Policy*, 2006, **34**(18): 3599-3611.
- [7] 孙建卫,赵荣钦,黄贤金,等. 1995-2005年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(8): 1284-1295.
- [8] 岳超,胡雪洋,贺灿飞,等. 1995-2007年我国省区碳排放及碳强度分析[J]. *北京大学学报*, 2010, **46**(4): 510-516.
- [9] 谭丹,黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析与比较[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, **18**(3): 54-57.
- [10] 刘占成,王安建,于汶加,等. 中国区域碳排放研究[J]. *地球学报*, 2010, **31**(5): 727-732.
- [11] 王金南,蔡博峰,严刚,等. 排放强度承诺下的 CO_2 排放总量控制研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(11): 1568-1572.
- [12] 杜官印,蔡运龙,李双成. 1997-2007年中国分省化石能源碳排放强度变化趋势分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, **26**(5): 76-81.
- [13] Wong D W S, Lee J. Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS and ArcGIS[M]. John Wiley and Sons. 2005. 337.
- [14] 马晓冬,马荣华,徐建刚. 基于ESDA-GIS的城镇群体空间结构[J]. *地理学报*, 2004, **59**(6): 1048-1057.
- [15] 李小建,乔家君. 20世纪90年代中国县际经济差异的空间分析[J]. *地理学报*, 2001, **56**(2): 136-143.
- [16] 赵小风,黄贤金,张兴榆,等. 区域COD、 SO_2 及TSP排放的空间自相关分析:以江苏省为例[J]. *环境科学*, 2009, **30** (6): 1580-1587.
- [17] 李元寿,张人禾,王根绪,等. 青藏高原典型高寒草甸区土壤有机碳氮的变异特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1826-1831.
- [18] 邱炳文,王钦敏,陈崇成,等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. *自然资源学报*, 2007, **22**(2): 311-320.
- [19] 陈志刚,王青,赵小风,等. 中国土地违法现象的空间特征及其演变趋势分析[J]. *资源科学*, 2010, **32**(7): 1387-1392.
- [20] 张松林,张昆. 全局空间自相关Moran指数和G系数的对比研究[J]. *中山大学学报*, 2007, **46**(4): 93-97.
- [21] 王俊松,贺灿飞. 能源消费、经济增长与中国 CO_2 排放量变化——基于lmdi方法的分解分析[J]. *长江流域资源与环*

- 境, 2010, **19**(1): 18-23.
- [22] 邱灵, 申玉铭, 任旺兵, 等. 中国能源利用效率的区域分异与影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2008, **23**(5): 920-928.
- [23] Boden T, Marland G, Andres R J. National CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and GAS Flaring: 1751- 2007 [EB/OL]. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, 2009: doi 10. 3334/CDIAC/00001.
- [24] 刘强, 庄幸, 姜克隽, 等. 中国出口贸易中的载能量及碳排放量分析[J]. 中国工业经济, 2008, (8): 46-55.
- [25] 肖炼. 中美能源合作前景及对策: 改善能源安全和保护环境[M]. 北京: 世界知识出版社, 2008. 133.