

# 基于夜间灯光数据的中国能源消费 碳排放特征及机理

苏泳娴<sup>1,3,4</sup>, 陈修治<sup>2</sup>, 叶玉瑶<sup>1</sup>, 吴旗韬<sup>1</sup>, 张虹鸥<sup>1</sup>, 黄宁生<sup>3</sup>, 匡耀求<sup>3</sup>

(1. 广州地理研究所, 广州 510070;

2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 本研究基于DMSP/OLS夜间灯光影像实现了1992-2010年以市级为基础单元的我国碳排放估算, 弥补了统计数据不全、统计口径不一的缺点。从全国、4个经济区和6大城市群3个层面的碳排放分析结果显示, 我国CO<sub>2</sub>排放总量持续增长, 各地区、省市增速各不相同, 空间聚集程度越来越明显, 基本形成了“东部沿海城市高高集聚, 西部欠发达城市低低集聚”的格局。人均碳排放强度基本呈现为“东部>东北部>西部>中部”, 单位GDP碳排放强度则呈现为“东北部和西部较高”、“东部和中部较低”。GDP增长是决定CO<sub>2</sub>排放总量增长的主导因素, 而能源结构、能源利用效率、产业结构是影响碳排放强度的主要原因。对于西部和东北部等以能源和重工业为主导产业的城市, 其减排策略应着重能源结构优化和能源利用效率的提高。对于东部和中部等以技术、劳动密集型和轻工业为主导产业的城市, 其减排策略应侧重于产业结构调整 and 转型升级。

**关键词:** 碳排放; 时空变化; 机理; DMSP/OLS夜间灯光影像; 遥感

DOI: 10.11821/dlxb201311007

## 1 引言

碳循环过程是全球气候及环境变化的基本动力源之一。随着陆表系统物质能量交换规模的不断扩大和交换速率的不断加快, 碳循环过程的非对称性发展(排放多、吸收少)对全球气候和环境产生越来越明显的负面影响<sup>[1]</sup>。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次报告认为, 人类活动产生的大规模能源消费所排放的CO<sub>2</sub>是导致全球气候变化的最主要原因之一<sup>[2]</sup>。因此, 探索经济发展与能源消费等人类活动造成的碳排放成为目前国内外学术界研究的热点问题<sup>[3-4]</sup>。据统计, 2000年以来中国CO<sub>2</sub>排放量年均增速达10%左右, 2008年碳排放总量达83.25亿t, 超过美国成为世界第一碳排放大国<sup>[5]</sup>。巨大的排放总量和较高的增速, 使中国面临着巨大的减排压力。由于中国各区域经济社会发展和能源消费结构存在很大差异, 因此, 科学准确地测算和分析不同区域碳排放的时空变化, 揭示其机理问题, 是未来明确减排目标、科学制定减排规划的根本前提。

近年来, 学者开展了大量的中国碳排放相关研究, 主要包含以下几个方面。(1) 基于全国能源消费统计数据, 测算了国家尺度的能源消费碳排放量、碳排放强度和人均碳排放

收稿日期: 2013-04-05; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ15B02); 国家自然科学基金项目(41001385); 广东省科技计划项目(2011B031100003) [Foundation: The National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period, No.2012BAJ15B02; National Natural Science Foundation of China, No.41001385; Science & Technology Plan Project Grant, Guangdong province, China, No.2011B031100003]

作者简介: 苏泳娴(1985-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事区域生态与区域发展研究。E-mail: suyongxian@163.com

通讯作者: 张虹鸥(1962-), 男, 研究员, 中国地理学会会员(S110000213M), 近年来主要从事城市与区域规划等研究。E-mail: hozhang@gdas.ac.cn

量的变化趋势、空间格局以及不同产业的碳排放差异<sup>[1, 2, 5-11]</sup>。(2) 结合中国人口、GDP、产业数据、能源消费数据等, 分析了影响中国能源消费碳排放量的主要因素<sup>[7, 12-14]</sup>。(3) 利用对数平均迪氏分解模型 (Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI), 分解了影响中国能源消费碳排放的主导因素, 揭示碳排放影响因素在不同区域的贡献率<sup>[15-18]</sup>。(4) 基于中国碳排放格局、趋势及主要影响因素分析结果, 开展了初步的减排策略研究<sup>[15, 18-20]</sup>。另外, 部分学者也对省级、区域尺度和部分发达城市的碳排放进行了类似的研究<sup>[21-28]</sup>。但大部分研究主要依据国家统计局及下属部门发布的统计数据, 由于统计数据大多是以国家或省级为单位, 市级及更小尺度的统计数据较难收集, 给全面了解中国市级及以下尺度碳排放情况带来很大限制。另外, 鉴于国家级、省级、市级统计数据的统计口径、计算方法和统计误差等各不相同, 三个层面统计数据之间存在较严重的不一致性<sup>[28]</sup>, 也给我我国制定准确、系统、差异化的碳减排计划带来较大困难。因此, 急需利用新的空间信息获取手段, 实现我国碳排放的规范性评估。

遥感技术在时空一致性方面独具优势, 逐渐成为地理学领域监测空间信息时空变化的重要手段。美国军事气象卫星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 搭载的 Operational Linescan System (OLS) 传感器, 能够有效地探测到城市夜间灯光甚至小规模居民地、车流等产生的低强度夜间灯光, 是监测人类活动强度的良好数据源<sup>[29]</sup>。国内外许多学者已成功地将 DMSP/OLS 夜间灯光影像应用于城镇扩展监测<sup>[30]</sup>、社会经济因子估算<sup>[31-32]</sup>以及能源消耗估算<sup>[33]</sup>等领域。由于人类活动是碳排放的主要来源, 而 DMSP/OLS 夜间灯光影像恰能有效地反映人类活动强度。因此, DMSP/OLS 夜间灯光影像可用于碳排放量的估算, 这一结论已被国外学者证明<sup>[34-35]</sup>。但目前利用 DMSP/OLS 夜间灯光影像估算碳排放量的研究较少, 仍处于起步阶段, 研究尺度大多为全球或国家层面, 省市级尺度较少, 且研究内容仅停留于碳排放总量的探讨。

本文基于 1992-2010 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 以 TM 遥感影像分类结果为验证, 精确提取研究区建成区范围, 结合 30 个省或直辖市以及 66 个地级市的统计数据, 建立 DMSP/OLS 灯光数值与碳排放统计量之间的关系方程。在此基础上, 以市级为基础单元, 模拟碳排放量, 并分别从中国大陆、4 大经济区和 6 大城市群 3 个层面, 分析 1992-2010 年我国碳排放总量、碳排放密度的时空变化特征, 揭示影响碳排放的内在机理, 为我国制定差异化的减排策略提供重要参考依据。

## 2 研究区域

选取我国大陆 (香港、澳门特别行政区和台湾地区除外) 为研究区域 (图 1), 从市级尺度分析我国 CO<sub>2</sub> 排放的时空分布特征。选取东部、中部、西部和东北部 4 大经济区, 分析各区域之间碳排放的差异。另外, 近年来逐步成型和迅速发展的 6 大城市群, 集聚了我国大部分的人口和经济活动, 是目前碳减排重点关注的地区, 因此, 本文进一步选取珠三角、辽中南、京津唐、山东半岛、川渝地区、沪宁杭等 6 大城市群做更深入的研究。

## 3 数据来源和处理

数据来源包括 DMSP/OLS 夜间灯光影像、Landsat TM 影像、全国 30 个省或直辖市以及 66 个地级市的统计数据。

(1) DMSP/OLS 夜间灯光影像。采用的 1992-2010 年 DMSP/OLS 数据, 来自美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 下属的国家地球物理数据中心 NGDC (National Geophysical Data Center), 该数据消除了云及火光等偶然

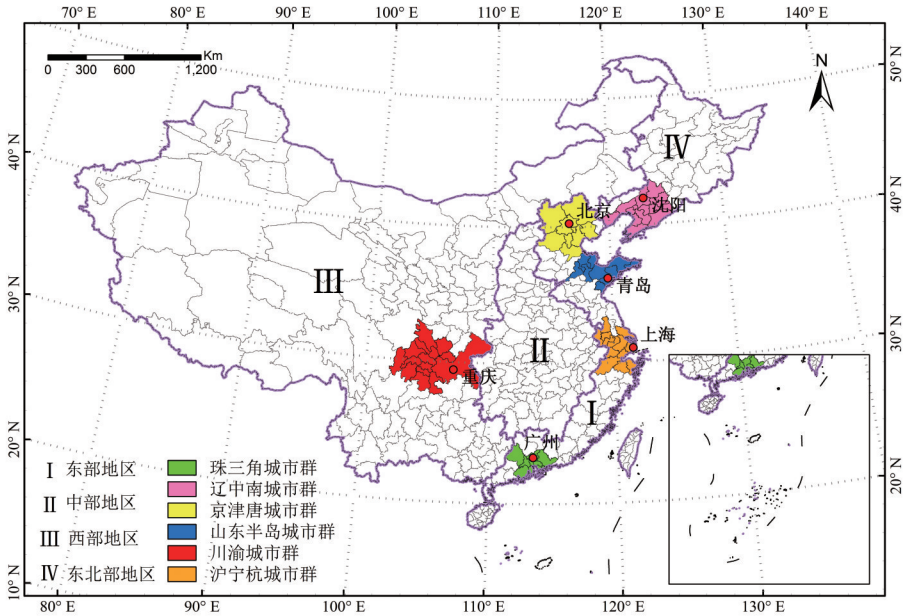


图1 研究区域

Fig. 1 Locations of the study areas

噪声影响, 数据灰度值范围1~63, 空间分辨率为0.008333度。由于同一时期不同传感器获取的夜间灯光数据之间有轻微差异, 且存在一些光噪声, 本文采用Liu等<sup>[10]</sup>建立的方法对夜间灯光遥感影像进行融合去噪、切割、相对辐射标定以及地理坐标转换等预处理。

(2) Landsat TM影像。选取覆盖珠三角、长三角、北京、上海、重庆等多个城市的1995、2000、2005、2009、2010年的多幅质量较好的TM遥感影像进行地表类型分类, 检验和校正DMSP/OLS夜间灯光影像提取的建成区精度。

(3) 统计数据。考虑到采集统计数据的可能性和准确性, 选取1995、2000、2005、2009、2010年30个省或直辖市(除澳门、香港、台湾和西藏)及66个地级市(哈尔滨、齐齐哈尔、鸡西、鹤岗、双鸭山、大庆、伊春、佳木斯、七台河、牡丹江、黑河、绥化、太原、大同、阳泉、长治、晋城、朔州、运城、忻州、临汾、武汉、黄石、十堰、宜昌、鄂州、荆门、孝感、咸宁、随州、仙桃、潜江、天门、神农架、南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、赣州、吉安、宜春、上饶、厦门、南平、宁德、广州、深圳、珠海、汕头、佛山、韶关、河源、梅州、惠州、东莞、中山、江门、湛江、茂名、肇庆、清远、潮州、揭阳、云浮)的统计年鉴数据。其中用于计算CO<sub>2</sub>排放量的能源消费数据来自能源消费平衡表中的一次能源终端消费量。

(4) 其他辅助数据。主要包括中国国家基础地理信息中心发布的1:400万比例尺的国家、省级、市级的矢量行政界线。

## 4 研究方法

(1) 基于DMSP/OLS夜间灯光影像提取建设用地。DMSP/OLS夜间灯光影像与DEM高程数据相似, 存在着明显的“峰”和“陷”, 在此分别称为“亮源”和“暗源”。亮源与暗源之间存在一个明显的突变区域, 即建设用地与非建设用地的分界线。本文采用ArcGIS的Neighborhood Statistics表面分析工具, 借鉴地形起伏度分析方法, 以5个栅格为单元, 识别建设用地与非建设用地的分界线, 提取建设用地范围。利用TM遥感影像分类



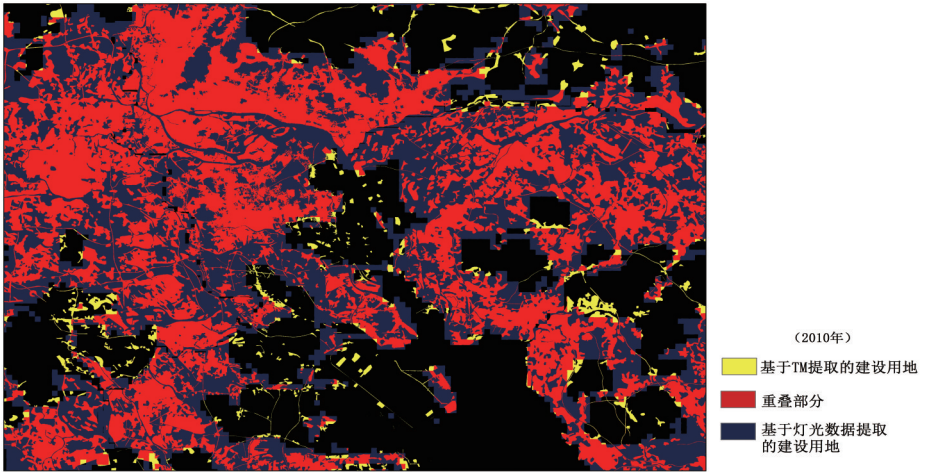


图2 DMSP/OLS与TM影像建设用地提取结果对比图

Fig. 2 Comparison of urban areas extracted from DMSP/OLS data with those from TM imageries

结果进行验证精度达95.27%，kappa系数0.91。此方法提取的建设用地不会漏掉灯光值比较暗的小城镇建成区，且能够有效提取较宽的道路主干道以及城郊之间分布于道路两侧的居民点。受篇幅所限，仅展示2010年珠三角局部地区的建设用地提取结果(图2)。

(2) 基于统计数据计算CO<sub>2</sub>排放量。采用IPCC公布的《2006温室气体排放清单》来计算能源产生的CO<sub>2</sub>排放量，公式如下：

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^9 K_i E_i \tag{1}$$

式中： $E_i$ 为能源*i*消费量，按标准煤计，10<sup>4</sup> t； $K_i$ 为能源*i*碳排放系数，(10<sup>4</sup> t碳)/(10<sup>4</sup> t标准煤)；*i*为能源种类， $K_i$ 值来源于IPCC碳排放计算指南缺省值，原始数据单位为J，为与统计数据单位一致，将其转化成标准煤，转化系数为1×10<sup>4</sup> t标准煤等于2.93×10<sup>5</sup>GJ。各种能源的标准煤折算系数和碳排放系数见表1。

(3) 建立夜间灯光数值与CO<sub>2</sub>排放量统计值之间的关系方程。利用建设用地边界切割DMSP/OLS夜间灯光影像，获取各省市建设用地范围内的夜间灯光数据，并统计各省市的夜间灯光总值，然后与相应的CO<sub>2</sub>排放量统计值进行拟合分析，结果显示(图3和公式2)，夜间灯光数据总值(SDN)与CO<sub>2</sub>排放统计值具有较好的线性相关关系，在0.01水平上显著相关，R<sup>2</sup>为0.818。

$$SDN = 0.041 \times CO_2 \tag{2}$$

(4) 人均碳排放强度、单位GDP碳排放强度计算方法。为全面了解碳排放格局和机理，本文进一步结合各市人口及经济统计数据，研究了全国人均碳排放强度和单位GDP碳排放强度的时空分布特征及影响机理。

$$\text{人均碳排放强度} = CO_2/p \tag{3}$$

$$\text{单位GDP碳排放强度} = CO_2/GDP \tag{4}$$

表1 能源碳排放系数表<sup>[36-37]</sup>

Tab. 1 Carbon emission factor for different types of fuels

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	热力	电力
换算成标准煤 (t标准煤/t)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.33	34.12*	0.345
碳排放系数 (10 <sup>4</sup> t碳/10 <sup>4</sup> t标准煤)	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483	0.67	0.272*

\*注：热力换算成标准煤单位为kg标煤/百万kJ，电力的换算系数单位为kg/kWh。

式中: CO<sub>2</sub>为二氧化碳排放总量, 万t; *p*采用统计年鉴中的年末常住人口数据, 万人。GDP为地区生产总值, 换算为以1992年为基期的可比价格, 万元。

(5) 利用Moran's I指数分析中国CO<sub>2</sub>排放的空间聚集特征。

Moran's I指数方法是用于统计分析空间分布特征和揭示空间分布差异的有效研究手段<sup>[38]</sup>。Moran's I指数包括全局Moran's I指数和局部Moran's I指数(LISA)。全局Moran's I指数能有效反应区域整体集聚情况, 值介于-1~1, 大于0为正相关, 且越接近1, 正相关性越强, 即邻接空间单元之间具有很强的相似性; 小于0为负相关, 且越接近-1, 负相关性越强, 即邻接空间单元之间具有很强的差异性; 接近0则表示邻接空间单元不相关。LISA指数能识别局部区域集聚特性。

(6) 利用倾向值法(SLOPE)分析中国CO<sub>2</sub>排放的变化趋势。利用一元线性回归模型计算1992-2010年19年间的变化斜率, 即倾向值(SLOPE), 来分析每个城市CO<sub>2</sub>排放的线性倾向<sup>[39]</sup>, 计算公式为:

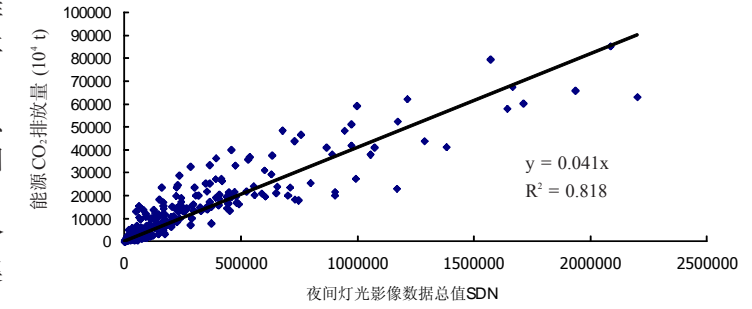


图3 夜间灯光数据总值(SDN)与CO<sub>2</sub>排放量统计值的拟合关系  
Fig. 3 Relationship between total light values of DMSP/OLS data and CO<sub>2</sub> emissions calculated using statistical data

$$SLOPE = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i C_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n C_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (5)$$

式中: *n*是总年份数, 等于19; *x<sub>i</sub>*是第*i*年(1992为第一年); *C<sub>i</sub>*代表第*i*年对应的CO<sub>2</sub>排放量。CO<sub>2</sub>排放增长类型等级划分标准见表2。

## 5 结果与分析

### 5.1 CO<sub>2</sub>排放量模拟值的精度检验

为确保CO<sub>2</sub>排放量模拟值的可靠性, 将其与基于统计数据计算的30个省及直辖市以及66个地级市的CO<sub>2</sub>排放量进行比照, 结果发现(图4), 模拟的CO<sub>2</sub>排放量与统计数据计算值的均方根误差(RMSE)为943.79万t, 相对误差(RE)为7.65%。可见, 基于夜间灯光数据模拟所得CO<sub>2</sub>排放量的精度良好, 可用来开展全国CO<sub>2</sub>排放量的时空特征及机理研究。

### 5.2 全国碳排放时空格局

1992-2010年, 我国CO<sub>2</sub>排放总量持续增长, 由1992年的14.92亿t增长到2010年的101.23亿吨, 年均增速11.22%。总体来看, 主要经历4个阶段(图5): 1992-1999年增长较为平缓, 年均增长率为7.59%; 1999-2002年增速有所加快, 年均增长率为12.82%; 2002-2007年增长速度再度放缓, 年均增长率为4.47%; 2007-2010年CO<sub>2</sub>排放总量迅猛增

表2 CO<sub>2</sub>倾向值(SLOPE)等级划分标准

Tab. 2 Classification criteria of CO<sub>2</sub> emission SLOPE

增长类型	缓慢增长型	较慢增长型	中速增长型	较快增长型	迅猛增长型
SLOPE值	< $\bar{C} - 0.5s$	$\bar{C} - 0.5s \sim \bar{C} + 0.5s$	$\bar{C} + 0.5s \sim \bar{C} + 1.5s$	$\bar{C} + 1.5s \sim \bar{C} + 2.5s$	> $\bar{C} + 2.5s$

注:  $\bar{C}$ 是指某城市19年CO<sub>2</sub>排放量平均值; *s*是指某城市19年CO<sub>2</sub>排放量标准差。

长，仅4年间就增加了42.27亿t，相当于过去16年的增加量，年均增长率达19.72%。

本文利用趋势分析法计算了1992-2010年我国各城市的CO<sub>2</sub>排放总量倾向值，并根据分级标准(表2)，将各城市CO<sub>2</sub>排放总量增长趋势划分为缓慢增长型、较慢增长型、中速增长型、较快增长型、迅猛增长型等5种类型。结果显示(图6)，全国有12个城市属于迅猛增长型、32个城市属于较快增长型，分别占了国土总面积的2.11%和10.94%，主要集中在东部沿海和经济较发达的内陆地区；另外有126个城市属于较慢增长型、168个城市属于缓慢增长型，分别占了国土总面积的28.33%和48%，主要集中在西部地区以及东北部、中部的欠发达地区。

由于各地区CO<sub>2</sub>排放量的差异化增长，至今已形成新的CO<sub>2</sub>排放量空间分布格局。Moran's I空间相关性分析结果显示，1995、2000、2005、2010年全国CO<sub>2</sub>排放量全局Moran's I指数分别为0.3848、0.3978、0.4303和0.4781，表明全国CO<sub>2</sub>排放量分布一直存在正的空间相关性，且空间相关性逐步增强，可见，1992-2010年期间我国CO<sub>2</sub>排放量在整体上空间聚集现象越来越明显。进一步利用LISA指数对1995、2000、2005、2010年全国CO<sub>2</sub>排放量进行局部分析发现(图7)。1995年在中部和西部形成了西藏—青海—甘肃—四川—云南—贵阳—广西—湖南—江西—安徽连片的低低集聚区，在海南省形成了另一个低低集聚区。而在张家口—北京—唐山—天津—廊坊—保定、晋中—长治、南通—苏州—泰州—上海、广州—佛山—中山—珠海—东莞—深圳等形成了4个高高集聚区，但此时的高高集聚规模较小，空间分散。兰州、成都、重庆与其周边城市表现出高低邻近的负相关性，承德市、湖州市、清远市则分别与其周边城市表现出低高邻近的负相关性。至2000年，中部和西部连片的低低集聚区逐渐破碎化、规模逐渐减小，而东部和中部的4个高高集聚区规模不断增大，且在潍坊市开始出现新的高高集聚区。至2010年，最终形成了以京津唐城市群为核心的11个城市高高集聚区、以长三角城市群为核心的13个城市高高集聚区、以山东半岛城市群为核心的7个城市高高集聚区、以珠三角城市群为核心的8个城市高高集聚区等；并形成了西藏—甘肃—青海、湖北—湖南—云南—广西、海南岛等3大低低集聚区；兰州、成都、重庆、长沙、武汉分别与其周边城市表现出高低邻近的负相关性，而承德、衡水、日照、宣城、厦门则分别与其周边城市表现出低高邻近的负相关性。碳排放的高高集聚主要发生在区域经济发展水平较高的东部地区，低低集聚则主要分布在经济发展水平落后的西部和中部及海南岛，高低、低高集聚现象则主要出现在经济发展水平差异较大的相邻城市。可见，区域经济发展水平差异是碳排放空间格局的决定因素。

### 5.3 四大经济区碳排放变化趋势

由于不同时期各地区的经济发展水平、政策导向、产业结构的不同，我国东部、中部、西部、东北部四大经济区碳排放量占全国总排放量的比例不断变化(图8)。(1)东部是中国CO<sub>2</sub>排放的主要地区，1992-1993年，东部地区碳排放在全国的比重大体保持在

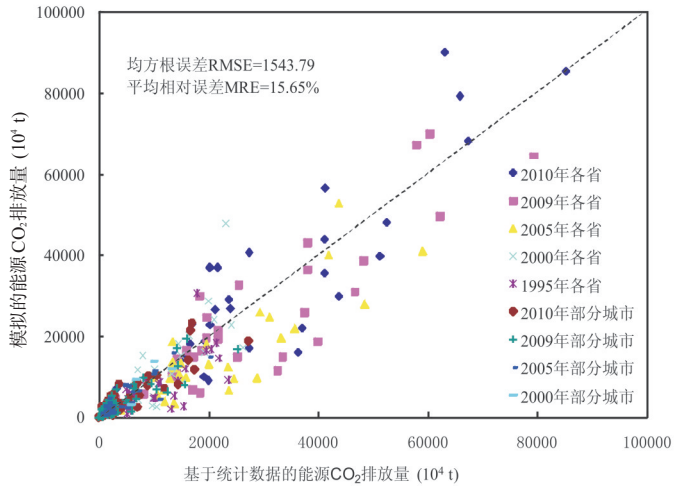


图4 能源消费CO<sub>2</sub>排放量统计值与DMSP/OLS影像模拟值散点图  
Fig. 4 Scatter diagram between energy-related CO<sub>2</sub> emissions calculated from statistical data and CO<sub>2</sub> emissions simulated from DMSP/OLS nighttime light data

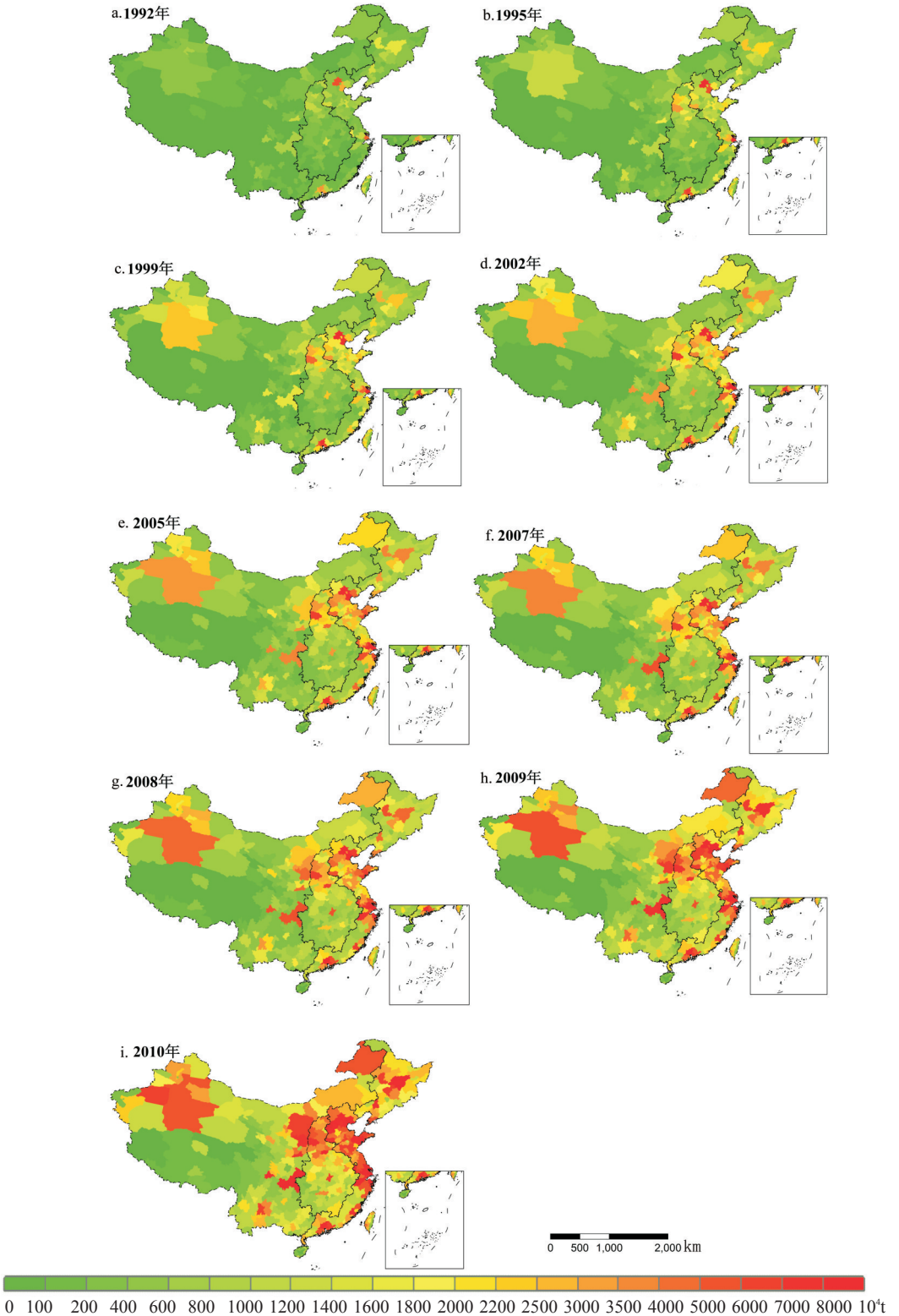


图5 1992-2010年全国CO<sub>2</sub>排放总量时空分布图

Fig. 5 Spatial and temporal distributions of national CO<sub>2</sub> emissions in China from 1992 to 2010



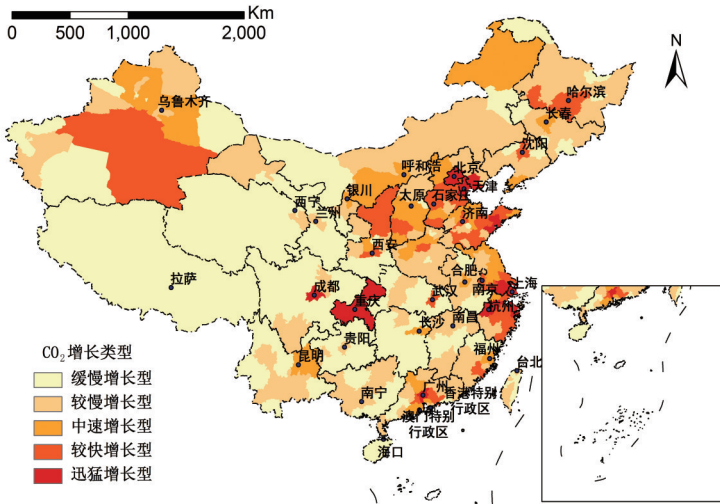


图6 1992-2010年全国CO<sub>2</sub>排放总量增长等级图

Fig. 6 Classification of CO<sub>2</sub> emission increment speeds in China from 1992 to 2010

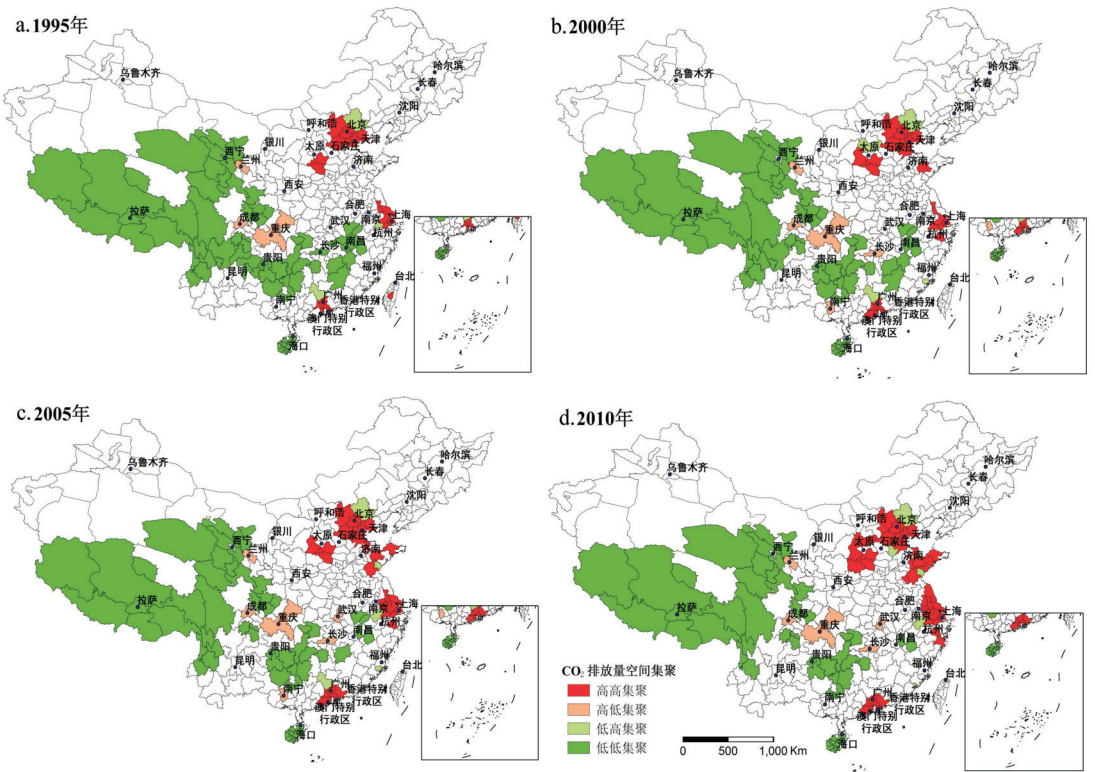


图7 1995、2000、2005、2010年全国CO<sub>2</sub>排放总量集聚分布图

Fig. 7 Cluster conditions of the CO<sub>2</sub> emissions in China in 1995, 2000, 2005 and 2010

50%左右。继1992年邓小平南巡讲话和1994年党的十四大召开，东部地区经济建设进入新的阶段，大量生产要素涌入，使之成为我国人口和经济的聚集地，1994年CO<sub>2</sub>排放比重也随之猛升到54.28%。1995-2008年，我国经济发展战略逐步转向区域经济的协调发展，东部的碳排放比重也呈稳步略有下降趋势。2008年之后东部地区经济发展重心逐步转为经济结构优化升级和提升经济发展质量，此期间东部的碳排放比重下降至48%。(2) 中部



地区的碳排放比重始终比较稳定,基本处于17%~19%之间,间接反映中部地区经济发展速度和政策导向处于比较稳定的局面。(3)西部地区的碳排放比重逐年上升。20世纪90年代初,西部碳排放比重仅约为15%,2000年国家开始实施西部大开发战略,西部碳排放比重瞬间增长至18.71%,但由于初期资金投入不足和投资效益不高,西部经济并没得到很快的增长,2000-2005年期间碳排放比重增长缓慢(仅为1.03%)。而“十一五”时期,西部投资进入高速增长阶段,2009年的碳排放比重明显增长,较2008年增加了1.65%。(4)由于

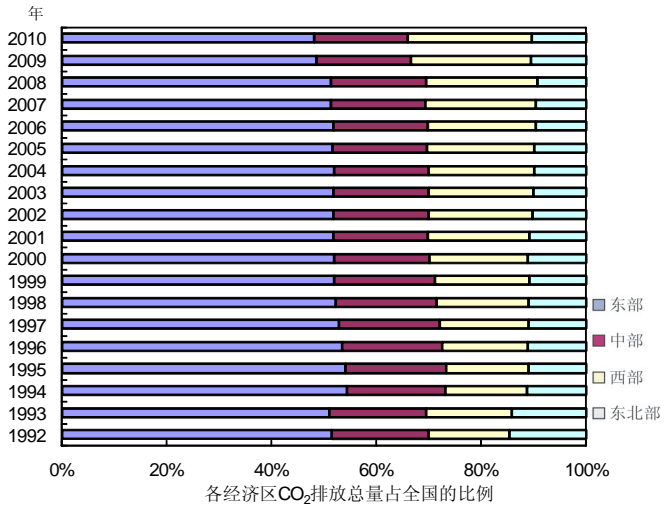


图8 1992-2010年四大经济区CO<sub>2</sub>排放量占全国的比重  
Fig. 8 CO<sub>2</sub> emission proportions of the four major economic regions from 1992 to 2010

90年代以来东北老工业基地逐步衰落,东北地区经济与沿海发达地区差距不断扩大,碳排放量比重不断下降。2003年党中央、国务院正式实施振兴东北老工业基地重大战略决策,2008年其生产总值占全国的比重升至8.62%,增长率为13.4%,碳排放比重同时也呈现转折性的改变。综上所述,GDP是决定地区碳排放水平的主导因素。

1992-2010年期间,四大经济区人均碳排放强度总体呈上升趋势(图9),基本呈现“东部>东北部>西部>中部”的格局。由于东部地区产业规模大,经济发展程度高,能源消费总量大,人均碳排放强度最大;东北部由于主要发展重工业产业类型,能源利用效率低,消费量大,人均碳排放强度也相对较高。从增长速度来看,四大经济区的人均碳排放强度增长速度越来越快,特别是在2007/2008年之后,出现了明显的增长拐点,其中,东北部地区的人均碳排放强度增长趋势最大,年均增长率达30.05%,其次为西部地区,年均增长率达29.62%,中部地区和东部地区相对较低。这种增长特征与四大经济区的主导

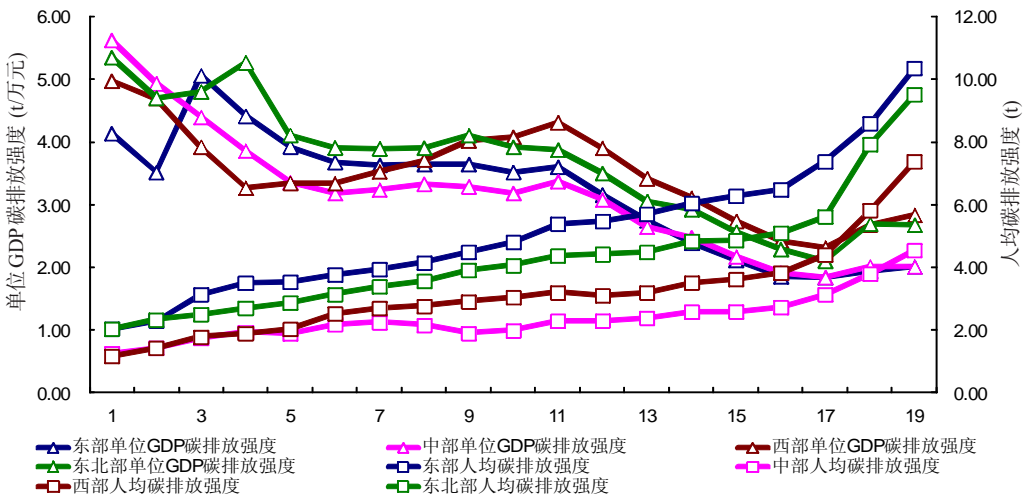


图9 1992-2010年四大经济区人均碳排放强度与单位GDP碳排放强度

Fig. 9 CO<sub>2</sub> emission intensity per capita and per GDP of the four major economic regions from 1992 to 2010

产业类型有密切关系,由于东北和西部以资源和重工业为主导,相对于以轻工业和制造业为主的东部和中部地区,东北和西部的经济增长带来更快的碳排放增速,而其人口增长速率较东部和中部较缓,导致呈现相对较高的人均碳排放强度。

与人均碳排放强度不同,单位GDP碳排放强度呈现“东北部和西部较高”、“东部和中部较低”的格局(图10)。主要由于东部和中部以轻工业和高端制造业为主,能源效率高,而西部和东北部分别以能源和重工业为主,能源效率相对较低,可见,东部和中部的产业结构较西部和东北部地区更为“低碳”。从时间上看,四大经济区单位GDP碳排放强度总体均逐年减少,特别是2002-2008年期间,各区域单位GDP碳排放强度降幅明显加快,这与中国“十五”期间大力倡导节能减排,积极引入高新技术提高劳动效率与物质能源使用效率有着密切的关系。而2008年之后,东北和西部地区单位GDP碳排放强度突然反弹,这恰好与西部和东北部地区经济快速发展的拐点时间吻合,也间接说明以能源产业和重工业为主导产业的我国西部和东部地区,能源利用效率较低,其经济增长导致单位GDP碳排放强度的增加。

进一步在4大经济区选取典型省市构建了能源消耗总量与碳排放总量的双累计曲线(图10)。以北京和天津为代表的京津唐省市,能源结构一直处于稳定状态,而以广东和上

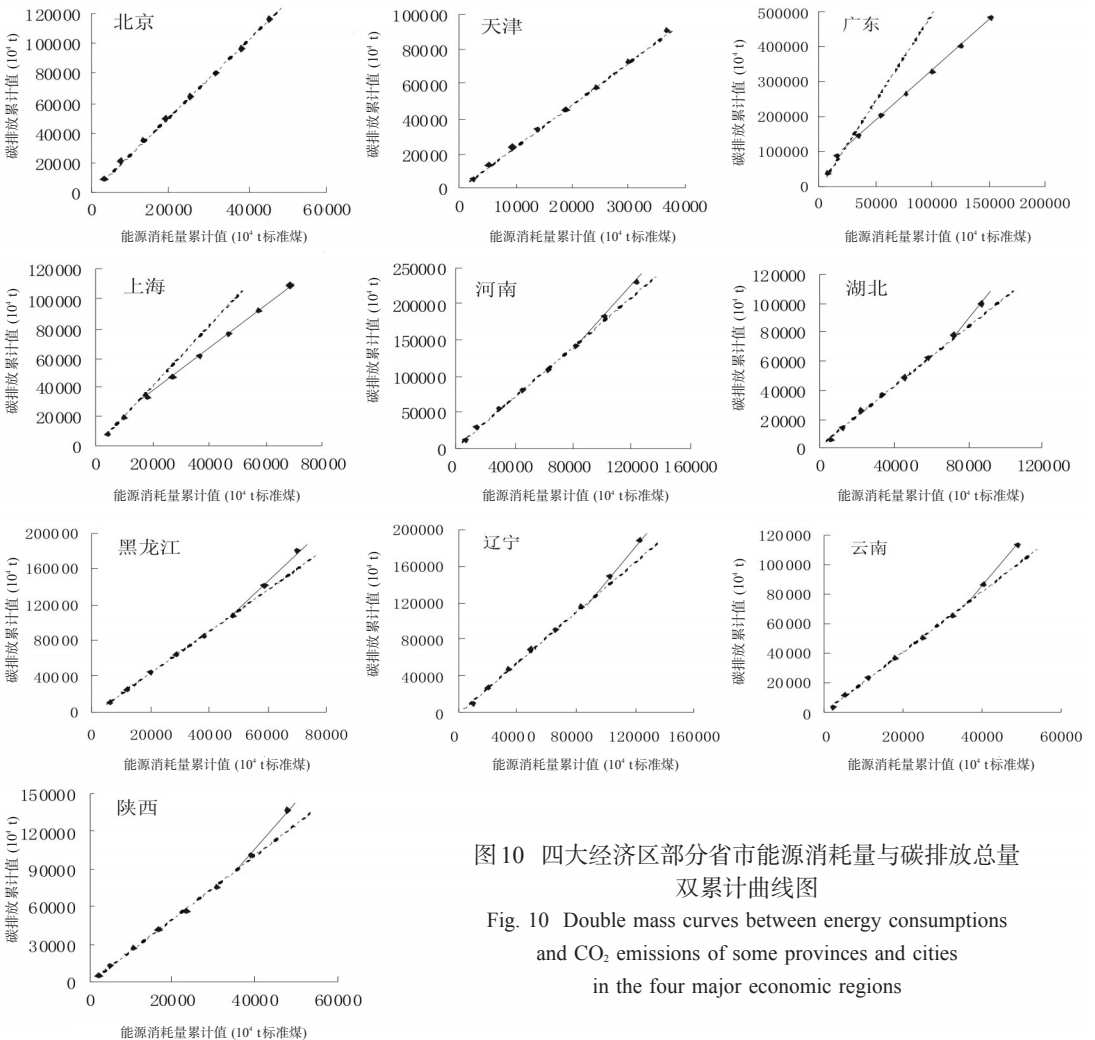


图10 四大经济区部分省市能源消耗量与碳排放总量双累计曲线图

Fig. 10 Double mass curves between energy consumptions and CO<sub>2</sub> emissions of some provinces and cities in the four major economic regions

海为代表的东部沿海省市,其能源结构在2005-2006年得到有效改善,碳排放系数明显减少。相反,西部(陕西和云南)、东北部(黑龙江和辽宁)、中部(河南和湖北)在2009-2010年碳排放系数明显增高,说明其能源结构水平有朝高能源消耗水平发展的趋势,西部比较明显,东北部次之,中部趋势最不明显,主要因为西部的能源密集型产业开始蓬勃发展,东北部的重工业基地开始快速崛起,中部则因为承接东部地区的产业转移,引入了大批较高能源消耗水平的产业,导致其碳排放系数有所增加。

#### 5.4 六大城市群碳排放变化趋势

珠三角、辽中南、京津冀、山东半岛、川渝地区和沪宁杭等6大城市群的CO<sub>2</sub>排放总量、人均碳排放强度总体呈现增长态势,单位GDP碳排放强度则呈现减少趋势(图11)。珠三角城市群作为改革开放的先锋地区,20世纪90年代碳排放具有“三高”特点,即高CO<sub>2</sub>排放量、高人均碳排放强度、高单位GDP碳排放强度。进入21世纪,随着国家经济发展战略转移,珠三角经济发展遇到瓶颈,开始寻求高新技术发展模式,大力开展结构调整和产业升级,提高能源利用效率,此时珠三角CO<sub>2</sub>排放量增长减缓,单位GDP碳排放强度明显降低,到2010年其单位GDP碳排放强度1.49t/万元,是6大城市群的最低。沪宁杭城市群CO<sub>2</sub>排放总量一直保持较高的增长率,自1997年起超过珠三角城市

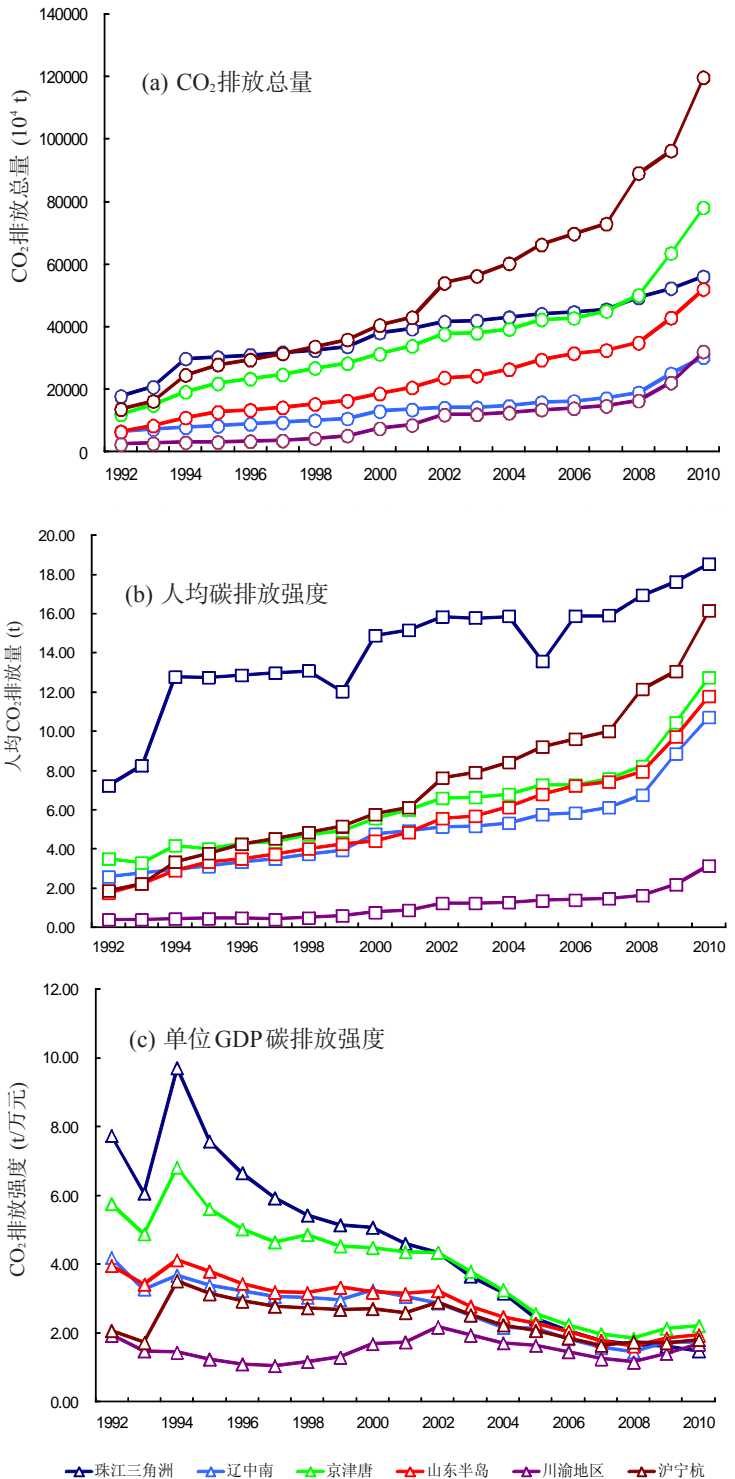


图11 1992-2010年6大城市群CO<sub>2</sub>排放趋势。

Fig. 11 CO<sub>2</sub> emission conditions of the six urban agglomerations

群。沪宁杭城市群CO<sub>2</sub>排放总量一直保持较高的增长率,自1997年起超过珠三角城市



群, 成为我国CO<sub>2</sub>排放总量最高的城市群。由于沪宁杭城市群始终以发展低碳的“信息化和高新技术产业”为主, 其单位GDP碳排放强度一直处于较低水平。京津唐城市群与依靠“工商业发展、先行对外开放”的珠三角城市群和以“信息化、技术化”为主的沪宁杭城市群发展路径不同, 其受全国资源向都城的集中程度影响较大, 特别是2008年奥运会的举办, 给京津唐城市群带来快速的经济增长, 其碳排放总量和人均碳排放强度增长趋势凸显。山东半岛城市群、辽中南城市群和川渝城市群起步较晚, 无论是CO<sub>2</sub>排放总量、人均碳排放强度, 还是单位GDP碳排放强度都均处于相对较低的水平。

## 6 结论与讨论

利用DMSP/OLS夜间灯光影像能有效估算我国市级CO<sub>2</sub>碳排放总量, 具有独特的时空连续性, 弥补了传统统计数据不全、统计口径不一的缺点, 是一种可靠的新型碳排放监测手段。分析结果显示, 我国CO<sub>2</sub>排放总量持续增长, 各地区增速各不相同, 东部、中部、西部、东北部四大经济区碳排放总量变化与经济发展趋势(GDP)、国家经济政策调整密切相关, 六大城市群作为东部、中部、西部、东北部四大经济区域最有代表性的地区, 也具有类似的碳排放变化趋势。全国碳排放总量空间聚集程度越来越明显, 基本形成了“东部沿海城市高高集聚, 西部欠发达城市低低集聚”的格局, 人均碳排放强度基本呈现“东部>东北部>西部>中部”, 单位GDP碳排放强度则呈现“东北部和西部较高”、“东部和中部较低”的格局, 这主要归因于地区能源结构、能源利用效率、产业结构的差异。因此, GDP增长是决定CO<sub>2</sub>排放总量增长的主导因素, 而能源结构、能源利用效率、产业结构是影响碳排放强度的主要原因。

通过调整碳排放强度来实现减排目标是减排的重要手段。由于各地的经济发展水平、产业结构、能源利用水平各不相同, 所面临的碳减排瓶颈也不一样, 应因地制宜地实施差异化的减排措施。(1) 对于西部和东北地区等以能源和重工业为主导产业的城市, 能源结构和能源利用效率是影响地区碳排放强度的主导因素, 减排策略应该主要放在能源结构优化和能源高效利用新技术的引入。逐步减少煤炭等高碳排放系数能源的使用, 大力发展太阳能、风能和地热能等清洁能源, 稳步推进新能源基础设施的建设。(2) 对于东部和中部地区以技术、劳动密集型和轻工业产业为主导的城市, 其减排策略应侧重于产业结构调整, 加快淘汰钢铁、有色、化工、建材、电力等高耗能行业的落后生产能力、工艺装备, 加快传统高碳产业的升级改造, 大力发展高技术为代表的低能耗、低污染、技术密集型产业, 增强自主创新能力, 不断降低单位产值能耗; 着力培育以低碳为特征的产业体系。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhang Lei. A changing pattern of regional CO<sub>2</sub> emissions in China. *Geographical Research*, 2006, 25(1): 1-9. [张雷. 中国一次能源消费的碳排放区域格局变化. *地理研究*, 2006, 25(1): 1-9.]
- [2] Zhao Rongqin, Huang Xianjin, Zhong Taiyang. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048-1056. [赵荣钦, 黄贤金, 钟大洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1056.]
- [3] Soyata U, Sari R, Ewing B T. Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4): 482-489.
- [4] Zhu Yongbin, Wang Zheng, Pang Li et al. Simulation on China's economy and prediction on energy consumption and carbon emission under optimal growth path. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 935-944. [朱永彬, 王铮, 庞丽等. 基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测. *地理学报*, 2009, 64(8): 935-944.]
- [5] Liu Zhancheng, Wang Anjian, Yu Wenjia et al. Research on regional carbon emissions in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(5): 727-732. [刘占成, 王安建, 于汶加等. 中国区域碳排放研究. *地球学报*, 2010, 31(5): 727-732.]
- [6] Zhang L F. Analysis of carbon emission characteristics of China. *Physics Procedia*, 2012, 33: 1304-1308.
- [7] Hu C Z, Huang X J. Characteristics of carbon emission in China and analysis on its cause. *China Population, Resources*

- and Environment, 2008, 18(3): 38-42.
- [8] You J. China's energy consumption and sustainable development: Comparative evidence from GDP and genuine savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 2984-2989.
- [9] Huang B, Meng L N. Convergence of per capita carbon dioxide emissions in urban China: A spatio-temporal perspective. *Applied Geography*, 2013, 40: 21-29.
- [10] Zhang X P, Cheng X M. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*, 2009, 68: 2706-2712.
- [11] Geng Y H, Tian M Z, Zhu Q et al. Quantification of provincial-level carbon emissions from energy consumption in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 3658-3668.
- [12] Liu D U, Chu W, Cai S H. Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis. *China Economic Review*, 2012, 23: 371-384.
- [13] Zhou X Y, Zhang J, Li J P. Industrial structural transformation and carbon dioxide emissions in China. *Energy Policy*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.017>.
- [14] Zhang Y J. The impact of financial development on carbon emissions: An empirical analysis in China. *Energy Policy*, 2011, 39: 2197-2203.
- [15] Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F et al. Regional differences in the factors that influence China's energy-related carbon emissions, and potential mitigation strategies. *Energy Policy*, 2011, 39: 7712-7718.
- [16] Tian X, Chang M, Tanikawa H et al. Structural decomposition analysis of the carbonization process in Beijing: A regional explanation of rapid increasing carbon dioxide emission in China. *Energy Policy*, 2013, 53: 279-286.
- [17] Zhu Q, Peng X Z. The impacts of population change on carbon emissions in China during 1978-2008. *Environmental Impact Assessment Review*, 2012, 36: 1-8.
- [18] Dong Jun, Zhang Xu. Decomposition of carbon emissions and low carbon strategies for industrial sector energy consumption in China. *Resources Science*, 2010, 32(10): 1856-1862. [董军, 张旭. 中国工业部门能耗碳排放分解与低碳策略研究. *资源科学*, 2010, 32(10): 1856-1862.]
- [19] Chen W Y, Wu Z X, He J K et al. Carbon emission control strategies for China: A comparative study with partial and general equilibrium versions of the China MARKAL model. *Energy*, 2007, 32: 59-72.
- [20] Wang T, Watson J. Scenario analysis of China's emissions pathways in the 21st century for low carbon transition. *Energy Policy*, 2010, 38: 3537-3546.
- [21] Wang Y S, Ma W C, Tu W. A study on carbon emissions in Shanghai 2000-2008, China. *Environmental Science and Policy*, 2013, 27: 151-161.
- [22] Zhao Guanwei, Chen Jianfei, Cui Haishan et al. Carbon Emission in energy consumption in GuangZhou during 1992 to 2007. *Resources and Industries*, 2012, 12(6): 179-184. [赵冠伟, 陈健飞, 崔海山等. 1992-2007年广州市能源消费碳排放研究. *资源与产业*, 2012, 12(6): 179-184.]
- [23] Liu J, Feng T T, Yang X. The energy requirements and carbon dioxide emissions of tourism industry of Western China: A case of Chengdu city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 2887-2894.
- [24] Niu X G, Niu J G, Men D. Energy consumption and carbon emissions: Analysis and prediction-the case of Hebei province in China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2271-2277.
- [25] Zhang Leqin, Li Rongfu, Chen Suping et al. Trend prediction and analysis of driving factors of carbon emissions from energy consumption during the period 1995-2009 in Anhui Province based on the STIRPAT model. *Resources Science*, 2012, 34(2): 316-327. [张乐勤, 李荣富, 陈素平等. 安徽省1995年-2009年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测: 基于STIRPAT模型. *资源科学*, 2012, 34(2): 316-327.]
- [26] Wu Biai, Gao Jianhua, Xu Chong. The decomposition of carbon emissions in Henan province based on the industrial structure and energy structure. *Economic Geography*, 2010, 30(11): 1902-1907. [吴彼爱, 高建华, 徐冲. 基于产业结构和能源结构的河南省碳排放分解分析. *经济地理*, 2010, 30(11): 1902-1907.]
- [27] Zhang Jiekun. Factor decomposition of carbon emissions from energy consumption of Shandong Province based on LMDI. *Resources Science*, 2012, 34(1): 35-41. [宋杰鲲. 基于LMDI的山东省能源消费碳排放因素分解. *资源科学*, 2012, 34(1): 35-41.]
- [28] Guan D B, Liu Z, Geng Y et al. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nature Climate Change Letters*. 2012, 2: 672-675.
- [29] Elvidge C D, Cinzano P, Pet D R et al. The nights at mission concept. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(12): 2645-2670.
- [30] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106: 62-72
- [31] Christopher N H, Doll J P M, Jeremy G M. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery. *Ecological Economics*, 2006, 57: 75-92.
- [32] Christopher N H, Shonali Pachauri. Estimating rural populations without access to electricity in developing countries through night-time light satellite imagery. *Energy Policy*, 2010, 38: 5661-5670.
- [33] Silvana A, Gilberto C, Antonio M V M et al. Estimating population and energy consumption in Brazilian Amazonia

- using DMSP night-time satellite data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29: 179-195.
- [34] Elvidge C D, Imhof f M L, Baugh K E, et al. Night time lights of the world: 1994-1995. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 56(2): 81-99.
- [35] Raupach M, Rayner P, Paget M. Regional variations in spatial structure of night lights, population density and fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy*, 2009, 2: 61-65.
- [36] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 2 [EB/OL]. Japan: the Institute for Global Environmental Strategies, 2008 [2008-07-20]. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/Methodology-reports.htm>.
- [37] Song Jiekun. Empirical research on factors driving economic growth of Anhui province. *Technology Economics*, 2012, 31(01): 82-85. [宋杰鲲. 山东省能源消费碳排放预测. *技术经济*, 2012, 31(1): 82-85.]
- [38] Wang Qian, Wang Xiaobin, Zhou Renkang. Spatial differences and its driving factors of emery indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 247-256. [王千, 金晓斌, 周寅康. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因. *生态学报*, 2011, 31(1): 247-256.]
- [39] Lu Hu, Shi Jiancheng. Reconstruction and analysis of temporal and spatial variations in surface soil moisture in China using remote sensing. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(16): 1412-1422. [卢麾, 施建成. 基于遥感观测的21世纪初中国区域地表土壤水及其变化趋势分析. *科学通报*, 2012, 57(16): 1412-1422.]

## The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries

SU Yongxian<sup>1,3,4</sup>, CHEN Xiuzhi<sup>2</sup>, YE Yuyao<sup>1</sup>, WU Qitao<sup>1</sup>,  
ZHANG Hong'ou<sup>1</sup>, HUANG Ningsheng<sup>3</sup>, KUANG Yaoqiu<sup>3</sup>

(1. *Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;*

2. *South China Botanical Garden, CAS, Guangzhou 510650, China;*

3. *Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** It is critical for China to make the emission reduction targets and development of the scientific emission reduction planning in the future. On the basis of the DMSP/OLS night light imageries, this research estimates the China's city-level carbon emissions from 1992 to 2010. This makes up the vacancies of statistical carbon emission data and overcomes the inconsistency of statistical carbon emission methods. Analysis results from three scales (the whole mainland of China, 4 economic regions and 6 urban agglomerations) show that the national CO<sub>2</sub> emissions grew continually, but varied from place to place. What is more, the spatial agglomeration of China's CO<sub>2</sub> emissions has become more and more obvious, which have led to the current CO<sub>2</sub> emission pattern—"high-high concentration in eastern coastal cities and low-low concentration in western undeveloped cities". The carbon emission intensity of per capita basically maintains as the "Eastern > Northeastern > Western > Central" pattern. The carbon emission intensity of per GDP shows the "Higher in Northeastern and Western China" and "Lower in Eastern and Central China" pattern. Growth rate of GDP is the major factor affecting the increasing speed of carbon emissions. Energy structures, energy efficiencies, industrial structures are the three main factors influencing the carbon intensities. As for the Western and Northeastern regions, whose industries are mainly energy-related and heavy ones, their best mitigation policies should be optimizing the energy structure and increasing energy use efficiently.

**Key words:** carbon emission; temporal and spatial variation; mechanism; DMSP/OLS night light imagery; remote sensing