

DMSP/OLS 夜光数据的珠三角碳排放 时空差异性分析

王艳军^{1,2,3}, 王孟杰^{1,2,3}, 柳林^{4,5}, 李少春^{1,2,3}, 林云浩^{1,2,3}

1. 湖南科技大学 测绘遥感信息工程湖南省重点实验室, 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湘潭 411201;
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201;
4. 广州大学地理科学与遥感学院 公共安全地理信息分析中心, 广州 510006;
5. 辛辛那提大学地理系, 美国辛辛那提 OH45221-0131

摘要: 碳排放时空分布及其异质性是生态环境保护和气候变化监测研究的重要课题。本文针对珠三角城市群碳排放空间分布的精细分析, 基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像与土地利用数据, 研究了 2000 年—2013 年珠三角城市群碳排放时空差异性, 揭示了不同地市不同用地类型的碳排放时空分布特征、碳排放增长趋势和强度趋势。结果表明: (1) 2000 年—2013 年珠三角城市群碳排放总量一直处于增长阶段, 但受 2008 年金融危机影响由高速增长转为缓慢增长阶段; (2) 人均碳排放强度在 2008 年金融危机后增长速度减缓; (3) 单位 GDP 碳排放强度在经历了 2005 年—2008 年小幅增长阶段之后, 整体呈现降低趋势; (4) 地均碳排放强度方面, 工矿用地的地均碳排放强度由 2008 年金融危机前的增长阶段过渡到危机后的降低阶段, 而城镇用地的地均碳排放强度一直处于持续增长阶段。研究发现, 珠三角城市群碳排放 2008 年金融危机前后具有明显的时空差异性, 城镇用地碳排放持续增长将成为碳减排的关键问题, 本研究可为碳排放估算预测、节能减排及生态环境保护提供科学参考。

关键词: 碳排放, 时空分布, DMSP/OLS 夜间灯光影像, 土地利用数据, 精细化

引用格式: 王艳军, 王孟杰, 柳林, 李少春, 林云浩. 2022. DMSP/OLS 夜光数据的珠三角碳排放时空差异性分析. 遥感学报, 26(9): 1824–1837

Wang Y J, Wang M J, Liu L, Li S C and Lin Y H. 2022. Analyzing the spatiotemporal differences of carbon emission in the Pearl River Delta using DMSP/OLS nighttime light images. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(9): 1824–1837 [DOI: 10.11834/jrs.20210556]

1 引言

人类活动产生的大量碳排放是全球气候变暖的主要原因 (赵荣钦等, 2010)。近年来, 中国社会经济飞速发展, 产生了大量的能源消耗, 导致碳排放总量急速增加 (江威和曾海鹰, 2019), 2008 年已成为全球第一的碳排放大国 (刘占成等, 2010), 由此引起了空气污染、旱涝灾害等许多环境问题, 严重制约影响了区域可持续发展。同时, 中国勇于承担碳减排责任, 承诺在 2030 年单

位 GDP 碳排放比 2005 年减少 60%—65%。

面向该严峻环境问题, 许多学者开展了中国区域碳排放及其空间分布的监测研究。夜间灯光影像能够有效地反映不同地理空间的人类活动强度 (Shi 等, 2016; Lu 和 Liu, 2014), 提供更多空间细节信息, 实现时序监测人类社会活动的时空动态变化 (余柏菡等, 2021)。大量成果证明夜间灯光与碳排放 (Doll 等, 2000; Ghosh 等, 2010)、人口空间分布 (胡云锋等, 2018; 李翔等, 2017; 高倩和阿里木江·卡斯木, 2017; 赵利利等, 2016;

收稿日期: 2020-12-13; 预印本: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41971423, 31972951, 41771462); 湖南省自然科学基金优秀项目(编号: 2020JJ3020); 湖南省科技计划项目(编号: 2019RS2043, 2019GK2132); 湖南省教育厅优秀青年项目(编号: 18B224); 湖南省自然科学基金创新研究群体项目(编号: 2020JJ1003)

第一作者简介: 王艳军, 研究方向为多源遥感数据处理与空间环境建模分析。E-mail: wongyanjun@163.com

黄杰等, 2015) 具有较强的相关性, 可用于碳排放和人口的空间化与估算分析。目前, 结合夜间灯光影像数据的碳排放空间化研究主要包括: (1) 直接利用夜间灯光值与省市级的能源消耗碳排放建立关系方程, 进而估算碳排放量及其时空分布 (Shi等, 2016; Wen等, 2019; 张永年和潘竟虎, 2019; 许燕燕等, 2019; 马忠玉和肖宏伟, 2017; 武娜等, 2019; 苏泳娴等, 2013; 吕倩和刘海滨, 2019; 顾羊羊等, 2017), 如苏泳娴等 (2013) 结合 30 个省或直辖市以及 66 个地级市的统计数据, 张永年和潘竟虎 (2019) 利用中部地区城市能源消耗数据, 建立 DMSP/OLS 灯光数值与碳排放统计量之间的关系方程, 模拟碳排放量; (2) 先利用夜间灯光值估算碳排放量, 再结合其他经济社会统计数据, 分析碳排放的空间分布特征 (Shi等, 2019; 于博等, 2020), 如于博等 (2020) 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据估算哈长城市群碳排放量, 再用城市富裕程度、城市人口密度等分析城市碳排放空间特征; 很多研究已经将夜间灯光数据与土地利用数据的交互处理应用于经济等参数空间化 (肖国峰等, 2018; 张怡哲等, 2018; 卢秀等, 2019a; 王明明和王卷乐, 2019; 陈晴和侯西勇, 2015), 但当前在碳排放空间化方面, 此类相关研究还较少; (3) 综合利用夜间灯光值与经济社会统计数据进行碳排放量模拟与估算 (Shi等, 2020; 郭忻怡等, 2016; 苏旭冉和蔺雪芹, 2019), 如 Shi等 (2020) 利用夜间稳定灯光值、归一化植被指数和降水估算碳排放量, 苏旭冉和蔺雪芹 (2019) 结合人口规模、人均 GDP 等, 进行拟合分析实现碳排放空间化以及估算。

上述研究成果多侧重于独立应用夜间灯光影像, 在省市县尺度上实现碳排放的空间化与估算, 存在区域内部碳排放分析较粗放、不同用地类型、生活/生产能源消耗碳排放精细分析不足等问题。同时, 面向科学节能减排的迫切需要, 本文选择中国碳减排的重要区域广东省珠三角城市群, 基于夜间灯光影像, 结合土地利用数据与市级尺度能源消耗统计数据, 分为生活碳排放 (万文玉等, 2016) 和生产碳排放 (赵荣钦等, 2010) 两大类, 精细化估算珠三角城市群及其内部地市级尺度的碳排放空间分布, 探索 2000 年—2013 年珠三角碳排放时空差异特征规律。

2 珠三角城市群与数据源

2.1 珠三角城市群概况

珠三角城市群位于广东省中南部、珠江下游 (图 1), 濒临南海, 大部分位于北回归线以南, 地处亚热带, 属亚热带海洋季风气候, 范围包括广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山和江门等 9 个地级市, 总面积约 55368.7 km², 占广东省土地面积的 1/3 左右, 但集聚了全省约 53.35% 的人口, 79.67% 的经济总量 (2019 年统计数据)。珠三角城市群是中国经济发展较发达区域和能源消耗较密集地区, 其碳排放空间分布和时空差异需要深入挖掘分析。

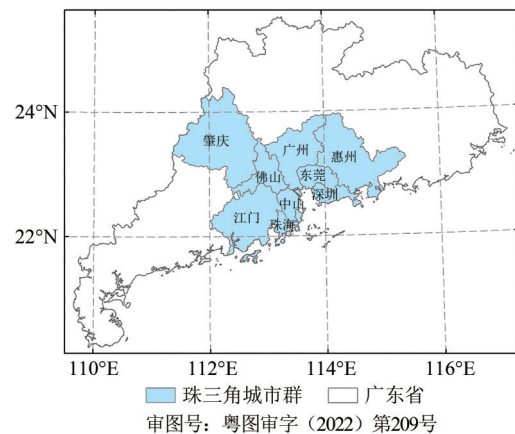


图1 珠三角城市群的空间位置

Fig.1 Location of Pearl River Delta (PRD) urban agglomeration

2.2 数据源

数据包括 2000 年—2013 年的 DMSP/OLS 夜间灯光影像, 2000 年、2005 年、2008 年、2010 年和 2013 年同期的珠三角城市群土地利用数据、能源统计数据 and 人口统计数据。

2.2.1 DMSP/OLS 夜间灯光影像

2000 年—2013 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像来源于美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 本文选用了“Stable Lights”类型的夜间灯光影像数据, 包含城镇和其他地点的稳定照明, 过滤掉了偶然灯光, 如闪电、火光、渔船等。原始 DMSP/OLS 夜间灯光影像数据先投影转换成 Krasovsky_1940_Albers 坐标系, 再重采样为 1 km 网格栅格。DMSP/OLS 夜间灯光影像的校正, 采用曹子阳等 (2015)、卢

秀等(2019b)和吴健生等(2018)的处理方法,包括相互校正、饱和校正和影像间的连续性校正等步骤。

2.2.2 土地利用数据

2000年、2005年、2008年、2010年和2013年珠三角城市群土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(徐新良等,2017,2018),各期的土地利用数据主要基于Landsat-TM/ETM遥感影像解译生成,分辨率为100 m。本文中土地利用数据主要应用了城镇用地、农村居民点、其他建设用地(工矿用地)3种数据类型。

2.2.3 能源统计数据

2000年、2005年、2008年、2010年和2013年珠三角城市群能源统计数据来源于同期的《广东省统计年鉴》和珠三角城市群各地级市统计年鉴。

生活能源消耗碳排放的空间分布一般和稳定的常住人口分布(可通过夜间灯光影像估算)一致,且缺乏地市级尺度的生活能源消耗统计数据。因此,本文中省级尺度的人均居民生活碳排放引用了李玥凝(2017)的研究结果。

为避免能源消耗的重复计算,生产能源消耗碳排放一般主要基于一次能源终端消费计算。同时,考虑到珠三角城市群有外部能源补充,电力和热力二次能源产生的二氧化碳可忽略。因此,珠三角城市群生产能源消耗碳排放的计算数据来自能源消费平衡表中一次能源和外部补充的二次能源(排除热气、电力)的终端消费量,详细计算方法参考苏泳娴等(2013)的研究成果。

2.2.4 人口统计数据

2000年、2005年、2008年、2010年和2013年珠三角城市群人口统计数据来源于同期的《广东省统计年鉴》和珠三角城市群各地级市统计年鉴。人口数据主要用于人类活动因素的碳排放空间分布分析,侧重于长时间固定住所生活的人们。因此,人口统计数据主要采用常住人口数据。

3 珠三角碳排放估算及空间化

不同用地类型的能源消耗差异极大,《广东省统计年鉴》统计数据显示,2000年—2013年间广东省工业能源消耗占总能源消耗的比重均大于59%,而农业能源消耗占比均小于3.7%。因此,需要引入土地利用数据,相同或相似用地类的灯

光值在碳排放空间化过程中才具有对比意义,从而得到更精确的碳排放空间化结果。

生活能源消耗碳排放估算及空间化是在城镇用地和农村居民点用地的空间范围约束下,基于夜间灯光影像数据和市级尺度常住人口统计数据得到常住人口空间分布,再结合人均居民生活碳排放计算。生产能源消耗碳排放估算及空间化是基于城镇/工矿用地、夜间灯光影像、市级尺度分产业能源消耗统计数据,先构建生产能源消耗碳排放与夜间灯光值的关系模型,再根据不同用地类型分别进行城镇用地和工矿用地生产能源消耗碳排放估算及空间化,后结合分产业能源消耗碳排放统计数据进行空间化修正。本文具体实现流程见图2。

3.1 珠三角能源消耗碳排放估算模型构建

3.1.1 生活能源消耗碳排放估算

居民生活能源消耗碳排放可分为直接碳排放和间接碳排放,直接碳排放是居民在日常生活及交通出行等方面对各类能源的直接消耗导致的碳排放,间接碳排放是居民为满足日常基本生活所需的所有非能源商品和服务在生产及销售各环节消耗能源而产生的碳排放。本文根据采用的夜间灯光影像和土地利用数据的特征,结合碳排放的空间化,侧重关注居民生活能源消耗碳排放中的直接碳排放估算。

居民生活能源消耗所产生的碳排放是基于人口空间分布的,需要先进行常住人口空间分布估算。本文建立了2000年、2005年、2008年、2010年和2013年珠三角城市群常住人口与夜间灯光总值拟合模型,具有较高线性关系, P 值均小于1%,通过了1%的显著性检验。考虑到降尺度模型反演的精度问题(吴健生等,2014),拟合模型采用无常数项线性方程见式(1),拟合关系见图3,方程系数见表1。

$$P_{(i)} = a_1 \times SDN \quad (1)$$

式中, $P_{(i)}$ 为第*i*年范围内的模拟常住人口; SDN 为第*i*年范围内夜间灯光总值; a_1 为常数系数。

在常住人口空间化的基础上实现珠三角城市群生活能源消耗碳排放的估算,计算公式见式(2)。

$$C_{sl(i)} = P_{(i)} \times C \quad (2)$$

式中, $C_{sl(i)}$ 第*i*年范围内生活能源消耗模拟碳排放值; $P_{(i)}$ 同式(1); C 为人均居民生活直接碳排放

值。2000年、2005年、2008年、2010年和2013年广东省人均居民生活直接碳排放值参考李玥凝

(2017)的研究结果,分别为0.21吨/人、0.32吨/人、0.38吨/人、0.40吨/人、0.49吨/人。

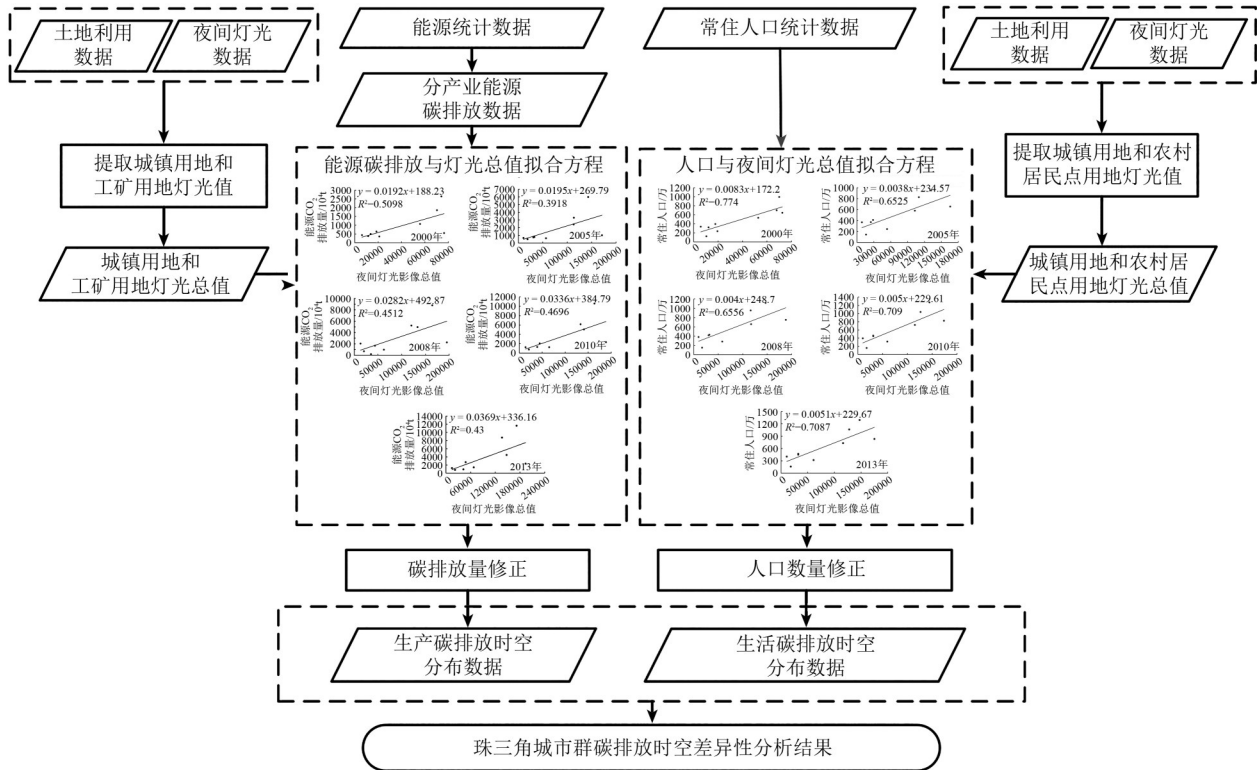


图2 珠三角城市群碳排放时空差异性分析流程图

Fig.2 Flowchart of spatial and temporal difference analysis of carbon emission in PRD

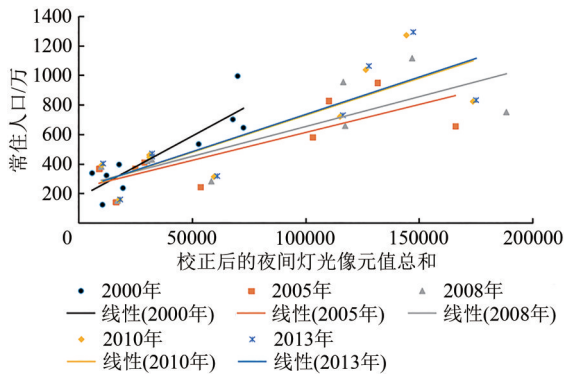


图3 常住人口与夜间灯光总值拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between resident population and total nighttime light value

3.1.2 生产能源消耗碳排放估算

生产能源消耗碳排放根据产业可分为第一产业、第二产业和第三产业。在2000年—2013年珠三角城市群分产业能源消耗中,第一产业的能源消耗碳排放占比较少(最多时为2000年的3.89%),大部分是农业机械和化肥农药的生产导致,且其碳排放空间化较难确定,本文对第一产业能源消耗碳排放暂不考虑。第二产业主要包括工业与建筑业,第三产业主要为批发零售、住宿

餐饮、交通运输和邮政业等。根据土地利用分类及其产业对应关系,本研究中工矿用地对应第二产业中工业碳排放估算,城镇用地对应第二产业中建筑业和第三产业碳排放估算。

表1 常住人口与夜间灯光总值拟合系数表

Table 1 Fitting coefficient between resident population and total nighttime light value

年份	系数		
	a_1	R^2	P
2000	0.0114	0.9143	0.0018
2005	0.0059	0.8677	0.0085
2008	0.0060	0.8704	0.0082
2010	0.0069	0.8957	0.0044
2013	0.0069	0.8972	0.0044

由于2000年—2013年珠三角城市群快速发展,每年生产能源消耗碳排放量与夜间灯光值之间的关系是不同的,本文分别建立了2000年、2005年、2008年、2010年和2013年珠三角生产能源消耗碳排放与夜间灯光总值拟合模型,两者具有较高的线性关系, P 值均小于1%,通过了1%的

显著性检验。考虑到降尺度模型反演的精度问题(吴健生等, 2014), 拟合模型采用无常数项线性方程见式(3), 拟合关系见图4, 方程系数见表2。

$$C_{s23(i)} = C_{s2(i)} + C_{s3(i)} = a_2 \times SDN_{(i)} \quad (3)$$

式中, $C_{s23(i)}$ 为第 i 年范围内生产能源消耗模拟碳排放量; $C_{s2(i)}$ 为第 i 年范围内工矿用地生产能源消耗模拟碳排放; $C_{s3(i)}$ 为第 i 年范围内城镇用地生产能源消耗模拟碳排放; $SDN_{(i)}$ 为第 i 年范围内夜间灯光总值; a_2 为常数系数。

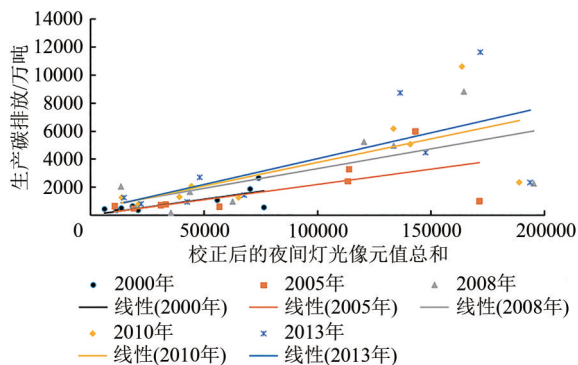


图4 生产能源碳排放与夜间灯光总值拟合关系

Fig.4 Fitting relationship between carbon emissions from energy production and total nighttime light value

表2 生产能源碳排放与夜间灯光总值拟合系数表

Table 2 Fitting coefficient between carbon emissions from energy production and total nighttime light value

年份	系数		
	a_1	R^2	P
2000	0.0224	0.7964	0.0008
2005	0.0218	0.6961	0.0037
2008	0.0319	0.7510	0.0017
2010	0.0365	0.7595	0.0015
2013	0.0393	0.7267	0.0024

3.2 生活能源消耗碳排放空间化

由拟合方程估算得到的模拟碳排放量与实际生活能源消耗碳排放会存在误差, 需要进行修正,

使得生活能源消耗碳排放在地级市尺度更精确, 修正公式为

$$u_i = C_{r1(i)} / C_{s1(i)} \quad (4)$$

$$C_{s1(i)(k)} = a_1 \times SDN_{(i)(k)} \quad (5)$$

$$C_{r1(i)(k)} = C_{s1(i)(k)} \times u_i \quad (6)$$

式中, u_i 为第 i 年生活能源消耗碳排放修正系数; $C_{r1(i)}$ 为第 i 年范围内生活能源消耗统计碳排放; $C_{s1(i)}$ 由式(2)计算; $SDN_{(i)(k)}$ 为第 i 年第 k 个栅格单元夜间灯光值; $C_{s1(i)(k)}$ 为第 i 年第 k 个栅格单元生活能源消耗模拟碳排放值; $C_{r1(i)(k)}$ 即为第 i 年第 k 个栅格单元生活能源消耗碳排放值。

由此, 可计算得到珠三角城市群地级市尺度的生活能源消耗碳排放空间分布(图5)。结果显示, 2000年—2013年珠三角城市群生活能源消耗碳排放量及其空间范围均呈现增长趋势, 其中广州市、深圳市、东莞市和佛山市增长较多, 内部不用地级市之间存在显著的增长异质性。

3.3 生产能源消耗碳排放空间化

3.3.1 工矿用地生产能源消耗碳排放空间化

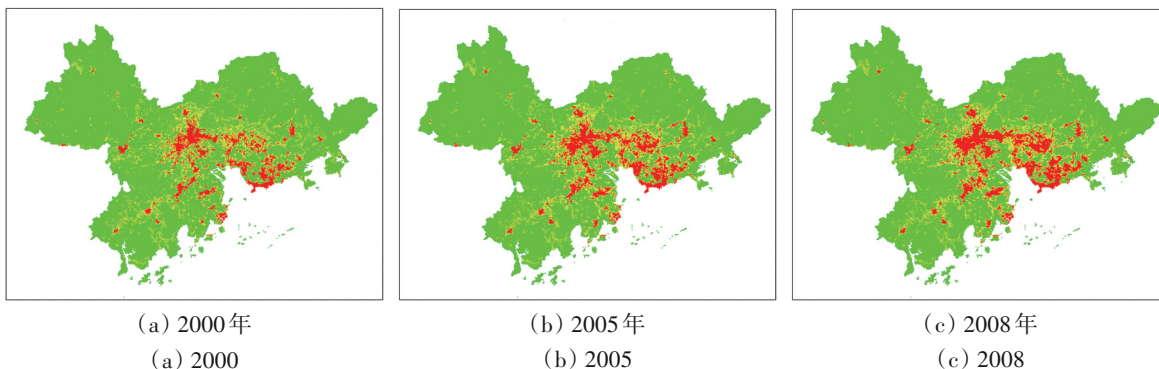
根据以上分析, 工矿用地对应的能源消耗碳排放为工业能源消耗碳排放, 结合市级尺度工业能源消耗碳排放统计数据对每年的工矿用地模拟碳排放进行空间化修正, 以使得珠三角工矿用地生产能源消耗碳排放估算结果更精确, 修正公式为

$$m_i = C_{r2(i)} / C_{s2(i)} \quad (7)$$

$$C_{s2(i)(k)} = a_2 \times SDN_{(i)(k)} \quad (8)$$

$$C_{r2(i)(k)} = C_{s2(i)(k)} \times m_i \quad (9)$$

式中, m_i 为第 i 年工矿用地碳排放修正系数; $C_{r2(i)}$ 为第 i 年范围内工矿用地生产能源消耗统计碳排放; $C_{s2(i)}$ 同式(3); $SDN_{(i)(k)}$ 同式(5); $C_{s2(i)(k)}$ 为第 i 年第 k 个栅格单元工矿用地生产能源消耗模拟碳排放值; $C_{r2(i)(k)}$ 即为第 i 年第 k 个栅格单元工矿用地生产能源消耗碳排放值。



(a) 2000年
(a) 2000

(b) 2005年
(b) 2005

(c) 2008年
(c) 2008

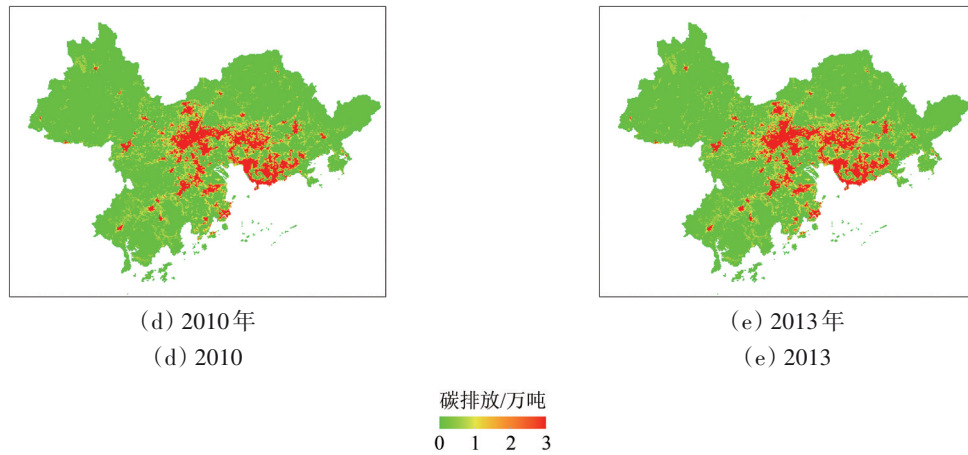


图5 珠三角生活能源消耗碳排放分布图

Fig.5 Carbon emission of domestic energy consumption in PRD

由此,可计算得到珠三角城市群的工矿用地生产能源消耗碳排放空间分布(图6)。结果显示,工矿用地生产能源消耗碳排放量在2005年和2008年呈现明显增长,而在2010年和2013年则显著降

低;同时工矿用地生产能源消耗碳排放空间范围呈现逐年扩张趋势,其中广州市、东莞市和惠州市的空间范围增长较为明显。

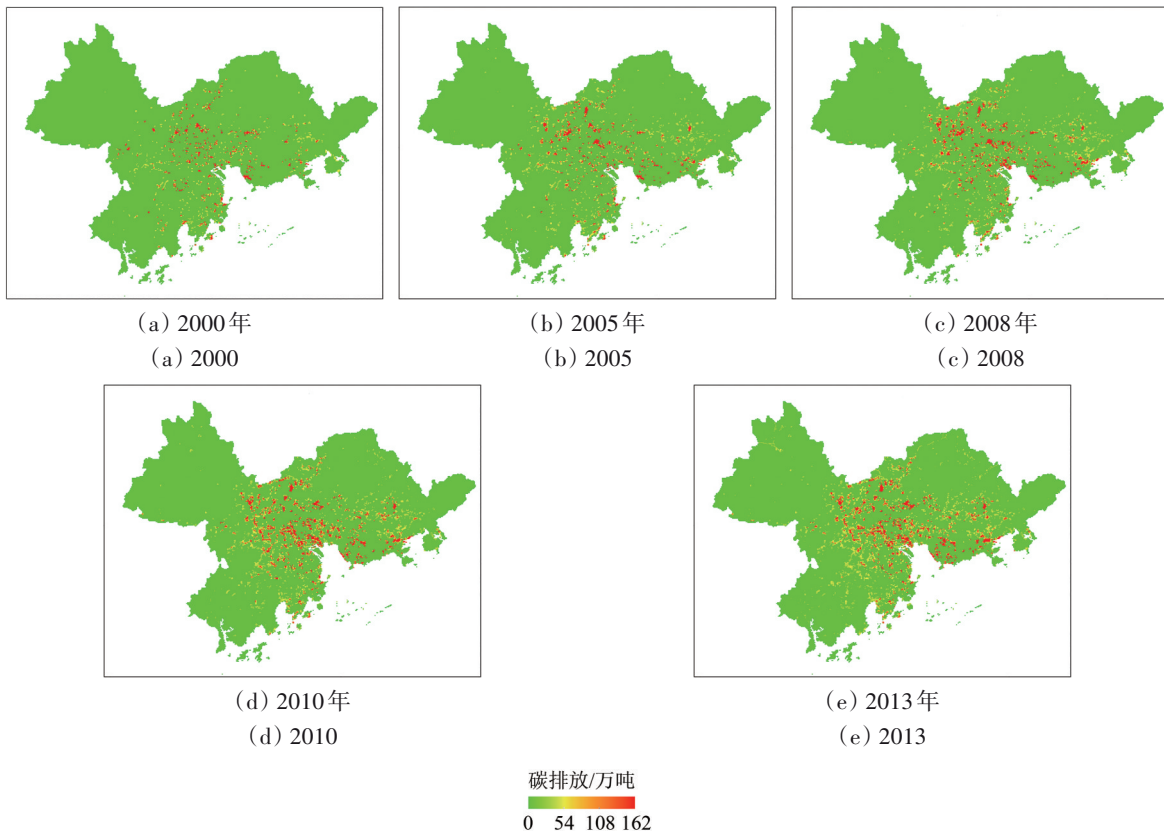


图6 珠三角工矿用地生产能源消耗碳排放分布图

Fig.6 Carbon emission from productive energy consumption of industrial and mining land in PRD

3.3.2 城镇用地生产能源消耗碳排放空间化

根据以上分析,城镇用地对应的能源消耗碳排放为第二产业中建筑业和第三产业的能源消耗

碳排放,结合市级尺度对应的能源消耗碳排放统计数据对每年的城镇用地碳排放格网进行空间化修正,以使得珠三角城镇用地生产能源消耗碳排

放估算结果更精确, 修正公式为

$$n_i = C_{r3(i)} / C_{s3(i)} \quad (10)$$

$$C_{s3(i)(k)} = a_2 \times SDN_{(i)(k)} \quad (11)$$

$$C_{r3(i)(k)} = C_{s3(i)(k)} \times n_j \quad (12)$$

式中, n_i 为第 i 年城镇用地生产碳排放修正系数; $C_{r3(i)}$ 为第 i 年范围内城镇用地生产能源消耗统计碳排放; $C_{s3(i)}$ 同式 (3); $SDN_{(i)(k)}$ 同式 (5); $C_{s3(i)(k)}$ 为第 i 年第 k 个栅格单元城镇用地生产能源消耗模拟碳排放值; $C_{r3(i)(k)}$ 即为第 i 年第 k 个栅格单元城镇用

地生产能源消耗碳排放值。

由此, 可计算得到珠三角城市群的城镇用地生产能源消耗碳排放空间分布 (图7)。结果显示, 城镇用地生产能源消耗碳排放量及其空间范围均呈现增长趋势, 并存在显著的增长空间异质性, 广州市、深圳市、东莞市和佛山市的空间范围增长较为明显, 其中东莞市和佛山市的城镇用地碳排放强度相较于广州市和深圳市较低。

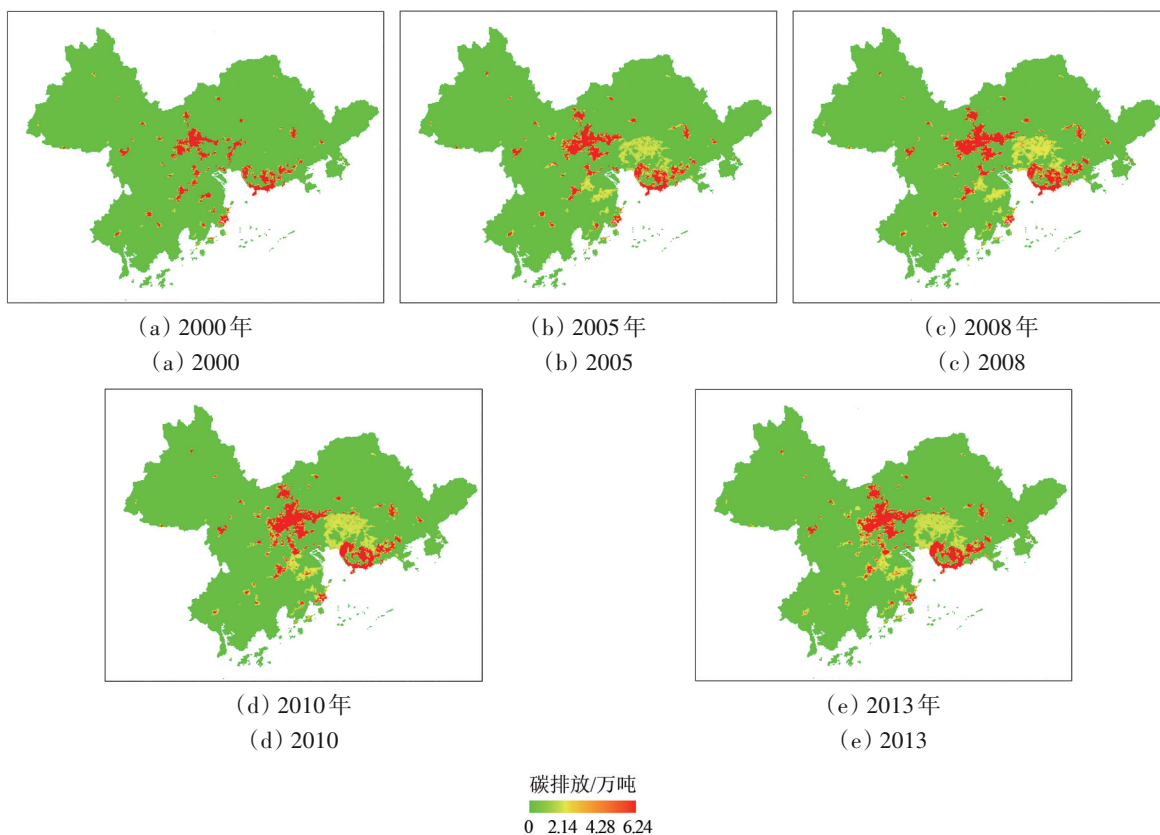


图7 珠三角城镇用地生产能源消耗碳排放分布图

Fig.7 Carbon emission from productive energy consumption of urban land in PRD

4 珠三角城市群碳排放时空差异分析

4.1 模型结果精度检验

为了检验常住人口估算模型和生产能源消耗碳排放估算模型, 分别将2000年、2005年、2008年、2010年和2013年的珠三角常住人口、生产能源消耗碳排放量的估算值与统计值进行误差分析 (见表3和表4)。结果表明, 本文构建的模型结果精度较高, 可用于珠三角城市群碳排放时空差异分析研究。

表3 珠三角城市群常住人口估算精度

Table 3 Estimate accuracy of permanent population in PRD

年份	绝对误差/万人	相对误差/%
2000	6.18	0.14
2005	10.10	0.22
2008	30.17	0.59
2010	14.43	0.26
2013	32.52	0.57

4.2 2000年—2013年珠三角碳排放总体特征

珠三角城市群碳排放总量为生活和生产能源消耗碳排放的总和。2000年—2013年的珠三角城市

群碳排放时空分布差异较大，其碳排放空间分布见图8。通过计算结果发现：2000年—2013年珠三角城市群碳排放量一直处于增长阶段，其中2005年—2008年碳排放增长最多，达到年均增长3540.12万t；此后受2008年金融危机影响，增长速度减缓，2008年—2010年年均增长2096.36万t，2010年—2013年持续减缓，年均增长1146.13万t/a。

同时，通过空间自相关分析方法，计算得到珠三角城市群碳排放总量、生活、城镇用地和工矿用地的能源消耗碳排放的Moran's I值（表5），其Z统计量均大于2.58，表明计算结果有效且显著。四者能源消耗碳排放的Moran's I值均大于0，

表明该区域存在能源消耗碳排放空间聚集效应，且整体逐步增强，其中城镇用地能源消耗碳排放空间聚集效应最为显著。

表4 珠三角生产能源消耗碳排放估算精度

Table 4 Estimate accuracy of carbon emission from production energy consumption in PRD

年份	绝对误差/(10 ⁴ t)	相对误差/%
2000	584.66	7.00
2005	850.22	3.82
2008	1488.20	5.58
2010	1144.78	3.72
2013	956.69	2.80

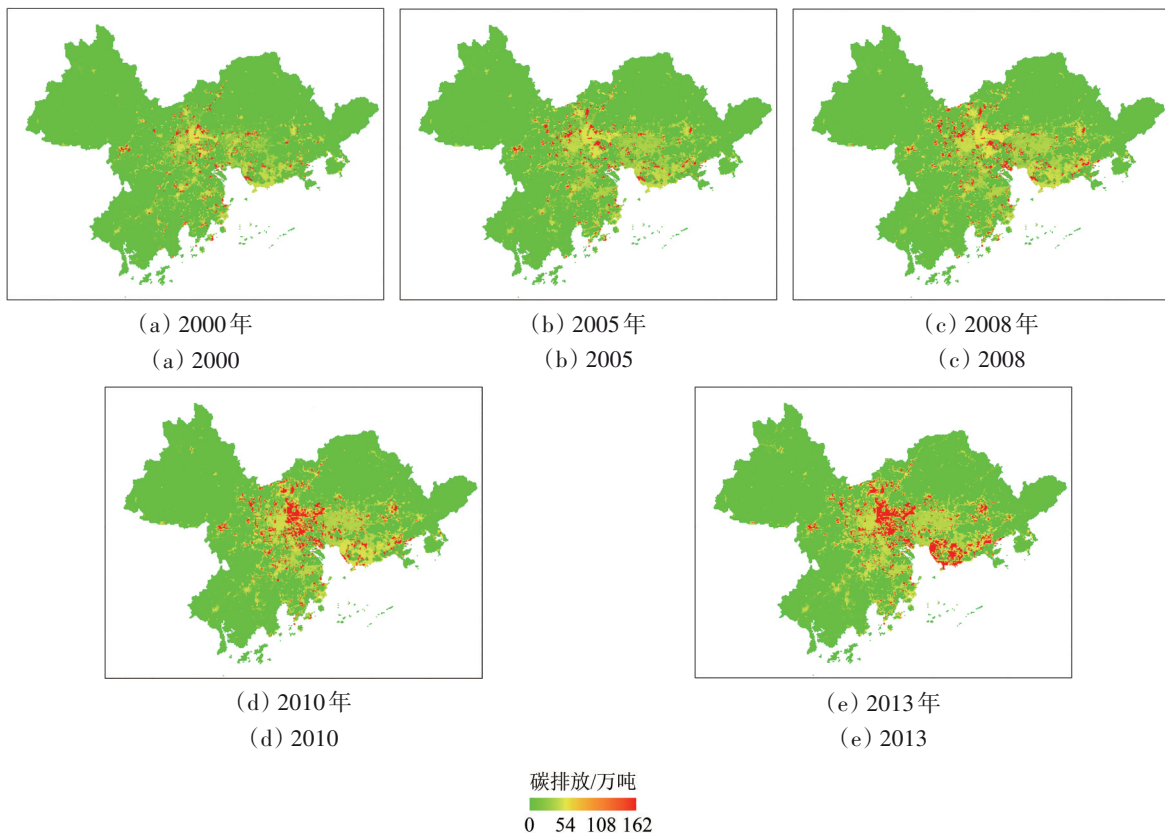


图8 珠三角城市群碳排放空间分布图
Fig.8 Carbon emission distribution in PRD

表5 珠三角城市群碳排放 Moran's I 值

Table 5 Moran's I value of carbon emission in PRD

年份	碳排放总量	生活碳排放	工矿用地碳排放	城镇用地碳排放
2000	0.1429	0.1937	0.2146	0.6762
2005	0.1373	0.1824	0.3333	0.7759
2008	0.1445	0.2082	0.1846	0.6904
2010	0.1670	0.2379	0.1859	0.5544
2013	0.2145	0.2516	0.2615	0.7738

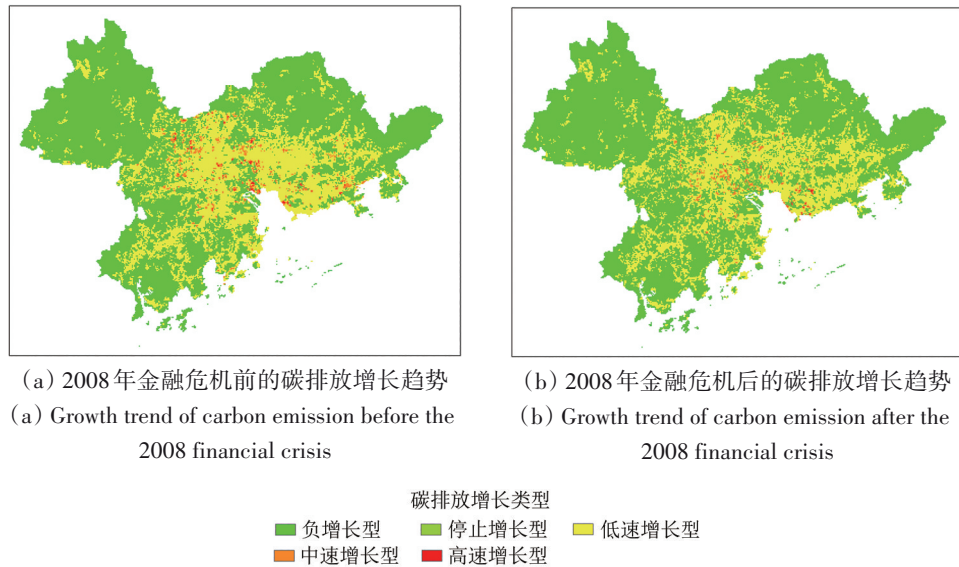
4.3 2000年—2013年珠三角碳排放时空差异

在2008年金融危机前后，不同地级市、不同用地类、同用地类不同区域之间的碳排放及其增长速度都具有明显的空间异质性。

(1) 2008年金融危机后，除中山市和肇庆市外，珠三角大部分市（特别是佛山市和东莞市）的碳排放增速明显减缓，2008年金融危机前的

2005年—2008年和危机后的2008年—2010年珠三

角年均碳排放变化趋势见图9。



(a) 2008年金融危机前的碳排放增长趋势
(a) Growth trend of carbon emission before the 2008 financial crisis

(b) 2008年金融危机后的碳排放增长趋势
(b) Growth trend of carbon emission after the 2008 financial crisis

图9 2008年金融危机前后的珠三角城市群年均碳排放增长趋势

Fig.9 Growth trend of carbon emission per year in PRD before and after the 2008 financial crisis

佛山市的碳排放增速从2005年—2008年的843.65万t/a下降到2008年—2010年的51.94万t/a；东莞市由2008年金融危机前的414.94万t/a下降到危机后的41.20万t/a；其他市的年均增速也不同程度地降低，广州市年均增速减少了42.87万t/a，深圳市减少了172.94万t/a，珠海市减少了23.94万t/a，惠州市减少了88.42万t/a，江门市减少了108.99万t/a。

(2) 2000年—2013年的珠三角城市群的工矿用地生产能源消耗碳排放占同期碳排放总量的比例呈逐年递减趋势，而城镇用地碳排放占比逐年递增。特别是2008年金融危机后，工矿用地生产能源消耗碳排放占比明显下降，由2005年—2008年的年均减少1.10%过渡到2008年—2010年的年均减少2.97%，随后2010年—2013年的年均减少1.53%。

珠三角九市内部的工矿用地生产能源消耗碳排放占该市碳排放总量的比例也具有明显空间差异，惠州市工矿用地碳排放量年均占比最大，为83%；广州市工矿用地碳排放量年均占比最小，为71%，珠三角城市群的总体平均占比为79%。2008年金融危机后，佛山市和广州市工矿用地生产能源消耗碳排放占比减少最显著，分别年均减少3.70%和3.31%，其他城市减少程度较小，珠三角城市群整体年均减少2.97%。

4.4 2000年—2013年珠三角碳排放强度趋势分析

(1) 常住人口人均碳排放强度：2000年—2013年珠三角城市群人均碳排放强度处于增长阶段，但在2008年金融危机后，增速明显减缓，由2005年—2008年的年均增长4.41 t/人年减缓到2008年—2010年的1.41 t/人年。2000年—2013年珠三角九市的常住人口人均碳排放强度见图10，可发现：个别城市还出现负增长情况，如佛山市和东莞市；广州市、深圳市人均碳排放强度增长较快且处于高位，如2013年广州市、深圳市人均碳排放强度分别为8.98 t/人、8.20 t/人，而同期江门市仅为2.08 t/人。

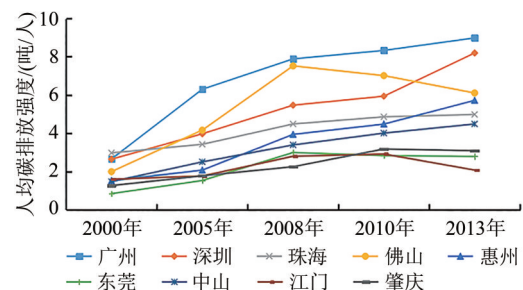


图10 2000年—2013年珠三角九市的人均碳排放强度

Fig.10 Per capita carbon emission intensity in PRD from 2000 to 2013

(2) 单位GDP碳排放强度：2000年—2013年珠三角城市群九市的单位GDP碳排放强度（图11）

基本处于缓慢负增长阶段,由2005年—2008年的缓慢正增长转变为2008年—2013年的负增长阶段。2013年惠州市的单位GDP碳排放强度最大,为1.00 t/万元,随后是广州市和肇庆市,均为0.75 t/万元,其他市均处于0.42—0.63 t/万元,差别较小。

(3) 地均碳排放强度:2000年—2013年珠三角城市群九市的工矿和城镇用地的地均碳排放强度见图12。珠三角城市群的工矿用地的地均碳排放强度经历了2000年—2005年的负增长、2005年—2008年的正增长到2008年—2013年的负增长三个阶段,各年的工矿用地的地均碳排放强度分别为 1.98×10^5 t/km²、 1.77×10^5 t/km²、 2.09×10^5 t/km²、 1.72×10^5 t/km²和 1.46×10^5 t/km²。珠三角九市的工矿

用地的地均碳排放强度见图12(a),各市大体趋势基本一致,深圳市明显高于同期其他地级市。

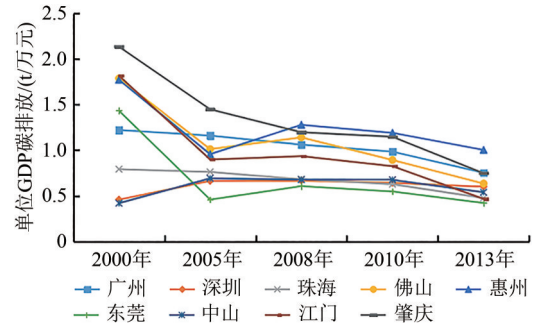
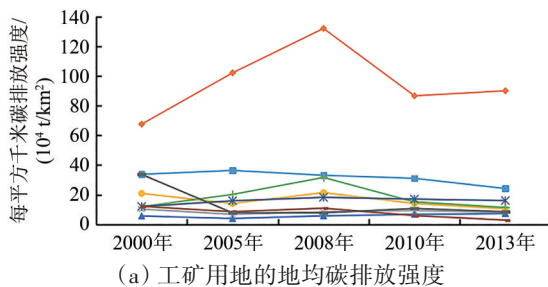
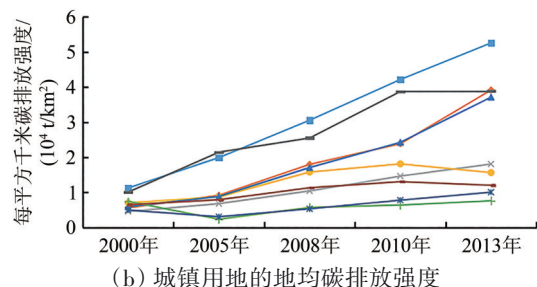


图11 2000年—2013年珠三角九市的单位GDP碳排放强度
Fig.11 Carbon emission intensity per unit of GDP in PRD from 2000 to 2013



(a) Carbon emission intensity of industrial and mining land



(b) Carbon emission intensity of urban land

图12 2000年—2013年珠三角城市群九市的地均碳排放强度

Fig.12 Carbon emission intensity per square kilometer in PRD from 2000 to 2013

2000年—2013年的珠三角城市群城镇用地的地均碳排放强度呈现较快增长趋势,各年的城镇用地的地均碳排放强度分别为 7.44×10^3 t/km²、 9.53×10^3 t/km²、 1.60×10^4 t/km²、 2.07×10^4 t/km²和 2.64×10^4 t/km²。珠三角九市的城镇用地的地均碳排放强度见图12(b),各市(除个别年份的佛山、肇庆等市)基本上处于增长阶段。

5 讨论

当前已有较多学者结合夜间灯光影像进行碳排放研究,大部分研究成果集中在碳排放的估算与省市/地域尺度的空间化,或者直接利用夜间灯光影像数据的灯光总值进行空间分布分析(Wen等,2019)。但是,还需要考虑不同用地类型、同一用地类型的不同能源消耗碳排放等差异性,探索碳排放精准估算和精细空间化途径。

本文结合土地利用数据的碳排放精细估算及

时空分布以揭示2000年—2013年珠三角城市群碳排放时空差异性。土地利用数据的引入为基于夜间灯光影像数据的碳排放估算与空间化提供细化约束,能够揭示珠三角城市群及其内部各地级市的碳排放时空分布及差异规律。

结果分析表明,2000年—2013年珠三角城市群存在显著的碳排放时空差异,2008年金融危机后,这种碳排放时空差异变得更加复杂。2008年金融危机前,珠三角城市群总体碳排放呈高速增长,而危机后其增速逐渐降低。从不同用地类型角度,珠三角城市群的城镇用地的地均碳排放强度基本处于逐年增长趋势;而2008年金融危机后的工矿用地的地均碳排放强度明显下降。这可能的原因是:2008年金融危机后珠三角城市群工业发展较成熟,产业结构/能源结构优化调整,能源利用水平提高,产业朝着更低耗、绿色环保的方向发展;2008年—2013年,第三产业飞速发展,

其碳排放增速加快, 城镇用地能源消耗碳排放占比在2008年金融危机后明显增大, 总体增速大于危机前。随着珠三角城市群第三产业的快速发展, 城镇用地碳排放持续增长将成为碳减排的关键问题。

另外, 珠三角城市群不同地级市的碳排放具有较独特的现实特征, 应该因地制宜制定碳减排策略。广州市、深圳市、佛山市一直处于碳排放高位, 相对而言肇庆市、江门市、珠海市、中山市的碳排放较少。各地市的经济水平与产业/能源结构、能源利用水平可能是这种差异的关键原因。

6 结 论

本文结合夜间灯光影像数据与土地利用数据分析探索了2000年—2013年珠三角城市群碳排放估算及其时空差异性, 揭示了2008年金融危机前后碳排放总量、常住人口人均/地均/单位GDP等碳排放强度分布及其趋势规律。研究结果表明:

(1) 夜间灯光影像能够较好地监测常住人口和生产能源碳排放的空间分布。2000年、2005年、2008年、2010年和2013年夜间灯光总值与常住人口、生产能源碳排放均具有较高的线性相关性, 其中夜间灯光总值与常住人口、生产能源碳排放的 R^2 值域分别为0.8677—0.9143、0.6961—0.7964, 且均通过了1%的显著性检验。

(2) 2000年—2013年珠三角城市群碳排放量存在明显的时空变化差异, 但整体处于增长阶段, 不过2008年金融危机的影响使其增长速度减缓。此外, 珠三角城市群碳排放具有空间聚集效应, 且该效应逐步增强。

(3) 2008年金融危机对珠三角城市群碳排放强度具有较大的影响, 使得人均碳排放增长速度减缓, 单位GDP碳排放和工矿用地的地均碳排放, 在2008年金融危机后均处于转为降低趋势, 但是城镇的地均碳排放一直处于增长趋势。

同时, 考虑到碳排放的复杂机理过程, 基于夜间灯光影像等数据的碳排放空间分布估算、影响因素和趋势预测等还需进一步深入研究。

参考文献(References)

Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q and Huang N S. 2015. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China. *Journal of Geo-information Science*, 17(9): 1092-1102 (曹子阳,

吴志峰, 匡耀求, 黄宁生. 2015. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用. *地球信息科学学报*, 17(9): 1092-1102 [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01092]

Chen Q and Hou X Y. 2015. An improved population spatialization model by combining land use data and DMSP/OLS data. *Journal of Geo-Information Science*, 17(11): 1370-1377 (陈晴, 侯西勇. 2015. 集成土地利用数据和夜间灯光数据优化人口空间化模型. *地球信息科学学报*, 17(11): 1370-1377) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.01370]

Doll C N H, Muller J P and Elvidge C D. 2000. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(3): 157-162 [DOI: 10.1579/0044-7447-29.3.157]

Gao Q and Alimujiang K S M. 2017. Modeling the population spatial distribution of Tianshan North-slope urban agglomeration based on DMSP/OLS night lighting data. *Northwest Population Journal*, 38(3): 113-120 (高倩, 阿里木江·卡斯木. 2017. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的天山北坡城市群人口分布空间模拟. *西北人口*, 38(3): 113-120) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-0672.2017.03.016]

Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, Baugh K E, Ziskin D and Tuttle B T. 2010. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO₂ emissions from nighttime satellite imagery. *Energies*, 3(12): 1895-1913 [DOI: 10.3390/en3121895]

Gu Y Y, Qiao X N, Fan L X, Guan Z M, Feng D X and Gao Y H. 2017. Spatial analysis of carbon emissions from region energy consumption based on night light data. *Science of Surveying and Mapping*, 42(2): 140-146 (顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 关中美, 冯德显, 高亚红. 2017. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化. *测绘科学*, 42(2): 140-146) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.02.027]

Guo X Y, Yan Q W, Tan X Y and Liu S J. 2016. Spatial distribution of carbon emissions based on DMSP/OLS nighttime light data and NDVI in Jiangsu province. *World Regional Studies*, 25(4): 102-110 (郭忻怡, 闫庆武, 谭晓悦, 刘思佳. 2016. 基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟. *世界地理研究*, 25(4): 102-110) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-9479.2016.04.012]

Hu Y F, Zhao G H and Zhang Q L. 2018. Spatial distribution of population data based on nighttime light and LUC data in the Sichuan-Chongqing region. *Journal of Geo-information Science*, 20(1): 68-78 (胡云锋, 赵冠华, 张千力. 2018. 基于夜间灯光与LUC数据的川渝地区人口空间化研究. *地球信息科学学报*, 20(1): 68-78) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.170224]

Huang J, Yan Q W and Liu Y W. 2015. Modeling the population density of Jiangsu province based on DMSP/OLS satellite imagery and land use data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 24(5): 735-741 (黄杰, 闫庆武, 刘永伟. 2015. 基于DMSP/OLS与土地利用的江苏省人口数据空间化研究. *长江流域资源与环境*, 24(5): 735-741) [DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201505004]

Jiang W and Zeng H Y. 2019. Research on the relations among energy consumption, carbon emission and economic growth—take Hubei province as an example. *Productivity Research*, (11): 29-33 (江威, 曾海鹰. 2019. 能源消费、碳排放与经济增长的关系研究——以湖北省为例. *生产力研究*, (11): 29-33) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-2768.2019.11.007]

Li X, Chen Z J, Wu J X, Wang W X, Qu L A, Zhou C and Han X F.

2017. Gridding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models. *Journal of Geo-information Science*, 19(10): 1298-1305 (李翔, 陈振杰, 吴洁璇, 汪文祥, 曲乐安, 周琛, 韩肖锋. 2017. 基于夜间灯光数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究. *地球信息科学学报*, 19(10): 1298-1305) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01298]
- Li Y N. 2017. Research on Calculation and Impact Factors of Household Carbon Dioxide Emissions in Guangdong Province. Harbin: Harbin Institute of Technology (李玥凝. 2017. 广东省居民生活消费二氧化碳排放测算与影响因素研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)
- Liu Z C, Wang A J, Yu W J and Li M. 2010. Research on regional carbon emissions in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(5): 727-732 (刘占成, 王安建, 于汶加, 李铭. 2010. 中国区域碳排放研究. *地球学报*, 31(5): 727-732) [DOI: 10.3975/cagsb.2010.05.17]
- Liu H L and Liu G F. 2014. Spatial effects of carbon dioxide emissions from residential energy consumption: a county-level study using enhanced nocturnal lighting. *Applied Energy*, 131: 297-306 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.036]
- Lu X, Li J, Duan P, Li C and Wang J L. 2019a. Spatial difference of GDP in Yunnan border area based on nighttime light and land use data. *Journal of Geo-Information Science*, 21(3): 455-466 (卢秀, 李佳, 段平, 李晨, 王金亮. 2019a. 基于夜间灯光和土地利用数据的云南沿边地区GDP空间差异性分析. *地球信息科学学报*, 21(3): 455-466) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180483]
- Lu X, Li J, Duan P, Zhang B R and Li C. 2019b. Correction of nighttime light images of DMSP/OLS in China. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 7: 127-131, 159 (卢秀, 李佳, 段平, 张碧蓉, 李晨. 2019b. 中国区域DMSP/OLS夜间灯光影像的校正. *测绘通报*, (7): 127-131, 159) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0234]
- Lv Q and Liu H B. 2019. Spatio-temporal evolution characteristics of county scale carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region—a study based on DMSP/OLS nighttime light data. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 21(6): 41-50 (吕倩, 刘海滨. 2019. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于DMSP/OLS夜间灯光数据. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 21(6): 41-50) [DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.7493]
- Ma Z Y and Xiao H W. 2017. Spatiotemporal simulation study of China's provincial carbon emissions based on satellite night lighting data. *China Population Resources and Environment*, 27(9): 143-150 (马忠玉, 肖宏伟. 2017. 基于卫星夜间灯光数据的中国分省碳排放时空模拟. *中国人口·资源与环境*, 27(9): 143-150) [DOI: 10.12062/cpre.20170502]
- Shi K F, Chen Y, Yu B L, Xu T B, Chen Z Q, Liu R, Li L Y and Wu J P. 2016. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis. *Applied Energy*, 168: 523-533 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.055]
- Shi K F, Xu T, Li Y Q, Chen Z Q, Gong W K, Wu J P and Yu B L. 2020. Effects of urban forms on CO₂ emissions in China from a multi-perspective analysis. *Journal of Environmental Management*, 262: 110300 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110300]
- Shi K F, Yu B L, Zhou Y Y, Chen Y, Yang C S, Chen Z Q and Wu J P. 2019. Spatiotemporal variations of CO₂ emissions and their impact factors in China: a comparative analysis between the provincial and prefectural levels. *Applied Energy*, 233-234: 170-181 [DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.050]
- Su X R and Lin X Q. 2019. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of carbon emission in Beijing, Tianjin and Hebei based on night light data. *Journal of Capital Normal University (Natural Sciences Edition)*, 40(4): 48-57 (苏旭冉, 蔺雪芹. 2019. 基于夜间灯光数据的京津冀地区碳排放的时空演化特征及影响因素. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 40(4): 48-57) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-9398.2019.04.012]
- Su Y X, Chen X Z, Ye Y Y, Wu Q T, Zhang H O, Huang N S and Kuang Y Q. 2013. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries. *Acta Geographica Sinica*, 68(11): 1513-1526 (苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 2013. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. *地理学报*, 68(11): 1513-1526) [DOI: 10.11821/dlxb201311007]
- Wan W Y, Zhao X Y and Wang W J. 2016. Spatial-temporal patterns and impact factors analysis on carbon emissions from energy consumption of urban residents in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(9): 3445-3455 (万文玉, 赵雪雁, 王伟军. 2016. 中国城市居民生活能源碳排放的时空格局及影响因素分析. *环境科学学报*, 36(9): 3445-3455) [DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0817]
- Wang M M and Wang J L. 2019. Spatialization of township-level population based on nighttime light and land use data in Shandong province. *Journal of Geo-information Science*, 21(5): 699-709 (王明明, 王卷乐. 2019. 基于夜间灯光与土地利用数据的山东省乡镇级人口数据空间化. *地球信息科学学报*, 21(5): 699-709) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.180497]
- Wen J Q, Chuai X W, Li S C, Song S, Li Y W, Wang M J and Wu S S. 2019. Spatial heterogeneity of the carbon emission effect resulting from urban expansion among three coastal agglomerations in China. *Sustainability*, 11(17): 4590 [DOI: 10.3390/su11174590]
- Wu J S, Li S and Zhang X W. 2018. Research on saturation correction for long-time series of DMSP-OLS nighttime light dataset in China. *Journal of Remote Sensing*, 22(4): 621-632 (吴健生, 李双, 张曦文. 2018. 中国DMSP-OLS长时间序列夜间灯光遥感数据饱和校正研究. *遥感学报*, 22(4): 621-632) [DOI: 10.11834/jrs.20187174]
- Wu J S, Niu Y, Peng J, Wang Z and Huang X L. 2014. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light. *Geographical Research*, 33(4): 625-634 (吴健生, 牛妍, 彭建, 王政, 黄秀兰. 2014. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态. *地理研究*, 33(4): 625-634) [DOI: 10.11821/dlyj201404003]
- Wu N, Shen L and Zhong S. 2019. Spatio-temporal pattern of carbon emissions based on nightlight data of the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region of China. *Journal of Geo-Information Science*, 21(7): 1040-1050 (武娜, 沈镭, 钟帅. 2019. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局. *地球信息科学学报*, 21(7): 1040-1050) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.190010]
- Xiao G F, Zhu X F, Cai Y and Sun Z L. 2018. GDP spatialization in Henan Province based on multi-source data. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 54(2): 232-238 (肖国峰, 朱秀芳, 蔡毅, 孙章丽. 2018. 基于多源数据的河南省GDP空间

- 化. 北京师范大学学报(自然科学版), 54(2): 232-238 [DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.02.014]
- Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, Li R D, Yan C Z and Wu S X. 2018. China many periods of land use land cover remote sensing monitoring data set (CNLUCC)[EB/OL]. Chinese Academy of Sciences, resources and environment science data center data registration and publication system <http://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/literature/11017d06-010c-40cc-8db9-cc47df17d0ac/> (徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 2018. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统 <http://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/literature/11017d06-010c-40cc-8db9-cc47df17d0ac/>)
- Xu X L, Liu J Y, Zhang X Z, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X and Shi X Z. 2017. A time series land ecosystem classification dataset of China in five-year increments (1990-2010). *Journal of Global Change Data and Discovery*, 1(1): 52-59 (徐新良, 刘纪远, 张增祥, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正. 2017. 中国5年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990-2010)内容与研发. *全球变化数据学报*, 1(1): 52-59) [DOI: 10.3974/geodp.2017.01.08]
- Xu Y Y, Zhou T G, Li H Z, Zhu W D and Yang Y J. 2019. Study on spatial-temporal dynamics of carbon emissions in Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on DMSP/OLS nighttime light data. *Environmental Pollution and Control*, 41(12): 1504-1511 (许燕燕, 周廷刚, 李洪忠, 朱文东, 杨永健. 2019. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的成渝城市群碳排放时空动态特征研究. *环境污染与防治*, 41(12): 1504-1511) [DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.12.022]
- Yu B, Yang X and Wu X L. 2020. Study on spatial spillover effects and influencing factors of carbon emissions in county areas of Ha-Chang city group: evidence from NPP-VIIRS nighttime light data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(2): 697-706 (于博, 杨旭, 吴相利. 2020. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于NPP-VIIRS夜间灯光数据的实证. *环境科学学报*, 40(2): 697-706) [DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0402]
- Yu B L, Wang C X, Gong W K, Chen Z Q, Shi K F, Wu B, Hong Y C, Li Q X and Wu J P. 2021. Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 342-364 (余柏菡, 王丛笑, 宫文康, 陈佐旗, 施开放, 吴宾, 洪宇辰, 李乔玄, 吴健平. 2021. 夜间灯光遥感与城市问题研究: 数据、方法、应用和展望. *遥感学报*, 25(1): 342-364) [DOI: 10.11834/jrs.20211018]
- Zhang Y N and Pan J H. 2019. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data. *China Environmental Science*, 39(4): 1436-1446 (张永年, 潘竞虎. 2019. 基于DMSP/OLS数据的中国碳排放时空模拟与分异格局. *中国环境科学*, 39(4): 1436-1446) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2019.04.011]
- Zhang Y Z, Yang X C, Hu K J, Chen Q and Chen J. 2018. GDP spatialization in the coastal area of China based on multi-sensor remote sensing data and land use data. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(2): 235-242 (张怡哲, 杨续超, 胡可嘉, 陈倩, 陈江. 2018. 基于多源遥感信息和土地利用数据的中国海岸带GDP空间化模拟. *长江流域资源与环境*, 27(2): 235-242) [DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201802002]
- Zhao L L, Meng F and Ma C X. 2016. The analysis on spatial distribution and evolution of the population in Wuhan city based on multi-source remote sensing data. *Areal Research and Development*, 35(3): 165-169 (赵利利, 孟芬, 马才学. 2016. 基于多源遥感数据的武汉市人口空间分布格局演化. *地域研究与开发*, 35(3): 165-169) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2016.03.031]
- Zhao R Q, Huang X J and Zhong T Y. 2010. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 65(9): 1048-1057 (赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 2010. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 65(9): 1048-1057) [DOI: 10.11821/xb201009002]

Analyzing the spatiotemporal differences of carbon emission in the Pearl River Delta using DMSP/OLS nighttime light images

WANG Yanjun^{1,2,3}, WANG Mengjie^{1,2,3}, LIU Lin^{4,5}, LI Shaochun^{1,2,3}, LIN Yunhao^{1,2,3}

1. Hunan Provincial Key Laboratory of Geo-Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. National-local Joint Engineering Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. School of Geography Science and Remote Sensing, Center of GeoInformatics for Public Security, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

5. Department of Geography, University of Cincinnati, Cincinnati, OH45221-0131, USA

Abstract: The temporal and spatial distribution of carbon emissions and their heterogeneity are important topics in the study of ecological environment protection and climate change monitoring.

Based on the fine analysis of the spatial distribution of carbon emissions in the Pearl River Delta urban agglomeration, this paper studies the spatial-temporal differences of carbon emissions in the area from 2000 to 2013 based on DMSP/OLS nighttime light images and land use data. This paper also reveals the spatial-temporal distribution characteristics, growth trend, and intensity trend of carbon emissions in different cities and land types.

Results show the following. (1) The total carbon emissions of the Pearl River Delta urban agglomerations from 2000 to 2013 have been in the growth stage, but due to the 2008 financial crisis, the growth has turned from a high-speed growth stage to a slow growth stage. (2) The growth rate of per capita carbon emission intensity slowed down after the 2008 financial crisis. (3) The carbon emission intensity per unit of GDP experienced a small growth stage from 2005 to 2008, and then the overall trend is decreasing. (4) In terms of carbon emission intensity per square kilometer, the average carbon emission intensity of industrial and mining land transited from the growth stage before the 2008 financial crisis to the post-crisis reduction phase, while the average carbon emission intensity of urban land has been in a continuous growth phase. The carbon emissions of the Pearl River Delta urban agglomeration have obvious temporal and spatial differences before and after the 2008 financial crisis, and the continuous growth of carbon emissions from urban land will become a key issue for carbon emission reduction.

This study can provide a scientific reference for carbon emission estimation and prediction, energy conservation and emission reduction, and ecological environment protection.

Keywords: carbon emission, spatial and temporal distribution, DMSP/OLS nighttime light image, land use data, refinement

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41971423, 31972951, 41771462); Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2020JJ3020); Science and Technology Planning Project of Hunan Province (No. 2019RS2043, 2019GK2132); Outstanding Youth Project of Education Department of Hunan Province (No. 18B224); Foundation for Innovative Research Groups of the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2020JJ1003)