

中国城市 CO₂ 排放核算 及其特征分析

王兴民 吴静 王铮 贾晓婷 白冰

摘要 准确估算城市的 CO₂ 排放水平, 是科学制定城市低碳政策的前提。作者基于城市层面的 20 种能源消费数据, 运用碳排放系数法重新估算了中国 2016 年 198 个地州市的 CO₂ 排放, 并对其空间格局和尺度特征进行分析, 结论如下: (1) 从整体看, 中国城市 CO₂ 排在总量、人均和排放强度上呈现一定程度的空间分离特征; 其中, 中国 CO₂ 排放总量最高的城市主要集中在华北、华东和重庆等地区, 人均排放水平和排放强度最高的城市则主要集中在西北和华北地区。(2) 不同类型城市的 CO₂ 排放特征有所不同。资源型城市的 CO₂ 排放总量和排放强度两个指标均较高; 旅游与欠发达城市则均较低; 而超大城市与许多特大城市 CO₂ 排放总量较高, 但排放强度一般均较低; 其他城市则不存在明显规律。(3) 空间分析表明, 中国 CO₂ 高排放城市呈现聚集特征, 京津冀、长三角、山东以及晋豫皖资源产区是高排放城市的聚集区。(4) 尺度分析表明, 不同尺度的 CO₂ 排放特征会有所不同。省级尺度的研究有助于分析碳排放的环境影响和总量效应, 而城市尺度的研究有助于探究城市的多样性和阶段性。最后, 基于本研究主要结论, 得出相应的政策启示。

关键词 CO₂ 估算 空间格局 产业转移 尺度效应 地州市

[中图分类号] X24 [文献标识码] A [文章编号] 2095 - 851X (2020) 01 - 0067 - 14

【基金项目】 国家自然科学基金项目“《巴黎协定》背景下我国城市参与国家气候治理的分类机制及政策研究——基于可计算模拟评估”(批准号: 41871219); 国家社会科学基金青年项目“我国城市群碳源演变机理及低碳转型研究”(批准号: 14CJY032)。

【作者简介】 王兴民 (1987 -), 中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院大学博士研究生, 邮政编码: 100190; 吴静 (1981 -), 中国科学院科技战略咨询研究院研究员, 中国科学院大学公共政策与管理学院教授, 本文通讯作者; 王铮 (1954 -), 中国科学院科技战略咨询研究院研究员, 中国科学院大学公共政策与管理学院教授, 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室兼职教授, 本文通讯作者; 贾晓婷 (1993 -), 中国科学院新疆生态与地理研究所、中国科学院大学博士研究生, 邮政编码: 830011; 白冰 (1995 -), 中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院大学博士研究生。

致谢: 感谢审稿专家匿名评审, 当然文责自负。

一、引言

化石能源的消费与燃烧是产生 CO₂ 等温室气体的主要来源。城市由于具有高人口密度、高经济密度和高能源消耗强度等特征，是人类能源消费和 CO₂ 排放的主要聚集地 (Cai et al., 2017)。2018 年，中国常住人口城镇化率已经达到 59.58%，且今后中国的城镇人口将继续增长，温室气体排放增长的趋势也将长时间延续。有研究表明，中国大约 85% 的 CO₂ 排放是由城市能源消费所产生的 (Cai et al., 2017; Shan et al., 2018)。2015 年，中国政府在《巴黎协定》中承诺 2030 年左右中国 CO₂ 排放量达到峰值并争取尽早达峰，并将单位 GDP 的 CO₂ 强度比 2005 年降低 60% ~ 65%。随着各国减少 CO₂ 排放的努力不断加强，中国也致力于让城市在 CO₂ 减排中扮演重要的角色。因此，准确的城市 CO₂ 排放数据对于科学地制定国家节能减排政策极为关键。但其中的一个关键性问题是城市 CO₂ 排放的核算。由于受到统计数据缺乏和估算方法的限制，当前的研究较少涉及全国性城市尺度的碳排放问题。已有的城市尺度 CO₂ 排放的研究主要集中在总量估算和影响机制，前者是城市二氧化碳问题研究的基础，后者是制定城市低碳政策的关键。关于城市碳排放估算的研究主要有两种思路，一种是基于间接数据进行估算，另一种是基于直接能源消费数据进行核算。

基于间接数据对城市尺度的 CO₂ 排放估算，一是采用夜间灯光影像数据对城市 CO₂ 排放水平进行模拟与反演 (张晓梅、庄贵阳, 2015; 马忠玉、肖宏伟, 2017; 王少剑等, 2018; 张永年、潘竞虎, 2019); 二是基于省级尺度建立自上而下的估算方法，如通过省级能源平衡表，并建立一套分配指标或核算方法，从省级碳排放数据中估算下属城市的碳排放量 (吴旭等, 2017; 景侨楠等, 2019); 三是随着 CO₂ 排放监测、报告和核查资料的不断完善，基于排放源自下而上的高质量 CO₂ 排放空间数据得以发展，并将可能发展为城市碳排放估算的主流方法 (蔡博峰等, 2018; Liu and Cai, 2018)。而基于直接能源消费数据对城市 CO₂ 排放水平进行核算的路径，则主要运用投入产出表法或清单分析法对城市的碳排放进行核算。其中，投入产出表法由于对投入产出数据的依赖性较强，目前中国仅有国家、省级尺度以及部分副省级城市编制有投入产出表，使得投入产出分析法在城市尺度的应用受到数据限制；而清单分析法则由于简单易算的特点，被广泛应用于国家、省域和主要城市的碳排放问题研究 (孙建卫等, 2010; 王海鲲等, 2011; 王长建等, 2018; 张琦峰等, 2018; Shan et al., 2018)。

但是，由于不同方法各有其优缺点及适用范围，且中国的能源消费清单数据主要集中在国家、省级和大城市层面，致使关于城市碳排放核算的研究大部分聚焦于城市的个案研究，以及间接估算方法的探索；并且由于地级城市长期以来缺乏完善的能源平衡表 (张晓梅、庄贵阳, 2015; Cai et al., 2017; Shan et al., 2018)，所以在更大尺度范围，包括全国性城市碳排放的研究非常有限。因此，城市尺度碳排放量估算的核心问题在于估算方法与估算范围的确定 (丛建辉等, 2014a)。目前，仅有蔡博峰

等 (2018) 基于中国高空间分辨率网格数据、城市层面的统计数据以及大量现场调研和走访, 率先建立的 2005 年中国城市 CO₂ 排放数据集, Liu 和 Cai (2018) 运用中国 CHRED 基础数据对中国 2012 年的 288 个城市 CO₂ 排放问题进行探究, 以及 Shan 等 (2018) 对中国 2010 年 182 个城市的研究。而本文则是基于中国城市层面的能源消费统计数据, 对中国 2016 年 198 个地州市 CO₂ 排放的最新估算, 并在供给侧结构性改革的背景下, 与 Shan 等 (2018) 2010 年的研究进行比较分析, 并对中国城市层面 CO₂ 排放的空间格局和空间尺度变化导致的结论差异对比分析。因此, 本研究对于中国城市层面的绿色发展和科学制定低碳政策具有重要意义。

二、数据来源与估算方法

(一) 数据来源

本研究所需要的省级单位能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴 (2017)》。城市层面的能源消费数据是首先查阅各地州市 2017 年的统计年鉴, 在没有相应数据的情况下则查阅所在省份的 2017 年统计年鉴获得的。没有数据的地州市存在两种原因: 一是可以获得相应城市的统计年鉴或省份统计年鉴, 但都没有公布城市的能源消费数据; 二是无法找到相应城市的统计年鉴。城市经济数据和年平均人口数据来源于《中国城市统计年鉴 (2017)》和《中国城市建设统计年鉴 (2016)》, 各省、自治区、直辖市的经济和人口数据来源于《中国统计年鉴 (2017)》。由于受到统计资料的限制, 本研究共获得 198 个地州市的 20 种能源的消费数据。同时, 由于不同国家和地区, 不同的技术水平及能源结构下的碳排放系数 K 往往是不同的, 因此, 本研究中运用的标准煤折算系数和二氧化碳排放系数来源于《中国能源统计年鉴 (2017)》、《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008) 和《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候〔2011〕1041 号), 并参照了秦耀辰 (2013) 的研究。样本中的 198 个地州市绝大多数位于东部和中部地区, 这也是中国经济与人口的主要聚集区。2016 年, 本研究涉及的 198 个地州市的地区生产总值 (GDP) 总量为 67.03 万亿元, 占全国 GDP 比重为 90.57%。同时, 消费各种能源 346168.81 万吨标准煤, 占全国能源消费总量的 79.43%。其中, 原煤消费占比最大, 为 51.25%; 其次为原油、洗精煤、焦炭和天然气, 分别占能源消费总量的 14.49%、7.56%、7.34% 和 3.52%。

(二) 估算方法

化石能源消费和燃烧是城市排放 CO₂ 的主要来源, 计算城市能源消费产生的 CO₂, 一般采用系数法或物料平衡法。本文运用碳排放系数法计算城市层面能源消费的二氧化碳排放, 如公式 (1) 所示:

$$Q_{CO_2} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot E_i \quad (1)$$

其中, Q_{CO_2} 表示 CO₂ 排放总量, E_i 为第 i 种能源的能源消费量, 可按标准统一折

算为标准煤,系数 K_i 为第 i 种能源碳排放系数。本文中的各种能源折标准煤的参考系数和 CO_2 排放系数,可参见表 1。

表 1 不同能源品种的标准煤折算系数和 CO_2 排放系数

能源品种	标准煤折算系数 (kgce/kg)	CO_2 排放系数 (10^4 吨/ 10^4 吨)	能源品种	标准煤折算系数 (kgce/kg)	CO_2 排放系数 (10^4 吨/ 10^4 吨)
原煤	0.7143	2.492	燃料油	1.4286	2.219
洗精煤	0.9000	2.631	液化石油气	1.7143	1.828
其他洗煤	0.2857	2.492	天然气	1.2143	2.162
煤制品	0.6000	2.631	液化天然气	1.7572	2.660
焦炭	0.9714	2.977	炼厂干气	1.5714	1.654
其他焦化产品	1.3000	2.341	其他石油制品	1.2000	2.126
原油	1.4286	2.104	焦炉煤气	0.6143kgce/m ³	1.288
汽油	1.4714	1.988	高炉煤气	0.1286kgce/m ³	7.523
煤油	1.4714	2.051	其他煤气	0.3571kgce/m ³	1.288
柴油	1.4571	2.167	其他燃料	—	2.4567

资料来源:《中国能源统计年鉴(2017)》、《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)、《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)和秦耀辰(2013)。

三、城市碳排放空间格局分析

本文首先依据 2016 年中国 198 个地州市的 20 种能源消费数据,以及表 1 中不同种类能源的标准煤折算系数和 CO_2 排放系数,运用公式(1)对中国 198 个地州市的 CO_2 排放量进行估算,并结合相应城市的地区生产总值数据和年平均人口数据计算相应的 CO_2 排放强度和人均 CO_2 排放量。

(一) 二氧化碳排放总量的空间格局分析

研究涉及的 198 个地州市 CO_2 排放的分布如表 2 所示。根据核算结果,2016 年 CO_2 排放量高达 15000 万吨及以上城市有 11 个,其中 CO_2 排放量最高的是河北省唐山市,达到 26022.26 万吨,其他依次是邯郸、南京、东营、长治、苏州、滨州、上海、重庆、宁波、淄博。除上海和重庆两个直辖市外,其他城市分布在河北、江苏、山东、山西、浙江 5 个省份。 CO_2 排放量 10000~14999 万吨的城市有 10 个,分别是济宁、天津、包头、太原、徐州、大连、安阳、潍坊、泉州、平顶山。通过查阅中国资源型城市名录可知,以上城市中绝大多数是资源型城市或工业城市,这些城市的经济结构中制造业、重工业、钢铁、煤炭化工等高耗能行业占据相当的规模或比重,并且对煤炭或石油等化石能源具有较高的依赖性。而 CO_2 排放总量低于 1000 万吨的地州市共有 48 个,这些地州市主要是旅游城市、商贸城市和欠发达城市,且部分地州市的城市化水平比较低。

表 2 中国地州市 CO₂ 排放总量分布单位：万吨 CO₂

排放区间	城市分布	
	2010 年	2016 年
15000 及以上	唐山、上海、苏州、南阳	唐山、邯郸、南京、东营、长治、苏州、滨州、上海、重庆、宁波、淄博
10000 ~ 14999	重庆、南京、天津、鄂尔多斯、邯郸、石家庄、包头、三门峡、大庆、北京、宁波、武汉、广州	济宁、天津、包头、太原、徐州、大连、安阳、潍坊、泉州、平顶山
5000 ~ 9999	银川、淄博、太原、青岛、杭州、攀枝花、昆明、徐州、郑州、大连、无锡、驻马店、呼和浩特、哈尔滨、潍坊、本溪、洛阳、济南、泰安、沈阳、通辽、长春、克拉玛依、晋中、平顶山、临沂、乌鲁木齐、长治、西安、马鞍山、榆林、淮南、张家口、东营	北京、马鞍山、武汉、莱芜、运城、昌吉、晋城、银川、阳泉、淮北、朔州、无锡、青岛、榆林、乌鲁木齐、淮南、咸阳、茂名、日照、邢台、延安、克拉玛依、洛阳、惠州、聊城、郑州、娄底、柳州、临沂、济南、湛江、九江、忻州、泰安、沈阳、张家口、岳阳
2500 ~ 4999	柳州、常州、商丘、齐齐哈尔、周口、镇江、鸡西、鹤岗、金华、乌兰察布、兰州、南通、成都、吉林、贵阳、南昌、泉州、绍兴、深圳、淮北、赤峰、焦作、嘉兴、贵港、阜新、晋城、合肥、龙岩、阳泉、新乡、湘潭、扬州、江门、黄石、许昌、温州、新余、郴州、芜湖、西宁、茂名、朔州、咸阳、宝鸡、荆门、萍乡、泰州、宜昌	枣庄、承德、烟台、呼和浩特、哈尔滨、石家庄、哈密、泰州、兰州、镇江、常州、德州、长春、南通、新余、嘉峪关、成都、三门峡、韶关、秦皇岛、商丘、东莞、安庆、焦作、嘉兴、佛山、连云港、福州、六盘水、三明、遵义、淮安、扬州、铜陵、郴州、杭州、吕梁、鹤壁、广州、荆门、盐城、台州
1000 ~ 2499	九江、盐城、宜春、汕头、湖州、忻州、鄂州、鹤壁、淮安、遵义、惠州、南宁、嘉峪关、韶关、白银、襄阳、四平、乌海、岳阳、来宾、菏泽、宿州、十堰、巢湖、信阳、铜陵、双鸭山、辽源、安庆、巴音郭楞、云浮、中山、上饶、濮阳、绵阳、阳江、衡阳、益阳、怀化、赣州、邵阳、延边、阜阳、珠海、蚌埠、德阳、景德镇、荆州、厦门、宣城、自贡、佳木斯、滁州、吐鲁番、咸宁、宁德、丹东	乐山、芜湖、珠海、衢州、湘潭、黄石、绍兴、许昌、宜春、信阳、合肥、新乡、萍乡、鄂州、南昌、江门、宜宾、舟山、威海、齐齐哈尔、南阳、景德镇、西安、湖州、汕头、保定、漳州、吐鲁番、邵阳、四平、深圳、金华、汕尾、广元、肇庆、泸州、宜昌、咸宁、孝感、襄阳、潮州、开封、阳江、清远、阜阳、龙岩、揭阳、驻马店、宁德、云浮
999 及以下	吉安、河源、丽水、伊春、六安、恩施、白城、南平、亳州、莆田、黑河、宿迁、舟山、武威、鹰潭、张家界、阿勒泰、抚州、湘西、随州、黄山	中山、宿州、衡阳、贵阳、梅州、常德、上饶、宣城、南宁、长沙、株洲、濮阳、益阳、蚌埠、亳州、厦门、吉安、眉山、抚州、赣州、自贡、来宾、漯河、德阳、滁州、鹰潭、荆州、莆田、六安、温州、桂林、张掖、河源、河池、十堰、宿迁、南平、永州、怀化、周口、丽水、安康、雅安、张家界、湘西、随州、海口、黄山

资料来源：2010 年数据来源于 Shan 等（2018），2016 年数据由作者计算整理。

与 Shan 等（2018）2010 年的数据相比，中国各城市碳排放量绝大多数有所增加，且城市碳排放格局已经发生了较为深刻的变化。由局部自相关分析可得中国地州市 CO₂ 排放空间格局变化如表 3 所示。由表 2 和表 3 可得，与 2010 年相比，中国 CO₂ 高排放城市呈现更为聚集的特征，其中，京津冀、长三角、山东以及晋豫皖资源产区成为城市 CO₂ 排放的高 - 高（H - H）聚集区；同时，重庆、武汉、泉州等城市

则各自成为一个单独的 CO₂ 排放高-低 (H-L) 聚集区; 而闽赣地区和湖南南部则成为两个低-低 (L-L) CO₂ 排放区。究其原因, 这是中国经济步入新常态以来, 伴随国家宏观经济目标的调整, 中国产业升级与产业转移, 以及各地区“去产能、调结构”的结果 (张跃等, 2018; 赵璐、赵作权, 2018)。当前, 中国各地区工业和制造业份额已经发生了较大程度的变化。其中, 北京、上海、广州、深圳等城市均将制造业大规模转出, 从而实现产业结构的转型升级, 现今这四个城市第三产业的比重均已达到 60% 以上, 而转出的产业大多转移到周边和中西部地区; 同时, 大部分城市的第二产业所占比例均有所降低, 样本中的 198 个地州市的第二产业所占份额较 2010 年平均降低了 5.53%。因此, 在中国能源结构持续改善和能源效率不断提高的前提下, 可以推断中国城市 CO₂ 排放量的增长更多是由经济增长所推动的。

表 3 中国地州市 CO₂ 排放空间格局变化

类型	地区分布	
	2010 年	2016 年
H-H 聚集区	京津冀地区、长三角地区、山东省、豫西地区、内蒙古中部地区、山西省	京津冀地区、长三角地区、山东省、晋豫皖地区
H-L 聚集区	重庆市、武汉市、粤中地区	重庆市、武汉市、泉州市
L-H 聚集区	—	保定市
L-L 聚集区	闽赣地区	闽赣地区、湖南南部地区

资料来源: 2010 年数据来源于 Shan 等 (2018), 2016 年数据由作者计算整理。

(二) 人均 CO₂ 排放量的空间格局分析

中国城市人均 CO₂ 排放量的空间格局, 如表 4 所示。2016 年, 本研究涉及的 198 个地州市的城镇人口达 5.11 亿人, 占中国城镇总人口的 64.48%, 人均排放量为 13.19 吨 CO₂/人。由表 4 分析可得, 中国城市人均 CO₂ 排放量呈现从东南向西北递增的趋势, 且人均 CO₂ 排放量最高的城市主要集中在北方地区, 江苏、浙江和广东等省份也有个别城市人均 CO₂ 排放水平较高。人均排放量高于 40.00 吨 CO₂/人以上城市有 13 个, 依次是嘉峪关、克拉玛依、东营、哈密、延安、莱芜、昌吉、阳泉、包头、长治、朔州、银川、滨州, 以上城市位于甘肃、新疆、山东、陕西、内蒙古、山西、宁夏等省份。在这 13 个城市中, 嘉峪关市人均排放水平最高, 高达 162.52 吨 CO₂/人。人均排放量在 20.00~39.99 吨 CO₂/人之间的城市有 16 个, 依次是吐鲁番、马鞍山、晋城、淮北、太原、淄博、南京、唐山、新余、苏州、宁波、乌鲁木齐、邯郸、日照、珠海、榆林。以上城市绝大多数是资源型城市和工业城市, 因此, 这些城市对化石能源具有较强的依赖性, 且有研究表明, 资源型城市隐性为附近的工业城市和大城市排放了大量的 CO₂, 这也是导致资源型城市人均 CO₂ 排放量较高的深层原因 (Shan et al., 2018)。

而人均排放量低于 2.5 吨 CO₂/人的城市共有 53 个, 如孝感、贵阳、信阳、漯

河、开封、襄阳、蚌埠、西安、自贡、眉山、濮阳、梅州、莆田、常德、南阳、宿州、长沙、南宁、驻马店、桂林、雅安、湘西州、温州、张家界、丽水、永州、安康、海口、周口、黄山等地州市，其中大部分属于旅游城市或欠发达的城市。同时，广州、深圳、北京、杭州、成都、重庆等超大城市和特大城市，虽然 CO₂ 排放总量水平比较高，但是人均 CO₂ 排放量也较低。

表 4 2016 年中国地州市人均 CO₂ 排放量分布单位：吨 CO₂/人

人均排放区间	城市分布
40.00 及以上	嘉峪关、克拉玛依、东营、哈密、延安、莱芜、昌吉、阳泉、包头、长治、朔州、银川、滨州
20.00 ~ 39.99	吐鲁番、马鞍山、晋城、淮北、太原、淄博、南京、唐山、新余、苏州、宁波、乌鲁木齐、邯郸、日照、珠海、榆林
10.00 ~ 19.99	大连、舟山、呼和浩特、淮南、平顶山、安阳、鄂州、东莞、忻州、惠州、济宁、运城、铜陵、三门峡、镇江、无锡、鹤壁、柳州、泉州、咸阳、兰州、天津、娄底、徐州、承德、秦皇岛、上海、潍坊、枣庄、常州、韶关、武汉、三明、张家口、九江、景德镇
5.00 ~ 9.99	萍乡、青岛、聊城、衢州、六盘水、嘉兴、济南、泰安、洛阳、岳阳、泰州、茂名、荆门、焦作、邢台、湘潭、黄石、佛山、湛江、德州、北京、威海、郑州、烟台、吕梁、乐山、沈阳、芜湖、安庆、中山、扬州、湖州、连云港、郴州、长春、南通、淮安、临沂、重庆
4.99 及以下	江门、哈尔滨、绍兴、潮州、四平、鹰潭、福州、广元、石家庄、咸宁、台州、许昌、阳江、深圳、汕尾、遵义、杭州、商丘、南昌、张掖、宜春、龙岩、宜宾、宜昌、云浮、厦门、齐齐哈尔、新乡、肇庆、广州、盐城、宣城、漳州、宁德、成都、金华、汕头、合肥、来宾、清远、泸州、孝感、贵阳、信阳、漯河、开封、襄阳、蚌埠、株洲、西安、自贡、眉山、濮阳、邵阳、梅州、益阳、莆田、抚州、德阳、揭阳、常德、南阳、宿州、吉安、保定、滁州、长沙、衡阳、河源、亳州、南宁、上饶、十堰、阜阳、驻马店、南平、河池、桂林、六安、荆州、雅安、赣州、湘西、宿迁、温州、张家界、丽水、怀化、永州、安康、随州、海口、周口、黄山

资料来源：作者计算整理。

(三) CO₂ 排放强度的空间格局分析

中国地州市 CO₂ 排放强度的空间格局如表 5 所示。由表 5 分析可得，中国城市层面 CO₂ 排放强度的空间格局从东南向西北有增强的趋势，这也反映出东南沿海地区是中国经济与技术最为发达的地区，且从东南向西北，经济与技术水平有逐步降低的整体趋势。而且，西北地区和山西省是中国最为重要的能源基地和重化工基地，而东南沿海地区则以轻工业和高技术产业为主。

具体来看，2016 年，CO₂ 排放强度在 10.01 吨 CO₂/万元及以上的城市有 7 个，依次是嘉峪关、长治、阳泉、莱芜、哈密、克拉玛依和淮北，其中嘉峪关市最高，达到 25.43 吨 CO₂/万元，且这些城市有一个共同的特点，就是同为资源型城市。CO₂ 排放强度在 5.01 ~ 10.00 吨 CO₂/万元的城市有 15 个，依次是朔州、晋城、昌吉、淮南、忻州、滨州、运城、邯郸、吐鲁番、东营、马鞍山、延安、平顶山、安阳和银

川, 这些城市基本是资源型城市, 因此这些城市的 CO₂ 排放强度也较高。由表 5 可得, 这些 CO₂ 排放强度高的城市主要集中在北方地区, 尤其华北和西北地区是我国主要的能源和资源产地, 煤炭、化工、金属冶炼等高耗能产业比较集中, 且技术水平有限, 这些都将导致其 CO₂ 排放强度偏高。

而 CO₂ 排放强度为 0.5 吨 CO₂/万元及以下的地州市有 48 个, 分别是漳州、吉安、河源、六安、上饶、保定、南昌、绍兴、滁州、北京、金华、佛山、宜昌、德阳、襄阳、株洲、衡阳、合肥、荆州、成都、常德、中山、莆田、贵阳、赣州、十堰、西安、杭州、桂林、南宁、雅安、南平、厦门、永州、张家界、怀化、宿迁、安康、广州、湘西、丽水、温州、长沙、深圳、周口、随州、黄山、海口, 其中大部分属于旅游和欠发达城市。

表 5 2016 年中国地州市 CO₂ 排放强度分布

单位: 吨 CO₂/万元

强度区间	城市分布
10.01 及以上	嘉峪关、长治、阳泉、莱芜、哈密、克拉玛依、淮北
5.01 ~ 10.00	朔州、晋城、昌吉、淮南、忻州、滨州、运城、邯郸、吐鲁番、东营、马鞍山、延安、平顶山、安阳、银川
2.51 ~ 5.00	太原、娄底、唐山、新余、日照、包头、淄博、鹤壁、张家口、济宁、邢台、承德、咸阳、韶关、乌鲁木齐、铜陵、三门峡、榆林、吕梁、秦皇岛、茂名、九江
1.01 ~ 2.50	鄂州、柳州、六盘水、枣庄、徐州、南京、潍坊、聊城、安庆、湛江、广元、景德镇、萍乡、兰州、宁波、衢州、惠州、商丘、乐山、大连、荆门、泉州、汕尾、黄石、三明、洛阳、岳阳、泰安、焦作、舟山、德州、呼和浩特、临沂、齐齐哈尔、连云港、云浮、苏州、湘潭、潮州、四平、遵义、郴州、宜春、咸宁、张掖、镇江、宜宾、珠海、泰州、来宾、信阳
0.51 ~ 1.00	邵阳、淮安、重庆、新乡、阳江、芜湖、沈阳、泸州、梅州、许昌、济南、鹰潭、无锡、清远、嘉兴、宣城、阜阳、孝感、天津、江门、青岛、石家庄、武汉、汕头、常州、哈尔滨、郑州、长春、亳州、宿州、开封、湖州、烟台、肇庆、台州、宁德、扬州、上海、南通、河池、眉山、威海、漯河、龙岩、南阳、蚌埠、盐城、濮阳、揭阳、驻马店、益阳、抚州、东莞、自贡、福州
0.50 及以下	漳州、吉安、河源、六安、上饶、保定、南昌、绍兴、滁州、北京、金华、佛山、宜昌、德阳、襄阳、株洲、衡阳、合肥、荆州、成都、常德、中山、莆田、贵阳、赣州、十堰、西安、杭州、桂林、南宁、雅安、南平、厦门、永州、张家界、怀化、宿迁、安康、广州、湘西、丽水、温州、长沙、深圳、周口、随州、黄山、海口

资料来源: 作者计算整理。

运用中国地州市的 CO₂ 排放总量和排放强度的对数数据, 绘制得到 2016 年中国地州市 CO₂ 排放总量和排放强度联合分布图, 如图 1 所示。由图 1 可得, 不同类型城市的 CO₂ 排放特征有所不同。其中, 超大城市、特大城市和 I 型大城市在 CO₂ 排放总量方面较高, 但是 CO₂ 排放强度比较低, 究其原因在于这些城市技术水平较高, 经济结构和能源结构较为合理, 以及存在一定程度的规模效应, 如右下方区域所示; 而右上方区域的城市基本是资源型城市, 由于受自身经济结构特征和技术水平所限, 往往总量和排放

人均 CO₂ 排放量和 CO₂ 排放强度分布, 如表 6 所示。由表 6 可知, 中国省级单位所表现出的 CO₂ 排放格局呈现出东部沿海省份排放总量较高, 但人均 CO₂ 排放水平和排放强度方面都处于中低水平的特征, 这主要得益于东部沿海省份经济发达, 高度聚集了中国的人口和财富, 而且也具有更为合理的经济结构和更高的科技水平; 而西北地区、东北地区 and 内蒙古自治区则由于经济规模较小, 且人口稀少, 在 CO₂ 排放总量上往往表现为中低水平的空间特征, 但是在人均 CO₂ 排放量和排放强度方面表现出高水平的空间特征 (谭丹、黄贤金, 2008; 舒娱琴, 2012; 陈志建等, 2015)。与前文城市尺度的空间格局对比, 东南沿海的整体表现, 无论 CO₂ 排放总量、人均 CO₂ 排放水平, 还是 CO₂ 排放强度方面大多表现为中低水平的空间特征。仅有个别城市表现出了高排放的特征, 比如城市 CO₂ 排放总量中的南京、苏州、上海和宁波等。同时, 中部和西北地区的一些城市则在总量水平上表现出了高排放特征, 而人均水平和排放强度方面则与省级尺度的分析相同。尤其, 在一个省内, 其下辖的不同城市之间由于城市类型、发展阶段、经济结构和技术水平差异所导致的碳排放水平的差异, 往往也会被省级尺度的数据所掩盖。

表 6 中国省级行政单位 CO₂ 排放总量、人均排放量和排放强度分布

排放总量(万吨 CO ₂)		人均排放量(吨 CO ₂ /人)		排放强度(吨 CO ₂ /万元)	
排放区间	省份分布	人均排放区间	省份分布	强度区间	省份分布
50001 及以上	河北、山东、辽宁、江苏	10.00 及以上	辽宁、内蒙古、宁夏	2.00 及以上	辽宁、宁夏、新疆、山西、河北、青海
30001 ~ 50000	河南、四川、内蒙古、广东、山西	7.51 ~ 10.00	天津、新疆、河北、青海、吉林、山西、上海	1.51 ~ 2.00	黑龙江、内蒙古、吉林、甘肃
20001 ~ 30000	黑龙江、湖北、湖南、浙江、新疆、吉林、安徽	5.01 ~ 7.50	黑龙江、江苏、山东	1.01 ~ 1.50	贵州、云南
10001 ~ 20000	上海、陕西、广西、福建、云南、江西、贵州、天津、重庆、甘肃、北京	5.00 及以下	陕西、湖北、浙江、北京、重庆、福建、贵州、甘肃、湖南、四川、河南、广西、江西、安徽、云南、海南、广东	0.51 ~ 1.00	四川、广西、陕西、安徽、江西、河南、山东、湖南、湖北、天津、重庆、海南、上海、江苏、福建、浙江
10000 及以下	宁夏、青海、海南	—	—	0.50 及以下	北京、广东

资料来源: 作者计算整理。

究其原因, 就在于空间数据存在的空间分异性和可变面元问题, 即空间分异性意味着样本数据是非均质的, 可变面元问题是指空间数据所表现属性会随着空间的不同划分而变化。在城市尺度上存在的 CO₂ 排放特征, 往往会在省级 CO₂ 排放格局的研究中被掩盖; 同样, 城市尺度的分析也会掩盖省级 CO₂ 排放的总量效应。这是在做数据的空间分析时忽略空间数据的尺度效应和非均质性的缘故。

五、结论与政策启示

（一）主要结论

本研究在查阅中国各地级城市统计年鉴和省份统计年鉴的基础上，得到 198 个地州市的 20 种能源消费数据。基于该数据，本研究运用碳排放系数法估算了中国城市层面的 CO₂ 排放水平，并与 Shan 等（2018）关于中国 2010 年 182 个地州市的研究进行对比，对中国城市层面 CO₂ 排放空间格局和空间尺度进行分析。根据以上分析，所得主要结论如下。

（1）从整体看，中国城市 CO₂ 排放在总量、人均排放和排放强度上呈现一定程度的空间分离特征。CO₂ 排放总量最高的城市主要集中在华北、华东、重庆等地区，这些城市是全国主要的资源型城市和工业制造业中心，对煤炭或石油等化石能源具有较高依赖性，这也是导致这些城市 CO₂ 排放量较高的主要原因。城市人均 CO₂ 排放量和排放强度有从东南向西北增强的趋势，这也反映出东南沿海地区是中国经济与技术最为发达的地区，以及人口最密集的地区，且从东南向西北，经济与技术水平有逐步降低的趋势。而且，西北地区和山西省是中国最重要的能源基地和重化工基地，而东南沿海地区的城市则以轻工业和高技术行业为主。

（2）不同类型城市的 CO₂ 排放特征有所不同。北京、广州、深圳、上海等超大城市，以及许多特大城市 CO₂ 排放总量虽然较高，但人均 CO₂ 排放水平和排放强度都较低，原因在于这些城市技术发达，人口较多，经济结构和能源结构较为合理，并且存在一定程度的规模效应。资源型城市则由于受自身经济结构特征和技术水平所限，在 CO₂ 排放总量、人均排放和排放强度三个层面都较高，而旅游和商贸城市则与之相反。而其他城市则不存在明显规律，具体城市则由城市的类型和经济结构特点所决定。

（3）空间分析表明，中国 CO₂ 高排放城市呈现聚集特征，京津冀、长三角、山东以及晋豫皖资源产区是高排放城市的聚集区。这与中国产业重构有关，北京、上海、广州、深圳等城市经过大规模的制造业转出，且能源消费结构已经基本实现了清洁化。同时，中国其他城市工业和制造业份额发生了较大程度的变化，样本中的 198 个地州市的第二产业占比相比 2010 年平均降低了 5.53%，而且煤炭在能源消费结构中的比例也有所降低。由此，在中国能源结构持续改善和能源效率不断提高的前提下，可以推断当前城市 CO₂ 排放量的增长更多是由经济增长所推动的。

（4）由于空间数据存在的空间分异性和可变面元问题，不同空间尺度的 CO₂ 排放特征会有所不同。省级尺度的 CO₂ 排放格局研究往往会掩盖城市发展的差异性和多样性；同样，城市尺度的分析也会掩盖省级 CO₂ 排放的总量效应。因此，在研究 CO₂ 排放的环境影响时，从省级尺度进行研究才能更好分析温室气体排放的总量效应；而在气候减缓政策的分析中，则更应该从城市层面进行考虑，才更具有现实意义和政策针对性。

(二) 政策启示

中国是一个经济多元化的大国,工业化和城镇化发展迅速,不同地区之间经济发展水平和速度具有显著差异,由此导致不同城市的碳排放水平相差很大。同时,城镇化水平的不断提高,也将显著提高城市的能源消耗量和CO₂排放量。因此,鉴于以上研究结论,给出以下政策建议。

第一,中国城市CO₂减排重点应该放在资源型城市和工业城市,同时,将CO₂减排的重点区域放在西北和华北地区,这些城市和地区的人均CO₂排放量较高,且CO₂排放强度一般也偏高,因此加强技术研发,推行技术革新,扩大企业运行规模、提高管理和技术水平,是降低CO₂排放的可行方案。

第二,根据作者整理的能源消费数据,中国城市的能源消费结构整体已经得到很大提升,而且各直辖市、省会城市和经济比较发达的大城市在能源消费结构方面已经基本实现清洁化,继续改进的空间有限。因此,能源消费结构改进的空间主要在资源型城市和工业城市。

第三,由于CO₂减排政策最终要落实到空间上执行,因此,要注意不同空间尺度上研究结果可能存在的差异,且不同空间尺度的研究可能具有不同的政策含义。因此,在分析CO₂排放的环境影响和总量效应时,应从省级尺度进行研究;而在气候减缓政策的分析中,则更应该从城市层面进行研究,以考虑城市发展的非均衡性和多样性。

第四,中国应该加强城市层面的能源数据建设,以有利于科学分析和研究城市碳排放问题。只有更加准确估算城市层面的CO₂排放水平,才有利于制定更加科学和合理的城市低碳政策和减排目标。此外,由于统计工作需要投入大量的人力和物力,且不同城市所处的发展阶段、财政状况不同,目前仅有一些副省级以上的城市才有相对完善的能源统计数据。所以,由不同地州市分别统计的能源消费数据在统计口径、统计范围方面可能存在一定程度的差异,这也导致本研究存在一定程度的缺陷。但是,本研究所用数据直接来源于各城市统计年鉴,是各个城市能源消费最直接的反映,因此,也具有其他数据不可替代的优势。综上所述,本研究可以基本反映中国城市层面的CO₂排放水平及其空间格局。

参考文献

蔡博峰、刘晓曼、陆军等(2018):《2005年中国城市CO₂排放数据集》,《中国人口·资源与环境》第4期,第1~7页。

陈江平、张瑶、余远剑(2011):《空间自相关的可塑性面积单元问题效应》,《地理学报》第12期,第1597~1606页。

陈占明、吴施美、马文博等(2018):《中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型》,《中国人口·资源与环境》第10期,第45~54页。

陈志建、王铮、孙翊(2015):《中国区域人均碳排放的空间格局演变及俱乐部收敛分析》,《干旱区资源与环境》第4期,第24~29页。

丛建辉、刘学敏、赵雪如(2014a):《城市碳排放核算的边界界定及其测度方法》,《中国人

口·资源与环境》第4期，第19~26页。

丛建辉、刘学敏、朱婧等（2013）：《中小城市工业碳排放：核算方法与影响因素——以河南省济源市为例》，《资源科学》第11期，第2158~2165页。

丛建辉、朱婧、陈楠等（2014b）：《中国城市能源消费碳排放核算方法比较及案例分析——基于“排放因子”与“活动水平数据”选取的视角》，《城市问题》第3期，第5~11页。

景侨楠、侯慧敏、白宏涛等（2019）：《自上而下的城市能源消耗碳排放估算方法》，《中国环境科学》第1期，第420~427页。

李海萍（2009）：《空间统计分析中的 MAUP 及其影响》，《统计与决策》第22期，第15~17页。

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》第9期，第143~150页。

秦耀辰（2013）：《低碳城市研究的模型与方法》，北京：科学出版社。

舒娱琴（2012）：《中国能源消费碳排放的时空特征》，《生态学报》第16期，第4950~4960页。

孙建卫、陈志刚、赵荣钦等（2010）：《基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究》，《中国人口·资源与环境》第5期，第28~34页。

谭丹、黄贤金（2008）：《我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较》，《中国人口·资源与环境》第3期，第54~57页。

王长建、张虹鸥、汪菲等（2018）：《城市能源消费碳排放特征及其机理分析——以广州市为例》，《热带地理》第6期，第759~770页。

王海赜、张荣荣、毕军（2011）：《中国城市碳排放核算研究——以无锡市为例》，《中国环境科学》第6期，第1029~1038页。

王卉彤、王妙平（2011）：《中国30省区碳排放时空格局及其影响因素的灰色关联分析》，《中国人口·资源与环境》第7期，第140~145页。

王少剑、苏泳娴、赵亚博（2018）：《中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素》，《地理学报》第3期，第414~428页。

吴旭、胡晓娟、蔡和（2017）：《面向考核的城市碳强度核算方法——基于生产和消费的双重视角》，《环境经济研究》第4期，第35~48页。

张琦峰、方恺、徐明等（2018）：《基于投入产出分析的碳足迹研究进展》，《自然资源学报》第4期，第696~708页。

张晓梅、庄贵阳（2015）：《中国省际区域碳减排差异问题的研究进展》，《中国人口·资源与环境》第2期，第135~143页。

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》第4期，第1436~1446页。

张跃、王图展、刘莉（2018）：《比较优势、竞争优势与区域制造业转移》，《当代经济科学》第6期，第107~118页。

赵璐、赵作权（2018）：《中国经济空间转型与新时代全国经济东西向布局》，《城市发展研究》第7期，第18~34页。

Cai, B., J. Wang and S. Yang, et al. (2017), "Carbon Dioxide Emissions from Cities in China Based on High Resolution Emission Gridded Data", *Chinese Journal of Population, Resources and*

Environment, 15 (1), pp. 58 – 70.

Liu, Z. and B. Cai (2018), *High-resolution Emission Data for Chinese Cities*, Belfer Center for Science and International Affairs, Cambridge, Mass: Harvard University.

Shan, Y., D. Guan and K. Hubacek, et al. (2018), “City-level Climate Change Mitigation in China”, *Science Advances*, 4 (6), pp. 1 – 15.

An Accounting of CO₂ Emission in Chinese Cities and Spatial Pattern Analysis

WANG Xing-min^{1,2}, WU Jing^{1,2}, WANG Zheng^{1,2,3}, JIA Xiao-ting^{2,4}, BAI Bing^{1,2}

(1. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Geographic Information Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography,

Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

Abstract: Accurate estimation of CO₂ emission is a prerequisite for scientific low-carbon emission policy making. Based on 20 types of energy consumption data at the prefecture level in China, this paper re-estimates the CO₂ emissions of 198 prefecture level cities in 2016 by using the method of carbon emission coefficient, then the spatial pattern and scale characteristics are analyzed, the conclusions are as follows. (1) Overall, the cities with the highest CO₂ emission in China are mainly concentrated in North China, East China and Chongqing, while the cities with the level of highest per capita CO₂ emission and intensity are mainly concentrated in Northwest and North China. (2) Different types of cities have different CO₂ emission characteristics. Resource-based cities have higher total amount and emission intensity; tourism and underdeveloped cities are both lower; while super-large cities and many mega-cities have higher CO₂ emission, but the emission intensity is usually lower; and there is no obvious law in other cities. (3) Spatial analysis shows that cities with higher CO₂ emissions are clustered. The Beijing-Tianjin-Hebei region, the Yangtze River Delta region, Shandong Province, Shanxi-Henan-Anhui resource-producing areas are the agglomeration areas of high-emission cities. (4) Scale analysis shows that the characteristics of CO₂ emissions at different scales are different. Provincial-level research can help to identify the environmental impact and total effect of carbon emissions, while urban-scale research is helpful to explore the diversity and phases of cities. Finally, based on the main conclusions of this study, the corresponding urban low-carbon policy enlightenment is drawn.

Key Words: CO₂ estimation; spatial pattern; industrial transfer; scale effect; prefecture-level cities

责任编辑：周枕戈