新型冠状病毒肺炎疫情对中国2020年碳排放的影响

刘竹^{1*}, 崔夺^{1*}, 邓铸¹, 汪宜龙², 钟海旺³, 乐旭⁴, 张宁⁵, 陈彬⁶, 任小波⁷, 魏伟⁸, 吕永龙⁹, 姜克隽¹⁰, 窦新宇¹, 朱碧青¹, 郭睿¹, 孙韬淳¹, 柯丕煜¹, 关大博¹, 宫鹏¹

1. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;
4. 南京信息工程大学, 环境科学与工程学院, 南京 210044;
5. 山东大学威海前沿交叉科学研究院, 威海 264209;
6. 北京师范大学环境学院, 北京 100875;
7. 中国科学院重大科技任务局, 北京 100864;
8. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201203;
9. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
10. 中国宏观经济研究院能源研究所, 北京 100038

* 联系人, E-mail: zhuliu@tsinghua.edu.cn; cuiduo@mail.tsinghua.edu.cn

2020-06-18 收稿, 2020-09-24 修回, 2020-09-25 接受, 2020-09-29 网络版发表

国家自然科学基金(71874097, 41921005)、北京市自然科学基金(JQ19032)和求是科技基金会项目资助

摘要 中国的二氧化碳减排工作一直承受着国际社会的压力. 新型冠状病毒肺炎疫情(COVID-19, 简称“新冠疫情”) 对全球碳排放产生了显著影响. 准确估算新冠疫情对中国二氧化碳排放量及其排放趋势的影响, 对评估中国对全球变化的贡献有重要意义. 本研究系统构建了基于活动数据的中国省级日碳排放数据库, 对涵盖了化石燃料燃烧和水泥生产造成的所有人为源二氧化碳排放进行定量化的动态评估. 本研究发现中国各省的碳排在新冠疫情期间受到不同程度的影响. 江苏、湖北和浙江三省的碳排放受疫情影响最严重, 其碳排放减少量分别占总排放减少量的19.4%、17.0%和12.5%. 青海省和西藏自治区受疫情的影响最小. 从排放部门方面看, 电力部门是多数省份减排量的主要贡献源, 对于湖北、重庆、青海和福建等省份, 工业部门是碳减排的主要贡献源. 对于北京、天津这样的大城市以及四川和黑龙江两省, 新冠疫情对交通部门的减排作用最显著. 从疫情对碳排放的时间影响看, 江苏省的碳排放分别在2020年1和2月份下降最多, 3月份之后, 湖北省的碳排放减少量最为突出. 而宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、福建省、陕西省和云南省受疫情影响较小的地区3月份的碳排放已经率先恢复到2019年同期水平. 进入4月份, 除湖北省的碳排放相比2019年同期下降4.9 Mt二氧化碳外, 其他省份均接近或已经恢复到2019年同期水平.

关键词 新冠疫情, 省级二氧化碳排放, 日排放清单, 全球变化

自2019年底暴发的新型冠状病毒肺炎疫情(COVID-19, 简称“新冠疫情”) 对中国和全世界人民的健康和财产造成重大冲击, 对社会生产、能源活动造成巨大影响. 世界各国政府采取停工停学和“封城”等强制措

施, 阻断病毒的传播. 在政府一系列强有力的“封城”措施下, 企业和工厂停工停产, 人民出行减少, 人类活动大规模减少, 导致化石能源消费及其产生的二氧化碳排放大幅缩减. 相关研究表明由于新冠疫情的影响, 全

引用格式: 刘竹, 崔夺, 邓铸, 等. 新型冠状病毒肺炎疫情对中国2020年碳排放的影响. 科学通报, 2021, 66: 1912–1922

Liu Z, Cui D, Deng Z, et al. Impact on China's CO₂ emissions from COVID-19 pandemic (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1912–1922, doi: [10.1360/TB-2020-0729](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0729)

球的温室气体和大气污染物排放出现了大幅度下降(<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>)^[1~3]。中国作为全球主要的温室气体排放国之一,以及最早对新冠疫情采取控制措施的国家,新冠疫情在2020年1~4月对中国的温室气体排放和大气污染物的减少产生了明显影响^[4,5]。在中国采取强有力的防控措施下,截至2020年6月初,全国新冠疫情普遍下调至三级响应。但是,中国碳排放在新冠疫情下的动态变化仍缺乏实时、量化研究,且目前国际上的温室气体排放数据集都基于年度统计数据且通常滞后一年或以上(<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2019>; www.bp.com)^[6]。因此,亟须构建更长时间、空间分辨率的排放数据集定量分析新冠疫情等突发事件对中国各地区碳排放的影响。

本研究在对中国碳排放数据长期的、系统的收集和前期碳排放数据库构建^[7~11]的基础上,系统构建了日分辨率的中国省级碳排放监测体系。相比之前的数据库,该数据库具有更高的时间分辨率(日尺度)和空间分辨率,能够更及时、准确地反映突发事件对中国各地区碳排放的影响。本研究基于该数据库针对新冠疫情对中国大陆31个省份和直辖市2020年碳排放的影响展开系统评估。研究考虑了电力、交通(地面交通与航空)、工业、居民消费等4个主要部门的碳排放活动数据,覆盖了所有一次能源消费以及水泥生产活动的二氧化碳排放。数据源包括:全国每日发电量数据、省级月度火力发电量数据、全国月度工业生产数据、省级水泥生产数据、地面交通拥堵指数和车流量数据、省级民用汽车拥有量数据、航空飞行距离数据和人口加权的采暖度日数等。同时,该数据集与卫星和地面观测对二氧化碳和空气质量的独立测量数据进行交叉核对和比较。

与其他新冠疫情对二氧化碳排放影响研究相比,本研究在时间分辨率和空间分辨率上都具有更高的精度。从时间分辨率角度,基于2019和2020年的日活动数据,对2019和2020年电力、工业、交通和居民消费4个部门的二氧化碳日排放进行估计。相比使用3个不同疫情控制政策期间的代理数据的方法,该研究方法能更准确地反映日尺度上的二氧化碳排放变化。从空间分辨率角度,我们对中国大陆31个省份的电力、工业和陆地交通3个部门的日排放进行估计。之前的研究更多的是关注新冠疫情对全球二氧化碳变化的影响,针对中国省级碳排放进行日估计尚属首次。为了提高该研

究的准确性,我们使用中国本地的活动数据和排放因子,能够更有针对性地分析中国二氧化碳在新冠疫情期间的变化趋势。本研究构建了一套针对中国的省级日尺度谈判检测系统,能够更精确地表征类似新冠疫情这种突发事件对中国碳排放的时间和空间影响。该系统提高了碳排放清单估计的空间和时间精度,对完整地分析预测突发事件过程对某一国家或地区二氧化碳排放的影响具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 二氧化碳排放核算方法

基于联合国气候变化框架公约^[12]及我们前期研究所建立的相关方法^[7,13],由化石能源燃烧所产生的二氧化碳排放量(E)可由化石能源消费量(AD_{ff})和单位能源的二氧化碳排放因子(EF_{ff})计算得出:

$$E = AD_{ff} \times EF_{ff}. \quad (1)$$

从部门能源消费的视角,二氧化碳总排放量 E 可由各部门活动数据(AD_s)与相应的排放因子(EF_s)计算得出:

$$E = \sum AD_s \times EF_s. \quad (2)$$

水泥生产过程所产生的二氧化碳排放(E_{cement})计算与化石能源燃烧的碳排放(E)计算类似:

$$E_{\text{cement}} = AD_{\text{cement}} \times EF_{\text{cement}}. \quad (3)$$

根据前期研究^[7,8,13],碳排放因子的年际变化小于2%,并且大部分排放因子的年际变化是由于不同煤质的煤燃热值不同导致的,如果通过发电量而不是耗煤量对碳排放进行估计的话,排放因子年际变化的影响可忽略不计。因此,本研究基于实时活动数据对实时排放量进行核算,分别计算火力发电、工业产品生产、交通(地面交通与航空)、居民消费等4个部门的碳排放,对碳排放的日变化进行定量估计,并评估了新冠疫情对中国碳排放的影响(表1)。该4个部门覆盖了化石燃料燃烧和水泥生产过程所产生的所有二氧化碳排放,保证了该数据库与国际其他数据库^[14~16]的一致,便于各数据库之间的数据对比。

1.2 中国各部门的日尺度碳排放估算

根据2017年IEA公布的二氧化碳排放数据(图S1),中国的二氧化碳排放主要来自煤炭燃烧(80.3%)。其次,

表 1 基于日尺度变化的中国碳排放检测系统

Table 1 Daily scale CO₂ emission system in China

部门	数据	核算方法
电力	2019~2020 年国家电网逐日火力发电	假设单位火力发电量的排放因子不变, 推算日火力排放. 式(4)、(5)
工业	国家统计局月度钢铁产量、水泥产量、9 种化工产品产量、和 26 种其他工业产品产量数据	假设能源消费变化与工业产品产量变化一致, 以日火力发电量为权重系数将月度工业排放推算至逐日. 式(6)~(8)
交通-地面交通	TomTom 数据库中国 22 个主要城市的逐日拥堵指数	构建“拥堵指数-车流量”回归模型, 根据车流量推算排放. 式(9)、(10)
交通-航空	Flightradar24 每日航线距离	式(11)
居民消费	根据 ERA5 气温再分析数据计算的逐日人口加权采暖度日数	假设烹饪产生的排放量保持稳定, 而供暖产生的排放量取决于并随供暖需求而变化, 以 2018 年住宅排放量的 EDGAR 估计值为基准, 根据人口加权采暖度日数的变化, 将 EDGAR 的 2018 年住宅排放估计值推算到 2019 和 2020 年

燃油和天然气燃烧分别贡献了中国二氧化碳排放的 14.5% 和 4.8%。从排放部门方面看, 中国接近半数 (49.6%) 的二氧化碳排放来自电力部门, 其次是工业部门, 占全国总排放的 33%。交通部门产生的二氧化碳接近中国总二氧化碳排放的 1/10 (9.6%)。居民消费和其他部门的二氧化碳排放则分别占中国总二氧化碳排放的 4.1% 和 3.7%。为了更精确地了解中国各部门二氧化碳排放的实时变化情况, 以及突发事件 (例如新冠疫情) 对各部门二氧化碳的不同影响, 我们估算了中国电力、工业、交通和居民消费等部门日尺度的二氧化碳排放。

(i) 电力部门. 在假设单位火力发电量的排放因子不变的条件下, 根据全国日火力发电量的统计数据, 以 2019 年日火力发电量 ($E_{\text{elec},d,2019}$) 占全年火力发电量 ($E_{\text{elec},2019}$) 的比重为权重, 由 2019 年电力部门的年度排放量 ($E_{\text{power},2019}$) 推算出 2019 年的每日排放量 ($E_{\text{power},d,2019}$):

$$E_{\text{power},d,2019} = \frac{E_{\text{elec},d,2019}}{E_{\text{elec},2019}} \times E_{\text{power},2019} \quad (4)$$

然后根据 2020 年相比 2019 年火力发电量的同期增长率 $\left(\frac{E_{\text{elec},d,2020}}{E_{\text{elec},d,2019}}\right)$, 推算出 2020 年的日碳排放量 ($E_{\text{power},d,2020}$):

$$E_{\text{power},d,2020} = \frac{E_{\text{elec},d,2020}}{E_{\text{elec},d,2019}} \times E_{\text{power},d,2019} \quad (5)$$

(ii) 工业部门. 本研究在估计工业部门排放时考虑了直接能源消费和水泥生产的化学过程所产生的排放, 工业部门涉及的电力相关排放计入电力部门排放考虑. 对于直接能源消费排放的计算, 本研究考虑了钢铁、水泥、化工、其他工业等 4 个行业, 并假设能源消费变化与工业产品产量变化一致. 根据式(6)、(7), 对各

行业工业产品的平均月度增长率月度排放进行计算 (数据来源请见表 2):

$$E_{\text{industry,monthly},2019} = \sum E_{\text{industry,yearly},2019,i} \times \frac{P_{\text{monthly},2019,i}}{P_{\text{yearly},2019,i}}, \quad (6)$$

$$E_{\text{industry,monthly},2020} = \sum E_{\text{industry,yearly},2019,i} \times \frac{P_{\text{monthly},2020,i}}{P_{\text{yearly},2019,i}}. \quad (7)$$

对于来自水泥生产的分解过程所产生的排放, 本研究基于国家统计局发布的日度水泥产量数据, 根据式(3)计算其月度排放量. 最后, 基于日度火力发电数据, 将各月的月度工业排放加权分解为日度工业排放数据:

$$E_{\text{industry},d} = E_{\text{industry,monthly}} \times \frac{E_{\text{elec},d}}{E_{\text{elec,monthly}}}. \quad (8)$$

(iii) 交通部门. 交通部门包含对地面交通和航空两个部门的日碳排放估算. 对于地面交通部门, 本研究通过构建“拥堵指数-排放量”模型对地面交通部门的排放进行估计. “拥堵指数-排放量”模型是基于 TomTom 数据库 (全球 57 个国家或地区的 416 座城市的逐日拥堵指数), 拟合 TomTom 在巴黎市的日均拥堵指数与巴黎市的日均车流量数据 (<https://opendata.paris.fr/pages/home/>) 的相关关系, 构建了全球拥堵指数 (X) 和车流量 (Q) 的回归模型:

$$Q = a + \frac{bX^c}{d^c + X^c}. \quad (9)$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 四个参数的值分别为 100.87、671.06、1.98 和 6.49. 在假设地面交通每日排放量与日平均车流量成正比的条件下, 将该回归模型应用到全

表 2 工业部门工业产品产量数据
Table 2 Data of industrial production

行业	数据	来源
钢铁行业	粗钢产量	世界钢铁协会(https://www.worldsteel.org/)
水泥行业	水泥产量	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/tjsj/)
化工行业	硫酸、烧碱、纯碱、乙烯、化肥、化学农药、初级塑料制品和合成橡胶产量的平均增长率	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/tjsj/)
其他行业	粗铁矿石、磷矿石、食盐、饲料、精制食用植物油、鲜肉和冷冻肉、乳制品、白酒、软饮料、葡萄酒、啤酒、烟草、纱线、布料、丝绸和机织物、机制纸和纸板、新闻纸、普通玻璃、10种有色金属、精炼铜、铅、锌、电解铝、工业锅炉、金属冶炼设备和水泥设备产量的平均增长率	国家统计局(http://www.stats.gov.cn/tjsj/)

球其他城市. 由于TomTom数据库中只包含了22座中国主要城市, 我们应用该模型计算了这22座城市(北京、长春、长沙、成都、福州、广州、重庆、上海、深圳、沈阳、武汉、珠海、石家庄、厦门、南京、杭州、天津、宁波、泉州、东莞、苏州、无锡)的碳排放量变化. 结合这22座城市排放量之和占全国总排放量的比例, 估算出陆地交通部门的全国总排放. 各城市排放量与全国总排放量的比例是通过EDGARv4.3.2网格化排放数据中22座城市边界内的排放之和占全国排放总量的比例获得的. 基于拥堵指数和车流量的回归模型计算中国地面交通的日尺度碳排放量计算公式如下:

$$E_{\text{ground},d} = \frac{Q_d}{Q_{2019}} \times E_{\text{ground},2019}. \quad (10)$$

在假设航空部门排放因子不变的条件下, 航空部门的排放与航线距离线性相关. 本研究基于Flightradar24(<https://www.flightradar24.com/>)的每日航线距离数据, 计算了中国航空的日排放量:

$$E_{\text{air},d} = \frac{\text{Kilometers Flown}_d}{\text{Kilometers Flown}_{2019}} \times E_{\text{air},2019}. \quad (11)$$

(iv) 居民消费部门. 居民消费部门的排放主要是指商业和住宅建筑中燃料使用所产生的排放. 本研究根据地面温度数据计算了人口加权采暖度日数, 估算了中国的居民消费部门排放. 首先, 根据ERA5气温再分析数据, 计算每天的人口加权采暖度日; 其次, 以2018年住宅排放量的EDGAR估计值为基准, 根据EDGAR指南, 将中国的住宅排放分为烹饪排放和供暖排放两部分. 假设烹饪产生的排放量保持稳定, 而供暖产生的排放量随供暖需求变化; 最后, 根据人口加权采暖度日数的变化, 将EDGAR的2018年住宅排放估计值推算到2019和2020年. 由于采暖度日数指标是日值, 因此

可以得到住宅的日排放量. 由于本研究没有城市区域和建筑类型的燃料消耗数据, 因此没有考虑到居民在住宅建筑物和在商业和公共建筑物中花费的时间变化对燃料消耗的影响.

1.3 中国省级日尺度碳排放估算

分别根据中国各部门的排放量, 结合各部门省级权重参数对各省的电力、工业和交通部门的碳排放进行估计. 各部门省级排放计算公式如下:

$$\sum_{i,p} E_{\text{pro}} = E_{i,\text{China}} \times R_{i,p}, \quad (12)$$

其中, E_{pro} 代表省级的碳排放, E_{China} 代表中国总的碳排放, R 为权重参数, p 代表各省, i 代表排放各部门. 本研究分别采用省级的火力发电量、水泥产品产量以及汽车拥有量计算各排放部门的省级权重参数. 省级的火力发电量、水泥产品产量以及汽车拥有量数据均来自国家统计局官方网站. 各部门省级权重参数计算方法如下.

(i) 电力部门的省级权重参数计算. 我们统计了各省从2019年1月~2020年4月每月的火力发电量. 计算每个月各省火力发电量与全国发电量的比例. 由于缺少可用的日尺度的火力发电量数据, 假设各省火力发电量与全国火力发电量的比例在月尺度内变化很小, 可以忽略. 我们将月尺度的各省火力发电量与全国总发电量的比值作为电力部门日尺度的省级权重参数.

(ii) 工业部门的省级权重参数计算. 在计算全国工业部门的碳排放时, 我们考虑了钢铁、水泥、化工、其他工业等4个行业的碳排放. 由于数据的限制, 在考虑中间过程时, 水泥部门的碳排放在工业部门的碳排放比例最高. 在计算工业部门的省级碳排放时, 我们选择水泥部门的省级产量数据与全国数据的比例作

为工业部门的省级权重参数.

(iii) 交通部门的省级权重参数计算. 首先, 统计出2018年度各省的民用汽车拥有量主要包括民用载客(大型、中型、小型、微型)汽车拥有量、民用载客(大型、中型、小型、微型)汽车拥有量, 以及民用其他汽车拥有量. 随后, 计算2018年度各省的民用汽车拥有量在全国民用汽车拥有量中所占的比例. 由于缺乏月度和日度的省级民用汽车拥有量数据, 考虑到各省民用汽车拥有量在全国的平均占比在2年内的变化小于2.3%, 我们假设各省的汽车拥有量比例在2年之内的变化很小, 可忽略. 因此, 将2018年度各省民用汽车拥有量与全国民用汽车拥有量的比例作为交通部门的省级权重参数.

2 结果与讨论

2.1 新冠疫情对中国各部门碳排放的空间影响

由于各地区受到的新冠疫情影响程度不同, 所以在2020年前4个月各省碳排放的变化情况不同. 研究结果显示(图1), 在2020年1~4月期间, 江苏、湖北和浙江三省的碳排放量下降最多, 三省的碳排放量下降接近全国碳排放减少量的一半(48.9%). 相比2019年同期, 江苏省碳排放减少了48.5 Mt二氧化碳, 占全国碳排放总减少量的19.4%. 其中, 电力贡献了51.0%, 工业和交通分别贡献了35.5%和13.4%. 湖北省的碳排放量在2020年1~4月间减少了42.6 Mt二氧化碳, 相当于全国同期碳排放减少量的17.0%, 其中工业部门的减排贡献了65.8%, 电力和交通部门的减排分别贡献了27.6%和6.7%. 浙江省在2020年前4个月共减排31.3 Mt二氧化碳, 占全国总减排量的12.5%. 就浙江省而言, 对碳排放减少贡献最大的部门是电力部门, 占60.4%, 其次是工业部门, 占21.6%, 交通部门贡献了剩余的18.0%. 2020年前4个月, 山东、河北、安徽、河南和重庆五省的碳排放减少量均超过了10 Mt二氧化碳. 其中, 山东省的碳排放减少最多, 比2019年同期减少了20.7 Mt二氧化碳, 重庆市的碳排放减少量最低为10.1 Mt二氧化碳, 五省的减排量占全国总排放量的28.8%. 在2020年1~4月期间, 云南省、甘肃省、广西壮族自治区、宁夏回族自治区、陕西省和新疆维吾尔自治区的碳排放相比2019年同期没有减少, 而是略有增加. 其中, 云南省只增加了0.2 Mt二氧化碳, 新疆维吾尔自治区碳排放增长了8.5 Mt二氧化碳. 在碳排放增加的6个省份中, 甘肃

省的工业部门是排放增加的主要贡献源, 其他五省均是电力部门为排放增长的主要贡献源. 值得注意的是, 即便这6个省份的总排放显示了增加的趋势, 但是这6个省份陆地交通部门的碳排放均为负增长. 这意味着, 对于中国全部省份, 新冠疫情对陆地交通部门碳排放的影响截止到2020年4月底仍在持续.

从排放部门方面看, 电力部门是多数省份减排量的主要贡献源, 但是对于湖北、重庆、青海和福建等省份, 工业部门是碳减排的主要贡献源. 而对于北京、天津这样的大城市以及四川和黑龙江两省, 新冠疫情对交通部门的碳排放的减排作用最明显. 此外, 构建省级的日尺度碳排放检测系统不仅能够反映突发事件对不同区域碳排放的影响, 也可以反映如节假日等更短时间尺度事件对不同区域碳排放的影响.

2.2 新冠疫情期间中国各省碳排放的变化趋势

图2显示了中国大陆31个省份2020年1~4月相比2019年同期的日尺度碳排放差值. 在1月份, 有15个省份的碳排放相比2019年同期减少超过了1 Mt二氧化碳, 其中下降最多的3个省份分别为江苏省(-15.4 Mt二氧化碳)、浙江省(-9.1 Mt二氧化碳)和湖北省(-8.4 Mt二氧化碳). 在1月23日武汉开始实行封城政策, 截至1月25日, 除西藏地区外, 其余各省均启动了“一级响应”. 1月29日, 西藏自治区也启动了“一级响应”. 在各省“一级响应”之前, 已经反映出碳排放的下降趋势, 因为这次新冠疫情的暴发时间恰逢2020年春节前后, 各省进入春节假期, 导致了碳排放的下降. 除了青海省和西藏自治区, 其他各省在春节假期期间都显示了碳排放的减少.

到2月份, 全国大陆31省份均进入了对新冠疫情的一级响应. 相比2019年同期, 31省份的碳排放量在2月份都减少了, 有26个省份的减排量超过了1个百万吨二氧化碳. 其中, 江苏省(-19.1 Mt二氧化碳)、浙江省(-10.8 Mt二氧化碳)和山东省(-10.5 Mt二氧化碳)3个省份的排放减少量超过了10 Mt二氧化碳. 全国大部分地区的碳排放差值在2020年2月初没有持续减少, 反而显示了一个短暂的回升. 由于2019年的春节假期为2月4~10日, 因此导致这段时间, 2020年碳排放与2019年碳排放的差值缩小. 值得注意的是, 湖北省、江苏省和浙江省的排放差值在2月初的最小值接近-0.2 Mt二氧化碳. 这表明新冠疫情对这3个省份碳减排的影响超过春节假期. 2月底, 陆续有省份将应对新冠疫情的政策调整为“二级响应”. 除湖北省还执行严格的封城计划, 以及青海

(-) (-) (-) (-) (-)

进入3月份,湖北省由于疫情的持续影响,相比2019年同期,碳排放减少量达到了19.6 Mt二氧化碳。减排量超过1 Mt二氧化碳的省份减少到18个。截至3月25日,除武汉外,全国其他各省市对新冠疫情的响应调整为“三级”,宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、福建省、陕西省和云南省受疫情影响较小地区的碳排放已经率先恢复到2019年同期水平。除湖北、浙江和江苏三省的碳排放与2019年同期相比,还有明显下降外,其他省份的碳排放已经逐渐接近2019年同期水平。

从全国整体的情况看(图3), 其中1月份排放量减少51.5 Mt二氧化碳, 比2019同期年下降5.6%, 有接近70%的下降(37.6 Mt二氧化碳)发生在封城政策实施后的9 d中. 2月份中国碳排放量下降接近20%(-18.5%), 减排量为134.8 Mt二氧化碳; 3月份以来, 随着部分省市逐步解封及复工复产的推行, 中国的排放量下降幅度缩小

图 2 中国 31 省份二氧化碳日排放差值(2020 年 1~4 月与 2019 年同期相比)

Figure 2 The difference of daily CO₂ emissions between the first four month in 2020 and the same period in 2019 in 31 provinces of China

图 3 2020 年 1~5 月与 2019 年同期相比中国碳排放的变化

Figure 3 Changes in CO₂ emissions between the first five month in 2020 and the same period in 2019

(-9.4%), 减排量为82.0 Mt二氧化碳(图4)。4月8日武汉解除封城, 全国全部进入解封状态, 随着中国的工业生产和经济生活开始逐步恢复, 中国二氧化碳排在4月份恢复到正常水平(比2019年同期增长0.5%)。全国整体的情况与分省的情况基本一致。

2.3 新冠疫情对中国各部门碳排放的时间动态影响

由于数据可用性的限制, 分省的碳排放只计算了电力、工业和地面交通3个部门。但是在全国范围内, 我们还估计了新冠疫情对航空业和居民消费部门碳排放的影响(图4)。电力和工业部门的排放是中国碳排放的主要排放源。在2020年1~4月期间, 新冠疫情导致电力和工业部门排放, 比2019年同期减少91.1 Mt二氧化碳(-6.0%)和70.5 Mt二氧化碳(-5.9%)。其中, 1月份, 电力和工业部门碳排放相比2019年同期分别下降了3.6%和6.4%。2月份, 碳排放的降幅最大, 电力和工业部门相比2019年同期分别下降了14.4%和16.8%。3月份碳排放的降幅有所缓解, 电力和工业部门相比2019年同期都下降了8%。在新冠疫情导致的封城期间(2020年1月23日~2020年3月25日), 电力部门共产生652.88 Mt二氧化碳, 相比2019年同期减少了12%。工业部门共产生481.12 Mt二氧化碳, 相比2019年同期减少了13%。进入4月份之后, 封城政策在全国范围内解除, 复工复产有序实施, 中国电力和工业部门的碳排放有所回升, 电力和工业部门在4月份的碳排放分别为355.87 Mt二氧化碳和364.99 Mt二氧化碳, 比2019年同期分别增长了1.1%和3.4%。这表明新冠疫情对电力和工业部门二氧化碳的影响在2月份最严重, 随着复工复产的有序进行, 截至2020年4月份, 电力和工业部门的二氧化碳排放已经恢复到2019年同期水平。

交通部门(地面交通和航空)是中国碳排放的第三大排放源(9.6%)。相比其他排放部门, 新冠疫情对地面交通和航空部门的影响更明显。1~4月, 新冠疫情导致地面交通和航空部门的排放相比2019年同期分别减少了28%(-84.2 Mt二氧化碳)和43.8%(-10.8 Mt二氧化碳)。值得注意的是, 新冠疫情导致的严格防控措施对地面交通部门的排放量的影响在排放量方面已经超过了对工业(70.5 Mt二氧化碳)部门碳排放的影响。新冠疫情导致地面交通和航空部门碳排在2月份下降最快, 相比2019年分别下降了37.8%和71.2%。随后, 疫情对地面交通和航空部门碳排放的影响有所缓解, 3月份相比2019年同期分别下降了20%和56.4%。进入4月份后, 尽

管封城政策解除, 但是, 地面交通部门和航空部门的碳排放都远没有恢复到2019年同期水平, 4月份地面交通和航空部门的碳排放相比2019年同期分别下降16.3%和51.7%。

居民消费部门的碳排放占中国总二氧化碳排放的4.1%。2020年1~4月, 居民消费部门的碳排放相比2019年同期减少了7.5 Mt二氧化碳, 下降率为2.3%。在全国大部分地区(武汉除外)实施封城政策期间(2020年1月23日~2020年3月25日), 居民消费部门的碳排放相比2019年同期减少了5%。随着温度的回升, 居民消费部门的碳排放从1~4月逐渐减少。2和3月份, 居民消费部门的碳排放相比2019年同期分别下降了7.5%和17%。4月份, 居民消费部门的碳排放相比2019年同期上升了7.3%。

综上所述, 就全国而言, 新冠疫情在2月份对电力、工业、交通和居民消费4个部门的二氧化碳排放都产生了最强的减排影响。随着封城政策的放松, 新冠疫情对二氧化碳减排的影响也逐步缓解。截至2020年4月30日, 电力、工业和居民消费3个部门的二氧化碳排放已经恢复到2019年同期水平。但是交通部门(地面交通和航空), 尤其是航空部门, 与2019年同期水平仍有较大差距。从减排贡献看, 2020年1~4月期间, 中国二氧化碳排放相比2019年同期共减少264.0 Mt二氧化碳, 其中交通部门(地面交通和航空部门)贡献了36.0%, 电力和工业部门分别贡献了34.5%和26.7%, 其余为居民消费部门贡献(2.8%)。

3 结论

本研究基于中国省级日尺度碳排放监测系统, 揭示了新冠疫情对中国碳排放的时、空影响。研究发现: 新冠疫情对中国碳排放的影响展现出不同的空间差异。在2020年1~4月期间, 江苏、湖北和浙江三省的碳排放受新冠疫情影响最重, 相比2019年同期, 其碳排放减少量分别占总排放减少量的19.4%、17.0%和12.5%。山东、河北、安徽、河南和重庆五省的碳排放减少量均超过了10 Mt二氧化碳, 五省的减排量占全国总排放量的28.8%。云南省、甘肃省、广西壮族自治区、宁夏回族自治区、陕西省和新疆维吾尔自治区的碳排放相比2019年同期略有增加。此外, 新冠疫情对青海省和西藏自治区的影响非常小。

从排放部门看, 电力部门是多数省份减排量的主要贡献源, 对于湖北、重庆、青海和福建等省份, 工业部门是碳减排的主要贡献源。对于北京、天津这样的

图4 新冠疫情对中国各部门二氧化碳排放的影响

Figure 4 Impacts of COVID-19 pandemic on China's daily CO₂ emissions by sectors

大城市以及四川和黑龙江两省，新冠疫情对交通部门碳排放的减排作用影响最显著。从全国看，新冠疫情对电力、工业和居民消费部门的碳排放的影响在4月份

已经基本消除，但是对交通部门，包括地面交通和航空的影响则仍在持续。4月份，电力和工业部门的二氧化碳碳排放相比2019年同期略微升高，分别增长了1.1%和

3.4%。但是,新冠疫情对交通部门的减排影响仍在持续,4月份,地面交通部门和航空部门的碳排放相比2019年同期分别降低了20%和51.7%。

从新冠疫情对中国碳排放影响的时间发展看,江苏省的碳排放1和2月份下降最多,3月份之后,湖北省的碳排放减少量最为突出。而宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、福建省、陕西省和云南省受疫情影响较小的地区3月份的碳排放已经率先恢复到

2019年同期水平。进入4月份,除湖北省的碳排放相比去年同期减少5 Mt二氧化碳外,其他省份均已接近或已经恢复到2019年同期水平。3月25日开始,全国(除武汉地区)逐步解封,经济活动陆续恢复;4月份中国碳排放已恢复到2019年同期水平,相比2019年同期增长0.5%。中国碳排放封城政策解除后显示了逐步增长的趋势,这与中国经济的有序恢复密切相关。

参考文献

- 1 Liu Z, Ciais P, Deng Z, et al. Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nat Commun*, 2020, 11: 1–12
- 2 Quéré C, Jackson R, Jones M, et al. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat Clim Chang*, 2020, 10: 647
- 3 Forster P, Forster H, Evans M, et al. Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nat Clim Change*, 2020, 10: 913–919
- 4 He G, Pan Y, Tanaka T. The short-term impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in China. *Nat Sustain*, 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0581-y
- 5 Zhang R, Zhang Y, Lin H, et al. NO_x emission reduction and recovery during COVID-19 in East China. *Atmosphere*, 2020, 11: 433
- 6 Gregg J S, Andres R J. A method for estimating the temporal and spatial patterns of carbon dioxide emissions from national fossil-fuel consumption. *Tellus B-Chem Phys Meteorol*, 2008, 60: 1–10
- 7 Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. *Nature*, 2015, 524: 335–338
- 8 Liu Z, Zheng B, Zhang Q. New dynamics of energy use and CO₂ emissions in China. 2018, arXiv: 1811.09475
- 9 Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 14095–14111
- 10 Cui D, Deng Z, Liu Z. China's non-fossil fuel CO₂ emissions from industrial processes. *Appl Energy*, 2019, 254: 113537
- 11 Guan D, Liu Z, Geng Y, et al. The gigatonne gap in China's carbon dioxide inventories. *Nat Clim Chang*, 2012, 2: 672–675
- 12 Eggleston S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 5. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006
- 13 Liu Z, Guan D B, Wei W. Carbon emission accounting in China (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2018, 48: 878–887 [刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48: 878–887]
- 14 Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, et al. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012. *Earth Syst Sci Data*, 2019, 11: 959–1002
- 15 Quéré C, Andrew R, Friedlingstein P, et al. Global carbon budget 2018. *Earth Syst Sci Data*, 2018, 10: 2141–2194
- 16 Andres R J, Gregg J S, Losey L, et al. Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption. *Tellus B-Chem Phys Meteorol*, 2011, 63: 309–327

补充材料

图S1 消耗能源及其使用部门对中国碳排放的贡献

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com。补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责。

Summary for “新型冠状病毒肺炎疫情对中国2020年碳排放的影响”

Impact on China's CO₂ emissions from COVID-19 pandemic

Zhu Liu^{1*}, Duo Cui^{1*}, Zhu Deng¹, Yilong Wang², Haiwang Zhong³, Xu Yue⁴, Ning Zhang⁵, Bin Chen⁶, Xiaobo Ren⁷, Wei Wei⁸, Yonglong Lü⁹, Kejun Jiang¹⁰, Xinyu Dou¹, Biqing Zhu¹, Rui Guo¹, Taochun Sun¹, Piyu Ke¹, Dabo Guan¹ & Peng Gong¹

¹ Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

⁴ School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

⁵ Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China;

⁶ School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

⁷ Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

⁸ Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

⁹ State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

¹⁰ Energy Research Institute, Academy of Macroeconomic Research, Beijing 100038, China

* Corresponding authors, E-mail: zhuliu@tsinghua.edu.cn; cuiduo@mail.tsinghua.edu.cn

Assessing the impact of the COVID-19 pandemic on China's carbon emissions is crucial for China to lead global climate change mitigation. However, thorough quantitative analyses of the pandemic's effects on energy use and emissions are still lacking. This is largely because well-known published datasets of greenhouse gas emissions are based on annual statistics that commonly become available one or more years after they are gathered. A high temporal resolution emission dataset is critical to capture the immediate effects of an event such as the COVID-19 pandemic. Such an improved resolution might also allow policy makers to more quickly observe the effects of policies aimed at decreasing CO₂ emissions, facilitating rapid adjustments.

Here, based on a newly developed, near real-time global emission dataset, Carbon Monitor, we estimate China's daily energy consumption and associated CO₂ emissions and use this dataset to estimate the impact of COVID-19 on CO₂ emission trends. Such a near-real-time CO₂ emission database based on activity data quantifies both anthropogenic CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement production. We show that the higher-resolution emission dataset can be used to assess the impact of COVID-19 (and similar future disruptions) within a reasonable range of uncertainty. This study finds that China's CO₂ emissions in the first four months of 2020 decreased by 6.9% compared to the same period in 2019, with a total emission reduction of 234.5 million tons of CO₂. The provinces of Jiangsu, Hubei, and Zhejiang were most severely affected by COVID-19, accounting for 19.4%, 17.0% and 12.5% of the total reduction in CO₂ emissions, respectively. The reduction of CO₂ emissions from Shandong, Hebei, Anhui, Henan and Chongqing provinces is more than 10 Mt CO₂, and the sum of the reduction from these five provinces accounts for 28.8% of the national total reductions. CO₂ emissions in Yunnan Province, Gansu Province, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Ningxia Hui Autonomous Region, Shaanxi Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region increased slightly compared to the same period in 2019. In addition, COVID-19 has a little effect on CO₂ emissions from Qinghai Province and Tibet Autonomous Region.

This decrease in atmospheric pollutants is the largest decrease recorded and is consistent with the decrease in air pollutants observed by ground observation stations. This study finds that China's national economy has recovered rapidly. In April 2020, China's carbon emissions returned to the same level observed last year. This study predicts that China's full-year CO₂ in 2020 will be 2% lower than in 2019. This will be the first time China has experienced a decline since 1997. China's carbon emissions have not rebound significantly, and the dynamic changes in China's CO₂ indicate a rapid recovery of the Chinese economy.

Regarding long-term trends, it is still unclear how much China's CO₂ emissions will change at the end of this year and how fast the economy and industry will return to normal. With policy support, the economy will be stimulated as the pandemic fades. The IMF predicts that the global annual economic output will decrease sharply by -3.0% in 2020, which is worse than the financial crisis in 2008, based on the assumption that COVID-19 will fade globally in the second half of this year. Based on current emission dynamics, China's emission decline is estimated to be less than 5%, and the future trend will be affected by whether there will be another pandemic in the future. Current statistics are still not capable of comprehensively capturing the dynamics of CO₂ emissions during the COVID-19 pandemic, and further monitoring, observation and data collection are urgently needed.

COVID-19 pandemic, provincial CO₂ emission, daily emission inventory, global change

doi: [10.1360/TB-2020-0729](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0729)