

气溶胶短期减排对城市碳储量的扰动机制

杨田

兰州石化职业技术大学, 甘肃 兰州 730060

DOI:10.61369/SE.2025060037

摘 要 : 国庆假期人为活动周期性变化为研究短期减排的碳响应提供了理想场景。本研究利用2020年10月1–8日全国空气质量监测数据及卫星CO₂柱浓度,结合气象再分析资料,解析了假期污染过程对碳储量的影响路径。研究表明:(1)假期前6天,全国PM_{2.5}均值28 μg/m³,XCO₂浓度较9月下降0.9 ppm;在假期后期,静稳天气导致华北重污染,北京PM_{2.5}峰值183 μg/m³,XCO₂骤升2.4 ppm,其中化石源贡献占比>70%。(2)人为活动作为XCO₂短期波动主因,假期“双峰式”交通模式,使得XCO₂的分布呈现“东南高、西北低”格局,城市群排放热点与卫星XCO₂高值区显著匹配。(3)短期气溶胶减排在扩散条件良好时增益碳储量,但静稳天气下污染爆发将逆转增益。

关 键 词 : 空气质量指数; 碳储量; 克里金插值; XCO₂ 浓度

Perturbation Mechanism of Short-Term Aerosol Emission Reduction on Urban Carbon Storage

Yang Tian

Lanzhou Petrochemical University of Vocational Technology, Lanzhou, Gansu 730060

Abstract : The periodic changes in human activities during the National Day holiday provide an ideal scenario for studying the carbon response of short-term emission reductions. This study utilizes national air quality monitoring data and satellite CO₂ column concentrations from October 1–8, 2020, combined with meteorological reanalysis data, to analyze the impact path of the holiday pollution process on carbon storage. The research shows that: (1) During the first six days of the holiday, the national average PM_{2.5} concentration was 28 μg/m³, and the XCO₂ concentration decreased by 0.9 ppm compared to September. In the later part of the holiday, stable weather conditions led to heavy pollution in North China, with a peak PM_{2.5} concentration of 183 μg/m³ in Beijing and a sharp increase of 2.4 ppm in XCO₂, with fossil fuel sources contributing more than 70%. (2) Human activities are the main cause of short-term fluctuations in XCO₂. The "bimodal" traffic pattern during the holiday results in a "high in the southeast and low in the northwest" distribution of XCO₂, and there is a significant match between urban agglomeration emission hotspots and high XCO₂ value areas observed by satellites. (3) Short-term aerosol emission reductions can increase carbon storage when diffusion conditions are good, but the outbreak of pollution under stable weather conditions can reverse the gains.

Keywords : air quality index; carbon storage; kriging interpolation; XCO₂ concentration

引言

空气是包围在地球周围的气体,是人类赖以生存的环境。虽然大气有一定的自洁能力,但是由于工业以及交通运输业的快速发展,城市化发展水平迅速提高,大量的有害物质被排放到空气中,使空气质量不断下降,危害人类健康^[1]。

2020年10月9日,文化和旅游部发布了当年国庆中秋“双节”八天假期的市场数据。数据显示,国内游客接待量总计6.37亿人次,可比口径下恢复至2019年同期的79.0%。此次假期旅游呈现“短途化”特征,国内中长线游显著减少,省内游及近程游成为主流。其中,跨省游客仅占29.1%,83.5%的出行距离在300公里以内。值得注意的是,游客平均出游半径在假期第5日降至最低点,随后于第6日回升至200.1公里,较前日增长10.6%,并在第7日继续扩大。长假期间,全国铁路日均发送旅客量超1200万人次,全国高速公路日平均车流量4860.8万辆,西宁、丽江、三亚和拉萨机场计划执飞航班分别同比增长近38.6%、29.2%、22.5%和22.8%。这种人为活动的剧烈波动,为探究短期气溶胶排放对城市碳储量的扰动机制提供了理想场景。

基金项目:

兰州市科技局科技计划项目(2024-9-272)《区域环境甲烷排放分析及碳减排潜力研究》

兰州石化职业技术大学2025年校级“结构灾变识别与智能监测新技术”科研创新团队(004)资助。

作者信息: 杨田(1990-),女,甘肃静宁人,兰州石化职业技术大学,讲师,研究方向:摄影测量与遥感。

本文以国庆长假期间的空气质量监测数据为基础，融合全国空气质量监测数据、卫星 CO₂ 柱浓度，探讨空气质量指数（AQI）、XCO₂ 的时空分布特征，并分析短期气溶胶排放对城市碳储量的扰动机制，为“减污降碳”协同政策提供科学依据。

一、数据来源与研究方法

（一）数据来源

本文所用空气质量监测数据来源于全国城市空气质量实时发布平台，涵盖了2020年国庆期间全国空气质量监测点的监测数据，共有362个城市。XCO₂数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>)^[2]。行政区划数据来源于自然资源部网站，审图号为GS(2024)0650。

（二）研究方法

1. AQI

空气质量指数 (Air Quality Index, AQI)，是定量描述空气质量状况的无量纲指数^[3]。参与空气质量评价的主要污染物为 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 六项。由于 AQI 评价的6种污染物浓度限值各有不同，在评价时各污染物都会根据不同的目标浓度限值折算成空气质量分指数 IAQI^[4]，最终 AQI 用如下公式计算：

$$AQI = \max\{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\}$$

其中：

n 为污染物项目，IAQI_n 为污染物项目 n 的空气质量分指数。

AQI 分级标准见表1。

表1 AQI 分级标准

空气质量指数 (AQI)	空气质量指数级别	空气质量状况
0-50	I	优
51-100	II	良
101-150	III	轻度污染
151-200	IV	中度污染
201-300	V	重度污染
>300	VI	严重污染

2. 克里金插值

克里金法 (Kriging) 是依据协方差函数对随机过程 / 随机场进行空间建模和预测 (插值) 的回归算法^[5]。克里金法是对已知函数进行加权平均估计未知函数的方法，其预测理论接近于线性回归。

$$\hat{z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

其中：

$\hat{z}_0$ 是点 (x₀, y₀) 处的估计值。

λ_i 是权重系数。

同样是采用空间上所有已知点的数据加权求和来估计未知点的值。但是权重系数并非距离的倒数，而是能够满足点 (x₀, y₀) 处的估值与真实值的差最小的一套最优系数，同时满足无偏估计的条件^[6]。即同时满足以下两个式子：

$$\min_{\lambda_i} \text{Var} (\hat{z}_0 - z_0)$$

$$\sum (\hat{z}_0 - z_0) = 0$$

二、空气质量时空分析

统计得到，国庆期间，全国大多数城市的空气质量较好，处于优、良，其中阿克苏地区、克州、喀什地区等城市的空气质量出现了1-2天严重污染。为分析区域空气质量的连续空间分布特征，本研究采用克里金插值法 (Kriging) 对监测站点获取的 AQI 数据进行空间插值分析，其结果如图1所示。图1 基于克里金插值的 AQI 空间分布图清晰展示了：在长假的前七天，污染较严重的地区集中在阿克苏、克州、喀什等城市；而在长假的最后一天，污染较严重的地区集中出现在北京、天津、秦皇岛、石家庄、唐山等城市。

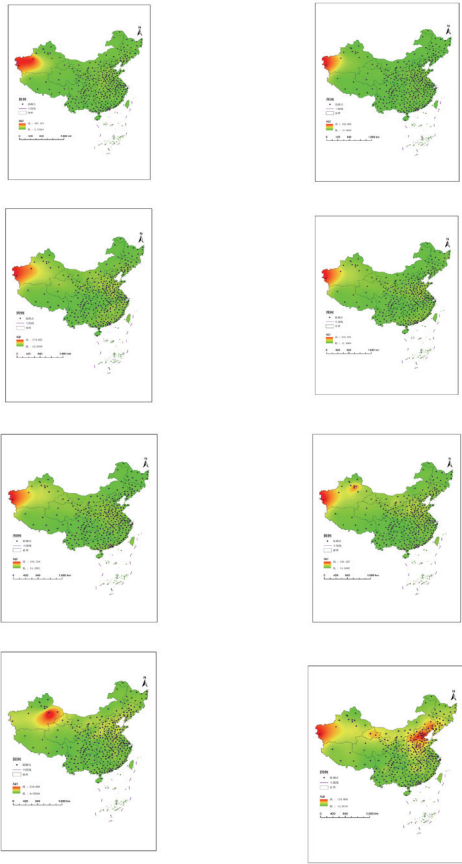


图1 10月1日-10月8日 AQI 的空间分布

图2展示了北京、成都、上海、三亚等代表性热门旅游城市在长假期间六种主要污染物的动态变化。图中一个突出的现象是：当假期接近尾声，相较于成都、上海、三亚三市污染物浓度变化较小的特点，北京市的 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂ 浓度曲线陡然上扬，

增长势头迅猛。参照《环境空气质量指数（AQI）技术规定（试行）》，北京这三种关键污染物的峰值浓度均已突破国家环境空气质量二级标准限值，这清晰地表明在长假收尾阶段，北京市经历了一次短时但显著的污染加重过程，空气质量状况明显劣于其他对比城市。值得注意的是，上海的 O₃ 浓度在整个研究周期内持续处于较高水平，相比之下，三亚的 O₃ 浓度自 10 月 4 日起出现急剧上升，而成都的 O₃ 监测测先经历了短暂的上升后又快速回落。

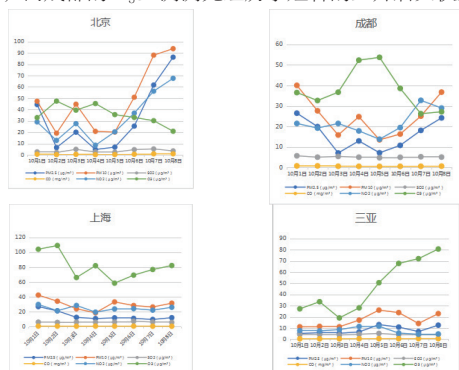


图3 北京、成都、上海、三亚等四个城市主要污染物浓度变化

三、XCO₂分布特征分析

基于 DSC-DF-LGB 的中国全覆盖 XCO₂逐日数据集（2015–2020 年），采用 ARCGIS 软件进行了 XCO₂的时空特征分析，发现 XCO₂在空间上，东西梯度差异明显，京津冀、长三角等东南沿海及城市群 XCO₂浓度明显偏高，而青藏高原及新疆部分地区 XCO₂较低；其次，XCO₂具有比较明显的城市群聚集效应，受返程高峰影响，京津冀后期 XCO₂升幅达到了日均增速 0.15 ppm；

在假期前期，全国大部地区大气扩散条件较好，XCO₂浓度相对较低。全国 PM_{2.5}均值降至 28 μg/m³，XCO₂较 9 月背景值下降 0.9 ppm；后期，由于静稳天气主导，华北等地出现重污染过程，人为排放积聚导致 XCO₂骤升 2.4 ppm，化石源贡献占比超 70%。

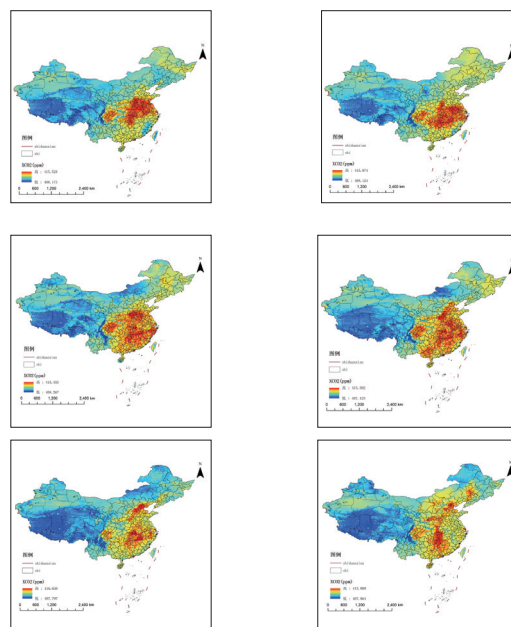
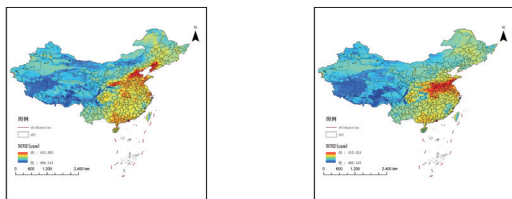


图3 10月1日–10月8日XCO₂的空间分布

四、分析与结论

在国庆长假期间，绝大多数城市空气质量良好，长假前 7 天，污染严重的城市分布在阿克苏、克州、喀什等西北城市，而在最后一天，污染严重的城市分布在华北地区的北京、天津、秦皇岛、石家庄、唐山等城市。假期“双峰式”交通模式（前期短途游 + 后期返程高峰）直接驱动排放峰值，尽管假期停工，但火电、钢铁等行业持续运行，导致京津冀工业带 XCO₂无显著下降。

主要结论如下：

（1）假期前 6 天，全国 PM_{2.5}均值 28 μg/m³，XCO₂浓度较 9 月下降 0.9 ppm；在假期后期，静稳天气导致华北重污染，北京 PM_{2.5}峰值 183 μg/m³，XCO₂骤升 2.4 ppm，其中化石源贡献占比 > 70%。

（2）人为活动作为 XCO₂短期波动主因，假期“双峰式”交通模式，使得 XCO₂的分布呈现“东南高、西北低”格局，城市群排放热点与卫星 XCO₂高值区显著匹配。

（3）短期气溶胶减排在扩散条件良好时增益碳储量，但静稳天气下污染爆发将逆转增益。

参考文献

- [1] 刘耀彬，李仁东，宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 105–112.
- [2] 杨辉. 基于 DSC-DF-LGB 的中国全覆盖 XCO₂逐日数据集（2015–2020 年）. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>), 2025. <https://cstr.cn/CSTR:11738.11.NCDC.ZENODO.DB6751.2025>.
- [3] 陈黎明，程度胜. 长株潭空气污染指数相关性研究及季节调整 [J]. 统计与决策, 2014, (14): 139–142.
- [4] 蔺雪芹，王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力 [J]. 地理学报, 2016, 71(8): 13571–1371.
- [5] 肖悦，田永中，许文轩，等. 近 10 年中国空气质量时空分布特征 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 243–252.
- [6] 王露云. 中国 31 个主要城市空气质量评价及主要污染物浓度预测 [D]. 重庆：重庆师范大学, 2014.