

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

重污染天气应对“绩效分级、差异化管理”措施首次实践效果后评估

曾景海, 王灿*

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 为提高重污染天气应对的科学性和精准度, 2019年7月生态环境部制定重污染天气应对“绩效分级、差异化管理”措施. 为应对9月底至10月初的重污染过程, 京津冀及周边共68个城市启动重污染预警, 该措施得以首次实践. 通过时间序列断点回归方法对该措施效果进行评估发现, 空气质量改善存在滞后的现象, SO_2 、 NO_2 和 CO 这3个气态污染物改善速度较快, 对涉及二次生成的 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 两个污染物见效速度相对较慢. 10月1日恰逢在北京举办庆祝中华人民共和国成立70周年阅兵式, 对10月1日当天进行评估, 发现与假如不采取措施的情形相比, 重污染应急措施使北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 CO 日均浓度显著下降, 下降幅度分别为54.1%、62.4%和25.8%. 如果不采取重污染应急措施, 北京10月1日上午可能出现中重度污染, 但实际上空气质量保持在良的水平. 区域启动预警的68城市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 CO 都整体改善, 部分城市出现了 O_3 不降反升现象. 总体看, “绩效分级、差异化管理”作为一项创新性的举措, 首次实践取得了较好的空气质量改善效果.

关键词: 重污染预警; 重污染应急; 绩效分级、差异化管理; 时间序列断点回归; 70周年阅兵式

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2436-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109166

Assessment of “Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading” Policy During Heavy Air Pollution Alert

ZENG Jing-hai, WANG Can*

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to make the heavy air pollution response more scientific and accurate, the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China formulated the “differentiated response requirement based on performance grading” policy in July 2019. A total of 68 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas issued heavy air pollution alerts from late September to early October. This was the first time the policy was put into practice. The regression discontinuity in time design was employed to estimate the effects of the policy on air quality in Beijing and 67 other cities. Here, we showed that the policy basically brought about a short-term, substantial air quality improvement in Beijing and 67 other cities. We found that there was a “lag phenomenon” in which three gaseous pollutants (SO_2 , NO_2 , and CO) achieved improvement relatively quickly; however, O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ achieved improvement slowly. A parade to celebrate the 70th anniversary of the founding of the People's Republic of China was coincidentally held in Beijing on October 1st. Compared with the hypothetical situation in the absence of the heavy air pollution alert, the heavy pollution response measure brought down the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , and CO by 54.1%, 62.4%, and 25.8%, respectively, in Beijing on October 1st. Without the heavy pollution response measures, the air quality rank on the morning of October 1st would have been unhealthy or very unhealthy while the parade was on-going, but in actuality it was moderate. Further analyses of 67 cities found that $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , SO_2 , and CO were all improved on October 1st, whereas the concentration of O_3 increased in a portion of the cities. Our study demonstrates that the “differentiated response requirement based on performance grading” policy is effective.

Key words: heavy air pollution alert; heavy air pollution response; differentiated response requirement based on performance grading; regression discontinuity in time; parade to celebrate 70th anniversary of the founding of China

重污染天气是民心之痛、民生之患,在我国北方地区,特别是京津冀及周边地区秋冬季受污染物的高强度排放、太行山东侧-燕山南侧的地理地形和不利的天气条件等影响,区域性大气重污染过程频发^[1~4]. 重污染期间,大气能见度降低,对社会经济和公众身体健康造成不利影响^[5~8]. 重污染天气应对是保护人民身体健康的有效方式,是大气污染防治的重要手段. 经过多年的努力,我国重污染天气应对体系不断健全,机制不断完善. 在预测预报体系方面,目前已在全国范围内建成了国家、区域、省、市四级空气质量预测预报组织体系,形成中长期、短期和邻近预报相结合的业务化预报模式. 在管理体系方面,2013~2016年生态环境部从应急预案体

系、预警分级标准和应急减排措施等方面提出了要求^[9~11],各地重污染天气应对体系实现从无到有并逐渐完善. 2017年和2018年对重污染天气应对体系进一步规范. 2017年统一京津冀及周边地区重污染天气预警分级标准,明确预警启动和解除条件,提出重点污染源应急管控措施,要求应急减排清单化管理^[12]; 2018年统一全国预警分级标准,明确各级预警措施减排比例,规范区域应急联动^[13]. 2019年和2020年对重污染天气应对体系进行改革创新.

收稿日期: 2021-09-17; 修订日期: 2021-10-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0606004)

作者简介: 曾景海(1981~),男,博士研究生,主要研究方向为大气污染防治和重污染天气应对等, E-mail: stokingzeng@163.com

* 通信作者, E-mail: canwang@tsinghua.edu.cn

2019 年首次提出了“绩效分级、差异化管控”措施,对 15 个重点行业进行了绩效分级,实施差异化管控^[14]。2020 年继续深化该措施,将 15 个重点行业扩展到了 39 个^[15]。重污染天气应对体系的有效运转,起到了污染物排放“削峰降速”的作用,2013 年以来我国北方地区重度及以上污染天数逐年下降,得到社会各界的一致认可。

在重污染应急措施方面,按照大气法规定重污染预警期间可以采取责令有关企业停产或者限产、限制部分机动车行驶、禁止燃放烟花爆竹、停止工地土石方作业和建筑物拆除施工、停止露天烧烤、停止幼儿园和学校组织的户外活动、组织开展人工影响天气作业等应急措施。以往在措施具体执行中,往往对同一行业的企业提出相同的应急减排要求,没有区分企业环保治理水平的差异性,行业协会和部分企业认为这样的做法合法但不合理,容易挫伤企业加强污染治理的积极性,也容易导致“劣币驱逐良币”。为了解决这一问题,生态环境部制定出台了“绩效分级、差异化管控”政策^[16~21],在重污染预警期间,环保水平高的企业可不采取或少采取停限产等措施,环保水平低的企业则需加大减排措施力度。这是一个创新性的政策,旨在以差异化管控鼓励先进的企业,鞭策落后的企业,提升环保基础工作水平,促行业转型升级,实现污染减排与行业高质量发展双赢。该政策于 2019 年 7 月出台,9 月底得以首次实践。

9 月底至 10 月一般处于夏季季风向冬季季风的过渡时期,气象条件的突变经常导致发生 PM_{2.5} 重污染过程^[22]。2019 年 9 月 25 日~10 月 2 日,预测预报显示京津冀及周边地区连续 8d 气象条件不利,湿度高、逆温强,边界层高度偏低,空气流动性弱,大气扩散条件为近 5 年同期最差,污染程度在 9 月 30 日~10 月 1 日将达到峰值,可能达到重度污染。10 月 1 日恰逢在北京市举行庆祝中华人民共和国成立 70 周年阅兵式(70 周年阅兵式),出现重污染过程不但影响人民群众身体健康,还将严重影响阅兵式效果。于是,京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区北部 10 省(市)共有 68 个城市启动了重污染天气预警,其中 8 个城市启动红色预警,55 个城市启动橙色预警,5 个城市启动黄色预警。大部分城市于 9 月 26 日前启动预警,10 月 1 日后解除预警,在预警期间各城市首次采取了“绩效分级、差异化管控”的重污染应急措施。

这项创新性的措施是否起到了改善空气质量的效果是一个非常值得研究和评估的问题,前人对此还未开展过相关研究,本文首次对该问题进行评估探讨。在评估方法上,有两大类的方法可供选择,第

一大类是传统的空气质量模型方法,第二大类是统计类方法。传统空气质量模型包括 CMAQ、CAMx、WRF-Chem 和 Polair3D 等。统计类方法包括计量经济学方法、人工神经网络和后向轨迹分析等。传统空气质量模型方法算是“自下而上”的方法,基于污染源清单和气象条件,模拟一系列复杂的物理和化学反应过程,得出空气质量状况结论。这类方法在空气质量预测预报、污染防治策略制定和达标规划制定等方面应用很广泛。统计类方法往往跳过复杂的物理和化学反应机制模拟,而是通过数据本身规律开展研究^[23]。这两类方法各有优缺点,空气质量模型在环境管理中应用非常广泛,但也会受到部分机制未知、源清单的准确性以及是否及时更新的时效性的制约。从目前看,重点区域、重点城市源清单较为完善,其他城市则相对不足。并且近年来随着大气污染治理快速推进,源清单变化较大,能否及时更新是个问题。基于统计的方法,快速、方便,但也会遇到模型设定误差和内生性等问题,从而导致评估偏差。计量经济学方法在政策评估领域近年来越来越受到重视,应用得也越来越广泛,主要包括双重差分、倾向得分匹配、断点回归、合成控制和工具变量法等^[24]。其中又以双重差分和断点回归两种方法应用得最为广泛。断点回归方法由于有不需要非实验方法那样严苛的假设条件、能得到比自然实验更可信的因果推断、与其他政策评估方法相比更接近于随机实验和能有效地解决内生性问题等优点,被广大学者认为是政策评估最有效的准实验方法^[3]。在大气政策或措施评估方面,断点回归方法得到了较为广泛的应用,包括应用于地铁高铁开通对空气质量影响评估^[25~27]、冬季采暖对空气质量影响评估^[28~31]、机动车限行对空气质量影响评估^[32~36]和油品升级对空气质量影响评估^[37]等方面。在污染预警和重大活动保障研究评估方面,断点回归方法也有较多应用,利用该方法,Neidell^[38]研究了加州南部空气污染预警对室外活动的影响,Noonan^[39]研究了亚特兰大市臭氧污染预警对户外活动和家庭用车出行的影响,Sexton^[40]研究了旧金山湾区“Spare the Air”项目中空气污染(主要是臭氧污染)预警期间公交免费措施对交通出行的影响,Chen 等^[41]研究了加拿大多伦多市空气质量预警对人体健康的影响,Wichmann 等^[42]研究了北京 APEC 会议和抗战胜利 70 周年大阅兵期间空气质量管控措施对空气质量的影响,Zeng 等^[43]研究了杭州 G20 空气质量保障政策对空气质量短期和长期的改善作用。

本研究采用时间序列断点回归作为评估方法,

对“绩效分级、差异化管控”这项创新性政策首次实践的效果开展后评估,结果表明该政策作为一项创新性的举措,首次实践取得了较好的空气质量改善效果.

1 材料与方法

1.1 时间序列断点回归模型

本研究采用时间序列断点回归模型开展重污染天气应急措施对空气质量影响的因果关系评估. 空气质量主要受几个关键因素影响:①污染源污染排放;②大气扩散条件,即气象条件状况;③时间趋势,比如近些年大气污染防治工作的不断推进所带来的空气质量改善趋势等;④城市的固定效应,比如地理位置,靠山或靠海等;⑤空气质量的滞后效应,比如具体到某一天的时候,由于污染物扩散需要时间,某日空气质量的好坏会影响次日空气质量,但本质上来讲空气质量的滞后效应是气象条件的滞后效应. 在模型设定的时候,充分考虑以上因素. 参照文献[23,44~46]所采用的方法,将时间序列断点回归模型设定如下:

$$\ln(p_t) = \beta_0 + \beta_1 YB_t + B \cdot \Gamma_t + f(\text{Date}_t) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中, t 为日为单元的时间序数; p 为大气污染物日均浓度或者日空气质量指数, $p \in \{\text{PM}_{2.5}, \text{SO}_2, \text{NO}_2, \text{CO}, \text{O}_3, \text{PM}_{10}, \text{AQI}\}$. YB_t 为重污染应急措施影响的虚拟变量,在评估时段取 1,在评估时段之前和之后取 0, β_1 为其系数. $B \cdot \Gamma_t$ 用于表征气象要素对空气质量的影响,其中 Γ_t 表示与气象有关的各种变量的行向量,考虑了日平均相对湿度、日累积降水量、日最高气温、日最低气温、日平均风速和风向等气象参数变量及其滞后项,还考虑了星期、月份和季节等虚拟变量,以及这些变量的多次项和交互项,具体包含的变量共计 199 项; B 为与气象有关的各个变量系数的行向量. 空气质量的滞后效应已经以气象条件滞后的形式包含于 $B \cdot \Gamma_t$ 之中. Date_t 为日期, $f(\cdot)$ 为 8 阶切比雪夫多项式,用来表征时间趋势, Li 等^[23] 和 Auffhammer 等^[44] 曾经比较过 7、8 和 9 阶切比雪夫多项式的评估效果,发现结果差别不大,所以本研究直接采用 8 阶多项式,共 8 个变量参与回归. ε_t 为干扰项,表征其他不可观测因素. 本研究使用聚类稳健标准差,在各年季节水平上聚类.

因果识别的假设是在重污染预警的短窗口事件期间,不可观测因素条件均值独立于重污染应急措施的影响,即:

$$E[YB_t \cdot \varepsilon_t | YB_t, \Gamma_t, f(\text{Date}_t)] = 0 \quad (2)$$

1.2 回归策略

对于本研究利用模型式(1)模型对启动预警的 68 个城市分别进行分析,这也是在模型中未设定城市固定效应的原因. 由于对各项污染物浓度取了自然对数,并且扣除了气象条件和时间趋势的影响,对每个城市回归分析后得出的即可代表由重污染应急措施引起的污染物百分比变化^[45,47]. 在评估时段的回归策略上,采取两种回归策略:

回归策略一:以 10 月 2 日重污染预警解除日为评估时段的终点,以预警期间每一天为起点进行评估,捕捉可能出现的空气质量改善效果的动态变化. 比如北京市预警启动时间为 9 月 26 日 00:00,解除时间为 10 月 2 日 24:00,则评估时段分别为:9 月 26 日~10 月 2 日、9 月 27 日~10 月 2 日、9 月 28 日~10 月 2 日、9 月 29 日~10 月 2 日、9 月 30 日~10 月 2 日和 10 月 1~2 日.

回归策略二:由于恰逢 10 月 1 日 70 周年阅兵式,将 10 月 1 日单独作为一个评估时段进行回归,考察重污染天气应急措施对该日空气质量的影响.

1.3 数据

本研究使用的各城市主要大气污染物日均值和 AQI 数据来自中国环境监测总站,各城市样本数据为 2014~2019 年数据,2013 年数据由于不完整所以未采用. 所有空气质量数据均已转化为实况数据. 气象数据来自国家气象局与中国环境监测总站共享的数据集. 每个城市挑选离该城市空间中心最近、与城市中心海拔差异小的气象站作为代表站,其数据作为该城市的气象数据. 表 1 展示了 68 个城市 2014 年 1 月 1 日~2019 年 12 月 31 日主要污染物和气象变量的描述统计结果.

2 结果与讨论

2.1 重污染应急措施对北京市空气质量的影响

对北京市进行回归分析发现,在 9 月 26 日~10 月 2 日重污染橙色预警初期空气质量整体改善作用不明显,但在后期空气质量的改善作用明显. 与假如不采取重污染应急措施的情形相比,重污染应急措施使 NO_2 从预警开始到结束时间都呈显著下降,并且下降幅度有逐渐递增的趋势,10 月 1~2 日在 1% 显著水平上平均下降幅度达 60%; $\text{PM}_{2.5}$ 9 月 30 日开始有下降趋势,10 月 1~2 日显著下降,下降幅度达 57%; SO_2 在预警期间上升和下降的幅度均较小,都不显著; CO 和 PM_{10} 在 10 月 1~2 日均显著下降,下降幅度分别为 19% 和 48%; O_3 与假如不采取应对措施的情形相比一直呈上升趋势,10 月 1~2 日显著上升的幅度为 15.3%. 不同时间段的评估结果见表 2.

表 1 启动预警的 68 个城市空气质量和气象指标的描述统计¹⁾

Table 1 Summary statistics of air quality and meteorological factors for 68 cities that issued heavy air pollution alert

变量	单位	观测值 (无量纲)	均值	标准差	最小值	最大值
SO ₂	μg·m ⁻³	165 327	27.1	29.3	2	786
NO ₂	μg·m ⁻³	165 330	35.5	17.7	2	182
CO	mg·m ⁻³	159 475	1.1	0.7	0.1	17.2
O ₃	μg·m ⁻³	159 481	95.9	49.5	2	336
PM ₁₀	μg·m ⁻³	163 411	103.5	66.8	4	1 908
PM _{2.5}	μg·m ⁻³	158 218	59.4	47.3	2	732
AQI	μg·m ⁻³	160 183	99.8	53.2	13	500
风速	m·s ⁻¹	153 263	1.5	1.0	0	11.7
日平均相对湿度	%	164 424	63.5	19.0	3	100
日最大相对湿度	%	164 424	83.3	15.8	11	100
日最小相对湿度	%	164 424	42.3	21.0	0	100
日累积降水量	mm	157 855	2.0	8.4	0	324.4
日最高气温	℃	164 422	19.6	10.6	-21.5	42.9
日最低气温	℃	164 422	9.8	10.7	-29.2	31.9
风向 1	—	165 580	0.3	0.4	0	1
风向 2	—	165 580	0.2	0.4	0	1
风向 3	—	165 580	0.2	0.4	0	1
风向 4	—	165 580	0.2	0.4	0	1

1) 将风向分为 4 类, 风向 1 为(0°, 90°], 风向 2 为(90°, 180°], 风向 3 为(180°, 270°], 风向 4 为(270°, 360°], 分别生成 4 个虚拟变量, 属于某风向时其对应的虚拟变量取值为 1, 否则取值为 0; O₃ 为日最大 8 h 平均值

表 2 重污染应急措施对北京市不同污染物处理效应¹⁾

Table 2 Treatment effects of heavy air pollution response measures on different pollutants in Beijing

评估时段 (月-日)	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	AQI
09-26 ~ 10-02	0.234 **	-0.037	-0.298 ***	0.170 ***	0.293 ***	0.015	0.157 *
09-27 ~ 10-02	0.247 **	0.020	-0.315 ***	0.168 ***	0.271 ***	0.025	0.105
09-28 ~ 10-02	0.162	-0.025	-0.321 ***	0.118 *	0.271 ***	0.013	0.045
09-29 ~ 10-02	0.019	-0.002	-0.370 ***	0.051	0.216 **	-0.047	-0.083
09-30 ~ 10-02	-0.101	0.111	-0.394 ***	0.002	0.105	-0.101	-0.236 *
10-01 ~ 10-02	-0.570 ***	0.034	-0.600 ***	-0.190 **	0.153 *	-0.480 **	-0.494 ***

1) *** 表示 $P < 0.01$, ** 表示 $P < 0.05$, * 表示 $P < 0.1$

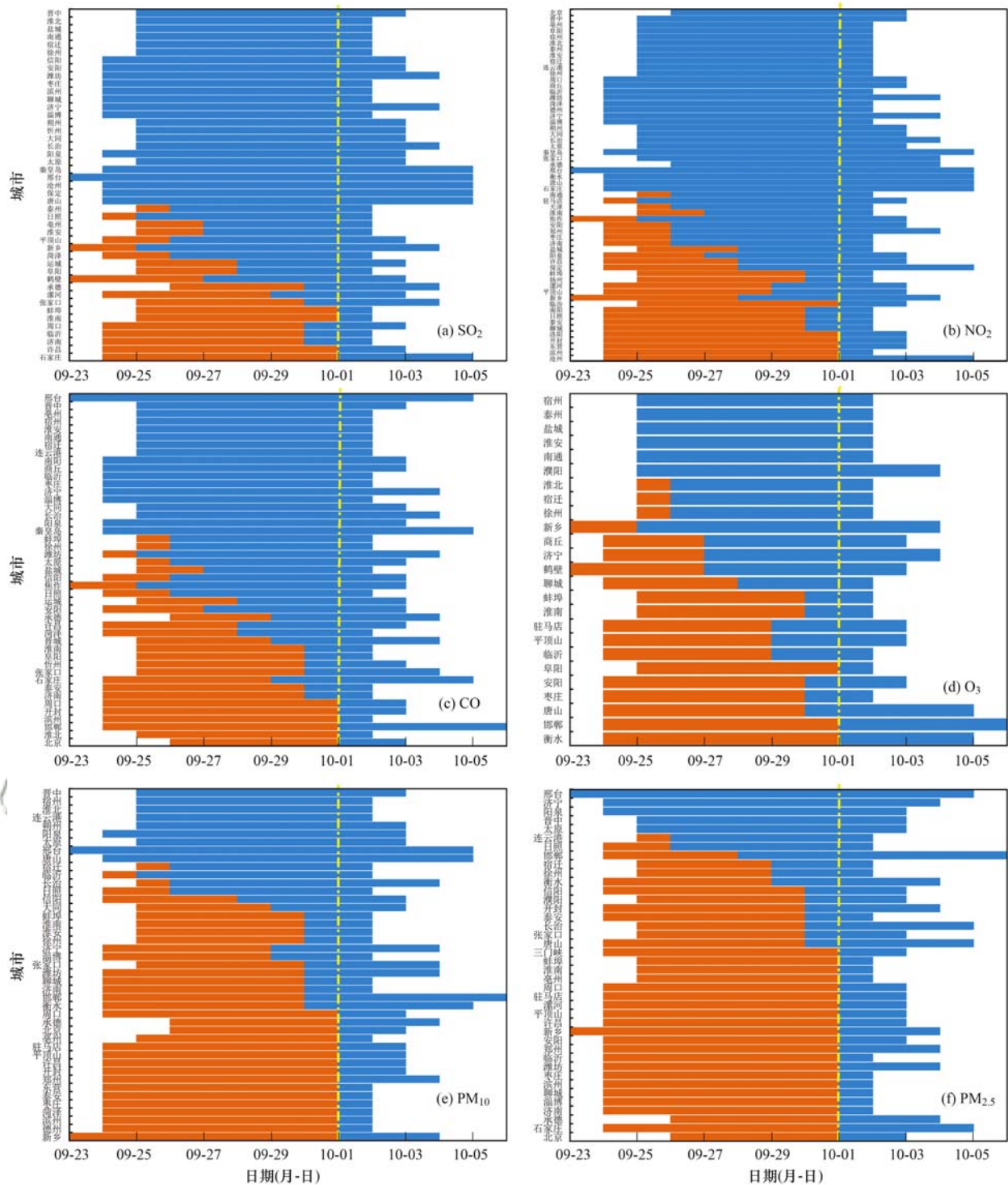
2.2 重污染预警期间空气质量改善的滞后效应

通过对 68 个城市的评估发现, 总体看重污染应急措施对每个城市的空气质量基本都有明显的改善效果, 但普遍存在滞后效应, 即并不是所有城市在预警开始到结束全时间段都对空气质量有明显改善, 而是不同城市不同污染物有不同的下降幅度和滞后效应。把每个城市每项污染物开始显著改善 ($P < 0.1$) 滞后时间进行统计, 图 1 展示了不同污染物的滞后效应。45 个城市 SO₂ 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 20 个, 占比为 44.4%, 相比预警启动日平均滞后 1.8 d; 58 个城市 NO₂ 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 28 个, 占比为 48.3%, 平均滞后 2.1 d; 45 个城市 CO 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 27 个, 占比为 60.0%, 平均滞后 2.4 d; 25 个城市 O₃ 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 19 个, 占比为 76.0%, 平均滞后 3.3 d; 43 个城市 PM₁₀ 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 34

个, 占比为 79.1%, 平均滞后 4.3 d; 40 个城市 PM_{2.5} 显著下降, 其中出现滞后效应的城市有 35 个, 占比为 87.5%, 平均滞后 5.2 d。

可以看出, 重污染应急措施对 SO₂、NO₂ 和 CO 这 3 个气态污染物改善见效速度最快, 采取措施后平均 1.8 ~ 2.3 d 就可以见到显著下降的效果; 对涉及二次生成的 O₃ 和 PM_{2.5} 这 2 个污染物则见效速度相对较慢, 采取措施 3.3 ~ 5.2 d 才显著下降。特别是 PM_{2.5}, 滞后城市占比最高, 滞后天数最长, 滞后效应最为突出。这应该与在不利气象条件下, 前体物转化为 PM_{2.5} 速度加快, 只有在前体物减排到一定程度, PM_{2.5} 才能出现下降有关, 其中的具体机制还需要进一步地研究和探讨。

另外, 还观察到一个有趣的现象。PM_{2.5} 显著下降的 40 个城市中有 22 个在 10 月 1 日当天才开始出现“断崖式”下降, 7 个城市 9 月 30 日开始出现下降, 3 个城市 9 月 29 日开始出现下降。也就是说



每个横条代表一个城市,横条的起始和结束位置分别对应预警的启动和解除时间,其中蓝色表示污染物显著下降的时间段,橙色表示污染物未出现显著下降的时间段,黄线用于标识 10 月 1 日

图 1 有关城市空气质量改善的滞后效应

Fig. 1 Air quality improvement lag phenomenon of cities

10 月 1 日当天 PM_{2.5}才开始显著下降的城市占到 55%, 9 月 29 日~10 月 1 日 PM_{2.5}才开始显著下降的城市共占 80%. PM₁₀也有类似的现象. 此次重污染应急有两个目的,一个是减轻 9 月 25 日~10 月 2 日这次污染过程的污染程度,另外一个则是改善 70 周年阅兵式期间的空气质量. 所以各城市普遍在 10

月 1 日举行阅兵活动的当天污染排放管控措施达到最严格,减排力度最大,这是出现这个有趣现象的重要原因.

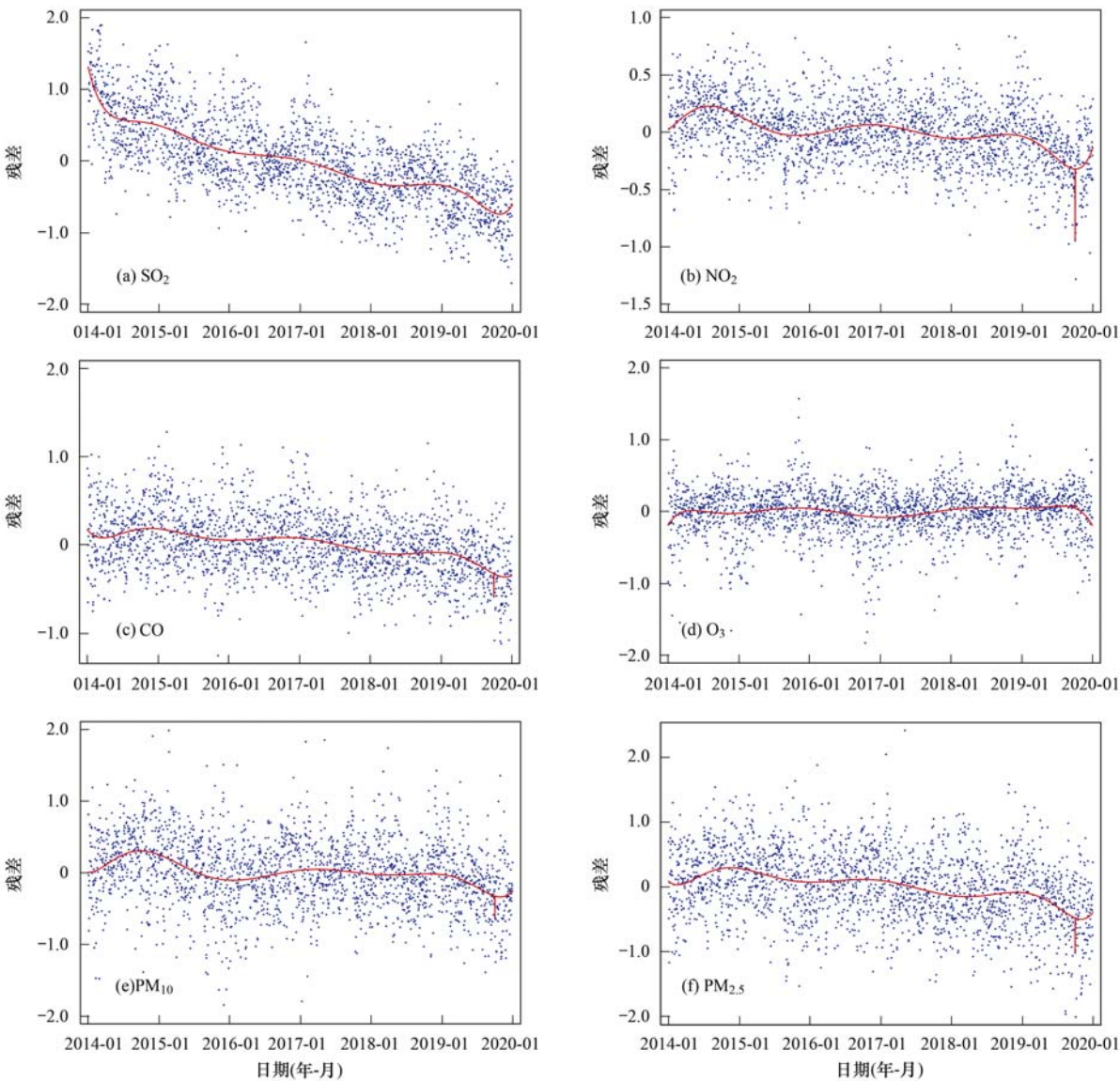
以北京为例对该现象做一个简单的探讨. 根据北京市生态环境局提供的数据,重型载货车日均进京量预警前约 3.3 万辆,预警期间约 1.9 万辆,下降

43%。这是使北京预警开始到结束整个时段实现 NO_2 显著下降的重要因素。在 1 712 家企业绩效分级差异化管控停、限制重型载货车进京等措施的基础上, 9 月 29 日北京市开始实施加强版措施, 主要包括: ①全市党政机关、事业单位、国有企业停驶公车 5 万余辆, 停驶率达到 80% 以上; ②3 325 所中小学提前放假; ③全市 1 600 余间汽修喷漆房停止使用; ④进一步对进京交通进行疏导分流, 日均进京车流量同比下降 40% 左右; ⑤全市所有施工工地停工, 非道路移动机械停用; ⑥增加外调电比例, 3 台燃气机组停机, 将本地发电占比减少 14%。在这些加强版措施作用下, 在 NO_2 一直显著下降的基础上, 9 月 30 日北京 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 开始呈下降趋势, 10 月 1 日~10 月 2 日 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO 都显著下降。

2.3 重污染应急措施对 10 月 1 日当天空气质量改善效果评估

从以上分析可以看到, 10 月 1 日 70 周年阅兵式当天应该是各城市减排力度最大, 空气质量改善最显著的一天。用同样的断点回归模型对 10 月 1 日当天空气质量保障效果进行评估。图 2 显示了由重污染应急措施以及时间趋势解释的北京市空气质量变化。图中红色的线是对式 (1) 进行回归后得到的重污染应急措施虚拟变量加时间趋势项 $\beta_1 \text{YB}_t + f(\text{Date}_t)$ 的估计值。蓝色的点是红色的线再加上式 (1) 的残差, 红线和蓝点都标准化到均值为 0。从图 2 可以直观看出, 重污染应急措施对 70 周年阅兵式当天空气质量的改善效果。

就重污染应急措施对 70 周年阅兵式当天北京主要污染物及 AQI 的处理效应进行估计, 结果如表



图中红线向上或向下的突变表示 10 月 1 日在重污染应急措施作用下空气质量发生了突变

图 2 北京市日度空气质量变化

Fig. 2 Daily variation in air quality in Beijing

3 所示. 可以发现,与假设不采取重污染应急措施的情形相比,重污染应急措施使 70 周年阅兵式北京市当天 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 CO 日均浓度都显著下降,下降幅度分别为 54.1%、62.4% 和 25.8%; PM_{10} 下降 29.2% 但并不显著; SO_2 和 O_3 分别上升 2% 和 7.8% 但并不显著. $\text{PM}_{2.5}$ 是影响大气能见度的主要因素,其大幅下降说明对 10 月 1 日当天 70 周年阅兵式期间空气质量改善取得了显著效果.

现有空气质量和气象数据暂无法实现对大气污染物的小时浓度处理效应进行评估. 但由于阅兵时段是管控措施最严格的时段,可以用日均浓度的处理效应保守估计小时浓度的改善效果. 对 10 月 1 日上午阅兵时段 $\text{PM}_{2.5}$ 的改善效果进行估算,结果见表 4. 如果不采取重污染应急措施北京 10 月 1 日 08:00~09:00 和 11:00~12:00 的 $\text{PM}_{2.5}$ 将达到小时中度污染,09:00~11:00 其将达到小时重度污染. 采取

表 3 重污染应急措施对北京市 10 月 1 日当天主要污染物浓度及 AQI 处理效应¹⁾

Table 3 Treatment effect of heavy air pollution response measures on different pollutants on October 1st in Beijing

项目	处理效应	样本量	R^2	Adj- R^2
$\text{PM}_{2.5}$	-0.541 **	2 178	0.670	0.636
SO_2	0.020	2 185	0.780	0.758
NO_2	-0.624 ***	2 185	0.722	0.693
CO	-0.258 **	2 186	0.718	0.689
O_3	0.078	2 184	0.849	0.833
PM_{10}	-0.292	2 177	0.574	0.531
AQI	-0.499 **	2 185	0.615	0.576

1) *** 表示 $P < 0.01$, ** 表示 $P < 0.05$, * 表示 $P < 0.1$

措施后的实际情况是 08:00~12:00 $\text{PM}_{2.5}$ 都是良的水平. 因此,重污染应急措施的有效实施使北京 10 月 1 日上午阅兵时段 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度下降了 2~3 个污染等级,取得了非常明显的效果,实属不易.

表 4 重污染应急措施对北京 10 月 1 日上午 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度改善效果

Table 4 Improvement in hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration brought by heavy air pollution response measures on October 1st in Beijing

时刻	实际情形		如果不采取措施情形	
	$\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	污染等级	$\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	污染等级
08:00~09:00	68	良	148.1	中度污染
09:00~10:00	69	良	150.3	重度污染
10:00~11:00	69	良	150.3	重度污染
11:00~12:00	66	良	143.8	中度污染

2.4 重污染应急措施对其他城市 10 月 1 日当天空气质量改善效果评估

对北京及周边 68 个城市进行逐一回归,估计出重污染应急措施对每个城市空气质量的改善效果. 从采取措施的 68 个城市整体上看,各项污染物按平均改善幅度从大到小分别为: NO_2 改善 42.4%, $\text{PM}_{2.5}$ 改善 27.7%, PM_{10} 改善 27.1%, CO 改善 26.3%, SO_2 改善 24.1%, O_3 改善 2.3%. NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 改善效果最明显, O_3 改善最有限. 从最关键的污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 来看,各区域、各省(直辖市)的平均改善幅度有差异. 从区域看,京津冀及周边地区城市平均改善幅度最大,为 31.6%; 长三角城市次之,为 20.0%; 汾渭平原城市幅度最小,为 15%. 从省(直辖市)看,北京改善幅度最大,为 54.1%,其余省市由大到小依次为: 山东(41.0%)、河北(30.1%)、安徽(29.8%)、山西(25.2%)、河南(23.3%)、江苏(12.7%)和天津(14.1%).

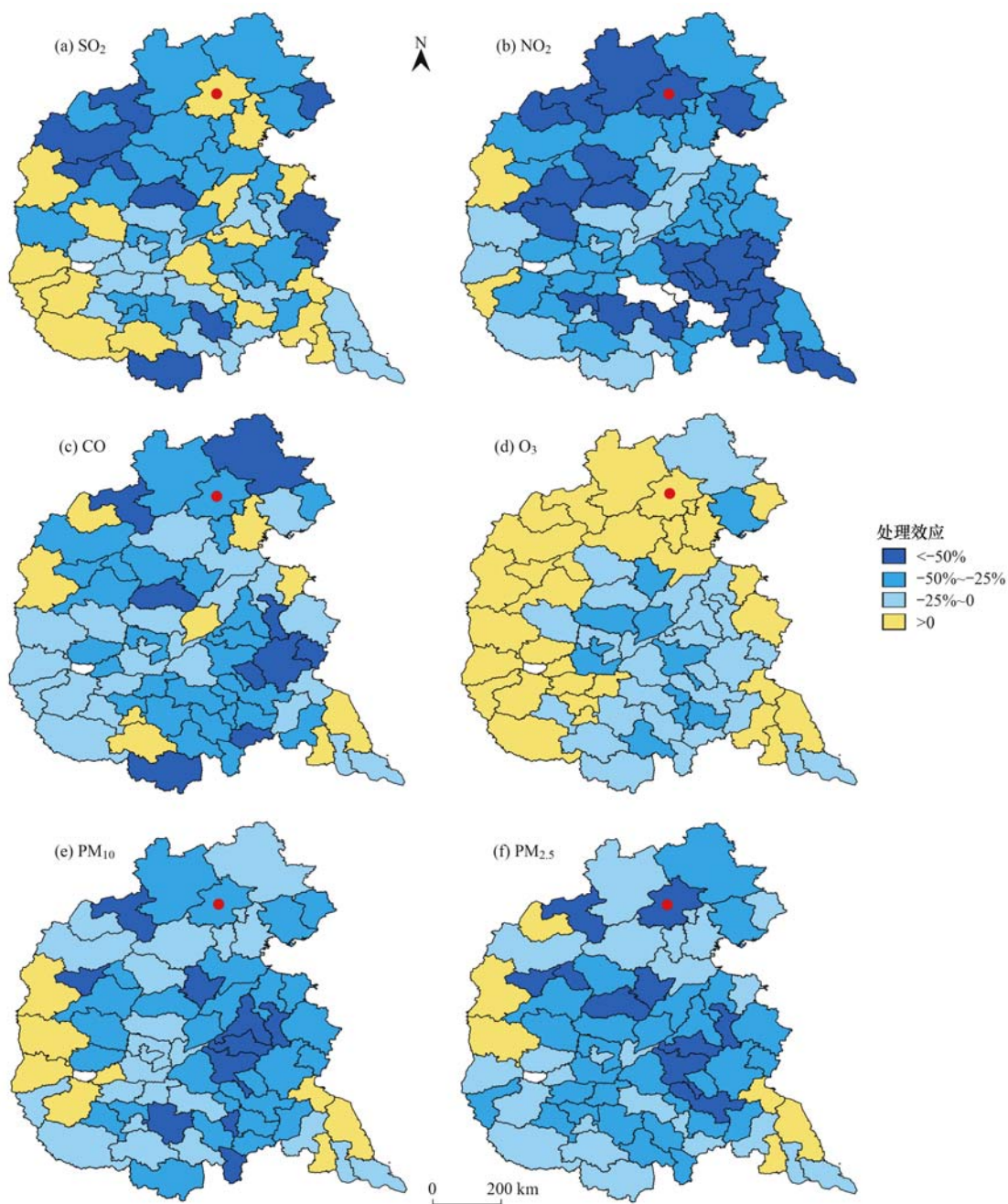
将 68 个城市的回归结果可视化在地图上,可以直观地看到不同城市不同污染物的改善效果,如图 3 所示,其中黄色表示相应的城市及污染物与假如不采取重污染应急措施相比不降反升,这是一个与预期相反的现象. 因此专门针对这个现象作一个更为深入的分析. 对几项污染物的处理效果作箱线图,

见图 4. 通过统计发现 NO_2 上升的有 2 个城市,占 2.94%; $\text{PM}_{2.5}$ 上升的有 6 个城市,占比 8.82%; PM_{10} 上升的有 8 个城市,占比 11.76%; CO 上升的有 9 个城市,占比 13.24%; SO_2 上升的有 17 个城市,占比 25%; O_3 上升的有 31 个城市,占比 45.59%. 这个统计方式并没有考虑评估结果的显著性水平. 统计 $P < 0.1$ 的评估结果有利于作出更精准的判断. 结果如下: 没有 NO_2 显著上升的城市; CO 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 显著上升的城市分别有 1 个; SO_2 显著上升的城市有 3 个; O_3 显著上升的城市有 11 个. 可以看出 O_3 显著上升的问题比较突出,其他污染物基本可以算是个别现象. O_3 显著下降 ($P < 0.1$) 的城市共 16 个,显著上升城市数和显著下降城市数比例为 1:1.45,可以将 O_3 不降反升看成是一个相对普遍的现象.

3 稳健性检验

3.1 空气质量预测预报数值模型检验

基于 NAQPMS 数值模型对这次污染过程进行预测预报,从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度演变过程看,9 月 26 日污染团在区域南部形成,在偏南风的作用下,污染团向北推移堆积. 污染凌晨至上午污染较重,下午至傍晚有所缓解,在方位上不断逼近北京. 9 月 29 日污染团



红色圆点用于标识北京市,白色部分为数据缺失,其他不同颜色表示某城市某项污染物处理效应值所在的范围,负值表示空气质量获得改善

图3 重污染应急措施对68城市不同污染物的处理效应

Fig. 3 Treatment effects of heavy air pollution response measures on different pollutants on October 1st in 68 cities

主体到达北京,见图5。由于北京三面环山的地形,在太行山脉、燕山山脉阻挡下,9月30日污染团在北京逐渐累积,见图6。10月1日08:00,北京PM_{2.5}小时浓度预测达到中度污染,见图7。

NAQPMS数值模型是基于区域污染源清单排放水平及未来气象条件进行预测预报。但在预测预报过程中,数值模型并没有考虑到采取重污染预警所导致的区域排放水平变化。也就是说数值模型预测预报结果,代表了假如不采取措施情形下,空气质量可能达到的水平。数值模型预测预报显示,如果不采取措施,

10月1日70周年阅兵式当天08:00,北京市PM_{2.5}小时浓度将达到中度污染,这个结论与断点回归模型所得评估结果(见表4)相一致。说明断点回归模型所得评估结果是稳健的。污染的传输转移过程说明联防联控是有效的,北京和周边,特别是上风向城市共同努力减排,才使得北京空气质量明显改善。

3.2 类比法检验

寻找历史上气象条件类似的污染过程案例,比较其污染水平的差异,可以粗略地估计重污染应急减排措施的效果。通过分析比较,发现2019年9月

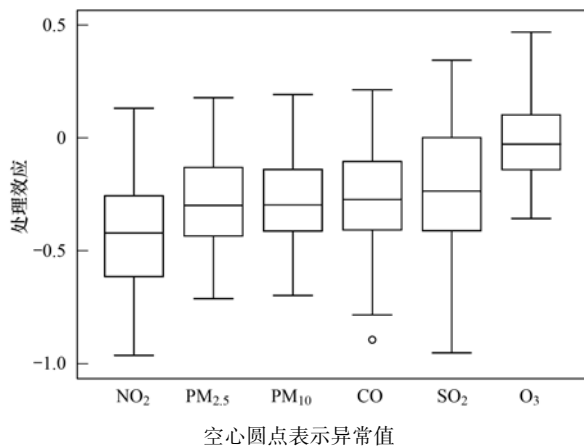
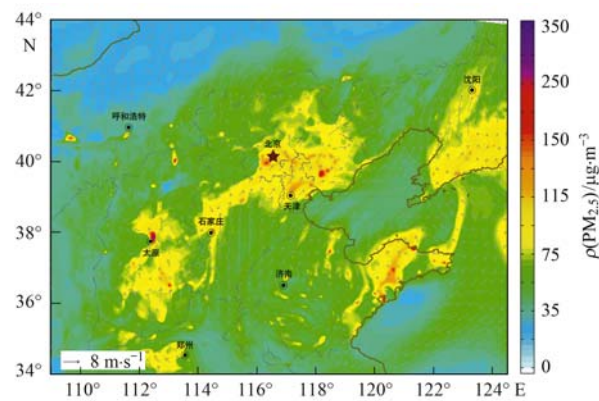


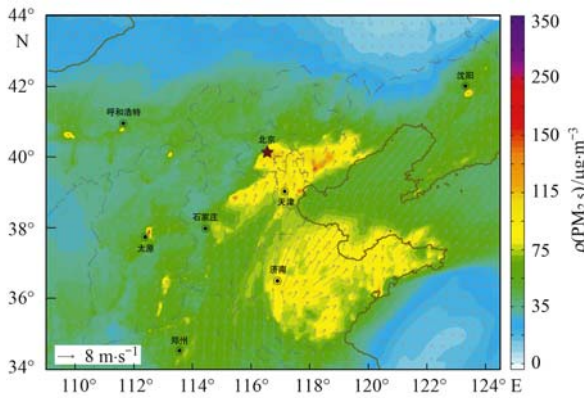
图 4 10月1日68个城市各项污染物处理效应箱线图

Fig. 4 Boxplot of treatment effects of different pollutants on October 1st in 68 cities



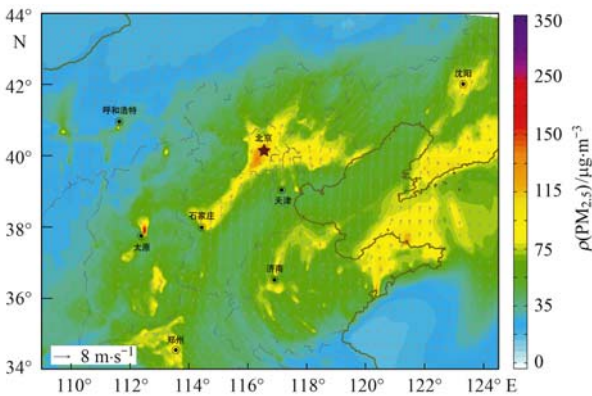
来自中国环境监测总站空气质量预测预报系统
图 7 10月1日早08:00PM_{2.5}小时浓度NAQPAMS
数值模型预报结果

Fig. 7 Forecast of PM_{2.5} hourly concentration
for 08:00 October 1st based on NAQPAMS model



来自中国环境监测总站空气质量预测预报系统
图 5 9月29日PM_{2.5}日均浓度NAQPAMS数值模型预报结果

Fig. 5 Forecast of PM_{2.5} daily concentration
for September 29th based on NAQPAMS model



来自中国环境监测总站空气质量预测预报系统
图 6 9月30日PM_{2.5}日均浓度NAQPAMS数值模型预报结果

Fig. 6 Forecast of PM_{2.5} daily concentration
for September 30th based on NAQPAMS model

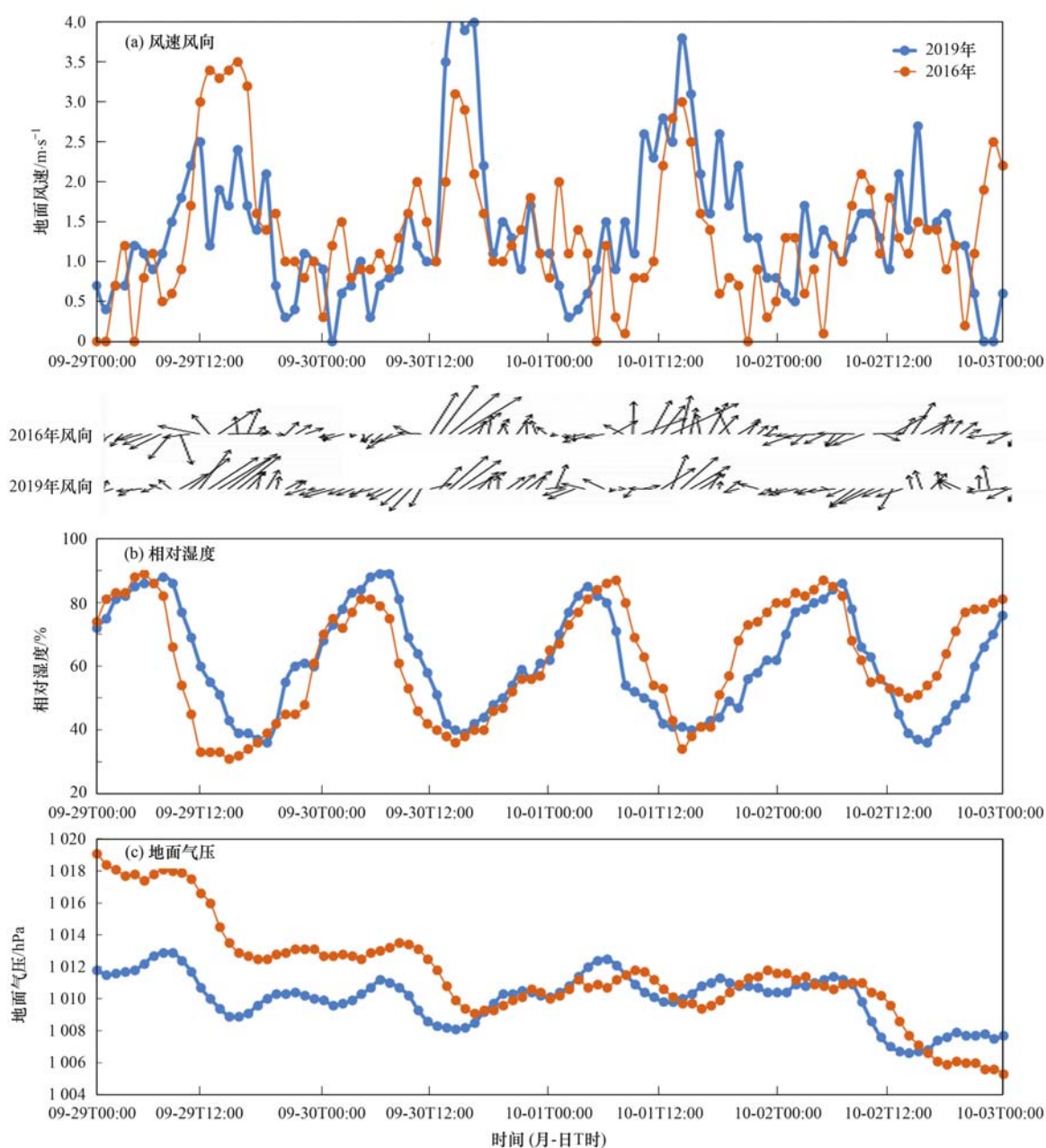
29日~10月3日的污染过程与2016年同期污染过程在主要气象要素上极其相似。两个时段风速风向、相对湿度和地面气压的比较见图8。在风速风向方面,风速水平基本相当,风向有一定的日变化,但总

体都以偏南风为主;在相对湿度方面,湿度水平相当,在日变化上高度一致;在地面气压方面,都呈现出持续下降的特征。

尽管两次污染过程气象条件类似,但污染水平却出现了巨大的差异。2016年污染过程,区域有11个城市出现重污染,北京市出现2个重污染日;区域PM_{2.5}日均浓度峰值为304 μg·m⁻³,北京市PM_{2.5}日均浓度峰值为183 μg·m⁻³。但2019年污染过程中,区域城市PM_{2.5}日均浓度总体为优良,仅唐山出现2d轻度污染,区域PM_{2.5}日均浓度峰值为88 μg·m⁻³,北京市日均浓度峰值为71 μg·m⁻³,均远低于2016年。从10月1日当天的空气质量看,2019年PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂和CO相较2016年分别下降68.2%、56.1%、72.9%、70%和42.9%,O₃比较特殊,不降反升了23.7%。5项主要污染物的下降主要有两方面原因,一方面是得益于大气污染治理工作不断深入,2016~2019年空气质量持续改善;另一方面是2019年启动了重污染预警,采取了应急减排措施,使得污染程度大大减轻。从年均浓度看,2019年PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂较2016年分别下降40%、21%、16%和60%,下降幅度均远低于10月1日的下降幅度。这说明应急减排措施的确在起作用,使得2019年10月1日空气质量相较不采取应急减排措施情形大大改善。这再次说明断点回归模型所得到的结论是稳健的。

4 政策启示

“绩效分级、差异化管控”的重污染应对措施政策出台后,第一次的实际应用就肩负了重大使命,既是对9月25~10月2日污染过程的应对,又是对70周年国庆阅兵重大活动的空气质量进行保障。本研究以实证依据表明,该措施可以有效改善空气质量。本



来自北京市生态环境监测中心

图8 2016年和2019年两次相似污染过程北京市主要气象要素对比

Fig. 8 Comparison of key meteorological factors between two typical air pollution episodes from 2016 and 2019, respectively

研究发现的一些规律和现象也给了人们一些政策上的启示。

本研究发现重污染应对措施对空气质量改善的滞后效应现象, SO_2 、 NO_2 和 CO 这3个气态污染物改善见效速度较快, 对涉及二次生成的 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 两个污染物见效速度相对较慢。其原因除了可能涉及 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 生成机制, 还可能与企业调整生产状态和开展应急减排需要一定准备时间有关。从目前重污染预警政策和实际操作来看, 一般是提前 24 h 发布重污染预警, 污染过程开始的时间要求相关企业或单位也开始采取措施进行减排。但由于滞后效应的存在, 现行的操作方式难以在污染过程前期就对

$\text{PM}_{2.5}$ 有改善效果。为更好地发挥重污染应对措施的作用, 在污染过程前期就实现 $\text{PM}_{2.5}$ 改善, 可考虑将发布预警时间酌情提前 2~3 d, 采取应急措施的时间也可酌情提前。但这样也会产生一个问题, 就是在空气质量尚未转差的情况下就要求企业采取应急减排措施, 是否能够得到理解与支持。这需要先作一些必要的宣传解读, 在获取广泛社会共识的基础上再推行预警发布和措施, 采取时间提前的政策。

本研究还发现了 O_3 不降反升的现象。Wang 等^[48] 和 Liu 等^[49] 在研究 APEC 会议保障措施对空气质量影响时发现过类似的现象, 即保障措施导致了 O_3 浓度的上升。Wang 等^[48] 的研究认为这是因为

NO_x 的削减程度超过了 VOCs 的削减程度,对 O₃ 生成产生了促进作用.本研究发现了 NO₂ 浓度的大幅下降,在各项大气污染物中平均下降幅度最大,由于缺少 VOCs 相关数据,无法对 NO_x 和 VOCs 的削减速率作出比较研究.但这个现象说明采取临时性减排措施应对 O₃ 污染须谨慎,如果没有精准把控好 NO_x 和 VOCs 削减速率,将会产生 O₃ 不降反升的效果,反而加重了 O₃ 污染.

“绩效分级、差异化管控”创新性措施首次实践取得了较好的效果.该政策在绩效分级的行业范围上,具体分级指标设定上,不同预警级别下减排措施的设计上,都还存在优化完善的空间.可以考虑继续推行完善该措施,以期后续能够取得更好效果.

5 结论

(1)使用时间序列断点回归准实验设计,对重污染应对“绩效分级、差异化管控”措施的首次实践效果进行评估,证实了该措施对空气质量的改善作用.

(2)在控制了气象条件等因素的影响后,重污染应急措施使北京市及周边的空气质量实现了大幅改善.空气质量的改善存在滞后效应,从 68 个城市处理效应看,SO₂、NO₂ 和 CO 这 3 个气态污染物改善见效速度较快,对涉及二次生成的 O₃ 和 PM_{2.5} 两个污染物见效速度相对较慢.

(3)评估发现,与假如不采取重污染应急措施的情形相比,10 月 1 日北京市 PM_{2.5}、NO₂ 和 CO 日均浓度都显著下降,下降幅度分别为 54.1%、62.4% 和 25.8%. 10 月 1 日上午阅兵时段北京市 PM_{2.5} 小时浓度下降 3 个污染等级,一直保持在良的水平;如果不采取措施,09:00~11:00 PM_{2.5} 将达到小时重度污染.空气质量改善是北京和周边城市共同努力的结果.

(4)通过数值模型预测和类比分析进行稳健性检验,发现本研究的评估结论是稳健的.

(5)滞后效应和 O₃ 不降反升两个现象为政策优化完善提供了启示.一方面为了在重污染过程初期取得 PM_{2.5} 下降效果,可考虑将重污染预警时间和重污染应对措施实施时间酌情提前;另一方面须谨慎采取临时性减排措施应对 O₃ 污染过程,如不能精准把控,反而将加重 O₃ 污染.

(6)“绩效分级、差异化管控”是一项创新性措施,还存在优化完善的空间,可以考虑继续推行完善该措施,以期后续能够取得更加精准的效果.

致谢:感谢中国环境监测总站提供了空气质量、气象数据和部分图片资料,感谢北京市生态环境监测中心提供了部分图片资料.

参考文献:

- [1] 肖致美,徐虹,蔡子颖,等. 2020 年天津市两次重污染天气污染特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 3879-3888.
Xiao Z M, Xu H, Cai Z Y, et al. Characterization of two heavy pollution episodes in Tianjin in 2020 [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 3879-3888.
- [2] 徐冉,张恒德,杨孝文,等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, et al. Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3405-3414.
- [3] 唐倩,郑博,薛文博,等. 京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1591-1599.
Tang Q, Zheng B, Xue W B, et al. Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1591-1599.
- [4] 尹晓梅,蒲维维,王继康,等. 北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束前后两次污染过程特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2110-2120.
Yin X M, Pu W W, Wang J K, et al. Characteristics of two pollution episodes before and after city heating in Beijing from february to march of 2019 [J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2110-2120.
- [5] 胡京南,柴发合,段菁春,等. 京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1704-1712.
Hu J N, Chai F H, Duan J C, et al. Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1704-1712.
- [6] 张瑾,薛彩凤,温彪,等. 浅谈 PM_{2.5} 的危害及我国的控制历程与经验[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 109-114.
Zhang J, Xue C F, Wen B, et al. Discussion about the harm of PM_{2.5} and its control process and experience in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(1): 109-114.
- [7] 李星谕,毛瑶,陈展乐,等. 华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价:以湖北黄冈为例[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4593-4601.
Li X Y, Mao Y, Chen Z L, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} under winter haze conditions in central China: a case study of huanggang, hubei province [J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4593-4601.
- [8] 李立伟,肖致美,杨宁,等. 天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4158-4167.
Li L W, Xiao Z M, Yang N, et al. Extinction characteristics of aerosols and the contribution of pollution sources to light extinction during three heavy pollution episodes in the winter of 2020 in Tianjin [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4158-4167.
- [9] 环境保护部. 城市大气重污染应急预案编制指南[EB/OL]. 北京. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201305/t20130510_251978.htm, 2013-05-06.
- [10] 环境保护部,中国气象局. 关于统一京津冀城市重污染天气预警分级标准强化重污染天气应对工作的函[EB/OL]. 北京. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201602/t20160204_329883.htm, 2016-02-02.
- [11] 环境保护部. 关于做好重污染天气应急预案修订工作的函

- [EB/OL]. 北京. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201607/i20160714_360695.htm, 2016-07-06.
- [12] 环境保护部. 关于印发《重污染天气预警分级标准和应急减排措施修订工作方案》的通知[Z]. 北京, 2017.
- [13] 生态环境部. 关于印发《关于推进重污染天气应急预案修订工作的指导意见》的函[Z]. 北京, 2018.
- [14] 生态环境部. 关于印发《关于加强重污染天气应对夯实应急减排措施的指导意见》的函[EB/OL]. 北京. http://sthjj.czs.gov.cn/wrjp/content_3002929.html, 2019-08-01.
- [15] 生态环境部. 关于印发《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南(2020年修订版)》的函[EB/OL]. 北京. <http://www.cnagi.org.cn/newsinfo/562634.html>, 2020-07-06.
- [16] 重污染期间环保绩效水平高的企业可不减排[J]. 中国氯碱, 2019, (12): 44-45.
- [17] 生态环境部企业绩效分级和认定工作已完成[J]. 建材发展导向, 2019, 17(24): 112.
- [18] 生态环境部印发《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》[J]. 区域治理, 2019, (36): 1-3.
- [19] 生态环境部. 关于加强重污染天气应对夯实应急减排措施的指导意见[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(4): 1-3, 7.
- [20] 生态环境部: 39个行业已实施绩效分级[J]. 砖瓦, 2020, (10): 176.
- [21] 再生铜铝铅锌行业首次列入重污染天气应急减排绩效分级管控[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(4): 70.
- [22] Yin X M, Sun Z B, Miao S G, *et al.* Analysis of abrupt changes in the PM_{2.5} concentration in Beijing during the conversion period from the summer to winter half-year in 2006-2015 [J]. Atmospheric Environment, 2019, 200: 319-328.
- [23] Li X, Qiao Y B, Zhu J M, *et al.* The “APEC blue” endeavor: causal effects of air pollution regulation on air quality in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 1381-1388.
- [24] 吴滨. 政策评价方法综述[J]. 统计与管理, 2021, 36(6): 15-22.
- Wu B. Review of policy assessment methods[J]. Statistics and Management, 2021, 36(6): 15-22.
- [25] 秦志龙, 陈晓光. 高铁开通改善了沿线城市的空气质量吗?——基于断点回归设计的分析[J]. 环境经济研究, 2020, 5(2): 76-94.
- Qin Z L, Chen X G. Has the opening of the high-speed railway improved air quality? An empirical analysis based on regression discontinuity design [J]. Journal of Environmental Economics, 2020, 5(2): 76-94.
- [26] Guo S H, Chen L Q. Can urban rail transit systems alleviate air pollution? Empirical evidence from Beijing [J]. Growth and Change, 2019, 50(1): 130-144.
- [27] Lu H Y, Zhu Y C, Qi Y, *et al.* Do urban subway openings reduce PM_{2.5} concentrations? Evidence from China [J]. Sustainability, 2018, 10(11), doi: 10.3390/su10114147.
- [28] Cai H Y, Nan Y Q, Zhao Y L, *et al.* Impacts of winter heating on the atmospheric pollution of northern China's prefectural cities: evidence from a regression discontinuity design [J]. Ecological Indicators, 2020, 118, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106709.
- [29] Fan M Y, He G J, Zhou M G. The winter choke: coal-fired heating, air pollution, and mortality in China [J]. Journal of Health Economics, 2020, 71, doi: 10.1016/j.jhealeco.2020.102316.
- [30] Huang X, Lanz B. The value of air quality in Chinese cities: evidence from labor and property market outcomes [J]. Environmental and Resource Economics, 2018, 71(4): 849-874.
- [31] Wang S L, Li Y T, Haque M. Evidence on the impact of winter heating policy on air pollution and its dynamic changes in North China [J]. Sustainability, 2019, 11(10), doi: 10.3390/su1102728.
- [32] Huang H J, Fu D Y, Qi W. Effect of driving restrictions on air quality in Lanzhou, China: analysis integrated with internet data source [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 1013-1020.
- [33] Li J J, Li X B, Li B, *et al.* The effect of nonlocal vehicle restriction policy on air quality in Shanghai [J]. Atmosphere, 2018, 9(8), doi: 10.3390/atmos9080299.
- [34] Lu X Y. Effectiveness of government enforcement in driving restrictions: a case in Beijing, China [J]. Environmental Economics and Policy Studies, 2016, 18(1): 63-92.
- [35] Ye J J. Better safe than sorry? Evidence from Lanzhou's driving restriction policy [J]. China Economic Review, 2017, 45: 1-21.
- [36] Zhang M, Shan C, Wang W W, *et al.* Do driving restrictions improve air quality: take Beijing-Tianjin for example? [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136408.
- [37] Li P, Lu Y, Wang J. The effects of fuel standards on air pollution: evidence from China [J]. Journal of Development Economics, 2020, 146, doi: 10.1016/j.jdevco.2020.102488.
- [38] Neidell M. Air quality warnings and outdoor activities: evidence from southern California using a regression discontinuity design [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2009, 64(10): 921-926.
- [39] Noonan D S. Smoggy with a chance of altruism: the effects of ozone alerts on outdoor recreation and driving in Atlanta [J]. Policy Studies Journal, 2014, 42(1): 122-145.
- [40] Sexton S E. Paying for pollution? How general equilibrium effects undermine the “spare the air” program [J]. Environmental and Resource Economics, 2012, 53(4): 553-575.
- [41] Chen H, Li Q S, Kaufman J S, *et al.* Effect of air quality alerts on human health: a regression discontinuity analysis in Toronto, Canada [J]. The Lancet Planetary Health, 2018, 2(1): E19-E26.
- [42] Wichmann B, Yang M. Blue Beijing: estimating the effects of temporary emissions restrictions on air quality [J]. Applied Economics Letters, 2017, 24(21): 1504-1510.
- [43] Zeng J Y, Guijarro M, Carrilero-Castillo A. A regression discontinuity evaluation of the policy effects of environmental regulations [J]. Economic Research-Ekonomska Istraživanja, 2020, 33(1): 2993-3016.
- [44] Auffhammer M, Kellogg R. Clearing the air? The effects of gasoline content regulation on air quality [J]. American Economic Review, 2011, 101(6): 2687-2722.
- [45] Davis L W. The effect of driving restrictions on air quality in Mexico City [J]. Journal of Political Economy, 2008, 116(1): 38-81.
- [46] Viard V B, Fu S H. The effect of Beijing's driving restrictions on pollution and economic activity [J]. Journal of Public Economics, 2015, 125: 98-115.
- [47] 达摩达尔·N·古扎拉蒂, 唐·C·波特. 计量经济学基础[M]. 费剑平, 译. (第五版). 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [48] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Changes in atmospheric composition during the 2014 APEC conference in Beijing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(24): 12695-12707.
- [49] Liu H R, Liu C, Xie Z Q, *et al.* A paradox for air pollution controlling in China revealed by “APEC Blue” and “Parade Blue” [J]. Scientific Reports, 2016, 6, doi: 10.1038/srep34408.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)