

目次

2018~2020年北京市大气PM_{2.5}污染特征及改善原因 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)

京津冀城市群冬季二次PM_{2.5}的时空分布特征 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)

COVID-19管控前后不同污染阶段PM_{2.5}中二次无机离子变化特征 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)

基于在线观测的太原市冬季PM_{2.5}中金属元素污染水平及来源解析 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)

湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)

2021年夏季新乡市区臭氧超标日污染特征及敏感性 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 徐金鹤, 徐文帅 (2481)

天津市空气污染的健康影响分析 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)

2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)

1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)

长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)

宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)

微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 陆嘉玮, 徐晨晔, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)

三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 张雪, 朱波 (2574)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 刘海, 赵国红 (2583)

基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)

河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)

饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)

镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)

纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)

富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)

富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)

污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)

森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)

气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)

西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)

不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)

互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)

黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)

短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)

福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)

中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)

河北省土壤化学元素的背景值与基准值 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)

非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)

基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)

长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)

贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)

贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)

山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)

P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)

施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)

广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)

五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)

天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜璋琳, 王英成 (2928)

紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)

长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 胡颖榭, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)

高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)

菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)

中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)

碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验 房琪, 李绍萍 (2983)

垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)

1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

《环境科学》征订启事(2480) 《环境科学》征稿简则(2538) 信息(2766, 2798, 2927)

2018 ~ 2020 年北京市大气 PM_{2.5} 污染特征及改善原因

刘保献^{1,2,3}, 李倩^{2,3}, 孙瑞雯^{2,3}, 董瑞^{2,3}, 王书肖¹, 郝吉明^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 北京市生态环境监测中心, 北京 100048; 3. 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 利用2018~2020年北京市33个环境评价站和5个区域评价站的空气质量数据,以及气象数据和北京市城区PM_{2.5}组分数据,研究了3年间北京PM_{2.5}的浓度演变、时空变化和重污染发生情况,并对PM_{2.5}组分和气象条件变化进行比较分析。结果发现,3年间北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为51、42和38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2020年的PM_{2.5}相比2017年下降30.9%,但仍超过国际标准8.6%;北京市PM_{2.5}空间分布依旧维持南高北低的特征,但南北差异逐年减小,区域浓度趋于均一化;1~3月PM_{2.5}浓度相对较高,8~9月PM_{2.5}浓度相对较低,采暖季各污染物浓度均显著高于非采暖季,NO_x和CO分别偏高58.4%和52.9%,PM_{2.5}偏高27.5%;采暖季和非采暖季PM_{2.5}日变化出现反向特征,采暖季夜间PM_{2.5}明显高于白天,而非采暖季PM_{2.5}峰值出现在中午前后;2018~2020年北京市发生重污染过程16次,重污染天共25 d,主要集中在秋冬季,区域性重污染特征显著;经分析,近年来大气扩散条件有好有差,持续的污染减排仍是PM_{2.5}逐年降低最重要的原因;2020年北京市PM_{2.5}组分中有机物、元素碳和地壳物质浓度较2017年分别下降43.3%、53.2%和51.5%,硝酸盐、硫酸盐和铵盐浓度降幅分别为34.5%、52.2%和43.7%,结果显示北京市PM_{2.5}各主要来源均取得明显控制效果。

关键词: 北京; 污染特征; 采暖季; PM_{2.5}组分; 空气质量改善

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2409-12 DOI: 10.13227/j.hjx.202205244

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM_{2.5} in Beijing from 2018 to 2020

LIU Bao-xian^{1,2,3}, LI Qian^{2,3}, SUN Rui-wen^{2,3}, DONG Rui^{2,3}, WANG Shu-xiao¹, HAO Ji-ming^{1*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 3. Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing 100048, China)

Abstract: Air quality data from 33 environment sites and five regional sites from 2018 to 2020, as well as meteorological data, were used to research PM_{2.5} variation, spatial and temporal change, diurnal variation, and heavy pollutions in Beijing. The annual average mass concentrations of PM_{2.5} in Beijing were 51, 42, and 38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, which showed great progress in air quality improvement. However, the PM_{2.5} concentration in 2020 was still 8.6% above the national limit value despite a 30.9% decline since 2017. The PM_{2.5} south-north gradient in Beijing remained throughout the three years, but this pattern showed a less significant trend. The highest monthly mean PM_{2.5} concentrations in Beijing tended to occur in January-March, with the lowest in August-September. NO_x, CO, and PM_{2.5} concentrations were significantly higher in the heating season than in the non-heating season by 58.4%, 52.9%, and 27.5%, respectively. Diurnal variation showed that greater PM_{2.5} concentrations were observed at nighttime during the heating season and, conversely, at noontime during the non-heating season. Sixteen pollution episodes occurred in Beijing over the last three years, resulting in 25 heavy pollution days distributed in autumn-winter of 2018-2020. The regional heavy pollution characteristics of PM_{2.5} in Beijing were significant. Through analysis, a continuous pollution reduction was still the most important reason for the yearly decrease in PM_{2.5}. The concentrations of organic matter, elemental carbon, and crustal matter in the PM_{2.5} in Beijing decreased by 43.3%, 53.2%, and 51.5% since 2017, respectively, and nitrate, sulfate, and ammonium decreased by 34.2%, 52.2%, and 43.7%. The results showed that the control effect of PM_{2.5} in Beijing was obvious.

Key words: Beijing; pollution characteristics; heating season; PM_{2.5} components; improvement in air quality

北京市作为中国的首都,世界级大都市,空气质量广受国内外关注。细粒子PM_{2.5}由于其来源复杂^[1~3],对大气能见度有直接的影响^[4~6],且严重危害健康^[7~9],近年来其成因、来源和时空变化规律^[10~12]以及与气象因子^[13~17]的相互关系等问题成为研究的重点。我国生态环境部门于2012年正式开展对PM_{2.5}的连续监测^[18],华北区域PM_{2.5}污染成为全国污染最严重的地区之一^[19],国家划分北京、天津和石家庄等“2+26”个城市作为大气污染治理的重点地区。北京市在2013~2017年开展了清洁空气行动计划^[20],并与京津冀区域开展污染防治的区域协作。自2013年以来北京市PM_{2.5}持续降低,2017

年全市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达到58 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,完成国家设定的“京60”目标。北京市在2018~2020年开展“打赢蓝天保卫战3年行动计划”^[21](“蓝保”),空气质量继续改善,2020年北京 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 首次降至40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,空气质量改善取得显著成效。

基于此,近年来针对大气PM_{2.5}的研究成为热点领域。但总体来看,对北京PM_{2.5}污染特征的研究主

收稿日期: 2022-05-22; 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 北京市科技计划项目(Z191100009119004)

作者简介: 刘保献(1983~),男,教授级高级工程师,主要研究方向为大气环境监测、大气环境评价、空气质量自动监测技术和污染物组分监测技术等, E-mail: liubaoxian28@163.com

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

要集中在污染个例分析^[12, 22, 23],或短时段的环境评估^[24~26]、空间规律研究^[27, 28],气象因素对 PM_{2.5} 的形成^[29, 30],以及传输规律^[12, 31~33]的“点”研究,对北京市 PM_{2.5} 综合特征的“面”状研究较为少见.本研究拟利用北京市 33 个环境评价站和 5 个区域站空气质量数据,依据国家空气质量评价标准^[34],对 2018~2020 年这 3 a 北京 PM_{2.5} 的浓度变化、时空分布特征、季节差异和重污染特征规律进行较为综合地评价和分析研究,同时利用气象和组分数据定性评判 2018~2020 年“蓝保”对北京市 PM_{2.5} 浓度改善的作用,以期对未来北京市 PM_{2.5} 浓度的进一步降低提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 数据来源

北京市空气质量数据来自北京市生态环境监测中心(监测中心),其中东四、天坛和官园等 33 个环境评价站用于北京市和各行政区空气质量评价,另外选择京东南、京东北、京西北、京西南和京南 5 个区域站点用于北京市空间差异研究,站点分布见图 1. 空气质量数据主要为空气质量标准的常规六参数,即 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5},使用仪器均为符合国家规范的自动在线监测设备,其中气态污染物的监测方法分别为紫外荧光法、化学发光法、红外吸收法和紫外吸收法,颗粒物监测使用微振荡天平法.在比较北京市与周边其他城市 PM_{2.5} 浓度特征时,采用“2+26”城市的 PM_{2.5} 浓度日均数据,来自环境监测总站(<https://air.cnemc.cn>).

北京市 PM_{2.5} 组分数据来自监测中心七楼站点(116.32°E, 39.93°N),为手工采样组分,采样频率为每天一次,其中 OC 和 EC 的质量浓度使用美国 Sunset-L4 型分析仪测定,膜裁剪面积为 1.5 cm²;水

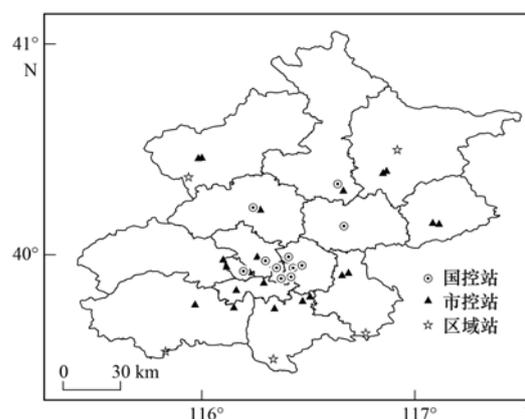


图 1 研究采用各监测点位分布示意

Fig. 1 Location of monitoring sites in Beijing

溶性离子的质量浓度使用美国 Thermo ICS-5000 型离子色谱分析仪测定,样品使用 50 mL 去离子水超声提取,0.45 μm 过滤头过滤测定; Si、Al、Fe 和 Mg 等金属和类金属组分的浓度使用帕纳科 Epsilon5 型能量色散-X 射线荧光光谱仪直接测定.

北京气象数据来自南郊观象台(编号 54511),原始数据为逐小时地面观测数据(温度、相对湿度、降水、风向和风速),探空数据来自美国怀俄明大学(<http://weather.uwyo.edu/surface/meteorogram/seasia.shtml>).边界层高度数据来自监测中心位于城区车公庄站点的 EV-Lidar 型激光雷达反演,利用了标准偏差方法^[35],剔除了云、雨和沙尘等天气的影响.

以上数据中,城市各项环境数据采集有效率均在 99% 以上,5 个区域站 PM_{2.5} 数据除京东北和京西南的个别年份,有效率均高于 95%,见表 1. 监测中心七楼组分数据除 2018 年有效率为 94.2% 以外,其他年份均高于 99%,气象数据和激光雷达数据有效率均超过 99%.

表 1 2017~2020 年北京区域站 PM_{2.5} 日数据有效率/%

Table 1 PM_{2.5} daily data effective rate of Beijing regional stations from 2017 to 2020/%

年份	京东南	京东北	京南	京西北	京西南
2017	95.4	95.3	94.3	98.6	72.2
2018	98.0	84.5	96.2	93.8	94.7
2019	97.4	97.5	97.2	98.2	97.8
2020	95.4	98.5	97.6	98.9	97.9

1.2 评价方法

采用 11 个国控站数据进行北京市的环境评价,33 个环境评价点(包含 11 个国控站和 22 个市控站)对北京市各行政区进行环境评价.环境评价依据中国生态环境部发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[34]及其修改单的要求,对日和月的有效数据进行控制. PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 的浓

度年均评价值,采用国家环境质量的二级标准,年均限值分别为 35、70、60 和 40 μg·m⁻³. CO 的年评价方法为全年 CO 日均浓度的 95 百分位,记作 COP95,二级标准限值为 4 mg·m⁻³. O₃ 的日评价方法日最大 8 h 滑动平均,而年评价方法为全年日最大 8 h 的 90 百分位,记作 O_{3-8h}P90,二级标准限值为 160 μg·m⁻³.

2 结果与讨论

2.1 空气质量基本情况

表2为2018~2020年北京市6项污染物年均浓度结果,可以看出,3年间北京市6项污染物均出现逐年下降趋势。2020年,北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_{3-8h}\text{P90})$ 和 $\rho(\text{COP95})$ 年均值分别为 $38\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $56\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $29\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $174\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.3\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 首次达到 $40\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,但仍超过国家标准8.6%; $\text{O}_{3-8h}\text{P90}$ 浓度为2013年连续监测以来的最低值,但仍超过国家标准8.8%。 PM_{10} 和 NO_2 自2019年开始连续2a达到国家标准, SO_2 自2004年以来已连续达到国家标准,COP95自

2013年新环境质量标准实施以来即连续达标。2020年“2+26”城 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 范围为 $38\sim 62\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,北京 $\text{PM}_{2.5}$ 在其中排第1位,另外北京 PM_{10} 、 SO_2 和CO年均浓度也排名第1, NO_2 排名第2, O_3 排名第6。

从“蓝保”评估角度来看,相比2017年, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、 $\text{O}_{3-8h}\text{P90}$ 和COP95浓度分别下降了34.5%、33.3%、37.0%、50.0%、9.8%和38.1%。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 降幅接近,三者具有较大的同源性。 SO_2 浓度降幅最大,得益于北京市对燃煤的严格控制措施。由于CO的来源来自燃煤和机动车^[36,37],燃煤的大幅降低也造成了CO相比 NO_2 具有更大的降幅。 O_3 降幅最小,由于 O_3 为光化学二次生成产物,其前体物 NO_x 和VOCs的复杂作用导致 O_3 控制更加复杂^[3],下降难度更大。

表2 2017~2020年北京市6项污染物浓度年均值

年份	$\rho(\text{SO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{10})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{COP95})$ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{O}_{3-8h}\text{P90})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2017	8	46	58	84	2.1	193
2018	6	42	51	78	1.7	192
2019	4	37	42	68	1.4	191
2020	4	29	38	56	1.3	174

本文统计了2018~2020年这3a的空气质量指数(air quality index, AQI),达标天数(空气质量优或良)分别为227、240和276d,呈现逐年增加趋势。相比2017年的226个达标日,2020年增加了50d。图2为2017~2020年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空气质量等级分布,从中可见,2018~2020年达标天数均持续增加,达标天数分别为290、315和330d,2020年比2017年 $\text{PM}_{2.5}$ 达标天数增加了52d,将近2个月。 $\text{PM}_{2.5}$ 的3级以上的天数也出现了连续减少,其中重污染天由2017年的22d减少至2020年的7d。

为进一步开展北京市各行政区 $\text{PM}_{2.5}$ 的分析,利用33个环境评价站的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,对北京17个行政区 $\text{PM}_{2.5}$ 变化情况进行了统计。图3为2018~2020年17个行政区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值变化情况,可以发现3年间各区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (50.2 ± 2.8) 、 (40.8 ± 3.1) 和 $(35.1\pm 2.7)\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,也呈现逐年下降趋势,2020年相比前两年降幅有所减缓。2018~2019年,通州区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均为全市最高,分别为 $55\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $46\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2020年东城区和西城区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均为 $40\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,并列成为全市最高,3年间怀柔区和密云区交替成为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低的区。3年间,各行政区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相比2017年降幅为33.3%~45.6%,降幅从核心区向外围逐渐扩大,东

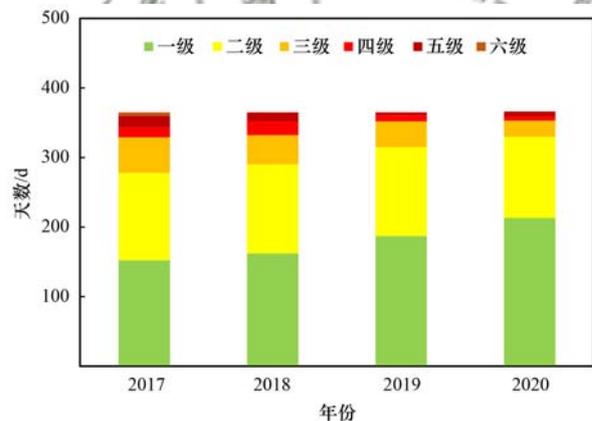
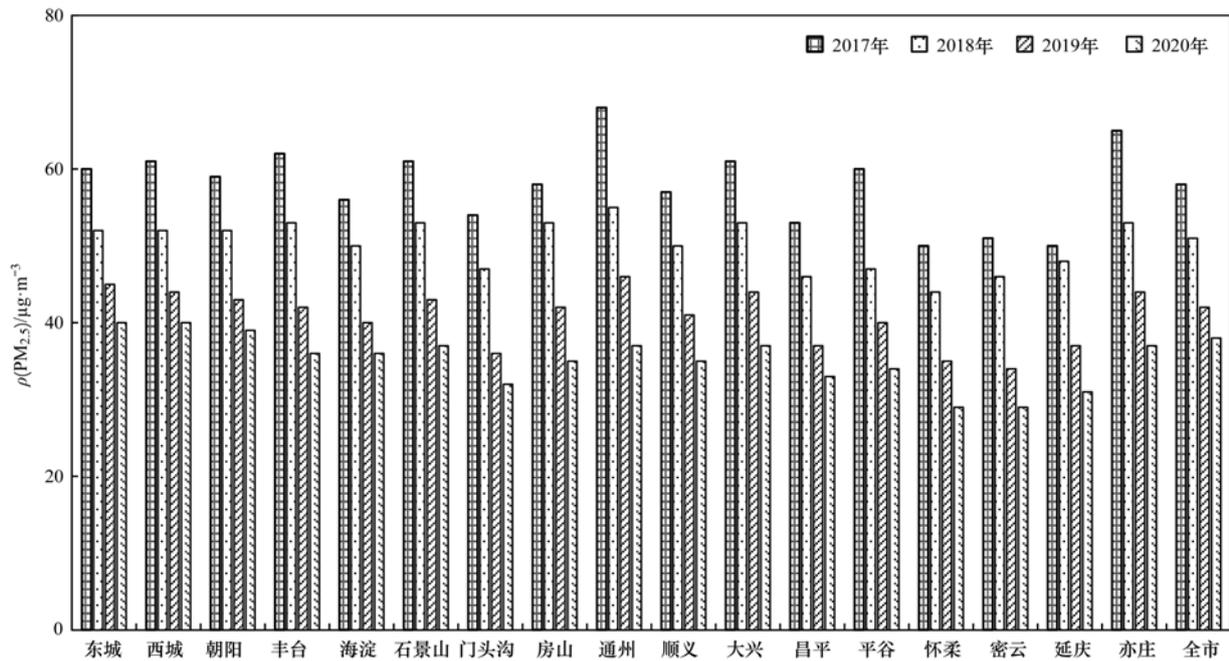


图2 2017~2020年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空气质量等级天数统计

Fig. 2 Number of days statistics of each $\text{PM}_{2.5}$ AQI level index category from 2017 to 2020

城、西城、海淀和朝阳降幅均小于36%,丰台和石景山降幅在40%左右。远郊区降幅较大,通州降幅最大为45.6%,说明远郊区对于污染治理敏感性更强,改善更为明显。2019年,密云和怀柔这2个区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值达到国家 $35\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的考核标准。2020年,达标区增加到8个,其中密云和怀柔继续达标, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值均为 $29\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到历史最低值,延庆、门头沟、昌平、平谷、房山和顺义这6区也达到国家2级标准, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值范围为 $31\sim 35\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图3 2017~2020年北京市行政区PM_{2.5}浓度Fig. 3 PM_{2.5} concentrations of districts in Beijing from 2017 to 2020

2.2 PM_{2.5}空间分布特征

PM_{2.5}作为北京市最重要的污染物,其空间分布特征广受关注.利用克里金插值方法,将环境监测站点和区域站点的PM_{2.5}年均浓度进行逐年插值,来获取北京市PM_{2.5}年空间分布结果.克里金插值法即空间局部插值法,以半变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计,实现对全域的空间插值,为近年来应用较为广泛的插值方法^[38,39].相比2017年,2018~2020年的北京PM_{2.5}分布仍存在南高北低、平原高山区低的特征,但高值区范围明显缩小,结果见图4.2018~2020年高值区主要集中在北京南部平原与河北省的交接地带,PM_{2.5}浓度由南向北逐步降低,处于山后的延庆盆地,PM_{2.5}浓度较四周山地偏低,也低于相邻的昌平平原地区.选取北部的京东北、京西北区域点与南部的京东南、京南和京西南区域点分别作为北部和南部的代表点,将南北代表点位PM_{2.5}浓度取均值后进行比较,发现2018~2020年南部ρ(PM_{2.5})平均值较北部高21.2 μg·m⁻³,而2017年这一差值为26.8 μg·m⁻³.分到各年来看,在各地空气质量改善的大背景下,南、北部PM_{2.5}浓度平均值均逐年下降,南部ρ(PM_{2.5})平均值水平较北部分别高24、22和19 μg·m⁻³,南北空间浓度差距呈现逐步缩小趋势,在空气质量改善的过程中,全市PM_{2.5}浓度空间分布趋向平均.

有研究表明^[2,40],北京冬季大气扩散形势总体较差,夏季扩散形势有利,年际间气象条件存在差

异.由图5可以看出,2018~2020年北部地区夏季PM_{2.5}浓度平均值最低,春季浓度水平最高,这主要是北部地区污染源少,加之冬季北部弱冷空气的影响,北部地区冬季浓度低于春季;南部地区夏季浓度最低,冬季最高,这主要是南部地区污染排放量大,在冬季不利扩散形势下,污染积累速率快,且在偏南气流作用下易受区域传输影响,导致高污染水平.因此,季节间南北部呈现夏-春-秋-冬ρ(PM_{2.5})差异变大的特征,南北部冬季差异达到(45.0 ± 5.4) μg·m⁻³,而夏季差异仅为(8.8 ± 1.1) μg·m⁻³.

2.3 PM_{2.5}时间变化特征

图6为3年间PM_{2.5}浓度月均值变化箱体图,从中可以发现3月为全年最高值,ρ(PM_{2.5})平均值达到57.5 μg·m⁻³,且月份内浓度最大值与最小值的差最大,为236.1 μg·m⁻³;其次是2月ρ(PM_{2.5})平均值为55.1 μg·m⁻³,浓度最大值与最小值的差也达到了202.8 μg·m⁻³;另外,11月ρ(PM_{2.5})平均值也较高,达到51.5 μg·m⁻³.相比而言,北京5~10月ρ(PM_{2.5})平均值相对较低,均在45 μg·m⁻³以下,全年最低值出现8~9月,在28.4~29.7 μg·m⁻³.另外,由图6可以看出,同为夏季的6月和7月ρ(PM_{2.5})平均值达到了39.3 μg·m⁻³和42.3 μg·m⁻³,较8月偏高10 μg·m⁻³以上;夏季6~8月PM_{2.5}浓度的较大差异,可能主要是从6~8月降水频繁逐渐增多引起的.12月同属冬季但ρ(PM_{2.5})平均值为37.4 μg·m⁻³,在全年相对偏低,甚至低于6

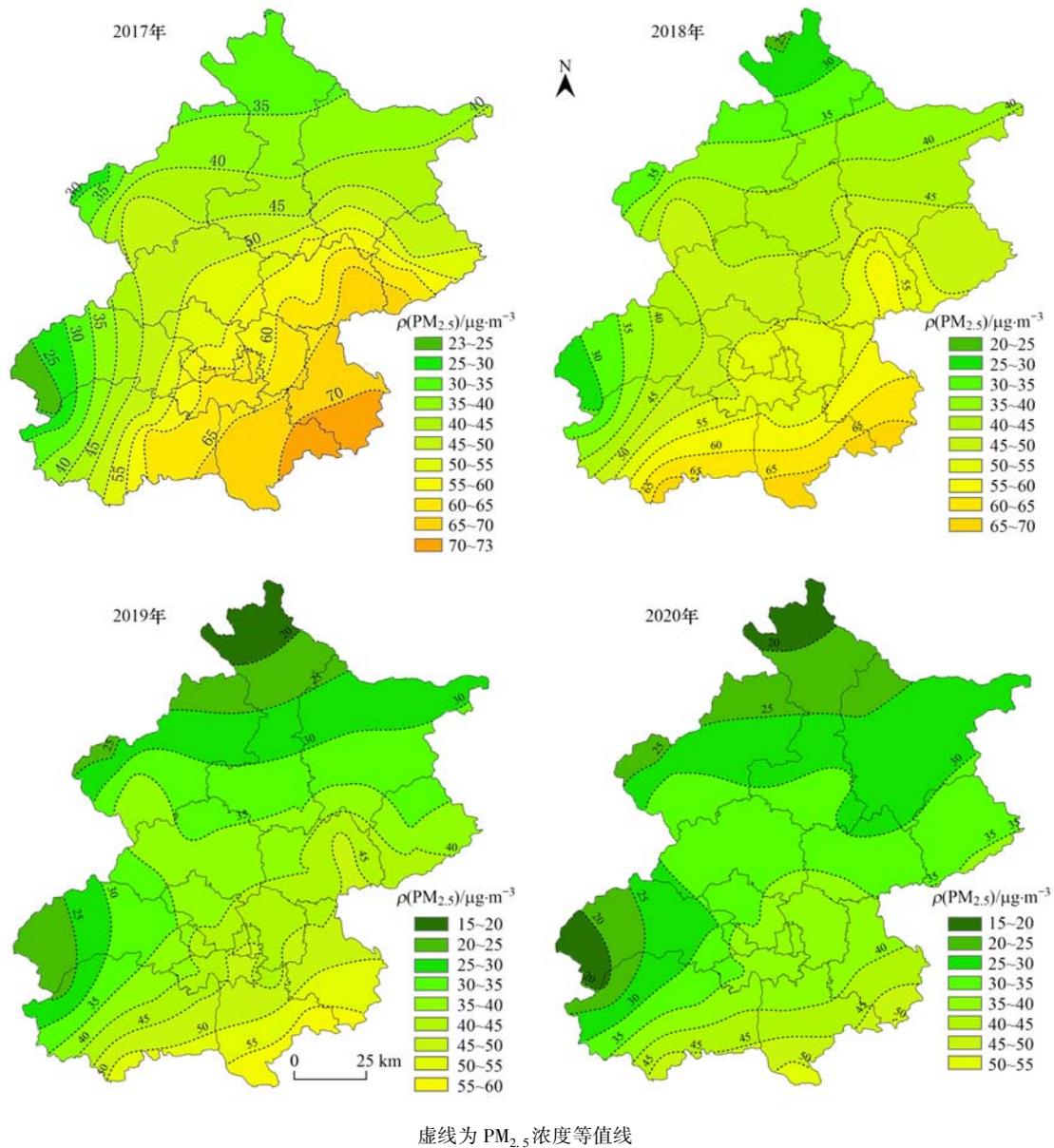


图 4 2017 ~ 2020 年北京 PM_{2.5} 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PM_{2.5} in Beijing from 2017 to 2020

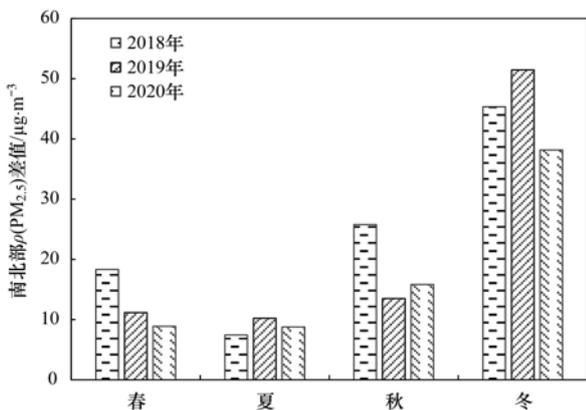
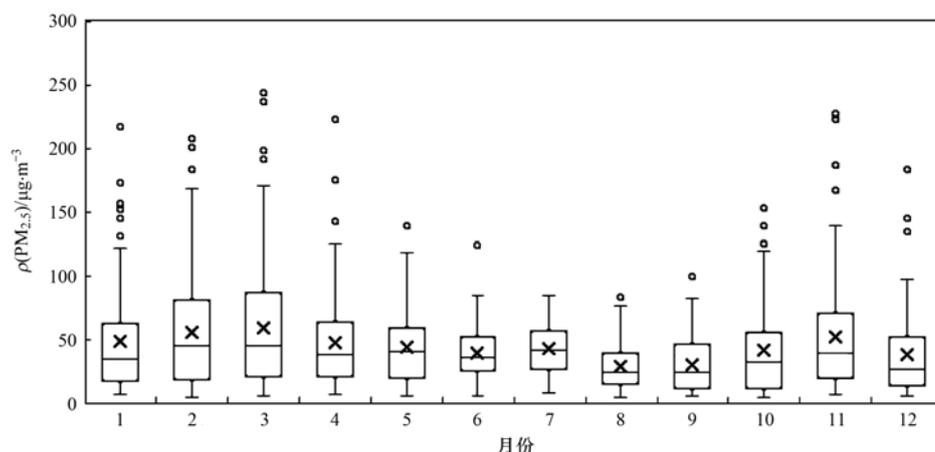


图 5 2018 ~ 2020 年北京南北部 PM_{2.5} 浓度季节差异

Fig. 5 PM_{2.5} seasonal concentration differences between the Southern and the Northern Beijing from 2018 to 2020

~7 月浓度平均值; 2018 ~ 2020 年 12 月 PM_{2.5} 浓度均较低, 范围为 28.6 ~ 44.8 μg·m⁻³, 说明 2018 ~ 2020 年间 12 月扩散条件均相对有利, 但 12 月也存在超过 150 μg·m⁻³ 的极值现象, 重污染风险仍不可忽略。

北京作为北方城市, 冬季存在取暖需求, 其采暖季和非采暖季的空气品质差异较大, 常规采暖季为每年的 11 月 15 日至次年 3 月 15 日。采暖季存在化石燃料燃烧取暖情况, 虽然北京绝大部分地区以天然气和电力这类清洁能源取暖为主, 但周边城市仍存在燃煤取暖现象^[41,42], 采暖季污染排放量要高于非采暖季。且秋冬季, 大气容量较春夏明显降低, 更容易发生污染物的积累, 推高 PM_{2.5} 的浓度水平^[43]。表 3 为采暖季和非采暖季各项污染物的浓度统计结

图 6 2018~2020年PM_{2.5}月浓度变化曲线Fig. 6 Variation of PM_{2.5} monthly concentrations from 2018 to 2020

果,从中可以发现2018~2020年采暖季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $(51.3 \pm 1.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,非采暖季则为 $(40.3 \pm 6.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,采暖季浓度较非采暖季平均高27.3%。除PM_{2.5}外,SO₂、NO₂、NO_x、PM₁₀和CO采暖季浓度较非采暖季平均高45.5%、19.0%、43.5%、

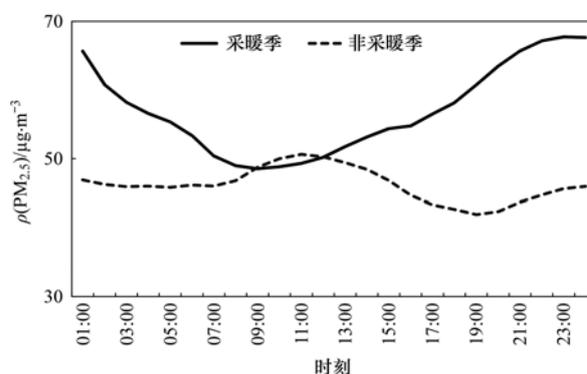
7.7%和52.9%,其中与化石燃料燃烧相关的SO₂、NO_x和CO均偏高非常显著,体现了取暖的排放特征。不过,由于沙尘多发于非采暖季(春季和夏初),导致采暖季和非采暖季PM₁₀差异相对其他污染物偏小,2019年还出现非采暖季略高于采暖季的情况。

表 3 采暖季及非采暖季浓度统计

Table 3 Average concentrations in both heating and non-heating seasons

时间	$\rho(\text{SO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{CO})$ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{10})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_x)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2018~2019年采暖季	7	1.7	47	84	53	79
2018年非采暖	5	1.4	40	75	50	54
2019~2020年采暖季	5	2.1	38	62	52	60
2019年非采暖	3	1	33	64	37	43
2020~2021年采暖季	4	1.4	34	65	49	49
2020年非采暖	3	1	27	57	34	34

使用2018~2020年的采暖季和非采暖季PM_{2.5}数据研究其日变化规律,结果见图7。从中可知,采暖季PM_{2.5}浓度日变化呈现夜间高,中午前后偏低的态势,其中在09:00~12:00较非采暖季偏低,其他时刻均高于非采暖季,以19:00至次日01:00偏高均在40%以上,21:00~22:00偏高达到50.3%和50.1%。非采暖季PM_{2.5}日变化的高值出现在中午前后,峰值为11:00,而谷值出现在19:00,夜间小幅升高,但较中午的高值明显偏低4~5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。两者差异显著的日变化曲线可能与污染排放和气象条件共同作用有关,采暖季整体污染排放量较大,而采暖的高峰时段为夜间,导致夜间PM_{2.5}浓度明显高于白天。而非采暖季在中午前后的高值可能受到北京局地山谷风环流和早高峰交通排放的影响,北京地区早高峰交通污染排放增加,10:00之后东北向的山风减弱^[29],交通污染不易扩散,之后转南风,带来南部污染输送,造成PM_{2.5}的高值。

图 7 采暖季和非采暖季北京PM_{2.5}日变化Fig. 7 Diurnal variations of PM_{2.5} concentration change in heating season and non-heating season in Beijing

2.4 PM_{2.5}重污染发生情况

当 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值大于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,当日PM_{2.5}的AQI即达到5级及以上,即认为1个重污染日;几个连续的重污染日,定义为一次重污染过程。3年间,北京市累计发生重污染过程16次,重

污染日 24 d. 利用表 4 对 2018 年以来北京重污染统计, 可以发现 2018 年重污染次数最多, 共 10 次 13 d, 2019 年和 2020 年重污染过程大幅减少, 均发生 3 次, 重污染日分别为 4 d 和 7 d. 北京的重污染过程持续时间均较短, 都在 1~3 d 之间, 其中 10 次污染过程仅出现了 1 d, 2020 年 1 月和 2 月的两次重污染过程均持续了 3 d. 从重污染发生的季节分布来看, 所有重污染过程都发生 1~4 月和 10

~12 月, 尤其是 1~3 月重污染日累计有 15 d, 占到了全年的 62.5%, 尤其是 2019~2020 年所有的重污染均发生在 1~3 月, 说明近年来 1~3 月为北京市重污染的高发季. 历次重污染过程, 北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日浓度为 157~241 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 小时峰值浓度范围为 182~456 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 2018 年 3 月 28 日重污染过程的后期伴随沙尘过程, 出现混合型污染.

表 4 2018~2020 年北京市 PM_{2.5} 重污染发生情况

Table 4 PM_{2.5} pollution episodes in Beijing from 2018 to 2020

年份	次数	起止日期(月-日)	持续时间/d	浓度平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	浓度峰值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2018	1	02-27	1	169	215
	2	03-03	1	171	204
	3	03-13~03-14	2	241	341
	4	03-27~03-28	2	172	245
	5	04-01~04-02	2	200	275
	6	10-15	1	161	182
	7	11-03	1	168	209
	8	11-13~11-14	2	208	271
	9	11-26	1	223	297
	10	12-02	1	188	205
2019	1	01-12	1	217	456
	2	03-02~03-03	2	174	231
	3	12-09	1	184	207
2020	1	01-18	1	157	234
	2	01-26~01-28	3	161	210
	3	02-11~02-13	3	198	249

根据历史多年研究, 北京重污染过程多为区域性重污染过程. 对 2018~2020 年这 3 年间北京 PM_{2.5} 重污染日同期的“2+26”城市 PM_{2.5} 浓度进行统计, 从图 8 可以发现 24 个重污染日中, 除了 2018 年 3 月 27 日北京为区域唯一的重污染城市, 其他时

段“2+26”城市中均有 2~22 个城市出现重污染, 平均为 8.2 个城市, 可见这 3 年北京发生重污染时大多伴随区域少量城市同步发生重污染现象. 对每个重污染日“2+26”城市 PM_{2.5} 浓度进行逆排序, 统计北京市 PM_{2.5} 浓度的排名, 发现有 7 次北京市成为

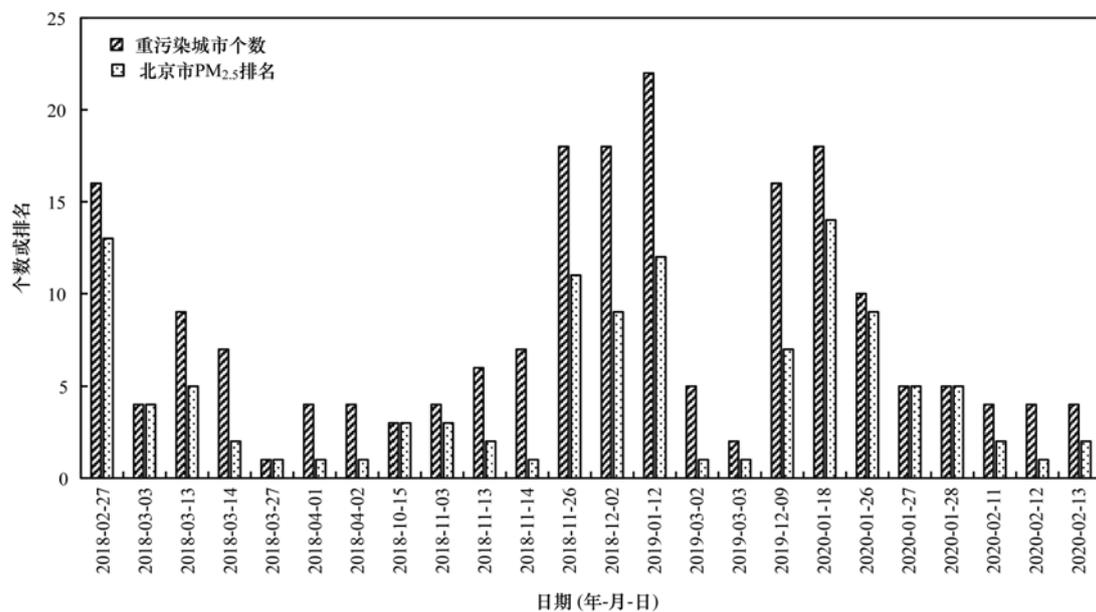


图 8 历次污染过程中“2+26”城市发生重污染城市个数和北京市 PM_{2.5} 浓度排名

Fig. 8 Number of affected cities and Beijing's PM_{2.5} ranking list of Beijing in “2+26” cities during heavy pollution episodes

区域污染最重的城市,北京也易在区域性污染过程中处于较重水平。

2.5 空气质量改善原因初探

气象条件对污染物的形成、积累和传输有重要影响,不同的天气条件可通过影响干湿沉降、化学转化率、通风率等影响大气污染^[43~45]。有研究表明^[46],京津冀地区的PM_{2.5}浓度与相对湿度和风速分别呈现显著的正相关和负相关,风向与传输有明显关联,北京的PM_{2.5}浓度还与北风频率有正相关。通过对2017~2020年年均北京气温、相对湿度、北风频率和边界层高度等气象要素进行分析(表5),发现2018~2019年平均气温较2017年有较大幅度降低,分别降低了54.0%和19.0%,2020年相比2017年

同期相差不大。相对湿度2018年较2017年同期减少13.8%,2019年减少了21.2%,而2020年则有17.7%的增加。北风频率2018~2020年也较2017年出现了一定程度降低,其中2018年降低16.3%,2020年降低15.0%,而2019年降低较小仅1.8%。风速2018~2019年均高于2017年,较高的风速代表更好的水平扩散条件,2020年风速低于2017年6.1%。逆温天数2018年和2020年明显较多。大气边界层高度由激光雷达获取,边界层高度2018~2020年均较2017年偏高,分别偏多28.1%、26.0%和9.5%,垂直扩散条件好于2017年。整体来看,2018~2020年气象扩散条件较2017年有好有差,其中2018年和2019年偏好,2020年扩散条件略转差。

表5 2017~2020年北京市气象要素

Table 5 Meteorological elements in Beijing from 2017 to 2020

年份	气温/℃	相对湿度/%	逆温天数/d	北风频率/%	风速/m·s ⁻¹	边界层高度/m
2017	3.3	41.2	8.7	32.8	2.2	782.3
2018	1.5	35.5	12.3	27.5	2.2	1002.0
2019	2.7	32.5	9.0	32.2	2.3	986.0
2020	3.1	48.5	10.3	27.9	2.1	857.0

北京市PM_{2.5}组分变化体现了污染源改善的效果(图9和图10)。有机物主要来自污染源的直接排放和机动车等污染源排放的气态有机物经大气化学反应形成的二次有机气溶胶^[47],2017~2020年其浓度逐年下降,2020年相比2017年降低43.3%。元素碳主要来自机动车的一次排放^[48],浓度波动下降,2018年相比2017年降低40.2%,2019年反弹52.3%,2020年降低48.9%。地壳物质主要来自于风沙和土壤尘、建筑扬尘和道路扬尘等^[46],2017~2019年其浓度逐年下降,2019年相比2017年降低64.7%,2020年反弹38.9%。硝酸盐、硫酸盐和铵盐

主要来自于氮氧化物、二氧化硫和氨的二次转化^[47,49],硝酸盐浓度2018年降低56.5%,随后逐年上升,2020年相比2018年升高50.9%;硫酸盐和铵盐浓度2017~2019年逐年下降,降幅为68.2%和60.0%,2020年反弹50.7%和40.8%。从占比变化来看,有机物占比呈下降趋势,2018年相比2017年升高8.5%,随后逐年下降,降低13.7%;元素碳占比2017~2019年逐年上升,升高2.6%,2020年降低3.9%;地壳物质占比,2018年相比2017年略有上升(0.7%),2019年降低5.0%,2020年反弹1.0%。硝酸盐占比2018年相比2017年降低4.4%,

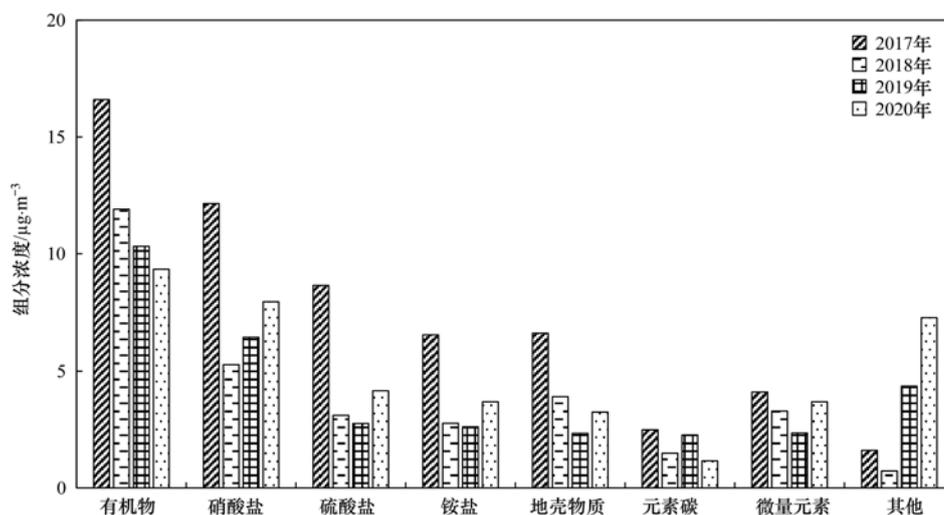


图9 2017~2020年PM_{2.5}组分浓度变化

Fig. 9 Concentration variation in PM_{2.5} components from 2017 to 2020

随后逐年上升,在 2020 年升高至 19.7%,但相比 2017 年仍下降 1.0%;硫酸盐占比变化趋势和硝酸盐一致;铵盐占比 2017~2019 年逐年下降,降低 3.3%,2020 年反弹 1.3%;二次离子占比之和 2017 年最高,2018 年降低 12.3%,2018~2020 年逐年升

高至 39.0%。从整体上看,有机物、元素碳和地壳物质浓度和占比均呈现下降趋势,表明近年来机动车一次排放和扬尘源管控成效显著。硝酸盐、硫酸盐和铵盐浓度和占比均呈现下降趋势,表明氮氧化物、二氧化硫和氨等前体物排放有所降低。

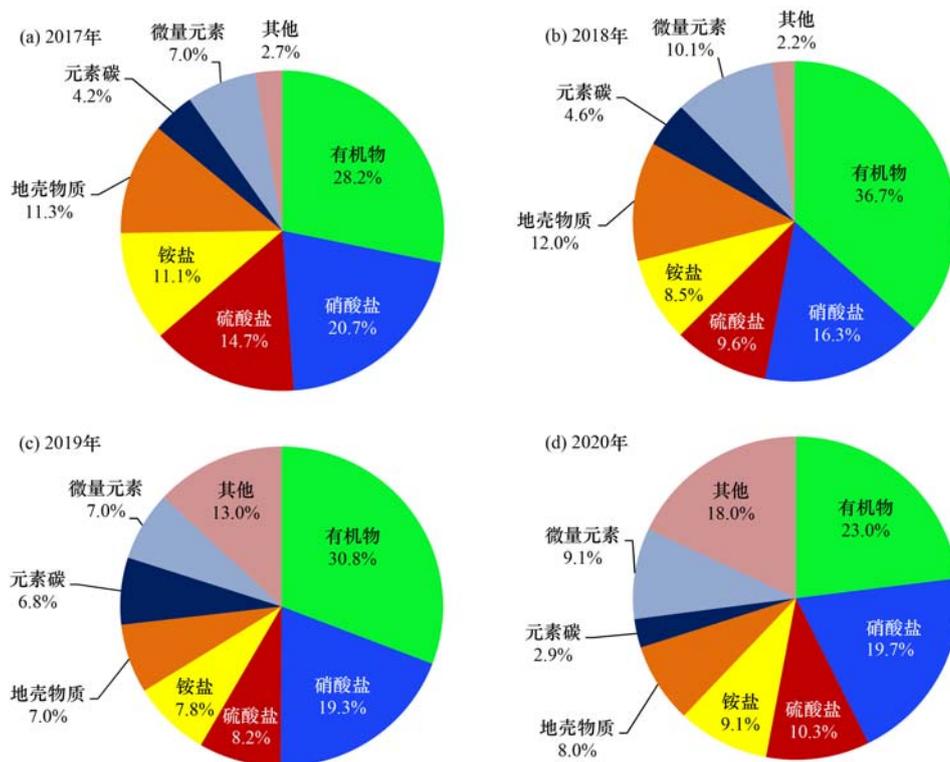


图 10 2017~2020 年 PM_{2.5} 组分占比变化

Fig. 10 Ratio variation in PM_{2.5} components from 2017 to 2020

2018 年北京市印发了“蓝保”^[21],2018~2020 年分别印发了年度行动计划.以 2017 年为基准年,文献[50]利用 MEIC 模型和北京市清单业务平台核算减排量针对每类措施进行评估测算,“蓝保”实施以来,北京市一次 PM_{2.5} 累积减排量为 1.1 万 t,减排幅度 31%,其中扬尘源综合整治对一次 PM_{2.5} 的减排效果显著,减排量为 0.37 万 t. SO₂、NO_x 和 VOCs 累积减排量则分别达到 0.84 万 t、5.2 万 t 和 3.1 万 t,减排幅度分别为 64%、40% 和 20%. 空气质量模型模拟结果显示^[48],2017~2020 年,北京市本地减排对 PM_{2.5} 浓度下降贡献 47.3%. 本地与周边减排是“蓝保”期间北京市空气质量改善的主要原因,贡献达 74%。

3 结论

(1)2018~2020 年北京 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐年下降,分别为 51、42 和 38 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与 2017 年相比,2020 年 PM_{2.5} 下降 30.9%,PM₁₀、NO₂、SO₂、CO 和 O₃ 分别下降 30.0%、31.0%、42.9%、35.0% 和 1.7%,除 O₃

外,其他污染物均有较大降幅.北京 PM_{2.5} 2020 年比 2017 年达标天数增加 52 d,重污染天数减少 15 d,细粒子污染均得到显著改善。

(2)北京市 PM_{2.5} 空间分布依旧维持南高北低的特征,3 年间南部 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较北部分别高 24、22 和 19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,南北差异逐年减小,区域浓度趋于均一化.3 年间北京 1~3 月 PM_{2.5} 浓度相对较高,8~9 月 PM_{2.5} 相对较低,12 月受冷空气较活跃影响,PM_{2.5} 浓度反而在秋冬季处于偏低水平.采暖季各项污染物均显著高于非采暖季,其中 PM_{2.5} 偏高 27.5%,其日变化出现反向特征,采暖季夜间 PM_{2.5} 明显高于白天,而非采暖季 PM_{2.5} 峰值出现在中午前后。

(3)2018~2020 年北京市发生重污染过程 16 次,重污染天累计 25 d,2018 年发生重污染天数最多,主要集中的秋冬季,而 2019~2020 年重污染均发生在 1~3 月.每次重污染过程持续 1~3 d,北京发生重污染时几乎都同步出现了区域重污染。

(4)经分析,近年来大气扩散条件有好有差,但持续的污染减排仍是 PM_{2.5} 逐年降低最重要的原因;

2020年北京市PM_{2.5}组分中有机物、元素碳和地壳物质浓度较2017年分别下降43.3%、53.2%和51.5%，硝酸盐、硫酸盐和铵盐浓度降幅分别为34.5%、52.2%和43.7%，结果显示北京市PM_{2.5}各主要来源均取得明显控制效果。但值得注意的是硝酸盐占比变化不大，氮氧化物的二次转化需要加强关注。

参考文献：

- [1] 徐祥德, 周丽, 周秀骥, 等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. 中国科学D辑, 2004, **34**(10): 958-966.
Xu X D, Zhou L, Zhou X J, *et al.* Influencing domain of peripheral sources in the urban heavy pollution process of Beijing [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, **48**(4): 565-575.
- [2] He Q S, Zhou G Q, Geng F H, *et al.* Spatial distribution of aerosol hygroscopicity and its effect on PM_{2.5} retrieval in East China[J]. Atmospheric Research, 2016, **170**: 161-167.
- [3] Crouse D L, Peters P A, Hystad P, *et al.* Ambient PM_{2.5}, O₃, and NO₂ exposures and associations with mortality over 16 years of follow-up in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC) [J]. Environmental Health Perspectives, 2015, **123**(11): 1180-1186.
- [4] 范引琪, 李春强. 1980—2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象, 2008, **27**(6): 1392-1400.
Fan Y Q, Li C Q. Visibility trends in Beijing, Tianjin and Hebei province during 1980—2003 [J]. Plateau Meteorology, 2008, **27**(6): 1392-1400.
- [5] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 31-36.
Zhao P S, Xu X F, Meng W, *et al.* Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(1): 31-36.
- [6] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 967-971.
Chen Y Z, Zhao D, Chai F H, *et al.* Correlation between the atmospheric visibility and aerosol fine particle concentrations in Guangzhou and Beijing [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(7): 967-971.
- [7] Atkinson R W, Kang S, Anderson H R, *et al.* Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis [J]. Thorax, 2014, **69**(7): 660-665.
- [8] Luo G W, Zhang L Y, Hu X S, *et al.* Quantifying public health benefits of PM_{2.5} reduction and spatial distribution analysis in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137445.
- [9] Ban J, Ma R M, Zhang Y, *et al.* PM_{2.5}-associated risk for cardiovascular hospital admission and related economic burdens in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **799**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149445.
- [10] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014年北京大气重污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013-2014 [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 27-35.
- [11] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(4): 483-493.
- [12] Lv L H, Zhang T S, Xiang Y, *et al.* Distribution and transport characteristics of fine particulate matter in Beijing with mobile lidar measurements from 2015 to 2018 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, **115**: 65-75.
- [13] 马小会, 廖晓农, 唐宜西, 等. 北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J]. 气象与环境学报, 2017, **33**(5): 53-60.
Ma X H, Liao X N, Tang Y X, *et al.* Weather pattern and case analysis of air heavy pollution days in Beijing [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, **33**(5): 53-60.
- [14] Chen Z Y, Chen D L, Zhao C F, *et al.* Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations across China: A review of methodology and mechanism [J]. Environment International, 2020, **139**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105558.
- [15] 王景云, 张红日, 赵相伟, 等. 2012-2015年北京市空气质量指数变化及其与气象要素的关系[J]. 气象与环境科学, 2017, **40**(4): 35-41.
Wang J Y, Zhang H R, Zhao X W, *et al.* Variation of air quality index and its relationship with meteorological elements in Beijing from 2012 to 2015 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, **40**(4): 35-41.
- [16] 李慧杰, 王秀兰, 王计平, 等. 2013—2017年间京津冀地区空气质量及影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, **31**(2): 21-25.
Li H J, Wang X L, Wang J P, *et al.* Analysis on air quality influence factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2013-2017 [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, **31**(2): 21-25.
- [17] 董群, 赵普生, 王迎春, 等. 北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2218-2230.
Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, *et al.* Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2218-2230.
- [18] 环境保护部. 关于实施《环境空气质量标准》(GB3095-2012)的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201203/t20120302_224147.htm, 2012-02-29.
- [19] 环境保护部. 2103年中国环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201605/P020160526564151497131.pdf>, 2014-05-27.
- [20] 北京市人民政府. 北京市2013-2017年清洁空气行动计划[EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_59933.html, 2017-01-03.
- [21] 北京市人民政府. 北京市人民政府关于印发《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》的通知[EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t20190522_61552.html, 2018-09-14.
- [22] 孙峰, 张大伟, 孙瑞雯, 等. 北京地区冬季典型PM_{2.5}重污染案例分析[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(6): 1-12.
Sun F, Zhang D W, Sun R W, *et al.* Typical heavy pollution episode analysis on PM_{2.5} in winter of Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(6): 1-12.
- [23] 董芬, 王喜全, 王自发, 等. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(1): 63-70.
Dong F, Wang X Q, Wang Z F, *et al.* A study of the north-south differences of the air quality in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2013, **18**(1): 63-70.

- [24] 李文涛, 高庆先, 刘俊蓉, 等. APEC期间北京空气质量改善对比分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4340-4347.
Li W T, Gao Q X, Liu J R, *et al.* Comparative analysis on the improvement of air quality in Beijing during APEC [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4340-4347.
- [25] Zhang J S, Chen Z Y, Lu Y H, *et al.* Characteristics of aerosol size distribution and vertical backscattering coefficient profile during 2014 APEC in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2017, **148**: 30-41.
- [26] 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 等. 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1024-1034.
Li Y R, Wang J X, Han T T, *et al.* Using multiple linear regression method to evaluate the impact of meteorological conditions and control measures on air quality in Beijing during APEC 2014[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1024-1034.
- [27] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, **39**(1): 34-42.
Wang G L, Xue J J, Zhang J Z. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and main cause of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, **39**(1): 34-42.
- [28] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, **73**(1): 177-191.
Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(1): 177-191.
- [29] 吴进, 李琛, 马志强, 等. 北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4660-4668.
Wu J, Li C, Ma Z Q, *et al.* Similarities and differences of valley winds in the Beijing plain and Yanqing areas and its impact on pollution[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4660-4668.
- [30] Chen Y, Zhao C S, Zhang Q, *et al.* Aircraft study of Mountain Chimney Effect of Beijing, China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, **114**(D8), doi: 10.1029/2008JD010610.
- [31] 孙婷婷, 项衍, 罗宇涵, 等. 基于综合立体观测网的京津冀地区污染过程分析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(1): 20-27.
Sun T T, Xiang Y, Luo Y H, *et al.* Pollution process in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas based on comprehensive stereoscopic observation network[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(1): 20-27.
- [32] 李青春, 李炬, 曹晓彦. 地形局地环流对北京冬季大气重污染形成的影响分析[A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷)[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [33] Miao Y C, Guo J P, Liu S H, *et al.* Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(4): 3097-3110.
- [34] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [35] 李霞, 权建农, 王飞, 等. 激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用[J]. 大气科学, 2018, **42**(2): 435-446.
Li X, Quan J N, Wang F, *et al.* Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by lidar and its application in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, **42**(2): 435-446.
- [36] 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学, 2000, **21**(3): 68-70.
Fu L X, Hao J M, He D Q, *et al.* The emission characteristics of pollutants from motor vehicles in Beijing [J]. Environmental Science, 2000, **21**(3): 68-70.
- [37] Tang G Q, Zhao P S, Wang Y H, *et al.* Mortality and air pollution in Beijing: The long-term relationship[J]. Atmospheric Environment, 2017, **150**: 238-243.
- [38] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. International Journal of Geographical Information System, 1990, **4**(3): 313-332.
- [39] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报, 2013, (9): 87-90, 97.
Li J X, Li C K, Yin Z H. ArcGIS based Kriging interpolation method and its application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013, (9): 87-90, 97.
- [40] 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3201-3209.
Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, *et al.* Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region during winter [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- [41] 赵文瑛, 于长友, 唐飞, 等. 北方地区冬季清洁取暖进展及展望[J]. 石油规划设计, 2020, **31**(3): 18-22, 48.
Zhao W Y, Yu C Y, Tang F, *et al.* Progress and prospects of clean heating in winter seasons in North China [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2020, **31**(3): 18-22, 48.
- [42] 杜晓林, 冯相昭, 王敏, 等. 北方地区清洁取暖的影响因素及污染物减排贡献分析[J]. 环境与可持续发展, 2020, **45**(3): 16-20.
Du X L, Feng X Z, Wang M, *et al.* Analysis on influencing factors of clean heating in North China and contribution of pollutant emission reduction [J]. Environment and Sustainable Development, 2020, **45**(3): 16-20.
- [43] Liu Z R, Hu B, Wang L L, *et al.* Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(1): 627-642.
- [44] 李军, 孙春宝, 刘威德, 等. 气象因素对北京市大气颗粒物浓度影响的非参数分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(6): 663-669.
Li J, Sun C B, Liu X D, *et al.* Non-parameter statistical analysis of impacts of meteorological conditions on PM concentration in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, **22**(6): 663-669.
- [45] Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, *et al.* Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(4): 2459-2475.
- [46] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市PM_{2.5}达标约束的大气环境容量模拟[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2490-2496.
Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2490-2496.
- [47] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物PM_{2.5}的来源研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 1-5.

- Zhu X L, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Source identification of ambient $PM_{2.5}$ in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(5): 1-5.
- [48] 刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 等. 北京城区大气 $PM_{2.5}$ 主要化学组分构成研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2346-2352.
- Liu B X, Yang D Y, Zhang D W, *et al.* Chemical species of $PM_{2.5}$ in the urban area of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2346-2352.
- [49] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012 ~ 2013 年间北京市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 768-773.
- Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Correlation, seasonal and temporal variation of water-soluble ions of $PM_{2.5}$ in Beijing during 2012-2013[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [50] 骆倩雯. 揭秘! 北京是如何大幅超额完成“蓝天保卫战三年行动计划”目标的? [EB/OL]. <https://wap.bjd.com.cn/news/2021/09/07/168646.shtml>, 2021-09-07.

环 境 科 学

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i> (2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i> (2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i> (2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China; Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i> (2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i> (2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i> (2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i> (2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i> (2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i> (2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo (2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong (2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i> (2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i> (2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei (2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments; Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i> (2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i> (2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i> (2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei (2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i> (2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i> (2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i> (2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i> (2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i> (2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i> (2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin (2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-qiang, <i>et al.</i> (2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i> (2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i> (2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i> (2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i> (2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i> (2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i> (2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i> (2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i> (2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i> (2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i> (2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i> (2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i> (2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i> (2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-ru, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i> (2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i> (2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity; Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping (2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions; A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i> (2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i> (3003)