

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估

侯露, 朱媛媛*, 刘冰, 李健军

(中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 对比分析 2015 ~ 2022 年冬奥会期间(1 月 31 日至 2 月 20 日)京津冀及周边区域 44 城市空气质量时空演变特征, 量化同期气象、协同减排和跨区域传输对 $PM_{2.5}$ 浓度及组分变化贡献, 为不利气象条件下区域空气质量联防联控提供科学参考。结果表明, 2022 年 44 城市 $PM_{2.5}$ 浓度为近 8 年农历同期最低($46 \mu g \cdot m^{-3}$), 优良天占比最高(83.3%), 不存在重污染天。 $PM_{2.5}$ 污染南重北轻, 高值区主要集中在太行山沿线及燕山传输通道城市。2016 年在春节中期未管控烟花爆竹燃放等源排放强度下, 优良天占比 93.5%, 大气强扩散能力对空气质量改善至关重要。2022 年静稳天气指数(SWI)同比增加 2.1, 大气扩散能力转差, 44 城市 $\rho(PM_{2.5})$ 均值和峰值同比下降 $14 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $76 \mu g \cdot m^{-3}$, 北京减排对 $PM_{2.5}$ 浓度降幅较未采取前增大 96%, 晋鲁豫地区在气象造成 $PM_{2.5}$ 浓度上升的不利背景下, 峰值下降 $87 \mu g \cdot m^{-3}$, 区域减排削峰成效显著。2019 ~ 2022 年区域化学组分浓度逐年降低, 空间差异性缩小, 高值集中在区域中南部。二次组分浓度降幅大小为: 有机物(21.9%) > 硫酸盐(20%) > 铵盐(16.7%) > 硝酸盐(9.7%), 硝酸盐占 $PM_{2.5}$ 比例逐年上升至 30.1%, 交通源污染贡献相对突出, 2022 年晋鲁豫地区 SNA 浓度同比回升。污染外源传输占主要贡献(>50%), 辽宁对环渤海沿岸城市 $PM_{2.5}$ 浓度贡献显著(>10%), 硝酸盐和硫酸盐易长距离传输, 需加强二次化学组分前体物 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 协同管控。

关键词: 冬奥会; 京津冀; $PM_{2.5}$; 气象影响; 减排效果; 污染传输

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-5899-16 DOI: 10.13227/j.hjxx.202211270

Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas

HOU Lu, ZHU Yuan-yuan*, LIU Bing, LI Jian-jun

(China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: From January 31st to February 20th, 2015 to 2022, the spatio-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ pollution evolution of 44 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its surrounding areas were analyzed. The contribution of simultaneous meteorology, coordinated emission reduction, and cross-regional transmission to $PM_{2.5}$ concentration and chemical component changes were quantified, respectively, with the aim to provide scientific reference for regional air quality joint prevention and control under adverse meteorological conditions. The results showed that the mean value of $PM_{2.5}$ concentration of 44 cities in 2022 was the lowest($46 \mu g \cdot m^{-3}$) without heavy pollution in the same period of the lunar calendar since 2015, whereas the proportion of days with good air quality was the highest(83.3%). $PM_{2.5}$ pollution was more serious in the southern region than that in the northern region, and the high values were mainly concentrated along the Taihang Mountains and Yanshan transmission channel cities. In 2016, under the unregulated emission of fireworks in the Spring Festival, the proportion of unpolluted days was 93.5%, which means that the strong atmospheric diffusion ability was crucial to improve air quality. In 2022, the static weather index(SWI) increased by 2.1 compared with that in 2021, indicating unfavorable atmospheric diffusion capacity. The average and peak values of $PM_{2.5}$ decreased by $14 \mu g \cdot m^{-3}$ and $76 \mu g \cdot m^{-3}$, respectively. The reduction in $PM_{2.5}$ concentration in Beijing owing to emission reduction measures increased by 96% compared with that before one month. Under the adverse atmospheric background in the Shanxi-Shandong-Henan Region, which contributed to the increase in $PM_{2.5}$ concentration, the peak value of $PM_{2.5}$ concentration decreased by $87 \mu g \cdot m^{-3}$, indicating that the peak clipping effect of regional collaborative pollution emission reduction was significant. From 2019 to 2022, the concentration of $PM_{2.5}$ chemical components decreased yearly with narrowed spatial differences, and the high value was concentrated in the central and southern regions. The descending order of $PM_{2.5}$ secondary component concentration decrease was as follows: organic matter(21.9%) > sulfate(20%) > ammonium salt(16.7%) > nitrate(9.7%). The proportion of nitrate in $PM_{2.5}$ increased yearly to 30.1%, indicating that the contribution of traffic pollution was relatively prominent. In 2022, the SNA concentration in the Shanxi-Shandong-Henan Region increased. Pollution from external sources accounted for the main contribution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region(>50%). Liaoning Province contributed significantly to the $PM_{2.5}$ concentration in cities along the Bohai(>10%), and nitrate and sulfate were easy to transport over long distances. It is necessary to strengthen the coordinated control of precursors of secondary chemical components SO_2 , NO_x , and NH_3 .

Key words: the Winter Olympics; Beijing-Tianjin-Hebei Region; $PM_{2.5}$; meteorological impact; emission reduction effect; pollution transmission

京津冀及周边区域受山地环绕^[1~4]、多源污染排放^[5~8]和局地气象^[9~11]等因素影响,在秋冬季易出现以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的重度污染天^[12~14]。有研究表明,区域秋冬季大气环境容量较春夏季小 30% 左右,常出现高湿、逆温、静小风和能见度低

收稿日期: 2022-11-25; 修订日期: 2023-01-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701201, 2018YFC0213203); 国家自然科学基金项目(41875164)

作者简介: 侯露(1996~),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为环境空气质量监测, E-mail: houlu@cncmc.cn

* 通信作者, E-mail: zhuyy@cncmc.cn

的静稳天气型^[15~17],由于PM_{2.5}复合型污染特征以及大气结构不稳定性,本地污染积累的同时常伴随污染跨区域传输^[18~22],形成连片的区域性污染过程.定量研究区域空气质量时空变化特征和污染成因,对污染综合防治和精细化管控具有重要意义.

2022年2月4~20日,北京冬季奥林匹克运动会(冬奥会)成功举办,京津冀及周边区域大部空气质量以优良为主,PM_{2.5}污染明显减轻,期间正值春节和采暖季^[23,24],大气污染减排难度增加,人为源减排效果值得深入总结分析.不少学者对华北地区PM_{2.5}污染特征和化学机制开展了研究分析,Yan等^[25]通过2016年京津冀13个城市的空间自相关性,表明区域内PM_{2.5}具有明显空间溢出效应.孙韧等^[26]研究发现,京津冀区域重污染期间近地面100 m处的风场气流为西南-南风,扬尘、燃煤和机动车是颗粒物主要排放源.刘玥晨等^[27]研究指出2015年以来北京市冬奥会历史同期PM_{2.5}重度污染发生频率较高,由Chu等^[28]研究得知这是受高浓度气态前体物叠加静稳天气双重不利因素影响,PM_{2.5}化学组成以二次无机盐为主,NO₃⁻代替SO₄²⁻对PM_{2.5}贡献最高,呈硝酸型污染态势.李令军等^[49]研究指出水溶性二次离子浓度增幅明显是导致重污染产生的主要原因之一.目前针对区域空气质量的相关研究大多围绕PM_{2.5}化学组成^[29]、污染机制^[30,31]、减排效果^[32~34]和成因溯源^[35,36]进行单一分析,但随着污染管控减排空间逐渐收窄,重大活动叠加春节和供暖等复杂不利背景,对区域秋冬季PM_{2.5}污染演变、气象影响、协同减排和传输贡献的综合定量分析较少.

为此,开展冬奥会期间京津冀及周边区域PM_{2.5}污染复盘研究,分析2015~2022年农历同期区域和典型城市PM_{2.5}污染和组分时空演变特征,量化同期气象影响和区域间协同减排效果,基于前向轨迹讨论辽宁污染长距离跨海传输贡献,以期为今后京津冀地区空气质量联防联控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究区域为京津冀及周边6省市,包括北京、天津、河北的张家口、承德、秦皇岛、石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、雄安新区和邯郸,河南的郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、洛阳、平顶山、许昌、商丘和周口,山东的济南、淄博、济宁、泰安、德州、聊城、滨州、菏泽、枣庄、东营、潍坊和临沂,山西的太原、阳泉、晋

中、大同、朔州和忻州共44个城市,辽宁的沈阳、锦州、营口、大连和葫芦岛为污染区域传输影响分析对象.

1.2 数据来源与评价方法

京津冀及周边区域44个城市(44城市)PM_{2.5}日均值、小时均值和空气质量指数AQI,采用中国环境监测总站国家空气质量监测网城市空气质量监测数据,并依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)进行评价.区域内3个及以上城市至少连续3d出现PM_{2.5}分指数为中度及以上时,判定为区域性污染过程^[32].气象观测数据来源于国家气象中心共享数据.PM_{2.5}采样站点依托于京津冀及周边地区大气污染综合立体观测网^[24],采样设备均满足HJ 93-2013《环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})采样器技术要求及检测方法》各项指标要求.PM_{2.5}及其化学组分严格按照《环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范》^[37]和《环境空气颗粒物源解析监测技术方法指南(试行)》^[38]开展样品分析和数据质量控制及保证工作.

2 结果与讨论

2.1 冬奥会期间区域空气质量时空特征

2.1.1 2022年冬奥会期间区域空气质量演变分析

2022年冬奥会期间(1月31日至2月20日)44城市首要污染物 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为46 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同比下降23.3%,未出现重度污染天.根据大气扩散条件与污染累积演变形势,划分3个阶段(图1):第1阶段(1月31日至2月8日),受低湿、强冷空气渗透和烟花燃放管控等多重有利因素影响,区域空气质量大部优良,北京日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低至5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;第2阶段(2月9~13日),扩散条件转为不利,本地一次排放叠加降水高湿和区域传输作用,污染物快速积累,出现区域性PM_{2.5}轻至中度污染过程,短时重度污染;第3阶段(2月14~20日),偏北强冷空气再次南下,扩散条件转好,湿度大幅降低,区域北部污染快速清除,空气质量恢复至优良水平,河南大部以良至轻度污染为主.

第1阶段:1月31日全域受较强偏西气流控制,平均风速为3.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图2(a)],相对湿度维持在较低水平(45%左右)[图2(b)],区域中南部受西部通道污染传输影响,空气质量以良为主,枣庄和临汾出现PM_{2.5}轻度污染[图2(c)].2月1~3日,区域中南部受弱东南风持续作用,平均风速降低为1.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度逐步抬升(50%左右),河南中北部个别城市相对湿度增加到60%以上,受

区域及城市		2022年1月					2022年2月															
		31日	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日
辽宁	沈阳	92	44	46	38	36	38	38	42	79	95	160	109	60	74	59	38	34	63	59	39	39
	锦州	82	45	73	67	38	39	39	60	85	130	175	88	60	43	43	35	37	33	50	38	39
	营口	89	37	45	54	39	43	41	47	59	80	117	85	72	70	67	35	37	50	45	39	43
	大连	58	39	43	43	40	41	40	45	47	88	109	105	59	64	52	36	37	33	40	40	41
	葫芦岛	75	40	73	77	39	41	37	52	67	95	180	80	57	40	38	39	39	38	45	41	42
京津冀	北京	35	36	37	39	39	38	38	36	36	55	77	69	57	68	39	35	37	38	49	37	36
	张家口	38	43	43	43	43	43	42	41	47	69	44	44	41	43	44	40	39	41	41	41	42
	承德	37	40	40	42	42	45	41	38	38	54	78	60	58	46	40	41	41	39	59	43	40
	秦皇岛	73	42	43	45	43	42	40	38	57	88	129	104	48	44	43	40	41	40	52	43	40
	天津	39	39	41	41	40	40	40	45	57	97	132	127	58	51	42	40	40	48	48	39	37
	石家庄	68	53	64	77	42	45	45	55	68	92	90	112	130	74	67	45	60	50	60	40	44
	唐山	69	40	42	41	41	40	40	44	62	112	144	120	57	53	55	46	40	37	55	40	36
	廊坊	42	38	39	40	41	40	40	40	48	103	107	103	62	64	41	36	38	53	47	37	35
	保定	55	42	54	54	41	45	55	60	68	112	110	125	73	64	55	42	43	68	70	41	55
	沧州	74	41	53	49	40	40	42	59	87	85	114	134	68	49	42	47	54	41	64	36	53
	衡水	70	42	48	77	41	43	67	70	84	94	130	124	149	78	49	43	64	43	104	42	50
	邢台	57	54	64	82	47	45	46	54	72	98	117	163	159	87	69	48	69	49	85	48	54
	邯郸	68	65	65	103	58	52	60	60	72	97	130	133	173	99	75	57	78	57	102	56	59
山东	济南	76	43	46	67	45	44	46	53	68	70	72	87	122	153	67	79	64	39	52	42	55
	淄博	84	43	55	70	54	43	54	69	74	85	88	113	140	132	73	73	53	41	54	45	54
	济宁	77	51	52	78	80	44	49	55	73	70	63	79	94	142	90	72	114	47	43	52	63
	泰安	77	43	48	85	64	44	49	64	84	84	85	94	114	149	77	74	89	40	52	41	54
	德州	76	42	54	70	42	44	69	80	87	83	97	90	150	77	46	63	58	43	69	44	58
	聊城	78	43	52	89	48	44	62	63	75	73	73	74	127	134	60	73	64	50	58	52	58
	滨州	73	43	49	60	43	43	46	57	79	92	89	122	102	62	57	60	41	42	59	42	48
	菏泽	75	62	60	93	80	46	54	69	78	69	73	73	119	166	92	83	107	65	54	58	73
	枣庄	102	79	62	92	99	49	55	57	83	83	70	75	99	128	132	74	80	48	49	51	56
	东营	69	40	48	55	42	40	41	43	69	95	99	122	103	55	53	55	41	41	55	39	43
	潍坊	83	38	48	64	49	40	42	48	73	94	89	119	113	125	62	58	42	37	54	43	47
	临沂	103	55	64	78	83	43	48	59	88	108	79	89	112	129	113	62	74	38	49	53	54
	郑州	74	57	68	82	68	53	63	54	59	79	102	80	98	137	102	79	93	74	107	120	97
	开封	78	63	70	92	74	54	63	57	64	80	83	73	105	149	102	77	105	78	82	100	102
河南	安阳	69	55	58	99	60	54	59	69	73	93	132	102	128	119	74	55	79	60	95	64	77
	鹤壁	62	54	63	94	63	48	57	63	73	95	122	97	107	135	82	60	82	67	105	74	70
	新乡	71	56	64	92	62	51	59	59	70	89	107	80	98	145	92	63	80	73	108	89	76
	焦作	62	46	58	72	77	49	55	58	72	94	110	103	82	144	108	75	79	79	129	117	65
	濮阳	67	50	55	100	67	44	58	62	72	79	85	73	117	153	70	69	87	59	73	68	67
	洛阳	86	62	63	87	87	58	68	48	67	89	103	122	102	135	128	97	90	88	108	109	69
	平顶山	90	73	89	77	87	73	77	55	63	72	85	85	104	93	107	97	130	100	87	112	110
	许昌	72	82	74	75	79	70	67	45	64	77	77	78	110	94	92	87	137	88	77	109	114
	商丘	88	113	62	82	85	51	55	52	64	74	59	68	99	119	103	90	95	61	47	53	60
	周口	88	91	63	87	89	72	55	40	50	62	63	69	85	92	89	97	105	68	57	77	93
山西	太原	49	72	57	41	39	38	38	45	85	93	88	79	105	124	36	57	53	119	114	40	41
	阳泉	66	43	58	62	58	41	59	55	62	68	74	79	123	84	80	79	77	64	85	40	52
	晋中	60	57	64	52	41	40	35	38	82	87	99	87	114	119	40	64	69	94	105	40	46
	大同	41	85	48	41	41	37	45	41	54	65	79	78	59	51	39	73	42	52	40	38	38
	朔州	55	102	52	53	42	46	56	64	58	60	68	72	58	65	52	67	57	72	55	42	51
	忻州	59	92	59	49	40	40	41	51	53	63	77	102	104	93	55	52	46	82	68	39	40

AQI级别

优

良

轻度污染

中度污染

图1 2022年1月31日至2月20日京津冀及周边区域49个城市AQI日均值

Fig. 1 Air quality index for 49 cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region from January 31st to February 20th in 2022

海上清洁气团湿清除和偏北气流南下叠加作用影响,污染物南移,京津冀和山东大部空气质量改善至1级优水平,商丘、朔州和邯郸先后出现轻度污染。2月4~6日对流层中层500 hPa等压面冷涡配合冷槽东移南下,平均风速为3 m·s⁻¹,扩散条件持续有利,相对湿度小幅降低至40%。2月7~8日鲁豫交界处地面风场由静小风转为偏南风,河南北部相对湿度达70%及以上,扩散条件开始转不利,区域大部空气质量以良为主。

第2阶段:2月9~11日地面受北低南高辐合气压场控制,在偏西南风主导下污染带北抬[图2(a)],区域中北部扩散条件持续不利,本地叠加南部污染传输影响污染快速累积,河北中南部出现连续多小时PM_{2.5}轻至中度污染[图2(c)],污染程度由北向南逐渐降低,相对湿度呈显著日周期性变化,高值集中在傍晚17:00至上午11:00[图2(b)]。沈阳、锦州和葫芦岛出现4 h PM_{2.5}重度污染[图2(c)],于2月10日21:00达ρ(PM_{2.5})小时峰值222 μg·m⁻³,2月11日05:00京津冀地区转为强偏东风,受辽宁可能的污染跨海传输影响,ρ(PM_{2.5})达

小时峰值149 μg·m⁻³。2月12~13日,降水中心集中在区域中北部,京津冀和山西出现连续4~12 h的雨雪过程,全天相对湿度快速上升至接近饱和,受降水强湿清除作用,空气质量由轻至中度污染快速改善至优良水平。偏东北冷空气持续向南渗透,污染物逐渐南移堆积至冀鲁豫交界处地区,叠加高湿和本地源排放影响,前体污染物二次转化加快,山东和河南PM_{2.5}以轻至中度污染为主,同时出现6 h重度污染,ρ(PM_{2.5})达小时峰值179 μg·m⁻³。

第3阶段:2月14~17日受东北冷高压影响,强冷空气大范围向南延伸[图2(a)],扩散条件转好,区域大部相对湿度显著降低[图2(b)],PM_{2.5}浓度逐步下降[图2(c)]。2月18日地面转弱偏南风,污染小幅回流,河南中部保持高湿状态,相对湿度达60%及以上,PM_{2.5}以良至低位轻度污染为主。闭幕式前1 d(2月19日)西北冷空气再次过境,区域大部空气质量优良。

2.1.2 近年冬奥会同期区域空气质量对比分析

按照2.1.1节划分的3个阶段,对比2015~2022年冬奥会农历同期(除夕至正月二十)区域空

气质量时空演变特征. 历年该时段重污染过程频发且主要集中在春节前夕(第1阶段)[图3(a)],仅2022年未出现重污染天,优良天占比同期最高(98.7%).在春节中期(第2阶段),2021年优良天占比最高(96.7%),2016年次之(93.5%),仅存在14天次的轻度污染,但同年还未严格管控烟花爆竹燃放,对比同期气象条件可知,2016年风速明显提高,湿度大幅降低,有利于污染物扩散,可见大气强扩散能力对污染程度的改善贡献至关重要^[39].

2015年以来,44城市PM_{2.5}日均重污染天数及城市个数先增加后大幅减少[图3(b)],重污染天集中在2017~2019年,2017年重污染城市数量最多(42个),同年河北11个城市和河南12个城市重污染总天次分别为71天次和74天次,重污染发生频率高达30.7%和29.4%,其中石家庄、保定、邢台和安阳PM_{2.5}浓度达到重度至严重污染水平,到2022年完全消除重污染天,可见河南和河北禁燃管控和违法排污精准整治措施成效尤为显著^[40,41].自2019年源排放水平锐减后^[35]空气质量逐年明显改善,2022年PM_{2.5}浓度为近8年农历同期最低,较

2017年峰值108 μg·m⁻³下降了62 μg·m⁻³,优良天占比最高(83.3%).重污染天发生频率(重污染天数与总天数之比)降低了23.5%,污染天出现频次(轻度及以上污染天次与总天次之比)降低至13.2%,较2017年降低48.6%.

PM_{2.5}污染区域差异性显著,呈南重北轻的特点(图4),高值区主要集中在太行山沿线及燕山传输通道城市,与山脉阻挡和山区平原热力差异易形成局地弱风场和逆温层,气流辐合停滞区阻碍污染水平垂直对流扩散^[4],西北沙尘的外来传送^[30]以及工业企业密集造成本地污染排放量大^[29]有关.2022年区域中南部空气质量由轻至中度污染转好为优良水平,ρ(PM_{2.5})较2017年同期降低30~90 μg·m⁻³及以上.

2.1.3 典型城市冬奥会同期空气质量对比分析
选择北京、张家口、石家庄、天津、太原和沈阳这6个城市对比分析2021年和2022年冬奥会期间PM_{2.5}浓度逐小时变化趋势,相关结果见图5.6城市PM_{2.5}浓度高值均集中在2月8~15日,2021年以中度及以上污染水平为主,2022年污染程度明

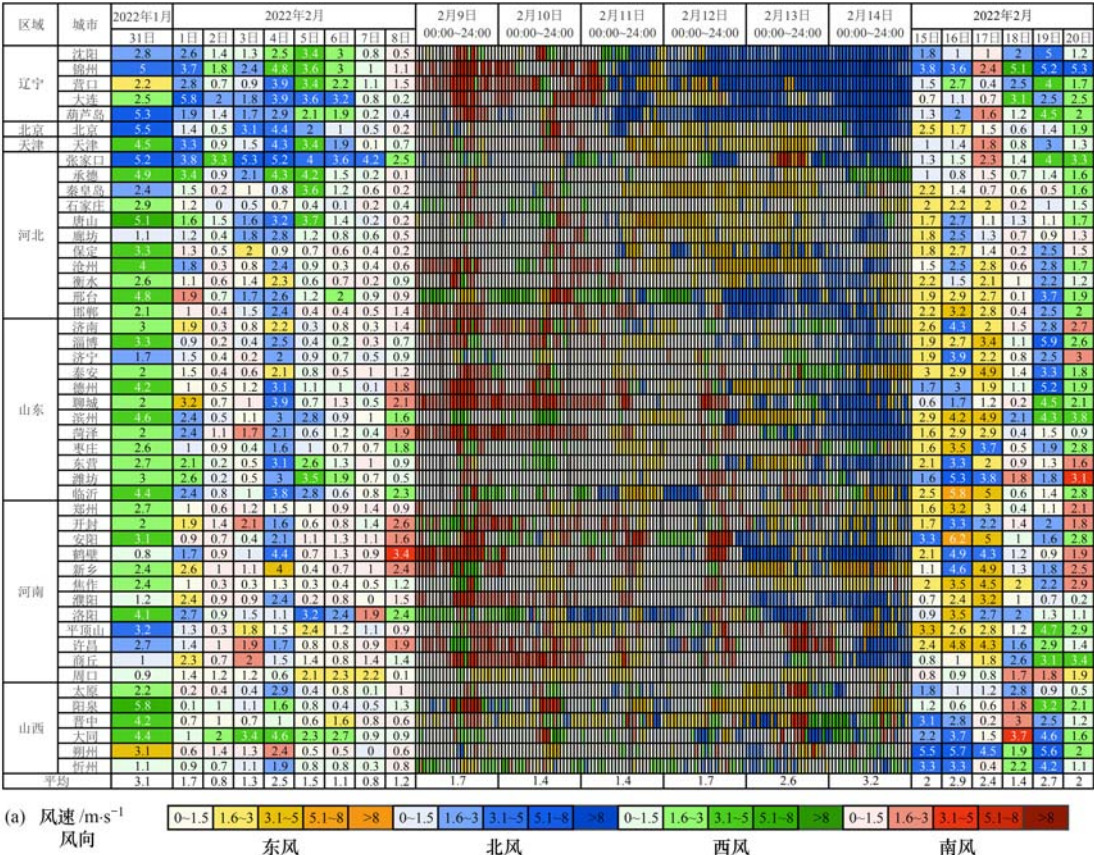
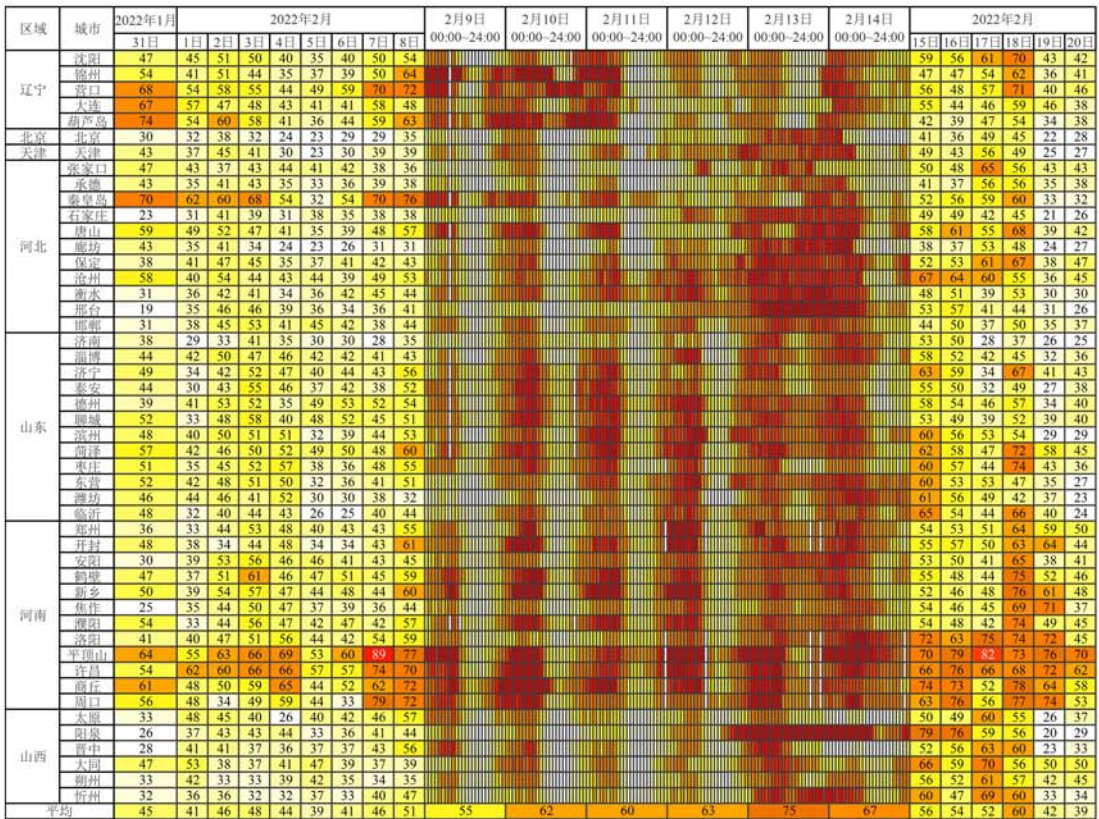


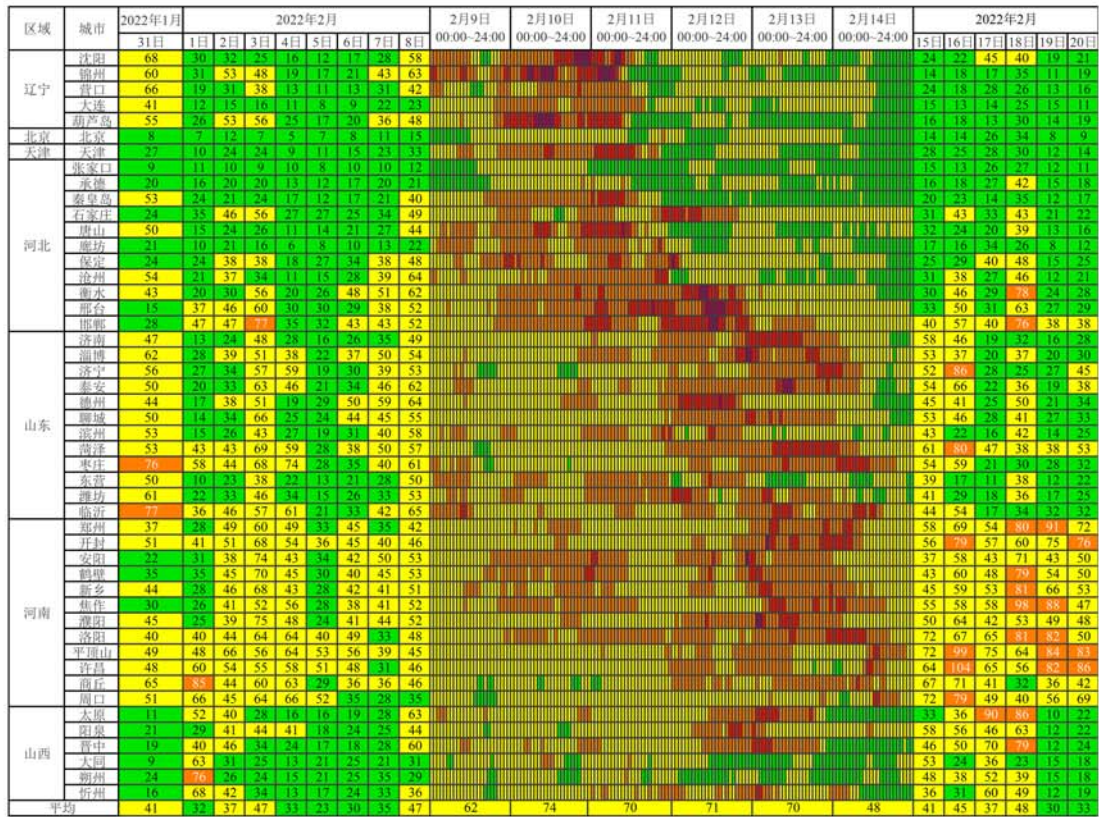
图2 2022年1月31日至2月8日、2月15~20日逐日及2月9~14日逐时风场、相对湿度和PM_{2.5}浓度分布

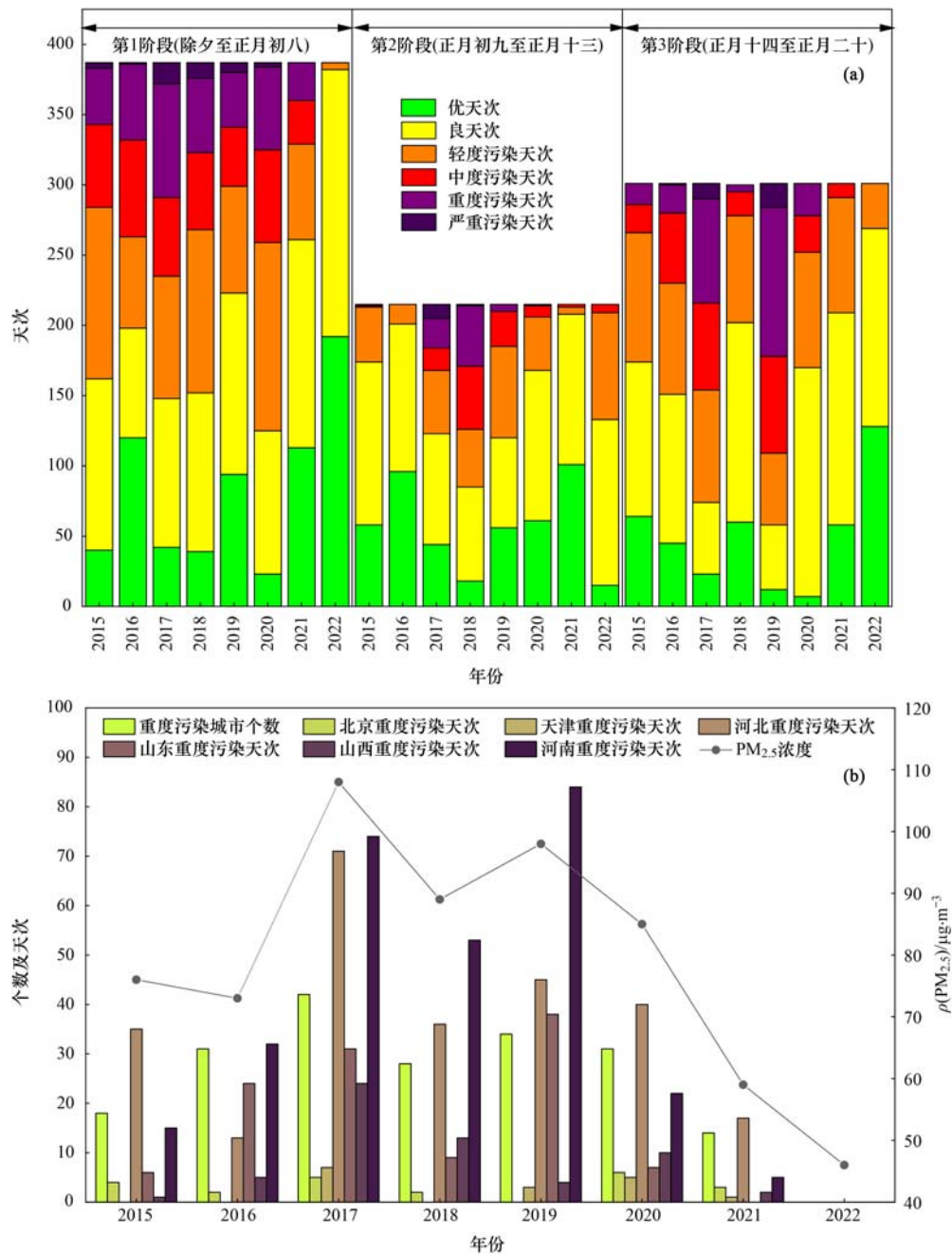
Fig. 2 Daily concentration distribution of PM_{2.5}, wind speed and direction, and relative humidity from January 31st to February 8th, February 15th to 20th and hourly from February 9th to 14th in 2022

续图2



(b) 相对湿度/% 30~35 36~40 41~45 46~50 51~55 56~60 61~65 66~70 71~75 76~80 81~85 86~90 91~95 96~100





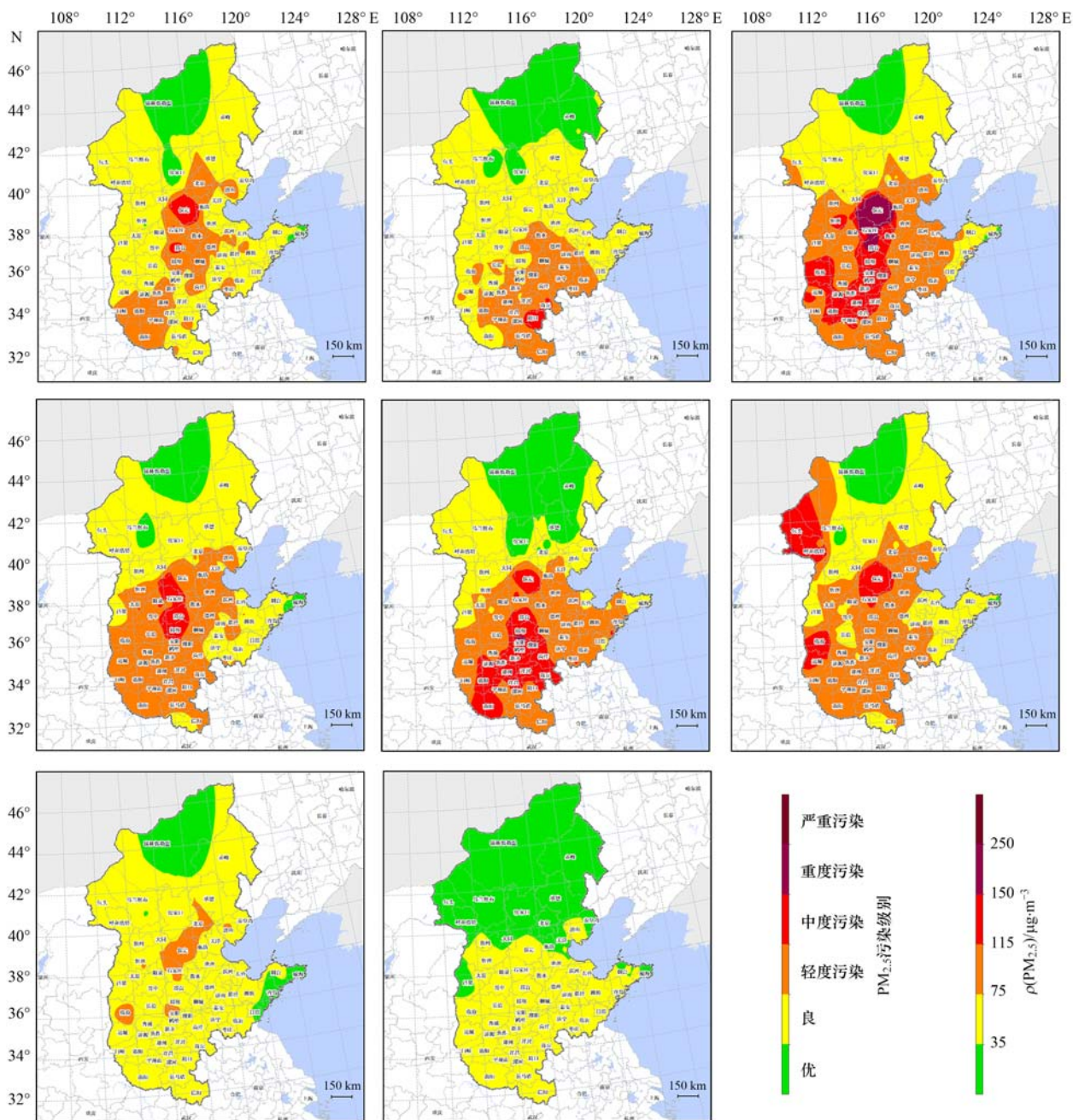
(a) 44 城市空气质量级别天次, (b) 各省市重度污染城市个数、天次和 $PM_{2.5}$ 浓度

图 3 2015 ~ 2022 年除夕至正月二十期间 44 城市空气质量级别和重度污染情况统计

Fig. 3 Air quality level and number of $PM_{2.5}$ heavy pollution in 44 cities from New Year's Eve to lunar January 20th, 2015-2022

和峰值同比降幅最大 (64.8% 和 60.6%)。2022 年区域同比呈低温、高湿和静小风的气象特征, 冬季湿度大和风力小是导致京津冀地区污染高值的主要气象因素^[42], 但同期空气质量显著转好, 说明污染源排放强度显著降低。沈阳 $PM_{2.5}$ 浓度峰值不降反增, 同比上升 10.3%, 自 2 月 9 日 21:00 污染持续累积, 于 2 月 10 日 19:00 达 $PM_{2.5}$ 重度污染水平, 出现连续 7 h 重度污染和 40 h 浓度超标, 天津和石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度在同时段先后出现快速涨幅, 达到中度污染水平, 可能与东风作用下沈阳污染跨海传输影响有关^[25]。

为进一步说明污染集中时段区域减排效果, 图 6 对比了 2021 年和 2022 年 2 月典型城市的 $PM_{2.5}$ 水溶性物质组分变化特征。除张家口外, 2022 年 2 月离子浓度同比大幅下降, 8 种水溶性无机离子浓度平均值降幅大小为: NO_3^- ($16.1 \mu g \cdot m^{-3}$) > NH_4^+ ($9.8 \mu g \cdot m^{-3}$) > SO_4^{2-} ($7.0 \mu g \cdot m^{-3}$) > Cl^- ($1.7 \mu g \cdot m^{-3}$) > Ca^{2+} ($0.4 \mu g \cdot m^{-3}$), K^+ 和 Mg^{2+} 基本不变, 各组分浓度同步下降表明燃煤、工业生产、移动交通和道路扬尘等活动明显减少。SNA (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+) 是 $PM_{2.5}$ 水溶性无机离子的最主要组



(a)2015年2月18日至3月10日,(b)2016年2月7~27日,(c)2017年1月27日至2月16日,(d)2018年2月15日至3月7日,(e)2019年2月4~24日,(f)2020年1月24日至2月13日,(g)2021年2月11日至3月3日,(h)2022年1月31日至2月20日

图4 京津冀及周边区域2015~2022年除夕至正月二十期间PM_{2.5}浓度均值空间分布

Fig. 4 Concentration distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei Region from New Year's Eve to lunar January 20th, 2015-2022

成部分,尤其是NO₃⁻占主导地位,说明燃煤与机动车尾气复合型污染源排放对大气污染占主要贡献^[28].2021年和2022年SNA浓度分别占总离子浓度的87.1%和76.7%,占PM_{2.5}浓度的68.0%和23.0%,比例大幅降低表明2022年二次污染减轻.SO₄²⁻、NH₄⁺和Cl⁻主要与燃煤和化工生产有关^[13],NO₃⁻主要来自机动车尾气排放,Ca²⁺和K⁺主要来自扬尘和生物质燃烧,北京、天津和石家庄ρ(NO₃⁻)/ρ(SO₄²⁻)同比显著降低,表明燃煤源较移动源贡献上升.

2.2 冬奥会期间污染成因分析

2.2.1 气象影响分析

气象条件对空气质量变化起关键作用,华北地区常用静稳天气指数(SWI)综合考虑温、风、湿和压等气象场要素以及逆温强度和混合层高度等大气热力动力条件^[43],SWI反映边界层结构和环流形势基本特征,对大气污染水平与垂直稀释和扩散能力有较好的指示意义.SWI大小与PM_{2.5}浓度呈显著正相关性^[44].“2+26”城市作为京津冀大气污染传输通道的重点监测区域^[23,45],与44城市污染情况密

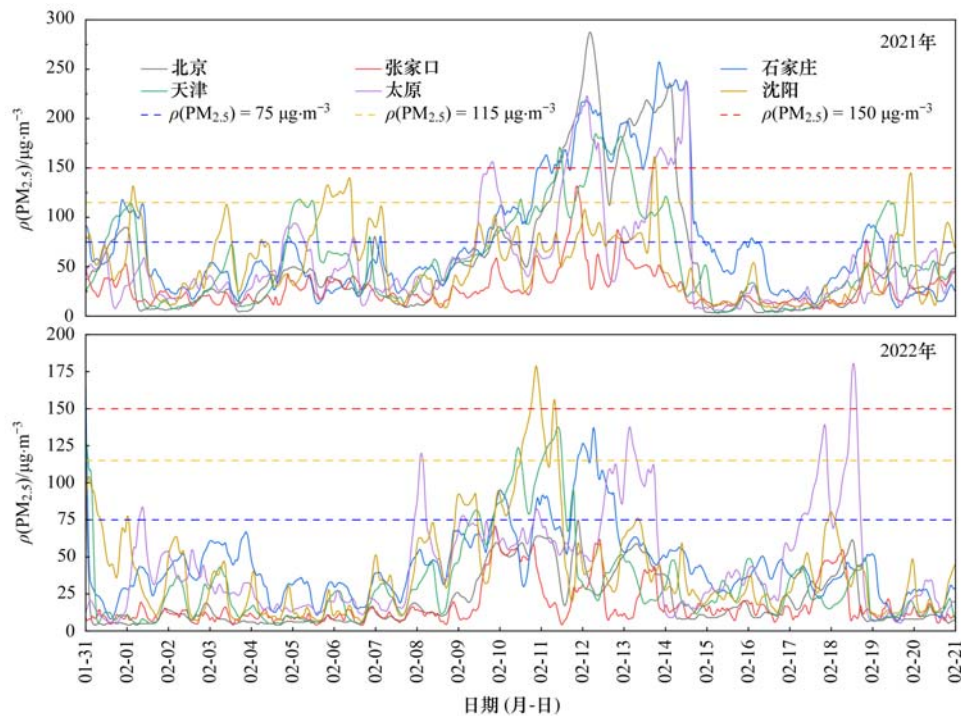


图5 2021年和2022年1月31日至2月20日6个典型城市PM_{2.5}逐小时浓度变化

Fig. 5 Hourly PM_{2.5} concentration for six typical cities from January 31st to February 20th in 2021 and 2022

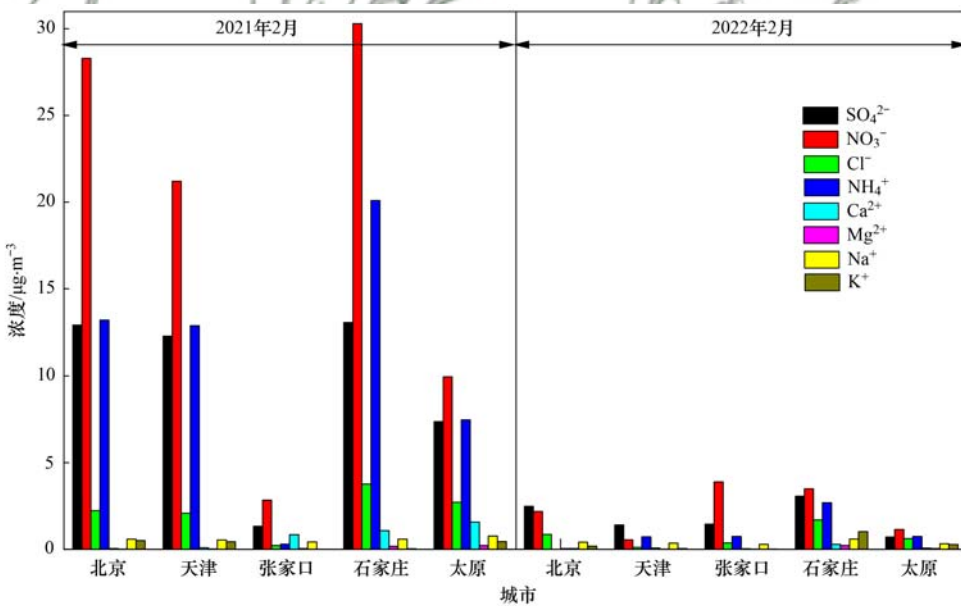


图6 2021年和2022年的2月典型城市PM_{2.5}水溶性无机离子浓度变化

Fig. 6 Temporal variations in average concentrations of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} of typical cities in February 2021 and 2022

切相关。

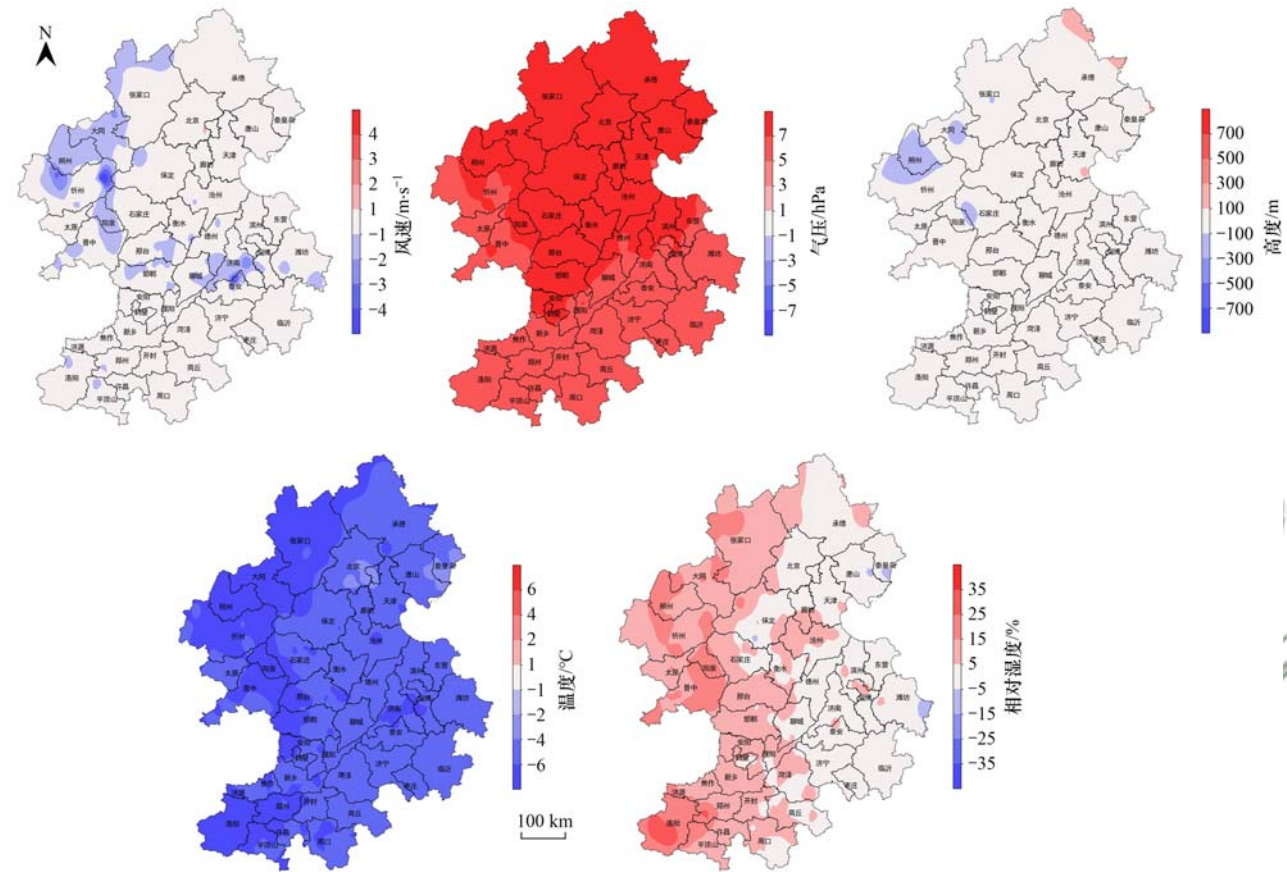
从时间上看,2022年冬奥会期间区域降温、增湿和增压明显(图7),近地面风速除大同、朔州、阳泉和济南等地同比略降低外,区域大部基本持平,平均降低 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大气湍流减弱,污染水平扩散条件同比略转差。边界层高度在 $300\sim 800\text{ m}$ 范围内同比小幅抬升,污染物垂直扩散小幅改善。区域SWI同比增加2.1(表1),大气综合扩散条件明显转差,在近地面温度较低和相对湿度较高的气象条件下,

不利于颗粒物扩散和去除,半挥发性化合物易形成PM_{2.5}的二次气溶胶组分,冬季燃煤供暖和机动车源等污染物大量排放时常伴随区域性污染过程^[46,47],但PM_{2.5}浓度同比降低23.3%,表明区域减排措施可降低污染积累程度。

从空间上看,2022年降水集中在京津冀地区,平均降水时长为5.9 h,区域东南部PM_{2.5}浓度相对较高。SWI值北低南高,北部扩散条件略好于中南部,与2021年呈相反的区域特征,北京大气扩散条

件偏有利 ($SWI < 9$)^[48], $\rho(PM_{2.5})$ 降幅最高 ($38 \mu g \cdot m^{-3}$). 受降水过程增加影响, 太行山沿山以西地区相对湿度明显升高, 洛阳、晋中和阳泉同比增加 25%~35%, 京津冀中北部和山东大部相对湿度基本持平. 山东和山西 SWI 分别为 9.6 和 9.3, 大气扩

散条件同比变化类似且偏不利, 与山东短时局地降水相比, 山西北部存在降水中心且平均降水时长同比增多 2.5 h, 降水湿清除作用较强烈, 但山东 $\rho(PM_{2.5})$ 下降 ($10 \mu g \cdot m^{-3}$) 略高于山西 ($9 \mu g \cdot m^{-3}$), 进一步表明一次污染排放管控力度显著.



红色表示基准值大于对比值, 蓝色表示基准值小于对比值, 数值越大表示差值越大, 数值为对应气象因子的平均偏差分布, 基准时间为 2022 年 1 月 31 日至 2 月 20 日, 对比时间为 2021 年 1 月 31 日至 2 月 20 日

图 7 2022 年 1 月 31 日至 2 月 20 日 44 城市气象因子同期变化

Fig. 7 Simultaneous variation in meteorological factors for 44 cities from January 31st to February 20th in 2022

表 1 2021 年和 2022 年 1 月 31 日至 2 月 20 日 $PM_{2.5}$ 平均浓度与气象因子均值

Table 1 Average $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors from January 31st to February 20th in 2021 and 2022

时间	区域	$\rho(PM_{2.5})$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	平均温度 / $^{\circ}C$	风速 / $m \cdot s^{-1}$	气压 /hPa	相对湿度 /%	边界层高度 /m	SWI	日降水小时数 /h
2021 年 1 月 31 日至 2 月 20 日	44 城市	60	4.9	2.2	1 022.4	46	423	—	1.6
	“2+26”城市	62	5.7	2.2	1 022.0	44	437	7.3	1.5
	北京	58	2.3	1.5	1 021.3	41	470	7.9	3.0
	天津	59	3.3	2.2	1 021.8	44	—	—	0
	河北	60	3.1	2.0	1 021.9	45	390	7.9	1.5
	山东	58	6.1	2.3	1 022.4	49	435	7.1	2.3
	河南	67	8.3	2.2	1 022.3	51	435	7.2	1.3
	山西	49	1.0	2.4	1 023.8	33	384	6.7	1.0
2022 年 1 月 31 日至 2 月 20 日	44 城市	46	-0.9	1.8	1 029.7	52	468	—	3.8
	“2+26”城市	46	-0.2	1.7	1029.4	50	464	9.4	3.9
	北京	20	-2.1	2.0	1 029.9	38	543	7.2	5.0
	天津	32	-1.8	2.3	1 029.3	45	—	—	6.0
	河北	38	-2.3	1.6	1 029.8	49	463	9.2	6.6
	山东	48	0.8	1.8	1 029.3	51	524	9.6	2.8
	河南	59	2.1	1.8	1 029.1	59	477	10.4	2.8
	山西	40	-6.2	1.5	1 031.2	47	483	9.3	3.5

2.2.2 减排影响分析

本地排放是影响空气质量的重要内因. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同比变化扣除同期气象影响, 得到排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高的贡献, 2022 年冬奥会期间减排措施采取前后 1 个月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅贡献计算结果见表 2. 区域协同减排阶段(1 月 31 日至 2 月 20 日), 排放水平

对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降占主要贡献且较前 1 个月贡献显著提高, 全国 339 城市和 44 城市平均提高 25%, 北京提高最多(96%), 河北、北京和天津由排放造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升的正贡献转变为负贡献. 全国和 44 城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值分别下降 $19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 河南下降最多($56\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 在全国

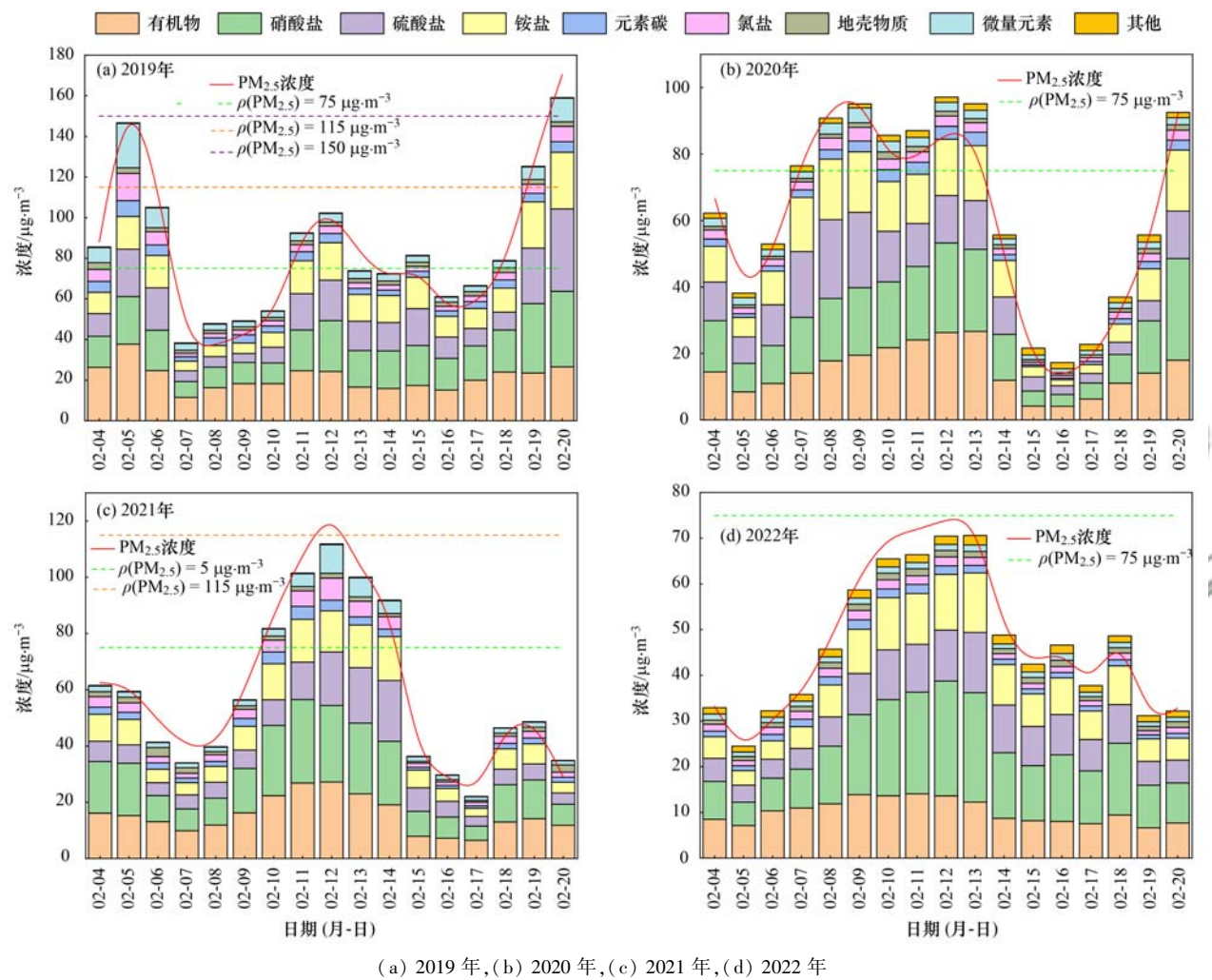


图 8 2019 ~ 2022 年 2 月 4 ~ 20 日京津冀及晋鲁豫地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分浓度变化
Fig. 8 Change in chemical compositions concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei and Shanxi-Shandong-Henan Region from February 4th to 20th, 2019-2022

表 2 冬奥会前 1 个月和冬奥会期间区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变幅及减排贡献

Table 2 Regional variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentration and emission reduction contribution in one month before and during the Beijing Winter Olympics

区域	2022 年 1 月 1 ~ 30 日					2022 年 1 月 31 日至 2 月 20 日				
	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})_{\text{max}}$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	浓度同比 变幅/%	气象贡献 率/%	排放 贡献率/%	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})_{\text{max}}$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	浓度同比 变幅/%	气象贡献 率/%	排放 贡献率/%
全国 339 城市	56	241	4	10	-6	37	313	-18	13	-31
44 城市	86	207	18	24	-6	47	131	-22	9	-31
“2+26”城市	89	207	24	24	0	48	131	-23	11	-34
北京	46	148	24	20	4	20	56	-66	-26	-92
天津	53	147	8	0	8	32	100	-46	-13	-33
河北	69	199	24	20	4	38	131	-35	-5	-30
山东	81	207	-2.5	6.5	-9	48	126	-17	6	-23
河南	115	197	24	30	-6	59	117	-11	18	-29
山西	77	195	47	91	-44	40	94	-17	38	-55

表 3 2 月 12 ~ 13 日近地面层 25 m 处 PM_{2.5} 及主要组分区域传输占比及贡献率/%

省份	城市	PM _{2.5} 区域传输占比	辽宁贡献率				
			PM _{2.5}	硝酸盐	硫酸盐	铵盐	CO
	北京	51.1	8.4	18.8	13.5	0.3	3.7
	天津	74.0	26.1	26.7	24.0	19.1	24.0
河北	石家庄	63.6	5.3	10.7	6.6	0.0	2.3
	唐山	100.0	22.6	27.0	25.5	5.4	23.5
	保定	100.0	8.8	17.5	12.4	0.2	4.3
	张家口	96.9	3.7	6.8	5.2	1.3	1.3
	沧州	68.7	18.0	15.4	14.7	11.8	22.2
	廊坊	92.1	16.1	25.3	21.6	0.6	12.1
	衡水	75.0	9.5	11.1	10.3	0.0	10.1
	邢台	98.0	4.9	8.4	0.0	0.0	0.0
山东	淄博	89.1	2.9	0.0	0.0	1.8	4.6
	德州	85.7	8.6	8.4	9.0	0	11.8
	滨州	92.5	10.8	9.3	7.9	5.0	17.1

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 峰值上升 $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的不利条件下,44 城市降低 $76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中山西削减最多 ($101 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 晋鲁豫在气象造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升的正贡献不利条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值降幅 (43.8%) 高于京津冀 (42.8%), 可见协同减排削峰效果十分显著.

对比 2019 ~ 2022 年冬奥会开闭幕式期间 (2 月 4 ~ 20 日) 京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分浓度及占比年际和空间同期变化特征 (图 8 和图 9). 从时间上看, 历年同期常出现区域性 $\text{PM}_{2.5}$ 轻至中度污染

过程,2022 年区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值为近 4 年最低, 较 2019 年最高值下降了 $37.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 有机物和 SNA 平均浓度逐年下降 (图 8), 2019 年浓度最高, 多年平均降幅分别为 21.9% 和 15.5%, 浓度降幅大小为: 有机物 (21.9%) > 硫酸盐 (20%) > 铵盐 (16.7%) > 硝酸盐 (9.7%). 尽管各组分浓度同比下降显著, SNA 对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率却呈上升态势 (图 9), 尤其是硝酸盐占比逐年上升至 30.1%, 较 2019 年上涨 7.7%, 自 2020 年代替有机物成为主导地位.

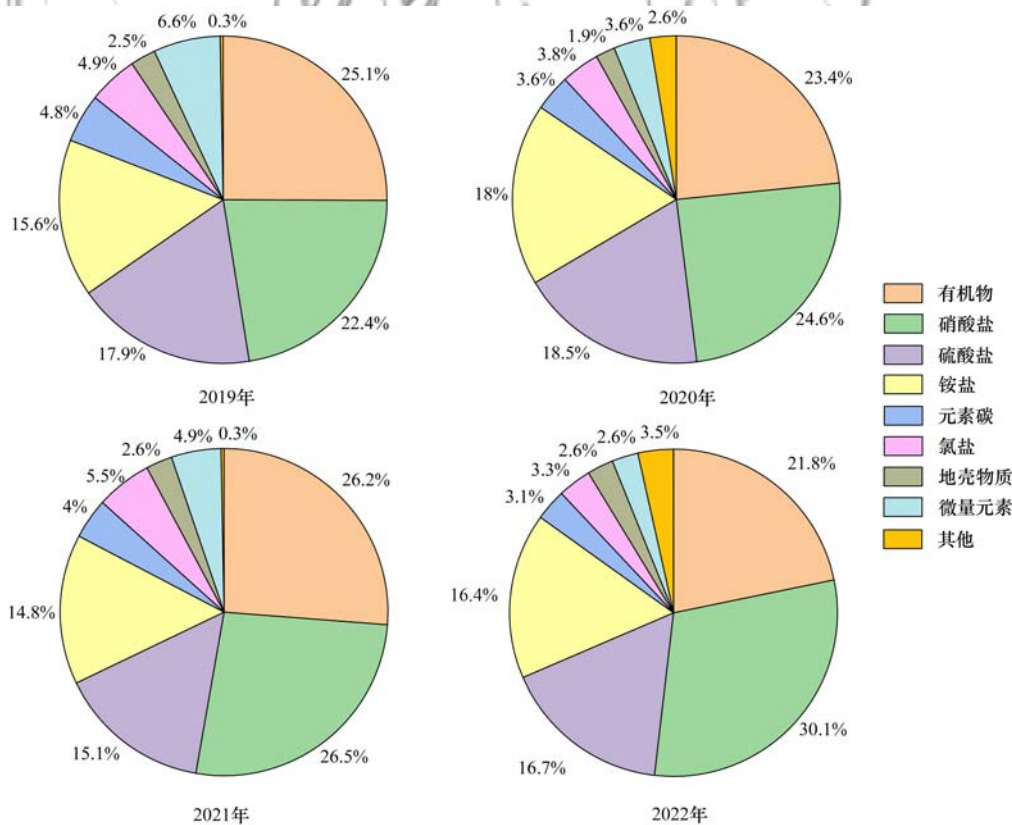


图 9 2019 ~ 2022 年 2 月 4 ~ 20 日京津冀及晋鲁豫地区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分占比变化

Fig. 9 Change in chemical composition ratios in $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei and Shanxi-Shandong-Henan Region from February 4th to 20th, 2019-2022

2022 年 SNA 占比最高 (63.2%), 较前 3 a 分别增加 7.3%、2.1% 和 6.8%, 与一次排放直接相关的 EC、微量元素、地壳元素和氯盐占 $PM_{2.5}$ 比例下降, 可见清洁能源使用、工业超低排放和重型柴油车排放标准提高等综合治理手段^[41]使交通源污染相对突出, 且冬季静稳高湿加强二次转化^[49].

从空间上看, 化学组分浓度区域差异性趋于缩小, 整体呈南高北低的空间特征, 建筑、道路扬尘和区域性沙尘导致地壳物质高值区分布较分散. 2019 年各组分浓度存在显著空间差异 (图 10), 有机物和硝酸盐以及硫酸盐、铵盐和 EC 浓度高值分别集中在区域中部 (山西和河北)、东南部 (河南和山东) 和西南部 (河南和山西), 山东对一次组分贡献突出. 2020 年以来, 近 3 年二次组分浓度变化存在较强空间一致性, 浓度范围向低值收窄, 与疫情影响下人为活动减少有关^[50], 尤其是 2022 年河北各组分浓度同步下降, 与重大活动期间南部钢铁和冶金等重点工业限排、乡镇或区县散煤“双代”排查和重型渣土车限行等区域精细化协同减排措施有关^[18,41], 而 SNA 浓度在晋鲁豫地区出现不同程度的同比涨

幅, 需加强采暖季燃煤排放 SO_2 、工业与交通源排放 NO_x 以及农业人畜与建筑工业排放 NH_3 三项前体物协同管控^[51], 同时加强区域联防联控.

2.2.3 传输影响分析

基于污染传输路线库及高值热点排查清单精准施策, 显著降低热点区域污染物浓度, 冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量显著改善. 然而, 此期间区域性污染过程却没有完全消失^[51], 2022 年 2 月 10 ~ 13 日锦州、葫芦岛和沈阳以及太行山沿线平原城市先后出现连续多小时 $PM_{2.5}$ 中至重度污染, 由 48 h 不同高度 $PM_{2.5}$ 气团前向轨迹可知 (图 11), 2 月 11 ~ 13 日 100、500 和 1 500 m 高度气团主要到达京津冀及周边区域, 东北方向气团长距离传输明显且经过污染高值区, 依此推断辽宁是区域大气污染的可能潜在源区.

为量化辽宁对京津冀鲁相关城市的污染传输影响, 区域性污染过程时段 (2 月 12 ~ 13 日) 近地面层 25 m $PM_{2.5}$ 及主要组分浓度传输贡献统计见表 3. 50% 以上 $PM_{2.5}$ 污染均来自跨区域传输, 尤其是天津、唐山、沧州和滨州等环渤海沿岸城市受辽宁污

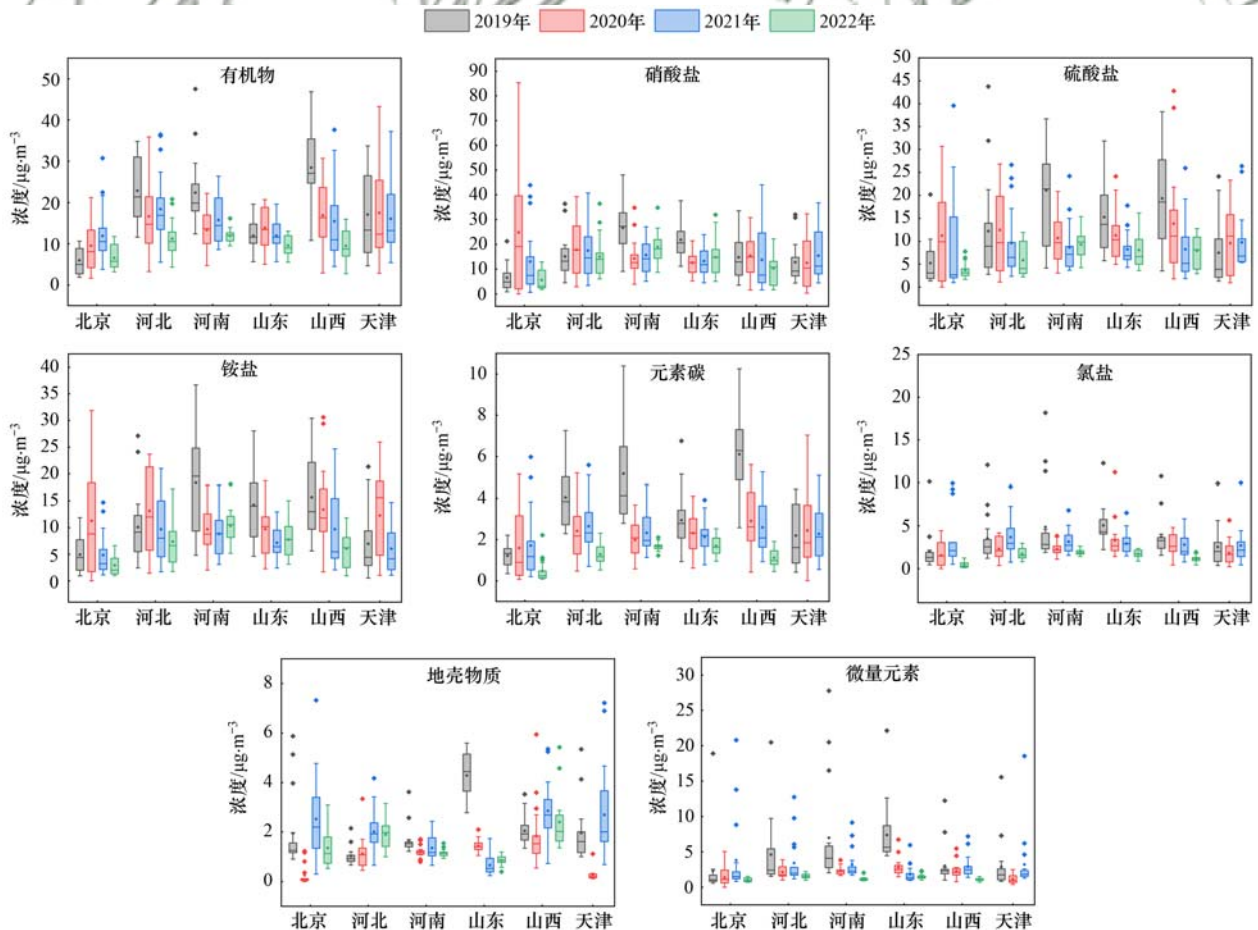
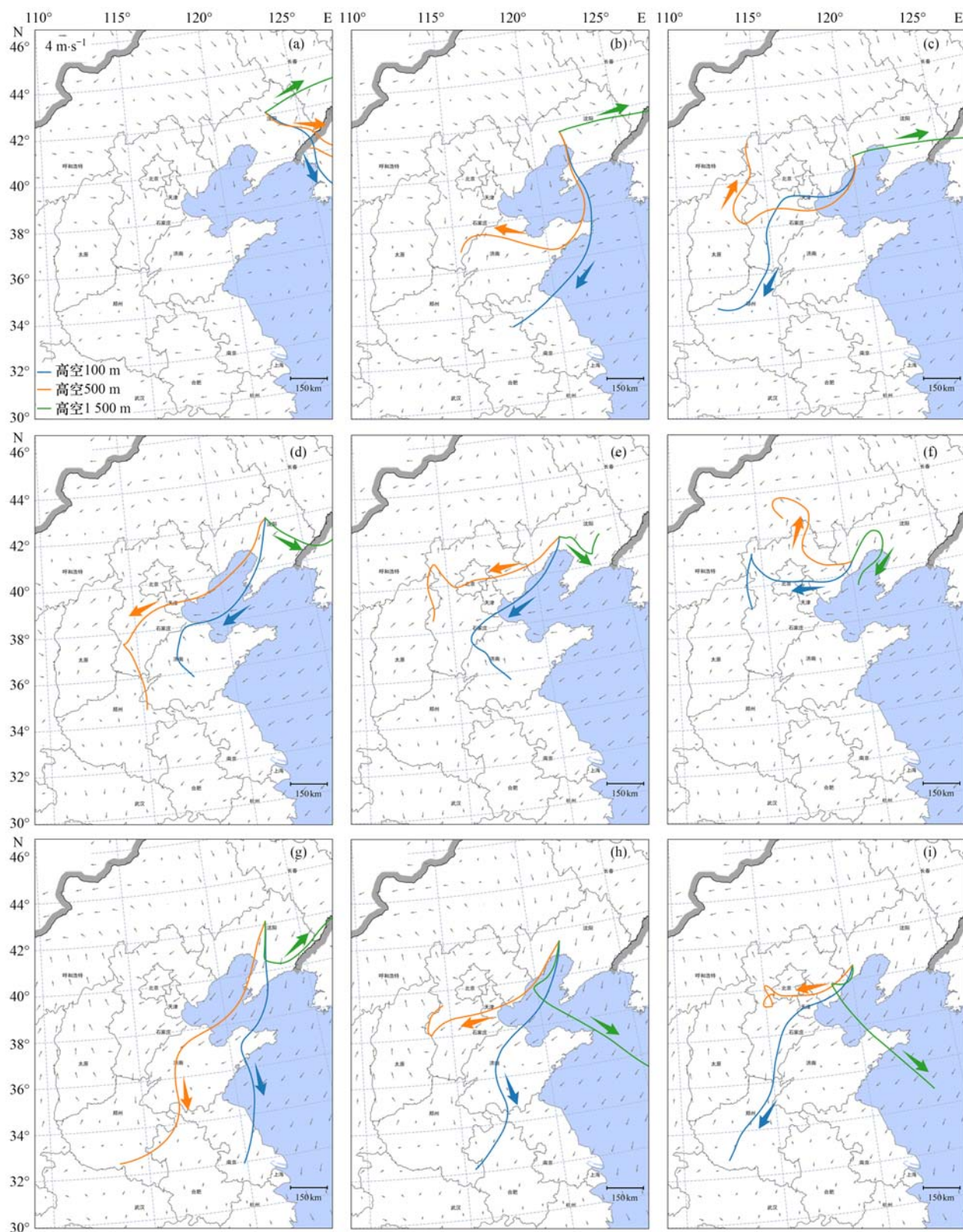


图 10 2019 ~ 2022 年 2 月 4 ~ 20 日京津冀及晋鲁豫地区 $PM_{2.5}$ 化学组分浓度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of chemical composition concentrations in $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei and Shanxi-Shandong-Henan Region from February 4th to 20th, 2019-2022



(a)2022年2月11日08:00 沈阳,(b)2022年2月11日08:00 锦州,(c)2022年2月11日08:00 葫芦岛,(d)2022年2月12日08:00 沈阳,(e)2022年2月12日08:00 锦州,(f)2022年2月12日08:00 葫芦岛,(g)2022年2月13日08:00 沈阳,(h)2022年2月13日08:00 锦州,(i)2022年2月13日08:00 葫芦岛

图 11 2月11~13日沈阳、锦州和葫芦岛 $\text{PM}_{2.5}$ 污染团前向轨迹

Fig. 11 Forward trajectories of $\text{PM}_{2.5}$ pollution mass in Shenyang, Jinzhou, and Huludao cities from February 11th to 13th

染跨海传输影响较大($>10\%$). 外源平均贡献为83.6%,其中来自辽宁的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染传输以交通源主

要贡献硝酸盐(6%~27%)和供暖期燃煤电厂主要贡献硫酸盐(5%~26%)和CO(4%~24%)为主,工

业生产贡献铵盐^[52]占比较低(<20%),可见硝酸盐和硫酸盐等二次组分易长距离传输,与王晓琦等^[22]分析的结果一致,NH₃一次污染物排放控制成效显著,但仍需加强燃煤排放和二次化学组分的管控。

因此,开展区域联防联控保障空气质量是十分必要的,建议结合地理位置和气象条件等因素综合考虑污染团的跨区域长距离传输,对本区域污染形势进行溯源分析,从而减少空气污染程度和持续时间,消除重污染过程,达到空气质量优良的目的。

3 结论

(1)2022 年冬奥会期间(1 月 31 日至 2 月 20 日)京津冀及周边区域 44 城市空气质量改善显著,未出现重污染天。PM_{2.5}浓度均值和峰值同比下降 14 μg·m⁻³和 76 μg·m⁻³,优良天占比为近 8 年最高(83.3%)。SWI 同比增加 2.1,大气扩散条件同比转差,高湿和南风易造成 PM_{2.5}区域性污染。区域 PM_{2.5}污染呈南重北轻的特点,2017~2019 年农历同期污染程度较重[ρ(PM_{2.5})>89 μg·m⁻³],高值区集中在太行山沿线及燕山传输通道城市(保定、石家庄、邢台、邯郸、安阳和新乡)。

(2)区域一次污染物减排削峰成效显著。44 城市 and 北京减排对 PM_{2.5}降幅贡献较减排前 1 个月分别增大 25% 和 96%,晋鲁豫地区在气象导致 PM_{2.5}浓度上升不利条件下,峰值降低明显(87 μg·m⁻³)。北京、天津和石家庄 ρ(NO₃⁻)/ρ(SO₄²⁻)同比显著降低,燃煤源较移动源贡献上升。

(3)2019~2022 年化学组分浓度逐年降低,空间差异性缩小,高值集中在区域中南部。二次组分浓度降幅为:有机物(21.9%)>硫酸盐(20%)>铵盐(16.7%)>硝酸盐(9.7%),硝酸盐占 PM_{2.5}比例逐年上升至 30.1%,2022 年 SNA 浓度在晋鲁豫地区出现同比涨幅,需加强前体物 SO₂、NO_x 和 NH₃ 协同管控。

(4)2022 年 2 月京津冀 PM_{2.5}区域性污染以外源传输为主(>50%)。在偏东北气流持续作用下,辽宁污染团对环渤海沿岸城市污染贡献较大(>10%),硫酸盐和硝酸盐易跨海长距离传输。

参考文献:

- [1] 刘倬诚,牛月圆,吴婧,等. 山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1306-1314.
- [2] Liu Z C, Niu Y Y, Wu J, et al. Characteristics and cause analysis of heavy air pollution in a mountainous city during winter[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1306-1314.
- [3] Ge B Z, Wang Z F, Lin W L, et al. Air pollution over the North China Plain and its implication of regional transport: a new sight from the observed evidences[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 29-38.
- [4] Bei N F, Zhao L N, Wu J R, et al. Impacts of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): a case study[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 429-438.
- [5] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, et al. Severe haze in Northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(18): 8657-8666.
- [6] Zhao P S, Dong F, He D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(9): 4631-4644.
- [7] 薛文博,史旭荣,严刚,等. 气象条件和排放变化对 2020 年春节前后华北地区重污染过程的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(2): 314-324.
- [8] Xue W B, Shi X R, Yan G, et al. Impacts of meteorology and emission variations on the heavy air pollution episode in North China around the 2020 Spring Festival[J]. Science China Earth Science, 2021, 64(2): 329-339.
- [9] 张莹,贾旭伟,杨旭,等. 中国典型代表城市空气污染特征及其与气象参数的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(2): 70-79.
- [10] Zhang Y, Jia X W, Yang X, et al. Characteristics of air pollution and its relationship with meteorological parameters in typical representative cities of China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(2): 70-79.
- [9] 肖腾,林廷坤,严宇,等. 石家庄市秋冬季大气环流型下的气象和 PM_{2.5}污染特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 414-424.
- [11] Xiao T, Lin T K, Yan Y, et al. Meteorological and pollution characteristics of PM_{2.5} under atmospheric circulation types in autumn and winter in Shijiazhuang[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(3): 414-424.
- [10] Wang Y, Liu H W, Mao G Z, et al. Inter-regional and sectoral linkage analysis of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 1436-1444.
- [11] 滑申冰,师华定,王堃,等. 2016-2017 年冬季华北地区一次重污染过程的气象条件分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 47-53.
- [12] Hua S B, Shi H D, Wang K, et al. Analysis of meteorological conditions for a heavy pollution process in North China during 2016-2017 winter[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(4): 47-53.
- [12] 周静博,段菁春,王建国,等. 2019 年元旦前后石家庄市重污染过程 PM_{2.5}污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 39-49.
- [13] Zhou J B, Duan J C, Wang J G, et al. Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} during heavy pollution in Shijiazhuang city around New Year's Day 2019[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 39-49.
- [13] 张蒙,韩力慧,刘保献,等. 北京市冬季重污染期间 PM_{2.5}及其组分演变特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2829-2838.

- Zhang M, Han L H, Liu B X, *et al.* Evolution of PM_{2.5} and its components during heavy pollution episodes in winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(7): 2829-2838.
- [14] 肖致美, 徐虹, 李鹏, 等. 京津冀区域重污染期间PM_{2.5}垂直分布及输送[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4303-4309.
- Xiao Z M, Xu H, Li P, *et al.* Vertical distribution and transport of PM_{2.5} during heavy pollution events in the Jing-Jin-Ji Region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4303-4309.
- [15] 梅梅, 朱蓉, 孙朝阳. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(3): 270-281.
- Mei M, Zhu R, Sun C Y. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2+26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Climate Change Research*, 2019, **15**(3): 270-281.
- [16] 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.
- [17] 张哈宇, 温维, 程水源, 等. 京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(4): 1209-1220.
- Zhang H Y, Wen W, Cheng S Y, *et al.* Study on typical heavy pollution process and feedback effect in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(4): 1209-1220.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Contributions of inter-city and regional transport to PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and its implications on regional joint air pollution control [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1191-1200.
- [21] Li N, Zhang X L, Shi M J, *et al.* Does China's air pollution abatement policy matter? An assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on a multi-regional CGE model [J]. *Energy Policy*, 2019, **127**: 213-227.
- [22] 王晓琦, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀及周边地区PM_{2.5}传输规律研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [23] 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 等. “2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1212-1225.
- Zhu R R, Wang X F, Wang W, *et al.* Analysis of pollution characteristics, meteorological impact, and forecast retrospective during the Spring Festival and the Lantern Festival in “2+26” cities [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1212-1225.
- [24] 刀谓, 吉东生, 张显, 等. 京津冀及周边地区采暖季PM_{2.5}化学组分变化特征[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 1-10.
- Dao X, Ji D S, Zhang X, *et al.* Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas during the heating period [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 1-10.
- [25] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, *et al.* Evolution of the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in China- a case study from the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 225-233.
- [26] 孙初, 肖致美, 陈魁, 等. 京津冀重污染大气污染物输送路径分析[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(12): 159-164.
- Sun R, Xiao Z M, Chen K, *et al.* The transmission paths analysis of heavy air pollution episode in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(12): 159-164.
- [27] 刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 等. 北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3895-3902.
- Liu Y C, Man R Q, Qiu Y T, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution in Beijing during the historical period of the 2022 Olympic winter games [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3895-3902.
- [28] Chu B W, Ma Q X, Liu J, *et al.* Air Pollutant correlations in China: secondary air pollutant responses to NO_x and SO₂ control [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(10): 695-700.
- [29] Zhang H, Yin S S, Bai L, *et al.* Establishment and evaluation of anthropogenic black and organic carbon emissions over central plain, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **226**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117406.
- [30] Liu H J, Tian H Z, Zhang K, *et al.* Seasonal variation, formation mechanisms and potential sources of PM_{2.5} in two typical cities in the central plains urban agglomeration, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 657-670.
- [31] 褚晰晰, 殷丽娜, 邵盼阳, 等. 中国典型区域2017-2020年期间大气重污染的时空特征与演变[J]. *中华疾病控制杂志*, 2021, **25**(10): 1133-1138.
- Chu Y X, Yin L N, Shao P Y, *et al.* The spatio-temporal variation of heavy air pollution in typical regions of China from 2017 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2021, **25**(10): 1133-1138.
- [32] 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 等. 2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, *et al.* Assessment of emergency emission reduction effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding area (“2+26” cities) from October to December 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- [33] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对PM_{2.5}污染改善贡献评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 867-875.
- Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 867-875.
- [34] Tong P F, Zhang Q R, Lin H M, *et al.* Simulation of the impact

- of the emergency control measures on the reduction of air pollutants: a case study of APEC blue [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(2), doi: 10.1007/s10661-019-8056-1.
- [35] 张章, 刘保献, 安欣欣, 等. 北京市传统春节假期空气质量特征研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 102-113.
Zhang Z, Liu B X, An X X, *et al.* A study on the air quality in Beijing during the Spring Festival [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 102-113.
- [36] 高阳, 韩永贵, 黄晓宇, 等. 基于后向轨迹模式的豫南地区冬季 PM_{2.5} 来源分布及传输分析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(3): 538-548.
Gao Y, Han Y G, Huang X Y, *et al.* PM_{2.5} source distribution and transmission in winter in southern Henan Province based on backward trajectory model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(3): 538-548.
- [37] HJ 656-2013, 环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范[S].
- [38] 环境保护部. 关于发布《大气颗粒物来源解析技术指南(试行)》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201308/t20130820_257699.htm, 2020-08-29.
- [39] 许艳玲, 薛文博, 雷宇. 气象和排放变化对 PM_{2.5} 污染的定量影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4546-4551.
Xu Y L, Xue W B, Lei Y. Impact of meteorological conditions and emission change on PM_{2.5} pollution in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4546-4551.
- [40] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于加强重污染天气应对夯实应急减排措施的指导意见(环办大气函[2019]648号)[R]. 北京: 生态环境部, 2019, 1-11.
- [41] 何伟, 张文杰, 王淑兰, 等. 京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1696-1703.
He W, Zhang W J, Wang S L, *et al.* Effects and improvement suggestions on air pollution joint prevention and control mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1696-1703.
- [42] 李慧, 王淑兰, 张文杰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 172-184.
Li H, Wang S L, Zhang W J, *et al.* Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas (“2+26” cities) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 172-184.
- [43] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4340-4351.
Zhang H D, Lv M Y, Zhang B H, *et al.* Analysis of the stagnant meteorological situation and the transmission condition of continuous heavy pollution course from February 20 to 26, 2014 in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4340-4351.
- [44] 张敏, 蔡子颖, 韩素芹. 天津静稳指数建立及在环境气象预报和评估中的应用[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(12): 4453-4460.
Zhang M, Cai Z Y, Han S Q. Establishment of stable weather index of Tianjin and its application in environmental weather forecast and assessment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(12): 4453-4460.
- [45] 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 等. 汾渭平原临汾市2019年春节期间大气污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5122-5130.
Liu W J, Hu T P, Mao Y, *et al.* Characteristics and origin analysis of air pollution during the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5122-5130.
- [46] 陈锦超, 董雪玲, 张婉, 等. 北京市霾天 PM_{2.5} 污染特征及其与气象因素的关系[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(8): 87-94.
Chen J C, Dong X L, Zhang W, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in haze days in Beijing and its relationship with meteorological factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(8): 87-94.
- [47] Zhu X W, Tang G Q, Guo J P, *et al.* Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air pollution in southern Hebei [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4897-4910.
- [48] 马学款, 张碧辉, 桂海林, 等. APEC 前后北京几次静稳天气边界层特征对比分析[J]. *气象*, 2017, **43**(11): 1364-1373.
Ma X K, Zhang B H, Gui H L, *et al.* Comparative analysis of boundary layer characteristics during stable weather over Beijing around APEC [J]. *Meteorological Monthly*, 2017, **43**(11): 1364-1373.
- [49] Tang M, Liu Y, He J, *et al.* In situ continuous hourly observations of wintertime nitrate, sulfate and ammonium in a megacity in the North China plain from 2014 to 2019: temporal variation, chemical formation and regional transport [J]. *Chemosphere*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127745.
- [50] Fan C, Li Y, Guang J, *et al.* The impact of the control measures during the COVID-19 outbreak on air pollution in China [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(10), doi: 10.3390/rs12101613.
- [51] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji Region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [52] Zhu C Y, Tian H Z, Hao Y, *et al.* A high-resolution emission inventory of anthropogenic trace elements in Beijing-Tianjin-Hebei(BTH) Region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 452-462.

CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)