

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析

廉涵阳¹, 杨欣^{2*}, 张普¹, 陈义珍², 杨小阳², 赵好希², 何友江², 赵丹婷³

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 济南 250013)

摘要: 为研究北京冬季霾污染过程的污染特征和成因, 以北京 2019 年 12 月一次典型 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程为分析对象, 利用气溶胶垂直探测资料、边界层气象场和近地湍流资料, 对霾不同污染阶段的特征与边界层理化特性的演变进行综合分析。结果表明: ①观测期间北京共经历两次污染生消, 历时 5 d, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度最高 $220 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过重度污染标准的时次占比 53%。②高空稳定形势和地面均压场配置下, 来自北京西南城市群地表的气溶胶和水汽传输 (占比 48%), 在近地层偏南弱风 (风速 $1\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 贴地强逆温 [$0.8 \text{ K}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$] 和高湿 (相对湿度 80% 以上) 等不利扩散的气象条件下不断吸湿增长, 加之本地污染排放, 成为霾日维持的主要原因。且随污染加重, 气溶胶球形特征逐步显著 (退偏比从 0.05 降至 0.02)。③各湍流统计量 (湍流强度、摩擦速度和湍流动能) 在重污染发生与结束前提前出现规律性异常突降 (小时波动率 77%) 与激增 (超过一个量级的峰值) 现象, 表明湍流统计量可作为重污染过程发生和结束的预报指标, 其中湍流强度响应提前的时长与其峰值后的持续湍流强弱有关。污染累积阶段摩擦速度 ($0.04\sim 0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、湍流强度 (均值 $0.678 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$) 和湍流动能 (均值 $0.643 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$) 等均维持在较低水平, 底层大气混合扩散能力较差, 对污染持续累积起重要作用。另外晴天和霾天感热通量均由地面向大气输送, 且呈明显的日单峰变化特征, 霾天感热通量 ($20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 较晴天小 ($60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$); 潜热通量则全程在 0 值附近。

关键词: 霾污染特征; 污染成因; 气流输送; 边界层结构; 湍流特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2121-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202008258

Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019

LIAN Han-yang¹, YANG Xin^{2*}, ZHANG Pu¹, CHEN Yi-zhen², YANG Xiao-yang², ZHAO Yu-xi², HE You-jiang², ZHAO Dan-ting³

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Shandong Environmental Protection Science Research and Design Institute Co. Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In order to study the pollution characteristics and causes of winter haze pollution in Beijing, a typical $\text{PM}_{2.5}$ pollution process in Beijing in December 2019 was used as the analysis object using aerosol vertical detection data, boundary layer meteorological field and near-ground turbulence data, and the difference in haze. The characteristics of the pollution stage and the evolution of the physical and chemical characteristics of the boundary layer were comprehensively analyzed. The results showed that ① the pollution process in Beijing during the observation period lasted 5 d and experienced two generations and eliminations. The maximum hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration was $220 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and the time exceeding the severe pollution standard was 64 h, thereby accounting for 53% of the total time. ② The aerosol optical properties and meteorological field observation data showed that the pollution originated from the regional transmission of aerosols and water vapor on the surface of the southwest urban agglomeration in Beijing, which accounted for 48% of the total pollution transmission, followed by a stable high-altitude situation and ground pressure field configuration. The near-surface field maintained weak southerly winds (wind speed: $1\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), a strong inversion temperature close to the ground [$0.8 \text{ K}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$], high humidity (relative humidity above 80%), and other unfavorable diffusion weather conditions, thereby promoting the accumulation of pollutants and the conversion of moisture absorption. Superimposing local pollution emissions were the main reasons for the maintenance of haze days. In addition, the near-ground extinction coefficient increased from 0.070 km^{-1} to 5.954 km^{-1} , and the depolarization ratio decreased from 0.05 to 0.02 during the two pollution generation and disappearance processes, thereby indicating that the spherical characteristics of aerosols gradually became significant as the pollution increased. ③ The analysis of the turbulence observation data showed that the characteristic quantities of different pollution stages were significantly different and negatively correlated with the pollutant concentration. Before the occurrence of heavy pollution, the turbulence statistics (turbulence intensity, friction velocity, and turbulent kinetic energy) suddenly decreased from high values (the hourly variation rate was 77%, thereby far exceeding the daily fluctuation of 33%), and the turbulence intensity responded first. During the pollution accumulation stage, the friction velocity ($0.04\sim 0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), turbulence intensity (average: $0.678 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$), and turbulence energy (average: $0.643 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$) were maintained at a low level, and the bottom atmosphere had a poor mixing and diffusion ability, which is important for

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-10-23

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0101, DQGG0304); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213501)

作者简介: 廉涵阳(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气边界层物理探测, E-mail: 809711390@qq.com

* 通信作者, E-mail: yangxin@craes.org.cn

continuous pollution accumulation. Four hours before the end of the pollution event, the turbulence intensity again showed a sharp increase (increment of more than one order of magnitude); thus, the turbulence intensity can be used as a predictive indicator of the occurrence and end of a heavy pollution event, and the response time is the same as the continuous turbulence intensity after the turbulence peak. In addition, the sensible heat fluxes on sunny days and haze days were both transported from the ground to the atmosphere, and showed clear daily single-peak changes. The sensible heat flux on haze days ($20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) was smaller than that on sunny days ($60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). The latent heat flux was approximately $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in the whole process. ④ There was a feedback effect between the meteorological conditions of the pollution layer and the boundary layer. On the one hand, unfavorable diffusion of the meteorological conditions was conducive to the accumulation of pollution. On the other hand, the aerosol layer and water vapor cooling effect that accumulated near the ground were worse than the night cooling radiation on the inversion layer. The contribution was greater, thereby further inhibiting the development of turbulent motion and ultimately resulting in increased pollution.

Key words: haze pollution characteristics; pollution causes; air transport; boundary layer structure; turbulence characteristics

近年来以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的大气重霾过程频发,成为我国环境领域的研究热点,针对这个问题,国内学者在污染时空分布特征和形成机制方面做了大量研究^[1,2]. 结果表明, $\text{PM}_{2.5}$ 暴发增长的途径分为本地排放、区域传输和二次转化,在污染源排放量稳定的情况下,边界层结构与气象条件对华东地区 $\text{PM}_{2.5}$ 长时域变化趋势影响占 48%,对京津冀重污染过程的相对贡献高达 84%^[3]. 其主要驱动因子包括:环流形势、风场、温度、相对湿度、边界层高度和湍流等^[4~6].

然而这些影响因子对霾时空分布的具体影响效果尚未得到有效研究. 为解决这个问题国内众多学者围绕天气系统内各要素对霾时空分布的因果影响开展了进一步研究^[7~9]. 有学者对污染年际变化特征与典型污染天气的环流形势进行了分型统计^[10~12]. 有学者采用天气分析与数值模拟结合的方式讨论了不同类型污染天气中典型通道对区域污染传输的贡献^[13,14],如陈桃桃等^[15]指出西北气流传输是兰州 2013~2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际上升的主要原因,而局地气象要素的贡献未做讨论. 有学者统计发现华北地区长时域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与局地风速和气压呈负相关、与相对湿度呈正相关^[16,17],而江西由于吸湿气溶胶排放较少且相对湿度本地值较高,污染浓度与相对湿度呈负相关,与华北地区研究结果相反^[18~20]. 还有学者指出清洁与污染时段的湍流物理量具有显著差异^[21,22],稳定层结下的弱湍流是污染累积的重要动力因素^[23]. 上述研究深入认识了天气系统内各要素在霾日发生和维持机制中发挥的重要作用.

北京市地处华北平原北部,北部、东北部和西部三面环山的特殊“簸箕状”地理环境与不利扩散的气象条件是污染累积,空气质量变差的客观条件^[24,25]. 目前针对北京市霾日气象成因分析也已有很多研究结论,北京秋冬季西南和东南典型污染传输通道对重污染日的贡献率高达 21.6%^[26]. 有学者指出弱风、逆温和高湿环境是北京霾日典型气象特

征^[27]. 有学者基于长时域污染变化与气象条件的关系建立了污染预报方程^[28]. 还有学者研究了霾演变过程边界层湍流特征量的变化规律,但对污染阶段交替中出现的异常突降与峰值信号未多做关注,且以往研究只针对单一要素与污染的因果关系,缺乏精细化联合观测资料对短时次霾过程中不同阶段的生消演变特征与成因进行综合分析. 因此本文以北京 2019 年 12 月 5~10 日典型 $\text{PM}_{2.5}$ 强霾污染过程为主要研究对象,通过多元化常规气象资料与湍流资料的联合观测,揭示了霾不同阶段的污染特征,剖析北京地区边界层内各指标在霾天气发生发展过程中的指示意义,揭示该次污染成因,以期对北京冬季重污染发生机制有深入了解.

1 材料与方法

本文采用的主要观测数据均来自中国环境科学研究院大气环境研究所楼顶的大气物理观测站 ($40^{\circ}02'27.8''\text{N}$ 、 $116^{\circ}24'44.8''\text{E}$ 、海拔高度 55 m,观测高度 14 m),周边无明显大气污染排放源,1 km 范围内植被和建筑物高度参差不齐,属于典型不均匀城市下垫面.

其中边界层气象及污染探测资料分别为边界层风场(法国 Leosphere 公司的 WINDCUBE 100S 型多普勒风廓线激光雷达)、气溶胶消光系数和退偏比等垂直光学参数(美国 Sigma Space 公司的 MPL-4B 型微脉冲激光雷达)、垂直温度和相对湿度场(美国 Rsdimetris 公司 MP-3000A 型微波辐射计)以及地面能见度(英国 Biral 公司 VPF-730 能见度仪)和太阳辐射值(荷兰 Kipp&Zonen 公司 CM6B 总辐射表),监测期间各项仪器定时维护检查,数据质量和可靠性经过检验,各项数据经严格质控后均取小时值.

湍流观测资料是以可实时高精度观测的三维超声风速和水汽密度(美国 Campbell 公司 Model CSAT-3 三维超声风速仪和 EC155 气体分析仪)为原始资料,30 min 为时间周期处理并取平均值得到

的湍流统计特征量,仪器采样频率 10 Hz,通量源区为观测站 800 ~ 1 400 m 范围内。针对环境因子对传感器的声光程干扰、仪器架设水平和空气湿度影响等问题,对数据进行合理性和可靠性评估,完成去除野点、平面坐标旋转、频率响应修正和超声虚温修正等数据预处理工作。数据通过稳定性和充分发展性检验。受客观条件(观测高度与通量源区下垫面特性)影响,湍流观测数据的代表性仅以该站点为背景,用做与污染浓度趋势关系的定性分析。其中摩擦速度是速度的特征量,代表风切变的机械力对湍流发展的影响;湍流强度(I)是衡量湍流强弱的标准;湍流动能(TKE)是研究湍流活动能量强弱的量度。

气流后向轨迹计算采用美国国家环境预报中心的 GDAS 全球再分析同化资料,基于搭载 HYSPLIT 模块的 MeteoInfo 软件对气流来向进行模拟和聚类分析。后向轨迹模式起点设为中国环境科学研究院大气物理观测站,考虑到北京城区边界层物理结构特征,轨迹起始高度选择 300 m,后向时间尺度设为 24 h,以反映北京气流输送规律,定位污染来源方向。

地面 $PM_{2.5}$ 监测数据为中国环境监测总站公开的逐小时数据,选取与大气物理观测站距离最近的奥体中心站点($40^{\circ}00'31''N$ 、 $116.40^{\circ}07'E$ 、海拔高度 45 m),污染浓度水平分布差异不大,因此数据同步性较好,可代表观测站源区内的污染演变过程。

2 结果与分析

2.1 北京冬季霾污染变化

北京地区重污染天气大多集中在秋冬季,以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物,统计发现 2016 ~ 2019 年北京冬季(12 月 ~ 次年 2 月) $PM_{2.5}$ 小时浓度均值分别为 95.21、52.0、51.92 和 54.4 $\mu g \cdot m^{-3}$,整体空气质量大幅好转,其中 2017 年改善力度最大,同比 2016 年 $PM_{2.5}$ 浓度均值下降 44%。文献[29]中将平均相对湿度 < 80% 的灰霾(能见度 < 10.0 km,平均相对湿度 < 95% 且排除该时段内出现降水、沙尘暴等天气现象造成的视程障碍,即可判识为灰霾)定义为干霾,平均相对湿度在 80% ~ 95% 之间的灰霾定义为湿霾。结合图 1 中霾出现频次及 $PM_{2.5}$ 污染等级分布^[30]来看,2017 年霾日出现频率下降了 31.77%,干霾占比增加,整体空气质量优良时次增加了 15.86%,重度污染以上时次减少 16.2%。2018 ~ 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 浓度改善有所放缓,其中 2019 年冬季优良小时数仅比上年增加 2.24%, $PM_{2.5}$ 浓度峰值均降至 250 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以下,不再出现严重污染等级事件,但值得注意的是,2018 ~ 2019 年冬季霾日出现反弹,且 2019 年湿霾占比增加,重度污染等级时次增加 3.15%,表明在近年空气质量大幅改善进程中,极端气象条件下仍会频繁出现强霾天气^[31],如 2019 年 12 月初就出现了一次全国范围的重污染过程。

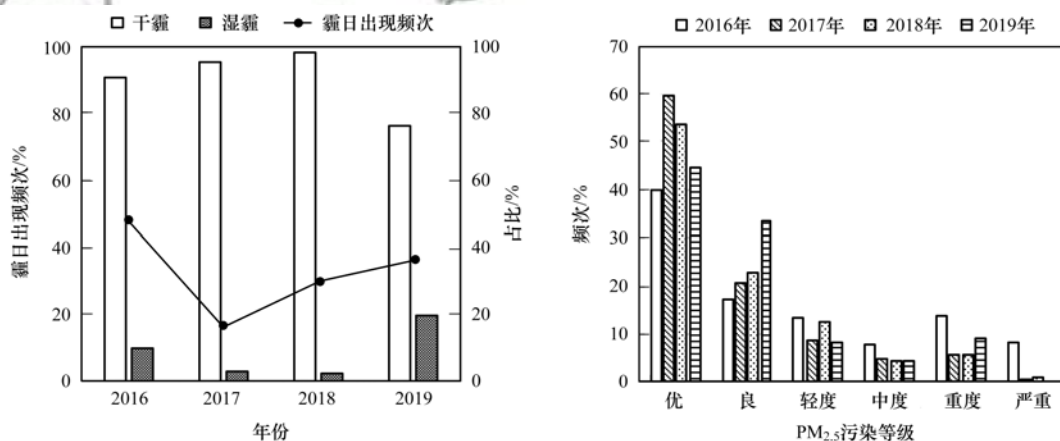


图 1 2016 ~ 2019 年北京冬季(12 月 ~ 次年 2 月)霾出现频次及 $PM_{2.5}$ 污染等级分布

Fig. 1 Frequency distribution of haze and the $PM_{2.5}$ pollution level in winter (December-February) in Beijing from 2016 to 2019

2.2 典型霾过程分析与讨论

2019 年 12 月 5 ~ 10 日,全国范围内出现空气污染过程,其中北京、天津、河南和山东西部等地处于重度霾天气^[32]。北京市的污染过程持续 5 d,首要污染物为 $PM_{2.5}$,期间无降水。与过往冬季同期污染相比,此次污染过程具有强度小,波及范围广,持续时间长且消散速度极快的特点。

图 2 为 2019 年 12 月 5 ~ 10 日北京市地面 $PM_{2.5}$ 逐小时浓度、能见度、温度、相对湿度、地面风场和太阳辐射随时间变化。依据污染演变情况,可将整个过程分为 P1 ~ P4 这 4 个阶段。P1(12 月 5 日早间至 6 日午后)轻微霾过程:环境空气质量从优($PM_{2.5}$ 小时浓度最低 14 $\mu g \cdot m^{-3}$)发展至轻度污染($PM_{2.5}$ 小时浓度达 90 $\mu g \cdot m^{-3}$),相对湿度从

17.70% 增至 51.03%；太阳辐射值存在明显的日单峰变化特征(日最高值在 $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右)；地表风速从 $2.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下且风向多变；能见度从 57.11 km 降至 10 km 以下,且与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈明显负相关. P2(12 月 6 日夜间至 7 日早间)污染缓解过程: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 $26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,能见度有所回升. P3(12 月 7 日午间至 10 日早间)重度霾过程:第二次污染暴发阶段空气质量跃升至重度污染水平, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度从 $26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 增至 $166 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 后维持在高值,最高达 $210 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,期间近地层持续增湿,相对湿度达 80% 以上,仅在 12 月 9 日午后出现短暂下降;太阳辐

射日最高值降至 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右;地面主导风向为稳定偏东风,整体风速较小,均值 $0.67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;大气能见度维持在 1 km 左右. P4(12 月 10 日 12:00 后)污染消散过程:受较强西北气流(近地风速 $4.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)影响,大气扩散条件好转, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度在 2 h 内降至 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,RH 降至 21.1%,太阳辐射与能见度条件大幅好转,污染过程结束.

整个过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (中度污染标准)的时次共计 76 h,占总污染时长 60.0%;超过 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (重度污染标准)的时次共 64 h,占比 50.39%.

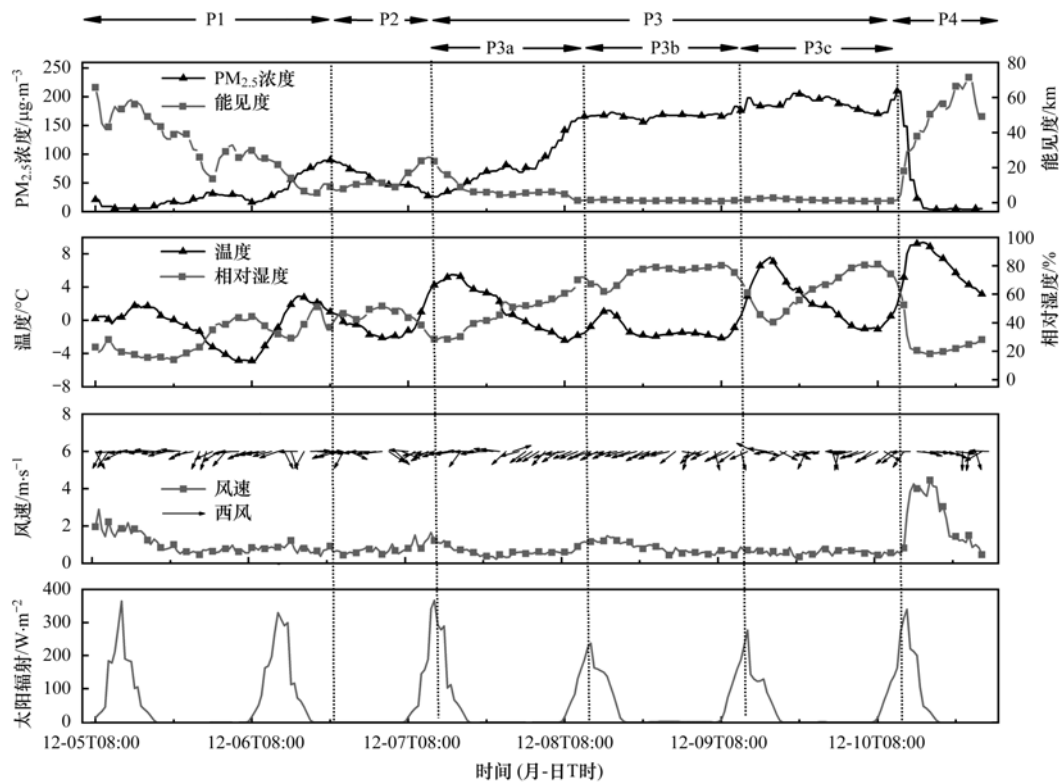


图2 2019年12月5~10日北京近地层 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、能见度、风场、温湿场和太阳辐射演变情况

Fig. 2 Evolution of the $\text{PM}_{2.5}$ concentration, visibility, wind field, temperature and humidity field, and solar radiation in the near strata of Beijing from December 5 to 10, 2019

2.2.1 局地气象要素演变分析

(1) 天气形势和气流输送变化

高低空环流形势宏观上决定区域气象要素,其中垂直风场活动与水平气流输送对污染传输来源、高度和路径有重要影响,可进一步定性污染的本地积累和区域传输^[33].本次污染过程(2019年12月5~10日)中,不同污染阶段的风场活动和气流输送特征显著不同.

图3和图4分别为观测点垂直风场的演变情况和典型阶段的气流运动轨迹.观测期间北京处于500 hPa高空平直西风气流,地面均压场频繁控制的背景下,850 hPa高度层(1.2 km以上)以平直西风

和西北风为主,风速较大($10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上);400 m下近地层风速较小;中间层则由弱偏南风 and 较强西北气流交替作用,并将整个观测过程分为4个时段,与污染物的累积与消散过程相对应.其中P3阶段又可划分为P3a、P3b和P3c这3个细节过程.

P1轻微霾过程:对流层中低层主导风向为偏南风,各高度风场活动均较弱(低空风速 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高空风速 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下),风速梯度小,结合后向轨迹,该时段300 m下气团来自西南方向的保定等城市地表,途经房山抵达北京,移动速度较慢,边界层内大尺度的天气扰动与混合能力弱,有利于污染堆积. P2污染缓解过程:垂直风场和后

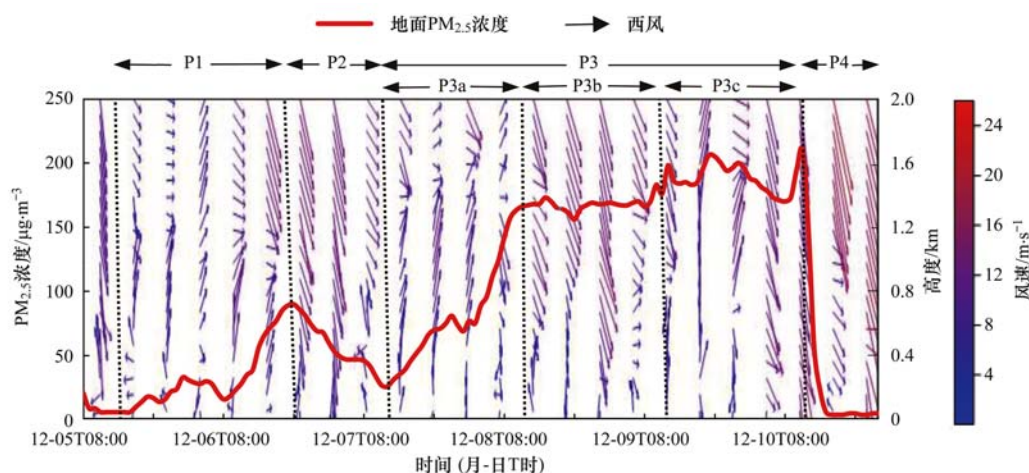


图3 2019年12月5~10日观测点边界层风场的时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of the boundary layer wind field at the observation site from December 5 to 10, 2019

向轨迹都表明强西北气流(风速 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)从 2 km 高度处向低空传输,动力方面对颗粒物有清除作用. P3 重度霾过程: P3a(12月7日午后至8日早间)和 P3c(12月9日早间至10日早间)两个阶段整体风场特征与 P1 阶段无异, 70% 时段的主导风向仍为偏南风, 且气团输送大多来自西南方, 但其传输特征有所差异, 其中 P3a 阶段的气流输送较为分散, 一部分来自北京西南方向大同市东南区域的高空输送通道, 占比约 48%; 另一部分为西北高空气流南下后在北京南部地区出现的贴地环流气团; 而 P3c 阶段除西北方向包头市和乌兰察布市的长距离高空输送外, 西南保定方向也有贴地气流传来, 轨迹较短, 表明天气系统持续静稳. 此外 P3b(12月8日午后至9日午后)阶段出现高空气流突转为西北风并向下传输现象, 但 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续维持在高值. P4 污染消散过程: 12月10日凌晨后, 整体环流形势改变, 新一轮槽后活跃的干冷西北气流下沉(风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 北京地区静稳格局被打破, 扩散条件自北向南好转, 地面颗粒物浓度在午后迅速降低.

(2) 气溶胶垂直分布特征

图5是2019年12月5~10日微脉冲激光雷达反演的北京北城区上空气溶胶光学特性(消光系数和退偏比)的时空分布, 从中可知, 大气污染的垂直分布演变与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化一致, 边界层内的污染的累积与消散也相应划分为4个时段(P1~P4).

在污染未发生前的12月5日白天近地面较为清洁, 大气垂向消光系数在 0.070 km^{-1} 左右; 在 P1 阶段的12月5日18:00开始, 上空 1.2 km 出现一层与地面分离, 厚度 400 m , 消光系数约 0.747 km^{-1} 的消光层, 明显高于 800 m 处消光 (0.107 km^{-1}), 其退偏比也小于下层, 数值在 $0.04 \sim 0.05$ 之间, 球

形特征较明显, 且随时间推移该消光层不断向地面延伸, 为典型污染传输层分布; 12月6日午后, 该消光层延展至近地 700 m 以下, 底层消光系数从 0.430 km^{-1} 逐渐增大至 1.034 km^{-1} 左右, 与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 的第一次显著增长对应, 其退偏比也出现相同的分布变化. 由于本次 $\text{PM}_{2.5}$ 增长期间地面无明显增湿状况, 结合 P1 过程的风场变化和后向轨迹分布, 可确定该污染是北京西南方向城市的二次球形气溶胶传输所致.

12月6日夜间22:00至7日06:00, 近地消光系数降至 0.460 km^{-1} , 为 P2 污染短时缓解阶段. 在12月8日早间至10日早间的 P3 阶段, 近地 700 m 高度内经历了一个时间长、强度大的连续消光段. 其中, 12月8日10:00消光系数从 0.827 km^{-1} 增长至 2.397 km^{-1} , 12月9日会同地面高湿影响, 消光系数高达 5.954 km^{-1} , 期间消光层厚度基本维持在 500 m , 退偏比较小, 约在 $0.02 \sim 0.04$, 表明大气底层强消光物质球形特征极其明显, 与地面高浓度的水汽和气溶胶对应, 期间污染的上空传输不明显, 以近地污染累积为主. 另外9日日间北京经历低压中心东移, $500 \sim 1700 \text{ m}$ 高空无明显消光层但退偏比较大 ($0.109 \sim 0.214$), 随时间推移 3000 m 高空均有出现, 判断应为随西北气流而来的含冰晶云层. 12月10日12:00后, 各高度消光系数迅速降低, 仅 0.105 km^{-1} , 与地面污染快速消散的 P4 过程对应, 贴地 200 m 高度内退偏比数值的增大 (0.217), 应与大风扬起部分粗颗粒有关.

(3) 边界层温和湿垂直分布特征

整体长时间的静稳边界层结构, 尤其是逆温层结分布, 是影响物质垂直扩散能力和环境容量的主要热力因素^[6], 相对湿度则是影响能见度, 同时对污染的二次生成和转化产生重要影响的重要指

标^[17]. 图 6 是 2019 年 12 月 5 ~ 10 日观测点 0 ~ 2 km 高度层温度的垂直分布和逆温分布变化情况, 图 7 为相对湿度的垂直分布.

温度垂直观测资料显示, 整个观测期间存在 3 个逆温时段, 其分布特征与污染形势密切相关. 前 2 个逆温时段仅在夜间出现, 表现为 12 月的 5 日和 6 日夜间贴地逆温, 其中 5 日高空出现污染传输, 但地面空气较为清洁, 逆温由夜间降温辐射造成, 强度不大, 6 日外源气溶胶在地表堆积, 削弱了到达地面的太阳辐射, 进而抑制对流的发展, 气溶胶冷却效应对夜间逆温有加重作用且增幅很快, 逆温强度从 $0.5 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 增至 $1.5 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$. 12 月 7 日早间伴随污染缓解和太阳升起, 逆温强度迅速降低至消失. 两阶段逆温对比表明, 气溶胶层的冷却效应对逆温的贡献远远大于夜间降温辐射, 污染的初步累积对逆温的加重有反馈作用.

在 12 月 7 日夜间至 10 日凌晨的第 3 个逆温过

程中, 逆温持续 66 h, 其中 12 月的 7 日和 9 日夜间与 12 月 6 日呈现相似的逆温特征, 逆温强度较强, 在 $1.0 \text{ K} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 左右, 较强逆温过程在天气尺度上削弱了上下层大气混合能力和环境容量, 促进气溶胶和水汽在逆温层下聚积并发生非均相反应, 对应地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高和维持. 而 12 月 8 日夜间的逆温层 (300 ~ 800 m) 强度不大, 随时间推进逆温层底向地面延展, 层顶高度不变, 逆温厚度 700 m, 结合风场和后向轨迹判断, 该逆温层为高空大尺度风向突转并下沉所致. 12 月 10 日早间稳定的逆温结构消失, 扩散条件好转, 污染消散.

相对湿度 (RH) 的垂直观测资料显示, 非污染时段 RH 基本在 40% 以下, 重污染时段增至 80% 以上. 观测过程中地面和高空共出现 12 月 6 ~ 7 日与 12 月 8 ~ 10 日的 2 次集中增湿过程, 与近地污染的 2 次传输累积阶段相对应.

其中 12 月 6 ~ 7 日, 近地 700 m 高度内有一个

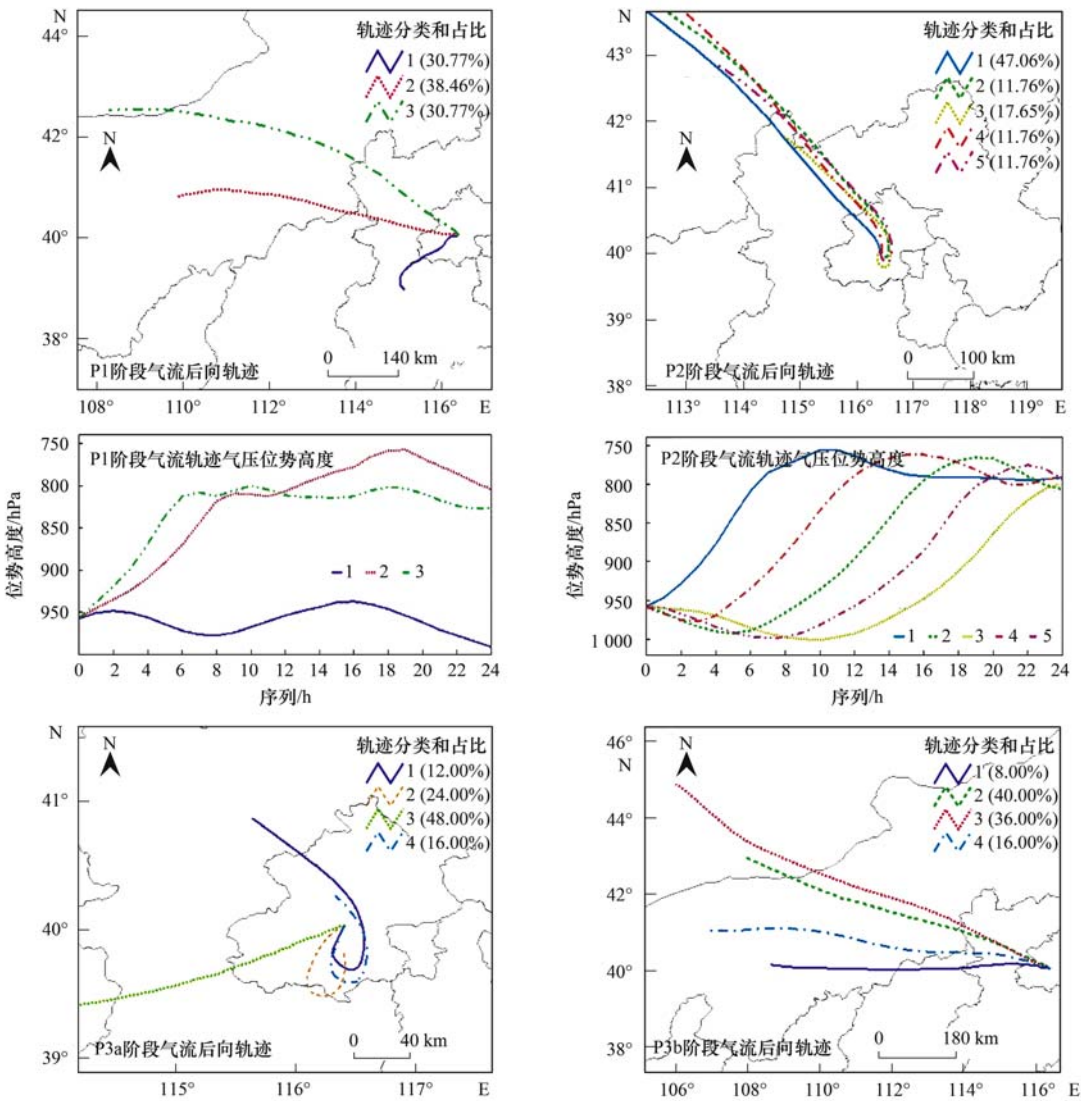
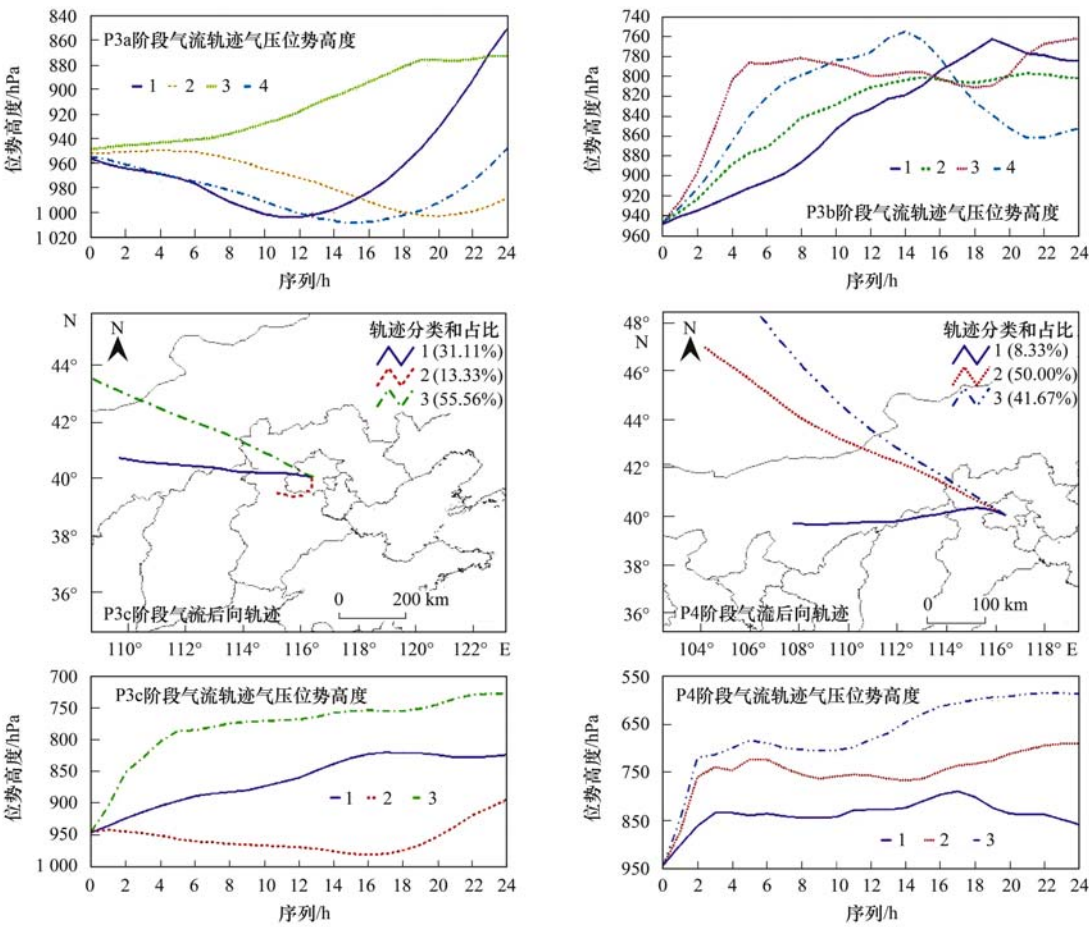


图 4 观测期间典型阶段的气流后向轨迹分布

Fig. 4 Backward trace distribution of airflow at typical moments during the observation period



续图4

小幅均匀增湿过程,RH从26%增至54%,结合后向轨迹和光学特性分析,判断为西南部城市地表的含湿污染气流输送所致.12月8~10日的增湿则是受区域升温影响,从地表开始RH由30%持续增至70%并向1 km高空发展,至12月8日夜间RH已高达100%,近地高湿层的出现直接加剧了北京本地污染物的二次转化和颗粒物的增长,不仅形态上致使消光粒子的不规则结构变为球状结构,且吸湿后颗粒物粒径络合增长明显,加重了大气污染程度.12月9日午后受短时天气系统调整影响,RH出现短暂下降(40%),夜间再次回升.12月10日08:00后RH从80%迅速降至20%以下,地面空气较为干洁.

2.2.2 地面湍流特征分析

大气湍流运动是引导边界层内物质和能量交换的主要形式,对污染物从地表向边界层上层交换起重要作用^[34].为更好理解湍流在霾生消过程中的作用,采用湍流统计量描述近地层湍流场演变情况.图8是本次污染过程中14 m高度处各湍流统计特征量、感热通量、潜热通量和PM_{2.5}浓度的时空序列.表1是典型阶段湍流统计量的代表性数值.观测期间各湍流统计量的演变趋势相似,其大幅度涨落与污

染累积和消散过程对应.

从图8中可知,清洁时段边界层内湍流发展较为旺盛,湍流统计量数值较高;污染前夕均提前下降,其中湍流强度(*I*)首先在12月5日07:00做出响应,从2.025降至0.678.摩擦速度、湍流动能(TKE)和动量通量推迟1 h出现下降趋势,TKE在1 h内从2.796 m²·s⁻²降低到0.643 m²·s⁻²,其小时变动率(77%)显著高于晴天日间的正常波动(33%),因此湍流统计量的异常突降可作为响应污染天气发生的预报指标,对污染天气的发生有警示作用,其中以湍流强度的反应最为优先^[35,36].

在重污染过程中伴随PM_{2.5}浓度的攀升,各湍流统计量均稳定在较低水平.其中,摩擦速度是清洁时期的1/7,呈现小幅度日变化特征,昼高夜低,变化范围0.04~0.21 m·s⁻¹,与PM_{2.5}浓度的负相关关系较为显著.*I*和TKE整体数值较小,以水平方向湍流活动为主(TKE为0.064 4 m²·s⁻²,*I_x*和*I_y*均<0.9),是垂直方向(TKE为0.011 5 m²·s⁻²,*I_z*<0.3)的3~6倍,表明该时段近地层机械湍流减弱,以水平风切变为主要动力来源,边界层持续处于小风静稳状态,大气运动对颗粒物的扩散能力进一步削减,有利于污染层的累积与维持.

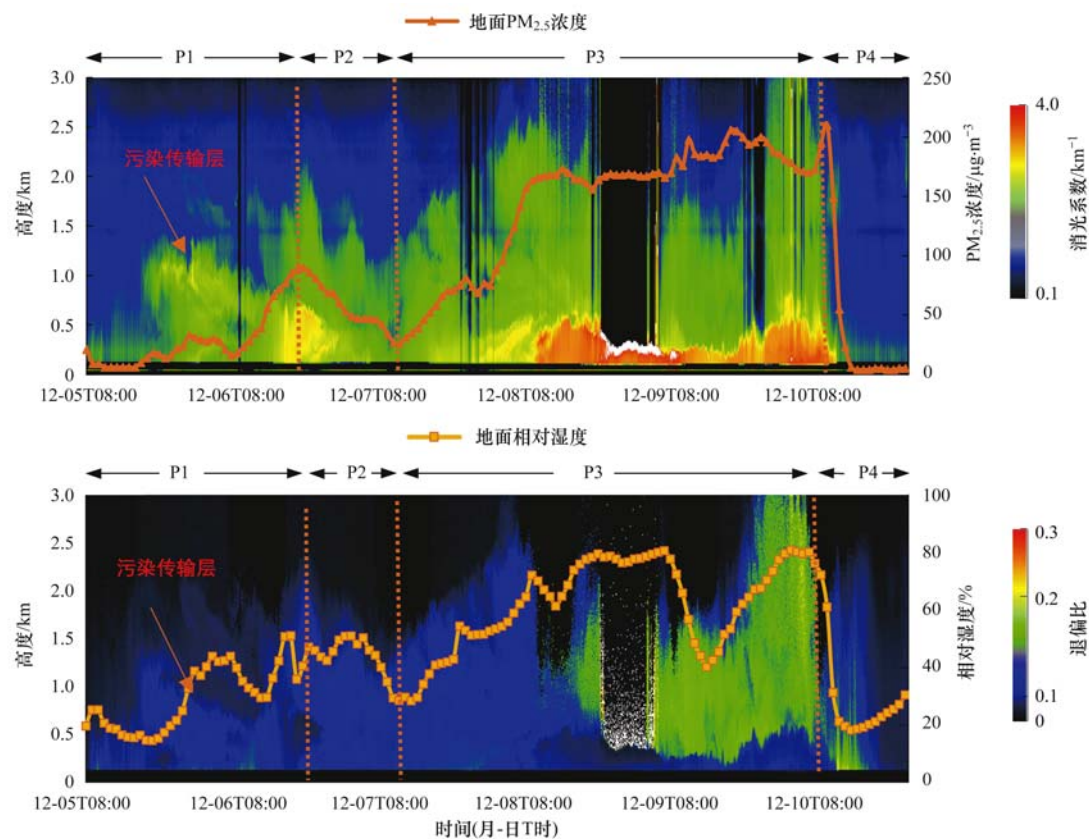


图 5 观测期间大气气溶胶光学特性垂直分布的时空演变

Fig. 5 Temporal and spatial evolution of the vertical distribution of the atmospheric aerosol optical properties during the observation period

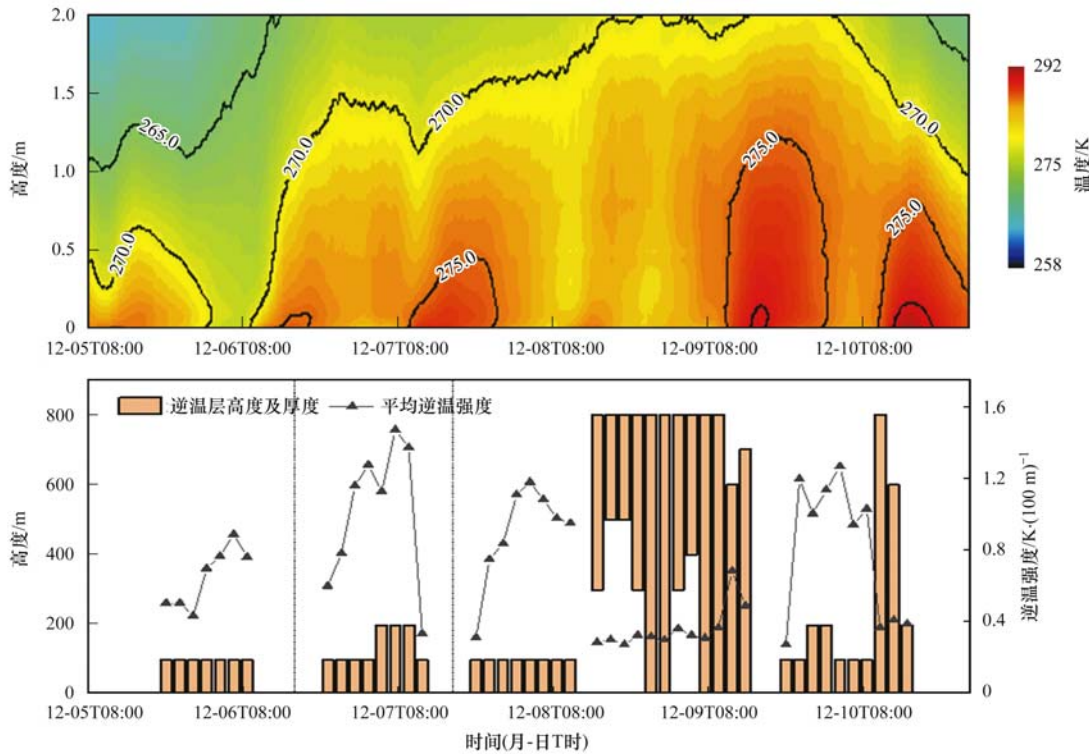


图 6 观测期间温度垂直分布和逆温位置和强度特征

Fig. 6 Temperature vertical distribution and temperature inversion position and intensity characteristics during the observation period

在对污染缓解消除的响应方面,12月6日15:00,水平方向湍流强度在0.5 h内迅速从0.488增至2.34,增量达6倍,比20:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的短暂

下降提前了5 h. 12月10日08:00,湍流强度再次出现激增, I_x 、 I_y 和 I_z 分别为4.022、5.380和1.717,是前一时次的10多倍,比12:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

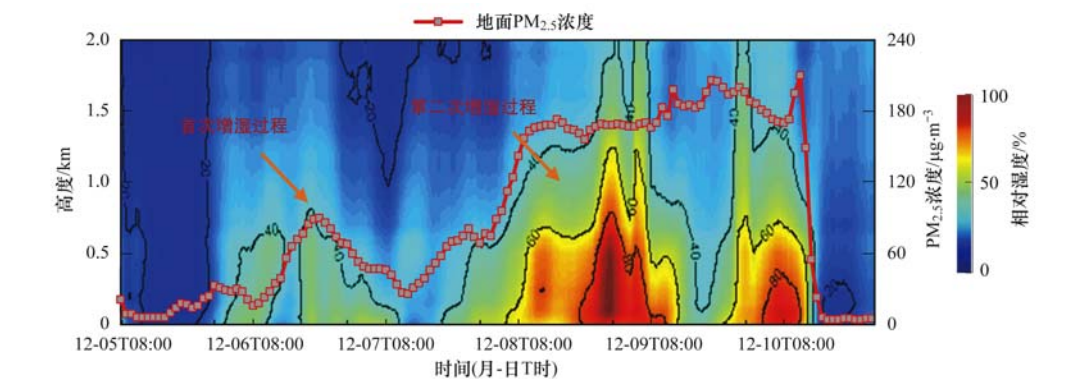


图 7 观测期间相对湿度的垂直分布情况

Fig. 7 Vertical distribution of relative humidity during the observation period

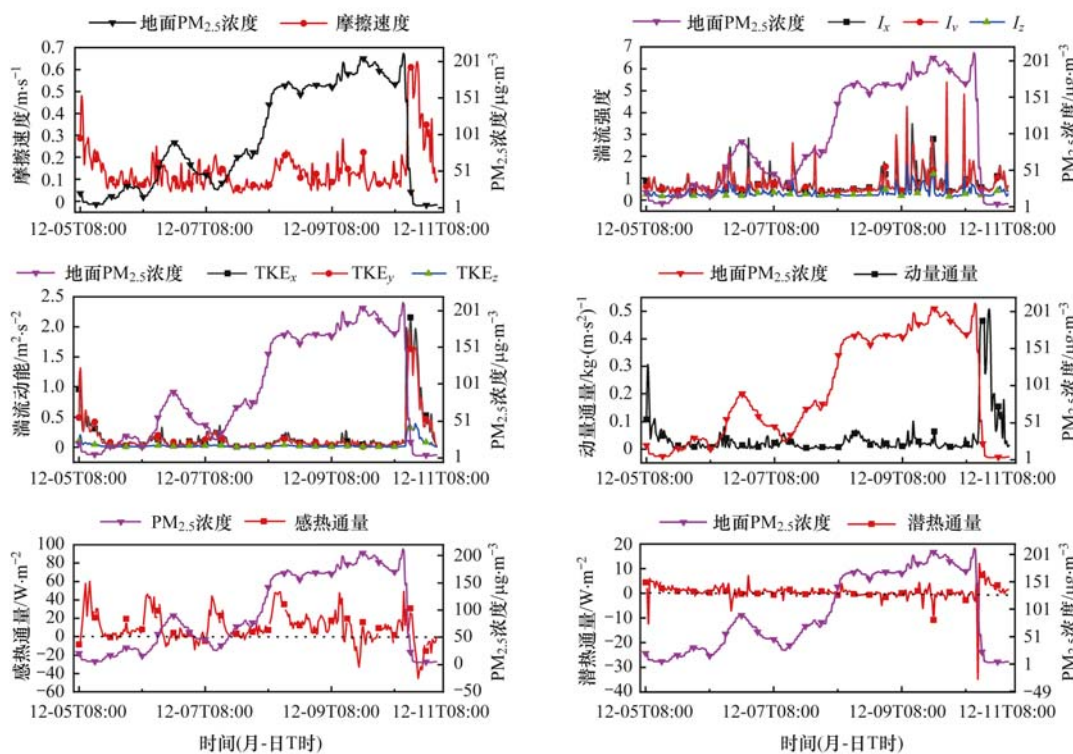


图 8 观测期间 14 m 高度处各湍流统计量、热通量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间变化

Fig. 8 Temporal changes in the turbulence statistics, heat flux, and $\text{PM}_{2.5}$ concentration at 14 m height during the observation period

的急剧下降提前了 4 h,反映了局地湍流发展的强弱在污染生消过程中对污染物的扩散作用. 对比两次湍流强度峰值出现与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的时间发现,湍流强度峰值的出现比污染好转提前 4 h 左右,比文献[35]中提前 1 h 的结论更长,这是其湍强峰值持续时间短,且后 3 h 各方向的稳定平均湍流强度较小所致(1.505、1.447 和 0.729),需要连续扩散才能带来污染的清除. 综上所述,可将湍强峰值的出现看作颗粒物浓度下降,空气质量好转的预报指标,而污染缓解的滞后时长由峰值后的持续湍强决定.

另外,在观测期间 12 月 9 日早间湍流强度也出现异常突增状况(I_x 为 3.49, I_z 为 1.97),但污染浓度持续走高,与 12 月 6 日呈现不同的污染走势,这

是因为当极端不利扩散的气象条件(如稳定层结和高湿环境)持续主导时,日间太阳辐射和水汽冷凝放热形成的短期湍流增长不足以改变稳定大气层结,反而促进了水汽和污染物在逆温层下的充分混合均匀,加快其异相反应,加剧污染程度,故 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度维持在较高水平,只有稳定天气形势被打破,湍流活动持续剧烈,污染才会快速清除^[34].

感热通量和潜热通量这两个要素不仅是能量收支平衡的重要环节,也与边界层内湍流的发展和扩散强度互相反馈,继而影响该区域中污染物质在大气中的分布^[37]. 感热通量是温度变化带来的地气热量传递,潜热通量是水汽相变过程产生的能量传递,二者在四季晴天中都有明显的单峰值日变化特征,

且秋冬时节最小^[36]. 从表 1 可知,本次污染暴发前日间感热通量峰值在 $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,夜间基本在 $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右;污染过程中感热通量峰值大约在 $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,方向均从地面向大气传输. 污染期间全程潜热通量都处于 0 值附近,也没有明显日变化趋势,这与天津和南京的雾霾的研究结果吻

合^[35,37,38]. 其中 12 月 10 日凌晨伴随天气系统调整,高空气流下沉带来地面水汽暴发凝结,潜热通量向下输送 $34.758 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 后迅速转为向上输送 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低对应,表明水汽相变产生的热量为湍流运动的发展提供了部分能量,可反馈至污染消散的进度.

表 1 观测期间各阶段湍流统计量的代表数值

Table 1 Representative values of turbulence statistics at various stages during the observation period

湍流统计量	P1 前	P1	P2	P3a	P3b	P3c	P4
湍流强度	I_x	2.024	0.832	1.794	0.621	0.435	3.693 44
	I_y	2.119	0.752	1.015	0.569	0.437	4.833 06
	I_z	0.964	0.316	0.392	0.202	0.218	1.042 77
湍流动能 $/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	TKE_x	1.273	0.233	0.292	0.027	0.027	0.063 1
	TKE_y	1.313	0.113	0.231	0.022	0.028	0.108 05
	TKE_z	0.208	0.028	0.035	0.003	0.007	0.005 03
摩擦速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		0.481	0.115	0.217	0.152	0.173	0.223 5
动量通量/ $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})^{-1}$		0.306	0.035	0.058	0.022	0.070	0.102
感热通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$		60.094	46.384	40.538	24.551	28.75	15.796
潜热通量/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$		4.982	1.1113.292	0.341	0.645	0.421	1.761 65

3 结论

(1)2019 年 12 月初的重污染过程分为两次污染生消过程,具有持续时间长、范围广、强度大且消散快的特征. 其中首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 超过 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时次共计 76 h, 占总污染时长的 60%, 超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的时次共计 64 h, 占总污染时长的 53%, 最高污染浓度为 $210 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(2)首次污染累积起源于北京西南城市地表的含湿污染物的低空传输. 第二次污染暴发过程由本地污染排放叠加小风(低空风速 $1\sim2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、高湿(相对湿度 $>80\%$)和贴地持续强逆温[平均逆温强度 $0.8 \text{ K}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$ 左右]等不利扩散的气象特征,促使吸湿颗粒物络合增长. 结合观测期间退偏比从 0.05 降至 0.02 的趋势,表明随污染加重,消光粒子从不规则结构变为球形结构. 直到西北强冷空气(风速 $>20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)入侵,打破原有的稳定边界层结构,污染才得以快速消散.

(3)污染过程中,各湍流统计特征维持在低值(摩擦速度 $<0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、湍流动能约 $0.0644 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 、湍流强度均 <0.9),底层大气扩散混合能力较弱. 而污染发生前与污染结束前的交替时段中,湍流强度、摩擦速度和湍流动能提前出现大幅下降(摩擦速度降低 6/7,湍流动能突降率 77%)和激增(湍流强度出现一个量级增幅的峰值),因此可作为污染阶段发生改变的信号和预报指标,其中湍流强度提前响应的时长则与其峰值后持续湍强大小有关. 此外感热通量在污染阶段比非污染时段小,方向均向下传输,而潜热通量在污染过程中稳定在

0 附近.

(4)污染物与边界层气象条件之间存在互相反馈作用:一方面不利扩散的气象条件有利于污染聚集,降低能见度,另一方面近地累积的气溶胶层和水汽冷却效应作用下逆温强度从 $0.5 \text{ K}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$ 增至 $1.5 \text{ K}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$,比夜间降温辐射贡献更大,进一步抑制湍流运动的发展,最终反馈为污染加剧.

参考文献:

[1] Xie Z S, Fan C L, Lu R, et al. Characteristics of ambient bioaerosols during haze episodes in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 1930-1942.

[2] 程雪雁, 朱磊, 周艺萱. 2015—2018 年京津冀城市群空气污染时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, **55**(4): 523-531.

Cheng X Y, Zhu L, Zhou Y X. Temporal and spatial characteristics of pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration 2015-2018 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, **55**(4): 523-531.

[3] Gui K, Che H Z, Wang Y Q, et al. Satellite-derived $\text{PM}_{2.5}$ concentration trends over Eastern China from 1998 to 2016: relationships to emissions and meteorological parameters [J]. Environmental Pollution, 2019, **247**: 1125-1133.

[4] 胡京南, 柴发合, 段菁春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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.

[5] 赵好希, 陈义珍, 杨欣, 等. 2018 年 3 月两会期间北京重污染过程边界层气象的演变分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(9): 1492-1499.

Zhao Y X, Chen Y Z, Yang X, et al. Meteorological evolution of boundary layer during heavy pollution in Beijing during the

- CPPCC (China People's Political Consultative Conference) in March 2018[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32** (9): 1492-1499.
- [6] 郝建奇, 葛宝珠, 王自发, 等. 2013 年京津冀重污染特征及其气象条件分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(8): 3032-3043.
- Hao J Q, Ge B Z, Wang Z F, *et al.* Characteristics and meteorological conditions analysis of severe haze events over Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(8): 3032-3043.
- [7] 王芳. 兰州市大气颗粒物及其化学组分污染特征和成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [8] 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 等. 成都市冬季 3 次灰霾污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4382-4391.
- Feng X Q, Chen J H, Yin H M, *et al.* Characteristics and formation mechanism of three haze pollution processes in Chengdu in winter[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4382-4391.
- [9] 杨欣, 陈义珍, 赵好希, 等. 2014~2017 年北京城区霾污染态势及潜在来源[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3232-3239.
- Yang X, Chen Y Z, Zhao Y X, *et al.* Analysis of haze pollution situation and potential sources in Beijing urban area from 2014 to 2017[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(9): 3232-3239.
- [10] 潘润西, 陈蓓, 莫雨淳, 等. 广西 PM_{2.5} 时空分布特征及污染天气类型[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(3): 465-474.
- Pan R X, Chen B, Mo Y C, *et al.* Spatio-temporal characteristics of PM_{2.5} and pollution weather types in Guangxi[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(3): 465-474.
- [11] 郝宏飞, 杨婷, 王自发, 等. 2013—2015 年北京污染频发期细颗粒物重污染成因与天气形势关系的研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2201-2213.
- Hao H F, Yang T, Wang Z F, *et al.* Investigation of relationship between synoptic pattern and heavy air pollution during heating from 2013 to 2015 in megacity Beijing, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(6): 2201-2213.
- [12] 蒋婉婷, 谢汶静, 王碧茜, 等. 2014—2016 年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 180-188.
- Jiang W T, Xie W J, Wang B H, *et al.* Analysis on the characteristics of heavy pollution atmospheric circulation in the Sichuan Basin from 2014 to 2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 180-188.
- [13] 崔萌, 安兴琴, 范广洲, 等. 北京一次重污染过程的天气成因及来源分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3628-3638.
- Cui M, An X Q, Fan G Z, *et al.* The analysis of weather causes and sources of a heavy pollution process in Beijing[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(10): 3628-3638.
- [14] 余钟奇, 马井会, 曹钰, 等. 影响上海 PM_{2.5} 污染不同源地和路径的数值模拟[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 21-31.
- Yu Z Q, Ma J H, Cao Y, *et al.* Numerical simulations of sources and transport pathways of different PM_{2.5} pollution types in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 21-31.
- [15] 陈桃桃, 李忠勤, 周茜, 等. “兰州蓝”背景下空气污染特征、来源解析及成因初探[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1361-1373.
- Chen T T, Li Z Q, Zhou X, *et al.* Air pollution characteristics, source analysis and cause of formation under the background of “Lanzhou blue”[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(4): 1361-1373.
- [16] 孙兆彬, 李梓铭, 廖晓农, 等. 北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- Sun Z B, Li Z M, Liao X N, *et al.* Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- [17] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(10): 1747-1754.
- Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, *et al.* Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Area in 2016 and its relationship with meteorological factors[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, **26**(10): 1747-1754.
- [18] Luo H, Han Y, Lu C S, *et al.* Characteristics of surface solar radiation under different air pollution conditions over Nanjing, China: observation and simulation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, **36**(10): 1047-1059.
- [19] 樊建勇, 黄玲, 李翔翔. 2015—2018 年江西省 PM_{2.5} 污染时空变化特征及气象成因分析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(6): 1165-1172.
- Fan J Y, Huang L, Li X X. Analysis of the characteristics of the spatial-temporal variations of PM_{2.5} pollution and the meteorological causes in Jiangxi Province from 2015 to 2018[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(6): 1165-1172.
- [20] 覃军, 袁正旋, 曾向红, 等. 湖南岳阳一次重度霾过程近地层物理量场异常特征分析[J]. 气候与环境研究, 2018, **23**(5): 533-542.
- Qin J, Yuan Z X, Zeng X H, *et al.* Analysis on characteristic variations of physical quantities in the near surface layer during a severe haze process in Yueyang Hunan Province[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, **23**(5): 533-542.
- [21] Guo X F, Sun Y L, Miao S G. Characterizing urban turbulence under haze pollution: insights into temperature-Humidity dissimilarity[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2016, **158**(3): 501-510.
- [22] Ren Y, Zheng S W, Wei W, *et al.* Characteristics of turbulent transfer during episodes of heavy haze pollution in Beijing in Winter 2016/17[J]. Journal of Meteorological Research, 2018, **32**(1): 69-80.
- [23] Ren Y, Zhang H S, Wei W, *et al.* Comparison of the turbulence structure during light and heavy haze pollution episodes[J]. Atmospheric Research, 2019, **230**, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104645.
- [24] 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.
- [25] 徐莉莉. 北京市秋冬季雾霾污染特征及来源研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [26] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration

- characteristics of $PM_{2.5}$ and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [27] Wu P, Ding Y H, Liu Y J. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34**(4): 429-440.
- [28] 尚子激, 康延臻, 杜晖, 等. 北京市空气污染与气象条件的关系及其预报[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, **56**(3): 380-387.
Shang Z W, Kang Y Z, Du H, *et al.* Study on the relationship between air pollution and meteorological conditions in Beijing and their forecasting[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, **56**(3): 380-387.
- [29] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [30] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- [31] Li W J, Shao L Y, Wang W H, *et al.* Air quality improvement in response to intensified control strategies in Beijing during 2013-2019[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140776.
- [32] 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 H L, Zhang W J, *et al.* Characteristics and influencing factors of air quality in “2+26” cities in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J]. *Environmental Science Research*, 2021, **34**(1): 172-184.
- [33] Zou J, Sun J N, Ding A J, *et al.* Observation-based estimation of aerosol-induced reduction of planetary boundary layer height[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34**(9): 1057-1068.
- [34] Zhao H J, Wu Z L, Liu J L, *et al.* Two air pollution events in the coastal city of Tianjin, North China Plain[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(6): 1780-1794.
- [35] 闫俊. 天津市区秋冬季雾过程边界层特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [36] 贺园园, 胡非, 刘郁珏, 等. 北京地区一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程的边界层特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2019, **24**(1): 61-72.
He Y Y, Hu F, Liu Y J, *et al.* Boundary layer characteristics during a heavy $PM_{2.5}$ pollution process in Beijing[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, **24**(1): 61-72.
- [37] 姚青, 刘敬乐, 蔡子颖, 等. 天津一次雾-霾天气过程的近地层温湿结构和湍流特征分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 3856-3867.
Yao Q, Liu J L, Cai Z Y, *et al.* Analysis of temperature and moisture structure and turbulence characteristics of a smog and haze weather process in Tianjin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 3856-3867.
- [38] 张贺, 张宏升, 赵子龙, 等. 南京南郊大气湍流统计特征实验研究[J]. *气象科学*, 2014, **34**(2): 139-148.
Zhang H, Zhang H S, Zhao Z L, *et al.* Statistic characteristics of atmospheric turbulence over southern suburbs of Nanjing[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, **34**(2): 139-148.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphotically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)