

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析

徐冉¹, 张恒德^{1*}, 杨孝文², 程水源², 张天航¹, 江琪¹

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了研究近两年北京地区 $PM_{2.5}$ 污染特征及成因变化, 利用常规观测资料和改进的后向轨迹模型 (TrajStat) 对 2016 ~ 2017 年秋冬季大气重污染时段的颗粒物浓度、气象要素和气团传输路径进行了综合分析。结果表明, 研究期间北京地区共发生 13 次持续 2 d 以上的重污染事件, 冬季过程约占 61.5%, 且污染程度和持续时间均高于秋季。地面受弱气压场控制、高湿度、静小风以及较低的混合层高度, 加之北京三面环山的特殊地势是导致秋冬季静稳型污染频发的重要因素, 重污染期间 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的平均比值高达 0.86。累积阶段气团主要来自于西北、偏西、西南和东南方向, 其中西南和东南路径为典型污染传输通道, 轨迹频率为 21.6%。此外, 采用 WRF-CAMx 模型定量估算了 2016 年 12 月 16 ~ 22 日典型过程中本地和外来污染源对北京 $PM_{2.5}$ 的贡献, 结果发现不同气团输送条件下, 二者的贡献差异较大。当南部气团输入时, 本地贡献会显著下降, 以外部区域输送为主导; 若气流来自西北方向情况则相反。污染过程期间, 本地贡献为 16.5% ~ 69.3%。

关键词: $PM_{2.5}$ 重污染; 气团轨迹; 气象要素; WRF-CAMx; 区域传输

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3405-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806061

Concentration Characteristics of $PM_{2.5}$ and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter

XU Ran¹, ZHANG Heng-de^{1*}, YANG Xiao-wen², CHENG Shui-yuan², ZHANG Tian-hang¹, JIANG Qi¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the changing of characteristics and formation mechanisms of $PM_{2.5}$ in Beijing during the last two years, particulate matter concentrations, weather conditions, and air-mass trajectories were analyzed during severe pollution episodes in fall and winter 2016-2017 using routine observations and the TrajStat model. Results showed that 13 heavy pollution events, each lasting at least two days, occurred in Beijing. Of these, approximately 61.5% occurred in winter, characterized by heavier pollution concentrations and longer durations than those occurring in autumn. A low-pressure gradient, high humidity, low surface wind speed, low boundary layer, and particular terrain (i. e., being surrounded by mountains on three sides) all contributed to the high occurrence frequency of severe pollution episodes in autumn and winter. During the pollution episodes, the average ratio of $PM_{2.5}$ to PM_{10} reached 0.86. The air-masses during the accumulation stage were mainly transported from the northwest, west, southwest, and southeast of Beijing. The southwestern and southeastern transmission paths accounted for 21.6% of the total pollution load. In addition, the WRF-CAMx model was used to quantitatively analyze the contributions of local and external sources to the concentrations of $PM_{2.5}$ in Beijing during 16-22 December 2016. Based on this analysis, $PM_{2.5}$ contributions notably varied with different air-masses; in the case of southern air-masses, external sources dominated the $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing and local contributions decreased rapidly; in contrast, in the case of northwestern air-masses, the opposite pattern occurred. Overall, the contribution of local sources to $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing varied from 16.5% to 69.3% during the monitored pollution episodes.

Key words: $PM_{2.5}$ heavy pollution; air-mass trajectories; meteorological elements; WRF-CAMx; regional transport

自《大气污染防治行动计划》实施以来, 以京津冀为代表的重点区域污染物减排效果尤为显著, 排放量整体呈现下降趋势^[1]。但受西、北环山的特殊地势和静稳天气等因素的影响, 北京及近周边地区仍出现了多次大范围持续性重污染事件。2015 年 12 月至今, 北京市共发布 3 次空气重污染红色预警、10 次橙色预警。现阶段, 防控区域性污染已成为实现人与自然和谐共生的首要任务, 因此也亟待开展重污染过程的深入研究。

当前, 针对重污染天气国内外学者基于大气环流形势、气象要素变化、污染物时空分布差异、化学组分分析和区域传输规律等方面开展了一定的

研究。杨旭等^[2]指出大陆高压场、高压后部、鞍型场和冷锋前部等天气形势更有利于京津冀地区霾的形成。江琪等^[3]的研究认为静稳天气和高湿环境可以快速形成以大气细粒子 ($PM_{2.5}$) 为典型特征的霾污染过程, 其中 $PM_{2.5}$ 浓度对风速和相对湿度的变化响应相对较快, 通常滞后 1 h 左右。程念亮等^[4]则对北京及周边五省市 $PM_{2.5}$ 空间分布进行插值分

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0203301); 国家自然科学基金项目 (91644223)

作者简介: 徐冉 (1990 ~), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为环境气象预报模拟, E-mail: xuran9011@163.com

* 通信作者, E-mail: zhanghengde1977@163.com

析,发现污染高值区均最先出现在河南北部及河北南部,再由南向北逐渐蔓延,而北京地区重污染累积持续时间也呈现南部站 > 城区站 > 北部站的特征. 此外,还有研究表明重霾天北京市区亚微米细颗粒物 (PM_{10}) 的质量浓度约是清洁天的 27.3 ~ 45.8 倍,其中二次无机离子贡献高达 69.7%^[5]. 在跨区域传输方面,王燕丽等^[6]通过建立典型年份京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 传输矩阵,发现北京与廊坊、保定、天津、沧州等城市之间存在明显的污染输送. Wen 等^[7]运用气象-空气质量模型 (WRF-CAMx) 对 2014 年 10 月北京市 $PM_{2.5}$ 进行来源解析,结果显示一次组分和二次有机气溶胶的外来区域贡献分别为 29.6% 和 60.6%. 然而,已往研究大多集中于探讨单次典型过程,内容较为分散不全面. 因此,本文对 2016 ~ 2017 年秋冬季北京地区发生的多个大气重污染过程的总体特征进行系统分析,采用后向轨迹聚类模型对污染气团的输送路径加以识别分类. 并在此基础上,针对典型过程基于 WRF-CAMx 耦合模型定量估算了北京及周边省市之间 $PM_{2.5}$ 的传输贡献,以加深对区域性重污染天气成因及污染物传输规律的认识和理解.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文使用的颗粒物浓度数据源于城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>). 气象数据来源于中国气象局常规地面 1h 观测资料,包括温度、相对湿度、能见度、风向和风速等. 气团后向轨迹聚类分析采用全球资料同化系统 (GDAS) 提供的分辨率为 1° 的再分析资料.

1.2 研究方法

1.2.1 后向轨迹聚类分析

在进行气团后向轨迹模拟和聚类分析时,本文选用 TrajStat 软件模型. 该模型将统计学方法与常规后向轨迹模型 (HYSPLIT) 相结合,可以半定量反映大气污染物的传输路径和潜在源区,并基于地理信息系统 (GIS) 实现了结果的可视化,目前已被广泛应用于污染物的传输和扩散研究^[8,9]. 为评估外来污染源远距离输送对重污染期间北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,选取北京城区中心位置 ($39.91^\circ N$, $116.42^\circ E$) 为轨迹起始点,设置近地面 100 m 为起始高度,追踪各过程污染累积阶段的气团来向,并与非污染时段 ($PM_{2.5} < 75 \mu g \cdot m^{-3}$) 进行对比,模拟时长为 48 h.

1.2.2 数值模拟

本文选用 WRF-CAMx 耦合模型对研究期间北

京及周边城市的空气质量进行模拟. 气象模式采用 Weather Research and Forecasting model (WRF) V3.3 版本,由美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 6 h、 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的 FNL 全球再分析资料驱动. 此外,采用空气质量模式 CAMx (comprehensive air quality model with extensions) 内嵌的颗粒物来源识别技术 (PSAT) 对模拟区域内 $PM_{2.5}$ 的传输规律进行分析. 针对颗粒物的各类组分,PSAT 模块通过示踪标记物可以有效地追踪不同地区、不同种类排放源对受体区域 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献. 目前, CAMx-PSAT 模型工具常被用于颗粒物来源解析和敏感区域筛选^[10~12].

本次模拟设置两层嵌套网格,外层分辨率为 36 km,覆盖我国中东部会对北京市空气质量产生影响的地区;内层分辨率为 12 km,覆盖京津冀和周边地区(包括北京、天津、河北、山西、山东、河南、江苏和上海,以及内蒙古、辽宁、陕西、湖北和安徽的部分区域),嵌套网格空间分配详见图 1. 为研究不同地区污染排放对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,本文参照地理边界将内层模拟区域标记为 11 个子排放区,包括北京、天津、山西、山东、河南、内蒙古、河北北部(张家口、承德)、河北东部(唐山、秦皇岛)、河北西南部(保定、石家庄、邯郸、邢台)、河北东南部(廊坊、衡水、沧州)及外围区域. CAMx 模式在垂直方向共分为 14 层,后续所有分析将针对最低层(近地面)的结果进行. 模拟使用的人为源排放数据采用清华大学研发的 0.25° 分辨率的 MEIC (multi-resolution emission inventory for China) 排放源清单^[13]. 考虑到预警期间京津冀地区采取了多种应急减排措施,本文参照文献^[14~16]的数值对部分区域的污染源进

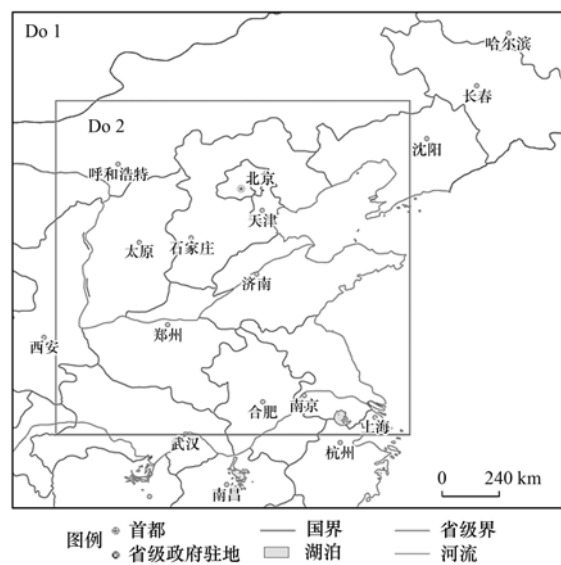


图 1 模拟区域嵌套设置示意

Fig. 1 Nesting simulation domain of the CAMx model

行了调整,并根据其特点应用 GIS 工具对模拟区域网格进行空间分配.模拟时段自污染起始日的前 5 d 起,以减小模式初始值的影响.

2 结果与讨论

2.1 秋冬季重污染过程概况

区域性大气重污染过程具有影响范围广、持续时间长、污染强度大等特点,在此本研究将重污染过程定义为至少连续两天 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度达到 $150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.按此标准对 2016~2017 年秋冬季北京市发生的重污染天气进行了统计, $PM_{2.5}$ 质量浓度选用 12 个国控站点均值.

结果显示,研究期间北京市共出现 13 次空气重污染过程,其中 2016 年秋冬季重污染发生较为频繁,达到 9 次,2017 年明显减少,仅为 4 次.通过统计逐年细颗粒物浓度可知,2016~2017 年秋冬季北京市 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度分别为 $79.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $64.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,呈下降趋势,这与同期的污染频次变化较为一致,但重污染时段的 $PM_{2.5}$ 浓度均值却不降反升,2017 年($246.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)较 2016 年($239.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)升高了 3.0%.表明尽管近年北京市大气环境质量持续改善,重污染过程发生频次显著降低,但污染强度却在加大.

秋、冬季节污染物浓度通常呈现非对称结构的“锯齿状”变化,慢积累而快清除的特征尤为突出^[17].纵观上述污染事件,近 2/3 的过程(9 次)为缓慢累积型,在冷空气间歇期 $PM_{2.5}$ 小时质量浓度呈持续性小幅振荡上升,峰值增长速率^[18]处于 2.4

~ $14.2\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 不等.另 4 次过程较为特殊,细颗粒物出现陡增型变化,相应速率也表现出一致性增大,以 2017 年初的跨年过程浮动最为显著,其夜间峰增长速率可达 $27.6\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,明显高于 13 次过程的平均增长速率 [$14.0\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$],此现象与王占山等^[19]得出的污染水平越重 $PM_{2.5}$ 浓度跃升幅度越大的结论相符合.从季节分布来看,近两年的重污染过程多出现在冬季(8 次),秋季发生相对较少(5 次).不同季节重污染过程的持续时间存在明显差异(表 1),冬季平均持续时间最长(约 74 h).其中,2016 年 12 月 30 日至 2017 年 1 月 7 日的单次过程 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染持续时间长达 208 h.相比前者,秋季污染持续时间显著缩短,平均仅为 46 h.将秋冬季的污染强度进行对比发现,重污染时段 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度也呈现冬高秋低的变化趋势.冬季污染期间细颗粒物浓度均值为 $244.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,各过程峰值浓度为 $237.5\sim505.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,有 4 次过程极大值可达 $400\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.而秋季重污染时段 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $207.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较冬季约降低了 15.2%,且浓度峰值普遍下降,最高仅为 $328.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.冬半年重污染频发主要是由于我国北方秋冬季节存在大量的生物质燃烧以及燃煤供暖活动,污染物排放量骤增^[20];同时冬季静稳天气多发也大大地提高了重污染发生的可能性,导致该时段区域性重污染过程发生频率远高于其它季节.然而,秋季高空环流多短波波动,弱冷空气活动较为频繁^[21],不利于大范围的持续性雾-霾天气形成.因此相比冬季,秋季重

表 1 2016~2017 年秋冬季北京市重污染过程统计
Table 1 List of heavy pollution episodes in fall and winter during 2016-2017 in Beijing

重污染过程	日期(年-月-日)	持续时间 /h	$PM_{2.5}$ 峰值浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$PM_{2.5}$ 平均 质量浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM_{10} 平均 质量浓度 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$PM_{2.5}/PM_{10}$ /%	$PM_{2.5}$ 峰值 增长速率 $/\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$
1	2016-01-01~2016-01-03	62	435.4	245.6	276.4	88.9	14.2
2	2016-10-01~2016-10-02	39	211.3	182.2	207.1	88.0	8.7
3	2016-10-13~2016-10-15	61	328.3	209.7	243.8	86.0	19.0
4	2016-11-03~2016-11-06	58	322.0	220.6	258.8	85.2	23.2
5	2016-11-25~2016-11-26	34	299.3	252.6	344.8	73.3	13.6
6	2016-12-03~2016-12-04	35	408.8	261.8	318.8	82.1	21.0
7	2016-12-11~2016-12-12	39	237.5	209.1	239.1	87.5	2.4
8	2016-12-16~2016-12-21	130	432.2	272.5	311.0	87.6	13.6
9	2016-12-30~2017-01-07	208	505.3	267.8	333.0	80.4	27.6
10	2017-01-25~2017-01-26	38	289.6	203.4	227.9	89.2	8.7
11	2017-02-03~2017-02-04	29	296.6	267.7	306.2	87.4	13.5
12	2017-02-14~2017-02-15	47	271.1	226.7	234.1	96.8	9.6
13	2017-10-26~2017-10-27	36	189.3	170.3	— ¹⁾	—	6.5
秋季过程		46	270.0	207.1	263.6	83.1	14.2
冬季过程		74	359.6	244.3	280.8	87.5	13.8
总体		63	325.1	230.0	275.1	86.0	14.0

1) “—”表示相关监测数据缺失

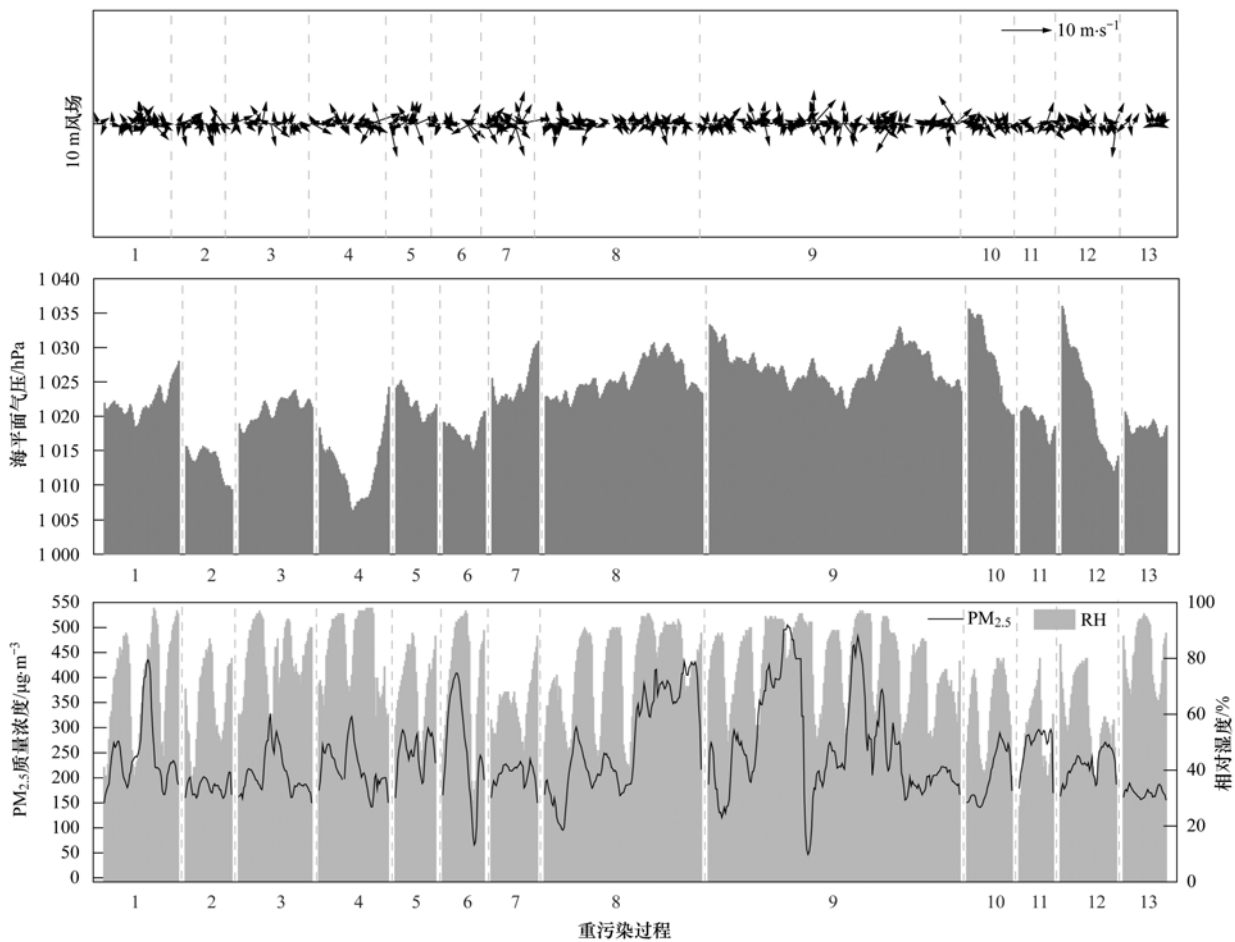
污染过程持续时间较短, 污染程度也相对较轻. 此外, 通过计算重污染期间颗粒物中的粗细粒子比重可进一步判断污染所属类型. 有研究发现当 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 大于 0.6 时, 重污染天气的形成主要是由人为污染产生的细颗粒物起主导作用^[22]. 经统计, 上述过程 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的比值在 73.3% ~ 96.8% 范围波动, 总体均值可达到 86.0%. 近两年秋冬季重污染时段 $PM_{2.5}$ 占比均高于 0.7, 说明冬半年大气污染已逐渐转型为复杂的细颗粒物污染, 亟需加大对于人为排放源的控制.

2.2 气象条件特征分析

静稳型污染与高负荷的源排放和不利的天气条件密切相关. 稳定的天气形势对于污染物的累积消散、气粒转化和二次形成等起多方面影响^[12, 17]. 北京高浓度 $PM_{2.5}$ 通常伴随较高的相对湿度 (> 70%) 以及偏东、偏南的低速风 (< 1.5 $m \cdot s^{-1}$), 如图 2 所示. 在污染累积阶段, 多次出现静风天气, 风向主要集中在 $50^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 之间, 以偏南风为主导; 与此同时相对湿度也在缓慢增长, 最高可达 98%, 接近饱和状态; 气压场则先呈现由高到低的变化趋

势, 而后维持均压控制, 直至污染物浓度积累到最大值. 这与很多课题组的研究结果相一致^[23 ~ 25].

相比整个秋冬季, 重污染时段的气象要素特征 (表 2) 表现为: ①气温总体偏低, 均值为 5.0℃, 低于秋冬平均值 6.6℃. 这与气溶胶的直接反馈效应有关, 高浓度的气溶胶粒子通过反射和散射作用可以有效减少到达地面的太阳辐射量, 引发地表温度下降^[26]. 并且低温天气更有利于二次无机组分中的 NO_3^- 以粒子形态存在^[27]. ②气压较弱, 重污染过程中地面气压变化范围主要集中在 1 012.5 ~ 1 028.4 hPa, 平均气压为 1 021.1 hPa, 小于常规时段的 1 024.0 hPa, 且在 $PM_{2.5}$ 达到峰值浓度前多为较小负变压, 使得近地面水平辐合增强、污染物逐渐汇聚. ③低风速, 上述污染时段以静小风 (< 2 $m \cdot s^{-1}$) 为主, 平均风速仅为 0.8 $m \cdot s^{-1}$, 静风频率可达 37.4%, 而统计得到的 2016 ~ 2017 年秋冬季节平均风速为 1.5 $m \cdot s^{-1}$, 约是重污染时段的 2 倍. 风向上, 偏南风 and 偏东风两者风频之和与程念亮等^[23] 的统计值 (80%) 持平, 其中西南气流和偏东气流均占 30% 以上. 较低的地面风速抑制了大气的



重污染过程编号内容见表 1, 下同
图 2 重污染期间逐小时 $PM_{2.5}$ 质量浓度和气象参数序列

Fig. 2 Hourly $PM_{2.5}$ concentration and meteorological parameters in Beijing during severe pollution episodes

水平交换能力,造成污染物在局地堆积,同时气态前体物也在源源不断地反应形成二次污染.④相对湿度较大,可能是受东部和南部的高湿气团影响,重污染期间近地面增湿明显,平均相对湿度为71.3%,远高于常规时段(50.8%),其中夜间至早晨时段湿度增长尤为突出,基本维持在90%左右.较高的相对湿度不仅有利于颗粒物的吸湿增长,增强其消光性,还能促进部分气态前体物的二次转化,已有研究发现在高湿环境下NO₂的转化速率约是干燥条件下的6倍,硝酸盐生成加快^[28].⑤大气能见度较差,污染时段平均能见度仅为1.4 km,单次过程最高为2.6 km,出现在秋季,冬季有四分之一过程不足1 km.能见度被认为是反映空气质量好坏的最直接指标之一.对比重污染时段,秋冬季常规时段的污染水平显著降低,能见度提升至10 km以上.此外,从边界层结构特征来看(图3),重污染时段混合层高度下降明显,约为568.6 m,部分过程不足400 m,且近地层均伴有不同程度的逆温.其他研究也曾表明^[22],重污染持续阶段边界层普遍存在较低的混合层高度以及较强的逆温特征.

重污染时段与清洁时段(PM_{2.5}<35 μg·m⁻³)的气象要素也存在差别,清洁天的近地面湿度、风速、海平面气压、能见度以及地表温度均值分别为35.3%、2.2 m·s⁻¹、1 026.1 hPa、24.2 km和5.8℃.相比之下,重污染时段除相对湿度涨幅接近一倍,其余要素值均有显著下降.这主要是由于污染期间悬浮在空气中的大量微小颗粒物降低了地表温度和大气反应活性^[26, 29].同时,低温高湿的气

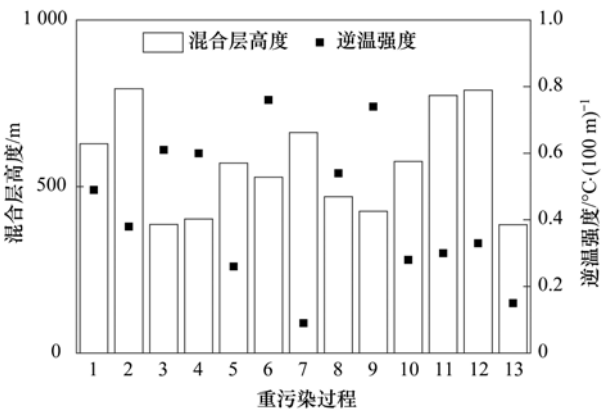


图3 北京地区重污染时段大气混合层高度及逆温强度
Fig. 3 Height of mixed layer and inversion intensity in Beijing during different severe pollution episodes

象条件更有利于发生液相氧化反应和非均相反应,促进PM₁中二次无机组分的生成,导致污染加剧^[30].

为进一步了解北京地区不同程度污染期间的气象条件差异,本文将各重污染时段与同一过程的轻-中度污染时段(75 μg·m⁻³≤PM_{2.5}<150 μg·m⁻³)进行对比,发现相对湿度和能见度变化最为明显.伴随PM_{2.5}质量浓度的急剧增长,重污染期间的地面湿度较轻-中度污染阶段上升了13.5%,而能见度下降了51.8%.可能是由于颗粒物中高浓度的硫酸盐、硝酸盐以及铵盐等无机组分不断吸湿增长,叠加水汽的消光作用造成了大气能见度显著降低.已有学者指出相对湿度较大时水汽对能见度的影响甚至超过了气溶胶粒子^[31].

表2 2016~2017年秋冬季不同时段PM_{2.5}质量浓度和气象要素统计

Table 2 List of PM _{2.5} concentrations and meteorological conditions during different periods in fall and winter during 2016-2017						
研究时段	PM _{2.5} 平均质量浓度 /μg·m ⁻³	相对湿度 /%	地面风速 /m·s ⁻¹	气压 /hPa	温度 /℃	能见度 /km
清洁	14.6	35.3	2.2	1 026.1	5.8	24.2
轻-中度污染	115.6	62.8	0.9	1 025.3	3.8	2.8
重污染	230.0	71.3	0.8	1 021.1	5.0	1.4
全时段	71.5	50.8	1.5	1 024.0	6.6	13.2

2.3 污染气团传输路径分类

重污染的形成不仅受本地排放源以及不利的气象条件影响,跨区域传输也是引发重污染天气的关键因素.本研究分析了近两年秋冬季节重污染累积阶段和非污染时段影响北京地区的气团来向,并对轨迹加以聚类.结果表明(图4),研究期间影响北京近地面的气团输送轨迹主要包括西北、偏西、西南及东南四类路径.其中,西北来向又可细分为两类:①始于蒙古国,经过内蒙古、河北省张家口到达北京;②始于西北地区,途经河北北部、天津北部和北三县(燕郊、大厂、香河),上述路径分别占

轨迹总数的26.7%和5.2%.伴随蒙古高压系统南下,西北气团自西向东移动速率较快,使得此类轨迹路径最长,并受上游沙尘天气影响,沿途携带了大量粗颗粒物至北京.而京、津交界地带人口稠密,下垫面源排放量大,轨迹②转向后气团中的PM_{2.5}粒子浓度有所上升,输送增强,但由于该段路径较短,故进入的污染物有限.偏西气团在平直的西风带系统引导下移动速率减缓,冷空气势力薄弱,污染物清除能力较差.轨迹途经山西北部及河北西部地区,多出现在污染初期,频率为46.5%.来自华北东南部的气流虽然占比最低(1.9%),但

其始于河北东部、经渤海到达山东,再沿衡水、沧州和廊坊等高排放负荷区域传输至北京,气团途经城市所携带的污染物对北京地区重污染形成有很大影响.西南路径沿太行山脉传输,经由邯郸、邢台、石家庄和保定,密集的工业布局使得河北中南部城市的排放水平远大于北部的张家口和承德,为典型污染输送路径,重污染累积阶段此轨迹概率为19.7%.清洁天气则与之不同,多以偏北风为主导风向,其中来自蒙古国西北方向的长距离大陆气团传输在非污染时段所占比例接近75%,约是重污染累积阶段的3倍.已有研究也表明南部气团缓慢输入更易使北京地区形成污染^[14, 32],这主要是由于其三面环山,当北京被高压后部或低压前部控制且等压线梯度稀疏时,会存在弱的偏南气流输入.但受特殊地势影响,近地层的南部气团极易被北部山脉阻挡,污染物在山麓附近汇聚并持续堆积,进而发生重污染天气.因此可以推断,偏南路径输送时,外来传输贡献是北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形成的重要原因之一.

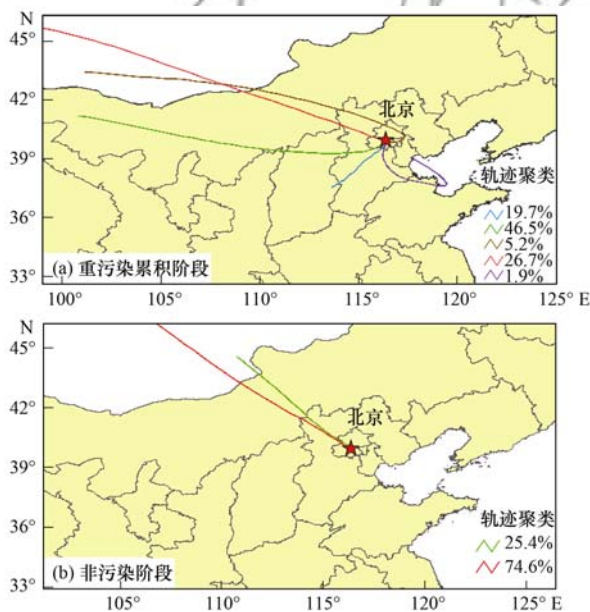


图4 2016~2017年秋冬季重污染累积阶段与非污染阶段气团后向轨迹聚类结果

Fig. 4 Clusters of air mass backward trajectories for heavy pollution accumulation stages and cleaning phases in fall and winter during 2016-2017

2.4 典型污染过程分析

2.4.1 模型验证

为定量研究不同污染气团输送条件下北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间来源,本文应用 CAMx-PSAT 模式对典型污染过程进行模拟,并选用相关系数(RC)、标准化平均偏差(NMB)和标准化平均误差(NME)来评估模拟值的准确性.图5为2016年12月16~22

日污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度模拟结果与监测值的对比散点图,RC为0.79,约78%的模拟值落在了监测值2倍误差范围内,模式能够较好地反映出 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度水平阶段,但部分时段较观测值略有偏低,NMB与NME分别为-31.8%和35.1%.模型本身存在局限性可能是造成误差的主要因素之一,二次颗粒物化学生成机制不完善、转化系数差异可导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低估;同时重污染时段的排放清单也存在较大的不确定性,污染源时空分配和化学物种分配等过程均会对模拟效果产生影响.而模式内层嵌套12 km的网格分辨率会将更小空间尺度的影响平滑掉,忽略受体点位近周边排放及气象条件对其重要影响,从而形成模拟与观测间的误差.综合考虑各项验证指标,模拟误差在可接受范围内,数据较为可靠.

本次重污染共持续130 h,其间国控站点 $\text{PM}_{2.5}$ 平均监测浓度为 $272.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,为环境空气质量标准(GB 3095-2012)中二级日均浓度限值($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的3.6倍,污染峰值最大可达 $432.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.全市处于空气重度污染及严重污染等级的时间分别占整个污染时段(12月16日14:00至12月22日05:00)的87.5%和46.3%,红色预警时段长达125 h.由此可见,相比于上述其他过程,此次重污染在时间跨度和污染强度均更具代表性.

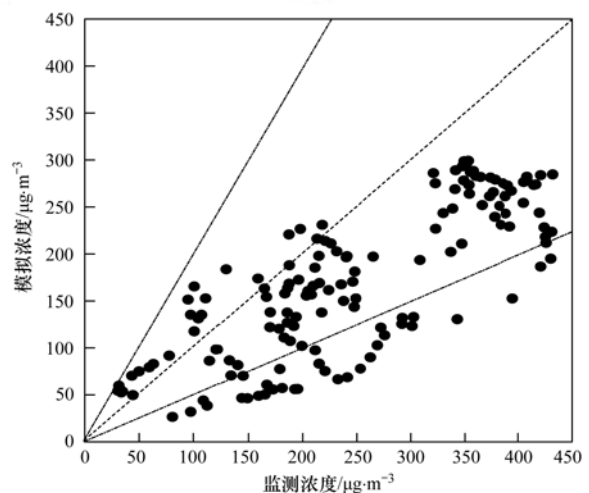


图5 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值与监测值小时浓度对比散点图

Fig. 5 Scatter plot of simulated and observed hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentrations

2.4.2 $\text{PM}_{2.5}$ 区域传输贡献

在此根据 $\text{PM}_{2.5}$ 逐时监测浓度将2016年12月的典型污染过程分为4个阶段,图6和图7分别为不同阶段的气团来向以及地面天气形势.第一阶段为爬升阶段(12月16日01:00至12月16日20:00),期间北京地区的静稳天气形势开始建立,

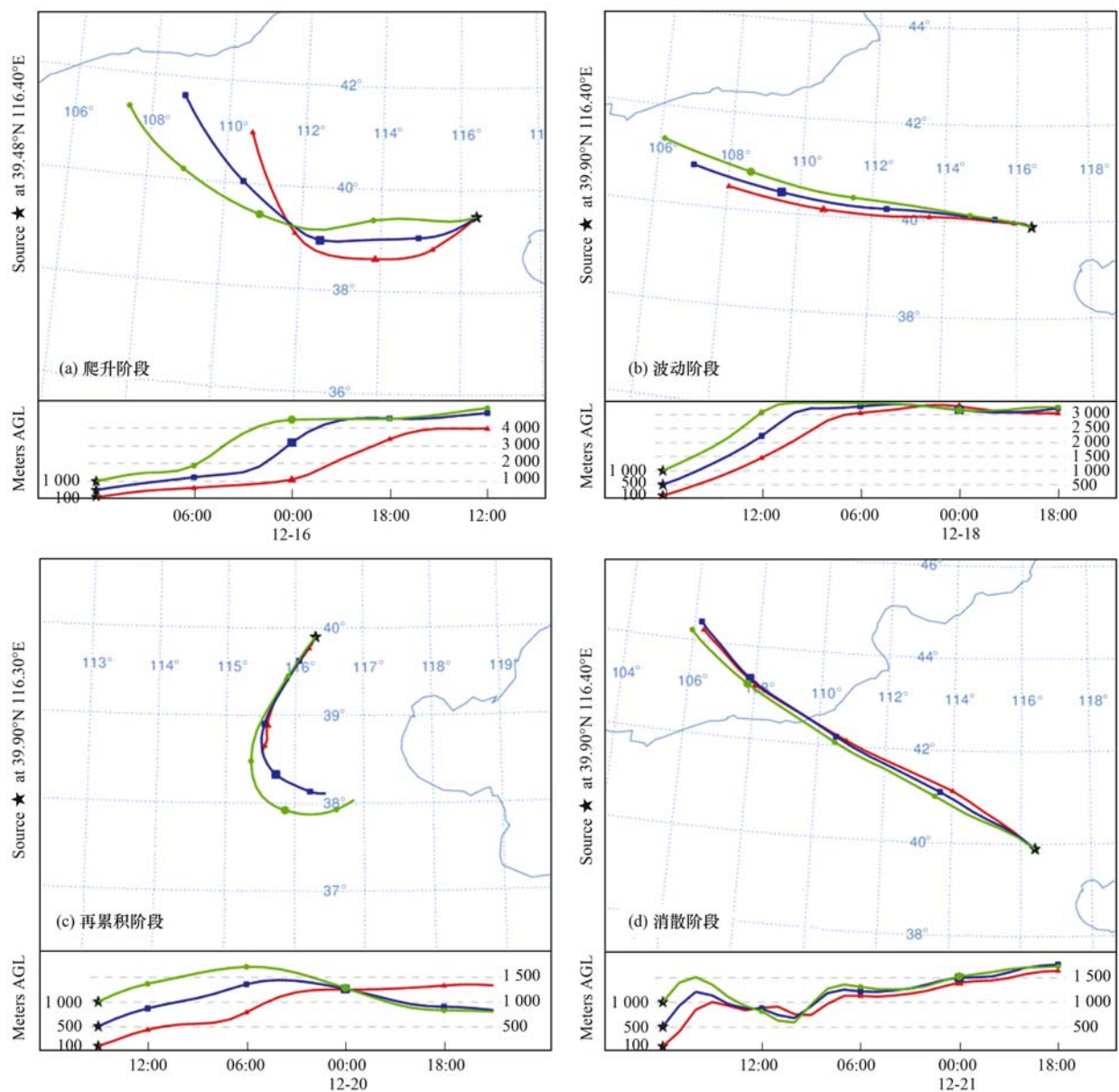


图6 典型污染过程不同阶段的气团来向

Fig. 6 Air mass backward trajectory during the four phases of a typical air pollution episode

能见度由12月15日白天的10 km以上逐渐降低至1.3 km(12月16日10:00),并在此后始终维持1 km左右. 累积阶段初期气团主要来自于西北高空,随后低层转为西南气流输送,水汽和外来污染物缓慢向北京及近周边一带传输. 地面天气形势表明京津冀区域处于高压后部,受近地面持续性弱偏南风($\leq 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)影响,大气扩散条件逐步转差. 12月16日午后,北京地区细颗粒物浓度上升速度明显加快,全市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度从13:00的 $63.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 迅速升至14:00的 $114.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,小时增长速率为 $51.7\text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,达到轻度污染水平,并于当日18:00($166.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)发展为重度污染,城区多个站点超过 $250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 数值模拟结果显示(图8), $\text{PM}_{2.5}$ 累积阶段北京市本地贡献出现大幅度下降,

由12月16日01:00的56.2%下降至最低可达16.5%,而山西省和河北西南部的区域贡献均有不同幅度上升,最高分别能达到13.1%与55.3%. 当细颗粒物浓度于12月16日20:00第一次达到峰值($195.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)后,污染过程进入第二阶段(12月16日21:00至12月19日08:00). 本阶段大陆高压主体向东北方向移动,华北大部地区逐渐转为均压场控制,100、500和1000 m高度气团均以西北高空输入为主,受动量下传影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在阶段前期略有下降,并呈现了小幅日变化,但中后期静风频率逐渐增加,污染物局地积累作用明显. 与之对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 本地贡献显著上升,12月19日08:00已迅速攀升至62.1%,同期天津市贡献上升幅度也较为明显,于12月17日14:00达到峰值13.7%. 第三阶段为污染再次累积阶段(12月19日09:00

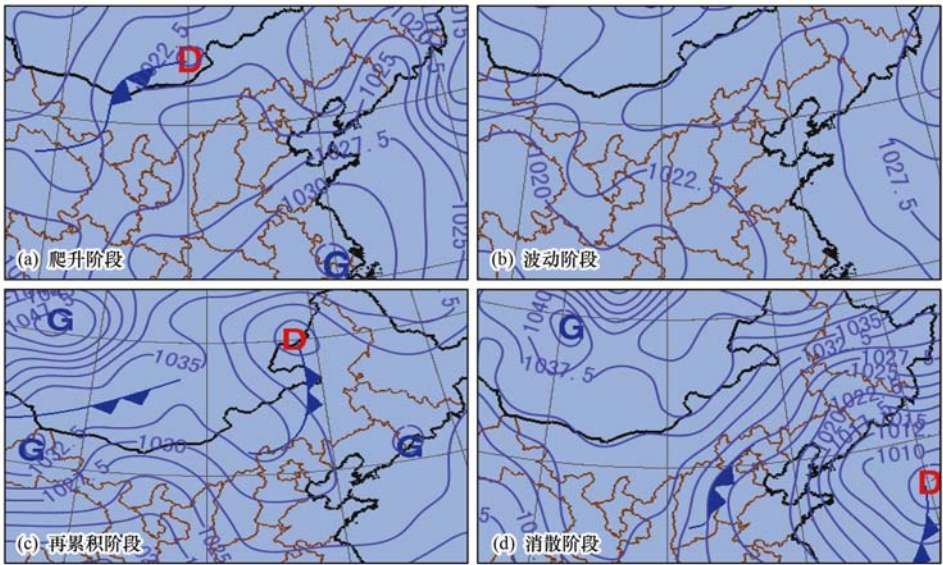


图7 典型污染过程不同阶段的海平面气压场

Fig. 7 Sea-level pressure during the four phases of a typical air pollution episode

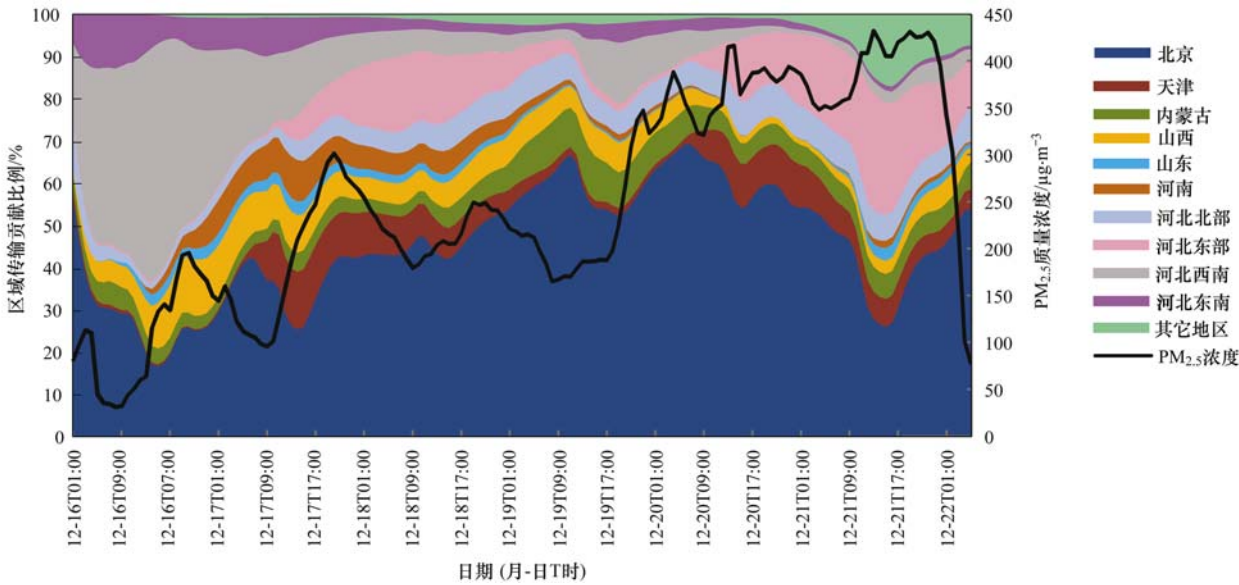


图8 典型污染期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化及区域传输贡献(2016 年)

Fig. 8 Variation of $PM_{2.5}$ concentration and regional transport contribution during typical air pollution (2016)

至12月21日13:00),北京处于高压底部,仍受大范围均压控制,污染气团转为南部气团输入,但当其移至北京近周边时速度明显减小.此外,该阶段地面辐合线始终在廊坊-石家庄一带摆动,区域大气湿度持续位于高值区,且夜间混合层高度一度维持在200 m左右,近地面逆温发展增强,从而导致了 $PM_{2.5}$ 出现暴发式增长,至12月21日13:00达到过程峰值浓度 $432.2\mu g\cdot m^{-3}$.其间伴随污染物的快速累积,本地贡献随之下降,而北京以东、以南区域输送贡献均有所上升,其中河北东部地区小时贡献高达27.8%.第四阶段为污染消散阶段(12月21日14:00至12月22日05:00),在此阶段系统性冷高压南下,冷空气侵入稳定层结,海平面气压场中

京津冀地区处于高压前部,气压梯度线较为密集.12月22日凌晨02:00左右,强冷空气前沿抵达北京城区,10 m风速明显增大($3\sim5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),污染物自北向南逐渐减弱消散,至早晨05:00全市平均 $PM_{2.5}$ 浓度已降为 $77.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,重污染过程趋于结束.但随着空气质量转好,本地贡献再次显著上涨,跃升至50%以上.

3 结论

(1)2016~2017年秋冬季北京市共出现13次持续两天及以上的空气质量重污染过程.冬季过程占比61.5%,且污染程度和持续时间均高于秋季.

(2)地面弱气压、高湿度、低风速和较低的混

合层高度以及不同强度的逆温层结是近两年秋冬季重污染过程的主要气象特征。重污染期间平均相对湿度约是清洁时段的 2 倍之高, 近地面风场以偏东气流和西南气流出现较为频繁, 所占比例均达 30% 以上。

(3) 秋冬季重污染累积阶段影响北京地区的气团主要来自于西北、偏西、西南和东南路径。其中, 典型污染输送通道(西南和东南方向)的轨迹概率为 21.6%。

(4) 探究典型过程 $PM_{2.5}$ 的空间来源可知, 污染累积阶段的本地源排放贡献在 16.5% ~ 69.3% 之间。当气团来源于西北方向, 本地贡献快速上升; 若气团自南部输入, 则以外来传输为主导, 其中河北南部及东部区域贡献更为显著, 最高可达 19.1% 和 27.8%。

参考文献:

- [1] 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 等. 京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4005-4014.
Wang Z B, Liang L W, Lin X B, *et al.* Control models and effect evaluation of air pollution in Jing-Jin-Ji urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4005-4014.
- [2] 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3201-3209.
Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, *et al.* Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region during winter[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- [3] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2013~2015 年北京市 $PM_{2.5}$ 反应性气体和气溶胶粒径的特性分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3647-3657.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* The characteristics of $PM_{2.5}$, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3647-3657.
- [4] 程念亮, 张大伟, 陈添, 等. 2015 年北京市两次红色预警期间 $PM_{2.5}$ 浓度特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2409-2418.
Cheng N L, Zhang D W, Chen T, *et al.* Concentration characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing during two red alert periods[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2409-2418.
- [5] 张晗宇, 程水源. 北京市秋季亚微米细颗粒物浓度及其化学组分特征[J]. 科技导报, 2018, **36**(2): 47-54.
Zhang H Y, Cheng S Y. Study on the concentration of submicron fine particles and its chemical constituents in autumn in Beijing[J]. Science & Technology Review, 2018, **36**(2): 47-54.
- [6] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$ 污染相互输送特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of $PM_{2.5}$ in Jingjini region, 2015[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [7] Wen W, He X D, Ma X, *et al.* Understanding the regional transport contributions of primary and secondary $PM_{2.5}$ components over Beijing during a severe pollution episodes[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(7): 1720-1733.
- [8] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ during the winter of 2013 in Chengdu (China)[J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- [9] Hua Y, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Characteristics and sources of aerosol pollution at a polluted rural site southwest in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **626**: 519-527.
- [10] Zhu Y H, Huang L, Li J Y, *et al.* Sources of particulate matter in China: insights from source apportionment studies published in 1987-2017[J]. Environment International, 2018, **115**: 343-357.
- [11] Kim B U, Bae C, Kim H C, *et al.* Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: case study of high particulate matter event[J]. Atmospheric Environment, 2017, **162**: 55-70.
- [12] Wen W, Cheng S Y, Liu L, *et al.* Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Tangshan, China-hybrid approaches for primary and secondary species apportionment[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, **10**(5): 83-96.
- [13] 何斌, 梅世龙, 陆琛莉, 等. MEIC 排放清单在空气质量模式中的应用研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3658-3668.
He B, Mei S L, Lu C L, *et al.* The application of MEIC emission inventory in air quality model[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3658-3668.
- [14] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and classification of $PM_{2.5}$ pollution episodes in Beijing from 2013 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 170-179.
- [15] 薛亦峰, 周震, 聂滕. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1593-1601.
Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- [16] Jia J, Cheng S Y, Liu L, *et al.* An integrated WRF-CAMx modeling approach for impact analysis of implementing the emergency $PM_{2.5}$ control measures during red alerts in Beijing in December 2015[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(10): 2491-2508.
- [17] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 北京市 $PM_{2.5}$ 和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 829-837.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and $PM_{2.5}$ in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 829-837.
- [18] 刘超. 典型区域 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [19] 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2015 年 1 月下旬北京市大气污染过程成因分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(7): 2324-2331.
Wang Z S, Li Y T, Sun F, *et al.* Formation mechanism of air pollution episodes in Beijing in late January 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(7): 2324-2331.
- [20] Duncan B N, Martin R V, Staudt A C, *et al.* Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D2): 4100.
- [21] 廖晓农. 华北秋季强弱线型对流发展时天气尺度环境条件探讨[J]. 气象, 2013, **39**(3): 291-301.

- Liao X N. A discussion on the synoptic condition for the autumn linear convection developing in Huabei area[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, **39**(3): 291-301.
- [22] 邓发荣, 康娜, Kumar K R, 等. 长江三角洲地区大气污染过程分析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 401-411.
- Deng F R, Kang N, Kumar K R, *et al.* Analysis of air pollution episodes over different cities in the Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 401-411.
- [23] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [24] 杨孝文, 周颖, 程水源, 等. 北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 679-686.
- Yang X W, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 679-686.
- [25] 王跃. 北京 $PM_{2.5}$ 时空变化特征及重污染时段气象成因研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [26] Solazzo E, Bianconi R, Pirovano G, *et al.* Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **53**: 75-92.
- [27] 贾佳, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$ 及二次无机组分污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 801-811.
- Jia J, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Pollution characteristic of $PM_{2.5}$ and secondary inorganic ions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 801-811.
- [28] 张周祥. 秋冬季北京北部重污染事件 PM_1 化学组分特征及气象因素的贡献[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- [29] Liu X G, Li J, Qu Y, *et al.* Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4501-4514.
- [30] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, *et al.* A case study of aerosol processing and evolution in summer in New York City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(24): 12737-12750.
- [31] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 596-603.
- Yao Q, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Effects of relative humidity on the aerosol size distribution and visibility in the winter in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 596-603.
- [32] 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(1): 15-26.
- Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 14-25.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)