

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



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析.....肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐逊,陈魁,邓小文(3879)

基于高分辨率MARGA分析成都市PM_{2.5}中水溶性离子污染特征.....尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)

宿迁市PM_{2.5}中水溶性无机离子的季节特征和来源分析.....
.....马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)

鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布.....李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析.....林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)

西安市冬季PM_{2.5}中WSOC的光谱特性和来源解析.....杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)

长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测.....
.....杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)

连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析.....崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛吾,曹云擎(3941)

成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析.....王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)

德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案.....严茹莎(3961)

超低改造下中国火电排放清单及分布特征.....屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)

浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征.....赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)

垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选.....赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)

兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源.....韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)

然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素.....张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)

河套灌区地下水化学演变特征及形成机制.....崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)

石期河流域地下水化学特征及物质来源分析.....李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)

长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.....季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)

2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析.....李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)

菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响.....康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)

金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析.....刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)

典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.....孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)

微塑料对河水抗生素抗性基因的影响.....周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)

莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价.....廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)

拟柱胞藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异.....叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)

奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟.....李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)

浅基质层干植草沟运行效果的现场实验.....张佳炜,李田,张庭秀(4105)

海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输.....李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)

天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制.....石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)

过硫酸盐氧化处理含砷磷酸废水.....章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)

温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响.....刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)

ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能.....缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能.....刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)

雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨.....郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)

基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例.....
.....吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)

基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价.....
.....张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)

云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力.....张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)

水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期.....胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾缤,刘俊,廖柏寒(4218)

田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率.....郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)

桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果.....
.....段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)

秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响.....杨彩迪,卢升高(4246)

土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应.....王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)

粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响.....理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)

松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响.....张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)

黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应.....李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)

土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响.....程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)

黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系.....尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)

贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性.....王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)

玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附.....刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊蕊,彭晶,铁柏清(4322)

无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法.....梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)

《环境科学》征订启事(4061) 《环境科学》征稿简则(4132) 信息(4233, 4293, 4304)

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析

肖致美¹, 徐虹¹, 蔡子颖², 李鹏¹, 刘彬¹, 元洁¹, 郑乃源¹, 唐邈¹, 陈魁^{1*}, 邓小文^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 为了解2020年天津市两次重污染天气污染特征, 基于2020年1~2月高时间分辨率的在线监测数据, 对天津市2020年1月16~18日(重污染过程I)和2020年2月9~10日(重污染过程II)进行分析, 结果表明, 两次重污染过程均呈现前期区域输送和后期本地不利气象条件叠加双重影响的特点, 重污染过程期间平均风速均较低, 平均相对湿度接近70%, 部分时段接近饱和, 边界层高度低于300 m, 水平和垂直扩散条件均较差. 与重污染过程I相比, 重污染过程II主要污染物浓度和污染程度均降低, 尤其是NO₂浓度下降明显, 重污染过程II北部地区PM_{2.5}和CO浓度较高. 两次重污染过程PM_{2.5}中化学组分浓度和占比发生明显变化, 重污染过程I二次无机离子(SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺)、EC和Ca²⁺平均浓度较高, OC和Cl⁻平均浓度略低于重污染过程II, K⁺平均浓度低于重污染过程II. 与重污染过程I相比, 受燃烧源增加和移动源大幅降低影响, 重污染过程II中SO₄²⁻、OC和K⁺在PM_{2.5}中占比明显上升, NO₃⁻和EC在PM_{2.5}中占比明显下降; 工业持续生产使重污染II中NH₄⁺和Cl⁻在PM_{2.5}中占比相对较高; 工地的停工使两次重污染过程中Ca²⁺占比均较低. PMF解析结果表明, 重污染过程I中PM_{2.5}来源为二次离子、燃煤和工业、机动车、扬尘、烟花爆竹及生物质燃烧, 贡献率分别为53.8%、20.2%、18.6%、6.3%和1.1%; 重污染过程II中各源对PM_{2.5}的贡献率分别为48.3%、28.2%、8.7%、2.6%和12.2%. 与重污染过程I相比, 重污染过程II燃煤和工业、烟花爆竹及生物质燃烧对PM_{2.5}贡献率明显上升, 二次离子、机动车和扬尘贡献率明显下降, 尤其是机动车和扬尘, 贡献率分别下降53.2%和58.7%.

关键词: 天津; 重污染; PM_{2.5}; 污染特征; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-3879-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003109

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020

XIAO Zhi-mei¹, XU Hong¹, CAI Zi-ying², LI Peng¹, LIU Bin¹, YUAN Jie¹, ZHENG Nai-yuan¹, TANG Miao¹, CHEN Kui^{1*}, DENG Xiao-wen^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: High-resolution online monitoring data from January to February in 2020 was used to study the characterization of two heavy pollution episodes in Tianjin in 2020; the heavy pollution episode that lasted from January 16 to 18, 2020 (referred to as episode I) and that from February 9 to 10, 2020 (referred to as episode II) were analyzed. The results showed that two heavy pollution episodes were influenced by regional transportation in the early stage and local adverse meteorological conditions in the later stage. During these episodes, the average wind speed was low, the average relative humidity was close to 70%, and relative humidity approached the saturated, the boundary layer heights were below 300 m, and the horizontal and vertical diffusion conditions were poor. Compared to episode I, the concentration of pollutants decreased during episode II, especially for the concentration of NO₂. During the episode II, the concentrations of PM_{2.5} and CO were higher in the north of Tianjin. The chemical component concentrations and their mass ratios to PM_{2.5} changed significantly in both episodes; the concentrations of secondary inorganic ions (NO₃⁻, SO₄²⁻, and NH₄⁺), elemental carbon (EC) and Ca²⁺ were higher in episode I, the concentrations of organic carbon (OC) and Cl⁻ slightly increased in episode II; and the concentrations of K⁺ were higher in episode II. Compared to episode I, because of the increase in the combustion sources and significant reductions in the number of vehicles, the mass ratios of SO₄²⁻, OC, and K⁺ to PM_{2.5} increased while the mass ratios of NO₃⁻ and EC to PM_{2.5} decreased in episode II; the mass ratios of NH₄⁺ and Cl⁻ to PM_{2.5} were relatively higher due to the continuity of the industrial production processes; the mass ratios of Ca²⁺ to PM_{2.5} were lower in two heavy pollution episodes because construction activities were halted. Source apportionment of PM_{2.5} was performed using the positive matrix factorization (PMF) model. In episode I, the major sources of PM_{2.5} in Tianjin were secondary sources, industrial and coal combustion, vehicle exhaust, crustal dust, fireworks and biomass burning, with contributions of 53.8%, 20.2%, 18.6%, 6.3%, and 1.1%, respectively. In episode II, the same sources were identified in the PMF analysis with contributions of 48.3%, 28.2%, 8.7%, 2.6%, and 12.2%, respectively. Compared to episode I, the contributions of industrial and coal combustion, fireworks and biomass burning increased, and the contributions of secondary sources, vehicle exhaust, and crustal dust decreased in episode II; contributions of vehicle exhaust and crustal dust decreased by 53.2% and 58.7%, respectively.

Key words: Tianjin; heavy pollution; PM_{2.5}; pollution characterization; source apportionment

收稿日期: 2020-03-09; 修订日期: 2020-04-02

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160)

作者简介: 肖致美(1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: xiaozhimei01@163.com

* 通信作者, E-mail: kuichen@126.com; dxwpp@163.com

重污染天气是不利气象条件和较高污染物排放量共同作用的结果, 逆温、高湿和静稳等不利气象条件是重污染发生的外因^[1~4], 较高污染物排放量是重污染天气形成的主要内因^[5~7]. 京津冀区域是我国污染物排放较高的区域之一, 颗粒物污染严重^[8], 近年来, 以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的重污染天气频发^[9~14]. 2020 年 1 月下旬开始至 2 月中旬, 受春节假期及新冠疫情延迟复工影响, 大量工地停工、移动源活动减少和工业企业排放量降低, 京津冀区域部分涉气污染源的排放强度发生了明显变化, 但期间京津冀区域仍发生了重污染天气过程. 目前关于春节假期期间空气质量的分析主要集中在烟花爆竹燃放对空气质量的影响^[15~23], 有关春节假期重污染研究十分有限. 春节假期期间重污染过程有什么样的污染特征? 在涉气污染源的排放强度发生了明显变化的情况下, $PM_{2.5}$ 的化学组分和来源有什么样的变化? 这些变化为大气污染防治带来哪些启示和指导? 因此, 十分有必要开展春节假期以及其它时期重污染天气污染特征分析, 为大气污染防治提供技术支撑.

天津是京津冀区域核心城市之一, 位于京津冀区域的中北部, 是环渤海地区的经济中心, 2017 年常住人口为 1 556 万, 机动车保有量为 294 万辆^[24], 主要工业包括石油化工、电子、机械制造和钢铁冶金等, 是京津冀区域典型工业城市, $PM_{2.5}$ 污染较重, 选取天津市为研究城市开展重污染天气污染特征分析具有一定代表性. 天津于 2020 年 1 月 24 日开始春节放假, 之后受延迟复工影响, 污染源的排放强度发生明显变化, 2 月 9~10 日重污染天气发生在春节延迟复工期间, 为便于分析比较, 将 1 月 16~18 日重污染天气称为重污染过程 I, 2 月 9~10 日重度污染天气称为重污染过程 II.

1 材料与方法

1.1 观测场地

环境空气质量监测数据来自天津市空气质量监测网络, 目前天津市空气质量监测网络共有城市评价点 23 个, 其中国控评价点 14 个, 市控评价点 9 个, 覆盖天津市所有区. $PM_{2.5}$ 组分监测点位于南开生态区天津市生态环境监测中心 4 楼顶, 距地面约 15 m, 为天津市生态环境监测中心超级观测站. 采样点周边为居住区和学校, 北面 300 m 左右为主要交通线复康路, 监测时间为 2020 年 1 月 1 日至 2 月 15 日. 监测点位分布见图 1.

1.2 采样及分析方法

采用美国 Thermo 公司 TEOM 1405F 监测 $PM_{2.5}$, 质量控制严格按照《环境空气颗粒物 (PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)

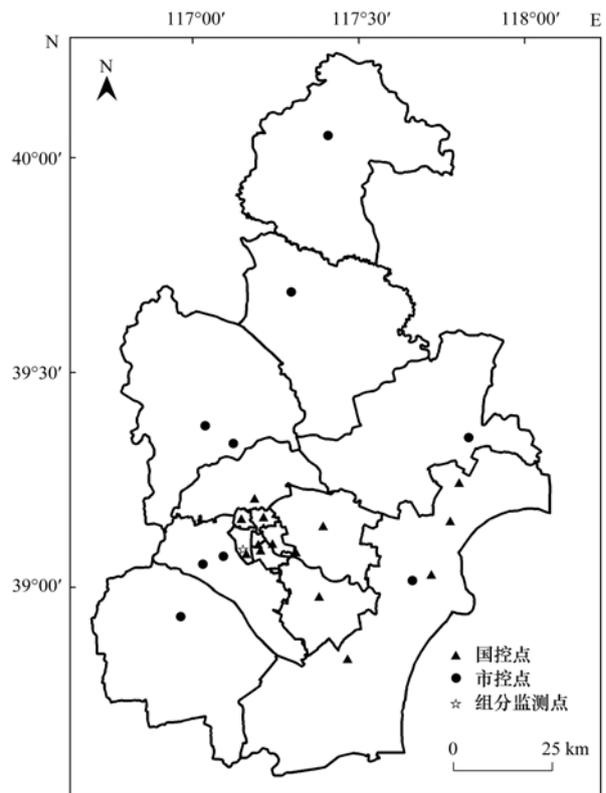


图 1 监测点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling station

连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 817-2018)^[25]要求进行. Thermo 42i 监测 NO_x , Thermo 43i 监测 SO_2 和 Thermo48i 监测 CO, 仪器每天进行自动校准, 质量控制均严格按照《环境空气气态污染物 (SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO) 连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 818-2018)^[26]要求进行.

采用美国 AIM-URG9000D 离子分析仪监测 $PM_{2.5}$ 中阴离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^-) 和阳离子 (Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+}). 每月配制标准溶液 (标准溶液均为优级纯), 绘制标准曲线, 相关系数除 NH_4^+ 外, 均大于 99.9% (NH_4^+ 相关系数大于 99.5%), 定期检查系统采样主流量 ($3 L \cdot min^{-1}$). 采用美国 Sunset Laboratory Inc 碳分析仪监测 $PM_{2.5}$ 中碳 (OC、EC), 系统每天自动内标检查, 每月用标准蔗糖溶液进行外标校正, 并定期检查系统采样流量 ($8 L \cdot min^{-1}$). 芬兰 CL31 云高仪观测大气边界层高度. 受检测原理局限, 当出现云层比较厚和云层比较低的情况, 监测仪器发出的光检测信号会被大量吸收, 仪器无法接收返回信号, 造成监测数据缺失, 导致监测数据不连续.

气象观测数据来自中国气象局天津大气边界层观测站 (台站编号为 54517); 区域其他城市空气质量数据来自真气网 (<https://www.aqistudy.cn/>); 污染物浓度与气象观测数据分析时均以小时为时间分辨率.

1.3 来源解析方法

采用正定因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型对 PM_{2.5} 的来源进行解析, PMF 模型利用权重计算颗粒物中各化学组分的误差, 通过最小二乘法确定主要污染源及其贡献^[27,28]. PMF 模型为:

$$X = G \times F + E \quad (1)$$

式中, X 为受体点位样品的各组分质量浓度矩阵, G 为源贡献矩阵, F 为源成分谱矩阵, E 为残差.

将颗粒物中化学组分数据作为模型输入文件, 经数学算法分解得出 F 、 G 和 E . 根据 F 对各类因子进行识别, 判别出各因子的主要来源, 而 G 可以估算各排放源对大气颗粒物的贡献情况, E 可表示模型计算过程中的不确定性.

PMF 模型在式(1)的基础上, 添加了目标函数:

$$Q(E) = \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^n (e_{ab}/\sigma_{ab})^2 \quad (2)$$

式中, m 和 n 分别表示样本数量和组分数量; e_{ab} 表示第 a 个样本中第 b 个组分的残差; σ_{ab} 代表第 a 个样本中第 b 个组分的不确定度; σ_{ab} 是由采样及分析过程中的采样误差、测量的检出限、缺失数据和异常值等因素决定的, PMF 模型在解析过程中目的是使目标函数 $Q(E)$ 最小.

2 结果与分析

2.1 气象因素分析

2.1.1 区域污染演变

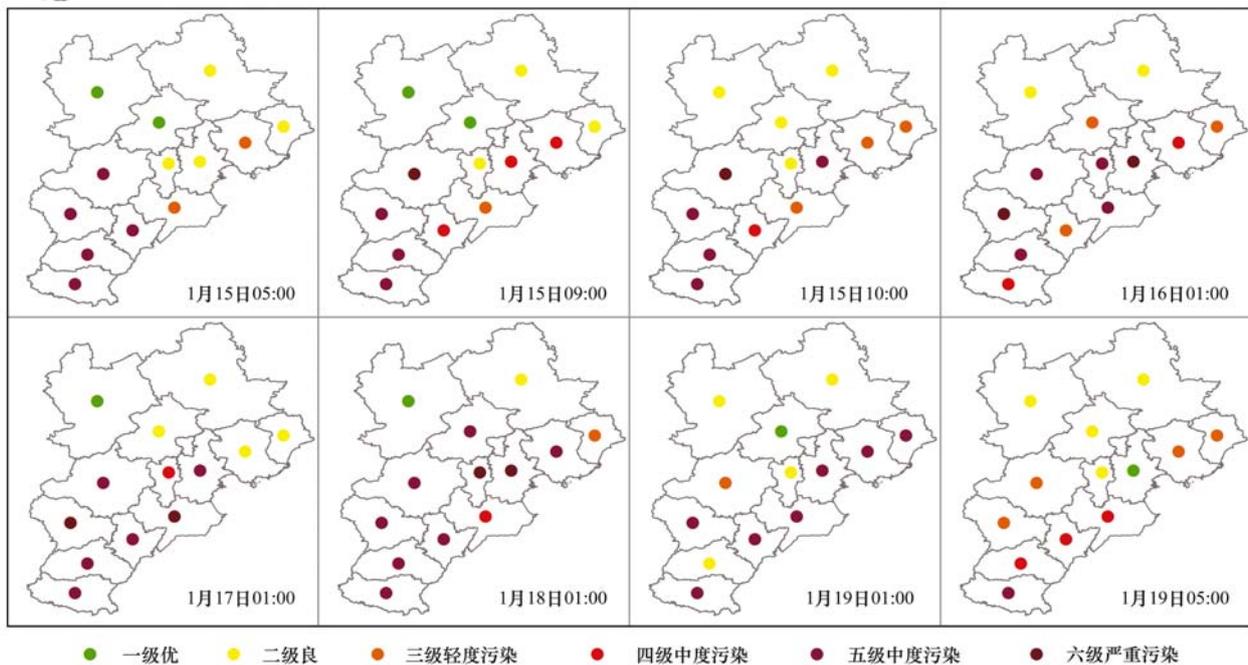
2020 年 1 月 14 日 00:00 至 15 日 04:00, 弱高

压下沉气流导致太行山前出现污染快速累积, 保定等地出现严重污染, 天津市 PM_{2.5} 浓度以优良为主, 1 月 15 日 05:00 至 10:00, 偏西和西南方向高浓度污染气团在西到西南风作用下向天津传输, 天津 PM_{2.5} 浓度迅速上升, 仅 5 h PM_{2.5} 浓度从良升至重度污染(图 2). 此后受弱高压系统和南北风场辐合影响, 天津 PM_{2.5} 浓度保持重度污染水平, 仅在 1 月 17 日下午垂直扩散条件好转, 边界层高度抬升, PM_{2.5} 浓度出现短暂降低. 该重污染过程持续至 1 月 19 日凌晨, 受冷空气影响, 天津地面转为西北风 4~5 级, 大气扩散条件逐渐转好, PM_{2.5} 浓度由北向南逐渐降低.

2020 年 2 月 8 日午后, 天津市大气扩散垂直扩散条件较好, 空气质量为良, 但京津冀太行山东侧大部分城市空气质量为重度污染, 2 月 9 日受自西向东弱冷空气影响, 京津冀太行山东侧城市空气质量改善, 但污染物受偏西-西南风影响传输至京津地区, 并在该区域内受高湿度环境、辐合风场和低边界层高度等不利气象条件影响, 持续出现重污染天气, 2 月 11 日白天, 天津南部地区东南风增加, 中南部地区空气质量由重度转为轻度, 但天津北部区域以及廊坊和北京地区仍然维持重度污染水平, 直到 2 月 14 日早晨, 受东北路径冷空气影响, 京津区域空气质量彻底转好(图 3).

2.1.2 气象因素分析

两次污染过程均呈现显著的前期区域输送和后



数据来源:真气网(<https://www.aqistudy.cn/>)

图 2 重污染过程 I 区域污染演变

Fig. 2 Variations in regional pollution during heavy pollution process I

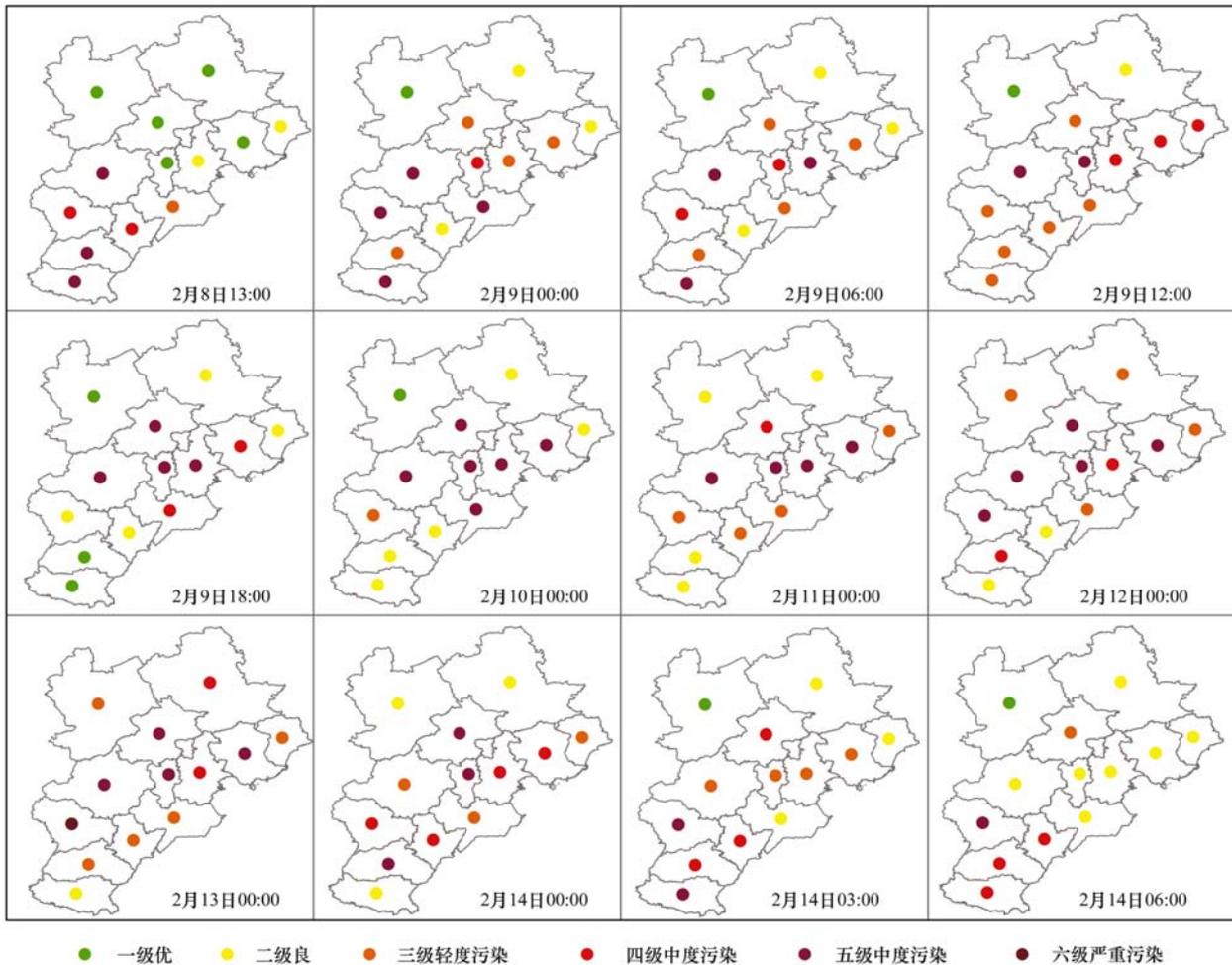


图3 重污染过程II区域污染演变

Fig. 3 Variations in regional pollution during heavy pollution process II

期本地不利气象条件叠加双重影响特征.一方面,污染气团的区域内迁移为局地重污染天气的发生提供可能;另一方面,本地不利气象条件的持续使污染气团无法再次移动,为局地重污染天气持续提供驱动.两次重污染期间,天津地面风向基本以西南风-南风为主,重污染过程I平均风速为 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度为65%,部分时段相对湿度达95%;重污染过程II平均风速为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度为68%,部分时段相对湿度达99%,接近饱和.高湿促进气溶胶的吸湿增长^[29-31],为气态前体物向二次颗粒的转化提供适宜的条件^[1,9,12,29],造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的累积上升.边界层高度可用来表征大气垂直扩散能力^[32],两次重污染期间,天津边界层高度均低于300 m,部分时段边界层高度仅为120 m左右(图4),近地层均存在逆温(图5),垂直方向扩散能力差,污染物在近地面显著累积.总之,从气象条件上看,两次重污染过程相似,前期区域输送后期叠加本地不利气象条件,导致重污染天气发生.

2.2 污染物浓度变化

两次重污染过程中,污染物小时浓度均随着风速、相对湿度和边界层高度的变化而发生变化.从总体浓度水平看,重污染过程I全市污染物平均浓度高于重污染过程II,重污染过程I全市 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO的平均浓度为 $12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $229 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,重污染过程II全市 SO_2 、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO的平均浓度为 $11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $161 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.与重污染过程I相比,重污染过程II污染物浓度和污染程度均明显降低,尤其是 NO_2 平均浓度下降32.9%.重污染过程I中 SO_2/NO_2 的比值为0.15,低于重污染过程II中的0.21,说明重污染过程II中移动源的贡献降低^[33].从空间分布上看,两次重污染过程中 SO_2 和 NO_2 空间分布相似,但重污染过程II中 SO_2 和 NO_2 浓度明显降低;对于 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO来说,重污染过程II天津北部的蓟州、宝坻浓度较高(图6).虽然两次重污染过程气象条件相似,但受春节假期和延迟复工影响,重污染过程II中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值明

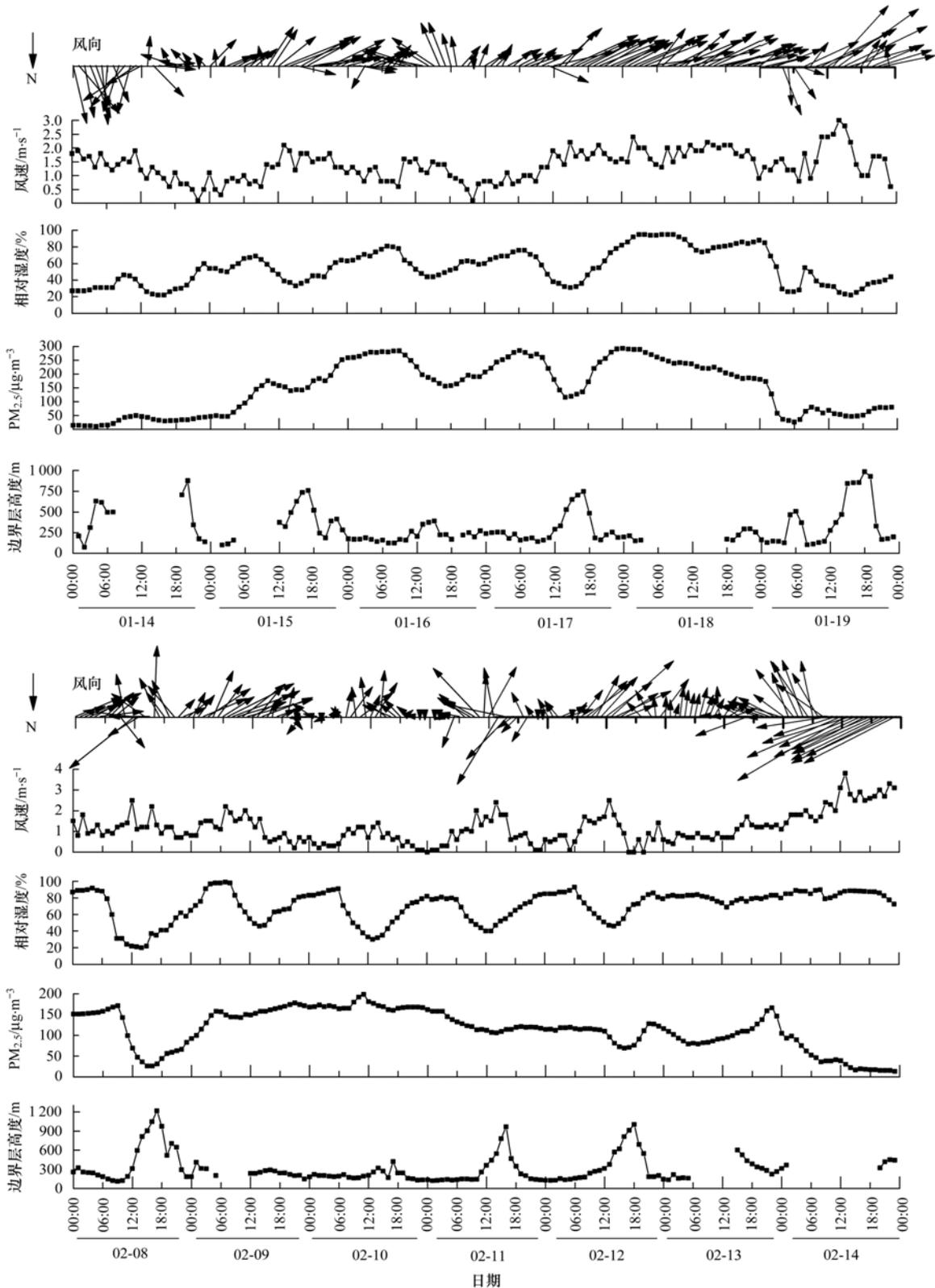


图 4 两次重污染过程中天津地面气象数据及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Fig. 4 Meteorological data and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during two heavy pollution processes in Tianjin

显低于重污染过程 I, 减少污染物排放量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削峰作用明显。

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征

两次重污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分呈现不同的特征. 重污染过程 I 中二次无机离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^-

和 NH_4^+) 平均浓度为 $133.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于重污染过程 II 的 $87.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 尤其是 NO_3^- 平均浓度, 重污染过程 I 是重污染过程 II 的 1.9 倍; 重污染过程 I 中 EC 平均浓度为 $5.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是重污染过程 II 的 1.9 倍; 两次重污染过程 OC 和 Cl^- 平均浓度基

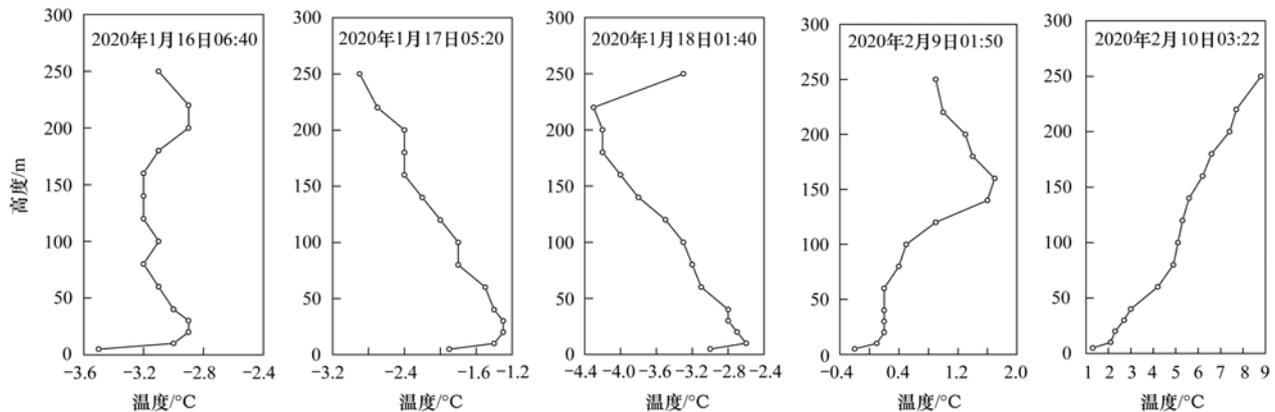


图5 两次重污染过程中温廓线分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature during two heavy pollution processes in Tianjin

本平稳,重污染过程Ⅱ浓度略高; K^+ 平均浓度在重污染过程Ⅱ明显增加,达 $4.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是重污染过程Ⅰ平均浓度的 1.9 倍; 两次重污染过程 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 平均浓度均较低,重污染过程Ⅰ中平均浓度分别为 0.4 、 1.5 和 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,重污染过程Ⅱ中平均浓度分别为 0.2 、 1.5 和 $0.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

从 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分占比看(图7),两次重污染过程二次无机离子在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比均较高,重污染过程Ⅰ和Ⅱ中分别为 53.8% 和 51.9%,进一步说明高湿的气象条件促使气态前体物的二次转化. 与重污染过程Ⅰ相比,重污染过程Ⅱ中 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、OC、 Cl^- 和 K^+ 等组分在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比明显上升,分别由重污染过程Ⅰ的 16.2%、12.6%、5.4%、2.2% 和 1.0% 升至重污染过程Ⅱ的 18.8%、13.8%、8.4%、3.3% 和 2.7%; NO_3^- 和 EC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比下降,分别由重污染过程Ⅰ的 25.0% 和 2.0% 降至重污染过程Ⅱ的 19.3% 和 1.6%; 两次重污染过程 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比均较低,重污染过程Ⅰ中分别为 0.2%、0.6% 和 0.1%,重污染过程Ⅱ中分别为 0.1%、0.9% 和 0.2%。

两次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分分布与污染源排放强度的变化密切相关. 重污染过程Ⅰ,移动源、工业企业排放正常,与这些源排放相关的二次无机离子和 EC 等组分浓度均较高^[34]. 重污染过程Ⅱ,受延迟复工影响,移动源大量减少, NO_2 平均浓度明显下降,与移动源排放相关的 NO_3^- 浓度及在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比呈现明显下降趋势; 由于移动源的大幅降低,重污染过程Ⅱ中二次无机离子主要由燃煤源排放的气态前体物(SO_2 和 NO_x) 转化而成. 重污染过程Ⅱ中 SO_4^{2-} 和 OC 占比明显高于重污染过程Ⅰ,说明燃烧源影响增加. 受延迟复工影响,大量外出务工人员只能呆在家里,这些务工人员主要居住于郊区或农村,燃烧和生物质的影响增加可能与农村取暖

和餐饮有关. 同时,2月9~10日为元宵节期间, K^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比增加可能与烟花爆竹燃放有关. 从全市各区 CO 浓度分布看,天津远郊区浓度相对较高,这也在一定程度上说明这些区散煤污染较为严重. 延迟复工期间虽然移动源流量较平时下降,但高污染行业(包括钢铁、炼焦、玻璃、石化和制药等)存在大量不可中断工序,仍需要持续生产,在移动源总量降低的前提下,与工业企业排放相关的 NH_4^+ 、 Cl^- 等组分在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比相对增加. 重污染过程Ⅰ期间天津市启动重污染天气橙色预警,重污染过程Ⅱ期间天津几乎所有的工地均处于停工状态,因此标识扬尘排放 Ca^{2+} 浓度以及在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比均较低,并在重污染过程Ⅱ中呈现下降趋势。

通常用 $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ 质量浓度的比值作为反映固定源(如燃煤)和移动源(如汽车尾气)对大气颗粒物中水溶性组分相对贡献的重要指标^[1,12],重污染过程Ⅰ期间 $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ 的比值为 0.65,低于重污染过程Ⅱ期间的 0.97,这也说明了重污染过程Ⅱ期间天津市燃煤影响增加,移动源影响明显降低。

与历年重污染天气相似^[1,12],本研究两次重污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分依然是二次无机离子和碳组分,说明近年来天津市主要污染源排放结构并没有明显的变化. 与夏季相比^[35],冬季重污染过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次无机离子浓度和占比均明显上升,说明冬季重污染过程期间前体物二次转化明显增加。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 来源

采用美国环保署最新公布的 PMF 5.0 模型对 2020 年 1~2 月天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源进行定量解析. 将小时分辨率 $\text{PM}_{2.5}$ 样本输入模型,对其进行 5 个因子解析,结果如图 8 所示: 因子 1 主要由 OC、EC、

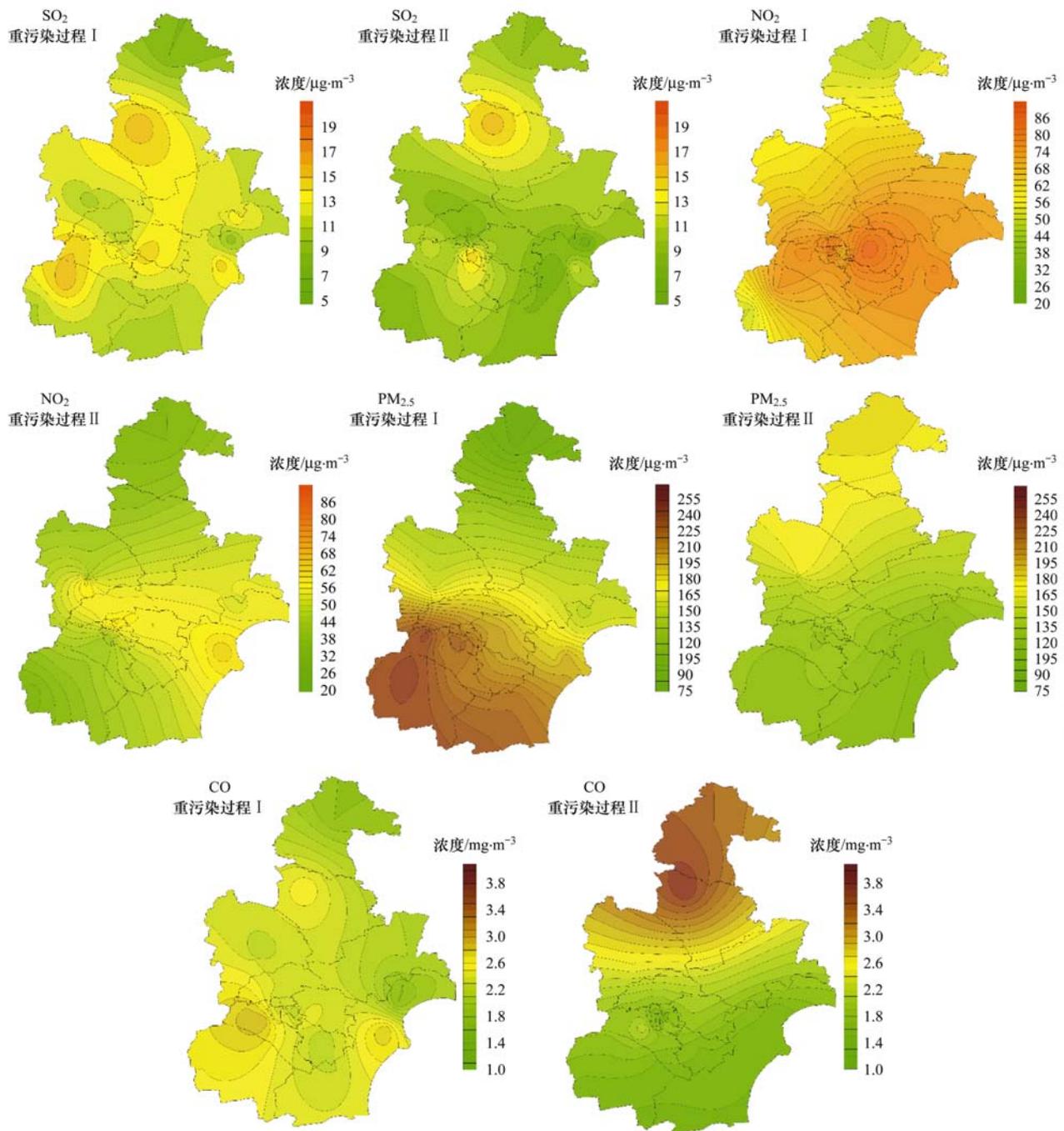


图 6 两次重污染过程天津主要污染物浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of main pollutants during two heavy pollution processes in Tianjin

NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 Cl^- 组成, 这些因子与燃煤和工业排放有关^[36], 故认为因子 1 代表工业和燃煤排放; 因子 2 主要由 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 组成, 燃煤和机动车排放的 SO_2 和 NO_2 气态污染物与 NH_3 通过化学反应生成 SO_4^{2-} 和 NO_3^- , 故该因子代表二次离子^[37,38]; 因子 3 中 Ca^{2+} 的载荷值较高, 代表与土壤扬尘等相关的扬尘源^[37,39]; 因子 4 中 NO_3^- 、OC 和 EC 比重较大, 这些组分与机动车排放有关^[37,40], 故认为因子 4 代表机动车排放; 因子 5 中 K^+ 和 Mg^{2+} 载荷值较高, K^+ 主要来自生物质燃烧^[41],

Mg^{2+} 可代表烟花爆竹燃放^[23], 故因子 5 代表烟花爆竹及生物质燃烧排放。

从 PMF 解析结果看 (图 9), 两次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源贡献率发生明显变化, 重污染过程 I, $\text{PM}_{2.5}$ 来源为二次离子、燃煤和工业、机动车、扬尘、烟花爆竹及生物质燃烧排放, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率分别为 53.8%、20.2%、18.6%、6.3% 和 1.1%; 重污染过程 II, 二次离子、燃煤和工业、机动车、扬尘、烟花爆竹及生物质燃烧排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率分别为 48.3%、28.2%、8.7%、2.6% 和 12.2%。两次重

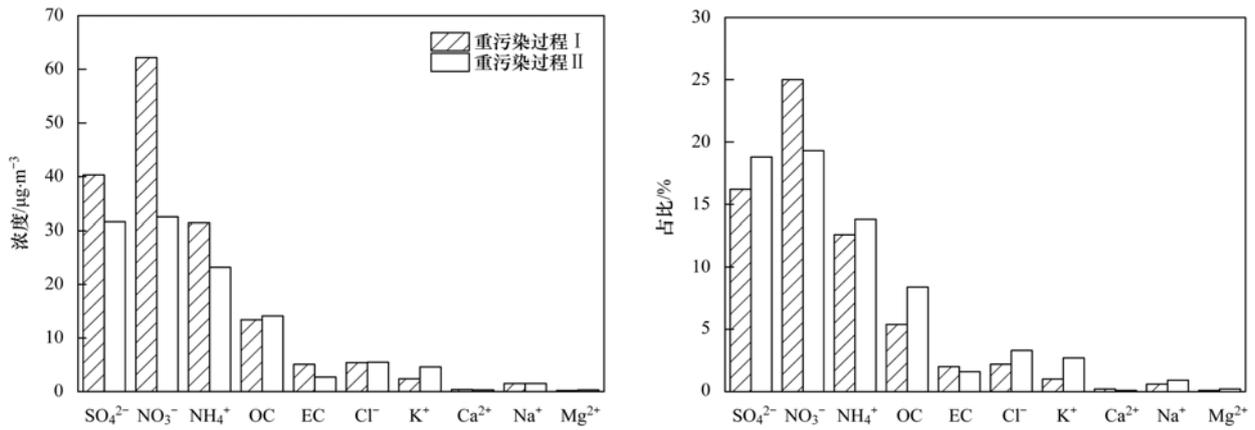


图 7 两次重污染过程 PM_{2.5} 中化学组分浓度及占比

Fig. 7 Chemical constituent concentrations and their mass ratios to PM_{2.5} during two heavy pollution episodes

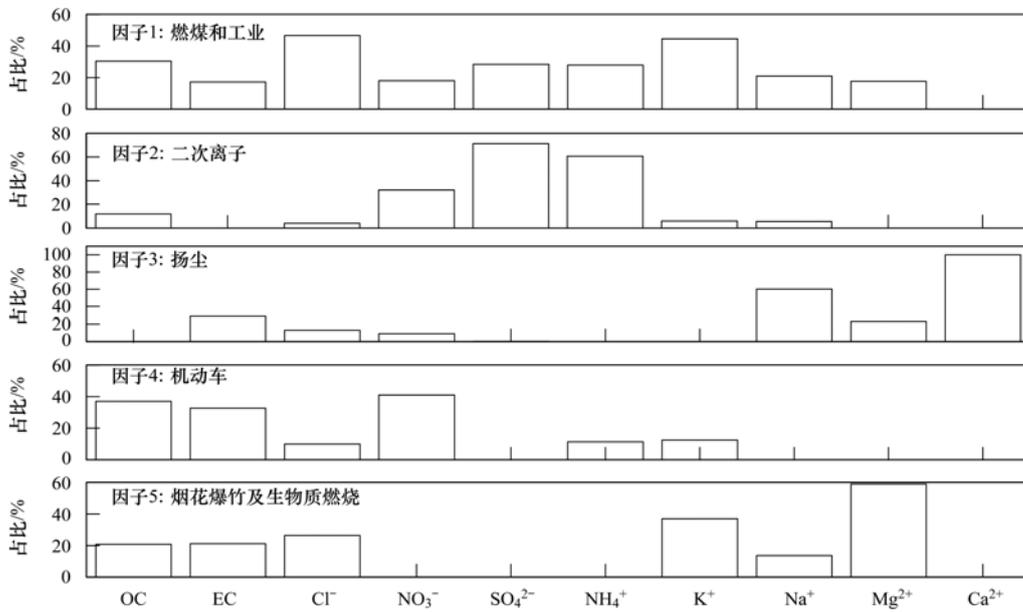


图 8 PMF 模型计算的源成分谱

Fig. 8 Source profiles calculated by PMF model

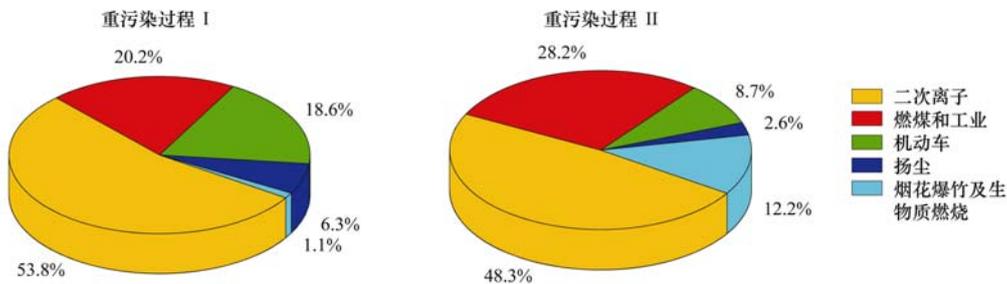


图 9 两次重污染过程 PM_{2.5} 来源解析结果

Fig. 9 Source apportionment of PM_{2.5} during two heavy pollution episodes

污染过程,二次离子、燃煤和工业均为 PM_{2.5} 主要来源.与重污染过程 I 相比,重污染过程 II 燃煤和工业、烟花爆竹及生物质燃烧对 PM_{2.5} 贡献率明显上升,二次离子、机动车和扬尘对 PM_{2.5} 贡献率明显下降,尤其是机动车和扬尘,贡献率分别下降 53.2% 和 58.7%.

3 讨论

特殊时期的重污染天气污染特征和来源,为常态化的大气污染防治和环境管理带来一些启示:从重污染过程形成原因来看,区域内城市空气质量相互影响,在京津冀区域污染整体较重、区域输送及污

染气团辐合滞留的影响下,区域内城市极易发生重度污染,只有加强区域联防联控,不断降低整个区域污染物排放量,城市重污染天气才能逐渐好转,环境空气质量才能逐渐改善。

从污染物的整体浓度水平看,污染物排放总量的减少对降低污染程度的效果明显。从 $PM_{2.5}$ 的化学组分和来源上看,无论是常态下还是特殊时期,二次无机离子和 OC 始终是 $PM_{2.5}$ 中主要的化学组分,燃煤和工业的一次排放及其前体物的二次转化起主导作用,燃煤和工业排放始终是天津市 $PM_{2.5}$ 最主要的两类污染来源。虽然近年来燃煤和工业污染得到一定程度的控制,但排放强度依然较大,产业结构和能源结构的调整始终是天津大气污染防治的主要方向。烟花爆竹燃放和生物质燃烧作为特殊时段的污染来源,在一定程度上加重了污染程度,但不是重污染的根本驱动要素。

特殊时期的工地停工、道路上机动车大幅减少,扬尘和机动车对 $PM_{2.5}$ 的贡献率明显降低,说明施工和道路扬尘依然是城市扬尘管控的重点;特殊时期天津市部分辖区的散煤问题有所反弹,尤其是远郊区的蓟州和宝坻散煤燃烧问题相对比较明显,远郊区的散煤污染管理仍需加强。

4 结论

(1) 两次重污染过程均呈现出前期区域输送和后期本地不利气象条件叠加双重影响的特点。重污染过程中,天津地面风向基本以西南风-南风为主,平均风速均较低,平均相对湿度接近 70%,部分时段接近饱和,边界层平均高度均低于 300 m,水平和垂直扩散条件均较差。

(2) 与重污染过程 I 相比,重污染过程 II 污染物浓度和污染程度均降低, NO_2 浓度下降明显。两次重污染过程 SO_2 和 NO_2 浓度空间分布相似,重污染过程 II 天津北部的蓟州、宝坻 $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度明显高于其他区域。

(3) 重污染过程 I 中二次无机离子、EC 和 Ca^{2+} 平均浓度均较高,OC 和 Cl^- 平均浓度略低于重污染过程 II, K^+ 平均浓度低于重污染过程 II。受燃烧源增加和移动源大幅降低影响,重污染过程 II 中 SO_4^{2-} 、OC 和 K^+ 在 $PM_{2.5}$ 中占比明显上升, NO_3^- 和 EC 在 $PM_{2.5}$ 中占比明显下降;工业持续生产使重污染过程 II 中 NH_4^+ 和 Cl^- 占比相对较高;工地的停工使两次重污染过程中 Ca^{2+} 占比均较低。

(4) 两次重污染过程中二次离子、燃煤和工业均为 $PM_{2.5}$ 主要来源。重污染过程 II 中燃煤和工业、烟花爆竹及生物质燃烧对 $PM_{2.5}$ 贡献率明显上升,二

次离子、机动车和扬尘贡献率明显下降,尤其是机动车和扬尘,贡献率分别下降 53.2% 和 58.7%。

(5) 无论是常态下还是特殊时期,燃煤和工业排放始终是天津市 $PM_{2.5}$ 最主要的两类污染来源,产业结构和能源结构的调整始终是天津市大气污染防治的主要方向,特殊时期应加强特殊污染源管控(如散煤、烟花爆竹及生物质燃烧等)。

参考文献:

- [1] 徐虹,肖致美,孔君,等. 天津市冬季典型大气重污染过程特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1239-1246.
Xu H, Xiao Z M, Kong J, et al. Characteristic of atmospheric heavy pollution episodes in Winter of Tianjin [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1239-1246.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Research, 2011, 101(3): 711-718.
- [5] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [6] Song C B, Wu L, Xie Y C, et al. Air pollution in China: status and spatiotemporal variations [J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 334-347.
- [7] Wang J D, Zhao B, Wang S X, et al. Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 426-447.
- [8] 中国环境监测总站. 2013-2018 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2020-03-30.
- [9] Wang Y J, Bao S W, Wang S X, et al. Local and regional contributions to fine particulate matter in Beijing during heavy haze episodes [J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 283-296.
- [10] 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.
- [11] Ji D S, Wang Y S, Wang L L, et al. Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. Atmospheric Environment, 2012, 50: 338-348.
- [12] 徐虹,肖致美,陈魁,等. 天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2519-2525.
Xu H, Xiao Z M, Chen K, et al. Secondary inorganic pollution characteristics during heavy pollution episodes of 2017 in Tianjin [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2519-2525.
- [13] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析 [J]. 环境科学研究, 2015, 28

- (2): 163-170.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. *Research of Environmental Science*, 2015, **28**(2): 163-170.
- [14] Wang Y H, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Aerosol physicochemical properties and implications for visibility during an intense haze episode during winter in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3205-3215.
- [15] Wang Y, Zhuang G S, Xu C, *et al.* The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 417-431.
- [16] 李令军, 李金香, 辛连忠, 等. 京市春节期间大气污染分析 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(5): 537-541.
Li L J, Li J X, Xin L Z, *et al.* Analysis of atmospheric air pollution of Beijing city in spring festival period [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(5): 537-541.
- [17] Zhang M, Wang X M, Chen J M, *et al.* Physical characterization of aerosol particles during the Chinese New Year's firework Events [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(39): 5191-5198.
- [18] 何松洁, 王英, 李令军, 等. 元宵节燃放烟花爆竹对北京市空气质量的影响 [J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2012, **21**(1): 22-27.
He S J, Wang Y, Li L J, *et al.* The influence of the burning of fireworks on air quality during the lantern festival in Beijing [J]. *Journal of MUC (Natural Sciences Edition)* 2012, **21**(1): 22-27.
- [19] 赵素平, 余晔, 何建军, 等. 兰州市2011年春节期间颗粒物浓度及其谱分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(11): 1939-1947.
Zhao S P, Yu Y, He J J, *et al.* Concentration and size distribution of aerosol particles during 2011 Spring Festival in Lanzhou [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(11): 1939-1947.
- [20] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 春节期间南京气溶胶质量浓度和化学组成特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 30-39.
Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* The mass concentration and chemical compositions of the atmospheric aerosol during the Spring Festival in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 30-39.
- [21] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2014年春节期间北京市空气质量分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 371-378.
Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Analysis of air quality in Beijing City during Spring Festival period of 2014 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 371-378.
- [22] 程念亮, 陈添, 张大伟, 等. 2015年春节北京市空气质量分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3150-3158.
Cheng N L, Chen T, Zhang D W, *et al.* Air quality characteristics in Beijing during Spring Festival in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3150-3158.
- [23] 杨志文, 吴琳, 元洁, 等. 2015年春节天津烟花爆竹燃放对空气质量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(1): 69-75.
Yang Z W, Wu L, Yuan J, *et al.* Effect of fireworks on the air quality during the Spring Festival of 2015 in Tianjin City [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 69-75.
- [24] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [25] HJ 817-2018, 环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统运行和质控技术规范[S].
- [26] HJ 818-2018, 环境空气气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范[S].
- [27] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [28] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1997, **37**(1): 23-35.
- [29] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(1): 3479-3494.
- [30] Kumar P, Hopke P K, Raja S, *et al.* Characterization and heterogeneity of coarse particles across an urban area [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 449-459.
- [31] Lagudu U R K, Raja S, Hopke P K, *et al.* Heterogeneity of coarse particles in an urban area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3288-3296.
- [32] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
Li M, Tang G Q, Huang J, *et al.* Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [33] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [34] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [35] Liu B S, Yang J M, Yuan J, *et al.* Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **185**: 22-31.
- [36] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China: 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [37] Liu B S, Song N, Dai Q L, *et al.* Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5} during the non-heating period in Taian, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **170**: 23-33.
- [38] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM_{2.5} in Beijing at a 1-h time resolution [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 162-171.
- [39] Bi X H, Feng Y C, Wu J H, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ in six cities of northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(5): 903-912.
- [40] Tao J, Gao J, Zhang L, *et al.* PM_{2.5} pollution in a megacity of southwest China: source apportionment and implication [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(16): 8679-8699.
- [41] Thurston G D, Ito K, Lall R. A source apportionment of U. S. fine particulate matter air pollution [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(24): 3924-3936.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)