

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM_{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锬, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 丁翔, 李志武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A²/O 与倒置 A²/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构与与环境因素响应关系分析 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估

党莹¹, 张小玲^{1*}, 饶晓琴², 康平¹, 何建军³, 卢宁生¹, 华明⁴, 向卫国¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 2. 中国气象局环境气象中心, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4. 成都市气象局, 成都 610072)

摘要: 近年来我国空气质量持续改善, 大气颗粒物浓度明显降低. 为探究气象条件和减排措施对细颗粒物(PM_{2.5})浓度的相对贡献, 选取两个典型代表城市——北京和成都, 对比分析两城市所处的地理环境条件、污染排放以及气象扩散条件. 结果表明, 北京与成都2013~2018年重污染天数及污染过程显著减少, SO₂和PM_{2.5}浓度降幅明显, 与2013年相比, 两城市2018年SO₂浓度的降幅分别为77.8%和70.9%, PM_{2.5}浓度分别降低了42.7%和48.5%. 冬季PM_{2.5}浓度下降速率最大, 每年分别以13.5 μg·m⁻³和14.1 μg·m⁻³的速率降低. 2013~2018年成都较北京风速偏小, 温度偏高约3℃, 静小风日数偏多, 冬季静小风频率高, 混合层高度、大气容量指数以及通风系数明显偏小, 大气扩散条件较差. 综合静稳天气指数(SWI)和环境气象指数(EMI)结果表明北京大气扩散条件优于成都, 但近几年的变化程度有所不同. 2014~2018年两城市的EMI呈减小趋势, 2018年成都地区EMI降幅最显著, 气象条件明显好转. 与2014年相比, 2018年北京与成都全年大气污染减排对PM_{2.5}浓度的贡献分别为33.5%和24.0%, 气象条件的贡献分别为7.2%和11.1%; 冬季减排贡献分别为31.7%和32.5%, 气象条件的贡献比全年的大.

关键词: 污染特征; 变化趋势; 减排贡献; 静稳天气指数(SWI); 环境气象指数(EMI); 北京; 成都

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3622-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012104

Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu

DANG Ying¹, ZHANG Xiao-ling^{1*}, RAO Xiao-qin², KANG Ping¹, HE Jian-jun³, LU Ning-sheng¹, HUA Ming⁴, XIANG Wei-guo¹

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Environmental Meteorological Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072, China)

Abstract: In recent years, China's air quality has been improving, and the concentration of atmospheric particulate matter has decreased significantly. In this study, the pollution characteristics and trends of two typical representative cities (Beijing and Chengdu) were analyzed. The geographical locations, pollution emissions, and meteorological diffusion conditions of the two cities were compared, to evaluate the relative contribution of meteorological conditions and pollution reduction regulations in decreasing fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations. The results showed that the number of heavily polluted days and pollution episodes in Beijing and Chengdu decreased significantly from 2013 to 2018, and the concentration of SO₂ and PM_{2.5} decreased substantially. Compared to 2013, SO₂ concentration in Beijing and Chengdu has decreased by 77.8% and 70.9%, whereas PM_{2.5} concentration has decreased by 42.7% and 48.5%, respectively. The largest reduction appeared in winter, when PM_{2.5} decreased at an annual rate of 13.5 μg·m⁻³ for Beijing and 14.1 μg·m⁻³ for Chengdu. During the study period, the wind speed in Chengdu was less than that in Beijing, temperature was approximately 3℃ higher, and static wind in winter was more frequent. A significantly lower mixed-layer height, atmospheric capacity index, and ventilation coefficient in Chengdu resulted in more unfavorable atmospheric diffusion conditions. The static and stable weather index and the environmental meteorological index (EMI) also showed that the atmospheric diffusion conditions were better in Beijing than in Chengdu. The EMI of the two cities showed a decreasing trend during the study period, and the decline in EMI in Chengdu was the most significant in 2018, indicating an evident improvement in meteorological conditions. In 2018, emission reductions are estimated to have contributed 33.5% and 24% to the decrease in PM_{2.5} in Beijing and Chengdu, respectively, and meteorological conditions contributed 7.2% and 11.1% to the reduction in these two cities. In winter, emission reductions respectively contributed 31.7% and 32.5% to reduction in Beijing and Chengdu, while meteorological conditions made a larger contribution.

Key words: pollution characteristics; trend of change; contribution to PM_{2.5} decrease; stable weather index (SWI); environmental meteorological index (EMI); Beijing; Chengdu

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-02-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602004, 2018YFC0214002); 四川省科技计划项目(2018JY0011, 2018SZDZX0023)

作者简介: 党莹(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向大气环境, E-mail: 229743738@qq.com

* 通信作者, E-mail: xlzhang@ium.cn

近 40 年来,由于我国经济和工业的快速发展,随之而来的大气污染问题也在加剧,重污染过程频发,对空气质量、人体健康和气候变化等都有着很大的影响^[1~3]. 而重污染事件频发的原因主要有两方面:污染物排放和气象条件. 有研究表明,在区域污染源排放确定的条件下,空气质量的好坏会受到气象条件的影响,一定的气象条件会为污染物的累积、传输、扩散、转化和清除提供有利的外部环境. 受污染区域的特殊地形、大气层结稳定、近地面的小风和逆温的存在都可能是导致污染频发的重要原因^[4,5].

为了改善空气质量,我国对于大气污染的治理力度不断加大,自国务院 2013 年 9 月颁布“大气污染防治行动计划”等多项治理方案以来,我国大气污染物的浓度发生了显著变化^[6]. 为了能够较好地量化评估减排措施和气象条件对环境空气质量改善的贡献情况,不少研究围绕着这一方面展开. 朱媛媛等^[7]对 2019 年 10~12 月京津冀及周边“2+26”城市进行了减排效果评估,认为应急减排措施有效地减少了区域性重污染过程的发生,区域性减排效果显著. 多个研究团队采用模式系统,评估了减排措施对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响,发现通过有力的排放管控,污染浓度可得到有效地控制^[8,9]. Wang 等^[10]选取了京津冀区域城市在亚太经合组织峰会(APEC)和国庆期间的 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征,对在此期间的管控效果作出评估,得到北京 $PM_{2.5}$ 浓度在这两个时间段内分别下降了 51.6%~65.1% 和 34.2%~64.7%,区域性减排措施实施效果明显. 且在其他对 APEC 或者国庆期间的研究中也得到了类似的结论^[11~13]. 欧阳正午等^[14]对 2014~2017 年四川盆地和京津冀地区的大气质量改善进行评估对比分析,认为四川盆地在气象条件、大气扩散能力差的条件下,减排效果更突出,强有力的减排措施是主要因素. Zhang 等^[15]利用 PLAM 指数研究了气象条件对我国重点地区 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响,认为在京津冀、长三角和珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 浓度降幅明显,主导因素来自于减排的贡献. 张恒德等^[16]通过构建静稳天气指数 SWI,对京津冀地区 2015 年一次重污染过程进行分析评估,指出 SWI 在重污染预报和减排评估中有较好的应用参考价值. 刘洪利等^[17]通过构建环境气象指数 EMI,评估分析了气象条件与减排对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响.

北京作为我国首都和超大城市,城市规模和发展水平十分快速,成都作为我国西南地区快速发展的特大城市和大气污染多发城市,近年来城市化发展迅速. 据统计,2018 年末北京与成都市人口总数

分别达 1 375.8 万和 1 476 万 (<http://data.stats.gov.cn/>),北京更是以 608.4 万辆 (<http://jtgl.beijing.gov.cn/>) 机动车保有量领跑全国,成都以 548.4 万辆位居第二 (<http://www.cdstats.chengdu.gov.cn/>). 同时,两城市地理位置条件比较相似,且同为我国严重污染区域的代表城市,近几年空气质量改善显著. 为此,本文选取了北京与成都两个代表城市作为研究对象,对比分析年/季/月污染物特征以及污染物浓度的变化趋势及差异,分析两个城市气象条件和大气污染扩散参数的变化特点,评估 2013~2018 年北京与成都的减排措施对大气环境改善的贡献,以期对不同区域城市大气污染减排治理和效果评估提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 研究区域及地理环境条件

北京地区三面环山,呈西北高,东南低的“半包围”结构. 夏季高温多雨,冬季气候寒冷干燥,春季和夏季盛行西南风和偏南风,秋季和冬季主要以北风和东北风为主^[18];属于典型的暖温带半湿润大陆性季风气候. 成都地区地处四川盆地西部,位于两山之间,地势由西北向东南倾斜,高度差较大,属于亚热带季风性湿润气候,风速常年维持在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,春季和秋季主导风向以西北、北和东北为主,夏季北风和西北风向增多,冬季东北风最为显著^[19]. 空气潮湿,具有多云雾和多阴雨的气候特征.

本文空气质量数据选取北京与成都国控环境监测站的站点日均值数据,监测站点及位置见图 1. 本文中季节划分为:3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季以及 12 月和当年 1~2 月为冬季.

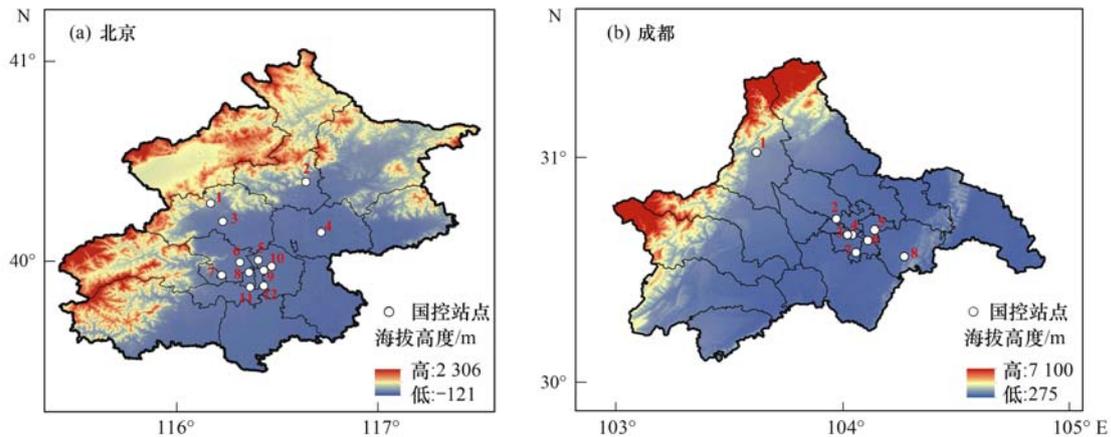
1.2 资料来源

空气质量资料:北京与成都市 2013~2018 年 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 数据来自中国环境监测总站 (<http://106.37.208.233:20035/>) 的站点日均值数据,成都市梁家港站点 2017 年 10 月 27 日停运,同日龙泉驿区政府观测站点启用. 部分污染物排放数据和城市化指标数据来源于统计年鉴.

气象资料:北京市与成都市同期逐小时地面观测数据(温度、相对湿度、降水、风向和风速等)分别来自北京观象台和成都温江气象站,并处理成日均值数据. 本文混合层高度数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF),时间范围为 2013 年 1 月 1 日~2018 年 12 月 31 日的 ERA5 数据集,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

1.3 研究方法

大气通风系数反映了大气边界层内通风情况,



(a)北京:1~12分别为定陵、怀柔镇、昌平镇、顺义新城、奥体中心、海淀区万柳、古城、东四、官园、农展馆、万寿西宫和天坛;
(b)成都:1~8分别为灵岩寺、金泉两河、十里店、君平街、大石西路、沙河铺、三瓦窑和龙泉驿区

图1 北京与成都国控环境监测站点分布

Fig. 1 Distribution of environmental monitoring sites in Beijing and Chengdu

能较好地说明大气的扩散能力,是混合层高度内风速的积分,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,计算方法为大气边界层高度乘以边界层内平均风速,值越大越有利于大气污染物的扩散^[20].而混合层高度也是衡量大气垂直扩散能力的因素之一,边界层较低易使污染物和水汽积聚,从而导致污染加重^[21].

大气容量指数 A 是表征大气自身对污染物容纳能力的重要的物理量,与近地面层空气流动性、垂直方向上大气的稳定性、稳定层的厚度和降水等要素有关.数值越小,表示大气对污染物的容纳能力越低^[22],计算方法为:

$$A = \frac{\sqrt{\pi}VH}{2}$$

式中, H 为边界层高度(m), V 表示平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

静稳天气与大气重污染的发生有紧密联系,为定量描述大气的静稳程度,结合历史统计和预报经验,挑选易导致大气污染形成的气象要素及其阈值条件,通过权重求和构建静稳天气指数(SWI)^[16].静稳天气指数考虑了低层大气(850 hPa以下)和污染物扩散相关的动力和热力条件. SWI越高,越容易形成雾-霾和重污染天气.本文使用的数据来自中央气象台环境气象中心业务预报中计算的每日08:00的SWI指数.

EMI是指地面至1500 m高度内 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度与参考浓度($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的比值,根据 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度连续方程可以得到 t 时刻的浓度,该浓度与气象条件的排放沉降、传输和扩散有关,在假定不同年份同一时期 $\text{PM}_{2.5}$ 排放率不变的前提下EMI的差异就是气象条件所导致的浓度变化^[17].其计算公式如下:

$$\text{EMI} = \frac{c}{c_0}$$

$$\text{EMI}_t = \text{EMI}_{t_0} + \int_{t_0}^t (i\text{Emid} + i\text{Tran} + i\text{Diff}) dt$$

式中: c 为气柱(地面至1500 m高空)内示踪物平均质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); c_0 是根据环境空气质量指数技术规定(HJ_633-2012)中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度优等级的上限值($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); $i\text{Emid}$ 、 $i\text{Tran}$ 和 $i\text{Diff}$ 分别表示地表交换层的排放沉降作用、水平与垂直方向的大气输送作用和大气湍流作用对示踪物浓度变化的指数,单位为 s^{-1} .本文中减排贡献率为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度实际变化率和气象条件变化率(EMI的变化)的差值.

2 结果与讨论

2.1 2013~2018年北京市和成都市大气污染特征及变化趋势

自2013年以来,北京和成都废气中主要污染物排放情况逐年好转.据统计(图2),北京与成都2013~2017年废气中主要污染物排放明显减少,两城市工业排放量显著下降(表1)^[23],截至2017年北京 SO_2 、 NO_2 和工业烟粉尘较2013年下降比例高达92.6%、79.7%和84.2%,但生活废气排放量波动较大,2015年排放量最大,之后迅速减小.成都生活废气排放量逐年增加,尤其到2017年生活 SO_2 和烟粉尘排放量较2013年增加量超两成,生活源的排放量仍需加大治理力度.

2013~2018年北京和成都 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 浓度逐年降低,臭氧日最大8 h均值第90百分位浓度值呈波动变化(图3).2018年北京 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 年均浓度分别为51、6和 $41 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,较2013年分别下降42.7%、77.8%和26.8%;成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 年均浓度50、9和 $47 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,较2013年分别下降48.5%、70.9%和25.4%.且2013

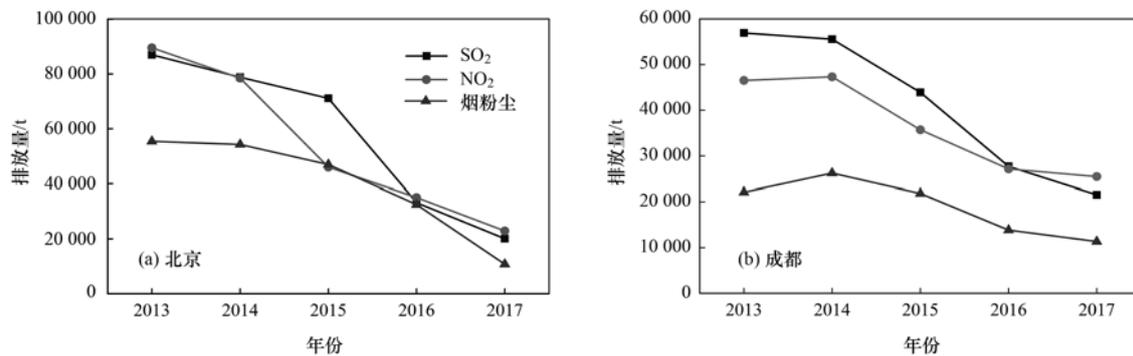


图2 北京和成都 2013~2017 年废气中主要污染物排放量变化

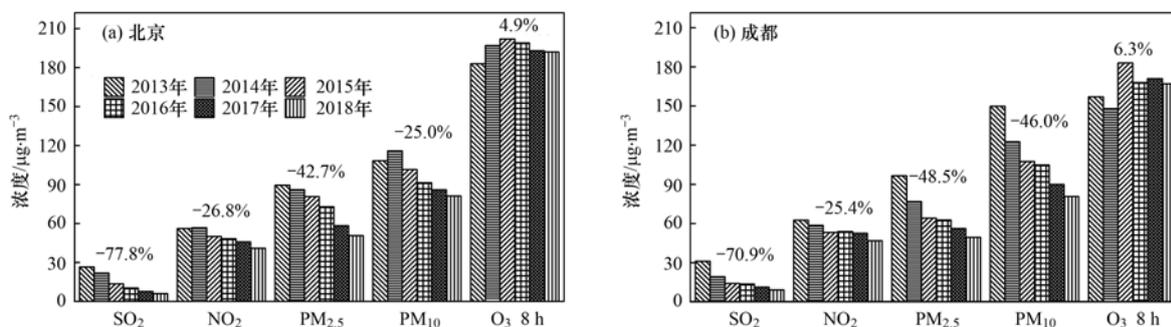
Fig. 2 Change in the emission of major pollutants in exhaust gas between Beijing and Chengdu from 2013 to 2017

表1 北京和成都 2013~2017 年工业与生活废气中主要污染物排放量情况¹⁾/t

Table 1 Emission status of major pollutants in industrial and domestic waste gas in Beijing and Chengdu from 2013 to 2017/t

年份	工业 SO ₂	工业 NO ₂	工业烟粉尘	生活 SO ₂	生活 NO ₂	生活烟粉尘
2013	52 041/52 040 ¹⁾	75 927/44 411	27 182/21 452	34 967/4 891	13 638/2 109	28 258/661
2014	40 347/50 754	64 400/45 249	22 710/25 574	38 475/4814	14 109/2 071	31 556/651
2015	22 070/37 224	26 864/33 299	12 987/20 607	49 064/6686	19 143/2 398	33 978/1 226
2016	10 257/17 318	23 412/2 4538	7 874/12 534	22 943/10366	11 652/2 589	24 630/1 296
2017	3 799/11 181	15 405/22 075	4 282/9 936	16 286/10366	7 510/3 400	6 506/1 402

1) 数值表示北京/成都,下同



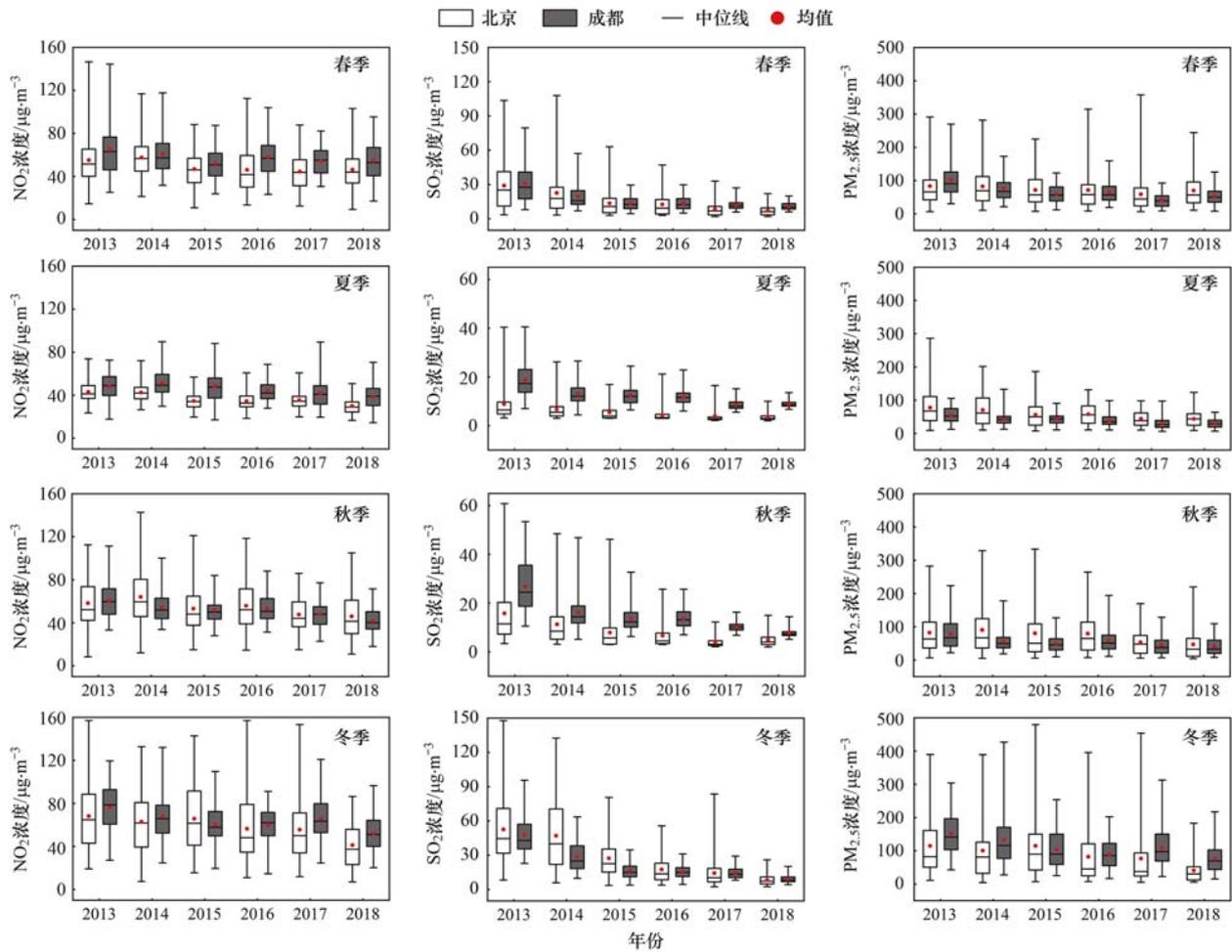
百分数代表 2018 年相比于 2013 年污染物浓度的变化比例

图3 2013~2018 北京和成都 SO₂、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀和 O_{3_8h} 年变化特征Fig. 3 Annual variation of SO₂, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, and O_{3_8h} change ratio from 2013 to 2018 in Beijing and Chengdu

年成都市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度明显高于北京,但在 2018 年末,成都市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 年均浓度已与北京持平,降幅更为明显. 2018 年 O_{3_8h} 浓度较 2013 年有所增加,且北京的 O_{3_8h} 浓度始终高于成都,这与北京地区夏季高温、低湿和日照强的气象条件有一定关系. 总体来看,北京与成都的 SO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度下降显著.

从季节上看(图 4),北京和成都 PM_{2.5}、SO₂ 和 NO₂ 浓度均表现为冬高夏低. 以 PM_{2.5} 为特征的细粒子污染呈现明显的季节变化,一般冬季最为严重,春秋季节次之. 需要指出的是 2018 年北京 PM_{2.5} 峰值浓度出现在春季,达到了 244.1 μg·m⁻³,秋、冬季污染水平较为接近,这与 2013~2017 年的季节变化趋势有所不同,但与北京市生态环境局发布的同期全市 PM_{2.5} 整体变化趋势接近,一是京津冀区域实施了更

为严格的污染减排措施^[24],使冬季 PM_{2.5} 污染浓度降低. 其次 2018 年冬季冷空气活动频繁,低温、低湿和北风频率高有利于污染的扩散^[25]. 三是北京春季管控措施较冬季有所缓和,部分时段仍有供暖且叠加多次区域沙尘传输影响,使得该季节 PM_{2.5} 浓度升高^[26]. 成都市 2018 年 PM_{2.5} 浓度较前几年明显降低. 与北京相比,成都春、夏、秋季的 PM_{2.5} 浓度偏小,但冬季 PM_{2.5} 浓度总体高于北京,这与成都地区冬季冷空气过程少、静小风频率高、湿度大、水平扩散能力和边界层垂直扩散条件差都有一定关系. 另外,成都的 NO₂ 浓度明显比北京偏高,高湿度下气态污染物的二次转化也是导致其颗粒物浓度升高的一个原因. 夏、秋季,成都 SO₂ 浓度高于北京地区,冬季,北京地区由于集中供暖、生物质燃烧增加,SO₂ 排放



箱型图从上至下依次为:最大值、75%分位数、中位数、25%分位数和最小值

图4 2013~2018年北京和成都NO₂、SO₂和PM_{2.5}季节变化特征

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of NO₂, SO₂, and PM_{2.5} from 2013 to 2018 in Beijing and Chengdu

量骤增^[27],导致SO₂高于成都.

进一步分析2013~2018年北京与成都不同季节PM_{2.5}浓度月均值及其线性趋势(图5),PM_{2.5}浓度在6a内呈现波动下降,其中冬季PM_{2.5}浓度下降速率最为显著,分别以每年13.5 µg·m⁻³和14.1 µg·m⁻³的速率降低.北京夏季以每年7.4 µg·m⁻³的速率降低,仅次于冬季,秋季次之;春季下降速率最慢;而成都夏、秋季下降速率相近且比北京的下降速率小,春季次于冬季,但比北京下降速率大.总体来看,北京与成都PM_{2.5}浓度在各个季节均有明显地下降,说明两城市各季节空气质量均得到改善.

根据HJ_633-2012《环境空气质量指数》(AQI)技术规定(试行),统计了北京[图6(a)]和成都[图6(b)]空气质量6个等级分别出现的天数及占比.图6表明了北京与成都2018年达标天数(优-良)分别为223 d和255 d,占全年61.4%和68.7%.而两个城市的重污染(200 < AQI ≤ 300)及严重污染天数(AQI > 300)逐年减少,2018年比2013年分别减少

74.1%和91.6%.2018年严重污染天基本消除(仅北京发生1 d),而重污染天数北京和成都分别有14 d和5 d.总的来说,2013~2018北京与成都的空气质量不断改善,污染物年平均浓度持续降低,重污染天数及污染过程显著减少.

表2是北京和成都地区2013~2018年持续污染过程(AQI > 150,污染持续天数 ≥ 3 d)相关特征的统计结果,北京AQI > 150的污染次数明显多于成都,但成都污染过程持续时间较长,平均持续时间为6.5 d,2013年成都最长的一次污染过程持续天数高达17 d,其中有12 d达到重度及以上污染.北京的污染过程持续时间较短,平均持续时间为4.1 d,最长一次污染过程为8 d.随着近几年多项污染治理措施的实施,北京与成都地区中度及以上污染过程逐年减少,污染过程持续时间缩短,并且持续污染过程期间的细颗粒物浓度逐年降低.此外,从表2中可以看出成都空气污染的累积相对缓慢,北京地区的污染过程在不利气象条件下增长较快.

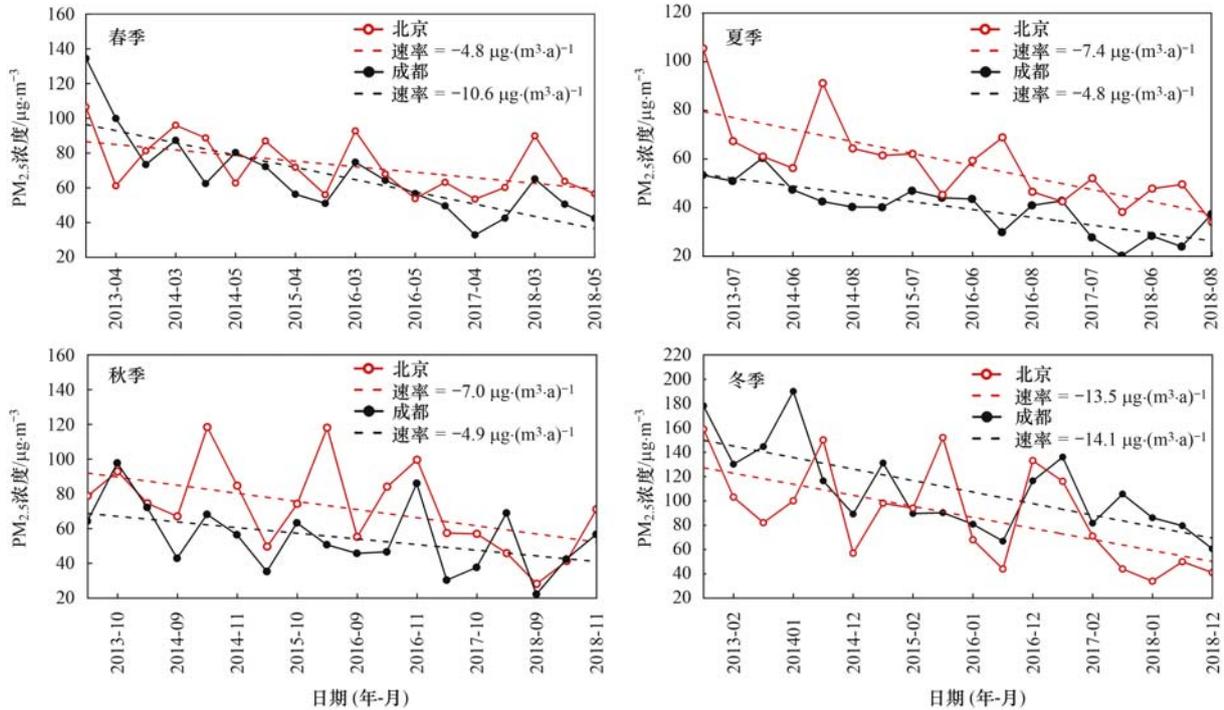


图5 2013~2018年北京与成都PM_{2.5}浓度季节变化速率特征

Fig. 5 Change rate of PM_{2.5} concentration in different seasons from 2013 to 2018 in Beijing and Chengdu

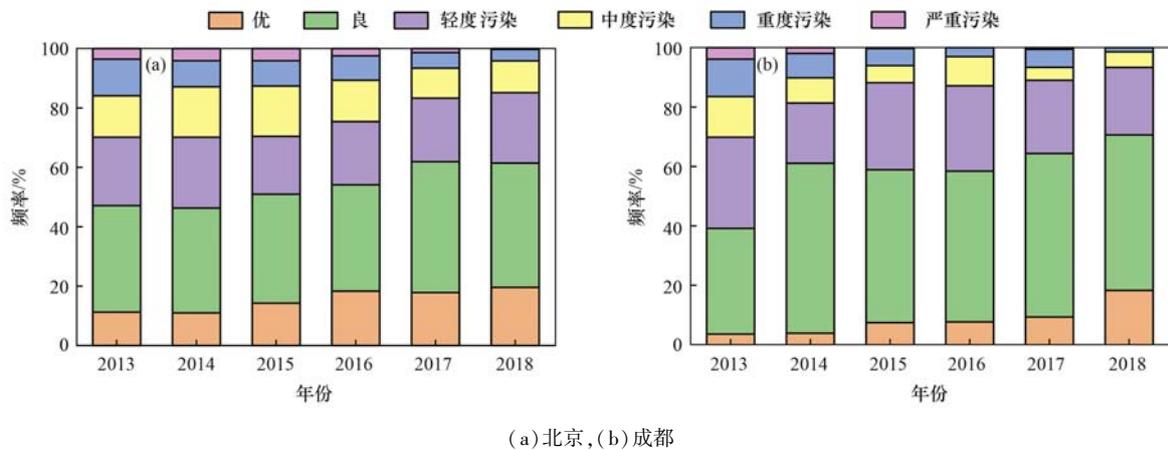


图6 2013~2018年北京和成都污染等级天数变化特征

Fig. 6 Variation characteristics in frequency of air quality level days from 2013 to 2018 in Beijing and Chengdu

表2 2013~2018年北京、成都AQI>150的持续污染过程统计结果

Table 2 Statistical results of persistent pollution events of daily AQI > 150 in Beijing and Chengdu from 2013 to 2018

年份	污染过程发生次数	空气污染平均持续天数/d	污染发展至峰值浓度平均所需天数/d	污染过程持续最长天数/d	污染发展至峰值浓度所需的最长天数/d	$\rho(\text{PM}_{2.5}) / \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2013	15/13	4.1/7.1	2.1/4.7	7/17	5/13	172.5 ± 67.5/169.7 ± 49.8
2014	13/10	4.2/5.2	2.2/4.5	7/11	5/10	164.6 ± 73.4/171.6 ± 60.6
2015	17/5	4.0/6.8	2.0/3.6	8/9	4/5	160.3 ± 80.3/151.1 ± 42.2
2016	12/5	3.9/4.6	2.2/1.5	6/6	5/2	154.8 ± 71.2/127.5 ± 35.5
2017	4/4	5.5/7.5	1.7/5	7/11	2/8	138.2 ± 88.1/155.6 ± 56.5
2018	4/4	3.0/3.3	1.2/2	3/4	2/2	112.5 ± 60.7/112.3 ± 46.9
2013~2018	65/38	4.1/6.5	1.9/3.5	8/17	5/13	150.5 ± 73.5/148.0 ± 48.6

2.2 气象条件分析

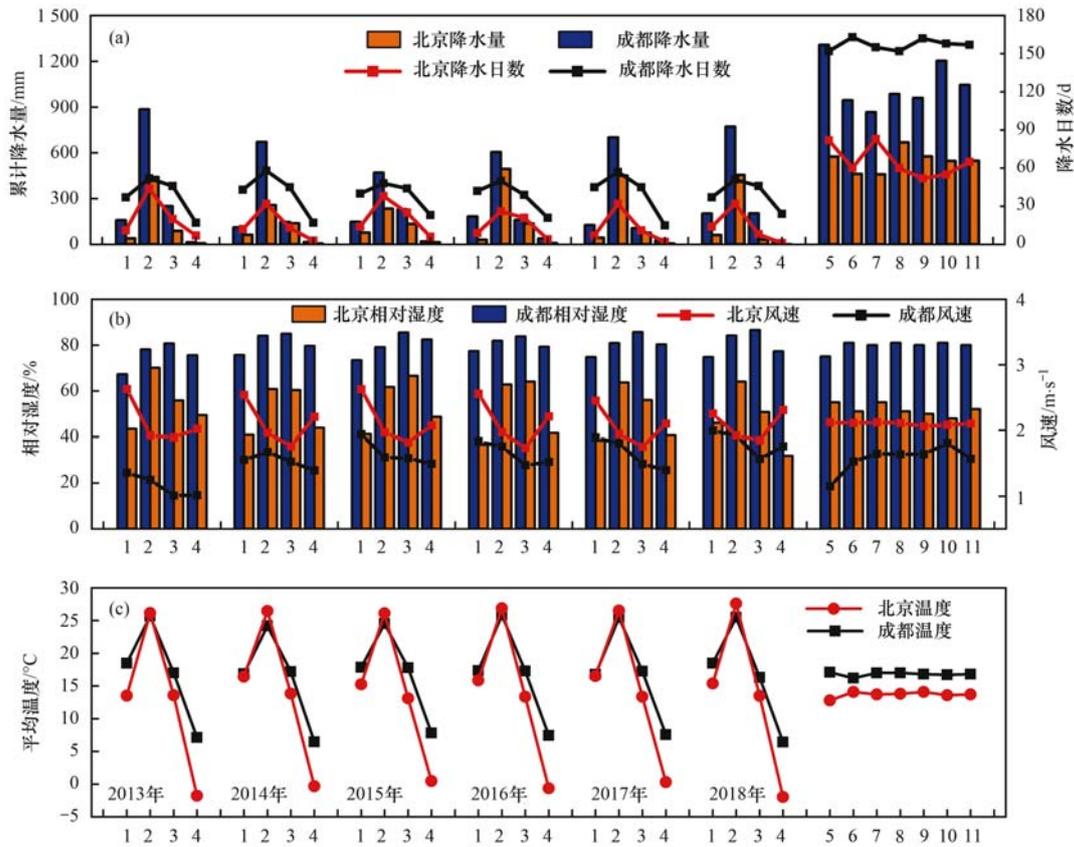
污染物浓度的减少及环境空气质量的改善会受到气象因子、人为排放和污染治理行动的共同影响。

在污染源确定的条件下,气象条件对大气污染状况影响很大^[28].为此,本文从温度、降水、相对湿度、风速风向和混合层高度等方面进行了对比和分析。

2.2.1 地面气象要素对比分析

对北京和成都基本气象要素变化特征进行分析可知(图7), 2013~2018年成都与北京相比, 风速偏小, 温度偏高约3℃, 小风日数偏多, 相对湿度较大, 降水量和降水频率偏高, 6 a平均降水量是北京的2倍, 对污染物的湿清除作用更为显著. 表明成都的气象条件主要以高温、高湿、多降水和小风(风速 $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)为主, 而北京则表现为气候干燥、风速偏大、

降水量少的气象条件. 进一步分析不同季节气象条件的差异表明, 2013~2018年成都各季节降水量大约是北京的2~3倍[图7(a)], 两个城市相对湿度[图7(b)]和温度[图7(c)]的差异主要表现在冬季, 其次是春季和秋季, 夏季平均温度基本接近. 2018年冬季, 两城市相对湿度较前几年降低, 风速有所增大, 加之冬季气温偏低, 该气象条件下两城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显降低, 这与图4中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势一致.



1. 春季, 2. 夏季, 3. 秋季, 4. 冬季, 5. 2013年, 6. 2014年, 7. 2015年, 8. 2016年, 9. 2017年, 10. 2018年, 11. 6 a平均

图7 2013~2018年北京与成都气象要素的季节和年变化特征

Fig. 7 Seasonal and annual variation characteristics of meteorological elements in Beijing and Chengdu from 2013 to 2018

分析2013~2018年北京与成都的边界层高度、大气容量指数和大气通风系数变化特征可知(图8), 北京和成都边界层高度、大气容量指数和大气通风系数均表现为春季最高, 夏季次之, 秋、冬季偏低的特征, 表明两城市春、夏季大气容纳能力较好. 北京2018年春季大气容量指数较前几年显著下降, 这与2018年春季风速降低[图7(b)]以及边界层高度明显降低[图8(a)]有关; 夏季, 大气容量指数较春季明显减小; 秋冬季波动较大, 2018年冬季大气扩散能力较好. 与北京相比, 成都边界层高度、大气容量指数、大气通风系数均较低, 大气容量指数四季均在1.0以下, 这与成都地区边界层高度较低, 风速常年偏低有密切关系. 综上所述, 成都的大气扩散条件更差.

2.2.2 不同污染等级下的气象扩散条件特征对比

分析2013~2018年不同污染等级下污染物浓度可知(表3), 北京与成都重度污染天 NO_2 浓度是非污染天的2倍, 这种较大浓度的 NO_2 为 NO_3^- 的形成提供了充足的前体物, 加之重污染时温度偏低, 湿度增大, 有利于气态污染物转化为二次颗粒物, 从而导致污染物浓度增加^[29]. 对比来看, 北京在非污染和轻中度污染类型下大气扩散条件优于成都, 轻中度污染类型下, 成都由于其地理位置的特殊性, 风速、边界层高度、大气容量指数以及通风系数均明显偏小, 扩散条件弱于北京, 成都的污染物浓度在这一类型下也比北京偏高. 在重污染类型下, 两城市的大气扩散条件差异性减小, 大气扩散能力均较差, 北京地区的大气扩散条件显著降低.

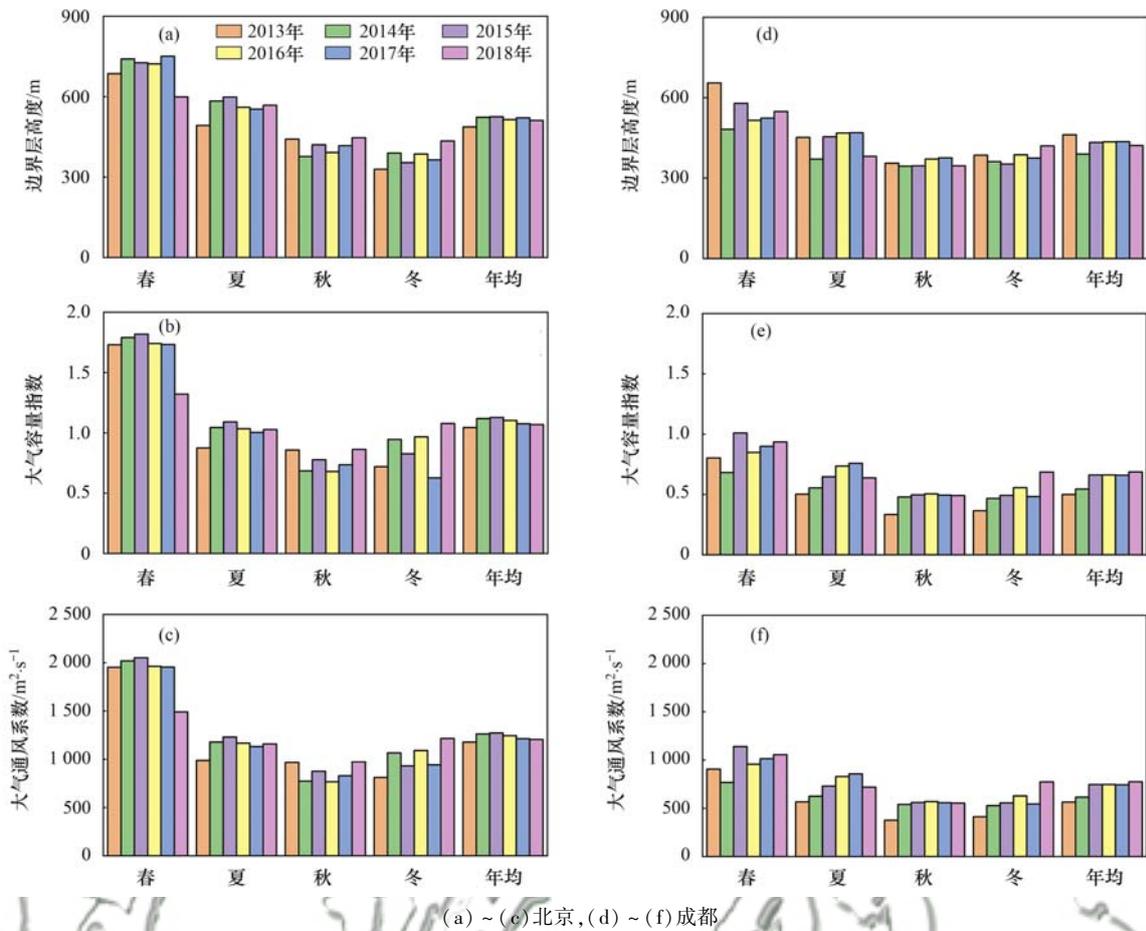


图 8 2013 ~ 2018 年北京和成都大气边界层高度、大气容量指数和通风系数变化特征
 Fig. 8 Variation characteristics of boundary layer height, atmospheric capacity index, and ventilation coefficient from 2013 to 2018 in Beijing and Chengdu

2.3 $PM_{2.5}$ 浓度改善的气象与减排贡献评估

图 9 是两城市秋冬各月 SWI (静稳天气指数)

及距平特征,成都 SWI 明显高于北京,说明成都地区大气静稳程度比北京高,大气扩散能力比北京差。

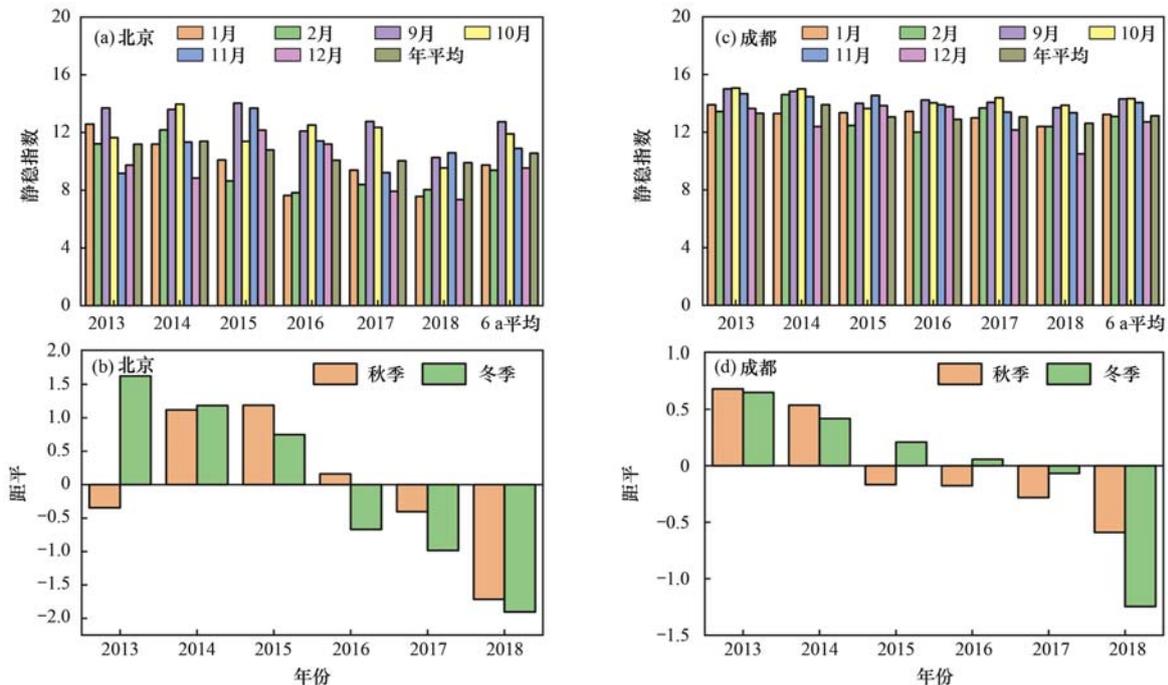


图 9 2013 ~ 2018 年北京和成都静稳天气指数及距平变化

Fig. 9 Stable weather index and anomaly change in Beijing and Chengdu from 2013 to 2018

表 3 2013 ~ 2018 年不同污染等级下气象条件和污染物浓度

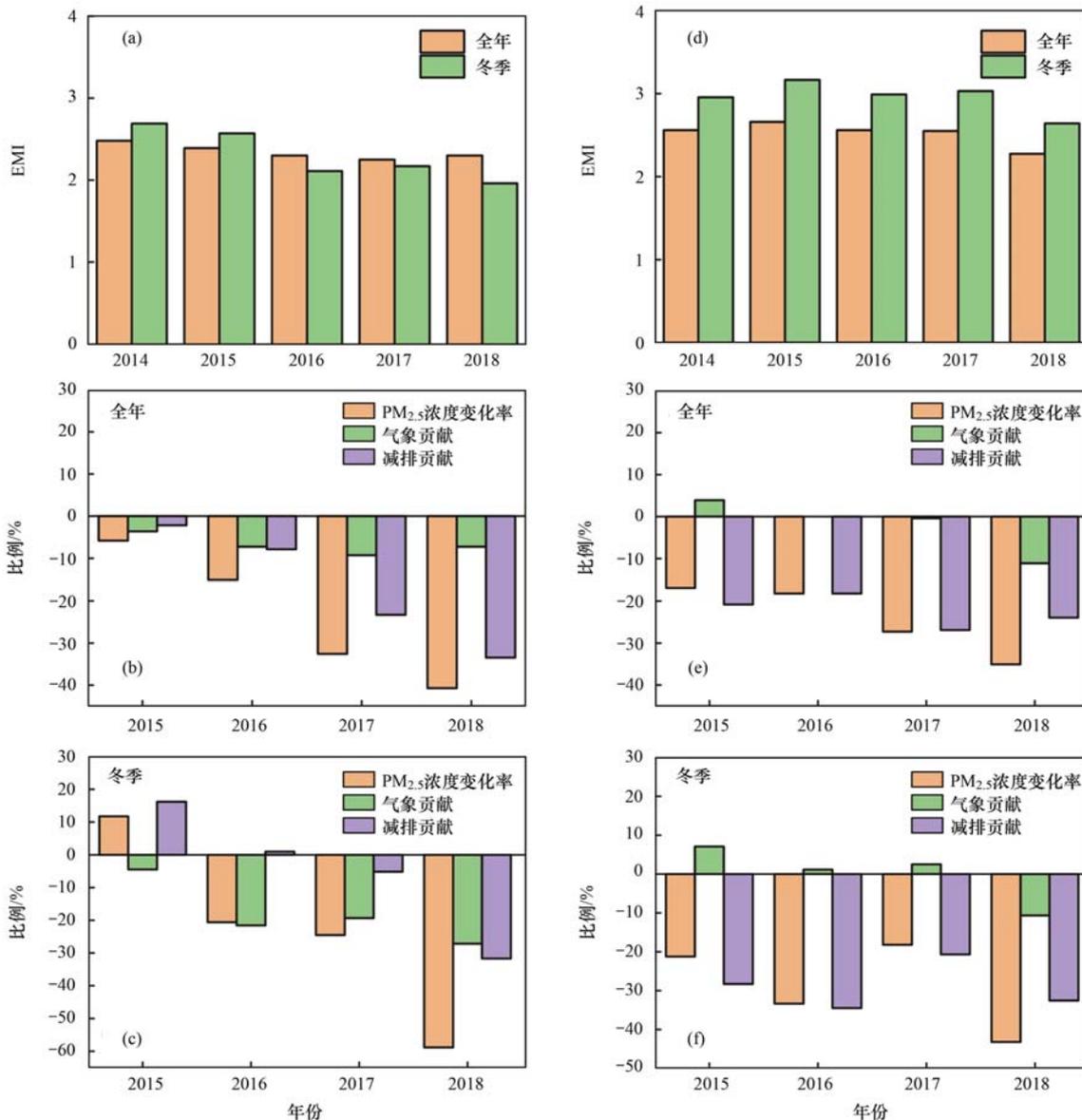
Table 3 Meteorological conditions and pollutant concentrations at different pollution levels from 2013 to 2018

气象要素	优-良	轻-中度污染	重度及以上污染
温度/°C	10.5/16.6	17.1/15.9	7.6/9.5
相对湿度/%	38/77	54/76	67/79
风速/m·s ⁻¹	2.4/1.5	2.0/1.4	1.5/1.1
边界层高度/m	582/445	494/437	303/338
大气容量指数	1.4/0.6	0.9/0.5	0.5/0.3
大气通风系数/m ² ·s ⁻¹	1560/693	1058/617	540/379
NO ₂ /μg·m ⁻³	40/49	55/65	92/87
SO ₂ /μg·m ⁻³	10/13	17/20	38/37
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	33/46	88/90	220/196

北京 SWI 变化幅度较大[图 9(a)], 在 9 ~ 13 之间波动, 2018 年冬季比前 5 a 同期平均 SWI 下降

22.9%, 比 2013 年冬季下降 31.5%, 表明污染扩散条件有一定的改善. 成都 6 a 平均 SWI 变化不大[图 9(c)], 基本在 12.6 ~ 13.9 范围内波动, 比较而言, 2018 年平均 SWI 最小, 冬季比前 5 a 同期平均 SWI 下降 10.9%, 表明 2018 年的大气污染扩散条件相对较好.

本文选取 2014 年为基准年, 利用 EMI 的计算结果和 PM_{2.5} 实际浓度, 逐年评估全年和冬季气象条件和减排措施的贡献率(图 10). 2015 ~ 2018 年北京与成都年平均 PM_{2.5} 浓度较 2014 年均明显降低, 2014 ~ 2018 年两城市的 EMI 呈减小趋势, 2018 年成都 EMI 降幅最显著, 表明气象扩散条件转好[图 10(d)]. 2018 年北京和成都的 PM_{2.5} 浓度比 2014



(a) ~ (c) 北京, (d) ~ (f) 成都

图 10 北京与成都全年和冬季 EMI 变化特征及气象条件和减排对 PM_{2.5} 浓度变化的贡献Fig. 10 Variation in EMI and contributions of meteorology and emission reductions to PM_{2.5} concentration

decreases over the whole year and winter for the two cities

年分别降低了 40.7% 和 35.1%, 通过模式计算 EMI 得到气象条件的贡献率分别为 7.2% 和 11.1%, 则可推算出大气污染减排贡献率分别为 33.5% 和 24.0% [图 10(b) 和图 10(e)]. 从前文分析可知, 冬季 $PM_{2.5}$ 浓度减少速率最大, 且气象条件也有明显的改善, 定量评估结果表明, 北京和成都 2018 年冬季比 2014 年冬季 $PM_{2.5}$ 分别降低了 58.8% 和 43.2%, 其中气象条件的改善贡献率分别为 27.1% 和 10.7%, 剔除气象条件影响后, 减排贡献率分别为 31.7% 和 32.5% [图 10(c) 和图 10(f)]. 可见, 大气污染减排措施的实施有效改善了城市空气质量, 气象条件对全年 $PM_{2.5}$ 的改善贡献约占 18% (北京) ~ 30% (成都), 对冬季的贡献可达 25% (成都) ~ 46% (北京), 气象条件对空气质量的影响也不容忽视.

3 结论

(1) 北京与成都市 2013 ~ 2018 年空气质量优良天数逐年增加, 2018 年达标天数 (优-良) 分别为 223 d 和 255 d, 占全年 61.4% 和 68.7%; 重污染天数及污染过程显著减少. 受大气扩散、清除条件和人为污染排放影响, 北京和成都 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 浓度均表现为冬高夏低的特点; 成都秋冬季出现持续污染的时间比北京长, 但污染峰值浓度比北京低.

(2) 除 O_3 浓度小幅增加外, 其他污染物浓度逐年降低. SO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度下降明显, 北京与成都 2018 年较 2013 年 SO_2 浓度降幅分别为 77.8% 和 70.9%, $PM_{2.5}$ 浓度同样分别降低了 42.7% 和 48.5%; 冬季 $PM_{2.5}$ 浓度的减少量和下降速率最大, 两城市分别以 $13.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $14.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 的速率降低. 成都春季 $PM_{2.5}$ 浓度下降速率比北京大, 但夏季和秋季的下降速率比较小.

(3) 2013 ~ 2018 年成都与北京相比, 风速偏小, 温度偏高约 $3^\circ C$, 静小风日数偏多, 冬季静小风频率高, 混合层高度、大气容量指数以及通风系数偏低, 大气扩散能力差. 两城市降水均集中在夏季, 成都降水量和降水频率均高于北京, 6a 平均降水量是北京的 2 倍, 对污染物的湿清除作用更为显著. 2018 年成都市的气象扩散条件较前几年有明显的改善.

(4) 北京地区静稳天气指数 (SWI) 和环境气象指数 (EMI) 比成都小, 表明北京地区整体大气扩散条件好于成都, 各季节和不同年份的变化程度有差异. 根据 EMI 和 $PM_{2.5}$ 浓度的变化, 定量评估气象条件和污染减排对 $PM_{2.5}$ 降低的贡献, 与 2014 年相比, 2018 年北京与成都大气污染减排对全年 $PM_{2.5}$ 浓度的降低分别贡献了 33.5% 和 24.0%, 气象条件的贡

献率分别为 7.2% 和 11.1%, 冬季气象条件的贡献占比更大, 分别为 27.1% 和 10.7%, 冬季减排贡献分别为 31.7% 和 32.5%. 大气污染减排措施的实施有效改善了空气质量, 气象条件对空气质量的影响也不容忽视.

致谢: 本文中部分数据由成都市环境保护科学研究院陆成伟老师等协助完成, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1936-1943. Li X F, Zhang M J, Wang S J, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. Environmental Science, 2012, 33(6): 1936-1943.
- [2] Liao T T, Gui K, Jiang W T, et al. Air stagnation and its impact on air quality during winter in Sichuan and Chongqing, southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 576-585.
- [3] 蒋婉婷, 谢汶静, 王碧菡, 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.
- [4] 熊亚军, 徐敬, 孙兆彬, 等. 基于数据挖掘算法和数值模拟技术的大气污染减排效果评估[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 116-125. Xiong Y J, Xu J, Sun Z B, et al. Air pollution reduction effect evaluation based on data mining algorithm and numerical simulation technology [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(1): 116-125.
- [5] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. Heavy aerosol pollution episodes in winter Beijing enhanced by radiative cooling effects of aerosols [J]. Atmospheric Research, 2018, 209: 59-64.
- [6] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000 ~ 2019 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4832-4843. Xia X S, Wang J H, Song W D, et al. Spatio-temporal evolution of $PM_{2.5}$ concentration during 2000-2019 in China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4832-4843.
- [7] 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 等. 2019 年 10 ~ 12 月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4402-4412. Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, et al. Assessment of emergency emission reduction effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding area (“2+26” cities) from October to December 2019 [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4402-4412.
- [8] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, et al. The impact of the “air pollution prevention and control action plan” on $PM_{2.5}$ concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 197-209.
- [9] Tong P F, Zhang Q R, Lin H M, et al. Simulation of the impact of the emergency control measures on the reduction of air pollutants: a case study of APEC blue [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2), doi: 10.1007/s10661-019-8056-1.
- [10] Wang G, Cheng S Y, Wei W, et al. Characteristics and

- emission-reduction measures evaluation of $PM_{2.5}$ during the two major events: APEC and Parade [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 81-92.
- [11] 李文涛, 高庆先, 刘俊蓉, 等. APEC 期间北京空气质量改善对比分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4340-4347.
Li W T, Gao Q X, Liu J R, *et al.* Comparative analysis on the improvement of air quality in Beijing during APEC [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4340-4347.
- [12] 张珺, 宋晓辉. 2014 年邯郸大气环境特征及气象条件影响因子分析[J]. *气象与环境科学*, 2016, **39**(2): 63-68.
Zhang J, Song X H. Analysis of atmospheric environment features and impact factors of meteorological conditions in Handan in 2014[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, **39**(2): 63-68.
- [13] 陈臣, 温天雪, 安俊琳, 等. 北京 9.3 阅兵前后天津市大气污染变化特征分析[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(10): 5446-5456.
Chen C, Wen T X, An J L, *et al.* Characteristic of air pollutants in Tianjin before, during and after the Beijing Military Parade in 2015[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(10): 5446-5456.
- [14] 欧阳正午, 廖婷婷, 陈科艺, 等. 2014-2017 年四川盆地与京津冀地区冬季空气停滞特征及大气质量改善评估对比分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(7): 2353-2361.
Ouyang Z W, Liao T T, Chen K Y, *et al.* Comparative analysis of winter air stagnation characteristics and air quality improvement assessment in Sichuan Basin and Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2017[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(7): 2353-2361.
- [15] Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [16] 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. *气象*, 2017, **43**(8): 998-1004.
Zhang H D, Zhang B H, Lü M Y, *et al.* Development and application of stable weather index of Beijing in environmental meteorology[J]. *Meteorological Monthly*, 2017, **43**(8): 998-1004.
- [17] 刘洪利, 龚山陵, 何建军, 等. 环境气象评估指数 EMI 原理及应用[A]. 见: 第 35 届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气、气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018. 371-374.
- [18] 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 等. 北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
Yin X M, Qiao L, Zhu X W, *et al.* Differences in pollution characteristics under the southerly and easterly wind in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4844-4854.
- [19] 李培荣, 肖天贵, 刘碧全, 等. 成都平原的边界层风场特征及其污染扩散通道分析[A]. 见: 第 35 届中国气象学会年会 S11 城市气象与环境——第七届城市气象论坛[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018. 2.
- [20] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2014~2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, *et al.* Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [21] Zhu X W, Tang G Q, Guo J P, *et al.* Mixing layer height on the North China Plain and meteorological evidence of serious air pollution in southern Hebei[J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2018, **18**(7): 4897-4910.
- [22] 朱蓉, 徐大海, 赵珊珊. 第 2 代大气污染物排放源强反演模式 SSIM2 及其在城市规划大气环境影响评价中的应用[J]. *气象科技*, 2009, **37**(6): 641-645.
Zhu R, Xu D H, Zhao S S. Second-Generation Source-Strength inversed model and its application in atmospheric environmental impact assessment for urban planning[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2009, **37**(6): 641-645.
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2013~2017 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014-2018.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/t20170824_420330.htm?keywords=, 2017-08-21.
- [25] 北京市生态环境局. 2018 年 1 月北京市环境空气质量状况[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718889/1724981/index.html>, 2018-02-07.
- [26] 李欢, 唐贵谦, 张军科, 等. 2017~2018 年北京大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
Li H, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Beijing during 2017-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4364-4373.
- [27] 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), doi: 10.1029/2002JD002378.
- [28] 梅梅, 朱蓉, 孙朝阳. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. *气候变化研究进展*, 2019, **15**(3): 270-281.
Mei M, Zhu R, Sun C Y. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2+26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Climate Change Research*, 2019, **15**(3): 270-281.
- [29] 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.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-ni, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)