

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.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

保定市大气污染变化趋势及特征

苟银寅^{1,2}, 张凯^{2*}, 李金娟¹, 吕文丽², 竹双², 黎洁^{1,2}, 何珊珊³, 郑悦², 支敏康²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 河北省保定环境监测中心, 保定 071000)

摘要: 为了解保定市近年来大气污染变化趋势和污染特征, 对2013~2018年保定市空气质量和大气污染物浓度进行分析, 结果表明: ①从2013~2018年保定市综合指数由11.6下降到6.6, 重度污染天数由114 d下降到27 d, 重度污染时污染物累积浓度由57.34%下降到20.59%。表明2013~2018年保定市空气质量逐年改善, 不仅重污染天数减少、污染物年均浓度降低, 而且重污染时污染物累积浓度的占比也在下降, 同时与“2+26”城市平均浓度水平的差距越来越小。②夏季 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 逐年上升, 2017年和2018年由 O_3 导致的重污染天分别占当年重污染天的17.0%和14.8%, 臭氧污染逐渐突出; 秋季 NO_2 特征值高于 SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} , 说明秋季污染类型偏机动车型; 冬季污染类型由2013~2014年的偏燃煤型转向2015~2018年的偏燃煤型和不完全燃烧的混合影响。③2016、2017和2018年高污染季 $\text{PM}_{2.5}$ 高位累积浓度占比较2015年同期分别下降5.56%、6.21%和2.58%, 是6种污染物中降幅最大的; 其次为 PM_{10} ; SO_2 和 NO_2 降幅较小, 说明应急措施对保定市重污染期间颗粒物削峰效果优于气态污染物。2018年高污染季重污染事件中, 偏燃煤型污染较2017年高污染季有所增加, 说明燃煤仍是保定市需要控制的污染源之一。综上, 保定市秋季应加强对机动车的管控, 冬季由原来的控煤措施逐渐转变为控煤和控柴相结合; 未来的大气污染防治重点应加强 O_3 污染治理。

关键词: 大气污染; 变化趋势; 污染类型; 高位浓度占比; 保定市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4413-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912193

Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City

GOU Yin-yin^{1,2}, ZHANG Kai^{2*}, LI Jin-juan¹, LÜ Wen-li², ZHU Shuang², LI Jie^{1,2}, HE Shan-shan³, ZHENG Yue², ZHI Min-kang²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Baoding Environmental Monitoring Center of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: To understand the trends and characteristics of air pollution in Baoding in recent years, an analysis of air quality and air pollutant concentrations in Baoding from 2013 to 2018 was carried out. The results showed that: ① from 2013 to 2018, the comprehensive index of Baoding dropped from 11.6 to 6.6, the days of severe pollution decreased from 114 days to 27 days, and cumulative concentration of pollutants during severe pollution decreased from 57.34% to 20.59%. This indicated that the air quality of Baoding city has improved year on year from 2013 to 2018. Not only has the number of heavy pollution days and the annual average concentration of pollutants decreased, but also the proportion of cumulative concentrations of pollutants during heavy pollution has decreased. the difference between the average concentration level of Baoding city and “2+26” Cities is getting smaller and smaller. ② Summer $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ increased year on year. In 2017 and 2018, the heavy pollution days caused by O_3 accounted for 17.0% and 14.8% of the heavy pollution days of the year, respectively, and the ozone pollution gradually became prominent; the characteristic value of NO_2 in autumn was higher than that of SO_2 , CO , $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} , indicating that the type of pollution in autumn was more motorized. The sources of pollution in winter changed from the partial combustion of coal in 2013-2014 to a mixed influence of partial combustion of coal and incomplete combustion in 2015-2018. ③ In 2016, 2017, and 2018, a high cumulative concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ during the high pollution season that accounted for 5.56%, 6.21%, and 2.58% declined as compared to that during the same period in 2015; this was the largest decline among the six pollutants; PM_{10} followed; The decreases of SO_2 and NO_2 were small, indicating that the emergency measures were better in cutting peaks of particulate matter than the gaseous pollutants during heavy pollution in Baoding. In a heavy pollution event during the high pollution season in 2018, partial-burning coal-type pollution increased as compared to that during the high pollution season in 2017, indicating that the coal combustion was still one of the pollution sources that Baoding city needed to control. In summary, Baoding should strengthen the management and control of motor vehicles in autumn, and gradually change from the original coal control measures to a combination of coal control and diesel control in winter; in the future, the focus of air pollution prevention and control should be strengthened toward O_3 pollution.

Key words: atmospheric pollution; variational trend; pollution type; high concentration ratio; Baoding City

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-04-07

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0304-05); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2016YSKY-025)

作者简介: 苟银寅(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境科学, E-mail: 18786774573@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangkai@cras.org.cn

自 20 世纪 70 年代以来,我国的大气污染防治经历了 4 个阶段^[1],2013 年《大气污染防治行动计划》的出台标志着我国大气污染防治进入第 4 个阶段——攻坚阶段,大气污染控制目标由单一污染物控制、单个城市治理^[2,3]转为多种污染源联合控制^[4,5]、多种污染物协同减排^[6,7],开展区域联防联控^[8]和重污染应急减排^[9].随着经济发展和城市化建设,人类活动规模的扩大,大气重污染问题频繁发生,传统的二氧化硫和颗粒物的污染与 PM_{2.5}、臭氧等新型区域复合型污染交织的复杂局面^[10,11].而区域间的大气污染又相互影响,京津冀、长三角和珠三角等重点区域大气污染问题日益严重^[12~14],其中京津冀的大气污染状况最为严重.众多学者分别对京津冀区域 PM_{2.5} 污染输送特征^[15,16]、颗粒物中化学组分与控制效果^[17~21]和近年来大气污染变化趋势及规律^[22~26]等不同方向、不同问题进行了相关研究.

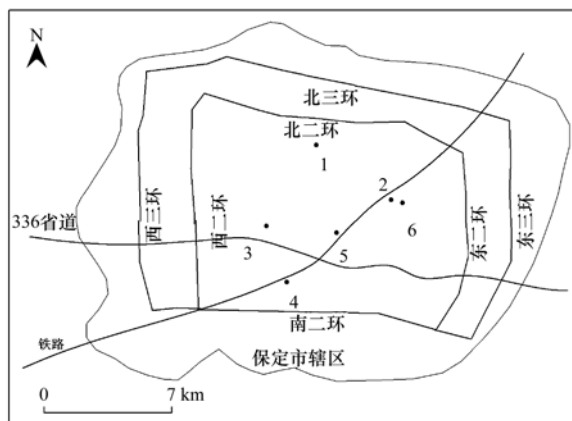
保定市位于北京市和石家庄市之间,地势由西北向东南倾斜,随着地势变化地貌类型由山区向平原向丘陵过渡,全年以西南偏南风(SSW)为主导风向,以西北偏北风(NNE)为次主导风向.保定市是京津冀地区空气污染最为严重的城市之一,作为“首都南大门”,保定市本地排放和区域传输的污染物可能直接影响北京市空气质量,因此保定市空气污染问题一直受到政府和科研工作者的广泛关注.众多学者对保定市大气污染进行了研究,包括对不同粒径颗粒物组分^[27]、颗粒物中水溶性离子^[28]、大气气溶胶有机成分^[29]、颗粒物中有机污染物来源分析^[30]、大气污染来源解析^[31]、绿化树种对 PM_{2.5} 的滞纳能力与 PM_{2.5} 浓度的关系^[32]和日间/夜间颗粒物中无机组分的特征及来源分析^[33]等.然而,已有的研究多是针对保定市大气污染物个别时段、个别污染物或组分的分析,未对常规 6 种大气污染物季节变化和多年变化趋势作全面分析和系统研究.因此,本文对保定市近 6 年大气污染变化趋势、季节污染特征和高污染季污染特征进行分析,此研究对于全面认识保定市大气污染治理工作和明确下一步工作重点具有一定指导意义.

1 材料与方法

1.1 数据来源

常规 6 项大气污染物(PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 和 O₃)质量浓度数据来自位于保定市主城区的 6 个国控监测站点(华电二区、地表水厂、接待中心、游泳馆、胶片厂和监测站,图 1).监测数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台

(<http://106.37.208.233:20035>).数据使用前进行了有效数据筛查,确保数据合理,分析结果可靠.监测时段为 2013 年 1 月 1 日至 2019 年 3 月 31 日.颗粒物监测仪器采用河北先河环保公司 XHPM2000E 环境空气颗粒物自动监测仪,环境气体监测仪器均采用美国 API 公司的气体分析仪. SO₂、NO_x、CO 和 O₃ 观测分别采用 T100 型紫外荧光法分析仪、T200 型化学发光法分析仪、T300 红外光吸收法分析仪和 T400 型紫外吸收法分析仪^[34].



1. 接待中心; 2. 华电二区; 3. 胶片厂;
4. 地表水厂; 5. 游泳馆; 6 监测站
图 1 保定市监测站点分布示意

Fig. 1 Map of the distribution of the monitoring site in Baoding City

1.2 数据分析方法

累积浓度占比方法:污染物累积浓度在年际累积浓度中的占比可反映区域或城市污染物浓度变化特征^[29].文中将优良天、中度污染、重度污染的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值分别相加,所得数值除以全年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值和,分别得到 3 种污染等级下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 占比.

高位累积浓度占比可反映城市采取应急措施后对污染物浓度的削峰效果^[35].2018 年 8 月发布的方案^[36]中要求预测 AQI 日均值大于 200 时,启动相应应急措施.该方案以 2015 年为基准年,因此本文也以 2015 年为基准年.经统计,2015 年高污染季(当年 10 月 1 日至翌年 3 月 31 日)保定启动应急措施条件的天数约占当年高污染季总天数的 20%.本文中将 2015~2018 年高污染季各污染物日均浓度从高到底分别排序,前 20% 的数据相加作为该污染物的高位累积浓度,此浓度与该污染物整个高污染季所有日均浓度数据相加之和的比即为高位累积浓度占比.

特征雷达图:为了更好识别保定大气污染物来源和大气污染类型,以特征雷达图的形式进行分析.其中标准值为当年污染物年均浓度值并归一化,标

准值上限为年均浓度和标准偏差的和与年均浓度比值,标准值下限为年均浓度和标准偏差的差与年均浓度比值,特征值为季平均浓度与年均浓度比值。

2 结果与讨论

2.1 年际变化趋势

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)标准,按空气质量指数将污染分为优、良、轻度、中度、重度和严重这6级,文中把优和良合为优良天,轻度和中度合为中度污染,重度和严重合为重度污染。

2013~2018年保定一直为74个重点城市中污染最重的5个城市之一,近年来保定市空气质量不断改善,2013~2018年保定优良天数由94 d上升到180 d,占比从26%上升到49%,重度污染天数由114 d下降到27 d,占比从31%下降到7%(图2),完成了文献[37]的既定目标。2018年北京优良天数为227 d,重度污染天数为15 d,天津优良天数为207 d,重度污染天数为10 d;河北省平均优良天数为208 d,平均重度污染天数为17 d。与京津冀其它城市相比,保定市空气质量在京津冀地区仍处于较差水平。

2013年保定市综合指数为11.6,2018年降为6.6, $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 2018年年均浓度分别为 $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.2 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $193 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染分指数分别为1.6、1.9、0.3、1.1、0.5和1.2。对比2013~2018年保定市常规6项大气污染物质量浓度可知, $\rho(\text{SO}_2)$ 是下降幅度最大的污染物,平均每年降幅20.6%; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 和 $\rho(\text{CO})$ 降幅也较为显著,平均每年降幅超过10%; $\rho(\text{NO}_2)$ 降幅不明显。虽然2018

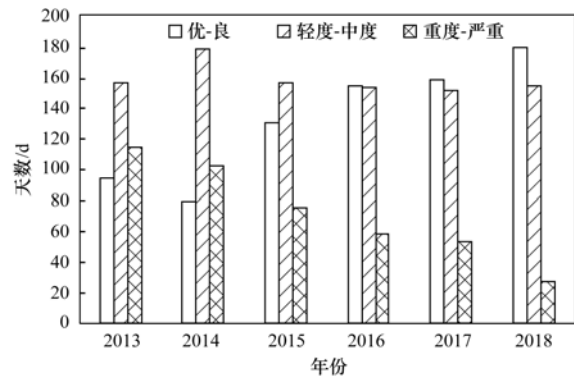


图2 2013~2018年保定市不同污染等级天数分布

Fig. 2 Distribution of days of different pollution levels in Baoding City, 2013-2018

年保定大气污染物浓度年均值有明显下降(除 O_3-8h 外),但在74个重点城市排名中没有明显提升。Zhang等^[25]估算了2013~2017年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 改善情况, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均下降32%,说明所有城市都在积极改善空气质量。

对比2013~2018年6项污染物距平图发现(图3),2013~2015年保定市6项污染物皆高于6a的均值,其中,2013年最为严重, $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别高于6a均值的48.39%、31.92%和30.82%;2016年以后,除 O_3-8h 以外,污染物浓度较6a均值均有大幅度地下降,2018年降幅最为显著, $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别低于6a均值的56.99%、36.48%和34.59%;2013~2018年 $\rho(\text{NO}_2)$ 变化最不显著,这与 NO_2 的主要来源之一——机动车有关。2015~2018年保定大气污染治理重点是清洁取暖工程^[31],因此主要来源于燃煤排放的 SO_2 有大幅下降,但保定市机动车保有量从2013年的195万辆增加到2018年的226万辆,全国机动车保有量从2013年1.37亿辆增加到2018年2.4亿辆,全国 NO_x 排放量逐年升高^[1]。孙爽等^[23]

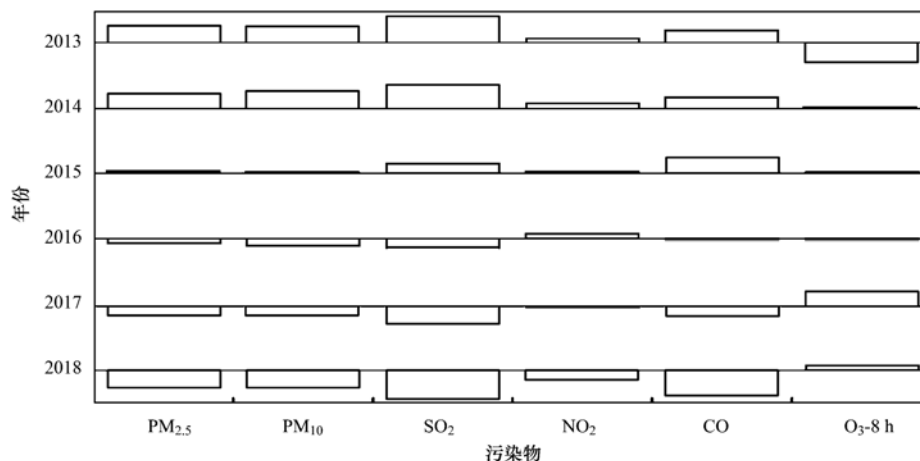


图3 2013~2018年保定市6项污染物距平

Fig. 3 Anomalies of six conventional pollutants in Baoding City, 2013-2018

对京津冀 NO₂ 污染研究也表明重污染区域主要分布在中部及南部地区.

2013~2016 年保定市重污染天首要污染物均为 PM_{2.5}或 PM₁₀, 2017 年和 2018 年由 PM_{2.5}或 PM₁₀ 为首要污染物的重度污染天分别占当年重度污染天的 83.0% 和 85.2%, 由 O₃ 为首要污染物的重度污染天分别占 17.0% 和 14.8%. 2013~2018 年 O₃ 是所有污染物中年均浓度唯一上升的污染物, 2018 年 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 均值浓度为 193 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 虽比 2017 年 (218 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 下降 11.47%, 但较 2013 年 (113 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 却同比上升 70.80%. 由图 4 可以看出 2013 年保定 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 明显低于京津冀大气污染传输通道“2+26”城市 (“2+26”城市) 平均值, 2018 年略高于平均值, 不仅说明保定 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 升高超过了整个区域的均值, 而且说明整个区域的氧化性也在增强, 杨俊益等^[38] 和 Verstraeten 等^[39] 的研究结

果也证实了后者. 何伟等^[8] 对京津冀 10 个城市 2014~2018 年 O₃ 的污染状况分析也表明保定的 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 呈逐年上升趋势且高于其它城市. 余益军^[22] 等研究认为京津冀地区 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 升高, 90.4% 是由于大气污染排放变化造成的. 因此, 保定的大气污染除 PM_{2.5} 外, O₃ 的污染也不容忽视, 下一步需加强对 O₃ 污染的治理和管控.

保定市的大气污染主要由 PM_{2.5} 引起, 因此着重分析不同污染等级 PM_{2.5} 累积浓度在年际累积浓度中的占比. 由表 1 可知, 优良天 PM_{2.5} 累积浓度占比由 2013 年的 13.09% 上升至 2018 年的 41.86%, 重度污染 PM_{2.5} 累积浓度占比由 2013 年的 57.34% 下降至 2018 年的 20.59%. 可见, 从 2013 年至 2018 年, 不仅重度污染天数减少、污染物年均浓度降低, 而且重度污染时污染物累积浓度的占比也在下降.

表 1 2013~2018 年不同污染等级 PM_{2.5} 浓度占比/%

Table 1 Proportion of PM _{2.5} concentration in different pollution levels from 2013 to 2018/%						
污染等级	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
优良天	13.09	12.98	17.79	25.01	35.17	41.86
中度污染	29.57	32.50	35.18	37.33	31.49	37.55
重度污染	57.34	54.53	47.03	37.66	33.35	20.59

对比 2013~2018 年保定市与“2+26”城市距平图可见(图 4): 保定市与“2+26”城市均值的差距在逐年减小, 2014 年保定市颗粒物均值浓度与“2+26”城市均值浓度是 6 年中差异最大的, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别超过“2+26”城市均值浓度的 0.38 倍和 0.44 倍; 2015 年保定市气态污染物均值浓度与“2+26”城市均值浓度是 6 年中差异较大的, $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 分别超过“2+26”城市均值浓度的 0.21、0.1 和 0.70 倍. 从 2016 年开始保定市污染物浓度与“2+26”城市平均水平的差

距越来越小, 到 2018 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_3\text{-8h})$ 和 $\rho(\text{CO})$ 分别超过“2+26”城市均值浓度的 0.17、0.07、0.0、0.08、0.06 和 0.09 倍, 说明保定市污染物浓度水平与京津冀整体水平差异逐渐缩小. 同时京津冀地区污染物浓度逐年降低, 与 2017 年相比, 2018 年京津冀地区 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 年均值和 $\rho(\text{CO})$ 日均值第 95 百分位数的降幅为 26.7%~36.8%^[1]. 王燕丽等^[15] 和 Zhang 等^[24] 的研究也表明京津冀地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 存在相互输送特征. 因此, 保定市大气污染物浓度下

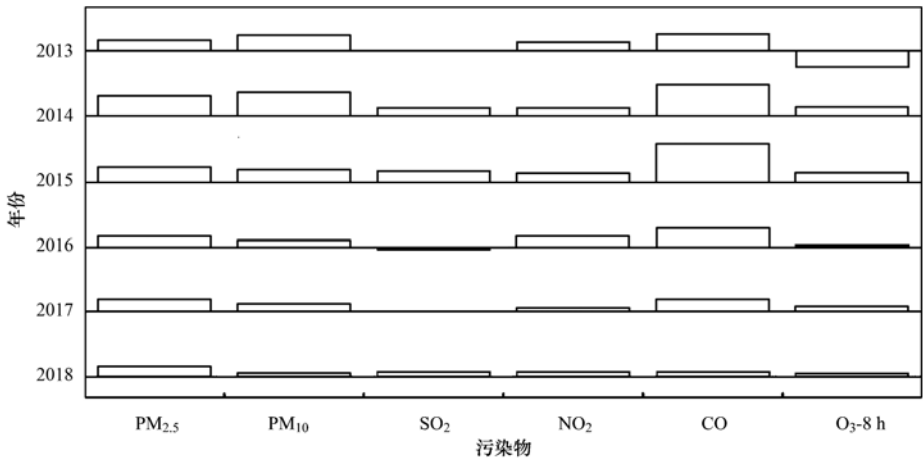


图 4 2013~2018 年保定市与“2+26”城市 6 项污染物距平

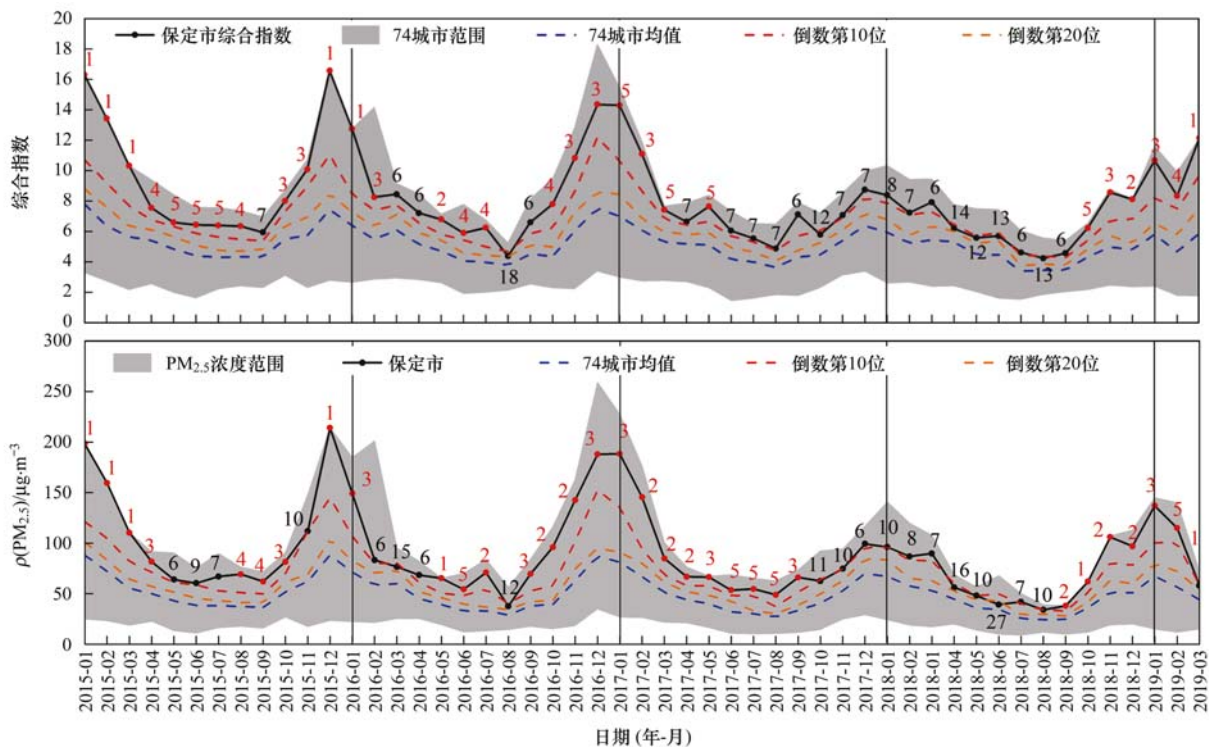
Fig. 4 Anomalies of six conventional pollutants in Baoding City and “2+26” cities, 2013-2018

降,一方面与保定市对当地污染源的管控不断加强、污染物排放量不断降低有关;另一方面可能与整个区域大气污染物浓度下降有关。

2.2 季节变化趋势

对保定市综合指数和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐月变化分析可知,综合指数和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐月变化曲线呈“U”型

分布,10月~次年3月污染明显重于4~9月(图5),同时,保定市在74个重点城市中的排名也呈“U”型分布[图5中综合指数或 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 排名均为74城市数值从高到低排序结果]。污染物直接影响城市排名,污染越重排名越低。4~9月综合指数和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在74个城市排名优于10月~次年3月。



图中红色数字表示排名在倒数5名之内,黑色数字表示排名倒数5名之后

图5 2015年1月~2019年3月保定综合指数、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐月变化趋势

Fig. 5 Trending of air quality composite index and concentration of $\text{PM}_{2.5}$ from January 2015 to March 2019

为了更清楚地了解保定市季节性变化特征,对2013~2018年各污染物季节浓度进行分析。其中3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12月和1月、2月为冬季。由图6可以发现,2018年冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ $97.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} >$ 秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ $69.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} >$ 春季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ $64.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} >$ 夏季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ $39.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和CO季节变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 相同。季节变化特征与郑悦等^[34]的研究一致。2013~2018年冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 在0.64~0.72;秋季 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 在0.56~0.64;夏季 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 在0.56~0.69;春季 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 在0.44~0.52。秋、冬两季气温低,降水稀少,同时边界层高度低、大气层结构稳定,不利于污染物的扩散,并且冬季采暖期的供暖需求增大了排放量,颗粒物质量浓度均较高。与秋、冬季相比,春季风速逐渐转大,再加上保定市外环路及郊区存在裸露土地,土壤扬尘和外来沙尘输送对 PM_{10} 的贡献增大, $\rho(\text{PM}_{10})$ 升高、 $\rho(\text{PM}_{2.5})/$

$\rho(\text{PM}_{10})$ 减小^[40]。夏季降水较多,虽对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 均有清除作用,但较高的相对湿度有利于气体向颗粒物的转化,并且相对湿度高于70%时,由于颗粒物的吸湿增长导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高, $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 有所增大^[41,42]。2013~2018年逐年各污染物浓度均有不同程度的下降,其中冬季降幅最大,2018年冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 分别为 $97.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $33.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $59.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.67 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,同比2017年冬季浓度分别下降32.70%、24.72%、34.31%、17.31%和30.44%;同比2013年冬季浓度分别下降56.41%、52.66%、78.08%、29.29%和53.51%。而 O_3 -8h是“夏高冬低”的季节变化特征,并且出现逐年升高的趋势。

2013~2018年逐日变化曲线可以明显看到 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐年下降且峰值出现的频次逐年降低。对四季分别做污染特征雷达图发现(图7),在春、夏、秋季各污染物因子特征值均未超出污染物特征值上

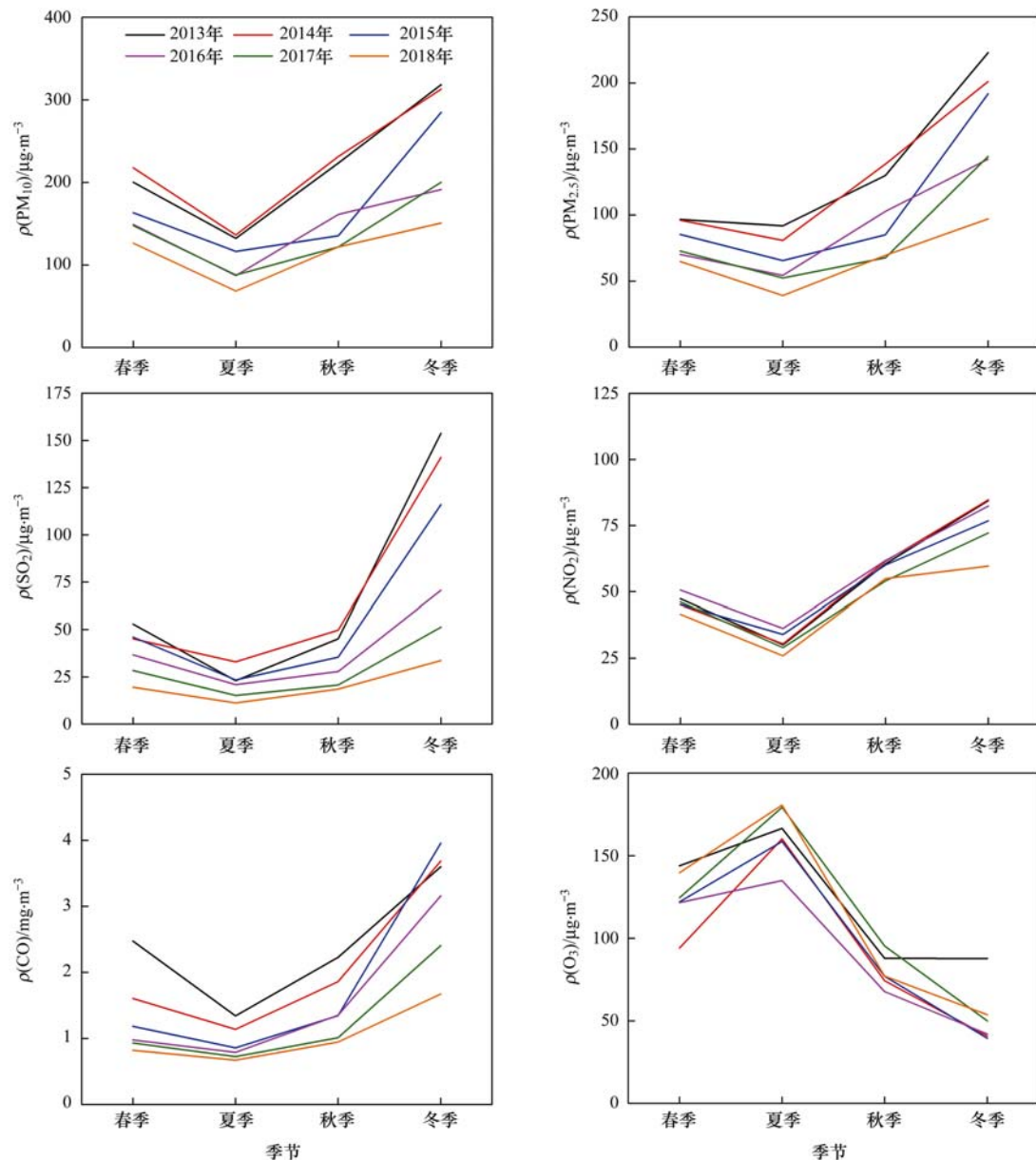


图 6 2013 ~ 2018 年保定市 6 项污染物季节变化曲线

Fig. 6 Seasonal changes of six conventional pollutants in Baoding City, 2013-2018

下限,表明污染物特征与全年相比未发生显著变化,值得注意的是,2013 ~ 2018 年秋季 NO_2 特征值均高于 SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,同时 CO 特征值也偏高, NO_2 和 CO 特征值同时偏高是机动车排放的主要特征,因此表明保定秋季污染特征为偏机动车型,说明秋季受机动车影响较大。冬季污染物特征最为显著,冬季 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 特征值比春、夏、秋季高,其中 2013 年冬季和 2014 年冬季只有 SO_2 超出标准值上限, SO_2 主要来源于燃煤排放, SO_2 特征值偏高或超出上限表明该城市燃煤污染明显,说明 2013 ~ 2014 年冬季污染特征为偏燃煤型,2015 ~ 2018 年 SO_2 和 CO 超出标准值上限,冬季逐渐从 SO_2 特征转向 SO_2 、 CO 特征, CO 主要来自于燃煤、机动车、钢铁及生物质等的不完全燃烧^[43],说明

2013 ~ 2018 年冬季污染类型由偏燃煤型逐渐转化为燃煤和不完全燃烧的混合型,下一步的控制重点应从单一的控煤转到控煤控柴相结合。

2.3 高污染季大气污染状况分析

从季节变化趋势可以看出,10 月 ~ 翌年 3 月污染物浓度显著高于 4 ~ 9 月,因此将当年 10 月 1 日 ~ 翌年 3 月定义为高污染季,对其污染特征做进一步分析。

2.3.1 保定市高位累积浓度占比

由表 2 可知:保定市 2015 年高污染季 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 高位累积浓度占比在 2015 ~ 2018 年这 4a 高污染季中最高,2016、2017 和 2018 年高污染季 $\text{PM}_{2.5}$ 高位累积浓度占比较 2015 年同期降幅分别为 5.56%、6.21% 和 2.58%;2016、2017 和 2018 年高

污染季 PM_{10} 高位累积浓度占比较 2015 年同期降幅分别为 3.65%、4.97% 和 2.96%；2016 年和 2018

年高污染季 SO_2 高位累积浓度占比较 2015 年同期升幅分别为 2.16%和 2.5%，2017 年较 2015 年同期

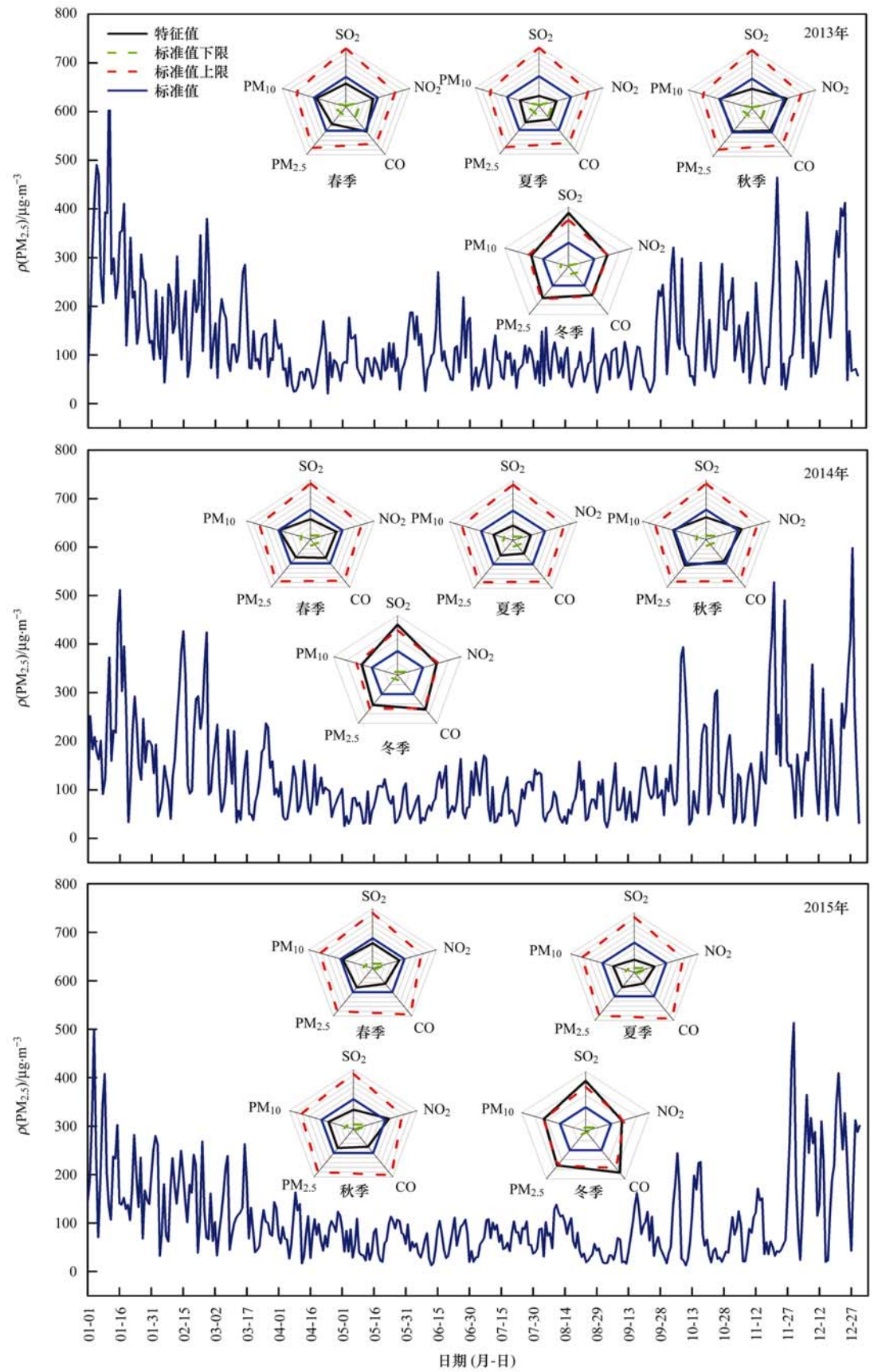
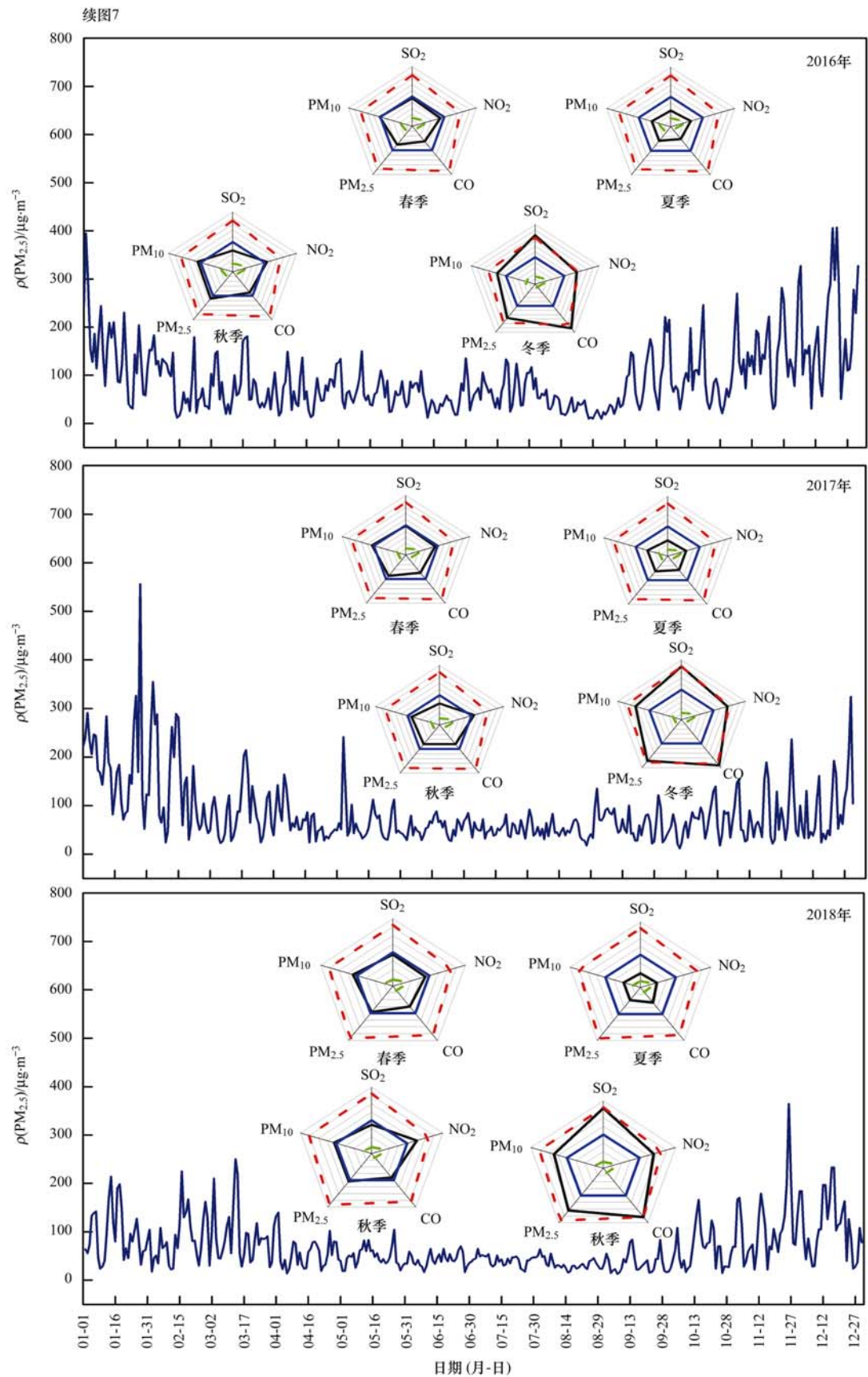


图 7 2013 ~ 2018 年保定市 $PM_{2.5}$ 日变化曲线及季节特征雷达图

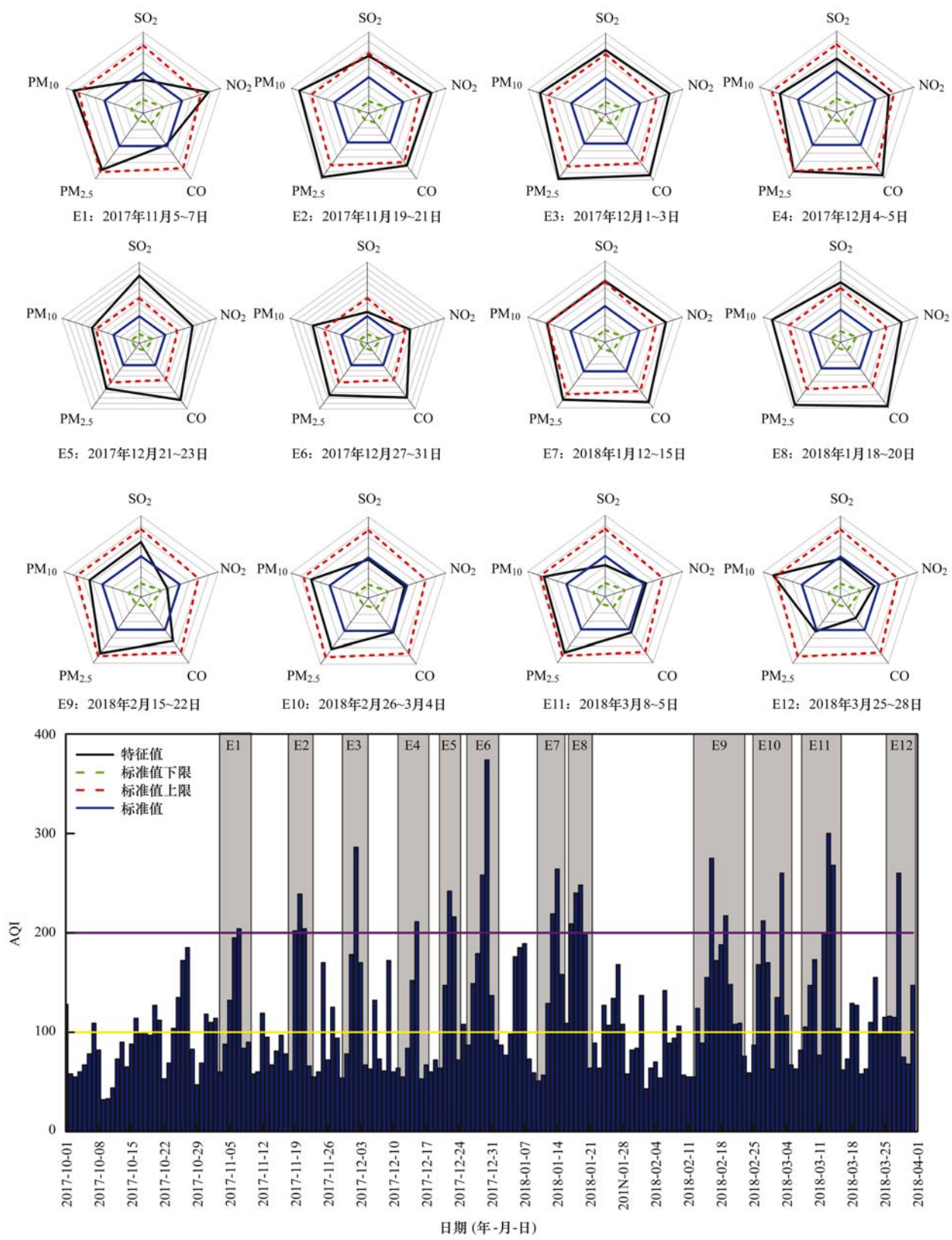
Fig. 7 Daily variation curves of $PM_{2.5}$ and seasonal radar charts in Baoding City, 2013-2018



降幅 0.67% ; 2016、2017 和 2018 年高污染季 NO₂ 高位累积浓度占比较 2015 年同期降幅分别为 1.12%、1.83% 和 1.45% .

保定市 PM_{2.5} 高位累积浓度占比明显大于其他

3 种污染物, 表明 PM_{2.5} 还有较大的削峰空间, NO₂ 高位累积浓度占比相对较小, 表明 NO₂ 削峰空间有限. 保定市 2016、2017 和 2018 年高污染季 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO₂ 高位累积浓度占比较 2015 年同期均是下



图中黄线表示空气质量达到轻度污染；紫线表示 AQI 日均值大于 200 时,启动相应应急措施,下同

图 8 2017 年 10 月 1 日至 2018 年 3 月 31 日 AQI 逐日变化及重污染过程特征雷达图

Fig. 8 Daily change of AQI and the characteristic radar chart of the heavy pollution process from October 1, 2017 to March 31, 2018

降趋势,表明应急措施对上述 3 种污染物均有削峰作用,其中 2017 年高污染季下降趋势最为显著. PM_{2.5} 和 PM₁₀ 高位累积浓度占比下降的幅度明显大于 SO₂ 和 NO₂,说明应急措施对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等颗粒物的重污

染削峰作用比 SO₂ 和 NO₂ 两种气态污染物更稳定、更显著,这与刘文雯等^[35]在“2+26”城市的研究结果一致. 张冲等^[17]对京津冀的一次重污染过程分析也表明红色应急措施会使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降 4.4%.

2.3.2 重污染发生频次分析

如图8和图9所示,2017和2018年高污染季各出现重污染过程12次,其中2018年10~12月出

现重污染过程7次,比2017年同期增加1次.2018年高污染季共严重污染7次,重度污染2次,静稳+熏烟型污染3次,弱静稳型污染6次,静小风最长时

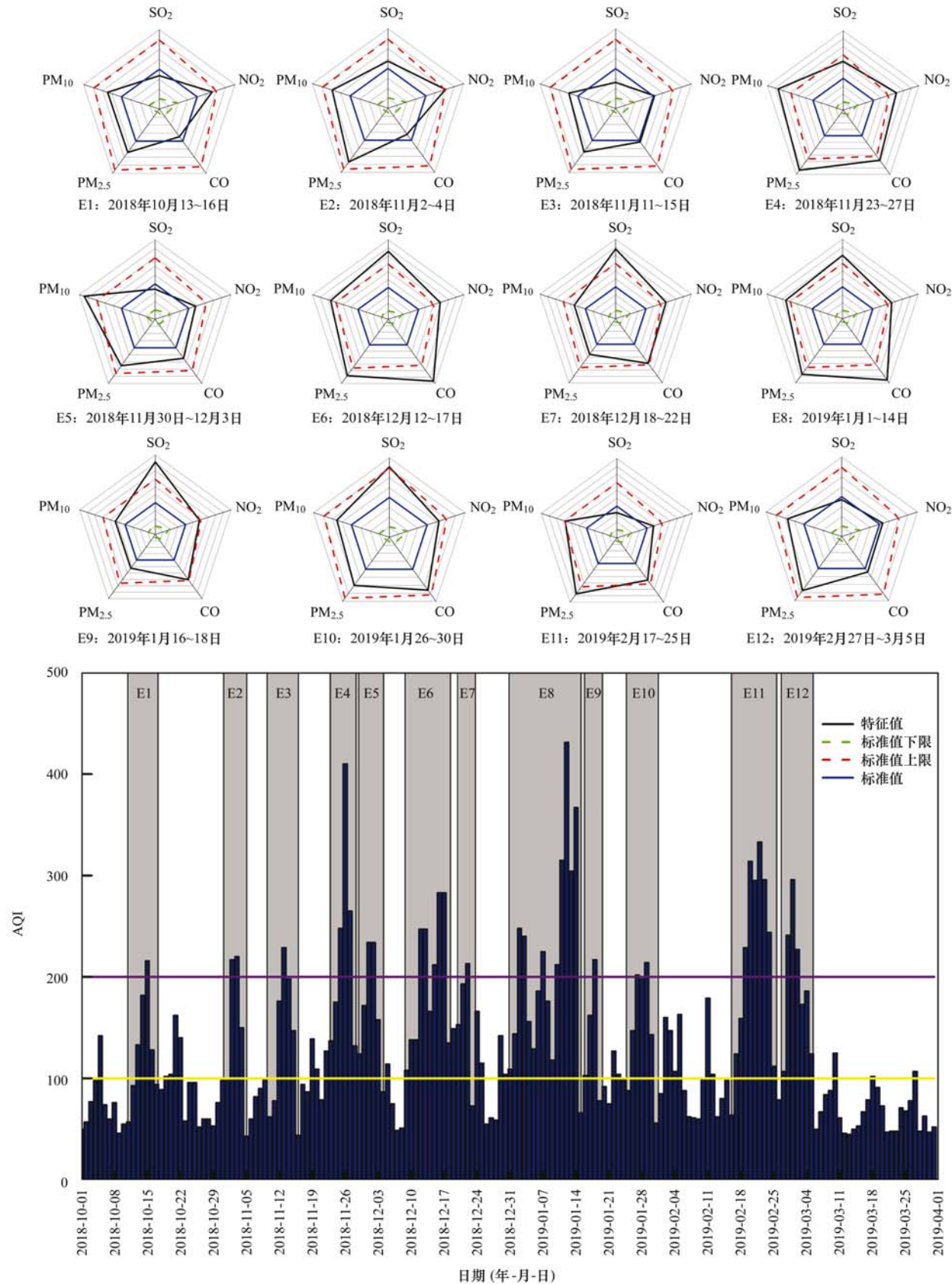


图9 2018年10月1日至2019年3月31日AQI逐日变化及重污染过程特征雷达图

Fig. 9 Daily change of AQI and the characteristic radar chart of the heavy pollution process from October 1, 2018 to March 31, 2019

表 2 2015 ~ 2018 年高污染季保定市污染物高位累积浓度占比

Table 2 Proportion of cumulative concentration of pollutants in Baoding City from 2015 to 2018

年份	高位累积浓度占比/%				高位累积浓度年际变化(以 2015 年为基准年)/%			
	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂
2015	46.23	41.65	37.16	33.52	—	—	—	—
2016	40.67	38.00	39.32	32.31	-5.56	-3.65	2.16	-1.21
2017	40.02	36.68	36.49	31.69	-6.21	-4.97	-0.67	-1.83
2018	43.65	38.69	39.66	32.07	-2.58	-2.96	2.5	-1.45

间达 313 h, 污染时间 918 h, 重污染过程以燃煤、二次和沙尘为主, 污染发生时以逆温、高湿等气象条件为主, 风向多为西南风、东南风. 2019 年 1 ~ 3 月出现重污染过程 5 次, 与 2018 年同期比减少 1 次. 保定市 2018 年高污染季重污染过程和 2017 年高污染季发生次数相同, 但污染持续时间长, 污染程度深, 静小风持续时间长, 逆温高湿等静稳天气现象频发, 气象条件较 2017 年高污染季不利.

2017 年高污染季发生的 12 次重污染事件中: 偏燃煤型 1 次 (E5), 偏二次型 3 次 (E9、E10 和 E11), 偏粗颗粒型 1 次 (E12), 偏机动车型 2 次 (E1 和 E6), 偏综合型 5 次 (E2、E3、E4、E7 和 E8); 2018 年高污染季 12 次重污染事件中: 偏燃煤型 3 次 (E7、E9 和 E10), 偏二次型 3 次 (E3、E11 和 E12), 偏粗颗粒型 1 次 (E5), 偏机动车型 2 次 (E1 和 E2), 偏综合型 3 次 (E4、E6、E8). 2018 年高污染季的污染类型中偏燃煤型污染有所增加说明燃煤仍是保定市最大的污染源之一; 同时发现偏机动车型主要发生在秋季和初冬 (10 ~ 11 月), 说明秋季主要是以机动车污染为主, 下一步应加强对机动车的管控. 2013 ~ 2018 年保定市高污染季空气质量逐年好转, 各项大气污染物质量浓度逐年降低, 但 2018 ~ 2019 年高污染季大气污染略有反弹, 除气象因素外, 还可能与“以民为本”的高污染季取暖政策和禁止企业“一刀切”有关.

3 结论

(1) 近年来保定市空气质量不断改善, 综合指数不断下降, 大气污染物浓度不断降低, 重污染天出现时间不断减少, 而且重污染时污染物累积浓度的占比也在下降. 保定市污染物浓度与“2 + 26”城市平均水平的差距越来越小, 保定空气质量改善与本地大气污染措施的实施和区域整体污染物浓度的降低有关. SO₂ 是 6 种常规污染物中年均浓度下降幅度最大的, 其次为 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 CO, NO₂ 降幅不明显. 而 O₃ 是所有污染物中年均浓度上升的污染物, 下一步需加强对 O₃ 污染的治理和管控.

(2) 保定市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 CO 浓度

季节变化趋势均为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 浓度逐年降低. 而 O₃-8h 呈现“夏高冬低”的季节变化特征, 并且出现逐年升高的趋势. 秋季污染类型为偏机动车型, 应加强对机动车的管控. 冬季是大气污染发生的主要季节, 污染特征由燃煤型污染逐渐过渡到燃煤和烧柴污染, 下一步进行清洁取暖的同时还应加强控煤和控柴相结合.

(3) 以 2015 年为基准年, 2016 年和 2017 年高污染季保定市 PM_{2.5}、PM₁₀ 高位累积浓度占比降幅相对 SO₂、NO₂ 较大, 其中, 2017 年 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 高位累积浓度占比较 2015 年同期降幅分别为 6.21% 和 4.97%, 说明应急措施对保定市污染物起到了较显著的重污染削峰作用, 并且重污染期间应急措施对 PM_{2.5}、PM₁₀ 等颗粒物较 SO₂、NO₂ 等气态污染物浓度削峰作用更大. 2018 年高污染季的污染类型中偏燃煤型污染有所增加, 说明燃煤仍是保定市最大的污染源之一.

致谢: 感谢陈建华老师和段菁春老师等在项目开展和文章撰写过程中给予的帮助和支持.

参考文献:

- [1] 王文兴, 柴发合, 任阵海, 等. 新中国成立 70 年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1621-1635.
Wang W X, Chai F H, Ren Z H, et al. Process, achievements and experience of air pollution control in China since the founding of the people's republic of China 70 years ago[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1621-1635.
- [2] Fu G Q, Xu W Y, Rong R F, et al. The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(21): 11949-11958.
- [3] 黄顺祥, 刘峰, 盛黎, 等. 基于伴随方法的大气污染溯源[J]. 科学通报, 2018, **63**(16): 1594-1605.
Huang S X, Liu F, Sheng L, et al. On adjoint method based atmospheric emission source tracing[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(16): 1594-1605.
- [4] Li M, Liu H, Geng G N, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. National Science Review, 2017, **4**(6): 834-866.
- [5] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [6] Hu J L, Wu L, Zheng B, et al. Source contributions and

- regional transport of primary particulate matter in China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **207**: 31-42.
- [7] Wang H B, Zhao L J. A joint prevention and control mechanism for air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in China based on long-term and massive data mining of pollutant concentration [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **174**: 25-42.
- [8] 何伟, 张文杰, 王淑兰, 等. 京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32** (10): 1696-1703.
He W, Zhang W J, Wang S L, *et al.* Effects and improvement suggestions on air pollution joint prevention and control mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32** (10): 1696-1703.
- [9] 胡京南, 柴发合, 段菁春, 等. 京津冀及周边地区秋冬季 PM_{2.5} 爆发式增长成因与应急管控对策 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32** (10): 1704-1712.
Hu J N, Chai F H, Duan J C, *et al.* Explosive growth of PM_{2.5} during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32** (10): 1704-1712.
- [10] Zheng J J, Jiang P, Qiao W, *et al.* Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **114**: 314-322.
- [11] 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.
- [12] Lou C R, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Socioeconomic drivers of PM_{2.5} in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13** (10): 928.
- [13] Liu S, Hu M, Slanina S, *et al.* Size distribution and source analysis of ionic compositions of aerosols in polluted periods at Xinken in Pearl River Delta (PRD) of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6284-6295.
- [14] Kang H Q, Zhu B, Su J F, *et al.* Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **120-121**: 78-87.
- [15] 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 Jingjinji Region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (12): 4897-4904.
- [16] 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.
- [17] 张冲, 郎建全, 程水源, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (8): 3397-3404.
Zhang C, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution and the efficiency of concentration control during a red alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (8): 3397-3404.
- [18] 赵普生, 张小玲, 孟伟, 等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32** (6): 1546-1549.
- Zhao P S, Zhang X L, Meng W, *et al.* Characteristics of inorganic water-soluble ions from aerosols in Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (6): 1546-1549.
- [19] Zhou J B, Xing Z Y, Deng J J, *et al.* Characterizing and sourcing ambient PM_{2.5} over key emission regions in China I: water-soluble ions and carbonaceous fractions [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **135**: 20-30.
- [20] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, *et al.* A monitoring-modeling approach to SO₄²⁻ and NO₃⁻ secondary conversion ratio estimation during haze periods in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **78**: 293-302.
- [21] Ji D S, Cui Y, Li L, *et al.* Characterization and source identification of fine particulate matter in urban Beijing during the 2015 Spring Festival [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 430-440.
- [22] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, during 2013-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (1): 106-114.
- [23] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (4): 1585-1593.
Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (4): 1585-1593.
- [24] Zhang Z, Zhang X, Gong D, *et al.* Possible influence of atmospheric circulations on winter haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (2): 561-571.
- [25] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116** (49): 24463-24469.
- [26] Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62** (12): 1857-1871.
- [27] 郭育红, 辛金元, 王跃思, 等. 保定市大气颗粒物中含碳组分粒径分布 [J]. *气候与环境研究*, 2014, **19** (2): 185-192.
Guo Y H, Xin J Y, Wang Y S, *et al.* A study of size distributions of carbonaceous species in ambient particles in Baoding, China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19** (2): 185-192.
- [28] 王丽, 温天雪, 苗红妍, 等. 保定大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26** (5): 516-521.
Wang L, Wen T X, Miao H Y, *et al.* Concentrations and size distributions of water soluble inorganic ion in aerosol particles in Baoding, Hebei [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26** (5): 516-521.
- [29] 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 等. 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (2): 441-447.
Li X R, Du X Q, Wang Y F, *et al.* Pollution characteristics and source identification of atmospheric particulate matters *n*-alkanes in Baoding City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (2): 441-447.

- [30] 刘芑岩, 郭近, 张瑞瑞, 等. 保定市雾霾期大气 $PM_{2.5}$ 中有机污染物解析[J]. 环境与健康杂志, 2014, **31**(11): 1014-1016.
- [31] 张凯, 吕文丽, 王婉, 等. 保定市大气污染来源与燃煤治理成效[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1720-1729.
Zhang K, Lü W L, Wang W, *et al.* Sources of air pollution and effects of coal combustion treatment in Baoding City [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1720-1729.
- [32] 王成云, 陈妍羽, 李帅英, 等. 保定地区常见城市绿化树种对 $PM_{2.5}$ 滞纳能力与大气 $PM_{2.5}$ 浓度关系的研究[J]. 河北林业科技, 2017, (1): 5-9, 14.
Wang C Y, Chen Y Y, Li S Y, *et al.* Study for relation on the atmospheric $PM_{2.5}$ concentration with the payment ability of common greening tree species to $PM_{2.5}$ in Baoding [J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2017, (1): 5-9, 14.
- [33] 王永慧, 刘芑岩, 于泊蓁, 等. 保定市日间、夜间大气 $PM_{2.5}$ 中无机组分的特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, **36**(9): 1941-1948.
Wang Y H, Liu P Y, Yu B Q, *et al.* Characteristics and source analysis of inorganic components in $PM_{2.5}$ samples collected during daytime and night in Baoding [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(9): 1941-1948.
- [34] 郑悦, 程方, 张凯, 等. 保定市大气污染特征和潜在输送源分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(2): 260-270.
Zheng Y, Cheng F, Zhang K, *et al.* Characteristics and potential transport source identification of atmospheric pollution in Baoding City [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 260-270.
- [35] 刘文雯, 段菁春, 胡京南, 等. 基于环境监测数据的大气重污染应急减排措施效果评估[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 734-741.
Liu W W, Duan J C, Hu J N, *et al.* Effect assessment of emergency measures for heavy air pollution based on environmental monitoring data [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(5): 734-741.
- [36] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于印送《关于推进重污染天气应急预案修订工作的指导意见》的函(环办大气函[2018]875号)[EB/OL]. <http://sthj.gansu.gov.cn/info/1712/55764.htm>, 2018-8-23.
- [37] 国务院. 大气污染防治行动计划, 国发[2013]37号[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2013-09/13/content_4561.htm, 2013-09-13.
- [38] 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 等. 2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3693-3704.
Yang J Y, Xin J Y, Ji D S, *et al.* Variation analysis of background atmospheric pollutants in north China during the summer of 2008 to 2011 [J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3693-3704.
- [39] Verstraeten W W, Neu J L, Williams J E, *et al.* Rapid increases in tropospheric ozone production and export from China [J]. Nature Geoscience, 2015, **8**(9): 690-695.
- [40] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source apportionment method [J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 147-161.
- [41] Wang G, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Source apportionment and seasonal variation of $PM_{2.5}$ carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**(3): 143.
- [42] Gao L J, Tian Y Z, Zhang C Y, *et al.* Local and long-range transport influences on $PM_{2.5}$ at a cities-cluster in northern China, during summer 2008 [J]. Particuology, 2014, **13**: 66-72.
- [43] 段菁春, 胡京南, 谭吉华, 等. 特征雷达图的设计及其在大气污染成因分析中的应用[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(8): 1329-1336.
Duan J C, Hu J N, Tan J H, *et al.* Design of characteristic radar chart and its application in air pollution analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(8): 1329-1336.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
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	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)