

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)

2015年北京大气VOCs时空分布及反应活性特征 张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)

北京市建筑类涂料VOCs排放清单编制技术方法及应用 邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)

基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征 高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)

2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)

北京市大气环境PM_{2.5}和PM₁₀及其碳质组分季节变化特征及来源分析 樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)

南京春季北郊地区大气PM_{2.5}中主要化学组分及碳同位素特征 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)

热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物 马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)

杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系 王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)

基于远程通讯技术的混动公交车SCR系统运行及NO_x排放特征 杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)

基于环境风险排序的流域优先污染物筛选 李奇锋, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)

重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)

黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征 宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)

脱甲河水系N₂O关键产生过程及氮素来源探讨 赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)

生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响 王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)

黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复 史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)

城市黑臭水体的吸收特性分析 丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)

岷江上游水体中DOM光谱特征的季节变化 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)

防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征 林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)

基于δ¹⁵N和δ¹⁸O的农业区地下水河硝酸盐污染来源 盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)

垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征 彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)

铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为 梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)

基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制 张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)

AAO工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性 李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)

抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除 李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)

磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响 刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)

海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能 杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)

低温下A²/O-BAF反硝化除磷脱氮特性 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)

O₃-BAC深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析 张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)

基于MBR不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析 吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)

3种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)

硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制 张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析 杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)

中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)

典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)

不同肥料施用对设施蔬菜地NH₃挥发和N₂O排放的影响 山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)

施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)

长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响 王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征 陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)

凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制 陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)

天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果 刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)

水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响 万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)

窖水中微生物降解污染物的关键细菌 杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)

砷氧化菌对胡敏酸络合As(III)的氧化作用 李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)

海域高温油田1株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制 杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)

1株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌Zobellella sp. B307的分离及脱氮特性 白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岩然 (4793)

1株镰刀菌属KY123915的分离及其对17β-雌二醇的降解特性 吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)

氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响 李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)

林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析 任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)

DEP对蚯蚓抗氧化酶系的影响及DNA损伤 平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)

生活垃圾焚烧飞灰矿物学特性及重金属分布 李建陶, 曾鸣 (4834)

《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)

2014 ~ 2016 年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析

王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军*

(中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 对北京、保定、石家庄、邢台和邯郸这 5 个京津冀太行山沿山城市 2014 ~ 2016 年空气质量首要污染物进行分析, 探讨其空间分布特征和时间变化趋势. 结果表明, 北京首要污染物由主到次为 $PM_{2.5}$ 、 O_3 -8h、 NO_2 和 PM_{10} , 其他 4 个城市首要污染物排序为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 -8h、 NO_2 、 SO_2 和 CO. 在空间分布上, 各城市 $PM_{2.5}$ 首要污染物天数比例 3 a 均值相当 (53.3% ~ 58.1%), 但从北向南, 5 个城市 PM_{10} 天数比例基本呈上升趋势, 而 O_3 -8h 反之. 除邯郸 $PM_{2.5}$ 首要污染物天数比例逐年明显下降外, 其他 4 个城市的天数比例年际变化幅度较小; 2016 年石家庄、邢台和邯郸 O_3 -8h 天数比例均显著上升. 各城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 -8h 首要污染物天数月变化曲线分别呈“W”型和“倒 U”型, PM_{10} 首要污染物天数在 3 ~ 5 月出现明显高值区. 从良至严重污染, 各城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 首要污染物天数比例之和随空气质量级别逐级递增, 其中 PM_{10} 天数比例逐级下降, 而 $PM_{2.5}$ 表现相反; O_3 -8h 首要污染物天基本出现在良至中度污染级别, 且总体上逐级下降; NO_2 仅在良级天有较高的天数比例贡献.

关键词: 首要污染物; 空气质量; 变化特征; 沿山城市; 京津冀区域

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4422-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801100

Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016

WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, XU Rong, LI Jian-jun*

(State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China)

Abstract: Primary pollutants of air quality in Beijing, Baoding, Shijiazhuang, Xingtai, and Handan cities along the Taihang Mountains were analyzed to investigate their spatial distribution characteristics and temporal variation trends during 2014-2016. The results showed that the primary pollutants were ranked as $PM_{2.5}$, O_3 -8h, NO_2 and PM_{10} from most to least important in Beijing, and $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 -8h, NO_2 , SO_2 and CO in the other four cities. Three-year average percentages of days with $PM_{2.5}$ as the primary pollutant in each city were similar (53.3%-58.1%), however, percentages of days with PM_{10} as primary pollutant increased, while percentages of O_3 -8h decreased basically, from north to south. Except for Handan with a significant descending trend, percentages of days with $PM_{2.5}$ as primary pollutant varied slightly in the other four cities during the study period, and percentages of O_3 -8h of Shijiazhuang, Xingtai and Handan increased significantly in 2016. Percentages of NO_2 slightly declined year by year in Beijing, and the other four cities mainly showed the opposite trend. Monthly variation curves of days with $PM_{2.5}$ and O_3 -8h as primary pollutants showed “W” and “inverted U” types respectively, while the high value interval of days with PM_{10} as primary pollutant occurred between March and May. With the exception of Beijing, peak of monthly variation curves for days with NO_2 as the primary pollutant was occurred in October in the other four cities. From “moderate” to “hazardous” levels for air quality, the percentages of days with $PM_{2.5}$ and/or PM_{10} as primary pollutants increased level by level, with percentages of PM_{10} trending downwards and $PM_{2.5}$ upwards. Meanwhile, days with O_3 -8h as the primary pollutant mostly appeared in the range between “moderate” and “unhealthy” levels, and NO_2 was only prominent in “moderate” level.

Key words: primary pollutants; air quality; variation characteristics; cities along Taihang Mountains; Beijing-Tianjin-Hebei Region

首要污染物是显著影响空气质量状况的大气污染物, 即反映当地大气污染特征的重要指标. 综合研究分析典型区域空气质量首要污染物的基本特征和变化趋势, 可全面准确掌握当地主要大气污染物对空气质量的影响程度, 有助于环境管理部门制定有针对性的大气污染防控和减排措施, 从而成本效益最大化地实现空气质量的持续改善.

京津冀城市群空气质量一直是国内外大气科学领域学者研究的焦点, 尤其是《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[1]自 2012 年分步实施以来, 基于

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209805); 国家自然科学基金项目(91644216)

作者简介: 王晓彦(1985~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气监测和空气质量预报, E-mail: wangxy@cnemc.cn

* 通信作者, E-mail: lij@cnemc.cn

标准中新增设的细颗粒物($PM_{2.5}$)、臭氧 8 h 滑动平均(O_3 -8h)浓度限值,国内外学者针对京津冀区域大气污染特征进一步开展了大量、深入研究.王冠岚等^[2]发现 2014 年京津冀 13 个城市空气质量呈现“北优南劣”的分布,首要污染物以 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 为主;郝静等^[3]基于 MODIS AOD 数据和混合效应模型模拟分析了京津冀内陆平原区 $PM_{2.5}$ 浓度分布规律,发现 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出“南高北低、西高东低”的分布趋势;潘本锋等^[4]、程麟钧等^[5]均发现 2013 ~ 2014 年京津冀区域 O_3 污染状况整体呈加重趋势,春末和夏季污染最重, O_3 污染主要集中于北京及其周边城市;王未来等^[6]发现 2014 ~ 2015 年京津冀 13 个城市总的首要污染物日数分布排序由高到低分别为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 -8h、 NO_2 、 SO_2 和 CO, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别占总日数的 74.6% 和 67.1%;熊新竹等^[7]发现冬季北京主城区 NO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 污染较为严重,三者超标天数分别占总天数的 58.1%、48.4% 和 83.9%;张霞等^[8]发现邯郸市 2013 ~ 2014 年大气污染以颗粒物尤其是 $PM_{2.5}$ 为主, PM_{10} 为首要污染物的频率下降, $PM_{2.5}$ 则表现相反.

以上研究多侧重于京津冀区域多城市空气质量总体状况或单个城市大气污染特征分析,目前国内以首要污染物的变化特征为切入点,开展多城市、长时间序列的系统性研究讨论较少.本研究选取同处京津冀内陆平原区太行山东麓沿线、具有相似地形条件和区域大气污染特征的北京、保定、石家庄、邢台和邯郸等 5 个城市,系统分析各城市 2014 ~ 2016 年空气质量首要污染物的空间分布特征和时间变化趋势,探讨影响太行山沿山地区空气质量的主要污染物及其变化规律,以期京津冀区域重点地区精准化大气污染管控决策提供基础性技术依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所选用的空气质量数据来源于国家环境空气质量监测网中国环境监测总站数据中心,选取北京、保定、石家庄、邢台和邯郸共 5 个典型京津冀区域沿山城市 2014 ~ 2016 连续 3 a 基本六项污染物(SO_2 、 NO_2 、CO、 O_3 -8h、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$)的日均浓度、AQI、空气质量级别和首要污染物为研究指标,围绕首要污染物的时空特征展开分析.其中,为满足研究需要,对不满足空气质量达标评价数据

有效性的个别天数,以当天至少一个点位的监测结果计算该城市的 AQI 和首要污染物,以保证全年有效分析天数的完整性,因此本研究数据不用于城市空气质量考核达标评价.

1.2 统计方法

城市首要污染物统计分析的基本依据为《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)、《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)^[9]和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)^[10],城市空气质量级别为优级天时,无首要污染物;空气质量级别为良、轻度污染、中度污染、重度污染至严重污染时,标注其首要污染物.

HJ 633-2012 规定城市 AQI 大于 100 时为超标日,该日的首要污染物为超标污染物,空气质量评价中通常统计超标日的首要污染物.为更全面分析首要污染物特征,本研究中扩展统计 AQI 大于 50 的天数中的各项首要污染物,即“非优天”首要污染物,下文中出现的“天数比例”,均指各项首要污染物天数占非优天数的比例.

HJ 633-2012 同时指出,若空气质量分指数 IAQI 最大的污染物为两项或两项以上时,则并列为首要污染物.本研究中当城市同一日有 N 项($N > 1$)首要污染物时,则 N 个首要污染物所占天数均按照 1 d 计算,因此各首要污染物天数所占非优天比例相加之和会出现大于 100% 的情况.

本研究中重点统计北京、保定、石家庄、邢台和邯郸这 5 个城市 2014 ~ 2016 年各项首要污染物天数和天数比例,总结其时间变化趋势和空间分布特征,并结合前人研究成果进行初步成因分析.

2 结果与讨论

2.1 首要污染物基本分布特征

各城市 2014 ~ 2016 年各项首要污染物天数及天数比例的统计结果显示(见表 1 和图 1),各城市每年非优天数差别较小,平均每年 344.4 d;北京非优天数相对较少,其他 4 个城市非优天数在 334 ~ 364 d 之间.总体上, $PM_{2.5}$ 是各城市第一大首要污染物,5 个城市 $PM_{2.5}$ 首要污染物天数比例 3 a 均值在 53.3% ~ 58.1% 之间.北京首要污染物种类最少,仅有 $PM_{2.5}$ 、 O_3 -8h 和 NO_2 和 PM_{10} ,其中 O_3 -8h 是第二大首要污染物,天数比例均值为 27.0%,明显高于第三大首要污染物 NO_2 的 11.6%; PM_{10} 天数比例 3 a 均值略低于 NO_2 .除北京外,其他 4 个城市第二大首要污染物均为 PM_{10} ,天数比例均值在

23.1%~30.1%之间;第三和第四大首要污染物分别为 O₃-8h 和 NO₂,但邢台 O₃-8h 天数比例明显低于其他城市;SO₂ 首要污染物天在 4 个城市中仅在 2015 和 2016 年分别出现 2 d 和 5 d;而 CO 首要污染物天仅有邯郸在 2016 年出现过 2 d,出现概率最低。

各城市 PM_{2.5}首要污染物天数比例相当,均占到五成以上,从空间分布上显示 PM_{2.5}污染是京津冀区域的共性问题,且各城市天数比例随城市纬度降低而略有上升,吴健生等^[11]在对京津冀区域城市 PM_{2.5}浓度空间分异模型模拟研究中也提出相似的空间分布规律。从北向南,5 个城市 PM₁₀首要污染物天数比例总体呈上升趋势,而 O₃-8h 则表现相反。多个前期研究结果也表明北京及周边地区是京

津冀 O₃ 污染的高值区^[4,5],北京和保定污染较重可能与贾海鹰等^[12]模拟揭示的北京-保定-山西北部地区存在一条 O₃ 污染传输带有关。北京 NO₂ 首要污染物天数比例明显高于其他 4 个城市,但石家庄、邢台和邯郸 NO₂ 污染也不容忽视,其分布特征与郑晓霞等^[13]在京津冀地区大气 NO₂ 污染特征研究中的结论基本一致。SO₂ 首要污染天以小概率在石家庄、邢台、邯郸和保定出现,张伟等^[14]和段文娇等^[15]的研究发现石家庄和邯郸等地区因钢铁、水泥、火电等产业集中而导致 SO₂ 排放集聚,是河北中南部地区仍存在 SO₂ 污染的主要原因。在邯郸 2016 年夏季出现的 CO 首要污染天为少数个例,可能与当地夏收秸秆焚烧等局地污染有关^[16]。

表 1 2014~2016 年各城市首要污染物天数及天数比例

年份	城市	全年非优天数/d	PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃ -8h		NO ₂		SO ₂		CO	
			首要污染物天数/d	天数比例/%	首要污染物天数/d	天数比例/%	首要污染物天数/d	天数比例/%	首要污染物天数/d	天数比例/%	首要污染物天数/d	天数比例/%	首要污染物天数/d	天数比例/%
2014	北京	325	181	55.7	33	10.2	74	22.8	40	12.3	0	0.0	0	0.0
	保定	364	195	53.6	121	33.2	52	14.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	石家庄	353	216	61.2	110	31.2	28	7.9	3	0.8	0	0.0	0	0.0
	邢台	360	206	57.2	131	36.4	26	7.2	3	0.8	0	0.0	0	0.0
	邯郸	362	258	71.3	84	23.2	22	6.1	3	0.8	0	0.0	0	0.0
2015	北京	313	163	52.1	23	7.3	95	30.4	36	11.5	0	0.0	0	0.0
	保定	347	201	57.9	55	15.9	84	24.2	14	4.0	1	0.3	0	0.0
	石家庄	334	200	59.9	72	21.6	33	9.9	32	9.6	0	0.0	0	0.0
	邢台	353	216	61.2	116	32.9	21	5.9	9	2.5	1	0.3	0	0.0
	邯郸	359	207	57.7	129	35.9	20	5.6	11	3.1	0	0.0	0	0.0
2016	北京	298	155	52.0	26	8.7	84	28.2	33	11.1	0	0.0	0	0.0
	保定	346	202	58.4	68	19.7	70	20.2	15	4.3	0	0.0	0	0.0
	石家庄	344	183	53.2	96	27.9	58	16.9	17	4.9	2	0.6	0	0.0
	邢台	350	191	54.6	70	20.0	58	16.6	35	10.0	2	0.6	0	0.0
	邯郸	358	146	40.8	112	31.3	78	21.8	27	7.5	1	0.3	2	0.6

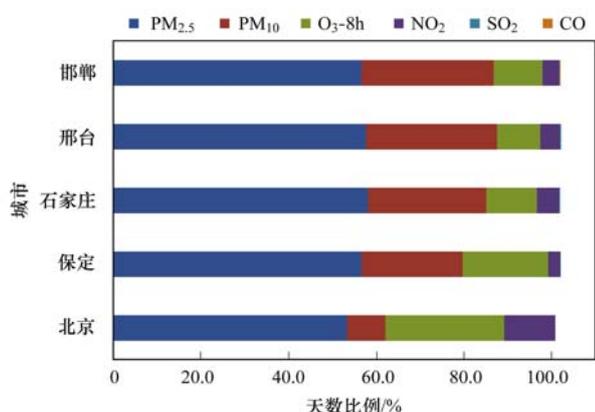


图 1 2014~2016 年各城市首要污染物 3 a 平均天数比例

Fig. 1 Three-year average percentages of days with different primary pollutants in five cities during 2014-2016

2.2 首要污染物年际变化趋势

考虑到 SO₂ 和 CO 首要污染天仅在部分城市个别年份以小概率出现,因此以下研究中主要对各城市 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃-8h 和 NO₂ 等 4 种主要的首要污染物进行特征分析。

各城市 4 种主要的首要污染物天数比例年际变化如图 2 所示。相对来说,北京、保定、石家庄和邢台 4 个城市 PM_{2.5} 首要污染物天数比例变化幅度较小,均处于 52.0%~61.2% 的范围内,上下浮动变化无统一规律;而邯郸 PM_{2.5} 天数比例从 2014 年的 71.3% 下降到 2016 年的 40.8%,呈现出明显的逐年下降趋势。

北京 PM₁₀ 首要污染物天数比例明显低于其

他城市,且年际变化幅度较小;保定、石家庄和邢台 2014 年 PM_{10} 天数比例均为最高值(31.2%~36.4%),保定和石家庄 PM_{10} 天数比例在 2015 年明显下降,降幅分别高达 52.3% 和 30.8%,而 2016 年又略有回升;邢台 PM_{10} 天数比例呈逐年下降趋势,2016 年相对于前两年分别下降 45.0% 和 39.1%;邯郸 PM_{10} 天数比例 2015 比 2014 年上涨明显(54.9%),2016 年又略有下降。

北京和保定各年 O_3 -8h 首要污染物天数比例相对较高,年际变化规律较为一致,2015 年比 2014 年分别上涨 33.3% 和 69.5%,2016 年均略有回落, O_3 与前体物的复杂关系和气象要素对 O_3 的显著影响都可能导致 O_3 污染程度的波动变化^[17];石家

庄、邢台和邯郸前两年 O_3 -8h 天数比例均较低,且变化幅度较小,但 2016 年相对于 2015 年均显著上涨,涨幅分别高达 70.6%、178.6% 和 291.1%,在一定程度上表明京津冀区域 O_3 污染范围逐渐扩大,程度有所加重^[18,19]。

北京 NO_2 首要污染物天数比例呈逐年有限下降趋势;保定 2015~2016 年 NO_2 天数比例稳定在 4% 左右;其他 3 个城市 2014 年 NO_2 天数比例最低($<1.0\%$),邢台和邯郸 NO_2 天数比例逐年上升,且 2016 年涨幅明显,相对于 2015 年分别上涨 2.9 倍和 1.5 倍,而石家庄 NO_2 天数比例在 2015 年也出现陡增。河北 4 个沿山城市 NO_2 污染总体呈加重趋势,可能与当地产业布局、能源结构和机动车保有量增加等因素有关。

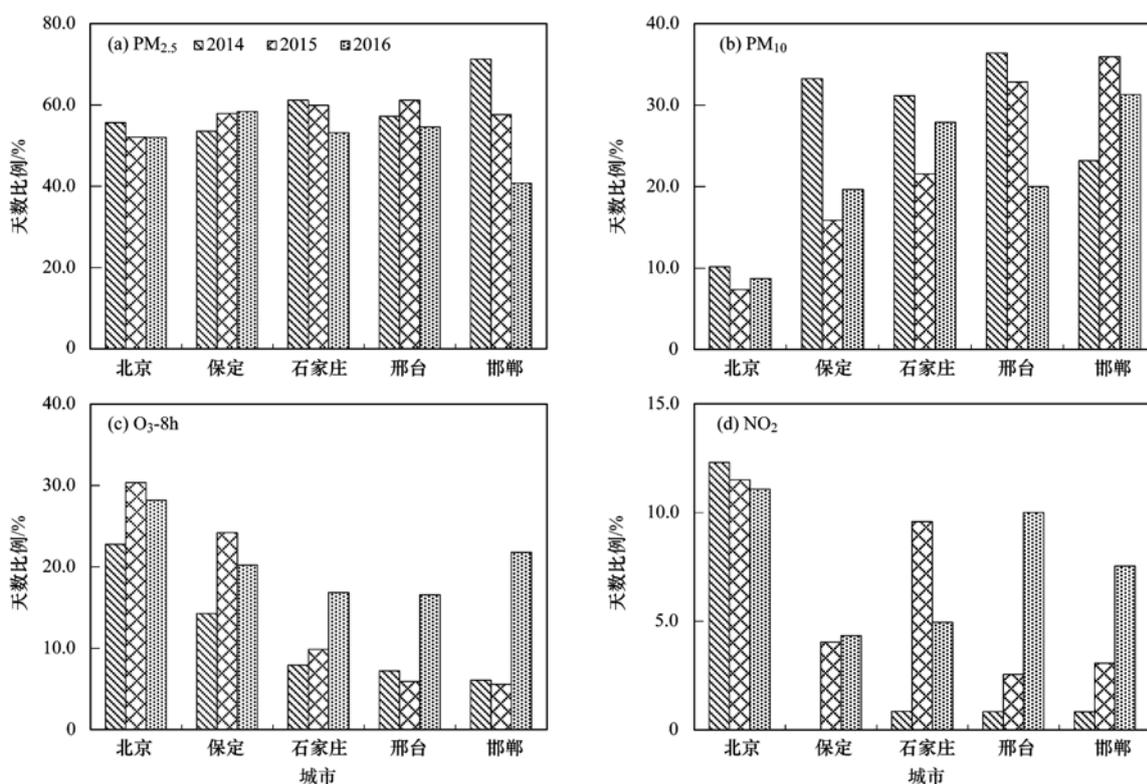


图 2 2014~2016 年各城市主要首要污染物年际变化趋势

Fig. 2 Annual variation trends of percentages of four primary pollutants during 2014-2016

2.3 首要污染物月变化趋势

各城市 4 种主要的首要污染物天数 3 a 平均月变化趋势如图 3 所示,各城市每种首要污染物天数月变化趋势总体较为一致。

$PM_{2.5}$ 首要污染物天数基本呈“W”型的月变化趋势,1 月和 12 月为第一高值区,7 月为第二高值区,5 月各城市 $PM_{2.5}$ 首要污染物天数均为最低值;冬季常见的静稳不利大气扩散条件和因供暖导致的

污染物排放量增大是造成 $PM_{2.5}$ 首要污染物天数“W”型分布的主要原因^[20,21]。各城市全年各月均会出现不同程度的 $PM_{2.5}$ 首要污染物天,反映出 $PM_{2.5}$ 是一种区域性、全年性、持续性的大气污染物。

北京 PM_{10} 首要污染物天数月变化曲线整体明显低于其他 4 个城市,各城市 PM_{10} 变化曲线在 3~5 月出现明显的高值平台区,这与华北地区春季易

受沙尘天气影响有显著关系^[20~23]. 各城市 PM₁₀ 首要污染物天数在 10 月集中出现了小峰值, 可能受秋季降水减少、大气边界层高度降低等气象因素影响^[24], 同时研究表明秋季区域性秸秆焚烧对 PM₁₀ 浓度抬升也有较大影响^[25,26].

各城市 O₃-8h 首要污染物天数月变化曲线均呈“倒 U”型, 1~3 月和 10~12 月几乎无 O₃-8h 首要污染物天, 5~9 月为高值区, 峰值集中在 6 月, 受温

度、光照和太阳辐射等因素影响, 夏季光化学反应较为强烈^[18,27], 导致 O₃ 污染多发. 在高值区, 北京和保定 O₃-8h 首要污染物天数明显高于其他 3 个城市, 且北京 5~8 月稳定维持在较高水平(16~20 d).

除北京外, 其他 4 个城市 NO₂ 首要污染物天数峰值集中在 10 月(邢台 9 月和 10 月相当); 北京 9~12 月为 NO₂ 首要污染物天数的高值区, 平均每月 6~7 d, 1 月略低, NO₂ 污染集中在秋冬季节.

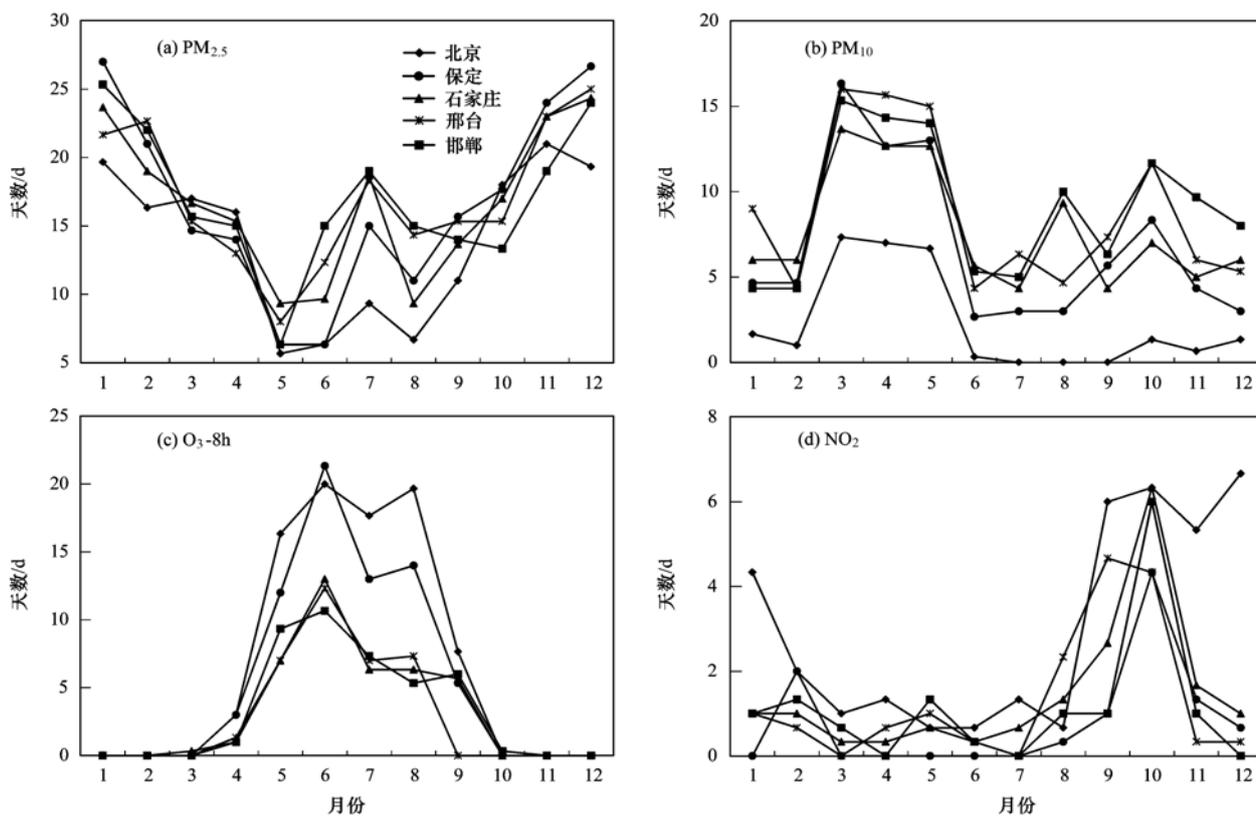


图3 各城市主要首要污染物天数月变化曲线

Fig. 3 Monthly variation curves for days with four main pollutants as primary pollutants in five cities

2.4 不同空气质量级别天中首要污染物分布

各城市从良至严重污染的不同空气质量级别天中的首要污染物分布情况如图 4 所示. 在良级天中, 各城市首要污染物种类最多, 且 4 种主要的首要污染物均有明显贡献. 从良至严重污染, 首要污染物种类逐渐减少.

5 个城市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 天数比例之和随空气质量级别逐级递增, 从良级的 69.0% 上升到严重污染的 105.4%. 北京重度污染天有 93.5% 是以 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 为首要污染物, 其他 4 个城市重度污染天和所有 5 个城市的严重污染天均由大气颗粒物导致.

从良至重度污染, 各城市 PM₁₀ 首要污染物天数比例总体上逐级下降, 而 PM_{2.5} 天数比例则逐级上

升; 在重度污染天, 各城市 PM_{2.5} 天数比例高达 92.5%~98.5%; 在严重污染天, 除北京 100% 以 PM_{2.5} 为首要污染物外, 其他 4 个城市 PM₁₀ 首要污染物天数反而显著增加, 邢台 PM₁₀ 天数比例甚至略高于 PM_{2.5}, 达到 56.3%.

O₃-8h 首要污染物天基本出现在良至中度污染级别; 除北京外, 其他 4 个城市 O₃-8h 首要污染物天数比例基本随空气质量级别逐级下降; O₃-8h 只在北京引发过重度污染, 贡献了 6.5% 的天数比例.

NO₂ 首要污染物天在各城市良级天中有较高天数比例, 北京良级天 NO₂ 首要污染物天数比例高达 27.7%; SO₂ 首要污染物天以低比例 (<1.0%) 集中在石家庄、邢台和邯郸的良级天中.

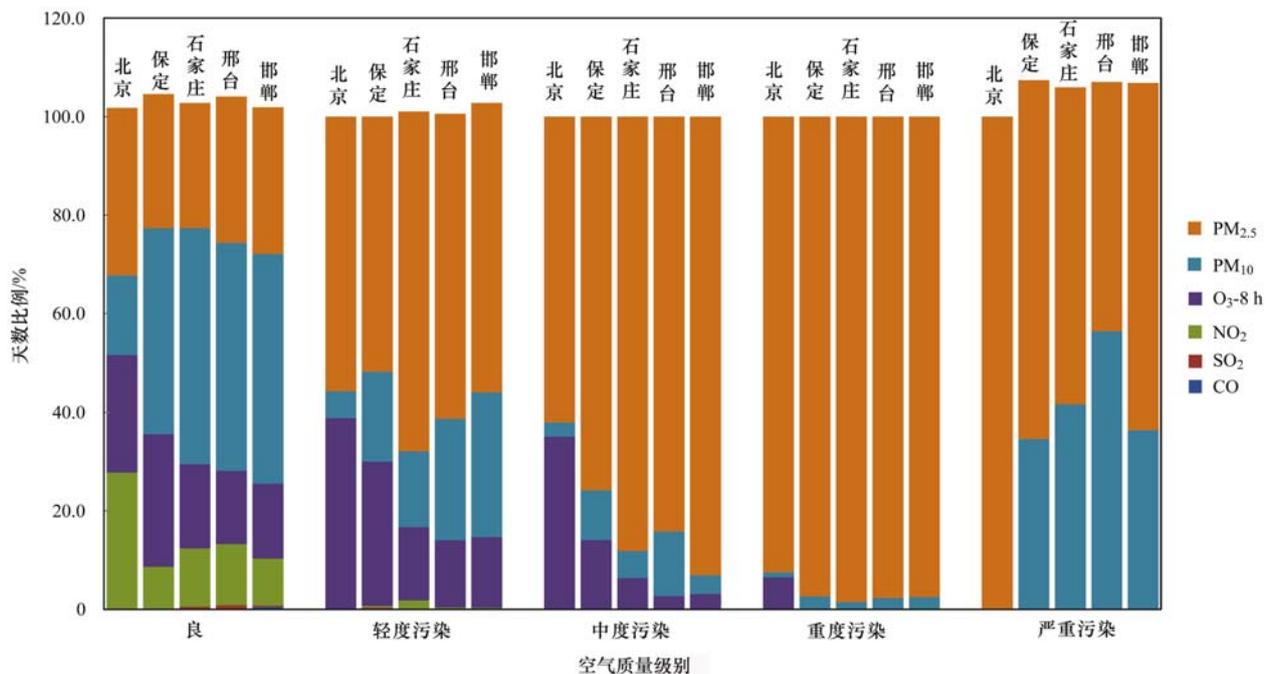


图4 不同空气质量级别天中首要污染物天数比例分布

Fig. 4 Percentages of primary pollutants in different air quality categories in five cities

3 结论

(1) 2014~2016年北京首要污染物由主到次排序为PM_{2.5}、O₃-8h、NO₂和PM₁₀,其他4个城市排序为PM_{2.5}、PM₁₀、O₃-8h、NO₂、SO₂和CO;5个城市第一大首要污染物均为PM_{2.5},具有显著的区域性污染特征;北京O₃-8h和NO₂污染突出,而河北中南部沿山城市PM₁₀污染形势仍较为严峻。

(2) 各城市中PM_{2.5}首要污染物天数比例3 a均值在53.3%~58.1%之间,空间差异性不明显;从北向南,5个城市的PM₁₀天数比例基本呈上升趋势,而O₃-8h天数比例则大致呈下降趋势。

(3) 除邯郸PM_{2.5}首要污染物天数比例逐年明显下降外,其他4个城市变化幅度较小;河北4城市PM₁₀天数比例年际变化较大且无明显规律;但2016年石家庄、邢台和邯郸O₃-8h天数比例均显著上升,区域臭氧污染形势有所加重。

(4) 各城市PM_{2.5}首要污染物天数月变化曲线基本呈“W”型,全年各月均有不同程度PM_{2.5}污染;PM₁₀首要污染物天数在3~5月出现明显高值区,10月出现小峰值;O₃-8h月变化曲线均呈“倒U”型,5~9月为高值区,峰值集中在6月;北京9~12月为NO₂首要污染物天数高值区,其他城市峰值集中在10月。

(5) 从良至严重污染,各城市PM_{2.5}和PM₁₀首

要污染物天数比例之和随空气质量级别逐级递增,在重度污染和严重污染天,98.7%以上由大气颗粒物污染导致;O₃-8h首要污染物天基本出现在良至中度污染级别,且天数比例逐级下降(除北京外);NO₂仅在良级天有较高天数比例贡献。

(6) 各城市首要污染物特征既有共性又有特性,环境管理部门应结合污染物来源解析等相关研究成果,有针对性地重点制定本地主要的首要污染物的减排措施,以达到事半功倍的治理效果。

参考文献:

- [1] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
GB 3095-2012, Ambient air quality standards[S].
- [2] 王冠岚, 薛建军, 张建忠. 2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 34-42.
Wang G L, Xue J J, Zhang J Z. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and main cause of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2014 [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(1): 34-42.
- [3] 郝静, 孙成, 郭兴宇, 等. 京津冀内陆平原区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1455-1465.
Hao J, Sun C, Guo X Y, et al. Simulation of spatio-temporally resolved PM_{2.5} aerosol mass concentration over the inland plain of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1455-1465.
- [4] 潘本锋, 程麟钧, 王建国, 等. 京津冀地区臭氧污染特征与来源分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(5): 17-23.
Pan B F, Cheng L J, Wang J G, et al. Characteristics and source attribution of ozone pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(5):

- 17-23.
- [5] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(1): 14-21.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(1): 14-21.
- [6] 王未来, 李明艳, 应锡钧, 等. 2014 和 2015 年京津冀地区 13 个城市空气质量特征分析[J]. 中国卫生工程学, 2017, **16**(5): 553-558.
Wang W L, Li M Y, Ying X J, *et al.* Analysis of characteristics of air quality of Jing-Jin-Ji Region in 2014 and 2015 [J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2017, **16**(5): 553-558.
- [7] 熊新竹, 陶双成, 高硕哈, 等. 北京典型主城区冬季大气污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(7): 1167-1173.
Xiong X Z, Tao S C, Gao S H, *et al.* Characteristics of air pollution in a typical main urban area of Beijing in winter [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(7): 1167-1173.
- [8] 张霞, 孟琛琛, 王丽涛, 等. 邯郸市大气污染特征及变化趋势研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, **32**(4): 69-74.
Zhang X, Meng C C, Wang L T, *et al.* Characteristics and trend of air pollution in Handan City [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, **32**(4): 69-74.
- [9] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].
HJ 633-2012, Technical regulation on ambient air quality index (on trial) [S].
- [10] HJ 663-2013, 环境空气质量评价技术规范(试行) [S].
HJ 663-2013, Technical regulation for ambient air quality assessment (on trial) [S].
- [11] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. $PM_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang X, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of $PM_{2.5}$ concentration; A case of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [12] 贾海鹰, 尹婷, 瞿霞, 等. 2015 年北京及周边地区臭氧浓度特征及来源模拟[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1231-1238.
Jia H Y, Yin T, Qu X, *et al.* Characteristics and source simulation of ozone in Beijing and its surrounding areas in 2015 [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1231-1238.
- [13] 郑晓霞, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀地区大气 NO_2 污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(12): 1938-1945.
Zheng X X, Li L J, Zhao W J, *et al.* Spatial and temporal characteristics of atmospheric NO_2 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(12): 1938-1945.
- [14] 张伟, 张杰, 汪峰, 等. 京津冀工业源大气污染排放空间集聚特征分析[J]. 城市发展研究, 2017, **24**(9): 81-87.
Zhang W, Zhang J, Wang F, *et al.* Spatial agglomeration of industrial air pollutant emission in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Urban Studies, 2017, **24**(9): 81-87.
- [15] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $PM_{2.5}$ 影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- [16] 李建峰, 宋宇, 李蒙蒙, 等. 江汉平原秸秆焚烧污染物排放的估算[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, **51**(4): 647-656.
Li J F, Song Y, Li M M, *et al.* Estimating air pollutants emissions from open burning of crop residues in Jiangnan Plain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, **51**(4): 647-656.
- [17] 王占山, 李云婷, 安欣欣, 等. 2006-2015 年北京市不同地区 O_3 浓度变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 1-8.
Wang Z S, Li Y T, An X X, *et al.* Variation trends of O_3 concentration in different regions of Beijing during 2006-2015 [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 1-8.
- [18] 孟晓艳, 宫正宇, 叶春霞, 等. 2013-2016 年 74 城市臭氧浓度变化特征[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(5): 101-108.
Meng X Y, Gong Z Y, Ye C X, *et al.* Characteristics of ozone concentration variation in 74 cities from 2013 to 2016 [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(5): 101-108.
- [19] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀地区典型月 O_3 污染输送特征[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3684-3691.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- [20] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(6): 783-790.
Wang H, Gao J, Li H, *et al.* Variation of $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing area during 2007-2014 [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(6): 783-790.
- [21] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013-2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(1): 103-111.
Wang Y R, Zhang X X, Zhao J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of $PM_{2.5}$ and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013-2014 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(1): 103-111.
- [22] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京春季一次沙尘气溶胶污染过程观测[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 87-94.
Yang X, Chen Y Z, Liu H F, *et al.* Measurement on a spring time dust aerosol pollution process in Beijing [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 87-94.
- [23] 徐文帅, 张大伟, 李云婷, 等. 北京两次沙尘污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征[J]. 气候与环境研究, 2016, **21**(1): 78-86.
Xu W S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Variation of $PM_{2.5}$ concentration during two dust pollution events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2016, **21**(1): 78-86.
- [24] 郭家瑜, 张英杰, 郑海涛, 等. 北京 2015 年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(7): 2409-2419.
Guo J Y, Zhang Y J, Zheng H T, *et al.* Characteristics of spatial

- distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2409-2419.
- [25] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 3045-3055.
- Zhu J L, Wang T J, Deng J J, *et al.* An emission inventory of air pollutants from crop residue burning in Yangtze River Delta Region and its application in simulation of a heavy haze weather process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 3045-3055.
- [26] 周悦, 岳岩裕, 李兰, 等. 秸秆焚烧导致湖北中东部一次严重霾天气过程的分析[J]. *气候与环境研究*, 2016, **21**(2): 141-152.
- Zhou Y, Yue Y Y, Li L, *et al.* Analysis of a serious haze event resulting from crop residue burning in central eastern Hubei[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(2): 141-152.
- [27] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2041-2051.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA);Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(<i>Comammox Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China; Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17β-estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Composting of Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)