

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期  
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM<sub>2.5</sub>污染防治的健康效益评估 ..... 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 ..... 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 ..... 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 ..... 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 ..... 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 ..... 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 ..... 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 ..... 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 ..... 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 ..... 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 ..... 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 ..... 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 ..... 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 ..... 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 ..... 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 ..... 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 ..... 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 ..... 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 ..... 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 ..... 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 ..... 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 ..... 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 ..... 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流气-水界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 ..... 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 ..... 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 ..... 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 ..... 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 ..... 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 ..... 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 ..... 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 ..... 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 ..... 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 ..... 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 ..... 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 ..... 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 ..... 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 ..... 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 ..... 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 ..... 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 ..... 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 ..... 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 ..... 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 ..... 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO<sub>2</sub>对水稻富集镉的影响机制 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 ..... 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 ..... 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 ..... 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 ..... 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 ..... 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 ..... 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响 ..... 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 ..... 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

# 南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析

张扬, 王红磊\*, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 于2018年11月16~28日使用在线气体组分及气溶胶监测系统 MARGA ADI 2080 观测了南京市颗粒物中的水溶性无机离子和一些痕量气体, 结合气象要素和探空数据, 分析了霾、雾、清洁和降水这4类过程中污染物及水溶性离子的分布特征及其昼夜差异. 结果表明, 在4类过程中  $PM_{2.5}$  平均浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 在 26.9 (降水) ~ 96.4 (霾), 而总水溶性离子浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 在 23.7 (降水) ~ 89.7 (霾). 在霾和雾过程中离子浓度大小排序为  $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ , 而在清洁和降水过程中为  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ . 水溶性离子的昼夜分布特征在4类过程中差异较大, 但昼夜间  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  (SNA) 均呈现出在霾 > 雾 > 清洁 > 降水过程中的特征. 由 PMF 源解析结果分析得到, 二次源是影响霾的主导因素, 二次源、海盐及燃烧源是雾过程的主要污染来源, 降水过程对燃煤源和二次源的清除作用较清洁过程更明显.

**关键词:** 南京市; 雾; 霾; 水溶性离子; 昼夜差异; PMF 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0564-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005317

## Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing

ZHANG Yang, WANG Hong-lei\*, LIU An-kang, CHEN Kui, ZHANG Yi-xin, LIU Si-han

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** From November 16 to 28 2018, water-soluble ions in particulate matter and some trace gases in Nanjing City were observed using the online gas composition and aerosol monitoring system MARGA ADI 2080. Combined with meteorological elements and sounding data, the distribution characteristics and day-night differences of pollutants and water-soluble ions during haze, fog, clear, and precipitation processes were analyzed. The results show that the average concentration of  $PM_{2.5}$  varied from 26.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (precipitation) to 96.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (haze) while total water-soluble ions varied between 23.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (precipitation) and 89.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (haze). The ranked order of ion concentrations was  $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$  during haze and fog events, and  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$  during clear weather and precipitation period. The diurnal distributions of water-soluble ions were quite different under the four conditions, although  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{NH}_4^+$  (SNA) were ranked haze > fog > clear > precipitation for both day and night periods. According to the PMF source analysis, secondary sources were the main factors affecting haze; secondary sources, sea salt, and combustion sources were the main pollution sources to foggy conditions; and the removal effect of precipitation on coal-fired sources and secondary sources was more notable than during clear conditions.

**Key words:** Nanjing City; fog; haze; water-soluble ions; day-night difference; PMF source analysis

$PM_{2.5}$  作为近年来我国主要的大气污染物, 对人体健康和大气环境造成严重影响<sup>[1~5]</sup>. 水溶性离子是  $PM_{2.5}$  的主要组分之一, 可占  $PM_{2.5}$  的 20%~60%, 最高可达 80% 以上<sup>[6,7]</sup>.  $PM_{2.5}$  来源复杂, 大量的研究表明在雾、霾过程中颗粒物表面的非均相化学过程对  $PM_{2.5}$  的贡献较大<sup>[8,9]</sup>. 朱彤等<sup>[10]</sup> 基于实验室研究识别出  $\text{NO}_2$ -颗粒物- $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$ -颗粒物- $\text{O}_3$  和有机物/ $\text{SO}_2$ -颗粒物-光照分别构成的三元体系具有协同作用, 使得大气颗粒物表面经非均相反应生成了一层吸湿性强的硫酸盐和硝酸盐. He 等<sup>[11]</sup> 的研究发现了一种新的霾形成机制, 即由于  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  在矿物粉尘表面反应时具有协同效应, 导致与  $\text{NO}_x$  共

存时  $\text{SO}_2$  的环境容量会降低, 使得  $\text{SO}_2$  快速转化为硫酸盐. Wang 等<sup>[12]</sup> 的研究发现北京市区上方存在一个反应层, 可能通过吸收  $\text{N}_2\text{O}_5$  而快速产生  $\text{pNO}_3^-$ , 并导致地表颗粒物质量浓度升高.

由于各地区污染源不同, 所处的地理和气象条件等不同, 因此各地颗粒物污染都有不同特征. 方言等<sup>[13]</sup> 的研究发现东海冬季气团主要来自于西

收稿日期: 2020-05-30; 修订日期: 2020-08-22

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK20180801); 国家自然科学基金项目 (41805096); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (18KJB170011); 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (201910300156)

作者简介: 张扬 (1999~), 男, 主要研究方向为大气物理, E-mail: 2311873734@qq.com

\* 通信作者, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

北方大陆,受季风输送污染物等的影响导致水溶性离子中  $\text{NO}_3^-$  质量浓度与占比最高. 王堃等<sup>[14]</sup>的研究说明西安市重霾日伴随静风、高湿等多种不利气象条件,而西北风输出对于重霾有较强消散作用. 廖碧婷等<sup>[15]</sup>分析发现广州地区灰霾过程中,1 830 m 高度以下,清洁过程各层的平均风速明显高于灰霾过程,有利于边界层内污染物的扩散. 王杰等<sup>[16]</sup>的研究经过分析得到,2 a 采暖季太行山沿线各城市 SNA 粒子质量浓度与占比呈现“南低北高”,而 OC 和 C 呈现“北低南高”的特征.

此前已有不少学者对长三角地区以至南京市地区产生的颗粒物污染进行了研究,蒋琳等<sup>[17]</sup>的研究发现长三角地区主要水溶性离子的质量浓度具有  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+$  的排序特征. Liu 等<sup>[18]</sup>的研究分析我国气溶胶的分布发现长三角地区二次气溶胶的来源主要为转化生成及远距离输送. Zhang 等<sup>[19]</sup>的研究根据主成分分析的结果说明二次源、燃烧源和空中灰尘源是主要潜在的南京市  $\text{PM}_{2.5}$  的来源. Wang 等<sup>[20]</sup>的研究经过实验表明,南京市  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的水溶性物质呈酸性, $\text{PM}_{2.5}$  的 pH 值低于  $\text{PM}_{10}$ . 邱晨晨等<sup>[21]</sup>的研究发现南京市  $\text{NO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$  大于 1,即移动源大于固定源,移动源对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献率相对更高.

南京作为长江下游地区重要的制造业产地,地理位置及产业结构使得复合型污染在此地影响严重,此前研究多针对的是  $\text{PM}_{2.5}$  及其水溶性离子在长期过程中表现出的特征<sup>[21~24]</sup>,而对水溶性离子在不同过程中的差异了解较少. 2018 年 11 月 16~28 日南京市发生一次持续性污染过程,期间霾、雾及清洁过程频繁转换,分别出现 91、113 和 75 个时次. 本研究利用 MARGA 在线气体组分及气溶胶监测系统对该过程气溶胶水溶性离子和污染气体进行了观测,结合同期其他要素资料,分析了霾、雾、清洁和降水这 4 个过程中水溶性离子及污染气体的变化特征,并使用 PMF 模式分析了 4 类过程中大气污染物的来源特征,以期为南京市污染研究及治理工作提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

本研究所用数据的观测时间为 2018 年 11 月 16~28 日,地点位于南京信息工程大学气象楼楼顶(32.207°N, 118.717°E),距地面约 40 m. 观测点处在龙王山下,紧挨南京北郊高新开发区,采样点以东约 500 m 为宁六路,双向六车道,东部 3~10 km 处能源和化工等大型企业较为密集,且观测站点附近

有少量农田,大气环境污染较为严重,属重工业污染园区. 因此该观测站点代表了南京北郊工业混合区域的空气污染状况.

### 1.2 观测仪器及数据

本研究采样使用仪器为瑞士万通集团研制的 MARGA ADI 2080 在线气体组分及气溶胶监测系统<sup>[25]</sup>,采样粒径为  $\text{PM}_{2.5}$ ,系统包括取样、分析、整合控制这 3 个部分,可以对气溶胶粒子中的水溶性离子成分和一些痕量污染性气体进行持续观测,包含有  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  这 8 类离子和  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HNO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$  这 5 类气体,时间分辨率为 1 h. 仪器原理详见文献[26, 27].

$\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  数据为中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)公布的数据,时间分辨率为 1 h. 同时段的大气气象环境要素(大气温度、湿度、压强、风速、风向、降雨量和能见度)来自于南京信息工程大学大气探测基地,时间分辨率为 1 h. 探空资料来源于美国怀俄明大学天气网(<http://weather.uwyo.edu/upperair/uamap.shtml>)公布的数据,时间分辨率为 12 h.

### 1.3 数据分析——PMF(正定矩阵因子分析法)模型方法

PMF 模型<sup>[28]</sup>是一种受体源解析模型,可对没有明确排放清单的排放源进行识别,在目前研究中广泛应用于大气颗粒物来源解析<sup>[29~31]</sup>. 其采用最小二乘法分析,并基于受体点的大量观测数据来估算污染源的组成和对环境浓度的贡献,基本原理是将多样本、多物种的采样数据看作是一个矩阵  $\mathbf{X}$  ( $n \times m$ ),其中,  $n$  代表样本数,  $m$  代表化学成分数目,那么矩阵  $\mathbf{X}$  可以分解为矩阵  $\mathbf{G}$  ( $n \times p$ ) 和矩阵  $\mathbf{F}$  ( $p \times m$ ) [见式(1)],其中矩阵  $\mathbf{G}$  为颗粒物排放源贡献矩阵,矩阵  $\mathbf{F}$  为污染源成分谱矩阵,  $p$  为主要污染源的数目.

$$\mathbf{X} = \mathbf{GF} + \mathbf{E} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为残差矩阵,表示  $\mathbf{X}$  与  $\mathbf{GF}$  之间存在差异. PMF 算法中,矩阵  $\mathbf{F}$  和矩阵  $\mathbf{G}$  均大于或等于 0 时,构造目标函数  $Q$ ,采用最小二乘法进行迭代计算求出使目标函数  $Q$  最小的  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{F}$ ,目标函数定义为

$$Q(\mathbf{E}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\mathbf{E}_{ij} / \sigma_{ij})^2 \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{E}_{ij}$  第  $j$  个样品中第  $i$  种水溶性离子组分的残差,  $\sigma_{ij}$  为第  $j$  个样品中第  $i$  种水溶性离子组分的标准偏差或不确定性<sup>[32]</sup>. 此次研究基于  $\text{PM}_{2.5}$  的水溶性离子组成和 5 类大气污染性气体成分 ( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、

$\text{NH}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ )及 $\text{PM}_{2.5}$ 自身,采用US EPA(美国环保署)PMF5.0模型<sup>[33]</sup>对南京市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子及污染性成分主要来源进行了解析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 观测期间污染特征概述

排除降水天气对能见度的影响,依据小时数据将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $< 75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且能见度 $\geq 5000.0 \text{ m}$ 的时次判为清洁过程;在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\geq 75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,将能见度 $< 1000.0 \text{ m}$ 且相对湿度(RH) $< 95.0\%$ ,或能见度 $\geq 1000.0 \text{ m}$ 且RH $< 90.0\%$ 的判为霾过程;在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $< 75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,将能见度 $< 5000.0 \text{ m}$ 的时次,以及在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $\geq 75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,将能见度 $< 1000.0 \text{ m}$ 且RH $\geq 95.0\%$ ,或能见度 $\geq 1000.0 \text{ m}$ 且RH $\geq 90.0\%$ 的时次判为雾过程<sup>[34,35]</sup>。

由图1可见,11月16~28日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度长时间超过 $75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级标准限值)<sup>[36]</sup>,造成了严重污染。11月21日11:00之前, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值保持在 $75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,温度和RH平均值分别为 $10.5^\circ\text{C}$ 和 $82.6\%$ ,大气能见度较高,平均能见度达 $6719.3 \text{ m}$ 。期间在11月16日02:00~06:00、17日18:00~18日04:00和18日08:00~19:00有弱降水过程,平均降水量分别为 $0.3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。11月18日20:00第3次弱降水过程结束后,较前一时刻, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升了48.4%,大气能见度下降了61.7%,风速下降了63.2%,且此前RH长时间保持在95.0%左右,小风高湿的环境为之后 $\text{PM}_{2.5}$ 快速吸湿增长提供了有利条件,并在湿清除作用减弱后立即得到了响应<sup>[37,38]</sup>。

至11月21日11:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增至 $75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,之后呈现波动式变化,并导致霾、雾和清洁过程不断相互转换。在11月21日12:00~13:00有一次弱降水过程,降水量为 $0.2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较11:00下降了36.6%。15:00时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度回升至 $105.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,较前一时刻增加了78.0%。可能是因为此次弱降水过程中天气形势稳定,降水持续时间短,清除作用弱,反而为 $\text{PM}_{2.5}$ 提供了有利的生成环境<sup>[39]</sup>。11月22日06:00起温度逐渐增大,RH逐渐下降,至14:00温度较06:00增加了128.8%,RH则下降了60.4%,不利于增长的环境配合 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右风速的清除作用,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了54.2%,雾过程转变为清洁过程。11月25日22:00开始RH保持在90.0%以上15个时次,导致26日期间PM浓度起伏多次达到本研究过程浓

度的峰值,其中 $\text{PM}_{10}$ 峰值浓度为 $208.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\text{PM}_{2.5}$ 峰值浓度为 $159.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

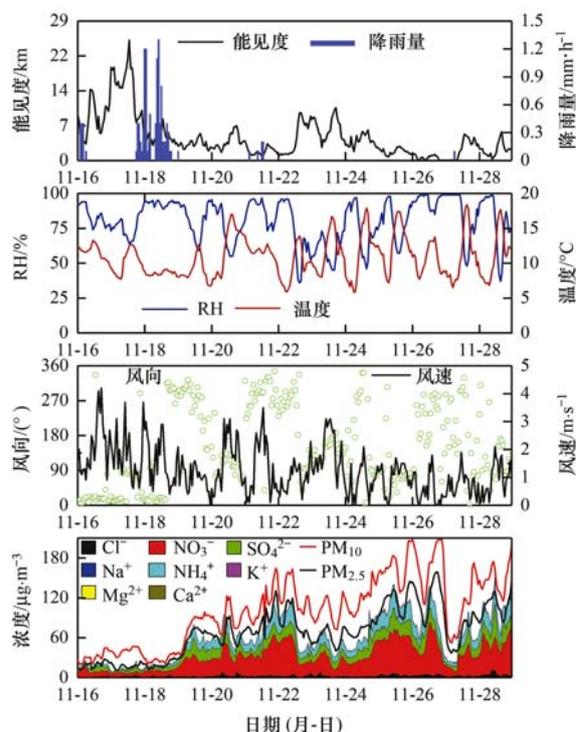


图1 2018年11月16~28日南京地区气象要素、PM和离子日变化

Fig. 1 Daily changes in meteorological variables, PM, and ions in Nanjing from November 16 to 28, 2018

4类过程中PM和水溶性离子存在显著差异。 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度在清洁、雾、霾和降水过程中分别为 $40.0$ 、 $77.8$ 、 $96.4$ 和 $26.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,总水溶性离子浓度分别为 $31.0$ 、 $64.1$ 、 $89.7$ 和 $23.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。各离子浓度大小排序在霾和雾过程中为: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ,而在清洁和降水过程中为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 。

### 2.2 不同过程大气污染物昼夜变化特征

#### 2.2.1 颗粒物及气体污染物昼夜变化

由于昼夜间气象场形式、逆温层特征和排放源贡献等的不同<sup>[40]</sup>,研究期间4类过程中的颗粒物、大气中污染气体成分和 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的质量浓度都呈现出明显的昼夜差异。本研究中将每一天的08:00~19:00作为白天,20:00~次日07:00作为夜间来研究过程中的昼夜差异。

由PM的昼夜对比可看出(图2),整体上昼夜间的 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均为:霾>雾>清洁>降水。夜间霾过程中 $\text{PM}_{2.5-10}$ 平均浓度为 $51.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,约为清洁、雾过程中的1.7倍,降水过程的5倍。白天,霾过程中 $\text{PM}_{2.5-10}$ 平均浓度下降至 $37.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,较夜间下降了27.9%,而清洁过程中下降

了 8.9%,雾和降水过程中则分别上升了 6.7% 和 24.1%.

由图 3 可知,霾过程中夜间离地面最近逆温层的顶部高度为 441.6 m,强度为  $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ ,到白天逆温层高度下降了 125.6 m,强度减弱了 4 倍左右,同时白天的平均风速为  $(14.0 \pm 0.7)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,是夜间的 1.4 倍,可能是白天边界层内较好的扩散条件<sup>[15]</sup>,使污染物不易积聚而导致  $\text{PM}_{2.5-10}$  浓度下降. 清洁过程中逆温层顶部高度昼夜平均值都在 1 000 m 以上,对污染扩散的影响不大,但白天平均风速达  $(1.8 \pm 1.0)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,较夜间高 5.9%,扩散条件较夜间有所改善. 雾过程中白天的逆温层强度较夜间增加 40.0%,厚度增长 72.2%,抑制了白天雾过程中  $\text{PM}_{2.5-10}$  的扩散. 降水过程中  $\text{PM}_{2.5-10}$  平均浓度不超过  $15.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,且昼夜差异不大.

夜间,霾过程中的  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度最高,达

$100.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是夜间清洁、雾和降水过程的 2.7、1.3 和 4.3 倍. 到白天时,霾过程中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降了 5.9%,而清洁过程、雾过程和降水过程中则分别上升了 12.4%、14.2% 和 28.6%,此时霾过程中浓度分别为清洁、雾和降水过程中的 2.3、1.1 和 3.1 倍.

对比  $\text{PM}_{2.5-10}$  的昼夜变化,清洁过程中  $\text{PM}_{2.5-10}$  的浓度在白天较夜间有所下降, $\text{PM}_{2.5}$  则有所增长,可能是白天汽车尾气排放量更大所致;白天,霾过程中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的下降明显低于  $\text{PM}_{2.5-10}$  浓度的下降,雾和降水过程中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的增长则明显高于  $\text{PM}_{2.5-10}$  浓度的增长,结合白天霾、雾和降水过程中的 RH 平均值都较夜间低 4.1% 左右,但标准差都为夜间两倍左右的情况,可认为白天短时较高的 RH 为  $\text{PM}_{2.5}$  提供了较好的吸湿增长环境<sup>[41]</sup>,使  $\text{PM}_{2.5}$  生成速度更快.

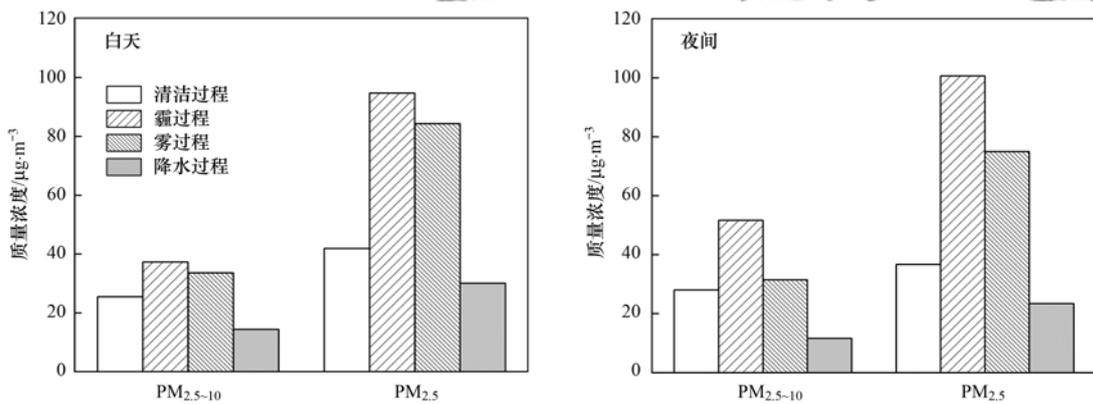


图 2 研究期间 4 类过程的 PM 昼夜特征

Fig. 2 Diurnal PM characteristics of four meteorological processes during the study period

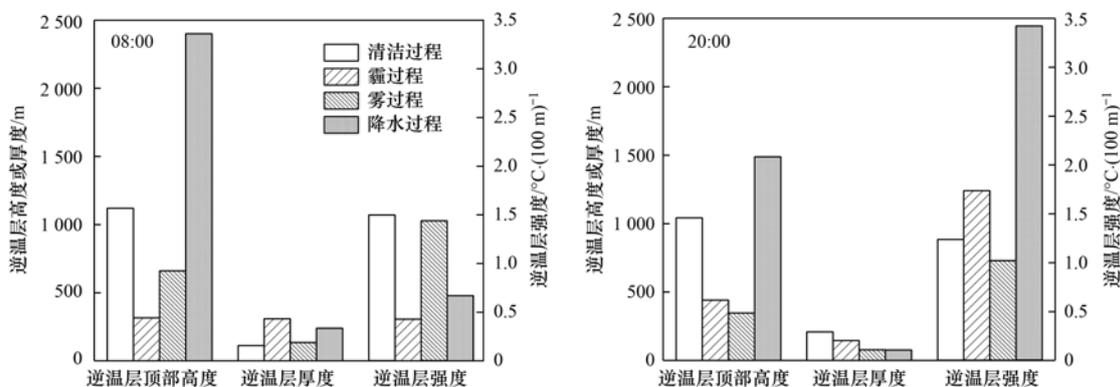


图 3 研究期间 4 类过程 08:00 与 20:00 逆温特征

Fig. 3 Inverse temperature characteristics under four meteorological processes at 08:00 and 20:00 during the study period

由图 4 可见, $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  浓度明显高于其他气体,研究过程中其平均浓度分别为  $58.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $38.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 夜间,霾过程中  $\text{NO}_2$  的浓度最高,达  $60.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次是降水过程 ( $60.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、雾过程 ( $59.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和清洁过程 ( $52.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 到白天,霾、雾和清洁过程中浓度分别较夜间增加了

4.9%、2.9% 和 5.3%,降水过程中则下降了 16.3%,即在白天无湿清除的作用时,交通量的增加会使得  $\text{NO}_2$  浓度明显增加.

夜间, $\text{O}_3$  浓度表现为降水过程 > 清洁过程 > 霾过程 > 雾过程,降水过程中的浓度分别为清洁、霾和雾过程中的 1.2、1.7 和 1.9 倍. 到白天, $\text{O}_3$  浓度在

霾、清洁、雾过程中分别较夜间增加了 140.2%、94.1% 和 6.1%，而在降水过程中下降了 15.0%，结合白天霾和清洁过程中的平均气温分别为  $(13.4 \pm 2.6)^\circ\text{C}$  和  $(12.9 \pm 2.4)^\circ\text{C}$ ，是其夜间的 1.1 倍和 1.3 倍，RH 则分别较夜间的低 9.6% 和 4.5%，存在相对高温低湿的有利生成环境，且白天  $\text{NO}_3^-$  的浓度较高为  $\text{O}_3$  生成提供了充足的反应物，加剧了  $\text{O}_3$  的增长。

$\text{SO}_2$  和 CO 主要来源于工业燃烧等过程，夜间，霾过程中  $\text{SO}_2$  浓度最高，为  $9.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，到白天，霾和降水过程中浓度较夜间上升了 33.3% 和 22.8%，而清洁和雾过程中则分别下降了 36.4% 和 12.8%。夜间，CO 的浓度同样在霾过程中最高，是其他过程中的 1~2 倍，到白天，雾过程中浓度较夜间增加最多，增加了 26.4%。雾过程中两者的浓度特征差异最大，可能是因为雾过程中多层逆温及高的 RH 为

二次离子的生成提供了有利条件，使得作为前体物的  $\text{SO}_2$  的反应消耗较其排放生成更快，而对 CO 基本无影响，白天排放源的增加使其浓度有明显上升。

$\text{NH}_3$  的平均浓度为  $9.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，白天雾、霾、降水和清洁过程中其浓度较夜间分别增加了 80.7%、32.8%、26.6% 和 2.6%。白天雾过程中  $\text{HNO}_3$  的浓度较夜间增加了 16.5%，而降水过程中下降了 6.5%。 $\text{HNO}_2$  气体在夜间的霾、雾和降水过程中浓度相近，是清洁过程中的 3.6 倍，白天霾和雾过程中的浓度是夜间的 4 倍，清洁过程中变化微弱，降水过程中则下降了 4.3 倍。 $\text{HCl}$  气体在霾和清洁过程中昼夜差异不明显，但白天雾过程中的浓度是其在夜间的 40.8%，降水过程中的则约为其在夜间的 3 倍。整体而言 4 类气体在 RH 较高的雾过程和降水过程中昼夜差异较明显，与它们易溶于水的特性相符合。

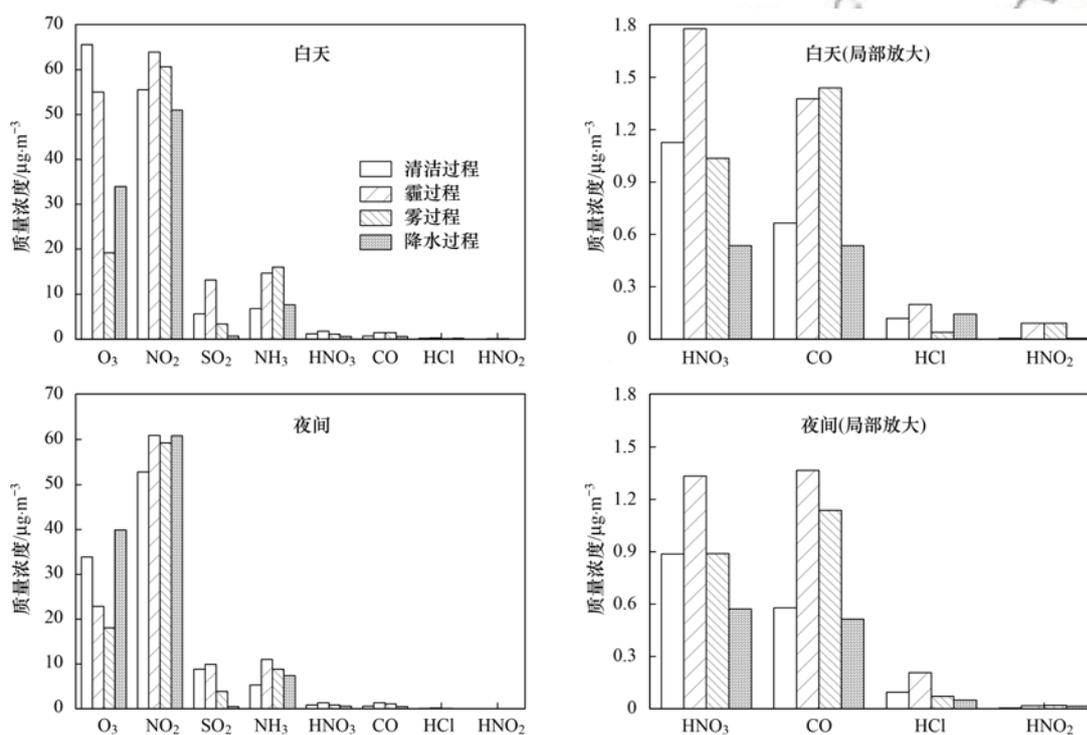


图 4 研究期间 4 类过程的气体昼夜特征

Fig. 4 Diurnal characteristics of gases under four meteorological processes during the study period

### 2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子昼夜变化

在  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  (SNA) 在不同过程中分别占 8 类水溶性离子总浓度的 92.5% (降水)、93.2% (清洁)、95.1% (雾) 和 95.7% (霾)。由图 5 可见，昼夜间 SNA 的浓度均呈现出霾 > 雾 > 清洁 > 降水的特征。夜间  $\text{NO}_3^-$  的浓度在霾过程中最高，达  $48.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，分别是雾、清洁和降水过程中的 1.6、3.4 和 4.5 倍，夜间  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度为  $15.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $20.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，两者在霾过程中的浓度同样明显高于其他过程。白天， $\text{NO}_3^-$  浓度在霾和清洁过程中较夜间下降了 5.5% 和 1.4%，在

雾、降水过程中则分别上升了 11.7% 和 16.9%，在霾、雾、清洁和降水过程中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别增加了 21.4%、56.9%、22.9% 和 69.2%， $\text{NH}_4^+$  浓度分别增加了 2.4%、29.9%、6.3% 和 54.1%。

夜间霾过程中的逆温层强度是清洁和降水过程中的 1.4 和 1.7 倍(图 3)，结合前段表述说明强稳定度条件下更有利于二次离子的生成。而白天的风速是夜间的 1.4 倍，较好的扩散条件使得虽然白天的  $\text{NO}_2$  浓度更高，但反应生成  $\text{NO}_3^-$  的浓度反而较夜间的低，而在雾、降水过程中白天的 RH 更高，提供了有利生成环境，使  $\text{NO}_3^-$  浓度显著增加。白天

$\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度在各类过程中都较夜间的高,可能是因为白天各过程中 RH 的标准差较大,且白天污染气体排放量大,反应条件充足使得浓度显著增加.此外, $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  浓度在整个研究过程中保持相近,表明此次研究过程中  $\text{NH}_4^+$  并不能完全中和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  同时会以  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  等形式存在<sup>[42]</sup>.

本研究过程中夜间  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的平均浓度分别为 1.7、0.1、0.3、0.1 和 0.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,到白天  $\text{Cl}^-$  的平均浓度较夜间增加了 29.4%, $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  分别下降了 50.0% 和 25.0%,

而  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的变化不足 0.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 白天  $\text{Cl}^-$  在雾过程中浓度最高,为 3.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,较夜间增长了 63.2%,且是白天霾、清洁和降水过程中的 1.1、2.4 和 1.8 倍,白天降水过程中  $\text{Cl}^-$  浓度较夜间增加了 1 倍,可能是由于白天降雨量高于夜间,为夜间的 1.2 倍,水汽输送的海盐气溶胶更多所致. 白天清洁过程中  $\text{Na}^+$  浓度较夜间下降了 57.6%,降水过程<sup>[43]</sup>中较夜间下降了 36.7%, $\text{Ca}^{2+}$  在两过程中皆下降 13.0%,与前两者不同的是,白天  $\text{K}^+$  在降水过程中浓度增加,而  $\text{Mg}^{2+}$  在清洁过程中浓度增加.

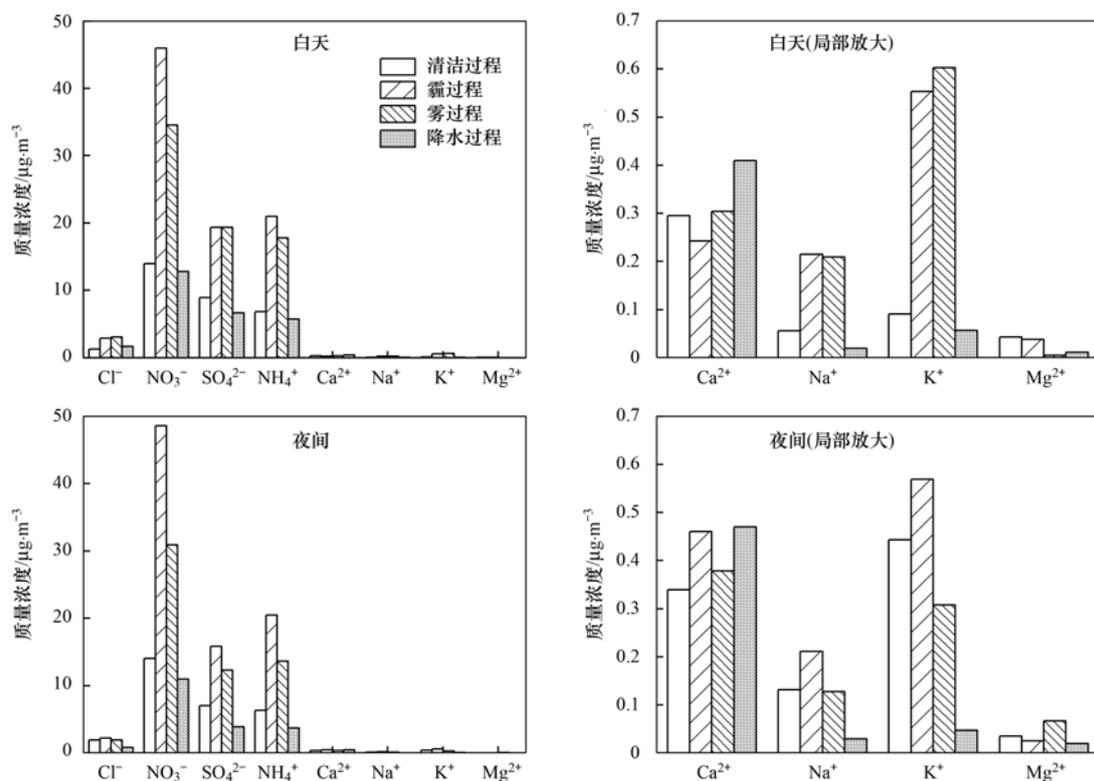


图5 研究期间4类过程的水溶性离子昼夜特征

Fig. 5 Diurnal characteristics of water-soluble ions under four meteorological processes during the study period

### 2.3 PMF 源解析结果

在本研究过程中,利用 PMF 源解析模型对水溶性离子等数据进行了分析,共获得 6 个因子. 由图 6 可见,因子 1 中  $\text{NO}_2$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  贡献较大, $\text{NO}_2$  多来自于机动车的尾气排放, $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  是土壤、水泥和石灰的特征元素<sup>[33]</sup>,主要来源于建筑粉尘、道路扬尘,故可认为因子 1 是交通源. 因子 2 主要贡献物为  $\text{SO}_2$ ,主要来源于化石燃料如煤的燃烧,为燃煤源. 因子 3 中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  贡献最大,都超过了 75%,而  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  主要来源于海盐离子, $\text{K}^+$  则是生物质燃烧<sup>[44,45]</sup> 的标志性元素,故该因子可作为一个混合源,即海盐及燃烧源. 因子 4 中贡献最大的气体成分是  $\text{NH}_3$ ,含有典型的来自农业施肥等排放的 N 元素,另外贡献较大的 CO 可认为是来源

于农田的秸秆焚烧<sup>[46]</sup>,因此将该因子作为农业源. 因子 5 中  $\text{O}_3$  的贡献率超过了 75%,远高于其他成分,而  $\text{O}_3$  是光化学烟雾的重要组成部分之一,此为光化学源. 因子 6 中 SNA 贡献率都在 50% 以上, SNA 则是二次过程产生的特征离子<sup>[47,48]</sup>,可将该因子确定为二次源.

由图 7 可知,霾过程中贡献率最高的是燃煤源,达 23.05%,其次为二次源(19.47%),而在清洁过程中燃煤源的贡献为 21.47%,霾过程中相较清洁过程中增加了 1.58%,此外二次源、农业源、海盐及燃烧源的贡献在霾过程中较清洁过程中也有明显增加,分别增加了 12.85%、9.35% 和 4.53%,而光化学源和交通源则分别下降了 15.97% 和 12.34%. 据上述表述可知,二次源在霾过程中占比较大,仅低

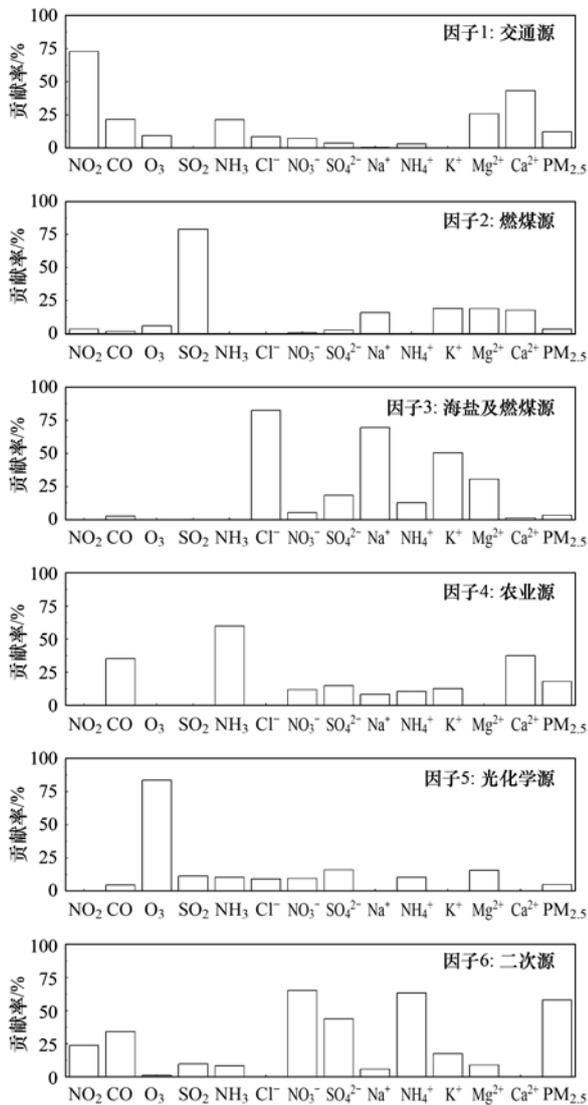


图6 研究期间南京地区不同污染来源的贡献率

Fig. 6 Contribution rate of different pollution sources in Nanjing during the study period

于燃煤源 3.58%,但其变化明显,是影响霾过程形成的主导因素,而燃煤源在霾过程中虽占比最大,但相较于清洁过程中变化很小,不是影响霾形成的主要因素。

在雾过程中农业源、二次源、海盐及燃烧源贡献率分别为 22.22%、21.74% 和 20.97%,相较于清洁过程,三者的贡献率分别增加了 14.81%、15.12% 和 9.37%,而交通源、燃煤源、光化学源的贡献率则分别减少了 3.70%、12.51% 和 23.08%。即在雾过程中农业源、二次源、海盐及燃烧源是主要的污染来源。在雾过程中,离地面最近逆温层高度为  $(546.9 \pm 910.4)$  m,是清洁过程时的一半,逆温层强度较强,为  $(1.3 \pm 1.5) \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ,边界层内多次出现多层逆温现象,同时 RH 达  $(92.2 \pm 13.7)\%$ ,是清洁过程中的 1.4 倍。可认为雾过程为二次气溶胶粒子和吸湿性海盐粒子浓度的增长提供了有利环境,使得二次源和海盐及燃烧源的占比显著增加。同时,二次和海盐粒子的增长改变了雾过程中气溶胶粒子的化学组成和粒径谱分布特征,继而影响了气溶胶的吸湿特性,使得雾过程得以持续发展。

在降水过程中,交通源、农业源、海盐及燃烧源和光化学源的贡献率较清洁过程中分别增加了 13.03%、7.98%、2.07% 和 0.06%,而燃煤源和二次源的贡献率则分别下降了 20.00% 和 3.14%。降水过程中由于交通、农业活动及少量的海盐输送和生物质燃烧导致的一次排放污染贡献率总和达 64.20%,说明这三类排放是降水过程中的主要污染来源;燃煤源在降水过程中占比 1.47%,为清洁过程燃煤源的 6.9%,二次源在降水过程中占比 3.48%,约为清洁过程中的一半,说明一次排放和二

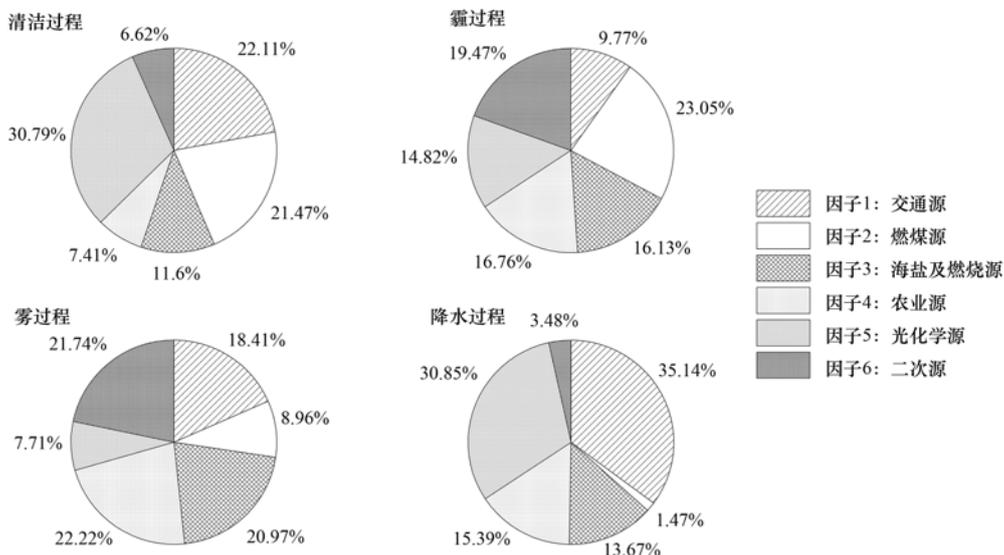


图7 6类源在霾、雾、清洁和降水过程的贡献占比

Fig. 7 Contribution proportion of six types of sources in different processes

次离子的反应生成在降水过程中都被显著抑制,且对于燃煤源和二次源,其清除作用较清洁过程更明显。

### 3 结论

(1)在清洁、雾、霾和降水过程中  $PM_{2.5}$  的平均浓度分别为 40.0、77.8、96.4 和 26.9  $\mu g \cdot m^{-3}$ , 总的水溶性离子浓度分别为 31.0、64.1、89.7 和 23.7  $\mu g \cdot m^{-3}$ 。在霾过程和雾过程中离子浓度大小排序为  $NO_3^- > NH_4^+ > SO_4^{2-} > Cl^- > K^+ > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$ , 而清洁过程和降水过程中为  $NO_3^- > SO_4^{2-} > NH_4^+ > Cl^- > Ca^{2+} > K^+ > Na^+ > Mg^{2+}$ 。

(2)不同过程中 PM 和污染气体的昼夜分布特征不同。霾过程中  $PM_{2.5-10}$ 、 $O_3$  和  $SO_2$  的昼夜差异显著,雾过程中  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$  和 CO 的昼夜差异显著,降水过程中  $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $SO_2$  的昼夜差异显著。 $NH_3$ 、 $HNO_3$ 、 $HNO_2$ 、HCl 在 RH 较高的雾和降水过程中昼夜变化明显。不同过程中 SNA 占 8 类水溶性离子总浓度的 92.5% (降水过程中) ~95.7% (霾过程中), 昼夜间 SNA 均呈现出在霾过程中 > 雾过程中 > 清洁过程中 > 降水过程中的特征。

(3)不同过程中水溶性离子来源贡献存在显著差异。霾过程中二次源贡献率达 19.47%, 较清洁过程增加了 12.85%, 是影响霾的主导因素。雾过程中二次源、海盐及燃烧源较清洁过程分别增加了 15.12% 和 9.37%, 是雾过程的主要污染来源。降水过程中燃煤源和二次源贡献率分别为 1.47% 和 3.48%, 较清洁过程下降了 20.00% 和 3.14%。

#### 参考文献:

- [1] 杨唐, 韩云平, 李琳, 等. 雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1680-1687.  
Yang T, Han Y P, Li L, et al. Microbial properties of different size aerosols at human average respiratory height during fog-haze days[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1680-1687.
- [2] Gangwar C, Choudhari R, Chauhan A, et al. Assessment of air pollution caused by illegal e-waste burning to evaluate the human health risk [J]. Environment International, 2019, **125**: 191-199.
- [3] Slanina S, Zhang Y. Aerosols: connection between regional climate change and air quality (IUPAC Technical Report) [J]. Pure and Applied Chemistry, 2004, **76**(6): 1241-1253.
- [4] Sorribas M, Andrews E, Ogren J A, et al. Climatological study for understanding the aerosol radiative effects at southwest Atlantic coast of Europe [J]. Atmospheric Environment, 2019, **205**: 52-66.
- [5] 徐昶, 叶辉, 沈建东, 等. 杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4422-4430.  
Xu C, Ye H, Shen J D, et al. Light scattering extinction properties of atmospheric particle and pollution characteristics in hazy weather in Hangzhou [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4422-4430.
- [6] Wang H L, Zhu B, Shen L J, et al. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in five sites in the Yangtze River Delta, China: size-fractionated, seasonal variations and sources [J]. Atmospheric Environment, 2015, **123**: 370-379.
- [7] 陈静, 杨鹏, 韩军彩, 等. 基于高分辨率 MARGA 数据分析石家庄  $PM_{2.5}$  成分谱特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2594-2604.  
Chen J, Yang P, Han J C, et al. Analysis of  $PM_{2.5}$  spectrum characteristics in Shijiazhuang based on high resolution MARGA data [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(9): 2594-2604.
- [8] Ding J, Zhu T. Heterogeneous reactions on the surface of fine particles in the atmosphere [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(21): 2267-2276.
- [9] Parrish D D, Zhu T. Clean air for megacities [J]. Science, 2009, **326**(5953): 674-675.
- [10] 朱彤, 尚静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J]. 中国科学: 化学, 2010, **40**(12): 1731-1740.  
Zhu T, Shang J, Zhao D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze [J]. Science China Chemistry, 2011, **54**(1): 145-153.
- [11] He H, Wang Y S, Ma Q X, et al. Mineral dust and  $NO_x$  promote the conversion of  $SO_2$  to sulfate in heavy pollution days [J]. Scientific Reports, 2014, **4**(1), doi: 10.1038/srep04172.
- [12] Wang H C, Lu K D, Chen X R, et al. Fast particulate nitrate formation via  $N_2O_5$  uptake aloft in winter in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(14): 10483-10495.
- [13] 方言, 曹芳, 范美益, 等. 中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1025-1035.  
Fang Y, Cao F, Fan M Y, et al. Chemical characteristics and source apportionment of water-soluble ions in atmosphere aerosols over the East China Sea Island during winter and summer [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1025-1035.
- [14] 王堃, 韩永明, 何世恒, 等. 西安市重污染与清洁天  $PM_{2.5}$  组分及其活性氧化物对比[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2679-2687.  
Wang K, Han Y M, He S H, et al. Comparison of characteristics and reactive oxidative species of  $PM_{2.5}$  in Xi'an, China during haze and clean days [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2679-2687.
- [15] 廖碧婷, 黄俊, 王春林, 等. 广州地区灰霾过程和清洁过程的边界层特征对比分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(12): 4432-4443.
- [16] Liao B T, Huang J, Wang C L, et al. Comparative analysis on the boundary layer features of haze processes and cleaning process in Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(12): 4432-4443.
- [17] 王杰, 张逸琴, 高健, 等. 2016~2018 年采暖季太行山沿线城市  $PM_{2.5}$  污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4521-4529.  
Wang J, Zhang Y Q, Gao J, et al. Characteristics of  $PM_{2.5}$  in cities along the Taihang Mountains during the heating season of 2016~2018 [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4521-4529.
- [17] 蒋琳, 朱彬, 王红磊, 等. 霾与轻雾天气下水溶性离子的组分特征——冬季长江三角洲地区一次污染过程分析[J]. 中

- 国环境科学, 2017, **37**(10): 3601-3610.
- Jiang L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics of water-soluble ions in the haze and mist days in winter in Yangtze River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3601-3610.
- [18] Liu Z R, Gao W K, Yu Y C, *et al.* Characteristics of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations and chemical species in urban and background areas of China; emerging results from the CARE-China network[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(12): 8849-8871.
- [19] Zhang X Y, Zhao X, Ji G X, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing, a megacity in southeastern China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, **76**(1): 73-88.
- [20] Wang G H, Huang L M, Gao S X, *et al.* Characterization of water-soluble species of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in urban area in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(8): 1299-1307.
- [21] 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 等. 南京江北新区冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 529-536.
- Qiu C C, Yu X N, Ding C, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> during winter in Nanjing Jiangbei New Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 529-536.
- [22] 王振彬, 刘安康, 卢文, 等. 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5213-5223.
- Wang Z B, Liu A K, Lu W, *et al.* Change in characteristics of pollution gas and water-soluble ions at different development stages of haze [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5213-5223.
- [23] 卫菲菲, 刘昊, 陆晓波, 等. 南京市大气细颗粒物二次组分的时空变化特征[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 2866-2876.
- Wei F F, Liu H, Lu X B, *et al.* Temporal and spatial characteristics of secondary components of PM<sub>2.5</sub> in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 2866-2876.
- [24] 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- Zhou Y Y, Ma Y, Liu J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> during winter hazy days at North Suburban Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- [25] Makkonen U, Virkkula A, Mäntykenttä J, *et al.* Semi-continuous gas and inorganic aerosol measurements at a Finnish urban site: comparisons with filters, nitrogen in aerosol and gas phases, and aerosol acidity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(12): 5617-5631.
- [26] Rodelas R R, Perdrix E, Herbin B, *et al.* Characterization and variability of inorganic aerosols and their gaseous precursors at a suburban site in northern France over one year (2015-2016) [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **200**: 142-157.
- [27] Liu J, Wu D, Fan S J, *et al.* A one-year, on-line, multi-site observational study on water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> over the Pearl River Delta region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1720-1732.
- [28] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [29] 皇甫延琦, 田瑛洋, 董世家, 等. 基于 PMF 模型的大气颗粒物多点位来源解析研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(6): 2032-2038.
- Huangfu Y Q, Tian Y Z, Dong S H, *et al.* Evaluating the performance of PMF model for Atmospheric PM source apportionment in multi-site [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(6): 2032-2038.
- [30] 罗干, 王体健, 赵明, 等. 基于在线监测的南京仙林 PM<sub>2.5</sub> 组分特征与来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1857-1868.
- Luo G, Wang T J, Zhao M, *et al.* Chemical composition and source apportionment of fine particulate matter in Xianlin area of Nanjing basing on-line measurement [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1857-1868.
- [31] Tian Y Z, Zhang Y F, Liang Y L, *et al.* PM<sub>2.5</sub> source apportionment during severe haze episodes in a Chinese megacity based on a 5-month period by using hourly species measurements; explore how to better conduct PMF during haze episodes[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117364.
- [32] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [33] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
- Zhang Y F, Yu R L, Hu G R, *et al.* Seasonal variation and source apportionment of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in Quanzhou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
- [34] 吴兑. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义[J]. *广东气象*, 2006, (1): 9-13.
- Wu D. More discussions on the differences between haze and fog in city[J]. *Guangdong Meteorology*, 2006, (1): 9-13.
- [35] 刘安康, 王红磊, 陈魁, 等. 南京市一次霾污染过程中水溶性离子分布特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 1793-1803.
- Liu A K, Wang H L, Chen K, *et al.* Distribution characteristics of water-soluble ions during a haze pollution process in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1793-1803.
- [36] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [37] 董群, 赵普生, 陈一娜. 降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3686-3692.
- Dong Q, Zhao P S, Chen Y N. Impact of collision removal of rainfall on aerosol particles of different sizes[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3686-3692.
- [38] 李凯飞, 张恒德, 谢永华. 降水对京津冀中南部 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 清除作用的分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, **33**(3): 69-74.
- Li K F, Zhang H D, Xie Y H. Analysis on precipitation scavenging on PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in central and south of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, **33**(3): 69-74.
- [39] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [40] 张勇, 刘随心, 曹军骥, 等. 汉中市秋季 PM<sub>2.5</sub> 昼夜变化特征[J]. *地球环境学报*, 2019, **10**(1): 79-86.
- Zhang Y, Liu S X, Cao J J, *et al.* Diurnal variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Hanzhong in autumn [J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, **10**(1): 79-86.
- [41] 梁林林, 孙俊英, 张养梅, 等. 临安夏季霾和清洁天气 PM<sub>2.5</sub>

- 化学组成特征比较[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3042-3050.
- Liang L L, Sun J Y, Zhang Y M, *et al.* Comparison of chemical components characteristics of PM<sub>2.5</sub> between haze and clean periods during summertime in Lin'an [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3042-3050.
- [42] 韩月梅, 沈振兴, 曹军骥, 等. 西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征[J]. 环境化学, 2009, **28**(2): 261-266.
- Han Y M, Shen Z X, Cao J J, *et al.* Seasonal variations of water-soluble inorganic ions in atmospheric particles over Xi'an [J]. Environmental Chemistry, 2009, **28**(2): 261-266.
- [43] 杨茜, 高阳华, 陈贵川. 降水对重庆市大气污染物浓度的影响分析[J]. 气象与环境科学, 2019, **42**(2): 68-73.
- Yang Q, Gao Y H, Chen G C. Influence analysis of the precipitation on atmospheric pollutant concentration in Chongqing [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, **42**(2): 68-73.
- [44] Wang G, Li J, Cheng C, *et al.* Observation of atmospheric aerosols at Mt. Hua and Mt. Tai in Central and East China during spring 2009-Part 1: EC, OC and inorganic ions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(9): 4221-4235.
- [45] Wang G H, Cheng C L, Huang Y, *et al.* Evolution of aerosol chemistry in Xi'an, inland China, during the dust storm period of 2013-Part 1: Sources, chemical forms and formation mechanisms of nitrate and sulfate [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(21): 11571-11585.
- [46] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单 [J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- Wang L T, Zhang Q, Hao J M, *et al.* Anthropogenic CO emission inventory of Mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- [47] 范美益, 曹芳, 张园园, 等. 徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- Fan M Y, Cao F, Zhang Y Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during winter in Xuzhou [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- [48] 张程, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4932-4942.
- Zhang C, Yu X N, An J L, *et al.* Aerosol chemical characteristics for different air pollution levels in North Suburban Nanjing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4932-4942.



## CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM <sub>2.5</sub> Pollution in China During 2013-2017 .....	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> ( 513 )
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement .....	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan ( 523 )
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016 .....	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 534 )
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020 .....	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> ( 546 )
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta .....	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> ( 556 )
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing .....	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> ( 564 )
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin .....	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> ( 574 )
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling .....	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> ( 584 )
Characterization, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City .....	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> ( 595 )
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City .....	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> ( 604 )
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods .....	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> ( 616 )
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai .....	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming ( 624 )
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou .....	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> ( 634 )
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017 .....	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> ( 643 )
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta .....	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> ( 653 )
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshui Watershed .....	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> ( 663 )
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshui .....	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 673 )
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City .....	WANG Wei, LI Xu-yong ( 681 )
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir .....	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 688 )
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation .....	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> ( 699 )
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake .....	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> ( 712 )
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> ( 723 )
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> ( 732 )
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River .....	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> ( 740 )
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 749 )
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds .....	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang ( 761 )
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin .....	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> ( 766 )
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin .....	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> ( 776 )
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution .....	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> ( 786 )
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes .....	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> ( 796 )
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties .....	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 808 )
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019 .....	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> ( 819 )
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season .....	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 831 )
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> ( 842 )
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems .....	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> ( 850 )
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection .....	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 860 )
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron .....	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> ( 867 )
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution .....	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> ( 874 )
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters .....	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> ( 883 )
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste .....	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> ( 891 )
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> ( 900 )
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City .....	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> ( 909 )
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> ( 917 )
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter .....	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong ( 925 )
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO <sub>2</sub> on Cadmium Enrichment of Rice .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> ( 932 )
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> ( 941 )
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells .....	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong ( 952 )
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs .....	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> ( 960 )
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments .....	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> ( 967 )
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China .....	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> ( 977 )
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils .....	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> ( 988 )
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems .....	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> ( 996 )
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar .....	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong ( 1004 )
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> ( 1013 )