

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用

于超, 于兴娜, 赵天良*, 张蕾, 马国煦, 王咏薇

(南京信息工程大学大气物理学院, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 利用 2013 年 5 月~2014 年 5 月的能见度和大气气溶胶化学组分资料, 分析南京北郊能见度变化特征、气溶胶化学组分与能见度变化的关联及其对大气消光的贡献, 识别在能见度变化中二次无机盐消光的重要作用. 结果表明, 观测期间平均能见度为 (6.78 ± 3.68) km, 能见度存在显著的季节变化. 粒径小于 $2.1 \mu\text{m}$ 的细粒子对能见度降低有较大影响, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 OC 是细粒子主要成分, 其中二次无机离子对重霾日能见度恶化具有重要贡献. 利用修正的 IMPROVE 方程重建观测期间消光系数, 均值为 $(527.2 \pm 295.2) \text{Mm}^{-1}$, $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分中硫酸铵、硝酸铵以及有机物对消光系数贡献最大, 达到 80.6%. 尽管在清洁日 ($\text{VR} > 10 \text{ km}$) 有机物的消光贡献高达 43.51%, 但随着能见度降低, 有机物消光贡献减少, 二次无机盐组分消光贡献增加, 在低能见度的重霾日 ($\text{VR} < 5 \text{ km}$) 二次无机盐消光贡献达到 58.96%, 表明二次无机盐消光对能见度恶化具有重要作用.

关键词: 能见度; 细粒子; 化学组分; 消光系数; 二次无机盐

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-0972-08 DOI: 10.13227/j.hjcx.201707171

Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing

YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang*, ZHANG Lei, MA Guo-xu, WANG Yong-wei

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Observed data regarding the visibility and aerosol chemical composition from May 2013 to May 2014 were used to analyze the variation of visibility, the relationship between aerosol chemical composition and visibility variations, and their contributions to atmospheric light extinction. An important effect of secondary inorganic salt extinction on the visibility impairment was determined. The present study suggests that the average visibility during the observation period was (6.78 ± 3.68) km, and there was obvious seasonal variation in the visibility. Fine particles with size less than $2.1 \mu\text{m}$ have a great influence on visibility, with the main chemical components of SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , and OC. The secondary inorganic ions make significant contributions to visibility degradation. The mean light extinction coefficient of Nanjing was $(527.2 \pm 295.2) \text{Mm}^{-1}$, which was calculated by using the revised IMPROVE equation. Regarding the chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$, the most contributive species to the light extinction coefficient were ammonium sulfate, ammonium nitrate, and organic species, which accounted for 80.6%. Although the light extinction contribution of organic matter was as high as 43.51% on a clear day ($\text{VR} > 10 \text{ km}$), with the decrease of visibility, the extinction contribution of organic matter decreased, but the contribution of secondary inorganic salt increased. The contribution of extinction was 58.96% for heavy haze days with low visibility ($\text{VR} < 5 \text{ km}$). This proves that the secondary inorganic salt extinction plays a significant role in visibility impairment.

Key words: visibility; fine particle; chemical composition; light extinction; secondary inorganic salt

能见度是人们判断一个地区的大气环境与空气质量最直观的标准, 它作为一种复杂的光学现象, 受到众多气象环境因素的制约. 较高的相对湿度、低风速和稳定大气边界层条件是低能见度天气发生的主要气象条件^[1~5]. 大气中悬浮的大量颗粒物及气态污染物通过吸收和散射太阳短波辐射, 加强大气消光作用, 导致大气透明度即能见度降低^[6,7], 低能见度已是空气污染的显著标志^[8]. 近年来我国中东部地区空气质量下降, 严重视程障碍的低能见度天气频发, 其空间尺度逐渐从城市尺度向区域尺度扩大^[9,10], 影响交通运输和社会生活^[11], 并带来

人体健康效应^[12,13].

为了分析 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分对能见度的贡献, 美国从 1988 年便开始建立能见度监测网络, 选取不同下垫面类型进行监测, 按照 5 种不同化学组分 (硫酸盐、硝酸盐、有机碳、元素碳、地壳物质) 进行了长期大型能见度观测计划 IMPROVE

收稿日期: 2017-07-21; 修订日期: 2017-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203304); 国家自然科学基金项目(41475142); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 于超(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与气候变化, E-mail: 1615653552@qq.com

* 通信作者, E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn

(Interagency Monitoring of Protected Visual Environment)^[14], 并重建了大气消光系数计算公式. Zhou 等^[15] 基于上海 2011 年在线观测所获取 $PM_{2.5}$ 化学成分数据, 使用未修正的 IMPROVE 方程分析, 结果显示消光贡献顺序为 $(NH_4)_2SO_4 > NH_4NO_3 > OC$, 三者贡献之和为 70%. 沈铁迪等^[4] 基于膜采样分析, 计算南京 2011 年夏秋季节消光系数, 硫酸铵、硝酸铵、有机物的消光贡献之和达到 80%, 三者中有机物贡献最小. 马佳等^[16] 对 2014 年南京北郊不同 $PM_{2.5}$ 化学组分的冬春季大气消光贡献的研究表明, 硫酸铵、硝酸铵、有机物的消光贡献之和增加到 90% 左右. 吴丹等^[17] 对 2013 年杭州消光贡献进行研究, 发现硫酸铵、硝酸铵对大气总消光系数的贡献达 60.8%, 二次无机盐组分重要消光贡献与杭州霾污染加重密切相关. 近年来在南京^[16]、杭州^[17]、北京^[18]、西安^[3]、宝鸡^[19] 等地的研究中均发现大气消光作用加强, 其中硫酸铵、硝酸铵对消光的贡献很重要.

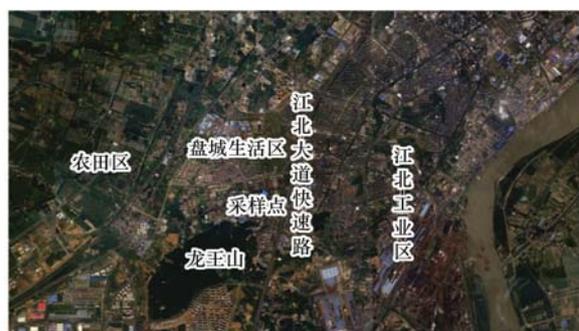
南京作为长三角城市群核心城市之一, 具有发达的城市化和工业化水平. 近 30 年以来, 南京地区能见度一直处于下降趋势^[20], 日益恶化的空气质量备受关注. 目前对低能见度事件发生的气象条件及大气消光的研究已取得诸多成果^[1-4], 但是对于南京能见度的研究多集中于气象因子的一般统计分析^[20-23], 对南京较长时间序列的化学组分大气消光特性变化规律和大气中不同能见度条件下化学组分的消光贡献的定量分析研究仍然较少. 而大气消光作用以气溶胶粒子的米散射贡献为主, 不同化学组分的消光贡献存在很大差异^[3,24,25], 深入研究不同能见度条件下化学组分消光贡献变化对分析低能见度事件成因尤为必要. 本研究通过南京北郊四季的观测采样数据, 试图分析细粒子化学组分与能见度变化间的关联, 并使用修正的 IMPROVE 方程估算不同能见度条件下各化学组分对大气消光的贡献, 以识别二次无机盐组分在能见度变化中重要作用, 以期在城市大气环境治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点与时间

观测采样点位于南京北郊南京信息工程大学校园(118°E, 32°N, 图 1), 其周边环境复杂, 东面为江北大道快速路和南京江北工业区, 北面和西面为街道、农田以及居民生活区, 南面是龙王山风景区, 因此该地所获取采样数据资料一定程度上可作

为南京北郊大气复合污染(工业、交通、生活污染)的代表点. 数据资料包括能见度、湿度等常规气象要素, 以及不同粒径范围颗粒物中主要无机离子组分、碳组分的质量浓度数据. 气溶胶粒子化学组分浓度数据来源于东苑校区气象楼 12 楼顶观测资料; 气象要素数据来源于同一区域自动站. 气象资料的观测时间为 2013 年 5 月 1 日~2014 年 4 月 30 日, 能见度时间分辨率是 1 min, 其它气象要素时间分辨率为 1 h; 在春季(04-17~05-15)、夏季(06-01~07-17)、秋季(10-15~11-13)和冬季(12-30~01-23)进行膜采样实验, 时间分辨率为 1 d.



蓝色“+”为采样点位置

图 1 采样点位置及周边主要环境状况

Fig. 1 Location of sampling site and surrounding environment

1.2 仪器和方法

本研究中使用 2013~2014 年南京北郊的气象资料是来自 CJY-1 型能见度仪和 CAWSD600 型自动气象站的连续观测数据. 两台 Andersen-II 型 9 级撞击采样器在气象楼 12 楼顶工作, 分别使用石英膜和特氟龙滤膜采样, 利用离子色谱法和热光反射法获取不同粒径的有机组分和无机组分质量浓度. 由于 Andersen-II 型 9 级撞击采样器切割头限制未能采集到 $PM_{2.5}$ 的化学组分浓度数据, 仅采集到 $PM_{2.1}$ 的各种化学组分浓度数据, 因此在本研究中将粒径 $2.1 \mu m$ 近似为粗细粒子界限.

采样时间为 23 h, 从 09:00 到次日的 08:00, 采样流量为 $28.3 L \cdot min^{-1}$, 所采集样品在恒温恒湿环境静置 24 h, 然后再用精密电子天平称重后置于冰箱($-18^\circ C$ 左右)冷冻避光保存至分析. 为保证数据质量每次实验均同步进行空白膜实验, 按照相同方法处理、测定空白滤膜. 称重使用精密电子天平(瑞士, Mettler Toledo MX5 型), 精度为 $10 \mu g$, 每次称量前用标准砝码进行仪器校准. 样品分析前, 所有分析仪器均需做仪器空白以确保无残留杂质影响实验结果. 样品分析时, 取 1/4 膜置于 PET 瓶中, 加入 25 mL 去离子水(电阻率为 18.2

$\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$), 超声提取 0.5 h 后静置 24 h, 再用 0.22 μm 微孔水滤头进行抽滤. 抽滤样品采用离子色谱分析仪(瑞士万通, 850 professional IC 型)测定 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等无机离子组分, 检测限分别为: 0.02、0.02、0.01、0.05、0.02、0.05、0.04、0.01 和 0.006 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

样品中的碳组分 OC 和 EC 浓度分析采用热光反射法(TOR), 分析仪器为热光碳分析仪(美国沙漠研究所, Model 2001 型). 该方法测量原理为: 首先将石英膜样品在氮气的非氧化环境中逐级升温, 使 OC 被加热挥发; 此后样品又在氮气/氧气(98%/2%)混合气的氧化环境中逐级升温, 该过程中 EC 燃烧分解. 由于第一阶段中有部分 OC 被碳化, 在实验过程中采用 633 nm 的 He-Ne 激光全程检测滤膜, 以准确界定 OC 和 EC 浓度. 两个阶段产生的 CO_2 在转化为 CH_4 后由离子火焰法(FID)定量检验^[26], 从而确定 OC 和 EC 浓度, EC 和 OC 最低检测限分别为 0.2 和 0.82 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 数据质量控制标准参照美国沙漠所标准^[27].

气溶胶的不同化学组分对大气消光系数有不同的影响. 美国 IMPROVE 消光算法于 2006 年被修正, 修正后的算法考虑了不同模态的硫酸铵、硝酸铵以及有机物的消光效率和吸湿增长因子不同^[28], 且将有机物与 OC 之间的转换系数由 1.4 调整为 1.8^[29,30]. 经过修正后的 IMPROVE 化学消光方程如下:

$$b_{\text{ext}} \approx 2.2 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{Small}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + 4.8 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] + 2.4 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{Small} \text{NH}_4\text{NO}_3] + 5.1 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{Large} \text{NH}_4\text{NO}_3] + 2.8 \times [\text{Small} \text{POM}] + 6.4 \times [\text{Large} \text{POM}] + 10 \times \text{EC} + 1 \times [\text{Soil}] + 1.7 \times f_{\text{ss}}(\text{RH}) \times [\text{Sea Salt}] + 0.6 \times [\text{PM}_{2.5-10}] + 0.33 \times [\text{NO}_2] + \text{Rayleigh Scattering}$$

$$[\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = \frac{[\text{Total}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]^2}{20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$(\text{Total}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 < 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$[\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = [\text{Total}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4],$$

$$(\text{Total}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \geq 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$[\text{Small}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = [\text{Total}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] - [\text{Large}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$$

式中, b_{ext} 为消光系数, RH 为相对湿度, $f_s(\text{RH})$ 和

$f_L(\text{RH})$ 为不同模态硫酸铵、硝酸铵吸湿增长因子, $f_{\text{ss}}(\text{RH})$ 为海盐粒子吸湿增长因子, 大小取值参见文献[31]. 硫酸铵、硝酸铵、有机物(POM)的浓度用 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC 浓度进行换算, 海盐粒子浓度用 Cl^- 浓度进行换算^[31], 其中: $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = 1.37 \times [\text{SO}_4^{2-}]$; $[\text{NH}_4\text{NO}_3] = 1.29 \times [\text{NO}_3^-]$; $[\text{POM}] = 1.8 \times [\text{OC}]$; $[\text{Sea Salt}] = 1.8 \times [\text{Cl}^-]$. IMPROVE 方程中各化学组分质量浓度单位均为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 所重建消光系数单位为 Mm^{-1} . 硫酸铵两个模态质量分配可按以上公式进行分配, 该方程同样适用于硝酸铵、有机物的模态质量分配. 有研究表明, 矿物尘组分(soil)对消光贡献很小^[21], 且本研究中未同步观测矿物尘组分浓度, 因此忽略其对大气消光系数的贡献. 在本研究中将不考虑气体消光贡献, 使用修正的消光系数方程对南京北郊的消光系数进行估算重建, 分析硫酸铵、硝酸铵、有机物、氯盐、元素碳和粒径大于 2.1 μm 范围内的颗粒物(CM)等气溶胶不同化学组分对消光系数贡献.

2 结果与讨论

2.1 能见度变化特征

南京北郊 2013 年 5 月 ~ 2014 年 4 月观测期间年平均能见度为 $(6.78 \pm 3.68) \text{ km}$, 日均能见度超过 10 km 的天数仅 68 d, 占比 18.9%. 与 1980 ~ 2005 年南京能见度相比较^[25], 年均大气能见度从 8.59 km 下降到 6.78 km, 表明南京北郊大气环境质量下降. 从季节平均来看, 夏季能见度最好, 为 $(10.69 \pm 4.37) \text{ km}$; 春、秋两季次之; 冬季能见度最差, 仅 $(5.13 \pm 3.06) \text{ km}$. 在去除降水日后, 按日均能见度(VR)的变化分别定义重霾日(VR < 5 km)、霾日($5 \text{ km} \leq \text{VR} < 10 \text{ km}$)、清洁日($\text{VR} \geq 10 \text{ km}$). 统计发现(表 1), 夏季清洁日(VR $\geq 10 \text{ km}$) 天数所占比例明显多于其他季节; 春、秋季能见度在 5 ~ 10 km 之间天数所占比例最大, 超过 45%; 冬季重霾日(VR < 5 km) 天数所占比例高达 37%.

2.2 细粒子化学组分变化特征

为分析颗粒物化学组分与能见度变化的关联, 本研究分析了南京北郊四季颗粒物中不同粒径范围各化学组分的质量浓度, 主要包含无机离子组分(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-)和碳组分(OC、EC). 图 2 是南京北郊气溶胶年平均及 3 类不同能见度天气的质量浓度谱分布, 颗粒物粒径在 0.43 ~ 2.1 μm 范围峰值显著, 在重霾日该峰值范围内颗粒物质量浓度在总的颗粒物质

表 1 南京北郊不同能见度等级相关统计

Table 1 Statistics for the different visibility levels in the northern suburb of Nanjing

季节	能见度等级	天数/d	占比/%	均值/km	标准差/km
春	VR ≥ 10	10	16	11.24	1.38
	5 ≤ VR < 10	38	62	7.24	1.35
	VR < 5	13	22	3.33	1.45
夏	VR ≥ 10	35	57	14.04	2.25
	5 ≤ VR < 10	20	32	7.12	1.37
	VR < 5	7	11	4.1	1.06
秋	VR ≥ 10	9	13	11.36	0.89
	5 ≤ VR < 10	31	45	7.53	1.46
	VR < 5	29	42	11.36	1.17
冬	VR ≥ 10	5	8	12.01	2.01
	5 ≤ VR < 10	23	35	7.1	1.28
	VR < 5	37	57	2.97	1.14

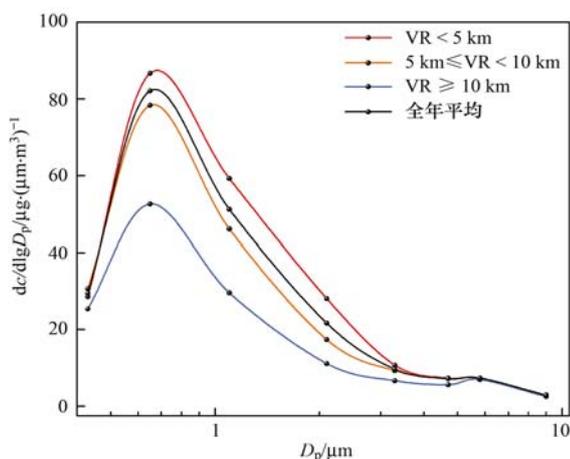


图 2 南京北郊观测期间颗粒物粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution during the observations in the northern suburb of Nanjing

量中占比高达 64.6%，峰值浓度分别为霾日、清洁日的 1.4 倍和 2.1 倍；而在粒径大于 4.7 μm 范围各天气状况的浓度差异不明显。研究细粒子化学组成与能见度降低的关联对大气环境改善具有重要意义。

表 2 描述了南京北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 主要化学组分质量浓度的变化特征。颗粒物化学组分中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 以及 OC 是南京北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 中主要组分，质量浓度占比达到 81.4%。颗粒物中 OC 所占比例最大 (24.6%)，其余依次为 SO_4^{2-} (19.2%)、 NO_3^- (17.7%)、 NH_4^+ (16.3%)、 Cl^- (7.6%) 以及 EC (3.1%)，所测其余组分 (包括 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 F^-) 含量较少，5 种组分占比仅 11.4%。 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 是 $\text{PM}_{2.1}$ 中重要二次无机盐组分，主要来自于气态污染物 (如 NH_3 、 SO_2 、 NO_2 等) 二次反应生成^[32]。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等一次气溶胶组分在

细粒子中含量较低，主要来自于扬尘且具有一致的变化特征。EC 主要为化石燃料燃烧和机动车尾气排放的一次产物，OC 则包括直接排放的有机碳和经过复杂的化学反应生成的二次有机碳，常用 OC 与 EC 的比值来区分一次污染和二次有机污染的相对贡献。对于南京北郊，颗粒物 OC/EC 比值约为 6.8，远大于二次有机污染的临界值 2^[33]，表明南京北郊存在严重的二次有机污染。各化学组分存在明显的季节变化，冬季颗粒物污染最为严重，浓度通常较其他季节高。在春夏季 SO_4^{2-} 浓度高于 NO_3^- ，OC 和 SO_4^{2-} 是春夏季 $\text{PM}_{2.1}$ 中最主要的组分，而秋冬季则为 OC 和 NO_3^- 。 SO_4^{2-} 全年浓度相对稳定，但 NO_3^- 具有较大的季节变化，这与硝酸铵在夏季高温下易挥发有关^[34,35]。

图 3 所示为南京北郊不同季节和不同能见度天气下二次无机盐组分 (NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})、

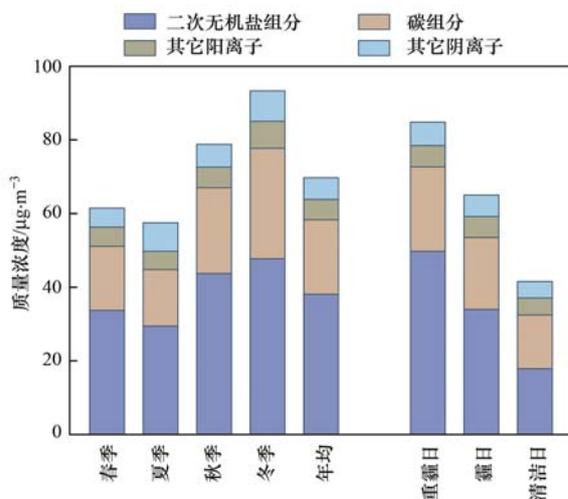


图 3 南京北郊不同季节和不同能见度状况下化学组分变化特征

Fig. 3 Characteristics of the chemical composition for different seasons and different visibility levels in the northern suburb of Nanjing

碳组分(OC和EC)、其它阳离子组分(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+})和其它阴离子组分(Cl^- 、 F^-)的特征. $\text{PM}_{2.1}$ 化学组分总质量浓度冬季明显高于其他季节,春、秋季次之,夏季最低.在 $\text{PM}_{2.1}$ 中二次无机盐组分浓度很高,四季占比均超过50%,其它阴、阳离子组分四季占比均在7%左右.在清洁日,碳组分质量浓度为 14.58

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,与二次无机盐组分浓度($17.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)相差不大;在霾日和重霾日, $\text{PM}_{2.1}$ 中各种组分浓度都有一定程度增加,但二次无机盐组分增幅最大,在重霾日其质量浓度达到 $49.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而此时碳组分浓度($22.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)相对较低,表明二次无机盐组分增加对能见度的恶化具有重要作用.

表2 南京北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 主要化学组分质量浓度季节变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Components of $\text{PM}_{2.1}$ in various seasons in the northern suburb of Nanjing/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

类别	春季	夏季	秋季	冬季	全年平均
Na^+	1.68 ± 0.60	2.09 ± 1.15	2.10 ± 0.84	2.84 ± 2.16	2.13 ± 1.15
NH_4^+	10.70 ± 3.45	9.56 ± 4.65	13.21 ± 4.63	13.23 ± 5.96	11.67 ± 4.65
K^+	1.09 ± 0.83	1.43 ± 0.87	1.73 ± 0.96	1.76 ± 0.83	1.47 ± 0.87
Mg^{2+}	0.35 ± 0.06	0.27 ± 0.18	0.31 ± 0.35	0.43 ± 0.11	0.32 ± 0.18
Ca^{2+}	2.10 ± 0.67	1.15 ± 0.86	1.47 ± 1.12	2.34 ± 0.39	1.66 ± 0.86
F^-	0.20 ± 0.02	0.49 ± 0.34	0.35 ± 0.40	0.30 ± 0.21	0.36 ± 0.34
Cl^-	4.94 ± 0.83	4.41 ± 1.85	5.85 ± 1.11	7.93 ± 2.49	5.49 ± 1.85
NO_3^-	9.98 ± 3.94	8.32 ± 8.35	15.59 ± 7.55	19.41 ± 12.60	12.65 ± 8.35
SO_4^{2-}	13.02 ± 5.87	11.57 ± 7.25	14.88 ± 6.58	15.09 ± 11.23	13.77 ± 7.25
OC	15.20 ± 5.05	12.85 ± 9.02	20.57 ± 8.69	27.05 ± 11.95	17.61 ± 9.02
EC	2.19 ± 1.03	2.48 ± 1.32	2.75 ± 1.73	2.91 ± 1.32	2.59 ± 1.32
$\text{PM}_{2.1}$	62.68 ± 17.08	57.52 ± 28.36	81.03 ± 26.47	93.79 ± 39.79	71.63 ± 28.36

2.3 化学组分对大气消光系数的贡献分析

利用修正的IMPROVE方程计算可得南京北郊总大气消光系数,全年平均值为(569.9 ± 302.7) Mm^{-1} ,比西安^[3]年平均值为(912 ± 882) Mm^{-1} 低近40%,比广州^[36]平均消光系数(326 ± 248) Mm^{-1} 、上海^[15]年均消光系数(332.2 ± 249.5) Mm^{-1} 略高.图4是观测期间南京北郊四季不同化学组分的消光系数柱状图.就季节平均来看,颗粒物消光系数依次为冬季>秋季>春季>夏季,冬季平均消光系数达到(783.9 ± 449.1) Mm^{-1} ,而夏季平均消光系数仅为冬季55%左右.有机碳、硫酸铵和硝酸铵平均值分别为(192.6 ± 87.4)、(155.6 ± 10.9)和(146.4 ± 47) Mm^{-1} ,其中有机碳和硝酸铵消光系数值有较大的季节变化,冬季明显高于其他季节,这与大气总消光系数季节变化一致.南京北郊的消光系数的季节变化更多依赖于硝酸铵及其它有机物的贡献.

图5是南京北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 不同化学组分对消光系数相对贡献.如图5(a)所示,有机物对南京北郊消光系数贡献最大(约32.19%),其次为硫酸铵(26.55%)和硝酸铵(21.81%),三者对南京大气消光贡献之和达到80.55%;氯盐对消光贡献达到9.33%,其作用不容忽视;元素碳和粗粒子对消光系数贡献较小,均在5%左右.对于重霾日,消光

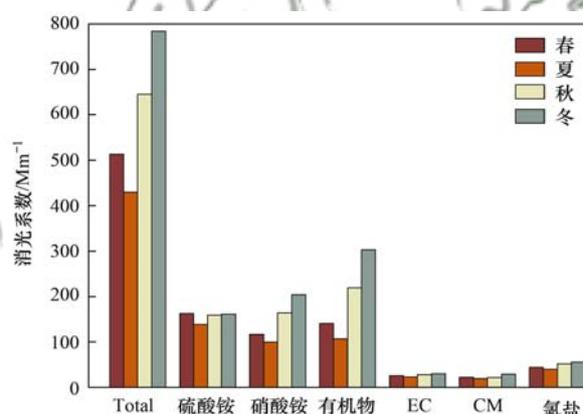
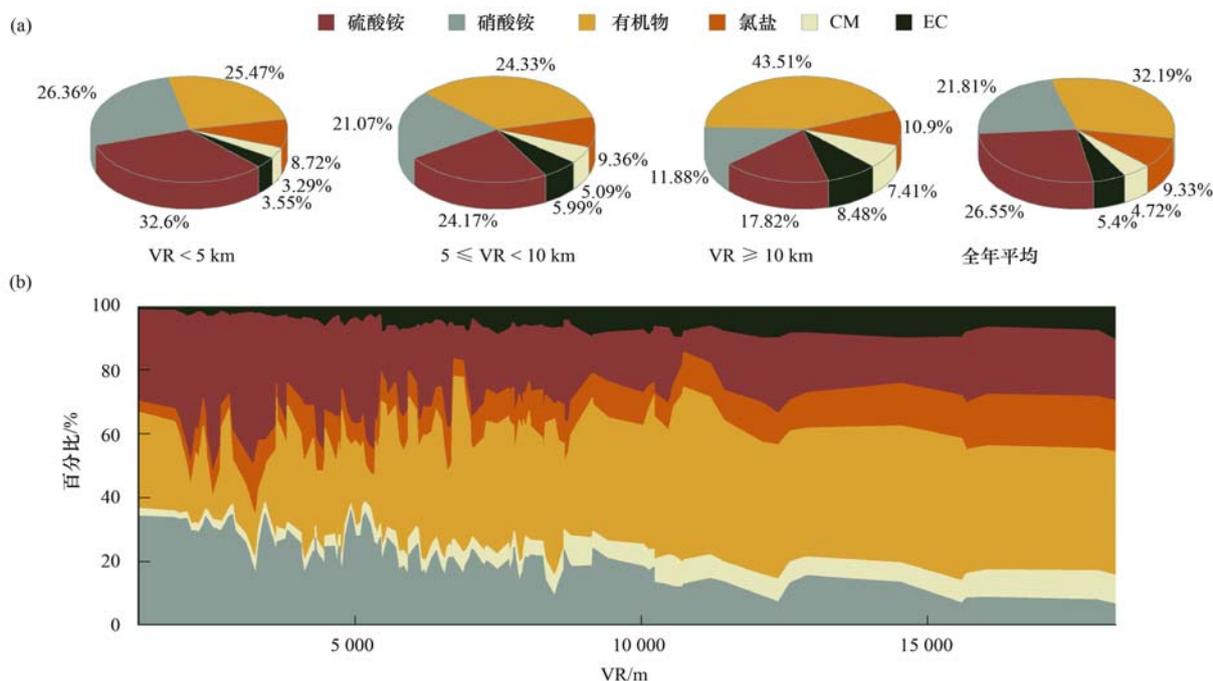


图4 观测期间化学组分对消光系数贡献季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of the contribution of chemical components to the extinction coefficient during the observation period

系数贡献顺序为硫酸铵>硝酸铵>有机物;对于能见度在5~10 km的霾日,有机物消光成为最大贡献者,硫酸铵、硝酸铵贡献降低;对于能见度大于10 km的清洁日来说,有机物的消光作用最高,达到43.51%,而硫酸铵和硝酸铵的相对贡献之和仅29.70%.图5(b)为化学组分对消光系数贡献比例随能见度变化情况,不同能见度条件下化学组分消光贡献差异明显.硫酸铵、硝酸铵等二次无机盐对低能见度的重污染天气的消光作用具有重要贡献,达到58.96%;但随着能见度增加,硫酸铵、硝酸铵等二次无机盐消光贡献比例显著降低,而有机物等



(a) 不同能见度等级及全年化学组分对消光系数贡献, (b) 不同能见度下化学组分对消光系数贡献比例

图5 不同化学成分对消光系数相对贡献

Fig. 5 Relative contribution of different chemical compositions to the extinction coefficient

其余组分消光贡献均持续增加。因此, 南京北郊硫酸铵、硝酸铵等二次无机盐组分的消光作用是环境低能见度重霾事件产生的主导因素, 能见度的恶化与二次无机盐组分的增加及消光加强有紧密的联系。

3 结论

(1) 研究期间南京北郊平均能见度为 (6.78 ± 3.68) km, 能见度表现出夏季高冬季低季节特征, 低能见度霾污染天气在秋、冬季发生频繁。

(2) 细粒子对能见度降低具有重要作用, NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 以及 OC 是南京北郊细粒子中最主要组分, 占比达到 81.40%, 其中 OC 浓度最高。 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等二次无机盐组分浓度在低能见度的重霾日显著增加, 对能见度的恶化具有重要贡献。

(3) 南京北郊年平均消光系数为 (527.2 ± 295.2) Mm^{-1} , 消光系数的季节变化依赖于有机物和硝酸铵的贡献。 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分中硫酸铵、硝酸铵和有机物对消光系数三者年平均消光贡献之和达到 80.55%。尽管在能见度 > 10 km 的清洁日, 有机物的消光作用高达 43.51%, 但随着霾污染过程能见度的降低, 有机物消光贡献显著减少, 二次无机盐组分消光贡献增加, 在重霾日 ($\text{VR} < 5$ km) 二次无

机盐消光贡献达到 58.96%, 表明二次无机盐消光对能见度恶化具有重要作用。

参考文献:

- [1] 崔健, 黄建平, 周晨虹, 等. 江苏省能见度时空分布特征及其影响因子分析[J]. 热带气象学报, 2015, 31(5): 700-712.
Cui J, Huang J P, Zhou C H, *et al.* Temporal-spatial variations of visibility and its affecting factors in Jiangsu province [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(5): 700-712.
- [2] Deng J J, Wang T J, Jiang Z Q, *et al.* Characterization of visibility and its affecting factors over Nanjing, China [J]. Atmospheric Research, 2011, 101(3): 681-691.
- [3] Cao J J, Wang Q Y, Chow J C, *et al.* Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, 59: 559-566.
- [4] 沈铁迪, 王体健, 陈璞珑, 等. 南京城区夏秋季能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的关系[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 652-658.
Shen T D, Wang T J, Chen P L, *et al.* Relationship between atmospheric visibility and chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ in the summer and autumn of Nanjing [J]. China Environmental Science, 2015, 35(3): 652-658.
- [5] 常炉予, 许建明, 周广强, 等. 上海典型持续性 $\text{PM}_{2.5}$ 重度污染的数值模拟[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 825-833.
Chang L Y, Xu J M, Zhou G Q, *et al.* A numerical study of typical heavy air pollution episode of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai [J]. Environmental Sciences, 2016, 37(3): 825-833.
- [6] 苗爱梅, 李苗, 王洪霞. 一次持续性雾霾天气过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(6): 947-953.
Miao A M, Li M, Wang H X. Characteristics in stages of a long-

- lasting fog and haze weather and influence factors analysis[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, **32**(6): 947-953.
- [7] 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析[J]. *高原气象*, 2005, **24**(4): 623-628.
- Ma Y J, Zuo H C, Zhang Y H, *et al.* Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in multi-cities in central Liaoning[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, **24**(4): 623-628.
- [8] 范引琪, 李春强. 1980—2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. *高原气象*, 2008, **27**(6): 1392-1400.
- Fan Y Q, Li C Q. Visibility trends in Beijing, Tianjin and Hebei province during 1980—2003[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(6): 1392-1400.
- [9] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [10] 陈静, 赵春生. 大气低能见度的影响因子分析及计算方法综述[J]. *气象科技进展*, 2014, **4**(4): 44-51.
- Chen J, Zhao C S. A review of influence factors and calculation of atmospheric low visibility[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014, **4**(4): 44-51.
- [11] 张利娜, 张朝林, 王必正, 等. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析[J]. *大气科学*, 2008, **32**(6): 1229-1240.
- Zhang L N, Zhang C L, Wang B Z, *et al.* Evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical analysis[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(6): 1229-1240.
- [12] Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles[J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 804-806.
- [13] 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 等. 南京北郊大气BTEX变化特征和健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 453-460.
- Zhang Y X, An J L, Wang J Y, *et al.* Variation characteristics and health risk assessment of BTEX in the atmosphere of northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 453-460.
- [14] Sisler J F, Malm W C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(5): 851-862.
- [15] Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 151-160.
- [16] 马佳, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 41-50.
- Ma J, Yu X N, An J L, *et al.* Contributions of factors that influenced the visibility in north suburb of Nanjing in winter and spring[J]. *Environmental Sciences*, 2016, **37**(1): 41-50.
- [17] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM_{2.5} in Hangzhou[J]. *Environmental Sciences*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [18] Tao J, Zhang L M, Gao J, *et al.* Aerosol chemical composition and light scattering during a winter season in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **110**: 36-44.
- [19] Xiao S, Wang Q Y, Cao J J, *et al.* Long-term trends in visibility and impacts of aerosol composition on visibility impairment in Baoji, China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, **149**: 88-95.
- [20] 叶香, 姜爱军, 张军, 等. 南京市大气能见度的变化趋势及特征[J]. *气象科学*, 2011, **31**(3): 325-331.
- Ye X, Jiang A J, Zhang J, *et al.* Analysis of characteristics and trends of atmospheric visibility in Nanjing[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, **31**(3): 325-331.
- [21] Cheung H C, Wang T, Baumann K, *et al.* Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(34): 6463-6474.
- [22] 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- Shang Q, Li Z H, Yang J, *et al.* Size distributions of aerosol particles and impact on visibility in winter of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [23] 侯灵, 安俊琳, 朱彬. 南京大气能见度变化规律及影响因子分析[J]. *大气科学学报*, 2014, **37**(1): 91-98.
- Hou L, An J L, Zhu B. Characterization of visibility variation trend and its influence factors in Nanjing[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, **37**(1): 91-98.
- [24] Han T T, Qiao L P, Zhou M, *et al.* Chemical and optical properties of aerosols and their interrelationship in winter in the megacity Shanghai of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **27**: 59-69.
- [25] Chow J C, Watson J G, Edgerton S A, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **287**(3): 177-201.
- [26] 岳建华, 陶俊, 林泽健, 等. 成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2151-2157.
- Yue J H, Tao J, Lin Z J, *et al.* Characterization and reconstruction of aerosol light scattering coefficient at Chengdu during biomass burning and dust storm period in spring[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2151-2157.
- [27] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 313-318.
- Li X R, Wang Y F, Guo X Q, *et al.* Size distribution and characterization of EC and OC in aerosols during the Olympics of Beijing, China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 313-318.
- [28] Hand J L, Malm W C. Review of the IMPROVE equation for estimating ambient light extinction coefficients[M]. CIRA, Colorado State University, 2006. 13-44.
- [29] 杨复沫, 欧阳文娟, 王欢博, 等. 大气颗粒物对能见度影响的研究进展[J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2013, **5**(3): 252-258.
- Yang F M, Ouyang W J, Wang H B, *et al.* Recent progress in research on impact of atmospheric particulate matters on visibility[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2013, **5**(3): 252-258.
- [30] El-Zanan H S, Lowenthal D H, Zielinska B, *et al.*

- Determination of the organic aerosol mass to organic carbon ratio in IMPROVE samples[J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(4): 485-496.
- [31] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [32] 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.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environment chemistry (2nd ed) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [33] 吴丹, 左芬, 夏俊荣, 等. 中国大气气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征综述[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(S1): 23-32.
- Wu D, Zuo F, Xia J R, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric aerosol in China: a review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(S1): 23-32.
- [34] Seinfeld J H, Pandis S N, Noone K. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change[J]. *Physics Today*, 1998, **51**(10): 88-90.
- [35] Schwarz J, Cusack M, Karban J, *et al.* PM_{2.5}, chemical composition at a rural background site in central Europe, including correlation and air mass back trajectory analysis [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 108-120.
- [36] 陶俊, 谢文彰, 许振成, 等. 冬季广州大气能见度影响因子分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2007, **20**(1): 17-20.
Tao J, Xie W Z, Xu Z C, *et al.* Analysis on variation trends of atmospheric visibility and its effect factors in winter in Guangzhou [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, **20**(1): 17-20.

欢迎订阅 2018 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,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 JIGST;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》2018 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号: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

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)