

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝瑛, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究

马佳, 于兴娜*, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航

(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, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 为研究南京北郊气象要素以及气溶胶对大气能见度的影响, 利用 2014 年 1~5 月的能见度、相对湿度、温度、颗粒物浓度及其化学成分等观测数据, 探讨了气溶胶不同化学组分对消光系数的贡献, 提出了该地区能见度基于不同参数的拟合方案. 结果表明, 观测期间平均能见度为 (5.78 ± 3.64) km, 能见度与相对湿度、 $PM_{2.5}$ 存在明显的负相关, 相关系数分别为 -0.66 、 -0.48 . 冬季平均消光系数为 (398.72 ± 219.88) Mm^{-1} , Organic、 NH_4NO_3 、 $(NH_4)_2SO_4$ 和 EC 对消光的贡献率分别为 38.81%、27.81%、23.95% 和 7.15%; 春季平均消光系数为 (248.36 ± 78.42) Mm^{-1} , Organic、 NH_4NO_3 、 $(NH_4)_2SO_4$ 和 EC 对消光的贡献率分别为 31.59%、24.36%、32.63% 和 8.64%. 对比不同的能见度拟合方案时, 基于颗粒物成分的能见度拟合方案优于基于散射系数的. 不同相对湿度区间内 $PM_{2.5}$ 对能见度的影响程度不同, 基于 $PM_{2.5}$ 、相对湿度和温度的能见度拟合方案说明: 低相对湿度的条件下, $PM_{2.5}$ 对能见度的影响较大; 随相对湿度增大, 相对湿度成为更为重要的影响因子.

关键词: 能见度; 相对湿度; $PM_{2.5}$; 颗粒物成分; 消光系数; 拟合方案

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0041-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.007

Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring

MA Jia, YU Xing-na*, AN Jun-lin, ZHU Bin, YU Chao, ZHU Jun, XIA Hang

(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 and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The data of visibility, relative humidity (RH), temperature (T), concentrations and chemical compositions of particles from January to May in 2014 were analyzed to understand the effects of meteorological elements and aerosols on the visibility in north suburb of Nanjing, research the contributions of different aerosol chemical compositions to extinction coefficients and propose the visibility fitting solutions of this region based on different parameters. As the results showed, the average visibility during the observation period was (5.78 ± 3.64) km; there were obvious negative correlations between visibility and RH, $PM_{2.5}$ and the correlation coefficients were -0.66 and -0.48 , respectively. The average extinction coefficient in winter was (398.72 ± 219.88) Mm^{-1} , the contributions of Organic, NH_4NO_3 , $(NH_4)_2SO_4$ and EC to extinction coefficient were 38.81%, 27.81%, 23.95% and 7.15%, respectively; and the average extinction coefficient in spring was (248.36 ± 78.42) Mm^{-1} , the contributions of Organic, NH_4NO_3 , $(NH_4)_2SO_4$ and EC to extinction coefficient were 31.59%, 24.36%, 32.63% and 8.64%, respectively. The visibility fitting solution based on chemical compositions of aerosols was better than that based on extinction coefficient when comparing the different fitting solutions. The levels of $PM_{2.5}$ mass concentrations' influences on the visibility depended on different ranges of RH; the visibility fitting solutions based on $PM_{2.5}$, RH and T explained that the effects of $PM_{2.5}$ on visibility were strong when RH stayed low, while RH became the more important factor with its increase.

Key words: visibility; relative humidity; $PM_{2.5}$; compositions of particles; extinction coefficient; fitting solutions

大气能见度是反映大气透明度的一个指标, 通常指白天视力正常的人在当时的天气条件下, 在一个指定的方向上能够从天空背景中看到和辨认出目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离^[1]. 大气能见度是反映空气质量的指标之一, 也是空气污染最显著的标志^[2]. 影响大气能见度的因素主要包括降水、雾、大风、沙尘暴、扬沙等天气现象, 以及大气中广泛存在的污染性气体和气溶胶等^[3], 特别是 $PM_{2.5}$ 不仅能通过消光作用造成大气能见度下降, 而且还是聚集大量有毒有害物质的复杂污染物^[4]. 工业化以来, 人类活动直接向大气排放大量粒子和污

染气体, 污染气体通过非均相化学反应亦可转化形成气溶胶粒子^[5].

关于气溶胶不同化学组分对消光系数影响的研究是基于美国 IMPROVE 研究计划得到的化学消光公式^[6], 其中最主要的成分包括 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、OC、

收稿日期: 2015-07-02; 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05030104); 国家自然科学基金项目(41475142); 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(201510300053y, 201510300065y); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 马佳(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理学与大气环境, E-mail: nuistmj@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

EC 等颗粒物以及 NO_2 气体, 它们对消光系数的影响机制各不相同^[7~10]. Qu 等^[11] 在其研究中指出硫酸盐和硝酸盐对气溶胶消光具有巨大贡献, 并且相对湿度影响气溶胶化学组成从而影响大气能见度. Tao 等^[12] 发现北京地区冬季严重霾污染期间硫酸盐和硝酸盐对消光贡献最大, 而轻微污染时则是有机物对消光贡献较大, 从而指出了控制无机污染物排放从而减少霾污染事件的方案; Gao 等^[13] 同样发现霾污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中二次气溶胶浓度 (包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+) 均显著增加. Xiao 等^[14] 研究了中国宝鸡近 30 年大气能见度的变化趋势, 指出 2012~2013 年 4 个季节有机物对消光的贡献均为最高.

南京作为长三角地区核心城市, 经济迅速发展的同时空气污染也日益突出, 能见度也趋于恶化^[15]. 以往的研究多关注于南京能见度变化趋势、影响因子、雾霾的宏微观特征等^[16~18], 少有文章定量讨论该地区颗粒物成分对能见度的影响, 因此本文利用 2014 年 1~5 月的能见度、气象要素、 $\text{PM}_{2.5}$ 以及膜采样等数据, 在分析了南京北郊大气能见度的变化趋势及其影响因子的基础上, 探讨了颗粒物和 NO_2 对大气消光的贡献, 并提出了该地区能见度基于不同因素的拟合方案, 以期能见度预报提供一定的理论依据.

1 材料与方法

NO_2 气体采用美国热电环境设备公司生产的 42CTL 高精度化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪, 放置在南京信息工程大学气象楼 12 楼的实验室内, 分析仪最低检测限: 0.05×10^{-9} (体积分数); 零漂: 小于 0.025×10^{-9} (体积分数) $\cdot (24 \text{ h})^{-1}$; 跨漂: $\pm 1\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ (满度值)^[19]. 观测时间为 2014 年 1 月 1 日~1 月 25 日和 4 月 1 日~5 月 15 日, 时间分辨率 1 h. 使用时根据公式将体积分数转化为质量浓度.

两台 Andersen-II 型 9 级撞击采样器和 FH62C14 系列 β 射线颗粒物连续监测仪 (用于测量 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度) 均放置在南京信息工程大学气象楼楼顶. 膜采样实验时间为 2014 年 1 月 1 日~1 月 25 日和 4 月 17 日~5 月 21 日, 采样时间约 23 h, 从 09:00 到次日的 08:00, 分别采用石英膜和特氟龙滤膜采集有机组分和无机组分. 颗粒物浓度采用称重法获得, 称重天平为瑞士 Mettler Toledo MX5 型微量天平, 称量精度为 $0.1 \mu\text{g}$. 水溶性离子的测量使用瑞士万通 850 professional IC 型色谱仪, 测定大气气溶胶中 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、

NO_2^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 10 种无机离子和甲酸; OC 和 EC 采用美国沙漠所研制的 Model 2001 热光碳分析仪, 在纯氮气环境下分别在 120、250、450、550℃ 的温度下, 对滤膜进行加热, 再将样品在含 2% O_2 的氮气环境下, 分别于 550、700、800℃ 逐步加热. 上述各个温度梯度下产生的 CO_2 , 经 MnO_2 催化, 于还原环境下转化为可通过火焰离子化检测器 (FID) 检测的 CH_4 . 在测量过程中, 采用波长 633 nm 的氦-氖激光监测滤纸的反射光强, 利用光强的变化指示出元素碳氧化的起始点^[20]. β 射线颗粒物连续监测仪实验时间为 2015 年 1 月 1 日~2 月 9 日以及 3 月 26 日~5 月 30 日, 时间分辨率 1 h.

CJY-1 型能见度仪和 CAWSD600 型自动气象站观测地点位于南京信息工程大学内的中国气象局综合观测培训实习基地. 观测时间为 2014 年 1 月 1 日~5 月 31 日, 能见度时间分辨率 5 min, 气象要素时间分辨率 1 h.

2 结果与讨论

2.1 能见度、 $\text{PM}_{2.5}$ 及气象要素变化特征

观测期间南京北郊平均能见度、RH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 $(5.78 \pm 3.64) \text{ km}$ 、 $(60.48 \pm 22.41)\%$ 和 $(62.77 \pm 42.79) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 不同能见度范围的平均能见度、相对湿度以及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时均值如表 1 所示, 日均值变化见图 1. $<1 \text{ km}$ 的低能见度共出现 132 个时次, 多出现在 1 月和 5 月, 对应的平均 RH 和平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别在 80% 以及 $90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 1 月 18~19 日以及 1 月 30~31 日南京均出现了大范围的雾霾天气, 其中 1 月 18~19 日的雾霾是在全省受高压控制和南风影响、扩散条件差的背景下发生的, 结合 CALIPSO 卫星 532 nm 激光总后向散射系数的剖面图以及气溶胶类型图 (图 2 和图 3 中黑框为南京及周边地区) 可以看出, 卫星经过南京上空时, 南京地区海拔 0~2 km 的垂直范围内存在大量气溶胶, 且主要以沙尘、污染性沙尘以及烟尘为主; 1 月 30~31 日则是寒潮天气间接导致的, 伴随着较高的相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度; 5 月则集中出现在 5 月 18 日和 5 月 22 日两天, 平均能见度不足 1 km, 主要是由于降雨较少, 空气流通差, 本地排放容易在城市上空堆积, 扩散困难, 导致污染不断累积加重, 而青奥会前的大面积施工更是让这种静稳气象条件下的空气质量进一步恶化, 以 5 月 18 日为例结合图 3 可以看出, 南京及周边地区海拔 0~2 km 存在污染大陆型气溶胶, 说明

南京地区的污染主要来源于建筑、工业以及交通等局地源. 能见度 < 5 km 的样本约占样本总量的 50%, 能见度 > 10 km 的仅占 12.95%, 表明南京北郊能见度衰减状况十分严重. 总体上随能见度减小, 平均 RH 和 PM_{2.5} 质量浓度均呈现出增大的趋势, 图 1 中能见度与 RH 以及 PM_{2.5} 质量浓度表现出了相反的变化趋势, 能见度与 RH 以及 PM_{2.5} 质量浓度的相关系数分别为 -0.66 和 -0.48.

表 1 不同能见度范围的平均能见度、相对湿度以及 PM_{2.5} 质量浓度

Table 1 Mean values of visibility, RH and mass concentrations of PM _{2.5} in different ranges of visibility					
能见度范围	平均能见度 /km	样本量	百分比 /%	平均相对湿度 /%	平均 PM _{2.5} 质量浓度 /μg·m ⁻³
< 1 km	0.56	132	3.71	79.33	95.61
1 ~ 3 km	2.10	796	22.41	79.94	89.58
3 ~ 5 km	3.98	851	23.96	68.21	65.60
5 ~ 10 km	7.25	1313	36.97	50.25	52.10
> 10 km	12.60	460	12.95	35.99	34.13

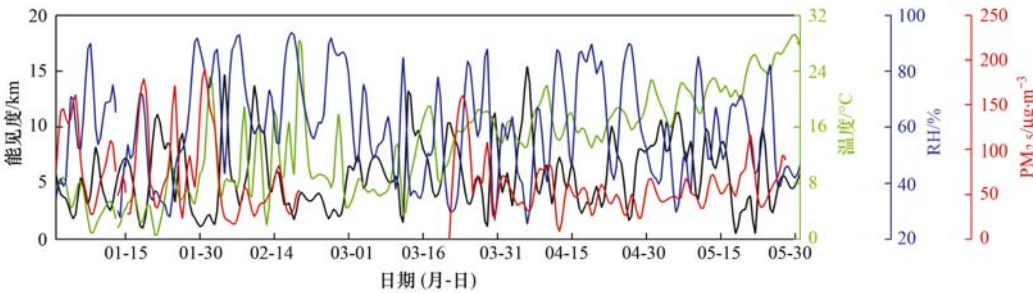
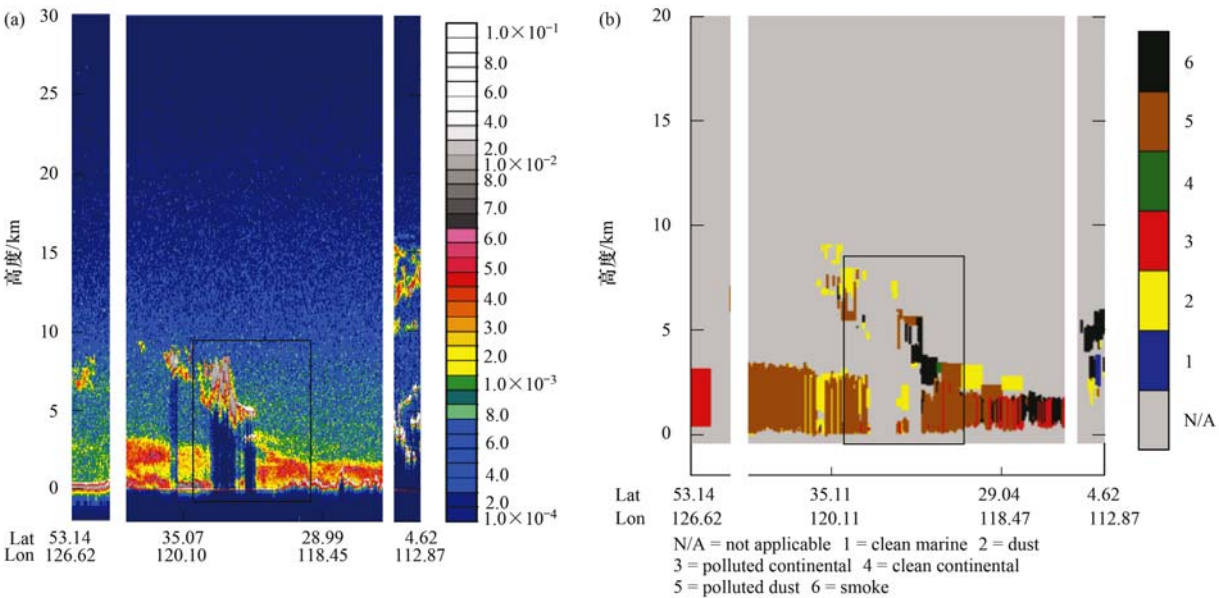


图 1 观测期间能见度、温度、RH 和 PM_{2.5} 质量浓度日均值变化

Fig. 1 Daily variations of visibility, T , RH and mass concentrations of PM_{2.5} during the observation period



(a) 垂直剖面; (b) 气溶胶类型

图 2 1 月 19 日 CALIPSO 卫星 532 nm 激光总后向散射系数的垂直剖面以及气溶胶类型

Fig. 2 Altitude-orbit cross-section of total 532 nm attenuated backscattering intensity and aerosol types on January 19th

2.2 颗粒物化学成分及 NO₂ 对消光系数的贡献

表 2 为部分城市细粒子中各成分的平均质量浓度. 同 2010 年南京北郊春季的观测相比, 本研究中国几乎所有成分浓度都有不同程度的提高; 而海拔较

高的黄山顶以及作为珠三角背景地区的鼎湖山, 除鼎湖山地区的 SO₄²⁻ 浓度较高以外, 其余成分的浓度明显低于本研究; 与海峡西岸城市群、济南市以及 2001 ~ 2003 年的北京市相比, 本研究中的 SO₄²⁻、

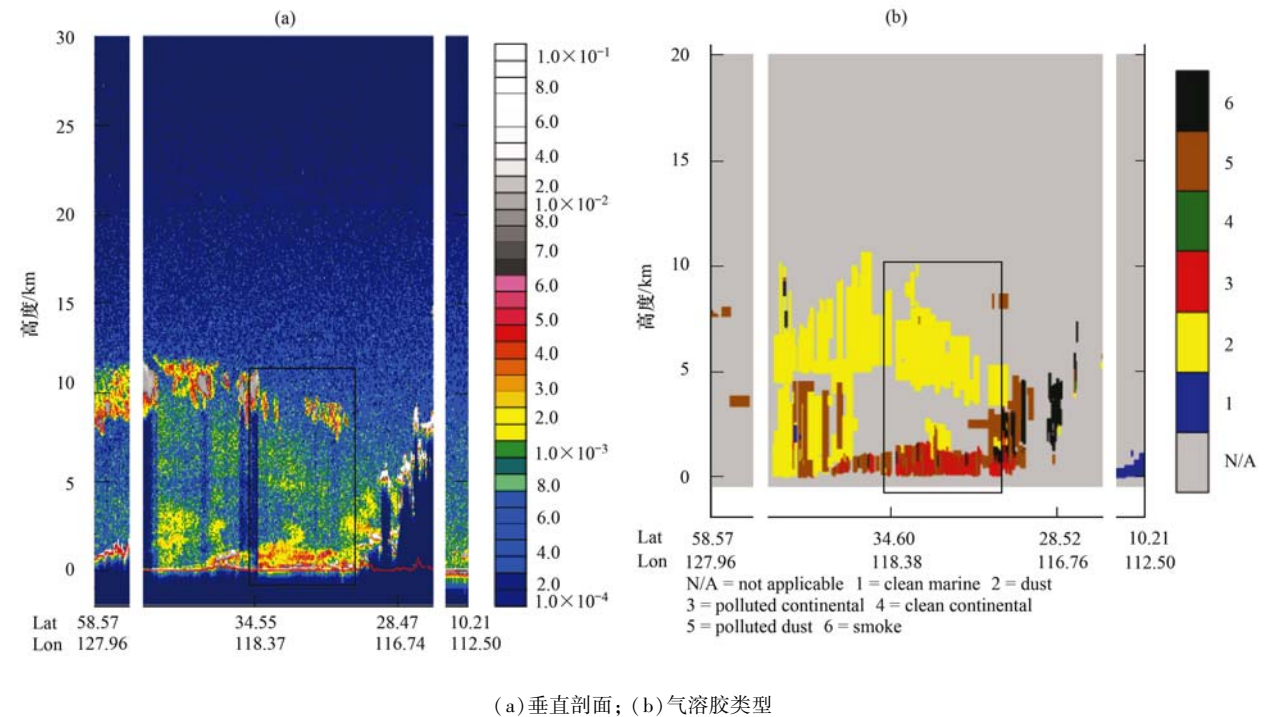


图3 5月18日 CALIPSO 卫星 532 nm 激光总后向散射系数的剖面图以及气溶胶类型图

Fig. 3 Altitude-orbit cross-section of total 532 nm attenuated backscattering intensity and aerosol types on May 18th

表2 部分城市细粒子中各组分的平均质量浓度¹⁾/μg·m⁻³

Table 2 Mean mass concentrations of components of fine particles in some cities/μg·m⁻³

成分	时间(年-月)	OC	EC	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	F ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻
本研究(PM _{2.1})	2014-01	27.24	2.91	2.80	0.45	13.62	2.38	1.70	0.26	19.77	7.98	15.64	0.47
本研究(PM _{2.1})	2014-04~2014-05	15.20	2.19	1.77	0.35	10.70	2.10	1.09	0.20	9.98	4.94	13.02	1.33
南京北郊(PM _{2.1}) ^[21]	2010-05~2011-04	—	—	0.5	0.2	4.1	0.8	0.9	0.3	7.3	2.1	10.8	0.2
黄山顶(PM _{2.1}) ^[22]	2011-06~2011-08	—	—	0.19	0.02	1.77	0.73	0.23	—	0.55	0.21	5.72	—
鼎湖山(PM _{2.5}) ^[23]	2007-01~2008-12	—	—	0.7	0.2	6.8	0.6	1.4	—	6.1	1.3	19.1	—
海西(PM _{2.5}) ^[24]	2011-01	—	—	0.42	0.07	7.99	1.00	1.44	0.09	13.23	2.16	13.60	—
济南(PM _{1.8}) ^[25]	2009-10	—	—	0.35	0.10	8.86	0.73	1.73	0.05	10.59	1.00	15.47	—
广州(PM _{2.5}) ^[26]	2008-07	—	—	2.7	—	3.2	1.6	0.6	—	2.3	1.0	14.2	—
北京(PM _{2.5}) ^[27]	2001~2003	—	—	0.55	0.17	8.72	1.63	1.55	0.29	11.52	3.07	17.07	0.41
北京(PM _{2.5}) ^[28]	2012-08~2013-07	—	—	1.19	0.05	13.5	0.78	1.05	0.57	20.3	3.61	19.4	—

1) “—”表示文章中没有相关数据

NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 这 3 种主要成分的浓度较为接近, 广州地区 NO₃⁻ 远低于本研究的水平, 而 2012~2013 年北京市的污染状况比南京稍严重.

图 4 为采样期间 PM_{2.1} 中水溶性离子以及 EC、OC 质量浓度逐日变化. 结合表 2 可以看出, 1 月 (冬季) 总质量浓度以及各组分的浓度明显大于 4

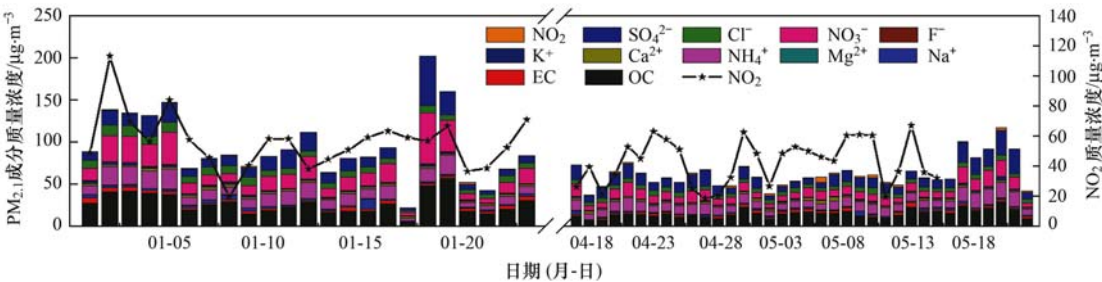


图4 采样期间 PM_{2.1} 中水溶性离子、EC、OC 以及 NO₂ 质量浓度逐日变化

Fig. 4 Daily variations of mass concentrations of water-soluble ions, EC, OC in PM_{2.1} and NO₂ during the sampling period

~5 月(春季),可见该地区气溶胶成分呈现明显的季节差异,与魏玉香等^[29]的研究结果一致. 且冬季颗粒物质量浓度波动更大,尤其在 1 月 18 ~ 19 日南京发生雾霾天气现象时,主要的污染成分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 OC 均出现较大幅度的增长,达到平时的 2 ~ 3 倍;而春季则相对较稳定,5 月 18 日和 22 日发生低能见度事件时,各组分浓度增长并不明显.

已有的关于美国 IMPROVE 研究计划得到的颗粒物消光系数 (B_{ext}) 计算公式的研究基本探讨的是 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分对消光系数的贡献^[30],考虑到本研究的观测中气溶胶成分的观测数据是来自安德森采样器,并没有 $\text{PM}_{2.5}$ 的切割头,而 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度存在良好的一致性(图 5),因此在本研究中计算了 $\text{PM}_{2.1}$ 的化学组分以及 NO_2 对消光系数的贡献率. 陶俊等^[31]将 IMPROVE 研究计划的公式简化修正为:

$$B_{\text{ext}} \approx 3f(\text{RH}) \times [(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3] + 4[\text{Organics}] + 10[\text{EC}] + 0.161[\text{NO}_2] \quad (1)$$

表 3 不同相对湿度范围的 $f(\text{RH})$ 值

Table 3 Values of $f(\text{RH})$ in different ranges of RH

RH 范围/%	40 ~ 45	45 ~ 50	50 ~ 55	55 ~ 60	60 ~ 65	65 ~ 70	70 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 85	85 ~ 90	> 90
$f(\text{RH})$ 值	1.22	1.27	1.33	1.38	1.45	1.55	1.65	1.83	2.10	2.46	3.17

利用上面的公式(1)对南京北郊地区冬春季 $\text{PM}_{2.1}$ 化学成分和 NO_2 对消光系数的贡献进行计算,结果如图 6 所示. 1 月和 4 ~ 5 月的平均消光系数分别为 $(398.72 \pm 219.88) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(248.36 \pm 78.42) \text{ Mm}^{-1}$,冬季消光系数均值约为春季的 1.6 倍,数值上远远低于 Cao 等^[34]的结果(冬季 1328 Mm^{-1} ,春季 659 Mm^{-1}),但与其冬季高于春季的事实相符合. 整个采样期间的消光系数均值为 $(313.22 \pm 171.48) \text{ Mm}^{-1}$,这与 Yang 等^[35]在 2007 年济南的观测结果(292 Mm^{-1})近似,略低于 Jung 等^[36]2009 年广州的研究结果(367 Mm^{-1}). 冬季消光贡献率最高的为有机物 (Organic),占 38.81%,OC/EC 为 11.15,远大于 2,说明在细粒径段南京北郊冬季细粒径段中主要污染源是燃煤排放和机动车尾气排放等^[37],且普遍存在二次有机物污染^[38],这也正是该地区能见度衰减的重要原因; NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 是占第二和第三的大气消光贡献源,分别达到了 27.81% 和 23.95%, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 均值为 1.33,说明该地区本时间段污染物主要来源为机动车排放^[39]; Organic、 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 EC 对

式中, B_{ext} 的单位是 Mm^{-1} ,化学成分和 NO_2 的单位是 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $f(\text{RH})$ 是相对湿度增长系数,取值见表 3^[32]. $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = 1.37[\text{SO}_4^{2-}]$; $[\text{NH}_4\text{NO}_3] = 1.29[\text{NO}_3^-]$; $[\text{Organics}] = 1.4[\text{OC}]$ ^[33].

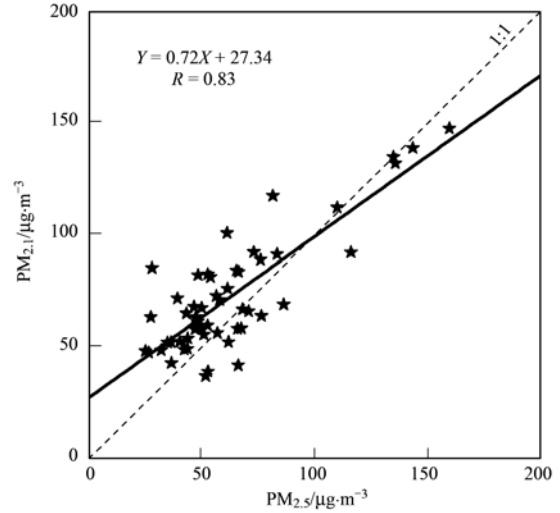


图 5 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度散点

Fig. 5 Scatter diagram of mass concentrations of $\text{PM}_{2.1}$ and $\text{PM}_{2.5}$

消光的总贡献率高达 97.72%. 春季消光贡献率最高的为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,其次是 Organic 和 NH_4NO_3 ,跟冬季相比,OC/EC 以及 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 均值均有不同程度的下降,但是仍然分别高达 7.96 和 0.81,可见该地区的污染物来源变化不大; NO_2 对大气消光的贡献仍然很低,仅为 2.78%. 总的来说,两段采样时间内 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和 Organic 均为南京北郊能见度衰减的重要因素,三者对消光的贡献之和都在 90% 左右.

2.3 不同变量的能见度拟合方案

2.3.1 基于消光系数的方案 I

Koschmieder 提出的将大气能见度与消光系数联系起来的公式:

$$\text{Vis} = 3.912/B_{\text{ext}} \times 1000, \quad (2)$$

式中,Vis 为能见度,单位是 km; B_{ext} 为式(1)中利用 $\text{PM}_{2.1}$ 化学成分及 NO_2 计算出的总消光系数,单位是 Mm^{-1} ; 3.912 为常数,随时空的变化而变化. 高澜等^[40]在研究中指出适合南京北郊的常数为 1.97,因此公式(2)就转化为:

$$\text{Vis} = 1.97/B_{\text{ext}} \times 1000, \quad (3)$$

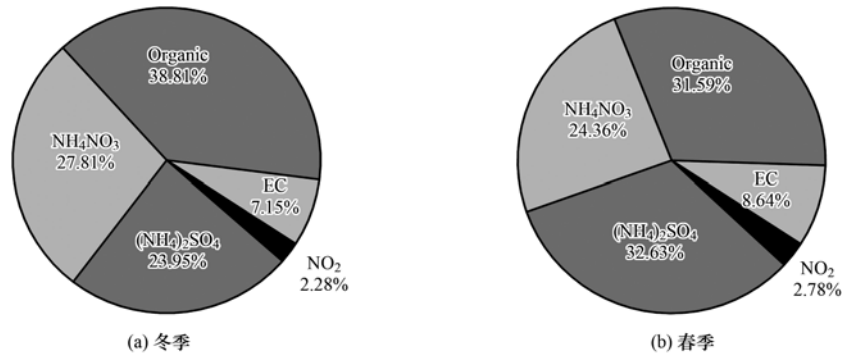


图6 冬季和春季PM_{2.1}化学成分以及NO₂对消光系数的贡献

Fig. 6 Contributions of chemical compositions of PM_{2.1} and NO₂ to extinction coefficients in winter and spring

在利用 3.912 和 1.97 两个数值分别计算能见度并进行对比后,发现公式(3)计算出的更接近实测的能见度数值,因此结合 2.2 节的公式(1)以及公式(3)从而计算能见度的方案记为方案 I.

2.3.2 基于 PM_{2.1}中化学组分的方案 II

由上文已知 Organic、NH₄NO₃、(NH₄)₂SO₄ 和 EC 是造成大气消光最主要的 4 种成分,且考虑到能见度与污染物之间存在的负相关性,因此在剔除了 5 月 18 日和 22 日两个平均能见度低于 1 km 的严重污染天气数据以后,建立了 100/Vis 关于 OC、EC、NO₃⁻ 以及 SO₄²⁻ 这 4 个因子的多元线性拟合方程,得到了两个拟合公式分别如下.

1 月:

$$100/\text{Vis} = 10.116 + 0.361 \times \text{OC} - 3.817 \times \text{EC} + 0.228 \times \text{NO}_3^- + 0.82 \times \text{SO}_4^{2-} \quad (4)$$

$(R^2 = 0.913)$

4~5 月:

$$100/\text{Vis} = 10.735 - 1.36 \times \text{OC} + 0.368 \times \text{EC} + 1.622 \times \text{NO}_3^- + 0.975 \times \text{SO}_4^{2-} \quad (5)$$

$(R^2 = 0.715)$

2.3.3 两种方案的对比

从公式变量之间的关系来看,两种拟合方案本质上的物理意义相似. 表 4 为两种拟合方案的对比,图 7 为以上两种方案拟合出的能见度与实际能见度的逐日变化. 从中可以看出,两种方案所拟合的能见度与实际能见度拥有相似的变化趋势. 结合表 4, 1 月实测的、方案 I 和方案 II 拟合的能见度的均值分别为 5.12、6.70 和 5.13 km, 方案 II 拟合能见度与实测能见度的相关系数和协方差分别为 0.74 和 4.92,均高于方案 I,而绝对误差仅为 0.01 km,远远低于方案 I,说明方案 II 的拟合效果更好; 4~5 月的拟合结果与 1 月的一致.

表 4 两种拟合方案的对比

统计量	1 月		4~5 月	
	方案 I	方案 II	方案 I	方案 II
拟合能见度均值/km	6.70	5.13	8.67	6.46
实测能见度均值/km	5.12	5.12	6.45	6.45
绝对误差/km	1.58	0.01	2.22	0.01
与实测值的协方差	3.67	4.92	2.65	6.04
与实测值的相关系数	0.30	0.74	0.39	0.67

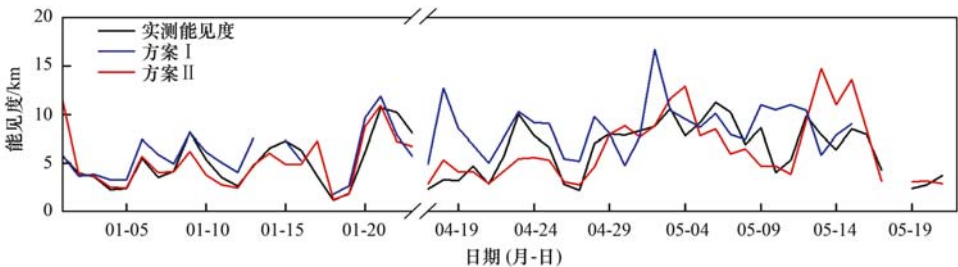


图7 两种拟合方案计算的能见度与实际能见度逐日变化

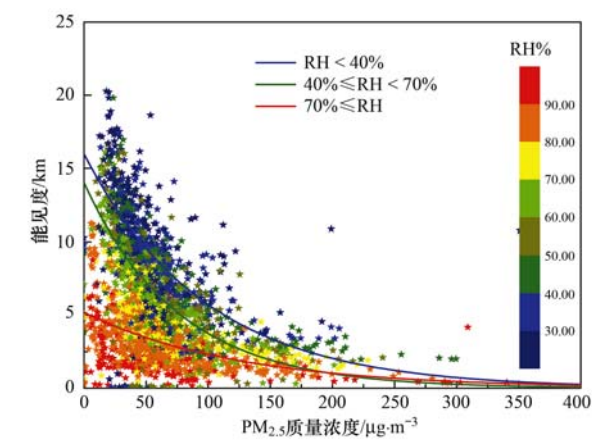
Fig. 7 Daily variations of visibilities calculated based on two fitting solutions and the actual visibility

2.3.4 基于气象要素和 PM_{2.5}的拟合方案

诸多研究表明,颗粒物尤其是细颗粒物(PM_{2.5})对能见度有强烈的衰减作用,其原理在于颗粒物对

光的吸收和散射,而相对湿度对能见度的影响主要体现在对颗粒物的吸湿增长的影响,进而影响能见度,因此能见度衰减的最根本原因是颗粒物的产生

和累积. 图 8 为南京北郊能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度小时均值的散点图, 散点颜色表示相对湿度. 不难看出能见度与两者都存在一定的负相关性: 随 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度提高, 能见度呈指数下降; $\text{RH} > 80\%$ 大多出现在能见度 $< 10 \text{ km}$ 时, $\text{RH} > 90\%$ (红色散点) 则几乎只在能见度 $< 5 \text{ km}$ 时出现. 分别对 $\text{RH} < 40\%$ 、 $40\% \leq \text{RH} < 70\%$ 和 $\text{RH} \geq 70\%$ 的散点进行指数函数拟合分析, 得到的拟合曲线分别为 $\text{Vis} = 15.98 \times \exp(-0.01029 \times \text{PM}_{2.5})$ ($R^2 = 0.3871$)、 $\text{Vis} = 14.01 \times \exp(-0.01321 \times \text{PM}_{2.5})$ ($R^2 = 0.5277$) 和 $\text{Vis} = 5.19 \times \exp(-0.008099 \times \text{PM}_{2.5})$ ($R^2 = 0.2311$). 从拟合公式来看, 当 $40\% \leq \text{RH} < 70\%$ 能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性最强, 而 $\text{RH} \geq 70\%$ 时能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性最弱, 可见 $\text{PM}_{2.5}$ 对大气能见度的影响程度随 RH 的变化而有所变化. 而从



散点颜色表示相对湿度
图 8 能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度散点
Fig. 8 Scatter diagram of visibility and mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$

$\text{PM}_{2.5}$ 取值为 0 时 3 条拟合曲线的初始值 (即 15.98 km、14.01 km 和 5.19 km) 来看, 随 RH 的升高数值降低, 且降低的幅度越来越大. 可见, $\text{PM}_{2.5}$ 和 RH 都是影响南京北郊大气能见度的关键因素.

除了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 RH 之外, 温度 (T)、风速等气象要素对能见度也有一定的影响, 因此引入第 3 个变量 T , 构建能见度 (Vis) 关于 $\text{PM}_{2.5}$ 、 RH 和 T 多元回归方程. 由上文可知, 在不同的 RH 范围内, 能见度对于各个量的响应程度并不一致, 因此将 RH 划分为 $\text{RH} < 40\%$ 、 $40\% \leq \text{RH} < 70\%$ 和 $\text{RH} \geq 70\%$, 同时, 在各个 RH 范围内将 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度划分为 $\text{PM}_{2.5} < 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \leq \text{PM}_{2.5} < 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $\text{PM}_{2.5} \geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 这 3 个区间, 因此得到表 5 中的 9 个能见度多元线性回归方程, 显著性均通过 0.05 的置信检验. 其中除了方程 9 外, 其余都剔除了低于 1 km 的极端低能见度的样本. 从表 5 可以看出, 在暂不考虑 T 的情况下, 当 $\text{RH} < 40\%$ 、 $\text{PM}_{2.5} < 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以及 $40\% \leq \text{RH} < 70\%$ 、 $\text{PM}_{2.5} < 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 回归方程中 $\text{PM}_{2.5}$ 前的系数绝对值较大, 说明其对能见度的影响比 RH 大, 研究表明相对湿度低于 60% 时, 气溶胶常以“干”的状态存在于大气当中, 其质量浓度和粒子谱分布是影响散射能力的主要因素^[41]; 其余 6 个方程中都是 RH 占的权重较大, 尤其当 $70\% \leq \text{RH}$ 时, 相对湿度对气溶胶粒子群体光学特性参数和太阳增温率的影响在量级上可与气溶胶粒子浓度成倍改变的影响相比拟^[42]. 虽然 $\text{RH} < 40\%$ 、 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} \leq \text{PM}_{2.5} < 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以及 $40\% \leq \text{RH} < 70\%$ 、 $\text{PM}_{2.5} < 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时 T 的系数绝对值最高, 但由于其自身变化幅度并不大, 因此并没有 RH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 对能见度的影响大.

表 5 不同 RH 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度范围的能见度拟合方程

Table 5 Fitting solutions of visibility in different ranges of RH and mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$				
相对湿度/%	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	回归方程	R^2	样本数
$\text{RH} < 40\%$	方程 1 $\text{PM}_{2.5} < 50$	$\text{Vis} = 19.699 - 0.1 \times \text{RH} - 0.149 \times \text{PM}_{2.5}$	0.37	286
	方程 2 $50 \leq \text{PM}_{2.5} < 150$	$\text{Vis} = 9.93 - 0.022 \times \text{RH} - 0.041 \times \text{PM}_{2.5} + 0.53 \times T$	0.253	208
	方程 3 $\text{PM}_{2.5} \geq 150$	$\text{Vis} = 9.044 - 0.243 \times \text{RH} + 0.015 \times \text{PM}_{2.5}$	0.855	12
$40\% \leq \text{RH} < 70\%$	方程 4 $\text{PM}_{2.5} < 50$	$\text{Vis} = 20.081 - 0.094 \times \text{RH} - 0.158 \times \text{PM}_{2.5} - 0.3 \times T$	0.32	354
	方程 5 $50 \leq \text{PM}_{2.5} < 150$	$\text{Vis} = 14.147 - 0.93 \times \text{RH} - 0.45 \times \text{PM}_{2.5} - 0.14 \times T$	0.461	469
	方程 6 $\text{PM}_{2.5} \geq 150$	$\text{Vis} = 4.562 - 0.04 \times \text{RH} - 0.011 \times T$	0.338	48
$70\% \leq \text{RH}$	方程 7 $\text{PM}_{2.5} < 50$	$\text{Vis} = 23.965 - 0.202 \times \text{RH} - 0.074 \times \text{PM}_{2.5} - 0.013 \times T$	0.397	420
	方程 8 $50 \leq \text{PM}_{2.5} < 150$	$\text{Vis} = 13.344 - 0.106 \times \text{RH} - 0.022 \times \text{PM}_{2.5}$	0.437	440
	方程 9 $\text{PM}_{2.5} \geq 150$	$\text{Vis} = 5.649 - 0.056 \times \text{RH} - 0.002 \times \text{PM}_{2.5}$	0.377	58

结合图 9 可以看出, 回归方程计算出的能见度与实测能见度具有较好的一致性, 散点的分布集中在中心线附近, 9 个方程计算值和实测值之间的平

均偏差分别为 1.75、1.66、0.75、1.91、1.14、0.39、1.24、0.71 和 0.38 km. 且除了 $\text{PM}_{2.5} \geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区间中样本量较少从而导致趋势不显著

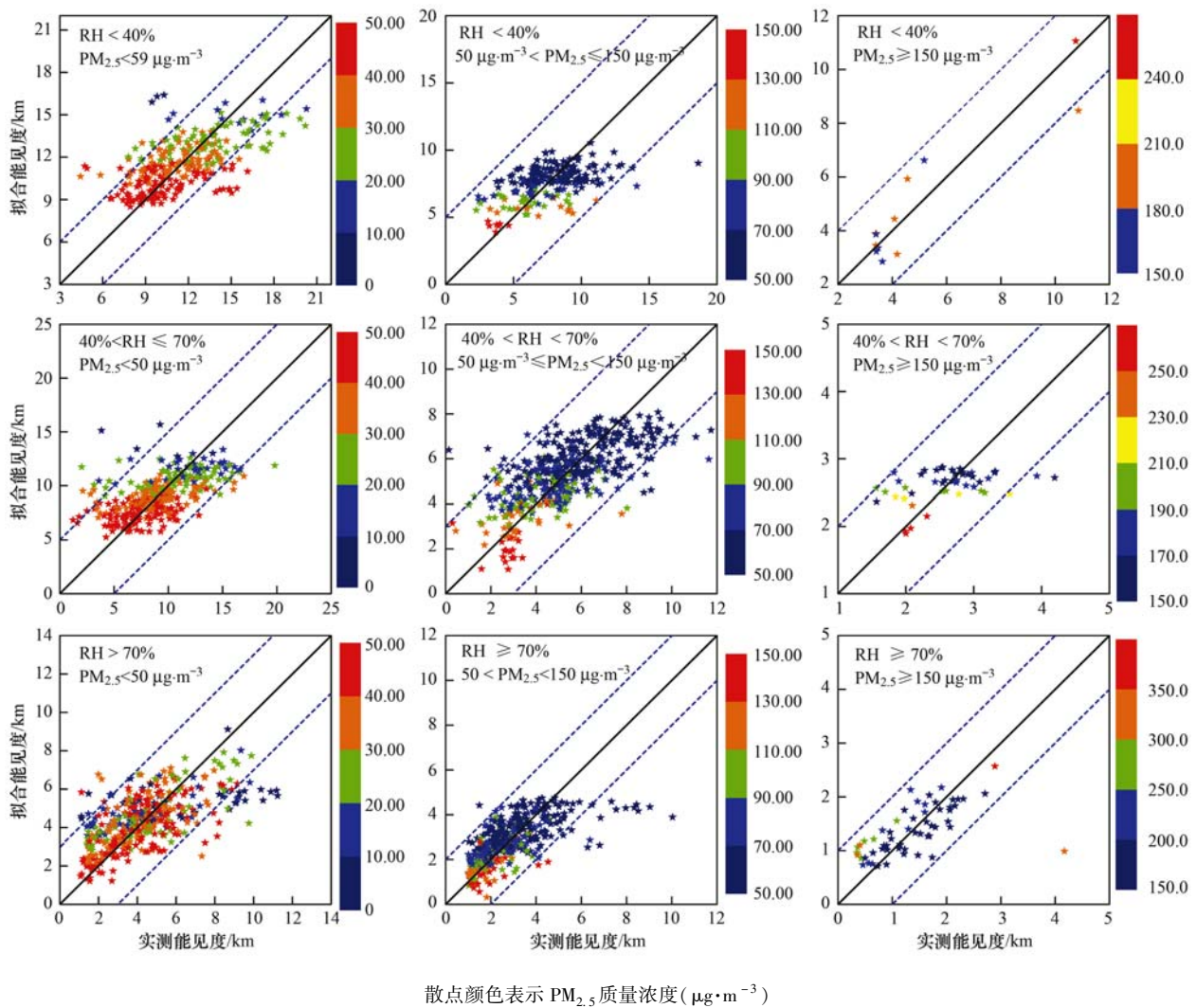


图9 拟合与实测能见度散点

Fig. 9 Scatter diagram of fitted and actual visibility

之外,随着 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增加,能见度均出现明显的衰减趋势。

3 结论

(1) 观测期间南京北郊平均能见度、平均 RH 和平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 (5.78 ± 3.64) km、 $(60.48 \pm 22.41)\%$ 和 $(62.77 \pm 42.79) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随平均 RH 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增大,能见度呈现出减小的趋势,能见度和它们的相关系数分别为 -0.66 和 -0.48 。

(2) 冬季和春季的平均消光系数分别为 $(398.72 \pm 219.88) \text{Mm}^{-1}$ 和 $(248.36 \pm 78.42) \text{Mm}^{-1}$, 冬季消光贡献率最高的为 Organic, 占 38.81%; 春季最高的为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 达到了 32.63%。两段采样时间内 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 和 Organic 均为南京北郊能见度衰减的重要因素,三者

对消光的贡献之和都在 90% 左右。

(3) 观测期间,基于 Organic、 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 EC 浓度的能见度参数化方案 II 拟合效果优于基于 Koschmiederp 公式和散射系数的方案 I。而关于 RH、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 T 的拟合方案则表明,低相对湿度的条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 对能见度的影响较大; 随相对湿度增大,相对湿度成为更为重要的影响因子。

致谢:感谢南京信息工程大学中国气象局综合观测培训实习基地提供的常规气象要素资料; 同时感谢美国国家航空航天局 (NASA) 对于 CALIPSO 星载激光雷达关于全球云及气溶胶高度、覆盖率和种类信息监测数据的无私分享。

参考文献:

- [1] Tao J, Ho K F, Chen L G, *et al.* Effect of chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring[J]. Particuology, 2009, 7(1): 68-75.
- [2] 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.
- [3] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 596-603.
- [4] 王京丽, 刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探[J]. 气象学报, 2006, **64**(2): 221-228.
- [5] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报, 2006, **64**(4): 510-517, 538.
- [6] Pitchford M, Maim 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.
- [7] 毛华云, 田刚, 黄玉虎, 等. 北京市大气环境中硫酸盐、硝酸盐粒径分布及存在形式[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1237-1241.
- [8] 邓涛, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 193-199.
- [9] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 1-8.
- [10] 王琼, 毕晓辉, 张裕芬, 等. 杭州市大气颗粒物消光组分的粒径分布特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 10-16.
- [11] Qu W J, Wang J, Zhang X Y, *et al.* Influence of relative humidity on aerosol composition: Impacts on light extinction and visibility impairment at two sites in coastal area of China [J]. Atmospheric Research, 2015, **153**: 500-511.
- [12] 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.
- [13] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* The variation of chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **107**: 1-8.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [18] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1425-1431.
- [19] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 SO₂、NO_x、CO 和 O₃ 体积分数变化分析[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1585-1589.
- [20] 姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津 2009 年 3 月气溶胶化学组成及其消光特性研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 214-220.
- [21] 薛国强, 朱彬, 王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [22] 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1973-1981.
- [23] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1232-1235.
- [24] 于艳科, 尹丽倩, 牛振川, 等. 中国海峡西岸城市群冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中水溶性离子的污染特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1546-1553.
- [25] 于阳春, 董灿, 王新峰, 等. 济南市秋季大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(4): 561-567.
- [26] 陶俊, 张仁健, 董林, 等. 夏季广州城区细颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1417-1424.
- [27] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [28] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012~2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 768-773.
- [29] 魏玉香, 杨卫芬, 银燕, 等. 霾天气南京市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(11): 66-71.
- [30] Shen G F, Xue M, Yuan S Y, *et al.* Chemical compositions and reconstructed light extinction coefficients of particulate matter in a mega-city in the western Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **83**: 14-20.
- [31] 陶俊, 张仁健, 许振成, 等. 广州冬季大气消光系数的贡献因子研究[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(5): 484-490.
- [32] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(16): 2845-2860.
- [33] 沈铁迪, 王体健, 陈璞琰, 等. 南京城区夏秋季能见度与 PM_{2.5} 化学成分的关系[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 652-658.
- [34] 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, 2012, **59**: 559-566.
- [35] Yang L X, Wang D C, Cheng S H, *et al.* Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China [J]. Science of the Total Environment, 2007, **383**(1-3): 164-173.
- [36] Jung J S, Lee H L, Kim Y J, *et al.* Aerosol chemistry and the effect of aerosol water content on visibility impairment and radiative forcing in Guangzhou during the 2006 Pearl River Delta campaign[J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(11): 3231-3244.
- [37] 段卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有

- 机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- [38] 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京地区大气 $PM_{1.1}$ 中 OC、EC 特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 774-779.
- [39] 许明君, 王月华, 汤莉莉, 等. 南京城区与郊区秋季大气 PM_{10} 中水溶性离子的特征研究[J]. 环境工程, 2012, **30**(5): 108-113.
- [40] 高澜, 邱玉珺, 朱彬. 南京北郊气溶胶散射特性观测研究[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(2): 22-28.
- [41] Covert D S, Charlson R J, Ahlquist N C. A study of the relationship of chemical composition and humidity to light scattering by aerosols [J]. Journal of Applied Meteorology, 1972, **11**(6): 968-976.
- [42] 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响[J]. 大气科学, 1999, **23**(2): 239-247.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjkx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行