

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_{2.5}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_{2.5}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MnO₂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)

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^{1,2}, 朱彬^{1,2*}, 王红磊¹, 康汉青¹

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 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发实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气与环境实验教学中心, 国家综合气象观测专项试验外场, 南京 210044)

摘要: 为研究长三角地区细颗粒物污染分布特征及其光学特性, 选择在城市(苏州)、郊区(南京)和区域背景站(临安)同时进行PM_{2.5}采集并进行化学分析. 这次污染过程中, 苏州、南京和临安的PM_{2.5}平均浓度分别达到(169.8 ± 56.5)、(169.9 ± 51.2)和(154.0 ± 54.9) μg·m⁻³. 散度系数分析显示3个站点气象要素和PM_{2.5}化学成分的差异较小, PM_{2.5}污染呈现同步性和区域化特征. 利用化学成分法估算的消光系数在苏州、南京和临安分别是(561 ± 223)、(655 ± 340)和(679 ± 349) Mm⁻¹, 与能见度法估算的消光系数之间相关度较高(*r*为0.73~0.80). 利用PMF模型解析PM_{2.5}的污染来源, 二次硝酸(32%)和二次硫酸(25%)的占比最大, 其次是生物质燃烧(16%)、不完全燃烧源(7%)、燃料燃烧(7%)、土壤地壳源(8%)和海洋源(5%). 对PM_{2.5}消光系数的主要贡献源是二次生成的硝酸硫酸源、不完全燃烧和生物质燃烧源. 与质量浓度的源贡献相比, 二次硝酸硫酸源的占比降低了约4%, 不完全燃烧源的贡献增加了5%, 说明PM_{2.5}的各类源对其质量浓度和消光系数的贡献效率存在差别.

关键词: 长三角; 细颗粒物; 气象要素; 消光系数; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0556-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006082

Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta

XIA Li^{1,2}, ZHU Bin^{1,2*}, WANG Hong-lei¹, KANG Han-qing¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Experimental Teaching Center for Meteorology and Environment, Special Test Field of National Integrated Meteorological Observation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the distribution and optical characteristics of fine particulate matter pollution in the Yangtze River Delta, PM_{2.5} samples were collected and analyzed from city (Suzhou), suburb (Nanjing), and regional background monitoring stations (Lin'an). The average concentrations of PM_{2.5} in Suzhou, Nanjing, and Lin'an were (169.8 ± 56.5), (169.9 ± 51.2), and (154.0 ± 54.9) μg·m⁻³, respectively. There was little difference in meteorological conditions and the chemical composition of PM_{2.5} among the three sites, and PM_{2.5} pollution showed significant synchronization and regionalization characteristics. The extinction coefficients estimated using a chemical component method for Suzhou, Nanjing, and Lin'an are (561 ± 223), (655 ± 340), and (679 ± 349) Mm⁻¹, respectively. There is strong correlation between the extinction coefficients estimated by the chemical component method and those estimated by a visibility-based method (*r* 0.73-0.80). Using a PMF model to analyze the PM_{2.5} sources, secondary nitrate sources (32%) and secondary sulfate sources (25%) accounted for the largest proportions followed by biomass combustion (16%), incomplete combustion (7%), fuel combustion (7%), soil crusts (8%), and marine sources (5%). The primary sources of the extinction coefficients of PM_{2.5} are secondary nitrate and sulfate sources, incomplete combustion, and biomass combustion. Compared with the source contribution of mass concentrations, the proportion of secondary nitrate and sulfate sources decreased by approximately 4% and the proportion of the incomplete combustion source increased by 5%. These results show that there are differences in the contributions of various PM_{2.5} source according to mass concentrations and extinction coefficients.

Key words: Yangtze River Delta; fine particle; meteorological elements; light extinction coefficient; source apportionment

由于快速的经济增长、城市化和不断增加的人口, 中国的特大城市和城市群经历了严重的空气污染^[1]. 其中, 细颗粒物(PM_{2.5})污染备受关注, 因为PM_{2.5}对公众健康、能见度产生不利影响, 存在直接和间接辐射强迫以及气候效应^[2]. 对大气中PM_{2.5}的观测研究大多数集中在其化学性质、形成机制、光

学性质和控制策略等方面^[3].

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2020-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602003); 国家自然科学基金项目(41575148)

作者简介: 夏丽(1985~), 女, 硕士研究生, 实验师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xialix@163.com

* 通信作者, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

通常颗粒物污染过程与一次颗粒物和污染气体排放有关,还受不利的天气条件影响^[4]. 细颗粒物的来源贡献有很多研究,如杭州的细颗粒物主要贡献源是二次粒子和机动车尾气^[5]. 上海城区的PM_{2.5}贡献最大的源为二次无机盐(硝酸盐、硫酸盐)和二次有机碳等二次污染源^[6]. 南京的PM_{2.5}最大源为二次无机盐气溶胶,其次是汽车尾气^[7]. 背景站崇明岛的PM_{2.5}污染存在局地生物质燃烧型污染和区域传输型污染^[8]. 细颗粒物对太阳辐射的散射和吸收作用,是导致能见度下降的主要原因. PM_{2.5}的消光效应与其浓度、化学成分和相对湿度密切相关^[9]. IMPROVE(interagency monitoring of protected visual environments)多元线性回归公式在国内外广泛应用,能够反映不同化学组分对消光作用的定量贡献. 如济南背景区域的消光系数范围是172.7~320.6 Mm⁻¹,呈现明显的冬高夏低季节趋势^[10];冬季南京北郊通过三波长光声黑碳光度计测得细颗粒物消光系数为(730.6 ± 392.7) Mm⁻¹,与化学组分估算的接近^[11]. 然而,PM_{2.5}的光学特性与污染源之间的关系研究相对较少.

长三角地区是我国经济社会发展最快的地区之一,包含上海、江苏和浙江等这些人口密集的大中型城市,细颗粒物污染事件频繁发生. 细颗粒污染的观测分析大多只是单个站点,为了解长三角区域性颗粒物污染的空间分布特征,及其消光特性和源贡献,实验选取了南京(郊区站)、苏州(市区站)和临安(区域背景站)这3个站点同时进行外场观测. 基于PM_{2.5}化学成分的源解析结果,结合IMPROVE公式的消光计算,定量估算出导致能见度降低的源贡献,这为改善能见度的策略制定提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验时间和地点

2015年1月16~26日,在长三角地区分别选取在南京(118.72°E, 32.21°N, 22 m)、苏州(120.38°E, 31.22°N, 3 m)和临安(119.43°E, 30.13°N, 322 m)同时进行了PM_{2.5}的采集实验. 根据采样点的当地环境不同,苏州代表城市点(商业居民区, 42个样本),南京站点代表郊区点(工业区, 41个样本),临安代表区域背景站(山区本底站, 38个样本). 这些站点的位置如图1所示.

1.2 观测仪器和数据来源

采用中流量空气采样器(KC-120H, 青岛崂山),每6 h(03:00~08:40、09:00~14:40、15:00~20:40和21:00~次日02:40)采集环境PM_{2.5}样品,空气流速为100 L·min⁻¹. 石英滤膜(美国PALL, 90 mm)在

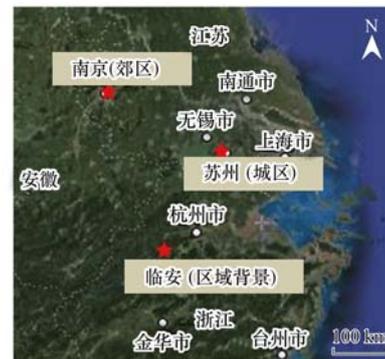


图1 观测采样点的位置分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites

使用前进行800℃烘焙5 h,且在采样前后的72 h置于恒温(25℃)和恒湿(50%)的干燥器中干燥. 直到预处理前,滤膜样品保存在-18℃以下. 用分辨率为10 μg的电子微天平(Mettler Toledo MS-105)称量颗粒物质量. 为了质量保证/质量控制(QA/QC),在采样期间收集了3个现场空白样本并进行了分析. 每个过滤器至少测量3次,取平均.

有机碳(OC)和元素碳(EC)由热/光碳分析仪(DRI Model 2001, US)分析. 为了QA/QC,每天使用已知量的CH₄来校准分析仪. 每10个样品中取一个重复测量,重复分析得到的差值应小于总碳的5%,且小于OC或EC的10%. OC和EC的DL(detection limit, 检出限)分别为0.45 μg·cm⁻²和0.06 μg·cm⁻².

负载有颗粒物的另一半滤膜则采用超声波萃取系统进行预处理,来进行水溶性离子分析. 使用850Professional离子色谱仪(瑞士Metrohm)测定了离子(Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻). 色谱柱为Metrosep C4150/4.0分离柱和Metrosep A Supp 5150/4.0分离柱. 柱温为30℃,流速为1.0 mL·min⁻¹,进样量为20 μL. Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻的DL分别为0.001、0.005、0.001、0.002、0.001、0.04、0.01、0.04、0.006和0.05 mg·L⁻¹.

CO浓度由一氧化碳分析仪(Thermo Electron, 48i)在线采样测量,DL为0.04 × 10⁻⁶,并每周校准一次. 相关的气象数据(如温度、湿度、风向风速、降水和能见度等)是由当地的中国气象局地面气象观测站提供,时间分辨率为1 h.

1.3 消光系数及其源分配的计算方法

(1)根据IMPROVE公式算法,不同的化学成分对细颗粒物的消光效果有不同的影响. 硫酸铵、硝酸铵和有机物是颗粒物光散射的主要贡献者^[12],元素碳是颗粒物光吸收的主要成分,土壤项和氯化物

只占细颗粒物质量的很小一部分,所以在消光系数的计算中忽略不计^[13]. 因此,修改后的 $PM_{2.5}$ 消光系数 ($B_{\text{ext_chemical}}$) 估计如下:

$$B_{\text{ext_chemical}} = 3f_{(\text{RH})} \times 1.375\text{SO}_4^{2-} + 3f_{(\text{RH})} \times 1.29\text{NO}_3^- + 4 \times 1.8\text{OC} + 10\text{EC} \quad (1)$$

式中,离子的质量浓度单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 吸湿生长因子 $f_{(\text{RH})}$ 是无量纲值,见文献^[14].

(2) 根据 Koschmieder 公式^[15], 利用能见度的观测数据可以估算出大气消光系数 ($B_{\text{ext_vis}}$):

$$B_{\text{ext_vis}} = 3.912/\text{VIS} \times 1000 \quad (2)$$

式中, VIS 为观测能见度 (km); 3.912 是 Koschmieder 常数. 有研究发现常数 1.97 更加适合本地区^[16,17]. 故公式(2)修改为:

$$B_{\text{ext_vis}} = 1.97/\text{VIS} \times 1000 \quad (3)$$

(3) 基于 $PM_{2.5}$ 中各化学成分的源解析结果, 各个源对 $PM_{2.5}$ 消光系数的贡献比可以计算如下: 首先, 矩阵 $B_i = [b_i]$, 式中, b_i 是第 i 个消光分量对消

光系数的百分比(%), i 是消光分量的个数 ($i = 1, 2, \dots, I$). 其次, 矩阵 $C_{I \times J} = [c_{ij}]$ 可以从 PMF 结果中得到, 式中, c_{ij} 表示第 j 个源对第 i 个消光分量浓度的贡献率(%), j 是源的个数 ($j = 1, 2, \dots, J$). 第三, 矩阵 $A_j = [a_j] = B_i C_{I \times J}$, 式中 $a_j = \sum_{i=1}^I b_i \cdot c_{ij} \times 100\%$ 是第 j 个源对消光系数的百分比.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 浓度及其化学成分特征

观测期间 3 个站点苏州、南京和临安的 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别达到 (169.8 ± 56.5) 、 (169.9 ± 51.2) 和 $(154.0 \pm 54.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均超过国家空气质量二级区 24 h 浓度标准 $(75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ ^[18] 两倍以上, 说明这是长三角地区一次严重的细颗粒物污染过程. 如图 2, 整体上 3 个站点的 $PM_{2.5}$ 浓度、风向风速、温度和湿度等气象要素呈现较强的同步性. 1 月 16 ~ 22

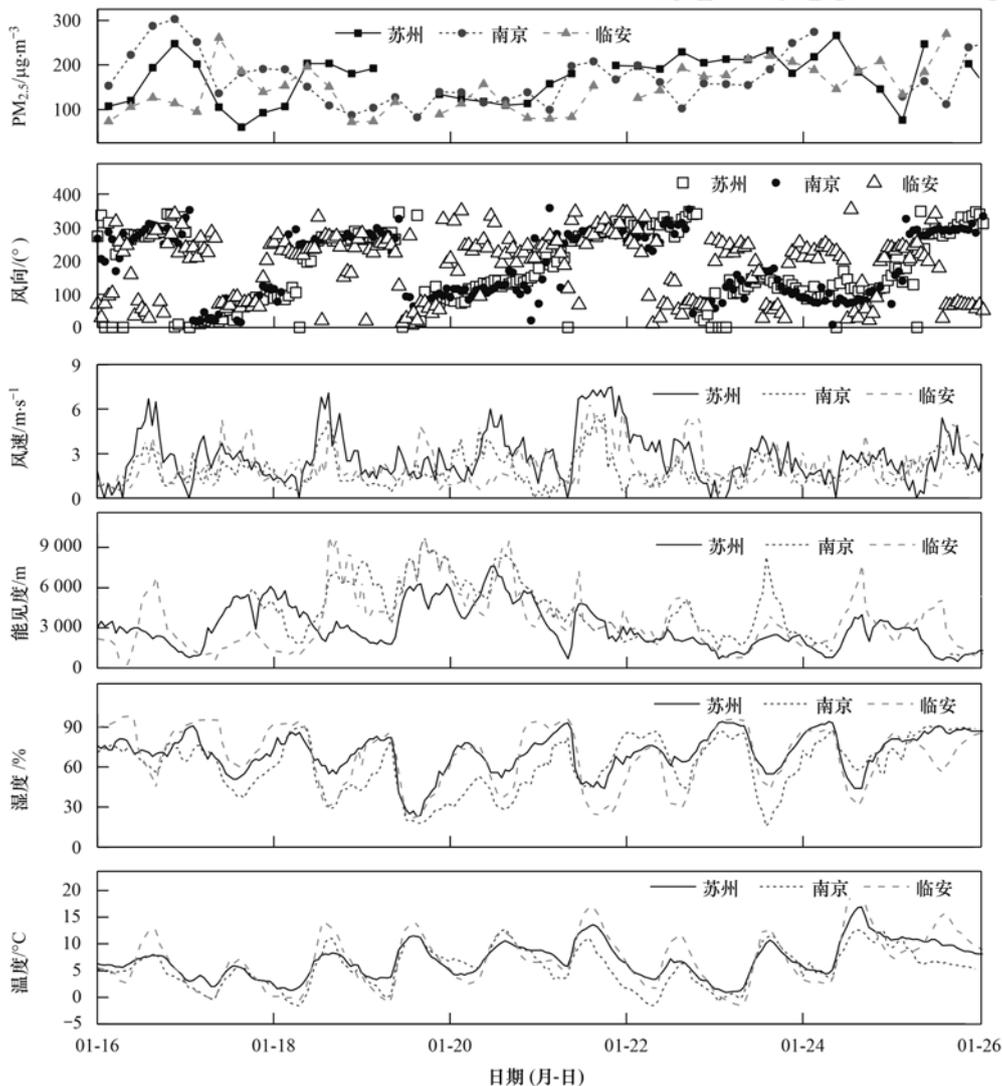


图 2 $PM_{2.5}$ 浓度和相关气象要素的时间变化

Fig. 2 Temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and related meteorological elements

日受冷锋南下的天气系统影响,长三角地区风向偏北风,风速较大,平均 $(2.0 \pm 1.2) \sim (3.0 \pm 1.8) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最高达 $7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 1月23~26日长三角地区受高压系统控制,风向偏东南风,风速较低,平均 $(1.8 \pm 0.8) \sim (2.2 \pm 1.1) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 根据 WRF-CMAQ (weather research and forecasting-community multiscale air quality modeling system) 模式模拟研究^[19],观测期间的细颗粒物污染在1月22日之前主要由于北方污染物远距离传输,1月23~26日主要是本地污染物累积. 观测期间苏州、南京和临安的湿度分别是 $(71 \pm 13)\%$ 、 $(63 \pm 19)\%$ 和 $(75 \pm 20)\%$,温度分别是 (7.0 ± 3.0) 、 (5.6 ± 3.3) 和 $(7.1 \pm 4.5)^\circ\text{C}$.

散度系数(CD)常常用来衡量不同地点数据的空间均匀性. CD值按如下方式确定:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2} \quad (4)$$

式中, x_{ij} 和 x_{ik} 表示化学组分(i)在站点(j 和 k)的浓

表1 夜间和白天 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC的浓度值及OC/EC值(平均值 \pm 标准差)

Table 1 Diurnal variations in the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, OC, EC, and OC/EC values (mean \pm standard deviation)

组分	白天(09:00~14:40和15:00~20:40)			夜间(21:00~02:40和03:00~08:40)		
	苏州	南京	临安	苏州	南京	临安
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	179.5 \pm 53.9	157.4 \pm 50.1	173.4 \pm 50.3	161.9 \pm 46.2	174.5 \pm 55.3	133.7 \pm 50.7
OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	29.7 \pm 10.0	25.2 \pm 7.8	30.1 \pm 8.5	26.0 \pm 5.7	24.6 \pm 7.1	26.4 \pm 10.6
EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	7.2 \pm 2.7	7.1 \pm 2.8	8.2 \pm 2.8	7.2 \pm 2.6	7.3 \pm 2.7	7.8 \pm 3.3
OC/EC	4.3 \pm 1.0	3.8 \pm 0.8	3.6 \pm 0.8	3.9 \pm 0.9	3.5 \pm 0.7	3.9 \pm 1.1

$\text{PM}_{2.5}$ 的离子成分中,二次无机盐 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 质量浓度最高,与 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度比值在3个站点比较接近,分别占26%~27%、20%~21%和14%~16%. Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度之间非常高的相关性($R > 0.90$),表明 Mg^{2+} 的主要来源是与地壳矿物有关的粉尘^[22]. 离子的等效浓度($\mu\text{eq}\cdot\text{m}^{-3}$)关系分析, Cl^-/K^+ 等效浓度比值是1.80~4.82,远高于生物质燃烧的比值(1.0). Cl^-/Na^+ 等效浓度比值为5.75~9.40,显著大于海水的平均比值(1.17)^[23]. 离子(如 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 K^+)可分为海盐和非海盐两种. 假设颗粒物中的 Na^+ 只来自海盐,非海盐离子质量浓度(nss- X)可用如下

表2 3个站点的非海盐离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 K^+)浓度及所占比例

Table 2 Concentrations and proportions of non-sea salt ions (SO_4^{2-} , Cl^- , and K^+) at three sites

站点	SO_4^{2-} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	K^+ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Cl^- / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	nss- SO_4^{2-} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	nss- K^+ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	nss- Cl^- / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	nss- $\text{SO}_4^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$ /%	nss- K^+/K^+ /%	nss- Cl^-/Cl^- /%
苏州	24.12	1.20	5.65	24.02	1.18	4.94	99.6	98.8	87.3
南京	23.78	1.62	6.97	23.69	1.60	6.27	99.6	99.1	90.0
临安	21.65	1.39	2.67	21.55	1.38	1.97	99.5	99.0	73.6

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 消光系数的分析

严重的颗粒物污染降低了能见度,观测期间苏

度, p 是样品的数量^[20]. CD值为0表示不同地点的浓度没有差异,而接近1的值表示存在很大的差异或绝对的不均匀性. Wongphatarakul等^[21]的研究认为,CD值小于0.27可以反映出两个站点颗粒物之间的相似性. 计算结果显示3个位点之间的气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的CD值大多在0.14~0.35之间,说明这3个地点之间气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分的差异很有限,反映了污染过程呈现区域化特征.

OC和EC是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组分,EC通常代表了一次燃烧的排放,OC包含一次排放和二次生成. OC和EC的平均浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分别是27.7和7.2(苏州)、24.9和7.2(南京)以及28.3和7.9(临安). 白天和夜间的 $\text{PM}_{2.5}$ 、OC、EC浓度及OC/EC值的比较分析(表1), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在苏州和临安是白天高于夜间($P = 0.003 < 0.05$),南京反之. 3个采样点OC浓度均白天高于夜间($P = 0.007 < 0.05$),EC浓度昼夜相近. OC/EC比值均白天较高($P = 0.005 < 0.05$),说明白天的二次有机物生成更加剧烈.

公式来估算:

$$\text{nss-}X = [X] - [\text{Na}^+] \times C_{(X)} \quad (5)$$

式中, $[X]$ 和 $[\text{Na}^+]$ 代表该离子和钠离子的质量浓度, $C_{(X)}$ 为固定系数,分别为0.2455(SO_4^{2-})、1.727(Cl^-)和0.0355(K^+)^[24]. 如表2所示,nss- SO_4^{2-} 和nss- K^+ 占可溶性 SO_4^{2-} 和 K^+ 离子的98.8%~99.8%,说明 SO_4^{2-} 和 K^+ 基本全部来自二次生成和生物质燃烧. nss- Cl^- 占73.6%~90.0%,结合 Cl^-/Na^+ 和 Cl^-/K^+ 等效浓度比值较大,说明 Cl^- 除了来自海盐,大部分来自燃料燃烧,例如燃煤等^[25]. 另外,非海盐离子的占比在南京最高,在临安最低,可能与南京距离海洋更远有关.

州、南京和临安的能见度分别是 (2.95 ± 1.56) 、 (4.11 ± 2.19) 和 $(3.26 \pm 1.90) \text{ km}$,苏州和临安的

能见度较低,南京最高. 使用两种消光系数的估算方法,分别是 IMPROVE 化学成分估算法和能见度法估算法. 根据 IMPROVE 化学成分估算出的苏州、南京和临安 $PM_{2.5}$ 消光系数 ($B_{ext_chemical}$) 分别为 (561 ± 223) 、 (655 ± 340) 和 (679 ± 349) Mm^{-1} . 通过能见度观测值估算苏州、南京和临安的消光系数 (B_{ext_vis}) 分别为 (852 ± 489) 、 (692 ± 484) 和 (880 ± 590) Mm^{-1} . 化学成分法比能见度法的消光系数低,分别占 0.62、0.83 和 0.69,主要因为化学成分法采用了近似,忽略了粗颗粒物和其他低含量的化学成分(如土壤、海盐和金属元素等),及与吸湿生长因子的适用性等等有关. 另一方面,化学成分法和能见度法估算出的消光系数的相关性较好,相关系数 r 分别为 0.74(苏州)、0.73(南京)和 0.80(临安),说明 IMPROVE 化学成分法能够为本地区提供合理的消光系数估算. 与本研究结果类似,如 Yu 等^[26]在南京地区研究发现化学成分法与能见度法的消光系数比例是 0.80,相关系数为 0.56; Bai 等^[27]在武汉地区的分析结果是两者相关系数为 0.6.

根据 IMPROVE 算法估算出重建 $PM_{2.5}$ 的质量浓度,苏州、南京和临安分别是 (130.5 ± 45.6) 、 (128.3 ± 48.2) 和 (124.9 ± 50.4) $\mu g \cdot m^{-3}$. 结果显示重建的与观测的细颗粒物质量浓度之间相关度很高(0.90~0.98),占观测 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 80% 左右. 在重建的细颗粒物质量浓度(RCFM)中,有机物(36%~42%)、硝酸铵(28%~31%)和硫酸铵(24%~28%)是主要成分,EC(5%~6%)是次要成分. 在对消光作用的贡献比例上,有机物仍然占比最大,但比例有所下降,占 28%~36%. 其次是硫酸铵(25%~29%)和硝酸铵(27%~32%). EC 虽然是 $PM_{2.5}$ 中的光吸收组分,但由于其所占质量分数较低,对消光系数的贡献相对较小(约 11%). 另一方面,临安的 $PM_{2.5}$ 重建质量浓度最低,但其消光系数是 3 个站点中最大,主要因为临安的相对湿度(75%)高于南京(63%)和苏州(71%).

2.3 $PM_{2.5}$ 质量浓度及消光系数的源贡献

EPA PMF 模型广泛用于来源解析,PMF v5.0 能够读取多个站点的数据^[28],散度系数的分析反映了 3 个采样点 $PM_{2.5}$ 的化学特征是相似的,因此 121 个样本可以合并处理. 排除 Cl^- 中海盐部分的干扰,用 $nss-Cl^-$ 浓度代替 Cl^- 浓度输入模型. 另外,CO 是不完全燃烧产物,且在空气中化学性质相对稳定^[29],为更好地解释来源类别,增加了同时期的 CO 浓度. 模型输入数据包含浓度文件和不确定性文件^[30]. 浓度值 $\geq DL$ 时,其每个值对应的不确定度

为 $(0.05 \times \text{浓度} + DL)$,而对于浓度值 $< DL$,其不确定度为 $(5 \times DL/6)$,浓度用 $DL/2$ 代替. 信噪比低 ($S/N \leq 0.2$) 的物质或超过 70% 的数据低于 DL 的物种应在分析中删除. 多次测试运行之后,发现 7 个因子数最合适. 每种化学成分的模拟结果与观测结果的拟合度达 $r^2 > 0.8$,说明 PMF 模拟结果可靠.

模拟结果中源成分谱显示在图 3 中,因子 1 对 CO 的贡献率很高,CO 是不完全燃烧产物,如汽车发动机燃烧和垃圾焚烧产生的,故因子 1 统称为不完全燃烧. 因子 2 与 Cl^- 和 NO_2^- 浓度高度相关, Cl^- 是燃烧的示踪物,尤其是煤碳燃烧,广泛应用于发电厂^[31]. 所以因子 2 是燃料燃烧源. 因子 3 主要负载在 NO_3^- 和 NH_4^+ 上,表明是二次硝酸源. 因子 4 对 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的载荷很高,主要是二次硫酸源. 因子 5 与 K^+ 、EC 和 OC 相关度很高, K^+ 是生物质燃烧的典型组分,所以因子 5 是生物质燃烧源. 因子 6 主要负载在 Na^+ 上,通常来自海盐来源,所以是海洋源. 因子 7 中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的贡献率较高,表明是地壳土壤源.

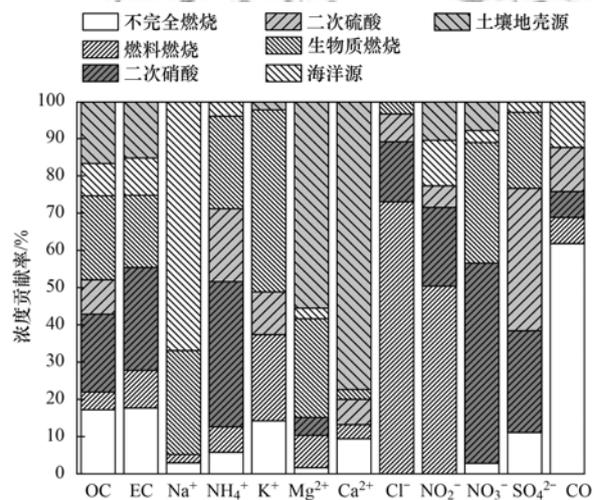


图 3 PMF 模拟的 $PM_{2.5}$ 源成分谱结果

Fig. 3 Source profiles of $PM_{2.5}$ as modeled using PMF

根据模式运行结果, $PM_{2.5}$ 质量浓度的主要源贡献是二次生成的硝酸和硫酸(图 4),分别占 32% 和 25%,其次是生物质燃烧(16%)、土壤地壳源(8%)、不完全燃烧源(7%)、燃料燃烧(7%)和海洋源(5%). 3 个站点的源解析结果比较接近,其中南京的二次生成的硝酸硫酸源贡献占 61%,大于苏州(56%)和临安(52%).

根据不同的源对各化学组分质量浓度的贡献结果,估算出各排放源对 $PM_{2.5}$ 消光系数的贡献比. 3 个观测点的 $PM_{2.5}$ 消光系数源贡献结果比较接近,主要贡献源是二次生成的硝酸和硫酸源、不完全燃烧和生物质燃烧源,说明这三者对能见度削弱作用比

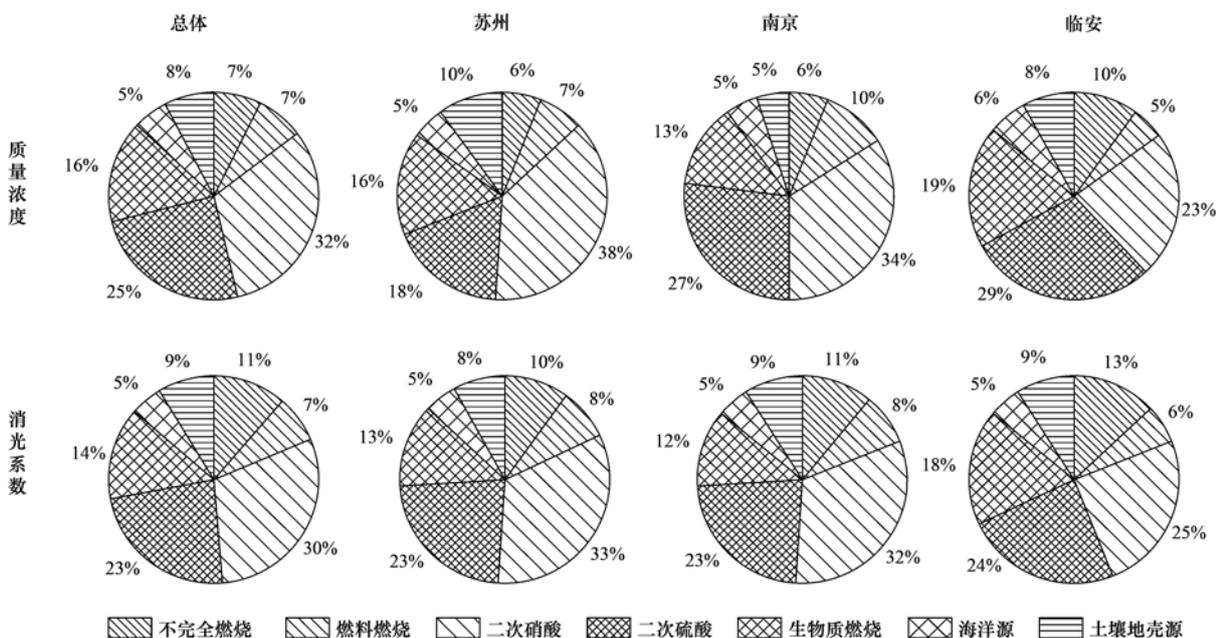


图 4 3 个站点的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和消光系数的源贡献比

Fig. 4 Source apportionment of $PM_{2.5}$ mass concentrations and extinction coefficients at three sites

较强. 与 $PM_{2.5}$ 质量浓度的源贡献结果对比, 显示: ①二次生成的硝酸和硫酸源对消光系数的总贡献是 53%, 比例降低了约 4%. 其中郊区点(南京)降低得最多(7%); ②不完全燃烧对消光的贡献是 12%, 贡献比例增大 5%. 这表明 $PM_{2.5}$ 的各类贡献源对其质量浓度和消光系数的贡献效率存在差别, 二次硝酸和硫酸源对消光系数的贡献效率降低, 不完全燃烧源的消光贡献率增加.

这类源解析受体模型 (IMPROVE) 的分析方法在其他研究中有着不同的结果. Wang 等^[32] 的研究发现, 杭州地区二次硝酸和机动车排放对消光系数的贡献比质量浓度的贡献有所增大. 李倩等^[33] 的研究发现在廊坊夏季二次无机盐对 $PM_{2.5}$ 消光系数的贡献增加, 而燃煤降低. Chen 等^[34] 的研究使用 PMF-Mie 耦合模型发现南京污染天的机动车和工业排放是降低能见度的主要源. 这类方法是在 $PM_{2.5}$ 化学成分浓度的源贡献基础上, 提取出 IMPROVE 公式中消光分量的化学成分 (即 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、OC 和 EC 等) 所对应的源贡献, 再进行矩阵计算方法估算出各个来源对消光系数的贡献. 其结果的误差来源存在于 3 个方面: ①基于模式运行的化学浓度源贡献误差传递给消光系数的源贡献估算; ② $PM_{2.5}$ 中化学成分浓度的测量误差和种类不全; ③ IMPROVE 公式中因子系数在不同地区的适用性误差. 各类排放源对能见度的定量贡献还有待进一步分析, 这将为提高能见度的政策制定提供依据和帮助.

3 结论

(1) 长三角地区冬季一次严重的细颗粒物污染过程中, 城市、郊区和背景站受同一个天气系统的影响, 表现出较强的同步性. 气象要素和 $PM_{2.5}$ 化学成分差异很有限, 反映了污染过程呈区域化.

(2) IMPROVE 化学成分法与能见度法估算的消光系数之间相关系数较高 (r 为 0.73 ~ 0.80), 说明 IMPROVE 化学成分法估算的消光系数能够为本地区提供合理的消光系数估算. 化学成分法比能见度法的消光系数低, 约占 0.7 ~ 0.8.

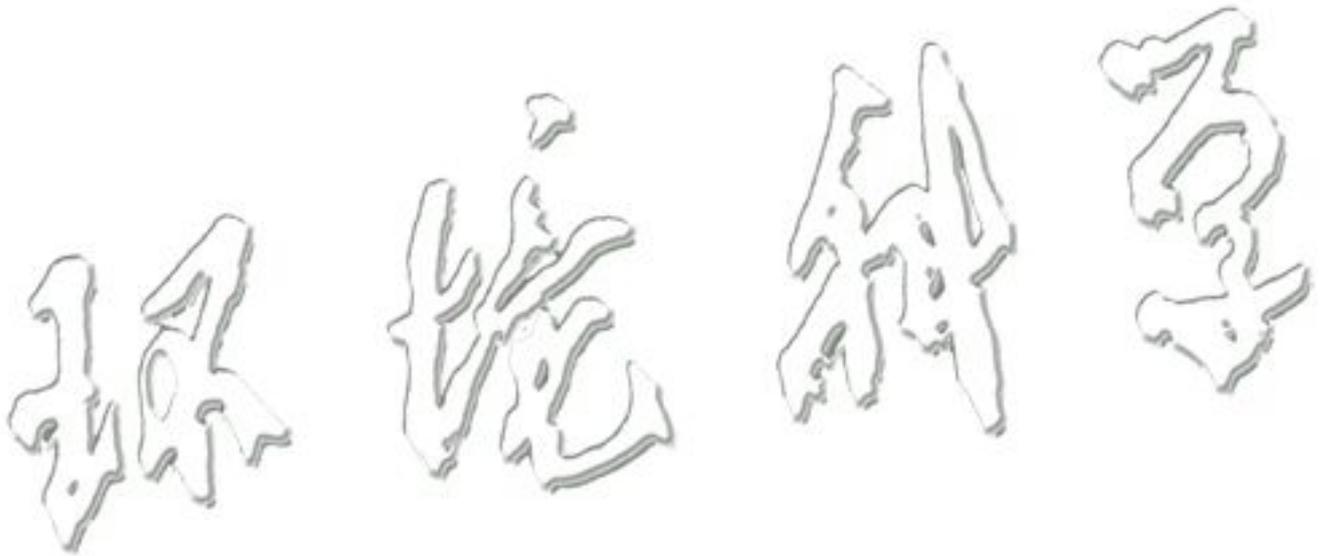
(3) PMF 模型运算结果显示, $PM_{2.5}$ 的质量浓度源贡献中二次硝酸 (32%) 和二次硫酸 (25%) 的占比最大, 其次是生物质燃烧 (16%)、土地地壳源 (8%)、不完全燃烧源 (7%)、燃料燃烧 (7%) 和海洋源 (5%). 3 个站点的源解析结果比较接近, 其中南京的二次生成的硝酸硫酸源贡献占比大于苏州和临安.

(4) $PM_{2.5}$ 的消光系数主要贡献源是二次生成的硝酸和硫酸源、不完全燃烧和生物质燃烧源. 与质量浓度的源贡献相比, 二次硝酸硫酸源的贡献平均减少了 4%, 其中南京降低最多 (7%). 其次不完全燃烧贡献平均增加了 5%. 说明各类来源对质量浓度和消光系数的贡献效率有差别, 对能见度的削弱能力不同. 这类源解析受体模型 (IMPROVE) 的分析方法在其他研究中有着不同的结果, 估算过程存在一些误差, 各类排放源对能见度的定量贡献还有待进一步分析.

参考文献:

- [1] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al.* Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 163-170.
- [2] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [3] Liang C S, Duan F K, He K B, *et al.* Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of $PM_{2.5}$ [J]. *Environment International*, 2016, **86**: 150-170.
- [4] 吕喆, 魏巍, 周颖, 等. 2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警 $PM_{2.5}$ 成因分析及效果评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
Lü Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of $PM_{2.5}$ during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [5] 沈建东, 焦荔, 徐昶, 等. 杭州市大气细颗粒物分粒径来源解析[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 367-373.
Shen J D, Jiao L, Xu C, *et al.* Source apportionment of size-resolved ambient fine particulate matter in Hangzhou[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **31**(3): 367-373.
- [6] 周敏. 上海大气 $PM_{2.5}$ 来源解析对比: 基于在线数据运用3种受体模型[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 1997-2005.
Zhou M. Comparison of three receptor models for source apportionment of $PM_{2.5}$ in Shanghai: using hourly resolved $PM_{2.5}$ chemical composition data[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 1997-2005.
- [7] 陈璞珑, 王体健, 胡忻, 等. 南京市细颗粒物来源解析研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2015, **51**(3): 524-534.
Chen P L, Wang T J, Hu X, *et al.* A study of chemical mass balance source apportionment of fine particulate matter in Nanjing[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2015, **51**(3): 524-534.
- [8] 王心培, 王格慧, 谢郁宁, 等. 长三角背景点夏季大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(6): 1366-1375.
Wang X P, Wang G H, Xie Y N, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of water-soluble inorganic ions of summertime atmospheric $PM_{2.5}$ in the background of Yangtze River Delta Region, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(6): 1366-1375.
- [9] 王继康, 张恒德, 桂海林, 等. 能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度关系及其分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2985-2993.
Wang J K, Zhang H D, Gui H L, *et al.* Relationship between atmospheric visibility and $PM_{2.5}$ concentrations and distributions[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2985-2993.
- [10] 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 等. 济南市背景区域大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及其对能见度的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3868-3874.
Bie S J, Yang L X, Gao Y, *et al.* Characteristics of atmospheric $PM_{2.5}$ pollution and its influence on visibility in background areas of Ji'nan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3868-3874.
- [11] 刘兴瑞, 马嫣, 崔芬萍, 等. 南京北郊一次重污染事件期间 $PM_{2.5}$ 理化特性及其对大气消光的影响[J]. *环境化学*, 2016, **35**(6): 1164-1171.
Liu X R, Ma Y, Cui F P, *et al.* Physicochemical characteristics of $PM_{2.5}$ and impacts on light extinction during the heavy pollution period at North Suburban Nanjing[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(6): 1164-1171.
- [12] 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.
- [13] Hsu S C, Liu S C, Tsai F, *et al.* High wintertime particulate matter pollution over an offshore island (Kinmen) off southeastern China: an overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D17), doi: 10.1029/2009JD013641.
- [14] 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.
- [15] Koschmieder H. Theorie der horizontalen Sichtweite [J]. *Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre*, 1924, **12**: 33-53.
- [16] 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.
Gao L, Qiu Y J, Zhu B. An observation study of aerosol scattering properties in northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 22-28.
- [17] 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.
- [18] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [19] Kang H Q, Zhu B, Gao J H, *et al.* Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(6): 3673-3685.
- [20] Cesari D, Donato A, Conte M, *et al.* An inter-comparison of $PM_{2.5}$ at urban and urban background sites: chemical characterization and source apportionment [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **174-175**: 106-119.
- [21] Wongphatarakul V, Friedlander S K, Pinto J P. A comparative study of $PM_{2.5}$ ambient aerosol chemical databases [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(24): 3926-3934.
- [22] Li G J, Chen J, Chen Y, *et al.* Dolomite as a tracer for the source regions of Asian dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D17), doi: 10.1029/2007JD008676.
- [23] Chester R. Marine geochemistry[M]. London: Unwin Hyman, 1990. 698.
- [24] Morales J A, Pirela D, de Nava M G, *et al.* Inorganic water soluble ions in atmospheric particles over Maracaibo Lake Basin in the western region of Venezuela[J]. *Atmospheric Research*, 1998, **46**(3-4): 307-320.
- [25] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [26] Yu X N, Ma J, An J L, *et al.* Impacts of meteorological condition and aerosol chemical compositions on visibility impairment in Nanjing, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **131**: 112-120.
- [27] Bai D P, Wang H L, Tan Y, *et al.* Optical properties of aerosols and chemical composition apportionment under different pollution levels in Wuhan during January 2018 [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(1), doi: 10.3390/atmos11010017.
- [28] 皇甫延琦, 田瑛泽, 董世豪, 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.
- [29] Geng F H, Cai C J, Tie X X, *et al.* Analysis of VOC emissions using PCA/APCS receptor model at city of Shanghai, China[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2009, **62**(3): 229-247.
- [30] Brown S G, Eberly S, Paatero P, *et al.* Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 626-635.
- [31] Yudovich Y E, Ketris M P. Chlorine in coal: a review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, **67**(1-2): 127-144.
- [32] Wang J, Zhang Y F, Feng Y C, *et al.* Characterization and source apportionment of aerosol light extinction with a coupled model of CMB-IMPROVE in Hangzhou, Yangtze River Delta of China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 570-579.
- [33] 李倩, 吴琳, 张进生, 等. 廊坊市夏季大气气溶胶消光特性及其来源[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
- Li Q, Wu L, Zhang J S, *et al.* Extinction characteristics of aerosol and the contribution of pollution source to light extinction in Langfang[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2249-2257.
- [34] Chen D, Zhao Y, Zhang J, *et al.* Characterization and source apportionment of aerosol light scattering in a typical polluted city in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2020, doi: 10.5194/acp-2020-176.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} 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 _{2.5} -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 Wuliangshai 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 Wuliangshai	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 ₂ 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)