

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, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间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, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气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, 赵峰, 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	于宗灵, 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, 谢慧君, 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, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 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)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、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, 王鑫燕, 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, 徐民氏, 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	李源遽, 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)	

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^{1,2}, 乔利平^{2*}, 周敏², 黄丹丹², 安静宇², 郭会琴^{1,3*}, 王红丽², 黄成², 董赵鑫^{4,5}, 王书肖^{4,5}

(1. 南昌航空大学环境与化学工程学院, 南昌 330063; 2. 上海市环境科学研究院国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 3. 江西省持久性污染物控制与资源循环利用重点实验室, 南昌 330063; 4. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 5. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 于2019年10月15日~11月7日对上海大气中颗粒物的质量浓度和PM_{2.5}的化学组分进行了在线连续观测, 期间, 华东地区遭遇了一次大范围的沙尘过程。根据相关规定, 结合沙尘示踪组分和WRF-CMAQ数值模拟, 将观测过程分为4个阶段: 沙尘前、沙尘I (输送和滞留过程)、沙尘II (海上回流和清除过程) 和沙尘后。基于相关规定、沙尘示踪物和空气质量模型这3种方法判定的沙尘开始时间为10月29日08:00~09:00, 但结束时间存在明显分歧; 相关规定的判定方法无法对海上回流的沙尘气团进行识别; 不同示踪物判断的沙尘结束时间有明显差异; WRF-CMAQ模型虽然能够较好地模拟沙尘的时间变化趋势, 但对于短期滞留的沙尘和海上回流沙尘存在高估。沙尘天气中PM₁₀、PM_{2.5}和无机元素的质量浓度显著高于非沙尘天, 最高日均浓度出现在10月29日, 分别为(234.8 ± 125.5)、(76.8 ± 22.5)和(17.54 ± 10.5) μg·m⁻³。沙尘期间地壳元素对PM_{2.5}的浓度贡献显著升高, 二次离子(SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺)对PM_{2.5}的浓度贡献明显降低, 沙尘I和沙尘II过程Al、Si、Ca和Fe这4种地壳元素占PM_{2.5}的质量分数分别为23.5%和13.7%, 二次离子分别占PM_{2.5}的质量分数为24.3%和41.9%。PMF源解析法、Ca含量丰度法、沙尘源区PM_{2.5}/PM₁₀比值法和地壳物质重构法表明, 沙尘颗粒对PM_{2.5}的直接浓度贡献为43.4%~50.0%, 回流沙尘对PM_{2.5}的浓度贡献为19.2%~24.7%。

关键词: 沙尘过程; 回流沙尘; 沙尘示踪物; 起止时间; WRF-CMAQ数值模拟; 沙尘贡献

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0584-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006120

Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling

ZHANG Zhe^{1,2}, QIAO Li-ping^{2*}, ZHOU Min², HUANG Dan-dan², AN Jing-yu², GUO Hui-qin^{1,3*}, WANG Hong-li², HUANG Cheng², DONG Zhao-xin^{4,5}, WANG Shu-xiao^{4,5}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of the Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Key Laboratory of Jiangxi Province for Persistent Pollutants Control and Resources Recycle, Nanchang 330063, China; 4. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: Continuous on-line observation of particulate matter and PM_{2.5} chemical composition was conducted from October 15th to November 7th 2019 in East China. During the observation period, a wide range of dust-related processes took place. According to supplementary urban air quality assessment affected by dust (hereafter referred to as supplementary provisions), the observations were divided into four stages including pre-dust event, dust I, dust II, and post-dust event. The dust I stage represented the processes of transportation and retention, while the dust II stage represented processes of backflow from the sea and scavenging. The start time of the studied dust event was October 29th 08:00-09:00 based on the supplementary provisions, dust tracers, and air quality models; however, disagreements existed between these data sources with respect to the finishing time. The supplementary provisions could not effectively distinguish backflow dust from sea, and results from different dust tracers were variable. The WRF-CMAQ model simulated dust variation trends well but overestimated short-term suspended dust and backflow dust. PM₁₀, PM_{2.5}, and trace element concentrations were much higher during dust events than during non-dust periods, with highest daily concentrations of (234.8 ± 125.5), (76.8 ± 22.5), and (17.54 ± 10.5) μg·m⁻³, respectively, which occurred on October 29th. During the dust event,

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213800); 南昌航空大学研究生创新专项(YC2018007)

作者简介: 张哲(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为颗粒物化学组分, E-mail: signorcheung@163.com

* 通信作者, E-mail: qiaolp@saes.sh.cn; guohuiqin@nchu.edu.cn

concentration of crustal elements were remarkably high in $PM_{2.5}$. At the same time, secondary ions (SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+) contributed less to $PM_{2.5}$ mass concentrations. Four major crustal elements (Al, Si, Ca, and Fe) accounted for 23.5% and 13.7% of the mass concentration of $PM_{2.5}$ and secondary ions accounted for 24.3% and 41.9% during dust I and dust II stages, respectively. Based on PMF source apportionment, Ca abundance, $PM_{2.5}/PM_{10}$ in dust sources, and the reconstruction of crustal material, dust particulates accounted for 43.4%-50.0% of $PM_{2.5}$ and backflow dust accounted for 19.2%-24.7% of $PM_{2.5}$.

Key words: dust process; back-flow dust; tracer components; beginning and ending time; WRF-CMAQ model; dust contribution

颗粒物污染已经成为影响我国城市空气质量的重要环境问题^[1]. 以 $PM_{2.5}$ (细颗粒物) 为首要污染物的灰霾天气, 显著降低能见度, 威胁人体健康, 其化学组成复杂, 主要包括 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、OC、EC 和地壳元素等^[2]. 以 PM_{10} 为主的粗颗粒物在东亚的远距离传输途经戈壁荒漠、水土流失带和人为污染高排放的城市群, 随气团输送的矿质颗粒和大量污染物充分混合、相互作用, 给下风区域的空气质量造成极大影响^[3, 4]. 近海回流陆地的颗粒物更呈现多污染物共存、多污染源叠加、多尺度关联、多过程耦合和多介质影响的特征^[5].

开展颗粒物来源解析可为制定针对性防治措施和实现精准污染管控提供科学依据^[6]. 颗粒物源解析方法主要包括从污染源出发的空气质量扩散模型和以受体采样点为研究对象的受体模型^[7]. 受体模型法的不确定性主要来自颗粒物采集和化学物种分析过程的误差、源成分谱的共线性以及二次来源的识别等^[8]. 空气质量模型不受观测点位局限, 可根据需要选择目标区域开展源解析研究, 其不确定性主要来自气象场模拟和排放清单等^[9]. 目前已有大量研究采用正定矩阵因子法 (PMF)、化学质量平衡法 (CMB)、主成分分析法 (PCA) 和多元线性模型 (ME2) 等方法对颗粒物进行来源解析, 但基于空气质量模型和数值模拟等方法进行颗粒物源解析的研究仍然较少^[10].

沙尘是我国频繁发生的一类自然灾害, 侵袭我国的沙尘主要来源于西北干旱地区的塔克拉玛干沙漠和内蒙古半干旱地区的戈壁沙漠^[11], 地面观测^[12]、卫星遥感^[13]和气象模型^[14, 15]等方法广泛应用于沙尘频率和分布的研究中. 得益于尘源区植被的增加, 2007~2016年间我国沙尘天气的次数明显减少, 其强度明显减弱^[16]. 随着大气污染防治工作的不断深入, 环境空气管理的精细化要求随之提高, 客观评价环境空气质量状况及其变化趋势是检验和评估大气污染防治措施实施效果的重要保障^[17]. 沙尘天气作为一种不可抗力因素, 对环境空气质量考核和月度城市空气质量排名有较大影响, 国际上在进行类似情景的评估时, 通常会扣除沙尘天气等事件的影响, 例如美国环保署 (EPA) 专门编制了剔除受强风沙尘天气影响^[18]的空气质量数据的指导

性文件^[19]. 生态环境部结合我国环境管理实际需求, 于2017年1月印发了《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》^[20], 其实施两年多以来, 总体上消除了沙尘天气对空气质量考核结果的影响, 客观反映了各地区大气污染防治成效, 但仍存在判定方法不够完善、部分地区扣除沙尘影响的污染天数统计结果与公众感受不一致等问题^[21].

2019年10月29日, 受北方沙尘输送影响, 长三角部分城市遭遇以 PM_{10} 为首要污染物的重度及严重污染. 10月30~31日, 整个长江中下游地区为均压场形势, 大气中的粗颗粒物无法快速沉降, 沙尘气团在长三角地区滞留, 11月1日, 沙尘东移出海, 影响减弱, 次日, 沙尘气团回流陆地并逐渐减弱. 本研究基于上海市环境科学研究院城市大气复合污染观测基地的在线连续观测数据, 利用文献^[20]的方法、示踪物法和 WRF-CMAQ 数值模拟等方法, 判断了沙尘的起止时间, 分析了沙尘期间上海大气 $PM_{2.5}$ 的化学组成及变化特征, 同时对比了4种方法 (PMF 源解析法、Ca 含量丰度法、沙尘源区 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值法和地壳物质重构法), 探讨了沙尘对上海市 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献.

1 材料与方法

1.1 观测地点

观测地点为上海市环境科学研究院城市大气复合污染观测基地, 位于院内培训楼五楼楼顶 (31.17°N, 121.43°E), 采样口距离地面约15 m. 该站点位于上海市中心城区西南角, 毗邻居民区, 周边以商业区和居民区为主, 南面150 m处是城市主干道漕宝路, 东面500 m处是沪闵高架路, 与上海市空气质量监测国控点 (上师大) 相距1500 m. 站点周边2 km范围内无明显工业大气污染源, 下垫面状况与上海市城区类似, 基本代表了上海市城区的空气质量状况.

1.2 观测内容和观测仪器

颗粒物质量浓度 (PM_{10} 和 $PM_{2.5}$) 采用 1405F 锥形传感器振荡微天平 (Thermo Fisher Scientific Inc.) 进行测量, 时间分辨率 1 min.

$PM_{2.5}$ 中的水溶性组分 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+}) 采用在线气溶胶和气体组

分监测系统^[22] (MARGA ADI 2080, Applikon Analytical B. V.) 进行测量, 采样流量 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间分辨率 1 h, 吸收液为 H_2O_2 溶液 (0.003 5%); 阴离子分离柱为 Metrosep A Supp 10-75/4.0, 淋洗液为 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 混合溶液 ($\text{Na}_2\text{CO}_3: 7.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaHCO}_3: 8.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 抑制剂为 H_3PO_4 ; 阳离子分离柱为 Metrosep C4-100/4.0, 淋洗液为甲磺酸溶液 ($3.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$). K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的最低检测限分别为 0.16、0.12 和 $0.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其他离子的最低检测限为 $0.10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 或更高^[23].

$\text{PM}_{2.5}$ 中的有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 采用基于热光法原理的半连续 OC/EC 分析仪^[24] (RT-4, Sunset Laboratory Inc.) 进行测量, 采样流量 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间分辨率 1 h (其中采样 45 min, 分析 15 min), 采用二阶升温程序 (He 气氛: $600^\circ\text{C} \rightarrow 840^\circ\text{C}$, $2\% \text{ O}_2 + 98\% \text{ He}$ 气氛: $550^\circ\text{C} \rightarrow 650^\circ\text{C} \rightarrow 870^\circ\text{C}$), OC、EC 的最低检测浓度均为 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

$\text{PM}_{2.5}$ 中的 20 种无机元素 (Al、Si、S、Cl、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ba、Ag、Cd、Hg 和 Pb) 采用 Xact625 多金属连续在线监测系统 (Cooper Environmental Services, USA) 进行测量.

1.3 研究方法

1.3.1 WRF-CMAQ 模型

WRF (weather research and forecasting model) 是一种先进的中尺度数值气象模拟系统, 模型的运算程序由一系列完全可压缩非静力方程组成, 对云微物理过程、边界层过程、陆面过程和长短波辐射过程等一系列大气物理过程提供参数化方案, 用户将地形和气象数据输入自定义的网格中, 可为化学传输模型提供较为准确的气象驱动场.

CMAQ (community multiscale air quality) 是第三代空气质量三维化学传输模型, 采用多尺度和可嵌套的欧拉三维模式网格, 与 WRF 气象模型耦合, 可用于模拟空气中污染物的浓度及传输扩散过程.

本研究使用 WRF v3.4 和 CMAQ v5.0.2 版本, 结合 CB05 气相化学机制和 AERO6 气溶胶化学模块, 垂直方向上采用地形跟随坐标 (Sigma 坐标), 共分为 30 个气压层, 层间距自下而上逐渐增大; 水平方向采用兰伯特地图投影, 坐标系原点选取: 36.5°N , 102°E . 模型采用三层嵌套, 空间分辨率分别为 36、12 和 3 km, 第三层区域覆盖上海及周边地区. 气象初始条件数据来自美国 NCAR/NCEP 的全球资料同化系统的 FNL 全球气象再分析数据, 土地利用数据来自 MODIS 土地利用资料. 空气质量模型采用敏感性测试法 (或称强力法) 研究沙尘的贡献, 即

将考虑沙尘源排放条件下模拟得到的 PM_{10} 浓度与不考虑该类源排放的结果进行比较, 用两次模拟的 PM_{10} 浓度差值表示沙尘的贡献.

为量化数值模拟的准确性, 通过模拟值和观测值的统计参数对模型结果进行评估. 统计参数主要包括: 平均偏差 (mean bias, MB)、总误差 (gross error, GE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE)、归一化平均偏差 (normalized mean bias, NMB)、归一化平均误差 (normalized mean error, NME) 和相关系数 r 等. 美国环保署规定的“准则标准 (performance criteria)”条件是 NMB 的绝对值 $\leq 30\%$ 且 $\text{NME} \leq 75\%$, 此时模式结果是可以接受的, 目标标准 (performance goal) 的条件是 NMB 绝对值 $\leq 15\%$ 且 $\text{NME} \leq 35\%$, 此时数值模拟结果处于可达到的最优范围^[25].

1.3.2 源解析方法

正定矩阵因子法 (positive matrix factorization, PMF) 是一种常用的受体模型. 因其无需输入源谱信息和气象参数, 现已被广泛应用于颗粒物来源解析的研究中. 将采集到的样品作为一个矩阵 X , 通过最小二乘法确定目标函数 $Q(E)$, 进而确定污染源贡献率 G 和污染源廓线 F , 再根据污染源廓线对来源进行识别.

示踪物法分别选择 Ca 含量丰度、沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值和地壳物质作为沙尘示踪物, 探讨沙尘对上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度贡献.

2 结果与讨论

2.1 不同方法对沙尘天气影响起止时间的判断对比

2.1.1 基于环办监测[2016]120号的规定

根据文献[20], 沙尘天气影响起始时间可采用两种方法确定: ①城市 PM_{10} 小时平均浓度大于等于前 6 h PM_{10} 平均浓度的 2 倍且大于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 作为受影响起始时间; ②城市 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 小时浓度比值小于等于前 6 h 比值平均值的 50% 作为受影响起始时间.

沙尘天气影响结束时间判定: 以城市 PM_{10} 小时平均浓度首次降至与沙尘天气前 6 h PM_{10} 平均浓度相对偏差小于等于 10% 作为沙尘天气影响结束时间的判定依据.

依据判定方法①, 上海市受沙尘天气影响的起始时间为 10 月 29 日 08:00, 相应受沙尘天气影响的结束时间为 11 月 1 日 05:00.

依据判定方法②, 上海市受沙尘天气影响的起始时间为 10 月 29 日 09:00, 相应受沙尘天气影响的结束时间为 11 月 1 日 03:00.

2.1.2 基于沙尘示踪物的变化特征

表 1 给出了 PM 质量浓度与 PM_{2.5} 中水溶性离子、元素碳、有机碳和无机元素等组分的相关分析结

果。可以看到, Ca²⁺ 以及 Ca、Si、Ba、Fe 和 K 等元素与粗颗粒物 (PM_{2.5-10}) 具有很好的相关性, 反映出这些元素对于沙尘和扬尘具有一定的示踪性。

表 1 PM 质量浓度与 PM_{2.5} 化学组分的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 1 Pearson's correlation coefficient for PM mass concentration and PM _{2.5} chemical components													
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	OC	EC
PM _{2.5}	0.75 *												
PM _{2.5-10}	0.96 *	0.54											
Cl ⁻	0.10	0.44	-0.06										
NO ₃ ⁻	0.40	0.86 *	0.15	0.52									
SO ₄ ²⁻	0.28	0.66	0.08	0.34	0.64								
Na ⁺	0.16	0.06	0.18	0.36	-0.05	0.12							
NH ₄ ⁺	0.29	0.81 *	0.03	0.55	0.95 *	0.83 *	0.03						
K ⁺	0.47	0.38	0.45	0.02	0.22	0.32	0.37	0.20					
Mg ²⁺	0.66	0.34	0.70	0.11	0.03	0.08	0.39	-0.06	0.50				
Ca ²⁺	0.93 *	0.61	0.92 *	0.02	0.24	0.16	0.18	0.13	0.40	0.74			
OC	0.62	0.85 *	0.43	0.54	0.76 *	0.50	0.02	0.70	0.32	0.14	0.44		
EC	0.57	0.81 *	0.38	0.60	0.74	0.46	0.03	0.68	0.27	0.10	0.39	0.88 *	
Si	0.93 *	0.60	0.93 *	0.09	0.23	0.17	0.14	0.12	0.45	0.76 *	0.95 *	0.40	0.36
K	0.94 *	0.78 *	0.87 *	0.12	0.45	0.39	0.14	0.37	0.54	0.67	0.91 *	0.63	0.55
Ca	0.90 *	0.58	0.91 *	0.04	0.20	0.18	0.19	0.11	0.34	0.73	0.95 *	0.38	0.34
V	-0.15	-0.07	-0.16	0.18	0.05	0.11	0.15	0.08	-0.06	-0.11	-0.12	-0.19	0.11
Cr	0.38	0.58	0.24	0.51	0.48	0.45	0.08	0.51	0.17	0.07	0.25	0.54	0.61
Mn	0.74	0.72	0.64	0.29	0.46	0.42	0.10	0.43	0.35	0.33	0.66	0.62	0.65
Fe	0.94 *	0.71	0.90 *	0.07	0.36	0.29	0.13	0.27	0.46	0.65	0.92 *	0.55	0.53
Ni	0.35	0.56	0.21	0.20	0.52	0.49	0.03	0.53	0.32	0.17	0.28	0.41	0.49
Cu	0.08	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.06	0.07	0.08
Zn	0.47	0.64	0.33	0.50	0.51	0.51	0.13	0.54	0.17	0.12	0.38	0.59	0.64
As	0.22	0.40	0.11	0.33	0.31	0.57	0.24	0.43	0.20	0.08	0.17	0.31	0.31
Se	0.37	0.71	0.17	0.55	0.69	0.74	0.10	0.77 *	0.18	0.06	0.25	0.61	0.59
Ba	0.95 *	0.68	0.93 *	0.03	0.32	0.25	0.12	0.21	0.50	0.73	0.95 *	0.50	0.47
Pb	0.20	0.27	0.14	0.16	0.23	0.28	0.03	0.26	0.10	0.05	0.16	0.28	0.26
	Si	K	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ba
K	0.92 *												
Ca	0.97 *	0.88 *											
V	-0.08	-0.19	-0.09										
Cr	0.24	0.42	0.28	0.20									
Mn	0.63	0.74	0.66	0.21	0.56								
Fe	0.93 *	0.93 *	0.92 *	0.15	0.39	0.84 *							
Ni	0.30	0.40	0.27	0.30	0.58	0.38	0.36						
Cu	0.06	0.07	0.06	0.05	0.18	0.08	0.08	0.13					
Zn	0.32	0.51	0.39	0.22	0.67	0.72	0.52	0.39	0.38				
As	0.13	0.29	0.17	0.06	0.35	0.34	0.22	0.22	0.02	0.47			
Se	0.21	0.45	0.26	0.05	0.51	0.49	0.37	0.39	0.03	0.62	0.53		
Ba	0.98 *	0.95 *	0.94 *	0.10	0.30	0.72	0.96 *	0.36	0.07	0.40	0.17	0.28	
Pb	0.14	0.23	0.15	0.06	0.21	0.26	0.20	0.17	0.06	0.34	0.36	0.23	0.17

1) *表示相关性≥0.75 且 P<0.05 的值

选择 PM 浓度指标及与 PM 质量浓度强相关的 Ca²⁺、Ca、Fe、Si、Ba 和 K 等作为研究对象,依据文献[20]的方法①将 PM₁₀ 替换为各指标,各指标的小时浓度及前 6 h 浓度均值的 2 倍 (PM_{2.5}/PM₁₀ 为前 6 h 均值的 50%) 如表 2 所示。截至 10 月 29 日 08:00, PM₁₀、PM_{2.5-10}、Ca²⁺、Ca、Si 和 K 这 6 项指标已达到小时平均浓度大于等于前 6 h 平均浓度 2 倍的要求,至 10 月 29 日 09:00,除 PM_{2.5}/PM₁₀ 的所

有指标小时浓度都大于前 6 h 平均浓度的 2 倍, PM_{2.5}/PM₁₀ 小时浓度比值小于前 6 h 比值平均值的 50%。据此判定沙尘开始时间为 2019 年 10 月 29 日 09:00 更加准确。

以 10 月 29 日 09:00 作为沙尘开始时间,通过各指标计算出的沙尘结束时间如表 3 所示:根据 PM₁₀、K 和 PM_{2.5-10}, 沙尘结束时间为 11 月 1 日 03:00~08:00; 根据 Fe、Ca²⁺、Ba、Si 和 Ca 等沙尘

示踪物,沙尘结束时间为11月3日04:00~17:00;根据 $PM_{2.5}/PM_{10}$,沙尘结束时间为11月4日14:00.

结合图1给出的PM质量浓度、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值和部分无机元素的时间序列. 可以看到,伴随10月29日09:00沙尘的到来, PM_{10} 和 $PM_{2.5\sim10}$ 的浓度出现显著抬升, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值出现断崖式下降,至11月1日06:00, PM_{10} 和 $PM_{2.5\sim10}$ 浓度显著降低,而 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值抬升,出现峰值,与文献[20]判定的沙尘结束时间基本一致. 从示踪组分(Ca、 Ca^{2+} 、

Si、Ba、Fe和K)来看,于10月29日09:00开始, $PM_{2.5}$ 中的Ca、Si、K、Fe、Ba和Mg等元素的浓度出现明显抬升,这些元素的浓度高值持续到11月3日09:00左右.

基于示踪组分,判定上海市受沙尘天气影响的起始时间为10月29日09:00,受沙尘天气影响的结束时间为11月3日09:00. 该方法判定的沙尘天气影响开始时间与文献[20]判定的起始时间相一致,然而结束时间较文献[20]判定的结束时间明显推迟.

表2 沙尘天气小时数据及前6 h均值

Table 2 Hourly and preceding 6 h averaged data during dust conditions

监测时间 (月-日 T时)	PM _{2.5}	PM _{2.5} /PM ₁₀ (50%前6 h 均值)	PM ₁₀	PM ₁₀ (2 倍前6 h 均值)	PM _{2.5~10}	PM _{2.5~10} (2 倍前6 h 均值)	Ca ²⁺	Ca ²⁺ (2 倍前6 h 均值)
11-01T02:00	65	0.93	70		5		0.42	
10-29T03:00	60	0.92	65		5		0.43	
10-29T04:00	60	0.96	63		3		0.52	
10-29T05:00	61	0.86	71		10		0.45	
10-29T06:00	69	0.82	84		15		0.44	
10-29T07:00	75	0.67	112		37		0.52	
10-29T08:00	89	0.50	181	155	91	25	0.98	0.92
10-29T09:00	104	0.35	299	192	195	54	1.77	1.11
10-29T10:00	119	0.28	418	270	300	117	3.25	1.56
10-29T11:00	114	0.24	466	388	352	216	4.24	2.47

监测时间 (月-日 T时)	Fe (2 倍前6 h 均值)	Si (2 倍前6 h 均值)	Ba (2 倍前6 h 均值)	K (2 倍前6 h 均值)	Ca (2 倍前6 h 均值)					
11-01T02:00	0.97	0.34	0.03	0.85	0.10					
10-29T03:00	1.00	0.44	0.03	0.78	0.09					
10-29T04:00	0.96	0.36	0.03	0.86	0.09					
10-29T05:00	0.96	0.41	0.03	0.92	0.10					
10-29T06:00	1.01	0.56	0.03	0.97	0.11					
10-29T07:00	1.05	0.53	0.03	1.11	0.13					
10-29T08:00	1.25	1.99	1.02	0.88	0.05	0.06	1.30	1.83	0.24	0.20
10-29T09:00	2.30	2.08	4.06	1.11	0.11	0.06	2.14	1.98	1.21	0.25
10-29T10:00	3.50	2.51	9.67	2.32	0.19	0.09	2.80	2.43	2.62	0.63
10-29T11:00	5.17	3.36	15.92	5.42	0.29	0.15	3.64	3.08	4.25	1.47

表3 根据沙尘开始时间计算的沙尘结束时间及对应污染物平均浓度

Table 3 Ending time of dust events calculated from the starting time and corresponding hourly averaged pollutant concentrations

监测指标		PM _{2.5}	PM ₁₀	K	PM _{2.5~10}	Fe	Ca ²⁺	Ba	Si	Ca	PM _{2.5} /PM ₁₀
沙尘前 6 h 平均浓度/μg·m ⁻³ (10-29T03:00 ~ T08:00)		69.1	96.0	0.99	26.8	1.04	0.56	0.03	0.55	0.12	0.82
沙尘结束时间的 1 h 平均浓度/μg·m ⁻³	11-01T03:00	40.0	95.1								0.42
	11-01T05:00	37.3	74.1	0.85							0.50
	11-01T08:00	40.4	60.6	0.58	20.2						0.67
	11-03T04:00	49.9	78.8	1.29	28.9	0.96					0.63
	11-03T08:00	16.9	23.2	0.68	6.3	0.56	0.38				0.73
	11-03T09:00	17.3	23.7	0.45	6.4	0.41	0.52	0.03			0.73
	11-03T17:00	12.4	45.9	0.40	33.5	0.26	0.51	0.01	0.37	0.09	0.27
	11-04T14:00	38.1	45.1	1.04	7.0	0.55	0.44	0.0	0.95	0.22	0.84

2.1.3 基于WRF-CMAQ的数值模拟

图2展示了数值模拟的 PM_{10} 浓度与实际观测的 PM_{10} 浓度的时间序列,可以看出模拟值比实际观测的结果偏高,模拟值与实测值的平均偏差MB为

$28.2\mu g\cdot m^{-3}$,总误差GE为 $34.2\mu g\cdot m^{-3}$ 、均方根误差RMSE为 $43.6\mu g\cdot m^{-3}$ 、归一化平均偏差NMB为25.6%、归一化平均误差NME为31.1%和相关系数 r 等于0.861. NMB和NME结果表明,WRF-CMAQ

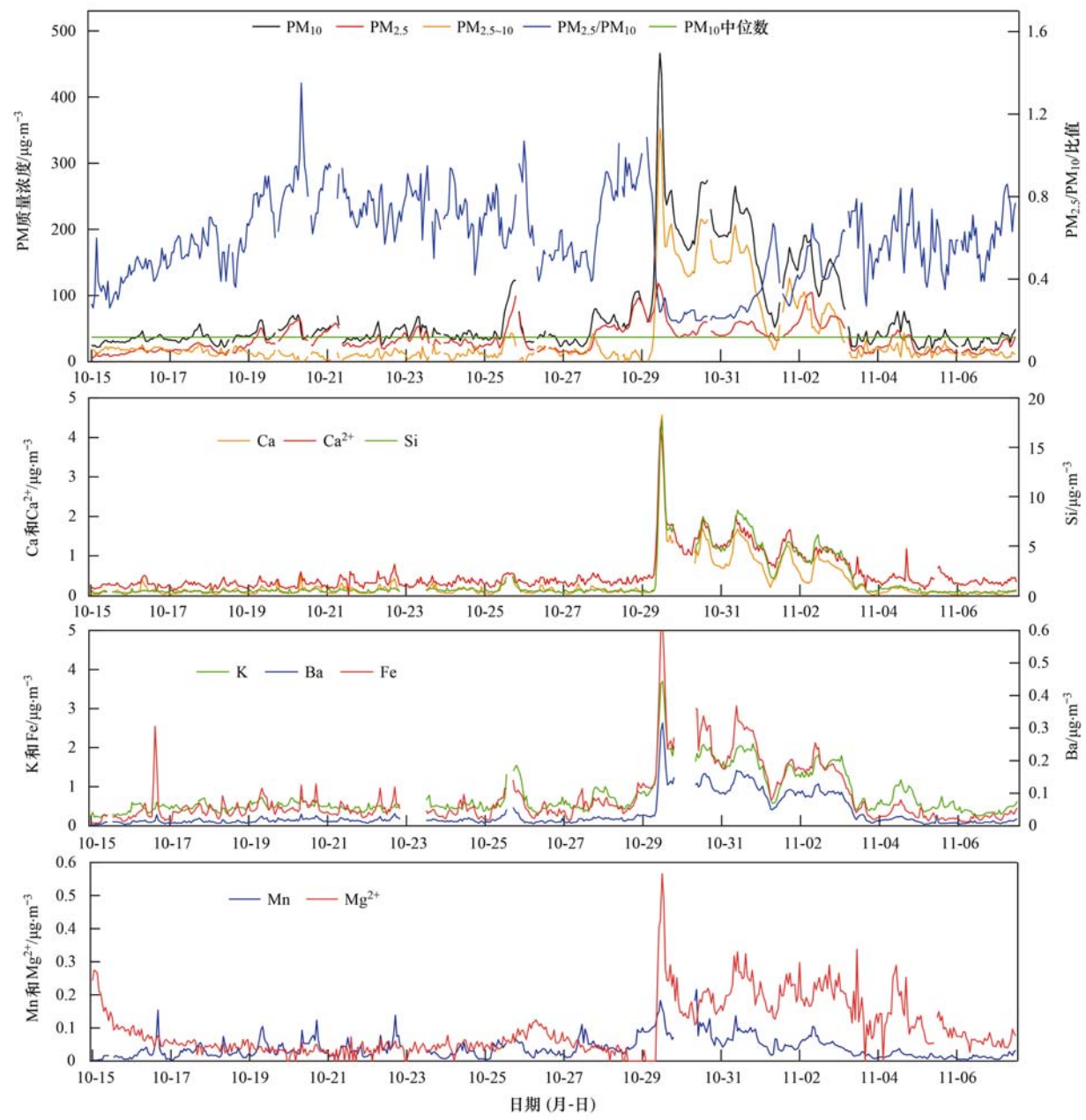


图 1 PM 质量浓度及 PM_{2.5} 中沙尘/扬尘示踪组分的时间序列

Fig. 1 Time-series of PM mass concentrations and sand dust/fugitive dust tracers in PM_{2.5}

模拟的 PM₁₀ 质量浓度可被接受但不处于最优范围。

图 3 给出了基于强力法模拟的沙尘贡献分布，

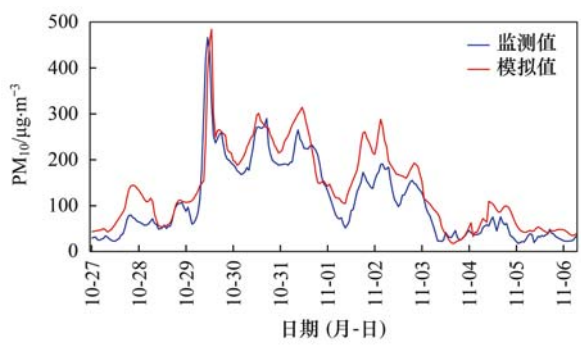


图 2 数值模拟的和实际观测的上海市 PM₁₀ 浓度变化时间序列

Fig. 2 PM₁₀ time-series of simulated and observed values in Shanghai

可以看到，10 月 29 日 09:00，沙尘前锋抵达上海，沙尘贡献值出现显著抬升；至 10 月 29 日 12:00，沙尘主体到达上海，沙尘贡献值达到最高；10 月 31 日 20:00，沙尘气团东移出海，对上海影响减小；11 月 2 日 10:00 左右，前期东移出海的沙尘气团回流回上海；至 11 月 3 日 09:00，沙尘向西南移动出上海，对上海的影响减弱。模型虽然能够反映东移入海的沙尘的回流，但对回流沙尘的数值模拟结果偏高，沙尘 I 阶段短期滞留的沙尘也有一定程度的高估。

基于数值模拟，判定上海市受沙尘天气影响的起始时间为 10 月 29 日 09:00，受沙尘天气影响的结束时间为 11 月 3 日 09:00。该方法判定的沙尘天气影响开始时间与文献[20]判定的起始时间和基

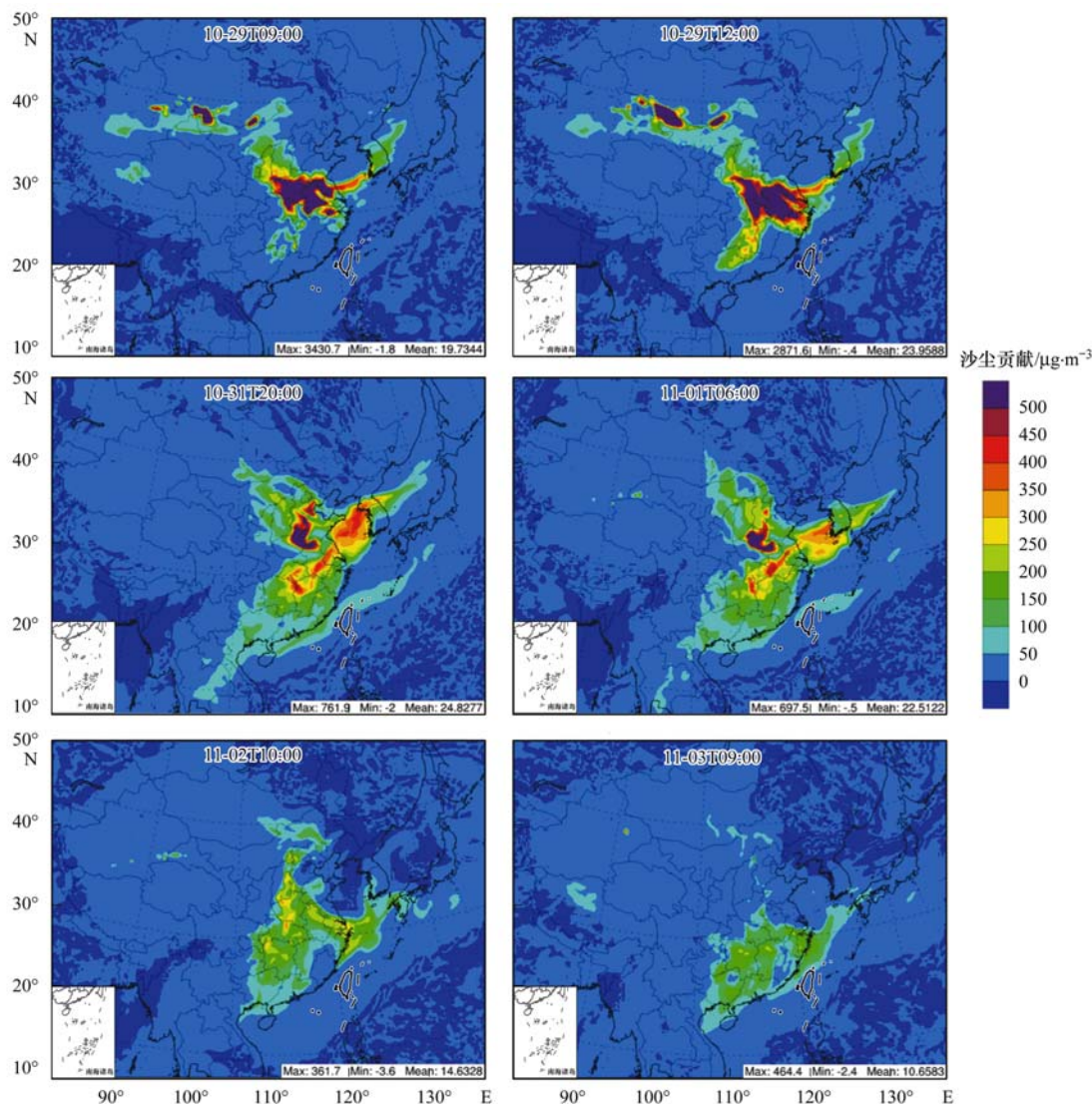


图3 基于强力法模拟的沙尘贡献分布

Fig. 3 Analogous dust distribution based on the brute force method

于示踪组分判定的起止时间基本一致;对比数值模拟的结果,可以发现基于文献[20]判定的结束时间分歧主要在于,无法对东移入海的沙尘气团的回流过程进行识别。

2.2 沙尘期间上海大气 $PM_{2.5}$ 的化学组分的变化特征

根据上述结论,将本次沙尘过程分为4个阶段。

沙尘前(10月15日00:00~10月29日09:00)。

沙尘Ⅰ(10月29日09:00~11月1日03:00):来自长三角中北部地区的北方沙尘输送至上海境内,上海市出现以 PM_{10} 为首要污染物的轻度及中度污染;受均压场影响,抵达上海的沙尘气团无法快速沉降,滞留在上海上空。

沙尘Ⅱ(11月1日03:00~11月3日09:00):沙尘气团东移入海,接着又回流至上海, PM_{10} 小时浓度再度升高,随着沙尘强度减弱,污染逐渐清除。

沙尘后(11月3日09:00~11月7日19:00)。

这4个阶段 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别为 (31.2 ± 18.0) 、 (55.4 ± 18.7) 、 (57.8 ± 20.4) 和 $(22.6 \pm 10.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,沙尘Ⅰ和沙尘Ⅱ期间 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别是沙尘前的1.78倍和1.85倍。

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ (SNA) 是 $PM_{2.5}$ 中最主要的二次离子,沙尘前和沙尘后 SNA 的浓度分别为 $(15.1 \pm 10.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(10.5 \pm 6.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,分别占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的48.6%和46.3%;沙尘Ⅰ期间 SNA 的平均浓度为 $(13.5 \pm 5.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的24.3%,沙尘Ⅱ期间 SNA 的平均浓度为 $(24.2 \pm 10.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,占 $PM_{2.5}$ 质量浓度的41.9%。沙尘期间 SNA 占 $PM_{2.5}$ 的比重明显下降,但仍是 $PM_{2.5}$ 中最主要的化学组分,其中沙尘Ⅱ的 SNA 比重高于沙尘Ⅰ,说明沙尘Ⅱ是由回流沙尘和城市污染混合形成的。

沙尘前、沙尘Ⅰ、沙尘Ⅱ和沙尘后这4个阶段 OC 的浓度分别为 (4.6 ± 2.6) 、 (6.7 ± 1.3) 、 $(5.4 \pm$

1.9) 和 $(3.7 \pm 0.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 14.7%、12.2%、9.4% 和 16.2%; EC 的浓度分别为 (0.9 ± 0.6) 、 (1.2 ± 0.3) 、 (1.1 ± 0.3) 和 $(0.5 \pm 0.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 2.9%、2.2%、1.9% 和 2.3%。沙尘期间 OC 和 EC 的质量浓度较沙尘前后有所上升, 但 OC 和 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比重下降, 说明沙尘夹带了外来的 OC 和 EC 污染物。

一般情况下, 大气中无机元素的质量浓度及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分的贡献较为稳定, 沙尘前 Al、Si、Ca 和 Fe 这 4 种地壳元素与其他金属元素 (Na、Mg、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ba、Ag、Cd、Hg 和 Pb 等) 的质量浓度分别为 $(1.4 \pm 0.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(0.8 \pm 0.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 4.3% 和

2.5%; 沙尘后这 4 种地壳元素和其他金属元素的浓度恢复到 $(1.4 \pm 0.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(0.8 \pm 0.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 虽然沙尘前后浓度不变, 但由于沙尘对颗粒物的清除作用, 沙尘后它们在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比分别上升到 6.4% 和 3.5%。从图 4 可以看出, 沙尘期间 4 种地壳元素的浓度大幅上升, 沙尘 I 中 4 种地壳元素的平均浓度为 $(13.0 \pm 5.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比为 23.5%, 沙尘 II 中 4 种地壳元素的平均浓度为 $(7.9 \pm 2.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比为 13.7%; 沙尘期间其他金属元素的浓度仅小幅上升, 沙尘 I 中其他金属元素的浓度为 $(1.3 \pm 0.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比为 2.3%, 沙尘 II 中其他金属元素的浓度为 $(1.0 \pm 0.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比为 1.7%。说明了沙尘期间 Al、Si、Ca 和 Fe 这 4 种地壳元素对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的重要贡献。

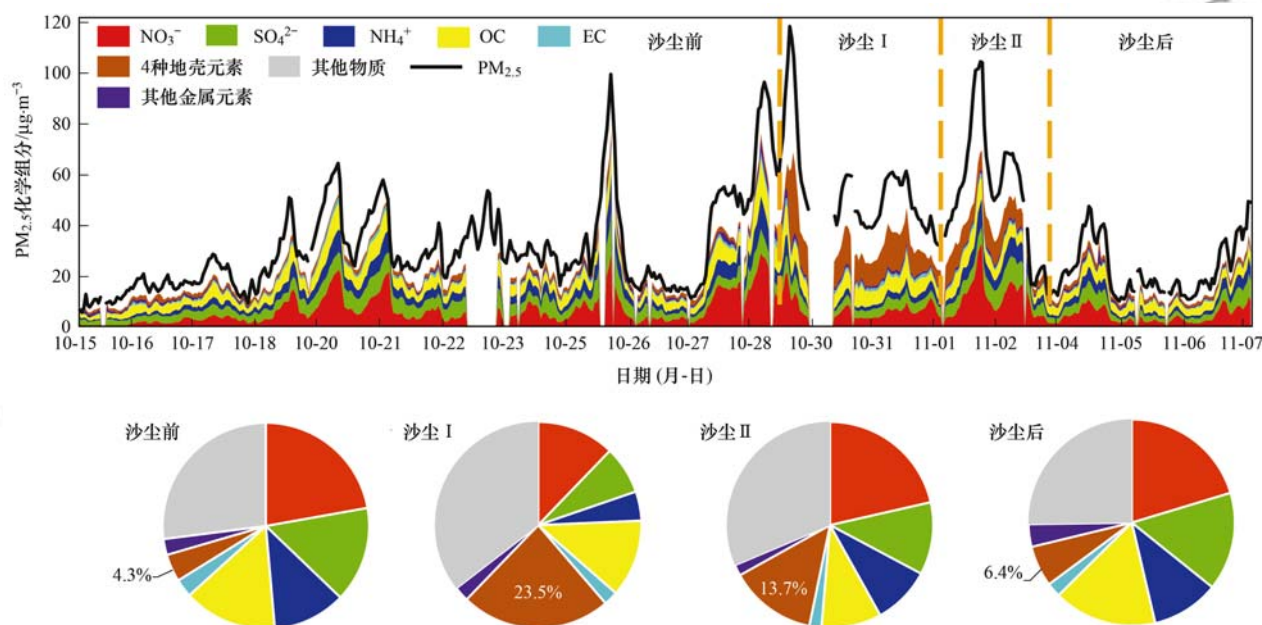


图 4 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与主要化学组分的变化

Fig. 4 Time-series of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and its major chemical components

2.3 沙尘对上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的多方法对比分析

2.3.1 基于 PMF 源解析方法

利用上海市环境科学研究院城市大气复合污染观测基地 $\text{PM}_{2.5}$ 及其化学组分 (水溶性离子、OCEC 和无机元素等) 的实时在线观测数据, 利用受体模型正定矩阵因子法 (PMF) 开展 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析, 可以解析获得尘源 (含扬尘和沙尘) 的贡献, 通过扣除本底扬尘源的贡献后获得沙尘的贡献。本研究选取 $\text{PM}_{2.5}$ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、OC、EC、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ba 和 Pb 等 21 个物种参与 PMF 模型解析计算, 解析获得 7 个因子, 包括重油燃烧源、电厂源、生物质燃烧源、移动源、二次源、工艺过程源和尘源等。其中尘源的示踪组分为 Ca、Ba、Fe、

Mn 和 K 等组分。

2.3.2 基于沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Ca 含量的丰度法

据报道^[26~28], 沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Ca 的含量在 3%~7% 之间, 取平均值 5% 进行尘源贡献的估算, 通过扣除本底扬尘源的贡献后获得沙尘的贡献。

2.3.3 基于近沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值法

以靠近沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值作为沙尘中裹挟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的计算依据, 基于实际 PM_{10} 实测浓度计算获得尘源的贡献, 通过扣除本底扬尘源的贡献后获得沙尘的贡献。根据此次沙尘传输通道城市 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值 (图 5), 发现沙尘先后传输经过呼和浩特、北京、济南、徐州、南通和上海, 在呼和浩特和北京先后观测到 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 最低比值且持续数小时, 取此次沙尘上游城市呼和浩特的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比

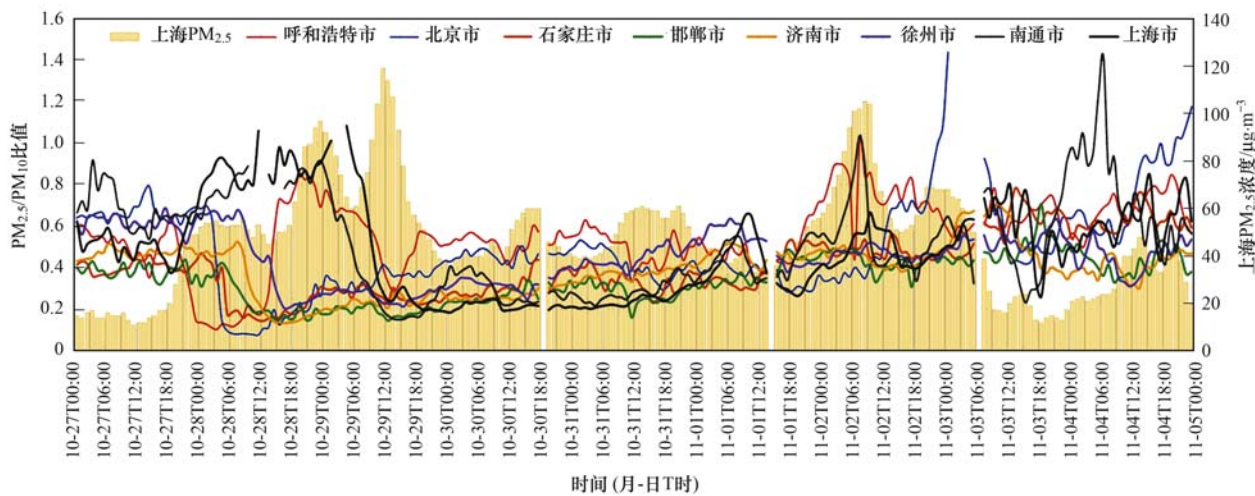


图 5 沙尘通道城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比值的时间序列

Fig. 5 Time-series of $PM_{2.5}/PM_{10}$ in dust channel cities

值(0.128)进行尘源贡献的估算.

2.3.4 基于地壳物质重构法^[29~31]

通过元素 Al、Si、Ca 和 Fe 的浓度重构出组成

沙尘的几种主要地壳物质(Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 FeO 和 Fe_2O_3)的含量,扣除本底扬尘源的贡献后获得沙尘的贡献. 重构地壳物质的公式如式(1).

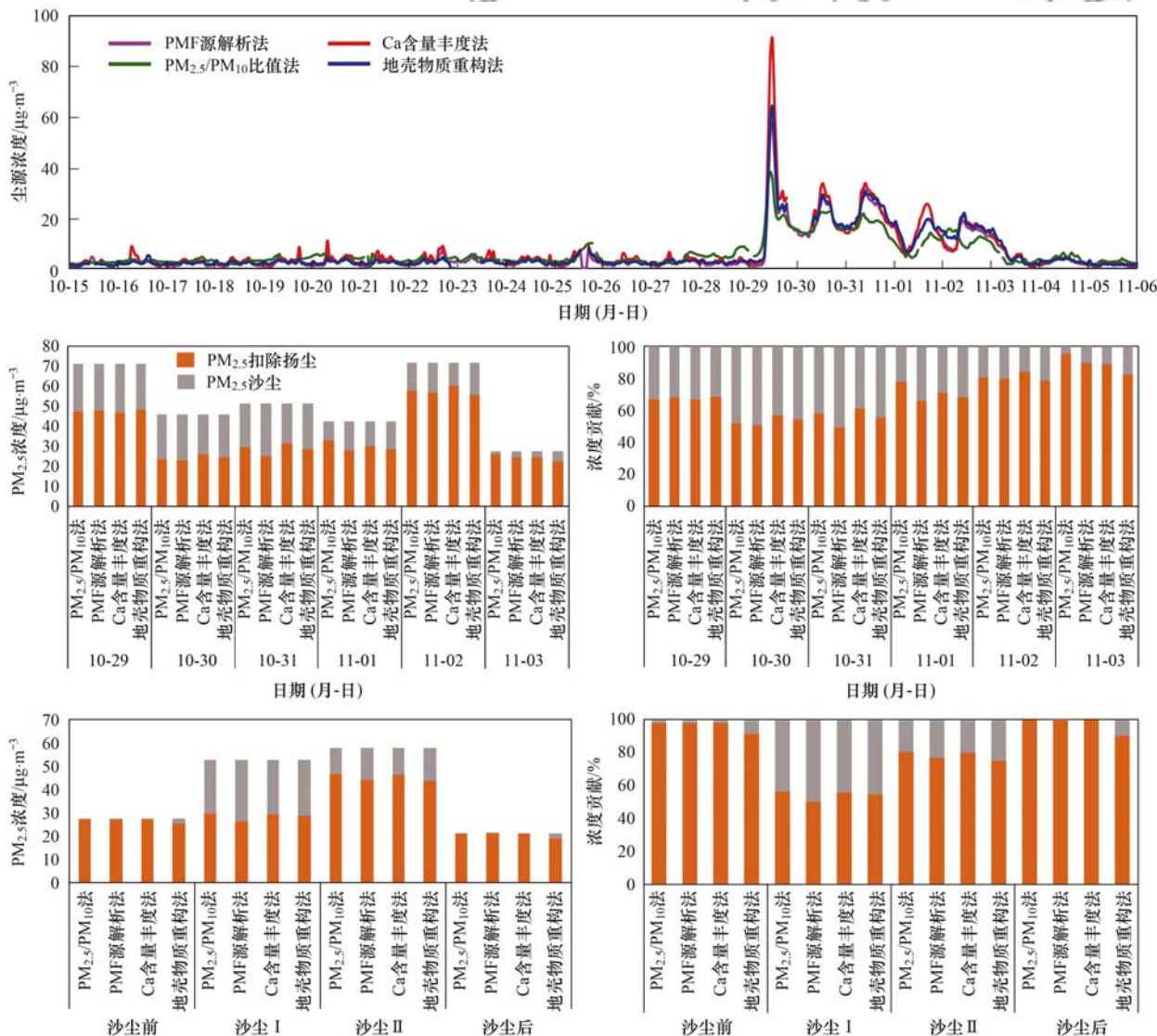


图 6 不同方法解析获得的尘源贡献 $PM_{2.5}$ 浓度的时间序列及分阶段贡献

Fig. 6 $PM_{2.5}$ concentration time-series based on different source apportionments and the contribution of corresponding sand-dust stages

$$\begin{aligned} \text{地壳物质} = & 1.89 \times \text{Al} + 2.14 \times \text{Si} + \\ & 1.40 \times \text{Ca} + 1.43 \times \text{Fe} \end{aligned} \quad (1)$$

图6给出了基于上述4种方法获得的沙尘贡献 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间序列和分阶段贡献柱形。从小时浓度的变化趋势来看,在沙尘输送滞留期间(10月29日09:00~11月1日06:00),4种方法获得的沙尘贡献的时间变化趋势相一致;在沙尘海上回流期间(11月1日06:00~11月3日09:00),PMF源解析法、Ca丰度法和地壳物质重构法获得的沙尘浓度的时间变化趋势相一致,与 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值法的时间变化趋势一致性相对较差。从最高小时浓度贡献来看,4种方法获得的最高沙尘浓度均出现在10月29日11:00, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值法、PMF源解析法、Ca丰度法和地壳物质重构法获得的最高沙尘小时浓度分别为38.2、57.8、91.3和64.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中PMF源解析法和地壳物质重构法的最高沙尘小时浓度结果基本相同。

图6同时对比了10月29日~11月3日期间沙尘对 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的绝对贡献和相对贡献,4种方法计算的沙尘浓度对这6日 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的平均贡献分别(23.3±0.7)、(21.5±1.2)、(22.9±2.6)、(12.5±2.2)、(14.0±1.8)和(3.1±1.4) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相对贡献分别为(33±1)%、(47±3)%、(44±5)%、(29±5)%、(19±3)%和(11±5)%;4种方法对这6日 $\text{PM}_{2.5}$ 中沙尘浓度的估算相对偏差分别为3%、6%、12%、18%、13%和47%,相对偏差随时间基本呈递增趋势。

图6同时对比了沙尘影响不同阶段对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的绝对贡献和相对贡献,4种方法对沙尘前、沙尘Ⅰ、沙尘Ⅱ和沙尘后这4个阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的平均贡献分别(1.0±0.9)、(24.2±1.9)、(12.6±1.5)和(0.5±1.0) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相对贡献分别为(3±3)%、(46±3)%、(22±3)%和(2±5)%;4种方法对沙尘Ⅰ和沙尘Ⅱ阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 中沙尘浓度的估算相对偏差分别为6%和12%。

3 结论

(1)基于相关规定、沙尘示踪物的变化特征和WRF-CMAQ数值模拟这3种方法,将本次沙尘过程分为沙尘前、沙尘Ⅰ(输送和滞留过程)、沙尘Ⅱ(海上回流和清除过程)和沙尘后这4个阶段。3种方法判定上海市受沙尘天气影响的起始时间均为10月29日09:00,结束时间分别为11月1日05:00、11月3日04:00~17:00和11月3日09:00。相关规定的无法对东移入海的沙尘气团的回流过程进行准确识别,判断结果使沙尘结束时间提前;基

于沙尘示踪物的变化特征和数值模拟可以弥补相关规定的不足;WRF-CMAQ数值模拟可以准确地定性判断沙尘起止时间并识别回流沙尘。

(2)沙尘期间SNA的浓度和它们在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比重显著下降,但仍是 $\text{PM}_{2.5}$ 中最主要的化学组分。沙尘Ⅰ中SNA的浓度为(13.5±5.5) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占比为24.3%;沙尘Ⅱ中SNA的浓度为(24.2±10.2) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占比为41.9%。沙尘Ⅱ的SNA占比高于沙尘Ⅰ,说明沙尘Ⅱ是由回流沙尘和城市污染混合形成的。沙尘期间Al、Si、Ca和Fe这4种地壳元素的浓度和它们在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比显著上升,沙尘Ⅰ中4种地壳元素的平均浓度为(13.0±5.1) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占比为23.5%,沙尘Ⅱ中4种地壳元素的平均浓度为(7.9±2.0) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占比为13.7%。

(3)基于PMF源解析方法、沙尘源区 $\text{PM}_{2.5}$ 中Ca含量丰度法、尘源区 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 最小比值法和地壳物质重构法对沙尘贡献 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间变化趋势基本一致,PMF源解析方法和地壳物质重构法对最高沙尘小时浓度的估算结果基本相同,相比之下,基于沙尘源区Ca含量的丰度法的小时浓度结果偏高,基于 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 最小比值法估算的小时浓度结果偏低。4种方法对沙尘Ⅰ和沙尘Ⅱ的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的平均贡献分别(24.2±1.9) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和(12.6±1.5) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相对贡献分别(46±3)%和(22±3)%。

参考文献:

- [1] Shen J Y, Zhao Q B, Cheng Z, *et al.* Evolution of source contributions during heavy fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) pollution episodes in Eastern China through online measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117569.
 - [2] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 495-502.
 - [3] Chen S P, Lu C H, McQueen J, *et al.* Application of satellite observations in conjunction with aerosol reanalysis to characterize long-range transport of African and Asian dust on air quality in the contiguous U. S. [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **187**: 174-195.
 - [4] Farahani V J, Arhami M. Contribution of Iraqi and Syrian dust storms on particulate matter concentration during a dust storm episode in receptor cities: case study of Tehran [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117163.
 - [5] 周敏, 陈长虹, 乔利平, 等. 2013年1月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3118-3126.
- Zhou M, Chen C H, Qiao L P, *et al.* The chemical characteristics of particulate matters in Shanghai during heavy air pollution episode in Central and Eastern China in January 2013

- [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33** (11): 3118-3126.
- [6] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM_{2.5} 来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [7] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, *et al.* Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [8] 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.
- [9] 许艳玲, 易爱华, 薛文博. 基于模型模拟的成都市 PM_{2.5} 污染来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 50-56.
- Xu Y L, Yi A H, Xue W B. Modeling studies of source contributions to PM_{2.5} in Chengdu, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 50-56.
- [10] 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 等. 京津冀及周边区域 PM_{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 574-586.
- Zhu Y Y, Gao Y X, Chai W X, *et al.* Heavy pollution characteristics and assessment of PM_{2.5} predicted model results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and surrounding areas during November 23 to December 4, 2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 574-586.
- [11] Wang X, Huang J P, Ji M X, *et al.* Variability of East Asia dust events and their long-term trend [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 3156-3165.
- [12] Bozlaker A, Prospero J M, Fraser M P, *et al.* Quantifying the contribution of long-range Saharan dust transport on particulate matter concentrations in Houston, Texas, using detailed elemental analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(18): 10179-10187.
- [13] Bao Y S, Zhu L H, Guan Q, *et al.* Assessing the impact of Chinese FY-3/MERSI AOD data assimilation on air quality forecasts: sand dust events in northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **205**: 78-89.
- [14] Chen S Y, Huang J P, Kang L T, *et al.* Emission, transport, and radiative effects of mineral dust from the Taklimakan and Gobi deserts: comparison of measurements and model results [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(3): 2401-2421.
- [15] Chen S Y, Huang J P, Qian Y, *et al.* An overview of mineral dust modeling over East Asia [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(4): 633-653.
- [16] An L C, Che H Z, Xue M, *et al.* Temporal and spatial variations in sand and dust storm events in East Asia from 2007 to 2016: relationships with surface conditions and climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 452-462.
- [17] 钟利健, 雷熊, 钱一凡, 等. 《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》的实际应用及修改建议[J]. *黑龙江环境通报*, 2019, **43**(1): 85-87.
- Zhong L J, Lei X, Qian Y F, *et al.* The practical application and modification suggestions of the supplementary regulations on urban air quality assessment affected by dust weather process [J]. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2019, **43**(1): 85-87.
- [18] EPA. The final 2016 exceptional events rule, supporting guidance documents, updated FAQs, and other rule implementation resources [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-quality-analysis/final-2016-exceptional-events-rule-supporting-guidance-documents-updated-faqs>, 2018-09-11.
- [19] EPA. Guidance on the preparation of demonstrations in support of requests to exclude ambient air quality data influenced by high wind dust events under the 2016 exceptional events rule [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-quality-analysis/guidance-preparation-demonstrations-support-requests-exclude-ambient-air>, 2019-04-01.
- [20] 生态环境部. 关于印发《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201701/t20170106_394054.htm, 2017-01-04.
- [21] 生态环境部. 对十三届全国人大二次会议第 1118 号建议的答复 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk13/201910/t20191031_740019.html, 2019-07-17.
- [22] Stieger B, Spindler G, Fahlbusch B, *et al.* Measurements of PM₁₀ ions and trace gases with the online system MARGA at the research station Melpitz in Germany—a five-year study [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2018, **75**(1): 33-70.
- [23] Makkonen U, Virkkula A, Mäntykenttä J, *et al.* Semi-continuous gas and inorganic aerosol measurements at a Finnish urban site: comparisons with filters, nitrogen in aerosol and gas phases, and aerosol acidity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(12): 5617-5631.
- [24] 樊啸辰, 郎建垒, 程水源, 等. 北京市大气环境 PM_{2.5} 和 PM₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4430-4438.
- Fan X C, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Seasonal variation and source analysis for PM_{2.5}, PM₁ and their carbonaceous components in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4430-4438.
- [25] EPA. Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, PM_{2.5}, and regional haze [EB/OL]. <https://www.epa.gov/ttn/scrpm/guidance/guide/final-03-pm-rh-guidance.pdf>, 2007-04-01.
- [26] Wang G H, Cheng C L, Huang Y, *et al.* Evolution of aerosol chemistry in Xi'an, inland China, during the dust storm period of 2013-part 1: sources, chemical forms and formation mechanisms of nitrate and sulfate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(12): 11571-11585.
- [27] Wu F, Zhang D Z, Cao J J, *et al.* Soil-derived sulfate in atmospheric dust particles at Taklimakan desert [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39** (24), doi: 10.1029/2012gl054406.
- [28] Zhang R, Cao J J, Tang Y R, *et al.* Elemental profiles and signatures of fugitive dusts from Chinese deserts [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 1121-1129.
- [29] Chow J C, Lowenthal D H, Chen L W A, *et al.* Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: a review [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2015, **8**(3): 243-263.
- [30] Chow J C, Chen L W A, Watson J G, *et al.* PM_{2.5} chemical composition and spatiotemporal variability during the California regional PM₁₀/PM_{2.5} air quality study (CRPAQS) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D10), doi: 10.1029/2005JD006457.
- [31] Solomon P A, Fall T, Salmon L, *et al.* Chemical characteristics of PM₁₀ aerosols collected in the Los Angeles area [J]. *JAPCA*, 1989, **39**(2): 154-163.

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, YANG 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 Wuliangsuhai 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 Wuliangsuhai	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)