

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

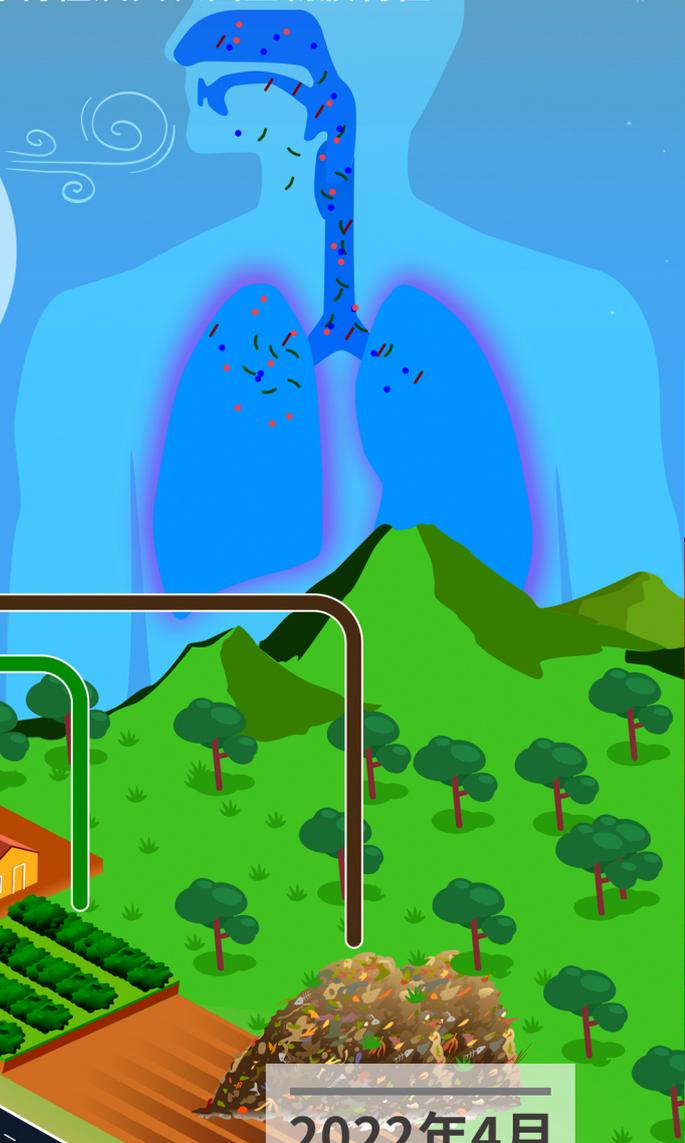
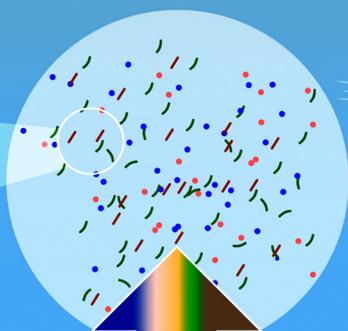
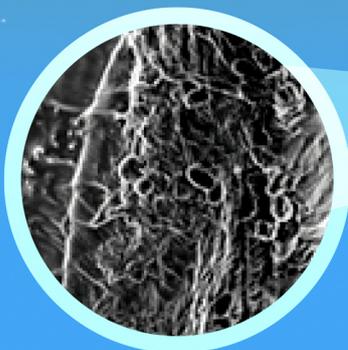
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4



目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析

杨梦蓉^{1,2,3}, 潘勇^{1,2,3}, 黄仲文⁴, 张晶晶⁵, 黄显军⁵, 何萌萌^{1,3*}, 肖航^{1,3}

(1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 浙江省城市环境过程与污染控制重点实验室, 宁波 315800; 4. 韩山师范学院化学与环境工程学院, 潮州 521041; 5. 滨海国际合作学校, 宁波 315800)

摘要: 利用在线气体及气溶胶检测系统对宁波市春节期间痕量气体和水溶性离子组分进行观测, 结合气象要素, 分析研究细颗粒物中水溶性离子污染来源和组分特征。观测期间 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $33.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 存在轻度污染。水溶性离子浓度大小排序为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 二次无机离子 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 分别为 12.5、10.5 和 $7.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是主要的水溶性离子。使用 PMF 进行源解析得到, 爆竹燃烧源、二次生成(背景、工业源)和扬尘源是观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 主要的污染来源, 贡献率分别是 21.9%、64.5% 和 13.6%。二次污染较重时, NH_4^+ 占阳离子浓度的 92.2%。爆竹燃烧在除夕到初二为主要污染时, K^+ 占比增加。扬尘源为主要来源时, $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ 占比增加, 主要源于西北大气输送。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 水溶性离子; 春节; 组成特征; 来源解析; Piper 图

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1716-09 DOI: 10.13227/j.hjx.202107170

Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo

YANG Meng-rong^{1,2,3}, PAN Yong^{1,2,3}, HUANG Zhong-wen⁴, ZHANG Jing-jing⁵, HUANG Xian-jun⁵, HE Meng-meng^{1,3*}, XIAO Hang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Zhejiang Key Laboratory of Urban Environment Processes and Pollution Control, Ningbo Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315800, China; 4. School of Chemistry and Environmental Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China; 5. Ningbo Binhai International Cooperative School, Ningbo 315800, China)

Abstract: Water-soluble ions and some trace gases during the Spring Festival in Ningbo were observed using an ion online gas composition and aerosol monitoring system. Combined with meteorological elements data, the source analysis and composition characteristics of water-soluble ions and trace gases were analyzed. The average concentration of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ during the observation period was $33.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and there was light pollution. The order of concentration of water-soluble ions was $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. The secondary inorganic ions $\rho(\text{NO}_3^-)$, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$, and $\rho(\text{NH}_4^+)$ were the most water-soluble ions, which were 12.5, 10.5, and $7.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. According to the PMF source analysis, firecracker combustion, secondary generation (background, industrial source), and dust sources were the major sources of fine particles during the observation period, and their contribution rates of $\text{PM}_{2.5}$ were 21.9%, 64.5%, and 13.6%, respectively. When the secondary generation was the main pollution, NH_4^+ accounted for 92.2% of the cations. When firecracker combustion was the main pollution from New Year's Eve to the second day, the proportion of K^+ ions significantly increased. Dust sources were affected by regional transport from the northwest direction. When the dust source was the main pollution, the proportion of $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ and $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ increased.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; water-soluble ions; Spring Festival; composition characteristic; source analysis; Piper diagram

近年来,全国范围内细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)污染频发发生^[1-4]。 $\text{PM}_{2.5}$ 可以直接进入肺泡,导致细胞内DNA损伤,对人体健康造成危害^[5]。 $\text{PM}_{2.5}$ 主要含有水溶性组分、元素组分和碳质组分^[6]。水溶性组分主要包含硫酸盐、硝酸盐、铵盐和氯化钠等,占细颗粒物浓度的60%~70%^[7]。水溶性离子集中的主要粒径范围,与可见光波长相近,对大气消光系数具有影响^[8,9],是造成能见度下降的主要原因。水溶性离子能直接影响大气降水酸度,也是导致大气复合污染的重要物种^[10]。

春节是中国最重要的传统节日,已有大量研究发现国内各个城市,在此期间细颗粒物和水溶性离子浓度有明显上升^[11-14]。春节期间空气质量影响因素较多,由于社会活动和经济活动在春节前后一个

多月的时间强度与往常不同,再叠加烟花燃烧等因素,造成这期间环境污染成因复杂。研究春节期间空气质量污染特征和组分来源,对量化相关管控措施具有重要意义。马莹等^[11]的研究对广州春节期间MARGA数据进行分析,发现爆竹燃放时期,主要是细颗粒物污染, K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度急剧升高。姚祎等^[12]对北京春节期间空气质量因素进行分析,发现外部传输是主要的污染来源,而不利气象条件使烟花燃放和散煤燃烧在短时间加重春节期间的空气污染。Yao等^[13]的研究发现上海春节期间 Mg^{2+} 、

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(21976171)

作者简介: 杨梦蓉(1993~),女,博士研究生,主要研究方向为气溶胶化学, E-mail: mryang@iue.ac.cn

* 通信作者, E-mail: mmhe@iue.ac.cn

K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子浓度出现剧增,烟花是节日期间 $PM_{2.5}$ 的重要来源. Yu 等^[14] 的研究发现,南京市禁止燃放烟花后,春节期间仍然能观测到 Ba、K、Hg 和 Pb 元素浓度的急剧增长,可能来源于周边郊区和农村传输.但长三角相关污染研究主要集中在上海和南京等特大城市,宁波作为长三角重要的制造业产地,相关研究相对较少.

宁波因属于典型的亚热带季风气候,冬季湿冷,盛行偏北风.冬季夜晚静稳状态时,不利于污染物扩散,致使颗粒物污染发生.探究该地区春节期间的大气污染特征,对了解该地区大气污染物形成具有重要意义.此前研究多针对宁波细颗粒物污染时离子特征进行分析^[15-17],针对春节期间和不同污染源下水溶性离子组成状态变化的研究较少.故本研究利用 MARGA (monitoring instrument for Aerosols and Gases) 对宁波市春节期间大气细颗粒物中水溶性离子进行实时监测,结合气象数据等,分析细颗粒物、水溶性离子和痕量气体污染特征.使用 PMF 源解析模型,推测水溶性离子的污染来源,针对不同污染源下细颗粒水溶性组成成分进行分析,以期对宁波污染减排工作提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点和采集设备

研究观测地点位于中国科学院宁波城市环境观测研究站(29.75°N, 121.9°E)楼顶,高于地面约 20 m.采样地点无明显排放源.该站点位于春晓湖边,周边为工业园区,有天然气厂、汽车制造厂和制衣厂等工厂.从 2016 年 2 月 1~26 日,利用 MARGA 监测痕量气体和 $PM_{2.5}$ 中的水溶性化学离子成分.

研究用到的相关参数来源于同一幢大楼自动气象站监测数据,包括该站点的常规大气污染物 ($PM_{2.5}$) 及气象要素(温度、湿度、风速和风向等)的小时数据. $PM_{2.5}$ 是用赛默飞世尔公司的 FH62 C-14 监测仪,利用 β 射线吸收法对大气中的颗粒物进行测定.温度、湿度、风速和风向采用德国 Lufft 公司的 WS500-UMB 气象站监测数据.降雨数据采用武汉新普惠 PH-1 气象站监测数据.

1.2 MARGA 的介绍

MARGA 是由荷兰能源所与 Metrohm Applikon 公司共同研制,可以在线监测气溶胶中水溶性无机离子与其前体气体浓度.本文中研究站点的 MARGA 采用 $PM_{2.5}$ 旋风分离器采集大气中的 $PM_{2.5}$ 样品,大气中的水溶性气体被旋转式溶蚀器定量吸收,颗粒物则被后面与溶蚀器相连接的蒸汽喷射气溶胶收集器所收集,气溶胶中无机离子被喷射出的

饱和水蒸气凝聚溶解,溶解了气溶胶的液体进入 25 mL 的注射器中,经脱气加内标后注入离子色谱柱进行含量分析.该仪器可以得到 8 种水溶性离子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-) 和 5 个痕量气体组分 (SO_2 、HCl、 NH_3 、 HNO_3 、 HNO_2).

1.3 正交矩阵因子分解法(PMF)

正交矩阵因子分析(PMF)是一种有效源解析手段,是在传统的主成分分析上发展起来的受体模型.VOCs 数据集可被视为 $i \times j$ 的数据矩阵 X ,其中 i 为样本数, j 为观测的化学物种数,PMF 的原理如式(1):

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ki} \cdot F_{kj} + E_{ij} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 为 i 样品中 j 组分的浓度, G_{ki} 为 k 个源对 i 样品的贡献, F_{kj} 是第 k 个排放源中 j 组分的含量, E_{ij} 是残差, p 为污染源数目.

PMF 最优化解是使目标函数 $Q(E)$ 趋近于自由度,进而求解 G 和 F ,如式(2)所示:

$$Q = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \left[\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ki} \cdot F_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (2)$$

式中, u_{ij} 为样品 i 中组分 j 的不确定度,计算如式(3)和式(4):

$$u_{ij} = \sqrt{(0.05 \times X_{ij})^2 + MDL_j^2} \quad (X_{ij} > MDL_j) \quad (3)$$

$$u_{ij} = \frac{5}{6} \times MDL_j \quad (X_{ij} \leq MDL_j) \quad (4)$$

式中, MDL_j 为组分 j 的最低检测限.

1.4 Piper 图

Piper 图是水环境化学常用于表示离子平衡状态的图形.阳离子和阴离子分别用单独三元相图表示,两个三元图中的数据点通过延长线投射到菱形,通过菱形区域可以直观展示样品中阴阳离子的主要化学组成^[18,19].该图已被用于大气中水溶性离子^[20,21],所有离子均换算为摩尔当量浓度计算百分比进行做图展示.TWSI (total water-soluble inorganic ions) 是样品中所有水溶性离子浓度总和.

1.5 NOR 与 SOR 计算

硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR)可以反映 SO_2 和 NO_2 二次转化的程度,SOR 和 NOR 的值越大,则表示 SO_2 和 NO_2 气体在大气中通过气相或液相反应更多地转化为二次气溶胶粒子,计算公式如下:

$$SOR = SO_4^{2-} / (SO_4^{2-} + SO_2) \quad (5)$$

$$NOR = NO_3^- / (NO_3^- + HNO_3) \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 污染特征概述

研究期间温度、湿度、风速、风向、 $PM_{2.5}$ 、水溶性离子和痕量气体的时间序列变化如图 1 所示. 观测期间为冬季, 气温平均值为 6.7°C , 湿度平均值为 74.4% , 风速平均值为 $2.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 主导风向是西北和西北偏西. $\rho(PM_{2.5})$ 范围在 $1 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $33.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 依照《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定》(HJ 633-2012), 从 2 月 1 ~ 26 日, 宁波空气质量优良天数 24 d, 轻度污染天数为 2 d, 首要污染物为 $PM_{2.5}$. 在研究时段内, $PM_{2.5}$ 出现 5 次峰值超出环境空气质量国家二级标准 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, GB 3095-2012) 的污染过程, 分别出现在 2 月的 3、6、13、20 和 24 日. 第一次污染过程从 2 月 2 日 03:00 开始, $PM_{2.5}$ 浓度出现明显上升, 在 2 月 3 日

02:00 风速为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最大值 $86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 之后 $PM_{2.5}$ 浓度开始逐渐下降, 整个过程持续 2 d. 第二次污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度从 2 月 5 日 16:00 到 2 月 6 日 08:00 都维持在 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 最高值出现在 2 月 6 日 03:00, 风速为 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 在 2 月 6 日 08:00 后浓度急速下降. 第三次峰值出现于 2 月 13 日 19:00, 风向为正南方向, 风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 2 月 14 日的降水可能造成 $\rho(PM_{2.5})$ 迅速下降. 第四次和第五次污染峰值均出现在风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向为西北风时, 污染过程持续时间不超过 1 d. 2 月 7 ~ 13 日为春节公休假期. 2 月 7 ~ 9 日 $PM_{2.5}$ 日小时最高浓度均大于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2 月 9 日后浓度下降, 到 2 月 11 日 03:00 都维持在 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2 月 11 日出现降雨, 一直到 2 月 13 日 00:00, 相对湿度维持在 100% . 降水有利于空气中颗粒物清除, 在 2 月 11 ~ 13 日期间 $PM_{2.5}$ 浓度小于 $12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

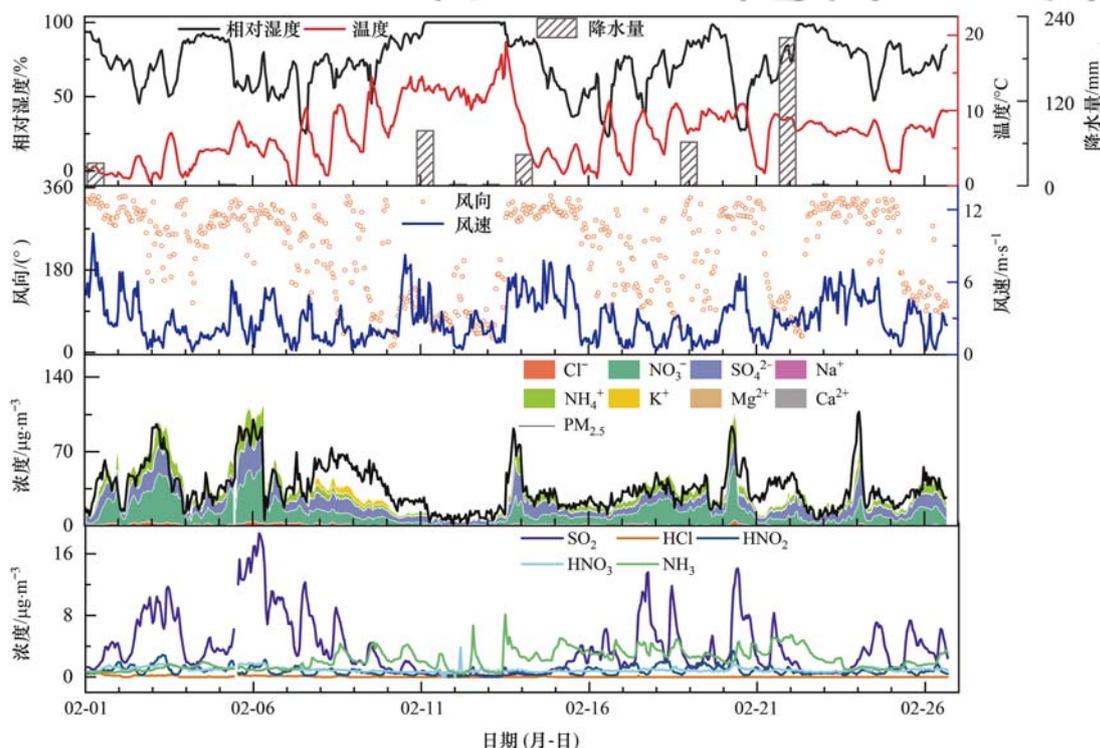


图 1 2016 年 2 月 1 ~ 26 日宁波地区气象条件、 $PM_{2.5}$ 、水溶性离子和痕量气体浓度的时间序列

Fig. 1 Time series in meteorological variables, $PM_{2.5}$, water-soluble ions, and trace gases in Ningbo from February 1 to 26, 2016

2.2 水溶性离子和痕量气体污染特征

将 MARGA 监测的细颗粒物中水溶性离子 (SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+}) 的浓度总和与在线监测的 $PM_{2.5}$ 浓度相比 (图 2), 相关系数 r 为 0.84, 说明水溶性离子浓度总和与 $PM_{2.5}$ 浓度之间具有强相关. 拟合的直线的斜率为 0.97, 表明 MARGA 所测 8 种水溶性离子是细颗粒物的主要组分. 整个观测期间 (2 月 1 ~ 26 日)、春节前 (2 月 1 ~ 6 日)、春节间 (2 月 7 ~ 11 日) 和春节

后 (2 月 14 ~ 20 日) 的水溶性离子和痕量气体的浓度平均值见表 1.

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 主要来自气粒转化, 大气中 NO_x 和 SO_2 在氧化剂作用下, 生成硝酸和硫酸, 再与氨气反应形成铵盐. 3 个离子属于二次水溶性无机离子 (SNA), 互相影响, 与 H_2O 形成一个复杂的 SO_4^{2-} - NO_3^- - NH_4^+ - H_2O 无机气溶胶体系^[22]. 它们在观测时段的平均值如表 1 所示, 分别为 10.5 、 12.5 和 $7.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 TWSI 的 31.8% 、 37.9% 和

21.7%。春节期间 3 个离子浓度下降,分别为 9.6、8.4 和 $4.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占 TWSI 的 35.0%、30.7% 和 15.7%。相较于整个观测阶段, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 在春节期间浓度均有所下降,但 SO_4^{2-} 占比增加。细颗粒物 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 浓度比可以反映固定源和移动源对大气中 S 和 N 的贡献率^[23],整个观测阶段, NO_3^- 与 SO_4^{2-} 比值为 1.2,介于机动车尾气污染严重地区的 6.9 和电力排放明显地区的 0.9^[24] 之间,表明该地区受到移动源和固定源的综合影响;该比值比国内的上海(2013~2014 年,1.49)^[25] 和成都(2015 年,1.57)^[26] 等观测点低,说明相对国内其他地区,观测点受到移动源贡献较低。在春节期间, NO_3^- 与 SO_4^{2-} 浓度比为 0.9,说明固定源和移动源对颗粒物的相对贡献发生较大变化。 K^+ 占 TWSI 的 3.4%, $\rho(\text{K}^+)$ 平均值为 $1.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,略低于石家庄($1.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[27] 和上海($1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[28]。春节期间, $\rho(\text{K}^+)$ 平均值为 $3.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别是春节前的 3.6 倍和春节后的 4.8 倍,表明春节期间存在相关污染源。观测期间 $\rho(\text{Cl}^-)$ 平均值为 $1.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在 $\text{PM}_{2.5}$ 出现峰值时,与 SNA 等同时出现浓度增加, Cl^- 可能主要为 HCl 等与其他气体经由液相反应而形成。 Na^+ 和 Ca^{2+} 浓度较低,仅占 TWSI 的 1.3% 和 0.7%。前期研究得知, Na^+ 在该地区冬季浓度较低, Ca^{2+} 在冬季主要分布在大于 $2.5 \mu\text{m}$ 的粗颗粒态^[20]。 Mg^{2+} 在研究区域不同时期浓度均较低,说明该地区几乎不存在细颗粒态 Mg^{2+} 污染源。

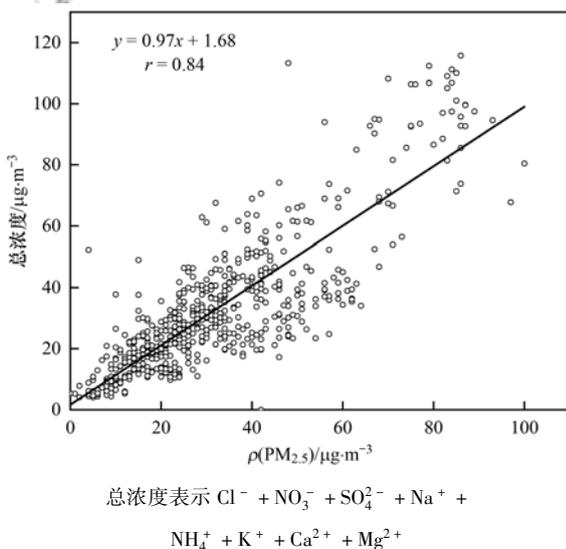


图2 MARGA 阴阳离子总浓度与在线仪器监测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性

Fig. 2 Correlation between MARGA anions and online instrument monitoring of $\text{PM}_{2.5}$

痕量气体整体浓度较低,可能与 MARGA 低估痕量气体浓度有关^[29]。 SO_2 是观测期间浓度最高的

表1 水溶性离子和痕量气体浓度

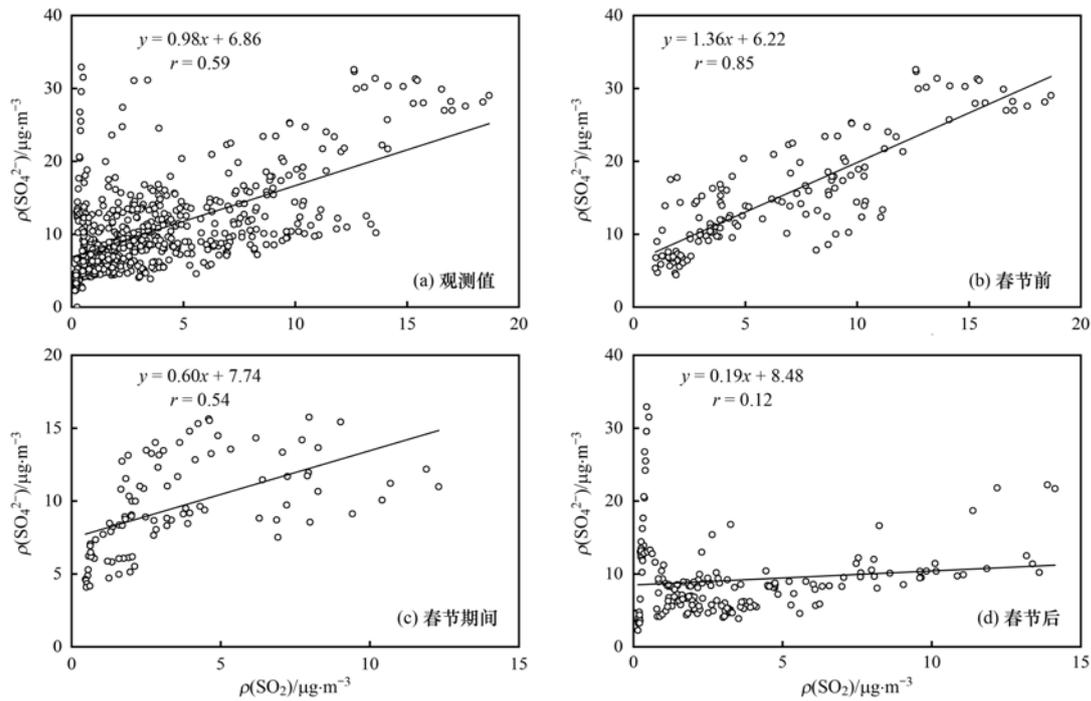
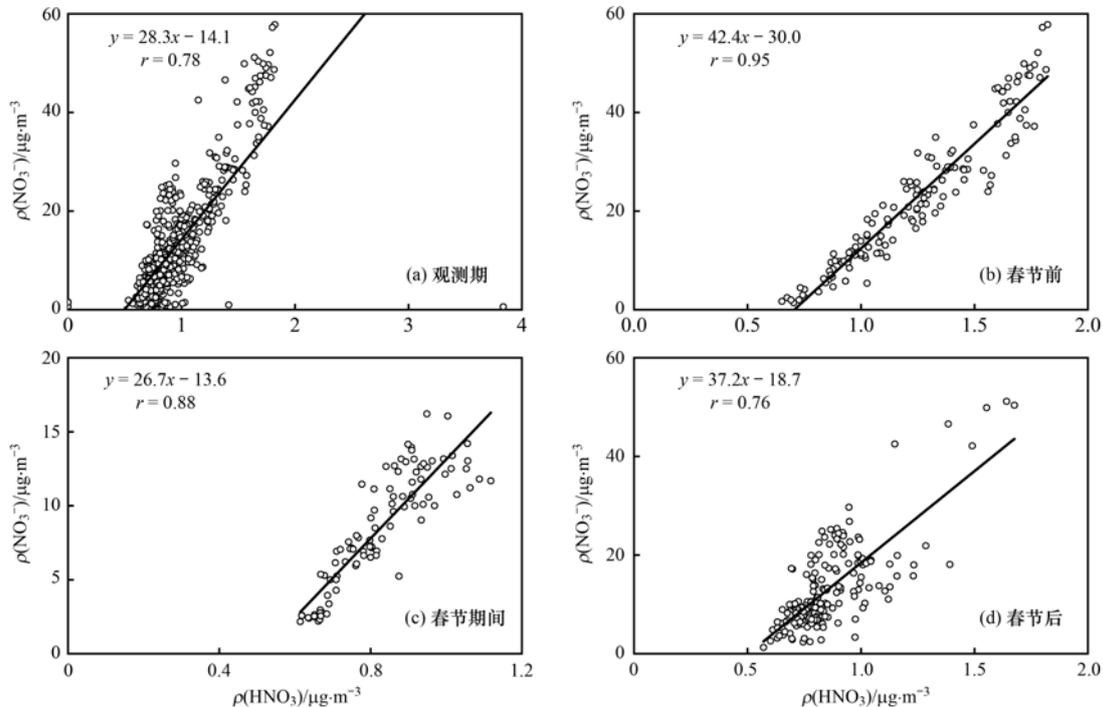
项目	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$			
	观测时期	春节前	春节期间	春节后
Cl^-	1.102	1.942	1.198	1.075
NO_3^-	12.530	22.997	8.449	12.978
SO_4^{2-}	10.528	15.301	9.612	9.113
Na^+	0.414	0.474	0.333	0.371
NH_4^+	7.171	12.119	4.310	7.361
K^+	1.124	0.931	3.430	0.708
Mg^{2+}	0.003	0.003	0.003	0.004
Ca^{2+}	0.218	0.188	0.165	0.229
TWSI	33.091	53.955	27.501	31.840
SO_2	3.744	6.697	3.602	3.281
HCl	0.044	0.153	0.040	0.006
HNO_2	0.820	1.090	0.621	0.929
HNO_3	0.940	1.250	0.825	0.853
NH_3	2.249	1.051	2.431	3.114

气体。春节前 $\rho(\text{SO}_2)$ 平均值为 $6.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约为春节期间和春节后的 2 倍,表明节前相关污染源排放量较大。 SO_2 是 SO_4^{2-} 主要的气体前体物,整个观测期间,SOR 为 0.73,说明硫酸盐主要通过 SO_2 氧化的二次转化产生。如图 3(a) 所示, SO_2 和 SO_4^{2-} 在整个观测期间呈中等相关($r=0.59$),但春节前、春节期间和春节后的 SO_2 和 SO_4^{2-} 相关性(r 为 0.85、0.54 和 0.12)差别较大,可能受到前体物浓度影响。当 SO_2 浓度较高时,促进 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 较快地生成。 $\rho(\text{HNO}_3)$ 在观测期间平均值为 $0.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在春节期间浓度较低。春节前 $\rho(\text{HNO}_3)$ 平均值为 $1.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,约为春节期间和节后的 1.5 倍。春节前、期间和春节后 HNO_3 和 NO_3^- 的相关性如图 4(b)~4(d) 所示(r 为 0.95、0.88 和 0.76),均呈现较强相关性,NOR 在观测期间为 0.93,远高于南京(0.18)^[9] 和杭州(0.15)^[30],说明 HNO_3 转化率较高,该地区存在明显二次污染。 HNO_2 和 HNO_3 主要源于机动车尾气排放,观测期间 $\rho(\text{HNO}_2)$ 比 $\rho(\text{HNO}_3)$ 低,但趋势一致,春节期间平均值均较低,可能与春节期间交通排放量下降相关。 NH_3 是大气中重要的碱性气体,春节后浓度较高,可能与污染源和大气中和反应等多种因素相关。观测期间 $\rho(\text{HCl})$ 平均值较低,为 $0.044 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春节前浓度较高。

2.3 气溶胶来源解析

利用 PMF 源解析模型对水溶性离子和 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行分析,共获得 4 个因子,模型模拟值和观测值进行相关性分析,如图 5 所示,相关系数 r 为 0.88,斜率为 0.96,解析结果可靠。

因子源成分如图 6 所示,分别为爆竹燃烧源、二次生成(背景、工业源)和扬尘源,在观测时段内

图3 SO_4^{2-} 和 SO_2 相关性Fig. 3 Correlation between SO_4^{2-} and SO_2 图4 NO_3^- 和 HNO_3 相关性Fig. 4 Correlation between NO_3^- and HNO_3

对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率分别是 21.9%、64.5% 和 13.6%。图 7 展现了 4 个污染源贡献率的时间序列。污染源贡献率是通过 EPA PMF 模型分别对 4 个污染源浓度值进行平均值为 1 的标准化处理。因子 1 中 K^+ 贡献率超过 80.0%，从图 7 可知在 2 月 7 日出现剧增。2 月 8~10 日，即春节、初一和初二，因子 1

贡献率仍处于较高水平。 K^+ 通常被认为主要来自生物质燃烧^[31]，而此前的研究表明， K^+ 在烟花气溶胶中含量丰富^[11, 13]，可作为烟花的示踪剂，该因子被定义为爆竹燃烧源。从污染源极坐标图可以看出(图 8)，该污染源浓度高值主要出现在风速小于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的各个方向，主要为本地排放造成。因子 2 中

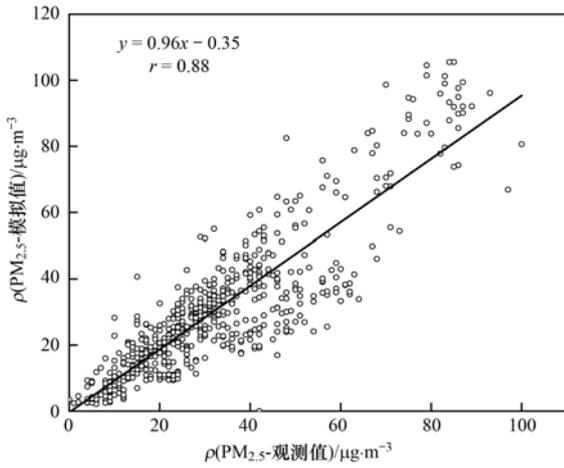


图5 PM_{2.5}观测值和PMF模拟值散点图

Fig. 5 Scatter plots of observed and PMF model simulated PM_{2.5}

NO₃⁻、SO₄²⁻和NH₄⁺这3种离子贡献率都在60.0%以上,故因子定义为二次生成源(背景).该污染源占到PM_{2.5}的55.0%,与张晶晶^[20]研究中离线采样因子的分析结果一致,是观测区域冬季最主要的污染源.从图1和图7看出PM_{2.5}浓度出现峰值超过75 μg·m⁻³的5次污染过程,二次生成来源都呈现峰值,污染特征明显.因子3中Cl⁻贡献率最大,该元素主要来源于海盐粒子、燃煤和废物焚烧等.海盐中Cl⁻/Na⁺的比值被认为是1.81^[27],本研究比值为2.79,大于海盐比值,则海盐对该因子贡献小,因子主要源于工业燃煤和废物焚烧等工业排放的HCl

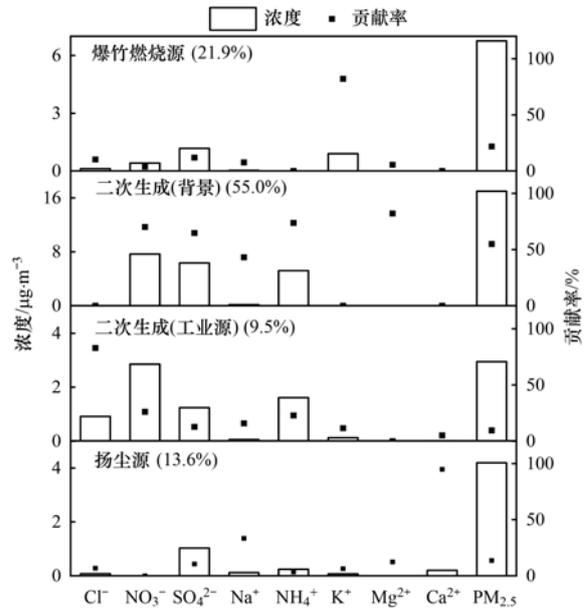
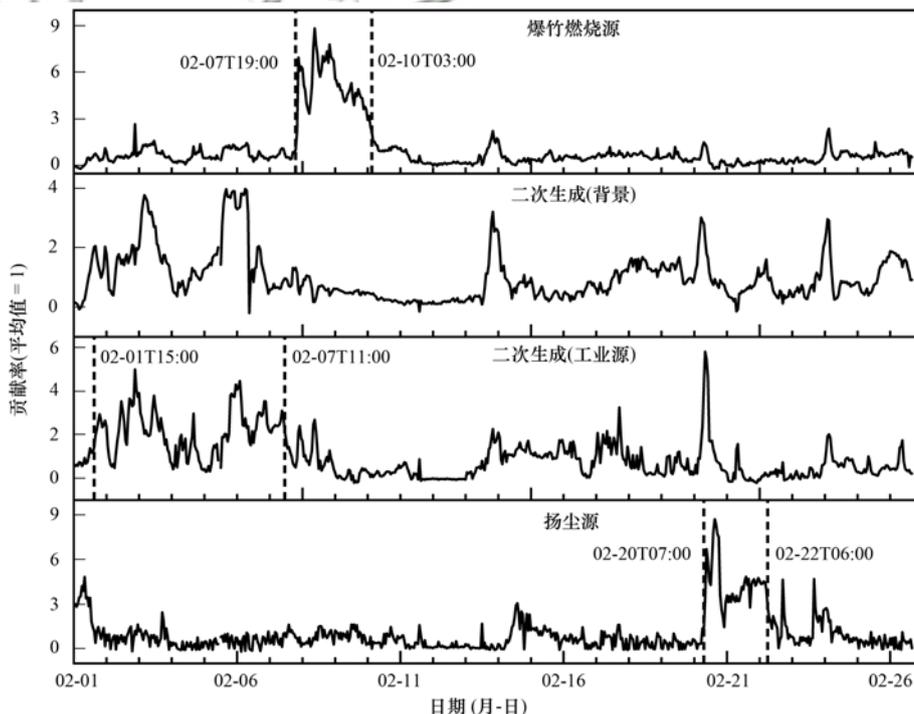


图6 PMF源成分谱

Fig. 6 Source profiles derived from PMF

等与NH₃经由液相反应而形成.因子3被定义成二次生成(工业源),占PM_{2.5}的9.5%.二次生成(工业源)与PM_{2.5}浓度变化趋势较为一致,说明污染源长期排放.二次生成的背景和工业源浓度高值主要出现在西北和西南方向(图8),风速大于2 m·s⁻¹,可能来源于站点周边西南和西北的工业园区.因子4中Ca²⁺贡献率最高,并伴随着较高Na⁺贡献率. Ca²⁺主要来源于沙尘、土壤尘和建筑尘,



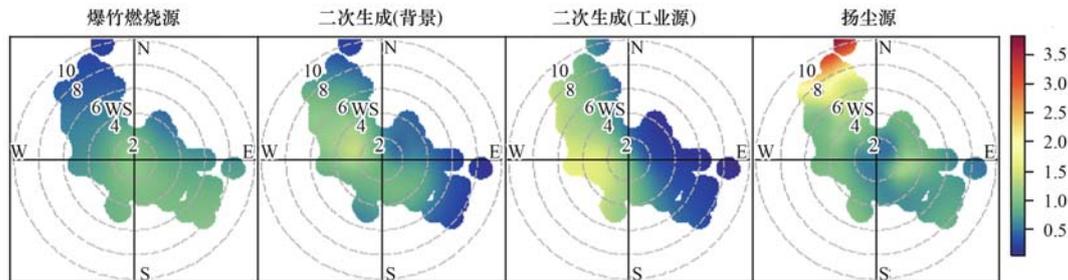
平均值=1表示模型计算后浓度被归一化,每个污染源浓度在观测期间的平均值为1,贡献率表示模型软件对污染源浓度以平均值=1的标准化处理后的计算值

图7 PMF模型污染源贡献率变化

Fig. 7 Contribution rate variation in pollution sources derived PMF model

Na^+ 主要来源于海盐、土壤尘和燃煤飞灰. 在 2 月 20 ~ 22 日期间, 因子 4 贡献明显增加, 表明有污染输入, 2 月 20 日因子贡献率达到峰值时. 该因子

浓度高值出现在西北风向(图 8), 风速大于 $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 该因子可能与西北的扬尘输送相关, 因子定义为扬尘源.



色块表示特定风速风向下污染源加权浓度平均值, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 圆圈线代表风速 (ws), 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 8 污染源极坐标

Fig. 8 Polar diagram for pollution sources

2.4 水溶性离子平衡状态特征

为研究不同污染源对细颗粒物化学组成影响, 对二次生成(工业源)、爆竹燃烧源和扬尘源小时贡献率曲线进行变点检测(change point detection)的二元切分(binary segmentation), 如图 7 所示, 得到 3 对切分点, 分别为 2 月 1 日 15:00 和 2 月 7 日 11:00、2 月 7 日 19:00 和 2 月 10 日 03:00 以及 2 月 20 日 07:00 和 2 月 22 日 06:00. 通过切分点进行时段划分, 分别对应 t_1 时段、 t_2 时段和 t_3 时段. 由图 9(a) 知, 在 t_1 时段, 二次生成(背景)对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率

达到 70.4%. 二次生成(工业源)贡献率为 13.2%, 高于整个观测时段贡献率(9.5%). t_2 时段开始时间为除夕夜, 结束时间为初三凌晨. 该时段爆竹燃烧源成为贡献率最高的污染源[图 9(b)], 为 69.2%, 说明除夕到初三爆竹燃烧最集中的时段. 二次生成(工业源)在这段时间, 因春节假期部分工厂停产, 排放源减少, 贡献率仅为 3.8%. t_3 时段[图 9(c)], 扬尘源贡献大幅增加, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率为 50.3%. 而二次生成(工业源)贡献率由 t_2 时段的 3.8% 增加到 6.1%, 表明工厂开始逐步恢复生产.

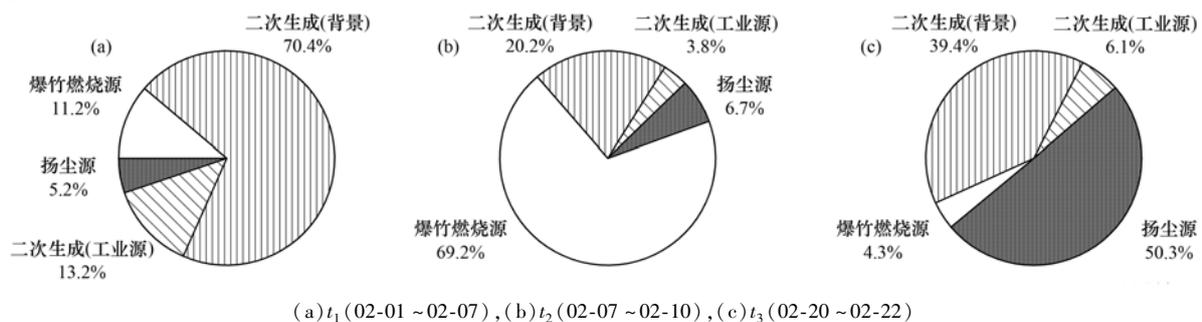
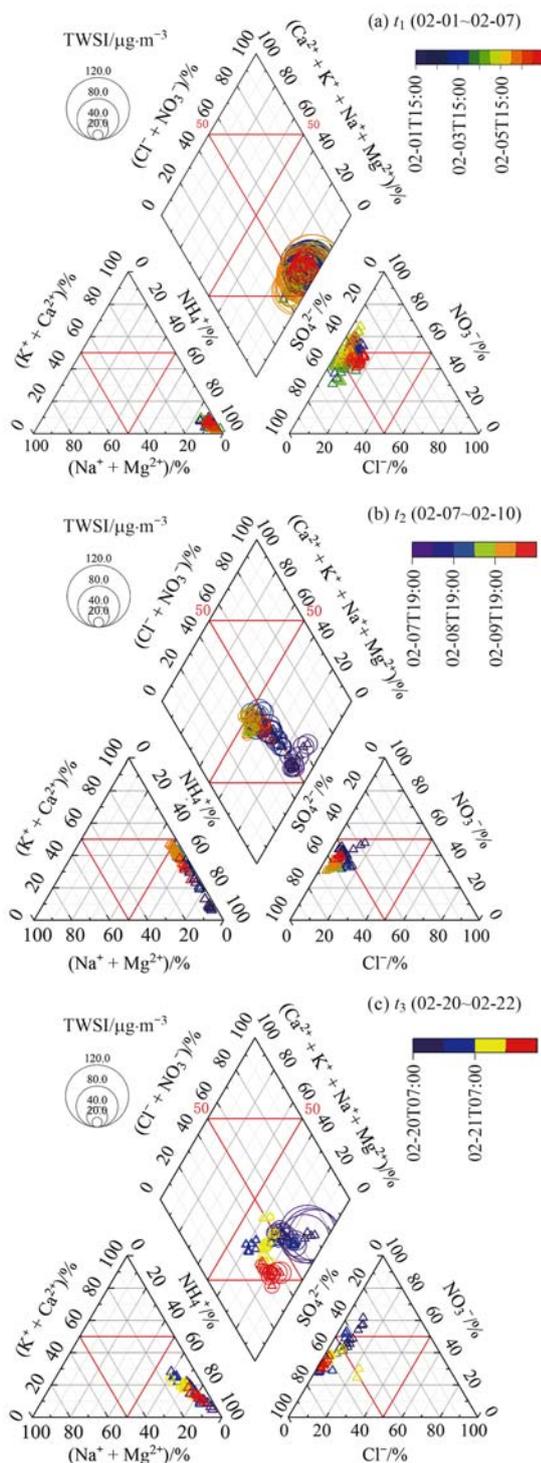


图 9 不同时段污染源占比

Fig. 9 Proportion of pollution sources in different periods

将颗粒物中水溶性无机离子按不同污染时段做 Piper 图(图 10). 样品点主要出现在 NH_4^+ 为主导的阳离子区域和 SO_4^{2-} 为主导的阴离子区域. 在 t_1 时段二次污染是主要的污染来源, 离子组成如图 10(a) 所示. 样品点分布较为集中, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化对离子占比影响较小. NH_4^+ 平均占阳离子的 92.2%, 细颗粒主要以 NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 状态存在. 在 t_2 时段, 如图 10(b) 所示, 爆竹燃烧源对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献最大, 细粒子的混合状态以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为主, 包含 K_2SO_4 、 NH_4NO_3 和 KNO_3 等成分. 阳离子三元图中, $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ 在整个污染过程中占到 2.5% ~ 4.9%,

变化幅度小; NH_4^+ 平均占比为 64.5%, 较 t_1 时段降低; $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 平均占比为 32.0%, 较 t_1 时段增加, 主要为 K^+ 浓度增加. 随着污染过程推移, 阳离子散点逐渐向 NH_4^+ 占比下降和 K^+ 占比增加方向移动. 样品点在阴离子三元图中较集中, SO_4^{2-} 是占比最高的离子. 在 t_3 时段, 扬尘源为主要污染源, $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ 平均占比分别为 16.4% 和 8.1%. 在 2 月 20 日 07:00 到 2 月 21 日 07:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低, 扬尘源贡献较高时, NH_4^+ 占比降低, $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ 占比增加; 当 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平稳后, NH_4^+ 占比逐渐增加. 阴离子则由 NO_3^- 为主要成分, 向以



TWSI 表示样品所有水溶性离子浓度总和;
色块表示标识的 12 h 污染时段

图 10 不同时段水溶性离子 Piper 图

Fig. 10 Piper diagram of water-soluble ions in different periods
 SO_4^{2-} 为主要成分转变。

3 结论

(1) 宁波冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $33.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 存在轻度污染. MARGA 测定的水溶性离子总浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有很好的相关性. 水溶性离子浓度大小排序为: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- >$

$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分, 占到所测定水溶性离子浓度的 91.2%.

(2) 爆竹燃烧源、二次生成(背景、工业源)和扬尘源是宁波沿海地区冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的主要来源, 且该地区二次污染特征明显. 爆竹燃烧源浓度在春节到初二出现剧增, 扬尘源主要源于西北的大气输送.

(3) 不同污染来源对水溶性阳离子组分影响明显. 二次污染较重时, NH_4^+ 占比高达到 92.2%; 爆竹燃烧为主要污染来源时, $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 占比显著增加, 平均占比为 32.0%; 扬尘源为主要污染时, $\text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ 占比增加, 分别为 16.4% 和 8.1%.

参考文献:

- [1] 蒋琳, 朱彬, 王红磊, 等. 霾与轻雾天气下水溶性离子的组分特征——冬季长江三角洲地区一次污染过程分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3601-3610.
Jiang L, Zhu B, Wang H L, et al. Characteristics of water-soluble ions in the haze and mist days in winter in Yangtze River Delta[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3601-3610.
- [2] 陈颖元, 王晓琦, 程水源, 等. 京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2481-2492.
Chen H Y, Wang X Q, Cheng S Y, et al. Analysis of meteorological causes and transmission characteristics of a heavy haze process in Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River Delta[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(6): 2481-2492.
- [3] 姬艺珍, 郭伟, 胡正华, 等. 太原市 $\text{PM}_{2.5}$ 积累特征及重污染天气成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 853-862.
Ji Y Z, Guo W, Hu Z H, et al. Accumulation characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and the causes of serious pollution weather in Taiyuan city, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 853-862.
- [4] 张宸赫, 赵天良, 陆忠艳, 等. 沈阳地区一次颗粒物重污染天气过程的气象成因分析[J]. 环境保护科学, 2021, **47**(1): 97-103.
Zhang C H, Zhao T L, Lu Z Y, et al. Analysis of meteorological causes of a heavy particulate matter pollution weather in Shenyang[J]. Environmental Protection Science, 2021, **47**(1): 97-103.
- [5] Schlesinger R B, Kunzli N, Hidy G M, et al. The health relevance of ambient particulate matter characteristics: coherence of toxicological and epidemiological inferences[J]. Inhalation Toxicology, 2006, **18**(2): 95-125.
- [6] Tian M, Wang H B, Chen Y, et al. Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(11): 7357-7371.
- [7] Bougiatioti A, Zampas P, Koulouri E, et al. Organic, elemental and water-soluble organic carbon in size segregated aerosols, in the marine boundary layer of the Eastern Mediterranean[J]. Atmospheric Environment, 2013, **64**: 251-262.
- [8] 朱李华, 陶俊, 陈忠明, 等. 2010 年 1 月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 13-19.
Zhu L H, Tao J, Chen Z M, et al. Reconstructed ambient light

- extinction coefficient and its contribution factors in Beijing in January, 2010[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 13-19.
- [9] 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- Zhou Y Y, Ma Y, Zheng J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in PM_{2.5} during winter hazy days at north suburban Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- [10] Yao X H, Fang M, Chan C K. The size dependence of chloride depletion in fine and coarse sea-salt particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 743-751.
- [11] 马莹, 吴兑, 刘建. 珠三角春节期间 PM_{2.5} 及水溶性离子成分的变化——以 2012 年为例[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 2890-2895.
- Ma Y, Wu D, Liu J. The characteristics of PM_{2.5} and its water soluble ions during Spring Festival in PRD in 2012[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2890-2895.
- [12] 姚祎, 王宇, 俞海, 等. 北京市 2020 年春节期间空气质量影响因素分析[J]. *环境与可持续发展*, 2021, **46**(2): 107-114.
- Yao Y, Wang Y, Yu H, *et al.* Analysis on the influencing factors of air quality during the Spring Festival in Beijing in 2020 [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, **46**(2): 107-114.
- [13] Yao L, Wang D F, Fu Q Y, *et al.* The effects of firework regulation on air quality and public health during the Chinese Spring Festival from 2013 to 2017 in a Chinese megacity [J]. *Environment International*, 2019, **126**: 96-106.
- [14] Yu Y Y, He S Y, Wu X L, *et al.* PM_{2.5} elements at an urban site in Yangtze River Delta, China: high time-resolved measurement and the application in source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **253**: 1089-1099.
- [15] 林佳梅, 易辉, 佟磊, 等. 气团来源对沿海城市 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子形成特征的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(4): 795-802.
- Lin J M, Yi H, Tong L, *et al.* Study on the influence of air masses on secondary water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} in a coastal city[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(4): 795-802.
- [16] Yang M R, Zhou J, Dai X R, *et al.* Characteristics of single aerosol particles during pollution in winter in an urban area of Ningbo, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2019, **19**(8): 1697-1707.
- [17] Cai Q L, Dai X R, Li J R, *et al.* The characteristics and mixing states of PM_{2.5} during a winter dust storm in Ningbo of the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136146.
- [18] Peeters L. A background color scheme for piper plots to spatially visualize hydrochemical patterns [J]. *Groundwater*, 2014, **52**(1): 2-6.
- [19] Teng W C, Fong K L, Shenkar D, *et al.* Piper diagram - A novel visualisation tool for process design [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, **112**: 132-145.
- [20] 张晶晶. 沿海地区气溶胶的粒径分布及气粒分配研究[D]. 厦门: 中国科学院城市环境研究所, 2018.
- [21] 林佳梅. 基于在线监测的沿海地区 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征的研究[D]. 厦门: 中国科学院城市环境研究所, 2019.
- [22] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1998. 1-1326.
- [23] 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.
- [24] Tolocka M P, Solomon P A, Mitchell W, *et al.* East versus West in the US: chemical characteristics of PM_{2.5} during the Winter of 1999 [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **34**(1): 88-96.
- [25] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [26] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季 PM_{2.5} 化学组分污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 76-85.
- Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} chemical components in Chengdu in Winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 76-85.
- [27] 陈静, 杨鹏, 韩军彩, 等. 基于高分辨率 MARGA 数据分析石家庄 PM_{2.5} 成分谱特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2594-2604.
- Chen J, Yang P, Han J C, *et al.* Analysis of PM_{2.5} spectrum characteristics in Shijiazhuang based on high resolution MARGA data [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2594-2604.
- [28] 王晓浩, 赵倩彪, 崔虎雄. 基于在线监测的上海郊区冬季 PM_{2.5} 来源解析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2015, **51**(3): 517-523.
- Wang X H, Zhao Q B, Cui H X. PM_{2.5} source apportionment at suburb of Shanghai in winter based on real time monitoring [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2015, **51**(3): 517-523.
- [29] Rumsey I C, Cowen K A, Walker J T, *et al.* An assessment of the performance of the Monitor for Aerosols and Gases in ambient air (MARGA): a semi-continuous method for soluble compounds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5639-5658.
- [30] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM_{2.5} in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [31] Raveendran K, Ganesh A, Khilar K C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics [J]. *Fuel*, 1995, **74**(12): 1812-1822.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)