

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭峰, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源

刘慧琳¹, 陈志明¹, 毛敬英¹, 梁桂云¹, 黄炯丽¹, 李宏姣¹, 杨俊超¹, 莫招育^{1,2*}

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 为研究南宁市四季大气颗粒物的化学成分及污染来源, 利用单颗粒气溶胶质谱仪 (single particle aerosol mass spectrometer, SPAMS) 对南宁市 2015 年四季大气细颗粒物进行观测。SPAMS 所测得 4 个观测阶段大气细颗粒物数浓度与细颗粒物质量浓度线性相关系数均在 0.75 以上, 在一定程度上颗粒物数浓度可反映大气污染状况。南宁市四季大气细颗粒物平均质谱图体现出冬、春两季二次反应生成的污染物质较多。利用自适应共振神经网络分类方法对细颗粒物化学成分进行分类, 南宁市细颗粒物各化学成分数浓度占比和污染来源在四季均有差异, 且化学成分能体现污染来源。冬季元素碳最高, 对应较高的燃煤源; 秋季有机碳最高, 对应较高的机动车尾气源; 夏季富钾颗粒、左旋葡聚糖和矿物质较高, 对应较高的生物质燃烧源和扬尘源; 春季富钠颗粒和重金属略高。在污染升高过程, 生物质燃烧源和燃煤源等贡献较大。

关键词: 单颗粒气溶胶质谱仪; 细颗粒物; 四季; 化学成分; 污染来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0894-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201602009

Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning

LIU Hui-lin¹, CHEN Zhi-ming¹, MAO Jing-ying¹, LIANG Gui-yun¹, HUANG Jiong-li¹, LI Hong-jiao¹, YANG Jun-chao¹, MO Zhao-yu^{1,2*}

(1. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To study the chemical composition and pollution sources of the fine particulate matter during the four seasons in Nanning, single particle aerosol mass spectrometry was performed to characterize the fine particulate matter in Nanning during the four seasons. The correlation (R^2) between the fine particulate matter number concentration and the mass concentration of the fine particulate matter obtained using SPAMS was all above 0.75 in the observation period. The particle number concentration could reflect the atmospheric pollution situation to some degree. The average mass spectrogram of the fine particulate matter reflected that secondary pollutants were more in winter and spring in Nanning. The Art-2a classification method was used to classify the chemical composition of the fine particulate matter. The results showed that the number concentration of the chemical composition and sources of pollution had differences in the four seasons. Chemical composition could reflect pollution sources. The elevated elemental carbon was positively with increasing coal combustion in winter. The elevated organic carbon was positively correlated with motor vehicle source in autumn. Rich potassium particles, levoglucosan and substance were positively correlated with biomass burning source and dust in summer. The rich sodium particles and heavy metals were higher in spring. During the process of increasing pollution, the contributions of biomass and coal combustion sources were large.

Key words: single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS); fine particulate matter; the four seasons; chemical component; pollution source

大气细颗粒物是大气能见度下降^[1,2]、影响降水的酸性^[3]、全球变暖、霾等大气污染现象的主要诱导因素之一。因其粒径较小, 比表面积较大, 活性强, 更易富集有毒有害物质, 对人民群众的健康存在巨大潜在威胁^[4,5]。

2014 年, 南宁市空气质量达标天数比例 (AQI 优良率) 为 80.0%。空气质量达标天数为 292 d (其中优 90 d, 良 202 d), 出现轻度污染 50 d, 中度污染 15 d, 重度污染 8 d。2014 年市区环境空气 $PM_{2.5}$ 年平均浓度分别为: $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过《环境空气质量

标准》(GB 3095-2012) 年平均二级标准 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 超标倍数为 0.4。因此研究细颗粒物成分及污染来源是做好大气污染防治工作关键, 改善南宁市环境空气质量迫在眉睫。目前, 仅有对南宁市

收稿日期: 2016-02-03; 修订日期: 2016-09-27

基金项目: 广西环境保护厅项目 (广西大气 $PM_{2.5}$ 特性与控制对策研究); 广西科学研究与技术开发计划项目 (桂科合 14125008-2-11); 广西自然科学基金项目 (2015GXNSFBA139203); 广西重点研发项目 (桂科 AB16380292)

作者简介: 刘慧琳 (1986~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境研究与污染防治, E-mail: 517507123@qq.com
* 通信作者, E-mail: 65678503@qq.com

一次霾过程的污染特征分析^[6~8],其主要污染物为细颗粒物,但对全年的大气细颗粒物污染特征未见详细分析. 为了全面了解大气细颗粒物的四季变化特征而开展此项研究.

在线源解析法针对颗粒物来源不清、机制不明等问题,可在短时间内定性识别主要颗粒物(主要是PM_{2.5})的来源,弥补传统方法存在的工作周期长、需要大量人力物力等不足^[9,10]. 我国对单颗粒飞行时间质谱仪的研发与应用起步较晚,广州禾信分析仪器有限公司于2010年研制出单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS)^[11,12]. SPAMS能够同时获得单颗粒的空气动力学直径和正负离子质谱数据,已被国内广泛应用于气溶胶研究^[13~15]. 如周静博等^[16]利用SPAMS研究石家庄市冬季连续霾天气的污染特征及成因;潘海燕^[17]利用SPAMS研究淮南市冬季霾空气污染;张志朋等^[18]对桂林市夏季大气PM_{2.5}化学组成和成分分布进行质谱研究. 本研究利用单颗粒气溶胶质谱仪连续在线监测,实现大气细颗粒物实时动态源解析,同时,选取南宁市2015年4个季节部分时段的细颗粒物化学成分和污染来源进行差异分析,以期对环境管理部分指定污染防治对策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验观测

本研究在线监测点位设置在广西南宁市广西环科院大气科学观测站楼顶,距地面约30 m. 该监测点位周围主要为办公楼、居民楼、学校和街道,无明显工业源. 根据南宁市季节规律,本次观测时间选择2015年的2月15~24日(代表冬季)、5月6~20日(代表春季)、8月5~19日(代表夏季)、10月28日~11月11日(代表秋季),使用SPAMS 0515(广州禾信分析仪器有限公司生产)对南宁市四季大气细颗粒物的数浓度、粒径、化学组分和来源的占比及变化规律等进行监测.

1.2 SPAMS 工作原理

气溶胶飞行时间质谱仪(aerosol time of flight mass spectrometry, ATOFMS)最早由Prather等提出^[19,20],近20年来得到了很大发展,Pratt等^[21]与Laskin等^[22]已经对该仪器的原理以及应用进行了十分充分的综述. 其原理是利用空气动力学透镜实现单气溶胶粒子的聚焦,利用双激光测径技术对0.13~3 μm的粒子进行粒径测量,同时触发一束激光,对测径粒子进行电离,最后通过双极飞行时间质谱技术对

电离产生的正负离子进行检测. 该技术可以实现单颗粒气溶胶粒径和化学成分同时检测,获得每个气溶胶粒子的正负质谱图信息,可以分析颗粒物中的元素碳、有机碳、矿物元素、盐类、金属等成分.

1.3 数据处理

质谱仪采集数据软件为YAADA,软件核心为自适应共振神经网络算法(adaptive resonance yheory-2a, ART-2a),运行3个主要参数为警戒因子、学习因子和迭代次数,分别为0.75、0.05和20. 本研究的数据处理参数同刘慧琳等^[23]利用SPAMS研究南宁市冬季颗粒物气溶胶化学成分中的参数. 本研究所测颗粒粒径范围:0~2.5 μm;粒径检测速度:20个·s⁻¹;击打率:>20%;质谱分辨率:优于500FWHM(full width at half maximum);化学成分可测量范围:1~500 u;266 nm激光电离,电离激光器能量:0.5~0.6 mJ,能量密度:108 W·cm⁻²;气体进样标准流量:75 mL·min⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 四季细颗粒物数浓度与质量浓度相关性分析

冬季10日共采集3 390 248个颗粒物(SIZE, matlab中的一个函数),其中同时被测径和带有正负离子信息的颗粒物833 363个,占24.6%. 春季15日共采集1 951 166个颗粒物,其中同时被测径和带有正负离子信息的颗粒物294 008个,占15.7%. 夏季15日共采集1 341 420个颗粒物,其中同时被测径和带有正负离子信息的颗粒物124 933个,占9.3%. 秋季15日共采集2 492 271个颗粒物,其中同时被测径和带有正负离子信息的颗粒物353 782个,占14.2%. 四季监测结果表明,研究选取的部分时间段单颗粒气溶胶质谱仪所测得细颗粒物数浓度(数浓度指单位时间内仪器所检测到的单颗粒数量)变化趋势与大气细颗粒物质量浓度高低变化趋势较为一致,见图1. 根据线性关系分析,四季细颗粒物的质量浓度与数浓度相关性普遍较好,见表1,说明质谱仪的监测数据一定程度上可反映大气污染状况,有研究意义.

表1 四季细颗粒物数浓度与质量浓度线性关系¹⁾
Table 1 Liner relationship between number concentration and mass concentration of the fine particulate matter in the four seasons

季节	冬季	春季	夏季	秋季
相关系数	0.758 5	0.755 2	0.836 4	0.835 7

1)冬季2月15~24日去除掉2月19日(春节)凌晨00:00~02:00这3 h左右因燃放烟花的瞬时污染影响^[24]

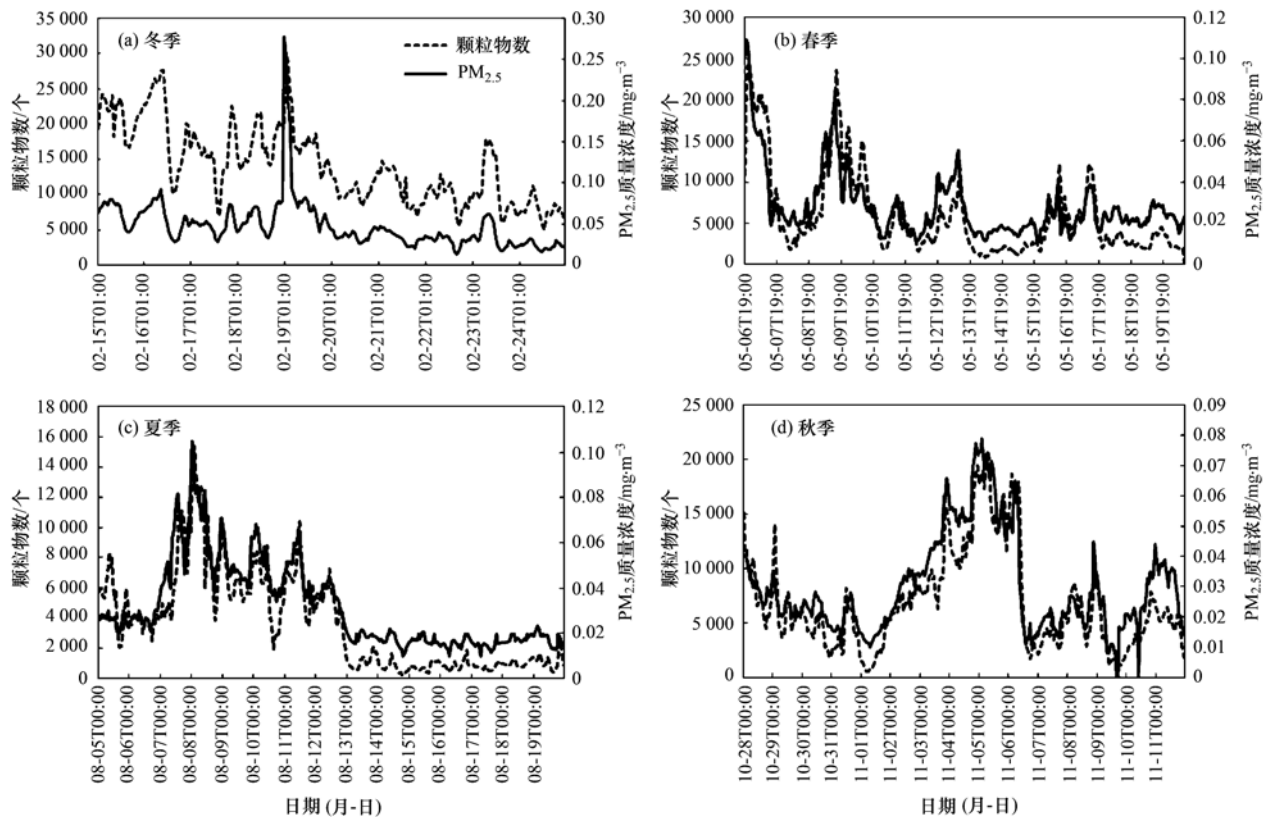


图1 四季细颗粒物数浓度与质量浓度的变化趋势对比

Fig. 1 Contrast of changing tendency between number concentration and mass concentration of the fine particulate matter in the four seasons

2.2 四季细颗粒物物质谱信息分析

将四季检测到的细颗粒物进行质谱分析,平均质谱图见图2。

从四季各监测时段的细颗粒物平均质谱图来看,均有较明显的碳族元素信号,即 C_2^+ 、 C_3^+ 、 C_4^+ 、 C_5^+ 、 C_2^- 、 C_3^- 、 C_4^- 、 C_5^- 和 C_6^- (元素碳成分); 另有较强的 Na^+ 、 K^+ 、 Fe^+ / CaO^+ (矿物质成分), 以及 CN^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 HSO_4^- 等离子信号。对比发现,四季正谱图相似,夏季和秋季还存在明显的 $C_2H_3^+$ 、 $C_2H_3O^+$ (有机碳成分)、 CNO^- 等离子信号; 负谱图中,冬春两季相比夏秋季的 NO_2^- 、 NO_3^- 和 HSO_4^- 等离子信号高,说明二次反应生成的物质较多。

2.3 四季细颗粒物化学成分分析

SPAMS 对颗粒物中的成分分类方法主要有两种,一是根据特征离子提取直接分类,二是利用自适应共振神经网络分类方法(Art-2a),根据细颗粒物化学成分结合形式的不同进行分类^[25,26]。Art-2a 分类方法在国内外应用较为广泛,能识别颗粒物的来源。本研究利用 Art-2a 分类方法,再经过人工合并,大致确定南宁市四季细颗粒物化学成分主要有元素

碳、有机碳、元素碳有机碳混合颗粒、富钾颗粒、富钠颗粒、矿物质、左旋葡聚糖以及重金属等8类。分类方法可详见刘慧琳等^[23]利用 SPAMS 研究南宁市冬季颗粒物气溶胶化学成分中的研究。元素碳其正负谱图中含有信号较强的碳族元素; 有机碳其正谱图中含有 $C_2H_3^+$ 、 C_3H^+ 、 $C_2H_3O^+$ 、 $C_4H_3^+$ 和 $C_5H_3^+$ 等信号。富钾颗粒其正谱图中 K^+ 信号明显高于其他信号,有时还伴有 K_2Cl^+ 、 $K_3SO_4^+$, 其他信号不明显。富钠颗粒其正谱图中 Na^+ 信号明显高于其他信号,另外还含有 Na_2O^+ 、 Na_2OH^+ 等信号。矿物质其正谱图中多含有 Ca^+ 、 Al^+ 、 Fe^+ 、 Mg^+ 等矿物质离子信号,负谱图中含有 SiO_3^- 信号的颗粒物。左旋葡聚糖其正谱图中有明显的 K^+ 信号,负谱图中有 CN^- 、 CNO^- 、 $C_2H_3O_2^-$ 和 $C_3H_5O_2^-$ 等信号。重金属其正谱图中含有明显的重金属离子信号,如 Mn^+ 、 Pb^+ 、 Cu^+ 等。

以颗粒物数浓度统计,四季细颗粒物化学成分对比结果见图3和表2。

各化学成分数浓度占比在四季均有差异。元素碳数浓度占比以冬季最高,夏季最低,其主要来源于燃煤、机动车尾气以及生物质燃烧排放等,可见在

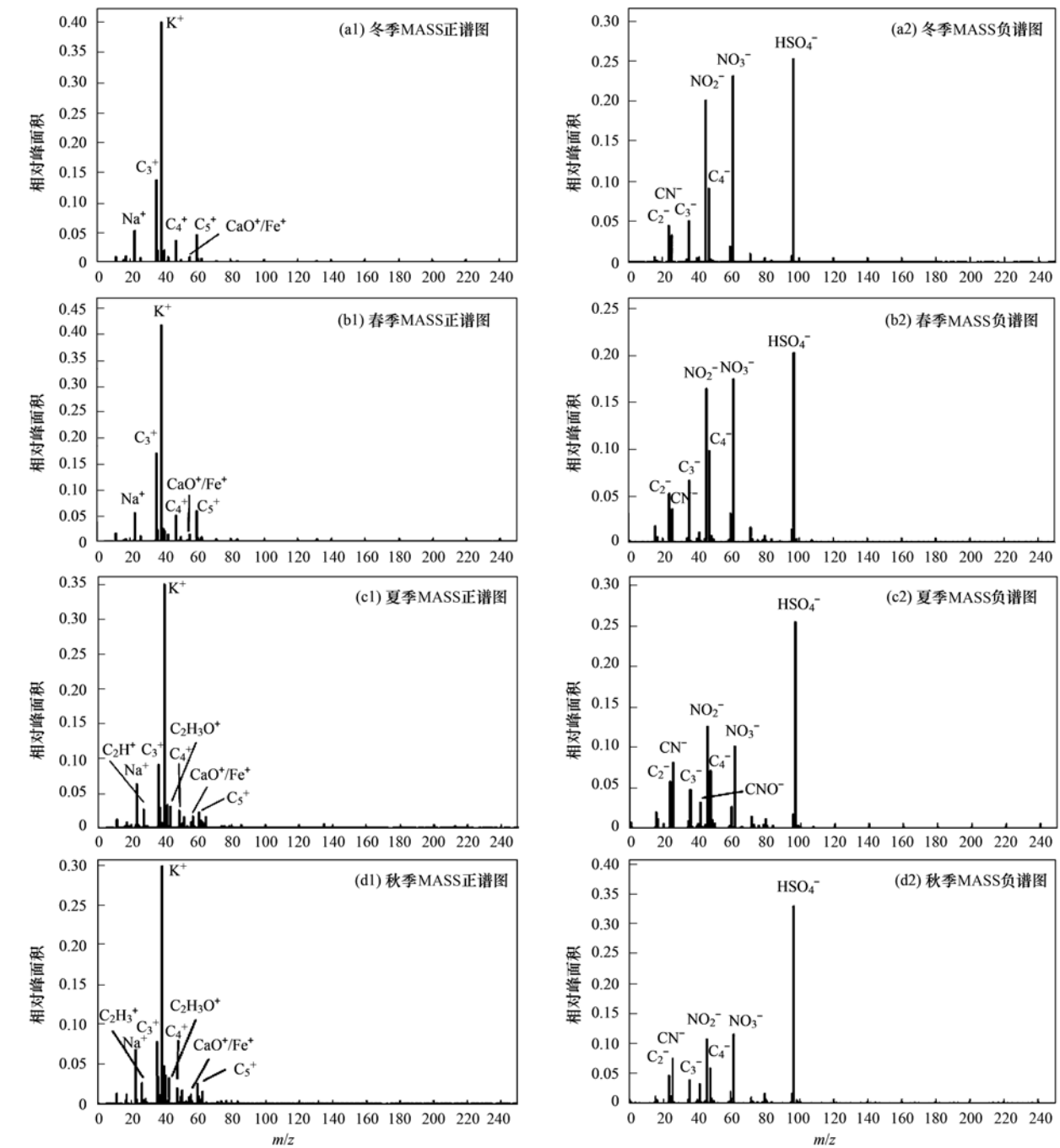


图 2 四季细颗粒物化学成分平均质谱图

Fig. 2 Average mass spectrogram of the chemical components of the fine particulate matter in the four seasons

化学成分	冬季	春季	夏季	秋季
元素碳	76.7	63.1	31.5	29.3
有机碳	8.4	10.0	18.9	31.1
元素碳有机碳混合颗粒	4.9	5.3	5.9	10.8
富钾颗粒	6.9	7.0	24.8	17.8
矿物质	2.0	3.7	7.0	3.2
富钠颗粒	0.1	5.5	3.7	4.6
左旋葡聚糖	0.3	4.0	7.6	2.7
重金属	0.6	1.4	0.6	0.5

冬季静稳天气下, 比较容易累积该类型污染物, 同时易发生二次化学反应. 秋季有机碳数浓度占比最高, 夏季有机碳也相对冬春季较高, 主要来源于燃煤、生物质燃烧排放以及工业工艺排放, 与周静博等^[16]的研究结果相近, 表明该监测时段受燃煤影响大于受机动车尾气影响, 可能该时段企业生产量大. 夏季富钾颗粒和左旋葡聚糖数浓度占比较高, 秋季次之, 反映的是生物质燃烧源较多^[27], 可能是夏季繁忙的农活和秋季秸秆燃烧带来的(截取夏季观测

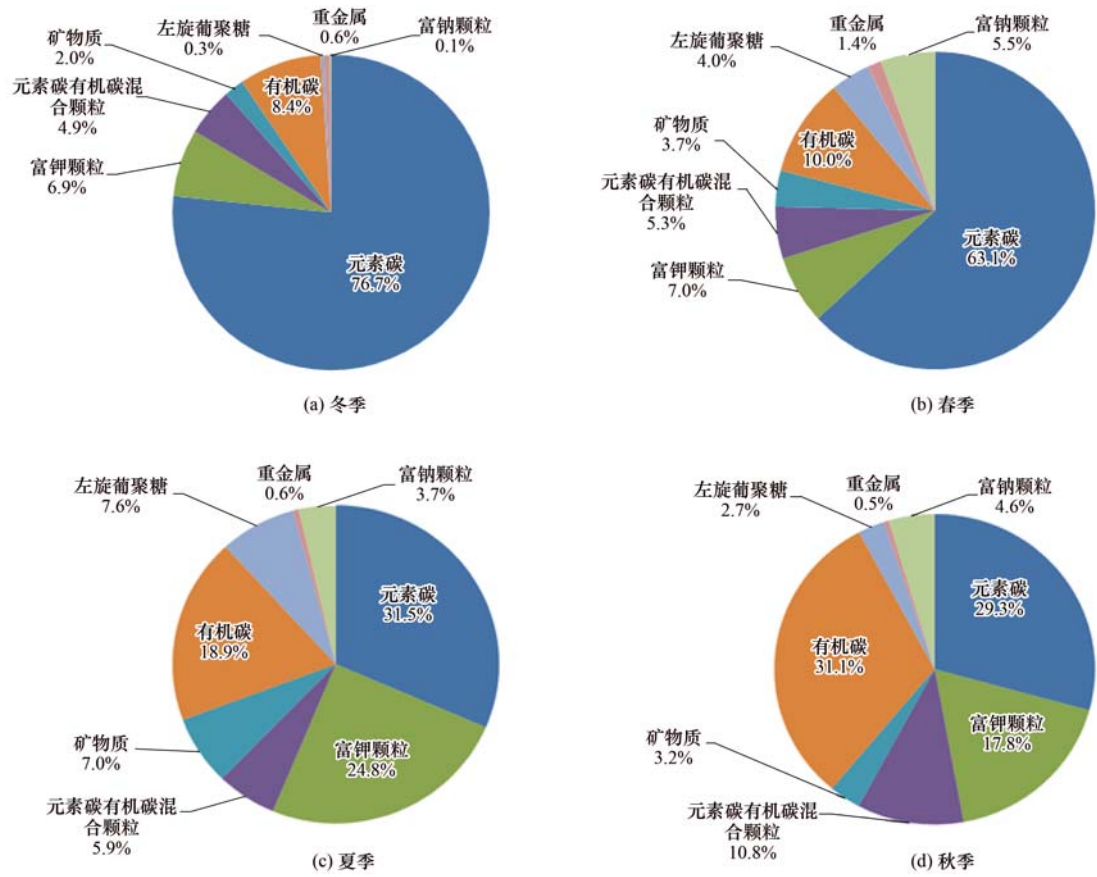


图 3 四季细颗粒物化学成分分布

Fig. 3 Distribution of chemical components of the fine particulate matter in the four seasons

期间部分时段的 NASA 卫星火点,见图 4,可以看到南宁市周边的越南、老挝、贵州及桂北一带的生物质燃烧较多,会带来一定的传输影响);夏季矿物质数浓度占比较高,可能是空气流动频繁,易带起扬尘所致. 富钠颗粒主要来源于海盐粒子,还有部分来自于扬尘,春夏季富钠颗粒数浓度占比较高主要是受季风气候的影响,来自南向的气流较多,带来海盐

粒子;同时监测到春季重金属中有 V^{+} 成分,见图 5,多来自于船舶重油^[28]、含钒矿石的开采和五氧化二钒的冶炼过程. 南宁市春季东方上风向上有上林县工业区,含钒颗粒物的远程输送也会带来一定影响^[29].

2.4 细颗粒物化学成分随浓度变化的案例分析
截选秋季 11 月 2 ~ 5 日细颗粒物浓度上升过



红色三角为南宁

图 4 2015 年夏季观测期间部分时段的 NASA 卫星火点图

Fig. 4 NASA satellite point figures in part time of the summer observation period in 2015

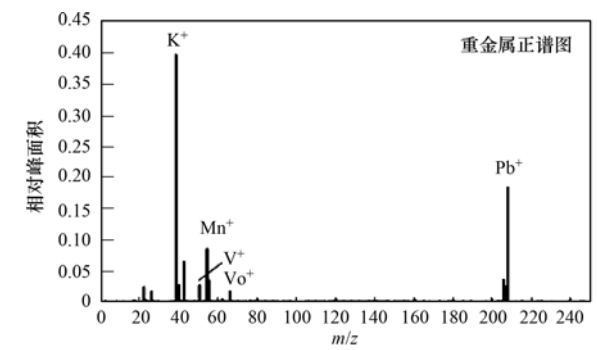


图 5 春季细颗粒物化学成分平均质谱图

Fig. 5 Average mass spectrum of the chemical components of the fine particulate matter in spring

程,见图 1,研究细颗粒物化学成分随浓度变化的情况. 11 月 2 日 00:00,南宁市细颗粒物浓度为 $21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,逐渐上升至 11 月 5 日 00:00 的 $75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,每小时采集到的细颗粒物也从 5 422 个增加到 19 305 个. 从图 6 中可以看到,各化学成分总体上随总颗粒物数升高而升高. 具体从表 3 分析,随着细颗粒物变化趋势最明显的是富钾颗粒、左旋葡聚糖和元素碳,说明污染增加的时候,生物质燃烧和燃煤、机动车尾气等的污染影响贡献较大. 重金属和矿物质在人为污染过程中体现较小.

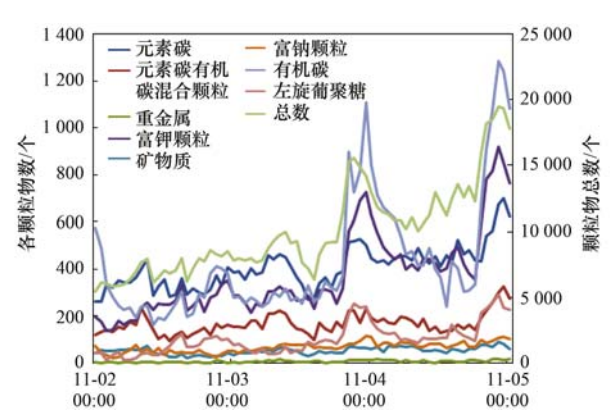


图 6 各化学成分随细颗粒物数变化趋势

Fig. 6 Change of chemical components with fine particulate matter

2.5 四季细颗粒物污染来源分析

基于上述研究结果,以颗粒物数浓度统计,将南宁市细颗粒物污染来源分为扬尘源、生物质燃烧源、工业工艺(非燃烧产生的颗粒)源、机动车尾气源、燃煤源和其它等六类,见图 7 和表 4.

南宁市四季细颗粒物主要的污染来源为燃煤源、机动车尾气源、工业工艺源和生物质燃烧源,因仪器监测到的是粒径较小的颗粒物,所以显示出来的扬尘源占比不大. 冬季细颗粒物污染来源最多

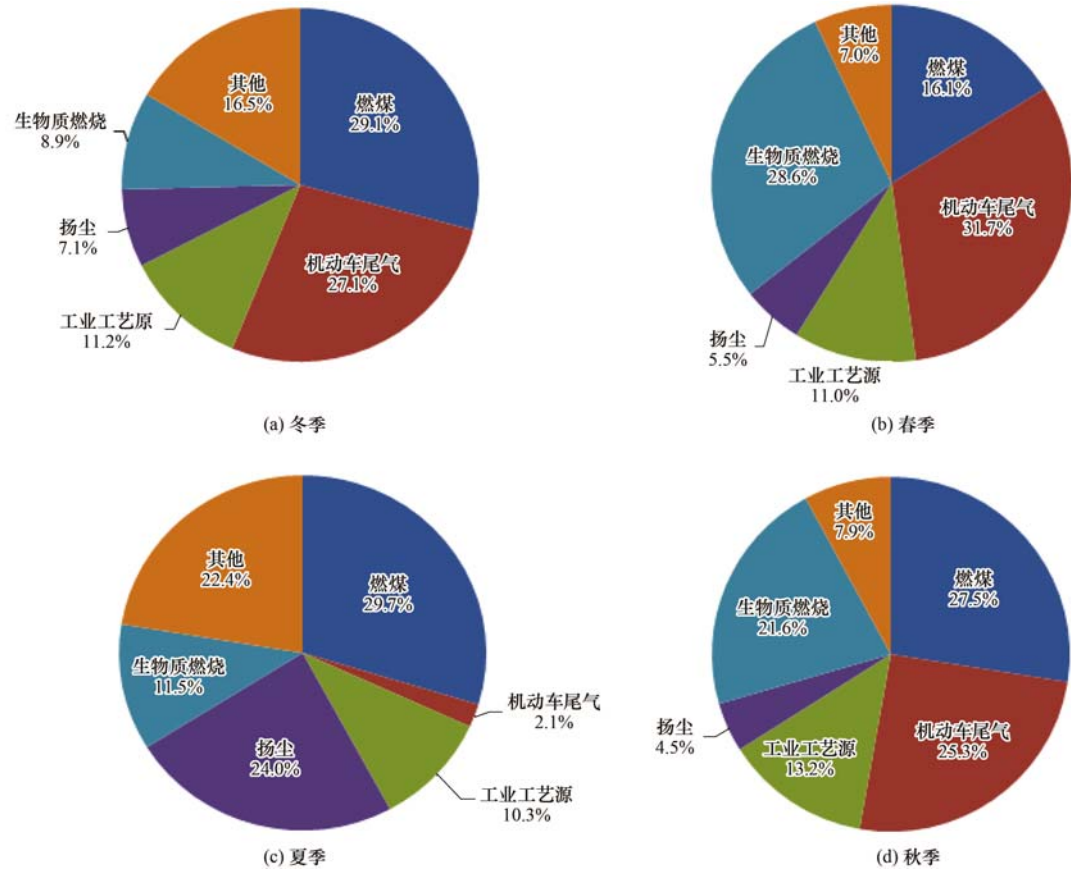


图 7 四季细颗粒物污染来源分布

Fig. 7 Distribution of pollution sources of the fine particulate matter in the four seasons

表 3 各化学成分与细颗粒物数的相关系数

Table 3 Relationship between chemical component concentration and number of the fine particulate matter								
化学成分	元素碳	元素碳有机碳混合颗粒	重金属	富钾颗粒	矿物质	富钠颗粒	有机碳	左旋葡聚糖
相关系数	0.795 2	0.507 4	0.393 1	0.897 9	0.438 5	0.606 3	0.707 2	0.807 8

表 4 四季细颗粒物污染来源对比表(数浓度占比)/%

Table 4 Pollution sources of the fine particulate matter in the four seasons(accounted for number concentration)/%				
污染来源	冬季	春季	夏季	秋季
燃煤	29.1	16.1	29.7	27.5
机动车尾气	27.1	31.7	2.1	25.3
工业工艺源	11.2	11.0	10.3	13.2
扬尘	7.1	5.5	24.0	4.5
生物质燃烧	8.9	28.6	11.5	21.6
其他	16.5	7.0	22.4	7.9

的是燃煤源、机动车尾气源和工业工艺源,与冬季细颗粒物成分中较高的元素碳对应. 本研究与潘海燕^[17]研究淮安市冬季霾期间细颗粒物污染来源相似,主要为燃煤、机动车尾气源和生物质燃烧源. 春季细颗粒物污染来源最多的机动车尾气源、生物质燃烧源和燃煤源,与春季细颗粒物成分中较高的元素碳和有机碳对应. 春季较高的生物质燃烧源可

能来自本地及周边繁忙的农业活动所带来的生物质燃烧影响. 夏季细颗粒物污染来源最多的是燃煤源、扬尘源和生物质燃烧源,与夏季细颗粒物成分中较高的元素碳、有机碳和富钾颗粒对应. 扬尘源占比高可能是因为夏季天气高温干燥,道路、建筑、施工扬尘等更容易随空气流动而扬起,同时经过一些二次碾压,在细粒径段体现的更为明显. 而冬春季气候湿润,细颗粒物可吸湿增长,体现得更多的是粗颗粒物. 根据夏季细颗粒物中矿物质的平均质谱图正谱图可以看出(见图 8),含有较高的 Al 和 Ca 元素,一般被认为来自人为污染可忽略不计,主要是自然矿物来源^[30],也说明夏季受风沙尘土的影响较大. 细颗粒物秋季细颗粒物污染来源最多的是燃煤源、机动车尾气源和生物质燃烧源,与秋季细颗粒物成分中较高的有机碳、元素碳和有机碳混合颗粒及富钾颗粒对应.

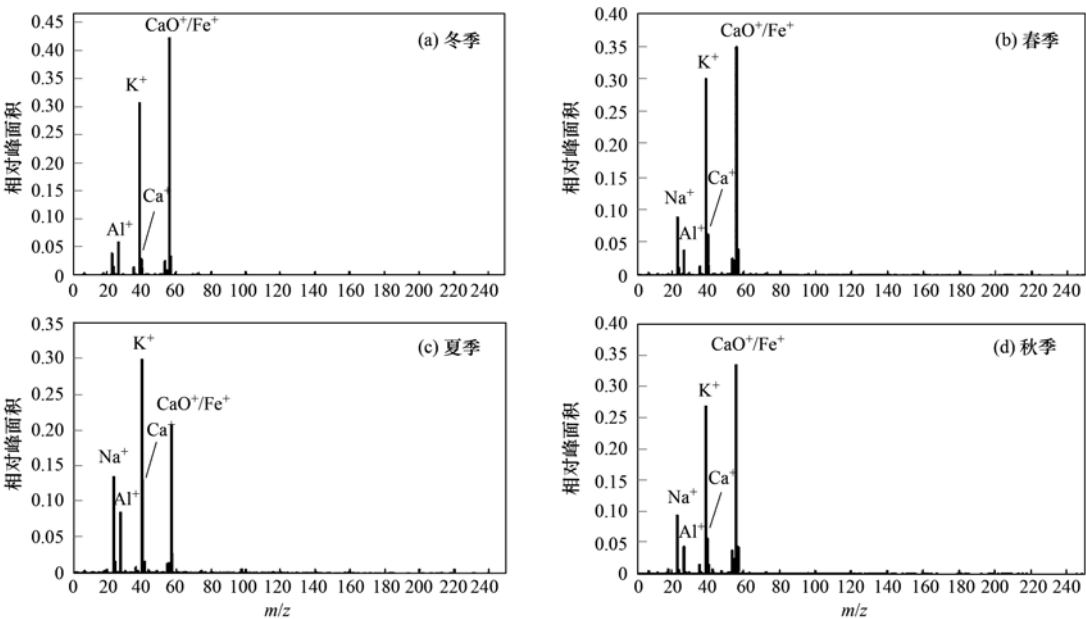


图 8 四季矿物质平均质谱图正谱图

Fig. 8 Average mass spectrogram of the minerals in the four seasons

3 结论

(1) SPAMS 所测得四季细颗粒物数浓度变化趋势与大气细颗粒物质量浓度高低变化趋势较为一致,质谱仪的监测数据一定程度上可反映观测时段

的大气污染状况.

(2) 南宁市 2015 年四季细颗粒物平均质谱图相似,均有较明显的碳族元素信号、Na⁺、K⁺、Fe⁺/CaO⁺,以及 CN⁻、NO₂⁻、NO₃⁻ 和 HSO₄⁻ 等离子信号. 冬春两季相比夏秋季的硫酸盐和硝酸盐等

离子信息高,说明二次反应生成的物质多。

(3)利用 Art-2a 分类方法对细颗粒物的化学成分进行分类,大致确定南宁市四季细颗粒物化学成分主要有元素碳、有机碳、元素碳有机碳混合颗粒、富钾颗粒、富钠颗粒、矿物质、左旋葡聚糖以及重金属等 8 类。南宁市细颗粒物各化学成分浓度占比和污染来源在四季均有差异。

(4)冬季元素碳最高,对应较高的燃煤源和机动车尾气源;秋季有机碳最高,对应较高的机动车尾气源和生物质燃烧源;夏季富钾颗粒、左旋葡聚糖和矿物质较高,对应较高的生物质燃烧源和扬尘源;春季富钠颗粒和重金属略高,部分来自于海盐粒子。在不同季节可根据污染来源进行重点关注和控制。

(5)本研究列举秋季细颗粒物一污染升高过程,发现富钾颗粒、左旋葡聚糖和元素碳随着细颗粒物变化趋势最明显,说明污染增加时,生物质燃烧和燃煤、机动车尾气等的污染影响贡献较大,而重金属和矿物质在人为污染过程中体现较小。污染天气时大气污染防治可重点关注和贡献较大的污染源。

参考文献:

- [1] 白志鹏,董海燕,蔡斌彬,等. 灰霾与能见度研究进展[J]. 过程工程学报, 2006, 6(S2): 36-41.
Bai Z P, Dong H Y, Cai B B, *et al.* Dust haze and visibility [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(S2): 36-41.
- [2] 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517.
Wu D, Bi X Y, Deng X J, *et al.* Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(4): 510-517.
- [3] 王玮,汤大钢,刘红杰,等. 中国 PM_{2.5} 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.
Wang W, Tang D G, Liu H J, *et al.* Research on current pollution status and pollution characteristics of PM_{2.5} in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1-5.
- [4] 郭新彪,魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1171-1177.
Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient PM_{2.5} pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1171-1177.
- [5] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 1-8.
- [6] 莫招育,陈志明,黄炯丽,等. 南宁地区秋季一次连续灰霾过程的污染特征及成因分析[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(3): 540-548.
Mo Z Y, Chen Z M, Huang J L, *et al.* Characteristics and formation mechanism from a serious haze event in autumn of Nanning[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015, 35(3): 540-548.
- [7] 施禅臻,莫招育,陈志明,等. 南宁地区一次典型灰霾过程气溶胶光学特性的地基观测[J]. 复旦学报(自然科学版), 2015, 54(4): 423-430.
Shi C Z, Mo Z Y, Chen Z M, *et al.* Aerosol optical properties derived from ground-based measurement during a haze pollution episode in Nanning[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2015, 54(4): 423-430.
- [8] 唐利利,何莉,陈家宝,等. 南宁市一次严重空气污染期间颗粒污染物特征及气象条件分析[J]. 广西科学院学报, 2012, 28(4): 302-305.
Tang L L, He L, Chen J B, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics of particulate pollutant and meteorological condition during a serious air pollution in Nanning[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2012, 28(4): 302-305.
- [9] 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.
- [10] 喻义勇,王苏蓉,秦玮. 大气细颗粒物在线源解析方法研究进展[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(3): 12-17.
Yu Y Y, Wang S R, Qin W. Progresses and perspectives of on-line source apportionment of PM_{2.5} [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2015, 27(3): 12-17.
- [11] Li L, Huang Z X, Dong J G, *et al.* Real time bipolar time-of-flight mass spectrometer for analyzing single aerosol particles[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2011, 303(2-3): 118-124.
- [12] 蔡靖,郑玫,闫才青,等. 单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪在细颗粒物研究中的应用和进展[J]. 分析化学, 2015, 43(5): 765-774.
Cai J, Zheng M, Yan C Q, *et al.* Application and progress of single particle aerosol time-of-flight mass spectrometer in fine particulate matter research [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015, 43(5): 765-774.
- [13] 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2071-2080.
Mu Y Y, Lou S Y, Chen C H, *et al.* Aging and mixing state of particulate matter during aerosol pollution episode in autumn shanghai using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2071-2080.
- [14] 何俊杰,张国华,王伯光,等. 鹤山灰霾期间大气单颗粒气溶胶特征的初步研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2098-2104.
He J J, Zhang G H, Wang B G, *et al.* Analysis of single particle characteristics during haze events in Heshan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(8): 2098-2104.
- [15] 李梅,李磊,黄正旭,等. 运用单颗粒气溶胶质谱技术初步

- 研究广州大气矿尘污染[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 632-636.
- Li M, Li L, Huang Z X, *et al.* Preliminary study of mineral dust particle pollution using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) in Guangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(6): 632-636.
- [16] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- Zhou J B, Ren Y B, Hong G, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a multi-day haze in the winter of Shijiazhuang using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [17] 潘海燕. 利用 SPAMS 研究淮安市冬季灰霾空气污染[J]. 环境工程, 2015, **33**(增刊): 450-452, 480.
- Pan H Y. Research on haze air pollution in winter using SPAMS [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(S): 450-452, 480.
- [18] 张志朋, 杜娟, 宋韶华, 等. 夏季桂林市大气 PM_{2.5} 化学组成和成分分布的质谱研究[J]. 环境监测管理与技术, 2015, **27**(6): 22-26.
- Zhang Z P, Du J, Song S H, *et al.* Study on chemical constitution and component distribution of airborne PM_{2.5} in summer of Guilin by mass spectrometer[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, **27**(6): 22-26.
- [19] Budisulistiorini S H, Canagaratna M R, Croteau P L, *et al.* Real-time continuous characterization of secondary organic aerosol derived from isoprene epoxydiols in downtown Atlanta, Georgia, using the aerodyne aerosol chemical speciation monitor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(11): 5686-5694.
- [20] Robinson E S, Saleh R, Donahue N M. Organic aerosol mixing observed by single-particle mass spectrometry. [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2013, **117**(51): 13935-13945.
- [21] Pratt K A, Prather K A. Mass spectrometry of atmospheric aerosols—recent developments and applications. Part I: Off-line mass spectrometry techniques [J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2012, **31**(1): 1-16.
- [22] Laskin A, Laskin J, Nizkorodov S A. Mass spectrometric approaches for chemical characterisation of atmospheric aerosols: critical review of the most recent advances [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **9**(3): 163-189.
- [23] 刘慧琳, 宋红军, 陈志明, 等. 利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 434-442.
- Liu H L, Song H J, Chen Z M, *et al.* Chemical composition of the single particle aerosol in winter in Nanning using SPAMS[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 434-442.
- [24] Li J Y, Xu T T, Lu X H, *et al.* Online single particle measurement of fireworks pollution during Chinese New Year in Nanning [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, doi: 10.1016/j.jes.2016.04.021.
- [25] 付怀于, 闫才青, 郑玫, 等. 在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4070-4077.
- Fu H Y, Yan C Q, Zhang M, *et al.* Application of on-line single particle aerosol mass spectrometry (SPAMS) for studying major components in fine particulate matter [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4070-4077.
- [26] 张莉, 李梅, 李磊, 等. 基于单颗粒质谱信息气溶胶分类方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 190-195.
- Zhang L, Li M, Li L, *et al.* Research Progress in aerosol clustering based on single particle's mass spectrum information [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(3): 190-195.
- [27] Silva P J, Liu D Y, Noble C A, *et al.* Size and chemical characterization of individual particles resulting from biomass burning of local Southern California species [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(18): 3068-3076.
- [28] Matsui H, Koike M, Kondo Y, *et al.* Impact of new particle formation on the concentrations of aerosols and cloud condensation nuclei around Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D19): D19208.
- [29] Xu T T, Chen H, Lu X H, *et al.* Single-particle characterizations of ambient aerosols during a wintertime pollution episode in Nanning: local emissions vs. regional transport [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, doi: 10.4209/aaqr.2016.01.0026.
- [30] 韩力慧, 庄国顺, 程水源, 等. 北京地面扬尘的理化特性及其对大气颗粒物污染的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 1-8.
- Han L H, Zhuang G S, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of re-suspended road dust and its significant effect on the airborne particulate pollution in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 1-8.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)