

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究

颜金培^{1,2}, 陈立奇^{1,2}, 林奇^{1,2}, 赵淑惠^{1,2}, 李磊³, 朱大勇¹

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 2. 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室, 厦门 361005; 3. 暨南大学大气环境安全与污染控制研究所, 广州 511443)

摘要: 利用船载走航单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS)对东南沿海海洋气溶胶进行在线观测, 获得了近岸海区大气气溶胶化学组成分布特性, 并对气溶胶谱特征及其来源进行分析. 结果表明: 从近岸到远海, 气溶胶的浓度呈下降趋势; 在近岸海区气溶胶主要受港口及码头周边的汽车、船舶及燃煤等工业排放源的影响; 随着离陆地距离的增加, 海源性气溶胶的比重上升; 海洋气溶胶在观测范围内呈单峰分布, 峰值粒径在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右, 大多数颗粒主要集中在 $0.2\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 的粒径段; 近岸气溶胶元素碳谱峰强, 正谱图中 K^+ 元素具有很强的谱峰, 负离子谱中 HSO_4^- 谱峰信号明显, 但缺少 NO_3^- 和 NO_2^- 谱峰信号; 远海气溶胶中元素碳的谱峰强度明显降低, 正谱图中 Na^+ 的谱峰很强, 并出现 Mg^+ 、 Ca^+ 和 NaCl^+ 的谱峰信号; 负离子谱出现了明显的海洋生物特征气溶胶甲基磺酸 MSA^- 、 CN^- 、 O^- 和 HSO_4^- 等的谱峰信息. 表明该观测海区的气溶胶组成复杂, 同时受陆源排放气溶胶和海源气溶胶的影响.

关键词: 海洋气溶胶; 成分; 粒径分布; 走航观测; 单颗粒气溶胶质谱仪

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2629-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612065

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry

YAN Jin-pei^{1,2}, CHEN Li-qi^{1,2}, LIN Qi^{1,2}, ZHAO Shu-hui^{1,2}, LI Lei³, ZHU Da-yong¹

(1. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 2. Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Xiamen 361005, China; 3. Institute of Atmospheric Environment Safety and Pollution Control, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

Abstract: Marine aerosols were measured in real-time by an on-board signal particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) over the Southeast China Sea. The chemical compositions and size distribution characteristics of aerosol particles were obtained, and the sources and ion spectra were analyzed. The results showed that particle number concentration decreased with the distance apart from the coastal area. In the coastal area, the aerosol compositions were mainly determined by the emissions of industry, such as vessel, traffic and coal combustion etc. When it was far from the continent, aerosols were mainly affected by the sea sources. Aerosol particles during the observation period disturbed singly with a peak diameter value of $0.5\ \mu\text{m}$. Most of the particles were in the size range of $0.2\ \mu\text{m}$ to $0.8\ \mu\text{m}$. High signal intensity of EC with high K^+ intensity in the positive spectrum and HSO_4^- intensity in negative spectrum was present in the marine aerosol over the coastal area. However, the signals of NO_3^- and NO_2^- were absent in the negative spectrum. The signal intensity of EC was weak in the marine aerosol over the sea area far from the coastal area. High signal intensity of Na^+ and weak Mg^+ , Ca^+ and NaCl^+ signals were present in the positive spectrum, while high signal intensity of MSA^- , CN^- , O^- and HSO_4^- were present in negative spectrum which was considered to be the special ions spectrum of marine biological sources. It indicated that ambient aerosols over the observation area were influenced not only by the anthropogenic emission sources but also affected by the marine aerosol formation.

Key words: marine aerosol; chemical compositions; size distribution; on-board observation; single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS)

海洋气溶胶是全球气溶胶的重要组成部分, 其独特的物理、化学性质在海洋大气环境中扮演着重要的角色, 研究表明海洋气溶胶在很多自然现象中起着举足轻重的作用^[1,2]. 地球表面超过 71% 的区域为海洋所覆盖, 海洋产生的气溶胶是自然界最大的气溶胶来源^[3]. 与陆源气溶胶相比, 海洋气溶胶研究起步较晚, 研究主要集中在含硫化合物、矿物质元素和化合物、气溶胶沉降、光学性质及物理性质等的观测^[4-6]. 近年来, 随着经济的发展和能源消耗的急剧增加, 大量污染物进入到大气环境, 改变

了大气化学物质的结构、组成和含量, 同时也导致沿海岸区空气质量迅速恶化^[7-10]. 这些排放到大气中的颗粒物是大气污染物的转化与二次污染物形成的重要媒介^[11], 可促进酸雨的沉降, 导致光化学烟雾的形成等, 更为严重的是随着气溶胶污染的加剧,

收稿日期: 2016-12-08; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J05024); 国家自然科学基金项目(21106018); 国家海洋局公益性行业科研专项(2004DIB5J178); 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项(海三科 2014027)

作者简介: 颜金培(1981~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气化学及污染排放控制, E-mail: jpyan@tio.org.cn

通过气溶胶海气交换进入海洋的污染物大量增加,引起近岸海水富营养化及海洋重金属污染,对海洋环境和生态造成严重破坏。

目前,海洋大气气溶胶的观测技术仍主要采用离线分析方法,通过气溶胶采样器将颗粒物收集到滤膜后带回实验室分析。离线分析方法定量准确、结合不同分析技术可以全面掌握气溶胶的组成信息,但该方法的采样时间长,采样到分析的时间间隔长,气溶胶中一些不稳定的化学成分易遭破坏而得不到样品的原始信息,且时间分辨率非常低,难以捕捉到即时变化的信息,无法对气溶胶在环境中的演变过程进行解析和判别^[12,13]。随着技术的发展,大量在线仪器也逐渐被用于海洋观测研究。海洋气溶胶的研究也正经历着重大的转变,特别是气溶胶质谱技术在海洋气溶胶中的应用,使得海洋气溶胶生成机理、传输特性及老化过程的研究不断深入^[14]。目前海洋气溶胶已有较多的观测研究^[15~20],对海洋气溶胶的理解也不断深入,如 Gaston 等^[19]将 ATOFMS 用于海洋气溶胶检测中,发现当出现高浓度的叶绿素-a 和二甲基硫(DMS)时,观测到一种含有 Mg^+ 、 Ca^+ 、 K^+ 和有机碳的含镁颗粒物,认为海洋会产生两个亚群的海洋颗粒物。Phinney^[20]等用船载 AMS 研究了北大西洋海洋气溶胶特点,表明气溶胶主要来自氧化的二甲基硫酸盐、海盐一次释放和船舶排放。单颗粒气溶胶质谱技术在环境监测及气溶胶源解析方面已有较多应用^[21~23],但在船载走航海洋气溶胶的观测应用上却很少^[13],对自然条件下海洋气溶胶的形成机制、来源及传输过程的研究仍存在不足。本研究利用船载单颗粒气溶胶质谱技术实时在线分析我国东南沿海大气气溶胶的谱分布特性,分析近海大气气溶胶的来源及组成特征,以期气溶胶质谱技术在海洋的应用及揭示海洋大气气溶胶的传输特性、污染物的入海通量及其对海洋生态的影响提供基础。

1 材料与方法

1.1 走航路线

本次观测起止时间为 2016 年 6 月 12~21 日,共 10 d,将单颗粒气溶胶质谱仪(SPAMS)安装在“向阳红 03”海洋科考船上进行走航观测,观测路线如图 1 所示,观测区域主要为我国东南沿海。观测期间每天 24 h 连续采样,期间因为仪器校准和维护产生短时间的暂停,但对采样不产生影响。本次观测期间共检测到具有正负谱图信息的气溶胶颗粒

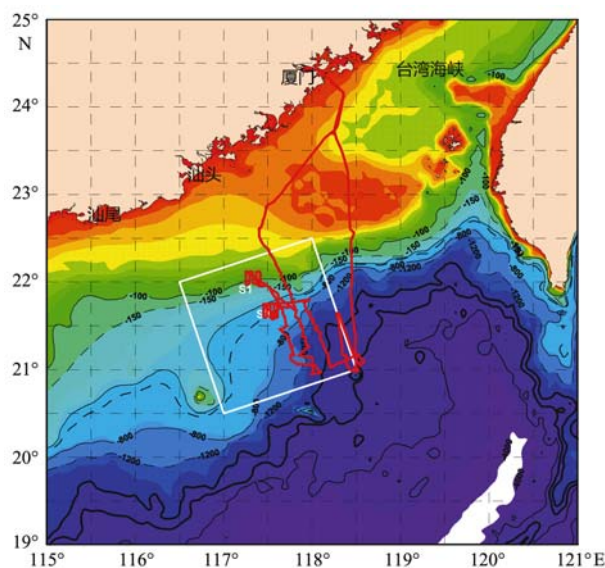


图 1 船载走航路线示意

Fig. 1 Route map of the vessel

347 590 个。

1.2 测量方法与仪器

首次采用船载单颗粒气溶胶质谱仪(广州禾信分析仪器有限公司)进行海洋大气气溶胶走航观测,获得了高时间分辨率(时间分辨率为 10min)的海洋大气气溶胶组分及粒径分布信息。该船载走航气溶胶质谱仪配备了重型船载稳定平台及专用箱式移动观测实验室,确保走航过程中仪器的稳定运行及数据的准确可靠。SPAMS 测量原理:通过空气动力学透镜聚焦进样使颗粒聚集成颗粒束,利用双激光测径系统以及双极飞行时间质量分析器实现对气溶胶颗粒空气动力学直径和化学组分进行同时检测,仪器的详细检测原理及分析方法详见已有的文献资料,在此不做详细论述^[24]。采样期间用 PSL 标准小球进行粒径校正,SPAMS 粒径测量范围:0.2~2.5 μm 。

采集的单颗粒数据通过 MATLAB 上运行的 SPAMS Data Analysis V2.2(禾信公司自主开发)软件包进行处理。通过自适应共振理论神经网络算法(ART-2a)将颗粒自动分类^[25],在本研究中使用的 ART-2a 算法参数如下:警戒因子为 0.65,学习率为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 海洋大气气溶胶分布特征

图 2 给出了走航观测区域,大气气溶胶浓度及组成空间分布特征。从中可看出,从近岸到远海,气溶胶数浓度呈下降的趋势,离陆地距离越远气溶胶

的浓度越低. 从气溶胶组成分析, 在近岸区域, 元素碳(EC)、硫酸盐和有机碳(OC) 为气溶胶的主要组成物质, 三者共占总颗粒数的 50% 以上, 其次是含 K^+ 和 Na^+ 的颗粒物, 分别占 15% 和 10% 以上. 从陆地到海洋的过程中, 气溶胶的组成也发生了很大变化, 以 Na^+ 和 Cl^- 为主要组分的海盐气溶胶含量急剧增加, 从近岸的 10% 左右增加到 26% 以上, 最高达到 48%; 此外有机碳 OC 的含量也呈现上升的趋势; 与此相反的是, 元素碳 EC 的占比呈下降趋势, 由近岸最高的 45% 左右下降到最低约为 8.5%. 从污染物来源特征分析, EC 主要来自于汽车尾气、船舶及工业等的排放; OC 除了来自汽车、船舶等工业源的排放外, 还来自于海洋生物活动及二次气溶胶的转化; 硫酸盐则主要来自煤燃烧及海洋生物活动; Na^+ 则主要来自于海盐气溶胶, 由海浪破碎等机制

产生^[26]. 在近岸海区, 由于靠近港口码头, 路上交通运输及海上船舶活动频繁, 导致近岸区域交通及工业排放污染严重, 表现出高的 EC 和硫酸盐含量. 而从近岸到远海的过程, 由于陆源气溶胶在向海洋传输的过程中发生沉降, 随着距离的增加陆源气溶胶的沉降量上升, 导致陆源气溶胶的污染特征不断下降. 同时, 随着离陆地的距离增加, 海洋风浪变大, 海盐气溶胶含量上升, 海洋来源气溶胶的比重逐渐增加, 最明显的是以 Na^+ 为主的海盐气溶胶的含量增加^[27]. 此外, 从硫酸盐的变化趋势可看出, 在远海区域, 硫酸盐的含量下降, 这表明颗粒中的硫酸盐主要来自于陆源排放, 而非来自海洋排放源. 而 OC 气溶胶的含量在远离近岸区域呈上升的趋势, 表明了这部分有机碳受海洋生物活动排放影响较大, 这从 K^+ 含量的变化亦可看出.

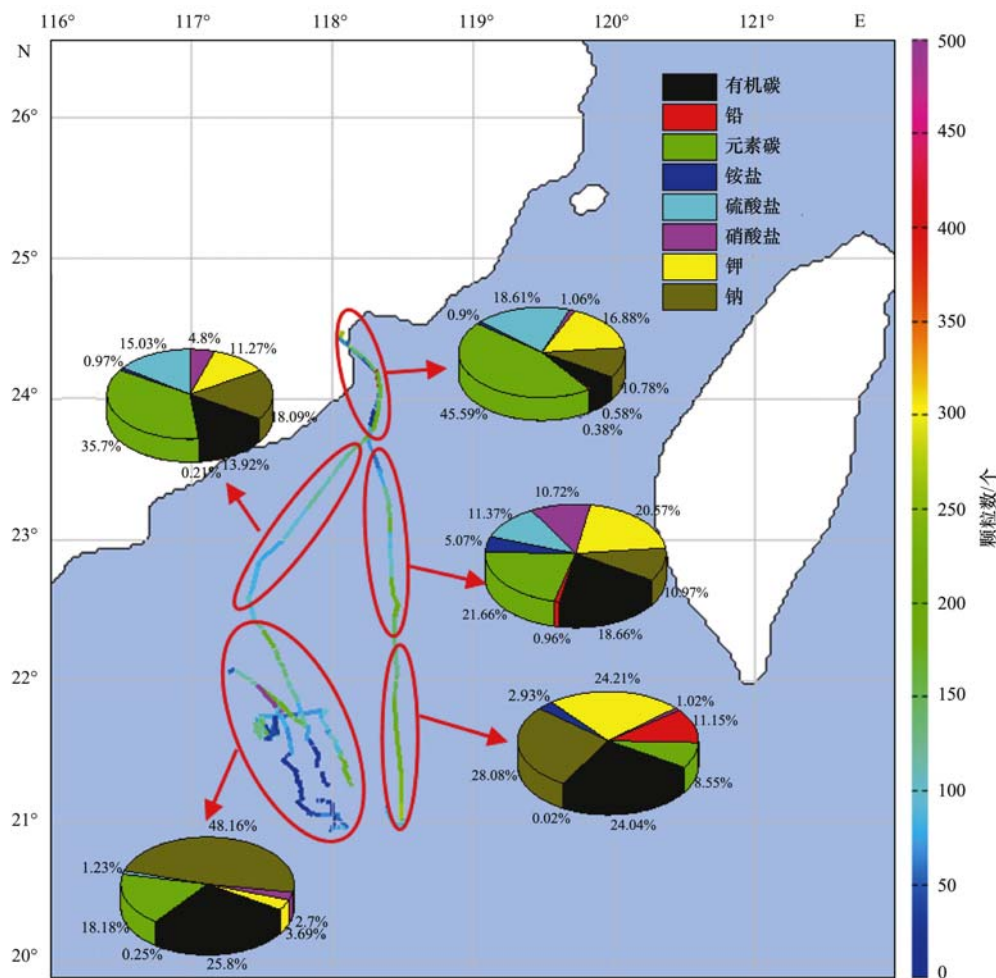


图2 海洋气溶胶浓度及组成分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of measured hourly particle number and chemical compositions of marine aerosol

2.2 海洋气溶胶颗粒物质谱图解析

为了对整体细颗粒物的来源类别有更清楚地认识, 利用 ART-2a 分类方法对颗粒进行了分类. 根据

颗粒谱图特征及与源谱特征的比对结果, 将细颗粒物分为 8 类: 元素碳(EC)、有机碳(OC)、混合碳(ECOC)、长链碳(HEC)、富钾颗粒(K)、左旋葡聚

糖(LEV)、富钠颗粒(Na)及矿物质(Si).

从细颗粒的组分含量可以看出,含碳颗粒物是气溶胶中含量最高的一类物质,为了准确地分析这类含碳颗粒物的特征及来源,本文将含碳颗粒物分成了4个亚类,不同类颗粒的平均质谱图如图3所示.其中EC主要是以元素碳为特征,特别是小分子元素碳(C^+ 、 C_3^+ 、 C_4^+ 、 C_5^+ 、 C_2^- 等)谱峰信号较强,

在负离子谱中含有很强的 HSO_4^- 谱峰,但是硝酸盐的谱峰信号很弱,表明这类颗粒主要来自于燃煤源排放^[12];OC的主要物质是有机物(m/z 为+27、+43、+51和+63等)的碎片峰;并且在负离子谱中也出现很强的硫酸盐和MSA的谱峰,表明这类物质主要受海洋生物活动排放的影响^[19];ECOC主要是元素碳与有机碳的混合特征,负离子谱中除了元

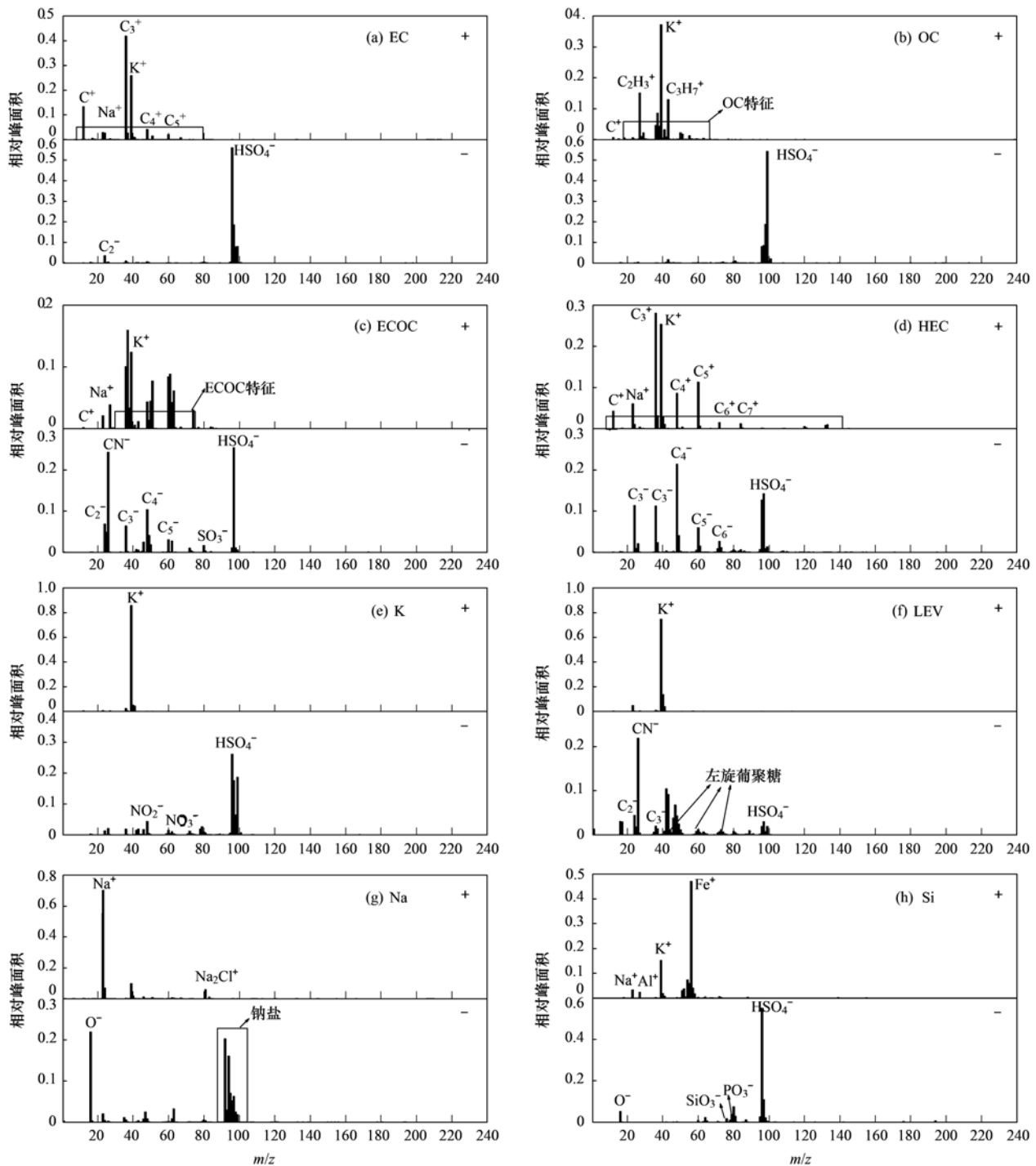


图3 不同来源气溶胶颗粒的图谱特征

Fig. 3 Average mass spectra of major clusters of fine particles during the observation period

素碳谱峰,还出现了很强的 CN^- 和 HSO_4^- 谱峰信号,表明该类颗粒在大气中经历了混合和老化过程;与 EC 不同的是,HEC 主要是以长链的元素碳为特征,特别是负离子谱图中的元素碳谱峰明显(C_2^- 、 C_3^- 、 C_4^- 、 C_5^- 、 C_6^- 和 C_7^- 等);这类物质主要来自于劣质油等化石燃料未完全燃烧排放的污染物^[26]. K 的平均质谱图中 K^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 HSO_4^- 是主要成分,其它组分的信号不明显;LEV 的平均质谱图中正离子有非常明显的 K^+ ,负离子中 CN^- 的信号非常强,且左旋葡聚糖的特征峰($^{-42}\text{CNO}^-$ 和 $^{-59}\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$)也非常明显,表明该类颗粒主要来源于生物活动排放^[24];富 Na 颗粒的主要特征是 Na^+ (m/z 为 +23)和 Na_2Cl^+ (m/z 为 +81 和 +83)的信号非常明显,且负离子含有明显的钠盐特征,该类物质主要来自于海盐粒子,与海洋物理过程及海气界面活动相关^[12];Si 的主要特征是 Na^+ 、 Al^+ 、 Ca^+ 、 Fe^+ 和 SiO_3^- 等矿物质离子谱峰信号很强,这类地质元素特征主要来自于陆源扬尘^[24],一般随离陆地距离的增加而降低.

图 4 给出了气溶胶颗粒物组成相对含量随时间的变化规律. 根据细颗粒的组成变化特征,可以将整个走航观测期间分为 3 个阶段,第一阶段为走航开始阶段,此时,观测海区离岸较近,大气气溶胶组成特征主要受陆源污染物排放的影响,表现出以 EC 和长碳链等为代表的工业排放源,该阶段 EC 占总颗粒数的 50% 以上,而海洋性气溶胶的含量相对较低;第二阶段为近岸到远海过渡阶段,即从近岸到远海的过渡阶段,该阶段的主要特征是以 EC 为代表的陆源污染比例下降,而以 Na^+ 为代表的海盐气溶胶占比上升;说明在此阶段,陆源气溶胶的影响由于传输和沉降等原因而逐步减弱,而海洋来源气溶胶的比重则随之逐步增加,该阶段同时受陆源和海洋气溶胶的影响;第三阶段为远海走航阶段,该阶段观测海区远离陆地,受陆源污染物的影响较小,因此陆源污染物的特征较弱,相反来自海洋来源气溶胶的特征明显,以 Na^+ 和 MSA^- 为特征的海洋来源气溶胶占主导地位. 这与图 2 中气溶胶组成空间分布的结果分析一致.

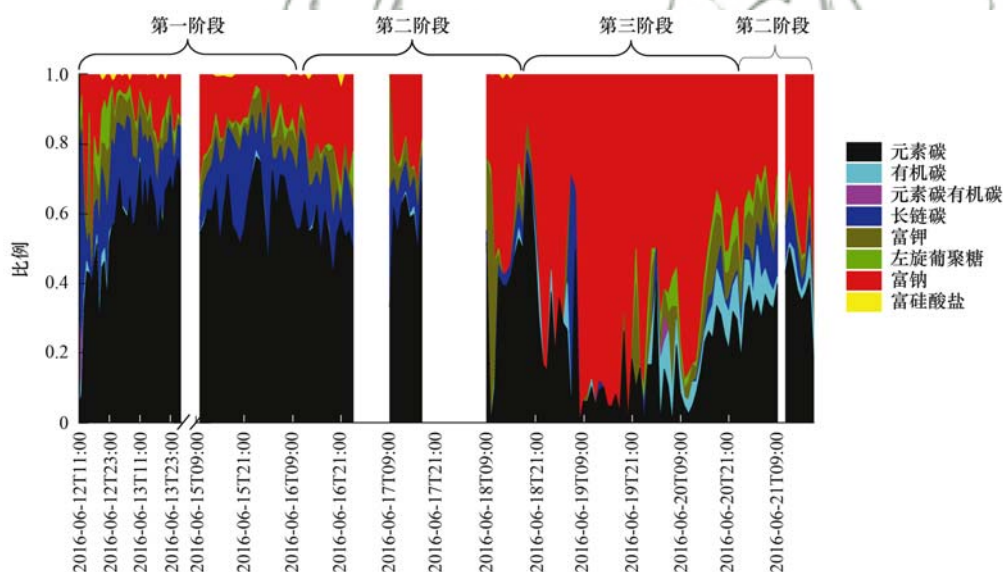


图 4 细颗粒组成相对含量随时间的变化规律

Fig. 4 Temporal variation of relative contribution for different clusters of fine particles

2.3 海洋气溶胶颗粒组成分布

图 5 给出了含有 NO_x^- 、 HSO_4^- 、 Cl^- 、 Mg^+ 、 Na^+ 和 EC 的气溶胶颗粒的粒径分布,从中可看出海洋气溶胶颗粒在测量范围内呈单峰分布,峰值粒径在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右,气溶胶颗粒主要集中在 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的粒径段,该粒径段的细颗粒占总颗粒数 96% 以上. 从图 5 可看出,含有 EC、 HSO_4^- 和 Na^+ 的颗粒物最多. HSO_4^- 和 NO_x^- 主要是由其气态前驱物

(SO_2 和 NO_2) 在大气中经过化学反应而形成的二次气溶胶颗粒,属于二次气溶胶污染^[26],但从图中发现在观测期间 HSO_4^- 的颗粒数浓度很高,而 NO_x^- 则表现出很低的颗粒数浓度,这说明气溶胶中的硫酸盐可能主要来自于煤燃烧及海洋生物活动 processes. Na^+ 和 Cl^- 则主要是海盐颗粒中的典型组成,说明其主要来自海盐气溶胶的贡献,从粒径分布特征可以看出,含 Na^+ 颗粒数浓度在大粒径段明显高于

其他类型的细颗粒,这与海盐粒子主要为粗颗粒的结果一致^[12].

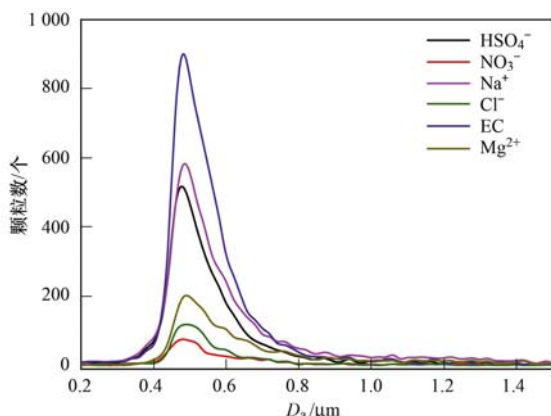


图5 颗粒物组成谱分布特征

Fig. 5 Chemical compositions distribution of aerosol particles

2.4 海洋气溶胶来源特征

图6给出了船载走航观测期间近岸海区和远海区域大气气溶胶颗粒的平均质谱图. 气溶胶主要正离子组分有: Na^+ 、 Mg^+ 、 K^+ 、 Ca^+ 和EC等;而负离子主要包含 HSO_4^- 、 MSA^- 、 Cl^- 和 CN^- 等. 近岸气溶胶图谱中表现出很强的元素碳谱峰,正谱图中 K^+ (m/z 为 +39) 离子具有很强的谱峰,由于K元素可来自于生物质燃烧或植物排放源或海洋生物活动,表明该元素具有较广泛的来源. 由于元素碳主要来自于汽车、船舶及燃煤等工业排放,表明近岸

气溶胶主要受近岸陆源污染排放的影响^[28]. 从负谱图可以看出,在负离子谱中有明显的 HSO_4^- 谱峰,但是却缺少了 NO_3^- 和 NO_2^- ,一般认为 HSO_4^- 和 NO_3^- 主要由于其前驱物 (SO_2 和 NO_2) 在大气中转化形成,被认为是二次气溶胶的主要标志,因此在作为二次组分时, HSO_4^- 和 NO_3^- 通常同时出现,并表现出很好的相关性^[26]. 但是在本文中,近岸气溶胶中只有 HSO_4^- 谱峰而缺少 NO_3^- 谱峰,表明 HSO_4^- 主要不是来自于二次气溶胶,更多的受煤燃烧排放及其他工业排放过程的影响.

与近岸气溶胶的平均谱图不同的是,远海气溶胶中元素碳的谱峰强度明显降低,正谱图中表现出很强的 Na^+ 谱峰,同时出现 Mg^+ 、 Ca^+ 和 NaCl^+ 的谱峰信号,这些特征谱峰均是海洋源气溶胶的谱峰,表明远海气溶胶受陆源污染物的影响较弱,而海源性气溶胶占主导地位. 这一结果与图2气溶胶走航空间分布的分析结果一致. 在负离子谱中,则出现了明显的海洋生物活动排放的特征组分信息,如 MSA^- 、 CN^- 、 O^- 和 HSO_4^- 等, MSA^- 和 HSO_4^- 主要为海洋生物活动释放的二甲基硫 DMS 在大气中氧化形成,被认为是二次海洋气溶胶的主要特征^[19],因此,从负离子谱的组成特征分析,该观测海区的气溶胶同时受一次海洋气溶胶(海盐)和受二次海洋气溶胶的影响.

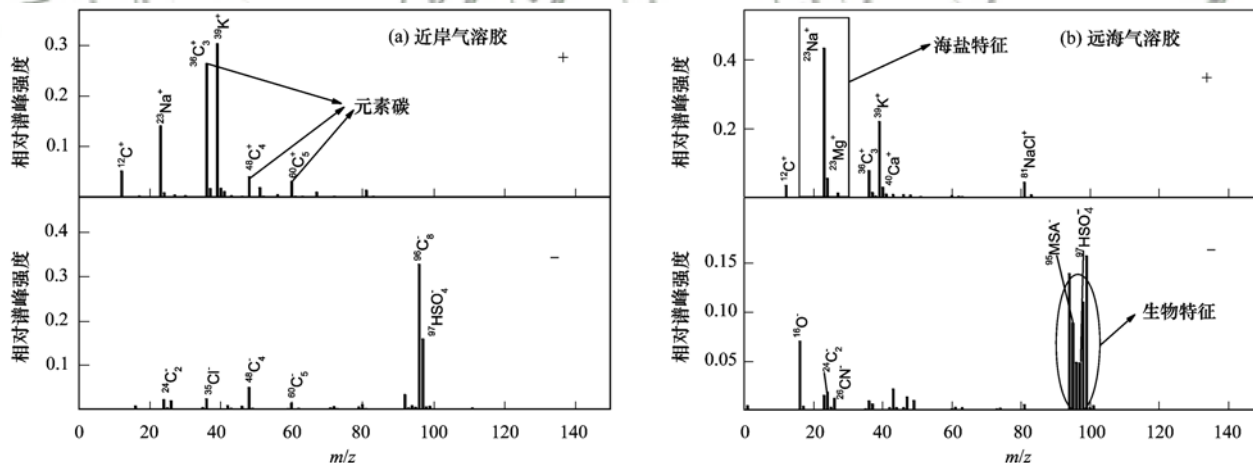


图6 海洋大气气溶胶颗粒的平均质谱图

Fig. 6 Positive and negative ion average mass spectra for marine aerosol particles

3 结论

(1)在观测海域内,从近岸到远海的走航过程中,气溶胶的浓度呈下降的趋势;在近岸海区气溶胶主要由元素碳、硫酸盐、有机碳及钾等组成,从其来源分析,主要受港口及码头周边,汽车、船舶及燃

煤等工业排放源的影响;随着离陆地距离的增加,陆源性污染物的影响下降,而海洋来源气溶胶的影响增大,主要表现为以 Na^+ 和 HSO_4^- 等为主要特征的海洋气溶胶的含量急剧增加.

(2)含 NO_x^- 、 HSO_4^- 、 Cl^- 、 Mg^+ 、 Na^+ 和EC等的气溶胶颗粒在测量粒径范围内呈单峰分布,峰值

粒径在 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右, 气溶胶颗粒物主要集中在 $0.2\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 的粒径段, 大多为亚微米颗粒物。

(3) 近岸海区大气气溶胶表现出很强的元素碳谱峰, 正谱图中 K^+ (m/z 为 +39) 元素具有很强的谱峰信号, 负离子谱中有明显的 HSO_4^- 谱峰, 但是却缺少 NO_3^- 和 NO_2^- 离子信号。远海气溶胶中元素碳的谱峰强度明显降低, 正谱图中表现出很强的 Na^+ 谱峰, 同时出现 Mg^+ 、 Ca^+ 和 NaCl^+ 的谱峰信号; 负离子谱出现了明显的海洋生物特征气溶胶 MSA^- 、 CN^- 、 O^- 和 HSO_4^- 等谱峰信息, 表明该观测海区的气溶胶同时受一次海洋气溶胶(海盐)和二次海洋气溶胶的影响。

致谢: 感谢“向阳红 03”船提供的航次支持, 感谢禾信工程师庞美交在走航期间提供的仪器保障支持, 感谢禾信仪器股份有限公司在数据处理方面提供的支持。

参考文献:

- [1] Guasco T L, Cuadra-Rodriguez L A, Pedler B E, *et al.* Transition metal associations with primary biological particles in sea spray aerosol generated in a wave channel[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(2): 1324-1333.
- [2] Lang-Yona N, Lehahn Y, Herut B, *et al.* Marine aerosol as a possible source for endotoxins in coastal areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**(15): 311-318.
- [3] Gkikas A, Hatzianastassiou N, Mihalopoulos N, *et al.* Characterization of aerosol episodes in the greater Mediterranean Sea area from satellite observations (2000-2007) [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **128**: 286-304.
- [4] Davison B, Hewitt C N, O'Dowd C D, *et al.* Dimethyl sulfide, methane sulfonic acid and Physicochemical aerosol properties in Atlantic air from the United kingdom to Halley Bay[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D17): 22855-22867.
- [5] Hoornaert S, Van Malderen H, Van Grieken R. Gypsum and other calcium-rich aerosol particles above the north sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(5): 1515-1520.
- [6] Tsunogai S, Kondo T. Sporadic transport and deposition of continental aerosols to the Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, **87**(C11): 8870-8874.
- [7] Masalaite A, Holzinger R, Remeikis V, *et al.* Characteristics, sources and evolution of fine aerosol (PM_{10}) at urban, coastal and forest background sites in Lithuania [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **148**: 62-76.
- [8] 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 等. 青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3651-3662.
Chen X J, Qi J H, Liu N, *et al.* Concentration distribution of metal elements in atmospheric aerosol under different weather conditions in Qingdao coastal region[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3651-3662.
- [9] 颜金培, 陈立奇, 杨林军. 燃煤细颗粒在过饱和氛围下声波团聚脱除的实验研究[J]. *化工学报*, 2014, **65**(8): 3243-3249.
- Yan J P, Chen L Q, Yang L J. Agglomeration removal of fine particles at super-saturation steam by using acoustic wave [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(8): 3243-3249.
- [10] Lee C S L, Li X D, Zhang G, *et al.* Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China-Evidence of the long-range transport of air contaminants [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 432-447.
- [11] Kanakidou M, Seinfeld J H, Pandis S N, *et al.* Organic aerosol and global climate modeling: a review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**: 1053-1123.
- [12] 颜金培, 陈立奇, 林奇, 等. 厦门岛南部沿岸大气气溶胶成分谱分布特征[J]. *应用海洋学学报*, 2013, **32**(4): 455-460.
Yan J P, Chen L Q, Lin Q, *et al.* A study of aerosol chemical compositions and size distribution property on the coastal area of southern Xiamen island [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, **32**(4): 455-460.
- [13] Fu H Y, Zheng M, Yan C Q, *et al.* Sources and characteristics of fine particles over the Yellow Sea and Bohai Sea using online single particle aerosol mass spectrometer [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **29**: 62-70.
- [14] Hoornaert S, Godoi R H M, Van Grieken R. Single particle characterisation of the aerosol in the marine boundary layer and free troposphere over Tenerife, NE Atlantic, during ACE-2 [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003, **46**(3): 271-293.
- [15] Chi J W, Li W J, Zhang D Z, *et al.* Sea salt aerosols as a reactive surface for inorganic and organic acidic gases in the Arctic troposphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(19): 11341-11353.
- [16] 芦亚玲, 贾铭鑫, 李文凯, 等. 北极夏季大气气溶胶单颗粒研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1642-1648.
Lu Y L, Jia M X, Li W K, *et al.* Characteristics of individual aerosol particles in Arctic summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1642-1648.
- [17] 孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 等. 海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2443-2452.
Kong Y W, Sheng L F, Liu Q, *et al.* Impact of marine-atmospheric process on aerosol number size distribution in the south China sea [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2443-2452.
- [18] 李忠, 陈立奇, 颜金培. 气溶胶质谱技术在海洋气溶胶亚微米级颗粒物特征的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, **30**(2): 226-236.
Li Z, Chen L Q, Yan J P. Review on application of aerosol mass spectrometric technique in characterizing submicron particles in marine aerosols [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, **30**(2): 226-236.
- [19] Gaston C J, Furutani H, Guazzotti S A, *et al.* Unique ocean-derived particles serve as a proxy for changes in ocean chemistry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D18), doi: 10.1029/2010JD015289.
- [20] Phinney L, Richard Leaitch W, Lohmann U, *et al.* Characterization of the aerosol over the sub-arctic north east Pacific Ocean [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, **53**(20-22): 2410-2433.

- [21] 蔡靖, 郑枚, 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]. 分析化学评述与进展, 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.
- [22] 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 等. 利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1188-1198.
- Huang Z L, Zeng L M, Dong H B, *et al.* Analysis of single particle aging and mixing state at an agriculture site(Quzhou) in the North China Plain in summer using a single particle aerosol mass spectrometer[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1188-1198.
- [23] Zhang G Z, Han B X, Bi X H, *et al.* Characteristics of individual particles in the atmosphere of Guangzhou by single particle mass spectrometry[J]. Atmospheric Research, 2015, **153**: 286-295.
- [24] Li L, Li M, Huang Z X, *et al.* Ambient particle characterization by single particle aerosol mass spectrometry in an urban area of Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2014, **94**: 323-331.
- [25] Song X H, Hopke P K, Fergenson D P, *et al.* Classification of single particles analyzed by ATOFMS using an artificial neural network, ART-2A[J]. Analytical Chemistry, 1999, **71**(4): 860-865.
- [26] Yan J P, Chen L Q, Lin Q, *et al.* Chemical characteristics of submicron aerosol particles during a long-lasting haze episode in Xiamen, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **113**: 118-126.
- [27] Ault A P, Guasco T L, Baltrusaitis J, *et al.* Heterogeneous reactivity of nitric acid with nascent sea spray aerosol: large differences observed between and within individual particles[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, **5**(15): 2493-2500.
- [28] Yan J P, Chen L Q, Lin Q, *et al.* Effect of typhoon on atmospheric aerosol particle pollutants accumulation over Xiamen, China[J]. Chemosphere, 2016, **159**: 244-255.



CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)