

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, 陈旭锋, 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	邓哈, 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)	

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析

迟建伟¹, 李传金², 孙俊英³, 张剑¹, 王辉¹, 王瀚韬¹, 李卫军^{1*}

(1. 山东大学环境研究院, 济南 250100; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 3. 中国气象科学研究院大气成分研究所大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 运用透射电子显微镜-X 射线能谱技术分析了中国第 29 次南极科考期间采集的大气气溶胶单颗粒样品, 获得颗粒物的形貌特征、混合状态、成分组成及数量分布等信息。结果表明, 航渡区域海洋上空的颗粒物主要表现为 4 类: 海盐颗粒、矿物颗粒、富硫颗粒和含碳颗粒, 其中海盐颗粒占主导, 本研究将海盐颗粒又分为新鲜、部分老化及完全老化的海盐颗粒。部分和完全老化的海盐颗粒占海盐颗粒总数的 86%, 且部分老化的海盐颗粒表面及完全老化的海盐颗粒以长条状 Na_2SO_4 成分为主。同时, 发现两处采样点(印度洋中东部和南极内陆)的样品中富硫颗粒较多, 根据后向气团轨迹判断这些富硫颗粒主要来源于海洋地区, 推测是由海洋表面浮游生物释放的二甲基硫(dimethyl sulfide, DMS)经过大气氧化形成。本研究表明, 南半球海洋大气中海盐颗粒老化是由海洋表面释放的 DMS 控制, 这不同于北半球海洋大气中人为源影响的海盐颗粒老化现象。

关键词: 海盐颗粒; 单颗粒分析; 混合状态; 透射电镜; 南极

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0903-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201607091

Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere

CHI Jian-wei¹, LI Chuan-jin², SUN Jun-ying³, ZHANG Jian¹, WANG Hui¹, WANG Han-tao¹, LI Wei-jun^{1*}

(1. Environment Research Institute, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. Gold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: During the 29th Chinese National Antarctic Research Expedition (CHINARE), individual particle samples were collected from South China to Antarctic during November 2012 to April 2013. A transmission electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectrometry (TEM-EDS) was employed to analyze the morphology, mixing state, composition, and relative abundances of individual aerosol particles. Atmospheric particles were classified into four types: sea salt, mineral, S-rich and C-rich. Sea salt aerosols (SSA) were dominant in the marine particles from South China to Antarctic, and they were further divided into three sub-types: fresh SSA, partially aged SSA, and fully aged SSA. Partially and fully aged SSA accounted for 86% of total SSA number. Interestingly, surface of partially aged SSA and fully aged SSA contained abundant rod-like Na_2SO_4 . Mineral dust particles increased in the coastal areas which were influenced by continental air. In addition, we found that S-rich particles were abundant at two sampling sites (the middle eastern of Indian Ocean and Antarctic inland). The back trajectories of air masses indicated that these S-rich particles were mainly formed via the oxidation of dimethyl sulfide (DMS) emitted from the marine phytoplanktons. Our study suggests that the SSA aging process in the South Hemisphere atmosphere was controlled by the DMS which is different from the SSA aging under the influence of anthropogenic pollutants in the North Hemisphere.

Key words: sea salt aerosol; individual particle analysis; mixing state; transmission electron microscopy (TEM); Antarctic

海洋气溶胶是地球对流层大气的重要组成成分之一,它能够通过吸收或散射太阳光直接影响地球的辐射平衡^[1],也能够作为云凝结核或冰结核形成云产生间接影响^[2,3]。海洋气溶胶在全球大气中分布范围较广,能够作为物质界面与陆源或海洋源的大气酸性气体进行反应^[4-8],进而沉降到海洋且影响海洋生态^[9]。因此,研究海洋大气中颗粒物的理化特性,对于理解全球与局地之间物质循环以及气候变化和人类活动之间的关系均有重大意义。

南极地区因其特殊的自然条件和地理位置,在研究全球环境变化的过程中处于至关重要的地位。

自 20 世纪 80 年代以来,我国就开展了南北极科学考察航渡期间的多学科综合(如海洋学、大气化学等)研究。利用雪龙号作为研究平台,进行了全球尺度走航过程中的海洋、大气及地质等方面的研

收稿日期: 2016-07-14; 修订日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575116); 山东省杰出青年科学基金项目(JQ201413); 山东大学青年学者未来计划项目(2015WLJH37); 山东大学基本科研业务费专项(2014QY001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CBA01804); 国家海洋局极地专项(CHINARE 2016-04-04, CHINARE 2016-02-02)

作者简介: 迟建伟(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶科学, E-mail: CJW9697@126.com

* 通信作者, E-mail: liweijun@sdu.edu.cn

究^[10, 11]. 其中,部分学者利用南极科考契机对南半球海洋上空大气气溶胶进行了详实的研究,例如:陈立奇等^[12]利用离子色谱法分析了中国首次南极科考时在太平洋和南极半岛附近海域采集的海洋气溶胶样品,研究发现太平洋海洋气溶胶中非海洋源硫酸盐自北纬向南纬含量明显降低,且估算了南极半岛海域生物源输入大气的硫通量为 $0.065 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 效存德等^[13]对第 12 次南极考察航线上降水样品中的甲基磺酸[MSA, 二甲基硫(DMS)的氧化产物]进行了分析,结果显示 MSA 的含量由赤道海域向高纬海域呈递增趋势. 徐国杰等^[14]分析了在第 26 次南极科考航线上采集的气溶胶样品中各水溶性离子组分的浓度、组成及存在形式,结果表明航线上海盐气溶胶占主导,另外,MSA 的浓度结果与效存德等^[13]的研究一致. 同时,从 20 世纪 60 年代,国外学者对南极大气气溶胶开始进行观测和研究. Moser 等^[15]在南极研究了海盐颗粒物与无机酸性气体的非均相化学反应,结果显示此过程是 S 和 N 沉降到冰川表面的一个新的途径. Legrand 等^[16]研究表明南极地区的海盐颗粒物的浓度远高于碱性物质(如 NH_3)的浓度,因此,海盐颗粒物能够作为重要的碱性界面吸附硫酸、硝酸或甲基磺酸等,并与其发生大气非均相化学反应. 以上国内外研究主要集中在利用全样分析法分析海洋大气中气溶胶颗粒物的浓度、化学成分、粒径大小及其时空变化,然而,这些结果缺乏对全球不同区域海洋大气中气溶胶单颗粒微观形貌和混合状态等信息的研究.

本研究在第 29 次南极科考航渡期间(2012 年 11 月至 2013 年 4 月)从珠江口到南极大陆采集了北半球到南半球不同海域海洋上空的气溶胶单颗粒样品. 本研究利用透射电子显微镜分析颗粒物的形貌和混合状态等微观特性,同时也分析了其成分组

成和数量分布等信息,以期理解海洋大气与陆地大气之间的物质交换及海洋大气颗粒物表面大气化学反应等信息提供了直接证据.

1 材料与方法

第 29 次中国南极科学考察 2012 年 11 月 4 日从上海出发,于 2013 年 4 月 6 日返回上海,历经 154 d,途径珠江口、菲律宾民都洛海峡、印度尼西亚爪哇海、澳大利亚西部海岸弗里曼特尔、印度洋和南极大陆. 南极大陆被一个巨大的冰盖覆盖,集中了全球 90% 的冰川,对全球冷热循环具有至关重要作用,也是全球气候变化的重要驱动力. 南极位于地球南半球最顶端,受到人类活动的干扰比较小. 中国在南极大陆设有中山站、长城站、昆仑站和泰山站,用于科学考察.

在南极科考航渡期间利用 KB-2 型单颗粒采样器对海洋大气气溶胶进行单颗粒采集,采用直径 0.5 mm 的采样头,采样流量为 $1.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样膜为附有一层碳膜的铜网膜且直径为 3 mm. 根据大气能见度和实地观测的空气污染程度来确定采样时长^[17],此次航渡中采样时长由 5 ~ 180 min 不等. 如果大气颗粒物的密度为 $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,该采样器对空气动力学直径在 $0.5 \mu\text{m}$ 以下的粒子有 100% 的捕捉率. 采集好的铜网膜放置在特制的样品盒中,将其保存在 25°C 、相对湿度为 $20\% \pm 3\%$ 的干燥箱中^[18]. 采样期间环境温度范围为 $-5.3 \sim 30.7^\circ\text{C}$,相对湿度为 $48\% \sim 100\%$,风速为 $0 \sim 17.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 共采集 56 个单颗粒样品.

本研究使用 JEOL-2100 型透射电子显微镜-X 射线能谱仪(TEM-EDS)方法共分析了 18 个单颗粒样品,其中南极内陆分析了 7 个样品,共获得 1 872 个单颗粒(表 1). 利用 TEM 获取高倍透射电镜图,同时利用 X 射线能谱分析颗粒物成分特征,并进一

表 1 利用 TEM-EDS 分析的南极科考航线上单颗粒样品的详细信息

Table 1 Detailed information of the individual particle samples obtained by TEM-EDS from South China to Antarctic

采样点	采样时间	样品数目	分析样品数目	单颗粒数目	采样点地理位置描述
珠江口	2012-11-04 ~ 2012-11-05	2	1	96	停船,船头采样
菲律宾民都洛海峡	2012-11-07	1	1	248	停船,船头采样
印尼,爪哇海	2012-11-10	1	1	92	停船,船头采样
澳大利亚西部海岸弗里曼特尔	2012-11-11 ~ 2012-11-19	4	2	169	停船,船头采样
印度洋中东部	2012-11-21	1	1	79	浮冰区,停船,船头采样
印度洋南部	2012-11-27	1	1	58	浮冰区,停船,船头采样
南极附近	2012-11-28	1	1	242	浮冰区,停船,船头采样
南极海岸	2012-11-30 ~ 2012-12-01	2	1	98	浮冰区,停船,船头采样
南极内陆	2012-12-16 ~ 2013-01-23	18	7	594	南极陆地采样
南极中山站	2013-03-06 ~ 2013-03-12	3	2	196	南极中山站,采样器离地面高度约 2 m

步分辨出单颗粒内部的成分混合特性. 能谱仪仅能检测原子序数大于 5 的元素,同时因采样膜为附有一层碳膜的铜网膜,所以剔除 Cu 元素,且高估了颗粒物中有机物的含量^[19]. 本研究分析了颗粒物的形貌特征、元素组成和混合状态等信息,从而判断其种类,统计了各个采样点不同种类颗粒物的数量分布并比较其数量差异,进一步计算分析了采样期间的后向气团轨迹,判断大气气溶胶的可能来源.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物类型及元素分布

对南极科考航渡期间采集的单颗粒样品进行 TEM-EDS 分析,研究发现这些颗粒中包含的主要元素为 C、O、Na、Si、Al、S、Cl、Mg、Ca、K、Fe 等. 基于颗粒物的形貌及成分组成,本研究将其分为 4 大类: 海盐颗粒[图 1(A)]、矿物颗粒[图 1(B)]、富硫颗粒[图 1(C)]和含碳颗粒[图 1(D)]. 图 1 显示了上述颗粒物的透射电镜图与能谱分析结果,

表 2 显示了南极科考航线上大气单颗粒的分类及特征描述.

海盐颗粒是海洋大气气溶胶的重要组成成分,本研究根据海盐颗粒的形貌及成分变化,将其划分为 3 大类: 新鲜、部分老化和完全老化的海盐颗粒. 新鲜的海盐颗粒由海浪气泡破裂时产生的颗粒直接进入大气中产生,未与大气中其他物质发生任何化学反应. 新鲜的海盐颗粒由立方晶体的 NaCl 组成,一些颗粒表面包裹着少量的 MgCl₂ 和 CaSO₄ 或二者的混合物,如图 2(a)~2(c)所示;部分老化的海盐颗粒由新鲜的海盐颗粒的表面发生大气非均相化学反应产生,颗粒中仍含有不规则形状 NaCl 核,外壳成分主要由 Na、Mg、Ca、O、S 和 N^{*} (由能谱数据推断得出)组成并含有少量或几乎不含 Cl. 根据颗粒物元素特征及海盐颗粒的表面非均相化学反应特性^[20]进一步获得气溶胶的组分主要包括: Na₂SO₄、MgSO₄、Mg(NO₃)₂ 和 NaNO₃ [如图 2(d)~2(f)];完全老化的海盐颗粒定义为新鲜的海盐

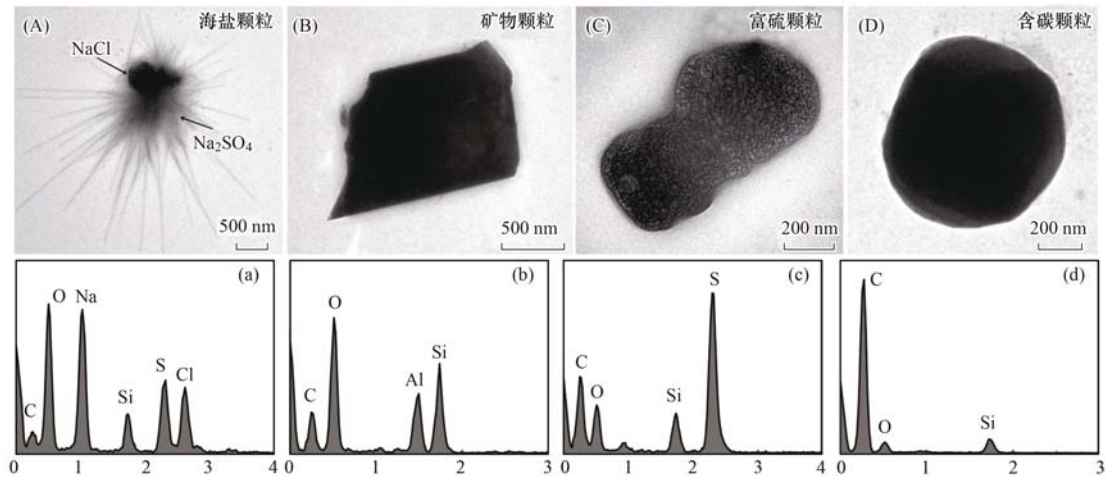
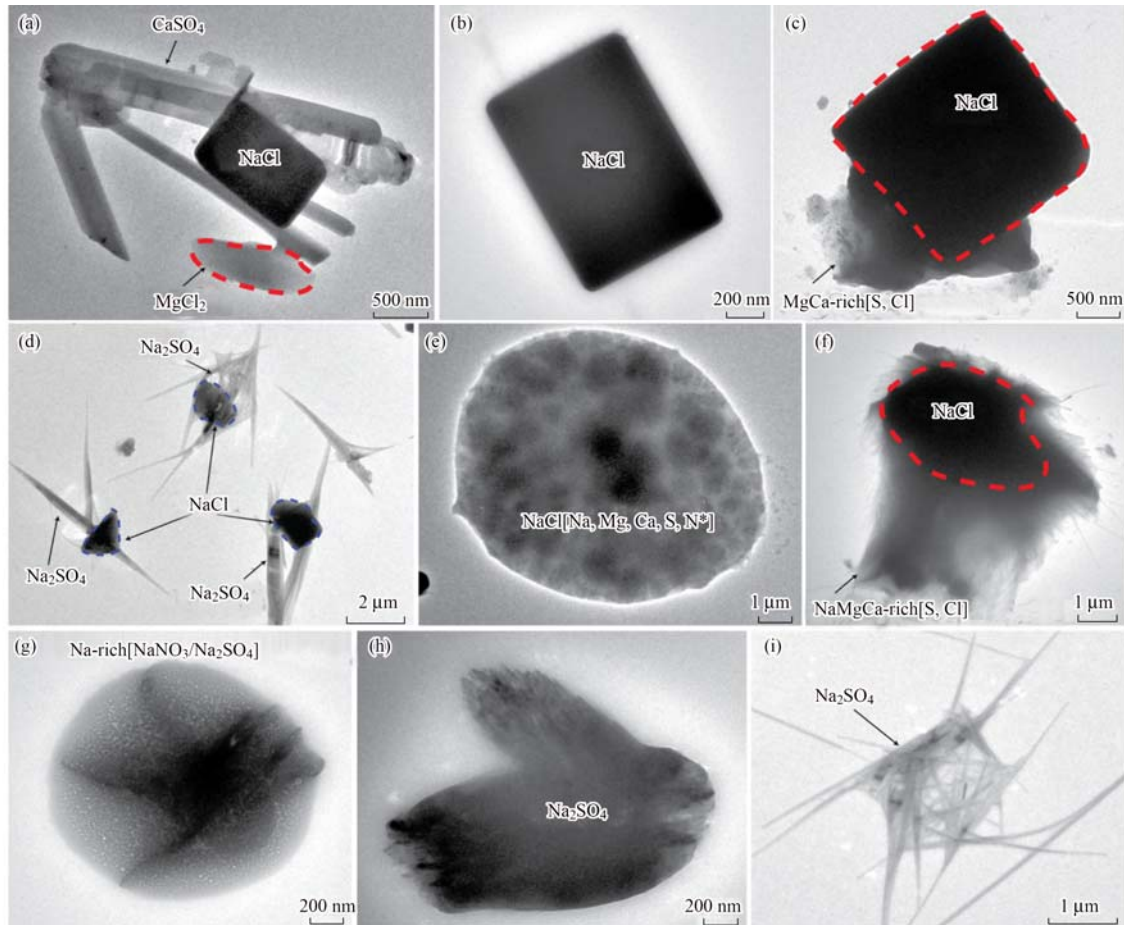


图 1 南极科考航线上海洋大气中典型颗粒物的透射电镜图及能谱图
Fig. 1 TEM images and EDS spectra of individual typical particles from South China to Antarctic

表 2 南半球大气单颗粒分类及特征描述

Table 2 Classification and characterization of individual particles on South Hemisphere			
项目	类别	特征	图例
海盐颗粒	新鲜的海盐颗粒	立方晶体的 NaCl 为主,些许颗粒表面包裹着少量的 MgCl ₂ 和 CaSO ₄ 或二者的混合物,能谱主要由 Na 和 Cl 元素组成.	图 2(a)~2(c)
	部分老化的海盐颗粒	不规则形状 NaCl 核,外壳成分主要由 Na、Mg、Ca、O、S 和 N [*] 元素组成,并含少量 Cl 或不含 Cl 元素	图 1(a), 2(d)~2(f)
	完全老化的海盐颗粒	不含 NaCl 核,不规则形状,能谱主要由 Na 和 S 元素组成	图 2(g)~2(i)
矿物颗粒	硅铝酸盐类	不规则形状,能谱主要由 Si、Al、O 元素组成	图 1(b)
	富“Ca + Mg”类	很少,多数以长条状存在,能谱主要由 Ca、Mg、S、O 元素组成	
富硫颗粒		易受电子束影响导致表面呈泡沫状,能谱主要由 S、O 元素组成	图 1(c)
含碳颗粒		能谱主要由 C、O 和 Si 元素,C 峰明显高于其余二者	图 1(d)
其他类型	金属颗粒	很少,主要含有 Fe、Zn、Pb、Mn 等元素	
	飞灰颗粒	很少,圆形,能谱由 Al、Si 等元素组成	



(a) ~ (c) 为新鲜海盐颗粒, (d) ~ (f) 为部分老化的海盐颗粒, (g) ~ (i) 为完全老化的海盐颗粒

图2 南极科考航线上3类海盐颗粒物的透射电镜图

Fig. 2 TEM images of three types of sea salt particles from South China to Antarctic

颗粒经过大气化学反应,由原来的 NaCl 完全转变为 Na_2SO_4 和 NaNO_3 。与新鲜的和部分老化的海盐颗粒相比,完全老化的海盐颗粒不再含有 NaCl 核[图 2(g) ~ 2(i)]。以上有关海盐颗粒分类及观测结果与北极地区大气中海盐颗粒的研究结果一致^[20]。

南极科考航渡沿途大气中发现含有少量形状不规则的矿物颗粒,包括硅铝酸盐类[图 1(B)]和富“Ca + Mg”颗粒,其中硅铝酸盐类主要元素组成为 Si、Al、O 等[图 1(b)],这些矿物颗粒多来源于地壳^[21]。芦亚玲等^[22]在北极大气中也发现了以硅铝酸盐、 CaCO_3 、 CaSO_4 等为主的矿物颗粒。这些结果表明在全球海洋大气中,由自然源排放的陆源矿物颗粒在全球大气中广泛存在。

此次科考过程中还发现少量富硫颗粒[图 1(C)]的存在,主要包含 S 和 O 元素[图 1(c)]。同时,一些富硫颗粒周围包裹着有机物,构成核-壳结构。

少量含碳颗粒[图 1(D)]在南极科考沿途大气中被发现,主要包含 C、O 和 Si 元素[图 1(d)],C

元素含量明显高于其余二者。大部分含碳颗粒外混于其它颗粒或单独存在,表明这些颗粒为新鲜排放的一次颗粒,芦亚玲等^[22]和 Xie 等^[23]在北极大气气溶胶中也发现此类颗粒存在,且主要来自人为燃料(如煤、石油)或秸秆、森林自燃等排放。

2.2 颗粒物的数量分布

图 3 显示了不同采样点 4 类大气颗粒物的数量丰度,图 4 为各采样点的后向气团轨迹,显示大气气溶胶的来源。

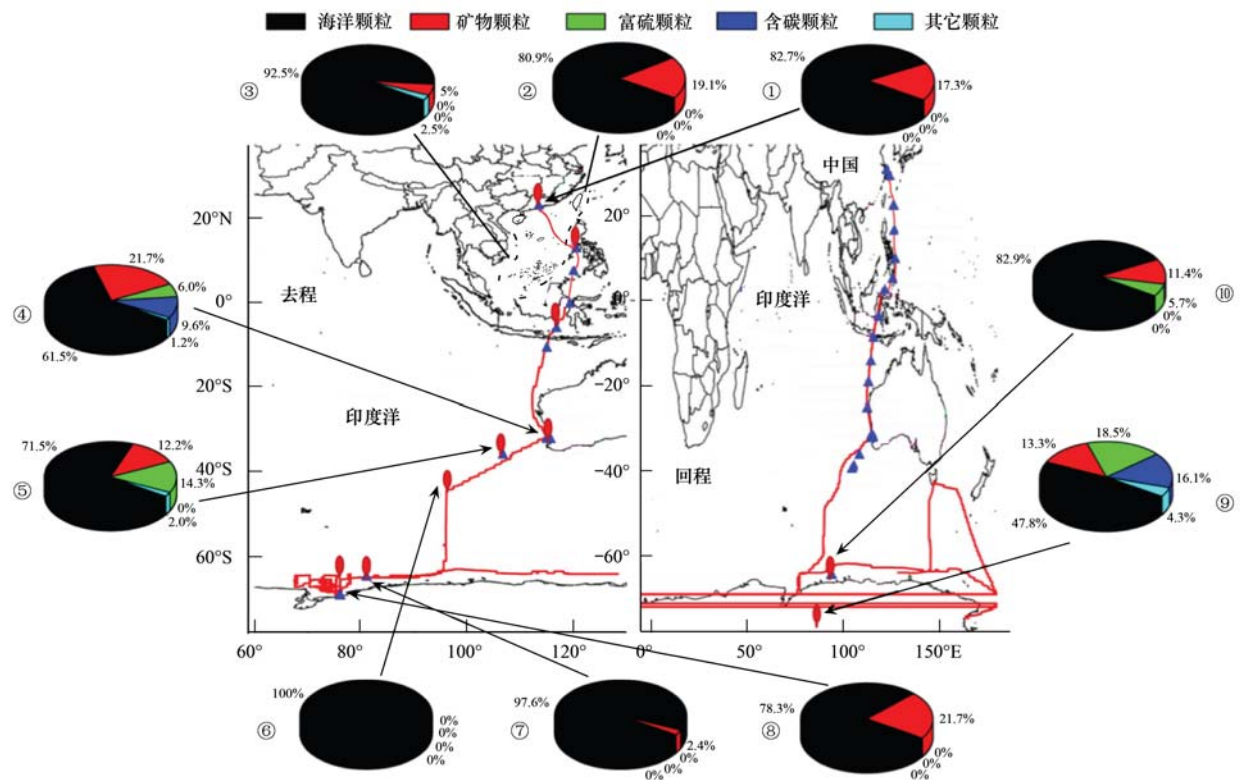
在南极科考航渡沿途,海盐颗粒在海洋大气气溶胶中占主导,其数量丰度范围为 47.8% ~ 100%。海盐颗粒的数量丰度最高值出现在南纬以南的印度洋南部采样点,根据后向气团轨迹,发现采样期间受西风带影响,颗粒物主要来自海洋源。徐国杰等^[14]在第 26 次南极科考走航过程中也在 40°S 左右发现海盐颗粒丰度达最大值。本研究发现海盐颗粒数量丰度最低值(47.8%)出现在南极内陆,这有可能是受海洋源和人为源共同影响。

矿物颗粒的数量丰度范围为 0 ~ 21.7%,其丰

度在澳大利亚西部海岸弗里曼特尔(21.7%)、南极海岸(21.7%)、珠江口(19.1%)及民都洛海峡(17.3%)等地较高,分析其后向气团轨迹,明显可见受陆地源的影响。

富硫颗粒的数量丰度范围为0~18.5%,在南北回归线之间、南极附近及其海岸线上采集的大气气溶胶单颗粒中,富硫颗粒丰度较小,而印度洋中东部和南极内陆采样点其所占丰度较大,分别为14.3%和18.5%。根据后向气团轨迹,发现印度洋

中东部采样期间受西部印度洋气团影响,且经过长距离海上传输。耿红等^[24]研究发现南极地区海洋浮游生物代谢生成的DMS及其降解产物是富硫颗粒的重要来源。同时,徐国杰等^[14]在中国第26次南极科学考察走航过程中研究发现在60°S以南地区,DMS含量明显增多,导致南极内陆富硫颗粒含量增加。因此,本研究通过比较采样点观测结果及后向气团轨迹,表明这些富硫颗粒极可能形成于海洋表面释放的DMS。



①珠江口,②菲律宾民都洛海峡,③印度尼西亚爪哇海,④澳大利亚西部海岸,⑤印度洋中东部,⑥印度洋南部,⑦南极附近,⑧南极海岸,⑨南极内陆和⑩南极中山站;横坐标为经度,纵坐标为纬度

图3 南极科考航线上不同采样点不同类型颗粒物的数量分布情况

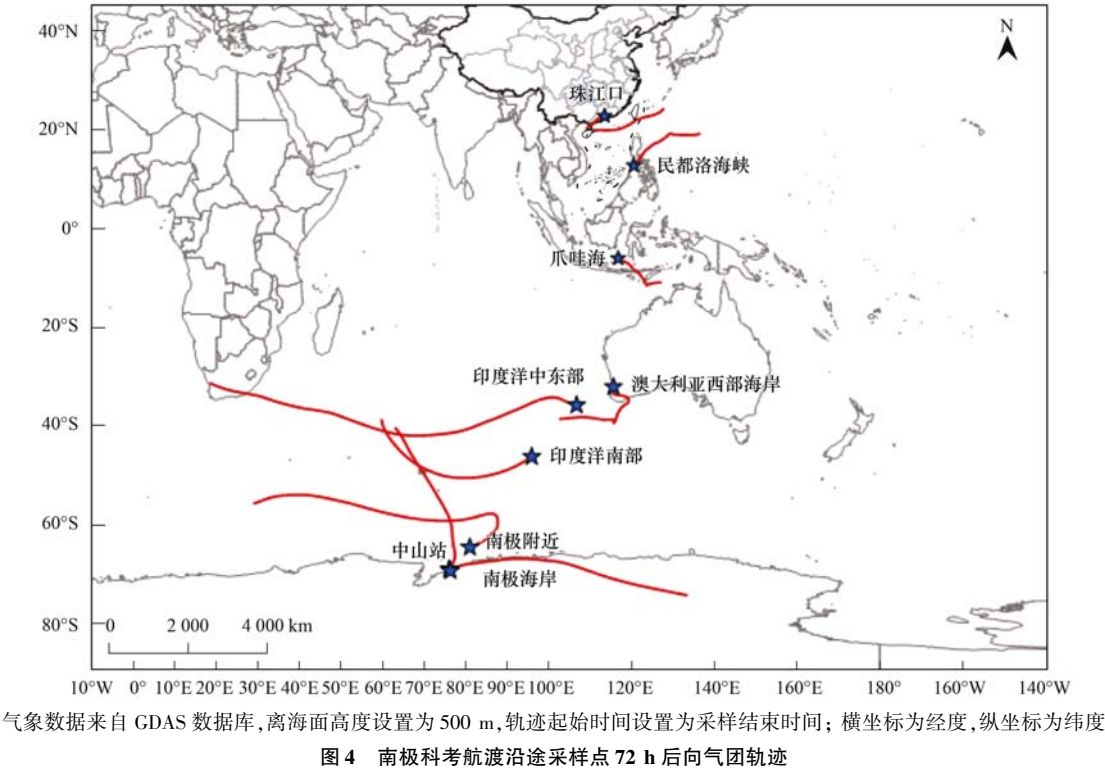
Fig. 3 Number distribution of different types of particles at different sampling sites from South China to Antarctic

2.3 海盐颗粒老化分布

本研究分析了南极科考航渡沿途不同采样点三类海盐颗粒的数量比例分布情况。如图5所示,在全部采样点,部分和完全老化的海盐颗粒占主导,平均比值为86%。在印度洋中东部采样点,完全老化的海盐颗粒所占比重最大,其值为57%,根据后向气团轨迹,气团在海洋表面输送距离最远,此过程中海盐颗粒有足够时间与酸性气体(如 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{SO}_2$ 、 HNO_3/NO_x 、有机酸等)发生非均相化学反应,导致其老化现象的发生。从40°S以南到南极海岸附近,新鲜的海盐颗粒的数量有明显地升高趋势,但仍以老化的海盐颗粒为主。本研究发现在南极内陆老化

的海盐颗粒占主导,其比值为87%,这一结果与耿红等^[24]在2009年3月南极观测中发现新鲜海盐颗粒占总数的76.7%(2.5~10 μm的粒径范围)和70.6%(1~2.5 μm的粒径范围)有差异,海盐颗粒老化结果可能与夏季气温较高以及南极海域浮游生物释放较多的DMS导致硫酸生成有关^[25]。

南极科考航渡期间海洋大气中完全老化的海盐颗粒以混合在一起的长条状 Na_2SO_4 为主[图5(a)]。该结果不同于之前在北极的单颗粒观测结果,本研究发现北极大气老化的海盐颗粒中 Na_2SO_4 和 NaNO_3 [图5(b)]同时存在,且颗粒物形貌一般为圆形^[20]。此外,Li等^[26]在中国南部沿海城市澳



门也发现 NaNO_3 外壳包裹着 Na-S/NaCl 核. Bates 等^[27]研究表明在南半球海洋浮游生物产生的 DMS 是富硫物质的最主要来源, 甚至在一些远离陆地海域, 其贡献率几乎达到 100%, 而北半球富硫物质主

要来自人为源. 同时, 耿红等^[24]利用电子探针微区分析技术检测在南极乔治王岛采集的大气颗粒物样品, 研究发现反应的海盐颗粒全部含有硫酸盐、未发现含硝酸盐, 推断含硫物质来源于海洋浮游生物,

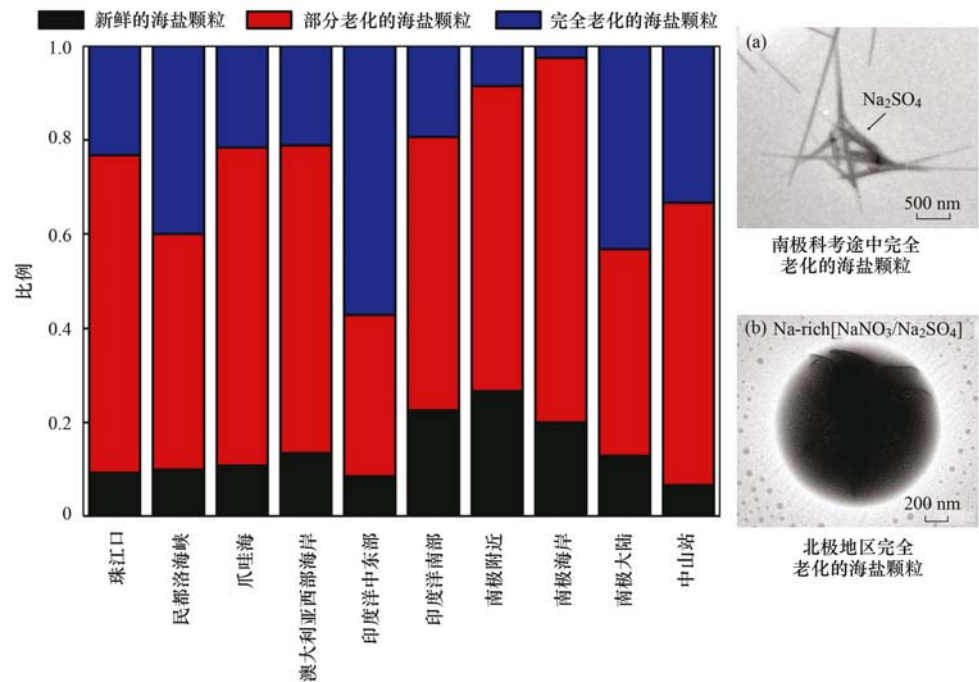


图 5 南极科考航线上不同采样点三类海盐颗粒的数量比例分布及南北极完全老化的海盐颗粒透射电镜图片

Fig. 5 Quantity proportion distribution of three types of sea salt particles at different sampling sites from South China to Antarctic and TEM images of fully aged sea salt particles in Arctic and Antarctic

而非人为污染源。与北半球相比,南半球海洋为主,人为污染物较少^[12],以上研究结果表明南半球海洋大气气溶胶颗粒物主要受海洋源影响且老化的海盐颗粒主要受海洋表面释放的 DMS 的影响。

3 结论

(1)利用 TEM-EDS 对南极科考航线上的 1 872 个气溶胶单颗粒进行分析,结果发现该航线上大气颗粒物主要包括海盐颗粒、矿物颗粒、富硫颗粒和含碳颗粒这 4 大类。其中,根据形貌及成分,本研究又将海盐颗粒划分为三类:新鲜、部分老化及完全老化的海盐颗粒。

(2)在南极科考航渡期间,海盐颗粒数量占主导,主要受海洋源影响。矿物颗粒在受陆地源影响较大的沿海地区丰度较大。富硫颗粒在印度洋中东部和南极内陆采样点丰度较大,分析后向气团轨迹,判断其主要受海洋浮游生物释放的 DMS 影响。

(3)在南极科考航渡期间,86% 的海盐颗粒为部分和完全老化的海盐颗粒,且部分老化的海盐颗粒表面及完全老化的海盐颗粒以长条状的 Na_2SO_4 为主,该结果和人为源交互影响的圆形老化海盐颗粒包括 Na_2SO_4 和 NaNO_3 有较大差别。因此,老化的海盐颗粒主要受海洋表面释放的 DMS 影响。

参考文献:

- [1] Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, **123**(543): 1907-1930.
- [2] Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, *et al.* The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(32): 11207-11212.
- [3] Langmann B, Scannell C, O'Dowd C. New directions: organic matter contribution to marine aerosols and cloud condensation nuclei [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(33): 7821-7822.
- [4] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, *et al.* The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, **5**(3): 193-259.
- [5] 王珉, 胡敏. 青岛沿海大气气溶胶中海盐源的贡献 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(5): 83-85.
Wang M, Hu M. Sea salt source contribution to the aerosol in Qingdao seashore area [J]. *Environmental Science*, 2000, **21**(5): 83-85.
- [6] Geng H, Ryu J, Jung H J, *et al.* Single-particle characterization of summertime arctic aerosols collected at Ny-Ålesund, Svalbard [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2348-2353.
- [7] Sierau B, Chang R Y W, Leck C, *et al.* Single-particle characterization of the high-Arctic summertime aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(14): 7409-7430.
- [8] 姚小红, 黄美元, 高会旺, 等. 沿海地区海盐和大气污染物反应的致酸作用 [J]. *环境科学*, 1998, **19**(3): 22-27.
Yao X H, Huang M Y, Gao H W, *et al.* The mechanism of reaction between sea salt with atmospheric pollutants to acidify rainwater in coastal [J]. *Environmental Science*, 1998, **19**(3): 22-27.
- [9] 高会旺, 姚小红, 郭志刚, 等. 大气沉降对海洋初级生产过程与氮循环的影响研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2014, **29**(12): 1325-1332.
Gao H W, Yao X H, Guo Z G, *et al.* Atmospheric deposition connected with marine primary production and nitrogen cycle: a review [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**(12): 1325-1332.
- [10] 吴荣荣, 何剑锋, 王建国. 我国极地科考事业发展与第 26 次南极科考成果 [J]. *上海地质*, 2010, **31**(3): 83-90.
Wu R R, He J F, Wang J G. The development of China's polar scientific expedition and the 26th Antarctic scientific expedition achievement [J]. *Shanghai Geology*, 2010, **31**(3): 83-90.
- [11] 陈雪忠, 徐兆礼, 黄洪亮. 南极磷虾资源利用现状与中国的开发策略分析 [J]. *中国水产科学*, 2009, **16**(3): 451-458.
Chen X Z, Xu Z L, Huang H L. Development strategy on Antarctic krill resource utilization in China [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, **16**(3): 451-458.
- [12] 陈立奇, 杨绪林, 黄江淮. 太平洋上空硫酸盐的分布和来源 [J]. *环境科学学报*, 1988, **8**(1): 27-31.
Chen L Q, Yang X L, Huang J H. The sources and the distribution of sulfate in the Pacific Atmosphere [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1988, **8**(1): 27-31.
- [13] 效存德, 孙俊英, 秦大河, 等. 南太平洋降水中 MSA 的纬度分布及其分解的气温敏感性 [J]. *海洋学报*, 2001, **23**(3): 112-116.
Xiao C D, Sun J Y, Qin D H, *et al.* Latitudinal distribution of MSA in precipitation over the southern Pacific Ocean and the sensitivity of its decomposition to temperature [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **23**(3): 112-116.
- [14] 徐国杰, 陈立奇, 张远辉, 等. 中国第 26 次南极科学考察航线上空水溶性气溶胶化学成分特征研究 [J]. *极地研究*, 2011, **23**(2): 98-107.
Xu G J, Chen L Q, Zhang Y H, *et al.* Chemical composition characteristics of marine aerosols collected on the route of the 26th Chinese national antarctic research expedition [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2011, **23**(2): 98-107.
- [15] Moser K, Wagenbach D, Münnich K. Nitrate in coastal Antarctic shallow firn cores: comparison of seasonal pattern and total fluxes [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, **14**: 349.
- [16] Legrand M, Ducroz F, Wagenbach D, *et al.* Ammonium in coastal Antarctic aerosol and snow: Role of polar ocean and penguin emissions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D9): 11043-11056.
- [17] Li W J, Shao L Y. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D9): D09302.
- [18] Li W J, Chen S R, Xu Y S, *et al.* Mixing state and sources of

- submicron regional background aerosols in the northern Qinghai-Tibet Plateau and the influence of biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13365-13376.
- [19] Li W J, Shao L Y, Wang Z S, *et al.* Size, composition, and mixing state of individual aerosol particles in a South China coastal city[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(4): 561-569.
- [20] 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.
- [21] 李卫军, 邵龙义, 余华, 等. 内陆输送过程中沙尘单颗粒类型及其非均相反应[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(3): 193-197.
- Li W J, Shao L Y, Yu H, *et al.* Individual dust particles of long-range transport over continent of China: types and sulfuric heterogeneous reactions [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(3): 193-197.
- [22] 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.
- [23] Xie Z Q, Blum J D, Utsunomiya S, *et al.* Summertime carbonaceous aerosols collected in the marine boundary layer of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D2): D02306.
- [24] 耿红, 李屹, 张志敏, 等. 南北极大气气溶胶单颗粒成分特点研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(8): 1361-1367.
- Geng H, Li Y, Zhang Z M, *et al.* Analysis of chemical compositions of individual atmospheric aerosol collected in Arctic and Antarctic area[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(8): 1361-1367.
- [25] Grosjean D. Photooxidation of methyl sulfide, ethyl sulfide, and methanethiol[J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, **18**(6): 460-468.
- [26] Li W J, Shao L Y, Shen R R, *et al.* Internally mixed sea salt, soot, and sulfates at Macao, a coastal city in South China[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2011, **61**(11): 1166-1173.
- [27] Bates T S, Lamb B K, Guenther A, *et al.* Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**(1-4): 315-337.

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) ₃ 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)