

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征

王曼婷^{1,2}, 朱彬^{1,2*}, 王红磊^{1,2}, 薛国强^{1,2}, 何俊³, 徐宏辉⁴, 曹锦飞⁵

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3. 宁波诺丁汉大学化学与环境工程系, 宁波 315100; 4. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008; 5. 苏州市气象局, 苏州 215000)

摘要: 为研究长江三角洲地区霾天水溶性离子的区域污染特征, 于 2013 年 1 月 18 ~ 24 日使用 Andersen 气溶胶粒度分布采样器和离子色谱仪(850professional IC)对南京、苏州、杭州、宁波这 4 个城市和临安区域大气本底站的大气气溶胶质量浓度及水溶性离子进行了同期观测分析, 并结合天气形势分析了长三角地区大范围霾天气的形成原因及水溶性离子的分布特征. 结果表明, 观测期间长三角处于高压以及高压前部, 气压梯度较大时, 低层大气有明显气流辐散, 有利于污染物扩散; 处于弱低压及弱高压的均压场形势下, 并伴随有大气低层气流辐合现象时不利于污染物扩散. 观测期间霾天气发展过程中, 各监测点的大气颗粒物及其中水溶性离子(TWSS)增加显著; TWSS 增加比例分别为杭州 0.9%、临安 4.2%、南京 8.1%. 二次离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 均为细模态(粒径 $< 2.1 \mu\text{m}$)分布, 峰值有一个从 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 向 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 段迁移的过程, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 出现峰值, Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 则呈双模态分布. 各监测点 TWSS 中的二次无机离子 SNA(NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)浓度上升较快, 上升百分比分别为杭州 3%、临安 55%、南京 64.9%; SO_4^{2-} 在 SNA 中所占比例最大, 可达 45%; 各监测点 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值均大于固定源 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ (0.5)比值, 可能说明流动源在区域污染过程中对颗粒物的贡献相对较大.

关键词: 长江三角洲地区; 霾; 天气形势; 水溶性离子; 谱分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2337-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.002

Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period

WANG Man-ting^{1,2}, ZHU Bin^{1,2*}, WANG Hong-lei^{1,2}, XUE Guo-qiang^{1,2}, HE Jun³, XU Hong-hui⁴, CAO Jin-fei⁵

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaboration Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Ningbo Chemical and Environmental Engineering, University of Nottingham, Ningbo 315100, China; 4. Zhejiang Institute of Meteorological Science, Hangzhou 310008, China; 5. Suzhou Meteorological Bureau, Suzhou 215000, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics of water soluble ions in fine atmospheric particles in Yangtze River Delta during the haze period from 18th to 24th Jan 2013, a joint sampling campaign using Andersen sampler was conducted at five cities (including Nanjing, Suzhou, Hangzhou, Lin'an and Ningbo). The analysis of size distribution of these ionic species coupled with the local meteorological conditions may shed some insightful light on the haze formation mechanism in this region. The result has shown: firstly, during the observation period, when Yangtze River Delta located at high pressure or in the front of high pressure, and has a large pressure gradient, the lower atmosphere has a significant airflow divergence in favor of pollutant dispersion; while located in weak low pressure and weak high pressure, the equalizing pressure field is not favorable for pollutant dispersion, especially accompanied with lower atmosphere convergence airflow. Secondly, during the hazy period, the concentration of fine particles and total water-soluble inorganic ions (TWSS) has increased dramatically; the increasing proportions of TWSS in fine particles are: Hangzhou 0.9%, Lin'an 4.2%, Nanjing 8.1%. The particle size of secondary ions of SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ complies fine mode (particle size $< 2.1 \mu\text{m}$), whose peaks migrates from $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ to $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ during the observation period, the peak of particle size of Ca^{2+} , Mg^{2+} appears at $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$, while the ions of Na^+ , Cl^- , K^+ show a bimodal distribution. Moreover, secondary inorganic ions play a significant role in the formation of haze pollution, where the concentrations of secondary inorganic ions of NH_4^+ , SO_4^{2-} and NO_3^- have higher increasing

收稿日期: 2014-11-23; 修订日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275143); 公益性行业(气象)科研专项(201206011); 江苏省高校自然科学研究重大基础研究项目(12KJA170003)

作者简介: 王曼婷(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: 13813008703@163.com

* 通讯联系人, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

rates; their relative proportions of increasing from each monitoring points are: Hangzhou 3%, Lin'an 55% and Nanjing 64.9%. Finally, SO_4^{2-} has the highest mass contribution to SNA, up to 45%; also, the $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ ratios in each monitoring points are always higher than a fair 0.5, which could indicate the significant contribution of mobile source towards this particle pollution.

Key words: Yangtze River Delta; haze; meteorological situation; water-soluble-ions; size distribution

大气颗粒物是导致我国大部分地区能见度降低的主要原因,还会对气候和人类健康产生严重影响^[1-3].在我国大部分地区,水溶性离子作为大气细颗粒物的最主要成分,研究其理化特征对于深入认识细颗粒物的环境、健康及气候效应有着重大的意义^[4-6].

长三角地区作为我国经济发展最快、工业化和城市化最为迅速的地区,在国土面积仅占 2.2% 的地方创造了 22.1% 的 GDP,并且还将继续保持经济高速增长的态势.目前国内对霾天气下区域性大气颗粒物污染及水溶性离子成分的研究,主要集中在京津冀^[7,8]、长三角^[9,10]和珠三角^[11,12]地区,如赵普生等^[13]研究了京津冀地区气溶胶中无机离子的污染特征,表明京津冀地区主要为细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 的持续累积引起的区域污染过程,Li 等^[14]研究了京津冀地区无机离子季节分布特征,表明二次离子夏冬季节浓度较高,京津冀城市群光化学反应过程强烈,耿彦红等^[15]研究了上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征,表明离子主要集中在细颗粒物中,离子粒径分布与采样期间的气象条件、离子的形成机制和来源有关,薛国强等^[16]研究了南京市市区与北郊气溶胶水溶性离子的季节性变化特征,表明市区无机离子冬季浓度高夏季浓度低,北郊春季高夏季低.

然而,目前大多数研究局限于对短期单一站点和离子单一粒径范围的讨论,分析区域性污染和气溶胶离子成分变化及来源的研究有限.因此,结合天气系统和局地污染源特征,分析现阶段区域大气颗粒物水溶性离子的变化、系统了解区域气溶胶污染状况,可为进一步评估区域空气污染状况,为区域气溶胶污染防治提供支持.

本研究结合区域天气形势,分析对比了长三角地区 5 个监测点在一次霾天气过程中大气颗粒物在粗、细粒径段质量浓度分布,水溶性离子的谱分布,二次无机离子分布等特征,通过更深入地认识持续大气污染过程中气溶胶化学组分分布特征并推测其来源,以期改善长三角空气质量提供切实依据.

1 材料与方法

1.1 仪器介绍

本研究使用 FA-3 型 Andersen 气溶胶分粒径采

样器,设置流速为 $28.3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,粒子的 50% 切割等效空气学粒径 (EAD) 为 9.0、5.8、4.7、3.3、2.1、1.1、0.65、0.43 μm . 采样膜使用特氟龙滤膜 ($\phi=80\text{ mm}$,上海兴亚公司).采样前后均将采样膜恒温恒湿处理,用精度为 $1\text{ }\mu\text{g}$ 的电子天枰 (瑞士 Mettler Toledo MX5 型)准确称量.

离子分析使用瑞士万事通 850professional IC 型色谱分析仪,实验检测了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 NH_4^{+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 NO_2^{-} 、 F^{-} 共 10 种无机离子,各离子标准曲线相关性都大于 0.999,最低检出限为 $0.006\sim0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对某种离子取 6 份质量浓度 (0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 2.0 、 $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的标液,分别加入同体积 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标液混匀,进行回收实验,测得 10 种离子的加标回收率均达到 96% 以上.阳离子分离柱为 Metrosep C4-150,保护柱为 Metrosep C4 GUARD,阴离子色谱柱为 Metrosep A-supp7-250,保护柱为 Metrosep A supp 4/5.淋洗液: $3.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{CO}_3$ (阴离子), $1.7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸 + $0.7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 吡啶二羧酸 (阳离子).样品前处理及淋洗液的配制均使用电阻率为 $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的超纯水.

1.2 监测站点与采样时间

长三角地区大气气溶胶样品采集点有 5 个,如表 1,分别为南京信息工程大学、苏州气象局、杭州国家基准气候观测站、临安区域大气本底站和宁波气象局.

表 1 长三角地区各采样站具体特点
Table 1 Specific characteristics of individual station

采样点	经度,纬度	海拔高度/m	站点分类
杭州	120.11°E, 30.15°N	41.7	大型城市
苏州	120.36°E, 31.16°N	3~5	中型城市
临安	119.44°E, 30.18°N	138.6	区域背景监测点
南京	118.47°E, 32.00°N	67.9	大型城市
宁波	121.33°E, 29.49°N	2.2	中型工业城市

采样时间为 2013 年 1 月 18~24 日共计 7 d 对 5 个站点进行同步观测,每日连续采样 23 h.滤膜取一半剪碎,置于 50 mL 的 PET 瓶中,加入 20 mL 超纯水,静置 30 min.超声处理 1 h,于 4℃ 保存分析.针对实验过程中对大气颗粒物 $\text{PM}_{2.1}$ 阴阳离子的质量平衡计算,可求得离子平衡值:

$$\frac{\frac{[\text{Na}^+]}{23} + \frac{[\text{NH}_4^+]}{18} + \frac{[\text{K}^+]}{39} + \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{12} + \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{20}}{\frac{[\text{F}^-]}{19} + \frac{[\text{Cl}^-]}{35.5} + \frac{[\text{NO}_2^-]}{46} + \frac{[\text{NO}_3^-]}{62} + \frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{48}} = 0.94$$

该值处于表征离子平衡的 0.9 ~ 1.1^[17],说明离子测量结果可靠.

2 结果与讨论

2.1 天气形势过程分析

由图 1 可知,1 月 18 日[图 1(a)]长三角地区受高压控制,高压自西向东快速移动;1 月 19 日上午高压移至东部海面东海上,长三角处于高压后部;1 月 19 日[图 1(b)]中午此高压消散,长三角地区主要受西南方向移来的低压系统影响,等压线较密,地面风速较大.本研究将 1 月 18 日至 20 日[图 1

(c)]的污染过程称为污染过程一,过程一 等压线密集、梯度风大,有利于污染物输送和扩散,各监测点 PM_{2.1} 的平均质量浓度(图 2)分别为南京 86.3 μg·m⁻³、杭州 87.6 μg·m⁻³、临安 99.2 μg·m⁻³. 1 月 21 日长三角持续处于低压东移的天气控制下,此时长三角地区处于冷锋后,有微弱降水.1 月 22 日[图 1(d)]长三角地区位于弱高压前部,1 月 23 日[图 1(e)]受弱高压控制,气压梯度很小,天气系统不利于污染物输送扩散,且在 850 hPa 高度处有风场的辐合,局地排放可引起污染累积.1 月 24 日[图 1(f)]中午开始高压自西北方向向东南部移动.本研究将 1 月 21 日至 22 日开始的弱高压发展过程称为污染过程二,过程二中 PM_{2.1} 的平均质量浓度达到(图 2)100.4 μg·m⁻³(南京)、98.3 μg·m⁻³(杭州)、106.1 μg·m⁻³(临安).

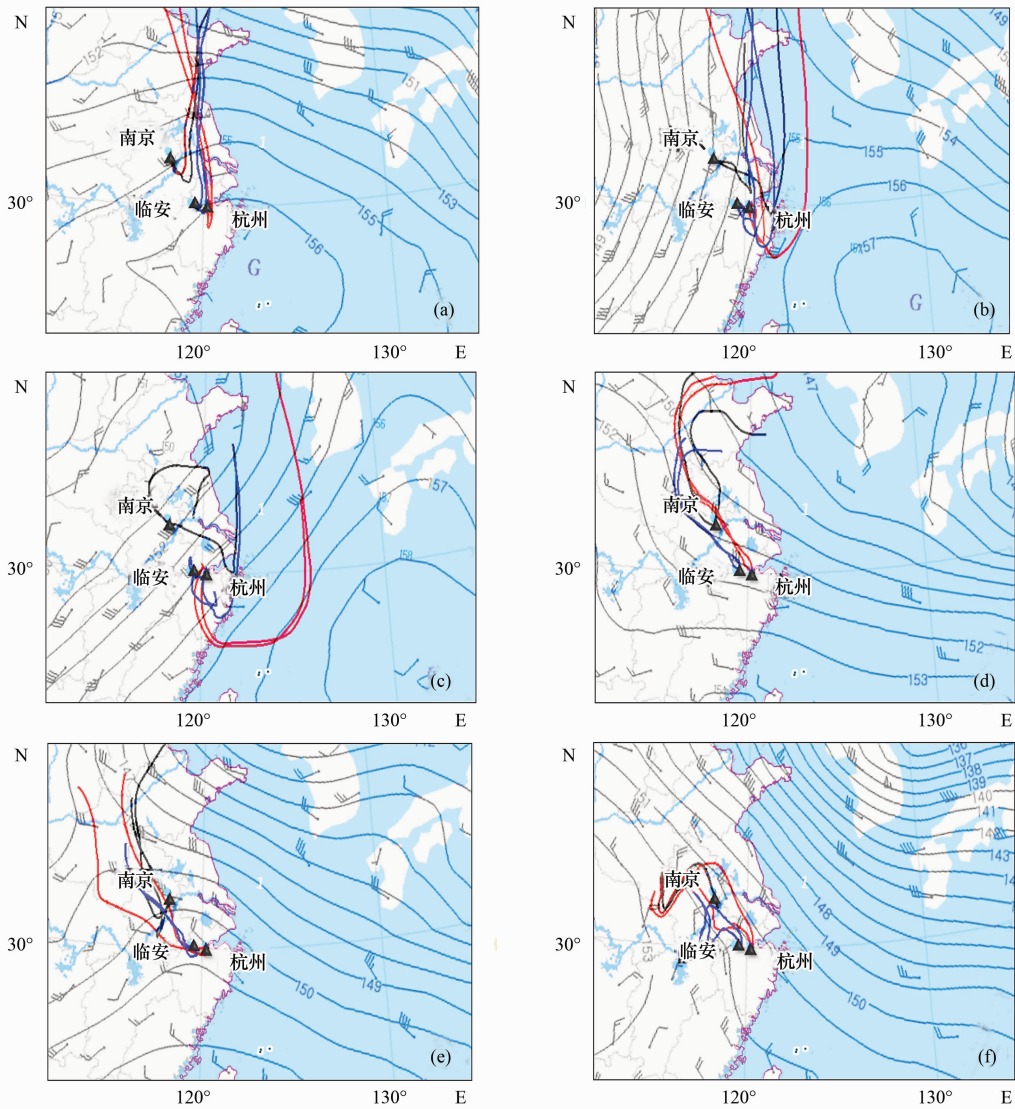


图 1 2013 年 1 月 18 日至 24 日长三角地区 850 hPa 形势图(当时每日 20:00 时)与后向轨迹(每日 08:00、20:00 两条轨迹)

Fig. 1 Ground situation map of Yangtze River Delta from 18 January 2013 to 24 January 2013 at 20:00 (CST)

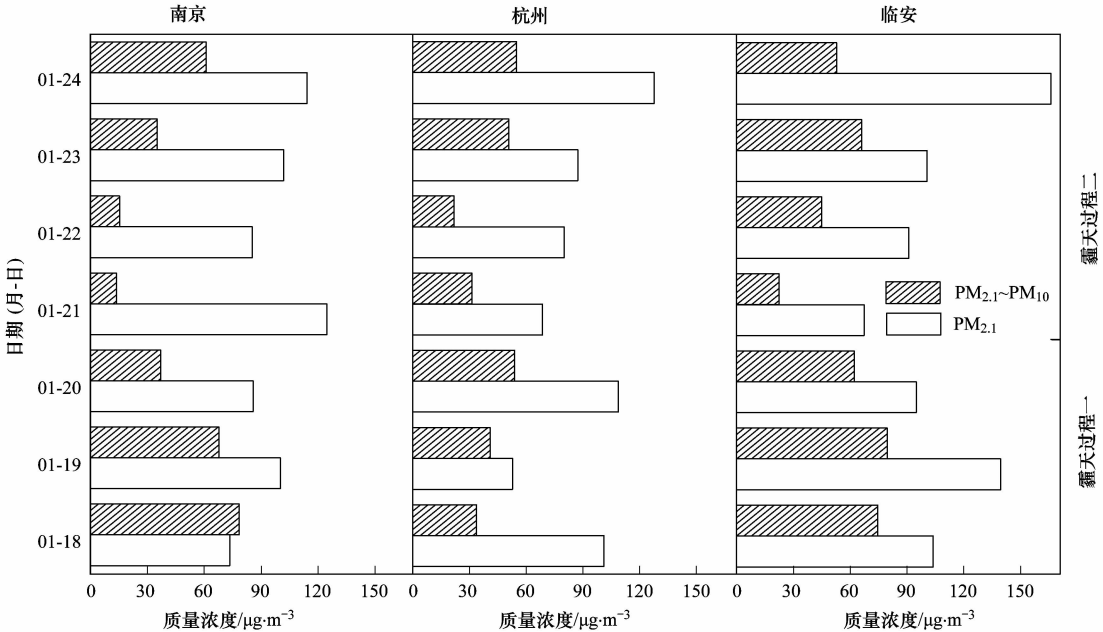
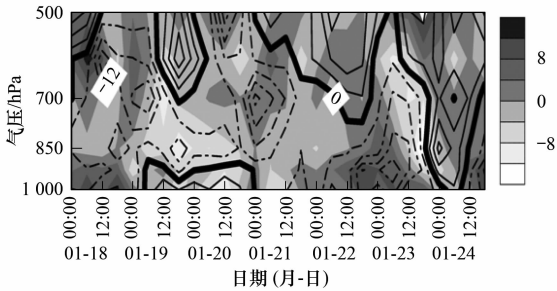


图2 污染过程中PM_{2.1}、PM_{2.1}~PM₁₀质量浓度逐日变化

Fig. 2 Daily changes of mass concentration of PM_{2.1}, PM_{2.1}-PM₁₀ during the pollution period

与天气形势对应,长三角气流辐散辐合和涡度大致可反映区域扩散气象条件.从图3可看出,1月18日至19日00:00在650 hPa和900 hPa高度处各有一个正散度大值中心,其值为 $10 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,同时1月18日06:00左右在900 hPa高度处有一个负涡度大值中心,其值为 $-14 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,1月18日至19日00:00长三角地区基本属于底层切变产生的辐散气流控制(负涡度和正散度),负涡度的产生是由于水平辐散使反气旋性涡度增加.1月19日12:00至1月21日12:00在850 hPa以下基本受辐合气流控制(负散度和正涡度),正涡度的产生是由于水平辐合使气旋性涡度增加,1月20日12:00左右在950 hPa左右有一个负散度极大值中心,其值为 $-12 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.1月23日12:00开始至1月24日700 hPa以下基本受辐散气流控制,1月24日00:00左右在850 hPa高度处有一个负散度极大值中心,其值为 $-14 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.综上在长三角地区850 hPa以下1月18日至19日受辐散气流控制,1月20日开始至22日受辐合气流控制,通常情况下高空产生辐合气流,对应地面辐散气流,杨德宝等^[18]和刘兴中等^[19]的研究都指出,低层大气有辐合时污染更加严重.因此与图3相互印证在1月18日至20日污染过程一在天气形势上相对有利于污染物扩散,1月21日至24日污染过程二天气形势更易造成区域污染.

图4利用边界层探空资料分析了霾天弱高压发展过程污染物累积后期(1月23日和24日)南京和



色块表示散度,单位: $\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$;
等值线表示涡度,单位: $\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

图3 2013年01月18日00:00到1月24日12:00污染区(101.3°~135.3°E, 22°~41.1°N)区域散度和涡度的垂直剖面
Fig. 3 Vertical profile of polluted area (101.3°-135.3°E, 22°-41.1°N), regional divergence and vorticity from 18 January 2013 (00:00, CST) to 24 January 2013 (12:00, CST)

杭州站点的边界层温度、露点温度随高度的变化特征,代表两类站点在区域污染状况下局地的边界层特征.杭州[图4(a)]1月23日08:00在925 hPa以下为中性层结,925~882 hPa有逆温层,20:00也在此高度存在一个逆温层,逆温层强度不大;1月24日925 hPa以下有逆温层,逆温层高度很低,易造成污染物累积.南京[图4(b)]1月23日08:00在913~1482 hPa有一个很厚的逆温层,20:00开始逆温层下降,降到925 hPa以下;24日08:00逆温层持续到20:00渐渐消失,近地面形成一个中型层结.可见,南京与杭州在1月23日和24日灰霾天气持续发展过程中都有一个发展较厚的逆温层.

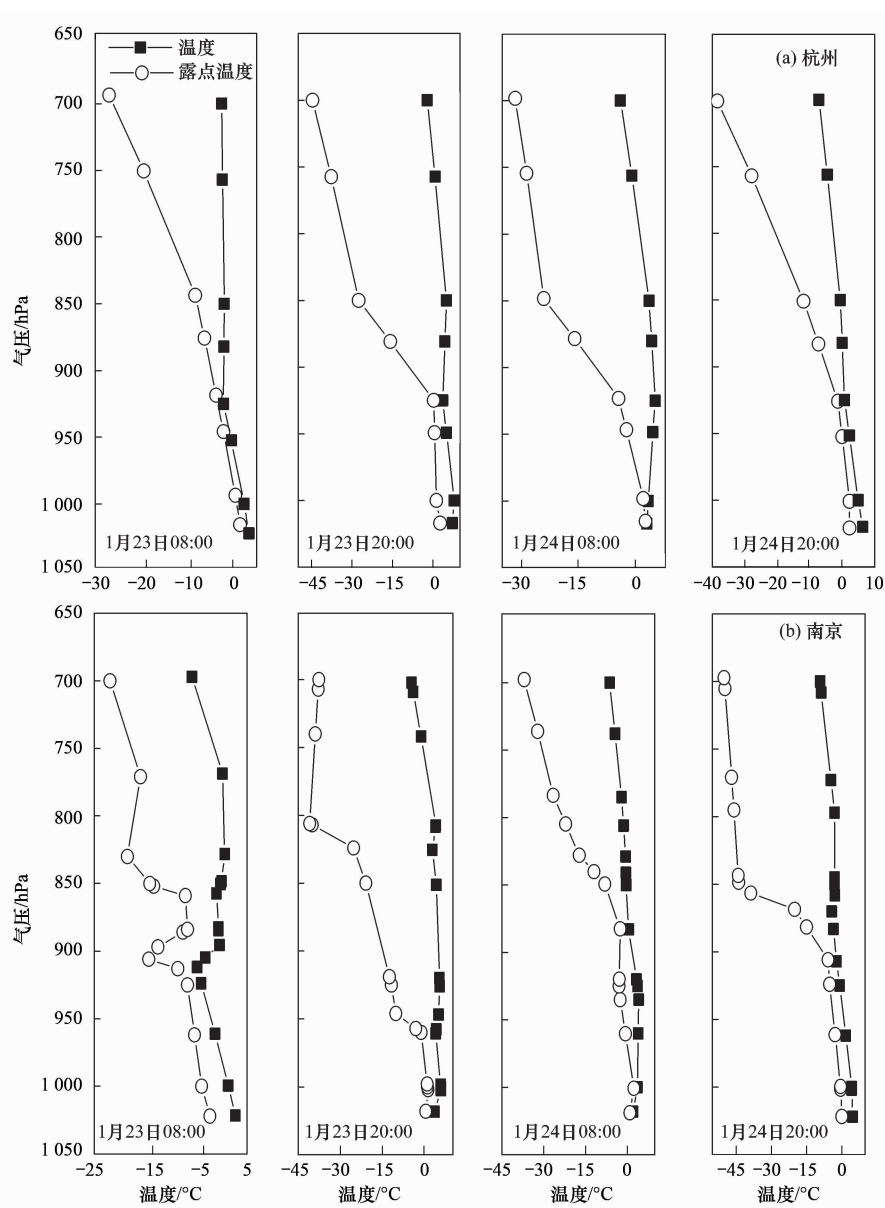


图4 2012年1月23~24日杭州、南京边界层露点温度、温度随高度变化特征

Fig. 4 Correlations between height and both the Dew point temperature and temperature of boundary layer in 23-24 January 2012 in Hangzhou and Nanjing

2.2 各地气溶胶质量浓度及其水溶性离子特征

2.2.1 采样点相关性分析

差异系数(coefficient of divergence, CD)可用来评估采样站点之间样品来源的相似程度^[20,21],CD越趋于0代表两个站点之间离子的来源越相近,趋于1则表明站点之间离子来源差异性越大,本研究以CD=0.2作为区分两个站点之间离子来源差异的阈值^[14].

其定义式如下:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 表示*j*检测站点第*i*种化学物质的平均质量浓度;*j*、*k*分别表示两个不同的采样点;*p*表示所测样品中无机离子总数.

表2列出了两个监测点相互之间大气颗粒物中的水溶性离子的CD值,分析其相似性有以下两类:①南京和苏州之间的CD=0.17,杭州与宁波之间的CD=0.14,CD值比较小其离子同源性较强;②临安与各监测点之间CD值都大于0.2,差异均较大,与南京的CD=0.34值最大,说明其离子来源差异最大;南京与杭州、宁波的CD都为0.26,差异也较大.由于边界层探空资料的限制,选取南京、杭州、临安作为长三角地区代表站点,并进一步深入分析.

表 2 采样站点相关系数 (CD) 分布
Table 2 Coefficient of divergence between distributions
of sampling sites

	苏州	临安	南京	宁波
杭州	0.20	0.22	0.26	0.14
苏州		0.28	0.17	0.20
临安			0.34	0.21
南京				0.26

2.2.2 各监测点大气颗粒物与水溶性离子分布特征
通常将空气动力学直径 2.5 μm 作为粗、细粒

子的分界^[22],由于 Andersen 采样器没有 2.5 μm 的切割粒径,本研究将空气动力学直径 2.1 μm 作为粗、细粒子的分界. 图 5 表明南京、杭州和临安 PM_{2.1} 和水溶性离子在霾天气污染过程中急剧增加,与 1 月 18 日至 20 日高压消散过程相比,1 月 21 日至 24 日弱高压天气形势下 PM_{2.1}/PM₁₀ 平均增加值比例为南京 19.7%、杭州 28.3%、临安 8.7%,PM_{2.1} 中水溶性离子三地相应平均分别增加南京 14.3%、杭州 2.4%、临安 1.5%.

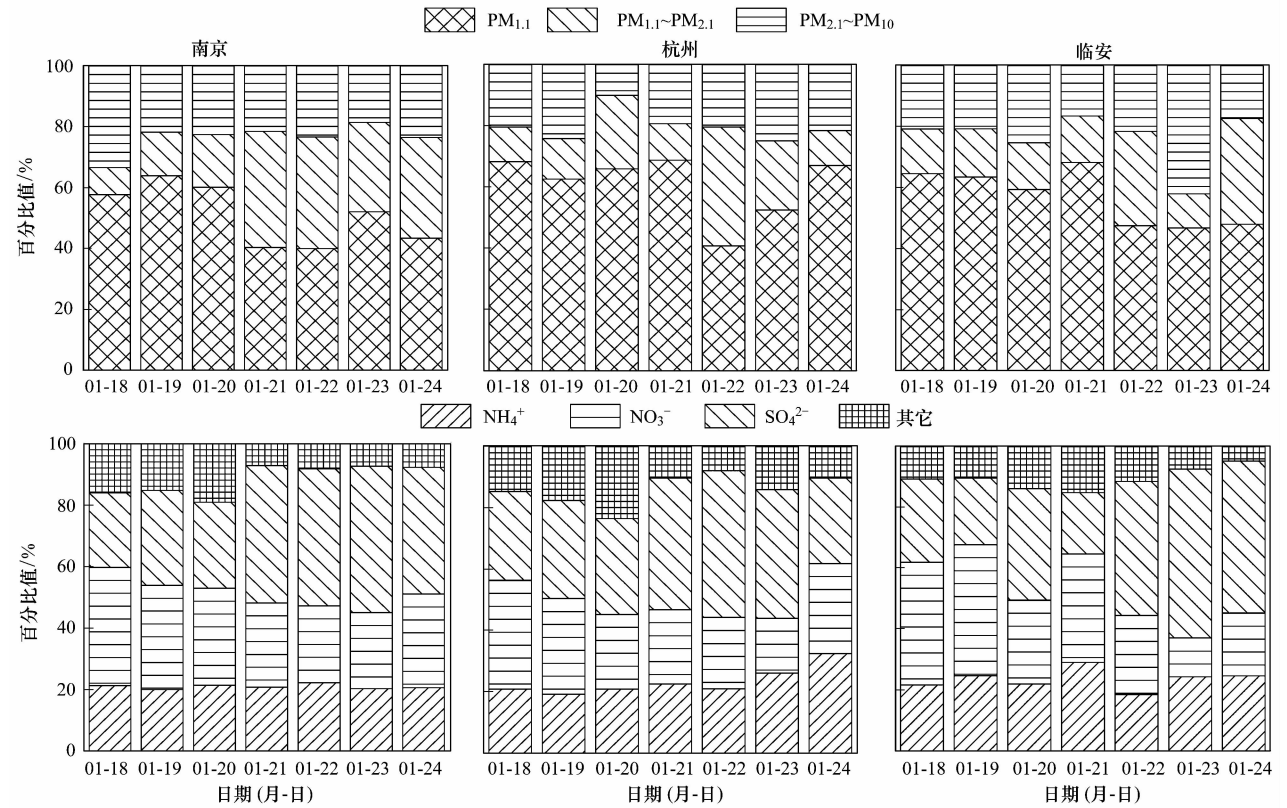


图 5 2013 年 1 月 18 至 24 日南京、杭州、临安这 3 个监测点大气颗粒物及水溶性离子浓度百分比变化

Fig. 5 Variation of concentrations of particulate matter and water-soluble ions at Nanjing, Hangzhou, Lin'an from 18 to 24 January 2013

图 5 可见霾天长三角地区 3 站大气颗粒物质量浓度粒径分布主要以 PM_{2.1} 为主. 尤其在 1 月 21 日, PM_{2.1} 所占比例较 20 日升高 (图 5) 南京 20.2%、杭州 1.7%、临安 14.5%, 各监测点 1 月 23 日 PM_{2.1} 质量浓度略有降低, 与 1 月 22 日相比各监测点相应降低了 10.4% (南京)、15.3% (杭州)、6.5% (临安). 同时由图 5 逐日变化可发现伴随着霾天的发展, 各监测点 PM_{1.1} 不同程度地向 PM_{1.1} ~ PM_{2.1} 偏移, 这可能是由于随着气溶胶细粒子在大气中停留时间延长, 碰并聚合、化学反应等使细粒子老化加剧. 3 个监测点各粒径段水溶性离子在细颗粒物中所占比例较大, 约占 75%. 从细颗粒物 PM_{2.1} 中水溶

性离子质量浓度的变化趋势来看, 在 1 月 18 日至 20 日高压消散过程中 3 个监测点水溶性离子浓度为南京 25.9 μg·m⁻³、杭州 21.0 μg·m⁻³、临安 18.9 μg·m⁻³, 分别占 PM_{2.1} 的浓度约为 25% ~ 30% (南京)、19% ~ 25% (杭州)、16% ~ 19% (临安), 1 月 21 日至 24 日弱高压天气条件下水溶性离子浓度为南京 44.4 μg·m⁻³、杭州 25.1 μg·m⁻³、临安 29.0 μg·m⁻³, 分别占 PM_{2.1} 浓度的 40% ~ 46% (南京)、21% ~ 37% (杭州)、18% ~ 19% (临安). 1 月 21 日南京地区 PM_{1.1} ~ PM_{2.1} 中水溶性离子质量浓度显著上升, 是 1 月 20 日的 4 倍, 1 月 22 日杭州和临安地区 PM_{1.1} ~ PM_{2.1} 中水溶性离子质量浓度显著上

升,分别是1月21日的3倍和2.7倍.在霾天气过程中各粒径段水溶性离子质量浓度变化趋势与颗粒物PM_{2.1}质量浓度日变化趋势一致,说明水溶性离子对霾天颗粒物的形成、增长起到很大的作用.并且从1月21日起,各监测站PM_{2.1}中二次离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺)增加,增加质量浓度分别为南京20.9 μg·m⁻³、杭州0.47 μg·m⁻³、临安0.9 μg·m⁻³,可看出南京地区霾天弱高压天气形势下二次离子增加较其它两个地区严重.

观测期间1月21日开始弱高压天气过程,杭州地区PM_{2.1}平均质量浓度增加28.3%,增加明显,但水溶性离子增加较少约0.9%,图1后向轨迹分析可得1月18日至20日气团来自长三角地区,经过南京、苏州、上海等工业发达地区;1月21日至24日气团主要来自中小型城市的安徽东部地区(气团无外来严重污染),但是由于存在一个高度较低(900 hPa左右)的逆温层,这种情况导致大气污染物被阻滞在低空和近地面层,前期积累的污染物没有及时扩散,易形成持续的霾天污染.南京在1月21日开始PM_{2.1}(增加19.7)和水溶性离子(增加8.1%)都有一个较大的升高趋势,1月21日至24

日气团来自西北地区,且1月23日至24日在边界层内存在一个高度持续下降,厚度增加的逆温层,在西北风作用下,使近地层空气中的水汽、细微颗粒物只能漂浮在逆温层下面的空气中,而无法扩散,因此1月21日开始南京为外来气团输送及高强度逆温层发展引起的中重度污染.临安在此次霾天气过程中,其PM_{2.1}和水溶性离子增加并不显著,分别为8.7%和1.6%.结合图1可见临安地区气团在污染过程一、二中多来自绍兴、宣城等周边地区.

2.2.3 水溶性离子谱分布

水溶性离子质量浓度谱分布分析结果(图6)可见,3个监测点观测结果按照各离子粒径分布的相似性可以分为3类:①在0.43~1.1 μm出现峰值的细模态离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺);②在4.7~5.8 μm出现峰值的粗模态离子(Ca²⁺、Mg²⁺);③在0.65~1.1 μm和4.7~5.8 μm分别出现峰值的双模态离子(Na⁺、K⁺、Cl⁻).

观测期间,3个监测点有一个共同趋势,即污染过程一中二次离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺)的峰值粒径出现在0.43~0.65 μm,污染过程二中峰值出现在1.1~2.1 μm粒径段,局地气象条件高湿(70%~

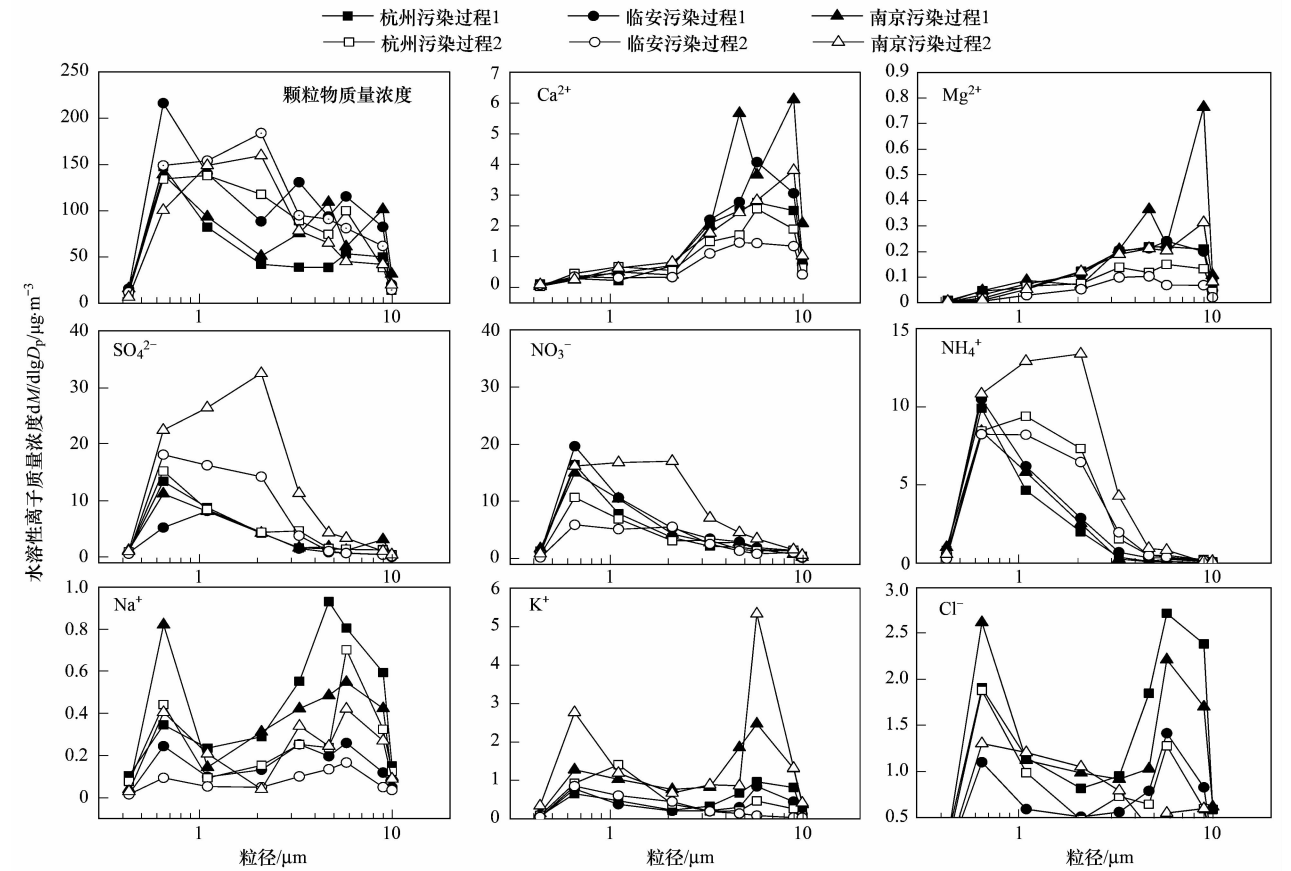


图6 长三角地区水溶性离子的粒径分布

Fig. 6 Size distributions of main water soluble ions in the Yangtze River Delta region

85%),逆温层低 900 hPa 左右,逆温温差大(5 ~ 10℃),可推测为持续污染天气过程中气粒转化产生的硫酸盐、硝酸盐在大气中累积,浓度升高^[24]. Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 同为地壳元素,各监测点中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 主要分布在粗粒径段(粒径 2.1 ~ 10 μm),峰值粒径出现在 4.7 ~ 5.8 μm . Ca^{2+} 主要来自于建筑尘, Na^+ 、 Mg^{2+} 主要来自海洋源和土壤扬尘,这 3 种离子主要存在于粗颗粒物中^[25]. 杭州、临安在霾天气发展过程中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 粒径分布无显著变化,南京在污染过程一中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 质量浓度显著偏高,根据采样记录 1 月 18 日至 19 日采样点周围有施工,土壤扬尘可能引起这 3 种离子在粗粒径段浓度显著升高. 弱高压天气过程中各采样点 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 呈双模态分布,其质量浓度都是在粗粒径段高于细粒径段, K^+ 来源较多,本研究中其在细粒径段质量浓度较粗粒径段低,虽然其是生物燃烧示踪物,但在本研究中未必来自生物燃烧, Cl^- 主要来自燃煤和海盐,在粗、细颗粒物中含量相当^[26],与高压消散过程相比,在弱高压发展过程中 K^+ 在南京站点粗粒径段含量较高,高压消散过程南京、杭州 Cl^- 在 4.7 ~ 5.8 μm 段显著升高,冬季工业排放可能是造成 Cl^- 在粗粒径段质量浓度较高的原因.

2.2.4 二次无机离子分析

大气颗粒物 $\text{PM}_{2.1}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的一次

表 3 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的相互关系

项目		污染过程一			污染过程二		
		$\text{SO}_4^{2-}/\text{SNA}$		$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{SNA}$		$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$
		$\text{SNA}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$			$\text{SNA}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
南京	$\text{PM}_{2.1}$	21.50	0.33	1.27	42.43	0.48	0.61
	PM_{10}	24.50	0.35	1.20	49.69	0.49	0.61
杭州	$\text{PM}_{2.1}$	19.53	0.40	0.92	20.00	0.43	0.69
	PM_{10}	21.76	0.41	0.93	23.42	0.44	0.70
临安	$\text{PM}_{2.1}$	18.02	0.32	1.40	18.92	0.46	0.75
	PM_{10}	20.47	0.31	1.53	20.99	0.44	0.77

3 结论

(1)长三角地区 1 月 18 日至 20 日处于高压以及高压前部,气压梯度较大,低层大气有气流辐散,天气形势有利于污染物扩散; 1 月 21 日至 24 日处于弱高压发展天气形势下,低层大气伴随气流辐合,天气形势不利于污染物扩散,易造成区域性大气颗粒物污染. 因此从 1 月 21 日开始 3 个地区大气颗粒物 $\text{PM}_{2.1}$ 浓度开始增加, $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$ 增加百分比分别为南京 19.7%、杭州 28.3%、临安 8.7%, $\text{PM}_{2.1}$ 中水溶性离子增加百分比分别为南京 14.3%、杭州

来源很少,主要来源为二次转化. 表 3 分析了各采样点 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_{10} 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的相互关系. $\text{SNA}(\text{SO}_4^{2-}$ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 之和)为 $\text{PM}_{2.1}$ 的主要成分,其浓度变化与 $\text{PM}_{2.1}$ 质量浓度变化显著相关,表 3 表明在过程二中 1 月 21 日至 24 日弱高压天气形势发展过程中,南京大气颗粒物 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_{10} 中 SNA 增加最快,其 $\text{PM}_{2.1}$ 中 SNA 由 21.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增至 42.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,杭州、临安 SNA 值在霾天过程中增加较少,分别增加 0.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 3 个采样点 SNA 中 SO_4^{2-} 含量均最高,且污染过程二 SO_4^{2-} 所占比例显著增加,3 个站点 SNA 中 SO_4^{2-} 所占比例分别为南京 14%、杭州 3%、临安 13%. NO_x 与 SO_2 分别为 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的气体前体物, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值可用于定性分析移动源和固定源对颗粒物浓度的相对贡献,3 个监测点在污染天气过程中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值都大于 0.5^[23],因此可能说明在区域污染过程中,移动源对颗粒物的贡献相对较大,这可能与近几年来长三角地区机动车保有量迅速增加有关. 由表 3 的 SNA 、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{SNA}$ 和 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 分析,与污染过程一相比,过程二的 $\text{PM}_{2.1}$ 和 PM_{10} 中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值明显降低,是由于过程二中 SO_2 转化为 SO_4^{2-} 增多,原因有待于进一步分析.

2.4%、临安 1.5%,是典型的以细粒子污染为主的区域性污染,且水溶性离子对霾天颗粒物的形成、增长起到一定的作用.

(2)二次离子 $\text{SNA}(\text{SO}_4^{2-}$ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 之和)为 $\text{PM}_{2.1}$ 的重要组成部分,其浓度变化与 $\text{PM}_{2.1}$ 质量浓度变化显著相关; 在不利于污染物扩散的天气形势下各监测点 SNA 质量浓度增加分别为南京 20.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、杭州 0.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、临安 0.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 并且霾天气过程中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值都大于固定源(0.5)的比值,可见移动源对区域污染过程中颗粒物的贡献相对较大.

(3) 霾天二次无机离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 均呈现细模态分布, 峰值有一个从 $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$ 向 $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 段转化的过程, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 出现峰值, Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 则呈双模态分布, 冬季工业排放可能造成 Cl^- 在 $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 段显著增多。

参考文献:

- [1] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational study [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(2): 185-208.
- [2] Monks P S, Granier C, Fuzzi S, *et al.* Atmospheric composition change-global and regional air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(33): 5268-5350.
- [3] Menon S, Genio A D D, Koch D, *et al.* GCM simulations of the aerosol indirect effect: Sensitivity to cloud parameterization and aerosol burden[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, **59**(3): 692-713.
- [4] Chen R J, Peng R D, Meng X, *et al.* Seasonal variation in the acute effect of particulate air pollution on mortality in the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES) [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **450-451**: 259-265
- [5] Schwartz J, Dockery D W, Neas L M. Is daily mortality associated specifically with fine particles [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1996, **46**(10): 927-939.
- [6] Stieb D M, Judek S, Burnett R T. Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: Effects of gases and particles and their influence of cause of death, age and season [J]. *Journal of Air & Management Association*, 2002, **52**(4): 470-484.
- [7] 黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 等. 北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1236-1244
- [8] Yao X H, Lau A P S, Fang M, *et al.* Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1—inorganic ions [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2991-3000
- [9] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952
- [10] 魏玉香, 杨卫芬, 银燕, 等. 霾天气南京市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(11): 66-71
- [11] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 238-245.
- [12] Tan J H, Duan J C, He K B, *et al.* Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(6): 774-781.
- [13] 赵普生, 张小玲, 孟伟, 等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- [14] Li X R, Wang L L, Ji D S, *et al.* Characterization of the size-segregated water-soluble inorganic ions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration: Spatial/temporal variability, size distribution and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 250-259.
- [15] 耿彦红, 刘卫, 单健, 等. 上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1585-1589.
- [16] 薛国强, 朱彬, 王红磊, 等. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1633-1643.
- [17] 姚青, 孙政玲, 张长春, 等. 潮州沿海大气气溶胶无机离子浓度分布与气象要素的相关分析[J]. *气象与环境学报*, 2007, **23**(4): 39-42.
- [18] 杨德宝, 王式功, 黄建国. 兰州市区大气污染与气象条件的关系[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1994, **30**(1): 132-136.
- [19] 刘兴中, 严从路, 牛玉琴, 等. 南京大气高浓度污染的特征及与气象条件的关系[J]. *气象科学*, 1992, **12**(1): 107-112.
- [20] Krudysz M A, Froines J R, Fine P M, *et al.* Intra-community spatial variation of size-fractionated PM mass, OC, EC, and trace elements in the Long Beach, CA area [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(21): 5374-5389.
- [21] Wang Y, Zhuang G S, Tang A, *et al.* The ion chemistry and the source of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [22] 金鑫, 程萌田, 温天雪, 等. 北京冬季一次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机盐的变化特征 [J]. *环境化学*, 2012, **31**(6): 783-790.
- [23] Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, *et al.* Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEMW Olympic Games[J]. *Environmental Science*, 1996, **30**(12): 3448-3454.
- [24] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 14-19.
- [25] Xiu G L, Zhang D N, Chen J Z, *et al.* Characterization of major water-soluble inorganic ions in size-fractionated particulate matters in Shanghai campus ambient air [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(2): 227-236.
- [26] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气 PM_{10} 中水溶性氯盐的观测研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 825-830.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaile, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱 (海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行