

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚,乔永民(1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)
全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建,高金华,常江(1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环,周兴求,伍健东(1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣,杨志琴(1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平,陈竞翱,徐明亮,艾平,张衍林(1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳,赵宏,王建龙(2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇,史青,Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武,何苗,施汉昌(2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇,刘丹,李启彬(2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)
《环境科学》征稿简则(1877)	《环境科学》征订启事(1890)
信息(1822,1857,1896,2138)	

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究

张秋晨^{1,2}, 朱彬^{1,2*}, 苏继峰^{1,2}, 王红磊^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

摘要: 为了探讨不同大气污染过程下气溶胶中水溶性离子组分的差异, 分析比较了2009年10月16~30日持续污染、2010年4月27~30日沙尘污染、2010年6月14日秸秆焚烧污染这3次污染过程中气溶胶(PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{1.1}$)及主要水溶性离子(NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NO_2^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})质量浓度及其谱分布。结果发现, 3次污染过程中气溶胶污染严重, $PM_{2.1}/PM_{10}$ 比值有明显区别, 其中沙尘污染过程最低, 平均值仅为0.27; 秸秆焚烧过程最高, 为0.7。持续污染过程中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度较高, 总阴离子质量浓度占 PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{1.1}$ 的18.62%、32.92%和33.53%。沙尘污染过程使气溶胶中的不溶物增加, 总水溶性离子组分减少, 仅占 PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{1.1}$ 的13.36%、23.72%和28.54%, 而 Ca^{2+} 质量浓度高于其他时期, 且主要分布在 $>1\ \mu m$ 粒径段上。秸秆焚烧过程中各种水溶性无机离子质量浓度均高于其他时期, 但在气溶胶中比例较低; 示踪物 K^+ 明显高于其他过程。3次污染过程中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 质量浓度峰值均在 $0.43\sim0.65\ \mu m$ 粒径段。

关键词: 气溶胶; 水溶性无机离子; 持续污染; 沙尘污染; 秸秆焚烧

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1944-08

Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City

ZHANG Qiu-chen^{1,2}, ZHU Bin^{1,2}, SU Ji-feng^{1,2}, WANG Hong-lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to compare aerosol water-soluble inorganic species in different air-pollution periods, samples of PM_{10} , $PM_{2.1}$, $PM_{1.1}$ and the main water-soluble ions (NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_2^- , F^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) were measured, which were from 3 air-pollution incidents (continued pollution in October 16-30 of 2009, sandstorm pollution in April 27-30 of 2010, and crop burning pollution in June 14 of 2010). The results show that aerosol pollution of 3 periods is serious. The lowest $PM_{2.1}/PM_{10}$ is only 0.27, which is from sandstorm pollution period, while the largest is 0.7 from crop burning pollution period. In continued pollution periods, NO_3^- and SO_4^{2-} are the dominant ions, and the total anions account for an average of 18.62%, 32.92% and 33.53% of PM_{10} , $PM_{2.1}$ and $PM_{1.1}$. Total water-soluble ions only account for 13.36%, 23.72% and 28.54% of PM_{10} , $PM_{2.1}$ and $PM_{1.1}$ due to the insoluble species is increased in sandstorm pollution period. The mass concentration of Ca^{2+} in sandstorm pollution period is higher than the other two pollution periods, and which is mainly in coarse particles with diameter larger than $1\ \mu m$. All the ten water-soluble ions are much higher in crop burning pollution especially K^+ which is the tracer from crop burning. The peak mass concentrations of NO_3^- , SO_4^{2-} and NH_4^+ are in $0.43\sim0.65\ \mu m$.

Key words: aerosol; water-soluble inorganic ions; continued pollution; sandstorm pollution; crop burning

随着城市化的进一步发展和城市人口的不断增长, 城市的大气气溶胶污染日益严重。2007~2010年“南京市环境状况公报”指出, 南京市环境空气中首要污染物为可吸入颗粒物(PM_{10})^[1]。水溶性组分是大气气溶胶的重要组成部分, 其在大气中的吸湿特性可以改变气溶胶的粒径大小、组分、数量和存在寿命^[2]。气溶胶的粒径越小, 其比表面积越大, 表面吸附的有害物质越多, 人体一旦吸入, 对人体健康的危害越大。

近年来, 许多学者已经对南京地区大气气溶胶的化学组分开展了一系列的研究^[3~10]。研究表明, 南京地区气溶胶污染较为严重, 尤其是细粒子

收稿日期: 2011-08-08; 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030962); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB426313); 教育部博士点基金项目(20093228110003); 江苏省优势学科建设项目

作者简介: 张秋晨(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: zqc0904@163.com

* 通讯联系人, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

($\text{PM}_{2.5}$) 的质量浓度, 其日均值常会超过 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (美国大气质量 $\text{PM}_{2.5}$ 标准). 水溶性无机离子和有机物是气溶胶的重要组分, 而来源于二次转化过程的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 是最主要的水溶性离子, 并且在细粒子上浓度较高.

大气污染过程中污染物的来源不同, 气溶胶化学成分存在一定区别. 目前许多研究中分析了某一类污染过程下气溶胶水溶性离子组分的特征^[11~17], 但对不同类型污染过程下变化特征的对比研究相对较少. 沙尘污染、持续污染和秸秆焚烧污染等是南京地区主要的 3 类大气污染过程. 本研究的目的是分析比较南京地区这 3 种不同大气污染过程下气溶胶水溶性离子的差异特征, 并与空气相对清洁时期进行对比, 可以更深入地认识不同大气污染过程下气溶胶化学组成的谱分布特征并推测其来源, 以期为改善城市空气质量提供依据.

1 材料与方法

1.1 气溶胶样品的采集

大气气溶胶样品的采集开始于 2009 年夏季, 采样时间是每天 08:00 ~ 22:00. 本研究所分析的 3 次不同类型空气污染过程分别为 2009 年 10 月 16 ~ 30 日持续污染、2010 年 4 月 27 ~ 30 日沙尘污染和 2010 年 6 月 14 日秸秆焚烧污染. 根据国家环境保护部网站“重点城市空气质量日报”得知, 2009 年 10 月 16 ~ 30 日为大气持续污染过程, 空气质量均为“轻微污染”; 2010 年 4 月 30 日空气质量状况为“轻度污染”, 而 2010 年 6 月 14 日更是达到了“中度重污染”. 图 1 所示为 3 次污染过程的污染指数 (API).

采集地点设在南京信息工程大学校园内“气象楼”二楼平台, 距地面约 6 m. 南京信息工程大学位于南京市北郊 6 km 处, 距扬子工业区约 3 km; 东侧约 500 m 为交通干道宁六路, 且采样点附近有少量农田. 因此采样点同时受工业源、交通源和生活源的共同影响, 可以代表南京城乡结合部的污染特征. 气溶胶的采样仪器为 FA-3 型 Anderson 气溶胶粒度分布采样器, 采样滤膜为 Teflon 滤膜 (上海兴亚, 直径为 80 mm), 采样流量设为 $28.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 该采样器共分为 9 级, 各级所采的粒子粒径范围分别为: 0 级: $9.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$, 1 级: $5.8 \sim 9.0 \mu\text{m}$, 2 级: $4.7 \sim 5.8 \mu\text{m}$, 3 级: $3.3 \sim 4.7 \mu\text{m}$, 4 级: $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$, 5 级: $1.1 \sim 2.1 \mu\text{m}$, 6 级: $0.65 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 7 级: $0.43 \sim 0.65 \mu\text{m}$, 8 级: $0.43 \mu\text{m}$ 以下; 采样器所有的 9

级之和为 PM_{10} , 5、6、7、8 级之和为 $\text{PM}_{2.5}$, 6、7、8 级之和为 $\text{PM}_{1.1}$.

采样前后, 所用滤膜均已在干燥器中平衡 24 h, 恒重后用电子天平 (型号: METTLER TOLEDO MX5, 称量精度为 $0.1 \mu\text{g}$) 称量, 并将其放入密封袋中保存, 前后质量差为采集到的气溶胶质量.

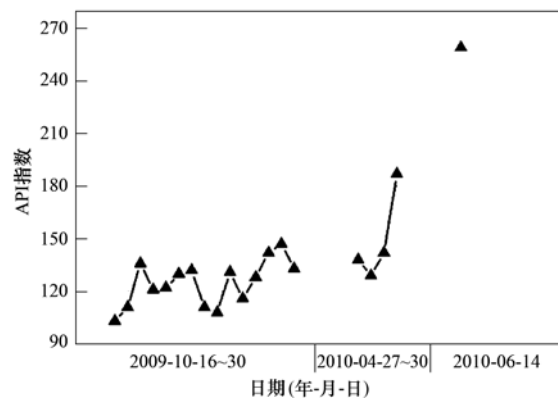


图 1 3 次污染过程 API 指数

Fig. 1 API index in three air-pollution incidents

1.2 气溶胶水溶性离子成分的提取和测定

将采集过气溶胶样品的滤膜用少量乙醇湿润, 浸入装有 40 mL 去离子水的塑料瓶中, 超声提取 (型号: BL3-120) 30 min, 恒温振荡 (型号: SHZ-82A) 1 h, 使用 40 mL 标准注射器经 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后待测.

利用离子色谱 (ICS-2000, 美国戴安) 测定气溶胶中的水溶性离子组分, 分别测定了 5 种阳离子 (NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+) 和 5 种阴离子 (NO_2^- 、 F^- 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}) 的含量. 这 10 种离子的最低检测限分别为: 0.02、0.02、0.05、0.02、0.01、0.04、0.04、0.006、0.05 和 $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

同时用同样的方式对空白滤膜进行前处理, 并测定其中所含水溶性离子含量. 最终数据处理时均减去空白值.

1.3 研究方法

气流的轨迹分析利用了美国 NOAA Air Resources Laboratory 的 HYSPLIT_4 模式, 该模式具有处理多种气象输入场, 多种物理过程和不同类型排放源的较完整的输送、扩散和沉降的综合模式系统^[18]. 模式中的气象场资料为美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的全球同化数据 (GDAS).

2 结果与讨论

2.1 3 次空气污染过程的天气背景概况及气流后向轨迹模拟

2.1.1 持续污染过程

2009 年 10 月 16~30 日大气污染持续半个月,虽然都属于“轻微污染”,但是持续时间之长是 10 a 来罕见的^[19]. 造成这次持续污染的原因是多方面的. 由 500 hPa 高空天气形势发现,南京大多处于高空槽后,主要受西北气流的控制;这 15 d 中,有 11 d 受弱高压控制,大气层结较为稳定,污染物在垂直方向不易扩散;其他几日处在低压中心或低压外围,但大气上升运动很微弱,有研究表明^[20],在大气垂直运动速度很小的条件下,微弱的上升运动不易于污染物的扩散,因此也加重了局地的污染. 通过 MODIS 反演的火点数据(<http://firefly.geog.umd.edu/firemap>)可知,这段时期南京周边地区出现少量火点,说明秸秆焚烧作为外来污染源可能也加重了大气污染.

图 2 为利用 HYSLIT_4 模式对 72 h 后向轨迹进行聚类分析,在 500 m 高度上可以看出,10 月 16~30 日影响南京的气流主要来自南京周边地区(70%)和西北方向(30%). 由每日的 72 h 后向轨迹(图略)可以得知,10 月 17~20 日受西北气流影响,而 10 月 21~30 日气流则主要来自南京周边地区,这说明局地污染物和远距离输送的污染物共同造成了这次持续污染.

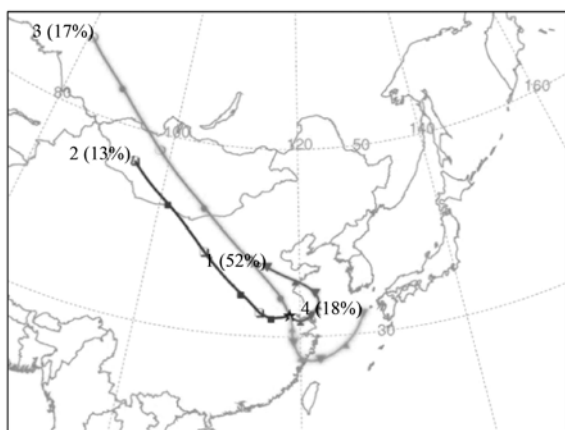


图 2 2009 年 10 月 16~30 日 500 m 高度上 72 h 后向轨迹聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of back trajectory to Nanjing during 72 h at 500 m in Oct. 16-30, 2009

2.1.2 沙尘污染过程

根据中国气象局对 2010 年 4 月的气候影响评价得知,该月我国出现 5 次沙尘天气过程,其中,4 月 24~26 日的沙尘暴过程影响最重,南疆盆地、青海、甘肃中西部、内蒙古西部、宁夏北部、陕西等地出现了扬沙或浮尘,南疆盆地东部、青海西北部、甘肃

中部、内蒙古西部的部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴^[21]. 通过高空 850 hPa 和 500 hPa 天气图(图略)可以看出,4 月 27 日~5 月 2 日高空主要受东亚大槽影响,南京位于槽后,以西北风为主,其中 4 月 30 日西北气流弱于 4 月 29 日,有利于大量污染物在南京上空停留积累.

图 3 是利用 HYSLIT_4 模式得到的 4 月 27~30 日 72 h 后向轨迹合成图,模式高度设为 1 200 m,可以看出这 4 d 到达南京的气流主要来自西北部. 主要经过银川、延安、西安和洛阳等,图 3 同时标注了银川和西安 4 月 25~27 日的 API 指数. 轨迹途经的这 3 个城市在这 4 d 空气污染很严重,来自这些区域的气流携带大量的沙尘颗粒,也加重了南京的大气污染. 利用 HYSLIT_4 模式还可得出,5 月 1 日以后气流轨迹主要来自东南部(图略),沙尘对南京地区的影响结束,因此 4 月 30 日是受沙尘影响最重的 1 d.

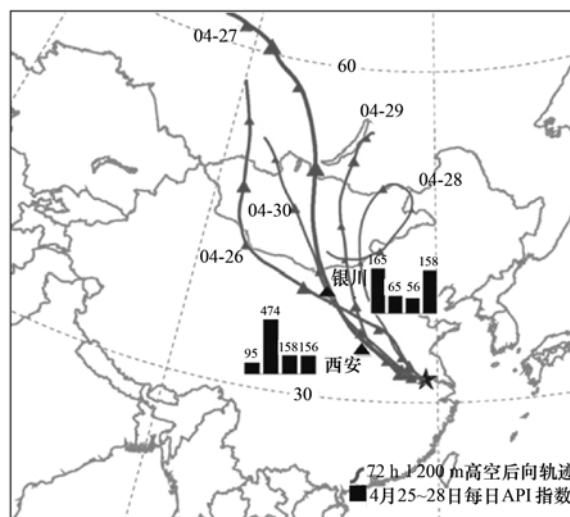


图 3 2010 年 4 月 26~30 日 72 h 后向轨迹及主要途经城市 API 指数

Fig. 3 Back trajectory to Nanjing during 72 h and API index of main following cities in Apr. 26-30, 2010

2.1.3 秸秆焚烧污染

受秸秆焚烧的影响,2010 年 6 月 14 日空气污染状况达到“中度重污染”,是当年 6 月大气污染最严重的一天.

尹聪等^[22]研究了 2006~2009 年南京地区出现的 6 次秸秆焚烧事件,研究发现上风火点与下风城市的污染有明显的相关性,按其研究,2010 年 6 月 14 日这次过程为“局地型”,此类污染发生时,污染物基本在大气边界层内输送;并且发生秸秆焚烧污染时气象条件均不利于污染物的扩散,例如风速小、湍流弱、湿度高、低层大气常产生辐合(正涡度、负

散度)而大气上升运动弱.

图 4 为 6 月 14 日秸秆焚烧火点图 (<http://firefly.geog.umd.edu/firemap>) 及后向轨迹的合成图,后向轨迹高度依次为 100、500 和1 000 m. 气流主要来自安徽和山东的主要焚烧区.

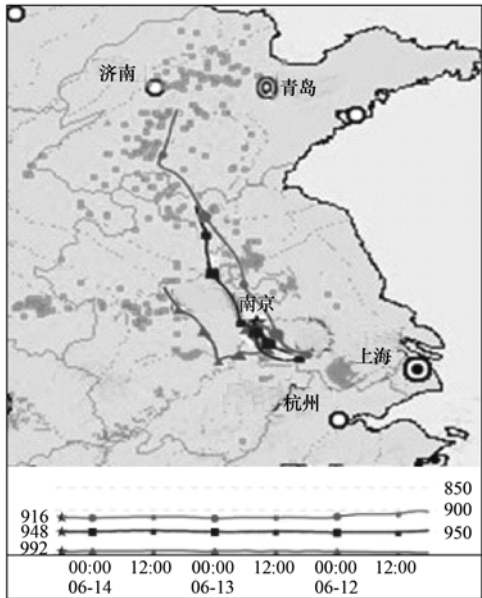


图 4 2010 年 6 月 14 日 72 h 后向轨迹与火点和合成图
Fig. 4 Back trajectory to Nanjing during 72 h and fire hot spots

2.2 气溶胶质量浓度水平对比

2010 年 6 月 10 ~ 11 日空气质量为“优”, API 指数仅为 32 和 47, 远低于本研究所讨论的 3 次污染过程, 因此, 在讨论 PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{1.1}$ 的质量浓度时, 将 3 次污染过程与这 2 d 进行对比.

表 1 列出了这 3 次污染过程和 2010 年 6 月 10 ~ 11 日的 PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 和 $PM_{1.1}$ 的质量浓度. 在空气质量状况为“优”的 2010 年 6 月 10 日和 11 日, $PM_{2.1}/PM_{10}$ 比值平均为 0.56, $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 为 0.79. 说明在大气没有受到明显污染的情况下, 细粒子 (本研究指 $PM_{2.1}$) 是 PM_{10} 的主要部分, 而且 $PM_{1.1}$ 占 $PM_{2.1}$ 的大部分. 2009 年 10 月 16 ~ 30 日持续污染过程, PM_{10} 日质量浓度均远远超过 $150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (空气质量二级标准), 最高值达 $376.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (10 月 26 日). $PM_{2.1}/PM_{10}$ 值, 最低值为 0.2, 最高值为 0.59, 波动较大; 其平均值为 0.38, 低于 2010 年 6 月 10 ~ 11 日. 从图 2 可以看出, 这次持续污染过程是南京局地污染物和西北地区远距离输送共同造成的, 这可能是造成 $PM_{2.1}/PM_{10}$ 值范围较大的原因. $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 值在该时间内的波动范围是 0.70 ~ 0.81, 均值为 0.75, 说明这期间 $PM_{1.1}$ 一直是 $PM_{2.1}$ 的主要部分.

表 1 3 次污染过程和正常天气气溶胶质量浓度对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Comparison of aerosol the mass concentration between three air-pollution incidents and normal days/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				
颗粒物	2009 年 10 月 16 ~ 30 日 (持续污染)	2010 年 4 月 27 ~ 30 日 (沙尘污染)	2010 年 6 月 10 ~ 11 日	2010 年 6 月 14 日 (秸秆焚烧污染)
PM_{10}	$308.12 \pm 43.13^{1)}$	269.22 ± 33.76	45.96	369.60
$PM_{2.1}$	116.47 ± 38.00	73.33 ± 6.87	25.34	258.15
$PM_{1.1}$	87.47 ± 29.43	46.28 ± 7.88	20.15	215.02
$PM_{2.1}/PM_{10}$	0.38 ± 0.12	0.27 ± 0.03	0.56	0.70
$PM_{1.1}/PM_{2.1}$	0.75 ± 0.04	0.63 ± 0.08	0.79	0.83

1) 标准偏差,下同

2010 年 4 月 27 ~ 30 日受西北沙尘影响, 其中 4 月 30 日受沙尘污染影响最重, 5 月 1 日后污染情况有所减缓. PM_{10} 浓度超过 $150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这 4 d 的 $PM_{2.1}/PM_{10}$ 比值分别为 0.29、0.26、0.24 和 0.30, 明显低于本研究所讨论的其他时期, 说明沙尘天气带来了大量粗粒子; 而这 4 d $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 分别为 0.72、0.62、0.52 和 0.66.

2010 年 6 月 14 日受秸秆焚烧影响, 空气污染严重. 14 日 $PM_{2.1}/PM_{10}$ 比值为 0.70, $PM_{1.1}/PM_{2.1}$ 为 0.83, 均高于其他时期, 说明细粒子在气溶胶中比重较大.

3 次污染过程与 2010 年 6 月 10 ~ 11 日正常天气的气溶胶质量浓度谱分布如图 5 所示. 2010 年 6

月 10 ~ 11 日, 其气溶胶质量浓度谱分布呈双模态分布, 2 个峰值分别位于 $0.43 \sim 0.65\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4.7 \sim 5.8\text{ }\mu\text{m}$, 但 2 个峰值相差不大. 与之相比, 2009 年 10 月 16 ~ 30 日持续污染过程同样在 $0.43 \sim 0.65\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段出现峰值, 但是峰值后呈上升趋势, 这可能是地面扬尘造成的.

2010 年 4 月 27 ~ 30 日沙尘污染过程的气溶胶质量浓度谱分布没有出现明显的峰值, 随着粒径的增大呈上升趋势, 这也说明沙尘污染使大气中粗粒子大量富集, 其中在 $4.7 \sim 5.8\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段质量浓度最高. 2010 年 6 月 14 日秸秆焚烧过程质量浓度谱也为双模态分布, 但 $0.43 \sim 0.65\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段的峰值远高于 $4.7 \sim 5.8\text{ }\mu\text{m}$ 粒径段的峰值.

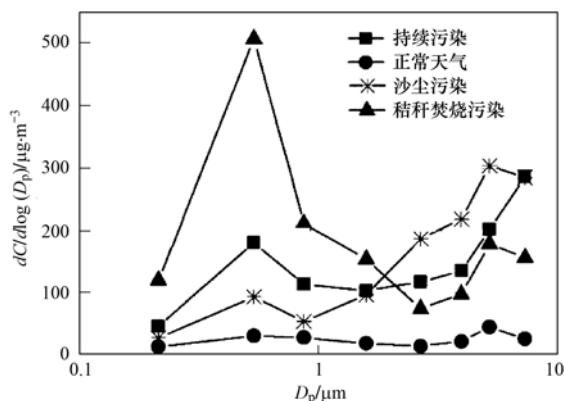


图5 3次污染过程和正常天气气溶胶质量浓度谱分布

Fig. 5 Mass concentration distribution of aerosol in three air-pollution incidents and normal days

2.3 气溶胶中水溶性离子污染水平对比

表2列出了3次污染过程下不同粒径的大气气溶胶(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$)中的无机水溶性离子的质量浓度,并与2010年6月10~11日进行对比.由于2009年的气溶胶样品仅检测了水溶性阴离子(NO_3^- 、 F^- 、 NO_2^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}),因此表2中没有列出2009年10月持续污染过程下的水溶性阳离子浓度.

2010年4月27~30日水溶性离子总质量浓度在 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 中的平均值分别为35.78、17.40和13.21 $\mu g \cdot m^{-3}$;6月10~11日分别为22.26、15.78和13.06 $\mu g \cdot m^{-3}$;6月14日分别为135.47、112.23和94.82 $\mu g \cdot m^{-3}$.4月27~30日气溶胶水溶性离子的质量浓度(尤其是细粒子)与6月10~11日相差不大,而6月14日明显高出许多.说明4月份的沙尘过程并没有对水溶性离子的浓度产生太大的影响,而气溶胶中的不溶物增加很多.对比显示,本研究沙尘过程 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子浓度低于北京^[23]沙尘污染 $PM_{2.5}$ 中的浓度(38.33 $\mu g \cdot m^{-3}$).而6月14日的秸秆焚烧不仅造成了严重的气溶胶污染,而且大大增加了水溶性离子的质量浓度.

比较阳离子质量浓度可以发现,与2010年6月10~11日相比,除了 Ca^{2+} ,2010年4月的沙尘污染并没有造成阳离子浓度大幅增加.虽然6月14日秸秆焚烧造成较高 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 的质量浓度,分别为沙尘污染时期的1.4倍、3.5倍和4.6倍,但沙尘污染时期的 Ca^{2+} 浓度仍高于秸秆焚烧时期,可见春季受到北方沙尘和大风天气引起的地面扬沙等,大大增加了气溶胶(特别是 PM_{10})中 Ca^{2+} 的含量.6

月14日秸秆焚烧期间,各种阳离子浓度都偏高, K^+ 作为秸秆焚烧的示踪物,在6月14日这天其浓度明显升高,其在 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 中的质量浓度分别是6月10~11日的11.5倍、16.16倍和17.24倍,但 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 的质量浓度分别是6月10~11日的8.0倍、10.0倍和10.7倍,说明秸秆焚烧是 K^+ 偏高的主要原因.段凤魁等^[24]研究秸秆焚烧对北京空气质量影响时也发现水溶性 K^+ 质量浓度显著增长.图6比较了2010年4月30日(沙尘污染)、6月10日(空气质量状况为“优”)和6月14日(秸秆焚烧污染)这3d的 Ca^{2+} 和 K^+ 在 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 上的质量浓度.由图6可见,4月30日 Ca^{2+} 明显高于后2d,且主要在粗粒子(PM_{10})上富集;而6月14日 K^+ 最高,主要在细粒子($PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$)富集.

对于阴离子质量浓度,3次污染过程与2010年6月10~11日质量浓度最高的均为 NO_3^- 和 SO_4^{2-} .这2种离子是由化学反应生成的二次气溶胶离子.值得注意的是,与2010年6月10~11日相对清洁天气对比,持续污染和秸秆焚烧污染大气中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度大量增加.持续污染发生时气象条件不利于污染物扩散,受局地人为源(如机动车排放尾气和化石燃料燃烧)污染,会使 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 大量积累,对比2004年10月北京发生的一次持续污染过程, PM_{10} 中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 分别比前后段非污染时期增长了7.9倍和4.1倍^[13];而秸秆焚烧发生时,若气象条件较为稳定,会造成大气中的 NO_2 和 SO_2 浓度显著增长^[25],从而使气溶胶中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 在气溶胶中的比例大量增加.表2也可以看出,2010年4月27~30日沙尘污染期间, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是质量浓度最高的3种离子,而其他时期均为 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ .图7所示为3次污染过程和2010年6月10~11日气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 质量浓度谱分布(2009年仅有阴离子).从中可以看出, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 峰值均在0.43~0.65 μm 粒径段;2010年4月沙尘污染与6月10~11日基本重合,说明这次沙尘污染过程没有使南京大气中的二次离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+)明显增加. Ca^{2+} 主要集中在粗粒子段,在>1 μm 粒径段上,2010年4月27~30日沙尘污染期间 Ca^{2+} 高于图中其他时期.颜鹏等^[17]在临安也发现沙尘暴会使气溶胶中 Ca^{2+} 大量富集在较粗的粒径段上.

表 2 3 次污染过程和正常天气气溶胶中主要水溶性离子质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Mass concentration of main inorganic ions in aerosol during three air-pollution incidents and normal days/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					
颗粒物	离子	2009 年 10 月 16 ~ 30 日 (持续污染)	2010 年 4 月 27 ~ 30 日 (沙尘污染)	2010 年 6 月 10 ~ 11 日	2010 年 6 月 14 日 (秸秆焚烧污染)
PM ₁₀	NH ₄ ⁺	—	1.72 ± 1.98 ¹⁾	2.52	19.63
	Mg ²⁺	—	0.48 ± 0.61	0.02	0.37
	Ca ²⁺	—	9.62 ± 1.94	2.18	7.38
	Na ⁺	—	3.84 ± 1.04	2.11	3.73
	K ⁺	—	1.53 ± 0.53	0.67	7.7
	NO ₂ ⁻	2.66 ± 0.92	1.09 ± 0.23	0.51	0.8
	F ⁻	3.48 ± 1.47	1.63 ± 0.32	0.7	1.08
	NO ₃ ⁻	23.72 ± 5.98	6.50 ± 3.64	6.52	42.02
	Cl ⁻	4.34 ± 2.19	1.56 ± 0.54	0.67	6.1
	SO ₄ ²⁻	23.15 ± 9.71	7.82 ± 3.82	6.35	46.66
PM _{2.1}	NH ₄ ⁺	—	1.47 ± 1.91	2.34	19.13
	Mg ²⁺	—	0.11 ± 0.12	0.02	0
	Ca ²⁺	—	1.99 ± 0.68	0.9	1.65
	Na ⁺	—	1.69 ± 0.41	0.95	1.9
	K ⁺	—	0.96 ± 0.34	0.43	6.95
	NO ₂ ⁻	1.09 ± 0.39	0.39 ± 0.12	0.2	0.38
	F ⁻	1.90 ± 1.41	0.35 ± 0.14	0.22	0
	NO ₃ ⁻	14.36 ± 6.52	4.04 ± 2.99	5.05	35.18
	Cl ⁻	2.27 ± 1.28	0.94 ± 0.40	0.4	5.02
	SO ₄ ²⁻	18.72 ± 7.20	5.46 ± 3.38	5.27	42.02
PM _{1.1}	NH ₄ ⁺	—	1.28 ± 1.63	2.03	16.02
	Mg ²⁺	—	0	0.02	0
	Ca ²⁺	—	1.21 ± 0.42	0.66	1.15
	Na ⁺	—	1.26 ± 0.28	0.71	1.49
	K ⁺	—	0.76 ± 0.32	0.37	6.38
	NO ₂ ⁻	0.88 ± 0.32	0.26 ± 0.10	0.16	0.3
	F ⁻	0.85 ± 0.71	0.27 ± 0.13	0.2	0
	NO ₃ ⁻	10.97 ± 4.88	2.92 ± 2.29	4.04	30.59
	Cl ⁻	1.61 ± 0.92	0.7 ± 0.32	0.32	4.19
	SO ₄ ²⁻	15.02 ± 4.15	4.56 ± 2.62	4.54	34.7

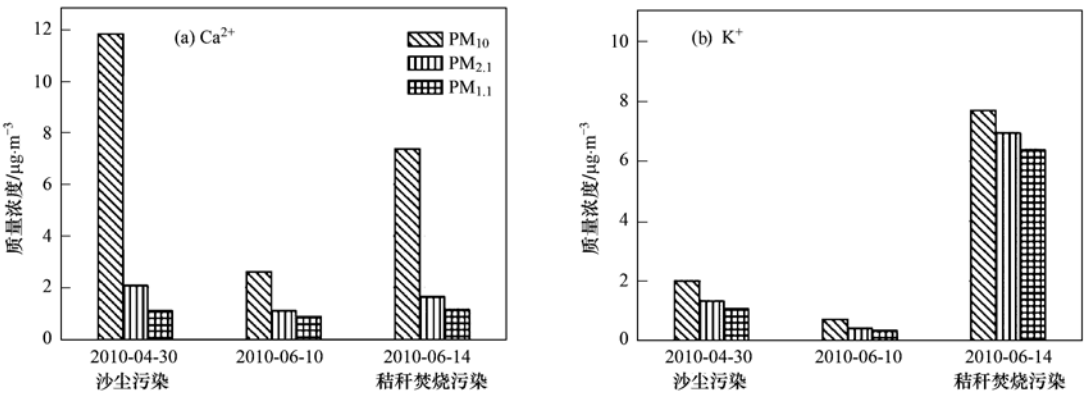


图 6 2010 年 4 月 30 日、6 月 10 日和 6 月 14 日这 3 d PM₁₀、PM_{2.1} 和 PM_{1.1} 中 Ca²⁺ 和 K⁺ 的质量浓度比较

Fig. 6 Comparison of the mass concentration of Ca²⁺ and K⁺ in Apr 30, 2009, Jun 10, 2010 and Jun 14, 2010

表 3 所示为 3 次污染过程和正常天气下 PM₁₀、PM_{2.1} 和 PM_{1.1} 中水溶性离子所占比例. 比较 10 种主要水溶性离子在气溶胶中的比例可以看出, 2010 年 6 月 10 ~ 11 日气溶胶中水溶性离子占主要部分, 4 月 27 ~ 30 日沙尘污染过程所占比例最小, 6 月 14 日秸秆焚烧污染比重较低. 原因可能是 4 月 27 ~ 30 日受沙尘影响气溶胶中还有大量不溶物, 而秸秆焚烧(6 月 14 日)使气溶胶中的有机碳(OC)的含量较

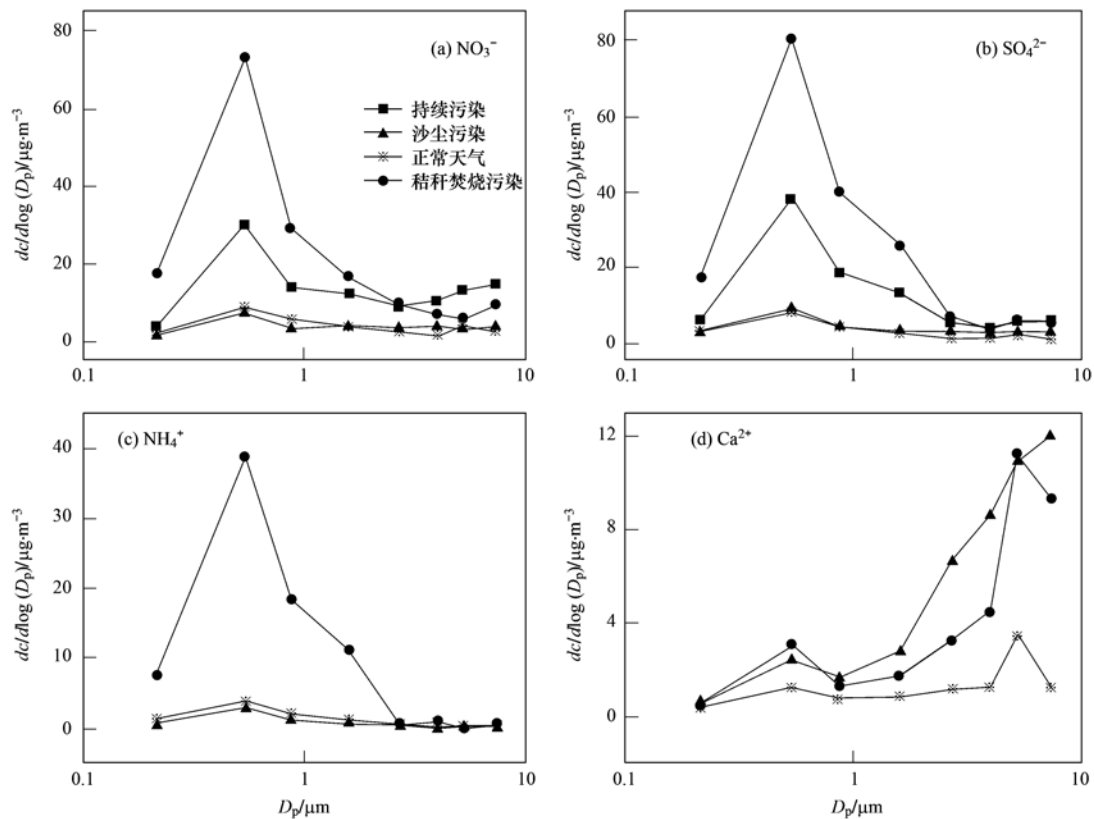


图 7 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 Ca^{2+} 质量浓度谱分布

Fig. 7 Mass concentration distributions of NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ and Ca^{2+}

高^[26],水溶性组分不是含量最高的成分。此外,水溶性离子在 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{1.1}$ 中所占比例依次增长,说明粒径小的颗粒受水溶性离子影响较大。表 3 同时分别比较了阳离子和阴离子所占比例,阳离子所占比例明显低于阴离子。与空气质量相对清洁的 2010 年 6 月 10~11 日相比,3 次污染过程的阴离子质量浓度均低于空气清洁时期。

表 3 3 次污染过程和正常天气气溶胶中主要水溶性离子质量浓度在气溶胶中的比例/%

Table 3 Percentages of main water-soluble inorganic ions in aerosol during three air-pollution incidents and normal days/%		2009 年 10 月 16~30 日 (持续污染)	2010 年 4 月 27~30 日 (沙尘污染)	2010 年 6 月 10~11 日	2010 年 6 月 14 日 (秸秆焚烧污染)
颗粒物	项目				
PM_{10}	$\sum +$	—	6.38	16.32	10.50
	$\sum -$	18.61	6.91	32.11	26.15
	$\sum$	—	13.29	48.43	36.65
$\text{PM}_{2.1}$	$\sum +$	—	8.48	18.31	11.48
	$\sum -$	32.92	15.25	43.92	32.00
	$\sum$	—	23.73	62.23	43.48
$\text{PM}_{1.1}$	$\sum +$	—	9.74	18.81	11.64
	$\sum -$	33.53	18.82	46.00	32.45
	$\sum$	—	28.56	64.81	44.09

3 结论

(1)2009 年 10 月 16~30 日持续污染过程是由局地污染物和远距离输送的污染物共同造成的,同

时稳定的气象条件不利于污染物的扩散,从而加重了大气污染。 PM_{10} 日质量浓度较高,最高值达到 $376.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (10 月 26 日); $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_{10}$ 比值范围较大,平均值为 0.38,低于正常天气时期(2010 年

6 月 10 ~ 11 日); 气溶胶谱分布特征为在 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段出现峰值, 但是峰值后呈上升趋势; 通过化学反应生成的二次气溶胶离子 (NO_3^- 和 SO_4^{2-}) 浓度较高, 且峰值在 0.43 ~ 0.65 μm 粒径段; 阴离子占气溶胶质量浓度比例较高, 分别为 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.1}$ 质量浓度的 18.62%、32.92% 和 33.53%。

(2) 2010 年 4 月 27 ~ 30 日, 从南京地区 72 h 后向轨迹可以看出, 气流途径西北地区受沙尘污染较重的地区。这 4 d 的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值平均值为 0.27, 明显低于本研究讨论的其他时期, 说明受沙尘影响带来了大量粗离子; 气溶胶质量浓度谱分布随粒径的增大呈上升趋势, 其中在 4.7 ~ 5.8 μm 粒径段上质量浓度最高; 沙尘过程并没有对水溶性离子的浓度有太大的影响, 在气溶胶中所占比例也低于其他过程; Ca^{2+} 质量浓度高于其他时期, 且主要分布在粗粒子粒径段; NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 是质量浓度最高的 3 种离子。

(3) 2010 年 6 月 14 日秸秆焚烧污染达到“中度重污染”, 72 h 后向轨迹途径南京周边燃烧秸秆的火点区。 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值为 0.70, $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_{2.5}$ 为 0.83, 这 2 个比值均高于本研究讨论的其他时期, 说明细粒子在气溶胶中比重较大; 2010 年 6 月 14 日秸秆焚烧过程呈现出双模态分布, 峰值分别在 0.43 ~ 0.65 μm 和 4.7 ~ 5.8 μm 粒径段; 水溶性离子总质量在气溶胶中的比重较低, 造成这种现象的原因可能是秸秆焚烧使气溶胶中的有机碳 (OC) 的含量较高; 秸秆焚烧的示踪物 K^+ , 在 6 月 14 日这天其浓度明显高。

参考文献:

- [1] 南京市环境保护局. 南京市环境状况公报 (2007 ~ 2010 年) [EB/OL]. <http://www.njhb.gov.cn/col/col28/index.html>.
- [2] Climate Change. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [M]. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [3] Yang H, Yu J Z, Ho S S H, *et al.* The chemical composition of inorganic and carbonaceous materials in $\text{PM}_{2.5}$ in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3735-3749.
- [4] Wang G H, Huang L M, Gao S X, *et al.* Characterization of water-soluble species of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ aerosols in urban area in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(8): 1299-1307.
- [5] Wang G H, Wang H, Yu Y J, *et al.* Chemical characterization of water-soluble components of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2893-2902.
- [6] 银燕, 童尧青, 魏玉香, 等. 南京市大气细颗粒物化学成分分析 [J]. *大气科学学报*, 2009, **32**(6): 723-733.
- [7] 王荟, 王格慧, 高士祥, 等. 南京市大气颗粒物春季污染的特征 [J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(1): 55-59.
- [8] 沈宏雷, 汤莉莉, 李红双, 等. 南京大气 PM_{10} 谱分布和细粒子中多环芳烃的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(7): 66-72.
- [9] 王荟, 常卫民, 杨丽波, 等. 南京市大气气溶胶中部分无机离子的粒径分布 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(6): 12-14.
- [10] 陈魁, 银燕, 魏玉香, 等. 南京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分观测分析 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(8): 1015-1020.
- [11] Kang C M, Lee H S, Kang B W, *et al.* Chemical characteristics of acidic gas pollutants and $\text{PM}_{2.5}$ species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(28): 4749-4760.
- [12] 李丽珍, 沈振兴, 杜娜, 等. 霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性离子特征 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, **24**(5): 674-679.
- [13] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气重污染过程 PM_{10} 中水溶性盐的研究 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 385-389.
- [14] 刘咸德, 董树屏, 李冰, 等. 沙尘暴事件中大气颗粒物化学组分的浓度变化和硫酸盐的形成 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(6): 12-17.
- [15] 李金香, 赵越, 李令军, 等. 麦秸焚烧导致的北京市大气污染时空分布和化学组成特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1904-1909.
- [16] 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.
- [17] 颜鹏, 毛节奏, 杨东贞, 等. 临安一次沙尘暴过程影响气溶胶物理化学特性演变的初步分析 [J]. *第四纪研究*, 2004, **24**(4): 437-446.
- [18] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system [M]. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-244, 1997. 1-2.
- [19] 王娟. 罕见! 南京连遇 10 个污染天 [EB/OL]. http://epaper.yangtse.com/yzwb/2009-10/26/content_14243687.htm, 2009-10-26.
- [20] 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.
- [21] 中国气象报社. 2010 年 4 月气候影响评价与 2010 年 5 月评估 [EB/OL]. http://www.cma.gov.cn/zxbd/2010zt/20100322/2010032204/201005/t20100517_68348.html, 2010-05-17.
- [22] 尹聪, 朱彬, 曹云昌, 等. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 207-213.
- [23] Wang Y, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6579-6591.
- [24] 段凤魁, 鲁毅强, 狄一安, 等. 秸秆焚烧对北京市空气质量的影响 [J]. *中国环境监测*, 2001, **17**(3): 8-11.
- [25] 朱彬, 苏继峰, 韩志伟, 等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 585-592.
- [26] Duan F K, Liu X D, Tong Y, *et al.* Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1275-1282.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人