

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的藜袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析

薛国强, 朱彬*, 王红磊

(南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘要: 为探讨南京市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.1}$ 中水溶性离子的季节变化和其主要来源, 分别在南京市区和北郊进行了为期 1 a 的观测, 得到了南京市城郊气溶胶的质量浓度和水溶性离子浓度并进行了来源解析. 结果表明: ①南京市区和北郊 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.1}$ 颗粒物浓度顺序均为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 春夏秋冬季节 3 种颗粒物浓度北郊高于市区, 冬季相反. ②检测的 10 种离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 F^- 、 NO_2^- 、 Mg^{2+} 总质量浓度为市区 $46 \mu g \cdot m^{-3}$, 北郊 $39.6 \mu g \cdot m^{-3}$, 对市区和北郊 $PM_{1.1}$ 、 $PM_{1.1-2.5}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 的贡献率分别为 56%、49.5%、20.4% 和 42.5%、37.9%、18.3%. ③主要离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 浓度季节变化明显, 在市区冬季高, 夏季低, 在北郊春季高, 夏季低, 南京地区季节性的气候变化和市郊两地的复杂下垫面和人为因素是影响离子浓度季节变化的主要原因. ④ NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的前体物 NH_3 、 SO_2 、 NO_x 的转化夏季主要来自汽车尾气, 冬季汽车尾气和燃煤排放二者比重相近. Cl^- 在冬季主要来自工业排放, 夏秋季和 Na^+ 一起主要来自海盐输送, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 多为地面扬尘和建筑扬尘等地壳源, K^+ 、 F^- 、 NO_2^- 主要来自生物质燃烧和工业排放.

关键词: 南京; 水溶性离子; 粒径分布; 季节变化; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1633-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.002

Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing

XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To explore the seasonal variation and source apportionment of soluble ions in PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.1}$, the aerosol mass concentration and soluble ion concentration were investigated during a one-year observation in the urban-district and north suburb. As the results showed, ①The concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.1}$ were in the order of winter > spring > autumn > summer. In spring, summer and autumn, the concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.1}$ in the north suburb were higher than in the urban, while the situation was opposite in winter. ② SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , K^+ , Na^+ , F^- , NO_2^- , Mg^{2+} were measured, and their total concentration in PM_{10} was $46 \mu g \cdot m^{-3}$ in urban sites and $39.6 \mu g \cdot m^{-3}$ in north suburbs. Mass fraction percentage of water soluble ions in $PM_{2.5-10}$, $PM_{1.1-2.5}$, $PM_{1.1}$ in the urban district increased from 20.4% to 49.5% and 56%, and the value in the north suburb increased from 18.3% to 37.9% and 42.5%. ③ Major ions, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , second components and Ca^{2+} , had significant seasonal variation. In the urban district, the highest concentrations were observed in winter, and the lowest in summer, while in the north suburb, the highest concentrations were observed in spring, and the lowest in summer. The seasonal changing climate in Nanjing and different anthropogenic influences with land surface in urban-suburb may be the major factors for the ions' seasonal variation. ④ NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- came from secondary chemical reactions of NH_3 , SO_2 , NO_x , and these precursors mostly came from automobile exhaust in Summer while equally came from automobile exhaust and fossil fuel in winter. Cl^- came from biomass burning in Winter while transported from sea salt with Na^+ in Summer. Ca^{2+} and Mg^{2+} came from ground dust and construction dust. K^+ , F^- , NO_2^- may come from biomass burning and industrial emissions.

Key words: water-soluble-ions; Nanjing; size distribution; seasonal variation; source apportionment

气溶胶已经成为我国城市大气环境的主要污染物, 影响到能见度, 空气质量和气候系统的辐射平衡. 且其沉降物对生物系统有影响, 气溶胶的化学组成结构影响到人体健康, 气溶胶中化学成分的吸湿特性和光学作用, 影响地球辐射和全球气候, 并进一步影响行星尺度的能量平衡^[1~4]. 大气气溶胶很少由单一成分组成, 通常由多种化学成分组成, 包括水溶性离子, 各种矿物元素, EO/OC 等^[5~8]. 部分离子和元素对人体健康影响较大, 不同类型的人类活

动区域污染程度有差别, 众多学者对气溶胶化学成分进行了短期采样研究, 研究了不同污染源和不同过程下的气溶胶离子成分, 其中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(201206011); 国家自然科学基金项目(41275143); 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA170003); 江苏省“333”高层次人才培养工程项目; 江苏省“六大人才高峰”计划项目

作者简介: 薛国强(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境和大气化学, E-mail: xueguoqiang88@163.com

* 通讯联系人, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

是气溶胶中主要的水溶性离子^[9-12]. 大量的研究局限于短期数据和单一粒径范围,对长期的季节变化和不同粒径范围内的气溶胶离子成分变化及来源缺少充分讨论.

南京市地处长三角经济圈,地势三面环山,一面靠水. 其工业和城市布局,容易导致污染物堆积,南京市的污染状况一直较重^[13]. 南京近年也对气溶胶质量浓度和水溶性无机离子作了大量研究^[14-16],研究选择特殊天气过程和短期采样,分析了不同污染过程的气溶胶离子特征,但缺乏气溶胶离子的整年长期统计特征. 本研究利用 FA-3 型 Anderson 气溶胶分粒径采样器、万通离子色谱仪,对南京 2010~2011 年进行持续 1 a 的常规采样分析,得到南京城郊两地离子的全年粒径分布统计特征和季节变化并分析其主要来源特征的季节差异,以期对气溶胶污染控制提供参考基础.

1 材料与方法

1.1 气溶胶采样

大气气溶胶样品的采集时间为 2010 年 5 月~2011 年 4 月,每个月采样 3 次,每次采样时间为连续 72 h(第 1 d 上午 08:00~至第 4 d 上午 08:00),市郊两地同时采样,数据处理时避开雨天,并避开秸秆焚烧等极端污染型天气. 市区采样地点设在南京大学鼓楼校区知行楼三楼平台,距地面约 12 m,采样点周围主要是办公楼,四面附近为街区和商业区. 北郊采样点设于南京信息工程大学气象楼二楼平台,距地面约 6 m,周围百米以内主要是校区办公楼和白天少量汽车,距离东部扬子工业园区约 4 km,东部 500 m 为国道宁六公路,采样点西部和北部为居民区,村庄和农田^[17].

大气气溶胶样品的采集使用 FA-3 型 Anderson 气溶胶分粒径采样器,采样器粒径尺度分级为:9.0~10.0、5.8~9.0、4.7~5.8、3.3~4.7、2.1~3.3、1.1~2.1、0.65~1.1、0.43~0.65 和 0.0~0.43 μm . 采样流速为 28.3 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. 采样膜使用特氟龙滤膜($\Phi 80$ mm,上海兴亚公司). 采样前后将采样膜放于干燥器中平衡 24 h,至恒重后用瑞士 Mettler Toledo MX5 型微量天平快速称重(天平精度 1 μg),采样后的滤膜称重后放入密封袋置于冰箱冷藏,并在 2 d 内进行离子分析.

1.2 水溶性离子分析

样品前处理方法:取滤膜一半剪碎,置于 50 mL 的 PET 瓶中,加入 20 mL 超纯水和 20 μL 甲醇. 浸

泡 30 min,置于超声波发生器中,温度 40 $^{\circ}\text{C}$,处理 30 min,超声后振荡 1 h,静置. 取静置后样品上层清液,经孔径 0.22 μm 聚醚砜滤膜过滤后,转移至进样试管,上机分析.

离子分析仪器使用瑞士万通公司 850 professional IC 型离子色谱分析仪,阳离子分离柱 Metrosep C4-150,保护柱为 Metrosep C4 GUARD,阴离子色谱柱使用 Metrosep A-supp7-250,保护柱 Metrosep A supp 4/5. 阴淋洗液为 3.6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度 Na_2CO_3 溶液,阳淋洗液为 1.7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 + 0.7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 吡啶二羧酸. 样品前处理和淋洗液配制等实验用水均使用 Million Q 仪器超滤至电阻率达 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的超纯水. 检测 10 种离子: Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} .

离子检测限方法公式为:

$$C_L = k_i s_i \frac{c}{\bar{X}}$$

式中, C_L 指方法检测限; k_i 指置信因子,一般取 3; s_i 指样品测量读数的标准偏差; c 指样品含量值; $\bar{X}$ 指样品测量读数平均值. 对实验中单种离子,取最低浓度标液(0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),测量 9 次, $\bar{X}$ 为离子峰面积平均值, s_i 为 9 次测量浓度的标准偏差. 测得 10 种离子的方法检测限分别为 0.02、0.02、0.01、0.05、0.02、0.04、0.05、0.04、0.006 和 0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

样品的加标回收率,对某种离子,取 6 份不同质量浓度的标液(0.1、0.2、0.5、1.0、2.0 和 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),分别加入同体积 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的标液,混匀,进行回收实验. 测得对 10 种离子的加标回收率均达到 96% 以上.

2 结果与讨论

2.1 气溶胶质量浓度的季节变化

如图 1 所示,给出了观测期间 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.1}$ 质量浓度值与 2012 年最新公布《GB 3095-2012 环境空气质量标准》规定的浓度限值(二类功能区使用二类标准限值,年平均浓度 PM_{10} 不超过 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 不超过 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

采样期间,市区 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{1.1}$ 各季节平均浓度值高低顺序为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 得 6 月 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度值最低,分别为 55.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 25.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,6 月和 8 月达到年平均浓度限值二类标准,其它月份 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 均高于年

平均浓度限值二类标准,其中浓度最高的冬季二月, PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 、 $PM_{1.1}$ 分别达 221.4、136.0、84.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 北郊 PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 、 $PM_{1.1}$ 各个季节平均浓度值高低顺序也为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,冬季与春季浓度相差很小. 浓度最低的 9 月 3 种颗粒物浓度为 54.1、27.6、21.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,达到了年平均浓度限值二类标准,其它月份 PM_{10} 和 $PM_{2.1}$ 均高于二级年平均浓度限值,其中最高浓度的月份也是二月, PM_{10} 、 $PM_{2.1}$ 、 $PM_{1.1}$ 达 131.3、80.3、41.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,接近二类限值的近两倍. 南京地区夏季太阳辐射强,气温高,大气对流活动强烈,且夏季受东亚季风影响和副高控制,有利于污染物扩散,冬季相反,污染物容易堆积,这种季节的气候变化是造成南京两地区气溶胶浓度冬季高夏季低的重要原因. 市区和北郊浓度有差异,1~4 月和 11、12 月,市区的 3 种粒径范围的气溶胶浓度均高于北郊,5~10 月基本为北郊高于市区. 北郊处于工业区,且采样点临近国道交通动脉,各种复杂的排放源导致北郊颗粒物浓度偏高;从 11 月深直至 4 月初春受北风控制,北郊的平坦下垫面受东北风作用,污染物向南部的市区集中,市区复杂的高楼林立的下垫面和边界层结构阻滞北风气团和污染物,造成污染物堆积,使市区浓度高于北郊. $PM_{2.1}$ 占 PM_{10} 的质量分数随季节没有明显变化,计算得北郊各个月份 $PM_{2.1}$ 占 PM_{10} 的比重平均为 52%,高于市区的约 40%. 因为北郊工业区的石化化工和电力钢铁工业的排放工业排放影响较大,细粒子较多.

由图 2 可知,在 0.1~10 μm 范围内,南京市市区气溶胶质量浓度谱呈三峰型分布,谱峰位于 0.43~0.65、4.7~5.8 和 9.0~10 μm 粒段,北郊呈双峰型分布,谱峰位于 0.43~0.65 μm 和 9.0~10 μm

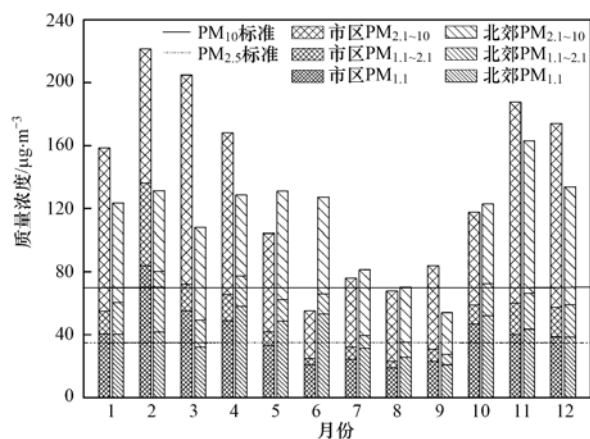


图 1 南京市市区与北郊气溶胶浓度月变化

Fig. 1 Monthly variation of aerosol mass concentration in urban district and suburbs of Nanjing

粒段. 两地谱型在各季节基本一致,谱峰高度随季节有些变化,市区夏季谱峰浓度最低,冬春季最高,因南京夏季受东亚季风影响,东南风居多,来自海洋的清洁空气对南京大气的清洁作用所致,而北郊春季谱峰浓度最高,尤其是 0.43~0.65 μm 峰最高,因为北郊临近工业园区和交通干道,工业排放对细粒子的贡献显著. 市区在粗粒段有两个峰,且峰高度高于北郊,因为市区采样点周围人流车流量大,人为活动造成地面扬尘较多,北郊采样点办公楼周围人为活动少.

2.2 水溶性离子质量浓度粒径分布和城郊差异

本研究分析 $PM_{2.1-10}$ 、 $PM_{1.1-2.1}$ 、 $PM_{1.1}$ 这 3 种粒径段中 10 种主要的水溶性无机离子. 计算得 3 种粒径段中阴阳电荷当量比值分别为 1.05、1.12、1.20,说明样品中阴阳离子基本平衡. 以 $PM_{2.1}$ 作为接近 $PM_{2.5}$ 的分界, $PM_{1.1}$ 作为近似亚微米粒子的分界线. 3 种粒径段离子浓度差异较大.

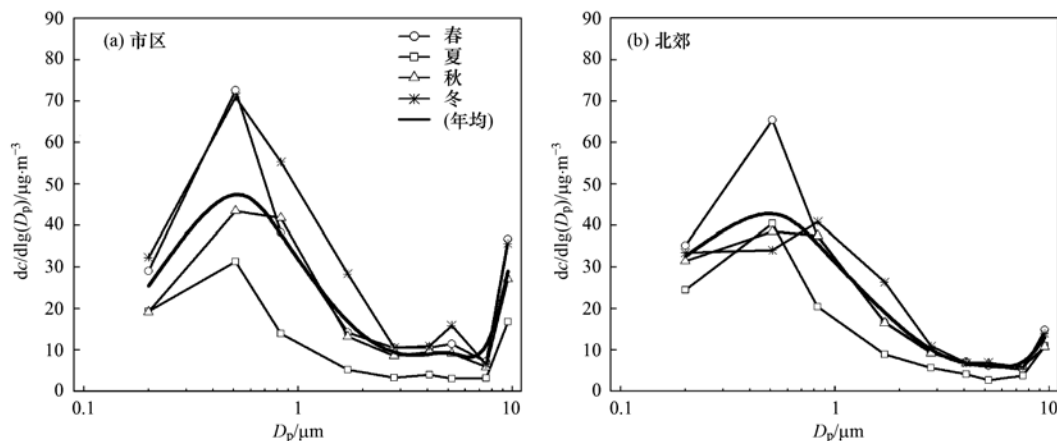


图 2 南京市市区与北郊气溶胶浓度谱

Fig. 2 Spectrum distributions of aerosol mass concentration in the urban district and suburbs

PM_{2.1~10}中,浓度顺序由高到低为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_2^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+$ (图3). 市区的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 浓度分别达 6.7、5.1、4.1、1.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 北郊的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 浓度分别达 4.8、5.0、3.9、1.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 市区的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度略高于北郊.

PM_{1.1~2.1}中,浓度高低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_2^-$, 市区 PM_{1.1~2.1} 中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 浓度达 18.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、15.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、6.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、3.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比 PM_{2.1~10} 中的浓度高出 3 倍, Ca^{2+} 浓度为 1.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 PM_{2.1~10} 中 Ca^{2+} 浓度的 1/4. 北郊 PM_{2.1~10} 中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 浓度值低于市区, 且比 PM_{2.1~10} 中的浓度值高出 3 倍, Ca^{2+} 浓度为 1.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 也是 PM_{2.1~10} 中 Ca^{2+} 浓度的 1/4. PM_{2.1~10} 中市区各个离子浓度均高于北郊.

PM_{1.1}中,浓度高低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{F}^- > \text{NO}_2^- > \text{Mg}^{2+}$, 市区 PM_{1.1} 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度为 21.9、16.9、8.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于 PM_{1.1~2.1} 中浓度, 北郊的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度也高于 PM_{1.1~2.1} 中浓度. 两地 Cl^- 浓度均与 PM_{1.1~2.1} 中浓度相仿, Ca^{2+} 浓度均低于 PM_{1.1~2.1}

中浓度. 北郊各个离子浓度低于市区. PM_{1.1} 中的离子浓度分布趋势与 PM_{1.1~2.1} 中相似, 可以结合在一起讨论. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Cl^- 这 5 种离子主要存在于细粒段 PM_{2.1} 中, Ca^{2+} 和 Na^+ 主要存在于粗粒段 PM_{2.1~10} 中, F^- 、 NO_2^- 、 Mg^{2+} 在 3 种 PM 中的比重相差无几.

10 种离子总质量浓度在市区和北郊对 PM_{1.1}、PM_{1.1~2.1}、PM_{2.1~10} 的贡献率分别为 56%、49.5%、20.4% 和 42.5%、37.9%、18.3%. PM_{1.1} 和 PM_{1.1~2.1} 中水溶性离子质量分数接近, 可以结合在一起研究讨论. 水溶性离子是南京市细粒子 PM_{2.1} 中的重要成分. 细粒子 PM_{2.1} 中离子质量分数比粗粒子 PM_{2.1~10} 中高出 1 倍多. 3 种主要离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 总质量浓度在市区和北郊对 PM_{1.1}、PM_{1.1~2.1}、PM_{2.1~10} 的贡献率分别为 47.7%、40.5%、9.5% 和 35.0%、30.6%、9.2%. 这 3 种离子主要来自 NH_3 、 NO_x 、 SO_2 的二次转化, 说明南京市郊两地的二次污染程度严重, 二次污染物经常存在于细粒子粒段, 因此, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 在 PM_{2.1} 和 PM_{1.1} 中的贡献率是 PM_{2.1~10} 中的 3 倍多. Ca^{2+} 、 Na^+ 在粗粒段 PM_{2.1~10} 的百分比在市郊两地分别达 7% 和 5%, 远高于 PM_{2.1} 中的 2%, 分别是 PM_{2.1} 中的 3 倍和 2.5 倍.

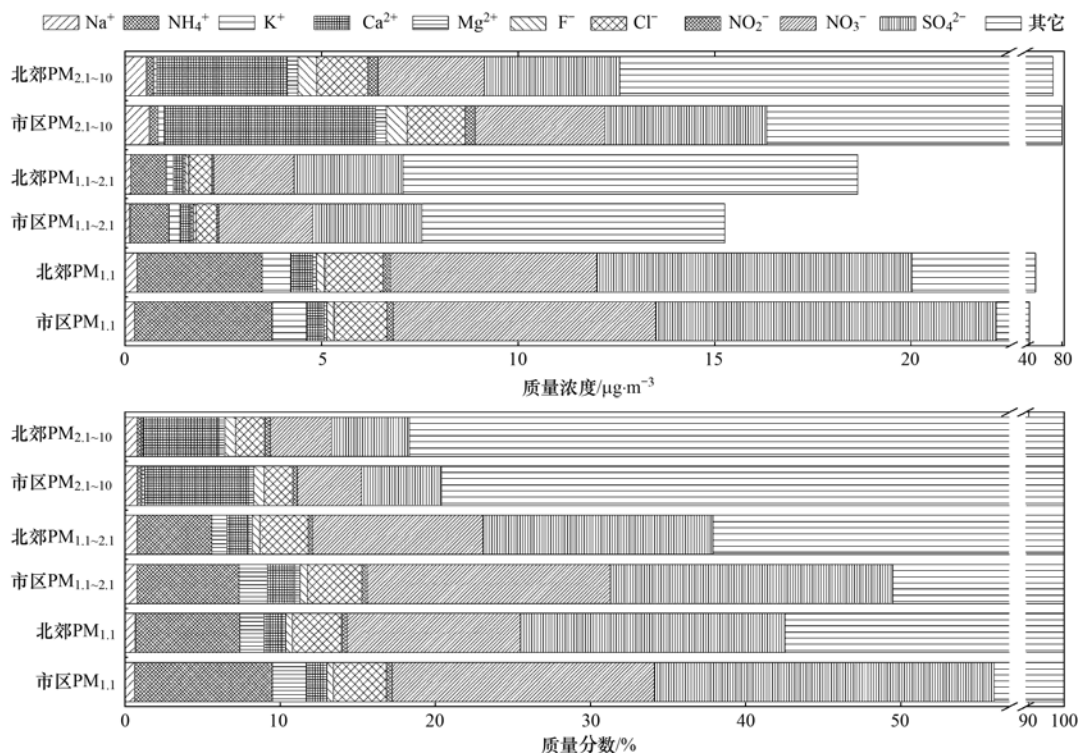


图3 南京市气溶胶 PM_{1.1}、PM_{1.1~2.1}、PM_{2.1~10} 中主要水溶性离子所占质量浓度和质量分数

Fig. 3 Mass concentration and percentages of major ions in PM_{1.1}, PM_{1.1~2.1} and PM_{2.1~10}

10 种离子浓度谱型在市区和北郊基本一致,没有明显的地域差别,离子质量浓度谱呈三峰型分布(图4). 5 种阴离子最高谱峰均出现在 0.65 ~ 1.1 μm 粒段,在 4.7 ~ 5.8 μm 之间和 9.0 ~ 10 μm 之间有次峰出现,谷值出现在 5.8 ~ 9.0 μm 粒段. NH_4^+ 和 K^+ 呈双峰型分布,最高谱峰均出现在 0.65 ~ 1.1

μm 粒段,次峰在 9.0 ~ 10 μm 粒段,而在 5.8 ~ 9.0 粒段出现明显的浓度谷值. Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 呈三峰型分布,峰值出现在 0.65 ~ 1.1、3.3 ~ 4.7 和 9.0 ~ 10 μm 粒段,其中 Na^+ 、 Mg^{2+} 峰值相近, Ca^{2+} 的最高峰在 9.0 ~ 10 μm ,峰型特征也与粗粒粒段中的离子浓度分布相符合.

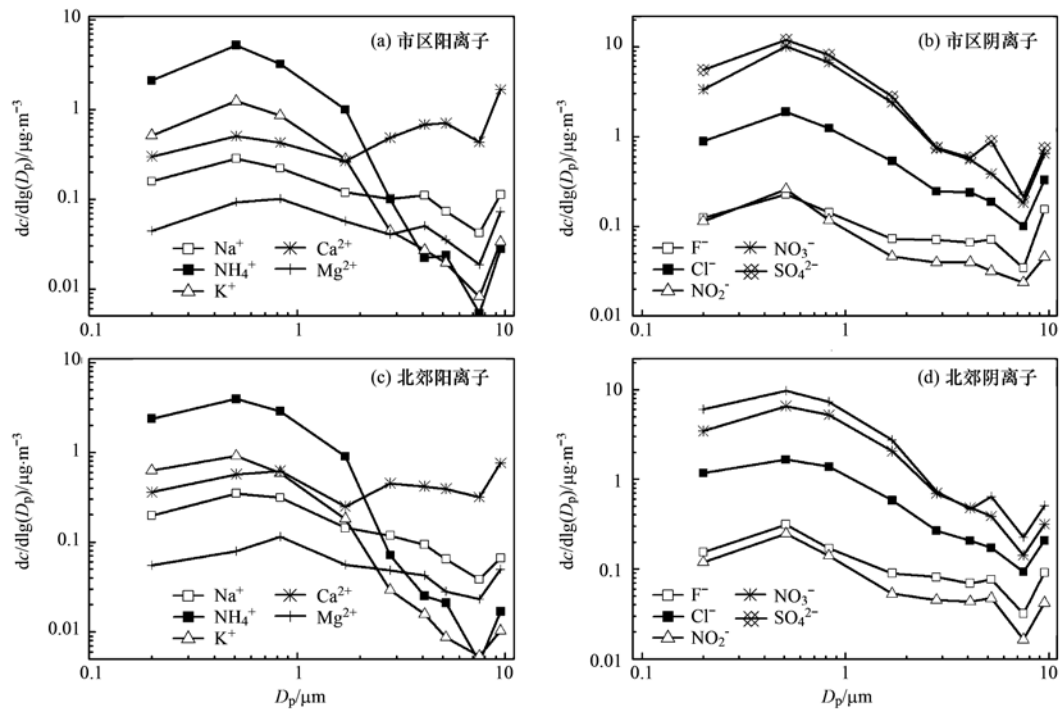


图4 离子年平均质量浓度谱
Fig. 4 Spectrum distributions of major ions in the whole observation year

2.3 南京与其它城市 PM_{2.5} 中离子浓度水平比较

表1 是部分城市 PM_{2.5} 及其中水溶性离子的质量浓度. 澎湖和 Cape Fuguei 为海洋城市或清洁城市,其当地的污染水平低,气溶胶主要来自亚洲季风输送; 鼎湖山作为珠三角背景地区, SO_4^{2-} 浓度较高,其它离子浓度均很低. 高山市作为韩国较为清

洁地区,污染程度较低. 相比于这些清洁地区,南京的细粒子 PM_{2.1} 污染状况比较严重,细粒子 PM_{2.1} 质量浓度, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 浓度是清洁地区的两倍, Na^+ 质量浓度则低于这些靠海地区. 鼎湖山是珠三角背景地区,大气污染状况受珠三角影响,南京细粒子 PM_{2.1} 及其中离子浓度与鼎湖山比较接近,

表1 南京与其他城市 PM_{2.5} 中水溶性离子质量浓度水平/μg·m⁻³

Table 1 Statistical summary of soluble ions in Nanjing City and reported data in other cities/μg·m ⁻³													
位置	时间(年-月)	PM _{2.5}	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	文献
南京市区 (PM _{2.1})	2010-05 ~ 2011-04	54.8	0.4	4.5	1.2	0.7	0.2	0.2	1.9	0.2	9.1	11.4	本研究
南京北郊 (PM _{2.1})	2010-05 ~ 2011-04	80.6	0.5	4.1	0.9	0.8	0.2	0.3	2.1	0.2	7.3	10.8	本研究
北京	2001 ~ 2003	154.26	0.55	8.72	1.55	1.63	0.17	0.29	3.07	0.41	11.52	17.07	[15]
广州	2004-10 ~ 2004-11	102.9	0.46	12.1	2.59	0.49	0.069	— ¹⁾	0.55	—	4.31	27.8	[18]
鼎湖山	2007-01 ~ 2008-12	36.3	0.7	6.8	1.4	0.6	0.2	—	1.3	—	6.1	19.1	[11]
高山市	2007	18.9	0.38	1.97	0.18	0.24	0.04	—	0.34	—	1.45	5.42	[19]
Cape Fuguei	2005	23.4	0.8	1.7	0.3	0.1	0.2	—	0.6	—	1.1	6.8	[20]
澎湖	2005	22.7	0.8	2.1	0.3	0.7	0.2	—	1	—	0.5	6.8	[20]
屏东	2006-03	47.5	0.39	—	0.58	0.1	0.06	—	1.52	—	7.97	8.74	[21]
圣保罗	2002-05 ~ 2002-07	11.9	0.13	0.3	0.14	0.1	0.02	—	0.12	—	0.43	1.2	[22]

1) “—”表示文章中没有相关数据

污染程度相当. 与发达城市相比较, 屏东和圣保罗的细粒子污染程度要低于南京, 屏东是农业旅游城市, 巴西是世界唯一用乙醇作为汽车燃料的国家, 汽车尾气这一污染源相对减少, 圣保罗的细粒子和 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 这 3 种主要离子质量浓度远低于南京. 而北京和广东的污染状况比南京更为严重, 尤其以 SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 浓度比南京翻倍.

2.4 离子质量浓度的季节变化

2.4.1 市郊两地阴离子季节变化特征

经计算得 10 种离子年均总浓度在市区为 $46.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 北郊为 $39.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季最高, 夏季最低, 这与气溶胶颗粒物浓度季节变化趋势基本一致. 市区冬季离子浓度高出夏季两倍. 夏季浓度超过邻近背景点黄山浓度 $13.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 2 倍. 离子占气溶胶质量的百分比随季节没有明显的变化. 图 5 给出 $D_p < 2.1 \mu\text{m}$ 和 $2.1 \mu\text{m} < D_p < 10 \mu\text{m}$ 两种粒径段的各离子浓度的季节变化.

市区 $\text{PM}_{2.1}$ 中阴离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 浓度高低变化为冬 > 春 > 秋 > 夏, SO_4^{2-} 在夏季为 $8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季达 $15.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 接近夏季的 2 倍. NO_3^- 季节变化最为显著, 在冬季达 $15.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季仅为 $1.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, Cl^- 在冬季达 $4.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季为 $0.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_3^- 和 Cl^- 的冬季浓度比夏季高出一个量级. $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 这 3 种阴离子季节变化趋势不太一致, 但均为夏季浓度最低, SO_4^{2-} 在秋季浓度最高, 四季浓度在 $3.3 \sim 5.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间变化, NO_3^- 春季浓度最高, 四季浓度变化范围为 $1.7 \sim 4.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, Cl^- 在冬季浓度值最高, 四季浓度变化范围为 $1.2 \sim 2.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. F^- 和 NO_2^- 季节变化不明显, F^- 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中春秋两季浓度相近, 约 $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季浓度值略低为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NO_2^- 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中夏秋两季浓度略高, 在 $\text{PM}_{2.1}$ 中季节变化不明显.

北郊阴离子 SO_4^{2-} 在 $\text{PM}_{2.1}$ 中含量丰富, 浓度最高的春季为 $12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度最低的冬季为 $9.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中浓度季节变化与 $\text{PM}_{2.1}$ 中相反, 最高浓度为冬季 $4.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最低浓度为春季 $3.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NO_3^- 在 $\text{PM}_{2.1}$ 中季节变化明显, 浓度值为春 > 冬 > 秋 > 夏, 其中春季浓度为 $9.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季浓度为 $2.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅为春季浓度的 1/3. NO_3^- 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中含量较低, 且季节变化不明显, 冬季浓度值略低, 为 $2.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春夏秋浓度值相近, 约为 $2.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Cl^- 在 $\text{PM}_{2.1}$ 中季节浓度高低顺序为冬 > 春

> 秋 > 夏, 冬季达 $4.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季为 $0.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, Cl^- 在粗粒段浓度也是冬高夏低, 但变化幅度微弱, 四季浓度相近约为 $1.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. F^- 和 NO_2^- 含量较低, 在粗细粒段均没有明显的季节变化.

2.4.2 市郊两地阳离子季节变化特征

市区 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中各阳离子均有明显的四季变化(图 5). Ca^{2+} 主要存在于 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中, 浓度高低顺序为冬 > 春 > 秋 > 夏, 冬季达 $6.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季为 $3.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 细粒段 Ca^{2+} 含量有季节变化, 但不如粗粒段明显. NH_4^+ 主要存在于细粒段 $\text{PM}_{2.1}$ 中, 浓度高低顺序为冬 > 春 > 秋 > 夏, 冬季浓度高达 $7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季为 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NH_4^+ 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中季节变化趋势与 $\text{PM}_{2.1}$ 中相同, 浓度在 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间变化. K^+ 浓度冬春季大于夏秋季, 且主要存在于 $\text{PM}_{2.1}$ 中, 冬季浓度达 $2.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度最低的秋季为 $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Na^+ 季节变化幅度较小, 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 和 $\text{PM}_{2.1}$ 中均为冬季最高, 分别达 $0.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.1}$ 中的秋季浓度最低, 约为 $0.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Mg^{2+} 在 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中浓度相当, 季节变化均为冬高秋低.

北郊阳离子 Ca^{2+} 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中季节浓度高低为春 > 秋 > 冬 > 夏, 变化幅度较小, 春季为 $3.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季为 $2.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在 $\text{PM}_{2.1}$ 中含量较低, 且冬高夏低, 变化范围 $0.6 \sim 1.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NH_4^+ 主要存在于 $\text{PM}_{2.1}$ 中, 浓度季节变化为春 > 冬 > 秋 > 夏, 其中春季 $4.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季 $2.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NH_4^+ 在粗粒段含量很低, 且季节变化不明显, 浓度约为 $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. K^+ 主要存在于 $\text{PM}_{2.1}$ 中, $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中浓度季节变化都不明显. Na^+ 在 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中含量相近, 且季节变化幅度较小, 均为秋 > 冬 > 春 > 夏. Mg^{2+} 在 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中含量略高, 在 $\text{PM}_{2.1}$ 和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中的季节变化均为冬高夏低.

概而言之, 南京地区离子季节变化明显, 市区 $\text{PM}_{2.1}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 和粗粒子中的 Ca^{2+} 季节浓度多表现出冬季高夏季低的变化特征, $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中离子变化趋势复杂. 北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 中各个离子和 $\text{PM}_{2.1\sim10}$ 中的 Ca^{2+} 表现出春季高夏季低的浓度变化特征, 一些含量较低的离子 F^- 和 NO_2^- , 在两地季节变化特征都不明显. 南京市季节性的天气形势变化是影响离子成分变化的原因, ①夏季受西太平洋副高控制, 东风和西南风为主导风向, 夏季风的清洁作用是各项离子成分浓度降低的重要原因. ②冬季受亚洲大陆冷性反气旋影响, 主导风向为东北风

和西风,从内陆输送来的污染成分使得南京地区离子来源更为丰富. ③市郊边界层下垫面对污染物扩散的影响^[23,24],北郊的平坦下垫面使冬季风的清除作用显现,使得北郊冬季离子浓度低于春季,冬季风将北郊的污染物吹向市区,市区的高楼群下垫面阻

滞作用使得污染物堆积. 南京北郊不仅人口密度大,东部临近扬子石化,南京钢铁,南京化工,华能电厂等大型工业基地,且采样点附近靠近交通动脉,西部和北部为农村,北郊复杂的污染物排放源使得北郊离子成分的季节变化形态更为复杂.

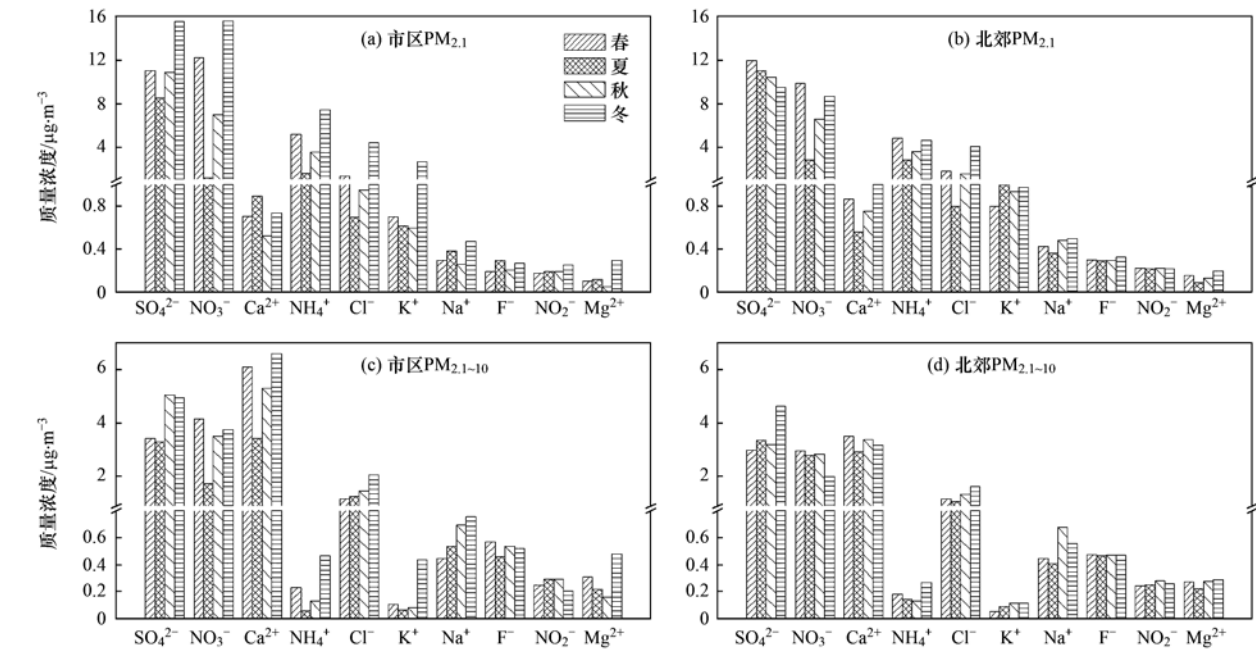


图5 南京市气溶胶中10种水溶性离子浓度季节变化
Fig. 5 Seasonal variation of soluble ions in aerosol from Nanjing

2.5 水溶性离子相关性分析

Pearson 相关系数用以评价二元变量之间的相关程度,相关系数越接近1,表示相关程度越高. 本

研究利用 SPSS 16.0 软件统计计算9种不同粒径段中各个离子成分之间相关系数. 表2中为部分较显著的相关系数.

表2 主要的相关系数¹⁾
Table 2 Most significant correlations between the variables

地点	离子成分	$D_p < 0.43 \mu\text{m}$	$0.43 < D_p < 0.65 \mu\text{m}$	$0.65 < D_p < 1.1 \mu\text{m}$	$1.1 < D_p < 2.1 \mu\text{m}$	$2.1 < D_p < 3.3 \mu\text{m}$	$3.3 < D_p < 4.7 \mu\text{m}$	$4.7 < D_p < 5.8 \mu\text{m}$	$5.8 < D_p < 9.0 \mu\text{m}$	$9.0 < D_p < 10 \mu\text{m}$
市区	$\text{NH}_4^+ - \text{SO}_4^{2-}$	0.460 **	0.857 **	0.906 **	0.945 **	0.888 **	0.647 **		0.457 **	
	$\text{NH}_4^+ - \text{NO}_3^-$	0.731 **	0.952 **	0.943 **	0.956 **	0.644 **	0.410 **	0.641 **		0.498 **
	$\text{NO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$		0.701 **	0.751 **	0.831 **	0.620 **	0.349 **			0.499 **
	$\text{K}^+ - \text{Cl}^-$		0.796 **	0.853 **	0.900 **	0.605 **	0.670 **	0.581 **	0.515 **	0.755 **
	$\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$		0.553 **		0.562 **	0.593 **	0.891 **	0.847 **	0.900 **	0.932 **
	$\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$	0.973 **	0.737 **	0.462 **		0.414 *	0.695 **	0.600 **		
	$\text{K}^+ - \text{SO}_4^{2-}$	0.335 **	0.674 **	0.671 **	0.921 **	0.851 **	0.766 **	0.404 *	0.566 **	0.765 **
	$\text{NH}_4^+ - \text{Cl}^-$	0.546 **	0.655 **	0.590 **	0.871 **	0.574 **	0.400 *	0.423 *		
北郊	$\text{NH}_4^+ - \text{SO}_4^{2-}$	0.460 **	0.904 **	0.911 **	0.935 **	0.660 **				0.456 *
	$\text{NH}_4^+ - \text{NO}_3^-$	0.773 **	0.875 **	0.929 **	0.893 **	0.453 **	0.410 *	0.557 **	0.369 *	0.530 **
	$\text{NO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$		0.632 **	0.772 **	0.804 **	0.524 **	0.393 *			0.430 *
	$\text{K}^+ - \text{Cl}^-$			0.500 **	0.762 **	0.642 **	0.687 **		0.619 **	0.710 **
	$\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$			0.354 *	0.381 *	0.765 **	0.868 **	0.886 **	0.835 **	0.884 **
	$\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$	0.973 **	0.934 **	0.924 **	0.360 *	0.742 **		0.409 *	0.880 **	0.611 **
	$\text{K}^+ - \text{SO}_4^{2-}$		0.526 **	0.423 *	0.479 **	0.696 **		0.878 **	0.453 **	

1) * 表示显著性水平 0.05, ** 表示显著性水平 0.01

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 这 3 种离子相互间相关性最好,相关性在不同粒径段有所差异,且在细粒段最好. NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 在 $0.43 < D_p < 4.7 \mu\text{m}$ 粒段,置信水平达 99% ($P \leq 0.001$) 且相关系数接近或达到 0.9. NH_4^+ 与 NO_3^- 在 $D_p < 2.1 \mu\text{m}$ 以下,置信水平达 99%,且相关系数达到或接近 0.9. NO_3^- 与 SO_4^{2-} 在 $D_p < 2.1 \mu\text{m}$ 粒段,表现出较好相关性,接近 0.8. 说明 NO_3^- 、 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同为二次污染源有较好的同源性. 在 $0.43 < D_p < 2.1 \mu\text{m}$ 粒段,经计算得物质的量的比 $[\text{NH}_4^+]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 约为 2, $[\text{NH}_4^+]/[\text{NO}_3^-]$ 在市区和北郊分别约为 1.3 和 1.6,结合 3 种离子的高相关性,可以判断 NH_4^+ 主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形式存在,且市区与北郊的存在形式基本相同,但比例不同. 而在 $D_p > 2.1 \mu\text{m}$ 粒段,三者相关性不佳,粗粒段的来源较为复杂,局地污染,尤其交通排放的 NO_x 在 NO_3^- 形成过程中起到重要作用,工业燃料尤其化石燃料排放的 SO_2 是 SO_4^{2-} 的重要来源.

Cl^- 与 K^+ 在 $D_p > 0.43 \mu\text{m}$ 粒段, Cl^- 与 Na^+ 在

$D_p > 2.1 \mu\text{m}$ 粒段具有较好的相关性. 在 $D_p > 3.3 \mu\text{m}$ 粒段, Cl^- 与 Na^+ 的相关系数达到或接近 0.8,明显好于 Cl^- 与 K^+ ,市区与北郊情况相同, Cl^- 主要以 NaCl 形式存在,而在 $D_p < 3.3 \mu\text{m}$ 粒段, Cl^- 与 K^+ 的相关性占优,故 Cl^- 以 KCl 存在,在市区体现尤为明显.

K^+ 与 SO_4^{2-} 在市区各粒段均表现出较好的相关性,结合 K^+ 与 Cl^- 的高相关,说明 K^+ 主要以 KCl 和 K_2SO_4 形式存在,在北郊, K^+ 与 SO_4^{2-} 的相关性不如市区好,因为北郊局地排放如农作物焚烧等排放出的 K^+ 和工业 SO_2 的排放对其存在影响复杂. Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 在可计算的粒段均表现出良好相关性,且北郊的相关性高于市区,因 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 同为主要的地壳源,且 Ca^{2+} 主要存在于粗粒段中(如图 3),二者质量浓度谱型也基本一致.

2.6 水溶性离子因子分析

使用 SPSS 16.0 软件,用因子分析方法对市区和北郊 $\text{PM}_{2.1}$ 中离子进行源解析(表 3),当 KMO 值大于 0.6 时说明使用此方法适用. 本研究中两地各季节解析结果 KMO 值均符合因子分析的要求.

表 3 $\text{PM}_{2.1}$ 中离子的因子分析

Table 3 Varimax rotated factor loading matrix for elements in PM _{2.1} from Nanjing													
地点	组分	载荷(春季 $K=0.634$)			载荷(夏季 $K=0.734$)			载荷(秋季 $K=0.716$)			载荷(冬季 $K=0.546$)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
市区	Na ⁺	0.121	0.924	0.091	0.927	0.046		0.163	0.805	0.401	0.235	0.783	
	NH ₄ ⁺	0.971				0.851	0.186	0.931			0.952	0.224	
	K ⁺	0.929	0.154			0.144	0.835	0.497	0.038	0.677	0.668	0.588	
	Ca ²⁺		0.925		0.947				0.861	0.346	0.27	0.514	
	Mg ²⁺		0.961		0.895		0.072		0.716	0.519	0.671	0.647	
	F ⁻			0.703	0.44	0.205	-0.527		0.803	-0.214		0.857	
	Cl ⁻	0.721	0.455		0.956			0.16	0.191	0.894	0.797	0.367	
	NO ₂ ⁻		0.115	0.906	0.284	0.7		-0.267	-0.403		0.397	0.678	
	NO ₃ ⁻	0.942	0.008		0.513	0.133	0.684	0.792		0.492	0.902		
	SO ₄ ²⁻	0.894				0.856	0.139	0.949	0.125	0.129	0.852	0.484	
贡献率/%		42.55	28.81	14.28	40.38	20.37	16.13	28.4	27.66	21.15	42.73	32.75	
地点	组分	载荷(春季 $K=0.465$)			载荷(夏季 $K=0.628$)			载荷(秋季 $K=0.731$)			载荷(冬季 $K=0.488$)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4
北郊	Na ⁺		0.957		0.887		0.137	0.349	0.878	0.151	0.912	0.094	
	NH ₄ ⁺	0.946		0.205	—	0.516	0.769	0.955	0.139	0.906		0.314	0.106
	K ⁺	0.73	0.304		0.177	-0.213	0.745	0.629	0.44	0.348	0.085	0.844	0.101
	Ca ²⁺		0.972		0.834		-0.429	0.143	0.901		0.918		0.17
	Mg ²⁺	0.078	0.973		0.927			0.175	0.916	0.066	0.963		0.099
	F ⁻	0.211	0.208	0.617	0.151	0.91		0.252	0.357	0.168		0.314	0.856
	Cl ⁻		0.172	0.637	0.845	0.371	0.193	0.578	0.717	0.182		0.925	
	NO ₂ ⁻	0.251		0.793		0.888	0.114	0.726	0.244	0.116	0.141		0.903
	NO ₃ ⁻	0.785		0.474	0.33	0.691	0.404	0.878	0.368	0.906	0.081	0.367	0.063
	SO ₄ ²⁻	0.953	0.161	0.041		0.304	0.817	0.928	0.232	0.944	0.227	0.036	0.197
贡献率/%		31.35	30.76	17.34	33.26	26.44	22.61	40.37	35.25	27.61	27.17	19.63	16.7

春季,市区和北郊离子来源类似,可以解析出 3 个因子,第一个因子在 K^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 上有较高负载,该因子成分在市区和北郊分别占数据集总方差的 42.55% 和 31.35%,说明这 4 种离子同源性高,且占据春季离子来源的主要部分,其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 主要来自于二次转化,其前体物 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 主要源是化石燃料燃烧和汽车尾气, NO_3^- 作为交通排放源的指标, SO_4^{2-} 作为燃煤排放源的指标, NO_3^-/SO_4^{2-} 比值是否大于 1 常用于判别大气颗粒物污染是以燃煤为主还是以汽车尾气为主^[25]. 计算得 NO_3^-/SO_4^{2-} 比值冬春季达 1 左右,远高于夏季的 0.2,说明夏季交通排放占据主要地位,冬春季燃煤排放污染和汽车尾气两者并重,这与冬春季北方气团的输送有一定关系. K^+ 主要来自生物质燃烧^[26,27]. 第二个因子在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 上有较高负载,这 3 种离子同为自然源,均是土壤中富含的主要元素^[28], Ca^{2+} 主要来自土壤扬尘,建筑扬尘等局地源. 第三个因子在 Cl^- 和 F^- 上有较高负载,主要来自工业排放.

夏季,市区和北郊离子来源类似,可以解析出 3 个因子,首要因子在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 上有高负载,占 44.38% 和 33.26%. 当 Cl^-/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 的当量比值都大于或等于海水的相应值($Cl^-/Na^+ = 1.165$; $Mg^{2+}/Na^+ = 0.227$) 时,则可选用 Na^+ 作为海盐示踪离子^[29,30]. 本研究中四季 Cl^-/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 当量比值均大于海水中相应值,可认为 Na^+ 有丰富的海洋源,鉴于越往内陆,Na 的地壳源越丰富^[31],以及 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的同因子高同源性,可以判断 Na^+ 的源是海洋源与土壤扬尘源的混合.

Mg^{2+} 可以作为示踪物区分矿物气溶胶的来源^[32],已知土壤中 Mg^{2+}/Na^+ 的当量比值为 0.72,本研究中夏秋季 Mg^{2+}/Na^+ 当量比值约 0.29,冬春季 Mg^{2+}/Na^+ 值约 0.4,高于海洋中 Mg^{2+}/Na^+ 值,且远低于土壤中 Mg^{2+}/Na^+ 值,可以判断 Mg^{2+} 主要来自土壤扬尘和海洋源^[33~35],且土壤源远多于海洋源,这与许明君等的研究结果一致^[16].

计算得 Cl^-/Na^+ 夏季值为 2.0,其它三季约为 5.0,说明夏季 Cl^- 有大量的海洋源,其它季节 Cl^- 以非海盐源为主,主要来自工业排放. 夏季 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 三者同源性不高,可能是夏季高温使 NH_4NO_3 不易以颗粒物形式存在^[36].

秋季,市区和北郊离子来源体现出差异,北郊解析出两种因子,其中 Na^+ 和 Cl^- 依旧高相关同源,源

于海盐输送的可能很大,市区的 Na^+ 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等同源.

冬季,北郊解析出 4 种因子,首要因子载荷于 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ,主要为二次源,第二个因子在 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 上有高负载,主要为扬尘等局地源, K^+ 和 Cl^- 主要来自生物质燃烧^[25,26], F^- 和 NO_2^- 量极少,分别来源于垃圾焚烧和汽车尾气. 市区解析出两种因子,第一个指示 K^+ 和 Cl^- 同源, NH_4^+ 和 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 同源,第二个因子指示 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 同源,这几种同源的离子之间均具有高相关. 可以分析冬季市区离子来源和北郊的基本一样.

综上所述,可看出某些离子不同季节来源的差异. ① Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在各个季节均处于同一因子载荷,有很高的同源性, Ca^{2+} 主要来自土壤扬尘等局地源, Mg^{2+} 来自土壤扬尘和海洋源,且以土壤扬尘为主, Na^+ 主要为海洋源与土壤源的混合. ② NO_3^- 、 SO_4^{2-} 在夏季主要以汽车尾气污染为主,冬季汽车尾气和燃煤排放比重持平. ③ K^+ 和 Cl^- 在秋季和冬季负载于同一个因子,主要来源于生物质燃烧,而在春季和夏季, K^+ 主要和 SO_4^{2-} 同源,主要来源于工业排放. ④ Cl^- 在冬季主要和 K^+ 同源,而在夏秋季主要和 Na^+ 一起来来自于海盐夏季风输送.

3 结论

(1) 南京市市区和北郊颗粒物污染严重,四季浓度变化为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 市区各月 $PM_{2.1}$ 占 PM_{10} 比重约为 40%,气溶胶质量浓度谱呈三峰型分布;北郊各月 $PM_{2.1}$ 占 PM_{10} 比重约为 52%,气溶胶质量浓度谱呈双峰型分布. 北郊 5~10 月颗粒物污染高于市区,11 月低于市区.

(2) 10 种离子总质量浓度在市区和北郊对 $PM_{1.1}$ 、 $PM_{1.1\sim2.1}$ 、 $PM_{2.1\sim10}$ 的贡献率分别为 56%、49.5%、20.4% 和 42.5%、37.9%、18.3%,在 $PM_{2.1}$ 中的贡献率是 $PM_{1.1\sim2.1}$ 中的 2 倍多. 3 种主要离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 总质量浓度在市区和北郊对 $PM_{1.1}$ 、 $PM_{1.1\sim2.1}$ 、 $PM_{2.1\sim10}$ 的贡献率分别为 47.7%、40.5%、9.5% 和 35.0%、30.6%、9.2%,在 $PM_{2.1}$ 中的贡献率是 $PM_{1.1\sim2.1}$ 中的 3 倍多. Ca^{2+} 、 Na^+ 在市区和北郊对 $PM_{2.1\sim10}$ 的贡献率是对 $PM_{2.1}$ 的 3 倍和 2.5 倍.

(3) 市区主要离子季节变化为冬季高夏季低,北郊主要离子季节变化为春季高夏季低,夏季副高天气扩散清除作用和冬季冷气旋的堆积作用,北郊

平坦市区粗糙的边界层下垫面特点是造成市区和北郊季节变化差异的主要原因。

(4) 南京市 $\text{PM}_{2.1}$ 中二次离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 的前体物夏季主要来自汽车尾气, 冬季汽车尾气和燃煤排放比重持平, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来自土壤扬尘, Mg^{2+} 、 Na^+ 主要源于土壤源和海盐, 其中 Mg^{2+} 的土壤源较多。 Cl^- 在夏季主要来自海盐, 冬季 Cl^- 主要源于生物质燃烧和工业排放。

参考文献:

- [1] West J J, Hope C, Lane S N. Climate change and energy policy: The impacts and implications of aerosols [J]. *Energy Policy*, 1997, **25**(1): 923-939.
- [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] Fan J W, Rosenfeld D, Ding Y N, *et al.* Potential aerosol indirect effects on atmospheric circulation and radiative forcing through deep convection [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(9): doi: 10.1029/2012GL051851.
- [4] Hahn B D, Lee J M, Park D S, *et al.* Mechanical and in vitro biological performances of hydroxyapatite-carbon nanotube composite coatings deposited on Ti by aerosol deposition [J]. *Acta Biomaterialia*, 2009, **5**(8): 3205-3218.
- [5] 姚利, 李杏茹, 郭雪清, 等. 2007 年春节期间北京大气细粒子中正构烷烃的污染特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 589-593.
- [6] 伍德侠, 魏庆农, 魏键琰, 等. 秸秆焚烧期的碳黑气溶胶观测及研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3304-3309.
- [7] 李秀镇, 盛立芳, 徐华, 等. 青岛市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 元素组成及来源研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1438-1445.
- [8] 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.
- [9] Khan M F, Hirano K, Masunaga S. Quantifying the sources of hazardous elements of suspended particulate matter aerosol collected in Yokohama, Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(21-22): 2646-2657.
- [10] Tanaka K, Ohta K, Haddad P R, *et al.* Acid-rain monitoring in east Asia with a portable-type ion-exclusion-cation-exchange chromatographic analyzer [J]. *Journal of chromatography A*, 1999, **850**(1-2): 311-317.
- [11] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 鼎湖山 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子浓度特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1232-1235.
- [12] 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1973-1981.
- [13] 张予燕, 芮冬梅, 刘军, 等. 南京市重点污染源对城区空气质量的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2009, **21**(6): 62-64.
- [14] 张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 等. 南京 3 类不同大气污染过程中气溶胶水溶性无机离子的特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **33**(6): 1944-1951.
- [15] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [16] 许明君, 王月华, 汤莉莉, 等. 南京城区与郊区秋季大气 PM_{10} 中水溶性离子的特征研究[J]. *环境工程*, 2012, **30**(5): 108-113.
- [17] 王红磊, 朱彬, 康汉青, 等. 南京市城市不同功能区 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.1}$ 质量浓度的季节变化特征[J]. *气象科学*, 2011, **31**(S1): 16-23.
- [18] Andreae M O, Schmid O, Yang H, *et al.* Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6335-6350.
- [19] Kim N K, Kim Y P, Kang C H. Long-term trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$ data between 1992 and 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6107-6115.
- [20] Chou C C K, Lee C T, Yuan C S, *et al.* Implications of the chemical transformation of Asian outflow aerosols for the long-range transport of inorganic nitrogen species [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(32): 7508-7519.
- [21] Lin C C, Huang K L, Tsai J H, *et al.* Characteristics of water-soluble ions and carbon in fine and coarse particles collected near an open burning site [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 39-45.
- [22] Bourotte C, Curi-Amarante A P, Forti M C, *et al.* Association between ionic composition of fine and coarse aerosol soluble fraction and peak expiratory flow of asthmatic patients in São Paulo city (Brazil) [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(10): 2036-2048.
- [23] 陈燕, 蒋维楣. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(1): 66-73.
- [24] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2008, **44**(1): 99-106.
- [25] 李彩霞, 李彩亭, 曾光明, 等. 长沙市夏季 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 599-603.
- [26] Cachier H, Liousse C, Buat-Menard P, *et al.* Particulate content of savanna fire emissions [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, **22**(1-2): 123-148.
- [27] Duan F K, Liu X D, Yu T, *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.
- [28] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 28-31.
- [29] Keene W C, Pszenny A A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**

- (D6): 6647-6658.
- [30] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等. 玉龙雪山地区不同海拔高度降水中常量无机离子特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 963-970.
- [31] Suzuki T, Iizuka Y, Furukawa T, *et al.* Spatial variability of chemical tracers in surface snow along the traverse route from the coast to 1000 km inland at east Dronning Maud Land, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Science, 2003, **14**(1): 48-56.
- [32] 胡敏,赵云良,何凌燕,等. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 1-6.
- [33] 常辉,杨绍晋,董金良,等. 大气气溶胶中元素种态研究[J]. 环境化学, 2000, **19**(6): 485-500.
- [34] Zhang D Z, Iwasaka Y. Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in Spring of 1995 and 1996 [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(19): 3213-3223.
- [35] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等. 北京市大气 PM_{2.5} 中矿物成分的污染特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(5): 26-30.
- [36] Han L H, Zhuang G S, Sun Y L, *et al.* Local and non-local sources of airborne particulate pollution at Beijing-The ratio of Mg/Al as an element tracer for estimating the concentrations of mineral aerosols from outside Beijing [J]. Science in China Series B: Chemistry, 2005, **48**(3): 253-264.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2013年9月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2012年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2012年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分77.8,排名第一,总被引频次6489,影响因子1.156.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评价,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2012年度《环境科学》综合评价总分77.8,在被统计的30种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行