

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析

王念飞^{1,2}, 陈阳², 郝庆菊¹, 王欢博², 杨复沫^{2,3*}, 赵晴⁴, 薄宇⁴, 贺克斌⁴, 姚玉刚⁵

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 水库水环境重点实验室, 重庆 400714; 3. 中国科学院城市大气环境研究卓越创新中心, 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084; 5. 苏州市环境监测中心, 苏州 215004)

摘要: 2015 年在苏州市城区采集大气细颗粒物 PM_{2.5} 样品共 87 套, 用重量法分析了 PM_{2.5} 的质量浓度, 离子色谱法分析了颗粒物中 F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺, 共 9 种水溶性无机离子。观测期间, 苏州市 PM_{2.5} 的年均质量浓度为 (74.26 ± 38.01) μg·m⁻³, 其季节特征为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季; 9 种水溶性离子的总质量浓度为 (43.95 ± 23.60) μg·m⁻³, 各离子的浓度高低顺序为 NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Ca²⁺ > F⁻ > Mg²⁺; SNA(SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 三者的简称) 是最主要的水溶性离子; SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 三者之间具有显著的相关性, 它们在 PM_{2.5} 中主要是以 NH₄NO₃ 和 (NH₄)₂SO₄ 的结合方式存在。苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的主要来源包括工业源、燃烧源、二次过程和建筑扬尘等。

关键词: 水溶性离子; PM_{2.5}; 苏州; 季节变化; 来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4482-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201605094

Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou

WANG Nian-fei^{1,2}, CHEN Yang², HAO Qing-ju¹, WANG Huan-bo², YANG Fu-mo^{2,3*}, ZHAO Qing⁴, BO Yu⁴, HE Ke-bin⁴, YAO Yu-gang⁵

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Suzhou Environmental Monitor Center, Suzhou 215004, China)

Abstract: A total of 87 daily PM_{2.5} samples were collected in the urban area of Suzhou city during 2015, representing spring, summer, autumn, winter, respectively. Mass concentration of PM_{2.5} was analyzed gravimetrically. Water-soluble inorganic ions, including F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺ and Ca²⁺, were determined by ion chromatography. The average mass concentration of PM_{2.5} was (74.26 ± 38.01) μg·m⁻³. The seasonal variations of PM_{2.5} concentrations decreased in the order of winter > spring > autumn > summer. The average total mass concentrations of 9 ions was (43.95 ± 23.60) μg·m⁻³, and the order of concentration of ions was NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Ca²⁺ > F⁻ > Mg²⁺. Seasonal variation of ion concentrations was significant, with the highest concentration observed in winter and the lowest in summer. The secondary inorganic species, including SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ (SNA) were the major components of the water-soluble ions in PM_{2.5}. SNA's correlations with each other were significant. SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ were probably in the form of NH₄NO₃ and (NH₄)₂SO₄. The [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] ratio approaching to 1 implied that mobile sources were as important as stationary sources. Ion balance calculations indicated strong correlations between anion and cation equivalents. The PM_{2.5} was acidic. Industrial emission, combustion process, secondary formation and fugitive dust were the major sources of the water-soluble ions in PM_{2.5}.

Key words: water-soluble ions; PM_{2.5}; Suzhou; seasonal variation; source

近年来大气颗粒物已成为我国大中城市的主要空气污染物之一, 导致城市空气污染事件如霾天等的频繁出现。PM_{2.5} (空气动力学等效直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物) 具有粒径小、比表面积大和空气中滞留时间长等特征, 易成为其他污染物的运载体和反应体, 并富集更多有毒有害化学成分 (如多环芳烃 PAHs、重金属等)^[1,2]。PM_{2.5} 化学组成复杂, 含有机碳 (OC)、元素碳 (EC)、水溶性离子、地壳

元素及各种微量元素等。其中水溶性离子组分一般占 PM_{2.5} 质量的 30% ~ 50%, 是 PM_{2.5} 的重要组成部分^[3~5]。水溶性离子组分直接影响降水酸度^[6], 云

收稿日期: 2016-05-13; 修订日期: 2016-07-28

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KJZD-EW-TZ-G06-04); 苏州市科技支撑计划 (社会发展) 项目 (SS201417)

作者简介: 王念飞 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: wangnianfei55@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fmyang@cigit.ac.cn

凝结核的形成^[7],引起间接的辐射强迫效应. 有研究表明,水溶性离子对大气的消光系数具有较高的分担率^[8],导致能见度降低.

国内对长三角地区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分的研究较多,但多集中在上海、杭州、南京等城市. 苏州地处长三角腹地,在区域性大气复合污染过程的研究中有所涉及. 如 Fu 等^[9]分析了 2007 年 1 月长三角地区的一次污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分的变化; Li 等^[10]利用 PSAT(颗粒物源解析技术)分析了长三角区域 2013 年 1 月污染过程的主要贡献源; Tian 等^[11]对苏州市 2013 年 1 月污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 及其主要化学组分在线数据进行了研究; 均表明污染过程由不利的气象条件和污染物的传输共同造成. 在全年尺度上,对苏州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分的研究鲜有报道. 本研究拟通过持续 4 个季节的采样和分析,对苏州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度水平、组成特征以及季节变化规律进行研究,以期为认清当地大气颗粒物化学组成和污染成因提供基础数据.



图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling site

1 材料与方法

1.1 采样方法

采样点位于苏州市高新区实验小学教学楼楼顶 ($31^{\circ}18'N, 120^{\circ}33'E$), 处于苏州市全年主导风向上.

实验小学临近居住区和商业区,周围不存在明显污染源,能较好地代表苏州市 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染水平. 采样期为 2015 年 4 月(春季)、8 月(夏季)、10 月(秋季)、12 月(冬季). 用两台流量为 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器(Derenda LVS/MVS, 德国)平行采集石英纤维滤膜(Whatman, 英国)和 Teflon 滤膜(Whatman, 英国)样品共 87 套. 采样时间为每天早上 10:00 至次日 09:00, 采样时长为 23 h. 春、夏、秋和冬各采集了 20、26、20、21 套样品,且每采样季收集 3 套空白样品. 石英滤膜用于水溶性离子分析, Teflon 膜用于质量浓度分析.

1.2 分析方法

Teflon 滤膜用微电子天平(Sartorius ME 5-F, 德国),并严格按照《环境空气颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)手工检测方法(重量法)技术规范》(HJ 656-2013)在恒温恒湿滤膜称重箱(ECWS-2014 $\text{PM}_{2.5}$, 中国)中进行称重分析,测得 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度. 用离子色谱法对采集的石英纤维滤膜样品中的水溶性无机组分进行分析. 具体方法为:切取 1/4 的滤膜剪碎后加入去离子水超声振荡 30 min,后用 $0.45 \mu\text{m}$ 的水系过滤头过滤并定容至 25 mL 的容量瓶中待测. 分析仪器为离子色谱(Dionex 600, 美国),阳离子柱为 CS12A 柱,阴离子柱为 AS11-HC,抑制器为 ASRS. 分析项目为 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等 9 种水溶性无机离子的质量浓度.

1.3 质量控制

为去除滤膜中有机杂质对分析的影响,石英滤膜在采样前均放入马弗炉内进行灼烧(温度为 450°C , 时长为 5 h). 采样仪器在使用前经校正,保证采样时流量的准确. 滤膜称重时,确保称量箱恒温恒湿(相对湿度范围为 35% ~ 45%, 温度范围为 $20 \sim 23^{\circ}\text{C}$),滤膜称量精确到 $1 \mu\text{g}$, 保证采样后滤膜两次称重误差小于 $20 \mu\text{g}$. 水溶性离子测定时均进行空白校正,即样品值减去空白值,以消除操作过程污染物的带入. 实验质量控制采用美国沙漠所(DRI)质量控制标准,每测 10 个样品进行 1 次复检,样品浓度在 $0.030 \sim 0.100 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围时,允许的标准偏差为 $\pm 30\%$; 浓度在 $0.100 \sim 0.150 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间时,要求标准偏差 $< 20\%$; 样品浓度 $> 0.150 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,允许的标准偏差为 10%.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间变化特征

2015 年苏州市 $\text{PM}_{2.5}$ 及水溶性离子浓度的日变

化(24 h 平均浓度)如图 2 所示, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化范围为 $18.32 \sim 215.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均值为 $(74.26 \pm 38.01) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 此结果高于同处长三角地区的上海的 $68.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2011-12 ~ 2012-11)^[12], 南京的 $55.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2010-05 ~ 2011-04)^[13]. 春季、夏季、秋季和冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 (78.53 ± 21.93) 、 (56.95 ± 25.14) 、 (68.04 ± 21.10) 、 $(99.37 \pm 58.50) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度存

在明显的季节变化, 即冬季浓度最高, 夏季浓度最低, 春季浓度高于秋季浓度.

春、秋两季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日变化趋势较平稳, 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值相对其他季节较低, 但从 8 月 23 日开始 $\text{PM}_{2.5}$ 逐步累积并于 8 月 28 日达到最大值 $112.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 之后又缓慢降低. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度变化范围为 $32.73 \sim 215.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度水平较其他季节高且波动大.

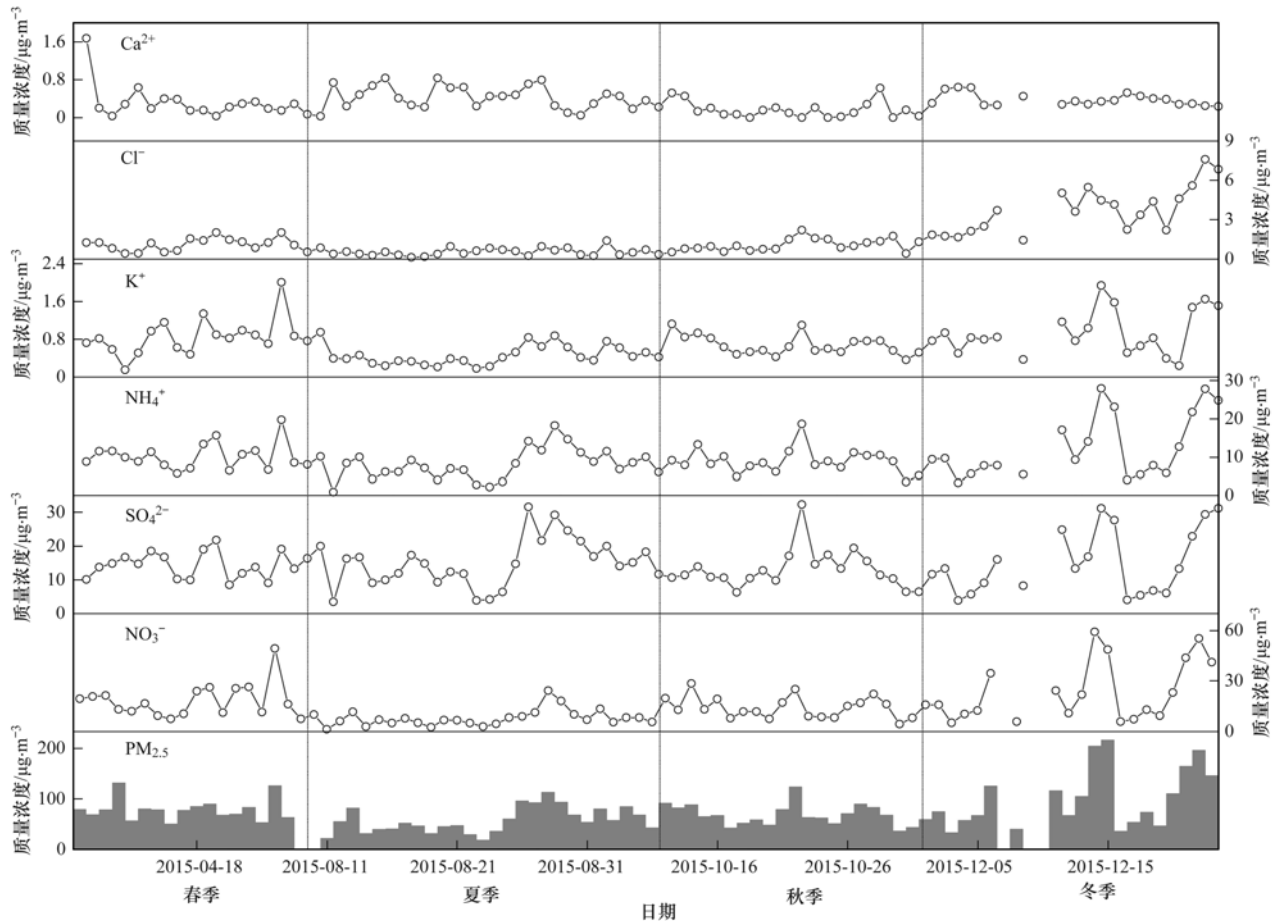


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 和各水溶性离子浓度的日变化特征

Fig. 2 Daily variations of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and water-soluble ions species

2.2 水溶性离子浓度及季节变化特征

观测期间, 9 种水溶性离子年均质量浓度为 $(43.95 \pm 23.60) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 各离子浓度高低顺序为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+}$, 其中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 占总水溶性离子的质量分数高达 88%. 9 种水溶性离子各季节的质量浓度如表 1 所示, 春、夏、秋、冬总离子的浓度分别为 (47.19 ± 15.83) 、 (34.66 ± 15.64) 、 (39.19 ± 14.26) 、 $(57.74 \pm 36.71) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节变化特征相似. Wang 等^[14]的研究中, 苏州市春、夏、秋和冬这 4 个季节总水溶性离子浓度分别

为 24.4、9.0、23.1、 $67.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 本研究结果中, 除冬季总水溶性离子浓度低于该研究外, 其他季节浓度均高于该研究, 两者总水溶性离子的季节变化特征相似.

SNA(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 三者的简称) 占总水溶性离子的比例在春、夏、秋和冬分别为 89.7%、86.3%、91.8%、84.9%, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例分别为 55.5%、52.8%、52.6%、48.5%. 说明 SNA 是苏州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中最主要的无机水溶性离子, 也是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平的主要因素之一. NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 作为二次气溶胶的重要组分, 由大气中的 NO_x 、

SO₂、NH₃ 经均相或非均相过程转化而成,在一定程度上反映了苏州市的大气细颗粒物的二次污染水平. SNA 占总水溶性离子的比例秋季高、夏季低,可能是苏州市属于亚热带季风气候,夏季温度高降

雨多,主导风向为来自干净海洋的东南季风,有利于夏季污染物的扩散和沉降,尤其有利于水溶性离子的沉降;秋季的风速和沉降量相比于夏季均有所减弱,污染物易于滞留,导致秋季的 SNA 占比较高.

表 1 PM_{2.5} 中水溶性离子组分的季节变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Seasonal variation of water-soluble ions concentration in PM_{2.5}/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

分析物种	春季	夏季	秋季	冬季	全年
PM _{2.5}	78.53 ± 21.93	56.95 ± 25.14	68.04 ± 21.1	99.37 ± 58.50	74.26 ± 38.01
NO ₃ ⁻	17.82 ± 9.98	7.88 ± 4.94	14.19 ± 6.45	23.19 ± 17.56	15.19 ± 11.89
SO ₄ ²⁻	14.65 ± 3.99	14.90 ± 7.16	13.07 ± 5.78	15.06 ± 9.53	14.45 ± 6.89
NH ₄ ⁺	10.18 ± 3.42	8.00 ± 4.05	8.98 ± 3.29	12.53 ± 8.26	9.78 ± 5.31
Cl ⁻	1.10 ± 0.48	0.53 ± 0.29	1.08 ± 0.47	3.74 ± 1.79	1.54 ± 1.55
F ⁻	0.13 ± 0.03	0.05 ± 0.06	0.07 ± 0.01	0.19 ± 0.06	0.10 ± 0.07
Na ⁺	2.08 ± 0.76	2.30 ± 0.98	0.89 ± 0.21	1.61 ± 0.34	1.76 ± 0.86
K ⁺	0.86 ± 0.38	0.44 ± 0.19	0.68 ± 0.21	0.94 ± 0.47	0.71 ± 0.38
Mg ²⁺	0.07 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.04
Ca ²⁺	0.30 ± 0.36	0.44 ± 0.23	0.17 ± 0.18	0.38 ± 0.13	0.33 ± 0.26

季节变化特征方面,如表 1 所示,冬季 NO₃⁻ 浓度明显高于其他季节,是夏季 NO₃⁻ 浓度的 3 倍左右. 这可能是由于颗粒态的 NO₃⁻ 以挥发性组分为主,易受温度的影响^[15]. 在夏季温度较高时,颗粒态的硝酸盐容易向气态转化;在冬季,低温利于硝酸盐以颗粒态的形式存在. 此外,由于冬季大气层结构稳定,混合层高度较低,累积效应明显,污染物在大气中易聚集,污染物滞留时间较长^[16],利于污染物发生二次转化. 苏州市 NO₃⁻ 浓度的季节变化特征与福州^[17]、杭州^[14] 以及重庆^[18] 的一致,即冬季最高,夏季最低,春季略高于秋季.

SO₄²⁻ 在春、夏和冬的浓度值较接近,并高于秋季. 由于 SO₄²⁻ 是由 SO₂ 在大气中经均相和非均相氧化而来,夏季温度高,光化学反应较强,利于 SO₂ 向 SO₄²⁻ 的气相转化. 苏州冬季北风和西北风较多,冬季北方地区燃煤取暖产生较多污染物的前体物,经气流传传输携带至苏州,对该地区的污染产生影响;且颗粒物传输过程较长,污染物有足够的时间集聚和二次转化,因此冬季污染过程较多,污染物浓度较高.

NH₄⁺ 和 K⁺ 的季节变化趋势一致,即冬季最高,春秋季节高于夏季. 由于 NH₄⁺ 和 K⁺ 均与农业活动(化肥使用、秸秆燃烧等)有关,导致春、秋季的浓度高于夏季. NH₄⁺ 主要与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 结合,夏季高温不利于 NH₄NO₃ 以颗粒态的形式存在,也是导致夏季 NH₄⁺ 浓度低的原因之一.

Cl⁻ 浓度的季节差异较明显,冬季 Cl⁻ 的浓度是年均值的 2 倍以上,是夏季 Cl⁻ 的 7 倍左右. 表现出

与 Na⁺ 不同的季节变化特征,说明两者的来源并不相同. Cl⁻ 的冬季浓度明显高于夏季浓度,一方面可能因为颗粒物中的 NaCl 和 KCl 与大气中的酸性气体(如 HNO₃) 等反应生成气态的 HCl,导致颗粒物中氯盐的损失^[15];另一方面,颗粒物中的 NH₄Cl 在高温的大气中易挥发,导致氯盐的减少. 此外,煤燃烧也是 Cl⁻ 的来源之一,冬季 Cl⁻ 含量较高,这也表明了煤燃烧对苏州市污染的影响. Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 显示出相同的季节变化特征,即夏季浓度最高,冬春两季浓度次之,秋季浓度最低,说明两种离子可能具有相似的来源.

有研究表明中国的汽油和柴油中分别含有 0.12% 和 0.2% 的 S,其燃烧产生的 SO_x 和 NO_x 的比值分别为 1:13 和 1:8^[19]. 中国煤炭平均 S 含量为 1%,燃煤产生的 SO_x 与 NO_x 的比值为 2:1^[20]. 因此 NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 的比值 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 可以较好地反映流动源(汽车排放)与固定源(煤炭燃烧)对颗粒物的贡献^[21];该比值越大表明流动源的贡献较固定源大,反之亦然. 本研究中全年的 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 为 1.05,表明流动源与固定源的贡献大体相当. 春、夏、秋、冬的 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 比值分别为 1.22、0.53、1.09 和 1.54,表明固定源的贡献夏季突出,而流动源的贡献冬季较明显.

本研究测得的水溶性离子浓度与其他城市的研究对比结果如表 2 所示. 苏州市 PM_{2.5} 中各水溶性离子的浓度要低于重庆^[18]、北京^[22],且秋冬季的水溶性离子浓度低于汤蕾^[23] 在 2010 年对苏州市的相关研究,而高于 Wang 等^[24] 对上海、Chen 等^[13] 对南京和吴耕晨^[25] 对广州的同类研究.

表 2 不同城市 PM_{2.5}及水溶性离子浓度分析¹⁾/μg·m⁻³

Table 2 Mass concentration of PM_{2.5} and water-soluble ions in different cities/μg·m⁻³

地点	年份	样品数	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Mg ²⁺
苏州(本研究)	2015	87	74.26	14.45	15.19	9.78	1.54	1.76	0.71	0.33	0.10	0.09
苏州 ^[23]	2010(秋冬)	29	174	25.53	23.43	—	23.96	1.94	1.48	13.96	0.84	2.84
南京 ^[13]	2010~2011	36	55.1	12.01	9.07	4.51	1.89	0.35	1.16	0.7	—	0.14
上海 ^[24]	2011~2013	—	47	10.23	9.21	6.04	1.52	0.32	1.31	0.9	—	0.16
北京 ^[22]	2012~2013	519	89.8	19.4	20.3	13.5	3.61	1.19	1.05	0.78	0.57	0.05
广州 ^[25]	2013~2014	130	66.2	12.6	6.578	4.516	1.0	1.4	0.7	0.7	0.1	0.1
重庆 ^[18]	2010~2011	74	104	24.8	7.9	8.75	0.71	1.44	1.77	3	0.08	0.21

1) —为不存在相应数据

2.3 阴、阳离子平衡及铵盐的存在形态

大气颗粒物的酸碱性对降水的 pH 值有重要影响,能引起降水的酸化,也能对酸性降水起到中和作用^[26]. 有研究表明,SO₄²⁻、NO₃⁻、F⁻、Cl⁻等阴离子可增加颗粒物的酸性^[17];相反,NH₄⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和 K⁺等阳离子可增加颗粒物的碱性. 阴、阳离子的电荷当量计算公式分别为式(1)、(2):

$$\sum \text{阴} = [\text{F}^-]/19 + [\text{Cl}^-]/35.5 + [\text{SO}_4^{2-}]/48 + [\text{NO}_3^-]/62 \quad (1)$$

$$\sum \text{阳} = [\text{Na}^+]/23 + [\text{NH}_4^+]/18 + [\text{K}^+]/39 + [\text{Mg}^{2+}]/12 + [\text{Ca}^{2+}]/20 \quad (2)$$

本研究中,阴阳离子间具有较好的相关性,全年 $\sum \text{阴} / \sum \text{阳}$ 的值为 1.13 ($R^2 = 0.94$, 阴阳离子间的相关系数). 春、夏、秋、冬 $\sum \text{阴} / \sum \text{阳}$ 的值分别为 1.13 ($R^2 = 0.95$)、1.00 ($R^2 = 0.95$)、1.24 ($R^2 = 0.87$)、1.12 ($R^2 = 0.94$),表明苏州市的颗粒物呈弱酸性,秋季颗粒物中酸性无机阴离子的贡献较大.

SO₄²⁻与 NH₄⁺摩尔浓度比的均值为 0.28,NO₃⁻与 NH₄⁺摩尔浓度比的均值为 0.45,表明 PM_{2.5}中 SO₄²⁻和 NO₃⁻主要被 NH₄⁺中和. NH₄⁺完全中和 SO₄²⁻[即铵盐形式为 NH₄NO₃和 (NH₄)₂SO₄],其预期的 NH₄⁺由式(3)计算. NH₄⁺未完全中和 SO₄²⁻(即铵盐形式为 NH₄NO₃和 NH₄HSO₄),其预期的 NH₄⁺由式(4)计算,[X]代表所测物质的质量浓度.

$$[\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-] \times 18/62 + [\text{SO}_4^{2-}] \times 18 \times 2/96 \quad (3)$$

$$[\text{NH}_4^+] = [\text{NO}_3^-] \times 18/62 + [\text{SO}_4^{2-}] \times 18/97 \quad (4)$$

如图 3 所示,NH₄⁺的计算值与实测值相关性较强($R^2 > 0.90$). 各季节中,SO₄²⁻未完全被中和时

NH₄⁺的计算值处于 1:1 平衡线下方,表明计算值被低估. SO₄²⁻完全被中和时 NH₄⁺的计算值位于 1:1 平衡线上,计算值和实测值较吻合,表明以 NH₄NO₃和 (NH₄)₂SO₄ 计算的 NH₄⁺能较好地反映真实值. 因此,在各季节中 NH₄⁺与 SO₄²⁻主要以 (NH₄)₂SO₄ 的结合形式存在.

2.4 SO₄²⁻、NO₃⁻与其气态前体物的转化

SO₄²⁻和 NO₃⁻是 PM_{2.5}中主要的水溶性离子成分,较高的 SO₄²⁻和 NO₃⁻浓度表明大气中存在较多的二次气溶胶^[27]. 硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR)用来衡量 SO₂向 SO₄²⁻、NO₂向 NO₃⁻的转化程度^[28],计算公式如下:

$$\text{SOR} = [\text{SO}_4^{2-}]/([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2]) \quad (5)$$

$$\text{NOR} = [\text{NO}_3^-]/([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2]) \quad (6)$$

本研究中,SOR 和 NOR 的季节变化如图 4 所示. SOR 年均值为 0.25,季节变化特征为夏季略高于冬季,春季次之,秋季最低. 各季节 SOR 值均较高,且季节间的差异小. 这与其他研究中 SOR 冬季低、夏季高的现象不同,可能是 SOR 受污染源、气象条件和污染物清除状况等因素的综合影响. NOR 的年均值为 0.14,小于 SOR. NOR 的季节特征为春季最高,夏季最低,冬季高于秋季. 夏季 NOR 值低的原因,一是夏季降雨多、风速快且风向为东南季风,这利于污染物的清除. 二是夏季温度高光化学反应强,一方面利于颗粒态向气态转化,其中 NH₄NO₃最为明显;另一方面也利于 HNO₃向 NO₂转化,进一步导致 NO₃⁻降低,NO₂升高. 研究表明,SOR 大于 0.25、NOR 大于 0.10,表明大气中存在较高的 SO₂和 NO₂的氧化^[28]. 本研究中 SOR 和 NOR 值均较高,因此苏州市大气中存在较强的 SO₂向 SO₄²⁻、NO₂向 NO₃⁻转化的二次过程.

2.5 水溶性离子的来源

主成分分析(PCA)方法是对大量气溶胶相关组

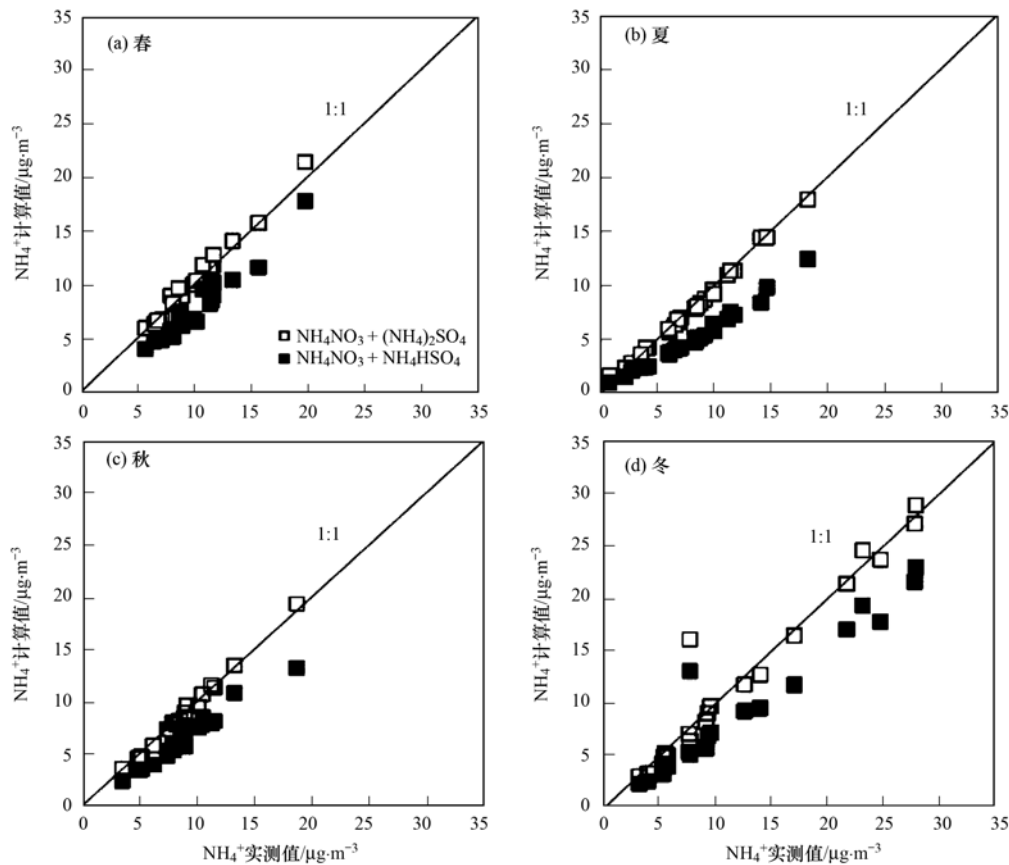


图3 NH₄⁺ 计算值与实测值的散点

Fig. 3 Scatter plots of calculated and measured values of NH₄⁺

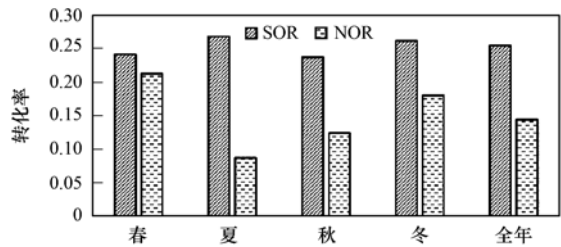


图4 PM_{2.5} 中 SOR 和 NOR 的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of SOR and NOR in PM_{2.5}

分数据的降维分析来识别污染源的数据分析工具^[29]. 本研究利用 SPSS 17.0 对 PM_{2.5} 中水溶性离子进行主成分分析,主成分正交旋转因子荷载矩阵如表 3 所示. 分析结果解释了水溶性无机离子来源的 75.07%. 因子 1 中 NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻ 和 K⁺ 的作用显著,解释了离子来源的 48.69%. NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺ 主要来源于二次转化,Cl⁻ 的来源包括海盐、垃圾焚烧、燃煤和工业生产等,K⁺ 是生物质燃烧的标志物^[30]. 因此,因子 1 主要指向二次过程和燃烧源. 因子 2 中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 作用显著,解释了离子来源的 26.38%. Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 均为地壳元素标

志物,因子 2 主要指向道路尘和土壤源.

表 3 PM_{2.5} 中水溶性离子组分的正交旋转因子荷载矩阵

Table 3 Varimax rotated factor loading matrix for water-soluble ions in PM_{2.5}

物种	因子 1 (燃烧源二次过程)	因子 2 (道路尘土壤源)	公因子方差
NO ₃ ⁻	0.94	-0.08	0.88
SO ₄ ²⁻	0.79	-0.08	0.63
NH ₄ ⁺	0.97	-0.08	0.94
Cl ⁻	0.74	0.06	0.56
Na ⁺	0.04	0.76	0.58
K ⁺	0.88	-0.08	0.79
Mg ²⁺	-0.07	0.87	0.75
Ca ²⁺	-0.13	0.92	0.87
贡献值/%	48.69	26.38	75.07

3 结论

(1) 苏州市大气中 PM_{2.5} 的年均质量浓度为 (74.26 ± 38.01) μg·m⁻³, 变化范围为 18.32 ~ 215.87 μg·m⁻³. PM_{2.5} 的质量浓度具有明显的季节变化特征,即冬季浓度最高,夏季浓度最低,春季浓度高于秋季浓度.

(2) 观测期间,苏州市水溶性无机离子总质量

浓度为 $(43.95 \pm 23.60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,各离子的浓度水平为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+}$. NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 是水溶性离子的主要成分,对颗粒物浓度的贡献率较高.各离子存在不同的季节变化特征.

(3)苏州市颗粒物阴阳离子电荷当量年均值的比为1.13,各季节颗粒物中阴阳离子相关性显著,阴阳离子平衡性良好,颗粒物呈弱酸性.

(4)水溶性离子中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 这3种离子具有较强的相关性,且 NH_4^+ 与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 主要以 NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的形式结合存在.

(5)SOR和NOR均值分别为0.25、0.14,存在较强的 SO_2 向 SO_4^{2-} 、 NO_2 向 NO_3^- 转化的二次过程.

(6)苏州市水溶性离子来源主要有燃烧、二次过程、土壤和道路尘等.

参考文献:

- [1] Calcabrini A, Meschini S, Marra M, *et al.* Fine environmental particulate engenders alterations in human lung epithelial A549 cells[J]. *Environmental Research*, 2004, **95**(1): 82-91.
- [2] Vedal S. Ambient particles and health: lines that divide[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1997, **47**(5): 551-581.
- [3] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [4] Yao X H, Fang M, Chan C K. Size distributions and formation of dicarboxylic acids in atmospheric particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(13): 2099-2107.
- [5] 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.
- [6] Yao X H, Fang M, Chan C K. The size dependence of chloride depletion in fine and coarse sea-salt particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 743-751.
- [7] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 8-23.
- [8] Sloane C S, Watson J, Chow J, *et al.* Size-segregated fine particle measurements by chemical species and their impact on visibility impairment in Denver[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(5-6): 1013-1024.
- [9] Fu Q Y, Zhuang G S, Wang J, *et al.* Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(9): 2023-2036.
- [10] Li L, An J Y, Zhou M, *et al.* Source apportionment of fine particles and its chemical components over the Yangtze River Delta, China during a heavy haze pollution episode[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 415-429.
- [11] Tian M, Wang H B, Chen Y, *et al.* Characteristics of aerosol pollution during heavy haze events in Suzhou, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(11): 7357-7371.
- [12] Zhao M F, Huang Z S, Qiao T, *et al.* Chemical characterization, the transport pathways and potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai: seasonal variations[J]. *Atmospheric Research*, 2015, **158-159**: 66-78.
- [13] Chen P L, Wang T J, Hu X, *et al.* Chemical mass balance source apportionment of size-fractionated particulate matter in Nanjing, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(5): 1855-1867.
- [14] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in five sites in the Yangtze River Delta, China: size-fractionated, seasonal variations and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 370-379.
- [15] Hu M, Wu Z J, Slanina J, *et al.* Acidic gases, ammonia and water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ at a coastal site in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6310-6320.
- [16] 曹军骥. $\text{PM}_{2.5}$ 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 67-154.
- [17] Xu L L, Chen X Q, Chen J S, *et al.* Seasonal variations and chemical compositions of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in the urban area of Fuzhou, China[J]. *Atmospheric Research*, 2012, **104-105**: 264-272.
- [18] 张丹, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区不同粒径颗粒物水溶性无机组分特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(10): 1099-1106.
- [19] Zhang D, Zhai C Z, Zhou Z E, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in different size particles in Chongqing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(10): 1099-1106.
- [20] Kato N. Analysis of structure of energy consumption and dynamics of emission of atmospheric species related to the global environmental change (SO_x , NO_x , and CO_2) in Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(5): 757-785.
- [21] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [22] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al.* Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for PM_{10} aerosol in Hangzhou, China[J]. *Particuology*, 2009, **7**(3): 161-168.
- [23] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012~2013年间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [24] Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Correlation, seasonal and temporal variation of water-soluble ions of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing during 2012-2013[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [25] 汤蕾. 苏南三市大气颗粒物污染特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [26] Tang L. Characteristics of atmospheric particle pollution in three cities of southern Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science, 2013.
- [27] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1302-1311.
- [28] 吴耕晨. 广州大气气溶胶水溶性组分分布特征的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2015.

- Wu G C. Analysis of distribution characteristics for water soluble content in aerosol in Guangzhou [D]. Guangzhou: Jinan University, 2015.
- [26] 冯加良, 胡小玲, 管晶晶, 等. 上海市大气细颗粒物的酸度及其与组成的关系[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2010, **16**(5): 541-546.
- Feng J L, Hu X L, Guan J J, *et al.* Acidity of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai and its correlation with chemical composition of the particles[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2010, **16**(5): 541-546.
- [27] Kaneyasu N, Yoshikado H, Mizuno T, *et al.* Chemical forms and sources of extremely high nitrate and chloride in winter aerosol pollution in the Kanto Plain of Japan [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(11): 1745-1756.
- [28] Ohta S, Okita T. A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990, **24**(4): 815-822.
- [29] Larsen R K III, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [30] Zhao J P, Zhang F W, Xu Y, *et al.* Characterization of water-soluble inorganic ions in size-segregated aerosols in coastal city, Xiamen[J]. Atmospheric Research, 2011, **99**(3-4): 546-562.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行