

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析

杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟*, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽

(北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 2014 年 1~12 月, 使用 URG 在线及滤膜采集-实验室分析两种方法对北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 中的水溶性离子进行检测, 并对春、夏、秋、冬这 4 种不同季节下两种测量方法的差异性进行了比对研究. 全年测量结果显示, 在线 URG 所获离子总量高于滤膜采集所获离子总量, 其中两种方法所测 Cl⁻、NO₃⁻、Mg²⁺、Ca²⁺ 年均浓度差异不大, 而在线所测 SO₄²⁻、NH₄⁺、Na⁺、K⁺ 结果均明显高于滤膜测试结果. 4 种主要的水溶性离子中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 Cl⁻ 的相关性较好, NH₄⁺ 相关性略差; 不同季节两种测量方法所获结果也略有不同, NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 在秋、冬季差异不显著, 而 NH₄⁺ 仅在冬季拟合性较好.

关键词: PM_{2.5}; 水溶性离子; 在线; 手工采样; 比对

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3730-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.10.008

Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM_{2.5}

YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, ZHANG Da-wei*, DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, FU Jia-ming, JING Kuan

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: Concentrations of water-soluble ions were measured in Beijing during 2014 for comparison of URG online monitoring systems and filter-based manual methods. The differences of four main ions components in spring, summer, autumn and winter were compared. The total concentrations of eight ions measured by URG online were higher than those of filter-based manual method. There was no significant differences among the annual concentrations of Cl⁻, NO₃⁻, Mg²⁺ and Ca²⁺ obtained by the two methods, while the concentrations of SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺ from online were higher than those from filter. NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ had good correlations in autumn and winter, and NH₄⁺ only had better fitting performance in winter.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble ions; on-line monitoring; manual sampling; comparison

大气颗粒物包括多种组分, 如地壳物质、有机物、微量元素、二次离子等, 其中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ (SNA) 主要由气态前体物 SO₂、NO_x、NH₃ 等经过大气化学反应而形成的二次颗粒物, 受人为因素影响较大, 具有较高的区域贡献, 对于细颗粒物的急速累积产生重要影响^[1~4], 并对能见度、大气光化学反应以及地面辐射产生直接或间接的影响^[5~8]. 作为大气颗粒物的重要组成部分, 可溶性离子物种的浓度水平及形成机制一直是国内外气溶胶领域关注的热点^[9~11]. 传统的水溶性离子检测大都采用滤膜采集-实验室手工分析的方法, 该方法时间周期较长, 并要求样品采集装备能够有效去除 SO₂ 和 HNO₃ 干扰, 并做到及时低温保存和分析, 以确保样品分析的准确性^[12~15]. 近些年随着在线监测设备的发展, 已有部分研究学者将水溶性离子在线监测仪应用于 PM_{2.5} 组分分析及来源解析工作^[16~21]. 在线监测设

备具有时空分辨率高、样品分析速度快等优点, 对于重污染过程研究及快速来源解析具有重要意义. 对于在线监测仪器的适用性, 虽然国内外部分学者针对其与滤膜采集-实验室分析之间的可比性进行过一系列的研究^[22~25], 但比对时间相对较短, 且国外水溶性离子浓度水平普遍偏低, 无法评估其在国内的适用性.

本研究于 2014 年间在北京市城区车公庄监测点位, 利用 URG9000 在线观测 PM_{2.5} 中水溶性无机离子, 并与滤膜采集-实验室手工分析所获数据进行对比, 评估了一整年 4 个季度、不同污染水平下在线 URG 与滤膜采集-实验室手工分析(离线)之间数据的可比性, 以期为北京市精细及在线来源解析的

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-05-09

作者简介: 杨懂艳(1979~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向大气气溶胶、湿沉降等, E-mail: ydongyan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dwzhang@gmail.com

应用提供技术依据。

1 材料与方法

本实验观测点位于北京城区海淀区西二环与西三环之间,监测中心(39°55′51″N,116°19′9″E)6 层楼顶上,离车公庄西路约 50 m;URG9000 在线监测仪与 PM_{2.5} 膜采样仪距离约 5 m。采样时间为 2014 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,其中 URG9000 每 1 h 获取一组数据,可实时分析 9 种阴、阳离子浓度水平;为有效评估每个自然日水溶性离子的浓度水平并避免离子浓度过载,离线分析每日设置 00:00 ~ 12:00 和 12:00 ~ 24:00 两个采样时段采集 PM_{2.5} 样品。

使用 Thermo Partisol 2025i 单通道连续空气采样器采集 PM_{2.5} 细颗粒物,采样流量为 16.7 L·min⁻¹;采样膜为 Whatman Φ 47 mm 特氟龙材质滤膜;水溶性离子分析方法参照文献[9]。URG9000 工作原理为:环境空气以 3 L·min⁻¹ 流速经过一根 3 m 长进样管,并通过一个 PM_{2.5} 切割头,环境空气中小于 2.5 μm 的颗粒经切割器分离后进入液相扩散溶蚀器,SO₂ 和 HNO₃ 气体经溶蚀器后被臭氧吸收后并入气体吸收装置,PM_{2.5} 颗粒经溶蚀器后进入气溶胶液化室,液化室中的蒸汽发生器以 0.2 mL·min⁻¹ 的速率产生水蒸气并与颗粒物混合,并将气溶胶颗粒溶解成液滴,经过分离器后混合,并分流成两路进入阴、阳离子检测系统进行检测。为确保数据的可比性,本研究期间严格按照实验室质量控制要求定期对在线 URG 和 Thermo2025i 进行流量校准,并采用了统一批号的标准溶液对在线 URG 和实验室所用离子色谱仪进行校准。通过比较

在线 URG 与离线所获数据之间的线性拟合程度判断两组数据之间的可比性。

2 结果与讨论

2.1 水溶性离子浓度特征

观测期间,在线 URG 共获得 335 d 有效样品,离线分析共获得 345 d 有效样品;两种方法所获得的水溶性离子总量的变化趋势如图 1 所示。从中可以看出,在线 URG 所获离子总量的变化趋势与离线分析所获离子总量的变化趋势相同,均经历相同的污染积累周期,呈锯齿型周期变化规律;且显现出春、冬季 PM_{2.5} 中水溶性离子累积浓度偏高,夏、秋季离子浓度水平偏低。除春、夏季出现个别累积过程离线分析所获离子总量高于在线 URG 外,全年大部分情况下,在线 URG 所获离子总量均普遍高于离线所获离子总量。

两种方法所测 8 种水溶性离子浓度及季节变化特征(F⁻ 浓度均在检出限附近,在此不做统计)统计如表 1 所示。其中两种方法所测 Cl⁻、NO₃⁻、Mg²⁺、Ca²⁺ 年均浓度差异不大,而在线所测 SO₄²⁻、NH₄⁺、Na⁺、K⁺ 结果均明显高于滤膜测试结果。主要的 3 种水溶性离子中 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 Cl⁻ 的两种测量方法相关性较好,线性相关系数 R² 分别达到 0.70、0.71 和 0.91;两种方法所测 NH₄⁺ 相关性略差,R² 为 0.50。其它 4 种阳离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺) 由于浓度相对较低,两种测量方法的相关系数均小于 0.2,以下不再详细论述。本研究期间两种测量方法所获主要离子的线性相关系数及一元线性回归方程统计见表 2。

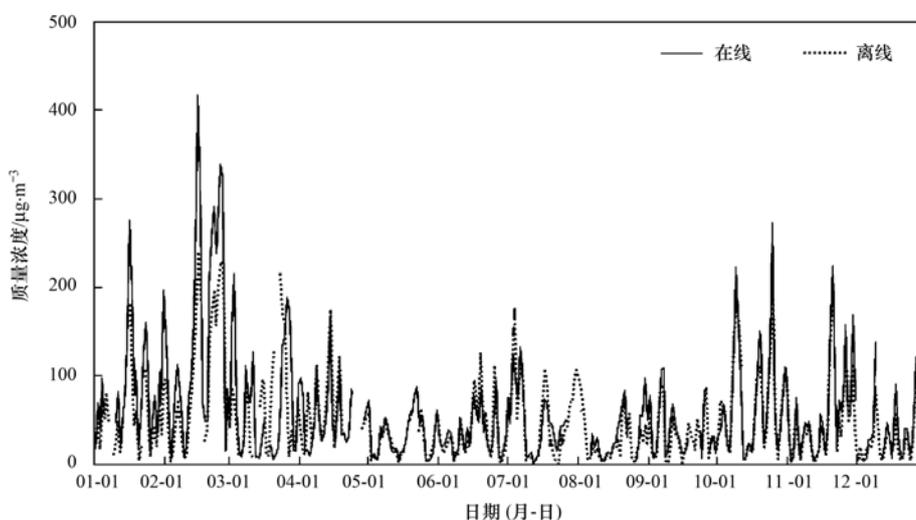


图 1 观测期间水溶性离子总量浓度变化趋势

Fig. 1 Total mass concentration of water-soluble ions during the observation period

表 1 滤膜采集实验室分析及在线所测水溶性离子日均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 1 Diurnal average mass concentrations of water-soluble ions obtained by the two methods/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	时间	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
URG	年	2.92 ± 4.08	18.1 ± 22.5	19.6 ± 20.5	15.9 ± 13.9	1.43 ± 2.62	2.62 ± 8.75	0.28 ± 1.30	0.48 ± 0.71
	春	2.01 ± 2.63	16.5 ± 14.8	16.7 ± 14.8	15.1 ± 12.0	0.19 ± 0.41	1.35 ± 3.53	0.07 ± 0.19	0.40 ± 0.72
	夏	0.37 ± 0.63	9.36 ± 8.51	14.7 ± 12.3	14.4 ± 10.6	0.48 ± 0.44	0.53 ± 1.00	0.07 ± 0.04	0.07 ± 0.04
	秋	3.62 ± 4.61	20.2 ± 22.2	17.5 ± 16.8	17.8 ± 16.1	0.85 ± 0.67	0.59 ± 1.04	0.24 ± 0.10	0.62 ± 0.52
	冬	5.75 ± 4.81	26.4 ± 32.2	29.8 ± 30.4	16.2 ± 16.2	4.00 ± 4.09	8.28 ± 16.2	0.78 ± 2.61	0.85 ± 0.96
Filter	年	2.63 ± 3.48	18.4 ± 22.0	15.7 ± 15.5	9.52 ± 10.1	0.37 ± 0.36	1.18 ± 2.06	0.27 ± 1.35	0.49 ± 0.58
	春	2.21 ± 2.19	20.7 ± 21.9	13.6 ± 11.5	10.1 ± 9.92	0.24 ± 0.15	0.87 ± 1.75	0.34 ± 1.09	0.72 ± 0.94
	夏	0.38 ± 0.51	10.5 ± 13.8	18.6 ± 16.1	8.01 ± 8.16	0.26 ± 0.33	0.68 ± 0.64	0.06 ± 0.07	0.27 ± 0.38
	秋	2.83 ± 3.76	22.4 ± 25.4	13.3 ± 13.3	7.73 ± 7.78	0.47 ± 0.43	1.44 ± 2.33	0.22 ± 1.28	0.51 ± 0.34
	冬	5.24 ± 4.18	20.2 ± 23.7	17.2 ± 19.3	12.5 ± 13.4	0.51 ± 0.37	1.73 ± 2.77	0.27 ± 1.35	0.49 ± 0.42

表 2 滤膜采集-实验室分析及在线所测 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子相关性比较

Table 2 Summary of inter-comparison results of URG with filter-based method for SNA

	在线设备	地点	时间(年-月)	浓度水平 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相关系数	方程	文献
SO_4^{2-}	URG9000B	上海	2005-05 ~ 2005-06	1.1 ~ 140	0.67	$y = 1.28x + 2.71$	[23]
	URG9000B	北京	2005-06 ~ 2005-08	0.6 ~ 103	0.97	$y = 0.58x + 2.75$	[23]
	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	2.63 ± 1.38	0.99	$y = 0.97x + 0.29$	[22]
	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	2.57 ± 1.38	0.99	$y = 0.97x + 0.21$	[22]
	MARGA	荷兰基尔德	2007-01 ~ 2008-01	3.1 ± 2.6	0.57	—	[21]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-02	3.18 ± 1.23	0.98	$y = 0.85x + 0.24$	[20]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-05	1.64 ± 1.08	0.98	$y = 0.85x + 0.24$	[20]
	URG9000	北京	2014-01 ~ 2014-12	0.76 ~ 120	0.70	$y = 1.13x + 1.98$	本研究
NO_3^-	URG9000B	上海	2005-05 ~ 2005-06	0.2 ~ 69.1	0.96	$y = 0.83x$	[23]
	URG9000B	北京	2005-06 ~ 2005-08	0.1 ~ 35.7	0.88	$y = 0.45x + 1.54$	[23]
	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	0.53 ± 0.38	0.80	$y = 2.36x - 0.23$	[22]
	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	0.41 ± 0.28	0.81	$y = 1.73x - 0.14$	[22]
	MARGA	荷兰基尔德	2007-01 ~ 2008-01	5.9 ± 5.2	0.69	—	[21]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-02	2.27 ± 1.76	0.93	$y = 0.90x + 0.46$	[20]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-05	1.40 ± 2.04	0.93	$y = 0.90x + 0.46$	[20]
	URG9000	北京	2014-01 ~ 2014-12	0.05 ~ 126	0.71	$y = 0.85x + 2.21$	本研究
NH_4^+	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	0.16	0.97	$y = 1.02x + 0.04$	[22]
	MARGA	美国北卡罗来纳州	2010-09 ~ 2010-10	0.23	0.96	$y = 0.97x + 0.09$	[22]
	MARGA	荷兰基尔德	2007-01 ~ 2008-01	2.4 ± 2.4	0.71	—	[21]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-02	0.74 ± 0.65	0.83	$y = 0.91x - 0.30$	[20]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-05	0.46 ± 0.80	0.83	$y = 0.91x - 0.30$	[20]
	URG9000	北京	2014-01 ~ 2014-12	0.05 ~ 73.9	0.50	$y = 0.96x - + 6.64$	本研究
Cl^-	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-02	0.10 ± 0.25	0.83	$y = 0.71x + 0.03$	[20]
	MARGA	芬兰赫尔辛基	2010-05	0.04 ± 0.14	0.83	$y = 0.71x + 0.03$	[20]
	URG9000	北京	2014-01 ~ 2014-12	0.05 ~ 23.0	0.91	$y = 1.09x - 0.07$	本研究

2.2 SO_4^{2-}

图 2 为在线与离线两种测量方法所测 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的日浓度变化趋势. 从中可以看出, 冬季及春季所属采暖季 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 浓度较高, 且在线 SO_4^{2-} 浓度水平普遍高于离线 SO_4^{2-} 浓度; 夏季离线 SO_4^{2-} 浓度则会略高于在线所得结果. 比较图 3 两种方法所获 SO_4^{2-} 浓度散点图可以看出, 两种方法的总线性相关系数为 0.70, 略低于以往研究结果, 其拟合线性函数斜率为 1.13, 略低于 Wu 等^[23]

在上海的研究结果, 但高于其它研究结果^[20-22]. 从其季节分布来看, 冬、秋、夏季 SO_4^{2-} 拟合性较好, 春季拟合性较差; 秋、冬季在线 URG 所测结果高于离线分析结果, 夏季离线测量结果偏低, 春季 SO_4^{2-} 浓度分散性较大. 造成本研究测量结果与以往研究不同的原因有以下几个方面: 一是由于本研究浓度范围跨越较大, 且北京不同季节污染类型及气象因素差异显著^[24,25], 尤其是 1 月浓度范围差异较大; 另一方面, 研究期间春、冬季节 SO_2 浓度较高, 分别

为 $(8.52 \pm 4.34) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(20.9 \pm 13.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 虽然在线检测设备配备有溶蚀器以达到去除 SO₂ 干扰的目的, 但溶蚀器无法去除掉所有的 SO₂ 气体, 过载的 SO₂ 气体会溶解到水中并被氧化, 导致在线检测数据偏高^[23,26,27]; 此外, 冬季及春季初期采暖期间, PM_{2.5} 浓度普遍偏高, 即使本次采用了分时段采样, 也有可能由于滤膜过载的情形, 导致离线结果偏低. 而夏季 SO₂ 浓度相对较低, 仅为 $(2.31 \pm 1.65) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对在线结果影响不大, 而 SO₄²⁻ 组分相对比较稳定, 离线设备对颗粒物的捕集率相对较高, 这可能是夏季离线测量结果偏高的主要原因.

2.3 NO₃⁻

从表 1 可以看出, 与 SO₄²⁻ 测量结果不同, NO₃⁻ 在夏、秋两季测量结果差异性较小, 春、冬季差异较大; 全年在线 NO₃⁻ 平均值为 $(18.1 \pm 22.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 Schaap 等^[21] 在荷兰一整年所获研究结果的 3 倍, 在线与离线所获 NO₃⁻ 的线性相关系数为 0.71, 略高于与 Schaap 等^[21] 的研究结果, 但略低于以往短期研究结果 $(0.80 \sim 0.96)$ ^[20,22,23]; 比较在线系统所测 NO₃⁻ 结果与离线所测结果的拟合线性函数斜率发现, 不同地区其函数斜率差异较大, 变化范围在 0.45 ~ 2.36 之间^[20~23]. 两者所检测的 NO₃⁻ 浓度变化趋势如图 2 所示, 虽然两种方法线性相关良好, 但由于本次研究跨越了春、夏、秋、冬四季, 在不同的月份, 两者检测结果差异不尽相同. 其中 1~3 月间, URG 在线所测 NO₃⁻ 结果略高于离线检测分析结果; 4~11 月间两者数据差异不大; 尤其是 APEC 期间, 两者拟合性处于全年最好水平. Rumsey 等^[22] 通过对 MARGA 的研究发现, 由于在线及离线两者在采集 PM_{2.5} 颗粒物时, 切割头对颗粒物捕集的捕集效率直接影响两者的测量差异. 粗颗粒中钠和镁以及降尘中的无机组分均可与环境空气中的 HNO₃ 发生反应导致在线检测方法所测 NO₃⁻ 浓度水平偏高. 比较图 4 中 $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 与阳离子/阴离子当量浓度的比值发现, 12 月、1 月及 2 月间, $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 当量浓度比值显著高于阳离子/阴离子当量浓度比值, 来自粗颗粒中 Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺ 等无机元素对颗粒物的贡献增大, 也是导致此期间在线 NO₃⁻ 浓度偏高及除 NH₄⁺ 外其它阳离子浓度偏高的主要原因^[27~29]. 此外, 值得关注的是, 虽然本研究所用单通道 Thermo2025i 颗粒物采样器无法捕获到因采样环境温度偏高而造成的硝酸铵损失, 但 5~8 月间滤

膜测试结果仍出现偏高的现象, 可见 HNO₃ 与颗粒物发生反应对测量结果产生正偏差仍无法忽视^[28,29].

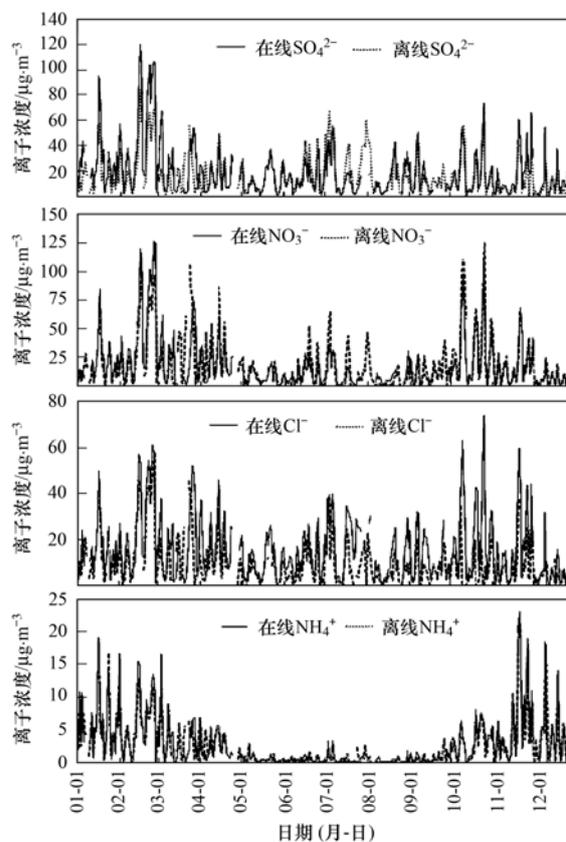
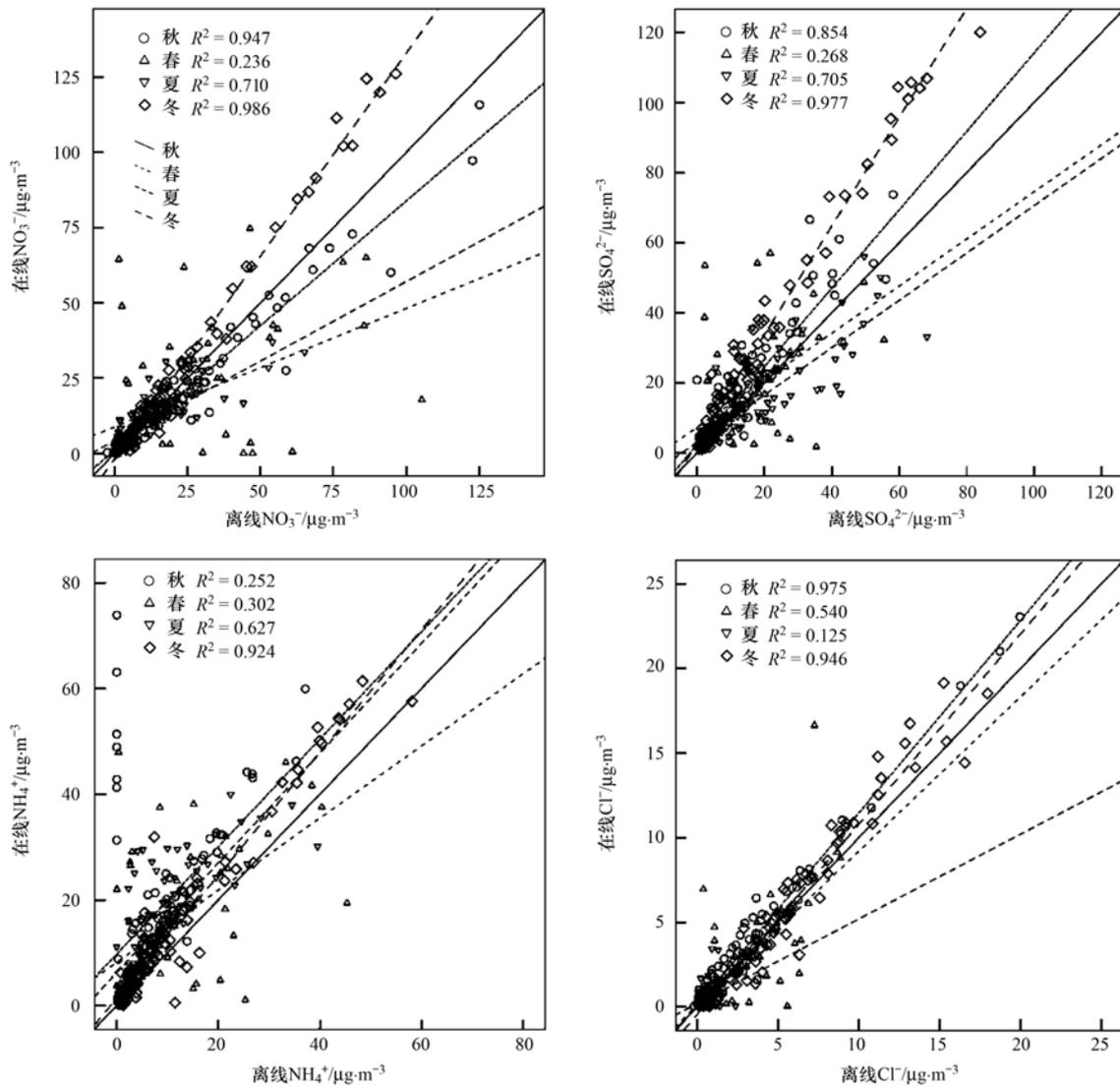
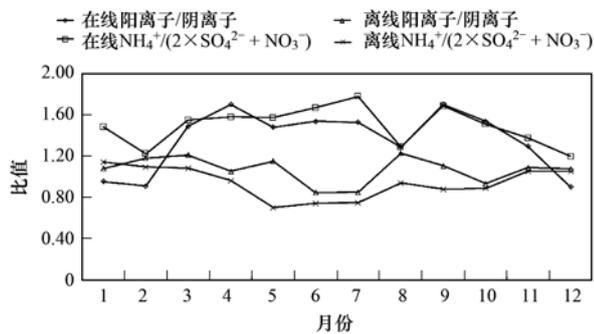


图 2 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻ 日均浓度变化趋势

Fig. 2 Daily trends of SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Cl⁻ in PM_{2.5}

2.4 NH₄⁺

与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 研究结果不同, 研究期间, URG 在线与离线所测的 NH₄⁺ 两者线性相关系数仅为 0.50, 相关性较差, 且夏季和冬季两者拟合性要好于春、秋季节; 其拟合线性函数斜率为 0.96, 与以往研究结果相差不大^[20~22]. 研究期间, 两者所检测 NH₄⁺ 浓度变化趋势如图 2 所示, 整体来看, URG 在线所测 NH₄⁺ 略高于离线分析结果, 即使 APEC 期间 NH₄⁺ 质量浓度相对较低时, 两者差异也非常显著; 且当颗粒物中水溶性离子累积到最高点时, 两者差异更明显. Makkonen 等^[20] 和 Rumsey 等^[22] 在研究使用 MARGA 在线测量颗粒物中的 NH₄⁺ 与离线对照分析时同样指出, 与 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 相比, 在线与离线 NH₄⁺ 的偏差相对较为复杂; 一方面由于离线滤膜样品采集及运输不当造成 NH₄NO₃ 的挥发损失, 导致离线 NH₄⁺ 相对较低; 另一方面, 比较图 4 中在线与离线 $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 比值及阳/

图3 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 相关性比较Fig. 3 Scatter plots of SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- in different seasons图4 在线与离线 $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 与阳离子/阴离子比值月变化Fig. 4 Monthly changes of online and offline $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ and cation/anion

阴离子比值发现, 离线阳/阴离子比值略高于离线 $\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 比值; 而除 4 月外, 在线

$\text{NH}_4^+ / (2 \times \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 比值均要略高于阳/阴离子比值, 表明在线 URG 对 NH_4^+ 捕集率相对较高. NH_3 活性较强, 本地排放或远距离传输的 NH_3 对于细颗粒物中 NH_4NO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的形成起主要作用, 北京本地 NH_3 浓度仍处于较高水平^[27], 而溶蚀器对 NH_3 的去除效率相对较低可能是在线 NH_4^+ 浓度高于离线测量结果的主要原因.

2.5 Cl^-

Cl^- 浓度变化趋势显现出明显的采暖季特征, 11 月~次年 3 月底浓度显著偏高, 春、夏季浓度处于较低水平. 全年 Cl^- 拟合线性函数斜率为 1.09, 高于 Mallonen 等^[20] 使用 MAGAR 在线系统测量结果, 但相关系数相差不大. 不同季节两种测量方法所获 Cl^- 浓度差异略较小, 其中秋、

冬季两种测量方法相关性较好,且在线测量结果偏高;春季两种测量方法拟合性略差,而夏季两种测量方法的线性相关系数仅为 0.125. 究其原因,Cl⁻相对比较稳定,且主要以颗粒物形势存在,气态干扰相对较低,所以两种测量方法总体差异性不大;而夏季 Cl⁻相对较低,平均浓度仅为(0.37 ± 0.63) μg·m⁻³,而在线 URG 所测 Cl⁻检出限为 0.10 μg·m⁻³,这也是导致两种方法测量结果产生较大偏差的主要原因.

3 结论

(1)在线 URG 所测 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 Cl⁻ 与滤膜采集-实验室分析所获结果具有良好的可比性,NH₄⁺ 相关性略差;季节分布来看,对于 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 Cl⁻,秋、冬季两种测量方法的相关性要好于春、夏季;且秋、冬在线 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 测量结果要高于滤膜采集结果;冬季在线 NO₃⁻ 结果高于滤膜结果;在线 NH₄⁺ 测量结果普遍高于离线采集结果,且仅在冬季具有良好的可比性.

(2)本研究各项离子浓度跨度范围较大,且当颗粒物在空气中累积造成水溶性离子浓度逐渐升高时,在线监测系统所获离子浓度结果普遍偏高;水溶性离子浓度偏高、挥发性组分损失以及滤膜采集本身的误差、粗粒子干扰等因素是导致两种测量方法结果产生差异的主要原因.

参考文献:

- [1] Ho K F, Ho S S H, Huang R J, *et al.* Chemical composition and bioreactivity of PM_{2.5} during 2013 haze events in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **126**: 162-170.
- [2] Calvo A I, Alves C, Castro A, *et al.* Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **120-121**: 1-28.
- [3] 戴永立,陶俊,林泽健,等. 2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2925-2932.
- [4] Lv B L, Zhang B, Bai Y Q. A systematic analysis of PM_{2.5} in Beijing and its sources from 2000 to 2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 98-108.
- [5] Wang H B, Tian M, Li X H, *et al.* Chemical composition and light extinction contribution of PM_{2.5} in urban Beijing for a 1-year period[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(6): 2200-2211.
- [6] Wu Y F, Zhang R J, Tian P, *et al.* Effect of ambient humidity on the light absorption amplification of black carbon in Beijing during January 2013[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 217-223.
- [7] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: situation, sources and control policies[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 93-101.
- [8] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [9] 杨懂艳,刘保献,张大伟,等. 2012~2013 年间北京市 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.
- [10] 杨懂艳,刘保献,张大伟,等. 2014 年间 APEC 前后北京城区 PM_{2.5}中水溶性离子特征分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4325-4330.
- [11] Zhang X Y, Wang J Z, Wang Y Q, *et al.* Changes in chemical components of aerosol particles in different haze regions in China from 2006 to 2013 and contribution of meteorological factors[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(22): 12935-12952.
- [12] 程萌田,潘月鹏,王辉,等. 大气 PM_{2.5}中水溶性离子在线观测技术的应用研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2943-2949.
- [13] 王强,钟琪,迟颖,等. 环境空气 PM_{2.5}连续监测系统手工采样比对测试[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1538-1543.
- [14] 袁超,王韬,高晓梅,等. 大气 PM_{2.5}在线监测仪对 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 的测定评价[J]. *环境化学*, 2012, **31**(11): 1808-1815.
- [15] 王晓彦,杜丽,李健军,等. PM_{2.5}手工监测技术要点探讨[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(4): 146-150.
- [16] Xue J, Lau A K H, Yu J Z. A study of acidity on PM_{2.5} in Hong Kong using online ionic chemical composition measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(39): 7081-7088.
- [17] Gao J, Peng X, Chen G, *et al.* Insights into the chemical characterization and sources of PM_{2.5} in Beijing at a 1-h time resolution[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **542**(Part A): 162-171.
- [18] Gao X M, Yang L X, Cheng S H, *et al.* Semi-continuous measurement of water-soluble ions in PM_{2.5} in Jinan, China: temporal variations and source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(33): 6048-6056.
- [19] Kim J S, Bais A L, Kang S K, *et al.* A semi-continuous measurement of gaseous ammonia and particulate ammonium concentrations in PM_{2.5} in the ambient atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2011, **68**(3): 251-263.
- [20] Makkonen U, Virkkula A, Mäntykenttä J, *et al.* Semi-continuous gas and inorganic aerosol measurements at a Finnish urban site: comparisons with filters, nitrogen in aerosol and gas phases, and aerosol acidity [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(12): 5617-5631.
- [21] Schaap M, Otjes R P, Weijers E P. Illustrating the benefit of using hourly monitoring data on secondary inorganic aerosol and its precursors for model evaluation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(21): 11041-11053.
- [22] Rumsey I C, Cowen K A, Walker J T, *et al.* An assessment of the performance of the Monitor for aerosols and gases in ambient air (MAGAR): a semi-continuous method for soluble compounds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5639-5658.
- [23] Wu W S, Wang T. On the performance of a semi-continuous PM_{2.5} sulphate and nitrate instrument under high loadings of particulate and sulphur dioxide [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(26): 5442-5451.

- [24] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013 ~ 2014 年北京大气重污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 27-35.
- [25] 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2014 年 10 月上旬北京市大气重污染分析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(6): 1654-1663.
- [26] Drewnick F, Schwab J J, Högrefe O, *et al.* Intercomparison and evaluation of four semi-continuous PM_{2.5} sulfate instruments[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(24): 3335-3350.
- [27] Nie W, Wang T, Gao X M, *et al.* Comparison among filter-based, impactor-based and continuous techniques for measuring atmospheric fine sulfate and nitrate [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(35): 4396-4403.
- [28] Hou S Q, Tong S R, Ge M F, *et al.* Comparison of atmospheric nitrous acid during severe haze and clean periods in Beijing China [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**(Part B): 199-206.
- [29] Griffith S M, Huang X H H, Louie P K K, *et al.* Characterizing the thermodynamic and chemical composition factors controlling PM_{2.5} nitrate: insights gained from two years of online measurements in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 864-875.
- [30] Meng Z Y, Lin W L, Jiang X M, *et al.* Characteristics of atmospheric ammonia over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(12): 6139-6151.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2015 年 10 月 21 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 14 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

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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