

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征

李友平¹, 周洪¹, 张智胜², 王启元³, 罗磊⁴

(1. 西华师范大学化学化工学院, 化学合成与污染控制四川省重点实验室, 南充 637009; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 3. 西安交通大学环境科学与工程系, 西安 710049; 4. 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071)

摘要: 2009 年 4 月 ~ 2010 年 1 月在成都市城区采集 131 个 PM_{2.5} 样品, 应用离子色谱法对 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子 (NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻) 含量进行分析, 并探讨其污染特征. 结果表明, PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的平均浓度值分别为 (10.4 ± 8.6)、(19.7 ± 14.6) 和 (32.8 ± 21.8) μg·m⁻³, 分别占 PM_{2.5} 质量的 (5.5 ± 2.8)%、(11.1 ± 3.5)% 和 (19.3 ± 6.4)%, 三者总和占 PM_{2.5} 质量浓度的 (35.9 ± 12.7)%. PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的季节变化特征明显, 夏、冬两季 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的浓度均为 SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺, 其总和占 PM_{2.5} 质量浓度的百分比为冬 (44.3%) > 夏 (39.4%). 相关分析结果显示, NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 在成都主要以 NH₄HSO₄、(NH₄)₂SO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在; NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值表明, 成都市大气中硫和氮的主要来源以固定源为主; 硫酸化速率和氮氧化速率的年均值分别为: 0.33 ± 0.12 和 0.19 ± 0.09, 表明成都市 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 主要经二次转化形成.

关键词: PM_{2.5}; 二次水溶性无机离子; 成都市; 污染特征; 来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4439-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.004

Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM_{2.5} in Urban Chengdu, China

LI You-ping¹, ZHOU Hong¹, ZHANG Zhi-sheng², WANG Qi-yuan³, LUO Lei⁴

(1. Chemical Synthesis and Pollution Control Key Laboratory of Sichuan Province, College of Chemistry and Chemical Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Chengdu Institute of Plateau Meteorology, China Meteorology Administration, Chengdu 610071, China)

Abstract: A total of 131 samples of PM_{2.5} were collected at urban area of Chengdu from April, 2009 to January, 2010. The secondary water-soluble inorganic ions (NH₄⁺, NO₃⁻ and SO₄²⁻) in PM_{2.5} were determined to study the pollution characteristics by Ion Chromatography method. The results showed the NH₄⁺, NO₃⁻ and SO₄²⁻ concentrations were (10.4 ± 8.6), (19.7 ± 14.6) and (32.8 ± 21.8) μg·m⁻³, accounting for (5.5 ± 2.8)%, (11.1 ± 3.5)% and (19.3 ± 6.4)% of PM_{2.5}, respectively, and the sum of these three ions accounted for (35.9 ± 12.7)%. Meanwhile, the seasonal characteristics of secondary inorganic ions were obvious. The seasonal concentrations order of secondary inorganic components was SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ in summer and winter, and the proportion of secondary inorganic ions of PM_{2.5} was 39.4% in summer and 44.3% in winter. The results of Correlation Analysis showed that most of NH₄⁺, NO₃⁻ and SO₄²⁻ existed as NH₄HSO₄, (NH₄)₂SO₄ and NH₄NO₃ in Chengdu. And the average ratio of NO₃⁻/SO₄²⁻ indicated that the main source of sulfur and nitrogen in the atmosphere was given priority to a fixed source. In addition, the sulfate oxidizing rate (SOR) and nitrate oxidizing rate (NOR) were 0.33 ± 0.12 and 0.19 ± 0.09, respectively. It showed that SO₄²⁻ and NO₃⁻ in PM_{2.5} were due to the secondary transformation.

Key words: PM_{2.5}; secondary water-soluble inorganic ions; Chengdu City; pollution characteristics; source

由于工业化和城市化快速发展, 大气颗粒物污染已成为我国城市空气质量的主要影响因素, 尤其细颗粒物 (空气动力学粒径 ≤ 2.5 μm, 简称 PM_{2.5}) 是最主要的空气污染物之一, 给人类健康、能见度和气候变化等带来巨大的影响^[1-3]. 其中, 水溶性无机离子是大气细颗粒物的重要组成部分, 而二次水溶性无机离子 (SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺) 又是水溶性离子的主要成分^[4-6]. 由于较强的吸湿作用, 可直接影

响降水的酸度^[7-10]; 同时, 对消光系数和大气能见度影响较大^[11], 是形成大气区域复合型污染的重要组成部分. 目前, 在国内外范围内开展了一系列 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征的研究^[5, 7, 12, 13], 但

收稿日期: 2014-05-06; 修订日期: 2014-06-30

基金项目: 四川省教育厅项目 (13ZB0011); 南充市科技局项目 (13A0071)

作者简介: 李友平 (1979 ~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: lyp920@163.com

是这些研究主要集中在北京、上海、广州和天津等地区^[5, 7, 9, 13]. 而位于成渝经济区、人口密集且空气污染形势严峻的成都市却很少研究^[14, 15]. 为了准确评估二次水溶性无机离子的影响, 急需对该地区PM_{2.5}中二次无机离子污染特征进行分析研究.

成都位于四川省西部, 是我国西南地区最大的城市之一, 也是成渝经济区的重要城市之一, 具有地形封闭, 较高的静小风频率等特点, 使得该地区常年大气污染比较严重^[16, 17]. 本研究通过 2009 年 4 月~2010 年 1 月在成都城区进行观测实验, 获取 PM_{2.5} 二次水溶性无机离子(NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻) 浓度数据, 分析其质量浓度水平和季节变化特征, 应用相关分析探讨影响 PM_{2.5} 二次水溶性无机离子的因素以及存在形式, 以期为当地政府制定 PM_{2.5} 污染防治政策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 颗粒物采样

本研究采样地点(图 1)设在中国气象局成都高原气象研究所的办公楼楼顶, 距离地面约 15 m, 5 km 范围内无工业污染源, 是较为典型的城区大气观测站点. 利用额定流量为 5.0 L·min⁻¹ 的小流量颗粒物采样器(Air metrics, USA)于 2009 年 4 月 19 日~2010 年 1 月 31 日共采集 131 个 PM_{2.5} 样品, 其中, 春季(2009-04-29~2009-05-17)29 个; 夏季(2009-07-06~2009-08-06)31 个; 秋季(2009-10-26~2009-11-26)31 个; 冬季(2010-01-01~2010-01-31)30 个; 空白样品 10 个. 使用 47 mm 的 Teflon 滤膜(What man, UK)进行样品采集, 每 24 h 更换一次滤膜. 滤膜在采样前后于恒温恒湿(温度 22℃ ± 1℃, 相对湿度 40% ± 5%)平衡 24 h 后, 再用精度为 1 μg 的电子天平(Sartorius, Germany)进行称量以确定 PM_{2.5} 的质量浓度. 所有样品均放入冷冻柜(-18℃)中保存至实验分析.

1.2 水溶性无机离子分析

剪取四分之一的滤膜加入 10 mL 去离子水(R > 18.2 MΩ), 超声萃取 1 h, 采用 0.45 μm 针孔过滤

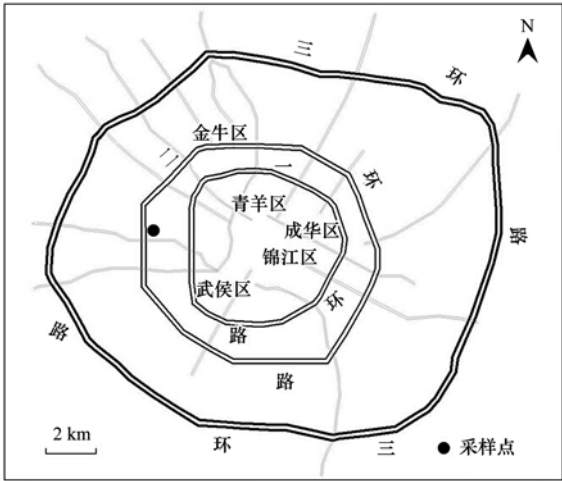


图 1 成都市 PM_{2.5} 采样点

Fig. 1 Location of PM_{2.5} sampling site in Chengdu City

器过滤, 用中国科学院地球环境研究所气溶胶实验室的 Dionex-600 型离子色谱仪对二次水溶性无机离子进行分析测定. 质量控制采用美国沙漠所质量控制标准, 每测定 10 个样品, 测定 1 个标准样, 样品溶液质量浓度范围在 0.030~0.100 g·L⁻¹, 0.100~0.150 g·L⁻¹, >0.150 g·L⁻¹ 时, 允许的标准偏差分别为 ±30%, <20% 和 ±10%. 用同样的方法对空白样品进行测定. NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的检出限分别为 0.004 1, 0.103 7 和 0.109 4 μg·m⁻³. 具体分析方法详见参考文献[18].

2 结果与讨论

2.1 二次水溶性无机离子质量浓度特征

2.1.1 二次水溶性无机离子浓度水平

观测期间, 成都市城区 PM_{2.5} 的日均质量浓度在 (49.2~425.0) μg·m⁻³ (表 1), 年平均浓度值为 (165.1 ± 84.7) μg·m⁻³, 按照《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) PM_{2.5} 质量浓度二级标准(日均值 75 μg·m⁻³), 其超标率达到了 90.9%. PM_{2.5} 中二次水溶性离子 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的平均浓度值分别为 (10.4 ± 8.6)、(19.7 ± 14.6) 和 (32.8 ± 21.8) μg·m⁻³, 分别占 PM_{2.5} 含量的 (5.5 ± 2.8)%、(11.1

表 1 PM_{2.5} 及其二次水溶性无机离子浓度和比重¹⁾

Table 1 Concentrations and percentage of PM_{2.5} and secondary water-soluble inorganic ions

项目	PM _{2.5} 及其二次离子浓度/μg·m ⁻³				二次离子比重/%		
	PM _{2.5}	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
最小值	49.2	—	3.7	4.5	—	1.2	3.4
最大值	425.0	32.2	67.5	99.9	9.7	19.2	33.7
平均值	165.1	10.4	19.7	32.8	5.5	11.1	19.3
标准差	84.7	8.6	14.6	21.8	2.8	3.5	6.4

1) “—”表示离子浓度值低于检出限

$\pm 3.5\%$ 和 $(19.3 \pm 6.4)\%$, 三者总和占 PM_{2.5} 质量浓度的 $(35.9 \pm 12.7)\%$, 超过了 PM_{2.5} 质量浓度的 1/3, 说明二次水溶性无机离子是成都市城区 PM_{2.5} 的主要组分。

与国内外城市相比(表 2), 成都市城区 NH₄⁺ 浓度值明显高于国内外城市, 是其浓度值约 2 倍; 而 NO₃⁻ 浓度值除低于米兰以外, 明显高于其它国内外城市; SO₄²⁻ 浓度值略高于重庆, 远高于其它城市。说明 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 这 3 种离子对成都市城区大气 PM_{2.5} 污染贡献较大。

表 2 不同城市大气 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Concentrations of secondary water-soluble inorganic ions in PM _{2.5} / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				
城市	观测时间	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
成都(本研究)	2009-04~2010-01	10.4	19.7	32.8
首尔 ^[19]	2003-03~2005-02	5.5	7.1	7.5
米兰 ^[20]	2002-08~2003-11	5.2	20.2	5.8
荷兰 ^[21]	2007-08~2008-08	2.4	5.9	3.1
台湾 ^[22]	2003-04~2009-04	0.8	0.2	2.7
香港 ^[23]	2010-10~2010-12	4.9	2.9	14.3
北京 ^[24]	2001~2003	8.7	11.5	17.1
上海 ^[13]	2003-12~2005-01	3.8	6.2	10.4
广州 ^[25]	2007-12~2008-01	3.4	4.7	8.3
天津 ^[26]	2008 年 1、4、7、10 月	3.6	9.3	8.6
重庆 ^[27]	2010-03~2011-07	8.8	7.9	24.8

2.1.2 二次水溶性无机离子季节变化特征

夏、冬两季 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子浓度及气象因素变化如图 2 所示。气象数据来源于 Weather Underground (<http://www.wunderground.com>)。从图 2 可以看出, 3 种离子的质量浓度均为 SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺, 其总和占 PM_{2.5} 质量浓度的百分比为冬(44.3%) > 夏(39.4%)。SO₄²⁻ 在冬季的平均浓度值高于夏季, 分别为: $(50.6 \pm 20.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(27.8 \pm 11.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这主要是由于成都夏季温度高、风速大, 大气对污染物的湍流扩散能力增强, 且降水集中、湿度较大, 有利于 SO₂ 的去除, 抑制了 SO₂ 向 SO₄²⁻ 转化; 冬季气温较低, SO₂ 向 SO₄²⁻ 转化的气相反应速率较低, 不利于转化, 但液相反应以及充足的 SO₂ 来源导致 SO₄²⁻ 的大量生成。NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 两种离子夏季明显低于冬季。冬季 NO₃⁻ 的平均浓度为夏季的 2.6 倍; 冬季 NH₄⁺ 浓度是夏季的 3.9 倍。尽管夏季有利于离子的转化及生成, 然而这些组分都属于半挥发组分, 受温度影响较大, 温度的升高导致 NH₄NO₃ 挥发, 因此, NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 随温度升高而降低。

2.2 二次水溶性无机离子之间及其与气象因素的相关分析

通过对 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子进行相关性分析, 可以判断离子的形态及相互关系。表 3 给出

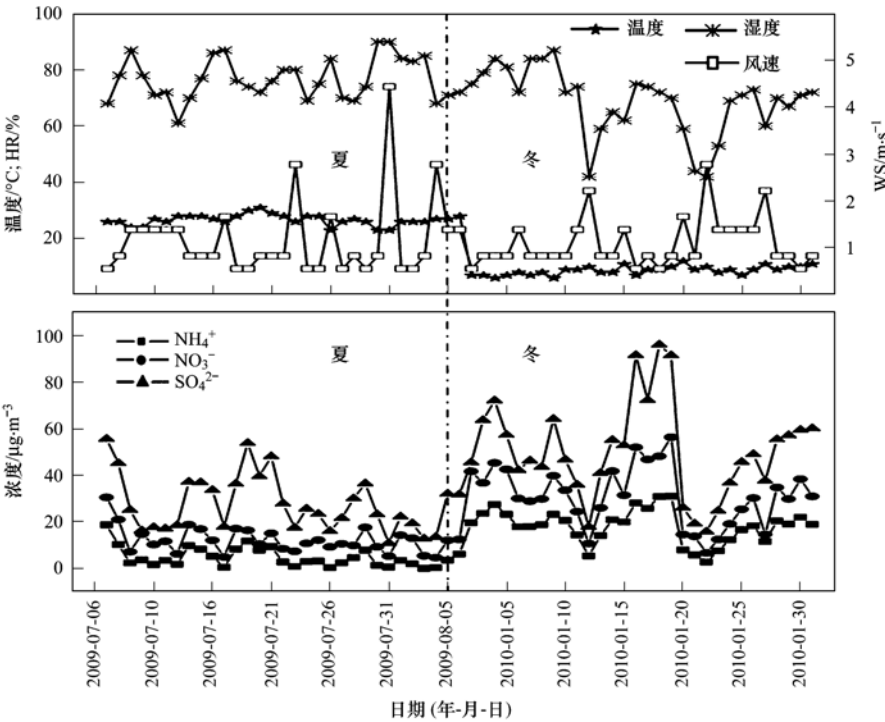


图 2 夏、冬季 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子浓度及气象因素变化

Fig. 2 Changes of secondary water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} and meteorological factors in summer and winter

了观测期间成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和温度、湿度、风速之间的相互关系. 温度对 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的影响表现为一定程度的负相关, 相关系数分别为: -0.592 、 -0.510 和 -0.371 ($P < 0.01$), 原因可能是温度升高会加快气相及液相化学反应速率, 但另一方面温度升高会加快 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 的挥发, 结果与 2.1.2 节季节变化特征中的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度值与温度的关系相吻合; 而相对湿度对 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的影响表现为正相关, 相关系数分别为: 0.302 、 0.302 和 0.348 ($P < 0.01$), 说明液相化学反应对颗粒态的二次无机离子的形成有着重要的影响; 风速与 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 均呈负相关, 相关系数

分别为: -0.454 、 -0.472 和 -0.468 ($P < 0.01$), 表明风速的影响主要表现为加速城市污染物的传输和扩散. 图 3 为成都市城区在研究期间的风玫瑰图, 主导风向为东北风, NE 和 NNE 风向出现频率分别为 15.7% 和 20.1% , 成都市的典型工业区(如:水泥厂、火电厂等)主要分布在成都市的东北部. 因此, 在风的传输作用下, 使得下风向 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度升高. 另外, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 两两相关性很高, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的相关系数为 0.926 ($P < 0.01$), 这表明两种离子受相同大气过程支配, 可能有相同或类似的形成过程, 即由气态前体物(SO_2 、 NO_x) 通过气相或液相反应形成, 详见 2.4 节.

表 3 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次水溶性无机离子与气象因素的相关性¹⁾

	Table 3 Correlation between secondary water-soluble inorganic ions and meteorological factors					
	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	温度	湿度	风速
NH_4^+	1.000					
NO_3^-	0.967 **	1.000				
SO_4^{2-}	0.932 **	0.926 **	1.000			
温度	-0.592 **	-0.510 **	-0.371 **	1.000		
湿度	0.302 **	0.302 **	0.348 **	0.348	1.000	
风速	-0.454 **	-0.472 **	-0.468 **	0.290	-0.242 **	1.000

1) * * 表示 $\alpha=0.01$ 水平上, 相关性极显著 (双侧检验)

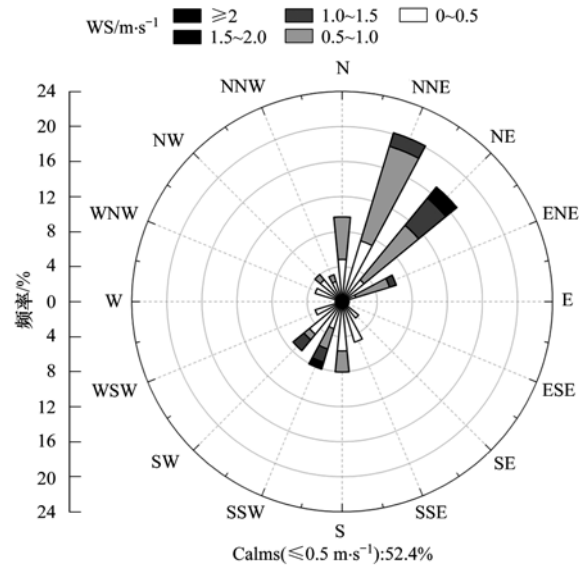


图 3 风玫瑰图

Fig. 3 Wind rose diagram

NH_4^+ 和 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 相关性都较高, 相关系数分别为: 0.967 和 0.932 ($P < 0.01$). 因此, NH_4^+ 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中可能以 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 NH_4HSO_4 的形式存在. 如果 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 全部生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 则 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的当量浓度比为 $2:1$;

如果全部生成 NH_4HSO_4 , 则其当量浓度比为 $1:1$. 在研究期间, 成都市城区四季的 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 摩尔浓度的相关性如图 4 所示, 夏秋冬三季的回归直线斜率分别为: 0.50 、 0.52 和 0.51 , 大于 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的摩尔比 0.50 , 这说明 SO_4^{2-} 未被完全中和, 可能以酸式盐的形式存在; 而春季的回归直线斜率为 0.34 , 小于 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的摩尔比 0.50 , 说明 SO_4^{2-} 被完全中和生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. 结果表明, 成都市城区 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 质量浓度受到温度、相对湿度和风速等气象因素的影响, 3 种离子在春季主要以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形式存在, 夏、秋、冬季主要以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 形式存在.

为判断 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 或 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 之间的具体存在方式, 可通过比较实验测得的 NH_4^+ 与计算所得的 NH_4^+ 的比例来判别^[28]. 当 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 形式存在时, NH_4^+ 的估算浓度为 $[\text{NH}_4^+](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) = 0.38[\text{SO}_4^{2-}](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) + 0.29[\text{NO}_3^-](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$; 当 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 以 NH_4HSO_4 和 NH_4NO_3 的形式存在时, NH_4^+ 的估算浓度为 $[\text{NH}_4^+](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) = 0.192[\text{SO}_4^{2-}](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) + 0.29[\text{NO}_3^-](\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$.

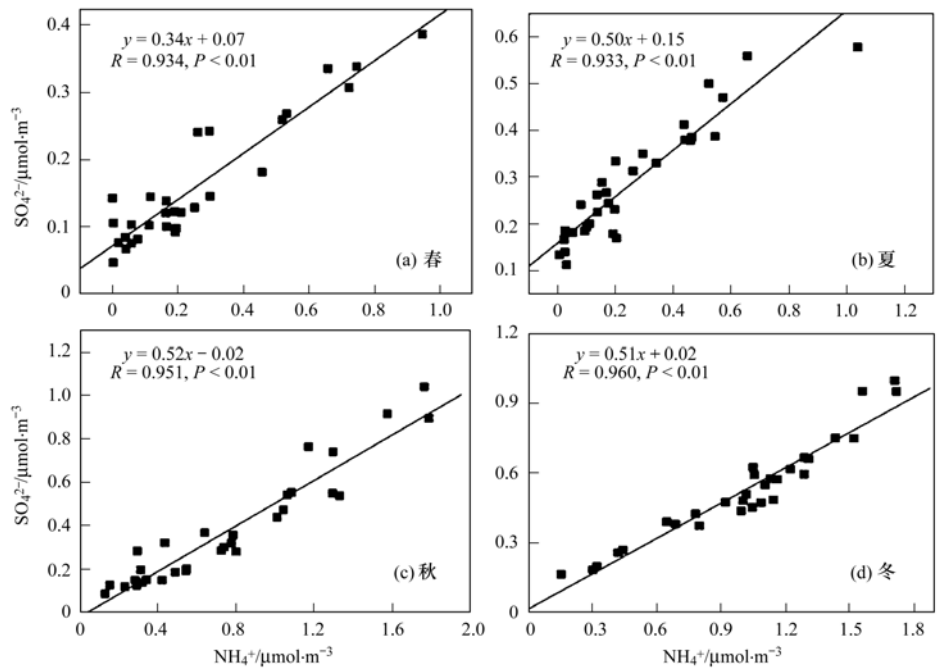


图 4 NH₄⁺ 与 SO₄²⁻ 的相关性

Fig. 4 Correlations between NH₄⁺ and SO₄²⁻

利用 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 在 4 个季节的浓度值,通过计算将实测值和计算值进行回归分析如表 4 所示. 当假设 NH₄⁺ 以 (NH₄)₂SO₄ 存在时,春夏秋冬回归直线的斜率分别为 1.06、1.34、1.64 和 1.52; 当假设 NH₄⁺ 以 NH₄HSO₄ 存在时,回归直线的斜率分别为 0.72、0.84、1.12 和 1.01. 通过分析比较得出,夏秋

冬三季以 NH₄HSO₄ 存在的斜率和春季以 (NH₄)₂SO₄ 存在的斜率更接近 1,实测值和计算值较为符合,由此可以判断成都市城区在采样期间 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 在春季主要以 (NH₄)₂SO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在,夏秋冬主要以 NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在. 两种相关性分析方法的结果较吻合.

表 4 NH₄⁺ 计算值与实测值的回归分析¹⁾

Table 4 Regression analysis between calculated values and monitored values of NH₄⁺

季节	以 (NH ₄) ₂ SO ₄ 形式存在			以 NH ₄ HSO ₄ 形式存在		
	线性回归方程	R	P	线性回归方程	R	P
春	y = 1.06x + 3.67	0.962	< 0.01	y = 0.72x + 2.45	0.964	< 0.01
夏	y = 1.34x + 7.74	0.967		y = 0.84x + 4.86	0.974	
秋	y = 1.64x - 1.33	0.973		y = 1.12x - 0.97	0.979	
冬	y = 1.52x + 0.65	0.979		y = 1.01x + 0.36	0.983	

1) x 表示 NH₄⁺ 实测值 (μg·m⁻³); y 表示 NH₄⁺ 计算值 (μg·m⁻³)

2.3 PM_{2.5} 中 NO₃⁻ 与 SO₄²⁻ 的比值

NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 主要是由其气态前体物 (NO_x、SO₂) 经大气化学反应而形成的二次离子,属于二次污染物. 常用 NO₃⁻/SO₄²⁻ 的质量比值来指示大气中硫和氮主要来自于固定源或移动源,若 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值较低 (< 1),说明固定源 (如煤燃烧) 为主; 若 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值较高 (> 1),说明移动源 (如机动车尾气) 为主^[29].

在采样期间,成都市年均 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值为 0.61 ± 0.20 (< 1),比上海 (0.64)^[13] 和北京

(0.72)^[24] 等发达城市低,但是比长沙 (0.31)^[30]、广州 (0.27)^[31] 和香港 (0.16)^[32] 高. 表明成都市大气中硫和氮的主要来源以固定源为主. 另外,从季节变化来看,NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值秋 > 春 > 冬 > 夏,分别为: 0.72 ± 0.20、0.66 ± 0.23、0.61 ± 0.10 和 0.45 ± 0.14,其原因为成都秋季多雾霾天气,加上稀释扩散条件差,使 PM_{2.5} 浓度处于较高水平,而汽车尾气排放的 NO、NO₂ 在湿度和稳定度较大的情况下,NO_x 更加容易转化为 NO₃⁻,使得大气中 NO₃⁻ 的浓度增大. 相反地,最小值出现在夏季,主要原因可能

是与成都市夏季高温、高湿、强太阳辐射等气象条件有关,随着大气相对湿度的升高,SO₂ 在云中的氧化反应明显增强,从而有利于 SO₂ 的光化学反应及其气-粒转化过程,促进了 SO₄²⁻ 的生成,从而降低了 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值.

2.4 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 与其前体物的转化

通常用硫氧化速率 (SOR) 和氮氧化速率 (NOR) 来表示二次气溶胶的形成、转化过程^[9], 计算公式见式(1)和(2).

$$SOR = [SO_4^{2-}] / ([SO_4^{2-}] + [SO_2]) \quad (1)$$

$$NOR = [NO_3^-] / ([NO_3^-] + [NO_2]) \quad (2)$$

式中, [SO₄²⁻], [SO₂], [NO₃⁻], [NO₂] 分别为相应组分的摩尔浓度. SOR 和 NOR 的大小可以分别反映大气中 SO₂ 转化为 SO₄²⁻ 和 NO₂ 转化为 NO₃⁻ 的反应程度. SOR 和 NOR 的值越高, 说明大气中 SO₂ 和 NO₂ 生成的二次水溶性离子越多^[33]. 根据成都草堂大气自动监测站相应时间的 SO₂ 和 NO₂ 监测数据, 计算观测期间的日均浓度值, 对照 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 浓度值, 计算各季节以及年均 SOR 和 NOR 值.

成都市城区四季和年均 SOR 和 NOR 水平如表 5 所示. 在观测期间, PM_{2.5} 的 SOR 和 NOR 变化明显, 年平均值分别为: 0.33 ± 0.12 和 0.19 ± 0.09, 均大于 0.1, 说明成都 PM_{2.5} 中硫酸盐和硝酸盐主要是经过转化形成的. 另外, SOR 值各季节平均值分别为秋季 (0.41 ± 0.13) > 夏季 (0.35 ± 0.09) > 冬季 (0.33 ± 0.08) > 春季 (0.24 ± 0.12), SO₂ 向 SO₄²⁻ 的转化包括 SO₂ 和 HO· 自由基的气相氧化和 SO₂ 与氧化剂在水汽或气溶胶液滴表面的非均相氧化反应两种途径^[24, 34]. SOR 最大值出现在秋季的原因可能是成都市城区秋季相对湿度较高, 较高的 SOR 主要与 SO₂ 吸湿后发生的非均相反应有关. 而冬季气温低, 大气光化学活性弱, SO₂ 的转化以液相氧化过程为主, 所以 SOR 值在冬、春两季相对较低. NOR 在冬季最高, 为 0.25 ± 0.08, 其次为秋、夏和春季, NOR 平均值分别为 0.21 ± 0.07、0.19 ± 0.09 和 0.12 ± 0.06. NO₂ 向 NO₃⁻ 转化机制主要是通过 NO₂

光化学反应生成硝酸, 硝酸在特定的条件下形成硝酸盐进入颗粒物, 冬、秋两季相对较高的 NOR 值不仅与大气中氧化自由基和臭氧有关, 此外, 还可能受到相对湿度、温度等气象条件的影响.

3 结 论

(1) 成都市城区 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的平均浓度值分别占 PM_{2.5} 含量的 (5.5 ± 2.8)%、(11.1 ± 3.5)% 和 (19.3 ± 6.4)%, 三者总和占 PM_{2.5} 质量浓度的 (35.9 ± 12.7)%. PM_{2.5} 的二次无机离子的季节变化特征明显, 夏、冬两季 NH₄⁺、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的质量浓度均为 SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺, 其总和占 PM_{2.5} 质量浓度的百分比为冬 (44.3%) > 夏 (39.4%). 结果表明, 二次水溶性无机离子是成都市城区 PM_{2.5} 的主要组分.

(2) 成都市城区 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 在春季主要以 (NH₄)₂SO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在, 夏、秋、冬季主要以 NH₄HSO₄ 和 NH₄NO₃ 形式存在.

(3) 成都市年均 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值为 0.61 ± 0.20 (<1), 从季节变化来看, NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值秋 > 春 > 冬 > 夏, 分别为: 0.72 ± 0.20、0.66 ± 0.23、0.61 ± 0.10 和 0.45 ± 0.14, 表明成都市大气中硫和氮的主要来源以固定源为主.

(4) 成都市 SOR 和 NOR 的年均值分别为: 0.33 ± 0.12 和 0.19 ± 0.09; 最大值分别出现在秋季和冬季, 分别为: 0.41 ± 0.12 和 0.25 ± 0.08. 结果表明, 成都市 PM_{2.5} 中硫酸盐和硝酸盐主要是经二次转化形成的.

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘庆阳, 刘艳菊, 杨峥, 等. 北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 12-18.

[3] 陶俊, 柴发合, 曹军骥, 等. 16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 409-415.

[4] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 长白山 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 9-14.

[5] 狄一安, 杨勇杰, 周瑞, 等. 北京春季城区与远郊区不同大气粒径颗粒物中水溶性离子的分布特征[J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1604-1610.

[6] 李杏茹, 宋爱利, 王英锋, 等. 兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 15-20.

[7] Andreae M O, Schmid O, Yang H, et al. Optical properties and

表 5 PM_{2.5} 的 SOR 和 NOR 水平

Table 5 SOR and NOR levels in PM_{2.5}

季节	SOR	NOR
春	0.24 ± 0.12	0.12 ± 0.06
夏	0.35 ± 0.09	0.19 ± 0.09
秋	0.41 ± 0.12	0.20 ± 0.07
冬	0.33 ± 0.08	0.25 ± 0.08
总体	0.33 ± 0.12	0.19 ± 0.09

- chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6335-6350.
- [8] Li Y C, Yu J Z. Composition profile of oxygenated organic compounds and inorganic ions in PM_{2.5} in Hong Kong [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **7**(4): 338-349.
- [9] Lai S C, Zou S C, Cao J J, *et al.* Characterizing ionic species in PM_{2.5} and PM₁₀ in four Pearl River Delta cities, South China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19** (8): 939-947.
- [10] Wang H L, Zhuang Y H, Wang Y, *et al.* Long-term monitoring and source apportionment of PM_{2.5}/PM₁₀ in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(11): 1323-1327.
- [11] 陶俊, 张仁健, 董林, 等. 夏季广州城区细颗粒物 PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 中水溶性无机离子特征 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1417-1424.
- [12] Guo Y T, Zhang J, Wang S G, *et al.* Long-term characterization of major water-soluble inorganic ions in PM₁₀ in coastal site on the Japan Sea [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2011, **68** (4): 299-316.
- [13] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [14] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D22): D22S11.
- [15] Zhao Q, He K, Rahn K A, *et al.* Dust storms come to central and Southwestern China, too: implications from a major dust event in Chongqing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**: 2615-2630.
- [16] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: Importance of springtime dust storms and biomass burning [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [17] Tao J, Cheng T T, Zhang R J, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} at an urban site of Chengdu in southwestern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, **30** (4): 1070-1084.
- [18] Zhang T, Cao J J, Tie X X, *et al.* Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **102** (1-2): 110-119.
- [19] Kim H S, Huh J B, Hopke P K, *et al.* Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(32): 6762-6770.
- [20] Lonati G, Giugliano M, Butelli P, *et al.* Major chemical components of PM_{2.5} in Milan (Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(10): 1925-1934.
- [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**: 11041-11053.
- [22] Lee C T, Chuang M T, Lin N H, *et al.* The enhancement of PM_{2.5} mass and water-soluble ions of biosmoke transported from Southeast Asia over the Mountain Lulin site in Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(32): 5784-5794.
- [23] 袁超. 香港 PM_{2.5} 水溶性离子的在线监测仪器评估及理化特征分析 [D]. 济南: 山东大学, 2012. 35-37.
- [24] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [25] Tan J, Chen Y, He K, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during a typical haze episode in Guangzhou [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(6): 774-781.
- [26] 古金霞, 吴丽萍, 霍光耀, 等. 天津市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征及来源分析 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29** (3): 30-34.
- [27] 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.
- [28] Shen Z X, Arimoto R, Cao J J, *et al.* Seasonal variations and evidence for the effectiveness of pollution controls on water-soluble inorganic species in total suspended particulates and fine particulate matter from Xi'an, China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2008, **58**(12): 1560-1570.
- [29] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [30] 李彩霞, 李彩亭, 曾光明, 等. 长沙市夏季 PM₁₀ 与 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.
- [31] Hagler G S W, Bergin M H, Salmon L G, *et al.* Source areas and chemical composition of fine particulate matter in the Pearl River Delta region of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(20): 3802-3815.
- [32] Louie P K K, Watson J G, Chen A, *et al.* Seasonal characteristics and regional transport of PM_{2.5} in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(9): 1695-1710.
- [33] Kang C M, Lee H S, Kang B W, *et al.* Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (28): 4749-4760.
- [34] Keeler G J, Spengler J D, Castillo R A. Acid aerosol measurements at a suburban Connecticut site [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25** (3-4): 681-690.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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

国内外公开发行人