

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
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	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

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

杨懂艳, 刘保献, 张大伟*, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平

(北京市环境保护监测中心, 北京 100048)

摘要: 2012年8月~2013年7月, 在北京市包括城市背景、城区、郊区以及边界传输点在内的9个监测点位进行大气细颗粒物PM_{2.5}样品的采集与分析, 共获得486个有效样本及9种水溶性离子的质量浓度。观测期间9种水溶性离子总质量浓度为60.5 μg·m⁻³, 浓度水平高低顺序分别为NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > F⁻ > Mg²⁺; 其中SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺ (三者简称SNA) 占全部所测水溶性离子的88%; NO₃⁻是全年波动范围最大的二次离子。对所测阴、阳离子相关性研究发现, 阴、阳离子总体相关性良好, 春、冬季阴、阳离子相关性要好于夏、秋季。对不同颗粒质量级别中的水溶性离子研究发现, SNA积累活跃, 相对于SO₄²⁻的积累, NO₃⁻和NH₄⁺在二次离子的形成过程中占据主导地位; NO₃⁻是重污染过程累积效应比较明显且贡献相对较高的二次离子。

关键词: 水溶性离子; PM_{2.5}; 北京; 相关性; 季节变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0768-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.03.002

Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM_{2.5} in Beijing During 2012-2013

YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei*, CHEN Yuan-yuan, ZHOU Jian-nan, LIANG Yun-ping

(Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: A total of 486 daily PM_{2.5} samples were collected at a background site, 3 urban sites, 4 suburban sites and a boundary transfer site during August 2012-July 2013. Mass concentrations of 9 water-soluble ions were obtained. The average mass concentration of the 9 ions was 60.5 μg·m⁻³, and the order of concentration of ions was NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > F⁻ > Mg²⁺; Secondary inorganic species NO₃⁻, SO₄²⁻ and NH₄⁺ were the major components of water-soluble ions in PM_{2.5}, with a contribution of 88% to the total ions of PM_{2.5}. NO₃⁻ was the most fluctuated anion during the sampling period. With the increase of pollution level, the accumulation of SNA was obvious, the components that contained nitrogen, NO₃⁻ and NH₄⁺, occupied the dominant position in the formation of the secondary components. NO₃⁻ had a relatively higher contribution to the accumulation of heavy pollution.

Key words: water-soluble ions; PM_{2.5}; Beijing; correlation; seasonal variation

近些年, 随着公众对大气环境质量改善需求的上升, PM_{2.5}越来越受到普遍关注。北京作为中国首都, 属于典型的“复合型大气污染”城市, 大气PM_{2.5}的来源及形成机制极为复杂^[1,2]。PM_{2.5}作为一种复合污染物, 不仅影响大气能见度^[3,4], 也对人体健康产生严重危害^[5,6]。研究结果表明, PM_{2.5}中包含有机碳、元素碳、水溶性离子、地壳元素及各种微量元素等^[7,8], 其中水溶性离子组分可高达80%以上, 也是颗粒物浓度升高的主要因素; 但因各地地理条件、能源结构、气象条件等不同, 其组成结构及浓度水平会存在巨大差异^[9~11]。国内研究者也曾对北京市的大气PM_{2.5}中水溶性离子开展过一系列的研究, 对北京市大气PM_{2.5}中水溶性离子的浓度水平及季节变化规律有一定的认识^[12,13]。然而上述研究监测点位设置单一、且主要集中在北京城区; 监测样

品覆盖时间较短, 缺乏长时间连续监测数据。本研究在9个监测点位以每月连续采集5~7 d的形式, 对2012年8月~2013年7月一个整自然年间北京市PM_{2.5}中水溶性离子进行检测, 并对其浓度水平、相关性、主要离子的时空变化规律进行了分析, 并探讨了不同空气质量级别下二次离子的变化规律, 以期对细颗粒物污染治理提供一定的理论依据。

1 监测点位及分析概况

2012年8月~2013年7月间, 分别在1个城市背景点(定陵)、3个城区监测点(车公庄CGZ、东

收稿日期: 2014-07-18; 修订日期: 2014-10-29

基金项目: 北京市科委项目(Z121100000312035)

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

四 DS、石景山古城 SJS)、4 个郊区监测点(通州 TZ、房山 FS、亦庄 YZ、怀柔 HR)以及 1 个边界污染传输点(榆堡 YF)共计 9 个监测点位使用武汉天虹 TH-16A 型四通道采样器采集 PM_{2.5} 样品,共获得 486 个有效样本,具体监测点分布见图 1。

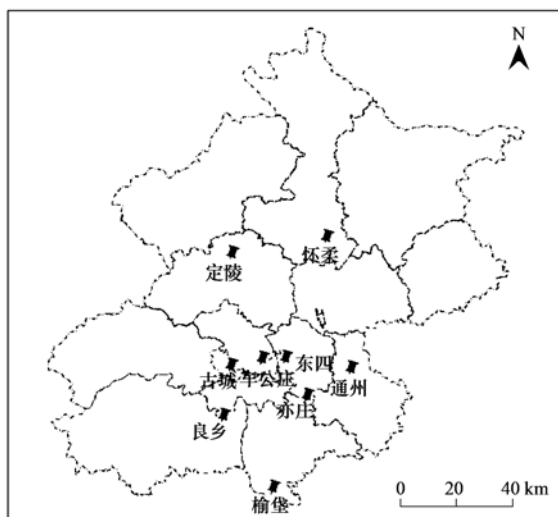


图 1 北京市 PM_{2.5} 监测点位分布示意

Fig. 1 Sampling sites of PM_{2.5} in Beijing

滤膜采集后进行化学分析,其中水溶性离子采集所用滤膜为 Whatman 公司生产的石英纤维滤膜,滤膜采集及运输过程严格按照《环境空气颗粒物(PM_{2.5})手工监测方法(重量法)技术规范》执行。滤膜称重后放入 50.0 mL 聚乙烯超声瓶中,加入去离子水(电阻率大于 18.2 MΩ·cm),定容后于室温下超声振荡 60 min,超声过程加入冰块以保证试样温度维持在室温水平。试样静置后用 0.45 μm 滤膜过滤并用离子色谱仪(戴安 ICS-3000/5000)分别测定样品中的阴离子(F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻)及阳离子(NH₄⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺),样品检测过程中的质量保证与质量控制严格按照实验室监测技术规范执行。

2 结果与讨论

2.1 水溶性离子浓度水平分析

观测期间,9 种水溶性离子总质量浓度为 60.5 μg·m⁻³,浓度水平高低顺序为 NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > F⁻ > Mg²⁺。其中 3 种主要的二次离子 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ (三者简称 SNA) 主要是由气态前体物 SO₂、NH₃ 和 NO_x 转化而来,占全部所测水溶性离子的 88%。9 种水溶性离子累积浓度季节分布见图 2,冬季二次离子浓度最高,春

季次之,秋季最低。SNA 在春、夏、秋、冬所占全部所测水溶性离子的比例分别为 89%、95%、78% 和 86%。

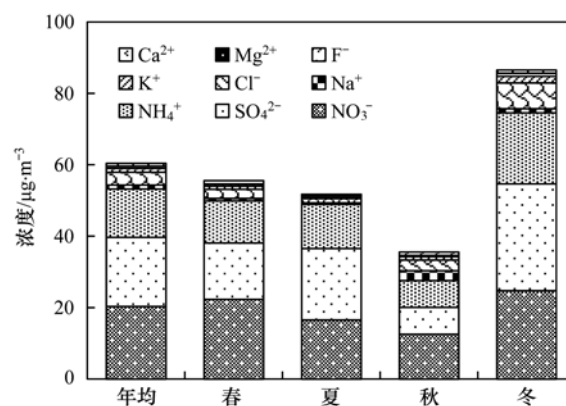


图 2 观测期间北京市水溶性离子季节分布

Fig. 2 Seasonal variation of water-soluble ions in Beijing during 2012-2013

本研究所测水溶性离子中(表 1),含 N 组分 NO₃⁻ 与 NH₄⁺ 离子浓度水平明显高于以往北京市研究结果^[9~16],也明显高于北京周边城市天津及南方城市上海及广州的水平^[17~20];尤其是 NO₃⁻ 浓度水平明显上升,比 He 等^[9]研究结果高出 57% 以上,浓度水平略高于 SO₄²⁻。这主要可能是由于近年来北京市机动车数量急增,沉重的交通压力造成近些年 NO₃⁻ 比例急速上升。从季节分布来看,春季和冬季 NO₃⁻ 浓度水平及在 PM_{2.5} 中所占比例较高,夏季高温炎热,硝酸盐挥发损失严重,造成其浓度水平略低^[21]。

NH₄⁺ 离子所占 PM_{2.5} 比例冬季较高,秋季最低;与以往研究相比,此次 NH₄⁺ 离子占 PM_{2.5} 质量浓度高达 11%,是 He 等^[9]所检测 NH₄⁺ 含量(5%)的 2 倍,与纽约和广州的贡献水平相当^[22,23]。铵盐主要是由大气中的前体物 NH₃ 转化而来,是促成大气中的 SO₂ 和 NO_x 等酸性物质中和形成二次颗粒物的重要因素^[24]。NH₃ 主要来源于农业生产、工业排放、机动车尾气以及其它排放源^[25]。近些年,北京市机动车数量迅速增加,导致大量的含氮化合物通过汽车尾气排放到大气中,并与氨反应形成硝酸铵微粒,而经济和人口的迅速增长导致了氨排放量的增加,也促使硝酸铵微粒的生成^[25]。与 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 不同的是,SO₄²⁻ 浓度水平虽呈高低交替的变化趋势,但其质量浓度总体呈下降趋势,其在 PM_{2.5} 中所占的比例低于 2005~2007 年 SO₄²⁻ 比例,这主要是因为近年来北京及周边区域大气污染治理措施的实行,促使 SO₂ 年均浓度稳步下降有关^[26,27]。

表 1 不同大中城市 PM_{2.5}及水溶性离子浓度分布/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Mass concentration of PM _{2.5} and the water-soluble ions at different sites/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$														
地点	位置	时间	采样点	样品数	PM _{2.5}	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
北京(本研究)	城、郊	2012~2013	8	519	89.8	0.57	3.61	20.3	19.4	13.5	1.19	1.05	0.05	0.78
北京 ^[12]	城区	2009~2010	1	121	135	—	1.4	11.3	13.6	6.9	0.46	0.92	0.16	1.6
北京 ^[13]	城、郊	2008	2	180	60.9	—	—	33.3	—	—	—	—	—	—
北京 ^[14]	城、郊	2005~2007	2	105	102	—	—	18.6	29.5	—	—	—	—	2.63
北京 ^[15]	城、郊	2002~2003	3	—	115.6	0.09	1.87	12.9	18.3	10.4	—	1.31	—	—
北京 ^[16]	城区	2001~2003	5	334	154	—	3.07	11.52	17.07	8.72	0.55	1.55	0.17	1.63
北京 ^[10]	城区	1999~2000	—	—	129	—	1.80	9.90	16.90	6.50	0.70	2.20	0.40	0.80
北京 ^[9]	城区	1999~2000	2	48	129	—	2.05	12.9	14.47	6.45	—	2.83	—	1.23
上海 ^[18]	城区	2003~2005	2	202	94.6	—	3.00	6.32	10.39	3.78	0.57	0.63	0.28	1.25
天津 ^[17]	城区	2008	1	19	144.6	—	6.7	16.6	24.1	8.7	3.4	0.9	1.0	1.8
天津 ^[19]	城、郊、海边	2006~2007	3	36	223	—	9.3	15.9	39.7	11.2	1.0	1.0	0.2	1.3
香港 ^[20]	城区	2003	1	—	49.3	—	0.17	0.79	11.6	4.3	0.26	0.67	0.045	0.13
广州 ^[21]	城区	2007	1	28	79.2	—	—	9.5	21.6	7.3	—	—	—	—
纽约 ^[22]	城、郊	2001~2003	5	1527	13.4	—	—	1.98	4.27	1.88	0.22	0.02	—	—

与以往研究结果不同的是,Na⁺在秋季浓度水平最高,显示与Cl⁻不同的污染来源.另外两种无机阴离子F⁻、Cl⁻呈冬季浓度水平较高的特征,且明显高于Zhang等^[12]所测Cl⁻的浓度水平,其中冬季Cl⁻浓度为全年平均浓度的2倍.K⁺冬季浓度水平较高,春、秋次之,这主要与北京周边秸秆燃烧密切相关^[28].与以往研究结果相比,地壳元素Ca²⁺、Mg²⁺浓度水平明显低于以往,但显示出相同的季节变化特征,均是春、秋水平略高.近些年,应对气候变化,北京市及其周边区域加强了植树造林等绿化活动,虽然目前北京春、秋季仍会出现少量风沙扬尘现象,但因扬尘造成的空气质量恶化现象已明显降低^[29].

2.2 水溶性离子相关性分析

图3为PM_{2.5}中9种水溶性离子中的阴阳离子总和浓度散点图,利用SPSS软件进行回归分析,阴、阳离子一元线性回归方程为 $y = 0.051 + 0.96x$,阴、阳离子存在明显相关性,且阴阳平衡性良好.

从季节分布来看,春、冬季阴阳离子相关性要高于夏、秋季.阴、阳离子浓度比值全年均值为1.12,水溶性离子总体偏酸性或弱碱性^[30];春、夏、秋、冬季两者比值分别为1.18、1.34、0.82和1.07,夏季及春季水溶性离子中酸性无机阴离子贡献较大.

对PM_{2.5}及其水溶性离子进行相关性分析,结果见表2.NH₄⁺与SO₄²⁻的相关性优于Cl⁻、NO₃⁻.在大气颗粒物中,由于SO₄²⁻的反应活性要明显高于NO₃⁻,且一旦形成,就能够在大气中稳定存在,因此SO₄²⁻常以(NH₄)₂SO₄形式存在^[3];而NH₄NO₃在

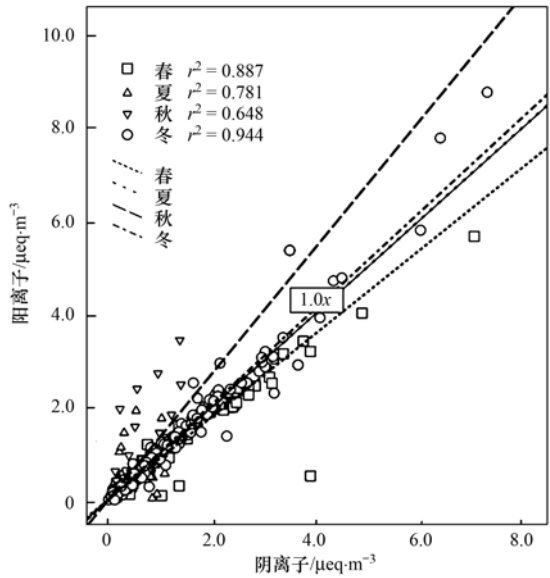


图 3 阴、阳离子浓度

Fig. 3 Scatter plots of anions and cations

大气中不稳定,受大气温、湿度影响较大,春、冬季易捕捉,NH₄⁺与NO₃⁻结合形成NH₄NO₃并在颗粒物上凝聚.Cl⁻除与K⁺、Na⁺结合外,还可能与NH₄⁺结合形成NH₄Cl.与Na⁺不同的是,Cl⁻与NH₄⁺和K⁺均明显相关,表明Cl⁻与Na⁺不同的污染来源,Cl⁻浓度水平除受秸秆或燃煤的影响外,可能与农村及农业来源有关^[18].

2.3 水溶性离子时间分布规律

观测期间,6种主要水溶性离子月均浓度及NO₃⁻/SO₄²⁻变化规律如图4所示,Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻这3种水溶性离子月均浓度变化特征不明显,不在其中显示.其中NO₃⁻、SO₄²⁻和NH₄⁺这3种主要水

溶性离子以及 Cl⁻ 均在 1 月和 3 月出现两个浓度高峰,这主要是因为 2013 年 1 月及 3 月间出现过两次重污染时段,极端不利的气象条件造成各项污染物的急剧累积,然而两次重污染特征却明显不同. 其中

1 月重污染过程中 SO₄²⁻ 浓度高达 52.3 μg·m⁻³, 3 月重污染过程中 NO₃⁻ 浓度水平高达 64.5 μg·m⁻³, 1 月和 3 月 NH₄⁺ 浓度分别为 4.4 μg·m⁻³ 和 26.4 μg·m⁻³,SNA 所占比例均明显高于全年年均水平.

表 2 水溶性离子与 PM_{2.5} Spearman 相关系数¹⁾

Table 2 Spearman correlations of PM _{2.5} and the water-soluble ions										
	PM _{2.5}	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
PM _{2.5}	1									
Na ⁺	0.037	1								
NH ₄ ⁺	0.658 **	0.069	1							
K ⁺	0.658 **	-0.010	0.136 **	1						
Mg ²⁺	-0.009	-0.015	-0.087 *	-0.021	1					
Ca ²⁺	0.106 *	0.065	0.016	0.049	0.225 **	1				
F ⁻	0.152 **	0.021	0.149 **	0.200 **	0.074	0.033	1			
Cl ⁻	0.838 **	0.073	0.701 **	0.605 **	-0.005	0.158 **	0.296 **	1		
NO ₃ ⁻	0.552 **	0.059	0.834 **	0.147 **	0.084	-0.016	0.143 **	0.601 **	1	
SO ₄ ²⁻	0.727 **	0.115 **	0.911 **	0.354 **	-0.012	0.017	0.187 **	0.763 **	0.761 **	1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,n=486

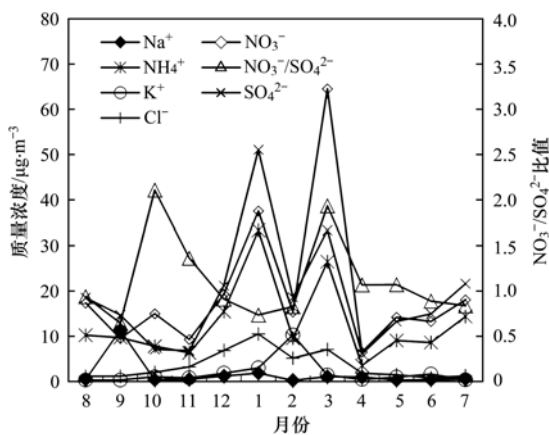


图 4 水溶性离子月变化规律
Fig. 4 Monthly variation of water-soluble ions in Beijing during 2012-2013

Cl⁻ 浓度水平显示出与 SO₄²⁻ 相同的变化特征,且与 SO₄²⁻ 相关性良好,Cl⁻ 浓度增高是燃煤活动的重要标志,也是烟花爆竹燃放的特征污染物. 其中 Cl⁻ 在 11 月 ~ 次年 3 月期间,对 PM_{2.5} 的贡献率在 3.1% ~ 4.6% 之间,这与北京 11 月 ~ 次年 3 月供暖季及春节期间燃放烟花爆竹密不可分. 而 K⁺ 贡献率则在 10 月 ~ 次年 1 月之间相对较高,但其浓度高峰出现在 2 月,除与秸秆燃烧有关外,春节燃放烟花爆竹应是主导因素^[31].

NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值可以反映流动源与固定源对颗粒物的贡献^[9~16],比较 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值发现,NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值出现两个最大高峰,分别在 10 月与 3 月,比值为 1.7 和 1.5. 由于 NO₃⁻ 在颗粒物中的分布除

受温度影响外,湿度及压力等对其在气-粒态分布也会产生重要影响. 10 月及 3 月北京温度虽不处于最低水平,但仍相对较低,NO₃⁻ 更易于以细颗粒物形态存在; 3 月处于采暖期末期,SO₄²⁻ 贡献水平略有下降; 以上综合因素的影响,导致秋末以及冬季 NO₃⁻ 在细颗粒物累积效应更加突出^[9]. 其它月份 NO₃⁻/SO₄²⁻ 比值范围在 0.5 ~ 1.1 之间,年均比值为 0.83,明显高于 1999 ~ 2010 年的研究水平(比值范围为 0.46 ~ 0.70)^[9~16],以上结果表明,相对于燃煤等固定源、机动车等流动源以及区域污染传输均对北京市 PM_{2.5} 的贡献水平呈一定的上升^[12].

2.4 不同空气质量级别下水溶性离子组分特征

分别按照 PM_{2.5} 质量浓度将环境空气质量级别按照优级(0 ~ 35 μg·m⁻³)、良(35 ~ 75 μg·m⁻³)、轻度污染(75 ~ 115 μg·m⁻³)、中度污染(115 ~ 150 μg·m⁻³)、重度污染(150 ~ 250 μg·m⁻³)、严重污染(250 μg·m⁻³ 以上) 进行划分并比较 5 种主要水溶性离子对 PM_{2.5} 质量浓度的贡献.

从图 5 可以看出,随着 PM_{2.5} 质量浓度的增加,K⁺ 和 Cl⁻ 缓慢增加,NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 这 3 种离子比例急剧上升; 其中 NO₃⁻ 积累速率最明显. 比较这 5 种离子在不同的质量浓度级别下对颗粒物的贡献发现,随着细颗粒质量级别的增加,含 N 污染物增幅最明显. 从图 6 中各种物质的百分含量对数变化来看,其中 NH₄⁺ 在细颗粒物中的百分含量从 5.3% 增加到 11.8% (图 6),增幅率高达 123%; NO₃⁻ 在细颗粒物中的百分含量从 10.9% 增加到

18.1%,增幅率为66%;而 SO_4^{2-} 在细颗粒物中的百分含量从10.5%增加到16.4%,增幅率为56%。 K^+ 和 Cl^- 质量浓度虽然随着颗粒物质量级别有微量增加,但在细颗粒物中的比例均无显著变化。

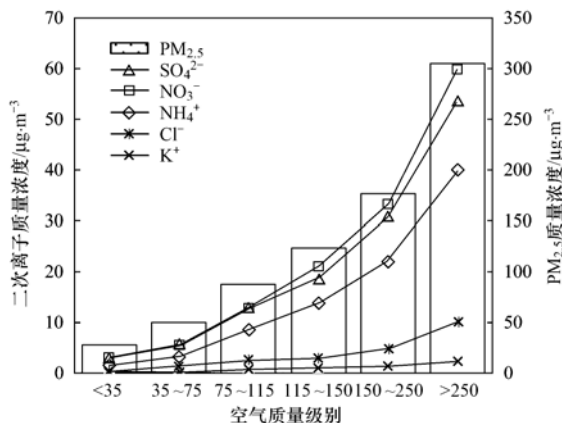


图5 细颗粒物级别及水溶性离子质量浓度变化

Fig. 5 Variation of concentrations of water-soluble ions at different $\text{PM}_{2.5}$ levels

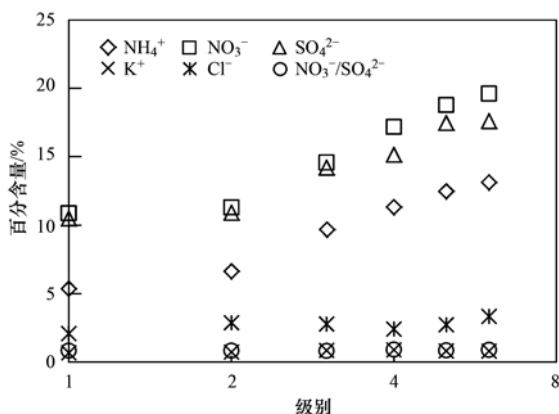


图6 不同级别水溶性离子百分含量及 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值变化趋势

Fig. 6 Percentage of water-soluble ions and ratio of $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ at different $\text{PM}_{2.5}$ levels

比较 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值也可发现随着污染程度的增加, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值略有上升;随着细颗粒物质量级别的增加, NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- (即SNA)积累活跃,但相对含S化合物的积累,含N污染物在二次粒子的形成过程中占据主导地位, NH_4^+ 与 NO_3^- 是重污染过程累积效应比较明显且贡献率较大的离子。

3 结论

(1)观测期间,9种水溶性离子总质量浓度为 $60.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其浓度高低顺序分别为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$

$> \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{F}^- > \text{Mg}^{2+}$;冬季二次离子累积浓度最高,春季次之,秋季最低。SNA对颗粒物的贡献率春、夏季高于秋、冬季,与以往研究相比, NO_3^- 与 NH_4^+ 浓度水平及对细颗粒物的贡献均有所上升。

(2)北京市细颗粒物中阴阳离子相关性显著,平衡性良好;春、冬季阴阳离子相关性要高于夏、秋季;阴阳离子年均比值为1.12,水溶性离子总体偏酸性或弱碱性。

(3) $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值波动较高,全年范围在0.7~1.4之间,相对于燃煤等固定源、机动车等流动源以及区域污染传输均对北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 产生不同程度的贡献。 NO_3^- 月均浓度范围为 $6.5 \sim 64.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是全年波动范围最大的二次离子,也是贡献率相对较高的二次离子。

(4)随着细颗粒质量级别的增加,SNA积累活跃,但相对于 SO_4^{2-} 的积累, NO_3^- 和 NH_4^+ 在二次离子的形成过程中占据主导地位。

参考文献:

- [1] 胡敏,唐倩,彭剑飞,等.我国大气颗粒物来源及特征分析[J].环境科学与发展,2011,(5):15-19.
- [2] 郑玫,张延君,阎才青,等.中国 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析方法综述[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1141-1154.
- [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] Yuan C S, Lee C G, Liu S H, et al. Correlation of atmospheric visibility with chemical composition of Kaohsiung aerosol [J]. Atmospheric Research, 2006, 82(3-4): 663-679.
- [5] Duan J C, Tan J H. Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: Situation, sources and control policies [J]. Atmospheric Environment, 2013, 74(1): 93-101.
- [6] 谢元博,陈娟,李魏.雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [7] Ho K F, Lee S C, Chan C K, et al. Characterization of chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(1): 31-39.
- [8] Calvo A I, Alves C, Castro A, et al. Research on aerosol sources and chemical compositions: Past, current and emerging issues [J]. Atmospheric Research, 2013, 120-121(1): 1-28.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 胡敏, 赵云良, 何凌燕, 等. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布[J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 1-6.
- [12] Zhang R T, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(4): 9953-10007.
- [13] 刘辉, 贺克斌, 马永亮, 等. 2008 年奥运前后北京城、郊 PM_{2.5} 及其水溶性离子变化特征[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(1): 177-185.
- [14] Wang H L, Zhou Y M, Zhuang Y H, *et al.* Characterization of PM_{2.5}/PM_{2.5-10} and source tracking in the juncture belt between urban and rural areas of Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(14): 2506-2515.
- [15] Sun Y L, Zhuang G S, Wang Y, *et al.* The air-borne particle pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(35): 5991-6004.
- [16] 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.
- [17] Gu J X, Bai Z P, Li W F, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} during winter in Tianjin, China[J]. Particuology, 2011, **9**(3): 215-221.
- [18] 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.
- [19] Li W F, Bai Z P, Liu A X, *et al.* Characteristics of major PM_{2.5} components during winter in Tianjin, China[J]. Aerosol and Air Quality, 2009, **9**(1): 105-119.
- [20] Cheng Y, Lee S C, Ho K F, *et al.* Chemically-specified on-road PM_{2.5} motor vehicle emission factors in Hong Kong[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(7): 1621-1627.
- [21] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬、夏季持续性雾霾发生的环境气象条件比对分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2031-2044.
- [22] Tao J, Ho K F, Chen L G, *et al.* Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring[J]. Particuology, 2009, **7**(1): 68-75.
- [23] Qin Y J, Eugene K, Philip K H. The concentrations and sources of PM_{2.5} in metropolitan New York City [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(S2): 312-332.
- [24] Battye W, Aneja V P, Roelle P A. Evaluation and improvement of ammonia emissions inventories [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(27): 3873-3883.
- [25] 彭应登, 杨明珍, 申立贤. 北京氨源排放及其对二次粒子生成的影响[J]. 环境科学, 2000, **21**(6): 101-103.
- [26] 北京市环保局. 2013 年北京市环境状况公报[EB/OL]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323474/331443/331937/333896/395964/index.html>, 2014-4-10.
- [27] 北京市环保局. 2012 年北京市环境状况公报[EB/OL]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/323474/324034/324735/453492/index.html>, 2014-4-10.
- [28] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [29] 李令军, 王英, 李金香, 等. 2000~2010 北京大气重污染研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 23-30.
- [30] 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): 431-436.
- [31] 李令军, 李金香, 辛连忠, 等. 北京市春节期间大气污染分析[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 537-541.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行