

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

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

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国 2000 ~ 2010 年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用 SPAMS 研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区 VOCs 特征及 O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体 CDOM 中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH 对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA 对 Pd/Fe 体系还原脱氯 2,4-D 的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的 A ² O 与 BIOLAK 活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米 Ni/Fe 用于去除染料生产废水二级生物处理出水中 AOX 和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和 1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对 Cd 淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根 (AM) 对香蒲耐 Cd 胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状 Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及 N ₂ O 产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事 (557) 《环境科学》征稿简则 (594) 信息 (419,442,781)	

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征

张六一¹, 刘源², 乔保清¹, 付川^{1*}, 王欢博², 黄怡民¹, 杨复沫^{1,2*}

(1. 重庆三峡学院三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室, 重庆 404100; 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)

摘要: 为研究三峡库区腹地大气微量金属沉降特征, 在万州城区采样点收集了 2014 年 1 月~6 月的干湿沉降样品, 在云阳晒经村(工厂区)、云阳高阳(场镇郊区)、开县白家溪(自然保护区)、开县野塘溪(县郊区)、开县大德(乡村区)收集了 2014 年 4 月的干湿沉降样品; 分别测定了样品的 pH 值、电导率和微量金属元素(Al、As、B、Ba、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mn、Pb、Ni、Sb、Sr、Sn、Ti、Zn、V)。结果表明: ①万州城区酸雨频率为 48.44%, 酸雨主要集中在 1~4 月。不同功能区酸雨频率高低顺序为: 工厂区 > 万州城区 > 县郊区 > 场镇郊区 > 自然保护区 > 乡村区。②湿沉降中 20 种微量金属质量浓度均低于国家地表水环境质量标准Ⅲ级标准限值, 而 Cd、Cu、Pb 和 Zn 不同程度超Ⅰ级标准限值, 其中工厂区相对严重。③万州城区干湿沉降提取液 pH 值在 4.91~6.74 之间, 平均为 5.79。各功能区干沉降酸度高低顺序为: 工厂区 > 县郊区 > 万州城区 > 乡村区 > 场镇郊区 > 自然保护区, 这与湿沉降酸度顺序完全一致, 说明干湿沉降中主要酸性物质具有同源性。④万州城区 Ba、Co、Cu、Cr、Li、Mn、Ni、Sr、Zn 干沉降超过湿沉降, 而 Al、As、B、Bi、Cd、Fe、Pb、Sb、Sn、Ti、V 湿沉降大于干沉降。富集因子分析表明, 万州城区 Al 为中等富集, Bi 和 Cd 显著富集。

关键词: 干湿沉降; 微量金属; 三峡库区; 腹地; 酸雨

中图分类号: X131.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0466-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.009

Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China

ZHANG Liu-yi¹, LIU Yuan², QIAO Bao-qing¹, FU Chuan^{1*}, WANG Huan-bo², HUANG Yi-min¹, YANG Fu-mo^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in Three Gorges Reservoir, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of atmospheric trace metals deposition in the hinterland of the Three Gorges Reservoir, the wet and dry deposition samples were collected at an urban area sampling site in Wanzhou during January to June 2014. Besides, the samples were collected at five other sampling sites in April 2014 for comparative analysis, including factory region, town suburb, nature reserve, county suburb, and rural area. pH, conductivity, and trace metals (Al, As, B, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Pb, Ni, Sb, Sr, Sn, Ti, Zn, V) were analyzed. In urban area, the acid rain frequency was 48.44%, and the acid rain occurred mainly in the period of January to April. The order of acid rain frequency in various functional areas was factory region > urban area > county suburb > town suburb > nature reserve > county rural area. All of the trace metals in wet deposition during the sampling period were lower than the National Environmental Quality Standard for Surface Water Standard of Class III. Cd, Cu, Pb and Zn were found exceeding the standard of class I, and the pollution in factory region was more serious compared to other functional areas. The extract pH of dry deposition in urban area was in the range of 4.91-6.74, with an average value of 5.79. The order of dry deposition in various functional areas was factory region > county suburb > urban area > county rural area > town suburb > nature reserve, which was exactly the same as that of the wet deposition, indicating the similar sources of dry and wet deposition. In urban area, the contents of Ba, Co, Cu, Cr, Li, Mn, Ni, Sr, Zn in dry deposition were greater than those in wet deposition, but the contents of Al, As, B, Bi, Cd, Fe, Pb, Sb, Sn, Ti, V showed the opposite trend. Analysis of the enrichment factors showed that Al was in moderate enrichment, while Bi and Cd were significantly enriched.

Key words: wet and dry deposition; heavy metals; Three Gorges Reservoir; hinterland; acid rain

大气微量金属沉降是指大气中微量金属经过迁移转化, 重新回到陆地和水体的过程。随着人为排

收稿日期: 2015-07-26; 修订日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375123); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-14); 重庆市教委科技项目(KJ1501006); 重庆三峡学院项目(14QN24); 三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室项目(WE PKI2013MS-07)

作者简介: 张六一(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: zhang.liuyi@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fmyang@cigit.ac.cn; casual2005@163.com

放日益增加,大气中微量元素尤其是有害微量元素含量急剧增加,在一些重工业和发达城市地区尤为显著^[1,2]. 大气中有害金属元素主要来自工业生产、汽车尾气、轮胎磨损和建筑活动等产生的含有有害金属元素的细小颗粒物^[3]. 这些元素的富集不仅直接危害人体健康,也可在地表环境中产生长期的潜在危害. 最终,它们在随颗粒物迁移过程中通过自然沉降和雨水淋溶作用进入土壤和水体,产生复合交叉污染^[4].

欧美较早开展了大气微量金属元素干湿沉降研究^[5~10],其中欧洲国家基于长期规范监测每年发布数据报告^[11]. 近十年来,国内大气微量金属沉降研究也取得了一定进展. 战雯静等^[12]研究表明大气沉降是长江口水体中微量金属的重要来源. 潘月鹏等^[13]分析了京津冀区域微量金属元素富集因子,发现 Zn、Pb、Cu 这 3 种元素出现不同程度富集. 杨忠平等^[14,15]报道了重金属干湿沉降造成长春市表层土壤中重金属不同程度的累积,其中 Zn 的累积最为明显. 汤奇峰等^[16]发现成都经济区土壤中 Pb 和 Hg 的累积与大气干湿沉降密切相关. 有研究表明,我国青藏高原大气中微量金属元素也存在一定程度富

集^[17,18]. 这些研究主要集中在大气微量元素的粒径分布^[19]、来源解析^[20~22]、迁移转化和风险评价^[23~25]、监测方法^[26]等方面;在研究区域上则主要集中在大中城市^[27,28]、近海海域^[29]、大型湖泊^[30]等生态敏感地区.

三峡库区是长江中下游地区的生态环境屏障和西部生态环境建设的重点,其大气环境变化已受到广泛关注. 一些学者开展了三峡库区大气降水化学组成特征和来源、库区城市 PM_{2.5} 中金属元素含量等研究^[31~33]. 已有研究表明^[34~36],大气沉降是导致三峡库区土壤和水体出现重金属污染的重要因素. 然而,迄今缺乏对库区大气中微量元素干湿沉降方面的研究. 为此,本文针对三峡库区开展大气微量金属沉降研究,不仅可丰富库区大气环境的研究内容,还将为库区生态环境保护提供大气沉降理论支持.

1 材料与方法

1.1 采样点

本研究共设 6 个不同功能区采样点,采样点周边环境描述及具体分布情况分别如表 1 和图 1 所示.

表 1 干湿沉降采样点特征

Table 1 Characteristics of sampling sites of dry and wet deposition		
采样点	采样时间(年-月)	采样点周围环境描述
沙龙路(T)	2014-01 ~ 2014-06	万州城区,周围为居民区,无化工厂等污染源
晒经村(S)	2014-04	乡村工厂区,距长江主干道约 200 m,采样点在养蜂基地楼顶,养蜂基地加工和生产蜂箱,周围无其它污染源
高阳(G)	2014-04	高阳场镇郊区,四周开阔,无化工厂等污染源
白家溪(B)	2014-04	彭溪河湿地自然保护区,四周开阔,无化工厂等污染源
野塘溪(Y)	2014-04	县郊区,四周开阔,无化工厂等污染源
大德(D)	2014-04	乡村区,四周开阔,无化工厂等污染源

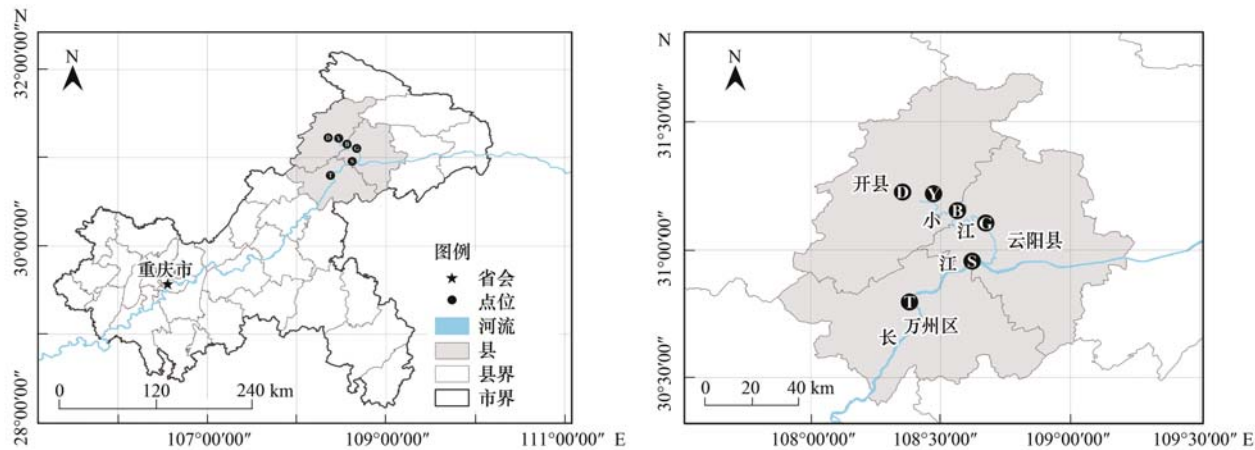


图 1 干湿沉降采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites of dry and wet deposition

1.2 样品采集及分析

采用自动干湿沉降采样器(长沙湘蓝, APS-III 型)采集干湿沉降样品. 该仪器在没有发生降水时湿沉降盖子关闭, 此时收集干沉降; 发生降水时干沉降盖子关闭, 并自动收集湿沉降样品. 湿沉降样品以天为单位采集, 干沉降样品每两周采一次, 收集的干沉降样品用 100 mL 去离子水冲洗定容^[37], 得到干沉降提取液.

由于 pH 值影响颗粒物中微量金属元素的溶出^[23], EC 可表征溶液中离子浓度^[37,38]. 通过 pH 和 EC 不仅可以了解微量金属溶液环境, 还可以反映大气颗粒物受人为污染程度. 所以, 在每次收集样品后, 先取出 10 mL 样品测定其 pH 值(上海雷磁 pH-3C 型)与电导率(美国哈希 sensION5 型), 测量前分别用标准缓冲液和标准氯化钠溶液对 pH 计和电导率仪进行标定. 剩余样品用 0.45 μm 滤膜过滤, 然后置于 4℃ 冰箱中待测. 万州城区采样点收集了 2014 年 1~6 月的样品, 其它 5 个采样点收集了 2014 年 4 月的样品.

采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES, PE 公司 Optima7000)测定了样品中 Al、As、B、Ba、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Li、Mn、Pb、Ni、Sb、Sr、Sn、Ti、Zn、V 的质量浓度. 多元素混合标样(GSB04-1767-2004)购自国家标准物质网, 质量浓度为 100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$. 用超纯水(电阻率 > 18.25 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)分别将标样配制质量浓度为 0、50、100、200、500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 所测元素标准曲线线性关系均达 0.999. 同时, 采用国家一级标准物质进行质量监控^[14], 结果表明, 各元素测试精密度在 2%~5% 之间, 回收率在 90%~110% 之间; 重复性测试检验表明, 相对偏差均小于 40% 的允许限, 分析合格率 100%.

干湿沉降量计算公式^[39]:

$$M = (Q_{\text{干}}/S_{\text{干}}) + (Q_{\text{湿}}/S_{\text{湿}})$$

式中, M 为单位面积总沉降量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$), $Q_{\text{干}}$ 为单位面积干沉降量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$), $Q_{\text{湿}}$ 为单位面积湿沉降量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$), $S_{\text{干}}$ 为干沉降采样面积 (m^2), $S_{\text{湿}}$ 为湿沉降采样面积 (m^2). 仪器干湿沉降采样口为圆形结构, 其内径分别为 15 cm 和 30 cm, 计算得到干湿沉降采样面积分别为 176.625 cm^2 和 706.5 cm^2 .

2 结果与讨论

2.1 湿沉降特征

2.1.1 降雨量及 pH

研究期间, 万州城区平均月降雨量为 90.13

mm, 半年总降雨量为 540.80 mm. 在 64 个降水样品中, 有 31 个样品为酸雨 ($\text{pH} < 5.6$), 酸雨频率为 48.44%. 样品电导率 (EC) 范围为 8.19~234 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 平均电导率为 55.05 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 从图 2 可知: 降雨量在 1~6 月呈上升趋势, 而雨水 pH 逐月升高, 表明 2014 前半年, 重庆万州的酸雨主要集中在 1~4 月 (酸雨频率为 83.87%), 降雨主要集中在 4~6 月 (占半年降雨量的 83.85%). 出现此种趋势可能是因为酸性污染物排放和降雨量多少共同作用的结果. 1、2 月万州气温较低, 居民燃煤量较大, 造成酸性污染物排放增加^[40]; 另一方面, 年初干旱少雨, 酸性物质容易在少量的雨水中聚集, 而随着雨水的增加, 酸性物质逐渐得到稀释, 酸雨频率反而变少.

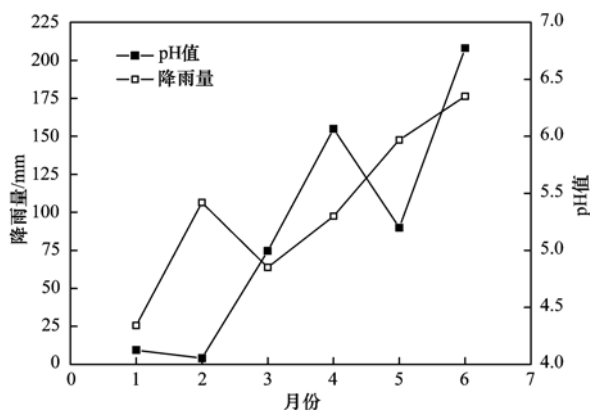


图2 降雨量与 pH 值逐月变化

Fig. 2 Monthly variation of precipitation and pH values of precipitation

表2反映了2014年4月三峡库区腹地不同功能区采样点的降雨量、pH和EC情况. 从中可知, 不同功能区4月总降雨量高低顺序为: 万州城区 > 县郊区 > 乡村区 > 场镇郊区 > 工厂区 > 自然保护区; 降水平均酸度高低顺序为: 工厂区 > 县郊区 > 万州城区 > 乡村区 > 场镇郊区 > 自然保护区; 酸雨频率高低顺序为: 工厂区 > 万州城区 > 县郊区 > 场镇郊区 > 自然保护区 > 乡村区. 工厂区雨水酸度和酸雨频率分别为 4.92% 和 90%, 都为几个点最高, 这主要是因为采样点养蜂基地的影响和长江干流船舶排放污染物所致. 万州城区和县郊区采样点的酸雨频率也分别达到了 78.57% 和 61.54% 的较高程度, 这可能由于城区生活, 交通, 工业等综合环境影响的结果. 而位于场镇郊区、自然保护区和乡村区采样点的酸雨频率分别 47.06%、45.54% 和 42.86%, 相差不大, 这说明越靠近城区的地方, 出现酸雨的频率越高. 从整个研究区域来看, 4 月库区腹地酸雨频率超过了 60%, 降水平均 pH 低于 5.6,

说明该地区降水存在一定程度酸化. 虽然 4 月 6 个采样点平均 EC 高低顺序为: 县郊区 > 万州城区 > 乡村区 > 自然保护区 > 工厂区 > 场镇郊区, 但是 EC 的平均值相差不大, 范围为 30.97 ~ 34.61 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. EC 平均值均低于我国湖南 (56.6

$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[41]、深圳 (42.2 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[42] 和北京 (66.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[43] 等地, 但均高于我国瓦里山的降水背景值 (14.8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[44], 表明三峡库区腹地降水受人类活动影响虽然不及湖南、深圳和北京, 但也受到了一定程度影响.

表 2 4 月各采样点降水特征

Table 2 Precipitation characteristics of different sampling sites in April								
采样点	样品个数	雨量范围	降雨总量 /mm	pH 范围	平均 pH	酸雨频率 /%	EC 范围 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	平均 EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
T	14	2.3 ~ 23.6	154.9	4.70 ~ 6.16	5.3	78.57	10.55 ~ 85.80	34.50
S	10	2.2 ~ 15.3	97.2	4.13 ~ 6.09	4.92	90.00	12.20 ~ 76.60	31.25
Y	13	0.3 ~ 21.9	117.1	4.16 ~ 6.36	5.18	61.54	12.86 ~ 52.00	34.61
G	17	0.7 ~ 18.9	108.4	4.29 ~ 6.64	5.4	47.06	3.16 ~ 67.10	30.97
D	14	2.0 ~ 16.9	112.8	4.03 ~ 6.66	5.36	42.86	16.51 ~ 51.40	33.86
B	11	2.2 ~ 13.4	69.6	4.06 ~ 6.86	5.64	45.45	12.16 ~ 72.60	32.01

2.1.2 微量金属湿沉降特征

由于所有湿沉降样品中微量金属质量浓度均未超过《中华人民共和国地表水环境质量标准》Ⅲ类标准限值, 所以下面将以国家地表水 I 类标准限值做比较分析. 与 I 类标准值相比 (表 3), 万州城区情况为: 4 月 Cd 略微超标, 1 月 Zn 略超标, 1 月和 2 月 Pb 也超标 1 倍. 说明万州降水总体良好, 但也会受到一些不定因素影响. 影响雨水中微量金属元素的因素很多, 包括季节、雨量、降雨时间、风速风向及污染源排放等^[45,46]. 比较各月份微量金属元素的平均质量浓度的变异系数得出, B、Cd、Cr、Pb、Ni 变化最大, 说明其不同月份来源不稳定, 可能受到比如 pH、雨量等影响; Fe、Bi、Li、Sb、Ti、V 次之, 而 Al、As、Ba、Co、Cu、Mn、Sr、Zn 变化最小, 说明在不同月份其来源比较稳定. 由表 3 可知, 包括 Cd、Pb、Zn 等在内的大部分微量金属元素在 1 月和 2 月的质量浓度出现相对较高的浓度值, 可能冬季万州城区较高浓度的大气颗粒物造成了冬季沉降量的增加^[40].

4 月三峡库区腹地各采样点微量金属元素质量浓度可见 (表 3), 库区腹地大气降水微量金属元素随区域不同而略有差异, 总体而言, 绝大部分元素都低于国家地表水环境质量标准 I 级标准限值, 存在超标的元素有 Cd、Cu 和 Pb. 其中, 万州城区和工厂区降水中的 Cd 超标, 其中工厂区超标达 1 倍; 工厂区和自然保护区降水中 Pb 元素略有超标; 工厂区 Cu 元素超标 4 倍. 从几种超标元素采样点分布来看, 城区环境和工厂区环境对大气微量金属污染影响较大.

2.2 干沉降特征

2.2.1 干沉降提取液 pH 与 EC

图 3 为 1 ~ 6 月万州城区干沉降提取液的 pH 和 EC 月均值变化. 干沉降提取液 pH 在 4.91 ~

6.74 之间, 平均值为 5.79, 可见万州城区干沉降酸性较大; 其中 1 和 2 月 pH 均小于 5.00, 说明这两个月干沉降中含有大量酸性物质, 可能与冬季使用燃煤增加有关; 而 3 ~ 6 月 pH 接近中性且变化不大, EC 值则降低, 说明此时干沉降中酸性物质相对减少. 图 3 中还可看出 EC 呈降低趋势, 表明干沉降中水溶性离子含量在减少.

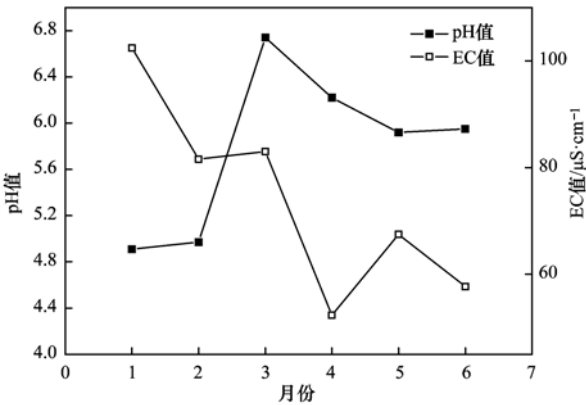


图 3 万州城区干沉降 pH 与 EC 月均值

Fig. 3 Mean values of pH and EC in dry deposition at urban area of Wanzhou

图 4 比较了不同功能区采样点的 pH 及 EC 值. 4 月库区腹地各采样点 pH 范围 5.38 ~ 6.44, 平均 pH 为 6.08, 比北京地区低了很多^[37]. 其干沉降酸度高低顺序为: 工厂区 > 县郊区 > 万州城区 > 乡村区 > 场镇郊区 > 自然保护区, 这与前面讨论的 4 月同地区的降雨酸度顺序完全一致, 说明其干沉降的酸性物质与湿沉降的酸性物质具有同源性. 各采样点 EC 值高低顺序为: 县郊区 > 乡村区 > 工厂区 > 万州城区 > 场镇郊区 > 自然保护区, 范围为 47.78 ~ 79.50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 平均值为 57.71 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 比湿沉降的 EC 值 (32.87 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 高.

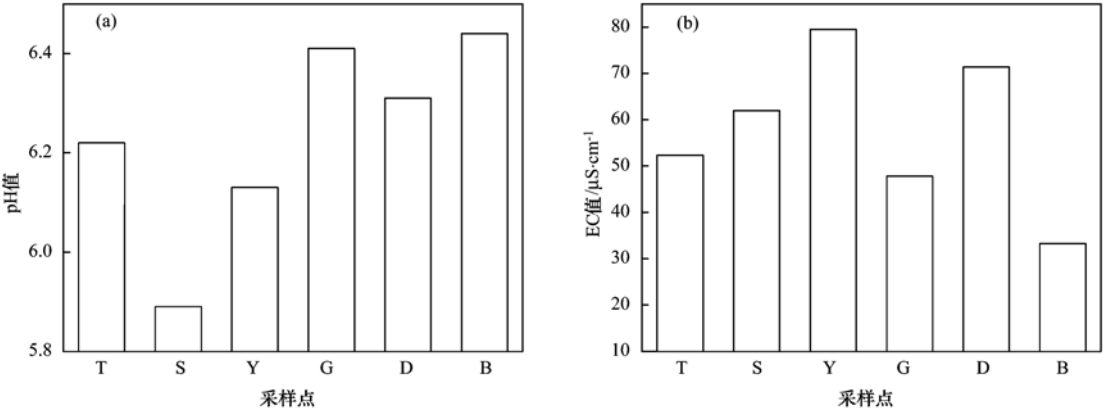


图 4 各采样点干沉降 pH 值与 EC 值

Fig. 4 The pH and EC values of dry deposition at different sampling sites

表 3 三峡库区腹地降水微量金属元素月平均质量浓度/μg·L⁻¹

Table 3 Mean monthly concentrations of trace metals in rain water in the hinterland of the Three Gorges Reservoir/μg·L ⁻¹										
月份	Al	As	B	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
1	114	ND ²⁾	14.9	11.9	0.5	ND	ND	ND	1.4	84.4
2	47.4	0.6	7.8	7.7	7.4	0.7	ND	1.7	5.9	26.2
3	21.0	ND	0.4	3.3	7.3	ND	ND	ND	1.7	8.5
4	T	35.0	0.5	1.0	5.6	8.1	1.1	ND	ND	5.9
	S	28.0	1.4	ND	4.1	6.7	2.0	ND	ND	49.2
	Y	27.9	0.9	ND	5.2	9.5	0.1	ND	ND	3.8
	G	25.1	1.1	ND	5.1	7.6	0.1	ND	ND	1.4
	D	35.1	0.9	ND	6.7	9.8	0.2	ND	ND	3.9
	B	26.0	ND	0.3	6.0	8.5	0.2	ND	ND	2.1
5	31.1	0.7	0.1	5.5	1.7	0.2	ND	ND	0.9	16.7
6	15.9	0.6	2.3	4.1	0.6	0.2	ND	ND	1.9	10.6
标准 ¹⁾		50	500	700		1	1 000	10	10	300
月份	Li	Mn	Pb	Ni	Sb	Sr	Sn	Ti	Zn	V
1	1.5	25.8	22.3	ND	2.4	8.0	ND	3.2	64.5	3.2
2	1.2	4.8	21.8	2.0	4.2	4.9	ND	2.8	31.1	2.1
3	1.0	2.0	3.6	ND	3.0	3.7	1.0	2.0	13.9	0.8
4	T	ND	21.4	1.6	0.6	6.3	2.6	0.5	28.7	0.5
	S	ND	9.1	15.0	0.3	6.6	6.3	0.4	22.3	0.3
	Y	ND	10.6	2.9	ND	5.3	3.9	0.2	21.2	0.4
	G	ND	11.5	2.4	0.2	6.4	4.8	0.2	21.9	0.5
	D	ND	17.1	4.3	0.3	6.3	2.1	0.4	25.2	0.3
	B	0.2	14.4	14.8	0.4	6.3	7.5	ND	40.6	0.4
5	0.2	12.4	1.8	ND	0.9	4.6	0.9	0.3	19.2	0.5
6	ND	7.4	1.4	0.2	0.3	3.8	0.2	ND	27.1	0.4
标准 ¹⁾		100	10	20	5			100	50	50

1) 参照《中华人民共和国地表水环境质量标准》GB 3838-2002 I 类水质标准; 2) ND: 未检出

表 4 万州城区前半年干湿沉降量/mg·m⁻²

Table 4 Dry and wet deposition in first half of 2014 in Wanzhou city/mg·m ⁻²										
元素	Al	As	B	Ba	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
湿沉降量	9.84	0.24	0.22	1.67	2.36	0.29	0.03	0.02	0.86	6.03
干沉降量	5.08	0.17	ND	2.45	0.66	0.24	0.04	0.05	1.40	2.53
总沉降量	14.92	0.41	0.22	4.12	3.02	0.53	0.07	0.07	2.26	8.56
元素	Li	Mn	Pb	Ni	Sb	Sr	Sn	Ti	Zn	V
湿沉降量	0.09	4.44	1.27	0.10	0.36	1.52	0.41	0.25	8.67	0.18
干沉降量	0.12	4.86	0.24	0.32	ND	3.56	0.12	0.06	16.93	0.06
总沉降量	0.21	9.30	1.51	0.42	0.36	5.08	0.53	0.31	25.60	0.24

2.2.2 大气微量金属干沉降特征

图5为万州城区微量金属元素1~6月的干沉降量及其在总沉降中的质量分数。干沉降量超过 $1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的元素分别是:Zn、Al、Mn、Sr、Fe、Ba、Cu,其余元素干沉降量相对较小。由图5(b)可知,万州城区干沉降量占总沉降量大于50%的金属元素有:Ba、Co、Cu、Cr、Li、Mn、Ni、Sr、Zn,说明这

些元素以干沉降为主。而其它元素干沉降小于50%,以湿沉降为主。

2.3 富集因子分析

富集因子(EF)在大气颗粒物源辨析中的应用在于评估污染物在环境中的富集程度。一般认为,当EF小于2时,为非富集元素,主要来自于地壳;当EF增大到2~5,为中等程度富集;当EF介于5

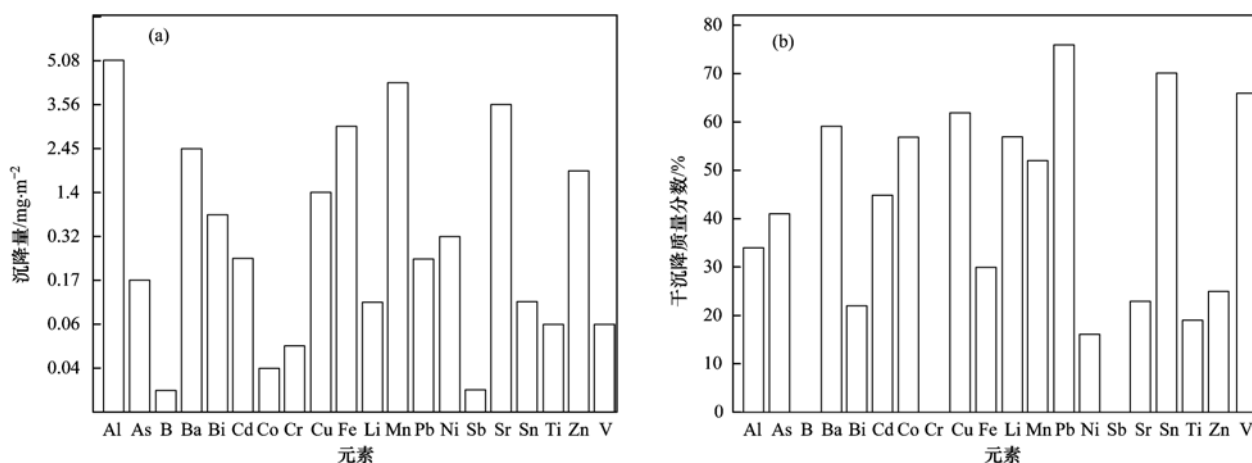


图5 万州城区微量金属元素1~6月干沉降量与干沉降质量分数

Fig. 5 Amount of dry deposition and percentages of trace metals in dry deposition during the period of January to June in urban Wanzhou

~20,认为该元素显著富集;当EF增加到20~40,呈现出较强富集的特性;当EF大于40,则为极强富集,人为污染占有相当比例^[47,48]。富集因子的计算公式:

$$EF = \frac{(C_x/C_{ref})_{sample}}{(C_x/C_{ref})_{background}}$$

式中, $(C_x/C_{ref})_{sample}$ 与 $(C_x/C_{ref})_{background}$ 分别为样品和背景物质中某元素与参比元素的比值。国际上一般选择Fe、Al或Si等地壳中分别相对比较均匀,含量比较稳定的矿质元素作为参比元素^[47,49]。本研究取Fe作为参比元素。其土壤背景值来自于中国土壤背景平均值^[2,50]。通过计算得出,万州城区20种微量金属元素中,Al元素富集因子均值为2.62,处于中等富集程度,表明Al元素为自然源和人为源共同贡献^[51];Bi和Cd两种元素富集因子均值分别为9.48和8.32,为显著富集,表明出现了较多的人为排放^[51];其余元素富集因子均小于2,说明其主要来自自然源,受人为活动影响不显著。

2.4 微量金属干湿沉降量讨论

本文研究对象为水溶性的微量金属元素部分,获得的金属元素沉降量存在一定程度偏低,但对于一些水溶性很高的微量金属元素与国内外地区仍有比较价值^[1]。表5选择了万州城区5种高水溶性重

金属元素干湿沉降量与城市化和工业较发达的北美五大湖区(Lake Superior、Lake Michigan、Lake Erie)、欧洲北海(North Sea)、德国Creteil和Chatou,及国内北京、太湖流域、重庆主城等地区沉降量相比较。万州城区砷沉降量比北京和成都都低得多;Cu沉降量比国内地区低,与国外相关地区相当;万州城区Cd沉降量比成都和华北地区低,比重庆城区等其他地区高;Pb沉降量比1993年美国五大湖地区略高,比国内城市低;Zn沉降量与国内长春相当,比长三角地区低而比国外大多数地区高。总体而言,万州Cd沉降量比表5中国内外大多数地区大,应该引起重视。

4月各功能区微量金属沉降比较而言,大部分元素在万州城区呈现较高的沉降量,而Cu、Cd、As、Pb在工厂区呈现较高沉降量,而其它几个采样点各元素沉降量相差不大。国际上,不同地区的微量金属元素的大气沉降量由于经济发展模式和产业结构类型不同而各不相同,对大气的影响也有所差异。三峡库区腹地以农业经济为主,少有大型污染型企业,总体而言,三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降水平较其它发达地区低。但在城市区及一些工业区域,由于受到交通、冶金、建筑、化工等影响,也有少量金属元素沉降量较高,例如Cd、Pb、Zn等

表 5 万州城区大气几种微量金属元素干湿沉降量与其它地区比较¹⁾

Table 5 Comparison of atmospheric dry and/or wet deposition of trace metal elements between urban Wanzhou and other regions

地区(研究时段)	沉降量/mg·m ⁻²					文献
	As	Cu	Cd	Pb	Zn	
Lake Superior (1993 ~ 1994 年)	—	3.10	—	1.50	8.80	[52]
Lake Michigan (1993 ~ 1994 年)	—	1.90	—	1.60	6.0	[52]
Lake Eric (1993 ~ 1994 年)	—	4.20	—	1.80	17.0	[52]
North Sea (1993 ~ 1994 年)	—	1.24	—	3.52	6.50	[53]
Creteil (1999 ~ 2000 年)	—	10	0.34	9.5	15	[6]
Chatou (1994 ~ 1995 年)	—	8	0.34	31	76	[6]
香港 (2001 ~ 2002 年)	—	22.5	0.045	6.75	117	[54]
珠江三角洲(2001 ~ 2002 年)	—	18.6	0.07	12.7	104	[54]
大庆市(2008 ~ 2009 年)	0.81	—	0.17	15.71	78.81	[55]
长春(2006 ~ 2007 年)	—	8.22	0.25	12.31	48.15	[15]
北京昌平(2005 ~ 2006 年)	4.28	—	0.19	45.69	—	[39]
华北地区(2007 ~ 2010 年)	12.75	45.3	1.62	79.5	106.5	[1]
成都(2004 ~ 2005 年)	4.94	—	4.04	106.7	—	[16]
太湖流域(2009 ~ 2010 年)	—	—	0.34	7.57	101.0	[30]
重庆城区(2011 ~ 2012 年)	4.50	13.00	0.44	30.25	76.26	[56]
万州城区(2014-01 ~ 2014-06)	0.41	2.26	0.53	1.51	25.6	本研究

1) —: 未测

元素在部分采样点沉降量较高,应该引起重视.

3 结论

(1) 万州城区 2014 年 1 ~ 6 月酸雨频率为 48.44%,酸雨主要集中在 1 ~ 4 月,其酸雨频率为 83.87%. 4 ~ 6 月降雨量较大,占半年总降雨量 83.85%. 4 月库区腹地各功能区采样点酸雨频率高低顺序为:工厂区 > 万州城区 > 县郊区 > 场镇郊区 > 自然保护区 > 乡村区.

(2) 三峡库区腹地大气降水中微量金属元素随区域不同而略有差异. 与国家地表水环境质量标准 I 级标准限值相比,Cd、Cu 和 Pb 存在超标,其中,万州城区和工厂区降水中的 Cd 出现超标,工厂区超标 1 倍;工厂区和自然保护区降水中 Pb 元素略有超标;工厂区 Cu 元素超标 4 倍.

(3) 万州城区 1 ~ 6 月干沉降提取液 pH 在 4.91 ~ 6.74 之间,平均 pH 为 5.79. 4 月各采样点干沉降酸度高低顺序为:工厂区 > 县郊区 > 万州城区 > 乡村区 > 场镇郊区 > 自然保护区,这与降雨酸度顺序完全一致,说明其干沉降的酸性物质与湿沉降的酸性物质具有同源性.

(4) 万州城区干沉降中 Ba、Co、Cu、Cr、Li、Mn、Ni、Sr、Zn 大于湿沉降,而 Al、As、B、Bi、Cd、Fe、Pb、Sb、Sn、Ti、V 湿沉降大于干沉降. 富集因子分析表明,Al 为中等富集,Bi 和 Cd 产生显著富集,而其余元素未表现出富集.

参考文献:

[1] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.

[2] Huang S S, Tu J, Liu H Y, *et al.* Multivariate analysis of trace element concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(36): 5781-5790.

[3] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1584-1589.

[4] 周传龙, 代朝猛, 张亚雷, 等. 大气重金属引发交叉污染的研究进展 [J]. 环境化学, 2012, **31**(9): 1344-1348.

[5] Lazrus A L, Lorange E, Lodge J P Jr. Lead and other metal ions in United States precipitation [J]. Environmental Science & Technology, 1970, **4**(1): 55-58.

[6] Azimi S, Rocher V, Garnaud S, *et al.* Decrease of atmospheric deposition of heavy metals in an urban area from 1994 to 2002 (Paris, France) [J]. Chemosphere, 2005, **61**(5): 645-651.

[7] Biegalski S, Landsberger S. An evaluation of atmospheric deposition of trace elements into the Great Lakes [J]. Biological Trace Element Research, 1999, **71-72**(1): 247-256.

[8] Gichuki S W, Mason R P. Wet and dry deposition of mercury in Bermuda [J]. Atmospheric Environment, 2014, **87**: 249-257.

[9] Connan O, Maro D, Hébert D, *et al.* Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France [J]. Atmospheric Environment, 2013, **67**: 394-403.

[10] Lynam M M, Dvonch J T, Hall N L, *et al.* Spatial patterns in wet and dry deposition of atmospheric mercury and trace elements in central Illinois, USA [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(6): 4032-4043.

- [11] Aas W, Breivik K. Heavy metals and POP measurements[M]. Kjeller, Norway: Norwegian Institute for Air Research (EMEP/CCC- Report 3/2012), 2010. 5-6.
- [12] 战雯静, 张艳, 马蔚纯, 等. 长江口大气重金属污染特征及沉降通量[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 900-905.
- [13] 潘月鹏, 王跃思, 杨勇杰, 等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 553-559.
- [14] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥. 长春市城区重金属大气干湿沉降特征[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(1): 28-34.
- [15] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等. 长春市城区大气湿沉降中重金属及 pH 值调查[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, **39**(5): 887-892.
- [16] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. 地学前缘, 2007, **14**(3): 213-222.
- [17] Huang J, Kang S C, Zhang Q G, *et al.* Atmospheric deposition of trace elements recorded in snow from the Mt. Nyainqêntanglha region, southern Tibetan Plateau[J]. Chemosphere, 2013, **92**(8): 871-881.
- [18] Dong Z W, Kang S C, Qin X, *et al.* New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **529**: 101-113.
- [19] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J]. 环境化学, 2007, **26**(5): 675-679.
- [20] 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 等. 北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2735-2742.
- [21] 陈立齐, 王志红, 杨绪林, 等. 台湾海峡西部海域大气中金属的特征: II. 大气颗粒金属的来源和入海通量[J]. 海洋学报, 1999, **21**(1): 23-31.
- [22] 白莉, 王中良, 黄毅. 西安地区大气降水的痕量金属特征及其来源解析[J]. 干旱区地理, 2010, **33**(3): 385-393.
- [23] 吕玄文, 陈春瑜, 黄如秋, 等. 大气颗粒物中重金属的形态分析与迁移[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, **33**(1): 75-78.
- [24] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, *et al.* Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(4): 726-733.
- [25] Lee P K, Choi B Y, Kang M J. Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk[J]. Chemosphere, 2015, **119**: 1411-1421.
- [26] Sun S Q, Wang D Y, He M, *et al.* Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Chongqing, China—based on moss bag technique[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **148**(1-4): 1-9.
- [27] 李山泉, 杨金玲, 阮心玲, 等. 南京市大气沉降中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 22-29.
- [28] 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 等. 济宁市近地表大气降尘地球化学特征及污染来源解析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 40-48.
- [29] Hsu S C, Wong G T F, Gong G C, *et al.* Sources, solubility, and dry deposition of aerosol trace elements over the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2010, **120**(1-4): 116-127.
- [30] 余辉, 张璐璐, 李焕利, 等. 太湖流域重金属湿沉降特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(12): 1331-1338.
- [31] 鲁群岷, 赵亮, 李莉, 等. 三峡库区降水化学组成及时空变化特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1682-1689.
- [32] 吴起鑫, 韩贵琳. 三峡水库库首地区大气降水化学特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(3): 385-390.
- [33] 张六一, 付川, 杨复沫, 等. 微波消解 ICP-OES 法测定 PM_{2.5} 中金属元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(11): 3109-3112.
- [34] 敖亮, 雷波, 王业春, 等. 三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 179-185.
- [35] 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2390-2398.
- [36] 王图锦, 杨清伟, 刘雪莲. 三峡库区 172 m 蓄水位实现后干流水体溶解态重金属含量变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(9): 1195-1200.
- [37] 蔡阳阳, 杨复沫, 贺克斌, 等. 北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1071-1076.
- [38] 陈魁, 肖致美, 李鹏, 等. 天津市大气降水化学组分变化趋势及来源研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 956-964.
- [39] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. 地质通报, 2008, **27**(2): 257-264.
- [40] Zhang L Y, Huang Y M, Liu Y, *et al.* Characteristics of carbonaceous species in PM_{2.5} in Wanzhou in the hinterland of the Three Gorges Reservoir of Northeast Chongqing, China[J]. Atmosphere, 2015, **6**(4): 534-546.
- [41] 张龚, 曾光明, 蒋益民, 等. 湖南省大气湿沉降化学研究[J]. 中国环境监测, 2003, **19**(5): 7-11.
- [42] 牛彧文, 何凌燕, 胡敏. 深圳大气降水的化学组成特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1014-1019.
- [43] Yang F, Tan J, Shi Z B, *et al.* Five-year record of atmospheric precipitation chemistry in urban Beijing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(4): 2025-2035.
- [44] 汤洁, 薛虎圣, 于晓岚, 等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(4): 420-425.
- [45] Yuan Y, Hall K, Oldham C. A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment[J]. Science of the Total Environment, 2001, **266**(1-3): 299-307.
- [46] Wang C X, Zhu W, Peng A, *et al.* Comparative studies on the concentration of rare earth elements and heavy metals in the atmospheric particulate matter in Beijing, China, and in Delft, the Netherlands[J]. Environment International, 2001, **26**(5-6): 309-313.
- [47] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特

- 征和来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(11): 3087-3091.
- [48] Shi G, Chen Z, Teng J, *et al.* Fluxes, variability and sources of cadmium, lead, arsenic and mercury in dry atmospheric depositions in urban, suburban and rural areas [J]. *Environmental Research*, 2012, **113**: 28-32.
- [49] Fernández-Olmo L, Puente M, Montecalvo L, *et al.* Source contribution to the bulk atmospheric deposition of minor and trace elements in a Northern Spanish coastal urban area [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **145-146**: 80-91.
- [50] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 等. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J]. 中国环境监测, 1991, **7**(1): 1-6.
- [51] Lynam M M, Dvonch J T, Hall N L, *et al.* Trace elements and major ions in atmospheric wet and dry deposition across central Illinois, USA[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2015, **8**(1): 135-147.
- [52] Sweet C W, Weiss A, Vermette S J. Atmospheric deposition of trace metals at three sites near the Great Lakes[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, **103**(1-4): 423-439.
- [53] Injuk J, Van Grieken R, De Leeuw G. Deposition of atmospheric trace elements into the North Sea: coastal, ship, platform measurements and model predictions [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(17): 3011-3025.
- [54] Wong C S C, Li X D, Zhang G, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 767-776.
- [55] 汤洁, 李娜, 李海毅, 等. 大庆市大气干湿沉降重金属元素通量及来源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(2): 507-513.
- [56] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2490-2496.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 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	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