

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地桤木类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源

李月梅¹, 潘月鹏², 王跃思^{2*}, 王英锋¹, 李杏茹¹

(1. 首都师范大学化学系, 北京 100048; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为了解华北工业地区降水中金属元素的污染特征及其来源, 使用干湿沉降自动观测仪采集了河北唐山市 2009 年 12 月 ~ 2010 年 11 月大气降水样品, 使用 ICP-MS 对样品中 25 种金属元素的浓度进行了分析。结果表明, 唐山降水中地壳元素 (Ca、Mg、Na、K、Fe 和 Al) 占所测元素浓度总量的 97.72%, 重金属 (Zn、Mn、Pb、Ba、Sb、Cu、Ni、As、V、Co 和 Se) 仅占 2.25%; Zn 和 Ca 分别是含量最高的重金属和地壳元素, 加权平均浓度分别为 $88.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。降水中金属元素浓度的季节变化十分明显, 多数元素表现为冬春季高、夏秋季低的特征。唐山降水中部分重金属的浓度高于华北背景地区泰山顶的报道结果, 其中 Tl、As、Ag、Zn、Pb、Cd、Se 和 Sb 的富集因子介于 $10^2 \sim 10^5$ 之间, 明显受到人类活动的影响。因子分析表明唐山降水中金属元素的污染主要与钢铁冶炼工业、扬尘和燃煤的源排放有关。

关键词: 降水化学; 金属元素; 来源分析; 工业城市; 华北

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3712-06

Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China

LI Yue-mei¹, PAN Yue-peng², WANG Yue-si², WANG Ying-feng¹, LI Xing-ru¹

(1. Department of Chemistry, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To investigate the chemical characteristics and possible sources of trace metals in precipitation of Tangshan, a typical industrial city in Northern China, precipitation samples were collected using an automated wet-only sampler for one year from December 2009 to November 2010 and subjected to chemical analysis using ICP-MS. The results showed that crustal elements (Ca, Mg, Na, K, Fe and Al) accounted for 97.72% of the total concentrations while heavy metals (Zn, Mn, Pb, Ba, Sb, Cu, Ni, As, V, Co and Se) only contributed 2.25% of the total. Zinc was the most abundant heavy metal and calcium had the highest concentration among the crustal elements, with volume-weighted mean concentrations of $88.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Seasonal variations of trace metals were significant, with higher values observed in winter and spring than in summer and autumn. The calculation of crustal enrichment factors with Al as the reference element indicated that Tl, As, Ag, Zn, Pb, Cd, Se and Sb were mainly derived from anthropogenic sources and the enrichment factor values of those elements ranged from 10^2 to 10^5 . In addition, the concentrations of heavy metals such as Pb, Cu and Ni in precipitation of Tangshan city were higher than those reported for Mt. Tai. The results of principle component analysis demonstrated that steel smelting emissions, fugitive dusts and coal combustion were probably the major contributors of trace metals in the precipitation of Tangshan City.

Key words: precipitation chemistry; trace metals; source analysis; industry city; Northern China

湿沉降是大气污染物通过雨、雪和雾等过程被清除的主要方式, 是各种元素参加生物地球化学循环的重要环节。降水作为湿沉降的一种重要形式, 其携带的金属元素大量输入地表环境后会对陆地和水体的生态系统健康造成严重影响^[1]。近几十年来, 欧洲^[2]、北美^[3]和亚洲^[4]多数国家和地区都开展了降水中金属元素的研究工作, 我国学者也对青藏高原^[5]、东部近海^[6]及部分城市^[7~10]降水中金属元素浓度的时空分布和来源进行了探讨, 但以往研究多局限于 Zn、Pb、As、Cu、Cd、Cr、V 和 Ni 等少数几种重金属, 对其它金属元素 (如 Be、Co、Mo、Ag、Tl、Se 和 Sb) 的关注较少, 有关华北工业地区降

水中多种金属元素的观测研究资料较为缺乏。

唐山作为华北典型的工业城市, 是京津冀地区重要的能源和工业材料产业支撑地, 对推动整个环渤海经济圈的发展举足轻重。唐山地区日益增加的 VOCs、NO_x 和 NH₃ 等污染物的排放不仅导致大气颗粒物污染严重, 也明显影响了降水化学组成^[11~14]。2008 ~ 2010 年观测结果表明唐山 31.4%

收稿日期: 2012-01-02; 修订日期: 2012-03-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05100100); 北京市科技计划公益应用项目 (D09040903670902); 国家自然科学基金项目 (41021004)

作者简介: 李月梅 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为分析化学, E-mail: luai88@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

的降水样品出现明显酸化 ($\text{pH} < 5.6$)^[15], 氮沉降总量接近 $60 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[16], 这无疑给周边生态系统造成潜在威胁. 重金属作为一类典型的有毒污染物, 通过干湿沉降进入地表环境后可以沿食物链传递最终威胁人类健康, 但到目前为止对唐山地区降水中金属元素的研究鲜见报道. 本研究的目标是阐明唐山市降水中金属元素的污染特征及其来源. 研究结果有利于科学认知华北降水化学组成, 以期为工业地区重金属污染防治提供参考.

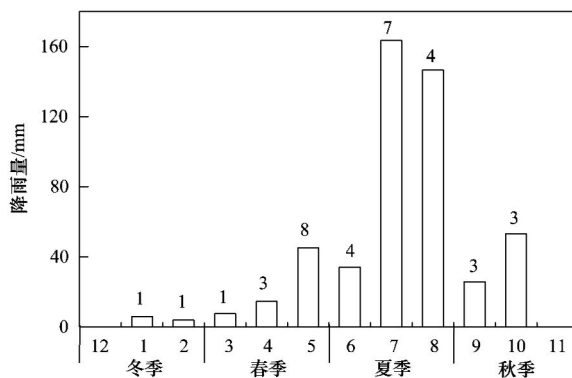
1 材料与方法

1.1 观测地点和样品采集

降水化学观测站位于唐山市区南部, 河北理工大学校本部办公楼楼顶 ($39.6^\circ\text{N}, 118.2^\circ\text{E}$), 距离地面约 10 m, 周边多为居民区和工业区. 降水样品利用 APS-2B 湿沉降自动观测仪 (长沙湘蓝科学仪器有限公司) 采集. 降水发生时, 观测仪的湿沉降盖板自动打开, 采雨筒自动升起, 雨水经塑料管道流入聚乙烯塑料桶, 于第 2 d 08:00 采集. 采样系统每日 08:00 自动切换阀门, 出现连续 2 d 降水时以 08:00 为界分为两次样品. 仪器配备自动雨量计, 同时输出降水起止时间和降雨量信息. 采集时间为 2009 年 12 月 ~ 2010 年 11 月, 观测期间共采集有效降水样品 35 个, 降雨事件和降雨量信息见图 1.

1.2 样品处理和分析

样品采集后, 取 20 mL 水样加 1% 的 HNO_3 保护于 4°C 条件下待测. 实验过程所用器皿经过酸处理后用超纯水冲洗数次, 空白实验表明样品前处理过程对降水中元素浓度分析无明显影响. 使用 ICP-



柱上数值表示降雨次数

图 1 2009 年 12 月至 2010 年 11 月唐山降雨量信息

Fig. 1 Variations of precipitation from December 2009 to November 2010 in Tangshan City

MS (Agilent 7500ce) 分析样品中 Ca、Mg、Na、K、Fe、Al、Zn、Mn、Pb、Ba、Sb、Cu、Ni、As、V、Co、Se、Cr、Cd、Tl、Mo、Ag、U、Be 和 Th 等 25 种元素的含量, 元素浓度的定量方法采用内标法, 内标物质为 Sc、Ge、In 和 Bi.

2 结果与讨论

2.1 降水中元素的浓度水平

唐山市 2010 年降水中元素的数据统计结果见图 2. 从中可以看出所测 25 种元素中 Ca 含量最高, 加权平均 (VWM) 浓度为 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 其次为 Mg、Na、K、Fe 和 Al, VWM 浓度分别为 1.0、0.7、0.5、0.3 和 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这些地壳元素占所测元素总量的 97.72%. 相比以上地壳元素, 重金属元素 Zn、Mn、Pb、Ba、Sb、Cu、Ni、As、V、Co 和 Se 浓度较低, VWM 浓度分别为 88.7、21.8、18.3、15.8、

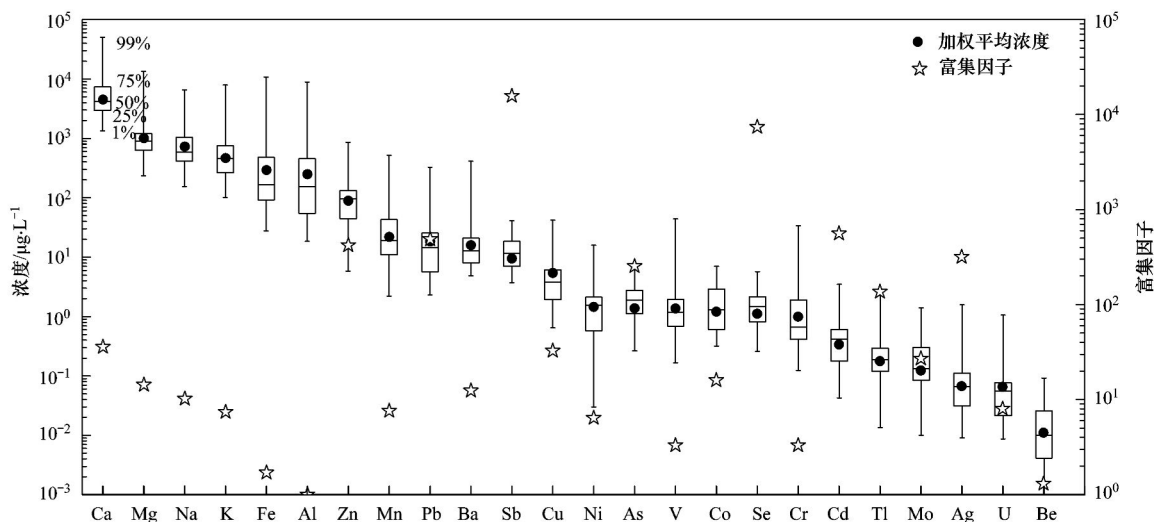


图 2 唐山 2010 年降水中金属元素浓度及污染特征

Fig. 2 Concentrations and enrichment factors of trace metals in the precipitation of Tangshan City

9.4、5.4、1.4、1.4、1.4、1.2 和 $1.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 这些元素占所测元素总量的 2.25%。然而, 这些重金属元素浓度的变化范围较大, 特别是重金属 Zn 不但浓度较高, 其变化范围 ($5.8 \sim 858.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 达 2 个数量级, 这种大幅度的波动在以往的研究中也有所发现, 可能受到了金属冶炼^[7] 和燃煤^[8] 等污染源的共同影响。与 Zn 相比, Cr、Cd、Tl、Mo、Ag 和 U 等重金属含量较低, VWM 浓度分别为 990.1、337.3、175.8、122.6、66.7 和 $65.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 它们仅占所测元素总量的 0.02%。所测元素中, Be 含量最低且有 2 次未检出, VWM 浓度为 $11.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。多数样品未检出 Th 元素, 图 2 未给出 Th 的浓度。

2.2 降水中元素的污染特征

为评估唐山 2010 年降水中金属元素相对于地壳的富集程度, 以 Al 为参比元素, 使用各元素的 VWM 浓度计算其富集因子 (EF)^[17], 计算方法为:

$$EF_{(x)} = (c_x/c_{\text{Al}})_{\text{precipitation}} / (c_x/c_{\text{Al}})_{\text{crust}}$$

式中, $EF_{(x)}$ 为元素 x 的富集因子, $(c_x/c_{\text{Al}})_{\text{precipitation}}$ 为大气降水中该元素 x 与参比元素 Al 浓度之比, $(c_x/c_{\text{Al}})_{\text{crust}}$ 为地壳中该元素 x 与参比元素 Al 浓度之比。地壳元素丰度选择为全球平均值^[18]。若元素 x 的 $EF < 10$, 表示此元素主要来自地壳源; $10 < EF < 100$, 表示此元素呈现中度富集特征, 受到轻微人为源影响; $EF > 100$, 表示此元素呈现严重富集特征, 明显受到人类活动的影响^[19]。

唐山降水元素的富集因子结果见图 3。从中可知, 降水中元素富集程度有很大差异, 其中 Al、Be、Fe、Cr、V、Ni、K、Mn 和 U 的 EF 值低于 10, 表明这几种元素未发生富集, 主要来自地壳源; 其余元素的 EF 值均大于 10, 表明它们在人类活动的影响下发生了富集。在发生富集的元素中, Na、Ba、Mg、Co、Mo、Cu 和 Ca 的 EF 值变化于 $10 \sim 100$, 呈现中度污染特征; 而 Tl、As、Ag、Zn、Pb、Cd、Se 和 Sb 的 EF 值在 $10^2 \sim 10^5$ 之间, 呈现严重污染特征。

假如降水中某个元素来自地壳, 所有降水样品中该元素的 EF 值应该趋于稳定, 不会随 Al 的浓度发生明显变化; 反之, 受污染元素的 EF 值会随着 Al 浓度的增加而降低^[3]。如图 3 所示, 唐山降水中 $EF < 10$ 的元素, 如 Fe、Cr、V 和 Mn 的 EF 值几乎不随 Al 的浓度发生变化; 而 $EF > 10$ 的元素, 如 Zn、Pb、Cd 和 Sb 的 EF 值随着 Al 浓度的增加而降低, 这进一步证实观测期间这些重金属元素明显受到了人为污染源的影响。

为进一步了解唐山降水中元素的污染状况, 表

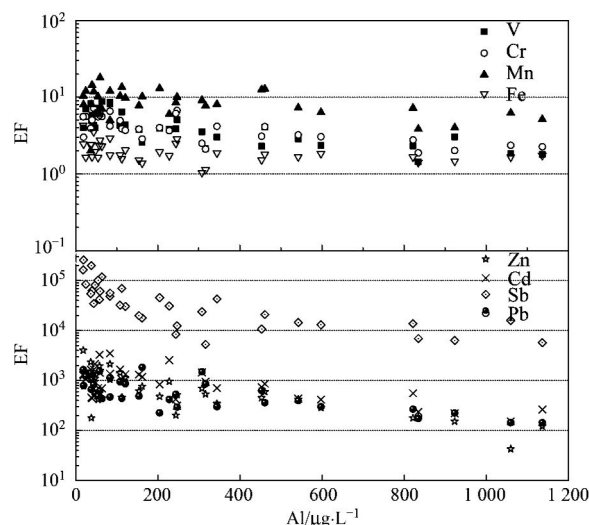


图 3 降水中元素的富集因子随 Al 浓度的变化

Fig. 3 Enrichment factors versus Al concentration in the precipitation of Tangshan City

1 对比了其它地区的观测结果。结果表明, 不同地区大气降水中元素的浓度水平存在差异, 唐山降水中 Zn 和 Pb 元素的 VWM 浓度低于长春和贵阳, 但显著高于表 1 中其它城市 1.5 ~ 12 倍。唐山降水中如此高含量 Pb 和 Zn 不仅出现在降水中, 大气颗粒物和降尘中也具有这种特征^[12, 20], 可能与其发达的冶炼工业有关, 相关研究表明这两种元素常出现在冶炼工业排放物中^[21, 22]。唐山降水中地壳元素 Al 和 Fe 的 VWM 浓度低于土耳其, 但显著高于表 1 中其它城市 5 ~ 18 倍, 这可能与华北大气颗粒物中高浓度的矿物尘有关^[12]。此外, 唐山降水中 V、Cr 和 Ni 元素的 VWM 浓度低于国内外多数地区的观测结果。

与我国华北背景站点泰山顶的观测结果相比, 唐山降水中金属元素的浓度明显较高, 其中 Al、Fe、Mn、Pb、Cu 和 Ni 元素的 VWM 浓度分别是泰山相应元素的 13、10、2.2、2.2、2 和 1.8 倍。虽然唐山降水中 Zn 元素 VWM 浓度略小于泰山, 但其最大值是泰山的 2.5 倍。由于 Zn、Mn、Pb、Cu 和 Ni 等均是有害重金属, 而唐山降水中这些元素的浓度已经明显高于华北背景水平, 需要引起足够的重视。

2.3 唐山降水中元素浓度的季节变化

图 4 为唐山降水中元素浓度的季节变化。从中可以看出, 几乎所有元素在夏秋季的浓度都较低, 这主要是因为夏秋降水量较大, 对元素稀释效应明显^[16]。而冬春季较高的浓度除了与降水稀释效应不明显外, 排放源强度的增加也有一定贡献。比如, 冬春季源自西北的矿物气溶胶会携带较多的地壳

元素 Al、Fe、K 和 Ca^[24], 而造成唐山大气降水中这些元素浓度的增加. 另外, 冬春季居民燃煤取暖过程中也会将大量污染元素排入大气环境中^[25], 这也很可能是图 4 所示重金属元素呈现冬春季高于夏秋季特征的原因之一. 特别值得注意的是, 冬春季唐山降水中 Zn、Pb、Cd、Cu、As、Mo、Sb、Se、Co

和 Ag 等元素的浓度是夏秋季的 1.9 ~ 9.7 倍, 明显不同于地壳元素 Al(35.2 倍) 和 Fe(31.3 倍) 的季节差异. 这种差异表明冬春季的沙尘对 Al 和 Fe 等地壳元素浓度造成的影响大于燃煤引起的重金属浓度变化. 在北京的观测研究表明, 采暖期大部分重金属浓度高于采暖前 2 倍^[25].

表 1 国内外不同地区大气降水中元素的浓度水平比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 VWM concentrations of trace metals in the precipitation of different areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

地区	唐山	西安 ^[7]	长春 ^[10]	成都 ^[9]	贵阳 ^[8]	土耳其 ^[2]	新加坡 ^[4]	墨西哥 ^[22]	泰山 ^[23]
Zn	88.7	61.0	148.6	9.9	420.0	50.2	7.2	—	92.9
Pb	18.3	12.6	21.7	9.7	45.8	11.4	3.4	2.5	8.0
Al	247.7	50.7	—	32.4	13.6	485.0	18.4	50.7	18.9
Fe	291.0	30.7	—	43.3	18.8	743.0	23.9	—	29.4
V	1.4	—	—	—	—	—	3.5	5.1	—
Cr	1.0	1.3	3.6	—	—	5.7	1.6	0.5	—
Mn	21.8	11.1	—	31.3	33.7	19.0	2.8	9.6	10.1
Co	1.2	0.1	—	—	—	2.1	0.6	—	—
Ni	1.4	2.2	—	—	—	7.2	3.9	3.4	0.8
Cu	5.4	2.9	9.3	1.8	4.5	3.9	5.6	—	2.7
As	1.4	1.9	18.4	—	—	—	—	—	1.7
Cd	0.3	0.9	0.9	—	—	0.8	0.3	0.4	0.5

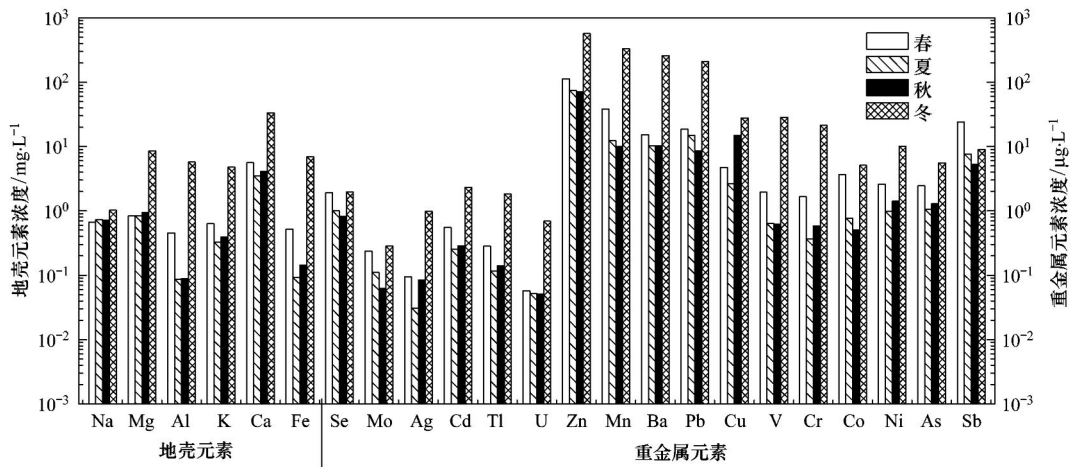


图 4 唐山降水中元素浓度季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of trace metals in the precipitation of Tangshan City

2.4 唐山降水中元素的来源分析

为了解唐山降水中元素的来源,应用 SPSS 软件对 25 种元素的浓度数据进行了最大方差旋转主成分因子分析,以特征根 >1 为原则提取了 3 个因子,这 3 个因子累积方差贡献率为 85%,结果见表 2. 本研究只对载荷数 >0.5 的因子进行讨论^[2].

从表 2 可知,第一个因子(PC1)中载荷数 >0.5 的元素包括 Zn、Cd、Pb、Cu、Al、Mn、Ni、Fe、Ti、Ba、Be、Cr、As、V 和 U,累积方差贡献率达 43%. 该因子与 Zn、Cd、Pb 和 Cu 元素有很高的相关度,且这几种元素均呈现明显富集,可能与冶炼工业排

放有关^[26]. 此外,该因子与 Al、Mn、Ni 和 Fe 的相关度也较大,且后 3 种元素常出现在钢铁冶炼企业排放的颗粒物中^[27, 28]. 因此,该因子可能代表钢铁冶炼源,这与唐山近年来钢铁工业的迅速发展不无关系. 据唐山 2010 年国民经济和社会统计公报报道,唐山钢铁产品产量比 2009 年增加了 3.7% ~ 5.4%.

第二个因子(PC2)中载荷数 >0.5 的元素包括 Na、Mg、Ca、Mo、U、K、Ag 和 Ba,累积方差贡献率为 24%,该因子与 Na、Mg、Ca 和 Mo 元素有很高的相关度. 其中 Na 的富集可能受到海盐影响^[29], 而

后 3 种元素可能与建筑和道路扬尘有关^[28, 30, 31]. 因此,该因子可能受到了扬尘源和海盐的共同影响.

表 2 降水中金属元素浓度的最大方差旋转因子分析

Table 2 Rotational maximum variance factor analysis of trace

metal concentrations in precipitation

元素	PC1	PC2	PC3
Be	0.732¹⁾	0.056	0.487
Na	-0.079	0.924	-0.091
Mg	0.367	0.885	-0.083
Al	0.807	0.352	0.388
K	0.411	0.674	0.352
Ca	0.479	0.812	0.204
V	0.669	0.420	0.508
Cr	0.724	0.468	0.440
Mn	0.804	0.326	0.436
Fe	0.764	0.428	0.376
Co	0.368	0.066	0.828
Ni	0.803	0.172	0.037
Cu	0.825	0.408	0.224
Zn	0.934	0.019	-0.088
As	0.675	0.375	0.504
Se	0.526	0.325	0.535
Mo	-0.016	0.730	0.590
Ag	0.322	0.622	0.439
Cd	0.913	0.061	0.246
Sb	-0.003	-0.111	0.895
Ba	0.748	0.566	0.171
Tl	0.751	0.240	0.417
Pb	0.909	0.279	0.047
U	0.578	0.687	-0.169
特征值	10.212	5.874	4.273
累积贡献率%	43	24	18

1) 黑体数字表示因子载荷数大于 0.5 的元素

第三个因子(PC3)中载荷数 >0.5 的元素包括 Sb、Co、Mo、Se、As 和 V,累积方差贡献率为 18%, 其中前 5 个元素出现了明显富集,它们都是燃煤的标识性元素^[32, 33];而 V 与重油燃烧有关^[34],Sb 还可能源自垃圾焚烧^[35]. 因此,该因子可能代表燃烧源. 以往的研究表明,燃煤对唐山市大气污染具有显著影响^[11, 14].

3 结论

(1)唐山降水中 Th 和 Be 含量较低,部分样品未检出;其它 23 种元素浓度变化于 $10^{-5} \sim 4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 地壳元素的浓度明显高于重金属,Zn 和 Ca 分别是浓度最高的重金属和地壳元素.

(2)唐山降水中金属元素的浓度表现出冬春明显高于夏秋的季节变化特征. 降水量的稀释作用导致夏秋季浓度较低;而冬春季的高值除了与降水量小有关,还受到沙尘和采暖的影响.

(3)唐山降水中重金属污染严重,其中 Tl、As、Ag、Zn、Pb、Cd、Se 和 Sb 呈现出显著富集特征. 因子分析结果表明,唐山降水中金属元素的污染与钢铁冶炼、扬尘和燃煤有关.

参考文献:

- [1] Kim G, Scudlark J R, Church T M. Atmospheric wet deposition of trace elements to Chesapeake and Delaware Bays [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(20): 3437-3444.
- [2] Özsoy T, Örnektekin S. Trace elements in urban and suburban rainfall, Mersin, Northeastern Mediterranean [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 203-219.
- [3] Al-Momani I F. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS: acidity and possible sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(32): 4507-4515.
- [4] Hu G P, Balasubramanian R. Wet deposition of trace metals in Singapore [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **144**(1-4): 285-300.
- [5] Cong Z Y, Kang S C, Zhang Y L, *et al.* Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(9): 1415-1421.
- [6] 刘昌岭,任宏波,陈洪涛,等. 黄海及东海海域大气降水中的重金属 [J]. *海洋科学*, 2003, **27**(9): 64-68.
- [7] 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.
- [8] 胡健,张国平,刘丛强. 贵阳市大气降水中的重金属特征 [J]. *矿物学报*, 2005, **25**(3): 257-262.
- [9] 王华,马宁,杨晓静,等. 成都市雨水中的重金属特征 [J]. *地球与环境*, 2010, **38**(1): 49-53.
- [10] 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.
- [11] 孙杰,王跃思,吴方堃,等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [12] 孙颖,潘月鹏,李杏茹,等. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2732-2740.
- [13] 王晓元,辛金元,王跃思,等. 唐山夏秋季大气质量观测与分析 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 877-885.
- [14] 周瑞,辛金元,邢立亭,等. 唐山工业新区冬季采暖期大气污染变化特征研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1874-1880.
- [15] Wang Y S, Yu W P, Pan Y P, *et al.* Acid neutralization of precipitation in Northern China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2011, **62**(2): 204-211.
- [16] Pan Y P, Wang Y S, Tang G Q, *et al.* Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(14): 6515-6535.
- [17] Duce R A, Hoffman G L, Zoller W H. Atmospheric trace metals

- at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural? [J]. *Science*, 1975, **187**(4171): 59-61.
- [18] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, **28**(8): 1273-1285.
- [19] Kyllönen K, Karlsson V, Ruoho-Airola T. Trace element deposition and trends during a ten year period in Finland [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(7): 2260-2269.
- [20] 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.
- [21] Adachi K, Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust [J]. *Environment International*, 2004, **30**(8): 1009-1017.
- [22] Báez A, Belmont R, García R, *et al.* Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **86**(1): 61-75.
- [23] 王艳, 刘晓环, 金玲仁, 等. 泰山地区湿沉降中重金属的空间分布 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2562-2568.
- [24] Sun Y L, Zhuang G S, Wang Y, *et al.* The air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(35): 5991-6004.
- [25] 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源 [J]. *环境科学*, 2008, **20**(11): 3275-3279.
- [26] Szefer P, Szefer K. Some metals and their possible sources in rain water of the Southern Baltic coast, 1976 and 1978-1980 [J]. *Science of the Total Environment*, 1986, **57**(1): 79-89.
- [27] Var F, Narita Y, Tanaka S. The concentration, trend and seasonal variation of metals in the atmosphere in 16 Japanese cities shown by the results of National Air Surveillance Network (NASN) from 1974 to 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(17): 2755-2770.
- [28] Querol X, Viana M, Alastuey A, *et al.* Source origin of trace elements in PM from regional background, urban and industrial sites of Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(34): 7219-7231.
- [29] Ooki A, Uematsu M, Miura K, *et al.* Sources of sodium in atmospheric fine particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(27): 4367-4374.
- [30] Yang F M, Ye B M, He K B, *et al.* Characterization of atmospheric mineral components of PM_{2.5} in Beijing and Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **343**(1-3): 221-230.
- [31] Chueinta W, Hopke P K, Paatero P. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(20): 3319-3329.
- [32] Furimsky E. Characterization of trace element emissions from coal combustion by equilibrium calculations [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, **63**(1): 29-44.
- [33] Ren D Y, Zhao F H, Wang Y Q, *et al.* Distributions of minor and trace elements in Chinese coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, **40**(2-3): 109-118.
- [34] Fang G C, Wu Y S, Huang S H, *et al.* Review of atmospheric metallic elements in Asia during 2000-2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(17): 3003-3013.
- [35] Pacyna J M, Pacyna E G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide [J]. *Environmental Reviews*, 2001, **9**(4): 269-298.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行