

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性

王春峰¹, 陈冠飞¹, 朱艳臣¹, 姚丹¹, 皇晓晨¹, 王连军²

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007;
2. 南京理工大学环境与生物工程学院, 江苏省化工污染控制与资源化重点实验室, 南京 210094)

摘要: 对城市生活垃圾焚烧飞灰的化学性质和粒径分级毒性进行分析研究, 并采用美国 EPA 的毒性浸出程序 TCLP (toxicity characteristic leaching procedure)、欧盟危险废物鉴别浸出标准 (EN12457-2)、逐级浸出程序 SEP (sequential extraction procedure) 与体外模拟实验方法 PBET (physiologically based extraction test) 对不同粒径的焚烧飞灰中重金属浸出效果进行对比研究。结果表明, 焚烧飞灰的主要组成元素为 Ca、Si、Al、Mg、Fe、Na 和 K; 58.7% 的飞灰粒径分布在 38 ~ 106 μm , 粒径小于 150 μm 的焚烧飞灰占总量的 90% 以上。重金属 Cu、Pb 和 Cd 等在各粒径飞灰中主要以残渣态的形式存在, 可交换态较少。TCLP 结果证实, 除 As 和 V 外, Zn、Cu 和 Pb 的浸出量随飞灰粒径的减小呈先增大后减少的趋势, 粒径在 38 ~ 106 μm 下 Zn 的浸出量最大为 547 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而采用欧盟浸出标准, 所有粒径飞灰的重金属浸出量都较低。PBET 实验中 Zn、Pb、Cu 和 As 的浸取浓度分别达 3 270、339、335 和 16.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其结果显著高于 TCLP 重金属浸出量, 说明焚烧飞灰中重金属对于人体具有潜在的生物有效性。

关键词: 焚烧飞灰; 粒径分级; 重金属; 浸出毒性; 生物可给性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4891-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605141

Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes

WANG Chun-feng¹, CHEN Guan-fei¹, ZHU Yan-chen¹, YAO Dan¹, HUANG Xiao-chen¹, WANG Lian-jun²

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Chemical Pollution Control and Resources Reuse, School of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Size fractionation and chemical composition of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash were investigated. And the leaching efficiency of heavy metals was contrastively studied using toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), European standard protocol (EN12457-2), sequential extraction procedure (SEP) and physiologically based extraction test (PBET) for different size-fractionated fly ash. The results indicated that the main composing elements of fly ash were Ca, Si, Al, Mg, Fe, Na, K. 58.7% of fly ash particles were in the range of 38-106 μm and the amount in the < 150 μm particle-size fraction accounted for more than 90% of in total. Cu, Pb and Cd mainly existed in the residual form with a minor amount of exchange fraction for any size-fractionated fly ash particles. TCLP result showed that leaching amounts of Zn, Cu and Pb, except for As and V, firstly increased and then decreased with the reduction of particle size. The leaching amount of Zn reached the highest value of 547 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the range of 38-106 μm , whereas the leaching amount of heavy metals exhibited a lower level for all size-fractionated fly ash particles. The extraction concentrations of Zn, Pb, Cu and As reached 3 270, 339, 335 and 16.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for the PBET tests, respectively, which were significantly higher than those of the TCLP. Therefore, heavy metals in MSWI fly ash had the potential bioavailability to human body.

Key words: fly ash; size distribution; heavy metal; leaching toxicity; bio-accessibility

焚烧法作为一种新型城市垃圾处理技术,因其减容性好、无害化程度高、能源利用率高等优点,成为城市垃圾主要的处理方式^[1]。焚烧飞灰是垃圾焚烧过程中产生的二次污染物,其产量约为垃圾焚烧量的 0.5% ~ 3%^[2]。由于焚烧飞灰中含有高浓度的重金属,具有浸出毒性,已被我国列为危险废弃物 (GB 5085.3-2007),必须予以安全处置^[3]。

近年来,国内外对生活垃圾焚烧飞灰的研究大多集中在重金属浸出特性和水泥固化两个方

面^[4,5], Tian 等^[6]研究了城市生活垃圾焚烧飞灰特性及重金属浸出毒性,为焚烧飞灰的无害化处理提出了合理化建议, Chiang 等^[7]通过连续提取法 (sequential extraction procedure, SEP) 与修改后的

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (5201219120004); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (13A610514); 中央高校基本科研业务费专项 (30916014102)

作者简介: 王春峰 (1977 年 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体废物处理及其资源化利用, E-mail: chunfeng1314_wang@163.com

TCLP(toxicity characteristic leaching procedure) 浸出浓度进行对比发现这两种方法的浸出百分比非常相似,表明 pH 值对重金属的浸出有很大影响. 由于 TCLP 法对实验环境条件要求较高,它的测定结果很容易因实验条件的变化而受影响,Ghosh 等^[8]研究表明在固体废弃物填埋条件下,TCLP 毒性浸出方法可能低估了砷的渗滤毒性,欧盟采用 EN12457/1-4 标准来作为不同类型废物填埋的入场判别方法,相对 TCLP,以去离子水作为浸取剂的欧盟标准反应更温和,更能反映实际情况. 然而现有研究尚未对富含重金属的焚烧飞灰进行全面的风险评估,为解决现有方法不能提供足够保守结果的问题,研究人员推荐采用模拟人体消化吸收的方法,测试污染物中能够溶解于胃肠系统的重金属含量^[9~11],弥补现有标准方法的不足.

目前,国际上广泛应用的体外消化方法有 SBET (simple bioaccessibility extraction test)、PBET (physiologically-based extraction test)、SGET (simple gastrointestinal extraction test) 和 UBM (the unified bioaccessibility method). 这些体外消化方法大多应用于评估土壤中重金属的污染^[12~15],有关生活垃圾焚烧飞灰的体外模拟实验数据的报道相对较少. 本研究选择 TCLP 和 EN12457-2(EN)两种广泛应用的毒性鉴别标准与 PBET 法对垃圾焚烧飞灰各粒径中重金属浸出进行分析,以期对垃圾焚烧飞灰的污染控制和可能产生的毒害效应分析提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验分析使用的垃圾焚烧飞灰来源于河南省郑州市某生活垃圾焚烧厂,在垃圾焚烧厂稳定运行期间,对全年不同月份产生的飞灰进行多点采集,混合均匀后密封避光贮存,于 60℃ 下烘干 24 h 作为实验样品备用. 将干燥后的焚烧飞灰分别过 50、70、150、400、800 目标准筛网,根据其对应尺寸将飞灰分为 18~38、38~106、106~212、212~300 μm ,并测定不同粒径飞灰的质量分数,计算其粒径分布及筛下累积分布.

1.2 实验方法

1.2.1 飞灰主要成分和重金属元素分析

焚烧飞灰是高温过程中形成的以钙、硅、铝等化合物为主要成分的非均质材料,采用日本理学公司生产的 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定飞灰的主要成分. 实验样品研磨后过 200 目筛,在 105℃ 下烘

干 24 h 后用 ZSX100e 型 X 射线荧光光谱仪进行测定. 不同粒径焚烧飞灰中矿相采用德国 Bruckner 公司的 X 射线衍射仪(D8 Advance)进行定性分析.

重金属含量的测定采用 MDS-6G 型微波消解仪消解样品,准确称取飞灰样品,置于聚四氟乙烯消解罐中,按 5:3:1 比例依次加入 HNO_3 、HF 和 HClO_4 . 在微波消解仪中消解 2 h 后,移至电热板加热去除残留 HF,蒸发至近干后加入 2% HNO_3 稀释,过滤后用 ICP-MS 分析测试.

样品分析全过程采用标准物质 SRM 1633c (coal fly ash) 进行质量控制,回收率为 86.7% ~ 112.26%,为保证仪器稳定,每 10 个样品后测定一次标样.

1.2.2 重金属浸出毒性

采用美国环保署(EPA)的毒性特性浸出标准方法(TCLP),并依据浸取剂选取标准^[16],确定飞灰样品所采用的标准浸取液为 $\text{pH} = 2.88 \pm 0.05$ 的醋酸溶液. 试样与浸取剂按固液比为 1:20 混合后,室温 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 下,以 $(30 \pm 2) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速,浸取时间为 18 h. 欧盟标准 EN12457/1-4 是废物和淤泥进入不同填埋场的标准实验方法,实验包括 4 个程序,浸取实验采用 EN12457-2 标准方法,以去离子水为浸取剂,固液比 1:10,室温 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 下浸取 24 h. 收集全部滤液,过 0.45 μm 滤膜,2% HNO_3 稀释后用 ICP-MS 分析测试.

1.2.3 焚烧飞灰中重金属化学形态分析

逐级提取程序(SEP)是目前应用最为广泛的重金属形态分析方法,实验中采用 Tan 等^[17]改进的 Tessier 方法^[18]对焚烧飞灰中重金属进行连续提取,每个样品平行测定两次,同时做空白实验. 具体步骤如表 1 所示.

1.2.4 模拟消化液提取方法

PBET 法由 Ruby 等^[19]1993 年提出,此次实验采用 Intawongse 等^[20]的方法,实验中所用胃蛋白酶、胰酶、胆盐、碳酸氢钠、柠檬酸、苹果酸、乳酸和乙酸等药品均来自美国 Sigma-Aldrich 公司.

人工配置的模拟胃消化液包含胃蛋白酶、柠檬酸盐、苹果酸盐、乳酸、乙酸等有机酸,用盐酸(优级纯)调节 pH 值为 1.3. 向模拟反应器分液漏斗中加入 40 mL 模拟胃液,以固液比 1:100 加入飞灰 0.4 g,在反应开始 0.5 h,1 h 时分别取 2 mL 反应液,0.45 μm 滤膜过滤,2% 硝酸稀释后测定重金属在胃阶段的可给量;同时加入 2 mL 胃液,保持反应液体积不变,用饱和 NaHCO_3 溶液透析袋调节 pH 至 7.0,加

表 1 逐级提取程序

Table 1 Experimental parameters of SEP test

形态	试剂/5 g 样品	振荡时间及温度
交换态	100 mL 1 mol·L ⁻¹ 醋酸钠溶液 (pH=8.2)	25℃ 下振荡 1 h
碳酸盐结合态	100 mL 1 mol·L ⁻¹ 醋酸钠溶液 ((pH=5.0)	25℃ 下振荡 5 h
Fe-Mn 氧化物结合态	100 mL 0.04 mol·L ⁻¹ 盐酸羟胺溶液 (用 25% 醋酸溶液配制)	96℃ ±3℃ 下水浴加热 5 h
	15 mL 0.02 mol·L ⁻¹ HNO ₃ + 25 mL 30% H ₂ O ₂ (pH=2)	85℃ ±2℃ 下水浴加热 2 h
有机结合态	15 mL 30% H ₂ O ₂ (pH=2)	85℃ ±2℃ 下水浴加热 3 h
	25 mL 3.2 mol·L ⁻¹ 醋酸铵溶液 (用 20% HNO ₃ 溶液配制)	85℃ ±2℃ 下水浴加热 30 min
残渣态	HNO ₃ + HF + HClO ₄	消解 2 h

入胰酶、胆盐来模拟小肠阶段,反应 2 h,4 h 后取 2 mL 提取液过滤,2% 硝酸稀释后测定重金属在肠阶段的可给量. 整个过程在恒温水浴下保持 37℃,同时连续通入氩气来维持厌氧环境和模拟胃肠的蠕动.

2 结果与讨论

2.1 焚烧飞灰中粒径分布

由图 1 可知,飞灰粒径近似呈正态分布. 其中粒径在 38 ~ 106 μm 范围内的飞灰含量最高,占总量的 58.7%,而粒径大于 250 μm 的飞灰含量则不足 1.6%,粒径小于 150 μm 占飞灰总量的 90% 以上,如此细微颗粒极易飞散到大气中,造成环境的污染,故微粒逸散问题需要特别留意.

2.2 焚烧飞灰矿物成分

采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析得到不同粒径垃圾飞灰的主要化学成分,由表 2 可知,飞灰的主

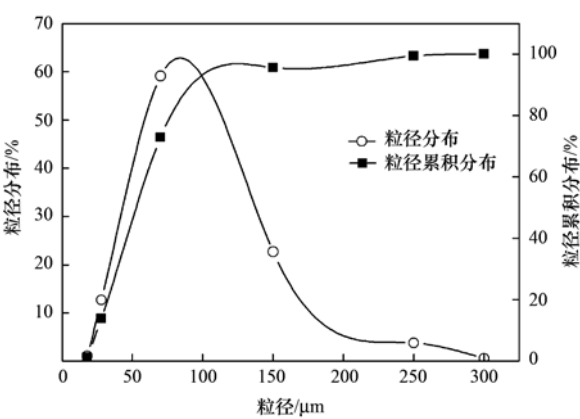


图 1 飞灰粒径分级曲线

Fig. 1 Distribution of particles with different size in fly ash

要成分为 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃,总含量约占 55%;而常量金属氧化物 MgO、Fe₂O₃、Na₂O、K₂O 约占 16%. CaO 较多集中在大粒径飞灰中,而 SiO₂ 在小粒径飞灰中含量最高,这与图 2 的 XRD 测定结果中 SiO₂ 含量相一致.

表 2 不同粒径级别飞灰颗粒中主要元素化学成分/%

Table 2 Major element contents in different size fractions of fly ash/%

粒径范围/μm	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
18 ~ 38	29.42	17.01	8.96	4.01	5.87	3.6	2.7
38 ~ 106	30.26	16.43	8.21	3.98	5.52	4.01	2.83
106 ~ 212	30.1	16.54	8.13	4.25	5.07	4.28	2.62
212 ~ 300	30.87	16.32	8.01	3.56	6.02	2.7	3.11

不同粒径飞灰的矿相具有一定差异,各粒径飞灰中含有大量钙和硅的化合物以及碱金属氯化物. 部分重金属的结晶在小粒径飞灰上富集较多,由于高温烟气中的气态重金属在低温时冷凝形成金属晶相,这些冷凝的重金属被附着于比表面积较大的飞灰颗粒上. 飞灰的这种矿物相组成表明小粒径下重金属更易浸出.

2.3 焚烧飞灰重金属总量分析

由表 3 可知,除 Ni 含量随飞灰粒径变化不明显之外,其它重金属的含量随粒径分布具有相似的规律. 小于 300 μm 粒径的飞灰中,Zn、Cu 和 Pb 等重

金属随着粒径的减小对重金属的富集量逐渐增加,由于飞灰粒径小而比表面积大,这样更容易富集高浓度重金属. 而实验中 As 和 V 两种重金属的含量呈现相反的规律. 表 3 还可看出,焚烧飞灰中含有大量重金属,其组成与我国土壤背景值 (GB 15618-1995) 进行比较,可以看出重金属在焚烧飞灰中有很强的富集性,显示了飞灰对生态环境的潜在影响.

2.4 重金属浸出毒性分析

重金属浸出毒性是评价垃圾焚烧飞灰对环境危害的主要指标,由图 3 可知,TCLP 实验中,Cu、Pb 和 Zn 的浸出量随着飞灰粒径的增大先增大后减小,

表 3 不同粒径焚烧飞灰中重金属元素的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

粒径范围/ μm	Cu	Zn	As	Cd	Pb	V	Ni
18 ~ 38	737.51	4 211.3	81.15	34.95	399.25	1 312.5	173.45
38 ~ 106	635.7	4 460.2	64.25	27.75	353.5	1 270.1	174.75
106 ~ 212	613.16	3 625.4	277.42	25.10	383.1	1 345.7	171.02
212 ~ 300	334.68	3 586.9	280.94	20.37	371.61	1 490.2	168.69

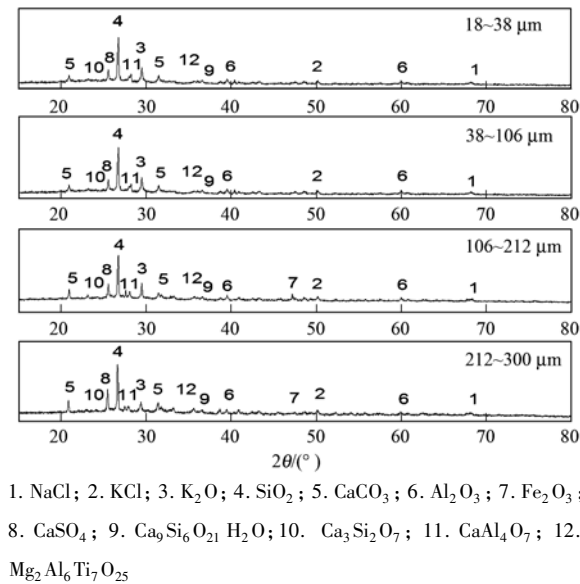


图 2 不同粒径垃圾焚烧飞灰的 XRD 分析

Fig. 2 XRD analysis of various size fractions of MSWI fly ash

在粒径 106 ~ 212 μm 内 Cu 和 Pb 的浸出量最高,而 Zn 的最大浸出量在粒径 38 ~ 106 μm ,随着飞灰粒径的增大,重金属 As 和 V 的浸出量增大,实验表明细微颗粒的飞灰中重金属更容易浸出. 在各种重金属中 Zn 的浸出量最高,Cu、V、As 和 Pb 浸出相对较低;以欧盟标准进行实验中,Cu 和 Pb 的浸出量随着飞灰粒径的增大而减小,表明粒径越小更易浸

出,As 和 V 的浸出量随着粒径的增大而增大,浸出量较高的重金属主要集中在粒径 18 ~ 38 μm 和 212 ~ 300 μm 的飞灰颗粒上.

由图 3 浸出结果可知,Cu、Zn、As、V 和 Pb 在醋酸溶液中的浸出量明显高于其在去离子水中的浸出量,尤其是 Zn、Cu 和 Pb,这是因为飞灰中的部分重金属以可交换态和碳酸盐结合态存在,而 pH 值的变化对飞灰中重金属的浸出也有显著影响^[21]. Zhou 等^[22]的研究指出,重金属浸出量与其结合形式有关,垃圾焚烧的过程中,不易挥发的金属通常以氧化物形式凝结成飞灰颗粒中,而 Zn 和 Pb 等易挥发金属容易凝结在颗粒表面^[23],这就导致了 Zn 和 Pb 的浸出量远远高于其他重金属.

焚烧飞灰中重金属形态直接影响其浸出行为与在环境中的迁移转化,图 4 实验结果表明,Zn 和 V 在各级粒径下的浸出总量最高,Cu、Pb 和 Mn 的浸出量次之,Cd 和 As 的总浸出量最少. 随着粒径的减小,其碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态比例增加,残渣态的比例减少,表明较小粒径下,其环境潜在风险增加. TCLP 实验中 Cu 的浸出量与可交换态比例相似,说明了 Cu 在环境中相对稳定. TCLP 结果中 Zn 的浸出量远大于欧盟标准实验结果,提取液酸性环境下飞灰中大量碳酸盐结合态中的 Zn 被洗

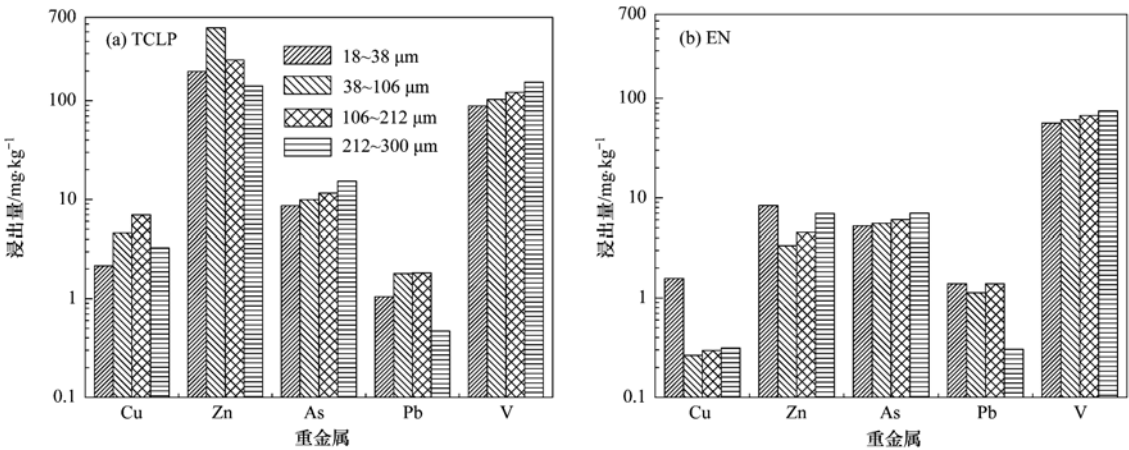


图 3 不同粒径飞灰重金属浸出量

Fig. 3 Leaching content of heavy metals in various size fractions of MSWI fly ash

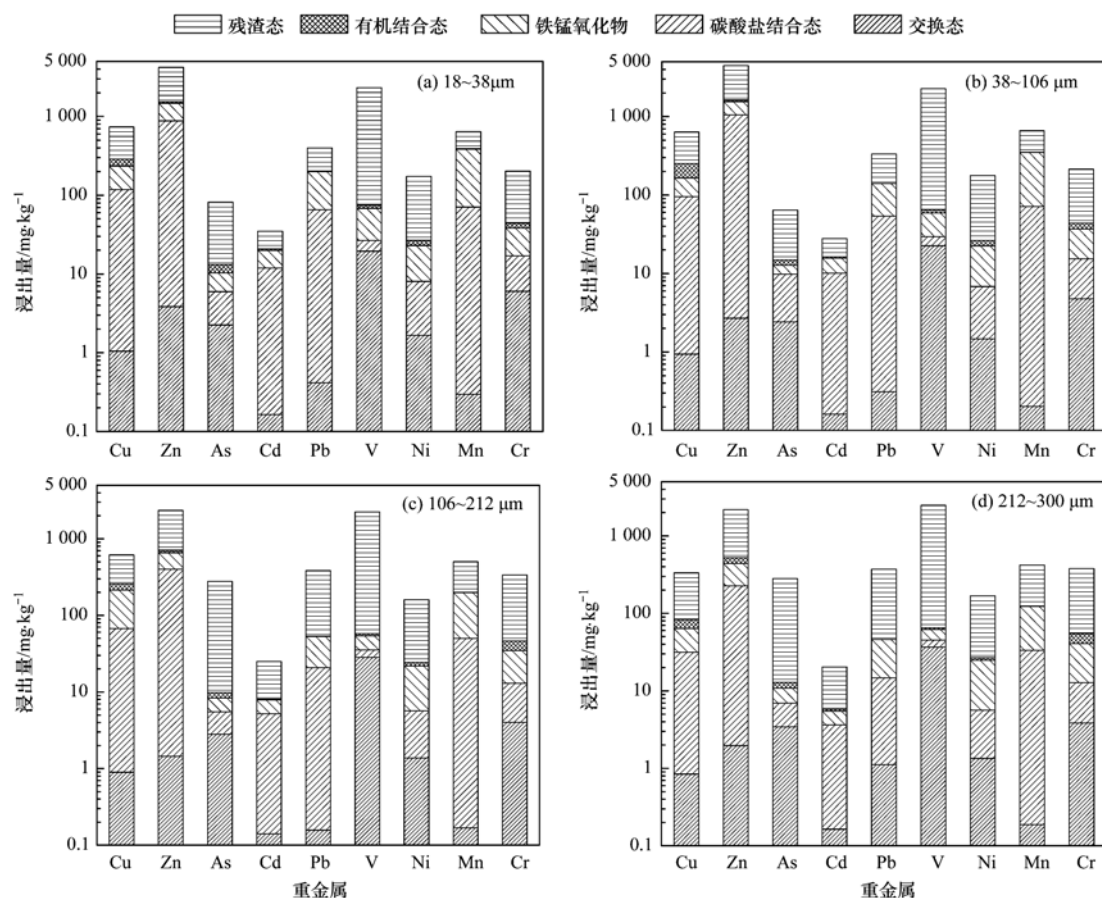


图4 不同粒径焚烧飞灰重金属形态分布

Fig. 4 Different particle size distribution of heavy metals speciation in fly ash

脱下来,进而增加了在 TCLP 中浸出量,As 和 V 的可交换态含量较高,易发生重金属的释放和迁移,从而危害生态系统。

2.5 各粒径焚烧飞灰中重金属生物可给性

从表4可知,不同粒径焚烧飞灰中重金属的浸出量在肠胃模拟阶段存在显著差异,Cu、Zn和Pb的浸出量具有随着粒径增大而增加的趋势,粒径212~300 μm下其最大生物浸出量分别为335、3270和339 mg·kg⁻¹。胃肠消化液对As和V的提取效果在各粒径中也存在显著差异,而两种金属最大生物浸出量出现在粒径106~212 μm,浸出量分别为16.8 mg·kg⁻¹和35.4 mg·kg⁻¹。这些结果表明,不同粒径飞灰中重金属的提取效果与飞灰性质及颗粒粒径有关,飞灰中占比较大的是细微颗粒,对重金属有较强的固持力,这与飞灰中具有较大的比表面积等特性有关^[24]。飞灰颗粒的比表面积越大,与重金属的接触面积越大,吸附能力越强,当粒径增大后,Cu、Pb和Zn的生物可给量也随之增大。而飞灰中As和V的生物可给性规律并不明显,影

响不同粒径飞灰中As的生物可给性因素不仅包括比表面积,还可能包括As与飞灰的结合形态,Wragg等^[25]的研究表明在土壤中铁锰氧化物结合的As可给性较低。

从表4还可知,Cu、Zn和Pb在小肠消化阶段浸出量明显高于胃液,即进入肠液后的重金属的可接受性增加。这表明PBET法中肠液并没有降低飞灰中重金属的溶解度,相反一定程度促进了飞灰中Cu、Zn等金属的进一步溶解。反应到4 h后,Cu、Pb等重金属的浸出量呈现一定下降趋势。部分溶解态金属产生沉淀。而飞灰中As和V在肠液中提取量均低于在胃液中的浸出量,这表明As和V进入小肠阶段发生了沉淀,从而降低了其生物可接受性。

Cu、Zn和Pb等金属在进入pH值增加的小肠阶段溶解度不一定降低,甚至出现增加趋势。Sialelli等^[26]的研究表明不同污染物中Cu在模拟肠液中的溶解度要略高于胃消化液,有学者研究认为Cu与胃蛋白酶形成了Cu²⁺的复合物,进入肠液阶

表 4 PBET 法中重金属浸出含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Heavy metal leaching content of physiologically based extraction test/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	胃阶段($\text{pH}=1.3$)								小肠阶段($\text{pH}=7.0$)							
	0.5 h				1 h				2 h				4 h			
	18 ~ 38	38 ~ 106	106 ~ 212	212 ~ 300	18 ~ 38	38 ~ 106	106 ~ 212	212 ~ 300	18 ~ 38	38 ~ 106	106 ~ 212	212 ~ 300	18 ~ 38	38 ~ 106	106 ~ 212	212 ~ 300
Cu	43.6	53.2	84.6	86.5	69.7	61.6	173	164	33.8	62.6	177	335	45	57.1	87	227
Zn	471	379	758	776	386	334	1 050	974	1 060	751	3 210	3 270	504	489	1 830	2 070
As	11.4	8.4	15.7	15.4	11.73	8.43	16.4	14.5	8.73	7.78	16.8	11.2	6.04	5.7	15.4	13.1
Pb	157	102	180	201	162	187	214	194	148	273	327	339	63.1	135	244	288
V	34.8	30.7	32.6	35.2	30.2	36.4	35.4	33.8	29.4	29.7	33.3	33.4	30.8	33.5	56.1	35.2

段其能继续保持溶解^[27],而 Pb 和 Zn 都是两性金属,较高的 pH 值可能导致了飞灰中 Pb 和 Zn 的进一步浸出^[28],因而在小肠模拟阶段 Pb 和 Zn 的生物可给量继续上升,由此表明,pH 值并不是影响重金属溶解度的唯一因素. 随着时间增加,Cu、Pb 和 Zn 在碱性较强的肠液阶段溶解度下降,部分溶解态金属产生沉淀,导致生物浸出量降低,而胃消化产物中的溶解态 As 和 V 进入肠液后,因 pH 值的增加导致溶解度降低,其生物浸出量出现降低趋势,这与 Pelfrène 等^[29]的研究结果一致.

2.6 不同浸出方法毒性浸出分析

如图 5 可知,不同粒径焚烧飞灰的浸出实验中,采用欧盟标准中重金属的浸出量远低于 TCLP 和 PBET,这说明浸取剂的种类和 pH 值对飞灰重金属的浸出具有较大影响^[30,31]. 由图 4 的 SEP 和图 5 可知,Zn 在 TCLP 和 PBET 中浸出量与可交换态和碳酸盐结合态所占百分比非常相似,较低 pH 值在一定情况下促进了重金属的浸出. Cu 和 Pb 在 TCLP 中浸出量与可交换态所占比例相似,而 PBET 中 Cu 和 Pb 的浸出量远远大于其他浸出方法,说明胃肠消化液促

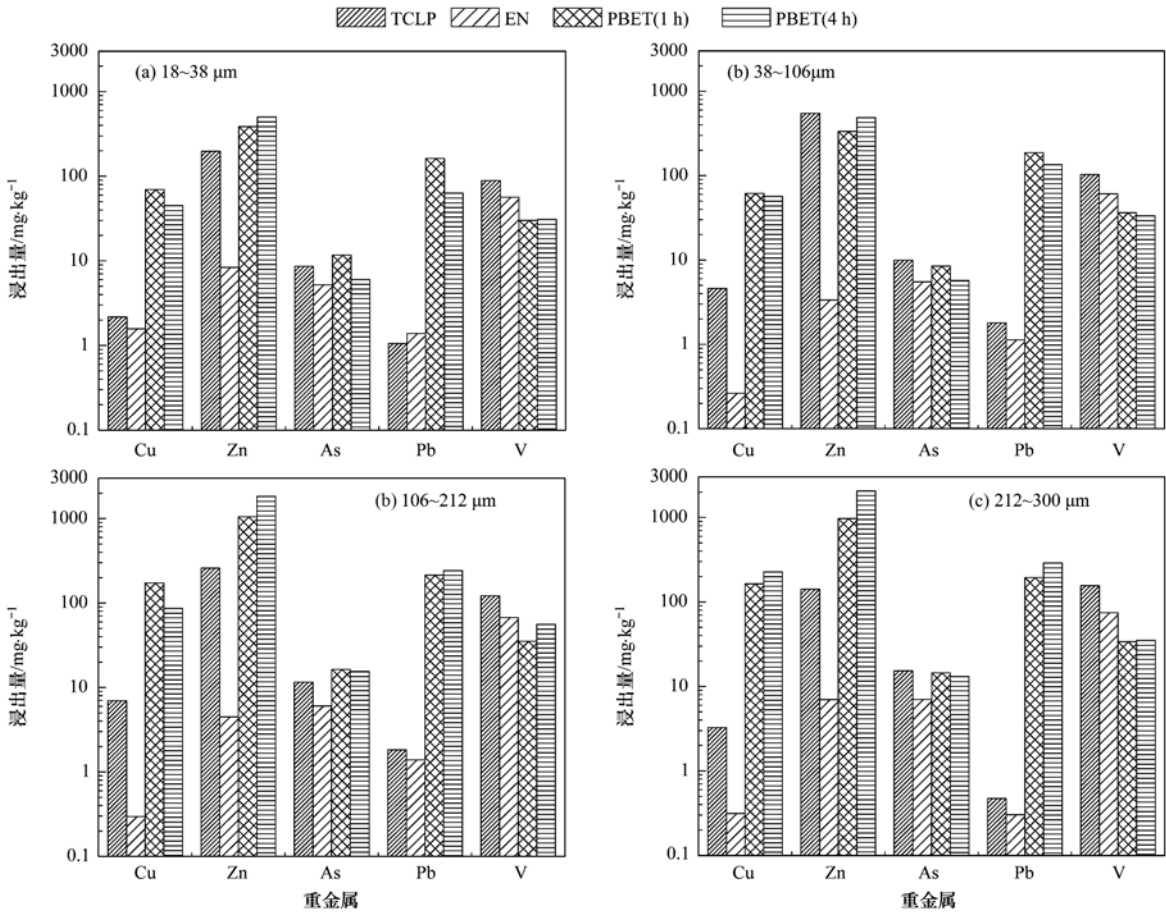


图 5 TCLP、EN、PBET(1 h) 和 PBET(4 h) 这 4 种标准下重金属浸出量对比

Fig. 5 Leaching content comparison between TCLP, EN, PBET(1 h) and PBET(4 h)

进了飞灰中 Cu 和 Pb 的进一步溶解,由于小肠阶段 pH 值的变化影响,PBET 中 As 和 V 的浸出量均低于 TCLP 和 EN 标准下重金属浸出量。对于含有大量碱性物质和重金属的焚烧飞灰,浸取过程中大量碱性物质与酸中和后 pH 值变化较大,进而影响了重金属的浸出。当浸取液呈酸性时,飞灰中重金属大量被浸出,飞灰呈现较高浸出毒性;当浸取液呈中性时,飞灰中部分重金属如 As 和 V 因吸附而产生沉淀;当浸取液呈碱性时,Pb 和 Zn 等两性金属形成可溶性的氢氧根离子配合物而出现大量浸出。

不同毒性鉴别方法得到的评价结果具有显著差别,从而说明了单一毒性浸出标准并不能准确地评价飞灰的危害性,处置环境的不同其浸出毒性可能表现出明显的差异性,为了对焚烧飞灰进行综合的风险评价,必须建立适用于焚烧飞灰的综合评价体系,减少焚烧飞灰对环境的潜在危害。

3 结论

(1) 焚烧飞灰的主要组成元素为 Ca、Si、Al、Mg、Fe、Na 和 K。飞灰粒径近似正态分布,58.7% 的飞灰粒径分布在 38 ~ 106 μm ,粒径小于 150 μm 的焚烧飞灰占总量的 90% 以上,所以在飞灰堆放时须特别注意微粒逸散问题。

(2) 重金属元素总量分布与飞灰粒径大小表现出明显的相关性,重金属总量表现出向小颗粒富集趋势。焚烧飞灰中 Zn 含量最大,V 和 Cu 等重金属次之。而大部分重金属都以残渣态为主,Zn 和 V 等金属醋酸可提取态含量较高,具有一定的潜在危险性。

(3) TCLP 和 EN 实验说明,As 和 V 的浸出量随飞灰粒径的增大呈逐渐增加的趋势,Cu、Pb 和 Zn 在 TCLP 中随飞灰粒径的增大呈先增加后降低的趋势,而在 EN 实验中浸出规律并不明显,PBET 实验表明在人体的肠胃阶段飞灰中大量的碳酸盐结合态重金属转化为可溶性离子释放到环境中。

(4) 本研究中 4 种不同鉴别标准方法对生活垃圾焚烧炉中飞灰的重金属浸出量存在显著差异,PBET 实验中焚烧飞灰的生物可给量显著高于美国 EPA 的 TCLP 和欧盟的 EN12457-2,特别是在中性和弱碱性条件,因此结合飞灰的特性及实际处置环境,建立一种飞灰浸出毒性综合评价体系,降低焚烧飞灰对环境的潜在风险。

参考文献:

[1] 叶秀雅,周少奇,徐斌,等. 不同粒径垃圾焚烧飞灰金属形

态分布比较研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4235-4239.

Ye X Y, Zhou S Q, Xu B, *et al.* Comparative study on metal speciation distributions in MSWI fly ash with various particle sizes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 4235-4239.

[2] Wang L, Jin Y Y, Nie Y F. Investigation of accelerated and natural carbonation of MSWI fly ash with a high content of Ca [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 334-343.

[3] Tian H Z, Gao J J, Lu L, *et al.* Temporal trends and spatial variation characteristics of hazardous air pollutant emission inventory from municipal solid waste incineration in China [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(18): 10364-10371.

[4] Chang F Y, Wey M Y. Comparison of the characteristics of bottom and fly ashes generated from various incineration processes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(3): 594-603.

[5] Chou J D, Wey M Y, Chang S H. Evaluation of the distribution patterns of Pb, Cu and Cd from MSWI fly ash during thermal treatment by sequential extraction procedure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(2-3): 1000-1006.

[6] Tian Z P, Zhang B R, He C J, *et al.* The physiochemical properties and heavy metal pollution of fly ash from municipal solid waste incineration [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 333-341. (与第 28 条参考文献重复,请核对)

[7] Chiang K Y, Tsai C C, Wang K S. Comparison of leaching characteristics of heavy metals in APC residue from an MSW incinerator using various extraction methods [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 277-284.

[8] Ghosh A, Mukiibi M, Ela W. TCLP underestimates leaching of arsenic from solid residuals under landfill conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(17): 4677-4682.

[9] Latawiec A E, Simmons P, Reid B J. Decision-makers' perspectives on the use of bioaccessibility for risk-based regulation of contaminated land [J]. Environment International, 2010, 36(4): 383-389.

[10] Wragg J, Cave M R. *In-vitro* methods for the measurement of the oral bioaccessibility of selected metals and metalloids in soils: a critical review [R]. Almondsbury, Bristol: Environment Agency, 2003.

[11] Xie Y J, Zhu J X. Leaching toxicity and heavy metal bioavailability of medical waste incineration fly ash [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2013, 15(4): 440-448.

[12] 郑顺安,王飞,李晓华,等. 应用 *in vitro* 法评估土壤性质对土壤中 Pb 的生物可给性的影响 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(8): 851-857.

Zheng S A, Wang F, Li X H, *et al.* Application of *in vitro* digestion approach for estimating lead bioaccessibility in contaminated soils: influence of soil properties [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(8): 851-857.

[13] He K M, Wang S Q, Zhang J L. Blood lead levels of children and its trend in China [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3986-3993.

- [14] 姜林, 彭超, 钟茂生, 等. 基于污染场地土壤中重金属人体可给性的健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(4): 406-414.
Jiang L, Peng C, Zhong M S, *et al.* Health risk assessment based on bioaccessibility of heavy metals in contaminated sites [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(4): 406-414.
- [15] Dean J R, Ma R L. Approaches to assess the oral bioaccessibility of persistent organic pollutants: a critical review [J]. Chemosphere, 2007, **68**(8): 1399-1407.
- [16] Method 1311: toxicity characteristic leaching procedure [S]. Washington, DC: US EPA, 1992.
- [17] Tan L C, Choa V, Tay J H. The influence of pH on mobility of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, **44**(1-3): 275-284.
- [18] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [19] Ruby M V, Davis A, Schoof R, *et al.* Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test [J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(2): 422-430.
- [20] Intawongse M, Dean J R. Use of the physiologically-based extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(1): 60-72.
- [21] Ludwig B, Khanna P, Prenzel J, *et al.* Heavy metal release from different ashes during serial batch tests using water and acid [J]. Waste Management, 2005, **25**(10): 1055-1066.
- [22] Zhou J Z, Wu S M, Pan Y, *et al.* Enrichment of heavy metals in fine particles of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash and associated health risk [J]. Waste Management, 2015, **43**: 239-246.
- [23] 李润东, 聂永丰, 李爱民, 等. 垃圾焚烧飞灰理化特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2004, **32**(2): 175-179.
- Li R D, Nie Y F, Li A M, *et al.* Study on physical chemical characteristics of fly ash from municipal solid waste incinerator [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2004, **32**(2): 175-179.
- [24] 张玉, 张朝, 王世杰, 等. 黑土不同粒径有机-矿质复合体对镉的吸附特性[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(4): 447-452.
Zhang Y, Zhang C, Wang S J, *et al.* Adsorption characteristics of cadmium on particle-sized aggregates from black soil [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(4): 447-452.
- [25] Wragg J, Cave M, Nathanail P. A study of the relationship between arsenic bioaccessibility and its solid-phase distribution in soils from Wellingborough, UK [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2007, **42**(9): 1303-1315.
- [26] Sialelli J, Urquhart G J, Davidson C M, *et al.* Use of a physiologically based extraction test to estimate the human bioaccessibility of potentially toxic elements in urban soils from the city of Glasgow, UK [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2010, **32**(6): 517-527.
- [27] Poggio L, Vrščaj B, Schulín R, *et al.* Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco (Italy) [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(2): 680-689.
- [28] Zhang H, Zhao Y, Qi J. Characterization of heavy metals in fly ash from municipal solid waste incinerators in Shanghai [J]. Process Safe and Environmental Protection, 2010, **88**(2): 114-124.
- [29] Pelfrène A, Waterlot C, Mazzuca M, *et al.* Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France) [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011, **33**(5): 477-493.
- [30] Shim Y S, Rhee S W, Lee W K. Comparison of leaching characteristics of heavy metals from bottom and fly ashes in Korea and Japan [J]. Waste Management, 2005, **25**(5): 473-480.
- [31] Van Herck P, Vandecasteele C. Evaluation of the use of a sequential extraction procedure for the characterization and treatment of metal containing solid waste [J]. Waste Management, 2001, **21**(8): 685-694.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行