

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征

梁俊宁¹, 李文慧¹, 葛毅², 陈洁¹, 宋丽娜¹, 刘杰¹

(1. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 2. 陕西省环境监测中心站, 西安 710054)

摘要: 使用安德森撞击式粒径分级采样器, 分别对陕西某铅锌冶炼厂熔炼备料、鼓风熔炼炉和铸铅工艺无组织颗粒物进行分级采样, 并分析不同工艺各粒径段颗粒物中的铅元素含量及粒径分布特征。结果表明, 不同工艺颗粒物的排放量有所不同, 其中鼓风炉熔炼工艺颗粒物排放量最大, 为 $402.83 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$, 熔炼备料和铸铅工艺分别为 $182.71 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $100.03 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$; 各工艺段颗粒物中的铅元素含量也不相同, 其中熔炼备料工艺颗粒物中铅元素质量分数为 $111.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 鼓风炉熔炼 $68.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铸铅工艺 $10.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从粒径分布来看, 熔炼备料和鼓风炉熔炼铅元素主要集中在粗粒径范围, 而铸铅工艺在粗、细粒径段中比重相当, 其中熔炼备料粗粒径铅元素占总量的质量分数为 43.42%, 鼓风炉熔炼占到了 47.48%, 铸铅工艺粗、细粒径中铅元素分别占 37.14%、45.72%; 熔炼备料和铸铅工艺在粗粒径和细粒径范围内均有峰值出现, 而鼓风炉熔炼铅元素峰值主要出现在粗粒径段; 各工艺铅元素累积频率分布曲线均符合对数正态分布。

关键词: 铅锌冶炼; 铅(Pb); 粒径分布; 质量分数; 累积频率

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-2883-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.007

Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter

LIANG Jun-ning¹, LI Wen-hui¹, GE Yi², CHEN Jie¹, SONG Li-na¹, LIU Jie¹

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China; 2. Shaanxi Province Environmental Monitoring Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using a cascade impactor (Andersen Series NVA-800), the size-segregated atmospheric particulates were collected daily and characters of lead contents and size distribution in the particles were analyzed from melting preparation, blast furnace smelting and lead-cast processes within a lead-zinc smelter in Shaanxi province. The results showed that emissions of particulate matter were different in different processes, in which the emissions of blast furnace smelting process was $402.83 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$, while melting preparation were $182.71 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ and $100.03 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ in lead-cast processes. Lead contents in different sizes of particles varied in different processes. The mass fraction of lead were $111.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $68.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $10.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in melting preparation, blast furnace smelting and lead-cast respectively. For lead's size distribution, the melting preparation and blast furnace smelting were mainly concentrated in the coarse particles, and the lead proportion in coarse and fine particles was approximately in lead-cast processes. The proportions of lead in coarse particles were 43.42% and 47.48% in melting preparation and blast furnace smelting process respectively, while the proportion of lead in coarse and fine particles was 37.14% and was 45.72% in lead-cast processes. There had peaks in both coarse and fine particles of melting preparation and lead-cast process, but the lead peak appeared only in the coarse particles of blast furnace smelting. It also indicated that the lead's cumulative frequencies of all processes were conforming to lognormal distribution.

Key words: lead-zinc smelter; lead (Pb); size distribution; mass fraction; cumulative frequency

铅是一种灰白色软金属, 在自然界分布很广, 其在地壳中的含量为 0.0016%。作为最早被人类发现和使用的金属元素之一, 铅被广泛应用于蓄电池、焊料、玻璃、印染、橡胶、化工以及建筑等领域。铅是一种具有毒性的重金属, 进入环境中的铅可通过呼吸、食物、饮水等途径进入人体, 并在人体骨骼、肝、肾和脾中不断累积, 进入血液中的铅可与红细胞结合, 对人体神经系统、造血系统、泌尿系统、消化系统以及生殖器官等造成很大的危害^[1~3]。国内外血铅事件时有发生, 一度引起人们的恐慌。为此, 国内外专家学者对铅的污染特性作了大量的研究工作^[4,5], Rudolph 等^[6]对铅工厂暴露环境和生物样进

行了监测研究; Putnam 等^[7]对一次铅冶炼和二次铅冶炼过程减少铅损耗的可行性方案进行了分析; Van Alphen 等^[8]对铅锌冶炼厂周围大气降尘中的 Pb、Zn、Cu、Fe、As、Cd 等重金属进行了研究; Ohmsen 等^[9]利用光学显微镜和 X 射线衍射技术对铅锌冶炼厂各工艺过程中的铅污染进行了相关研究; Goodarzi 等^[10]对加拿大不列颠哥伦比亚省某铅锌冶炼厂微量元素的沉降和分布特征进行了研究; Zhang 等^[11]对

收稿日期: 2014-01-06; 修订日期: 2014-03-27

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201109053)

作者简介: 梁俊宁(1979~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: ljntb@163.com

珠穆朗玛峰地区大气中的铅污染水平进行了分析;梁静等^[12]对铅元素人为循环环境释放物形态进行了研究;谭科艳等^[13]对南方某城市土壤和蔬菜样品中的铅含量水平进行了检测,并对其健康风险进行了评估;陈海珍等^[14]以广州主城区土壤为研究对象,采用体外模拟实验的方法探讨了土壤铅对人体健康的风险程度;杨红梅等^[15]对荆州市主要农产品中的铅来源进行了同位素示踪分析,发现该地区农产品中的铅主要来自土壤、汽车尾气和染料等;潘月鹏等^[16]对京津冀地区 10 个站点大气降尘颗粒物中的 20 种重金属元素进行了测定分析,其中就包括铅;李月梅等^[17]对华北工业区大气降尘中的 Pb、Zn 等 11 种重金属元素的污染特征和来源进行了研究;李玉成等^[18]、刘咸德等^[19]、边归国^[20]、陈岩等^[21]、李山泉等^[22]分别对上海、北京、南京等地大气中铅元素的浓度水平和来源进行了研究. 国内学者对铅锌冶炼厂周围大气环境中的铅污染特征和来源研究较多^[23~25],王利军等^[26]对宝鸡长青镇冶炼厂周边土壤中的重金属进行了研究,发现土壤中铅的含量均高于国家和陕西省土壤背景值,表明已受到轻度污染,并且易于向植物体迁移. 任春辉等^[27]对宝鸡长青镇冶炼厂周围大气灰尘中的重金属空间分布及污染水平进行了评价;梁俊宁等^[28]、杨柳等^[29]分别对陕西西部某工业园区大气降尘重金属元素特征和铅元素同位素比值分析作了相关研究.

现有的研究成果主要针对铅冶炼厂周围大气环境中的铅污染特征和各有组织污染源的铅污染排放特征,而对铅冶炼厂无组织排放源及厂区内部环境关注较少. 作为铅污染的一个重要来源,铅冶炼企业无组织排放对厂区内内部及附近大气环境影响较大,对各工艺无组织排放中铅的粒径分布进行研究,这对于掌握铅污染分布特征和影响区域等具有重要的意义. 本文以陕西省某铅锌冶炼厂为研究对象,使用 8 级 Andersen 撞击式分级采样器,通过主动采样的方式对该厂熔炼备料、鼓风炉熔炼和铸铅等工艺过程中的无组织颗粒物进行分级采样,测定不同粒径颗粒物中的铅元素含量,分析铅锌冶炼厂不同工艺无组织污染源铅排放的粒径分布特征,以期科学确定铅冶炼行业大气安全防护距离及防控区域的划分提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点选择

陕西某铅锌冶炼厂采用密闭鼓风炉铅锌 (ISP)

工艺,年产精锌 7 万 t、粗精铅 3.5 万 t. 该厂所在区域东西两侧为高原丘陵地、中间沟壑区,长年以东南-西北对倒风向为主,特殊的地形和气象条件导致企业内部无组织污染物很难及时扩散,造成厂区及周边区域大气污染的加剧. 本研究分别选择熔炼备料、鼓风炉熔炼和铸铅工艺段下风向作为采样点,采样点周围开阔,无建筑物、树木等遮挡,并不受其他工艺污染源影响. 采样点的确定主要根据各工艺铅排放源强和监测期间的地面气象条件,利用 CALPUFF 模型进行预测,并结合现场实际情况确定监测点位.

1.2 样品采集

使用美国 Andersen NVA-800 分级采样器(见图 1)进行主动采样,采样高度 1.2 m,采集粒径依次是 $<0.43\ \mu\text{m}$ 、 $0.43\sim0.65\ \mu\text{m}$ 、 $0.65\sim1.1\ \mu\text{m}$ 、 $1.1\sim2.1\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\sim3.3\ \mu\text{m}$ 、 $3.3\sim4.7\ \mu\text{m}$ 、 $4.7\sim5.8\ \mu\text{m}$ 、 $5.8\sim9.0\ \mu\text{m}$ 和 $>9.0\ \mu\text{m}$,采集流量 $28.3\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$,每次采样前进行流量校准,膜托和采样器用蒸馏水超声波清洗. 滤膜选用英国 Whatman 1851-865 型石英滤膜(81 mm),采样前滤膜使用 SDH-150SD 恒温恒湿箱恒重,具体过程为将备选滤膜于马弗炉中 $800\ ^\circ\text{C}$ 焙烧 4 h 以上,冷却后放入恒温恒湿箱(温度 $25\ ^\circ\text{C}$,湿度 50%)中平衡 24 h,使用德国德多利斯公司生产的 ME5-F 型百万分之一天平进行称重,重复操作直至滤膜恒重. 各点采样方法相同,具体步骤为用镊子将滤膜逐级放入已清洗的撞击板,固定仪器并与抽气泵连接,打开电源开始采样,同时记录采样时间,采样完成后用镊子将滤膜逐级取出,对折用铝箔包好,放入滤膜袋避光保存,及时送实验室分析. 采样时间为 2013 年 8 月 10~14 日,每天连续采集 24 h(10:00~次日 10:00),共获得滤膜样品 138 个. 采样期间环境温度在 $20\sim35\ ^\circ\text{C}$ 之间,环境湿度 49%~72% 之间,气压 925~930 hPa,风向以东南风和西北风为主,平均风速 $1.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

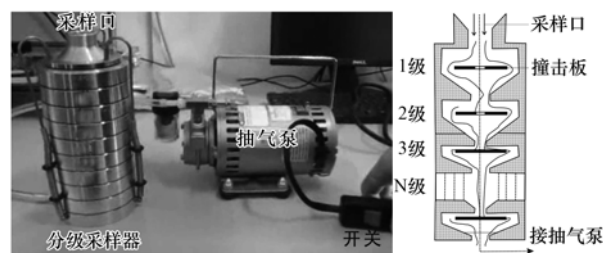


图 1 安德森撞击式分级采样器

Fig. 1 Anderson cascade classification impactor

1.3 样品处理与测定

样品送达实验室后,于恒温恒湿箱(温度 25℃,湿度 50%)中恒重 24 h 后进行称重和重金属元素的测定. 测定时用塑料剪刀取 1/2 滤膜,置于微波消解罐中,依次加入浓硝酸(优级纯) 5 mL、30% 的过氧化氢 5 mL 进行微波消解,残渣使用(1+9)硝酸溶液继续消解至完全,消解液用蒸馏水定容至 50 mL,利用真空抽率装置将消解液过滤后使用 Thermo Scientific 公司生产的 M series(ice3500)型火焰原子吸收分光光度仪测定铅元素. 实验前对同批次石英滤膜中的金属元素空白值和检出限进行了测定,该批滤膜中铅元素的空白值和检出限为 0.017 ~ 0.031 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,平均为 0.023 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. 实验期间同时做空白实验和重复性检验实验. 空白实验有两个,一个是现场采样之前,在采样器不运行的情况下,严格按照采样步骤用空白滤膜进行放膜、取膜全过程操作,获得现场空白样;二是在实验室测定分析过程中,使用空白滤膜同步进行操作,获得实验

室空白样. 为保证实验结果的可靠性和准确性,在实验过程中随机抽取 20% 的样品进行重复性检验实验,对结果进行比对,铅元素测试精密度均在 5% 左右,相对双差 10% 左右,分析合格率 100%. 需特别说明的是,石英滤膜具有亲水性,采样前后滤膜都经过恒湿恒重,因此空气湿度对实验结果影响很小. 实验室操作条件温度 26.3℃,湿度 42%.

2 结果与分析

2.1 不同粒径铅元素排放量水平

由于 Andersen 采样器没有 2.5 μm 和 10 μm 的采集粒径,国内专家学者大都以 <2.1 μm 、2.1 ~ 9.0 μm 和 >9.0 μm 作为细粒子、粗粒子和颗粒物的分级界限^[30]. 本研究根据 Andersen 采样器的粒径分级和普遍的分类^[31]方法,将空气动力学直径 2.1 μm 作为粗、细粒子的分界点. 3 种工艺过程中不同粒径无组织颗粒物及不同粒径中铅元素排放量如表 1 所示.

表 1 不同工艺各粒径段颗粒物及铅排放量

Table 1 Emission of particles and lead size distributions in different processes												
粒径段/ μm	熔炼备料				鼓风炉熔炼				铸铅			
	颗粒物		Pb		颗粒物		Pb		颗粒物		Pb	
	排放量 / $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%	排放量 / $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%	排放量 / $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%	排放量 / $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%	排放量 / $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%	排放量 / $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	比重 /%
合计	182.71	100.00	20.38	100.00	402.83	100.00	27.61	100.00	100.03	100.00	1.05	100.00
>9.0	44.59	24.40	7.06	34.64	88.59	21.99	12.16	44.04	28.51	28.50	0.18	17.14
5.8~9.0	18.76	10.27	3.53	17.32	88.8	22.04	5.91	21.41	19.37	19.36	0.09	8.57
4.7~5.8	9.74	5.33	1.26	6.18	13.14	3.26	2.07	7.50	2.16	2.16	0.03	2.86
3.3~4.7	16.46	9.01	2.03	9.96	71.07	17.64	3.35	12.13	19.37	19.36	0.02	1.90
2.1~3.3	14.55	7.96	2.03	9.96	12.78	3.17	1.78	6.45	1.41	1.41	0.25	23.81
1.1~2.1	18.58	10.17	2.61	12.81	36.15	8.97	1.05	3.80	12.35	12.35	0.07	6.67
0.65~1.1	24.81	13.58	1.03	5.06	41.52	10.31	0.57	2.06	5.61	5.61	0.08	7.62
0.43~0.65	34.19	18.71	0.69	3.39	40.72	10.11	0.52	1.88	9.02	9.02	0.3	28.57
<0.43	1.03	0.57	0.14	0.69	10.06	2.50	0.2	0.72	2.23	2.23	0.03	2.86

由表 1 可知,3 个工艺中鼓风炉熔炼工艺无组织颗粒物排放量最大,为 402.83 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其中 9.0 μm 以上粒径颗粒物排放量为 88.59 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的质量分数为 21.99%,粗粒子(2.1 ~ 9.0 μm)排放量为 185.79 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 46.12%,细粒子(<2.1 μm)排放量为 128.45 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 31.89%;该工艺段颗粒物排放量最大的是 5.8 ~ 9.0 μm 粒径段,其排放量为 88.80 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 22.04%,最小的是 0.43 μm 以下粒径段,排放量为 10.06 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,仅占总排放量的 2.50%. 熔炼备料工艺无组织颗粒物排放量为 182.71 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其中 9.0 μm 以上颗粒物排放量为 44.59 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 24.40%,粗粒

子排放量为 59.51 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 32.57%,细粒子排放量为 78.61 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 43.03%;该工艺过程中细颗粒物的排放量大于粗颗粒物. 铸铅工艺颗粒物排放量较小,其颗粒物排放总量为 100.03 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其中 9.0 μm 以上大颗粒物排放量为 28.51 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 28.50%,粗粒子排放量为 42.31 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 42.30%,细粒子排放量为 29.21 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 29.20%,由表 1 可以看出,铸铅工艺过程中粗颗粒物排放量明显大于细颗粒物.

不同工艺不同粒径颗粒物中的铅元素排放量也有所不同,鼓风炉熔炼和熔炼备料工艺铅元素排放量比较接近,分别为 27.61 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 20.38

$\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 铸铅工艺排放量较小, 只有 $1.05\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$. 其中鼓风炉熔炼工艺 $9.0\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物中铅元素排放量为 $12.16\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总量的 44.04% , 粗粒子中铅元素的排放量为 $13.11\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总量的 47.48% , 而细粒子中铅的排放量只有 $2.34\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 仅总排铅量的 8.48% . 熔炼备料工艺中 $9.0\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物中铅元素排放量为 $7.06\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总排铅量的 34.64% , 粗粒子中铅元素的排放量为 $8.85\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总量的 43.42% , 细粒子为 $4.47\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占 21.94% , 其中 $0.43\ \mu\text{m}$ 以下粒径段排放量最小, 为 $0.14\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总量的 0.69% , 其余各粒径段颗粒物中的铅元素比重比较接近. 铸铅工艺中 $9.0\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物中铅元素排放量为 $0.18\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总排放量的 17.14% , 粗粒子中铅元素排放量为 $0.39\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总排放量的 37.14% , 细粒子中铅的排放量为 $0.48\ \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, 占总排放量的 45.72% . 由表 1 可知, 鼓风炉熔炼和熔炼备料工艺过程中铅元素主要分布在粗颗粒物和大颗粒物中, 而铸铅工艺中铅元素排放主要集中在细粒径段.

2.2 不同粒径铅元素含量分布特征

根据各工艺不同粒径段颗粒物及铅元素排放量, 可分别计算出不同粒径段中铅元素的质量分数, 具体结果见表 2.

表 2 不同工艺各粒径段铅元素含量表

粒径段/ μm	Pb 质量分数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	熔炼备料	鼓风炉熔炼	铸铅
颗粒物	111.54	68.54	10.50
>9.0	158.33	137.26	6.31
5.8~9.0	188.17	66.55	4.65
4.7~5.8	129.36	157.53	13.89
3.3~4.7	123.33	47.14	1.03
2.1~3.3	139.52	139.28	177.30
1.1~2.1	140.47	29.05	5.67
0.65~1.1	41.52	13.73	14.26
0.43~0.65	20.18	12.77	33.26
<0.43	135.92	19.88	13.45

由表 2 可以看出, 熔炼备料工艺铅元素在颗粒物中的质量分数为 $111.54\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径段含量在 $20.04\sim188.00\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 其中 $0.43\sim0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.65\sim1.1\ \mu\text{m}$ 粒径段含量较低, 分别为 $20.04\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $41.62\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他各段含量均在 $120\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上; 大于 $9.0\ \mu\text{m}$ 颗粒物中铅的质量分数为 $158.33\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 粗粒子中铅的质量分数为 $148.71\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 细粒子中铅的质量分数为 $56.86\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可见该工艺过程中大颗粒物和粗粒

子中的铅元素含量明显高于细粒子. 鼓风炉熔炼工艺铅元素在颗粒物中的质量分数为 $68.54\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径段含量在 $12.65\sim157.45\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 其中 $2.1\sim3.3\ \mu\text{m}$ 、 $4.7\sim5.8\ \mu\text{m}$ 和 $>9.0\ \mu\text{m}$ 颗粒物中的铅元素含量明显高于其他各段, 分别为 139.13 、 157.45 和 $137.24\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其他各段铅含量均在 $70\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下; $9.0\ \mu\text{m}$ 以上大颗粒物中铅的质量分数为 $137.26\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 粗粒子中铅的质量分数为 $70.56\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 细粒子中铅的质量分数为 $18.22\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可见该工艺过程中铅元素也主要分布在大颗粒物和粗粒子中, 而细粒子中铅的含量较小. 铸铅工艺铅元素在颗粒物中的质量分数为 $10.50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各粒径段含量在 $1.26\sim178.89\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 其在 $2.1\sim3.3\ \mu\text{m}$ 粒径段含量高达 $178.89\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次为 $0.43\sim0.65\ \mu\text{m}$ 粒径段的 $33.57\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.65\sim1.1\ \mu\text{m}$ 、 $<0.43\ \mu\text{m}$ 和 $4.7\sim5.8\ \mu\text{m}$ 粒径段含量分别为 33.57 、 13.37 和 $12.00\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其余各段铅元素含量均在 $10\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下; $9.0\ \mu\text{m}$ 以上大颗粒物中铅的质量分数为 $6.31\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 粗粒子中铅的质量分数为 $9.22\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 细粒子中铅的质量分数为 $16.43\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 该工艺过程中细粒子中的铅含量很大, 其次为粗粒子, 而大颗粒物中铅元素含量比较低, 这主要与其工艺特点有关.

2.3 铅元素粒径分布特征

图 2 是各工艺无组织颗粒物中不同粒径中铅元素的粒径分布图. 从中可以看出, 熔炼备料工艺铅元素主要分布在 $9.0\ \mu\text{m}$ 以上大颗粒物粒径范围, 并在粗粒子 ($5.8\sim9.0\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\sim4.7\ \mu\text{m}$) 和细粒子 ($1.1\sim2.1\ \mu\text{m}$) 粒径段均有小高峰出现; 鼓风炉熔炼工艺铅元素最大峰值在 $9.0\ \mu\text{m}$ 以上颗粒物粒径范围, 其在粗粒径段中的峰值分别出现在 $5.8\sim9.0\ \mu\text{m}$ 和 $3.3\sim4.7\ \mu\text{m}$ 粒径段; 铸铅工艺颗粒物中铅元素在粗粒径和细粒径段各出现一个峰值, 其中最大峰值出现细粒子粒径范围内 ($0.43\sim0.65\ \mu\text{m}$), 在粗粒径范围出现第二峰值 (在 $2.1\sim3.3\ \mu\text{m}$ 段). 从图 2 中各工艺段 $9.0\ \mu\text{m}$ 以下颗粒物中铅元素占总排铅量的比重来看, 铸铅工艺呈现出明显的双峰结构, 其在细粒径和粗粒径范围内各有一个峰值, 并且最大值出现在细粒径段, 鼓风炉熔炼工艺峰值主要出现在粗粒径范围内, 而熔炼备料工艺中铅元素比重峰值分布比较均匀, 其在粗、细粒子过渡段出现一个连续高峰, 并在粗粒径段出现两个小高峰 ($5.8\sim9.0\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\sim4.7\ \mu\text{m}$). 分析认为, 造成

各工艺过程无组织颗粒物中铅元素粒径分布特征差异的原因主要与各工艺特点及颗粒物来源有关,熔炼备料工艺颗粒物主要来自破碎机破碎、工艺研磨和筛分过程,可散发不同粒径段的颗粒物,从图中也可以看出其在细粒子(1.1~2.1 μm)和粗粒子(2.1~4.7 μm 、5.8~9.0 μm)以及大颗粒物中均有峰值出现;鼓风机熔炼颗粒物主要来自燃烧过程,其峰值出现粗粒子和大颗粒物中,分析认为与熔炼过程中的细颗粒物受冷凝塔高湿气流影响迅速凝结增大有关;铸铅工艺过程中逸散出来的颗粒物以细颗粒物为主,其在粗粒径段出现的峰值主要是烟气中的细颗粒物进入空气后迅速冷却凝并,使粒径变大。

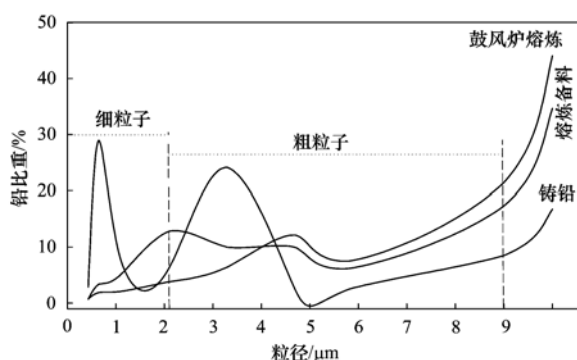


图2 各工艺不同粒径中铅元素粒径分布
Fig. 2 Aerodynamic particle size distribution of lead in different processes

图3是各工艺段铅元素累积频率分布曲线,熔炼备料、鼓风机熔炼、铸铅的累积频率分布均符合对数正态分布^[32]。鼓风机熔炼和熔炼备料铅元素主要集中在粗粒径范围,而铸铅工艺在粗细粒径段排放量相当。熔炼备料工艺铅元素的几何平均粒径为4.00 μm ,其中粗粒径铅元素占总排放量的43.42%,细粒径段占总排放量的21.94%;鼓风机熔炼铅元素几何平均粒径是8.20 μm ,粗粒径铅元

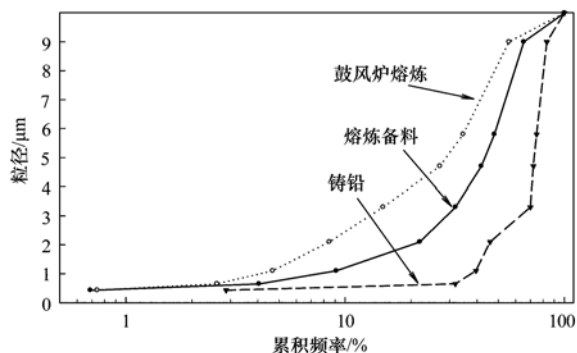


图3 铅元素粒径累积频率分布
Fig. 3 Cumulative frequency of lead size distributions in different processes

素占总排放量的47.48%,其中细粒径段仅占总排放量的8.48%;铸铅工艺铅元素几何平均粒径为2.60 μm ,其中粗粒径铅元素占总排放量的37.14%,其中细粒径段占总排放量的45.72%。

3 讨论

粒径分布是颗粒物的基本特征之一,它能够反映颗粒物在大气环境中的迁移、挟持以及沉降特点,并直接影响颗粒物在大气中的运动轨迹^[33],是大气预测模型中的核心信息之一,在确定无组织源排放的颗粒物在大气中的扩散距离和最大浓度落地点中具有十分重要的作用,是大气预测模型软件中的基本参数。研究者只有在准确掌握了颗粒物的粒径分布特征之后,才能通过模型对其在大气环境中的迁移和沉降规律进行科学预测^[34]。铅锌冶炼厂排放的重金属元素一般都附着在颗粒物中,为了解铅锌冶炼行业无组织排放源中铅元素的迁移路径、扩散距离和沉降量,就必须对不同粒径颗粒物中的铅元素含量以及铅元素的粒径分布特征进行分析,从而为铅锌冶炼厂无组织污染源设定一定的大气防护距离,其作用是为无组织排放源的污染物提供一段稀释距离,使其到达居民区的浓度满足要求^[35]。本研究主要对陕西某铅锌冶炼厂3种重点工艺过程中的无组织排放颗粒物进行分级采样,测定分析不同粒径颗粒物中铅元素的含量及粒径分布特征,以准确判定铅锌冶炼行业无组织排放源中铅的扩散距离和最大浓度落地点,并计算出环境空气降尘中的铅元素在土壤环境中的累积效应,从而为科学确定铅锌冶炼行业大气安全防护距离和划分防控区域提供理论依据。

4 结论

(1)该铅锌冶炼厂鼓风机熔炼工艺中无组织颗粒物排放量为402.83 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其中粗粒子排放量为185.79 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的46.12%,细粒子排放量128.45 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占31.89%;熔炼备料工艺无组织颗粒物排放量182.71 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,粗粒子和细粒子排放量分别为59.51 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 和78.61 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,各占总量的32.57%和43.03%;铸铅工艺颗粒物排放总量为100.03 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其中粗粒子排放量为42.31 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占总量的42.30%,细粒子排放量为29.21 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$,占29.20%。

(2)鼓风机熔炼和熔炼备料工艺铅元素排放量比较接近,分别为27.61 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 和20.38 $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,

铸铅工艺排放量较小,只有 $1.05 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ 。鼓风炉熔炼粗粒子铅元素排放量为 $13.11 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,占总量的 47.48%,细粒子中铅的排放量为 $2.34 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,仅总排铅量的 8.48%;熔炼备料工艺粗粒子中铅元素排放量 $8.85 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,占总量的 43.42%,细粒子为 $4.47 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,占 21.94%;铸铅工艺中粗粒子中铅元素排放量为 $0.39 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 37.14%,细粒子中铅的排放量为 $0.48 \mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,占总排放量的 45.72%。

(3)熔炼备料工艺颗粒物中铅元素的质量分数为 $111.54 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中粗粒子中铅的质量分数为 $148.71 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,细粒子 $56.86 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;鼓风炉熔炼工艺铅元素在颗粒物中的质量分数为 $68.54 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,粗、细粒子中铅含量分别为 $70.56 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $18.22 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;铸铅工艺铅元素在颗粒物中的质量分数为 $10.50 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,粗、细粒子中铅的质量分数分别为 $9.22 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $16.43 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(4)铸铅工艺在细粒径和粗粒径范围内各有一个峰值,并且最大值出现在细粒径段,鼓风炉熔炼工艺峰值出现在粗粒径范围内,而熔炼备料工艺中铅元素比重比较均匀,其在粗、细粒子过渡段出现一个连续高峰,并在粗粒径段出现两个小高峰。3个工艺铅元素的几何平均粒径分别为熔炼备料 $4.00 \mu\text{m}$ 、鼓风炉熔炼 $8.20 \mu\text{m}$ 、铸铅 $2.60 \mu\text{m}$,各工艺铅元素累积频率分布曲线均呈对数正态分布。

参考文献:

- [1] 汪晔君. 铅污染对人体健康的危害及防治措施[J]. 沈阳大学学报, 2004, **16**(6): 103-106.
- [2] 周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3675-3678.
- [3] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中 Pb 分布特征[J]. 地球学报, 2009, **30**(1): 72-78.
- [4] Sheng X F, Xia J J, Jiang C Y, *et al.* Characterization of heavy metal-resistant endophytic bacteria from rape (*Brassica napus*) roots and their potential in promoting the growth and lead accumulation of rape [J]. Environmental Pollution, 2008, **156**(3): 1164-1170.
- [5] Zhang H, He P J, Shao L M, *et al.* Leaching behavior of Pb and Zn in air pollution control residues and their modeling prediction [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(3): 583-586.
- [6] Rudolph L, Sharp D S, Samuels S, *et al.* Environmental and biological monitoring for lead exposure in California workplaces [J]. American Journal of Public Health, 1990, **80**(8): 921-925.
- [7] Putnam R D, Vornberg D L, Putnam R. The feasibility of processing lead-based paint abatement wastes through primary and secondary lead smelters [J]. Environmental Geochemistry and Health, 1994, **16**(3-4): 159-165.
- [8] Van Alphen M. Atmospheric heavy metal deposition plumes adjacent to a primary lead-zinc smelter [J]. Science of the Total Environment, 1999, **236**(1): 119-134.
- [9] Ohmsen G S. Characterization of fugitive material within a primary lead smelter [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, **51**(10): 1443-1451.
- [10] Goodarzi F, Sanei H, Duncan W F. Monitoring the distribution and deposition of trace elements associated with a zinc-lead smelter in the Trail area, British Columbia, Canada [J]. Journal of Environmental Monitor, 2001, **3**(5): 515-525.
- [11] Zhang R J, Shen Z X, Zou H. Atmospheric Pb levels over Mount Qomolangma region [J]. Particuology, 2009, **7**(3): 211-214.
- [12] 梁静, 毛建素. 铅元素人为循环环境释放物形态分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1191-1197.
- [13] 谭科艳, 陈燕芳, 汤奇峰, 等. 南方某工业区周边土壤和蔬菜中铅的健康风险评估[J]. 地球学报, 2012, **33**(5): 801-806.
- [14] 陈海珍, 龚春生, 陈丽秋, 等. 基于体外模拟法的城市土壤铅的健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(3): 254-257.
- [15] 杨红梅, 段桂玲, 童喜润, 等. 荆州市郊主要农产品中铅来源的同位素示踪研究[J]. 地球化学, 2012, **41**(6): 576-584.
- [16] 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.
- [17] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3712-3717.
- [18] 李玉武, 刘威德, 李冰, 等. 绝对主因子分析法解析北京大气颗粒物中铅来源[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3310-3319.
- [19] 刘威德, 朱祥坤, 董树屏, 等. 北京市大气颗粒物分级样品的铅同位素丰度比测量与来源研究[J]. 质谱学报, 2011, **32**(3): 151-158, 163.
- [20] 边归国. 大气颗粒物中铅污染来源解析技术[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(2): 48-52.
- [21] 陈岩, 朱先芳, 季宏兵, 等. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 219-228.
- [22] 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.
- [23] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1349-1354.
- [24] 黄维, 连兵, 常沁春, 等. 某铅冶炼厂周围环境铅污染调查[J]. 环境与健康杂志, 2007, **24**(4): 234-237.
- [25] 许中坚, 吴灿辉, 刘芬, 等. 典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, **22**(1): 111-114.

- [26] 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(2): 325-330.
- [27] 任春辉, 卢新卫, 陈灿灿, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周围灰尘中重金属的空间分布及污染评价[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 706-712.
- [28] 梁俊宁, 刘杰, 陈洁, 等. 陕西西部某工业园区采暖期大气降尘重金属特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(2): 318-324.
- [29] 杨柳, 李旭祥. 大气降尘中重金属元素及铅同位素分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, **48**(2): 118-124.
- [30] Pan Y P, Wang Y S, Sun Y, *et al.* Size-resolved aerosol trace elements at a rural mountainous site in Northern China: Importance of regional transport [J]. Science of the Total Environment, 2013, **461-462**: 761-771.
- [31] 徐宏辉, 王跃思, 杨勇杰, 等. 泰山顶夏季大气气溶胶中水溶性离子的浓度及其粒径分布研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 305-309.
- [32] 卢正永, 张志龙, 傅翠明. 气溶胶粒度分布测量的数学处理[J]. 工业卫生与职业病, 2005, **31**(3): 184-190.
- [33] Blott S J, Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, **26**(11): 1237-1248.
- [34] Gerald M F. Address of the retiring President of the International Association of Sedimentology: difference in size distributions of populations of particles among sands from various origins [J]. Sedimentology, 1979, **26**(1): 3-22.
- [35] 许宁, 闫旭, 胥占忠, 等. 铅冶炼业卫生防护距离标准探讨[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(5): 464-465.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行