

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

铅元素人为循环环境释放物形态分析

梁静, 毛建素*

(北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

摘要: 环境中铅污染物来自于物质人为循环的环境释放, 铅释放物的形态差异意味着其在环境介质中迁移和转化的起始状态不同. 确定铅元素人为循环环境释放物的形态, 可以为环境风险评估和源头管理提供科学依据. 本研究通过追踪铅元素人为循环流动过程, 应用物理化学分析方法, 辨识生命周期各阶段环境释放物中铅元素的形态, 并以 2010 年为例, 定量分析中国铅元素人为循环中环境释放物的形态分布特征. 结果表明, 2010 年中国铅人为循环中环境释放物主要形态表现为 PbSO_4 , 约占总量的 23.4%; 其次是 PbO 、 Pb 和 PbCO_3 , 共占总释放量的 46.2%. 国内每消费 1 kt 精铅, 将向环境释放 547.9 t 的铅, 这些环境释放物中 73.3% 来源于产品使用阶段和废物处置与回收阶段; 从形态看, PbSO_4 占释放物的量为 128.2 t, 主要来源于生产阶段和废物处置与回收阶段, PbO 、 Pb 和 PbCO_3 则分别主要来源于废物处置与回收、产品使用和生产几个阶段.

关键词: 铅; 物质流动; 释放物; 形态; 生命周期

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1191-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.053

Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China

LIANG Jing, MAO Jian-su

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Lead pollutants in the environment origin from lead losses in the anthropogenic lead cycle, and the diversity of lead loss species indicates different starting points for transferring and transformation in the environmental medium. The knowledge of lead loss species from anthropogenic flow can help lay a scientific and sound foundation for future environmental risk assessment and source management. The anthropogenic lead flow was tracked down in the research, and with the methodology of physical and chemical analysis, the species of lead losses in all life-cycle stages were recognized. The year 2010 was used as a case study for quantitative speciation analysis of total lead losses. It turns out that PbSO_4 is most, which contributes 23.4% of the total losses; followed by PbO , Pb and PbCO_3 , and these three species together occupy 46.2%. In addition, for every 1 kt refined lead consumed domestically, lead losses total 547.9 t, of which 73.3% are from use and waste management & recycling. In view of speciation, PbSO_4 is 128.2 t and mainly occurs in production and waste management & recycling; while most PbO , Pb and PbCO_3 are separately from waste management & recycling, use and production.

Key words: lead; substance flow; lead losses; species; life-cycle stage

从岩石圈中开采出的矿物铅, 经过富集、冶炼成精铅, 然后加工、制造成产品为人类社会服务, 使用后又返回到自然环境中, 整个过程称为铅的人为循环过程^[1]. 研究表明, 生物圈中 95% 以上的铅是由于人为因素造成的^[2], 铅释放物进入大气、土壤、水体等环境介质中会对生态系统和人类健康造成危害. 值得注意的是, 铅的最终归宿以及健康风险除了与数量有关外, 更大程度上取决于它的形态和暴露水平^[3,4]. 形态的差异直接导致污染物在环境中的迁移转化、生物有效性和潜在毒性的不同^[5]. 正确识别人为循环释放到环境中的铅的起始形态, 可以为其健康风险研究奠定基础, 更重要的是, 弄清铅释放物的形成特点, 有利于对污染物实行有效的源头控制, 从而大大提高管理的科学性和有效性.

人为循环的铅释放物不同于铅污染物, 它是铅与环境介质发生复杂作用生成污染物之前的状

态^[6]. 本研究中形态分析的对象是人为循环产生的、尚未和环境介质发生作用的铅释放物. 目前, 形态分析在环境领域的应用已成为分析化学的趋势和热点^[7]. 现有铅形态的研究多集中在环境化学和工程技术领域. 其中, 环境化学关注的是释放物进入环境后的状态, 通过典型化学试剂提取来分析铅的不同形态^[8,9], 这种分析难以对所有环境释放的产生源头进行测量, 同时, 采样结果易受到采样点位置、测试方法等人为因素的影响. 工程技术领域则关注技术革新中铅形态的变化^[10~12], 这些研究虽然为研究某环节铅形态的变化提供了方法, 但无法了解铅整个生命周期中发生的转化以及释放到环境中的形

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171361)

作者简介: 梁静(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为产业生态学, E-mail: liangjing1988727@163.com

* 通讯联系人, E-mail: maojs@bnu.edu.cn

态种类. 本研究通过应用物理化学分析方法, 追踪铅元素人为循环流动过程, 辨识生命周期各阶段环境释放物的形态, 并以 2010 年为例, 定量分析中国人为循环中铅释放物的形态分布特征.

1 材料与方法

1.1 环境释放物研究框架

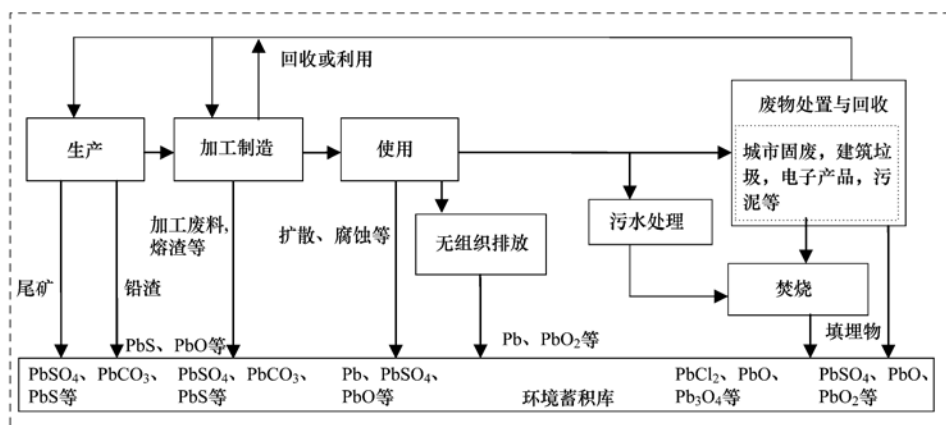


图1 人为循环中铅释放形态分析研究框架

Fig. 1 Framework of lead speciation analysis for anthropogenic lead losses

铅元素的化学形态包含形态种类和数量分配特征两方面. 其中, 形态种类包括元素赋存状态和化学结构^[6], 本研究中主要讨论铅元素环境释放物的化学结构, 不考虑铅与其他物质复杂的结合状况. 如PbO既包含在冶炼的铅渣中, 也和其他物质结合起来作为铅蓄电池中铅膏的成分, 无论怎样的结合状况, 铅渣和铅膏中所含铅是相同的化学结构; 在数量分配方面, 文中所涉及量均指铅释放物中的含铅量. 在生命周期的某阶段, 形态 X 的铅释放物产生量为:

$$X = \sum_{j=1}^n K_j Y_j \quad (1)$$

式中, j 分别表示铅金属生产阶段中某过程 (包括采选、原生铅冶炼和再生铅冶炼), 或其它生命周期3个阶段中某特种铅产品 (如铅酸电池、电缆包皮等), n 表示生产阶段中生产过程总数, 或其它阶段中铅产品类别总数; Y 为该阶段中第 j 个过程或第 j 种铅产品所对应的铅环境释放总量, K 为铅释放物中 X 形态的比例.

整个铅人为循环过程中, 铅释放物表现为 X 形态的总量 E_X 为:

$$E_X = \sum_{i=1}^4 X_i \quad (2)$$

式中, i 依次为生产、加工制造、产品使用和废物处

置和回收这4个阶段. 由于各阶段主要的生产过程和生产工艺存在差异, 产生的环境释放物在化学结构、赋存状态上也有很大不同. 本研究在追踪铅人为循环的过程中, 着重分析人类社会-环境界面上环境释放物的形态, 按照铅的生命周期的划分, 建立了铅环境释放物形态的研究框架 (图1).

置与回收这4个阶段中的第 i 个阶段, X_i 为第 i 阶段释放物表现为 X 形态的量.

将式(1)~(2)结合可得:

$$E_X = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n K_{ij} Y_{ij} \quad (3)$$

1.2 生命周期各阶段铅环境释放物形态分析

1.2.1 金属生产阶段

铅矿石一般含铅3%~9%, 富集后可获得达到冶炼要求的铅精矿, 没有进入铅精矿的铅留存于尾矿中. 方铅矿 (PbS)、白铅矿 (PbCO₃) 和铅矾 (PbSO₄) 是目前炼铅的主要原料, 选矿过程会产生尾矿. 我国尾矿中铅矿物以氧化矿为主, PbSO₄ 是矿物的主要形态, 氧化率高达85%左右^[13], 综合我国铅矿石实际情况, PbSO₄、PbCO₃、PbS 与其他形态的比例取为50%、35%、10%和5%.

国内原生铅冶炼多以烧结鼓风炉传统工艺为主^[14], 然后以柏兹电解法 (Betts Electrolytic Process) 精炼得到含铅99%以上的精铅. 炉渣中包含来不及发生还原反应而产生的一系列铅氧化物 (如PbO、Pb₂O₃、Pb₃O₄)、硫化物的共熔体铅锍 (PbS) 以及少量PbSO₄等. 电解精炼过程中Pb²⁺在阴极上放电, 形成含有PbO、PbFeCl等的阳极泥, 电解前加硫除铜的工艺产生含有PbS的浮渣, 之后碱性精炼产生含有PbO的氧化渣. 原料和熔炼条件不同会使铅渣

和铅铈的组分存在差异. 综合企业清洁生产审计^[15]和现场调研结果, PbO 、 PbS 、 PbSO_4 、 Pb_2O_3 、 Pb_3O_4 及其他形态的比例可取为 40%、30%、12%、10%、6% 和 2%.

中国再生铅的冶炼多采用传统的反射炉^[16], 冶炼的原料中废铅蓄电池占 85%^[17]. 含铅的废电池壳和隔板上黏有 PbSO_4 、 PbO_2 、 Pb 、 PbO 等含铅物质^[11]. 熔炼过程一般加入铁屑、苏打和碎焦进行还原、固硫和造渣反应, 生成的熔炼铅渣中一般含有 PbS 、 PbO 、 PbSO_4 等. 同时, 冶炼的铅尘为 PbS 、 PbO 等形态的释放物, 其比例为 51%、49%^[18]. 结合再生铅企业铅平衡表^[19], 可得 PbS 、 PbO 、 PbSO_4 、 PbO_2 和 Pb 所占的比例分别为 34.6%、22.0%、18.4%、23.3% 和 1.7%.

1.2.2 产品加工制造阶段

精铅主要用于铅蓄电池、铅氧化物产品、铅合金及铅材等, 其中铅蓄电池的使用量占 70% 以上^[20]. 铅蓄电池生产过程分为铅粉与板栅制造、和膏、固化组装等多种工序, 加工制造中的含铅废物主要为板栅冶炼的铅渣以及废弃极板、板栅等, 根据成分可划分为铅合金损失和铅膏损失. 铅合金主要为铅锑合金 (Pb_xSb_y) 或铅钙合金 (Pb_xCa_y), 铅膏的成分为 PbO 、 $3\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 $4\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$ ^[21]. 制造产生的铅合金和铅膏废物的比例约为 1:2^[22], 由此, 该阶段释放的 Pb 、 PbO 和 PbSO_4 的比例约为 33.4%、53.3% 和 13.3%.

铅氧化物的制备通常采用金属氧化法, 通过金属熔融、磨粉后焙烧氧化. 温度为 330 ~ 450℃ 时熔融过程中会形成 Pb_2O_3 , 450 ~ 470℃ 的温度范围内则形成 Pb_3O_4 , 温度再高时变为 PbO . 铅氧化物产品在制造阶段产生 PbO 、 Pb 、 Pb_2O_3 和 Pb_3O_4 的比例取为 55%、30%、10% 和 5%.

铅合金熔炼时熔融铅的表面覆盖有氧化物浮渣, 其成分为 PbO , 同时有少量铅蒸气和铅尘的产生. 铅渣的具体成分因合金种类不同而不同, 如在铅钙合金配制生产过程中, 浮渣中含有 CaPb_3 和少量铅金属^[23]. 铅合金熔炼中 PbO 、 Pb 的比例取为 85%、10%, 其余形态比例为 5%.

1.2.3 产品使用阶段

铅使用的类型通常可以划分为铅蓄电池、铅材等可回收性铅以及弹壳、涂料、添加剂等耗散性铅. 产品使用阶段的铅损失主要包含以下 3 种: 一是耗散型产品, 如涂料、弹药、塑料添加剂、焊料等,

这些产品中的铅在其使用中全部释放进入环境^[24]; 二是部分电缆难以就地回收或回收成本过高, 常常留存于远洋海底, 这部分铅也被称作“休眠铅”(hibernating lead)^[24]; 三是铅产品使用中经风化和磨损产生环境扩散、腐蚀等. Lohm 等^[25]曾对第三种释放过程进行了深入分析. 本研究沿用其中环境释放系数的概念, 采用环境释放系数表示特定时间段内向环境中发生自由迁移的量占使用中铅产品的总量的比值. 中国和瑞典的铅释放情况存在差异, 首先中国的铅产品消费结构中耗散型产品的比例大, 其次, 中国的技术水平与瑞典有所差异. 考虑到这些因素, 对 2010 年中国使用阶段的环境释放系数进行估值, 具体见表 1 所示.

表 1 铅使用阶段的环境释放系数

Table 1 Loss coefficients of lead products in use stage

铅产品	铅释放系数	
	瑞典	中国
铅蓄电池	0.01	0.09
铅氧化物产品	0.1	0.45
其他涂料和添加剂	0.5	0.75
电缆包皮	0.01	0.25
金属制品	0.005	0.008
焊料	— ¹⁾	0.9
其他	0.01	0.05

1) 表示文献中没有相关数据

不同的铅产品产生不同形态的环境释放物, 铅蓄电池、铅氧化物产品和铅盐等使用过程中释放到环境中的铅的形态往往存在差异. 铅蓄电池中正极活性物质为 PbO_2 , 负极为海绵状铅, 铅蓄电池中 Pb 、 PbO_2 、 PbSO_4 比例取为 30%、30% 和 40%; 铅氧化物产品中 PbO 、 Pb_3O_4 (红丹) 和 Pb_2O_3 的环境释放量根据其使用情况以 65%、25% 和 10% 计; 含铅涂料和添加剂多为铅盐, 如 $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ (铅白)、 PbCl_2 、 PbCrO_4 等, 文中 PbCO_3 和 PbCl_2 占铅盐释放物的比例取为 25% 和 5%, 其余为 PbCrO_4 、硬脂酸盐等其他形态; 而焊料、电缆护套、子弹壳释放到环境中的形态主要表现为 Pb .

1.2.4 铅废物处置与回收阶段分析

我国回收的废铅主要包括铅酸电池、电缆包皮、耐酸器皿衬里、印刷合金及轴承合金等^[17], 含铅垃圾 80% 以上进行填埋, 其余进行焚烧处理. 含铅垃圾的种类包括城市固体废弃物、建筑垃圾、危险废弃物(如阴极射线管)和污水处理的污泥等.

部分化学添加剂和铅氧化物产品经过焚烧被释放到环境中. 焚烧产生的含铅物质主要为底渣和飞灰, 它们的成分与氯、硫组分的含量、燃烧环境和

金属特性等有关.我国垃圾中含有大量的厨余垃圾、PVC 塑料等含氯物质和纺织、橡胶等含硫物质,焚烧中会产生 PbCl_2 、 PbSO_4 和铅的氧化物.根据垃圾中氯、硫含量,化合物 PbCl_2 和 PbSO_4 的比例约为 2:1^[26].废铅蓄电池的成分区别于新电池, PbSO_4 、 PbO_2 、Pb 和 PbO 所占比例分别为 50%、20%、17% 和 13%^[27];铅氧化物产品在废物处置与回收阶段释放的形态种类比较复杂, Pb_3O_4 (铅丹)为涂料的主要成分,占环境释放的 25%; PbCO_3 作为铅白的成分所占比例为 20%;假设通过焚烧产生的 Pb_2O_3 所占比例为 5%,其余为 PbCl_2 、 PbSO_4 和 PbO 形态的铅.废物处置与回收阶段环境释放系数的取值汇总后可见表 2.

2 结果与讨论

2.1 各阶段铅释放物形态比例

人为循环中环境释放物形态及其所占比例汇总

表 2 废物处置与回收阶段的铅环境释放系数

Table 2 Loss coefficients of lead products in waste management & recycling

铅产品	环境释放系数
铅蓄电池	0.15
铅氧化物产品	0.55
其他涂料和添加剂	0.15
电缆包皮	0.08
金属制品	0.1
其他	0.7

整理后见表 3.可以看出,生命周期的某些过程产生的释放物形态种类较多,如焚烧过程可产生 PbSO_4 、 Pb_3O_4 、 PbCl_2 、 PbCO_3 等 7 种形态的释放物,而选矿过程释放物的种类较少,主要为 PbSO_4 、 PbCO_3 和 PbS.

2.2 生命周期铅释放物形态构成

生产阶段的铅释放来自选矿过程产生的尾矿、原生和再生冶炼的熔炼铅渣.尾矿中的含铅量可用

表 3 生命周期各阶段铅环境释放物的形态及比例

Table 3 Speciation and contribution of the lead losses in product life-cycle stages

生命周期阶段	产生过程	环境释放物名称	释放物形态	所占比例 ¹⁾ /%
生产	选矿	尾矿	PbSO_4 : PbCO_3 : PbS: 其他	50: 35: 10: 5
	原生铅冶炼	炉渣、铅铈、阳极泥、浮渣、氧化渣	PbO: PbS: PbSO_4 : Pb_2O_3 : Pb_3O_4 : 其他	40: 30: 12: 10: 6: 2
	再生铅冶炼	铅渣、废电池隔板、除尘灰	PbS: PbO_2 : PbO: PbSO_4 : Pb	34. 6: 23. 3: 22. 0: 18. 4: 1. 7
加工制造	电池制造	铅膏、铅渣、废弃极板、板栅	PbO: Pb: PbSO_4	53. 3: 33. 4: 13. 3
	铅氧化物产品	铅渣	Pb: PbO: Pb_3O_4 : Pb_2O_3	55: 30: 10: 5
	合金冶炼	浮渣	PbO: Pb: 其他	85: 10: 5
	铅氧化物产品	铅渣	Pb: PbO: Pb_3O_4 : Pb_2O_3	55: 30: 10: 5
产品使用	合金冶炼	浮渣	PbO: Pb: 其他	85: 10: 5
	铅蓄电池	腐蚀和无组织排放	Pb: PbO_2 : PbSO_4	30: 30: 40
	铅氧化物产品	腐蚀和扩散	PbO: Pb_2O_3 : Pb_3O_4	60: 30: 10
	其他涂料和添加剂	腐蚀和扩散	PbCO_3 : PbCl_2 : 其他	25: 5: 70
	铅蓄电池	固体废弃物	PbSO_4 : PbO_2 : Pb: PbO	50: 20: 17: 13
废物处置与回收	铅氧化物产品	灰渣、飞灰	PbO: Pb_3O_4 : PbCO_3 : PbCl_2 : Pb_2O_3 : PbSO_4 : 其他	31. 3: 25: 20: 13. 3: 5: 3. 3: 2
	其他涂料和添加剂	灰渣、飞灰	PbO: PbCl_2 : Pb_2O_3 : Pb_3O_4 : PbSO_4 : 其他	63. 3: 13. 3: 10: 10: 3. 3: 10

1) 各数据均以含铅量计算

2010 年铅精矿的使用量^[28]乘以 1 减去采矿回收率算得,熔渣中的含铅量可以用精铅量乘以 1 减去冶炼回收率算得,其中精铅包含原生铅和再生铅,采矿效率、原生和再生铅冶炼效率分别为 83.97%、95.74%^[29]和 98%^[1].简单计算可得铅生产阶段选矿、原生和再生铅冶炼过程中环境释放物总量,又已知铅各形态释放物的所占比例(表 3),由式(1)可得铅释放物在生产阶段的形态构成,结果见表 4.为简化研究结果和使之便于比较,文中研究精铅的生产量为 1 kt 所对应的环境释放情况.

中国自 2006 年起限制精铅出口,2010 年精铅

为净进口,铅矿进口将是长期趋势,研究中假设我国生产的精铅全部用于国内消费.铅的消费结构中铅蓄电池约占 73%,铅氧化物产品约占 13%,铅合金及铅材约占 8%,上述铅使用量在铅产品的总制造中占 94% 左右^[20],文中制造阶段主要考虑以上 3 种产品.制造过程中没有进入铅产品的铅,即释放到环境中铅数量采用铅产品量乘以 1 减去制造效率可得.由于铅酸电池和化工制品的制造效率为 85%~98%,铅材的铅利用率较低^[30],铅蓄电池制造效率取值为 $0.98\text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,铅氧化物产品为 $0.97\text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$,铅合金及铅材为 $0.9\text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$.同理,由表 3 和式(1),可得

加工制造阶段各形态铅环境释放物的量。

以 2010 年中国铅的消费情况为例,除铅蓄电池和铅氧化物产品外,铅材占铅消费量的 3%^[20],焊料 3%,电缆护套 1%,铅弹 1%。每消费 1 kt 精铅,

根据铅的消费结构以及产品使用、废物处置与回收阶段的铅产品释放物各形态的比例(表 3),由式(1)易求得使用阶段和废物处置与回收阶段各形态铅的量,结果见下表 4。

表 4 生命周期各阶段铅环境释放物的形态构成

生命周期阶段	环境释放物形态的数量/t									
	PbSO ₄	PbO	Pb	PbCO ₃	PbO ₂	Pb ₃ O ₄	PbS	PbCl ₂	Pb ₂ O ₃	其他
生产	42.6	13.1	0.1	29.4	1.7	1.7	23.8	—	2.9	4.8
加工制造	1.9	16.7	6.8	— ¹⁾	—	0.4	—	—	0.2	0.4
产品使用	26.3	38.0	59.5	11.3	19.7	14.6	—	1.9	5.9	24.9
废物处置与回收	56.1	40.1	22.4	14.3	21.9	18.3	0.7	13.2	4.0	8.5
总计	126.9	107.9	88.8	55.0	43.3	35.0	24.5	15.0	12.9	38.5

1)表示可忽略不计

由式(2)~(3),可得整个生命周期释放的各形态铅的量。从表 4 可以看出,2010 年中国铅人为循环的环境释放物主要形态为 PbSO₄,当精铅消费量为 1 kt 时其产生量为 128.2 t,约占总释放量的 23.4%。PbSO₄ 主要来自尾矿中以硫酸盐存在的铅^[13]以及废旧铅蓄电池的组成成分。PbSO₄ 还可用作颜料、草酸生产催化剂、纤维增重剂、涂料、油漆等。其次释放量较大的是 PbO、Pb 和 PbCO₃,共占释放量的 46.2%。PbO 作为铅化合物中最重要的—种,广泛用于蓄电池、涂料、陶瓷、玻璃、铅盐制备、聚氯乙烯和橡胶等工业领域,由于多为耗散性使用而难以回收,PbO 常在使用或者焚烧处置时释放到环境中。PbO 具有氧化性,通常不能稳定存在,在环境介质中逐渐与 CO₂ 等发生反应,这是进一步研究铅释放物在环境中迁移转化所要考虑的重要内容。铅和铅合金形式的弹壳、焊料等在产品使用阶段几乎全部以金属或合金形式释放出来,故 Pb 形态的释放物也较多。Pb 在潮湿和含有 CO₂ 的空气中会失去光泽而变成暗灰色,转变成碱式碳酸盐。PbCO₃ 主要来源于生产阶段的选矿后的尾矿,PbCO₃ 在环

境中一般比较稳定。

2.3 生命周期铅释放物来源构成

2010 年,国内每消费 1 kt 精铅产生的环境释放物的总量为 547.9 t(表 5)。考虑到中国的经济发展情况及研究时间的不同,这一结果和相关研究中世界范围内每消费 1 kg 铅就有 0.5 kg 铅进入环境中的结果相一致^[2,24]。可以看出,铅释放物形态基于生命周期各阶段的分布存在很大差异,PbSO₄ 主要分布在生产阶段和废物处置与回收阶段;PbO 虽然在生命周期各个阶段都产生较多,但源于废物处置与回收阶段的量最多;Pb 形态的释放物主要来自产品使用阶段的无组织的排放和腐蚀扩散,而 PbCO₃ 主要来自生产阶段(图 2)。

表 5 铅释放物在各生命周期阶段的数量分布

Table 5 Distribution of total lead losses among life-cycle stages		
生命周期阶段	释放量/t	所占总量比例/%
生产	120.1	21.9
加工制造	26.5	4.8
使用	201.9	36.9
废物处置与回收	199.3	36.4
总计	547.9	100.0

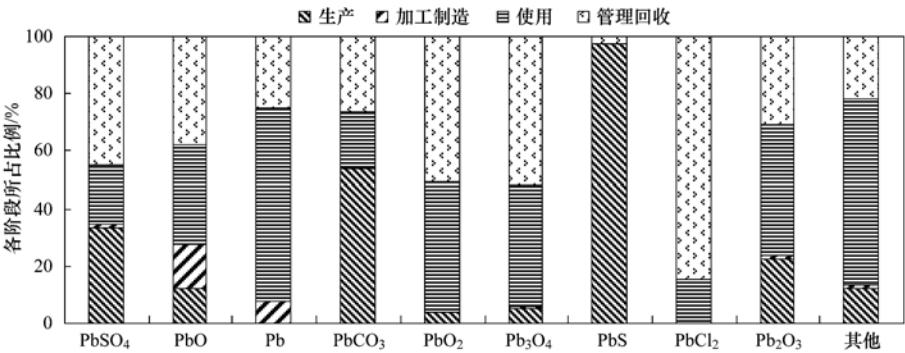


图 2 各形态铅环境释放物的产品生命周期阶段分布

Fig. 2 Distribution of lead species fractions among product life-cycle stages

就整体而言,铅释放物来自使用、废物处置与回收阶段的数量远大于生产、加工制造阶段,使用阶段和废物处置与回收阶段的产生量占总量的73.3% (表5)。即使生产和加工制造阶段的数量相对较少,但是由于职业暴露和职业风险,采矿业生产和电池制造回收、喷漆、焊接等加工车间的工人血铅含量较高,相关研究中也较多涉及铅生产和加工制造业中工人的血铅含量^[31]。我国铅产品使用阶段环境释放偏高,这可能与以下原因有关:一是我国耗散性铅在消费结构中所占的比重高^[30];二是我国公民的环保意识比发达国家落后,随意丢弃现象严重;三是缺乏全国性的回收网络^[32],废铅酸蓄电池回收处于无序状态,很多铅产品无法进入管理回收的下一阶段。另外,废物处置回收阶段的环境释放量也较大。这可能是由于国内再生铅技术设备较落后、生产规模较小、回收率低、环境污染严重^[33],同时,铅管理回收的相关法律法规还有待完善。我国废物处置与回收阶段的回收效率与发达国家相比低10个百分点左右,仅为85%左右^[32]。

3 讨论

中国铅人为循环的环境释放受到多种因素的影响,如资源利用情况、再生铅的比例、铅的消费结构等。中国虽然是世界上铅资源最丰富的国家之一,但随着近年来大规模的开采,高品位矿逐年减少,后备储量难以满足未来发展需求^[34]。铅冶炼原料供应不足,将使铅精矿长期处于净进口状态。未来国内铅矿石开采和尾矿的产生量将减少,相应环境释放物中 PbCO_3 、 PbSO_4 和 PbS 的数量也将减少。

未来再生铅的比例将对铅释放物的产生造成影响。目前,工业发达国家再生铅的产量占精铅总产量的比例可达65%,而我国再生铅所占比例不超过30%^[35]。随着可回收性铅使用量的增加,我国再生铅原料将稳定增长,再生铅的比例将不断提高。废物处置与回收阶段铅释放物总量将减少,该阶段产生的释放物如 PbO 、 Pb 、 PbCl_2 等也将减少。但在未来十几年内,如果中国铅市场出现供过于求的现象,则有可能导致铅回收动力不足,回收量减少,铅的环境释放较以前反而增加^[36]。

铅的市场消费结构对于环境释放物的形态分布的影响很容易理解,如禁止向汽油中添加铅极大地减少了环境中的四乙基铅等有机铅。现阶段,无铅化已成为一种趋势,在未来十几年内,耗散性铅如阴极射线管、铅弹、塑料稳定剂和铅焊料的应用将进一

步减少。同时,电子产业和汽车市场的发展必将带来铅蓄电池需求量的快速增长。在不改变现有技术的情况下,电池制造过程中 PbO 、 Pb 的释放量和使用阶段及废物处置与回收阶段 PbSO_4 、 PbO_2 等的释放量将增加。

4 结论

(1)2010年中国国内每消费1 kt精铅,铅人为循环产生的环境释放物总量约为547.9 t,主要源于产品使用阶段和废物处置与回收阶段(73.3%)。

(2)生命周期中所产生的环境释放物主要形态表现为 PbSO_4 ,约占总量的23.4%。其次是 PbO 、 Pb 和 PbCO_3 ,共占总释放量的46.2%。

(3) PbSO_4 主要分布在生产阶段和废物处置与回收阶段, PbO 源于废物处置与回收阶段的量最多, Pb 形态的释放物主要来自产品使用阶段,而 PbCO_3 主要来自生产阶段。

参考文献:

- [1] Mao J S, Dong J, Graedel T E. The multilevel cycle of anthropogenic lead I. Methodology [J]. Resource Conservation and Recycling, 2008, 52(8): 1058-1064.
- [2] Smith D R, Flegal A R. Lead in the biosphere: recent trends [J]. AMBIO, 1995, 24(1): 21-23.
- [3] Shah P, Strezov V, Nelson P F. X-Ray absorption near edge structure spectrometry study of nickel and lead speciation in coals and coal combustion products [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(3): 1518-1525.
- [4] Xie X, Ding G D, Cui C, *et al.* The effects of low-level prenatal lead exposure on birth outcomes [J]. Environmental Pollution, 2013, 175: 30-34.
- [5] 章骅, 何晶晶, 吕凡, 等. 重金属在环境中的化学形态分析研究进展 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 130-137.
- [6] Mao J S, Ma L, Niu J P. Anthropogenic transfer & transformation of heavy metals in anthroposphere: concepts, connotations and contents [J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2012, 5(5): 1129-1137.
- [7] Szpunar J, Obiński R. Speciation in the environmental field-trends in analytical chemistry [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1999, 363(5-6): 550-557.
- [8] Liu Y S, Ma L L, Li Y Q, *et al.* Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge [J]. Chemosphere, 2007, 67(5): 1025-1032.
- [9] Cui Y S, Fu J, Chen X C. Speciation and bioaccessibility of lead and cadmium in soil treated with metal-enriched Indian mustard leaves [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(4): 624-632.
- [10] Volpe M, Oliveri D, Ferrara G, *et al.* Metallic lead recovery from lead-acid battery paste by urea acetate dissolution and cementation on iron [J]. Hydrometallurgy, 2009, 96(1-2):

- 123-131.
- [11] Zhu X F, Yang J K, Gao L X, *et al.* Preparation of lead carbonate from spent lead paste via chemical conversion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **134-135**: 47-53.
- [12] Sonmez M S, Kumar R V. Leaching of waste battery paste components. Part 2: leaching and desulphurisation of PbSO_4 by citric acid and sodium citrate solution [J]. *Hydrometallurgy*, 2009, **95**(1-2): 82-86.
- [13] 郭翠香, 赵由才. 我国含铅废物现状及铅回收技术研究进展[J]. *有色冶金设计与研究*, 2008, **28**(2): 46-49, 54.
- [14] 蒋继穆. 我国铅锌冶炼现状与持续发展[J]. *中国有色金属学报*, 2004, **14**(1): 54-62.
- [15] 赵晓声. ISP 炼铅锌技改清洁生产评价[J]. *工程设计与研究*, 2007, (2): 11-19.
- [16] 王吉坤. 铅锌冶炼生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012. 30.
- [17] 郭学益, 钟菊芽, 宋瑜, 等. 我国铅物质流分析研究[J]. *北京工业大学学报*, 2009, **35**(11): 1554-1561.
- [18] Lewis A E, Beaument C. Prioritising objectives for waste reprocessing: a case study in secondary lead refining[J]. *Waste Management*, 2002, **22**(6): 677-685.
- [19] 杨继东, 刘佳泓, 徐建京, 等. 铅蓄电池生产企业的清洁生产审核[J]. *化工环保*, 2012, **32**(3): 264-268.
- [20] 王晔. 中国铅行业发展及展望[J]. *有色金属工程*, 2011, **1**(1): 27-29.
- [21] 李志明, 谭晓波, 吴贤章, 等. 和膏工艺对铅膏性能的影响[J]. *蓄电池*, 2009, **46**(1): 18-20.
- [22] Dahodwalla H, Heart S. Cleaner production options for lead-acid battery manufacturing industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2000, **8**(2): 133-142.
- [23] 郭占金, 吴国庆, 赵振波, 等. 铅钙合金生产过程中浮渣控制的生产实践[J]. *世界有色金属*, 2013, (2): 72-73.
- [24] Mao J S, Cao J, Graedel T E. Losses to the environment from the multilevel cycle of anthropogenic lead [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(10): 2670-2677.
- [25] Lohm U, Anderberg S, Bergbäck B. Industrial metabolism at the national level: a case-study on chromium and lead pollution in Sweden, 1880 - 1980 [A]. In: Ayres R U, Semonis U E. *Industrial Metabolism* [C]. Tokyo: United Nations University Press, 1994. 101-118.
- [26] Shi D Z, Wu W X, Lu S Y, *et al.* Effect of MSW source-classified collection on the emission of PCDDs/Fs and heavy metals from incineration in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(1-2): 685-694.
- [27] 周正华. 从废旧蓄电池中无污染火法冶炼再生铅及合金[J]. *上海有色金属*, 2002, **23**(4): 157-163.
- [28] USGS. Mineral commodity summaries [EB/OL]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lead/leadmcs05.pdf>, 2006-01-20.
- [29] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 2011 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属年鉴编辑部, 2012. 602.
- [30] 毛建素, 陆钟武. 关于我国废铅实得率低下原因的研究[J]. *世界有色金属*, 2003, (11): 24-28, 32.
- [31] United Nations Environment Programme. Draft final review of scientific information on lead [EB/OL]. http://www.chem.unep.ch/Pb_and_Cd/SR/Draft_final_reviews/Pb_Review/Final_UNEP_Lead_review_Nov_2008.pdf, 2013-07-20.
- [32] 王红梅, 刘茜, 王菲菲, 等. 中国铅酸蓄电池回收处理现状及管理布局研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(6): 51-54.
- [33] 陈永桥, 王冬. 废铅酸蓄电池的再生利用及其污染控制[J]. *环境科学与技术*, 2013, **35**(6I): 439-441.
- [34] 王淑玲. 世界铅资源形势分析[J]. *国土资源情报*, 2004, (6): 28-36.
- [35] 刘毅. 废铅蓄电池回收提取氧化铅粉循环利用新技术[J]. *科技与企业*, 2012, (14): 304-305.
- [36] Elshkaki A, Van der Voet E, Van Holderbeke M, *et al.* The environmental and economic consequences of the developments of lead stocks in the Dutch economic system [J]. *Resource, Conservation and Recycling*, 2004, **42**(2): 133-154.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Biofloculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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