

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价

郭鹏然¹, 雷永乾¹, 蔡大川¹, 张涛², 吴锐¹, 潘佳钊¹

(1. 中国广州分析测试中心, 广州 510070; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

摘要: 分析了广州市 4 个不同来源的城市污水处理污泥中重金属含量, 考察了污泥样品中重金属形态分布和生物可利用性, 并分别利用风险评价指数(RAC)和固废重金属毒性浸出方法评价了污泥中重金属生态危害风险和浸出毒性风险。结果表明, 污泥样品中 Cu、Cr、Pb 和 Zn 含量较高, 不同来源污水处理污泥中重金属含量差别较大。污泥样品中重金属绝大部分以非稳定态存在, 酸性污泥中可迁移的酸溶态重金属比例较高。由单一萃取结果, 1 mol·L⁻¹ NaOAc 溶液(pH 5.0)和 0.02 mol·L⁻¹ EDTA + 0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液(pH 4.6)分别对酸性和碱性污泥中生物可利用态重金属具有较好的萃取能力。污泥酸性越强, 其中生物可利用态重金属比例越大。污泥中重金属的迁移能力使其处于高生态危害风险程度; 重金属的生物可利用性使酸性污泥大多处于极高危害风险程度, 而使碱性污泥大多处于中等危害风险水平。除城市污水处理污泥外, 污泥样品中重金属具有高的浸出毒性风险, 萃取重金属生物可利用态后, 污泥仍具有高浸出毒性风险, 但由于浸出毒性风险降低使部分污泥可进行填埋处置。

关键词: 城市污水污泥; 重金属; 形态特征; 生态危害风险; 浸出毒性

中图分类号: X703; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0684-08

Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou

GUO Peng-ran¹, LEI Yong-qian¹, CAI Da-chuan¹, ZHANG Tao², WU Rui¹, PAN Jia-chuan¹

(1. China National Analytical Center (Guangzhou), Guangzhou 510070, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Contents of heavy metals in different sewage sludges were analyzed and the speciation distribution and bioavailability of heavy metals were investigated, and the risk assessment code (RAC) and toxicity characteristic leaching procedure for solid waste were used to evaluate the potential ecological risk and leaching toxicity risk of heavy metals in sludge samples, respectively. The results showed that contents of Cu, Cr, Pb and Zn were high and presented a great difference by different sources in sewage sludges. Most of heavy metals existed in non-residual fractions and percentages of the mobile fraction (acid soluble fraction) of heavy metals in acidic sludge were higher. According to the results of single extraction, 1 mol·L⁻¹ NaOAc solution (pH 5.0) and 0.02 mol·L⁻¹ EDTA + 0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc solution (pH 4.6) were suitable for evaluating bioavailable heavy metals in acidic and alkaline sludge, respectively. Percentages of bioavailable heavy metals were higher with the stronger of sludge acidity. The mobile ability of heavy metals resulted in the high ecological risk of sludge samples, and the bioavailability of heavy metals caused acidic sludges with a very high ecological risk but alkaline sludges with the middle ecological risk. Leaching toxicity risk was very high in sludge samples except domestic sewage sludge. After the removal of bioavailable heavy metals, leaching toxicity risk of sludge samples was still high in spite of its decrease; however, part type of sludges could be implemented landfill disposal.

Key words: sewage sludge; heavy metals; speciation characteristics; ecological harm risk; leaching toxicity

污水处理过程中产生的污泥, 是多种菌胶团与其吸附的有机和无机物组成的集合体^[1]。随着我国城市污水处理率的不断提高, 污泥的产量也随之不断增大。到 2010 年底, 全国城镇污水处理量有 343 亿 m³, 每年产出的脱水污泥接近 2 200 万 t, 其中有 80% 未得到处理。大量来自生活和工业生产重金属在污水处理过程中, 50% ~ 80% 以上会通过吸附或沉淀而转移浓缩到污泥中^[2]。由于污泥中含有大量的有机质和养分元素, 污泥种植利用成为一种最具成本效益的处置方法^[3~5]。然而, 污泥在种植利用过程中, 可迁移重金属会释放进入生态环境, 重金

属生物可利用部分会被植物吸收利用, 对生态环境和人体健康造成危害风险。而且, 由于污泥长期暴露在环境中, 重金属元素的不稳定形态(如可迁移的酸溶态、还原态、氧化态等)会逐渐释放进入环境介质, 致使重金属在污泥作为种植泥质利用时会产生生态危害风险^[6]。污泥中重金属的生物可利用

收稿日期: 2013-05-17; 修订日期: 2013-08-02

基金项目: 广东省科技计划项目(2010B031000015, 2011A030200001); 珠江科技新星专项(2012J2200054)

作者简介: 郭鹏然(1978~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为重环境毒害物质的分析和环境化学行为, E-mail: prguo@fenxi.com.cn

性、存在形态及其生态危害风险程度限制其大规模土地利用。

为了降低污泥利用时有害重金属的影响,目前常采用有机酸和螯合剂 EDTA 等对污泥重金属进行化学淋洗去除^[7, 8]。化学淋洗虽然能将污泥中生物可利用态或可迁移态除去,但污泥在种植利用过程中仍会存在浸出毒性风险,危害生态环境。因此,本研究针对广州市不同类型城市污水处理污泥,考察了污泥中重金属含量、存在形态及其潜在生态危害风险;分析了污泥中重金属生物可利用态去除前后重金属浸出毒性风险的变化,以期为城市污水处理污泥的无害化处置和资源化利用提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 污泥样品的采集与预处理

污泥样品产自广州 4 种不同类型的污水处理所产生的污泥,包括生活污水处理污泥(LDW)、化工废水处理污泥(NSW),电镀废水处理污泥(DDW)和造纸废水处理污泥(ZZW),这些污泥目前处置方式除 LDW 做建筑材料外,其它污泥皆是填埋。2012 年两次从污泥处置车间各采集脱水后湿污泥样,混匀后用聚乙烯袋封口保存。形态和浸出毒性分析之前放在冰箱中 4℃ 保存。取部分污泥样品置于阴凉、通风处晾干,用玻璃棒压散,于烘箱中(100 ± 5)℃ 干燥 4 h 后,用四分法多次筛选后取 30 g 污泥样品,用玛瑙研钵磨至样品全部通过 150 μm (100 目)尼龙筛,装入密封袋备用。

1.2 污泥理化性质测定

分别采用烘干法、电位法、外加热容量法、乙酸铵法、开氏法和钼锑抗比色法测定采集的污泥和萃取过的污泥样品的含水率、pH 值、有机质(OM)、阳离子交换量(CEC)、总氮(TN)、总磷(TP)和总钾(TK)含量^[9]。

1.3 污泥中重金属总量测定

分别称取 0.500 0 g 干污泥样品置于 50 mL 的玻璃消解管中,加入 10 mL 的 HNO₃ 浸泡过夜,再加入 0.5 mL 高氯酸,在石墨消解仪上 130℃ 加热消解至溶液剩余 2~3 mL 时,将溶液倒入容量瓶中,用去离子水定容至刻度线。取部分消解液加入盐酸羟胺,直到溶液反应平衡。将两种消解液同时采用微波等离子体发射光谱(MP-AES,配 MSIS 系统,Agilent MP 4100)测定污泥中重金属(As、Hg、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn)含量。每个样品平行消解 3 份,同时带流程空白。实验用酸皆为优级纯,水为

超纯水。分析过程中用土壤成分分析标准物质 GBW07401 和 GBW07406 进行质量控制,其分析结果与标准值差异小于 10%。

1.4 污泥中重金属生态危害风险

重金属对生态环境的毒性依赖于其迁移行为和被吸收利用程度^[10],而重金属的迁移能力和生物可利用性分别由重金属的赋存形态和生物可利用性大小决定^[11, 12]。因此本研究从重金属的迁移风险和生物可利用性风险两方面评估污泥中重金属的生态危害风险。

1.5 污泥中重金属的赋存形态特征

污泥中重金属形态采用欧共体标准化局提出的 BCR 法^[11]分析。BCR 程序将重金属顺序提取为 4 种形态,分别为酸溶态(F1,主要为可交换态和碳酸盐结合态):采用 0.11 mol·L⁻¹ 乙酸按液比 1(g):40(mL)室温下振荡萃取 16 h;还原态(F2,铁锰氧化物结合态):采用 0.1 mol·L⁻¹ NH₂OH·HCl (pH = 2.0) 溶液按液/液 = 1/40 室温下振荡萃取 16 h;氧化态(F3,有机质与硫化物结合态):先用 8.8 mol·L⁻¹ H₂O₂ (pH = 2.5) 按液比 1/20 在 85℃ 水浴 2 h,之后用 1 mol·L⁻¹ NH₄Ac (pH = 2.0) 按液比 1/50 室温下振荡萃取 16 h;残渣态(F4):按总量分析消解法处理。称取适量的湿污泥样品于 100 mL 的 PE 离心管中,采用上述 BCR 法萃取操作连续提取污泥中重金属各形态,离心后上清液用 0.45 μm 滤膜过滤。每步残渣用 DDW 离心清洗后进行下一步萃取。MP-AES 测定上清液中 Cu、Cr、Pb 和 Zn。各形态含量以湿沉积物含水率校正。每个样品平行萃取 3 次。

污泥中可迁移重金属部分包括溶液中水合重金属离子、在固相上专性吸附重金属离子及与碳酸盐矿物共沉淀金属离子,即为重金属酸溶态,这部分重金属可被 0.11 mol·L⁻¹ 的 HOAc 完全萃取出来^[13]。因此污泥中重金属酸溶态大小决定其中重金属的迁移风险程度。

1.6 污泥中重金属生物可利用态萃取

土壤中金属元素生物可利用态的提取剂大致有三类:以无机盐为主的提取剂,使用浓度较大,在性质上代表了金属元素的阳离子可代换部分;弱酸类,在性质上模拟了植物根系有机酸分泌所造成的微酸性环境;有机络合物,使用浓度较低,在性质上模拟了植物根系有机酸分泌物对金属元素吸附的部分^[12, 14]。称取采集的污泥湿样各 6 g 于 50 mL 的离心管中,按萃取液与污泥干重比 12

L: 1 kg加入不同类型的萃取剂溶液(表1), 萃取污泥中生物可利用态重金属^[15]. 样品溶液充分摇匀后将离心管放置于回旋式振荡器, 转速为 230 r·min⁻¹, 振荡 5 h, 离心分离后, 用 0.45 μm 滤膜

过滤萃取液到 PE 小瓶, 采用原子吸收光谱法(AAS, 福立 AA1700)测定萃取液中重金属的浓度, 以干重计算污泥中重金属生物可利用态含量. 每个样品平行萃取 3 次.

表 1 萃取溶液的性质

Table 1 Characteristics of extraction solutions

编号 ¹⁾	试剂	类型	pH
Extr-A	1 mol·L ⁻¹ CH ₃ COONH ₄ + CH ₃ COOH	缓冲盐	7
Extr-B	0.02 mol·L ⁻¹ EDTA + 0.5 mol·L ⁻¹ CH ₃ COONH ₄	络合剂 + 有机酸盐	4.6
Extr-C	0.1 mol·L ⁻¹ CaCl ₂	无机盐	5.55
Extr-D	0.05 mol·L ⁻¹ EDTA	有机络合剂	4
Extr-E	0.02 mol·L ⁻¹ 柠檬酸	有机酸	6
Extr-F	1 mol·L ⁻¹ NaOAc	有机酸盐	5

1) Extr-A ~ Extr-F 分别为萃取剂 A、B、C、D、E 和 F

1.7 污泥中重金属浸出毒性分析

本研究模拟处置环境特点(南方地区多酸雨), 考察污泥中重金属浸出毒性状况. 分别称取污泥湿样和生物可利用态萃取后污泥样品各 10 g, 按《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007), 以硝酸/硫酸混合溶液为浸提剂, 模拟废物在填埋处置、堆存或土地利用时, 其中的有害组分在酸性降水的影响下, 从废物中浸出而进入环境的过程. 采用 MP-AES 测定浸提消解液中重金属浓度, 评估浸出环境风险.

2 结果与分析

2.1 污泥样品的理化性质特点

污泥样品的理化性质及含量见表 2. 除造纸废

水处理污泥外, 其它脱水污泥含水率较高, 达到 75% 以上. 生活污水处理污泥(LDW)和化工废水处理污泥(NSW)呈酸性, 电镀废水处理污泥(DDW)和造纸废水处理污泥(ZZW)呈碱性. 不同类型污泥中成分含量差别较大, 其中 LDW 中 TN、TK 和 OM 含量较高, 碱性污泥中 TN 和 OM 含量较低. NSW 由于酸性较大造成阳离子流失较多, 其它污泥中阳离子交换量皆高于 10 cmol·kg⁻¹.

2.2 污泥中重金属含量

污泥样品中 As、Hg、Ni 和 Cd 含量较低而未检出, 污泥农用标准中其它控制的重金属含量结果见表 3. 化工废水处理污泥(NSW)中 Cr 和电镀废水处理污泥(DDW)中 Cu 含量都高于污泥农用标准中

重金属限定值(表 4); 生活污水处理污泥(LDW)中

表 2 污泥的理化性质及养分含量

Table 2 Physico-chemical properties of sewage sludge

样品	pH 值	含水率/%	TN/%	TP/%	TK/%	OM/%	CEC/cmole·kg ⁻¹
LDW	5.05	76.8	3.88	0.16	1.20	10.5	17.4
NSW	3.48	74.8	2.29	3.59	0.31	1.19	8.69
DDW	9.04	84.7	0.45	1.86	1.73	8.14	13.4
ZZW	7.49	48.5	0.61	0.08	0.97	7.04	11.7

表 3 污泥样品中重金属总量及相关污泥中重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹Table 3 Total concentration of heavy metals in sewage sludge samples and other related sludge/mg·kg⁻¹

样品	Zn	Cu	Pb	Cr	合计
LDW	454	374	9.10	210	1 043
NSW	50.0	360	1.66	4 288	4 700
DDW	507	2 436	71.5	437	3 441
ZZW	229	302	73.2	2.34	606
GZSS ^[16]	609	146	69.9	51.9	
GZZS ^[16]	717	175	ND	19.4	
GZHCS ^[16]	946	125	33.4	185	
GZAS ^[17]	84.7	33	40	71.4	

1) GZSS、GZZS 和 GZHCS 分别为广州生活污水处理厂污泥、广州造纸厂污泥和广州河涌污泥, 污泥样品为 2009 年采集^[16], GZAS 为广州农田土壤均值^[17]; ND: 未检出

表 4 污泥标准中重金属控制限值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 4 Limit values of heavy metals in the sewage sludge standards/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

标准	项目	Zn	Cu	Pb	Cr
农用泥质标准 ¹⁾	A 级	1 500	500	300	500
	B 级	3 000	1 500	1 000	1 000
园林绿化用泥质标准 ²⁾	pH < 6.5	2 000	800	300	600
	pH \geq 6.5	4 000	1 500	1 000	1 000
绿化种植土壤标准 ³⁾	pH < 6.5	400	300	350	200
	pH \geq 6.5	450	350	450	250

1) CJ/T 309-2009; 2) GB/T 23486-2009; 3) CJ/T 340-2011 的Ⅲ级标准

重金属含量满足园林绿化和农用泥质标准的限量要求, 但 Zn 和 Cu 含量高于绿化种植土壤标准限值, 因此污泥样品种植利用时可能存在生态危害风险. LDW 中 Cu 和 Cr 含量相比之前污泥样品^[16]较高, 且高于广州河涌污泥中含量^[16]. ZZW 中重金属含量较低, 但 Cu 和 Pb 含量高于之前造纸厂废水污泥和广州河涌污泥中含量^[16].

2.3 污泥中重金属形态分布

不同类型污泥中重金属形态分布见表 5. 不同类型污泥中重金属赋存形态分布差别较大. 酸性污泥 LDW 和 NSW 中, Zn 主要以酸溶态存在, 占总量 64% ~ 73%, LDW 中酸溶态 Zn 含量高达 $330 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 碱性污泥 DDW 和 ZZW 中, Zn 主要以酸溶态和氧化态存在, 占总量 26% ~ 43%. 污泥中 Cu 主要以酸溶态和氧化态存在, 其中酸性污泥中比例较高, 但受 Cu 污染的碱性污泥 DDW 中酸溶态 Cu 高达 $785 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 污泥中虽然酸溶态 Pb 比例较高但总量较低, ZZW 中酸溶态 Pb 含量较高为 $35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 污泥中 Cr 主要以酸溶态和氧化态存在,

表 5 污泥中重金属形态分布/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 5 Distribution of heavy metals' speciation in sludge/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

样品	形态	Zn	Cu	Pb	Cr
LDW	F1	330	152	2.95	75.5
	F2	18.7	25.9	1.46	23.1
	F3	77.2	162	2.06	76.8
	F4	28.1	34.1	2.63	34.6
NSW	F1	32.0	216	0.97	3 458
	F2	7.22	49.0	0.23	196
	F3	4.72	35.3	0.21	75.0
	F4	6.06	59.7	0.25	559
DDW	F1	157	785	24.2	139
	F2	67.8	370	19.6	127
	F3	219	869	14.4	117
	F4	63.2	412	13.3	53.7
ZZW	F1	60.0	97.0	35.0	0.70
	F2	38.0	26.0	3.90	0.20
	F3	87.0	126	24.0	1.00
	F4	44.0	53.0	10.3	0.44

酸溶态占总量的 30% 以上, 特别是受 Cr 污染的 NSW 中酸溶态 Cr 占总量 80%, 含量高达 $3 458 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4 污泥中重金属的生物可利用态萃取

不同类型萃取剂对污泥中重金属生物可利用态萃取结果见图 1. 比较 Extr-A、Extr-B、Extr-D 和 Extr-F 萃取量发现, 含酸性乙酸盐萃取剂 (Extra-A、B 和 F) 对酸性污泥 LDW 和 NSW 中重金属具有较强的萃取能力. 其中, $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOAc 溶液 (pH 5.0) 对酸性污泥中重金属萃取量较高. 由 Extr-A、Extr-D 和 Extr-F 对污泥中重金属皆有较大萃取量, 表明酸性乙酸盐和 EDTA 对碱性污泥 DDW 和 NSW 中重金属都具有较强的萃取能力. 其中联合萃取剂 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ EDTA + $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4OAc 溶液 (Extra-B) 对碱性污泥中重金属萃取量较高.

据生物可利用态重金属最大萃取量, LDW 中 Cu、Cr 和 Zn 生物可利用态分别为重金属总量的 28.1%、4.8% 和 70.9%; NSW 中 Cu、Cr 和 Zn 生物可利用态分别为总量的 65.5%、86.0% 和 66.4%; DDW 中 Cu、Cr、Pb 和 Zn 生物可利用态分别占总量的 27.7%、24.9%、24.9% 和 29.8%; ZZW 中 Cu、Pb 和 Zn 分别占总量的 33.1%、46.0% 和 19.2%. 总体而言, 污泥酸性越强, 其中重金属的生物可利用性越高, 这与重金属形态可迁移性一致.

2.5 污泥中重金属生态危害风险

重金属生态危害风险由其迁移能力和生物可利用性决定. 土壤和沉积物中重金属潜在生态危害风险评价常用 Hakanson 指数法^[18], 然而由于污泥样品由不同来源污水和废水处理产生, 因此难于选择确定合适的背景值用于评价. 在沉积物中重金属与水相平衡过程中, 酸溶态重金属 (即可迁移态) 是最易于迁移的存在形态, 较易对生态环境产生危害. 因此基于重金属酸溶态与总量比值的风险评价

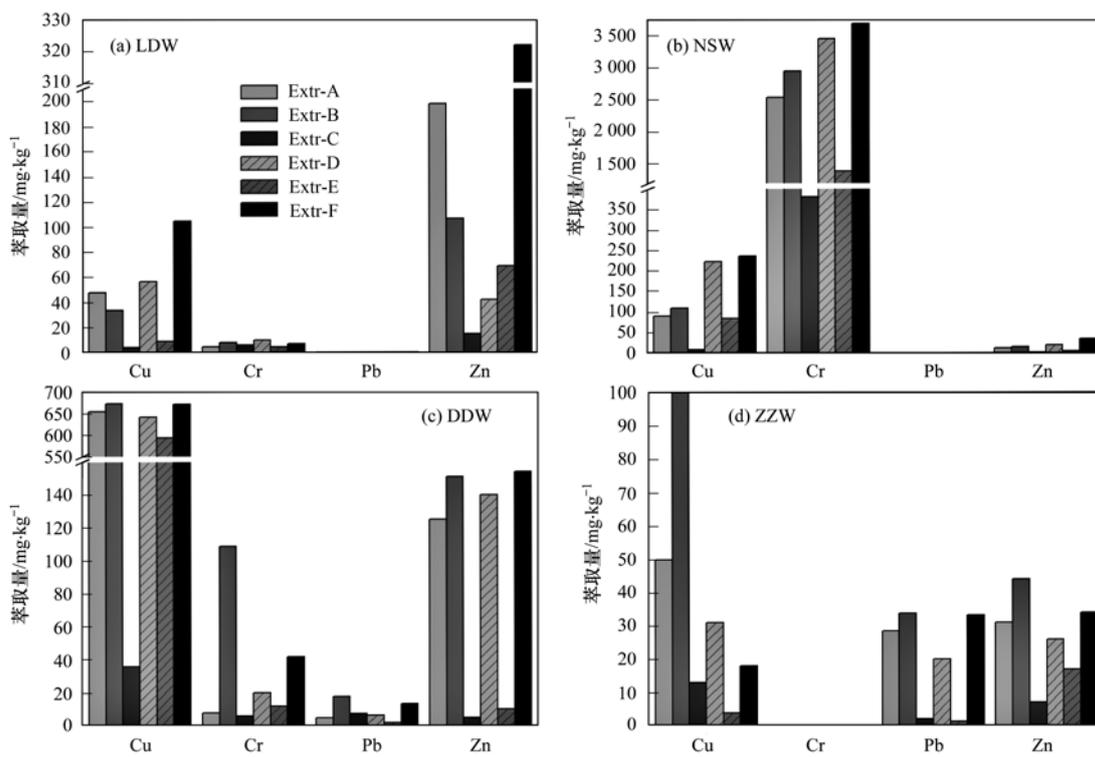


图1 不同类型萃取剂对污泥中重金属萃取量

Fig. 1 Extraction concentrations of heavy metals in sewage sludge by different extractants

指数 (risk assessment code, RAC) 被用于评价沉积物中重金属基于迁移的生态危害风险^[10, 19]. $RAC = ([M]_{\text{酸溶态}}/[M]_{\text{总量}}) \times 100\%$, RAC < 1、1 ~ 10、11 ~ 30、31 ~ 50 和 > 50 所对应的风险级别分别为 I (无)、II (低)、III (中)、IV (高) 和 V (极高) 风险^[10]. 由于重金属生物可利用态与可迁移态的从底泥固相释放方式相似, 且所提取重金属大部分相同, 因而采用重金属生物可利用性产生的生态危害风险也用 RAC 法计算. 因为生态危害与重金属存在形态相关而与背景值无关, RAC 相比 Hakanson 指数法较适于污水处理产生污泥中重金属的迁移风险和生态危害风险评价.

污泥样品中重金属潜在生态危害风险评价结果

见图 2. 除 ZZW 中 Zn 处于中等迁移风险外, 污泥样品中其它重金属皆处于高迁移风险水平, 特别是 LDW 中 Zn 和 NSW 中重金属, 迁移风险处于极高程度. 根据生物可利用性评价, 由于 LDW 中 Zn 和 NSW 中重金属的生物可利用性高造成污泥处于极高水平生态危害风险, 与迁移风险评价结果一致; ZZW 中 Cu 和 Pb 处于高生态危害风险污泥水平; DDW 中重金属的生物可利用性危害风险处于中等程度, 相比迁移风险程度稍低. 总之, 污泥样品中重金属无论迁移性或生物可利用性, 所造成生态危害风险都应予以重视.

2.6 污泥中重金属的毒性浸出风险

不同类型污泥样品中重金属浸出量见表 6. 从

表 6 原污泥和萃取后污泥中重金属浸出浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Table 6 Leaching concentrations of heavy metals in bulk and extracted sludge samples/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

样品	项目	Zn	Cu	Pb	Cr
LDW	萃取前	9.1	7.8	0.4	8.6
	萃取后	4.8	4.0	ND	3.2
NSW	萃取前	23	44	ND	124
	萃取后	11	15	ND	70
DDW	萃取前	75	514	1.4	3.2
	萃取后	29	85	0.8	ND
ZZW	萃取前	52	ND	7.8	2.8
	萃取后	45	ND	4.8	1.5
国标限定值 ¹⁾		100	100	5	15

1) 危险废物浸出毒性鉴别国家标准 (GB 5085.3-2007)

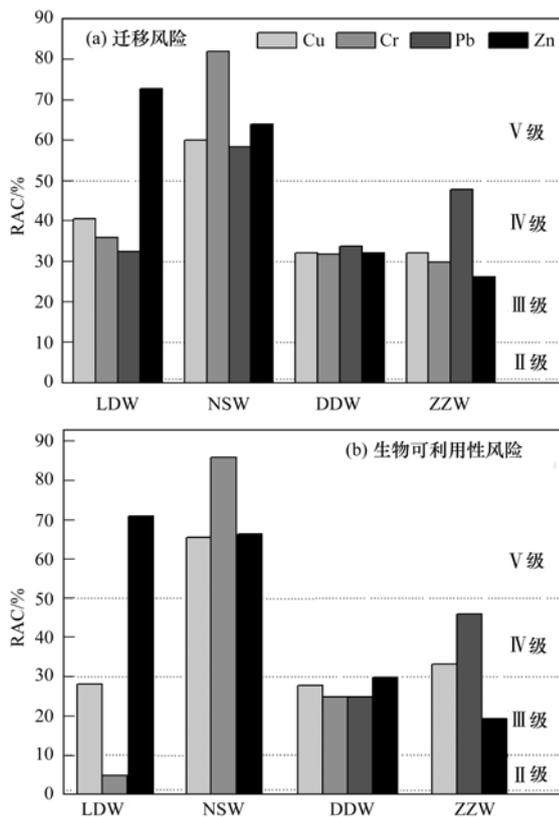


图2 不同类型污泥中重金属生态危害风险程度

Fig. 2 Degree of ecological harm risk of heavy metals in different sludge samples

中可知,除 LDW 外,其它污泥样品在生物可利用态萃取前处置时,NSW 中 Cr、DDW 中 Cu 和 ZZW 中 Pb 的浸出浓度高于毒性浸出标准限值,因而具有浸出毒性危害风险,无论种植利用或填埋时皆会造成环境污染。

3 讨论

不同类型的城市污泥样品中重金属可迁移态(酸溶态)皆以较高比例存在,酸性污泥中重金属可迁移态比例相比碱性污泥较高。酸性污泥中酸溶态为重金属主要存在形态,特别是化工废水污泥(NSW);污泥样品中绝大部分重金属以非稳定态(酸溶态、还原态和氧化态之和)存在,这表明城市污泥中重金属具有较强的迁移能力,且环境条件变化时污泥中大量重金属会释放出来迁移到生态环境,污泥样品具有较高潜在生态危害风险。

对于污泥中生物可利用态重金属的萃取,1 mol·L⁻¹ NaOAc 溶液(pH 5.0)的弱酸性模拟了植物根系有机酸分泌所造成的微酸性环境,H⁺ 酸溶作用可将污泥中与碳酸盐矿物共沉淀金属离子溶解释

放到溶液中;而高浓度 Na⁺ 通过离子交换作用可将固相上以离子交换作用吸附的重金属置换到溶液中;CH₃COO⁻ 较强的负电性通过与酸性污泥中重金属阳离子结合,模拟了植物根系分泌物对金属元素吸附,因而酸性乙酸盐对污泥中重金属生物可利用态具有较好的萃取能力。由于 NH₄OAc 类似 NaOAc 萃取能力,且 EDTA 对碱性污泥具有酸溶解和络合稳定作用,因而 0.02 mol·L⁻¹ EDTA + 0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液(pH 4.6)对碱性污泥具有较好提取能力。EDTA 对有机质结合态重金属具有一定萃取能力^[13],但由碱性污泥中重金属生物可利用性风险与迁移性风险结果相当甚至会较低(图 2),表明 EDTA 对有机质结合态影响可以忽略。

酸性污泥 LDW 和 NSW 中重金属可迁移态和生物可利用态比例较高,从而致使它们处于高风险水平。由于 H⁺ 酸化溶解作用使酸性较强 NSW 污泥中重金属主要以可迁移态存在,且重金属生物可利用性很高。LDW 中较高含量 CEC 对萃取缓冲作用和较高含量 OM 对 Cu 和 Cr 较强吸附作用,致使其中重金属生物可利用态稍低。虽然强碱性条件对有机质具有分解作用,但碱性污泥 DDW 和 ZZW 中重金属氧化态比例较高,表明碱性城市污泥中有机质对污泥中重金属离子的吸附能力仍较强,使重金属可迁移态转化为氧化态,从而使碱性污泥中重金属迁移风险相比酸性污泥较低,但仍具有中等以上风险水平。总体而言,污泥中重金属生态危害风险 NSW > LDW > ZZW > DDW,与污泥中重金属总量顺序(NSW > DDW > LDW > ZZW)并不一致,表明污泥中重金属生态危害风险并不由重金属总量决定,更大程度上有赖于重金属可迁移态和生物可利用态含量。

萃取生物可利用态后,酸性污泥 pH 值升高而碱性污泥 pH 值降低(表 7),污泥中 CEC 由于萃取时离子交换损失而明显降低;污泥中 TK 和酸性污泥中 TP 由于淋滤作用而降低;污泥中 OM 和碱性污泥中 TN 无明显变化,表明萃取剂在污泥中持留量很少,萃取剂从污泥中所释放的生物可利用态重金属也几乎全部进入萃取溶液而除去。

电镀废水处理污泥(DDW)中生物可利用态 Cu 萃取去除后,污泥中 Cu 仍高于农用泥质或绿化泥质标准限量,由于污泥中 Cu 浸出浓度低于标准限值(表 6),DDW 中生物可利用态 Cu 萃取后可进行无害化填埋。值得注意的是,NSW 中生物可利用态 Cr 萃取后其含量虽然达到种植利用泥质标准,但由于 Cr 浸出浓度较高而存在生态危害风险。

表 7 污泥样品萃取净化后重金属总量及养分含量

Table 7 Concentration of heavy metals and nutritional components in the extracted sludge samples

样品	重金属/mg·kg ⁻¹				pH	TN/%	TP/%	TK/%	OM/%	CEC/%
	Cu	Cr	Pb	Zn						
LDW	269	198	ND	132	5.51	3.18	0.22	0.31	11.4	11.7
NSW	124	600	ND	16.8	5.28	1.34	3.08	0.08	8.16	6.75
DDW	1761	328	53.7	356	5.21	0.55	1.81	0.13	2.01	6.50
ZZW	202	ND	39.5	185	5.66	0.80	0.10	0.10	6.56	7.16

4 结论

(1)不同来源城市污水处理污泥中重金属含量差别较大,工业废水处理污泥中重金属总量相比生活污水处理污泥一般较高.来源于电镀废水和化工废水处理污泥中重金属含量超过园林绿化和农用泥质标准的限值,来源于生活污水处理厂污泥和造纸废水处理污泥中重金属含量较低,但超过当地农田土壤中重金属均值.

(2)不同来源城市污水处理污泥中重金属形态分布差别较大.污泥样品中重金属绝大部分以非稳定态存在,其中酸性污泥中可迁移态重金属比例较高,特别是化工废水污泥中重金属绝大部分以可迁移态存在;碱性污泥中可迁移态和氧化态为重金属主要存在形态,电镀废水污泥中还原态重金属也较多.污泥样品中重金属可迁移能力较强.

(3)1 mol·L⁻¹ NaOAc 溶液 (pH 5.0)对酸性污泥中生物可利用态重金属具有较好的萃取能力,0.02 mol·L⁻¹ EDTA + 0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液 (pH 4.6)对碱性污泥中生物可利用态重金属具有较好的提取能力.污泥酸性越强,其中生物可利用性越高,造成污泥潜在生态危害风险也越大.酸性较强的 NSW 中重金属以生物可利用态较高,污泥处于很高危害风险水平,碱性较强的 DDW 中重金属生物可利用态稍低,污泥处于中等危害风险水平.污泥样品中重金属生物可利用性较高.

(4)除城市污水处理污泥外,其它污泥样品中重金属皆具有高的浸出毒性危害风险.除去生物可利用态后,化工废水污泥和电镀废水污泥仍具有高浸出毒性风险,由于其毒性浸出风险降低,部分污泥可进行填埋处置.

参考文献:

- [1] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge [J]. *Environmental International*, 2009, **35**(1): 142-156.
- [2] 周立祥,沈其荣,陈同斌,等.重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J].*环境科学学报*, 2000, **20**(3): 269-274.
- [3] 张灿,陈虹,余忆玄,等.我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析[J].*环境科学*, 2013, **34**(4): 1345-1350.
- [4] 姚金铃,王海燕,于云江,等.城市污水处理厂污泥重金属污染状况及特征[J].*环境科学研究*, 2010, **23**(6): 696-702.
- [5] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **147**(3): 1063-1072.
- [6] Garcia-Delgado M, Rodriguez-Cruz M S, Lorenzo L F, *et al.* Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludge from different wastewater treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **382**(1): 82-97.
- [7] Veeken A H M, Hamelers H V M. Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acids [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(1): 129-136.
- [8] 陈玉成,郭颖,魏沙平.螯合剂与表面活性剂复合去除城市污泥中 Cd 和 Cr [J].*中国环境科学*, 2004, **24**(1): 100-104.
- [9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社, 2000. 12-24, 107-168, 289.
- [10] Perin G, Craboledda L, Lucchese M, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas T D (Ed.). *Heavy Metals in the Environment*, vol. 2 [M]. Edinburgh: CEP Consultants, 1985.
- [11] Quevauviller P. Operationally defined extraction procedure for soil and sediment analysis I. Standardization [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 1998, **17**(5): 289-298.
- [12] 钱进,王子健,单孝全.土壤中微量元素元素的植物可给性研究进展[J].*环境科学*, 1995, **16**(6): 73-75, 78.
- [13] Rao C R M, Sahuquillo A, Lopez Sanchez J F. A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials [J]. *Water, Air, Soil Pollution*, 2008, **189**(1-4): 291-333.
- [14] Rauret G. Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment [J]. *Talanta*, 1998, **46**(3): 449-455.
- [15] Pueyo M, López-Sánchez J F, Rauret G. Assessment of CaCl₂, NaNO₃ and NH₄NO₃ extraction procedure for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils [J]. *Analytica*

- Chimica Acta, 2004, **504**(2): 217-226.
- [16] 刘敬勇, 孙水裕, 许燕滨, 等. 广州城市污泥中重金属的存在特征及其农用生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(12): 2545-2556.
- [17] Wong S C, Li X D, Qi S H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China [J]. Environmental Pollution, 2002, **119**(1): 33-44.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control-A sediment ecological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [19] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediment—a tributary of the Ganges, India [J]. Journal of Hydrology, 2005, **312**(1-4): 14-27.

欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为大 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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