

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

重金属捕集剂对水中微量Hg(Ⅱ)的处理研究

胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华*

(浙江大学环境工程系, 杭州 310058)

摘要: 针对含汞废水采用常规处理难以达标的问题, 选用二硫代氨基甲酸盐类(DTCR-2)、2,4,6-三巯醇基钠硫代三嗪(TMT-18B)、硫化钠(Na_2S)和氢氧化钙[$\text{Ca}(\text{OH})_2$]作为重金属捕集剂, 对水中微量 Hg^{2+} 进行深度处理研究。通过处理效果的对比, 最终选用DTCR-2作为 Hg^{2+} 最理想的捕集剂, 重点考察了pH值、DTCR-2投加量、反应时间、 Hg^{2+} 初始浓度及其他重金属离子等因素对 Hg^{2+} 去除效果的影响。结果表明, 在 Hg^{2+} 初始浓度为 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, pH为8.0, 投加量1.0倍化学计量比, 反应时间10 min时处理效果较好, Hg^{2+} 剩余浓度为 $41.36\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于国家排放标准中的限值($50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。另外, Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 这3种重金属离子对DTCR-2去除 Hg^{2+} 具有抑制作用, 影响大小依次为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$, 而 Zn^{2+} 具有促进作用。通过本研究, 可以为DTCR-2处理低浓度含汞废水工艺设计提供理论支持。

关键词: DTCR-2; 重金属捕集剂; 微量Hg(Ⅱ); 螯合沉淀; 排放标准

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3486-07

Research on Low-level Hg(Ⅱ) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent

HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, TAN Li-sha, XU Xin-hua

(Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Treatment of mercury containing wastewater using conventional approach is considered to be difficult to bring down its concentration to meet the discharge standard. In this study, we utilized dithiocarbamate (DTCR-2), 2,4,6-trimercaptotriazine (TMT-18B), Na_2S and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as the advanced treatment agents to remove low-level Hg^{2+} from water. Due to its better treatment effect, DTCR-2 was finally chosen as the most ideal option. The influence of pH value, dosage of DTCR-2, reaction time, initial Hg^{2+} concentration as well as other heavy metal ions on the Hg^{2+} removal were studied. The results showed that DTCR-2 had high removal efficiency under the following conditions: $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of initial Hg^{2+} concentration, pH 8.0, 1.0 times stoichiometric ratio of DTCR-2 dosage and 10 min of reaction time, leading to $41.36\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of residual Hg^{2+} concentration which was below the national discharge standard ($50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). Moreover, three heavy metal ions including Cd^{2+} , Pb^{2+} and Cu^{2+} , inhibited the DTCR-2 capturing capacity towards Hg^{2+} and the inhibition effects followed this order: $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$, while Zn^{2+} promoted the Hg^{2+} removal. From this study, we could provide theoretical support for process design to deal with wastewater containing low mercury concentration using DTCR-2.

Key words: dithiocarbamate (DTCR-2); heavy metal capturing agent; low-level Hg(Ⅱ); chelating precipitation; discharge standard

汞是一种银白色的液体金属, 主要以单质汞、无机汞和有机汞几种形式存在于自然界中^[1]。由于汞具有特殊的物理、化学性能, 广泛应用于有色金属冶炼工业^[2]、氯碱工业^[3]、化学工业以及制药、纸浆造纸、电器电子仪表等工业部门^[4]。与此同时, 大量的汞及其化合物会以“三废”特别是废水的形式进入环境, 成为重要的污染物之一。汞具有很强的毒性, 不易生物降解, 会通过食物链富集, 以致直接作用于人体而引起严重的疾病或促使慢性病的发生^[5]。所以含汞废水在排放前必须进行处理, 实行达标排放。

处理含汞废水的传统方法主要有化学沉淀法、金属还原法、活性炭吸附法、离子交换法、电解法、微生物法等^[6]。其中, 化学沉淀法在我国应用较普

遍, 能处理不同浓度、不同种类的汞盐, 但处理成本较高、效果不稳定, 生成的沉淀絮凝体在自然环境中存在再度溶出的可能性, 容易造成二次污染^[7-9]。

近年来, 国内外学者已经开始研究利用重金属捕集剂来处理含汞废水, 并取得了极佳的效果。蒋建国等^[10]成功地合成一种含二硫代氨基甲酸基团的高分子螯合剂, 对 Hg^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 等重金属离子的捕集效率多在99%以上, 且不受溶液pH变化的影响; Matlock等^[11]合成1,3-苯二酰氨基乙硫醇(BDETH₂)来处理含 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 废水, 去除率都在

收稿日期: 2012-12-26; 修订日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21271119); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2012C23061)

作者简介: 胡运俊(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理, E-mail: 21114094@zju.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xuxinhua@zju.edu.cn

99% 以上, 处理出水 Hg^{2+} 浓度为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 黄兰等^[12]设计合成一种新的三基配位聚合超分子试剂二硫代氨基三聚氰酸钠(TDC), 对 Hg^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 等重金属离子的沉淀效率在 99% 以上, 处理出水水质达到国家一级排放标准; 王君杰等^[13]研究了重金属捕集剂 NBMIPA 对单一 Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 电镀废水的捕集性能. 其中, Hg^{2+} 去除率达到 99.83%, 残余 Hg^{2+} 浓度为 $0.032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此外, Henke 等^[14]对 2,4,6-三硫醇基钠硫代三嗪(TMT-55)与 Hg^{2+} 反应生成物的稳定性进行了研究, 结果表明螯合产物极难溶于水, 且具有良好的稳定性. 可见, 重金属捕集剂具有强大的螯合能力, 可有效去除废水中的 Hg^{2+} 及各种形式共存的其他重金属离子, 并形成强稳定的螯合物避免二次污染. 然而, 绝大多数学者研究的是高浓度 Hg^{2+} ($\geq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的去除情况, 而实际含汞废水中 Hg^{2+} 浓度一般较低, 痕量级浓度存在于环境中, 就能毒害水生生物^[15]. 因此, 本研究配制低浓度含汞模拟废水, 通过比较选出最佳重金属捕集剂, 重点分析其对 Hg^{2+} 的去除效果, 并考察各工艺条件及其他重金属离子对去除效果的影响, 以期后续含汞废水工艺设计提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 实验材料

DTCR-2(有效成分 65%, 苏州普锐德新材料开发有限公司)、TMT-18B(有效成分 70%, 武汉博仁迪科技有限公司)均稀释至 0.01% 左右溶液使用; 所用化学试剂, 如 HgCl_2 、 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 CdCl_2 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为分析纯; 盐酸和硝酸为优级纯; KHB_4 ($\geq 97.0\%$), 均采购自国药集团化学试剂有限公司或阿拉丁试剂(上海)有限公司.

1.2 实验方法

在实验室条件下, 溶解一定量的 HgCl_2 粉末, 配制 Hg^{2+} 浓度 $100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的单一含汞模拟废水, 调节 pH 至所需值. 每次取水样 150 mL 置于 250 mL 烧杯中, 加入一定量的捕集剂, 用六联磁力搅拌器快速搅拌($300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)一段时间, 然后加入一定量的絮凝剂 PAC($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和助凝剂 PAM($2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 继续缓慢搅拌($30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)约 5 min. 静置一段时间(30 min)后取 5 mL 上清液, 用 $0.22 \text{ } \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 加酸酸化后采用原子荧光分光光度计测定溶液中残存的 Hg^{2+} 浓度^[16], 具体流程如图 1 所示.

1.3 分析方法

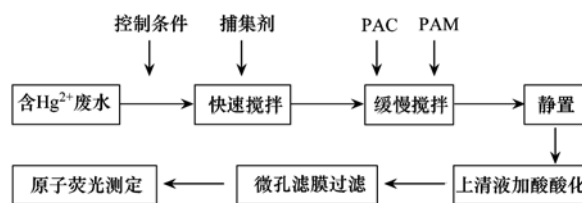


图 1 实验流程示意

Fig. 1 Experiment flow chart

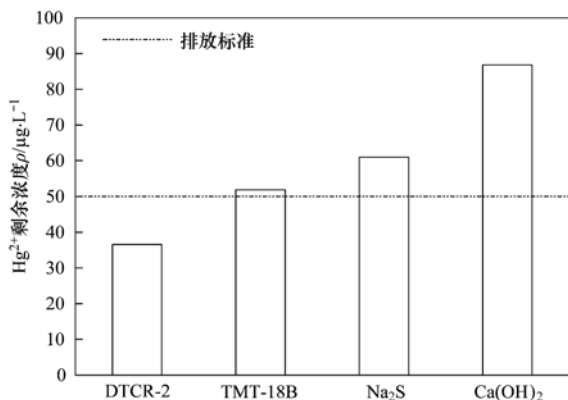
实验中溶液 pH 值由梅特勒-托利多公司的 SG2 型 pH 计测定; Hg^{2+} 浓度采用北京海光仪器公司的 AFS-230E 双道原子荧光光度计进行测定, 进样过程中用 1% 的硼氢化钾与 0.5% 氢氧化钠的混合溶液将待测样品中的 Hg^{2+} 还原为 Hg^0 , 用氮气作为载气将 Hg^0 吹至反应器, 读取峰值. 其中, 光电倍增管的负高压为 280 V, 原子化器高度为 8 mm, 总灯电流 30 mA, 载气流量为 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 屏蔽气流量为 $1000 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 不同捕集剂对 Hg^{2+} 去除效果的比较

实验选用 DTCR-2、TMT-18B、 Na_2S 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为重金属捕集剂, 比较其在相同实验条件下对低浓度 Hg^{2+} 的去除效果. Hg^{2+} 初始浓度为 $100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 调节水样 pH 为 8.0, 各捕集剂均按 1.0 倍化学计量比投加, 控制反应时间 20 min, 实验结果如图 2 所示. 从中看出, DTCR-2 处理效果最好, Hg^{2+} 剩余浓度为 $36.56 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于国家排放标准 ($50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); TMT-18B 次之, 为 $51.81 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Na_2S 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 处理效果较差, Hg^{2+} 剩余浓度分别为 $61.04 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $86.82 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 均高于排放标准. 可见, 单纯投加碱, 利用中和沉淀法来处理低浓度含汞废水, 效果一般. 相比之下, 投加 Na_2S 来沉淀 Hg^{2+} , 效果有所提升, 因为 S^{2-} 与 Hg^{2+} 的结合力比 OH^- 强. 但 S^{2-} 与 Hg^{2+} 属于单原子结合, 结合力并不是很强, 甚至竞争不过一些常用的络合剂; 在同等条件下, 投加 DTCR-2 或 TMT-18B, 处理效果显著提高. 分析认为, 有机硫螯合剂(DTCR-2 与 TMT-18B)具有多个螯合基团, 能牢牢捕获废水中的 Hg^{2+} , 其结合力远远大于 OH^- 和 S^{2-} . 另外, 实验观察发现, Na_2S 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 Hg^{2+} 形成的沉淀絮体比较小, 不容易沉降而悬浮在上清液中, 而 DTCR-2、TMT-18B 与 Hg^{2+} 形成的沉淀絮体则相对较大, 更有利于沉降, 并且产生的污泥量也少. 综合考虑处理效果和经济成本, DTCR-2 的优势更大. 况且,

DTCR-2 属于长链大分子物质,每条分子链上有几千个螯合基团,这些基团与重金属离子结合,迅速变成水不溶性物质,不会过量存在于水中,避免带来二次污染^[17]. 所以选择 DTCR-2 作为 Hg^{2+} 的捕集剂做进一步研究.



$\rho(\text{Hg}^{2+}) = 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, DTCR-2 = 1.0 倍, $\text{pH} = 8.0$, $t = 20 \text{ min}$

图2 不同捕集剂对 Hg^{2+} 的去除效果

Fig. 2 Effects of different capturing agents on the removal of Hg^{2+}

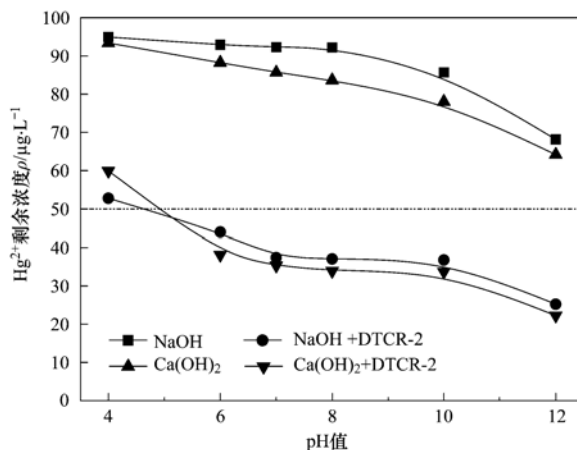
2.2 影响 Hg^{2+} 去除效果的因素

2.2.1 pH 值

为考察 pH 值对 Hg^{2+} 去除的影响,实验设置对照组. 同时,模拟实际工业应用情况,分别选用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 NaOH 来调节 pH,并比较其效果. 冶炼废水往往呈酸性,故实验研究的 pH 范围定为 4 ~ 12. Hg^{2+} 初始浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, DTCR-2 按 1.0 倍化学计量比投加,反应时间 20 min,实验结果如图 3 所示. 从中看出,不投加捕集剂时,随着 pH 值的增大, Hg^{2+} 剩余浓度有缓慢减小的趋势,当 pH 达到 12 时,分别降为 $68.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (NaOH) 与 $64.16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [$\text{Ca}(\text{OH})_2$],表明仅通过调节 pH,对废水中 Hg^{2+} 去除能力的提升非常有限. 在此基础上,投加捕集剂,去除效果明显提高. 当水样初始 $\text{pH} > 5$ 时,即可达到排放要求,并且随着 pH 值的增加, Hg^{2+} 剩余浓度逐渐减少,最后分别降为 $25.19 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (NaOH) 和 $22.24 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. 说明在弱酸性或碱性条件下投加 DTCR-2,不必调整或仅仅稍微调整 pH 即可使出水 Hg^{2+} 达标,克服了传统方法的不足^[18]. 另外,结果显示,不论加药与否,在大多数 pH 值范围内选用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为 pH 调节剂更有利于 Hg^{2+} 的去除. 分析认为,投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,改变溶液 pH 的同时也增加了浊度,于明泉等^[19]研究发现,浊度的存在不仅不会影响 Hg^{2+} 的去除,而且在一定程度上还能提高 Hg^{2+} 的去除效果. 但采用

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH,容易产生较多的污泥,应用时需要考虑.

对于大部分重金属离子,当 $\text{pH} > 7$ 时,即可形成氢氧化物. 在此条件下使用 DTCR-2,可以大大减少其消耗量,降低处理成本. 即先用碱作为沉淀剂,将废水 pH 调节到 7.0 ~ 8.0 之后,再投加 DTCR-2 进行后续处理. 考虑到投加 PAC 后,会略微降低出水的 pH 值,故最佳 pH 值为 8.0.



$\rho(\text{Hg}^{2+}) = 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, DTCR-2 = 1.0 倍, $t = 20 \text{ min}$

图3 pH 对 Hg^{2+} 去除效果的影响

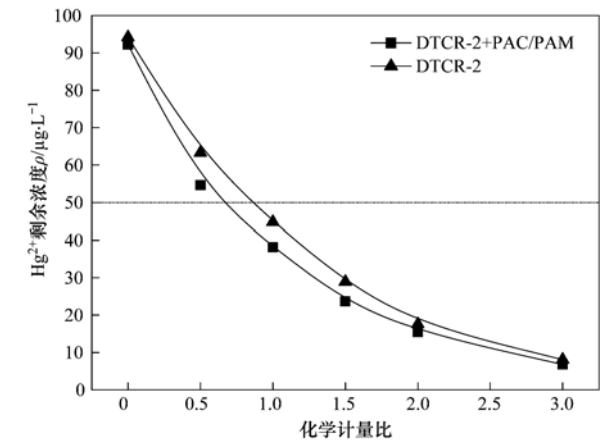
Fig. 3 Effect of pH on the removal of Hg^{2+}

2.2.2 DTCR-2 投加量

调节水样 pH 为 8.0,控制反应时间 20 min,按 0 ~ 3.0 倍化学计量比投加捕集剂 DTCR-2. 同时,实验设立对照组,探究絮凝剂 PAC 与助凝剂 PAM 联用对 DTCR-2 去除 Hg^{2+} 的影响,结果如图 4 所示. 从中看出,随着捕集剂投加量的增加, Hg^{2+} 剩余浓度迅速减小,当投加量 ≥ 1.0 倍时,处理出水 Hg^{2+} 浓度均低于排放标准;在捕集剂投加量相同的情况下, PAC/PAM 的加入,有助于 Hg^{2+} 的去除,但作用很微弱. 分析认为,捕集剂 DTCR-2 与 Hg^{2+} 形成的沉淀质量较小,不易自然沉降,投加 PAC/PAM 后,利用高分子絮凝剂的吸附架桥作用,可以使质量较轻的沉淀物絮凝形成较大的矾花,从而得到分离去除,提高去除效果^[20,21]. 考虑到实际工程应用的成本,选取 1.0 倍化学计量比为理想的投加量,并继续投加 PAC/PAM,增强混凝沉淀的效果.

2.2.3 反应时间

反应时间对于废水处理工艺设计尤为重要,直接关系到反应池的池容,进而影响反应所需设备的选型等. 调节水样 pH 为 8.0,按 1.0 倍化学计量比投加 DTCR-2,控制反应时间为 0 ~ 40 min,实验结果如图 5 所示. 从中看出, Hg^{2+} 剩余浓度随着反应时

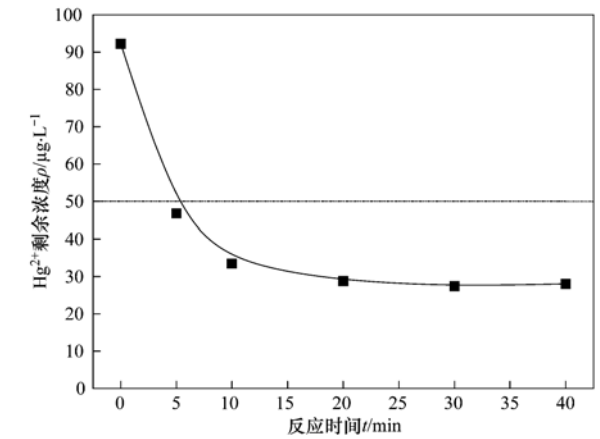


$\rho(\text{Hg}^{2+}) = 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 8.0$, $t = 20 \text{ min}$

图4 DTCR-2投加量对 Hg^{2+} 去除效果的影响

Fig. 4 Effect of DTCR-2 dosage on the removal of Hg^{2+}

间的增加而减小,从反应最初的 $92.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降为反应 40 min 时的 $28.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.反应前 10 min , Hg^{2+} 浓度降低幅度较大,出水低于排放标准;后 30 min ,降低幅度较小.这表明DTCR-2与 Hg^{2+} 结合迅速,反应基本在前 10 min 内完成.再延长反应时间,去除效果的提升有限,考虑到经济因素,确定后续反应时间为 10 min .



$\rho(\text{Hg}^{2+}) = 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, DTCR-2 = 1.0 倍, $\text{pH} = 8.0$

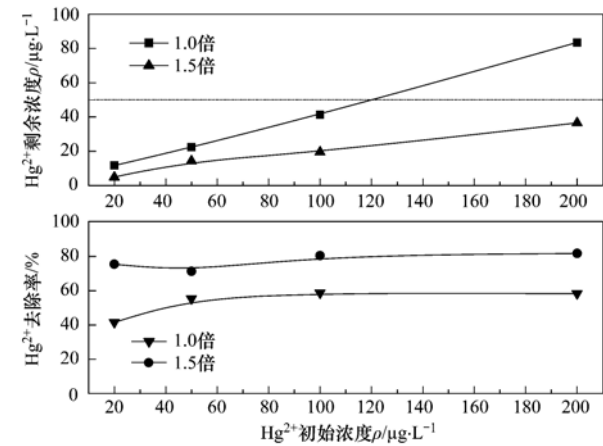
图5 反应时间对 Hg^{2+} 去除效果的影响

Fig. 5 Effect of reaction time on the removal of Hg^{2+}

2.2.4 Hg^{2+} 初始浓度

实际含汞废水的 Hg^{2+} 浓度往往会有所波动,为探究其浓度变化对DTCR-2去除 Hg^{2+} 的影响,在水样 pH 为 8.0 ,反应时间 10 min 的条件下,控制 Hg^{2+} 初始浓度为 $20 \sim 200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,实验结果如图6所示.从中看出, Hg^{2+} 剩余浓度随着初始浓度的增加而增大,去除率在低浓度时略有波动,之后基本维持稳定.当投加量为 1.0 倍时,去除率维持在 $40\% \sim$

60% .此时,对 Hg^{2+} 初始浓度 $< 120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的模拟废水,其剩余浓度低于排放标准;但提高至 $120 \sim 200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,剩余浓度均超标.当投加量增加到 1.5 倍,去除率随之升高,维持在 $70\% \sim 80\%$, Hg^{2+} 剩余浓度均低于排放标准,最大值为 $36.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.分析认为,当投加量一定时,去除率基本维持稳定,剩余浓度与初始浓度呈正相关,增加初始浓度,会导致剩余浓度增大.可见,处理高浓度含汞废水时,要适当提高捕集剂DTCR-2的投加量,才能保持其对 Hg^{2+} 良好的去除效果,保证出水达标.Zhen等^[22]利用重金属捕集剂DTC(TBA)处理含铜废水也得出了类似的结论.



DTCR-2 = 1.0 倍, $\text{pH} = 8.0$, $t = 10 \text{ min}$

图6 Hg^{2+} 初始浓度对 Hg^{2+} 去除效果的影响

Fig. 6 Effect of Hg^{2+} initial concentration on the removal of Hg^{2+}

2.2.5 其他共存重金属离子的影响

通常情况下,实际废水成分复杂,除 Hg^{2+} 外,往往还存在 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 等重金属离子,这些离子均有可能与DTCR-2形成螯合物.当它们中的某一种或几种与 Hg^{2+} 同时存在时,可能会影响DTCR-2对 Hg^{2+} 的去除效果.根据表1中所列河南某矿山冶炼废水水质,确定实验过程中重金属离子的投加量.

表1 冶炼废水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Quality of smelting wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					
指标	Hg	Cd	Pb	Cu	Zn
数值	0.10	1.57	4.28	63.5	119

Hg^{2+} 初始浓度 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,调节水样 pH 为 8.0 ,在反应时间 10 min ,投加量为 1.0 倍化学计量比的条件下,控制各金属离子的投加浓度范围(Cu^{2+} : $0 \sim 120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cd^{2+} : $0 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;

合物时有额外的稳定化能产生。 d^{1-9} 型金属离子中研究最多的是第一过渡系中的 $Mn^{2+}(d^5)$ 、 $Fe^{2+}(d^6)$ 、 $Co^{2+}(d^7)$ 、 $Ni^{2+}(d^8)$ 和 $Cu^{2+}(d^9)$ 等的配离子。这些离子及 d^{10} 构型的 Zn^{2+} 与几十种配体形成的配离子,其稳定性遵循 Irving-William 顺序,即 $Mn^{2+} < Fe^{2+} < Co^{2+} < Ni^{2+} < Cu^{2+} > Zn^{2+}$ 。所以 $Cu^{2+}(d^9)$ 和 $Zn^{2+}(d^{10})$ 与 DTCT-2 形成螯合物的稳定性 $Cu^{2+} > Zn^{2+}$ 。 Pb^{2+} 属于 $d^{10}s^2$ 型金属离子,此类离子极化作用小,变形性也较小,所以配合能力较弱,不易生成稳定的配合物。一般来说,作为中心离子,同一周期过渡金属离子形成配合物的能力要比主族离子强。Hg 和 Pb 在同一周期,但 Hg 是过渡金属,Pb 是主族金属,因此与 DTCT-2 的螯合能力 $Hg^{2+} > Pb^{2+}$ [27]。

3 结论

(1) 选用 DTCT-2、TMT-18B、 Na_2S 和 $Ca(OH)_2$ 作为重金属捕集剂,通过处理效果的对比,最终选定 DTCT-2 为最理想的 Hg^{2+} 捕集剂。

(2) DTCT-2 对 Hg^{2+} 的去除效果受 Hg^{2+} 初始浓度及投加量影响较大。在 Hg^{2+} 初始浓度为 $100 \mu g \cdot L^{-1}$, pH 为 8.0, 投加量 1.0 倍化学计量比, 反应时间 10 min 的条件下, 处理效果较好, Hg^{2+} 剩余浓度为 $41.36 \mu g \cdot L^{-1}$, 低于国家排放标准中的限值 ($50 \mu g \cdot L^{-1}$)。处理高浓度含汞废水, 要适当提高 DTCT-2 的投加量, 才能保证出水达标。

(3) 采用 $Ca(OH)_2$ 调节水样 pH, 可以提高处理效果, 但产泥量会增加, 工程应用时需要注意。

(4) 絮凝剂 PAC 与助凝剂 PAM 联用, 可以增强混凝沉淀的效果, 有助于去除 DTCT-2 与 Hg^{2+} 形成的絮体, 但作用微弱。

(5) Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 这 3 种重金属离子对 DTCT-2 去除 Hg^{2+} 具有抑制作用, 影响大小依次为 $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+}$, 而 Zn^{2+} 具有促进作用。实际含汞废水工艺设计时, 可以考虑优先将 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 去除。

参考文献:

- [1] Holmes P, James K A F, Levy L S. Is low-level environmental mercury exposure of concern to human health? [J]. Science of the Total Environment, 2009, **408**(2): 171-182.
- [2] Boudou A, Maury-Brachet R, Coquery M, et al. Synergic effect of gold mining and damming on mercury contamination in fish [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(8): 2448-2454.
- [3] Kinsey J S, Anscombe F R, Lindberg S E, et al. Characterization of the fugitive mercury emissions at a chlor-alkali plant: overall study design [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(4): 633-641.
- [4] 张荣斌. 工业废水中汞的处理技术[J]. 山东化工, 2007, **36**(6): 17-22.
- [5] Xu Y, Zhang F. Experimental research on heavy metal wastewater treatment with dipropyl dithiophosphate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **137**(3): 1636-1642.
- [6] 唐宁, 柴立元, 闵小波. 含汞废水处理技术的研究进展[J]. 工业水处理, 2004, **24**(8): 5-8, 13.
- [7] 修莎, 周勤, 林冰. 重金属捕集剂的合成与应用研究[J]. 化学与生物工程, 2009, **26**(3): 62-64.
- [8] 马前, 张小龙. 国内外重金属废水处理新技术的研究进展[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(7): 10-14.
- [9] 李定龙, 姜晟. 重金属废水处理的方案比较研究[J]. 工业安全与环保, 2005, **31**(12): 18-19.
- [10] 蒋建国, 王伟, 赵翔龙, 等. 重金属螯合剂在废水治理中的应用研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(1): 65-67.
- [11] Matlock M M, Howerton B S, Atwood D A. Irreversible precipitation of mercury and lead [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, **84**(1): 73-82.
- [12] 黄兰, 付丰莲, 陈润铭, 等. 沉淀剂 TDC 的合成及其性能研究[J]. 广州化工, 2006, **34**(4): 1-4.
- [13] 王君杰, 王凤贺, 雷武, 等. 新型重金属捕集剂 NBMIPA 处理含铜汞废水[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(11): 3933-3936.
- [14] Henke K R, Robertson D, Krepps M K, et al. Chemistry and stability of precipitates from aqueous solutions of 2, 4, 6-trimercaptotriazine, trisodium salt, nonahydrate (TMT-55) and mercury(II) chloride [J]. Water Research, 2000, **34**(11): 3005-3013.
- [15] Girginova P I, Daniel-da-silva A L, Lopes C B, et al. Silica coated magnetite particles for magnetic removal of Hg^{2+} from water [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, **345**(2): 234-240.
- [16] 汤婷媚, 沃静静, 徐新华. 有机硫对水体中微量 Cu(II) 的处理研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2009, **36**(5): 566-570, 574.
- [17] 童新, 汤婷媚, 吴华燕, 等. 重金属捕集剂 DTCT 对水中微量 Zn^{2+} 的处理研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2010, **37**(3): 296-299.
- [18] 曹阳, 黄娟, 纪晓红, 等. 二硫代氨基甲酸盐重金属捕集剂对废水中镉捕集的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2011, **33**(5): 38-40.
- [19] 于明泉, 常青, 安瑜. 高分子重金属絮凝剂对 Hg^{2+} 的捕集及性能[J]. 环境化学, 2004, **23**(6): 664-667.
- [20] 赖水秀. 广谱型重金属捕集剂的合成及处理重金属废水的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 29-30.
- [21] 李清峰. 重金属捕集剂处理电镀重金属废水的试验研究及其工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 19-20.
- [22] Zhen H B, Xu Q, Hu Y Y, et al. Characteristics of heavy metals

capturing agent dithiocarbamate (DTC) for treatment of ethylene diamine tetraacetic acid-Cu (EDTA-Cu) contaminated wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **209**: 547-557.

[23] Hhackett D S, Siggia S. Environmental Analysis [M]. New York: Academic Press, 1977. 253.

[24] 相波, 刘亚菲, 李义久, 等. DTC 类重金属捕集剂研究的进展[J]. 电镀与环保, 2003, **23**(6): 1-4.

[25] 汤婷媚. 燃煤烟气脱硫液及脱硫石膏中汞的稳定化研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2011. 13-14.

[26] 朱声逾, 周永治, 申泮文. 配位化学简明教程[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1990. 115.

[27] 杨帆, 林纪筠, 单永奎. 配位化学简明[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2002. 54-60.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2012 年 12 月 7 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2011 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2011 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 81.2,排名第一,总被引频次5 359,影响因子 0.956.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2011 年度《环境科学》综合评价总分 81.2,在被统计的 1998 种核心期刊中名列第 41 位,在被统计的 37 种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

国内外公开发行人