

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究

陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏*

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用零价铁和碱激发矿渣对铬渣进行稳定/固定化处理, 考察了处理后固化体的毒性浸出水平, 矿物组成及 Cr 形态分布变化情况, 并对铬渣的处置和利用的有效性进行评价. 结果表明, 还原固定化处理后的样品硫酸硝酸法浸出毒性可满足作为砖或砌块使用的标准, 抗压强度均高于 15 MPa, 其中 Cr 主要以 Fe/Mn 氧化物结合态存在, 可被用于采石场修复、封闭泻湖以及作为路基材料等一些特殊用途.

关键词: 铬渣; 稳定/固定化; 碱激发矿渣; 零价铁; 浸出

中图分类号: X758 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3026-06 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.08.040

Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag

CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, FAN Lei-tao, SHEN Ji-min*

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The solidification/stabilization (S/S) of chromite ore processing residue (COPR) was performed using zero-valent iron (ZVI) and lime-activated ground granulated blast furnace slag (GGBFS). The degree of Cr immobilization was evaluated using the leaching procedure, mineral composition analysis and morphology analysis. Semi-dynamic leaching tests were implemented to investigate the potential for reusing the final treatment product as a readily available construction material. The results showed that after reduction, all of the S/S treated COPR samples met the pollution control limit of bricks and building block products (Chinese standard HJ/T 301-2007) produced with COPR for total Cr ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the compressive strength of all the S/S samples could meet the compressive strength standard (15 MPa) for producing clay bricks, and Cr existed as the specie that bound to Fe/Mn oxides in the S/S samples. At the same time, all of the S/S treated specimens tested were suitable for utilization at certain levels.

Key words: COPR; solidification/stabilization; lime-activated ground granulated blast furnace slag; ZVI; leaching

铬盐被广泛应用于电镀、鞣革、木材防腐、催化剂、玻璃、陶瓷、搪瓷、化学试剂、有机合成、染料、香料、医药及涂料等领域^[1]. 其生产工艺可分为有钙焙烧和无钙焙烧. 有钙焙烧工艺的核心问题在于铬渣(chromite ore processing residue)产生量大, 每生产 1 t 铬盐产品要排放 2.5 ~ 3 t 高毒性铬渣, 且铬盐提取率只有 75%, 由于生产工艺落后, 2013 年工信部要求淘汰有钙焙烧法, 并鼓励采用无钙焙烧工艺, 该工艺铬渣产生量为 $0.8 \text{ t} \cdot \text{t}^{-1}$ 产品^[2]. 根据国家环保部的一份材料显示, 建国后我国建有 50 多家铬盐厂, 部分厂区建在人口稠密区、风景区、水源上游地, 这些厂区已基本停产. 目前我国共有 13 家铬盐企业, 虽然基本不在上述敏感区域内, 且采用无钙焙烧工艺后, 铬渣产生量大大降低, 但是这些铬渣如不经过妥善处理而只是简单堆放, 经过雨水的冲刷, 铬渣中的六价铬汇入附近的地表水或渗入地下水, 仍会对地表水^[3]、地下水^[4]和土壤^[5]造成严重的污染. 铬渣中铬元素含量小于 5%, 其中 30% 左右为 Cr(VI), 其余为 Cr(III).

Cr(VI) 具有很高的流动性和很强的毒性, 且对生物体具有致癌作用^[6]. Cr(III) 的流动性较低, 是人体必需的微量元素之一, 但过多食用也会对人体造成危害. 因此, 铬渣被认为是一种危险废物, 需要对其进行无害化处理.

稳定/固定化(stabilization/solidification)技术被美国环保署评价为是处理危险废物最有效的技术. 该技术的目的是将流动性和毒性强的物质转化为流动性弱和无毒性的物质, 并将其包裹在结构完整的固化体中. 最常用的稳定/固定化技术是以水泥为固化剂处理含有重金属的固体废弃物^[7-10]. 然而有研究表明^[11]水泥基稳定/固定化技术不能有效固定 Cr、As 和 Hg 等以流动性形式存在的重金属. 高炉矿渣(ground granulated blast furnace slag)是冶炼生

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2015-03-20

基金项目: 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题项目(2014DX02)

作者简介: 陈忠林(1967~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高级氧化技术, E-mail: zhonglinchen@hit.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: shenjimin@hit.edu.cn

铁时从高炉中排出的一种废渣,早在一百年前它就作为一种辅助胶凝材料被使用^[12]. Duchesne 等^[13]考察了几种粘结剂对 Cr 的固定效果,结果表明用高炉矿渣固定的样品的效果是最好的. Batchelor^[14]认为水泥对 Cr 的固定效果不好是因为水泥通常提供的是中等的氧化环境,不利于 Cr(VI) 还原为 Cr(III),而矿渣的加入通过 S²⁻ 的释放可产生还原环境,有利于 Cr 的固定. 由于 Cr(VI) 流动性极强,直接固定效果很差,必须先将其还原为 Cr(III) 后再进行固定. 化学还原过程中常用的还原剂为含 Fe 或 S 的还原剂^[15-17],本研究选择零价铁是因为它价格便宜且容易得到,如在机械加工及制造行业常产生的铁屑等也可用于作为还原剂,达到以废治废的目的^[18,19].

本研究目的是采用零价铁和碱激发矿渣对铬渣进行稳定/固定化处理,考察处理后固化体的毒性浸出水平,矿物组成及 Cr 形态分布变化情况,并对铬渣的处置和利用的有效性进行评价.

1 材料与方法

1.1 实验材料

铬渣取自某铁合金厂,矿渣取自某混凝土生产厂(为高炉冶炼生铁时得到的熔融物,平均粒径 23.918 μm ,比表面积为 2.87 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$),碱激发剂为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,零价铁购于天津博迪化工股份有限公司,粒径 80 目,比表面积为 2.06 $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

表 1 铬渣和矿渣中元素组成及含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Element contents in COPR and slag/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	Ca	Mg	Fe	Al	Na	Mn	K	Si	S	Cr	Cr(VI)
铬渣	203	120	72.4	32.8	16.6	2.20	0.34	34.2	1.48	27.2	9.35
矿渣	304	33.2	6.33	63.1	2.70	3.66	4.28	160	7.38	—	—

表 2 改进的 Tessier 连续提取方法

Table 2 Modified Tessier sequential extraction methods

步骤	化学相态	提取条件
1	交换态	100 mL 醋酸钠 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 8.2$) 溶液,室温下振荡 1 h
2	碳酸盐结合态	100 mL 醋酸钠 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 醋酸调节 $\text{pH} = 5.0$) 溶液,室温下振荡 4h
3	Fe/Mn 氧化物结合态	100 mL 盐酸羟胺-醋酸溶液(盐酸羟胺浓度 $0.04 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,醋酸浓度 25%)加热至 96°C 振荡 5 h
4	硫化物结合态	15 mL $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸、25 mL 30% 双氧水(硝酸调节 $\text{pH} = 2.0$)加热至 85°C 振荡 3 h,冷却后加入 25 mL 醋酸铵-硝酸溶液(醋酸铵浓度 $3.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$,硝酸浓度 20%),用去离子水稀释至 100 mL,室温振荡 30 min
5	残余态	微波消解

1.4 单独固定化实验

单独固定化实验操作过程如下:取铬渣、矿渣和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量比为 35:52:13,三者质量之和为

1.2 分析方法

pH 值测定采用 pH 计(WTW Inolab pH720);用 X 射线荧光光谱仪(帕纳克 PW4400)对铬渣和矿渣样品进行全分析,方法参考 USEPA Method 6200(结果见表 1);铬渣中 Cr(VI) 含量测定,用碱消解预处理,然后用二苯碳酰二肼显色法测定,参考 USEPA Method 3060A 和 USEPA Method 7196A;铬渣中 TCr 含量的测定,用微波消解预处理,然后用原子吸收光谱仪(5300DV)进行测定,具体方法参考 USEPA Method 3051A 和 USEPA Method 6010C;物相组成用 X 射线衍射仪(Bruker D8 Advance)进行检测,样品经玛瑙研钵研磨后过 200 目筛,测试条件:Cu K α ($\lambda = 1.5406$),电压:40 kV,电流:40 mA,扫描速度:扫描范围: $5^\circ \sim 80^\circ$.

1.3 形态分析实验

铬渣中 Cr 的存在形态分析采用的是改进的 Tessier 连续浸提法^[20],该方法将铬渣中 Cr 的形态分为 5 种,包括交换态、碳酸盐结合态、Fe/Mn 氧化物结合态、硫化物结合态和残余态,它利用 5 种不同的浸提剂经过 5 级浸提程序将浸提出的各形态的 Cr 含量与未浸提前样品中 TCr 含量进行对比,计算出各形态 Cr 所占的质量分数. 具体操作步骤如下:取 5 g 铬渣按表 2 所示的浸提程序分级浸提,将浸提之后的固液混合物用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,测滤液中 TCr 和 Cr(VI) 浓度,固相残渣用于下一级浸提.

干固体总质量,矿渣和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量比为 4:1. 将三者依次放入水泥胶砂搅拌机中搅拌均匀,然后加入一定比例的水(水投加体积与干固体总质量比为

0.5),充分搅拌后,装入 40 mm × 40 mm × 160 mm 三联试模,振实后抹平覆盖一层保鲜膜,放于快速养护箱内,于 70℃ 蒸养 24 h,拆模后放入恒温恒湿箱内标准养护(温度 20℃,湿度 95%)28 d,然后测定抗压强度和进行毒性浸出等实验.

1.5 稳定/固定化实验

稳定/固定化实验被分为还原和固定两部分进行,具体过程如下:首先将一定质量的铬渣与一定量的去离子水混合,搅拌 30 min 后沉淀 20 min,将上清液倒出,然后向上清液中加入一定体积的浓 H_2SO_4 和一定比例的铁粉,反应 30 min,然后将反应后的溶液与未反应完的铁粉一起倒入经水浸提后的铬渣中,搅拌反应 30 min,还原部分实验完成,这部分得到的固液混合物被称之为浆液. 然后将浆液与一定比例的矿渣和 $Ca(OH)_2$ 混合均匀,放入水泥胶砂搅拌机中搅拌均匀后,装入 40 mm × 40 mm × 160 mm 三联试模,振实后抹平覆盖一层保鲜膜,放于快速养护箱内,于 70℃ 蒸养 24 h,拆模后放入恒温恒湿箱内标准养护(温度 20℃,湿度 95%)28 d,然后测定抗压强度和进行毒性浸出等实验.

铬渣、矿渣和 $Ca(OH)_2$ 质量比为 35:52:13,三者质量之和为干固体总质量,矿渣和 $Ca(OH)_2$ 质量比为 4:1. 酸投量(以 H^+ /铬渣计)为 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$,铁粉投量按 $Fe/Cr(VI)$ 摩尔比为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 投加. 水投加体积与干固体总质量比为 0.5.

1.6 抗压强度测试方法

参考《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671-1999).

1.7 浸出实验方法

硫酸硝酸法毒性浸出方法参照国家标准《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007);毒性浸出程序(toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)方法参照 USEPA Method 1311;半动态浸出实验方法参考美国核协会《用短期试验法测定已固化的低放射性废物的浸出性》(ANSI/ANS16.1-2003).

2 结果与讨论

2.1 浸出毒性

TCLP 和硫酸硝酸法毒性浸出实验结果见图 1. 从中可以看出,未用铁粉预还原时,两种毒性浸出实验结果一致,固化体中 TCr 和 $Cr(VI)$ 浓度都超过了 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且浸出的 Cr 主要以 $Cr(VI)$ 为主. 而使用铁粉进行预还原后,在两种毒性浸出实验的浸出剂中 $Cr(VI)$ 浓度均低于检测限,而在 TCLP 浸出剂中 TCr 浸出浓度高于硫酸硝酸法,且随着铁粉投量的增加,TCr 浸出浓度没有明显的变化.

根据《铬渣污染治理环境保护技术规范(暂行)》(HJ/T 301-2007)^[21]中规定,铬渣经固化处理后,按硫酸硝酸法制备的浸出液 TCr 小于 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Cr(VI)$ 小于 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可作为一般工业固体废物进行填埋. 规定中还指出利用铬渣生产砖或砌块的标准为 TCr 浓度小于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Cr(VI)$ 浓度小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在本实验中,只经过固化处理的样品满足作为一般工业固体废物进行填埋的标准,而经过铁粉还原再进行固化处理的样品可作为砖或砌块使用.

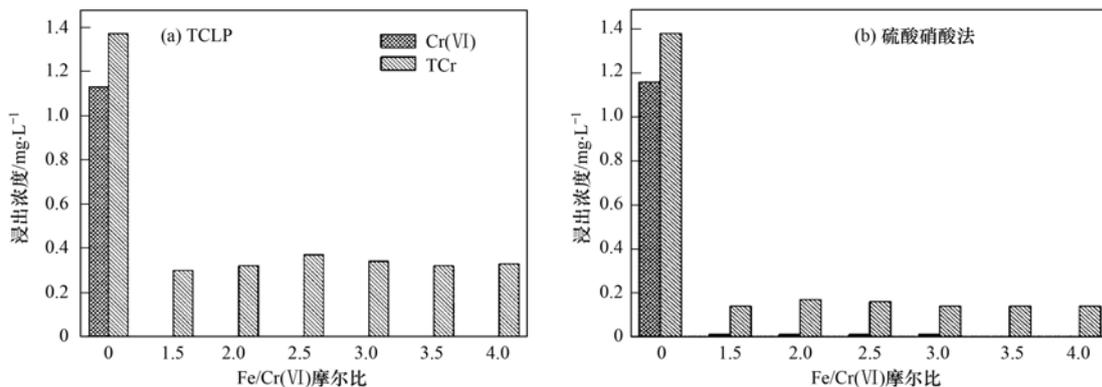


图 1 毒性浸出结果

Fig. 1 Leaching test results

2.2 抗压强度

图 2 表示随着铁粉投量的增加固化体 28 d 抗压强度变化情况. 从中可以看出,只经过固化处理

的试件抗压强度为 15 MPa,说明铬渣和矿渣具有火山灰活性,在 $Ca(OH)_2$ 的激发下发生水化反应而产生了一定的强度. 经过铁粉还原再进行固化处理的

试件,随着 Fe/Cr(VI) 摩尔比从 1.5 增加至 4.0, 抗压强度从 25 MPa 下降至 16 MPa, 但仍高于只经过固化处理的试件抗压强度. 产生这种现象的原因是, 因为在铁粉还原阶段硫酸的使用引入了 SO_4^{2-} 有助于钙矾石的形成, 这部分详细的讨论将在下一节矿物组分部分进行. 而随着铁粉投量的增加固化体抗压强度降低的原因可能是因为铁粉投量的增加导致产生的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量增加, 而在固化阶段 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的加入产生的碱性环境使得 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 与 OH^- 结合产生沉淀而消耗了一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 致使作为激发剂的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量减少或其浓度降低, 激发矿渣的最佳碱浓度发生变化而导致强度降低.

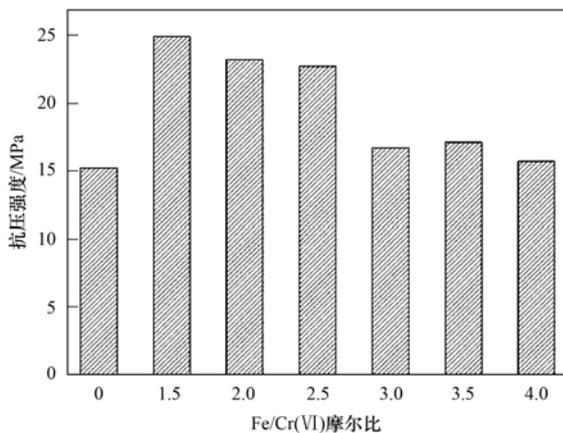


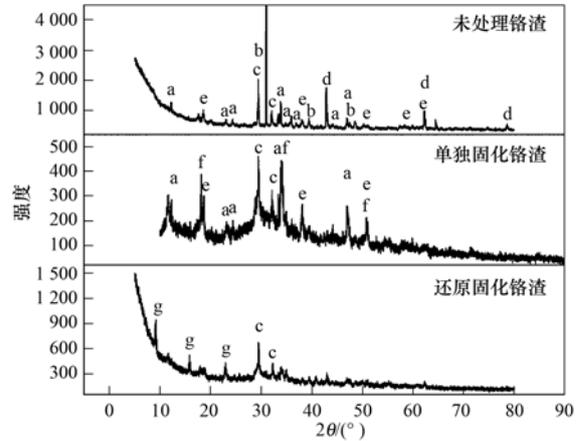
图 2 随着铁粉投量的增加固化体 28 d 抗压强度变化情况

Fig. 2 Compressive strength of treated samples for 28 d with different Fe/Cr(VI) mole ratios

2.3 矿物组分

图 3 表示未处理铬渣、只经固化处理的铬渣和经还原固化处理的铬渣的 XRD 图. 从中可以看出在未经处理的铬渣样品中检测出 5 种矿物, 分别为钙铁石、方解石、水化硅酸钙、方镁石和水镁石. 说明铬渣以含 Ca 和 Mg 的矿物为主, 这与 XRF 的结果一致. 经过单独固化处理的铬渣样品中发现方解石和方镁石的衍射峰消失了, 而出现了羟钙石的衍射峰, 这说明加入的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 未完全参与反应, 且因为强碱性条件下铬渣中矿物未能完全溶解. 在还原固定处理的样品中出现了钙矾石的衍射峰, 而在未经处理的铬渣样品中检测出的 5 种矿物中, 只有水化硅酸钙的衍射峰一直存在, 羟钙石的衍射峰也消失了. 这是由于还原阶段硫酸的加入使得还原后的铬渣浆体 pH 降至 7 左右, 有研究表明 pH < 9 时有利于含 Cr(VI) 的矿物溶解^[22]. 钙矾石的形成过程则被认为是 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 结合产生 CaSO_4 , 而

CaSO_4 在强碱性条件 (pH > 9) 及含 Al 矿物同时存在时可被转化为钙矾石^[23]. 钙矾石是产生强度的矿物, 这就可以解释还原固定样品的强度高于单独固定的样品.



- (a) 钙铁石 ($\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$); (b) 方解石 (CaCO_3);
 (c) 水化硅酸钙 ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$); (d) 方镁石 (MgO);
 (e) 水镁石 [$\text{Mg}(\text{OH})_2$]; (f) 羟钙石 [$\text{Ca}(\text{OH})_2$];
 (g) 钙矾石 [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$]

图 3 未处理铬渣、只经固化处理的铬渣和经还原固化处理的铬渣的 XRD 图

Fig. 3 XRD patterns for untreated, solidification and reduction/solidification samples

2.4 形态分析

采用改进的 Tessier 连续浸提法研究了未处理及还原固定处理后铬渣样品中 Cr 的形态分布, 结果见图 4. 从中可以看出未处理铬渣中 Cr 主要以 Fe/Mn 氧化物结合态为主, 占 TCr 的 56%, 其次是可交换态和碳酸盐结合态, 比例分别为 23% 和 17%, 剩余两种形态只占 5% 左右. 而经过还原固定的铬渣样品中 Fe/Mn 氧化物结合态形式存在的 Cr 占 97%, 只有硫化物结合态 Cr 的百分比没有变化, 其他 3 种形态的 Cr 所占的比例均有降低, 特别是可交换态和碳酸盐结合态. 表明经过还原固定处理后铬渣中环境迁移能力较强的可交换态和碳酸盐结合态 Cr 被转化为不容易迁移的 Fe/Mn 氧化物结合态 Cr.

2.5 半动态浸出

半动态浸出实验主要考察固化体中 Cr 长期浸出行为. 根据菲克定律可计算出固化体中 Cr 的扩散系数 D_e , 计算公式如下^[24]:

$$D_e = \pi \left[\frac{a_n/A_0}{\Delta t_n} \right]^2 \left[\frac{V}{S} \right]^2 T \quad (1)$$

式中, a_n 代表各浸出间隔污染物损失量 (mg); A_0 代

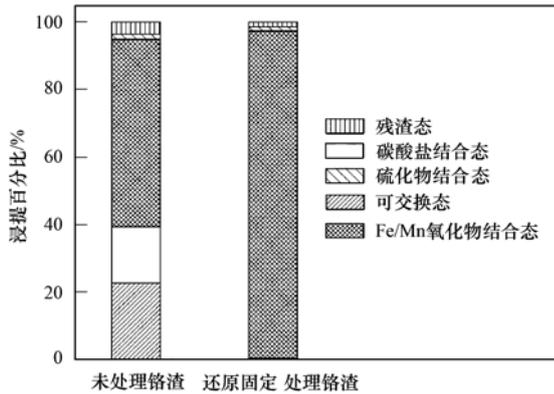


图 4 未处理铬渣和还原固定处理铬渣中 Cr 形态分布

Fig. 4 Distribution of Cr in sequentially extracted fractions of untreated and treated samples

表污染物在固体中的初始质量 (mg); V 代表固体体积 (cm^3); S 固体表面积 (cm^2); Δt_n 代表浸出间隔时间 (s); T 代表浸出间隔平均时间 (s); De 代表有效扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Environment Canada 用浸出因子 LX 来评价对固体废弃物的利用和处置的有效性^[25]. 根据 De 可得到浸出因子 LX, 计算公式如下^[24]:

$$LX = \left(\frac{1}{m} \right) \sum_{n=1}^m [-\lg(De)]_n \quad (2)$$

对经过还原固定处理的铬渣样品进行半动态浸出实验, 结果见图 5 和表 3. 从图 5 中可以看出, 随着累积浸出时间的增加, TCr 浸出量呈现先快速升高, 后缓慢升高的趋势. 除了 Fe/Cr(VI) 摩尔比为 3.5 的样品, 其他固体随着 Fe/Cr(VI) 摩尔比的增加, TCr 浸出质量也随之升高. 从表 3 中可以看出, 所有固体中 TCr 累积浸出质量百分比均在 0.14% ~ 0.20% 范围内, 有效扩散系数 De 在 10^{-10} 数量级上变化, 且浸出因子 LX 均大于 9. 有研究表明^[12] 有效扩散系数一般在 10^{-5} (流动性很高) 和 10^{-15} (稳定的) 范围内变化, 这说明本实验中经还原固定处理的铬渣中 Cr 是比较稳定的, 不易流动. 且由于浸出因子 LX 均大于 9, 经还原固定的样品可被

表 3 TCr 累积浸出质量百分比、扩散系数和浸出指数

Table 3 Cumulative fraction of leached TCr, diffusion coefficients and LX values of TCr

Fe/Cr(VI) 摩尔比	TCr 累积浸出质量百分比/%	扩散系数 $De/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	浸出因子 LX
1.5	0.14	4.21E-10	9.53
2.0	0.14	4.19E-10	9.55
2.5	0.17	6.23E-10	9.37
3.0	0.18	7.01E-10	9.28
3.5	0.16	5.90E-10	9.40
4.0	0.20	8.09E-10	9.24

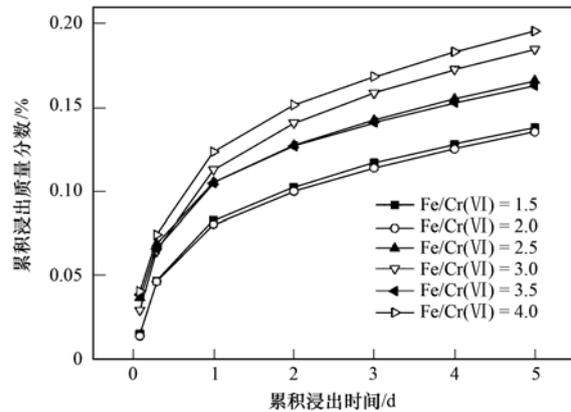


图 5 TCr 累积浸出质量百分比随累积浸出时间变化情况

Fig. 5 Cumulative fraction of TCr during the leaching time for treated samples

用于一些特殊用途, 如用于采石场修复、封闭泻湖以及作为路基材料等.

2.6 碱性消解

为考察单独固定化和还原固定化处理的效果, 采用碱性消解法对单独固定化和还原固定化 [Fe/Cr(VI) 摩尔比为 3 时] 样品进行处理, 测定样品中未被还原的 Cr(VI) 含量, 并与未处理前铬渣中 Cr(VI) 含量进行比较, 结果如图 6 所示. 从中可以看出, 未经处理的铬渣中 Cr(VI) 含量为 $9.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 铬渣, 经过单独固定化处理后 Cr(VI) 含量降至 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 铬渣, 而进行还原固定化处理后 Cr(VI) 含量被进一步降低至 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 铬渣, 两种处理方法的 Cr(VI) 还原率分别为 91.9% 和 97.2%.

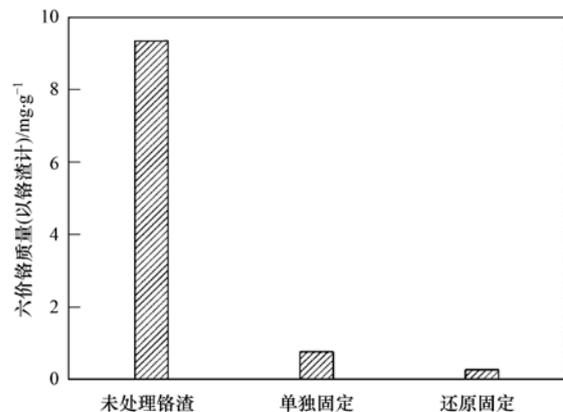


图 6 碱消解法测定未处理铬渣、单独固定化样品及还原固定化 (Fe/Cr(VI) 摩尔比为 3) 样品中 Cr(VI) 含量

Fig. 6 Cr(VI) contents determined with alkaline digestion method in the untreated COPR, solidification sample and S/S sample (Fe/Cr(VI) mole ratio = 3)

3 结论

(1)单独固化处理样品的硫酸硝酸法浸出毒性结果满足作为一般工业固体废物进行填埋的标准,而经还原固定处理样品的浸出结果满足作为砖或砌块使用的标准。

(2)单独固定处理样品的抗压强度低于还原固定样品的强度。

(3)未处理的铬渣样品中检测出 5 种矿物,分别为钙铁石、方解石、水化硅酸钙、方镁石和水镁石;经单独固化处理后方解石和方镁石消失,出现了羟钙石衍射峰,说明水化反应进行得不完全;经还原固定处理样品中只检测出了钙矾石和水化硅酸钙,钙矾石的形成是还原固定样品抗压强度高于单独固定样品强度的原因。

(4)未处理样品中 Cr 形态以 Fe/Mn 氧化物结合态为主,其次是可交换态和碳酸盐结合态;而经还原固定处理后可交换态和碳酸盐结合态基本都转化为稳定性较好的 Fe/Mn 氧化物结合态。

(5)动态浸出实验结果表明经还原固定处理的铬渣中 Cr 是比较稳定的,不易流动;并且经还原固定处理的样品可被用于采石场修复、封闭泻湖以及作为路基材料等一些特殊用途。

(6)碱消解测定结果表明单独固定化和还原固定化两种处理方法的 Cr(VI) 还原率分别为 91.9% 和 97.2%。

致谢:感谢马桂荣老师在实验方面提供的关心和帮助。

参考文献:

- [1] 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 等. 污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3882-3887.
- [2] 陈永安, 王武育, 李平, 等. 铬铁矿焙烧后期铬再氧化机理[J]. 中国有色金属学报, 2015, **25**(1): 203-210.
- [3] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评估[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [4] 朱文会, 董良飞, 王兴润, 等. Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2711-2717.
- [5] 王旌, 罗启仕, 张长波, 等. 铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4036-4041.
- [6] 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 等. 重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3155-3161.
- [7] Zhang J L, Liu J G, Li C, *et al.* Comparison of the fixation effects of heavy metals by cement rotary kiln co-processing and cement based solidification/stabilization [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **165**(1-3): 1179-1185.
- [8] Yu Q J, Nagataki S, Lin J M, *et al.* The leachability of heavy metals in hardened fly ash cement and cement-solidified fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2005, **35**(6): 1056-1063.
- [9] 王晶, 周永祥, 王伟, 等. 水泥固化作用对固体废物中重金属浸出特性的影响[J]. 粉煤灰, 2015, (1): 1-4.
- [10] 黄玉柱, 韩杯芬, 熊丽荣. 水泥对铬渣无害化处理及其固化体浸出毒性的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2002, **30**(4): 366-369.
- [11] Shi C J, Fernández-Jiménez A. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2006, **137**(3): 1656-1663.
- [12] Bellmann F, Stark J. Activation of blast furnace slag by a new method [J]. Cement and Concrete Research, 2009, **39**(8): 644-650.
- [13] Duchesne J, Laforest G. Evaluation of the degree of Cr ions immobilization by different binders [J]. Cement and Concrete Research, 2004, **34**(7): 1173-1177.
- [14] Batchelor B. Overview of waste stabilization with cement [J]. Waste Management, 2006, **26**(7): 689-698.
- [15] Erdema M, Tumen F. Chromium removal from aqueous solution by the ferrite process [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2004, **109**(1-3): 71-77.
- [16] Grahama M C, Farmer J G, Anderson P, *et al.* Calcium polysulfide remediation of hexavalent chromium contamination from chromite ore processing residue [J]. Science of the Total Environment, 2006, **364**(1-3): 32-44.
- [17] Wazne M, Jagupilla S C, Moon D H, *et al.* Assessment of calcium polysulfide for the remediation of hexavalent chromium in chromite ore processing residue (COPR) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**(3): 620-628.
- [18] Cissokoa N, Zhang Z, Zhang J H, *et al.* Removal of Cr(VI) from simulative contaminated groundwater by iron metal [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2009, **87**(6): 395-400.
- [19] Gheju M, Iovi A. Kinetics of hexavalent chromium reduction by scrap iron [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **135**(1-3): 66-73.
- [20] 韦江雄, 白瑞英, 余其俊, 等. 水泥硬化体中 Cr 的形态及分布——改进的 Tessier 连续浸提法 [J]. 硅酸盐学报, 2010, **38**(7): 1167-1172.
- [21] HJ/T 301-2007, 铬渣污染治理环境保护技术规范(暂行) [S].
- [22] Jagupilla S C, Moon D H, Wazne M, *et al.* Effects of particle size and acid addition on the remediation of chromite ore processing residue using ferrous sulfate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(1): 121-128.
- [23] Zhang J G, Provis J L, Feng D W, *et al.* The role of sulfide in the immobilization of Cr(VI) in fly ash geopolymers [J]. Cement and Concrete Research, 2008, **38**(5): 681-688.
- [24] Dermatas D, Moon D H, Menounou N, *et al.* An evaluation of arsenic release from monolithic solids using a modified semi-dynamic leaching test [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **116**(1-2): 25-38.
- [25] EPS 3/HA/9, Proposed Evaluation Protocol for CementBased Solidified Wastes [S].

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行