

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 ..... 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 ..... 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 ..... 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 ..... 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 ..... 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 ..... 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 ..... 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 ..... 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 ..... 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 ..... 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 ..... 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 ..... 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 ..... 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 ..... 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 ..... 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张焯 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 ..... 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 ..... 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 ..... 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 ..... 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 ..... 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 ..... 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 ..... 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 ..... 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 ..... 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 ..... 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 ..... 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 ..... 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 ..... 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 ..... 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 ..... 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 ..... 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 ..... 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 ..... 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 ..... 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 ..... 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 ..... 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 ..... 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 ..... 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 ..... 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 ..... 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 ..... 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 ..... 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 ..... 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 ..... 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 ..... 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 ..... 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及品种筛选研究 ..... 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的短期响应 ..... 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 ..... 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 ..... 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 ..... 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 ..... 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 ..... 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 ..... 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 ..... 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

# 废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究

伊元荣<sup>1,2</sup>, 韩敏芳<sup>1\*</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083; 2. 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以氧化铝冶炼过程中排出的碱性固体废渣赤泥为研究对象,利用烟气中 CO<sub>2</sub> 对其进行了脱钠工艺的实验分析. 研究了在不同 pH、反应时间和温度下废气中 CO<sub>2</sub> 与废渣赤泥协同作用脱钠反应特性及机制,结果表明,赤泥脱钠反应过程是赤泥中钠基固体物质与 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 和 OH<sup>-</sup>-CO<sub>2</sub> 系统协同作用的结果,脱钠过程与 pH 值、温度和反应时间有一定的反应规律. 采用 XRD 和 SEM 方法对赤泥脱钠前后物料特性进行表征分析,结果表明赤泥中的碱性物质与 CO<sub>2</sub> 发生反应,赤泥脱钠后固相中的钠含量明显降低. 通过合理的设计和适当的操作,可使赤泥脱钠率达 70% 以上,为低成本赤泥脱钠提供了一种有效的途径.

**关键词:**废气与废渣; 协同作用; 脱钠; 碱度; 反应特性

**中图分类号:** X701; X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)07-2522-06

## Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid

YI Yuan-rong<sup>1,2</sup>, HAN Min-fang<sup>1</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in flue gas was used to remove the sodium in the red mud (RM), a kind of alkaline solid waste generated during alumina production. The reaction characteristics and mechanism of sodium removal by the synergistic action of CO<sub>2</sub> and RM were studied with different medium pH, reaction time and temperature. It was demonstrated that the remove of sodium by RM was actually the result of the synergistic action of sodium-based solid waste in RM with the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and OH<sup>-</sup>-CO<sub>2</sub> systems. The sodium removal efficiency was correlated with pH, reaction temperature and time. The characteristics of RM before and after sodium removal were analyzed using X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM), and the results showed that the alkaline materials in the red mud reacted with CO<sub>2</sub> and the sodium content in solid phases decreased significantly after reaction. The sodium removal efficiency could reach up to 70% with scientific procedure. The results of this research will offer an efficient way for low-cost sodium removal.

**Key words:** flue gas and solid waste; synergistic action; sodium removal; alkalinity; reaction characteristics

赤泥是铝土矿中提炼氧化铝过程中产生的极细颗粒的强碱性固体废弃物,每生产 1 t 氧化铝大约产生赤泥量为 1.0 ~ 1.3 t<sup>[1]</sup>,赤泥 pH 值为 10.29 ~ 13<sup>[2-4]</sup>,由于赤泥碱含量过高,对赤泥进一步使用受到很大限制. 进入 21 世纪后,随着全球经济发展对原材料需求的快速增长,我国氧化铝产能持续提高,使得赤泥的排放量也逐年增加,目前我国高达 2 亿 t 的赤泥主要是筑坝堆存<sup>[5]</sup>,赤泥的筑坝堆存不但占用大量土地和珍贵的农田,同时,赤泥的堆存还易造成环境污染和安全隐患. 因此,赤泥低成本脱碱是解决赤泥大宗利用的关键技术. 赤泥所含的碱主要是钠碱<sup>[6,7]</sup>,目前,形成几种卓有成效的脱碱技术,如:石灰石脱碱法<sup>[8-10]</sup>、废酸中和法<sup>[11]</sup>、膜脱钠法<sup>[12]</sup>、氯化物法回收碱<sup>[13,14]</sup>等方法,其中研究较多的是石灰脱钠法,其脱碱率可达 70% 以上,但由于脱碱过程中存在着工艺周期长、成本高、环境影响大等问题

没有大面积推广应用. 文献[15,16]提出了铝业碱性赤泥的悬浮碳化法脱碱的新工艺,通过实验虽然得出脱碱效率可达 85% 以上,但对赤泥先在 600 ~ 700℃ 焙烧 5 h 进行预处理然后再进行脱碱,使得用此法提高了赤泥脱碱的成本. Sahu 等<sup>[17]</sup>利用赤泥对 CO<sub>2</sub> 进行封存,通过实验表明 CO<sub>2</sub> 可以与赤泥中含碱性物质有效发生酸碱中和反应.

CO<sub>2</sub> 是一种可以溶于水形成酸性流体的“活性气体”,CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系统的各个成分的变化对赤泥脱钠过程中起着非常重要的作用. 笔者在前人研究的基础上,结合 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系统对赤泥废渣协同作用脱

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2012-02-03

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08010); 中央高校基本科研业务费项目(2010YH02)

作者简介: 伊元荣(1974~),女,博士研究生,主要研究方向为固体废物处理与处置, E-mail: yyrhyw@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: hanminfang@sina.com

钠的机制以及脱钠过程中在 pH、温度和反应时间条件下其脱钠率和碱度变化方面进行了较详细的分析。鉴于我国赤泥碱性物含量高,对环境造成污染,通过对赤泥这种工业固体废物脱钠方法的详细研究,提出用燃烧后烟气中的  $\text{CO}_2$  对其进行脱钠,不仅可以使工业废物赤泥得到综合利用,而且还可降低燃煤烟气中  $\text{CO}_2$  对环境的污染,达到“以废治废”的目的。

表 1 所选赤泥的化学成分(质量分数)/%

Table 1 Chemical composition of the red mud selected/%

化学名称	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{ZrO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$
质量分数	42.66	20.00	19.74	7.34	3.97	3.61	1.06	0.22	0.15	0.15

## 1.2 实验方法

本研究涉及实验装置主要由三相反应池、 $\text{CO}_2$  气源、采样装置和测定装置等组成。实验时,先将赤泥在  $105^\circ\text{C}$  的烘箱中进行干燥、破碎、研磨,然后按照一定比例将赤泥调制成矿浆,通入有搅拌器的三相反应池中,充分搅拌混合。三相反应池有一个  $\text{CO}_2$  入口和一个出口。溶液用磁力搅拌器以恒定速度  $700 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  搅拌以增加其溶解性。每次赤泥脱钠的一次循环约  $1\sim 3 \text{ h}$  左右。赤泥脱钠反应过程中用 pH 值和电导率进行跟踪,待其  $\text{pH} < 7$  及电导率不变时,即为赤泥脱钠反应结束。反应结束后,将悬浮液与固渣进行过滤、分离、干燥,滤液用碱度滴定法测定溶液中的碱度变化。固渣先进行消解,然后利用 ICP-AES 测定其钠含量的变化。

## 1.3 样品的表征测定

用 X-射线粉末衍射仪(XRD, 荷兰 Panalytical 公司)对样品的物相进行表征。XRD 的使用条件为  $40 \text{ kV}$ ,  $22.5 \text{ mA}$ ,  $\text{Cu-K}\alpha$ , 扫描速率  $2^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ 。

用电子扫描显微镜(SEM, Carl-Zeiss EVO-18)对赤泥脱钠前后物相组成和微观形貌进行表征。扫描透射环境下的能谱成分分析(SEM/EDS)相结合,确定赤泥脱钠前后的相组成及结晶学特征。

利用 ICP-AES(SPECTRO Analytical Instruments GmbH, 美国)电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定赤泥脱钠过程固相中钠的含量。

## 2 废气和废渣协同作用脱钠反应机制分析

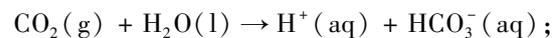
在碱性环境下,废气  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  与废渣协同作用脱钠反应过程与 pH 关系紧密。为了能更好揭示废气和废渣协同作用脱钠反应机制,首先需要了解  $\text{CO}_2$  在溶液中存在形式,  $\text{CO}_2$  在碱性水溶液环境下

## 1 材料与方法

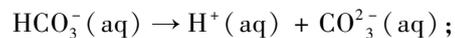
### 1.1 实验材料

实验采用中铝公司某厂赤泥为原料,经过干燥、破碎、研磨、筛选,粒径在  $1.868\sim 31.95 \mu\text{m}$  之间,比表面积为  $7.97 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  的赤泥进行脱钠实验,化学成分见表 1。主要成分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{SiO}_2$ , 其次为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ , 和少量  $\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O}$ , pH 为  $12\sim 13$ 。

发生酸碱中和、电离反应释放出  $\text{H}^+$ 、 $\text{OH}^-$  和  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , 但是碳酸在溶液中的存在形式很多,在确定  $\text{CO}_2$  与赤泥中含碱性物质的反应形式时,需要确定在研究的碱性环境下它们的主要存在形式。下面分别对  $298.15 \text{ K}$  条件下碳酸系统  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  的各种存在形式,不同 pH 环境下的分布进行分析。 $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  构成了碳酸溶液中简单的二元体系,其中与碳酸组分直接相关的电离反应及其相关的平衡常数为:



$$K_1 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad (1)$$



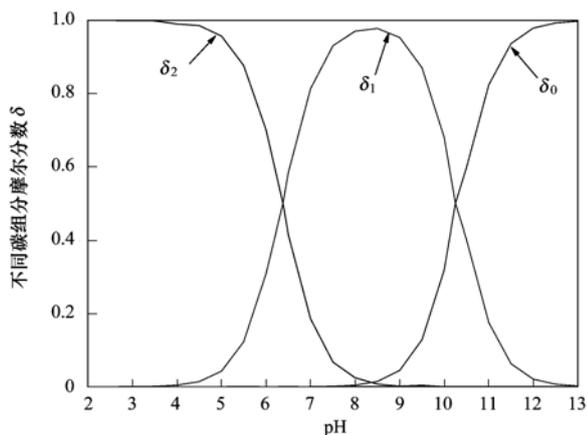
$$K_2 = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2)$$

式中,  $K_1$  和  $K_2$  等为平衡常数。

在浆液中碳酸电离成  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  是受 pH 值的控制,假定浆液中总碳酸的含量为  $C$ , 即  $\sum C = [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$  (单位:  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[18,19]</sup>。其中碳酸组分的摩尔分数为  $\delta_i$ , 则  $[\text{H}_2\text{CO}_3] = \delta_2\cdot C$ ,  $[\text{HCO}_3^-] = \delta_1\cdot C$ ,  $[\text{CO}_3^{2-}] = \delta_0\cdot C$ 。

由图 1 可知,在 pH 12.5 以上的区域内,只存在  $\text{CO}_3^{2-}$ , 在碱性溶液中  $\text{CO}_3^{2-}$  会不断的与水反应生成  $\text{HCO}_3^-$  而使 pH 降低; 在 pH 值 10 以下主要是  $\text{HCO}_3^-$ , 而在 pH 低于 8.3 时,溶液中实际上没有  $\text{CO}_3^{2-}$  的存在,只有  $\text{HCO}_3^-$  存在; 当 pH 降低到 4.3 以下,溶液中实际上不存在  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 而仅有  $\text{H}_2\text{CO}_3$  [ $\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{CO}_3$ ]。因此,利用  $\text{CO}_2$  对赤泥脱碱的最佳 pH 范围是  $10\sim 7$  左右,而此范围的主要物质是以  $\text{HCO}_3^-$  的形式存在。

与此同时,由于赤泥与水是强碱性浆液,所以采

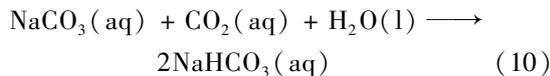
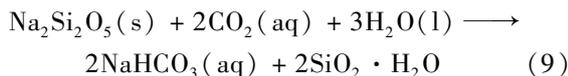
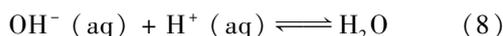
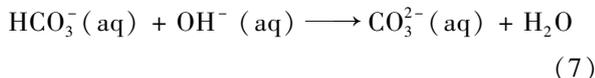
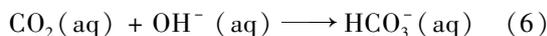
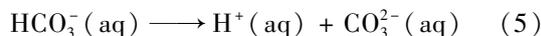
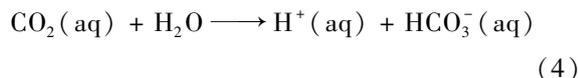
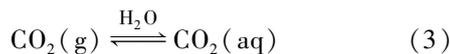


$\delta_0$  为  $\text{CO}_3^{2-}$ ;  $\delta_1$  为  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\delta_2$  为  $\text{H}_2\text{CO}_3$

图 1 不同碳组分摩尔分数与 pH 值间的关系

Fig. 1 Relationship of pH with the molar fraction of different carbon components

用弱酸物质  $\text{CO}_2$  对赤泥脱钠的过程中还会出现  $\text{CO}_2$  与  $\text{OH}^-$  的反应,且此反应速度快.结合图 1 分析得出,利用  $\text{CO}_2$  对赤泥脱钠可能发生的化学反应为:



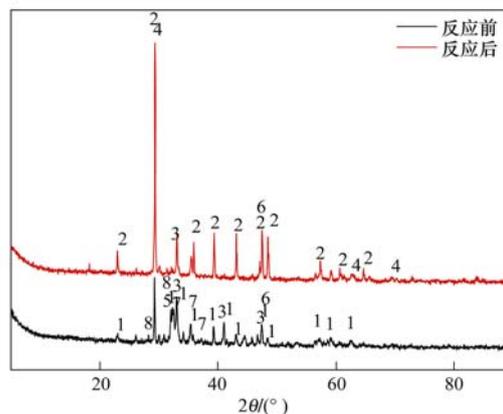
在碱性条件下,通  $\text{CO}_2$  反应开始时,由于浆液 pH 值为 12 左右强碱状态,使得反应式(6)、(7)、(8)的反应速率大于反应式(4)和(5),随着反应进程 pH 值的降低,反应生成  $\text{CO}_3^{2-}$  的量逐渐减少,反应式向左进行,生成  $\text{HCO}_3^-$  的量后续持续增加.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 固相脱钠前后的物相分析

烧结法赤泥是通过高温烧结反应过程中产生的,因此赤泥的矿相物质多数是不溶性矿物和溶出过程的水化、水解产生的衍生物、水合物以及二次副反应所形成的新生矿物.图 2 显示了赤泥脱钠前后 XRD 图谱,从 XRD 峰可以看出原料赤泥中主要的

结晶态矿相物质为:硅酸二钙、钙钛矿、硅酸三钙、石英、方解石、赤铁矿等<sup>[20]</sup>.其中  $\text{CaO}$  和  $\text{SiO}_2$  主要以硅酸二钙的形式存在<sup>[21,22]</sup>.赤泥脱钠前后 XRD 峰强出现了明显的变化,从图 2 可知赤泥脱钠后 XRD 峰中碳酸钙峰分布密度显著增加,其它成分硅酸二钙、硅酸三钙,特别是钠盐物质  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等几种峰大量消失<sup>[17]</sup>.这说明赤泥中钠盐碱性物质  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  等均与  $\text{CO}_2$  发生了化学反应,使赤泥表面大量的碱性物质进入溶液中,充分起到利用  $\text{CO}_2$  对赤泥脱钠的目的.



1. Dicalcium silicate ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ); 2. Calcite ( $\text{CaCO}_3$ );  
3.  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ; 4. Quartz ( $\text{SiO}_2$ ); 5. Hatrurite ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_5$ );  
6.  $\text{CaTiO}_3$ ; 7.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 8.  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$

图 2 赤泥脱钠前后 XRD 图

Fig. 2 XRD analysis of the red mud before and after sodium removal

#### 3.2 固相脱钠前后的微观结构变化

扫描电镜主要用于观察原料赤泥及脱钠赤泥的微观形貌,工作电压为 20 kV.赤泥及其脱钠后赤泥的扫描电镜(SEM)照片特征如图 3,从图 3(a)中可看出原料赤泥是以胶结连接为主的多孔框架结构,由细小微粒组成,呈无定形状态.而图 3(b)可知,脱钠后赤泥外观发生了明显变化,产生了较多的颗粒状晶体,通过点扫描 EDS 分析该层主要是碳酸钙为主<sup>[23]</sup>,且含量明显增多,脱钠后赤泥固体颗粒表面未检测到钠盐,表明  $\text{CO}_2$  与钠盐类碱性物质发生脱钠化学反应,使之溶解进入到溶液中,因此固体颗粒表相没有钠盐附着.

#### 3.3 温度与脱钠反应的规律

温度对  $\text{CO}_2$  赤泥脱碱效果起关键性作用.由图 4 和 5 可以看出,随着温度的上升,脱钠率和  $\text{HCO}_3^-$  浓度均下降,而  $\text{CO}_3^{2-}$  由于碳酸氢根离子在有温度条件下不稳定,容易分解而使溶液中  $\text{CO}_3^{2-}$  略微上升,总体来说,升高温度不利于赤泥脱钠效果.

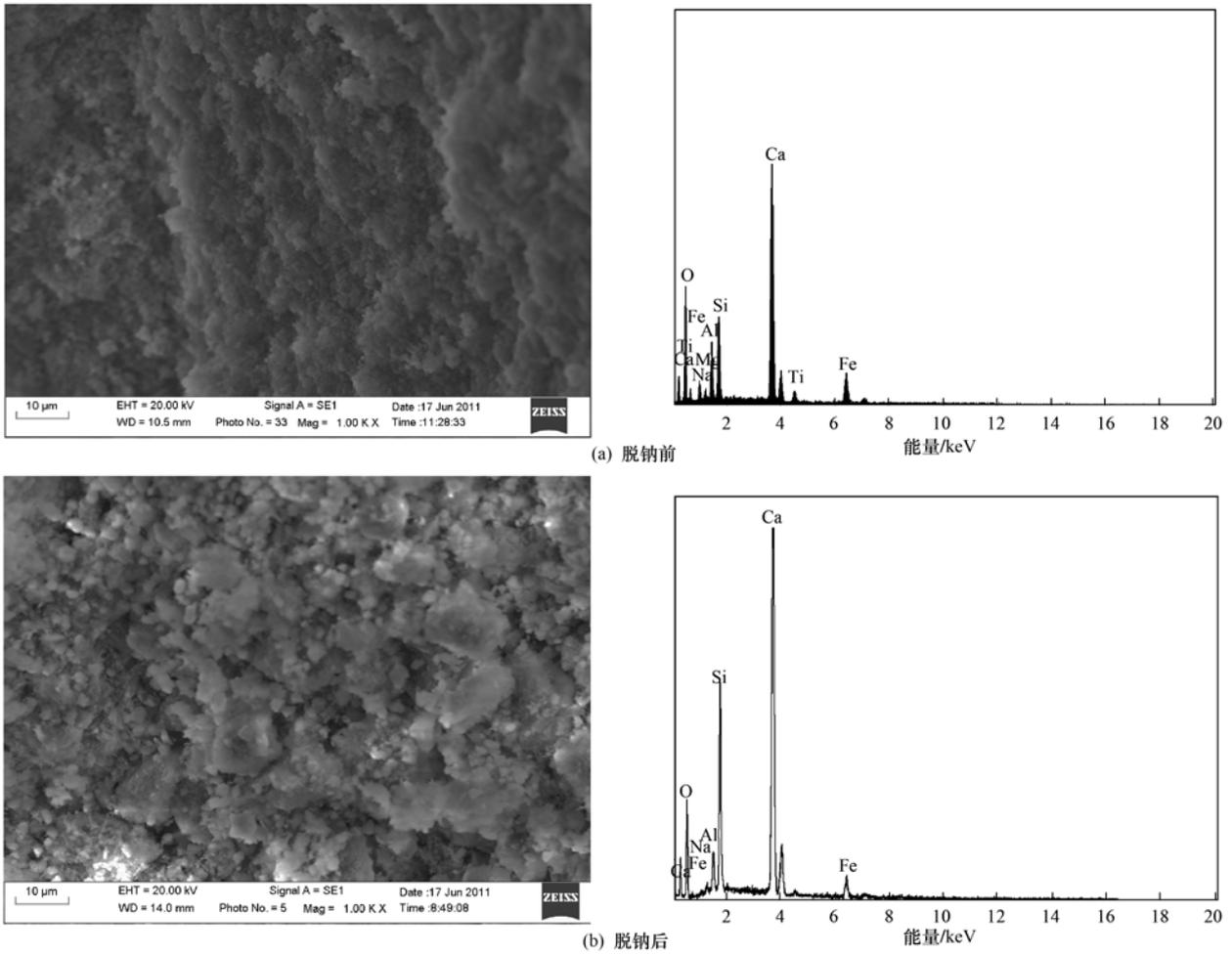


图 3 赤泥脱钠前后 SEM 图

Fig. 3 SEM analysis of the red mud before and after sodium removal

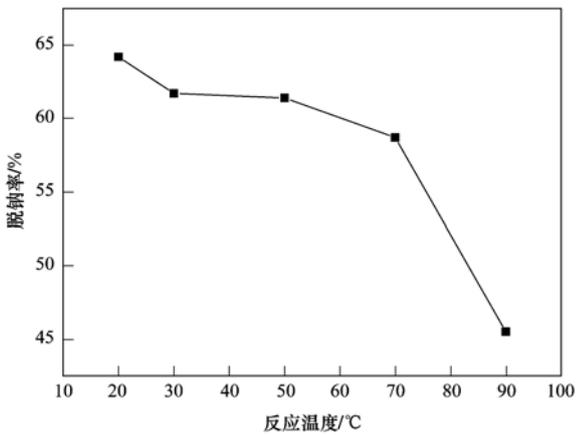


图 4 不同温度条件下脱钠率的变化

Fig. 4 Variations in sodium removal efficiency at different reaction temperatures

其原因是由于  $\text{CO}_2$  溶于水形成  $\text{H}_2\text{CO}_3$  的反应受温度影响很大造成的。

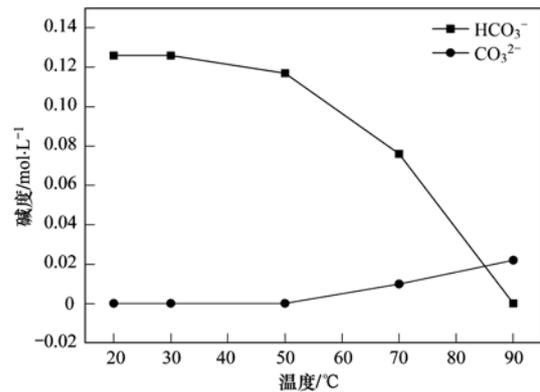
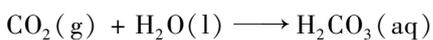


图 5 不同温度条件下溶液碱度的变化

Fig. 5 Variations in the alkalinity of solution at different reaction temperatures

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{[\text{CO}_2(\text{g})] \times [\text{H}_2\text{O}]}$$

式中,  $K_{\text{CO}_2}$  为反应式的平衡常数(无量纲); 方括号内各项为活度<sup>[24]</sup>(单位:  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

由表 2 可知,0℃时  $K_{\text{CO}_2}$  是 90℃时  $K_{\text{CO}_2}$  的 6.760 倍,那么在相同  $P_{\text{CO}_2}$  下,90℃时  $\text{H}_2\text{CO}_3$  的活度比 0℃ 时将降低 6.760 倍.这也就是说,在相同  $P_{\text{CO}_2}$  下温度

越高  $\text{H}_2\text{CO}_3$  的活度越低.高温溶液中形成  $\text{H}^+$  也必然会少很多,与含碱赤泥的反应能力减弱,因此该溶液对赤泥的脱钠率必然显著降低.

表 2 不同温度条件下的  $K_{\text{CO}_2}$  计算值<sup>[25]</sup>

Table 2 Calculated values of  $K_{\text{CO}_2}$  at different reaction temperatures

温度/℃	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\lg K_{\text{CO}_2}$	-1.11	-1.27	-1.41	-1.52	-1.62	-1.71	-1.78	-1.85	-1.9	-1.94

### 3.4 pH 与脱钠反应的规律

将赤泥用水稀释至一定浓度,在室温及常压下,采用  $0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  的流量通入  $\text{CO}_2$ ,每隔一段时间取样,过滤后进行分析,考察不同 pH 下脱钠率和碱度的变化规律,结果如图 6 和图 7 所示.从中可以看出,赤泥的 pH 在 12 左右,碱性强的范围内  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度最大,而随着 pH 值 12 降低到 11 的过程速度较快,脱钠效果明显,pH 值降低到 10 以下后  $\text{CO}_3^{2-}$  逐渐降低为零,而  $\text{HCO}_3^-$  的浓度上升.这是由于在碱性条件下,反应式(6)的反应速率要快于反应式(4).pH 较高时所提供的  $\text{OH}^-$  较多,促使生成了较多的  $\text{CO}_3^{2-}$ ,此时大量的  $\text{Na}^+$  直接与  $\text{CO}_3^{2-}$  产物结合成  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,从而消耗  $\text{OH}^-$ ,反应式的  $\text{CO}_3^{2-}$  浓度较高,随着碱性矿相物质的溶解,消耗  $\text{OH}^-$  的数量不断增多,使溶液的碱性减弱,pH 降低, $\text{OH}^-$  的消耗促使反应式(6)向右进行, $\text{HCO}_3^-$  浓度增大,同时碱性矿相物质的溶解也产生了  $\text{HCO}_3^-$ ,使得 pH 8~7 为  $\text{HCO}_3^-$  浓度达到最大,脱钠率也达到最大.

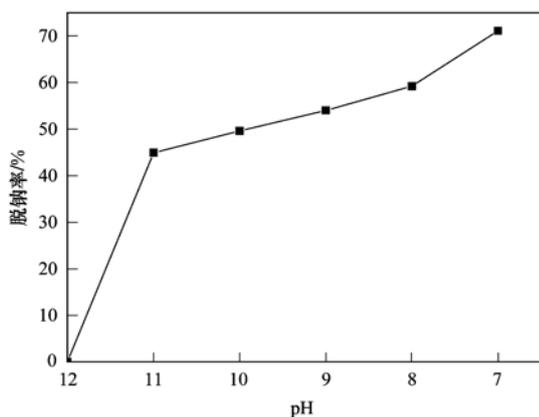


图 6 不同 pH 条件下脱钠率的变化

Fig. 6 Variations in sodium removal efficiency at different pH

### 3.5 反应时间与脱钠反应的规律

反应时间对赤泥脱钠反应是尤为重要的.反应时间短,脱钠反应不完全,同时  $\text{CO}_2$  进入反应体系中的量较少,最终导致脱钠效率低.相反,反应时间长了,虽然反应较完全,但会浪费原料气,同时会增

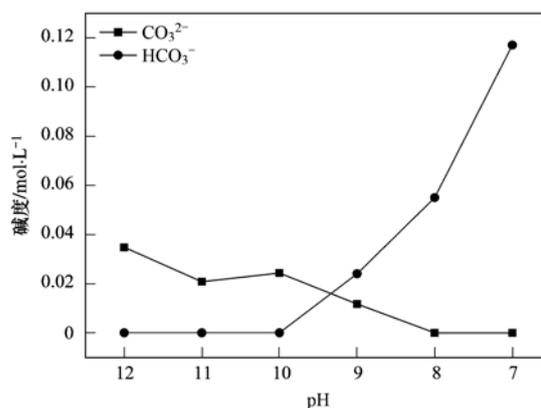


图 7 不同 pH 条件下溶液碱度的变化

Fig. 7 Variations in the alkalinity of solution at different pH

加设备负荷,增大了能耗和成本.因此,适宜的反应时间对赤泥脱钠效果起着重要的作用.

图 8 和图 9 是不同反应时间条件下脱钠率和溶液碱度的浓度变化曲线.从中可看出,在其他条件相同的情况下,反应时间越长,体系中的反应进行程度越完全.  $\text{CO}_2$  首先溶于浆液中,迅速离解生成  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}^+$  与浆液中  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{OH}^-$  迅速反应,pH 值急剧降低;随着反应继续进行,赤泥中碱基数目逐渐减少,  $\text{CO}_2$  溶于水后电离出的  $\text{H}^+$  逐渐增多,使溶液 pH 值降低,直至赤泥浆液达到了饱和脱钠点,随后  $\text{CO}_2$

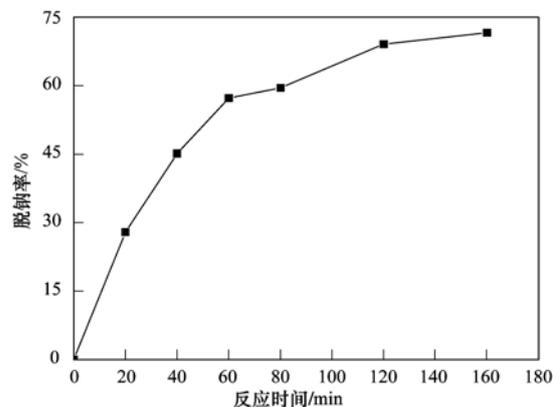


图 8 不同反应时间条件下脱钠率的变化

Fig. 8 Variations in sodium removal efficiency with different reaction time

在溶液中的溶解也达到饱和,不再电离出更多的氢离子,当反应时间超过 120 min 后,脱碱率和  $\text{HCO}_3^-$  的提高幅度不大.说明,脱钠效果最明显的时间是在 120 min 之内.

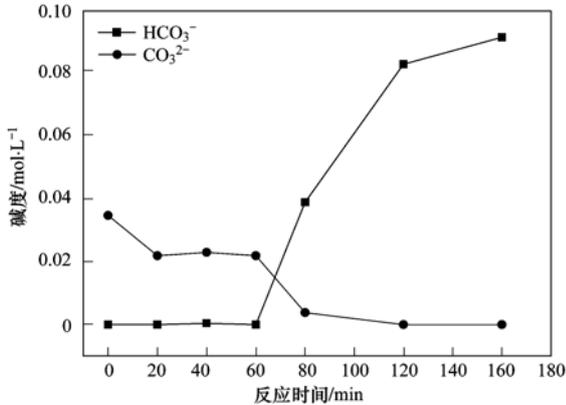


图9 不同反应时间条件下溶液碱度的变化

Fig. 9 Variations in the alkalinity of solution with different reaction time

#### 4 结论

(1) 利用  $\text{CO}_2$  对赤泥脱钠的反应不仅包括  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  系统反应,还包括  $\text{CO}_2$  与碱性条件下与  $\text{OH}^-$  的反应,且反应刚开始  $\text{CO}_2$  与  $\text{OH}^-$  的反应速率较快.

(2) 随着反应温度的上升,赤泥脱钠率和溶液中碱度浓度都依次降低,说明高温不利于赤泥脱钠;赤泥脱钠过程与 pH 变化紧密相关,pH 高于 10 是以  $\text{CO}_3^{2-}$  的形式为主,而 pH 低于 10 以下后是以  $\text{HCO}_3^-$  为主,同时脱钠率上升.

(3) 用燃烧后的烟气中的  $\text{CO}_2$  对赤泥可以进行脱钠,不仅可以使工业废物赤泥得到综合利用,而且还可降低燃煤烟气中  $\text{CO}_2$  对环境的污染,达到“以废治废”的目的.

#### 参考文献:

- [1] 王平升,付毅,贾海龙.我国赤泥综合利用的关键技术与解决方向[A].见:全国氧化铝赤泥综合利用技术现场交流会议论文集[C].2010.67-72.
- [2] 刘昌俊,李文成,周晓燕,等.烧碱法赤泥基本特性的研究[J].环境工程学报,2009,3(4):739-742.
- [3] 赵宏伟,李金洪,刘辉.赤泥制备硫酸铝盐水泥熟料的物相组成及水化性能[J].有色金属,2006,58(4):119-123.
- [4] 景英仁,杨奇,景英勤.赤泥的基本性质及工程特性[J].山西建筑,2001,27(3):80-82.
- [5] 工业和信息化部科学技术部.2010年赤泥综合利用指导意见[R].
- [6] Sahu R C, Patel R, Ray B C. Removal of hydrogen sulfide using red mud at ambient conditions[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(8): 1587-1592.
- [7] 郭晖,管学茂,马小娥.烧碱法赤泥物理化学特性的研究[J].山西冶金,2010,33(6):1-3.
- [8] 何润德,张念炳,黎志英,等.添加石灰处理纯碱烧碱法赤泥的研究[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2003,33(3):7-9,14.
- [9] 郑秀芳,胡剑,姜梅,等.低温拜耳赤泥石灰法脱碱工艺优化研究[J].轻金属,2010,(4):21-23.
- [10] 李耀刚,王雅琼,王克勤,等.烧碱法赤泥脱碱过程[J].化工冶金,1998,19(4):309-312.
- [11] 吴一峰,李晓东.一种赤泥脱碱的方法[P].中国专利:200810231008.3,2010-07-07.
- [12] 刘作霖,罗玉长,谭萍.赤泥废液离子膜法分离回收碱[J].轻金属,1994,(4):10-14.
- [13] 王云山,杨刚,张金平.氧化铝工业产出赤泥脱钠新工艺[J].有色金属,2010,62(3):61-64.
- [14] 张振.利用氯化镁降低赤泥中碱含量的研究[J].化学工程师,2007,21(9):60-61.
- [15] 王琪,李津,赵颖,等.铝业碱性赤泥的悬浮碳化法脱碱工艺研究[J].环境工程学报,2009,3(12):2275-2280.
- [16] 王琪,栾兆坤,韦斌.铝矿赤泥碱回收的动力学及机理研究[J].无机盐工业,2008,40(5):39-41.
- [17] Sahu R C, Patel R K, Ray B C. Neutralization of red mud using  $\text{CO}_2$  sequestration cycle [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1-3): 28-34.
- [18] 黄君礼.水分析化学[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.33-48.
- [19] 大连理工大学无机化学教研室.无机化学[M].(第四版).北京:高等教育出版社,2002.108-122.
- [20] 赵宏伟,李金洪,刘辉.赤泥制备硫酸铝盐水泥熟料的物相组成及水化性能[J].有色金属,2006,58(4):119-124.
- [21] 伊元荣,韩敏芳,于立安.利用赤泥捕获  $\text{CO}_2$  反应特性[J].化工学报,2011,62(9):2635-2642.
- [22] Liu X M, Zhang N, Sun H H, et al. Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue-Red mud [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(8): 847-853.
- [23] Yadav V S, Prasad M, Khan J, et al. Sequestration of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) using red mud [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3): 1044-1050.
- [24] 曹锡章,宋天佑,王杏秀.无机化学[M].北京:高等教育出版社,1998.308-315.
- [25] 何燧源,金云云,何方.环境化学[M].上海:华东理工大学出版社,2001.58-68.

## CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China .....	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring .....	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements .....	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai .....	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China .....	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao .....	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant .....	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model .....	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i> .....	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years .....	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes .....	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling .....	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake .....	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan .....	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China .....	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake .....	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales .....	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment .....	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau .....	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau .....	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering .....	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu .....	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate .....	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake .....	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing .....	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants .....	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing .....	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study .....	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay .....	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming .....	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake .....	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors .....	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal in Drinking Water Biofilter .....	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane .....	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation .....	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration .....	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater .....	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN .....	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body .....	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process .....	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System .....	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1 .....	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production .....	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields .....	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary .....	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province .....	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition .....	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils .....	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial .....	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops .....	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid .....	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China .....	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

# 《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)

2012年7月15日 33卷 第7期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行