

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

**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

2008 ~2010年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O<sub>3</sub> 生成潜势 ..... 曹函玉,潘月鹏,王辉,谭吉华,王跃思(2065)  
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 ..... 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,周敏,王红丽,周振,乔利平,黄成,李梅,李莉,王倩,黄海英,邹兰军(2071)  
沈阳市降水化学成分及来源分析 ..... 张林静,张秀英,江洪,张清新(2081)  
秦皇岛大气污染物浓度变化特征 ..... 刘鲁宁,申雨璇,辛金元,吉东生,王跃思(2089)  
笼养鸡生长过程 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放 ..... 周忠凯,朱志平,董红敏,陈永杏,尚斌(2098)  
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能 ..... 王晓晖,卜龙利,刘海楠,张浩,孙剑宇,杨力,蔡力栋(2107)  
生物滴滤塔净化多组分废气的研究 ..... 张定丰,房俊逸,叶杰旭,邱松凯,钱东升,戴启洲,陈东之(2116)  
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 ..... 金圣,黄立维,李国平(2121)  
模拟大气 CO<sub>2</sub> 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 ..... 赵旭辉,汤龙升,史小丽,杨州,孔繁翔(2126)  
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 ..... 华祖林,汪靛(2134)  
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 ..... 李燕,李兆富,席庆(2139)  
基于非点源污染的水质监测方案研究 ..... 吴喜军,李怀恩,李家科,李强坤,董雯(2146)  
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 ..... 陈玲,刘德富,宋林旭,崔玉洁,张革(2151)  
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 ..... 李鸿妹,石晓勇,陈鹏,张传松(2159)  
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 ..... 张永生,郑丙辉,王坤,姜霞,郑浩(2166)  
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 ..... 冯伟莹,张生,焦立新,王圣瑞,李畅游,崔凤丽,付绪金,甄志磊(2176)  
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 ..... 侯金枝,魏权,高丽,孙卫明(2184)  
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 ..... 李大鹏,王晶,黄勇(2191)  
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 ..... 李昆,赵高峰,周怀东,刘晓茹,余丽琴,文武,张盼伟(2198)  
UV 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 ..... 张一清,周玲玲,张吉(2205)  
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 ..... 于丽,张培龙,侯甲才,庞立飞,李越,贾寿华(2210)  
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 ..... 毛雯,孙荣国,王定勇,马明,张成(2218)  
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 ..... 王斌楠,刘国强,孔德洋,陆隽鹤(2225)  
金属离子对 δ-MnO<sub>2</sub> 去除对叔辛基酚抑制作用的研究 ..... 李非里,牟华倩(2232)  
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 ..... 刘建明,李红,熊振湖(2240)  
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 ..... 闫梦玥,庞志华,李小明,赵建宇,罗隽(2249)  
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 ..... 于红蕾,霍守亮,杨周生,席北斗,答逢宇,张靖天(2256)  
改性水凝胶的制备及其对 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 吸附性能研究 ..... 吴宁梅,李正魁(2263)  
直接大红 4BE 的磷钨酸均相催化还原脱色 ..... 魏红,李克斌,李娟,陈经涛,张涛(2271)  
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 ..... 张磊,刘平,马锦,张静,张明,吴根(2277)  
Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 ..... 郭庆稳,张敏,王炜,杨治中,吴东雷(2283)  
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 ..... 李永峰,王艺璇,程国玲,刘春妍(2290)  
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 ..... 陈志强,邓毅,黄龙,温沁雪,郭子瑞(2295)  
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 ..... 刘文如,沈耀良,丁玲玲,丁敏(2302)  
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 ..... 杨敏,卢龙,冯涌,方超,李雄清(2309)  
体积分数传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 ..... 李志华,范长青,王晓昌(2314)  
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价 ..... 汪浩,冯承莲,郭广慧,张瑞卿,刘跃丹,吴丰昌(2319)  
麦穗鱼物种敏感性评价 ..... 王晓南,刘征涛,闫振广,张聪,何丽,孟双双(2329)  
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 ..... 雷炳莉,文育,王艺陪,康佳,刘倩(2335)  
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 ..... 钱建平,张力,李成超,黄栋(2344)  
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cl<sup>-</sup> 和 Hg<sup>2+</sup> 的响应 ..... 王飞祥,袁玲,黄建国(2350)  
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 ..... 宋新章,卜涛,张水奎,江洪,王志坤,赵明水,刘永军(2355)  
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 ..... 刘玲,方炎明,王顺昌,谢影,杨聃聃(2361)  
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 ..... 于皓,陈川,张莉,王爱杰(2368)  
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp<sup>TM</sup> 方法 ..... 陈晓娟,吴小红,刘守龙,袁红朝,李苗苗,朱捍华,葛体达,童成立,吴金水(2375)  
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 ..... 陈建刚,曹雪(2383)  
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 ..... 刘意章,肖唐付,宁增平,贾彦龙,黎华军,杨菲,姜涛,孙旻(2390)  
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 ..... 陈志凡,赵焯,郭廷忠,王永锋,田青(2399)  
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 ..... 李晓燕(2407)  
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 ..... 王登阁,崔兆杰,傅晓文,殷永泉,许宏宇(2416)  
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 ..... 段雷,马萧萧,余德祥,谭炳全(2422)  
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 ..... 孙明明,滕应,骆永明,李振高,贾仲君,张满云(2428)  
胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤铜含量及土壤酶活性影响 ..... 杨榕,李博文,刘微(2436)  
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 ..... 吴小莲,向垒,莫测辉,姜元能,严青云,李彦文,黄献培,苏青云,王纪阳(2442)  
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 ..... 张旭,席北斗,赵越,魏自民,李洋,赵昕宇(2448)  
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 ..... 王昭,李振山,冯亚斌,焦安英,薛安(2456)  
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 ..... 官贞珍,陈德珍,Thomas Astrup(2464)  
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 ..... 朱芬芬,高冈昌辉,大下和傲,姜惠民,北岛义典(2473)  
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能 ..... 李坤权,李焯,郑正,张雨轩(2479)  
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 ..... 姜志翔,郑浩,李锋民,王震宇(2486)  
基于物质流分析的钾素流动与循环研究 ..... 白桦,曾思育,董欣,陈吉宁(2493)  
《环境科学》征订启事(2115) 《环境科学》征稿简则(2224) 信息(2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知(2478)

# 二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响

李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 金属离子  $\text{Fe}^{2+}$  在生物产氢机制中起着重要作用. 以红糖为底物, 研究了  $\text{Fe}^{2+}$  在  $0 \sim 1\ 650\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内对 UASB 发酵产氢效能的影响. 结果表明, 适当浓度的二价铁离子对产氢具有一定的促进作用. 当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $0 \sim 450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 发酵产气量及其氢气含量都随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加而增加; 且当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 获得最大生物气体积为  $17.72\ \text{L}$ , 较空白组提高了  $40.75\%$ , 此时氢气含量  $60.01\%$ . 而当外加的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度大于  $450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 则开始呈下降趋势. 因此,  $\text{Fe}^{2+}$  可以成为调控发酵制氢的工程措施之一.

**关键词:** UASB;  $\text{Fe}^{2+}$ ; 发酵产氢; 浓度; 产氢能力

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2290-05

## Effect of $\text{Fe}^{2+}$ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB

LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, LIU Chun-yan

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:**  $\text{Fe}^{2+}$  has an important effect on the production of hydrogen in a biological way. With the brown sugar as the substrate, the effect of biotechnology hydrogen production capacity of the  $\text{Fe}^{2+}$  concentration ranging from  $0\text{-}1\ 650\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  on the condition of anaerobic fermentation was studied. The results showed that appropriate divalent ions had the ability to enhance the hydrogen production. Biogas amounts and hydrogen content increased with increasing  $\text{Fe}^{2+}$  concentration from  $0\text{-}450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Compared with the control group increased by  $40.75\%$ , the maximum biogas amount of  $17.72\ \text{L}$  was obtained at  $\text{Fe}^{2+}$  concentration of  $450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . And at the same time, the hydrogen content was  $60.01\%$  percent. Biogas amounts and hydrogen content decreased gradually when the concentration of  $\text{Fe}^{2+}$  was higher than  $450\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Therefore  $\text{Fe}^{2+}$  is one of important engineering parameters for the fermentative hydrogen production.

**Key words:** UASB;  $\text{Fe}^{2+}$ ; hydrogen fermentation; concentration; hydrogen production capacity

与光合制氢技术相比, 厌氧发酵产氢具有无需光源、原料来源广泛、产氢速率快、反应装置设计操作简单等特点, 因此更具有发展潜力, 也更容易应用于工业生产<sup>[1-5]</sup>. 对于厌氧微生物来说, 一定的微量元素可以满足其正常新陈代谢的物质需求. 在产氢细菌体内, 可以催化氢气氧化或质子还原的氢化酶的活性中心含有铁, 它主要作用于有机物在微生物体内的生物氧化过程<sup>[6]</sup>. 已有的研究结果也证明了氢化酶的活性随着铁离子的损耗而降低<sup>[7]</sup>. 由此, 在厌氧发酵生物制氢过程中, 必须考虑铁元素对其的影响.

目前大多数学者对厌氧发酵生物制氢的研究多集中在温度、pH 值、水力停留时间、有机负荷等运行参数上<sup>[8]</sup>. 虽然已有林明等<sup>[9]</sup>研究证实, 金属离子  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  对 B49 产氢能力促进作用的顺序为  $\text{Fe}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ , 且  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  是促进发酵产氢的直接因素. 但在这些微量元素研究中多是采用间接培养或 CSTR 实验装置<sup>[10-12]</sup>, 而采用 UASB 反应器作为实验装置的几乎没有. 因此, 本研究以红糖为底物, 探讨二价铁离子浓度对 UASB 反应器

厌氧发酵生物制氢效能的影响, 并确定最佳的铁离子浓度.

### 1 材料与方法

#### 1.1 接种污泥

本实验所用污泥是哈尔滨市文昌污水处理厂二沉池的剩余污泥, 为防止污泥中留存有废弃物(碎玻璃、石子等), 需先对其进行过滤、沉淀和淘洗. 再用添加一定质量氯化铵和磷酸二氢钾作为氮、磷营养源的糖蜜废水进行间接曝气培养, 直至污泥颜色由灰黑色变为黄褐色, 此时的污泥沉降性能良好, 可作为 UASB 反应器的接种污泥. 本次实验接种污泥量为  $22.87\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

#### 1.2 实验装置

本实验所采用的实验装置是上流式厌氧污泥床(UASB)反应器如图 1 所示. 该反应器由有机玻璃

收稿日期: 2012-09-12; 修订日期: 2012-11-07

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(200909043)

作者简介: 李永峰(1961~), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为环境工程, E-mail: dr\_lyf@163.com

制成,内设使气、液、固分离的三相分离装置,反应器总体积为 34 L,有效容积为 18 L. 根据 Radjaram 等<sup>[13]</sup>及 Wang 等<sup>[14]</sup>的研究将反应器外壁用电阻丝缠绕加热保温,用温控仪将温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ . 所配制的水采用蠕动泵将水从进水箱泵入反应器内,并通过调节蠕动泵的流量确保进水量的恒定.

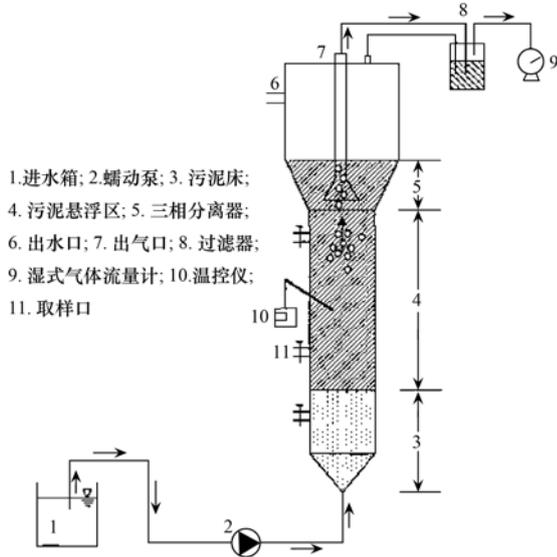


图1 UASB 生物制氢反应器

Fig. 1 UASB  $\text{H}_2$ -producing fermentation reactor

### 1.3 实验材料

**实验底物:**本实验底物为市售的散装红糖,将其用自来水配制成 COD 为  $4\,000 \sim 4\,500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的进水. 同时向其中加入 1.5 g 氮磷复合肥以满足 COD:N:P = 1 000:5:1<sup>[15,16]</sup>.

**产氢实验:**实验共分为 7 组,其中第 1 组为空白组(不添加任何二价铁离子),用 CK 来表示. 从第 2 组到第 7 组分别添加  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (分析纯),使二价铁离子的浓度分别为 0、50、150、450、850、1 250、1 650  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.4 分析方法

**生物气体积(L):**采用 LML-1 型湿式气体流量计(长春汽车滤清器有限责任公司,中国)计量产气量.

**氢气的含量(%):**采用 GC7890 II 型气相色谱仪(上海天美公司,中国)进行测定,该色谱仪的不锈钢色谱填充柱为  $2 \text{ m} \times 3 \text{ mm}$ ,担体为 TDX-01,60/80 目,并配有热导检测器(TCD). 以氮气为载气,在桥电流设定为 80 mA,柱温、进样口和检测器温度分别升至 50、60 和  $120^\circ\text{C}$  时,用注射器抽气 0.5 mL 进样测定.

**氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP):**采用雷磁 pHS-25 型酸度计(上海精密科学仪器有限公司,中国)以氧化-还原电极测出.

**pH 值:**采用配有 pH-Electrode SenTix 41 电极的德国 WTW pH 340i 型手提式 pH 计进行测量.

**化学需氧量(chemical oxygendemand, COD,  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ):**采用雷磁 COD-571 型化学需氧量测定仪(上海精密科学仪器有限公司,中国)测出.

**液相末端产物的浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ):**采用 GC 7890 II 型气相色谱仪(上海天美公司,中国)进行测定,该色谱仪的不锈钢色谱填充柱为  $2 \text{ m} \times 3 \text{ mm}$ ,担体为 GDX-103,60/80 目,并配有火焰检测器(FID). 以氮气为载气,柱温首先设定为  $100^\circ\text{C}$ ,当进样口和检测器温度分别升至  $200^\circ\text{C}$  和  $220^\circ\text{C}$  时,将柱温再次升温至  $140^\circ\text{C}$ ,用微量进样器抽取  $1 \mu\text{L}$  水样进行测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 UASB 反应器的启动与运行

本实验生物制氢反应器采用连续流的方式运行. 在反应器的启动和运行过程中,调节进水的 pH 值在 6~7 以保持反应器内部 pH 值在 4.5~5.0 之间. 通过调节进水流量控制水力停留时间为 8 h. UASB 反应器的启动阶段为 20 d,除向人工废水中加入氮和磷外未添加其它营养物质. 启动阶段的第 1~10 d 采用的人工配置红糖废水的 COD 浓度为  $2\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 第 11~20 d 采用 COD 浓度为  $4\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 每次提升负荷时都要稳定 24 个 HRT 再进入到下一个阶段中. 启动进入到第 25 d 时,反应器在目标负荷  $4\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下稳定运行. 反应器启动初期 COD 去除率最高仅为 29.3%,当系统内的微生物适应了有机负荷的冲击后,COD 去除率最高达到 38%. ORP 受环境中 pH 值的影响,在启动初期的氧化还原电位较高在  $-300 \text{ mV}$  左右,随着发酵的进行,由于受到微生物代谢和环境的影响,氧化还原电位逐渐降低至  $-440 \text{ mV}$  左右.

### 2.2 $\text{Fe}^{2+}$ 对产氢能力的影响

生物气体积和氢气含量是评定厌氧发酵生物制氢效率的重要指标,二者共同反映了反应器内微生物产氢气能力的大小. 由于实验过程中没有检测到甲烷产生,因此所测生物气中仅包括  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$ <sup>[16]</sup>. 图 2 所示为不同  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对生物气体积和氢气含量的影响情况. 其中数据显示,在  $\text{Fe}^{2+}$  浓度达到  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (包括  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 以前,生物气体积随

着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加呈上升趋势. 其中, 当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度分别为  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时与空白组相比上升幅度较小, 而当外加的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度从  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高到  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时生物气体积则有大幅度的上升, 并且此时达到了最高值  $17.72 \text{ L}$ , 较空白组提高了  $40.75\%$ . 之后随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的进一步增加, 生物气体积逐渐下降, 且当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $1650 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时降至最低为  $13.01 \text{ L}$ , 但与空白组相比均有明显的提高.

氢气含量方面, 在  $\text{Fe}^{2+}$  浓度达到  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (包括  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 以前逐渐上升, 之后随着外加  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的提高, 氢气含量虽无显著变化规律, 但总体也呈现下降趋势, 这与整个实验过程中生物气体积的变化情况基本一致. 在整个实验运行阶段, 氢气含量变化幅度较大, 与生物气体积相同的是, 当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 氢气含量也达到了最高值  $60.01\%$ . 这表明, 投加一定浓度的  $\text{Fe}^{2+}$  能够提高混合细菌的产氢能力, 这是因为铁存在于细胞色素、铁氧还原蛋白和其他铁硫蛋白、酶的辅助因子中, 是大多数细菌生存的必要因素. 但过量的  $\text{Fe}^{2+}$  则不利于产氢细菌发酵底物的产氢<sup>[10,17,18]</sup>.

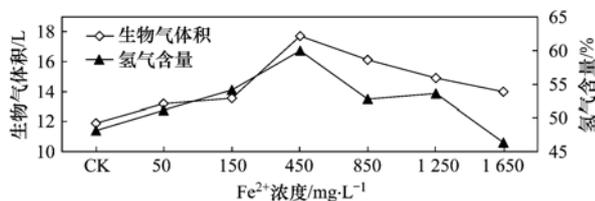


图2  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对生物气体积和氢气含量的影响

Fig. 2 Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration on biogas production and hydrogen percentage

### 2.3 $\text{Fe}^{2+}$ 对 ORP 及出水 pH 值的影响

氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, ORP) 是影响微生物生长繁殖代谢的重要生态因子之一. 在厌氧生物制氢工艺中, 是反映反应体系运行状态的一项关键指标. 各种微生物对 ORP 的要求是不同的<sup>[19,20]</sup>. 图 3 所示为不同  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对 UASB 反应器内部 ORP 的影响情况. 从中可知, 只有在较低的 ORP 下, 厌氧微生物才能够正常生长. 这是由于它们的一些脱氢酶系包括辅酶 I、铁氧还原蛋白和黄素蛋白等只有在低的 ORP 下才能保持活性<sup>[21]</sup>. 此外,  $\text{Fe}^{2+}$  的加入, 直接导致了反应系统 ORP 的提高, 但之后尽管  $\text{Fe}^{2+}$  浓度有大幅度的提高, 也并没有对 ORP 有很大的影响, 一直在  $-390 \text{ mV}$  左右.

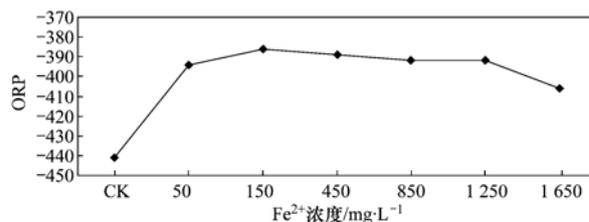


图3  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对 ORP 的影响

Fig. 3 Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration on ORP

pH 值对产甲烷菌的活性影响很大, 也是对厌氧生物制氢过程有重要影响的参数之一, 过高或过低的 pH 值都会影响微生物酶的活性, 不利于微生物的生长和代谢<sup>[22]</sup>. 换句话说, 厌氧生物处理过程就是有机物厌氧消化产甲烷的过程, 在这个过程中有多种微生物参加, 主要有酸性发酵阶段的产氢产乙酸细菌和碱性发酵阶段的产甲烷细菌<sup>[23]</sup>. 不同的厌氧微生物类群的 pH 值范围是不同的<sup>[24]</sup>. 实验过程中, 调节进水 pH 值, 使其一直保持在  $6\sim 7$  之间.  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对出水 pH 值的影响如图 4 所示. 从中可以明显看出, 当有  $\text{Fe}^{2+}$  加入时, 随着发酵反应的进行, 体系中碳水化合物被微生物分解, 出水 pH 值明显下降, 从空白组的  $4.63$  下降到  $4.38$ . 这说明微生物厌氧发酵产氢过程实际上是一种产酸过程. 此后,  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的提高并没有对 pH 值产生显著的影响, 出水 pH 值无明显变化规律, 且基本保持平稳, 波动范围一直上在  $4.24\sim 4.36$  之间.

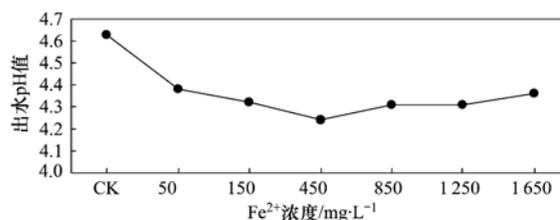


图4  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对出水 pH 值的影响

Fig. 4 Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration on final pH

此外, 根据李建政等<sup>[25]</sup>对不同产酸发酵类型的研究结果, 本实验过程中 ORP 及 pH 值范围基本属于乙醇型发酵类型的生态位.

### 2.4 $\text{Fe}^{2+}$ 对 COD 去除率的影响

发酵法生物制氢的生物反应特性是通过大分子有机物在微生物的作用下水解、发酵进而被转化为小分子物质如挥发酸、氢气和二氧化碳等, 并被合成细胞物质. 虽然产酸相对底物的 COD 去除率不是衡量反应器运行效能的唯一标准, 但也可以起到提供最佳底物种类组成给产甲烷相、提高出水可生

物降解性及具有较高有机物转化率和产酸(醇)比率的作用<sup>[25]</sup>。图 5 所示为不同  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对 COD 去除率的影响情况。从中可以看出,空白组的 COD 去除率就达到了 45.39%,这是因为反应器运行稳定后,体系内的微生物对环境逐渐适应,一直保持着较高的活性。随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加,COD 去除率总体呈下降趋势,这主要是因为反应体系进入产酸产氢阶段,使得 pH 值下降的同时也导致了污泥中微生物活性的降低。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 50~450  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,COD 去除率与空白组相比还较高,且随  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加没有太大变化,平均为 40.34%。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 1 250~1 650  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,COD 去除率相对较低(平均 33.65%),这说明,过高的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度不利于微生物在发酵产氢过程总对底物的降解。

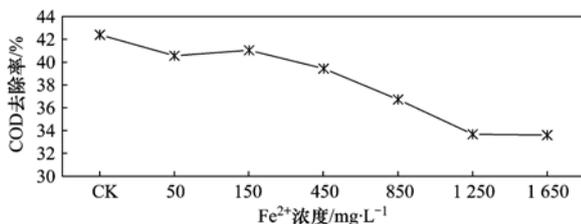


图 5  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对 COD 去除率的影响

Fig. 5 Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration on COD removal percentage

## 2.5 $\text{Fe}^{2+}$ 对液相末端产物的影响

液相末端产物是能够直接反映反应器运行特性的又一重要参数。在厌氧发酵产氢过程中会产生大量挥发性脂肪酸(VFA),而挥发性脂肪酸的组成和含量通常用来监测污泥中微生物的发酵代谢进程,同时还可以初步判断生物制氢反应体系的发酵类型<sup>[26]</sup>。表 1 所示为不同  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对液相末端产物浓度的影响情况。通过对液相末端产物成分的分析,发现主要含有乙醇、乙酸、丙酸和丁酸这 4 种产物。

本研究结果显示,当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度从 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高到 450  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,反应系统内 4 种末端产物的浓度较空白组比较均有小幅度的增加。与此同时,液相末端产物主要含有乙醇和乙酸,呈现出了典型的乙醇型发酵类型。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 850  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,系统内的末端产物并没有明显的优势酸,表现出了一定的混合型发酵的倾向。随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的进一步增加,液相末端产物主要含有乙酸和丁酸,发酵产物产氢的代谢类型也从乙醇型发酵转变为丁酸型发酵类型。这说明, $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加会对液相末端产物的分布情况产生一定的影响,且会使发酵产氢菌的优

势种群发生改变。也就是说, $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加不仅导致了反应系统内代谢途径的改变,还会影响底物发酵的产氢能力。

表 1  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对液相末端产物浓度的影响/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

$\text{Fe}^{2+}$ 浓度	液相末端产物浓度			
	乙醇	乙酸	丙酸	丁酸
CK	890.97	767.25	155.01	314.19
50	1 087.13	803.56	184.76	326.18
150	1 112.12	824.31	222.71	355.93
450	1 163.18	837.25	247.50	374.96
850	763.18	737.25	297.50	724.96
1 250	551.66	806.83	218.42	932.86
1 650	402.57	693.35	170.48	1 139.24

乙醇和乙酸相对应的质量和比例的变化,反映了产氢发酵代谢流的改变,而不表示混合培养过程中发生代谢类型的改变<sup>[27]</sup>。 $\text{Fe}^{2+}$  浓度对乙醇和乙酸含量的影响如图 6 所示。从中可以明显看出,当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,与空白组对比,乙醇含量略有提高,但并不显著,这可能是气体体积的测定误差造成的结果。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度从 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高到 450  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的过程中,乙醇和乙酸含量几乎没有改变,一直保持在 70% 以上。这说明  $\text{Fe}^{2+}$  作为酶活性中心的组成部分,对维持微生物的活性有促进作用,但并不能进一步提高总挥发酸中乙醇和乙酸的含量。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 850  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,乙醇含量出现明显下降。之后,随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加,总挥发酸中乙醇含量继续下降,且当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 1 650  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时下降到最低值 16.73%。由此看出,适当的加入  $\text{Fe}^{2+}$  可以保持污泥中细菌的代谢能力,但过多的  $\text{Fe}^{2+}$  却会降低其代谢能力,并对氢气产量产生深刻的影响。因此, $\text{Fe}^{2+}$  可以作为调控 UASB 反应器厌氧生物制氢的工程措施之一。

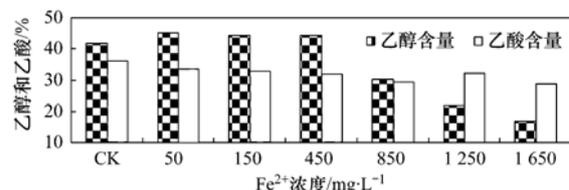


图 6  $\text{Fe}^{2+}$  浓度对乙醇和乙酸含量的影响

Fig. 6 Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  concentration on ethanol and acetic acid percentage

## 3 结论

(1)  $\text{Fe}^{2+}$  浓度在 0~450  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,对产氢能力有明显的促进作用,且当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 450  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

时,生物气体积和氢气含量均达到最高值,分别为 17.72 L 和 60.01%。而在外加  $\text{Fe}^{2+}$  浓度大于  $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,则有下降趋势。

(2)  $\text{Fe}^{2+}$  的加入导致了 ORP 的提高,但一直维持在  $-390 \text{ mV}$  左右。进水 pH 值通过调节在  $6\sim 7$  之间,而出水 pH 值则随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度增加有大幅度下降,但始终保持在  $4.24\sim 4.36$  范围之间。

(3) 随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加,COD 去除率总体呈下降趋势。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $50\sim 450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,COD 去除率没有显著变化,平均保持在 40% 左右。随着微生物代谢活性的降低,当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为  $1250\sim 1650 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,COD 去除率降到 30% 左右。

(4) 液相末端产物主要包括乙醇、乙酸、丙酸和丁酸。随着  $\text{Fe}^{2+}$  浓度的增加,对液相末端产物的组成产生一定影响,从而导致反应系统发酵类型的改变。

(5) 适当加入  $\text{Fe}^{2+}$  可以提高产氢细菌的生物有效性,对乙醇型发酵菌群的产氢能力有明显的促进作用。而过量的  $\text{Fe}^{2+}$  则会降低微生物的代谢活性,从而影响反应体系的发酵产氢能力。

#### 参考文献:

- [1] 宫曼丽,任南琪,邢德峰. 丁酸型发酵生物制氢反应器的运行特性研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(2): 275-278.
- [2] Alessandro S, Stefania C, Roberto F. Effect of the organic loading rate on biogas composition in continuous fermentative hydrogen production[J]. Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2010, **45**(12): 1475-1481.
- [3] Kaparaju P, Serrano M, Angelidaki I. Effect of reactor configuration on biogas production from wheat straw hydrolysate [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(24): 6317-6323.
- [4] 陈文花,叶冰玲. 厌氧发酵制氢的研究现状与发展前景[J]. 环境卫生工程, 2008, **16**(4): 1-3.
- [5] 卢文玉,刘铭辉,陈宇,等. 厌氧发酵法生物制氢的研究现状和发展前景[J]. 中国生物工程杂志, 2006, **26**(7): 99-104.
- [6] Yang H J, Shen J Q. Effect of ferrous iron concentration on anaerobic bio-hydrogen production from soluble starch [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, **31**(15): 2137-2146.
- [7] Junelles A M, Janati-Idrissi R, Petitedmange H, et al. Iron effect on acetone-butanol fermentation[J]. Current Microbiology, 1988, **17**(5): 299-303.
- [8] Debabrata D, Veziroglu T N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature[J]. Hydrogen Energy, 2001, **26**(1): 13-28.
- [9] 林明,任南琪,王爱杰,等. 几种金属离子对高效产氢细菌产氢能力的促进作用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, **35**(2): 147-151.
- [10] 丁杰,任南琪,刘敏,等.  $\text{Fe}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  对混合细菌产氢发酵的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 48-53.
- [11] 曹东福,黄兵,张续春.  $\text{Fe}$  对厌氧发酵生物制氢的影响研究[J]. 江西农业学报, 2007, **19**(4): 86-88.
- [12] 李永峰,陈红,韩伟,等. 零价铁和二价铁离子对发酵产氢效能的影响[J]. 太阳能学报, 2009, **30**(4): 551-557.
- [13] Radjaram B, Saravane R. Start up study of UASB reactor treating press mud for biohydrogen production[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, **35**(7): 2721-2728.
- [14] Wang L, Li Y F, Wang Y X, et al. Biohydrogen production and wastewater treatment by anaerobic fermentation with UASB[A]. In: 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering[C]. Wuhan, 2010. 1683-1686.
- [15] Ren N Q, Chen X L, Zhao D. Control of fermentation types in continuous-flow acidogenic reactors: effects of pH and redox potential[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, **8**(2): 116-119.
- [16] Ren N Q, Wang D Y, Yang C P, et al. Selection and isolation of hydrogen-producing fermentative bacteria with high yield and rate and its bioaugmentation process [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, **35**(7): 2877-2882.
- [17] Lee Y J, Miyahara T, Noike T. Effect of iron concentration on hydrogen fermentation [J]. Bioresource Technology, 2001, **80**(3): 227-231.
- [18] Lay J J, Fan K S, Hwang J I, et al. Factors affecting hydrogen production from food wastes by Clostridium rich composts [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(4): 595-602.
- [19] 赵丹. 产酸相发酵类型控制对策研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998. 39.
- [20] 周群英,王士芬. 环境工程微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 57-58.
- [21] 汤桂兰,汤亲青,黄健,等. 不同底物种类对厌氧发酵产氢的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2345-2349.
- [22] Macarie H, Guyot J P. Use of ferrous sulphate to reduce the redox potential and allow the startup of UASB reactors treating slowly biodegradable compounds: application to a wastewater containing 4 methyl benzoic acid[J]. Environmental Technology, 1995, **16**(12): 11851.
- [23] 戴世明. UASB 及其衍生反应器的运行性能研究[J]. 安全与环境工程, 2010, **17**(5): 17-22.
- [24] 朱金英,杨金国. UASB 反应器的运行管理[J]. 甘肃科技, 2010, **26**(18): 82-84.
- [25] 李建政,任南琪. 产酸相最佳发酵类型工程控制对策[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(5): 398-402.
- [26] Venkata M S, Mohanakrishna G, Veer Raghavulu S. Enhancing biohydrogen production from chemical wastewater treatment in anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBFR) by bioaugmenting with selectively enriched kanamycin resistant anaerobic mixed consortia[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1994, **19**(10): 807-812.
- [27] Lin C Y, Lay C H. Effects of carbonate and phosphate concentrations on hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004, **29**(3): 275-281.

## CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Hui-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, CAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Hui-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrain the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by $\delta$ -MnO <sub>2</sub>	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe <sup>2+</sup> on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr <sup>6+</sup> and Hg <sup>2+</sup>	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp <sup>TM</sup>	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- $\beta$ -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHANG Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

# 《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6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 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