

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 ..... 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 ..... 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 ..... 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM<sub>2.5</sub> 的特征分析 ..... 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> 低温催化还原 NO 性能研究 ..... 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO<sub>2</sub> 吸收和再生特性 ..... 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 ..... 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO<sub>2</sub> 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 ..... 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

# 氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究

王宏杰,董文艺\*,刘莉莎,韩贵超

(哈尔滨工业大学深圳研究生院,深圳市水资源利用与环境污染控制重点实验室,深圳 518055)

**摘要:** 通过小试考察了氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺的可行性. 结果表明,在氯化铁投加量(以铁计)为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下,反硝化污泥通过 14 d 的驯化,可以适应氯化铁的投加,反硝化速率、COD 和  $\text{NO}_3^-$ -N 去除效果与空白反应器无明显差异,同时具有较好的 TP 去除效果,去除率高于 80%. 氯化铁的投加虽然提高了污泥浓度,但由于污泥中无机物比例增加、密度增大,同时污泥粒径变小,使污泥的沉淀性能与空白反应器中的污泥无明显差异,且  $\text{SV}_{30}$  值仅为 22% 左右,小于空白反应器中污泥的 27%. 投加氯化铁后的污泥比阻平均为  $1.5 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远低于空白反应器中污泥的  $40.2 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,浓缩后污泥的体积减少和比阻的降低有利于污泥的后续处理.

**关键词:** 氯化铁; 反硝化; 化学生物絮凝; 出水水质; 污泥性质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1897-05

## Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process

WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, HAN Gui-chao

(Shenzhen Key Laboratory of Water Resource Application and Environmental Pollution Control, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** The efficiency of iron chloride on simultaneous denitrification and chemical-biological flocculation process was investigated through a lab-scale study. The results showed that: there were not significant differences in the denitrification rate, COD and  $\text{NO}_3^-$ -N removal efficiency between the control reactor and the denitrification reactor with the dosage of  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  Fe after 14 days' domestication. Meanwhile the TP removal efficiency was increased to over 80%. Though sludge concentration was increased by adding  $\text{FeCl}_3$ , the settling performance wasn't change because the sludge density was increased and the particle size was reduced. The sludge settling volume ( $\text{SV}_{30}$ ) and specific resistance of filtration (SRF) after adding  $\text{FeCl}_3$  were only 22% and  $1.5 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ , which were lower than the values in the control reactor and benefit for sludge treatment.

**Key words:** iron chloride; denitrification; chemical-biological flocculation; effluent quality; sludge characteristics

目前,污水处理过程中除磷方法主要有生物法和化学法. 生物法处理成本较低、产泥量少,但受影响因素较多<sup>[1-6]</sup>,包括 DO、有机物浓度及组成、pH 值、硝酸盐氮浓度、温度、污泥龄等,尤其当水质波动较大时,单独的生物法往往很难达到稳定有效的除磷效果. 同时,生物除磷过程中产生的富磷污泥在后续处理过程中会产生一定量的高含磷废水,这些废水回到生物处理系统后,增加了系统生物除磷负荷<sup>[7,8]</sup>. 并且,有些生物处理工艺,如曝气生物滤池工艺,因无生物除磷所需的厌氧好氧交替环境,需结合化学除磷方法才能保证出水总磷达标<sup>[9]</sup>.

化学法的除磷效率高于生物法,且操作简单、稳定可靠<sup>[10]</sup>. 按在工艺流程中化学药剂投加的位置可分为前置除磷、协同除磷和后置除磷<sup>[11]</sup>. 协同除磷法也称之为化学生物絮凝工艺,该工艺是将化学混凝剂投加到活性污泥生化处理段,一般投加到生化池的首端或末端. 该方法因具有运行方便、占地面

积小、相对产泥量少、污泥沉降效果好、处理效果稳定等优点<sup>[12-15]</sup>而被广泛使用,在国外约占所有化学除磷工艺的 50%.

目前化学生物絮凝工艺的研究和应用主要集中在药剂与好氧生物段的联合使用<sup>[16-19]</sup>,但与缺氧段的联合使用尚鲜见相关报道. 同时,部分研究仅基于烧杯试验,缺乏长期的运行效果,无法体现微生物的适应性. 本研究通过连续运行,考察三氯化铁用于反硝化同步生物化学絮凝工艺的可行性,以为该工艺的推广应用提供良好的借鉴.

### 1 材料与方法

#### 1.1 原水和除磷药剂

收稿日期: 2011-08-16; 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-02)

作者简介: 王宏杰(1983~),男,博士后,主要研究方向为污水资源化技术, E-mail: whj1533@yahoo.com.cn

\* 通讯联系人, E-mail: dwy1967@yahoo.com.cn

### 1.1.1 原水

试验过程中原水为人工配水,母液由甲醇、硝酸钾和磷酸二氢钾配制而成,每次换水后加入一定量的母液。

### 1.1.2 除磷药剂

试验过程中选用的除磷药剂为氯化铁,相比于铝盐,具有产生的污泥密度大、沉降性能好、对微生物影响小等优点。

## 1.2 试验过程

试验采用 2 个 SBR 反应器进行平行试验,其中 1 号反应器为空白反应器,在运行过程中不投加化学除磷药剂,2 号反应器运行过程中投加氯化铁。两反应器的有效体积均为 18 L,每天换水 2 次,每个运行周期为 12 h。每一周期具体运行过程如下:加入营养液母液和自来水至反应器刻度线并搅拌 1 min,加入氯化铁溶液(稀释后浓度为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,以铁计,空白不加)并搅拌反应 9 h。静沉 0.5 h,排去上清液,再加自来水至反应器刻度线,再静沉 0.5 h,排去上清液,如此循环 5 个周期,以减少反应器中残余营养物的积累。反应器定期排泥,保持污泥龄为 18 d,试验过程中水温为  $28^\circ\text{C}$  左右。

原水为加入营养液至反应器刻度线并搅拌 1 min 后取的混合液的上清液,出水及污泥的样品为搅拌反应 9 h 后取的混合液。

## 1.3 检测方法

试验中的常规水质分析方法参照文献[20]进行。COD 采用重铬酸钾密闭消解法;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  采用紫外分光光度法;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; TP 采用钼锑抗分光光度法; MLSS 和 MLVSS 采用滤纸重量法; 碱度采用电位滴定法测定。

污泥沉降性能测定方法如下:量取 100 mL 污泥,记录不同时间条件下的污泥体积;污泥比阻的测定采用布氏漏斗试验法<sup>[21]</sup>;污泥粒径分布采用 Microtrac S3500 激光粒度分析仪测定;污泥的微观形态采用数码显微镜(IX71,日本奥林巴斯)观察拍照。

反硝化速率测定:取 1L 泥水混合液,加入一定量营养液,使原水中的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,采用磁力搅拌器搅拌,隔一定时间取样分析其中的  $\text{NO}_x^- - \text{N}$  ( $\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N}$ ) 含量。根据不同时刻测得  $\text{NO}_x^- - \text{N}$  含量,绘制其与反应时间的变化规律,通过计算斜率并除以混合液 MLVSS 含量即可得反硝化速率。

EPS 的提取和测定:取适量污泥离心 ( $6000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 20 min) 后弃去上清液,以超纯水补足体积,混合后将污泥样品于 21 kHz, 40 W 下超声 2 min,然后加盖密封后于  $80^\circ\text{C}$  水浴提取 30 min,取出混合均匀后离心 ( $6000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 30 min),取离心后的上清液通过  $0.22 \mu\text{m}$  微孔滤膜过滤,滤液即为 EPS 样品。蛋白质测定采用考马斯亮蓝法,多糖采用蒽酮比色法测定<sup>[22]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氯化铁投加对反硝化速率的影响

投加氯化铁对反硝化速率的影响如图 1 所示。

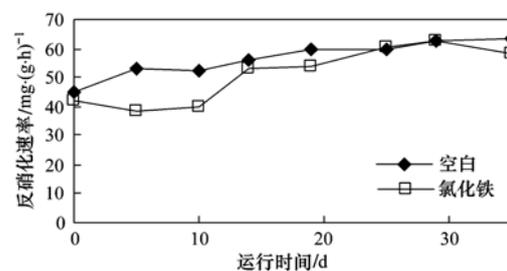


图 1 投加氯化铁对反硝化速率的影响

Fig. 1 Effect of ferric chloride on denitrification rate

由图 1 可知,在运行前 10 d,氯化铁的投加对污泥的反硝化速率有一定的抑制作用,空白反应器中单位质量活性污泥的反硝化速率平均为  $50.0 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ,而投加氯化铁的反应器中单位质量活性污泥的反硝化速率仅为  $39.2 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。在运行至第 14 d 以后,两反应器的污泥活性基本一致,反硝化速率在  $55 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$  左右。由此可知,虽然铁盐的投加在运行初期对反硝化有一定的抑制作用,但通过一段时间的驯化可以使反硝化菌适应氯化铁的投加。

### 2.2 氯化铁投加对出水水质的影响

投加氯化铁对出水水质的影响如表 1 所示。

表 1 投加氯化铁对出水水质的影响

Table 1 Effect of ferric chloride on effluent

参数	原水	空白反应器出水	投加氯化铁反应器出水
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	239.8	41.1	45.8
$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	41.65	0.18	0.10
pH 值	7.13	7.83	7.38
碱度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	90	253	212
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.93	4.54	0.92

由表 1 可知,与空白反应器相比,投加氯化铁对反应器去除 COD 和脱氮无明显影响,在原水 COD 和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  分别为  $239.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $41.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的

条件下,有无投加氯化铁反应器对 COD 的去除率均高于 80%,对  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除率均高于 99%,可见 2 个反应器的反硝化均进行得非常彻底。

由于反硝化作用,两反应器出水的碱度(以  $\text{CaCO}_3$  计)和 pH 值较原水均有一定程度的提高:空白反应器中的出水碱度由原水的  $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加至  $253 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而 pH 值由原水的 7.13 增加至 7.83;而投加氯化铁的反应器中,由于铁离子除与磷酸根形成磷酸铁沉淀外,还会与  $\text{OH}^-$  或  $\text{HCO}_3^-$  反应形成多核羟基络合物<sup>[23]</sup>,这些反应的存在会消耗一定的碱度,因此,出水中的碱度和 pH 均低于空白反应器。

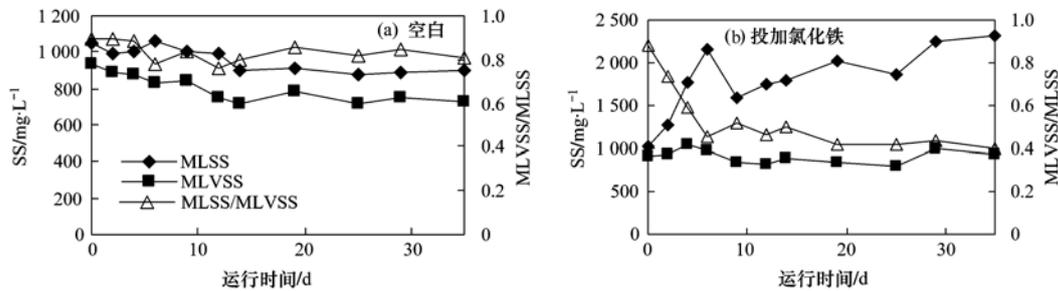
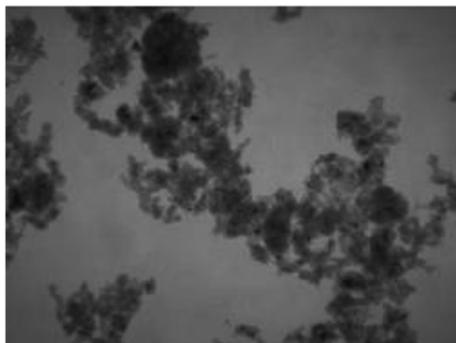


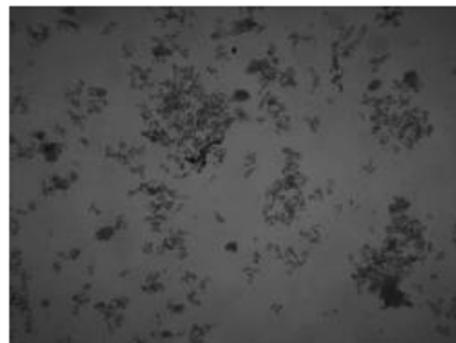
图 2 投加三氯化铁对污泥浓度的影响

Fig. 2 Effect of ferric chloride on sludge concentration

由图 2 可知,对于空白反应器,MLSS 浓度维持在  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,MLVSS 浓度在  $800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,MLVSS/MLSS 为 0.8 左右。而对于投加氯化铁的反应器,MLVSS 浓度略高于空白反应器,在  $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,而无机物的积累,使 MLSS 浓度由初期的  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右增加  $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,MLVSS/MLSS 降至 0.4 左右。



(a) 空白



(b) 投加氯化铁

图 3 两反应器中污泥的照片(40 倍,运行 30 d 后)

Fig. 3 Pictures of sludge by two reactors ( $\times 40$ , after 30 d operation)

### 2.3.3 沉降性能

两反应器中污泥沉降性能随运行时间的变化如图 5 所示。

由图 5 可知,两反应器中污泥沉降速度基本一

致,在 5 min 左右完成受阻沉降阶段,10 min 左右完成过渡沉降阶段,而在剩余时间内进行压缩沉降。而沉淀 30 min 后的污泥体积,对于空白反应器,随运行时间基本上无明显变化, $\text{SV}_{30}$  为 27% 左右,而投加

### 2.3 氯化铁投加对污泥性质的影响

#### 2.3.1 污泥浓度

药剂的投加会影响污泥浓度,包括污泥中无机物的比例,两反应器中的污泥浓度随运行时间的变化如图 2 所示。

#### 2.3.2 污泥粒径

两反应器中污泥的显微镜照片如图 3 所示,粒径分布如图 4 所示。可以看出,投加氯化铁后的污泥絮体粒径较小, $d_{50}$  仅为  $12.38 \mu\text{m}$ ,远小于未投加药剂条件下的  $72.27 \mu\text{m}$ 。这主要是由于投加氯化铁的反应器中的污泥形成的絮体被打碎后较难重新凝聚。

致,在 5 min 左右完成受阻沉降阶段,10 min 左右完成过渡沉降阶段,而在剩余时间内进行压缩沉降。而沉淀 30 min 后的污泥体积,对于空白反应器,随运行时间基本上无明显变化, $\text{SV}_{30}$  为 27% 左右,而投加

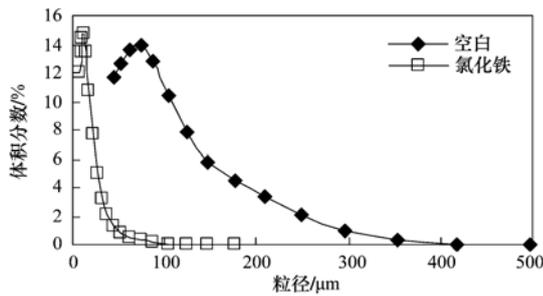


图 4 两反应器中污泥的粒径分布(运行 30 d 后)

Fig. 4 Sludge particle size distribution by two reactors (after 30 d operation)

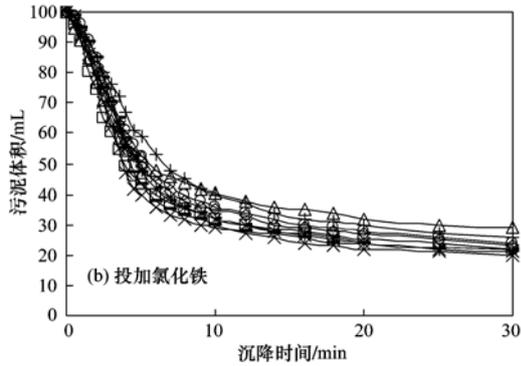
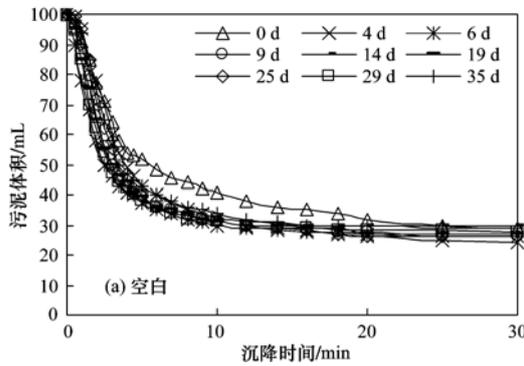


图 5 三氯化铁对污泥沉降性能的影响

Fig. 5 Effect of ferric chloride on sludge sedimentation performance

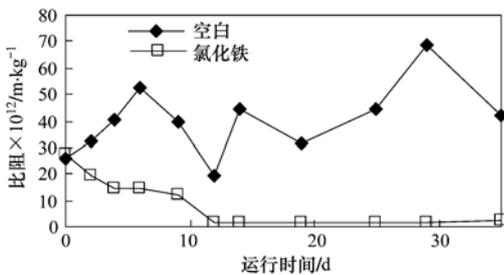


图 6 三氯化铁对污泥比阻的影响

Fig. 6 Effect of ferric chloride on sludge specific resistance of filtration

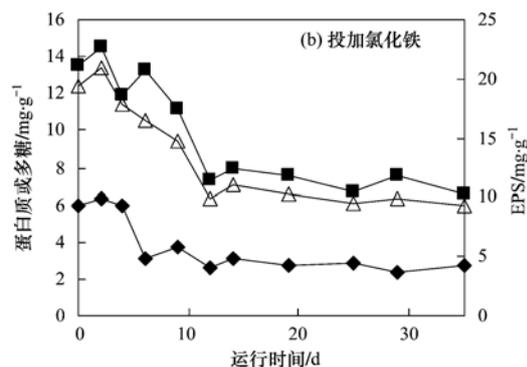
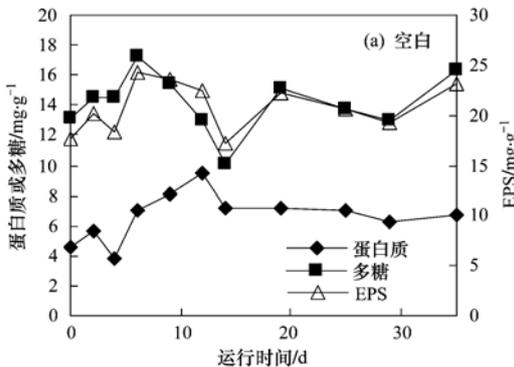


图 7 三氯化铁对污泥中 EPS 含量的影响

Fig. 7 Effect of ferric chloride on sludge EPS concentration

氯化铁的反应器,其  $SV_{30}$  在运行初期逐渐减少,运行 9 d 以后平均值仅为 22%。可见,虽然投加氯化铁后的污泥浓度增加,但由于无机物含量增加,污泥密度变大,同时絮体直径变小,沉淀后的污泥更加密实,沉淀后污泥体积要小于空白反应器中的污泥体积,这将有利于污泥的后续处理。

### 2.3.4 脱水性能

污泥的脱水性能常用比阻来表示,该参数能非常准确地反映出污泥的真空过滤脱水性能,也能较准确地反映出污泥的压滤脱水性能。两反应器中沉淀 30 min 后的污泥的比阻随运行时间的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,空白反应器中的污泥比阻长期处于较高值,平均值为  $40.2 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而投加氯化铁的污泥,其比阻随运行时间的延长而降低,在运行至第 12 d 后,比阻降至  $2 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下,平均比阻为  $1.5 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这表明投加氯化铁后的污泥更易脱水,有利于后续的污泥处理。

有研究表明<sup>[24,25]</sup>,污泥的 EPS 含量与脱水性能有一定的关系,EPS 含量越低,污泥脱水性能越好。两反应器中污泥 EPS 含量如图 7 所示。

由图 7 可知,空白反应器中污泥的蛋白质、多糖

和 EPS 含量均高于投加氯化铁的反应器中的污泥, 空白反应器中污泥(以 MLVSS 计, 下同)的蛋白质、多糖和 EPS 含量分别为 6.65、14.17 和 20.82  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 而投加氯化铁的污泥(运行 12 d 以后)中的蛋白质、多糖和 EPS 的含量分别仅为 2.73、7.26 和 9.99  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . EPS 含量的降低有利于污泥后续脱水处理.

### 3 结论

(1) 氯化铁的投加对反硝化去除 COD 和脱氮无明显影响, 出水 COD 低于 50  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度仅为 0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 与空白反应器接近; 但氯化铁的投加能提高磷的去除效果, 在投加量(以铁计)为 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下, TP 去除率高于 80%, 出水 TP 低于 1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 远优于空白反应器.

(2) 氯化铁的投加对反硝化速率有一定的抑制作用, 但通过 14 d 左右的驯化, 可使反硝化速率与空白反应器接近, 单位质量活性污泥的平均反硝化速率为 55  $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ .

(3) 氯化铁的投加会使污泥浓度增加, 但由于污泥粒径变小、密度变大, 使污泥沉降 30 min 后的体积小于空白反应器中的污泥, 且 2 种污泥的沉淀性能基本一致.

(4) 氯化铁的投加使污泥中 EPS 的含量减少, 有利于提高污泥脱水性能, 投加氯化铁的污泥比阻平均为  $1.5 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远低于空白反应器中污泥的  $40.2 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 参考文献:

- [ 1 ] Brdjanovic D, Slamet A, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Impact of excessive aeration on biological phosphorus removal from wastewater [J]. *Water Research*, 1998, **32**(1): 200-208.
- [ 2 ] Pijuan M, Saunders A M, Guisasaola A, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor using propionate as the sole carbon source [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **85**(1): 56-67.
- [ 3 ] Randall A A, Liu Y H. Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2002, **36**(14): 3473-3478.
- [ 4 ] 李勇智, 彭永臻, 张艳萍, 等. 硝酸盐浓度及投加方式对反硝化除磷的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2003, **25**(6): 323-325.
- [ 5 ] Panswada T, Doungchaia A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Water Research*, 2003, **37**(2): 409-415.
- [ 6 ] 郭绣, 孙洪伟. 生物除磷主要影响因素的研究 [J]. *水处理技术*, 2008, **34**(9): 7-10.
- [ 7 ] 王莉, 杨永哲, 李林辉, 等. 富磷剩余污泥重力浓缩过程中各参数的变化特征 [J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(1): 37-40.
- [ 8 ] 毕东苏, 郭小品, 陆烽. 富磷剩余污泥厌氧消化过程中的水解与生物释磷机制 [J]. *环境科学学报*, 2002, **30**(12): 2445-2449.
- [ 9 ] Clark T, Stephenson T, Pearce P A. Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter [J]. *Water Research*, 1997, **31**(10): 2557-2563.
- [ 10 ] 邱维, 张智. 城市污水化学除磷的探讨 [J]. *重庆环境科学*, 2002, **24**(2): 81-84.
- [ 11 ] 郑俊, 吴浩汀. 曝气生物滤池工艺的理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 30.
- [ 12 ] De Haas D W, Wentzel M C, Ekama G A. The use of simultaneous chemical precipitation in modified activated sludge systems exhibiting biological excess phosphate removal. Part 1: literature review [J]. *Water SA*, 2000, **26**(4): 439-452.
- [ 13 ] 郑兴灿, 张悦, 陈立. 化学-生物联合絮凝的污水强化一级处理工艺 [J]. *中国给水排水*, 2000, **16**(7): 29-32.
- [ 14 ] 饶应福, 夏四清, 陈轶波, 等. 化学生物絮凝工艺污染物去除试验研究 [J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(1): 10-12.
- [ 15 ] Qiu L P, Ma J, Zhang L X. Characteristics and utilization of biologically aerated filter backwashed sludge [J]. *Desalination*, 2007, **208**(1-3): 73-80.
- [ 16 ] 张志斌, 赵建夫, 夏四清, 等. 化学生物絮凝工艺的反应机理初探 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 993-996.
- [ 17 ] 张志斌, 赵建夫, 夏四清, 等. 化学生物絮凝工艺污泥回流对污染物的絮凝效果研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 840-844.
- [ 18 ] 黄天寅, 夏四清. 化学生物絮凝强化一级处理工艺的影响因素研究 [J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(7): 19-21, 26.
- [ 19 ] Zhang Z B, Zhao J F, Xia S Q, *et al.* Particle size distribution and removal by a chemical-biological flocculation process [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(5): 559-563.
- [ 20 ] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 21 ] 涂玉. 污泥调理中混凝剂对污泥脱水性能影响研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2008. 20-23.
- [ 22 ] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 137-244.
- [ 23 ] 邢伟, 黄文敏, 李敦海, 等. 铁盐除磷技术机理及铁盐混凝剂的研究进展 [J]. *给水排水*, 2006, **32**(2): 88-91.
- [ 24 ] Tian Y, Zheng L, Sun D Z. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(3): 420-427.
- [ 25 ] Sanin F D, Vesilind P A. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(8): 117-127.

## CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China .....	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed .....	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current .....	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions .....	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater .....	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

# 《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6月15日 33卷 第6期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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