

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

硫自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析

张超¹, 陶华强², 宋圆圆², 逯彩彩², 郭延凯¹, 廉静¹, 郭建博^{2*}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018; 2. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘要: 采用硫自养填充床反应器处理模拟高浓度高氯酸盐(ClO_4^-)污染水, 考察不同进水 ClO_4^- 浓度及水力停留时间(HRT)下的 ClO_4^- 降解特性. 结果表明, HRT 为 12 h 时, 进水 ClO_4^- 浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ClO_4^- 能被完全降解; 进水 ClO_4^- 浓度为 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, HRT 由 12 h 减少至 4 h 时, ClO_4^- 去除率仅为 74%; SO_4^{2-} 的产量随着进水 ClO_4^- 浓度与 HRT 的增加而增加; 进水 pH 和碱度(以 CaCO_3 计)分别为 8.0 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 pH 和碱度(以 CaCO_3 计)分别为 6.7 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 反应器底部氧化还原电位(ORP)稳定在 $-380 \sim -330 \text{ mV}$, 反应器上部氧化还原电位(ORP)稳定在 $-300 \sim -250 \text{ mV}$. 分子生物学分析表明, 反应器内的菌群结构随高度的变化而变化, 硫氧化菌 *Sulfurovum* 随反应器高度的增加而减少, 由底部 57.78% 减少到上部的 32.19%, 同时硫化氢氧化菌 *Hydrogenophilaceae* 随反应器高度的增加而增加, 由底部 4.35% 增加到上部的 22.24%.

关键词: 硫自养; 高氯酸盐; 水力停留时间(HRT); 氧化还原电位(ORP); 菌群分析

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0247-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607010

Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration

ZHANG Chao¹, TAO Hua-qiang², SONG Yuan-yuan², LU Cai-cai², GUO Yan-kai¹, LIAN Jing¹, GUO Jian-bo^{2*}

(1. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environment Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The effects of perchlorate concentration and hydraulic retention time (HRT) on perchlorate reduction characteristics were investigated in a sulfur-based perchlorate reduction reactor. The results showed that the perchlorate was completely removed at HRT of 12 h and the influent perchlorate concentration ranged from $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; The perchlorate removal efficiency was 74% at HRT of 4 h and the influent perchlorate concentration was $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; The yield of sulfate was increased by increasing the influent perchlorate concentration and HRT; The influent pH and alkalinity was approximately 8.0 and $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, and the effluent pH and alkalinity was approximately 6.7 and $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, respectively; The oxidation reduction potential (ORP) ranged from -380 mV to -330 mV at the bottom of the reactor, however, ORP ranged from -300 mV to -250 mV at the top of the reactor; The molecular biological analysis showed that the microbial consortium structure was different along the flow path in the reactor, *Sulfurovum* which is known to oxidize sulfur was decreased from 57.78% to 32.19% and *Hydrogenophilaceae* which is known to oxidize hydrogen sulfide was increased from 4.35% to 22.24%.

Key words: sulfur autotrophic; perchlorate; hydraulic retention time (HRT); oxidation reduction potential (ORP); consortium structure analysis

近些年,地表水和地下水中的高氯酸盐(ClO_4^-)污染已成为十分严峻的问题^[1,2]. ClO_4^- 能抑制甲状腺对碘离子的吸收从而影响人体的健康^[3,4], 因此, ClO_4^- 污染问题逐渐得到广泛关注. 由于 ClO_4^- 具有非挥发性、强稳定性、高溶解性等特点,一般的物理化学法很难将其彻底去除,并且耗资大^[5~7]. 生物法因其较彻底,成本低,成为最受关注的处理 ClO_4^- 废水的方法之一^[8,9]. 生物法分为异养生物法

和自养生物法,其中异养生物法以有机物为电子供体,污泥产量高,易造成二次污染;而自养生物法以

收稿日期: 2016-07-02; 修订日期: 2016-08-18

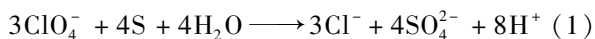
基金项目: 河北省应用基础研究计划项目(12966739D); 河北省杰出青年基金项目(E2012208012); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划项目(BR2-211); 国家自然科学基金项目(51678387)

作者简介: 张超(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: 15690327278@163.com

* 通信作者, E-mail: jianbguo@163.com

无机物作为电子供体,从而避免了这些问题^[10,12].

自养还原 ClO_4^- 所需电子供体通常是氢气、还原态硫(S^{2-} 、 S^0 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)、零价铁等无机物^[13~18],因硫颗粒微溶于水,具有来源广泛、价格低廉等优点成为自养法降解 ClO_4^- 的研究热点^[13,15]. 硫自养还原 ClO_4^- 的理论反应如式(1)所示^[15]:



微生物以硫颗粒作为电子供体,以 ClO_4^- 作为电子受体,最终将 ClO_4^- 完全转化为无毒无害的 Cl^- 同时产生副产物 SO_4^{2-} ^[19,20].

2007 年 Ju 等^[10]通过首次研究了硫颗粒作为电子供体自养还原 ClO_4^- 的可行性,同时分析了 SO_4^{2-} 实际产量高于理论产量的原因是由于硫歧化的发生. 目前许多研究者都是利用硫自养反应器降解低浓度的 ClO_4^- 废水. 如 2009 年 Gao 等^[21]利用硫自养反应器将 ClO_4^- 浓度为 $4 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的废水降至 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 2011 年 Boles 等^[16]利用硫自养反应器进行了中试规模的实验,将 ClO_4^- 浓度为 $12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的废水降至 $15 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 除此之外,利用硫自养反应器进行污染物如 ClO_4^- 、 NO_3^- 等的降解时,最大的问题就是出水 SO_4^{2-} 浓度过高^[21,22].

尽管近年来对于硫自养填充床反应器降解 ClO_4^- 的研究已逐渐成熟,但目前对于硫自养反应器处理高浓度 ClO_4^- 废水,和如何控制硫自养反应器出水 SO_4^{2-} 过高的问题还没有很好的解决方案. 基于以上研究背景,本文以硫自养填充床反应器降解 ClO_4^- 为体系,通过改变进水 ClO_4^- 浓度和 HRT,着重考察硫自养反应器去除 ClO_4^- 的效率、 SO_4^{2-} 的产率及反应过程中 pH 及碱度的消耗量,同时对反应器内菌群结构进行分析,进一步考察其降解 ClO_4^- 的规律,以期为该技术的实际应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验所用硫自养 ClO_4^- 还原反应器为升流式固定床反应器,图 1 为实验装置. 反应器内径为 10 cm,有效高度为 45 cm,材质为有机玻璃. 反应器内填充载体为硫单质和石英砂($V_{\text{硫}}:V_{\text{砂}}=2:1$),装填体积为 3.6 L. 硫颗粒和石英砂粒径均为 2~3 mm,反应器内孔隙率为 0.4,反应器有 4 个不同高度的出水口,分别为出水口 1(60 mm),出水口 2(180 mm),出水口 3(300 mm),出水口 4(390 mm),菌群

结构分析所取泥样分别来自取样口 1(60 mm)和取样口 3(300 mm).

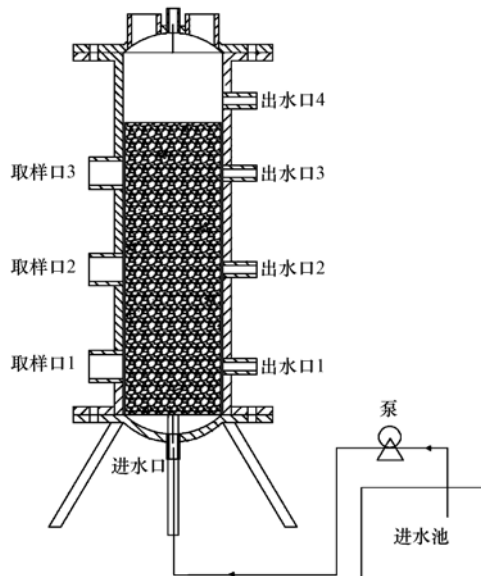


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

1.2 实验材料

本实验采用的活性污泥取自石家庄市桥西污水处理厂二次沉淀池,将污泥沉降半小时,取沉降后的污泥与按比例混匀的硫和石英砂混匀,直接填充至反应器内,测得此时的污泥量(以 SS 计)为 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 然后开始间歇式驯化挂膜 7 d(先进水后停滞 12 h,然后连续运行 12 h,依次重复 7 d),开始连续进水. 采用人工模拟高浓度 ClO_4^- 地下水,反应器进水均用自来水配制,其主要成分: $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $1.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; NH_4Cl , $0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; NaClO_4 , $0.14 \sim 0.27 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (在不同阶段 ClO_4^- 的浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 微量元素为 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$. 微量元素培养基的组成: EDTA, $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; CaCl_2 , $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 运行条件

实验运行调控参数如表 1,前 4 个阶段水力停留时间(HRT)为 12 h, ClO_4^- 的浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 依次增加到 100、150、194 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后 ClO_4^- 浓度稳定在 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,减少 HRT 分别为 9 h 和 4 h,共分为 6 个阶段. 每个阶段内,定时监测进出水各离子浓度、pH 值和碱度等指标,待出水 ClO_4^- 浓度连续

4 d 去除率在 96% 以上, 则改变条件开展下一阶段的实验.

表 1 运行调控参数
Table 1 Operation control parameters

阶段	I	II	III	IV	V	VI
时间/d	1 ~ 25	26 ~ 37	38 ~ 51	52 ~ 61	62 ~ 89	90 ~ 116
$\text{ClO}_4^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	50	100	150	194	194	194
流量/ $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$	300	300	300	300	400	900
HRT/h	12	12	12	12	9	4
ClO_4^- 负荷/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	4. 17	8. 33	12. 5	16. 17	21. 56	48. 5

1.4 分析方法

ClO_4^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 S^{2-} 都用离子色谱 (Dionex 1100) 进行测定, 所用分析柱为 AS20 (4 mm × 250 mm) 和保护柱 AG20 (4 mm × 50 mm). 采用梯度淋洗的方法, 淋洗液为 KOH, (0 ~ 10 min 为 15 mmol·L⁻¹ 淋洗, 10 ~ 21 min 为 40 mmol·L⁻¹ 淋洗), 淋洗液流速 1.0 mL·min⁻¹, 柱温 30℃. 反应器不同位置的菌群结构基于 16S rDNA 基因的 V3-V4 区 DNA 序列 PCR 扩增与高通量测序技术进行分析, 其中测试的序列数分别为 1361 (反应器上部菌群结构) 和 1498 (反应器下部菌群结构) (上海生工生物工程有限公司); pH 使用 PHS225C 型数字酸度计进行测定; 氧化还原电位 (ORP) 使用 ORP 计进行测定; 碱度采用标准方法进行测定^[23].

2 结果与讨论

2.1 硫自养反应器高氯酸盐的去除及硫酸盐的产生

反应器在运行期间 ClO_4^- 的去除效果及 SO_4^{2-} 的产生量如图 2 所示. 反应器在运行的前 4 个阶段 HRT 为 12 h, 主要考察进水 ClO_4^- 的浓度分别为 50、100、150 和 194 mg·L⁻¹ 时对反应器降解 ClO_4^- 及生成 SO_4^{2-} 的影响; 反应器运行的第 IV、V、VI 阶段主要考察在进水 ClO_4^- 浓度为 194 mg·L⁻¹ 时, HRT 分别为 12、9、4 h 时反应器降解 ClO_4^- 及生成 SO_4^{2-} 的影响.

反应器在运行的前 5 个阶段分别在第 23、33、48、58 和 85 d 时 ClO_4^- 的去除率达到了 100%; 第 VI 阶段, HRT 减少为 4 h, 进水 ClO_4^- 浓度 194 mg·L⁻¹, ClO_4^- 的去除率最终稳定在 72% 左右. 以上结果表明, 在维持较长的 HRT 条件下, 进水 ClO_4^- 的浓度增加至 194 mg·L⁻¹ 时, ClO_4^- 的去除率并不会受太大影响, 然而减少 HRT, 降低了 ClO_4^- 传递至生物膜内的时间, 导致 ClO_4^- 的去除率受到了较大影响, 所以传质是限制 ClO_4^- 降解速率的主要原

因^[10]. Sahinkaya 等^[22] 研究表明较高的上升流速会限制硫的溶解从而影响了硫自养的降解效率.

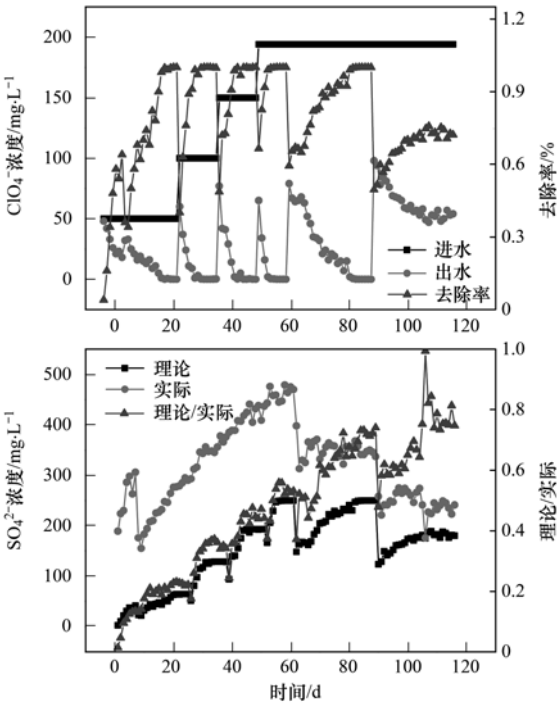


图 2 硫自养反应器运行过程中高氯酸盐及硫酸盐的变化
Fig. 2 Perchlorate and sulfate concentration variations during operation of the sulfur-based reactor

随着进水 ClO_4^- 浓度的增加, SO_4^{2-} 的产生量也在增加, 进水 ClO_4^- 浓度为 194 mg·L⁻¹ 时, 由反应方程式 (1) 得对应的理论 SO_4^{2-} 的量 250 mg·L⁻¹ (国家饮用水标准), 而实际产生的 SO_4^{2-} 的量高达 500 mg·L⁻¹. 万东锦等^[24] 的研究表明在缺溶解氧及缺少电子受体的条件下, 硫颗粒上的歧化菌即会发生歧化反应. Ju 等^[10] 通过序批式实验观察到了硫自养 ClO_4^- 还原过程中存在着硫歧化反应. 当进水 ClO_4^- 的浓度为 194 mg·L⁻¹, HRT 由 12 h 减少到 4 h 时, 由图 2 可得, 出水 SO_4^{2-} 的量由 500 mg·L⁻¹ 减少到 250 mg·L⁻¹. 其原因可能是进水流速增加抑制了硫歧化细菌的生长, 并且在较快的水力冲刷速度下

减少了硫歧化的反应时间^[10]. 同时由图 2 可得理论产生 SO_4^{2-} 的量与实际产生 SO_4^{2-} 的量的比值随着进水 ClO_4^- 浓度的增加而增加, 硫的利用率也在增加. 结果表明, 增加进水 ClO_4^- 浓度及减少 HRT 都会提高硫的利用率, 但当上升流速过快时, 由于 ClO_4^- 的去除率低, 对 SO_4^{2-} 的产量影响较大.

2.2 pH 和碱度的变化

如图 3 所示, 反应器的进水 pH 稳定在 8.0 左右, 出水 pH 稳定在 6.5~7.0 之间, 反应方程式(1)表明硫自养降解 ClO_4^- 是一个产酸的反应, 1 mol 的 ClO_4^- 产生 2.66 mol 氢质子. 在前 4 个阶段, 碱度消耗随着进水 ClO_4^- 浓度的增加而增加, 进水 ClO_4^- 浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对应的 pH 变化不大, 并且稳定在 6.7 左右, 同时碱度(以 CaCO_3 计)消耗由 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在后 3 个阶段, HRT 对出水 pH 波动较大, 并且随着 HRT 的减少而增加, 碱度消耗量随着 HRT 的减少而降低. 进水 ClO_4^- 浓度为 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 当 HRT 由 12 h 减少到 4 h 时, 碱度(以 CaCO_3 计)消耗由 $450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少到 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Sahinkaya 等^[22]研究表明硫自养降解过程中会有硫歧化的发生, 该反应是一个产酸的反应. 在缺溶解氧、缺少电子受体的条件下, 会发生硫歧化反应, 增加上升流速, 抑制了硫

歧化菌的增长, 缩短了硫歧化的反应时间, 即减少了硫歧化反应的发生, 同时减少了酸的产生量, 也减少了碱度消耗^[8,21]. 结果表明, 碱度消耗量随进水 ClO_4^- 浓度的增加而增加, 随 HRT 的减少而减少.

2.3 硫自养反应器内 ORP 的变化

ORP 的变化与反应器体系内的反应相关, 所以通过检测反应器内不同位置的 ORP 能够间接地反映反应器不同位置所发生的反应^[25]. 通过检测不同位置 ORP、出水 SO_4^{2-} 和 ClO_4^- 浓度的变化, 来表征反应器内不同位置主反应的变化, 同时对反应器的不同位置进行菌群结构分析.

如图 4 所示, 反应器下部(距反应器底部 60 mm), 在运行第 10 d 的时候基本稳定在 -380 mV , 并且随进水 ClO_4^- 浓度的变化并没有太大变化, 但当 HRT 为 9 h 和 4 h 时, ORP 分别为 -360 mV 和 -330 mV . 溶解氧的减少会导致 ORP 的降低^[26], 减少 HRT 即增加进水流速, 导致进水溶解氧的消耗减慢, 从而使 ORP 增加. 反应器上部(距反应器底部 300 mm)的 ORP 随着驯化时间的增加, 由反应器最开始的 -370 mV 增加到 -260 mV , 由此可得, 反应器上部发生的主体反应在发生变化, 同时反应器下部和反应器上部的菌群结构在发生变化.

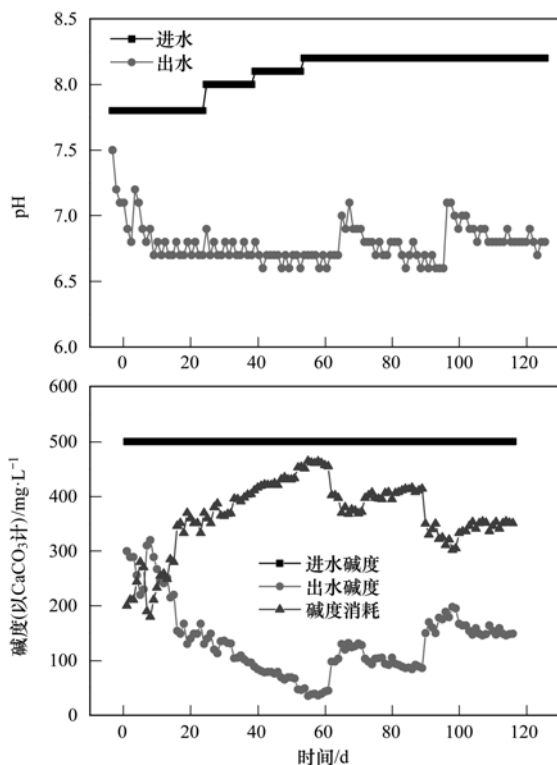


图 3 硫自养反应器中 pH 及碱度的变化

Fig. 3 Variations of pH and alkalinity in the sulfur-based reactor

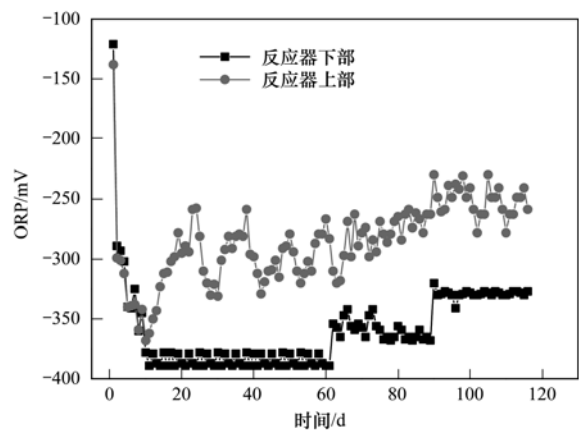


图 4 硫自养反应器中 ORP 的变化

Fig. 4 Variations of ORP in the sulfur-based reactor

如图 5 所示, 在反应器的不同出水高度进行取样测定, 在前 4 个阶段中, ClO_4^- 在距反应器底部 300 mm 的高度时就已经降解完全, 且在距反应器底部 390 mm 的高度中 SO_4^{2-} 的产生量并不会随着 ClO_4^- 已经降解完全而减少, 说明在反应器的上部发生的是其他的副反应如硫歧化反应^[16]. 为了进一步分析硫自养反应器内不同位置发生的不同反应, 从反应器上部和下部中分别采样进行菌群结构分析, 如图 6 所示, 实验结果展示了属水平菌群分布随

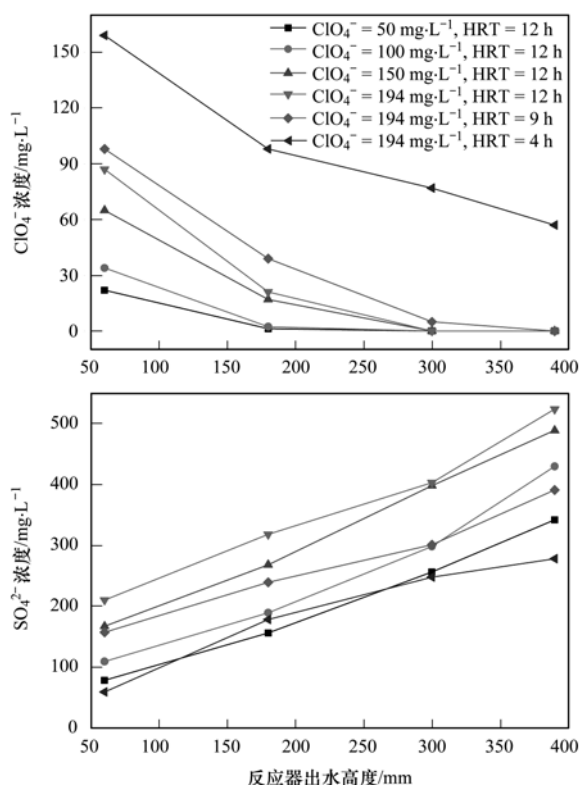
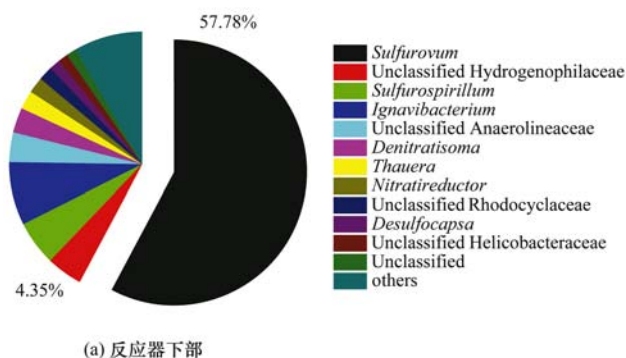
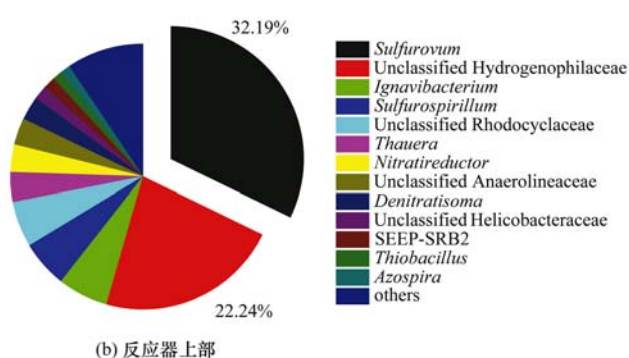


图5 高氯酸盐及硫酸盐浓度随反应器出水高度的变化

Fig. 5 Variations of perchlorate and sulfate concentrations along the flow path in the reactor



(a) 反应器下部



(b) 反应器上部

图6 属水平菌群分布随反应器高度的变化

Fig. 6 Variation of microbial flora by genus along the flow path in the reactor

度消耗随进水 ClO_4^- 浓度的增而增加,随 HRT 减少而减少。

(3) 硫自养反应器内的菌群结构随高度的变化而变化,硫氧化菌 *Sulfurovum* 在反应器下部与上部的比例分别为 57.78% 与 32.19%, 硫化氢氧化菌 *Hydrogenophilaceae* 在反应器下部与上部的比例分别为 4.35% 与 22.24%。

参考文献:

[1] Wu D L, He P, Xu X H, et al. The effect of various reaction parameters on bioremediation of perchlorate-contaminated water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(2): 419-423.

反应器高度的变化,反应器下部与反应器上部的优势菌群均为 *Sulfurovum*, 所占比例分别为 57.78% 和 32.19%, 但反应器上部 *Hydrogenophilaceae* 的比例为 22.24%, 而反应器下部 *Hydrogenophilaceae* 的比例仅为 4.35%。Gao 等^[21] 得出 *Sulfurovum* 为硫氧化菌可以将硫氧化成 SO_4^{2-} , 同时将 ClO_4^- 还原成无毒无害的 Cl^- 。 *Hydrogenophilaceae* 为一种嗜氢菌, 分析可能是由于反应器内存在硫歧化反应进而产生硫化氢, 而反应器下部的比例要小于反应器上部的比例, 所以反应器内下部主要是硫的氧化及 ClO_4^- 的降解, 而反应器上部主要的反应体系为硫氧化及硫化氢的氧化。

3 结论

(1) SO_4^{2-} 理论产生的量与实际产生的量的比值, 由第 I 阶段的 0.2 最终增加到第 VI 阶段的 0.8, 说明硫自养降解 ClO_4^- 过程中硫的利用率会随着 ClO_4^- 的进水浓度增加及 HRT 的减少而增加。

(2) 进水 pH 值与碱度(以 CaCO_3 计)分别稳定在 8.0 左右和 500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而出水 pH 值与碱度(以 CaCO_3 计)分别为 6.7 和 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明硫自养降解 ClO_4^- 的过程是一个产酸耗碱的过程, 同时碱

[2] Xu X, Gao B Y, Jin B, et al. Study of microbial perchlorate reduction: considering of multiple pH, electron acceptors and donors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 285: 228-235.

[3] Atikovic E, Suidan M T, Maloney S W. Anaerobic treatment of army ammunition production wastewater containing perchlorate and RDX[J]. Chemosphere, 2008, 72(11): 1643-1648.

[4] Zhu Y P, Gao N Y, Chu W H, et al. Bacterial reduction of highly concentrated perchlorate: Kinetics and influence of co-existing electron acceptors, temperature, pH and electron donors [J]. Chemosphere, 2016, 148: 188-194.

[5] 张媛媛, 郭延凯, 张超, 等. 非水溶性醛加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐的研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 988-993.

- Zhang Y Y, Guo Y K, Zhang C, *et al.* Effect of non-dissolved quinone on perchlorate reduction by strain GWF [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 988-993.
- [6] Baidas S, Gao B Y, Meng X G. Perchlorate removal by quaternary amine modified reed [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **189**(1-2): 54-61.
- [7] Kucharzyk K H, Crawford R L, Paszczynski A J, *et al.* Maximizing microbial degradation of perchlorate using a genetic algorithm: media optimization [J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, **157**(1): 189-197.
- [8] Zhang T, Ma Y F, Wang D, *et al.* Placental transfer of and infantile exposure to perchlorate[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 948-954.
- [9] Liu F J, Gentles A, Theodorakis C W. Arsenate and perchlorate toxicity, growth effects, and thyroid histopathology in hypothyroid zebrafish *Danio rerio* [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(7): 1369-1376.
- [10] Ju X M, Field J A, Sierra-Alvarez R, *et al.* Chemolithotrophic perchlorate reduction linked to the oxidation of elemental sulfur [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2007, **96**(6): 1073-1082.
- [11] Mora M, Guisasola A, Gamisans X, *et al.* Examining thiosulfate-driven autotrophic denitrification through respirometry [J]. *Chemosphere*, 2014, **113**: 1-8.
- [12] Sun Y M, Nemati M. Evaluation of sulfur-based autotrophic denitrification and denitritation for biological removal of nitrate and nitrite from contaminated waters [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 207-216.
- [13] Wan D J, Liu Y D, Niu Z H, *et al.* Perchlorate reduction by hydrogen autotrophic bacteria and microbial community analysis using high-throughput sequencing[J]. *Biodegradation*, 2016, **27**(1): 47-57.
- [14] Zhang L L, Zhang C, Hu C Z, *et al.* Sulfur-based mixotrophic denitrification corresponding to different electron donors and microbial profiling in anoxic fluidized-bed membrane bioreactors [J]. *Water Research*, 2015, **85**: 422-431.
- [15] Ju X M, Sierra-Alvarez R, Field J A, *et al.* Microbial perchlorate reduction with elemental sulfur and other inorganic electron donors [J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(1): 114-122.
- [16] Boles A R, Conneely T, McKeever R, *et al.* Performance of a pilot-scale packed bed reactor for perchlorate reduction using a sulfur oxidizing bacterial consortium [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, **109**(3): 637-646.
- [17] Son A, Lee J, Chiu P C, *et al.* Microbial reduction of perchlorate with zero-valent iron[J]. *Water Research*, 2006, **40**(10): 2027-2032.
- [18] Wang Z C, Gao M C, Zhang Y, *et al.* Perchlorate reduction by hydrogen autotrophic bacteria in a bioelectrochemical reactor[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **142**: 10-16.
- [19] Xu J L, Logan B E. Measurement of chlorite dismutase activities in perchlorate respiring bacteria[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2003, **54**(2): 239-247.
- [20] Sahu A K, Conneely T, Nüsslein K R, *et al.* Biological perchlorate reduction in packed bed reactors using elemental sulfur [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(12): 4466-4471.
- [21] Gao M C, Wang S, Ren Y, *et al.* Simultaneous removal of perchlorate and nitrate in a combined reactor of sulfur autotrophy and electrochemical hydrogen autotrophy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 1008-1016.
- [22] Sahinkaya E, Dursun N, Kilic A, *et al.* Simultaneous heterotrophic and sulfur-oxidizing autotrophic denitrification process for drinking water treatment: control of sulfate production [J]. *Water Research*, 2011, **45**(20): 6661-6667.
- [23] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington DC, USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 2005.
- [24] 万东锦, 刘永德, 樊荣, 等. 硫自养填充床生物反应器去除水中的高氯酸盐[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(11): 5267-5272.
- Wan D J, Liu Y D, Fan R, *et al.* Sulfur-autotrophic reduction of perchlorate from aqueous solution using a packed bed reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(11): 5267-5272.
- [25] Chang Y J, Chang Y T, Hung C H, *et al.* Microbial community analysis of anaerobic bio-corrosion in different ORP profiles[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, **95**: 93-101.
- [26] Yu R F, Chi F H, Cheng W P, *et al.* Application of pH, ORP, and DO monitoring to evaluate chromium (VI) removal from wastewater by the nanoscale zero-valent iron (nZVI) process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **255**: 568-576.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172