

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

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

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性	施禅臻, 于兴娜, 周斌, 项磊, 聂皓浩 (4139)
秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析	张岩, 张洪海, 杨桂朋 (4146)
中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征	杨毅红, 陶俊, 高健, 李雄, 施展, 韩保新, 谢文彰, 曹军骥 (4152)
改进的大气 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO 在线观测 FTIR 系统	夏玲君, 刘立新, 周凌晔, 方双喜, 王红阳, 张振波 (4159)
长沙市郊大气 CH ₄ 浓度变化特征	刘鲁宁, 王迎红, 徐小娟, 王卫东, 王跃思 (4165)
麦草及其烟尘中正构烷烃的组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹 (4171)
过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭	杨世迎, 王雷雷, 冯琳玉, 赵腊娟, 石超 (4178)
污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征	钟佳, 魏源送, 赵振凤, 应梅娟, 周国胜, 熊建军, 刘培财, 葛振, 丁刚强 (4186)
长江口沿岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究	顾丽军, 杨毅, 刘敏, 聂明华, 李涛, 侯立军 (4195)
海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价	吕书丛, 张洪, 单保庆, 李立青 (4204)
汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征	东口朋宽, 史江红, 张晖, 刘晓薇 (4211)
基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析	李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍 (4218)
合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析	戴梅红, 李田, 张伟 (4226)
微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究	随伟伟, 丁海兵, 杨桂朋, 陆小兰, 李文娟, 孙立群 (4231)
太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响	马久远, 王国祥, 李振国, 许宽, 周峰, 张佳 (4240)
表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究	秦晶, 高甫威, 谢慧君 (4251)
带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究	王亚, 张春华, 王淑, 申连玉, 葛滢 (4257)
铜改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究	李佳, 林建伟, 詹艳慧 (4266)
底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究	任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 薛健 (4275)
铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化化和溴化比较	田川, 郭婷婷, 刘锐平, William Jefferson, 刘会娟, 曲久辉 (4282)
天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析	徐磊, 俞文正, 梁亮, 王彤 (4290)
DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响	丰桂珍, 董秉直 (4295)
零价铁去除废水中的汞	周欣, 张进忠, 邱昕凯, 王定勇 (4304)
Fe ₃ O ₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究	周红艺, 梁思, 曾思思, 雷双健 (4311)
不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究	李政剑, 石宝友, 王东升 (4319)
氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 方巧, 杨孟娟, 王虹 (4325)
改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究	吴艳, 罗汉金, 王侯, 张子龙, 王灿, 王雨微 (4333)
经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题	朱健, 吴庆定, 王平, 李科林, 雷明婧, 张伟丽 (4341)
硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响	刘妍妍, 龙焰, 尹华, 叶锦韶, 何宝燕, 张娜 (4349)
硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究	张丽, 黄勇, 袁怡, 李祥, 刘福鑫 (4356)
硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究	袁怡, 黄勇, 李祥, 张春蕾, 张丽, 潘杨, 刘福鑫 (4362)
UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析	赵健慧, 张百惠, 李宁, 王兵, 李永峰 (4370)
响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价	李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 孙德智 (4376)
高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应	刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (4386)
NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4392)
近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征	章明奎, 常跃畅 (4399)
浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨	黄春雷, 宋明义, 魏迎春 (4405)
黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征	孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 李丽丽, 孙景宽, 孙万龙, 牟晓杰, 王玲玲 (4411)
崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究	孙阳昭, 王学彤, 张媛, 孙延枫, 李梅, 马中 (4420)
福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征	瞿程凯, 祁士华, 张莉, 黄焕芳, 张家泉, 张原, 杨丹, 刘红霞, 陈伟 (4427)
电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平	邵科, 尹文华, 朱国华, 巩宏平, 周欣, 王玲, 刘劲松 (4434)
外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性	蔡荟梅, 彭传燧, 陈静, 侯如燕, 宛晓春 (4440)
丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用	赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 赵文静, 郭江源, 毕娜, 张君 (4447)
丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果	李少朋, 毕银丽, 孔维平, 王瑾, 余海洋 (4455)
超积累植物垂序商陆 (<i>Phytolacca americana</i> L.) 吸收锰机制的初步探讨	徐向华, 李仁英, 刘翠英, 施积炎, 林佳 (4460)
<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 对硫化汞的生物利用性研究	陈艳, 王卉, 司友斌 (4466)
基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究	蒋宝, 崔晓勇 (4473)
不同结构有机磷在 (氢) 氧化铝表面的吸附与解吸特征	柳飞, 张延一, 严玉鹏, 刘凡, 谭文峰, 刘名茗, 冯雄汉 (4482)
煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究	熊金钰, 李寒旭, 董众兵, 张颂, 钱宁波, 武成利 (4490)
植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应	杨新萍, 赵方杰 (4495)
《环境科学》征订启事 (4239) 《环境科学》征稿简则 (4369) 信息 (4225, 4265, 4303, 4375)	

硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究

张丽¹, 黄勇^{1*}, 袁怡², 李祥¹, 刘福鑫¹

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用厌氧上流式生物膜反应器, 通过控制不同的水力停留时间、进水 $n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 和 HCO_3^- 浓度研究了无机营养条件下硫酸盐/氨的厌氧生物转化特性。结果表明, 反应器中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 发生了同步去除, 最大 NH_4^+-N 和 $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ 去除速率分别为 $47.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $16.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 稳定去除率最高分别超过了 80% 和 43%; 反应过程中有 NO_3^- -N 的明显生成, 出水 NO_3^- -N 浓度最大时为 $77.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整个过程中, 未检测到 S^{2-} 的生成, 有单质硫附着在生物污泥表面; 由于控制条件的不同, 会产生不同的 $n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 转化比, 表明 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的厌氧生物反应并不是简单地接续反应, 反应器中存在更为复杂的反应过程和转化途径。

关键词: 硫酸盐; 厌氧氨氧化; 转化特性; HCO_3^- 浓度; $n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 转化比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4356-06

Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions

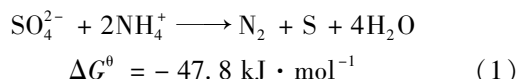
ZHANG Li¹, HUANG Yong¹, YUAN Yi², LI Xiang¹, LIU Fu-xin¹

(1. School of Environmental Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. School of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The anaerobic biological transformation characteristics of sulfate and ammonia were investigated in the upflow anaerobic biofilm reactor under inorganic nutrition condition by controlling different hydraulic retention time, NH_4^+-N and $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ ratio and HCO_3^- concentration in the influent. The results showed that NH_4^+ and SO_4^{2-} were synchronously removed. The maximum NH_4^+-N and $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ removal rate was $47.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and $16.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively, and the highest stable removal efficiency was more than 80% and 43%. Obviously NO_3^- -N generated in the reaction and the maximum NO_3^- -N concentration was $77.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the effluent. Throughout the process S^{2-} was not detected, but there was elemental sulfur generated attached to the surface of the biological sludge. During the whole process, different control conditions led to different $n(\text{NH}_4^+-\text{N})$ and $n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ conversion ratios, which showed that anaerobic biological NH_4^+ and SO_4^{2-} transformation was not a simple serial reaction, more complex reactions and conversion pathways occurred in the reactor.

Key words: sulfate; ANAMMOX; transformation characteristics; HCO_3^- concentration; $n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ conversion ratio

2001年, Fdz-Polanco等^[1]在用颗粒活性炭为载体的厌氧流化床反应器处理甜菜糖蜜废水时, 发现进入反应器中的TKN大约有50%变成了 N_2 , 转化的 $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ 中仅有20%以 S^{2-} 和 H_2S 的形式存在于出水和产气中, 在固相中则检测到有单质硫产生。他们认为这一转化过程的总计量式为:



这是首次发现厌氧微生物条件下 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 同步转化的现象。但同一研究者在随后的研究中未能重现这一现象^[2]。之后的一些研究者^[3~9]陆续报道了有机条件下 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的同步厌氧生物转化现象, Sabumon^[7]观察到的 NH_4^+-N 去除率高达50%~90%。还有一些研究者^[10~14]在无机条件下对这一过程进行了研究, 也观察到了 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的同

步转化。然而, 在有关转化过程的细节方面, 上述研究却有明显不同的结果。例如, 有机条件下的研究均报道了 S^{2-} 的生成, 而无机条件下的研究却无此报道。Liu等^[10]的实验得到出水pH高于进水, 出水中含有 NO_3^- 的生成, 但在反应机制推测中并未对此加以考虑; 赖杨岚等^[13]、李祥等^[14]也发现了明显的 NO_3^- 生成, 但出水pH低于进水。在反应过程的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ 摩尔转化比 $[n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})\text{转化比}]$ 方面则更存争议, Liu等^[10]的实

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008202); 江苏省2011年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0976); 江苏省2012年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0858)

作者简介: 张丽(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: helene25@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

验结果在 1.71 ~ 1.75 之间, Yang 等^[12] 的报道为 1.8 ~ 2, Sabumon^[8] 和 Rikmann 等^[9] 的结果是相对于 SO_4^{2-} -S 转化量而言 NH_4^+ -N 转化量明显高于按式 (1) 计算的数值. 硫酸盐与氨在厌氧条件下的生物转化具有重要的科学意义和应用价值^[15]. 本研究通过控制不同的水力停留时间 (HRT)、进水 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 及进水 HCO_3^- 浓度, 考察了硫酸盐和氨的厌氧生物转化特性, 旨在为深入研究硫酸盐和氨的厌氧生物转化机制和过程控制提供进一步的依据与参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

接种污泥为运行状态良好的亚硝酸盐型厌氧氨氧化红色颗粒状污泥和本课题组前期接种该污泥通过批式反应器以 SO_4^{2-} 代替 NO_2^- 驯化一段时间的污泥^[16], 混合污泥的 MLSS 为 $14.015 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $7.875 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS/MLSS 为 0.562.

进水采用人工配水, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 按需投加, $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CaCl_2 为 $68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 为 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 I $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 II 为 $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, KHCO_3 与 NaHCO_3 按需投加.

微量元素 I ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为: EDTA 5 000, 硫酸亚铁 5 000.

微量元素 II ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为: EDTA 5 000, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 430, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 240, $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 990, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 250, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 220, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 190, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 210, H_3BO_4 14, $\text{NaWO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 50.

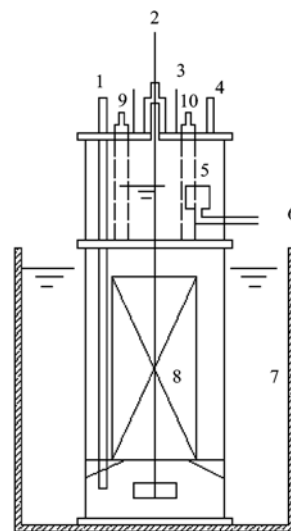
1.2 装置及方法

实验采用厌氧上流式生物膜反应器, 装置如图 1 所示

反应器由有机玻璃制成, 有效容积为 2.2 L, 进水由蠕动泵泵入进水口至反应器底部, 搅拌混合, 自下而上连续流过反应器, 至反应器上部泥水分离区, 出水由溢流槽导出, 反应器内固定一圈无纺布纤维膜, 中间带有搅拌装置, 使泥水充分接触. 恒温水浴温度为 35°C 左右, 反应器进水曝气充氮 30 min 除氧, 运行过程中 ORP 在 -400 mV 左右.

1.3 控制条件

反应过程的 HCO_3^- 由 KHCO_3 和 NaHCO_3 提供, 运行前 100 d, 投加 KHCO_3 和 NaHCO_3 分别为 $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即 HCO_3^- 为 $1\,202.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 100 d 后, 仅



1. 进水口; 2. 搅拌轴; 3. 水封; 4. 出气口;
5. 溢流槽; 6. 出水口; 7. 恒温水浴;
8. 无纺布生物膜; 9. pH 计探头; 10. ORP 探头

图 1 硫酸盐/氨的厌氧生物反应器

Fig. Schematic diagram of the $\text{SO}_4^{2-}/\text{NH}_4^+$ anaerobic reactor

投加 KHCO_3 $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即 HCO_3^- 为 $762.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 在 8.0 ~ 8.4. 进水 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 分别控制在 4 和 2, 为 4 时, HRT 分别控制为 72、48、24、16 h; 为 2 时, HRT 分别控制为 16 h、24 h. 因反应器运行后期出现异常现象 (后面将有讨论), 故后期停止对 HRT 的改变, 维持在 24 h 运行至稳定.

1.4 分析测定项目及数据处理方法

分析测定项目参照文献^[17], $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$: N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 紫外分光光度法; SO_4^{2-} : 铬酸钡分光光度法; S^{2-} : 对氨基二甲基苯胺光度法. pH 采用 PHS-3TC 型酸度计测定; MLSS 和 MLVSS 用重量法.

由于控制条件的改变, $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比的取值为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 去除速率稳定状态下的 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比的平均值.

$n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比计算公式为:

$$n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S}) \text{ 转化比} = \frac{(\text{进水 } \text{NH}_4^+\text{-N 浓度} - \text{出水 } \text{NH}_4^+\text{-N 浓度})/14}{(\text{进水 } \text{SO}_4^{2-}\text{-S 浓度} - \text{出水 } \text{SO}_4^{2-}\text{-S 浓度})/32}$$

2 结果与讨论

2.1 反应器运行试验结果与分析

反应器运行过程中进出水各物质浓度如图 2 所示.

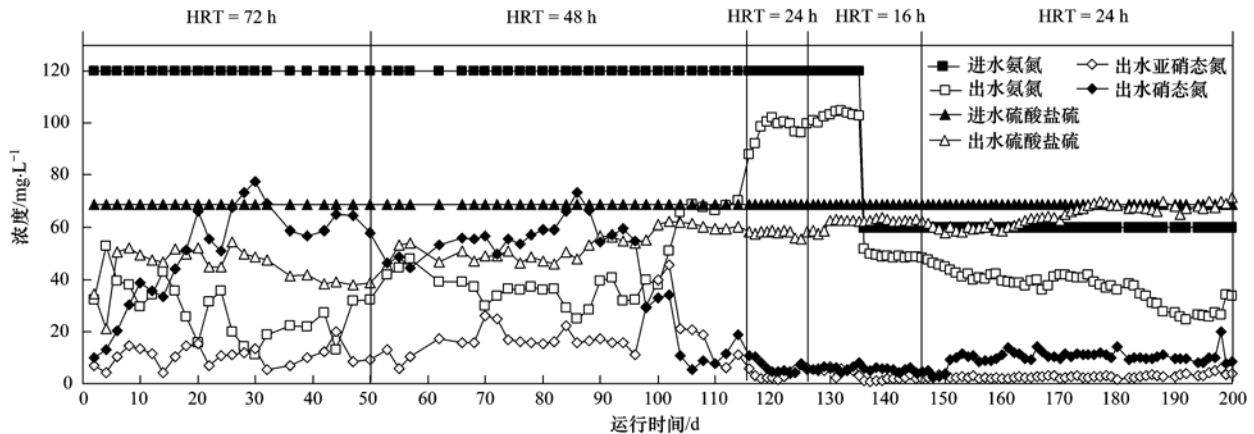


图2 进出水氨氮、亚硝态氮、硝态氮浓度和硫酸盐硫浓度

Fig. 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ concentrations in effluent and influent

反应器运行的 0 ~ 172 d, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 发生了同步转化, 最大 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 去除速率分别为 $47.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $16.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 的稳定去除率最高分别超过了 80% 和 43%, 表明厌氧条件下, ANAMMOX 微生物可以催化硫酸盐的还原和氨的氧化. 在 0 ~ 100 d 内, 进水 HCO_3^- 控制在 $1202.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 都有明显的生成, 浓度分别在 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和

$52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度最大达到 $77.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这段时间进出水 pH 变化不大 (如图 3). 100 ~ 200 d, 将进水 HCO_3^- 降低到 $762.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时提高了进水负荷, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 浓度较之 100 d 前都有所升高, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度有所降低, 在这段时间, 出水 pH 低于进水. 172 d 后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有去除, 最大去除率接近 60%, 但 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 变得几乎无去除.

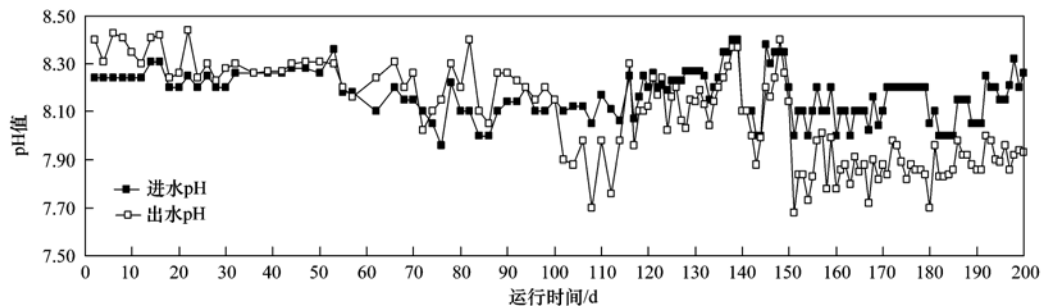


图3 进出水 pH 大小

Fig. 3 The pH value in the influent and effluent

在整个反应过程中, 反应器出水 S^{2-} 浓度始终低于检测限 ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 从反应器前后污泥变化来看 (如图 4), 红色厌氧氨氧化污泥逐渐变为土黄色, 出水偶尔带有淡黄色固体, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 纤维滤膜过滤, 将收集的淡黄色固体分别置于水和酒精中, 发现该固体溶于酒精, 可以定性判断该黄色物质为单质硫, 即表明 SO_4^{2-} 还原的产物为 S^0 而不是 S^{2-} . 李亚新等^[18] 认为生物氧化产生的单质硫颗粒是由微生物体内排出的微小颗粒, 在水中呈胶体状态, 由本试验看来, 这些硫颗粒可能部分随出水流出, 部分附着在反应器生物膜表面, 减弱了 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 反应效率.

2.2 氨、硫酸盐的同步转化特性分析

将反应器运行的前 172 d 内发生氨和硫酸盐同步转化的实验数据, 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 的去除率及各自的转化速率为纵坐标绘图, 如图 5 所示. 从中可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 的转化随着控制条件的不同发生变化. 在负荷较低时 (前 50 d), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化率多高于 60%, 还有大于 80% 的情形; $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 的转化率也在 30% 以上, 并可稳定在 43% 左右; 随着负荷的提高, 二者的转化率均有降低, 但仍能在相应的水平上保持稳定. 这充分证实了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 在厌氧条件下的生物转化. 但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 的相对转化率则未稳定在同一水平. 取不同



图4 污泥颜色变化

Fig. 4 Color change of the sludge

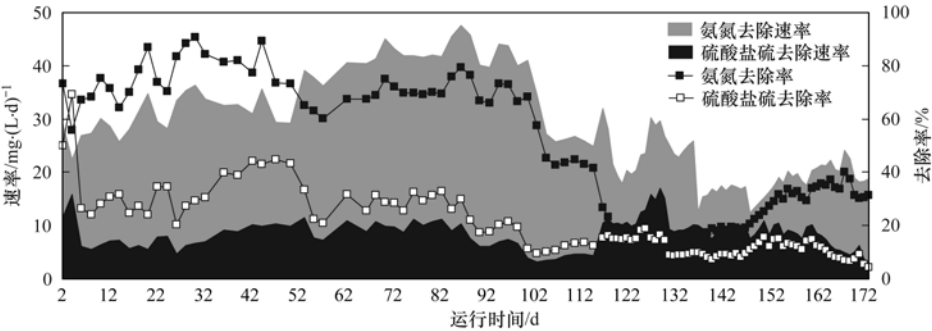


图5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 去除率和去除速率

Fig. 5 Removal efficiency and removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$

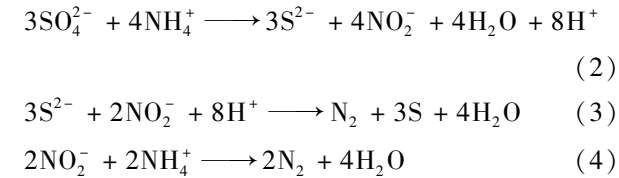
表1 不同控制条件下的 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比

Table 1 Different $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ conversion rate in different conditions						
运行时间 /d	HRT /h	进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	进水 $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ 负荷 / $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	进水 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$	进水 HCO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比
24~50	72	40	22.9	4	1 202.6	9.6
66~84	48	60	34.3	4	1 202.6	9.8
104~114	48	60	34.3	4	762.5	14.5
118~125	24	120	68.7	4	762.5	4.4
140~146	16	90	103	2	762.5	4.2
151~158	24	60	68.7	2	762.5	4.8

与 Rikmann 等^[9]的报道较为一致. 这与 Fdz-Polanco 等^[1]推断的转化过程计量关系,即总反应式(1)所得出的 $n(\text{NH}_4^+\text{-N})/n(\text{SO}_4^{2-}\text{-S})$ 转化比明显不相符合,表明硫酸盐与氨的厌氧生物转化存在着更为复杂的反应过程,并受到环境条件的影响.

3 硫酸盐/氨的厌氧生物转化机制探讨

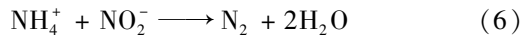
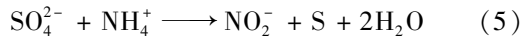
Fdz-Polanco 等^[1]推测有机条件下硫酸盐/氨的厌氧生物转化过程分为3个步骤:



本研究在各种条件下的实验结果均未检测到 S^{2-} 的生成. 结合在无机条件下进行相关研究的文献中均未见有 S^{2-} 生成的报道^[10~14],基本可以断定, S^{2-} 不是硫酸盐还原氨氧化反应的直接产物. 在有机物存在的情况下所观察到的 S^{2-} 生成,很可能

是广泛报道的异养硫酸盐还原菌(SRB)以有机物为电子供体还原 SO_4^{2-} 的结果.

Liu 等^[10]提出的无机条件下的反应过程为:



尽管其实验数据表明有明显的 NO_3^- 生成^[10], 这一反应过程机制对 NO_3^- 的生成并未作解释. 许多研究者^[1,4,5,10~15]都认为 NH_4^+ 的去除包含了传统厌氧氨氧化过程(即以 NO_2^- 为电子受体氧化 NH_4^+). 从本研究以及部分研究者采用以 NO_2^- 为电子受体的 ANAMMOX 细菌培养物作为研究硫酸盐与氨的厌氧生物转化过程的微生物接种物^[3,10,12~14]的情况看来,这一假定具有其合理性. 为此,本研究从传统厌氧氨氧化反应过程产生 NO_3^- 的角度进行了计算. 传统厌氧氨氧化反应的 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 的转化比分别为 1:1.32:0.26^[19],取各个稳定阶段的出水 NO_3^- -N 浓度的平均值与传统厌氧氨氧化理论计算的 NO_3^- -N 浓度如表 2.

表 2 实测 NO_3^- -N 浓度与按传统厌氧氨氧化

反应计算的 NO_3^- -N 浓度

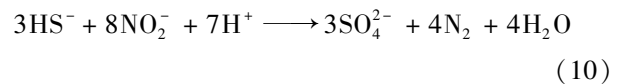
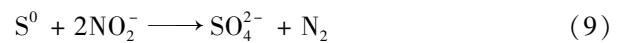
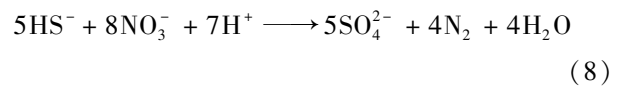
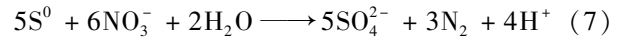
Table 2 Actual and calculated NO_3^- -N concentration

运行时间 /d	实测 NO_3^- -N 浓度 /mg·L ⁻¹	计算 NO_3^- -N 浓度 /mg·L ⁻¹
24 ~ 50	63.6	25.3
66 ~ 84	56.8	22.1
104 ~ 114	10.5	13.9
118 ~ 125	5.4	5.4
140 ~ 146	5.1	3.0
151 ~ 158	9.8	4.8

可以看出,多数情况下仅经历传统厌氧氨氧化步骤不足以生成如此多的 NO_3^- -N. 这说明 NO_3^- -N 的生成应还有其他途径. 从本研究和其他无机条件下研究所控制的条件来看,厌氧状态下, SO_4^{2-} 是唯一的电子受体,存在着由 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 直接反应生成 NO_3^- -N 的可能性.

传统厌氧氨氧化反应出水 pH 高于进水^[19]. 由本实验 pH 变化来看,运行初期,pH 变化不明显,因反应器接种污泥含有大量良好的亚硝酸盐型厌氧氨氧化污泥,反应器中发生以 SO_4^{2-} 为电子受体、 NH_4^+ 为电子供体的氧化还原反应,又发生传统厌氧氨氧化反应,在某种程度上使得出水 pH 与进水 pH 相差不大;而反应器运行后期,出水 pH 明显低于进水(见图 3),同时, NH_4^+ 有转化, SO_4^{2-} 几乎无转化,出水 NO_2^- 和 NO_3^- 相较于之前来说小很多(见图 2).

Rikmann 等^[9]推断 NH_4^+ 明显多于 SO_4^{2-} 被转化的原因是因为 SO_4^{2-} 转化生成的硫化物、单质硫与 NO_2^- 、 NO_3^- 发生了基于硫的自养反硝化反应生成了 SO_4^{2-} . 反应过程如下:



从上述反应方程可以看出,单质硫与 NO_3^- 的反应是一个 pH 降低的过程. 综合本研究中未检测到 S^{2-} 的生成、反应器运行后期 pH 降低、 $n(\text{NH}_4^+ - \text{N})/n(\text{SO}_4^{2-} - \text{S})$ 转化比提高、出水 NO_2^- 和 NO_3^- 浓度显著降低等实验现象,可以推测,在无机条件下 NH_4^+ 被 SO_4^{2-} 氧化很可能也会生成 NO_3^- ,而在反应器运行后期发生了明显的单质硫自养反硝化反应. 故在本实验的反应器中, SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 发生反应生成单质硫、 NO_2^- 和 NO_3^- , NH_4^+ 与 NO_2^- 发生传统厌氧氨氧化反应,单质硫与 NO_2^- 和 NO_3^- 发生自养反硝化反应,又使 SO_4^{2-} 重新生成等多种反应过程均有可能存在. 这充分说明,以 ANAMMOX 细菌为接种物进行 SO_4^{2-} 还原 NH_4^+ 氧化的反应过程十分复杂,存在着多种反应和转化途径. 如何通过反应条件的控制调控反应过程和转化途径,进而深入揭示反应的机制和特性,还有待于进一步的研究.

4 结论

(1)在厌氧上流式生物膜反应器中接种厌氧氨氧化污泥,观测到反应器中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 发生了同步转化,最大转化速率分别为 $47.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $16.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$; NH_4^+ -N 和 SO_4^{2-} -S 的稳定去除率最高分别超过了 80% 和 43%.

(2)反应过程中有 NO_3^- -N 的明显生成,出水 NO_3^- -N 浓度最大时为 $77.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 整个过程中,出水未检测到 S^{2-} ,同时接种前后污泥颜色发生变化,由 SO_4^{2-} 转化的单质硫附着在生物污泥表面;可以推测 S^0 和 NO_3^- 是厌氧硫酸盐还原氨氧化反应的直接产物.

(3)反应过程控制条件的不同,使得 $n(\text{NH}_4^+ - \text{N})/n(\text{SO}_4^{2-} - \text{S})$ 摩尔转化比发生变化,表明 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的厌氧生物过程并不是简单的接续反

应,反应器中发生了更为复杂的反应造成了不稳定的 $n(\text{NH}_4^+-\text{N})/n(\text{SO}_4^{2-}-\text{S})$ 摩尔转化比。

参考文献:

- [1] Fdz-Polanco F, Fdz-Polanco M, Fernandez N, *et al.* New process for simultaneous removal of nitrogen and sulphur under anaerobic conditions[J]. *Water Research*, 2001, **35**(4): 1111-1114.
- [2] Villaverde S. Recent developments on biological nutrient removal processes for wastewater treatment[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2004, **3**(2): 171-183.
- [3] 董凌霄, 吕永涛, 韩勤有, 等. 硫酸盐还原对氨氧化的影响及其抑制特性研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006, **38**(3): 425-428, 432.
- [4] Zhao Q L, Li W, You S J. Simultaneous removal of ammonium-nitrogen and sulphate from wastewaters with an anaerobic attached-growth bioreactor[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(8): 27-35.
- [5] 赵庆良, 李威, 徐永波, 等. 厌氧附着生长反应器处理氨氮和硫酸盐废水的研究[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2007, **24**(4): 421-426.
- [6] Samubon P C. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter: a novel route[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(1): 49-59.
- [7] Sabumon P C. Development of a novel process for anoxic ammonia removal with sulphidogenesis [J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43**(9): 984-991.
- [8] Sabumon P C. Effect of potential electron acceptors on anoxic ammonia oxidation in the presence of organic carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(1): 280-288.
- [9] Rikmann E, Zekker I, Tomingas M, *et al.* Sulfate-reducing anaerobic ammonium oxidation as a potential treatment method for high nitrogen-content wastewater[J]. *Biodegradation*, 2012, **23**(4): 509-524.
- [10] Liu S T, Yang F L, Zheng G, *et al.* Application of anaerobic ammonium-oxidizing consortium to achieve completely autotrophic ammonium and sulfate removal [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 6817-6825.
- [11] 张蕾, 郑平, 何玉辉, 等. 硫酸盐型厌氧氨氧化性能的研究[J]. *中国科学(B辑): 化学*, 2008, **38**(12): 1113-1119.
- [12] Yang Z Q, Zhou S Q, Sun Y B. Start-up of simultaneous removal of ammonium and sulfate from an anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in an anaerobic up-flow bioreactor. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 113-118.
- [13] 赖杨岚, 周少奇. 硫酸盐型厌氧氨氧化反应器的启动特征分析[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(15): 41-44.
- [14] 李祥, 黄勇, 袁怡, 等. 自养厌氧硫酸盐还原/氨氧化反应器启动特性[J]. *化工学报*, 2012, **63**(8): 2606-2611.
- [15] 张丽, 黄勇, 袁怡, 等. 生物同步脱氮除硫工艺研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(12): 70-73, 79.
- [16] 张春蕾. 自养型厌氧硫酸盐还原/氨氧化生物反应特性研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012. 11-21.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-284, 139-167.
- [18] 李亚新, 苏冰琴, 耿诏宇, 等. 生物法处理含硫酸盐酸性废水及回收单质硫工艺[J]. *给水排水*, 2000, **26**(8): 28-30.
- [19] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.

CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH ₄ in the Suburb of Changsha City, China	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin	 LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu	 MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i>	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River	 LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination	 TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Flocs Formed	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe ₃ O ₄ -Stabilized Nanoscale Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i>	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

《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11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 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