

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国锋, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征

张海芹¹, 王翻翻¹, 李月寒¹, 陈重军^{1,2}, 沈耀良^{1,2*}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 采用两套相同的厌氧折流板反应器 (ABR), 分别接种厌氧絮状/颗粒污泥的混合污泥 (R1) 以及厌氧絮状污泥 (R2)。采用人工配水配制 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 负荷 $54.5 \sim 68.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 在温度 $30 \sim 35^\circ\text{C}$, HRT 为 26 h, pH 值 7.5 ± 0.5 条件下, 经过 120 d、125 d 分别成功启动厌氧氨氧化反应。两个反应器在氮素去除规律上基本相似, 均经历了菌体水解期、活性停滞期、活性提高期和稳定运行期等 4 个阶段。在稳定运行期间, R1、R2 反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均去除率都高达 90% 以上, 且 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均去除负荷为 $57.3 \sim 67.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, R1 在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷上略高于 R2。值得一提的是, 90% 以上的氮素都在 ABR 反应器的第一格室被去除。同时, 随着水流的方向, 污泥的颜色逐渐由少量红棕色、黄褐色向黑色转变, 这与氮素去除规律一致。由此表明, 接种污泥的不同并未造成 ABR 厌氧氨氧化反应器的启动规律和污染物去除特征有明显差异。

关键词: 厌氧氨氧化; 启动; 接种污泥; 厌氧折流板反应器; 脱氮

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2216-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.06.040

Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor

ZHANG Hai-qin¹, WANG Fan-fan¹, LI Yue-han¹, CHEN Chong-jun^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China)

Abstract: Two anaerobic baffled reactors (ABR) were compared for anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) enrichment using synthetic wastewater with different inoculated sludge, the mixed anaerobic flocculent sludge/granular sludge (R1) and anaerobic activated sludge (R2). The research showed the ANAMMOX activity occurred in both reactors allowing continuous removal of ammonium and nitrite, in which the ammonia and nitrite nitrogen loading was about $54.5 \sim 68.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, when maintaining the temperature at $30 \sim 35^\circ\text{C}$, pH at 7.5 ± 0.5 and HRT at 26 h. However, the ANAMMOX reaction was successfully started after 120 d and 125 d, respectively. The removal rules of the two reactors were basically similar, and the enrichment processes occurred in both reactors could be divided into 4 phases, which were sluggish phase, expressive phase, enhanced phase and steady phase. In the steady phase, the average removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ were higher than 90%, and the average removal load achieved $57.3 \sim 67.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Moreover, the ammonium removal load in R1 was slightly higher than that in R2. Additionally, more than 90% of nitrogen was dramatically removed in the first compartment of ABR. Meanwhile, the color of sludge gradually changed from brown, litter bed brown to black along with the flow direction, which was similar to the removal rule of nitrogen. In a word, the results showed the different inoculated sludge did not cause obvious differences in the starting rule and the removal characteristics of ANAMMOX reactor.

Key words: anaerobic ammonium oxidation; start up; inoculated sludge; ABR; nitrogen removal

厌氧氨氧化菌 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 生长速度缓慢^[1], 在选择启动反应器时需考虑其具有较好的生物截留能力, 保证足够的菌群。而 ABR 反应器具有可耐受较高的污染负荷、良好的生物截留能力、易于固液分离、易形成颗粒污泥等特点, 其对培养增殖速度缓慢的厌氧氨氧化菌具有优势, 已经应用于厌氧氨氧化反应的启动和研究^[2,3]。

厌氧污泥如反硝化污泥、厌氧颗粒污泥等^[4~6]均已成功应用于厌氧氨氧化的启动。相较于絮状污泥, 颗粒污泥可有效减少微生物从反应器中流失, 以保证足够的生物量。但是颗粒污泥培养过程缓慢,

严重阻碍了其应用。本文以 ABR 反应器为厌氧氨氧化的启动反应器, 分别接种完全絮状厌氧污泥、厌氧颗粒/絮状混合污泥, 考察两个厌氧氨氧化反应器启动过程的差异、添加部分颗粒污泥对絮状污泥形成颗粒污泥的诱导效应, 并初步明确启动过程中反应器对污泥的截流率以及稳定后各隔室对氮素去

收稿日期: 2014-11-18; 修订日期: 2015-01-04

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重点项目 (12KJA610002); 江苏省高校自然科学基金项目 (14KJB610008); 江苏省建设系统科技项目 (2013ZD35); 江苏省 2013 年度普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ13_0859); 苏州科技学院研究生科研创新计划项目 (SKCX13S_017)

作者简介: 张海芹 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: haiqinz@yeah.net

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

除的贡献率, 以期为厌氧氨氧化的启动提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验采用的 ABR 反应器由有机玻璃制成。反应器长 37.5 cm, 宽 8 cm, 高度 33 cm, 持水高度 26.5 cm, 有效容积 6.36 L。反应器分为 5 个隔室, 每隔室升流区降流区格间宽度比为 4:1, 折流板导向角 45° (见图 1)。反应器整体密封保证厌氧, 每隔室的上部使用橡胶管来排除产生的气体, 橡胶管采用水封, 反应器整体用遮阳塑料膜遮住避光。采用恒流蠕动泵控制进水, 反应器放置于水浴中, 利用温度控制器维持反应器温度 30 ~ 35℃。

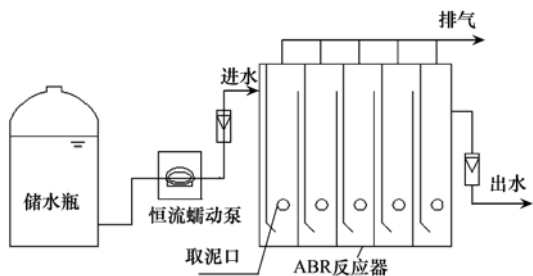


图 1 ABR 反应器装置示意
Fig. 1 Schematic of anaerobic baffled reactor

1.2 接种污泥

本研究采用两种污泥, 污泥 1: 取自 UASB 反应器的厌氧颗粒污泥, 污泥浓度 52.5 mg·mL⁻¹, 污泥 2: 城市污水处理厂 A²/O 工艺的厌氧污泥, 污泥浓度 102 mg·g⁻¹。采用 2 个相同的 ABR 反应器, 第一个反应器 (R1 反应器) 接种污泥 1 和污泥 2 的混合污泥, 按照 1:3 质量比混合, 分别为 250 mL 的絮状厌氧污泥和 386 g 的厌氧颗粒污泥; 第二反应器 (R2 反应器) 接种污泥 2 共 3000 mL 的絮状厌氧污泥。污泥在 ABR 反应器各隔室均匀接种, 接种后 R1、R2 反应器中混合液的污泥浓度相同 (以 MLSS 值表示), 均为 24.8 g·L⁻¹。

1.3 反应器运行条件

两个 ABR 反应器运行条件相同。反应器 HRT 设置在 26 h, 采用人工配水, 进水的 pH 值为 7.5 ± 0.5, 其组分包括 (NH₄)₂SO₄, NaNO₂, 以及 KH₂PO₄ 0.027 g·L⁻¹, MgSO₄·H₂O 0.300 g·L⁻¹, CaCl₂ 0.136 g·L⁻¹, KHCO₃ 0.5 g·L⁻¹, 微量元素 I、II。参照文献 [7] 配制, 按每 1 L 配水添加 1 mL 微量元素 I、II。NO₂⁻-N 浓度过高会抑制厌氧氨氧化菌的活性 [8], 逐渐提高进水氮素的浓度提高进水的基质负

荷, 促进厌氧氨氧化菌的增长 [9,10]。1 ~ 68 d, NO₂⁻-N 与 NH₄⁺-N 浓度以 1:1 配置, 负荷控制在 54.5 g·(m³·d)⁻¹ (表 1); 69 ~ 114 d 提高进水负荷, 两者负荷控制在 62.3 g·(m³·d)⁻¹; 在第 3 阶段后期 NO₂⁻-N 基本全部去除, 而 NH₄⁺-N 还有部分未被去除, 在 114 ~ 170 d 提高 NO₂⁻-N 负荷为 68.0 g·(m³·d)⁻¹, NH₄⁺-N 负荷维持在 62.3 g·(m³·d)⁻¹, 以期通过添加 NO₂⁻-N 负荷来去除 NH₄⁺-N, 增强总氮的去除率。

表 1 启动过程中氮负荷的变化 / g·(m³·d)⁻¹
Table 1 Changes of nitrogen load during the start-up / g·(m³·d)⁻¹

氮负荷	运行时间/d		
	1 ~ 68	69 ~ 114	114 ~ 170
NH ₄ ⁺ -N	54.5	62.3	62.3
NO ₂ ⁻ -N	54.5	62.3	68.0

1.4 测定项目与方法

启动过程中每天采集进出水水样, 成功启动后采集每个格室水样, 分析 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N。同时, 测定接种污泥及启动成功时每个格室污泥浓度 (MLSS)。NH₄⁺-N: 采用纳氏试剂光度法, NO₂⁻-N: 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, NO₃⁻-N: 采用紫外分光光度法, MLSS 采用重量法 [11]。

2 结果与讨论

R1 和 R2 反应器均成功启动了 ANAMMOX 反应, 启动耗时分别为 120 d 和 125 d。R1 和 R2 反应器的启动规律相似, 根据 NH₄⁺-N 的去除规律可将两个反应器的启动过程分为 4 个阶段, 分别为菌体水解期 (出水 NH₄⁺-N 高于进水, NO₂⁻-N 基本被去除)、活性停滞期 (出水 NH₄⁺-N 基本等于进水, 出水 NO₂⁻-N 升高)、活性提高期 (NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 大幅度且同比例降低) 和稳定运行期 (NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 的去除率稳定, 基本达到 90% 以上)。这与 Yang 等 [12] 对 ANAMMOX 启动过程的研究结果一致。但是, 有研究者将 ANAMMOX 启动过程分为 3 个阶段 [13~15], 为活性迟滞期, 活性提高期以及稳定运行期, 虽然比本研究少 1 个阶段, 但启动过程氮素的去除规律基本一致。

2.1 进出水水质

2.1.1 R1 反应器的启动特征

(1) 菌体水解期 (Phase I: 1 ~ 15 d)

运行开始前 2 d, 出水较浑浊, 第 1、2 d 出水的污泥浓度 (以 MLSS 表示) 为 0.61、0.35 g·L⁻¹。但是, 第 3 d 开始出水澄清, 未检测到 SS

流失,表明 ABR 反应器对污泥具有较好的持留作用. 从水质来看,启动过程的前 15 d 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 明显高于进水,而出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的含量基本为零(图 2),跟其他学者的研究结果基本一致. 孟凡能等^[16]接种好氧颗粒污泥、厌氧颗粒污泥、氧化沟/短程硝化活性污泥组成的混合污泥启动厌氧氨氧化反应,在前 11 d, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水亦大于进水,但 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除量可达 $0.02 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,认为主要是菌体的溶酶作用导致了出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 高于进水,溶酶作用产生的有机物以及接种污泥带入的有机物可作为电子供体反硝化还原 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,促进 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 被高效去除^[17].

(2) 活性停滞期 (Phase II : 15 ~ 74 d)

该阶段出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度不断下降,但依旧高于或基本等于进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度. 从出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度来看,前 27 d 依旧保持很低(低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),去除率均达 99% 以上,反硝化作用依旧很强. 然而,从第 28 d 开始,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度不断升高,最高达 $31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率不断降低,最低达到 44.57%. 这是因为第 I 阶段的溶酶作用产生的有机物以及污泥中含有的有机物不断被消耗,反硝化作用降低造成出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的升高^[18].

(3) 活性提高期 (Phase III : 75 ~ 119 d)

从 75 d 开始,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不断降低,去除率不断升高,最高达 86.2%; 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度开始降低,去除率持续升高,在第 92 d 恢复到 99.4%. 在

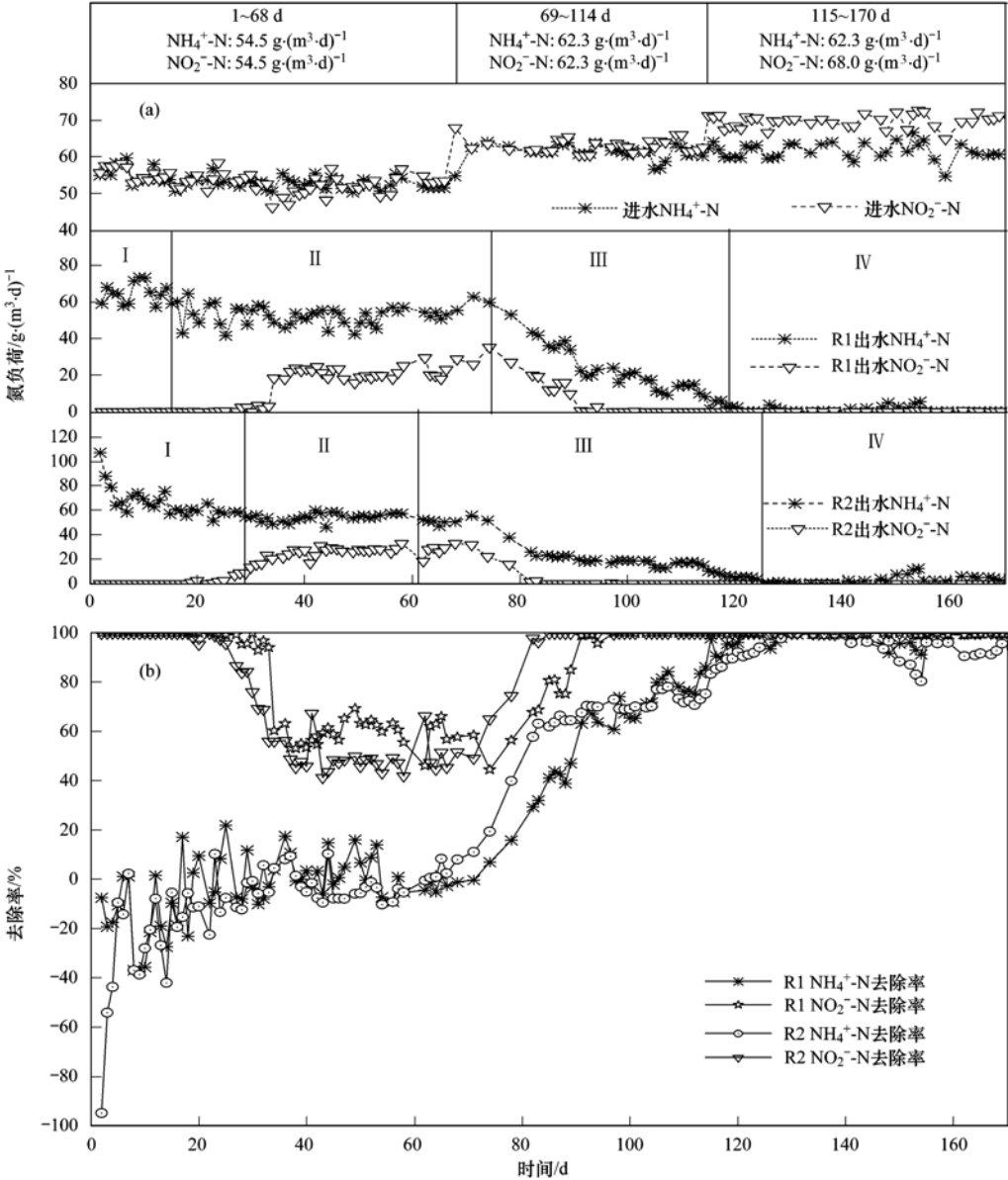


图 2 启动过程中水质变化及氮去除率变化

Fig. 2 Water quality changes and nitrogen removal efficiency changes during the start-up

该阶段, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 大幅度被消耗, 表明 ANAMMOX 开始显现^[19].

(4) 稳定运行期(Phase IV: 120 ~ 170 d)

反应器运行到 120 d, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 去除率都高达 97%, 此后出水基本稳定, 表明反应器启动成功. 稳定运行期间, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 负荷分别为 $62.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $68 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 平均去除率分别高达 97.4%、99.7%, 厌氧氨氧化反应器的培养阶段结束.

2.1.2 R2 反应器启动特征

R2 反应器的启动特征与 R1 基本相似, 但也存在差异. 从污泥截流来看, R2 反应器前 3 d 的污泥浓度(以 MLSS 表示)2.74、1.12、0.56 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 从第 4 d 开始出水未检测到 SS, R1 反应器比 R2 具有更好的截流污泥能力, 这也是接种颗粒污泥的优势.

从启动的过程和污染物去除特征来看, R2 反应器的菌体水解期持续时间较 R1 多 13 d, 且在前 3 d 的出水 NH_4^+ -N 浓度都高于 R1, 尤其第 1 d 出水 NH_4^+ -N 高达 94.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 推测是 R1 反应器接种的颗粒污泥来自于工业废水 UASB 反应器, 有机物和有机氮含量高所致. 但是, 活性停滞期的持续时间相对 R1 较短, 仅 37 d, NO_2^- -N 浓度升高, 最高达 29.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率仅为 41.3% ~ 66.4%. R2 反应器在第 62 d 进入活性提高期, 较 R1 提前 12 d, 该阶段出水 NH_4^+ -N 不断减低, 去除率不断升高, 最高达 94.2%; 同时 NO_2^- -N 去除率也大幅度升高, 在 82 d 恢复到 99.4%, 此后维持在 99% 左右. 在第 125 d, R2 反应器运行进入稳定运行期, NH_4^+ -N 平均去除率 92.0%, 略低于 R1; NO_2^- -N 平均去除率和 R1 相近, 达 99.9%. 同时, 从污泥截流率看(该时段反应器总污泥量除以接种污泥量), R2 反应器居于劣势, 平均污泥截留率仅为 33.6%, 而 R1 反应器的平均污泥截留率为 41.9%, 表明接种具有良好沉降性能的颗粒污泥可有效减少污泥的流失, 截留 ANAMMOX 微生物, 促进其富集.

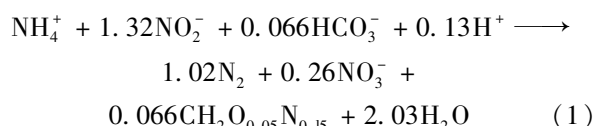
R1 反应器进入活性提高期的时间较晚, 而进入稳定期的时间较早, 推测是 R1 反应器接种的颗粒污泥来自于工业废水 UASB 反应器, 以人工配水为底物进行驯化, 活性恢复较为困难, 所需复活时间长. 但是由于颗粒污泥的沉降性能较好, 流失较少, 活性一旦恢复, 微生物的基数大, 增长的也快, 较于 R2 反应器提前进入稳定期, 稳定运行期 R1 对 NH_4^+ -N 的去除率略高于 R2. 总体来说, 即使 R1 污

泥截留量明显高于 R2, 两者表现出厌氧氨氧化活性的时间相差不大, 均取得良好的脱氮效果, 说明接种污泥的不同并未造成 ABR 厌氧氨氧化反应器的启动规律和污染物去除特征有明显差异.

不管是 R1 还是 R2 反应器, 启动耗时基本接近, 在 120 d 左右, 这与许多研究者的研究结果一致^[20,21]. 如朱月琪等^[2]在 ABR 反应器内接种厌氧河流底泥, 在 4 个月内成功启动厌氧氨氧化, 稳定运行时 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的容积负荷分别为 31.9 $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 31.2 $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 平均的去除率达 85.2% 和 98.2%. 本研究中 R1 和 R2 反应器的启动时间与其研究接近, 但对底物的平均去除率均略高, 这可能与接种的污泥、容积负荷、pH 及其他不可复制的环境因素相关.

2.2 3 种氮素之间的定量关系

目前, 学术界普遍接受的 ANAMMOX 菌分解合成的总计量化学式如式(1)所示^[1].



由式(1), 厌氧氨氧化反应中 NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 的消耗量, 以及 NO_3^- -N 的生成量理论比值为 1:1.32:0.26. 然而, 不同研究者得出的结论之间存在着差异, 冯平等^[22]研究结果表明, 稳定运行阶段三者之间的比值为 1:1.44:0.26; 而彭绪亚等^[23]采用两套 UASB 反应器启动 ANAMMOX 反应, 稳定时三者比值分别为 1:(1.1~1.2):(0.25~0.45) 和 1:(1.1~1.2):(0.30~0.40), 可能是接种污泥的性质、pH 等环境的不可复制性导致的差异.

本实验中, R1、R2 达到稳定运行后三者的比值分别为 1:1.16:0.21 和 1:1.27:0.36, 这与 Strous 等^[1]的研究结果有一定差异. 两个反应器中 NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 消耗量的比值分别为 1:1.16 和 1:1.27, 均低于理论值, 可能是反应器进水未进行有效除氧, 导致部分 NH_4^+ -N 被亚硝化菌和硝化菌转化为 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N, 使得 NO_2^- -N 与 NH_4^+ -N 消耗量比值小于理论值. 但是在 NO_3^- -N 生成量与 NH_4^+ -N 生成量之间, 两个反应器存在差异, R1 反应器略小于理论值, 推测稳定期 R1 反应器中可能还存在反硝化作用, 这主要是因为 UASB 颗粒污泥有机质含量较高, 且颗粒污泥菌体释放有机物的速率较慢所致^[24]; 但是, R2 反应器高于理论值, 具体原因还有待分析.

2.3 格室间的氮素去除规律

对稳定期间各格室氮素去除规律分析发现(图3),R1反应器中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 基本在第一格室已被去除,去除率均高达99%以上,其余4个隔室并未起到作用. R2反应器的去除规律有所不同,第一格室虽然对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 具有较大的去除作用, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率高达99%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率85%,但其余4个格室对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 亦有去除作用,贡献率为7%. 从 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的生成量及每个格室的变化情况

看,均在第一格室生成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,且R1第一格室生成量比R2第一格室高 $8.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均被逐渐消耗部分,且两个反应器的消耗量基本相同. 监测稳定运行时的各格室的污泥浓度发现(表2),R2反应器污泥浓度总体低于R2反应器,尤其第一格室的污泥浓度比R2反应器的第一格室的污泥浓度低34%,两个反应器对氮的去除存在一定的差异,造成该结果的原因很多,如污泥的性质及污泥量、生物量等,但具体原因有待进一步研究.

表 2 稳定运行时的各格室的污泥浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Sludge concentration of each compartment during stable operation/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

反应器	第一格室	第二格室	第三格室	第四格室	第五格室
R1	8 702	9 471	11 616	11 858	10 307
R2	5 404	8 908	9 187	9 123	9 024

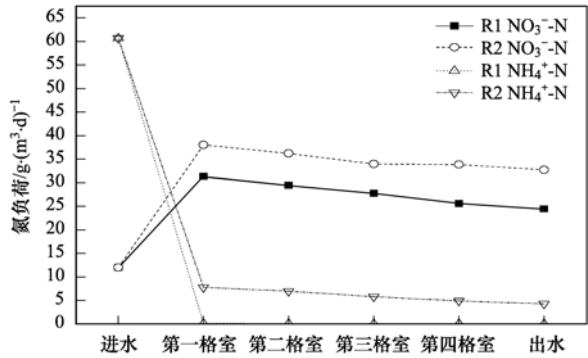


图 3 稳定运行时水质变化

Fig. 3 Water quality changes during stable operation

接种的厌氧颗粒污泥和厌氧絮状污泥分别是黑色和灰黑色,启动成功时R1、R2反应器的相对应格室的颜色相似,均是第一格室有少部分的红棕色,随着水流的方向颜色变化依次为少量红棕色→黄褐色→黑色,该现象与鲍林林等^[25]研究相似. 而典型的ANAMMOX细胞中含有大量的细胞色素C而呈现红色^[26],结合第一格室对氮素的大部分的去除,可认为该格室的红色菌群为ANAMMOX,且高于其他格室. 其余格室由于基质的浓度低导致ANAMMOX的富集度较低,颜色是黄褐色甚至最后格室仍保持原接种污泥颜色黑色,但对每个格室菌属类别仍需进一步的鉴定. 从污泥形态看,R2中污泥以不规则块状和絮状存在,R2中污泥是不规则块状、絮状和部分颗粒污泥,可能由于水力负荷较低,没有足够的剪切力使得在ABR中诱导絮状污泥形成颗粒污泥,可尝试通过提高流速,增大剪切力来培养厌氧颗粒污泥.

3 结论

(1)接种厌氧絮状/颗粒混合污泥、厌氧絮状污泥的ABR反应器,分别经过120 d和125 d均成功启动厌氧氨氧化反应,都经历了菌体水解期、活性停滞期、活性提高期和稳定运行期等4个阶段,稳定运行期间对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率均可达到90%以上,且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的平均去除负荷为 $57.3\sim67.9\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,R1在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除负荷上略高于R2.

(2)启动成功后,两个ABR反应器的第一格室均已去除90%以上的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,其余格室对氮的去除贡献率较小,这与污泥的颜色特征相一致,第一格室部分污泥呈少量红棕色,随着水流的方向颜色变化依次为少量红棕色→黄褐色→黑色.

(3)以上表明,接种污泥的不同并未造成ABR厌氧氨氧化反应器的启动规律和污染物去除特征有明显差异.

参考文献:

[1] 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.

[2] 朱月琪, 张丽娟, 曾国驱, 等. 低浓度氨氮废水在ABR中的厌氧氨氧化研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(6): 1224-1230.

[3] 曾国驱, 贾晓珊. 制革废水的厌氧氨氧化ABR脱氮工艺研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4618-4626.

[4] Chamchoi N, Nitisoravut S. Anammox enrichment from different conventional sludges[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(11): 2225-2232.

- [5] Suneethi S, Joseph K. ANAMMOX process start up and stabilization with an anaerobic seed in Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR)[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(19): 8860-8867.
- [6] 赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵. 生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3171-3179.
- [7] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [8] 李亚峰, 马晨曦, 张驰. UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3044-3051.
- [9] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor: operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance [J]. *Desalination*, 2012, **286**: 436-441.
- [10] Wang T, Zhang H M, Gao D W, *et al.* Comparison between MBR and SBR on Anammox start-up process from the conventional activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **122**: 78-82.
- [11] 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. 88-284.
- [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 [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 113-118.
- [13] Tsushima I, Ogasawara Y J, Kindaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) biofilm reactors[J]. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [14] van de Vossenberg J, Rattray J E, Geerts W, *et al.* Enrichment and characterization of marine Anammox bacteria associated with global nitrogen gas production[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 3120-3129.
- [15] Nakajima J, Sakka M, Kimura T, *et al.* Enrichment of anammox bacteria from marine environment for the construction of a bioremediation reactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **77**(5): 1159-1166.
- [16] 孟凡能, 张树军, 吕鑑, 等. 混合污泥接种的厌氧氨氧化处理污泥脱水液的启动[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(3): 318-324.
- [17] Tang C J, Zheng P, Mahmood Q, *et al.* Start-up and inhibition analysis of the Anammox process seeded with anaerobic granular sludge[J]. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 2009, **36**(8): 1093-1100.
- [18] Wang T, Zhang H M, Gao D W, *et al.* Enrichment of Anammox bacteria in seed sludges from different wastewater treating processes and start-up of Anammox process [J]. *Desalination*, 2011, **271**(1-3): 193-198.
- [19] Wang T, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Start-up of the Anammox process from the conventional activated sludge in a membrane bioreactor[J]. *Bioresource technology*, 2009, **100**(9): 2501-2506.
- [20] Tang C J, Zheng P, Chai L Y, *et al.* Characterization and quantification of anammox start-up in UASB reactors seeded with conventional activated sludge[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **82**: 141-148.
- [21] 马富国, 张树军, 曹相生, 等. 硝化生物膜启动厌氧氨氧化反应器的研究[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(23): 24-28.
- [22] 冯平, 周少奇. 常温下厌氧氨氧化生物膜反应器的启动研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(6): 19-22, 34.
- [23] 彭绪亚, 李治阳, 王璐, 等. UASB 反应器培养厌氧氨氧化菌的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(11): 20-24.
- [24] 李冬, 邱文新, 张男, 等. 常温 ANAMMOX 工艺运行性能及功能菌研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 56-62.
- [25] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯, 等. 常温低基质厌氧氨氧化反应器启动及其稳定性[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(3): 981-986.
- [26] 张海芹, 陈重军, 王建芳, 等. 厌氧氨氧化启动过程及特性研究进展[J]. *化工进展*, 2014, **33**(8): 2180-2186.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行