

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶笠湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

快速启动厌氧氨氧化工艺

闫刚¹, 徐乐中^{1,2,3*}, 沈耀良^{1,2,3}, 吴鹏^{1,2,3}, 张婷¹, 程朝阳¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 为研究如何获得厌氧氨氧化的快速启动工艺, 采用两种不同水力流态反应器: 完全混合式膜生物反应器(MBR)和推流式厌氧折流板反应器(ABR), 分别接种絮状硝化污泥, 考察其厌氧氨氧化快速启动性能. 结果表明: 两种反应器均能成功启动厌氧氨氧化, MBR启动周期(90 d)比 ABR(111 d)缩短 20%; 稳定运行期内, MBR 总氮($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N}$)平均去除负荷 [$0.098 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]也明显高于 ABR [$0.089 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]; 此外, 两个反应器中污泥形态差异明显, MBR 中污泥呈絮状, 而 ABR 第 1 隔室中以厌氧氨氧化颗粒污泥为主; NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 之间的定量关系分析表明: 相较于 ABR, MBR 能实现完全的生物截留, 使得系统内含有更多种类的脱氮功能菌, 有利于氮素的去除. MBR 在厌氧氨氧化的快速启动方面表现出更明显的优势.

关键词: 厌氧氨氧化; 膜生物反应器; 厌氧折流板反应器; 快速启动; 脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1116-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609051

Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process

LÜ Gang¹, XU Le-zhong^{1,2,3*}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}, WU Peng^{1,2,3}, ZHANG Ting¹, CHENG Chao-yang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to study the quick start-up process of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX), two types of reactors with different hydraulic flow state inoculated with aerobic nitrifying sludge were investigated, the membrane bioreactor (MBR) and anaerobic baffled reactor (ABR), respectively. The result showed that both reactors successfully started up ANAMMOX process. The start-up period of the MBR (90 d) was 20% shorter than the ABR (111 d). During the stable operation, the average nitrogen ($\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N}$) removal capacity of $0.098 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in the MBR was also higher than that of $0.089 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in the ABR. In addition, the differences of sludge morphology were obvious in the two reactors; flocculent sludge was developed in the MBR while ANAMMOX granular sludge was mainly formed in the first compartment of the ABR. Moreover, the quantitative relationship analysis between NH_4^+-N , NO_2^--N and NO_3^--N showed that the MBR system contained more kinds of bacteria with nitrogen removal function, compared to the ABR, and it was therefore more conducive to the removal of nitrogen. MBR exhibited a more excellent performance for ANAMMOX start-up.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); membrane bioreactor (MBR); anaerobic baffled reactor (ABR); quick start-up; nitrogen removal

厌氧氨氧化的启动过程实质上是反应器内厌氧氨氧化菌活化、扩增、功能增强的过程. 但是厌氧氨氧化菌生长速率低、对外界环境变化极其敏感^[1], 使得厌氧氨氧化工艺的启动需要一个相当长的周期, 已成为该工艺工业化应用的重要瓶颈^[2], 探寻一种合适的厌氧氨氧化生物反应器将有助于推动厌氧氨氧化工艺的工业化进程. 理想的生物反应器既能满足厌氧氨氧化菌的生长条件, 促进细胞增殖, 又能有效地持留菌体. 据报道, 多种类型反应器如序批式反应器(SBR)^[3,4]、上流式厌氧污泥床反应器(UASB)^[5,6]、膨胀颗粒污泥床反应器(EGSB)^[7]等均能成功启动厌氧氨氧化. 膜生物反应器(MBR)被认为是一项新型高效的厌氧氨氧化

反应器, 能实现完全的生物截留^[8,9], 从根本上防止了厌氧氨氧化菌的流失; 厌氧折流板反应器(ABR)是一种厌氧生物反应器, 具有结构简单、生物截留能力强、运行效果稳定可靠等特点^[10,11], 适合于生长缓慢菌种的培养. 上述两种反应器既能很好地满足了厌氧氨氧化菌的生长条件, 又有高效的污泥截

收稿日期: 2016-09-06; 修订日期: 2016-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578353); 江苏省自然科学基金项目(BK20160356); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目; 江苏省高校自然科学基金研究项目(16KJB610013); 苏州科技学院科研基金青年项目(XKQ201504); 江苏省2015年度普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15-0636)

作者简介: 闫刚(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: gl930522@163.com

* 通信作者, E-mail: kgre505@163.com

留性能,可作为快速启动厌氧氨氧化的理想反应器。

本研究分别在 MBR 和 ABR 中接种同种硝化污泥启动厌氧氨氧化,对比两个反应器厌氧氨氧化启动过程中启动时间、脱氮性能、污泥性状等方面的差异,以期快速启动厌氧氨氧化反应器的选型提供依据,促进厌氧氨氧化工艺的实际应用。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所采用的 MBR(图 1)与 ABR(图 2)反应器均由有机玻璃制成。MBR 反应器长 20 cm,宽 15 cm,有效高度 16 cm,有效容积 4.8 L。采用恒流泵连续进水,恒流泵经中空纤维微滤膜抽吸连续出水。反应器中设置搅拌机,控制转速 $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,使污泥与基质充分接触混匀。ABR 反应器长 26 cm,宽 9 cm,有效高度 20 cm,有效容积 4.8 L。分为 3 个隔室,每个隔室升降流区宽度比为 4:1,折流板导向角为 45° ,采用恒流泵连续进水,溢流水。

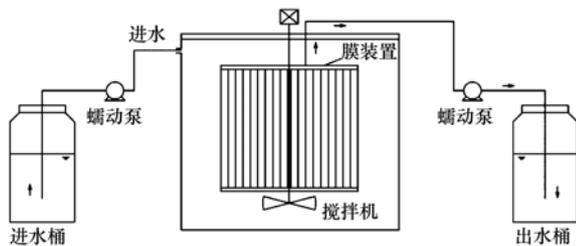


图 1 MBR 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic of membrane bio-reactor

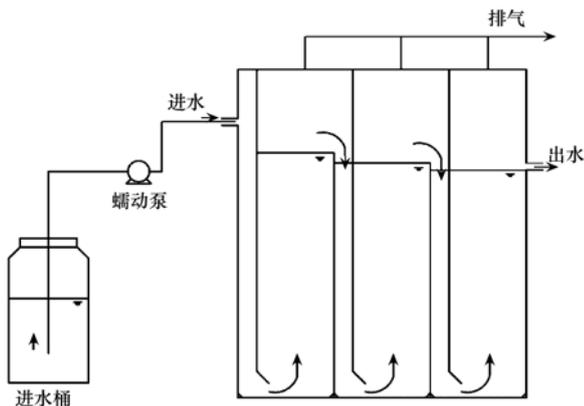


图 2 ABR 反应器装置示意

Fig. 2 Schematic of anaerobic baffled reactor

1.2 接种污泥

本实验中两个反应器接种同种活性污泥,污泥取自苏州市某污水厂 A²/O 工艺的好氧硝化污泥。接种初期 ABR 各隔室和 MBR 污泥指标如表 1 所示。

表 1 接种污泥性质

反应器	ABR			MBR
	第一隔室	第二隔室	第三隔室	
MLSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	9.5	8.4	9.7	7.2
MLVSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	5.6	5.0	6.2	4.4
MLVSS/MLSS/%	59	60	64	61

1.3 反应器运行条件

MBR 与 ABR 反应器运行条件相同。两个反应器整体密封保证厌氧,采用遮阳塑料膜遮住避光,置于恒温水浴缸中,控制水浴温度 $33^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,HRT 设置为 24 h,控制进水 pH 为 7.5 ± 0.5 ,采用人工配水,其成分主要包括 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaNO_2 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KHCO_3 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $27.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $180 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微量元素 I 和微量元素 II 按照 $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 添加。微量元素 I 组分($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): EDTA 5, FeSO_4 5;微量元素 II 组分($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): EDTA 15, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.43, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.19, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.21, H_3BO_4 0.014。

1.4 测定项目与方法

启动过程中每隔 2 d 分别采集两个反应器进出水水样及 ABR 反应器各隔室水样。测定项目主要包括 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、MLSS、MLVSS、污泥粒径。 NH_4^+-N : 纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N : N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N : 紫外分光光度法; MLSS、MLVSS 采用重量法^[12]; 污泥粒径: 从反应器中取一定量污泥,用水冲洗后依次通过 1.6、1.25、0.8、0.5、0.2 mm 的分样筛,然后将各个分样筛中截留的颗粒污泥收集,在 105°C 烘干、称重,计算不同粒径范围的污泥所占质量分数。

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化反应器快速启动

2.1.1 MBR 反应器启动特征

控制进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 负荷在 $0.05 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右,在此负荷下连续运行 90 d 成功启动厌氧氨氧化。Wang 等^[13]在 MBR 中接种两种好氧活性污泥的混合物连续培养 60 d 成功启动厌氧氨氧化,比本实验缩短了 1/3 个周期,不同污泥源厌氧氨氧化的启动时间会产生明显差异,其所接种混合污泥源中一部分含有同步硝化反硝化功能,可

能加快了厌氧氨氧化的启动,但具有同步硝化反硝化的污泥源不易获取,不利于厌氧氨氧化快速启动工艺的工业化应用. 根据 NH_4^+ -N 的去除规律(图3)可将该启动过程分为3个阶段^[14],分别为活性停滞期(1~13 d)、活性提高期(14~90 d)和稳定运行期(91~121 d).

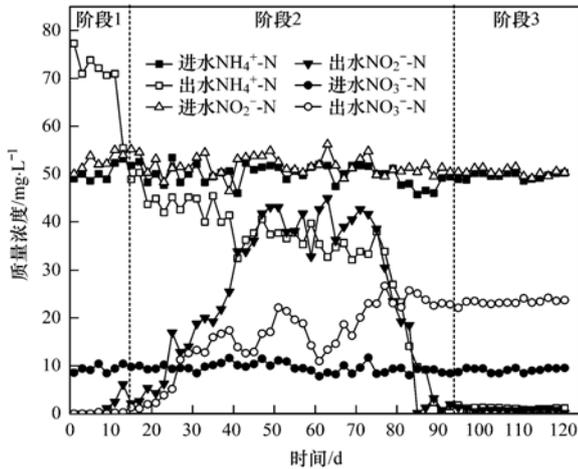


图3 MBR启动过程中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N变化

Fig. 3 Variation of NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N concentration during start-up in the MBR

在阶段 I (1~13 d) 中,出水 NH_4^+ -N浓度明显高于进水浓度,出水 NO_2^- -N和 NO_3^- -N浓度基本为零. 路青等^[15]分别接种好氧污泥、厌氧颗粒污泥和厌氧消化污泥均成功启动厌氧氨氧化,在启动初期,出水 NH_4^+ -N浓度大于进水,这与本研究结果一致. 这是由于微生物所在环境的改变,使得接种好氧硝化污泥因不能适应厌氧环境而发生细胞自溶^[16],从而释放出大量的 NH_4^+ -N,导致出水 NH_4^+ -N浓度升高. 与此同时,细菌自溶产生大量的有机物为反硝化菌提供了电子供体和碳源,反硝化成为该阶段的主反应,进水 NO_2^- -N和 NO_3^- -N因反硝化作用而得到去除^[16].

在阶段 II (14~90 d) 中,出水 NH_4^+ -N浓度不断降低,而出水 NO_2^- -N浓度先升后降. 由于阶段 I 中的细菌自溶产生的有机物被消耗,使得反硝化菌失去电子供体而活性减弱,导致 NO_2^- -N去除率降低,出水 NO_2^- -N浓度升高^[17];在适宜的进水基质和环境下,厌氧氨氧化菌活性逐渐增大, NO_2^- -N去除率增大,出水 NO_2^- -N浓度不断降低. 值得说明的是,出水 NO_2^- -N浓度由高到低的变化过程正是厌氧氨氧化菌活性由弱到强的过程,即厌氧氨氧化菌逐渐淘汰反硝化菌成为系统主要菌种的过程. 第70~90 d期

间, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N去除率显著提高,表明厌氧氨氧化菌已成为本阶段的优势菌^[18].

在阶段 III (91~121 d) 中,出水 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N浓度基本稳定, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N平均去除率均达到98%以上,平均去除负荷为 $0.049 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,且 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N去除量和 NO_3^- -N的生成量呈现一定的比例关系,标志着厌氧氨氧化成功启动^[19].

2.1.2 ABR 反应器启动特征

ABR 与 MBR 反应器进水条件相同,两个反应器平行运行. 在 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N负荷均为 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下,连续运行111 d成功启动厌氧氨氧化. 张海芹等^[20]在 ABR 中接种厌氧絮状/颗粒污泥的混合污泥经过120 d成功启动厌氧氨氧化,与本研究启动周期基本一致. 根据氮素的去除规律(图4),ABR 反应器启动特征与 MBR 基本相似,都经历了上述3个阶段.

ABR 反应器活性停滞期所持续的时间较 MBR 多18 d,且前10 d出水 NH_4^+ -N浓度明显低于 MBR. 推测这与两种反应器的水力流态有关,MBR 中机械搅拌会对污泥产生扰动,加速了细菌自溶速率,导致活性停滞期内 MBR 出水 NH_4^+ -N浓度较高. 两者在活性提高期所持续的时间大致相同. ABR 反应器在第111 d运行进入稳定期. NH_4^+ -N和 NO_2^- -N平均去除率分别达到77%和99%左右,平均去除负荷分别为 $0.039 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. ABR 中 NH_4^+ -N去除负荷明显低于 MBR,MBR 完全截留作用使得反应器中含有更多的厌氧氨氧化菌,提高了 NH_4^+ -N的去除负荷. 朱月琪等^[21]在 ABR 中接种厌氧污泥与河涌底泥的混合污泥,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容积负荷分别为 $65.53 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $68.46 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,平均去除率为76.3%和91.3%. 这与本实验的研究结果较为相似,然而张海芹等^[20]在相同的进水 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N负荷下, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的平均去除率都在90%以上,这可能与接种污泥、运行条件等不可复制的环境因素有关.

值得一提的是,稳定运行期内,ABR 第1隔室对 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N去除贡献率分别达到90%和99%左右,其余两个隔室对 NH_4^+ -N平均去除贡献率分别为7%和3%左右. NO_3^- -N基本在第1隔室生成,随后 NO_3^- -N在另外两个隔室被逐渐去除小部分. 本研究 ABR 在厌氧氨氧化的启动过程中,主要由第

1 隔室承担了脱氮功能,其余各隔室作用不大.这与张海芹等^[20]取得的结果基本一致;然而朱月琪等^[21]和曾国驱等^[22]的研究结果显示 ABR 各隔室的厌氧氨氧化功能菌呈现进水隔室少,后段隔室多的特点.也就是说 ABR 各隔室脱氮功能顺着水流方向是逐步增强的,这与本实验的结果差异较大.作为一种推流式反应器,ABR 第 1 隔室底物充足,营养丰富,利于该隔室内厌氧氨氧化菌的生长与富集.其余沿程各隔室出现底物匮乏的状况,不适合厌氧氨氧化菌的生长.本实验中进水基质负荷较低,推测适当提高进水基质负荷,可在 ABR 其余各隔室内培养出厌氧氨氧化优势菌种,充分利用 ABR 各隔室脱氮功能.

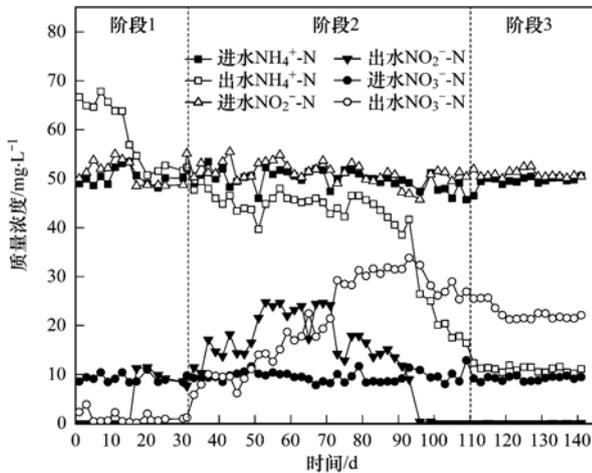


图 4 ABR 启动过程中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 变化

Fig. 4 Variation of NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N concentration during start-up in the ABR

MBR 与 ABR 反应器均能成功启动厌氧氨氧化.从启动时间来看,MBR 比 ABR 节省了 20% 的启动时间;从氨氮去除负荷来看,MBR 较 ABR 去除负荷更高.由此可知:相对于 ABR 而言,MBR 更适合厌氧氨氧化的快速启动.这为快速启动厌氧氨氧化工艺反应器的选型提供了理论依据.

2.2 污泥性状

2.2.1 污泥质量浓度

稳定运行期内,ABR 各隔室和 MBR 内污泥浓度如表 2 所示.与接种初期相比,总固体质量浓度 (MLSS)、挥发性固体质量浓度 (MLVSS) 以及 MLVSS/MLSS 比值都有所下降.由于好氧 \rightarrow 厌氧环境的改变,导致大量硝化污泥死亡分解,造成污泥浓度降低.

表 2 稳定期内污泥性质

Table 2 Characteristics of sludge during stable operation				
反应器	ABR 第一隔室	ABR 第二隔室	ABR 第三隔室	MBR
MLSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	6.6	4.5	4.5	4
MLVSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.4	1.8	2.6	1.5
MLVSS/MLSS/%	36	40	58	38

2.2.2 污泥颜色

稳定运行期内,两个反应器中污泥颜色与接种污泥相比较,污泥颜色没有显著变化,皆为棕黄色(图 5).朱静平等^[23]在 ASBR 反应器中接种硝化污泥成功启动厌氧氨氧化,稳定期内污泥颜色与接种污泥相比较基本没有变化,这与本研究的现象较为一致.路青等^[15]在 MBR 中接种厌氧颗粒污泥启动厌氧氨氧化,经过长期驯化后颗粒污泥颜色由黑色转变为红褐色.说明接种污泥源的不同导致了厌氧氨氧化污泥颜色的差异.

2.2.3 污泥粒径

稳定运行期内,ABR 第 1 隔室形成大小不一的厌氧氨氧化颗粒污泥,颗粒污泥粒径主要集中在 0.2 ~ 1.25 mm 之间(图 6),其余各隔室污泥呈絮状.MBR 中未形成颗粒污泥,依旧为絮状.ABR 第 1 隔室基质充足,由于下向流室中较高的水流速度及上向流室中较低的上升流速,使得絮体污泥在运行过程中形成的污泥床集中在上流隔室中,且混合充分,利于污泥的颗粒化作用^[24, 25],其余各隔室由于基质浓度较低,营养匮乏,形成颗粒污泥的速率较

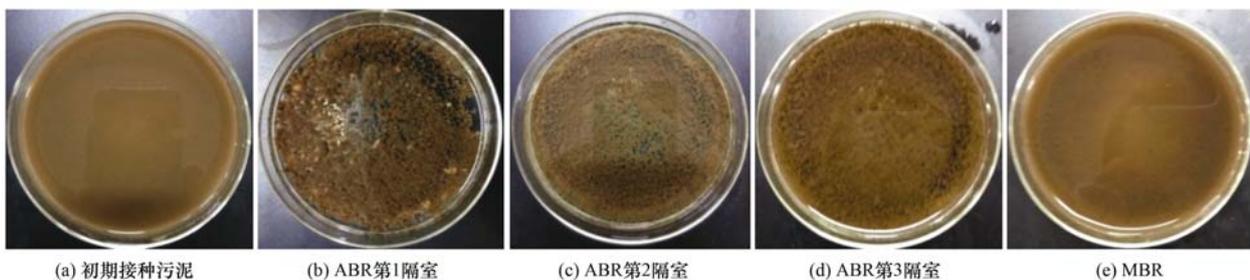


图 5 稳定期污泥形态

Fig. 5 Photos of the sludge during stable operation

慢. MBR 属于完全混合式反应器,污泥与基质混合均匀,脱氮效果佳,但是不利于厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成.

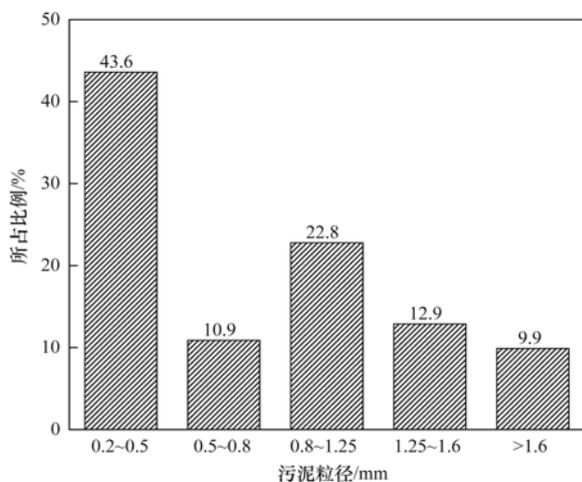
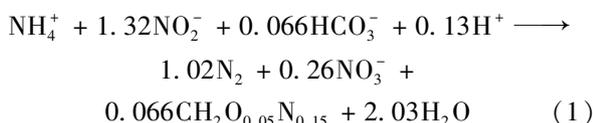


图6 ABR 第1隔室污泥粒径分布

Fig. 6 Diameter distribution of the sludge in the first compartment of the ABR

2.3 基质及产物计量比

目前,学术界普遍接受的厌氧氨氧化反应方程式如式(1)所示^[3]. 从中可知,厌氧氨氧化稳定运行期内, NH_4^+ -N/ NO_2^- -N消耗量和 NO_3^- -N生成量/ NH_4^+ -N消耗量理论值分别为 1.32 和 0.26,这也是厌氧氨氧化成功启动的标志之一.



本实验中,MBR 和 ABR 稳定运行时, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的消耗量与 NO_3^- -N生成量比值分别为 1:1.03:0.28 和 1:1.32:0.33,ABR 与 Strous 等^[3]所提出的理论值吻合较好,而 MBR 与理论值差异较大. 有研究表明,厌氧氨氧化反应器中,少量的好氧氨氧化菌(AOB)能利用泄漏进入反应器的氧而存活下来从而能够氧化更多的 NH_4^+ -N^[26]. 本实验进水未进行有效除氧,进水中含有少量溶解氧,反应器中会有部分 AOB 存活下来. 反应器中还存在着部分反硝化菌^[27],菌体由于生长过程中死亡或外层组织脱落而使反应环境中存在少量有机物,这有利于反硝化菌的生长,它们能利用有机物进行反硝化作用去除一部分 NO_2^- -N和 NO_3^- -N. 由于 MBR 对微生物的完全截留作用使得该反应器内有较多的脱氮功能菌,如 AOB 和反硝化菌^[13]. 厌氧氨氧化菌与 AOB、反硝化菌之间存在着协同关系^[28],AOB 能为厌氧氨氧化菌提供缺氧环境和亚硝酸盐基质;反硝化菌能

将有机碳转化为 CO_2 ,为厌氧氨氧化提供碳源,从而有利于厌氧氨氧化的进行^[29]. MBR 中多种功能菌协同脱氮,有利于总氮的去除,这也是 MBR 中三氮比与理论值差异较大的重要原因之一.

3 结论

(1) MBR 和 ABR 分别经过 90 d 和 111 d 均成功启动厌氧氨氧化. 稳定运行期内,MBR 与 ABR 中 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N平均去除负荷分别达到 $0.048 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.049 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.039 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. MBR 启动时间短, NH_4^+ -N去除负荷高,更加适合厌氧氨氧化的快速启动.

(2) 经过 111 d 的运行,ABR 第1隔室以厌氧氨氧化颗粒污泥为主,对 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N去除贡献率分别为 90% 和 99% 左右,该反应器利于厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成.

(3) 稳定运行时,ABR 中三氮变化比与理论值吻合较好,而 MBR 与理论值差异明显. 由于 MBR 完全的生物截留能力使得该反应器内有更多种类的脱氮功能菌,从而有利于总氮的去除.

参考文献:

- [1] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [2] Lotti T, Kleerebezem R, Abelleira-Pereira J M, *et al.* Faster through training: the anammox case [J]. *Water Research*, 2015, **81**: 261-268.
- [3] 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.
- [4] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [5] Ma B, Peng Y Z, Zhang S J, *et al.* Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 606-611.
- [6] Niu Q G, He S L, Zhang Y L, *et al.* Process stability and the recovery control associated with inhibition factors in a UASB-anammox reactor with a long-term operation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **203**: 132-141.
- [7] Chen T T, Zheng P, Tang C J, *et al.* Performance of ANAMMOX-EGSB reactor [J]. *Desalination*, 2011, **278**(1-3): 281-287.
- [8] van der Star W R L, Miclea A I, van Dongen U G J M, *et al.* The membrane bioreactor: a novel tool to grow anammox bacteria

- as free cells[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(2): 286-294.
- [9] Huang X W, Urata K, Wei Q Y, *et al.* Fast start-up of partial nitrification as pre-treatment for anammox in membrane bioreactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 371-378.
- [10] Yu J J, Chen H, Guo Q, *et al.* Response of performance of an anammox anaerobic baffled reactor (ABR) to changes in feeding regime[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 19-27.
- [11] Jin R C, Yu J J, Ma C, *et al.* Performance and robustness of an anammox anaerobic baffled reactor subjected to transient shock loads[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 126-136.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors[J]. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [15] 路青, 李秀芬, 华兆哲, 等. 接种污泥源对厌氧氨氧化启动效能的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(4): 60-65.
Lu Q, Li X F, Hua Z Z, *et al.* Effect of type of sludge on efficiency of ANAMMOX process [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(4): 60-65.
- [16] 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 and Biotechnology*, 2009, **36**(8): 1093-1100.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张海芹, 王翻翻, 李月寒, 等. 不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2216-2221.
Zhang H Q, Wang F F, Li Y H, *et al.* Start-up performance of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge in anaerobic baffled reactor [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2216-2221.
- [21] 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.
- Zhu Y Q, Zhang L J, Zeng G Q, *et al.* Study on anammox of low concentration of ammonia nitrogen wastewater in ABR [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(6): 1224-1230.
- [22] 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.
- Zeng G Q, Jia X S. Nitrogen removal performance of ANAMMOX ABR process in tannery wastewater treatment [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4618-4626.
- [23] 朱静平, 胡勇有. 不同污泥源厌氧氨氧化污泥的比较[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(6): 130-134.
- Zhu J P, Hu Y Y. Comparison of different anammox sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(6): 130-134.
- [24] 沈耀良. ABR 反应器中颗粒污泥的微生态特性[J]. *中国沼气*, 2005, **23**(1): 13-16.
- Shen Y L. Micro-ecological characteristics of granule sludge in Anaerobic Baffled Reactor (ABR) [J]. *China Biogas*, 2005, **23**(1): 13-16.
- [25] 徐金兰, 王志盈, 杨永哲, 等. ABR 的启动与颗粒污泥形成特征[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(5): 575-581.
Xu J L, Wang Z Y, Yang Y Z, *et al.* Start-up of anaerobic baffled reactor (ABR) and the feature of granular sludge forming [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(5): 575-581.
- [26] Dapena-Mora A, Van Hulle S W H, Campos J L, *et al.* Enrichment of anammox biomass from municipal activated sludge: experimental and modelling results [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2004, **79**(12): 1421-1428.
- [27] 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.
Li D, Qiu W X, Zhang N, *et al.* Study on performance of ANAMMOX reactor and the functional bacteria at room temperature [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(1): 56-62.
- [28] 贾方旭, 彭永臻, 杨庆. 厌氧氨氧化菌与其他细菌之间的协同竞争关系[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1351-1361.
Jia F X, Peng Y Z, Yang Q. Competition and synergism between anammox bacteria and other bacteria [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1351-1361.
- [29] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(5): 1-4.
Zhou S Q. Stoichiometric analysis of combined reaction of anaerobic ammonia oxidation with denitrification [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, **34**(5): 1-4.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)