

 方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



**2019**

Vol.40 No.3  
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估.....尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响.....李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)

京津冀郊区站点秋冬季大气PM<sub>2.5</sub>来源解析.....王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)

四川省典型工业行业PM<sub>2.5</sub>成分谱分析.....冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)

典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析.....赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)

沈阳市采暖期与非采暖期空气PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源分析.....张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)

新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析.....闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)

烟台市环境受体PM<sub>2.5</sub>四季污染特征与来源解析.....刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)

常州市冬季PM<sub>2.5</sub>中类腐殖质昼夜特征分析.....顾远,李清,黄雯倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)

西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险.....曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)

京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析.....邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)

中国城市O<sub>3</sub>浓度时空变化特征及驱动因素.....黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)

基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征.....张倩倩,张兴赢(1132)

舟山市臭氧污染分布特征及来源解析.....王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)

中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立.....高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小栓(1152)

异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化.....黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)

兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征.....栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析.....胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)

基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO<sub>2</sub>扩散通量估算.....张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)

渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化.....刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)

思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学.....劳心宇,原杰,刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)

厦门湾海滩微塑料污染特征.....刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)

高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析.....王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)

鲜水河断裂带拉花盆地地下水化学特征及控制因素.....何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)

成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征.....吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)

丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析.....张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)

蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响.....刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)

基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.....苏瑛,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)

生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响.....黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性.....何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)

BiOCl-(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制.....张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)

微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除.....吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除.....邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)

Ca/Mg负载改性渣渣生物炭对水中磷的吸附特性.....易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)

两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素.....程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)

静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响.....俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)

4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制.....王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析.....徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦婷,汤同欢(1353)

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响.....李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰(1360)

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复.....李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)

CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能.....马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)

不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能.....袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建园(1382)

ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水.....李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)

室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性.....谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)

不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征.....任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,姜雁,王桐屿,周少奇(1405)

降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征.....付昆明,廖敏辉,周厚田,付巢,姜婍,仇付国,曹秀芳(1412)

IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析.....刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,陈昌明(1419)

温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响.....于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化.....牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)

牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响.....彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响.....张彦军,郭胜利(1446)

三峡库区典型微生物土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的反应.....李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响.....王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)

长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征.....宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征.....童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)

桂林市仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征.....徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征.....王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)

大气污染对居民健康影响研究进展.....秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)

《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

# 不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征

任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁\*, 曹雁, 王桐屿, 周少奇

(华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

**摘要:** 采用2套 UBF 反应器 R1 和 R2, R1 接种好氧硝化污泥与厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥, R2 接种厌氧消化絮状污泥与厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥, 采用逐渐提高进水亚硝氮和氨氮浓度的方式富集培养 ANAMMOX 菌. 结果表明, R1 启动时间短, 仅耗时 36 d 就成功启动了厌氧氨氧化反应器, 而 R2 则需要 53 d; R1 和 R2 脱氮效果均较好, 但 R1 脱氮效果优于 R2 且稳定. 在稳定运行阶段, R1 氨氮、亚硝氮和总氮去除率分别为 99.92%、96.64% 和 81.87% 左右, R2 氨氮、亚硝氮和总氮去除率分别为 97.54%、94.91% 和 80.98% 左右. 反应器启动成功后, *Candidatus Kuenenia* 属在所检测出的属中丰度位列前六, 在 R1 和 R2 中的相对丰度分别为 3.22% 和 2.35%; 改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型和二级动力学模型对拟稳态阶段 R1 和 R2 的脱氮性能均能进行较好地拟合, 经计算, R1 的最大基质去除速率  $U_{\max}$  稍大于 R2, 说明 R1 的脱氮潜力较大.

**关键词:** 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 接种污泥; 脱氮性能; 动力学特征; 微生物群落

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1405-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201806120

## ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics

REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, QIN Yu-jie\*, CAO Yan, WANG Tong-yu, ZHOU Shao-qi

(School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Two different mixed sludges (aerobic nitrifying sludge and ANAMMOX-denitrification sludge: R1, and anaerobic digestion flocculent sludge and ANAMMOX-denitrification sludge: R2), were used as inocula in two UBF reactors to enrich Anammox bacteria. Both kinds of mixed sludge set up the Anammox process successfully. It took 36 days for R1, while R2 required 53 days. Nitrogen removal rates of R1 and R2 were high during the whole operation. During the stable operation stage, the removal rates of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_2^--\text{N}$ , and TN were about 99.92%, 96.64%, and 81.87% for R1; and 97.54%, 94.91%, and 80.98% for R2. Illumina High-throughput Sequencing revealed *Candidatus Kuenenia* was in the top six taxa in the two reactors with 3.22% relative abundance in R1 and 2.35% in R2 after the successful start-up. Simulation results indicated that the Modified Stover-Kincannon model and the second-order model were appropriate models. It was deduced that the N-removal potential of R1 was a little greater than that of R2 after comparing the projected maximum substrate removal rate  $U_{\max}$  of the two reactors.

**Key words:** anaerobic ammonium oxidation(ANAMMOX); seed sludge; nitrogen removal performance; kinetics; microbial community

厌氧氨氧化是指在厌氧条件下 ANAMMOX 菌以亚硝酸盐氮为电子受体, 氨氮为电子供体, 生成氮气和少量硝酸盐的生物过程<sup>[1]</sup>. 自从 ANAMMOX 菌首次在流化床中发现以来, 人们相继在淡水<sup>[2]</sup>、海洋<sup>[3]</sup>等环境中找到了它的存在. ANAMMOX 菌为分支很深的浮霉菌门, 已发现了 *Candidatus Brocadia*、*Candidatus Kueuenia*、*Candidatus Scaliudua*、*Candidatus Auammoxoglobus*、*Candidatus Jetteuia* 和 *Candidatus Anammoximicrobium* 属<sup>[4]</sup>. 污水处理系统中 *Candidatus Brocadia* 和 *Candidatus Kueuenia* 较为常见.

虽然与传统的生物脱氮工艺相比, 厌氧氨氧化工艺具有无需外加有机碳源、脱氮速率较高等优势<sup>[5,6]</sup>, 但是由于 ANAMMOX 菌为自养菌, 倍增时间长, 在 32~33°C 倍增时间约为 11 d<sup>[7]</sup>, 导致反应器启动时间较长. 因此一些研究者把焦点集中于厌氧氨氧化反应器接种污泥的选择上, 以期找到合适

的接种污泥, 实现厌氧氨氧化反应器迅速、稳定、高效的启动. 有研究分别采用活性污泥和厌氧颗粒污泥为种泥启动反应器时发现, 两类种泥都能成功启动厌氧氨氧化反应器, 但以活性污泥为种泥较好, 溶胞阶段和活性迟滞阶段较短, 浮霉菌门的丰度较高<sup>[8]</sup>. 研究者也发现采用混合污泥比采用单一污泥能更快启动厌氧氨氧化反应器<sup>[9]</sup>.

反应器动力学模型常常用来更好地理解反应器的运行情况, 可以获得非常有利的信息来预测反应器性能, 并有助于优化操作条件<sup>[10]</sup>. 基于动力学模型的分析结果, 可以对不同类型的厌氧氨氧化反应器的性能进行评估和调控. 本文采用两种不同的混

收稿日期: 2018-06-12; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578244); 广州市科技计划项目(201804010345); 中匈两国政府间科技合作交流项目(7-4)

作者简介: 任君怡(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: joyiren@163.com

\* 通信作者, E-mail: qinyujie@scut.edu.cn

合污泥作为接种污泥启动厌氧氨氧化反应器, 并采用高通量测序技术对处于稳定运行阶段的污泥进行微生物多样性分析比较, 同时从动力学角度进一步解读两个反应器的脱氮性能异同, 以期为厌氧氨氧化反应器的快速启动及动力学特征提供新思路.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本研究采用两套平行运行的 UBF 反应器, 反应器有效容积为 2.1 L, 反应器内部均设有 20 cm 高的填料层, 填料为 1 cm × 1 cm 的海绵方块. 废水经同一个蠕动泵同时泵入两个反应器内. 反应器设有保温层, 启动阶段不采取保温措施, 动力学实验阶段温度控制为 30°C ± 3°C. 反应装置如图 1 所示.

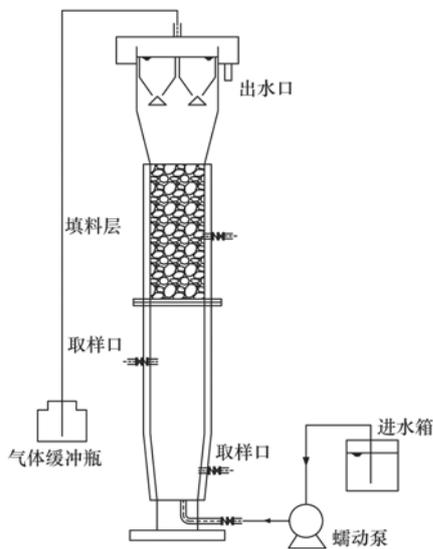


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

### 1.2 接种污泥和实验用水

R1 采用的种泥为 600 mL 的好氧硝化污泥与 600 mL 的厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥, R2 采用的种泥为 600 mL 的厌氧消化絮状污泥与 600 mL 的厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥. 其中, 好氧硝化污泥取自广州市沥滘污水处理厂的二沉池, 厌氧氨氧化-反硝化污泥为实验室内 UBF 反应器自行培养的污泥<sup>[11]</sup>, 厌氧消化絮状污泥为实验室内连续搅拌反应器 CSTR 中的中温厌氧消化产甲烷污泥<sup>[12]</sup>.

本实验用水采用模拟废水, 进水未采取除氧措施, 主要成分为 NH<sub>4</sub>Cl 和 NaNO<sub>2</sub>, 浓度根据实验需求进行调整, 其他成分根据文献进行添加<sup>[13]</sup>, 进水 pH 用 1 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸控制为 7.3 ~ 7.8.

### 1.3 反应器运行方式

以逐步提高进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度的方式

富集培养 ANAMMOX 菌. 启动成功之后, 保持进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度分别为 200 mg·L<sup>-1</sup> 和 264 mg·L<sup>-1</sup>, 当出水浓度稳定时 (±5%), 认为反应器达到了拟稳态阶段. 此后, 进入动力学特性试验阶段. 第一阶段, 保持进水 HRT 为 14 h, 逐步提高进水基质浓度. 第二阶段, 保持进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度分别为 210 mg·L<sup>-1</sup> 和 280 mg·L<sup>-1</sup>, 将 HRT 由 14 h 缩短至 3 h, 综合分析两组反应器的动力学特征.

### 1.4 水样测定方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法, 亚硝酸盐氮采用分光光度法, 硝酸盐氮采用紫外分光光度法, 总氮为氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮之和. pH 采用便携式 pH 计进行测定.

### 1.5 微生物多样性检测方法

当两个反应器均达到拟稳态阶段后, 在第 65 d 分别取两个反应器上层污泥. 采用 PowerSoil DNA Isolation Kit 试剂盒进行 DNA 提取, 应用细菌 16S rRNA (V3 + V4) 区域引物对 DNA 进行扩增, 扩增引物序列为 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3' 和 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3', 扩增片段大小为 490bp. 采用 PCR 仪对目标区域进行扩增, PCR 反应条件为: 95°C 5 min, 95°C 1 min, 50°C 1 min, 72°C 1 min, 72°C 7 min, 经 15 cycles 完成后, 扩增产物进行磁珠筛选片段以纯化 PCR 产物, 随后对 PCR 纯化产物依次进行 Solexa PCR、磁珠纯化、Nanodrop 定量及混样和切胶回收. 采用 Illumina HiSeq 2500 进行高通量测序.

### 1.6 动力学特征

采用改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型和二级动力学模型对 R1 和 R2 脱氮性能进行动力学分析.

改进的 Stover-Kincannon 模型为式(1):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V} \times (S_i - S_e) \quad (1)$$

式中, dS/dt 又可定义为式(2):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{U_{\max} \left( \frac{QS_i}{V} \right)}{K_B + \left( \frac{QS_i}{V} \right)} \quad (2)$$

将式(1)、(2)整理可得式(3):

$$\frac{V}{Q(S_i - S_e)} = \frac{K_B}{U_{\max}} \frac{V}{QS_i} + \frac{1}{U_{\max}} \quad (3)$$

式中, dS/dt 为基质去除速率 [g·(L·d)<sup>-1</sup>]; Q 为进水流量 (L·d<sup>-1</sup>); V 为反应器体积 (L); S<sub>i</sub> 为进水基质浓度 (g·L<sup>-1</sup>); S<sub>e</sub> 为出水基质浓度 (g·L<sup>-1</sup>); K<sub>B</sub>

为饱和常数 [ $\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ];  $U_{\max}$  为最大基质去除速率 [ $\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ].

二级动力学模型的表达式为式(4):

$$-\frac{dS}{dt} = k_{2(s)} X \left( \frac{S_e}{S_i} \right)^2 \quad (4)$$

将其进行积分和线性化处理, 可得式(5):

$$\frac{S_i \cdot \text{HRT}}{S_i - S_e} = \text{HRT} + \frac{S_i}{k_{2(s)} X} \quad (5)$$

式中, HRT 为水力停留时间(h),  $(S_i - S_e)/S_i$  为基质去除率,  $k_{2(s)}$  为二级基质去除速率( $\text{d}^{-1}$ );  $X$  为反应器污泥平均浓度( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 用  $E$  表示, 令  $a$  (常数) =  $S_i/[k_{2(s)} X]$ , 则式(5)可表示为式(6):

$$\frac{\text{HRT}}{E} = a + b\text{HRT} \quad (6)$$

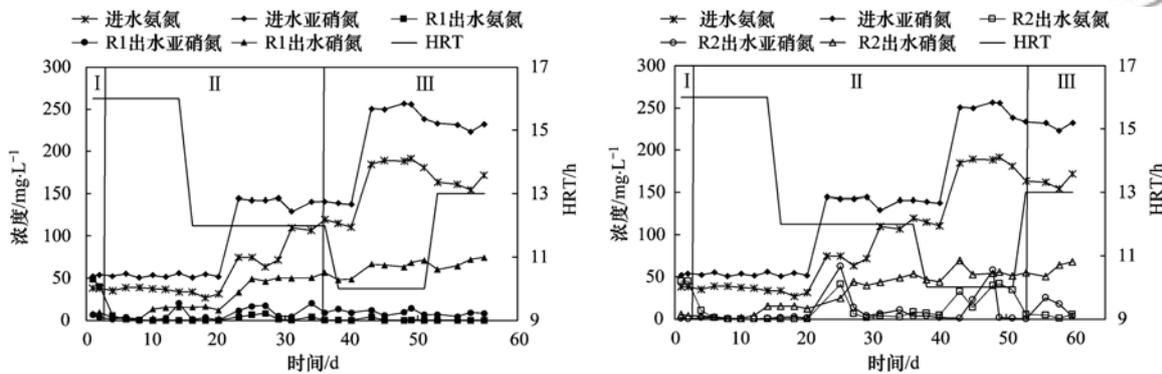


图2 启动阶段反应器脱氮性能变化

Fig. 2 Nitrogen removal performance of reactors during start-up

### 2.1.2 活性提高阶段(II)

从第4 d起, 反应器 R1 和 R2 进入活性提高阶段. 在此阶段内, 氨氮出水浓度迅速降低, 在进水氨氮浓度为  $(34.70 \pm 7.90) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 第8~20 d R1 和 R2 氨氮去除率均高达99%. 同时, R1 亚硝氮去除率基本在94%以上, 而 R2 亚硝氮出水效果非常稳定, 去除率高达99%. 从图2可以看出, 当反应器运行至第10 d时, R1 出水硝氮浓度突增至  $13.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而 R2 出水硝氮第14 d才明显升至  $15.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . Li 等<sup>[15]</sup>指出硝氮产生量可视为 ANAMMOX 反应的重要指标, 由此推测反应器 R1 的 ANAMMOX 菌活性早于反应器 R2 得到提高. 第16 d将 HRT 由16 h缩短至12 h, 第21 d开始逐步将进水氨氮和亚硝氮浓度提高, R1 出水氨氮浓度为  $0.31 \sim 8.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水亚硝氮浓度在  $4.68 \sim 20.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水硝氮浓度明显升至  $33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上, 氨氮、亚硝氮和总氮的平均去除率分别为96.6%、92.4%和74.9%. 当 R1 运行到第36 d时, 总氮容积负荷和去除负荷分别达到了  $0.63 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.47 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 标志着反应器

式中,  $b$  为常数.

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的启动特征

#### 2.1.1 适应阶段(I)

反应器运行1~3 d, HRT 为16 h, R1 和 R2 出水氨氮均高于进水氨氮, 推测原因有两个, 一是因为两个反应器内的部分好氧和异养微生物菌体因不适应新的环境而破裂水解, 使得出水的氨氮高于进水氨氮<sup>[14]</sup>, 二是污泥中的含氮有机物分解, 产生了氨氮. 同时在此阶段内, 从图2可以看出 R1 和 R2 出水亚硝氮都较低, R1 和 R2 亚硝氮平均去除率分别为93%和98%. 这主要归于两个反应器内反硝化细菌的作用.

R1 启动成功. 相对于 R1 而言, 当第21 d提高进水基质浓度后, R2 出水氨氮和亚硝氮浓度突然升高, 去除率分别降至44.36%和56.34%. 推测是由于 R2 污泥中的厌氧氨氧化菌活性不如 R1 中的高, 当进水中氨氮和亚硝氮浓度提升幅度较大时, 不能快速消耗基质. 经过两天的适应, R2 氨氮和亚硝氮去除率又回升到89.94%和90.26%. 类似的情况也出现在第41 d再次提高进水基质浓度后. 经过53 d的连续运行, R2 的总氮容积负荷和去除负荷分别达到了  $0.95 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.81 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 反应器 R2 也启动成功. Cao 等<sup>[16]</sup>通过在 UASB 反应器内接种亚硝化污泥与成熟的厌氧氨氧化污泥的混合污泥, 仅耗时26 d就成功启动了反应器. 而张海芹等<sup>[17]</sup>在两个相同的厌氧折流板反应器中分别以厌氧絮状污泥与厌氧颗粒污泥的混合污泥和厌氧絮状污泥为种泥, 耗时120 d和125 d才分别成功启动. 由此推测接种一定程度 ANAMMOX 菌富集的污泥可以大大缩短反应器的启动时间.

#### 2.1.3 稳定运行阶段(III)

反应器运行至第36~60 d, R1 处于稳定运行

阶段. 在此时期内, R1 脱氮性能较好, 氨氮、亚硝氮和总氮去除率分别稳定在 99.92%、96.64% 和 81.87% 左右.

反应器运行至第 53 ~ 60 d, R2 也进入了稳定运行阶段. 此阶段内 R2 氨氮、亚硝氮和总氮去除率稳定在 97.54%、94.91% 和 80.98% 左右, 略低于 R1. 在此阶段内, R1 和 R2 氨氮消耗量: 亚硝氮消耗量: 硝氮产生量分别为 1:1.28:0.36 和 1:1.35:0.36, 接近理论计量比 1:1.32:0.26. 赵宗升等<sup>[18]</sup> 分别以厌氧消化污泥和好氧硝化污泥启动厌氧氨氧化反应器, 结果表明以厌氧消化污泥为泥源的反应器启动较快, 但去除效果远不如以好氧硝化污泥为泥源的反应器, 好氧硝化污泥是更适合的泥源. 而从本文 R1 和 R2 两个反应器的启动特征中发现, 加入了好氧硝化污泥的反应器 R1 启动时间较加入了厌氧消化污泥的反应器 R2 短, 脱氮效果也优于反应器 R2, 不仅证明了之前的研究结果, 而且表明了厌氧氨氧化-反硝化污泥的加入可以弥补以好氧硝化污泥为泥源启动时间长的短板. 主要原因是由于进水未采取除氧操作, 好氧硝化污泥中的好氧菌可以在启动初期快速消耗水中的溶解氧, 为厌氧氨氧化菌的生长提供合适的厌氧环境. 厌氧氨氧化菌和反硝化菌同为厌氧菌, 有些反硝化菌的代谢途径与厌氧氨氧化菌类似<sup>[19]</sup>, 可被诱导表现出厌氧氨氧化特征. 同时厌氧氨氧化菌存在群体感应机制, 达到一定的细胞密度后才能显示出活性<sup>[20]</sup>, 厌氧氨氧化-反硝化污泥中存在的一定的厌氧氨氧化菌在良好的厌氧环境中迅速增殖, R1 在启动过程中脱氮效果稳定, 仅历时 36 d 容积负荷就达到了  $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 为初始容积负荷的 5 倍. 而 R2 中接种的厌氧消化污泥不能消耗水中的溶解氧, 不能为厌氧氨氧化菌的生长创造合适的厌氧条件. 虽然 R2 中也接种了同样的厌氧氨氧化-反硝化污泥, 但从启动过程来看, R2 的脱氮效果不如 R1 稳定, 提升基质浓度后, 出水效果需要几天的适应期才能恢复, 可能是由于厌氧氨氧化反应尚未建立起其主导地位, 厌氧氨氧化菌与其他细菌存在着竞争/抑制平衡, 基质浓度的提高打破了这种平衡关系, 厌氧氨氧化菌需要重新适应新的环境.

## 2.2 反应器微生物多样性分析

图 3 显示的是门水平上相对丰度水平位于前 10 的物种, 可以发现, R1 和 R2 经过 65 d 的运行后, 变形菌门 Proteobacteria, WWE3 门, 绿弯菌门 Chloroflexi, 浮霉菌门 Planctomycetes 和拟杆菌门 Bacteroidetes 总相对丰度均大于 80%, R1 Planctomycetes 相对丰度占 10.25%, 而 R2

Planctomycetes 相对丰度低于 R1, 为 8.55%. ANAMMOX 菌是 Planctomycetes 的成员, 而反硝化菌大多分布在 Proteobacteria 中. 在两个反应器中, Proteobacteria 是主要的物种, 相对丰度均约 40%, 远高于 Planctomycetes, 类似的情况也在其他研究中可见<sup>[21]</sup>. Chloroflexi 也常常出现在厌氧氨氧化反应器中, 这可能意味着厌氧氨氧化反应器中的微生物群落结构复杂, 并不一定是 ANAMMOX 菌的丰度最高<sup>[22]</sup>.

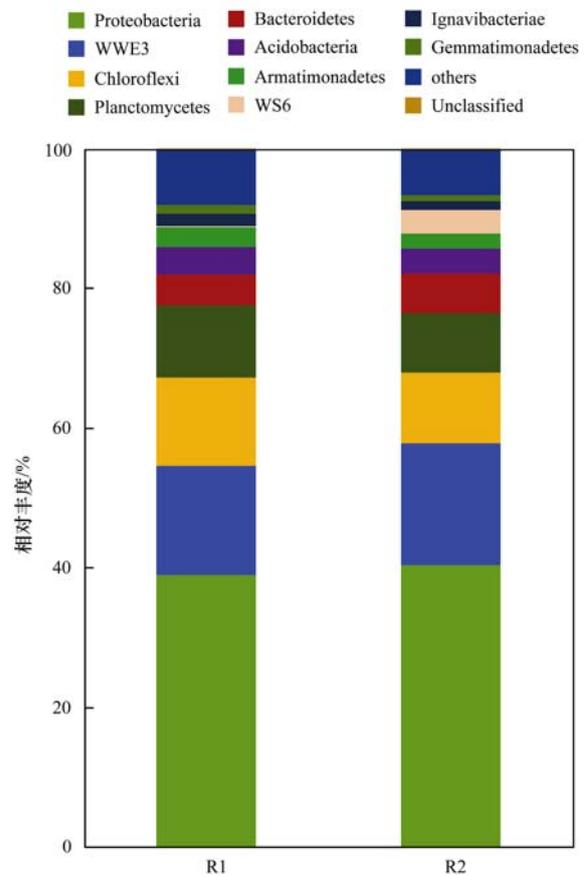


图 3 门水平物种相对丰度分布

Fig. 3 Relative abundance distribution at phylum level

图 4 表示的是属水平上相对丰度水平位于前 10 的物种, R1 和 R2 中主要的微生物类群一致, 分别是 *Denitratisoma* 属、*Limnobacter* 属、*uncultured\_bacterium\_f\_Anaerolineaceae* 属、*SMIA02* 属和 *Candidatus Kuenenia* 属, 但是丰度有差异. *Candidatus Kuenenia* 属是一种 ANAMMOX 菌, 在 R1 和 R2 中的丰度分别为 3.22% 和 2.35%. 这种常见的 ANAMMOX 菌, 在污水处理设施和大型厌氧氨氧化反应器中常可检测到其存在<sup>[23,24]</sup>. R1 的 ANAMMOX 菌的相对丰度均大于 R2, 这也可以作为 R1 和 R2 在启动阶段的脱氮性能差异的微生物证据. 由于本实验的高通量测序样品来自反应器上层污泥, 上层污泥中 ANAMMOX 菌的含量较下

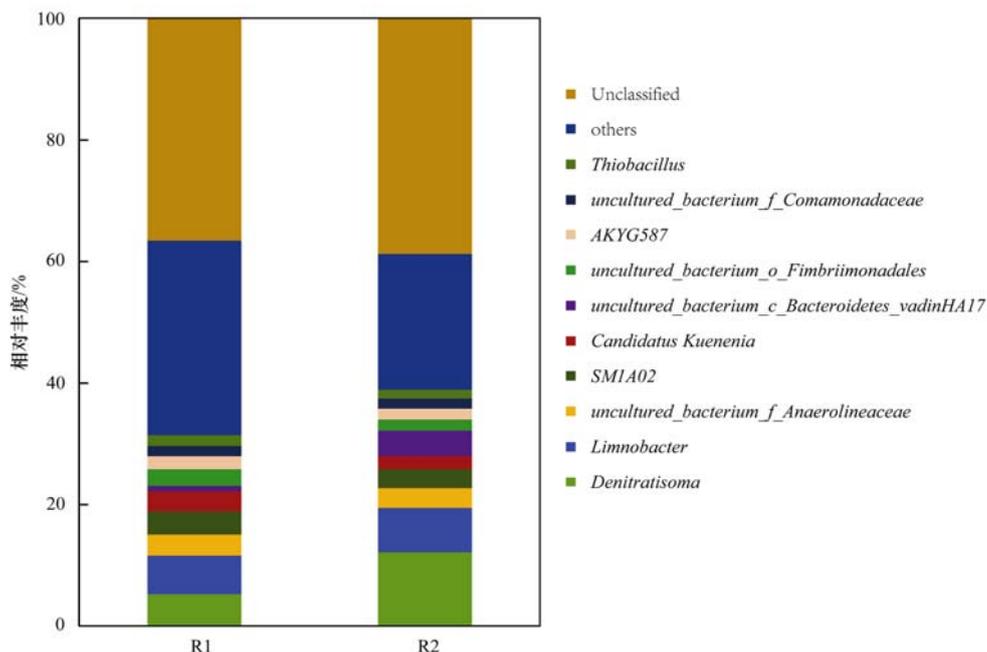


图4 属水平物种相对丰度分布

Fig. 4 Relative abundance distribution at genus level

层污泥低<sup>[13]</sup>, 测序结果显示 Planctomycetes 和 *Candidatus Kuenenia* 属分别在门水平和属水平上的相对丰度并不是最高的, 但两个反应器都显示出较好的脱氮性能, 厌氧氨氧化反应器运行稳定, Ren 等<sup>[25]</sup>也得出类似的研究结果. *Denitratisoma* 属是一种反硝化细菌<sup>[26]</sup>, 在 R2 中的丰度是 R1 的两倍左右, 由于 R2 接种了厌氧消化污泥, 推测可能是厌氧消化污泥中含有比较丰富的 *Denitratisoma* 属.

### 2.3 动力学特征比较

#### 2.3.1 改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型

Stover-Kincannon 模型最初用于预测固定生长

的生物膜的性能<sup>[27]</sup>, 后来广泛应用于描述和预测各类上流式厌氧过滤器的性能, 同时在厌氧氨氧化反应器中也有一定的应用<sup>[28,29]</sup>.

R1 和 R2 分别以  $V/(QS_i)$  为自变量,  $V/[Q(S_i - S_e)]$  为因变量作图 (图 5), 则  $K_B/U_{max}$  为斜率,  $1/U_{max}$  为截距, 由图 5 可得两个反应器的 S-K 动力学方程. 由公式 (3) 可计算出 R1 和 R2 的  $K_B$  分别为 6.327 和 6.255,  $U_{max}$  分别为  $6.988 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$  和  $6.761 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ , S-K 模型对两个反应器的拟合情况均较好, R1 的拟合程度较 R2 高. 比较两个反应器的  $U_{max}$  值后, 可以推测 R1 的脱氮潜力稍优于 R2.

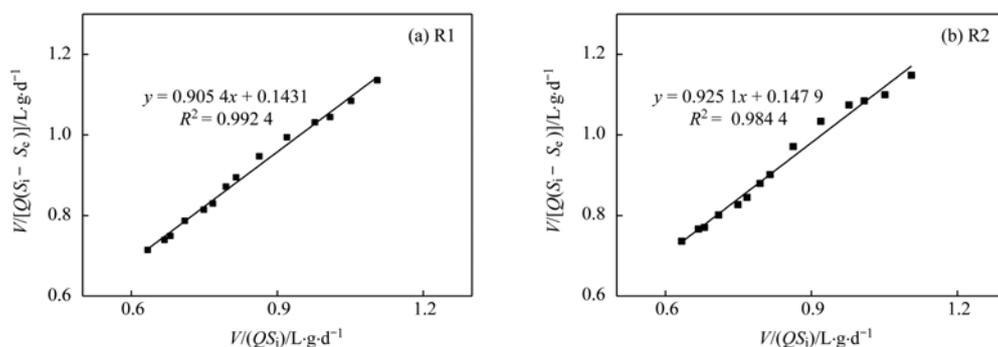


图5 改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型

Fig. 5 Modified Stover-Kincannon substrate removal model plot

#### 2.3.2 二级动力学模型

动力学试验第二阶段的反应器脱氮数据整理后, 用二级动力学模型 [式 (6)] 进行拟合作图 (如图 6). R1 的  $a = 1.395$ ,  $b = 0.8951$ ,  $R^2 = 0.9892$ ; R2 的  $a = 1.277$ ,  $b = 0.9708$ ,  $R^2 = 0.9845$ . 两个不同种泥的厌氧氨氧化反应器对二级动力学模型的拟

合效果均较好, 将所得结果代入式 (6) 可得 R1 和 R2 反应器的出水预测公式分别为式 (7) 和 (8).

R1:

$$S = S_0 \left( 1 - \frac{\text{HRT}}{1.395 + 0.8951 \cdot \text{HRT}} \right) \quad (7)$$

R2:

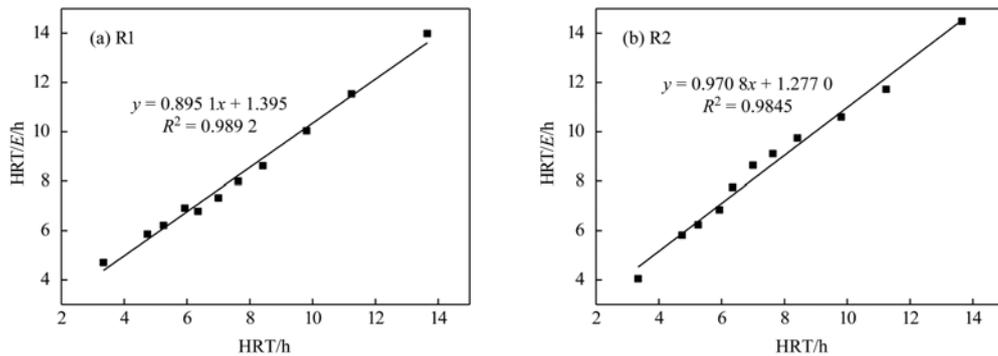


图 6 二级动力学模型

Fig. 6 Second-order kinetics model plot

$$S = S_0 \left( 1 - \frac{\text{HRT}}{1.277 + 0.9708 \cdot \text{HRT}} \right) \quad (8)$$

### 3 结论

(1) 两个 UBF 反应器分别接种好氧硝化污泥与厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥, 厌氧消化絮状污泥与厌氧氨氧化-反硝化污泥的混合污泥, 可以快速启动厌氧氨氧化反应器, R1 运行 36 d 的容积负荷由  $0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  提高至  $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , R2 运行 53 d 的容积负荷由  $0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  提高至  $0.95 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 接种的厌氧氨氧化-反硝化污泥可以促进反应器快速实现厌氧氨氧化.

(2) R1 启动成功时间较 R2 短, 脱氮效果较 R2 好且稳定, 好氧硝化污泥较厌氧消化污泥而言更适合作厌氧氨氧化反应器的接种污泥.

(3) 从测序结果可以看到, R1 和 R2 的 Planctomycetes 门水平相对丰度均较高, 分别为 10.25% 和 8.55%, ANAMMOX 菌得到了较好的富集, *Candidatus Kuenenia* 属水平相对丰度分别为 3.221% 和 2.353%, R1ANAMMOX 菌丰度更高.

(4) 改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型和二级动力学模型均能对两个反应器的脱氮性能进行较好的拟合. 经改进的 Stover-Kincannon 基质去除模型拟合后, 发现 R1 的脱氮潜力大于 R2.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences--an application survey [ J ]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [ 2 ] Shen L D, Liu S, Huang Q, *et al.* Evidence for the cooccurrence of nitrite-dependent anaerobic ammonium and methane oxidation processes in a flooded paddy field [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, **80**(24): 7611-7619.
- [ 3 ] Ganesh S, Parris D J, Delong E F, *et al.* Metagenomic analysis of size-fractionated picoplankton in a marine oxygen minimum zone [ J ]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(1): 187-211.
- [ 4 ] Ali M, Oshiki M, Awata T, *et al.* Physiological characterization of anaerobic ammonium oxidizing bacterium '*Candidatus Jettenia caeni*' [ J ]. *Environmental Microbiology*, 2015, **17**(6): 2172-2189.
- [ 5 ] Speth D R, In 't Zandt M H, Guerrero-Cruz S, *et al.* Genome-based microbial ecology of anammox granules in a full-scale wastewater treatment system [ J ]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 11172.
- [ 6 ] 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.  
Li Y F, Ma C X, Zhang C. Influencing factors of sludge liquor treatment in UASBB [ J ]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3044-3051.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 姚芳, 刘波, 王德朋, 等. 不同接种污泥的厌氧氨氧化反应器启动特性及菌群结构演替规律分析 [ J ]. *环境科学学报*, 2017, **37**(7): 2543-2551.  
Yao F, Liu B, Wang D P, *et al.* Start-up of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge and analysis of microbial community structure shift [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2543-2551.
- [ 9 ] 张泽文, 李冬, 张杰, 等. 接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5215-5221.  
Zhang Z W, Li D, Zhang J, *et al.* Effect of seeding single/mixed sludge on rapid start-up of an ANAMMOX reactor [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5215-5221.
- [ 10 ] Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis [ J ]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, **53**: 41-79.
- [ 11 ] Qin Y J, Yan C, Ren J Y, *et al.* Effect of glucose on nitrogen removal and microbial community in anammox-denitrification system [ J ]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**: 33-39.
- [ 12 ] Wang T Y, Qin Y J, Cao Y, *et al.* Simultaneous addition of zero-valent iron and activated carbon on enhanced mesophilic anaerobic digestion of waste-activated sludge [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(28): 22371-22381.
- [ 13 ] 曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 等. 厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1544-1550.  
Cao Y, Wang T Y, Qin Y J, *et al.* Nitrogen removal characteristics and diversity of microbial community in ANAMMOX reactor [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1544-1550.

- [14] Qin Y J, Han B, Cao Y, *et al.* Impact of substrate concentration on anammox-UBF reactors start-up[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **239**: 422-429.
- [15] 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.
- [16] Cao S B, Du R, Li B K, *et al.* High-throughput profiling of microbial community structures in an ANAMMOX-UASB reactor treating high-strength wastewater[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(14): 6457-6467.
- [17] 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.
- [18] 赵宗升, 赵云霞, 陈智均, 等. 厌氧氨氧化菌接种污泥的选择培养过程研究[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(2): 39-42.  
Zhang Z S, Zhang Y X, Chen Z J, *et al.* The culture of anaerobic ammonia oxidation biomass seeded by two kinds of sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(2): 39-42.
- [19] Wang S H, Guo J B, Lian J, *et al.* Rapid start-up of the anammox process by denitrifying granular sludge and the mechanism of the anammox electron transport chain [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **115**: 101-107.
- [20] Tang X, Guo Y Z, Jiang B, *et al.* Metagenomic approaches to understanding bacterial communication during the anammox reactor start-up[J]. *Water Research*, 2018, **136**: 95-103.
- [21] Xu X L, Liu G H, Wang Y Y, *et al.* Analysis of key microbial community during the start-up of anaerobic ammonium oxidation process with paddy soil as inoculated sludge [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **64**: 317-327.
- [22] Chen C J, Sun F Q, Zhang H Q, *et al.* Evaluation of COD effect on anammox process and microbial communities in the anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 571-578.
- [23] Oshiki M, Satoh H, Okabe S. Ecology and physiology of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, **18**(9): 2784-2796.
- [24] Liu W R, Yang D H, Chen W J, *et al.* High-throughput sequencing-based microbial characterization of size fractionated biomass in an anoxic anammox reactor for low-strength wastewater at low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **231**: 45-52.
- [25] Ren Y H, Li D, Li X K, *et al.* High-rate nitrogen removal and microbial community of an up-flow anammox reactor with ceramics as biomass carrier[J]. *Chemosphere*, 2014, **113**: 125-131.
- [26] He S L, Yang W, Qin M, *et al.* Performance and microbial community of anammox in presence of micro-molecule carbon source[J]. *Chemosphere*, 2018, **205**: 545-552.
- [27] Sharma M K, Kazmi A A. Substrate removal kinetics of domestic wastewater treatment in a two-stage anaerobic system [J]. *Separation Science and Technology*, 2015, **50**(17): 2752-2758.
- [28] Niu Q G, Zhang Y L, Ma H Y, *et al.* Reactor kinetics evaluation and performance investigation of a long-term operated UASB-anammox mixed culture process [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **108**: 24-33.
- [29] Jin B C, Zheng P. Kinetics of nitrogen removal in high rate anammox upflow filter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(2-3): 652-656.

## CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ling, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM <sub>2.5</sub> During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO <sub>2</sub> Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)