

低温厌氧氨氧化生物滤池群落结构分析

曾涛涛¹, 李 冬², 邱文新², 曾辉平², 刘 涛¹, 张 杰^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨;

2. 北京工业大学 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 100124 北京)

摘 要: 为了解低温(15.0~16.5℃)稳定运行的厌氧氨氧化生物滤池微生物特征,利用扫描电镜(SEM)、变性梯度凝胶电泳技术(DGGE)和克隆测序等方法,对低温稳定运行的两个上流式厌氧氨氧化生物滤池进行微生物群落结构分析. SEM结果显示,陶粒填料反应器(B1)内丝状菌较多,球形细菌分布密度较低,而火山岩填料反应器(B2)没有发现丝状菌,球形细菌分布密集. DGGE结果表明, B1与B2反应器微生物种类有所差别,种群相似性为68.1%, B2反应器内细菌丰度更高,但两反应器内厌氧氨氧化细菌种类相同. 通过细菌及ANAMMOX菌16S rRNA克隆测序,鉴定反应器内厌氧氨氧化细菌为 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*. 采用火山岩填料生物滤池反应器形式,并富集 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, 有助于厌氧氨氧化工艺在较低温度(15.0~16.5℃)条件下稳定运行和推广应用.

关键词: 厌氧氨氧化; 变性梯度凝胶电泳; 生物滤池; 低温

中图分类号: X172

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)06-0006-05

Community structure analysis of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) biofilter at low temperature

ZENG Tao-tao¹, LI Dong², QIU Wen-xin², ZENG Hui-ping², LIU Tao¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, 100124 Beijing, China)

Abstract: To characterize the microbial community in anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) biofilter and to apply this technology, techniques of scanning electron microscopy (SEM), denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE), cloning and sequencing were utilized to study the community structures in two up-flow ANAMMOX biofilters, which were operated stably at low temperature (15.0–16.5℃). The results of SEM showed that the filamentous bacteria were just found within ceramic packing B1 biofilter. Spherical bacteria had more densely distribution in volcanic packing B2 biofilter than that in B1 biofilter. Bacterial DGGE results showed that there were some differences between B1 and B2 microbial species and the population similarity was 68.1%, and B2 reactor had higher bacteria richness. However, the type of anammox bacteria existence in two reactors was the same. The sequences of bacteria and ANAMMOX 16S rRNA identification revealed that *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* occurred in two ANAMMOX bioreactors. It was helpful to apply ANAMMOX technology at low temperature (15.0–16.5℃) through *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* enrichment, with the form of biofilter reactor filled with volcanic rocks.

Key words: anaerobic ammonium oxidation; denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE); biofilter; low temperature

收稿日期: 2011-11-08.

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0008); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放基金(QAK201005); 国家重大科技专项水专项(2012ZX07202-005).

作者简介: 曾涛涛(1985—),男,博士研究生;

李 冬(1976—),女,教授,博士生导师;

张 杰(1938—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 张 杰, 6282031@163.com.

与传统硝化-反硝化工艺相比,厌氧氨氧化(anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX)具有需氧量低、污泥产量低和无需外加碳源等优点^[1],是目前最简捷的废水生物脱氮途径. 厌氧氨氧化的推动者——厌氧氨氧化菌是一群分支很深的浮霉状菌,属于自养型革兰氏阴性细菌. 迄今为止,通过分

子生物学检测手段已经在不同生态系统中鉴定了 5 种不同的“*Candidatus*” Anammox 菌属。

目前,ANAMMOX 工艺研究主要是针对污泥消化回流液和垃圾渗滤液等高温高氨氮废水方面^[2],反应器也以 UASB 类型为主^[3],而对于低温厌氧氨氧化生物滤池的研究较少,相应的微生物研究更是缺乏。本课题组已成功启动了上流式厌氧氨氧化生物滤池,脱氮效果良好,并进行了厌氧氨氧化影响因素实验^[4-5]。与厌氧氨氧化最适温度 30~40℃ 相比,在较低温度下(16℃ 左右)的厌氧氨氧化研究通常用低温厌氧氨氧化表示^[6]。本研究对在低温(15.0~16.5℃)稳定运行的两个上流式厌氧氨氧化生物滤池取样,通过扫描电镜(SEM)、变性梯度凝胶电泳技术(DGGE)和克隆测序等方法对微生物群落结构进行分析,探索不同填料生物滤池微生物多样性之间的关系,为促进厌氧氨氧化菌生长、提高反应器效能

提供依据。

1 实 验

1.1 反应器装置

试验装置为有机玻璃加工而成、相同大小的两个生物滤柱,内径 185 mm,高度 2.0 m,有效容积 45 L。采用易于接种挂膜的陶粒和火山岩作为填料,其主要性能参数如表 1 所示。B1 柱内装填表面多微孔的陶粒填料,B2 柱内装填轻质多孔、表面粗糙的火山岩填料。两个反应器均通过接种厌氧氨氧化污泥启动成功,在自来水中通过添加硫酸铵与亚硝酸钠配置实验用水,使得 $m(\text{NH}_4^+ - \text{N}) : m(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 约为 1:1.31,以符合厌氧氨氧化反应基质比例要求,氨氮质量浓度约 200 mg/L。另外添加 1.5% 的生活污水 A/O(厌氧/好氧)除磷工艺的二级处理出水^[7]。反应器内 pH 保持在 7.4~8.2,温度为冬季室内自然温度(15.0~16.5℃)。

表 1 两种填料的主要性能参数

填料	粒径/mm	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	堆积密度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	实际密度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率/%	空隙率/%
陶粒	2~3	28.2	0.98	1.5	41.0	49
火山岩	4~6	11.3	0.82	1.6	62.5	58

1.2 生物膜样品电镜(SEM)观察

收集 B1 与 B2 厌氧氨氧化生物膜 0.5 g,加入 2.5% (体积分数)的戊二醛,置于 4℃ 冰箱中固定 4 h;用 0.1 mol/L, pH 为 8.0 的磷酸缓冲溶液冲洗 3 次,每次 10 min;分别用 30%, 50%, 70%, 90% (体积分数)的乙醇进行脱水,每次 15 min,再用无水乙醇脱水 3 次,每次 15 min;然后加入体积比为 1:1 的 100% 乙醇和乙酸异戊酯及纯乙酸异戊酯各一次进行置换,每次 15 min;样品真空干燥后喷金,通过扫描电镜(HITACHIS-4300)观察生物膜形态。

1.3 变性凝胶梯度电泳

1.3.1 总 DNA 提取

取 200 mL 生物膜水样, $12\,000 \times g$, 4℃ 离心 10 min,收集沉淀。沉淀加入 10 mL, 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(PBS, pH8.0)重悬 2 次。总 DNA 提取参考文献[8]进行,之后进行纯化回收。

1.3.2 PCR 扩增

对大多数细菌 16S rRNA 基因 V3 区,采用通用引物 BSF338-GC (5'-CGCCCCGCCGCGCGCGCGGGC GGGCGGGGCACGGGGG ACTCTACGGGAGGCAGCAG) (下划线部分为“GC”夹)和 BSR518 (ATTAC-GCGCGCGCTGG)进行扩增^[9]。对于厌氧氨氧化 16S rRNA 基因,采用特异性引物 Amx368-GC (5'-CGCCCGCGCGCGCGCGCGGC GGGCGGGGCACGGGGG

CCTTTCGGGCATTGCGAA-3') (下划线部分为“GC”夹)和 Amx820 (AAAACCCCTCTACTTAGT-GCCC)^[10]进行扩增。两种引物 PCR 反应体系及扩增条件相同。反应体系组成为: DNA 模板 1.0 μL, 10× Buffer 2.5 μL, dNTPs (2.5 mmol·L⁻¹) 2.0 μL, 上游引物和下游引物 (20 μmol·L⁻¹) 各 0.5 μL, Ex Taq 酶 (5 U/μL) 0.125 μL, 补水至终体积为 25 μL。PCR 扩增条件为: 94℃, 5 min; 94℃, 40 s, 55℃, 40 s, 72℃, 1 min, 35 个循环; 72℃, 10 min。PCR 产物采用 DNA 纯化回收试剂盒(天根, 中国)纯化回收。

1.3.3 DGGE 及其结果分析

利用 DGGE 电泳对 PCR 产物进行分离,仪器为 D-Code System (Bio-Rad 公司),电泳条件为:凝胶变性梯度 30%~60%,聚丙烯酰胺质量分数分别为 8% (BSF338-GC/BSR518 扩增产物)和 6% (amx368-GC/amx820 扩增产物),电压 120 V,电泳缓冲液为 1×TAE,电泳温度 60℃,电泳时间分别为 5 h (BSF338-GC/BSR518 扩增产物)和 8 h (amx368-GC/amx820 扩增产物)。电泳结束后,凝胶进行银染^[11],通过凝胶成像仪(BioRad, Gel Doc XR)获取图像。

为了解生物滤池反应器中微生物群落结构,通过软件 Quantity One 4.6.0 (Bio-Rad, USA)对 DGGE 图谱进行分析,其中微生物群落多样性用

Shannon-Weaver 指数 (H) 表示^[12],相关性分析主要分析不同填料反应器内细菌种群的相似性,用 Sorenson 配对比较相似性系数 (C_s) 表示.

1.4 微生物系统发育分析

对于细菌及厌氧氨氧化 DGGE 凝胶上条带进行切胶溶于 100 μL 1 $\times$ TE 中,4 $^{\circ}\text{C}$,16 h. 以此为模板,相应不带 GC 夹的 BSF338/BSR518 及 amx368/amx820 为引物,扩增细菌及厌氧氨氧化细菌 16S rRNA 片段. 将纯化回收的 PCR 产物连接到载体 pMD19-T (TaKaRa) 上,并转化到感受态细胞 *Escherichia coli* DH5 α (天根,中国)中. 阳性克隆送交上海生工生物公司(中国)进行测序.

获得的序列通过 NCBI 网站的 BLAST 工具搜索相近序列,并进行比对. 通过 MEGA 4.1 软件,以 bootstrap-NJ 法构建系统进化树. 本研究所测得的 ANAMMOX 菌 16S rRNA 序列已提交至 GenBank,登录号为 JN244671.

2 结果与讨论

2.1 微生物形态

两个反应器启动成功后稳定运行 1 个月,B1 反应器平均总氮去除负荷为 0.5 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,去除率为 50%;B2 平均总氮去除负荷 1.6 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,去除率为 60%. 两个生物滤柱填料表面都形成红色生物膜,这正是 anammox 菌独特的颜色特征. 其中 B1 反应器生物膜红色比较浅,分布稀疏;B2 反应器生物膜红色比较深,分布稠密. 生物膜微观结构通过扫描电子显微镜观察,结果见图 1.

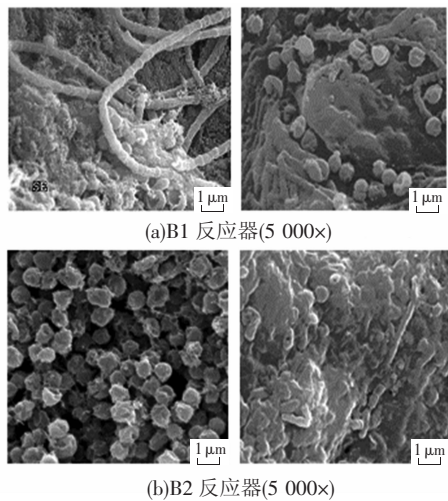


图 1 厌氧氨氧化生物膜扫描电镜照片

比较 B1 和 B2 扫描电镜结果,发现 B1 反应器生物膜特点是丝状菌比较多,球形细菌分布密度较低. 而 B2 反应器生物膜特点是以球形细菌为主,存在少量卵状、杆状细菌,没有发现丝状菌的存在. 丝状菌一般为异养细菌,比自养菌繁殖速度快^[13],本

文认为丝状菌的大量繁殖会优先占据反应器内填料表面及其空隙,不利于自养菌 anammox 菌的生长与附着,因而会影响反应器的脱氮效果. 这可能是 B1 反应器总氮去除负荷(0.5 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)远低于 B2 反应器(1.6 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$)的原因. 已报道的典型厌氧氨氧化细菌形态为球形,直径在 0.8 ~ 1.1 μm ^[14]. 两个厌氧氨氧化反应器内都发现这种球形细菌的存在,推测可能是厌氧氨氧化细菌. B2 反应器球形细菌分布更为密集,推测原因是火山岩填料比陶粒填料具有更大的空隙率与孔隙率,更有利于这种微生物的富集.

2.2 微生物群落结构

对银染后的 DGGE 凝胶进行成像,在两条泳道上共观察到 12 条不同的条带,见图 2(a);图 2(b)是对 DGGE 照片经过 Quantity One 4.6.0 分析后绘制的 DGGE 图谱示意图,12 条横线位置及横线颜色深浅可以简单反映各条带的分布与相对强度. 微生物群落多样性指数 H_1 、 H_2 分别为 1.258 和 1.276. 图 2(c)是 ANAMMOX 细菌 DGGE 结果. 对图 2(a)中 12 个条带进行切胶、PCR 扩增,克隆测序鉴定,结果见表 2.

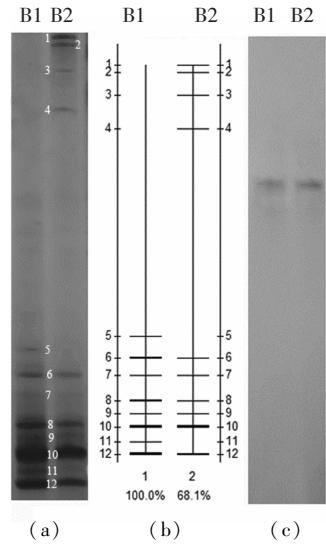


图 2 两种厌氧氨氧化生物膜 DGGE 结果比较

由图 2(a)可见,B1 和 B2 中的微生物种类丰度不是很高,这可能与反应器进水采用无机配水有关^[15]. H_2 略大于 H_1 ,表明 B2 反应器微生物多样性更高,火山岩填料(B2)比陶粒填料(B1)更有利于微生物富集. B1 和 B2 反应器内细菌种群的相似性为 68.1%,表明不同填料 ANAMMOX 反应器内微生物种类有所差别. DGGE 结果中(图 2(a)),B1 总共有 8 个条带,B2 有 10 个条带,两个反应器有 6 个条带在相同位置(6,7,8,9,10 和 12),表明这 6 种微生物在两个反应器内都存在,分别与 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* (AF375995)、*Ignavibacterium album*

(AB478415.1)、*Hipaea maritime* (AB072402.1)、*Acinetobacter* sp. ‘Acinet. 1’ (EF409307.1)、*Sulfur-oxidizing bacterium* gps61 (AB266389.1) 及 *Rhodopseudomonas palustris* (D12700.1) 最相似(表 2)。两反应器内具有厌氧氨氧化作用的为条带 6 所代表的 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, 其他为污水处理系统常见微生物。这表明两个反应器虽然填料不同, 但经过较长时间运行后, 能富集到同一种厌氧氨氧化细菌。

表 2 厌氧氨氧化反应器内细菌 16S rRNA 测序结果		
条带	最相似序列(登陆号)	相似度/%
1	<i>Oxalicibacterium</i> sp. JCN-21 (GU295961.1)	93
2	<i>Oxalicibacterium</i> sp. JCN-21 (GU295961.1)	91
3	<i>Thermomonas hydrothermalis</i> strain SGM-6 (NR025265.1)	88
4	<i>Anaerobic ammonium-oxidizing planctomycete</i> KOLL2a (AJ250882.1)	89
5	<i>Anaerobic bacterium</i> MO-CFX2 (AB598278.1)	96
6	<i>Candidatus Kuenenia stuttgartiensis</i> (AF375995)	94
7	<i>Ignavibacterium album</i> (AB478415.1)	98
8	<i>Hipaea maritima</i> (AB072402.1)	95
9	<i>Acinetobacter</i> sp. ‘Acinet. 1’ (EF409307.1)	85
10	<i>Sulfur-oxidizing bacterium</i> gps61 (AB266389.1)	91
11	<i>Ignavibacterium album</i> (AB478415.1)	93
12	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> (D12700.1)	93

条带 5 与条带 11 只出现在 B1 反应器内, 它们与 *Anaerobic bacterium* MO-CFX2 (AB598278.1) 和 *Rhodopseudomonas palustris* (D12700.1) 最相似, 相似度分别为 96% 和 93%, 表明这两种细菌更容易在陶粒填料生物滤柱(B1)内生长。而条带 1、2、3 和 4

仅出现在 B2 反应器内, 它们与 *Oxalicibacterium* sp. JCN-21 (GU295961.1)、*Oxalicibacterium* sp. JCN-21 (GU295961.1)、*Thermomonas hydrothermalis* strain SGM-6 (NR025265.1) 和 *Anaerobic ammonium-oxidizing planctomycete* KOLL2a (AJ250882.1) 相似度分别为 93%、91%、88% 及 89%, 表明这 4 种细菌更容易在火山岩填料生物滤柱(B2)内生长。两种反应器内存在不同的细菌, 这可能与填料性质相关, 因为火山岩填料具有更好的孔隙度, 因而能富集更多的细菌。

虽然 B1 和 B2 生物滤池的填料不同, 但在连续运行过程中, 二者的操作条件基本相同。图 2(c) 中两组泳道都只有一个条带且位置相同, 表明长时间运行后, 两个反应器中存在同一类厌氧氨氧化菌, 细菌 16S rRNA 克隆测序也发现两个反应器内 ANAMMOX 菌同为 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*。大多数对于废水处理厌氧氨氧化菌的研究发现, 虽然不同反应器内 ANAMMOX 菌属可能不同, 但其种类比较单一, 以某一种为主^[16], 这可能与进水水质及运行工况相关, 而 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 比较容易在生物滤池形式的反应器内出现^[14]。

2.3 厌氧氨氧化细菌系统发育分析

因为细菌 16S rRNA V3 区片段较短(约 180 bp), 信息量较少, 为了更详尽地了解反应器内 ANAMMOX 菌种类, 对 ANAMMOX 菌 DGGE 条带(约 480 bp)进行切胶回收、PCR 重扩增和克隆测序。将该序列与其他相关细菌的 16S rRNA 序列, 通过 MEGA 4.1 软件构建系统发育树, 如图 3 所示。

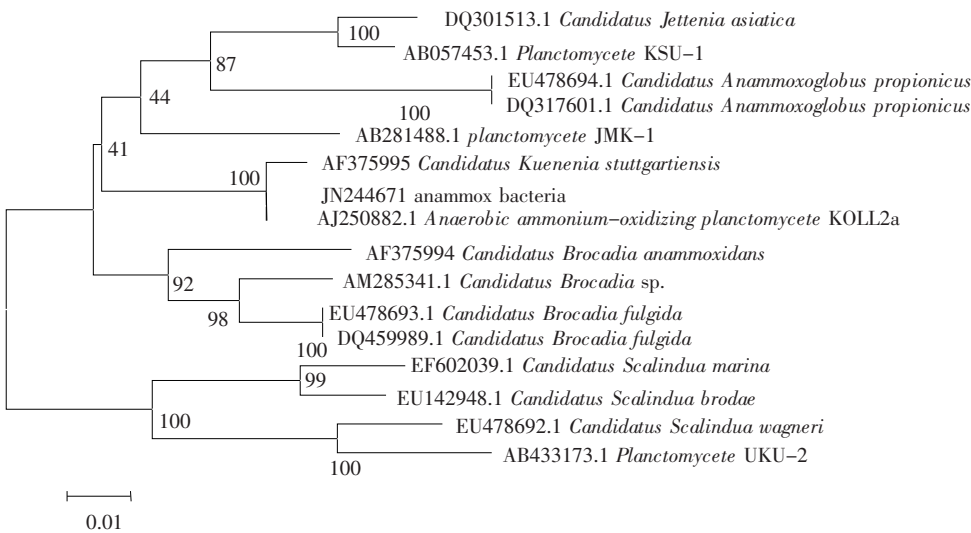


图 3 厌氧氨氧化细菌的系统发育树分析

图 3 代表生物滤池中厌氧氨氧化细菌和已知的 5 类厌氧氨氧化细菌及相关浮霉菌的系统发育关系。序列 JN244671 与 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* (AF375995) 同源性最高, 相似度达 99%。同时, 与 *Anaerobic ammonium-oxidizing*

planctomycete KOLL2a (AJ250882.1) 在同一个分支上, 显示它们在进化关系上最为接近。*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 最早发现于生物滤池中^[14], 通过环境基因组方法, 已经完成全基因组测序^[17], 这为研究厌氧氨氧化细菌提供了

新的蓝图. *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 菌体呈球状, 直径 1 μm 左右, 化能自养型, 具有典型的厌氧氨氧化菌细胞结构特征, 本实验中观察到的厌氧氨氧化菌与这些特征十分吻合.

已报道的大多数厌氧氨氧化反应器操作温度保持在 30 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$ [2], 而一般废水的温度都处于常温 (25 $^{\circ}\text{C}$) 或更低温度, 在实际污水处理中, 对废水进行加热和保温成本太高也不实际, 这成为厌氧氨氧化工艺应用的一个难题. 本研究中, 火山岩填料厌氧氨氧化生物滤池 (B2) 在较低温 (15.0 ~ 16.5 $^{\circ}\text{C}$) 条件下脱氮效果良好; 另外, 反应器长时间运行中, 一直在室内自然光线环境中, 并不需要严格黑暗避光, 这对 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 的认识更深了一步. 综合研究表明, 可以采用火山岩填料填充生物滤池反应器, 并富集 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, 有助于厌氧氨氧化工艺在较低温度 (15.0 ~ 16.5 $^{\circ}\text{C}$) 条件下稳定运行, 从而节省废水加热与保温费用.

3 结 论

1) SEM 结果显示, 陶粒填料反应器 (B1) 内丝状菌比较多, 球形细菌分布密度较低, 火山岩填料反应器 (B2) 没有发现丝状菌, 而球形细菌分布密集. 丝状菌的存在不利于 anammox 菌的生长, 火山岩填料更有利于球形细菌的富集.

2) 细菌 DGGE 结果表明, 不同填料反应器内微生物种类有所差别, B1 和 B2 细菌种群的相似性仅为 68.1%, B2 反应器内细菌丰度更高. 虽然 B1 和 B2 填料不同, 但经过较长时间运行后, 能富集到同一种厌氧氨氧化细菌.

3) 通过细菌及厌氧氨氧化细菌 DGGE 条带 16S rRNA 克隆测序, 鉴定反应器内功能微生物为厌氧氨氧化菌 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*. 可以采用火山岩填料生物滤池反应器形式, 通过富集 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, 有助于厌氧氨氧化工艺在较低温度 (15.0 ~ 16.5 $^{\circ}\text{C}$) 下稳定运行, 从而节省废水加热与保温费用.

参考文献:

- [1] KARTAL B, KUENEN J G, LOOSDRECHT van M C. Engineering. Sewage treatment with anammox[J]. Science, 2010, 328(5979): 702 - 703.
- [2] ZHANG L, YANG J C, HIRA D, et al. High-rate nitrogen removal from anaerobic digester liquor using an up-flow anammox reactor with polyethylene sponge as a biomass carrier[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, 111(3): 306 - 311.
- [3] 杨洋, 左剑恶, 全哲学, 等. UASB 反应器中厌氧氨氧化污泥的种群分析[J]. 中国环境科学, 2006 (1): 52 - 56.
- [4] 田智勇, 李冬, 杨宏, 等. 上向流厌氧氨氧化生物滤池的启动与脱氮性能[J]. 北京工业大学学报, 2009 (4): 509 - 515.
- [5] 李冬, 王俊安, 陶晓晓, 等. 常温条件下厌氧氨氧化生物滤池影响因素[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010 (6): 869 - 872.
- [6] WINKLER M K H, KLEEREBEZEM R, KUENEN J G, et al. Segregation of biomass in cyclic anaerobic/aerobic granular sludge allows the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria at low temperatures[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(17): 7330 - 7337.
- [7] 马金明, 李冬, 吴迪, 等. 低温城市生活污水再生全流程中 A/O 高效除磷研究[J]. 水处理技术, 2012, 37(12): 103 - 108.
- [8] ZHOU J, BRUNS M A, TIEDJE J M. DNA recovery from soils of diverse composition[J]. Appl Environ Microbiol, 1996, 62(2): 316 - 322.
- [9] OVREAS L, FORNEY L, DAAE F L, et al. Distribution of bacterioplankton in meromictic Lake Saelenvannet, as determined by denaturing gradient gel electrophoresis of PCR-plified gene fragments coding for 16S rRNA[J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63(9): 3367 - 3373.
- [10] SCHMID M, WALSH K, WEBB R, et al. Candidatus "Scalindua brodae", sp. nov., Candidatus "Scalindua wagneri", sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. Syst Appl Microbiol, 2003, 26(4): 529 - 538.
- [11] BASSAM B J, CAETANO-ANOLLES G, GRESSHOFF P M. Fast and sensitive silver staining of DNA in polyacrylamide gels[J]. Anal Biochem, 1991, 196(1): 80 - 83.
- [12] SHANNON C E. The mathematical theory of communication. 1963[J]. MD Comput, 1997, 14(4): 306 - 317.
- [13] 杨宏, 姚乾, 黄春雷, 等. A/O 生物除磷工艺丝状菌膨胀的控制[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35 (12): 1663 - 1669.
- [14] 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(5): 473 - 481.
- [15] 秦玉洁, 周少奇, 朱明石. 厌氧氨氧化反应器微生物生态的研究[J]. 环境科学, 2008 (6): 1638 - 1643.
- [16] KARTAL B, RATTRAY J, NIFTRIK van L A, et al. Candidatus "Anammoxoglobus propionicus" a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Syst Appl Microbiol, 2007, 30(1): 39 - 49.
- [17] STROUS M, PELLETIER E, MANGENOT S, et al. Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. Nature, 2006, 440(7085): 790 - 794.

(编辑 刘 彤)