

包埋厌氧氨氧化的脱氮特性及其微生物群落结构

王维奇,王秀杰,李 军*,王思宇 (北京工业大学建筑工程学院,北京 100124)

摘要: 采用聚乙二醇二丙烯酸酯作为载体,分别以 N,N,N,'N'-四甲基乙二胺(TEMED),过硫酸钾(KPS)作为促进剂和引发剂,对厌氧氨氧化菌进行包埋固定化.采用正交试验优化包埋条件,得到的最佳条件为: 10% PEGDA 单体,0.25% KPS,0.5% TEMED,最佳的操作条件为:聚合温度 20℃,聚合时间控制在 5min 左右,菌胶比选取 1:1.包埋颗粒的连续流实验表明,颗粒经过短暂的活性恢复后,脱氮效果不断提升,并且对水力负荷的提高有一定的抗冲击能力.扫描电镜(SEM)表明本实验包埋材料具有很好的生物相容性,且具有良好的传质性能.高通量测序显示,稳定运行一段时间后,颗粒内微生物多样性略有减小,厌氧氨氧化功能菌 *Candidatus Kuenenia* 占整个微生物体系比例由 6.58%上升至 9.8%,微生物种群的变化说明了包埋后厌氧氨氧化性能能够得到更大的提升.

关键词: 厌氧氨氧化菌; 聚乙二醇二丙烯酸酯; 包埋; 脱氮; 微生物群落结构

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)09-3343-08

Nitrogen removal characteristics and microbial community structure analysis of entrapped anaerobic ammonium oxidizing bacteria. WANG Wei-qi, WANG Xiu-jie, LI Jun*, WANG Si-yu (The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2018,38(9): 3343~3350

Abstract: Using polyethylene glycol diacrylate as carrier materials, respectively with N, N, N, 'N'-tetramethylethylenediamine (TEMED) as promoter and potassium persulfate (KPS) as initiator to immobilize anaerobic ammonium oxidizing bacteria. Orthogonal experiments were used to optimize immobilization conditions of anaerobic ammonium oxidation bacteria: 10% PEGDA monomer, 0.25% KPS, 0.5% TEMED, the optimum operation condition was to control the polymerization temperature at 20℃, polymerization time was about 5min, The ratio of bacteria to gum was 1:1. The continuous flow experiment of immobilized pellets showed that after a short period of activity recovery, the nitrogen removal effect was continuously improved, and it had a certain impact resistance to the increase of hydraulic load. The scanning electron microscopy (SEM) showed that the immobilization materials have good biocompatibility and good mass transfer performance. High-throughput sequencing showed that after a period of time of stable operation, the microbial diversity in the pellets decreased slightly. And the *Candidatus Kuenenia* that belongs to anaerobic ammonium oxidizing bacteria which accounted for 6.58% of the total microbial system was up to 9.8%, the changes in microbial population showed that the performance of anaerobic ammonium oxidation could be improved greatly after immobilization.

Key words: anaerobic ammonium oxidizing bacteria; polyethylene glycol diacrylate; immobilization; nitrogen removal; microbial community structure

厌氧氨氧化(ANAMMOX)是指在厌氧或缺氧条件下,一类浮霉菌门细菌以亚硝酸盐为电子受体,将铵盐氧化产生氮气并产生少量硝酸盐的过程^[1-3].与传统生物脱氮工艺相比,厌氧氨氧化工艺具有能耗低,占地面积小,产生的剩余污泥量少,不需要外加有机碳源等优点^[4].但无论是絮状还是颗粒厌氧氨氧化污泥,都存在菌体流失,颗粒形成过程缓慢的问题^[5-6];因此减少或者防止厌氧氨氧化菌体流失,保持生物量成为研究厌氧氨氧化工艺的主要方向之一^[7-8].20 世纪 70 年代中期,水处理领域引入了微生物固定化技术,目前该技术已进入实用开发阶段.微生物固定化技术是经过特定的技术方法将细菌细

胞固定在一定的载体上,能够减少甚至防止发生菌体流失现象,并提高细菌的可利用率,从而达到简化处理工艺,提高应用效率的目的^[9].

包埋法固定微生物是目前普遍应用的一种固定化方法^[10-11],其采用特定的材料将微生物菌株包埋在半透性的聚合物凝胶或膜内,以达到提高生物量的目的.然而现有包埋材料制备的厌氧氨氧化包埋颗粒普遍存在生物活性低,机械强度不足,长期运

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202-013);北京市基金面上项目(8172012)

* 责任作者, 教授, 18811715723@163.com

行稳定性不够等一系列问题,即使通过各种方式对包埋颗粒进行强化,效果也并不明显^[12-13].另外,由于厌氧氨氧化菌的世代周期长,细胞产率低,且易受环境条件影响等特点^[14],使得厌氧氨氧化菌的包埋成为难点.聚乙二醇二丙烯酸酯作为一种新型包埋材料,多用于硝化菌以及反硝化菌的固定化研究,例如将其用于包埋硝化细菌,并与弹性塑料填料硝化生物膜反应器作对比,启动 30d 后,包埋反应器硝化速率达到 39mgN/(L·h),优于生物膜 25mgN/(L·h)^[15];此外,将其作为反硝化菌的载体,用于处理硝酸盐合成废水,16d 后,发现反硝化速率高达 4.4kgN/(m³·d)^[16].然而其用于包埋厌氧氨氧化菌的研究却鲜有报道.因此本实验采用其作为固定化介质^[17],对厌氧氨氧化菌进行固定化试验.为制备具有良好机械性能和脱氮效果的包埋颗粒,本实验设计了正交试验对包埋条件进行了优化.并观察了包埋颗粒长期运行的稳定性,分析了运行前后微生物群落的变化,以探索本包埋材料的特点以及应用的优势.

1 材料与方

1.1 实验材料和仪器

厌氧氨氧化污泥取自实验室稳定运行 4a 的 UASB 反应器^[18];实验所用药剂及仪器:聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA),生化试剂;四甲基乙二胺(TEMED),生化试剂;过硫酸钾(KPS),分析纯;磷酸二氢钠(NaH₂PO₄·2H₂O),分析纯;磷酸氢二钠(Na₂HPO₄·12H₂O),分析纯;氯化钠(NaCl),分析纯;氯化钾(KCl),分析纯.

实验用水采用人工配水,主要成分见表 1,微量元素 I 和 II 参照文献[19],pH 值为 7.5~8.0.

表 1 人工模拟废水成分组成
Table 1 Compositions of artificial wastewater

主要成分	质量浓度
KH ₂ PO ₄	25mg/L
CaCl ₂	120mg/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O	260mg/L
KHCO ₃	753mg/L
微量元素 I	1ml/L
微量元素 II	1ml/L

微量元素 I 组成:FeSO₄, 5g/L;EDTA, 5g/L;微量元素 II 组成:EDTA, 15g/L; CuSO₄·5H₂O, 0.2g/L;

ZnSO₄·7H₂O, 0.43g/L; CoCl₂·6H₂O, 0.24g/L; MnCl₂·4H₂O, 0.99g/L; NaMoO₄·2H₂O, 0.22g/L; NiCl₂·6H₂O, 0.19g/L; NaSeO₄, 0.11g/L; H₃BO₃, 0.014g/L; NH₄⁺-N, NO₂⁻-N 分别用 NH₄Cl 和 NaNO₂ 按需配制.

1.2 固定化颗粒的制备

1.2.1 污泥浓缩液的制备 由 UASB 反应器取得的厌氧氨氧化颗粒污泥,将其打碎,经 PBS (0.1mol/L, pH 7.4)冲洗 2~3 次,除去污泥表面的残留基质,4000r/min 离心 10min,制得污泥浓缩液.

1.2.2 包埋颗粒制作过程 取一定量 PEGDA 溶解于磷酸缓冲溶液中,加入一定量的 TEMED 并将 pH 调至 7.0,将制得的溶液与污泥浓缩液按一定比例混合,搅拌均匀.加入一定量 KPS,迅速搅拌,一定温度下(20~30℃)聚合一定时间后混合液成固态,将形成的凝胶切成 3mm×3mm×3mm 的立方体,即得 PEGDA 包埋颗粒.将制得的包埋颗粒用去离子水冲洗彻底,将未交联的 PEGDA 单体和未固定的厌氧氨氧化菌洗出.而后浸泡于去离子水中,低温避光贮存.

1.3 分析方法

1.3.1 水质分析方法 NH₄⁺-N:纳氏试剂光度法;NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO₃⁻-N:麝香草酚分光光度法;pH/温度:WTW/Multi3420 测定仪.

1.3.2 包埋颗粒机械稳定性测定方法 取大小相似的包埋颗粒各 30 粒加入血清瓶反应器(图 1)中,加入 400mL 去离子水,600r/min 磁力搅拌 48h 后观察完好包埋颗粒占原颗粒数的比例^[20].

1.3.3 厌氧氨氧化性能的测定方法 包埋颗粒厌氧氨氧化性能测定装置如图 1 所示.取活化后的包埋颗粒 40mL,转入 500mL 的带塞血清瓶中,血清瓶用黑色反光纸包裹,加入 400mL 人工废水,放在恒温磁力搅拌器上.进气口通过通高纯氮气 30min 左右以吹脱水中的溶解氧进而保证厌氧环境.磁力搅拌器转速 150r/min,温度保持 30℃.隔一定时间用注射器通过进气口取样.每个实验设置 3 组平行取平均值.

1.3.4 扫描电镜分析 包埋颗粒扫描电镜(SEM)分析:取出包埋颗粒,清洗后经 2.5%戊二醇固定 1.5h,PBS 清洗 3 遍,随后经体积分数为 50%,70%,80%,90%,100%乙醇梯度脱水,每次 10~15min,最后用乙酸异戊酯置换,冷冻干燥 24h 后在样品表面镀

上一层 1500nm 厚的金属膜,采用 Hitachi S-4300 型扫描电镜进行观察。

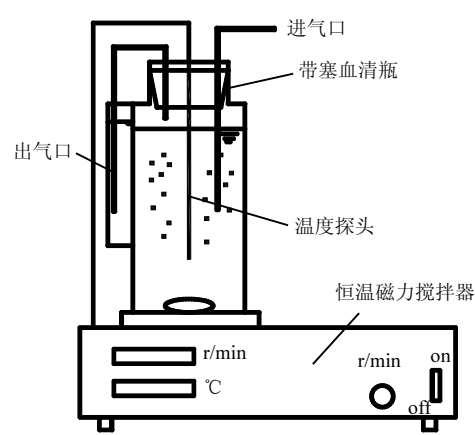


图 1 厌氧氨氧化性能测定装置
Fig.1 Anammox activity measuring device

1.3.5 连续流稳定运行及微生物群落结构分析

(1) 连续流运行:为了进一步研究包埋颗粒脱氮效果,采用连续流运行的方法,运行装置为有效容积约 6L 的 UASB 反应器,外部覆盖一层遮光保温层.水浴控制运行温度稳定在 32℃左右.包埋颗粒通过琉璃球与鞭式填料按照体积填充率 10%投加均匀分布于反应器中.实验采用人工配水,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度约为 35mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度约为 45mg/L,其余按照表 1 配制。

(2) 微生物群落结构分析:为研究包埋材料对厌氧氨氧化菌的影响以及运行稳定后颗粒内部微生物的结构,取少量刚包埋后以及 60d 后稳定运行的包埋颗粒,利用 Miseq 高通量测序对比分析包埋颗粒的微生物群落以及多样性的变化。

使用 Usearch 软件(版本 8.1.1831)对样品的有效序列进行 OTU 聚类,聚类标准为 97%相似.基于前述 OTU 聚类结果,调用 Mothur 软件(版本 1.30.1),计算各个样品 shannon、Simpson、Coverage 指数值并绘制相关曲线图,参数为默认参数.采用 RDPclassifier 软件(版本 2.12)将前述各样品合格序列进行物种分类操作,阈值设置为 0.8,低于该阈值的分类结果被划归为 unclassified 一类.分类完成后采用自写 perl 脚本统计各物种门、属比例并用自写 R 脚本绘制相关柱状图.采用 STAMP 软件(版本 2.1.3),采用默认参数,基于物种分类结果得到的在不同水平上各 rank 的丰度值,比较样本或组间丰度

差异,找出样本或组间丰度存在显著差异的物种分类,筛选条件为 $P\leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 正交法优化包埋条件

实验将单体浓度、催化剂浓度、引发剂浓度、聚合温度、菌胶比作为正交因素应用到实验设计中.固定单体浓度、催化剂浓度、引发剂浓度作为正交实验的 3 因素,分别以聚合温度,菌胶比作为第 4 个因素,进行 2 次正交实验,分别考察其对固定化颗粒相对活性,机械稳定性的影响.凝胶时间与反应温度密切相关,当单体、引发剂和催化剂浓度一定时,反应温度越高,凝胶时间越短.由单因素实验可知聚合温度在 15℃以下时,聚合反应很难进行,聚合温度在 20~30℃之间时,凝胶时间下降非常明显,20℃时大分子单体的凝胶时间可以下降到 5min 左右(具体数据未列出);但如果聚合反应温度过高,反应速率将过快,使得交联度分布不均匀,形成的水凝胶外观浑浊不透明,硬度也不均一.针对本研究中的应用于微生物固定化的 PEGDA 凝胶,为了控制聚合反应以适当速率进行,以及考虑到过高温度对微生物的灭活作用,因此控制聚合温度为 20℃~30℃.设置单体浓度范围 8%~12%,催化剂浓度范围 0.25%~1%,引发剂浓度范围 0.25%~1%,菌胶比范围 0.5~2.凝胶时间统一为 5min.具体因素水平设置如表 2 所示。

表 2 因素水平 1
Table 2 Factors and levels 1

水平	A	B	C	D
	PEGDA 单体 浓度(%)	催化剂浓度 (%)	引发剂浓度 (%)	温度 (℃)
1	8	0.25	0.25	20
2	10	0.5	0.5	25
3	12	1	1	30

由表 3 可知,以包埋颗粒活性为参考值,4 个因素的最优水平是 $A_1B_1C_1D_1$,即 PEGDA 单体浓度 8%,催化剂浓度 0.25%,引发剂浓度 0.25%,温度控制在 20℃.4 种影响因素的主次为 $D>A>B>C$.可见,试剂用量越少,温度越低,得到的包埋颗粒的活性越高.其中,温度对于包埋菌体的活性具有较大的影响,过高的聚合温度可致使菌体活性完全丧失.单体浓度和催化剂浓度对菌体活性的影响程度大小相接近,而

催化剂的用量相对于单体的用量非常的少,这也正侧面的说明了 TEMED 对生物的毒性.在满足要求的情况下需要最大程度的降低催化剂的浓度,防止其对包埋菌的活性造成不可逆转的影响.

表 3 正交实验结果 1

Table 3 Results of orthogonal experiment 1

实验号	A	B	C	D	相对活性(%)
1	8	0.25	0.25	20	65.00
2	8	0.5	0.5	25	50.00
3	8	1	1	30	30.00
4	10	0.25	0.5	30	39.00
5	10	0.5	1	20	53.00
6	10	1	0.25	25	43.00
7	12	0.25	1	25	42.00
8	12	0.5	0.25	30	29.00
9	12	1	0.5	20	40.00
K1	48.33	48.67	45.67	52.67	
K2	45.00	44.00	43.00	45.00	
K3	37.00	37.67	41.67	32.67	
R	11.33	11.00	4.00	20.00	

表 4 因素水平 2

Table 4 Factors and levels 2

水平	A	B	C	D
	PEGDA 单体 浓度(%)	催化剂浓度 (%)	引发剂浓度 (%)	菌胶比
1	8	0.25	0.25	0.5:1
2	10	0.5	0.5	1:1
3	12	1	1	1:2

表 5 正交实验结果 2

Table 5 Results of orthogonal experiment 2

实验号	A	B	C	E	机械稳定性(%)
1	8	0.25	0.25	0.5:1	86.67
2	8	0.5	0.5	1:1	93.33
3	8	1	1	2:1	80.00
4	10	0.25	0.5	2:1	83.33
5	10	0.5	1	0.5:1	90.00
6	10	1	0.25	1:1	96.67
7	12	0.25	1	1:1	80.00
8	12	0.5	0.25	2:1	80.00
9	12	1	0.5	0.5:1	80.00
K1	86.67	83.33	87.78	85.56	
K2	90.00	87.78	85.55	90.00	
K3	80.00	85.56	83.33	81.11	
R	10.00	2.22	4.45	8.89	

由表 5 可知,以包埋颗粒机械稳定性为参考值,实验设置的 4 个因素的最优水平是 A₂B₃C₁E₂,即

PEGDA 单体浓度 10%,催化剂浓度 1%,引发剂浓度 0.25%,菌胶比为 1:1.4 种影响因素的主次为 A>E>C>B.综合考虑表 3,表 5 得到包埋颗粒的活性以及机械稳定性,催化剂用量 0.5%已能够满足包埋颗粒的稳定性要求,降低催化剂的用量可极大提高包埋颗粒活性.所以,综合考虑,选取 PEGDA 单体浓度 10%,催化剂浓度 0.5%,引发剂浓度 0.25%,菌胶比为 1:1,温度控制为 20℃.

2.2 连续流运行及扫描电镜分析

为了进一步研究包埋颗粒的长期运行脱氮性能,进行了为期 100d 的连续流运行实验.从图 2 可以看出,前期的包埋处理对厌氧氨氧化菌的活性产生了一定的影响,因此前 10d 为包埋颗粒活性的恢复阶段,10~100d 为包埋颗粒的稳定运行以及性能逐渐提升阶段.包埋颗粒经过活性恢复后 NH₄⁺-N 的去除率从一开始的 24%提高到 48%,NO₂⁻-N 的去除率从 22%提高到 43%.随着包埋颗粒脱氮效果的不断提升,第 40d 时,NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的去除率分别达到 91%和 83%,第 41d 将水力停留时间从之前的 12h 缩短为 8h,由图中可以看出,虽然出水氮浓度有所提高,但是 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的去除率依然能有 63%和 55%,这一现象说明包埋颗粒有一定抗负荷冲击能力,当氮负荷突然升高,本包埋材料会削弱氮负荷的升高对厌氧氨氧化污泥的冲击影响,本实验的 41~46d 表现一段平稳的去除效果,之后包埋颗粒逐渐适应氮负荷的变化,活性开始继续升高,这一现象与 Bae 等^[21]的研究结果类似.实验期间,出水未检测到污泥的流出,也并未观察到包埋颗粒的破碎,种种现象表明,本包埋颗粒具有良好的污泥截留效果以及良好的稳定性.

运行 60d 时,取少许包埋颗粒观察其外观形态及扫描电镜(SEM)分析,如图 4 所示.图 4(c)为运行 60d 后的数码照片,与刚包埋的相比(图 3(a)),不难看出,厌氧氨氧化菌在颗粒内部大量增长,这也从侧面显示了厌氧氨氧化效果不断的提高.观察包埋颗粒,可以看出,颗粒依然保持着小正方体的形态,并未出现破碎,缺损的现象,表明本实验所用包埋材料能够用于长时间运行.图 4(a)和图 4(b)分别为放大 5000 倍包埋材料形成的内部孔道以及放大 10000 倍切开包埋材料后内部生长的厌氧氨氧化细菌,可以看出,本包埋材料不仅稳定性好,而且具有良好的传质性

能,能够为细菌提供良好的生长环境,从而使得脱氮效果不断提升.

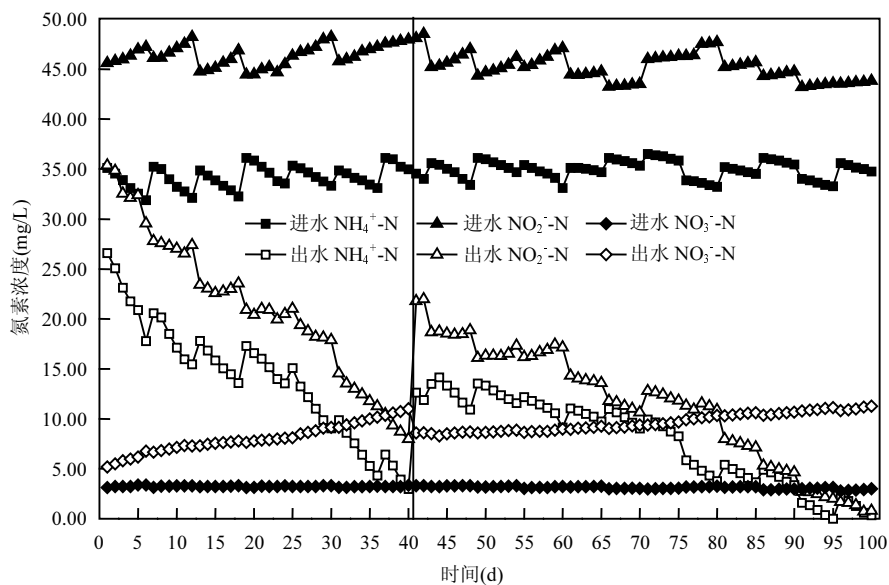
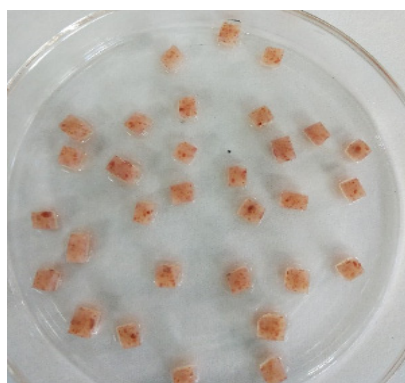
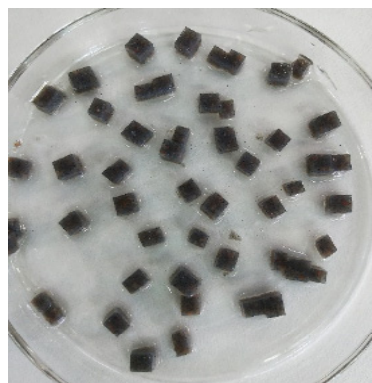


图2 反应器进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$

Fig.2 The changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the reactor in and out of water



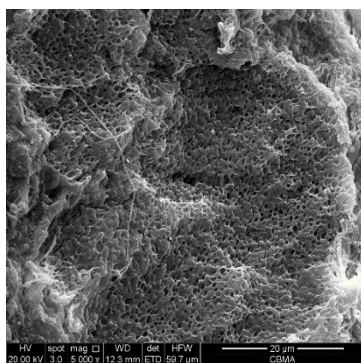
(a)未添加活性炭



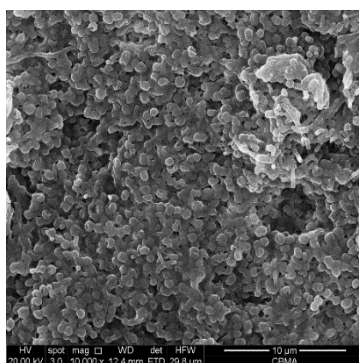
(b)添加活性炭

图3 包埋后颗粒数码照片

Fig.3 Picture of immobilized pellets



(a)



(b)



(c)

图4 运行 60d 后包埋颗粒内部扫描电镜及外观数码照片

Fig.4 Internal scanning electron microscopy and appearance digital photos of embedded particles after 60 days of operation

分说明了本实验所用包埋材料适用于厌氧氨氧化菌的生长,能够促进厌氧氨氧化菌的富集.李滨等分析了稳定运行的 UASB 厌氧氨氧化反应器,发现浮霉菌门仅占 3.1%^[24],本实验测得的浮霉菌门比例均高于李滨等^[24]的研究,分析可能是本实验的接种污泥为实验室稳定运行几年的厌氧氨氧化污泥的原因.拟杆菌门,酸酐菌门比例均有所下降,分别由 5.48%,5.25% 下降到 5.25%,3.48%;厚壁菌门, *Ignavibacteriae*,绿弯菌门比例均有所增长,分别由 2.91%,3.61%,2.53%增长到 11.31%,4.86%,6.08%.

从属层面看,如图 6,变形菌门主要包含 19 个属,刚运行时最多的为 *Dokdonella*,占 9.67%,运行 60d 后测得 *Citrobacter* 占最大比例,为 5.90%,*Dokdonella* 所占比例下降为 4.72%.本实验的功能菌为厌氧氨氧化菌,2 种厌氧氨氧化菌(*Candidatus Brocadia* 和 *Candidatus Kuenenia*)都有被检测出来,这 2 种属广泛存在于淡水系统和生物反应器中.其中, *Candidatus Brocadia* 比例较低,*Candidatus Kuenenia* 占据主要部分,与 Cao 等^[23]研究有所差距,Cao 的研究为 *Candidatus Brocadia* 占据主要部分.运行 60d 后,*Candidatus Brocadia* 相对增长,但并不明显,而 *Candidatus Kuenenia* 所占比例由 6.58%增加到 9.8%,增长较为显著,由原来属水平的第 3 位上升为第一位.这一结果有力地说明了,相对颗粒污泥,包埋后的厌氧氨氧化颗粒能够进一步扩大厌氧氨氧化功能菌所占比例,从而进一步提高脱氮效果.这也相应地为连续流运行时水力负荷突然提高,本实验所用包埋颗粒能够具有良好的抗冲击能力给出了合理的解释.

3 结论

3.1 综合考虑包埋颗粒的活性和机械稳定性能,聚合凝胶最优配比为:10%PEGDA 单体,0.25%KPS,0.5%TEMED.为保证厌氧氨氧化菌包埋后的性能,最佳的操作条件为聚合温度控制在 20℃左右,聚合时间控制在 5min 左右,菌胶比选取 1:1.

3.2 100d 的连续流运行效果观察显示,前 10d 是颗粒的活性快速恢复阶段,10d 后反应器运行效果趋于稳定,脱氮性能逐步提高, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率分别达到 91%和 83%.在 41d,将水力停留时间从 12h 降为 8h, NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率仍然能达

到 63%和 55%,包埋颗粒表现出一定的抗水力负荷冲击能力.

3.3 观察运行 60d 后扫描电镜(SEM)和颗粒外观形态,能够看出:本实验所采用的包埋材料具有良好的传质性能,能够为微生物提供良好的生长环境,且具备良好的生物截留能力.表明本包埋材料能够应用于长期运行.

3.3 包埋颗粒微生物分析显示,运行 60d 后,颗粒内部微生物的多样性有所降低.由门水平物种相对丰度可知,变形菌门比例下降幅度巨大,由 70.79%降为 48.78%;浮霉菌门比例大幅度提高,增长了两倍多,由 7.46%增长到 15.9%.由属水平物种相对丰度可知,颗粒内部的厌氧氨氧化菌主要为 *Candidatus Kuenenia*,占整个微生物群落的比例由 6.58%增加到 9.8%,增长显著,由开始属水平的第 3 位上升为第 1 位.表明本实验的包埋材料具有良好的生物相容性,能够进一步扩大厌氧氨氧化功能菌所占比例,从而进一步提高脱氮效果.

参考文献:

- [1] Zhu W, Li J, Dong H, et al. Effect of influent substrate ratio on anammox granular sludge: performance and kinetics [J]. Biodegradation, 2017,28(5/6):437-452.
- [2] Zhang L, Narita Y, Gao L, et al. Microbial competition among anammox bacteria in nitrite-limited bioreactors [J]. Water Research, 2017,125:249-258.
- [3] Tang X, Guo Y, Jiang B, et al. Metagenomic approaches to understanding bacterial communication during the anammox reactor start-up [J]. Water Research, 2018,136:95-103.
- [4] Jetten M S M, Wagner M, Fuerst J, et al. Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2001,12(3):283-288.
- [5] 祖波,张代钧,阎青.颗粒污泥厌氧氨氧化动力学特性及微量 NO_2^- 的影响 [J]. 环境科学, 2008,29(3):683-687.
- [6] 赵志宏,廖德祥,李小明,等.厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究 [J]. 环境科学, 2007,28(4):800-804.
- [7] Qiao S, Tian T, Duan X, et al. Novel single-stage autotrophic nitrogen removal via co-immobilizing partial nitrifying and anammox biomass [J]. Chemical Engineering Journal, 2013,230:19-26.
- [8] 袁青,黄晓丽,高大文.不同填料 UAAB-ANAMMOX 反应器的脱氮效能 [J]. 环境科学研究, 2014,27(3):301-308.
- [9] 申婷婷,李小明,岳秀,等.微生物固定化技术的研究与应用 [J]. 广州化工, 2011,39(20):3-5.
- [10] 许晓毅,张婷婷,尤晓露,等.包埋固定化硝化污泥处理氨氮废水的过程特性 [J]. 中国环境科学, 2016,36(10):2988-2996.
- [11] Seo J K, Jung I H, Kim M R, et al. Nitrification performance of nitrifiers immobilized in PVA (polyvinyl alcohol) for a marine

- recirculating aquarium system [J]. *Aquacultural Engineering*, 2001, 24(3):181-194.
- [12] Magri A, Vanotti M B, Szögi A A. Anammox sludge immobilized in polyvinyl alcohol (PVA) cryogel carriers [J]. *Bioresource Technology*, 2012,114:231-240.
- [13] 钟成华,刘 鹏,张文东,等.卡拉胶,膨润土改性 PVA 包埋小球 [J]. *环境工程学报*, 2013,7(8):2837-2843.
- [14] 唐崇俭,熊 蕾,王云燕,等.高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 [J]. *环境科学*, 2013,34(9):3544-3551.
- [15] Li Z, Zhang Z, Li J, et al. Comparative study of the nitrification characteristics of two different nitrifier immobilization methods [J]. *Biodegradation*, 2009,20(6):859-865.
- [16] Isaka K, Kimura Y, Osaka T, et al. High-rate denitrification using polyethylene glycol gel carriers entrapping heterotrophic denitrifying bacteria [J]. *Water Research*, 2012,46(16):4941-4948.
- [17] Isaka K, Date Y, Sumino T, et al. Ammonium removal performance of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria immobilized in polyethylene glycol gel carrier [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 76(6):1457-1465.
- [18] 李泽兵,刘常敬,赵白航,等.多基质时厌氧氨氧化菌,异养反硝化污泥活性及抑制特征 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(4):648-654.
- [19] Strous M, Van Gerven E, Zheng P, et al. Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in different reactor configurations [J]. *Water Research*, 1997,31(8):1955-1962.
- [20] 陈光辉,李 军,邓海亮,等.厌氧氨氧化污泥包埋固定化及其脱氮效能 [J]. *北京工业大学学报*, 2015,41(4):612-620.
- [21] Bae W, Han D, Cui F, et al. Microbial evaluation for biodegradability of recalcitrant organic in textile wastewater using an immobilized-cell activated sludge process [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014,18(4):964-970.
- [22] Du R, Cao S, Wang S, et al. Performance of partial denitrification (PD)-ANAMMOX process in simultaneously treating nitrate and low C/N domestic wastewater at low temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2016,219:420-429.
- [23] Cao S, Du R, Li B, 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.
- [24] 李 滨,赵志瑞,马 斌,等.克隆文库方法分析厌氧氨氧化反应器中细菌群落结构 [J]. *环境科学与技术*, 2012,1(12):159-164.

作者简介: 王维奇(1993-),男,江苏盐城人,北京工业大学硕士研究生,主要从事污水处理与资源化方面的研究。