

# 低温低 C/N 比污水微氧生物脱氮性能研究

李 慧<sup>1</sup>, 张 潇<sup>1\*</sup>, 曹 岳<sup>2</sup>, 赵博玮<sup>1</sup>, 岳秀萍<sup>1</sup>,  
(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;  
2. 深圳市利源水务设计咨询有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**为探究低温条件下溶解氧(DO)质量浓度对微氧生物脱氮反应器启动和运行的影响,采用外曝气回流上升流式微氧污泥处理系统,将低C/N比模拟城市污水泵入反应器进行处理,实验各阶段微调DO浓度并测定主要出水水质指标。结果表明,反应器对TOC、IC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TN去除率分别为62.32%、60.02%、91.56%、64.09%,在低温、低DO、低C/N比的条件下处理效果良好。菌群结构分析表明,驯化污泥存在促进颗粒化菌,好氧氨氧化、厌氧氨氧化、自养反硝化、异养反硝化和好氧反硝化可协同脱氮,在低温、低C/N比下富集节能高效脱氮菌群。

**关键词:**微氧;低温;低C/N比;脱氮

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)02-0151-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.02.031

## Research on performance of microaerobic biologically removing nitrogen from municipal wastewater with low C/N ratio at low temperature

LI Hui<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>1\*</sup>, CAO Yue<sup>2</sup>, ZHAO Bo-wei<sup>1</sup>, YUE Xiu-ping<sup>1</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2.Shenzhen Liyuan Water Design Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:**In order to explore the influence of dissolved oxygen (DO) concentration on the start-up and operation of the microaerobic biological nitrogen-removing reactor under low temperature (15°C) conditions, the simulated municipal sewage with a low C/N ratio is pumped into the reactor with an external aeration-reflux upflow microaerobic sludge treatment system. The concentration of DO is adjusted slightly at each stage of the experiment, meanwhile main effluent water quality indicators are determined accordingly. It is shown that the removal efficiencies of TOC, IC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TN by the reactor are 62.32%, 60.02%, 91.56%, 64.09%, respectively, showing that the treatment effect by the reactor is good under the conditions of low temperature, low DO and low C/N ratio. The results from analyzing the structure characteristics of bacterial flora show that domesticated sludge can promote granular bacteria, aerobic oxidation of ammonia, anaerobic oxidation of ammonia, autotrophic denitrification, heterotrophic denitrification and aerobic denitrification to coordinate with removal of nitrogen, and enrich bacterial flora with energy-saving and high-efficiency nitrogen-removing performances at low temperature and low C/N ratio.

**Key words:** microaerobic; low temperature; low C/N ratio; nitrogen removal

目前,大部分城市污水厂通过有氧碳矿化作用以及全程生物硝化和反硝化作用实现污水中碳氮污染物的去除<sup>[1]</sup>,因而,城市污水厂具有曝气量大、需额外补充碳源、污泥产量高和运行费用高等缺点<sup>[2-3]</sup>,加剧了能源消耗。从污水中回收能源已成为污水处理领域的研究热点,在最初的污水处理工序中回收有机碳源并用于产能,使进入后续生物处理工艺的污水为低碳氮比污水,利用微氧(DO控制

在0.3~1.0 mg/L)生物处理技术,通过亚硝化-厌氧氨氧化-部分反硝化等新型脱氮途径降解污水中剩余污染物,可减少曝气量和建设费用<sup>[4-8]</sup>。在微氧生物处理过程中,DO和温度等是影响处理效能的重要因素,Zhang等<sup>[9]</sup>研究先将DO由1.53 mg/L降低为0.37 mg/L实现NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的积累,再提高DO至0.50 mg/L增加硝化反应程度,最终实现在(25±1)℃下NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TN去除率达到90%以上,

收稿日期:2021-03-04;修回日期:2021-12-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0408601);山西省高等学校科技创新项目(jyt202004);山西省研究生创新项目(2020SY543);山西省重点研发项目(社发领域)(201903D321055,201903D321057);国家重点研发计划项目(2019YFC0408602)

作者简介:李慧(1995-),女,硕士研究生,研究方向为水污染控制与水质安全保障,601602906@qq.com;张潇(1990-),女,博士,讲师,研究方向为水污染的控制工程,通讯联系人,2505512180@qq.com。

Meng 等<sup>[10]</sup>研究表明,当控制微氧反应器的溶解氧(DO)的温度从 35℃ 降低到 15℃ 时,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 从 20℃ 的去除率 97.3% 和 81.2% 降低到 15℃ 时的 61.8% 和 39.7%。然而,目前在微氧生物处理技术处理回收碳源工艺后的城市污水的研究中多采用高温驯化和运行,在低温下启动和调控运行的研究较少,因此,笔者以碳源回收后的低 C/N 比城市污水为研究对象,在 15℃ 条件下启动各阶段微调溶解氧(DO)质量浓度,测定  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  等出水水质指标,最后分析了微生物菌群结构和反应器碳氮去除途径,为低温下快速驯化和培养协同合作的微氧生物群落提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验装置

微氧污泥反应器如图 1 所示。外曝气回流上升流式微氧污泥反应器是由有机玻璃制成的圆柱体,直径为 0.8 m,高度为 1.5 m,有效容积为 7.5 L,侧壁配置 4 个同间距取样口;进水经蠕动泵从反应器底部进水口连续泵入反应器,上升至反应器顶部溢流出水,出水流入外循环复氧水池,经曝气砂头装置曝气复氧后,一部分复氧水回流到反应器底部回流进水口,通过控制复氧水蠕动泵调控反应器内 DO 浓度;另一部分复氧水溢流排放,复氧池容积为 0.1 L。反应器外层包裹遮光布,避免光照影响反应器内藻类生长,从而影响反应器内 DO 的精确调控,实验控制温度为 15℃。实验分 4 个运行阶段,阶段 1、2、3 和 4 的 DO 质量浓度分别为 0.26、0.18、0.27 mg/L 和 0.38 mg/L,运行时间分别为 17、50、50、33 d。

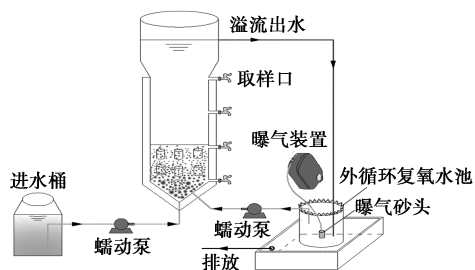


图 1 微氧污泥反应器示意图

### 1.2 污水组成和污泥接种

进水采用人工模拟配水,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的质量浓度为 90 mg/L, COD 的质量浓度为 60 mg/L。配水组分为:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (344 mg/L)、 $\text{NaHCO}_3$  (1 200 mg/L)、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  (56 mg/L)、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (10 mg/L)、 $\text{CaCl}_2$

(20 mg/L)、 $\text{MgSO}_4$  (300 mg/L),同时添加 1.2 mL/L 的微量元素。微量元素溶液包含: EDTA (15 mg/L)、 $\text{H}_3\text{BO}_4$  (0.014 mg/L)、 $\text{MnCl}_2$  (0.99 mg/L)、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0.25 mg/L)、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.45 mg/L)、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.19 mg/L)、 $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (0.21 mg/L)、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.22 mg/L)。试验种泥取自山西太原某污水厂(AAO 工艺)活性污泥,污泥 MLSS 和 MLVSS 分别为 2 800 mg/L 和 1 600 mg/L。

### 1.3 分析方法

反应器每隔 2 d 取进出水水样,并用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤。水样的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  按标准方法(APHA, 1998)测定<sup>[11]</sup>; TOC、IC 采用 TOC 测定仪(TOC-V CPH 日本); pH、DO、温度分别采用 HI5222-02(ROMANIA)、Oxi 3310(德国)进行监测;分别取阶段 1、2、3、4 末的 0.326 2、0.302 0、0.358 1、0.301 0 gVSS/L 污泥,测定硝化和反硝化速率<sup>[12-13]</sup>。

### 1.4 高通量测序

对反应器启动后的微生物群落多样性和菌群结构进行分析,选取阶段 4 运行稳定期的污泥进行高通量测序,采用引物对 341F (5'-CCTACGGGNGGC-WGCAG-3')、805R (5'-GACTACHVGGGTATCTA-ATCC-3') 通过 Illumina MiSeq 测序平台完成样品细菌 16S rDNA 高通量测序。

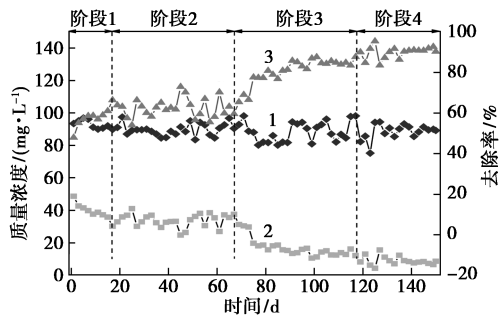
## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物去除效果

#### 2.1.1 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除效果

DO 对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除的影响如图 2 所示。运行初期,阶段 1 反应器内 DO 质量浓度为 0.26 mg/L,运行第 1 d 出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度为 48.72 mg/L,随着运行时间的延长,在阶段 1 的末期逐渐降低至 30.24 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率由 47.88% 逐渐增加至 66.36%。阶段 2 反应器内 DO 质量浓度为 0.18 mg/L, DO 质量浓度的降低使好氧氨氧化菌(AOB)获得的氧含量减少,活性受到抑制,因此  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  出水质量浓度略微增加至 37.58 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率逐渐降低至 59.54%。阶段 3 反应器内 DO 质量浓度 0.27 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  出水质量浓度降低至 12.18 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率增加至 87.59%。阶段 4 反应器内 DO 质量浓度为 0.38 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  出水质量浓度降低至 8.71 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率增加至 91.56%。通过先降低,硝化菌的活性被短暂抑制,随后在相同溶解氧条件下(阶段 1 的

0.26 mg/L和阶段3的0.27 mg/L)展现出更高的硝化能力,因此 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率逐渐提高。

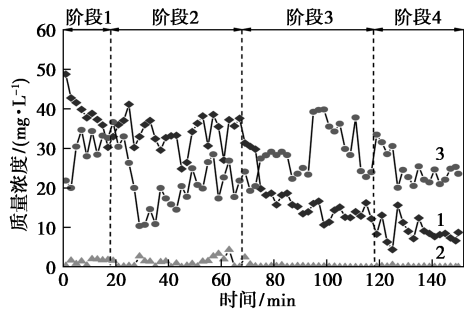


1—进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度;2—出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度;  
3— $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度

图2 DO对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的影响

### 2.1.2 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N积累

出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N的变化情况如图3所示。由图3中可以看出,阶段1反应器出水 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N质量浓度分别为1.82 mg/L和32.59 mg/L。由于阶段2的DO质量浓度由阶段1的0.26 mg/L调整至0.18 mg/L,DO的降低使亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)受抑制。由AOB氧化 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 生成的 $\text{NO}_2^-$ -N不能完全氧化成 $\text{NO}_3^-$ -N,因此,阶段2反应器出水 $\text{NO}_2^-$ -N积累, $\text{NO}_3^-$ -N降低,出水 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N平均质量浓度分别为3.10 mg/L和23.82 mg/L。并且在阶段2运行结束时 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度同时降低,说明富集了厌氧氨氧化菌(ANAMMOX)<sup>[14]</sup>。在阶段3出现出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-$ -N的比值逆转,说明在低DO条件的长期运行,AOB产生丰富的 $\text{NO}_2^-$ -N,为NO<sub>B</sub>提供充足的底物,发生硝化作用, $\text{NO}_3^-$ -N质量浓度升高。阶段4的DO略微增加,出水 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N质量浓度分别为0.02 mg/L和23.54 mg/L,出现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$



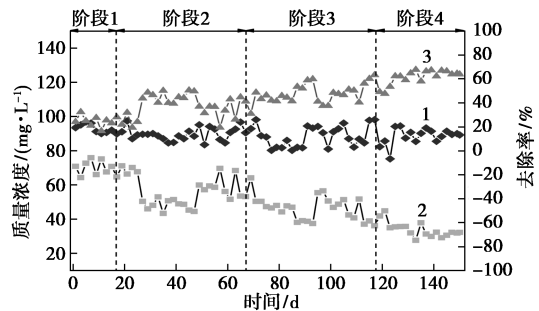
1—出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ;2—出水 $\text{NO}_2^-$ -N;3—出水 $\text{NO}_3^-$ -N

图3 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N的变化情况

和 $\text{NO}_3^-$ -N的同步降低,说明系统的硝化菌、ANANMMOX和反硝化菌的协同脱氮合作能力增强, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化效能提高,且反应底物能快速被降解。

### 2.1.3 TN去除效果

DO对TN去除的影响如图4所示。由图4中可以看出,第1d反应器出水TN质量浓度为67.69 mg/L,随着阶段1运行时间的延长,出水TN质量浓度持续降低,在阶段2、3和4质量浓度分别达到58.36、37.38 mg/L和32.16 mg/L,TN去除率分别为25.51%、37.36%、59.85%和64.09%,Zhang等<sup>[9]</sup>得到类似的研究结果。尽管阶段1末 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较高,但是TN去除率较低,想要在反应器内同时实现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除,需要在保证硝化反应进行的同时,实现反硝化过程,适宜的DO质量浓度是解决上述问题的关键,为了使TN得到有效地去除,降低阶段2的DO质量浓度以富集自养反硝化菌和厌氧氨氧化菌,从而实现低C/N比浓度污水的TN去除。阶段3和阶段4的DO质量浓度逐渐增加以进一步降低 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度,最终获得较高的TN去除率。

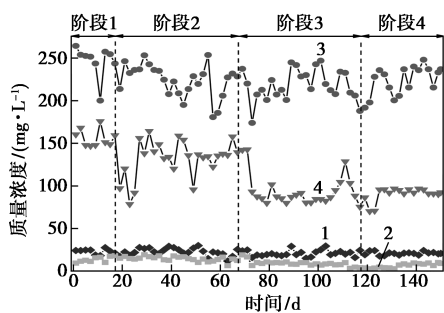


1—进水TN;2—出水TN;3—TN去除率

图4 DO对TN去除的影响

### 2.1.4 TOC和IC的变化

DO对TOC和IC去除的影响如图5所示。由图5中可以看出,进水TOC的质量浓度约为22 mg/L,阶段1反应器出水TOC的质量浓度约为15.28 mg/L,阶段2、3和4出水TOC的质量浓度分别为11.11、3.99 mg/L和7.88 mg/L,去除率分别为47.72%、78.06%和62.32%。进水IC的质量浓度约为225 mg/L,出水IC的质量浓度在阶段1、2、3、4分别为153.07、144.47、89.03 mg/L和91.20 mg/L,去除率分别为39.15%、36.99%、55.88%和60.02%。随着运行时间的延长,IC的去除率逐渐增加,这是因为长期进水为低C/N比污水的条件下,自养菌丰度逐渐增加所致。

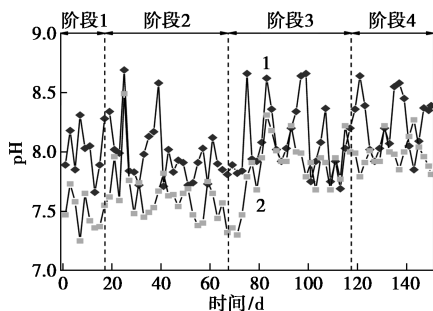


1—进水 TOC;2—出水 TOC;3—进水 IC;4—出水 IC

图 5 DO 对 TOC 和 IC 去除的影响

### 2.1.5 pH 的变化

DO 对 pH 的影响如图 6 所示。由图 6 中可以看出,进水 pH 约为 8.1,由于硝化作用消耗碱和反硝化作用产生碱<sup>[15]</sup>,随着微氧反应器运行时间的延长,出水 pH 从 7.4 逐渐增加至 7.8,反硝化性能逐渐提高。且随着运行时间的延长,出水和进水 pH 越接近,说明中间产物对微生物带来的 pH 抑制越来越弱,这也解释了微生物活性越来越高。

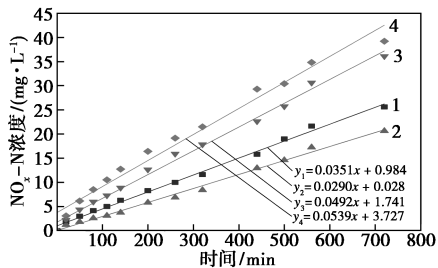


1—进水 pH;2—出水 pH

图 6 DO 对 pH 的影响

### 2.1.6 硝化和反硝化速率的变化

在各个阶段取适量污泥样品进行硝化速率测定,结果如图 7 所示。由图 7 中可以看出,硝化反应是零级反应,阶段 1、2、3 和 4 末的斜率分别是 0.029 0、0.035 1、0.049 2 和 0.053 9,硝化强度分别为 0.174、0.211、0.295 mg(NO<sub>x</sub>-N)/h 和 0.323 mg(NO<sub>x</sub>-N)/h,硝化速率分别为 1.08、0.82、0.65 和

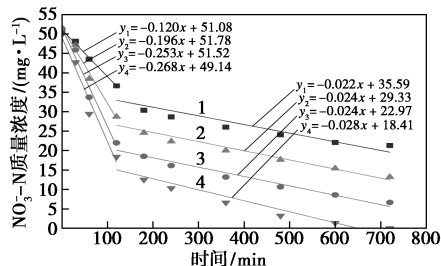


1—阶段 1 末;2—阶段 2 末;3—阶段 3 末;4—阶段 4 末

图 7 DO 对硝化速率的影响

0.58 mg(NO<sub>x</sub>-N)/[g(VSS)·h],硝化活性大小为:阶段 4>阶段 3>阶段 1>阶段 2,说明溶解氧的降低抑制硝化活性,反之则提高硝化活性。

在各个阶段末取污泥样品进行反硝化速率测定,结果如图 8 所示。由图 8 中可以看出,反硝化反应分为 2 个阶段:第 1 阶段可利用的碳源充足,硝酸盐降解强度与污泥反硝化活性有关,在阶段 1、2、3 和 4 末的污泥反硝化强度和速率逐渐增大,150 d 的反硝化强度和速率分别为 1.61 mg(NO<sub>3</sub>-N)/h 和 5.32 mg(NO<sub>x</sub>-N)/[g(VSS)·h]。郑兰香等<sup>[16]</sup>研究发现,在 15℃ 和 27℃ 的反硝化速率分别为 5.8、9.26 mg(NO<sub>x</sub>-N)/[g(VSS)·h],该研究结果与其相近,也说明低温是本实验出水 NO<sub>3</sub>-N 偏高的重要原因。



1—阶段 1 末;2—阶段 2 末;3—阶段 3 末;4—阶段 4 末

图 8 DO 对反硝化速率的影响

## 2.2 微生物群落结构

### 2.2.1 门结构的微生物结构分析

为了分析微生物菌群结构对反应器运行性能的影响,取阶段 4 运行稳定期的活性污泥样品进行高通量测序。丰度超过 2% 的菌门有变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycetes)、疣微菌门(Verrucomicrobia)和酸杆菌门(Acidobacteria) 8 个菌门,丰度分别为 52.31%、14.33%、6.23%、5.27%、4.67%、3.82% 和 2.68%。Proteobacteria 在大部分污水处理工艺中都是优势菌门,在去除有机物和脱氮方面发挥重要作用,在本实验中占主导地位,其包含的种类非常丰富,也奠定了菌门包含了多样的生理代谢类型<sup>[17-20]</sup>。Bjornsson<sup>[21]</sup>的研究表明,Chloroflexi 可以充当微生物絮体的骨架。De<sup>[22]</sup>的研究表明,Verrucomicrobia 是在低温下驯化颗粒污泥的主要细菌,对环境的适应能力很强,微氧条件下由于基质和氧气的传质阻力,形成了外部好氧、中间兼氧、内部厌氧的颗粒污泥,在颗粒污泥中多种脱氮菌群的协同

合作、高效脱氮,而 Chloroflexi、Verrucomicrobia 菌门促使絮体污泥颗粒化,也就从微观上解释了随着驯化时间的延长,出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 同步提高的现象。

### 2.2.2 属结构的微生物结构分析

进一步分析微生物在属水平上的菌群结构以揭示反应器脱氮的机理,如图 9 所示。由图 9 中可以看出,污泥样品中, AOB、NOB 的丰度分别为 0.73%、0.24%,其中, *Nitrosomonas*、*Nitrospira* 分别是 AOB、NOB 中的优势菌属,丰度分别为 0.71%、0.22%。研究表明, *Nitrospira* 在底物缺乏的环境中仍能够保持较高的细胞活性,而 *Nitrobacter* 的细胞活性受底物的影响较大,一旦底物来源缺乏,其活性就迅速受到较大的影响<sup>[23-24]</sup>,由于处理污水为低 C/N、低  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度的污水,因此 *Nitrospira* 为 NOB 的优势菌属。在污泥样品中检测到 ANAMMOX,其对于 DO 质量浓度和进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_2^--\text{N}$  质量浓度有比较严格要求<sup>[25]</sup>,在污泥中的比例为 0.74%,说明驯化条件利于 ANAMMOX 的富集。厌氧氨氧化相关菌属 *Candidatus Kuenenia*、*Candidatus Brocadia*、*Candidatus Anammoxoglobus* 在污泥样品中占比分别为 0.71%、0.02%、0.01%。*Candidatus Kuenenia* 为丰度最高的厌氧氨氧化菌属。研究表明, *Candidatus Kuenenia* 对底物的亲和力较高<sup>[26-27]</sup>,适合生存在低基质浓度污水中,污泥样品中 *Candidatus Kuenenia* 占比最高也表明了相比于 NOB, ANAMMOX 处于对  $\text{NO}_2^--\text{N}$  的竞争优势。污泥样品也检测到丰度为 1.01% 的自养反硝化菌,其可以利用  $\text{H}_2$  进行反硝化。另外,在污泥样品高通量检测中检测到丰度为 0.4% 的反硝化甲烷氧化菌属 *Ferruginibacter*,研究表明,单位质量  $\text{CH}_4$  产生的温室效应相当于  $\text{CO}_2$  的 25 倍<sup>[28]</sup>,而 *Ferruginibacter* 能利用  $\text{CH}_4$  进行反硝化,微氧生物处理技术可减少  $\text{CH}_4$  的排放。污泥样品中还检测到丰度分别为 2.81% 和 17.77% 的好氧反硝化

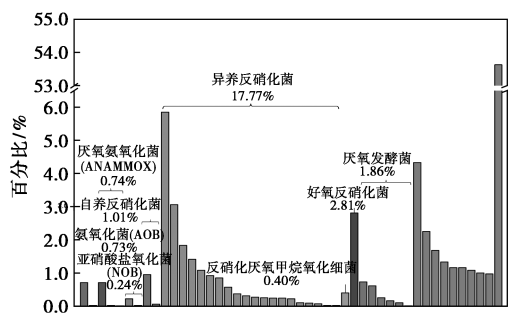


图 9 样品属的细菌群落结构

化菌和异养反硝化菌。微生物菌群结构的多样性表明,在微氧生物处理低 C/N 城市污水的过程中,碳氮去除途径包括好氧氨氧化、厌氧氨氧化、自养反硝化、异养反硝化和好氧反硝化。

## 3 结论

低 C/N 城市污水在微氧生物反应器进行低温启动,在进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  质量浓度约为 90 mg/L、C/N 比约为 0.67 的运行条件下,经过 150 d 的微调 DO 运行,反应器获得了良好的碳氮去除效率,出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TOC 和 IC 去除率达到 91.56%、64.09%、62.32% 和 60.02%。对反应器内微生物菌群门和属的结构进行分析,存在促进污泥颗粒化的 Chloroflexi 和 Verrucomicrobia 菌门,碳氮同步去除途径包括好氧氨氧化、厌氧氨氧化、自养反硝化、异养反硝化和好氧反硝化。

## 参考文献

- [1] Guo J, Peng Y, Wang S, et al. Pathways and organisms involved in ammonia oxidation and nitrous oxide emission[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 43(21): 2213-2296.
- [2] Mamais D, Noutsopoulos C, Dimopoulou A, et al. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions[J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2015, 71(2): 303-308.
- [3] 李云, 蒋进元, 白璐, 等. 污水处理厂能耗评估与优化现状[J]. 工业水处理, 2018, 38(9): 1-4.
- [4] Wu L, Xu Y, Shi X, et al. Advanced treatment of landfill leachate by combined process of partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 587-593.
- [5] Ma Bin, Wang Shanyun, Can Shenbin, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: Recent advances[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 981-990.
- [6] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 11-16.
- [7] 宋晶晶, 周鑫, 王共磊, 等. 部分硝化-短程反硝化-厌氧氨氧化系统脱氮效能及  $\text{N}_2\text{O}$  排放特性的研究[J]. 现代化工, 2020, 40(11): 110-114.
- [8] 韩越梅, 刘志军, 许晓飞, 等. 气升式生物反应器用于废水脱氮的组合工艺研究[J]. 现代化工, 2016, 36(1): 160-163, 165.
- [9] Zhang Xiao, Zhao Bowei, Meng Jia, et al. Efficiency, granulation, and bacterial populations related to pollutant removal in an upflow microaerobic sludge reactor treating wastewater with low COD/TN ratio[J]. Bioresource Technology, 2018, 270: 147-155.
- [10] Meng Jia, Li Jiuling, Li Jianzheng, et al. Effect of temperature on nitrogen removal and biological mechanism in an up-flow

- microaerobic sludge reactor treating wastewater rich in ammonium and lack in carbon source[J]. *Chemosphere*, 2018, 216: 186-194.
- [11] Public A, Association H. APHA Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. *Am J Public Health Nations Health*, 1998, 874-885.
- [12] 陈金声, 史家梁. 硝化速率测定和硝化细菌计数考察脱氮效果的应用[J]. *上海环境科学*, 1996, (3): 18-20.
- [13] 沈翼军, 吴瑒, 张新喜. 不同测定条件对于活性污泥反硝化速率测定的影响[J]. *山东化工*, 2016, 45(5): 7-11.
- [14] Mojiri Amin, Zhou John L, Harsha Ratnaweera, *et al.* Performance optimization of a chitosan/anammox reactor in nitrogen removal from synthetic wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(3): 105252.
- [15] Henderson, Garry Mark. *Biological Wastewater treatment: Principles, Modelling and design* [J]. *Biological Wastewater Treatment*, 2002, 15(2): 275-290.
- [16] 郑兰香, 鞠兴华. 温度和 C/N 比对生物膜反硝化速率的影响[J]. *工业安全与环保*, 2006, (10): 13-15.
- [17] 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.
- [18] Qiang J, Zhou Z, Wang K, *et al.* Coupling ammonia nitrogen adsorption and regeneration unit with a high-load anoxic/aerobic process to achieve rapid and efficient pollutants removal for wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2019, 170: 115280-115289.
- [19] Chen G, Huang J, Fang Y, *et al.* Microbial community succession and pollutants removal of a novel carriers enhanced duckweed treatment system for rural wastewater in Dianchi Lake basin[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 276: 8-17.
- [20] Wang X, Chen Z, Shen J, *et al.* Impact of carbon to nitrogen ratio on the performance of aerobic granular reactor and microbial population dynamics during aerobic sludge granulation[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 271: 258-265.
- [21] Bjornsson, Lovisa, Hugenholtz, *et al.* Filamentous *Chloroflexi* (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal[J]. *Microbiology*, 2002, 148(8): 2309-2318.
- [22] De Menezes A B, Prendergast-Miller M T, Poonpatana P, *et al.* C/N ratio drives soil actinobacterial cellobiohydrolase gene diversity[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(9): 3016-3028.
- [23] Liu G, Wang J. Long-Term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(10): 5109-5117.
- [24] Vadivelu V M, Yuan Z, *et al.* Kinetic characterisation of an enriched Nitrospira culture with comparison to Nitrobacter [J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3033-3042.
- [25] Van d G A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of <sup>15</sup>N studies in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1997, 143(7): 2415-2421.
- [26] Star W R L V D, 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.
- [27] 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.
- [28] 程远平, 王亮. 中国煤矿区域性瓦斯治理技术的现状与发展 [C]//探索建立煤矿区煤层气立体抽采与经济利用产业化体系, 推动煤矿瓦斯治理, 立体抽采技术示范与煤层气资源综合利用——全国煤矿瓦斯抽采利用与通风安全技术现场会煤矿瓦斯抽采与通风安全论文集, 2013. ■
- .....
- (上接第 150 页)
- [25] 刘士艳. 复合金属氧化物上异丁烯选择氧化制备甲基丙烯醛反应的研究[D]. 吉林: 吉林大学化学学院, 2009.
- [26] Pan H, Jian Y F, Chen C W, *et al.* Sphere-shaped Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> catalyst with remarkable low-temperature activity for methyl-ethyl-ketone combustion [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(11): 6288.
- [27] Deng J G, He S N, Xie S H, *et al.* Ultralow loading of silver nanoparticles on Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires derived with molten salts: A high-efficiency catalyst for the oxidative removal of toluene [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 11089-11095.
- [28] Yang X Q, Yu X L, Lin M Y, *et al.* Enhancement effect of acid treatment on Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for toluene oxidation[J]. *Catalysis Today*, 2019, 327: 254-261.
- [29] Wang L, Li Z X, Zhang S J, *et al.* Selective oxidation of isobutylene over Cs-promoted Mo-Bi-Co-Fe-Ce-O catalyst [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2005, 13(5): 705-708.
- [30] Kappe C O. Controlled microwave heating in modern organic synthesis [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43: 6250-6284.
- [31] Moloto N, Mpelane S, Sikhivhilu, L M, *et al.* Optical and morphological properties of ZnO- and TiO<sub>2</sub>-derived nanostructures synthesized via a microwave-assisted hydrothermal method [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 2012: 189069.
- [32] Zheng X, Chen X, Chen J, *et al.* Synthesis and application of highly dispersed ordered mesoporous silicon-doped Pd-alumina catalyst with high thermal stability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 297: 148-157.
- [33] Xiao Y, Zheng X, Chen X, *et al.* Synthesis of Mg-doped ordered mesoporous Pd-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with different basicity for CO, NO, and HC elimination [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(7): 1687-1695.
- [34] 王蕾, 张锁江, 李增喜, 等. 制备条件对异丁烯选择性氧化催化剂性能的影响[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(4): 481-485. ■