



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202102134

中图分类号 X703

文献标识码 A

顾晓丹, 黄勇, 丁永伟, 等. 改良型 UNITANK 工艺冬季运行特性及微生物群落分析[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2480-2487.

GU Xiaodan, HUANG Yong, DING Yongwei, et al. Operation characteristics and microbial community of modified UNITANK process in winter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(7): 2480-2487.

改良型 UNITANK 工艺冬季运行特性及微生物群落分析

顾晓丹^{1,2}, 黄勇^{1,2,*}, 丁永伟³, 黄继会⁴, 王伟⁴, 张俊⁴, 陈芳芳⁴

1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009

2. 苏州科技大学城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009

3. 苏州市水务集团, 苏州 215001

4. 苏州市排水有限公司, 苏州 215001

第一作者: 顾晓丹(1986—), 女, 博士, 讲师。研究方向: 城市污水处理系统运行调控及模型构建。E-mail: guxiaodan1986@163.com

*通信作者: 黄勇(1958—), 男, 博士, 教授。研究方向: 城市污水资源化。E-mail: hyong05@163.com

摘要 针对苏州某城市污水处理厂改良型 UNITANK 工艺冬季出水水质波动大的问题, 采用模型分析了改良型 UNITANK 工艺的周期性运行特征, 通过 Illumina MiSeq 高通量测序对改良型 UNITANK 工艺冬季活性污泥的微生物种群结构进行了分析。结果表明, 冬季改良型 UNITANK 工艺缺氧池反硝化充分, 边池的均匀曝气导致边池前端和中段硝化不充分, 周期性出水氨氮、溶解性磷酸盐的质量浓度逐渐升高。微生物种群结构分析结果表明: 冬季微生物多样性较高, 独特的工艺运行方式会对生物多样性产生影响; *Saprospiraceae*、*Nitrosomonas*、*Nitrospira* 作为冬季活性污泥中的优势菌属, 保证了改良型 UNITANK 工艺内生物脱氮除磷功能的发挥。

关键词 改良型 UNITANK 工艺; 冬季; 模型; 群落结构; 运行特征

交替式生物反应池 (UNITANK) 作为一种结构紧凑、运行灵活的活性污泥工艺, 在我国城市污水处理中得到了较广泛的应用^[1-2]。然而, 由于结构上的不足, UNITANK 在运行过程中普遍存在污泥分布不均、低负荷释磷不充分、池体容积布局不合理等问题^[3-4]。为了解决这些问题, 张发根等^[4]提出了双流态 UNITANK, 即将 UNITANK 工艺中的 1 个边池改成 2 个以上, 且交替向中间池提供污泥, 他们同时利用 ASM2D 模型和实验验证了双流态 UNITANK 工艺的可行性, 但这种工艺的运行周期调控相对更为复杂。因此, 改良型 UNITANK 工艺应运而生。改良型 UNITANK 是在 UNITANK 的基础上增设了单独的厌氧池和缺氧池, 同时增加了内回流点, 以强化工艺的脱氮除磷效果。目前国内对改良型 UNITANK 工艺的研究报道较少。朱海敏等^[5]、夏海波等^[6]比较了改良型 UNITANK 工艺与 UNITANK 工艺的实际运行效果, 结果均表明, 改良型 UNITANK 工艺可以获得

收稿日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-05-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题 (2017ZX07205-0203); 苏州科技大学科研项目 (XKZ2018001); 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目

更高、更稳定的脱氮除磷能力。朱海敏等^[5]提出, 在处理水量持续超设计负荷 15% 的情况下, 改良型 UNITANK 出水水质仍可以稳定达到一级 A 排放标准, 且产泥量远低于 UNITANK 工艺。但是, 目前有关改良型 UNITANK 工艺的报道均未对工艺特性进行探讨。

目前, 工艺特性研究普遍基于实验方法开展。然而, 受进水、环境条件变化、采样代表性等多因素影响, 实验研究面临着局限性, 无法全面表征污水处理厂复杂工艺面临的实际问题。污水生物处理系统的数学模拟是利用数学模型类比复杂的生化反应, 以寻求其中的过程规律。大量研究^[7-8]表明, 数学模型可以成功应用于污水处理系统的优化, 并指导污水处理系统的运行调控。宋纯金等^[9]、董姗燕等^[10]、张发根等^[4]分别采用数学模拟方法对 UNITANK 工艺特性进行了模拟分析, 证明采用模型研究复杂的交替式工艺的可行性和可靠性, 为工艺特性研究提供了新工具。此外, 我国城市污水处理厂普遍采用季节性调控策略, 大部分污水厂的运行实践表明^[11-13], 夏季出水水质稳定达标; 而冬季, 由于水温降低影响微生物的活性, 导致系统的生物脱氮除磷能力下降, 容易出现出水水质浓度波动大、超标等问题。因此, 冬季的运行调控一直是城市污水处理厂运行过程中的难点。本研究以苏州某城市污水处理厂改良型 UNITANK 工艺为研究对象, 针对污水厂冬季普遍存在的运行稳定性差等问题, 采用模型分析了改良型 UNITANK 工艺的周期性运行特征, 同时利用高通量测序技术分析了微生物群落组成, 旨在为实际污水厂改良型 UNITANK 工艺冬季运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 改良型 UNITANK 工艺及处理效果

苏州某城市污水处理厂主要接纳生活污水, 设计规模 $1.2 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 采用 4 组改良型 UNITANK 工艺。改良型 UNITANK 出水依次进入高效沉淀池、气水反冲洗滤池、紫外线消毒池, 出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准。改良型 UNITANK 工艺冬季进、出水水质如表 1 所示, 冬季出水水质波动较大, 运行稳定性仍有待进一步提高。

每组改良型 UNITANK 工艺分隔成 5 格顺序连通的矩形反应池, 分别为 1 个厌氧池 F, 1 个缺氧池 E、1 个连续好氧池 A、2 个边池 B 和 C(图 1)。每组平面尺寸为 $89.85 \text{ m} \times 44.85 \text{ m}$, 有效水深 7.50 m。平均水力停留时间 23.72 h, 厌氧、缺氧、好氧、边池停留时间分别为 1.32、5.63、3.36、13.41 h。厌氧池 F 与缺氧池 E、连续好氧池 A 与边池之间通过隔墙底部开孔水力连通; 缺氧池 E 至连续好氧池 A、缺氧池 E 到厌氧池 F 通过泵强制实现混合液流动; 边池到缺氧池 E 通过边池末端底部闸阀控制; 剩余污泥由边池两侧的剩余污泥泵定期排放。

改良型 UNITANK 工艺运行周期为 8 h。上半周期 (0~3 h): 污水依次进入厌氧池 F、缺氧池 E、连续好氧池 A 和边池 B(边池 B 作为曝气池), 边池 C 作为沉淀池(不曝气), 出水从边池 C 通过空气堰排出, 剩余污泥从边池 C 通过泵排放。过渡周期 (3~4 h): 边池 B 停止曝气, 转换为沉淀模式。

表 1 苏州某城市污水处理厂改良型 UNITANK 工艺冬季进出水水质

Table 1 Influent and effluent quality of modified UNITANK process in a Suzhou sewage treatment plant in winter

水样	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	399.2 ± 109.5	29.0 ± 4.4	41.3 ± 6.5	4.3 ± 1.0	163.0 ± 48.0
出水	44.8 ± 14.0	6.0 ± 3.5	10.6 ± 3.1	0.7 ± 0.6	15.1 ± 8.8

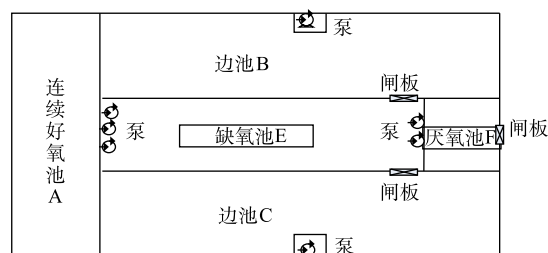


图 1 改良型 UNITANK 工艺平面布置图
Fig. 1 Layout of modified UNITANK process

污水仍依次进入F、E、A、B，出水从边池C流出。下半周期与上半周期的运行完全一致，通过过渡周期进行衔接。下半周期(4~7 h)：B池和C池功能互相转换，边池B作为沉淀池，出水从边池B通过空气堰排出，边池C作为曝气池。过渡周期(7~8 h)：边池C停止曝气，转换为沉淀模式。

1.2 样品采集

2020年2月中旬取自改良型UNITANK工艺曝气池末端活性污泥，取3个平行样(标记为M1、M2、M3)，以代表系统经过冬季低温后微生物群落的分布特征。样品经过30 min静置并离心(4℃、8 000 r·min⁻¹、5 min)后保存于-20℃冰箱内，用于后续分子生物学测定。

1.3 DNA提取, PCR扩增及Illumina MiSeq高通量测序分析

DNA提取采用PowerSoil® DNA Isolation Kit试剂盒，提取后经1%琼脂糖凝胶电泳检测条带完整性。PCR扩增所用引物为338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTA CHVGGGTWTCTAAT-3')。反应体系为20 μL，PCR扩增管中添加DNA模板10 ng，正反向引物各0.8 μL，灭菌水20 μL，dNTP 2 μL，缓冲液4 μL，FastPfu聚合酶0.4 μL。PCR反应程序：首先95℃预变性3 min，然后进行27个循环(95℃变性30 s，55℃退火30 s，72℃延伸45 s)，最后72℃延伸10 min。扩增结束后，采用2%琼脂糖凝胶电泳检测PCR产物，结果表明，PCR产物条带大小正确，浓度合适，可进行后续实验，委托美吉生物进行Illumina MiSeq高通量测序。

高通量测序获得的原始序列数据经过质控过滤后得到高质量数据，采用USEARCH进行OTU聚类分析，通过贝叶斯算法在97%相似水平对OTU进行物种分类学注释。基于OTU数据，对反映微生物群落丰富度(Sobs, Chao, ACE指数)和多样性(Simpson, Shannon指数)的参数进行统计。

1.4 水质指标与分析方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定；NO₃⁻-N采用麝香草酚分光光度法测定；TN采用TOC-VCPN总氮测定仪测定；PO₄³⁻-P采用钼锑抗分光光度法测定；TP采用钼酸铵分光光度法测定；SS采用重量法测定；COD采用重铬酸钾法测定；DO和温度由德国WTW multi3420测定仪在线监测。

1.5 模型构建

以BioWIN软件为平台，选择ASM2D模型为核心机理描述生物碳、氮、磷的去除过程。采用1个非曝气完全混合反应池(CSTR)模拟厌氧池F，4个非曝气CSTR(缺氧池E-1、E-2、E-3、E-4)串联模拟缺氧池E，3个曝气CSTR的串、并联模拟连续好氧池A，5个等体积SBR(边池B-1、B-2、B-3、B-4、B-5/边池C-1、C-2、C-3、C-4、C-5)串联模拟边池B/C的运行，通过分离器的控制实现2组边池的交替运行。

采用该厂改良型UNITANK工艺中2组冬季历史数据进行模型校准和验证，通过调整进水有机物组分(表2)和氨氧化菌最大比生长速率(由默认值0.9 d⁻¹校准为0.7 d⁻¹)，改良型UNITANK出水中COD、氨氮、TN、TP、SS模拟值和实测值的绝对误差分别为4.7、1.1、1.6、0.3、2.1 mg·L⁻¹；同时，改良型UNITANK工艺沿程氨氮、NO₃⁻-N、溶解性磷酸盐(SPO₄³⁻-P)模拟值与实测值的变化趋势拟合基本一致(图2(b))，因此，经校准后的模型可以反映该厂改良型UNITANK工艺生物碳、氮、磷的去除过程。

表2 苏州某城市污水处理厂改良型UNITANK工艺进水有机物组分

Table 2 Influent organic matter composition of a modified UNITANK process in a Suzhou sewage treatment plant

数值	溶解性不可生物降解COD/(g·g ⁻¹)	易生物降解COD/(g·g ⁻¹)	发酵产物/(g·g ⁻¹)	可发酵的易生物降解COD/(g·g ⁻¹)	颗粒性不可生物降解COD/(g·g ⁻¹)	颗粒性易生物降解COD/(g·g ⁻¹)
校准值	0.05	0.35	0.15	0.85	0.20	0.40
BioWIN推荐值	0.05	0.16	0.15	—	0.13	—

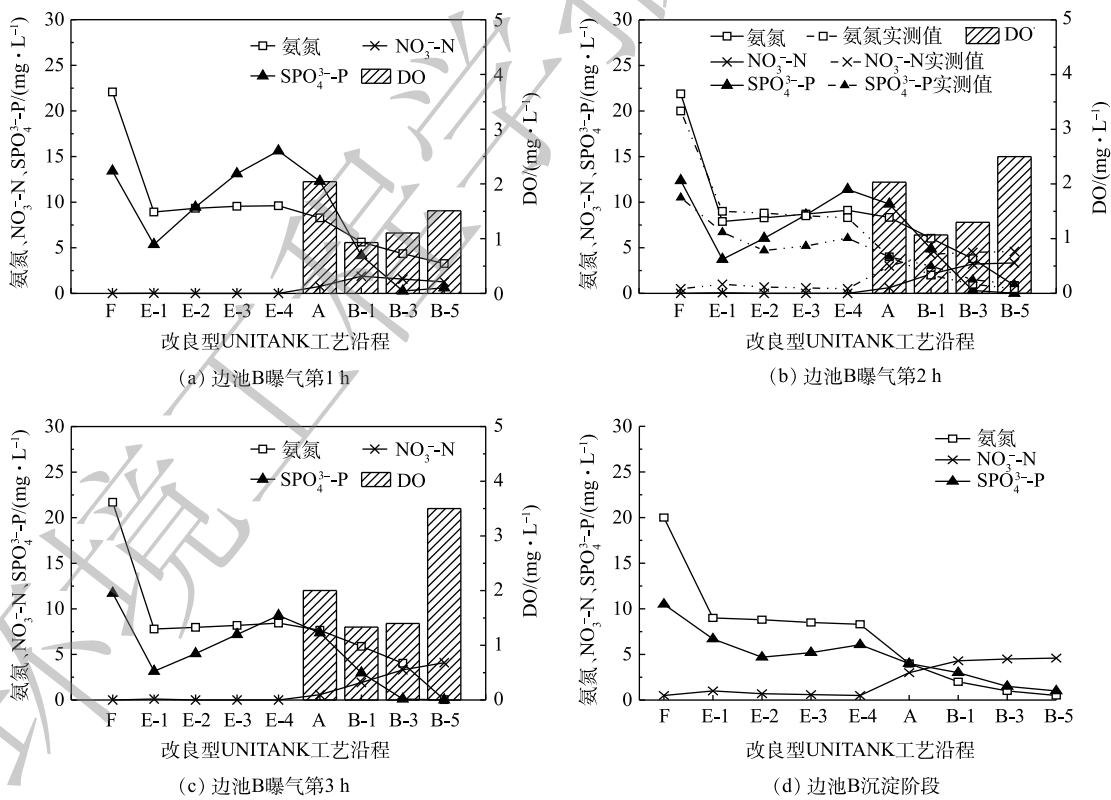
2 结果与讨论

2.1 改良型 UNITANK 工艺运行特性

采用经校准和验证后的模型为工具，模拟冬季低温 (12 °C) 条件下，在 1 个运行周期内，改良型 UNITANK 沿程氨氮、 NO_3^- -N、 SPO_4^{3-} -P 的变化如图 2 所示。当边池 B 处于曝气第 2 h 时，分别采集改良型 UNITANK 工艺中厌氧池 F、缺氧池 E 沿程、连续好氧池、边池 B 首端、中端和末端的水样，以确定工艺沿程氨氮、 NO_3^- -N、 SPO_4^{3-} -P 实测值的变化。

由图 2(a) 可知，在上半周期边池 B 曝气第 1 h，污水首先流入厌氧池 F，并与从缺氧池 E 首端回流的混合液混合，在厌氧池 F 内利用搅拌形成局部污泥负荷较高的区域，促进磷的释放，因此，厌氧池 F 内 SPO_4^{3-} -P 升高至 $13.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。受边池 B 到缺氧池 E 混合液回流的稀释作用影响，氨氮和 SPO_4^{3-} -P 在缺氧池首端 (缺氧池 E-1) 迅速下降到 $8.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个缺氧池 E 内的水流呈推流状态，在水流的推动作用下，缺氧池沿程氨氮和 SPO_4^{3-} -P 逐渐升高至 $9.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而沿程 NO_3^- -N 基本维持在 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。模拟结果表明，改良型 UNITANK 工艺冬季反硝化彻底。该工艺沿程实测结果 (图 2(b)) 验证了这一结论。由于反硝化充分，聚磷菌在缺氧池内进行了有效释磷，同时部分有机氮发生了水解，导致 SPO_4^{3-} -P、氨氮在缺氧池 E 沿程升高。在上半运行周期，连续好氧池 A 和边池 B 均为曝气池，因此，A、B 曝气池沿程氨氮逐渐降低至 $3.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，相应 NO_3^- -N 升高至 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， SPO_4^{3-} -P 降低到 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，曝气池内发生了硝化和吸磷过程。

当边池 B 处于曝气第 2、3 h 及沉淀阶段，沿程氨氮、 NO_3^- -N 和 SPO_4^{3-} -P 变化趋势 (图 2(b)~(d))



注： SPO_4^{3-} -P 为溶解性 PO_4^{3-} -P；F 表示厌氧池，E-1~E-4 表示缺氧池沿程，A 表示连续好氧池，B-1、B-3、B-5 分别表示边池首端、中端、末端。

图 2 上半周期改良型 UNITANK 工艺沿程氨氮、 NO_3^- -N、 SPO_4^{3-} -P 的变化

Fig. 2 Changes of ammonium, NO_3^- -N and SPO_4^{3-} -P concentration along the modified UNITANK process in the first half period

与曝气第1 h相同,但随着曝气时间的延长,沿程氨氮、 $\text{SPO}_4^{3-}\text{-P}$ 逐渐下降。在曝气第3 h,边池B末端(B-5)氨氮接近 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明此区域氨氮已彻底转化为 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$;但此时,边池B前端(B-1)和中段(B-3)氨氮仍高于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。改良型UNITANK工艺边池沿程均匀曝气,沿程DO分布是曝气量、污染物浓度共同作用的结果。在边池的推流作用下,边池B首端和中段污染物浓度较高,在整个曝气过程中,边池B首端和中段的DO始终保持在 $0.9\sim 1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,末端DO达到 $1.5\sim 3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此,均匀曝气导致了边池前端及中段DO偏低,边池末端DO偏高,从而导致上半周期内边池首端和中段的硝化不充分。

当工艺进入下半周期,边池B切换为沉淀池,边池B末端通过空气堰出水,改良型UNITANK出水氨氮、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{SPO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化规律如图3所示。在4 h的出水周期内,出水氨氮、 $\text{SPO}_4^{3-}\text{-P}$ 逐时升高,出水 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 逐渐降低。出水水质的波动特征主要受上半周期边池B沿程污染物分布影响,在边池水流推动作用下,在接下来的出水周期(4 h)内,出水氨氮由 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐升高到 $5.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{SPO}_4^{3-}\text{-P}$ 升高到 $0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此,边池均匀曝气是导致改良型UNITANK工艺冬季出水水质波动大的主要原因。针对推流式边池,加大边池前端的曝气量,同时适当削弱后端曝气量可作为改进措施以解决这一问题。

2.2 活性污泥群落结构分析

1) 多样性分析。污水厂改良型UNITANK工艺冬季活性污泥微生物群落的多样性指数见表3所示。3组污泥样品的有效序列为43 774~43 967,经抽平处理后,3组样品的有效序列标准化至43 774。在97%的相似水平上,覆盖率均高于98%,表明本次测序相对于整体样本的覆盖程度极高,测序结果能够较准确地反映改良型UNITANK内冬季的生物特性。3组污泥样品中的Sobs指数为2 017~2 106,略高于张晓红等^[14]和韩文杰等^[15]的研究结果。张晓红等^[14]针对京津冀地区市政污水厂活性污泥种群结构研究发现,5个污水厂AO或AAO工艺中的Sobs指数在1 006~1 965。韩文杰等^[15]在长三角地区污水厂低温季节微生物多样性分析中指出,5个污水厂AAO及其变形工艺中Sobs指数为1 014~1 782。因此,该污水厂改良型UNITANK的微生物多样性较高。与张晓红等^[14]和韩文杰等^[15]对国内其他污水厂的研究结果相比,该厂3组样品的Shannon指数、ACE指数和Chao指数属于较高水平,Simpson指数显著低于文献报道^[14-15]的平均水平,证实了生物多样性在改良型UNITANK工艺中较高。ZHANG等^[16]提出,进水水质差异是导致系统内微生物多样性的关键因素。而SEIB等^[17]发现,除了进水水质,反应器结构也会对污泥群落结构产生影响。本研究中的污水厂进水水质为典型的城市污水,与张晓红等、韩文杰等^[14-15]研究的污水厂进水水质处于类似水平。因此,导致该系统生物多样性较高的原因可能与改良型UNITANK独特的工艺运行方式有关,边池交替式的运行控制模式导致微生物多样性较高。郑向阳等^[18]发现,微生物多样性与运行条件有关,同一进水条件下,缺氧段多样性明显高于好氧段。彭永臻等^[19]在对

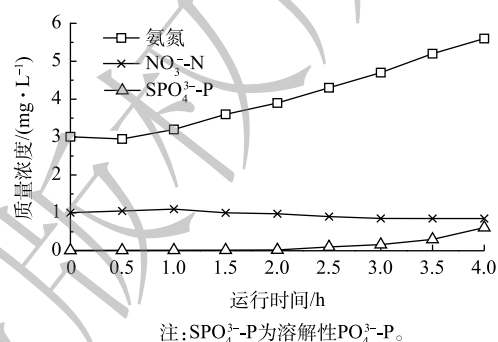


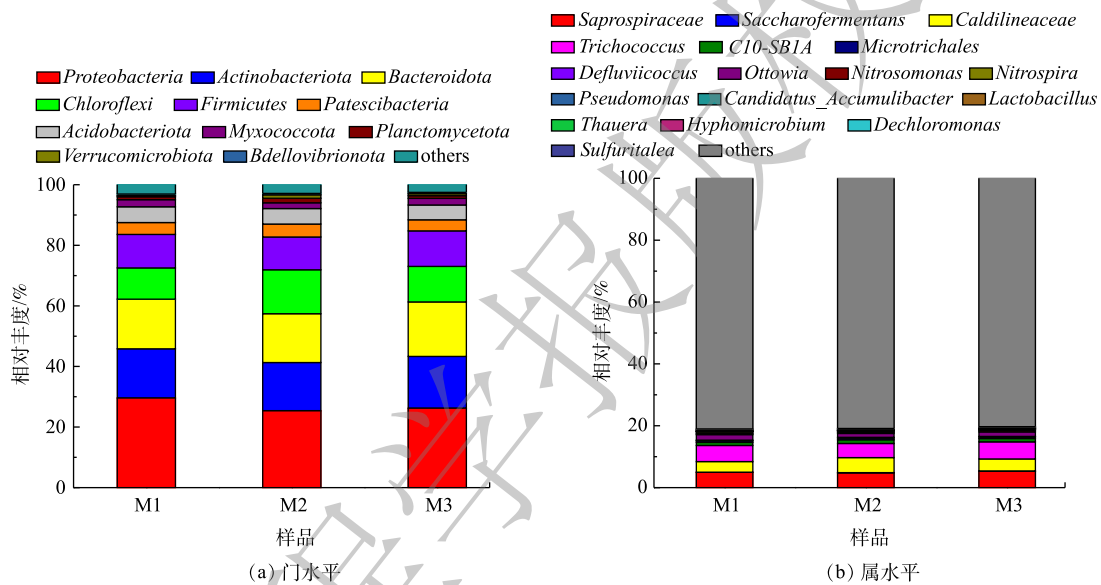
图3 改良型UNITANK工艺出水水质变化
Fig. 3 Variation of effluent quality of modified UNITANK process

表3 改良型UNITANK工艺物种多样性指数及其比较
Table 3 Species diversity indices of the modified UNITANK process and their comparison

样品	Sobs	Shannon	Simpson	ACE	Chao	覆盖率/%
M1	2 027	5.936	0.008	2 566	2 606	98.9
M2	2 106	5.964	0.007	2 687	2 681	98.9
M3	2 017	5.909	0.008	2 632	2 716	98.6

城市污水处理厂生物脱氮污泥菌群结构分析中发现, 更为复杂的运行方式会导致污水处理系统中生物多样性更高。

2) 物种组成分析。在门水平上, 3组污泥样品共检测到48个门, 其中, 有9种物种的丰度高于1%。由图4可以看出, *Proteobacteria*、*Actinobacteria*、*Chloroflexi*、*Bacteroidetes*、*Firmicutes*是3组污泥样品中的主要优势菌群, 其总相对丰度达到82.73%~84.76%, 与文献报道^[14-15]的城市污水厂活性污泥系统中门水平上的微生物组成结论一致。其中, *Proteobacteria*是样品中丰度最高的菌门, 其相对丰度达到25.40%~29.65%; *Actinobacteria*、*Chloroflexi*相对丰度分别为15.89%~17.04%、10.31%~14.50%。*Proteobacteria*和*Actinobacteria*是生物脱氮除磷和异养生物降解的主要微生物, 而*Chloroflexi*在功能上多与生物除磷有关。王思佳等^[20]的研究表明, 以乙酸钠为碳源时, 会促进*Bacteroidetes*含量上升。因此, 3组污泥样品中门水平上的优势菌群均与生物脱氮除磷功能有关。



注: M1、M2、M3为改良型UNITANK工艺冬季曝气池末端的3个活性污泥平行样。

图4 门和属水平的细菌群落分布

Fig. 4 Bacterial community distribution at phylum and genus level

在属水平上丰度高于2%的微生物的分析表明, *Caldilineaceae*、*Saprospiraceae*、*Trichococcus*是优势菌属, 其相对丰度分别可达3.41%~4.87%、4.83%~5.40%、4.55%~5.52%。张朝升等^[21]的研究表明, *Saprospiraceae*是以亚硝酸盐为电子受体的反硝化除磷系统中的优势菌种。徐伟峰等^[22]的研究表明, 延长泥龄, 反硝化除磷对系统除磷所起的作用增强。该厂改良型UNITANK工艺冬季的泥龄控制在20d左右, 为*Saprospiraceae*的生长提供了良好的条件。因此, 改良型UNITANK可能存在反硝化除磷现象。有研究^[14-15]表明, 除了*Saprospiraceae*, *Pseudomonas*和*Candidatus_Accumulibacter*也是污水处理系统中常见的聚磷菌。本研究中, *Pseudomonas*和*Candidatus_Accumulibacter*在3组污泥样品中的丰度分别为0.03%~0.05%和0.03%~0.04%, 显著低于*Saprospiraceae*的丰度。*Defluviicoccus*、*Micropruina*属于常见的聚糖菌属, 在厌氧段会与聚磷菌竞争碳源, 从而导致生物除磷效果恶化, 这2种菌属在改良型UNITANK工艺冬季污泥样品中的相对丰度仅为0.16%~0.21%、0.51%~0.56%, 表明聚糖菌所占比例较低, 这与目前的普遍研究结论^[13]一致, 即在低温条件下, 聚磷菌更具竞争优势, 而当温度高于20℃, 聚糖菌的生长占优势。

*Nitrosomonas*为氨氧化菌(AOB)优势菌属, 其功能是将氨氮转化为亚硝酸盐, 该菌属在改良型UNITANK工艺内所占比例为0.31%~0.45%。*Nitrospira*为亚硝酸盐氧化菌(NOB)优势菌属, 其作

用是将亚硝酸盐转化为硝酸盐,该菌属所占比例为0.41%~0.60%。在污水处理系统中,常见的NOB菌属包括*Nitrospira*和*Nitrobacter*^[23]。然而,在改良型UNITANK工艺冬季3组污泥样品中均未检测出*Nitrobacter*。已有研究^[24]表明,*Nitrobacter*生长速率高,但与底物之间的亲和能力弱,适合生长于基质充足的环境;*Nitrospira*的生长速率仅为*Nitrobacter*的1/3,但*Nitrospira*对基质亲和力更大。因此,在氨氮浓度较低的城市污水处理系统中*Nitrospira*更具优势。韩文杰等^[15]针对长三角地区5座污水厂低温季节微生物检测结果中也指出,在活性污泥系统中*Nitrospira*为NOB优势菌,相对丰度达0.25%~3.06%,未检测到*Nitrobacter*。张晓红等^[14]在京津冀区域5座城市污水厂的微生物检测中虽发现了*Nitrobacter*的存在,但其丰度远低于*Nitrospira*。

3 结论

1) 改良型UNITANK工艺冬季反硝化充分,均匀曝气导致边池前端和中段硝化不充分,在边池的推流作用下,出水氨氮、 $\text{SPO}_4^{3-}\text{-P}$ 逐时升高。边池均匀曝气是导致改良型UNITANK工艺冬季出水水质波动的主要原因,加大边池前端的曝气量,同时适当削弱后端曝气量可作为解决这一问题的措施。

2) 改良型UNITANK工艺冬季微生物多样性较高,可能与独特的工艺运行方式有关。*Saprospiraceae*是优势菌属,其相对丰度可达4.83%~5.40%,工艺内可能存在反硝化除磷现象。*Defluviococcus*和*Micropruina*2种聚糖菌属的相对丰度仅为0.16%~0.21%和0.51%~0.56%。

3) *Nitrosomonas*、*Nitrospira*分别为AOB、NOB的优势菌属,其在改良型UNITANK工艺中的相对丰度分别为0.31%~0.45%、0.41%~0.60%,这2类菌属主要完成了冬季改良型UNITANK工艺脱氮功能。

参考文献

- [1] 雷明,李凌云,苏锡波,等. 对三池式UNITANK工艺的几点深入认识[J]. 环境工程, 2006, 24(6): 35-36.
- [2] 廖振良,朱柏荣,叶建锋. UNITANK工艺机理及研究进展[J]. 水处理技术, 2009, 35(1): 20-23.
- [3] 雷明,张勇,徐廷国,等. UNITANK工艺强化生物除磷运行矩阵的确定[J]. 工业水处理, 2011, 31(9): 41-43.
- [4] 张发根,李迪,隋军. 基于ASM2D模拟的双流态UNITANK改进工艺的设计与实验分析[J]. 环境工程, 2011, 29(6): 53-57.
- [5] 朱海敏,徐菲. 改良型UNITANK工艺在城市污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 96-98.
- [6] 夏海波,谢志宏. 改良UNITANK工艺在东翻污水处理厂的应用分析[J]. 环境工程, 2014, S32: 85-86.
- [7] 马昭,刘玉玲,巩书涵,等. 基于ASM2D模型对奥贝尔氧化沟工艺的模拟研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(12): 6947-6955.
- [8] SARKAR U, DASGUPTA D, BHATTACHARYA T, et al. Dynamic simulation of activated sludge based wastewater treatment processes: Case studies with Titagarh sewage treatment plant, India[J]. Desalination, 2010, 252(1): 120-126.
- [9] 宋纯金,孙培德,郑育毅,等. FCASM3模型模拟UNITANK工艺的研究[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(1): 21-24.
- [10] 董姗姗,陈刚,池春榕,等. 厌氧环境对UNITANK工艺性能的影响[J]. 中国给水排水, 2018, 34(21): 74-79.
- [11] 姜体胜,杨琪,尚海涛,等. 温度和pH值对活性污泥法脱氮除磷的影响[J]. 环境工程学报, 2007, 1(9): 10-14.
- [12] 戴兴春. 城市污水A²/O工艺调控-监控体系优化与异常修复技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [13] 张玲,彭党聪,常蝶. 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2429-2434.
- [14] 张晓红,姜博,张文武,等. 京津冀区域市政污水厂活性污泥种群结构的多样性及差异[J]. 微生物学通报, 2019, 4(8): 1896-1906.
- [15] 韩文杰,吴迪,周家中,等. 长三角地区IFAS污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5037-5049.
- [16] ZHANG S H, HUANG Z J, LU S J, et al. Nutrients removal and bacterial community structure for low C/N municipal

- wastewater using a modified anaerobic/anoxic/oxic (mA²/O) process in North China[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 975-985.
- [17] SEIB M D, BERG K J, ZITOMER D H. Influent wastewater microbiota and temperature influence anaerobic membrane bioreactor microbial community[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 446-452.
- [18] 郑向阳, 罗晓, 袁立霞, 等. AO工艺处理淀粉污水效能及微生物群落解析[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(3): 804-814.
- [19] 彭永臻, 钱雯婷, 王琦, 等. 基于宏基因组的城市污水处理厂生物脱氮污泥菌群结构分析[J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(1): 95-102.
- [20] 王思佳, 顾卓江, 丁丽丽, 等. 碳源对活性污泥微生物细胞膜特性和群落结构影响[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(3): 561-573.
- [21] 张朝升, 张可方, 唐家桓, 等. 短程反硝化除磷工艺培养过程的群落结构分析[J]. *给水排水*, 2013, 39(1): 138-141.
- [22] 徐伟锋, 陈银广, 张芳, 等. 污泥龄对A/A/O工艺反硝化除磷的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 193-196.
- [23] CAO Y, VAN LOOSDRECHT M C, DAIGGER G T. Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: Status, bottlenecks, and further studies[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(4): 1365-1383.
- [24] ZHANG X, LIANG Y, MA Y, et al. Ammonia removal and microbial characteristics of partial nitrification in biofilm and activated sludge treating low strength sewage at low temperature[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 93: 104-111.

(责任编辑: 曲娜)

Operation characteristics and microbial community of modified UNITANK process in winter

GU Xiaodan^{1,2}, HUANG Yong^{1,2,*}, DING Yongwei³, HUANG Jihui⁴, WANG Wei⁴, ZHANG Jun⁴, CHEN Fangfang⁴

1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

3. Suzhou Water Group Co. Ltd., Suzhou 215001, China

4. Suzhou Drainage Co. Ltd., Suzhou 215001, China

*Corresponding author, E-mail: hyong05@163.com

Abstract To solve the problem of large fluctuation of effluent quality from modified UNITANK process in a Suzhou municipal sewage treatment plant in winter, periodical operation characteristics of the modified UNITANK was analyzed by the model. The high-throughput sequencing of Illumina MiSeq was used to analyze the microbial community structure of activated sludge in the modified UNITANK in winter. The results showed denitrification was sufficient in the anoxic zone, uniform aeration in the edge tank led to inadequate nitrification in the front and middle of the edge tank, ammonia and soluble phosphate in the periodic effluent gradually increased. The analysis of microbial community structure indicated that the microbial diversity was higher than other seasons, which was related to the unique process operation mode. *Saprospiraceae*, *Nitrosomonas* and *Nitrospira* were the dominant bacteria in the activated sludge in winter, which ensured the performance on the biological removal of nitrogen and phosphorus in the modified UNITANK process.

Keywords modified UNITANK process; winter; model; community structure; operating characteristic