

吕燕. 污泥龄对城镇污水处理厂微生物群落结构及运行效能的影响[J]. 净水技术, 2026, 45(7): 86-93.

Lü Y. Effect of sludge retention time on microflora structure and operation performance in municipal WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(7): 86-93.

污泥龄对城镇污水处理厂微生物群落结构及运行效能的影响

吕 燕*

(上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘 要 【目的】 污泥龄(SRT)是影响活性污泥系统微生物群落组装与运行稳定性的关键调控参数。为揭示不同 SRT 水平对系统运行特征的影响,选取 2 座采用相同处理工艺但 SRT 显著不同的城镇污水处理厂开展对比研究。【方法】 B 厂和 C 厂 SRT 分别约为 24 d 和 43 d。在长期稳定运行条件下,系统分析两厂污染物去除效果及污泥理化性质,并基于 Illumina MiSeq 高通量测序技术解析微生物群落多样性与功能菌属组成差异。【结果】 两厂在不同 SRT 条件下均保持稳定的有机物及氮磷去除效果,出水水质均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,SRT 差异对整体污染物去除率影响不显著。较高 SRT 显著提高了微生物群落的丰富度和多样性,C 厂 Ace、Chao 和 Shannon 指数均高于 B 厂;两厂污泥性质整体表现稳定。Beta 多样性分析显示,两厂微生物群落结构差异显著,SRT 对群落组成具有明显的环境筛选作用。群落结构分析表明,较高 SRT 条件下硝化功能菌属相对丰度增加,而较低 SRT 条件下反硝化菌属及丝状菌更具优势。【结论】 SRT 主要通过调控污泥性质及微生物群落结构影响活性污泥系统的运行稳定性。在满足出水稳定达标的前提下,合理调控 SRT 并优化排泥运行方式,有助于提升脱氮过程稳定性并实现脱氮除磷过程的协同运行。

关键词 污泥龄;微生物群落;功能菌属;环境筛选;运行效能

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)07-0086-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.07.010

Effect of Sludge Retention Time on Microflora Structure and Operation Performance in Municipal WWTPs

Lü Yan*

(Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract [Objective] Sludge retention time (SRT) is a key operational parameter influencing microbial community assembly and process stability in activated sludge systems. To elucidate the effects of different SRT levels on system performance, two full-scale municipal wastewater treatment plants (WWTPs) employing the same treatment process but operated at markedly different SRTs are selected for comparative analysis. [Methods] The SRTs of WWTP B and WWTP C were maintained at approximately 24 d and 43 d, respectively. Under long-term stable operating conditions, pollutant removal performance and sludge physicochemical properties were systematically evaluated. Microbial community diversity and the distribution of functional genera were further characterized using Illumina MiSeq high-throughput sequencing. [Results] Under actual operational loading conditions, both WWTPs achieved stable and efficient removal of organic matter and nutrients, with effluent quality consistently meeting the class 1-A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002), indicating that SRT variation had no significant impact on overall pollutant removal efficiency. A longer SRT significantly enhanced microbial richness and diversity, as reflected by higher Ace, Chao, and Shannon indices. Sludge properties remained generally stable under both SRT conditions. Beta diversity analysis revealed distinct microbial community structures between the two systems, demonstrating a clear SRT-driven environmental selection effect. At the genus level, extended SRT favored the enrichment of nitrifying bacteria, whereas shorter SRT conditions were associated with higher relative abundances of denitrifying and filamentous microorganisms. [Conclusion] SRT influences the

[收稿日期] 2026-02-11

[基金项目] 上海市科技计划项目(22dz1205704)

[通信作者] 吕燕(1983—),女,高级工程师,主要从事污水处理等工作,E-mail:coco_lvyan@163.com。

operational stability of activated sludge systems primarily by regulating sludge characteristics and reshaping microbial community structure rather than directly improving pollutant removal efficiency. Under stable effluent compliance, appropriate adjustment of SRT and sludge wasting strategies can enhance the stability of nitrogen removal processes and facilitate coordinated nitrogen and phosphorus removal, providing practical guidance for optimizing full-scale WWTP operation.

Keywords sludge retention time; microflora; functional bacteria genus; environmental selection; operation efficiency

污泥龄是活性污泥系统中影响微生物群落结构及生物处理效能的重要运行参数。通过调节微生物在反应器中的平均停留时间,污泥龄能够改变功能微生物的保留与淘汰过程,从而影响污染物去除效果和系统运行稳定性^[1-4]。研究^[5-7]表明,不同污泥龄条件下微生物群落组成及功能分布存在显著差异。较短污泥龄不利于硝化菌和聚磷菌等慢生功能菌的富集,易导致快速生长型异养菌占据优势;而较长污泥龄有利于慢生菌的维持和脱氮过程的稳定运行,但可能伴随污泥老化及内源呼吸增强等问题。此外,污泥龄不仅通过“冲刷-保留”机制影响慢速生长功能菌的建立,还通过调节系统有机污染物质与活性污泥量的比值(F/M)及底物环境,对微生物群落组装产生环境筛选作用,进而重塑脱氮除磷相关功能菌群结构^[8-10]。因此,合理控制污泥龄是保障活性污泥系统稳定运行和出水水质达标的关键措施。

工程实践中,城镇污水处理厂通常在满足排放标准的前提下,通过调控污泥龄以平衡处理效能与运行稳定性。然而,在全规模运行条件下,不同污泥龄对微生物群落结构及其与系统运行效能之间耦合关系的影响仍缺乏系统研究。基于此,本文选取2座采用处理工艺相同但污泥龄水平不同的城镇污水处理厂为研究对象,在长期稳定运行条件下,对比分析污泥理化性质及微生物群落多样性、群落结构与优势功能菌属特征,并结合污染物去除效果,系统探讨污泥龄对活性污泥系统运行效能及微生物群落结构的影响,为在出水稳定达标的前提下优化污泥龄调控与排泥策略、实现脱氮除磷协同稳定运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况

本文选取华东区B、C两座城镇污水处理厂(B厂和C厂)为研究对象。其中,B厂和C厂设计处理能力分别为80万m³/d和70万m³/d。两厂进水来自同一片区,污水处理工艺均为“预处理+厌氧-缺

氧-好氧(AAO)二级生物处理+深度处理”,其生物反应池主要设计参数如表1所示。在实际运行中,B厂污泥龄长期维持在平均为24 d;而C厂通过调节排泥方式并结合污泥系统运行工况,将污泥龄控制并延长至平均为43 d,以增强活性污泥系统对冲击负荷(如降雨)的适应能力和运行稳定性。

表1 B厂、C厂生物反应池设计参数
Tab. 1 Design Parameters of Biological Tanks for WWTP B and C

参数	B 厂	C 厂
设计流量/(m ³ ·d ⁻¹)	80 万	70 万
最低水温/℃	10	10
最高水温/℃	25	25
污泥负荷/[kg BOD ₅ ·(kg SS·d) ⁻¹]	0.08	0.08
混合液悬浮固体(MLSS)	3 500	3 500
质量浓度/(mg·L ⁻¹)		
有效总池容积/m ³	511 046	—
有效水深/m	10.0	8.5
厌氧池有效容积/m ³	55 696	—
厌氧池停留时间/h	1.67	1.00
缺氧池有效容积/m ³	133 670	—
缺氧池停留时间/h	4.01	5.03
好氧池有效容积/m ³	321 680	—
好氧池停留时间/h	9.65	9.60
总水力停留时间/h	15.66	16.13
高峰时供气量/(m ³ ·h ⁻¹)	195 710	186 902
气水比	5.87 : 1.00	6.41 : 1.00
污泥外回流比	50% ~ 100%	50% ~ 100%
混合液内回流比	200% ~ 300%	100% ~ 300%

注:BOD₅为五日生化需氧量,SS为悬浮物。

1.2 样品处理分析

1.2.1 常规指标测试方法

2023年8月—2024年6月期间试验所涉及的常规指标及测试方法如表2所示。

污泥粒径采用激光衍射式粒度分布仪(SALD-2201, Shimadzu)测定,毛细吸水时间使用毛细吸水时间测定仪(Model 304 M, Triton)测得,分形维数的测定方法同Zhou等^[11]的方法相同。

表 2 常规指标及其测试方法
Tab. 2 Conventional Indices and the Test Methods

指标	测试方法	方法来源
化学需氧量(COD)	重铬酸钾法	《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)
氨氮	纳氏试剂分光光度法	《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)
MLSS	重量法	《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB/T 11901—1989)
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解-紫外分光法	《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法	《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893—1989)

1.2.2 微生物分析

研究期间分别采集 B 厂、C 厂好氧池末端活性污泥样品开展高通量测序分析。测序工作由上海美吉生物医药科技有限公司完成,采用 Illumina MiSeq 测序平台进行数据获取与分析。主要试验流程包括脱氧核糖核酸(DNA)提取、聚合酶链式反应(PCR)扩增、扩增产物纯化与定量、MiSeq 文库构建及质检,以及高通量测序,具体操作步骤参照既有研究方法^[11]。

2 结果与讨论

2.1 有机物及氮磷污染物去除现状分析

运行期间,B 厂与 C 厂均表现出稳定而高效的污染物去除性能(图 1 和图 2)。B 厂进水和出水 COD 质量浓度分别为 (266.6 ± 67.9) mg/L 和 (9.6 ± 3.5) mg/L,去除率为 $96.1\% \pm 1.7\%$;C 厂进水和出水 COD 质量浓度分别为 (216.6 ± 52.9) mg/L 和 (10.2 ± 3.7) mg/L,去除率为 $95.1\% \pm 2.3\%$ 。B、C 两厂进水和出水氨氮质量浓度分别为 (23.5 ± 4.0)

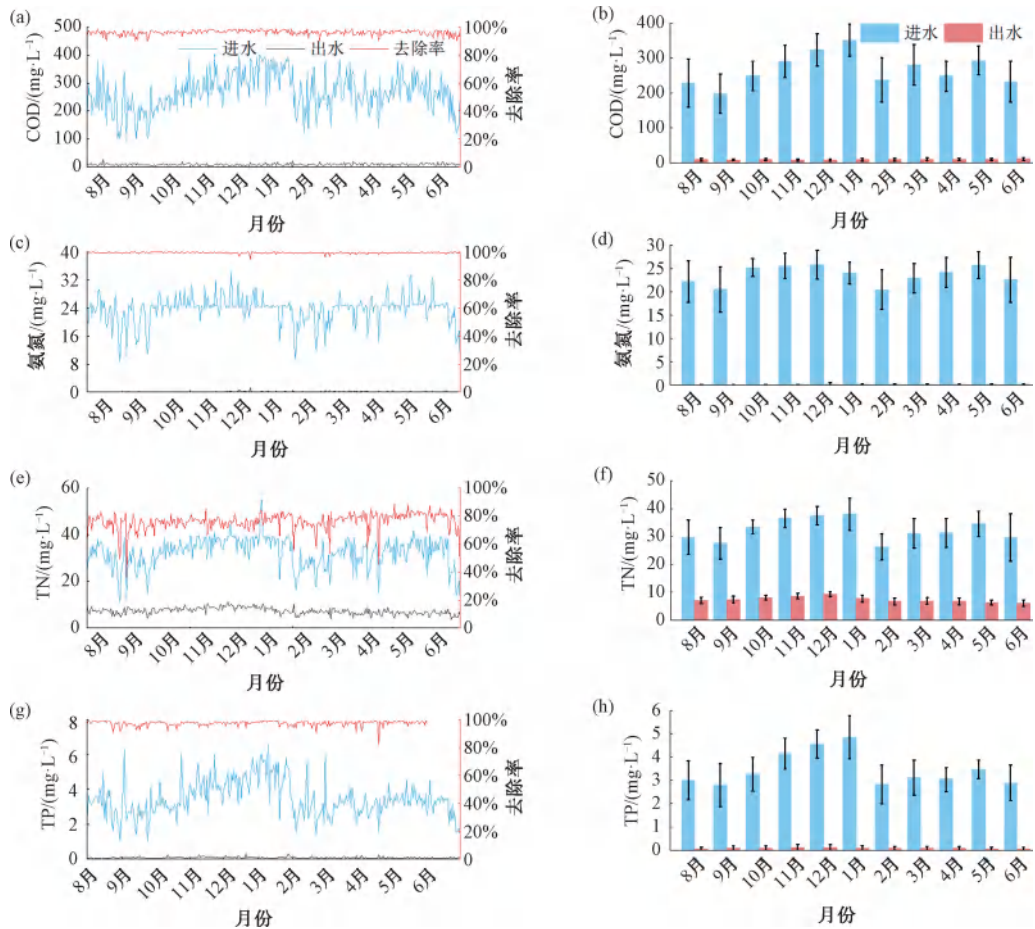


图 1 B 厂进、出水污染物质量浓度及去除率

Fig. 1 Influent and Effluent Pollutants Mass Concentrations and Removal Efficiencies in WWTP B

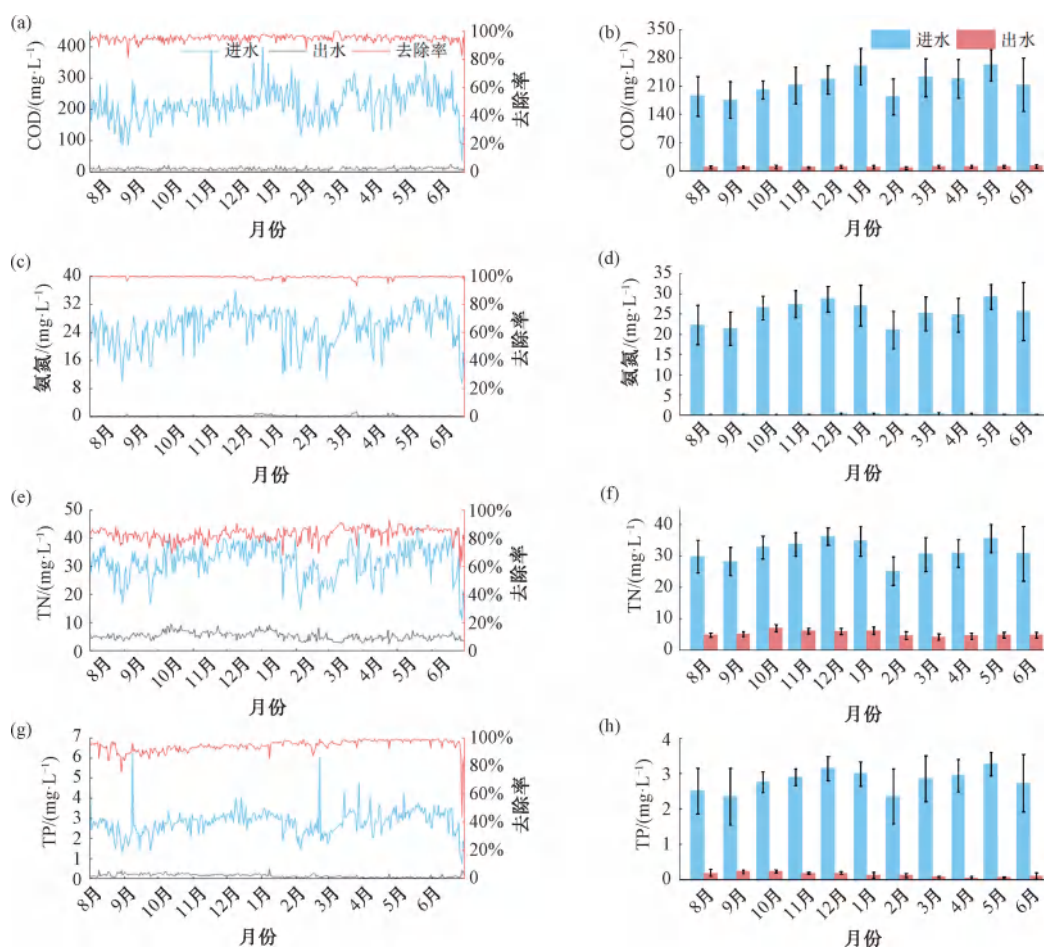


图2 C厂进、出水污染物质量浓度及去除率

Fig. 2 Influent and Effluent Pollutants Mass Concentrations and Removal Efficiencies in WWTP C

mg/L 和 (0.1 ± 0.1) mg/L 和 (25.5 ± 5.1) mg/L 和 (2.0 ± 0.2) mg/L, 对应去除率为 $99.5\% \pm 0.5\%$ 和 $97.8\% \pm 2.1\%$ 。B 厂和 C 厂 TN 质量浓度由 (32.3 ± 6.4) mg/L 和 (31.7 ± 5.8) mg/L 分别降至 (7.4 ± 1.4) mg/L 和 (5.3 ± 1.3) mg/L, 去除率为 $76.3\% \pm 6.3\%$ 和 $81.6\% \pm 11.0\%$; B 厂和 C 厂 TP 质量浓度由 (3.46 ± 1.02) mg/L 和 (2.80 ± 0.63) mg/L 分别降至 (0.09 ± 0.05) mg/L 和 (0.14 ± 0.09) mg/L, 对应去除率为 $97.1\% \pm 1.8\%$ 和 $93.2\% \pm 12.4\%$ 。总体而言, 两厂出水 COD、氨氮、TN 和 TP 均稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准要求, 其中 COD、氨氮和 TN 达到Ⅳ类水标准, TP 达标保证率分别为 99.4% 和 96.7%。从上述运行数据可以看出, 污泥龄的差异并未对两厂主要污染物的去除率产生显著影响。

2.2 污泥性质分析

在运行期间(图3和图4), B 厂与 C 厂污泥粒径

均表现出较大的月度波动, 粒径分别为 (106.6 ± 36.5) μm 和 (98.9 ± 34.7) μm 。B 厂最大粒径 $(173.9 \mu\text{m})$ 出现在 1 月、最小粒径 $(56.1 \mu\text{m})$ 出现在 6 月; C 厂则分别出现在 12 月 $(192.0 \mu\text{m})$ 和 9 月 $(70.6 \mu\text{m})$, 两厂污泥粒径变化趋势相似, 均受季节性温度波动显著影响, 且在冬季(约 15°C) 污泥絮体粒径明显增大。分析原因可能是反应器内水力剪切与混合条件的变化会影响絮体破碎与重组平衡, 从而导致粒径波动^[12]。两厂污泥分形维数平均值接近, B 厂和 C 厂分别为 1.19 ± 0.07 和 1.20 ± 0.07 , 均处于 $1.07 \sim 1.73$ 的常规范围内, 表明污泥絮体结构稳定且密实性良好。B 厂活性污泥的污泥容积指数为 (81.3 ± 25.9) mL/g, 低于 C 厂的 (98.6 ± 25.3) mL/g, 但两者均处于理想范围, 显示出良好的污泥沉降性能和运行稳定性。此外, B 厂和 C 厂活性污泥的毛细吸水时间分别为 (7.1 ± 1.8) s 和 (8.0 ± 1.5) s, 整体处于较低水平, 表明两厂污泥脱水性能均较为优良。

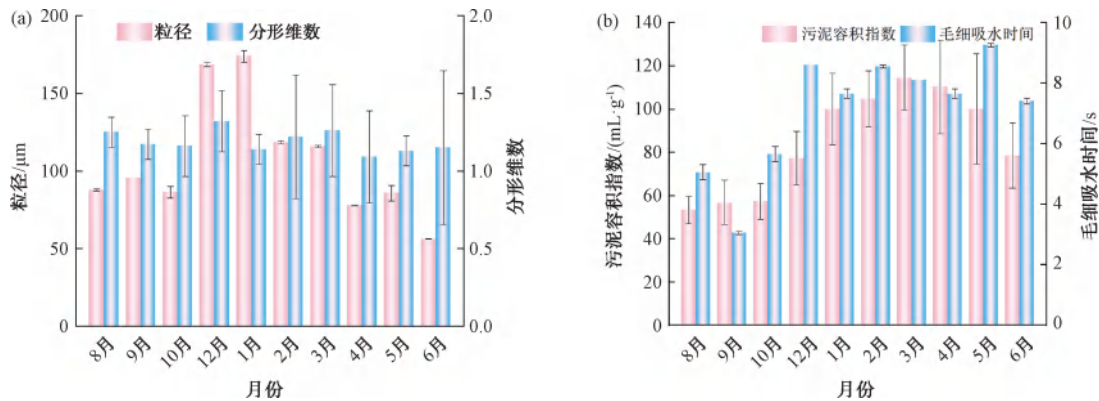


图3 B厂不同月份(a)污泥粒径、分形维数、(b)污泥容积指数及毛细吸水时间的变化特征

Fig. 3 Variation of (a) Sludge Particle Size, Fractal Dimension; (b) Sludge Volume Index, and Capillary Suction Time in WWTP B in Different Months

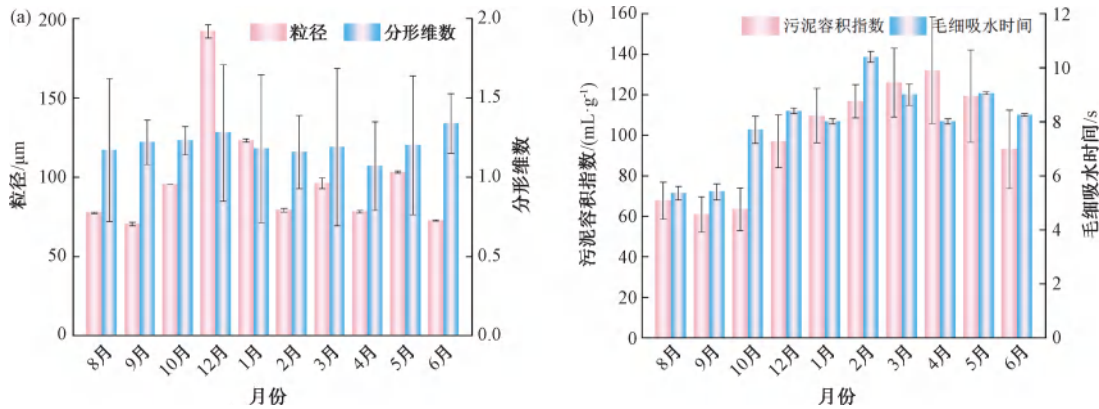


图4 C厂不同月份(a)污泥粒径、分形维数、(b)污泥容积指数及毛细吸水时间的变化特征

Fig. 4 Variation of (a) Sludge Particle Size, Fractal Dimension; (b) Sludge Volume Index, and Capillary Suction Time in WWTP C in Different Months

2.3 污泥龄对微生物群落多样性的影响

2.3.1 Alpha 多样性分析

对B厂和C厂活性污泥样品进行高通量测序分析,其微生物群落多样性指数结果如表3所示。所有样本的Coverage指数均高于0.980,表明测序深度充分,所得序列能够较好地反映微生物群落的

真实组成。与B厂相比,表征群落丰富度的Ace和Chao指数在C厂中均显著升高,反映群落多样性的Shannon指数亦明显增加,说明C厂活性污泥微生物群落的丰富度和多样性均高于B厂。结果表明,较高的污泥龄有利于微生物群落的富集与多样化^[13]。

表3 B厂和C厂微生物多样性和丰富度

Tab. 3 Microbial Diversity and Abundance in WWTP A and B

污水处理厂	污泥龄/d	Coverage 指数	Ace 指数	Chao 指数	Shannon 指数
B 厂	24	0.990±0.004	1 818±365	1 767±334	6.15±0.61
C 厂	43	0.988±0.005	2 071±394	2 017±364	6.35±0.16

此外,采用Venn图分析评估了2座城镇污水处理厂中物种组成(图5)。在2个微生物群落中共观察到40 646种扩增子序列变体(ASVs),其中3 726种ASVs被B厂和C厂所共有,占总ASVs数量的

9.2%。C厂具有更多的独有ASVs数量(19 853),证明了较高的污泥龄在富集和保留微生物方面具有较大的优势,同时也说明B厂和C厂微生物群落组成有较大差异。

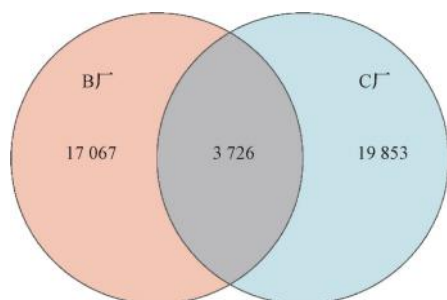


图5 B厂和C厂微生物 Venn 图分析

Fig. 5 Venn Diagram Analysis of Microorganisms in WWTP B and C

2.3.2 Beta 多样性分析

对 B 厂和 C 厂的微生物群落组成进行了非度量多维尺度(NMDS)分析,结果显示,2 座城镇污水处理厂微生物群落组成差异明显(ANOSIM, NMDS: stress=0.111, $R=0.59$, $P=0.001$)(图 6)。进一步结合 R 值(0.59)的中高水平表明,不同的运行环境对微生物群落组成有较强的影响,而显著的 P 值(0.001)则佐证了这一效应的统计学可靠性^[14]。微生物群落组成在 2 座城镇污水处理厂间的显著差异,可能反映了污水处理过程中不同环境选择压力(如有机物含量、水力停留时间和污泥龄等)对微生物群落结构和功能的筛选作用。

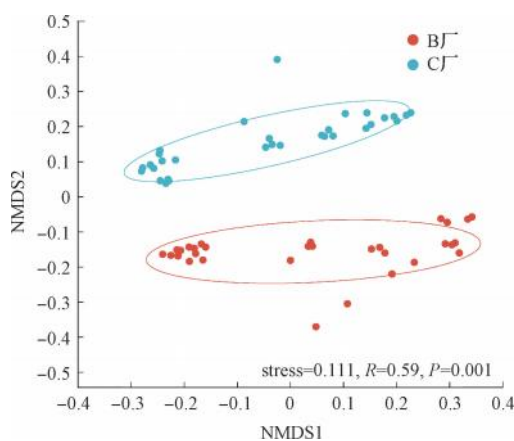


图6 B厂和C厂微生物 NMDS 分析

Fig. 6 Microbiological NMDS Analysis of WWTP B and C

2.4 污泥龄对微生物群落结构的影响

2.4.1 微生物门水平分析

在 B 厂中,优势菌门(相对丰度>1%)依次为变形菌门(Proteobacteria)(24.1%)、拟杆菌门(Bacteroidota)(17.2%)、绿弯菌门(Chloroflexi)(13.9%)、放线菌门(Actinobacteriota)(9.9%)、酸杆菌门(Patescibacteria)(9.6%)、厚壁菌门(Firmicutes)(5.3%)和黏细菌门(Myxococcota)(2.9%)等(图 7)。对比 B 厂,Proteobacteria 和 Bacteroidota 相对丰度在 C 厂中基本未变,相对丰度分别为 24.2%和 17.2%;Chloroflexi、Actinobacteriota、Acidobacteriota、Firmicutes 和 Myxococcota 相对丰度在 C 厂中下降,相对丰度分别下降至 13.2%、9.0%、8.3%、3.9%和 2.5%。

(Acidobacteriota)(9.6%)、厚壁菌门(Firmicutes)(5.3%)和黏细菌门(Myxococcota)(2.9%)等(图 7)。对比 B 厂,Proteobacteria 和 Bacteroidota 相对丰度在 C 厂中基本未变,相对丰度分别为 24.2%和 17.2%;Chloroflexi、Actinobacteriota、Acidobacteriota、Firmicutes 和 Myxococcota 相对丰度在 C 厂中下降,相对丰度分别下降至 13.2%、9.0%、8.3%、3.9%和 2.5%。

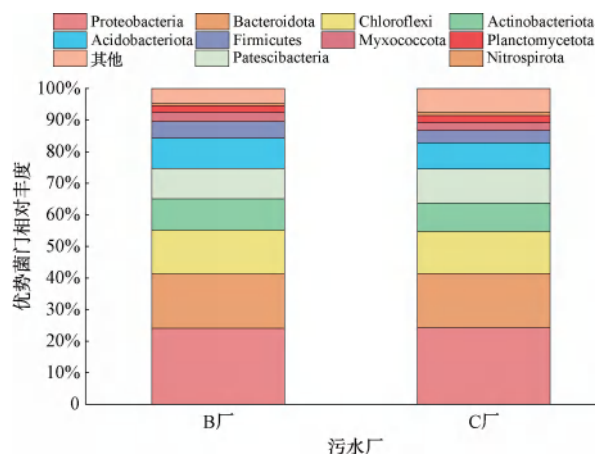


图7 B厂和C厂微生物门水平分析

Fig. 7 Analysis of Microbiological Phylum Levels in WWTP B and C

2.4.2 微生物属水平分析

为了进一步揭示污泥龄对微生物群落属水平的影响,共鉴定出 10 个优势功能菌属(在至少一个样本中相对丰度大于 1%),并将其划分为硝化菌属、反硝化菌属和丝状菌属三类(图 8)。在 B 厂中,以 Ellin6067 和硝化螺旋菌属(Nitrospira)为代表的硝化菌属相对丰度分别为 1.15%和 0.76%,而在 C 厂中分别增加至 1.41%和 1.05%,表明较高污泥龄条件下硝化功能菌更易富集,这与 C 厂良好的氨氮去除效果相一致。在 B 厂中,以 Ferruginibacter、OLB17、土生单胞菌属(Terrimonas)、候选种竞争聚磷菌(Candidatus_Competibacter)、硝化肉菌属(Denitratisoma)和独岛菌属(Dokdonella)为代表的反硝化菌属相对丰度分别为 2.05%、1.63%、1.04%、1.28%、0.57%和 0.34%,而在 C 厂中上述反硝化菌属的总体相对丰度有所降低。尽管如此, C 厂仍保持了较高的总氮去除率,说明较高污泥龄可能通过增强硝化过程的稳定性,为后续反硝化反应提供更持续的硝酸盐底物,从而维持整体脱氮效果。此外,与 C 厂相比, B 厂中以毛球菌属

(*Trichococcus*) 和 *Kouleothrix* 为代表的丝状菌属相对丰度较高,表明在较低污泥龄条件下丝状菌更具优势。

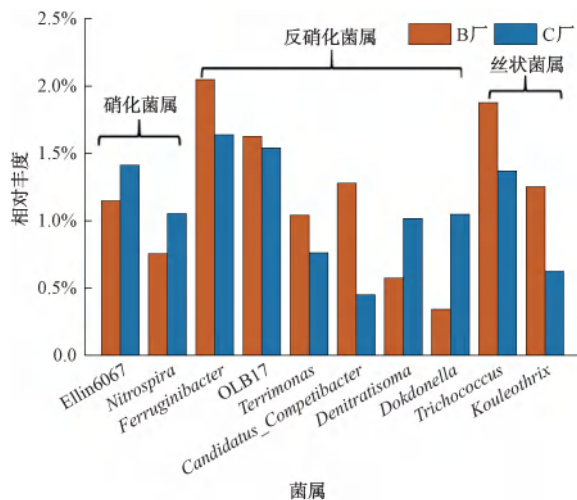


图8 B厂和C厂微生物属水平分析

Fig. 8 Analysis of Microbial Genus Levels in WWTP B and C

2.5 微生物多级物种差异判别分析

多级物种差异判别分析方法被用来探究活性污泥系统中微生物群落标记物,进而对样品组间菌群丰度差异特征进行分析^[15]。图9为B厂和C厂中微生物分类等级树图,内圈到外圈分别对应门到属水平,黄色节点表示该微生物类群在组间无显著差异,其他颜色节点表示该类群在组内丰度较高且组间差异显著,节点大小表示丰度高低,线性判别分析得分(LDA)值反映物种丰度差异对组间分类的贡献度,绝对值越大表明该物种作为生物标志物区分不同分组的指示作用越强。在LDA阈值为3.2时,B厂和C厂分别有13个和18个显著差异物种。

在B厂中具有代表性的差异性功能属包括 *Candidatus_Competibacter*、*Kouleothrix*、*Mycobacterium* 和 *Ferruginibacter*。其中 *Mycobacterium* 是典型的异养硝化菌属,属于放线菌门,同时具有降解大分子有机物的功能^[16]。*Candidatus_Competibacter* 和 *Ferruginibacter* 属于反硝化菌属,参与生物脱氮过程。*Kouleothrix* 属于丝状菌属,可以构成活性污泥絮体的骨架,对维持絮体结构的稳定具有重要作用^[17]。在C厂中具有代表性的差异性功能属包括 *Dokdonella*、*Denitratisoma* 和 *Nitrospira*。其中,*Nitrospira* 是活性污泥系统中常见的硝化功能菌属,而 *Dokdonella* 和 *Denitratisoma* 属于反硝化菌属。结果表明,较高污

泥龄条件下更有利于硝化功能菌的富集与维持,同时对部分反硝化功能菌属的筛选具有重要影响,进一步说明污泥龄通过重塑脱氮相关功能菌群结构而影响系统运行特征。

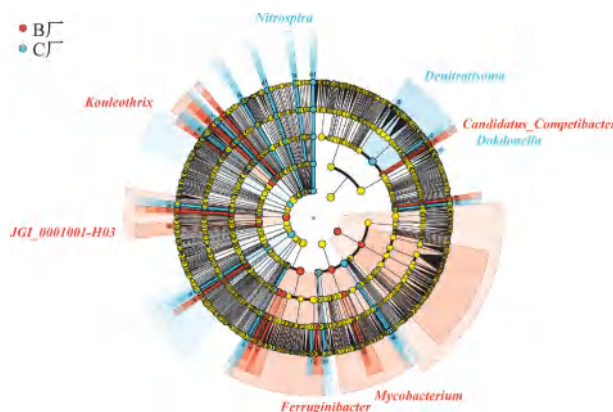


图9 B厂和C厂微生物线性判别分析效应量 LEfSe 分类学组成差异性分析

Fig. 9 Differential Analysis of the Taxonomic Composition of Microbial LEfSe in WWTP B and C

3 结论

(1)在实际运行负荷条件下,B厂与C厂在不同污泥龄条件下均保持稳定运行,有机物及氮磷去除效果良好,出水COD、氨氮、TN和TP均稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,这说明污泥龄差异对整体污染物去除率影响不显著。

(2)较高污泥龄显著提高活性污泥微生物群落的丰富度和多样性,C厂Ace、Chao和Shannon指数均高于B厂;Beta多样性分析显示两厂微生物群落结构明显分离,表明污泥龄对微生物群落组装具有显著环境筛选作用,并重塑功能菌群结构。

(3)在群落结构层面,较高污泥龄能促进硝化功能菌属富集,有利于脱氮过程稳定,但对总体去除率提升作用有限;工程运行中,在保障出水稳定达标的前提下,建议将污泥龄控制在30~45 d,并通过连续或分次排泥方式减少污泥龄波动,同时兼顾除磷过程对运行条件的敏感性,实现脱氮与除磷协同稳定运行。

参考文献

- [1] 阴方芳,宋小康,吴鹏,等.污泥泥龄对连续流颗粒污泥亚硝化系统的影响特性[J].工业安全与环保,2026,52(3):101-106.

- Yin F F, Song X K, Wu P, et al. Effect of sludge retention time on a continuous-flow nitrification system with granular sludge[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2026, 52(3): 101-106.
- [2] Wang Z H, Peng Y Z, Li J W, et al. Rapid initiation and stable maintenance of municipal wastewater nitrification during the continuous flow anaerobic/oxic process with an ultra-low sludge retention time[J]. Water Research, 2021, 197: 117091. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117091.
- [3] Amancio Frutuoso F K, da Silva V E P S G, C V Silva T F, et al. Solids retention time (SRT) control in the co-treatment of leachate with domestic sewage in aerobic granular sludge systems: Impacts on system performance, operational stability, and bioresource production[J]. Bioresource Technology, 2025, 415: 131664. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131664.
- [4] Zhang Z M, Yu Z D, Wang Z H, et al. Understanding of aerobic sludge granulation enhanced by sludge retention time in the aspect of quorum sensing[J]. Bioresource Technology, 2019, 272: 226-234. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.10.027.
- [5] 徐伟锋, 陈银广, 张芳, 等. 污泥泥龄对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1693-1696.
Xu W F, Chen Y G, Zhang F, et al. Effect of SRT on denitrifying phosphorus removal in A/A/O process [J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1693-1696.
- [6] 常飞, 操家顺, 徐续, 等. 泥龄对反硝化除磷脱氮系统效率的影响分析[J]. 水资源保护, 2004, 20(5): 29-32.
Chang F, Cao J S, Xu X, et al. Effect of sludge age on efficiency of denitrifying nitrogen and phosphorus removal process [J]. Water Resources Protection, 2004, 20(5): 29-32.
- [7] Chen X Y, Lee Y J, Yuan T, et al. A review on recovery of extracellular biopolymers from flocculent and granular activated sludges: Cognition, key influencing factors, applications, and challenges[J]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127854. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127854.
- [8] 董滨, 高君, 陈思思, 等. 我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3384-3391.
Dong B, Gao J, Chen S S, et al. Main influencing factors and strengthening of anaerobic transformation of excess sludge in China[J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3384-3391.
- [9] Su Z C, Liu T, Guo J H, et al. Nitrite oxidation in wastewater treatment: Microbial adaptation and suppression challenges[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(34): 12557-12570.
- [10] 刘世崇. 污泥泥龄和水力停留时间对厌氧/好氧高负荷活性污泥工艺碳捕获的影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024.
Liu S C. Effect of SRT and HRT on carbon capture in A/O high-rate activated sludge process[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.
- [11] Zhou Z, Qiao W M, Xing C, et al. Characterization of dissolved organic matter in the anoxic-oxic-settling-anaerobic sludge reduction process [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 259: 357-363. DOI: 10.1016/j.cej.2014.07.129.
- [12] 祁超. 机械搅拌对浸没式 MBR 膜污染的影响与机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
Qi C. Influence and mechanism of mechanical stirring on membrane fouling of submerged MBR [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [13] 田园, 段亮, 宋永会, 等. 不同污泥龄膜生物反应器内微生物的群落结构特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(3): 453-459.
Tian Y, Duan L, Song Y H, et al. Characteristics of microbial community structure in membrane reactors under different solid retention times[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(3): 453-459.
- [14] Pi X E, Yu Z C, Yang X X, et al. Effects of zymosan on short-chain fatty acid and gas production in *in vitro* fermentation models of the human intestinal microbiota[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 921137. DOI: 10.3389/fnut.2022.921137.
- [15] 艾胜书, 王子恒, 杜林竹, 等. 污泥膨胀特性及控制研究现状[J]. 环境保护科学, 2022, 48(3): 57-64.
Ai S S, Wang Z H, Du L Z, et al. Research status of characteristics and control of sludge bulking[J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(3): 57-64.
- [16] Kong L W, Wang Y, Xiang X Q, et al. Study on the impact of hydraulic loading rate (HLR) on removal of nitrogen under low C/N condition by modular moving bed constructed wetland (MMB-CW) system [J]. Environmental Technology & Innovation, 2024, 34: 103579. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103579.
- [17] Chen X, Gong Y Z, Li Z H, et al. Key function of Kouleothrix in stable formation of filamentous aerobic granular sludge at low superficial gas velocity with polymeric substrates[J]. Bioresource Technology, 2024, 397: 130466. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.130466.