

文章栏目：面向减污降碳协同增效的污水处理系统运行管理研究与实践专题
DOI 10.12030/j.cjee.202302142 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

龚立, 王启镛, 刘志远, 等. 某大型造纸废水处理厂的污泥膨胀控制及微生物群落结构分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 1761-1768.
[GONG Li, WANG Qibin, LIU Zhiyuan, et al. Sludge bulking control and microbial community structure analysis of a large papermaking wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 1761-1768.]

某大型造纸废水处理厂的污泥膨胀控制及微生物群落结构分析

龚立¹, 王启镛^{2,✉}, 刘志远³, 张德祥⁴

1. 宜兴市建邦环境投资有限责任公司, 宜兴 214200; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 3. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 4. 山东省建筑设计研究院有限公司, 济南 250001

摘要 以一座处理规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的造纸废水处理厂污泥膨胀控制为研究对象。通过进水补充氮磷营养物质、进水更换混凝剂去除硫化物, 控制系统 DO 为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 选择池加大预曝气等措施改变优势丝状菌的生存环境。经过调控, 系统 SV、SVI 出现显著下降, 分别从 98%、 $198 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降至 37%、 $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 恢复至正常范围, 从而解决了该厂的污泥膨胀问题。对污泥进行微生物镜检和染色镜检分析发现, 该厂活性污泥膨胀主要为 Type 021N 型丝状菌 (发硫菌) 和 *Beggiatoa* sp. (贝氏硫细菌) 过度繁殖引起的丝状膨胀。对污泥膨胀控制前后的活性污泥进行高通量测序以分析其微生物菌群结构, 从种属变化角度发现在污泥膨胀前后, Actinobacteria 门中 *Rhodococcus* 属占比从 2.92% 下降为 0.19%、*Mycolata* 属占比从 0.1% 下降为 0, Alpha-proteobacteria 门中的 *Meganema* 属占比从 0.14% 下降为 0, Gamma-proteobacteria 中 *Thiothrix* 占比从 0.18% 下降为 0.01%。这几种微生物是引起该厂污泥膨胀的主要菌属。本研究案例在解决污泥膨胀的前提下, 减少了药剂用量, 提升了系统处理能力, 避免了污泥流失, 吨水电耗得以降低, 且方法简单易行高效, 可为其他同类污水处理厂解决污泥膨胀问题提供参考。

关键词 造纸废水; 污泥膨胀; 丝状菌; 微生物群落结构; 工程实例

污泥膨胀会制约活性污泥法处理污水效率、影响出水水质^[1]。造纸废水的 COD 和悬浮物两个指标较高, 并存在缺少氮、磷元素等特点^[2-3], 采用活性污泥法进行处理时, 往往会产生污泥膨胀问题^[4-5], 严重时会影响出水水质。污泥膨胀的控制方法分为药剂控制、环境调控和代谢机制控制。郝晓地^[6]从污泥膨胀形成机理、研究进展、控制修复措施几个方面对活性污泥的污泥膨胀进行了系统分析; 艾胜书^[7]根据污泥膨胀特性研究现状, 分析了污泥膨胀的主要因素和控制措施, 提出了添加选择器、调控运行参数等污泥膨胀控制思路; 范念斯等^[8]以膨胀污泥为接种污泥, 通过续批实验研究发现微丝菌优势生长的影响因素主要有油酸碳源、厌氧/好氧交替环境和低温; 范念斯等^[9]从污泥负荷角度研究了丝状菌膨胀的控制方法; 杨雄等^[10]从微生物角度对氮磷缺乏所引发的污泥沉降性能进行了系统研究。刘春^[11]通过对某造纸厂污泥浓度控制、污泥补充措施, 解决了该厂污泥膨胀问题; 张雪^[12]用氧化沟处理造纸废水引发污泥膨胀并进行治理, 研究投加聚合氯

收稿日期: 2023-02-28; 录用日期: 2023-04-24

第一作者: 龚立 (1987—), 男, 硕士, 工程师, dxawu@163.com; ✉通信作者: 王启镛, 男, 博士, 高级工程师, wangqibin188@163.com

化铝、生物絮凝剂、双氧水等几种药剂来控制污泥膨胀。这些污泥膨胀控制方法往往只能在实验室开展的，而在实际造纸废水处理工艺中，对污泥膨胀成因进行研究，并总结污泥膨胀调控经验的较少。特别是在大型造纸废水处理厂，控制污泥膨胀对提高工艺运行稳定性、减少环境污染风险具有重要意义。

本案例旨在解决我国南方某大型废纸造纸污水处理厂(处理规模 $15 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)的污泥膨胀问题，采取补充进水氮磷营养物质、更换混凝剂、控制系统 DO、加大预曝气等调控措施以改变优势丝状菌的生存环境，并进行污泥膨胀控制，再结合污泥镜检和高通量测序分析，从微生物群落角度分析污泥膨胀前后菌群变化，以深入了解膨胀污泥群落特性，以为同类污水处理厂探索节能降耗的污泥膨胀控制方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况

某污水处理厂的设计规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。该厂的设计进水废纸造纸污水占 95% 以上，生活污水占比低于 5%，配套收集管网 22.5 km。目前，该厂服务上游废纸造纸企业 16 家，造纸企业主要产品为白板纸、特种纸、瓦楞纸、箱板纸等。废纸造纸废水主要来自制浆和抄纸两大工序，主要污染物来自制浆部分的洗涤废水。随着造纸工艺的改进和清洁生产的推行，每生产 1 t 成品纸约产生废水 10~15 m^3 ，上游企业废水均有内部预处理站，采用厌氧塔和活性污泥法工艺。预处理站出水控制指标按污水厂设计进水指标执行。污水厂正常运行时的日均处理污水量为 $8.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。相关处理工艺见图 1。生化池为完全混合式曝气池，池容 54 000 m^3 ，前端设有一座选择池，池容 3 125 m^3 。曝气方式为射流曝气。

污水厂进出水水质见表 1。出水执行《浙江省造纸工业(废水类)水污染物排放标准》DHJB1-

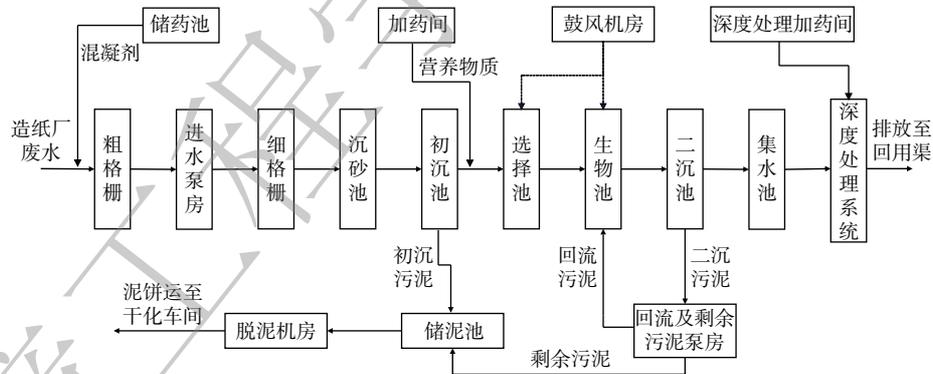


图 1 工艺流程图

Fig. 1 Process Flow Chart

表 1 污水厂进出水水质

Table 1 Inlet and outlet water quality of the wastewater treatment plant

水样类型	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ -N/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	进水硫化物/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
设计进水水质	1 000	350	—	—	0.25	—
进水水质	1 125	330	13.6	32.26	0.6	4.3
初沉池出水水质	843	242	12.48	33.02	0.58	3.5
出水水质	46	5.68	1.19	7.98	0.03	—
排放标准(≤)	60	10	5	10	0.5	—

2001 中的第二时段标准和《城市污水再生利用工业用水水质》(GB/T19923-2005) 中的敞开式循环冷却水系统补充水和工艺与产品用水标准限值。该厂站在生产运行中生化系统经常会发生污泥膨胀, 污泥膨胀期间 SVI、 SV_{30} 维持较高水平, 污泥在二沉池沉降缓慢导致池内泥位处于高位, 污泥膨胀严重时期二沉池上清液低于 0.2 m, 局部区域甚至会出现污泥流失情况。

1.2 污泥镜检及染色镜检方法

污泥镜检是污泥处理厂稳定运行的重要工具, 其通过指示性微生物的观察, 可提前预判系统运行状况, 对指导生产具有重要作用。污泥镜检是利用显微镜技术观察活性污泥生物相, 观察污泥絮体颗粒的大小、污泥结构的松紧程度、菌胶团菌和丝状菌的比例。污泥染色镜检是根据丝状生物体对特殊微生物染色剂或染色技术呈阴性或阳性反应, 从而鉴定出丝状生物体的方法, 主要染色方法有革兰氏染色法、奈瑟染色法、PHB 染色法和鞘染色法。本研究主要使用革兰氏染色法, 其步骤主要有涂片、干燥、固定、初染、水洗、媒染、水洗、脱色、复染、水洗^[13]。

1.3 污泥高通量分析

Miseq 高通量测序技术以 16SrDNA 为基础, 获取 DNA 碱基序列包含的全部生物遗传信息, 通过 MOTHUR、RDP classifier 软件处理分析后全面地反映基因的多样性和复杂性, 能从本质上对微生物的菌群结构进行研究^[14]。

1.4 工艺调控方案

根据污泥镜检及高通量测序结果分析, 筛选出引起污泥膨胀的主要丝状菌群, 针对其最优生长环境开展工艺调控, 采取进水营养物补充及进水混凝剂更换、生化池 DO 调整、选择池曝气量等措施来调控 3 个阶段。阶段 I (2017 年 10 月 20 日至 2017 年 12 月 15 日), 在进水中投加液体氮磷制剂, 投加量 $1 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$; 阶段 II (2017 年 12 月 16 日至 2018 年 3 月 1 日), 在阶段 I 基础上, 增加了生化池 DO 调控措施, 生化池 DO 从 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 调整为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 阶段 III (2018 年 3 月 1 日至 2018 年 9 月 13 日), 在阶段 II 基础上, 增加选择池曝气量调控措施, 选择池曝气量从 $69 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 调整为 $138 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.5 分析测试方法

COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN、MLSS、MLVSS 等指标均按《水和废水检测分析方法》(第 4 版) 标准方法测定。污泥负荷参考《室外排水设计规范》GB50014-2021(2021 年版)。VFA 是使用气相色谱仪测定, 使用 GC-2010 FID 检测器, 色谱柱是 DB-FFAP (30 m, $0.25 \mu\text{m}$, $0.25 \mu\text{m}$)。

2 结果与讨论

2.1 工艺调控措施效果与分析

2.1.1 调控过程中污泥特性的变化

在该污水处理厂污泥膨胀调控过程中, 污泥特性变化如图 2 所示。污泥膨胀调控前, MLSS 平均为 $5300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SV_{30} 平均为 96%, SVI 平均为 $182 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥处于严重膨胀状态; 调控阶段 I~II, MLSS 平均为 $5089 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SV_{30} 平均为 98%, SVI 平均为 $191 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥仍处于膨胀状态; 调控阶段 III 的 MLSS 平均为 $5833 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SV_{30} 平均为 59%, SVI 平均为 $101 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥指数逐步恢复至正常范围, 污泥膨胀情况已经得到控制。

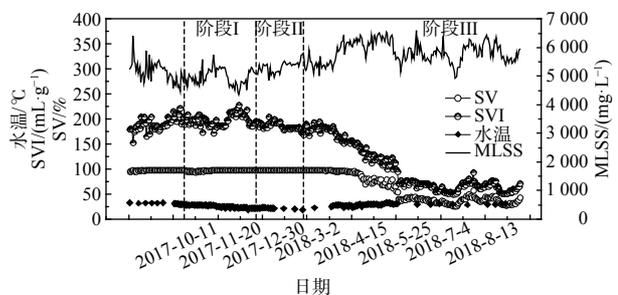


图 2 2017 年 9 月 1 日-2018 年 9 月 13 日
污泥特性变化曲线

Fig. 2 Sludge characteristic change curve from September 1, 2017 to August 31, 2018

2.1.2 基于影响因素分析的调控思路

在活性污泥系统运行过程中,引起污泥膨胀的影响因素分为废水水质、环境因素和运行条件等。废水水质包含低分子有机物含量、氮和磷营养物质、硫化物成分;环境因素则有反应温度、溶解氧水平、pH;而运行条件主要有污泥负荷、曝气方式等^[15]。

1) 废水物理特性分析。对上游废纸造纸废水的水质检测中发现,废纸造纸废水 pH 一般为 5.5~6.5,偏酸性。本污水处理厂接纳一部分环保热电厂板框脱水下滤液, pH 为 10~11,与造纸废水混合后对进水 pH 进行了调节,混合后厂区进水 pH 在 7~8,在正常范围内。然而,厂区主要处理造纸废水来水,造纸企业在生产中使用大量高温蒸汽会导致其排水水温即使在冬季也处于较高水平,全年生化池水温在 21~33 °C,亦不是影响该厂污泥膨胀的关键因素。根据污水厂污泥负荷计算,污泥负荷(以 COD 计)平均为 0.221 kg·kg⁻¹·d⁻¹,按照 BOD₅ 计算污泥负荷为 0.064 kg·kg⁻¹·d⁻¹,也在正常范围。

2) 废水中主要污染物元素分析。由于废纸造纸工业原材料使用特点,故进入污水厂的废水缺少氮、磷,污水厂进水水质中 C:N:P 仅为 100:2.9:0.05。根据进水缺氮、磷的特征,于 2017 年 10 月 20 日在初沉池出水处投加液体氮磷制剂,投加量为 1 t·d⁻¹,进入调控阶段 I,补充后初沉出水平均 C:N:P=100:4.2:0.14,因二沉池出水 TP 仍有 0.1 mg·L⁻¹ 剩余,故未进一步增加磷的补充。CHUDOBA 等^[16]根据不同种群微生物的生长动力学参数的不同提出了微生物选择性理论,该理论指出引起污泥膨胀的丝状菌的最大比增长速率 μ_{\max} 和饱和常数 K_s 比菌胶团小,故在营养物质缺乏情况下丝状菌具有较高的增殖速率。而进水营养物比例调整对菌胶团正常生长有积极作用。

废纸造纸废水中含有大量含硫有毒物质,一部分来自添加剂中的化合物如树脂类化合物、有机硫化物、等,还有一部分来自硫酸盐、亚硫酸盐等无极化合物^[2]。这类化合物在厌氧环境中会部分转化为硫化物、硫化氢等物质^[17],从而引起如 *Beggiatoa* sp. 等丝状菌的大量繁殖。故于 2017 年 10 月底在初沉池投加聚合硫酸铁,投加量 12 mg·L⁻¹,以期通过 Fe³⁺ 把 S²⁻ 氧化成 S 单质,并经过混凝沉淀和初沉池排泥,去除了进水中的硫化氢等含硫毒性物质。进水硫化物等毒性物质导致污泥膨胀,主要是因为 H₂S 对菌胶团细菌的抑制毒害作用大于对丝状菌的作用^[18],同时,还原态硫化物的存在又能为丝状菌的繁殖提供能源。而在缺氧条件下,硫酸盐还原和硫化物氧化的反应速率较快。在这样的硫循环中,021N 型丝状菌和硫丝菌能获得足够能量。因此,通过选择池投加聚合硫酸铁调控,初沉池检测硫化物从 3.5 mg·L⁻¹ 降至 0~0.3 mg·L⁻¹。

3) DO 等工艺参数分析。该污水处理厂生化池曝气为射流曝气形式,考虑曝气量大幅提高后加大了污泥絮体切割打碎,生化池 DO 一直控制约为 0.8 mg·L⁻¹。经过对生化池不同点位检测,射流曝气 DO 分布存在不均匀情况。虽然整体 DO 处于 0.8 mg·L⁻¹,但池内存在较多 DO 低于 0.3 mg·L⁻¹ 的区域。于 2017 年 12 月 16 日起进入阶段 II 调控阶段,采用提高生化池曝气量的方式,控制生化池 DO 约为 1.5 mg·L⁻¹。在低 DO 环境下,好氧微生物代谢受到抑制,而丝状菌由于比表面积大,具有相对较高的生长速率,大部分丝状菌在低 DO 环境下能优势生长。DO 是现有污水厂运行过程中引起污泥膨胀的关键因素^[19],进入阶段 II 的调控后,生化池 DO 最低处也达到 1 mg·L⁻¹,从而消除了生化池局部低 DO 的环境。

4) 废水中有机物的影响。通过对污水厂污泥膨胀解决前后进水 COD 组分检测,结果显示污泥膨胀期进水 COD 中 VFA 占比达 37%。该情况与文献 [20] 情况一致,废纸造纸废水中 COD 主要以低分子量组分(残留浆料中的可溶物、细小纤维、木质素、半纤维素等)和高分子量组分(絮凝剂、添加的胶乳和填料等化学助剂)为主,分子量居中的组分很少。针对进水含有大量低分子 VFA 的情况,于 2018 年 3 月 1 日开始进入阶段 III 调控,将选择池曝气量从 69 m³·min⁻¹ 调整为 138 m³·min⁻¹。调整后选择池 DO 从 0.1 mg·L⁻¹ 上升至 0.2~0.3 mg·L⁻¹,调控后选择池出水 VFA 占比从 26% 降至

17%，结果变化见表 2。根据文献 [15]，COD 中 VFA 高组分更适合 *Type 021N*、*Beggiatoa* sp. 类丝状菌优势生长，通过阶段 II 和阶段 III 的调控，可大幅改变优势丝状菌的生长环境，对丝状菌的解决具有重要作用。

2.1.3 调控效果

污泥膨胀控制后，二沉池泥位出现显著改善（前后对比见图 3），二沉池平均上清液达到 1.5~2 m，大幅改善了二沉池出水带泥、跑絮情况。

2.2 微生物群落分析

2.2.1 污泥镜检分析

1) 污泥普通镜检。通过生化池活性污泥镜检发现，系统活性污泥菌胶团含有大量丝状菌（图 4），属于污泥丝状膨胀。在污泥膨胀控制期、恢复正常后，持续进行污泥镜检，活性污泥菌胶团丝状菌数量出现显著变少直至基本消失。

2) 污泥染色镜检。通过染色镜检可更好地观察丝状菌的形态结构和生理学特征，基本可确定丝状菌的种类和优势生长原因，从而有针对性的进行调控，缩短调控时间。革兰氏染色镜检结果见图 5。

污泥样品染色镜检显示，丝状菌过度增殖。根据国际通用的《Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming and Other Solids Separation Problems》（第三版）中描述方法进行比对鉴定，革兰氏染色结果显示主要的优势丝状菌为革兰氏阴性；次要优势丝状菌为革兰氏阴性菌带阳性颗粒物。结合生态生理特征判定为 *Type 021N* 型丝状菌（发硫菌）和 *Beggiatoa* sp.（贝氏硫细菌）。

Type 021N 型丝状菌无分枝，不能运动。菌丝是直型或者轻微弯曲，延伸至污泥絮体

表 2 污泥膨胀前后 COD 组分变化对比

Table 2 Comparison of COD composition before and after sludge bulking

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	溶解性COD/(mg·L ⁻¹)	VFA占比/%
进水口	1 084	909	37
初沉池出口	860	790	35.8
生化池出口	122	109	26.2
调控前选择池出水	390	310	26
调控后选择池出水	350	285	17

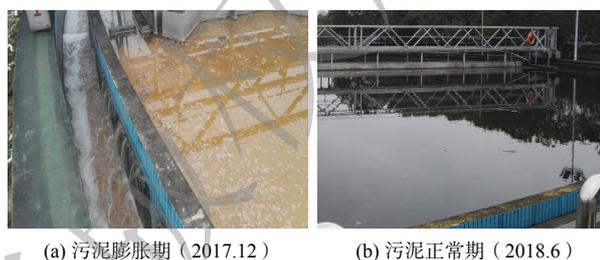


图 3 污泥膨胀前后二沉池状况

Fig. 3 Conditions of secondary sedimentation tank before and after sludge expansion

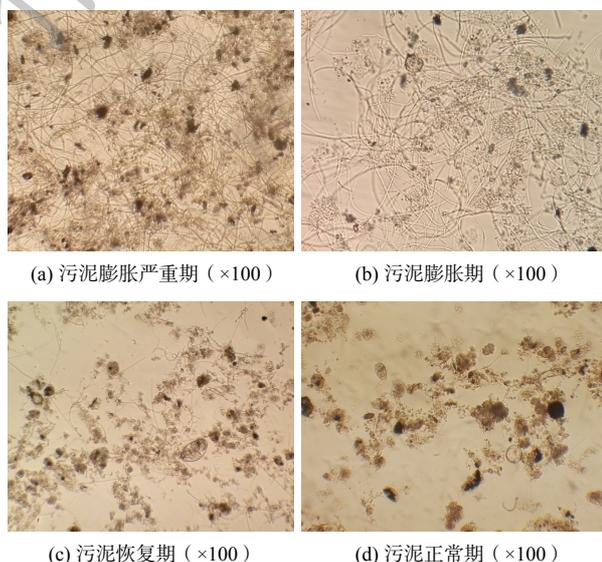


图 4 污泥镜检生物相

Fig. 4 Microscopic examination of sludge biofacies

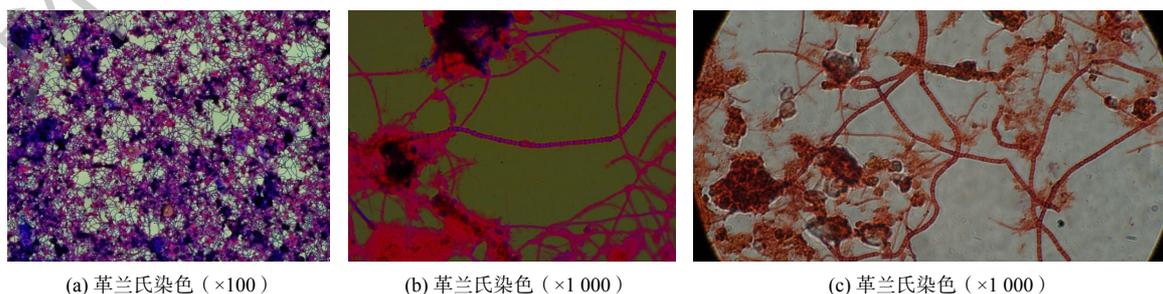


图 5 革兰氏染色镜检生物相

Fig. 5 Gram staining microscopy of biofacies examination

外围。菌丝长度 500~1 000 μm ，直径 1.6~2.5 μm 。其细胞形状多样，有棒状、矩形和铁饼状，无鞘，有隔膜、隔膜有缩缢，不常见附着生长，存在硫粒。*Beggiatoa* sp.无分枝，可运动。菌丝是直形或者弯曲，游离于混合液中，长度 100~500 μm ，直径 1.2~3.0 μm 。其细胞方形、无鞘，隔膜不清晰可见，不附着生长，存在硫粒^[15,21]。

2.2.2 污泥高通量测序分析结果

在 2017 年 10 月污泥膨胀期间将系统活性污泥 (样品简称 HXWN) 和池组上生物泡沫 (样品简称 SWPM) 进行了高通量宏基因组微生物测序。同时，于 2018 年 6 月在污泥膨胀得到控制后再对活性污泥 (HXWN2) 进行高通量宏基因组微生物测序比对。根据测序结果，在活性污泥膨胀时期，生化池活性污泥中含有变形菌门 (Proteobacteria) 52.62%、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 21.75%、浮霉菌门 (Planctomycetes) 6.67%、绿弯菌门 (Chloroflexi) 5.96%、酸杆菌门 (Acidobacteria) 4.1%、疣微菌门 (Verrucomicrobia) 2.84%、放线菌门 (Actinobacteria) 1.18%。在污泥膨胀恢复前后，Actinobacteria 门中 *Rhodococcus* 属占比从 2.92% 下降为 0.19%，*Mycolata* 属占比从 0.1% 下降为 0，Alpha-proteobacteria 门中 *Meganema* 属占比从 0.14% 下降为 0，Gamma-proteobacteria 中 *Thiothrix* 属占比从 0.18% 下降为 0.01%。*Genus* 水平所有样本群落结构分布见图 6。

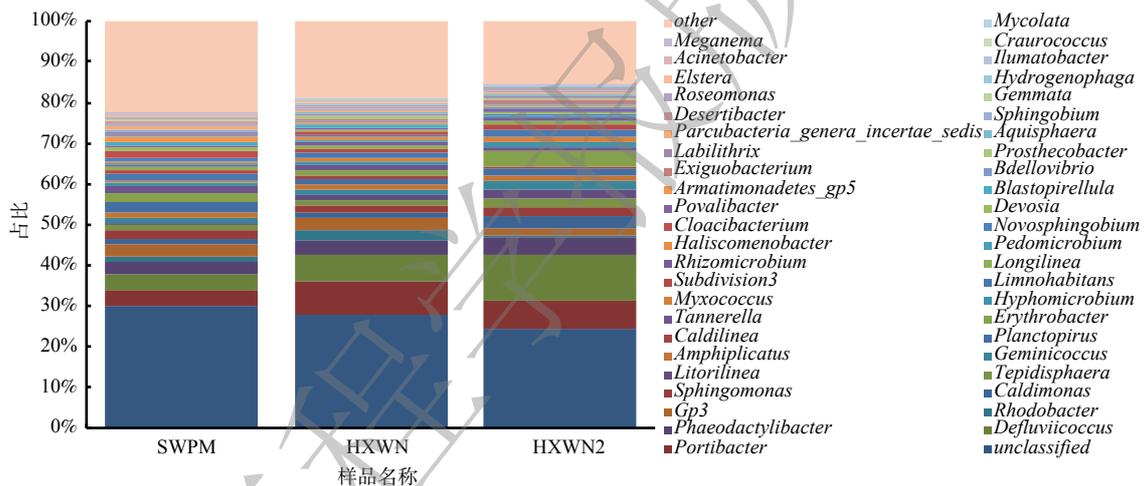


图 6 属水平所有样本群落结构分布图

Fig. 6 Community structure distribution of all samples at genus level

2.3 工程意义分析

1) 活性污泥膨胀成因分析思路的可行性。结合污泥膨胀调控前后污泥镜检、微生物菌群高通量测序对比，通过活性污泥絮体形态、微生物菌群变化判断引起污泥膨胀的主要菌群。该厂引起污泥膨胀的主要丝状菌为 *Type* 021N 型、*Beggiatoa* sp.型丝状菌。引起污泥膨胀的主要原因为：进水缺少氮、磷元素，进水水质 C:N:P 仅为 100:2.9:0.05。在此情况下，丝状菌具有较高的增殖速率；进水 COD 中挥发性脂肪酸 (VFA) 占 37%，大量低分子的有机物或者有机酸容易被 *Type* 021N 型、*Beggiatoa* sp.型丝状菌优势吸收，选择池在运行中 DO 始终未超过 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，也未能对进水中低分子有机物或有机酸较好预处理；上游造纸企业废水预处理站的厌氧塔等处理工艺，会将废水中的硫酸根还原成硫化物、硫化氢等有毒物质，持续进入系统对活性污泥增殖带来影响；生化池 DO 长期控制在 0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，由于使用射流曝气，DO 分布不均衡，较多区域处于低 DO 状态。

2) 活性污泥膨胀控制策略的有效性。污泥膨胀的药剂控制，即投加增重剂、能直接杀灭丝状菌的氧化剂。像增加增重剂、絮凝剂这类药剂控制，只能改善污泥沉降性能、缓解沉降性能不好

带来的不利影响;加氯、臭氧等氧化剂杀灭丝状菌的方法,只能作为应急使用,因为其没有对从根本上控制丝状菌的繁殖,而且投加量控制不好的情况下,还会对正常微生物菌群产生较大影响。

污泥膨胀的环境调控和代谢机制控制,主要有污水成分的控制、溶解氧控制、设置生物选择器、设置污泥再生池等方法。这类控制方法能从根本上抑制丝状菌的优势生产,但是需要找到正确的调控方向,有时候更是多种因素交织在一起,使用单一调控方法并不能解决污泥膨胀问题^[22]。

造纸废水处理过程中,受水质特点影响,污泥系统参数一旦控制不当,容易发生污泥膨胀,在运行中,要密切关注生化系统SV和SVI变化,一旦出现污泥膨胀趋势,要尽快分析成因并有针对性进行调控。通用控制策略有根据来水水质的性质,及时对存在的毒性物质进行去除,选择池DO、生化池DO控制在合适范围,确保消除有利于丝状菌优势生长的环境。如进水中低分子有机物或有机酸较多时,还需根据系统活性污泥状况,及时调整预曝气量,以防进一步加剧丝状菌的优势生长。

3) 污泥膨胀判断方法的实用性。通过污泥普通镜检发现活性污泥菌胶团含有大量丝状菌。通过染色镜检,更好地观察丝状菌的形态结构和生理学特征,根据国际通用的《Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming and Other Solids Separation Problems》(第三版)中描述方法进行比对鉴定,判断引起污泥丝状膨胀的主要为Type 021N。根据该丝状菌优势生长的工艺条件,进一步缩小引起污泥膨胀的成因范围。

3 结论

1) 该大型造纸废水处理厂污泥膨胀主要是由于进水营养物质比例失衡、进水存在硫化物等毒性物质、生化池DO偏低、进水挥发性脂肪酸占比高从而诱发丝状菌优势生长,引起污泥膨胀。通过进水补充营养物质、更换混凝剂去除硫化物改善进水水质,调整生物池DO至 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、选择池加大预曝气破坏优势丝状菌生长环境,成功解决了该厂的污泥膨胀问题。

2) 通过污泥镜检,快速确定该厂污泥膨胀优势丝状菌为Type 021N型丝状菌和*Beggiatoa* sp.;通过污泥膨胀前后微生物群落结构分析,Actinobacteria门中*Rhodococcus*属占比从2.92%下降为0.19%,*Mycolata*属占比从0.1%下降为0,Alpha-proteobacteria门中*Meganema*属占比从0.14%下降为0, Gamma-proteobacteria中*Thiothrix*属占比从0.18%下降为0.01%,上述几种微生物种属是引起该大型造纸废水处理厂污泥膨胀的主要菌属。

3) 由于进水营养物质比例、进水含硫化物等,造纸废水处理厂容易诱发污泥丝状膨胀,在运行中尤其要关注生化池DO、选择池运行等运行条件控制。本案例在解决污泥膨胀问题的前提下,减少了药剂用量,提升了系统处理能力,并避免了污泥流失,且方法简单易行高效,起到了节能降耗的作用,可为其他同类污水处理厂解决污泥膨胀问题提供参考。

参考文献

- [1] 杨敏,杨思敏,范念斯,等. 微生物诱发污泥膨胀生长特性控制策略研究进展[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 253-263.
- [2] 周娅. 改良型厌氧颗粒污泥膨胀床反应器处理造纸废水的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [3] 苟青,何滔,朱旺平,等. MBR工艺在造纸废水处理中的应用实验[J]. 中华纸业, 2020, 41(20): 21-25.
- [4] 张玉生,邹丽. 臭氧催化氧化与芬顿工艺在造纸废水深度处理中的对比分析[J]. 中华纸业, 2022, 43(14): 39-43.
- [5] 陈学萍,占正奉,伊浩,等. 废纸制浆造纸废水中溶解性有机物特化特性的研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(7): 1-10.
- [6] 郝晓地,朱景义,曹秀芹. 污泥膨胀形成机理及控制措施研究现状和进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(5): 1-9.
- [7] 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.
- [8] FAN N S, QI R, ROSSETTI S, et al. Factors affecting the growth of *Microthrix parvicella*: Batch tests using bulking sludge as seed sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1192-1199.
- [9] FAN N S, WANG R F, QI R, et al. Control strategy for filamentous

- sludge bulking Bench-scale test and full-scale application.[J]. *Chemosphere*, 2018, 210: 709-716.
- [10] 杨雄, 彭永臻, 郭建华, 等. 氮/磷缺乏对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. *化工学报*, 2014, 65(3): 1040-1048.
- [11] 刘春, 张安龙. 造纸厂废水处理污泥膨胀的解决实例[J]. *纸和造纸*, 2009, 28(1): 51-52.
- [12] 张雪. 氧化沟处理造纸废水活性污泥膨胀的引发与控制[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- [13] 范念斯, 王润芳, 齐嵘, 等. 多维度耦合丝状菌监测方法在污泥膨胀中的应用[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(15): 6-12.
- [14] 尚越飞, 王申, 宗倪, 等. 污水生物处理工艺低温下微生物种群结构[J]. *环境科学*, 2020, 41(10): 4636-4643.
- [15] 李倩. 城镇污水脱氮除磷系统污泥膨胀生物学成因及控制措施研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [16] CHUDOBA J, GRAU P, OTTOVA V. Control of activated-sludge (责任编辑: 靳炜)
- filamentous bulking- II: Selection of microorganisms by means of a selector[J]. *Water Research*, 1973, 7(10): 1389-1398.
- [17] 高春娣, 侯春艳, 李悦等. 硫酸盐还原产物对EBPR系统影响的研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(8): 898-906.
- [18] 王硕, 李长波, 赵国峥等. 活性污泥丝状菌膨胀生物群落及调控研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 535-542.
- [19] 张程程. 低DO状态丝状菌膨胀的微生物表面特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [20] 徐静静. 高分子有机-无机复配混凝沉淀剂的制备及其在废纸造纸废水处理中的应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [21] JENKINS D, RICHARD M G, DAIGGER G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming and other solids separation problems[M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [22] 周利, 彭永臻, 徐晓军, 等. 丝状菌污泥膨胀机理与控制方法[J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2005(18): 43-47.

Sludge bulking control and microbial community structure analysis of a large papermaking wastewater treatment plant

GONG Li¹, WANG Qibin^{2,*}, LIU Zhiyuan³, ZHANG Dexiang⁴

1. Yixing Jianbang Environmental Investment Co., Ltd., Yixing 214200, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Shouchuang Ecological Environmental Protection Group Co., Ltd, Beijing 100044, China; 4. Shan Dong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Jinan 250001, China

*Corresponding author, E-mail: wangqibin188@163.com

Abstract A papermaking wastewater treatment plant with a processing capacity of $15 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ was taken as the research project to study the control of sludge bulking in the process. The living environment of dominant filamentous bacteria was changed by adding nitrogen and phosphorus nutrients to the influent, replacing coagulant with water and removing sulfide. controlling the DO of the system at $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and increasing pre-aeration in the selection tank. After regulation and control, SV and SVI in the system decreased significantly from 98% and $198 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ to 37% and $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, and returned to the normal range, which successfully solved the sludge bulking problem of the plant. The results showed that the activated sludge bulking of the plant was mainly caused by the overgrowth of *Type 021N* filamentous bacteria (*Thiobacillus* sp.) and *Beggiatoa* sp. Based on the high flux analysis of microbial flora structure of activated sludge before and after sludge bulking control, from the perspective of species change, it was found that before and after sludge bulking, the proportion of Rhodococcus in Actinobacteria decreased from 2.92% to 0.19%, the proportion of Mycolata decreased from 0.1% to 0, the proportion of Meganema decreased from 0.14% to 0, and the proportion of Thiothrix decreased from 0.18% to 0.01%. These kinds of microorganisms were the main bacteria causing sludge bulking in the plant. The solution of this case can provide reference for other similar sludge bulking problems.

Keywords papermaking wastewater; sludge bulking; filamentous bacteria; microbial community structure; engineering examples