

李美, 王燕, 支尧, 等. 牛奶清洗废水作为潜在碳源的纳管准入评估[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 120-126.

LI M, WANG Y, ZHI Y, et al. Evaluation of wastewater connection access of washing wastewater in milk processing as a potential carbon source[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11): 120-126.

牛奶清洗废水作为潜在碳源的纳管准入评估

李 美¹, 王 燕², 支 尧², 王小飞³, 郑凯凯^{4,*}

(1. 无锡市照明和排水管理中心, 江苏无锡 214001; 2. 无锡普汇环保科技有限公司, 江苏无锡 214028; 3. 江苏至善汇智慧科技有限公司, 江苏无锡 214121; 4. 无锡汇恒水务有限公司, 江苏无锡 214028)

摘 要 国家鼓励和支持可生化性好的食品废水根据评估结果放宽纳管标准, 作为污水处理厂的碳源使用。研究以某牛奶加工企业清洗废水为例, 从该废水的污染物降解、作为碳源的效果、生物抑制性等方面分析放宽纳管标准的可行性。结果表明, 该牛奶清洗废水具有高碳、低氮磷的特性, 其综合反硝化速率达到 $5.9 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$, 具备作为碳源的潜力, 且对下游污水处理厂无明显生物毒性。因此, 该废水的接入可以代替少部分商用碳源, 具有经济、环境的双重效益。研究所建立的方法体系对于同类型废水的评估鉴定具有一定的指导意义。

关键词 牛奶清洗废水 纳管评估 硝化速率 反硝化速率 耗氧呼吸速率

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)11-0120-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.11.014

Evaluation of Wastewater Connection Access of Washing Wastewater in Milk Processing as a Potential Carbon Source

LI Mei¹, WANG Yan², ZHI Yao², WANG Xiaofei³, ZHENG Kaikai^{4,*}

(1. Wuxi Lighting and Drainage Management Center, Wuxi 214001, China;

2. Wuxi Puhui Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuxi 214028, China;

3. Jiangsu Zhishanhui Smart Technology Co., Ltd., Wuxi 214121, China;

4. Wuxi Huiheng Water Affairs Co., Ltd., Wuxi 214028, China)

Abstract Our country encourages and supports the food processing wastewater with good biodegradability to relax the wastewater connection standard according to the assessment results, and this wastewater could be used as carbon source to enhance biological nitrogen and phosphorus removal. In this study, the washing wastewater of a milk processing enterprise as an example, the feasibility of relaxing the wastewater connection standard was analyzed from the aspects of the pollutant degradation, effects as a carbon source, and biological inhibition. The results showed that the washing wastewater in milk processing had the characteristics of high carbon, low nitrogen and phosphorus, and its comprehensive denitrification rate reached $5.9 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$, which had the potential as a carbon source. Besides, no obvious biological toxicity was observed after the mixture with activated sludge of the downstream wastewater treatment plant (WWTP). Therefore, this wastewater could replace a small number of commercial carbon sources with dual economic and environmental benefits. The method system established in this study has certain guiding significance for the evaluation and identification of the same type of wastewater.

Keywords washing wastewater in milk processing evaluation of wastewater connection access nitrification rate denitrification rate oxygen consumption rate

[收稿日期] 2023-01-07

[作者简介] 李美(1978—), 女, 高级工程师, 研究方向为水环境污染防治, E-mail: 18077825@qq.com。

[通信作者] 郑凯凯(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为污水生物处理, E-mail: zkk1022@126.com。

无锡某牛奶制品有限公司的经营范围包括乳制品、液体乳(巴氏杀菌乳、调制乳、发酵乳)加工等, 2021 年年产消毒牛奶共 4 303.9 t、酸奶共 1 406 t、含乳饮料共 12 t。该公司排放的废水主要为清洗牛

奶加工生产线的机器、管道、储奶罐等产生的废水(以下简称“牛奶清洗废水”),水量约为 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 。排污许可证中允许该废水直接排入下水道,执行《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)。如表 1 所示,该废水 COD_{Cr} 浓度较高,TN、TP 等指标相对较低,其中 COD_{Cr} 平均质量浓度约为 595 mg/L ,最小值为 302 mg/L ,最大值为 $1\,510 \text{ mg/L}$,超过 500 mg/L 的比例为 27.3%。TN、氨氮、TP、SS、pH 指标均能满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015), COD_{Cr} 存在超标现象。此外,我国城镇污水处理厂进水普遍存在低碳

氮比的特征,需要投加大量的商业碳源进行强化脱氮除磷^[1-2]。因此,该废水可能具备作为碳源、实现污水处理碳减排的潜力^[3]。

《国家水污染物排放标准制订技术导则》(HJ 945.2—2018)规定,“对于可生化性较好的农副食品加工工业等废水,可执行协商限值”。为切实执行国家相关文件的规定,发挥废弃物的资源化利用,为污水处理节能减排添砖加瓦^[4],助力社会层面“双碳”目标的实现,开展了该废水对于下游污水处理厂的影响研究,为该废水能否直接接管提供依据。

表 1 牛奶清洗废水水质检测结果
Tab. 1 Test Results of Milk Washing Wastewater

采样日期	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{BOD}_5/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH 值
2020-10-10	302	95	/	0.53	1.1	52	9.3
2021-02-26	1 120	/	/	0.87	3.6	160	7.2
2021-04-06	784	/	/	0.82	2.2	120	6.6
2021-05-11	320	/	/	3.0	1.1	77	7.7
2021-07-09	492	/	7.2	0.39	0.97	92	7.1
2021-07-22	353	/	3.0	0.25	1.0	58	6.5
2021-09-07	412	/	7.0	0.30	1.2	67	6.8
2021-10-11	439	/	3.2	0.20	1.4	52	6.8
2021-11-03	494	/	12.7	1.1	1.8	80	6.7
2021-12-09	1 510	/	20.4	0.14	5.6	218	6.7
2022-05-24	323	101	/	1.18	1.18	78	7.69

注: COD_{Cr} 、 BOD_5 、TN、氨氮、TP、SS 及 pH 值的排放标准分别为 500、350、70、45、8、400 mg/L 及 6.5~9.5。

1 试验原理与方法

1.1 耗氧呼吸速率

耗氧呼吸速率也称为耗氧速率,是指单位时间内单位体积混合液中的微生物所消耗的氧量,对应的比耗氧呼吸速率则是指耗氧呼吸速率与污泥浓度的比值。当活性污泥系统加入具有毒性或抑制性的废水,微生物活性就会受抑制或中毒,表现为耗氧呼吸速率的降低。在活性污泥中加入不同的进水,测定其耗氧呼吸速率就可以判断不同进水对活性污泥的抑制作用^[5]。

本研究设置两组对比试验。Ⅰ组:下游污水处理厂污泥+下游污水处理厂进水。Ⅱ组:下游污水处理厂污泥+牛奶清洗废水。污泥与进水以 3:1 的比例混合,曝气至 DO 饱和后停止曝气,保持搅拌

的状态,每隔 1 min 测定 DO,记录 DO 逐渐下降的过程。

1.2 硝化速率

在污水处理过程中,脱氮主要包括硝化和反硝化两个过程。氨氮在好氧环境中被硝化菌(氨氧化菌和亚硝酸盐硝化菌)氧化为氧化态氮(主要为 NO_3^- -N),在缺氧环境中反硝化菌利用碳源作为电子供体,将 NO_3^- -N 还原为 N_2 ,从而达到污水中氮去除的目的。生物硝化作用主要依靠的是硝化菌,硝化菌是自养菌,世代周期长,繁殖速度慢,容易受到有毒有害物质影响^[6]。进行对比曝气硝化试验,可以判断牛奶清洗废水是否会对活性污泥中硝化菌的活性产生抑制作用。

本研究分别取 2 组下游污水处理厂活性污泥,

试验组中加入牛奶清洗废水,对照组中加入下游污水处理厂进水,分别曝气进行硝化速率测定试验。

I 组:取 6 L 下游污水处理厂好氧池活性污泥,加入 2 L 该厂进水,为保证足够量的氨氮和碱度,加入 1.2 g NH_4Cl 和 1 g NaHCO_3 。II 组:将下游污水处理厂进水置换为牛奶清洗废水,其余试验条件保持一致。两组试验保持相同的曝气量,DO 质量浓度维持在 2~4 mg/L。分别在 0、10、20、30、40、50、60 min 取混合液过滤,测滤后水中的 NO_3^- -N 浓度。

1.3 反硝化速率

反硝化反应是在缺氧状态下,反硝化菌将 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 还原成 N_2 的过程,该过程使得污水中的氮得到有效去除^[7]。为考察牛奶清洗废水中的有机物能否被活性污泥作为反硝化碳源利用,利用下游污水处理厂活性污泥,进行反硝化对比试验。

研究设置 3 组对比试验。A 组:取 6 L 下游污水处理厂缺氧池泥水混合液和 2 L 该厂进水,共 8 L 泥水混合液,搅拌并测定其 DO 质量浓度至 0,加入 1.2 g 的 KNO_3 以保证初始 NO_3^- -N 浓度。B 组:取 8 L 下游污水处理厂缺氧池活性污泥,搅拌并测定其 DO 质量浓度至 0;加入 2 g 的 KNO_3 以保证初始 NO_3^- -N 浓度,并加入优质碳源乙酸钠 2 g。C 组:取 6 L 沉淀后缺氧池泥水混合液,搅拌并测定其 DO 质量浓度至 0;加入 2 g 的 KNO_3 以保证初始 NO_3^- -N 浓度,并加入牛奶清洗废水 2 L。分别在 0、1、3、5、10、15、20、30、45、60、90、120 min 测定混合液中的 NO_3^- -N 浓度。

1.4 检测方法

本研究中涉及到的污染物检测项目及方法如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 直排对下游污水处理厂水质及水量的影响分析

牛奶清洗废水直排后对下游污水处理厂进水水质影响的核算如表 3 所示, COD_{Cr} 平均增加质量浓度为 0.024 mg/L,最大增加浓度(按照历史最高 COD_{Cr} 质量浓度为 1 510 mg/L 核算)也仅为 0.346 mg/L,负荷提升率均小于 0.01%;牛奶清洗废水的 TN、氨氮、TP、SS 平均浓度均远低于下游污水处理厂的进水浓度,接入后污水处理厂这些指标均有所下降,降低质量浓度在 0.001~0.015 mg/L。可知,接入牛奶清洗废水后对下游污水处理厂水质的影响较小。

表 2 检测项目及方法

Tab. 2 Test Items and Methods

分析项目	分析方法
COD_{Cr}	重铬酸钾法
BOD_5	稀释测定法
氨氮	纳氏试剂分光光度法
NO_3^- -N	紫外分光光度法
PO_4^{3-} -P	钼锑抗分光光度法
TP	过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
SS	重量法
MLVSS	重量法
MLSS	重量法
pH	WTW Oxi/pH-3310 便携式 pH&DO 仪
DO	WTW Oxi/pH-3310 便携式 pH&DO 仪
镜检	日本奥林巴斯生物显微镜 CX31

下游污水处理厂设计水量为 250 000 m^3/d ,目前水量负荷在 67.4% 左右。牛奶清洗废水水量为 60 m^3/d ,只有下游污水处理厂设计值的 0.024%,对污水处理厂水量负荷的影响较小。

下游污水处理厂设计有机负荷为 0.062 kg $\text{BOD}_5/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$,根据 2021 年的实际运行数据核算,2021 年实际有机负荷为 0.046 kg $\text{BOD}_5/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$,负荷率为 74.2%。即使按照历史数据中牛奶清洗废水的最高 COD_{Cr} 质量浓度(1 510 mg/L)核算,所增加的负荷率也小于 0.001 kg $\text{BOD}_5/(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})$,因此,下游污水处理厂有充足有机负荷余量来接纳和处理该废水。

综上,无论是从水质水量角度,还是从有机负荷方面分析,即使按照目前已测的最高牛奶清洗废水 COD_{Cr} 质量浓度(1 510 mg/L)核算,其污染物总量对下游污水处理厂的影响也较小,下游污水处理厂完全有能力处理这部分废水。

2.2 耗氧呼吸速率

为分析牛奶清洗废水对污水处理厂出水水质的影响,通过设计针对性小试模拟试验,判断牛奶清洗废水对污泥的活性是否存在抑制现象。不同进水与下游污水处理厂活性污泥混合后的耗氧速率变化情况如图 1 和表 4 所示。I 组的耗氧呼吸速率为 10.59 mg $\text{DO}/(\text{h}\cdot\text{g VSS})$,曝气饱和后 DO 质量浓度

表 3 牛奶清洗废水接入对污水处理厂进水水质的影响
Tab. 3 Influence of Milk Washing Wastewater on Influent of WWTP

项目	COD _{Cr}	TN	氨氮	TP	SS
下游污水处理厂的设计进水值/(mg·L ⁻¹)	500	50	40	8.0	280
下游污水处理厂的进水平均值/(mg·L ⁻¹)	356	43.7	31	5.42	146
平均负荷率	71.2%	87.4	77.5%	67.75%	52.1%
牛奶清洗废水接入后平均增加值/(mg·L ⁻¹)	0.024	-0.010	-0.009	-0.001	-0.015
牛奶清洗废水接入后最大增加值/(mg·L ⁻¹)	0.346	-0.007	-0.009	0	0.022

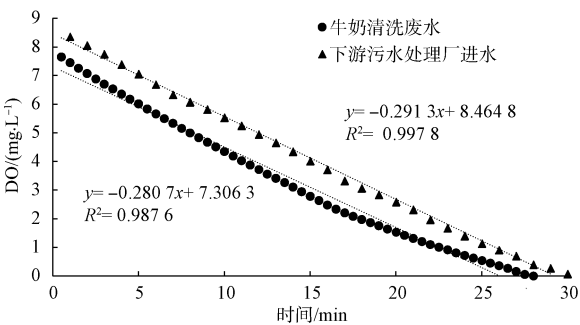


图 1 耗氧呼吸速率曲线

Fig. 1 Curve of Oxygen Consumption Respiration Rate

表 4 耗氧呼吸速率结果

Tab. 4 Results of Oxygen Consumption Respiration Rate

序号	试验对象	斜率绝对值	反应时间/min	MLVSS/(mg·L ⁻¹)	耗氧速率/ [mg DO·(h·g VSS) ⁻¹]
I 组	下游污水处理厂污泥+进水	0.291 3	30	1 651	10.59
II 组	下游污水处理厂污泥+牛奶清洗废水	0.280 7	30	1 556	10.76

游污水处理厂活性污泥+牛奶清洗废水后,硝化速率为 4.34 mg NO₃⁻-N/(g VSS·h)。加入牛奶清洗废水后,硝化效果良好,污泥的硝化速率稍有上升。结果表明,牛奶清洗废水对下游污水处理厂活性污泥中硝化菌的活性具有略微的促进效应。

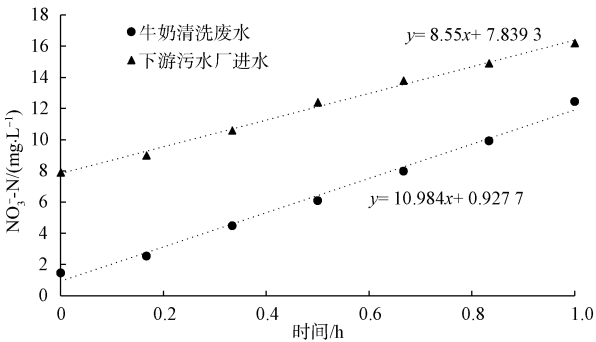


图 2 硝化曲线

Fig. 2 Nitrification Curve

下降到 0.06 mg/L 耗时 30 min; II 组耗氧呼吸速率为 10.76 mg DO/(h·g VSS),曝气饱和后 DO 下降到 0 耗时 28 min。两组试验结果较为接近,且加入牛奶清洗废水的试验组的耗氧呼吸速率略高于加入下游污水处理厂进水的对照组,说明牛奶清洗废水不但没有对活性污泥产生抑制作用,反而更易被微生物吸附降解^[8]。

2.3 硝化速率

由图 2 和表 5 可知,下游污水处理厂活性污泥+进水的硝化速率为 3.97 mg NO₃⁻-N/(g VSS·h);下

表 5 硝化速率试验结果

Tab. 5 Results of Nitrification Rate Test

试验项目	斜率	MLVSS/ (mg·L ⁻¹)	硝化速率/ [mg NO ₃ ⁻ -N/ (g VSS·h) ⁻¹]
下游污水处理厂进水	8.55	2 150	3.97
牛奶清洗废水	10.984	2 530	4.34

2.4 反硝化速率

利用下游污水处理厂进水、乙酸钠、牛奶清洗废水进行反硝化试验结果如图 3 及表 6 所示,加入乙酸钠和牛奶清洗废水后,反硝化速率均得到提升。在下游污水处理厂活性污泥中加入牛奶清洗废水进行试验,反硝化曲线分为两段:第一段反硝化速率为 11.07 mg NO₃⁻-N/(gVSS·h),反应时间为 30 min,速率高于利用乙酸钠作为外加碳源时的反硝化速

率;第二段反硝化速率为 $3.61 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$, 低于乙酸钠作碳源时的速率,但高于下游污水处理厂进水的速率;其综合反硝化速率达到 $5.9 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$,略低于乙酸钠。由试验结果可知,牛奶清洗废水中的有机物可以被反硝化细菌用作碳源进行反硝化反应,且其中含有一定浓度的快速碳源,这部分碳源的脱氮效果甚至优于商用乙酸钠,综合脱氮效率略低于乙酸钠,但远高于下游污水处理厂进水,完全具备作为碳源的潜力^[9]。

综上,牛奶清洗废水高碳、低氮的特征,可以作为碳源使用,具有很好的脱氮效果,排入下游污水处理厂后能够在一定程度上减少商用碳源的投加,在降低运行费用的同时,还可以起到减少碳排放的作

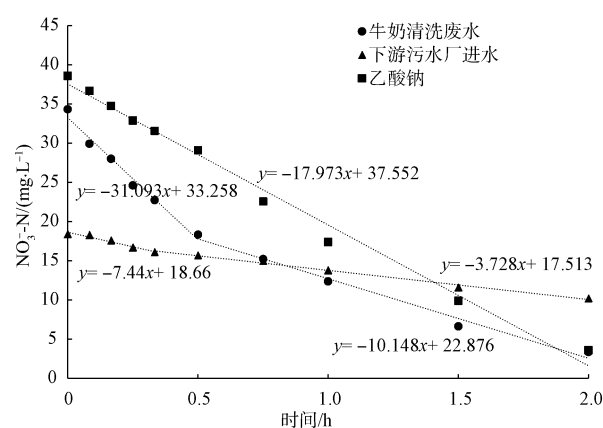


图3 反硝化曲线

Fig. 3 Denitrification Curve

表6 反硝化试验结果

Tab. 6 Results of Denitrification Test

测试项目		斜率绝对值	MLVSS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	反硝化速率/潜力/[$\text{mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot (\text{gVSS} \cdot \text{h})^{-1}$]
污水处理厂进水	第一段	7.44	2 820	2.64
	第二段	3.728		1.32
乙酸钠		17.973	2 310	7.79
牛奶清洗废水	第一段	31.093	2 810	11.07
	第二段	10.148		3.61

用^[10],符合“双碳”背景下的污水处理发展方向(充分利用可生化性好的食品废水作为碳源,减少商用碳源的投加)。按照2021年全国乳制品产量为3 032万t相应的废水产生量核算,如果所有企业的废水均不处理、以碳源的形式排入污水处理厂,可节省下游污水处理厂262.5 t乙酸钠的投加量, CO_2 减排量达到280.9 t^[11],具有显著的经济和环境效益。

2.5 活性污泥镜检分析

为从微观层面分析牛奶清洗废水对于下游污水处理厂活性污泥系统的影响,在开展上述曝气试验和反硝化试验的前后,均采集了污泥样品,进行了镜检分析,如图4~图5所示,所有镜检拍照的微生物均为活动的个体。“曝气试验开始”和“反硝化试验开始”的污泥样品均为下游污水处理厂原始的活性污泥,尚未投加牛奶清洗废水。从镜检结果可以看

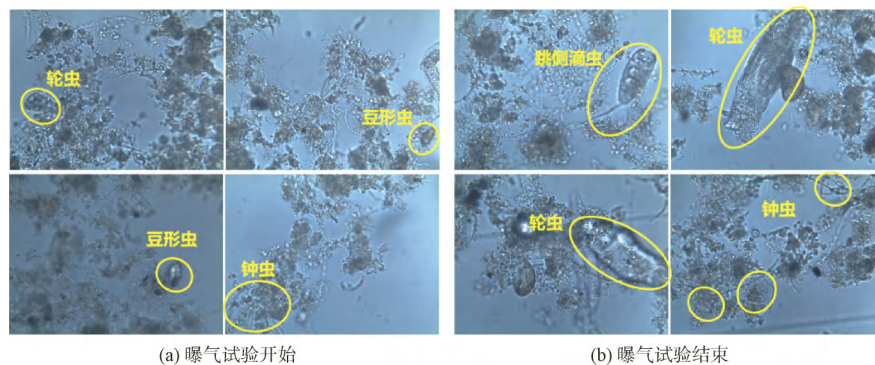


图4 曝气试验前后的镜检(400倍)

Fig. 4 Microscopic Examination before and after Aeration (400 Times)

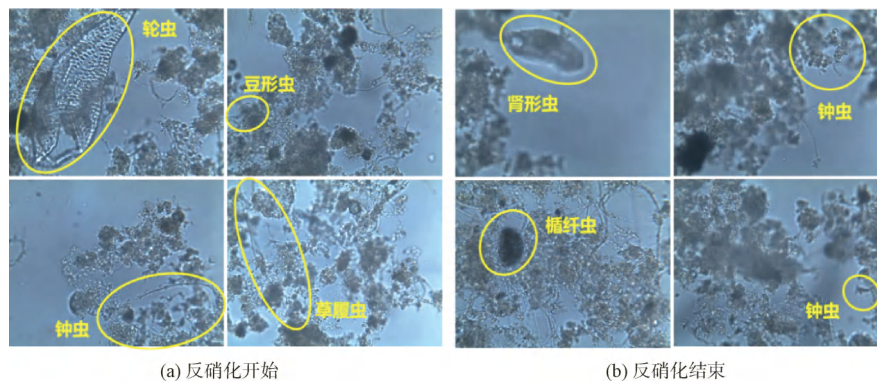


图 5 反硝化试验前后的镜检(400 倍)

Fig. 5 Microscopic Examination before and after Denitrification (400 Times)

出,下游污水处理厂活性污泥的菌胶团较为紧密,对照活性污泥的微生物图谱^[12],观察到了轮虫、钟虫、豆形虫等原生或后生微生物。其中,轮虫是一种典型的后生动物,属于轮虫动物(Rotifera),其长度为4~4 000 μm ,多数在500 μm 左右。轮虫是活性污泥中常见的微生物,它的出现一般标志着污泥系统培养成熟,出水水质良好。此外,钟虫是一种原生动物,同样是活性污泥中常见的微生物。钟虫一般固着生长在菌胶团中,属于固着型纤毛虫类微生物,钟虫的出现同样标志着活性污泥系统相对成熟, COD_{Cr} 、氨氮等污染物去除效率高,出水水质良好。草履虫和豆形虫均为游泳型原生微生物,旋转慢速游动,活动在菌胶团周围,以藻类和细菌为食。这两种微生物也广泛存在于活性污泥中,没有特别明确的指示作用。

投加牛奶清洗废水进行曝气试验后,污泥的絮体结构同样较为紧密,没有出现分散解体的迹象。除轮虫、钟虫外,还观察到了跳侧滴虫。跳侧滴虫属于原生动物中的鞭毛虫纲,其典型特征是具有一根与体长相当或更长的鞭毛作为运动器官,会捕食细菌,它的出现也是活性污泥系统成熟稳定的标志。利用牛奶清洗废水作为碳源进行反硝化试验后,菌胶团较为紧密,观察到了大量钟虫,表明活性污泥性状保持良好。此外,还观察到了肾形虫和楯纤虫,这两种微生物均为游泳型原生生物,可以作为水质处理良好的指示生物。

综上,镜检结果表明,无论是搅拌还是曝气的处理方式,牛奶清洗废水的加入均没有改变下游污水处理厂活性污泥的菌胶团结构,没有影响钟虫、轮虫等指示性原生及后生动物的存活。基于上述镜检结

果,说明该废水无明显生物毒性。

3 结论

(1)牛奶清洗废水的可生化性较好,废水中的大部分 COD_{Cr} 能够被下游污水处理厂的活性污泥降解,不含或含极少量的难生物降解 COD_{Cr} ,且由于水量较少,不会对污水处理厂产生冲击影响。基于水质、水量和污染物负荷核算可知,下游污水处理厂完全有余量接纳并处理该废水。

(2)从硝化速率 $[4.34 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})]$ 、耗氧呼吸速率 $[10.76 \text{ mg DO}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})]$ 、活性污泥镜检等多角度分析表明,牛奶清洗废水无有毒有害物质,不会对下游污水处理厂的活性污泥系统产生抑制或毒害效应。

(3)牛奶清洗废水作为碳源的反硝化速率达到 $5.9 \text{ mg NO}_3^- \text{-N}/(\text{g VSS} \cdot \text{h})$,远高于下游污水处理厂的进水,表明该废水中的碳源更易被活性污泥中的反硝化菌群利用,具备作为碳源使用的潜力。因此,该废水完全可直排,并代替少部分商用碳源,节约污水处理厂的运行费用并减少碳排放。

(4)本研究所建立的方法体系对于同类型废水的评估鉴定具有一定的指导意义,开发可生化性好的食品类废水作为污水处理厂的免费碳源,符合双碳目标下的污水处理发展方向,具有经济、环境的双重效益。

参考文献

- [1] 李惠平, 庞维海, 谢丽, 等. 低 C/N 污水处理过程中有机碳源的特性及转化分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 69-74.
- LI H P, PANG W H, XIE L, et al. Characteristics and conversion of organic carbon sources during treatment of

- municipal wastewater with low carbon to nitrogen ratio[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(7): 69-74.
- [2] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 212-218.
- WU Y H, WANG X D, CHEN N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 212-218.
- [3] 周乙新, 李激, 王燕, 等. 城镇污水处理厂低浓度进水原因分析及提升措施[J]. 环境工程, 2021, 39(12): 25-30.
- ZHOU Y X, LI J, WANG Y, et al. Reason analysis and improvement measures for low pollutants concentration of influent water of urban sewage treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12): 25-30.
- [4] 高富丽. 污水处理行业实现“双碳”目标技术措施探讨[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(8): 118-121.
- GAO F L. Discussion on technical measures to achieve "double carbon" target in sewage treatment industry [J]. Intelligent Building and Smart City, 2022(8): 118-121.
- [5] 鞠晨曦, 李建军. 4 种重金属对活性污泥的呼吸抑制作用[J]. 工业水处理, 2018, 38(10): 17-20.
- JU C X, LI J J. Respiratory Inhibition of four heavy metals on activated sludge [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(10): 17-20.
- [6] 王程, 张念慈, 肖娟, 等. 硝化污泥低温冲击强化试验[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(4): 68-71.
- WANG C, ZHANG N C, XIAO X, et al. Enhancement test of low temperature impact on nitrifying sludge [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(4): 68-71.
- [7] 慈晓琳. 污水处理工艺反硝化过程的不同碳源研究[J]. 广州化工, 2022, 50(10): 100-102.
- CI X L. Study on different carbon sources of denitrification in wastewater treatment process[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(10): 100-102.
- [8] 陈明飞, 许海琴, 蒋秋明, 等. 改性凝胶球包埋活性污泥对污水中重金属的响应[J]. 中国给水排水, 2020, 36(3): 8-15.
- CHEN M F, XU H Q, JIANG Q M, et al. Response of modified gel sphere embedded activated sludge to heavy metals in sewage [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(3): 8-15.
- [9] 李激, 王燕, 罗国兵, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.
- LI J, WANG Y, LUO G B, et al. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on empassis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12.
- [10] 王凯军, 宫徽, 金正宇. 未来污水处理技术发展方向的思考与探索[J]. 建设科技, 2013(2): 36-38.
- WANG K J, GONG H, JIN Z Y. Thinking and exploration on the development direction of sewage treatment technology in the future[J]. Construction Technology, 2013(2): 36-38.
- [11] 周曼. 某污水处理厂碳排放核算研究[J]. 广东化工, 2022, 49(5): 132-134.
- ZHOU M. Study on carbon emission accounting of a sewage treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(5): 132-134.
- [12] 马放, 杨基先, 魏利, 等. 环境微生物图谱[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- MA F, YANG J X, WEI L, et al. Environmental microbiological map[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.

(上接第 48 页)

- [61] 郝晓地, 张益宁, 李季, 等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 1-8.
- HAO X D, ZHANG Y N, LI J, et al. Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 1-8.
- [62] 蒋彬, 刘中亚, 陈垚, 等. 碳中和视角下污水处理现状与展望[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 51-58.
- JIANG B, LIU Z Y, CHEN Y, et al. Current situation and prospect of wastewater treatment under the perspective of carbon neutralization[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(6): 51-58.
- [63] 黄志心. 城镇污水处理厂提标改造实践与思考[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 48-53, 60.
- HUANG Z X. Practice and thinking of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 48-53, 60.