

赵颖. 外加碳源强化农村生活污水处理及成本分析[J]. 净水技术, 2024, 43(12): 111-118.

ZHAO Y. Treatment with external carbon source and cost analysis enhanced rural domestic wastewater[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 111-118.

外加碳源强化农村生活污水处理及成本分析

赵 颖*

(成都空港环境投资有限公司, 四川成都 610299)

摘 要 以农村生活污水处理中具有代表性的序批式活性污泥(SBR)工艺和厌氧/缺氧/好氧(AAO)+膜生物反应器(MBR)工艺为考察对象,将固体葡萄糖和固体乙酸钠作为有机物外加碳源,通过药剂化验分析,对比葡萄糖、乙酸钠 2 种外加碳源的 COD_{Cr} 含量、BOD₅ 含量、溶解速度等,通过烧杯试验和一体化污水处理设备生产试验,对比 2 种外加碳源对污染物的去除效果及经济效益。结果表明,固体乙酸钠溶解速度为固体葡萄糖的 2.3 倍, COD_{Cr} 含量为 2.4 倍。同样投加成本条件下,投加乙酸钠的 TN 去除率达 96.3%,比葡萄糖高 13%。投加相同 COD_{Cr} 当量条件下,投加乙酸钠的反硝化速率约为葡萄糖的 1.3 倍, TN 去除率为 87.2%,比葡萄糖高 3.2%。投加乙酸钠的工艺出水 TP 去除率更高,具有更好的生物强化除磷作用。投加乙酸钠的污泥浓度增长率比葡萄糖低 29%,污泥容积指数(SVI)值较平稳,污泥膨胀风险较低,适合作为外加碳源长期使用。

关键词 农村生活污水 外加碳源 序批式活性污泥工艺(SBR) 厌氧/缺氧/好氧+膜生物反应器(AAO+MBR) 污染物去除 成本分析

中图分类号: X799 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)12-0111-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.12.013

Treatment with External Carbon Source and Cost Analysis Enhanced Rural Domestic Wastewater

ZHAO Ying*

(Chengdu Konggang Environmental Investment Co., Ltd., Chengdu 610299, China)

Abstract The research focused on the representative sequencing batch reactor (SBR) process and anaerobic/anoxic/oxic (AAO) + membrane bioreactor (MBR) process in rural domestic wastewater. Glucose and sodium acetate were used as additional carbon sources for organic compounds. Through chemical analysis, the COD_{Cr} content, BOD₅ content, dissolution rate, etc. of the two external carbon sources, glucose and sodium acetate, were compared. The removal efficiency and economic benefits of the two external carbon sources for pollutants were compared through jar test and integrated equipment for rural domestic wastewater. The results showed that the dissolution rate of sodium acetate was 2.3 times that of glucose, and COD_{Cr} content was 2.4 times. Under the same cost conditions, the removal rate of TN by adding sodium acetate was 96.3%, 13% higher than glucose. Under the condition of adding the same COD_{Cr} content, the denitrification rate of sodium acetate was about 1.3 times that of glucose, the TN removal rate was 87.2%, 3.2% higher than glucose. The removal rate of TP in effluent of the process flow adding sodium acetate was higher, the effect of biological enhanced phosphorus removal was better. The increase rate of sludge concentration with sodium acetate was 29% lower than glucose, the sludge volume index (SVI) value was relatively stable. The risk of sludge bulking was relatively low, sodium acetate was suitable for long-term use as an external carbon source.

Keywords rural domestic wastewater external carbon source sequencing batch reactor(SBR) anaerobic/anoxic/oxic+membrane bioreactor (AAO+MBR) pollutant removal cost analysis

反硝化是污水脱氮的重要环节,主要由反硝化菌在厌氧条件下,以亚硝酸盐或硝酸盐作为电子受

体,将污水中的有机物作为碳源充当电子供体,将含氮污染物转化为气态氮的过程,能为反硝化菌所利用的碳源主要为污水本身所含碳源以及外加碳源,当五日生化需氧量(BOD₅)/总氮(TN)>5时,无需外加碳源,当 BOD₅/TN<3 时,需另投加有

[收稿日期] 2023-03-27

[通信作者] 赵颖(1990—),女,工程师,研究方向为给排水工程, E-mail: 844952789@qq.com。

机碳源^[1]。目前城镇污水处理厂进水碳源不足是共性问题,研究全国 19 个省市及自治区 127 座污水处理厂中 80% 的污水厂进水 $BOD_5/TN < 3.6$, 存在反硝化碳源不足的情况^[2], 且随着污水排放标准不断提高, 相继出台更为严格的排放标准, 碳源不足问题更加凸显, 直接影响污水厂正常运行, 故投加外部碳源成为目前污水厂从设计到运行的普遍手段。

目前, 污水处理外加碳源的研究主要集中于城市污水, 城镇污水处理厂具有处理规模大、工艺成熟、停留时间长等特点, 且一般配套深度处理系统, 对污水污染物的去除率较高。但近年来随着国民经济的快速发展, 城镇化进程加快, 农村生活方式发生改变, 农村人均生活用水量和污水排放量增加^[3], 近年来农村污水处理愈发受到国家重视。我国农村地区生活污水是以生物处理技术为主, 且主要选取好氧工艺, 如厌氧/好氧工艺(AO)、厌氧/缺氧/好氧(AAO)工艺、膜生物反应器(MBR)、序批式活性污泥(SBR)工艺、周期循环活性污泥(CASS)工艺、生物转盘、生物接触氧化、生物滤池等工艺^[4], 四川省乡镇农村污水水质控制指标普遍采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准或一级 B 标准。由于点位分散、收集困难、水量不均等因素, 我国农村生活污水处理方式主要是活性污泥法、生物接触氧化法等为主的一体化污水处理设备^[5], 农村污水处理设施多数采用 $50 \sim 500 \text{ m}^3/\text{d}$ 的微型一体化污水处理设施, 具有投资低、安装灵活、占地面积小的特点。由于水质水量不稳定、停留时间短等因素, 农村一体化污水处理设施出水水质不稳定, 尤其是 TN 和总磷(TP)去除率低^[6]。因此, 针对农村微型一体化污水处理设施的外加碳源研究具有重大意义, 如何选择方便高效低成本的碳源对于农村生活污水处理至关重要, 目前国内鲜有此方面的研究。

目前广泛应用于污水厂的外加碳源有低分子有机物(如甲醇、乙酸、乙酸钠)和糖类物质(葡萄糖、乳糖)^[7], 由于葡萄糖和乙酸钠固体运输方便, 比较适应农村污水点位分散、距离远的特点, 同时考虑到储存安全性、运输便捷性、化学需氧量(COD_{Cr})当量、反应时间等因素, 研究的农村污水设施主要采用乙酸钠和葡萄糖 2 种碳源。

研究选取农村污水处理中 SBR 工艺和 AAO+

MBR 工艺^[8]作为研究对象, 其中 SBR 工艺属于较为落后的污水处理工艺, MBR 工艺属于目前较为先进的农村污水处理工艺。采用烧杯试验模拟 SBR 工艺流程和 AAO+MBR 微型一体化处理设施工艺流程 2 种试验方法, 重点考察固体乙酸钠和固体葡萄糖分别在 2 种工艺中对污染物去除效果和活性污泥培养的影响, 研究特点在于通过烧杯试验和生产试验 2 种方式进行对比, 通过 SBR 工艺、MBR 工艺横向对比脱氮工艺效果, 又通过投加葡萄糖、乙酸钠 2 种不同的碳源纵向对比的使用效果和成本投入。以期对低 C/N 的农村生活污水外加碳源的选择提供理论支持。

1 试验原理

研究主要涉及脱氮除磷过程。脱氮过程基于活性污泥法中的硝化菌和反硝化菌发生的氨化反应、硝化反应、反硝化反应^[9]。除磷过程基于聚磷菌的厌氧释磷过程和好氧过量吸磷过程。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料与设备

2.1.1 试验材料

乙酸钠, 无色结晶体, 化学式为 $CH_3COONa_3 \cdot H_2O$, 密度为 1.45 g/cm^3 , 熔点为 $58 \text{ }^\circ\text{C}$, $123 \text{ }^\circ\text{C}$ 时失去结晶水, 易溶于水, 呈弱碱性, 湿法制取时有醋酸味道。葡萄糖, 无色结晶体, 甜味的单糖, 化学式为 $C_6H_{12}O_6$, 密度为 1.54 g/cm^3 , 熔点为 $153 \sim 158 \text{ }^\circ\text{C}$, 易溶于水。乙酸钠和葡萄糖在污水处理中均称作碳源。碳源价格查询网站为“生意社”(http://www.100ppi.com/), 截至文章编写日期, 固体葡萄糖单价为 2 900 元/t, 固体乙酸钠单价为 2 600 元/t。

2.1.2 试验器材

磁力搅拌器 2 台、充氧泵 2 台、便携式溶氧仪 2 台、2 000 mL 烧杯 2 个、电子天平 1 台、抽滤装置 1 套、紫外可见分光光度计 1 台(UV1810, 上海佑科)、标准 COD_{Cr} 消解器 1 台(TC-100D, 北京科伟永兴)、电热鼓风干燥箱 1 台(HN101-24, 狼山)、碳源投加装置。烧杯试验装置如图 1 所示。

2.1.3 试验用污水

烧杯试验用污水取自微型一体化污水处理设施进水, 选取 BOD_5/TN 为 $2.5 \sim 3.0$ 的污水作为烧杯试验的用水, 以保证烧杯试验中, 外加碳源后反硝化反应的有效进行。生产试验中, 选取 $BOD_5/TN <$

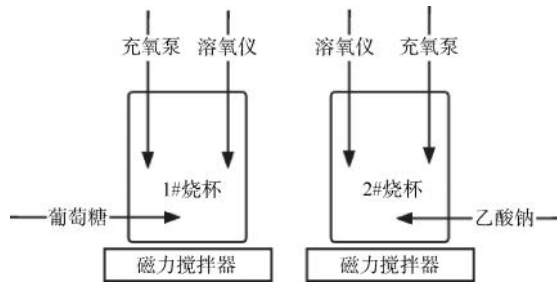


图 1 烧杯试验装置

Fig. 1 Setup of Jar Test

3.0 低碳高氮期间的进水,以保证外加碳源的水处理效果。

2.1.4 试验用活性污泥

烧杯试验用活性污泥取样自微型一体化污水处理设施曝气池,污泥质量浓度为 5 000 mg/L 左右。

2.1.5 检测项目及分析方法

本试验检测项目为 COD_{Cr} 、氨氮、TP、TN、pH、污泥容积指数(SVI),分析方法如表 1 所示。

表 1 检测项目及分析方法

Tab. 1 Test Items and Analysis Method

检测项目	方法
COD_{Cr}	《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)
氨氮	《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)
TP	《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)
TN	《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)
pH	《水质 pH 值的测定 电极法》(HJ 1147—2020)
SVI	污泥沉降比(SV_{30})/活性污泥质量浓度(MLSS)

2.2 试验方法

2.2.1 烧杯试验方法

固体乙酸钠和固体葡萄糖的单价比为 0.9,在保证投加碳源成本一致的条件下,称取固体葡萄糖 1.35 g,固体乙酸钠 1.5 g 开展试验。在 2 000 mL 烧杯中分别倒入相同体积为 1 700 mL 的活性污泥,再加入相同体积生活污水,模拟 SBR,对比出水水质指标,研究同等成本情况下污染物去除效果。烧杯试验流程如图 2 所示,流程按照时序来模拟:多点进水-厌氧-缺氧-好氧-硝化回流-沉淀,全流程停留时间约为 14 h,最后曝气阶段完成后取 100 mL 混合

液测试 SV_{30} ,静置 2 h 后,取上清液测试 5 项水质指标。烧杯试验上清液水质指标均需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,否则试验结果无效。

2.2.2 生产试验原理

固体乙酸钠和固体葡萄糖单位质量的 COD_{Cr} 和 BOD_5 比值为 2.43,按照投加碳源 COD_{Cr} 当量相同的原则,微型一体化污水处理设施 1 号线投加固体葡萄糖 25 kg/d,2 号线投加固体乙酸钠 10.3 kg/d,试验时间持续 6 d。

微型一体化设施分为 2 条工艺线(各 500 m^3/d),工艺流程为进水-厌氧池-缺氧池-好氧池-MBR 池-出水,有硝化回流和污泥回流系统,2 条线的工艺流程、进水水质水量及参数设定均一致,厌氧池溶解氧质量浓度控制在 0.2 mg/L 以下,缺氧池溶解氧质量浓度控制在 0.2~0.5 mg/L,好氧池溶解氧质量浓度控制在 2.0~4.0 mg/L,膜池溶解氧质量浓度控制在 4.0~6.0 mg/L,产水周期为产 8 min、停 2 min,产水流量设置为 11~12 m^3/h 。利用 AAO+MBR 工艺微型一体化处理设施开展生产试验,生产试验流程如图 3 所示,研究 COD_{Cr} 有效含量相同条件下污染物去除效果,分析使用成本差别。生产试验出水水质指标均需满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,否则试验结果无效。

3 数据分析

3.1 药剂分析

3.1.1 单位价格分析

如表 2 所示,单位质量的固体乙酸钠 COD_{Cr} 和 BOD_5 含量均为葡萄糖的 2.4 倍,单位价格的固体乙酸钠的 COD_{Cr} 和 BOD_5 含量均为葡萄糖的 2.7 倍,固体葡萄糖中 COD_{Cr} 含量成本为 15.59 元/kg, BOD_5 含量成本为 21.33 元/kg,固体乙酸钠 COD_{Cr} 含量成本为 5.77 元/kg, BOD_5 含量成本为 7.88 元/kg。

3.1.2 溶解速度分析

将 25 g 药剂样品倒入 250 mL 的烧杯,加入 250 mL 水温 100 $^{\circ}C$ 的沸水,固体乙酸钠 30 s 内完全溶解,固体葡萄糖 70 s 完全溶解,乙酸钠溶解速度约为葡萄糖的 2.3 倍,固体乙酸钠更易于溶解到水中,溶解速度快,具体数据如表 3 所示。

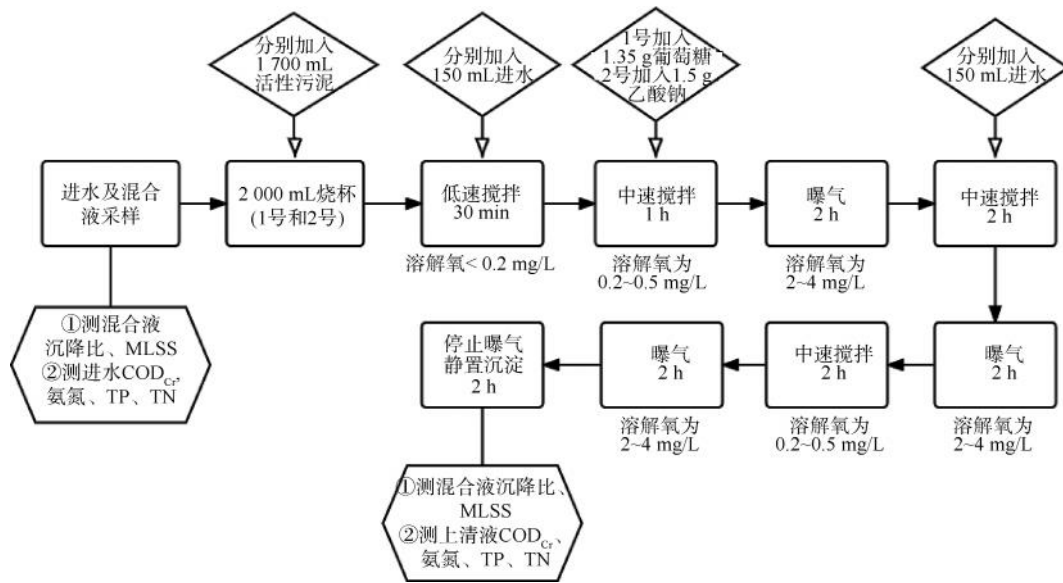


图2 烧杯试验流程

Fig. 2 Process Flow of Jar Test

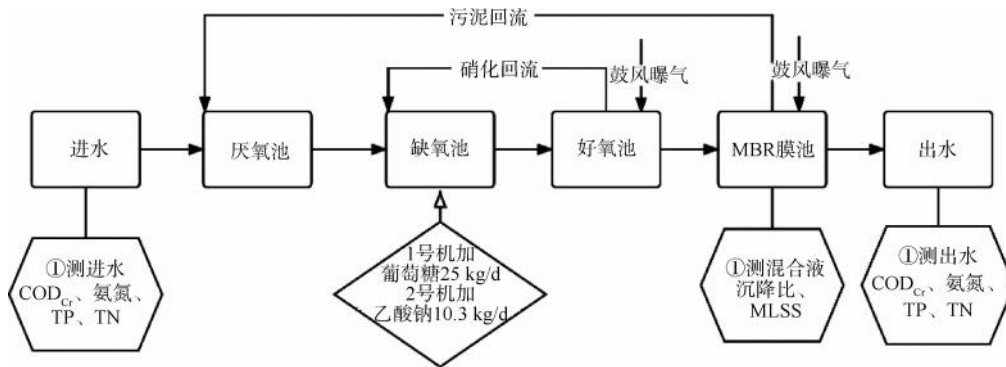


图3 生产性试验流程

Fig. 3 Process Flow of Productive Experiment

表2 价格对比

Tab. 2 Prices of Comparison

外加碳源	单价/ (元·t ⁻¹)	COD _{Cr} / (元·kg ⁻¹)	BOD ₅ / (元·kg ⁻¹)	单位质量 COD _{Cr} 比值	单位质量 BOD ₅ 比值	单位价格 COD _{Cr} 比值	单位价格 BOD ₅ 比值
固体葡萄糖	2 900	15.59	21.33	2.4	2.4	2.7	2.7
固体乙酸钠	2 600	5.77	7.88				

表3 化学分析

Tab. 3 Chemical Analysis Data

外加碳源	性状	臭味	有效质 量分数	COD _{Cr} / (mg·kg ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·kg ⁻¹)	pH 值	水不溶物 质量分数	溶解速 度/s	堆密度/ (g·mL ⁻¹)
固体葡萄糖	白色粉末	无味	90%	186 000	136 000	9.9	1%	70	1.195 7
固体乙酸钠	淡黄色晶体	醋酸味	58%	451 000	330 000	7.4	2%	30	0.814 5

3.2 烧杯试验分析

3.2.1 污染物去除效果分析

(1)对污泥浓度影响:在表4中,1#烧杯和2#烧杯 MLSS 质量浓度分别为 5 322、5 289 mg/L,SV₃₀ 分别为 58%和 55%,SVI 值均在正常范围内,投加葡萄糖的混合液污泥浓度增长稍快,由于烧杯试验流程短,没有体现明显差异,说明两者在短时间内对微生物增殖没有明显区别。

表4 活性污泥数据
Tab.4 Activated Sludge Data

项目	MLSS/(mg·L ⁻¹)	SV ₃₀	SVI/(mL·g ⁻¹)
试验前活性污泥	5 109	50%	98
1#烧杯活性污泥	5 322	58%	109
2#烧杯活性污泥	5 289	55%	104

注:1#烧杯投加固体葡萄糖,2#烧杯投加固体乙酸钠。

(2)氨氮去除情况:在表5中,投加固体乙酸钠的氨氮去除率比投加葡萄糖低 0.7%,主要因为投加乙酸钠的混合液中有机基底物质多,微生物更加活跃,生物活性更高,使得对氧气的争夺更加明显,对氧气要求较高的硝化反应受到一定抑制。故在实际生产中,可动态调整碳源投加量,避免出现此种情况。

表5 进出水水质数据
Tab.5 Data of Influent and Effluent Qualities

项目	COD _{Cr}	氨氮	TP	TN
进水/(mg·L ⁻¹)	255	42.5	6.21	45.1
1#烧杯出水/(mg·L ⁻¹)	14	0.5	0.13	7.6
1#烧杯去除率	94.5%	98.8%	97.9%	83.3%
2#烧杯出水/(mg·L ⁻¹)	28	0.8	0.14	1.67
2#烧杯去除率	89.0%	98.1%	97.7%	96.3%

注:1#烧杯投加固体葡萄糖,2#烧杯投加固体乙酸钠;表内为单次测验值。

表6 成本分析
Tab.6 Cost Analysis

外加碳源	烧杯试验 TN 去除率	实际用量/g	设计 TN 去除率	采购单价/(元·t ⁻¹)	预估使用量比值	预计使用成本比值
固体葡萄糖	83.3%	1.35	88.0%	2 900	1.04	1
固体乙酸钠	96.3%	1.50	88.0%	2 600		

注:预估使用量比值和预计使用成本比值均为葡萄糖/乙酸钠。

3.3 生产试验分析

3.3.1 污染物去除效果分析

(1)对污泥浓度的影响:如表7所示,1#工艺线

(3)TP 去除情况:如表5所示,由于2种药剂均不属于絮凝剂或混凝剂,且试验时间较短,在烧杯试验中外加碳源对 TP 去除效果区别不大。

(4)COD_{Cr} 去除情况:在表5中,在试验条件相同情况下,投加乙酸钠的混合液中,COD_{Cr} 去除率更低,混合液中剩余 COD_{Cr} 含量更高,主要由于乙酸钠单价更低,投加质量为葡萄糖的 1.1 倍,使得 COD_{Cr} 含量更高,溶解于水中的 COD_{Cr} 浓度约为葡萄糖的 2.6 倍,出水中残留有未参与反应的乙酸钠,故固体乙酸钠 COD_{Cr} 的去除率较低。

(5)TN 去除情况:如表5所示,投加乙酸钠 TN 去除效果非常明显,去除率达 96.3%,而投加葡萄糖 TN 去除率仅为 83.3%,主要因为投加乙酸钠的混合液中,有机物含量约为葡萄糖的 2.6 倍,利用效率高,异养型微生物反硝化细菌生长得到优势。李文龙等^[9]在城市污水处理厂开展的乙酸钠、乙醇、葡萄糖 3 种外加碳源的脱氮作用研究,指出乙酸钠作为碳源时对 TN 的去除率比葡萄糖高;杨碧印^[10]在外加碳源在反硝化生物滤池研究中指出乙酸钠作为碳源的脱氮效果优于葡萄糖。

(6)在模拟 SBR 中,外加碳源对氨氮、TP 的去除影响不大,对 COD_{Cr}、TN 去除影响较大。在缺氧阶段外加碳源,目的是为反硝化细菌提供充足的养分,更好地去除污水中的 TN。故在投加同样价格成本的碳源条件下,投加固体乙酸钠的 TN 去除效果更好。

3.2.2 成本分析

农村污水处理站设计 TN 去除率一般为 86%~88%,故将设计 TN 去除率设为 88.0%(表6)。如表6所示,在投加碳源成本相同的条件下,TN 去除率均为 88.0%时,预估葡萄糖使用量为乙酸钠的 1.04 倍。

曝气区的 MLSS 到第4d达到峰值为 6 785 mg/L,污泥浓度增长率为 59%;2#工艺线曝气区的 MLSS 到第2d达到峰值为 5 516 mg/L,随后逐渐平稳,污泥

表 7 活性污泥数据

Tab. 7 Activated Sludge Data

项目	时间	MLSS/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SV ₃₀	SVI/ ($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)
1#工艺线	第 1 d	4 261	46%	107.7
	第 2 d	5 392	65%	120.6
	第 3 d	5 808	76%	130.9
	第 4 d	6 785	81%	119.4
	第 5 d	5 769	65%	112.7
	第 6 d	4 751	60%	126.3
2#工艺线	第 1 d	3 864	40%	103.5
	第 2 d	5 516	69%	125.1
	第 3 d	5 025	55%	109.5
	第 4 d	4 832	58%	120.0
	第 5 d	3 921	40%	102.0
	第 6 d	4 108	48%	116.9

注:1#工艺线投加固体葡萄糖,2#工艺线投加固体乙酸钠;表内为单次测验值。

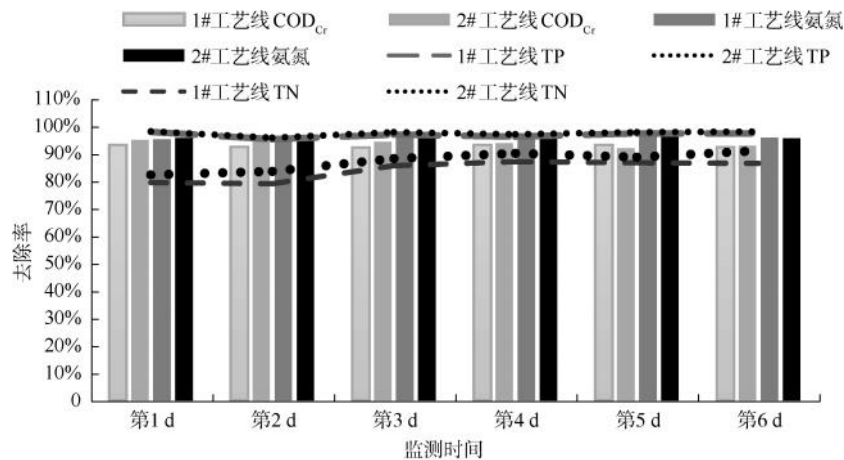
浓度增长率为 30%,说明固体葡萄糖被细菌利用速度慢,但细胞增殖多,产泥量大,而固体乙酸钠被利用速度快,但产泥量较低。1#工艺线混合液 SVI 平均为 119.6 mL/g,最高为 130.9 mL/g,持续性投加葡萄糖作为碳源会造成细菌细胞过度增长^[11],存在污泥膨胀风险^[12]。2#工艺线混合液平均 SVI 为 112.8 mL/g,SVI 较稳定且在正常范围内,说明外加碳源对活性污泥的絮体有一定助长作用,如果过多投加葡萄糖,SVI 值持续上涨,长期来看更易导致污

泥膨胀。乙酸钠分子结构为含羧基的小分子有机物,更有利于微生物降解和吸收利用^[13],因此在 COD_{Cr} 有效含量相同条件下,投加固体乙酸钠的污泥膨胀风险比较低。

(2)氨氮去除效果:如图 4 所示,进出水水质去除率可知,1#工艺线氨氮平均去除率为 96.2%,2#工艺线氨氮平均去除率为 96.1%,说明投加葡萄糖和投加乙酸钠对氨氮的去除影响较小,主要因为硝化菌为好氧自养细菌,氨氮去除效果主去除要和溶解氧有关,外加碳源对氨氮去除率影响较小。

(3)TP 去除效果:如图 4 所示,进出水水质去除率可知,1#工艺线 TP 平均去除率为 96.7%,2#工艺线 TP 平均去除率为 97.3%,投加乙酸钠的工艺出水 TP 浓度更低,去除率更高。根据相延铮^[14]的研究发现,不同碳源对生化系统中反硝化聚磷菌的筛选作用明显,投加乙酸钠的系统中含有 11.82%的聚磷菌菌属,投加葡萄糖系统的优势菌种中未检测到反硝化聚磷菌的存在。因此,外加不同的碳源对 TP 去除率存在影响。

(4)COD_{Cr} 去除效果:如图 4 所示,进出水水质去除率可知,前 3 d 时,1#工艺线 COD_{Cr} 平均去除率为 92.5%,2#工艺线 COD_{Cr} 平均去除率为 94.5%,说明乙酸钠溶解性和可利用率较高,故在碳源投加前期,投加乙酸钠的工艺线出水 COD_{Cr} 浓度低,去除率高。乙酸钠作为一种低级脂肪酸,在反应中较易被生物降解,可在短时间内用于生物强化除磷和反硝化脱氮过程,故前期乙酸钠作为碳源中出水



注:1#工艺线投加固体葡萄糖,2#工艺线投加固体乙酸钠;图内为单次测验值。

图 4 进出水水质数据

Fig. 4 Data of Influent and Effluent Qualities

COD_{Cr} 浓度低,对 COD_{Cr} 的去除率更理想^[15]。后 3 d 时,1#工艺线 COD_{Cr} 去除率缓慢上升趋于稳定,2#工艺线 COD_{Cr} 去除率缓慢下降趋于稳定,两者 COD_{Cr} 去除率比较接近(92.8%、92.7%),说明葡萄糖的利用率随着时间延长逐渐提高。在 COD_{Cr} 有效含量相同条件下,固体葡萄糖和固体乙酸钠作为长期外加碳源投加,其对 COD_{Cr} 去除率趋近一致。

(5)TN 去除效果:如图 4 所示,进出水水质去除率可知,1#工艺线 TN 去除率为 78.9%~87.0%(平均为 84.0%),2#工艺线 TN 去除率为 82.2%~91.0%(平均为 87.2%),表明投加固体乙酸钠对 TN 去除的效果更好。主要由于葡萄糖分子的结构比乙酸钠复杂,碳源代谢途径不同,投加乙酸钠对 TN 的去除率比葡萄糖高 10%^[16]。该试验表明,在投加 COD_{Cr} 有效含量相同条件下,固体乙酸钠利用效率更高,印证了固体乙酸钠作为小分子有机物,溶解更快、利用率高的特点,固体乙酸钠不仅可作为外加碳源长期投加,也可作为应急碳源投加,短时间内可降低 TN,在污水处理厂站应急处置中效果显著。

(6)反硝化速率:如图 4 所示,进出水水质去除

率可知,1#工艺线 TN 去除率在第 4 d 达到 87.0%,2#工艺线 TN 去除率在第 3 d 就达到 88.1%,故投加乙酸钠的反硝化速率更快,按照天数模糊计算其速率约为葡萄糖的 1.3 倍。胡小宇等^[16]考察了乙酸钠、乙醇、葡萄糖等外加碳源的脱氮效果,结果发现,乙酸钠作为外加碳源时,反硝化速率为 6.9 mg/(g·h),以葡萄糖作为碳源时,反硝化速率仅为 4.3 mg/(g·h)。经过一定的反应时间后,投加乙酸钠对 NO₃⁻-N 的去除率达 100%,投加葡萄糖对 NO₃⁻-N 去除率仅为 64.8%,故在外加单一碳源系统中,以外加乙酸钠系统对 NO₃⁻-N 的去除效果最佳。因此,在 COD_{Cr} 有效含量相同条件下,固体乙酸钠的反硝化速率快于葡萄糖。

3.3.2 成本分析

农村污水处理站设计 TN 去除率一般为 86%~88%,故将设计 TN 去除率设为 88.0%。在 TN 去除率相同的情况下,且在投加碳源的 COD_{Cr} 当量相同的条件下,葡萄糖预估使用量为乙酸钠的 2.52 倍,预计使用成本为乙酸钠的 2.81 倍,如表 8 所示。在对 TN 去除率相同情况下,固体乙酸钠的使用成本为葡萄糖的 35.6%,固体乙酸钠成本优势显著。

表 8 成本分析

Tab. 8 Cost Analysis

项目	生产试验 TN 去除率	实际用量/kg	设计 TN 去除率	采购单价/(元·t ⁻¹)	预估使用量比值	预计使用成本比值
固体葡萄糖	84.0%	25	88.0%	2 900	2.52	2.81
固体乙酸钠	87.2%	10.3	88.0%	2 600		

注:预估使用量比值和预计使用成本比值均为葡萄糖/乙酸钠。

4 结论

4.1 烧杯试验结论

通过烧杯试验,验证在 SBR 中,投加碳源成本相同条件下,固体乙酸钠的对 TN 的去除率为 96.3%,比投加葡萄糖高 13%,固体乙酸钠作为外加碳源对反硝化促进效果明显,对 TN 的去除效果显著。2 种碳源短时间投加时,对氨氮和 TP 的去除效果差别较小。

4.2 生产试验结论

通过生产试验,投加葡萄糖前期污泥浓度增长率是投加乙酸钠的 2 倍,SVI 值上涨速度快且最高达 130.9 mL/g,生产试验中可以体现短期投加固体葡萄糖对混合液 SVI 值影响更大,SVI 增速高,有发生污泥膨胀的风险。可能因为葡萄糖更易被活性污

泥中细菌合成细胞,细胞产率高,需求量更大,而乙酸钠的细胞产率低,SVI 比较平稳,有机物利用率高,故固体乙酸钠建议更适合作为长期外加碳源使用。

在 COD_{Cr} 有效含量相同条件下,固体乙酸钠对 TN 的去除率为 87.2%,比投加葡萄糖高 3.2%,反硝化速率速率约为葡萄糖的 1.3 倍,固体乙酸钠对 TN 去除效果更好,可能因为固体乙酸钠有机物成分更容易被活性污泥中的微生物吸收和利用。

4.3 价格比对分析

单位重量的固体乙酸钠的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 含量均为葡萄糖的 2.43 倍,单位价格的固体乙酸钠的 COD_{Cr} 和 BOD₅ 含量均为葡萄糖的 2.70 倍,乙酸钠药剂纯度和有效含量条件更优。在生产性试验中,

在 TN 去除率相同情况下,固体乙酸钠的使用成本仅为固体葡萄糖的 35.6%,固体乙酸钠使用成本优势显著,经济效益更佳。

参考文献

- [1] 张自杰,林荣忱,金儒霖.排水工程(下册)[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2014.
ZHANG Z J, LIN R C, JIN R L. Drainage works (volume II) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等.全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J].给水排水,2018,54(6):12-15.
GUO H L, LI X W, REN Q Y, et al. Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(6): 12-15.
- [3] 龙世平.乡镇生活污水处理现状分析与发展对策——以渝东北地区为例[J].安徽农业科学,2020,48(11):82-84.
LONG S P. Analysis of current situation of township domestic sewage treatment and development countermeasures—Taking northeast Chongqing as an example [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(11): 82-84.
- [4] 李菊,胡颖铭,彭子宸,等.四川省农村地区生活污水处理现状调研分析[J].四川环境,2020,39(5):164-169.
LI J, HU Y M, PENG Z C, et al. Investigation and research of the current situation of rural domestic sewage treatment in Sichuan Province[J]. Sichuan Environment, 2020, 39(5): 164-169.
- [5] 张婷,王孟珍,曹仲.农村一体化生活污水处理设备应用现状与发展趋势[J].净水技术,2021,40(s1):107-111.
ZHANG T, WANG M Z, CAO Z. Application status and development trend of integrated domestic sewage treatment equipment in rural areas[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 107-111.
- [6] 谢林花,吴德礼,张亚雷.中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J].生态与农村环境学报,2018,34(10):865-870.
XIE L H, WU D L, ZHANG Y L. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(10): 865-870.
- [7] 熊子康,郑怀礼,尚娟芳,等.污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J].土木与环境工程学报,2021,43(2):168-181.
XIONG Z K, ZHENG H L, SHANG J F, et al. State of the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 168-181.
- [8] 李昀婷,石玉敏,王俭.农村生活污水一体化处理技术研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(3):499-506.
LI Y T, SHI Y M, WANG J. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 499-506.
- [9] 李文龙,杨碧印,陈益清,等.不同外加碳源反硝化滤池的深度脱氮特性研究[J].水处理技术,2015,41(11):82-85.
LI W L, YANG B Y, CHEN Y Q, et al. Study on the characteristics of deep nitrogen removal by denitrification filters with different carbon sources [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(11): 82-85.
- [10] 杨碧印.不同外加碳源反硝化生物滤池的深度脱氮研究[D].长沙:湖南大学,2015.
YANG B Y. Study on denitrification biological filter depth processing with different external carbon source[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [11] 张怡芳.固液体碳源对反硝化生物滤池的影响及微生物特性[D].重庆:重庆大学,2019.
ZHANG Y F. The denitrification influence and microbial characteristics of solid/liquid carbon source in denitrification biofilter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [12] 贺雪濛.乙酸钠为单一碳源条件下的膨胀污泥性能及调控研究[D].南京:南京大学,2018.
HE X M. Performance and control of bulking sludge using sodium acetate as the single carbon source [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [13] 王鸿远.膜生物反应器处理农村生活污水效果研究[D].北京:中国农业科学院,2021.
WANG H Y. Study on treatment effect of rural domestic wastewater of membrane bio-reactor [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [14] 相延铮.四种碳源对生物除磷颗粒污泥除磷效能影响研究[D].扬州:扬州大学,2023.
XIANG Y Z. effect of four carbon sources on phosphorus removal efficiency of biological phosphorus removal granular sludge[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [15] 胡小宇,朱静平.3种单一及其混合碳源的生物反硝化脱氮效能[J].水处理技术,2020,46(1):57-61.
HU X Y, ZHU J P. Biological denitrification efficiency of three single and mixed carbon sources [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(1): 57-61.
- [16] 王逸飞.基于污水处理厂总氮提标的工艺运行优化及碳源投加技术[D].重庆:重庆大学,2019.
WANG Y F. Operation management optimization technologies and carbon source dosing technology based on total nitrogen improvement in wastewater treatment plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.