

供排水企业运行及管理成果专栏

乐磊,刘康禾,熊雪芹,等.一种新型复合碳源的脱氮效能及工程应用[J].净水技术,2024,43(9):182-187,194.

YUE L, LIU K H, XIONG X Q, et al. Nitrogen removal efficiency and engineering application of a new composite carbon source [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 182-187,194.

一种新型复合碳源的脱氮效能及工程应用

乐磊¹,刘康禾²,熊雪芹²,曹阳^{1,*},黄币娟³,王珏²,王攀²,陈敏¹

(1.四川发展国润水务投资有限公司,四川成都 610041;2.遂宁国润排水有限公司,四川遂宁 629000;3.成都理工大学生态环境学院,四川成都 610059)

摘要 碳源不足是污水处理厂普遍存在的问题,低成本高效碳源对提升污水脱氮效能以及降低污水处理成本至关重要。文章对一种新型乙二醇复合碳源(EGC)在污水反硝化脱氮进行了实验室小试和实际工程应用研究。结果表明:EGC反硝化速率与乙酸钠相当,能促进反硝化的彻底进行。在污水处理厂实际应用中,EGC的使用能够保持出水总氮(TN)和化学需氧量(COD_{Cr})的稳定达标排放,使用过程中污泥松散附着的胞外聚合物(EPS)由碳源替换前的23.14 mg/(g SS)降低至9.16 mg/(g SS),污泥容积指数(SVI)从121 mL/g下降至71 mL/g。相关性研究表明L-EPS含量与SVI变化呈正相关关系,相关性曲线为 $y=2.72x+63.51$ ($R^2=0.689$),表明长期使用EGC不会导致污泥沉降性能降低和诱发污泥膨胀等问题。EGC的实际使用成本平均仅为0.04元/m³,较葡萄糖降低86.2%,污泥平均产率仅为0.70 g/g,较替换前降低17.6%,表现出优异的经济适用性,具有良好的大规模应用前景。

关键词 复合碳源 反硝化 乙二醇 工程应用 经济适用性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2024)09-0182-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.09.023

Nitrogen Removal Efficiency and Engineering Application of a New Composite Carbon Source

YUE Lei¹, LIU Kanghe², XIONG Xueqin², CAO Yang^{1,*}, HUANG Bijuan³, WANG Jue², WANG Pan², CHEN Min¹

(1. Guorun Water Investment Co., Ltd., of Sichuan Development, Chengdu 610041, China;

2. Suining Guorun Drainage Co., Ltd., Suining 629000, China;

3. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract Insufficient of carbon sources is a common problem in wastewater treatment plants(WWTPs). Low-cost and efficient carbon sources are essential for improving effluent nitrogen removal efficacy as well as reducing wastewater treatment costs. This paper has investigated the waste water denitrification efficiency and economy of a new type of ethylene glycol composite carbon source (EGC) through laboratory trial and practical engineering application. The results show that the denitrification rate of EGC is comparable to that of sodium acetate and it can promote complete denitrification. In the practical application of WWTP EGC can maintain the effluent of total nitrogen (TN) and chemical oxygen demand (COD_{Cr}) stable discharge. The sludge L-EPS decreased from 23.14 mg/(g SS) before carbon source replacement to 9.16 mg/(g SS) after replacing with EGC, and the sludge volume index (SVI) decreased from 121 mL/g to 71 mL/g. The correlation study shows a positive correlation between the L-EPS content and the change of SVI with a correlation curve of $y=2.72x+63.51$ ($R^2=0.689$), which indicates that the long-term use of the EGC carbon source does not lead to the reduction of sludge settling performance or induce sludge swelling and other Problems. Furthermore, the average cost of using the

[收稿日期] 2023-07-10

[基金项目] 四川省重点研发项目(2018sz0311)

[作者简介] 乐磊(1982—),男,研究方向为环境工程,E-mail:188951407@qq.com。

[通信作者] 曹阳(1997—),女,硕士,研究方向为污水处理与资源化利用,E-mail:13688368046@163.com。

EGC carbon source is only 0.04 yuan/m³, 86.2% lower than that of glucose, and the average sludge yield is only 0.70 g/g, 17.6% lower than before replacement, showing excellent economic applicability and promising prospects for large-scale application.

Keywords composite carbon source denitrification ethylene glycol engineering application economical applicability

生物反硝化是去除废水中硝酸盐的可靠且经济可行的技术,反硝化微生物多为异养型细菌。然而,我国城市污水进水碳氮比(C/N)普遍较低,80%的污水处理厂C/N<3.6,仅有10%污水厂C/N>4^[1]。因此,工程上常常需要额外添加碳源,以促进反硝化脱氮过程,抑制废水中硝酸盐氮的积累,实现废水TN的去除,外部投加碳源的选择常需要考虑化学成本、反硝化速率、污泥产量和化学品储存安全性等要素^[2]。目前常用的碳源主要有甲醇、乙醇、乙酸和乙酸盐、葡萄糖等,它们具有结构简单、易于微生物利用等特点,但存在经济性效益低、安全性能差、适用范围小和去除效率不稳定等方面的缺陷^[3]。

为了提升碳源经济性和脱氮过程的促进效能,对于复合碳源的研究逐渐成为热点。如张民权等^[4]研制出COD_{Cr}高达100万mg/L的复合碳源,可显著降低碳源使用量,但碳源稳定性较差,容易分解;周玮^[5]研究复合碳源对渗滤液脱氮作用,相比于乙酸钠,反应速率更快,但使用成本较高;相对于以上复合碳源,袁芳等^[6]利用乙醇副产物作为反硝化碳源,反硝化脱氮效果与乙酸钠相当,且有助于提升微生物种群丰富度;丁晓萍等^[7]利用甘油生物质废弃物衍生物制备的复合碳源,能有效降低TN含量,处理成本较乙酸钠大幅降低,还可促进反硝化菌的大量繁殖;蒋铭明等^[8]研究甲醇复合碳源对不锈钢酸洗废水中硝酸盐去除性能,结果表明可试下TN的稳定去除,同时可改善污泥的性状,降低碳源投加量,相比于传统复合碳源,醇类复合碳源可改善醇类单独使用导致的安全风险,更好利用其分子量小、COD_{Cr}当量高等特性强化微生物脱氮。

乙二醇是最简单多元醇,在实际应用过程中,碳源的选择指标主要有COD_{Cr}当量、产泥系数、适用范围等。本文所选用的以乙二醇为主要成分的复合碳源(EGC)纯度可达95%以上,远高于乙酸钠30%~40%的纯度,换算乙二醇的COD_{Cr}当量可达116万mg/kg,远高于乙酸钠的30万~40万mg/kg(根据乙酸钠浓度换算)以及葡萄糖的100万mg/kg,碳源的分子量小,使用成本低,是一种高效的反硝化碳源。目前关于乙二醇作为碳源,其强化

脱氮过程在实际应用的相关研究还比较少见,作用机理也尚不明确。因此,本文拟以EGC为反硝化过程中的基础外部碳源,从其脱氮效能、脱氮机理以及经济适用性等多渠道探究了EGC在污水处理中应用的可行性,以期填补研究空白,为外部碳源的选择提供参考,并为外部碳源的应用提供理论支撑和技术支持。

1 材料与amp;方法

1.1 EGC主要成分及特性

EGC是一种液体碳源,其主要组成是质量分数约为90%乙二醇、0.5%碳酸氢镁、其余为水,不含氯离子。EGC密度约为1.07 g/cm³,成分简单,其主要成分乙二醇作为最简单的二元醇,根据乙二醇安全技术说明书,乙二醇可以任意比例与水互溶,生物毒性和生态毒性低,沸点为118℃,凝固点较低,使用方便、无爆炸危险,使用安全性能较高。碳源中碳酸氢镁的加入,可以调节平衡反应体系的碱度,还可以增加污泥的絮凝性^[9],有助于提升微生物脱氮除磷的效率。EGC不引入钠离子,该碳源可以有效降低体系出水的盐度,有利于出水在环境中更好的纳纳。

1.2 试验装置及试验方法

小试试验对比分析了乙酸钠、葡萄糖和EGC的反硝化速率,以验证EGC在脱氮方面的高效性能。小试反应器有效容积为4.5 L,活性污泥来自某污水处理厂,污泥质量浓度(MLSS)约为4 000 mg/L,MLVSS/MLSS为0.57~0.73,试验前缓慢搅拌释氧,使得污泥DO质量浓度<0.5 mg/L,然后将模拟废水置入反应器内,分别在30、60、120、180、240 min和300 min取样,测定硝酸盐氮(NO₃⁻-N)浓度变化。试验系统进水为模拟废水,主要成分是KNO₃,质量浓度为60 mg/L,碳源投加量保证C/N为6,整个反应阶段控制温度约为25℃。

1.3 EGC工程应用

以四川省川北某生活污水处理厂为例,探究了EGC在实际污水处理中的效果。该厂采用AAO氧化沟工艺处理污水,工艺流程如图1所示,设计处理规模为2×10⁴ m³/d,设计出水水质为《城镇污水处理厂污染物排放》(GB 18918—2002)一

级 A 标准, 厂站常年进水平均 COD_{Cr} 为 110.36 mg/L, TN 为 50.34 mg/L, C/N 约为 2.73, 碳源严重不足, 需补充碳源以强化 TN 去除过程。该污水处理厂使用葡萄糖作为反硝化碳源, 出水 TN 存在超标情况, 为了提升生化系统的脱氮性能, 于 5 月—12 月使用 EGC 完全替代葡萄糖, 碳源投加点

位不变, EGC 投加量根据实际进水 COD_{Cr} 和出水 TN 浓度实时进行调整。每日监测厂站进出水 COD_{Cr} 、TN、30 min 的沉降比 (SV_{30})、MLSS, 计算污染物去除效率、污泥容积指数 (SVI) 和产泥系数, 每月取样测定污泥胞外聚合物 (EPS) 含量, 以评价碳源对污泥性能的影响。

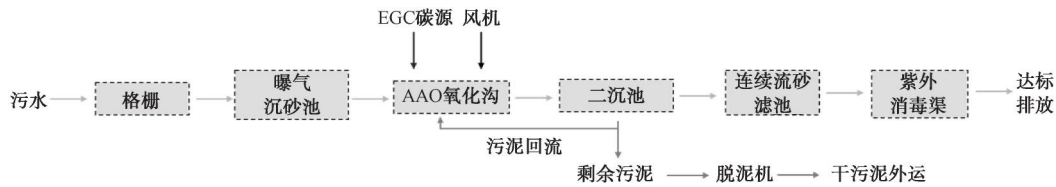


图 1 污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of WWTTP

1.4 分析项目与检测方法

试验每次取样量为 50 mL, 采用 0.45 μm 滤膜过滤后进行检测。 NO_3^- -N 采用氨基磺酸紫外分光光度法测定, TN 浓度采用《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) 进行测定, COD_{Cr} 含量采用《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017) 测定; 污泥 SV_{30} 、MLSS 采用《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005) 测定; 每月采集污泥样品, 参照王先宝等^[10] 的方法提取活性污泥 EPS, 并检测蛋白质 (PN) 和多糖 (PS) 浓度, 其中 PN 采用考马斯亮蓝法 (Bradford 法) 测定, PS 采用苯酚-硫酸法测定, 以各层 PN 和 PS 的之和作为污泥各层 EPS 的总量。

2 结果与讨论

2.1 不同碳源反硝化性能评估

城市废水中无机氮磷的排放是导致河流湖泊水

体富营养化的主要原因^[11], 实际污水处理过程中通过曝气调节、微生物浓度调节后出水氨氮质量浓度常常低于 0.1 mg/L, 出水中的 TN 主要来源于 NO_3^- -N 的积累, 因此, NO_3^- -N 的去除效果直接影响出水 TN 指标是否达标。

图 2 为不同碳源的反硝化效能和反硝化速率。由图 2(a) 可知, 在 C/N 为 6 的条件下, 经过 300 min 的反应时间, 葡萄糖、乙酸钠和 EGC 组的 NO_3^- -N 分别降至 23.7、2.9 mg/L 和 1.1 mg/L, 对硝酸盐的去除率分别为 60.4%、95.2% 和 98.2%, 表明乙酸钠和 EGC 的反硝化效果优于葡萄糖。结合图 2(b), 在 0~120 min, 乙酸钠碳源的反硝化速率平均为 0.37 mg NO_3^- -N/(L·min), 高于 EGC 的 0.32 mg NO_3^- -N/(L·min), 而在后期 120 min 后, 乙酸钠碳源的反硝化速率平均为 0.07 mg NO_3^- -N/(L·min), 略低于 EGC 的 0.11 mg NO_3^- -N/(L·min)。在反应初期,

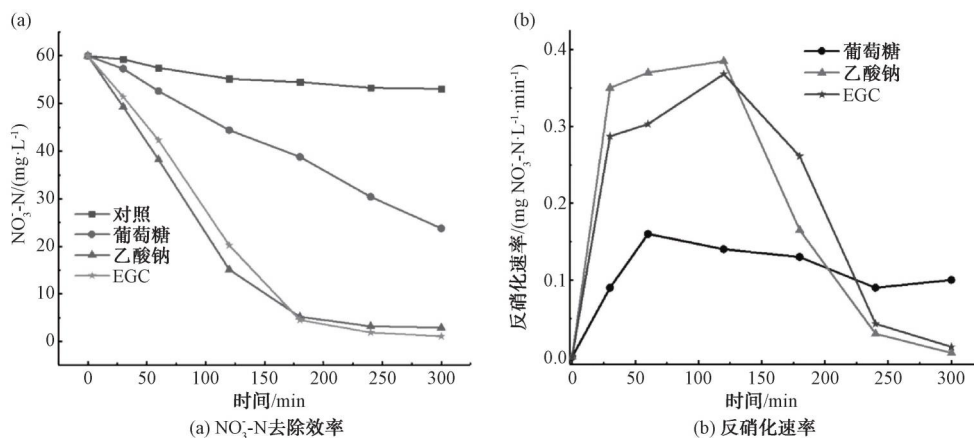


图 2 不同碳源的反硝化效能对比

Fig. 2 Comparison of Denitrification Efficiency of Different Carbon Sources

EGC 对微生物反硝化的促进作用略低于乙酸钠,但随着底物浓度的不断降低,EGC 在低浓度下反硝化速率更高,NO₃-N 去除更彻底。

2.2 EGC 的工程应用效能分析

在实验室小试基础上,探究 EGC 作为外加碳源在工程应用的脱氮效果。在 3 月—12 月的试验周期内,水温随季节不断变化,碳源替换前,水温平均值为 21.0 ℃,替换后的 6 月—8 月水温较高,但在 10 月—12 月,水温平均值仅为 19.4 ℃,表明所得试验结果可排除由于温度变化导致污泥活性变化引起的反硝化速率的增长。

图 3 为污水处理厂 300 d 的运行数据。图 3(a) 为碳源替换前后进出水 TN 随时间变化,使用 EGC

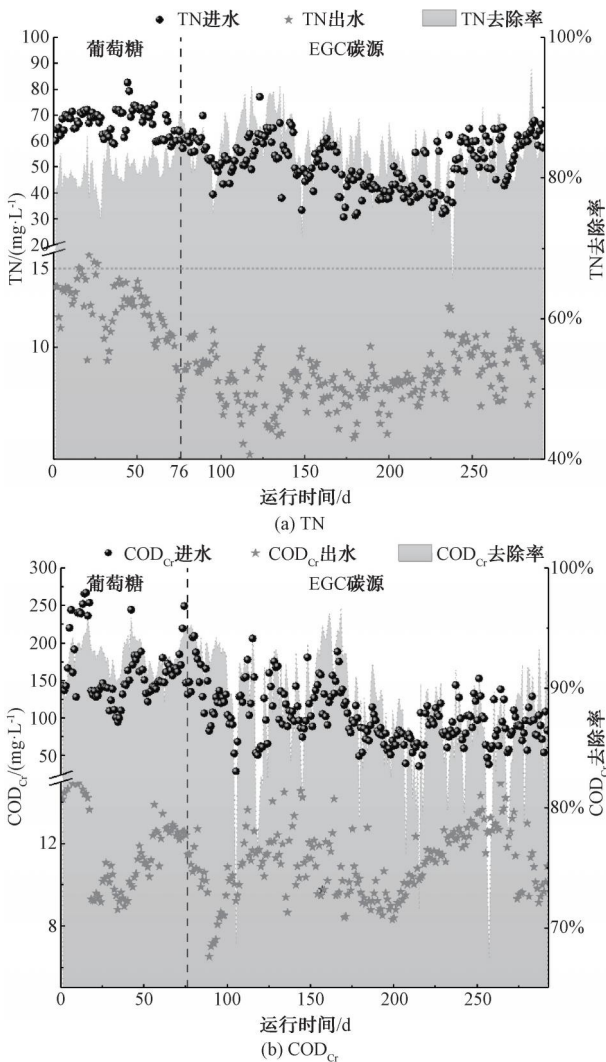


图 3 EGC 替换前后污水处理厂指标变化
 Fig. 3 Indices Changes of WWTP before and after EGC Replacement

碳源之前,该厂使用常规的葡萄糖作为碳源,在进水 TN 平均质量浓度为 67.62 mg/L 条件下,出水的 TN 平均值为 12.53 mg/L, TN 平均去除率为 81.22%,该结果较常规葡萄糖脱氮结果偏高^[12],主要是冬季 TN 进水浓度高,为了使出水浓度达标,污水厂会加大碳源投加量以及增加缺氧水力停留时间的缘故。试验第 76 d,使用 EGC 完全替换葡萄糖碳源,出水 TN 浓度较替换之前明显下降并逐渐趋于稳定。在长达 220 d 的试验过程中,出水 TN 平均质量浓度仅为 9.11 mg/L,平均去除率为 84.07%。该结果低于小试的试验值,主要是季节变化导致进水 TN 平均质量浓度降低至 51.63 mg/L,以及气温上升、微生物活性增加、污水厂减少反硝化停留时间所致。图 3(b)为碳源替换前后污水厂进出水 COD_{Cr} 浓度变化,整个试验阶段污水处理厂进水平均 C/N 仅为 2.15,碳源严重不足,需要使用外加碳源以提升系统脱氮效能。试验 1~76 d 使用葡萄糖作为外加碳源,出水 COD_{Cr} 平均值分别为 16.63 mg/L, COD_{Cr} 去除率为 89.89%,换成 EGC 后,出水 COD_{Cr} 平均值降至 11.07 mg/L, COD_{Cr} 去除率为 89.3%。替换前后出水 COD_{Cr} 浓度均稳定达到一级 A 标准。

EGC 工程应用结果表明,EGC 作为外加碳源,具有稳定优良的脱氮效能,能够保证系统 TN、COD_{Cr} 出水稳定达标,是一种高效的外加碳源。

2.3 生化系统污泥性能

污泥膨胀会导致二沉池固液分离困难、出水水质恶化等现象,是活性污泥生物处理系统常见运行难题。目前已有大量的文献证明投加乙酸钠、葡萄糖、蛋白胨、尿素、腐植酸、乳酸钠等碳源均会不同程度地诱发污泥膨胀^[13]。为了探究 EGC 的添加是否会引发活性污泥膨胀,对 SVI 进行了测定。由图 4 可知,使用 EGC 之前,生化池污泥 SVI 平均值为 121 mL/g,污泥沉降性能较差,使用 EGC 之后,SVI 值逐渐减小,至第 200 d 污泥 SVI 值降低为 71 mL/g,而后 SVI 值保持在 60~100 mL/g。试验前期,污泥 SVI 值得下降可能归结于水温升高微生物活性增强导致的菌胶团生长引起,但 200 d 后随着水温不断降低,体系的 SVI 值始终低于 EGC 替换前,表明 EGC 具有改善污泥沉降性能的作用,长期使用 EGC 的生化池不会出现污泥膨胀现象。

研究^[14-15]表明,微生物 EPS(胞外聚合物)对污泥沉降性能有显著的影响。为了探究 EGC 对污泥

SVI影响的机理,每月对污泥EPS进行了测量。结果如图4所示,污泥松散结合EPS(L-EPS)含量整体呈现降低趋势,从试验开始的23.14 mg/(g SS)降低至300 d后的9.16 mg/(g SS),紧密黏附EPS(T-EPS)则呈现波动状态,无明显变化趋势。SVI与EPS含量变化相关性分析表明,L-EPS含量与SVI变化呈正相关关系,相关性曲线为 $y = 2.72x + 63.51 (R^2 = 0.689)$,而T-EPS与污泥SVI变化无显著相关关系。原因可能是L-EPS具有官能团如羟基、羧基和磷酸盐使得絮凝体表面整体带负电荷,具有疏松结构和流变特性。根据DLVO理论^[16],L-EPS的减少会降低基团间的静电斥力,从而增加污泥的沉降性能,而带正电荷的离子的加入可通过压缩双电层、离子架桥等方式提高污泥沉降性能,因此,EGC碳源中镁离子的加入有利于进一步降低Zeta电位,提高污泥絮凝性能。

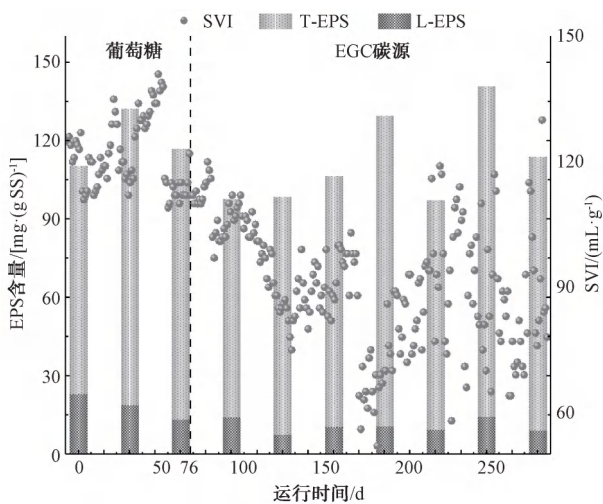


图4 污泥SVI及EPS随时间变化

Fig. 4 Variation of Sludge SVI and EPS with Time

EGC主要成分乙二醇等脂溶性物质通过自由扩散方式进入细胞,经过多次氧化最终转化为乙酰辅酶A,而后进入三羧酸循环(TCA),微生物通过TCA产生电子并将它们转移到NADH(还原型辅酶I)、FADH₂(还原型辅酶Q),并通过电子转移的无氧呼吸过程系统实现硝酸盐还原和转化为其他氮氧化物,最终转化为氮气^[17]。反硝化脱氮过程主要涉及4种酶,即NaR(膜结合硝酸盐还原酶)、NaP(周质硝酸盐还原酶)亚硝酸盐还原酶(NiR)、一氧化氮还原酶(NoR)、一氧化二氮还原酶(N₂oR)。NAR在高水平硝酸盐的厌氧条件下上调表达,NAP在较低

硝酸盐浓度的周质中起作用,硝酸盐还原酶合成受O₂的限制^[18]。研究^[19]表明,醇的加入使得细胞具有更强的自适性,创造细胞内的缺氧环境以诱导代谢调节。亚硝酸盐快速转化为NO,随后转化为N₂O是反硝化过程中的重要步骤,亚硝酸盐和NO可能会积聚到对生物体有毒的水平,而当有机负荷相对较低时(C/N≤2.5),NoR活性因无法获得足够的电子而受到抑制,从而产生N₂O,因此,适当投加碳源可大幅减少N₂O得产生,提高反硝化菌活性。此外,低pH也是导致反硝化中N₂O积累的重要原因,维持稳定的碱度也有利于加快碳氧化速率,减小不同氮氧化酶之间的竞争^[20]。综上,EGC可通过诱导微生物细胞内缺氧环境的形成和提升碳氧化速率,减少N₂O的产生和累积等微观机制,从而实现高效脱氮。

3 经济运行指标分析

对试验期间污水厂碳源药剂单耗及产泥系数进行分析,以了解EGC在降本增效的成效。由图5可知,在使用EGC碳源之前,污水厂葡萄糖碳源使用平均成本为0.29元/m³,最高值达到0.44元/m³,完全替换为EGC之后,碳源的使用成本平均仅为0.04元/m³,在保证TN出水浓度长期稳定条件下,碳源成本下降了约86.2%。按照试验污水处理厂现状处理能力计算,仅碳源使用费用一项,一年可节约成本约40万元(仅计算11月一次年4月碳源大规模使用阶段的碳源成本),具有显著的降本增效效果。

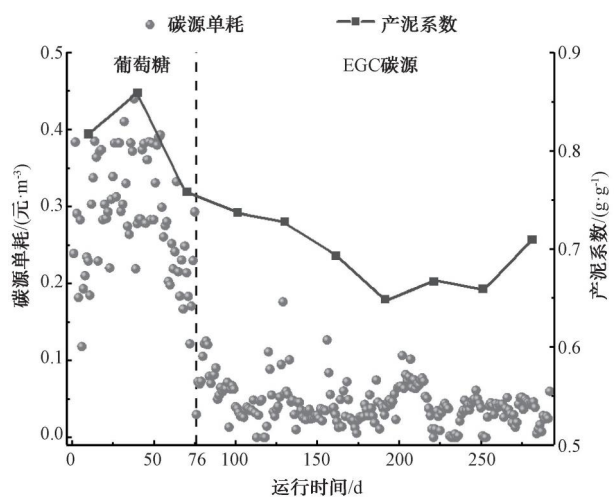


图5 污水厂碳源药剂单耗及产泥系数

Fig. 5 Unit Consumption of Carbon Source Chemicals and Sludge Production Factor in WWTPs

除了碳源直接使用成本外,污泥产率与污泥处置成本密切相关,也是污水厂碳源重点关注的经济指标。为此在试验过程中,对污水处理厂污泥产率(Y_{COD})进行了计算。如图5所示,试验1~76 d,葡萄糖碳源的平均污泥产率为0.85 g/g,替换成EGC后(第76 d),污泥平均产率降至0.70 g/g,较替换前下降约17.6%,但该试验结果大于相关文献报道的乙醇、乙酸钠的0.42、0.65 g/g^[21],主要是在实际生产过程中,进水中携带有大量泥沙导致污泥产量增加。试验第200~300 d,污泥产率从0.64 g/g缓慢上升至0.71 g/g,主要原因是季节变化水温升高导致微生物生长速率提升,但该阶段污泥产率始终小于替换前,表明EGC具有降低和维持较低污泥产率的特点。

4 结论

(1)EGC成分简单,不含重金属,不引入含盐离子,避免使用时产生二次污染,具有环境友好的特性。通过诱导微生物细胞内缺氧环境的形成和碳氧化速率,EGC碳源在促进反硝化脱氮方面与乙酸钠有同等优异的效能,能够维持出水TN、 COD_{Cr} 的稳定达标排放。

(2)替换为EGC后,污水厂污泥的EPS中L-EPS从23.14 mg/(g SS)降低至9.16 mg/(g SS),污泥的沉降性能逐渐增强,SVI值保持在60~100 mL/g,表明长期使用EGC不会诱发污泥膨胀等问题。

(3)EGC中 COD_{Cr} 当量高达116万 mg/kg,适用于进水有机物浓度较低,TN去除效率不佳的各类污水处理厂,药剂使用成本低,污泥产率低,降本增效成果显著,具有广泛的适用性和推广价值。

参考文献

[1] 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, 44(6): 12-15.
GUO H L, LI X W, REN Q Y, et al. Analysis of influent water quality characteristics of typical urban sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 12-15.

[2] CAO S B, WANG L, YAN W W, et al. Primary sludge as solid carbon source for biological denitrification; System optimization at micro-level[J]. Environmental Research, 2020, 191: 110160. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110160.

[3] 赵文莉,郝瑞霞,王润东,等. 复合碳源填料反硝化脱氮及微生物群落特性[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3003-3009.

ZHAO W L, HAO R X, WANG R Z, et al. Denitrification of composite carbon filler and character of microbial community[J]. China Environmental Science, 2015, 35(10): 3003-3009.

[4] 张民权,刘永,范杰,等. 新型高效复合碳源的制备及其在反硝化脱氮中的应用[J]. 给水排水, 2019, 55(s1): 153-155, 158.
ZHANG M Q, LIU Y, FAN J, et al. Preparation of new high-efficiency composite carbon source and its application in denitrification and denitrification and denitrification[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(s1): 153-155, 158.

[5] 周玮. 复合碳源在填埋场渗滤液中脱氮实验研究[J]. 广州化工, 2023, 51(8): 166-169.
ZHOU W. Experimental study on nitrogen removal of composite carbon source in landfill leachate [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(8): 166-169.

[6] 袁芳,郭盛楠,蒲一凡,等. 黄水作为补充碳源的反硝化效果研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(4): 516-520.
YUAN F, GUO S N, PU Y F, et al. Study on denitrification effect of yellow water as supplementary carbon source [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2023, 45(4): 516-520.

[7] 丁晓萍,丁海兵,宁守俭. 一种新型高能碳源的污水处理效能研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 216-220.
DING X P, DING H B, NING S J. Wastewater treatment efficiency of a new type of high-energy carbon source [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 216-220.

[8] 蒋铭明,袁丁,何梓灏,等. 新型复合碳源去除不锈钢酸洗废水中硝酸盐的研究[J]. 广东化工, 2023, 50(20): 109-111, 87.
DING M M, YUAN D, HE Z H, et al. Experimental study on removal of nitrate-nitrogen from stainless steel pickling wastewater with novel composite carbon source [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(20): 109-111, 87.

[9] 张兰河,张宇,王旭明,等. Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 对SBR运行效果和活性污泥性能的影响[J]. 化学工程, 2014, 42(8): 1-5.
ZHANG L H, ZHANG Y, WANG X M. Effects of Ca^{2+} and Mg^{2+} on SBR operation effect and activated sludge performance [J]. Chemical Engineering, 2014, 42(8): 1-5.

[10] 王先宝,冉家荣,陈甜甜,等. 不同方法提取活性污泥的胞外聚合物氧化还原特性分析[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(4): 8-14.
WANG X B, RAN J R, CHEN T T, et al. Analysis of redox characterization of activated sludge extracellular polymeric substances extracted by different methods [J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2023, 41(4): 8-14.

[11] LI Y, NI J, LIU F, et al. Bibliometric analysis of research trends related to carbon sources for nitrogen removal in wastewater treatment [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2023, 234: 112. DOI: 10.1007/s11270-023-06137-7.

(下转第194页)

- 用的长期运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 53(12): 48-52.
- HE J L, HU X F, ZHANG X N, et al. Effects of long-term direct reuse of filter backwashing water in water treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(12): 48-52.
- [5] 陈停, 崔福义, 徐叶琴, 等. 净水厂生产废水回用强化混凝处理低浊水及安全性[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 21-25.
- CHEN T, CUI F Y, XU Y Q, et al. Drinking water treatment plant streams recycle for strengthening coagulation efficiency of low turbidity water and its water quality safety evaluation [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5): 21-25.
- [6] 郑心愿, 华英豪. 磁加载多效澄清技术在城市黑臭水体治理和城市生活污水处理中的应用案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3136-3142.
- ZHENG X Y, HUA Y H. Application of magnetic ballasted clarification technology in black and smelly water treatment and domestic sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(9): 3136-3142.
- [7] 张念琦. 上海市某水厂排泥水处理应急工程设计[J]. 净水技术, 2022, 41(1): 140-146, 179.
- ZHANG N Q. Emergency engineering design of sludge wastewater treatment project for WTP in Shanghai City [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(1): 140-146, 179.
- [8] 胡坤, 李龙伟, 车爱伟, 等. 高效澄清池及V型滤池在孟加拉国大型水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 72-75.
- HU K, LI L W, CHE A W, et al. Application of high efficiency clarifier and V-type filter in a large-scale water supply plant in Bangladesh [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 72-75.
- [9] 朱海涛, 周晓龙, 刘宏远, 等. 中置式高密度沉淀池的改造与优化运行[J]. 中国给水排水, 2014, 30(4): 95-99.
- ZHU H T, ZHOU X L, LIU H Y, et al. Modification and optimization operation of intermediate high-density sedimentation tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(4): 95-99.
-
- (上接第 187 页)
- [12] 余琴芳, 章诗璐, 杜敬, 等. 反硝化生物滤池碳源选择与运行方式优化研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 113-117, 122.
- YU Q F, ZHANG S L, DU J, et al. Study on carbon source selection and operation mode optimization of denitrification biological filter [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(9): 113-117, 122.
- [13] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3471-3477.
- YANG X, HUO M X, WANG S Y, et al. Effects of carbon source type on sludge sedimentation performance and filamentous bacteria growth [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(12): 3471-3477.
- [14] LI W M, LIAO X W, GUO J S, et al. New insights into filamentous sludge bulking: The potential role of extracellular polymeric substances in sludge bulking in the activated sludge process [J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 126012. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126012.
- [15] RURANGWA E, SIPKEMA D, KALS J, et al. Impact of a novel protein meal on the gastrointestinal microbiota and the host transcriptome of larval zebrafish *Danio rerio* [J]. *Frontiers in Physiology*, 2015, 6: 133-143. DOI: 10.3389/fphys.2015.00133.
- [16] 王宇. 基于拓展 DLVO 与絮体结构特征的化学调理对污泥脱水影响规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WANG Y. Study on the effects of chemical conditioning on sludge dewatering performance based on extended DLVO theory and floc structure characteristics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [17] PANG Y M, WANG J L. Various electron donors for biological nitrate removal: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 794: 148699. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148699.
- [18] WEI Q, ZHANG J S, LUO F Z, et al. Molecular mechanisms through which different carbon sources affect denitrification by *Thauera linaloolentis*: Electron generation, transfer, and competition [J]. *Environment International*, 2022, 170: 107598. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107598.
- [19] XU L, YANG J P, XUE B, et al. Molecular insights for the biological interactions between polyethylene glycol and cells [J]. *Biomaterials*, 2017, 147: 1-13. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2017.09.002.
- [20] YANG R, YUAN L J, WANG R. Enzymatic regulation of N₂O production by denitrifying bacteria in the sludge of biological nitrogen removal process [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157513.
- [21] 马勇, 彭永臻, 王淑莹. 不同外碳源对污泥反硝化特性的影响[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 820-824.
- MA Y, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(6): 820-824.