

多核碳源与常规单一类型碳源的实际应用研究

王国瑞, 马 凯, 沈天曦, 祖利朝, 李雁鸿

神美科技有限公司, 河北 河间
Email: wangguorui@shenmeikeji.com

收稿日期: 2021年1月8日; 录用日期: 2021年2月11日; 发布日期: 2021年2月19日

摘 要

目前我国大部分污水处理厂, 都存在着进水碳氮比低, 不能满足正常的生物反硝化脱氮的需求。所以为保证生物脱氮的正常进行, 我们需要投加外加碳源, 以满足污水厂正常的出水排放要求。本文选用多核碳源与通用单一类型碳源——乙酸钠、葡萄糖为外加碳源, 在秦皇岛某水厂进行生产性平行对比实验, 来研究多核碳源的脱氮性能和运行费用。结果表明: 以多核碳源作为外加碳源相比乙酸钠, 脱氮单耗降低了49.71%, 吨水投加成本降低了17.41%。以多核碳源作为外加碳源比以葡萄糖, 脱氮单耗降低了37.84%, 吨水投加成本降低了20.83%。且在保证水厂出水稳定达标的前提下, 可以实现水厂的降本增效, 具有较高的市场推广价值。

关键词

多核碳源, 外加碳源, 脱氮单耗, 降本增效

Practical Application Research of Polynuclear Carbon Source and Conventional Single Type Carbon Source

Guorui Wang, Kai Ma, Tianmeng Shen, Lichao Zu, Yanhong Li

Smedic Technology Co., Ltd., Hejian Hebei
Email: wangguorui@shenmeikeji.com

Received: Jan. 8th, 2021; accepted: Feb. 11th, 2021; published: Feb. 19th, 2021

Abstract

At present, the low C/N ratio in the sewage is existing in most of the Sewage Treatment, which cannot guarantee the demand of normal biological nitrogen removal. So in order to ensure the

normal operation of biological nitrogen removal, we need to add additional carbon source. In order to verify the economic applicability of polynuclear carbon sources, a comparative experiment was carried out in a water plant in Qinhuangdao using polynuclear carbon sources, sodium Acetate and glucose as additional carbon sources. The results show that the unit denitrification consumption is increased by 49.71% and the cost is reduced by 17.41%. Using polynuclear carbon source as carbon source is 37.84% lower than using glucose as carbon source, and the cost of adding carbon source is 20.83% lower. And under the premise of ensuring the water plant to meet the standard stably, the water plant can reduce cost and increase efficiency, which has high market promotion value.

Keywords

Multi-Core Carbon Source, Additional Carbon Source, Unit Consumption of Nitrogen Removal, Cost Reduction and Efficiency Increase

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

污水处理过程中, 有机物是异养微生物进行新陈代谢的必要物质和能量来源, 因此, 碳源是决定反硝化进程及系统脱氮能力与效率的关键因素[1]。在缺氧条件下, 反硝化细菌利用有机碳作为电子供体并提供的能量还原硝酸盐, 释放出分子态氮(N_2)或一氧化二氮(N_2O)以达到脱氮的效果。目前我国大部分城镇污水处理厂普遍面临着原污水碳氮比低而无法满足不同生物脱氮碳源需求的问题[2], 尤其进入低温季节, 情况更为严重。因此, 生物脱氮除磷所需的碳源不足是我国城镇污水厂的共性问题[3], 为提高系统反硝化脱氮效率同时满足日益严峻的出水排放标准, 向生化系统中投加碳源已成为一种趋势[4]。国外对碳源的研究主要集中在三个方面, 分别是固体碳源, 气体碳源和工业废水, 污泥水解上清液及垃圾渗滤液等高浓度有机废液为碳源[5]。国内目前常用的碳源一般为糖类、甲醇、乙酸、乙酸钠等, 此外还有化工碳源以及某些行业取得中间产物或废料残渣等同样可以作为外加碳源。

虽然以上外加碳源可以有效提高反硝化过程的脱氮效果, 但外加碳源使用的同时也增加了污水处理厂的运营成本。而且不同的外加碳源对系统的反硝化过程影响不同[6] [7] [8]。因此选择一种价格合适且能够极大提高脱氮效果的外加碳源对污水处理厂至关重要。

神美科技有限公司是一家立足于水环境治理技术、以环保处理药剂为支撑, 集研发、生产、销售、技术服务为一体的环境治理整体方案解决商。神美技术团队从碳源在水体中的消耗、吸收、利用途径角度出发, 以小分子有机酸盐、单糖发酵中间体、催化酶、微生物营养盐、促生剂为原料, 研发并生产出一系列用于污水脱氮工艺中的生物促进型多核碳源专利产品。

神美多核碳源系列为污水脱氮过程中提供快速、中速、慢速三类反硝化能量/电子供体组分。

- 1) 快速和中速碳源组分主要消耗于生化前段反硝化和释磷工艺, 保证反硝化脱氮效率;
- 2) 微生物促生剂和活跃剂与快速、中速碳源组分协同增效, 可以增强微生物的繁殖和活跃能力, 降低碳源吸收率;
- 3) 慢速碳源组分主要消耗于生化工艺中、后段; 提高微生物对污水盐度、pH 值耐受度, 缩短微生

物驯化时间，提升系统抗负荷冲击能力，持续为微生物功能的稳定性提供能量。

该多核碳源不仅价格低、易获取，而且 COD 含量可调($2 \times 10^5 \sim 13 \times 10^5 \text{ mg/L}$)；适用于不同水质的污水脱氮处理，定制化产品，提高出水指标与药剂投加的反应联动，减少碳源的冲击性过量投加。现场投加时，可有效降低数据反应时间，增加碳源投加量调控密度，缩小投加量调控范围，最大程度上控制无效投加、延时过量投加等问题，最终实现水厂药剂运营的降本增效。

为了研究神美多核碳源相比传统单一碳源在脱氮性能和运行方面的优势，同时避免时间和空间上更换碳源由于季节、水量、运行工况所产生的差异性，神美科技有限公司在秦皇岛某污水处理厂进行了同期生产性对比试验。通过生产性平行对比试验，对比多核碳源与乙酸钠及葡萄糖的脱氮效果，同时研究其对于系统稳定运行的影响。

2. 水厂概况

2.1. 水厂简介

处理污水以生活污水为主，同时接收和处理附近污泥处理厂的污泥液。设计规模 22 万吨/日，分两期实施，一期规模 10 万吨/日。生化段工艺为改良型多级 AO 工艺，数量 2 座；深度除磷工艺为高效沉淀池，数量 2 座。

2.2. 水厂水质

水厂进、出水水质如下表 1：

Table 1. Designed incoming and outgoing water quality of the water plant

表 1. 水厂设计进、出水水质

| 水质指标 | COD _{Cr} | BOD ₅ | SS | NH ₃ -N | TP | TN | pH |
|--------|-------------------|------------------|---------|--------------------|-----------|------------|-----------|
| 设计进水水质 | ≤350 | ≤160 | ≤120 | ≤47 | ≤5 | ≤70 | 6~9 |
| 实际进水水质 | 146~416 | 83~218 | 233~286 | 27~45 | 1.23~8.62 | 39~50 | 6~9 |
| 设计出水水质 | ≤50 | ≤10 | ≤10 | ≤5(8) | ≤0.5 | ≤15 | 6~9 |
| 实际出水水质 | 12~26 | 7.3~9.8 | 3~8 | 0.28~0.65 | 0.03~0.19 | 6.43~13.31 | 6.88~7.18 |

注：表中除 pH 单位为无量纲，其余指标单位均为 mg/L。

2.3. 工艺简介

水厂污水经粗格栅后经进水泵房提升至中细格栅，再经曝气沉砂池后进入生物池，然后经二沉池沉淀，再经中间提升泵房提升至高效沉淀池进行处理，再经活性砂滤池过滤，流入回用水池，最终排入人工河。其中生物池由多级 AO 组成，生物池进水流向依次为前置反硝化段 - 厌氧段 - 第一缺氧段 - 第一好氧段 - 第二缺氧段 - 第二好氧段，其中设计停留时间为：前置反硝化：厌氧：一缺：一好：二缺：二好 = 1.5：1.5：4.8：7.01：2.0：0.63 h，故试验期间实际停留时间约为设计值的 2 倍。试验期间，碳源投加点位根据对比试验中碳源自身特性及水力停留时间投加在第一缺氧段或第二缺氧段，具体工艺流程图 1 所示。

3. 碳源投加试验方案

3.1. 运行条件

1) 碳源加药系统的改造

碳源加药利用原厂加药系统，并进行如下改造：由试验前的贮存同一种药剂同时向两组生物池投加

同种药剂,改造为两种药剂分别单独贮存,通过管路开关的切换,实现在药剂贮池和加药泵不变换的情况下两系列生物池所投加碳源种类的对调。并可实现分别向两组生物池投加不同碳源以及碳源种类的切换。(改造由神美科技完成)

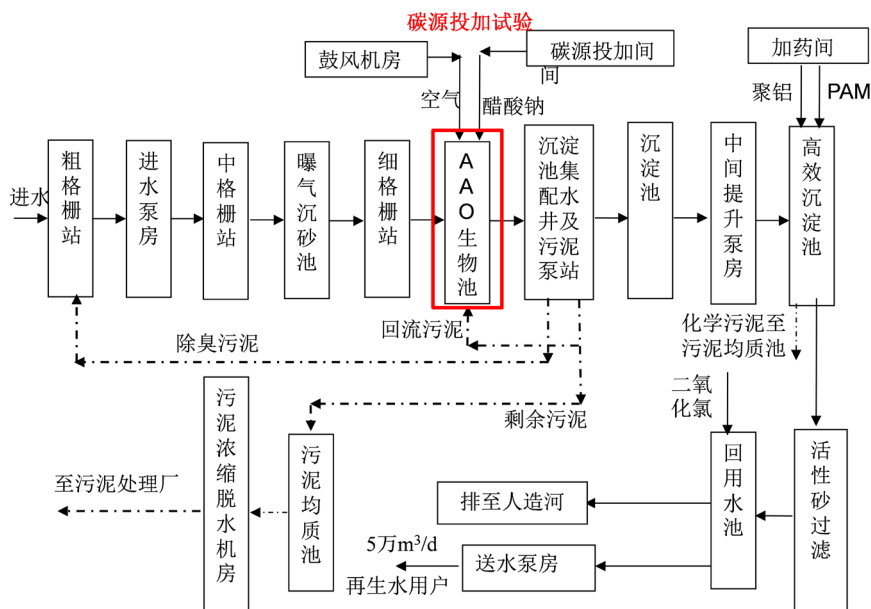


Figure 1. Process flow chart of water plant
图 1. 水厂工艺流程图

2) 运行条件

采用平行试验的方式进行对比,即在一期的 1 个系列中投加多核碳源,第 2 个系列投加乙酸钠、葡萄糖参照对比,两个系列的操作条件完全一致,通过研究出水水质比较脱氮效果。第一阶段对比多核碳源与乙酸钠;第二阶段对比多核碳源与葡萄糖。

操作条件:

- 2 个系列内回流、外回流能够独立运行,进水量一致;
- 多核碳源与乙酸钠、葡萄糖可向任意一个系列投加(可对调)。

3.2. 药剂投加方案

由于实际运行中碳源投加量较大,为尽可能优化碳源成本,降低试验水厂的负担和出水超标风险,生产性试验期间,试验方案采用控制两座生物池出水 TN。

3.3. 评价方法

1) 主要评价指标

进出水 COD、BOD、TN,碳源投加量,运行费用。

2) 参考评价指标

抗冲击负荷能力,碱度,MLSS,污泥粘度,污泥产量和脱水性能,进水溶解性 COD 与颗粒 COD 比例,TP,反硝化比速率验的方式进行对比。

3) 数据测定周期

见下表 2 测定周期表。

Table 2. Periodic table of data measurement

表 2. 数据测定周期表

| 序号 | 分类 | 测定指标 | 取样点 | 测定周期 |
|----|------|-----------------------|--------------------|--------|
| 1 | 主要指标 | COD、BOD、TN、水温 | 总进水、两组工艺二沉池(好氧池)出水 | 一天 1 次 |
| 2 | | 缺氧池上清液 COD、TN | 两组缺氧池上清液 | 一周 1 次 |
| 3 | | 沿程 NO ₃ -N | 两组缺氧池、好氧池上清液 | 一周 1 次 |
| 4 | 参考指标 | 碱度、TP | 两组工艺二沉池(好氧池)出水 | 一周 1 次 |
| 5 | | 溶解性 COD | 总进水 | 一周 1 次 |
| 6 | | 反硝化比速率 | 两组缺氧池混合液 | 1 次 |

3.4. 试验时间

多核碳源与乙酸钠对比：2019 年 12 月 17 日至 2020 年 1 月 13 日。

多核碳源与葡萄糖对比：2020 年 2 月 17 日至 2020 年 4 月 27 日，其中 2020.3.28 日双沟调换。

3.5. 试验要求

生产性试验期间，水厂出水达到一级 A 排放标准，即出水标准 COD < 50 mg/L，TN < 15 mg/L。

3.6. 比对碳源产品及量化指标

如表 3，通过多核碳源与常规碳源的对比生产试验，以出水 TN 含量和运行费用的对比为核心，综合分析试验中主要指标和参考指标的异同，评价水质达标前提下投加多核碳源在技术和经济方面的优势。

Table 3. Comparison table of technical parameters of polynuclear carbon source, sodium acetate and glucose

表 3. 多核碳源和乙酸钠、葡萄糖技术参数对比表

| 多核碳源 | | 乙酸钠 | | 葡萄糖 | |
|------------------------------|-----------|------------------------------|---------|------------------------------|-------|
| 项目 | 指标 | 项目 | 指标 | 项目 | 指标 |
| pH 值(1%水溶液) | 5.0~8.0 | 醋酸钠含量 | 25 | 葡萄糖含量 | ≥50% |
| COD 值(×10 ⁴ mg/L) | ≥35 | COD 值(×10 ⁴ mg/L) | ≥19 | COD 值(×10 ⁴ mg/L) | ≥50 |
| 密度 | 1.00~1.05 | 密度 | 1.1~1.2 | 氯化物(%) | ≤0.01 |
| 水不溶物(%) | ≤0.5 | 水不溶物 | ≤0.03 | 硫酸灰分(%) | ≤0.25 |

3.7. 多核碳源与乙酸钠反硝化速率小试

取生化池污泥进行反硝化速率小试试验，结果见表 4 所示。

Table 4. Denitrification rate data of multinuclear carbon source and sodium acetate

表 4. 多核碳源与乙酸钠反硝化速率数据

| 时间类型 | 空白 | 乙酸钠 | 多核碳源 |
|---------|-------|-------|-------|
| 0 min | 25.55 | 25.18 | 25.18 |
| 30 min | 25.45 | 20.46 | 20.69 |
| 60 min | 24.57 | 18.5 | 17.45 |
| 120 min | 24.3 | 18.1 | 13.06 |

Continued

| | | | | |
|---------|---------------------------|-------|------|-------|
| 180 min | | 23.8 | 17.6 | 10.16 |
| 240 min | NO ₃ -N (mg/L) | 23.56 | 17.2 | 8.27 |
| 300 min | | 23.04 | 17.2 | 7.62 |
| 360 min | | 22.91 | 16.9 | 7.57 |
| 360 min | TN(mg/L) | 23.87 | 19.3 | 11.16 |

通过室内反硝化小试实验可以得知:

1) 在同等加药量条件下, 0~30 min 内, 乙酸钠相对多核碳源具有较快的响应速度(图 2)。这主要是由于乙酸钠为小分子有机物, 易于被微生物利用和降解。在生产性试验运行中, 乙酸钠几乎不需要进行驯化, 在极短的时间内可快速完成反硝化反应。

2) 在 30~240 min 内, 多核碳源的反硝化作用持续, 与乙酸钠逐渐拉开差距。

3) 将碳源投加量换算为 COD 投加量, 则 COD_{乙酸钠} 38 mg/L、COD_{多核碳源} 70 mg/L, 将 0~360 min 中每个时间节点消耗的 NO₃ 换算为 C/ Δ N, 结果见表 5, 反应初始时, COD_{乙酸钠}/ Δ N 为 8.05、COD_{多核碳源}/ Δ N 为 15.59, 反应终点时 COD_{乙酸钠}/ Δ N 为 4.59、COD_{多核碳源}/ Δ N 为 3.98。可见, 反应过程中碳源充足, 且初始时多核碳源较乙酸钠更加富余, 但反应速率略却低于乙酸钠, 由此可以推断该小试试验的初始 COD 浓度并不是影响后续硝化反应的主要因素。

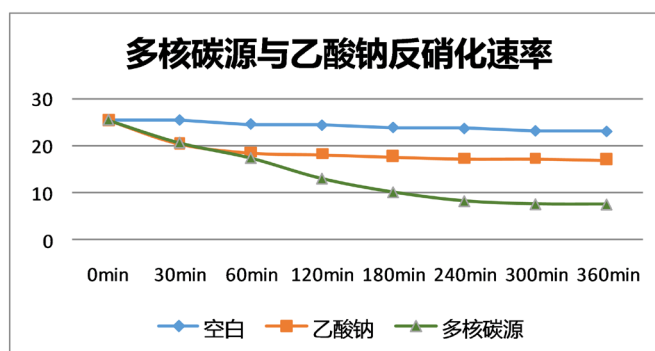


Figure 2. Comparison of denitrification rate between multi-nuclear carbon source and sodium acetate
图 2. 多核碳源与乙酸钠反硝化速率对比

Table 5. Carbon to nitrogen ratio in denitrification process

表 5. 反硝化过程碳氮比

| 2 | 乙酸钠 C/ Δ N | 多核碳源 C/ Δ N |
|---------|-------------------|--------------------|
| 0 min | — | — |
| 30 min | 8.05 | 15.59 |
| 60 min | 5.69 | 9.06 |
| 120 min | 5.37 | 5.78 |
| 180 min | 5.01 | 4.66 |
| 240 min | 4.76 | 4.14 |
| 300 min | 4.76 | 3.99 |
| 360 min | 4.59 | 3.98 |

4) 分析后期两者反硝化能力出现差距的原因：由于乙酸钠为单一组分，在前期提供电子释放完能量后，后期出现能量不足，反硝化速率明显降低的现象，后期的脱氮速率显著降低。而多核碳源在后期供能中体现了一些优势。

5) 试验水厂一段缺氧区停留时间 4.8 h，二段缺氧区停留时间 2.0 h。因此，现场投加时，乙酸钠适宜投加于二段缺氧区，快速去除 TN。而多核碳源适宜投加于一段缺氧区或者二段缺氧区。

3.8. 多核碳源与葡萄糖的反硝化速率对比

由于微生物对于葡萄糖需要一定时间适应，因此在更换碳源期间，对比试验正式开始前，通过葡萄糖掺兑多核碳源投加的方式对微生物进行驯化。驯化期间不断监测活性污泥的反硝化速率，通过对比驯化不同阶段的反硝化速率来表征驯化的终点，试验数据如表 6 和图 3 所示。

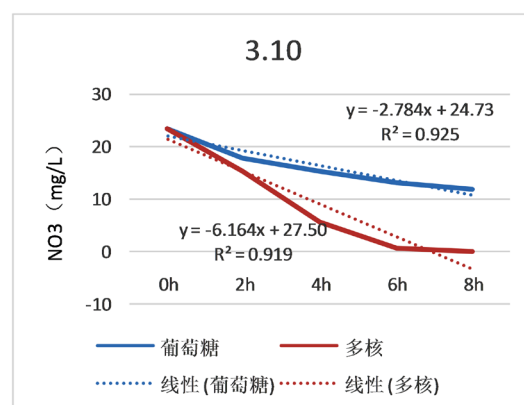
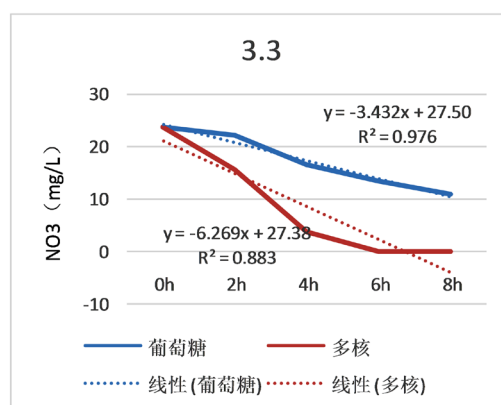
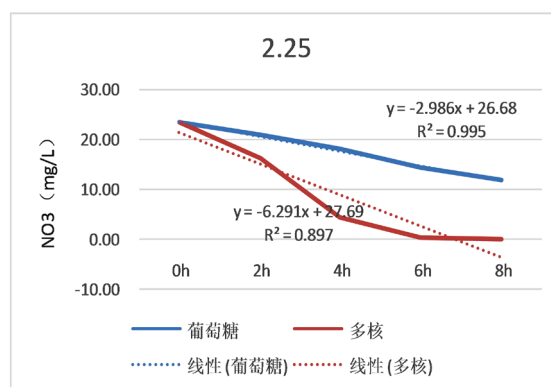
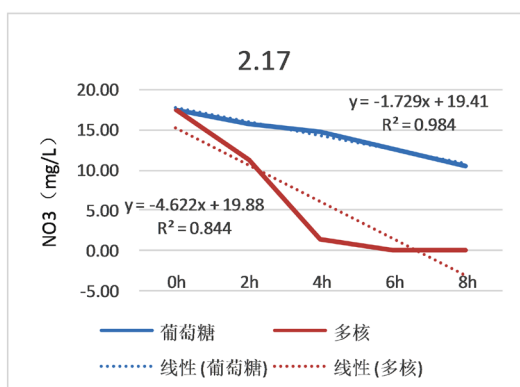
Table 6. Sludge denitrification rate test during glucose domestication

表 6. 葡萄糖驯化期间污泥反硝化速率试验

| 驯化阶段 | 日期 | 类别 | 0 h | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h |
|---------------|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 多核: 葡萄糖 = 7:3 | 2.17 小试 (16°C) | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /L) | 17.50 | 15.81 | 14.79 | 12.56 | 10.48 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /L) | 17.50 | 11.22 | 1.37 | 0.00 | 0.00 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 5753 | | |
| | | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 3.04 | 2.75 | 2.57 | 2.18 | 1.82 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 3.04 | 1.95 | 0.24 | 0.00 | 0.00 |
| 多核: 葡萄糖 = 5:5 | 2.25 小试 (16°C) | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.45 | 20.99 | 18.03 | 14.33 | 11.85 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.45 | 16.17 | 4.31 | 0.16 | 0.00 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 5742 | | |
| | | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 4.08 | 3.66 | 3.14 | 2.50 | 2.06 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 4.08 | 2.82 | 0.75 | 0.03 | 0.00 |
| 多核: 葡萄糖 = 3:7 | 3.03 小试 (16°C) | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.58 | 21.94 | 16.54 | 13.22 | 10.78 |
| | | MLVSS(mg/L) | | | 5663 | | |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.58 | 15.61 | 3.62 | 0.08 | 0.00 |
| | | MLVSS(mg/L) | | | 5663 | | |
| | | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 4.16 | 3.87 | 2.92 | 2.33 | 1.90 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 4.16 | 2.76 | 0.64 | 0.01 | 0.00 |

Continued

| | | | | | | | |
|---------|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全部投加葡萄糖 | 3.10 小试 (18°C) | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.46 | 18.01 | 15.31 | 13.17 | 11.96 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 4910 | | |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /L) | 24.14 | 15.77 | 4.29 | 0.91 | 0 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 4830 | | |
| | | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 4.78 | 3.67 | 3.12 | 2.68 | 2.44 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 5.00 | 3.27 | 0.89 | 0.19 | 0.00 |
| 全部投加葡萄糖 | 4.05 小试 (18°C) | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.69 | 17.02 | 14.96 | 12.86 | 10.04 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 3990 | | |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /L) | 23.69 | 14.95 | 4.53 | 0.52 | 0.06 |
| | | MLVSS (mg/L) | | | 3696 | | |
| | | 葡萄糖(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 5.94 | 4.27 | 3.75 | 3.22 | 2.52 |
| | | 多核(mg NO ₃ ⁻ /gMLVSS) | 6.41 | 4.04 | 1.23 | 0.14 | 0.02 |



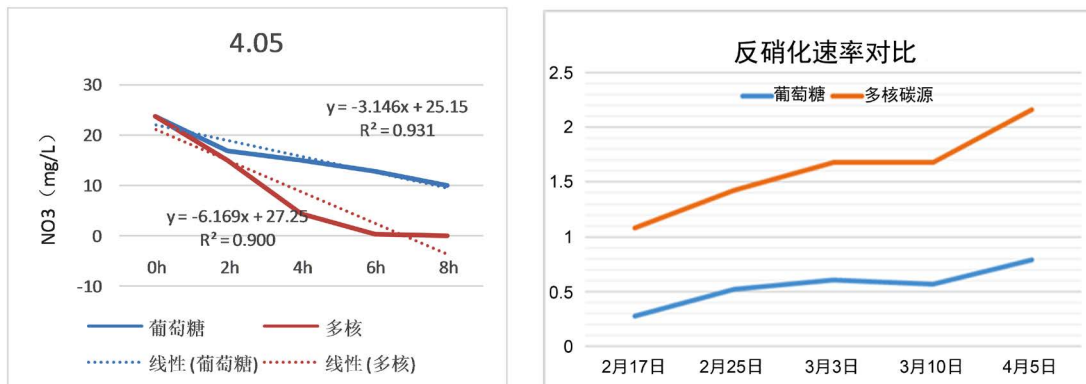


Figure 3. Judging the end point of domestication
图 3. 驯化终点判定

小试数据分析如下:

1) 2.17~3.27, 1#生物池投加多核碳源, 2#生物池投加葡萄糖, 从图 3 中葡萄糖和多核的反硝化速率来看, 从 2.17 号开始, 随着驯化时间的延长, 两种碳源的反硝化速率逐渐增大, 至 3.10 数据变化不大, 反硝化速率基本上平稳, 初步判定葡萄糖和多核的驯化期基本结束, 3.10 起 2#生物池全部投加葡萄糖, 3 日后进入稳定期(即 3.13~3.27)。

2) 3.30 生物池碳源调换后, 于 4.05 测定一次反硝化速率, 之后并未加测。葡萄糖的反硝化速率并未减弱, 保险起见, 设定对调后的驯化时间为两周, 之后为稳定期(即 4.13~4.27)。

3) 对比 4.05 和 3.10 的反硝化速率结果可以看出, 两种碳源的反硝化速率均有所提升, 分析原因有以下两点: ① 入春后, 水温逐渐升高, 微生物活性增加, 故反硝化速率有所提升; ② 剩余污泥排放的增大, 老化污泥逐渐被新活性污泥置换, 新活性污泥反应活性较强。

4) 如不考虑亚硝酸盐氮的累积, 稳定期内多核碳源的反硝化速率是葡萄糖的 2.8 倍左右, 多核碳源具有较高的反硝化速率。

5) 葡萄糖反硝化曲线的 R^2 均在 0.9 以上, 线性较好, 说明投加葡萄糖的污泥反硝化速率在反应过程中较为稳定, 故葡萄糖不适宜作为应急投加碳源。由于代谢时间较长, 葡萄糖宜投加于一段缺氧区。

4. 生产性试验数据分析

4.1. 多核碳源与乙酸钠生产性试验数据

4.1.1. 试验期间进水 C/N

由图 4 可以看出, 多核碳源与乙酸钠对比期间处于冬季, 两个系列生物池水温 10℃~11℃, 平均 10.3℃, 进水 C/N 和 B/N 比分别为 2.86~13.35 (平均 7.65)、1.06~6.63 (平均 3.67)。根据神美科技服务运行水厂碳源投加经验, 水温 12℃ 以上, $BOD/TN \geq 3$ 不投加碳源; 水温 12℃ 以下, 按 $BOD/TN = 4$ 的比例投加碳源。试验期间, 水温低于 12℃, 进水 B/N 波动较大, B/N 平均 3.67, 需补充碳源以保证 TN 达标。

4.1.2. 投加位置

多级 AO 后置缺氧池实际停留时间 4 h, 多核碳源与乙酸钠两种药剂完全满足后置缺氧投加需求, 且在后置缺氧投加能充分发挥原水碳源潜能, 故乙酸钠和多核碳源在后置缺氧展开平行试验对比。

4.1.3. 生物池脱氮效果

多核碳源与醋酸钠生产性试验划分为驯化段(12.17~12.26)和稳定段(12.27~1.07)两部分, 具体生产性试验沿程数据如下图 5 所示:

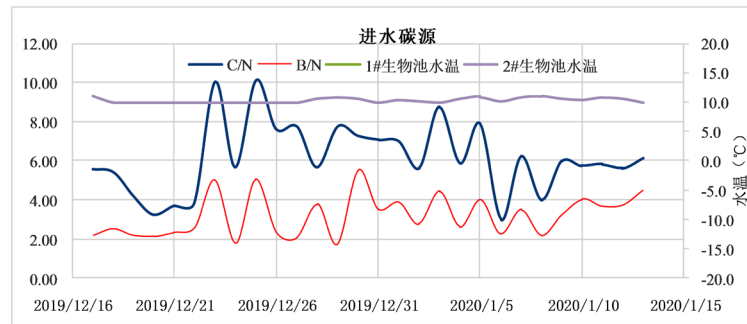


Figure 4. The carbon-nitrogen ratio of influent water during the comparison of multi-nuclear carbon source and sodium acetate
图 4. 多核碳源与乙酸钠对比期间进水碳氮比

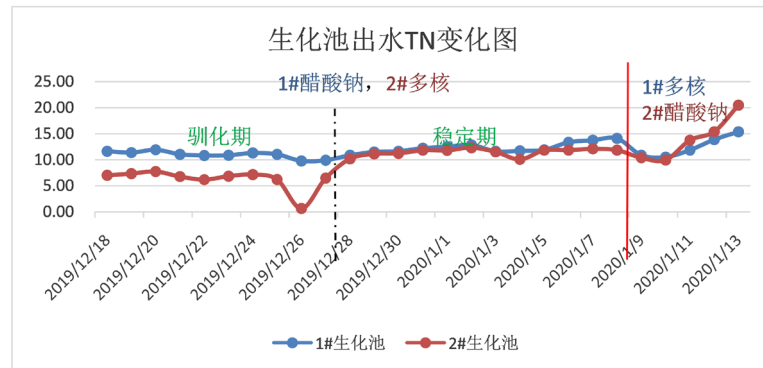


Figure 5. TN Removal effect diagram of multi-nuclear carbon source and sodium acetate
图 5. 多核碳源与乙酸钠 TN 去除效果图

1) 试验驯化期间通过调整系统进水、内外回流的平衡,使得两个系列生物池二缺进水达到大致相同,如图 5 醋酸钠与多核碳源试验期间稳定期所示,1#生物池稳定期二缺进水 TN 平均为 15.76 mg/L,2#生物池稳定期二缺进水 TN 平均为 16.21 mg/L,数据波动率相差 2.15%,结合表 4 数据,可认为双沟进水及运行参数大致相同。

2) 大试期间通过控制两系列生物池出水 TN 相接近为原则,来对比醋酸钠和多核碳源的投加量,大试稳定期间,1#生物池(投加醋酸钠)生物池出水 TN 平均为 12.00 mg/L,2#生物池(投加多核碳源)生物池出水 TN 平均为 11.09 mg/L,数据波动率相差 8.80%,相应的碳源投加量如下图 6 所示:

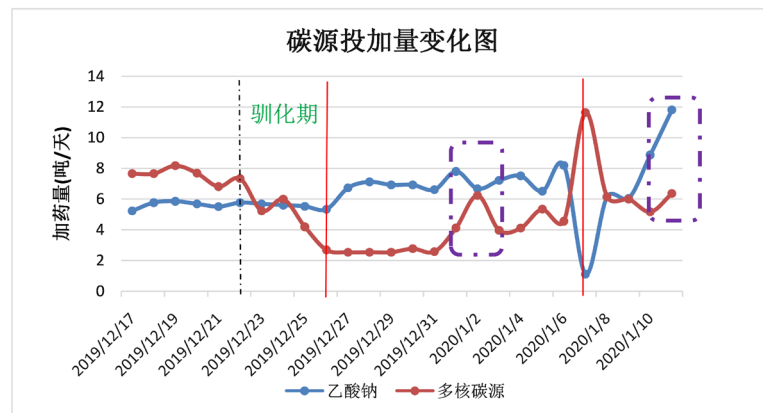


Figure 6. Comparison of carbon source dosage
图 6. 碳源投加量对比图

4.1.4. 碳源使用效率及经济性对比

分析图 7 可以看出，生产性试验稳定期乙酸钠投加量为 6.96 t/d，吨水处理成本为 0.316 元；多核碳源投加量为 3.67 t/d，吨水处理成本为 0.261 元；投加多核碳源比投加乙酸钠降本 17.41%。

乙酸钠单位碳源脱氮量为 129.68 kgN/t 碳源，多核碳源单位碳源脱氮量为 257.90 kgN/t 碳源，单位碳源脱单量提升 49.71%。

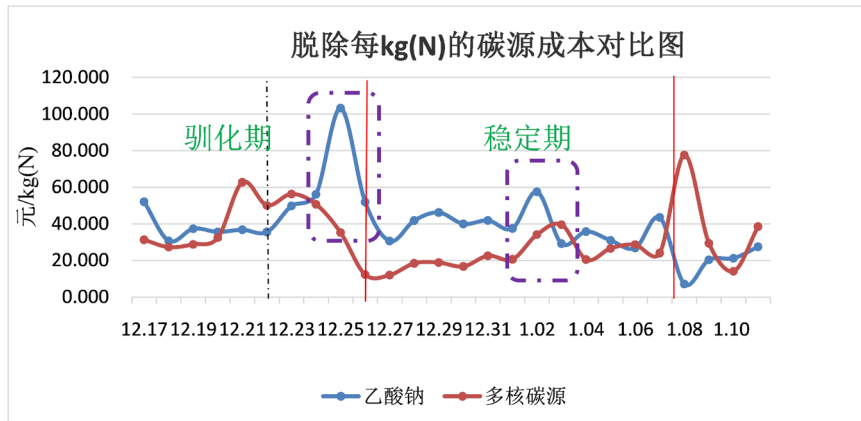


Figure 7. Comparison of carbon source utilization efficiency and economy
图 7. 碳源使用效率及经济性对比图

4.1.5. 多核 VS 醋酸钠 MLSS 变化

- 1) 分析图 8 得知 12.26~1.09 多核碳源与醋酸钠对比期间，多核碳源的 MLSS 低于醋酸钠 6.87%。
- 2) 多核碳源与醋酸钠对比期间，由于 1.13 进水异常，导致系统崩溃，多核碳源与乙酸钠的换沟实验未如期进行。

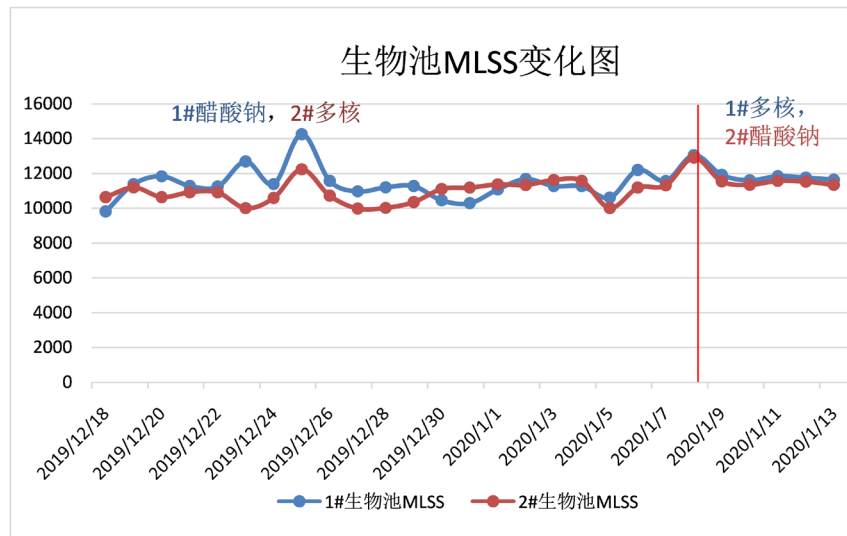


Figure 8. Change trend of multi-nuclear carbon source VS sodium acetate MLSS
图 8. 多核碳源 VS 乙酸钠 MLSS 变化图

多核碳源与乙酸钠对比试验期间，水厂总出水各项指标均达到一级 A 排放标准，现将各项对比数据汇总成表 7 如下：

Table 7. Summary table of comparison data between multi-nuclear carbon source and sodium acetate
表 7. 多核碳源与乙酸钠对比数据汇总表

| 试验日期 | 2019.12.27~2020.1.13 | |
|---------------------------|----------------------|--------|
| 生物池 | 1#生物池 | 2#生物池 |
| 碳源种类 | 乙酸钠 | 多核碳源 |
| COD 值(mg/L) | 19.15 万 | 35 万 |
| 水量(m ³ /d) | 53218 | |
| 进水(mg/L) | COD | 304.58 |
| | TN | 45.81 |
| 出水(mg/L) | COD | 19.83 |
| | TN | 11.89 |
| 加药量(t/d) | 6.96 | 3.67 |
| 供货单价(元/吨) | 1208 | 1890 |
| 日脱氮量(Kg/d) | 902.58 | 946.48 |
| 消耗 C/N | 9.87 | 9.56 |
| 单位碳源脱氮量(Kg N/t 碳源) | 129.68 | 257.90 |
| 吨水处理成本(元/m ³) | 0.316 | 0.261 |
| 脱氮率(%) | 74.04 | 77.65 |
| 单位碳源脱氮量提升(%) | 49.71 | |
| 降本(%) | 17.41 | |

备注：日脱氮量 = (进水 TN - 出水 TN) * 水量；消耗 C/N = [(进水 COD - 出水 COD) * 水量 + 碳源投加量 * 自身 COD 值]/日脱氮量；单位碳源脱氮量 = 日脱氮量/加药量；吨水处理成本 = 供货单价 * 加药量/水量；脱氮率 = (进水 TN - 出水 TN)/进水 TN * 100%；单位碳源脱氮量提升率 = (单位碳源脱氮量(多核碳源) - 单位碳源脱氮量(乙酸钠))/单位碳源脱氮量(多核碳源) * 100%；降本 = (吨水处理成本(乙酸钠) - 吨水处理成本(多核碳源))/吨水处理成本(乙酸钠) * 100%。

4.16. 结合小试及大试生产性试验，多核碳源优势原因分析

醋酸钠作为一种单一组分，其水解产物为小分子物质，固定 COD 值的微生物能量/电子供体，因其提供的能量主要用于反硝化脱氮和微生物繁殖增长两部分，当微生物受进水水质变化冲击，丰度发生变化时，更多的能量用于维持微生物丰度，反硝化脱氮的能量势必减少，造成其投加后的功能分配与现场运行工艺匹配度降低，致使出水无法保证达到平稳的脱氮效果。

4.2. 多核碳源与葡萄糖的试验数据分析

4.2.1. 试验期间进水碳氮比

多核碳源与葡萄糖对比试验跨冬，两个系列生物池水温 10.6℃~13.8℃，平均 12.07℃，进水 C/N 和 B/N 比分别为 2.07~9.81 (平均 4.13)、1.23~4.60 (平均 2.00)。试验期间，水温逐渐高于 12℃，但进水 B/N 波动较大，B/N 平均 2.00 (<3)，需补充碳源以保证 TN 达标。

由图 9 可以看出，多核碳源与葡萄糖对比试验跨冬，两个系列生物池水温 10.6℃~13.8℃，平均 12.07℃，进水 C/N 和 B/N 比分别为 2.07~9.81 (平均 4.13)、1.23~4.60 (平均 2.00)。试验期间，水温逐渐高于 12℃，但进水 B/N 波动较大，B/N 平均 2.00 (<3)，需补充碳源以保证 TN 达标。

4.2.2. 投加位置

因葡萄糖属于慢速分解大分子碳源，反硝化停留时间>4 h，为充分发挥碳源利用潜能及对比试验的合理公平性，故多核碳源和葡萄糖的对比试验投加在前置缺氧池。

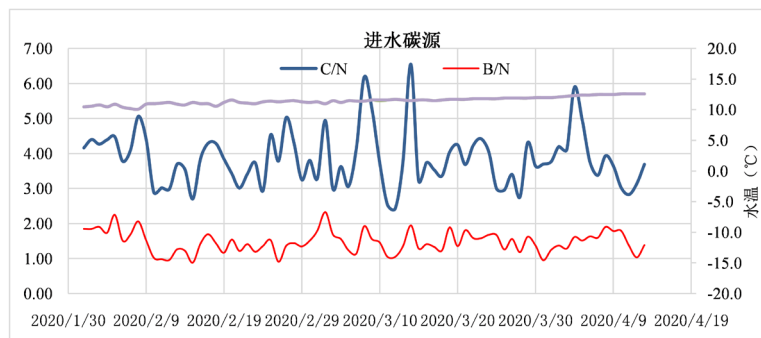


Figure 9. The carbon-nitrogen ratio of influent water during the comparison of multi-nuclear carbon source and glucose
图 9. 多核碳源与葡萄糖对比期间进水碳氮比

4.2.3. 生物池脱氮效果

多核碳源与葡萄糖生产性试验划分为驯化段(2.17~3.12)和稳定段(3.13~3.27), 3.28 双沟调换, 驯化段(3.29~4.12), 稳定段 4.13~4.27 (稳定期)具体生产性试验沿程数据如下图 10 所示:

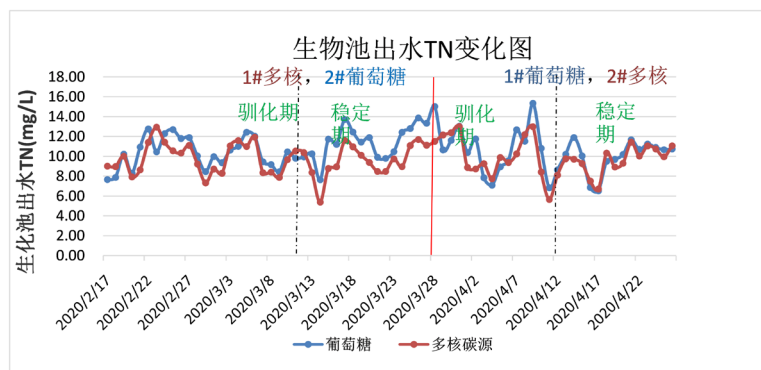


Figure 10. The removal effect of multi-nuclear carbon source and glucose TN
图 10. 多核碳源和葡萄糖 TN 去除效果图

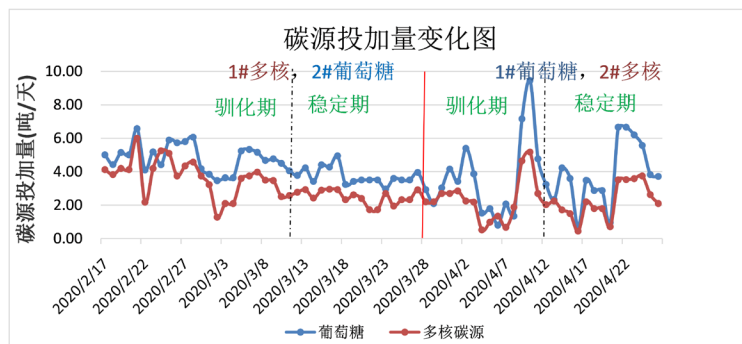


Figure 11. Comparison of carbon source dosage
图 11. 碳源投加量对比图

大试期间通过控制两系列生物池出水 TN 相接近为原则, 来对比葡萄糖和多核碳源的投加量, 大试稳定期间, 对调前 1#生物池(投加多核)生物池出水 TN 平均为 9.54 mg/L, 2#生物池(投加葡萄糖)生物池出水 TN 平均为 11.53 mg/L, 数据波动率相差 17.3%; 对调后 1#生物池(投加葡萄糖)生物池出水 TN 平均为 10.06 mg/L, 2#生物池(投加多核碳源)生物池出水 TN 平均为 9.70 mg/L, 相应的碳源投加量如上图 11 所示。

4.2.4. 碳源使用效率及经济性对比

分析图 12 可以看出,多核碳源投加量为 2.48 t/d,吨水处理成本为 0.19 元;葡萄糖投加量为 3.74 t/d,吨水处理成本为 0.24 元;投加多核碳源比投加乙酸钠降本 20.83%;

多核碳源单位碳源脱氮量为 317.20kgN/t 碳源,葡萄糖单位碳源脱氮量为 197.17 kgN/t 碳源,单位碳源脱氮量提升 37.84%;

总出水 COD 指标控制在 8~30 mg/L 之间,平均值为 13.89 mg/L;总出水 TN 控制在 8~14 mg/L 之间,平均值为 10.71 mg/L。

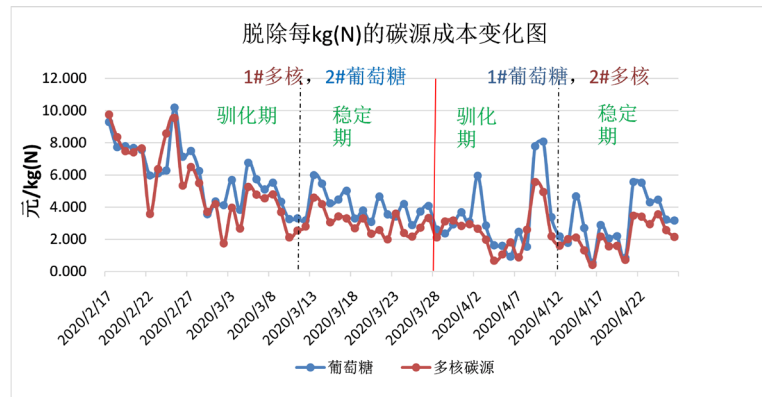


Figure 12. Comparison of carbon source utilization efficiency and economy
图 12. 碳源使用效率及经济性对比图

4.2.5. 碳源产泥量比对效果

如图 13 多核碳源 VS 葡萄糖 MLSS 变化可知:

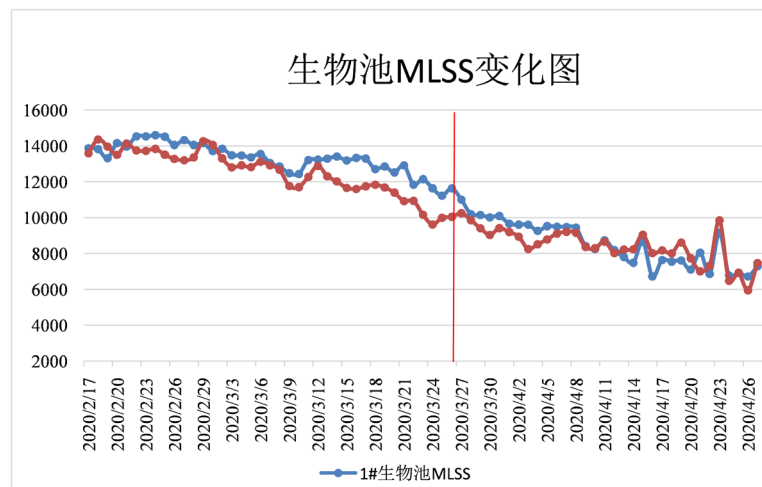


Figure 13. Change trend of multi-nuclear carbon source VS glucose MLSS
图 13. 多核碳源 VS 葡萄糖 MLSS 变化图

1) 2.17~3.10 (1#生化池投加葡萄糖, 2#生化池投加多核碳源), 葡萄糖掺兑多核碳源驯化阶段, 多核碳源与葡萄糖的污泥浓度差异性较小, 多核碳源 MLSS 低于葡萄糖 3.7%。

2) 3.11~3.27 葡萄糖与多核碳源正式比对期间, MLSS 差距开始逐步拉大, 多核碳源 MLSS 低于葡萄糖 10.5%。

3) 3.28~4.27 双沟调换后, 由于多核碳源的产泥量低的优势, 两生物池的 MLSS 差距开始逐步降低。
 4) 多核碳源与葡萄糖的产泥量比对是基于双方规定的比对时间方案进行, 长期比对投加, 多核碳源的产泥量优势将更加突出。

试验期间出水稳定达标。多核碳源与葡萄糖对比数据汇总如下表 8:

Table 8. Summary of comparison data between multi-nuclear carbon sources and glucose
表 8. 多核碳源与葡萄糖对比数据汇总

| 试验日期 | 2020.02.17~2020.04.27 | |
|--------------------------|-----------------------|--------|
| 生物池 | 1#生物池 | 2#生物池 |
| 碳源种类 | 多核碳源 | 葡萄糖 |
| COD 值(mg/L) | 35.5 万 | 53.4 万 |
| 水量(m ³ /d) | 49459 | |
| 进水(mg/L) | COD | 157.73 |
| | TN | 41.35 |
| 出水(mg/L) | COD | 12.80 |
| | TN | 9.54 |
| 加药量(t/d) | 2.48 | 3.74 |
| 供货单价(元/吨) | 1890 | 1590 |
| 日脱氮量(Kg/d) | 786.65 | 737.43 |
| 消耗 C/N | 5.68 | 7.61 |
| 单位碳源脱氮量(Kg N/t 碳源) | 317.20 | 197.17 |
| 吨水处理成(元/m ³) | 0.19 | 0.24 |
| 脱氮率(%) | 76.93 | 72.12 |
| 单位碳源脱氮量提升(%) | 37.84 | |
| 降本(%) | 20.83 | |

备注: 同表 7 中备注。单位碳源脱氮量提升率 = (单位碳源脱氮量(多核碳源) - 单位碳源脱氮量(葡萄糖)) / 单位碳源脱氮量(多核碳源) * 100%;
 降本 = (吨水处理成本(葡萄糖) - 吨水处理成本(多核碳源)) / 吨水处理成本(葡萄糖) * 100%。

4.2.6. 结合小试及大试生产性试验, 多核碳源优势原因分析:

A) 与生化工艺匹配度高, 反硝化过程中, COD 利用率高

神美多核碳源以低于葡萄糖 30% 的 COD 贡献量, 总氮去除率却高于固体葡萄糖, 且控制出水 COD 更低, 表明神美多核碳源作为微生物反硝化能量/电子供体, 反硝化脱氮过程中 COD 利用率更高, 脱氮效率高, 与生化系统各工艺参数匹配度高。

B) 污泥增量降低

葡萄糖作为大分子碳源, 分解速率慢, 脱氮效率低, 靶向作用差, 所以固体葡萄糖提供多余的 COD 必然是被微生物吸收消耗进而转化成污泥增量, 相比之下, 长期运行多核碳源可以降低污泥增量。

5. 结论

通过多核碳源与乙酸钠及葡萄糖的生产性对比试验可以看出:

1) 以多核碳源作为外加碳源比以乙酸钠作为外加碳源, 单位碳源脱氮量提高了 49.71%, 投加成本降低了 17.41%。

2) 以多核碳源作为外加碳源比以葡萄糖作为外加碳源, 单位碳源脱单量提高了 37.84%, 投加成本降低了 20.83%。

3) 以多核碳源作为外加碳源比 C/N 均低于以乙酸钠或葡萄糖作为外加碳源的 C/N, 主要得益于多核碳源中的微生物促生剂和益生因子, 产品组分中的微生物促生剂和益生因子是产品开发过程中, 通过大量正交试验筛选出的微生物营养盐组分, 对反硝化微生物具有靶向促进作用, 投加应用中优先满足反硝化菌种的繁殖增长及保持丰度活性所需的能量, 降低反硝化菌种对碳源(COD)的消耗吸收, 使更多的碳源(COD)参与到微生物脱氮过程, 从反硝化机理上提高了碳源的综合利用效率, 从而产泥率更低; 多核碳源与乙酸钠对比试验期间, 多核碳源平均 MLSS 低于乙酸钠 6.87%, 多核碳源与葡萄糖对比试验期间, 多核碳源平均 MLSS 低于葡萄糖 10.5%, 长期持续投加, 多核碳源的优势将更加突出。

4) 多核碳源区别于常规碳源(乙酸钠、葡萄糖、甲醇、淀粉等)单一组分、脱氮效率单一等缺点, 生物促进型碳源以不同组分碳源在各流程段的消耗和综合利用, 通过复配微生物促生剂和益生因子强化微生物多样性及丰度, 均衡持续为反硝化提供 COD, 控制降低微生物因繁殖增长而消耗的碳源量, 同时提升系统抗负荷、抗波动冲击能力。而且降低了碳源的投加成本, 在保证水厂出水稳定达标的前提下, 可以实现水厂的降本增效, 具有较高的市场推广价值。

参考文献

- [1] 王淑莹, 侯红勋, 许春生, 等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(11): 1521-1526.
- [2] 王洪贞, 李毅. 不同外碳源对生物反硝化影响的研究[J]. 科学与技术工程, 2013(13): 1671-1815.
- [3] 孙永利, 许光明, 等. 城镇污水处理厂外加商业碳源的选择[J]. 中国给水排水, 2010, 26(19): 84-86.
- [4] Nyberg, U., Andersson, B. and Aspegren, H. (1996) Long-Term Experiences with External Carbon Sources for Nitrogen Removal. *Water Science & Technology*, **33**, 109-116. <https://doi.org/10.2166/wst.1996.0314>
- [5] 冯延申, 黄天寅, 等. 反硝化脱氮新型外加碳源研究进展[J]. 现代化工, 2013, 33(10): 52-57.
- [6] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 给水排水, 2010, 36(11): 125-128.
- [7] 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.
- [8] 殷芳芳, 王淑莹, 昂雪野, 等. 碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 108-113.