莫 昊,赵婷婷,姚思博,等.基于 GPS-X 的外加碳源种类对污水处理厂的影响机制研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4235-4244.
Mo H, Zhao T T, Yao S B, et al. Research on the impact mechanism of external carbon source types on wastewater treatment plants based on GPS-X [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4235-4244.

基于 GPS-X 的外加碳源种类对污水处理厂的影响机制研究

莫 昊,赵婷婷,姚思博,郁振天,艾海男* (重庆大学环境与生态学院,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要: 为探究碳源种类对污水处理厂运行的整体影响,对比了某复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖 3 种外加碳源对污水处理厂整体运行过程的影响,结果表明,碳源种类的不同造成了异养微生物代谢性能发生变化,三种碳源影响下的异养菌产率 Y_H 为 0.703(复合碳源),0.676(乙酸钠)与 0.889(葡萄糖);异养菌衰减系数 b_H 为 0.405,0.433 与 0.775d^{-1};异养菌最大生长比μ_{mH} 为 2.146,3.071 与 6.078d^{-1}.应用 GPS-X 软件对目标污水厂进行了模型构建与校正,并将各碳源影响下的动力学参数代入模型进行模拟,结果显示:动力学参数的变化直接影响了污水处理厂的处理效率,电能消耗,污泥产量及温室气体排放.在 TN 去除率方面,复合碳源,乙酸钠有着更为显著的优势,但伴随着耗能与温室气体排放的增加;而葡萄糖虽更加节能降碳,但除氮效率较低,且可能导致污泥量增加.在综合了市场价格考量后,认为复合碳源作为反硝化碳源更具竞争力.

关键词: 碳源种类；活性污泥模型；动力学参数；去除效率
中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)08-4235-10

Research on the impact mechanism of external carbon source types on wastewater treatment plants based on GPS-X. MO Hao, ZHAO Ting-ting, YAO Si-bo, YU Zhen-tian, AI Hai-nan* (Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China). *China Environmental Scienc*e, 2025,45(8)：4235~4244

Abstract: To investigate the overall effects of carbon source types on wastewater treatment plant (WWTP) performance, this study compared the impacts of three external carbon sources—a composite carbon source, sodium acetate and glucose—on the overall operational process. The results demonstrated that different carbon sources led to variations in the metabolic performance of heterotrophic microorganisms. Under the influence of the three carbon sources, the heterotrophic yield coefficients Y_H were 0.703 (composite carbon source), 0.676 (sodium acetate), and 0.889 (glucose), respectively. The heterotrophic decay coefficients b_H were 0.405, 0.433 and 0.775d^{-1}, while the maximum heterotrophic growth rates μ_{mH} were 2.146, 3.071 and 6.078d^{-1} respectively. Using GPS-X software, a model of the target WWTP was constructed and calibrated. The kinetic parameters under each carbon source were incorporated into the model for simulation. The results indicated that changes in kinetic parameters directly affected the treatment efficiency, energy consumption, sludge production, and greenhouse gas (GHG) emissions of the WWTP. In terms of total nitrogen removal efficiency, the composite carbon source and sodium acetate exhibited more significant advantages, albeit with increased energy consumption and GHG emissions. In contrast, while glucose was more energy-efficient and reduced carbon emissions, it resulted in lower nitrogen removal efficiency and potentially higher sludge production. After considering market pricing, the composite carbon source was found to be a more competitive option for denitrification.

Key words: type of carbon sources；activated sludge model；kinetic parameters；removal efficiency

目前,受限于我国排水体制与管道系统的结构性缺陷,城市污水处理厂普遍面临着进水水质难以满足生物脱氮要求的难题[1-2].为保证出水能满足排放要求,大部分污水处理厂在运行过程中通过外加碳源以提高脱氮效率[3],然而这一过程增加了污水厂的运行成本与能源消耗.因此关于外加碳源种类比选,减量化以及高效利用等相关问题一直是研究热点[4].

目前的研究表明,不同的外加碳源将对活性污泥动力学相关参数产生较大的影响.Cherchi 等[5]研究发现 20℃下甲醇的污泥反硝化速率为 6.1NO_3^--N/(gVSS·h),而乙酸钠为 13.6NO_3^--N/(gVSS·h);Wei Qi 等[6]通过研究几种碳源对 *Thauera* 属细菌反硝化效能的影响,发现代谢途径简单的碳源(如乙醇和乙酸钠)在促进微生物繁殖方面更为出色.但关于碳源种类对污水厂运行效能,污泥产量,能耗等方面影响的综合评估尚显匮乏.与此同时,以活

收稿日期: 2025-01-06
基金项目: 企业单位横线委托项目(02190026051505)
* 责任作者, 教授, aihainan@126.com

性污泥动力学为基础的活性污泥模型(ASMs)及商业软件(如 GPS-X,Biowin 等)已成为优化污水厂运营的重要工具[7-10].鉴于此,利用这些先进的软件平台,从上述多维度对碳源种类进行综合评价,显得尤为必要.

因此,本研究首先考察了不同碳源对活性污泥动力学参数的具体影响,重点关注了异养菌产率系数 Y_H,异养菌衰减系数 b_H 与异养菌最大生长比μ_{mH}的变化情况.并基于 GPS-X 模拟平台构建了实际污水处理厂模型,在模型校正后将测量的参数整合代入,从出水水质,能源消耗,污泥产量以及温室气体排放多个维度对不同种类碳源进行系统评估,以期为污水处理厂调控提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

动力学参数与污水厂进水 COD 组分的测定在实验室中进行,构建了如图 1 的微电极(Unisense,丹麦)-溶解氧测试平台.系统装置主要有(1)Unisense 氧气电位型微电极;(2)主机部分;(3)磁力搅拌器;(4)电脑;(5)进料管;(6)气泵;(7)1000mL 锥形瓶.

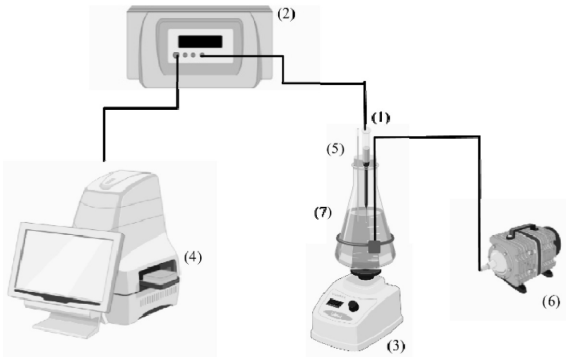


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.DO 微电极;2.主机;3.磁力搅拌器;4.电脑;5.进料管;6.气泵:(7)1000mL 锥形瓶

1.2 污水处理厂概况

目标污水处理厂为重庆市某污水厂,目前运行规模为 1.5 万 m^3/d,生物池采用缺氧前置 AAO 工艺,池体编号分别为缺氧 1 池,缺氧 2 池,厌氧池与好氧池.进水点与外回流点均与缺氧 1 池连接,外加碳源(复合碳源)与硝化液回流接入缺氧 2 池.其工艺流程如图 2:

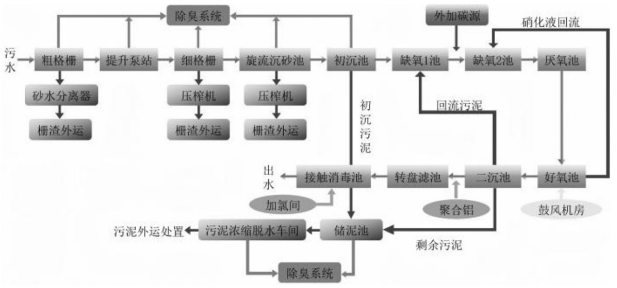


图 2 目标污水厂工艺流程图

Fig.2 Process flow diagram of the target sewage treatment plant

1.3 测试参数及方法

取好氧池出口的污泥,将其浓缩后,洗涤 3 次,除去残留的基质与代谢产物.将样品分成 3 个实验组,分别以目标污水处理厂实际添加的复合碳源(多元醇,乙酸钠,酶制剂以及维生素等组成),乙酸钠以及葡萄糖作为基质,对其进行持续 7d 的驯化.在实验前,对样品空曝数小时,使其进入内源呼吸期.

1.3.1 异养菌产率系数的测定 将 MLVSS 1000mg/L 的 3 组污泥分别投入锥形瓶中,并投入 20mg/L 丙烯基硫脲(ATU)溶液抑制硝化反应.随后加入一定量的对应碳源,通过电极连续记录溶液 DO 浓度,待 DO 曲线重新变得缓慢下降后停止试验.Y_H 的测定值通过下式确定[11]:

$$Y_H = 1 - \frac{\Delta DO}{S_S} \quad (1)$$

式中:ΔDO 为投入碳源时到结束实验期间的溶解氧浓度变化;S_S 为碳源的 COD 当量.

1.3.2 异养菌衰减系数的测定 取 MLVSS 2000mg /L 的 3 组污泥分别投入反应器并充分曝气,连续 5d 定时测定混合液 DO 下降曲线,测定时停止曝气,取 DO 曲线斜率为呼吸速率(OUR),做出其对数与时间的关系图.其斜率即为传统一级衰减速率 K_d,再由式(2)可换算得衰减系数 b_H:

$$b_H = \frac{K_d}{1 - Y_H(1 - f_i)} \quad (2)$$

式中:K_d 为传统一级衰减系数,d^{-1};f_i 为微生物中惰性颗粒比例,一般取 0.08[12].

1.3.3 异养菌最大生长比的测定 取 MLVSS 200mg /L 的 3 组污泥分别投入反应器并充分曝气,加入食微比 F/M=5 的对应碳源,连续检测其 DO 浓度.同时保证混合液 DO 大于 2mg/L,不足时采用间

歇大量曝气的方式补充.根据 DO 变化浓度做出 OUR 曲线,并绘制其对数与时间的关系图,斜率即为 $\mu_{mH}-b_H$.具体公式如(3):

$$\ln(\mathrm{OUR}) = \ln[\frac{1-Y_H}{Y_H}\mu_{mH} + (1-f_i)b_H]X + (\mu_{mH}-b_H)t \quad (3)$$

式中:X 为微生物浓度,mg/L;t 为时间,d.

1.3.4　进水组分测定　COD 组分测定参照卢培利等[13]的方法,主要测定易降解 COD(S_S),溶解惰性 COD(S_I),慢速可降解 COD(X_S),颗粒惰性 COD(X_I)以及生物量 COD(X_H).NO_3^--N,TN,TP 的测定依据《水与废水监测分析方法》第四版进行.

1.3.5　模型平台　本次研究模拟平台采用加拿大 Hydroamntis 公司开发的 GPS-X 软件.

1.3.6　模型评价方法　研究采用均方根误差(RMSE)与平均相对误差(REL)量化模型的预测质量,计算公式如式(4)与式(5):

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{i,m})^2}{n}} \quad (4)$$

$$\mathrm{REL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[(y_i - y_{i,m})^2/y_i^2)}{n}} \quad (5)$$

式中:y_i 为水质指标实际测量值;$y_{i,m}$ 为水质指标模拟值.平均相对误差代表实际值与模拟值之间的相对误差的平均值,是评价模型模拟效果的重要指标.在国际水协(IWA)出版的《活性污泥模型应用指南》中,认为模型有 5%~15%的误差是可以接受的[14].因此,本研究将 15 %作为模型评价指标的上限.

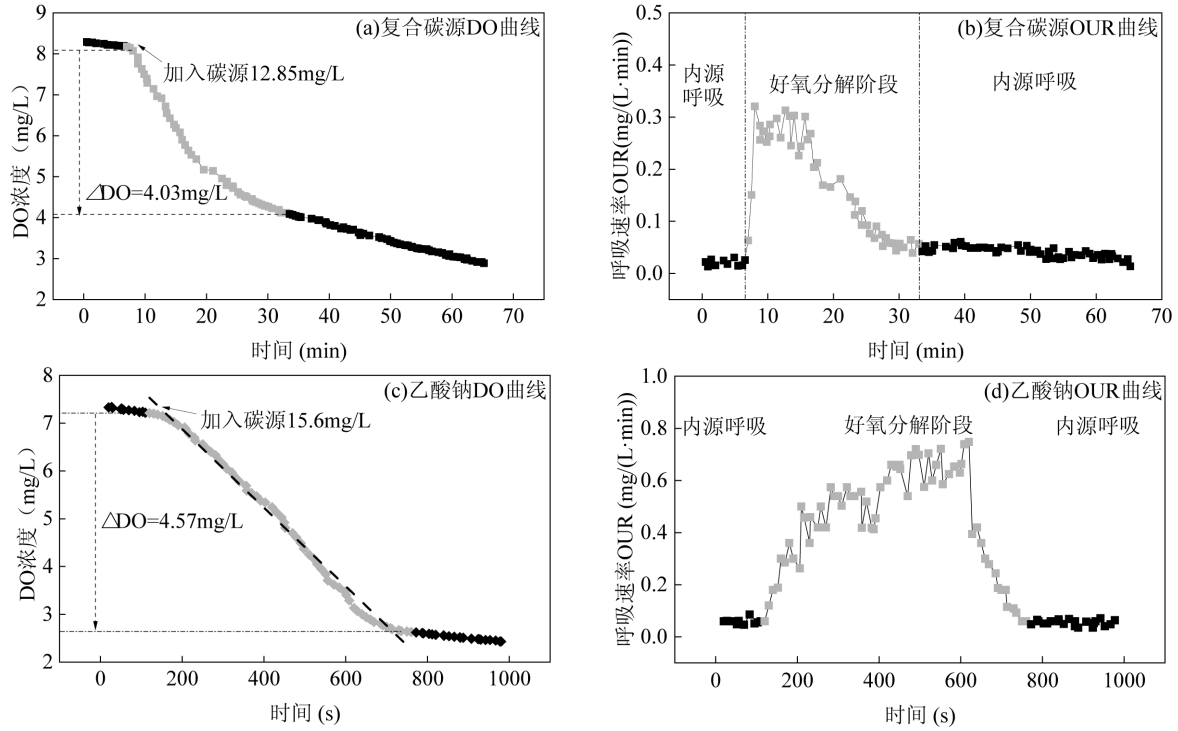
1.3.7　数据统计分析方法　本研究每个实验测试均重复 3 次进行,并使用 SPSS 软件对实验数据进行方差分析,以确保分析结果的准确性以及科学性.

2　结果与讨论

2.1　活性污泥动力学参数变化规律及原因分析

2.1.1　异养菌产率 Y_H 的变化规律　图 3 为 3 种碳源影响下活性污泥的 OUR 曲线,最终结果如表 1 所示.葡萄糖作基质时,活性污泥的 Y_H 最大,其次是复合碳源,乙酸钠最小.其中,乙酸钠与复合碳源的 Y_H 分别为 0.676 与 0.703,与李若谷等人的测试结果相似[15].而葡萄糖则高达 0.889,分别为复合碳源,乙酸钠的 126.46%与 131.51%(P<0.05).

2.1.2　异养菌衰减速率 b_H 的变化规律　由图 4 可知,复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖影响下的 b_H 分别为 0.405,0.433 和 0.775d^{-1}.在 3 种基质的驯化下,活性污泥的衰减系数均处于文献报道范围内(0.09~4.38d^{-1})[16],但葡萄糖的衰减系数显著高于其余两者(P<0.05).



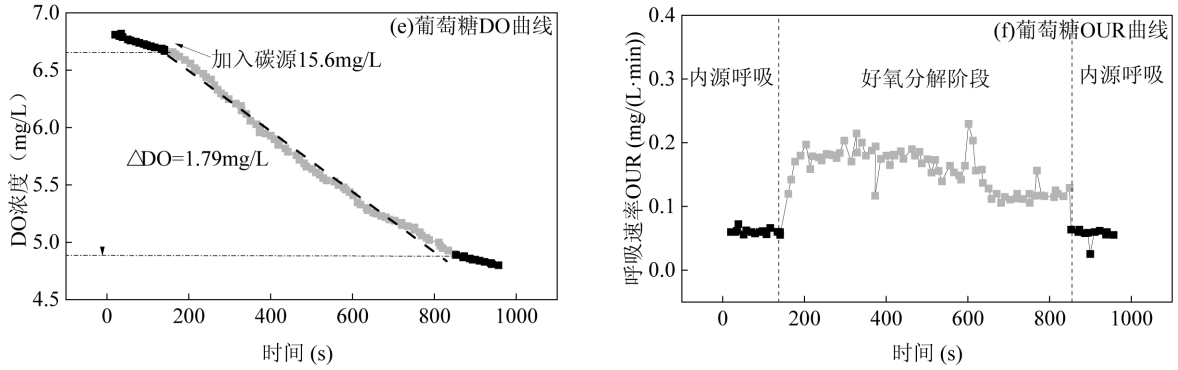


图 3 污泥呼吸速率曲线与溶解氧曲线

Fig.3 OUR curve and DO curve

表 1 异养菌产率测试结果

Table 1 Y_H test results

碳源种类	实验组	MLVSS (mg/L)	混合液基质(mg/L)	F/M	Y_H	平均值
复合碳源	第一组	1000	12.85	0.0156	0.687	0.703
	第二组	1000	15.60	0.0257	0.707	
	第三组	500	15.60	0.0257	0.717	
乙酸钠	第一组	1000	15.60	0.0156	0.707	0.676
	第二组	1000	15.60	0.0156	0.663	
	第三组	500	15.60	0.0312	0.658	
葡萄糖	第一组	1000	15.60	0.0156	0.888	0.889
	第二组	1000	15.60	0.0156	0.894	
	第三组	500	15.60	0.0312	0.885	

2.1.3 异养菌最大生长比μ_{mH}的变化规律 如图 5 所示,不同碳源影响下的μ_{mH}从大到小为:葡萄糖,乙酸钠,复合碳源,分别为 6.078,3.071 与 2.146d^{-1}.这与李超等[17]的研究结果类似,即葡萄糖为碳源时,异养菌的生长速率最大,其次是乙酸钠,最后是醇类物质.

2.1.4 变化规律成因分析 一般认为,Y_H代表着异养菌的生长速率与底物降解速率之间的比例系数;b_H代表着异养菌在无法向外界摄取有机物时的衰减速率;而μ_{mH}则决定了异养菌的最大增殖速率,三者均与微生物自身的特性和基质种类有关.

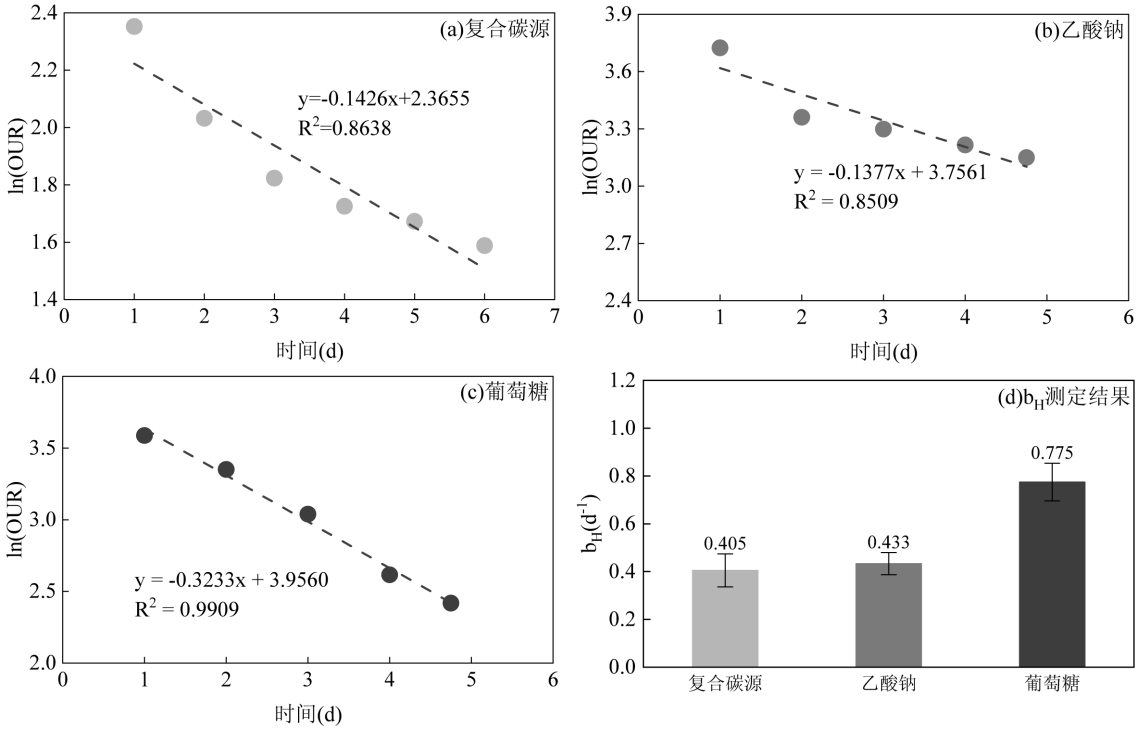


图 4 衰减期 ln(OUR)曲线测定结果

Fig.4 ln(OUR) curve results in the decay phase

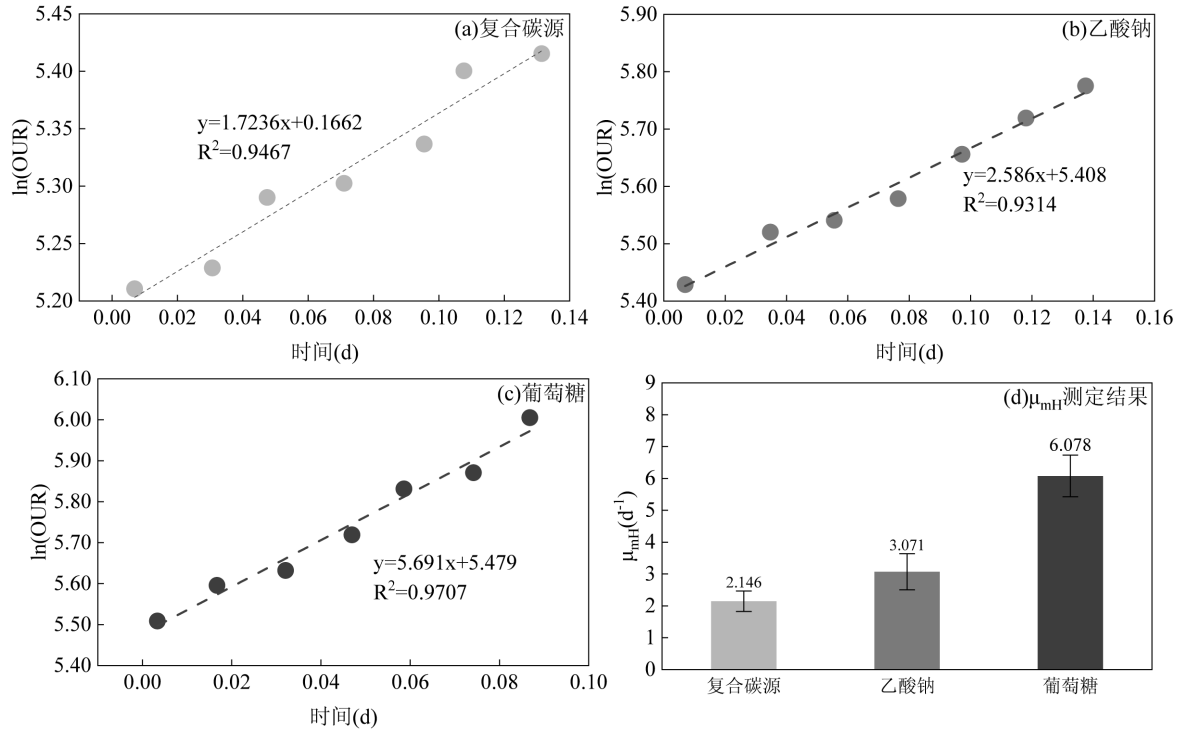


图 5　生长期 ln(OUR)曲线测定结果

Fig.5　ln(OUR) curve results in the growth phase

从实验结果可以看出,葡萄糖易用于活性污泥的合成代谢,绝大部分 COD 被转化为生物质;相比之下,乙酸钠作为分子量最小的挥发性脂肪酸,可直接被转化为乙酰辅酶,并进入三羧酸循环(TCA cycle),被水解为无机碳以提供能量,更多的有机质被用于分解代谢,故在合成代谢中的贡献比例相较于葡萄糖有所降低[4,18].因此,葡萄糖 Y_H 的测试水平高于乙酸钠,这也意味着以葡萄糖作为反硝化碳源,产泥量将显著升高[19].同时由于葡萄糖更易快速吸收并转化为细胞质,导致细胞数量显著增加,微生物整体增殖速率加快,因此其μ_{mH}最高.此外,在 ASMs 中,衰减过程采用了“死亡再生”概念,即衰减的微生物转化为颗粒产物以及 X_S,而 X_S 可用于在好氧或缺氧的条件下生成新的细胞.因而,b_H 在一定程度上也反映了微生物种群细胞更替速率与活性水平的情况.由于微生物在葡萄糖的影响下,其生长速率显著加快,进而强化了微生物更新换代的过程,这可能是其 b_H 提升的原因[20].

至于复合碳源,其组成物质复杂,包括醇类,乙酸钠等物质.由于醇类分子的结构相较于葡萄糖更为简单,代谢途径相对较短,且其水解产物为乙酸,丁酸等物质,故复合碳源呈现出的测试结果与乙酸钠接近.

2.2　污水处理厂进水组分特性

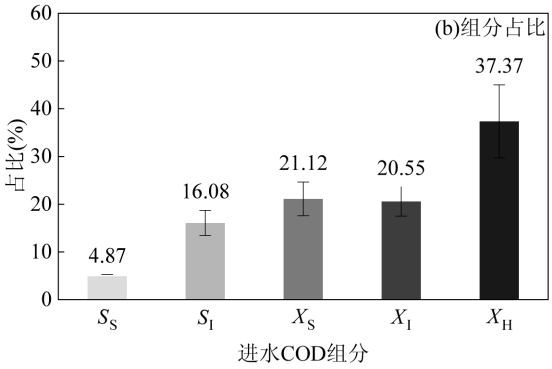


图 6　OUR 曲线以及 COD 组分占比

Fig.6　OUR curve and the proportion of COD components

图 6 为污水厂进水的呼吸测定结果,可见 COD 组分占比从大到小为 X_H,X_S,X_I,S_I 与 S_S,平均值分别为 37.37%, 21.12%, 20.55%,16.08%以及 4.87%.观察到 S_S 的占比仅为 4.53%~5.22%,显著低于 GPS-X 软件默认值 20%以及一般城市污水处理厂[13].分析其原因可能为:目标污水厂接收了部分工业废水,进而造成了有机物浓度的稀释;同时,长距离的管道输送使得进水中 X_H 有着足够的时间分解 S_S[21],污水中高活性的 X_H 便印证了这一推论,其占比高达 29.72%~

45.02%.鉴于污水厂所在城市为山地城市,地势起伏较大,由于重力流原因,管道处于未充满状态,输送过程中频繁跌水,能够对污水管道起到曝气作用,增强了进水微生物的代谢活性,从而提高了其繁殖速率以及对 S_S 的分解能力,进而导致了 S_S 浓度的降低.根据厂内调研以及进水实测,取 NO_3^--N 占 TN 的 30%;而正磷酸盐比例则采用 GPS-X 软件默认值,占 TP 的 80%.

2.3 污水处理厂模型的构建与校正

2.3.1 模型的构建 将目标污水厂的流程进行梳理后,对模型做出了适当的假设与简化:pH 值在模拟期间保持恒定且为中性;温度维持在 25℃;去除一级处理构筑物.具体全流程模型如图 7 所示:

2.3.2 模型的校正 进出水水量水质数据来源于污水处理厂 2023 年 3 月 15 日~5 月 20 日.研究采用了 COD,TN,NH_4^+-N 以及 TP 出水浓度作为模型评价指标,并将前述测定的复合碳源影响下的动力学参数以及进水组分代入模型,同时结合 GPS-X 软件本身的校核功能对其余参数进行调整.最终模拟结果如图 8 所示:

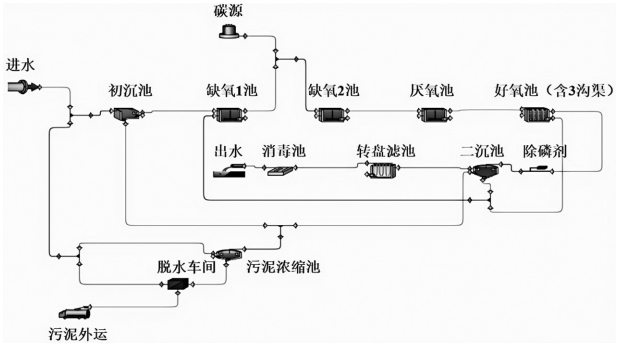


图 7 污水厂全流程模型

Fig.7 Full process model of the sewage treatment plant

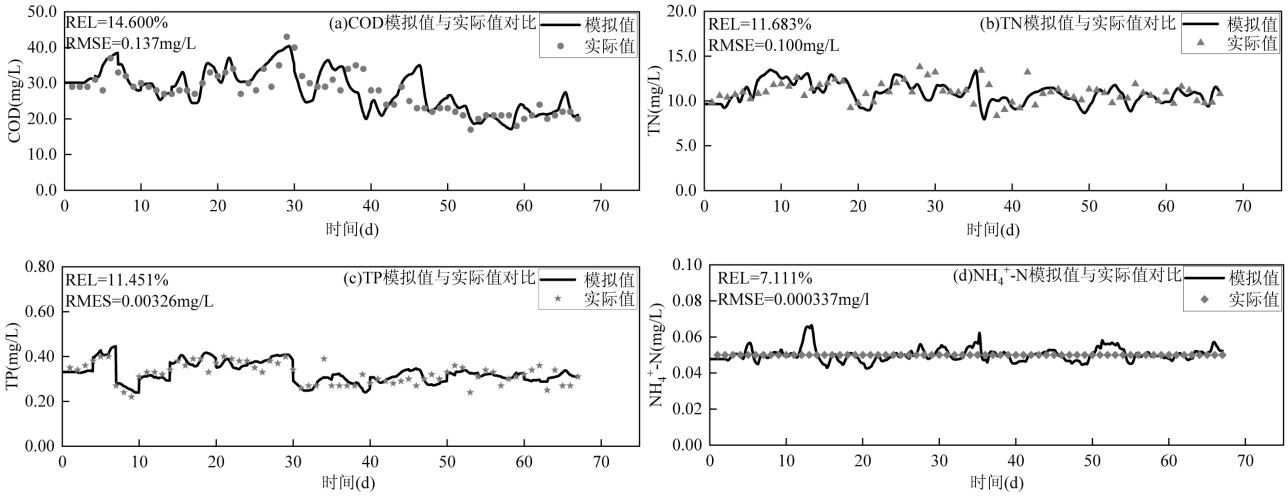


图 8 模型校正后的模拟结果

Fig.8 Simulation results after model calibration

表 2 各参数校正值

Table 2 Correction values for each parameter

参数	S_I	S_S	X_I	X_B	Y_H	μ_{mH}	b_H
GPS-X 名称	frsi	frss	frxi	frxbh	yhaircon	muhcon	bhcon
调整值	16.08%	4.78%	20.55%	37.37%	0.703	2.146	0.403
默认值	5%	20%	15%	0	0.666	3.2	0.62

通过 GPS-X 稳态模拟分析,发现模型对 COD,TN,TP 以及 NH_4^+-N 出水指标的模拟结果与实际测量值相接近,其平均相对误差 REL 分别为 14.60%,11.68%,11.45%与 7.11%,小于 15%的校核要求,表明模型拥有较高精度,并能够有效反映目标污水厂实际运行情况,可用于进一步探讨碳源对污水厂运行效能的影响.模型部分参数调整如表 2.

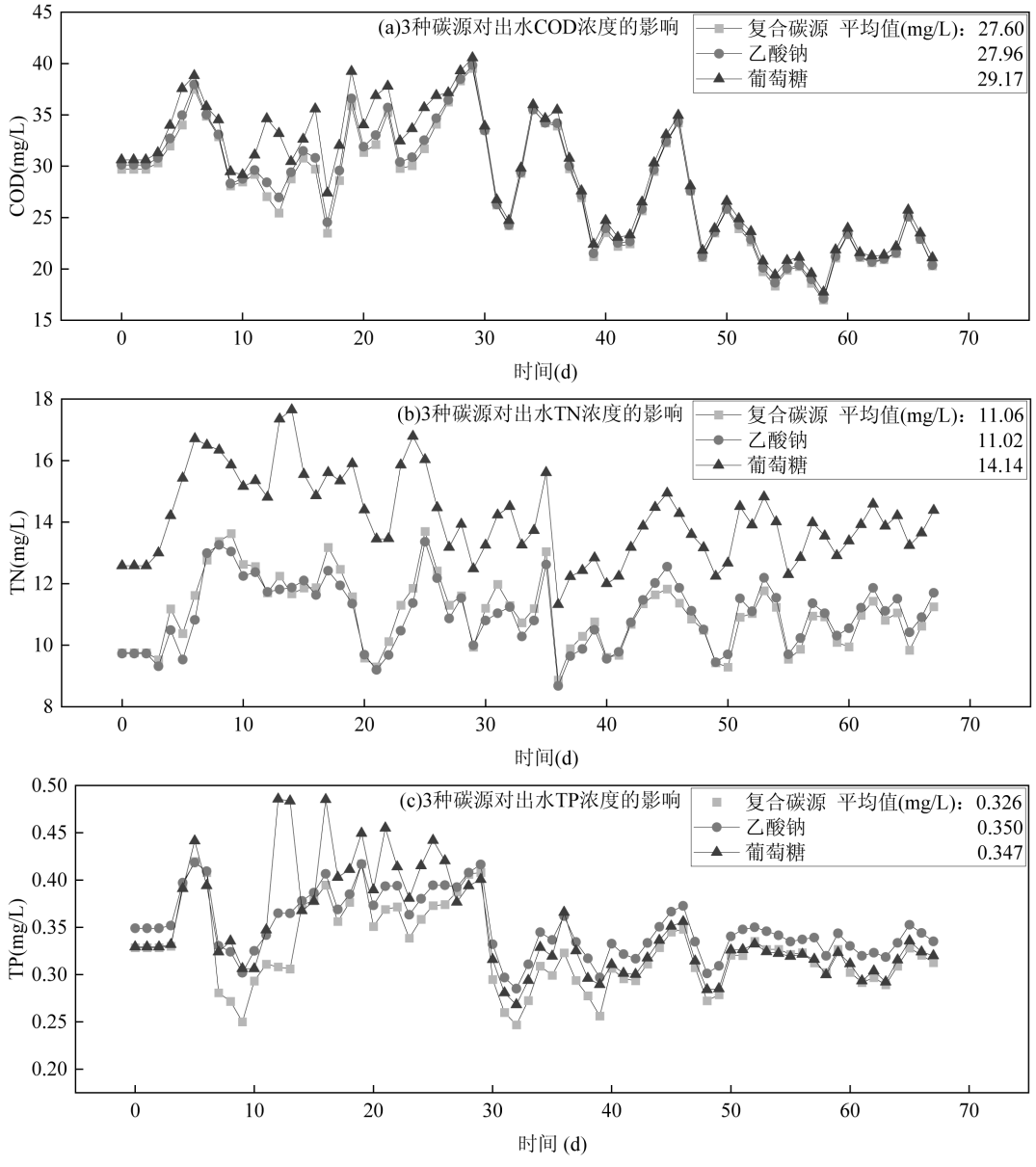
2.4 各碳源影响下污水处理厂的效能变化

在不改变现有工艺,各操作参数与进水水质的前提下,将各碳源的动力学参数分别输入模型中,并且设置每日投加碳源 COD 当量相同,对出水水质,电能消耗,产泥量以及温室气体排放量进行模拟.

2.4.1 出水水质分析 由图 9 可知,COD 的出水浓度变化并不显著,这主要是归因于出水中 COD 大

部分由 S_I 组成,而 3 种投加的有机物早已得到充分利用.对于 TN 指标而言,复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖影响下的 TN 出水浓度分别为 11.06,11.02 与 14.14mg/L,平均 TN 去除率分别为 72.64%,72.74% 与 65.02%,这与实验研究结果相似[22-23],即葡萄糖的除氮效率低于乙酸钠与复合碳源.去除率的不同可能是由于动力学参数的改变导致了模型在模拟异养菌缺氧生长过程中,基质与硝酸盐的化学计量数发生了改变,从而引起了模拟结果的改变.此外,由于研究未对聚磷菌的相关动力学参数进行观测,所以 TP 模拟结果未出现明显变化,且 3 种碳源影响下的出水 NH_4^+-N 指标显示均接近于 0.基于上述分析,在出水水质评价方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖.

2.4.2　电能消耗分析　如图 10 所示,复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖的每天平均用电量为 3195,3367 与 2839kW·h,其对应的瞬时功率分别为 133,140 与 118kW,主要在曝气系统能耗上发生了变化.这是由于葡萄糖 Y_H(0.894)显著高于复合碳源与乙酸钠,表明微生物利用葡萄糖时更多有机物被转化为生物质而非完全氧化,因此代谢相同 COD 当量的葡萄糖所需氧气量较少.故在投加葡萄糖的曝气系统中,减少一定的出风量仍可以保持生物池 DO 浓度.而复合碳源由于含多种常规碳源,因此所需氧气量在其余两种碳源之间.由此可见,在电能消耗方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖.



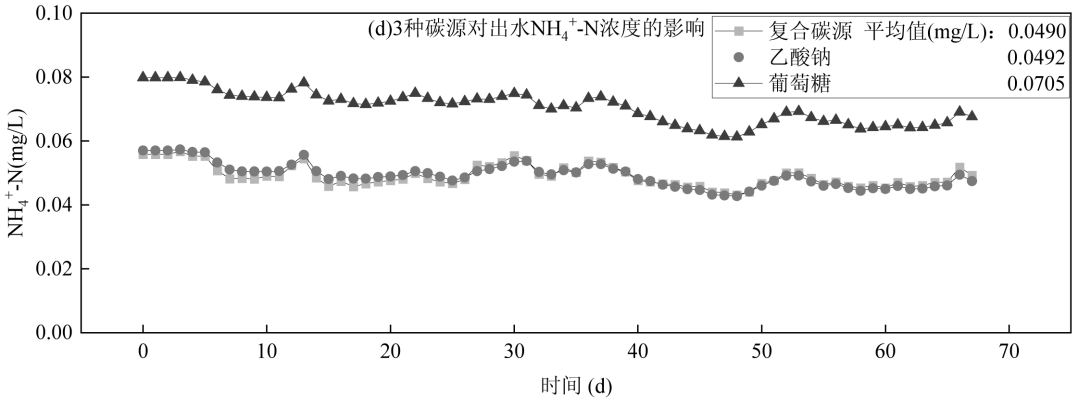


图 9 各碳源影响下的出水水质

Fig.9 Effluent water quality under various carbon sources

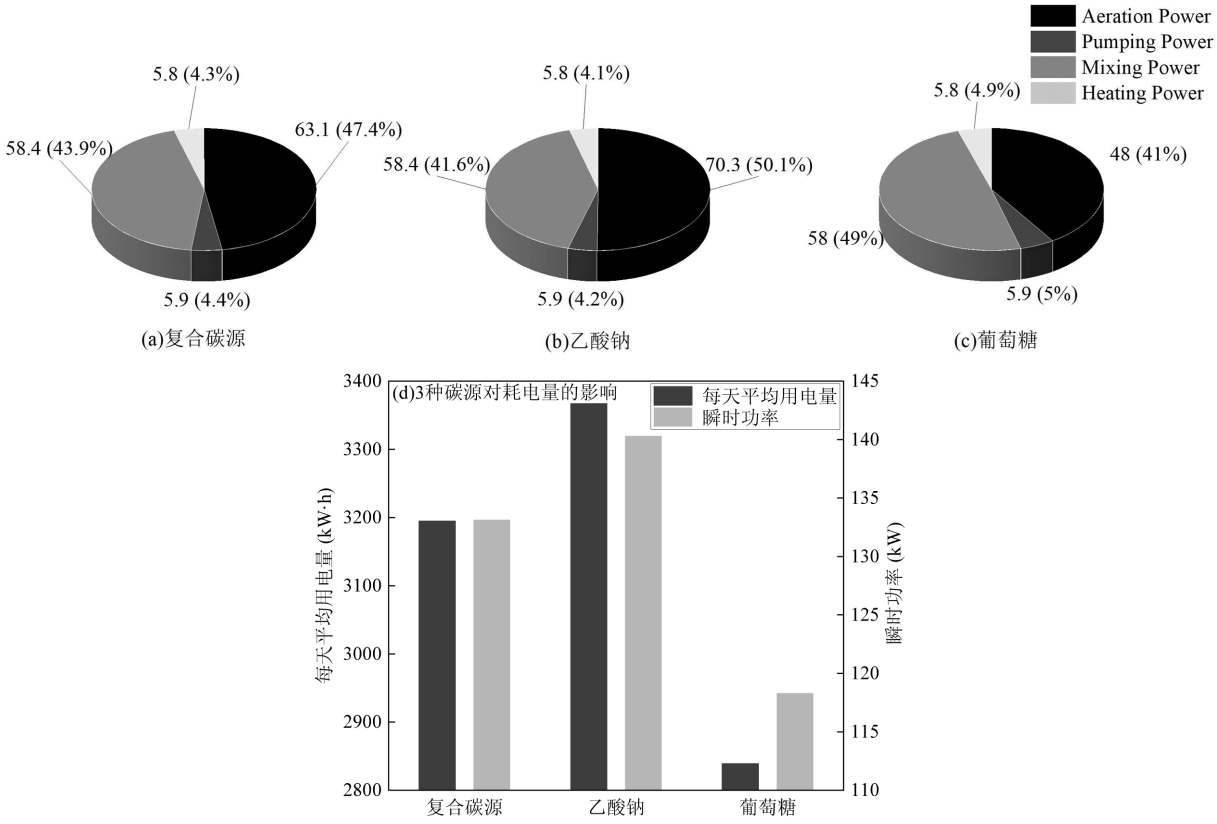


图 10 各碳源影响下的能耗结构与用电量

Fig.10 Energy consumption structure and electricity consumption under various carbon sources

2.4.3 污泥产量分析 运用 GPS-X 软件质量流功能,统计进入污泥浓缩池的干污泥 TSS 总质量,同时以含水率 80%计算泥饼重量,具体结果如图 11.可见污水厂投加复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖每天将产生出厂泥饼重量分别为 6390,6340kg 和 6816kg,每年的泥饼重量为 2332,2314 以及 2487t.与复合碳源相比,乙酸钠每年出厂泥饼量减少了 18t,而葡萄糖则增加了 155t.葡萄糖的高污泥产量与实际工程经验相符合,糖类物质由于其高生物生长量往往会出现工艺管道堵塞的现象,反应在动力学参数上则是高 Y_H 与高μ_{mH}.可见,在污泥产量方面:葡萄糖>复合碳源>乙酸钠.

2.4.4 温室气体排放分析 研究还重点考察了生化池的温室气体排放,并将 N_2O 与 CH_4 换算为同等温室效应的 CO_2 当量[24-25].具体结果如图 12,3 种碳源的温室气体每日平均排放量从高到低为复合碳

源,乙酸钠与葡萄糖,分别为 4.75,4.68 与 4.46tCO_2e/d,吨污水温室气体排放量为 0.402,0.396 与 0.377kgCO_2e/t,均处于文献报道的范围内[26-27].牛婷婷[28]的研究表明,以葡萄糖为碳源的人工湿地系统所产生的 CO_2 与 N_2O 排放量低于乙酸钠.这是由于乙酸钠更容易被微生物用于分解代谢,最终转化为 CO_2 等物质以提供能量,从而提升了温室气体排放.另外,由于复合碳源组成含有生物酶等物质[29],这可能提高了反硝化电子传递链的活性,强化了反硝化过程,促使更多 N_2O 转化为 N_2[30].而这一生物过程的变化,最终体现在动力学参数上,进而导致了复合碳源的模拟结果略低于乙酸钠.因此,在温室气体排放方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖.

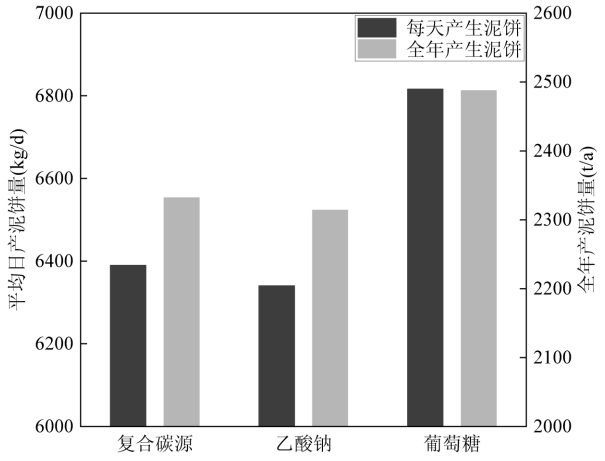


图 11　各碳源影响下的污泥产量

Fig.11　Sludge production under various carbon sources

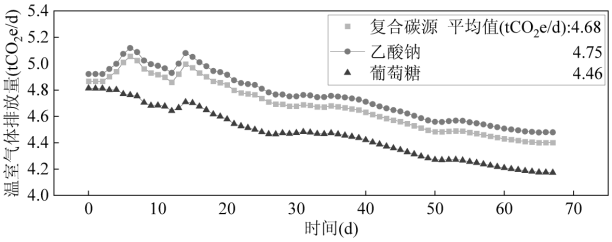


图 12　各碳源影响下的碳排放量

Fig.12　Carbon emissions under various carbon sources

以上分析表明,在处理 TN 方面,复合碳源和乙酸钠展现出了更为突出的优势,但会造成更高水平的能耗与碳排放;相比之下,葡萄糖虽然在节能减排方面具有优势,但除氮效率较低,有超标的风险,且有导致污水厂产泥增多的可能.此外,根据目标污水厂与市场调研,复合碳源,乙酸钠与葡萄糖的每吨价格约为 900 元,2850 元与 1800 元[18],复合碳源 COD 当量为 40 万 mg/L,厂内平均每日投加量约 2.02t;电价以 0.1 元/kW·h 估计,污泥处置以 250 元/t 估计,则 3 种碳源平均日运行费用如表 3.

表 3　日运行费用估算

Table 3　Daily operating cost estimation

碳源种类	COD 当量(g/g)	含量(%)	投加量(t/d)	投加 COD 当量(t/d)	碳源投加费用(元/d)	电能消耗费用(元/d)	污泥处置费用(元/d)	合计(元/d)
复合碳源	0.40	99	2.02	0.81	1818	320	1598	3736
乙酸钠	0.78	60	1.73	0.81	4931	337	1585	6853
葡萄糖	1.07	99	0.76	0.81	1368	284	1705	3357

综上所述,从出水水质,运行费用以及节能减排效益等多个维度进行考量,复合碳源作为反硝化碳源更具优势.

3　结论

3.1　活性污泥在复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖的影响下,动力学参数 Y_H 分别为 0.703,0.676 与 0.889;b_H 分别为 0.405,0.433 与 0.775d^{-1};μ_{mH} 分别为 2.146,3.071 与 6.078d^{-1}.

3.2　污水厂进水 COD 组分 X_B,X_S,X_I,S_I 与 S_S 的占比平均值分别为 37.37%,21.12%,20.55%,16.08%以及 4.87%,低易降解 COD 占比可能与山地城市地形与接收工业污水等因素有关;模型的出水数据与实测数据吻合较好,可用于进一步模拟分析.

3.3　模拟结果显示,复合碳源,乙酸钠以及葡萄糖能够对污水厂的多个运行效能产生影响.其中,在出水 TN 去除率方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖(72.74%>72.64%>65.02%);在曝气能耗方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖(118.64%>112.71%>100%);在污泥产量方面:葡萄糖>复合碳源>乙酸钠(106.65%>100.78%>100%);在温室气体排放量方面:乙酸钠>复合碳源>葡萄糖(106.63%>105.40%>100%).

参考文献:

[1] 周小国,惠二青,彭寿海,等.长江沿线污水处理厂进水 BOD_5 浓度与管网运营调查分析 [J]. 给水排水, 2021,57(S01):129-133.
Zhou X G, Hui E Q, Peng S H, et al. Investigation and analysis of BOD_5concentration for sewage plants and pipe network operation along the Yangtze River [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(S01):129-133.

[2] 孙永利,许光明,游　佳,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.
Sun Yong li, Xu Guang ming, You Jia, et al. Selection of external carbon source for municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010,26(19):84-86.

[3] Isaacs S H, Henze M. Ccontrolled carbon source addition to an alternating nitrification denitrification waste-water treatment process including biological P-removal [J]. Water Research, 1995,29(1):77-89.

[4] 吴光学,时运红,魏 楠,等.外加常规碳源污水反硝化脱氮研究进展 [J]. 给水排水, 2014,40(S1):168-172.
Wu G X, Shi Y H, Wei N, et al. The research progress on denitrification in wastewater using additional conventional carbon sources [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014,40(S1):168-172.

[5] Cherchi C, Onnis A, El I, et al. Implication of using different carbon sources for denitrification in wastewater treatments [J]. Water Environment Research, 2009,81(8):788-799.

[6] 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.

[7] Gao F, Nan J, Li S N, et al. Modeling and simulation of a biological process for treating different COD: N ratio wastewater using an extended ASM1model [J]. Chemical Engineering Journal, 2018,332:671-681.

[8] Wu X H, Yang Y, Wu G M, et al. Simulation and optimization of a coking wastewater biological treatment process by activated sludge models (ASM) [J]. Journal of Environmental Management, 2016,165:235-242.

[9] 周 振,胡大龙,吴志超,等.基于数学模型的多模式AAO系统运行优化研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(7):1734-1739.
Zhou Z, Hu D L; Wu Z C, et al. Model-based optimization of the multimode anaerobic/anoxic/aerobic system [J]. China Environmental Science, 2014,34(7):1734-1739.

[10] 陈治池,何 强,蔡 然,等.碳中和趋势下数学模拟在污水处理系统中的发展与综合应用 [J]. 中国环境科学, 2022,42(6):2587-2602.
Chen Z C, He Q, Cai R, et al. Development and comprehensive application of mathematical simulation in sewage treatment system under the trend of carbon neutralization [J]. China Environmental Science, 2022,42(6):2587-2602.

[11] Strotmann U J, Geldern A, Kuhn A, et al.Evaluation of a respirometric test method to determine the heterotrophic yield coefficient of activated sludge bacteria [J]. Chemosphere, 1999,38(15):3555-3570.

[12] Henze M, Gujer W, Mino T, et al.Activated sludge model No.2d, ASM2d [J]. Water Science and Technology, 1999,39(1):165-182.

[13] 卢培利,艾海男,张代钧,等.废水COD组分表征方法体系构建与应用 [M]. 科学出版社, 2012:1-172.
Lu P L, Ai H N, Zhang D J, et al. Construction and application of a characterization methodology system for wastewater COD components [M]. Science Press, 2012:1-172.

[14] Rieger L, Gillot S, Langergraber G, et al. Guidelines for using activated sludge models [M]. IWA publishing, 2012:122-123.

[15] 李若谷,孙 艳,张雁秋,等.差压仪测定活性污泥中异养菌产率系数的研究 [J]. 中国给水排水, 2012,28(21):113-116.
Li R G, Sun Y, Zhang Y Q, et al. Determination of heterotrophic bacteria yield coefficient in activated sludge with manometric respirometer [J]. China Water & Wastewater, 2012,28(21):113-116.

[16] 华立娜.呼吸计量法对葡萄糖,乙酸钠和甲醇为基质的ASM1参数测定 [D]. 长安:长安大学, 2012.
Hua L N. Determination of parameters in Activated Sludge Model No.1 (ASM1) with respirometry method and with Glucose, Sodium acetate and Methanol as substrate [D]. Changan: Changan University, 2012.

[17] 李 超,冯玉杰,张大伟.营养条件对 *Chlorella vulgaris* 生长的影响 [J]. 太阳能学报, 2011,32(8):1134-1138.
Li C, Feng Y J, Zhang D W. Effect of nutrient condition on the growth of *chlorella vulgaris* [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011,32(8):1134-1138.

[18] 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(中英文), 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.

[19] 邵 留,徐祖信,尹海龙.污染水体脱氮工艺中外加碳源的研究进展 [J]. 工业水处理, 2007,27(12):10-14.
Shao L, Xu Z X; Yin H L. Advances in the polluted water denitrification by using additional carbon sources [J]. Industrial Water Treatment, 2007,27(12):10-14.

[20] 樊 磊,赵 煜,李 婷,等.葡萄糖乙酸钠不同基质微生物燃料电池电化学性能对比研究 [J]. 电化学, 2016,22(1):81-87.
Fan L, Zhao Y, Li T, et al. The study on comparison of electrochemical performance in microbial fuel cell with glucose and sodium acetate acting as substrates [J]. Journal of Electrochemistry, 2016,22(1):81-87.

[21] 周 振,吴志超,王志伟,等.基于活性污泥模型的污水COD组分划分方案研究 [J]. 环境科学, 2010,31(6):1478-1482.
Zhou Z, Wu Z C, Wang Z W, et al. Activated Sludge Model based cod fractionation in wastewater characterization [J]. Environmental Science, 2010,31(6):1478-1482.

[22] 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.

[23] 唐子玮.不同碳源与投加方式强化生化池及深床反硝化滤池脱氮性能研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2022.
Kang Z W. different carbons sources and adding methods to strengthen biochemical pools and denitrifying performance of deep bed denitrifying filter [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[24] Short M D, Daikeler A, Wallis K, et al.Dissolved methane in the influent of three Australian wastewater treatment plants fed by gravity sewers [J]. Science of the Total Environment, 2017,599:85-93.

[25] Masuda S, Suzuki S, Sano I, et al.The seasonal variation of emission of greenhouse gases from a full-scale sewage treatment plant [J]. Chemosphere, 2015,140:167-173.

[26] 钱晓雍,胡 静,李 丹,等.上海城镇污水处理厂温室气体排放核算及其特征 [J]. 中国给水排水, 2022,38(21):39-44.
Qian X Y, Hu J, Li D, et al. Calculation and characteristics of greenhouse gas emission from urban wastewater treatment plants in shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2022,38(21):39-44.

[27] Huang F N, Shen W H, Zhang X W, et al.Impacts of dissolved oxygen control on different greenhouse gas emission sources in wastewater treatment process [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,274:123233.

[28] 牛婷婷.碳源对微生物燃料电池耦合人工湿地(MFC-CWs)水质净化与气体排放的影响研究 [D]. 长春:东北师范大学, 2022.
Niu T T. Study on effects of carbon sources on water purification and gases emission of MFC-CWs [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2022.

[29] 范双刚,龚代高,陈伟杰.一种复合碳源生物酶制备方法:中国, CN202311186905.8 [P]. 2024-01-12.
Fan S G, Gong D G, Chen W J. A preparation method for a composite carbon source bioenzyme: China, CN202311186905.8 [P]. 2024-01-12.

[30] 徐炜谟,张 龙,李润佳,等.水钠锰矿对沉积物反硝化过程的影响机制 [J]. 中国环境科学, 2023,43(7):3704-3712.
Xu W M, Zhang L, Li R J, et al. The effect mechanism of K-Birnessite on denitrification in sediments [J]. China Environmental Science, 2023,43(7):3704-3712.

作者简介：莫 昊(1999-)男,重庆忠县人,重庆大学硕士研究生,研究方向为污水厂脱氮处理技术.发表论文 1 篇.1084342934@qq.com.