

活性污泥作用下固体碳源释碳及脱氮性能比选

孙凤海¹, 刘昱迪¹, 方远航¹, 傅金祥¹, 唐婧¹, 张旭²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 东北大学设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110004)

摘要 目的 研究不同固体碳源在活性污泥作用下的释碳特性, 优选出释碳性能良好的反硝化碳源种类, 进而解决低碳氮比污水脱氮效果不佳的问题, 并实现农业废弃物的资源化利用。方法 采用室内静态试验, 以玉米芯(有皮玉米芯和无皮玉米芯)、大豆壳、稻秆为外加固体碳源, 通过比较各固体碳源沉降性、碳源浸泡液可生化性、及活性污泥作用下的水解释碳特性, 优选出释碳品质良好, 适宜作为反硝化外加碳源的固体碳源。结果 有皮玉米芯和稻秆可在7 d和4 d内完全去除50 mg的硝酸盐氮, 在浸泡过程中水解产生的累积葡萄糖质量浓度占COD释放量的37.11%和24.62%。结论 有皮玉米芯和稻秆的释碳品质较大豆壳更佳, 更适宜作为外加碳源应用于反硝化脱氮研究。

关键词 固体碳源; 释碳特性; 可生化性; 反硝化

中图分类号 X703

文献标志码 A

Comparison and Characteristics of Carbon Releasing of Solid Carbon Source and Nitrogen Removal under the Effect of Activated Sludge

SUN Fenghai¹, LIU Yudi¹, FANG Yuanhang¹, FU Jinxiang¹, TANG Jing¹, ZHANG Xu²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Northeastern University Design Institute, Shenyang, China, 110004)

Abstract: The characteristics of carbon releasing of kinds of solid carbon source under the effect of activated sludge were studied. Optimal selection of suitable carbon source was gotten. It could solve the problem which led to poor effect on nitrogen removal of sewage. And it could achieve the utilization of agricultural waste. Corn cob (including corn cob with epidermis and corn cob without epidermis), soybean hull and rice straw were prepared and used as solid carbon source for denitrifying bacteria by a static test. This paper focused on the settle ability of carbon source, biodegradability and the carbon releasing characteristics of carbon soakage liquid were investigated and compared. The optimal and high quality carbon releasing of carbon source would be selected. It

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202-011)

作者简介: 孙凤海(1960—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事污水控制理论与技术研究。

was demonstrated that systems using corncob with epidermis and rice straw could remove 50 mg of nitrate nitrogen after 7 d and 4 d. Glucose releasing accounted for 37.11% and 24.62% of COD under the effect of activated sludge. They were more suitable for carbon source because of high quality and the moderate release capacity than soybean hull.

Key words: solid carbon source; the carbon releasing characteristics; biodegradability; denitrification

随着城市化进程加快,饮食的营养结构发生了改变,导致生活污水碳氮比降低.当污水碳氮比低于6时,反硝化过程不完全,出水总氮浓度偏高,无法达到城镇污水排放一级A标准^[1],需人为补充有机碳源,提高碳氮比.目前乙酸钠、葡萄糖、甲醇、甲烷、高分子材料等常作为外加碳源应用至生物脱氮工艺中^[2-5].但葡萄糖和乙酸钠投加量不易控制^[4-6],甲醇作为碳源需要一定的响应时间,聚羟基烷酸(Poly Hydroxy Alkanoates, PHAs)类多聚物作为外加碳源价格高且需外加微量元素^[7-8],在以啤酒废水作为A²/O工艺的外加碳源时,虽然可以调节系统的碳氮比,增强系统对COD质量浓度变化的抵抗力,但会造成污泥膨胀^[9].而天然纤维材料因含有大量纤维素、易降解、具备一定的机械强度、经济易得等优点,被作为外加碳源进行研究^[10-13].罗佳等^[14]的研究中,在秸秆碳化物中分别添加了甲醇、稻壳和木屑,对富营养化水体中总氮的移除率比只添加生物膜载体的反应器分别提高了29.8%、14.3%、17.1%.张兰河等^[15]的研究中,在以棉花为外加碳源时,进水硝酸盐氮质量浓度为22.6 mg/L,水力停留时间不小于9.8 h时,硝酸盐氮可以完全去除.曹文平等^[16]在以竹丝和PBS作为碳源进行反硝化特性对比研究中发现,以竹丝和PBS作为反硝化碳源和载体在相同条件下,竹丝比PBS更廉价,具有更高的硝酸盐去除率.在以稻草为反硝化外加碳源时,系统一周内可以达到稳定,硝酸盐氮去除率达90%以上^[17],可见农业废弃物类纤维材质可作为反硝化外加碳源开展深入研究.

但是,在目前的研究中,对微生物利用的

碳源成分以及在活性污泥作用下的释碳特性、可生化性及反硝化性能的研究尚浅.基于此,笔者以玉米芯(有皮玉米芯和无皮玉米芯)、大豆壳、稻秆为固体碳源的研究对象,开展各固体碳源沉降性能以及在活性污泥作用下的释碳特性研究以及SBBR的脱氮性能研究,优选出释碳量适宜且易被微生物利用的优质碳源作为反硝化的外加碳源,为实际应用提供基础数据.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用玉米芯(有皮玉米芯、无皮玉米芯)、大豆壳、稻秆作为固体碳源研究对象,所选材料均来自沈阳建筑大学稻田园区,其中一部分玉米芯破碎成1 cm³的块状,另一部分玉米芯破碎得到内部软芯,并将其切成1 cm³的块状,稻秆剪成2 cm段状,大豆壳仅去除表面杂物,不进行破碎.将所有碳源用去离子水清洗去灰,并放置烘箱中,在80℃下加热、烘干5 h后取出分别放置密封袋保存.

1.1.1 固体碳源沉降性比选

分别称取上述处理后的固体碳源各2 g,有皮玉米芯6粒,大豆壳36片,稻秆20段,无皮玉米芯94粒.分别放置4个大小相同且含有500 mL去离子水的1 L烧杯中浸泡.为减少试验过程中因碳源吸水后造成的质量误差,因此在碳源沉降性比选试验中,沉降比选按碳源沉降个数所占总个数百分比计.

沉降比为检测材料沉降数目占总体材料的百分比:

$$\text{沉降比} = \frac{\text{沉降颗数}}{\text{材料总数}} \times 100\%. \quad (1)$$

1.1.2 固体碳源释碳特性比选

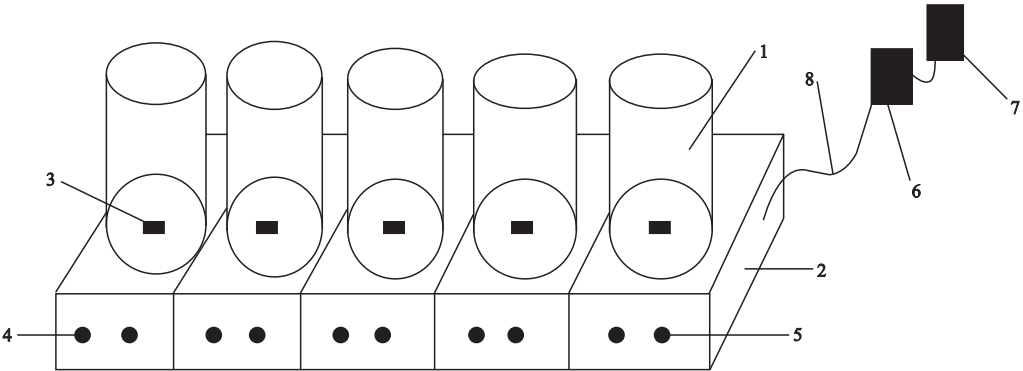
在编号分别为0~4号的反应器中,分别接种富集污泥150 mL,每个反应器中都加入硝酸钾0.363 g、去离子水350 mL,并搅拌均匀,此时每个反应器内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度为100 mg/L.称取烘干、去灰的有皮玉米芯、大豆壳、稻秆、无皮玉米芯各5 g,分别加入1~4号反应器,在0号反应器中加入0.1 g葡萄糖(此时反应器内葡萄糖质量浓度为200 mg/L),不添加固体碳源.0~4号反应器每24 h取出沉淀期结束后的碳源浸泡液的上清液100 mL,并随后补充100 mL去离子水,0号反应器除补充100 mL去离子水,再补充0.1 g葡萄糖,各反应器均采用1.3节中的运行方式运行.

1.2 污泥培养

接种污泥取自抚顺三宝屯污水处理厂二沉池剩余污泥,经20 d搅拌培养,污泥质量浓度(MLSS)为10 345 mg/L,取出750 mL培养污泥,平均接种至5个反应器中,则每个反应器接种150 mL,此时每个反应器的污泥质量浓度约为3 000 mg/L.

1.3 试验装置及运行方式

系统装置如图1所示,试验采用5个完全相同的有机玻璃圆柱形反应器,直径12 cm,高10 cm(设超高1 cm).采用磁力搅拌方式,按试验设定的投加量加入固体碳源,以缺氧-厌氧交替运行,搅拌5 h→沉淀50 min→取样10 min,6 h为一个周期,每日运行4个周期.



1.有机玻璃反应器;2.磁力搅拌器;3.磁力转子;4.转速调节钮;5.温度调节钮;6.时控开关;7.电源;8.电源线。

图1 SBRR 系统装置图

Fig. 1 Device of SBRR

1.4 试验分析方法

本试验需检测 COD、葡萄糖、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 BOD_5 等指标的质量浓度以及浸泡液的 UV_{254} ,在水样分析项目的测定过程中,COD 质量浓度采用重铬酸盐法测定, BOD_5 质量浓度采用五日生化需氧量稀释法测定,葡萄糖和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的质量浓度分别采用葡萄糖氧化酶法和紫外分光光度法测定, UV_{254} 采用 U-3010 紫外分光光度法测定.

2 试验结果与讨论

2.1 固体碳源的沉降性能比选

以浸泡8 d 玉米芯完全沉降为准,各固

体碳源沉降性试验结果如图2所示.有皮玉米芯、无皮玉米芯、稻秆在浸泡前4 d 均无沉降,只有大豆壳出现微量沉降.在浸泡6 d 时,各农业废弃物都相继出现沉降,有皮玉米芯出现92.31%的沉降,此时大豆壳也出现大量沉降,沉降比为63.89%,而稻秆和无皮玉米芯的沉降比分别为5%、2.13%;直至浸泡8 d 时,有皮玉米芯完全沉降,此时大豆壳、稻秆、无皮玉米芯的沉降比分别为77.78%、15%、10.64%.大豆壳在浸泡13 d 后全部沉降,稻秆98%沉降,无皮玉米芯15 d 后大部分悬浮沉降.可见,有皮玉米芯的沉降性最佳,大豆壳次之,无皮玉米芯因其密度较小

(经计算仅为 0.0457 g/cm^3),沉降性最差,就沉降性而言,不宜作为反硝化外加碳源。

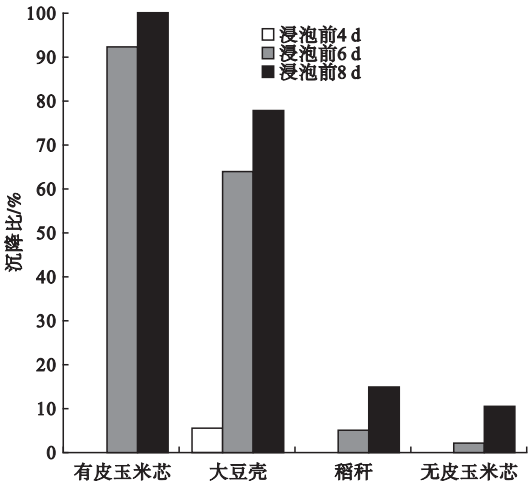


图2 各固体碳源的沉降性比较

Fig.2 Settle ability of solid carbon source performance comparison

2.2 固体碳源在污泥中的释碳特性比选

各反应器按1.3节中运行方式进行,投加固体碳源后,连续25 d检测各反应器固体碳源浸泡上清液COD和葡萄糖的释出及硝酸盐氮的去除情况,通过释碳特性的比较,优选出释碳性能较好的固体碳源种类。葡萄糖含量及硝酸盐氮去除情况如图3所示。

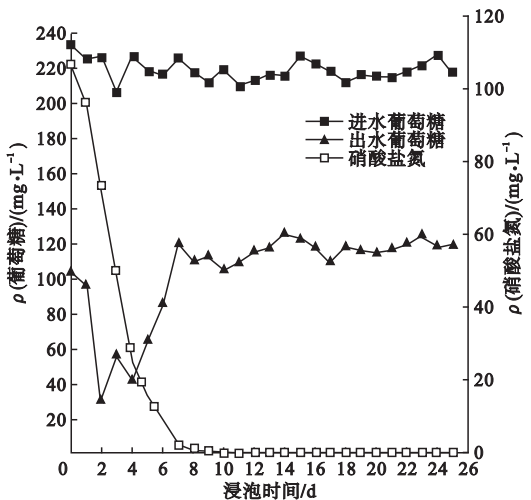


图3 0号反应器进出水葡萄糖含量及硝酸盐氮去除情况

Fig.3 Removal of nitrate nitrogen and the change of glucose using glucose as carbon source

以葡萄糖为碳源的0号反应器,历时8 d可将 50 mg 硝酸盐氮完全去除,根据第

2~6天,每日进出水葡萄糖含量差值以及对硝酸盐氮去除量,计算得出该工艺去除 1 g 硝酸盐氮需要消耗 10.07 g 葡萄糖。

第 i 天去除 $1\text{ g NO}_3^- - \text{N}$ 对应消耗葡萄糖质量 =

$$\frac{C_{\text{第}i\text{天葡萄糖进水后}} V_{\text{反应器}} - C_{\text{第}i+1\text{天葡萄糖出水时}} V_{\text{反应器}}}{C_{\text{第}i\text{天硝酸盐氮}} V_{\text{反应器}} - C_{\text{第}i+1\text{天葡萄糖出水时}} V_{\text{反应器}}} \quad (2)$$

COD释放及硝酸盐氮去除情况如图4所示。图中,累积释放质量浓度 ρ (COD累积) = ρ (COD实测值) + ρ (葡萄糖消耗值) + ρ (COD折损值); ρ (COD实测值)表示试验中每天COD质量浓度的实际检测值; ρ (葡萄糖消耗值)表示系统反硝化去除硝酸盐氮的质量浓度对应消耗的葡萄糖质量浓度; ρ (COD折损值)表示每次用于测样所损耗掉的COD质量浓度。

以农业废弃物作为外加碳源,可为微生物提供有机碳源发生反硝化反应,历时3~11 d将 50 mg 硝酸盐氮完全去除,稻秆历时时间最短仅为4 d,大豆壳用时5 d,有皮玉米芯用时7 d,无皮玉米芯用时最长为11 d;各固体碳源连续浸泡25 d后,无皮玉米芯、大豆壳、稻秆和有皮玉米芯的COD累积释放质量浓度分别为 5142.52 mg/L 、 4721.79 mg/L 、 3977.75 mg/L 和 1581.86 mg/L ;各固体碳源在浸泡10~16 d释碳达到稳定后,有皮玉米芯、大豆壳、稻秆、无皮玉米芯在释碳稳定期的每日COD释放质量浓度分别为 22.84 mg/L 、 47.58 mg/L 、 58.83 mg/L 、 28.25 mg/L ,其中无皮玉米芯在浸泡18 d时,浸泡液度COD质量浓度实测值达到了 4211.84 mg/L ,每日释碳量由 87.90 mg/L 降低至 23 mg/L 左右,表明质量浓度过大抑制其释碳。

试验所选固体碳源的主要成分是纤维素和半纤维素,因活性污泥中主要含有原生动物、后生动物、细菌等,其中多数微生物都含有纤维素酶(胞内酶),可以使纤维素水解产生葡萄糖^[18-19]。葡萄糖分子结构较小,会优先被微生物利用,因此,可以认为葡萄糖的产

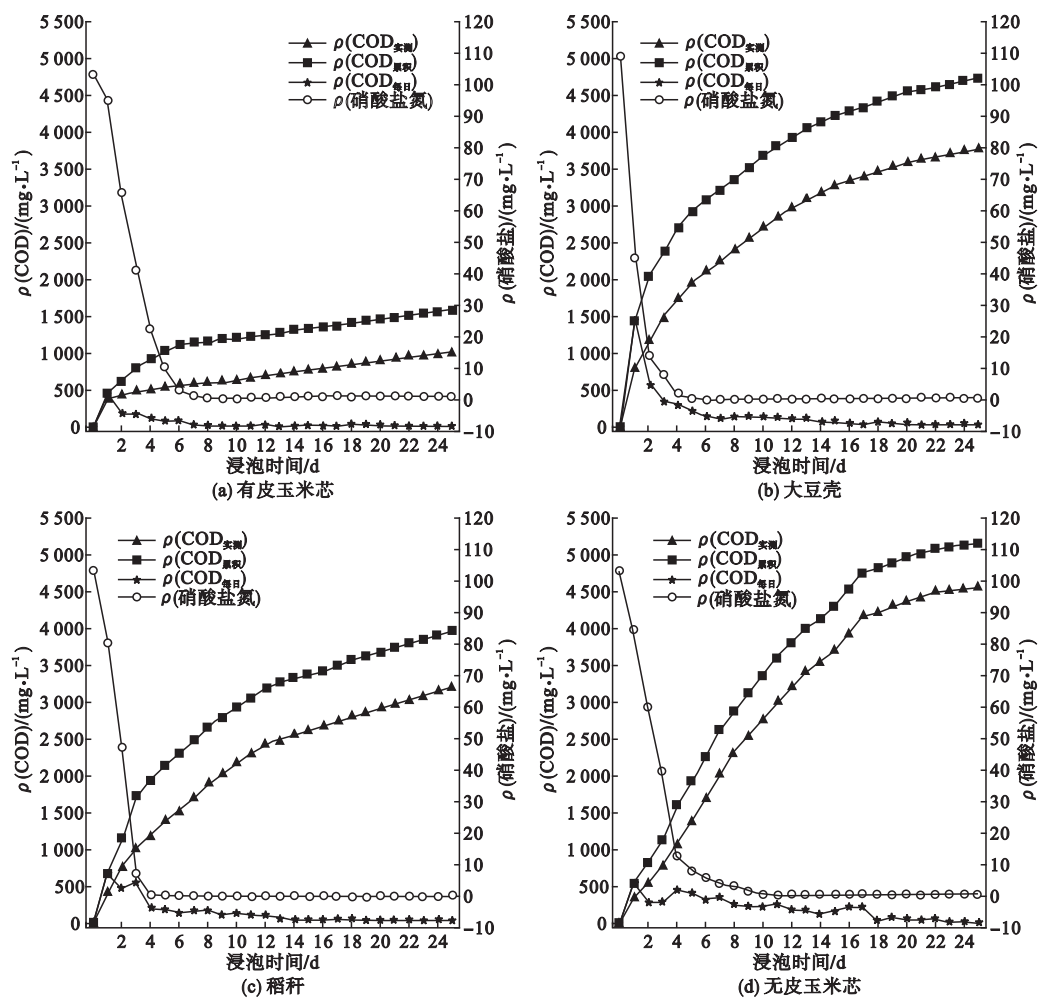


图 4 COD 释放及硝酸盐氮去除情况

Fig. 4 COD releasing and removal of nitrate nitrogen under the effect of activated sludge

量是衡量固体碳源释碳品质的重要衡量标准之一.如图 5 所示,通过对固体碳源浸泡液进行葡萄糖检测,各固体碳源连续浸泡 25 d 后,大豆壳浸泡液葡萄糖累积释放质量浓度 > 稻秆累积释放质量浓度 > 无皮玉米芯累积释放质量浓度 > 有皮玉米芯累积释放质量浓度,分别达到 1 162.32 mg/L、1 021.65 mg/L、839.47 mg/L、587.10 mg/L,占 COD 累积释放量的 24.62%、25.68%、16.32%、37.11%;在浸泡初期各固体碳源葡萄糖释放量较大,浸泡前 4 d 的有皮玉米芯、大豆壳、稻秆、无皮玉米芯葡萄糖累积释放质量浓度分别达到 417.47 mg/L、947.99 mg/L、776.77 mg/L、541.49 mg/L,4 种固体碳源

葡萄糖释放量均在浸泡 3~4 d 时,开始下降幅度明显,直至浸泡 5~7 d 后,释放量基本达到稳定,此时有皮玉米芯、大豆壳、稻秆和无皮玉米芯的葡萄糖每日释放质量浓度分别为 0.95 mg/L、0.91 mg/L、4.73 mg/L、12 mg/L,可见葡萄糖在浸泡前期反硝化阶段释放量较高,随着硝酸盐氮的完全去除以及固体碳源释碳达到稳定,葡萄糖释放量也随之减少.根据葡萄糖累积释放量占 COD 累积释放量比例的计算结果,表明有皮玉米芯、大豆壳和稻秆葡萄糖释放量及释碳量相对适宜,而无皮玉米芯因释碳量过高导致葡萄糖所占比例较低,释碳品质不佳,不适宜作为外加碳源.

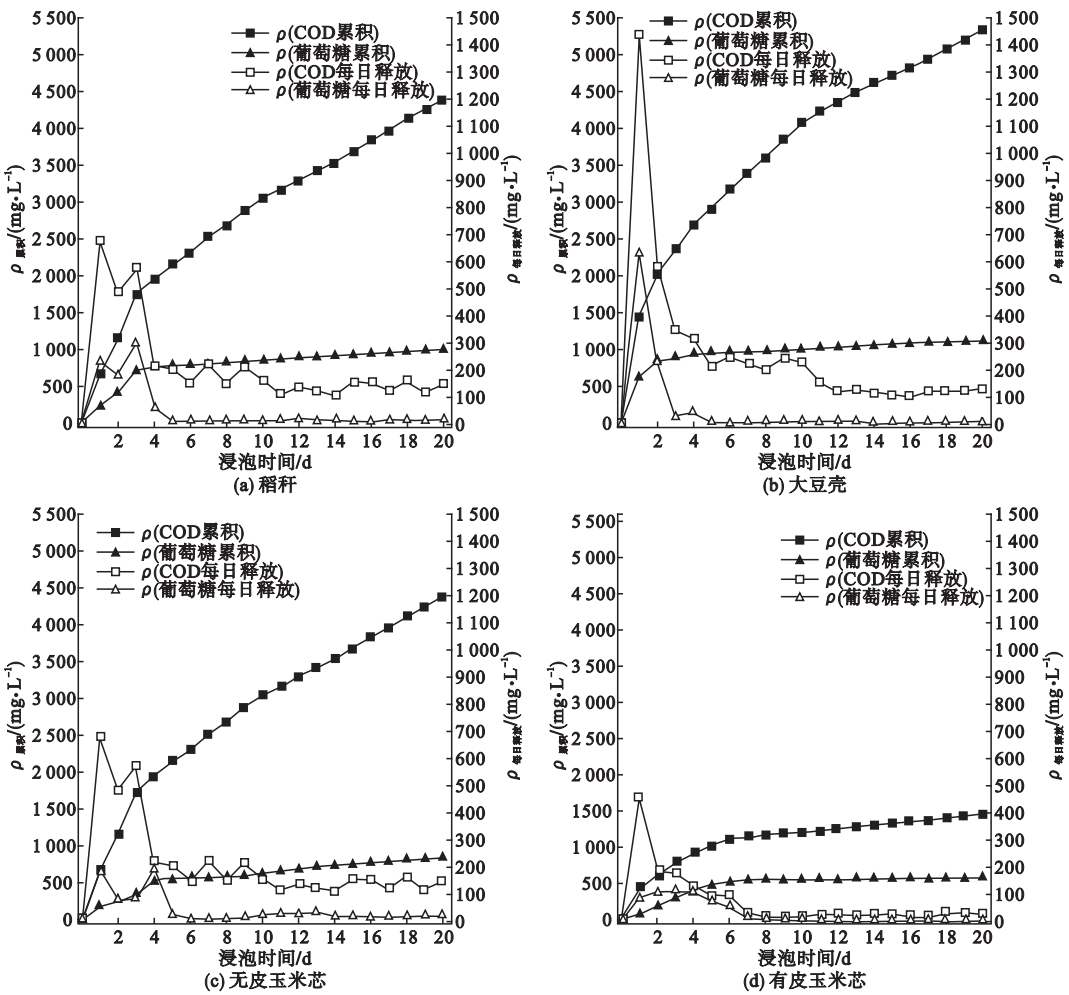


图5 COD及葡萄糖释放情况

Fig. 5 COD and glucose releasing under the effect of activated sludge

试验结束后,取出反应器中的各固体碳源,发现浸泡25 d后,4种固体碳源均有一定程度的损耗,但大豆壳损耗尤为明显,粗糙面全部消耗,仅剩部分光滑膜状物质,表明作为碳源,其释碳持久性较差。因此就释碳特性而言,玉米芯和稻秆较为适宜作为外加碳源应用于实际工程中。

2.3 固体碳源浸泡液的可生化性分析

在各固体碳源浸泡12 d后,释碳量达到稳定,此时换出1/2浸泡液,补充同等体积的去离子水,经过3 d浸泡,各固体碳源充分释碳后,取上清液,检测 $\rho(\text{BOD}_5)$ 和 UV_{254} ,结果如表1所示。

表1 各固体碳源的可生化性

Table 1 Biodegradability of carbon source

碳源	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	可生化比	UV_{254}
葡萄糖	125	199.74	0.626	0.11
有皮玉米芯	64	140.94	0.454	0.32
大豆壳	321	797.29	0.403	0.74
稻秆	241	543.74	0.443	0.66
无皮玉米芯	498	875.96	0.569	0.78

注:可生化比为 BOD_5 与COD的质量浓度之比,衡量污水的可生化性,其值高于0.3时,表明可进行生化处理。

检测结果表明,无皮玉米芯浸泡液可生化比最大,为 0.569,有皮玉米芯次之,为 0.454,大豆壳最差,但仍在 0.3 以上,说明无皮玉米芯的可生化性优于有皮玉米芯优于稻秆优于大豆壳; UV_{254} 主要表征溶液中芳香性和具有 $C=C$ 结构物质的含量, UV_{254} 值越高代表所含上述难降解的大分子物质越多^[20]。通过对这四种固体碳源浸泡液的 UV_{254} 检测发现,有皮玉米芯 UV_{254} 值与以葡萄糖为碳源的上清液最为接近,仅为 0.32,表明有皮玉米芯浸泡液中腐殖酸、 $C=C$ 芳香烃大分子物质含量最低,更易被微生物降解,而无皮玉米芯、大豆壳、稻秆浸泡液的 UV_{254} 值相对较高,但远小于垃圾渗滤液的 UV_{254} 值(38~73),说明这三种固体碳源浸泡液仍具备一定的可生化性;由于长期浸泡,死亡后的微生物残留在浸泡液中,会导致腐殖酸类大分子物质的产生,因此本阶段的 UV_{254} 检测值高于实际值。

3 结 论

(1)在缺氧-厌氧运行条件下,以玉米芯(有皮玉米芯和无皮玉米芯)、大豆壳、稻秆为外加碳源,可发生反硝化反应,完全去除 50 mg 的硝酸盐氮。其中稻秆耗时(4 d) < 大豆壳耗时(5 d) < 有皮玉米芯耗时(7 d) < 无皮玉米芯耗时(11 d),表明稻秆、大豆壳和有皮玉米芯浸泡释出的有机碳源类型更易被微生物利用。

(2)在活性污泥作用下,玉米芯(有皮玉米芯和无皮玉米芯)、大豆壳、稻秆发生水解产生葡萄糖,为微生物提供有机碳源。其中有皮玉米芯、大豆壳和稻秆葡萄糖释放量及 COD 释放量相对适宜,更宜作为反硝化外加碳源。

(3)综合比较各固体碳源沉降性、浸泡液生化需氧量和 UV_{254} 检测发现,有皮玉米芯和稻秆 UV_{254} 值分别为 0.32 和 0.66,且可生化比为 0.454 和 0.443,说明有皮玉米芯和

稻秆更适宜作为反硝化外加碳源。

参考文献

- [1] HONGDUCK R, SONGLLL L. Comparison of 4-stage biological aerated filter BAF) with MLE process in nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater [J]. Environ. (English science), 2009, 26: 163-170.
- [2] 王淑莹,殷芳芳,侯鸿勋,等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2008, 28(8): 673-678.
(WANG Shuying, YIN Fangfang, HOU Hongxun, et al. Biological denitrification with methanol as external carbon source[J]. Journal of Beijing university of technology, 2008, 28(8): 673-678.)
- [3] 董文艺,赵志军,李继. 甲烷作为反硝化气体碳源的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(4): 64-69.
(DONG Wenyi, ZHAO Zhijun, LI Ji. Research advances in the denitrification with methane as external gaseous carbon source[J]. Safety and environmental engineering, 2011, 18(4): 64-69.)
- [4] 马勇,彭永臻,王淑莹. 不同外加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 Yong, PENG Yongzhen, WANG Shuying. Sludge denitrification characteristics with different external carbon source[J]. Journal of Beijing university of technology, 2009, 35(6): 820-824.)
- [5] 王洪贞,李毅. 不同外碳源对生物反硝化影响的研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 19(13): 5728-5731.
(WANG Hongzhen, LI Yi. Effect of different carbon sources on bio-denitrification[J]. Science technology and engineering, 2013, 19(13): 5728-5731.)
- [6] HAFMAN M, NIELSEN J L, NIDLSN P H, et al. Microbial carbon sources for nitrate reduction in activated sludge identification of bacteria and process activity studies[J]. Water research, 2008, 42: 1539-1546.
- [7] 苏彤,范铮. 以聚羟基脂肪酸酯为固体碳源去除地下水中的硝酸盐[J]. 北方环境, 2011, 23(6): 138-141.
(SU Tong, FAN Zheng. Removal of nitrate from groundwater using polyhydroxyalkanoates as solid carbon sources[J]. Northern environment, 2011, 23(6): 138-141.)

- [8] 范振兴,王建龙. 利用聚乳酸作为反硝化固体碳源的研究[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 138-141.
(FAN Zhenxing, WANG Jianlong. Denitrification using polylactic acid as solid carbon source[J]. Environmental science, 2009, 30(8): 138-141.)
- [9] 刘方婧,段怡彤,赵健慧,等. 不同浓度外加碳源对 A^2/O 系统的冲击及修复前后脱氮除磷效果研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 1-10.
(LIU Fangjing, DUAN Yitong, ZHAO Jianhui, et al. Impact of external carbon source on A^2/O system and its biological phosphorus and nitrogen removal effect before and after restoration[J]. Environmental pollution & control, 2014, 36(4): 1-10.)
- [10] 李国朝,张新华,陈捷,等. 以玉米芯为碳源和生物膜载体的反硝化反应器启动性能研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 5994-5995, 6003.
(LI Guochao, ZHANG Xinhua, CHEN Jie, et al. Study on the starting performance of denitrification reactor with corncob as carbon source and biofilm carrier[J]. Journal of Anhui agricultural science, 2011, 39(10): 5994-5995, 6003.)
- [11] 付慧坛,程巧换,张茂亮,等. 以天然植物纤维为碳源的固相反硝化碳氮比研究[J]. 河南科学, 2016, 34(3): 393-396.
(FU Huitan, CHENG Qiaohuan, ZHANG Maoliang, et al. The C/N ratio for solid-phase denitrification by using natural cellulose as carbon source[J]. Henan science, 2016, 34(3): 393-396.)
- [12] 曹文平,张后虎,汪银梅. 以纤维素物质为反硝化碳源和载体去除水中硝酸盐[J]. 工业水处理, 2012, 32(2): 5-9.
(CAO Wenping, ZHANG Houhu, WANG Yinmei. Removal of nitrate from water with cellulosic substances as carbon source and biocarrier[J]. Industrial water treatment, 2012, 32(2): 5-9.)
- [13] 周贵忠,孙静,张旭,等. 地下水生物反硝化碳源材料研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(7): 4-6.
(ZHOU Guizhong, SUN Jing, ZHANG Xu, et al. Carbon source study on biological denitrification in groundwater[J]. Environmental science & technology, 2008, 31(7): 4-6.)
- [14] 罗佳,韩士群,罗海荣,等. 外加碳源对富营养化水体生物脱氮效果及细菌群落结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1312-1317.
(LUO Jia, HAN Shiqun, LUO Haitang, et al. Effect of exogenous resource on biological denitrification and bacterial community structure of eutrophic waters[J]. Jiangsu journal of agricultural science, 2012, 28(6): 1312-1317.)
- [15] 张兰河,徐恒铎,庞香蕊,等. 低温下碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 化学工程, 2014, 41(4): 11-15.
(ZHANG Lanhe, XU Hengduo, PANG Xiangrui, et al. Effect of carbon sources on simultaneous nitrification and denitrification at low temperature[J]. Chemical engineering, 2014, 41(4): 11-15.)
- [16] 曹文平. 竹丝和 PBS 作为碳源进行反硝化特性对比研究[J]. 节水灌溉, 2012(9): 45-47.
(CAO Wenping. Comparison study on denitrification characteristics using filamentous bamboo and PBS as carbon sources and biocarriers[J]. Water saving irrigation, 2012(9): 45-47.)
- [17] 邵留,徐祖信,金伟,等. 以稻草为碳源和生物膜载体去除水中的硝酸盐[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1414-1419.
(SHAO Liu, XU Zuxin, JIN Wei, et al. Nitrate removal from wastewater using rice straw as carbon source and biofilm carrier[J]. Environmental science, 2009, 30(5): 1414-1419.)
- [18] 吕晓磊. 新活性污泥法处理效能及种群组成研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
(Lü Xiaolei. The research on increasing efficiency of the new activated sludge process and the analysis of the community structure of the bacteria[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [19] 冯立顺,李春辉,刘洪燕,等. 纤维素酶处理玉米秸秆对染料的吸附[J]. 化工环保, 2011, 31(4): 365-368.
(FENG Lishun, LI Chunhui, LIU Hongyan, et al. Adsorption of dye on cellulase-treated corn straw[J]. Environmental protection of chemical industry, 2011, 31(4): 365-368.)
- [20] WEISHAAR J L, AIKEN G R, BERGAMASCHI B A, et al. Evaluation of specific ultraviolet adsorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. Water research, 2008, 42(6/7): 1595-1605.