

厌氧光合菌 SU6 处理模拟啤酒废水及生物质转化

刘 茹¹, 王育光¹, 刘 芳^{1,2}, 李雪洁¹, 赵 鑫¹

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 江苏理工学院化学与环境工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要: 光合细菌 (Photosynthetic Bacteria, PSB) 可以在去除污水中有机污染物的同时, 将其转化为具有高附加值的生物质。该研究通过批次实验探讨了不同碳源、氮源和磷源浓度对厌氧光合细菌外硫红螺菌属的新菌株 (*Ectothiorhodospira* sp. SU6) 处理模拟啤酒废水和生物质转化的影响。结果表明, 模拟啤酒废水中 COD、NH₃-N、TP 浓度均对光合细菌的生长, 污染物去除效率和生物质转化效率具有显著影响。COD 浓度 2 000 mg/L, 外加氮源 100 mg/L、磷源 40 mg/L 时, 菌株 SU6 的啤酒废水生物质转化效果最佳, 培养 96 h 后 COD、NH₃-N 和 TP 去除率分别为 57.0%、82.7% 和 50.7%, 细胞生物质 OD₆₀₀ 值为 1.28, 实现了模拟啤酒废水碳氮磷同步去除和生物质的转化。

关键词: 光合细菌; *Ectothiorhodospira*; 模拟啤酒废水; 生物质转化; 效率提升

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.02.013

Treatment and bioconversion of simulated brewery wastewater by anaerobic photosynthetic strain SU6

LIU Ru¹, WANG Yuguang¹, LIU Fang^{1,2}, LI Xuejie¹, ZHAO Xin¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Chemical & Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Photosynthetic bacteria (PSB) have the ability to remove the organic pollutants in sewage, at the same time, which can convert them into biomass with a high value. The effects of different initial concentration of carbon, nitrogen and phosphorus sources on the treatment of simulated brewery wastewater and biomass conversion by anaerobic photosynthetic strain *Ectothiorhodospira* sp. SU6 were investigated. The concentration and proportion of COD, NH₃-N and TP in simulated brewery wastewater had a significant influence on the growth of the strain SU6, pollutants removal and biomass conversion. The optimal pollutant removal with a highest biomass conversion was obtained with the initial COD concentration of 2 000 mg/L, nitrogen of 100 mg/L and phosphorus of 40 mg/L. After 96 hours cultivation, the COD, NH₃-N and TP removal rates were 57%, 82.7% and 50.7%, respectively, and the biomass of OD₆₀₀ was 1.28. The experimental results indicated that the pollutants removal and biomass conversion from simulated brewery wastewater could be accomplished by anaerobic photosynthetic strain *Ectothiorhodospira* sp. SU6.

Keywords: photosynthetic bacteria; *Ectothiorhodospira*; simulated brewery wastewater; biomass conversion; efficiency improvement

CLC number: X703

啤酒废水是一种高浓度有机废水, 主要污染物为高浓度的糖类、醇类等有机物, COD、BOD₅ 浓度分别为 1 000 ~ 2 500、600 ~ 1 500 mg/L^[1], 如果不经处理, 直接排入自然水体会消耗大量的溶解氧, 造

成严重的环境污染。我国的啤酒产销量已连续多年位居世界第一^[2], 啤酒在酿造和罐装等过程中会产生大量废水, 我国每年啤酒废水总量可达 2.5 亿 t。啤酒废水处理通常采用厌氧与好氧结合^[3]、水解酸

收稿日期: 2020-08-13

基金项目: 中央直属高校基本科研业务费项目(N170104021, N182508026)

作者简介: 刘 茹(1996-), 女, 硕士研究生。研究方向: 光合菌污水控制与资源回收。E-mail: liuru401@163.com

通信作者: 赵 鑫(1982-), 男, 博士、副教授、博士生导师。研究方向: 水污染控制与废弃物资源化。E-mail: zhaoxin@mail.neu.edu.cn

引用格式: 刘 茹, 王育光, 刘 芳, 等. 厌氧光合菌 SU6 处理模拟啤酒废水及生物质转化[J]. 环境保护科学, 2021, 47(2): 76-79.

化-接触氧化^[4]、UASB^[5]等工艺,这些工艺可有效地去除废水中的污染物,但会产生大量的剩余污泥,增加下游剩余污泥处置费用。因此,找到一种既可以高效去除啤酒废水中的高浓度有机污染物,又可以实现污染物资源化回收的工艺具有非常重要的现实意义。

光合细菌(Photosynthetic Bacteria, PSB)是一种广泛分布于水、土壤和活性污泥等自然和人工环境的原核生物,可以利用光能和各种碳氮源生长^[6]。PSB 能够耐受较高的有机负荷,并能实现多种废水中污染物的生物资源化^[7],现已在大豆加工^[8]、淀粉发酵^[9]、养殖业^[10]和啤酒生产等行业废水处理中成功应用。袁盈波等^[11]从养殖场底泥中分离出一株外硫红螺菌,其对畜禽废水和鱼粉废水中硫化物去除率分别为 68.55% 和 56.15%。戴晓等^[12]利用 *Rhodospseudomonas sphaeroides* Z08 探讨不同光氧条件下啤酒废水的资源化应用。

本文利用 1 株具有污染物同步去除能力的厌氧光合细菌 *Ectothiorhodospira* sp. SU6, 通过调节初始碳源和氮磷含量等参数优化其对模拟啤酒废水中污染物的去除与光合细菌生物质的回收,同时进一步探索了 *Ectothiorhodospira* sp. SU6 的潜在功能性,为啤酒废水的处理和资源回收提供新的选择。

1 材料和方法

1.1 菌种来源

实验菌种外硫红螺菌 *Ectothiorhodospira* sp. SU6(KX619404)是 1 株具有多种污染物的同步去除能力的严格厌氧光合细菌^[13],现保存于东北大学环境分子生态学实验室。

1.2 实验方法

实验用水参考实际啤酒废水污染物组成,以雪花啤酒稀释后配制,COD、TN、TP 浓度分别为 1 000 ~ 4 500、20 ~ 21 和 1 ~ 2 mg/L^[14]。菌株 SU6 对模拟啤酒废水的处理能力和对回收细胞生物量的影响通过批次实验探讨。

种子培养基(乙酸钠 1.0 g/L、谷氨酸钠 1.0 g/L、NH₄Cl 1.0 g/L、琥珀酸钠 1.0 g/L、NaHCO₃ 1.0 g/L、KH₂PO₄ 0.5 g/L、K₂HPO₄ 0.5 g/L、MgCl 0.2 g/L、CaCl 0.08 g/L、NaCl 0.1 g/L、FeSO₄·7H₂O 0.012 g/L、EDTA-Na₂ 0.1 g/L、L-半胱氨酸 0.5 g/L)和模拟啤酒废水经分装后,通入高纯氩气 3 min 以排除残余

的氧气,用橡胶塞封瓶保证厌氧环境,121 °C 高压灭菌 20 min 后静置待用。

单因素条件实验在 100 mL 厌氧瓶中进行,每个厌氧瓶含 50 mL 培养基,5%($V_{\text{SU6}}/V_{\text{废水}}$)接种对数期种子液,初始 pH=8.0,2 000 lux 光照,30 °C,120 rpm 恒温振荡培养,每个实验设置 3 组平行实验。

1) 最优初始 COD 条件实验:模拟啤酒废水 COD 浓度分别为 1 000、2 000、3 000 和 4 500 mg/L, NH₃-N 浓度 50 mg/L、磷浓度 0 mg/L;

2) 最优初始 NH₃-N 浓度实验:根据最佳初始 COD 浓度配置模拟啤酒废水, NH₃-N 浓度分别设置为 0、50、100、150 和 200 mg/L,其余条件同上;

3) 最优初始 TP 浓度实验:根据最优初始 COD 和 NH₃-N 浓度配置啤酒废水,并添加磷酸盐,TP 梯度为 0、40、80 和 120 mg/L,其余条件同上;

上述所有条件实验均以空白培养基为对照,每 24 h 测定菌液 OD₆₀₀ 值,96 h 取样测定培养基的 COD、NH₃-N 和 TP 变化。

1.3 检测方法

水中 COD_{Cr}、NH₃-N、TP 和细胞生物量均采用国家标准的分光光度法测定^[15]。其中 COD_{Cr}、NH₃-N 和 TP 分别采用:快速消解法、纳氏试剂法和钼酸铵法,生物量以波长 600 nm 时的菌液光密度值(OD₆₀₀)计算,未接种液体培养基为空白对照。

2 结果与讨论

2.1 初始 COD 对菌株 SU6 去除效率和生长的影响

菌株 SU6 在 COD 浓度为 1 000 ~ 4 500 mg/L 的培养基中均可迅速生长,见图 1。

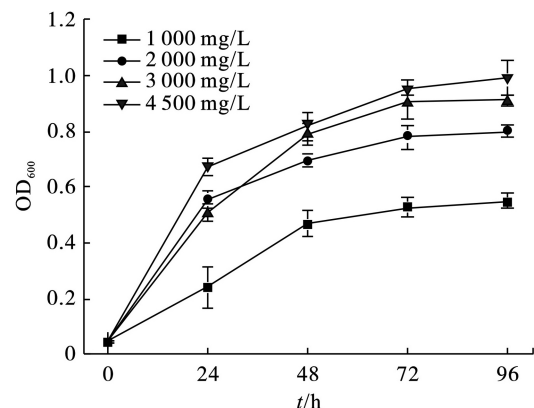


图 1 不同初始 COD 浓度对菌株 SU6 生长的影响

菌株 SU6 在前 24 h 生长速率较快,但是,随着

时间的延长,生长速度趋缓,72 h后均进入生长稳定期。在初始 COD 浓度为 3 000 和 4 500 mg/L 时,菌株 SU6 的细胞生物量较为接近。初始 COD 浓度为 4 500 mg/L 时,菌株长势最佳,OD₆₀₀ 值为 1.00,培养 96 h 的细胞生物量是 COD 为 1 000 mg/L 时的 1.82 倍。

污染物的去除情况,见图 2。

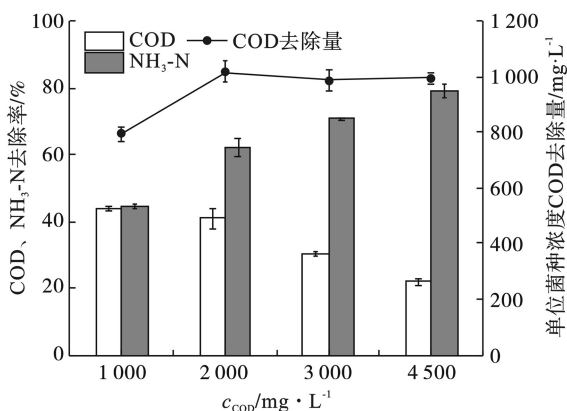


图 2 不同初始 COD 浓度啤酒废水中污染物的去除情况

图 2 可见,随着初始 COD 浓度增加,菌株 SU6 对 NH₃-N 的去除率逐渐升高,而对 COD 的去除率在 20%~45% 之间,且整体呈下降趋势。当 COD 浓度为 4 500 mg/L 时,细菌 SU6 的生长状态最佳,增长速度最快,细胞生物质回收量最高,NH₃-N 去除率为 79.1%,但 COD 去除率低,模拟啤酒废水中剩余大量有机物未能被光合细菌利用。通过计算,在初始 COD 浓度为 2 000 mg/L 时,单位细胞生物量对 COD 的去除效率最高,为 1 013.34 mg/L。

模拟废水的组分对菌株 SU6 的生长和处理效率会产生一定的影响。本研究中,啤酒废水负荷过高,其中残存的乙醇等物质会对光合细菌的生长产生抑制作用,影响细胞生物量的回收。WU et al^[16] 和 ZHOU et al^[17] 利用光合细菌处理淀粉发酵废水和制糖废水,此类废水组分更适于光合细菌生长,COD 的平均去除率超过 60%,最高达 95%。另外,啤酒废水 C/N/P 比例失衡会导致细菌活性下降、生物质回收量降低。虽然增加碳氮比例可以同时提升 NH₃-N 的去除率和光合细菌回收量,但是会导致 COD 去除效率明显降低。因此,菌株 SU6 处理模拟啤酒废水的最适初始 COD 为 2 000 mg/L,去除率为 40.8%,菌株 SU6 的 OD₆₀₀ 值为 0.80。

2.2 氮含量对菌株 SU6 去除效率和生长的影响

实验证明,额外添加氮源可以促进菌株 SU6 的

细胞生物量增长,并能够提高对 COD 的去除率,见图 3 和图 4。

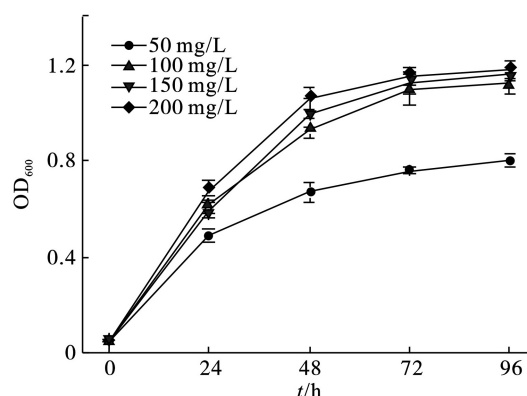


图 3 不同 NH₃-N 浓度对菌株 SU6 处理啤酒废水生长的影响

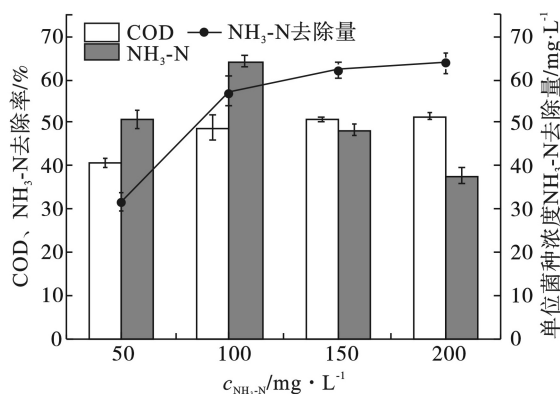


图 4 NH₃-N 浓度对菌株 SU6 处理啤酒废水的影响

图 3 和图 4 可见,当 NH₃-N 浓度由 50 mg/L 增加至 100 mg/L 时,细胞生物量明显提升,96 h 内菌株 SU6 的 OD₆₀₀ 由 0.80 增至 1.12,COD 的去除率由 40.7% 提升至 48.8%,单位细胞生物量对 NH₃-N 的去除率迅速增加。在 NH₃-N 浓度由 100 增至 200 mg/L 的过程中,菌株 SU6 的生物量没有明显增长,COD 去除率基本不变,但 NH₃-N 去除率下降,模拟啤酒废水中剩余较多 NH₃-N 未被去除,单位生物量去除 NH₃-N 率没有明显增加,最高为 63.87 mg/L。

YANG et al^[18] 研究发现 PSB 的氮代谢途径不同于传统处理途径,NH₃-N 可能被直接氧化为 N₂ 或 N₂O,具备突破现有技术局限性的可能。何春华^[6] 研究发现 C/N 比过高或过低均不利于光合细菌生长。本实验额外添加氮源改善 C/N 比例,有效改善了菌株 SU6 的生长,提高了啤酒废水的 COD 去除效率。当添加 NH₃-N 浓度过高时,细胞生物量虽增加,但 COD 去除率并没有得到提升。因此,光合细菌 SU6 处理啤酒废水最佳 NH₃-N 浓度为

100 mg/L, 细胞生物量 OD_{600} 值为 1.12。

2.3 磷含量对菌株 SU6 去除效率和生长的影响

实验表明, 光合细菌 SU6 在没有磷源的培养基中可以正常生长, 适当补充磷源可以促进细菌的生长, 见图 5。

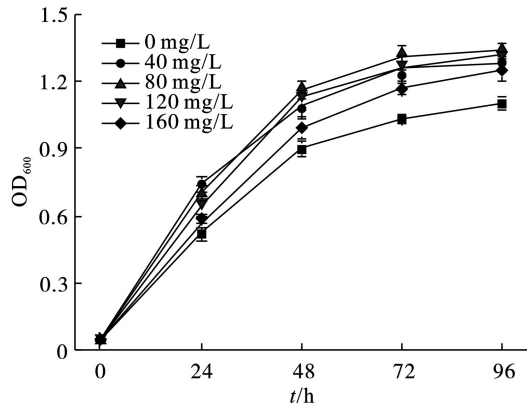


图 5 TP 浓度对菌株 SU6 处理啤酒废水生长的影响

图 5 可见, 在不同浓度磷源培养条件下菌株 SU6 的生长趋势较为接近, 培养 72 h 后光合细菌均进入稳定期。额外添加 40 ~ 160 mg/L 磷源, 均可以略微提升菌株 SU6 的细胞生物量, 实验结束时, 添加 80 mg/L 磷的实验组获得细胞生物量最大值 $OD_{600}=1.34$, 较空白对照提高 1.21 倍。当磷浓度高于 80 mg/L 时, 菌株 SU6 的生长开始受到抑制。

TP 浓度对菌株 SU6 处理啤酒废水生长的影响, 见图 6。

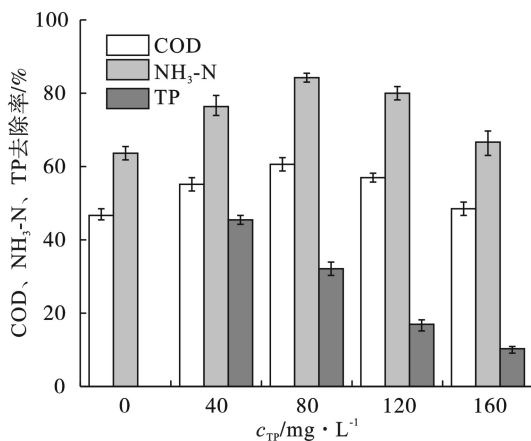


图 6 TP 浓度对菌株 SU6 处理啤酒废水的影响

图 6 可见, 随着外加磷含量的增加, COD 和 NH_3-N 去除率也随之提升, 在磷浓度为 80 mg/L 时获得最高去除率分别为 60.6% 和 84.3%, 分别较空白对照组提升了 13.8% 和 20.5%。但是, 随着磷浓度的继续增加, COD 和 NH_3-N 去除率开始逐步降低, 在磷浓度为 160 mg/L 时, 降低至 48.3% 和 66.4%。少量磷酸盐, 可以促进光合细菌 SU6 的生长, 也可

以提高光合细菌对啤酒废水中有机物的转化, 收获更多细胞生物量。但是, 当补加的磷酸盐过量时, 会对光合细菌产生抑制, 导致啤酒废水处理效率降低, 光合细菌细胞生物质回收率降低, 后续除磷成本增加。因此, 在使用光合细菌处理啤酒废水时, 可以考虑补加少量的磷酸盐以提升效率, 本研究建议选择外加磷源 40 mg/L, 此时菌株 SU6 可获得生物量 $OD_{600}=1.28$ 。

3 结论

通过对光合菌 *Ectothiorhodospira* sp. SU6 处理模拟啤酒废水的研究, 发现菌株 SU6 在不同初始 COD 浓度的模拟啤酒废水中均可生长, 对不同初始 COD 浓度处理效果差异明显。适当补加氮源和少量磷源可以有效提高光合菌 SU6 对 COD 的去除, 并获得更高的细胞生物量。菌株 SU6 在初始 COD、 NH_3-N 和 TP 浓度分别为 2000、100 和 40 mg/L 的啤酒废水中处理效果最佳, 去除效率分别为 57.0%、82.7% 和 50.7%, 细胞生物量 $OD_{600}=1.28$ 。菌株 *Ectothiorhodospira* sp. SU6 具有很好的污染物处理和生物质转化能力, 可以在后续有机废水的处置中尝试应用。

参考文献

- [1] 张翠英. 光合污泥在啤酒废水处理中的应用[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(6): 75-77.
- [2] [s.n.] 2017 年全球啤酒产量报告[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2018(19): 1-4.
- [3] 郑平, 梅玲玲, Fogno Claude Jean. 喀麦隆啤酒废水厌氧生物处理的研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 230-235.
- [4] 刘义, 邵凯, 张兆昌. 水解酸化——SBR 工艺处理啤酒废水的试验研究[J]. 中国给水排水, 1997(S1): 22-25.
- [5] 王松林, 汪大庆. 内循环 UASB 反应器+氧化沟工艺在啤酒废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2001, 32(2): 23-24.
- [6] 何春华. 光合细菌的分离鉴定和生长条件优化及应用初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] LU H, ZHANG G, DAI X, et al. A novel wastewater treatment and biomass cultivation system combining photosynthetic bacteria and membrane bioreactor technology[J]. Desalination, 2013, 322: 176-181.
- [8] WU P, ZHANG G, LI J, et al. Effects of Fe^{2+} concentration on biomass accumulation and energy metabolism in photosynthetic bacteria wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2012, 119: 55-59.

(下转第 112 页)