

# 光合细菌(Z08)啤酒废水资源化研究

戴 晓, 张光明

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090, gmgwen@gmail.com)

**摘 要:** 为了优化光合细菌处理啤酒废水的工艺条件以实现污水资源化, 利用一株新的光合细菌(Z08)处理啤酒废水并回收菌体, 探讨在光照厌氧、黑暗好氧、自然光微氧3种不同的环境条件对废水处理效果以及菌体增长的影响. 结果表明: 光照厌氧条件下COD去除率(88%)大于自然光微氧条件下COD去除率(74%), 大于黑暗好氧条件下COD去除率(62%); 光照厌氧条件下菌体总量增长率(38%)大于自然光微氧条件下菌体总量增长率(-35%), 大于黑暗好氧条件下菌体总量增长率(-43%); 光照厌氧条件所需水力停留时间(240 h)大于自然光微氧条件所需水力停留时间(60 h), 大于黑暗好氧条件所需水力停留时间(36 h). 光合细菌可以实现啤酒废水的处理与资源化, 推荐的工艺条件为: 白天厌氧, 夜晚好氧, 光线不足时补充光源. 在此条件下既可以快速降解污染物, 又能获得较高的光合细菌增长量, 此条件时废水中有机物转化为单细胞蛋白的转化率达到26%, 有效地实现了污水资源化.

**关键词:** 光合细菌; Z08; 啤酒废水; 资源化

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)06-0937-04

## Brewery wastewater treatment and resource recovery by photosynthetic bacteria Z08

DAI Xiao, ZHANG Guang-ming

(State Key Laboratory of Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, gmgwen@gmail.com)

**Abstract:** This paper discusses the possibility and optimal conditions of brewery wastewater treatment using a new strain of photosynthetic bacteria (Z08). Light-anaerobic, natural light-microaerobic, and dark-aerobic operational conditions were explored to treat the wastewater and recover bacterial protein. The results show that the COD removal ratio under light-anaerobic condition (88%) is greater than that under natural light-microaerobic condition (74%), and it is also greater than that under dark-aerobic condition (62%); total bacterial growth ratio under light-anaerobic condition (38%) is greater than that under natural light-microaerobic condition (-35%), and it is also greater than that under dark-aerobic condition (-43%); hydraulic retention time under light-anaerobic condition (240 h) is longer than that under natural light-microaerobic condition (60 h) and that under dark-aerobic condition (36 h). It is feasible to use Z08 to treat beer wastewater and recover bacteria cell mass. The recommended conditions are as follows: anaerobic in daytime and aerobic at night, with additional artificial light when needed. Under such conditions, pollutants in the wastewater can be rapidly transformed into bacterial cell mass for utilization with a transformation efficiency of 26% for single cell protein.

**Key words:** photosynthetic bacteria; Z08; brewery wastewater; resource recovery

收稿日期: 2010-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978072); 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题(2008QN01).

作者简介: 戴 晓(1985—), 男, 硕士研究生;

张光明(1973—), 女, 教授, 博士生导师.

高浓度有机废水的处理与资源化是环境领域关注的热点. 传统污水处理都采用活性污泥, 虽然能够有效地去除废水中的污染物, 但是会产生大量的剩余污泥, 造成二次污染, 处理处置困难, 而

且无法实现水中有用物质的资源化. 光合细菌污水处理提供了一条可以同时实现污染物消减与资源回收的新途径, 而且没有有害污泥的产生.

光合细菌是多种广泛分布在海洋、河流、湖泊和土壤中, 拥有 2 套能量代谢途径的微生物的总称<sup>[1]</sup>, 光合细菌能利用多种物质作为碳源和能源合成很多营养物质, 如单细胞蛋白、生物高聚物、抗生素、类胡萝卜素、泛酸、以及一些药用物质<sup>[2-4]</sup>. 这些物质能够应用于农业、医疗、生物制氢、食品工业等<sup>[5-9]</sup>. 因此, 光合细菌污水处理可以同时实现污染消减与资源回收.

我国是啤酒生产大国, 全国啤酒废水排放量达 3 亿  $\text{m}^3$ , 对环境造成严重污染. 啤酒废水为高浓度有机废水, 目前常用水解酸化-接触氧化、SBR、CASS、UASB 等工艺<sup>[10-11]</sup> 进行处理, 流程长, 产生大量剩余污泥, 并且无法有效地回收利用其中的有益物质. 使用光合细菌处理啤酒废水能够有效处理污染物, 并且可以将其中的有用物质转化为菌体, 回收单细胞蛋白. 本文通过光合细菌在啤酒废水处理中不同的处理条件下的 COD 降解情况和菌体生长情况, 研究光合细菌处理啤酒废水的最优工艺条件以实现污水的资源化.

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

从土壤中分离得到 1 株新型光合细菌, 经 16SrDNA 鉴定为红螺菌科、红假单胞菌属、球形红假单胞菌 (*Rhodobacter-sphaeroids*), 命名为 Z08<sup>[12]</sup>, 全球统一编号 GU990615. 啤酒废水采用人工配水, COD、总氮、总磷质量浓度分别为 8 000 ~ 10 000、1.0、2.6  $\text{mg/L}$ , 与实际啤酒废水近似, 由于啤酒废水 C/N 比例失调, 所以在本实验中添加 800  $\text{mg/L}$  的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液和 80  $\text{mg/L}$  的  $\text{KH}_2\text{PO}_3$  溶液以补充 N 源和 P 源, 并用 NaOH 溶液调节 pH 值为 6.7. 光合细菌纯培养采用 HCH 培养基<sup>[12]</sup>.

### 1.2 方 法

光合细菌接种与驯化: HCH 培养基在 121  $^\circ\text{C}$  条件下灭菌 20 min, 冷却后在无菌操作台上接入 168  $\text{mg/L}$  的 Z08, 接种后的混合液封口膜密封, 置于磁力搅拌器上, 在 25 ~ 30  $^\circ\text{C}$  条件下, 光照培养 48 h, 保存在 4  $^\circ\text{C}$  条件下备用. 将纯培养的 Z08 按上述的接种量接种至 HCH 培养基和啤酒废水体积比为 1:1 的混合液中, 驯化培养 96 h, 驯化好后, 将 Z08 用超滤膜滤出, 按不同的 F/M (废水 COD 质量/菌质量) 接种到啤酒废水中.

光合细菌处理污水常用的 2 种条件是光照厌

氧和黑暗好氧, 另外在前期研究中发现自然光微氧也可实现光合细菌的增长<sup>[12]</sup>, 因此, 本文比较了这 3 种方法. 试验在室温下进行. 光照厌氧条件, 采用白炽灯与节能灯供光, 照度约为 1 200 lx, 这是光合细菌培养中常用的照度, 溶解氧小于 0.1  $\text{mg/L}$ ; 黑暗好氧条件, 空气曝气, 溶解氧 2 ~ 4  $\text{mg/L}$ ; 自然光微氧条件, 采用自然光, 溶解氧 0.3 ~ 0.5  $\text{mg/L}$ . 黑暗好氧与自然光微氧条件下投菌量  $F/M = 1$ , 光照厌氧条件下投菌量  $F/M = 0.5$ .

COD 采用快速消解法测定 (5B-1, 联华科技). 溶解氧采用 YSI-DO200 溶氧仪测定. 光密度采用紫外可见分光光度计 (T6, PurKinje General Instrument Com) 在 660 nm 条件下测定, 记为  $\text{OD}_{660}$ . 光密度与细菌干重的关系<sup>[12]</sup> 为: 细菌干重/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = 839.55 \times \text{OD}_{660}$ . 菌体蛋白采用食品分析标准方法进行.

## 2 结果与讨论

### 2.1 光照厌氧条件下处理效果

图 1 为光照厌氧条件下的 COD 和 Z08 干重变化曲线, 可见, 在光照厌氧条件下, 废水 COD 去除率较高但去除速度较慢, 经过 240 h 的处理, COD 去除率达到 88%, 这是因为在厌氧条件下菌体的适应期长并且代谢速率低. 菌体干重在 72 h 轻微下降, 在 72 ~ 96 h 进入对数生长期, 96 ~ 120 h 再次轻微下降, 120 ~ 144 h 轻微上升, 144 h 后基本保持不变. 96 ~ 144 h 菌体干重先下降后上升, 其原因是由于 Z08 随时间的变化大量消耗了啤酒废水中易吸收的营养物质, 营养物质缺乏的同时 Z08 产生消化其他营养物质的酶, 造成了菌体干重的变化. 光照厌氧处理既较好地处理了废水又大量积累了菌体蛋白, 但对 COD 的处理效率低.

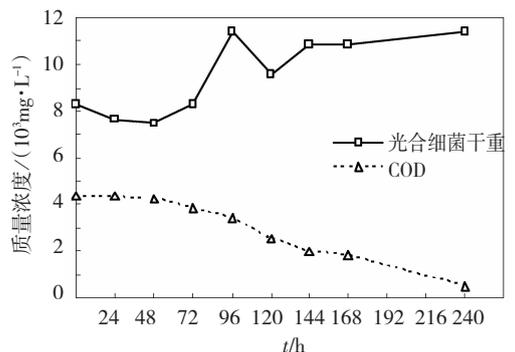


图 1 光照厌氧条件下的 COD 和 Z08 干重变化曲线

### 2.2 自然光微氧条件下处理效果

图 2 为自然光微好氧条件下 COD 和 Z08 干

重变化曲线,可见,在自然光微氧条件下,废水COD在0~60 h随时间逐渐减少,60~90 h反而增大,达到最高降解率(74%)的时间为60 h.菌体干重在0~60 h基本保持不变,60 h后下降.0~60 h COD下降同时菌体干重不变,主要原因是在此条件下Z08的繁殖数量与死亡数量平衡,Z08保留了在厌氧条件下繁殖以维持种群数量的特点,又保留了在好氧条件下快速降解有机物的能力.60 h后由于有机物质已经基本耗尽,Z08进入内源呼吸期,开始分解自身物质,细胞破碎造成COD上升同时菌体干重下降.自然光微氧条件下废水处理效果较好,但是细胞没有明显增长,不能积累菌体蛋白.

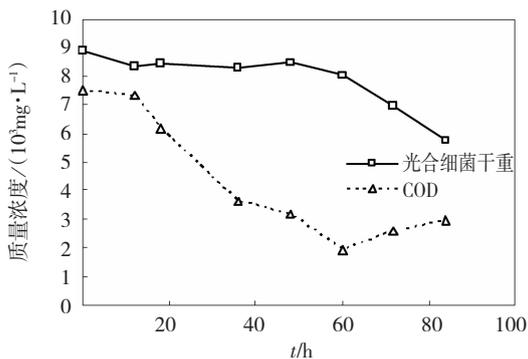


图2 自然光微好氧条件下COD和Z08干重变化曲线

### 2.3 黑暗好氧条件下处理效果

图3为黑暗好氧条件下的COD和Z08干重变化曲线,可见,在黑暗好氧条件下,COD在0~36 h随时间减少,在36~90 h反而上升.达到最高降解率(62%)的时间是36 h.其可能原因是,在有氧条件下Z08对有机物的利用率高,36 h后有机物质已经基本耗尽,Z08进入内源呼吸期,开始分解自身物质,导致细胞质释放到水中,COD上升.菌体干重在0~36 h缓慢减少,36~60 h迅速下降,60 h后基本不变.分析原因是在黑暗好氧条件下,Z08以分解代谢为主,繁殖受到抑制.此条件下废水处理效率高,但是无法积累菌体蛋白.

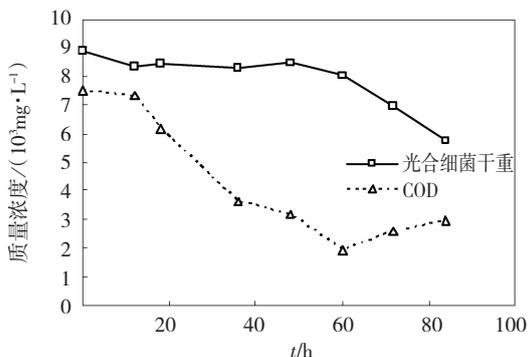


图3 黑暗好氧条件下的COD和Z08干重变化曲线

### 2.4 3种环境条件比较

由表1可见,在以上3种条件下,废水中有机物都能得到降解,光照厌氧条件下COD处理率最高,但黑暗好氧条件下降解最快,而菌体只有在光照厌氧条件下才有明显增长.分析发现,溶解氧越高,有机物降解速率越快,说明Z08在有氧条件下主要通过分解有机物获取能量,效率较高;另一个原因是,有光照时,Z08能够进行光能合成,减少了对水中有机物的利用.同时,溶解氧有抑制Z08生长的作用,在厌氧条件下Z08增长量为38%,而在有氧条件下没有观察到Z08的增长.光照条件对Z08生长起主要作用,在黑暗条件下,菌体下降,在自然光环境中可以保持稳定,在光照条件下增加.

表1 3种条件下COD降解效果和菌体产量

光合细菌条件	Z08 增长率/%	COD 降解率/%	停留时间/h
光照厌氧	38	88	240
自然光微好氧	-35	74	60
黑暗好氧	-43	62	36

### 2.5 最优条件的推荐

综合以上分析,对3种方案进行优化,本文提出Z08处理啤酒废水应采用的条件:白天厌氧,夜晚好氧的条件,白天光线不足时可增加补充光源.这样既可以发挥厌氧条件下Z08大量繁殖的优势,又保留了在好氧条件下高效分解有机物的优点,既能高效净水,又能够大量回收菌体实现资源化.

3次重复试验表明,该灵活处理方法可以在48 h内COD去除率达70%,其中乙醇含量从4 261.7 mg/L降低至51 mg/L,去除率达到98.6%,表明光合细菌对小分子有机物的利用极为高效.相对应的菌体增量为25%,菌体产率(菌体增加量/COD去除量)达到0.41,这一菌体产率与好氧条件下活性污泥的菌体产率类似.由于啤酒废水中不含有毒物质,而所用的Z08菌株属于Rhodobacter-sphaeroids,菌体安全无毒,长期被用于饲料,尤其是对虾与蟹苗的开口饲料添加剂.因此,从啤酒废水中培养的Z08可以被用作饲料或饵料,从而实现资源化,与此同时,避免了传统处理工艺中活性污泥的二次污染.实现光合细菌资源化的另一途径是提取其中的单细胞蛋白,本实验中对所收获的Z08菌体进行分析,发现其中单细胞蛋白含量达到菌体干重的56.8%,蛋白质含量很高.相应地,啤酒废水中有机物(以COD计)的蛋白转化率为26%.

上述结果表明,光合细菌可以高效地降解啤

酒废水中的有机污染物质,尤其是其中的小分子有机物,去除率达到 98.6%,而且没有废弃污泥的产生;与此同时,啤酒废水也可作为基质培养光合细菌,菌体产率达到 41%,所收获的 Z08 菌体可以作为饲料或饵料;光合细菌 Z08 在处理啤酒废水的同时,合成单细胞蛋白,蛋白质转化率为 26%,所形成的单细胞蛋白安全无毒,可以作为饲料添加剂利用。

### 3 结 论

1) 在有氧环境下,Z08 对啤酒废水有机物的利用效率较高,主要以分解代谢为主.在厌氧环境中,Z08 分解啤酒废水有机物效率较低,主要以合成代谢为主,生物量增长明显.

2) 光照厌氧条件虽然能够同时高效降解有机物并获得较好的生物量增长,但所需时间太长;自然光照微好氧条件下 COD 降解时间较长,菌体仅能保持稳定数量,不能够大量繁殖;黑暗好氧条件虽然能够高效处理 COD,但是生物增长受到抑制,甚至出现负增长.

3) Z08 处理啤酒废水应采用的最优条件:白天厌氧,夜晚好氧,光线不足时增加补充光源,这样既可以发挥厌氧条件下 Z08 大量繁殖的优势,又保留了黑暗好氧条件下高效分解有机物的优点,既能高效净水,又能够大量回收菌体实现资源化.在最优条件下,48 h 内啤酒废水中 COD 去除率达到 70%,污水中有机物转化为菌体单细胞蛋白的转化率达到 26%.

### 参考文献:

[1] KOBAYASHI M. Microbial energy conversion [M]. New York: Pergamon Press, 1977: 443 - 453.

[2] IMHOFF J F, TRÜPER H G. Purple nonsulfur bacteria [M]//STALEY J T. Bergey's manual of systematic bacteriology. Baltimore: Williams and Wilkins, 1989: 1658 - 1682.

[3] LU Y, XU J, LIU B, *et al.* Photosynthetic reaction cen-

ter functionalized nano-composite films: effective strategies for probing and exploiting the photo-induced electron transfer of photosensitive membrane protein [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2007, 22: 1173 - 1185.

[4] TAKAICHI S. Distribution and biosynthesis of carotenoids in plants and photosynthetic bacteria [J]. Foods Food Ingredients J Jpn, 2007, 212(7): 673 - 677.

[5] SIRIANUNTAPIBOON S, SRIKUL M. Reducing red color intensity of seafood wastewater in facultative pond [J]. Bio Resource Technology, 2006, 97: 1612 - 1617.

[6] LORRUNGRUANG C, MARTTHONG J, SASAKI K, *et al.* Selection of photosynthetic bacterium Rhodospira rubra 14F for polyhydroxyalkanoate production with two-stage aerobic dark cultivation [J]. J Biosci Bioeng, 2006, 102: 128 - 131.

[7] CHIEMCHAI SRI C, HONDA R, CHAITRONG L, *et al.* Application of cleaner technology and photosynthetic wastewater treatment system in noodle processing factory [J]. Southeast Asian Water Environment, 2008, 2: 327 - 334.

[8] TAO Yongzhen, HE Yanling, WU Yongqiang, *et al.* Characteristics of a new photosynthetic bacterial strain for hydrogen production and its application in wastewater treatment [J]. Int J Hydrogen Energy, 2008, 33(3): 963 - 973.

[9] AI C. The effect of photosynthetic bacteria on the treatment efficiency of high-strength monosodium glutamate wastewater [J]. Environ Sci Manage, 2008, 10: 13 - 17.

[10] 邱贤华, 李明俊, 张秋根. 水解酸化 - SBR 工艺处理啤酒废水 [J]. 工业水处理, 2004, 24(2): 58 - 60.

[11] 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.

[12] 何春华. 光合细菌的富集分离鉴定及生长条件研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

(编辑 魏希柱)