



基于物料平衡的光合细菌污水资源化碳排放研究

孟 帆¹, 张光明²

(1. 中国共产党北京市委员会党校经济学教研部, 北京 100044;

2. 河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300131)

[摘要] 加速实现碳中和已成为全球共识, 污水处理领域的碳排放情况和低碳技术的发展也逐渐被关注。光合细菌污水资源化技术是一种新兴的污水处理技术, 可同时实现污水处理和资源回收, 目前该技术的碳排放情况还没有被研究。基于光合细菌的处理过程和物料平衡原理, 根据污水处理数据计算出 CO₂ 的净产生量, 并对该技术进行低碳程度评价。结果表明, 光合细菌污水资源化技术单位 COD 去除量对应的 CO₂ 净产生量(碳排放量/COD 去除量)的值均在 1.1 以下, 该值远低于其他污水处理技术。同时, 该技术还会产生多种高价值物质如辅酶 Q10 等, 可抵消一部分碳排放。因此, 光合细菌污水资源化技术是一种适应碳中和目标的低碳污水处理技术。

[关键词] 污水处理; 资源化; 光合细菌; 碳排放

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)06-0074-05

Carbon emission of photosynthetic bacteria wastewater bioconversion technology based on material balance algorithm

MENG Fan¹, ZHANG Guangming²

(1. Department of Economics, Party School of the Beijing Municipal Committee of the Communist Party of China, Beijing 100044, China; 2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: Accelerating carbon neutralization has become a global consensus. The carbon emission and carbon reduction technologies in the field of sewage treatment have also been gradually concerned. Photosynthetic bacteria bioconversion technology of wastewater is a new wastewater recycling technology. It is a new method that can realize wastewater treatment and resource recovery simultaneously. At present, the carbon emission of this technology has not been studied. Based on the biological treatment process of photosynthetic bacteria, this study calculated its net carbon emission and evaluated its low-carbon degree based on the sewage treatment data and the material balance. The results showed that the carbon emission/COD removal of photosynthetic bacteria bioconversion technology of wastewater was less than 1.1, which was far lower than other wastewater treatment technologies. At the same time, the technology could also produce a variety of high-value products such as coenzyme Q10, which would offset part of the carbon emissions. Therefore, photosynthetic bacteria bioconversion technology of wastewater is a wastewater recycling technology suitable for the goal of carbon neutralization.

Key words: sewage treatment; resource recovery; photosynthetic bacteria; carbon emission

2020 年, 我国宣布 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值、2060 年前实现碳中和, 即“3060”碳目标。欧美等国家纷纷提出污水处理要走低碳运行之路, 美国水环境研究基金会更是提出至 2030 年美国所有污水处理厂均要实现碳中和运行的目标。因此,

国内外学者针对不同工艺、不同规模的污水处理系统碳排放量进行了核算和研究。污水处理领域碳排放的估算一般基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在 2010 年发布的《2006 国家温室气体清单指南》中提供的计算方法^[1-2]。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52070067)

光合细菌(PSB)污水资源化技术是一种新兴的污水处理和资源回收技术,该技术能有效去除污水中的污染物,同时也不存在污泥处理处置的问题^[3-4]。光合细菌是具有原始光能合成体系的原核生物的总称,广泛存在于水田、湖泊、江河、海洋、活性污泥及土壤中。光合细菌能够以光作为能源,在光照厌氧或黑暗好氧条件下利用有机物、硫化物、氨等作为供氢体兼碳源进行代谢。光合细菌的菌体因其蛋白质含量高而成为有用的资源,并且光合细菌菌体还含有许多高价值的物质,如聚羟基烷酸酯(PHA)、类胡萝卜素、5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)和辅酶Q10^[5-6]。

光合细菌环境友好、可资源回收的性质使其比传统污水处理技术更有竞争力,其低碳程度值得探索。但光合细菌污水资源化技术由于其反应过程未被完全研究清楚,很难沿用现行方法直接计算碳排放量。本研究基于光合细菌的处理过程和物料平衡原理,根据污水处理数据计算出CO₂的净产生量,从而对该技术进行低碳程度评价。

1 材料与方法

1.1 菌种和废水

光合细菌属革兰阴性菌,其细胞形态多样,本研究中使用的光合细菌菌株为球形红杆菌。本研究采用蔗糖废水为处理对象,以苹果酸、蔗糖、磷酸二氢钾、硫酸铵、七水硫酸镁和碳酸氢钠为原料配制蔗糖废水,蔗糖和苹果酸的质量比为5:3。该废水的COD为(7 000±200) mg/L,氨氮为(350±20) mg/L,初始pH为7.0±0.2。

1.2 反应器和环境条件

将80%(体积分数)的废水和20%的光合细菌(PSB)菌液加入1 000 mL锥形瓶中。实验组设置3种类型的溶解氧水平(DO<0.5 mg/L、0.5~2 mg/L和>2 mg/L),使用溶解氧计(YSI 550A)测量溶解氧水平。光照条件设置为2 000 Lx,反应器温度保持在(28±2)℃。分别在0、12、24、48、72 h吸取25 mL液体作为样本。

1.3 废水COD和光合细菌生物量的分析方法

首先对收集的样本进行离心,离心条件为9 000 r/min和10 min;离心后,用重铬酸钾法测试上清液的COD。剩下的样本用紫外分光光度法(北京普析分光光度计TU-1900)测定光合细菌的生物量,即在660 nm波长下测定其吸光度^[7]。实验数据取3

次平行实验的平均值。

1.4 光合细菌污水资源化技术CO₂净产生量的计算方法

光合细菌独特的代谢过程包括光磷酸化和氧化磷酸化2个过程,分别对应着光合作用和呼吸作用。光合细菌的光合作用是指光合细菌将吸收的光能转化成化学能的过程。植物和藻类的光磷酸化过程中会发生水的光解,是非环式光合作用;而光合细菌的光磷酸化过程与传统光合代谢过程最大的不同是其是环式光磷酸化,不以水作供氢体,不发生水的光解,也不释放氧气,但同样可以吸收CO₂。光合细菌的呼吸作用(氧化磷酸化)和其他生物的呼吸作用一样,即有机物经过一系列的氧化分解,最后生成CO₂等物质,并随之释放能量^[8]。

光合磷酸化和氧化磷酸化这2个过程包括吸收CO₂和排放CO₂的过程(图1)。由于光合细菌的整个反应过程是比较独特的,很难沿用碳核算的方法进行计算。但是基于物料守恒的原则,再加上光合细菌各反应的基本过程,CO₂的净产生量可以被分析出来。

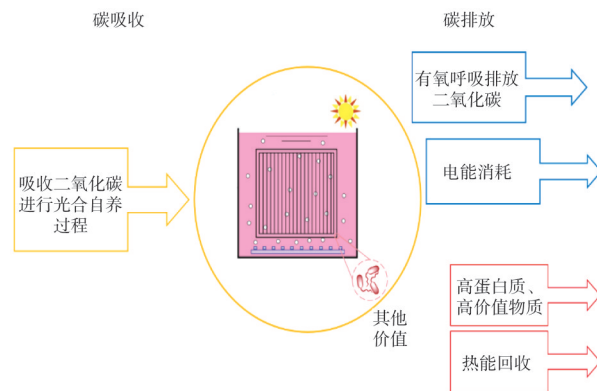


图1 光合细菌吸收碳和排放碳的过程

Fig. 1 The process of carbon absorption and emission by photosynthetic bacteria

1.4.1 CO₂净产生量

根据物料守恒的原则,光合细菌直接的碳吸收和碳排放过程衡算可列为:

$$\begin{aligned} & \text{吸收的CO}_2\text{的碳含量} + \text{初始废水COD中的碳含量} = \\ & \text{剩余废水COD中的碳含量} + \text{排出的CO}_2\text{中的碳含量} + \\ & \text{PSB生物量增加量中的碳含量} \end{aligned} \quad (1)$$

再根据发生反应前后碳总量是一定的,计算CO₂的净产生量:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{的净产生量} &= \text{排出的CO}_2\text{的量} - \text{吸收的CO}_2\text{的量} = \\ & \text{废水COD消耗量对应的CO}_2\text{的量} - \\ & \text{PSB生物量增加量对应的CO}_2\text{的量} \end{aligned} \quad (2)$$

1.4.2 废水 COD 与 CO₂ 的对应关系

每单位 COD 可以生成的 CO₂ 的量可以基于 COD 反应过程计算。具体的 CO₂ 产生量由碳源类型决定, 因为不同碳源类型的 COD 对应的 CO₂ 也不同。假设本研究碳源为 C₃H₅O₂, 根据反应过程, 1 mg/L 的 COD 对应产生的 CO₂ 的量为 $\frac{11x}{8x+2y-4z}$ mg/L。以此代入不同类型的碳源, 可计算得到对应生成的 CO₂ 的量。

1.4.3 光合细菌生物量与 CO₂ 的对应关系

根据文献, 光合细菌菌体干重中碳质量分数约为 50%。因此, 可根据碳在菌体干重中的质量分数计算光合细菌菌体与 CO₂ 的对应关系, 即 1 g PSB 生物量对应能产生的 CO₂ 为 1.83 g。

根据 1.4.1~1.4.3 章节的物料守恒与换算关系, 即可计算出光合细菌资源化技术的净碳排放量。

除了上述直接碳排放, 污水处理过程中还有间接的碳排放, 如好氧过程消耗的电量产生的间接碳排放也需考虑在内。国内污水处理厂的耗电量约为 0.29 kW·h/m³[9], 碳排放量为 0.96 kg/(kW·h)[10], 处理每吨水因耗电产生的间接碳排放量是 0.278 4 kg/m³, 即为 278.4 mg/L。这部分因耗电产生的碳排放也应计算在内。

2 结果与讨论

2.1 不同光氧条件下的 CO₂ 产生量

光合细菌废水资源化过程中, 最重要的因素是光氧条件。本课题组根据 1.4 章节的物料守恒计算方法, 对不同光氧条件下光合细菌废水资源化过程中的碳排放进行了计算。蔗糖的分子式为 C₁₂H₂₂O₁₁, 苹果酸的分子式是 C₄H₆O₅, 配制的蔗糖废水对应的 COD 与 CO₂ 的换算系数为 1.5。通过计算, 不同光氧条件下光合细菌污水资源化技术的 COD 去除量、PSB 生物量增加量及 CO₂ 净产生量见表 1。

光合细菌污水资源化技术中单位 COD 去除量对应的 CO₂ 净产生量(碳排放量/COD 去除量)的结果见图 2。

由表 1 和图 2 可以得出, 光合细菌污水资源化技术中 CO₂ 净排放量与 COD 去除量的比值均小于 1.1, 说明该技术的单位碳排放量比较低。尽管 4 种不同光氧条件下, COD 的去除量、PSB 生物量增加量、CO₂ 净产生量存在很大差异, 但碳排放量/COD 去除量的

表 1 不同光氧条件下光合细菌污水资源化技术的 CO₂ 净产生量

Table 1 Net CO₂ production of PSB wastewater bioconversion technology under different oxygen conditions

光氧条件	COD 去除量/(mg·L ⁻¹)	PSB 生物量增量/(mg·L ⁻¹)	CO ₂ 净产生量/(mg·L ⁻¹)
自然光, DO<0.5 mg/L	4 869.0	1 569.7	4 431.0
自然光, DO=0.5~2 mg/L	7 978.5	2 482.1	7 703.9
自然光, DO>2 mg/L	8 279.1	2 262.4	8 556.9
光照厌氧	1 432.5	501.0	1 510.3

注: DO=0.5~2 mg/L、DO>2 mg/L 和光照厌氧条件下均使用了搅拌和照明设备, 计算 CO₂ 净产生量时都加入了电能消耗对应的碳排放量 278.4 mg/L。

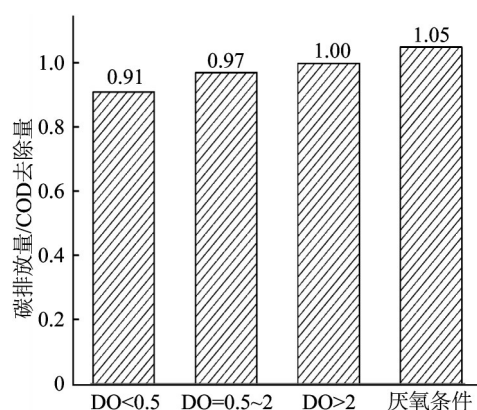


图 2 不同光氧条件下光合细菌污水资源化技术的碳排放量/COD 去除量

Fig. 2 Carbon emission/COD removal of PSB wastewater bioconversion technology under different oxygen conditions

值却相差不大, 说明不同光氧条件下单位 COD 去除量对应的碳排放效率相对稳定, 原因可能是光合细菌自身复杂独特的能量转换和物质代谢机制。

2.2 不同类型废水的 CO₂ 产生量

除了光氧条件, 不同碳源对应产生的 CO₂ 的量也不同, 所以本研究也分析了光合细菌污水资源化技术处理不同碳源类型废水的碳排放情况。大豆废水主要成分色氨酸的分子式为 C₁₁H₁₂N₂O₂, 酿酒废水中乙醇的分子式为 C₂H₆O, 二者的 COD 与 CO₂ 的换算系数分别为 1.16 和 0.92; 海产品废水的主要成分是甘氨酸, 制药废水中的主要成分是抗生素, 经计算二者的 COD 与 CO₂ 的换算系数分别为 1.22 和 1.07。以大豆废水、酿酒废水、海产品废水和制药废水为研究对象, 计算其碳排放数据, 结果如表 2 和图 3 所示。

如图 3 所示, 光合细菌污水资源化技术在处理不同类型废水时的碳排放量/COD 去除量的值均在

表2 不同废水类型下光合细菌污水资源化技术的CO₂净产生量Table 2 Net CO₂ production of PSB wastewater bioconversion technology under different kinds of wastewater

废水类型	COD去除量/ (mg·L ⁻¹)	PSB生物量增 加量/(mg·L ⁻¹)	CO ₂ 净产生量/ (mg·L ⁻¹)	参考 文献
大豆废水1	3 207.6	1 323.5	1 577.2	[11]
大豆废水2	9 285.0	4 520.0	2 777.4	[10]
酿酒废水	9 205.1	1 472.8	6 051.9	[12]
海产品废水	485.0	271.6	373.1	[13]
制药废水	2 000.0	860.0	844.6	[14]

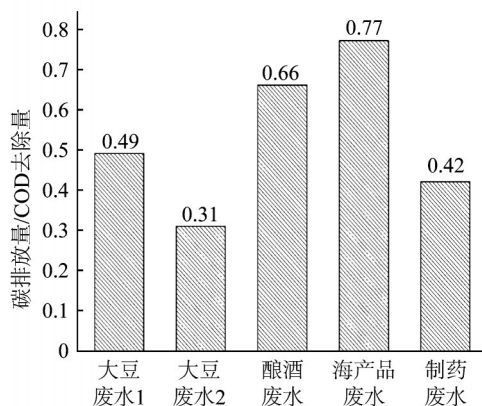


图3 不同废水类型下光合细菌污水资源化技术的碳排放量/COD去除量

Fig. 3 Carbon emission/COD removal of photosynthetic bacteria wastewater bioconversion technology under different kinds of wastewater

0.8以下,说明光合细菌污水资源化技术处理不同类型的废水的单位碳排放量都较低。包含蔗糖废水在内的5种废水的碳排放量/COD去除量值相差很大,说明光合细菌对于不同类型的碳源的利用机制略有不同。

2.3 与其他污水处理技术碳排放情况比较

利用本研究不同条件下的数据,计算出该研究中的光合细菌污水资源化技术的碳排放量/COD去除量的均值为0.7。根据文献计算得到其他工艺中的碳排放量/COD去除量的数据^[15-17],光合细菌污水资源化技术与其他工艺的对比见图4。

从图4可以看出,除光合细菌污水资源化技术外,其他污水处理技术的碳排放量/COD去除量的值均大于1.1。所以,基于碳排放量/COD去除量,光合细菌污水资源化技术更有优势。

除了碳排放量/COD去除量的优势外,光合细菌污水资源化技术还可以进行资源回收。光合细菌细胞中蛋白质的质量分数很高(40%~60%),营养价值高,可

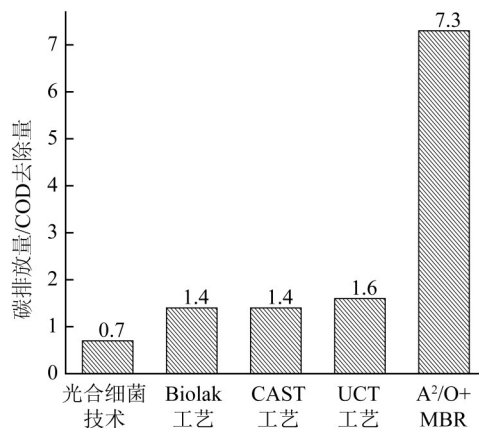


图4 不同污水处理技术的碳排放量/COD去除量

Fig. 4 Carbon emission/COD removal value of different sewage treatment technologies

用于水产、畜禽养殖和农作物培育等领域^[18]。光合细菌细胞中还含有一些高价值的物质,如PHA、辅酶Q10、类胡萝卜素和5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)等,这些高价值物质也可抵消一部分的碳排放量。根据目前CO₂排放的市场价(2021年12月31日成交均价为42.85元/t),这些资源对应抵消的碳排放量见表3。

表3 光合细菌污水资源化技术的附加价值

Table 3 The added value of photosynthetic bacteria wastewater bioconversion technology

资源回收种类	光合细菌菌体量	市场价	抵消碳排放量	参考文献
菌液	—	20~50 元/L	0.47~1.17 t/L	[19]
辅酶Q10	38.60 mg/g	30 000 元/g	700.12 t/g	[19]
类胡萝卜素	2.53 mg/g	5 元/g	0.12 t/g	[19]
5-ALA	1.30 g/L	18 元/g	0.42 t/g	[5]

3 结论

本研究基于物料平衡,依据光合细菌污水资源化技术的处理数据,计算其CO₂净产生量,并进行低碳程度评价。光合细菌污水资源化技术在处理蔗糖废水时的碳排放量/COD去除量的值均低于1.1,在处理大豆废水、酿酒废水、海产品废水和制药废水时的碳排放量/COD去除量的值都低于0.8,低碳程度均远大于其他污水处理技术。同时,光合细菌污水资源化技术还可产生一些高价值物质的附加价值。因此,光合细菌污水资源化技术是一种符合低碳目标的污水处理技术。

参考文献

- [1] 程豪. 碳排放怎么算:《2006年IPCC国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014(11): 28-30.

- CHENG Hao. How to calculate carbon emissions: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[J]. China Statistics, 2014(11): 28-30.
- [2] SINGH P, KANSAL A, CARLIELL-MARQUET C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 22-30.
- [3] PRACHANURAK P, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, et al. Biomass production from fermented starch wastewater in photo-bioreactor with internal overflow recirculation [J]. Bioresource Technology, 2014, 165: 129-136.
- [4] HÜLSEN T, BARRY E M, LU Yang, et al. Domestic wastewater treatment with purple phototrophic bacteria using a novel continuous photo anaerobic membrane bioreactor [J]. Water Research, 2016, 100: 486-495.
- [5] LU Haifeng, ZHANG Guangming, ZHENG Ziqiao, et al. Bio-conversion of photosynthetic bacteria from non-toxic wastewater to realize wastewater treatment and bioresource recovery: A review[J]. Bioresource Technology, 2019, 278: 383-399.
- [6] 张光明, 赵微. 光合细菌内高价值物质研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(7): 156-160.
- ZHANG Guangming, ZHAO Wei. Research development of high-value substances in photosynthetic bacteria [J]. Journal of North-east Agricultural University, 2013, 44(7): 156-160.
- [7] EATON A D, CLESCERI L S, GREENBERG A E, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater[J]. American Journal of Public Health Nations Health, 1966, 56(3): 387-388.
- [8] LU Haifeng, ZHANG Guangming, WAN Tian, et al. Influences of light and oxygen conditions on photosynthetic bacteria macromolecule degradation: Different metabolic pathways [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20): 9503-9508.
- [9] 臧小华. 污水处理厂如何降低能耗分析[J]. 节能, 2019, 38(4): 101-102.
- ZANG Xiaohua. Analysis on how to reduce energy consumption in sewage treatment plant [J]. Energy Conservation, 2019, 38(4): 101-102.
- [10] 姚明涛, 康艳兵, 熊小平. 我国大型发电集团度电碳排放分析与思考[J]. 中国能源, 2017, 39(6): 27-31.
- YAO Mingtao, KANG Yanbing, XIONG xiaoping. Analysis and considerations on carbon emission of large power generation group in China[J]. Energy of China, 2017, 39(6): 27-31.
- [11] 赵微, 张光明. 微量元素对废水中光合细菌生长的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 52-55.
- ZHAO Wei, ZHANG Guangming. Effects of trace elements on photosynthetic bacteria growth in wastewater[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 52-55.
- [12] LU Haifeng, ZHANG Guangming, DAI Xiao, et al. A novel wastewater treatment and biomass cultivation system combining photo-synthetic bacteria and membrane bioreactor technology[J]. Desalination, 2013, 322: 176-181.
- [13] LIMA L K F, PONSANO E H G, PINTO M F. Cultivation of *Rubrivivax gelatinosus* in fish industry effluent for depollution and biomass production [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(11): 2553-2558.
- [14] MADUKASI E I, DAI X, HE C, et al. Potentials of phototrophic bacteria in treating pharmaceutical wastewater [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2010, 7(1): 165-174.
- [15] 呼永锋, 梁梅, 张永祥, 等. $A^2/O+MBR$ 工艺运行效果与碳排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2021(9): 4439-4446.
- HU Yongfeng, LIANG Mei, ZHANG Yongxiang, et al. Study on operation efficiency and carbon emission characteristics of $A^2/O+MBR$ process[J]. China Environmental Science, 2021(9): 4439-4446.
- [16] 蒋礼兵, 刘金鑫, 董进波, 等. 城镇污水处理厂二氧化碳排放研究现状[J]. 山东化工, 2021, 50(22): 222-224.
- JIANG Libing, LIU Jinxin, DONG Jinbo, et al. Research status of carbon dioxide emission from urban sewage treatment plants [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(22): 222-224, 227.
- [17] 解清杰, 韩鹏飞, 陈诗龙, 等. CAST 工艺污水处理厂 CO_2 排放特性分析[J]. 环境科技, 2019, 32(3): 39-44.
- XIE Qingjie, HAN Pengfei, CHEN Shilong, et al. The characteristics of CO_2 emissions in sewage treatment plant with CAST process [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(3): 39-44.
- [18] 张光明, 孟帆, 曹可凡, 等. 光合细菌污水资源化研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(3): 1-6.
- ZHANG Guangming, MENG Fan, CAO Kefan, et al. Research progress in resource recovery of wastewater by photosynthetic bacteria (PSB) [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(3): 1-6.
- [19] MENG Fan, YANG Anqi, WANG Hangyao, et al. One-step treatment and resource recovery of high-concentration non-toxic organic wastewater by photosynthetic bacteria [J]. Bioresource Technology, 2018, 251: 121-127.
- [作者简介] 孟帆 (1990—), 博士。E-mail: mengfan2015@163.com。通讯作者: 张光明, 博士。E-mail: zgm5000@126.com。
- [收稿日期] 2022-04-13 (修改稿)