

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.002

光合细菌废水资源化再利用研究进展

赵维鑫¹, 黄志勇², 黄津辉¹, 杨晨¹, 王波¹, 杨莎莎¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院 中加水与环境安全联合研发中心, 天津 300071;

2. 中国科学院天津工业生物技术研究所 天津市工业生物系统与过程工程重点实验室,
天津 300308)

摘要: 环境污染和资源短缺是当今世界面临的两大难题,如何在高效处理废水的同时获得资源性物质已经成为环境领域的热点问题。光合细菌作为一类特殊的微生物,在废水处理中不仅可以实现碳、氮、磷的同步去除,而且可以产生类胡萝卜素、菌绿素、5-氨基乙酰丙酸等高价值资源物质,实现了废水高效处理和物质资源化再生的双重目的。简述了光合细菌的特点、分类及其资源化处理模式,总结了利用光合细菌处理废水的同时产生高价值资源物质方面的研究,重点阐述了相关调控因素、反应器类型及相关高价值资源物质的提取回收研究,并对相关不足及未来研究方向进行了展望,以期为该技术的进一步推广应用提供借鉴。

关键词: 光合细菌; 废水处理; 资源化; 回收再利用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0009-08

Research Progress on Wastewater Resource Utilization by Photosynthetic Bacteria

ZHAO Wei-xin¹, HUANG Zhi-yong², HUANG Jin-hui¹, YANG Chen¹, WANG Bo¹,
YANG Sha-sha¹

(1. Sino-Canadian Joint R & D Centre for Water and Environmental Safety, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Key Laboratory for Industrial Biological Systems and Bioprocessing Engineering, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China)

Abstract: Environmental pollution and resource shortage are the two major problems facing the world today. How to efficiently dispose wastewater and obtain resource materials has become a hot issue in the environmental field. As a special microorganism, photosynthetic bacteria can not only remove carbon, nitrogen and phosphorus simultaneously, but also produce high-value resources such as carotenoids, bacteriochlorophyll, 5-aminolevulinic acid, etc., thus realizing the dual purposes of efficient wastewater disposal and material recycling. In this work, the characteristics, classification and resource treatment methods of photosynthetic bacteria are briefly introduced, and the research progress of using photosynthetic bacteria to treat wastewater and produce high-value resource materials is summarized. It mainly describes the related regulatory factors, reactor types and the extraction and recovery of high-value

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400709); 天津市滨海新区科技项目(BHXQKJXM-PT-ZJSHJ-2017001)

通信作者: 黄津辉 E-mail: huangj@nankai.edu.cn

resource materials. In addition, the related deficiencies and future research directions are prospected in order to provide reference for the further popularization and application of this technology.

Key words: photosynthetic bacteria; wastewater treatment; resource utilization; recycling

环境污染与资源短缺是当今世界亟需解决的两大难题。传统的活性污泥法在废水处理过程中不仅会产生大量的剩余污泥,而且曝气所带来的高能耗问题也限制了该工艺的进一步发展。一些新兴的废水处理工艺,如短程硝化反硝化工艺、厌氧氨氧化工艺、全程自养脱氮工艺等,虽然可以节省曝气量、减少碳源投加量,实现废水的高效低耗处理,但仍无法有效回收废水中的资源性物质,造成了资源的浪费^[1]。

自1960年,光合细菌首次被应用于处理高浓度有机废水后,这一新型废水处理技术在几十年间得到了迅猛发展,目前已经在食品加工废水^[2]、淀粉发酵废水^[3]、合成蛋白胨废水^[4]等多种工业废水中取得了较好的处理效果。相较于其他废水处理微生物(氨氧化细菌、亚硝酸盐氧化菌、反硝化细菌、聚磷菌等),光合细菌在处理废水时不仅可以实现碳、氮、磷的同步去除,而且可以通过自身代谢合成类胡萝卜素、菌绿素、蛋白质、5-氨基乙酰丙酸等高价值资源物质,从而实现废水的高效处理和物质资源化再生的双重目的^[5]。但目前有关利用光合细菌对废水进行资源化处理的研究综述较少,限制了该技术的进一步推广应用,因此有必要总结相关研究进展,以期为该技术的发展应用提供借鉴。

1 光合细菌的分类及其废水资源化再利用

光合细菌是一类以光作为能源,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光合作用的微生物^[2,5]。其分布广泛,不仅存在于自然界的土壤、湖泊、海洋中,而且在人工污水处理系统中也有分布。根据自身的生存环境及代谢特点,可将光合细菌分为紫色硫细菌、紫色非硫细菌、绿色硫细菌和绿色非硫细菌四类^[5],具体如图1所示。其中,紫色非硫细菌因其对污染物具有较好的降解效果,是目前废水处理中应用最广泛的光合细菌。

随着废水排放量的增加及经济发展的需要,通过合适的处理方法将废水中的资源、能源回收后再利用的想法逐渐受到青睐。相较于其他废水处理

微生物,光合细菌自身含有极高的类胡萝卜素、菌绿素、蛋白质、5-氨基乙酰丙酸等高价值物质^[5]。这些物质在食品加工、医疗保健、日用化妆、农药杀虫等方面具有极高的需求量。

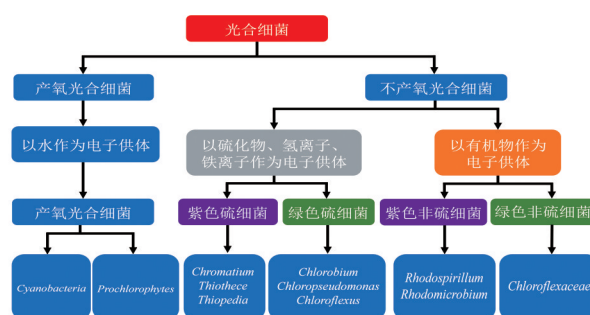


图1 光合细菌的分类

Fig.1 Classification of photosynthetic bacteria

基于光合细菌的这一特点,人们提出了利用光合细菌替代传统污水处理厂的生化处理部分,将废水达标化处理转变为废水资源化利用^[6](见图2)。如图2所示,废水经光合细菌处理后达标排放,通过合适的分离技术将光合细菌进行收集获得菌体,之后通过不同的提纯技术分别回收类胡萝卜素、菌绿素和5-氨基乙酰丙酸等高价值资源物质,并将其分别应用于医疗保健、畜禽饲料、食品加工等不同产品中,最终实现废水合理处置和物质循环利用的双重目的^[5-6]。

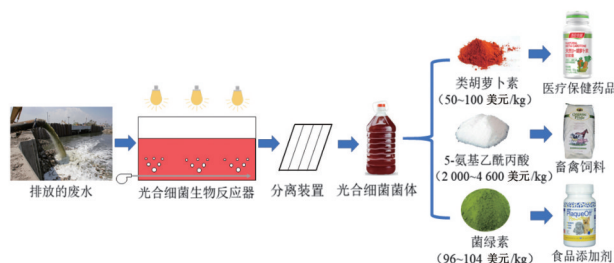


图2 光合细菌废水资源化再利用技术

Fig.2 Wastewater resource utilization technology by photosynthetic bacteria

2 光合细菌废水资源化利用特点及调控因素

2.1 光合细菌废水资源化利用特点

光合细菌废水处理技术作为一种新型废水资源化再生技术,目前已有较多案例研究^[2-4,7-13](见表

1),菌种大多为沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*)、球形红假单胞菌(*Rhodobacter sphaeroides*)、外硫红螺菌(*Ectothiorhodospira*),这几种光合细菌的底物利用范围较广,可利用乙醇、低级脂肪酸、分子氢等作为光合作用的电子供体,对外界不良环境具有较好的抵抗能力,且自身富含多糖类、聚-β-羧基丁酸盐等物质,因而可以进行后续资源物质的提取回收。光合细菌处理的废水大多为有机无毒废水,

如大豆废水、食品加工废水、制糖废水等,这些废水中含有大量的碳、氮、磷等营养性元素,有利于光合细菌的生长代谢。废水的COD去除率和高价值资源物质产量因废水种类、光合细菌种类及环境条件的差异而有所不同,但普遍表现为大豆废水和制糖废水的物质转化效率较高,其原因可能是由于这两种废水的营养物质含量比较充足,适合光合细菌的生长。

表1 利用光合细菌处理不同废水并实现高价值资源物质生产的研究

Tab.1 Study on the use of photosynthetic bacteria to treat different wastewaters and realize the production of high-value resource materials

废水种类	COD去除率/%	光合细菌种类	生物量产量	高价值资源物质	高价值资源物质产量
食品加工废水	58	沼泽红假单胞菌(<i>Rhodospseudomonas palustris</i>)	0.41 g/gBOD	菌绿素	2.12 μmol/g
淀粉发酵废水	88	沼泽红假单胞菌(<i>Rhodospseudomonas palustris</i>)	0.51 g/gBOD	类胡萝卜素	0.60 mg/g
合成蛋白胨废水	56.5	球形红假单胞菌(<i>Rhodobacter sphaeroides</i>)	3 848 mg/L	类胡萝卜素	3 245 mg/g
蔗糖废水	53.5	外硫红螺菌(<i>Ectothiorhodospira</i>)	1 198.2 mg/L	蛋白质	335.89 mg/g
大豆废水	93.3 ± 0.9	类球红细菌(<i>Rhodobacter sphaeroides</i>)	(31.8 ± 0.5) mg/(L·h)	5-氨基乙酰丙酸	(4.5 ± 0.5) mg/g
啤酒废水	60.3 ~ 99.1	外硫红螺菌(<i>Ectothiorhodospira</i>), 球形红假单胞菌(<i>Rhodobacter sphaeroides</i>), 荚膜红假单胞菌(<i>Rhodospseudomonas capsulate</i>)	4 500 mg/L	多糖	177.6 mg/g
蔗糖废水	60	红假单胞菌属(<i>Rhodospseudomonas</i>)	1 404.5 mg/L	辅酶Q10	88.8 mg/g
大豆废水	89.5	球形红假单胞菌(<i>Rhodobacter sphaeroides</i>)	2 655 mg/L	5-氨基乙酰丙酸	7.4 mg/g
制糖废水	94.7	红假单胞菌属(<i>Rhodospseudomonas</i> sp.)	2 645 mg/L	类胡萝卜素	1.455 mg/L
生活污水	85	红假单胞菌属(<i>Rhodospseudomonas</i> sp.)	3.2 g/gCOD	赖氨酸	0.97 mg/g

光合细菌废水资源化技术从本质上讲,属于生物转化技术。这一技术将有机无毒废水作为生长培养基,在不同光氧条件下借助光合细菌的代谢将废水中的营养物质转变为高价值资源物质,实现废水的资源化再生。光合细菌在不同光氧条件下的物质能量代谢途径^[14]如图3所示。

底物水平磷酸化和氧化磷酸化获得能量,有机物通过糖酵解途径和ED途径被分解为中间代谢产物,并进入三羧酸循环,以氧气作为最终电子受体,有机物被转变为自身细胞物质和CO₂^[15]。在光照厌氧条件下,光合细菌通过光合磷酸化和底物水平磷酸化获得能量,利用废水中的硫化物、H₂或小分子有机物作为电子供体,以中间代谢产物为最终电子受体,合成自身细胞中的高价值资源物质^[14]。在光照好氧条件下,光合细菌同时发生光合磷酸化和氧化磷酸化两种代谢模式,两种代谢途径共用辅酶Q、细胞色素bc1复合物和细胞色素c^[14,16]。

相较于传统的活性污泥处理工艺,光合细菌废水资源化技术不仅可以避免大量剩余污泥的产生,而且可以回收得到类胡萝卜素、菌绿素、5-氨基乙酰丙酸等高价值资源物质,实现了物质的循环利用^[5,16]。考虑到实际操作中废水处理效率和物质回收率的需要,许多研究人员根据光合细菌独特的生理代谢模式,通过改变环境因素来调控光合细菌在

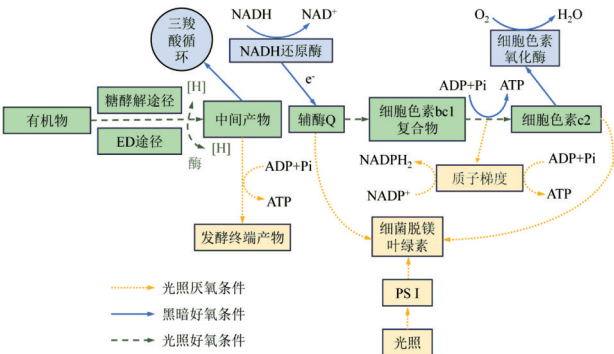


图3 光合细菌在不同光氧条件下的代谢途径
Fig.3 Metabolic pathways of photosynthetic bacteria under different light-oxygen conditions

如图3所示,在黑暗好氧条件下,光合细菌通过

废水处理过程中的物质和能量代谢途径,从而使其消耗更多的污染物和产生更多的特定目标产物,以获得较高的经济价值。

2.2 调控因素

2.2.1 光照

光照作为光合细菌最为重要的能量来源,在光合细菌的生长、繁殖、代谢等方面发挥着重要的作用。不同的光照参数(如光源、光暗比、光照度等)通过影响光合细菌的光合磷酸化过程,对废水的去除率和高价值资源物质的产量产生影响^[14]。光合细菌体内含有多种光合色素,不同种类的光合色素对光的吸收波长各不一致。Zhou等^[17]研究发现,当光源为红光(650 nm)时,光合细菌具有最高的生物量(2 580 mg/L)和COD去除率(88.6%)。但也有研究发现,当光源为蓝光(470 nm)时,光合细菌具有最高的生物量(2.5 g/L),并且在此条件下类胡萝卜素的产量也达到最高(1 782 $\mu\text{g/g}$)^[18]。更进一步的研究发现,无论在何种波长下,类胡萝卜素的含量都明显高于菌绿素。这可能是由于类胡萝卜素吸收波长较宽,不仅可以吸收波长为450~550 nm的光,还可以吸收部分可见光;而菌绿素的吸收波长较短,仅为715~1 050 nm^[17]。

光照度作为另一个重要的产能代谢调控参数,也影响着光合细菌废水资源化的效率。

光合细菌主要通过菌绿素、类胡萝卜素等光合色素来捕获光能,并将其转化为电子进行光合磷酸化作用,从而利用废水中的碳、氮、磷等元素合成高价值资源物质。而光照度可以调控光合基因(*bchF*、*bchC*、*bchE*、*crtA*、*pufB*、*puc1B*)的表达,进而影响菌绿素、类胡萝卜素、细胞色素f等光合色素的合成,最终对光合细菌生理代谢活动速率产生干扰。当光照度在一定范围(1 668~8 340 lx)时,光合基因的表达量随光照度的增加而增大,生物量和类胡萝卜素产量也随之增加。当光照度达到8 340 lx时,生物量和类胡萝卜素的产量达到最高值,分别为2.68 g/L和1.70 mg/g。但当光照度过高(10 008 lx)时,光照会抑制光合基因的表达,甚至破坏光合基因的结构,导致光合细菌的生理代谢活动受到抑制,进而抑制生物量和类胡萝卜素的合成^[19]。Zhou等^[12]研究发现,不同的光照度会对物质资源化效果产生很大影响,2 000 lx是光合细菌生物量回收和COD去除的最佳光强,相应值分别为2 645 mg/L和94.7%,

光合细菌在8 000 lx下具有类胡萝卜素的最高产量(1.455 mg/L)。

除光源和光照度外,光照周期对光合细菌废水资源化过程也具有重要影响。一般的研究大多采用连续光照策略,但Zhi等^[10]研究发现,当光照周期控制为24 h光照/24 h黑暗时,光合细菌废水处理获得了最高的氨氮去除率和生物量浓度,而在3 h光照/3 h黑暗的循环下获得了最高浓度的蛋白质(826.73 mg/g)和辅酶Q10(88.8 mg/g),但光照周期不会对COD和TP的去除率产生影响。

2.2.2 溶解氧

溶解氧作为废水处理中的重要参数,可以调控光合基因的表达和某些产能代谢关键酶的活性,进而对废水处理效果和光合细菌资源化产率产生重要影响。光合细菌以氧气作为电子受体,通过氧化磷酸化作用将废水中的有机物一部分分解转变为CO₂排放到大气中,另一部分用于合成自身细胞物质^[14]。研究表明,在一定范围内增大溶解氧的浓度,丙酮酸激酶、磷酸果糖激酶等光合细菌产能代谢关键酶的活性随之增加,其对废水处理的效率和资源化产率也随之增加,但过高的溶解氧浓度会抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶的活性,进而使光合细菌的生理代谢活动受到抑制^[15]。Meng等^[20]研究发现,当光合细菌以氧气作为电子供体并通过氧化磷酸化获取能量时,其最佳DO为4~8 mg/L,在此条件下COD和氨氮的去除率可分别达到93%和83%,其生物量可达到1 645 mg/L。考虑到实际运营中曝气成本会占污水处理厂运营成本的45%~75%,因而建议DO浓度保持在1~2 mg/L。

2.2.3 化学促进剂

研究发现,除直接通过调控外界光氧环境以调控物质代谢流和能量流外,还可通过添加某些外源促进剂以增强光合细菌代谢和增殖速率。Wu等^[21]研究发现,Fe²⁺可以构成脱氢酶的活性中心,因此适当添加Fe²⁺可以通过上调脱氢酶的活性来提高能量的产生,当添加量为20 mg/L时,光合细菌的生物量产量和COD去除率均可以达到最高值,分别为4 800.9 mg/L和93.4%。Liu等^[19]研究发现,添加Fe²⁺可以提高光合细菌*nif*基因的表达,促进ATP的产生,进而提高细胞生长和5-氨基乙酰丙酸的合成。Liu等^[22]研究发现,添加Mg²⁺离子可以促进某些关键酶(脱氢酶、固氮酶)的活性,进而提高光合细

菌对废水的处理效果及资源回收率。除微量元素外,添加植物激素也会刺激光合细菌的生长,提高其代谢活性。琥珀酸、三十烷醇、赤霉素等植物激素可以提高光合细菌产能代谢过程中菌绿素、类胡萝卜素及ATP的产量,进而提高菌体产量和有机物去除率^[23]。此外,Tian等^[24]研究发现,当向光合细菌培养液中添加20%的烟草水解质进行产物水解时,辅酶Q10的产率提高了108.2%。

2.2.4 其他方法

除以上几种方法外,研究发现,低强度短时间的超声也可以促进光合细菌的生长,这一现象可能是由于超声刺激提高了光合细菌脱氢酶的活性,使得细胞代谢活动加快而引发细胞产率提高^[25]。但同时应注意的是,超声刺激的强度和时间不应过长,否则会对细胞造成破坏。此外,Wang等^[26]研究发现,高盐分条件也会刺激光合细菌脱氢酶活性的增强,提高细胞代谢活性,同时也会刺激光合细菌产生更多的菌绿素和类胡萝卜素。

3 光合细菌废水生物处理反应器

3.1 光合序批式反应器

光合序批式反应器操作模式灵活、可以设置多相厌氧和好氧状态,能够满足废水处理的不同要求,因而在光合微生物的废水处理中具有广泛的应用。Chitapornpan等^[27]利用光合序批式反应器处理食品加工废水,COD去除率达到73%,生物量可达到0.53 gSS/gBOD,并且通过回收得到了较高产量的菌绿素和类胡萝卜素。光合序批式反应器由于构造简单、操作灵活,因而目前广泛应用于多种研究。但由于光合细菌沉淀性较差,难以与水分离,因此容易发生流失问题,需在光合序批式反应器后接入分离装置,以截留光合细菌。此外,为了保证光合细菌正常生长的需要,反应器多采用聚乙烯透明材料制成,使其具有良好的透光性。但考虑到在实际操作中存在的光路过长、内部光照不够的问题,目前也有学者提出在内部增加光纤以照亮反应器、优化光分布的策略^[28]。

3.2 平板型光生物反应器

平板型光生物反应器易于设计,通过改变厚度可以解决序批式反应器中存在的内部光照度不足的问题。Hülsen等^[29]利用浸没式平板反应器培养光合细菌,并用来处理畜禽废水,COD去除率达到

90%,回收得到190 kg/m³的蛋白质。Prachanurak等^[3]利用平板型反应器处理淀粉废水,COD去除率达到88%,菌绿素和类胡萝卜素含量分别为1.13 μmol/gVSS、0.60 mg/gVSS。与其他光生物反应器相比,平板光生物反应器被认为更经济。平板型光生物反应器难以按比例放大至几升的体积,但可通过改变布局,使其呈阶梯状分布,以提高废水的处理效率和高价值资源物质的产率。

3.3 光合细菌-膜生物反应器

由于光合细菌自身体积较小、细胞表面带负电荷、分泌的胞外聚合物较少,导致其难以自我絮凝分离。与之相对应的是,膜生物反应器由于具有良好的固液分离性能,因而特别适用于光合细菌从废水中分离和回收^[30]。此外,与其他方法相比,光合细菌-膜生物反应器具有操作简便、生物量回收率高和出水性能优异的优点。Lu等^[9]利用光合细菌-膜生物反应器处理啤酒废水,COD去除率超过97%,生物量产率可达到483.5 mg/(L·d),并且成功从废水中回收分离出蛋白质、多糖、类胡萝卜素等高价值资源物质。光合细菌-膜生物反应器作为一种具有广阔应用前景的反应器,目前正在逐渐成为光合细菌废水生物处理反应器的主流。然而,实际运行中却发现,该反应器在运行较长时间后容易出现膜污染阻塞问题^[31]。因此,寻找有效的方法来消除膜污染问题,同时提高生物量的回收率,仍然是这一技术大规模应用亟需解决的问题。

4 光合细菌回收并提取高价值资源物质

4.1 类胡萝卜素和菌绿素的提取

目前,类胡萝卜素和菌绿素的提取多采用有机溶剂提取法,如单纯的丙酮、甲醇、氯仿、己烷、乙醚等,也有将多种溶剂组合起来使用。Liu等^[4]利用HCl和丙酮从光合细菌菌体中成功提取出了类胡萝卜素。Zhou等^[12]采用甲醇和丙酮从光合细菌菌体中提取出类胡萝卜素。Lu等^[9]采用甲醇和乙醚混合溶液从光合细菌菌体中提取得到菌绿素。研究表明,不同溶剂的适当组合可以大幅增加光合色素的提取效率^[32]。

在提取方式上,传统的光合色素大多在常压下直接浸渍提取,提取效率主要取决于细胞壁的破坏程度,细胞壁的有效破坏可以促使溶剂进入细胞溶解其中的类胡萝卜素,从而使其产量提高8~10

倍^[33]。为了提高提取效率,在直接浸渍提取方法的基础上,出现了索氏提取、微波辅助萃取、超声辅助提取、加速溶剂萃取、超临界流体萃取等改进方法^[32],但是在使用这些方法时,需要对提取效率、使用成本及环境安全进行综合评估,以寻找最合适的方法。

4.2 5-氨基乙酰丙酸的提取

目前,有关利用光合细菌生产5-氨基乙酰丙酸的研究已趋于成熟,但相关分离方法则较少有报道,且大多集中于溶剂萃取法。Saikur等^[34]利用乙酰丙酮溶剂成功从光合细菌菌体破碎液中萃取得到5-氨基乙酰丙酸。Nunkaew等^[35]采用乙酰丙酮/乙醇/水溶液成功从光合细菌菌体破碎液中萃取得到5-氨基乙酰丙酸。Zhi等^[7]采用乙酰丙酮和乙酸钠混合溶液从光合细菌菌体破碎液中萃取得到了5-氨基乙酰丙酸。考虑到5-氨基乙酰丙酸的较高价值和广泛用途,因此有必要加强对其分离方法的研究。

4.3 单细胞蛋白和多糖的提取

目前,有关单细胞蛋白的提取方法主要有膜分离方法和化学沉淀法两种。Lo等^[36]通过使用截留分子质量为30 000 u的聚砜膜,几乎保留了废水中的所有粗蛋白。Avula等^[37]采用超滤技术成功分离得到蛋白质。通过膜分离方法得到的蛋白质纯度较高,但该方法由于膜易污染而导致处理费用较高。此外,也有研究人员采用盐析法获得蛋白质混合物之后再进行分离。Zhi等^[7]将硫酸铵溶液与蛋白质溶液进行混合,搅拌过夜后成功分离得到蛋白质,但盐析法的纯度较低,需后续进行提纯处理。

在多糖提取方面,目前应用最广泛的方法是热水法,即通过60℃以上的热水提取数小时,大多数多糖可以稳定地溶解于热水中,因而可以获得较完整的多糖物质^[38]。考虑到一些酸性多糖或高分子多糖不易溶于热水,它们在稀碱溶液中的溶解度通常比在热水中大,有研究者在热水法后采用NaOH溶液或Na₂CO₃溶液来进一步提取多糖^[39]。此外,也有研究者将一定量的酶添加到提取系统,先使用热水提取,然后使用酶提取,从而大大提高多糖产率^[40]。由于不同种类的多糖性质差异较大,因此需根据目标多糖的特性,选择合适的提取方法。

5 结论与展望

近年来,废水排放量持续增加,循环经济的概

念日益深入人心,光合细菌作为一种独特的微生物,以其独特的废水资源化再生的特点,逐渐受到广泛的关注。但在实际大规模应用中,仍存在以下不足有待解决:①光合细菌的资源化物质转化效率较低。与通过合成生物学构建的人工菌株相比,大多数的光合细菌对污染物的降解能力和高价值资源物质的产量较差。②反应器处理能力有限,运行成本较高。目前光合细菌废水资源化的研究仍限于采用人工光源、封闭式小型室内反应器,导致其仅能在小范围内处理废水,且电力成本较高。③缺乏合适的分离提取技术,相较于其他传统废水处理技术,光合细菌废水资源化技术最大的优势在于可以获得某些高价值资源物质,从而实现废水资源化和物质再利用。但是目前尚未有合适的分离提取技术以获得高纯度的产物。

针对以上几个问题,应加强以下几个方面的研究:①高效菌株的筛选和获得。为提高资源化物质转化效率,有必要筛选可以高效降解污染物和资源物质产率高的光合细菌,以提高废水资源化处理效率。②新型光生物反应器的设计。为实现大规模户外废水处理,应设计采用太阳光源的新型户外开放式光生物反应器,在强化处理能力的同时降低能耗。③高价值内含物提取分离技术的研发。为实现废水资源化和物质再利用,有必要研发相应的提取分离技术,以推动高价值资源物质的回收利用。

参考文献:

- [1] BECKINGHAUSEN A, ODLARE M, THORIN E, *et al.* From removal to recovery: an evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater [J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114616.
- [2] CHITAPORN PAN S, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, *et al.* Organic carbon recovery and photosynthetic bacteria population in an anaerobic membrane photobioreactor treating food processing wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 141: 65-74.
- [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] LIU S L, ZHANG G M, LI X K, *et al.* Enhancement of *Rhodospirillum rubrum* growth and carotenoid

- production through biostimulation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 33: 21–28.
- [5] CAO K F, ZHI R, ZHANG G M. Photosynthetic bacteria wastewater treatment with the production of value-added products: a review [J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 122648.
- [6] LU H F, ZHANG G M, ZHENG Z Q, *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.
- [7] ZHI R, CAO K, ZHANG G, *et al.* Zero excess sludge wastewater treatment with value-added substances recovery using photosynthetic bacteria [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119581.
- [8] LIU S L, LI X K, ZHANG G M, *et al.* Optimization of influencing factors on biomass accumulation and 5-aminolevulinic acid (ALA) yield in *Rhodobacter sphaeroides* wastewater treatment [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 25(11): 1920–1927.
- [9] LU H F, PENG M, ZHANG G M, *et al.* Brewery wastewater treatment and resource recovery through long term continuous-mode operation in pilot photosynthetic bacteria-membrane bioreactor [J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 196–205.
- [10] ZHI R, YANG A Q, ZHANG G M, *et al.* Effects of light-dark cycles on photosynthetic bacteria wastewater treatment and valuable substances production [J]. Bioresource Technology, 2019, 274: 496–501.
- [11] LIU S L, ZHANG G M, ZHANG J, *et al.* Performance, 5-aminolevulinic acid (ALA) yield and microbial population dynamics in a photobioreactor system treating soybean wastewater: effect of hydraulic retention time (HRT) and organic loading rate (OLR) [J]. Bioresource Technology, 2016, 210: 146–152.
- [12] ZHOU Q, ZHANG P Y, ZHANG G M. Biomass and carotenoid production in photosynthetic bacteria wastewater treatment: effects of light intensity [J]. Bioresource Technology, 2014, 171: 330–335.
- [13] SAEJUNG C, THAMMARATANA T. Biomass recovery during municipal wastewater treatment using photosynthetic bacteria and prospect of production of single cell protein for feedstuff [J]. Environmental Technology, 2016, 37(23): 3055–3061.
- [14] LU H F, ZHANG G M, WAN T, *et al.* Influences of light and oxygen conditions on photosynthetic bacteria macromolecule degradation: different metabolic pathways [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20): 9503–9508.
- [15] MENG F, YANG A Q, ZHANG G M, *et al.* Effects of dissolved oxygen on key enzyme activities during photosynthetic bacteria wastewater treatment [J]. Process Biochemistry, 2019, 76: 165–170.
- [16] CHEN J Q, WEI J J, MA C, *et al.* Photosynthetic bacteria-based technology is a potential alternative to meet sustainable wastewater treatment requirement? [J]. Environment International, 2020, 137: 105417.
- [17] ZHOU Q, ZHANG P Y, ZHANG G M. Biomass and pigments production in photosynthetic bacteria wastewater treatment: effects of light sources [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 505–509.
- [18] KUO F S, CHIEN Y H, CHEN C J. Effects of light sources on growth and carotenoid content of photosynthetic bacteria *Rhodospseudomonas palustris* [J]. Bioresource Technology, 2012, 113: 315–318.
- [19] LIU S L, ZHENG Z H, TIE J X, *et al.* Impacts of Fe^{2+} on 5-aminolevulinic acid (ALA) biosynthesis of *Rhodobacter sphaeroides* in wastewater treatment by regulating *nif* gene expression [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 70: 11–19.
- [20] MENG F, YANG A Q, ZHANG G M, *et al.* Effects of dissolved oxygen concentration on photosynthetic bacteria wastewater treatment: pollutants removal, cell growth and pigments production [J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 993–997.
- [21] WU P, ZHANG G M, LI J Z, *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.
- [22] LIU S L, ZHANG G M, LI J Z, *et al.* Effects of metal ions on biomass and 5-aminolevulinic acid production in *Rhodospseudomonas palustris* wastewater treatment [J]. Water Science and Technology, 2016, 73 (2): 382–388.
- [23] CHEN Y, YANG A Q, MENG F, *et al.* Additives for photosynthetic bacteria wastewater treatment: latest developments and future prospects [J]. Bioresource Technology Reports, 2019, 7: 100229.
- [24] TIAN Y T, YUE T L, YUAN Y H, *et al.* Tobacco biomass hydrolysate enhances coenzyme Q10 production

- using photosynthetic *Rhodospirillum rubrum* [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(20): 7877-7881.
- [25] ZHOU Q, ZHANG P Y, ZHANG G M. Enhancement of cell production in photosynthetic bacteria wastewater treatment by low-strength ultrasound [J]. Bioresource Technology, 2014, 161: 451-454.
- [26] WANG H Y, YANG A Q, ZHANG G M, *et al.* Enhancement of carotenoid and bacteriochlorophyll by high salinity stress in photosynthetic bacteria [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 121: 91-96.
- [27] CHITAPORN PAN S, CHIEMCHAI SRI C, CHIEMCHAI SRI W, *et al.* Photosynthetic bacteria production from food processing wastewater in sequencing batch and membrane photo-bioreactors [J]. Water Science & Technology, 2012, 65(3): 504-512.
- [28] ADESSI A, DE PHILIPPIS R. Photobioreactor design and illumination systems for H₂ production with anoxygenic photosynthetic bacteria: a review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(7): 3127-3141.
- [29] HÜLSEN T, HSIEH K, TAIT S, *et al.* White and infrared light continuous photobioreactors for resource recovery from poultry processing wastewater—a comparison [J]. Water Research, 2018, 144: 665-676.
- [30] GONZÁLEZ E, DÍAZ O, RUIGÓMEZ I, *et al.* Photosynthetic bacteria-based membrane bioreactor as post-treatment of an anaerobic membrane bioreactor effluent [J]. Bioresource Technology, 2017, 239: 528-532.
- [31] LU H F, ZHANG G M, 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.
- [32] SAINI R K, KEUM Y S. Carotenoid extraction methods: a review of recent developments [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 90-103.
- [33] UQUICHE E, ANTILAF I, MILLAO S. Enhancement of pigment extraction from *B. braunii* pretreated using CO₂ rapid depressurization [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2016, 47(2): 497-505.
- [34] SAIKEUR A, CHOORIT W, PRASERTSAN P, *et al.* Influence of precursors and inhibitor on the production of extracellular 5-Aminolevulinic acid and biomass by *Rhodopseudomonas palustris* KG31 [J]. Bioscience Biotechnology, 2009, 73(5): 987-992.
- [35] NUNKA EW T, KANTACHOTE D, CHAI PRAPAT S, *et al.* Use of wood vinegar to enhance 5-aminolevulinic acid production by selected *Rhodopseudomonas palustris* in rubber sheet wastewater for agricultural use [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(4): 642-650.
- [36] LO Y M, CAO D, ARGIN-SOYSAL S, *et al.* Recovery of protein from poultry processing wastewater using membrane ultrafiltration [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(6): 687-698.
- [37] AVULA R Y, NELSON H M, SINGH R K. Recycling of poultry process wastewater by ultrafiltration [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(1): 1-8.
- [38] SHI L. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 37-48.
- [39] CAMPESTRINI L H, RASERA G B, DE CAMARGO A C, *et al.* Alkaline conditions better extract anti-inflammatory polysaccharides from winemaking by-products [J]. Food Research International, 2020, 131: 108532.
- [40] SONG Y, HAN A, PARK S, *et al.* Effect of enzyme-assisted extraction on the physicochemical properties and bioactive potential of lotus leaf polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 169-179.

作者简介: 赵维鑫(1994-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为废水处理与生态修复。

E-mail: zhaoweixin0728@163.com

收稿日期: 2020-06-18

修回日期: 2020-07-28

(编辑: 丁彩娟)