

沼泽红假单胞菌应用的研究进展

王永迪, 汪春蕾* (东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 沼泽红假单胞菌在自然界中分布广泛, 由于其独特生理特性, 在多个领域都有应用。对沼泽红假单胞菌在农业、养殖业、环境治理和化工 4 个方面的应用研究进行了综述, 旨在为沼泽红假单胞菌在与植物互动、饲料级微生物添加剂、水质净化、生产清洁能源方面的后续研究提供参考。

关键词 沼泽红假单胞菌; 农业; 养殖业; 环境治理; 化工

中图分类号 Q939.9 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)02-0005-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Application of *Rhodopseudomonas palustris*

WANG Yong-di, WANG Chun-lei (College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract *Rhodopseudomonas palustris* is widely distributed in nature. Because of its unique physiological characteristics, it has been applied in many fields. In this paper, the application of *Rhodopseudomonas palustris* in agriculture, aquaculture, environmental treatment and chemical engineering was reviewed. The aim of this paper was to provide reference for the follow-up research of *Rhodopseudomonas palustris* in the fields of interaction with plants, feed-grade microbial additives, water purification and production of clean energy.

Key words *Rhodopseudomonas palustris*; Agriculture; Aquaculture; Environmental treatment; Chemical engineering

沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)属于不产氧的光合细菌,为紫色非硫细菌,属于红螺菌科,红假单胞菌属,是研究光合磷酸化、固氮调节、产氢以及厌氧降解芳香族化合物的模式生物。沼泽红假单胞菌具有多种营养类型,如进行厌氧光能自养、厌氧光能异养和好氧异养生长,它可以适应多种环境条件。沼泽红假单胞菌寄主广泛,目前已知该菌可以定殖在水稻、烟草、大豆等多种植物上。沼泽红假单胞菌能够合成促进植物生长的物质如吲哚乙酸(IAA)、5-氨基乙酰丙酸(5-ALA),通过固氮作用合成 NH_4^+ ,在缺铁状态下诱导产生铁载体^[1],并能在胁迫条件下诱导植物合成抗氧化酶,如过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶和超氧化物歧化酶(SOD)等。

沼泽红假单胞菌对 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Cd^{2+} 等重金属离子具有很明显的抗性和去除能力,并且对难降解的污染物有比较好的降解能力^[2-3]。该菌能够产生多种化合物,在生物防治、医疗健康、化工生产、环境治理等方面有较为广泛的应用潜力。沼泽红假单胞菌能够利用碳酸氢钠、醋酸钠、葡萄糖和纤维素等多种碳源,进行生长和繁殖,这一性状为科学研究提供了极大的便利。目前,沼泽红假单胞菌仍然是国内外学者重要的研究内容之一,在其与植物互动,固定重金属,生产清洁能源等方面取得显著成果,因此,有必要对现有结果进行整理和总结,为今后研究工作的开展提供参考。

1 农业方面的应用

沼泽红假单胞菌在农业上能够通过生物固氮、磷酸盐溶解^[4]、植物激素与生长调节剂合成、抗生物物质合成、植物免疫诱导、重金属固定等途径,在植物营养、促生、抗逆、病害防控

等方面起重要的作用。

沼泽红假单胞菌是一种紫色非硫光合细菌,它能定殖在水稻、烟草^[5]和白菜等植物体内,能够释放 IAA 和 5-ALA 等促生物质,促进细胞分裂,抑制病原菌的活性,影响土壤中菌群的组成。在对白菜的研究中发现,沼泽红假单胞菌 PS3 可以促进硝酸盐的吸收,提高了白菜的产量。在接种了菌株 PS3 的叶片中,内源 IAA 和细胞分裂率明显提高,同时发现菌株 PS3 中 IAA 合成相关基因 *mao* 的表达量没有明显升高,从而推断叶片中 IAA 含量的升高是由于菌株 PS3 诱导的^[6]。水稻是目前主要的粮食作物之一,NaCl、重金属和病原真菌胁迫等都是水稻减产的关键因素,如何提高水稻产量和水稻抗病性仍然是目前的重点研究内容之一。在水稻的研究中发现,沼泽红假单胞菌和枯草芽孢杆菌共接种对水稻产量有协同效应,接种对土壤细菌群落结构有明显的影响,对丰度低的群落影响更大^[7-9]。沼泽红假单胞菌 TN110 能够释放 5-ALA 和 IAA 来促进水稻的生长,并且菌株 TN110 的接种使稻田中甲烷排放量减少 80%以上^[10-11]。沼泽红假单胞菌 KTSSR54 的胞外多聚物(EPS)、脂肽和光色素对 3 种水稻病原菌(稻曲霉菌 NPT0508、新月弯孢霉 SPB0627 和稻瘟病菌 PTRC63)具有一定的抗性,其中 EPS 的抗菌活性最高^[12]。在沼泽红假单胞菌 PSB06 培养液中发现的 ATP 合成酶亚基 Atp2 蛋白,能够显著抑制稻瘟病菌的附着,从而影响稻瘟病菌对水稻的侵染^[13]。沼泽红假单胞菌 ISP-1 接种花生植株 5 年后,显著促进花生种子对氮素的吸收,提高了蛋白质的含量,从而使花生总产量提高了 12.5%^[14]。四溴双酚 A(TBB-PA)是世界上用量最大、产量最大的溴化阻燃化合物,TBB-PA 对植物的胁迫会导致活性氧(ROS)的产生,从而损害植物细胞的蛋白质、核酸和色素。沼泽红假单胞菌 RP11 通过溶磷溶钾并释放 IAA 和 5-ALA 来促进大豆幼苗的生长,其根长、类胡萝卜素、可溶性糖和可溶性蛋白的含量都有显著性提高。同时,可溶性蛋白和可溶性糖含量的增加提高了大

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572020DP07)。
作者简介 王永迪(1997—),女,山东滨州人,硕士研究生,研究方向:微生物学。*通信作者,副教授,博士,从事微生物学等研究。
收稿日期 2022-03-22

豆幼苗对 TBBPA 的抗性^[15]。

NaCl 胁迫显著降低植物的总叶绿素含量,增加植物体内过氧化氢(H_2O_2)的浓度。5-ALA 施加显著提高了叶片总叶绿素含量,提高了过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APx)、谷胱甘肽还原酶(GR)和超氧化物歧化酶(SOD)的抗氧化活性。沼泽红假单胞菌 TN114 可以通过分泌 EPS,使菌株 TN114 能够在高浓度的 NaCl 中存活^[16]。另外,菌株 TN114 可以释放 5-ALA,促进盐碱地水稻的生长,其成本可能比商品 5-ALA 更低^[17]。在砷(As)胁迫状态下,沼泽红假单胞菌 C1 和苯甲酸红假单胞菌 C31 混合接种水稻,通过释放 5-ALA、IAA、EPS 和铁载体,来增加水稻中类胡萝卜素、一氧化氮、叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量,提高 SOD、APx、CAT 和 GR 的活性,减轻 As 对水稻的胁迫,从而促进水稻的生长^[18-19]。镉(Cd)在水稻中的积累及其向食物链的转移已成为世界性的重大环境问题。镉污染会导致植物生长缓慢,对活体的毒性高。有效的 Cd 固定化和减少水稻籽粒对 Cd 的吸收是将其毒性降到最低的有效策略。在 Cd 胁迫状态下,沼泽红假单胞菌和枯草芽孢杆菌联合使用,能够影响植株不同部位对 Cd 的吸收能力,根、茎、叶的转运过程受到抑制,降低了 Cd 在水稻籽粒中的积累,能够提高土壤中脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性,提高土壤肥力,促进植株的生长^[20-21]。

2 养殖方面的应用

作为光合细菌的一员,沼泽红假单胞菌具有非凡的代谢多功能性,已成为饲料工业中潜在的益生菌之一。沼泽红假单胞菌作为饲料,通过改变动物肠道菌群结构,促进肠道益生菌的生长;通过改善水质来增强水生动物的抗病性,提高养殖动物的产量。在奶牛的养殖过程中,通过在奶牛饲料中添加沼泽红假单胞菌和地衣芽孢杆菌菌剂,显著提高奶牛的生产性状、日采食量、产奶量和饲料的转化率^[22]。在奶牛饲料中添加沼泽红假单胞菌菌剂,体外瘤胃培养 48 h 后,干物质消失、累积产气量和总挥发性脂肪酸(VFAs)都有明显提高。沼泽红假单胞菌的添加可以增加微生物蛋白质合成量和总 VFAs 产量,改变发酵系统的发酵气体组成,来维持微生物平衡的厌氧环境,有利于厌氧微生物生长和饲料的转化^[23]。在对皱纹鲍的研究中,在饲料中添加沼泽红假单胞菌可以通过提高 SOD、CAT、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、碱性磷酸酶(AKP)、酸性磷酸酶(ACP)和酚氧化酶(PO)的活性,显著提高幼鲍存活率、壳生长率、体重增长率、饲料转化效率和蛋白质合成效率^[24]。传统饲料和药剂在淡水养殖中的应用加剧了环境污染,导致水生动物疾病频发。用沼泽红假单胞菌处理后的大豆加工废水培养瓦氏黄颡鱼,其乙酸激酶调控基因(*ack*)、*acp*、*sod* 和 *cat* 表达上调,蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶、AKP、ACP、吞噬细胞、SOD 和 CAT 的活性增强,提高了瓦氏黄颡鱼的产量和抗病性^[25]。在草鱼饲料中添加沼泽红假单胞菌 R-3,提高了草鱼中 SOD、CAT 活性,降低 MDA 含量、养殖水体中的氨氮、亚硝酸盐含量来改善养殖水质,提高草鱼免疫能力和成活率,促进草鱼

生长^[26]。

3 环境修复方面的应用

沼泽红假单胞菌具有较高的氨氮去除能力,并吸附、降解废水中的污染物,包括染料、氯代苯甲酸和 1,2,5,6,9,10-六溴环十二烷(HBCD)等污染物。沼泽红假单胞菌 51ATA 通过吸附废水中的偶氮染料耐晒黑 K 盐使其脱色^[27]。沼泽红假单胞菌 PSB1 对废水中氨氮的降解率可达 99%^[28]。氯代苯甲酸(CBA)是一种由氯化物分解而产生的环境污染物。沼泽红假单胞菌 RCB100 通过将 3-氯苯甲酸(3-CBA)转化为 3-氯苯甲酰辅酶 A 并将其还原脱卤生成苯甲酰辅酶 A 2 种途径来降解 3-CBA^[29]。沼泽红假单胞菌 *ysc3* 诱导了 HBCD 降解关键酶卤酸脱卤酶、谷胱甘肽-S-转移酶、细胞色素 P450、水解酶和双加氧酶等的表达,通过好氧羟基化和厌氧脱溴的途径,使 HBCD 降解^[30]。

沼泽红假单胞菌对 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Cd^{2+} 等重金属离子都具有良好的耐受性。沼泽红假单胞菌 TN110 对 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 的去除率分别为 84% 和 55%^[19]。菌株 TN110 可以通过生物合成 CdS 纳米颗粒来修复镉污染的土壤^[31]。砷(As)是最广泛的环境致癌物之一,目前可以通过生物膜形成,氧化还原,As 生物甲基化,合成谷胱甘肽(GSH)、甲钴胺(维生素 B12)和 S-腺苷甲硫氨酸(SAM)等机制来对土壤中 As 进行微生物修复^[32]。沼泽红假单胞菌 CS2 具有将 As(V)还原为 As(III)的能力,而抗砷和解毒的基因表达是由一个 *Ars* 操纵子控制的,所以抗砷和解毒的能力往往同时存在^[19]。

4 化工方面的应用

能源和环境问题一直是当今世界的热点问题,如何生产更加绿色的能源一直备受关注。沼泽红假单胞菌因其具有利用 CO_2 、有机酸、木质纤维素等多种碳源,合成氢气、聚- β -羟丁酸(PHB)、正丁醇等多种化合物的能力而被广泛应用于此。

4.1 产氢 氢作为一种清洁能源已被广泛重视,并普遍作为燃料电池的动力源,然而制取氢气的传统方法成本高,技术复杂。为了可持续生物产氢,需要寻求更广泛的光发酵底物原料。目前研究发现青贮玉米和麦麸^[33]的发酵废水是较为良好的光发酵底物之一。木质纤维素产氢是一种很有前途的生产可持续能源的方式,但木质纤维素水解物中的酚类化合物、有机酸和呋喃衍生物^[34]可能会抑制氢气的产生。沼泽红假单胞菌 CGA009 在厌氧光发酵下,能够耐受较高浓度的酚类物质,可以作为木质纤维素产氢的菌株之一^[35]。在 VFAs 混合物多菌光发酵过程中,沼泽红假单胞菌作为产氢和 PHB 的主要生产者,当乙酸比例高时,就会优先利用其作为合成氢气的还原力,当丙酸和丁酸含量较高时,则会优先利用其作为合成 PHB 的还原力^[36]。沼泽红假单胞菌的聚- β -羟丁酸缺失突变体的产氢能力较野生型有明显提高,这表明 PHB 和氢气的合成过程存在还原力的竞争^[37-38]。但在 pH 胁迫状态下,合成的 PHB 对沼泽红假单胞菌 WP3-5 细胞有保护作用,所以在胁迫状态下 PHB 的合成有利于产氢^[39]。炔雌醇(EE2)是口服避孕药的基本成分,被认为是一

种高度顽固的雌激素类微污染物,然而在混合型光辅助微生物燃料电池(h-PMFC)中添加 EE2, EE2 的降解会为沼泽红假单胞菌产氢提供还原力,产生的氢气用来维持氢燃料电池的运转^[40]。

沼泽红假单胞菌产氢与 NADH 脱氢酶、固氮酶和吸氢酶的表达及其修饰有关。沼泽红假单胞菌在产氢过程中,编码 NADH 脱氢酶的 *nuoF* 表达上调,吸氢酶 *hupS* 表达下调^[41]。在 *vnf* 和 *anf* 固氮酶操纵子的上游插入 *pucBa* 启动子,使其过表达,可以用于提高工程菌株产氢效率^[42]。

4.2 其他 角鲨烯是一种具有医疗价值的生物活性化合物,还可以作为燃料的原料。通过同时阻断类胡萝卜素和霍烷途径使沼泽红假单胞菌合成角鲨烯的产量增加 57%^[43]。PHB 是一种由细菌合成的可降解生物塑料,是传统塑料的替代品。沼泽红假单胞菌 CGA009 在利用木质素分解产物各组分合成 PHB 时,p-香豆酸盐使 PHB 的产量显著增加^[44]。在 PHB 合成过程中 PHB 合成酶相关基因 *phbC* 表达上调^[39]。在 pH 胁迫^[38]、缺硫^[45] 等情况下,当光照和有机碳底物存在时,PHB 会大量积累在菌体表面。能源问题一直备受关注,正丁醇作为一种车用可替代燃料,又因其能量含量高、挥发性低、亲水性比乙醇低而受到更多的关注,正丁醇的生物合成涉及 *phaJ*、*ter*、*adhE2*、*phaA* 和 *phaB* 5 个基因。Bai 等^[46] 将正丁醇合成的相关基因转化到沼泽红假单胞菌 TIE-1 中,菌株 TIE-1 可以利用不同的碳源(有机酸、CO₂)、氮源(NH₄⁺、N₂)和电子源[H₂、Fe(II)、固定电极]合成正丁醇,并且发现固氮途径缺失突变体内还原力强,合成更多的正丁醇。相反,乙酰辅酶 A 消耗途径缺失突变体内还原力降低,导致正丁醇产量下降。

5 总结和展望

沼泽红假单胞菌作为地球上比较古老的微生物之一,其表现出多样化的生理遗传性和独特的代谢特征。研究至今,沼泽红假单胞菌在水质净化、植物促生、土壤治理、生产清洁能源等方面都能发挥作用。今后对于沼泽红假单胞菌的研究可能集中在以下几个方面:

(1) 农业方面。沼泽红假单胞菌可以通过释放生长激素,调节相关酶的活性,来增加植物的产量和对不良环境的抗性。但目前沼泽红假单胞菌产生的促生和抗逆的机制仍不是很明确,应结合组学分析、基因敲除等途径,探究其在植物促生、生物防治过程中可能发挥的作用;关注沼泽红假单胞菌与其他菌的联合作用,通过改变菌剂之间的比例,发挥更大的作用。

(2) 环境治理方面。沼泽红假单胞菌具有多种污染物的降解能力,未来的研究应该更集中于这些物质的降解途径,利用液质联用、核磁共振、红外分析等方法来分析降解途径,利用酶活性分析、基因敲除等途径来确定参与的基因。通过基因改造使菌株更加适应环境,尽可能使治理过程更加节能、高效。

(3) 化工方面。沼泽红假单胞菌具有多种化合物的生产能力,应该更集中于结合化学分析的方法来探究合成物质的

相关基因,利用传统意义上的废料生产新型绿色能源,使其生产方式更加高效低毒。

参考文献

- [1] 胡碧惠.沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*) CQV97 铁载体的初步研究[D].泉州:华侨大学,2013.
- [2] NGUYEN K Q, KANTACHOTE D, ONTHONG J, et al. Al³⁺ and Fe²⁺ toxicity reduction potential by acid-resistant strains of *Rhodospseudomonas palustris* isolated from acid sulfate soils under acidic conditions[J]. Ann Microbiol, 2018, 68(4): 217-228.
- [3] XIAO X, ZHU Y, GAO Y X, et al. Inoculation of paddy soils with *Rhodospseudomonas palustris* enhanced heavy metal immobilisation[J]. Plant Soil Environ, 2021, 67: 55-60.
- [4] KHUONG N Q, KANTACHOTE D, ONTHONG J, et al. Enhancement of rice growth and yield in actual acid sulfate soils by potent acid-resistant *Rhodospseudomonas palustris* strains for producing safe rice[J]. Plant Soil, 2018, 429(1/2): 483-501.
- [5] ZHAI Z Y, DU J, CHEN L J, et al. A genetic tool for production of GFP-expressing *Rhodospseudomonas palustris* for visualization of bacterial colonization[J]. AMB Express, 2019, 9(1): 1-12.
- [6] HSU S H, SHEN M W, CHEN J C, et al. The photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas palustris* strain PS3 exerts plant growth-promoting effects by stimulating nitrogen uptake and elevating auxin levels in expanding leaves[J]. Front Plant Sci, 2021, 12: 1-18.
- [7] XIAO X, ZHU Y, GAO C X, et al. Microbial inoculations improved rice yields by altering the presence of soil rare bacteria[J/OL]. Microbiol Res, 2022, 254[2021-09-27]. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126910.
- [8] ZHAO Y, SUN Y, PEI M, et al. Enhanced rice yields are related to pronounced shifts in soil resident bacterial community structures in response to *Rhodospseudomonas palustris* and *Bacillus subtilis* inoculation[J]. J Soils Sediments, 2021, 21(6): 2369-2380.
- [9] LUO L Y, WANG P, ZHAI Z Y, et al. The effects of *Rhodospseudomonas palustris* PSB06 and CGA009 with different agricultural applications on rice growth and rhizosphere bacterial communities[J]. AMB Express, 2019, 9(1): 1-10.
- [10] SAKPIROM J, KANTACHOTE D, NUNKAEW T, et al. Characterizations of purple non-sulfur bacteria isolated from paddy fields, and identification of strains with potential for plant growth-promotion, greenhouse gas mitigation and heavy metal bioremediation[J]. Res Microbiol, 2017, 168(3): 266-275.
- [11] KANTACHOTE D, NUNKAEW T, KANTHA T, et al. Biofertilizers from *Rhodospseudomonas palustris* strains to enhance rice yields and reduce methane emissions[J]. Appl Soil Ecol, 2016, 100: 154-161.
- [12] NOOKONGBUT P, KANTACHOTE D, KHUONG N Q, et al. The biocontrol potential of acid-resistant *Rhodospseudomonas palustris* KTSSR54 and its exopolymeric substances against rice fungal pathogens to enhance rice growth and yield[J]. Biological Control, 2020, 150: 1-10.
- [13] 吴希阳, 罗路云, 谭新球, 等. 沼泽红假单胞菌 Atp2 蛋白的原核表达及稻瘟病菌的互作蛋白初步筛选[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(3): 421-428.
- [14] WANG Y M, PENG S, HUA Q Q, et al. The long-term effects of using phosphate-solubilizing bacteria and photosynthetic bacteria as biofertilizers on peanut yield and soil bacteria community[J]. Front Microbiol, 2021, 12: 1-14.
- [15] GE H L, LIU Z H. Alleviation of tetrabromobisphenol A toxicity in soybean seedlings by *Rhodospseudomonas palustris* RP1n1[J]. Arch Microbiol, 2020, 202(4): 895-903.
- [16] NUNKAEW T, KANTACHOTE D, NITODA T, et al. Characterization of exopolymeric substances from selected *Rhodospseudomonas palustris* strains and their ability to adsorb sodium ions[J]. Carbohydr Polym, 2015, 115: 334-341.
- [17] NUNKAEW T, KANTACHOTE D, KANZAKI H, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA)-containing supernatants from selected *Rhodospseudomonas palustris* strains on rice growth under NaCl stress, with mediating effects on chlorophyll, photosynthetic electron transport and antioxidative enzymes[J]. Electron J Biotechnol, 2014, 17(1): 19-26.
- [18] NOOKONGBUT P, KANTACHOTE D, MEGHARAJ M, et al. Reduction in arsenic toxicity and uptake in rice (*Oryza sativa* L.) by As-resistant purple nonsulfur bacteria[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2018, 25(36): 36530-36544.
- [19] BATOOL K, TUZ ZAHRA F, REHMAN Y. Arsenic-redox transformation

- and plant growth promotion by purple nonsulfur bacteria *Rhodospseudomonas palustris* CS2 and *Rhodospseudomonas faecalis* SS5[J]. *Biomed Res Int*, 2017, 2017; 1-9.
- [20] XIAO X, ZHAO Y, ZHOU Q, et al. Alleviating the cadmium toxicity and growth-promotion in paddy rice by photosynthetic bacteria [J]. *CLEAN-Soil air water*, 2019, 47(3): 1-6.
- [21] 刘悦畅. 沼泽红假单胞菌和枯草芽孢杆菌联合修复农田土壤镉污染的研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [22] 王培嘉, 刘玉承, 韩瑞鑫, 等. 持续饲喂微生态制剂对奶牛生产性能的影响[J]. *今日畜牧兽医*, 2020, 36(7): 59-60.
- [23] CHEN Y Y, WANG Y L, WANG W K, et al. Beneficial effect of *Rhodospseudomonas palustris* on *in vitro* rumen digestion and fermentation[J]. *Benef Microbes*, 2020, 11(1): 91-99.
- [24] 张瑞标. 沼泽红假单胞菌对皱纹盘鲍幼鲍生长性能、抗氧化能力及非特异性免疫的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(16): 43-47.
- [25] LIU R J, WU W S, XU X H, et al. *Rhodospseudomonas palustris* in effluent enhances the disease resistance, TOR and NF- κ B signalling pathway, intestinal microbiota and aquaculture water quality of *Pelteobagrus vachelli* [J]. *Aquac Res*, 2020, 51(10): 3959-3971.
- [26] 刘小燕, 雷平. 沼泽红假单胞菌 R-3 对草鱼养殖及水质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2020(8): 72-75.
- [27] ÖZTÜRK A, BAYOL E, ABDULLAH M I. Characterization of the biosorption of fast black azo dye K salt by the bacterium *Rhodospseudomonas palustris* 51ATA strain[J]. *Electron J Biotechnol*, 2020, 46: 22-29.
- [28] 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 等. 1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2276-2283.
- [29] HAQ I U, FIXEN K R. Complete genome sequence of *Rhodospseudomonas palustris* RCB100, an anoxygenic phototroph that degrades 3-chlorobenzoate[J]. *Microbiol Resour Announc*, 2021, 10(15): 1-2.
- [30] LI Y J, WANG R, LIN C Y, et al. The degradation mechanisms of *Rhodospseudomonas palustris* toward hexabromocyclododecane by time-course transcriptome analysis[J]. *Chem Eng J*, 2021, 425: 1-10.
- [31] SAKPIROM J, KANTACHOTE D, SIRIPATTANAKUL-RATPUKDI S, et al. Simultaneous bioprecipitation of cadmium to cadmium sulfide nanoparticles and nitrogen fixation by *Rhodospseudomonas palustris* TN110 [J]. *Chemosphere*, 2019, 223: 455-464.
- [32] NOOKONGBUT P, KANTACHOTE D, MEGHARAJ M. Arsenic contamination in areas surrounding mines and selection of potential As-resistant purple nonsulfur bacteria for use in bioremediation based on their detoxification mechanisms[J]. *Ann Microbiol*, 2016, 66(4): 1419-1429.
- [33] CORNELI E, ADESSI A, DRAGONI F, et al. Agroindustrial residues and energy crops for the production of hydrogen and poly- β -hydroxybutyrate via photofermentation[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 216: 941-947.
- [34] YADAV M, PARITOSH K, VIVEKANAND V. Lignocellulose to bio-hydrogen: An overview on recent developments [J]. *Int J Hydrog Energy*, 2020, 45(36): 18195-18210.
- [35] IBRAHEEM O, NDIMBA B K. Molecular adaptation mechanisms employed by ethanologenic bacteria in response to lignocellulose-derived inhibitory compounds [J]. *Int J Biol Sci*, 2013, 9(6): 598-612.
- [36] MABUTYANA L, POTT R W M. Photo-fermentative hydrogen production by *Rhodospseudomonas palustris* CGA009 in the presence of inhibitory compounds [J]. *Int J Hydrog Energy*, 2021, 46(57): 29088-29099.
- [37] CARDEÑA R, VALDEZ-VAZQUEZ I, BUTRÓN G. Effect of volatile fatty acids mixtures on the simultaneous photofermentative production of hydrogen and polyhydroxybutyrate [J]. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2017, 40(2): 231-239.
- [38] 王中康, 田远明, 廖强, 等. 沼泽红假单胞菌 phbC-hupL 双突变株构建及产氢测定[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1395-1401.
- [39] YANG C F, LEE C M. Enhancement of photohydrogen production using phbC deficient mutant *Rhodospseudomonas palustris* strain M23 [J]. *Biore-sour Technol*, 2011, 102(9): 5418-5424.
- [40] WU S C, LIOU S Z, LEE C M. Correlation between bio-hydrogen production and polyhydroxybutyrate (PHB) synthesis by *Rhodospseudomonas palustris* WP3-5 [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 113: 44-50.
- [41] SOGANI M, PANKAN A O, DONGRE A, et al. Augmenting the biodegradation of recalcitrant ethinylestradiol using *Rhodospseudomonas palustris* in a hybrid photo-assisted microbial fuel cell with enhanced bio-hydrogen production [J/OL]. *J Hazard Mater*, 2021, 408[2021-09-27]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124421>.
- [42] JURADO-MARBAN V H, TAPIA-BUSTOS M A, GONZALEZ-GARCIA R A, et al. Hydrogen production by a mixed photoheterotrophic culture: Correlation between gene expression analysis and physiological behavior [J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(2): 641-651.
- [43] XU W, WANG D Y, FAN J B, et al. Improving squalene production by blocking the competitive branched pathways and expressing rate-limiting enzymes in *Rhodospseudomonas palustris* [J]. *Biotechnol Appl Biochem*, 2022, 69(4): 1502-1508.
- [44] ALSIYABI A, BROWN B, IMMETHUN C, et al. Synergistic experimental and computational approach identifies novel strategies for polyhydroxybutyrate overproduction [J]. *Metab Eng*, 2021, 68: 1-13.
- [45] MELNICKI M R, EROGLU E, MELIS A. Changes in hydrogen production and polymer accumulation upon sulfur-deprivation in purple photosynthetic bacteria [J]. *Int J Hydrog Energy*, 2009, 34(15): 6157-6170.
- [46] BAI W, RANAIVOARISOA T O, SINGH R, et al. *n*-Butanol production by *Rhodospseudomonas palustris* TIE-1 [J]. *Commun Biol*, 2021, 4: 1-16.

(上接第4页)

- [2] LV X R, LIN Y, JIE Y, et al. Purification, characterization, and action mechanism of plantaricin DL3, a novel bacteriocin against *Pseudomonas aeruginosa* produced by *Lactobacillus plantarum* DL3 from Chinese Suan-Tsai [J]. *European food and technology*, 2018, 244(2): 323-331.
- [3] 李桥兴, 赵红艳. 大健康产业发展研究综述 [J]. *经济研究导刊*, 2018(7): 53-55, 90.
- [4] GU Y R, SHEN S Z, HAN B J, et al. Family livestock waste: An ignored pollutant resource of antibiotic resistance genes [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, 197: 1-8.
- [5] 韩明明, 褚宇欣, 关波, 等. 驼乳中产转糖基活性 β -半乳糖苷酶乳酸菌的筛选鉴定及其酶学特性分析 [J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 74-83.
- [6] 杨珍妮, 刘丹, 刘冰熔. 肠道菌群与结肠直肠癌发病关系的研究进展 [J]. *世界华人消化杂志*, 2014, 22(18): 2547-2552.
- [7] 张娟, 陈坚. 益生菌功能开发及其应用性能强化 [J]. *科学通报*, 2019, 64(3): 246-259.
- [8] REID G. Probiotics: Definition, scope and mechanisms of action [J]. *Best practice & research clinical gastroenterology*, 2016, 30(1): 17-25.
- [9] KHALES I, BELLISSIMO N, VANDELANOTTE C, et al. A review of probiotic supplementation in healthy adults: Helpful or hype? [J]. *European journal of clinical nutrition*, 2019, 73(1): 24-37.
- [10] KENNEDY P J, MURPHY A B, CRYAN J F, et al. Microbiome in brain function and mental health [J]. *Trends in food science & technology*, 2016, 57: 289-301.
- [11] RODRÍGUEZ G, RUIZ B, FALEIROS S, et al. Probiotic compared with standard milk for high-caries children: A cluster randomized trial [J]. *Journal of dental research*, 2016, 95(4): 402-407.
- [12] MAYNARD C L, ELSON C O, HATTON R D, et al. Reciprocal interactions of the intestinal microbiota and immune system [J]. *Nature*, 2012, 489(7415): 231-241.
- [13] 张红星, 刘丽, 谢远红, 等. 产细菌素的戊糖片球菌的筛选及其细菌素的理化性质研究 [J]. *现代食品科技*, 2011, 27(2): 135-138, 143.
- [14] SANDEZ PENIDIZ S H, VELASCO MANINI M A, GEREZ C L, et al. Partial characterization and purification of phytase from *Lactobacillus plantarum* CRL1964 isolated from pseudocereals [J]. *Journal of basic microbiology*, 2020, 60(9): 787-798.
- [15] 周志江, 韩烨. 细菌素应用在食品中有效且安全 [J]. *农产品加工*, 2006(9): 32-34.
- [16] DUAN J A, WILLIAMS I D, CHE C T, et al. Tangutorine: A novel β -carboline alkaloid from *Nitraria tangutorum* [J]. *Tetrahedron letters*, 1999, 40(13): 2593-2596.
- [17] 汪洋燕, 辛国芹, 徐海燕, 等. 一株高抗氧化活性戊糖片球菌的筛选 [J]. *中国畜牧兽医*, 2022, 49(1): 179-187.
- [18] 杨丽丽, 韩玲, 张丽. 乳酸菌组合发酵菌种配方及其增殖培养基的优化 [J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(11): 113-116.
- [19] 陆路, 黄秀, 胡耀东, 等. 戊糖片球菌 CIC-4 菌株培养基、发酵条件及其发酵产品储藏温度的优化 [J]. *四川农业大学学报*, 2015, 33(1): 57-61.