

一株海洋源高产类胡萝卜素红酵母的 分离鉴定及培养条件优化

张婷婷¹, 李元跃^{1,2}, 陈政强^{1,2}, 陈尚军¹

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 从厦门市集美区近海自然海水中分离筛选出一株高产类胡萝卜素的海洋红酵母菌 JMRY-1, 通过形态学观察、生理生化测试及 18S rDNA 序列分析, 将其鉴定为胶红酵母 (*Rhodotorula mucilaginosa*)。进一步探究其生长特性及类胡萝卜素合成的最佳培养条件, 结果表明: 胶红酵母 JMRY-1 菌株最适生长温度为 28 ℃; 最适 pH 值为 4.0; 0~12 h 为对数生长期, 12~40 h 为稳定期, 40 h 后进入衰亡期, 28 h 时生物量达到峰值 (15.83 g/L)。通过正交试验优化类胡萝卜素合成条件, 确定了最佳培养条件, 即温度为 28 ℃、时间为 72 h、接种量为 8%、转速为 180 r/min, 在此条件下类胡萝卜素产量达 10.90 mg/L, 较初始条件提升 42.30%。

[关键词] 海洋红酵母; 胶红酵母; 类胡萝卜素; 形态学观察; 生理生化测试

[中图分类号] S 917.1

Isolation, Identification and Optimization of Culture Conditions for a Marine Source High-Yield Carotenoid Red Yeast

ZHANG Tingting¹, LI Yuanyue^{1,2}, CHEN Zhengqiang^{1,2}, CHEN Shangjun¹

(1. College of Fisheries, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Fishery Resources and Eco-Environment, Xiamen 361021, China)

Abstract: A marine red yeast strain JMRY-1 with high carotenoid production was isolated from natural seawater near Jimei District, Xiamen City, and identified as *Rhodotorula mucilaginosa* through morphological characteristics, physiological-biochemical tests, and 18S rDNA phylogenetic analysis. The biological characteristics and carotenoid synthesis conditions of the strain were systematically investigated. Results indicated that the optimal growth temperature and pH were 28 ℃ and 4.0, respectively, with a maximum biomass of 15.83 g/L at 28 h. Orthogonal experiments revealed that the optimal conditions for carotenoid production were 28 ℃, 72 h, 8% inoculation, and 180 r/min, yielding a carotenoid content of 10.90 mg/L, representing a 42.30% increase compared with initial conditions.

Keywords: marine red yeast; *Rhodotorula mucilaginosa*; carotenoid; morphological characteristics; physiological-biochemical tests

[收稿日期] 2025-03-27

[基金项目] 福建省海洋高新产业发展专项基金项目 (闽海渔高科合同 [2012] 科 20 号)

[通信作者] 陈政强 (1967—), 博士, 教授, 从事海洋水产养殖技术研究。E-mail: zhqchen999@163.com

0 引言

海洋红酵母是一类广泛分布于海洋环境中的单细胞真核微生物,其细胞富含蛋白质、类胡萝卜素、不饱和脂肪酸和维生素等高附加值代谢产物,被广泛应用于水产饲料添加剂、生物柴油前体和功能性食品开发等方面^[1-3]。近年来,随着水产养殖业对绿色添加剂需求的增加,海洋红酵母因其营养全面、环境友好等特性而成为研究热点^[4]。特别是作为天然抗氧化剂的类胡萝卜素可显著提升水产动物抗应激能力和产品品质^[5],而动物自身又无法合成此类物质,需要通过饲料进行补充^[6]。传统类胡萝卜素生产主要依赖化学合成或植物提取,存在成本高、污染重等缺陷^[7]。相比之下,微生物发酵法具有周期短、可控性强、环境友好等优势^[8]。胶红酵母(*Rhodotorula mucilaginosa*)因同时具备高产类胡萝卜素和油脂的特性而成为近年的研究焦点^[9]。例如,Machado等^[10]通过CRISPR-Cas9介导的代谢工程改造,使一株胶红酵母的虾青素产量提升2.1倍;Tsai等^[11]通过氮限制策略,使一株海洋胶红酵母的油脂含量达到细胞干重的50%,是生物柴油生产的理想菌株。然而,不同菌株的代谢特性受来源环境及培养条件的影响显著^[12],筛选高产菌株并优化其培养条件对其工业化应用至关重要。因此,本研究从厦门市近海分离出一株胶红酵母JMRY-1,系统解析其生长及类胡萝卜素合成特性,并通过正交试验优化培养条件,为海洋红酵母菌株的工业化应用(如水产饲料添加剂开发)提供高产菌种资源和工艺优化方案。

1 材料与方法

1.1 样品采集与菌株分离

于厦门市集美大桥周边海域(24°36'N,118°04'E)采集海水样品,无菌瓶封装后4℃保存。取200 μL水样涂布于含质量分数为0.05%氯霉素的YPD琼脂培养基(酵母提取物10 g/L,蛋白胨20 g/L,葡萄糖20 g/L,琼脂15 g/L),28℃培养3~5 d,挑取红色单菌落纯化,并以红酵母的类胡萝卜素产量作为初筛目标。

1.2 形态与生理生化鉴定

采用美蓝染色法观察细胞形态和出芽生殖特征;通过麦氏培养基检测子囊孢子的形成能力。参照《酵母菌鉴定手册》^[13]进行碳氮源同化、尿素分解、耐渗透压等实验。

1.3 分子生物学鉴定

使用CTAB法提取基因组DNA,引物ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')扩增18S rDNA序列^[14]。PCR产物纯化后进行测序(上海生工),通过NCBI BLAST比对并构建系统发育树(MEGA 11.0, Bootstrap = 1000)。

1.4 生长特性分析

- 1) 温度与pH值优化。将种子液($A(600) = 1.0$)以10%接种量接入发酵培养基,分别于26~34℃、pH = 3.5~7.0条件下培养24 h,测定 $A(600)$ 值。
- 2) 生长曲线的绘制。每4 h取样测定 $A(600)$ 值,绘制生长曲线。

1.5 类胡萝卜素的提取与测定

参照Saenge等^[15]的酸热破壁法。菌体离心后经3 mol/L HCl处理40 min,沸水浴5 min,冰浴骤冷,丙酮萃取类胡萝卜素。采用紫外分光光度计(UV-1800,岛津)测定波长为475 nm处的吸光度值。类胡萝卜素产量的计算公式为

$$\text{类胡萝卜素产量} = \frac{[m/(1000 V_1)] \times A(475) \times D \times [V_2/(0.16W)]}{1000}。$$

其中: m 为发酵液干物质质量(g); V_1 为发酵液体积(mL); $A(475)$ 为波长475 nm处的吸光度值; V_2 为提取所用有机溶剂的总体积(mL); D 为浸提液稀释倍数; W 为酵母菌发酵液干质量(g);0.16为类胡萝卜素的消光系数。

1.6 培养条件优化设计

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验进行培养条件的优化设计，考察温度（A）、时间（B）、接种量（C）、转速（D）对类胡萝卜素产量的影响（见表 1），确定最佳培养条件。

表 1 正交试验因素与水平				
Tab. 1 Orthogonal test factors and levels				
水平	温度/℃	时间/h	接种量/%	转速/(r · min ⁻¹)
1	28	48	6	180
2	30	72	8	200
3	32	96	10	220

2 实验结果

2.1 菌株的筛选与分离

从自然海水中筛选到 3 株海洋红酵母，经初步形态观察和镜检，3 株菌株均为海洋酵母菌，分别编号为 JMRY-1、JMRY-2、JMRY-3。将筛选到的红酵母进行发酵培养，测定其类胡萝卜素产量，确定 JMRY-1 菌株的类胡萝卜素产量相对较高（见表 2）。

表 2 海洋红酵母菌株的筛选结果			
Tab. 2 Screening results of marine red yeast strains			
菌种	生物量/(g · L ⁻¹)	类胡萝卜素质量比/(μg · g ⁻¹)	类胡萝卜素产量/(mg · L ⁻¹)
JMRY-1	13.098	584.980	7.662
JMRY-2	11.556	184.750	2.123
JMRY-3	12.609	134.063	1.690

2.2 菌株 JMRY-1 的鉴定

2.2.1 形态特征

胶红酵母 JMRY-1 菌株菌落呈粉红色，圆形隆起，表面光滑且湿润（见图 1a、图 1b），28 ℃ 条件下在 YPD 平板上培养 3 ~ 5 d 后，挑取单菌落经美蓝染色后在显微镜下观察，可见其细胞为球形，出芽繁殖（见图 1c）。

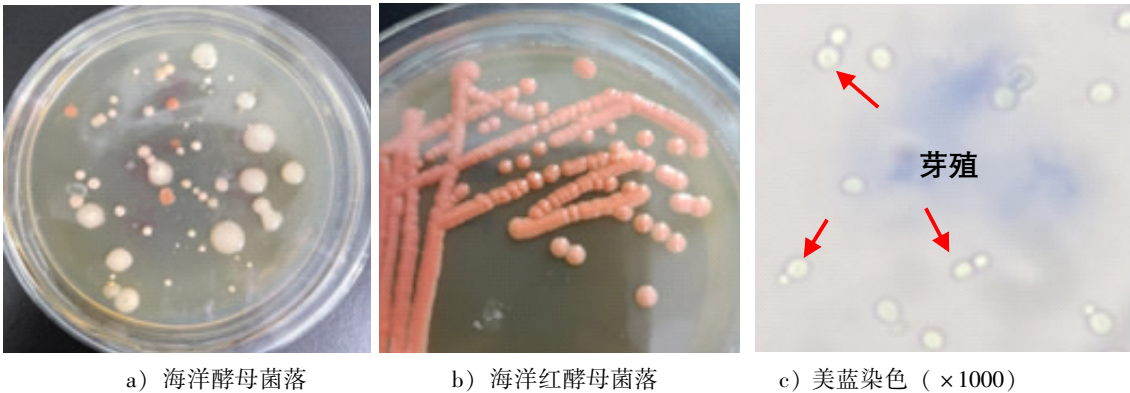


图 1 胶红酵母 JMRY-1 菌株的菌落与显微形态

Fig. 1 Colony and microscopic morphology of the *Rhodotorula mucilaginosa* JMRY-1 strain

2.2.2 生理生化特征

胶红酵母 JMRY-1 菌株在 37 ℃ 下生长良好，提示其潜在耐高温特性。该菌株可同化葡萄糖、蔗糖、木糖，但无法分解尿素或耐受 50% 葡萄糖高渗环境，可以在无维生素的培养基中生长，但不形成类淀粉化合物（见表 3）。

2.2.3 分子鉴定

PCR 产物电泳图见图 2a。18S rDNA 序列（GenBank 登录号为 OP654321）与 *Rhodotorula mucilaginosa*（MN256487.1）相似度达 99%，系统发育树支持其为胶红酵母（见图 2b）。

表 3 胶红酵母 JMRY-1 菌株的碳/氮源同化实验结果

Tab. 3 Results of carbon/nitrogen source assimilation experiments for the *Rhodotorula mucilaginosa* JMRY-1 strain

项目	结果	项目	结果	项目	结果
2% 葡萄糖	+	乳糖	-	木糖	+
蔗糖	+	半乳糖	-	棉子糖	-
海藻糖	+	L-阿拉伯糖	+	可溶性淀粉	-
山梨糖	+	D-纤维二糖	+	肌醇	+
菊糖	+	密二糖	-	KNO ₃	+
甘露糖	+	鼠李糖	-	50% 葡萄糖	-
麦芽糖	+	D-阿拉伯糖	-	60% 葡萄糖	-
淀粉	-				

说明：“+”表示可同化利用，“-”表示不能同化利用。

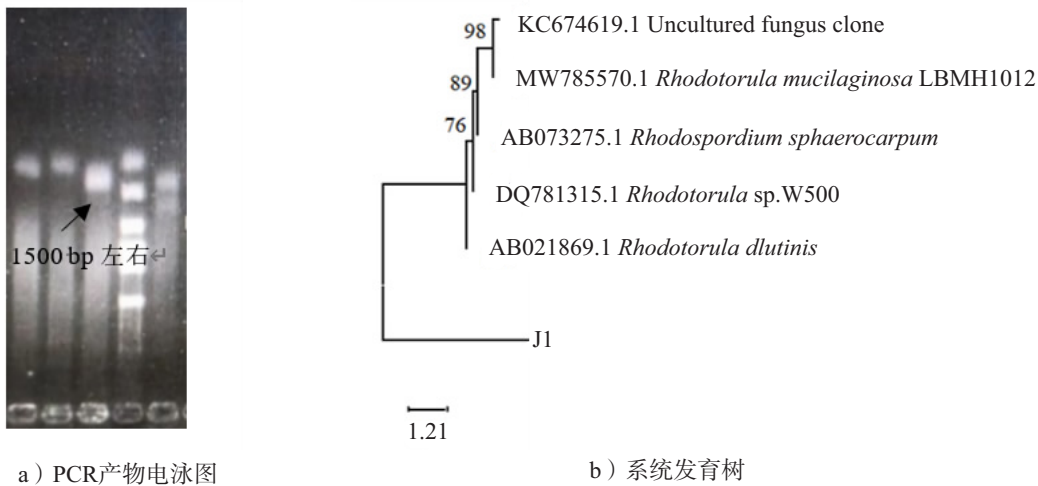


图 2 PCR 产物电泳图和基于 18S rDNA 序列的系统发育树

Fig. 2 Electrophoresis of PCR products and phylogenetic tree based on 18S rDNA sequences

2.3 生长特性

1) 最适温度与 pH 值。在 28 ℃ 条件下，胶红酵母 JMRY-1 菌株生物量最高（15.83 g/L）。而相较于其他酸碱度，pH = 4.0 时胶红酵母 JMRY-1 菌株处于最佳生长状态，为其最适酸碱度（见图 3）。

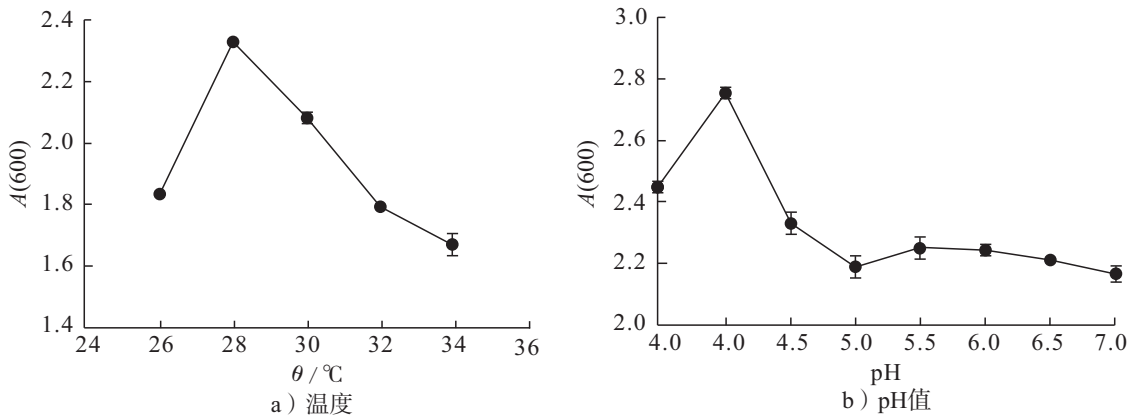


图 3 温度和 pH 值对胶红酵母 JMRY-1 菌株生长的影响

Fig. 3 Effects of temperature and pH value on growth of *Rhodotorula mucilaginosa* JMRY-1 strain

2) 生长曲线。在温度为 28 ℃、pH = 4.0 情况下, 胶红酵母 JMRY-1 菌株 0 ~ 12 h 生长处于对数期, 12 ~ 40 h 进入旺盛生长的稳定期, 菌体生物量在 24 ~ 28 h 时段内达到最高峰, 随后菌体生物量开始下降, 40 h 后生物量下降呈加速状态 (见图 4)。

2.4 类胡萝卜素合成的优化

对以综合评价为指标的正交试验进行极差分析 (见表 4), 结果显示, 各因素对 JMRY-1 菌株发酵液产类胡萝卜素的影响程度大小依次为 C > B > D > A, 即培养因素中接种量的影响程度最大, 培养时间的影响程度次之, 培养温度的影响程度最小。JMRY-1 菌株产类胡萝卜素的最优组合为 A1B2C2D1, 即培养温度为 28 ℃、培养时间为 72 h、接种量为 8% 和培养转速为 180 r/min。在此培养条件下, JMRY-1 菌株发酵液的生物量、类胡萝卜素质量比及产量总体达到最优值, 分别为 15.83 g/L、688.42 μg/g、10.90 mg/L, 相对于初始培养条件 (温度为 30℃、接种量为 10%、培养时间为 72 h、摇床转速为 200 r/min), 类胡萝卜素生物量、含量和产量分别提高了 20.84%、17.68%、42.30%。

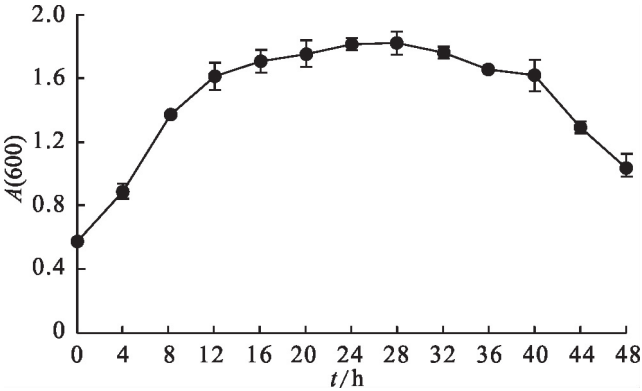


图 4 培育时间对胶红酵母 JMRY-1 菌株生长的影响
Fig.4 Influence of cultivation time on the growth of *Rhodotorula mucilaginosa* JMRY-1 strain

表 4 正交试验结果分析
Tab.4 Analysis of orthogonal test results

实验编号	A	B	C	D	类胡萝卜素产量/(mg · L ⁻¹)	生物量/(g · L ⁻¹)	综合评分
1	1	1	1	1	8.451	14.112	91.647
2	1	2	2	2	9.820	13.233	95.416
3	1	3	3	3	9.110	12.781	90.283
4	2	1	2	3	8.702	14.944	95.814
5	2	2	3	1	8.560	14.688	94.208
6	2	3	1	2	6.761	15.029	86.407
7	3	1	3	2	8.611	14.139	92.542
8	3	2	1	3	8.660	13.564	90.774
9	3	3	2	1	7.562	15.334	91.479
极差	0.851	4.076	4.627	0.990			
最优组合	A1B2C2D1						

3 讨论

3.1 胶红酵母的代谢特性与分类学意义

海洋酵母 JMRY-1 菌株被鉴定为胶红酵母 (*R. mucilaginosa*), 其形态、生理、代谢特征与文献报道一致^[16]。形态特征为单细胞, 椭圆形/球形 (3 ~ 8 μm), 出芽繁殖, 无假菌丝、掷孢子和子囊孢子, 厚细胞壁, 表面可能具环境适应性黏液层; 在 PDA/YPD 培养基上因合成β-胡萝卜素等类胡萝卜素形成光滑、湿润、黏液状红色、粉红色及橙红色菌落; 胶红酵母为异养需氧, 能利用葡萄糖、甘油等碳源 (不利用硝酸盐), 最适生长温度为 25 ~ 30 ℃, pH = 5 ~ 7, 耐高盐; 胶红酵母代谢产物为抗氧化类胡萝卜素 (可能参与胁迫响应)、胞外多糖、脂肪酶和蛋白酶等。与多数胶红酵母不同, JMRY-1 菌株表现出木糖同化能力, 推测是其海洋生活环境驱动的代谢适应性进化, 这一特性使其在木质纤维素废弃物资源化利用中具有潜在应用价值。近年的研究^[17-18]也表明, 海洋胶红酵母可能具备独特的碳源利用能力 (如木薯淀粉水解液产油), 进一步凸显了 JMRY-1 菌株的工业开发潜力。

3.2 培养条件对类胡萝卜素合成的调控机制

胶红酵母 (*R. mucilaginosa*) 的类胡萝卜素合成受温度、培养时间、接种量和转速等多因素协同调控,这些条件通过调节细胞代谢通量、关键酶活性和氧化应激响应最终影响色素积累效率。

温度通过对酶活性与膜完整性的双重调控来调节类胡萝卜素含量,低温环境 (20 ~ 25 °C) 可增强细胞膜脂质不饱和度,提升膜流动性,进而激活类胡萝卜素合成途径。研究表明,在 20 ~ 25 °C 温度区间内,关键限速酶 (如 HMG-CoA 还原酶、八氢番茄红素合成酶 *CrtYB*) 的稳定性较高,同时低温诱导的活性氧积累会触发抗氧化响应,促进作为保护性代谢产物色素的合成^[19-20]。高温 (>30 °C) 不仅会导致关键限速酶的热失活,还会加速活性氧的过量积累,抑制前体物质 IPP/DMAPP 的供应,使代谢流向脂质合成偏移^[21-22]。例如, Maldonade 等^[19]通过持续低温 (22.5 °C) 培养将色素产量提升至 1 533.27 µg/L,并延缓降解速率。

类胡萝卜素积累呈现典型的生长阶段依赖性,对数生长期 (0 ~ 48 h) 色素合成与生物量增长同步,而稳定期 (48 ~ 72 h) 因氮源耗尽触发次级代谢,产量达到峰值^[20,22]。例如,在玉米浆培养基优化实验中,胶红酵母 D 菌株在 28 h 时的 *A*(600) 达到最大值,类胡萝卜素产量为 26.17 mg/L^[20]。但过长时间培养 (>96 h) 可能导致色素光氧化或细胞自溶,因此需在稳定期初期 (约 72 h) 终止发酵以最大化回收率^[21]。

接种量通过影响营养竞争和氧化应激水平间接调控色素合成。低接种量 (1% ~ 5%) 延长滞后期,可能增强活性氧介导的抗氧化响应,但生物量积累缓慢导致总产量受限;高接种量 (>10%) 虽缩短生长周期,却因碳源快速消耗抑制次级代谢产物积累^[20,22]。实验表明,接种量 10% 结合玉米浆培养基可优化生物量与色素产量的平衡^[20]。

低转速 (<150 r/min) 导致缺氧代谢,限制前体合成;中转速 (150 ~ 200 r/min) 提高氧传递效率,促进 MVA 途径通量,同时通过适度活性氧刺激抗氧化基因 (如 *CrtYB*) 的表达^[19,20];过高转速 (>250 r/min) 产生的剪切力或过度氧化损伤细胞并抑制酶活性^[21]。如在本实验中,200 r/min 转速下类胡萝卜素的产量最高。

综上,最优工艺还需结合多因素 (菌株、培养基等) 调整优化。未来研究可通过转录组学解析温度或溶氧对 *Crt* 基因簇 (如 *CrtI*、*CrtYB*) 的表达调控,并利用 CRISPR 技术改造关键酶 (如提高 *CrtYB* 热稳定性) 以增强合成效率^[23]。此外,两阶段培养策略 (先优化生长后诱导合成) 可能进一步突破产量瓶颈^[19]。

3.3 菌株 JMRY-1 的应用潜力与产业化挑战

本文中胶红酵母 JMRY-1 菌株未优化前类胡萝卜素的生物量、质量比及产量分别为 13.098 g/L、584.980 µg/g 和 7.662 mg/L,优化后的类胡萝卜素生物量、质量比及产量分别为 15.83 g/L、688.42 µg/g 和 10.90 mg/L,比未优化前分别提高了 20.84%、17.68% 和 42.30%。相比于齐琼^[3]、汪洋^[24]对海洋胶红酵母产类胡萝卜素的研究,本文筛选的胶红酵母菌株的类胡萝卜素在实验水平上表现出较高的含量及产量,在类胡萝卜素的产量上是一种有潜力的备选菌株。

胶红酵母 (*R. mucilaginosa*) 作为一种多功能微生物,在多个领域展现出广阔的应用前景。例如,在环境修复与染料降解上,胶红酵母能高效降解三苯甲烷类染料,其代谢能力可将有机污染物转化为无害物质,净化工业废水^[25]。胶红酵母还可生产高附加值产物 (如类胡萝卜素和单细胞油脂),如菌株 JM401 在 25 ~ 32 °C、pH = 5.0 ~ 7.0 条件下发酵 36 ~ 48 h 即可高产类胡萝卜素^[25]。另外,胶红酵母作为生物饵料添加剂可应用于农业与水产养殖中。例如,张春晓^[26]将胶红酵母作为饵料添加到刺参饲料中,提高了刺参的免疫力,改善了刺参肠道菌群结构和产品品质;夏冬梅^[27]研究证明,胶红酵母可以促进凡纳滨对虾、罗非鱼和卵形鲳鲹的生长,提高实验鱼肝脏和肠道的消化酶活力,应用前景巨大。部分胶红酵母菌株还可应用于生物燃料、采后保鲜、酿酒、食品发酵、烟草发酵、医药和化妆品等方面^[28-29]。如菌株 A2 能高效利用乙酸合成油脂 (如油酸、棕榈酸),产量比普通菌株提升

90% 以上, 适用于生物燃料和化妆品原料生产^[30]。

JMRY-1 菌株在低 pH 值 (4.0) 下的稳定生长特性, 可减少发酵过程中的杂菌污染, 具备工业化应用优势。JMRY-1 菌株以葡萄糖为主碳源, 而甘油可同时促进油脂和类胡萝卜素合成^[31]。未来可通过代谢工程改造 (如过表达 *HMG1* 基因) 或混合碳源策略进一步提升产量^[32]。胶红酵母的油脂组成以 C16 ~ C18 脂肪酸为主, 适合生物柴油的生产^[33], 油脂含量需进一步评估, 但其缺乏多不饱和脂肪酸 (如 DHA) 的特性可能限制其作为水产饲料添加剂的单独使用, 因此建议与富含 DHA 的微藻复配, 以平衡营养组成^[34]。

4 结论

本研究成功分离并鉴定一株高产类胡萝卜素的胶红酵母 JMRY-1 菌株, 优化其最适培养条件, 即温度为 28 ℃、pH = 4.0、时间为 72 h、接种量为 8%、转速为 180 r/min。该培养条件下 JMRY-1 菌株发酵液的类胡萝卜素生物量、质量比和产量分别为 15.83 g/L、688.42 μg/g、10.90 mg/L, 比初始培养条件 (类胡萝卜素生物量、质量比和产量分别为 13.098 g/L、584.980 μg/g、7.662 mg/L) 分别提高了 20.84%、17.68%、42.30%。菌株 JMRY-1 在天然色素和功能性饲料开发中具有重要应用价值, 后续研究可聚焦于代谢途径解析及规模化发酵工艺优化。

[参 考 文 献]

- [1] 尹安伟, 路怀灯. 海洋红酵母作为水产饲料添加剂的开发应用研究[J]. 科学养鱼, 2010(5): 64-65.
- [2] MACHADO W R C, SILVA L G, VANZELA E S L, et al. Evaluation of the process conditions for the production of microbial carotenoids by *Rhodotorula mucilaginosa* URM 7409[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2019, 22: 2018043.
- [3] 齐琼. 海洋红酵母的筛选及其在凡纳滨对虾养殖中应用效果初步研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- [4] POONTAWEE R, LORLIAM W, POLBUREE P, et al. Oleaginous yeasts: biodiversity and cultivation[J]. Fungal Biology Reviews, 2023, 44: 100295.
- [5] MAPELLI-BRAHM P, GÓMEZ-VILLEGAS P, GONDA M L, et al. Microalgae, seaweeds and aquatic bacteria, archaea, and yeasts: sources of carotenoids with potential antioxidant and anti-inflammatory health-promoting actions[J]. Marine Drugs, 2023, 21(6): 340.
- [6] LORENZ R T, CYSEWSKI G R. Commercial potential for *Haematococcus microalgae* as a natural source of astaxanthin[J]. Trends in Biotechnology, 2000, 18(4): 160-167.
- [7] RODRIGUEZ-AMAYA D B. Natural food pigments and colorants[J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7: 20-26.
- [8] DUFOSSÉ L. Microbial production of food grade pigments[J]. Food Technology and Biotechnology, 2006, 44(3): 313-321.
- [9] KOT A M, BIAZEJAK S, KURCZ A, et al. *Rhodotorula glutinis*: potential source of lipids, carotenoids, and enzymes for use in industries[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100: 6103-6117.
- [10] MACHADO F R S, TREVISOL T C, BOSCHETTO D L, et al. Metabolic engineering of *Rhodotorula mucilaginosa* for improved carotenoid production[J]. Journal of Biotechnology, 2020, 324: 1-9.
- [11] TSAI H J, LEE C C, LIN S P, et al. Oleaginous yeast *Rhodotorula mucilaginosa* as a biodiesel feedstock: from lipid accumulation to fuel properties[J]. Renewable Energy, 2022, 181: 1028-1037.
- [12] BUZZINI P, MARTINI A. Extracellular enzymatic activity profiles in yeast and yeast-like strains isolated from tropical environments[J]. Journal of Applied Microbiology, 2002, 93(6): 1020-1025.
- [13] BARNETT J A, PAYNE R W, YARROW D. Yeasts: characteristics and identification[M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 215-230.
- [14] WHITE T J, BRUNS T, LEE S, et al. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics [C] // PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications. San Diego: Academic Press, 1990: 315-322.
- [15] SAENGE C, CHEIRSILP B, SUKSAROGE T T, et al. Efficient concomitant production of lipids and carotenoids by oleaginous red yeast *Rhodotorula glutinis* cultured in palm oil mill effluent and application of lipids for biodiesel production[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2011, 16(1): 23-33.

- [16] KURTZMAN C P, FELL J W, BOEKHOUT T. The yeasts: a taxonomic study [M]. 5th ed. Amsterdam: Elsevier, 2011: 1879-1898.
- [17] ZHAO X, HU C, WU S, et al. Lipid production by *Rhodotorula glutinis* YB-252 under aerobic and anaerobic conditions [J]. Bioresource Technology, 2011, 102 (22): 10677-10682.
- [18] LI Y, ZHAO Z, BAI F. High-density cultivation of oleaginous yeast *Rhodotorula glutinis* for lipid production using cassava processing wastewater [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2007, 137/140: 689-701.
- [19] MALDONADE, RODRIGUEZAMAYA I R, SCAMPARINI D B, et al. Statistical optimisation of cell growth and carotenoid production by *Rhodotorula mucilaginosa* [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2012, 43 (1): 109-115.
- [20] 王砚妮, 李敏, 黄满, 等. 海洋胶红酵母发酵玉米加工副产物产类胡萝卜素的研究 [J]. 饲料工业, 2022, 43 (17): 5.
- [21] 杨铿. 海洋胶红酵母 Y2 产类胡萝卜素发酵促进剂的研究 [J]. 南方水产科学, 2013 (2): 45-49.
- [22] 翟红梅, 肖冬光, 张坤生, 等. 黏红酵母发酵生产类胡萝卜素培养条件的优化 [J]. 生物技术, 2003, 13 (5): 30-32.
- [23] 孙文怡, 张素芳, 林心萍, 等. 一种遗传转化方法在海洋红酵母 (*Rhodotorula mucilaginosa*) 中的应用 [J]. 中国生物工程杂志, 2016, 36 (6): 81-86.
- [24] 汪洋. 一株胶红酵母的鉴定及其产类胡萝卜素的性能研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [25] 丁重阳, 李国辉, 刘元法, 等. 一株胶红酵母及其在染料降解脱色和类胡萝卜素生产中的应用; 201310232113. X [P]. 2013-11-27.
- [26] 张春晓. 饵料中添加胶红酵母对刺参免疫及其产品品质的影响 [D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- [27] 夏冬梅. 胶红酵母对凡纳滨对虾、罗非鱼、卵形鲳鲹生长、消化酶活力和免疫的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- [28] 束兆林, 张红印, 杨红福, 等. 胶红酵母 (*Rhodotorula mucilaginosa*) 对常温贮藏梨果保鲜效果的研究 [J]. 保鲜与加工, 2015, 15 (6): 47-50.
- [29] 李爱华, 王星晨, 彭文婷, 等. 胶红酵母与酿酒酵母混合酒精发酵中酵母生长与糖苷酶活动力学 [J]. 西北农业学报, 2018, 27 (6): 896-903.
- [30] 刘志佳, 白家伟, 曾旖, 等. 一种利用乙酸高产油脂的胶红酵母及其制备方法和应用; 202411308987. 3 [P]. 2024-12-13.
- [31] PARK P K, KIM E Y, CHU K H. Chemical disruption of yeast cells for the isolation of carotenoid pigments [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 53 (2): 148-152.
- [32] UKIBE K, KATSURAGI T, TANI Y, et al. Efficient screening for astaxanthin-overproducing mutants of *Phaffia rhodozyma* by flow cytometry [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74 (24): 7468-7473.
- [33] LI Q, DU W, LIU D H. Perspectives of microbial oils for biodiesel production [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 80 (5): 749-756.
- [34] PATEL A, MATSAKAS L, ROVA U, et al. Heterotrophic cultivation of *Aurantiochytrium* sp. T66 for docosahexaenoic acid-rich lipid production [J]. Marine Drugs, 2020, 18 (1): 12

(责任编辑 马建华 英文审校 黄力行)