

产棕榈油酸酵母提取液的活性分析

唐丹丹¹, 孙宸婧¹, 顾嘉文¹, 林银山¹, 钱秀娟¹, 董维亮^{1,2}

(1. 南京工业大学 生物与制药工程学院, 南京 211800; 2. 南京工业大学 材料化学工程国家重点实验室, 南京 211800)

摘要:为探究富含棕榈油酸(POA)的酵母提取液在化妆品中的应用潜力和价值,以具有 POA 合成能力的产油酵母 *Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193 及其重组菌株 SS-12 为研究对象,检测二者油脂及 POA 含量,并测定了 *S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液的多酚含量、抗氧化活性和酪氨酸酶抑制活性。结果表明:*S. segobiensis* DSM 27193 及其重组菌株 SS-12 两株酵母油脂含量分别为 14.72% 和 34.35%, POA 在油脂中的占比分别为 12.03% 和 16.00%;两株酵母提取液的多酚含量最高分别可达 $(3\,269 \pm 56) \mu\text{g/mL}$ 和 $(3\,546 \pm 268) \mu\text{g/mL}$, 对 DPPH 自由基的清除率最高分别可达 71.70% 和 77.38%, 还原力最高分别可达 0.459 和 0.578, 对酪氨酸酶抑制率最高分别可达 91.25% 和 99.37%。综上,两种酵母提取液均具有良好的抗氧化活性和酪氨酸酶抑制活性,在化妆品领域具有优良的应用前景。

关键词:棕榈油酸;酵母提取液;抗氧化活性;酪氨酸酶抑制活性

中图分类号:Q819;TQ926

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)09-0095-06

Activity analysis of extracts from palmitoleic acid – producing yeast

TANG Dandan¹, SUN Chenjing¹, GU Jiawen¹, LIN Yinshan¹,
QIAN Xiujuan¹, DONG Weiliang^{1,2}

(1. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 2. State Key Laboratory of Materials – Oriented Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: To investigate the potential and value of palmitoleic acid (POA) – rich yeast extracts for cosmetic applications, the oleaginous yeast *Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193 (with POA synthesis ability) and its modified strain SS-12 were used as research subjects, their oils and POA contents were analyzed, and the polyphenol content, antioxidant activity, and tyrosinase inhibitory activity of the yeast extracts of *S. segobiensis* DSM 27193 and SS-12 were determined. The results showed that the oils contents of *S. segobiensis* DSM 27193 and SS-12 were 14.72% and 34.35%, respectively, and the percentages of POA in the oils were 12.03% and 16.00%, respectively. The polyphenol contents of the two yeast extracts could reach up to $(3\,269 \pm 56) \mu\text{g/mL}$ and $(3\,546 \pm 268) \mu\text{g/mL}$, the scavenging rate of DPPH radicals could reach up to 71.70% and 77.38%, the reducing power could reach up to 0.459 and 0.578, and the inhibition rate of tyrosinase could reach up to 91.25% and 99.37%, respectively. In conclusion, both yeast extracts have good antioxidant activity and tyrosinase inhibitory activity, and have an excellent application prospect in the field of cosmetics.

Key words: palmitoleic acid; yeast extract; antioxidant activity; tyrosinase inhibitory activity

收稿日期:2024-05-07;修回日期:2025-04-17

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2101500);国家级大学生创新创业训练计划项目(202310291080Z)

作者简介:唐丹丹(2003),女,在读本科,制药工程专业(E-mail)202121126127@njtech.edu.cn。

通信作者:钱秀娟,副教授,硕士生导师(E-mail)xjujuanqian@njtech.edu.cn。

近年来,生物发酵技术在化妆品中的应用已成为推动化妆品行业发展的重要创新力量^[1]。酵母因其安全性高且能够合成多种活性因子,如活性糖类、多酚类^[2]、多肽、维生素等天然成分而备受关注。与

植物提取相比,酵母发酵技术具有周期短、成本低、产量效率高、绿色安全等优势,因此利用酵母发酵获取活性因子是化妆品原料开发的重要来源^[3]。

棕榈油酸(POA)是一种由16个碳原子组成且含1个双键的 $\omega-7$ 单不饱和脂肪酸,有“天然的抗炎剂”“时光逆转素”的美称^[4]。研究表明,POA具有抑制人体细胞内的黑素因子,改善人体皮肤色素沉淀的功效;此外,POA钙盐有显著的润滑性,对金黄色葡萄球菌及痤疮丙酸杆菌具有选择性杀菌作用^[5-6]。因此,POA在化妆品中具有潜在的应用价值。POA在自然界物种中特别稀少,高纯度POA市场价可达到每克两百多元。目前,POA的分离富集主要以澳洲坚果、沙棘果和鱼油等为原料,但这些来源存在POA含量低、资源量严重不足、生产成本高的问题^[7-9]。*Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193是鲜见报道的可以合成POA的产油酵母,其胞内油脂中POA含量大于10%^[10-11]。且*S. segobiensis* DSM 27193具有底物谱广、耐受性强、生物量高、生物安全性好等特性,在最佳培养条件下,*S. segobiensis* DSM 27193的生物量和油脂产量分别达到了16.7 g/L和5.29 g/L,POA产量为0.700 4 g/L。利用基因工程对*S. segobiensis* DSM 27193中POA的合成途径进一步强化后,所得重组菌株SS-12的生物量和油脂产量分别达到了59.6 g/L和29.6 g/L,POA产量达7.3 g/L^[12],是目前报道的产油微生物中POA产量最高的。Peng等^[13]通过动物实验证明了富含POA的产油酵母*S. segobiensis* DSM 27193没有口服毒性。但目前关于产POA酵母提取液的活性研究报道较少。因此,本研究以*S. segobiensis* DSM 27193和其重组菌株SS-12为研究对象,检测其油脂及POA的含量,并测定了这两种酵母提取液的多酚含量、抗氧化活性、酪氨酸酶抑制活性,以探究富含POA的酵母提取液在化妆品中的应用潜力和价值,以期在POA在化妆品领域的应用提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

Scheffersomyces segobiensis DSM 27193与其重组菌株SS-12,由实验室保藏和构建。

YPD培养基:酵母提取物10 g/L,蛋白胨20 g/L,葡萄糖20 g/L。MSM培养基:主培养基860 mL,盐溶液20 mL,微量元素液20 mL,0.5 g/mL葡萄糖母液200 mL。其中:主培养基组成为二水柠檬酸钠0.1 g/L,酵母提取物0.1 g/L, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 4.72 g/L,

1 L磷酸缓冲液;磷酸缓冲液组成为 KH_2PO_4 8.99 g/L, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g/L,pH为5;盐溶液组成为 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 20 g/L,酵母提取物10 g/L;微量元素液组成为 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 4 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.55 g/L,柠檬酸0.475 g/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.076 g/L,96% H_2SO_4 100 μL 。以上成分均在115 $^\circ\text{C}$ 灭菌20 min。

HVE-50高压灭菌锅,日本Hirayama公司;725超低温冰箱,日本三洋公司;MOD-B1R单层恒温振荡培养箱,上海晏泉仪器有限公司;5425型高速离心机,德国艾本德公司;UV1000D紫外可见分光光度计,翱艺仪器(上海)有限公司;3000FA型多功能酶标仪,上海闪谱生物科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种的培养

摇瓶发酵培养:将*S. segobiensis* DSM 27193和SS-12分别接种至含有5 mL YPD培养基的试管中,置于25 $^\circ\text{C}$ 、200 r/min恒温摇床振荡培养36 h,按体积分数1%的接种量转接至100 mL含有YPD培养基的摇瓶中继续培养36 h。

发酵罐培养:将摇瓶发酵培养的种子接种到2.5 L MSM培养基(保证初始 OD_{600} 为1)中进行补料分批发酵,每隔12 h取样检测葡萄糖含量,控制葡萄糖含量在50 g/L,每天补加体积分数2%的微量元素液和盐溶液。在25 $^\circ\text{C}$ 、400 r/min下培养36 h,之后转速提高至800 r/min,继续培养168 h,期间溶解氧保持在30%以上,通过自动添加4 mol/L的NaOH和 H_3PO_4 将pH控制在5.00。

1.2.2 酵母提取液的制备

参考安佳星等^[14]的方法制备酵母提取液。取1.2.1在800 r/min发酵罐培养120、144、168 h时的培养液,2 500 r/min离心5 min,去除上清液,用生理盐水清洗沉淀3次,以去除培养基,获得菌泥。取0.2 g菌泥,加入25 μL 破壁酶、5 μL 巯基还原剂、470 μL 山梨醇,30 $^\circ\text{C}$ 水浴锅中反应1.5~2.0 h,加入0.22~0.23 g酸洗玻璃珠,涡旋108 s,离心取上清液,得到酵母提取液。

1.2.3 酵母油脂含量、POA含量及占比测定

采用气相色谱法测定酵母油脂含量^[15]。具体步骤如下:*S. segobiensis* DSM 27193和SS-12发酵168 h后,取发酵液在2 500 r/min下离心5 min,去除上清液,菌体用生理盐水重悬后进行二次离心,获得菌体细胞。菌体细胞经液氮速冻后,置于真空冷冻干燥机中冻干48~72 h至恒重。准确称取20 mg冻干样品于15 mL的玻璃管中,加入1.5 mL正己

烷、0.5 mL 含 2 mg/mL 苯甲酸甲酯(内标)的正己烷以及 2 mL 含 15% 硫酸的甲醇溶液,98℃金属浴振荡 2 h,期间每 30 min 取出涡旋 1 次。反应完成后,取出试管,待试管内液体冷却后开盖,加入 1 mL 无菌水充分混匀,低温离心后取上清液进行气相色谱检测。

色谱条件:HP-88 气相色谱柱(60 m×0.25 mm×0.2 μm);升温程序为初始温度 140℃,保持 5 min,以 4℃/min 升至 240℃,保持 15 min。按照公式(1)计算油脂含量(W)。

$$W = AC_0/A_0m_1 \times 100\% \tag{1}$$

式中:A 为样品中脂肪酸峰面积之和;A₀为内标峰面积;C₀为内标含量,mg;m₁为实际称取的冻干样品质量,mg。

POA 含量计算式为将式(1)中脂肪酸峰面积之和替换为 POA 峰面积。POA 占比为 POA 含量与油脂含量的比值。

1.2.4 酵母提取液的多酚含量测定

采用福林酚法测定样品多酚含量^[16]。取 1 mL 样品于试管中,加入 5.0 mL 体积分数 10% 的福林酚溶液,反应 5 min 后,加入 4.0 mL 质量分数 7.5% 的碳酸钠溶液,振荡混匀,室温下放置 1 h。反应结束后取 200 μL 反应液于 96 孔板中,使用酶标仪测量 760 nm 处的吸光值,将测得的吸光值代入以没食子酸为标准溶液绘制的标准曲线中计算多酚含量(以没食子酸当量表示)。

1.2.5 酵母提取液的抗氧化活性测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力

参考文献[17]测定样品的 DPPH 自由基清除能力。取 1 mL 样品使用 2 mL 水稀释,置于 5 mL 离心管中,加入 1 mL 0.12 mg/mL DPPH 乙醇溶液,振荡,室温下反应 5 min,反应结束后取 200 μL 反应液于 96 孔板中,使用酶标仪测定 517 nm 处的吸光值(A)。按上述方法测定 1 mL 样品+2 mL 水+1 mL 95%乙醇的吸光值(A₀)、3 mL 水+1 mL 0.12 mg/mL DPPH 乙醇溶液的吸光值(A₁)、3 mL 水+1 mL 95%乙醇的吸光值(A₂)。根据所测得的吸光值,按公式(2)计算 DPPH 自由基清除率(Y)。

$$Y = [1 - (A - A_0)/(A_1 - A_2)] \times 100\% \tag{2}$$

以维生素 E 作为阳性对照,用 95%乙醇配制不同质量浓度梯度的维生素 E 溶液,按照上述操作测定其吸光值,并计算 DPPH 自由基清除率,以维生素 E 质量浓度为横坐标,DPPH 自由基清除率为纵坐标绘制标准曲线。再根据样品的吸光值计算其维生素 E 当量浓度。

1.2.5.2 还原力

参考文献[18]测定样品的还原力。取 400 μL 样品,加入 500 μL 质量浓度 1 g/100 mL 的铁氰化钾溶液、500 μL 磷酸盐缓冲液,振荡混匀,置于 50℃水浴锅中反应 20 min,加入 500 μL 质量浓度 10 g/100 mL 的三氯乙酸溶液,摇匀后 3 000 r/min 离心 10 min。取 500 μL 上清液,加入 500 μL 蒸馏水、100 μL 0.1 g/100 mL 的氯化铁溶液,常温反应 10 min 后,测定 700 nm 处吸光值。以吸光值表征样品还原力,吸光值越高代表样品的还原力越强。

1.2.6 酵母提取液酪氨酸酶抑制活性的测定

参考文献[19]测定样品酪氨酸酶抑制活性。取 1 mL 样品,加入 0.5 mL 100 U/mL 酪氨酸酶溶液,充分混匀后,置于 37℃水浴锅中孵育 10 min。孵育结束后加入 2 mL 1 mg/mL 的左旋多巴溶液,混匀后继续于 37℃水浴锅中孵育 5 min,测定反应溶液在 475 nm 处的吸光值(A)。将 0.5 mL 100 U/mL 酪氨酸酶溶液替换成磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液,按照上述操作测定其吸光值(A₀);同时测定 1 mL 磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液+0.5 mL 100 U/mL 酪氨酸酶溶液的吸光度(A₁)、1.5 mL 磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液的吸光度(A₂)。按公式(2)计算酪氨酸酶抑制率。

1.2.7 数据统计与分析

采用 Origin 2024 软件对数据进行统计与绘图;采用 SPSS Statistics 22 软件对数据进行显著性差异分析,p<0.05 表示有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 S. segobiensis DSM 27193 和 SS-12 的油脂含量、POA 含量与 POA 占比

S. segobiensis DSM 27193 和 SS-12 胞内油脂含量、POA 含量与 POA 占比如表 1 所示。

表 1 酵母提取液的胞内油脂含量、POA 含量与 POA 占比

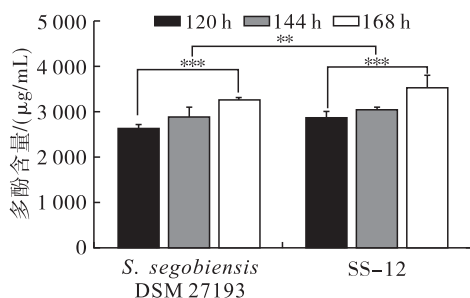
酵母种类	POA ratio of yeast extracts		%
	油脂含量	POA 含量	POA 占比
S. segobiensis DSM 27193	14.72	1.77	12.03
SS-12	34.35	5.50	16.00

由表 1 可知,S. segobiensis DSM 27193 和 SS-12 的 POA 含量分别为 1.77% 和 5.50%,油脂中 POA 占比分别为 12.03% 和 16.00%。常见产油酵母如圆红冬孢酵母和斯达氏油脂酵母的油脂中 POA 含量不高,为 1%~6%,导致 POA 占其总细胞干质量不足 5%^[20-21],低于本研究中 SS-12 的。

工业中常用的非产油酵母如马克斯克鲁维酵母、酿酒酵母和裂殖酵母,其 POA 在油脂中的含量虽然普遍较高,但非产油酵母积累油脂能力低下,导致 POA 在细胞中含量仍然很低,皆低于 3%^[22-24]。综上,SS-12 胞内富含油脂,且油脂中 POA 占比较高。因此,SS-12 酵母提取液是在化妆品领域具有应用潜力的抗黑色素原料。

2.2 酵母提取液中的多酚含量

多酚类物质是天然的抗氧化剂,具有良好的酪氨酸酶抑制活性和抗氧化作用,对自由基有良好的清除作用^[25]。*S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液中多酚含量如图 1 所示。



注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。下同

Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. The same below

图 1 两种酵母提取液的多酚含量随发酵时间的变化
Fig. 1 Variation of polyphenol contents of two yeast extracts with fermentation time

由图 1 可知,随着发酵时间延长,两种酵母提取液中多酚含量均呈上升趋势,当发酵时间为 168 h 时,SS-12 酵母提取液中多酚含量达到 $(3\,546 \pm 268) \mu\text{g/mL}$,*S. segobiensis* DSM 27193 酵母提取液的多酚含量达到 $(3\,269 \pm 56) \mu\text{g/mL}$ 。酿酒酵母常作为工程菌株用于天然产物的合成,被广泛应用于化妆品领域。赵丹等^[26]研究表明,酿酒酵母发酵玫瑰所获得的玫瑰发酵液中多酚含量为 $(847 \pm 13) \mu\text{g/mL}$ 。许满青^[27]研究表明,酿酒酵母发酵桑葚所获得的果酒中多酚含量为 $(39.25 \pm 0.06) \mu\text{g/mL}$ 。相比而言,*S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 两种酵母提取液多酚含量较高,在抗氧化类化妆品领域更具有应用前景。

2.3 酵母提取液的抗氧化活性

2.3.1 DPPH 自由基清除能力

S. segobiensis DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液的 DPPH 自由基清除率如图 2 所示。

由图 2 可知,在相同发酵时间下,SS-12 酵母提取液的 DPPH 自由基清除率大于 *S. segobiensis* DSM 27193 酵母提取液的。当发酵时间为 168 h

时,*S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液都具有较高的 DPPH 自由基清除率,分别达 71.70% 和 77.38%。以维生素 E 作为阳性对照,发酵时间为 168 h 时,*S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 的酵母提取液的维生素 E 当量浓度分别为 $(3\,016 \pm 751) \mu\text{g/mL}$ 和 $(3\,474 \pm 568) \mu\text{g/mL}$ 。可见,两种酵母提取液对 DPPH 自由基有良好的清除能力,具有较强的抗氧化能力。

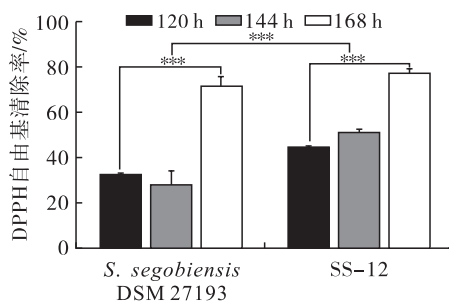


图 2 两种酵母提取液的 DPPH 自由基清除率随发酵时间的变化

Fig. 2 Variation of DPPH radical scavenging rates of two yeast extracts with fermentation time

2.3.2 还原力

S. segobiensis DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液的还原力如图 3 所示。

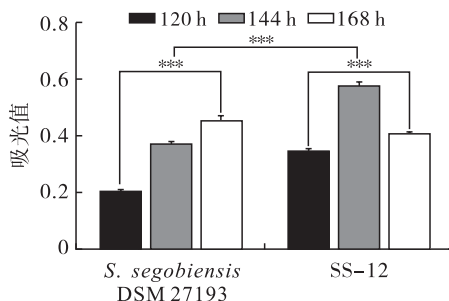


图 3 两种酵母提取液的还原力随发酵时间的变化
Fig. 3 Variation of reducing powers of two yeast extracts with fermentation time

由图 3 可知,当发酵时间为 144 h 时,SS-12 酵母提取液还原力最高(0.578),而 *S. segobiensis* DSM 27193 酵母提取液的还原力在发酵时间 168 h 时最高(0.459)。刘晓燕等^[28]研究了发酵前后活性物质与抗氧化能力存在的相关性,结果显示,发酵液中总酚含量与 Fe^{3+} 还原力、DPPH 自由基清除能力之间呈极强正相关,说明发酵后还原力有大幅度提升可能是总酚含量上升的结果。在发酵时间为 120、144 h 时,SS-12 酵母提取液的还原力要明显高于 *S. segobiensis* DSM 27193 的,这可能是因为 SS-12 酵母提取液中 POA 含量高,其还原力强。当发酵时间为 168 h 时,SS-12 酵母提取液的还原力显著降低,

可能是由于在发酵后期,所获得 SS-12 酵母提取液中的部分抗氧化物质被氧化分解,或部分细胞死亡所致。

2.4 酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性

黑素对皮肤颜色影响最大,黑素在表皮基底部的黑素细胞中形成^[29]。酪氨酸酶是黑素形成的关键酶,控制着黑素的形成过程,其活性程度对色素沉着起主要作用^[30]。目前市场上销售的大多数美白、祛斑的产品都是以抑制酪氨酸酶活性达到美白作用,故对酪氨酸酶抑制作用的强弱是评价增白化妆品的主要指标^[31]。*S. segobiensis* DSM 27193 和 SS-12 酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性如图 4 所示。

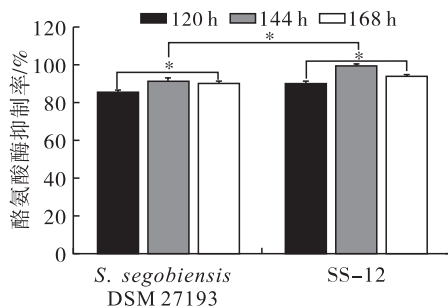


图 4 两种酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性随发酵时间的变化

Fig.4 Variation of tyrosinase inhibitory activity of two yeast extracts with fermentation time

由图 4 可知,两种酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性较高,均在 80% 以上,且 SS-12 酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性均大于 *S. segobiensis* DSM 27193 酵母提取液的,这是由于 POA 以剂量依赖的方式抑制了酪氨酸酶的表达^[19]。在发酵时间为 144 h 时,SS-12 和 *S. segobiensis* DSM 27193 酵母提取液的酪氨酸酶抑制活性均最高,抑制率分别达 99.37% 和 91.25%。邓逸琳等^[32]测定了 6 种乳酸菌发酵液的酪氨酸酶抑制活性,结果表明, *Lactobacillus plantarum* N2 和 *Lactobacillus plantarum* N4 具有较高的酪氨酸酶抑制活性,其抑制率分别为 71% 和 68%,均低于 80%。可见,富含 POA 的酵母提取液具有良好的酪氨酸酶抑制活性和抑制黑素生成的功效。

3 结 论

本研究对 *S. segobiensis* DSM 27193 及其重组菌株 SS-12 的油脂含量和 POA 含量进行测定,并分析了二者酵母提取液的多酚含量、抗氧化作用和酪氨酸酶抑制活性。结果表明,两株酵母油脂中 POA 含量较高,酵母提取液中含有丰富的多酚类物质,具有良好的抗氧化活性和酪氨酸酶抑制活性,在化妆品领域具有良好的应用潜力。本研究为富含 POA

的酵母提取液在化妆品领域的应用提供了理论基础。

参考文献:

[1] 王亚惠,谢纯良,周映君,等. 红麻副产品栽培中华红芝发酵液美白抗氧化研究[J]. 中国麻业科学, 2020, 42(2): 83-90.

[2] 李玲玲,刘雪,邱泽天,等. 植物多酚的微生物合成[J]. 生物工程学报, 2021, 37(6): 2050-2076.

[3] 李吉来,傅国华,王兴林,等. 酵母抽提水制备工艺与产业化研究及在化妆品中的应用[Z]. 广州:广州市娇兰化妆品有限公司,2017.

[4] 汪辉,周文俊,刘天中. 利用微藻生产单不饱和脂肪酸: 棕榈油酸[J]. 生物产业技术, 2016(2): 18-21.

[5] 夏琛,崔心禹,项婷,等. 棕榈油酸功能的研究进展[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 39-43.

[6] 张泽生,高山,郭擎,等. 棕榈油酸的研究现状及展望[J]. 中国食品添加剂, 2016, 27(9): 198-202.

[7] OZOGUL Y, OZOGUL F, CIÇEK E, et al. Fat content and fatty acid compositions of 34 marine water fish species from the Mediterranean Sea [J]. Int J Food Sci Nutr, 2009, 60(6): 464-475.

[8] MAGUIRE L S, O'SULLIVAN S M, GALVIN K, et al. Fatty acid profile, tocopherol, squalene and phytosterol content of walnuts, almonds, peanuts, hazelnuts and the *Macadamia* nut [J]. Int J Food Sci Nutr, 2004, 55(3): 171-178.

[9] 郑莉,赵晨伟,查娟,等. 沙棘油脂肪酸、sn-2 位脂肪酸及甘油酯的测定与分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(4): 143-146.

[10] SCHULZE I, HANSEN S, GROBHANS S, et al. Characterization of newly isolated oleaginous yeasts - *Cryptococcus podzolicus*, *Trichosporon porosum* and *Pichia segobiensis* [J/OL]. AMB Express, 2014, 4: 24 [2024-05-07]. <https://doi.org/10.1186/s13568-014-0024-0>.

[11] KIRAN SREE N, SRIDHAR M, VENKATESWAR RAO L, et al. Ethanol production in solid substrate fermentation using thermotolerant yeast [J]. Process Biochem, 1999, 34(2): 115-119.

[12] QIAN X, LEI H, ZHOU X, et al. Engineering *Scheffersomyces segobiensis* for palmitoleic acid-rich lipid production [J/OL]. Microb Biotechnol, 2024, 17(1): e14301 [2024-05-07]. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14301>.

[13] PENG Y, ZHANG L, BAO X, et al. Palmitoleic acid-rich oleaginous yeast *Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193 exerts anti-obesity effects by ameliorating hepatic steatosis and adipose tissue hypertrophy [J]. J Sci Food Agric, 2024, 104(4): 2156-2164.

- [14] 安佳星, 伍时华, 黄嘉齐, 等. 酵母破壁酶和蜗牛酶辅助 TRIzol 试剂法提取酿酒酵母总 RNA[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 46–50.
- [15] ZHOU X, BAO X, ZHOU J, et al. Evaluating the effect of cultivation conditions on palmitoleic acid – rich lipid production by *Scheffersomyces segobiensis* DSM 27193[J]. Biofuels Bioprod Bioref, 2021, 15(6): 1859–1870.
- [16] 王徐卿, 沈建福, 王敏, 等. 油茶籽饼多酚的乙醇提取工艺优化研究[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(3): 41–44.
- [17] 化妆品: 自由基 (DPPH) 清除实验方法: T/SHRH 006—2018[S]. 上海: 上海日用化学品行业协会, 2018.
- [18] 薛小兰, 范瑜珊. 灰树花粗多糖提取物体外抑菌及抗氧化活性初步探究[J]. 福建农业科技, 2021, 52(9): 15–19.
- [19] 化妆品: 酪氨酸酶活性抑制实验方法: T/SHRH 015—2018[S]. 上海: 上海日用化学品行业协会, 2018.
- [20] MENG X, YANG J, XU X, et al. Biodiesel production from oleaginous microorganisms[J]. Renew Energ, 2009, 34(1): 1–5.
- [21] KUMAR L R, KAUR R, YELLAPU S K, et al. Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels: Biodiesel production from oleaginous microorganisms with wastes as raw materials[M]. Cambridge: Academic Press, 2019: 661–690.
- [22] FONSECA G G, GOMBERT A K, HEINZLE E, et al. Physiology of the yeast *Kluyveromyces marxianus* during batch and chemostat cultures with glucose as the sole carbon source[J]. FEMS Yeast Res, 2007, 7(3): 422–435.
- [23] ŠAJBIDOR J, CIESAROVÁ Z, ŠMOGROVIČOVÁ D. Influence of ethanol on the lipid content and fatty acid composition of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Folia Microbiol, 1995, 40(5): 508–510.
- [24] YAZAWA H, KUMAGAI H, UEMURA H. Characterization of triglyceride lipase genes of fission yeast *Schizosaccharomyces pombe*[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2012, 96(4): 981–991.
- [25] 田丝竹, 李绪文, 臧爽, 等. 10 种野生植物果实对 α -淀粉酶和酪氨酸酶的抑制作用及其酚类化合物含量和抗氧化活性研究[J]. 分析化学, 2021, 49(3): 449–459.
- [26] 赵丹, 曹玉峰, 丁文玉, 等. 玫瑰发酵液的抗氧化及美白功效探究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 141–145, 196.
- [27] 许满青. 异常威克汉姆酵母与酿酒酵母发酵对桑椹果酒品质的影响[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2022.
- [28] 刘晓燕, 谢丹, 马立志, 等. 刺梨果渣发酵前后活性成分及抗氧化能力的比较研究[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 16–24.
- [29] 宋冠冠, 包东毅. 一种植物源多肽及在化妆品中的应用: 201810741300.3[P]. 2019–04–26.
- [30] 杜孝元, 刘玮, 史飞, 等. 酪氨酸酶活性抑制实验及其在祛斑美白化妆品功效评价中的应用[J]. 中国美容医学, 2005, 14(6): 740–742.
- [31] 周春英, 马秋华, 张玉. 壬二酸衍生物抑制酪氨酸酶活性实验[C]//山东中西医结合皮肤性病学术会议论文集. 上海: 中国中西医结合学会皮肤性病专业委员会, 2011: 64–66.
- [32] 邓逸琳, 王斌, 曹辉. 6 种乳酸菌发酵液对皮肤抗氧化及美白功能的评价[J]. 日用化学工业, 2020, 50(5): 325–330.
-
- (上接第 74 页)
- [4] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 81: 25–36.
- [5] CORNENT S H V, SNEL S J E, SCHREUDERS F K G, et al. Thermo – mechanical processing of plant proteins using shear cell and high – moisture extrusion cooking[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(12): 3264–3280.
- [6] MURILLO J L S, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high – moisture extrusion of meat substitutes[J]. J Food Eng, 2019, 242: 8–20.
- [7] 张王康, 于玉真, 荆孟杰, 等. PVC – U 管材共用挤出机头设计与分析[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2): 106–111.
- [8] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [9] 左晓甜, 郭树国, 金子云. 带有反向螺纹的同轴变速单螺杆三维流场分析[J]. 中国油脂, 2025, 50(1): 147–152.
- [10] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [11] 陈慧涛. 植物蛋白肉纤维成型工艺研究及系统开发[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2023.
- [12] 史佳伟, 徐秉恒, 史宏斌, 等. 喷嘴结构及工艺参数对固体推进剂 3D 打印挤出成型的影响分析[J]. 固体火箭技术, 2023, 46(5): 740–746.
- [13] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013(11): 60–63.
- [14] WITTEK P, ELLWANGER F, KARBSTEIN H P, et al. Morphology development and flow characteristics during high moisture extrusion of a plant – based meat analogue [J/OL]. Foods, 2021, 10(8): 1753[2024–06–20]. <https://doi.org/10.3390/foods10081753>.
- [15] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 郑州: 河南大学出版社, 1991.