刘战霞, 吴洪斌, 陈亚淑, 等. 酶法协同改性油莎豆淀粉的制备及其在构建淀粉基双乳液体系中的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 37−45. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080263

LIU Zhanxia, WU Hongbin, CHEN Yashu, et al. Preparation of Enzymatic Co-modified *Cyperus esculentus* Starch and Its Effect on the Construction of Starch-based Double Emulsion System[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 37−45. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080263

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

酶法协同改性油莎豆淀粉的制备及其在构建淀粉基双乳液体系中的影响

刘战霞[1], 吴洪斌[1], 陈亚淑[2], 张　珊[2], 金新文[1,*], 贾文婷[1,*]

（1.新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆石河子 832000;
2.中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室, 湖北武汉 430062）

摘　要: 为克服天然油莎豆淀粉易老化、溶解性与稳定性差等应用缺陷，本研究采用复合酶（Enzyme modification，EMD）协同介质研磨处理（Medium grinding，M-EMD）、高压均质处理（High-pressure homogenization，H-EMD）、纳米沉淀（Nanoprecipitation，N-EMD）处理改性技术对油莎豆淀粉改性处理，应用于构建淀粉基双乳液体系，分析其对双乳液体系界面张力、稳定性及负载番茄红素的体外消化的影响。结果表明，不同协同改性方式对淀粉的改性效果差异显著。其中，N-EMD 处理表现最优，制备的淀粉颗粒粒径最小（0.797 μm）、分布最均一（PDI=0.19），且具有最高的表面负电荷（Zeta 电位=−70 mV）和最强的亲水性（接触角=23.1°）。结构分析表明，H-EMD 与 N-EMD 处理能有效诱导淀粉分子结构重组。由 N-EMD 淀粉构建的双乳液液滴细小均一，结构规整，对番茄红素（Lycopene，Lyc）的包埋效率（88%）和装载能力（66%）最高。在储存过程中，该乳液物理稳定性最佳，且脂质氧化程度最低；在体外模拟消化中，其游离脂肪酸释放率（45%）与 Lyc 的生物利用度（48%）均显著高于其他组。综上，酶法协同纳米沉淀（N-EMD）是优化油莎豆淀粉性能及构建高效淀粉基递送体系的最有效策略。该研究为油莎豆淀粉的高值化利用开辟了新路径，并为开发性能优良的食品级活性成分递送载体提供了理论依据与技术参考。

关键词: 油莎豆淀粉, 酶法协同改性, 淀粉基双乳液体系, 理化性质, 稳定性

中图分类号: TS239　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0037−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080263

本文网刊:

Preparation of Enzymatic Co-modified *Cyperus esculentus* Starch and Its Effect on the Construction of Starch-based Double Emulsion System

LIU Zhanxia[1], WU Hongbin[1], CHEN Yashu[2], ZHANG Shan[2], JIN Xinwen[1,*], JIA Wenting[1,*]

（1.Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China;
2.Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China）

Abstract: To overcome the application limitations of natural jatropha starch, such as susceptibility to aging and poor

收稿日期: 2025−08−27

基金项目: 新疆农垦科学院院级科研项目（2024YJQN10）; 兵团重点领域科技攻关项目（2024AB031）; 兵团番茄优势特色产业集群（2410307009）; 油莎豆精深加工农业科技示范基地（2024YD026-26）; 兵团青年科学项目（2025DB023）。

作者简介: 刘战霞（1992−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: 806796383@qq.com。

*** 通信作者:** 金新文（1970−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工及副产物综合利用, E-mail: njs701022@163.com。

贾文婷（1987−）, 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工与副产物综合利用, E-mail: jwt246@sina.com。

solubility and stability, this study employed composite enzyme (EMD) synergistic medium grinding treatment (M-EMD), high-pressure homogenization treatment (H-EMD), nano-precipitation (N-EMD) modification techniques to enhance oilseed starch. The modified starch was then incorporated into starch-based double emulsion systems to evaluate its effects on interfacial tension, stability, and the *in vitro* digestion of lycopene-loaded emulsions. Results indicated that the modification effects of different synergistic modification methods on starch were significantly different. N-EMD treatment demonstrated optimal performance, yielding starch particles with the smallest size (0.797 μm), the most uniform distribution (PDI=0.19), the highest surface negative charge (Zeta potential=−70 mV), and the strongest hydrophilicity (contact angle=23.1°). Structural analysis revealed that both H-EMD and N-EMD treatments effectively induced starch molecular restructuring. The double emulsion droplets constructed from N-EMD starch were fine, uniform, and structurally regular, exhibiting the highest lycopene encapsulation efficiency (88%) and loading capacity (66%). During storage, this emulsion exhibited the optimal physical stability and minimal lipid oxidation. In simulated *in vitro* digestion, its free fatty acid release rate (45%) and Lyc bioavailability (48%) significantly surpassed other groups. In conclusion, enzyme-assisted nano-precipitation (N-EMD) represented the most effective strategy for optimizing oil palm starch properties and constructing efficient starch-based delivery systems. This study pioneers new pathways for high-value utilization of jatropha starch and provides theoretical foundations and technical references for developing high-performance food-grade delivery carriers for bioactive compounds.

Key words: *Cyperus esculentus* starch; enzymatic synergistic modification; starch-based double emulsion system; physico-chemical properties; stability

油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)又名油莎草,作为一种可替代大豆进口的新型潜在油源作物,是目前唯一的高淀粉基油料作物[1]。研究发现,油莎豆淀粉与玉米及藜麦淀粉具有相似的理化和功能特性,且具有价格低廉、生物相容性好和可降解等优点,是构建绿色、安全的食品级运载体系的理想载体材料[2−3]。但天然油莎豆淀粉易老化,不易溶于冷水,抗剪切性低,热稳定性较差也限制其在工业上的应用,通过有效的技术手段对油莎豆淀粉进行改性,使淀粉应用到更广泛的领域[4−5]。

目前,油莎豆淀粉的改性方法主要包括物理法、化学法、酶法以及协同法[6]。酶法改性(EMD)虽绿色高效,却受限于酶分子渗透难、对淀粉微观结构调控不足,故需结合辅助技术。酶法协同改性淀粉是一种通过两种或多种改性方法获得的淀粉,它结合了两种或多种改性淀粉的优点,在淀粉的实际生产中,可实现更优的改性效果、降低生产成本[7]。

改性淀粉经酶法协同改性后,颗粒结构与表面活性显著优化,既能作为优良乳化剂吸附于油水界面,降低界面张力以稳定乳液,又具备良好的生物相容性、可降解性及包埋能力,可有效包裹脂溶性活性成分(如番茄红素、功能性油脂)并减少其在加工储存中的流失,适配食品、医药领域的安全递送需求[8];Qiu 等[9] 研究了普鲁兰酶和 α-淀粉酶改性高直链淀粉增加了抗性淀粉含量,与白藜芦醇之间的有利 CH-π 相互作用有助于 V6 型晶体结构,可提高消化抵抗力。Fan 等[10] 研究了超声辅助酶促淀粉酯化制备 OSA 淀粉/壳聚糖复合颗粒,超声处理缩短了酯化时间,并增强了淀粉表面羟乙酸酯基团的均匀性,羟乙酸酯淀粉/壳聚糖复合颗粒是性能优良的皮克林乳液稳定剂。研究学者们发现,双乳液作为一种乳液运载体系可有效控制功能因子在胃肠道特定环境下缓慢且持续释放,有利于功能因子被吸收利用。然而,目前关于以淀粉为载体材料的双乳液研究较少,特别是粉基双乳液对功能因子的生物利用度的可行性尚未探究。

本研究构建复合酶分别与研磨(M)、高压均质(H)、纳米沉淀(N)的协同改性体系(M-EMD、H-EMD、N-EMD),其中 M-EMD 借研磨机械力破坏淀粉结构、提升酶解效率且避免颗粒团聚,H-EMD 靠高压均质细化颗粒、促进酶与淀粉接触,制备出均一稳定的改性淀粉适配工业化生产,N-EMD 先经酶解降解淀粉为低分子量片段,再通过纳米沉淀精准制备纳米颗粒并赋予其更多活性位点以拓展高端应用,并研究不同酶的协同改性的油莎豆淀粉微观结构、流变性质及其稳定双乳液的界面性质,旨在为构建食品级淀粉基双乳液和生物活性物质递送载体提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

油莎豆　采自第三师图木舒克市新疆三礼粮油有限公司,挑选成熟度良好、个体大小均匀的油莎豆,经过机械摩擦脱皮后置于自封袋中 4 ℃ 下备用;氢氧化钠、盐酸、无水乙醇、氯化钠、柠檬酸、磷酸二氢钾溶液　分析纯,新疆宏道仪器有限公司;普鲁兰酶(1000 μ/g)、α-淀粉酶(40000 μ/g)　食品级,维克奇生物有限公司;尼罗红染料　西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;异硫氰酸荧光素酯(Fluorescein Isothiocyanate Isomer I, FITC)　北京索莱宝科技有限公司;非酯化脂肪酸试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司;甲醇、正己烷、二氯甲烷等　色谱纯,国药集团化学试剂有限公司;番茄红素(Lyc)标准品(纯度≥99.46%)　德斯特生物公司;所有实验均使用蒸馏水;实验中使用的所有化学试剂均为分析纯。

CIENTZ-30ND 冷冻干燥机、SINDINSDC-100 光学接触角测量装置　宁波新芝生物科技股份有限公司；DF-101S 磁力搅拌器　上海力辰邦西仪器科技有限公司；JY92-IINe 超声波细胞粉碎机　宁波新芝生物科技股份有限公司；PHS-3Ce 酸度计　上海仪电科学仪器有限公司；Winner2005e 激光粒度分析仪　济南微纳颗粒仪器股份有限公司；JS94H 型 Zeta 电位仪　上海中晨数字技术设备有限公司；VERTEX 70v 傅里叶变换红外光谱仪　德国布鲁克仪器公司；AXRP 激光共聚焦显微镜　日本 Nikon 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　油莎豆淀粉及油的提取　采用吕程龙等[11]的方法，略作修改。取洁净饱满的脱皮油莎豆破碎，过 100 目分样筛，取 25 g 筛下物于烧杯中，按料液比 1∶6（g∶mL）加入 0.3% 的 NaOH 溶液，并在 50 ℃ 温度下以 300 r/min 的转速持续搅拌 30 min，使物料中蛋白质及可溶性杂质充分溶解于碱液中，以 5000 r/min 的转速离心 15 min，分离得到沉淀（粗淀粉）与上清液（含蛋白质、杂质），弃去上清液，向离心所得沉淀中加入 80 mL 蒸馏水，用玻璃棒搅拌至均匀悬浮状，过 100 目筛去除未溶解的粗纤维杂质，收集筛下悬浮液再次以 5000 r/min 离心 15 min；重复此洗涤-筛分-离心操作 3 次，直至洗液 pH 接近中性（pH6.8~7.2），将最终纯化后的淀粉沉淀转移至冻干托盘，先在−20 ℃ 冰箱预冻 4 h，再放入冷冻干燥机中（真空度 0.1 MPa，冷阱温度−50 ℃）干燥 24 h，取出后粉碎过 80 目筛，即得油莎豆淀粉。

油莎豆油采用低温压榨方法制备[12]：油莎豆烘烤（120 ℃、20 min）破碎后，置于微波炉内，微波真空膨化处理 5 min，低温压榨（温度<60 ℃），收集毛油，在 6000 r/min 下离心 10 min 去除沉淀，得油莎豆油，置于 4 ℃ 冰箱备用。

1.2.2　酶促协同改性油莎豆淀粉的制备　根据 Zhang 等[13]的方法制备，并适当修改。将 2 g α-淀粉酶与 8 mL 磷酸盐缓冲溶液（pH6.5，0.02 mol/L）涡旋混合 5 s。酶溶液在 40 ℃ 下在水浴振荡器中振动 20 min（200 r/min）。以 3075×g 离心 10 min，获得 α-淀粉酶上清液。将 α-淀粉酶与普鲁兰酶上清液按 1∶3（w/w）的比例混合，得到复合酶溶液。

称取 10 g 油莎豆淀粉，分别加入至 200 mL 磷酸盐缓冲溶液（pH6.5，0.02 mol/L）缓冲液中，配制成 0.05 g/mL 淀粉乳，先分别采用介质研磨处理、高压均质处理、纳米沉淀处理后，再分别加入 3%（w/w，淀粉干基）的复合酶溶液，具体制备方法如表 1 所示。将复合酶改性 EMD、介质研磨-复合酶改性 M-EMD、高压均质-复合酶改性 H-EMD、纳米沉淀-复合酶改性 N-EMD 得到的复合酶改性油莎豆淀粉，分别命名为 EMD、M-EMD、H-EMD 和 N-EMD。以未改性油莎豆淀粉为对照，记为 CE。

1.2.3　粒径、多分散性指数（Particle size，PDI）和 Zeta 电位测定　根据 Saechio 等[14]的方法，将淀粉样品（100 mg）分散在 10 mL 超纯水中并匀浆。将淀粉分散体逐滴添加到预装有超纯水试管中。在分散装置中，搅拌速率设置为 2500 r/min。测量淀粉粒径并记录。利用动态光散射仪测定多分散性指数（PDI）。使用 Zeta 电位分析仪测量 Zeta 电位，在分析之前，将样品用超纯水稀释 100 倍，以避免多重散射效应。结果采用每个粒子的 5 次测量值的平均值。

1.2.4　接触角测定　根据 Qin 等[15]的方法，测量不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉的三相接触角。将淀粉粉末在一定压力下压制在载玻片上，制成表面平整的样品。使用微量注射器将去离子水缓慢滴在样品表面，形成一个稳定的液滴。通过配备图像分析软件的接触角测量仪拍摄液滴图像，软件自动分析图像，测量接触角。

1.2.5　傅里叶变换-红外光谱学（Fourier transform infrared spectroscopy，FT-IR）　酶法协同改性淀粉经过真空冷冻干燥处理，干燥后的样品与 KBr 粉末以 1∶100（w/w）的比例混合，研磨至细粉并压制成薄片。使用傅里叶变换红外光谱仪对样品进行扫描，光谱扫描范围为 4000~400 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}。

1.2.6　酶法协同改性油莎豆淀粉基双乳液的制备　根据 Yang 等[16]的方法，以不同方法改性的油莎豆淀粉为水相（将淀粉溶解于磷酸盐缓冲液（PBS，5 mmol/L，pH7.0）中并以 300 r/min 的速度搅拌 2 h，

表 1　酶法协同改性淀粉的制备方法

Table 1　Preparation methods of enzymatically synergistically modified starch

酶法协同改性淀粉组	酶法协同改性淀粉的制备方法
未改性淀粉CE	–
复合酶改性EMD	分别加入3%（w/w，淀粉干基）的复合酶溶液，35 ℃下磁力搅拌2 h，随后添加400 mL无水乙醇，醇沉、抽滤并收集固形物，预冻12 h，冷冻干燥24 h，干燥后粉碎，过100目筛，将获得的改性油莎豆淀粉储存在干燥器中。
介质研磨-复合酶改性M-EMD	将上述制备得到的0.05 g/mL淀粉乳加入到球磨机中，同时加入适量的陶瓷球研磨，设置转速通常在300 r/min，研磨时间为2 h。
高压均质-复合酶改性H-EMD	将0.05 g/mL淀粉乳倒入高压均质机的进料罐中，设定均质压力200 MPa，均质次数为2次。
纳米沉淀-复合酶改性N-EMD	向0.05 g/mL淀粉乳加入体积5倍的无水乙醇，醇沉反应后以 5000 r/min离心5 min，然后进行洗涤，并在40 ℃干燥箱中干燥，得到油莎豆淀粉纳米颗粒。

注：“–”表示未处理。

制备含有 2.0wt% 的水相)，油莎豆油为油相(将 0.1 mg/mL Lyc 溶解在 10 mL 油莎豆油中)，司班 80 和吐温 80 为乳化剂。第一步乳化将 Lyc(0.1 mg/mL)溶解在 10 mL 油莎豆油中，以 7∶3 体积比将制备得到的 2.0wt% 的水相(含吐温 20)与将得到的油相溶液(含司班 80)混合，使用高速分散器在 16000 r/min 下剪切 1 min，制备 O/W 型单乳液。其中，两种乳化剂在整个单乳液体系中总浓度为 2%(v/v)，吐温 20 和司班 80 体积比为 3∶2。第二步乳化以 3∶2 体积比将 O/W 型单乳液缓慢滴加到油莎豆油(含司班 80，浓度为 2%，v/v)中，利用磁力搅拌器在 25 ℃ 以 2000 r/min 转速高速磁力搅拌 5 min，获得 O/W/O 乳液，制备得到淀粉基双乳液。得到的样品分别命名为负载 Lyc 的 EM-DEs、M-DEs、H-DEs、N-DEs。

1.2.7 酶法协同改性油莎豆淀粉基双乳液微观结构测定 通过采用激光共聚焦显微镜(CLSM)观察样品的形貌。分别将标记大豆油的尼罗红和标记淀粉的 FITC 溶于丙酮，配制成 0.1%(w/v)尼罗红溶液和 0.1%(w/v)FITC 溶液，将尼罗红、FITC 和乳液以 1∶1∶5 体积比混合均匀。然后将染色的乳液于 25 ℃ 避光静置过夜。尼罗红和 FITC 的激发波长分别设为 543 nm 和 488 nm。双乳液需稀释 100 倍后将其置于显微镜载玻片上，盖上盖玻片，观察并拍照[17]。

1.2.8 包埋率和装载能力的测定 采用梅钰琪等[18]的方法，准确称取一定量的番茄红素标准品，用正己烷溶解并配制成浓度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL 的标准溶液。在波长为 472 nm 处读取吸光度，得到番茄红素标准曲线。稀释后的油莎豆淀粉基双乳液(体积分数 1%)在 25 ℃ 下，以 9000 r/min 离心 10 min，收集上清液，在 472 nm 处测定吸光度。Lyc 充分溶出后适当稀释，Lyc 的含量按其标准曲线(y=0.2725x+0.0137，R^2=0.9976)计算。包埋率(Encapsulation Efficiency，EE)、装载能力(Loading Capacity，LC)分别采用式(1)、式(2)计算：

$$EE(\%) = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中：V_0 为包埋时番茄红素的质量浓度，为 250 μg/mL；V_1 为所得乳液中番茄红素的质量浓度(μg/mL)。

$$LC(\%) = \frac{m_1}{M} \times 100 \quad \text{式（2）}$$

式中：m_1 为包埋时番茄红素的质量；M 为包埋材料总质量。

1.2.9 乳化指数(Emulsification index，EI) 采用 Qin 等[15] 的方法，略作修改。不同改性后的淀粉基双乳液均质后立即将酶法协同改性油莎豆淀粉基淀粉双乳液转移到试管中，进行拍照，为了评估乳液的稳定性，在初始测定后，设置一个静置时间间隔(10 min)，然后再次测定。用乳化指数(EI)确定乳化剂的乳化能力，并根据式(3)计算。

$$EI(\%) = HE/HT \times 100 \quad \text{式（3）}$$

式中，HE 是上部乳化层的高度；HT 是液体的总高度。

1.2.10 脂质氧化稳定性 脂质氢过氧化物(ROOH)测定采用分光光度法[19]，1 mL 乳液加入酸性缓冲液(1 mL 0.25 mol/L 硫酸溶液)混匀，再加入 2 mL 含 Fe^{2+}和显色剂(二甲酚橙)的 FOX 试剂，避光反应 10~15 min，于 560 nm 波长处测定吸光度。

硫代巴比妥酸值(Thiobarbituric acid reactive substances，TBARS)的测定参考王思妤等[20] 的方法，1 mL 乳液样品加入 10 mL 7.5% 三氯乙酸(Trichloroaceticacid，TCA)溶液(含有 0.1% 没食子酸丙酯、0.1% EDTA-2Na)，均质后过滤，取 5 mL 上清液加入 5 mL 0.02 mol/L 的硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid，TBA)溶液，置于 90 ℃ 加热 30 min，冷却后于波长 532 nm 和 600 nm 处测定吸光值。TBARS 以每千克油中丙二醛(Malondialdehyde，MDA)的微摩尔数表示(μmol MDA/kg oil)。

1.2.11 负载番茄红素双乳液的体外消化实验 采用口腔、胃和小肠三阶段模型评估封装番茄红素的酶法协同改性油莎豆淀粉基淀粉双乳液体外消化动力学[21]。配制模拟唾液(Simulated saliva fluid，SSF)、模拟胃液(Simulated gastric fluid，SGF)及模拟肠液(Simulated intestinal fluid，SIF)。

口腔阶段：将含 5 mg/mL 黏蛋白的 SSF(9 mL)、3.6 g 乳液与 1.4 mL PBS(pH7.0，10 mmol/L)混合。调节混合液 pH 至 6.8 后，置于 37 ℃、100 r/min 的摇床中孵育 10 min。

胃阶段：取 15 mL 口腔阶段样本与含 3.2 mg/mL 胃蛋白酶的 15 mL SGF 混合。调节混合液 pH 至 2.5 后，于 37 ℃、100 r/min 条件下持续振荡孵育 1 h。

小肠阶段：将胃阶段产生的 30 mL 样本 pH 调至 7.0，与 1.5 mL SIF 混合，在持续搅拌下加入 3.5 mL 胆汁盐溶液(5 mg/mL)。调节 pH 至 7.0 后加入 2.5 mL 1.6 mg/mL 脂肪酶溶液。随后将混合液置于 37 ℃、100 r/min 的振荡培养箱中反应 2 h，期间通过添加 NaOH 溶液维持体系 pH 在 7.0。

1.2.11.1 游离脂肪酸(Free fatty acid，FFA)的释放 使用 pH-stat 自动电位滴定仪监测肠道消化过程中 KOH 的消耗量[21]。游离脂肪酸的释放量根据肠道中 0.1 mol/L KOH 溶液的消耗量，按以下公式计算：

$$FFA(\%) = \frac{V_{NaOH} \times C_{NaOH} \times Mlipid}{mlipid \times 2} \times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中，V_{NaOH} 和 C_{NaOH} 分别表示 0.1 mol/L NaOH 的消耗体积(L)和浓度(mol/L)；M_{lipid} 代表甘油三酯的质量(g/mol)；m_{lipid} 代表反应中甘油三酯质

量(g)。

1.2.11.2　番茄红素的生物利用度　参考 Hao 等[22]所述方法稍作修改进行。取模拟胃肠液消化样品，以 10000 r/min 离心 30 min，取上清液测定番茄红素含量，测定方法同 1.2.8。生物可及性按以下公式计算：

$$生物利用度(\%)=\frac{M_R}{M_b}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中，M_R 表示消化后上清液中的番茄红素含量(已释放的量)，μg；M_b 为消化前样品溶液中的番茄红素总含量(原始总量)，μg。

1.3　数据处理

所有实验均进行三次独立重复测定。采用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 检验(P<0.05)评估组间差异显著性，结果以平均值±标准差形式呈现，不同字母的数据表示显著不同(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉粒径分布与电位

淀粉粒径直接反映了淀粉颗粒的大小。PDI 是衡量颗粒尺寸分布均匀程度的重要指标。PDI 的值越小(≤0.25)，颗粒尺寸分布越均匀[15]。如图 1(A)所示，与未改性油莎豆淀粉颗粒(CE)相比，不同酶法协同改性处理(EMD、M-EMD、H-EMD、N-EMD)对油莎豆淀粉的粒径分布和多分散指数(PDI)具有显著(P<0.05)调控作用，其中 N-EMD 处理表现出最显著的改性效果，其淀粉粒径最小(0.797 μm)且 PDI 值最低，为 0.13，表明 N-EMD 改性处理方式能有效提高淀粉的均一性和分散性，主要是由于纳米沉淀过程制备出的淀粉颗粒具有较大的比表面积和较高的表面能，这使得淀粉颗粒表面的活性位点增多，更易于与复合酶接触和反应[23]；相比之下，EMD 处理的改性效果最弱，其淀粉粒径最大(约 9.126 μm)且 PDI 值大于 0.25，而 M-EMD、H-EMD 处理虽然较 EMD 有所改善，但仍不及 N-EMD 的效果。综上所述，说明酶改性处理和协同方式对淀粉改性效果具有决定性影响，N-EMD 处理因其独特的协同作用表现出较好的粒径。

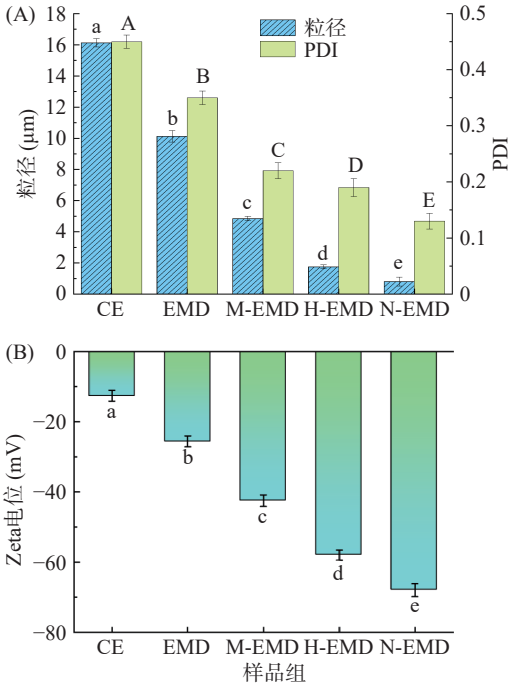


图 1　油莎豆淀粉颗粒及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉的平均粒径和 PDI(A)以及 Zeta 电位(B)

Fig.1　Average particle size, PDI (A), and Zeta potential (B) of *Cyperus esculentus* starch granules and their enzyme-assisted synergistically modified counterparts

注：相同指标、不同组别字母不同表示差异显著(P<0.05)；图 2、图 4、图 7 同。

Zeta 电位是反映淀粉颗粒表面电荷性质和电荷密度的重要指标[5]。图 1B 展示了不同酶法协同改性对油莎豆淀粉 Zeta 电位值的影响。从图 1B 中可以看出，与未改性油莎豆淀粉颗粒(CE)相比，各处理组间的 Zeta 电位存在显著差异(P<0.05)。其中，N-EMD 处理表现出最高的 Zeta 电位值(绝对值为 68.0 mV)，显著(P<0.05)高于其他处理组，这表明其淀粉颗粒表面净负电荷最高，静电排斥作用最强，可能具有最佳的胶体稳定性；H-EMD 处理次之(绝对值为 58.0 mV)，而 EMD 和 M-EMD 处理(绝对值为 25.6 mV 和 42.5 mV)的 Zeta 电位绝对值相对较小。N-EMD 处理产生的显著高负电位现象，可归因于其协同改性机制所引发的淀粉表面化学组成变化。这些结果证实，酶法协同改性类型通过改变淀粉的表面化学特性，显著影响其电荷特性，而 N-EMD 处理在提升淀粉分散体系稳定性方面最具潜力。

2.2　不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉接触角及二级结构

测定油莎豆改性淀粉接触角可了解其表面润湿性，评估改性效果。图 2A 展示了不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉接触角，系统评估了酶法协同改性对淀粉表面润湿性的影响。结果表明，与未改性油莎豆淀粉颗粒(CE)相比，不同酶法协同改性处理组间接触角存在显著差异(P<0.05)，其中 EMD 处理表现出最大的接触角，为 48.7°，表明其表面亲水性最弱；而 N-EMD 处理接触角最小，为 23.1°，表现出最优的亲水性能。表明酶法协同改性可有效调控淀粉表面特性，N-EMD 处理则因其优异的亲水性在需要快速润湿的应用中更具潜力。

图 2B 展示了通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析不同酶法协同改性对油莎豆淀粉结构的影响。结果显示，与未改性油莎豆淀粉颗粒(CE)相比，各处理组在特征吸收峰位置和强度上均表现出明显差异：O-H 伸缩振动(约 3414 cm^{-1})：改性后样品的 O-H 峰位置发生了移动(从 CE 的 3413.6 cm^{-1} 移至 N-EMD 的 3432.4 cm^{-1})，表明酶法协同改性显著改变了

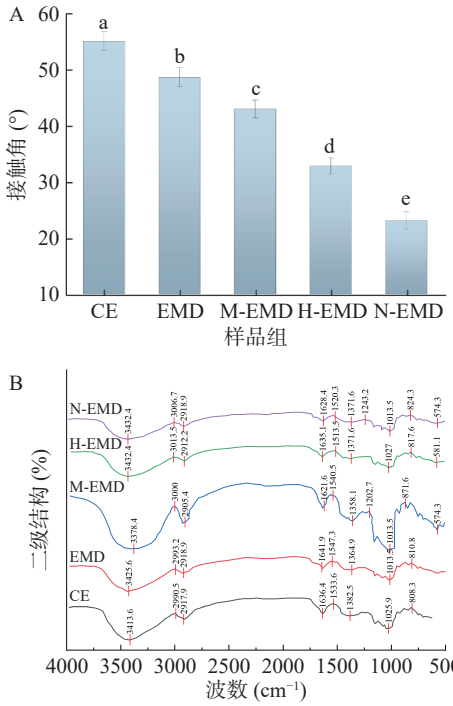


图 2　油莎豆淀粉颗粒及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉颗粒的接触角(A)及二级结构(B)

Fig.2　Contact angle (A) and secondary structure (B) of *Cyperus esculentus* starch granules and their enzymatically synergistically modified counterparts

淀粉分子中的氢键网络[17]。C-H 伸缩振动(2910~2936 cm^{-1}):不同改性处理导致 C-H 峰位置出现显著差异,其中 N-EMD 处理的最大(至 2918.9 cm^{-1}),而 CE 处理则位于较高波数(2990.5 cm^{-1}),说明改性影响了淀粉的疏水微环境。指纹区(800~1200 cm^{-1}):各处理组在 1018 cm^{-1} 左右(C-O 伸缩振动)和 1156 cm^{-1} 左右(C-O-C glycosidic linkage)等峰处的强度也存在差异,证实了分子结构的改变。这些结果证实酶法协同改性能有效调控淀粉的分子结构。

2.3　不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液的微观结构

通过共聚焦激光扫描显微镜(Confocal laser scanning microscope, CLSM)观察了不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液(EMD、M-EMD、H-EMD、N-EMD)的分布,结果如图 3 所示。淀粉水相用异硫氰酸荧光素(Fluorescein isothiocyanate, FITC)标记,油莎豆油相用尼罗红标记。从图 3 的 CLSM 图像可见,经 FITC 和尼罗红标记的不同改性油莎豆淀粉双乳液呈现出差异化的微观结构。EMD 处理组的乳液存在部分大尺寸液滴团聚现象,分散性欠佳;M-EMD 处理组的液滴尺寸较 EMD 明显减小,但粒径分布仍不均一;H-EMD 处理组的液滴尺寸进一步减小,均一性有所改善;而 N-EMD 处理组展现出明显优势,其形成的双乳液液滴直径最小且分布高度均一,内部水包油包水(W/O/W)结构清晰规整,FITC 标记的内层水相被尼罗红标记的油相紧密包

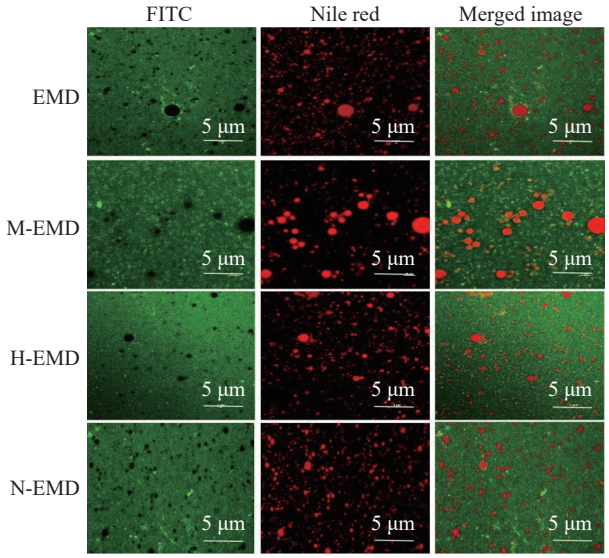


图 3　不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳 CLSM 图

Fig.3　CLSM images of double emulsion of *Cyperus esculentus* starch modified by synergistic enzymatic treatments

裹,外层水相则完整包覆,形成稳定的核-壳-外层三级结构,这表明纳米沉淀-复合酶改性技术在优化双乳液微观结构、提升乳液稳定性方面效果卓越[24]。

2.4　番茄红素的包埋率和装载能力

包埋率(EE)和装载能力可衡量酶法协同改性油莎豆淀粉对脂质的包埋效率及承载潜力[25],为优化淀粉基双乳液体系的载药/载脂性能及应用稳定性提供数据支撑[26]。不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液中番茄红素的包埋率如图 4 所示。结果显示各处理组在包埋率和装载能力方面均显著(P<0.05)优于对照组(CE,包埋率 25%,装载能力 57.55%)。其中 N-EMD 处理表现出最优异的性能,其包埋率(88%)和装载能力(66%)均显著(P<0.05)高于其他处理组(EMD、M-EMD、H-EMD)。这些结果证实酶法协同改性可有效改善淀粉的包埋特性,且改性效果与酶的种类和协同方式密切相关,其中 N-EMD 处理因其独特的协同作用机制在构建高效包埋系统方面最具应用潜力。Souza 等[27] 研究了改

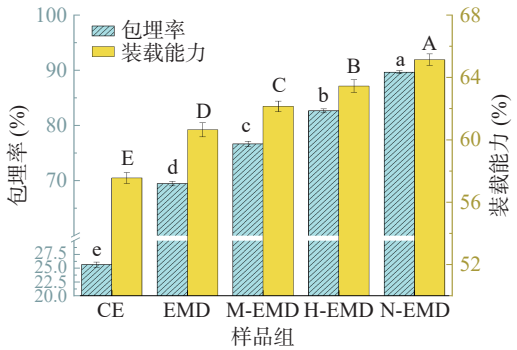


图 4　油莎豆淀粉双乳液及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液的包埋率和装载能力

Fig.4　Encapsulation efficiency and loading capacity of double emulsions of *Cyperus esculentus* starch and enzymatically co-modified double emulsions of *Cyperus esculentus* starch

性淀粉与麦芽糊精复配作为乳化剂，制备的番茄红素乳液经喷雾干燥后，微胶囊中番茄红素含量达 333~494 μg/g，储存期降解速率较麦芽糊精单体系降低 15%。改性淀粉形成的多孔球状结构可容纳油相核心，虽界面膜的致密性不足会导致初始包埋率偏低，但能减缓热加工中的番茄红素降解。

2.5　不同酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液的稳定性

乳液若能在实际使用时间内保持稳定，通常被视为具有良好的稳定性。如图 5 所示，通过测量 0~480 h 储存时间内乳化指数的变化评估了其稳定性[28]，结果表明 CE 组的乳化指数从初始的 78.6% 显著（P<0.05）降至 480 h 时的 12.6%，而酶法协同改性处理的乳化指数在储存期间均保持相对稳定，其中 N-EMD 处理的表现尤为突出，其乳化指数始终接近 100% 且几乎无变化，其余酶法协同改性处理的乳化指数虽略低但同样显著（P<0.05）优于对照组。Zhang 等[29] 采用复合酶（α-淀粉酶与糖化酶）协同改性藜麦淀粉，形成兼具多孔结构与表面亲水 - 疏水平衡的颗粒，作为 Pickering 乳液稳定剂时，其复杂的颗粒形态可紧密吸附于油水界面，抑制液滴聚结，乳液静置 30 d 无明显分层。Wang 等[4] 通过酶法制备油莎豆多孔淀粉（PS），其表面形成的孔洞结构使乳化能力提升至 22.6 mL/g（天然淀粉仅 4.2 mL/g）；进一步经植酸钠交联后，复杂的网络结构显著增强乳液储存稳定性，解决了单一酶改性淀粉热稳定性不足的问题。

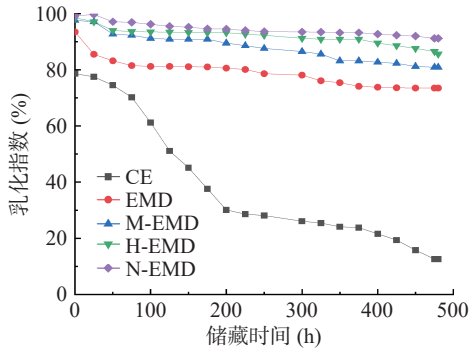


图 5　油莎豆淀粉双乳液及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液不同储存时间乳化指数

Fig.5　Emulsion layer proportion of double emulsions of *Cyperus esculentus* starch and enzymatically synergistically modified double emulsions of *Cyperus esculentus* starch at different storage times

2.6　脂质氧化稳定性

脂质氧化稳定性可评估淀粉基双乳液体系中脂质抵抗氧化降解的能力，为体系抗氧化性能优化及应用稳定性提供关键依据[30]。如图 6 所示，本研究测定了不同改性淀粉基双乳液在 0 至 14 d 内的脂质过氧化物含量、丙二醛（MDA）含量。结果显示，所有样品的脂质过氧化物含量、MDA 含量均随贮藏时间延长而增加（P<0.05），其中 CE-DEs 的氧化程度最高（14 d 时达 200 nmol/g oil，MDA 为 35 μmol/kg oil），而 N-DEs 的氧化程度最低（14 d 时为 120 nmol/g oil，MDA 为 19.4 μmol/kg oil），且增长幅度最小；其余样品中，EM-DEs、M-DEs、H-DEs 的氧化程度介于两者之间，14 d 时脂质过氧化物分别约为 180、160 和 140 nmol/g oil，MDA 含量分别为 29、19 和 18 μmol/kg oil。结果表明，酶法协同改性处理能有效抑制油莎豆淀粉双乳液的脂质氧化，N-DEs 之所以能表现出最优的抗氧化效果（其 MDA 含量较 CE-DEs 降低 74.3%），主要归因于 N-EMD 改性淀粉所形成的独特界面结构。N-EMD 淀粉具有最小的粒径、最高的表面负电荷（Zeta 电位为−70 mV）和最强的亲水性，这使其能在油水界面更紧密地排列，形成一层更厚、更致密的物理屏障界面膜[31]。这层膜能更有效地阻隔氧气、金属离子等促氧化因子的渗透与接触，从而从源头上减缓脂质氧化链式反应的引发。N-EMD 处理诱导了淀粉分子的结构重组，可能暴露了更多的羟基等活性基团，这些基团本身可通过氢键作用或轻微的自由基清除能力，进一步协同稳定界面、抑制过氧化物形成[32]。综上所述，N-EMD 改性通过优化淀粉的界面性质，构建了稳定性更高的乳液体系，这是其显著增强脂质氧化稳定性的核心机制。

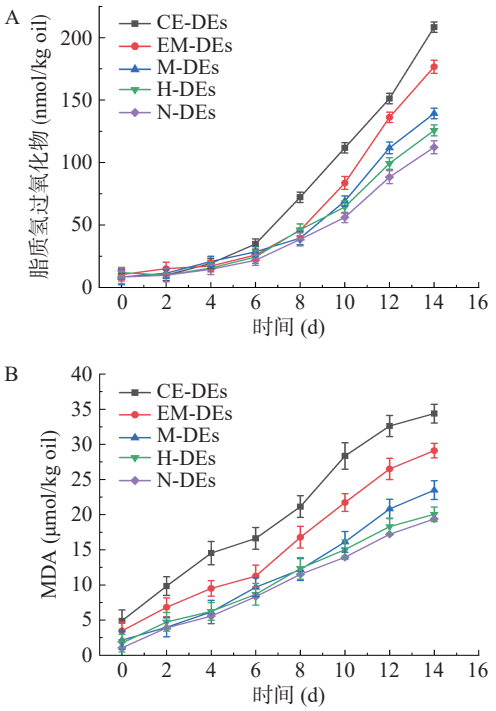


图 6　油莎豆淀粉双乳液及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液脂质氧化稳定性

Fig.6　Lipid oxidation stability of double emulsions of *Cyperus esculentus* starch and enzymatically modified double emulsions of *Cyperus esculentus* starch

注：A.脂质氢过氧化物；B. MDA。

2.7　番茄红素体外生物利用度分析

游离脂肪酸（FFA）释放百分比变化可通过量化

体系中脂质水解程度，揭示酶法协同改性油莎豆淀粉对双乳液体系中脂质稳定性及酶解敏感性的调控作用[33]。如图 7A 所示，测定了不同改性淀粉基双乳液在模拟消化条件下（0~120 min）的游离脂肪酸（FFA）释放百分比变化。结果显示，所有样品的 FFA 释放百分比均随时间显著（P<0.05）增加，其中 N-DEs 的最终释放率最高（45%），显著（P<0.05）高于其他组别（CE-DEs 25%、EM-DEs 35%、M-DEs 40%、H-DEs 42%），且其释放速率最快；而 CE-DEs 的 FFA 释放率最低且增加最缓慢。结果表明酶法协同改性处理能显著改善油莎豆淀粉双乳液的消化特性，其中纳米沉淀-复合酶改性（N-DEs）表现出最优的消化性能，其较高的 FFA 释放率表明该处理方式更有利于脂肪酶接触和分解乳液中脂质。图 7B 比较了不同改性淀粉基双乳液的生物利用度。结果显示，酶法协同改性显著（P<0.05）提高了油莎豆淀粉双乳液的生物利用度，其中 CE-DEs 的生物利用度最低（30%），而经过改性的样品生物利用度依次升高，EM-DEs、M-DEs、H-DEs 和 N-DEs 分别达到 40%、42%、45% 和 48%。结果表明，酶法协同改性处理能有效改善油莎豆淀粉双乳液的生物可及性，且改性程度越高效果越显著，其中纳米沉淀-复合酶改性（N-DEs）的处理生物利用度较未改性样品提高了 60%。

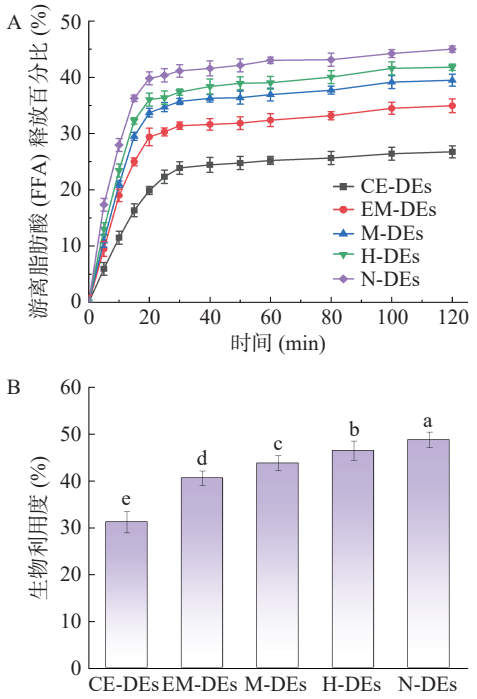


图 7 油莎豆淀粉双乳液及其酶法协同改性处理的油莎豆淀粉双乳液游离脂肪酸（FFA）的释放（A）与生物利用度（B）

Fig.7 Release of free fatty acids (FFA) (A) and bioaccessibility (B) of double emulsions of *Cyperus esculentus* starch and its enzymatically synergistically modified double emulsions of *Cyperus esculentus* starch

3 结论

本研究基于对油莎豆淀粉的复合酶协同介质研磨、高压均质与纳米沉淀等改性处理，系统分析了改性淀粉在构建淀粉基双乳液体系中的作用，并对乳液相关性质进行了综合评价。研究结果表明，不同酶法协同改性处理可显著改变油莎豆淀粉的理化特性。在粒径分布与 Zeta 电位方面，各处理组间差异显著（P<0.05），其中纳米沉淀处理（N-EMD）效果最为突出，其颗粒粒径最小、分布最均一，Zeta 电位显著（P<0.05）降低，接触角最小，表明该处理有效改善了淀粉颗粒的表面电荷特性并增强了其亲水性。结构分析显示，高压均质（H-EMD）与 N-EMD 处理均能显著（P<0.05）促进淀粉结构重组。在作为番茄红素（Lyc）载体的应用中，N-EMD 处理所构建的双乳液体系包埋率与装载能力分别达到 88% 与 66%，并在储存过程中表现出良好的物理稳定性与氧化稳定性，体外消化中游离脂肪酸释放率最高，Lyc 生物利用度达 48%，表明该处理能有效提升 Lyc 的稳定性和生物可利用性。本研究明确了酶法协同纳米沉淀在淀粉改性与乳液构建中的优势，拓展了油莎豆淀粉在功能成分包埋与递送体系中的应用潜力，为淀粉基乳液在食品与医药领域的开发提供了理论依据与实践参考。然而，关于改性淀粉在复杂食品基质中的长期稳定性及其规模化生产中的工艺适应性等问题仍需进一步探究。未来研究可围绕改性淀粉-乳液界面行为的调控机制，以及在不同环境条件下的释放动力学开展深入探索，以推动该技术的实际应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG S, LI P, WEI Z, et al. *Cyperus* (*Cyperus esculentus* L.): A review of its compositions, medical efficacy, antibacterial activity and allelopathic potentials[J]. Plants, 2022, 11(9): 1127.

[2] EDO G I, SAMUEL P O, NWACHUKWU S C, et al. A review on the biological and bioactive components of *Cyperus esculentus* L.: Insight on food, health and nutrition[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(14): 8414−29.

[3] YU Y, LU X, ZHANG T, et al. Tiger nut (*Cyperus esculentus* L.): Nutrition, processing, function and applications[J]. Foods, 2022, 11(4): 601.

[4] WANG J, ZHANG D, XIAO J, et al. Effects of enzymatic modification and cross-linking with sodium phytate on the structure and physicochemical properties of *Cyperus esculentus* starch[J]. Foods, 2022, 11(17): 2583.

[5] LIU Z X, LI B B, DU Y L, et al. Lycopene W/O/W emulsions stabilized by *Cyperus esculentus* starch: Effect of oil phase content on stability and *in vitro* digestive behavior[J]. LWT, 2025: 118780.

[6] WU X, YAN X, ZHANG J, et al. Intelligent films based on dual-modified starch and microencapsulated a ronia melanocarpa anthocyanins: Functionality, stability and application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 134076.

[7] MENG F, TIAN S, CHEN Y, et al. Preparation and physicochemical properties of OSA modified *Cyperus esculentus* starch nanoparticles[J]. International Journal of Biological Macromole-

cules, 2025, 292: 140045.
[8] WANG Y, ZHANG L, ZHANG Q, et al. Development of a novel resistant starch via synergistic triple modification strategy that enables lipid complexation under mild conditions[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 366: 123924.
[9] QIU Z P, LI R, CHEN J, et al. Favored CH-π interaction between enzymatically modified high amylose starch and resveratrol improves digestion resistance[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110137.
[10] FAN J W, LYU W K, LI J, et al. Ultrasound-assisted esterification of enzymatic starch for fabrication of OSA starch/chitosan complex granule: A stabilizer for Pickering emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111273.
[11] 吕程龙, 朱春阳, 王栋, 等. 超声波辅助提取油莎豆淀粉工艺优化及其理化特性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 192−199.
[LÜ C L, ZHU C Y, WANG D, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction process of *Cyperus esculentus* L. starch and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 192−199.]
[12] 刘佳杰, 万楚筠, 郑畅, 等. 油莎豆的制油工艺研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(4): 15−21,39. [LIU J J, WAN C Y, ZHENG C, et al. Research on oil extraction technology of *Oleosus japonicus*[J]. Chinese Journal of Oils and Fats, 2025, 50(4): 15−21,39.]
[13] ZHANG R Y, CHEN P X, LIU A B, et al. Effects of different isolation methods on the structure and functional properties of starch from tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) meal[J]. LWT, 2024, 196: 115853.
[14] SAECHIO S, AKANITKUL P, THIYAJAI P, et al. Astaxanthin-loaded pickering emulsions stabilized by nanofibrillated cellulose: Impact on emulsion characteristics, digestion behavior, and bioaccessibility[J]. Polymers, 2023, 15(4): 901.
[15] QIN W, TANG S, CHEN C, et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil Pickering emulsion stabilized by zein/carboxylated cellulose nanocrystals composite nanoparticles [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109321.
[16] YANG J, ZHOU Q, HUANG Z, et al. Mechanisms of *in vitro* controlled release of astaxanthin from starch-based double emulsion carriers[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106837.
[17] FU Y, WANG J, LIU X, et al. Effect on heat treatment on the physical stability, interfacial tension and *in vitro* digestion of whey protein-stabilized ω-6/ω-3 fatty acid balanced pumpkin seed oil complex condensate[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110728.
[18] 梅钰琪, 高亚轩, 杨韵仪, 等. 蛋黄蛋白肽纳米颗粒对姜黄素的包埋与递送特性[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 14−22. [MEI Y Q, GAO Y X, YANG Y Y, et al. Enrichment and delivery characteristics of curcumin by nanoparticles of egg yolk protein peptides[J]. Journal of Food Science, 2023, 44(21): 14−22.]
[19] 郑若凡, 张珊, 陈亚淑, 等. 微波辅助亚麻籽油脂体负载芝麻酚的机制探究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 143−153.
[ZHENG R F, ZHANG S, CHEN Y S, et al. Mechanism study of microwave-assisted loading of sesamol into flaxseed oil body[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 143−153.]
[20] 王思妤, 孙超飞, 苗金旭, 等. 茶黄素对冷冻不漂洗鱼糜制品香气和凝胶结构的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 225−237.
[WANG S Y, SUN C F, MIAO J X, et al. The effects of tea flavonoids on aroma and gel structure of frozen unwashed dish paste products[J]. Journal of Chinese Food Science, 2025, 25(7): 225−237.]
[21] ZHANG B, LIU W J, HE T S, et al. Insight into interfacial adsorption behavior of high-density lipoprotein hydrolysates regulated by carboxymethyl dextrin and *in vitro* digestibility of curcumin loaded high internal phase emulsions[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134006.
[22] HAO L, LI J, MAO J, et al. The soybean lecithin-cyclodextrin-vitamin E complex nanoparticles stabilized Pickering emulsions for the delivery of β-carotene: Physicochemical properties and *in vitro* digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265: 130742.
[23] CHANG Y, YANG J, REN L, et al. Characterization of amylose nanoparticles prepared via nanoprecipitation: Influence of chain length distribution[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 194: 154−60.
[24] XU T, YANG J, HUA S, et al. Characteristics of starch-based Pickering emulsions from the interface perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 334−346.
[25] 刘战霞, 李斌斌, 赵月, 等. 核桃蛋白/肉苁蓉多糖稳定白藜芦醇 Pickering 乳液的制备及其稳定性[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 2328−2334. [LIU Z X, LI B B, ZHAO Y, et al. Preparation and stability of walnut protein/cistanche polysaccharide-stabilized resveratrol Pickering emulsion[J]. Food Science, 2024, 45(23): 2328−2334.]
[26] 杨蔚秋, 毕会敏, 范方宇. 负载姜黄素/花色苷的木薯淀粉基 W1/O/W2 型 Pickering 双重乳液的制备及性质[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(2): 46−57. [YANG J Q, BI H M, FAN F Y. Preparation and properties of cassava starch-based W1/O/W2 Pickering dual emulsion loaded with curcumin/anthocyanins[J]. Journal of Food Science and technology, 2024, 42(2): 46−57.]
[27] SOUZA A L, HIDALGO-CHAVEZ D W, PONTES S M, et al. Microencapsulation by spray drying of a lycopene-rich tomato concentrate: Characterization and stability[J]. LWT, 2018, 91: 286−292.
[28] 姜欢, 缪铭, 江波. 麦芽糖转葡糖基酶修饰对普通玉米淀粉分子结构与消化性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(3): 41−45. [JIANG H, MIAO M, JIANG B. Effects of maltose-to-glucose enzyme modification on molecular structure and digestibility of common corn starch[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(3): 41−45.]
[29] ZHANG L, XIONG T, WANG X, et al. Pickering emulsifiers based on enzymatically modified quinoa starches: Preparation, microstructures, hydrophilic property and emulsifying property[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190: 130−140.
[30] CHEN P, YANG B Q, WANG R M, et al. Regulate the interfacial characteristic of emulsions by casein/butyrylated dextrin nanoparticles and chitosan based on ultrasound-assisted homogenization: Fabrication and characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107983.
[31] ZHU F. Starch based Pickering emulsions: Fabrication, properties, and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 85: 129−137.
[32] WANG Z Y, DENG D, PEI X, et al. Chemical modification of starch-based nanoparticles for Pickering emulsions: A review[J]. Journal of Polymer Research, 2025, 32(4): 1−17.
[33] ZHANG M, LIU X F, LIU Y F, et al. Effects of interface generation, droplet size and antioxidant partitioning on the oxidation rate and oxidative stability of water–in–oil emulsions: A comparison of coarse emulsions and nanoemulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108227.