

油茶籽淀粉的结构与体外模拟消化特性研究

向敏¹, 韩小苗^{1,2}, 吴苏喜^{1,2}, 李万元², 彭邵锋³

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南神农国油生态农业发展有限公司, 湖南 衡阳 421800; 3. 湖南省林业科学院, 长沙 410114)

摘要:为促进油茶籽淀粉资源的开发利用,采用“碱提+酶解”工艺从油茶籽粕中提取油茶籽淀粉,并以市售玉米淀粉和马铃薯淀粉为对照,比较其结构和体外消化特性。结果表明:本工艺所得油茶籽淀粉的提取率为64.25%,纯度为92.66%;与市售玉米淀粉、马铃薯淀粉相比,油茶籽淀粉呈球形或椭球形,颗粒更小;油茶籽淀粉为典型的A型淀粉,其长程结构不稳定,相对结晶度更低;油茶籽淀粉的短程有序程度与市售玉米淀粉、马铃薯淀粉相似,但双螺旋度数更低;油茶籽淀粉抗性淀粉含量(16.91%)更高。综上,油茶籽淀粉可作为一种新型抗性淀粉资源得以应用。

关键词:油茶籽粕;油茶籽淀粉;淀粉性质;抗性淀粉

中图分类号:TS229;TS222+.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)01-0084-05

Structure and digestion property *in vitro* of *Camellia oleifera* starch

XIANG Min¹, HAN Xiaomiao^{1,2}, WU Suxi^{1,2},
LI Wanyuan², PENG Shaofeng³

(1. College of Food and Bio-Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Shennongguo Oil Eco-Agriculture Development Co., Ltd., Hengyang 421800, Hunan, China; 3. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410114, China)

Abstract: To promote the utilization of starch resources from *Camellia oleifera* seed, the extraction of starch was conducted using alkaline and enzymatic methods on *Camellia oleifera* seed meal, and its structure and digestive property *in vitro* were compared with commercially available corn starch and potato starch. The results indicated that a high extraction yield of 64.25% and a purity of 92.66% for *Camellia oleifera* starch were obtained by this method, and the morphology of the starch exhibited spherical or ellipsoidal particles of smaller size compared to commercially available corn starch and potato starch. *Camellia oleifera* starch exhibited type A starch, with an unstable long-range structure and a lower relative crystallinity. The short-range order degree of *Camellia oleifera* starch was similar to that of commercially available corn starch and potato starch, but the degree of double helix was lower. The resistant starch content was significantly higher at 16.91% of *Camellia oleifera* starch. In conclusion, *Camellia oleifera* starch can be used as a new resistant starch resource.

Key words: *Camellia oleifera* seed meal; *Camellia oleifera* starch; starch property; resistant starch

油茶籽是山茶科山茶属植物山茶的种子,其占

收稿日期:2024-01-11;修回日期:2024-07-01

基金项目:湖南省自然科学基金青年基金项目(2024JJ6018);长沙市自然科学基金项目(kq2402011);2024年湖南省油茶产业科研示范项目(2024LYCY0009)

作者简介:向敏(1999),女,硕士研究生,研究方向为油茶加工(E-mail)1095857189@qq.com。

通信作者:吴苏喜,教授(E-mail)wsx6524@163.com。

鲜果质量的38%~40%^[1],常用于制油。据报道^[2],2021年我国油茶种植面积达 4.592×10^6 hm²,年产油茶籽394万t、油茶籽油88.9万t,由此可推算出我国油茶籽饼粕年产量约300万t。油茶籽饼粕作为油茶籽提油后的主要副产物,目前主要以全饼粕形式用于虾蟹养殖业,利用价值不高。油茶籽饼粕富含淀粉(40%左右)^[3]、粗纤维(14.77%~20.50%)、蛋白质(8.90%~14.40%)、茶皂素

(12.16%~26.88%)、活性多糖(10.15%~11.19%)等多种高价值成分^[4],其中已受到关注与研究的成分主要是蛋白质^[5]、茶皂素^[6]、活性多糖^[7]及多酚^[8],而对含量最多的淀粉则研究较少。目前有对茶叶籽淀粉的研究,如Huang^[9]、Qian^[10]等研究了不同品种茶叶籽淀粉的结构特征和理化特性。

本文以油茶籽粕为原料,采用“碱提+酶解”工艺提取油茶籽淀粉,开展油茶籽淀粉结构与消化特性的研究,并与2种市售粮食淀粉(玉米淀粉、马铃薯淀粉)进行比较,以期为油茶籽淀粉的高值化利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

油茶籽粕(水分含量6.35%,油脂含量2.62%,淀粉含量29.06%,蛋白质含量16.04%),由油茶籽经超临界CO₂脱脂后获得,由湖南和广生物科技有限公司提供;玉米淀粉、马铃薯淀粉,西安市佳香调味品食品有限公司。

氢氧化钠,分析纯,西陇科学股份有限公司;95%乙醇,食品级,湖北景源生物科技股份有限公司;3,5-二硝基水杨酸、葡萄糖、盐酸、石油醚、二甲亚砜、CaCl₂·2H₂O、KCl、KH₂PO₄、NaHCO₃、NaCl、MgCl₂·6H₂O、(NH₄)₂CO₃,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;猪胆盐,上海源叶生物科技有限公司;耐高温 α -淀粉酶、猪胰 α -淀粉酶(9 U/mg)、唾液 α -淀粉酶(20 U/mg)、碱性蛋白酶(200 U/mg),合肥博美生物科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶,上海麦克林生化科技有限公司;胃蛋白酶(3 000 U/mg)、胰蛋白酶(250 U/mg),上海华蓝化学科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

SCIENTZ-10N型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;AOELAB UV-1800PC紫外分光光度计,上海翱艺仪器有限公司;DL-5-B型低速台式离心机,北京海天友诚科技有限公司;AUY120电子分析天平,日本岛津公司;JSM-7900F场发射扫描电子显微镜、JSM-IT500钨灯丝扫描电子显微镜,日本电子株式会社(JEOL);D8 Advance X-射线衍射(XRD)仪,德国Bruker公司;Nicolet iS5傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析仪,Thermo Fisher公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油茶籽淀粉的提取

参考黄佳佳^[11]的方法并稍作修改。将20 g油茶籽粕按固液比1:10浸泡在去离子水中,用0.002

mol/L NaOH调节pH至10,加入2%(以粕干质量计)碱性蛋白酶后,40℃下孵育5 h;将浸提液过0.15 mm(100目)筛后,于4 000 r/min下离心20 min,弃去上清液,刮去淀粉沉淀表面的黄色杂质层;用去离子水洗涤淀粉沉淀并过0.15 mm(100目)筛,重复3次以去除杂质,用盐酸调节pH至7.0,再次离心分离,弃去上清液;随后用100 mL体积分数80%的乙醇溶液于室温下浸泡沉淀1 h,再次离心分离,弃去上清液,将淀粉沉淀进行冷冻干燥,过0.15 mm(100目)筛后,置于干燥器中保存备用。

1.2.2 油茶籽淀粉基本成分测定

粗纤维含量参照GB/T 5009.10—2003测定;粗脂肪含量参照GB 5009.6—2016索氏抽提法测定;粗蛋白质含量参照GB 5009.5—2016凯氏定氮法测定;灰分含量参照GB 5009.4—2016测定;茶皂素含量参照GB/T 41549—2022测定;直链淀粉含量采用碘染色法按AACC 61-03.01方法进行测定,其中以马铃薯直链淀粉(Sigma)、支链淀粉(Fluka)为对照制作标准曲线。

1.2.3 油茶籽淀粉提取率测定

总淀粉含量参照AACC 76-13.01方法进行测定,具体步骤:称取100 mg样品于离心管中,加入10 mL体积分数80%的乙醇溶液,混匀,80~85℃下孵育5 min,混匀,4 000 r/min下离心10 min,弃去上清液后继续加入等量乙醇溶液,孵育后再次离心,以消除样品中葡萄糖和麦芽糖对测定结果的干扰。然后立即加入2 mL二甲亚砜,混匀,沸水浴(100~105℃)孵育5 min,以溶解样品中可能存在的抗性淀粉。然后立即加入3 mL耐高温 α -淀粉酶(300 U),混匀后沸水浴(100~105℃)孵育6 min,随后将离心管置于50℃水浴,待温度稳定后依次加入4 mL醋酸盐缓冲液(200 mmol/L, pH 4.5)和0.1 mL淀粉葡萄糖苷酶(20 U),混匀,50℃水浴孵育30 min。最后将离心管从水浴中取出,冷却后,4 000 r/min离心10 min,转移上清液并加蒸馏水定容至10 mL,取1 mL上清液,稀释一定倍数后用3,5-二硝基水杨酸替代试剂盒测定其葡萄糖含量(C_1)。按式(1)计算样品中淀粉含量(D),按式(2)计算淀粉提取率(E)。

$$D = \frac{C_1 \times V \times T}{m} \times 0.9 \times 100\% \quad (1)$$

$$E = \frac{m_2 \times D_1}{m_1 \times D_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_1 为稀释液中葡萄糖含量,mg/mL; V 为上清液体积,mL; T 为稀释倍数; m 为样品质量,mg;

0.9 为葡萄糖转化成淀粉的系数; m_2 为油茶籽淀粉质量,mg; D_1 为产品油茶籽淀粉纯度; m_1 为原料油茶籽粕的质量,mg; D_2 为原料中淀粉含量。

1.2.4 淀粉结构分析

1.2.4.1 扫描电镜(SEM)分析

采用 JSM-IT500 钨灯丝扫描电子显微镜观测样品颗粒的表面形貌。测定条件:电压 10 kV,电流 60 mA,样品放大 3 000 倍。

1.2.4.2 XRD 分析

采用 D8 Advance X-射线衍射仪分析样品的晶体结构和相对结晶度。测定条件:靶型 Cu K α ;电压 40 kV;电流 40 mA;扫描速度 2($^\circ$)/min;2 θ 扫描范围为 4 $^\circ$ ~40 $^\circ$,扫描步长 0.02 $^\circ$ 。所得图谱利用 MDI Jade 6.0 软件进行处理并计算相对结晶度。

1.2.4.3 FT-IR 分析

称取 2 mg 样品与烘干至恒重的溴化钾以质量比 1:100 的比例混合,研磨后挤压成片状,采用 FT-IR 进行分析。分析条件:用环境空气去除背景,扫描范围 400~4 000 cm^{-1} ,平均扫描次数 32 次,分辨率 4 cm^{-1} 。使用 Omnic 8.2 软件进行平滑、基线校正和去卷积,分析 1 047 cm^{-1} 与 1 022 cm^{-1} ,以及 995 cm^{-1} 与 1 022 cm^{-1} 处峰的吸光度比值,以量化短程有序结构和双螺旋度。

1.2.5 淀粉体外消化组分测定

按照 Brodtkorb 等^[12]的方法并略作修改。取 5 g 糊化后的淀粉于 50 mL 离心管中,依次加入模拟唾液、唾液 α -淀粉酶(75 U),放入 3 颗玻璃珠模拟口腔咀嚼,于 37 $^\circ\text{C}$ 、250 r/min 下混合孵育 2 min;用 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 至 3.0,随后依次加入模拟胃液、胃蛋白酶(2 000 U),混合孵育 2 h 模拟胃消化阶段;最后调节 pH 至 7.0,依次加入猪胆盐、模拟

肠液、混合酶(含 100 U 胰蛋白酶、200 U 猪胰 α -淀粉酶和 3 000 U 淀粉葡萄糖苷酶),连续孵育 5 h 模拟肠消化阶段,在此阶段的 0、20、120 min 分别取 1 mL 样品转移到离心管,加入 3 mL 无水乙醇混匀以终止所有酶反应。将此乙醇混合物静置 30 min,再以 4 000 r/min 离心 15 min,收集上清液,用二硝基水杨酸比色法进行葡萄糖含量测定,分别按式(3)、式(4)、式(5)计算快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)的含量(ω)。

$$\omega_{\text{RDS}} = \frac{G_{20} - G_0}{S} \times 0.9 \times 100\% \quad (3)$$

$$\omega_{\text{SDS}} = \frac{G_{120} - G_{20}}{S} \times 0.9 \times 100\% \quad (4)$$

$$\omega_{\text{RS}} = 1 - \omega_{\text{RDS}} - \omega_{\text{SDS}} \quad (5)$$

式中: G_0 、 G_{20} 、 G_{120} 分别为孵育 0、20、120 min 后体系中葡萄糖质量,mg;0.9 为葡萄糖转化成淀粉的系数; S 为样品中总淀粉质量,mg。

1.2.6 统计分析

所有实验均重复 3 次以上,单因素方差分析、Duncan 多重分析均由 SPSS 20.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 油茶籽淀粉的提取率及基本成分

经测定,油茶籽淀粉提取率为 64.25%,纯度为 92.66%,粗纤维含量为(2.10 \pm 0.34)%,茶皂素含量为(1.93 \pm 0.21)%,灰分含量为(1.45 \pm 0.12)%,粗蛋白质含量为(0.57 \pm 0.40)%,粗脂肪含量为(0.24 \pm 0.14)%,直链淀粉含量为(16.70 \pm 0.72)%。

2.2 油茶籽淀粉的结构

2.2.1 颗粒表现形态

3 种淀粉放大 3 000 倍的 SEM 图像如图 1 所示。

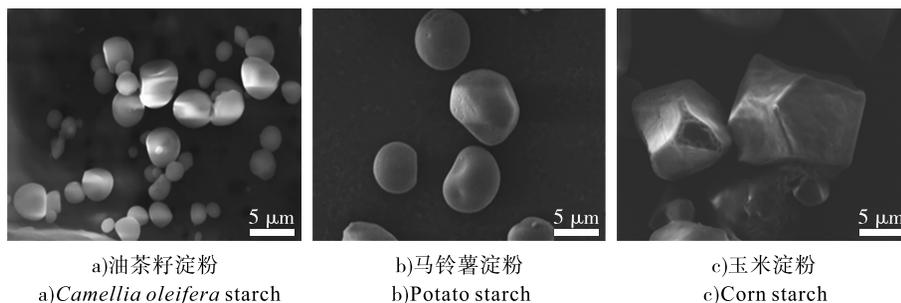


图 1 3 种淀粉的 SEM 图像

Fig. 1 The SEM images of three kinds of starch particles

由图 1 可知,不同于玉米淀粉的不规则多面体形,油茶籽淀粉多为椭球形和圆球形,与马铃薯淀粉的椭球形相似,但其颗粒更小,且有明显的较大、较小的颗粒,部分颗粒出现破损或形态不完整,可能是

在碱液提取过程中,分离与淀粉颗粒紧密结合的蛋白质和脂质时造成的^[13]。

2.2.2 晶体结构

3 种淀粉的 XRD 图谱如图 2 所示。

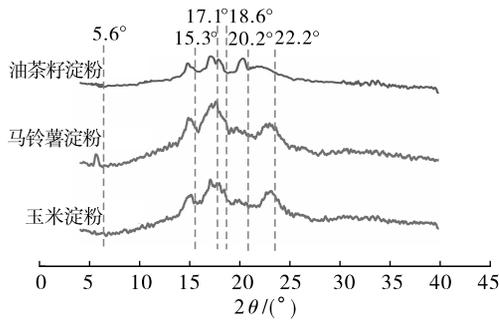


图2 3种淀粉的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of three kinds of starch

根据淀粉的XRD图谱的特征峰,可以将淀粉分为A型、B型、C型以及V型。其中,A型淀粉在 2θ 15°、17°、18°和23°出现特征峰,B型淀粉的特征峰在 2θ 5.6°、17°、22°和24°,C型淀粉的特征峰在 2θ 5.6°、15°、17°、19°、23°和26°,V型淀粉则在 2θ 7°、13°和19.9°出现特征峰^[14-17]。如图2所示:马铃薯淀粉呈现出典型B型衍射图,在 2θ 5.6°、17.1°、22.2°处有明显的衍射峰;玉米淀粉则呈现典型A型衍射图,在 2θ 约15°和22°处有2个强衍射峰,在17°和18°附近的衍射峰为双衍射峰;而油茶籽淀粉为典型A型淀粉,在 2θ 15.3°、17.1°、18.6°和20.2°处出现4个典型的衍射峰,并在20.2°处有更广泛、更强烈的反射,茶叶籽淀粉也有类似现象^[10],而这一现象与直链淀粉和脂肪酸等复合形成的抗性淀粉^[18-20]有关。通过对淀粉衍射峰的拟合计算,发现与玉米淀粉(相对结晶度30.93%)和马铃薯淀粉(相对结晶度29.69%)相比,油茶籽淀粉的相对结晶度较低,为24.80%,推测原因是原料油茶籽粕是通过超临界CO₂萃取获得,由于超临界CO₂萃取产生的高压剪切力切断了淀粉长链,使其支链淀粉结构中有更多的短链和更少的长链^[10],从而导致油茶籽淀粉的长程结构更不稳定、相对结晶度较低。

2.2.3 FT-IR分析

3种淀粉的FT-IR图谱如图3所示。

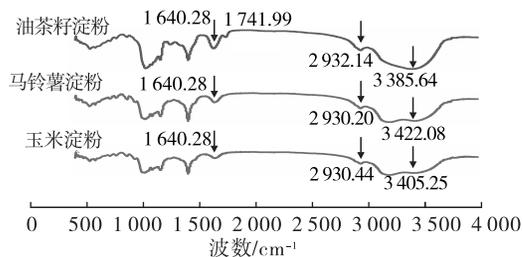


图3 3种淀粉的FT-IR图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of three kinds of starch

由图3可知:3种淀粉的FT-IR谱图相似,均在 3400 cm^{-1} 附近出现一个宽带,与羟基(—OH)拉伸振动相关; 2930 cm^{-1} 附近是多糖亚甲基(—CH₂)

的拉伸振动,反映了淀粉的疏水性和亲脂性^[21]; 1640 cm^{-1} 附近是吸收水的一OH拉伸振动^[19]。与马铃薯淀粉和玉米淀粉相比,油茶籽淀粉 2930 cm^{-1} 处的峰向更高波数(2932.14 cm^{-1})移动,在 1640 cm^{-1} 处表现出更大的吸光度($p < 0.05$),表明油茶籽淀粉的亲水作用更强。特别的是,油茶籽淀粉在 $1500\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 表现出更尖锐的峰和更大的吸光度,在 1741.99 cm^{-1} 处出现了特征峰,通常淀粉与脂质复合形成的抗性淀粉会在 1740 cm^{-1} 附近出现酯基C=O的特征吸收峰^[22],这可能与油茶籽淀粉中残留脂质有关。

1047 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 处峰的吸光度比值(DO)反映淀粉结构的短程有序程度,比值越大,淀粉结构的有序程度越高; 995 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 处峰的吸光度比值(DD)则反映双螺旋的度数^[13, 23],比值越大,双螺旋的度数越大。通过分析3种淀粉的DO和DD,进一步比较不同淀粉的短程有序结构和双螺旋度数,结果如表1所示。

表1 3种淀粉的DO和DD

Table 1 DO and DD of three kinds of starch

淀粉种类	DO	DD
油茶籽淀粉	0.929 ± 0.007^a	0.748 ± 0.014^b
玉米淀粉	0.941 ± 0.006^a	0.998 ± 0.003^a
马铃薯淀粉	0.950 ± 0.008^a	1.000 ± 0.013^a

注:同一列中不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

由表1可知,3种淀粉的DO没有明显差异,说明其短程有序程度相似。玉米淀粉和马铃薯淀粉的DD无显著差异,说明二者的双螺旋度数相近,但均显著大于油茶籽淀粉的,可能是因为油茶籽淀粉中脂肪酸、蛋白质等结合到直链淀粉中的疏水内腔单螺旋中,导致双螺旋度数较低^[24]。

2.3 油茶籽淀粉的消化特性

3种淀粉的体外模拟消化组分如表2所示。

表2 3种淀粉的体外模拟消化组分

Table 2 Simulated digestive components of three

淀粉种类	kinds of starch <i>in vitro</i>			%
	快消化淀粉	慢消化淀粉	抗性淀粉	
油茶籽淀粉	56.95 ± 0.26^b	26.14 ± 0.08^b	16.91 ± 0.34^a	
马铃薯淀粉	53.07 ± 0.22^c	31.16 ± 0.09^a	15.77 ± 0.13^b	
玉米淀粉	57.86 ± 0.35^a	26.14 ± 0.09^b	16.00 ± 0.44^b	

由表2可知,玉米淀粉和油茶籽淀粉中快消化淀粉含量较高,与图1中SEM结果相对应,油茶籽淀粉的颗粒小且表面受损,玉米淀粉不规则的多面体形,均导致二者与淀粉酶接触的面积增大从而更容易被酶解消化。油茶籽淀粉的抗性淀粉含量

(16.91%)显著高于马铃薯淀粉(15.77%)和玉米淀粉(16.00%),玉米、马铃薯中天然存在抗性淀粉,而油茶籽淀粉可能在植株生长过程中已经与游离脂肪酸、蛋白质等复合^[15],从而部分限制了消化酶对淀粉分子链的可及性,这与FT-IR中观察到油茶籽淀粉中存在酯基特征吸收峰和较低双螺旋度结果相一致。由于抗性淀粉一方面在小肠中不被消化吸收,可以作为缓慢释放葡萄糖的载体,控制体内葡萄糖释放,稳定餐后血糖,另一方面发酵产生的短链脂肪酸可增加胰岛素敏感性,改善糖耐量,减少 β 细胞凋亡,进而有效降低血糖指数^[25],因此油茶籽淀粉较高的抗性淀粉含量增加了其作为一种新型膳食纤维的潜力,有助于开发稳定糖尿病患者餐后血糖的功能性食品。

3 结论

采用“碱提+酶解”工艺从油茶籽粕中提取油茶籽淀粉,提取率为64.25%,产品纯度高达92.66%。与玉米淀粉、马铃薯淀粉相比,油茶籽淀粉呈圆球形或椭球形,颗粒更小,油茶籽淀粉为典型的A型淀粉,在 2θ 20.2°处有更广泛、更强烈的反射,长程结构更不稳定,其双螺旋度数低,抗性淀粉含量更高($p < 0.05$)。综上,油茶籽淀粉可作为一种新型抗性淀粉资源得以应用。本研究可为油茶籽淀粉高值化利用提供理论基础,有关油茶籽淀粉的抗性淀粉形成机制及其在食品中的加工应用有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHU G, LIU H, XIE Y, et al. Postharvest processing and storage methods for *Camellia oleifera* seeds[J]. *Food Rev Int*, 2020, 36(4): 319-339.
- [2] 陈永忠. 我国油茶科技进展与未来核心技术[J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(7): 1-22.
- [3] 罗晓岚,朱文鑫. 油茶籽油加工和油茶资源综合利用[J]. *中国油脂*, 2010, 35(9): 13-17.
- [4] 曾斌,唐敏,唐伟,等. 油茶副产物营养价值、生物活性功能及在动物养殖中的应用[J]. *饲料研究*, 2023, 46(23): 158-162.
- [5] 吕静,杨洁茹,李坤,等. 不同提取工艺对油茶籽粕蛋白质结构及功能特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 102-110.
- [6] 华军利,温金梅,钟莹莹,等. 乙醇溶液提取粤北油茶粕中茶皂素工艺优化[J]. *轻工科技*, 2023, 39(6): 14-16.
- [7] 林莉,石庆楠,周敏,等. 脱脂油茶籽粕多糖的提取及抗氧化活性研究[J]. *化学试剂*, 2022, 44(9): 1299-1305.
- [8] 陈佩云,陈晓华,孙伟峰,等. 油茶饼粕多酚提取物对红提致病菌抑菌活性的研究[J]. *现代食品*, 2022, 28(19): 195-199.
- [9] HUANG J, YUAN M A, KONG X, et al. A novel starch: Characterizations of starches separated from tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Ktze) seed[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 139: 1085-1091.
- [10] QIAN L, YAO Y, LI C, et al. Pasting, gelatinization, and retrogradation characteristics related to structural properties of tea seed starches[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 117: 106701 [2024-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106701>.
- [11] 黄佳佳. 茶叶籽的油脂组分、淀粉特性及淀粉-油脂复合研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
- [12] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. *Nat Protoc*, 2019, 14(4): 991-1014.
- [13] 高菲,李欣,刘紫薇,等. 4种高粱淀粉理化性质的比较分析[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(1): 71-79.
- [14] BERTOFT E. Understanding starch structure: Recent progress[J]. *Agronomy*, 2017, 7(3): 56-84.
- [15] ZHU F, XIE Q. Structure of Zealand sweet potato starch[J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 188(3): 181-187.
- [16] 柴子淇,徐恩波,郑瑜雪,等. 压热处理对不同晶型淀粉结构及消化特性的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(11): 64-72.
- [17] XU Z, SONG L, MING S, et al. Removal of starch granule associated proteins affects annealing of normal and waxy maize starches[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 131: 107695 [2024-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107695>.
- [18] 孙梦,贾健辉,张煜,等. 大米淀粉-单甘酯复合物的性质和结构研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 53-59.
- [19] 白芸. 不同种类及脱支处理对淀粉与脂质相互作用的影响研究[D]. 西安:陕西科技大学, 2019.
- [20] 刘健,文莉,张晓祥,等. 糯小麦淀粉结构特征和理化品质研究[J]. *核农学报*, 2023, 37(10): 2019-2027.
- [21] WANG S, HU X, WANG Z, et al. Preparation and characterization of highly lipophilic modified potato starch by ultrasound and freeze-thaw treatments[J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 64: 105054 [2024-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105054>.
- [22] 江佳妮,向贵元,邓佳宜,等. 脂肪酸链长对高直链玉米淀粉-脂质复合物结构及理化性质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 25-31.
- [23] 代香临,郑启航,胡楠楠,等. 超声辅助酶改性典型晶型淀粉的结构及消化特性[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(1): 78-86.
- [24] CHAO C, HUANG S, YU J, et al. Molecular mechanisms underlying the formation of starch-lipid complexes during simulated food processing: A dynamic structural analysis[J/OL]. *Carbohydr Polym*, 2020, 244: 116464 [2024-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116464>.
- [25] 费洪立,李志江,阮长青,等. 抗性淀粉的生理功能及其在食品中的应用[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 425-432.