大米淀粉-多酚复合物的制备及消化性研究

邓 楠[1]， 杨正香[2]， 刘成梅[1]， 胡秀婷[*1]
（1. 南昌大学 食品学院，江西 南昌 330047；2. 云南叙达实业有限公司，云南 临沧 677600）

摘要： 多酚可与淀粉发生相互作用，从而影响淀粉的消化性。为探究淀粉与多酚相互作用对淀粉消化性的影响，作者以金雀异黄酮、槲皮素、柚皮苷、没食子酸、阿魏酸和咖啡酸等6种多酚以及大米淀粉为原料制备淀粉-多酚复合物，并测定复合物的消化性。大米淀粉-多酚复合物的X射线衍射图在13.0°、20.0°出现衍射峰，表明大米淀粉与上述6种多酚均形成了V型包合物。差示扫描量热分析表明，复合物在104~113 ℃出现吸热峰，进一步证明淀粉-多酚V型包合物的形成。淀粉-多酚复合物为球形颗粒结构、颗粒松散聚集。大米淀粉-金雀异黄酮复合物、大米淀粉-槲皮素复合物、大米淀粉-柚皮苷复合物、大米淀粉-没食子酸复合物、大米淀粉-阿魏酸复合物和大米淀粉-咖啡酸复合物中多酚浓度分别为5.59、1.72、5.40、5.57、2.77、6.52 mmol/g，这表明咖啡酸是最易与淀粉形成复合物的多酚。然而，6种大米淀粉-多酚复合物中抗性淀粉质量分数约为32%，无显著性差异。上述结果表明，淀粉-多酚复合物的抗性不仅仅取决于复合物中多酚的含量。

关键词： 淀粉；多酚；V型复合物；消化性
中图分类号：TQ 920. 62 **文章编号：**1673-1689(2022)11-0057-07 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.11.007

Preparation and Digestibility of Rice Starch-Polyphenol Complex

Deng Nan[1]， *YANG Zhengxiang*[2]， *LIU Chengmei*[1]， *HU Xiuting*[*1]
(1. School of Food Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330096, China; 2. Yunnan Xuda Industrial Co., Ltd,. Lincang 677600, China)

Abstract: Polyphenol molecules can interact with starch molecules and this reaction can affect the digestibility of starch. In order to investigate the effect of interaction between starch molecules and polyphenol molecules on the starch digestibility, six polyphenols including genistein, quercetin, naringin, gallic acid, ferulic acid, and caffeic acid, and rice starch were used to prepare the starch-polyphenol complexes in this study, and the digestibility of the complexes was determined. The X-ray diffraction patterns of rice starch-polyphenol complexes showed diffraction peaks at 13.0° and 20.0°, which indicated that rice starch formed V-type complexes with the six polyphenols mentioned above. Differential scanning calorimetry analysis showed that the complexes exhibited an endothermic peak at 104~113 ℃, which further confirmed the formation of V-type starch-polyphenol inclusion complexes. The starch-polyphenol complex was spherical particles which were loosely aggregated. The molar contents of polyphenols in the complexes formed by rice starch and genistein,

收稿日期： 2022-03-14
基金项目： 国家自然科学基金项目(31972026)。
* **通信作者：** 胡秀婷(1987—)，女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事淀粉资源开发与利用方面的研究。E-mail：xthu@ncu.edu.cn

quercetin, naringin, gallic acid, ferulic acid, and caffeic acid were 5.59, 1.72, 5.40, 5.57, 2.77, and 6.52 mmol/g starch, which indicated that caffeic acid had the strongest ability to form complex with starch. However, the content of resistant starch in each complex was about 32% and insignificant difference was observed. The above results indicated that the resistance of starch-polyphenol complexes was not only dependent on the polyphenols content in complexes.
Keywords: starch, polyphenols, V-type complex, digestibility

淀粉是最重要的膳食碳水化合物之一,为人体提供 40%~60%的能量[1]。研究表明,大米淀粉易被消化吸收,会引起人体餐后血糖水平的急剧上升,长期食用可能增加肥胖、高血糖、Ⅱ型糖尿病等代谢综合症的发生概率[2]。因此,降低大米淀粉的消化率对人体健康具有重要意义。在食品加工过程中,添加多酚可有效改变淀粉的消化率和血糖指数[3-4]。多酚是一种以苯酚为骨架,以苯环的多羟基取代作为特征的化合物,包括酚酸和黄酮类化合物。多酚是植物的次生代谢产物,广泛分布于植物性食物中,是一类重要的天然抗氧化剂,具有多种生物活性[5]。大量研究表明,人体长期食用富含酚类化合物的植物性食物可降低各种非传染性慢性疾病的风险,例如心血管和神经退行性疾病、某些癌症、II 型糖尿病和骨质疏松症[4]。此外,多酚可以抑制淀粉酶的活性,从而延缓淀粉的消化,降低血糖水平[6-7]。

近年来,淀粉与多酚的相互作用引起了人们的广泛关注。大多数含有酚羟基的多酚可通过氢键、疏水作用等与淀粉分子发生非共价相互作用,从而产生 2 种类型的复合物,即 V 型包合物和非包合物复合物[8-10]。淀粉-多酚 V 型包合物是指多酚分子部分包封在淀粉的内部疏水螺旋中,如 4-O-棕榈酰绿原酸能够进入直链淀粉的螺旋内腔,与直链淀粉形成 V 型复合物[11],这种复合物与淀粉-脂质复合物结构类似。在淀粉-多酚非包合复合物中,多酚则不在淀粉螺旋空腔中,而是通过羟基、羰基等基团与淀粉相互作用形成分子聚集体,这种复合物亦不同程度地影响淀粉的糊化、流变及消化等特性[12]。淀粉-多酚复合物的类型与淀粉的种类、多酚的种类、浓度及制备方法等密切相关。目前,关于多酚与淀粉相互作用的研究主要集中在多酚对淀粉理化特性的影响方面[13]。然而,哪些多酚可与淀粉形成 V 型复合物尚不明确。因此,采用日常膳食中常见的 6 种多酚,包括金雀异黄酮、槲皮素、没食子酸、柚皮苷、阿魏酸、咖啡酸与大米淀粉复合,探究大米淀粉-多酚复合物的消化性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大米淀粉:金农生物科技有限公司;金雀异黄酮、槲皮素、柚皮苷、阿魏酸、没食子酸、咖啡酸、二甲基亚砜、碳酸钠、乙酸钠、乙酸(分析纯):阿拉丁公司;无水乙醇(分析纯):西陇科学股份有限公司;福林酚(分析纯):北京索莱宝科技有限公司;猪胰 α-淀粉酶(16 U/mg):美国 Sigma 公司;淀粉葡萄糖苷酶 (260 U/mL):美国 Sigma 公司;*D*-葡萄糖(GOPOD 格式)检测试剂:Megazyme。

1.2 仪器与设备

数显恒温磁力搅拌器(HJ-6A):金坛市医疗仪器厂;数显恒温磁力搅拌水浴锅:常州诺基仪器有限公司;分散机:德国 IKA 公司;电子天平(FA1104):上海舜宇恒平科学仪器有限公司;离心机(TGL-20B):上海安亭科学仪器厂;差示扫描量热(DSC7000X):日本 HITACHI 公司;X 射线衍射仪(Bede D1 HR):英国 Bede Scientific 公司;环境扫描电子显微镜(Quanta-200):美国 FEI 公司;多功能酶标仪(SpectraMax M2):美谷分子仪器(上海)有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 大米淀粉-多酚复合物的制备 一般地,淀粉复合物的制备过程如下:将淀粉和客体分子溶解在溶剂中,如二甲亚砜(Dimethyl sulfoxide,DMSO)、碱液(KOH 或 NaOH 溶液)、高温醇溶液或高温水,然后将混合物加水,酸化或冷却从而得到淀粉-多酚复合物沉淀[10]。因此,根据所用溶剂,制备淀粉复合物的方法可分为 DMSO 法、碱法、醇法和高温水法。显然,高温水法成本低、无须使用有毒有害试剂,更适合用于食品工业。因此,作者参照 Wang 等人[14]的方法,采用高温水法制备淀粉-多酚复合物。称取 5.0 g 大米淀粉分散在 100 mL 蒸馏水中,混合

均匀之后沸水浴 30 min 使其完全糊化。称取 0.5 g 多酚溶于 2 mL 乙醇,加入糊化的淀粉中,用分散机于 17 000 r/min 分散 8 min,加入 100 mL 无水乙醇沉淀,抽滤,除去液体,沉淀用无水乙醇洗涤去除未复合的多酚,50 ℃下干燥 24 h,即得大米淀粉-多酚复合物。

1.3.2 X 射线衍射(X Ray Diffraction,XRD)分析 采用 X 射线衍射在 40 kV 和 40 mA 条件下分析大米淀粉和大米淀粉-多酚复合物的晶体结构,光谱扫描衍射角(2θ)范围从 5°到 35°,利用 Origin 软件对数据进行分析。

1.3.3 差示扫描量热(Differential scanning calorimeter,DSC)分析 将样品(2~4 mg)置于铝坩埚中,然后加入去离子水,得到样品与水的质量体积比为 1:3。样品密封后,在室温下平衡 12 h 之后进行分析。使用铟校准仪器后用空坩埚作为空白参照。样品以 10 ℃/min 的速度从 30 ℃加热到 130 ℃。从 DSC 的糊化曲线中确定糊化峰值温度,本研究采用糊化峰值温度表征吸热峰温度。

1.3.4 扫描电镜(Scanning electron microscopy,SEM)分析 将少量的大米淀粉以及大米淀粉-多酚复合物粉末样品粘附在贴有导电胶的铜台上,并在真空蒸发器中喷涂金薄膜(10 nm)。通过扫描电子显微镜观察样品,加速电压为 5 kV,观察样品放大倍数为 2 000 倍。

1.3.5 大米淀粉-多酚复合物中多酚含量的测定 将 100 mg(干基)的大米淀粉-多酚复合物溶解在 5 mL 二甲基亚砜中,然后以 4 000 g 离心 10 min。吸取 0.5 mL 溶液与 1.5 mL 去离子水混合,向其中加入 1 mL 福林酚试剂并混合均匀,反应 10 min。向溶液中加入 1 mL 的质量分数 8%碳酸钠溶液,混合并在室温下于黑暗中保持 3 h,760 nm 处检测溶液的吸光度。

1.3.6 体外消化性的测定 采用体外模拟消化法测定大米淀粉-多酚复合物的消化性。将胰 α-淀粉酶(0.03 g,16 U/mg)加入到 10 mL 乙酸钠缓冲液(0.02 mol/L,pH 5.5)中,磁力搅拌 30 min,之后于 15 000 g 离心 5 min,上清液中加入 200 μL 淀粉葡萄糖苷酶(260 U/mL),涡旋混匀,得到 α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶的混酶液。于每个样品(200 mg,干基)中加入 20 mL 乙酸钠缓冲液(0.02 mol/L,pH 5.5),然后在 37 ℃下平衡 10 min,再加入 1 mL α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶的混酶。在消化期间以特定间隔取出溶液(0.2 mL)至无水乙醇(0.8 mL),混合使酶失活并以 4 000 g 离心 10 min 获得上清液。使用 GOPOD 试剂盒在 510 nm 处测量吸光度,并计算葡萄糖质量,每个样品测定 3 次,取平均值。通过测量计算获得快速消化淀粉(Rapidly Digestible Starch,RDS),缓慢消化的淀粉(Slowly Digestible Starch,SDS)和抗性淀粉(Resistant Starch,RS)的值。计算公式如下:

$$RDS(\%)=\frac{(G_{20}-G_0)\times 0.9}{TS}\times 100\%$$

$$SDS(\%)=\frac{(G_{120}-G_{20})\times 0.9}{TS}\times 100\%$$

$$RS(\%)=(1-RDS-SDS)\times 100\%$$

式中:G_0 为淀粉水解 0 min 时的葡萄糖质量,mg;G_{20} 为淀粉水解 20 min 时的葡萄糖质量,mg;G_{120} 为淀粉水解 120 min 时的葡萄糖质量,mg;TS 为总淀粉质量,mg。

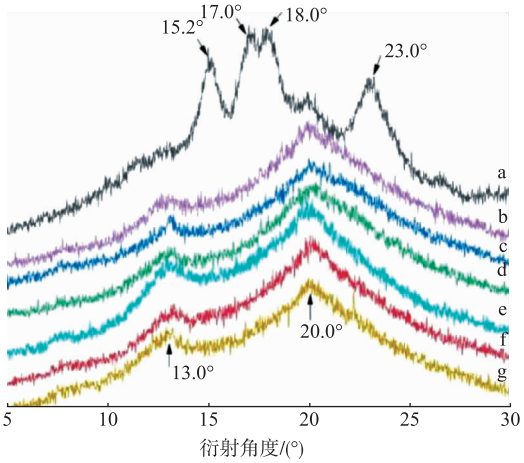
1.3.7 实验数据处理与统计分析 实验重复 3 次,利用 IBM SPSS Statistics 25 和 Excel 软件进行数据处理和统计分析,利用 Origin 2018 和 Prism 软件进行图形绘制,数据以平均值±标准差的方式表示。

2 结果与分析

2.1 XRD 分析

淀粉分子在淀粉颗粒中往往呈现出独特的构象和聚集方式[1]。当存在脂类等疏水小分子时,会诱导淀粉形成 V 型单螺旋结构,脂类等疏水小分子部分或全部嵌入淀粉单螺旋的疏水空腔中,形成淀粉-客体分子包合物[15]。这种包合物结构可以通过 XRD 鉴定,为 V 型结晶,并在 7.0°、13.0°和 20.0°处出现衍射峰[16]。因此,XRD 可用于鉴定淀粉包合物的形成。与淀粉-脂质包合物相似,淀粉-多酚包合物也呈现出 V 型结晶结构。例如,玉米淀粉-大豆异黄酮 V 型包合物在 7.05°、13.09°和 19.80°处存在衍射峰[14]。如图 1 所示,大米淀粉在 15.2°、17.0°、18.0°、23.0°处出现特征衍射峰,表明大米淀粉的晶体类型为典型的 A 型晶体。在本研究的条件下,淀粉-多酚混合体系均在 13.0°和 20.0°处出现明显的衍射峰,表明淀粉与多酚之间形成了 V 型晶体,即本研究中的多酚分子可部分进入淀粉螺旋空腔,从而与淀粉形成了包合物。Amoako 和 Awika 认为原花青素的 B

环可进入直链淀粉的螺旋空腔从而形成 V 型包合物[17]。由此推测,大米淀粉的螺旋空腔可包封金雀异黄酮、槲皮素、柚皮苷的 B 环或没食子酸、阿魏酸、咖啡酸的酚环从而形成 V 型包合物。此外,不同淀粉-多酚复合物形成衍射峰的强度不同,这可能与多酚结构不同有关。不同多酚羟基含量不同,这可能导致与淀粉络合形成的淀粉-多酚复合物数量不同。



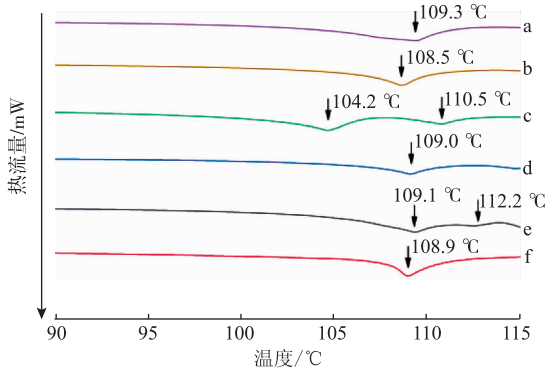
a:大米淀粉;b:大米淀粉-金雀异黄酮复合物;c:大米淀粉-槲皮素复合物;d:大米淀粉-柚皮苷复合物;e:大米淀粉-没食子酸复合物;f:大米淀粉-阿魏酸复合物;g:大米淀粉-咖啡酸复合物。

图 1 大米淀粉-多酚复合物的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD spectra of rice starch-polyphenol complexes

2.2 DSC 分析

在加热过程中,包合物吸收热量发生解离,在其 DSC 图谱中会出现吸热峰[18]。因此,DSC 分析也可证明淀粉-多酚包合物的形成。根据 DSC 分析,淀粉-脂质复合物具有 2 种不同的多晶型复合物,包括无定形形式(I 型)和结晶形式(II 型)[19-20]。I 型复合物由单一复合物的随机排列形成,其特点是熔点低(T_m<100 ℃)。II 型复合物由单一复合物的有序组织形成,其特征是熔点高(T_m>100 ℃)。根据温度的高低,II 型复合物进一步分为 IIa 型和 IIb 型[21]。例如,研究发现糊化淀粉与没食子酸十二烷基酯络合后会出现两个吸热峰,第一个吸热峰(峰 I)在 86.96~114.11 ℃出现,第二个吸热峰(峰 II)在 109.27~122.59 ℃出现,这表明形成了 I 型和 II 型淀粉-没食子酸十二烷基酯包合物[22]。DSC 分析发现,直链淀粉-原花青素复合物在 120 ℃左右有一个解离峰,证明该复合物为包合物[17]。在另一项研究中,高直链玉米淀粉与十二烷基、十六烷基和十八烷基没食子酸酯的复合物在 80~110 ℃有一个吸热峰,这也证实了包合物的形成[23]。因此,作者对淀粉-多酚复合物进行 DSC 分析。如图 2 所示,大米淀粉-金雀异黄酮复合物吸热峰温度为 109.3 ℃,大米淀粉-槲皮素复合物的吸热峰温度为 108.5 ℃,大米淀粉-柚皮苷复合物有 2 个吸热峰,其吸热峰温度分别为 104.2 ℃和 110.5 ℃,大米淀粉-没食子酸复合物在 109.0 ℃显示出吸热峰温度,大米淀粉-阿魏酸复合物也有 2 个吸热峰,吸热峰温度分别为 109.1 ℃和 112.2 ℃,大米淀粉-咖啡酸复合物的吸热峰温度为 108.9 ℃。上述结果进一步证明大米淀粉和 6 种多酚之间形成了复合物,结果与 XRD 一致。此外,大米淀粉-阿魏酸复合物和大米淀粉-柚皮苷复合物均出现了 2 个吸热峰,这可能是淀粉与阿魏酸、柚皮苷形成了 IIa 型和 IIb 型结晶结构的复合物。



a:大米淀粉-金雀异黄酮复合物;b:大米淀粉-槲皮素复合物;c:大米淀粉-柚皮苷复合物;d:大米淀粉-没食子酸复合物;e:大米淀粉-阿魏酸复合物;f:大米淀粉-咖啡酸复合物。

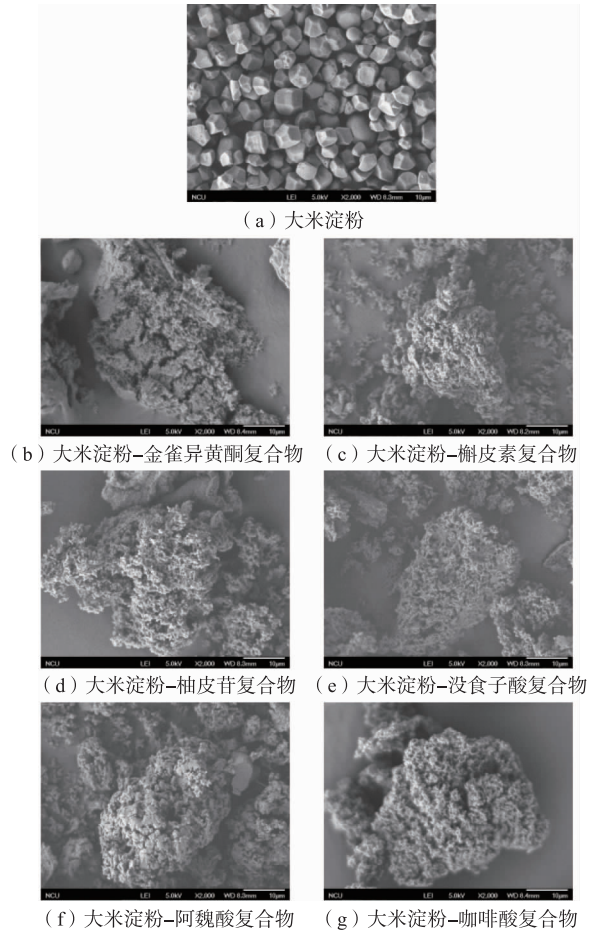
图 2 大米淀粉-多酚复合物的 DSC 图谱

Fig. 2 DSC spectra of rice starch-polyphenol complexes

2.3 SEM 分析

图 3 为大米淀粉和大米淀粉-多酚复合物的微观结构。大米淀粉呈规则的多面体形态,结构完整且棱角分明,尺寸范围为 3~8 μm,见图 3(a)。当与多酚复合时,大米淀粉发生了糊化,因此,淀粉-多酚复合物中均不存在天然大米淀粉颗粒,见图 3(b)~(g)。具体而言,淀粉-多酚复合物为球状颗粒,颗粒为纳米级,但松散聚集。Chin 等人通过无水乙醇共沉淀法制备的淀粉纳米颗粒与本研究的形态相似,同时也出现颗粒团聚的现象[24]。在另一项研究中,Huang 等人通过聚乙二醇沉淀得到的淀粉结晶其 SEM 形貌为聚集的球状颗粒[25]。由此可见,通过

共沉淀法制备大米淀粉–多酚复合物与非溶剂沉淀法制备淀粉纳米颗粒的机理类似，利用多酚与淀粉形成包合物亦可能用于制备淀粉纳米颗粒。



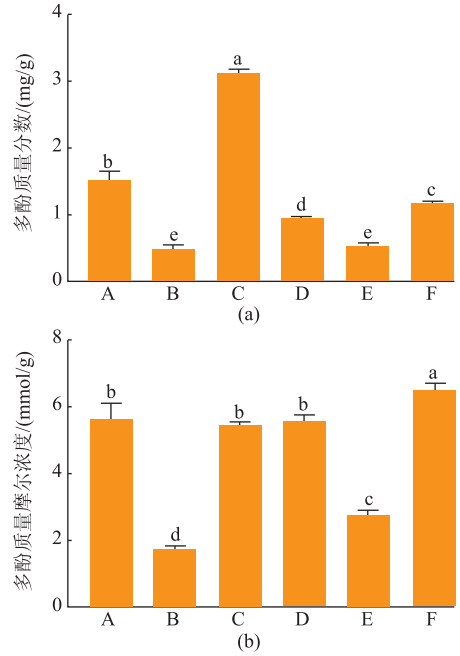
（a）大米淀粉　（b）大米淀粉–金雀异黄酮复合物　（c）大米淀粉–槲皮素复合物　（d）大米淀粉–柚皮苷复合物　（e）大米淀粉–没食子酸复合物　（f）大米淀粉–阿魏酸复合物　（g）大米淀粉–咖啡酸复合物

图 3　大米淀粉–多酚复合物的微观形貌

Fig. 3　Microtopography of rice starch–polyphenol complexes

2.4　大米淀粉–多酚复合物中多酚含量

如图 4 所示，大米淀粉–金雀异黄酮复合物、大米淀粉–槲皮素复合物、大米淀粉–柚皮苷复合物、大米淀粉–没食子酸复合物、大米淀粉–阿魏酸复合物和大米淀粉–咖啡酸复合物中的多酚质量分数分别为 1.51、0.52、3.13、0.95、0.54、1.17 mg/g。由于这 6 种多酚相对分子质量不一样，因此，进一步比较淀粉–多酚复合物中多酚的质量摩尔浓度。大米淀粉–金雀异黄酮复合物、大米淀粉–槲皮素复合物、大米淀粉–柚皮苷复合物、大米淀粉–没食子酸复合物、大米淀粉–阿魏酸复合物和大米淀粉–咖啡酸复合物中多酚质量摩尔浓度分别为 5.59、1.72、5.40、5.57、2.77、6.52 mmol/g。由此可见，大米淀粉–咖啡酸复合物中多酚的质量摩尔浓度最高，大米淀粉–金雀异黄酮复合物、大米淀粉–柚皮苷复合物和大米淀粉–没食子酸复合物中多酚质量摩尔浓度无显著性差异，而大米淀粉–槲皮素复合物中的多酚质量摩尔浓度最低。这表明多酚的结构是影响其与淀粉复合程度的关键因素。虽然多酚广泛存在于植物性食物中，但天然大米淀粉中的多酚含量极低。研究发现每克天然大米淀粉最多含 0.11 mg 多酚[26]。由此可见，通过外加多酚与淀粉相互作用，可增加大米淀粉中多酚的含量，此外，淀粉–多酚包合物的形成还可提高多酚的稳定性。



A：大米淀粉–金雀异黄酮复合物；B：大米淀粉–槲皮素复合物；C：大米淀粉–柚皮苷复合物；D：大米淀粉–没食子酸复合物；E：大米淀粉–阿魏酸复合物；F：大米淀粉–咖啡酸复合物。

图 4　淀粉–多酚复合物的多酚质量分数及质量摩尔浓度

Fig. 4　Polyphenol content of starch–polyphenol complexes

2.5　体外消化性

从营养学的角度来看，食物中的淀粉分为快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉[27]。RDS 是小肠中能快速消化吸收的部分，它会立即增加血糖指数。SDS 可以在小肠中缓慢地完全消化，有助于血糖的长期控制。RS 不能在小肠中被消化，但可以被结肠中的肠道菌群发酵成短链脂肪酸[28]。SDS 和 RS 对人体健康有益，可作为淀粉类食品的功能材料。与天然大米淀粉相比，淀粉–多酚复合物显示出对淀粉消化的抑制作用和对人类的潜在健康益处。如表 1 所

示，天然大米淀粉的 RDS 和 RS 质量分数分别为 40.99%和 26.88%。大米淀粉-金雀异黄酮复合物、大米淀粉-槲皮素复合物、大米淀粉-柚皮苷复合物、大米淀粉-没食子酸复合物、大米淀粉-阿魏酸复合物和大米淀粉-咖啡酸复合物中 RDS 质量分数分别为 32.35%、31.03%、32.55%、34.68%、30.03%、33.00%；它们的 RS 质量分数分别为 32.93%、33.46%、33.01%、33.16%、32.21%、33.57%。6 种淀粉-多酚复合物的 RDS 和 RS 无显著差异，这表明淀粉-多酚复合物的消化性不仅仅取决于复合物中多酚的质量分数。相比于天然大米淀粉，淀粉-多酚复合物的 RDS 质量分数显著降低，抗性淀粉质量分数提高了 5%~7%，这说明大米淀粉与 6 种多酚的相互作用降低了淀粉的消化性。淀粉-多酚包合物的抗性来源于多酚对消化酶的抑制作用和淀粉-多酚包合物中淀粉的单螺旋结构对淀粉酶的抗性[10]。XRD 和 DSC 分析证明，淀粉与 6 种多酚形成了 V 型复合物，因此，推测这种 V 型结构降低了淀粉的消化率。然而，本研究制备的 6 种淀粉-多酚复合物抗性淀粉质量分数均处于较低水平，可能原因是大米淀粉中直链淀粉的质量分数较低，与淀粉络合的多酚质量分数不低。故推测提高直链淀粉质量分数可更好地与多酚复合，从而提高复合物的抗性淀粉质量分数。

表 1　大米淀粉-多酚复合物中 RDS、SDS、RS 质量分数

Table 1　Contents of RDS, SDS and RS in rice starch-polyphenol complexes

样品	RDS 质量分数/%	SDS 质量分数/%	RS 质量分数/%
大米淀粉	40.99±0.20^{a}	32.14±0.57^{c}	26.88±0.76^{a}
大米淀粉-金雀异黄酮复合物	32.35±0.89^{bc}	34.72±1.83^{ab}	32.93±0.94^{b}
大米淀粉-槲皮素复合物	31.03±0.14^{bc}	35.52±0.83^{ab}	33.46±0.97^{b}
大米淀粉-柚皮苷复合物	32.55±0.92^{bc}	34.45±0.84^{ab}	33.01±0.07^{b}
大米淀粉-没食子酸复合物	34.68±1.38^{b}	32.17±0.60^{c}	33.16±0.48^{b}
大米淀粉-阿魏酸复合物	30.03±0.77^{c}	37.76±0.11^{a}	32.21±0.66^{b}
大米淀粉-咖啡酸复合物	33.00±0.43^{bc}	33.44±0.61^{ab}	33.57±1.03^{b}

3 结　语

XRD 和 DSC 分析表明，以金雀异黄酮、槲皮素、柚皮苷、没食子酸、阿魏酸、咖啡酸共 6 种多酚和大米淀粉为原料，通过高温水法成功制备了大米淀粉-多酚复合物，该复合物为 V 型包合物，其中大米淀粉-咖啡酸复合物中多酚质量分数最高，这表明咖啡酸最易与淀粉复合形成 V 型包合物。淀粉-多酚复合物为球形颗粒结构，松散聚集。体外消化实验表明，大米淀粉与多酚复合降低了淀粉中消化淀粉的质量分数，提高了抗性淀粉的质量分数，但 6 种淀粉-多酚复合物的 RS 值无显著性差异，这与复合物中多酚质量分数结果不一致。上述实验表明，大米淀粉与 6 种多酚的相互作用形成的 V 型结构降低了淀粉的消化性，且复合物的抗性不仅仅取决于多酚含量。显然，提高直链淀粉含量可促进淀粉和多酚的相互作用，因此可通过对淀粉脱支等方式促进淀粉与多酚的相互作用，从而进一步提高淀粉-多酚复合物的抗性。此外，抗性淀粉在大肠中可被肠道菌群代谢而具有益生元活性，因此，未来可重点研究高抗性淀粉-多酚复合物的制备及其酵解过程。

参考文献：

[1] 陈龙. 油炸过程中淀粉结构变化与吸油特性研究[D]. 无锡：江南大学，2019.

[2] BRAND-MILLER J，DICKINSON S，BARCLAY A，et al. The glycemic index and cardiovascular disease risk[J]. **Curr Atheroscler Rep**，2007，9(6)：479-485.

[3] CHI C，LI X，ZHANG Y，et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. **Food Hydrocolloids**，2018，84：473-480.

[4] ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound[J]. **Trends in Food Science & Technology**，2015，43(2)：129-143.

[5] VELDERRAIN-RODRIGUEZ G R，PALAFOX-CARLOS H，WALL-MEDRANO A，et al. Phenolic compounds：their journey after intake[J]. **Food & Function**，2014，5(2)：189-197.

[6] SUN L,MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level:a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2020,60(4):541-555.
[7] GIUBERTI G,ROCCHETTI G,LUCINI L. Interactions between phenolic compounds,amylolytic enzymes and starch:an updated overview[J]. **Current Opinion in Food Science**,2020,31:102-113.
[8] BORDENAVE N,HAMAKER B R,FERRUZZI M G. Nature and consequences of non-covalent interactions between flavonoids and macronutrients in foods[J]. **Food & Function**,2014,5(1):18-34.
[9] XU T,LI X,JI S,et al. Starch modification with phenolics:methods,physicochemical property alteration,and mechanisms of glycaemic control[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2021,111:12-26.
[10] DENG N,DENG Z,TANG C,et al. Formation,structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex:a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2021,112:667-675.
[11] LORENTZ C,PENCREAC'H G,SOULTANI-VIGNERON S,et al. Coupling lipophilization and amylose complexation to encapsulate chlorogenic acid[J]. **Carbohydrate Polymers**,2012,90(1):152-158.
[12] LI M,PERNELL C,FERRUZZI M G. Complexation with phenolic acids affect rheological properties and digestibility of potato starch and maize amylopectin[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,77:843-852.
[13] HAN X,ZHANG M,ZHANG R,et al. Physicochemical interactions between rice starch and different polyphenols and structural characterization of their complexes[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2020,125:109227.
[14] WANG S,WU T,CUI W,et al. Structure and in vitro digestibility on complex of corn starch with soy isoflavone[J]. **Food Science & Nutrition**,2020,8(11):6061-6068.
[15] BULEON A,COLONNA P,PLANCHOT V,et al. Starch granules:structure and biosynthesis[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,1998,23(2):85-112.
[16] LESMES U,COHEN S H,SHENER Y,et al. Effects of long chain fatty acid unsaturation on the structure and controlled release properties of amylose complexes[J]. **Food Hydrocolloids**,2009,23(3):667-675.
[17] AMOAKO D B,AWIKA J M. Resistant starch formation through intrahelical V-complexes between polymeric proanthocyanidins and amylose[J]. **Food Chemistry**,2019,285:326-333.
[18] BILIADERIS C G,PAGE C M,SLADE L,et al. Thermal-behavior of amylose-lipid complexes[J]. **Carbohydrate Polymers**,1985,5(5):367-389.
[19] PUTSEYS J A,LAMBERTS L,DELCOUR J A. Amylose-inclusion complexes:formation,identity and physico-chemical properties[J]. **Journal of Cereal Science**,2010,51(3):238-247.
[20] LUO S,ZENG Z,MEI Y,et al. Improving ordered arrangement of the short-chain amylose-lipid complex by narrowing molecular weight distribution of short-chain amylose[J]. **Carbohydrate Polymers**,2020,240:116359.
[21] KRISHNAN V,MONDAL D,THOMAS B,et al. Starch-lipid interaction alters the molecular structure and ultimate starch bioavailability:A comprehensive review[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2021,182:626-638.
[22] CHI C,LI X,FENG T,et al. Improvement in nutritional attributes of rice starch with dodecyl gallate complexation:a molecular dynamic simulation and *in vitro* study[J]. **Journal of Agricultural Food Chemistry**,2018,66(35):9282-9290.
[23] ZHANG Y,GLADDEN I,GUO J,et al. Enzymatic digestion of amylose and high amylose maize starch inclusion complexes with alkyl gallates[J]. **Food Hydrocolloids**,2020,108:106009.
[24] CHIN S F,AZMAN A,PANG S C. Size controlled synthesis of starch nanoparticles by a microemulsion method[J]. **Journal of Nanomaterials**,2014,2014:1-7.
[25] HUANG Z,ZENG Z,GAO Y,et al. Crystallization of short-chain amylose:effect of the precipitant[J]. **Starch - Stärke**,2019,71(9-10):1900007.
[26] CHI C,LI X,ZHANG Y,et al. Modulating the in vitro digestibility and predicted glycemic index of rice starch gels by complexation with gallic acid[J]. **Food Hydrocolloids**,2019,89:821-828.
[27] ENGLYST H N,KINGMAN S M,CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. **European Journal of Clinical Nutrition**,1992,46(2):S33-50.
[28] LIU G,GU Z,HONG Y,et al. Structure,functionality and applications of debranched starch:a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2017,63:70-79.