施晓丹, 张晶, 王妍, 等. 海门香芋淀粉和王桥花果芋淀粉的理化性质与体外消化特性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 115−121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040136

SHI Xiaodan, ZHANG Jing, WANG Yan, et al. Physicochemical Properties and *in Vitro* Digestive Property of Haimen Taro Starch and Wangqiao Fruit Taro Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 115−121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040136

· 研究与探讨 ·

海门香芋淀粉和王桥花果芋淀粉的理化性质与体外消化特性研究

施晓丹[1], 张　晶[1], 王　妍[1], 袁　涛[1], 张　童[2], 尹红梅[1,*]

（1.江西师范大学药学院, 天然与仿生药物研究江西省重点实验室, 江西南昌 330022;
2.分宜县源盛农业开发中心, 江西新余 338000）

摘　要: 本文以两种特色植物来源的淀粉即海门香芋淀粉（AAS）和王桥花果芋淀粉（CSS）为原料，以商业化红薯淀粉（SPS）为对照，对比分析三种淀粉的理化性质和体外消化特性。结果显示：三种淀粉纯度均比较高，SPS 的直链淀粉含量（53.4%）远高于 AAS（36.2%）和 CSS（26.3%）。红外光谱分析表明，AAS 和 SPS 的短程结构有序度指标 $R_{1044/1022}$ 值分别为 0.91 和 0.92，明显高于 CSS（0.79）。X 射线扫描结果显示，AAS 是典型的 A 型淀粉，而 SPS 和 CSS 是 C_A 型淀粉。扫描电镜图显示，AAS 和 CSS 呈现球形和不规则的多面体等多种形状，颗粒直径分别为 6.1±1.9 μm 和 3.1±1.2 μm。链长分布分析发现，AAS 的直链淀粉分子聚合度明显小于 CSS 和 SPS。支链部分，CSS 的 A 链和 B1 链相对更多，而 SPS 的 B2 和 B3 链最多。理化性质方面，AAS 和 CSS 溶解度、润胀度和热稳定性均低于 SPS。体外消化特性分析表明糊化前 AAS 约含 22% 快消化淀粉（RDS），最容易被消化。糊化后，SPS（约含 30% RDS）更能抵抗消化酶的作用，AAS 与 CSS 的抗消化能力接近（均含约 40% RDS）。因此，AAS 是一种颗粒均匀、直径大小适中且易消化的 A 型淀粉，而 CSS 是一种颗粒较小，结构有序程度稍低，淀粉糊不透明但更能抵抗消化的 C_A 型淀粉。研究结果可为两种新资源淀粉的开发应用提供参考。

关键词: 新资源食品, 淀粉, 分子结构, 体外消化, 糊化性质, 流变性质

中图分类号: TS231　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0115−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040136

本文网刊:

Physicochemical Properties and *in Vitro* Digestive Property of Haimen Taro Starch and Wangqiao Fruit Taro Starch

SHI Xiaodan[1], ZHANG Jing[1], WANG Yan[1], YUAN Tao[1], ZHANG Tong[2], YIN Hongmei[1,*]

（1.Jiangxi Province Key Laboratory of Natural and Biomimetic Drugs Research, College of Pharmacy, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
2.Fenyi YuanSheng Agricultural Research Center, Xinyu 338000, China）

Abstract: In this paper, the starches from two distinctive plants, namely, the starch from Haimen taro (AAS) and the starch from Wangqiao fruit taro (CSS), were used as raw materials. With commercial sweet potato starch (SPS) as control, the physicochemical properties and *in vitro* digestion characteristics were comparatively analyzed. Results showed that the purity of the three starches was relatively high. The amylose content of SPS (53.4%) was much higher than those of AAS (36.2%) and CSS (26.3%). Infrared spectroscopy analysis indicated that the values of short-range structural order index ($R_{1044/1022}$) of AAS and SPS were 0.91 and 0.92, respectively, which were significantly higher than that of CSS (0.79). X-ray diffraction results demonstrated that AAS was a typical A-type starch, while SPS and CSS were C_A-type starches.

收稿日期: 2025−04−14

基金项目: 江西省自然科学基金项目（20242BAB20325, 20242BAB20326）; 福建省农产品质量安全重点实验室开放基金（APQSKF202204）。

作者简介: 施晓丹（1990−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物化学, E-mail: xdshi0906@jxnu.edu.cn。

*** 通信作者:** 尹红梅（1988−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养, E-mail: yinhongmei556@126.com。

Scanning electron microscopy images revealed that AAS and CSS presented various shapes including spherical and irregular polyhedrons, with particle diameters of 6.1±1.9 μm and 3.1±1.2 μm respectively. Chain length distribution analysis revealed that the amylose molecular degree of polymerization of AAS was significantly lower than that of CSS and SPS. In the branched part, CSS had relatively more A chains and B1 chains, while SPS had the most B2 and B3 chains. In terms of physicochemical properties, the solubility, swelling power, and thermal stability of AAS and CSS starch gels were all lower than those of SPS. *In vitro* digestion characteristic analysis showed that before gelatinization, AAS contained approximately 22% rapidly digestible starch (RDS) and was the easiest to be digested. After gelatinization, SPS (containing approximately 30% RDS) was more resistant to the action of digestive enzymes, while the resistance to digestion of AAS and CSS was similar (both containing approximately 40% RDS). Therefore, AAS was an A-type starch with uniform particles at moderate particle size, and easy digestibility, while CSS was a C_A-type starch with smaller particles, slightly lower structural order, opaque starch paste, but better resistance to digestion. The research results can provide a reference for the development and application of these two new resource starches.

Key words: new resource food; starch; molecular structure; *in vitro* digestion; gelatinizing property; rheological property

天然淀粉主要分布在植物的根、茎、果实和种子中,是一类重要能量营养素,也是食品、化学、采矿和制药等工业中重要原辅料。然而,传统植物来源的淀粉结构相对固定,各方面性能存在局限,往往不能完全满足实际应用需求。此外,目前已开发的淀粉种类有限,产量增长困难,难以满足人口增长的需要[1−2]。因此,迫切需要开发新资源淀粉。例如,近年来我国研究人员对香蕉淀粉的结构、物理改性和功能特性进行了研究[3−4],还制备了香蕉淀粉纳米颗粒并发现其破坏肠道屏障完整性的分子机制[5]。猕猴桃[6]、菠萝蜜[7]、莲子[8]等其他新型来源的淀粉也受到关注。

海门香芋(*Apios americana* Medikus)是豆科土圞儿属多年生植物,产于江苏南通一带海门、启东等地,为稀有蔬菜[9]。王桥花果芋(*Colocasia esculenta* (L.) Schott)是天南星科芋属植物,为江西省抚州市东乡区特产[10]。两者均为全国农产品地理标志产品,属于富含淀粉但尚未被充分开发利用的新淀粉资源。

结构是天然淀粉发挥各种功能的基础,也是理性设计与人工合成新型淀粉的重要依据。根据尺度的大小,淀粉的微观结构依次分为颗粒结构(>1000 nm)、生长环结构(100~500 nm)、晶体结构(10~100 nm)、糖链构象(3~10 nm)和糖链结构(0.1~1 nm)[11]。课题组前期从海门香芋和王桥花果芋两种植物块茎中分离获得了淀粉样品(分别命名为 AAS 和 CSS),但其结构信息和理化性质还不清楚。为掌握其加工适应性,本文主要以商业红薯淀粉(Sweet potato starch, SPS)为对照,初步分析两种淀粉的结构、理化性质和体外消化特性。研究结果可为两者的营养品质、工业应用、结构改性以及天然淀粉构效关系的阐释提供更多基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

海门香芋　江苏南通;王桥花果芋　江西抚州;红薯淀粉(SPS)　福建八闽食品有限公司;葡聚糖分子量标准品(纯度≥95%)[DXT350(342 Da)、DXT3K(3650 Da)、DXT21K(2000 Da)、DXT130K(131400 Da)、DXT600K(606200 Da)、DXT820K(821700 Da)、DXT3800K(3800000 Da)]　美国聚合物标准公司;猪胰腺 α-淀粉酶(50 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(70 U/mg)、异淀粉酶(1400 U)、溴化锂(LiBr)、无水醋酸钠　西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;马铃薯直链淀粉标准品　上海麦克林生化技术有限公司;总淀粉测定试剂盒　Solarbio 生命科学公司;其他试剂为国产分析纯。

AVANCE Ⅲ 500 全数字化核磁共振波谱仪　瑞士 Bruker 公司;Nova NanoSEM 230 场发射扫描电子显微镜　捷克 FEI CZECH REPUBLIC S.R.O. 公司;Xpert3 X-射线多晶衍射仪　美国 CEM 公司;Nicolet is50 傅里叶变换红外光谱仪、高效液相色谱系统 U3000　美国赛默飞世尔科技有限公司;Invia Reflex 激光显微拉曼光谱仪　英国雷尼绍公司;DSC214 差示扫描量热仪　德国耐驰仪器制造有限公司;MCR302 旋转流变仪　奥地利安东帕有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　两种淀粉的制备　在前期预实验优化的基础上制备两种淀粉。具体操作如下:新鲜的海门香芋和王桥花果芋块根洗净去皮,切成小块后立即用清水漂洗。称取适量原料(300~500 g)装入打浆机,按料液比 1.0 g/mL 加入蒸馏水,按果蔬汁模式打成浆液,用 200 目筛过滤。所得滤液在 4 ℃ 静置 24 h,弃去上清,收集下层白色浆状物。用无水乙醇洗涤 2 次,除去醇溶性成分,然后用蒸馏水反复洗涤,直至静置后的上清液澄清,转速为 2800 r/min 条件下离心 10 min,得白色沉淀。40 ℃ 烘干即得海门香芋淀粉(AAS)和王桥花果芋淀粉(CSS),收集备用。

1.2.2　水分含量测定　按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准-食品中水分的测定》的方法测定;总淀粉含量严格按照总淀粉试剂盒中操作规程进行测定。

1.2.3　直链淀粉的含量测定　采用碘比色法测定淀粉中直链淀粉含量[12]。称取 10 mg 淀粉样品装入 2 mL 离心管中,加入 1 mL 95% 乙醇溶液,混匀后置于 80 ℃ 加热 30 min,取出冷却至室温,离心 5 min,

除去醇溶性杂质。向离心的沉淀物中加入 1 mL 石油醚，振荡混匀，按相同条件离心除去脂溶性杂质，向离心所得沉淀中加入 1.0 mL 0.2 mol/L NaOH 溶液提取直链淀粉后置于 90 ℃ 加热 10 min。提取液稀释一定倍数后用乙酸和碘试剂显色，测定吸光度（$OD_{620\ nm}$）。以 0.2 mol/L NaOH 溶液替代样品进行测定作为样品空白。

1.2.4　短程有序结构分析　称取一定量淀粉样品，用压片法制样。采用傅里叶变换红外光谱仪扫描并以纯溴化钾压片进行背景校准。利用 OMNIC 32 软件对数据进行反褶积处理，并计算 3 种淀粉的有序度（degree of order, DO）和双螺旋程度（degree of double helix, DD）[7]。

1.2.5　淀粉晶型测定　采用 X 射线衍射仪测定淀粉结晶类型，衍射角的扫描范围为 3°~50°，步长为 0.01°，扫描速率为 2°/min。根据出峰特点分析淀粉晶型并使用 MDI Jade 6 软件计算相对结晶度（relative crystallinity, RC）[13]。

1.2.6　淀粉颗粒结构观察　采用扫描电子显微镜在 5.00 kV 下对淀粉颗粒结构进行观察，放大倍数为 10000 倍。使用 Nano Measurer 软件（version 1.2）计算淀粉颗粒的直径。

1.2.7　脱支淀粉链长分布测定　称取已纯化淀粉 5 mg，重悬于 0.9 mL 水中，沸水浴 15 min，间断涡旋混匀；加入 0.1 mL 醋酸钠（0.1 mol/L，pH3.5），NaN_3（5 mL，40 mg/mL）和 10 μL 异淀粉酶（1400 U），37 ℃ 水浴 3 h。加入 5 mL 无水乙醇，4000 r/min 离心 10 min。加入 1 mL DMSO/LiBr 溶液，在混匀仪中，350 r/min，80 ℃ 溶解 2 h。

色谱系统采用凝胶排阻色谱柱（Ohpak SB-805 HQ（300×8 mm）和 Ohpak SB-803 HQ（300×8 mm）；柱温 60 ℃；进样量 100 μL；流动相 A（0.5% LiBr，DMSO）；流速 0.3 mL/min；洗脱梯度：等度；洗脱时间：120 min。

1.2.8　润胀度、溶解度和透明度测定　称量 0.2 g 淀粉样品装入 50 mL 离心管中，加入 10 mL 蒸馏水，混匀，95 ℃ 水浴中加热 60 min，然后离心 10 min（转速 3000 r/min）。上清液在 105 ℃ 下干燥至恒重，沉淀直接称重，溶解度和润胀度的计算按照文献 [7] 进行。

淀粉糊透明度测定方法为：首先配制 1%（w/w）的淀粉悬浮液，在 95 ℃ 水浴中加热糊化。测试前向装样试管中重新加水，以补充由于蒸发而损失的水分。然后在 60 min 时将淀粉糊转移到一次性分光光度比色皿中，设置波长为 600 nm，以蒸馏水为对照，使用紫外分光光度计测量透光率[9]。

1.2.9　糊化性质测定　采用差示扫描量热仪（differential scanning calorimeter, DSC）测定淀粉的糊化性质。记录淀粉的起始温度（T_o）、峰值温度（T_p）、终止温度（T_c）和糊化焓（ΔH）。

1.2.10　流变性能　采用流变仪测定两种淀粉的流变学性质，夹具选择直径 50 mm 的平行板，温度为 25 ℃。对于稳态剪切试验，将淀粉分散体在沸水浴中加热 30 min，制备 6%（g/mL）的淀粉糊，测试前将样品平衡约 60 s，剪切速率范围为 0.01~1000 s^{-1}。在动态振荡模式下，以 10 rad/s 的恒定频率在 0.01%~100% 进行应变扫描测量，以确定线性黏弹性区域。在线性黏弹区，应变 2%，角频率 0.1~100 rad/s 的条件下进行频率扫描测试，测定损耗模量（G"）、储能模量（G'）和损耗系数（tanδ）。

1.2.11　体外消化特性测定　参考文献 [13−14] 的经典方法，测定原淀粉和糊化淀粉中快速消化淀粉（rapidly digestible starch, RDS）、缓慢消化淀粉（slowly digestible starch, SDS）和抗性淀粉（resistant starch, RS）的含量。具体操作为：称取 0.2 g 三种未糊化淀粉，加入 3 颗玻璃磁珠和 15 mL 0.2 mol/L 的醋酸钠缓冲液（pH5.2），混合均匀后加入 5 mL 含有 α-淀粉酶（300 U/mL）和淀粉葡萄糖苷酶（20 U/mL）的预活化混合酶溶液。将样品置于 37 ℃，200 r/min 的摇床中，分别在 0、20 和 120 min 移取 0.5 mL 水解液，立即加入 0.5 mL 无水乙醇结束酶解，以 3000 r/min 离心 10 min。取上清，用 3,5-二硝基水杨酸（DNS）法测定样品的葡萄糖含量，然后计算 RDS、SDS 和 RS 含量。

糊化后样品制备方法为：称取 0.2 g 三种淀粉，加入 20 mL 蒸馏水制备成 1.0%（w/v）的淀粉悬浮液。室温下磁力搅拌均匀后于沸水浴加热糊化 30 min，取出冷却至室温后进行体外消化实验。

1.3　数据处理

本文数据通过 Excel 软件对实验数据整理归纳，以“平均值±标准偏差”形式呈现；采用 SPSS Statistics 25.0 软件中单因素方差分析（邓肯检验）比较显著性差异，$P<0.05$ 表示存在显著性差异；使用 Origin Pro 8.5 和 GraphPad 8.0 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　水分、总淀粉和直链淀粉含量

AAS、CSS 和 SPS 三种淀粉的总淀粉含量（g/100 g）分别为 98.5±3.8、95.3±5.3 和 90.3±4.5。水分含量（g/100 g）依次为 10.9±0.2、11.6±0.2 和 11.6±0.7，说明三种淀粉均是高纯度淀粉。本研究结果与几种主要根茎类作物淀粉的报道结果接近（总淀粉 78%~96%）[15]。直链淀粉含量是淀粉分子的一个重要参数，对淀粉双螺旋结构和晶体结构的形成和理化性质产生一定影响[16−17]。SPS 的直链淀粉含量（53.4%±0.0%）高于 AAS（36.2%±3.3%）和 CSS（26.3%±1.0%），均高于文献 [15] 报道的根茎类作物淀粉的直链淀粉含量（17%~22%）。

2.2　短程有序性分析

图 1 为三种淀粉的红外光谱图和去卷积图。由

图 1 可以看出, 3405、2928、1150 和 700~900、1000~1100 和 1644 cm^{-1} 存在主要吸收峰, 分别对应糖残基中-OH、C-H、C-O-C 和 C-O 的伸缩振动。图 1(b)是将图 1(a)中 1200~800 cm^{-1} 的原始数据进行傅里叶去卷积处理获得的图谱[18−19]。根据 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1}、995 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的吸收峰比值($R_{1047/1022}$ 和 $R_{995/1022}$)可以比较淀粉分子的短程有序性和双螺旋结构情况。经计算, AAS 和 SPS 的 $R_{1047/1022}$ 值分别为 0.91和 0.92, 明显高于 CSS 的 $R_{1047/1022}$ 值(0.79), 表明 SPS 和 AAS 分子中的短程有序性相对更好。AAS、CSS 和 SPS 的 $R_{995/1022}$ 值依次为 1.31、0.74 和 1.26, 提示 CSS 分子中的双螺旋结构所占比例相对更低。AAS 和 SPS 在一定区域内更高的短程有序性指标可能与其更高含量的直链淀粉有关。

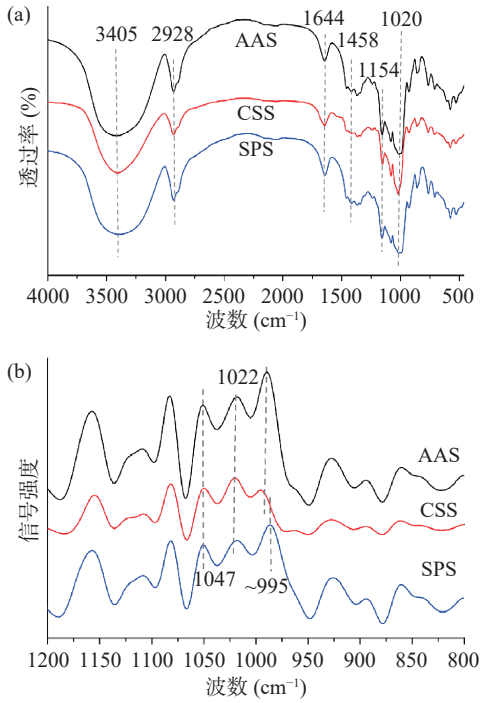


图 1 三种淀粉的红外光谱图(a)和去卷积图谱(b)

Fig.1 FT-IR spectra (a) and deconvolution (b) spectra of three starches

2.3 淀粉晶型分析

图 2 为三种淀粉的 X 射线衍射图。与 SPS 类似, AAS 和 CSS 在 15°、17°和 23°均有明显的衍射峰, 而 SPS 与 CSS 在 18°还有较弱的信号, 表明 AAS 是典型 A 型结晶淀粉, 而 SPS 和 CSS 是 C_A 型结晶淀粉。此外, CSS 在 20°有微弱信号, 表明可能存在直链淀粉-脂质复合物[20]。经计算, AAS、CSS 和 SPS 的相对结晶度依次为 24.7%±0.1%、21.5%±0.3%和 35.8%±0.2%, 三者具有显著性差异(P<0.05)。其中 SPS 和 AAS 较高的相对结晶度可能是因为其较高直链淀粉含量, 对其溶解性和糊化性质等具有一定的影响[21]。

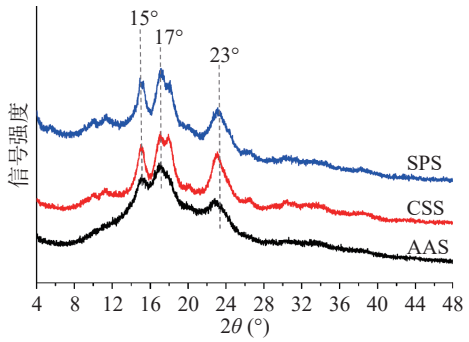


图 2 三种淀粉 X 射线衍射图

Fig.2 X-Ray diffraction patterns of three starches

2.4 颗粒结构特征

Hoover 等[22] 报道, 大部分块茎和块根淀粉颗粒具有椭圆形、圆形、球形、多边形和不规则形状。三种淀粉扫描电子显微镜扫描结果如图 3 所示。AAS 和 CSS 呈现球形、不规则的多面体等多种形状, 颗粒大小不一。AAS 淀粉颗粒表面光滑, 与红薯淀粉类似, 但 CSS 颗粒表面则比较粗糙。经计算, AAS 和 CSS 颗粒大小分别为 6.1±1.9 μm 和 3.1±1.2 μm, 均明显小于 SPS(10.8±4.4 μm)。前期研究表明植物块茎来源的淀粉颗粒大小因原料而异, 颗粒大小一般在 1~110 μm[22], AAS 和 CSS 的粒径均在此范围。

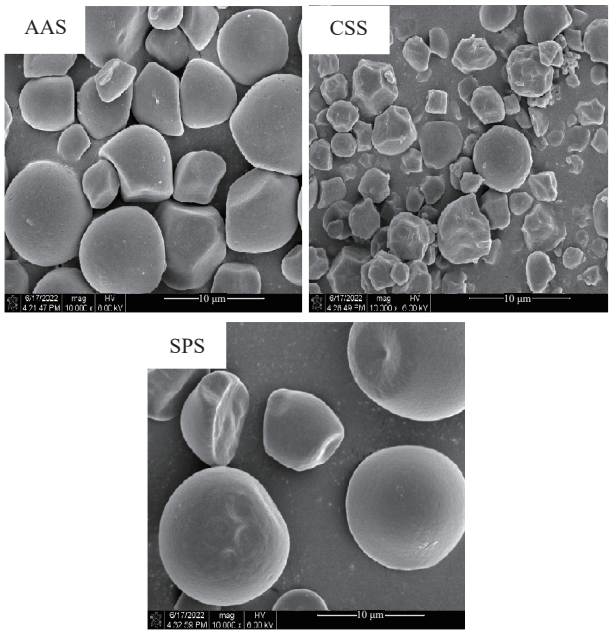


图 3 三种淀粉扫描电子显微图

Fig.3 Scanning electronic microscopic images of three starches

注: 放大倍数为 10000 倍, 标尺 10 μm。

2.5 支链链长分布特征

三种淀粉经过脱支酶处理后获得脱支链淀粉, 经尺寸排阻色谱检测获得分子量分布图。以信号最高的色谱峰为归一化标准, 对数据进行标准化处理获得链长分布图(图 4)。聚合度(DP)小于 100 的淀粉分子链被认为是来源于支链淀粉(Ap)的分支, DP 大于 100 的链则主要来源于直链淀粉(Am)[23]。如图 4

所示，三种淀粉的链长分布图可被粗略地划分为三个区域并标记为 Ap1、Ap2 和 Am 区。Ap1 区主要为链长较短的支链（DP<40），Ap2 区由较长的糖链组成，DP 值为 40~120，Am 区的糖链 DP 值在 200~100000。三种淀粉 AAS、CSS 和 SPS 的 Am 区相对峰面积分别占 26.2%、21.5% 和 31.6%，与直链淀粉含量的大小排序趋势一致。CSS 和 SPS 的 DP_{Am} 值（$1\sim2\times10^5$）远高于 AAS（$\sim1\times10^4$），表明它们的直链淀粉链相对更长。

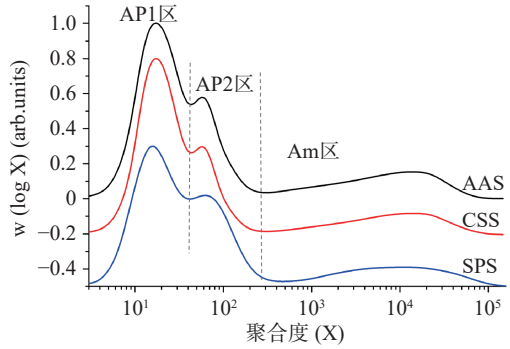


图 4　三种淀粉脱支链后的链长分布图

Fig.4　Chain length distribution of three starches after being de-branched

支链淀粉的长短链比值（h_{Ap2}/h_{Ap1}）定义为 Ap2 峰的最大值与 Ap1 峰最大值的高度比[24]。经计算 CSS 的 h_{Ap2}/h_{Ap1} 值（0.50）低于 SPS（0.65）和 AAS（0.58），表明 CSS 具有相对更多的短链组分。DP_{Ap1} 和 DP_{Ap2} 分别代表 Ap1 和 Ap2 区最大峰值对应的聚合度。SPS 的 DP_{Ap1} 值（15.8）略小于 AAS（17.5）和 CSS（17.5），而其 DP_{Ap2} 值（62.9）略大于两者（57.8）。三者 DP_{Ap1} 和 DP_{Ap2} 值均大于文献报道的玉米淀粉（DP_{Ap1}: 8.88; DP_{Ap2}: 22.16）[25]，但接近马铃薯淀粉[26]。

根据分支情况，淀粉的支链通常可分为四种类型，即 A 链（DP 6~12）、B1 链（DP 13~24）、B2 链（DP 25~36）和 B3 链（DP≥37）[27]，分别对应最外层的无支链部分、只有一个分支的支链、具有两个分支的支链和具有三个或更多分支的支链。在本研究中，三种淀粉 f_A、f_{B1}、f_{B2} 和 f_{B3} 的范围分别在 14%~16%、21%~30%、9%~13% 和 20%~23%（表 1）。木薯淀粉是一种增稠剂、持水剂与黏合剂，能使鱼糜制品和面制品的凝胶特性得到改善，持水性和弹性得以提升[28−29]。天然木薯淀粉中 A、B1、B2 和 B3 链相对比例分别为 33.8%、46.9%、12.8% 和 6.5%[27]。本研究中三种淀粉的 B3 链占比远高于木薯淀粉，具有更高的支化度。

表 1　4 种类型的淀粉链数量占淀粉链总数量的百分比

Table 1　Percentage of the number of four types of starch chains relative to the total number of starch chains

样品名称	f_A(%)	f_{B1}(%)	f_{B2}(%)	f_{B3}(%)
AAS	14.4±0.2^a	25.8±0.3^b	11.5±0.4^b	20.6±0.2^a
CSS	15.0±0.2^b	29.7±0.4^c	12.3±0.4^b	20.3±0.2^a
SPS	15.8±0.1^c	21.8±0.2^a	9.9±0.1^a	22.3±0.1^b

注：A链（DP 6~12）、B1链（DP 13~24）、B2链（DP 25~36）和B3链（37<DP<100）；同列不同字母表示各组间存在显著性差异（P<0.05），表2同。

2.6　润胀度、溶解度和透明度

润胀度和溶解度可以反映淀粉的水化能力。在此过程中，淀粉颗粒的膨胀更有利于消化酶对淀粉内部结构的攻击，从而导致淀粉水解速率的增加。由表 2 可知，AAS 和 CSS 溶解度相对更低（<5%），可能是由于 AAS 和 CSS 相对更高比例的 B1 和 B2 型支链，使得淀粉颗粒更难溶解和膨胀[1]；AAS 和 CSS 的润胀度显著低于 SPS（P<0.05），这可能是因为 SPS 具有更高的直链淀粉含量。

透明度是表征淀粉糊的一个重要指标，取决于颗粒大小、膨胀能力、直链淀粉含量和直链淀粉/支链淀粉的比例[30]。在 1% 质量浓度下 CSS 淀粉糊比较浑浊，而 AAS 和 SPS 的透明度很高。因此，AAS 可应用于果冻、果糕等透明度较高的食品加工，而 CSS 则适合于对透明度要求不高的食品加工。文献报道的马铃薯淀粉糊透明度为 28%，与本文 AAS 和 SPS 结果接近[31]。

2.7　热力学性质

三种淀粉起始温度（T_o）、峰值温度（T_p）、终止温度（T_c）和焓变值（ΔH）如表 2 所示。在加热过程中，当温度升高到 T_o 时，无定形区淀粉分子开始迁移，引发不可逆的分子转变，导致主要位于结晶区域的双螺旋结构发生解离[32]。CSS 的 T_o、T_p 和 T_c 值最高，表现出较高的热稳定性，其次是 SPS，AAS 最易糊化，稳定性最差。对于热转变温度（ΔT，T_C~T_o），SPS、AAS 和 CSS 的 ΔT 值依次为 21.3、27.8 和 14.7 ℃[33]，以 AAS 的热转变范围最大，说明其糊化过程更为缓慢，而 CSS 的糊化虽起始温度较低，但是淀粉颗粒和分子中有序结构的转变很快。两者可应用于不同的

表 2　三种淀粉的溶解度、润胀度、透明度和糊化参数

Table 2　Solubility, swelling power, transparency and gelatinization parameters of three starches

样品	溶解度(%)	润胀度(g/g)	透明度(%)^A	DSC分析^B			
				T_o(℃)	T_P(℃)	T_C(℃)	ΔH(J/g)
AAS	4.9±0.9^a	11.7±1.3^a	24.1±3.7^{bc}	56.7±0.4^a	73.1±0.9^a	84.5±0.3^a	9.7±0.6^a
CSS	4.6±0.9^a	13.5±1.4^a	3.6±0.3^a	77.0±0.3^c	83.3±0.1^c	91.7±0.8^b	14.8±0.1^c
SPS	13.7±0.5^b	22.1±0.5^b	28.1±0.2^c	62.9±0.3^b	76.0±0.1^b	84.2±0.2^a	13.2±0.4^b

注：A：淀粉糊在95 ℃下糊胶化60 min的透过率；B：T_o，起始温度；T_p，峰值温度；T_C，终止温度；ΔH，焓变。

热加工食品。ΔH 值取决于糊化过程中解开和熔化的双螺旋数量，AAS 的 ΔH 值显著低于 SPS 和 CSS（P<0.05），表明其淀粉分子间作用力更弱，双螺旋结构受热更容易被解开，淀粉易被糊化，与其最低的起始糊化温度结果一致。

2.8 流变性能

图 5(a)展示了三种淀粉在质量浓度为 6%(m/v)时，淀粉糊的表观黏度随剪切速率的变化特点。所有样品表观黏度随剪切速率的增加而降低，表现出典型的非牛顿流体性质。图 5(b)为三种糊化淀粉的储能模量(G')、损耗模量(G")和 tanδ 在 0.1~100 rad/s 的变化情况。结果表明，3 种淀粉具有一定的频率依赖性，这可能是由于淀粉糊化中逐渐形成了淀粉分子相互缠结的三维网络结构所致。对于所有糊化淀粉，G'值始终高于 G"值，表现出类似固体的性质，导致典型的弱凝胶行为。tanδ(G"与 G'比值)可以反映样品的类液体或类固体行为。一般地，tanδ 值越低，表示样品更偏向于呈现固体性质[34]。如图 5(b)所示 tanδ 均小于 1.0，表现出较强的类固体行为。AAS 的 tanδ 值最低，胶凝性能最强。

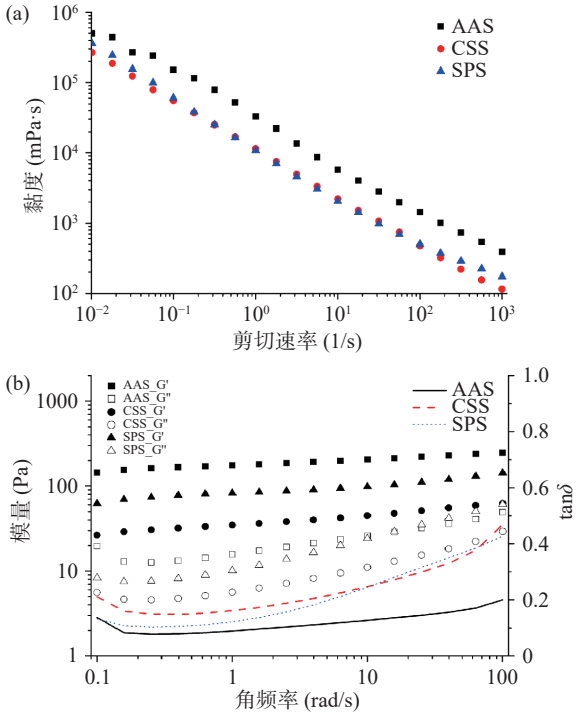


图 5 三种淀粉流变测试结果

Fig.5 Rheological results of three starches

注：(a)黏度曲线；(b)模量随角频率变化曲线。

2.9 体外消化特性分析

淀粉消化是一个复杂的过程，受到淀粉颗粒的形态和大小、片层的厚度、晶体模式和结晶度、链长分布、直链淀粉含量和分支程度等结构因子的影响[1]。在糊化过程中，水和淀粉分子的分子内和分子间氢键重新排列，淀粉颗粒的晶体结构会被破坏，导致淀粉化学和物理性质的变化[35]。糊化前后淀粉的体外消化特性如图 6 所示。糊化前，AAS 的 RDS 含量最高(21.58%)，更容易消化。CSS 和 SPS 的抗性淀粉(RS)含量相对更高(~90%)。糊化后淀粉的 RDS 均明显高于未糊化前，且糊化后 AAS 和 CSS 的 RDS(~40%)明显高于 SPS(~30%)，相比 SPS 更容易消化。这可能与 SPS 更大的淀粉颗粒、更高的相对结晶度和相对更多的长链淀粉分子有关。

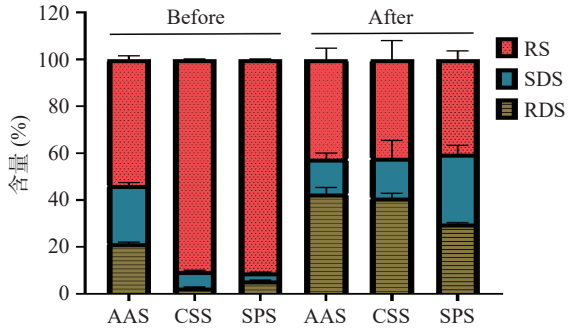


图 6 三种淀粉糊化前后的体外消化特性

Fig.6 *In vitro* digestibility of three starches before and after gelatinization

注：RDS，快速消化淀粉；SDS，慢消化淀粉；RS，抗性淀粉。

3 结论

本文以江苏稀有蔬菜海门香芋和江西特色地理标志农产品王桥花果芋为原料，采用水洗静置沉淀法提取了两种淀粉(AAS 和 CSS)，并分析了其结构信息、理化性质和体外消化特性。与商业化红薯淀粉(SPS)相比，AAS 和 CSS 的淀粉颗粒直径更小，具有相对不规则的颗粒形态。晶型方面，AAS 为 A 型淀粉，CSS 和 SPS 为 C_A 型淀粉。AAS 和 SPS 的短程有序性比 CSS 更高。分子层面上，两种淀粉的直链淀粉含量低于 SPS，经脱支酶处理和 SEC 检测发现 AAS 和 CSS 的支链链长分布模式更为接近，两者中等长度支链(AP2 链)与短支链(AP1 链)的比值高于 SPS。不同类型的几种支链所占比例的结果说明 AAS 和 CSS 的支化度略低于 SPS。两种淀粉的溶解度、润胀度、热稳定性均低于 SPS。在体外模拟体系中，AAS 和 CSS 抵抗消化酶的能力也相对更弱。以上结果表明结构上的差异如淀粉分子的粒径大小、相对结晶度和直链淀粉含量、支链淀粉链长分布等对淀粉的理化性质和消化特性相关，但具体的构效关系需要进一步研究。本研究可为两种新淀粉的加工应用提供指导，也可促进人们对淀粉构效关系的理解。

© 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] ROSTAMABADI H, DEMIRKESEN I, MERT B, et al. Starch digestibility: How single, double, and multiple physicochemical modifications change nutritional attributes of starch?[J]. Food Frontiers, 2024, 5(4): 1410−1444.

[2] 顾正彪, 洪雁, 王旭. 未来淀粉: 淀粉资源的挑战与思考[J].

粮油食品科技，2024，32(2)：1−13. ［GU Zhengbiao, HONG Yan, WANG Xu. Future starch：Challenges and reflections on starch from new sources［J］. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2)：1−13.］
［3］ SUN Ying, XIAO Dao, ZHENG Xiaoyan, et al. Integrative approach to modifying banana starch：The role of physical treatment and polyphenol enrichment on physicochemical and digestive characteristics［J］. Food Research International, 2025, 202：115676.
［4］ WANG Jiashui, LI Yanxia, MA Weihong, et al. Physicochemical changes and *in vitro* digestibility of three banana starches at different maturity stages［J］. Food Chemistry, 2023, 21：101004.
［5］ JIANG Bing, PENG Chenglu, LI Xiaoyang, et al. Banana starch nanoparticles disrupt the integrity of the intestinal barrier by opening tight junctions in mice［J］. Small, 2025, 21(5)：2408298.
［6］ LAN Tian, WANG Jiaqi, LEI Yushan, et al. A new source of starchy flour：Physicochemical and nutritional properties of starchy kiwifruit flour［J］. Food Chemistry, 2024, 435：137627.
［7］ ZHANG Yutong, XU Fei, WANG Qinfei, et al. Effects of moisture content on digestible fragments and molecular structures of high amylose jackfruit starch prepared by improved extrusion cooking technology［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 133：108023.
［8］ CHEN Chuanjie, LI Guantian, ZHU Fan. A novel starch from *Lotus*（*Nelumbo nucifera*）seeds：Composition, structure, properties and modifications［J］. Food Hydrocolloids, 2021, 120：106899.
［9］ 张德纯. 海门香芋［J］. 中国蔬菜，2019(7)：102. ［ZHANG Dechun. Haimen fragrant taro［J］. China Vegetables, 2019(7)：102.］
［10］ 冯晓曦，舒帆. 王桥花果芋 芋香飘万里［J］. 江西农业，2018(17)：48−49. ［FENG Xiaoxi, SHU Fan. Wangqiao Flowering taro fragrance of taro travels thousands of miles［J］. Jiangxi Agriculture, 2018(17)：48−49.］
［11］ GALLANT D J, BOUCHET B, BALDWIN P M. Microscopy of starch：Evidence of a new level of granule organization［J］. Carbohydrate Polymers, 1997, 32(3-4)：177−191.
［12］ SHI Xiaodan, YU Manling, YIN Hongmei, et al. Multiscale structures, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of oat starch complexes co-gelatinized with jicama non-starch polysaccharides［J］. Food Hydrocolloids, 2023, 144：108983.
［13］ HUANG Jingjing, YU Manling, WANG Shaoyun, et al. Effects of jicama（*Pachyrhizus erosus* L.）non-starch polysaccharides with different molecular weights on structural and physicochemical properties of jicama starch［J］. Food Hydrocolloids, 2023, 139：108502.
［14］ 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(Suppl 2)：S33−S50.
［15］ 陆国权，唐忠厚，郑遗凡. 主要根茎类作物淀粉特性研究［J］. 中国食品学报，2006，6(4)：67−71. ［LU Guoquan, TANG Zhonghou, ZHENG Yifan. Studies on the starch characteristics of three root and *Tuber* crops［J］. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(4)：67−71.］
［16］ HU Yanyu, CHEN Xu, CAI Xixi, et al. Effect of starch content and ultrasonic pretreatment on gelling properties of myofibrillar protein from *Lateolabrax japonicus*［J］. Food Frontiers, 2023, 4(3)：1482−1495.
［17］ TONG Chuan, MA Zheng, CHEN Hangjun, et al. Toward an understanding of potato starch structure, function, biosynthesis, and applications［J］. Food Frontiers, 2023, 4(3)：980−1000.
［18］ HAN Xiuying, WEN Huiliang, LUO Yu, et al. Effects of chitosan modification, cross-linking, and oxidation on the structure, thermal stability, and adsorption properties of porous maize starch［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 124：107288.
［19］ ZHEN Yiyuan, WANG Kedu, WANG Jing, et al. Increasing the pH value during thermal processing suppresses the starch digestion of the resulting starch-protein-lipid complexes［J］. Carbohydrate Polymers, 2022, 278：118931.
［20］ LU Hao, TIAN Yaoqi, MA Rongrong. Assessment of order of helical structures of retrograded starch by Raman spectroscopy［J］. Food Hydrocolloids, 2023, 134：108064.
［21］ YANG Fang, DU Qinling, MIAO Ting, et al. Interaction between potato starch and *Tremella fuciformis* polysaccharide［J］. Food Hydrocolloids, 2022, 127：107509.
［22］ HOOVER R, HUGHES T, CHUNG H J, et al. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches：A review［J］. Food Research International, 2010, 43(2)：399−413.
［23］ ZHAO Y T, HENRY R J, GILBERT R G. Testing the linearity assumption for starch structure-property relationships in rices［J］. Frontiers in Nutrition, 2022, 9：916751.
［24］ QIAO Dongling, WANG Zhong, LI Hao, et al. Supramolecular and molecular structures of potato starches and their digestion features［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152：939−947.
［25］ LUO Yu, SHEN Mingyue, LI Enpeng, et al. Effect of *Mesona* chinensis polysaccharide on pasting, rheological and structural properties of corn starches varying in amylose contents［J］. Carbohydrate Polymers, 2020, 230：115713.
［26］ AHMED S, RU W D, HAN H X, et al. Fine molecular structure and its effects on physicochemical properties of starches in potatoes grown in two locations［J］. Food Hydrocolloids, 2019, 97：105172.
［27］ LI Xuxu, YUE Xinran, HUANG Qilin, et al. Effects of wet-media milling on multi-scale structures and *in vitro* digestion of tapioca starch and the structure-digestion relationship［J］. Carbohydrate Polymers, 2022, 284：119176.
［28］ 仪淑敏，梁丰，杨领，等. 木薯淀粉对金线鱼鱼糜 3D 打印效果的影响［J］. 水产学报，2021，45(7)：1111−1120. ［YI Shumin, LIANG Feng, YANG Ling, et al. Effect of cassava starch on 3D printing of *Nemipterus virgatus* surimi［J］. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(7)：1111−1120.］
［29］ 王家胜，刘翀，王婷，等. 天然马铃薯、木薯和玉米淀粉添加对发酵挂面品质的影响［J］. 食品工业科技，2022，43(9)：40−47. ［WANG Jiasheng, LIU Chong, WANG Ting, et al. Effect of native potato, cassava and corn starches supplement on the quality of dried fermented noodles［J］. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9)：40−47.］
［30］ 武云娇，王一飞，魏明智，等. 微波复合酶解改性对小米淀粉结构表征及其理化特性的影响［J］. 中国粮油学报，2023，38(11)：44−51. ［WU Yunjiao, WANG Yifei, WEI Mingzhi, et al. Effect of microwave complex enzymatic digestion on structural and physicochemical properties of millet starch［J］. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(11)：44−51.］
［31］ GAO Haiyan, MENG Kexin, ZENG Jie, et al. Effect of dry heat, microwave and ultrasonic treatments on physicochemical properties of potato starch with or without pectin［J］. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2021, 18(7)：1365−1373.
［32］ WANG Yi, McCLEMENTS D J, LONG Jie, et al. Structural transformation and oil absorption of starches with different crystal types during frying［J］. Food Chemistry, 2022, 390：133115.
［33］ LIN H T, YEH A I, HO T D, et al. Molecular weight, chain length distribution and long-term retrogradation of cassava starch modified by amylomaltase［J］. Food Hydrocolloids, 2023, 134：108027.
［34］ JI Xiaolong, YIN Mingsong, HAO Lirui, et al. Effect of inulin on pasting, thermal, rheological properties and *in vitro* digestibility of pea starch gel［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193：1669−1675.
［35］ SHEN Huishan, YU Jiangtao, BAI Junqing, et al. A new pregelatinized starch preparing by spray drying and electron beam irradiation of oat starch［J］. Food Chemistry, 2023, 398：133938.