

野葛与粉葛淀粉的结构及物化特性比较

卢紫君¹, 蔡芳², 王少华², 何建军², 施建斌², 蔡沙², 隋勇², 熊添², 陈学玲², 范传会², 梅新²

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430064)

(2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 本文对比野葛和粉葛两种葛根淀粉成分、物化特性, 两种淀粉及其各自直链淀粉和支链淀粉结构特性, 结果表明: 野葛、粉葛淀粉的脂肪、粗纤维、灰分含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 淀粉、蛋白质、直链淀粉含量无显著差异 ($p > 0.05$); 野葛、粉葛淀粉平均粒径分别为 26.15 μm 、8.65 μm , 野葛、粉葛淀粉晶型均为 C 型, 野葛、粉葛直链淀粉晶型均为 V 型, 野葛、粉葛支链淀粉均属无定型结构; 野葛淀粉糊透光率低于粉葛淀粉, 而白度却高于粉葛淀粉; 野葛淀粉溶解度与吸水膨胀性高于粉葛, 两者凝沉稳定性变化趋势相同, 差异不明显; 野葛 T_o 、 T_c 分别为 59.06 $^{\circ}\text{C}$ 、75.24 $^{\circ}\text{C}$, 均低于粉葛的 73.24 $^{\circ}\text{C}$ 、85.64 $^{\circ}\text{C}$, 淀粉糊老化处理 3 d、7 d 后, 野葛老化度分别为 18.88%、42.00%, 显著低于粉葛的 63.45%、85.90%; 野葛淀粉凝胶回复率为 18.45%, 显著高于粉葛淀粉的 12.73%, 而野葛淀粉硬度为 10.53 g、粘性为 11.20 g、咀嚼性为 3.14 g 均显著低于粉葛淀粉的 12.55 g、20.71 g 和 3.79 g, 两者弹性等指标无显著差异 ($p > 0.05$)。总之, 野葛与粉葛淀粉结构与物化特性之间存在差异, 本研究结果可为葛根淀粉应用及产品研发提供理论依据。

关键词: 葛根淀粉; 成分; 结构; 物化特性; 直链淀粉; 支链淀粉

文章编号: 1673-9078(2021)08-109-118

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.1098

Comparison of Structures and Physicochemical Properties of *Pueraria*

lobata (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* Starches

LU Zi-jun¹, CAI Fang², WANG Shao-hua², HE Jian-jun², SHI Jian-bin², CAI Sha², SUI Yong², XIONG Tian²,
CHEN Xue-ling², FAN Chuan-hui², MEI Xin²

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430064, China)

(2. Institute of Agro-Product Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430064, China)

Abstract: The compositions and physicochemical properties of the starches of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* were compared in this study. The structural properties of the two types of starch as well as their amylose and amylopectin were also investigated. The fat, fiber, and ash contents of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch differed significantly ($p < 0.05$), while the starch, protein, and amylose contents showed no significant differences ($p > 0.05$). The starches of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* had average particle sizes of 26.15 μm and 8.65 μm , respectively, in the form of C-type crystals, whereas the amylose in both species existed as V-type crystals and the amylopectin crystals were amorphous. The transmittance of the *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi starch paste was lower than that of the *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch, but the whiteness of the former was higher than that of the latter. Additionally, the swelling power and solubility of the former were higher than those of the latter. The retrogradation curves of the *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starches were similar

引文格式:

卢紫君, 蔡芳, 王少华, 等. 野葛与粉葛淀粉的结构及物化特性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 109-118

LU Zi-jun, CAI Fang, WANG Shao-hua, et al. Comparison of structures and physicochemical properties of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi and *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starches [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 109-118

收稿日期: 2020-11-26

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2018ZYD011)

作者简介: 卢紫君 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏

通讯作者: 梅新 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用

with no noticeable differences. The To and Tc values of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi starch were 59.06 °C and 75.24 °C, respectively, which were lower than those of *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch (73.24 °C and 85.64 °C, respectively). After starch paste aging for three and seven days, the aging degrees of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi starch were 18.88% and 42.00%, respectively, which were significantly lower than those of *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch (63.45% and 85.90%, respectively). The gel recovery of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi starch was 18.45%, which was considerably higher than that of *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch (12.73%). In addition, the hardness, adhesiveness, and chewiness of *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi starch were 10.53 g, 11.20 g and 3.14 g, respectively. These values were significantly lower than those of *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch (12.55 g, 20.71 g and 3.79 g, respectively). However, there were no significant differences in other properties such as elasticity ($p>0.05$). Therefore, the starches of the two species had different structures and physicochemical properties. The results of this study can provide a theoretical basis for the application and product development of *Pueraria lobata* var. *thomsonii* starch.

Key words: *Pueraria lobata* starch; composition; structure; physicochemical properties; amylose; amylopectin

葛根是豆科植物葛的根,原产于中国,主要分布于热带和亚热带,野葛在中国除新疆、西藏外的大部分地区均有生长;粉葛是人工种植的葛根,目前已有专用品种及配套栽培技术,主要种植区域分布于两广、两湖和江西等长江及以南地区^[1]。葛根性平,味甘辛,其富含葛根素、异黄酮、大豆苷元等功能性成分,有解肌退热,降低血脂,美容养颜的功效^[2,3],是中国卫生部公布的食药同源植物之一^[4],葛根淀粉是市场上最为常见畅销的葛根加工产品。

天然淀粉为白色粉末状高分子生物聚合物^[5],由直链淀粉、支链淀粉和中间级分组成。淀粉因其来源广泛、安全性高,具有多种功能特性,已作为原辅料广泛用于食品、饲料、药品、化妆品乃至化工行业^[6]。淀粉是野葛、粉葛的主要食用部分,约占葛根鲜重的15~34%。淀粉的结构、直链淀粉含量以及理化特性之间具有相关性,有研究表明^[7]淀粉的分子结构和结晶度会影响淀粉的溶胀、糊化、回生速率以及质地,从而影响食品的加工性能、贮存和口感^[8]。目前在葛根淀粉的主要营养成分以及理化性质方向的研究不断深入^[9,10],品种选育也具备一定的工作基础^[11],但对分子结构以及结构与物化特性间的关系,仍有待进一步研究,因此,分析两种生长状态葛根淀粉的晶体结构和物理特性在实际生产中的应用有良好的指导意义。本研究系统分析了野葛、粉葛两种不同来源葛根淀粉成分、结构及物化特性,并深入比较了野葛、粉葛中直链淀粉和支链淀粉的结构特性,为以葛根淀粉为原料在食品、保健品、药品、化妆品等行业的应用及消费者科学消费提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

1.1.1 材料

粉葛品种为木生葛根;野葛、粉葛淀粉均来自湖北中坪葛业有限公司。

1.1.2 主要试剂

正丁醇、异戊醇、氢氧化钠、无水乙醇、盐酸、硫酸、二甲亚砷等均均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.1.3 主要仪器设备

QJ-08 400 g 多功能粉碎机,上海赵申科技有限公司;722N 可见分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;QUANTA 200 扫描式电子显微镜,FEI 公司;EMPYREAN X 射线衍射仪,荷兰 PANalytical B.V. 公司;VERTEX 70 红外光谱仪,德国 Bruker 公司;Mastersizer 2000 激光粒度仪,英国 Malvern Panalytical 仪器有限公司;Ta.XT 2i/50 质构仪,英国 Stable Micro Sytem 公司;DSC 200 差示扫描量热仪,德国 NETZSCH 公司;CR-400/410 色彩色差计,美能达投资有限公司;湘仪 GL-21M 离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;HHS-21-6 水浴锅,上海百典仪器设备有限公司;FE20 实验室 pH 计,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 基本成分测定

野葛、粉葛淀粉中水分、灰分、蛋白质、脂肪、粗纤维、淀粉、矿物元素及重金属等含量测定分别参照 GB/T 5009.3-2016、GB/T 5009.4-2016、GB/T 5009.5-2016、GB/T 5009.6-2016、GB/T 5009.9-2016、GB 5009.268-2016,直链淀粉采用爱尔兰 Megazyme 直链淀粉/支链淀粉含量检测试剂盒测定。

1.2.2 直链淀粉和支链淀粉的分离与纯化

参考石海信,陈德经等^[12,13]的文献并加以改进。称取 10.0 g 经索氏抽提脱脂的淀粉样品,按料液比 1:15 (g/mL) 与 70%乙醇充分混合处理 30 min 后,

过滤,滤渣用少量无水乙醇润湿分散,后加入 200 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液,混合均匀后沸水浴加热 30 min 至混合液糊化至透明且无结块状,得淀粉糊,淀粉糊冷却至室温后于 4000 r/min 离心 20 min,除去底层杂质。淀粉糊用 2 mol/L HCl 调节 pH 至 6.5~7.5,加入 80 mL 正丁醇和异戊醇混合溶液 ($V:V=3:1$),后置于沸水浴中加热搅拌 10 min 至整个体系透明,冷却至室温,4 °C 冷藏 24 h,后于 4 °C,8000 r/min 下离心 20 min,沉淀物为粗直链淀粉,上清液为粗支链淀粉。

直链淀粉纯化:将粗直链淀粉与 200 mL 正丁醇溶液 ($V_{\text{正丁醇}}:V_{\text{水}}=1:8$) 混合,沸水浴加热至透明,冷却至室温后于 2~4 °C 下放置 24 h,再于 2 °C 下 8000 r/min 离心 20 min,收集沉淀,重复上述步骤 5~8 次后,用无水乙醇洗涤沉淀 3~5 次,沉淀 40 °C 热风干燥,得直链淀粉。

支链淀粉纯化:将粗支链淀粉置于分液漏斗数分钟后,取下层乳胶状液体与 40 mL 正丁醇-异戊醇 ($V_{\text{正丁醇}}:V_{\text{异戊醇}}=1:1$) 溶液充分混合,沸水浴加热,不停搅拌至透明后,混合液冷却至室温,2~4 °C 下放置 48 h 后于 2 °C 下 8000 r/min 离心 20 min,收集上清液,以分液漏斗处理收集下层乳胶状液体,重复上述操作 2~3 次,所得乳胶状液体低温旋蒸浓缩至原体积 1/2,并与 2 倍体积预冷无水乙醇混合,收集沉淀与热的 100 mL 0.5 M NaOH 溶液充分混合后,再加入 2 倍体积的无水乙醇,收集沉淀,无水乙醇洗涤沉淀 3 次,40 °C 热风干燥,得支链淀粉。

1.2.3 淀粉形态学观察

采用扫描电镜观察淀粉显微形态。样品经粘台、喷金等步骤后,在加速电压 15 kV 下进行观察。采用激光粒度仪测定淀粉粒径,野葛、粉葛淀粉以水为分散相,野葛、粉葛直链和支链淀粉以乙醇为分散相,粒径用体积平均粒径 $D[4,3]$ 表示。扫描电镜观察与粒径测定之前,样品均经粉碎,过 200 目筛。

1.2.4 X-射线衍射

取粉末样品适量,置于玻璃凹槽,将表面压平后放置 X 射线衍射仪试样台上,从 5°~45° 范围内扫描,步宽角度为 0.013°,测量衍射图上结晶区和非结晶区,结晶区面积与总面积比 (%) 即为结晶度。

1.2.5 淀粉红外光谱 (FT-IR) 分析

称取 1 mg 淀粉与 100 mg 溴化钾粉末,充分混合后进行压片,采用红外光谱仪于 400~4 000 cm^{-1} 波数范围内扫描。

1.2.6 淀粉及淀粉糊白度的测定

参考 Wang 和 Astuti 等^[14,15]的方法,采用色彩色差计分别测定淀粉,淀粉糊和淀粉凝胶的 L^* 、 a^* 、

b^* 值,并计算白度。淀粉置于玻璃平皿中压平至厚度 50 mm 左右;配置 6% (W/V) 淀粉溶液,于沸水浴中加热糊化 30 min,即得淀粉糊;淀粉糊冷却后于 4 °C 下放置 24 h,得淀粉凝胶。

$$\text{白度}=100-\left[(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

1.2.7 淀粉热力学特性分析

参考 Hung, Lu 和周红英等^[16-18]相关方法分析淀粉热力学特性。称取 3 ± 0.1 mg 淀粉至铝坩埚中,后加入 10 μL 去离子水,加盖密封,于室温下平衡 2 h 后采用差示扫描量热仪分析其热力学特性,空坩埚作为参比。测定参数为:以 10 °C/min 升温速率将坩埚从 30 °C 升温至 120 °C,迅速以 40 °C/min 速率从 120 °C 迅速降至 30 °C 后,再从 30 °C 升温至 100 °C,确保样品糊化完全,氮气流量 20 mL/min。上述糊化后样品于 4 °C 下分别老化处理 3 d、7 d 后,按上述方法再次分别测定其热力学特性^[19]。老化处理后淀粉焓值与未老化处理淀粉焓值比,即为老化度。

1.2.8 淀粉溶解度与膨胀力测定

参考刘婷婷等^[20]相关方法测定淀粉溶解度与膨胀力。取一定量淀粉(记为 m) 配成浓度为 2% (W/V) 的淀粉溶液,并分别置于 60 °C,70 °C,80 °C,90 °C 下水浴搅拌加热 30 min,后于 3000 r/min 离心 20 min,上清液置于称量瓶中 105 °C 烘干至恒重,记为 m_1 ,沉淀干重,记为 m_2 ,溶解度和膨胀力计算公式如下:

$$\text{溶解度}(WSI)=\frac{m_1}{m}\times 100\% \quad (2)$$

$$\text{膨胀力}(SP)=\frac{m_2}{m\times(1-WSI/100)} \quad (3)$$

1.2.9 淀粉透光率测定

参考何海霞等^[21]相关方法,1% (W/V) 葛根淀粉溶液于沸水浴中搅拌加热 20 min,至完全糊化,糊化过程中始终保持淀粉糊体积与原淀粉溶液体积相同,糊化结束后,冷却至室温,以蒸馏水做参比,于 650 nm 下测定淀粉糊透光率。

1.2.10 淀粉凝沉稳定性测定

参考刘婷婷等^[20]相关方法测定淀粉凝沉稳定性。称取一定量淀粉,配成浓度为 1% (W/V) 的淀粉溶液,置于沸水浴中搅拌加热 30 min 至完全糊化,此过程中保持淀粉溶液(糊)体积不变,完全糊化后,将淀粉糊冷却至室温静置,并于 0、6、12、24、48 h 及 6 d 后记录上清液体积及淀粉糊总体积 (mL),淀粉凝沉稳定性 (%) 计算公式如下:

$$\text{凝沉稳定性}/\%=\frac{\text{上清液体积}}{\text{淀粉糊总体积}}\times 100\% \quad (4)$$

表1 葛根淀粉基本成分(干基)(%)

Table 1 Proximate composition of puerarialobata starch (dry matter) (%)

| | 淀粉 | 粗蛋白 | 灰分 | 脂肪 | 粗纤维 | 直链淀粉 |
|----|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 野葛 | 96.00±3.06 ^a | 0.12±0.01 ^b | 0.78±0.01 ^a | 0.26±0.01 ^b | 0.80±0.03 ^a | 25.09±0.45 ^a |
| 粉葛 | 95.85±2.63 ^a | 0.15±0.02 ^a | 0.22±0.00 ^b | 0.37±0.01 ^a | 0.52±0.05 ^a | 25.69±0.71 ^a |

注: 两种葛根淀粉同一指标间字母不同, 表明存在显著差异。

表2 葛根淀粉中矿物质及重金属含量(mg/kg)

Table 2 Composition of minerals and heavy metals in puerarialobata starch (mg/kg)

| | Ca | Fe | Mg | Zn | K | P | Cu | Hg | Pb | Cd | As |
|----|---------|-------|--------|------|--------|---------|------|--------|------|------|------|
| 野葛 | 1308.00 | 65.40 | 110.00 | 6.59 | 37.10 | 220.00 | 0.14 | 0.0032 | 0.30 | 0.04 | 0.03 |
| 粉葛 | 222.00 | 8.86 | 91.40 | 4.36 | 374.00 | 1754.00 | 1.84 | 0.0032 | 0.09 | 0.01 | 0.02 |

1.2.11 淀粉凝胶质构分析

参考刘婷婷等^[20]相关方法测定葛根淀粉凝胶质构。配制 6% (W/V) 的葛根淀粉溶液, 于沸水浴中搅拌加入 30 min 至完全糊化, 淀粉糊冷却至室温后置于 4 °C 下放置 24 h, 采用质构仪测定其质构特性。测定参数: texture profile analysis (TPA) 模式, 探头为 P/0.5, 下压速度 1.0 mm/s, 测试速率 1.0 mm/s, 接触后速度为 2.0 mm/s, 测定高度 6 mm, 停留间隔 5 s, 感应力 5 g, 下压深度为样品高度的 50%。

1.3 数据分析

采用 Excel 和 SPSS 对数据进行处理, Origin 9.1 绘图, 单因素方差分析评价两组间差异显著性 ($p < 0.05$), 结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 葛根淀粉基本成分

由表 1 可知, 野葛淀粉中粗纤维、灰分含量显著高于粉葛淀粉; 而粗蛋白、粗脂肪含量显著低于粉葛淀粉; 野葛淀粉中淀粉含量略高于粉葛淀粉, 两者间无显著差异, 分别为 96.00%、95.85%; 野葛淀粉中直链淀粉含量略低于粉葛淀粉, 两者间亦无显著差异, 分别为 25.09%、25.69% ($p > 0.05$)。葛根淀粉中直链淀粉含量与前人报道结果不同, Hung^[16]研究表明, 大部分葛根淀粉中直链淀粉含量介于 22%~23% 之间, 而 Soni^[22]研究表明葛根淀粉中直链淀粉含量仅为 15.1%, 影响葛根淀粉中直链淀粉含量的因素还有待进一步探讨。

2.2 葛根淀粉矿物质含量

由表 2 可以看出, 野葛淀粉中 Ca、Fe、Mg、Zn 等矿物元素含量高于粉葛淀粉, 分别为 1308.00

mg/kg、65.40 mg/kg、110.00 mg/kg、6.59 mg/kg, 而粉葛淀粉中这几种矿物元素含量分别仅为 222.00 mg/kg、8.86 mg/kg、91.40 mg/kg、4.36 mg/kg; 野葛淀粉中 K 和 P 等矿物元素含量远低于粉葛淀粉, 分别为 37.10 mg/kg、220.00 mg/kg, 而粉葛淀粉中 K 和 P 含量分别高达 374.00 mg/kg、1754.00 mg/kg。野葛淀粉中 Pb、Cd、As 含量高于粉葛淀粉, 分别为 0.30 mg/kg、0.04 mg/kg、0.03 mg/kg, 而粉葛中 Pb、Cd、As 含量分别为 0.09 mg/kg、0.01 mg/kg、0.02 mg/kg; 野葛淀粉中 Cu 含量低于粉葛淀粉, 分别为 0.14 mg/kg、1.84 mg/kg; 野葛、粉葛淀粉中 Hg 含量相近。

葛根对土壤中 Ca、Mg、K 等矿物元素富集能力较强, 对 Fe、Zn、P 等的富集能力较弱, 粉葛在栽培过程中若进行施肥管理, 亦会影响葛根对矿物元素的富集^[23]。野葛生长周期较长一般 3 年以上, 而粉葛生长周期较短一般最多 2 年, 此外, 粉葛栽培过程中会施用一定量 K、P 肥, 生长周期及施肥因素导致了野葛和粉葛矿物元素含量差异。

对比食用淀粉国家标准 (GB 31637-2016), 仅野葛淀粉中 Pb 含量超过限定值 0.2 mg/kg。章丽娟^[24]研究发现, 在葛根生长栽培土壤重金属含量达标的前提下, 葛根中 Pb 含量超标现象较为严重, 这可能与葛根对 Pb 的吸附能力有关。

2.3 淀粉显微形态及粒径

图 1 显示了野葛与粉葛淀粉、直链淀粉、支链淀粉扫描电镜图片。可以看出, 扫描电镜下野葛和粉葛淀粉颗粒外形均不规则, 多数呈现多角菱形, 少量圆球形, 部分表面有凹陷; 野葛与粉葛直链淀粉均呈片状结构, 野葛直链淀粉结构较为致密, 且表面平整性差, 有空隙; 同一放大倍数下, 野葛支链淀粉颗粒尺寸明显大于粉葛, 结构均较为致密, 呈尖锐棱角块状结构。

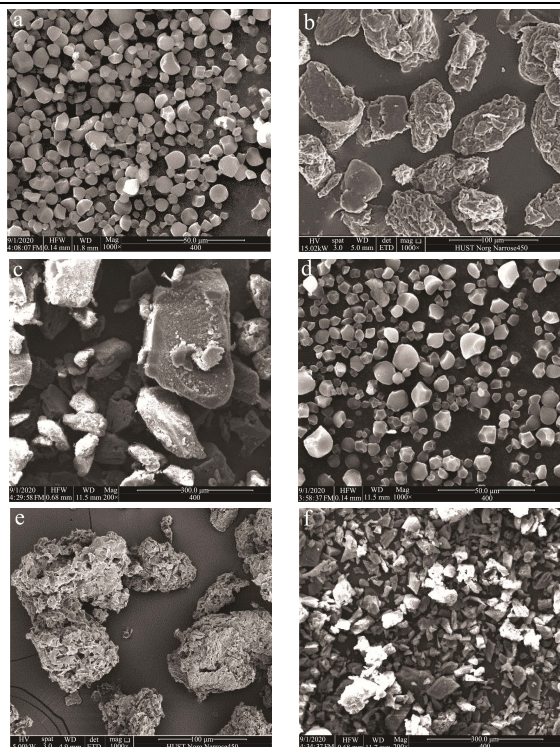


图1 葛根淀粉扫描电镜图

Fig.1 Puerarialobata starch scanning electron microscope

注: a: 野葛淀粉(×1000); b: 野葛直链淀粉(×1000);

c: 野葛支链淀粉(×200); d: 粉葛淀粉(×1000); e: 粉葛直链淀粉(×1000); f: 粉葛支链淀粉(×200)。

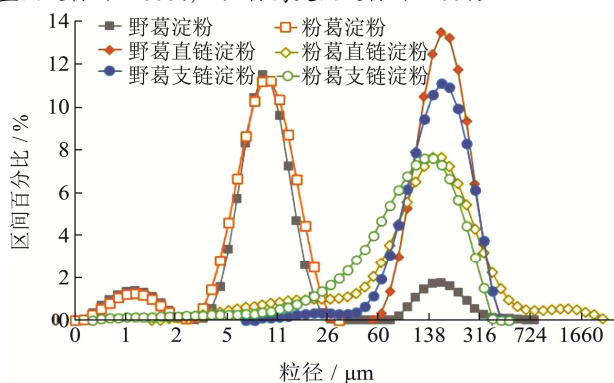


图2 葛根淀粉粒径分布情况

Fig.2 Puerarialobata starch particle size distribution

野葛、粉葛淀粉粒径分别为 26.15 μm、8.65 μm; 直链淀粉和支链淀粉提取后 40 °C 热风干燥, 经粉碎机粉碎, 过 200 目筛, 测定野葛、粉葛直链淀粉粒径分别为 161.46 μm、172.61 μm; 野葛、粉葛支链淀粉粒径分别为 149.83 μm、104.44 μm。野葛与粉葛淀粉、直链淀粉、支链淀粉粒径分布情况如图 2 所示, 从图中可以看出, 野葛、粉葛淀粉粒径分布范围分别为 0.48~630.96 μm、0.48~26.30 μm, 野葛淀粉粒径分布有 3 个峰, 分别位于 1.10 μm、8.71 μm 和 158.49 μm; 粉葛淀粉粒径分布仅有 2 个峰, 分别位于 1.10 μm、10.00 μm, 可能是淀粉颗粒在水相中发生聚集, 导致

野葛淀粉中有 11.77% 粒径大于 80 μm。野葛、粉葛直链淀粉粒径分布范围分别为 60.26~416.89 μm、1.66~2187.76 μm; 野葛、粉葛支链淀粉粒径分布范围分别为 7.59~416.89 μm、0.63~363.08 μm。

2.4 X-射线衍射

XRD 曲线可以根据衍射峰的位置和个数将天然淀粉的结晶类型分为 A 型, B 型和 C 型; 此外, 淀粉和脂质的复合物为 E 型, 淀粉经过改性处理还可能出现 V 型晶体结构。从图 3 可以看出, 野葛、粉葛淀粉在 2θ 为 5.73°、15.3°、17.3°、18.3°、23.5° 处均有衍射峰, 两种葛根淀粉衍射峰位置相同, 但强度存在差异, 其中 15.3°、17.3°、18.3° 处的衍射峰强度较大, 5.7° 处衍射峰强度较弱, 在 23.5° 处有明显单峰, 结晶型均为 C 型, 相对结晶度分别为 19.99% 和 24.30%。葛根淀粉晶型及结晶度与葛根生长环境有关^[4], Hung 和 Morita 研究比较了来自于越南、韩国、日本的葛根淀粉晶型结构, 发现其分别为 A 型、B 型和 C 型^[16]。葛根淀粉结构与葛根品种、生长栽培条件相关性还有待于进一步研究。

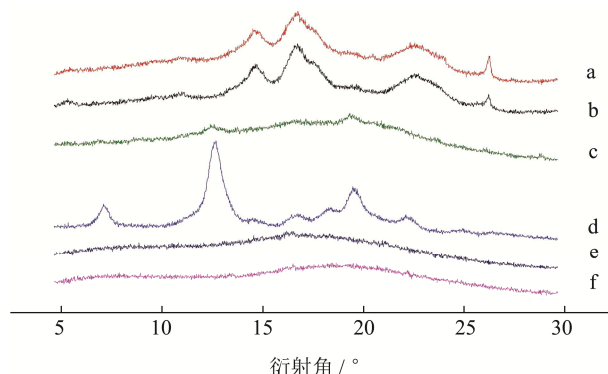


图3 葛根淀粉 X-射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction pattern of puerarialobata starch

注: a-野葛淀粉; b-粉葛淀粉; c-野葛直链淀粉; d-粉葛直链淀粉; e-野葛支链淀粉; f-粉葛支链淀粉。图 4 同。

野葛、粉葛直链淀粉在 2θ 为 7°, 13° 和 20° 处均出现衍射峰, 为典型 V 型晶体结构, 相比粉葛, 野葛直链淀粉衍射峰低且宽, 野葛、粉葛直链淀粉结晶度分别为 12.23%、33.12%。野葛、粉葛支链淀粉衍射峰均呈弥散状, 无特征峰, 属无定型结构, Tribess 等^[25] 研究发现, 香蕉支链淀粉晶型亦属无定型结构, 这是由于非晶结构只存在短程有序而长程无序造成的。

2.5 红外光谱分析

从图 4 可以看出, 野葛与粉葛淀粉之间、野葛与粉葛直链淀粉之间、野葛与粉葛支链淀粉之间均具有相似特征峰, 只是各波数下红外吸收强弱不同。1160、

1080、1020 和 930 cm^{-1} 处红外吸收峰, 代表淀粉中碳氧拉伸振动^[26]; 1636~1670 cm^{-1} 吸收峰对应于酰胺基团中 C=O 振动, 葛根淀粉和直链、支链淀粉在这一区域均有较强红外吸收; 1344 cm^{-1} 处红外吸收峰对应于 C-O-C 基团, 葛根支链淀粉在此处无吸收峰, 但在代表 β -C-H 基团的 1454 cm^{-1} 处有较强红外吸收。2930 cm^{-1} 红外吸收峰对应于 CH_2 中的 C-H 不对称拉伸振动^[27], 3300~3400 cm^{-1} 处较宽红外吸收峰对应于 O-H 拉伸, 葛根直链淀粉和支链淀粉在这一波段下红外吸收呈现变宽、强度减弱且向更大波数偏移的变化趋势^[28]。

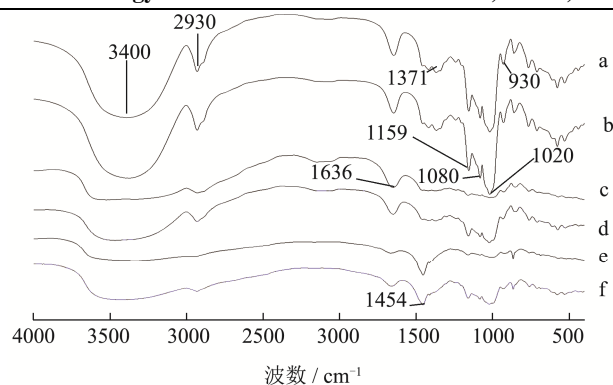


图4 葛根淀粉红外光谱图

Fig.4 The FT-IR measurement of puerarialobata starch

表3 葛根淀粉、淀粉糊、淀粉凝胶白度

Table 3 The color of pueraria powder starch, paste and gel

| 项目 | | L* | a* | b* | 白度/% |
|------|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 淀粉 | 野葛 | 90.72±0.10 ^b | 0.28±0.04 ^a | 6.37±0.11 ^a | 88.74±0.13 ^b |
| | 粉葛 | 96.12±0.40 ^a | 0.09±0.01 ^b | 3.45±0.21 ^b | 94.88±0.43 ^a |
| 淀粉糊 | 野葛 | 33.77±3.09 ^a | -0.46±0.07 ^a | 5.19±0.66 ^a | 33.56±3.06 ^a |
| | 粉葛 | 31.28±1.48 ^a | -0.50±0.07 ^a | 1.36±0.27 ^b | 31.26±1.48 ^a |
| 淀粉凝胶 | 野葛 | 44.81±1.00 ^b | -1.00±0.05 ^a | 1.62±0.13 ^a | 44.78±1.07 ^b |
| | 粉葛 | 51.04±2.08 ^a | -1.13±0.07 ^b | -4.97±0.07 ^b | 50.78±2.07 ^a |

注: 不同来源同一形态淀粉样品间字母不同, 表明存在显著差异。图4同。

表4 葛根淀粉热力学特性及老化特性

Fig.4 Thermodynamic properties and aging characteristics of puerarialobata starch

| 项目 | | $\Delta H/(\text{J/g})$ | $T_0/^\circ\text{C}$ | $T_p/^\circ\text{C}$ | $T_g/^\circ\text{C}$ | 老化度/% |
|--------|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 淀粉 | 野葛 | 11.76±0.44 ^a | 59.06±0.19 ^b | 65.10±0.30 ^b | 75.24±1.17 ^b | / |
| | 粉葛 | 5.39±0.33 ^b | 73.24±0.34 ^a | 80.22±0.22 ^a | 85.64±0.53 ^a | / |
| 老化 3 d | 野葛 | 2.22±0.25 ^b | 49.33±0.55 ^a | 56.50±1.23 ^b | 59.06±0.19 ^b | 18.88±1.88 ^b |
| | 粉葛 | 3.42±0.06 ^a | 48.97±0.64 ^b | 58.87±0.25 ^a | 66.67±0.58 ^a | 63.45±1.29 ^a |
| 老化 7 d | 野葛 | 4.94±0.12 ^a | 48.55±0.49 ^b | 58.60±0.14 ^b | 65.85±0.07 ^a | 42.00±0.91 ^b |
| | 粉葛 | 4.63±0.05 ^b | 51.33±0.55 ^a | 59.87±0.40 ^a | 67.00±0.62 ^a | 85.90±1.15 ^a |

2.6 葛根淀粉白度

白度是淀粉及淀粉产品最直观的物理性质, 从表3中可以看出, 野葛淀粉白度显著 ($p < 0.05$) 低于粉葛, 分别为 88.74%、94.88%; 野葛淀粉糊白度高于粉葛, 但无显著性差异, 分别为 33.56%、31.26%; 野葛淀粉凝胶白度显著低于粉葛, 分别为 44.78%、50.78%。此外, 野葛淀粉、淀粉凝胶的 L* 值显著 ($p < 0.05$) 低于粉葛, 而 a*、b* 值显著高于粉葛; 野葛淀粉糊 L*、a* 值高于粉葛, 但无显著性差异, 而 b* 值显著高于粉葛。葛根淀粉糊化到形成凝胶过程中, L* 值与白度呈先下降后上升变化趋势, 而 a*、b* 值均呈下降变化趋势。L* 值与样品颗粒大小有关, 颗粒越小, 表面积越大, 对光反射能力越强^[29], 葛根淀粉糊化过程中淀粉颗粒溶胀增大, 比表面积减

小, 对光反射能力减弱, 颜色变暗, 淀粉糊老化形成淀粉凝胶时, 淀粉分子重新缔合排列, 形成有序结构, 导致其亮度有所提升。

2.7 热力学特性及老化特性

淀粉的糊化稳定反映了淀粉晶体的特性, 淀粉热特性的差异与淀粉颗粒大小、颗粒的无定形区和结晶区的分子结构、链长分布、直链淀粉含量等有关, 与结晶度无关^[30], 但天然淀粉中支链淀粉含量和分子结构与结晶度相关^[31]。从表4中可以看出, 野葛淀粉糊化焓显著 ($p < 0.05$) 高于粉葛, 分别为 11.76 J/g、5.39 J/g; 野葛淀粉糊化后老化处理 3 d, 再次测定其回生焓 ΔH 显著低于粉葛, 分别为 2.22 J/g、3.42 J/g; 野葛淀粉糊化后老化处理 7 d, 再次测定其回生焓 ΔH 显著高于粉葛, 分别为 4.94 J/g、4.63 J/g。野葛淀粉

To、Tp、Tc 分别为 59.06 °C、65.10 °C、75.24 °C，均显著低于粉葛淀粉的 73.24 °C、80.22 °C、85.64 °C，这是由于粉葛的相对结晶度更高，Hung 等^[16]的研究结果也表明，直链淀粉链数和支链淀粉分子量越高，结晶度越高，其糊化越困难。Zhou 等^[32]的研究结果显示，淀粉相对结晶度越高，越难以糊化且糊化后越容易回生；相比野葛、粉葛淀粉，经老化处理的糊化野葛、粉葛淀粉的 To、Tp、Tc 明显降低。野葛淀粉糊化后老化处理 3 d，其老化度显著低于粉葛，老化度分别为 18.88%、63.45%；野葛淀粉糊化后老化处理 7d，其老化度亦显著低于粉葛，老化度分别为 42.00%、85.90%，由此说明，相同条件下，粉葛淀粉更易发生老化。杜先锋等^[19]测得野葛老化特性数据与本研究结果一致。

2.8 溶解度与膨胀力

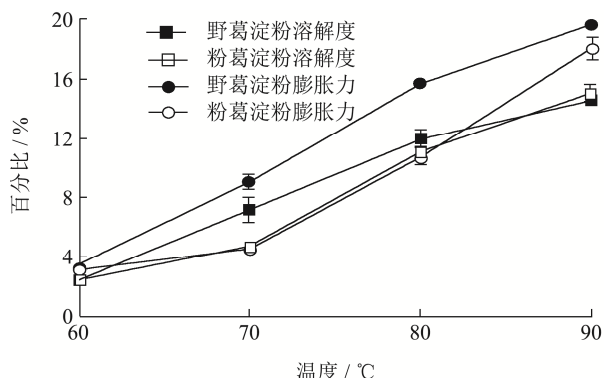


图5 葛根淀粉溶解度与膨胀力随温度变化情况

Fig.5 The Swelling power (SP) and water solubility index (WSI) of puerarialobata starch changed with temperature

溶解度与膨胀力可间接反应淀粉分子与水分子间相互作用力及淀粉分子通过氢键持水能力^[33]，与淀粉结构密切相关，膨胀力也受到脂类和其他成分的影响^[34]。淀粉在冷水中不溶，但水分子可以进入淀粉的非结晶部分，与无定型区域的亲水基团结合，从而使淀粉颗粒涨润。图5显示了野葛、粉葛淀粉于不同温度下溶解度与膨胀力，与其他淀粉一样，野葛、粉葛淀粉溶解度和膨胀力随着温度升高均呈上升趋势，温度低于 80 °C 时，野葛淀粉溶解度高于粉葛淀粉，温度达到 90 °C 时，野葛淀粉溶解度低于粉葛淀粉，此时两者溶解度分别为 14.54%、15.04%；不同温度下，野葛淀粉膨胀力均高于粉葛淀粉，90 °C 时，野葛、粉葛淀粉膨胀力分别达 19.62%、18.05%。此外，从图中也可以看出，野葛淀粉在 60~80 °C 处于快速溶胀阶段、粉葛淀粉在 70~80 °C 处于快速溶胀阶段。

2.9 透光率

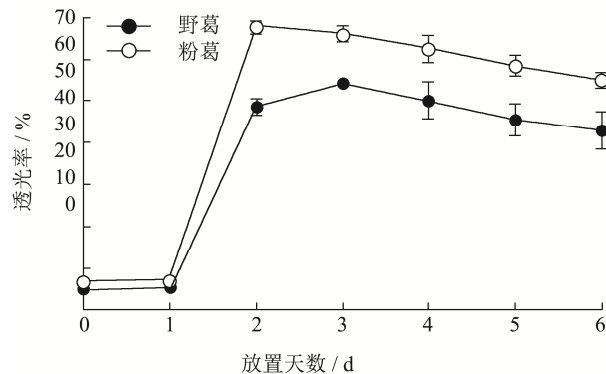


图6 葛根淀粉透光率随放置时间变化情况

Fig.6 The change of transparency of puerarialobata starch with time

通常以透光率表示淀粉糊的透明度，透光率越高，透明度越高，相比于玉米、马铃薯淀粉，葛根淀粉透光率较低^[21]。图6比较了野葛、粉葛淀粉糊化后常温下贮存 6 d 内，透光率变化情况。从图中可以看出，随着放置时间延长，糊化后野葛、粉葛淀粉透光率均呈先上升后下降变化趋势，糊化野葛淀粉在放置 3 d 后透光率达最大值；糊化粉葛淀粉在放置 2 d 后透光率达最大值。刚糊化野葛、粉葛淀粉透光率分别为 5.30%、6.70%，放置 1 d 后，其透光率上升幅度较小，放置 2 d 后，透光率成倍数升高，分别达 48.57%、67.70%，放置 6 d 后，透光率分别下降至 43.00%、54.93%，相同放置时间下，糊化粉葛淀粉透光率高于糊化野葛淀粉。淀粉糊化后放置 1~2 d 透光率迅速升高可能是由淀粉的熔融沉淀或淀粉分子重新缔合排列导致的^[35]，随着放置时间延长，淀粉逐渐老化形成凝胶，导致透光率下降^[36]。野葛淀粉透光率低于粉葛淀粉，可能与淀粉颗粒大小、直链淀粉与支链淀粉比例有关^[37]。

2.10 凝沉稳定性

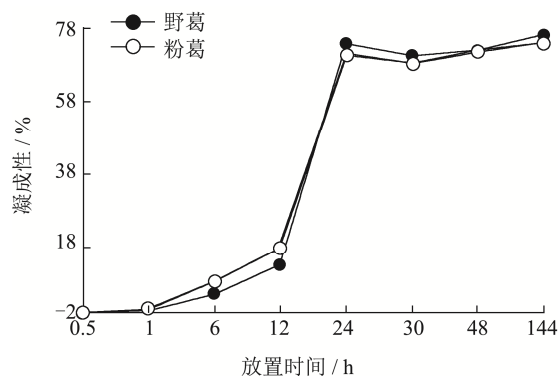


图7 葛根淀粉凝沉曲线

Fig.7 Retrogradation curves of puerarialobata starch

图7显示了野葛、粉葛淀粉凝沉性随放置时间变化情况，从图中可以看出，随着放置时间的延长，野

葛、粉葛淀粉的凝沉性均呈先上升后小幅下降最终又上升变化趋势,根据变化幅度可将放置 144 h 内野葛、粉葛淀粉凝沉性分为 5 个阶段,分别为 0.5~1 h、1~12 h、12~24 h、24~30 h、30~144 h,其中放置 12~24 h 之间,野葛、粉葛淀粉凝沉性变化幅度最大,分别从

13.23%、17.81%上升至 73.67%、70.77%。放置 24~30 h 之间,野葛和粉葛淀粉凝沉性均有小幅下降,孔璐等^[36]亦发现有色藜麦淀粉放置 24~48 h 之间凝沉性呈先下降后上升变化趋势,并认为这一变化趋势与淀粉结构的重新缔合排列有关。

表 5 葛根淀粉凝胶质构特性

Table 5 Gel texture properties of puerarialobata starch

| | 硬度/g | 粘性/(g·s) | 回复性/% | 内聚性 | 弹性/% | 胶着性/g | 咀嚼/(gmm) |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 野葛 | 10.53±1.59 ^b | 11.20±1.97 ^b | 18.45±3.59 ^a | 0.36±0.01 ^a | 84.01±3.02 ^a | 3.74±0.58 ^b | 3.14±0.52 ^b |
| 粉葛 | 12.55±1.15 ^a | 20.71±1.82 ^a | 12.73±1.53 ^b | 0.36±0.03 ^a | 83.92±2.79 ^a | 4.50±0.50 ^a | 3.79±0.49 ^a |

注:同一列不同行间字母不同,表明存在显著差异。

2.11 淀粉凝胶质构特性

野葛、粉葛淀粉凝胶质构特性如表 5 所示,从表中可以看出,野葛淀粉凝胶的硬度、粘性、胶着性、咀嚼性等指标显著 ($p<0.05$) 低于粉葛,而回复性显著高于粉葛;野葛与粉葛淀粉凝胶的内聚性、弹性等指标间无显著性差异。咀嚼性是硬度、弹性和内聚性数值的乘积,是一项综合指标,可直接反应口腔咀嚼感^[38]。

3 结论

3.1 本研究中野葛、粉葛淀粉中淀粉含量和直链淀粉含量均无显著性 ($p>0.05$) 差异,分别为 96.00%、95.85%和 25.09%、25.69%。矿物元素及重金属含量均存在明显差异,这也间接反映了两种葛根生长环境的差异。葛根淀粉显微形态多为不规则的多边多角型,少数呈现椭球型,极少数表明有凹陷,野葛淀粉、直链淀粉、支链淀粉平均粒径分别为 26.15 μm 、161.46 μm 、149.83 μm ;粉葛淀粉、直链淀粉、支链淀粉平均粒径分别为 8.65 μm 、172.61 μm 、104.44 μm 。通过 XRD 对淀粉晶体结构的观察发现,野葛、粉葛淀粉晶体结构均为 C 型,直链淀粉晶体结构均为 V 型。野葛淀粉、淀粉凝胶白度显著 ($p<0.05$) 低于粉葛,而淀粉糊白度显著高于粉葛,野葛淀粉、淀粉糊、淀粉凝胶白度分别为 88.74%、33.56%、44.78%;粉葛淀粉、淀粉糊、淀粉凝胶白度分别为 94.88%、31.26%、50.78%。野葛淀粉糊化焓显著 ($p<0.05$) 高于粉葛,而 T_0 、 T_p 、 T_c 等值显著低于粉葛;老化 7 d 后,其糊化焓、 T_0 、 T_p 、 T_c 等值均降低,老化度分别为 42.00%、85.90%。本研究还发现,溶解度与膨胀力的测定中,野葛淀粉快速溶胀阶段为 60~80 $^{\circ}\text{C}$,粉葛淀粉快速溶胀阶段为 70~80 $^{\circ}\text{C}$,这与淀粉热学特性中 T_0 、 T_c 值相吻合。葛根淀粉透光率随放置时间呈先迅速上升后缓慢下降变化趋势。随着放置时间的延长,淀粉凝沉

性均呈先上升后小幅下降最终又上升变化趋势,在放置 12~24 h 之间,两种淀粉凝沉性变化幅度最大,分别从 13.23%、17.81%上升至 73.67%、70.77%。此外,淀粉凝胶硬度、粘性、胶着性、咀嚼性和回复性存在显著差异 ($p<0.05$)。

3.2 综上所述,本研究结果为葛根淀粉加工利用及相关产品开发提供理论依据。目前有关葛根品种、栽培条件、生长环境等因素对葛根淀粉结构特性影响以及葛根淀粉结构与特性相关性,还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 郑水庆,曾明.云南葛属药用植物资源调查[J].中草药,2002,8:85-86
ZHENG Shui-qing, ZENG Ming. Investigation on medicinal plant resources of pueraria in Yunnan [J]. Chinese Herbal Medicine, 2002, 8: 85-86
- [2] SONG Wei, LI Yan Jiao, QIAO Xue, et al. Progress in studies on the chemical constituents of *Radix Puerariae* (In English) [J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences, 2014, 23: 347-360
- [3] Chen G, Zhang J, Ye J. Determination of puerarin, daidzein and rutin in *Pueraria lobata* (Wild.) Ohwi by capillary electrophoresis with electrochemical detection [J]. Journal of Chromatography, 2001, 923(20): 255-262
- [4] 沈娜,李亦蔚,汪霞丽,等.葛根淀粉性质及改性方法研究进展[J].食品与机械,2012,28:245-249
SHEN Na, LI Yi-wei, WANG Xa-li, et al. Research progress of *Pueraria lobata* starch properties and modification methods [J]. Food and Machinery, 2012, 28: 245-249
- [5] 沈舒民.高粱淀粉结构与功能特性研究及相关性分析[D].杭州:浙江大学,2020
SHEN Shu-min. Study on structure and functional properties of sorghum starch and correlation analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020

- [6] Zhou D, Ma Z, Yin X, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 386-394
- [7] Shujun W, Wenyuan G, Hongyan L, et al. Studies on the physicochemical, morphological, thermal and crystalline properties of starches separated from different *Dioscorea opposita* cultivars [J]. Food Chemistry, 2006, 99(1): 38-44
- [8] Dawei Zhu, Changyun Fang, Zihui Qian, et al. Differences in starch structure, physicochemical properties and texture characteristics in superior and inferior grains of rice varieties with different amylose contents [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106170
- [9] Souza R, Almeida C, Landi F. Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches [J]. Food Science and Technology (Campinas), 2010, 30(2): 544-551
- [10] 李臻,赖富饶,吴晖.葛根的营养成分分析[J].现代食品科技,2011,27(8):1010-1011,1019
LI Zhen, LAI Fu-rao, WU Hui. Nutritional composition analysis of *Radix Puerariae* [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(8): 1010-1011, 1019
- [11] 陶湘林,郭晋琦,吴跃辉,等.太空葛根的营养功能成分及淀粉理化特性评价[J].中国粮油学报,2017,32(12):38-43
TAO Xiang-lin, GUO Jin-qi, WU Yue-hui, et al. Evaluation of nutritive functional components and starchy physicochemical properties of *Radix Puerariae* [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(12): 38-43
- [12] 石海信,郝媛媛,方怀义,等.双波长法测定木薯淀粉中直链和支链淀粉的含量[J].食品科学,2011,32:123-127
SHI Hai-xin, HAO Yuan-yuan, FANG Huai-yi, et al. Determination of amylopectin and amylopectin in cassava starch by dual wavelength method [J]. Food Science, 2011, 32: 123-127
- [13] 陈德经,罗敏,苏文.西洋参直链淀粉与支链淀粉的分离纯化与含量检测[J].保鲜与加工,2020,20:146-149
CHEN De-jing, LUO Min, SU Wen. Separation, purification and content detection of amylose and amylose of American ginseng [J]. Preservation and Processing, 2020, 20: 146-149
- [14] Wang L, Ye F, Li S, et al. Effects of oat β -glucan incorporation on the gelatinization, flowability and moisture sorption of wheat flour [J]. Powder Technology, 2017, 315: 430-437
- [15] Astuti R M, Widaningrum, Asiah N, et al. Effect of physical modification on granule morphology, pasting behavior, and functional properties of arrowroot (*Marantha arundinacea* L) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 23-30
- [16] Hung P V, Morita N. Chemical compositions, fine structure and physicochemical properties of kudzu (*Pueraria lobata*) starches from different regions [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 749-755
- [17] Dalei Lu, Weiping Lu. Effects of protein removal on the physicochemical properties of waxy maize flours [J]. Starch - Stärke, 2012, 64(11): 874-881
- [18] 周红英.野葛与甘葛藤化学成分及淀粉理化特性和光合特性的研究[D].泰安:山东农业大学,2008
ZHOU Hong-Ying. Study on chemical components, starch physicochemical properties and photosynthetic characteristics of Kudu and Kudganvine [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008
- [19] 杜先锋,宛晓春,许时婴,等.葛根淀粉老化动力学的研究[J].中国农业科学,2002:1145-1149
DU Xian-feng, WAN Xiao-chun, XU Shi-ying, et al. Study on aging kinetics of puerarin starch [J]. Chinese Agricultural Science, 2002: 1145-1149
- [20] 刘婷婷,崔海月,樊红秀,等.超声波辅助提取人参淀粉工艺优化及其性质[J].食品科学,2014,35:34-40
LIU Ting-ting, CUI Hai-yue, FAN Hong-xiu, et al. Technology optimization and properties of ultrasonic assisted extraction of Ginseng starch [J]. Food Science, 2014, 35: 34-40
- [21] 何海霞,黎冬明,吴莹莹,等.脚板薯淀粉理化特性研究[J].食品与机械,2020,36: 30-33,38
HE Hai-xia, LI Dong-ming, WU Ying-ying, et al. Physicochemical properties of potato starch in baseboard [J]. Food and Machinery, 2020, 36: 30-33, 38
- [22] Soni, P L, Agarwal. The starch of pueraria tuberosa comparison with maize starch [J]. Starch/Staerke, 1983, 35(1): 4-7
- [23] 刘计权,刘亚明,裴香萍,等.均匀设计法优选葛根栽培中的配方施肥模式研究[J].中华中医药杂志,2014,29:1025-1027
LIU Ji-quan, LIU Ya-ming, PEI Xiang-ping, et al. Study on optimal formula fertilization model in Kudzu cultivation by uniform design method [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2014, 29: 1025-1027
- [24] 章丽娟.大理葛根及其种植土壤中主要金属元素的调查[D].大理:大理学院,2012
ZHANG Li-juan. Investigation on the main metal elements in pueraria and its planting soil in Dali [D]. Dali: Dali College, 2012

- [25] Tribess, T B, P J, et al. Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 42(5): 1022-1025
- [26] Fang J M, Fowler P A, Sayers C, et al. The chemical modification of a range of starches under aqueous reaction conditions [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 55(3): 283-289
- [27] Demiate I M, Dupuy N, Huvenne J P, et al. Relationship between baking behavior of modified cassava starches and starch chemical structure determined by FT-IR spectroscopy [J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 42(2): 149-158
- [28] Flores-Silva P C, Roldan-Cruz C A, Chavez-Esquivel G, et al. *In vitro* digestibility of ultrasound-treated corn starch [J]. Starch - Stärke, 2017, 69(9-10): 1700040
- [29] 齐婧, 吕莹果, 王远辉. 不同粒度区间小麦粉的淀粉特征[J]. 食品科技, 2017, 42: 164-170
- QI Jing, LYU Ying-guo, WANG Yuan-hui. Starch characteristics of wheat flour with different granularity intervals [J]. Food Science and Technology, 2017, 42: 164-170
- [30] Cooke D, Gidley M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition [J]. Carbohydrate Research, 1992, 227(C): 103-112
- [31] Gernat C, Radosta S, Anger H, et al. Crystalline parts of three different conformations detected in native and enzymatically degraded starches [J]. Starch - Stärke, 1993, 45(9): 309-314
- [32] Wenzhi Zhou, Jun Yang, Yan Hong, et al. Impact of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 122: 417-427
- [33] 刘婷婷, 宋春春, 王大为. 微波辅助提取马铃薯淀粉及其特性研究[J]. 食品科学, 2013, 34: 106-111
- LIU Ting-ting, SONG Chun-chun, WANG Da-wei. Microwave-assisted extraction of potato starch and its properties [J]. Food Science, 2013, 34: 106-111
- [34] Tester R F, Morrison W R. Swelling and gelatinization of cereal starches. VI. Starches from waxy hector and hector barleys at four stages of grain development [J]. Journal of Cereal Science, 1993, 17(1): 11-18
- [35] 刘成, 张佩丽, 沈群. 河北产区9个谷子品种淀粉性质的研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31: 81-84
- LIU Cheng, ZHANG Pei-li, SHEN Qun. Study on starch properties of 9 millet varieties in Hebei Province [J]. Technology of Food Industry, 2010, 31: 81-84
- [36] 孔露, 孔茂竹, 余佳熹, 等. 藜麦淀粉消化特性与理化特性研究[J]. 食品科技, 2019, 44: 285-290
- KONG Lu, KONG Mao-zhu, YU Jia-xi, et al. Study on digestion and physicochemical properties of quinoa starch [J]. Food Science and Technology, 2019, 44: 285-290
- [37] 李世杰, 段春月, 刘畅. 微波对板栗淀粉结构和理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35: 31-35, 49
- LI Shi-jie, DUAN Chun-yue, LIU Chang. Effect of microwave on the structure and physicochemical properties of chestnut starch [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2020, 35: 31-35, 49
- [38] 周剑敏, 卞旭, 孙佳, 等. 普鲁兰多糖对籼米粉凝胶及老化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 8-12
- ZHOU Jian-min, BIAN Xu, SUN Jia, et al. Effect of Pullulan polysaccharide on gelation and aging characteristics of indica rice powder [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2020, 35(5): 8-12