

“藜麦加工、营养与品质调控” 特约专栏文章之二

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.04.002

汪晓璇, 张好, 钱澄, 等. 藜麦的营养及其淀粉特性的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 12-19.

WANG X X, ZHANG Y, QIAN C, et al. Progress in the investigation on nutrition and starch properties of quinoa[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(4): 12-19.

藜麦的营养及其淀粉特性的研究进展

汪晓璇, 张好, 钱澄, 伊雪儿, 马志敏, 李帆, 李成, 管晓✉

(上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093)

摘要:近年来,因为藜麦含有完全蛋白质、碳水化合物、脂肪、维生素、矿物质以及多种生物活性成分而受到越来越广泛的关注。淀粉作为藜麦籽粒的主要成分,占干重的 50%以上,在藜麦及其相关制品特性中起到重要的作用。相较于其他谷物淀粉,藜麦淀粉具有特殊的理化性质,如颗粒较小(1~3 μm),直链淀粉的含量相对较低,支链淀粉含有较多的短链和超长链,并且藜麦淀粉中含有较高比例的慢消化淀粉,因此符合生产低升糖指数食品的要求。此外,藜麦淀粉在食品工业和其他行业中都有很多重要的应用。综述藜麦的营养成分、藜麦淀粉结构以及相关特性,以期对藜麦在食品及其他行业中的应用提供理论参考。

关键词:藜麦;营养;淀粉结构;理化性质;消化;完全蛋白质

中图分类号: TS212.7 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)04-0012-08

网络首发时间: 2021-07-02 11:28:20

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210702.1025.005.html>

Progress in the Investigation on Nutrition and Starch Properties of Quinoa

WANG Xiao-xuan, ZHANG Yu, QIAN Cheng, YI Xue-er, MA Zhi-min, LI Fan, LI Cheng, GUAN Xiao✉

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) has gaining wider attention for its well-balanced nutrition in recent years. As the main ingredient of quinoa grain, starch accounts for more than 50% of the dry weight, which plays an important role in defining the functions and properties of quinoa-contained products. Quinoa starch has smaller granules (1~3 μm) and lower amylose content, compared with other grains. Its amylopectin contains a larger amount of short chains and super-long chains. In terms of nutrition, quinoa starch contains a higher proportion of slow-digesting starch (SDS), indicating its possibility of being applied to produce processed food with low glycemic index. Furthermore, quinoa starch has many applications within and outside of the food industry. To provide theory to support the application of quinoa in different industries, this paper reviewed quinoa's composition, starch structure and related properties.

Key words: quinoa; nutrition; starch structure; physicochemical properties; starch digestion; complete protein

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2017YFD0401202); 上海市青年科技英才扬帆计划(34-20-308-004)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 13th five-year plan, China (No. 2017YFD0401202); Shanghai Sailing Program (No. 34-20-308-004)

作者简介: 汪晓璇, 女, 1996 年出生, 在读研究生, 研究方向为谷物精深加工。E-mail: wangxiaoxuan960105@163.com.

通讯作者: 管晓, 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为谷物加工与营养。E-mail: gnxo@163.com.

藜麦 (*Chenopodium quinoa Willd*) 属于苋科藜亚科藜属, 原产于南美洲安第斯山区秘鲁和玻利维亚境内, 几千年前就被当地土著居民种植, 并逐渐成为当地主要的粮食作物。藜麦籽粒中含有丰富的蛋白质, 其蛋白质的氨基酸组成均衡, 赖氨酸和蛋氨酸含量较高。此外, 藜麦籽粒中含有丰富的矿物质。联合国粮农组织认定藜麦是唯一一种可以满足人体基本营养需求的植物基食品^[1]。淀粉作为藜麦籽粒的主要成分, 占干重的 50% 以上, 且对藜麦相关制品的加工、感官等品质影响较大^[2]。基于此, 本文对藜麦的营养成分, 特别是藜麦淀粉的结构、理化性质和消化特性等进行了综述, 以期为藜麦进一步的研究与应用提供理论参考。

1 藜麦籽粒的营养

1.1 宏量营养素

谷物作为人类日常饮食的重要组成部分, 可以提供人体所需的大部分能量。与其他主要的粮食作物 (大米、大麦、小麦、玉米、黑麦、高粱等) 相比, 藜麦含有更高的营养价值。藜麦与其他作物主要营养成分比较如表 1 所示。

表 1 藜麦与其他谷物的营养价值比较 (100 g 可食部)^[3]
 Table 1 Comparison of nutritional value of quinoa and other grains (100 g edible part)

成分	藜麦	大米	大麦	小麦	玉米	黑麦	高粱
脂类/g	6.07	0.55	1.30	2.47	4.74	1.63	3.46
蛋白质/g	14.12	6.81	9.91	13.68	9.42	10.34	10.62
灰分/g	2.70	0.19	0.62	1.13	0.67	0.98	0.84
纤维素/g	7.00	2.80	15.60	10.70	7.30	15.10	6.70
糖类/g	64.16	81.68	77.72	71.13	74.26	75.86	72.09
能量/kcal	368.00	370.00	352.00	339.00	365.00	338.00	329.00

1.1.1 蛋白质

在藜麦籽粒的干物质中, 蛋白质的含量在 13.8%~16.5%, 与其他谷物相比, 藜麦的蛋白质含量高于大麦、大米、玉米等, 与小麦蛋白质含量相当 (见表 1)。藜麦蛋白主要由白蛋白 (35%)、球蛋白 (37%) 和少量的醇溶蛋白以及谷蛋白组成, 藜麦蛋白的溶解性好, 易被人体吸收^[4]。藜麦中的氨基酸组成接近于人体中的氨基酸组成, 且含有人体所必需的 8 种氨基酸, 其品质与牛奶中的酪蛋白相似。在其他谷物中, 赖氨酸常常成

为限制性氨基酸, 但藜麦中有较高的赖氨酸含量, 而且其丰富的组氨酸也可以满足儿童的需求。对照成人 (儿童) 蛋白质的推荐摄入量, 藜麦可提供组氨酸 180% (152%)、异亮氨酸 274% (128%)、赖氨酸 338% (123%)、苯丙氨酸 + 色氨酸 320% (97%)、苏氨酸 331% (88%)、色氨酸 228% (103%)、缬氨酸 324% (120%)^[5]。由于藜麦蛋白质氨基酸的均衡性, 可以作为人体良好的蛋白质来源。

1.1.2 糖类

藜麦中碳水化合物含量与小麦和大米相当, 为 70% 左右, 其中淀粉是藜麦碳水化合物的主要存在形式, 占比超过 50%。此外, 藜麦中还含有较为丰富的膳食纤维, 总膳食纤维含量在 7%~9.7%, 远高于稻米中的 2.8%, 其中不溶性膳食纤维占 6.8%~8.4%^[6-7]。因此藜麦作为可溶性和不溶性膳食纤维的优良来源, 在膳食中可用于调节血糖水平和胆固醇水平^[8]。

1.1.3 脂类

藜麦中的脂肪含量约为 2%~9.5%, 甘油三酯占总脂肪 50% 以上, 并且富含必需脂肪酸, 像亚油酸, α -亚麻酸和花生四烯酸。其中亚麻酸可以被代谢为二十碳五烯酸 (EPA) 和二十二碳六烯酸 (DHA), EPA 和 DHA 对儿童脑部发育、免疫、中老年人动脉粥样硬化和预防血栓都有重要作用。将藜麦的脂肪酸谱与大豆相比较发现, 藜麦的脂肪酸配比与大豆类似。藜麦富含多不饱和脂肪酸, 属于高品质的脂肪酸来源, 可作为一种有开发前景的油类作物加以研究^[3]。

1.2 微量营养素

藜麦富含微量营养素, 如维生素和矿物质。藜麦中的维生素 B6 和叶酸含量较高, 100 g 藜麦中所含的维生素 B6 和叶酸可以满足一个成年人的每日需要, 维生素 B2 则可满足成人每日 40% 和儿童每日 80% 的需要^[5]。藜麦中维生素 B1 的含量低于燕麦和大麦, 但是它维生素 B2、B6 和叶酸水平远高于其他谷物。此外, 藜麦也是维生素 E 的优良来源, 含量远高于小麦; 维生素 C 的含量变化和藜麦的种类以及加工过程有着密切联系。藜麦与其他谷物的维生素含量比较如下表 2。

表 2 藜麦与其他常见谷物维生素含量的比较^[9]

Table 2 Comparison of vitamin contents between quinoa and other common cereals

维生素种类	藜麦	水稻	小麦	大麦	荞麦
VA	0.39	NR	0.02	0.01	0.21
VB1	0.38	0.47	0.55	0.49	0.46
VB2	0.39	0.10	0.16	0.20	0.14
VB3	1.06	5.98	5.88	5.44	1.80
VC	4.00	0.00	0.00	0.00	5.00
VE	5.37	0.18	1.15	0.35	5.46

藜麦籽粒中含有丰富的矿物质，矿物元素的含量是小麦的 2 倍，水稻玉米的 5 倍，尤其 Ca 和 Fe 的含量远高于其他谷物。因此，食用藜麦可以促进骨骼和牙齿的发育，高 Fe 含量也可以预防缺铁性贫血的发生^[1]。

1.3 生物活性成分

藜麦含有丰富的皂苷、固醇类以及多酚类活性成分，能够预防治疗疾病，对于维持人类的健康具有十分重要的应用价值^[5]。皂苷苦涩的口感对于藜麦的食用会产生负面影响，在藜麦食用之前都会被去除。但是皂苷具有抗真菌、抗病毒、抗癌、降低胆固醇、降血糖、抗血栓和抗炎的作用^[10]。有关藜麦中植物固醇的研究较少，藜麦籽粒中植物固醇含量约 120 mg/100 g，其中主要包括 β -谷甾醇 (63.7 mg/100 g)、油菜甾醇 (15.6 mg/100 g) 和菜籽甾醇 (3.2 mg/100 g)；植物固醇是一种亲脂化合物，结构上与胆固醇类似，植物甾醇通过竞争胆固醇在肠道中的吸收从而降低血清胆固醇水平，并降低肝脏和肠道中动脉粥样硬化脂蛋白的生成。此外，植物甾醇还具有抗炎、抗氧化和抗癌作用^[11]。多酚广泛存在于植物性食物中，是一类具有生物活性的化合物，主要分为 3 种：黄酮、酚酸和儿茶素。对藜麦中总酚和可溶性酚酸含量进行测定，发现总酚含量变化范围为 16.8~59.7 mg/100 g，其中可溶性酚酸所占比例为 7%~61%，并表现出较强的体外抗氧化活性^[1,12]。

2 藜麦淀粉结构

2.1 藜麦淀粉分子链结构

淀粉主要是由直链淀粉和支链淀粉组成。直链淀粉主要是由 α -(1,4)糖苷键连接的线性分子，

而支链淀粉是具有 α -(1,6)糖苷键的高度支化聚集分子。淀粉中的直链和支链淀粉的结构和比例会影响淀粉的热特性，如糊化特性^[13]，此外淀粉的直/支比也与淀粉的老化密切相关。藜麦与其他常见谷物直链、支链淀粉含量比较见表 3。

表 3 藜麦与其他常见谷物直链/支链淀粉含量比较^[14]

Table 3 Comparison of amylose/amylopectin content between quinoa and other common cereals

	直链淀粉百分比/%	支链淀粉百分比/%	直/支比
藜麦	7.00±0.29	84.24±1.54	1 : 12.03
小麦	35.54±0.23	62.17±0.32	1 : 1.75
玉米	31.88±0.14	60.27±0.55	1 : 1.89
赤豆	41.92±0.52	57.52±0.62	1 : 1.37
小米	25.75±0.11	66.88±0.38	1 : 2.60
大米	18.68±0.14	81.28±0.30	1 : 4.35
糯米	0.65±0.45	91.73±0.11	1 : 141.12
马铃薯	28.04±0.21	49.80±0.70	1 : 1.77
木薯	17.25±0.00	76.86±0.62	1 : 4.45

直链淀粉与支链淀粉都是由葡萄糖分子聚集而成，由于其连接方式不同，其聚合度也不同。淀粉的聚合度可以用碘蓝法检测，直链淀粉可以直接与碘结合，根据颜色和强度测定吸光值，由此比较聚合度的大小；而支链淀粉结构较为复杂，可以将其由分支点断开，进而测分支链的聚合度和所占比例^[14]。此外，还可以使用尺寸排阻色谱 (size-exclusion chromatography, SEC) 来研究淀粉的分子构成。支链淀粉的单位链长分布可以根据聚合度 (degree of polymerization, 即 DP 值) 定义为几类: fa (DP 6-12), fb1 (DP 13-24), fb2 (DP 25-36), 和 fb3 (DP>36)^[15]，根据非还原端和分支点的位置，可以将单位链定义为外部链 (非还原端和分支之间的链段) 和内部链 (两个分支之间的链段)^[13]。藜麦支链淀粉的单位链长分布详见表 4。

2.2 藜麦淀粉结晶结构

淀粉链聚集的不同形式与排列会形成有序的结晶区和无序的无定形区，淀粉晶型结构会受淀粉形成方式和分子结构的影响^[17]，例如植物的生长环境、含水量、淀粉颗粒大小、链长等。根据 X-射线衍射图谱，淀粉可以分为 A 型，B 型，C 型 (包含 A 型与 B 型) 和 V 型^[18]，V 型淀粉是一种直链淀粉的结晶复合物，而其他三种则与淀粉的直链/支链淀粉含量、结构和聚合度有关。在天然淀粉颗粒中，一般认为，A 型主要来源于谷

表 4 藜麦支链淀粉单位链长分布^[16]
Table 4 distribution of unit chain length of quinoa amylopectin

%

样品	基于重量的单位链长分布				基于摩尔的单位链长分布			
	fa	fb1	fb2	fb3	Fa	Fb1	Fb2	Fb3
S3	26.9c	43.6a	12.3e	17.2c	45.0cd	42.0b	7.02e	5.93d
S6	26.7cd	42.4cd	12.8d	18.1b	45.3c	41.1d	7.34d	6.21bcd
S14	28.7a	42.9abc	12.2e	16.1d	47.5a	40.3e	6.81f	5.40e
S15	25.1g	42.1d	13.7b	19.1a	43.6f	41.7c	7.99ab	6.71a
S17	25.7f	43.5a	12.5e	18.3b	43.9f	42.6a	7.20d	6.34b
S21	26.1e	42.6bcd	13.1c	18.1b	44.6e	41.5c	7.59c	6.24bc
S22	24.7h	43.2ab	13.1c	19.1a	42.7g	42.9a	7.71c	6.72a
S24	27.4b	41.1e	13.8b	17.6bc	46.5b	39.6f	7.89b	6.03cd
S26	26.3de	42.5cd	14.1a	17.1c	44.9de	41.1d	8.10a	5.97cd
平均值	26.4	42.7	13.1	17.9	44.9	41.4	7.52	6.17

注：S3, S6, S14 等为不同品种的藜麦；f 表示基于重量的链长分布，F 表示基于摩尔的链长分布；a, b1, b2, b3 是指 DP 在 6-12、13-24、25-36 和 DP>36 范围内的范围；同一列中不同字母的值差异显著($P<0.05$)。

Note: S3, S6 and S14 are different varieties of quinoa; F is chain length distribution based on weight, f is chain length distribution based on mole; a, b1, b2, b3 refer to the range of DP in the range of 6-12, 13-24, 25-36 and DP>36; The values of different letters in the same column were significantly different ($P<0.05$).

类淀粉，如玉米、小麦等；B 型来源于块茎类淀粉，如马铃薯淀粉等；C 型包含有 A、B 两种晶型，如香蕉中的淀粉和多数豆类淀粉；但 V 型淀粉结构则在天然淀粉中发现较少^[19]。图 1 是藜麦淀粉与其他常见谷物淀粉 X-射线衍射图谱，由此可确定藜麦淀粉的晶体类型。

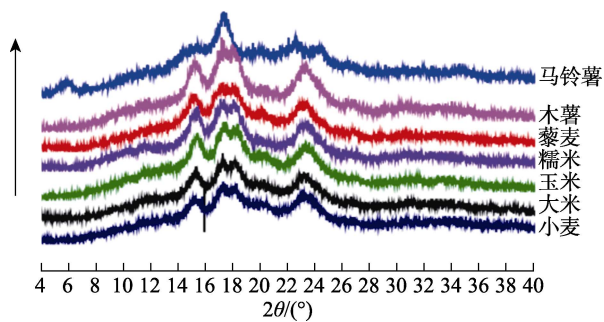


图 1 藜麦淀粉与其他常见谷物淀粉 XRD 衍射图^[14]
Fig.1 XRD diffraction pattern of quinoa starch and other common cereal starch

由上图可知，藜麦淀粉在 XRD 衍射图中 2θ 为 15°、17°、23°处有较强的衍射峰，这与 A 型晶体对应，表现为典型的谷物淀粉；在 20 °处的衍射峰表明有 V 型晶体存在，说明在藜麦淀粉中含有直链淀粉-脂质复合体^[14]。其他谷物的衍射曲线图谱也符合上述中的一般规律。此外，也有相关的研究报道藜麦淀粉的结晶度在 21.5%~43%^[12]，低于糯米淀粉（48.3%）而显著高于其他谷物淀粉^[14]。

2.3 藜麦淀粉颗粒结构

藜麦淀粉颗粒形貌可以通过扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM) 等技术对藜麦淀粉颗粒的形貌进行研究。藜麦淀粉颗粒的大小主要在 0.4~2.0 μm 范围内，小于其他大多数植物来源的淀粉；藜麦淀粉的形状是多边形和不规则的 (见图 2a)；单一藜麦淀粉颗粒在形状和尺寸上的多样性相对较小^[20]。有研究通过 TEM 观察

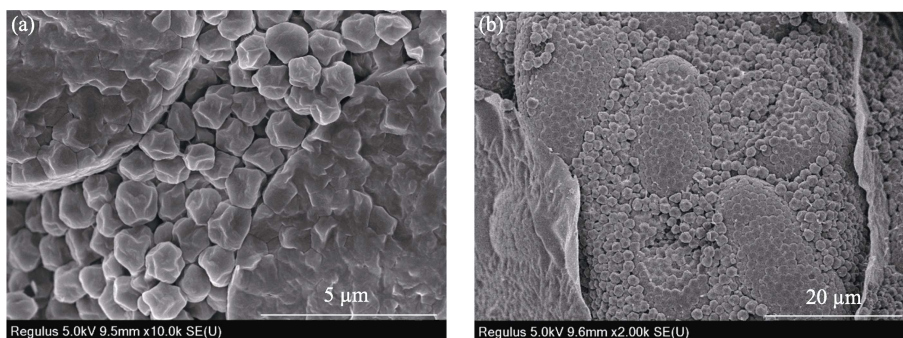


图 2 藜麦淀粉颗粒 (a) 和聚集体 (b) 扫描电镜图片
Fig.2 SEM images of quinoa starch granules (a) and aggregates (b)

到, 藜麦淀粉有着密度高且均匀的外壳以及较低密度的内芯^[21]。

藜麦淀粉常见以聚集体的形式存在(见图 2b), 这些球形或长方形聚集体的尺寸在 10~30 μm 之间, 含有单个淀粉颗粒 14 000~20 000 个^[22], 这些聚集体的形成可能主要是由于蛋白质的存在, 因为研究发现添加胃蛋白酶可以促进它们的分解^[23]。

3 藜麦淀粉理化性质与消化特性

淀粉的理化性质包括淀粉的糊化特性、热力学性质、流变特性、溶解度、膨润力、冻融稳定性等。藜麦淀粉的理化性质对藜麦在食品生产中的作用效果有着显著的影响, 这些性质引起的变化会改变食品的外观、质构、风味或口感, 影响着食品的品质; 淀粉作为人类饮食中的主要碳水化合物和能量来源, 它的消化率和消化部位对人体营养健康起着重要作用。所以, 淀粉的消化特性已成为科研人员和营养学家的关注焦点和热点。

3.1 藜麦淀粉的糊化特性

淀粉的糊化特性直接关系到食品品质, 包括食品的加工性、稳定性、质构和口感。淀粉的糊化可以分为三个阶段, 即可逆性吸水阶段、不可逆性吸水阶段和颗粒解体阶段, 其本质是淀粉的微观结构从有序变为无序。淀粉加水加热发生糊化时, 初始阶段中, 水分从淀粉分子间的微晶束的间隙中进入, 这就导致淀粉分子发生略微胀大, 淀粉的粘度变化不大。然后通过进一步的加热, 温度升高, 达到淀粉的糊化温度时, 已经有水分先与部分的淀粉分子进行结合, 导致淀粉颗粒发生胀大, 粘度开始逐渐增大。此时若继续加热, 温度持续升高, 淀粉颗粒继续吸水膨胀, 最后淀粉颗粒破裂, 成为淀粉糊。在糊化过程中会伴随着淀粉的粘度变化, 因此可以采用快速粘度仪法(RVA)对淀粉的糊化性质进行测定, 藜麦淀粉的 RVA 特性曲线见图 3。

如图 3 所示, 藜麦淀粉 RVA 特性曲线显示出: 藜麦淀粉在较低温度开始糊化, 淀粉液中的淀粉颗粒快速膨胀, 粘度开始快速增大, 此时的温度为糊化温度; 随着温度的继续升高, 淀粉液逐渐变成凝胶状态, 粘度线性增大, 在 95 °C 左右时

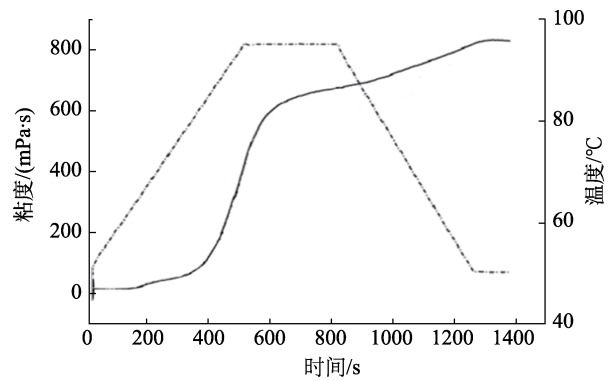


图 3 藜麦淀粉 RVA 特性曲线^[24]

Fig.3 RVA characteristic curve of quinoa starch

达到最大值, 此时的粘度为高峰粘度(Peak Viscosity); 温度在 95 °C 持续时, 溶液变为松懈的溶胶, 粘度略微下降到低谷粘度(Trough Viscosity), 高峰粘度和低谷粘度较为接近; 接着藜麦淀粉的粘度随着温度的降低再度上升达到最后粘度(Final viscosity)。

表 5 对比了藜麦淀粉与其它三种常用淀粉的 RVA 特征值。由数据分析可知, 不同种类淀粉的 RVA 特征值均存在显著差异。其中, 马铃薯淀粉的高峰粘度最高, 其次是藜麦淀粉, 然后依次是玉米淀粉和小麦淀粉。藜麦淀粉与玉米淀粉、马铃薯淀粉、小麦淀粉之间的高峰粘度均存在显著差异。马铃薯淀粉最后粘度最高, 其次是藜麦淀粉, 再次是玉米淀粉, 小麦淀粉最低。由方差分析可知, 藜麦淀粉与玉米淀粉、马铃薯淀粉、小麦淀粉之间的最后粘度均存在显著差异。反弹值是由于淀粉冷却时浸出的直链淀粉分子重新排列, 导致了粘度增大, 因此反弹值可以用来衡量淀粉的冷稳定性和淀粉的回生老化的程度。反弹值越低, 则说明淀粉越不容易回生老化, 冷稳定性越好。马铃薯淀粉的反弹值最高, 其次是玉米淀粉和藜麦淀粉, 小麦淀粉最低。由方差分析可知, 藜麦淀粉和玉米淀粉、马铃薯淀粉、小麦淀粉之间的反弹值均存在显著差异。藜麦淀粉的反弹值远远低于马铃薯淀粉, 但比小麦淀粉高, 说明藜麦淀粉比小麦淀粉短期老化速度快, 易老化, 但冷稳定性远高于马铃薯淀粉, 可用于加工冷藏食品及冷冻食品, 还可以用于延长食品的货架期。松懈值与淀粉耐外力作用有关, 在一般情况下, 稳定性较强的淀粉颗粒, 松懈值较小, 所以可以

用来反映淀粉的热淀稳定性^[25]。由表 5 可知, 马铃薯淀粉松懈值最高, 玉米淀粉次之, 藜麦淀粉最小。藜麦淀粉的松懈值极小, 则表明藜麦淀粉颗粒不容易碎裂, 代表藜麦淀粉的热稳定性较好, 说明在食品生产时, 在高温环境或者机械搅拌过程中, 藜麦淀粉可以保持一定粘度, 不易发生变化^[25]。玉米淀粉的糊化温度最高, 小麦淀粉次之, 藜麦淀粉糊化温度最低, 这是由于对于不同品种的淀粉颗粒, 其本身的淀粉结构等性质不同, 会导致糊化温度也各不相同。在通常情况下, 如果淀粉中的支链淀粉比例越高、淀粉的结晶程度越低、淀粉的结构排列越松散, 造成晶体熔解所需热量越小, 会使得淀粉的糊化温度也越低^[25]。根据实验数据, 藜麦淀粉的糊化温度较低, 低于其它三种常用淀粉, 则更容易糊化, 更易蒸煮。所以藜麦淀粉可以用于生产和改良速溶和快餐食品, 例如方便面以及挤压膨化食品。

表 5 藜麦淀粉与其他常见谷物淀粉 RVA 特征值比较
 Table 5 Comparison of RVA characteristics between quinoa starch and other common cereal starch

淀粉品种	高峰粘度 / (mPa·s)	低谷粘度 / (mPa·s)	最后粘度 / (mPa·s)	松懈值 / (mPa·s)	反弹值 / (mPa·s)	糊化温度 / °C
藜麦淀粉 ^[26]	703b	704b	874b	3d	166c	54.40d
玉米淀粉 ^[28]	659c	351c	555c	307b	203b	71.70a
马铃薯淀粉 ^[28]	3 106a	1 395a	1 804a	1 710a	408a	60.30c
小麦淀粉 ^[28]	365d	300d	438d	64c	137d	61.35b

注: 同一列中, 字母 a、b、c 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: letters a, B and C indicate significant difference in the same column ($P < 0.05$).

3.2 藜麦淀粉的热力学性质

淀粉发生糊化时, 微观结构也会发生变化, 这种变化可以通过差示扫描量热仪进行测量, 其测量结果在 DSC 曲线上显示为吸热峰。在 DSC 热力学特征参数中, T_0 表示淀粉糊化开始时的温度, 称为起始温度; T_p 表示糊化的中间温度, 称为峰值温度; T_c 表示糊化结束的温度, 称为终止温度; ΔH 表示糊化过程中能量发生的变化量, 称为热焓值^[21]。

通过 DSC 对藜麦淀粉和其它三种常用淀粉的

热力学特性进行测定 (表 6), 马铃薯淀粉的热焓值最高, 其次是玉米和小麦淀粉, 最后是藜麦淀粉。热焓值体现了淀粉分子的整体结晶度, 是淀粉颗粒中分子有序结构被破坏的指标。结果表明, 藜麦淀粉的 (ΔH) 显著低于其它品种淀粉, 说明藜麦淀粉颗粒中支链淀粉分子双螺旋结构量相对较少。在起始温度方面, 玉米淀粉最高, 其次是马铃薯和小麦淀粉, 最后是藜麦淀粉。在峰值温度方面, 玉米淀粉最高, 然后是马铃薯、小麦和藜麦淀粉。四种淀粉之间的峰值温度均存在显著差异。在糊化范围 ($T_c - T_0$) 方面, 藜麦淀粉最高, 小麦淀粉的糊化范围位于第二, 玉米淀粉的糊化范围位于第三, 马铃薯淀粉的糊化范围最低。藜麦淀粉和小麦淀粉之间的糊化范围存在显著差异, 二者与玉米淀粉和马铃薯淀粉同样存在显著差异, 而玉米淀粉和马铃薯淀粉之间无明显差异。糊化范围体现了晶体的完整程度, 晶体差异越大, 则糊化温度范围越大, 反之则越小。这表明玉米淀粉和马铃薯淀粉的颗粒均匀程度较高, 藜麦淀粉的颗粒均匀程度较低。通常, 在经过适当的改性处理后, 可以显著提高藜麦淀粉的溶解性能, 使其能够在溶液中有较好的分散度, 可作为 Pickering 乳液的稳定剂。此外, 藜麦淀粉由于其独有特性还可以用作生物膜包覆材料 (如油脂的微胶囊化)。

表 6 不同品种淀粉的 DSC 热力学特征参数
 Table 6 DSC thermodynamic characteristic parameters of different starches

淀粉品种	起始温度 T_0 / °C	峰值温度 T_p / °C	终止温度 T_c / °C	糊化范围 ($T_c - T_0$) / °C	热焓值 ΔH / (J/g)
藜麦淀粉 ^[24]	52.64d	58.56d	70.56b	17.92a	2.51d
玉米淀粉 ^[26]	66.80a	71.00a	77.05a	10.25c	11.28b
马铃薯淀粉 ^[26]	59.55b	63.80b	69.75c	10.20c	13.24a
小麦淀粉 ^[26]	57.6c	63.00c	69.65c	12.05b	8.06c

注: 同一列中, 字母 a、b、c 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: letters a, B and C indicate significant difference in the same column ($P < 0.05$).

3.3 藜麦淀粉的消化特性

Englyst 等^[27]依照淀粉消化速率的不同将其分为快速消化淀粉 (Rapidly digestible starch, RDS)、慢速消化淀粉 (Slowly digestible starch, SDS) 和抗性淀粉 (Resistant starch, RS)。快消化

性淀粉 (RDS) 指的是能在 20 min 内被消化吸收的淀粉; 慢消化性淀粉 (SDS) 指的是在小肠中能够完全消化吸收, 但是消化速度比较慢, 需要 20~120 min 才被消化的淀粉, 这类淀粉可以维持餐后血糖稳定; 抗性淀粉 (RS) 指的是消化超过 120 min 后仍不能被消化吸收的淀粉, 与膳食纤维类似, 这类淀粉可以被结肠中的微生物发酵, 有促进肠道健康的作用^[28]。

表 7 中是藜麦淀粉与其他几种常见谷物淀粉 RDS、SDS、RS 含量的比较。根据 Wang 和 Miao 等的研究表明, 各类淀粉经煮熟后的主要成分是 RDS, 而 SDS 与 RS 含量较低, 这是因为在蒸煮过程中, 天然淀粉颗粒的半结晶结构被完全摧毁。通过分析实验数据可知, 藜麦淀粉的快速消化淀粉 (RDS) 含量显著低于其他淀粉, 慢速消化淀粉 (SDS) 含量显著高于其他淀粉, 抗性淀粉 (RS) 含量显著低于其他淀粉。由于快速消化淀粉 (RDS) 与食物的血糖指数 (GI) 呈正相关, 所以降低快速消化淀粉 (RDS) 的含量, 增加慢速消化淀粉 (SDS) 和抗性淀粉 (RS) 的含量, 有助于预防糖尿病、高血脂及心脑血管疾病等慢性疾病。因此, 藜麦淀粉适合患有肥胖、糖尿病、高血脂及心脑血管疾病等人群食用。

表 7 不同品种淀粉的 RDS、SDS、RS 含量

Table 7 contents of RDS, SDS and RS in different starch varieties %

淀粉品种	RDS 含量	SDS 含量	RS 含量
藜麦淀粉 ^[24]	68.0a	25.5d	6.5a
玉米淀粉 ^[25]	80.4b	11.7c	7.9b
马铃薯淀粉 ^[25]	80.2b	6.4a	13.4d
小麦淀粉 ^[25]	80.9c	10.5b	8.6c

注: 同一列中, 字母 a、b、c 表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: letters a, B and C indicate significant difference in the same column ($P < 0.05$).

4 结论与展望

本文综述了藜麦的营养价值和藜麦淀粉的结构与相关特性, 发现藜麦的营养价值丰富, 符合人们对健康和营养的追求。藜麦淀粉中支链淀粉含量高, 糊化温度较低, 较之于其他谷物藜麦中含有较高的慢消化淀粉含量, 因此对于低升糖食品的生产也有较好的应用前景。目前藜麦已经应用于面包、馒头、面条等主食加工, 并且由于藜

麦中不含麸质, 可以成为麸质不耐受和腹腔疾病患者的无麸质 (GF) 食品替代品。除食品外, 藜麦淀粉由于其独有特性可以用于生物膜生产 (如油脂的微胶囊化) 以及经过修饰的藜麦淀粉可以作为 Pickering 乳液的稳定剂。目前, 藜麦在国内仍是新兴谷物, 对于藜麦的培育种植, 营养成分的研究以及相关产品的开发还有很大的研究空间。

参考文献:

- [1] 魏爱春, 杨修仕, 么杨, 等. 藜麦营养成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 272-276.
WEI A C, YANG X S, MO Y, et al. Research progress on nutritional functional components and bioactivity of quinoa[J]. Food science, 2015, 36 (15): 272-276.
- [2] GUANTIAN L, FAN Z. Quinoa starch: structure, properties, and applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181.
- [3] NAVRUZ-VARLI S, SANLIER N. Nutritional and health benefits of quinoa (Chenopodium Quinoa Willd.)[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69, 145-147.
- [4] LINDEBOOM N, CHANG P, FALK K, et al. Characteristics of starch from eight quinoa lines[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82(2): 216-222+103-106.
- [5] E AJL. Quinoa (chenopodium Quinoa Willd.): Composition, chemistry, nutritional, and functional properties[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2009, 58: 56-58.
- [6] WRIGHT K H, PIKE O A, FAIRBANKS D J, et al. Composition of atriplex hortensis, sweet and bitter chenopodium quinoa seeds[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(4): 75-78.
- [7] MUNDIGLER N. Isolation and determination of starch from amaranth (amaranthus cruentus) and quinoa (chenopodium quinoa)[J]. Starch-Stärke, 1998, 50(2): 20-23.
- [8] 陈树俊, 胡洁, 庞震鹏, 等. 藜麦营养成分及多酚抗氧化活性的研究进展[J]. 山西农业科学, 2016, 44(1): 110-114+122.
CHEN S J, HU J, PANG Z P, et al. Research progress of quinoa nutrients and antioxidant activity of polyphenols[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44 (1): 110-114+122.
- [9] M. J. K. Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (chenopodium quinoa willd.)[J]. Academic Press, 1992, 5(1): 24-33.
- [10] Vega-Gálvez A, MIRANDA M, VERGARA J, et al. Nutrition facts and functional potential of quinoa (chenopodium quinoa willd.), an ancient andean grain: a review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(15): 17-20.
- [11] GRAF B L, ROJAS-SILVA P, ROJO L E, et al. Innovations in health value and functional food development of quinoa (chenopodium quinoa willd.)[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(4). 24-26.

- [12] REPO R, HELLSTRM J K, PIHLAVA J, et al. Flavonoids and other phenolic compounds in andean indigenous grains: quinoa (chenopodium quinoa), kaiwa (chenopodium pallidicaule) and kiwicha (amaranthus caudatus)[J]. Food Chemistry, 2009, 120(1).
- [13] BERTOFT E, PIYACHOMKWAN K, CHATAKANONDA P, et al. Internal unit chain composition in amylopectins[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(3): 24-27.
- [14] 焦梦悦. 藜麦淀粉特性、结构及其对 I 型糖尿病小鼠的影响[D]. 河北农业大学, 2019.
JIAO M Y. Properties and structure of quinoa starch and its effect on type I diabetic mice[D]. Hebei Agricultural University, 2019.
- [15] HANASHIRO I, ABE J, HIZUKURI S. A Periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography[J]. Carbohydrate Research, 1996, 283.
- [16] LI G, ZHU F. Molecular structure of quinoa starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 158: 33-35.
- [17] 刘东莉. 不同链/支比玉米淀粉颗粒结构原位表征与分析[D]. 浙江大学, 2014.
LIU D L. In situ characterization and analysis of granular structure of corn starch with different chain/branch ratio[D]. Zhejiang University, 2014.
- [18] JANE J. Current understanding on starch granule structures[J]. The Japanese Society of Applied Glycoscience, 2006, 53(3): 45-47.
- [19] 刘延奇, 吴史博, 秦令祥, 等. 配体对淀粉晶型结构的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2009, 42(5): 26-27.
LIU Y Q, WU S B, QIN L X, et al. Effect of ligands on crystal structure of starch[J]. Food and feed industry, 2009, 42(5): 26-27.
- [20] LI G, ZHU F. Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 164.
- [21] TANG H, WATANABE K, MITSUNAGA T. Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki seeds[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(1).
- [22] SATHAPORN S, DELPHINE C, SEAN A, et al. Physicochemical properties and starch digestibility of whole grain sorghums, millet, quinoa and amaranth flours, as affected by starch and non-starch constituents[J]. Food Chemistry, 2017, 233.
- [23] INOUCHI N, NISHI K, TANAKA S, et al. Characterization of amaranth and quinoa starches[J]. The Japanese Society of Applied Glycoscience, 1999, 46(3).
- [24] 王隼. 藜麦蛋白和淀粉的分离提取及性质研究[D]. 江南大学, 2018.
WANG L. Isolation and properties of quinoa protein and starch[D]. Jiangnan University, 2018.
- [25] 缪铭, 江波, 张涛. 淀粉的消化性能与 RVA 曲线特征值的相关性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(5): 16-19.
MIAO M, JIANG B, ZHANG T. Correlation between starch digestibility and RVA curve eigenvalues[J]. Food science, 2009, 30 (5): 16-19.
- [26] 杨丽英, K. SRIROTH, K. PIYACHOMKWAN, 等. 泰国木薯淀粉特性研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2003(S1): 110-114.
YANG L Y, K. SRIROTH, K. PIYACHOMKWAN, et al. Study on starch properties of cassava in Thailand[J]. Journal of Yunnan University (Natural Science Edition), 2003, (S1): 110-114.
- [27] N E H, M K S, H C J. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46 Suppl 2.
- [28] 袁晓丽. 藜麦淀粉的提取及改性后理化性质的分析[D]. 天津科技大学, 2017.
YUAN X L. Extraction of quinoa starch and analysis of physicochemical properties after modification[D]. Tianjin University of Science And Technology, 2017. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。