

绿豆淀粉的性质、改性及其应用

周淑蓝, 叶发银*, 赵国华

(西南大学食品科学学院 川渝共建特色食品重庆市重点实验室 重庆北碚 400715)

摘要 绿豆及其组分作为高附加值健康食品配料的研究日益深入。淀粉是绿豆的主要组分,约占干物质的 25%~60%,不仅影响绿豆食用品质,而且是具有独特加工性能的原料。除了传统用于制作粉条和粉丝以外,近年来,利用绿豆淀粉加工新型食品以及抗性淀粉、活性成分载体、淀粉可食膜、淀粉纳米颗粒等配料的相关研究与开发受到重视。本文总结绿豆淀粉的提取制备、组成结构和理化性质,以及改善绿豆淀粉加工适应性的改性方法,归纳绿豆淀粉的食品工业用途,以期为提高绿豆淀粉的加工适应性和促进绿豆淀粉资源的综合利用提供参考。

关键词 淀粉; 绿豆; 理化特性; 食品应用; 改性技术

文章编号 1009-7848(2022)04-0450-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.044

绿豆(*Vigna radiate* L. Wilczek)是豆科豇豆属一年生草本植物,不仅是我国传统栽培作物,而且在南亚、东北亚、东南亚、中东等地区广泛种植,具有抗逆性强、生长期短等特点^[1]。绿豆营养丰富,在我国是药食兼用的重要资源;在印度、尼泊尔等南亚国家,绿豆用来制作汤、糊、饼等主食以及各类糕点、甜品及膨化休闲食品等^[2]。随着健康食品产业的蓬勃发展,绿豆在传统食品升级改造和功能性食品开发中越来越受到重视^[3-4]。淀粉是绿豆种子的主要组分,与谷物及薯类淀粉相比,绿豆淀粉具有较高的直链淀粉含量^[5],易老化,成膜性强^[6],是制作粉丝、粉条、粉皮的优良原料^[7]。用绿豆淀粉制作的龙口粉丝名扬海外,是中华传统食品中的瑰宝。随着研究的深入,绿豆淀粉的优良特性逐步被发现。绿豆淀粉可加工制备抗性淀粉、活性成分载体、胶囊壁材、可食膜等,具有极大的商业开发价值^[8-9]。然而,相比于大宗的玉米淀粉、马铃薯淀粉和小麦淀粉,绿豆淀粉的开发利用程度不高,其潜在的广阔的工业应用有待发掘^[1,10]。淀粉作为绿豆的主要组分,在加工绿豆糕点、豆芽菜、粉丝、粉皮及粥类等产品的过程中,淀粉的组分结

构变化对其制品品质的形成具有重要影响,相关研究有待深入^[11]。从这一现状出发,本文对绿豆淀粉的化学组成、加工特性、改性措施和应用开发进行总结,并探讨绿豆淀粉研究的重点方向,以助力我国绿豆淀粉资源的开发。

1 绿豆淀粉的提取及化学组成

绿豆淀粉占绿豆籽粒干重的 25%~60%,其含量受种质、栽培等因素影响。绿豆淀粉的提取通常采取湿磨法^[12-13],即在绿豆淀粉提取前,一般将绿豆浸泡(料水比 1:2~1:15)过夜,使其充分吸收水分,随后进行湿法研磨制成浆液。这时淀粉粒从细胞组织中分离,游离到浆液中。为了提高淀粉粒的分离效率,常采取碱法或亚硫酸浸泡绿豆,以便于淀粉的提取^[14]。浆液可采用布袋(约 80 目)粗滤、过筛,收集滤液,将滤液静置沉淀即可得到淀粉,经水反复洗涤去除杂质,最后将湿淀粉低温(约 40℃)烘干。由于绿豆的蛋白质含量偏高,通常浆液比较粘稠,淀粉沉降缓慢,给淀粉回收增加了难度。为解决此问题,工业上主要采取旋流分离法制备绿豆淀粉,通过离心手段加速淀粉与液体的分离,而我国生产龙口粉丝的绿豆淀粉则采取酸浆法制备^[15]。酸浆是绿豆浸泡磨浆后经自然发酵形成的含有大量活的微生物(主要是乳酸菌)的酸性浆液,酸浆微生物对绿豆淀粉具有凝集作用,可使绿豆淀粉在富含蛋白质的粘稠浆液中加速沉降,提高淀粉得率^[11]。同时,酸浆对绿豆淀粉粒具有净化或物性修饰的作用^[16]。Liu 等^[17]对比分析了酸浆

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871837);重庆市技术创新和应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-dxtwBX0029)

作者简介: 周淑蓝(2000—),女,硕士生

通信作者: 叶发银 E-mail: fye@swu.edu.cn

法和旋流分离法制备的绿豆淀粉的物性差异,结果表明酸浆法得率更高,酸浆法绿豆淀粉具有更高的直链淀粉含量、脂肪、蛋白质及灰分含量,淀粉糊(95℃)黏度更高,且酸浆法绿豆淀粉更适宜制作粉丝。

实验室及工业制取绿豆淀粉中总淀粉含量为 85~94.7 g/100 g (干重),还含有一定比例的脂肪(0~0.51/100 g 干重)^[12-14]、蛋白质(0.05~0.69 g/100 g 干重)^[7,18-19]和灰分(0~0.18 g/100 g 干重)^[9,17]等成分(表 1)。绿豆淀粉中直链淀粉含量为 16~47 g/100 g (干重)^[19,20,21]。绿豆淀粉中直链淀粉含量通常要高于薯类或谷物淀粉^[14-15]。绿豆淀粉提取方式会影响其化学组成。绿豆淀粉粒含有少量内源性脂质,以游离或结合态存在,游离型脂质可用氯仿-甲醇

提取,进一步采用异丙醇-水处理残留物可提取结合态脂肪^[22]。Park 等^[13]研究发现,向浸泡液中加入适量碱(0.2%NaOH)可显著降低绿豆淀粉中蛋白质含量,从 0.37%~0.69%(水浸法)下降到 0.24%~0.32%(碱浸法),这主要是由于碱液脱除了附着在淀粉粒表面的蛋白质。提取方式会影响到淀粉的加工特性。Chang 等^[21]研究了 4 种提取方式(纯水浸泡、NaOH 或 Na₂SO₃ 水溶液浸泡、乳酸发酵液浸泡)从绿豆中制取淀粉,结果显示提取方式对直链淀粉含量、粗蛋白及粗脂肪含量无影响,而用乳酸发酵液浸泡制得绿豆淀粉粒度显著减小,糊化温度区间(ΔT)变窄,糊化焓(ΔH)降低,冷糊黏度下降。

表 1 绿豆淀粉的化学组成

Table 1 Chemical composition of mung bean starch

产地	提取方法	得率/%	^a 淀粉/ g·(100g) ⁻¹	^b 直链淀粉/ g·(100g) ⁻¹	^a 蛋白质/ g·(100g) ⁻¹	^a 脂肪/ g·(100g) ⁻¹	^a 灰分/ g·(100g) ⁻¹	参考文献
中国	湿磨法	39.4	-	33.7 ^d	-	-	-	[7]
印度	湿磨法	59.3	90.9	47.0	0.14	-	0.09	[3]
印度	湿磨法	27.68	-	38.98	0.84	-	0.18	[9]
越南	湿磨法	-	-	16.1~31.7	0.21~0.38	0~0.1	0~0.1	[10]
韩国	湿磨法	-	-	39.7~42.2	0.37~0.69	-	-	[13]
韩国	湿磨法	-	93.0~94.7	36.9~38.5	0.1~0.2	-	-	[18]
泰国	-	-	-	24.56	0.13	0.06	0.03	[19]
加拿大	湿磨法	31.10	-	39.8	0.05 ^e	0.32	0.11	[22]
中国	酸浆法	33.8	-	34.3	1.34	0.13	0.15	[17]
中国	酸浆法	-	-	30.9	0.08	0.20	-	[22]

注:^a、以干基计;^b、相对于淀粉;^d、绝对直链淀粉含量;^e、氮元素含量;-、原文未提供数据。

2 绿豆淀粉的多尺度结构

2.1 颗粒结构

绿豆淀粉具有圆球形、椭球型、肾形等不同的形态^[23-24]。粒度通常为 5~35 μm,受品种的影响较大。较大颗粒(>10 μm)的绿豆淀粉一般为肾形或椭球形,表面光滑^[25],其垂直于颗粒长轴方向的一侧有折痕结构^[26-27],而较小颗粒(<10 μm)一般为圆球形^[26,28]。绿豆淀粉粒的形态粒度多样性的成因尚不清楚。绿豆淀粉具有典型的双折射现象^[29]。在偏光显微镜下交叉交叉点基本位于淀粉粒的中央^[4,30],在绿豆淀粉粒上多数呈斜交叉,极少数为颗粒中央垂直交叉^[20],双折射性的强弱

与绿豆淀粉颗粒的大小和结晶程度有关^[27]。

2.2 结晶结构

由表 2 可见,绿豆淀粉的晶型为 A 型^[19,24,31]或 C 型^[23,32]。A 型绿豆淀粉的结晶衍射峰(2θ)在 15°(单峰)、17°(双峰)和 23°(单峰)附近,不同品种绿豆淀粉 A 型结晶的衍射强度和位置略有差异。绿豆淀粉 C 型结晶是偏向于 A 型结构的 CA 型结晶,这可能是由 A 型结构在某些特定的情况下转化而来^[24,33]。在 C 型结晶中可观测到直链淀粉-脂质复合结构的衍射峰($2\theta=19.83^\circ$)^[34]。绿豆淀粉结晶结构的差异主要与品种来源有关^[31],同时还会受到提取制备方式的影响^[22]。绿豆淀粉相对结晶

度为16%~43%^[21,23]。淀粉结晶度的差异与其晶体大小、直链淀粉含量及链长、结晶区域数量以及结晶域内双螺旋的取向和相互作用程度有关。

表2 绿豆淀粉的结晶结构和粒度

Table 2 Semi-crystalline structure and granularity of mung bean starch

晶型	2 θ /°	结晶度/%	粒度/ μm	参考文献
A型	16.9°, 19.7°, 22.9°	21.6	-	[8]
A型	15°, 17°, 23°	27.8~34.6	-	[10]
A型	15.52°, 17.58°, 18.02°, 20.47°, 23.21°	34.52	-	[11]
A型	15.13°, 16.98°, 17.94°, 22.99°	-	7.9~31.6	[16]
A型	15.2°, 17.0°, 17.9°, 23°	20.80	22.09	[19]
A型	15.19°, 17.08°, 18.03°, 23.10°	24.49	-	[24]
C型	15°, 17°, 18°, 23°	29.5~30.4	17.0~17.6	[18]
C型	15.36°, 17.30°, 23.10°	16.23~42.39	18.46~26.81	[23]
C型	15.3°, 17.3°, 23.1°	24.2	-	[27]
C型	15.3°, 17.3°, 23.5°	24.4	13.56 ^a	[30]
C型	~15°, 17°, 18°, 23°	31	-	[32]
C型	15.13°, 17.11°, 23.10°	17.12	5~30	[33]
C型	15.00°, 17.00°, 17.83°, 19.83°, 22.91°	18.98	17~27	[34]
C型	15.20°, 17.21°, 17.92°, 23.20°	17.23~19.41	14~27	[35]

注: -, 原文未提供数据; ^a: D50。

2.3 分子结构

Yao等^[35]将绿豆淀粉用DMSO/LiBr溶解、异淀粉酶脱支后进行尺寸排阻色谱分析,得到的链长重量分布 $w_{\text{de}}(\lg X)$ 与聚合度(X)关系谱图为双峰曲线,其中, $X < 36$ ($R_h = 0.4 \sim 2$ nm)对应绿豆支链淀粉的短链部分(A_{p1}), $36 < X < 117$ ($R_h = 2 \sim 4.5$ nm)对应其长链部分(A_{p2}), $X > 117$ ($R_h > 4$ nm)对应绿豆直链淀粉。Thitipraphunkul等^[36]分离纯化出绿豆直链淀粉和支链淀粉,经测定直链淀粉的平均聚合度(DP_n)为2200,平均链长为350个葡萄糖残基,摩尔平均链数6.3,并发现直链淀粉含有少量分支结构(16%)。Kaur等^[37]采用HPSEC-MALLS-RI测定6个品种绿豆淀粉的分子结构,其直链淀粉重均分子量(M_w)为 $1.8 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^6$ g/mol; Kim等^[18]报道2个品种绿豆的直链淀粉 M_w 为 $1.8 \times 10^6 \sim 3.4 \times 10^6$ g/mol。这与燕麦淀粉(1.68×10^5 g/mol)、玉米淀粉(1.56×10^5 g/mol)和大米淀粉(1.63×10^5 g/mol)的直链淀粉相比,绿豆直链淀粉的 M_w 高出了1个数量级^[38]。Kaur等^[37]报道绿豆支链淀粉的重均分子量 M_w 达 $2.60 \times 10^8 \sim 2.89 \times 10^8$ g/mol, Ma等^[39]报道绿豆支链淀粉 M_w 为 3.54×10^8 g/mol;

这比谷物支链淀粉的 M_w 高出2个数量级^[38]。绿豆支链淀粉链长分布呈双峰分布,主峰在 DP_{13} 处,在 DP_{41-51} 有1个小峰^[34]。Yao等^[35]报道4个品种绿豆支链淀粉平均链长20.57~21.15,侧链分布为短链(DP_{6-12})27.12%~27.25%,中链(DP_{13-24})47.59%~47.99%,中长链(DP_{25-36})13.25%~13.83%,长链($DP_{>37}$)11.07%~11.87%。结果表明,绿豆支链淀粉以中侧链为主,也存在相当比例的长侧链。

3 绿豆淀粉的功能性质

3.1 热特性

通常采取差示扫描量热法(DSC),通过分析 T_o 、 T_p 、 T_c 以及糊化焓(ΔH)等热力学参数可了解绿豆淀粉的热特性。李文浩等^[20]报道9个品种绿豆淀粉的开始糊化时温度(T_o)为54.74~64.46℃,峰值糊化温度(T_p)在62.27~69.23℃之间,完成糊化温度(T_c)为65.62~75.39℃。糊化温度范围($\Delta T = T_c - T_o$)在一定程度上反映淀粉粒结晶区域的有序程度,有的品种(潍绿8901-32) ΔT 相对较窄(8.20℃),有的(苏绿1号)则相对较宽(20.65℃)。糊化焓(ΔH)的大小反映淀粉粒内有序结构的多少^[32]。

绿豆淀粉糊化焓(ΔH)为 2.3~17.5 J/g,可见不同品种之间差异较大^[20]。

3.2 糊化特性

据文献报道,不同产地或品种来源绿豆淀粉的糊化特性迥异。由于分析结果受所用仪器(布拉斯德黏度仪、快速黏度仪)及测试条件(淀粉浓度、升温速率)影响较大,这导致不同文献研究结果难以直接对比。当测量条件恒定,绿豆淀粉糊化特性即与品种来源、淀粉粒大小、淀粉分子结构、直链淀粉及其共存物含量等因素有关^[12-14]。Li 等^[5]分析了 10 个品种绿豆淀粉的黏度曲线,峰值黏度 6 064~7 149 cP,谷值黏度 2 890~3 514 cP,崩解值 2 858~3 937 cP,冷糊黏度 3 985~4 651 cP,回生值 511~1 201 cP,不同品种之间糊化特性参数之间存在显著差异。Park 等^[13]研究表明不同品种绿豆淀粉之间糊化特性参数间的差异主要体现在回生值和冷糊黏度上。Kaur 等^[37]研究报道 4 个品种绿豆淀粉的冷糊黏度(4 277~4 609 cP)甚至高于峰值黏度(3 208~3 977 cP),这些性质对绿豆淀粉作为增稠或凝胶类食品加工是有利的。

3.3 凝胶特性

绿豆淀粉容易形成凝胶。林伟静等^[12]将 16 种中国绿豆淀粉按照 5%质量浓度制作凝胶,其硬度为 27.95~173.50 g,弹性为 0.61~0.97。Park 等^[13]报道将 3.0 g(干基)与 25 mL 水加热糊化、室温静置 8 h 后在 4 ℃冰箱密封存放 4 d 制得凝胶,其硬度为 1 738.9~1 941.1 g,弹性为 0.54~0.56;Kim 等^[18]报道质量分数 7%的绿豆淀粉糊于 4 ℃放置 24 h 得到的淀粉凝胶,其硬度为 590.9~784.4 g,弹性为 0.98;Chung 等^[40]发现绿豆淀粉经糊化处理(水分 90%,40~60 ℃,1~24 h)后,使其凝胶(8%)的凝胶强度增加,60 ℃处理样品的凝胶硬度增幅达 48%。

3.4 体外消化特性

Sandhu 等^[41]将生绿豆淀粉在 37 ℃保温测定消化性,结果表明其抗性淀粉(RS)占 50.3%,慢消化淀粉(SDS)占 40.0%。Yao 等^[35]报道 4 个品种绿豆淀粉在天然状态下 RS 含量达 80.78%~86.13%,经蒸煮后 RS 仍在 5.89%~10.95%的水平。Sikora 等^[42]将绿豆淀粉浸泡在 NaHCO₃ 溶液(0.5%~2.0%)中,结果发现其抗性淀粉含量增加。Lin 等^[43]

绿豆淀粉依次经高压蒸汽处理、普鲁兰酶脱支、老化、烘干等工序后,测定 SDS 含量为 26.92%,RS 含量为 44.97%;将绿豆抗性淀粉分别与黄原胶、魔芋胶按一定比例复配,导致 RS 含量降低而 SDS 含量升高,0.30%魔芋胶使绿豆抗性淀粉中 RS 下降到 3.48%,而 SDS 上升到 54.23%;该研究为通过食品组分调节绿豆淀粉的消化性质提供了借鉴。

4 绿豆淀粉的改性技术

为提高绿豆淀粉的加工适性,可采取的改性手段包括化学、物理、微生物发酵或酶法,总结在表 3。

绿豆淀粉化学改性包括氧化^[44]、酯化^[44]、醚化^[27]、交联^[45]等方式。淀粉与氧化剂作用得到氧化淀粉。在次氯酸钠作用下,绿豆淀粉分子葡萄糖单元的仲醇羟基被氧化成羰基或羧基,得到取代度 0.05 的氧化淀粉。氧化使绿豆淀粉膨胀力降低(3.5 g/g→1.55 g/g)、吸水性和持油力增加;相比绿豆淀粉,质量分数 5%的氧化淀粉凝胶具有更高的储能模量。Bushra 等^[44]采用琥珀酸酐作用于绿豆淀粉,得到绿豆淀粉琥珀酸酯(取代度 0.1);与绿豆淀粉相比,其膨胀力增加,而持油力、糊化温度和凝胶析水率均降低。Bushra 等^[49]以醋酸乙烯酯为酯化剂,碳酸钾为催化剂,在微波辅助下通过酯交换得到取代度 0.003~0.27 的醋酸酯淀粉,酯化使其吸水性增加,糊化温度及糊化焓降低。Kittipongpatana 等^[28]利用一氯乙酸与绿豆淀粉反应制备羧甲基绿豆淀粉,研究发现产物的取代度受反应介质影响,在丙醇介质中产品取代度为 0.31~0.56,而甲醇中产品取代度为 0.06~0.36。

绿豆淀粉的物理改性手段更为丰富,包括球磨^[46]、高压均质^[26]、湿热^[8]、干热^[47]、糊化、高静压以及超声波处理等。逯蕾等^[46]采用行星式球磨机处理绿豆淀粉,淀粉结晶结构随球磨进行逐渐被破坏,最终偏光十字消失,淀粉糊峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值降低,透明度提高。李贵萧等^[26]报道绿豆淀粉乳(20%,质量分数)高压均质处理(100 MPa)后,峰值黏度、谷值黏度和冷糊黏度均有所降低,淀粉糊的透光率下降。湿热处理是在低于淀粉糊化所需水分含量且高于糊化温度

表3 绿豆淀粉的改性

Table 3 Modifications of mung bean starch

改性方法	相关技术	具体方法	有益效果	参考文献
化学改性	氧化	淀粉乳(50%,质量分数),35℃,pH 9.5,与5%NaOCl作用30 min	吸水性从1 g/g→2.2 g/g;90℃溶解性5%→10%	[44]
化学改性	酯化	50 g淀粉与3.3%(质量分数)碳酸钠混合,再加入3.3%(质量分数)琥珀酸酐,25℃反应10 h	冻融稳定性(5个循环):析水率从31%→13%	[44]
化学改性	酯化	10 g淀粉+28.7 mL醋酸乙酯,微波加热至72℃维持2 min,加入K ₂ CO ₃ ,95℃,2 min	取代度0.003~0.27;糊化温度随取代度增加而降低;吸水性随取代度增加而增加	[4]
化学改性	醚化	一氯乙酸为改性剂,溶剂为甲醇/乙醇/1-丙醇/2-丙醇,弱碱催化,冰乙酸终止反应	1%(质量分数)淀粉溶液的黏度比改性前的提升3~5倍,可达149.7 mPa·s	[27]
物理改性	辐照	⁶⁰ Co,0~5 kGy,环境温度~25℃	辐照使绿豆淀粉糊透明度提高,表观黏度降低,淀粉凝胶硬度增加,弹性降低	[32]
物理改性	球磨	80 g淀粉,行星式球磨机,转速300 r/min,0~6 h	随着球磨的进行淀粉溶解度提高,糊化温度降低,淀粉糊透明度增加	[45]
物理改性	高压均质	20%淀粉乳,100 MPa,处理数次	糊化焓降低,峰值黏度从3 108 mPa·s降至2 756 mPa·s,淀粉糊透光率下降	[26]
物理改性	湿热处理	淀粉物料水分含量15%~35%,密封,处理温度120℃维持12 h	抗性淀粉含量显著增加,初始水分含量20%,样品抗性淀粉含量高达45.2%	[8]
物理改性	糊化处理	8%淀粉乳,45~60℃维持1~24 h	糊化处理使绿豆淀粉凝胶硬度改善,45~55℃糊化处理使淀粉冷糊黏度增加	[48]
物理改性	高静水压	20%(质量分数)淀粉乳,120~600 MPa维持30 min	随着处理压力增加,淀粉凝胶刚性和黏弹性增加;480 MPa处理样品,触变性最明显	[49]
生物改性	微生物发酵	将酸浆(1:4,体积比)添加到淀粉乳中,常温静置24 h,收集淀粉	相对于旋流法,酸浆法得到的淀粉中直链淀粉含量较高,淀粉糊的透光性更高	[17]
生物改性	酶解	25%(质量分数)淀粉乳,醋酸钠缓冲液, α -淀粉酶+葡萄糖淀粉酶,35℃,处理24 h	淀粉粒剥蚀并形成孔洞;直链淀粉含量下降,峰值黏度上升(847.2 cP→1 132.8 cP)	[51]
复合改性	研磨+酯化	40%(质量分数)淀粉乳,pH 8.0~8.5,1.00 g乙酸酐,30℃反应0~48 h,研磨机转速20 r/min	取代度为0.0146~0.0259;研磨可改善乙酰化绿豆淀粉的品质	[30]
复合改性	酸水解+糊化处理	20%淀粉乳,HCl调整pH 1~5,50℃保温24 h;或pH 4恒定,20~60℃保温24 h	崩解值降低,冷糊黏度有升有降,淀粉凝胶硬度显著增加,弹性无显著性变化	[52]
复合改性	超声波+ α -淀粉酶	超声波25,40 Hz单用或联用,酶5 U/g,温度60℃,60 min	淀粉粒出现孔洞,粒度下降,峰值黏度下降,淀粉回生性提升	[53]

(100~120℃)条件下,长时间处理淀粉的一种物理改性方式。Li等^[8]控制绿豆淀粉水分含量(15%~35%),于120℃湿热处理12 h,结果表明湿热处理未引起淀粉粒粒度、完整性及晶型改变,而直链

淀粉含量(29.7%→35.0%)、相对结晶度(21.6%→34.5%)及糊化焓(5.1 J/g→22.1 J/g)显著增加,淀粉粒对水解酶抗性增强。糊化处理是在高于淀粉玻璃化转变温度(T_g)而低于起始糊化温度(T_0)条

件下,将淀粉粒置于充足水分含量环境中,使淀粉粒结构在水热作用下发生重组而未糊化,从而改善淀粉物性的改性方式。Vamadevan 等^[48]将绿豆淀粉在比 T_0 低 6 °C 的水(80%,质量分数)中糊化处理,绿豆淀粉的 ΔT 收窄而 ΔH 增加。Zou 等^[33]报道糊化处理使绿豆淀粉的冷糊黏度显著增加(3 947 cP \rightarrow 8 075 cP),相比于连续糊化,反复糊化使其相对结晶度、糊化焓以及对水解酶抗性的增幅更大。Jiang 等^[49]将绿豆淀粉乳(20%,质量分数)在高静水压 120~600 MPa 下维持 30 min,结果发现随着处理压力增加,淀粉的峰值黏度和冷糊黏度增加,回生值降低,其中 480 MPa 处理样品的冷糊黏度达最高值(未处理组的 1.89 倍),淀粉糊的流动指数(n)最低,触变性最明显,可见高静水压处理是调控绿豆淀粉流变学特性的有效手段。

绿豆淀粉的生物改性主要指通过微生物发酵、内源酶或外源酶的作用来改变淀粉的物性。熊柳等^[50]研究了发酵和发芽对绿豆淀粉黏度性质的影响,结果显示混合菌种发酵样品的峰值黏度和谷值黏度大幅下降,发芽后提取淀粉的峰值黏度和谷值黏度均显著增加。Uthumporn 等^[51]采用双酶法(α -淀粉酶和葡萄糖淀粉酶)处理绿豆淀粉(25%,质量分数,35 °C,24 h),发现绿豆淀粉粒出现孔洞和表面剥蚀现象,其糊峰值黏度增加 33.7%,崩解值增加 333%,而糊化温度和回生值无显著变化。

采用 2 种及以上改性方式或变性试剂处理淀粉即为复合改性。Zhang 等^[30]在醋酸酯绿豆淀粉制备时,将反应体系置于研磨机内,结果表明研磨腔体内发生的机械化学作用提高了反应效率,改善了醋酸酯绿豆淀粉的性能。Sun 等^[52]考察了酸水解联合糊化处理对绿豆淀粉的影响,研究发现在低酸度($\text{pH} \leq 2$)条件下,酸的影响占主导,在较高温度(50~60 °C)条件下,温度的影响占主导;联合处理使淀粉凝胶硬度显著增加,而凝胶弹性无显著性变化。Hu 等^[53]研究了超声波辅助 α -淀粉酶处理绿豆淀粉,结果表明酶处理使绿豆淀粉的峰值黏度下降,超声波辅助可提升酶处理效果,并且双频超声波(25 kHz+40 kHz)比单频超声波的降低幅度更大;研究认为超声波的空化效应破坏了淀粉粒的结构,以促进酶的作用;改性提升了绿豆淀粉

的回生性能。

5 绿豆淀粉的应用

绿豆淀粉因具有易老化的特性而广泛用于粉条、粉皮的加工^[2-3]。绿豆淀粉粉条品质(如干粉条的光泽度和透明度,熟粉条的口感和质地)与原料特性及加工工艺密切相关^[7,15]。高直链淀粉含量,直链淀粉具有较大的平均聚合度,以及直链淀粉-脂质复合物的存在是促进绿豆淀粉粉条品质形成的重要因素^[2,39]。绿豆粉条品质受原料因素和工艺因素(粉团水分含量、熟制时间和老化温度等)的影响^[54]。淀粉原料特性除品种及栽培因素影响外,还与绿豆淀粉提取方式有关^[17]。与旋流法绿豆淀粉相比,酸浆法绿豆淀粉制作的粉丝凝胶网状结构更致密,其蒸煮损失更低^[16]。绿豆淀粉作为配料可提升米粉的品质。添加 5% 的绿豆淀粉,可使干法挤出加工米粉表面更光滑,结构更致密,感官评分更高^[55]。

绿豆淀粉是生产抗性淀粉的优质原料。Photinam 等^[2]研究发现绿豆淀粉与豇豆淀粉按一定比例配粉,可增加粉丝中抗性淀粉含量。将二者按质量比 1:1 复配,可使干粉丝及熟粉丝 RS 分别提升 22.5% 和 46.7%。Li 等^[31]报道采用压热-回生技术处理绿豆淀粉制得 RS 为 11.7% 的抗性淀粉,而压热处理的淀粉采用普鲁兰酶脱支后再回生,可进一步提升抗性淀粉含量(RS 为 22.9%~51.0%)。Li 等^[8]研究报道对绿豆淀粉进行湿热处理(水分含量 20%,120 °C 处理 12 h),其抗性淀粉含量可达 45.2%,为原淀粉的 4 倍。赵姝婷等^[56]研究了硒化绿豆抗性淀粉制备工艺,采取干热法(150 °C,4 h)制备绿豆淀粉柠檬酸酯,接着通过硝酸-亚硒酸钠法得到硒化绿豆抗性淀粉,研究发现绿豆淀粉柠檬酸酯仅对 α -淀粉酶有抑制作用,而硒化绿豆抗性淀粉对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶都具有抑制活性,该研究为开发兼具调控淀粉消化和强化微量元素的功能性淀粉配料提供了思路。

绿豆淀粉是良好的成膜材料,在制膜时通过加入多元醇等增塑剂、食品胶(如魔芋葡甘聚糖)或油脂等提升膜的机械性能或阻隔性能^[57-58]。Lee 等^[59]以绿豆淀粉/瓜尔豆胶为基料的食用乳液对大米糕进行涂膜,结果表明该涂膜对大米糕具有

很好的保鲜效果,与对照组相比,硬度下降 29%,结晶速率降低 24%。Li 等^[60]采用纳米乳化精油与绿豆淀粉制备复合涂膜,涂膜对馒头感官和风味品质无显著影响,有效提升了馒头的贮藏品质(霉菌和酵母平板计数分别下降 32%和 37%)。绿豆淀粉膜具有良好的透明性、机械强度和阻隔性能,其作为包装材料的应用潜力值得深入研究。

绿豆淀粉作为活性成分载体。Keatkrai 等^[61]将绿豆淀粉糊化后加入薄荷酮,绿豆淀粉分子在老化过程中与薄荷酮复合,对薄荷酮的包封率为 4.2%,优于大米淀粉(<1%)。Mun 等^[62]采用绿豆淀粉制备乳液填充凝胶,研究表明,将含 β -胡萝卜素的乳液填充在淀粉凝胶中,淀粉凝胶网络不仅可以防止乳液经过上消化道时的油滴聚集作用,

而且提高了乳液的油脂消化率和 β -胡萝卜素的生物可给性。这为亲脂性成分荷载及营养强化提供了思路。Nadaf 等^[63]将绿豆淀粉制成凝胶,通过溶剂置换法得到多孔淀粉。研究发现,多孔淀粉可起到对难溶性药物阿苯达唑的固体分散作用,二者混匀后压成片剂,多孔淀粉使阿苯达唑的溶出速率提高,研究认为这主要是通过增强润湿,降低结晶性和降低界面张力的结果。该研究为亲脂性食品活性成分载体的开发提供了借鉴。有学者报道绿豆淀粉采用酸水解法(3.16 mol/L 硫酸,40 °C,7 d)制备淀粉纳米颗粒,平均粒径 53.7 nm,呈椭球型^[63]。绿豆淀粉纳米颗粒的食品用途有待进一步探究。

表 4 绿豆淀粉在食品工业中的用途

Table 4 A summarization of food application of mung bean starch

用途	淀粉形态	应用方式	具体应用特性	参考文献
粉丝	天然淀粉	分别采用酸浆法和旋流法制取淀粉;漏粉熟化制成粉丝,4 °C冷却,于-10 °C老化 24 h,40 °C热风烘干	与旋流法淀粉相比,酸浆法绿豆淀粉制作的粉丝表面更光滑,煮熟后网状结构更致密,蒸煮损失更低	[54]
米粉	天然淀粉	大米粉:绿豆淀粉=100~92:0~8,挤出法制成米粉挤出参数:腔体温度(°C) 55:65:90:0,转速 90 r/min	绿豆淀粉降低了米粉的蒸煮损失,提高了米粉硬度和弹性,黏着性下降,感官评分提高(25.40→31.00)	[55]
抗性淀粉	老化淀粉	950 g 生淀粉(绿豆淀粉与豇豆淀粉)与 250 g 熟芡(含 50 g 生淀粉)制备粉团,手工漏粉,熟化,4 °C放置 0~9.5 h,-13 °C冻藏 19~53 h,取出,45 °C烘至水分 10%~14%	绿豆淀粉与豇豆淀粉按质量比 1:1 复配制作的粉丝,4 °C老化 1.5 h,-13 °C冻藏 21 h,干粉丝及熟粉丝 RS 分别提升: 23.83%→29.2%,13.23%→19.41%	[2]
抗性淀粉	改性淀粉	干热法(150 °C,4 h)制备绿豆淀粉柠檬酸酯,硝酸-亚硒酸钠法制备硒化绿豆抗性淀粉 MB-RS4·Se(IV)	绿豆淀粉柠檬酸酯 RS 含量 83.72%; MB-RS4·Se(IV)对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶有明显抑制作用	[8]
抗性淀粉	酶改性淀粉	绿豆淀粉依次经高压蒸汽处理(121 °C,20 min),普鲁兰酶脱支(pH 4.6,55 °C),灭酶(100 °C,15 min),老化(4 °C,24 h),45 °C烘干至~10%水分制得抗性淀粉	抗性淀粉含量 29.9%~51.0%;重均分子量 $3.50 \times 10^3 \sim 3.97 \times 10^3$ g/mol;相对结晶度 21.9%~42.8%;热稳定好,RS 51.0%的 T_g 达 103.3 °C	[31]
可食膜	天然淀粉	绿豆淀粉加热糊化后与瓜尔胶(1.5%,质量分数)混匀,加入葵花籽油,均质 3 min,浇注成膜,40 °C,RH 25%干燥 24 h	葵花籽油(1%~2%)使膜的抗张强度、断裂伸长率、水蒸气透过性降低,氧气透过性和水接触角增加	[6]
可食膜	天然淀粉	向魔芋葡甘聚糖($M_n=9.67 \times 10^3$ u)分散液中趁热滴加绿豆淀粉溶液,混匀,浇注成膜,25 °C,RH 40%干燥 48 h	魔芋葡甘聚糖与绿豆淀粉质量比为 7:3 时,复合膜机械性能最佳;绿豆淀粉膜阻隔性能受二者配比影响	[57]

(续表 4)

用途	淀粉形态	应用方式	具体应用特性	参考文献
可食膜	天然淀粉	绿豆淀粉(3.5%~5.0%)与甘油或山梨糖醇混匀,85℃加热30 min,冷却至50℃,倒膜,35℃热风干燥20 h得到可食膜	可食膜抗张强度为7.14~46.30 MPa,断裂伸长率为2.46~56.95,弹性模量为16.29~1428.45 MPa,密封强度为422.36 N/m	[58]
可食膜	天然淀粉	绿豆淀粉糊化后与瓜尔胶、葵花籽油混匀,高速分散得到乳液;大米糕浸没于乳液15 s后取出,25℃,RH 25%下保存	绿豆淀粉(2%)+瓜尔胶(0.75%)+葵花籽油(1.5%)的膜:使大米糕硬度下降29%,结晶速率降低24%	[59]
可食膜	天然淀粉	绿豆淀粉、大豆多糖、甘油加水搅拌,85℃保温40 min,均质,加入纳米精油乳液(2%),涂刷在馒头表面	馒头在10℃,RH 50%贮藏,涂膜对馒头感官和风味品质无显著影响,然而有效降低了微生物平板计数	[60]
风味物包埋	天然淀粉	0.8%(质量分数)绿豆淀粉悬液140℃处理1 h,80℃水浴保温15 min后,滴加体积分数0.1%的薄荷酮继续保温1 h,冷却至室温过夜	绿豆淀粉对薄荷酮的包封率为4.2%,包封量5.5 μmol,复合物平均粒度13~18 μm,为V7型结晶	[61]
乳液填充凝胶	天然淀粉	β-胡萝卜素溶于玉米油,高压微射流(10 kpsi)处理得到乳液;向乳液中加入淀粉,90℃加热10 min,4℃过夜	乳液填充凝胶具有较高的油脂消化率和β-胡萝卜素生物可给性;凝胶网络可防止油滴聚集	[62]
多孔淀粉	改性淀粉	绿豆淀粉糊化、冷却得到凝胶,浸泡水中8℃过夜,乙醇溶剂置换,50℃干燥6 h,接着105℃干燥2 h,粉碎、过筛	阿苯达唑与多孔淀粉以1:0.5~1:2混匀后压成片剂,比市售制剂的溶出速率提高约1.90倍	[9]
淀粉纳米颗粒	天然淀粉	绿豆淀粉采用酸水解法(3.16 mol/L硫酸,40℃,7 d)可制得平均粒径53.7 nm的椭球型纳米颗粒	绿豆淀粉的酸水解度73.9%,颗粒碎片为圆形或椭圆形,平均直径53.57 nm,为C型结晶	[63]

6 结语

近年来,对绿豆淀粉的分子结构特性、改性制备及应用研究得到广泛重视。绿豆淀粉在粉条、粉丝、淀粉可食膜、抗性淀粉等食品加工及新配料领域极具开发潜力。为更好地开发绿豆淀粉资源,后续发展宜在以下方面进行深入研究:1) 绿豆淀粉分子结构-功能性质关联特性。这是理解绿豆淀粉工艺学特性和营养特性的基础;2) 传统食品加工过程及新兴加工技术对绿豆淀粉结构组成、理化特性及营养特性的影响;3) 绿豆淀粉改性方法以及通过改性探讨其组分变化与功能性质的关系,为探索其潜在的应用提供理论支持和案例式参考。

参 考 文 献

- [1] 曾志红,王强,林伟静. 绿豆的品质特性及加工利用研究概况[J]. 作物杂志, 2018, 27(4): 16-19.
ZENG Z H, WANG Q, LIN W J. Quality characteristics and utilization of mung bean [J]. Crops, 2018, 27(4): 16-19.
- [2] PHOTINAM R, MOONGNGARM A, PASEPHOL T. Process optimization to increase resistant starch in vermicelli prepared from mung bean and cowpea starch[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2016, 28(7): 449-458.
- [3] SINGH U, VORAPUTHAPORN W, RAO P V, et al. Physicochemical characteristics of pigeonpea and mung bean starches and their noodle quality [J].

- Journal of Food Science, 1989, 54(5): 1293–1297.
- [4] BUSHRA M, XU X Y, PAN S Y. Microwave assisted acetylation of mung bean starch and the catalytic activity of potassium carbonate in free - solvent reaction[J]. Starch - Stärke, 2013, 65 (3/4): 236–243.
- [5] LI W, SHU C, ZHANG P, et al. Properties of starch separated from ten mung bean varieties and seeds processing characteristics[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 814–821.
- [6] LEE J S, LEE E, HAN J. Enhancement of the water-resistance properties of an edible film prepared from mung bean starch via the incorporation of sunflower seed oil[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1–15.
- [7] TAN H Z, GU W Y, ZHOU J P, et al. Comparative study on the starch noodle structure of sweet potato and mung bean[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(8): 447–455.
- [8] LI S, WARD R, GAO Q. Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1702–1709.
- [9] NADAF S, JADHAV A, KILLEDAR S. Mung bean (*Vigna radiata*) porous starch for solubility and dissolution enhancement of poorly soluble drug by solid dispersion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 167: 345–357.
- [10] DUYEN T T M, HUONG N T M, PHI N T L, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of mung-bean starches varying amylose contents under citric acid and hydrothermal treatments[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 651–658.
- [11] LIU Y, SU C, SALEH A S M, et al. Effect of germination duration on structural and physicochemical properties of mung bean starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 706–713.
- [12] 林伟静, 曾志红, 钟葵, 等. 不同品种绿豆的淀粉品质特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 47–51.
- LIN W J, ZENG Z H, ZHONG K, et al. Study on characteristics of starch from different mung bean cultivars[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(7): 47–51.
- [13] PARK S J, CHOE E O, KIM J I, et al. Physicochemical properties of mung bean starches in different Korean varieties and their gel textures[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(5): 1359–1365.
- [14] KIM S H, LEE B H, BAIK M Y, et al. Chemical structure and physical properties of mung bean starches isolated from 5 domestic cultivars[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(9): 471–477.
- [15] LI Z, LIU W, SHEN Q, et al. Properties and qualities of vermicelli made from sour liquid processing and centrifugation starch[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(2): 162–166.
- [16] LIU W, SHEN Q. Structure analysis of mung bean starch from sour liquid processing and centrifugation Journal of Food Engineering[J]. 2007, 79(4): 1310–1314.
- [17] LIU W, SHEN Q. Studies on the physicochemical properties of mung bean starch from sour liquid processing and centrifugation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 358–363.
- [18] KIM Y, WOO K S, CHUNG H J. Starch characteristics of cowpea and mungbean cultivars grown in Korea[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 104–111.
- [19] PHRUKWIWATTANAKUL P, WICHICHOTAND S, SIRIVONGPAISAL P. Comparative studies on physico-chemical properties of starches from jackfruit seed and mung bean[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 17(9): 1965–1976.
- [20] 李文浩, 谭斌, 刘宏, 等. 我国 9 个品种绿豆淀粉的理化特性研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(4): 58–64.
- LI W H, TAN B, LIU H, et al. Physicochemical properties of starches separated from nine mung bean varieties grown in china[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(4): 58–64.
- [21] CHANG Y H, LIN C L, CHEN J C. Characteristics of mung bean starch isolated by using lactic acid fermentation solution as the steeping liquor[J]. Food Chemistry, 2006, 99(4): 794–802.
- [22] HOOVER R, LI Y X, HYNES G, et al. Physicochemical characterization of mung bean starch[J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(4): 401–408.
- [23] 张令文, 计红芳, 白师师, 等. 不同品种绿豆淀粉微观结构和热力学特性的比较[J]. 现代食品科技,

- 2015, 31(7): 80–85.
- ZHANG L W, JI H F, BAI S S, et al. Comparison of microstructure and thermal properties of starch from nine mung bean cultivars[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2015, 31(7): 80–85.
- [24] ZHAO K, ZHANG B, SU C, et al. Repeated heat-moisture treatment: A more effective way for structural and physicochemical modification of mung bean starch compared with continuous way[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 452–461.
- [25] LI W, ZHANG F, LIU P, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vigna radiata* L.) starch[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(4): 388–393.
- [26] 李贵萧, 牛凯, 侯汉学, 等. 高压均质对绿豆淀粉机械力化学效应的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(5): 99–105.
- LI G X, NIU K, HOU H X, et al. High pressure homogenization on the effect of mung bean starch mechanochemistry properties[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(5): 99–105.
- [27] ZHANG Y, DAI Y, YU K, et al. Mechanochemical effects of ultrasound on mung bean starch and its octenyl succinic anhydride modified starch[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14: 1261–1272.
- [28] KITTIPONGPATANA O S, SIRITHUNYALUG J, LAENGER R. Preparation and physicochemical properties of sodium carboxymethyl mungbean starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(1): 105–112.
- [29] LI W, GUO H, WANG P, et al. Physicochemical characteristics of high pressure gelatinized mung bean starch during recrystallization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131: 432–438.
- [30] ZHANG K, DAI Y, HOU H, et al. Influences of grinding on structures and properties of mung bean starch and quality of acetylated starch [J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 285–292.
- [31] LI S, GAO Q, WARD R. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch[J]. *Starch - Stärke*, 2011, 63(3): 171–178.
- [32] CASTANHA N, MIANO A C, SABADOTI V D, et al. Irradiation of mung beans (*Vigna radiata*): A prospective study correlating the properties of starch and grains [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 129: 460–470.
- [33] ZOU J, XU M, WANG R, et al. Structural and physicochemical properties of mung bean starch as affected by repeated and continuous annealing and their *in vitro* digestibility[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 898–910.
- [34] AWAIS M, ASHRAF J, WANG L, et al. Effect of controlled hydrothermal treatments on mung bean starch structure and its relationship with digestibility [J]. *Foods*, 2020, 9(5): 664.
- [35] YAO M, TIAN Y, YANG W, et al. The multi-scale structure, thermal and digestion properties of mung bean starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131: 871–878.
- [36] THITIPRAPHUNKUL K, UTTAPAP D, PIYACHOMKWAN K, et al. A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from different cultivars. Part II. Molecular structure of amylose and amylopectin [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54(4): 489–498.
- [37] KAUR M, SANDHU K S, SINGH N, et al. Amylose content, molecular structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from different mung bean (*Vigna radiata* L.) cultivars[J]. *Starch - Stärke*, 2011, 63(11): 709–716.
- [38] SIMSEK S, WHITNEY K, OHM J B. Analysis of cereal starches by high-performance size exclusion chromatography[J]. *Food analytical methods*, 2013, 6(1): 181–190.
- [39] MA M, WANG Y, WANG M, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of legume starches[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 249–255.
- [40] CHUNG K M, MOON T W, CHUN J K. Influence of annealing on gel properties of mung bean starch [J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77(5): 567–571.
- [41] SANDHU K S, LIM S T. Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71(2): 245–252.
- [42] SIKORA M, ŚWIECA M, GAWLIK-DZIKI U, et al. Nutritional quality, phenolics, and antioxidant capacity of mung bean paste obtained from seeds

- soaked in sodium bicarbonate[J]. LWT, 2018, 97: 456-461.
- [43] LIN S, LIU X, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting, rheology, microstructure, crystallinity and *in vitro* digestibility of mung bean resistant starch [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128001.
- [44] BUSHRA M, YUN X X, PAN S Y, et al. Effect of oxidation and esterification on functional properties of mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) starch[J]. European Food Research and Technology, 2013, 236(1): 119-128.
- [45] THESSRIMUANG N, PRACHAYAWARAKORN J. Characterization and properties of high amylose mung bean starch biodegradable films cross-linked with malic acid or succinic acid[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27(2): 234-244.
- [46] 逯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 球磨对绿豆淀粉颗粒形态和理化性质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2015, 12(1): 33-38.
- LU L, HAN X X, ZHENG X L, et al. Effect of ball milling treatment on granule shape and physicochemical properties of mung bean starch[J]. Cereal & Feed Industry, 2015, 12(1): 33-38.
- [47] LIANG S, SU C, SALEH A S M, et al. Repeated and continuous dry heat treatments induce changes in physicochemical and digestive properties of mung bean starch[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15281.
- [48] VAMADEVAN V, BERTOFT E, SOLDATOV D V, et al. Impact on molecular organization of amylopectin in starch granules upon annealing[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(1): 1045-1055.
- [49] JIANG B, LI W, HU X, et al. Rheology of mung bean starch treated by high hydrostatic pressure[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(1): 81-92.
- [50] 熊柳, 孙庆杰. 发酵与发芽处理对绿豆淀粉黏度性质的影响[J]. 粮食加工, 2009, 34(3): 47-49.
- XIONG L, SUN Q J. Effect of fermentation and germination on the viscosity of mung bean starch[J]. Grain Processing, 2009, 34(3): 47-49.
- [51] UTHUMPORN U, ZAIDUL I S M, KARIM A A. Hydrolysis of granular starch at sub-gelatinization temperature using a mixture of amyolytic enzymes[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(1): 47-54.
- [52] SUN Q J, XIONG L, DAI L, et al. Effects of acid hydrolysis and annealing treatment on the physicochemical properties of mung bean starch [C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 634: 1449-1453.
- [53] HU A, LU J, ZHENG J, et al. Ultrasonically aided enzymatical effects on the properties and structure of mung bean starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 146-151.
- [54] GALVEZ F C F, RESURRECCION A V A, WARE G O. Process variables, gelatinized starch and moisture effects on physical properties of mungbean noodles[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(2): 378-381.
- [55] WU F, MENG Y, YANG N, et al. Effects of mung bean starch on quality of rice noodles made by direct dry flour extrusion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1199-1205.
- [56] 赵姝婷, 王维浩, 全志刚, 等. 绿豆 RS4·Se(IV)制备、结构表征及对酶活抑制动力学[J/OL]. 食品科学, 2021: 1-17 [2021-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211203.0237.012.html>.
- ZHAO S T, WANG W H, QUAN Z G, et al. Preparation, structure characterization and inhibition kinetics of mung bean RS4·Se(IV)[J/OL]. Food Science, 2021: 1-17 [2021-12-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20211203.0237.012.html>.
- [57] FANG Y, WANG W, QIAN H, et al. Regular film property changes of konjac glucomannan/mung bean starch blend films[J]. Starch - Stärke, 2020, 72(5/6): 1900149.
- [58] ROMPOTHI O, PRADIPASENA P, TANANUWONG K, et al. Development of non-water soluble, ductile mung bean starch based edible film with oxygen barrier and heat sealability[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 748-756.
- [59] LEE E, SONG H, CHOI I, et al. Effects of mung bean starch/guar gum-based edible emulsion coatings on the staling and safety of rice cakes[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116696.
- [60] LI K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Improving storage quality of refrigerated steamed buns by mung bean starch composite coating enriched with nano-emulsified essential oils[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(9): e13475.

- [61] KEATKRAI J, LUMDUBWONG N, CHAISERI S, et al. Characteristics of menthone encapsulated complex by mungbean, tapioca, and rice starches [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(4): 810–820.
- [62] MUN S, KIM Y R, SHIN M, et al. Control of lipid digestion and nutraceutical bioaccessibility using starch-based filled hydrogels; Influence of starch and surfactant type [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44(44): 380–389.
- [63] KIM H Y, LEE J H, KIM J Y, et al. Characterization of nanoparticles prepared by acid hydrolysis of various starches [J]. *Starch - Stärke*, 2012, 64(5): 367–373.

The Properties, Modification and Application of Mung Bean (*Vigna radiata* L. Wilczek) Starch

Zhou Shulan, Ye Fayin*, Zhao Guohua

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Speciality Food Co-Built by Sichuan and Chongqing, Beibei 400715, Chongqing)

Abstract There is increasingly interest in utilization of mung beans and their components as ingredient for high value-added health foods in recent years. As the major component of mung bean (25%–60%, dry matter basis), the mung bean starch not only affects the edible quality of mung bean, but also has unique processing characteristics. Except for the traditional use for making starch noodles, mung bean starch has become substantially researched to formulate novel food and to manufacture ingredients such as resistant starches, bioactive ingredient delivery carriers, and starch edible films as well as starch nanoparticles. This paper provided an overview of the extraction and isolation, compositional and structural characteristics, physicochemical properties, as well as the enhancement of its processing adaptability through modification. Furthermore, the food industrial uses of mung bean starch were summarized. Future research issues and suggestions were put forward, with a view to the provision of a reference for expanding its functional properties and the comprehensive utilization of mung bean starch resources.

Keywords starch; mung bean; physicochemical properties; food application; modification