

张柳, 齐继风, 贾艳菊, 等. 预处理对豆类淀粉性质的影响及在低 GI 食品中的应用 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 429-436. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040268

ZHANG Liu, QI Jifeng, JIA Yanju, et al. Effect of Pretreatment on the Properties of Bean Starch and Its Application in Low GI Foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 429-436. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040268

· 专题综述 ·

预处理对豆类淀粉性质的影响及在低 GI 食品中的应用

张柳^{1,2}, 齐继风³, 贾艳菊^{1,*}, 生庆海¹, 赵巍², 张爱霞², 刘敬科², 李少辉^{2,*}

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北石家庄 050061;

2. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北石家庄 050050;

3. 河北省农业区划发展中心, 河北石家庄 050051)

摘要: 预处理方式影响豆类淀粉的性质, 进而影响豆类产品的应用。本文综述了不同预处理方式对豆类淀粉的颗粒形态、分子结构、溶解度、糊化特性、抗性淀粉含量等性质的影响, 分析这些预处理方法对豆类在低 GI 食品开发中应用的影响。一定条件下的湿热、超高压、干热、辐照、超声波和酶法处理可使豆类淀粉中抗性淀粉或直链淀粉的含量有所增加, 有利于豆类在低 GI 食品开发中的应用。此外, 本文综述了不同预处理的豆类产品在低 GI 食品开发中的应用现状, 并对应用前景进行了展望。

关键词: 豆类淀粉, 理化特性, 抗性淀粉, 预处理方式, 低 GI 食品

中图分类号: TS235.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)05-0429-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040268



本文网刊:

Effect of Pretreatment on the Properties of Bean Starch and Its Application in Low GI Foods

ZHANG Liu^{1,2}, QI Jifeng³, JIA Yanju^{1,*}, SHENG Qinghai¹, ZHAO Wei², ZHANG Aixia²,
LIU Jingke², LI Shaohui^{2,*}

(1. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business,
Shijiazhuang 050061, China;

2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences,
Shijiazhuang 050050, China;

3. Agricultural Regional Development Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Pretreatment methods affect the properties of bean starch and thus the application of bean products. This article reviewed the effects of different pretreatment methods on the properties of bean starch such as particle morphology, molecular structure, solubility, pasting properties and resistant starch content, and analyzed the impact of those pretreatment methods on the application of beans in the development of low GI foods. Hydrothermal, ultra-high pressure, dry heated, irradiated, ultrasonic and enzymatic treatments under certain conditions increased the content of resistant starch or amylose starch in bean starch, which was beneficial for the application of bean in the development of low GI food. In addition, this paper summarized the current status of the application of different pretreated bean products in the development of low GI food, and provided an outlook on the future prospects.

收稿日期: 2022-04-24

基金项目: 河北省农林科学院科技创新专项课题资助 (2022KJCXZX-SSS-1); 河北省重点研发计划项目 (21327113D); 2021 年度引进留学人员资助项目 (C20210360)。

作者简介: 张柳 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品的研究与开发, E-mail: 2504873812@qq.com。

* 通信作者: 贾艳菊 (1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 健康食品的研究与开发, E-mail: 909479470@qq.com。

李少辉 (1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品风味与物化特性, E-mail: lishaohui007@163.com。

Key words: bean starch; physical and chemical properties; resistant starch; pretreatment methods; low GI food

在我国豆类作物种植十分广泛,资源丰富。豆类作物包括红豆、黄豆、绿豆、鹰嘴豆及白芸豆等^[1],其中淀粉含量为22%~45%且仅含有少量脂肪的豆类称为淀粉质豆类^[2]。豆类营养丰富,可以为人体提供蛋白质、维生素、膳食纤维及矿物元素钙、镁等^[3],某些豆类还富含黄酮、赖氨酸和球蛋白等生物活性成分,在增强人体免疫力、降血糖和抗氧化方面具有一定作用^[4-5]。豆类淀粉具有特殊的结构和理化特性,其晶型结构大部分为C型^[2]。豆类的直链淀粉和抗性淀粉含量较谷物高,具有缓慢消化的特性,属于低或中GI(Glycemic index, GI)食品^[6]。近年来,一些研究人员通过对豆类进行加工预处理,改变豆类淀粉的颗粒结构、理化、消化等方面的特性,提高豆类在某些功能性食品的应用能力。本文介绍了豆类淀粉的结构和理化特性、预处理方式对其结构和特性的影响,并对预处理的豆粉和豆类淀粉在低GI食品中的应用进行了综述。

1 豆类淀粉的结构和理化特性

1.1 豆类淀粉的颗粒特性和分子结构

不同的豆类淀粉有不同的偏光形态和颗粒形状,一般采用偏光显微镜和扫描电子显微镜来观察^[7]。根据淀粉的结晶度和X射线图谱,可以将淀粉颗粒分为A、B、C三种类型,A型淀粉颗粒一般为不规则的多边形,B型淀粉颗粒为球形或卵圆形,C型淀粉颗粒为肾形^[8]。一般来说,A型淀粉更易消化,大多数豆类的淀粉结构为C型,其GI值比谷物类低^[2]。刘明^[2]研究表明,大部分豆类淀粉颗粒在30~40 μm,外表较谷物光滑、形状规则,多为肾形,与谷物淀粉颗粒差异显著。

豆类淀粉是一种由 α -葡萄糖聚合而成的多糖,分为直链淀粉和支链淀粉。直支链淀粉主要由 α -D-1,4糖苷键连接,其聚合度一般在100到10000之间;而支链淀粉的分支则由 α -D-1,6糖苷键连接,聚合度一般大于10000^[9-10]。两者在淀粉结构、性质和功能上差异很大。直链淀粉具有线性结构、更加紧凑,而支链淀粉则有支链结构^[11]。直链淀粉消化速度慢且不完全在小肠前端消化,而支链淀粉的消化迅速^[10]。主要原因是酶作用于直链淀粉的位点比支链淀粉少。谷类淀粉中直链淀粉一般在20%到30%之间,而豆类中的直链淀粉能到达30%以上^[2]。豆类淀粉相比马铃薯淀粉或高直链淀粉含量的玉米淀粉更易于消化,但是比天然的谷物淀粉或木薯淀粉不易消化^[2]。抗性淀粉包括物理包埋淀粉、天然抗性淀粉、回生淀粉、化学改性淀粉和直链淀粉-脂肪复合淀粉,而豆类中所含的抗性淀粉一般为物理包埋淀粉,消化的速度低,在人体内不会使血糖升高过快^[12-13]。研究发现白芸豆粉中抗性淀粉含量为11.89%,豌豆为2.45%、鹰嘴豆为3.39%^[14]。

1.2 豆类淀粉的理化特性

1.2.1 凝胶特性 豆类淀粉的凝胶特性是开发凝胶食品的关键因素^[15]。淀粉凝胶的形成,与淀粉的种类、直链淀粉的含量、淀粉的浓度及温度等有关^[16]。不同种类的豆类淀粉凝胶强度不同,豌豆淀粉的凝胶强度大于白芸豆淀粉和绿豆淀粉等,这是由于豌豆淀粉的直链淀粉含量显著高于白芸豆和绿豆淀粉的直链淀粉含量^[17]。因为豆类淀粉乳液经加热,直链淀粉首先膨胀糊化,冷却后再经氢键形成结晶结构^[18]。豆类淀粉中直链淀粉的含量越多,凝胶强度越大^[17]。此外,张正茂等^[17]研究发现豌豆淀粉和白芸豆淀粉在8%的淀粉浓度下,与淀粉浓度6%和10%相比,形成的淀粉凝胶硬度更小、弹性更好。

1.2.2 糊化特性和黏度稳定性 淀粉糊化过程是先吸水膨胀,晶体结构消失,分子间发生缠结和重排,受加热温度和水分含量的影响,形成不同状态的溶液、凝胶或者糊状^[19]。在豆类淀粉的糊化过程中,直链淀粉含量越高,淀粉的稳定性和抗剪切能力越强或凝胶程度越强^[20-21];而豆类支链淀粉的短链部分越多,淀粉易糊化,稳定性也就越差^[16]。杨红丹等^[4]研究表明扁豆淀粉的稳定性与糊化温度呈正相关,糊化温度越高,淀粉糊的热稳定性就越好。除此之外,豆类淀粉的颗粒大小也影响淀粉的糊化特性^[19]。例如,董贝贝^[19]研究发现豌豆淀粉颗粒的粒径比绿豆的大,豌豆淀粉崩解值较小、不易发生糊化,稳定性更好。因此,充分利用豆类直链淀粉含量较多和结构稳定的优势,可以开发成凝胶类食品^[22]。

1.2.3 溶解度和膨胀能力 豆类淀粉的膨胀能力和溶解度是其重要的特性之一。豆类淀粉颗粒吸水 and 膨胀的过程中,直支链淀粉分离且结晶度改变,进而直链淀粉向结晶区和非结晶区之间的空间浸出^[23]。豆类淀粉的溶解度大部分在15%~45%之间,膨胀度在0~30 g/g之间,两者均随温度的升高而升高^[16,24]。吴会琴等^[24]研究发现,小利马豆淀粉的直链淀粉含量较白芸豆高,膨胀能力和溶解度更好,与直支比和磷脂化合物的含量呈正相关。原因是直支比例高会抑制豆类淀粉的膨胀^[24]。因此,直链淀粉发挥着稀释和抑制淀粉颗粒溶胀的作用^[25]。

2 不同预处理方式对豆类淀粉的影响

豆类淀粉的预处理方式分为三类,包括物理法(如湿热处理、超高压处理、挤压处理和干热处理等)、化学法(如酯化、醚化和交联化等)和酶法(如用 α -淀粉酶、普鲁兰酶等处理)。由于化学法具有污染、不易控制和有副产物等劣势,物理法和酶法处理不需要使用化学试剂,更受到人们的青睐。下面综述和比较了不同预处理方式对豆类淀粉的影响,并分析了这些预处理方式促进豆类淀粉在低GI食品开发中应用的可能性。

2.1 湿热处理

湿热处理(Heat moisture treatment, HMT)是一种物理的淀粉加工处理方法,需要低于 35% 的水分,温度一般大于 90 °C 以及一定的处理时间^[26]。湿热处理通过诱导直链淀粉和支链淀粉在湿热处理后发生相互作用,使豆类淀粉分子的结构和理化性质发生改变,影响因素包括温度、水分等^[27-28]。

Piecyk 等^[29]研究了湿热水分(15%、30%)和温度(100、120 °C)对蚕豆淀粉的影响,经 15%、120 °C、30%、100 °C 和 30%、120 °C 的湿热处理 2 h 后,蚕豆淀粉结构均由 C 型转变为 A 型;15%、100 °C 下湿热处理组蚕豆淀粉中慢消化淀粉(37.1%)和抗性淀粉含量(45.1%)显著高于其他条件组,同时淀粉的膨胀力更高。抗性淀粉升高的原因是淀粉的分子间发生定向重排,增强淀粉的消化抵抗性^[26]。Han 等^[30]研究报道,与未处理组相比,30% 水分,120 °C 湿热处理 2 h 后豌豆和扁豆淀粉中快消化淀粉含量分别下降了 14.0% 和 15.1%,慢消化淀粉含量分别增加了 2.8% 和 4.7%,抗性淀粉含量分别增加了 11.2% 和 10.4%;扁豆的抗性淀粉含量下降幅度较小,可能因为扁豆直链淀粉的 DP_n⁶-12 链长度大于豌豆,扁豆淀粉链形成的双螺旋结构不稳定且不耐水解。Hyun 等^[31]研究了湿热时间对豌豆淀粉的影响,豌豆淀粉在水分为 25%、120 °C 下湿热处理 0~12 h,淀粉的结晶度显著降低;抗性淀粉含量增加了 1.65%~3.8%,其中湿热 12 h 时抗性淀粉最高;湿热超过 4 h 时,豌豆淀粉的晶体结构由 C 型变为 A。

由此可见,豆类淀粉在湿热水分为 15%~30% 和温度为 100~120 °C 的条件下,经过一定的时间处理,淀粉的结构发生转变,抗性淀粉含量有所增加,未来可以应用于低 GI 食品的研究与开发。

2.2 超高压处理

超高压技术(High hydrostatic pressure, HHP)是一种非加热的加工技术,需要传压介质、高静压(一般为 100~1000 MPa)以及一定的时间,具有消毒杀菌、保藏和对淀粉进行改性的作用^[2,32]。

超高压处理下可使豆类淀粉颗粒膨胀吸水,晶体结构改变,导致淀粉糊化和凝胶的程度发生变化^[33]。Lin 等^[34]研究发现,菜豆粉经 300、450 和 600 MPa 糊化处理后,随着压力的增加,黏度增加,糊化温度降低;淀粉颗粒的膨胀力可能小于受到的压缩力,淀粉的粘弹性和凝胶强度也随之增加^[34]。超高压也会引起豆类淀粉结构和抗性淀粉含量的变化。Guo 等^[35]研究报道将绿豆淀粉分别在高压 300、450 和 600 MPa 进行糊化处理,高压 600 MPa 处理后淀粉的 XRD 谱图显示其衍射角变弱、C 型结构损失;此外,三种条件下超高压处理后淀粉样品储存时间越久,C 型晶型强度越高,说明淀粉发生糊化后再结晶,可能是超高压使淀粉从 C 型结构自发转变为 B 型后,又重新生成原来的 C 型结构;与未处理的绿豆淀粉相比,几

种超高压处理均显著提高了抗性淀粉的含量,这是因为超高压技术引起了绿豆淀粉的糊化,直链淀粉和支链淀粉发生重组,延长淀粉的老化时间。综上所述,压力条件为 300~600 MPa,对豆类淀粉的 C 型结构和糊化特性有一定影响,同时增加了抗性淀粉的含量,有利于开发低 GI 食品。

2.3 发芽处理

发芽是一种普遍的豆类食品加工方式,可使豆的营养价值大大提高^[36]。发芽会改变豆类淀粉颗粒的表面形态、直支链淀粉和总淀粉的含量及淀粉的溶解度等。Liu 等^[37]研究表明发芽使绿豆淀粉颗粒的表面结构呈凹陷状,结晶度增加,但 C 型结构未发生变化;当萌发温度小于 80 °C,萌发温度与溶解度呈正相关,主要原因是绿豆发芽生长时会消耗直链淀粉,作为能量的补给,而萌发温度为 90 °C 时,溶解度不变。Benítez 等^[38]研究表明豇豆和扁豆经发芽后,其总淀粉含量、抗性淀粉含量均下降,这是因为萌发使淀粉酶的活性提高。Yin 等^[39]研究也获得了类似结果,发芽处理可使黑豆总淀粉的含量从 35 g/100 g 降低到 27 g/100 g,直链淀粉含量从 26 g/100 g 降低至 20 g/100 g。直链淀粉的含量降低是由于萌发过程中淀粉分子可能部分水解,产生了短直链淀粉链或糊精,不会与碘发生相互作用^[39-40]。Świeca 等^[41]研究表明,发芽处理后的绿豆、扁豆和豌豆,其豆类淀粉的消化率和预估血糖生成指数(eGI 值)显著提高,绿豆芽的 eGI 值达到 89.87。上述研究结果表明,发芽过程豆类中抗性淀粉和直链淀粉减少,豆类淀粉更易消化,因此发芽处理对于豆类在低 GI 食品开发中的应用不利。

2.4 挤压处理

挤压处理是一种连续高温、短时间的蒸煮过程,需要加热、压力、较低含水量和高剪切力^[42],是一种常用、高产和低能源成本的机械过程^[43]。挤压会导致淀粉发生一些化学变化,如糊化、蛋白质交联^[42]以及淀粉的改性,影响因素包括温度、转速和水分含量。

王立东等^[44]研究发现不同挤压条件对豆类淀粉的形貌影响不同,鹰嘴豆淀粉在挤压膨化温度为 85 °C、水分含量为 14% 和挤压螺杆转速为 29 Hz 条件下,淀粉颗粒外貌保持完整,但当挤压膨化温度和水分条件分别超过 85 °C 和 14% 时,颗粒形貌多数呈粗糙且多棱角形;转速超过 29 Hz,则晶体结构受到破坏。Pasqualone 等^[45]研究了不同挤压条件(100 °C, 220 r/min 和 115 °C, 230 r/min)对扁豆淀粉糊化的影响,扁豆粉经 115 °C, 230 r/min 条件挤压处理,其淀粉回生值较低、峰值黏度和糊化程度更高。挤压处理后糊化程度升高的原因可能是水使豆类淀粉颗粒的机械破损程度增大;螺旋转速越高,支链淀粉更易发生糊化^[46-47]。Arribas 等^[48]研究发现,长角豆和菜豆混合挤压后,与未挤压的对照组相比,总淀粉含量增加,直/支比例降低,总膳食纤维减少了 25% 左

右。总淀粉含量增加可能是挤压过程中还原糖的生成,直/支比例降低是由于直链淀粉和支链淀粉受到剪切力的影响发生裂解,产生易消化的小片段结构^[48]。

由于挤压处理后豆类的直/支比例降低、糊化程度提高,更容易消化,该技术对于豆类淀粉在低 GI 食品开发中的应用不利。

2.5 干热处理

干热处理(Dry heat treatment, DHT)是一种将淀粉样品放在干热的环境下,且不添加水分或蒸汽的加工处理方式^[49]。干热处理一般对淀粉颗粒外貌影响很小,对淀粉结构与物化特性有一定程度的影响^[50],影响因素包括温度和时间等。

Ge 等^[51]研究发现经 130 °C 干热处理 1、3 和 9 h 的红豆淀粉的晶型没有发生变化,颗粒形态完整但表面有裂缝或气孔,产生的裂缝与高温加速淀粉的运动有关;红豆淀粉中直链淀粉含量由 24.33% 降低到 16.25%~23.47%,慢消化淀粉和抗性淀粉的含量共增加了 0.81%~2.23%。Liang 等^[52]研究发现绿豆淀粉经 130 °C 干热处理 6~18 h 后,仍然保持 C 型结构,其溶胀力和黏度有一定程度的降低,其血糖指数(81.07~88.1)显著低于未经处理的血糖指数(100.03)。淀粉的溶胀力和黏度降低的原因是干热处理后淀粉结晶区重新排列,直链淀粉膨胀后的扩散作用减小^[53]。抗性淀粉的生成和血糖指数的降低原因主要是干热使淀粉的多尺度结构和分子间发生重新排列,淀粉不易被淀粉酶水解^[51]。因此,干热处理通过影响豆类淀粉的直链淀粉和支链淀粉链的排列和相互作用,提高豆类淀粉抵抗淀粉酶水解的能力,有助于豆类在低 GI 食品开发中的应用。

2.6 超声波处理

超声波处理是指声波频率一般大于 20 kHz 的加工处理方式^[54],在适宜的强度和频率下超声处理淀粉,通过空化和机械振荡的作用,引起 C-C 键的断裂,使淀粉发生降解。豆类淀粉经超声波处理后,其结构和理化特性发生变化,如淀粉的黏度、颗粒表面、透明度和抗性淀粉含量等^[54],其影响因素包括超声时间和功率等。

欧阳群富^[55]采用单因素实验考查了超声功率(100~600 W)、时间(5~30 min)、频率(20~28 kHz)和温度(5~50 °C)对豌豆淀粉的影响,豌豆淀粉中慢消化含量(25 min, 25 kHz, 200 W 和 35 °C)显著高于未处理组;随着时间、温度、频率和功率的增加,淀粉的粒径变大,直链淀粉减少,直链淀粉减少是由于直链淀粉发生断裂,与碘结合能力变弱。Hu 等^[56]研究发现绿豆淀粉经超声频率(25~40 kHz)处理 90 min 后,随超声频率的增加,表面的孔洞逐渐增多且存在部分淀粉碎块,是因为超声对淀粉产生空化作用。以上研究结果表明适当的超声处理条件有利于慢消化淀粉的生成,但超声时间过长或超声频率过高,可能会破坏淀粉的形态和结构^[54-55]。孟欣^[54]研究表明在

超声时间 45 min 和功率 450 W 下处理豌豆淀粉,处理后豌豆淀粉的峰值黏度下降,溶解度增加,产生氧化淀粉。因此,超声波处理在不破坏豆类淀粉晶型的情况下,淀粉颗粒的结晶部分改变,从而影响其理化性质。适当条件的超声处理可增加豆类淀粉中慢消化淀粉含量,有利于豆类在低 GI 食品开发中应用。

2.7 辐照处理

辐照是一种物理的食品加工技术,利用电离电磁射线对样品进行改性处理^[57],其主要受辐照剂量的影响。辐照处理能灭活微生物、延长食品的保质期、影响种子的生长发育和对淀粉改性等。

Chung 等^[58]研究了辐照剂量(0、10、50 kGy)对白豆淀粉(水分含量为 10%)的影响,辐照剂量越大,淀粉颗粒的裂缝越多,结晶度越低;与未辐照的对照组(0 kGy)相比,辐照处理组(10、50 kGy)的直链淀粉含量减少了 1.1% 和 6.3%,快消化淀粉含量增加了 0.8% 和 3.2%,慢消化淀粉含量增加了 2.1% 和 6.4%,抗性淀粉含量增加了 2.9% 和 9.6%,这是由于 γ 射线产生切割豆类淀粉大分子的自由基,使直链淀粉和支链淀粉在非结晶区和结晶区发生降解,同时辐照处理使其生成不易被酶解的淀粉结构或慢消化淀粉发生了转化。Sofi 等^[59]研究了辐照剂量(0、5、10、15 kGy)对蚕豆淀粉(水分含量为 20%)的影响,随着辐照剂量的增大,颗粒裂缝增多,糊化黏度降低,结晶度降低。辐照处理后淀粉黏度降低可能是由于糖苷键断裂,淀粉的完整度降低或者直链淀粉和支链淀粉重新排序^[60]。

现有研究表明辐照处理有利于抗性淀粉的增加,该技术在低 GI 食品的应用有待进一步研究。

2.8 酶法处理

酶处理法是酶对支链淀粉进行水解,产生游离的直链淀粉分子,直链淀粉分子聚集后形成双螺旋结晶体的过程,其影响因素包括酶、反应时间和温度等^[61]。处理豆类淀粉常用的几种酶有 α -淀粉酶、普鲁兰酶和葡萄糖淀粉酶等。

Hoover 等^[62]研究报道经 α -淀粉酶处理的扁豆淀粉颗粒表面粗糙并产生孔隙,而绿豆淀粉经 α -淀粉酶处理后,淀粉颗粒表面凹陷,呈海绵状;而圆皮豌豆淀粉比皱皮豌豆淀粉酶解后颗粒破损较小,这是由于圆皮豌豆淀粉含有的小颗粒淀粉更多,直链淀粉更高。雷鸣^[61]研究发现绿豆淀粉进行普鲁兰酶(56 °C, 3 h)处理,淀粉的还原糖最高,溶解度最大且结晶区域增加。

酶处理方法常常结合其他处理方式,影响豆类淀粉的特性。张翔^[63]研究发现利用辐照(3 kGy)和普鲁兰酶(60 °C, 24 h)联合处理绿豆淀粉、苦荞淀粉和藜麦淀粉来制备抗性淀粉,直链淀粉含量增加,溶解度降低,原因是直链淀粉升高导致淀粉分子重组,形成晶体结构更为致密。朱哲^[64]研究发现豌豆淀粉经压热(28 min, 121 °C)和酶(α -淀粉酶 9.56 min、

95 ℃ 和普鲁兰酶 3.34 h, 60 ℃)联合处理后, 结晶类型发生变化, 由 C 型晶体转变为 B+V 型。单一酶法和复合酶法处理可以改变豆类淀粉的晶体类型, 使直链淀粉或抗性淀粉含量增加, 可利于豆类淀粉在低 GI 食品开发中的应用。

不同加工处理方式对豆类淀粉的结构和理化特性的影响不同, 在促进豆类淀粉在低 GI 食品开发中应用方面也有所差异, 表 1 总结了儿种加工处理方式需要的条件、对豆类淀粉的影响结果以及优缺点。

3 预处理豆类淀粉在低 GI 食品中的应用

低 GI 饮食在预防和治疗一些慢性代谢病方面具有非常重要的作用, 例如糖尿病、高血脂、高血压等的疾病^[5,65]。食品的 GI 值与食品中抗性淀粉的含量有关。如前面所述, 豆类原材料或豆类淀粉经适当的方式进行预处理, 得到较高抗性淀粉含量的豆粉或豆类淀粉, 添加到食品中来增加抗性淀粉含量, 有利于降低食品的 GI 值。

一方面, 豆类原材料经适当条件的预处理后, 可使原材料糊化生成更多的淀粉-脂肪复合物或者淀粉-蛋白质, 减少了酶与淀粉的接触, 进而影响豆粉的消化性能^[66-67]。将预处理的豆粉添加到食品中, 有利于降低食品的 GI 值, 适合糖尿病人食用。Sankhon^[68]将经湿热处理的槐豆粉代替部分小麦粉来制作面包, 结果显示面包的抗性淀粉含量为 7.74%~8.68%, 显著高于对照组的抗性淀粉含量(1.67%)。郭世龙^[69]研究发现将粉碎和湿热处理后的黑豆粉制成曲奇饼干, 添加大粒径的黑豆粉, 饼干的抗性淀粉含量增加了 7.7%, 预测血糖指数为 86.49 显著低于未处理组饼干(109.33)。程新等^[70]研究报道湿热处理白芸豆

粉后, 白芸豆粉的淀粉链结构改变, 抗性淀粉含量显著提高, 制成的白芸豆面包的 GI 值为 39.54。

另一方面, 豆类淀粉经预处理后, 添加到食品中制成复合食品, 例如饼干、面包和蛋糕等, 可使食品中抗性淀粉和慢消化淀粉的含量增加, 降低了食品的 GI 值^[71]。Sanz-penella 等^[72]研究表明通过干热处理豌豆淀粉 1 h 后获得抗性淀粉, 将 30% 的抗性淀粉与小麦粉复配制成面包, 面包的膳食纤维的含量增加了 1.59 g/100 g, 有利于减缓人体的血糖波动。张翔^[63]研究报道苦荞、绿豆和藜麦淀粉经辐照(3 kGy)和普鲁兰酶(60 ℃、24 h)联合处理获得复合抗性淀粉, 添加复合抗性淀粉(55%)制成挤压重组米, 重组米的抗性淀粉含量比普通米增加了 26.66%, 其 GI 值为 62.24, 小于普通大米的 88.76。但加入预处理的豆类淀粉制品, 可能影响食品的品质。朱哲^[64]研究发现豌豆淀粉经复合酶法处理得到抗性淀粉, 添加比例为 20% 后, 馒头的质构特性和感官品质有所降低、加入高抗性淀粉面条(含 10% 的谷朊粉)蒸煮损失率有所降低^[64]。有的研究认为加工处理后抗性淀粉添加量在 10%~20%, 食物的感官品质在大众消费者的接受范围内^[69]。

4 结论与展望

预处理方式影响豆类淀粉中淀粉结晶区与非结晶区的排列、直链淀粉和支链淀粉的含量及其相互作用等, 使豆类淀粉的颗粒形态、分子大小、溶解度与膨胀力、糊化特性、凝胶特性和抗性淀粉的含量发生变化。湿热处理、超高压处理和干热处理等预处理方式使豆类淀粉中抗性淀粉和慢消化淀粉均增加, 对低 GI 食品的开发有利。

表 1 预处理方式对豆类淀粉的影响

Table 1 Effect of pretreatment methods on bean starch

预处理方式	处理条件	对豆类淀粉的影响	对豆类淀粉在低 GI 食品开发中应用有利于否	其他优点	缺点	文献来源
湿热处理	水分为 15%~30%、温度为 100~120 ℃ 和时间为 0~12 h	淀粉的膨胀力增加, 结构可能由 C 型转化成 A 型, 抗性淀粉和慢消化淀粉含量升高, 快消化淀粉含量降低	有利	-	仅供处理少部分样品	[26-31]
超高压技术	高静压 300~600 MPa	淀粉粘弹性和凝胶强度增加, 淀粉的抗性淀粉含量增加	有利	消毒杀菌、保藏	超高压设备成本高	[32-35]
发芽处理	温度小于 80 ℃	淀粉的结晶度增加, 总淀粉、直链淀粉和抗性淀粉含量都有所降低	不利	提高营养价值和加工成本低	-	[39-41]
挤压处理	温度为 85~130 ℃、转速为 220~230 r/min 和含水量为 8%~16%	淀粉的颗粒形貌改变, 糊化程度提高, 直/支比降低, 总淀粉含量增加	不利	降低抗营养因子和低能源成本	-	[42-48]
干热处理	温度在 130 ℃ 左右, 时间为 1~18 h	淀粉的溶胀力和黏度降低, 直链淀粉含量降低, 慢消化淀粉和抗性淀粉的含量增加	有利	-	温度过高可能会影响食物的营养成分等	[49-53]
超声波处理	超声功率为 100~600 W、时间为 5~30 min、频率为 20~40 kHz 和温度为 5~50 ℃	淀粉颗粒表面可能产生孔洞, 淀粉的直链淀粉含量减少, 慢消化淀粉含量增加	有利	生产抗氧化淀粉	设备噪音大	[54-56]
辐照处理	一般采用 γ 射线, 辐照剂量为 0~50 kGy	淀粉颗粒产生裂缝, 结晶度降低, 糊化黏度降低, 抗性淀粉含量增加	有利	灭活微生物, 延长食品的保质期	成本较高	[57-60]
酶法处理	α -淀粉酶为 56~60 ℃、普鲁兰酶为 95 ℃	淀粉的溶解度改变, 晶型转变为 B+V 型, 直链淀粉和抗性淀粉含量增加	有利	用来制备抗性淀粉且制取容易	成本高	[61-64]

目前预处理豆类淀粉的方式主要集中于实验室研究,在低 GI 食品产业上的应用较少。为了更好地开发豆类淀粉的潜力,可以从以下方面进行研究:深入研究不同预处理方式对豆类抗性淀粉的影响机制,完善预处理对淀粉的酶调控位点等深层次的机制研究;将预处理豆类淀粉应用到食品工业上,推动豆类淀粉在功能性食品领域的新发展。因此,本文基于现代健康饮食的新趋势,研究豆类淀粉的预处理方式,为我国豆类产品的开发与利用提供了新方向。

参考文献

- [1] 马子琳. 产单宁酶乳酸菌在豆类酸面团馒头中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [MA Z L. Study on the application of tannase producing lactic acid bacteria in legume sour dough steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [2] 刘明. 豌豆淀粉主食加工适应性机制及其加工方式对小鼠餐后血糖的稳态化评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. [LIU M. Adaptive mechanism of pea starch staple food processing and evaluation of its processing methods on postprandial blood glucose homeostasis in mice[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.]
- [3] CAMPOS-VEGA R, LOARCA-PIÑA G, OOMAH B D. Minor components of pulses and their potential impact on human health[J]. *Food Research International*, 2009, 43(2): 461-482.
- [4] 杨红丹, 杜双奎, 周丽卿, 等. 3种杂豆淀粉理化特性的比较[J]. *食品科学*, 2010, 31(21): 186-190. [YANG H D, DU S K, ZHOU L Q, et al. Comparison of physicochemical properties of three kinds of soybean starch[J]. *Food Science*, 2010, 31(21): 186-190.]
- [5] 杨小雪. 红小豆淀粉消化性及血糖生成指数的影响因素研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [YANG X X. Study on the influencing factors of starch digestibility and glycemic index of adzuki bean[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.]
- [6] 刘宁, 张铁鹏, 刘涛, 等. 豆类淀粉的研究进展[J]. *包装工程*, 2020, 41(7): 58-64. [LIU N, ZHANG T P, LIU T, et al. Research progress of soybean starch[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(7): 58-64.]
- [7] GÜZEL D, SAYAR S. Effect of cooking methods on selected physicochemical and nutritional properties of barlotto bean, chickpea, faba bean, and white kidney bean[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49(1): 89-95.
- [8] 马岁祥, 李涛, 宋洪波, 等. 过热蒸汽改性典型晶型淀粉的理化性质研究[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(8): 99-106. [MA S X, LI T, SONG H B, et al. Physicochemical properties of typical crystalline starch modified by superheated steam[J]. *Chinese Journal of Food Science and Technology*, 2018, 18(8): 99-106.]
- [9] 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 S M. Study on structure and functional characteristics of sorghum starch and correlation analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
- [10] 李岫怡, 杨桂芹, 郭东新. 不同来源淀粉的组成、结构及其在动物生产上的应用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(3): 1053-1060. [LI X Y, YANG G Q, GUO D X. Research progress on the composition, structure and application of starch from different sources in animal production[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(3): 1053-1060.]
- [11] RENGADU D, GERRANO A S, MELLEM J J. Physicochemical and structural characterization of resistant starch isolated from *Vigna unguiculata*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 268-275.
- [12] 龙金利, 张爱霞, 生庆海. 抗性淀粉制备及降糖作用研究进展[J]. *河北农业科学*, 2021, 25(2): 93-98. [LONG J L, ZHANG A X, SHENG Q H. Research progress on preparation and hypoglycemic effect of resistant starch[J]. *Hebei Agricultural Sciences*, 2021, 25(2): 93-98.]
- [13] 朱平, 孔祥礼, 包劲松. 抗性淀粉在食品中的应用及功效研究进展[J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 327-336. [ZHU P, KONG X L, BAO J S. Research progress in the application and efficacy of resistant starch in food[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(2): 327-336.]
- [14] 程新. 湿热-多菌发酵对白芸豆面包营养及风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CHENG X. Effects of moisture-heat and multi-bacteria fermentation on nutrition and flavor characteristics of white kidney bean bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [15] KATEKHONG W, CHAROENREIN S. The effect of rice aging on the freeze-thaw stability of rice flour gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 89(3): 777-782.
- [16] 杨红丹. 杂豆粉及其淀粉理化性质与功能特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011. [YANG H D. Study on physicochemical and functional properties of Soybean powder and its starch[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2011.]
- [17] 张正茂, 周颖. 5种豆类淀粉凝胶特性的比较研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 38-44. [ZHANG Z M, ZHOU Y. Comparative study on gel properties of 5 kinds of bean starch[J]. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2019, 34(3): 38-44.]
- [18] BILIADERIS C G. Structural transitions and related physical properties of starch[M]. *Starch*. Academic Press, 2009: 293-372.
- [19] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017. [DONG B B. Gelatinization and rheological properties of eight kinds of starch and their relationship with gel properties[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.]
- [20] 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(2): 67-73. [WANG L. Study on gelatinization and gelation characteristics of starch and edible quality[J]. *Preservation and Processing*, 2021, 21(2): 67-73.]
- [21] 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.
- [22] LIU Q, DONNER E, YIN Y, et al. The physicochemical properties and *in vitro* digestibility of selected cereals, tubers and legumes grown in China[J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(3): 470-477.
- [23] ALCÁZAR-ALAY S C, MEIRELES M A A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 35

- (2): 215–236.
- [24] 吴会琴, 杨秋歌, 黄梦迪, 等. 白芸豆淀粉与小利马豆淀粉理化性质的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 33–38. [WU H Q, YANG Q G, HUANG M D, et al. Study on the properties of Lima bean starch and lima bean starch[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2019, 34(9): 33–38.]
- [25] DE BARROS MESQUITA C, LEONEL M, FRANCO C M L, et al. Characterization of banana starches obtained from cultivars grown in Brazil[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 89: 632–639.
- [26] NA J, LI X J, CHAO Q, et al. Effects of heat moisture treatment on the physicochemical properties of starch nanoparticles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 605–609.
- [27] 乔昂, 王志伟, 周中凯. 湿热处理对糜子粉及淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 42–48. [QIAO A, WANG Z W, ZHOU Z K. Effect of damp heat treatment on physicochemical properties of millet powder and starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Society*, 2021, 36(11): 42–48.]
- [28] DA ROSA ZAVAREZE E, DIAS A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 317–328.
- [29] PIECYK M, DOMIAN K. Effects of heat-moisture treatment conditions on the physicochemical properties and digestibility of field bean starch (*Vicia faba* var. minor)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 425–433.
- [30] CHUNG H J, LIU Q, HOOVER R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 75(3): 436–447.
- [31] HAN L H, CAO S P, YU Y T, et al. Modification in physicochemical, structural and digestive properties of pea starch during heat-moisture process assisted by pre- and post-treatment of ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129929.
- [32] 朱创, 杨丽, 宋立华. 超高压处理对黑大麦加工特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 116–124. [ZHU C, YANG L, SONG L H. Effect of ultra-high pressure treatment on processing characteristics of black barley[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(10): 116–124.]
- [33] JIANG B, LI W H, HU X S, et al. Rheology of mung bean starch treated by high hydrostatic pressure[J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(1): 81–92.
- [34] LIN T T, FERNANDEZ-FRAGUAS C. Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 127: 109325.
- [35] LI W H, GUO H M, WANG P, et al. Physicochemical characteristics of high pressure gelatinized mung bean starch during recrystallization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 131: 432–438.
- [36] 郑立军. 七种豆催芽过程营养素与活性成分变化规律研究及豆芽脆片的制作[D]. 长春: 吉林大学, 2020. [ZHENG L J. Study on the changes of nutrients and active components in seven kinds of bean sprouts and the production of bean sprout crisps[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [37] LIU Y, SU C Y, 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.
- [38] BENÍTEZ V, CANTERA S, AGUILERA Y, et al. Impact of germination on starch, dietary fiber and physicochemical properties in non-conventional legumes[J]. *Food Research International*, 2013, 50(1): 64–69.
- [39] YIN Y Q, YANG R Q, GU Z X. Organ-specific proteomic analysis of NaCl-stressed germinating soybeans[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(29): 7233–7244.
- [40] KAYEMBE N C, JANSEN VAN RENSBURG C. Germination as a processing technique for soybeans in small-scale farming[J]. *South African Journal of Animal Science*, 2013, 43(2): 167–173.
- [41] ŚWIECA M, GAWLIK-DZIKI U. Effects of sprouting and postharvest storage under cool temperature conditions on starch content and antioxidant capacity of green pea, lentil and young mung bean sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 185: 99–105.
- [42] ROCHA-GUZMÁN N E, GALLEGOS-INFANTE J A, GONZÁLEZ-LAREDO R F, et al. Functional properties of three common bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars stored under accelerated conditions followed by extrusion[J]. *Food Science and Technology*, 2006, 39(1): 1–10.
- [43] LI M, HASJIM J, XIE F W, et al. Shear degradation of molecular, crystalline, and granular structures of starch during extrusion[J]. *Starch-Stärke*, 2014, 66(7-8): 595–605.
- [44] 王立东, 沈丹. 不同挤压参数对鹰嘴豆淀粉颗粒形貌的影响[J]. 农产品加工, 2017(16): 1–3, 7. [WANG L D, SHEN D. Effects of different extrusion parameters on the morphology of chickpea starch particles[J]. *Agricultural Products Processing*, 2017(16): 1–3, 7.]
- [45] PASQUALONE A, COSTANTINI M, LABARBUTA R, et al. Production of extruded-cooked lentil flours at industrial level: Effect of processing conditions on starch gelatinization, dough rheological properties and techno-functional parameters[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 147: 111580.
- [46] MOSIBO O K, FERRENTINO G, ALAM M R, et al. Extrusion cooking of protein-based products: Potentials and challenges[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(9): 2526–2547.
- [47] NATABIRWA H, MUYONGA J H, NAKIMBUGWE D, et al. Physico-chemical properties and extrusion behaviour of selected common bean varieties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(4): 1492–1501.
- [48] ARRIBAS C, CABELLOS B, CUADRADO C, et al. Extrusion effect on proximate composition, starch and dietary fibre of ready-to-eat products based on rice fortified with carob fruit and bean[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 111: 387–393.
- [49] LIM S T, HAN J A, LIM H S, et al. Modification of starch by dry heating with ionic gums[J]. *Cereal Chemistry*, 2002, 79(5): 601–606.
- [50] LEI N Y, CHAI S, XU M, et al. Effect of dry heating treat-

- ment on multi-levels of structure and physicochemical properties of maize starch: A thermodynamic study[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 109–116.
- [51] GE X Z, SHEN H S, SU C Y, et al. The improving effects of cold plasma on multi-scale structure, physicochemical and digestive properties of dry heated red adzuki bean starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129159.
- [52] LIANG S Y, SU C Y, 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.
- [53] CHI C D, LI X X, LU P, et al. Dry heating and annealing treatment synergistically modulate starch structure and digestibility[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 554–561.
- [54] 孟欣. 豌豆淀粉的超声改性研究及产品开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2015. [MENG X. Ultrasonic modification of pea starch and its product development[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.]
- [55] 欧阳群富. 超声处理对不同晶型淀粉的结构及理化性能的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. [OUYANG Q F. Effect of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of different crystalline starch[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.]
- [56] HU A J, LU J, ZHENG J, et al. Ultrasonically aided enzymatic effects on the properties and structure of mung bean starch[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20: 146–151.
- [57] CASTANHA N, MIANO A C, SABADOT 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.
- [58] CHUNG H J, QIANG L. Molecular structure and physicochemical properties of potato and bean starches as affected by gamma-irradiation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2010, 47(2): 214–222.
- [59] SOFI B A, WANI I A, MASOODI F A, et al. Effect of gamma irradiation on physicochemical properties of broad bean (*Vicia faba* L.) starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(1): 63–72.
- [60] KARIM A A, NADIHA M Z, CHEN F K, et al. Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sagu*) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(6): 1044–1053.
- [61] 雷鸣. 部分糊化及酶脱支处理对淀粉物化特性影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020. [LEI M. Thunder effects of partial gelatinization and enzyme debranching on physicochemical properties of starch[D]. Harbin: Harbin Business University, 2020]
- [62] HOOVER R, ZHOU Y. *In vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistant starch formation in legumes: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54(4): 401–417.
- [63] 张翔. 多元复合高抗性淀粉的加工特性表征及其主食产品开发[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021. [ZHANG X. Processing characteristics and staple food product development of multiple complex high resistant starch[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.]
- [64] 朱哲. 豌豆抗性淀粉的制备及其在面制品中的应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017. [ZHU Z. Preparation of pea resistant starch and its application in flour products[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017.]
- [65] LAL M K, SINGH B, SHARMA S, et al. Glycemic index of starchy crops and factors affecting its digestibility: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 741–755.
- [66] 燕子豪, 汪丽萍, 谭斌, 等. 谷物食品血糖生成指数研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(3): 147–156. [YAN Z H, WANG L P, TAN B, et al. Research progress on glycemic index of cereals[J]. *Cereals, Oils and Food Science and Technology*, 2021, 29(3): 147–156.]
- [67] BHATTARAI R R, DHITAL S, MENSE A, et al. Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion *in vitro*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 139–148.
- [68] SANKHON A. 非洲槐豆的消化性及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [SANKHON A. Study on the digestibility and application of African locust bean seeds[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [69] 郭世龙. 黑豆细胞壁完整性与曲奇饼干理化品质及淀粉消化特性的相关性研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021. [GUO S L. Study on correlation between cell wall integrity of black bean and physicochemical quality and starch digestion characteristics of cookies[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2021.]
- [70] 程新, 黄璟, JACOB O O, 等. 湿热处理和混菌发酵对白芸豆面包淀粉消化率的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 59–65. [CHENG X, HUANG J, JACOB O O, et al. Effects of wet heat treatment and mixed fermentation on starch digestibility of white kidney bean bread[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(13): 59–65.]
- [71] BAI Y X, LI X X, JI H Y, et al. A review of the design and architecture of starch-based dietary foods[J]. *Engineering*, 2021, 7(5): 663–673.
- [72] SANZ-PENELLA J M, WRONKOWSKA M, SORAL-ŚMIETANA M, et al. Impact of the addition of resistant starch from modified pea starch on dough and bread performance[J]. *European Food Research and Technology*, 2010, 231(4): 499–508.