

挤压对豌豆淀粉的消化及理化特性评价

王猛, 陈炫宏, 董雷超, 嵇威, 南希骏, 周泉城

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 农产品功能化技术山东省高校重点实验室, 山东淄博 255049)

摘要: 本文旨在探究单螺杆挤压对豌豆淀粉消化特性的作用机理, 阐述物料水分、螺杆转速和挤出温度影响规律, 并通过扫描电子显微镜, X衍射, 快速黏度仪从分子晶型、结构、黏度性质等角度, 揭示豌豆抗性淀粉的理化性质。结果表明, 豌豆淀粉经挤压处理, 快消化淀粉含量显著降低, 抗性淀粉和慢消化淀粉含量也发生不同程度影响, 其中在水分含量 26%, 螺杆转速 110 r/min, 挤出温度 70 °C 条件下抗性淀粉的含量达到为 78.83%; 挤压过程中高温、高压、高剪切力作用破坏了淀粉颗粒的结构, 使其转化成更稳定的 V 型晶体; 豌豆抗性淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值分别为 559.41 cP、474.38 cP、754.34 cP、280.33 cP, 与豌豆淀粉相比显著降低 ($p < 0.05$), 且黏度曲线较为平滑。挤压可以通过改变豌豆淀粉结构、晶型, 从而显著改变豌豆淀粉消化特性和黏度特性, 这为豌豆淀粉改性研究提供新思路, 为淀粉高值化加工产品拓宽新领域, 为开发相关功能性产品提供了新材料, 也为豌豆淀粉的产业化实践工艺参数提供了参考。

关键词: 豌豆淀粉; 挤压; 抗性淀粉; 消化特性; 黏度特性

文章编号: 1673-9078(2021)06-231-236

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.6.1035

Effect of Extrusion on the Digestibility and Viscosity Properties of Pea Starch

WANG Meng, CHEN Xuan-hong, DONG Lei-chao, JI Wei, NAN Xi-jun, ZHOU Quan-cheng

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Key Laboratory of Agricultural Products in Shandong Province, Zibo 255049, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the mechanism of single screw extrusion on the digestion characteristics of pea starch, and to explain the effects of material moisture, screw rotation speed and extrusion temperature. The physical and chemical properties of pea resistant starch were revealed by scanning electron microscope, X-ray diffraction and fast viscosity meter from the perspectives of molecular crystal type, structure and viscosity properties. The results showed that the content of rapidly digestible starch decreased significantly and the contents of resistant starch and slowly digestible starch were affected by extrusion, the highest content of resistant starch was 78.83% under the conditions of water content 26%, screw rotation speed 110 r/min, and extrusion temperature 70 °C; and the high temperature, high pressure and high shear force during extrusion destroyed the structure of starch granules and transformed them into V crystals. Then the peak viscosity, valley viscosity, final viscosity and setback value of pea resistant starch were 559.41 cP, 474.38 cP, 754.34 cP, 280.33 cP, respectively, which were significantly lower than those of pea starch ($p < 0.05$), and the viscosity curve was smooth. The extrusion could significantly change the digestibility and viscosity properties of pea starch by changing the structure and crystal form of pea starch, which provides new ideas for the modification of pea starch, broadens new fields for high-value starch processing products, provides new materials for the development of related functional products, and also provides a reference for the industrialization process parameters of pea starch.

Key words: pea starch; extrusion; resistant starch; digestibility; viscosity properties

引文格式:

王猛,陈炫宏,董雷超,等.挤压对豌豆淀粉的消化及理化特性评价[J].现代食品科技,2021,37(6):231-236

WANG Meng, CHEN Xuan-hong, DONG Lei-chao, et al. Effect of extrusion on the digestibility and viscosity properties of pea starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 231-236

收稿日期: 2020-11-10

基金项目: 山东省重点研发计划-医用食品专项计划项目 (2018YYSPO17); 山东省重点研发计划项目 (2019GNC106084); 山东理工大学招远工业技术研究院创新研究基金 (9101-219194); 山东省研究生教育管理项目 (117009); 山东理工大学研究生教育创新团队 (4053-218049; 4053-219076)

作者简介: 王猛 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品

通讯作者: 周泉城 (1977-), 男, 博士, 副教授, 功能性食品

淀粉是最常见的天然聚合物,主要存在于植物中,是自然界最丰富的的可再生资源^[1]。根据消化特性^[2],淀粉通常分为快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS),慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS),及抗性淀粉(resistant starch, RS)。其中 SDS, RS 对人体健康有着积极影响,如控制血糖,减少餐后的游离脂肪酸及氧化应激反应^[3,4]。同时,RS 在人体肠道内被肠道菌群发酵,产生短链脂肪酸调节人体的代谢反应,降低患结肠炎的风险^[3,5]。

豌豆具有极高的营养价值,主要成分为淀粉、蛋白等。豌豆中的淀粉含量约为 40%~65%,其中直链淀粉约占总含量的 35%~65%^[6]。但高含量的直链淀粉存在糊化时吸水膨胀力差,易回生的问题;同时,豌豆长支链淀粉在支链淀粉中的比例更高。这些结构特征表明豌豆淀粉是改性制备慢消化淀粉、抗性淀粉的最佳原料之一^[7]。许多加工工艺在制备抗性淀粉方面取得重大进展,包括湿热处理、微波、挤压、超声、酶解等^[8,9]。挤压膨化加工技术是集混合、搅拌、破碎,加热,杀菌,膨化及成型为一体的技术,由于其具有效率高,处理量大,易于产业化的显著优势^[10],自 1940 年代以来,已广泛用于食品加工,淀粉降解等行业^[11,12]。左慧玉^[13]等人利用双螺杆挤压菠萝蜜种子淀粉,发现其抗性淀粉含量降低,淀粉结构由致密结构转变为疏松多孔的多面体结构;戚明明^[12]等人对豌豆淀粉双螺杆挤压,在水分含量为 25%的情况下,SDS 的含量可以达到 34.41%,并且发现挤出物的凝胶特性增强,挤压的豌豆淀粉溶液为假塑性流体。

本研究以豌豆淀粉为研究对象,通过单螺杆挤压工艺对其改性,探索对其消化特性的影响,同时研究豌豆抗性淀粉的结构特性及黏度特性,拓宽豌豆淀粉的应用范围。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

豌豆淀粉,烟台双塔食品股份有限公司;糖化酶、猪胰腺 α -淀粉酶,上海爱纯生物科技有限公司;其余试剂均为分析纯。

单螺杆挤压机,山东理工大学农业工程与食品科学学院农产品精深加工中心;UV-2102PCS 型紫外分光光度计,尤尼柯仪器有限公司;D8 ADVANCE 多晶 X-射线衍射仪,Brucker AXS 公司;Quanta 250 扫描电镜,FEI 公司;RVA4500 快速黏度测定仪,澳大利亚波通仪器有限公司。

1.2 豌豆淀粉单螺杆挤压

表 1 单因素挤压试验表

挤压因素	a	b	c	d	备注
水分/%	18	22	26	30	110 °C、100 r/min
转速/(r/min)	60	80	100	120	110 °C、26%
温度/°C	70	90	110	130	26%、100 r/min

由前期预实验确定豌豆淀粉水分含量、挤压机螺杆转速、挤压机挤出筒温度为影响因素,每组取 2 kg 豌豆淀粉按表 1 进行挤压操作。挤出物室温下风干,粉碎过 100 目筛备用。

1.3 改性淀粉性质研究

1.3.1 改性淀粉消化特性研究

淀粉消化特性测定根据 Englyst 法加以改动^[2]。计算公式如下:

$$RDS/\% = \frac{(G20-FG) \times 0.9}{TS} \times 100\%$$

$$SDS/\% = \frac{(G120-G20) \times 0.9}{TS} \times 100\%$$

$$RS/\% = \frac{(TS-RDS-SDS)}{TS} \times 100\%$$

其中:G20 是反应 20 min 葡萄糖释放量,G120 是反应 120 min 葡萄糖释放量,FG 淀粉中游离葡萄糖量,TS 淀粉的总质量。

1.3.2 改性淀粉纯化

将 1.3.1 实验结果中抗性淀粉含量最高的组进行纯化。取定量改性淀粉,蒸馏水溶解,柠檬酸-磷酸氢二钠溶液调 pH 到 6.0~7.0,加过量耐高温 α -淀粉酶 90 °C 水浴振荡 2 h,沸水浴 10 min,加 4 倍体积 95%乙醇,沉淀 4 h 后 4000 r/min 离心 15 min,弃上清液。再用 95%乙醇溶液洗涤沉淀 2~3 次,4000 r/min 离心 15 min,弃上清液,50 °C 干燥,粉碎过 100 目筛得样品备用。

1.3.3 微观形态测定

采用扫描电子显微镜观察淀粉的微观形态^[14],将样品粉末用导电两面胶纸固定在样品座上,真空镀膜仪喷镀导电层。加速电压 5 kV,放大倍数 2000 倍下观察样品。

1.3.4 X-射线衍射(XRD)测定

参考冯传兴^[14]的方法,将样品粉末置于铝片 15 mm×20 mm×1.5 mm 的孔中,压紧,射线衍射测试。XRD 的测试条件为:扫描范围:3~50°;测角精度:2 θ ±0.01°;角分辨率:FWHM≤±0.1;角度重现性:±0.0001°。

1.3.5 快速黏度性质测定

通过快速黏度仪 RVA 分析淀粉糊化特性的差异

[15], 称取 2.00 g 淀粉(干基), 20 mL 蒸馏水混匀, 50 °C 下 960 r/min 保持 1 min; 以 10 °C/min 升温速率升至 95 °C, 95 °C 下保温 3 min; 以 10 °C/min 降温速率降至 50 °C, 保温 3 min, 获得淀粉的黏度曲线。其中, 程序升温至结束, 转速均 160 r/min。

1.3.6 统计分析方法

每个试验 3 次重复, 结果表示为平均数±SD。SPSS 19.0 分析试验数据, Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 消化特性测定

表 2 改性淀粉 RDS、SDS、RS 含量表

Table 2 Content of modified starch RDS, SDS and RS

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%
未处理淀粉	64.42±0.35 ^a	7.88±0.22 ^c	27.28±0.36 ^f
水分/%	18 33.31±0.25 ^c	13.32±0.33 ^b	53.39±0.46 ^d
	22 27.96±0.51 ^d	7.81±0.18 ^c	64.23±0.31 ^c
	26 44.58±0.38 ^b	2.36±0.2 ^g	53.07±0.29 ^d
	30 11.04±0.24 ^f	18.49±0.33 ^a	70.47±0.27 ^b
转速/(r/min)	60 32.45±0.36 ^c	1.91±0.34 ^g	65.64±0.36 ^c
	80 44.27±0.41 ^b	7.23±37 ^d	48.50±0.44 ^c
	100 44.58±0.38 ^b	2.36±0.2 ^g	53.07±0.29 ^d
	120 41.65±0.19 ^b	5.55±0.12 ^e	52.79±0.22 ^d
温度/°C	70 18.87±0.28 ^e	2.3±0.22 ^g	78.83±0.37 ^a
	90 29.43±0.26 ^d	4.23±0.25 ^f	66.34±0.31 ^c
	110 44.58±0.38 ^b	2.36±0.2 ^g	53.07±0.29 ^d
	130 20.34±0.36 ^e	8.32±0.34 ^c	71.34±0.27 ^b

注: a~g 同一列中的不同字母代表差异显著性。

由表 2 可知, 未处理的豌豆淀粉中 RDS、SDS 和 RS 的含量分别为 64.42%、7.88%、27.28%。经过单螺杆挤压后, 豌豆淀粉中的 RDS 含量显著性降低, 其 SDS 与 RS 含量有不同程度的升高, 这与挤压的工艺参数有关。

在物料水分由 18% 升至 30% 过程中, 其 RS 的含量也随着水分的升高而提高, 在物料水分达到 30% 的时候, RS、SDS 含量分别达到 70.47%, 18.49%。水分含量越高, 淀粉粒膨胀越充分, 糊化的程度也越高, 且高水分含量降低了淀粉黏度, 直链淀粉分子可以相互接近, 进而有利于双螺旋结构的形成和结晶过程, 从而提高挤压后淀粉的慢消化淀粉及抗性淀粉的含量, 这与李俊伟^[16]等人的研究结果相似。螺杆转速的快慢决定了物料在筒内的停留时间, 从而影响到淀粉颗粒的受热受力程度及糊化度。结果显示, 螺杆转速不断提高的过程中, RS 的含量是呈降低趋势的, 且在高转速 100、120 r/min

之间差异不显著 ($p>0.05$)。挤出温度由 70 °C 升至 130 °C 的过程中, RDS 含量呈现一种先升高后降低的趋势, 都显著低于未处理的豌豆淀粉 ($p<0.05$); 且 RS 含量是在 70 °C 的达到 78.83%。

豌豆淀粉在挤压过程中, 一方面水分含量升高, 水分子进入到淀粉颗粒中破坏分子间的氢键, 淀粉颗粒膨胀, 结晶区的淀粉分子双螺旋结构打开, 直链淀粉析出。另一方面, 淀粉还受高剪切力的作用, 强大的压力也能够破坏淀粉颗粒, 加速糊化^[16]。而且, 当温度过高时, 会导致淀粉发生降解导致抗性淀粉含量下降。

根据消化特性的结果, 选取水分含量 26%, 螺杆转速 110 r/min, 温度 70 °C 的豌豆淀粉挤出物为纯化原料, 观察其微观形态, 晶体结构及黏度变化。

2.2 微观形态测定

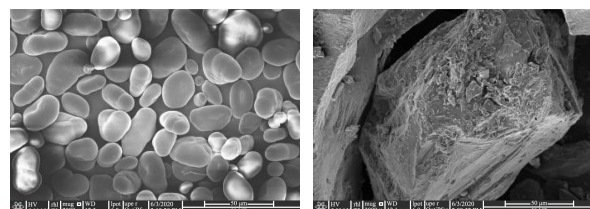


图 1 豌豆淀粉与挤压纯化后抗性淀粉的 SEM 图

Fig.1 The SEM patterns of pea starch and extruded and purified resistant starch

注: 改性淀粉挤压条件为挤压温度 70 °C、螺杆转速 100 r/min、物料水分 30%。

通过扫描电子显微镜观察淀粉颗粒的形态学特性。如图 1 所示, 未挤压的豌豆淀粉颗粒饱满, 形状规则呈椭球状, 表面光滑; 挤压纯化后的豌豆抗性淀粉形状不规则呈块状结构且表面呈片状, 颗粒尺寸较大。这是由于淀粉在挤压过程中受到高温高压高剪切力的作用, 直链和支链结构遭到破坏, 并且淀粉发生糊化现象致使颗粒之间紧密结合^[17]。这一现象与沈丹^[18]等人的研究结果相似。

2.3 XRD 测定

淀粉晶体可分为 A、B、C、V 四种结晶类型, 其中在 X-衍射图谱中, A 型淀粉结晶在 15°、17°、23°会有较强的衍射峰; B 型淀粉结晶在 5.6°、17°、22°、24°会有较强的衍射峰, C 型淀粉结晶则是 A 型和 B 型的混合物; V 型淀粉结晶多指糊化淀粉在 12.5°、19.5°有较弱的衍射峰^[19,20]。Imberty^[21]等阐明 A 型和 B 型结晶都具有标准双螺旋结构基础, 同时 B 型要比 A 型更加紧密。

图 2 可见豌豆淀粉在 5°、15°、17°、22°处出现较强的衍射峰, 属于 C 型结晶, 这与武俊超^[22]的研究结果一致。在挤压过程中, 豌豆淀粉受到高温高压高剪切力作

用, 淀粉颗粒中的双螺旋结构展开, 支链淀粉链遭到降解, 晶体中的有序化程度也受到影响, 体现在图中 17°、22°处的峰值降低。在 19°处出现小峰, 挤压后的豌豆淀粉更偏向于 V 型晶体, 这在朱哲^[23]等人研究得到印证。挤压之后的豌豆淀粉晶型结构符合抗性淀粉的晶型结构, 其高度的有序度增加了对 α -淀粉酶的耐受性, 因此降低了淀粉的消化率。其他位置处没有出现衍射峰, 说明淀粉挤压过程中, 没有产生新的晶体结构。

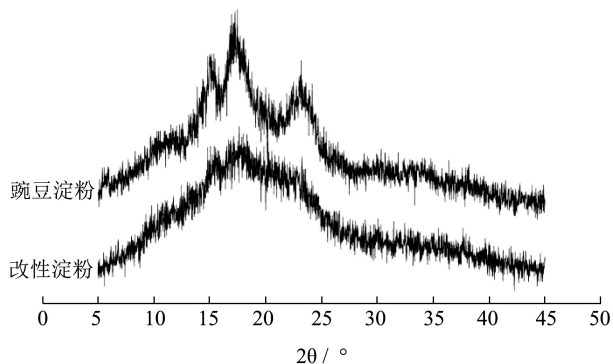


图2 豌豆淀粉与挤压纯化后抗性淀粉的 XRD 图

Fig.2 The XRD patterns of pea starch and extruded and purified resistant starch

注: 改性淀粉挤压条件为挤压温度 70 °C、螺杆转速 100 r/min、物料水分 30%。

2.4 黏度性质测定

RVA 特征值主要反映淀粉的糊化性质。直链淀粉的浸出量和颗粒溶胀会影响淀粉的峰值黏度等^[24]。豌

表3 豌豆淀粉与纯化抗性淀粉的黏度数据

Table 3 The viscosity data of pea starch and extruded and purified resistant starch

项目	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	破损值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	出峰时间/min	成糊温度/°C
豌豆淀粉	1948.12±10.21 ^a	1639.11±9.82 ^a	309.23±9.24 ^a	2824.86±11.61 ^a	1186.18±8.92 ^a	4.87±0.12 ^a	75.14
纯化抗性淀粉	559.41±9.52 ^b	474.38±7.46 ^b	85.11±8.19 ^b	754.34±7.12 ^b	280.33±7.18 ^b	4.40±0.13 ^b	-

注: 同一列中的不同字母代表差异显著性。

3 结论

挤压工艺参数的变化影响着豌豆淀粉中慢消化淀粉和抗性淀粉含量, 在物料水分 30%、螺杆转速 100 r/min、挤出温度 70 °C 下的挤出物抗性淀粉含量高达 78.83%。在对经过纯化之后的豌豆抗性淀粉结构及性质测定结果来看, 挤压过程中高温、高压、高剪切力作用破坏了淀粉颗粒的结构, 使其颗粒紧密结合为不规则的块状颗粒, 同时晶体类型转化成更稳定的 V 型晶体; 从 RVA 数据中可以看出, 豌豆抗性淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值都显著性下降, 分别为分别为 559.41 cP、474.38 cP、754.34 cP、280.33 cP, 且黏度曲线较为平滑。本研究表明挤压可以通过改变豌豆淀粉结

构、晶型, 从而显著改变豌豆淀粉组成和消化特性, 这为豌豆淀粉改性研究提供新思路, 豌豆淀粉高值化加工产品拓宽新领域, 为开发相关功能性产品提供了新材料, 也为豌豆淀粉的产业化实践工艺参数提供了参考。

豆淀粉和挤压纯化抗性淀粉的黏度曲线和数据如图 3 和表 3 所示。豌豆淀粉的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值分别为 1948.12 cP、1639.11 cP、2824.86 cP、1186.18 cP, 糊化温度为 75.14 °C, 这与刘晓庆^[6]等人研究结果相似; 经过挤压纯化的豌豆抗性淀粉的各项指标都显著降低 ($p < 0.05$), 峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值分别为 559.41 cP、474.38 cP、754.34 cP、280.33 cP, 其黏度曲线也较为平滑。一方面, 抗性淀粉在高温下不会像淀粉颗粒那样, 发生吸水溶胀及崩解, 使直链淀粉分子逸出, 而能呈现淀粉的粘度特性^[25]; 另一方面, 经过挤压, 淀粉分子的大小、颗粒内部分子排列的紧密程度及外界因素变化等也会造成这些糊化特性的差异^[26,27]。

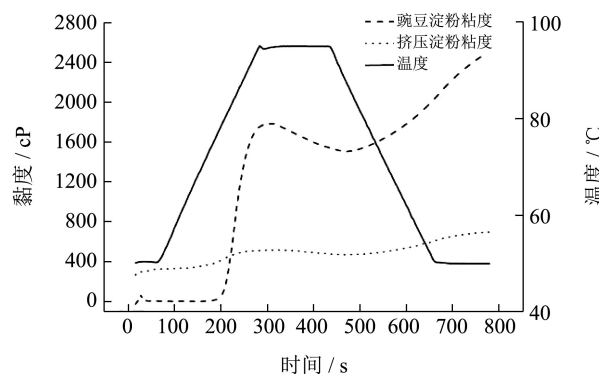


图3 豌豆淀粉与挤压纯化后抗性淀粉的黏度曲线

Fig.3 The viscosity curves of pea starch and extruded and purified resistant starch

构、晶型, 从而显著改变豌豆淀粉组成和消化特性, 这为豌豆淀粉改性研究提供新思路, 豌豆淀粉高值化加工产品拓宽新领域, 为开发相关功能性产品提供了新材料, 也为豌豆淀粉的产业化实践工艺参数提供了参考。

参考文献

[1] 张玉杰. 超声对淀粉结构、性质的影响及制备辛烯基琥珀酸淀粉酯的作用机理[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020
ZHANG Yu-jie. Effect of ultrasound on structures and properties of starch and mechanism of preparing octenyl succinic anhydride modified starch [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020

[2] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification

- and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46: 33-50
- [3] ZHAN Hui-lu, Nicholsa B, Elizabeth D, et al. Debranching of pea starch using pullulanase and ultrasonication synergistically to enhance slowly digestible and resistant starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 268: 533-541
- [4] LIU Si-yu, LIU Xia-ne, CAO Yao, 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
- [5] Danielle R, Abe S G, John J M. Physicochemical and structural characterization of resistant starch isolated from *Vigna unguiculata* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 268-275
- [6] 刘晓庆,刘松继,陈江平等.不同改良剂对豌豆淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J].*中国粮油学报*,2020,35(1):143-148
LIU Xiao-qing, LIU Song-ji, CHEN Jiang-ping, et al. Effects of different modifiers on gelation and gel properties of pea starch [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(1): 143-148
- [7] LIU Peng-fei, GAO Wei, ZHANG Xiao-lei, et al. Physicochemical properties of pea starch-lauric acid complex modified by maltogenic amylase and pullulanase [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 242: 116332
- [8] ZHOU Ding-ting, MA Zhen, XU Jiang-bin, et al. Resistant starch isolated from enzymatic, physical, and acid treated pea starch: preparation, structural characteristics, and *in vitro* bile acid capacity [J]. *LWT*, 2019, 116: 108541
- [9] 刘佳,曾英男,李瑞,等.抗性淀粉的制备研究进展[J].*粮食问题研究*,2020,5:47-50
LIU Jia, ZENG Ying-nan, LI Rui, et al. Advances in preparation of resistant starch [J]. *Grain Issues Research*, 2020, 5: 47-50
- [10] 白永亮,陈庆发,张全凯,等.三种改性方法对青香蕉淀粉物化性质的影响[J].*现代食品科技*,2013,29(10):2453-2460
BAI Yong-liang, CHEN Qing-fa, ZHANG Quan-kai, et al. Effects of three modification methods on the physicochemical properties of native banana starch [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2453-2460
- [11] Jozinović A, Šubarić D, Ačkar Đ, et al. Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 172: 31-37
- [12] 戚明明,任志尚,张光耀,等.挤压处理对豌豆淀粉的流变特性和体外淀粉消化率的影响(英文)[J/OL].*食品科学*: 1-12.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200722.1450.148.html>
- QI Ming-ming, REN Zhi-shang, ZHANG Gaung-yao, et al. Effects of extrusion treatment on the rheological properties and the *in vitro* starch digestibility of pea starch [J/OL]. *Food Science*, 1-12.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200722.1450.148.html>
- [13] 左慧玉,徐飞,张彦军,等.双螺杆挤压对菠萝蜜种子淀粉消化特性的影响[J/OL].*食品工业技*:1-12.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20191213.1203.018.html>
- ZUO Hui-yu, XU Fei, ZHANG Yan-jun, et al. Effect of twin screw extrusion on digestibility of jackfruit seed starch [J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*, 1-12.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20191213.1203.018.html>
- [14] 冯传兴,周泉城.马铃薯淀粉3D打印工艺及其3D打印结构的研究[J].*现代食品科技*,2017,33(9):189-194
FENG Chuan-xing, ZHOU Quan-cheng. 3D printing processing of potato starch and the changes in its structure and properties [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(9): 189-194
- [15] 章丽琳,付晶晶,张喻.应用 RVA 仪分析凉薯淀粉的糊化特性[J].*粮食与油脂*,2017,30(4):38-41
ZHANG Li-lin, FU Jing-jing, ZHANG Yu. Analysis on pasting properties of yam bean starch by RVA [J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(4): 38-41
- [16] 李俊伟,唐书泽,张志森,等.挤压法制备大米抗性淀粉中系统参数控制与目标参数的关系[J].*食品科学*,2008,29(12):381-384
LI Jun-wei, TANG Shu-ze, ZHANG Zhi-sen, et al. Relationship between system parameters and target parameter of extrusion in resistant rice starch preparation [J]. *Food Science*, 2008, 29(12): 381-384
- [17] 徐晓茹,周坚,吕庆云,等.挤压前、后大米淀粉理化性质的变化[J].*中国食品学报*,2019,19(12):187-194
XU Xiao-ru, ZHOU Jian, LYU Qing-yun, et al. Changes in the physicochemical properties of rice starch before and after extrusion [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 187-194
- [18] 沈丹.挤压膨化对鹰嘴豆淀粉理化特性及其品质的影响[D].黑龙江:黑龙江八一农垦大学,2015
SHEN Dan. Effect of extrusion on chickpea starch physicochemical properties and quality [D]. Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, 2015
- [19] 张莉莉.抗性淀粉营养强化大米的制备及其性质研究[D].

- 南昌:南昌大学,2012
ZHANG Li-li. Preparation and properties of resistant starch-fortified rice [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012
- [20] 赵凯. 淀粉非化学改性技术[M]. 化学工业出版社, 2009:241-243
ZHAO Kai. Non-chemical Modification of Starch [M]. Chemical Industry Press, 2009: 241-243
- [21] Imberty A. A revisit to the three dimensional structure of B-type starch [J]. Biopolymers, 1988, 27: 1205-1221
- [22] 武俊超, 高群玉, 梁楚琴. 采用不同方法制备豌豆抗性淀粉及其性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(9):119-123
WU Jun-chao, GAO Qun-yu, LIANG Chu-qin. Study on preparation and properties of pea resistant starches with different methods [J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(9): 119-123
- [23] 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 Zhe. Preparation of pea resistant starch and its application in flour products [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017
- [24] CHEN Long, TONG Qun-yi, REN Fei, et al. Pasting and rheological properties of rice starch as affected by pullulan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 66: 325-331
- [25] 申瑞玲, 刘晓芸, 董吉林, 等. 抗性淀粉制备及性质和结构研究进展[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(1):5-8
SHEN Rui-ling, LIU Xiao-yun, DONG Ji-lin, et al. Research progress on preparation, characteristics and structure of resistant starch [J]. Cereals & Oils, 2013, 26(1): 5-8
- [26] 张燕鹏, 庄坤, 丁文平, 等. 豌豆淀粉与马铃薯淀粉、玉米淀粉理化性质比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4):183-186
ZHANG Yan-peng, ZHUANG Kun, DING Wen-ping, et al. Comparison of physicochemical properties of pea starch, potato starch and corn starch [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(4): 183-186
- [27] Jaspreet S, Owen J M, Harjinder S, et al. Morphological, thermal and rheological characterization of starch isolated from New Zealand Kamo Kamo (*Cucurbita pepo*) fruit - a novel source [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67(2): 233-244

(上接第 62 页)

- [17] 李天洙, 朴永泉, 张学武. 桦褐孔菌对糖尿病豚鼠脂类代谢机理的影响[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(11):2839-2840
LI Tian-zhu, PIAO Yong-quan, ZHANG Xue-wu. Effects of *Inonotus obliquus* on lipid metabolism in diabetic guinea pigs [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2010, 21(11): 2839-2840
- [18] Qixing Nie, Haihong Chen, Jielun Hu, et al. Effects of nondigestible oligosaccharides on obesity [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2020, 11: 205-233
- [19] D Katiyar, B Singh, A M Lall, et al. Efficacy of chito-oligosaccharides for the management of diabetes in alloxan induced mice: a correlative study with antihyperlipidemic and antioxidative activity [J]. Eur J Pharm Sci, 2011, 44(4): 534-543
- [20] R Lan, S Li, Q Chang, et al. Chitosan oligosaccharides protect Sprague Dawley rats from cyclic heat stress by attenuation of oxidative and inflammation stress [J]. Animals (Basel), 2019, 9(12): 1074-1084
- [21] 施美莲, 朱冬琴, 高静华, 等. NOD 小鼠的遗传学特征和部分生物学特性观察[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2002, 20(3):207-212
SHI Mei-lian, ZHU Dong-qin, GAO Jing-hua, et al. Genetic and some biological characteristics of NOD mice [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2002, 20(3): 207-212
- [22] 张沛. TLR4 受体介导的壳寡糖对巨噬细胞激活机制的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014
ZHANG Pei. Research on the mechanisms of macrophage activation by chito-oligosaccharides by TLR4 receptor [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014

(上接第 158 页)

- [29] Xia X, Kong B, Xiong Y, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine longissimus muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation [J]. Meat Science, 2010, 85(3): 481-486
- [30] J M James, C R Calkins. The influence of cooking rate and holding time on beef chuck and round flavor [J]. Meat Science, 2008, 78(4): 429-437