# 水相高温处理对淀粉结构与性质的影响

陈　龙[1,2]，　王　谊[1]，　程　昊[1]，　田耀旗[1,2]，　金征宇[*1,2]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 食品科学与技术国家重点实验室，江南大学，江苏 无锡 214122）

**摘要：**淀粉作为食品中的主要成分之一，在人类饮食中起着重要作用。蒸制、水煮、挤压作为淀粉基食品加工中常用的3种水相高温处理手段，对淀粉的颗粒形态、分子结构、晶型、糊化、老化和消化等都会产生重要影响。作者综述了蒸制、水煮、挤压处理对淀粉结构与性质的影响，以期为提升淀粉类食品品质提供理论依据。

**关键词：**蒸制；水煮；挤压；淀粉；结构；性质

**中图分类号：**TS 234　　**文章编号：**1673-1689(2021)11-0001-11　　DOI：10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.11.001

# Effect of High Temperature Treatments of Aqueous Phase on Structure and Properties of Starch

*CHEN Long*[1,2]，　*WANG Yi*[1]，　*CHENG Hao*[1]，　*TIAN Yaoqi*[1,2]，　*JIN Zhengyu*[*1,2]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract**: As one of the main food components, starch plays a very important role in human diet. Steaming, boiling and extrusion are three aqueous phase and high temperature treatments commonly used in the processing of starch-based food, significantly affecting the granule morphology, molecular structure, crystal type, gelatinization, retrogradation and digestion of starch. In this work, the effects of aqueous phase and high temperature treatments (steaming, boiling and extrusion) on the structure and properties of starch were reviewed in order to provide theoretical basis for the quality improvement of starchy food.

**Keywords:** steaming, boiling, extrusion, starch, structure, properties

淀粉是食品中重要的组成成分，是人类重要的能量来源之一。普通淀粉一般含有质量分数20%~30%的直链淀粉，其主要是由α-*D*-葡萄糖通过α-1,4糖苷键连接而成的线性长链分子；支链淀粉通常占普通淀粉的质量分数70%~80%，为典型多分支状结构，主链由若干葡萄糖残基以α-1,4糖苷键首尾相连而成，在支链处为α-1,6糖苷键[1]。淀粉是一种可再生、低成本、易加工的高分子聚合物，在食品工业中有广泛的应用[2-3]。

在食品工业中，淀粉都要进行一定的加工处理

**收稿日期：**2020-10-22

**基金项目：**国家自然科学基金青年基金项目(32101990)；江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200617)；中央高校基本科研业务费专项资金项目 (JUSRP12002)；国家一流学科—食品科学与技术建设专项资金项目 (JUFSTR20180203)；中国工程院咨询研究项目 (1024130201190170)；江苏省现代农业重点及面上项目(BE2018304)。

**作者简介：**陈　龙(1988—)，男，博士，副研究员，主要从事淀粉结构与功能研究。E-mail：longchen@jiangnan.edu.cn

*** 通信作者：**金征宇(1960—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事碳水化合物资源开发与利用研究。E-mail：fpcenter@jiangnan.edu.cn

才能转变为适于人类食用的产品,其中热处理是最常见、最有效、最方便的加工处理方式。水相体系的热加工包括蒸制、水煮和挤压等。不同热加工方法有着不同的特点,从而赋予食品不同的品质。如蒸是以蒸汽为传热介质使食品熟化的一种热加工处理方法。蒸制食品具有营养成分流失少且可以很好地保持食品原有风味以及形状等特点[4]。而水煮是以水为介质传输热能,使得原料在加热过程中可以保持快速而均匀受热,是家庭烹饪中常用的加工方法。挤压则是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化以及成型等过程为一体的加工技术,具有效益高、能耗低、无污染等特点[1]。

淀粉在水相高温加工过程中,其结构与理化性质都会发生一系列变化。有关热加工处理中淀粉结构与性质变化方面的研究较多,但比较分散,大多都是针对一种热加工处理中淀粉结构与性质的变化进行综述,缺少基于热加工特点和原理的综合比较与分析。如林雅丽等人[5]研究了挤压对糙米淀粉糊化和热力学性质等理化性质以及结晶结构、分子结构的影响;崔文雪[6]研究了芋头在蒸煮过程中淀粉结构和糊化特性的变化。

作者综述了 3 类常见的水相高温处理,包括蒸制、水煮和挤压,重点介绍了这些热加工方法所引起的淀粉结构变化, 以及由此引起的淀粉糊化、回生、消化等理化性质的变化,以期为改进淀粉类食品加工工艺、提升淀粉类食品品质提供理论依据。

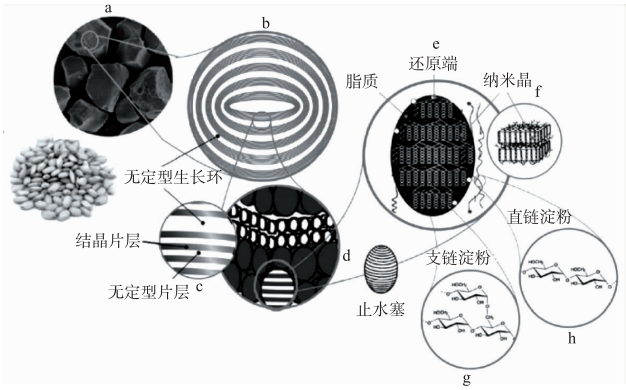
## 1 淀粉的结构和性质

### 1.1 淀粉结构

不同植物来源的淀粉颗粒其形状和大小都会有所不同。淀粉颗粒形状可分为椭圆形、球形、多边形等,一般淀粉颗粒直径大小为 0.1~200 μm。例如大米淀粉颗粒多呈不规则形态, 直径颗粒较小,一般约为 3~8 μm,其直径在谷物中最小[7];玉米淀粉颗粒呈椭圆形或不规则的多边形,颗粒直径一般为 5~20 μm [8]; 马铃薯淀粉颗粒则呈现偏圆形或椭圆形,直径较大,一般约为 15~75 μm[9]。

大部分淀粉颗粒由无定形区和结晶区组成(见图 1)。结晶区主要是由支链淀粉构成,而无定型区则主要是由直链淀粉构成[10]。不同来源的淀粉表现出的结晶性也不同, 采用 X-射线衍射仪对淀粉的结晶区进行测定,发现根据 X 射线图谱上衍射峰位置的差异, 淀粉的晶体类型可分为 A 型、B 型、C 型 3 种。A 型淀粉一般来源于小麦、大米等谷物淀粉;B 型淀粉通常来自直链淀粉含量较高的淀粉或马铃薯、芋头等块茎类淀粉;C 型淀粉则主要是来自绿豆、豌豆等豆类植物淀粉[8]。

尽管不同来源的淀粉在淀粉颗粒和晶体结构上有所差异,但它们都是由直链淀粉和支链淀粉组成。直链淀粉是一种线性聚合物,几乎无分支结构(见图 1),相对分子质量通常为 $1\times10^5$~$1\times10^6$,聚合度在 324~4 920;支链淀粉则有较多的分支结构,相对分子质量通常为 $1\times10^7$~$1\times10^9$, 聚合度为 9 600~15 900[7,11]。




a:淀粉颗粒;b:无定形和半结晶生长环;c:无定形和结晶层;d:Blocklets 小体;e:支链淀粉双螺旋结构;f:淀粉纳米晶;g:支链淀粉;h:直链淀粉。

**图 1 淀粉多尺度结构**

**Fig. 1 Starch multi-scale structure**

### 1.2 淀粉性质

淀粉糊化是淀粉颗粒在受热吸水膨胀过程中由有序状态变为无序状态的过程。淀粉糊化过程一般可分为 3 个阶段:第一是可逆吸水阶段,淀粉颗粒吸收少量水分并产生有限膨胀;第二是不可逆吸水阶段,大量水分进入淀粉颗粒内部,淀粉颗粒体积明显膨胀,表面有部分直链淀粉溢出,黏度迅速增加;第三是颗粒解体阶段,淀粉颗粒破裂失去原有形态,黏度开始下降,淀粉分子溢出并分散在溶液中[12]。淀粉糊化受淀粉的颗粒大小、结晶形态、支链淀粉分子结构、淀粉组成(直链淀粉与支链淀粉之比)、磷含量等诸多因素影响[13]。

在冷却和储存过程中,糊化淀粉中的直链淀粉和支链淀粉分子之间会重新排列形成有序的结构,这个过程被称为淀粉回生[14]。淀粉的糊化和回生特

性影响着食品的营养价值、消化特性、功能特性、感官属性以及货架期等[15]。通常来说，淀粉的回生是人们不期望发生的，因为回生造成了淀粉类食品货架期的缩短和营养价值的降低。但是，在有些食品中（如米线）淀粉的回生却被用来改善食品品质[16]。

淀粉的消化性质直接影响淀粉的营养品质，根据消化酶水解的速度和程度，淀粉可以分为快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）。快消化淀粉是在 20 min 内能被淀粉酶消化的淀粉；而在 20~120 min 内被淀粉酶消化的淀粉为慢消化淀粉，它是许多生谷物淀粉的主要淀粉成分；在 120 min 内不能被酶解的部分则是抗性淀粉。慢消化淀粉和抗性淀粉对人体健康有积极作用，慢消化淀粉可以维持人体血糖稳定，并可被人体完全消化吸收；抗性淀粉则具有饱腹感强、消化率低、血糖生成指数低等特点，对结直肠癌、糖尿病等疾病具有一定的预防作用[17-19]。

## 2 蒸制对淀粉结构与性质的影响

蒸是热加工处理中常用的一种，它是利用蒸汽为传热介质使食品经加热制熟。在现代食品工业中蒸汽可用于水果和蔬菜的热烫处理、食品的杀菌处理、酶的钝化等[20-22]。由于蒸汽的潜能大，其在冷凝变成水时会放出大量热量，使得水蒸气所产生的温度高于 100 ℃，这也是蒸制区别于其他热加工方法的主要特点。蒸汽根据压力和温度的关系又可分为过热蒸汽和饱和蒸汽，如图 2 所示[23]。在一定压力条件下，水在密闭空间加热达到沸腾状态所产生的水蒸气即饱和蒸汽；过热蒸汽是指对饱和蒸汽继续加热，使其蒸汽温度超过饱和蒸汽温度的一种水蒸气[19]。

在蒸制过程中，原料无须翻动，能够保留蒸制食品的色、香、味、形，且食品不与流动水直接接触，从而减少了食品中一些水溶性营养成分的损失，其在食品加工中有着广泛的应用。有研究表明对大麦进行蒸制加工处理，可以增加人们对大麦的可接受度，提高其口感，其原因是蒸更好地维持了大麦籽粒原有结构[24]。在蒸制过程中，淀粉会发生吸水、膨胀等变化。

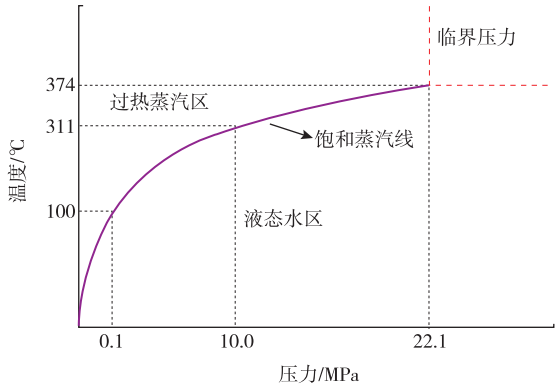



图 2　不同压力、温度下蒸汽分类

**Fig. 2　Steam classification under different pressure and temperature**

### 2.1　蒸制对淀粉微观结构的影响

蒸的过程淀粉颗粒会逐渐吸水膨胀，颗粒大小有所增加，直链淀粉有少量溶出，并在淀粉颗粒表面形成网络结构，进而抑制了淀粉颗粒的进一步膨胀[25]。胡月明[26]研究表明经过热蒸汽处理后淀粉颗粒发生聚集。崔文雪[6]对比了蒸、煮过程中芋头淀粉的变化，蒸制过程中淀粉颗粒逐渐糊化，且与煮相比，蒸制的糊化速度更快，结构更为紧密；淀粉的含水量也在增加，淀粉不断吸水膨胀，最后颗粒破裂，其中蒸制的芋头淀粉水分含量增加速度比水煮的慢，可能是因为水煮过程中芋头淀粉直接与大量的水接触[6]。

在蒸煮过程中，淀粉受热糊化，并伴随着晶体结构的改变[27]。根据胡月明[26]的研究结果，小麦粉具有 A 型晶体结构。小麦粉在过热蒸汽处理后结晶度有所降低。这是由于热处理会导致双螺旋链的移动和部分淀粉糊化，从而破坏了淀粉微晶，减少了结晶结构的含量，因此结晶度降低。此外，蒸煮压力对淀粉的结晶度也有一定的影响。徐丹萍[28]研究表明，常压蒸煮米饭中的淀粉在 13°、20°有明显的衍射峰，是典型的 V 型结构。随着蒸汽压力的增大，衍射峰强度逐渐减小。说明高压蒸汽蒸煮不利于直链淀粉–脂质复合物的形成。

蒸制过程中淀粉分子结构发生破坏，直链淀粉溶出。淀粉的分子结构和含量受蒸煮条件（温度、时间和压力等）、直链淀粉与支链淀粉的比例以及淀粉与体系中的其他组分如蛋白质、脂质的复合作用等因素影响。例如，胡月明[26]发现将小麦面粉经过热

蒸汽处理后,随着过热蒸汽温度的增加和处理时间的延长,直链淀粉的溶出量逐渐减少。原因在于加热处理会促使直链淀粉与直链淀粉、支链淀粉以及脂质之间发生交联,从而导致游离直链淀粉减少。据研究报道[28],大米在低蒸汽压力的情况下,其外部完整性较好,内部具有良好的孔隙结构,随着蒸汽压力增加,其表面孔洞有所增多,且可溶性直链淀粉含量减少。这可能是因为高压蒸汽破坏了大米结构,使表面孔洞变大,从而使得水分更易进入颗粒内部。可溶性直链淀粉含量减少可能是因为高压蒸汽蒸煮使得直链淀粉解离和双螺旋结构展开更加困难。

### 2.2 蒸制对淀粉理化性质的影响

在蒸制过程中,淀粉的糊化特性以及消化特性都会发生相应的变化。研究表明,淀粉在蒸制过程中,淀粉的最终黏度、糊化温度、崩解值均降低,峰值黏度和谷值黏度均升高[29]。而在 Ai 等[3]的研究中,小麦在蒸煮过程中表现出糊化温度升高,峰值黏度下降。这是因为小麦中磷脂含量较高,可以与直链淀粉形成直链淀粉-脂质复合物,从而降低了颗粒的膨胀性。这与胡月明[26]结论不同,他的研究结论显示过热蒸汽处理明显降低了淀粉的起始糊化温度。糊化温度的降低表明淀粉的吸水能力更强。这是因为热处理导致淀粉轻微糊化,糊化后的淀粉无定形区域所占比例更大,所以与未处理的淀粉相比其具有更快的吸水能力[30]。此外,在蒸的过程中,因为直链淀粉和支链淀粉的含量不同,淀粉的糊化温度也会有所差异;支链与直链比例不同,对淀粉颗粒的膨胀性和吸水性也会有所影响[31]。李培燕[32]研究了在不同蒸煮条件下籼米、粳米和糯米淀粉性质的影响,3 种大米淀粉的溶胀力都随着蒸煮温度的增加而增加,但增加的速率不同。糯米淀粉在较高温度(90 ℃)下表现出较高的溶胀力,在低温下(70 ℃),粳米淀粉的溶胀力较高。这表明低温下,淀粉的溶胀性受支链淀粉影响;在较高温度下,直链淀粉对淀粉的溶胀性影响更大。

淀粉的老化伴随着水分渗出、凝胶变硬等变化。Zhou 等人[33]研究表明,当蒸制馒头冷却至室温后,其硬度增大,这是由于淀粉在冷却过程中迅速回生所致。淀粉的回升值表示在降温阶段淀粉的老化程度,回升值的高低与淀粉老化程度的高低成正比。胡月明[26]用蒸汽处理小麦粉,结果表明小麦淀粉的回升值有所增加,说明其形成的淀粉凝胶的硬度变大,与崔文雪[6]研究结论一致。直链淀粉的含量也会影响回升值。Yu等[34]研究发现,淀粉的回升值随着直链淀粉含量的增加而升高,回升值越高老化速率越快。

淀粉消化性受淀粉的晶体结构、螺旋结构、分子结构以及淀粉的糊化程度等因素的影响。马梦婷等[35]发现,不同杂豆粉以及纯淀粉经过蒸煮,淀粉的水解速率和水解程度均有所提高,且纯淀粉的水解速率高于杂豆粉。这是由于豆粉可以形成淀粉脂质复合物,使得抗性淀粉含量和慢消化淀粉含量高于纯淀粉,且不易被破坏。通常来说,直链淀粉含量高的淀粉酶解速度较慢。张斌等[36]研究发现,蒸制处理后不同直链淀粉含量的玉米淀粉内 RDS 值都显著增加,且蜡质玉米淀粉比普通玉米淀粉更易消化,这是因为在蒸制过程中,淀粉颗粒表面的直链淀粉与支链淀粉可形成紧密的网状结构,这种结构不利于酶解,所以直链淀粉含量高的玉米淀粉更不易消化。此外,体系中水分含量也是影响蒸制处理时淀粉组分变化的一个重要因素。胡月明[26]分别将润水面粉和未润水面粉进行过热蒸汽处理,结果表明,润水面粉中的 SDS 和 RS 值增加,RDS 值减小;而未润水面粉中各淀粉组分值变化不大。这可能是因为水分含量的增加使得过热蒸汽处理时分子更易移动,有助于直链淀粉与直链淀粉、支链淀粉之间的交联以及淀粉-脂质复合物的形成,这些都不利于淀粉酶对淀粉的分解作用。Wu 等[37]研究结果表明,经过热蒸汽处理后,轻磨米中淀粉组分变化不大,其中 RDS 质量分数增加 4.5%,SDS 质量分数降低 5.1%。这可能是由于过热蒸汽处理时间短以及水分含量低所致。

此外,蒸制处理也会改善淀粉类食品品质如黏性、弹性和咀嚼性等[38]。有研究表明,面条经过热蒸汽处理,比未处理的面条更有弹性和咀嚼性。一方面,面粉的糊化特性经过热蒸汽处理后改变,黏度增强,使面条弹性增大;另一方面,热处理有利于小麦蛋白的聚集反应,从而形成更强的面筋网络结构,使面条的咀嚼性增加[26]。

## 3 水煮对淀粉结构与性质的影响

水煮是家庭烹饪中一种常用的热加工方式。与

蒸不同，煮是利用水作为传热介质产生热对流作用，使食品熟化的一种方法。食品的热处理过程存在热对流、热传导和热辐射 3 种基本传热方式，水煮主要是以热对流和热传导这两种方式进行传热。在常压下，水的沸点在常压下只能达到 100 ℃，所以相对来说，煮制食品加热时间较长。

在水煮过程中，水会先进入淀粉的无定形区。随着淀粉不断吸收水分，无定形区域发生膨胀。在一定压力下，水会从无定形区进入结晶区，导致淀粉失去原有的半结晶结构，使结晶区逐渐转变为无定形区，淀粉颗粒内部结构的无序性增加。

在水煮过程中，水从食物的外部逐渐渗透到内部，淀粉颗粒在受热的同时也会逐渐吸水膨胀，从而促进淀粉糊化[39]。用煮这种加工方式，会使淀粉含量降低，因为部分淀粉会在高温下降解而一些水溶性淀粉会在水中溶解[40]；同时，由于食品在沸水中烹饪，所以会导致蛋白质、维生素等水溶性或热敏性营养成分的流失。

### 3.1　水煮对淀粉微观结构的影响

现有的研究认为，利用水煮对淀粉类食品进行处理，糊化过程中淀粉颗粒的变化可分为 3 个阶段。第一阶段，淀粉颗粒开始逐渐膨胀；第二阶段，淀粉颗粒形态逐渐变化，例如芋头淀粉经水煮处理后颗粒形态从棱角状变为椭圆状；第三阶段，淀粉颗粒开始聚集并相互黏结[6,41]。白洁等[42]对红小豆烹调过程中微观结构的变化进行了研究，结果表明，随着时间的延长，淀粉的颗粒形态逐渐改变，从一开始的无明显变化，到淀粉颗粒不断吸水膨胀，最后呈现出较光滑、规则的椭球形颗粒。熊玮彦[43]研究表明，水煮处理后芸豆淀粉的颗粒结构明显被破坏，淀粉颗粒从圆球体逐渐吸水膨胀破裂成不规则的形状。此外，水煮时间也会对淀粉的微观结构产生一定影响。Pan 等[41]研究了在不同水煮时间下稻米形态的变化规律，结果表明，在水煮 10 min 后淀粉逐渐吸水膨胀；水煮 40 min 后，所有淀粉颗粒都黏在一起。与 Leelayuthsoontorn 等[44]研究一致，在烹调过程中，淀粉颗粒吸收水分，与未处理的原始样品相比有较大膨胀，其淀粉颗粒膨胀到一定程度后会有部分颗粒破裂，因此会有一部分直链淀粉浸出。

水煮处理后，淀粉相对结晶度下降、衍射峰强度减小[43,45-46]。崔文雪[6]研究表明，芋头淀粉在 15°、17°、18°、23°处有很强的衍射峰，是典型的 A 型晶体结构。经过水煮处理后，随着温度的上升，衍射峰呈逐渐减小的趋势。Yang 等[45]研究表明，蜡质小米淀粉和非蜡质小米淀粉具有 A 型晶体结构。非蜡质小米淀粉经水煮处理后，晶体结构类型未改变，但随着蒸煮时间的增加，衍射强度逐渐减小。有研究表明，淀粉的相对结晶度受支链淀粉与直链淀粉比例的影响。一般来说，直链淀粉的含量与相对结晶度呈反比关系。

水煮过程中淀粉分子结构发生破坏，会有部分直链淀粉浸出。何梦[47]研究了高直链淀粉水稻(LH)、低直链淀粉水稻(QG)和蜡质水稻(WX)这 3 种水稻在不同蒸煮条件下直链淀粉浸出率的情况。结果表明，蒸煮时间与温度对 WX 的影响不大，这归因于 WX 几乎不含直链淀粉；而在高温长时条件下 QG 和 LH 的直链淀粉浸出率降低。可能是因为高温促进了直链淀粉与支链淀粉、直链淀粉、脂质之间的相互作用，从而阻碍了直链淀粉的溶出，而这些相互作用在 WX 蒸煮过程中是不会出现的。周中凯等[48]对 5 种直链淀粉含量不同的小麦淀粉进行水煮处理，研究发现水煮后的淀粉颗粒都受到了一定程度的破坏，且直链淀粉含量越低，破坏程度越大，淀粉分子越易溶出。Yang 等[45]也发现非蜡质小米淀粉较蜡质小米淀粉耐煮。此外，水煮过程中水分和高温的共同作用可能会使部分淀粉分子发生降解。

### 3.2　水煮对淀粉理化性质的影响

淀粉糊化是淀粉类食品常见的处理过程，其糊化特性对其产品的加工品质有着重要影响[49]。白洁等[42]研究了不同水煮时间下红小豆糊化特性的变化规律，结果表明随着水煮时间的延长，其峰值黏度、谷黏度、衰减值、最终黏度和回升值均呈现先降低后趋于平稳的变化规律。在水煮过程中淀粉吸水膨胀，结晶结构受到破坏，使黏度下降。衰减值的降低表明淀粉发生了不可逆变化，淀粉糊化程度增大，到一定程度后趋于稳定，使得最终黏度下降，回升值也偏低。杜双奎等[50]对比了水煮过程中不同品种的大米(粳米、籼米、糯米)的糊化特性。他们发现糯米的糊化温度和回升值均比籼米和粳米低，说明糯米更易发生糊化，且不易老化，这与糯米中直链淀粉含量低有关[51]。Bett-Garber 等[51]研究了水煮过程中米水比对米饭质构的影响。结果表明，大米黏度随加水量的增加而增加，这可能是由于浸出直链淀

粉与支链淀粉相互作用,在大米表面形成了一层淀粉涂层。吸水能力是由膨胀力决定的,不同直链淀粉含量的淀粉吸水能力不尽相同。有研究表明,在水煮过程中,在 50 ℃加热条件下,蜡质小麦淀粉表现出较差的吸水能力,而高直链淀粉表现出较强的吸水能力[48]。吸水率以及膨胀容积与直链淀粉含量成正比[52]。蜡质小麦淀粉基本上是由支链淀粉组成的,其结晶区域所占比例较高,所以蜡质淀粉的吸水能力较弱。而在 90 ℃加热条件下,蜡质小麦淀粉表现出较大的吸水能力,高直链淀粉的小麦淀粉吸水能力最低,这说明温度对蜡质小麦淀粉吸水能力的影响远大于高直链淀粉的小麦淀粉,这与杜双奎等[50]研究结果一致。

回升值大的淀粉易老化,白洁等[42]利用水煮红小豆时发现,随着蒸煮时间的延长,回升值逐渐降低,最后趋于稳定。崔文雪[6]研究发现,随着水煮温度的升高,芋淀粉回升值呈上升的趋势。杜双奎等人[50]研究结果表明,在相同水煮条件下,相比籼米和粳米,糯米表现出较低的回升值,表明糯米不易老化,这与糯米中直链淀粉含量较少有关。回升值跟直链淀粉含量呈正比。此外,淀粉的回生作用也受淀粉种类、糊化淀粉冷却储藏温度、处理条件等因素影响。Hu 等[53]对大米淀粉进行研究发现,水煮处理的淀粉的回生程度随储存时间的延长而降低,且高压水煮处理 30 min 的大米淀粉回生速度比在常压水煮 30 min 中的低,说明加压水煮处理可适当延缓回生,这可能是因为颗粒破碎较少,直链淀粉浸出量较低。

水煮处理可以使淀粉糊化,提高淀粉的体外消化率。Hsu 等[54]研究了水煮对淀粉消化率的影响,发现经过水煮处理后, 快消化淀粉含量显著增加,抗性淀粉和慢消化淀粉含量降低。张习军等[55]研究了 3 种品种的大米:晶针雪 (籼型, 直链淀粉含量较多)、桃花香米(籼型)和金健贡米(粳米,直链淀粉含量少),结果表明在相同水煮条件下,金健贡米相比桃花香米和晶针雪更易消化。同时在高压长时的水煮条件下,所有品种大米的快消化淀粉和慢消化淀粉含量都较高, 而在低压短时的水煮条件下,其抗性淀粉含量相对较高。说明在较高压力和较长时间下淀粉颗粒结构破坏明显,从而使得淀粉酶更易作用于淀粉,因此淀粉的消化率上升。

## 4 挤压对淀粉结构与性质的影响

在挤压加工过程中,预处理后的物料通过挤压腔,在高温、高压和机械力的作用下,形成一定形状和结构的产品。当食品原料离开模具口时,由于压力的骤降使水转化为蒸汽, 从而使得食品原料膨胀。挤出物的形状通常反映模具的形状。在挤压过程中,食物中的营养物质将在高温和剪切力的作用下发生一系列变化,如淀粉糊化和降解、蛋白质变性等[56-57],这些变化与挤压的参数条件以及原料自身的性质都有一定的关系[58-59]。对于挤压加工,螺杆挤出机是最主要的部分。根据螺杆数量的不同可分为单螺杆、双螺杆以及多螺杆挤压机。单螺杆挤出机适合于成本低、配料简单的食品加工,而双螺杆挤出机在实际生产加工中较常用,它可适用于多种物料的加工,具有高产量、高质量、高效率等优点[60]。

挤压加工具有生产效率高、成本低、营养损失少、能耗低、无污染等特点,在淀粉基食品生产中得到广泛应用,不仅可用于谷物、休闲食品、糖果、巧克力等挤压食品的生产,也可用于食品原料的改性[10]。挤压加工后的食品原料更易被人体所消化吸收。此外,经挤压处理后食品原料内部会出现许多孔洞,这有利于水分子进入原料内部,进而可缩短产品熟化时间。

### 4.1 挤压对淀粉微观结构的影响

淀粉在挤压加工过程中由于受到高温、高压以及高剪切力作用。淀粉颗粒结构的完整性受到破坏。徐晓茹等[61]研究表明淀粉颗粒经挤压后其完整性被破坏,几乎不存在完整的颗粒,并且挤压后的淀粉结构也被破坏。这一结果与林雅丽等人[5]研究结果一致,糙米在经过挤压后,淀粉颗粒从形状规则、表面光滑向形态不规则、表面粗糙且有裂痕转变。刘丽等[62]研究发现,挤压前碎米淀粉颗粒外表规则,挤压后淀粉颗粒的外表呈松散无序的鳞片状结构,且几乎不存在完整的淀粉颗粒。挤压参数条件如挤压蒸煮温度、原料水分含量、螺杆转速、喂料速度等也会对淀粉的微观结构产生影响。王立东等[63]用双螺杆挤压在不同参数条件下处理鹰嘴豆淀粉,并对其颗粒形貌进行了观察。研究结果表明,鹰嘴豆淀粉经过挤压处理后,其淀粉颗粒形貌由原来的卵圆形向不规则的多角形转变。螺杆转速对淀粉颗粒的形貌具有较大影响,随着螺杆转速的增大,淀粉

颗粒由致密向疏松结构转变，淀粉晶体结构几乎都被破坏。随着原料水分含量的增加，淀粉颗粒表面粗糙程度也相应增加，并呈现出楞角形。这是由于在水分含量低的条件下淀粉糊化程度较低，当水分含量逐渐增多时，糊化程度加剧。此外，在高压和高剪切力作用下，淀粉颗粒受到破坏，也会导致淀粉颗粒呈现出不规则形态。

在挤压过程中，淀粉在低水分条件下糊化，同时会破坏淀粉的晶体结构。随着温度和剪切力的增加，淀粉的结晶区将会被破坏并转变为无定形区，结晶度将大大降低。Yang 等[64]发现，挤压后的碎米淀粉特征峰明显破坏和降低，结晶度也降低，并且晶体结构由 A 型转变为 B 型和 V 型的混合型。徐晓茹等[61]在研究挤压后大米淀粉晶型结构变化时发现，挤压前的大米淀粉在衍射角度为 15°、17°、18°、20°、23°有很强衍射峰，属于 A 型淀粉晶型结构；挤压后的大米淀粉在衍射角度为 13°、20°有很强的衍射峰，属于 V 型淀粉晶型结构，并且大米淀粉和蛋白质混合物经过挤压后，它们的衍射图谱几乎没有明显差别。这表明挤压加工处理破坏了淀粉的晶体结构，并有新的结晶区形成，同时在挤压加工过程中蛋白质的添加对淀粉晶型结构转变无明显影响。刘丽等[62]研究发现挤压处理碎米淀粉，其衍射峰值强度降低，结晶度下降。这是因为在剪切力的作用下，淀粉的结晶结构被破坏。

研究表明，挤压过程中直链淀粉分子变化不大，而支链淀粉会发生较大程度的降解。一般来说，淀粉经过挤压后，支链淀粉比例下降，直链淀粉比例上升。沈丹[65]研究发现挤压后鹰嘴豆淀粉中直链淀粉的含量有所增大，张洁等[66]在研究挤压膨化荞麦和玉米淀粉时也有类似的结果。在挤压过程中高剪切力导致淀粉的糖苷键断裂，使得部分支链淀粉降解成糊精、还原糖等小分子物质[67]。有研究者发现，挤压过程中马铃薯淀粉和豌豆淀粉的平均分子量显著降低，这是由于挤压加工过程中大分子链受到高剪切力作用所致[68]。肖香等研究表明，经过挤压的大麦全粉中支链淀粉、直链淀粉比例分别由 42.27%、20.53%下降到 36.37%、19.68%，说明在挤压过程中发生降解的大部分是支链淀粉而不是直链淀粉分子[69]。这是因为支链淀粉分支结构多而且分子尺寸大，所以在挤压加工过程中更易受到机械剪切力的影响[70]。有研究表明，挤压过程中对支链淀粉的降解模式与普鲁兰多糖脱支酶相似[71]。

### 4.2　挤压对淀粉理化性质的影响

挤压过程中淀粉的糊化特性也会发生相应的变化。张洁等[66]在研究挤压荞麦淀粉理化性质时发现，荞麦淀粉起始的糊化温度和峰值黏度均明显降低。徐晓茹等[61]的结果证明挤压加工处理明显改变了大米淀粉的糊化特性，糊化参数值如峰值黏度、最低黏度、崩解值、最终黏度、回升值和峰值时间均显著降低，他们认为：一方面，由于挤压过程中大米受到机筒内部高温高压以及高剪切力的作用，使得淀粉发生一部分降解，相对分子质量会有所下降，最终使得糊化黏度降低；另一方面，蛋白质发生变性，脂肪与淀粉形成复合物等变化，这些都会导致峰值黏度、最低黏度、最终黏度以及回升值的显著下降[72]。刘丽等研究发现碎米淀粉经挤压加工处理后，最终黏度由 2 343.67 mPa·s 降低到 114 mPa·s[62]，与杨庭等研究一致[73]。

由于挤压产品中水分的含量偏低，因此不易老化[74]。淀粉的回升值反映了降温过程中淀粉的老化程度，回升值越高表示淀粉的老化程度越高。Liu 等[75]研究表明，经挤压处理后的淀粉回升值下降，且在低水分含量、高螺杆转速下，呈现出的回升值更低。刘丽等[62]在研究挤压碎米理化性质时发现碎米经挤压后，回升值从 1 209.67 mPa·s 降低到 49.00 mPa·s，与吴琼等[76]研究一致。这可能是由于挤压中淀粉降解的多糖对淀粉分子之间重新结合有一定的抑制作用[77]。有研究表明[70]，挤压虽然延缓了短期回生，但长期回生加速。支链淀粉降解的小分子抑制了淀粉凝胶水分流动性，延缓了三维凝胶网络的形成，阻碍了直链淀粉的聚集，有效地抑制了淀粉凝胶回生。淀粉的长期回生主要是由于支链淀粉的重新排列所致，经挤压后降解的支链淀粉分子尺寸较小，从而空间位阻作用小，进而有利于支链淀粉链重新缔合形成双螺旋和微晶[78]。

报道称挤压加工过程中的剪切作用以及挤压机桶内的捏合作用会使淀粉颗粒结构的完整性遭到破坏，从而增强淀粉颗粒对酶的物理可及性，进而增加了淀粉的消化性[79]。在相同的挤压条件下，直链淀粉的含量不同，表现出的消化能力也不一样。张亭亭等对不同品种的大米（粳米、早籼米、籼米、糯米）经挤压后其淀粉消化性的差异进行了研究[80]，研究结果表明，早籼米制品中的 RS 值最高，这是由

于籼米中直链淀粉含量较高,且直链淀粉的线性结构在挤压加工中分子之间更易形成氢键,从而形成了不易被消化的淀粉聚合物。挤压条件不同,对淀粉分子的破坏程度也不同,因此淀粉的消化能力也会有所差异,Sun 等研究发现[81],当挤压温度从100 ℃提高到 140 ℃时,RDS 含量从 35.88%增加到44.14%,与 Zhang 等研究一致[82]。这是由于高温可以提高淀粉的糊化度,从而提高淀粉的消化率。表 1 列举了水相处理后淀粉的一些性质变化情况。

**表 1 水相处理后淀粉性质的变化**

**Table 1 Changes of starch properties after aqueous phase treatment**

| 原料 | 热处理 | 性质 | | | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 结晶度 | 糊化特性 | 消化性 | |
| 润水面粉 | 蒸制(170 ℃,4 min) | 结晶度由 28.14%降低为 25.95% | 糊化温度和崩解值降低,其余糊化参数均增加 | RDS 减少;RS 和 SDS 增加 | [26] |
| 未润水面粉 | | 结晶度由 28.14%降低为 28.10% | 糊化温度降低,其余糊化参数均增加 | RDS 略有增加 | |
| 芋头淀粉 | 蒸制;(90 ℃,40 min) | 上升 | 糊化参数均呈上升趋势 | – | [6] |
| 芸豆、绿豌豆等杂豆 | 蒸制;(95 ℃,60 min) | 下降 | – | 增加 | [43] |
| 红小豆 | 水煮(100 ℃,60 min) | 降低,晶体结构消失 | 糊化参数均下降 | – | [42] |
| 粳米 | 水煮(100 ℃,30 min) | – | 崩解值:16.0;回升值:142.5 | – | [50] |
| 籼米 | | – | 崩解值:16.5;回升值:182.5 | – | |
| 糯米 | | – | 崩解值:67.0;回升值:73.0 | – | |
| 黑小麦+黑米磨粉 | 挤压(24%,165 ℃,10 Hz) | 降低,由 A 型向 V 型转变 | 糊化参数均下降 | 消化率由 28.74%提高到 92.44% | [83] |
| 鹰嘴豆淀粉 | 挤压(16%,85 ℃,24 Hz) | 由 28.56%降低到 12.41% | – | 消化率提高将近 20% | [65] |
| 籼米米粉 | 挤压(20%,115 ℃,180 r/min) | 降低,由 A 型向 A+V 型转变 | 糊化参数均降低 | – | [61] |
| 大米淀粉 | | 由 A 型向 A+V 型转变 | 崩解值升高,其余糊化参数均降低 | – | |

## 5 展 望

蒸制、水煮、挤压作为水相高温处理的 3 种热加工手段都会对淀粉的结构与性质产生影响。所以了解不同加工手段对淀粉结构与理化性质产生的影响对于改善和控制淀粉类食品品质具有重要的意义。

虽然国内外学者对水相处理中淀粉以及淀粉类食品变化机制的研究不断深入,但大部分集中在食品加工工艺以及配方的改良等方面。有关食品热加工的研究大多局限于食品体系中某单一组分的结构与性质的变化,忽略了淀粉类食品中不同组分之间的相互作用;对淀粉结构与性质变化与食品品质之间的本质关系亦缺乏深入研究。

鉴于此,建议在今后的研究中考虑以下要点:1)在实际生产加工中,应全面考虑原料中的成分以及加工条件,深入探究实际食品加工生产中不同大分子之间的相互作用;2)关注加工工艺、淀粉结构与食品品质之间的关系,进一步深入研究加工处理方式对淀粉类食品品质的影响及机理;3)系统分析热加工参数包括温度、水分、压力、时间等对食品中淀粉等主要成分的分子结构、功能特性以及营养价值的影响,为设计、改造烹饪设备提供关键科学数据。

## 参考文献:

[1] 肖志刚,邵晨,杨柳,等. 淀粉改性方法的研究现状及进展[J]. 农产品加工,2020,19(3):81-84.
[2] TAO Y,YAN B,FAN D,et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating:a review from the perspective of dielectric properties[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2020,99:593-607.
[3] AI Y,JANE J L. Gelatinization and rheological properties of starch[J]. **Starch-Starke**,2015,67(3):213-217.
[4] 周龙章. 蒸汽在烹饪中的应用及其原理[J]. 四川烹饪,1995,6:41.
[5] 林雅丽,张晖,王立,等. 挤压对糙米中淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技,2016,32(12):254-259.
[6] 崔文雪. 芋蒸煮过程中淀粉形态结构及糊化特性的研究[D]. 扬州:扬州大学,2019.
[7] 刘传菊,李欢欢,汤尚文,等. 大米淀粉结构与特性研究进展[J]. 中国粮油学报,2019,34(12):107-114.
[8] 孙沛然. 高静压对玉米淀粉颗粒结构的影响[D]. 北京:中国农业大学,2015.
[9] 李丹. 高温油炸对马铃薯淀粉特性的影响研究[D]. 郑州:郑州轻工业学院,2018.
[10] 王盼,汪丽萍,田晓红,等. 挤压加工与淀粉理化性质关系的研究进展[J]. 粮油食品科技,2016,24(6):13-17.
[11] TESTER R F,KARKALAS J,QI X. Starch - composition,fine structure and architecture[J]. **Journal of Cereal Science**,2004,39(2):151-165.
[12] 邢俊杰. 酸解—湿热处理复合改性淀粉多阶段糊化特性及机理研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
[13] WANG L,XU J,FAN X,et al. The effect of branched limit dextrin on corn and waxy corn gelatinization and retrogradation[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2018,106:116-122.
[14] WANG S J,COPELAND L. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility:a review[J]. **Food & Function**,2013,4(11):1564-1580.
[15] MUTUNGI C,PASSAUER L,ONYANGO C,et al. Spectroscopy:Correlation of features in Raman spectra with X-ray diffraction and C-13 CP/MAS NMR spectroscopy[J]. **Carbohydrate Polymers**,2012,87(1):598-606.
[16] WANG S J,LI C L,COPELAND L,et al. Starch retrogradation:a comprehensive review[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2015,14(5):568-585.
[17] 黄峻榕,任瑞珍,蒲华寅,等. 慢淌化淀粉的消化特性[J]. 中国粮油学报,2015,30(3):134-139.
[18] 孟少华. 双改性籼米抗性淀粉的制备及其体内降血糖与预防结肠癌的功效研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
[19] 宋彦显,闵玉涛. 抗性淀粉防治糖尿病和肥胖症功能的研究进展[J]. 中国食物与营养,2009,7:48-50.
[20] 杨铭铎,孟宁,崔莹莹. 烹饪中蒸汽传热工艺 - 蒸制技法及其研究进展[J]. 食品工业,2019,40(11):299-303.
[21] MOSCETTI R,RAPONI F,MONARCA D,et al. Effects of hot-water and steam blanching of sliced potato on polyphenol oxidase activity[J]. **International Journal of Food Science & Technology**,2019,54(2):403-411.
[22] HEAD D S,CENKOWSKI S,ARNTFIELD S,et al. Superheated steam processing of oat groats[J]. 2010,43(4):690-694.
[23] 李书兵,庹保华,乔长虎,等. 饱和蒸汽与过热蒸汽的性质及应用[J]. 燃料与化工,2018,49(1):59-61.
[24] TAKEMITSU H,AMAKO M,SAKO Y,et al. Reducing the undesirable odor of barley by cooking with superheated steam[J]. **Journal of Food Science and Technology-Mysore**,2019,56(10):4732-4741.
[25] ZENG S,CHEN B,ZENG H,et al. Effect of microwave irradiation on the physicochemical and digestive properties of lotus seed starch[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2016,64(12):2442-2449.
[26] 胡月明. 过热蒸汽处理对小麦及小麦粉品质的影响研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
[27] CHEN X,HE X W,FU X,et al. *In vitro* digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment[J]. **Journal of Cereal Science**,2015,63:109-115.
[28] 徐丹萍. 高压蒸汽蒸煮对米饭食味品质影响及其机理探究[D]. 无锡:江南大学,2019.
[29] LIU S Y,LI Y T,OBADI M,et al. Effect of steaming and defatting treatments of oats on the processing and eating quality of noodles with a high oat flour content[J]. **Journal of Cereal Science**,2019,89:1-7.
[30] MARTINEZ M M,ROSELL C M,GOMEZ M. Modification of wheat flour functionality and digestibility through different

extrusion conditions[J]. **Journal of Food Engineering**,2014,143:74-79.
[31] VILLANOVA F A,EL HALAL S L M,VANIER N L,et al. Physicochemical and cooking quality characteristics of South American rice cultivars parboiled at different steaming pressures[J]. **Cereal Chemistry**,2020:97(2):472-482.
[32] 李培燕. 大米在不同蒸煮条件下淀粉消化性差异的相关因子解析[D]. 天津:天津科技大学,2017.
[33] ZHOU L,MU T H,MA M M,et al. Staling of potato and wheat steamed breads:physicochemical characterisation and molecular mobility[J]. **International Journal of Food Science and Technology**,2019,54(10):2880-2886.
[34] YU S F,MA Y,SUN D W. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage [J]. **Journal of Cereal Science**,2009,50(2):139-144.
[35] 马梦婷,王艺静,王美霞,等. 十种食用豆粉及其淀粉的消化特性研究[J]. 中国粮油学报,2017,32(5):26-31.
[36] 张斌,罗发兴,黄强,等. 不同直链含量玉米淀粉结晶结构及其消化性研究[J]. 食品与发酵工业,2010,36(8):26-30.
[37] WU J,MCCLEMENTS D J,CHEN J,et al. Improvement in nutritional attributes of rice using superheated steam processing[J]. **Journal of Functional Foods**,2016,24:338-350.
[38] LI H,PRAKASH S,NICHOLSON T M,et al. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains[J]. **Food Chemistry**,2016,196:702-711.
[39] ZHU L,WU G,CHENG L,et al. Effect of soaking and cooking on structure formation of cooked rice through thermal properties, dynamic viscoelasticity,and enzyme activity[J]. **Food Chemistry**,2019,289:616-624.
[40] LI Q,SHI X,ZHAO Q,et al. Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (Castaneamollissima Blume)[J]. **Food Chemistry**,2016,201:80-86.
[41] PAN T,ZHAO L,LIN L,et al. Changes in kernel morphology and starch properties of high-amylose brown rice during the cooking process[J]. **Food Hydrocolloids**,2017,66:227-236.
[42] 白洁,刘丽莎,李玉美,等. 红小豆蒸煮过程中的糊化特性及微观结构[J]. 食品科学,2018,39(7):41-46.
[43] 熊玮彦. 蒸煮和湿热处理对杂豆细胞内淀粉结构及体外消化性的影响机制研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
[44] LEELAYUTHSOONTORN P,THIPAYARAT A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions[J]. **Food Chemistry**,2006,96(4):606-613.
[45] YANG Q,LIU L,ZHANG W,et al. Changes in morphological and physicochemical properties of waxy and non-waxy proso millets during cooking process[J]. **Foods**,2019,8(11):583-593.
[46] 王娟,徐进,孙月玲,等. 部分糊化玉米淀粉浆液的性能[J]. 纺织学报,2015,36(4):76-81.
[47] 何梦. 蒸煮条件对米制品品质的影响[D]. 上海:上海交通大学,2019.
[48] 周中凯,张岩,陈晓姗,等. 5 种小麦淀粉的结构与性质的研究[J]. 粮食与饲料工业,2013,36(4):23-26.
[49] 马萌. 菱角粉的理化性质及应用研究[D]. 无锡:江南大学,2013.
[50] 杜双奎,杨红丹,于修烛,等. 商品粳米、籼米、糯米品质特性和糊化特性比较研究[J]. 食品科学,2010,31(5):78-81.
[51] BETT-GARBER K L,CHAMPAGNE E T,INGRAM D A,et al. Influence of water-to-rice ratio on cooked rice flavor and texture [J]. **Cereal Chemistry**, 2007,84(6):614-619.
[52] 阮少兰,毛广卿. 大米蒸煮品质的研究[J]. 粮食与饲料工业,2004,12(10):25-26.
[53] HU X T,XU X M,JIN Z Y,et al. Retrogradation properties of rice starch gelatinized by heat and high hydrostatic pressure(HHP) [J]. **Journal of Food Engineering**,2011,106(3):262-266.
[54] HSU R J-C,CHEN H-J,LU S,et al. Effects of cooking,retrogradation and drying on starch digestibility in instant rice making[J]. **Journal of Cereal Science**,2015,65:154-161.
[55] 张习军,熊善柏,周威,等. 蒸煮工艺对米饭中淀粉消化性能的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(S1):92-96.
[56] ALAM M S,KAUR J,KHAIRA H,et al. Extrusion and extruded products:changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters:a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2016,56(3):445-473.
[57] SINGH S,GAMLATH S,WAKELING L. Nutritional aspects of food extrusion:a review[J]. **International Journal of Food**

**Science and Technology**,2007,42(8):916-929.
[58] 王会然. 挤压重组米品质特性研究[J]. 食品工业,2015,36(4):92-95.
[59] 赵学伟,魏益民,张波. 挤压对小米淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技,2012,33(6):185-188.
[60] OFFIAH V,KONTOGIORGOS V,FALADE K O. Extrusion processing of raw food materials and by-products:a review[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2019,59(18):2979-2998.
[61] 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.
[62] 刘丽,程建军,杨文鑫,等. 挤压处理对碎米结构及特性的影响[J]. 食品工业科技,2013,34(1):92-96.
[63] 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.
[64] YANG W,ZHENG Y,SUN W,et al. Effect of extrusion processing on the microstructure and *in vitro* digestibility of broken rice [J]. **LWT–Food Science and Technology**,2020,119:108835.
[65] 沈丹. 挤压膨化对鹰嘴豆淀粉理化特性及其品质的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2015.
[66] 张洁,张国权,罗勤贵. 挤压对荞麦淀粉及其混配淀粉理化特性的影响[J]. 农业机械,2011,53(32):97-101.
[67] 徐树来. 挤压加工对米糠主要营养成分影响的研究[J]. 中国粮油学报,2007,27(3):12-16.
[68] LOGIé N,DELLA VALLE G,ROLLAND-SABATé A,et al. How does temperature govern mechanisms of starch changes during extrusion?[J]. **Carbohydrate Polymers**,2018,184:57-65.
[69] 肖香,周玉蓉,杨华平,等. 挤压膨化对大麦全粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(20):41-45.
[70] LIU Y,CHEN J,WU J,et al. Modification of retrogradation property of rice starch by improved extrusion cooking technology[J]. **Carbohydrate Polymers**,2019,213(2):192-198.
[71] LIU W C,HALLEY P J,GILBERT R G. Mechanism of degradation of starch,a highly branched polymer,during extrusion[J]. **Macromolecules**,2010,43(6):2855-2864.
[72] 贾喜午. 原料成分对挤压产品品质影响及营养米品质评价的研究[D]. 武汉:武汉轻工大学,2015.
[73] 杨庭,朱科学,吴娜娜,等. 挤压改性对糙米粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技,2014,35(24):96-103.
[74] 刘云飞. 改良挤压技术对大米淀粉结构和性质的影响及其在淀粉基食品中的应用[D]. 南昌:南昌大学,2019.
[75] LIU Y F,CHEN J,LUO S J,et al. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. **Carbohydrate Polymers**,2017,175:265-272.
[76] 吴琼,柳溪. 不同物理方法处理对碎米中淀粉特性的影响[J]. 中国酿造,2016,35(1):105-109.
[77] LIU C M,LIANG R H,DAI T T,et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. **Food Hydrocolloids**,2016,57:55-61.
[78] WANG S J,LI C L,COPELAND L,et al. Starch retrogradation:a comprehensive review[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2015,14(5):568-585.
[79] 戚明明,郭鹏,汪陈洁,等. 挤压对淀粉微观结构和理化性质影响的研究进展[J]. 食品工业科技,2020,41(5):305-310.
[80] 张亭亭,邢贝贝,赵强,等. 挤压膨化处理对婴幼儿米粉理化和体外消化特性的影响[J]. 中国食品学报,2020,20(1):158-165.
[81] SUN X,YU C,FU M,et al. Extruded whole buckwheat noodles:effects of processing variables on the degree of starch gelatinization,changes of nutritional components,cooking characteristics and in vitro starch digestibility[J]. **Food & Function**,2019,10(10):6362-6373.
[82] ZHANG Y T,ZHANG Y J,LI B,et al. *In vitro* hydrolysis and estimated glycemic index of jackfruit seed starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2019,121:1109-1117.
[83] 谢岩黎,张春雨,王小丽. 挤压膨化对婴幼儿颗粒面条中淀粉结构及消化特性的影响[J]. 中国粮油学报,2018,33(7):38-42.