

物理改性对淀粉特性影响的研究进展

曹英¹, 夏文^{2,*}, 王飞², 李积华², 林燕云²

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070;

2. 中国热带农业科学院农产品加工研究所, 广东湛江 524001)

摘要: 淀粉的物理改性是指利用物理作用, 使淀粉的结构与性质发生变化, 以获得某些特定的性质, 满足加工生产的要求。物理改性由于具有简单快速、绿色环保的特点, 已经受到越来越多研究者的青睐。本文主要综述了超高压处理、球磨处理、挤出作用、湿热处理、辐射处理以及超声波处理几种物理改性方法对淀粉特性的影响, 比如结晶结构、微观形态、分子链结构、糊化性质、老化性质、淀粉糊特性等, 并对其应用前景做了展望, 为物理改性淀粉的生产及应用提供了一定的理论依据。

关键词: 淀粉, 物理改性, 结构性质, 应用前景

Research Progress on the Effect of Physical Modification on Starch Properties

CAO Ying¹, XIA Wen^{2,*}, WANG Fei², LI Ji-hua², LIN Yan-yun²

(1. College of Food Science and Technology of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524001, China)

Abstract: Physical modification of starch refers to change the structure and properties of starch by physical effects, in order to obtain some specific properties to meet the requirements of processing and production. Physical modification has been favored by more and more researchers because of its simple, fast and environmental characteristics. In this paper, the effects of several physical modification methods including ultra-high pressure, ball milling, extrusion, hydrothermal, radiation and ultrasonic treatment on the structure and properties of starch, such as crystalline structure, micromorphology, gelatinization properties, molecular chain structure, retrogradation properties and paste properties of starch, are reviewed. The application prospect of physically modified starch is also prospected, which provides some theoretical basis for the starch industry.

Key words: starch; physical modification; structural properties; application prospect

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)21-0315-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.21.051

引文格式: 曹英, 夏文, 王飞, 等. 物理改性对淀粉特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 315-319, 325.

淀粉是一种由直链淀粉和支链淀粉组成的天然高分子化合物, 具有资源丰富、可再生、环境友好、成本低廉等优点, 被广泛地运用于食品、纺织、医药、包装材料、造纸工业等领域^[1]。淀粉的结构主要有颗粒结构(形态与大小)与分子结构(直链淀粉和支链淀粉的比例、链长分布、支链淀粉中长/短支链的比例等)两种形式, 其决定了淀粉的加工特性^[2]。天然淀粉存在易老化、溶解性差、容易热分解等问题, 在工业上的应用受到限制, 而淀粉的多羟基结构赋予其活泼的物理化学性质, 所以往往对其进行改性处理, 以适应特定的加工生产需求^[3]。物理改性、化学改性、酶法改性是目前常用的淀粉改性方法, 应用中往往也将某几种方法结合起来, 对淀粉进行复合改性

处理^[4]。化学改性是目前应用最广泛的改性方法, 且具有定向高效的优点, 但是反应过程难以控制, 且化学试剂的存在对环境和人体健康会造成威胁^[5]; 酶法改性易于控制, 但成本较高, 不适合工业化的生产; 而物理改性由于其具有简单快速、绿色环保的优点, 受到越来越多的关注^[6]。淀粉的物理改性是指利用热场、力场、电场等物理作用, 使淀粉的结构与性质发生变化, 以获得某些特定的性质, 满足加工生产的要求^[7]。常用的物理改性方法有超高压处理、球磨处理、挤压处理、湿热处理、辐照处理和超声波处理等^[8]。

目前, 关于单一物理改性方法对淀粉物理化学性质影响的报道很多, 但是缺乏对物理改性淀粉结

收稿日期: 2018-12-17

作者简介: 曹英(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉加工与改性, E-mail: cyecylily@163.com。

* 通讯作者: 夏文(1988-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 淀粉加工与改性, E-mail: xiawensg@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601397); 海南省自然科学基金项目(20163113)。

构与性质变化关系的系统总结,也限制了淀粉物理改性的应用。因此,本文主要综述了淀粉物理改性的方法,分析了其在加工过程中对淀粉结构与性质的影响,并对物理改性淀粉的应用前景作出了展望,以期为我国物理改性淀粉的研究提供一定的参考意见。

1 超高压处理对淀粉特性的影响

超高压技术是指将物料真空密封后置于高压设备中,并以水作为传递高压的介质,使用一定压力(100~1000 MPa)在一定温度下处理一段时间,从而达到改性的目的^[9]。超高压技术是一种非热处理方式,可以使导致食物变质的微生物失活,但不会对其热不稳定营养素造成破坏,同时保持食物原有的感官特性^[10]。

1.1 超高压处理对淀粉结晶结构的影响

超高压处理一般通过破坏食品大分子中的非共价键来改变其内部结构,而对其共价键没有太大影响^[11]。近年来国内外的研究表明,超高压处理对淀粉结晶结构的影响程度与处理压力、淀粉晶型、淀粉悬浮液的浓度等因素有关。低压会造成淀粉分子发生重排,使其短程有序性增加;高压则会破坏淀粉的结晶结构^[12]。Liu等^[13]将高粱淀粉进行高静水压力处理,实验结果显示,在120~480 MPa的压力水平下,高粱淀粉的晶型不受影响;在压力为600 MPa时,高粱淀粉结晶结构经历了从A型到B型的明显转变,淀粉颗粒表面变粗糙,相对结晶度下降。相较于B型与C型淀粉,A型淀粉对压力更为敏感,原因在于A型淀粉的双螺旋结构更为松散^[14]。Wang等^[15]研究表明,在600 MPa的高压下,小麦淀粉的结晶结构遭到明显的破坏,而土豆淀粉与山药淀粉的结构变化不大。Shen等^[12]发现在相同的处理压力下,含水量不同的淀粉具有类似的性质变化模式,随着高静水压的增加,其组织结构的有序性逐渐降低,表明在高压处理过程中,淀粉含水量不是影响其结晶结构的关键因素。

1.2 超高压处理对淀粉糊化特性的影响

经高压处理的高粱淀粉的糊化温度与糊化焓均下降,糊化温度的大小与淀粉结晶区域的稳定性有关,糊化焓的减小归因于淀粉双螺旋结构的破坏以及直链淀粉的部分糊化^[13]。热、机械力与高压作用均会导致淀粉发生糊化。超高压作用导致淀粉的糊化不同于传统的热糊化,没有或仅有很少的直链淀粉分子浸出并且颗粒不发生明显膨胀^[16]。超高压处理对淀粉的糊化作用取决于淀粉的种类、超高压处理参数和淀粉悬浮液的浓度等因素。左春姪等^[17]通过研究玉米淀粉高压糊化动力学提出了保压时间与淀粉糊化度的动力学关系式: $\ln(1-\alpha) = -kt$,式中 α 为糊化度; k 为表观速率常数; t 为保压时间,表明保压时间越长,淀粉的糊化程度越大。叶怀义等^[18]对小麦、玉米、绿豆、藕、木薯、甘薯、土豆淀粉经450 MPa以下的高压处理后,得出结论:当处理压力低于150 MPa时,淀粉表现出糊化现象,糊化温度均上升;当压力在150~250 MPa之间时,糊化温度基本不

变;小麦淀粉、绿豆淀粉、藕淀粉、木薯淀粉和甘薯淀粉在200 MPa下糊化焓基本无变化,但高于200 MPa后糊化焓降低;土豆淀粉和玉米淀粉的糊化焓在压力大于200 MPa时无明显变化,压力为400~450 MPa时糊化焓上升。

1.3 超高压处理对淀粉老化特性的影响

超高压处理不仅会促进淀粉的糊化,还能影响淀粉的老化特性。淀粉的老化特性与淀粉的种类、高压处理参数和淀粉悬浮液的浓度有关。Zhu等^[19]研究了高压对几种淀粉热特性的影响,结果表明高压处理对土豆淀粉老化的抑制作用更为明显,原因可能是相较于A型淀粉,B型淀粉结构疏松,容易受到高压的影响;Wang等^[15]研究表明200~300 MPa的低压会促进小麦淀粉和燕麦淀粉的老化,当压力高于300 MPa时淀粉的老化受到抑制。高压对淀粉老化的抑制作用与淀粉大分子结构的降解有关,淀粉发生降解后不利于老化过程中有序结构的形成,从而延缓了淀粉的老化。Xia等^[20]指出,木薯淀粉在240 MPa下经高速射流处理后发生降解,且降解程度越大,老化越不明显。

2 球磨处理对淀粉特性的影响

球磨作用是指使用摩擦、碰撞、冲击、剪切和其他机械作用来改变淀粉颗粒的结构和性质,以达到改性的目的,这个过程将淀粉中的大颗粒粉碎形成更小的颗粒,而小颗粒聚集并形成大颗粒^[21]。

球磨处理通过研磨体的冲击作用以及研磨体与球磨内壁的研磨作用对淀粉进行机械粉碎^[22],研究表明,球磨处理会导致淀粉颗粒的表面变得粗糙、结晶度降低、糊化焓变小、溶解度与膨胀度提高等。王立东等^[23]研究了球磨处理对绿豆淀粉颗粒结构及性质的影响,结果表明,淀粉颗粒由光滑变得粗糙,表面出现裂痕与凹陷,形成不规则的形状;淀粉颗粒发生团聚,粒径变大,由原来的有序结构向无序化结构转变;淀粉的结晶结构被破坏,由多晶态向无定形态转变;淀粉的溶解度与膨胀度显著提高,持水能力为原淀粉的3.2倍,且具有良好的冻融稳定性。淀粉的结构影响其物理化学性质,而球磨处理会对淀粉造成一定程度的损伤,导致淀粉分子链的断裂与淀粉分子的降解,且损伤程度随着球磨时间的增加而增加。球磨处理后支链淀粉分子的断裂使得游离水更容易进入淀粉分子内部,淀粉的溶解度和膨胀度均增加,并且支链淀粉侧链的断裂会导致淀粉糊粘度下降^[24]。

球磨对淀粉特性的影响程度大小取决于淀粉种类、球磨处理时间、球磨转速、球磨功率大小等因素。研究表明,球磨对高直链淀粉的结构和性能影响不大,但对蜡质淀粉的结构和性能影响较大,如Tan等^[25]指出,高直链淀粉具有较厚的半晶片、较大的直链淀粉结晶区域和较强的结构刚性直链淀粉非晶区域,在球磨处理的过程中表现出较强的抗机械能力,而蜡质玉米淀粉经过球磨处理以后糊化温度和糊化粘度降低,糊化稳定性提高,回生趋势减小。因此,球磨法可以用来制备具有较低粘度和较高糊化稳定

性的淀粉产品。球磨处理时间也是影响淀粉性质的一个重要因素。逮蕾等^[24]通过对比球磨0、1、2、4、6 h时绿豆淀粉颗粒形态和淀粉糊理化性质的变化后发现,随着球磨时间的延长,损伤淀粉和直链淀粉的含量逐渐增加,淀粉糊的粘度显著下降。田建珍等^[26]发现面粉经球磨5 h研磨后粒度迅速减小,但之后粒径不减反增,可能是由于球磨后期淀粉颗粒发生了团聚。球磨对淀粉特性的影响也与球磨能量大小有关,球磨产生的能量越大,淀粉结构破坏越明显。Ramadhan等^[27]指出,球磨转速越高,淀粉颗粒的平均直径越小;González等^[28]发现,随着球磨功率的增加,淀粉颗粒大小、相对结晶度和糊化焓均降低。

球磨是一种环保、经济的物理处理方法,能有效改变淀粉(尤其是蜡状淀粉)的多尺度结构和淀粉糊状性质,处理后的淀粉具有较低的糊化温度和糊化粘度,在不同温度下的糊化稳定性增强,回形率较小,适用于生产糖果、甜点、罐装和瓶装等产品,为工业上生产具有特定糊行为的淀粉提供了一定的参考意见。

3 挤出作用对淀粉特性的影响

挤出过程就是将热量、湿度、剪切力和压力应用于物料,使其在挤出机机筒中形成粘弹性熔体以完成特定的改性处理^[29]。通过改变挤出机的料筒温度、螺杆速度等一些因素可以使挤出过程中淀粉的结构变化得到很好的控制。在挤出过程中,淀粉流经模头成形,然后转变成均匀的熔融状态,有时也称为“热塑性淀粉”,这种转变可能包括各种结构变化,例如颗粒破裂、晶体熔化以及分子降解。晶体熔化主要是由于挤出过程中的温度超过淀粉热熔融温度;而分子降解则归因于剪切应力的存在,这有利于分子链分裂^[30]。

挤压作用通过使淀粉分子链发生降解,减少直链淀粉之间与支链淀粉之间的相互作用来减少分子链之间的纠缠作用,从而改变淀粉的特性。Román等^[31]研究了挤出行为对小麦、玉米和水稻淀粉凝胶网络结构力学性能的影响,结果显示小麦和玉米淀粉中直链淀粉颗粒粒径减小,导致构建凝胶结构的直链淀粉间的物理连接位点减少;而水稻淀粉中支链淀粉之间纠缠作用的减少也抑制了淀粉凝胶网络结构的形成,延缓了淀粉贮藏过程中的回生作用。

挤出作用导致淀粉分子结构的改变对淀粉的消化性能也有极大的影响。谢岩黎等^[32]通过体外模拟消化实验发现传统挂面工艺颗粒面条和挤压膨化颗粒面条淀粉消化率分别为85.13%和92.44%,证明挤压膨化提高了颗粒面条淀粉可消化性。而樊佳玫等^[33]则得到了相反的实验结果,即螺杆挤压技术可以提高抗性淀粉和慢消化淀粉的含量,减缓马铃薯淀粉的消化速率。这可能与挤出作用参数以及淀粉的类型有关。适当的挤压条件有助于淀粉内部形成连续致密的网络结构,从而增强了淀粉的质构特性,使淀粉的消化性降低,正如Rathod等^[34]指出:增加挤压过程中原料的水分含量,降低挤压过程中的温度可以使挤出物结构变得致密,硬度增加。挤压作用

通过改变淀粉分子链的结构以及它们之间的相互作用来改变食品的品质,但这种变化规律有待进一步研究。

淀粉的性质受到淀粉中直链淀粉与支链淀粉的含量、直链淀粉与支链淀粉的比例、直链淀粉与支链淀粉的相互作用等的影响,挤压作用通过改变淀粉分子的结构来控制淀粉的某些性质,如获得稳定性良好的淀粉糊,可有效控制酱料的凝固以及面包的老化等;而抗性淀粉与慢消化淀粉的含量则与餐后血糖上升速率有关,为保健食品的深度开发提供了新途径。

4 湿热处理对淀粉特性的影响

湿热处理是指在低水分含量(10%~30%)的条件下将淀粉高温(90~120℃)加热0.25~16 h,通过破坏淀粉的结晶区域并分离非晶区域中的双螺旋结构而不破坏淀粉的颗粒结构来诱导淀粉分子的结构重排^[35]。

如Molavi等^[36]指出,椰子淀粉经过湿热处理后形貌特征变化不明显,但是由于支链淀粉微晶结构的破坏,其相对结晶度降低;湿热处理增加了淀粉的溶解度和膨胀力,降低了椰子淀粉的糊化焓和糊化温度范围,使得颗粒分布更均匀;根据RVA数据,湿热处理增加了淀粉的峰值时间和糊化温度,但降低了其峰值粘度、崩解值、回生值和终值粘度,使得淀粉在酸性、高温、高剪切力等极端条件下更具稳定性。

湿热处理引起淀粉物理化学性质的改变主要归因于以下几个因素,包括直链淀粉含量的变化、淀粉链之间相互作用的增加、无定形区域中直链淀粉的排列方式的变化以及可能形成的直链淀粉-脂质复合物^[37]。González-Cruz等^[38]对稻米淀粉进行湿热处理,结果显示淀粉结晶区与非结晶区的双螺旋结构遭到破坏;傅立叶红外光谱分析表明湿热处理破坏了淀粉分子的短程有序结构;拉曼光谱显示湿热处理破坏了淀粉中官能团的相互作用。湿热处理引起淀粉颗粒内部重排以及淀粉官能团之间结合作用增强,因而会得到溶解度更小、糊化温度更高的淀粉^[39]。

5 辐照处理对淀粉特性的影响

辐照技术是利用射线与物质之间的相互作用产生活化的原子和分子,由此引发降解、聚合等物理化学反应,从而达到改性的目的^[40]。常见的辐射技术有伽马射线辐射、电子束辐射和X-射线辐射^[41]。辐照处理过程中没有温度的显著升高,不依赖于任何类型的催化剂,且处理方法简单快速,因而被广泛接受^[42]。

近年来,国内外的学者对辐照淀粉的结构及物理化学性质进行了研究,结果表明辐照处理不会破坏淀粉颗粒的表面结构,但可能在其表面造成一些凸起;辐照会使淀粉分子中的暴露的羧基数量增多,淀粉的溶解度、透光率、吸水吸油能力因此增加,而直链淀粉的表观含量、pH、膨胀指数减小;淀粉的糊化温度、糊化焓、峰值粘度、谷值粘度、终值粘度以及回生值均下降,而其冻融稳定性及脱水收缩作用均

得到明显改善,在改善冷冻食品的质量方面具有广阔的应用前景^[43-45]。

研究显示,辐照技术在保健食品、药品的开发生产方面具有广阔的前景。Mukhtar等^[46]采用4个不同剂量(5、10、15、20 kGy)的伽马射线对3个不同品种的燕麦进行了辐照处理,结果表明,辐照可以显著提高淀粉的抗氧化活性,且辐照剂量越大,淀粉的性质变化越明显,Kumar等^[47]也得到了类似的研究结果。Mutlu等^[43]研究发现微波辐照技术可以提高直链玉米淀粉中抗性淀粉的含量,且微波处理周期越长,抗性淀粉的含量越高,可以达到43.4%。抗性淀粉为糖尿病患者的健康带来了福音,而抗氧化淀粉在医药、美容等行业也具有巨大的发展潜力。

6 超声波处理对淀粉特性的影响

超声波处理是指应用频率高于人类听觉阈值的声波或频率范围为18 kHz~1 GHz的声波产生的能量对淀粉进行改性。超声波在溶液中产生超声空化并引起微气泡,当微气泡塌陷时,高能量释放并转化为高压和高温,在此过程中产生的物理效应包括:强烈的微气流、剪切力、由气泡塌陷和声流产生的冲击波^[48]。这种方法具有环境友好性,因为它减少了化学品的使用、废物产生和能量消耗。

超声波对淀粉的改性受到超声波的频率、强度、持续时间、系统温度、淀粉水分含量、大气中气体的组成以及淀粉的种类与结构等因素的影响。超声波处理对玉米淀粉(A型)和马铃薯淀粉(B型)以及直链淀粉含量为0~50%的淀粉的影响不大;淀粉的结晶类型一般不受超声影响,而其颗粒的结晶度与超声处理条件密切相关,如超声处理3 min(淀粉浓度30%,功率为500 W)可使淀粉结晶度增加,处理时间达到15 min后可使其结晶度降低,初始结晶度的增加可能是由于淀粉非晶态部分的破坏,而进一步的超声可能导致淀粉颗粒内晶体的破坏^[49]。因此,可以推论淀粉颗粒中晶体和非晶态部分对超声的敏感性不同。超声改性淀粉的峰值黏度、终值黏度、崩解值及回生值都显著下降,使得淀粉糊的稳定性得到明显改善^[49]。

在大多数情况下,超声波会导致淀粉颗粒中出现裂缝和孔隙,正如李薇等^[50]指出,超声波会对豌豆淀粉产生破坏作用,使淀粉颗粒表面出现坑洞和皱褶;一定强度的超声处理还会导致淀粉分子链的降解进而增加暴露的羟基数量,而这些裂缝、孔隙和暴露的羟基可以进一步提高淀粉的化学、物理、酶促反应的效率。Li等^[51]通过研究超声波对玉米淀粉酶解特性的影响,指出超声预处理减少了淀粉液化过程所需的时间,并且显著提升了糖化过程中的葡萄糖当量。同时,超声处理可以明显缩短马铃薯淀粉的辛烯基琥珀酰化时间,相比于对甲苯磺酸处理需要花费24 h,用超声处理只需要花费几分钟,是一种较为理想的前处理手段^[52]。

超声波处理技术具有加工时间短、生产成本低、产品回收率和纯度高、环境友好、能耗低等特点,已广泛应用于淀粉类食品和非食品领域,相比于其他

物理处理方式,超声导致的降解具有非随机性且淀粉链长趋于一致,在淀粉改性方面具有巨大的商业价值^[53]。

7 前景与展望

我国是淀粉生产大国,淀粉资源丰富,改性淀粉在我国发展迅速,物理改性仅仅涉及到物理场的作用,不会对人体健康的造成威胁,也不存在化学试剂对环境的污染问题,并且操作简单快速,已经受到了越来越多研究者的关注。因此,明确不同物理改性方法对淀粉特性的影响并深入探讨其调控手段及机理对控制与提升改性淀粉的质量具有重大的意义。

虽然目前关于物理改性淀粉已经开展了许多研究,但是任然存在许多问题:首先,物理改性方法存在着设备昂贵、成本较高、处理量小、不能实现工业化生产等问题。其次,相较于化学改性和酶法改性的精确性与可控性,物理改性缺乏一定的理论依据,改性结果不可预期,从而大大限制了人们对物理改性淀粉的应用。最后,国内外关于物理改性方法对淀粉结构与性质影响机理的报道也有很多,但是缺乏一定的深度,不能从分子结构对淀粉性质的变化规律做出很好地解释,并且得到的研究结果也存在一些分歧。

所以,对于物理改性淀粉研究者们要做的工作还有很多:将淀粉来源、物理方法、加工条件等多种因素结合起来,系统地研究这些因素对淀粉理化性质的影响及其机理;降低物理改性淀粉的加工成本,使其实现工业化生产。因此,本文对目前物理改性方法及其对淀粉结构与性质的影响做了简要的归纳与总结,并对其应用前景做了简单的概述,以期能为特定需求淀粉的生产研发提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] Hu X P, Zhang B, Jin Z Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure and retrogradation treatments on structural and physicochemical properties of waxy wheat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 560-565.
- [2] Szwengiel A, Lewandowicz G, Górecki A R, et al. The effect of high hydrostatic pressure treatment on the molecular structure of starches with different amylose content [J]. Food Chemistry, 2017, 240: 51.
- [3] Ahmed J, Thomas L, Taher A, et al. Impact of high pressure treatment on functional, rheological, pasting, and structural properties of lentil starch dispersions [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 152: 639-647.
- [4] 吕简. 几种复合改性淀粉的制备及应用 [D]. 安徽: 合肥工业大学, 2016.
- [5] Leite T S, Jesus A L T D, Schmiele M, et al. High pressure processing (HPP) of pea starch: Effect on the gelatinization properties [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 76: 361-369.
- [6] 李庭龙, 韦金峦, 刘振楷, 等. 物理法淀粉改性研究进展 [J]. 广西民族大学学报: 自然科学版, 2015, 21: 90-93.
- [7] 孙亚东, 陈启凤, 吕闪闪, 等. 淀粉改性的研究进展 [J]. 材

- 料导报, 2016, 30: 68-74.
- [8] 赵丹, 陈宁, 孙明明, 等. 物理改性淀粉的研究进展[J]. 广州化工, 2015(4): 9-11.
- [9] 郭泽镔. 超高压处理对莲子淀粉结构及理化特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [10] Shigematsu T, Furukawa N, Takaoka R, et al. Effect of high pressure on the saccharification of starch in the tuberous root of sweet potato (*Ipomoea batatas*) [J]. *Biophysical Chemistry*, 2017, 231: 105-110.
- [11] 刘文婷. 超高压处理对槟榔芋淀粉性质影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [12] Shen X, Shang W, Strappe P, et al. Manipulation of the internal structure of high amylose maize starch by high pressure treatment and its diverse influence on digestion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 40-48.
- [13] Liu H, Fan H, Cao R, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 753-760.
- [14] 王立, 杨懿, 钱海峰, 等. 不同加工方式对淀粉性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(3): 225-235.
- [15] Wang J, Zhu H, Li S, et al. Insights into structure and function of high pressure - modified starches with different crystalline polymorphs [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 102: 414-424.
- [16] Buckow R, Jankowiak L, Knorr D. Pressure - temperature phase diagrams of maize starches with different amylose contents [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 57(24): 11510-11516.
- [17] 左春桢, 张守勤, 马成林, 等. 玉米淀粉高压糊化动力学的初步探讨[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 177-180.
- [18] 叶怀义, 杨素玲, 叶曦昊. 高压对淀粉糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(1): 10-13.
- [19] Zhu F, Xie Q. Rheological and thermal properties in relation to molecular structure of New Zealand sweet potato starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 165-172.
- [20] Xia W, He D N, Fu Y F, et al. Advanced technology for nanostarches preparation by high speed jet and its mechanism analysis [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 176: 127-134.
- [21] Kaur B, Ariffin F, Bhat R, et al. Progress in starch modification in the last decade [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(2): 398-404.
- [22] Cavallini C M, Franco C M L. Effect of acid - ethanol treatment followed by ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava starch [J]. *Starch - Stärke*, 2010, 62(5): 236-245.
- [23] 王立东, 刘婷婷, 寇芳. 球磨处理对豌豆淀粉结构及理化性质的影响[J]. 高分子通报, 2016(11): 69-76.
- [24] 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(1): 33-38.
- [25] Tan X, Zhang B, Chen L, et al. Effect of planetary ball - milling on multi - scale structures and pasting properties of waxy and high - amylose cornstarches [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 198-207.
- [26] 田建珍, 姚阳, 沈莎莎, 等. 辊式磨及行星球磨对不同硬度小麦的淀粉损伤探析[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2015, 36: 8-15.
- [27] Ramadhan K, Foster T J. Effects of ball milling on the structural, thermal, and rheological properties of oat bran protein flour [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 229: 50-56.
- [28] González L C, Loubes M A, Tolaba M P. Incidence of milling energy on dry - milling attributes of rice starch modified by planetary ball milling [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 155-163.
- [29] Moisio T, Forssell P, Partanen R, et al. Reorganisation of starch, proteins and lipids in extrusion of oats [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 64: 48-55.
- [30] Logié N, Valle G D, Rolland - Sabaté A, et al. How does temperature govern mechanisms of starch changes during extrusion? [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 184: 57-65.
- [31] Román L, Gómez M, Hamaker B R, et al. Shear scission through extrusion diminishes inter - molecular interactions of starch molecules during storage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 238: 134-140.
- [32] 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, 50.
- [33] 樊佳玫, 俞东宁, 韩备竞, 等. 螺杆挤压对马铃薯淀粉消化性及血糖指数的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018(9): 3749-3754.
- [34] Rathod R P, Annapure U S. Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing [J]. *LWT*, 2017, 80: 121-130.
- [35] Park E Y, Ma J - G, Kim J, et al. Effect of dual modification of HMT and crosslinking on physicochemical properties and digestibility of waxy maize starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 33-40.
- [36] Molavi H, Sma R, Farhoosh R. Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 385-393.
- [37] Deka D, Sit N. Dual modification of taro starch by microwave and other heat moisture treatments [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 416-422.
- [38] González - Cruz L, Montañez - Soto J L, Conde - Barajas E, et al. Spectroscopic, calorimetric and structural analyses of the effects of hydrothermal treatment of rice beans and the extraction solvent on starch characteristics [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 107(Pt A): 965-972.
- [39] Oyeyinka S A, Oyeyinka A T. A review on isolation, composition, physicochemical properties and modification of *Bambara groundnut* starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 62-71.
- [40] 吴明红, 卜亭亭, 徐刚, 等. 辐射技术在环境保护中的应用[J]. 化学进展, 2011, 23: 80-82.

制备及其在冷鲜肉中的应用[J].食品科技,2016(2):140-146.

[41] Nielsen H B, Sonne A-M, Grunert K G, et al. Consumer perception of the use of high-pressure processing and pulsed electric field technologies in food production[J]. *Appetite*, 2009, 52(1):115-126.

[42] 马亚萍,康壮丽,王嘉楠,等.卡拉胶结合超高压处理对鸡胸肉糜品质的影响[J].食品工业科技,2016,37(6):275-279.

[43] Zhang H, Pan J, Wu Z. Investigation of the effects of high pressure processing on the process of rigor in pork [J]. *Meat Science*, 2018, 145:455-460.

[44] Argyri A A, Papadopoulou O S, Nisiotou A, et al. Effect of high pressure processing on the survival of *Salmonella enteritidis* and shelf-life of chicken fillets[J]. *Food Microbiology*, 2018, 70:55-64.

[45] Sheen S, Huang C Y, Ramos R, et al. Lethality prediction for *Escherichia coli* O157:H7 and uropathogenic *E. coli* in ground chicken treated with high pressure processing and trans-cinnamaldehyde[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3):740-749.

[46] Sommers C H, Scullen O J, Sheen S. Inactivation of uropathogenic *Escherichia coli* in ground chicken meat using high pressure processing and gamma radiation, and in purge and chicken meat surfaces by ultraviolet light [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7:413-413.

[47] Richa, Sinha R P, Häder D P. Physiological aspects of UV-

(上接第319页)

[41] Prakash A. Particular applications of food irradiation fresh produce[J]. *Radiation Physics & Chemistry*, 2016, 129:50-52.

[42] Majeed T, Wani I A, Hussain P R. Effect of dual modification of sonication and γ -irradiation on physicochemical and functional properties of lentil (*Lens culinaris* L.) starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 101:358-365.

[43] Mutlu S, Kahraman K, Öztürk S. Optimization of resistant starch formation from high amylose corn starch by microwave irradiation treatments and characterization of starch preparations [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 95:635-642.

[44] Verma R, Jan S, Rani S, et al. Physicochemical and functional properties of gamma irradiated buckwheat and potato starch[J]. *Radiation Physics & Chemistry*, 2018, 144:37-42.

[45] Dar M Z, Deepika K, Jan K, et al. Modification of structure and physicochemical properties of buckwheat and oat starch by gamma-irradiation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 108:1348-1356.

[46] Mukhtar R, Shah A, Noor N, et al. γ -irradiation of oat grain-effect on physico-chemical, structural, thermal, and antioxidant properties of extracted starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 104:1313-1320.

excitation of DNA. [J]. *Topics in Current Chemistry*, 2015, 356:203-248.

[48] 史易明,林捷,郑华,等.紫外线结合生物源膜基抑菌剂保鲜肉鸡技术[J].食品科技,2016(12):87-92.

[49] 杨明扬,王飞,孟庆阳.紫外线降低片猪肉表面微生物研究[J].肉类工业,2018(4):27-29.

[50] Mcleod A, Hovde Liland K, Haugen J-E, et al. Chicken fillets subjected to UV-C and pulsed UV light: Reduction of pathogenic and spoilage bacteria, and changes in sensory quality [J]. *Journal of Food Safety*, 2018, 38(1):e12421-e12421.

[51] 程述震,王宁,王晓拓,等.电子束和 γ 射线辐照对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[J].核农学报,2016,30(5):897-903.

[52] 王晶晶,徐超,杨题隆,等.壳聚糖协同 γ 射线辐照对冷鲜猪肉品质的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2016,42(2):220-227.

[53] Leal L N, Beltrán J A, Alonso V, et al. Dietary vitamin E dosage and source affects meat quality parameters in light weight lambs[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(4):1606-1614.

[54] Ortuño J, Serrano R, Bañón S. Incorporating rosemary diterpenes in lamb diet to improve microbial quality of meat packed in different environments [J]. *Animal Science Journal*, 2017, 88(9):1436-1445.

[55] Kamboh A A, Memon A M, Mughal M J, et al. Dietary effects of soy and citrus flavonoid on antioxidation and microbial quality of meat in broilers[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2018, 102(1):235-240.

[47] Kumar P, Prakash K S, Jan K, et al. Effects of gamma irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of brown rice starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 77:194-200.

[48] Wang S, Guo P, Xiang F, et al. Effect of dual modification by annealing and ultrahigh pressure on properties of starches with different polymorphs [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 174:549-557.

[49] Zhu F. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(1):1-17.

[50] 李薇,郑炯,陈映衡,等.超声波处理对豌豆淀粉糊化、流变及质构特性的影响[J].食品与机械,2018,34(5):32-37.

[51] Li M, Li J, Zhu C. Effect of ultrasound pretreatment on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111:848-856.

[52] Sujka M. Ultrasonic modification of starch - Impact on granules porosity [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 37:424-429.

[53] 沈莎莎,田建珍.不同物理改性对淀粉特性影响的研究进展[J].中国粉体工业,2013(5):13-17.