

物理场预处理对淀粉改性及其多尺度结构的影响研究进展

Advances in effects of physical field pretreatment on starch modification and its multi-scale structure

李光耀 李林波 杨天佑 王宝石 张明霞

LI Guang-yao LI Lin-bo YANG Tian-you WANG Bao-shi ZHANG Ming-xia

(河南科技学院生命科技学院现代生物育种河南省协同创新中心, 河南 新乡 453003)

(Henan Institute of Science and Technology, School of Life Science and Technology, Henan Collaborative Innovation Center in Modern Biological Breeding, Xinxiang, Henan 453003, China)

摘要:文章综述了超声波场、微波场以及电场等新型物理场在淀粉改性中的应用以及淀粉多尺度结构变化,并对改性淀粉的未来绿色安全生产的方向进行了展望。指出电子束辐射在淀粉干法改性中具有重要的应用潜力,探究辐射淀粉多尺度结构影响规律及其作用机制,有利于助推改性淀粉的绿色、智能制造。

关键词:淀粉改性;物理场预处理;多尺度结构

Abstract: In this paper, the applications of new physical fields such as ultrasonic field, microwave field and electric field in starch modification and the changes of starch multi-scale structure were reviewed, and the future green and safe production direction of modified starch was prospected. It is pointed out that electron beam radiation has important application potential in dry modification of starch. Exploring the influence law and mechanism of multi-scale structure of irradiated starch is helpful to promote the green and intelligent manufacture of modified starch.

Keywords: starch modification; physical field pretreatment; multi-scale structure

淀粉具有可再生、资源丰富、成本低廉等优点,被广泛应用于食品、纺织、医药包装等领域,但天然淀粉易老化、溶解性差、颗粒较大等缺陷限制了其应用范围,需要对淀粉进行改性。通常,物理法和生物酶法修饰被认为是环保的,它减少了化学品的使用和废物的产生。目前,

一些水解酶和转移酶,如 α -淀粉酶、普鲁兰酶、环糊精—糖基转移酶等已被报道用于获得具有多孔结构的淀粉颗粒^[1]。然而,由于生淀粉颗粒中支链淀粉结晶片段堆积紧密,导致其表面较难穿透,需要较高的酶用量维持合理的反应速率^[2],大大增加了生产成本。因此,生淀粉水解过程往往需要借助一些物理改性方法进行预处理。

物理改性方法由于不涉及化学试剂,安全环保且经济高效,应用非常广泛。传统物理改性方法包括湿热处理、高压处理^[3]和挤压处理^[4]等,破坏淀粉颗粒结构,并导致淀粉链的空间组织和淀粉结晶度的变化,改变淀粉的理化性质。然而,传统物理处理方法往往存在能耗高、工艺复杂和处理时间长等缺点限制了其快速发展。近年来一些新型物理场预处理方法(超声波场、微波场和电场)由于存在能耗低、绿色无污染等特点,适应了绿色制造的主题,逐渐成为淀粉改性研究的热点。文章拟对新型物理场预处理改性淀粉的最新进展进行综述,以期对淀粉绿色改性和工业化生产应用提供理论依据。

1 超声波场预处理淀粉

1.1 超声波场在淀粉改性中的应用

作为新兴的非热加工技术,超声波具有绿色节能、安全高效、应用方便等优点,逐渐成为食品加工领域的研究热点^[5-6]。超声波处理作为一种环境友好的加工方法,近年来被广泛应用(如表 1)。Park 等^[12]研究了常温和高湿条件下超声处理糙米,发现超声波能显著降低淀粉的熔融焓和相对结晶度,但淀粉颗粒仍保持 A 型晶型。Manchun 等^[13]发现超声波处理扭曲了木薯淀粉颗粒的结晶区,特别是在较高的振幅或超声时间,木薯淀粉溶解度会增加。超声处理的机械损伤破坏了淀粉颗粒的水分进出能力,从而使淀粉颗粒具有较高的吸水性和保持性。

基金项目:河南省科技计划(编号:212102110074, 202102110291, 192102210193)

作者简介:李光耀,男,河南科技学院在读硕士研究生。

通信作者:王宝石(1984—),男,河南科技学院讲师,硕士生导师,博士。E-mail: wangbaoshifsd@126.com

收稿日期:2021-05-14

Bai 等^[14]发现高频超声处理马铃薯淀粉颗粒时会发生点蚀现象,分析淀粉颗粒表面点蚀归因于超声波的空化效应。淀粉颗粒表面气泡的不对称塌陷产生微射流,微射流以高达 100 ms⁻¹的速度撞击到淀粉颗粒产生通道,损伤表现为点蚀。Monika^[15]研究了超声波处理不同来源淀粉(马铃薯、小麦、玉米和大米)在不同体系中(水、乙醇)颗粒孔隙率的变化,发现悬浮在水体系中淀粉颗粒,超声处理后不同来源淀粉比表面积均显著变化;而在乙醇体系中,仅马铃薯淀粉发生显著变化。超声波处理会影响淀粉中孔直径(2~50 nm),悬浮在乙醇体系中小麦和大米淀粉以及悬浮在水体系中马铃薯淀粉颗粒显著增加,但是在水体系中玉米淀粉略有降低。超声波对淀粉的理化性质和功能性质均有影响。适宜的超声波预处理条件可以为玉米淀粉的酶解创造较好的条件,淀粉的相对结晶度降低,淀粉呈 A 型。扫描电子显微镜显示淀粉颗粒表面有凹槽。淀粉的偏振十字变小甚至消失。超声预处理可以强化淀粉的酶解过程,提高淀粉的水解速率,是一种加速酶解的有效方法^[16]。

1.2 超声波场对淀粉多尺度结构的影响

超声波处理产生的物理效应(如空穴效应,机械效应等),使淀粉颗粒表面出现裂纹和孔洞,诱发高分子形态/超微结构发生变化^[10]。Falsafi 等^[17]发现超声处理后燕麦淀粉颗粒的结晶结构受到一定程度的破坏,而 A 型结晶模式保持不变。超声波处理提高了马铃薯直链淀粉含量、膨胀力、溶解度、透光率、保水性和保脂能力;而凝胶硬度在超声处理后降低。超声波降解优先发生在淀粉颗粒内部松散堆积的无定形区^[11]。Hassan 等^[18]发现在高超声功率下,糯玉米淀粉内部和外部均被降解,其中非晶区优先降解。超声波处理改变了糯玉米淀粉内部结构,增加了糯玉米淀粉的表面粗糙度,降低了其平均直径。双螺旋含量减少,而单螺旋和非晶相的比例增加。

Monroy 等^[19]发现超声波处理木薯淀粉的微观结构变化主要表现在颗粒形态和结晶度上,并未引起颗粒特征的变化,但是检测到表面粗糙度增加,且随着处理时间而增强。超声波处理会产生摩擦力,通过气泡的塌陷和空化引起淀粉颗粒的结构改变,从而在其周围区域引起高压梯度^[20]。超声波处理可以在玉米淀粉颗粒内部产生强大的机械力,使淀粉分子水合,超声波处理 5 min 后,少量水分进入淀粉颗粒,超声波机械力破坏了无定形区和部分结晶区,使结构变得疏松,被破坏的分子无序排列,淀粉颗粒糊化所需能量减少;超声波处理 15 min 后,结晶区的一些不规则淀粉分子被水合^[21]。

此外,超声波偶联其他物理改性方法可以获得更好的改性效果,Cao 等^[22]研究采用超声波、电场以及先电场后超声波和先超声波后电场不同处理组合对马铃薯淀粉改性,发现单改性和双改性均可以破坏非晶态和晶态区域,先电场后超声波组合处理方法使淀粉相对结晶度、透光性、吸水能力、溶解度、膨胀力和抗性淀粉含量均大大提高。超声处理后抗性淀粉的形态特征发生了变化,高功率的超声处理使抗性淀粉的块状结构更加致密。粒度分析、傅立叶变换红外光谱和 X 射线衍射结果表明,超声处理降低了抗性淀粉的长程有序度,但增加了中位粒径、短程有序度和 V 型多晶型。支链淀粉的双螺旋减少和 V-直链淀粉的单螺旋增加。消化图谱显示,部分快速消化淀粉组分转化为慢消化淀粉和/或抗性淀粉。超声波可以调控变性淀粉的分子结构,设计具有特定消化行为的抗性淀粉产品,调节高淀粉食物的消化,使其具有理想的消化率,是比较有效的潜在途径^[5]。

2 微波场预处理淀粉

2.1 微波场在淀粉改性中的应用

微波是 0.3~300.0 GHz 频率范围内的电磁波,波长

表 1 超声波场对淀粉改性的研究

Table 1 Modification of starch by ultrasonic field

研究对象	反应条件	研究结果	文献
玉米淀粉	温度 25~65 ℃,处理时间 5~15 min, 淀粉质量分数 10%~20%,超声振幅 50%,100%(最大功率 150 W)	水溶性、膨胀力和糊透明度增加;相对聚合度、相对结晶度、糊黏度降低	[7]
山药淀粉	超声振幅 12%,40%,68%(最大功率 450 W),处理时间 3,6,9 min	山药淀粉表面受损,无定形区减少,结晶模式未变化,为 B 型	[8]
车前草淀粉、 芋头淀粉	超声波频率 25 kHz,处理时间 20, 50 min	较大颗粒尺寸的淀粉受超声波处理的影响更大,峰值黏度随超声而增加,溶胀度和溶解度在处理后会降低	[9]
糯玉米淀粉	超声波功率 100,400 W	糯玉米淀粉支化度较低,双螺旋的含量减少,单螺旋和无定形成分增加;A 型晶体结构几乎未受到影响	[10]
马铃薯淀粉	超声波功率 60,105,155 W,超声波频率 20 kHz,处理时间 30 min	淀粉颗粒表面形成凹槽,B 型晶体结构变化不大;淀粉结晶区的影响较大,直链淀粉受到的影响比支链淀粉无定形片层更大	[11]

范围为 1~1 000 mm。微波场以 4.9×10^9 次/s 的速度振动,使极性分子和离子不断地重新排列,通过电磁感应与周围的分子发生摩擦和碰撞,从而产生热能^[23]。微波辐射处理作为一种非传统的能量形式,具有加热速度快、使用方便等优点,在食品加工领域被广泛应用(如表 2)。与传统加热方式相比,微波加热是基于食品材料中极性分子吸收微波能量并将其转化为热^[29]。微波可以引起淀粉颗粒内结晶区域的重排,导致吸水率、膨胀力和糊化黏度等理化性质变化,这取决于淀粉的类型和微波辐射参数^[30]。此外,微波处理会使直链淀粉含量增加,改善冻融稳定性,可以抑制淀粉的再生^[31]。Zeng 等^[24]采用微波处理莲子淀粉,发现随着微波功率的增加,莲子淀粉的膨胀势、直链淀粉浸出率、分子性质和回转半径均减小,影响莲子淀粉对酶降解的敏感性;抗性淀粉和慢消化淀粉含量增加,导致其水解指数和血糖指数降低。微波预处理粳米淀粉,可以通过诱导淀粉链的剧烈运动来解开淀粉链之间的缠结,促进分子重排和相互作用,从而促进淀粉结构及其理化性质变化^[25]。微波辐射引起的热效应导致淀粉失水,会降低淀粉的表面自由能和极性^[32]。微波处理木薯淀粉,未发现主峰的位移,相对结晶度随微波照射时间延长而降低^[33]。Lewandowicz 等^[34]通过对马铃薯和木薯淀粉进行微波处理,发现微波处理对淀粉的温度和含水率均有影响,且含水率与升温速率有很强的相关性。含水量超过 20% 出现等温转变,导致淀粉糊化温度升高,其溶解度下降;微波可以引起淀粉颗粒内结晶区域的重排,并导致其理化性质的变化。

2.2 微波场对淀粉多尺度结构的影响

在微波场作用下,淀粉颗粒被瞬间加热在吸收大量能量后,导致支链淀粉链断裂,形成线性直链淀粉链。微波处理不会改变淀粉颗粒的形状和大小,但可以改变颗

粒表面粗糙度而影响淀粉糊化黏度。Deka 等^[27]发现微波处理芋头淀粉呈现典型的 A 型衍射图谱,但结晶度明显降低;直链淀粉凝胶比支链淀粉凝胶更强,直链淀粉含量增加可以阻止水分排出,同时水热处理也导致支链淀粉分子的重排,并暴露出更多的羟基键,这些羟基键可以容纳更多的水并减少脱水收缩。Szepes 等^[35]用微波处理马铃薯和玉米淀粉,发现微波辐射淀粉结晶结构和微观结构受到淀粉来源的影响,微波辐射显著降低了淀粉表面自由能和致密层的极性。金属离子可以改变淀粉介电性质和内部结构,进而影响淀粉在微波辐射下产生自由基的能力,淀粉产生自由基能力受到金属离子浓度和类型的影响。Fan 等^[36]研究了不同金属离子(Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ca^{2+})存在下微波场对大米淀粉进行改性,发现金属离子增强了大米淀粉的介电性能,影响了大米淀粉与微波的相互作用;金属离子增加了淀粉分子的稳定性,而 Ca^{2+} 由于与淀粉结合能力强,促进作用最显著,但钙的富集并未改变自由基的形成机制,只影响产生的自由基数量。Yang 等^[28]微波辐射处理天然糯玉米淀粉(含水量 30%),发现辐照淀粉中支链淀粉的短 A 链较少,短 B1、长 B2 和 B3 链的比例较高。微波处理可以引起淀粉颗粒水分分布的改变和双螺旋结构的增加,使淀粉—水相互作用区和结晶区增加,从而提高糊化温度,降低分子量、相对结晶度、黏度和水解度。

3 电场预处理淀粉

3.1 电场在淀粉改性中的应用

基于电场的淀粉改性技术是近年来淀粉改性研究的热点^[37],根据改性过程中的热量变化,电场改性技术可以分为热法和非热法改性技术。对于淀粉的改性方式中,非热法有脉冲电场(PEF)、感应电场(IEF)和电子束场(EBF),热法有欧姆加热(OH)和中等电场(MEF),并获

表 2 微波场对淀粉改性的研究
Table 2 Modification of starch by microwave field

研究对象	反应条件	研究结果	文献
莲子淀粉	样品含水量 30%,微波功率 2.4,4.0,6.4,8.0 W/g,处理至淀粉糊化	随着微波功率的增加,莲子淀粉的膨胀势、直链淀粉浸出率、分子性质和回转半径均减小;抗性淀粉和慢消化淀粉含量增加	[24]
粳米淀粉	微波功率 540 W,处理时间 0,10,20,30 min	微波预处理 20 min 可以增强淀粉的长程和短程结晶结构,增加糊化焓、粒径、峰值黏度、崩解度	[25]
马铃薯淀粉	微波功率 440,800 W,微波频率 2 450 MHz,处理时间 5 min	淀粉的流变特性和热学特性改变,微波影响自由基的生成数量,并受到微波输出和淀粉结构的影响	[26]
芋头淀粉	样品含水量 25%,微波功率 180 W,处理时间 5 min	芋头淀粉呈现典型的 A 型衍射图谱,结晶度明显降低	[27]
糯玉米淀粉	样品含水量 30%,微波功率 1 600 W (160 W/g),微波频率 2 450 MHz,处理时间 5,10,20 min	支链淀粉短链(A 链)的数量较少,短 B1 和长 B2、B3 的比例较高,降低了淀粉的相对分子质量和相对结晶度	[28]

得广泛应用(如表 3)。近年来,基于电场的非热干法改性技术是新兴预处理改性的热点,它是利用射线与物质间的物理、化学和生物效应用于物质改性,具有便捷、节能等优势。电子束辐照处理玉米粉,会在玉米粉颗粒表面形成穿孔且颗粒辐照部分会逐渐剥离,形成光滑的表面、球形的结构和较小的尺寸,可有效降低总淀粉和粗纤维含量,提高还原糖含量。此外,在电子束照射下,玉米粉分子和碎片会获得一定的电荷,可以形成黏度较低的稳定胶体溶液^[43]。Kumar 等^[44]发现糙米淀粉经 γ 射线辐照后,结晶度略有降低而表面结构并未受影响,仍保持 A 型衍射图谱,表观直链淀粉含量和膨化指数降低;淀粉峰

黏度、消减值、谷值和最终黏度降低,溶解度指数升高;改善淀粉的功能性质如降低凝沉性、降低糊化焓等,可作为用于淀粉改性的一种快速方法。在冷冻食品中使用电离辐照改性淀粉可以非常方便地减少回生。脉冲电场技术是利用从微秒到毫秒的短脉冲高电场(场强为 1~80 kV/cm),脉冲电场处理会导致淀粉部分糊化,降低糊化温度,降低糊化过程中淀粉的焓变和黏度,增加淀粉对酶的敏感性。与 γ 射线辐照和电子束辐照相比,高电场强度(50 kV/cm)的脉冲电场处理淀粉理化特性(糊化黏度)似乎要小得多^[18]。因此,脉冲电场用于淀粉改性以及获取特定功能淀粉的应用前景尚不清晰。

表 3 电场辐射处理对淀粉改性的研究

Table 3 Modification of starch treated with ionizing radiation

研究对象	反应条件	研究结果	文献
马铃薯淀粉	^{60}Co 射线,辐照剂量 1.5~15.0 kGy	辐射改性淀粉黏度显著降低、还原糖含量增加,改善抗老化性能	[38]
玉米淀粉	感应电场,电压 50~150 V,频率 400~700 Hz	淀粉分子链断裂,颗粒表面粗糙化,相对结晶度增加,降低了淀粉糊的黏度,降低了淀粉凝胶的硬度,未明显改善糊化淀粉的重结晶	[39]
马铃薯淀粉	γ 射线,辐照剂量 25,75,150 kGy	产生淀粉分子链断裂和羧酸酯极性基团,溶解度提高,辐照剂量与极性增大、分子质量减小和链间静电吸引增大之间呈正相关	[40]
玉米淀粉	电子束,辐照剂量 2~20 kGy	淀粉黏度随辐照剂量增加呈指数递减,且随着剂量率的增加,淀粉对辐照的敏感度降低	[41]
马铃薯淀粉	中等电场,强场 7.6 V/cm,频率 25 kHz	提高淀粉膜的亲水性,具有较低的杨氏模量和抗拉强度	[42]

3.2 电场对淀粉多尺度结构的影响

理解电场对淀粉多尺度结构的影响,有助于改善淀粉的理化性质,以期实现不同的应用领域^[45]。感应电场加热是一种环保、经济、省时的淀粉水解方法,Li 等^[46]研究了感应电场(励磁电压 75 V,40~120 h)和 HCl (0.15 mol/L)联合水解马铃薯淀粉,扫描电镜显示马铃薯首先受到游离离子攻击,然后内部结构被破坏;水解 24 h 重均分子量由 $(104.7 \pm 4.7) \times 10^6$ Da 急剧下降到 $(9.3 \pm 0.7) \times 10^6$ Da。利用磁感应电场辅助玉米淀粉水解,发现还原糖含量显著提升,而平均聚合度降低,溶解度和膨胀力增加,冻融稳定性降低;通过多尺度结构解析发现(X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱和扫描电镜),玉米淀粉的理化特性变化源于感应电场的热效应^[47]。电子束辐照因不需要辐射源且不产生辐射废物、操作成本低、设备易维护等优势受到广泛关注。Pan 等^[48]用电子束辐照处理水稻籽粒,发现淀粉颗粒结构的变化呈剂量依赖性,淀粉分子降解形成小颗粒。另外,电子束辐照处理未改变淀粉晶型,部分降低淀粉相对结晶度。羧基的形成影响淀粉的消化率,微晶的破坏促进了淀粉的消化。不同剂量(2~30 kGy)电子束辐照处理糯玉米淀粉,分子量随辐照剂量增加而显著降低。在较低剂量的辐射下(辐照剂

量低于 15 kGy),支链长度、熔融温度、熔融热焓和相对结晶度略有下降, α -1,6-葡萄糖苷键比 α -1,4-葡萄糖苷键断裂更多,因此释放出更多的线状链;采用 10 kGy 辐照的糯玉米淀粉制得的薄膜力学性能提高,溶解性增加^[49]。总体而言,电场辐射技术尤其是电子束技术,辐照速度快,无需要催化剂,不会引起较大的温度升高,为生产具有新型功能的淀粉基材料提供了一种绿色技术途径。

4 展望

伴随着绿色制造和环保、以及食品安全的需求,新型物理场如超声波场和微波场等湿热改性方法在改善淀粉理化特性方面取得了可喜的进步。另外,电场改性尤其电子束场改性技术,作为淀粉常压干法改性的方法,具有重要的工业应用潜力;但在淀粉改性方面尚处于初步探索阶段,且对淀粉多尺度结构影响规律缺乏系统性研究,特别是重要因素间的系统关联性和相互作用的机制尚不清楚。伴随着绿色制造和智能制造新一代制造技术的驱动,开发面向工业化生产的设备也是该领域重要的研究方向。

参考文献

[1] 翟一潭,柏玉香,李晓晓,等.酶法改性淀粉颗粒的研究进展[J].食品科学,2020,42(7):319-328.

- ZHAI Yi-tan, BO Yu-xiang, LI Xiao-xiao, et al. Progress of enzymatic modification of starch granules[J]. Food Science, 2020, 42(7): 319-328.
- [2] CRIPWELL R A, FAVARO L, VILJOEN-BLOOM M, et al. Consolidated bioprocessing of raw starch to ethanol by *Saccharomyces cerevisiae*: Achievements and challenges [J]. Biotechnology Advances, 2020, 42: 107579.
- [3] GUO Ze-bin, ZENG Shao-xiao, ZHANG Yi, et al. The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 285-291.
- [4] HE Hai, BIAN Hua-wei, XIE Feng-wei, et al. Different effects of pectin and κ -carrageenan on the multiscale structures and in vitro digestibility of extruded rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 111: 106216.
- [5] DING Yong-bo, LUO Fei-jun, LIN Qin-lu. Insights into the relations between the molecular structures and digestion properties of retrograded starch after ultrasonic treatment[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 248-259.
- [6] 王宝石, 谭凤玲, 李光耀, 等. 超声波改性淀粉及其耦合酶解反应的生物学效应[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 81-85.
- WANG Bao-shi, TAN Feng-ling, LI Guang-yao, et al. Application of ultrasound treatment in starch modification and its biological effect on enzymatic hydrolysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 81-85.
- [7] AMINI A M, RAZAVI S, MORTAZAVI S A. Morphological, physicochemical, and viscoelastic properties of sonicated corn starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 122: 282-292.
- [8] BERNARDO C O, ASCHERI J, CHÁVEZ D, et al. Ultrasound assisted extraction of yam (*Dioscorea bulbifera*) starch: Effect on morphology and functional properties[J]. Starch-Starke, 2018, 70(5/6): 1700185.
- [9] CARMONA-GARCÍA R, BELLO-PEREZ L A, AGUIRRE-CRUZ A, et al. Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with different granule size[J]. Starch-Starke, 2016, 68: 972-979.
- [10] YANG Qing-yu, LU Xuan-xuan, CHEN Yong-zhi, et al. Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 350-358.
- [11] ZHU Jie, LI Lin, CHEN Ling, et al. Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 116-122.
- [12] PARK D, HAN J. Quality controlling of brown rice by ultrasound treatment and its effect on isolated starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 30-38.
- [13] MANCHUN S, NUNTHANID J, LIMMATVAPIRAT S, et al. Effect of ultrasonic treatment on physical properties of tapioca starch[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1 768: 294-297.
- [14] BAI Wen-zhe, HÉBRAUD P, ASHOKKUMAR M, et al. Investigation on the pitting of potato starch granules during high frequency ultrasound treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 35: 547-555.
- [15] MONIKA J. Ultrasonic modification of starch-Impact on granules porosity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 424-429.
- [16] LI Mei, LI Jun-xun, ZHU Chuan-he. Effect of ultrasound pretreatment on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 848-856.
- [17] FALSAFI S R, MAGHSOUDLOU Y, ROSTAMABADI H, et al. Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 311-320.
- [18] HASSAN S S, WILLIAMS G A, JAISWAL A K. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. Biore-source Technology, 2018, 262: 310-318.
- [19] MONROY Y, RIVERO S, GARCÍA M. Microstructural and techno-functional properties of cassava starch modified by ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 42: 795-804.
- [20] ZHU Fan. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(1): 1-17.
- [21] ZHANG Yu-jie, DAI Yang-yong, HOU Han-xue, et al. Ultrasound-assisted preparation of octenyl succinic anhydride modified starch and its influence mechanism on the quality[J]. Food Chemistry: X, 2020, 5: 100077.
- [22] CAO Mei-fang, GAO Qun-yu. Effect of dual modification with ultrasonic and electric field on potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 637-643.
- [23] EL KHALED D, NOVAS N, GAZQUEZ J A, et al. Microwave dielectric heating: Applications on metals processing[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2 880-2 892.
- [24] ZENG Shao-xiao, CHEN Bing-yan, ZENG Hong-liang, 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): 2 442-2 449.
- [25] ZHONG Ye-jun, XIANG Xiao-yue, ZHAO Jin-cheng, et al. Microwave pretreatment promotes the annealing modification of rice starch[J]. Food Chemistry, 2020, 304: 125432.
- [26] PRZETACZEK-ROZNOWSKA I, FORTUNA T, WODNIAK M, et al. Properties of potato starch treated with microwave radiation and enriched with mineral additives[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 229-234.
- [27] 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.
- [28] YANG Qing-yu, QI Liang, LUO Zhi-gang, et al. Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 473-482.
- [29] TAO Yuan, YAN Bo-wen, FAN Da-ming, 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.
- [30] BRASOVEANU M, NEMTANU M R. Behaviour of starch exposed to microwave radiation treatment[J]. *Starch-Starke*, 2014, 66(1/2): 3-14.
- [31] JIANG Qian-qian, XU Xue-ming, JIN Zheng-yu, et al. Physico-chemical properties of rice starch gels: Effect of different heat treatments[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(3): 353-357.
- [32] LIM S. A comparison of native and acid thinned normal and waxy corn starches: Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2007, 40(9): 1 527-1 536.
- [33] COLMAN T, DEMIATE I. The effect of microwave radiation on some thermal, rheological and structural properties of cassava starch[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2014, 115(3): 2 245-2 252.
- [34] LEWANDOWICZ G, FORMAL J W A, LKOWSKI A. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of potato and tapioca starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1997, 34(4): 213-220.
- [35] SZEPES A, HASZNOS-NEZDEI M, KOVÁCS J, et al. Microwave processing of natural biopolymers—studies on the properties of different starches[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2005, 302(1/2): 166-171.
- [36] FAN Da-ming, LIN Lu-fen, WANG Li-yun, et al. The influence of metal ions on the dielectric enhancement and radical generation of rice starch during microwave processing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 94: 266-270.
- [37] FAN Zhu. Modifications of starch by electric field based techniques[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 158-169.
- [38] BACHMAN S, WITKOWSKI S, PITKA M. Effect of ^{60}Co radiation on some chemical changes in potato starch pastes and gels[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1987, 118(3): 185-191.
- [39] LI Dan-dan, JIANG Li-ming, TAO Yang, et al. Enhancement of efficient and selective hydrolysis of maize starch via induced electric field[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111190.
- [40] HENRY F, COSTA L C, AYMES-CHODUR C. Influence of ionizing radiation on physical properties of native and chemically modified starches[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2010, 79(1): 75-82.
- [41] BRAOVEANU M, NEMANU M R. Pasting properties modeling and comparative analysis of starch exposed to ionizing radiation[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 168: 108492.
- [42] COELHO C C S, CERQUEIRA M A, PEREIRA R N, et al. Effect of moderate electric fields in the properties of starch and chitosan films reinforced with microcrystalline cellulose[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 174: 1 181-1 191.
- [43] XUE Pei-yu, ZHAO Yue, WEN Cheng-rong, et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties of corn flour and improvement of the gelatinization inhibition[J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 467-475.
- [44] 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.
- [45] 张喻, 谭兴和, 熊兴耀, 等. ^{60}Co - γ 射线对马铃薯淀粉颗粒性质影响研究[J]. *食品与机械*, 2009, 25(6): 22-25.
- ZHANG Yu, TAN Xing-he, XIONG Xing-yao, et al. Effects of ^{60}Co - γ radiation on the granule property of potato starch[J]. *Food & Machinery*, 2009, 25(6): 22-25.
- [46] LI Dan-dan, YANG Na, ZHOU Xing, et al. Characterization of acid hydrolysis of granular potato starch under induced electric field[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 71: 198-206.
- [47] XUE Li-ping, MA Ya-lu, YANG Na, et al. Modification of corn starch via innovative contactless thermal effect from induced electric field[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 255: 117378.
- [48] PAN Li-hong, XING Jia-li, ZHANG Hao, et al. Electron beam irradiation as a tool for rice grain storage and its effects on the physicochemical properties of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 2 915-2 921.
- [49] ZHOU Xing, YE Xiao-jai, HE Jian, et al. Effects of electron beam irradiation on the properties of waxy maize starch and its films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 151: 239-246.
- (上接第 193 页)
- [50] 张曦, 黎鑫. 湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因[J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(6): 747-756.
- ZHANG Xi, LI Xin. Temporal and spatial distribution characteristics and causes of summer high temperature heat waves in Hunan province[J]. *Climate and environment research*, 2017, 22(6): 747-756.
- [51] 范明辉, 范崇东, 王森. 利用脉冲 NMR 研究食品体系中的水分性质[J]. *食品与机械*, 2004, 20(2): 45-48.
- FAN Ming-hui, FAN Chong-dong, WANG Miao. Water properties in food systems were studied by pulsed NMR[J]. *Food & Machinery*, 2004, 20(2): 45-48.
- [52] 郭志光, 匡凤姣, 唐选明, 等. 食用槟榔卤水添加剂及应用: CN101843304A[P]. 2010-09-29.
- GUO Zhi-guang, KUANG Feng-jiao, TANG Xuan-ming, et al. Edible areca nut brine additives and application: CN101843304A[P]. 2010-09-29.
- [53] 陈耕, 刘忠义. 食用青果槟榔加工工艺研究[J]. *食品科技*, 2009, 34(8): 80-83.
- CHEN Geng, LIU Zhong-yi. Study on processing technology of edible green betel nut[J]. *Food Technology*, 2009, 34(8): 80-83.