

不同加工方式对淀粉性质的影响

王立, 杨懿, 钱海峰, 张晖, 齐希光

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 淀粉作为食品尤其是谷物制品的主要成分,在人类日常饮食中占有十分重要的地位。超高压、油炸、发酵、挤压和微波作为食品领域5种常用的加工手段,能显著地改变淀粉的糊化、老化、结晶等理化性质,影响其与食品其他组分之间的相互作用,进而影响食品的品质。作者主要综述了这5种加工技术在淀粉类食品中的应用,分析它们对淀粉性质的影响及作用机理,以期对淀粉类食品的深入开发提供一定的参考。

关键词: 超高压;油炸;发酵;挤压;微波;淀粉改性;淀粉-脂质复合物

中图分类号: TS 234 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1689(2017)03-0225-11

Effects of Different Processing Methods on Starch Properties

WANG Li, YANG Yi, QIAN Haifeng, ZHANG Hui, QI Xiguang

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Starch as one of the main components of food, especially cereal products, plays an important role in human diet. The five commonly used processing methods, including ultra-high pressure, frying, fermentation, extrusion and microwave, could significantly affect the physicochemical properties of starch, such as gelatinization, aging, crystallization etc. The interactions between starch and other components of food also influence the food quality. The applications of the five processing methods in starchy foods were summarized and the effects on starch properties and mechanisms were discussed in this paper, which are helpful for the further development of starchy food.

Keywords: ultra-high pressure, frying, fermentation, extrusion, microwave, starch modification, starch-lipid complex

以米面制品为主的谷物食品是我国传统的主食来源,提供了居民膳食中60%~70%的热量及60%的蛋白质^[1]。淀粉是谷物中最主要的组成部分,以其为主制作的食品种类多样,同时具有碳水化合

物含量高、脂肪含量低等特点。富含淀粉的食品在加工过程中常用的方法主要有超高压、油炸、发酵、挤压以及微波等。各种加工方法具有各自的特点,能够赋予食品不同的质构和口感。如超高压加工技

收稿日期: 2016-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471617)。

作者简介: 王立(1978—),男,江苏溧阳人,工学博士,教授,博士研究生导师,主要从事谷物功能因子及健康食品方面的研究。

E-mail: wl0519@163.com

引用本文: 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(03):225-235.

术(又称高静压加工技术)通常是以水为介质,在常温和高静压(一般为 100~1 000 MPa)下处理密封食品物料,使食品中的蛋白质、酶和淀粉等生物大分子在高压下变性、失活或糊化,达到食品改性和灭菌保鲜的目的^[2]。油炸技术是以油为传热介质,使食物在较高温度中熟化和干燥的一种加工方法,具有加热均匀、传热速度快等优点,同时能赋予食品较好的质构、色泽、外形、香气和口感^[3]。发酵技术是一种利用微生物产生的酸和酶等产物作用于食品以改善其品质的加工方法,能够有效地改善食品的质构、风味和口感,同时也能提高食品的营养价值^[4],因此,发酵技术常被用来对淀粉进行改性并应用于面包、面条、粉条和米粉等生产中,获得比未发酵产品更加筋道、柔韧、滑爽的口感^[5-6]。在挤压加工过程中,预处理后的物料通过挤压腔,经过高温、高压和机械力的作用,形成一定形状和组织状态的产品^[7]。微波技术则是利用微波辐射下介质发生的热效应和电磁效应来加工食品物料,具有方便、安全、高效、节能、清洁等优点,在食品工业中有着广泛的应用,同时还具有穿透性好、加热均匀快速、营养损失少等特点^[8]。

上述这 5 种加工方法在实际生产过程中,均能显著地改变淀粉的糊化、老化、结晶等理化性质,但其具体的加工原理还不是很清楚,因此逐渐成为国内外学者研究开发的热点。作者主要综述了这 5 种加工技术在淀粉类食品中的应用,分析了其在加工过程中所起的作用及机理,以为淀粉类食品的深入开发提供一定的参考。

1 超高压加工对淀粉性质的影响

超高压(HHP)加工属于一种非热物理加工技术,能破坏食品大分子中的非共价键,而对共价键几乎没有影响^[9-11],是一种对食品风味、口感和营养价值影响较小的食品加工技术^[9,12]。HHP 技术在谷物食品尤其是淀粉类食品中主要通过高压改变淀粉性质进而改善食品品质^[13]。据报道,HHP 导致的淀粉糊化存在淀粉颗粒的内部,同时会影响淀粉中氢键的断裂和形成^[9],另外,淀粉的物理化学特性等也会有不同程度的变化^[14-15]。

1.1 对直链淀粉和支链淀粉含量的影响

淀粉颗粒表面有大量的直链淀粉,且越靠近颗粒表面其链长越长;淀粉颗粒内部,直链淀粉以辐

射状的方式单链随机分布于支链淀粉中间^[2],因此,HHP 处理中浸泡会导致直链淀粉溶出。詹耀^[9]发现压力低于 300 MPa 时,随压力升高,早籼米和晚粳米中的直链淀粉含量显著降低;而高于 300 MPa 时,压力变化对直链淀粉的含量几乎没有影响;另外,随压力处理时间延长,直链淀粉含量先降低后增加,300 MPa 时保压 10 min,早籼米和晚粳米中的直链淀粉含量为最低。刘延奇等人^[16]发现经 HHP 处理后,淀粉颗粒仍是完整的但膨胀受到限制,同时有少量的直链淀粉溶出。此外,Oh 等人^[17]研究 HHP 处理大米淀粉时发现直链淀粉的溶出较少,仅占总量的 2%~2.5%。HHP 处理导致的淀粉糊化有别于传统的热糊化,没有或仅有很少的直链淀粉分子溶出,且淀粉颗粒不发生明显膨胀^[18],同时其对远距离有序支链的破坏比对直链淀粉的破坏更强^[19]。压力能使支链淀粉降解为更短的支链或直链淀粉^[20],减少双螺旋结构,进而降低膨胀度;也能使直、支链淀粉之间发生相互作用结合成双螺旋结构,增强颗粒刚性结构,减少内部物质溶出,从而降低溶解度和膨胀度^[15,21]。但也有不同的实验结果,Li 等人^[22]发现 HHP 加工后绿豆淀粉结晶度降低,淀粉颗粒膨胀加速,直、支链淀粉溶出量增加并加速聚集老化。

现有的研究认为 HHP 诱导淀粉糊化分为以下 3 个阶段:第一阶段,压力<300 MPa,颗粒内部的链支结构完好且膨胀被抑制、粒径减小;第二阶段,压力逐渐增加到 450 MPa,外层直-脂复合结构完好,但内部的支链淀粉断裂造成结晶结构消失,颗粒适度膨胀且有少量的直链淀粉溶出;第三阶段,压力>600 MPa,颗粒内的链支结构及表面的复合物层全被破坏,颗粒完全崩解破裂^[20,23-24]。

1.2 形成直链淀粉-脂质复合物

Stolt 等人^[25]利用 HHP 处理大麦淀粉时发现形成了直链淀粉和脂质的复合物。刘培玲等人^[26]研究发现,600 MPa 以内的 HHP 处理对 Hylon VII 淀粉的结晶结构具有韧化作用且使直链淀粉-脂质络合物形成的衍射峰增强,他们推测脂质在淀粉颗粒中呈放射状分布,在高压作用下淀粉分子的排列受到影响,从而脂质可以与直链淀粉以及支链淀粉的长链形成稳定的淀粉-脂质复合物,并存在于无定形结构中。Oh 等人^[17]认为 HHP 处理时,直链淀粉先与脂质相互作用形成螺旋复合物,进而与支链淀粉分子缠结并显著影响淀粉的结晶结构。直链淀粉-脂质

复合物的形成限制了可溶性直链淀粉分子的移动,抑制了淀粉颗粒的分散、溶解和膨胀^[22],同时,该复合物也抑制了淀粉分子与水分子的氢键结合,导致淀粉颗粒中的水分容易析出,颗粒的破坏程度加剧^[27]。

直链淀粉-脂质复合物在淀粉颗粒外层和内部区域分布有差异,这可能是造成淀粉颗粒内、外部不同耐压性能最主要的原因。直链淀粉-脂质复合物主要分布在淀粉颗粒外层,因而淀粉颗粒表面对高压的抵抗力更强,能起到抑制颗粒膨胀和阻碍直链淀粉溶出的作用^[18,24]。淀粉-脂质复合物的结晶度和热稳定性随直链淀粉链长的增加而增强,并随脂质饱和度的减小而减弱^[28]。

1.3 对淀粉结晶特性的影响

报道称 HHP 对淀粉的内部结构有一定的破坏作用且随压力增加,淀粉颗粒先被压缩韧化,结晶度增加;随后晶体结构解体;最终颗粒崩解,但其内部有序化增强,随即发生重结晶使结晶度增加^[20]。

张晶等人^[13]发现 HHP 处理板栗淀粉时不引起淀粉分子一级结构变化,仅改变其二级结构下分子原子团的排列方式。压力高于 200 MPa 时淀粉糊化开始,水分子渗透到颗粒内部尤其是无定形区并破坏其结晶结构^[12,29]。淀粉晶体结构转变会导致颗粒结构变化,从而改变其糊化时粘度特性、特征温度、峰值时间等^[17],因此,可以通过分析 HHP 处理后淀粉糊化参数等变化来了解其内部结构的改变。如 Li 等人^[22]研究 HHP 处理绿豆淀粉时发现 ΔTr 范围变窄,说明淀粉颗粒结晶域内晶体稳定性降低。

刘培玲等人^[26]利用 HHP 加工 A 型糯玉米淀粉时发现,300 MPa 的压力对其只有韧化作用,支链淀粉之间相互以氢键键合形成新的晶体使相对结晶度增加;而 450 MPa 的压力能使其晶型转变为 B 型,原因在于构成 A 晶型的双螺旋结构较松散,高压下被破坏形成新的螺旋结构导致晶型改变;经 600 MPa 的 HHP 加工后,X 射线衍射峰更强(结晶度增强),说明淀粉分子发生了重结晶。HHP 导致不同类型淀粉重结晶性质变化规律的研究有限,有待后续实验深入探究。

研究发现淀粉对 HHP 的耐受性和敏感度与其晶型有关^[9]。A 型淀粉最不耐高压,在 HHP 作用下会向弱 B 型转化,且这种转化对压力作用较明显;B 型淀粉最耐高压,能在加压后保持其原始 X 射线图案;C 型淀粉耐压性介于 A、B 型之间,高压下也能

向 B 型转化。原因在于 A 型淀粉晶格中有 8 个水分子且几乎不含直链淀粉,而短支链较多的支链淀粉会造成双螺旋结构松散;B 型淀粉具有空腔结构且与 36 个水分子以氢键相互作用,对晶体结构起稳定作用^[24,26,30]。此外,报道称自由水是淀粉在 HHP 作用下晶型改变的关键因素^[28]。

2 油炸对淀粉性质的影响

油炸是食品中常用的一种加工方法,在加工过程中淀粉经热作用以及与油脂的相互作用后生成淀粉-脂质复合物,使得淀粉的物理化学性质发生显著的变化,进而影响到油炸产品的品质及贮藏过程中的食用品质^[3]。因此,油炸对淀粉性质影响的研究对于提升油炸制品的品质及开拓淀粉的应用具有重要意义。

2.1 形成直链淀粉-脂质复合物

淀粉-脂质复合物有两种不同的形态,低温($<60\text{ }^{\circ}\text{C}$)时形成 I 型复合物,有较低离解温度($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$)和无序的晶体衍射图;高温($>90\text{ }^{\circ}\text{C}$)时形成 II 型复合物,有较高的离解温度($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$)和明显的 V 型 X 射线衍射图样^[31]。淀粉-脂质复合物的形成过程复杂,取决于多种因素,如淀粉的聚合度、分支度、浓度、反应温度以及脂质的结构等。直链淀粉螺旋结构内部的非极性区域可以与脂肪酸尾部的碳链之间形成单螺旋包接结构^[32]。支链淀粉能否与脂质形成复合物仍存在争议,Nakazawa 等人^[33]认为,有少部分棕榈酸渗入到支链淀粉结晶区并与其形成复合物;Huang 等人^[34]研究发现,单甘酯能与支链淀粉形成复合物并抑制其重结晶。但 Cjam 等人^[35]却认为单甘酯是与直链淀粉分子形成复合物,从而抑制淀粉的早期回生。

在油炸过程中,淀粉和脂质相互作用导致淀粉颗粒变大,且淀粉峰值粘度、崩解值降低,剪切稳定性提高^[5]。康巧娟^[36]推测在油炸过程中,部分紫甘薯直链淀粉与脂质形成复合物,从而造成淀粉的特征峰位置和强度发生较大变化。张令文等人^[37]也有类似的报道,发现复炸后在 $100\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现淀粉-脂质复合物熔融峰,另外较高的温度有利于形成稳定的直链淀粉-脂质复合物^[38]。油炸过程中形成淀粉-脂质复合物,限制淀粉颗粒溶胀并阻止直链淀粉溶出,导致淀粉的膨胀度、溶解度、碘兰值、透光率均降低,糊化焓、糊化温度升高,且对淀粉酶更稳定^[3,39-40]。

复炸过程中更易形成淀粉-脂质复合物^[44],且其含量随复炸时间延长而增加,从而形成更大的疏水空间并降低淀粉的膨胀度、溶解度,提高其冻融稳定性。此外,报道称直链淀粉的凝沉和直链淀粉-脂质复合物的形成之间存在竞争且后者更易发生^[3],因此淀粉-脂质复合物的形成可以抑制淀粉分子重排,进而推迟淀粉的凝沉过程,降低透光率^[41]。但周静舫等人^[3]却发现油炸淀粉的回生值增加,上述机理不能对其进行合理解释,具体原因还有待深入探究。

2.2 对淀粉结晶特性的影响

研究发现,直链淀粉-脂质复合物晶型一般为V型,但会随着加热温度升高而转变为E型^[3]。Bail等人^[42]研究发现,当加热温度达到150℃时,普通玉米淀粉(水分质量分数18%~35%)A型结构开始消失并出现Vh型(直链淀粉与线性有机分子形成的复合物晶型)结构;当温度升高到170℃以上时,A型结构完全消失,Vh型结构转变成E型结构;另外,高直链玉米淀粉加热至95℃出现Vh型结构。

周静舫等人^[3]发现,在油炸大米淀粉的X衍射图谱上 2θ 角度值19.62处(油炸后)和19.86处(油炸后放置10d)都出现V晶型特征峰。同样,张令文等人^[37]发现油炸后的淀粉均在 2θ 为20°附近出现不同强度的衍射峰,即直链淀粉-脂质复合物峰。淀粉在油炸过程中其结晶结构和结晶特性均会发生改变,周静舫等人^[3]发现,油炸后淀粉的(T_c-T_0)值升高40.0K,表明油炸后淀粉颗粒内部的结晶体趋于多样化;此外,研究发现初炸时间超过75s时的淀粉结晶度高于初炸25s时的结晶度,推测是直链淀粉-脂质复合物的形成增加了淀粉的结晶度^[43];但初炸100s和复炸40s后,淀粉结晶度随油炸时间的延长反而降低,具体原因仍有待深入探究。

3 发酵对淀粉性质的影响

发酵是一种传统的谷物类食品加工方法,现有的谷物发酵食品种类丰富,如:发酵米粉、发酵米粥、发酵粉条、年糕、米果等^[44]。在发酵过程中,乳酸菌、酵母菌等微生物的代谢产物(乳酸、胞外酶等)作用于淀粉颗粒,改变其物理化学性质^[45-46]。研究发酵对淀粉糊化、老化等特性的改变对于改善淀粉类食品的口感、风味和质构、提高其营养价值以及开发优质的发酵产品等都具有重要的意义。

3.1 对直链淀粉和支链淀粉分子结构和含量的影响

发酵会改变淀粉的分子结构,比如减少大分子数量、增加小分子及中等大小分子数量^[47]。闵伟红^[48]利用乳酸菌发酵米粉时发现,乳酸主要促进淀粉颗粒中蛋白质溶出而对淀粉的降解作用较小;胞外酶主要降解支链淀粉,增加直链淀粉含量和平均聚合度,从而改变淀粉中直/支链淀粉的比例,但对蛋白质的降解作用较小。发酵过程中,直、支链淀粉结构和含量的改变导致淀粉的衰减、剪切稀化程度降低^[49-50]。发酵对支链淀粉的断链和脱支作用集中在主链和长链上^[45],降低其结晶性、老化倾向和淀粉峰值粘度,但利于淀粉凝胶保持较多水分和较好的粘弹性,从而降低淀粉制品硬度^[48,50]。另外,发酵过程中部分蛋白质和脂肪被降解会促进直链淀粉溶出^[46],加速淀粉糊化和老化,增强其凝胶网络的刚性和粘弹性,进而增强淀粉制品的胶着性、咀嚼度和拉伸性能。

关于发酵对淀粉含量、结构及性质影响有不同报道。陶华堂^[46]应用红外检测研究发酵大米时发现既没有基团消失也没有新化学键或基团生成,认为发酵对淀粉结构的改变作用不大。丁文平等人^[51]认为发酵对大米中支链淀粉的降解和直、支链淀粉含量的影响不显著。同样,Lu等人^[52]也得出类似结论。袁美兰等人^[53]报道发酵会减小玉米支链淀粉分子大小和聚合度、增加其平均链长和外链长;同时,支链淀粉的短链水解造成长链比例上升,淀粉膨胀受抑制。

一般认为,发酵降低支链淀粉分子的分支化程度,减弱其再结晶性;发酵过程中,部分脂肪和蛋白质降解促进直链淀粉溶出,加速凝胶形成。发酵技术对淀粉分子结构和组成的影响及作用机理目前尚没有统一论,其可能与微生物种类、发酵条件和淀粉来源有关,具体原因有待研究。

3.2 对淀粉结晶特性的影响

研究表明,发酵能改变淀粉的结晶度,但不改变其晶体类型^[54]。发酵后淀粉红外结晶指数(R值)上升,说明颗粒表面淀粉分子的短程有序度升高^[50]。同时,发酵后直链淀粉含量增加,其可以参与形成支链淀粉的晶核进而促进支链淀粉重结晶^[46]。

关于发酵对淀粉无定型区和结晶区的影响有不同报道。闵伟红^[48]认为发酵产物乳酸影响淀粉的

结晶区,而胞外淀粉酶影响淀粉的无定型区;同时,淀粉发酵后其非结晶区增大而结晶度减小,Yang 等人^[55]也有类似的发现。但丁文平等^[51]却认为发酵产物酸和酶主要作用于淀粉的无定形区,而对晶区结构的影响不显著;同时,无定形区的减少及发酵小分子物质的不断溶出提高了结晶区的相对比例,Lu^[45,52]、袁美兰^[53]等人在研究中也获得类似的结论。

总体看,发酵不会改变淀粉的结晶类型,乳酸主要破坏淀粉颗粒的无定形区。我们认为上述研究结果出现分歧的主要原因可能在于具体的发酵条件不同(如菌种),因此,发酵对淀粉晶体特性的影响仍有待进一步研究。

3.3 蛋白质、脂质与淀粉的相互作用

蛋白质可以与直链淀粉结合形成网状结构紧密包裹淀粉颗粒外层,抑制其膨胀糊化;同时,这种相互作用也增大了淀粉颗粒的空间位阻,进而提高了其抗剪切能力。同样,脂质也可以与直链淀粉形成复合物,强化颗粒结构,限制其膨胀糊化,降低其衰减^[46]。另外,脂质与蛋白质在发酵过程中容易各自形成微观富集区,阻碍淀粉分子之间相互聚合和凝胶网络结构的形成^[45]。因此,可以通过发酵技术改变蛋白质、脂质对淀粉的络合作用,进而改变淀粉的特性。

发酵前期,蛋白质和游离脂肪酸缓慢溶出;而发酵后期,蛋白质、脂肪酸被分解^[56],含量迅速降低,其与淀粉的络合作用被破坏。发酵产物乳酸的 α -羟基可以与淀粉多肽链上的羟基形成氢键,从而促进蛋白质溶出^[48,57]。但蛋白质的含量在发酵4 d后趋于稳定,再发酵对蛋白质的影响不显著^[46]。发酵过程中,蛋白质溶出和淀粉的释放会加速淀粉的糊化,降低其峰值温度、峰值粘度和抗剪切能力,升高其热焓值^[50]。此外,发酵后淀粉分子之间更易形成氢键缔合,从而形成有序的凝胶结构,赋予淀粉制品透明的外观和筋道的口感^[45]。

3.4 对淀粉凝胶特性的影响

淀粉凝胶的性质与支链淀粉分子结构及直/支链淀粉的比例密切相关。一般认为凝胶形成过程为:直链淀粉之间或其与支链淀粉的外侧链结合形成网络结构,封闭支链淀粉内链的同时将较多的水分及支链淀粉分散相包埋在内,维持凝胶较好的粘弹性^[46]。另外,有报道称支链淀粉对凝胶老化的影响比直链淀粉显著^[57]。

发酵使淀粉分子大小趋于均匀且容易靠近聚合,从而加速形成均匀致密的凝胶网络结构^[54,58]。发酵过程中,支链淀粉发生断链,再结晶能力降低,凝胶相中得以保留更多水分,赋予凝胶良好的粘弹性。此外,直链淀粉含量增加和分子间氢键缔合增多使凝胶硬度和弹性增强。据报道^[45],发酵对淀粉凝胶特性的影响主要为乳酸的作用,一方面其作用于无定形区并水解支链淀粉,提高凝胶的保水性且加速凝胶老化;另一方面,其降低体系的pH值,促进淀粉分子链聚合老化;发酵产物 α -淀粉酶对凝胶性能的影响较小,原因在于其对生淀粉作用不敏感且酶活较低。此外,发酵产生的小分子糖类(葡萄糖、麦芽糖)、乙醇等会削弱凝胶结构。

发酵降低支链淀粉的分支化程度,削弱其空间阻碍作用;加速直链淀粉之间及其与支链淀粉间的相互作用;同时也促进脂质和蛋白质的溶出与降解,有利于形成稳定的凝胶结构并改善淀粉制品的食用品质。但是,发酵加工受淀粉来源、发酵菌种、发酵条件及发酵调控等多种因素影响,且其对淀粉的改性作用仍停留在研究阶段,因此,发酵对淀粉性质影响的规律、发酵淀粉凝胶的形成机理以及其对凝胶特性的改善有待进一步研究。

4 挤压技术对淀粉性质的影响

挤压作为一项重要的食品加工技术,现已广泛应用于玉米、小米、燕麦、大米等谷物食品加工中,具有设备简单、操作方便、环保、低成本、高效节能等优势。近年来,国内外学者在挤压技术对淀粉性质影响尤其是挤压过程中淀粉发生糊化和降解方面开展了广泛的研究^[59],包括淀粉在挤压机内受到高温、高压和机械力作用发生复杂的物理化学变化。研究挤压加工中淀粉理化性质的变化规律对于加工产品的品质调控具有重要意义。

4.1 对直链淀粉和支链淀粉分子结构和含量的影响

挤压过程中,淀粉发生不可逆的 α 化作用,同时降解生成麦芽糊精和小分子寡糖^[60-61];颗粒内部淀粉分子间作用力被破坏而发生糊化,粘度降低^[62]。陈子意^[63]发现挤压膨化时,槟榔芋淀粉分子内发生部分双键断裂并生成了新基团,说明淀粉在高压、高剪切力作用下结构发生了改变;另外,在挤压过程中,支链淀粉中支链部分发生降解的几率显著地

高于直链部分,且其降解作用类似于普鲁兰酶的作用,水溶指数增大。张洁等人^[64]发现,挤压后荞麦和玉米淀粉中直链淀粉含量有所增加,沈丹^[65]在研究挤压膨化鹰嘴豆淀粉时也得到类似结果。徐树来^[66]发现在挤压时的高剪切力作用下,淀粉中的糖苷键断裂且部分降解成小分子物质,因此,挤压后淀粉的平均相对分子质量和支链淀粉含量都减小。刘丽等人^[67]发现大米淀粉经过挤压后,晶体的有序化程度和结晶度降低,说明支链淀粉在挤压作用下发生了降解。但陈子意^[68]却发现挤压后,直链淀粉含量降低,支链淀粉含量升高,淀粉的冻融稳定性和膨胀力降低,凝沉稳定性和溶解度提高。

杨庭等人^[68]发现对原料进行适当的挤压有助于面条内部形成连续致密的网络结构,从而制得强度和质构特性较好的糙米面条,Zhuang 等人^[69]也得到类似结果。我们认为面团网络结构的形成与挤压对支链淀粉的改性以及直、支链淀粉之间的相互作用有关,因此研究挤压对淀粉分子性质的影响有助于改善食品的品质,但其变化规律有待更加全面地研究。

4.2 形成直链淀粉-脂质复合物

报道称油脂能降低挤压对物料的膨化效果,一方面,油脂的润滑作用减少物料所受机械力,并且改变水、淀粉、油脂及蛋白质间的界面效应,从而影响膨化产品的质构、密度及膨胀性;另一方面,在高温、高压和高剪切力作用下,甘油三酯水解产生单甘酯和游离脂肪酸,促进淀粉-脂质络合物形成,降低淀粉的糊化度、裂解性、溶解性和消化率^[70]。研究发现,挤压过程中直链淀粉-脂质复合物生成量与挤压温度和水分含量有关,在较低温度(<100℃)下,复合物的含量随温度升高而增加;而在较高温度(>100℃)下,复合物的含量随温度升高而降低;另外,随着水分含量增加,游离脂肪酸增多而直链淀粉-脂质复合物生成量减小^[71]。据报道^[71],挤压时剪切力的作用可以使直链淀粉-脂质络合物由V型结构向更稳定的E型结构转换。

链状脂肪酸或单甘酯能与淀粉生成结晶复合物降低淀粉的水溶性,且其水不溶性与脂肪酸碳链链长及脂肪酸饱和度成正比^[72]。甘油三酯或磷脂不能与淀粉形成稳定的结晶体,原因在于其结构较大,无法进入淀粉螺旋内部而只能附着于淀粉分子外表面。研究发现直链淀粉-脂质复合物不仅可以

改善淀粉基物料的质地和结构稳定性,还可以调节复合体系的疏水性质、降解性能、络合性能等功能性质,因此可以作为食品稳定剂、脂肪替代品、生物活性成分控释载体、降解包装材料和低血糖生成指数淀粉等^[20]。

总之,挤压时脂肪的水解促进淀粉-脂质复合物的形成,影响淀粉的溶解性、消化率和产品的膨化效果等。同时,挤压过程中发生美拉德反应,促进淀粉-脂质复合物和蛋白质-脂质复合物生成并降低脂肪氧化速度和程度,从而改善产品口感,延长食品货架期。

5 微波加工对淀粉性质的影响

近年来,微波作为一种安全、高效的加工方式在食品领域物料的干燥、杀菌、蒸煮以及焙烤等方面有着十分广泛的应用^[8]。研究认为,微波的快速加热效应和极化效应影响淀粉分子间及其与水分子间的化学反应动力学速率,进而影响淀粉的分子结构和物理化学性质。因此,研究微波加热过程中淀粉分子的变化规律及分子间的相互作用对微波淀粉改性理论与应用的发展具有重要意义^[73]。

5.1 对直链淀粉、支链淀粉分子结构和含量的影响

微波辐射下,淀粉颗粒内聚集大量热量,破坏淀粉分子结构,造成支链淀粉降解和直链淀粉溶出,同时淀粉粘度(最高粘度、热糊粘度、冷糊粘度等)下降^[74-75]。微波加工过程中,淀粉分子结构和含量受微波加热功率和时间、淀粉直/支链比例和含水量及复杂体系中淀粉与其他组分的复合作用等因素影响。例如 Palav^[76]用微波辐射小麦淀粉时发现,淀粉颗粒只发生短时、小幅度的膨胀,且高聚物溶出量与加热速率成反比。同时,当淀粉内直链淀粉含量较高时,微波加热溶出的直链淀粉可以迅速形成凝胶并在外围包裹住淀粉颗粒,阻止颗粒进一步膨胀糊化。此外,部分溶出的直链淀粉还可以与体系中的脂质、蛋白质等组分发生络合作用,形成稳定的复合结构阻止直链淀粉进一步溶出。

测定表观直链淀粉含量常用直链淀粉与碘络合显色法,这种方法受直链淀粉-脂质复合物以及支链淀粉结构的影响较大。陈秉彦^[73]研究发现,低强度微波(2.0~4.0 W/g)对鲜莲中直链淀粉含量几乎无影响,但当微波加热功率提高到 8.0 W/g 时,直链淀粉含量明显下降,推测可能是微波促进了直链淀

粉-脂质复合物的形成。

微波加工过程中,直、支链淀粉分子结构和含量变化以及直链淀粉浸出机制并不十分明确,研究结果受微波加热功率和时间、淀粉直/支链比例和含水量及淀粉与其他组分的复合作用等多种因素影响。因此未来的研究方向可以是:针对影响微波作用效果的多种因素进行归类,进而更加系统深入地研究微波加工对淀粉分子结构影响的规律和机制。

5.2 对淀粉结晶特性的影响

Fan 等人^[77-78]利用小角度 X 衍射和红外光谱等研究微波加热大米时发现,微波处理后淀粉的 C—H 振动吸收峰位置下降,C—O 振动吸收峰位置上升,但其官能团结构不变。据报道^[73],微波处理不改变 A 晶型淀粉的结晶类型但可使 B 晶型淀粉的晶型转变为 A 晶型。罗志刚^[79]研究发现,马铃薯淀粉经微波处理后,X 射线衍射强度增大,说明其结晶性增强;而衍射角 2θ 为 16.1° 的衍射峰消失,产生衍射角 2θ 为 4.93° 的衍射峰,说明马铃薯淀粉的晶型由 B 型转变为 A 型。陆冬梅等人^[80]研究微波加热木薯淀粉时同样发现了晶体类型的转变,但其结晶度却明显下降。一般认为微波加工时,B 型晶体内中间隧道中的 36 个水分子蒸发而脱水或新生成的双螺旋结构占据原来水分子占据的空间,从而使晶体类型发生转换。但在微波改性谷物淀粉的研究中,淀粉结晶结构没有发生改变,具体原因有待后续实验探究。

报道称电磁波作用使淀粉分子发生一定程度的降解、快速迁移和重排,从而使直、支链淀粉分子内与分子间易于相互靠近而发生交互作用,进而增强淀粉结晶性^[74]。淀粉结晶区增大使其起始糊化温度增加,抗酶解性增强,膨胀度和溶解度降低。微波处理后,淀粉的(T_c-T_0)值增加,说明直、支链淀粉分子内与分子间形成晶体的异种化程度增加^[74]。张民等人^[75]研究发现微波处理后,大米淀粉的凝沉性、 T_0 、 T_p 、 T_m 和 ΔH 均增加,说明微波使淀粉分子间重新聚合产生更多的双螺旋结构,从而形成耐高温的结晶体^[79],Cristina 等人^[81]也得出类似结论。

但还有研究发现微波造成部分淀粉的结晶度下降,罗志刚^[74]研究微波处理小麦淀粉时发现其 ΔH 降低,认为微波作用减少了其淀粉内部的双螺旋结构,同时,冻融稳定性的提高也说明微波降低了支链淀粉之间双螺旋结构的交联;因此,微波加

工过程中,淀粉内部主要发生直链淀粉分子内和分子间牢固的氢键键合作用。余巧莺等人^[82]利用微波处理木薯淀粉时发现仅在 2θ 为 20.20° 附近存在一个弥散峰,说明其内部大部分结晶态转化为无定型态。陈秉彦^[73]研究发现,莲子淀粉相对分子质量及晶区分布随微波加热功率的增大而减小,说明微波辐射抑制淀粉分子糊化后的晶区重排效应。

上述研究结果的差异与微波加热的特殊性有密切联系,是微波对淀粉快速热效应和极化效应综合作用的结果。首先,不同种类淀粉自身结晶水含量和所处加热环境的水分含量不同;其次,不同来源的淀粉其组成成分上有较大差异,直接影响微波加工过程中介电特性的变化和淀粉对微波的吸收;第三,微波辐射时间和功率不同对淀粉性质的影响也不同。上述多种因素都是通过影响微波加热的作用效果间接影响淀粉分子特性。Lewandowicz 等人^[83]研究发现,微波可以降低小麦淀粉和普通玉米淀粉的结晶度和溶解性,但几乎不影响蜡质玉米淀粉的物化性质和结构学特性。因此,淀粉组成的差异以及淀粉分子之间、淀粉与其他介电高分子组分之间的相互作用对微波加热效果的影响是未来研究的重点,也是探讨微波加热对淀粉改性作用机理的重要方面。

6 展望

超高压、油炸、发酵、挤压和微波作为食品领域 5 种常用的加工手段都会对淀粉的理化性质产生影响,因此,明确不同加工手段对淀粉性质产生的影响及过程中淀粉与其他组分之间的相互作用,深入探讨其机理并研究调控手段,对控制和提升淀粉类食品品质及其深度开发具有重要的意义。

虽然现已开展了较多的相关研究,但仍存在一些问题:1) 现有研究主要集中在食品贮藏保鲜、质构改善、货架期延长、技术和介质改良以及和预处理工艺优化等方面,在这些加工手段对淀粉性质的影响以及这些性质变化与产品品质之间的内在联系还缺乏深入的机理研究。2) 围绕加工手段对淀粉颗粒膨胀、直/支链淀粉分子结构和直链淀粉浸出量的影响等方面有一些研究报道,但得到的研究结果尚存在一些分歧,且研究过程中也存在一些难以解释的现象。3) 这些加工手段对食品中淀粉的改性作用及其过程中淀粉-脂质相互作用的相关研究仅限

于对淀粉单一组分进行处理,并且集中在单一的淀粉-脂肪酸体系中,其结果不足以反映实际加工过程对淀粉结构和性质的影响。

针对上述存在的问题,我们建议今后可以围绕以下方面开展研究:1) 结合不同来源淀粉的特点、不同加工方式的特点、不同的加工条件等多种因素,系统深入研究这些加工手段对淀粉理化性质的影响及其机理。2) 食品体系中除淀粉外还有蛋白

质、脂肪等多种成分,研究时需要模拟实际加工过程中食品复杂体系内不同大分子间的相互作用,深入探究具体加工过程中淀粉性质发生的改变。3) 淀粉在不同加工过程中理化性质的改变会影响到其与食品中其他组分之间的相互作用,进而对产品的口感、风味、质构等产生影响,这些变化需要深入研究。

参考文献:

- [1] QU Lingbo. Studies on grain nutrition and whole grain food[J]. **Cereal & Food Industry**, 2011, 18 (5): 7-9. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 周静舫. 面窝加工工艺参数优化及油炸对大米淀粉特性影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [4] LIAO Luyan, JIANG Liwen, ZHANG Yu, et al. Effects of different modification methods on sweet potato starch properties and flour quality[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2015, 30(11): 49-53. (in Chinese)
- [5] ZHANG Yurong, ZHOU Xianqing, LI Qingguang, et al. Changes in characteristics of rice flour and *Lactobacillus plantarum* starch fermentation[J]. **Cereal and Feed Industry**, 2012(8): 18-22. (in Chinese)
- [6] HAN Lihong, HAO Xueliang, CHENG Yongqiang, et al. Effects of natural fermentation on tensile properties of buckwheat extruded noodles[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2012, 27(4): 28-31. (in Chinese)
- [7] 张潜. 改良挤压技术制备耐蒸煮高抗性淀粉质构米及其性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [8] Adam F. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices[J]. **Journal of Food Engineering**, 2009, 94(1): 98-104.
- [9] 詹耀. 超高压处理对糙米物性品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [10] 田晓琳. 高压糊化玉米、糯玉米和糜子淀粉重结晶过程中性质和结构变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [11] BAO Yali, ZHOU Haiyu, REN Ruilin, et al. Effects of moisture on microstructures of different starch types treated by high hydrostatic pressure[J]. **Chinese Journal of High Pressure Physics**, 2014(6): 743-752. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] LIU Peiling, REN Ruilin, BAO Yali, et al. Study on gelatinization and recrystallization mechanism of waxy maize starch prepared by high hydrostatic physical denaturation process[J]. **Chinese Journal of High Pressure Physics**, 2014, 28(2): 247-256. (in Chinese)
- [14] LIU Ming, TAN Bin, SUN Zhijian, et al. Application of high static pressure technology in grain and beans processing[J]. **Science and Technology of Cereals, Oils and Foods**, 2014, 22(3): 18-23. (in Chinese)
- [15] ZHANG Jing, Enkhtuya Oldokh, SHEN Qun. Effect of high static pressure on thermal properties and structure of chestnut starch [J]. **Food Science and Technology**, 2013(4): 66-69. (in Chinese)
- [16] LIU Yanqi, ZHOU Jingqi, ZHAO Guangyuan, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the crystalline structure of defatted potato starch[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2007, 22(6): 86-90. (in Chinese)
- [17] OH H E, HEMAR Y, ANEMA S G, et al. Effect of high-pressure treatment on normal rice and waxy rice starch-in-water suspensions[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2008, 73(2): 332-343.
- [18] BUCKOW R, JANKOWIAK L, KNORR D, et al. Pressure-temperature phase diagrams of maize starches with different amylose contents[J]. **Journal of Agricultural & Food Chemistry**, 2009, 57(24): 11510-11516.
- [19] BLASZCZAK W, BIDZINSKA E, DYREK K, et al. Effect of phosphorylation and pretreatment with high hydrostatic pressure on radical processes in maize starches with different amylose contents[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2011, 85(1): 86-96.
- [20] LIU Peiling, REN Ruilin, BAO Yali, et al. Study on gelatinization and recrystallization mechanism of waxy maize starch prepared by high hydrostatic physical denaturation process[J]. **Chinese Journal of High Pressure Physics**, 2014, 28(2): 247-256. (in Chinese)
- [21] REN Ruilin, LIU Peiling, BAO Yali, et al. Effects of high static pressure physical denaturation on physical and chemical

- properties of waxy corn starch[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2015, 30(3):23-29. (in Chinese)
- [22] LI W, ZHANG F, LIU P, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vignaradiata* L.) starch[J]. **Journal of Food Engineering**, 2011, 103(4):388-393. (in Chinese)
- [23] ZHANG Jing, Enkhtuya Oldokh, SHEN Qun. Effects of high static pressure on starch granule and paste properties of chestnut[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2013, 34(17):53-55. (in Chinese)
- [24] PRIMO M C. Cross-linking of wheat starch improves the crispness of deep-fried battered food[J]. **Food Hydrocolloids**, 2012, 28(1):53-58.
- [25] STOLT M, OINONEN S, AUTIO K. Effect of high pressure on the physical properties of barley starch[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 2000, 1(3):167-175. (in Chinese)
- [26] LIU Peiling, SHEN Qun, HU Xiaosong, et al. Studies on the crystal structure of different types of starch after high hydrostatic treatment by X-ray diffractometry[J]. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, 2012, 32(9):2579-2582. (in Chinese)
- [27] REN Ruilin, LIU Peiling, BAO Yali, et al. Effects of high hydrostatic physical denaturation on physical and chemical properties of cassava starch[J]. **Modern Food Science & Technology**, 2014(3):150-156. (in Chinese)
- [28] LIU Wenting, GUO Zebin, ZENG Shaoxiao, et al. Effects of ultrahigh pressure treatment on physical and chemical properties of penang taro starch[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2013, 28(5):80-84. (in Chinese)
- [29] BAO W, DONG L, WANG L, et al. Effect of high-pressure homogenization on the structure and thermal properties of maize Starch[J]. **Journal of Food Engineering**, 2008, 87(3):436-444.
- [30] 田晓琳. 高压糊化玉米、糯玉米和糜子淀粉重结晶过程中性质和结构变化研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [31] CAI Liming, GAO Qunyu. Studies and prospects of starch-lipid complexes[J]. **Cereals and Oils Processing**, 2007(2):85-87. (in Chinese)
- [32] BAIL P L, RONDEAU C, BULEON A. Structural investigation of amylose complexes with small ligands: helical conformation, crystalline structure and thermostability[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2005, 35(1-2):1-7.
- [33] NAKAZAWA Y, WANG Y J. Effect of annealing on starch-palmitic acid interaction[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2004, 57(3):327-335.
- [34] HUANG J J, WHITE P J. Waxy corn starch: monoglyceride interaction in a model system[J]. **Cereal Chemistry**, 1993, 6(1):156-161.
- [35] CJAM K, TVAN V, JURGENS A, et al. Effects of lipid surfactants on the structure and mechanics of concentrated starch gels and starch bread[J]. **Journal of Cereal Science**, 1996, 24(1):33-45.
- [36] 康巧娟. 紫甘薯真空油炸工艺研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2012.
- [37] ZHANG Lingwen, JI Hongfang, LOU Shiyao, et al. Changes in grain morphology, crystallinity and thermodynamic properties of starch during frying[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2015(5):36-42. (in Chinese)
- [38] XIE Tao, ZHANG Ru. Swelling, enzymatic hydrolysis and paste properties of amylose-amylose-fatty acid complexes of *Castanea henryi*[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2012, 27(7):42-45. (in Chinese)
- [39] AI Zhilu, CHEN Di, XIE Xinhua, et al. Effects of palmitic acid and oleic acid on thermal properties of glutinous rice starch[J]. **Food Science**, 2013, 34(21):20-23. (in Chinese)
- [40] CIESLA K, ELIASSON A C. DSC studies of retrogradation and amylose-lipid complex transition taking place in gamma irradiated wheat starch[J]. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research**, 2007, 265(1):399-405.
- [41] ZHANG Lingwen, JI Hongfang, MA Hanjun, et al. Changes of starch functional properties in deep fried process[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2016, 31(9):64-68. (in Chinese)
- [42] BAIL P L, BIZOT H, OLLIVON M, et al. Monitoring the crystallization of amylose-lipid complexes during maize starch melting by synchrotron x-ray diffraction[J]. **Biopolymers**, 1999, 50(1):99-110.
- [43] URI L, SHAHARH C, YIZHAK S, et al. Effects of long chain fatty acid unsaturation on the structure and controlled release properties of amylose complexes[J]. **Food Hydrocolloids**, 2009, 23(3):667-675.
- [44] WANG Xiaohui, LI Lingyi, JIU Zewu, et al. Studies on the physical and chemical properties and modification of starch in fermentation[J]. **Chinese Journal of Food and Nutrition**, 2013, 19(4):33-36. (in Chinese)
- [45] 鲁战会. 生物发酵米粉的淀粉改性及凝胶机理研究[D]. 北京:中国农业大学, 2002.

- [46] 陶华堂. 发酵大米理化特性变化与米粉品质形成机理[D]. 郑州:河南工业大学, 2013.
- [47] YUAN Meilan, LU Zhanhui, LI Lite. Effects of natural fermentation on the molecular structure of corn starch[J]. **Food Science & Technology**, 2010 (8):290-293.(in Chinese)
- [48] 闵伟红. 乳酸菌发酵改善米粉食用品质机理的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2003.
- [49] MAJZOBI M, BEPARVA P. Effects of acetic acid and lactic acid on physicochemical characteristics of native and cross-linked wheat starches[J]. **Food Chemistry**, 2014, 147(6):312-317.
- [50] LAO Luyan, JIANG Liwen, ZHANG Yu, et al. Effects of different modification methods on sweet potato starch properties and flour quality[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2015, 30(11):49-53.(in Chinese)
- [51] DING Wenping, WANG Yuehui. Effects of soaking fermentation on physicochemical properties of rice flour system[J]. **Food Science**, 2005 (3):6-8.(in Chinese)
- [52] LU Z H, LI L T, CAO W, et al. Influence of natural fermentation on physico-chemical characteristics of rice noodles [J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2003, 38(5):505-510.
- [53] YUAN M L, LU Z H, CHENG Y Q, et al. Effect of spontaneous fermentation on the physical properties of corn starch and rheological characteristics of corn starch noodle[J]. **Journal of Food Engineering**, 2008, 85(1):12-17.
- [54] LIU Xiaofeng, LIU Yawei, LIU Jie, et al. Research progress of effects of fermentation on physicochemical properties of starch[J]. **Cereal and Feed Industry**, 2011, 12 (4):33-35.(in Chinese)
- [55] YANG Y, TAO W Y. Effects of lactic acid fermentation on ft-ir and pasting properties of rice flour [J]. **Food Research International**, 2008, 41(9):937-940.
- [56] LU Z H, LI L T, MIN W H, et al. The effects of natural fermentation on the physical properties of rice flour and the rheological characteristics of rice noodles[J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2005, 40(9):985-992.
- [57] ZHOU Xianqing, LI Yajun, ZHANG Yurong. Study on the effect of fermentation on the quality of rice flour and its products[J]. **Cereal and Feed Industry**, 2010(3):14-17.(in Chinese)
- [58] LU Z H, TOMOKO S, NAOKI K, et al. Elucidation of fermentation effect on rice noodles using combined dynamic viscoelasticity and thermal analyses[J]. **Cereal Chemistry**, 2009, 86(1):70-75.
- [59] ALRABADI G J, TORLEY P J, WILLIAMS B A, et al. Effect of extrusion temperature and pre-extrusion particle size on starch digestion kinetics in barley and sorghum grain extrudates[J]. **Animal Feed Science & Technology**, 2011, 168(3-4):267-279.
- [60] MOAD G. Chemical modification of starch by reactive extrusion[J]. **Progress in Polymer Science**, 2011, 36(2):218-237.
- [61] CHUNG H J, CHO A, LIM S T. Effect of heat-moisture treatment for utilization of germinated brown rice in wheat noodle[J]. **LWT-Food Science and Technology**, 2012, 47(2):342-347.
- [62] REDGWELL R J, CURTI D, ROBIN F, et al. Extrusion-induced changes to the chemical profile and viscosity generating properties of citrus fiber[J]. **Journal of Agricultural & Food Chemistry**, 2011, 59(15):8272-8279.
- [63] 陈子意. 槟榔芋全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2015.
- [64] ZHANG Jie, ZHANG Guoquan, LUO Qingui. Effects of extrusion on physical and chemical properties of buckwheat starch and its mixture starch[J]. **Farm Machinery**, 2011(32):97-101.(in Chinese)
- [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] XU Shulai. Effects of extrusion processing on the main nutritional components of rice bran[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2007, 22(3):12-16.(in Chinese)
- [67] LIU Li, CHENG Jianjun, YANG Wenxin. Effects of extrusion on the structure and properties of broken rice[J]. **Food Science and Technology**, 2013, 34(1):92-96.(in Chinese)
- [68] YANG Ting, WU Nana, WANG Na, et al. Study on the relationship between the pasting quality of extruded modified brown rice and wheat flour[J]. **Journal of Food Science and Technology**, 2014(6):6-10.(in Chinese)
- [69] ZHUANG H, AN H, CHEN H, et al. Effect of extrusion parameters on physicochemical properties of hybrid indica rice (type 9718) extrudates[J]. **Journal of Food Processing & Preservation**, 2010, 34(6):1080-1102.
- [70] LOPEZ O V, ZARITZKY N E, MVE G, et al. Acetylated and native corn starch blend films produced by blown extrusion[J]. **Journal of Food Engineering**, 2013, 116(2):286-297.
- [71] 李锴. 糙米挤压膨化的研究[D]. 无锡:江南大学, 2009.

- [72] SINGH B,SEKHON K S,SINGH N. Effects of moisture,temperature and level of pea grits on extrusion behaviour and product characteristics of rice[J]. **Food Chemistry**,2007,100(1):198-202.
- [73] 陈秉彦. 莲子淀粉微波效应的研究[D]. 福州:福建农林大学,2015.
- [74] LUO Zhigang, YU Shujuan, YANG Liansheng. Effects of microwave field on starch properties of wheat[J]. **Journal of Chemical Engineering and Technology**,2007,58(11):2871-2875.(in Chinese)
- [75] ZHANG Ming, WU Na, DONG Jiamei, et al. Effects of different modification methods on physical and chemical properties and grain structure of rice starch[J]. **Modern Food Science and Technology**,2013(1):19-23.(in Chinese)
- [76] PALAV T, SEETHARAMAN K. Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating [J]. **Carbohydrate Polymers**,2006,65(3):364-370.
- [77] FAN D, WANG L, MA S, et al. Structural variation of rice starch in response to temperature during microwave heating before gelatinization[J]. **Carbohydrate Polymers**,2013,92(2):1249-1255.
- [78] FAN D, MA W, WANG L, et al. Determination of structural changes in microwaved rice starch using fourier transform infrared and raman spectroscopy[J]. **Starch – Starke**,2012,64(8):598-606.
- [79] LUO Zhigang. Effect of microwave on properties of potato starch[J]. **Food and Fermentation Industries**,2007,33(6):50-52.(in Chinese)
- [80] LU Dongmei, YANG Liansheng. Effects of water content on the physical properties of tapioca starch granules with microwave irradiation[J]. **Chinese Journal of Chemical Engineering**,2005,19(5):4-6.(in Chinese)
- [81] BILBAO S C, BUTLER M, WEAVER T, et al. Wheat starch gelatinization under microwave irradiation and conduction heating [J]. **Carbohydrate Polymers**,2007,69(2):224-232.
- [82] YU Qiaoying, TONG Yuejin, GUAN Huaimin. Effect of microwave modification of starch on graft copolymerization[J]. **Journal of Fujian University of Technology**,2011,9(6):526-530.(in Chinese)
- [83] LEWANDOWICZ G, JANKOWSKI T, FORMAL J. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches[J]. **Carbohydrate Polymers**,2000,42(2):193-199.

会 议 科 息

会议名称(中文):第四届生态毒理学学术研讨会

所属学科:病毒与免疫学,生态学

开始日期:2017-04-01

所在城市:浙江省 杭州市

主办单位:浙江工业大学、浙江省农业科学院和中国科学院生态环境研究中心《生态毒理学报》编辑部

联系人:侯一宁、张慧

联系电话:010-62941072

E-MAIL:stdlxb@rcees.ac.cn

会议网站:http://www.cas.cn/xs/201702/t20170209_4590122.shtml

会议背景介绍:

2017年4月,“第四届生态毒理学学术研讨会”将在浙江省杭州市举行,本届会议由浙江工业大学、浙江省农业科学院和中国科学院生态环境研究中心《生态毒理学报》编辑部共同主办。

前三届生态毒理学学术研讨会得到了我国生态毒理学领域同仁的热情响应,在这个开放而活跃的平台,大家分享最新的科研进展,畅谈学术见解,结交志同道合的朋友,建立合作关系,每位与会代表都有满满的收获。“第四届生态毒理学学术研讨会”将秉承历届会议的宗旨,继续为大家搭建这个自由开放的平台,让大家能够在科学思想的交汇、交锋、交融中,汲取营养,收获智慧。

本届会议主题是“环境中的化学物质:暴露、影响和风险”,将根据本领域的最新进展设置多个议题展开讨论。如同往届会议,交流形式亦包括大会报告、分会主旨报告、口头报告和展板报告。会议计划依然由英国皇家化学会设立优秀口头报告奖和优秀墙报奖,并颁发获奖证书。

征文范围及要求:会议内容主要涉及化学物质的生态和健康风险,计划设立以下讨论主题:

主题1:化学物质转移释放和环境暴露;主题2:化学物质的物理、环境和健康危害;主题3:化学物质的生态和健康风险评估;主题4:有毒污染物环境管理技术