

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.06.038

面条制品常用淀粉及其衍生物研究进展

Research progress on starch and its derivatives in noodles

徐舒简 李兆丰

XU Shu-jian LI Zhao-feng

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

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

摘要:文章介绍了面条制品常用淀粉及改性淀粉的理化性质与结构特征,总结了淀粉、化学改性淀粉、物理改性淀粉及其在面条制品中的应用,并对中国淀粉及其衍生物在面条中的应用前景与面临的挑战进行了展望。

关键词:淀粉;改性淀粉;预糊化淀粉;抗性淀粉;面条

Abstract: In this paper, the chemical and structures properties of starch commonly used in several noodle products were first introduced. And then the applications of starch, chemically modified starch, pregelatinized starch and resistant starch in noodle products were introduced respectively. Finally, the application prospect and challenges of starch and its derivatives in noodles are prospected in China.

Keywords: starch; modified starch; pregelatinized starch; resistant starch; noodles

面条是中国传统主食,历史悠久、品种繁多、风味各异、颇具地方特色(如兰州拉面、山西刀削面、张爷爷空心面等),现代还产生了方便面、杂粮面、LL面等面条新品种^[1]。面条生产添加的淀粉包括原淀粉、化学改性淀粉(改性淀粉及其衍生物)及物理改性淀粉(预糊化淀粉),不仅可改善面条食用品质,如筋道、滑爽、Q弹等;还能赋予产品功能,如慢消化、低GI等,是面条生产中使用量最大的配料或品质改良剂。文章拟系统对比面条制品生产涉及的淀粉及其改性淀粉的来源、形态、性质等,试图从微观结构与化学结构角度,阐释其对面制品品质改良的效果及其机制,为淀粉及改性淀粉原料选用、淀粉改性工艺研究提供参考。

1 常用的原淀粉

在生面状态下,面絮或面条的物理性质主要由面筋

组分决定,而在煮熟状态下,影响面条食用品质的最主要因素为淀粉。适用于面制品面条生产的淀粉一般要求具有易膨胀、糊化温度低、黏度高等特点,目前常用的原淀粉包括玉米淀粉、木薯淀粉、马铃薯淀粉等,可在一定程度上改善面条的加工、蒸煮、食用及贮藏品质。

1.1 原淀粉的来源及其化学组成

淀粉主要由直链淀粉(AM)与支链淀粉(AP)组成,还包含少量脂质、蛋白质和矿物质(表1)。根茎类淀粉所含脂质(马铃薯0.1%和木薯淀粉0.2%)通常比谷类淀粉(0.6%~1.2%)少,且脂质含量与AM含量呈正相关^[8]。在过量水下加热淀粉,内源性脂质与AM易形成脂质-淀粉复合物,从而抑制淀粉膨胀和AM的溶出。马铃薯淀粉含有相对含量较高的磷,其以磷酸单酯的形式存在,主要与AP共价结合。马铃薯淀粉中磷酸单酯的存在对其膨胀行为具有重大影响。带负电荷的磷酸基团引起相邻AP链间的排斥,并使得淀粉团粒快速水化和颗粒显著溶胀^[4]。普通淀粉的AM含量为14%~29%。不含AM的淀粉称为蜡质淀粉,如玉米、木薯、小麦、马铃薯;也有一些高直链淀粉产品(AM含量>30%)。

1.2 原淀粉的形态

淀粉颗粒的大小和形状取决于植物来源,如马铃薯淀粉颗粒非常大且呈圆形或椭圆形(10~100 μm)^[5];木薯淀粉颗粒为圆形或截面形;玉米淀粉颗粒呈多边形(表1);小麦淀粉呈现双峰粒度分布,包括透镜状的大颗粒A淀粉(20~32 μm)和圆形小颗粒B淀粉(2~10 μm)(图1)^[2]。

1.3 原淀粉的物理特性

由表2可知,马铃薯淀粉的膨润力高于其他淀粉的,主要由于其含负电荷磷酸盐单酯^[9];木薯淀粉的膨润力高于谷类淀粉,淀粉膨胀特性主要由AP决定,但同时受AM抑制。因此,蜡质淀粉的膨润力高于同类普通淀粉。去除内源性淀粉脂质可减少AM-脂质复合物的形成,并增加小麦淀粉和玉米淀粉的膨润力,但不超过块茎类淀

基金项目:国家“十三五”重点研发计划(编号:2018YFD0401004)

作者简介:徐舒简,女,江南大学在读本科生。

通信作者:李兆丰(1979—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: zfli@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2020-02-24

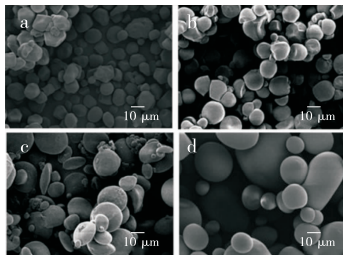
表 1 不同来源的淀粉的化学组成与结构特征^[2]

Table 1 Chemical composition and structural characteristics of starch from different sources

类别	脂质/%	蛋白质/%	灰分/%	磷/%	形状	直径/ μm	体积平均 直径/μm	数均直 径/μm	淀粉颗粒数/ (×10 ⁸ g ⁻¹)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)
玉米 淀粉	0.6~0.8	0.4	0.1	0.02, 0.01	圆形, 多边形	5~20	15	13	6	270
木薯 淀粉	0.2	0.3	0.3	0.1	圆形, 截面形	3~32	17~18	11	10	220
小麦 淀粉	0.8~1.2	0.2~0.3	0.2	0.05	轮形, 双凸透镜	A:20~35, B:2~10	A:21~23, B:6~7	A:17, B:3	A:2, B:80	A:180, B:670
马铃薯 淀粉	0.1	0.1	0.2, 0.3	0.09, 0.06	圆形, 椭圆形	10~110	48~60	29	0.5	75

类别	AM 含量/ %	AM 聚合度	AP 聚合度	淀粉的 AM 分子数/ (×10 ¹⁷ g ⁻¹)	淀粉的 AP 分子数/ (×10 ¹⁷ g ⁻¹)	AM 的 平均链长	AP 的 平均链长	AM 的 平均链数	AP 的 平均链数	结晶度/ %
玉米 淀粉	23,28	960, 830	15,510, 900	9~10	2~6	335,340	28,24, 20~21	2.9, 2.4	240	27,40
木薯 淀粉	18~24	26,603, 642	—	2~3	—	340	26,28, 18~19	7.8	—	24,38
小麦 淀粉	25,26	570,3 827, 1 290, 830~1 570	5 000~9 000, 13 000~ 18 000	3~11	2~6	250~320, 135~255, 270,300	25,23, 19~21	4.4~5.2, 5.5~6.5, 4.8,1.9	660~920	20,36
马铃薯 淀粉	19~22,17, 23,25~27	25,49, 208	11 200	1~2	2~4	670	34,29, 31,23	7.3	500	24,28

† 脂质、蛋白质、灰分和磷含量为总干重百分比;AM 表示直链淀粉,AP 表示支链淀粉;同一指标下出现的多组数据来源于不同的参考文献。



a. 玉米淀粉 b. 木薯淀粉 c. 小麦淀粉 d. 马铃薯淀粉

图 1 不同来源淀粉团粒的扫描电镜图^[2]

Figure 1 SEM images of starch granules from different sources

粉的膨胀水平。外源性脂质对淀粉颗粒膨胀性能的影响取决于该脂质类型和加热温度。木薯淀粉和马铃薯淀粉中缺乏 AM-脂质复合物,导致其膨润力增强^[6]。小麦淀粉具有最低的凝胶化温度,其次是马铃薯淀粉、木薯淀粉和玉米淀粉。马铃薯淀粉糊化焓略高于其他淀粉,而小麦淀粉和玉米淀粉的糊化焓较低。马铃薯淀粉和木薯淀粉的糊化温度低于谷物淀粉,由于马铃薯淀粉中带负电的磷酸基团含量较高,因此在较低温度下开始糊化。马铃薯淀粉可达到很高的峰值黏度(9 500 mPa·s),谷类淀

粉膨胀能力较弱,所以其峰值黏度低(1 250 mPa·s)^[6]。淀粉回生程度由存储时间和温度、淀粉糊浓度和淀粉结构特性等多因素决定。形成双螺旋至少需要 DP 为 10,这解释了在相同条件下马铃薯淀粉比谷物淀粉回生程度更高的原因^[10]。

1.4 原淀粉在面条加工中的应用

马铃薯淀粉是自然界唯一可与磷酸盐共价结合的淀粉,因此不易老化^[11]。添加马铃薯淀粉可增加面条黏弹性,促进煮面时面条的膨润度,增加面条煮后的透明感;马铃薯淀粉颗粒大、易糊化、膨胀性好,油炸时易形成微孔,可改善方便面的复水性^[12]。普通玉米淀粉与小麦淀粉相似,直链淀粉含量较多,添加后面条口感硬,易老化;而蜡质玉米淀粉由于不含直链淀粉,添加后可使面条质地变得软弹,面条久放不易老化。此外,木薯淀粉含有的直链淀粉少,添加后可使面条黏弹性、嚼劲增强,面条表面光亮、口感爽滑。

直链淀粉含量、膨胀性、晶体结构、淀粉颗粒大小均与面条食用品质密切相关,但起决定作用的直链淀粉与支链淀粉分子的精细结构特征尚不明确。淀粉的理化特性与面条食用品质密切相关,同样受淀粉精细结构的影

表 2 不同植物来源的淀粉的物理特性

Table 2 Physical properties of starch from different plant sources

物理特性	膨润力[6]			热特性(DSC)[7]				
	淀粉浓度/%	温度/℃	溶胀力/(g · g ⁻¹)	淀粉与水的比例	糊化起始温度/℃	糊化峰值温度/℃	糊化结束温度/℃	糊化焓/(J · g ⁻¹)
马铃薯淀粉	0.5	84	168	1 : 3	58	63	68	16
木薯淀粉	0.5	84	40~60	1 : 3	64	68	74	15
玉米淀粉	0.5	84	16	1 : 3	64	69	75	12
小麦淀粉	0.5	84	40	1 : 3	57	62	66	9

物理特性	回生特性(DSC)[7]			糊化特性(RVA)[8]			
	淀粉与水的比例	贮藏条件	熔化焓/(J · g ⁻¹)	淀粉浓度/%	糊化温度/℃	峰值黏度/(mPa · s)	终值黏度/(mPa · s)
马铃薯淀粉	1 : 3	7 d, 4 ℃	7.5	8	67	9 500	3 400
木薯淀粉	1 : 3	7 d, 4 ℃	3.7	8	67	2 300	2 000
玉米淀粉	1 : 3	7 d, 4 ℃	5.8	8	82	2 100	2 000
小麦淀粉	1 : 3	7 d, 4 ℃	3.6	8	89	1 250	1 850

响。因此,全面了解淀粉结构对面条品质的影响,对于指导面用小麦育种及面用淀粉辅料的选择具有重要意义。

2 常用的化学改性淀粉

原淀粉是食品体系优良的质地稳定剂与改良剂,由于其抗剪切能力弱、耐热性差、易于热降解与回生,限制了其在一些工业化食品中的广泛应用。改性淀粉,通过改变天然淀粉的理化特性来改善其功能特性,就能满足一些食品的特定需求,如熟面条的防回生、鲜面条的高持水性等。淀粉改性方法包括衍生化(如淀粉的醚化、酯化、交联和接枝)、降解(淀粉的酸或酶水解、氧化)或进行湿热处理对淀粉进行物理改性等(表 3)。其中,淀粉衍生化是将官能团引入淀粉分子中,从而导致其理化性质发生明显变化。天然淀粉的这种化学修饰极大地改变了其糊化、黏度以及抗回生特性。

2.1 改性淀粉的类型及其制备方法

食品级淀粉经化学修饰,主要是为了增加淀粉糊的稠度、光滑度和透明度,并赋予冻融和冷藏稳定性^[13]。化学改性后淀粉的新功能特性主要取决于淀粉来源、直链淀粉与支链淀粉的比例、颗粒形态以及反应物的类型和浓度,可通过选择合适的改性剂(取代基类型)、天然淀粉来源(淀粉分子中取代基的分布)和反应条件(反应物浓度、时间, pH 和催化剂的存在)来制备具有所需特性和取代度的改性淀粉^[14]。

具有低取代度的乙酰化淀粉通常通过在碱性催化剂存在下,将天然淀粉与乙酸酐酯化而获得,其中作为食品级羟丙基淀粉是在碱性条件下将天然淀粉与环氧丙烷醚化来制备的。引入淀粉链的羟丙基基团能够破坏分子间和分子内的氢键,从而削弱淀粉的颗粒结构,导致淀粉链

在无定形区域的运动自由度增加^[15]。

交联处理的目的是在淀粉颗粒的随机位置添加分子内和分子间键,以增强和稳定淀粉颗粒结构^[16]。交联淀粉的淀粉糊不会随着烹饪时间的延长、体系酸度的增加或剧烈剪切而分解,因而最大程度地减少烹饪过程中的淀粉颗粒破裂、黏度损失和丝状糊状物的形成。交联剂类型决定了所处理淀粉的功能性质的变化,三偏磷酸钠、三聚磷酸钠、表氯醇、磷酰氯、己二酸和乙酸酐的混合物以及氯乙烯是用于交联反应的主要试剂。常规制备的磷酸淀粉具有高稠度的透明糊状物,具有良好的冻融稳定性^[17]。

双重修饰是一种结合了取代和交联的方法,已被证明能稳定地防止淀粉的酸降解、热降解和机械降解,并能延缓淀粉在贮藏期间的老化。制备双重改性淀粉(交联/羟丙基化)所需的交联剂的量,随淀粉来源、交联剂的类型、交联反应的效率、所需的取代度和规定的最终改性淀粉性能范围而变化,碱浓度、温度、pH 和催化剂盐浓度等在羟丙基交联淀粉的适度改性制备中起着关键作用^[18]。

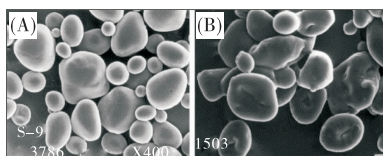
2.2 改性淀粉的形态

淀粉改性涉及接触相表面的物理、化学和生化变化。羟丙基化后的大多数结构变化发生在淀粉颗粒的相对较不规则的中央核心区域,即羟丙基最密集的沉积区域^[19]。羟丙基基团产生的“推挤效应”可能会导致羟丙基化后颗粒形态发生变化。Kaur 等^[18]发现采用环氧丙烷处理马铃薯淀粉颗粒会改变颗粒形态(图 2),在受影响较大的颗粒中,许多受影响较小的改性颗粒会产生凹陷,随后导致细微的碎裂、压痕,并沿着纵轴在中心核心区域形成深槽,这些颗粒以折叠结构的形式出现,其外侧向内拉,形成了类似甜甜圈的外观。

表 3 淀粉的不同改性方式、制备方法及用途

Table 3 Different modification methods, preparation methods and applications of starch

改性方式	类型	产品特点	产品名称	制备方法	应用范围
物理 改性	湿热 处理			热处理: 在高于糊化温度下加热淀粉, 水分不足以引起糊化	
		冷水可分散	/	退火: 在低于糊化温度下长时间加热粒状淀粉浆	/
	预糊化			使用滚筒干燥/喷雾干燥/挤压膨化/基于溶剂的工艺制备的预凝胶/速溶/冷水膨胀淀粉	
化学 改性	酸水解	分子量降低, 峰值黏度降低, 回生值增加	酸处理淀粉	经盐酸、磷酸或硫酸处理	油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
	酶水解			用一种或多种淀粉酶在低于糊化点的温度下于水溶液中处理	/
	氧化	低黏度, 高透明度和低温稳定性	氧化淀粉	经次氯酸钠处理	发酵/油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
	糊精化	低黏度, 高还原糖含量	环糊精	通过干法焙烧酸化淀粉制备	/
衍生化	醚化	改善淀粉糊的透明度, 更大的黏度, 降低脱水收缩和冻融稳定性	羟丙基淀粉	淀粉乳与醚化剂环氧丙烷反应	方便/冷冻米面制品
			羧甲基淀粉钠	淀粉乳与一氯乙酸或其钠盐反应	方便米面制品
	酯化	较低的糊化温度和回生度, 较低的形成凝胶趋势和较高的糊状透明度	醋酸酯淀粉	经乙酸酐或乙酸乙烯酯酯化	生湿/油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
			乙酰化双淀粉己二酸酯	经乙酸酐与己二酸酐酯化反应	发酵/油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
			辛烯基琥珀酸淀粉钠	经辛烯基丁二酸酯化反应	发酵面制品; 方便/冷冻米面制品
	交联	颗粒在溶胀, 高温, 高剪切和酸性条件下具有更高的稳定性	磷酸酯双淀粉	经三偏磷酸钠或三氯氧磷酯化	油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
磷酸化二淀粉磷酸酯			磷酸钾或三聚磷酸钠以及三偏磷酸钠、三氯氧磷混合处理淀粉	生湿面制品; 方便米面制品	
双重 修饰		耐酸, 热和机械降解以及在储存过程中延迟回生的稳定性	乙酰化二淀粉磷酸酯	经三偏磷酸钠或三氯氧磷, 以及乙酸酐或乙酸乙烯酯酯化	油炸面制品; 方便/冷冻米面制品
			羟丙基二淀粉磷酸酯	经三偏磷酸钠或三氯氧磷酯化, 并加上环氧丙烷酯化	发酵面制品; 方便/冷冻米面制品
		氧化羟丙基淀粉	淀粉乳与氧化剂、醚化剂发生反应	方便/冷冻米面制品	



A. 天然马铃薯淀粉 B. 羟丙基化马铃薯淀粉

图 2 羟丙基化对马铃薯淀粉颗粒形态的影响

Figure 2 Effect of hydroxypropylation on the morphology of potato starch granules

2.3 改性淀粉的物理特性

淀粉的理化性质如溶胀、溶解度和透光率会受到化学修饰的显著影响。与原淀粉相比, 经乙酰化或羟丙基化修饰后, 淀粉的溶胀力和溶解度呈增加趋势, 而交联淀粉呈减小趋势(取决于交联剂的类型和交联程度)。通过乙酰化将乙酰基引入淀粉分子会导致结构重组, 淀粉分子之间排斥, 从而促进了颗粒无定形区域内水渗透的增加, 以及溶胀能力的增加^[20]。研究^[21]表明, 乙酰化后淀

粉溶胀能力和溶解度均显著增加,其中马铃薯淀粉的增加程度更高。乙酰化后,结构崩解可能会削弱淀粉颗粒的稳定性,增加淀粉从颗粒中的浸出,从而增加淀粉的溶解度^[22]。在直链淀粉含量低和颗粒小的淀粉中,溶胀力的增加程度更高^[23]。

Perera 等^[24]研究了羟丙基化对马铃薯淀粉热学性质的影响,引入淀粉链的反应基团能破坏分子间和分子内的氢键,导致亲水性增加,从而降低淀粉的糊化温度;随着取代程度的增加, ΔH_{gel} 、 T_o 、 T_p 和 T_c 降低,糊化温度范围($T_c - T_o$)变宽。羟丙基化和交联化都大大减缓了淀粉回生趋势,对延缓糊化大米淀粉凝胶回生方面具有协同作用。羟丙基化交联淀粉比交联羟丙基化淀粉表现出明显更高的起始和峰值糊化温度、糊化焓以及更低的回生率,说明两种改性淀粉中交联的位置不同。羟丙基化再交联使淀粉具有更好的储存稳定性,磷酸交联对淀粉的影响比羟丙基化的影响更明显^[25]。

2.4 改性淀粉的营养与安全性

在食品级淀粉的乙酰化和羟丙基化过程中,引入的单取代基团数量相对较低。醋酸酯淀粉、磷酸酯淀粉和羟丙基淀粉的最大取代水平分别为 2.5%、0.4% 和 10.0%,每 1 000 个或更多的脱水葡萄糖单元包含一个取代基团的交联淀粉可安全食用^[26]。

淀粉衍生物越来越多地用作脂肪替代品或脂肪替代品,其部分或全部未被消化,因此在食用时热量贡献为零。化学修饰淀粉的生理效应受修饰类型的影响^[27],通过乙酰化对淀粉进行化学修饰可改善人的饱腹感、餐后血糖和胰岛素反应。磷酸化/交联化淀粉易于消化,被认为可为人类提供营养^[28];慢消化改性淀粉则可用于某些糖尿病的治疗^[29]。

化学改性获得的抗性淀粉(RS),因其潜在的健康益处和功能特性而备受关注^[30]。与普通膳食纤维相比,RS 具有对产品结构影响小、颜色白、质地更好的特点,其制作的食品比传统膳食纤维制成的食品具有更好的消费者接受度和口感。抗性淀粉具有低的持水性能,特别适于生产中、低水分食品,如面条、烘焙食品和油炸食品,并可轻松贴上简单的淀粉标签^[31]。国际市场已有多款 RS 产品上市,如 Hylong™ VII、Fibersol 2、Crystalean®、Hi-Maize®、Nutriose® 和 Novelose® 等^[32]。

2.5 改性淀粉在面条加工中的应用

GB 2760—2014 明确规定,在生湿面制品、发酵面制品、方便面制品及冷冻面制品中,可使用的改性淀粉有醋酸酯淀粉、磷酸酯双淀粉和羟丙基淀粉等 13 种类型,以下介绍两种面制品中最常用的改性淀粉。

2.5.1 醋酸酯淀粉 醋酸酯淀粉是在碱性条件下用醋酸酐等处理原淀粉,得到乙酰基在 0.5%~2.5% 的低取代度淀粉。少量醋酸根基团引入淀粉分子,阻碍或减少了直链淀粉分子间的氢键缔合,因而其糊化温度和回生度降

低,不易形成凝胶,淀粉糊具有较高透明度。在方便面配方中加入醋酸酯淀粉,可有效改善面条的质地,降低生产时耗油量,显著改善面条复水性^[33]。

2.5.2 羟丙基淀粉 羟丙基淀粉是利用淀粉与环氧丙烷在碱性条件下发生醚化反应制得。由于亲水性羟丙基的引入,减弱了淀粉颗粒结构的内部氢键强度,使其易于膨胀与糊化;同时,羟丙基会产生空间位阻效应,阻止淀粉链的聚集和结晶,从而提高了淀粉糊的透明度和冻融稳定性,有效防止了淀粉糊老化,所以适用于冷冻面条制品。研究^[34]表明,加入面粉量 1% 的羟丙基玉米淀粉或酯化糯玉米淀粉的面条,其蒸煮损失率降低;回生程度变缓,长时间冷藏的湿面仍有较柔软口感。

综上,在小麦粉中添加适量改性淀粉可显著提高混合粉的亲水性,易吸水膨胀,和面过程中能使面筋与淀粉颗粒、碎散的面筋间以及淀粉颗粒间很好地粘合起来,形成组织细密、黏弹性能良好的面团;能提高面条的弹性和黏聚性,减少蒸煮损失;提高熟面条的筋道感与爽滑性,且不易老化,但加入过量会对面团产生不利影响。

3 常用的物理改性淀粉

预糊化淀粉是一种物理改性淀粉,常采用滚筒干燥和挤压蒸煮两种方式生产^[35]。经预糊化处理的淀粉能在冷水中迅速膨胀,具有较大的黏性,可赋予食品理想的质地特征。具有常温水可溶性、凝胶性、保水性和膨胀性等优点^[36]。预糊化改性淀粉类似一种增“筋”剂,当面粉蛋白质含量低或质量不理想时,加入糊化改性淀粉可使面筋与淀粉颗粒很好地粘合,从而增强面条的抗拉强度。在杂粮面的生产中,添加预糊化淀粉可显著提高杂粮面条的质地与感官品质^[36]。研究^[37]发现,面条中预糊化淀粉使用量过大会增加断条率,通常添加量控制在 1%~5%。

4 结束语

淀粉来源广泛,通过化学或物理手段进行改性,可改善其理化与功能特性,使其更适用于面条加工、食用与营养品质要求。然而,中国对淀粉及其衍生物相关研究仍存在许多不足,与国外公司(如美国宜瑞安食品配料有限公司、松谷化学株式会社)相比,产品质量还有很大的提升空间,主要体现在种类少、工艺不够先进、性能不够理想、产品成本高等。另一方面,虽然中国食品添加剂使用标准 GB 2760 中已有面条用改性淀粉用量和用法的相关内容,但涉及食用改性淀粉的营养价值及安全性的内容较少。为了提高改性淀粉的食用安全性,迫切需要开展改性淀粉的营养与安全性评估,建立和完善改性淀粉的食用安全评价体系。

参考文献

[1] FU Bin-xiao. Asian noodles: History, classification, raw

- materials, and processing[J]. *Food Research International*, 2008, 41(9): 888-902.
- [2] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, FIERENS E, et al. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches[J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(1/2): 14-29.
- [3] BULEON A, COLONNA P, PLANCHOT V, et al. Starch granules; Structure and biosynthesis [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1998, 23(2): 85-112.
- [4] SINGH N, SINGH J, KAUR L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(2): 219-231.
- [5] JANE J L, KASEMSUWAN T, LEAS S, et al. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy[J]. *Starch-Stärke*, 1994, 46(4): 121-129.
- [6] ANGGRAINI V, SUDARMONOWATI E, HARTATI N S, et al. Characterization of cassava starch attributes of different genotypes[J]. *Starch-Stärke*, 2009, 61(8): 472-481.
- [7] JANE J L, CHEN Y Y, LEE L F, et al. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch[J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(5): 629-637.
- [8] SRICHUWONG S, SUNARTI T C, MISHIMA T, et al. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 62(1): 25-34.
- [9] TESTER R F, MORRISON W R. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids[J]. *Cereal Chem*, 1990, 67(6): 551-557.
- [10] GIDLEY M J, BULPIN P V. Crystallisation of malto-oligosaccharides as models of the crystalline forms of starch: Minimum chain-length requirement for the formation of double helices[J]. *Carbohydrate Research*, 1987, 161(2): 291-300.
- [11] PREZ S, BERTOFT E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules; A comprehensive review [J]. *Starch-Stärke*, 2010, 62(8): 389-420.
- [12] 彭荷花, 鲁战会, 李里特. 面条用品质改良剂综述[J]. *食品科技*, 2004(7): 78-82.
- [13] SINGH J, KAUR L, MCARTY O J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications; A review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(1): 1-22.
- [14] LIM S, SEIB P A. Location of phosphate esters in a wheat starch phosphate by ³¹P-nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. *Cereal Chemistry*, 1993, 70(2): 145-145.
- [15] SEOW C C, THEVAMALAR K. Internal plasticization of granular rice starch by hydroxypropylation: Effects on phase transitions associated with gelatinization[J]. *Starch-Stärke*, 1993, 45(3): 85-88.
- [16] ACQUARONE V M, RAO M A. Influence of sucrose on the rheology and granule size of cross-linked waxy maize starch dispersions heated at two temperatures[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 51(4): 451-458.
- [17] WOO K, SEIB P A. Cross-linking of wheat starch and hydroxypropylated wheat starch in alkaline slurry with sodium trimetaphosphate[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1997, 33(4): 263-271.
- [18] KAUR L, SINGH N, SINGH J. Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 55(2): 211-223.
- [19] KIM H R, HERMANSSON A M, ERIKSSON C E. Structural characteristics of hydroxypropyl potato starch granules depending on their molar substitution[J]. *Starch-Stärke*, 1992, 44(3): 111-116.
- [20] GONZALEZ Z, PREZÉREZ E. Effect of acetylation on some properties of rice starch[J]. *Starch-Stärke*, 2002, 54(3/4): 148-154.
- [21] SINGH N, CHAWALA D, SINGH J. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2004, 86(4): 601-608.
- [22] LAWAL O S. Succinyl and acetyl starch derivatives of a hybrid maize; Physicochemical characteristics and retrogradation properties monitored by differential scanning calorimetry[J]. *Carbohydrate Research*, 2004, 339(16): 2 673-2 682.
- [23] SODHI N S, SINGH N. Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(1): 117-127.
- [24] PERERA C, HOOVER R, MARTIN A M. The effect of hydroxypropylation on the structure and physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches[J]. *Food Research International*, 1997, 30(3/4): 235-247.
- [25] YOON C, PEK UN-HUA, PARKKWAN-HWA. Gelatinization and retrogradation characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rices [J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(2): 405-407.
- [26] WURZBURG O B. Nutritional aspects and safety of modified food starches [J]. *Nutrition Reviews (USA)*, 1986, 44(2): 74-79.
- [27] EBIHARA K, SHIRAISHI R, OKUMA K. Hydroxypropyl-modified potato starch increases fecal bile acid excretion in rats[J]. *The Journal of Nutrition*, 1998, 128(5): 848-854.
- [28] SANG Y, SEIB P A. Resistant starches from amylose mutants of corn by simultaneous heat-moisture treatment and phosphorylation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(2): 167-175.

(下转第 219 页)

- gy, 2019, 101(3): 559-566.
- [33] 段邓乐. 微波场内卵清蛋白-葡萄糖美拉德反应产物生成机制初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2016; 10-45.
- [34] 胡月明. 微波场内卵清蛋白糖基化反应的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014; 12-45.
- [35] 袁媛, 陈芳, 刘洁, 等. 微波对美拉德模拟体系中丙烯酰胺含量的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 135-138.
- [36] 张兰. 微波场内乳蛋白-乳糖模型的变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014; 20-52.
- [37] 张智刚. 微波场中米蛋白-葡聚糖复合物的制备、功能特性及其结构表征[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013; 30-37.
- [38] 毕伟伟. 微波对酪蛋白的糖基化反应及产物功能性质的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015; 18-77.
- [39] 刘红. 微波焙烤条件对饼干品质的影响及美拉德有害产物的控制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017; 16-44.
- [40] 杨楠, 罗凡, 费学谦, 等. 干燥方式对油茶籽油中美拉德反应产物及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 14-18.
- [41] 付全意. 食品模拟体系糖化反应过程中羧甲基赖氨酸的形成和抑制[D]. 广州: 华南理工大学, 2012; 27-95.
- [42] 孟岳成, 何珊珊, 李延华, 等. 不同加热条件下牛乳美拉德反应程度的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 158-165.
- [43] LAGUERRE J C, PASCALEG W, DAVID M, et al. The impact of microwave heating of infant formula model on neo-formed contaminant formation, nutrient degradation and spore destruction[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 208-213.
- [44] 严昊, 付惠, 谢冰. 美拉德反应及其产物抗氧化活性研究进展[J]. 宜宾学院学报, 2007(12): 82-84.
- [45] 杨立强. 微波加热食品过程中的 Maillard 反应[J]. 江西广播电视大学学报, 2004(1): 60-61.
- [46] 肖桂明, 卢红兵, 车靖, 等. 微波作用下不同反应温度的梅拉德反应研究[J]. 广州化工, 2015, 43(2): 59-61.
- [47] 胡军, 李国栋, 宗永立. 微波加热缬氨酸和葡萄糖的棕化反应[J]. 烟草科技/烟草化学, 2006(9): 45-50.
- [48] 董乐. 2 种氨基酸与葡萄糖美拉德反应产物的抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 89-92.
- [49] 刘志华, 刘春波, 韩敬美, 等. 中低 pH 下 Maillard 反应产物抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(13): 14-17.
- [50] WAGNER K H, REICHHOLD S, KOSCHUTNIG K, et al. The potential antimutagenic and antioxidant effects of Maillard reaction products used as "natural antibrowning" agents[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2007, 51(4): 496-504.
- [51] WIJEWICKREME A N, KITTS D D, DURANCE T D. Reaction conditions influence the elementary composition and metal chelating anance of nondialyzable model Maillard reaction products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(12): 4 577-4 583.
- [52] HWANG I G, KIM H Y, WOO K S, et al. Biological activities of Maillard reaction products (MRPs) in a sugar-amino acid model system[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 221-227.
- [53] RUFIAN-HENARES J A, MORALES. Effect of in Vitro Enzymatic digestion on antioxidant activity of coffee melanoidins and fractions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(24): 1 480-1 485.
- [54] 张开诚. 微波加热与传统加热对食品风味影响的探讨[J]. 武汉轻工大学学报, 1999(2): 23-26.
- [55] KAMBOJ S, SINGH K, TIWARY A K, et al. Optimization of microwave assisted Maillard reaction to fabricate and evaluate corn fiber gum-chitosan IPN films[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44(2): 260-276.
- [56] NOOSHKAM M, MADADLOU A. Microwave-assisted isomerisation of lactose to lactulose and Maillard conjugation of lactulose and lactose with whey proteins and peptides[J]. Food Chemistry, 2016, 200(1): 1-9.
-
- (上接第 213 页)
- [29] WOLF B W, BAUER L L, FAHEY G C. Effects of chemical modification on in vitro rate and extent of food starch digestion: An attempt to discover a slowly digested starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(10): 4 178-4 183.
- [30] SAJILATA M G, SINGHAL R S, KULKARNI P R. Resistant starch: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(1): 1-17.
- [31] 何健, 王韧, 张昊, 等. 改性蜡质玉米淀粉抗消化组分的理化性质及分子结构表征[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 1-4.
- [32] FUENTES-ZARAGOZA E, RIQUELME-NAVARRETE M J, SNCHEZ-ZAPATA E, et al. Resistant starch as functional ingredient: A review [J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942.
- [33] 蒲华寅, 马云, 黄萌, 等. 超高压辅助制备醋酸酯淀粉结构性性质研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 1-6.
- [34] 曹余, 何绍凯, 田映良, 等. 玉米交联羟丙基复合变性淀粉性能研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 16-18.
- [35] MAJZOBI M, BEPARVA P, FARAHNAKY A, et al. Physicochemical properties of cross-linked wheat starch affected by L-ascorbic acid[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(2): 355-364.
- [36] SUN Xiao-jing, LI Wen-hao, HU Ya-yun, et al. Comparison of pregelatinization methods on physicochemical, functional and structural properties of tarty buckwheat flour and noodle quality [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 63-71.
- [37] 郭玉. 预糊化淀粉的制备及其在冷冻面条中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013; 36-38.