

张宏远, 木泰华, 马梦梅. 马铃薯淀粉凝胶形成及其品质影响因素研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 450–456. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010181

ZHANG Hongyuan, MU Taihua, MA Mengmei. Formation of Potato Starch Gel and Influencing Factors of Its Quality-A Review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 450–456. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010181

· 专题综述 ·

马铃薯淀粉凝胶形成及其品质影响因素研究进展

张宏远, 木泰华*, 马梦梅*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘要: 马铃薯淀粉黏度高、易糊化, 淀粉糊稳定性及透明度高, 被广泛应用于各类凝胶制品的加工中。温度、pH 等环境因素以及盐类、多糖、蛋白质等食用成分对马铃薯淀粉的糊化特性及淀粉凝胶的回生特性、流变特性、微观结构等影响不同, 进而影响马铃薯淀粉凝胶制品的品质。本文在分析马铃薯淀粉凝胶形成机制的基础上, 综述了不同环境因素及食用成分对马铃薯淀粉凝胶品质特性的影响规律, 揭示了不同食用成分与马铃薯淀粉分子之间的相互作用原理。旨在为高品质、高营养马铃薯淀粉凝胶及其制品的研究与工业化生产提供参考。

关键词: 马铃薯淀粉, 凝胶, 环境因素, 食用成分

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)23-0450-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010181

本文网刊:



Formation of Potato Starch Gel and Influencing Factors of Its Quality-A Review

ZHANG Hongyuan, MU Taihua*, MA Mengmei*

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

Abstract: Potato starch has been widely used in the processing of various gel products due to its high viscosity, easy gelatinization and high stability and transparency of starch paste. Environmental factors, such as temperature and pH, as well as edible components, such as salts, polysaccharides, and proteins exhibits different effects on the pasting properties of potato starch and the retrogradation properties, rheological properties and microstructure of starch gel, which in turn affects the quality of potato starch gel products. Based on the analysis of the formation mechanism of potato starch gel, the influence of different environmental factors and edible components on the quality characteristics of potato starch gel are summarized in this paper, and the interaction principles between different edible components and potato starch molecules are revealed. The objective is to provide reference for the research and industrial production of high-quality, high-nutrition potato starch gel and its products.

Key words: potato starch; gel; environmental factors; edible components

我国马铃薯资源丰富, 据 FAO 统计, 2020 年我国马铃薯种植面积和产量分别为 421.8 万公顷和 0.78 亿吨, 均居世界首位, 在国民经济发展中发挥着重要作用。马铃薯块茎含有丰富的淀粉, 含量达

12%~22%(wt)^[1]。与玉米、小麦淀粉相比, 马铃薯淀粉颗粒粒径较大、支链淀粉含量较高、直链淀粉聚合度高、分子量大^[2]、持水性较强, 且含有天然的磷酸酯基团, 因此具有黏度高、易糊化且淀粉糊稳定性及

收稿日期: 2022-01-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32172250); 高端外国专家引进计划。

作者简介: 张宏远 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: zhanghy634278399@163.com。

* 通信作者: 木泰华 (1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: mutaihua@126.com。

马梦梅 (1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: meimei881020@163.com。

透明度高等优点^[3-4]。现阶段, 马铃薯淀粉主要用于加工凝胶制品及作为改性淀粉的原料^[5], 其中马铃薯淀粉凝胶作为重要的多糖类凝胶, 其特性与产品品质具有密切联系。因此, 明确马铃薯淀粉凝胶的形成机制及其品质特性的影响因素至关重要。本文通过对马铃薯淀粉凝胶形成机制以及影响其品质特性的环境因素、其他食用成分进行系统性总结与论述, 以期为高品质、高营养马铃薯淀粉凝胶及其制品的研究与生产提供参考。

1 马铃薯淀粉凝胶形成机制

1.1 淀粉糊化

常温下, 淀粉不溶于水, 在冷水中以悬浮液形式存在, 淀粉颗粒会发生有限和可逆的膨胀(图 1)。加热时, 水分子首先进入淀粉非晶区, 非晶区膨胀并将分裂力传递到结晶区, 当到达一定温度时, 淀粉吸水膨胀, 结晶区和非结晶区的淀粉分子间氢键断裂, 水和淀粉分子之间形成氢键, 淀粉发生糊化。在此过程中, 淀粉微晶熔化, 淀粉颗粒的分子顺序、结构和双折射特性发生改变, 淀粉溶解^[6]。

马铃薯淀粉分子结构中含有磷酸酯基团(占葡萄糖单位的 0.2%~0.4%), 磷酸酯键之间相互排斥, 将通过削弱结晶区内的结合程度来增加水合作用, 使马铃薯淀粉具有较高的溶胀能力^[7-8]。同时, 淀粉糊化程度与温度、湿度、加热速率有关, 同时受直链淀粉、支链淀粉的比例影响^[9-10]。

1.2 淀粉回生

淀粉回生是糊化淀粉中的直链淀粉和支链淀粉

因水分迁移而重结晶, 显著影响淀粉凝胶制品的质构特性(图 1)。回生过程中, 直链淀粉与支链淀粉有序重组, 使得淀粉凝胶结晶度和硬度增加^[11]。回生分为短期回生和长期回生, 短期回生主要是直链淀粉分子间的定向移动聚集形成的三维网状结构, 主要发生在淀粉糊的早期降温过程中; 长期回生发生在淀粉糊化后几天甚至几周, 主要是后期淀粉分子内支链淀粉聚集, 从而进一步增加淀粉凝胶的硬度, 这是最主要的回生方式^[12-13]。支链淀粉回生的程度取决于储藏时间、温度、淀粉浓度以及支链淀粉的精细程度, 例如, 聚合度小于 10 的淀粉不易发生回生, 而聚合度在 18~25 的淀粉更容易回生^[14]。

与小麦、大米、玉米、豌豆等其他淀粉相比, 马铃薯淀粉分子量大、支链淀粉含量较高、直链淀粉聚合度高(表 1)^[15], 因此其初始糊化温度较低(56~66 ℃), 淀粉糊黏度较高, 回生速率快。已有研究表明, 环境因素及不同食用成分会通过影响淀粉的糊化及回生特性来赋予凝胶不同的质构特性, 最终决定着淀粉类凝胶制品的品质和口感。

2 马铃薯淀粉凝胶品质的影响因素

2.1 环境因素对马铃薯淀粉凝胶品质的影响

2.1.1 温度 在淀粉糊化过程中, 淀粉的膨胀力随着温度的升高而增加, 当温度高于淀粉糊化温度时, 淀粉的膨胀程度更加显著。然而, 在较高的淀粉浓度下, 由于淀粉的拥挤作用其膨胀程度受到抑制^[16]。Torres 等^[17]研究了不同温度(54、58、65、70、80、85、90 ℃)对马铃薯淀粉凝胶硬度的影响, 结果显示, 马

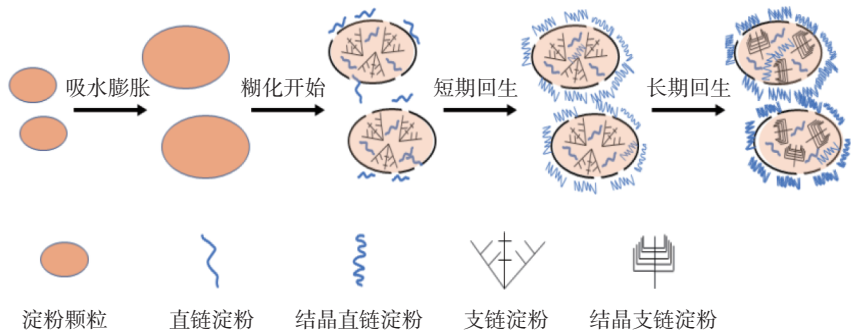


图 1 马铃薯淀粉糊化回生假想机制图^[12-13]

Fig.1 Hypothetical mechanism diagram of gelatinization-retrogradation of potato starch^[12-13]

表 1 不同来源淀粉直径、直链及支链淀粉平均聚合度等结构信息^[15]

Table 1 Structure information, including diameter, average polymerization degree and chain length of amylose and amylopectin, etc., of starches from different cultivars^[15]

指标	马铃薯淀粉	小麦淀粉	大米淀粉	玉米淀粉	豌豆淀粉
颗粒直径范围(μm)	10~100	2~10, 22~36	3~8	6~17	2~41
支链淀粉含量(%)	89, 79~82	75, 74	72~89, 87	77, 71, 66	70, 61~63
支链淀粉平均聚合度	11200	5000~9400, 13000~18000	8200~10900	15900	n.d.
支链淀粉平均链长	23, 26	19~21, 19~20	18~19, 17~18	20	22, 23~24
直链淀粉含量(%)	11, 18~21	25, 26	11~28, 13	23, 29, 34	30, 37~39
直链淀粉平均聚合度	4920, 8025	1290, 1200~1500	1110, 980~1110	960, 990	1300~1350, 1400
直连淀粉平均链长	670	300, 250~320	230~370, 320	335	340

注: n.d., 未测出。

铃薯淀粉的峰值糊化温度为 58 ℃, 当温度低于 58 ℃ 时, 淀粉凝胶网络未完全形成, 此时凝胶硬度较低; 当温度高于 58 ℃ 时, 淀粉凝胶硬度呈先增加后降低的趋势, 在 70 及 80 ℃ 时达到最大值, 而加热温度进一步增加至 85、90 ℃ 时, 凝胶硬度逐渐下降; 这可能是因为更高的加热温度使样品发生降解, 随后形成非碳水化合物聚合物, 导致硬度下降^[17-18]。Malumba 等^[19] 分析了加热速率(0.5、2、5 K/min)对马铃薯淀粉-水体系理化特性的影响, 结果显示, 马铃薯淀粉的糊化温度(59.27、59.48、60.59 ℃)、糊化焓(10.27、13.68、17.28 ℃)及所得淀粉凝胶的硬度(12.46、19.88、41.15 N)均与加热速率呈正相关关系。

除淀粉糊化外, 温度也是调控淀粉老化的一个重要因素, 且不同温度会影响淀粉分子在老化过程中的成核类型, 进而影响老化速率。Jiang 等^[20-21] 研究了温度对马铃薯淀粉回生的影响, 结果显示, 在亚冻结温度(-3 ℃)下, 所得凝胶具有良好的强度和弹性, 且凝胶中无大冰晶生成, 微观结构更加完整; 当温度为-6~-18 ℃ 时, 淀粉凝胶的网络结构被冰晶破坏, 孔隙结构处于无序状态; 温度进一步增加至 25 ℃ 时, 淀粉分子内部不稳定, 回生程度低。

由此可见, 糊化及老化温度是影响马铃薯淀粉凝胶品质的关键因素, 温度过低或过高均不利于淀粉凝胶的形成。因此, 确定不同品种、不同浓度马铃薯淀粉以及添加不同食用成分的马铃薯淀粉的起始与峰值糊化温度、样品热降解温度, 以及老化温度等^[22], 对高品质马铃薯淀粉凝胶配方及工艺研究具有重要的参考价值。

2.1.2 pH 与低磷酸化的大米和玉米淀粉相比, 马铃薯淀粉磷酸化程度高, 磷酸酯基团为单酯化, 其糊化、回生特性更易受酸碱度的影响, 然而, 磷酸酯基团对马铃薯淀粉凝胶特性的影响通常被忽视或低估^[22]。马铃薯淀粉上带负电的磷酸酯基团主要在葡萄糖残基的 C-6 和 C-3 位置与支链淀粉结合, 所产生的静电斥力可能会阻碍双螺旋的形成^[23]。在 pH<5 时或 pH>8 时, 马铃薯淀粉的峰值粘度降低, 凝胶性较弱, 不易回生; pH 在 5~8 时, 马铃薯淀粉凝胶性较强, 容易回生, pH 为 6 时凝胶强度最大^[24-25]。蜡质马铃薯淀粉在中性和碱性条件下由于分子间静电斥

力, 支链淀粉的回生能力被阻碍, 将 pH 降低至 4 时, 蜡质马铃薯淀粉分子间排斥力减弱, 能够形成高强度的凝胶^[23]。

过高或过低的 pH 可通过影响马铃薯淀粉磷酸酯基团的电荷来改变淀粉分子之间的静电相互作用, 从而影响淀粉的糊化及回生特性。然而, 关于 pH 对回生支链淀粉凝胶强度影响的报道并不一致, 这可能源于不同淀粉中磷酸酯基团含量的差异。因此, 从不同品种马铃薯支链淀粉与磷酸酯基团含量的差异性角度来研究 pH 对马铃薯淀粉凝胶品质的影响至关重要。环境因素对马铃薯淀粉凝胶品质的影响总结见表 2。

2.2 不同食用成分对马铃薯淀粉凝胶品质的影响

2.2.1 盐类 盐离子与马铃薯淀粉之间通过静电相互作用及竞争体系中可利用水的含量等方式, 来改变淀粉-盐络合物与溶剂的相互作用, 进而影响淀粉糊化与凝胶化的速率和程度, 且与盐离子的种类及浓度有关^[26]。

在糊化过程中, 阳离子通过屏蔽磷酸酯基团上的负电荷来减少马铃薯淀粉的膨胀及水合作用, 进而降低淀粉糊的粘度, 且二价和三价阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+})对马铃薯淀粉糊化的影响程度大于一价阳离子(Na^{+} 、 K^{+}), 这可能是因为多价阳离子不仅可以屏蔽磷酸酯基团上的负电荷, 还可以交联两个相邻的磷酸酯基团^[15,27]。在回生过程中, 阳离子对马铃薯淀粉凝胶强度的影响顺序为: 三价阳离子(Fe^{3+} 、 Al^{3+})>二价阳离子(Ca^{2+} 、 Cu^{2+})>一价阳离子(Na^{+}), 这可能是因为马铃薯支链淀粉的磷酸酯基团与阳离子交联形成络合物, 降低了淀粉分子之间的聚集以及体系中水的流动性, 提高了淀粉凝胶网络的强度和刚性; 同时, 硫酸铁、氯化铁、硫酸铝钾中三价阳离子对凝胶强度的影响与其浓度呈正相关关系, 即添加量从 1% 增大至 5%(淀粉干基)时, 凝胶强度显著增强; 硫酸亚铁、柠檬酸亚铁二价阳离子对凝胶强度的影响与浓度呈负相关关系; 而氯化钠、氯化钙对凝胶强度的影响与浓度无关^[28]。

另一方面, 盐对络合物-溶剂相互作用的影响在很大程度上与阴离子有关^[29]。阴离子对淀粉凝胶的影响符合 Hofmeister 序列, 其中盐析离子具有强烈

表 2 环境因素对马铃薯淀粉凝胶品质的影响

Table 2 Effect of environmental factors on gel quality of potato starch

因素	条件	影响结果	可能的机理解析
糊化温度	低于峰值糊化温度	凝胶硬度低	淀粉凝胶网络的形成或样品热降解 ^[17]
	高于峰值糊化温度	凝胶硬度最高	
	更高温度	凝胶硬度下降	
老化温度	-6~-18 ℃	凝胶强度低, 弹性差	冰晶尺寸影响凝胶结构, 温度高时淀粉分子内部不稳定 ^[20-21]
	亚冻结温度	凝胶弹性及强度良好	
	25 ℃	凝胶强度低, 弹性差	
pH	<5 或 >8	峰值粘度降低, 不易回生	pH 通过影响淀粉磷酸酯基团的电荷分布来改变淀粉体系的静电相互作用 ^[23-25]
	5~8	凝胶性强, 易回生	

的水化作用,以稳定蛋白质和大分子,例如 F^- 、 SO_4^{2-} ; 盐溶离子会破坏折叠蛋白质的稳定性^[30-31],例如 Br^- 、 NO_3^- 、 I^- 、 SCN^- 。Zhou 等^[32]、Wang 等^[33] 研究发现,盐析离子(0.1 mol/L, F^- 和 SO_4^{2-})对马铃薯淀粉颗粒结构具有保护作用,能够显著降低马铃薯淀粉的溶解度、冻融稳定性、膨胀力、透明度和粒径,同时促进直链淀粉溶出,提高马铃薯淀粉凝胶的强度以及最大弹性模量(G')和损耗模量(G''),而盐溶离子(Br^- 、 NO_3^- 、 SCN^- 和 I^-)与盐析离子相反,这主要是因为盐析效应可增强直链淀粉链间的聚集,形成三维网络结构^[32-33]。

由上可知,阳离子通过屏蔽马铃薯淀粉磷酸酯基团的负电荷以及与磷酸酯基团交联提高凝胶网络的稳定性。阴离子通过增强直链淀粉链间的聚集,形成三维网络结构,提高凝胶品质。此外,盐的种类与浓度对马铃薯淀粉凝胶品质的影响密切相关,而目前关于不同浓度对马铃薯淀粉凝胶的品质影响机制研究较少。

2.2.2 氨基酸 氨基酸含有氨基和羧基,具有两亲性,可与淀粉的羟基相互作用,改变环境 pH,进而影响淀粉的膨胀能力、糊化、回生以及淀粉粉团的流变学性能^[34-35]。目前,已有研究学者探讨了不同浓度(0.05、0.1 及 0.2 mol/kg)碱性氨基酸(精氨酸、赖氨酸)、酸性氨基酸(谷氨酸、天冬氨酸)及中性氨基酸(苯丙氨酸、甲硫氨酸、半胱氨酸)对马铃薯淀粉膨胀能力、直链淀粉浸出率、脱水率、淀粉凝胶强度与粘弹性等的影响。结果显示,酸性氨基酸,如谷氨酸、天冬氨酸添加量从 0.05 mol/kg 提高至 0.2 mol/kg 时,马铃薯淀粉的粒径、膨胀力及凝胶强度逐渐降低,糊化温度逐渐增大,这是因为在马铃薯淀粉溶液中加入酸性氨基酸,使更多的氢离子进入淀粉颗粒内部,降低负电荷数量和淀粉颗粒之间的排斥力,进而降低淀粉凝胶强度。然而,碱性氨基酸,如精氨酸,对马铃薯淀粉的上述特性有相反的影响^[36-37]。

与中性氨基酸相比,添加酸性与碱性氨基酸均可降低马铃薯淀粉凝胶的弹性模量(G')与损耗模量(G''),这是因为在淀粉-氨基酸系统中,酸性或碱性氨基酸可以通过与直链淀粉-直链淀粉相互作用的竞争来减少或阻止直链淀粉之间的关联,淀粉糊网络结构的分子缠结被削弱,导致在频率扫描期间 G' 的降低^[37-38]。值得注意的是,虽然赖氨酸也是碱性氨基酸,但与精氨酸相比,其 pH 更接近中性,因此对马铃薯淀粉影响较小^[36-37]。此外,也有研究表明,湿热(100 °C, 12 h)和退火(50 °C, 水浴 12 h)处理通过促进马铃薯淀粉-氨基酸体系中淀粉分子链重排、抑制淀粉颗粒分散与膨胀等来加快淀粉回生,且湿热处理的影响效果显著大于退火处理^[34,39-40]。

综上所述,碱性氨基酸通过限制直链淀粉的浸出,促使其形成稳定的网络,提高凝胶强度。然而,氨基酸的加入影响淀粉体系的 pH,受马铃薯磷酸酯基

团的影响,进而影响凝胶的粘弹性。因此,结合 pH 研究不同氨基酸种类对马铃薯淀粉凝胶品质的影响规律可能具有重要意义。

2.2.3 蛋白质 在热机械过程中,蛋白质与淀粉可能发生三种类型的相互作用:蛋白质在淀粉颗粒表面的渗透和物理吸附、蛋白质在连续相中的聚集、淀粉分子和蛋白质之间的共价和非共价结合,从而赋予食品不同的质构特性、力学性能、营养特性和消化特性^[41-42]。作为生物大分子,淀粉和蛋白质可通过氢键、静电力、范德华力等形成不同的凝胶,且蛋白质的种类、浓度对淀粉以及淀粉-蛋白体系的糊化、凝胶化、流变学特性和微观结构具有重要作用^[43]。例如, Villanueva 等^[44] 研究发现,与不含蛋白质的马铃薯淀粉凝胶相比,加热条件下,添加大豆分离蛋白可增加淀粉的稳定性和凝胶强度,这是因为蛋白质中存在极性氨基酸,淀粉通过竞争吸附糊化过程中的可吸收的水分,进而降低淀粉凝胶的粘度。添加大豆分离蛋白可增加淀粉的吸水能力和膨胀力,这主要归因于蛋白的加入降低了直链淀粉的析出,促进淀粉膨胀^[44]。此外,在加热过程中,酪蛋白和乳清蛋白可对马铃薯淀粉的糊化产生重要影响,表现在减小糊化温度、降低淀粉凝胶焓、显著抑制淀粉颗粒膨胀等,主要是因为酪蛋白对淀粉颗粒表面具有物理吸附特性,乳清蛋白也可以形成聚集体,并根据加工条件以连续相或分散相存在^[45]。酪蛋白通常以酪蛋白酸钠或酪蛋白酸钙、酸性酪蛋白的形式使用,当添加酪蛋白酸盐/淀粉比例为 1:1(w/w)时,马铃薯淀粉凝胶的储能模量(G')降低,这可能是因为酪蛋白的氨基以及盐离子与马铃薯淀粉的磷酸酯基团之间存在相互作用^[46-47]。Lavoisier 等^[48] 研究发现乳清蛋白(10%, w/v)加热到 80 °C 能够形成蛋白质网络,冷却后能够与马铃薯淀粉(1%)分散液形成稳定的冷凝胶,更高浓度(9%)的马铃薯淀粉能够提高复合凝胶硬度,可能是由于乳清蛋白和马铃薯淀粉凝胶之间形成了一个互穿网络。

值得注意的是,蛋白质对马铃薯淀粉凝胶强度的影响也与蛋白质等电点有关。Villanueva 等^[49] 研究发现,90 °C 时,添加大豆分离蛋白(2%, w/v)提高了马铃薯淀粉的弹性模量和损耗模量,当 pH 下降到 4.5 时,无论是否添加蛋白,弹性模量和损耗模量均下降,这意味着酸化破坏了凝胶网络结构。这是因为大豆分离蛋白-淀粉分散体的酸化促进了大豆分离蛋白(pI4.5~5.0)电荷的变化,导致蛋白-蛋白相互作用的强度降低,与介质接触的表面增加,同时,由于马铃薯淀粉的磷酸酯基团的存在也易受到酸碱度的影响^[50]。然而当加热温度为 120 °C 时,与 90 °C 时研究结果相反。蛋白质对马铃薯淀粉的影响主要是由于蛋白质本身具有凝胶特性,通过自身形成凝胶网络,或与淀粉形成互穿网络影响淀粉凝胶的结构及稳定性,而目前研究中蛋白的添加量往往较高,而较低浓度的蛋白对马铃薯淀粉凝胶的影响研究较少。同

表 3 不同食用成分对马铃薯淀粉凝胶品质的影响

Table 3 Effects of different edible ingredients on the gel quality of potato starch

因素	条件	影响结果	可能的机理解析
盐离子	阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Na^{+} 、 K^{+})	多价阳离子提高了淀粉凝胶网络的强度和刚性	阳离子屏蔽磷酸酯基团上的负电荷或交联(多价阳离子)两个相邻的磷酸酯基团 ^[15,27]
	阴离子(F^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Br^{-} 、 NO_3^{-} 、 SCN^{-} 、 I^{-})	盐析离子促进直链淀粉析出,提高凝胶强度与弹性模量,盐溶离子作用相反	盐析效应可增强直链淀粉链间的聚集,形成三维网络结构 ^[32-33]
氨基酸	酸性氨基酸	降低粒径、膨胀力与凝胶强度,提高糊化温度	带电氨基酸与磷酸酯基团的静电作用和直链淀粉析出 ^[37-38]
	碱性氨基酸	提高粒径、膨胀力与凝胶强度,降低糊化温度	
	中性氨基酸	无显著影响	
蛋白质	大豆分离蛋白	增加淀粉的稳定性和凝胶强度,pH在等电点附近时淀粉凝胶被破坏	蛋白质通过竞争水分,氨基以及盐离子与马铃薯淀粉的磷酸酯基团之间的相互作用或蛋白单独形成聚集体的能力等方式影响凝胶强度;pH在等电点附近时,酸化改变蛋白电荷分布,降低凝胶强度 ^[44-50]
	酪蛋白酸钠	储能模量(G')降低	
	乳清蛋白	形成稳定的冷凝胶,提高复合凝胶硬度	
亲水胶体	中性亲水胶体	增加了分散体的凝胶强度	亲水胶体与淀粉磷酸酯基团的静电排斥,或亲水胶体自身的粘度使淀粉体系结合紧密 ^[23,54,57]
	阴离子亲水胶体	对凝胶强度的影响与不同种类亲水胶体浓度有关	

时,后续研究不同种类蛋白质对淀粉凝胶的影响时,需根据淀粉凝胶应用到具体食品体系的 pH 以及加热温度来合理选择蛋白质种类及添加量。

2.2.4 亲水胶体 亲水胶体具有良好的水结合能力,可以通过减少淀粉-水体系中水的体积分数、限制水的可用性与流动性来抑制淀粉颗粒的糊化和膨胀,从而改变淀粉的糊化和回生模式^[48]。目前,亲水胶体已被广泛用于淀粉类食品的配方中,以改变淀粉的性质和功能,特别是延缓淀粉回生和提高冻融稳定性,还被用于开发低热量淀粉食品^[51-52]。

Fang 等^[23]研究了蜡质马铃薯淀粉在中性(瓜尔胶和魔芋葡甘露聚糖)和阴离子亲水胶体(阿拉伯胶、黄原胶、海藻酸钠和果胶)存在下形成凝胶的流变特性,并研究了蜡质马铃薯淀粉(10%, w/w)/亲水胶体(1%, w/w)分散体在 5 ℃ 下以 20 s⁻¹ 的剪切速率 24 h 内的凝胶强度变化。结果表明,在 5 ℃ 下,未添加剪切力时,含有刚性链黄原胶的分散体,具有更好的弹性,这可归因于黄原胶与支链淀粉的热力学不相容性导致的相分离和淀粉网络形成有关。通过长期应用低剪切力,中性的亲水胶体(瓜尔胶和魔芋葡甘露聚糖)增加了分散体的凝胶强度,这是因为 ζ 电位低,降低了淀粉-水胶体体系的静电排斥,而带负电的阴离子亲水胶体(阿拉伯胶、海藻酸钠、果胶和黄原胶)由于增大了静电排斥,会降低凝胶强度^[23]。Dobosz 等^[53]在研究黄原胶(0.05% 和 0.2%, 淀粉干基)对马铃薯淀粉与蜡质马铃薯淀粉(4%、5%、6%)回生特性影响的过程中,发现无论直链淀粉含量如何,黄原胶的加入都促进了两种淀粉凝胶网络的形成,从而加速了淀粉的短期回生;然而黄原胶分别促进和抑制了蜡质马铃薯淀粉和正常马铃薯淀粉凝胶的长期回生,这与马铃薯淀粉的支链淀粉所带磷酸酯基团有关。

海藻酸钠是一种多羟基化合物,由海藻酸和氢氧化钠中和而成,在食品工业中常用作增稠剂和胶凝剂。已有研究探讨了海藻酸钠(2%, 淀粉干基)对马

铃薯淀粉糊化、冻融稳定性,以及储藏过程中回生特性的影响。结果显示,由于海藻酸钠具有增稠特性,直链淀粉的浸出降低了 6.47%,限制直链淀粉之间的相互作用,增加淀粉糊化过程中对热和机械剪切力的抵抗力,马铃薯淀粉的糊化温度提高了 3.15 ℃,并降低短期回生^[54]。在储藏过程中,马铃薯淀粉凝胶强度、回生率提高了 3.8%;相对结晶度降低了 3.9%,冻融稳定性提高,这可能是由于连续相的粘度增加,海藻酸钠与淀粉相互作用,增加了体系静电斥力,抑制了马铃薯淀粉的长期回生,而海藻酸钠属于阴离子多糖,其可能通过吸附邻近水分子,限制水分子的移动,阻碍水转移形成冰晶^[55-56]。同时,当海藻酸钠添加量(5%、10%、15%、20%)提高时,马铃薯淀粉凝胶的强度和弹性随之提高,这是因为添加更多的海藻酸钠,使得淀粉凝胶体系结合的更紧密^[57]。

亲水胶体对马铃薯淀粉凝胶的影响与胶体的带电性质以及添加量有关,较低添加量使带负电的亲水胶体增加体系静电排斥,延缓回生,降低凝胶强度,而较高添加量时由于胶体的水合与粘性作用,使凝胶体系更加紧密。不同食用成分对马铃薯淀粉凝胶品质的影响总结见表 3。

3 结论与展望

马铃薯淀粉由于其独特的结构及优良的品质,在淀粉行业占据着重要的地位,且环境因素与食用成分对马铃薯淀粉及凝胶品质的影响显著。然而,随着研究的不断深入和消费者对食品品质、营养的要求日渐提高,马铃薯淀粉凝胶在食品中的应用在未来仍有极大的提升空间:a.环境因素及食用成分对马铃薯淀粉凝胶制品,如粉条、粉丝,尤其是高水分淀粉凝胶制品(水分含量>50%)质构及感官特性的影响有待系统研究;b.环境因素及食用成分对马铃薯淀粉凝胶及其制品形成的机制有待阐明,例如,从宏观、介观、微观角度出发,研究环境因素及食用成分对马铃薯淀粉凝胶气孔界面结构、分子内及分子间相互作用力、水分分布、凝胶粒子颗粒特性等的影响规律。

参考文献

- [1] 黄凤玲, 张琳, 李先德, 等. 中国马铃薯产业发展现状及对策[J]. 农业展望, 2017, 13(1): 25-31. [HUANG F L, ZHANG L, LI X D, et al. Development situation and countermeasures of China's potato industry[J]. Agricultural Outlook, 2017, 13(1): 25-31.]
- [2] 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.
- [3] NODA T, TAKIGAWA S, MATSUURA-ENDO C, et al. Physicochemical properties and amylopectin structures of large, small, and extremely small potato starch granules[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 60(2): 245-251.
- [4] 孟杰, 云雪艳, 陈倩茹, 等. 沙蒿籽胶对马铃薯淀粉凝胶的热学性能、质构特性、流变特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 66-74. [MENG J, YUN X Y, CHEN Q R, et al. Effects of artemisia sphaerocephala krasch gumon on the thermal, textural and rheological properties of potato starch gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 66-74.]
- [5] 程晓惠, 李琳, 肖帅, 等. 马铃薯主食化的问题与对策研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(1): 12-14. [CHENG X H, LI L, XIAO S, et al. Problems and countermeasures of using potato as staple food[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(1): 12-14.]
- [6] ALVANI K, TESTER R F, LIN C L, et al. Amylolysis of native and annealed potato starches following progressive gelatinisation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 36: 273-277.
- [7] SANDHU K S, KAUR M, MUKESH. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1289-1293.
- [8] GOMAND S V, LAMBERTS L, DERDE L J, et al. Structural properties and gelatinisation characteristics of potato and cassava starches and mutants thereof[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(4): 307-317.
- [9] HOOVER R. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 50(9): 835-847.
- [10] DHITAL S, SHRESTHA A K, HASJIM J, et al. Physicochemical and structural properties of maize and potato starches as a function of granule size[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(18): 10151-10161.
- [11] DONG R, NIU Q, ZHANG K, et al. The effect of retrogradation time and ambient relative humidity on the quality of extruded oat noodles[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(6): 2940-2949.
- [12] CHEN B, WANG Y-R, FAN J L, et al. Effect of glutenin and gliadin modified by protein-glutaminase on retrogradation properties and digestibility of potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125226.
- [13] CHEN Y F, SINGH J, ARCHER R. Potato starch retrogradation in tuber: Structural changes and gastro-small intestinal digestion *in vitro* [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 552-560.
- [14] 徐芬, 刘伟, 刘倩楠, 等. 不同糊化度马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 42-50. [XU F, LIU W, LIU Q N, et al. Viscosity and gelling properties of potato starch with different degrees of gelatinization[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 42-50.]
- [15] REYNIER S, OOMS N, GOMAND S V, et al. What makes starch from potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers unique: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2588-2612.
- [16] DESAM G P, LI J, CHEN G, et al. Swelling kinetics of rice and potato starch suspensions[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(4): e13353.
- [17] TORRES M D, CHENLO F, MOREIRA R. Rheological effect of gelatinization using different temperature-time conditions on potato starch dispersions: Mechanical characterization of the obtained gels[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(1): 132-140.
- [18] HAN H, HOU J, YANG N, et al. Insight on the changes of cassava and potato starch granules during gelatinization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 126: 37-43.
- [19] MALUMBA P, DORAN L, DANTHINE S, et al. The effect of heating rates on functional properties of wheat and potato starch-water systems[J]. *LWT*, 2018, 88: 196-202.
- [20] JIANG J, GAO H, ZENG J, et al. Determination of subfreezing temperature and gel retrogradation characteristics of potato starch gel[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 112037.
- [21] JIANG J, ZENG J, GAO H, et al. Effect of low temperature on the aging characteristics of a potato starch gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 519-527.
- [22] FANG F, LUO X, FEI X, et al. Stored gelatinized waxy potato starch forms a strong retrograded gel at low pH with the formation of intermolecular double helices[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(13): 4036-4041.
- [23] FANG F, LUO X, BEMILLER J N, et al. Neutral hydrocolloids promote shear-induced elasticity and gel strength of gelatinized waxy potato starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105923.
- [24] 马冰洁, 唐洪波, 马玲. 马铃薯淀粉糊的黏度性质[J]. 东北林业大学学报, 2006(4): 73-75. [MA B J, TANG H B, MA L. Viscosity property of potato starch paste[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006(4): 73-75.]
- [25] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 22-27. [LÜ Z L, LI G Q, CHEN H H. Gelatinization and gel properties of potato starch[J]. Food & Machinery, 2010, 26(3): 22-27.]
- [26] ZHANG X, GUO D, XUE J, et al. The effect of salt concentration on swelling power, rheological properties and saltiness perception of waxy, normal and high amylose maize starch[J]. *Food & Function*, Cambridge: Royal Soc Chemistry, 2017, 8(10): 3792-3802.
- [27] CHUANG L, PANYOYAI N, KATOPO L, et al. Calcium chloride effects on the glass transition of condensed systems of potato starch[J]. *Food Chemistry*, Oxford: Elsevier Sci Ltd., 2016, 199: 791-798.
- [28] CHEN Y, WANG C, CHANG T, et al. Effect of salts on textural, color, and rheological properties of potato starch gels[J]. *Starch-Starke*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2014, 66(1-2): 149-156.
- [29] LI Q, ZHANG L, YE Y, et al. Effect of salts on the gela-

tinization process of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) starch with digital image analysis method[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 468–475.

[30] 李晓佩, 黄昆, 林洁媛, 等. Hofmeister 离子序列及其调控水溶液中高分子溶质行为的作用机制[J]. 化学进展, 2014, 26(8): 1285–1291. [LI X P, HUANG K, LIN J Y, et al. Hofmeister ion series and its mechanism of action on affecting the behavior of macromolecular solutes in aqueous solution[J]. *Progress in Chemistry*, 2014, 26(8): 1285–1291.]

[31] WANG W, ZHOU H, YANG H, et al. Effects of salts on the gelatinization and retrogradation properties of maize starch and waxy maize starch[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 319–327.

[32] ZHOU H, WANG C, SHI L, et al. Effects of salts on physicochemical, microstructural and thermal properties of potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2014, 156: 137–143.

[33] WANG W, ZHOU H, YANG H, et al. Effects of salts on the freeze-thaw stability, gel strength and rheological properties of potato starch[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2016, 53(9): 3624–3631.

[34] CHEN X, LUO J, LIANG Z, et al. Structural and physicochemical/digestion characteristics of potato starch-amino acid complexes prepared under hydrothermal conditions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145: 1091–1098.

[35] LIANG Z, CHEN X, LUO J, et al. Addition of amino acids to modulate structural, physicochemical, and digestive properties of corn starch-amino acid complexes under hydrothermal treatment[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 160: 741–749.

[36] CHEN W, ZHOU H, YANG H, et al. Effects of charge-carrying amino acids on the gelatinization and retrogradation properties of potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 180–184.

[37] WANG W, CHEN W, YANG H, et al. Textural and rheological properties of potato starch as affected by amino acids[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 20: S3123–S3134.

[38] CUI M, FANG L, ZHOU H, et al. Effects of amino acids on the physiochemical properties of potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 162–167.

[39] CHEN X, LUO J, FU L, et al. Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124957.

[40] FONSECA L M, HALAL S L M E, DIAS A R G, et al. Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 274: 118665.

[41] SARABHAI S, PRABHASANKAR P. Influence of whey protein concentrate and potato starch on rheological properties and baking performance of Indian water chestnut flour based gluten free cookie dough[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 1301–1308.

[42] SOPADE P A, HARDIN M, FITZPATRICK P, et al. Macromolecular interactions during gelatinisation and retrogradation in starch-whey systems as studied by rapid visco-analyser[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2006, 2(4): 7.

[43] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical

properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 154: 214–222.

[44] VILLANUEVA M, DE LAMO B, HARASYM J, et al. Microwave radiation and protein addition modulate hydration, pasting and gel rheological characteristics of rice and potato starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 201: 374–381.

[45] KUMAR L, BRENNAN M A, MASON S L, et al. Rheological, pasting and microstructural studies of dairy protein-starch interactions and their application in extrusion-based products: A review[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(1–2): 1600273.

[46] BERTOLINI A C, CREAMER L K, EPPINK M, et al. Some rheological properties of sodium caseinate-starch gels[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, American Chemical Society, 2005, 53(6): 2248–2254.

[47] ZALESKA H, RING S, TOMASIK P. Electrosynthesis of potato starch-casein complexes[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2001, 36(5): 509–515.

[48] LAVOISIER A, AGUILERA J M. Starch gelatinization inside a whey protein gel formed by cold gelation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 256: 18–27.

[49] VILLANUEVA M, RONDA F, MOSCHAKIS T, et al. Impact of acidification and protein fortification on thermal properties of rice, potato and tapioca starches and rheological behaviour of their gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79: 20–29.

[50] RIBOTTA P D, ROSELL C M. Effects of enzymatic modification of soybean protein on the pasting and rheological profile of starch-protein systems[J]. *Starch-Stärke*, Weinheim:Wiley-V C H Verlag GmbH, 2010, 62(7): 373–383.

[51] MAHMOOD K, KAMILAH H, SHANG P L, et al. A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications[J]. *Food Bioscience*, 2017, 19: 110–120.

[52] VARELA M S, NAVARRO A S, YAMUL D K. Effect of hydrocolloids on the properties of wheat/potato starch mixtures[J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(7–8): 753–761.

[53] DOBOSZ A, SIKORA M, KRZYSTYJAN M, et al. Influence of xanthan gum on the short- and long-term retrogradation of potato starches of various amylose content[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 102: 105618.

[54] ZHAO Y, CHEN H, WANG Y, et al. Effect of sodium alginate and its guluronic acid/mannuronic acid ratio on the physicochemical properties of high-amylose cornstarch[J]. *Starch-Stärke*, Weinheim: Wiley-V C H Verlag GmbH, 2016, 68(11–12): 1215–1223.

[55] YU Z, WANG Y S, CHEN H H, et al. Effect of sodium alginate on the gelatinization and retrogradation properties of two tuber starches[J]. *Cereal Chemistry*, 2018, 95(3): 445–455.

[56] XU Z, ZHONG F, LI Y, et al. Effect of polysaccharides on the gelatinization properties of cornstarch dispersions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(2): 658–664.

[57] 陈金玉, 张坤生, 王轻, 等. 马铃薯淀粉与食用胶共混体系流变特性与冻融稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 17–22. [CHEN J Y, ZHANG K S, WANG Q, et al. Rheological properties and freeze-thaw stability of potato starch and edible gum mixed system[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(11): 17–22.]