

淀粉和蛋白质影响小米蒸煮食用品质的研究进展

吕平^{1,2}, 刘建奎², 段晓亮², 张东², 赵璐瑶², 孙辉^{2*}

¹上海理工大学健康科学与工程学院 上海 200093

²国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 102629

摘要 小米是我国重要的粮食作物,其主要食用方式是做成粥和小米饭。系统分析小米的蒸煮食用品质及其形成机制具有重要意义。淀粉和蛋白质是小米的两个最主要的组分,与小米的蒸煮食用品质密切相关。本文对小米中淀粉和蛋白质的含量、组成、结构以及蛋白质-淀粉互作对小米蒸煮食用品质的影响研究进行归纳分析,旨在为小米食用品质评价及改善提供理论参考。

关键词 小米; 蒸煮品质; 食用品质; 淀粉; 蛋白质

文章编号 1009-7848(2023)08-0440-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.043

谷子起源于中国,已有 8 000 多年的栽培历史,广泛种植于干旱和半干旱地区,被东亚和中亚大部分地区作为主食食用^[1]。谷子脱壳即为小米,小米含有大约 70%的碳水化合物、12%的蛋白质、4%的脂质、8%的粗纤维等成分^[2]。此外,小米还具有多种保健作用,包括抗氧化、降血糖、降血脂、降血压、抗肿瘤等^[3]。

小米的食用方式以煮粥为主,也可做成小米饭,或与大米混合制作二米饭食用。小米的化学组成及其结构是影响小米蒸煮食用品质的关键因素。淀粉和蛋白质是小米中含量最高的两种组分,对小米的蒸煮食用品质影响较大。近年来关于淀粉和蛋白质对小米蒸煮食用品质的影响已有一些报道,如 Zhang 等^[4]发现蒸煮过程中小米内源性蛋白质限制了水分子与淀粉颗粒的结合,从而限制了淀粉颗粒的吸水和溶胀,促进淀粉分子的回生。Qi 等^[5]研究认为小米淀粉中较高的直链淀粉含量促进了淀粉的回生和更刚性凝胶网络的形成等。目前,有关淀粉和蛋白质对小米蒸煮食用品质的影响及其机理尚缺乏全面系统的分析。

本文对小米中淀粉和蛋白质的含量、组成、结构以及蛋白质-淀粉互作对小米蒸煮食用品质影响的研究进行归纳分析,旨在揭示淀粉和蛋白质

及两者互作对小米蒸煮品质的影响,为小米食用品质调控及产品开发提供科学依据,对推动小米产业高质量发展具有重要意义。

1 小米蒸煮食用品质概述

1.1 小米的蒸煮品质

小米的蒸煮食用品质主要通过糊化特性、胶稠度、碱消值等指标进行评价。糊化温度是确定谷物蒸煮品质好坏的一个重要指标,如谷物的糊化温度越高,蒸煮所需的时间越长,蒸煮品质和适口性越差^[6];而糊化温度低、最低黏度大、峰值黏度高的大米一般具有较好的食用品质^[7]。胶稠度以小米胶长度计量,反映米饭冷却后的柔软性^[8]。胶稠度高的小米,米胶较长,表明小米饭更加柔软且口感好;相反,胶稠度低的小米,米胶较短,表明小米饭相对较硬且口感差^[9]。碱消值反映的是碱溶液对谷物胚乳淀粉粒的消解程度,它与淀粉的结构和性质密切相关,通过测定小米粉的碱消值可以间接反映其糊化温度。研究发现,碱消值越低,通常糊化温度越高^[10]。

蒸煮品质也通常用来作为评价小米品质的重要指标,如 GB/T 19503-2008《地理标志产品 沁州黄小米》中规定一级和优级小米的直链淀粉含量为 14.0%~20.0%,胶稠度 ≥ 100 mm,糊化温度(碱消值)为 2.0~4.0 级;地方标准 DB13/T 1298-2019《地理标志产品蔚州贡米(蔚州小米)》中的一级小米要求胶稠度 ≥ 80 mm,碱消值 ≥ 2.0 级^[11]。有

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项课题(ZX1927, JY2103-1)

第一作者: 吕平,女,硕士

通信作者: 孙辉 E-mail: sh@ags.ac.cn

研究表明,优质小米具有中等偏高的米胶长度及中等偏低的糊化温度^[12]。胶稠度和碱消值虽在一定程度上能评价小米的品质,且操作简便,但影响因素较多,试验误差较大。

1.2 小米的食用品质

食用品质是评价小米品质最重要的指标,按评价的主体可分为感官评价和仪器评价2种。感官评价是小米食用品质评价最常见的方法,目前现行标准中只有国家标准 GB/T 19503-2008《地理标志产品 沁州黄小米》的附录中规定了小米的食味品质评定方法^[13],品评人员对小米饭和小米粥的气味、外观、滋味和适口性进行评价。也有依据 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》对小米饭的食用品质进行评价^[14]。感官评分是一种相对直观的方法,然而,由于个体差异和主观因素的影响,需要结合仪器评价来更客观地表征小米的食用品质。

小米食用品质的仪器评价主要是利用仪器对小米的适口性、风味以及色泽等进行评价。如,用电子舌区分不同口感等级的小米^[15],利用质构仪测定小米饭的质构特性^[16],用硬度黏度仪测定小米饭的质地^[17];用气相色谱质谱联用技术(Gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)可对小米粥的挥发性香气化合物进行鉴定^[18];用色差仪测定小米的色泽^[19]等。

单一方法一般较难准确评价小米的蒸煮食用品质,通常将感官评价和仪器评价结合起来综合评价小米的食用品质。如,张凡等^[15]采用模糊感官评定结合电子舌技术建立了一种小米粥的食味品质评价方法,发现电子舌可以区别出不同口感等级的小米粥;尹瑞旻等^[16]利用质构仪结合理化指标和感官评定结果建立了小米饭综合评定模型,发现小米(饭)的各项指标间存在显著相关性,且通过此评价模型可以对小米饭的食用品质进行客观评估。

通过综合评价小米的理化特性与蒸煮品质和感官品质之间的关联,也可以综合评价小米的食用品质。如,王玉文等^[19]利用色差仪结合蒸煮品质来评价小米饭的食用品质,发现小米的色泽对小米饭的适口性影响较大,且色泽好以及衰减值大、碱消值小的小米品种适口性好。也有研究将直链

淀粉的含量与快速黏度分析(Rapid viscosity analysis, RVA)特征值结合对小米品质进行鉴定,发现衰减值对不同小米品种具有较强的区分能力,而直链淀粉的含量也与衰减值呈极显著负相关^[20]。直链淀粉的含量与糊化特性中峰值黏度、最低黏度和最终黏度均呈显著负相关,与糊化温度呈显著正相关^[16],与小米粥的色泽、黏度、弹性、滋味及分层等感官指标也呈负相关^[21]。蛋白含量与小米粥的食味品质呈极显著负相关^[15]。由此可知,淀粉和蛋白质与小米的蒸煮食用品质相关,淀粉和蛋白质对小米蒸煮食用品质的影响机理还需进一步探究。

2 淀粉对小米食用品质的影响

淀粉作为小米的主要成分之一,在决定小米食用品质方面发挥着重要作用。小米淀粉含量为58.66%~78.85%,直链淀粉的含量为16.95%~28.34%^[22]。淀粉的含量(直链淀粉的含量尤为关键)和结构对谷物食用品质具有重要影响。

2.1 直链淀粉含量与小米食用品质的关系

一些研究者认为,直链淀粉含量与谷物的食用品质呈负相关关系^[23-24]。通常直链淀粉含量低的淀粉颗粒刚性较差,加热时容易膨胀,显示出高黏度;直链淀粉含量高的淀粉颗粒刚性强而硬,加热时不易膨胀,显示出低黏度^[23]。因此,低直链淀粉的米饭通常软而黏,而高直链淀粉的米饭则更硬且黏性较小^[23-24]。

小米中直链淀粉含量的高低是影响小米食味品质的重要因素之一,小米饭的柔软性、黏性、滋味、光泽及适口性评分与直链淀粉含量呈显著负相关关系^[25]。也有研究发现,高直链淀粉含量(>25%)的小米蒸煮后小米饭干燥蓬松、颜色暗淡、冷却后变硬;低直链淀粉含量(<18%)的小米蒸煮后小米饭比较黏湿、表面有光泽、冷却后仍然保持柔软;而中等直链淀粉含量(18%~25%)的小米蒸煮后小米饭能够同时保持高含量直链淀粉的蓬松和低含量直链淀粉的柔软^[26]。Cordelino等^[27]研究了直链淀粉含量对黍子面食蒸煮品质的影响,发现高直链淀粉的黍子面食表现出高的吸水率且需要更长的烹饪时间,较低直链淀粉含量的黍子面食表现出较低的硬度及咀嚼性和较高的黏性。因为

直链淀粉含量低的淀粉颗粒具有较多的孔洞,使淀粉颗粒膨胀,最终导致低直链淀粉的面食硬度降低^[28]。

也有研究证明,虽然直链淀粉含量是影响米饭质地的一个重要因素,但它并不是唯一决定性因素,即具有相似直链淀粉含量的大米品种,它们可能具有不同的糊化特性和质地特性^[29-30]。Ayabe等^[31]认为生米的表现直链淀粉含量与熟米的黏性没有直接关系,即当两种大米的直链淀粉含量相近时,熟米表面提取物中长链和短链支链淀粉的总量越高且直链淀粉越低的大米品种黏性越强。由此可推测,小米的食用品质不仅受直链淀粉含量决定,还可能与淀粉的精细结构有关。

2.2 淀粉分子结构对小米食用品质的影响

小米的淀粉与其它淀粉分子组成相似,按其结构可分为直链淀粉和支链淀粉,约占淀粉干重的98%~99%^[32]。直链淀粉是由 α -D-葡萄糖通过 α -1,4糖苷键连接而成的线性大分子,分子结构中含有还原端和非还原端^[33]。有研究表明,米饭的硬度与直链淀粉的含量无关,而与直链淀粉分子大小有关,直链淀粉分子较小的水稻品种在烹饪后质地更硬,即聚合度为1 000~2 000的直链淀粉所占淀粉的比例越高,米饭的硬度越高^[34]。直链淀粉分子可以限制米饭蒸煮过程中淀粉的膨胀和浸出,从而导致米饭质地更硬且黏性较小^[35]。

支链淀粉是D-葡萄糖通过 α -1,4糖苷键和 α -1,6糖苷键连接而成的带分支的复杂大分子^[36]。不同的支链淀粉结构可以解释为什么相同直链淀粉含量的小米具有不同的质地特性。大米的直链淀粉含量越高且支链淀粉长链较多,蒸煮出的米饭口感较硬^[37]。大米的支链淀粉短链比例较高可能导致更高的峰值黏度和衰减值,使米饭质地更柔软、更黏稠、口感更好^[38]。

直链淀粉和支链淀粉的复杂精细结构决定了淀粉的糊化特性存在较大差异^[39]。有研究者认为,小米的直链淀粉含量与淀粉溶胀力和凝胶硬度相关,而支链淀粉的支链长度分布与淀粉颗粒的糊化特性有关^[5]。支链淀粉含量较高的淀粉糊化温度低,可能是因为支链淀粉具有簇状结构和更多的分支,使其比直链淀粉更容易吸水 and 膨胀^[40]。淀粉的糊化温度随着支链链长的增加而升高^[41],短链

支链淀粉的存在会降低双螺旋的稳定性,这可能导致较低的糊化温度^[42];较长的支链淀粉有助于形成结构更有序、热稳定性更高的重结晶支链淀粉^[43],从而导致较高的糊化温度。因此,淀粉的支链淀粉分子结构可能导致糊化温度的差异。

Noda等^[44]比较了正常直链淀粉和低直链淀粉水稻品种在淀粉理化特性方面的差异,发现两者的支链淀粉链长分布特征相似,淀粉糊化特性却没有显著差异。由此可知,不同直链淀粉含量的小米品种在糊化特性上的差异,可能并不完全是由支链淀粉的链长决定。因此,直链淀粉含量相同或直链淀粉含量不同但是支链淀粉链长分布相似的小米在食用品质上的差异可能是多种因素综合作用的结果,仅通过小米淀粉的组成以及结构解析并不能阐明其食用品质差异的原因,还需要考虑其它因素的影响。

3 蛋白质对小米食用品质的影响

3.1 蛋白质在小米中的形态及分布

蛋白质是小米中的第2大组成成分,小米的粗蛋白含量为8.87%~16.25%^[45]。小米蛋白按溶解性不同可分为清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白,其中醇溶蛋白和谷蛋白占比较高,分别为45.6%和21.1%,清蛋白和球蛋白含量很少^[46]。

小米中的蛋白质主要以蛋白体的形式存在,它们通常位于淀粉粒之间的间隙或镶嵌于淀粉粒之间;且主要分布在胚乳外围,而中心部分则相对较少;其形状呈圆形或近似圆形,直径约在1.0~1.5 μm 之间^[47]。有研究表明,小米中醇溶蛋白、清蛋白以及球蛋白分子之间连接紧密,以聚集状态存在,而谷蛋白分子连接松散,表面光滑^[47]。小米醇溶蛋白组成较为简单,相对分子质量较小,在11~25 ku有3条谱带,其中17 ku处谱带明显;而小米谷蛋白的分子质量分布范围较宽,且主要集中在15~17 ku及25~35 ku范围^[48]。

3.2 小米蛋白与食用品质之间的关系

有研究将小米蛋白质的含量、组成及结构与小米的食用品质之间建立了一定的关联,以下分别从这3个方面进行介绍。

3.2.1 蛋白含量与小米食用品质的关系 目前,有关米类蛋白质含量与食用品质关系的报道主要

集中在大米上。有研究发现蛋白质含量与大米的食用品质呈负相关关系^[49],也有研究认为蛋白质含量过高或过低都会使稻米的蒸煮食味品质变差^[50]。蛋白质含量对食用品质各方面的影响不同,大米蛋白质的含量与米饭的气味、滋味、冷饭质地呈负相关关系;与米饭色泽、米粒外观、适口性呈正相关关系^[51]。因此,大米蛋白的含量与食用品质之间并不是简单的线性关系。

关于蛋白质含量对小米食用品质的影响也有报道。有研究发现,小米粥感官综合评分最高的小米品种的蛋白含量最低,且小米蛋白含量越高,小米的食味品质越低,表明小米粥的食味品质与蛋白含量呈极显著负相关关系^[15]。然而,古世禄等^[52]研究发现平均蛋白质含量为 11.83% 的 7 个一级优质小米品种的平均品评评分为 87.83,平均蛋白质含量为 11.39% 的 10 个二级优质小米品种的平均品评评分为 79.72,然而蛋白质含量与小米食用品质之间的关系尚无明确结论,还需要进一步研究。

3.2.2 蛋白组分和结构对小米食用品质的影响

3.2.2.1 醇溶蛋白的影响

醇溶蛋白作为小米蛋白的主要组分,在小米的食用品质中发挥着重要作用。醇溶蛋白位于蛋白体内,被小米胚乳中的淀粉颗粒紧紧包裹^[53]。醇溶蛋白是一种含有大量疏水性氨基酸的蛋白质,它是由分子内和分子间二硫键连接而成的低聚物^[54]。Singh 等^[55]认为粳米的糊化特性与其蛋白质组分密切相关;粳米、粳米的食味值均与球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白的含量呈显著负相关,且 4 种蛋白组分的增加均会不同程度地降低稻米的食味值^[56]。同样,在米饭中添加醇溶蛋白,会使米饭变硬,黏性降低,食用品质下降^[57]。

Zhang 等^[58]研究了高、中、低 3 种适口性小米品种的醇溶蛋白特性,发现高适口性的小米熟化前二硫键含量最高,煮熟后二硫键含量略微增加;而中、低适口性的小米煮熟后二硫键的增加更为显著。也有研究表明,食用质量差的小米更容易在烹饪过程中以更快的速度形成二硫键^[59]。因此,可以推测醇溶蛋白的结构特性,特别是加工过程中二硫键的变化程度与小米的适口性有关。

3.2.2.2 其它蛋白的影响

小米醇溶蛋白在总蛋

白中的占比最高,决定了其在蛋白质对食用品质的影响上起主导作用。目前,有关蛋白组分对小米食用品质影响的研究较少,Baxter 等^[60-61]研究了谷蛋白、球蛋白和清蛋白对大米淀粉物理性质的影响,发现谷蛋白提高了糊化温度但降低了淀粉的黏度;球蛋白和谷蛋白都减少了烹饪过程中大米淀粉的吸水率;清蛋白会导致大米淀粉糊化温度、衰减值和最终黏度显著增加。蛋白质的存在可能限制了淀粉在糊化和回生过程中的水分进入,并与淀粉竞争吸水,从而影响了淀粉的糊化和食品的质地特性。由此推断,除了醇溶蛋白外的其它蛋白组分对小米的食用品质也会存在一定影响,但目前还缺乏相关的研究论证。

4 蛋白质和淀粉互作对小米食用品质的影响

蛋白质和淀粉对小米食用品质的影响不是孤立的,在蒸煮过程中两者必然会发生相互作用,进而影响小米的食用品质。蛋白质和淀粉通过其分子的不同片段与侧链发生相互作用,这两种分子的组成和结构特点决定了占主导作用的作用力^[62]。蛋白质和淀粉之间的相互作用主要是通过静电作用实现的,即淀粉中带负电荷的基团与蛋白质中带正电荷的基团之间发生的相互作用^[63]。谢黎虹等^[64]认为蛋白质对米饭食味的影响并不仅仅是由于其含量,还可能涉及到蛋白质网络结构本身以及蛋白质与淀粉互作等多个因素。大米蛋白与淀粉互作形成的网络结构能够增强淀粉的溶胀性和溶解性,降低峰值黏度和最低黏度,增加糊化温度和回生值,从而抑制淀粉糊化,降低米饭的黏度^[65]。微量蛋白质基质与淀粉颗粒的结合被认为赋予淀粉颗粒刚性,从而影响大米的黏弹性^[66]。

蛋白质对小米食用品质的影响是通过一系列的物理、化学行为实现的,主要体现在蛋白质对淀粉糊化特性的影响以及蛋白质-淀粉分子间的相互作用^[67]。Zhang 等^[14]研究了内源性蛋白质对小米水化、糊化、热特性和流变特性的影响,发现小米内源性蛋白质限制了水分子与淀粉颗粒的结合,从而限制了淀粉颗粒的吸水和溶胀,导致淀粉蒸煮后水化不足,促进了淀粉分子的回生。在蒸煮过程中,蛋白质和淀粉互作形成的网络结构能够抑

制淀粉分子之间的相互作用,从而导致淀粉无法完全糊化,进而对小米的食用品质产生影响^[68]。

Zhang等^[59]利用二硫苏糖醇研究二硫键对小米糊化特性的影响,发现食味品质差的小米品种在蒸煮过程中容易迅速形成二硫键,二硫键含量的增加会限制小米的水化和糊化特性,进而对小米的食用品质产生负面影响。蛋白质通过二硫键连接形成的网络结构影响淀粉的糊化特性^[30],小米在蒸煮后蛋白质内二硫键明显增加^[58],可以推测小米蛋白质在加热过程中结构发生改变,形成了坚固的网络结构并将淀粉颗粒包围其中,进而抑制了淀粉的膨胀,最终影响小米的食用品质^[69]。

Baxter等^[70]研究了醇溶蛋白对米粉和淀粉糊化特性的影响,发现在大米淀粉中添加醇溶蛋白会导致衰减值显著增加,在大米淀粉中添加醇溶蛋白也使其在烹饪过程中吸收水分更快。Cordelino等^[27]研究了醇溶蛋白对黍子面食蒸煮品质的影响,发现醇溶蛋白含量最低的黍子生产的面食品质最低,高分子质量醇溶蛋白的黍子品种制作的意大利面具有较低的烹饪损失和较低的黏性,高分子质量醇溶蛋白的存在可能会在淀粉周围形成更强的网络,阻碍酶的可及性,这表明小米蛋白质不仅充当淀粉和 α -淀粉酶之间的物理屏障,而且还部分隔离了 α -淀粉酶,这可以延缓淀粉的水解^[71],从而影响面食的食用品质。

5 结论与展望

从淀粉和蛋白质对小米食用品质影响的研究中发现,直链淀粉的含量并不能完全决定米饭的质地,复杂的直链淀粉和支链淀粉的精细结构才是决定淀粉的糊化特性和小米食用品质的关键因素。小米蛋白与食用品质之间的关系并没有明确的结论,两者之间并不是简单的线性关系。醇溶蛋白的结构特性,特别是加工过程中二硫键的变化程度与小米的适口性有关。蛋白质和淀粉互作是影响小米食用品质的重要原因,蛋白质主要通过物理屏障、与淀粉竞争吸水或通过二硫键连接形成的网络结构影响淀粉的糊化特性,进而影响小米的食用品质。

蛋白质和淀粉对小米食用品质的影响是一个复杂的过程。目前,研究人员对蛋白质和淀粉对小

米粉的影响进行了广泛的探索;其中,重点关注的是通过研究蛋白质结构变化对淀粉糊化性质的影响来解释蛋白质和淀粉互作,然而这并不能真实反映小米作为一个完整籽粒时蛋白质和淀粉的相互作用。因此,脱离小米整体结构的研究难以真实地体现小米在蒸煮过程中蛋白质和淀粉的形态变化及两者的相互作用,还需要更直观的手段来表示小米蛋白质和淀粉在蒸煮过程中的互作机制。此外,小米蛋白组分之间的相互作用和蛋白质-淀粉互作也是需要深入研究的,它们可能会影响小米糊化过程中的物理和化学变化,并进一步影响小米的食用品质。

参 考 文 献

- [1] SACHDEV N, GOOMER S, SINGH L R. Foxtail millet: A potential crop to meet future demand scenario for alternative sustainable protein[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 101(3): 831-842.
- [2] SHARMA N, NIRANJAN K. Foxtail millet: Properties, processing, health benefits, and uses[J]. *Food Reviews International*, 2017, 34(4): 329-363.
- [3] 刘建奎, 常柳, 段晓亮, 等. 谷子的生产概况及其保健功能与机理研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(5): 389-395.
LIU J L, CHANG L, DUAN X L, et al. Foxtail millet: Production status, advances on health benefits and its mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(5): 389-395.
- [4] ZHANG F, SHEN Q. The impact of endogenous proteins on hydration, pasting, thermal and rheology attributes of foxtail millet[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 100: 103255.
- [5] QI Y Y, WANG N, YU J L, et al. Insights into structure-function relationships of starch from foxtail millet cultivars grown in China[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 155: 1176-1183.
- [6] 张海波. 碾磨度对稻米蒸煮品质和营养品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
ZHANG H B. The effect of milling degree on cooking and nutrient quality traits of rice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

- [7] 李新华, 郑煜焱. 辽宁省主栽水稻品种的糊化特性和食用品质评价[J]. 食品工业科技, 2003, 24(21): 16-22.
LI X H, ZHENG Y Y. Gelatinization characteristics and edible quality evaluation of main rice varieties in Liaoning Province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003, 24(21): 16-22.
- [8] 赵欣, 梁克红, 朱宏, 等. 不同米色小米营养品质与蒸煮特性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 298-303.
ZHAO X, LIANG K H, ZHU H, et al. Nutritional quality evaluation and analysis on the cooking quality of foxtail millet with different color[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 298-303.
- [9] 张艾英, 郭二虎, 刁现民, 等. 不同气候和土壤对小米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(18): 3218-3231.
ZHANG A Y, GUO E H, DIAO X M, et al. Effects of different types of climate and soil on foxtail millet quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(18): 3218-3231.
- [10] 王国梁, 余克强, 成锴, 等. 小米米粉碱消值的高光谱快速预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3189-3193.
WANG G L, YU K Q, CHENG K, et al. Hyperspectral technique coupled with chemometrics methods for predicting alkali spreading value of millet flour[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10): 3189-3193.
- [11] 河北省市场监督管理局. 地理标志产品 蔚州贡米(蔚州小米): DB13/T 1298-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Market Supervision and Administration Bureau of Hebei Province. Product of geographical indication-Weizhou millet (Weizhou millet): DB13/T 1298-2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [12] 彭锁堂, 薛光文, 董淑英. 沁州黄谷子优质机理分析研究[J]. 山西农业大学学报, 2000, 20(1): 13-15.
PENG S T, XUAN G W, DONG S Y. Analytic studies on the mechanism of good quality in Qinzhouhuang millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2000, 20(1): 13-15.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地理标志产品 沁州黄小米: GB/T 19503-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Product of geographical indication-Qinzhouhuang foxtail-millet: GB/T 19503-2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [14] 杨成元, 侯东辉, 陈丽红, 等. 山西十种小米理化指标及蒸煮特性研究[J]. 东北农业科学, 2020, 45(3): 25-29, 40.
YANG C Y, HOU D H, CHEN L H, et al. Study on physicochemical indices and cooking characteristics of ten kinds of millet[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(3): 25-29, 40.
- [15] 张凡, 李书田, 王显瑞, 等. 不同品种小米蒸煮食味品质评价及比较[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 23-29.
ZHANG F, LI S T, WANG X R, et al. Comparative evaluation and analysis of cooking and eating quality of different foxtail millet varieties[J]. Food Science, 2020, 41(9): 23-29.
- [16] 尹瑞旸, 李星, 沈群. 小米饭食用品质评价模型的建立[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 270-277.
YIN R Y, LI X, SHEN Q. Establishment of edible quality evaluating model of millet[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 270-277.
- [17] LIU C, LIU P L, YAN S Q, et al. Relationship of physicochemical, pasting properties of millet starches and the texture properties of cooked millet[J]. Journal of Texture Studies, 2011, 42(4): 247-253.
- [18] ZHANG Y, YANG N, FRAY R G, et al. Characterization of volatile aroma compounds after in-vial cooking of foxtail millet porridge with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 8-15.
- [19] 王玉文, 李会霞, 田岗, 等. 小米外观品质及淀粉RVA谱特征与米饭适口性的关系[J]. 山西农业科学, 2008, 36(7): 34-39.
WANG Y W, LI H X, TIAN G, et al. Relationship between cooked millet palatability and both visual quality and RVA profile character of starch[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008, 36(7): 34-39.
- [20] 刘辉, 张敏. 不同品种小米的直链淀粉含量与快速

- 粘度分析仪谱特征值关系研究[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 31-33.
- LIU H, ZHANG M. Relationships between amylose content and gelatinization characteristics of different varieties of millet[J]. Food Science, 2010, 31(15): 31-33.
- [21] 张卓敏. 黑龙江省小米主栽品种理化特性与感官品质的相关性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
- ZHANG Z M. Research on relativity between physical-chemical properties and sensory quality of main cultivar millets in Heilongjiang Province[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018.
- [22] 刘雪梅, 潘少香, 闫新焕, 等. 我国小米优势产区特色品种淀粉含量与组成的差异分析[J]. 中国果菜, 2021, 41(12): 43-48.
- LIU X M, PAN S X, YAN X H, et al. Analysis of starch content and composition in millet varieties from advantageous areas of China [J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(12): 43-48.
- [23] SANDHYARANI M R, BHATTACHARYA K R. Rheology of rice-flour pastes: Effect of variety, concentration, and temperature and time of cooking [J]. Journal of Texture Studies, 2010, 20(2): 127-137.
- [24] REDDY K R, SUBRAMANIAN R, ALI S Z, et al. Viscoelastic properties of rice-flour pastes and their relationship to amylose content and rice quality[J]. Cereal Chemistry, 1994, 71(6): 548-552.
- [25] 赵淑玲, 李洪, 李萍. 小米直链淀粉含量与食味品质的关系[J]. 山西农业科学, 1987, 12: 1-2.
- ZHAO S L, LI H, LI P. Relationship between amylose content and eating quality of millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1987, 12: 1-2.
- [26] 王润奇, 杜竹铭, 田明, 等. 沁州黄小米优质机理的初步研究[J]. 山西农业科学, 1986(9): 5-7.
- WANG R Q, DU Z M, TIAN M, et al. Preliminary study on quality mechanism of "Qinzhouhuang" [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1986(9): 5-7.
- [27] CORDELINO I G, TYL C, INAMDAR L, et al. Cooking quality, digestibility, and sensory properties of proso millet pasta as impacted by amylose content and prolamin profile[J]. LWT, 2019, 99: 1-7.
- [28] HUANG T, ZHU B, DU X Z, et al. Study on gelatinization property and edible quality mechanism of rice[J]. Starch/Stärke, 2012, 64(11): 846-854.
- [29] CHAMPAGNE E T, BETT K L, VINYARD B T, et al. Correlation between cooked rice texture and rapid visco analyzer measurements[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(5): 764-771.
- [30] MARTIN M, FITZGERALD M A. Proteins in rice grains influence cooking properties! [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36(3): 285-294.
- [31] AYABE S, KASAI M, OHISHI K, et al. Textural properties and structures of starches from India and Japonica rice with similar amylose content[J]. Food Science & Technology International Tokyo, 2009, 15(3): 299-306.
- [32] BEAN S R, ZHU L, SMITH B M, et al. Chapter 6-Starch and protein chemistry and functional properties[M]// TAYLOR J R N, DUODU K G. Sorghum and millets: Chemistry, Technology, and Nutritional Attributes (second edition). Duxford: Woodhead Publishing, 2019: 131-170.
- [33] WONG K S, KUBO A, JANE J L, et al. Structures and properties of amylopectin and phytyglycogen in the endosperm of sugary-1 mutants of rice[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 37(2): 139-149.
- [34] LI H, PRAKASH S, NICHOLSON T M, et al. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 702-711.
- [35] YANG C H, CHANG W H. Effects of protein and lipid binding to starch on the physicochemical and pasting properties of rice flour[J]. Food Science and Agricultural Chemistry, 1999, 1: 277-285.
- [36] PUNIA S, KUMAR M, SIROHA A K, et al. Pearl millet grain as an emerging source of starch: A review on its structure, physicochemical properties, functionalization, and industrial applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 260: 117776.
- [37] ONG M H, BLANSHARD J. Texture determinants in cooked, parboiled rice. I: Rice starch amylose and the fine structure of amylopectin[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 21(3): 251-260.
- [38] PENG Y, MAO B G, ZHANG C Q, et al. Influence of physicochemical properties and starch fine structure on the eating quality of hybrid rice with similar apparent amylose content[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129461.

- [39] LI Z, KONG X, ZHOU X, et al. Characterization of multi-scale structure and thermal properties of Indica rice starch with different amylose contents[J]. RSC Advances, 2016, 6(109): 107491-107497.
- [40] WANG L L, GONG Y, LI Y X, et al. Structure and properties of soft rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 10-16.
- [41] 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.
- [42] LEE S, LEE J H, CHUNG H J. Impact of diverse cultivars on molecular and crystalline structures of rice starch for food processing[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 169: 33-40.
- [43] ZHU F. Relationships between amylopectin internal molecular structure and physicochemical properties of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 234-242.
- [44] NODA T, NISHIBA Y, SATO T, et al. Properties of starches from several low-amylose rice cultivars[J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(2): 193-197.
- [45] 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 等. 谷子籽粒蛋白质、脂肪、千粒重的遗传变异[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 819-829.
- YANG Y B, QIN L, CHEN E Y, et al. Genetic variations of protein content, fat content and TGW in foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) in China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(5): 819-829.
- [46] 赵学伟, 魏益民, 王章存, 等. 小米蛋白质的理化特性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2011(7): 34-37.
- ZHAN X W, WEI Y M, WANG Z C, et al. Physicochemical properties of foxtail millet protein[J]. Cereal & Feed Industry, 2011(7): 34-37.
- [47] 郭莲东, 徐丽, 欧才智, 等. 小米蛋白的分子组成及结构特性[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 201-206.
- GUO L D, XU L, OU C Z, et al. Molecular compositions and structural properties of proteins in millet[J]. Food Science, 2019, 40(24): 201-206.
- [48] 姬中伟, 戴甜甜, 毛健. 小米谷蛋白及醇溶蛋白结构特征[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 1-4.
- JI Z W, DAI T T, MAO J. Structural characteristics of millet glutenin and gliadin[J]. Food & Machinery, 2018, 34(6): 1-4.
- [49] 丁得亮, 张欣, 张艳, 等. 市场粳米食味品质及外观品质性状间的相关关系[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(9): 4454-4456.
- DING D L, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Relationship between appearance quality and eating quality of market japonica rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(9): 4454-4456.
- [50] 钱春荣, 冯延江, 杨静, 等. 水稻籽粒蛋白质含量选择对杂种早代蒸煮食味品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 323-326.
- QIAN C R, FENG Y J, YANG J, et al. Effects of protein content selection on cooking and eating properties of rice in early-generation of crosses[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(3): 323-326.
- [51] 王鲁峰, 王伟, 张韵, 等. 原料大米特性与米饭品质的相关性研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(8): 113-116, 290.
- WANG L F, WANG W, ZHANG Y, et al. Study on the relativity between characteristics of rice and quality of cooked rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(8): 113-116, 290.
- [52] 古世禄, 刘厦. 中国谷子蛋白质氨基酸组成的研究[J]. 华北农学报, 1989, 4(1): 8-15.
- GU S L, LIU X. Study on protein content and amino acid composition of Chinese foxtail millet[J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 1989, 4(1): 8-15.
- [53] MARCELLINO L H, JUNIOR C B, GANDER E S. Characterization of pearl millet prolamins[J]. Protein & Peptide Letters, 2002, 9(3): 237-244.
- [54] NITHIYANANTHAM S, KALAISELVI P, MAHO-MOODALLY M F, et al. Nutritional and functional roles of millets - A review[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(7): e12859.
- [55] SINGH N, PAL N, MAHAJAN G, et al. Rice grain and starch properties: Effects of nitrogen fertilizer application[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(1): 219-225.
- [56] 石吕, 张新月, 孙惠艳, 等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(6): 541-552.
- SHI L, ZHANG X Y, SUN H Y, et al. Relationship of grain protein content with cooking and eating quality as affected by nitrogen fertilizer at late growth stage for different types of rice varieties[J].

- Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33 (6): 541–552.
- [57] FURUKAWA S, TANAKA K, MASUMURA T, et al. Influence of rice proteins on eating quality of cooked rice and on aroma and flavor of sake[J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(4): 439–446.
- [58] ZHANG F, FU Y X, LIU Z Y, et al. Comparison of the characteristics of prolamins among foxtail millet varieties with different palatability: Structural, morphological, and physicochemical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 186: 194–205.
- [59] ZHANG F, LARAIB Y, CHAI X, et al. The effect of reducing agent DTT on pasting, hydration and microstructure properties of foxtail millet[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103044.
- [60] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of glutelin and globulin on the physicochemical properties of rice starch and flour[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(2): 414–420.
- [61] BAXTER G, ZHAO J, BLANCHARD C. Albumin significantly affects pasting and textural characteristics of rice flour[J]. Cereal Chemistry, 2010, 87 (3): 250–255.
- [62] 缪铭, 江波, 张涛. 食品典型组分相互作用的研究进展[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 625–629.
- MIAO M, JIANG B, ZHANG T. Research progress of interactions of food typical ingredients[J]. Food Science, 2008, 29(10): 625–629.
- [63] JAMILAH B, MOHAMED A, ABBAS K A, et al. Protein–starch interaction and their effect on thermal and rheological characteristics of a food system: A review[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2009, 7(2): 169–174.
- [64] 谢黎虹, 陈能, 段彬伍, 等. 稻米中蛋白质对淀粉 RVA 特征谱的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20 (5): 524–528.
- XIE L H, CHEN N, DUAN B W, et al. Effects of proteins on RVA viscosity properties of rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(5): 524–528.
- [65] 刘桃英, 刘成梅, 付桂明, 等. 大米蛋白对大米粉糊化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 97–99, 103.
- LIU T Y, LIU C M, FU G M, et al. Influence of rice protein in rice flour on pasting properties [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34 (2): 97–99, 103.
- [66] DERYCKE V, VERAVERBEKE W S, VAN-DEPUTTE G E, et al. Impact of proteins on pasting and cooking properties of nonparboiled and parboiled rice[J]. Cereal Chemistry, 2005, 82(4): 468–474.
- [67] SALEH M I. Protein–starch matrix microstructure during rice flour pastes formation[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 74: 183–186.
- [68] 谢黎虹, 罗炬, 唐绍清, 等. 蛋白质影响水稻米饭食味品质的机理[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 91–96.
- XIE L H, LUO J, TANG S Q, et al. Proteins affect rice eating quality properties and its mechanism [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013, 27(1): 91–96.
- [69] HAMAKER B R, GRIFFIN V K. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting [J]. Cereal Chemistry, 1993, 70 (4): 377–380.
- [70] BAXTER G, BLANCHARD C, JIAN Z. Effects of prolamins on the textural and pasting properties of rice flour and starch[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(3): 205–211.
- [71] JIN Z Q, BAI F L, CHEN Y B, et al. Interactions between protein, lipid and starch in foxtail millet flour affect the *in vitro* digestion of starch[J]. Cytotechnology of Food, 2019, 17(1): 640–647.

Research Progress on the Effects of Starch and Protein on the Cooking and Edible Quality of Milled Foxtail Millet

Lü Ping^{1,2}, Liu Jianlei², Duan Xiaoliang², Zhang Dong², Zhao Luyao², Sun Hui^{2*}

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

²Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102629

Abstract Milled foxtail millet is an important food crop in China, which is mainly eaten by porridge and cooked foxtail

millet. It is of great significance to systematically analyze the cooking and edible quality of milled foxtail millet and its formation mechanism. Starch and protein are the two main components in milled foxtail millet, which are closely related to its cooking and edible quality. In this paper, the research progress of the effects of the content, composition and structure of starch and protein in millet, as well as the protein–starch interaction on the cooking and edible quality of milled foxtail millet were summarized and analyzed. The purpose of this research is to provide a theoretical reference for evaluating and improving the edible quality of milled foxtail millet.

Keywords milled foxtail millet; cooking quality; edible quality; starch; protein