

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.008

孔庆霞, 邝吉卫, 杨希娟. 热诱导玉米淀粉模拟面团流变学、热力学和结构特性的变化[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 67-76.

KONG Q X, KUANG J W, YANG X J. Changes in rheological, thermal, and structural properties of simulated dough from heat induced corn starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 67-76.

热诱导玉米淀粉模拟面团流变学、 热力学和结构特性的变化

孔庆霞¹, 邝吉卫^{2,3}✉, 杨希娟³

(1. 青海大学 青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016;

3. 青海大学 农林科学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 为探讨不同结构玉米淀粉(高直链、普通和蜡质玉米淀粉)对面团加工品质的影响, 测定了玉米淀粉模拟面团的流变学特性、热特性、微观结构以及面筋蛋白的物化特性等指标。结果表明: 高直链玉米淀粉模拟面团的粘弹性显著高于普通/蜡质玉米淀粉模拟面团, 这归因于其不易糊化和高度填充的特性。蜡质玉米淀粉通过竞争吸水显著抑制了面筋蛋白的热聚集, 导致热处理后面团呈现较为松散的结构。分子量分布和分子间相互作用的结果也证实, 蜡质玉米淀粉主要通过抑制二硫键的交联来阻碍高分子量面筋蛋白的形成, 从而导致面筋蛋白从刚性的 α -螺旋向无序的 β -转角结构转变。研究结果有助于深入理解淀粉-面筋蛋白的互作机制, 为通过调控淀粉结构特性来改善面制品加工品质提供参考。

关键词: 玉米淀粉; 面筋蛋白; 流变学特性; 热性能; 微观结构

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0067-10

网络首发时间: 2024-08-29 13:28:30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240828.1504.013>

Changes in Rheological, Thermal, and Structural Properties of Simulated Dough from Heat Induced Corn Starch

KONG Qing-xia¹, KUANG Ji-wei^{2,3}✉, YANG Xi-juan³

(1. Key Laboratory of Agricultural Product Processing on Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and

Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

3. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室自主研究项目(2024-ZZ-04); 青海省农林科学院创新基金项目(2023-NKY-02); 青海省科技厅创新平台建设项目(2022-ZJ-T04)

Supported by: The Open Project of State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University (No. 2024-ZZ-04); The Applied Basic Research of Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences Special Research Project (No. 2023-NKY-02); Qinghai Provincial Department of Science and Technology Innovation Platform Construction Project (No. 2022-ZJ-T04)

第一作者: 孔庆霞, 女, 1999 年出生, 在读硕士生, 研究方向为农产品加工及贮藏工程, E-mail: 2366287071@qq.com

通信作者: 邝吉卫, 男, 1993 年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为谷物食品关键组分相互作用及品质调控, E-mail: 2023990011@qhu.edu.cn

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effects of different structures of corn starch (high amylose corn starch, normal corn starch, and waxy corn starch) on the processing quality of dough. The rheological properties, thermal properties, microstructure and physicochemical properties of gluten proteins in the simulated dough of corn starch were determined. The results showed that the viscoelasticity of the high-amylose corn starch mock dough was significantly higher than that of the normal/waxy cornstarch mock dough, which was attributed to its non-gelatinization and highly filling characteristics. Waxy corn starch significantly inhibited the thermal aggregation of gluten proteins through competitive water absorption, resulting in a relatively loose structure of the dough after heat treatment. The results of molecular weight distribution and intermolecular interactions also confirmed that waxy corn starch mainly inhibited the formation of high molecular weight gluten proteins by hindering the crosslinking of disulfide bonds, leading to the transition of gluten proteins from a rigid α -helix to a disordered β -turn structure. This study helps to gain a deeper understanding of the interaction mechanism between starch and gluten proteins, and provides a reference for improving the processing quality of flour products by regulating the structural characteristics of starch.

Key words: corn starch; gluten proteins; rheological properties; thermal properties; microstructure

在面团体系中，淀粉被普遍认为是面筋网络结构中的惰性填料。然而，近年来研究发现，除了作为惰性填料外，淀粉和面筋蛋白之间的分子间相互作用也对面团的结构具有重要的调控作用，这种调控作用主要与淀粉的颗粒大小、来源、结构有关^[1]。

Zhou 等^[2]解释了不同粒径的马铃薯淀粉在冻融处理过程中对面团影响，粒径小的淀粉面团具有更高的分子间相互作用、更致密的结构、更低的水迁移率，这表明面团具有更好的抗性和更高的稳定性。Zhang 等^[3]探讨了不同颗粒大小的马铃薯淀粉对面团特性的影响，发现小粒径马铃薯淀粉组成的面团表现出更紧凑和均匀的网状系统。Mu 等^[4]研究不同植物来源（小麦、玉米、木薯、甘薯和马铃薯）淀粉的模拟面团结构特性，结果发现植物来源的淀粉在决定无麸质面团的流变特性方面起着积极作用，如小麦淀粉的添加使无麸质模型面团更柔软，但降低了网络稳定性；马铃薯淀粉的添加增加了面团的抗变形性、粘度和回生率。不同植物来源淀粉对面团的吸水率、流变特性有不同程度的影响，这主要与模拟面团中淀粉-面筋相互作用有关^[5]。

热处理是面团加工的一个初步处理条件，通常伴随着淀粉的糊化和蛋白的变性，这是面团加

工品质形成的基础。已有研究表明，热处理能够增强面团中淀粉与蛋白质大分子之间的非共价相互作用，进而影响面筋蛋白在热处理过程中肽链之间的交联以及蛋白大聚体结构的稳定性^[6]。Zou 等^[7]通过研究小麦粉面团在湿热处理后对饼干品质的影响，发现在高温处理下，湿热处理的面筋蛋白显著变性，严重破坏了模拟面团的面筋网络，同时提高了面团的变形性。Lin 等^[8]的研究也表明了热处理可以改变淀粉和面筋蛋白之间的相互作用，同时有利于处理组的二硫键生成，生成更多高分子量蛋白质，提高了面筋网络的稳定性。因此，在热处理过程中，淀粉和面筋蛋白网络之间的相互作用对面团品质具有重要影响。然而，目前不同淀粉结构对面团品质调控作用的相关研究信息较少，无法对面制品的精准加工提供有效控制手段。因此，本研究旨以固定比例（淀粉与面筋蛋白比例为 86 : 14）混合不同结构的玉米淀粉（高直链、普通和蜡质玉米淀粉）与面筋蛋白来制备模拟面团，并对经过热处理后的不同模拟面团的流变特性、热特性、微观结构以及面筋蛋白的物化特性进行表征，明晰不同结构淀粉诱导的面筋蛋白结构转变与面制品品质特性之间的构效关系，以期从淀粉特性的角度来调控面团的加工品质。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

普通玉米淀粉、直链玉米淀粉、蜡质玉米淀粉、面筋蛋白、还原型谷胱甘肽 (Reduced glutathione, GSH): 上海源叶生物科技有限公司; 异硫氰酸荧光素 (Fluorescein isothiocyanate, FITC)、罗丹明 B: 美国 Sigma-Aldrich 公司; 5,5'-二硫代双 (2-硝基苯甲酸) (5,5'-Dithiobis(2-nitrobenzoic acid), DTNB)、乙二胺四乙酸 (Ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA): 上海麦克林生化科技有限公司; 氯化钠 (NaCl)、尿素 (Urea)、溴化钾 (KBr, 光谱纯): 天津科密欧化学试剂有限公司; 十二烷基硫酸钠 (Sodium dodecyl sulfate, SDS)、二硫苏糖醇 (Dithiothreitol, DTT): 上海生工生物工程有限公司。

1.2 仪器与设备

Haake-Mars 60 型流变仪: 德国 Thermo Scientific 公司; Q2000 差示扫描量热计: 美国 TA 公司; FEI Q45 扫描电子显微镜: 美国 FEI 公司; FV101 激光共聚焦扫描显微镜: 日本 Olympus 公司; Vertex 70 傅里叶红外光谱仪: 德国 Bruker 公司; HR/T20MM 立式高速冷冻离心机: 湖南赫西仪器装备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 玉米淀粉模拟面团的制备

使用高直链玉米淀粉、普通玉米淀粉和蜡质玉米淀粉与面筋蛋白以固定的比例 (84 : 16) 混合, 加水量为 50%, 制备三种不同玉米淀粉的面团, 揉成面团, 并在 95 °C 条件下蒸制 30 min 备用。

1.3.2 面团流变学特性的测定

根据 Kuang 等^[9]描述的方法, 使用 Haake-mars 60 型流变仪评估面团的流变行为。分别从三种面团上切下一块, 放在直径 35 mm, 间隙 2 mm 的平行板之间, 刮去板外多余的面团, 迅速把硅油涂抹在面团周围, 以防止测试过程中面团中的水分流失。首先, 在 25 °C 下将面团平衡 5 min, 然后以 4 °C/min 的速率将温度升至 95 °C, 在 0.1% 的恒定应变下进行温度扫描。并记录储能模

量 (G') 和耗能模量 (G'') 随温度变化的情况。

1.3.3 面团热特性的测定

参考李等^[10]所做实验, 用差示扫描量热计 (Differential scanning calorimeter, DSC) 表征热性能。首先面团样品进行冷冻干燥后, 准确称重 10 mg 到铝制样品锅中。随后, 将平底锅密封, 以 10 °C/min 速度从 50 °C 加热到 110 °C。使用软件记录蛋白变性和淀粉糊化的起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、结束温度 (T_c) 和焓 (ΔH)。

1.3.4 面团微观结构的测定

1.3.4.1 扫描电子显微镜观察 将加热过的面团样品冷冻干燥处理, 然后将样品放置在样品台上, 喷金。在 15 kV 的加速电压下, 用扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观察面团放大 500 × 的微观结构^[11]。

1.3.4.2 共聚焦激光扫描显微镜观察 将样品冷冻切成薄片, 用异硫氰酸荧光素 (FITC, 0.02%, w/v) 标记淀粉和罗丹明 B (0.025%, w/v) 标记蛋白质。用 60 × 油透镜观察标记的样品。分别设定 FITC 和罗丹明 B 的激发/发射波长为 488/518 nm 和 568/625 nm, 观察微观结构^[12]。

1.3.5 化学相互作用

测定自由巯基含量参考 Li 等^[13]的方法, 使用 Ellman 试剂测定面团样品中游离巯基的含量。首先, 在 3.0 mL 反应缓冲液中添加含有 30 mg 面筋蛋白的样品, 25 °C 下振荡 1 h, 随后, 添加 0.3 mL Ellman 试剂充分混合均匀, 置于黑暗条件下进行反应 1 h, 转速为 10 000 r/min 离心 15 min, 取上清液测定 412 nm 处吸光值。反应缓冲液配制: 3 mM EDTA, 1% SDS, 8 M Urea, 0.2 M Tris-HCl, pH=8.0, Ellman 试剂配制: 溶于 0.2 M Tris-HCl 的 DTNB 溶液, pH=8.0。使用 GSH 校准曲线计算自由巯基的含量, 结果以 mmol/g 蛋白质表示。

根据邝等^[14]描述的方法检测离子键、氢键和疏水相互作用。含有面筋蛋白 (0.6 g) 的面团样品分别加入到 S1、S2、S3 和 S4 溶剂中, 4 种溶剂分别是 0.05 M NaCl、0.6 M NaCl、0.6 M NaCl+1.5 M Urea 和 0.6 M NaCl+8 M Urea。在 25 °C 下振荡 1 h 摇匀, 再进行离心 (转速: 10 000 r/min) 20 min, 测定上清液中的蛋白质溶解

度。S2 和 S1、S3 和 S2、S4 和 S3 中溶解含量的差值分别代表离子键、氢键和疏水相互作用的强度。

1.3.6 面筋蛋白分子量分布

采用十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳 (Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) 对面筋蛋白的分子量分布进行测定。在室温下, 取含有 1 mg 面筋蛋白的面团, 用含有 5% DTT 的样品缓冲液提取 3 h, 接着进行 3 min 的沸水浴处理, 冷却到 25 °C 后, 在转速 10 000 r/min 和温度 4 °C 下离心 20 min。在恒定电流模式下, 使用 4% 的浓缩胶和 12% 的分离胶进行电泳, 电流分别是 20 mA/gel 和 40 mA/gel, 分别取 30 μ L 3 种面团的上清液加入到泳道中。电泳结束后, 将胶进行染色脱色处理^[14]。

1.3.7 二级结构

根据 Zhang 等^[15]的方法, 采用傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) 研究了面筋蛋白的二级结构。将热处理过的面团冻干并研磨成粉末, 以 1 : 60 的比例将样品与固体 KBr 粉末混合并压成片状。在 4 cm^{-1} 的分辨率条件下, 扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} , 总计扫描 64 次。用 OPUS 7.2 软件对所得到的光谱进行基线校正和归一化。面筋蛋白二级结构是从酰胺 I 区域 (1 600~1 700 cm^{-1}) 通过傅立叶自去卷积和曲线拟合计算的。

1.4 数据处理

实验数据经 SPSS 19.0 软件进行显著性差异

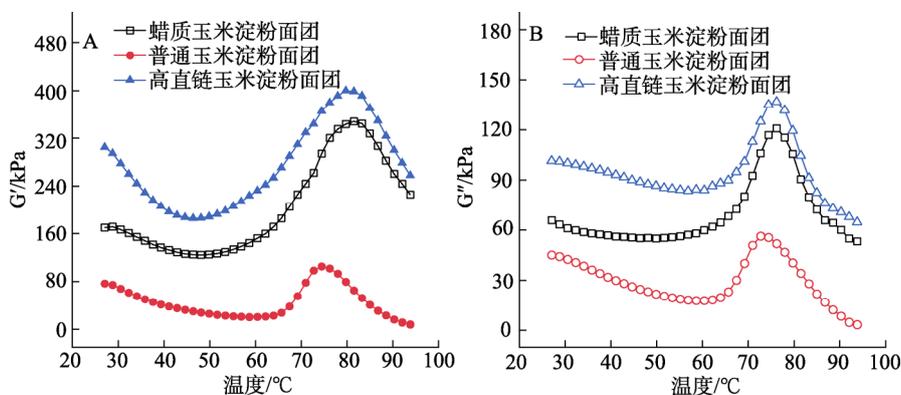
分析处理, 结果使用均值 \pm 标准差表示, 所有实验均重复测试 3 次并计算平均值。显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。同时, 利用 Origin 2022 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同面团温度扫描分析

为探究面团的流变特性, 对面团进行温度扫描。如图 1 所示, 不同类型的玉米淀粉面团的模量值整体随温度升高呈现先下降后上升, 再下降的趋势。从 25~60 °C 范围内, 面团粘弹性减弱, 且储能模量 (G') 大于耗能模量 (G''), 面团固体特性占主导地位。这是因为一方面温度升高非共价键断裂, 氢键被破坏, 面团结构崩解^[9]; 另一方面, 在加热过程中淀粉颗粒吸水膨胀, 面团强度下降^[16]。当温度由 60 °C 上升至 95 °C 时, 面团开始糊化, 面团的粘弹性快速升高并到达最大值后下降, 此最大值为玉米淀粉糊化温度。这是由于温度继续上升, 导致巯基氧化形成二硫键, 面筋蛋白之间发生交联使粘弹性明显增强^[13]。而后粘弹性下降则是温度的增加改变了分子的流动性, 使得淀粉颗粒发生崩解, 进而晶体结构发生熔化^[17]。

显然, 高直链玉米淀粉的加入增强了玉米淀粉模拟面团体系的粘弹性。面团里的水分分布在蛋白质网状结构中, 相对于蜡质玉米淀粉, 高直链淀粉具有更强的吸水性, 能够吸附更多的水分子, 可能面团中的水分分布发生改变, 导致面团的机械强度增加, 使面团的 G' 和 G'' 提高^[18]。



注: (A): G' , (B): G'' 。

Note: (A): G' , (B): G'' 。

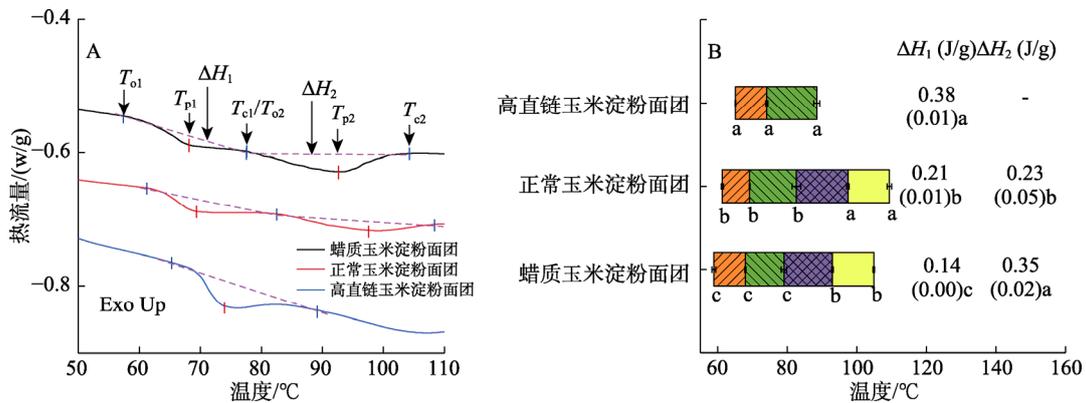
图 1 不同类型玉米淀粉模拟面团的温度扫描结果

Fig.1 Temperature scan results of different types of corn starch simulated dough

2.2 面团热特性分析

采用差示扫描量热法测定模拟面团的热特性,由图 2 A 可知,普通玉米淀粉-面筋蛋白和蜡质玉米淀粉-面筋蛋白面团的 DSC 曲线趋势基本一致,有两个吸热峰,这被认为与面筋蛋白热变性和淀粉糊化有关。高直链玉米淀粉-面筋蛋白的面团只有一个吸热峰,这是面筋蛋白变性的结果。由于高直链玉米淀粉模拟面团含有高含量的直链淀粉,导致其面团更难糊化,这是与普通/蜡质玉米淀粉模拟

面团在吸热峰上产生显著性差异的原因^[19]。图 2B 中高直链玉米淀粉面团的 T_{p1} 和 ΔH_1 显著高于其他两组,因为 T_{p1} 和 ΔH_1 越大面筋蛋白热稳定性越高,聚集程度越大,因此高直链玉米淀粉面团的面筋蛋白稳定性最高^[20]。糊化的起始温度是衡量淀粉是否容易糊化的重要指标。由图 2 B 可知,蜡质玉米淀粉面团糊化起始温度显著小于其他两组,而糊化的起始温度越小,淀粉颗粒越容易吸水膨胀^[21],因此蜡质玉米淀粉面团更易糊化。



注: (A): DSC 模式, (B): 变性温度范围示意图和焓转变数据。同一指标不同类型玉米淀粉面团上的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: (A): DSC mode, (B): Denaturation temperature range diagram and enthalpy transition data. Different lowercase letters on different types of corn starch dough of the same index indicate significant difference ($P < 0.05$), the same as below.

图 2 不同类型玉米淀粉模拟面团的热性能

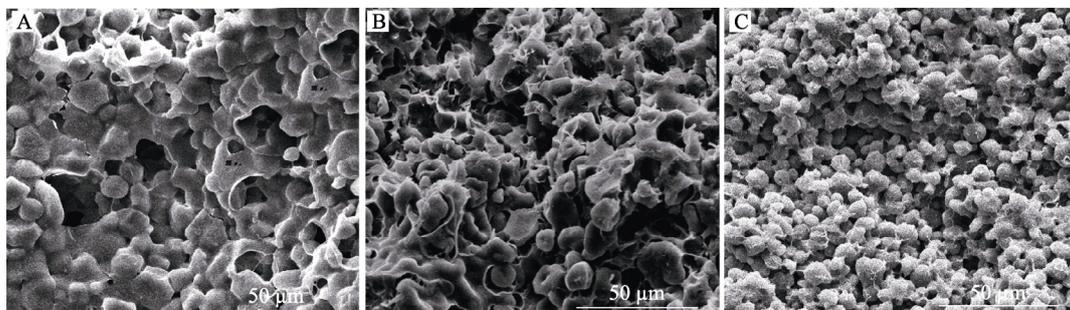
Fig.2 The thermal properties of different types of corn starch simulated dough

2.3 面团微观结构的分析

2.3.1 扫描电子显微镜分析

通过 SEM 观察了加热后含不同直支链比玉米淀粉面团的微观结构。结果显示 (图 3) 高直链玉米淀粉的颗粒形状为椭圆或球状,其平滑度显著高

于蜡质、普通玉米淀粉颗粒,且直链淀粉占比越大玉米淀粉的颗粒越小。加热后,蜡质玉米淀粉颗粒易吸水膨胀,与面筋蛋白网络结构变得不连续,而含有高直链淀粉的面团形变较小,这与面团热特性结果相同,同时有实验也证明了此结果^[22]。



注: A、B 和 C 分别表示蜡质玉米淀粉模拟面团、普通玉米淀粉模拟面团和高直链玉米淀粉模拟面团。

Note: A, B and C represent waxy corn starch simulated dough, ordinary corn starch simulated dough and high amylose corn starch simulated dough, respectively.

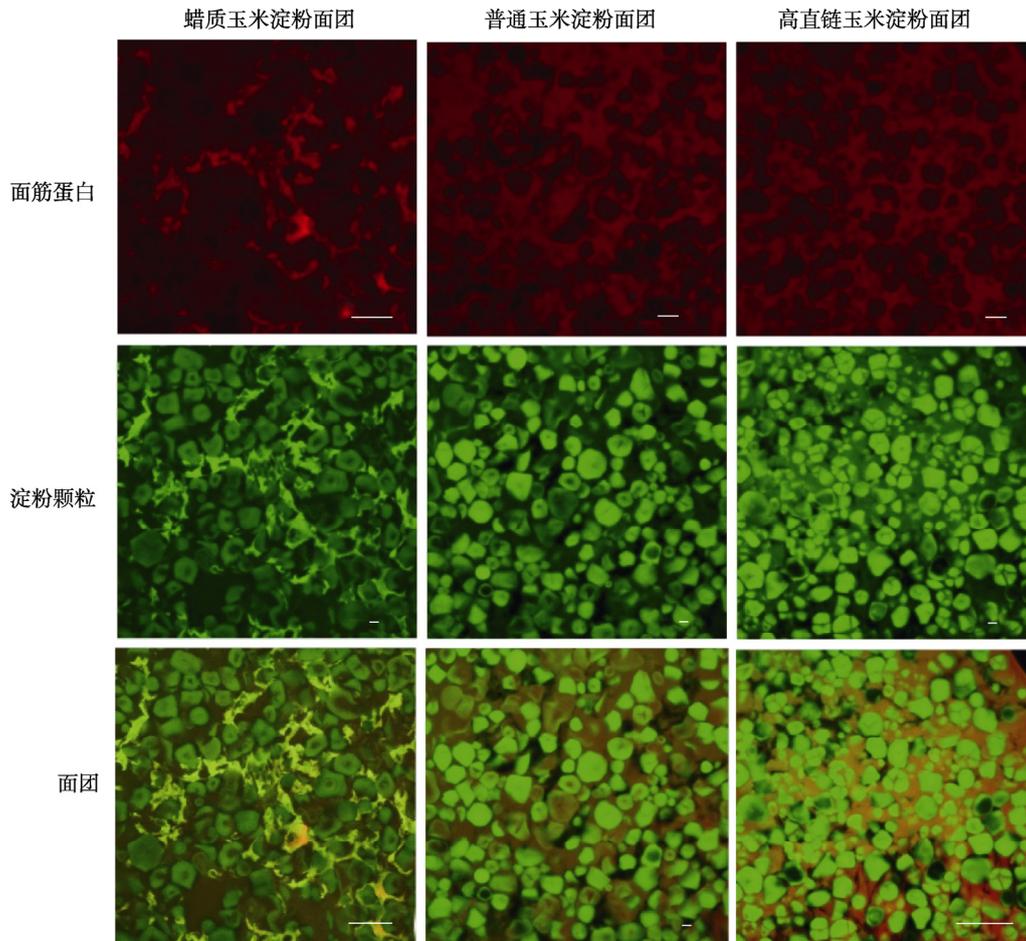
图 3 不同类型玉米淀粉模拟面团加热后的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of different types of corn starch simulated dough after heating

2.3.2 共聚焦激光扫描显微镜分析

为了进一步研究不同直支链比淀粉对面团微观结构的影响,使用共聚焦激光扫描显微镜(Confocal laser scanning microscopy, CLSM)观察面团结构,图 4 显示了由蛋白质(红色)和相互分散的淀粉颗粒(绿色)组成的网络。对于三种类型面团,分散的面筋蛋白网络包裹着淀粉

颗粒^[12]。在含有较高水平直链玉米淀粉的面团中,淀粉颗粒的聚集更为明显,蛋白质链厚度更大。直链淀粉颗粒的聚集可能导致其在蛋白质中分散性差,这可能是在面筋网络内形成较厚的蛋白质链的原因。颗粒-颗粒相互作用的增加可能导致含有聚集直链淀粉区域的局部剪切增稠^[12]。



注:图中红色和绿色分代表面筋蛋白和淀粉颗粒。

Note: The red and green sections represent gluten and starch granules.

图 4 不同类型玉米淀粉模拟面团加热后的 CLSM 图像

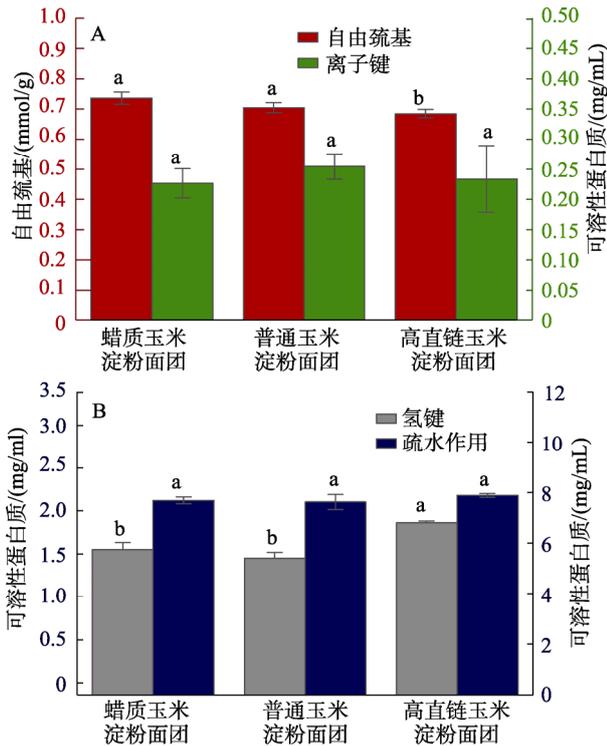
Fig.4 CLSM images of different types of cornstarch simulating dough after heating

2.4 化学相互作用分析

二硫键、离子键、氢键和疏水相互作用对维持面团的起着重要作用,其中二硫键是维持面筋蛋白网络结构的主要共价键^[23]。在本研究中,高直链玉米淀粉面团中的自由巯基含量显著低于其余两组,在蜡质面团中自由巯基含量多(图 5A),这可能蜡质淀粉的存在抑制了面筋中二硫键的形成,从而导致蛋白质之间的结合被弱化。随着二硫键数量的增加,面团的面筋蛋白网络更

稳定^[24]。

当玉米淀粉类型发生改变时,离子键和疏水相互作用的含量没有显著差别,其含量一致保持在 0.24 mg/mL 和 7.73 mg/mL 左右,表明在加热过程中二者几乎不参与淀粉和面筋蛋白的相互作用。氢键是维持蛋白质二级结构的重要作用力,其键合力较弱,在 95 °C 热处理条件,氢键易断裂,然而氢键含量在高直链淀粉的面团中最高(图 5 B),提高了面团弹性^[25]。



注：(A)：自由巯基含量和离子键的变化 (B)：氢键和疏水相互作用的变化。

Note: (A): Changes in free thiol content and ionic bonds. (B): Changes in hydrogen bonding and hydrophobic interactions.

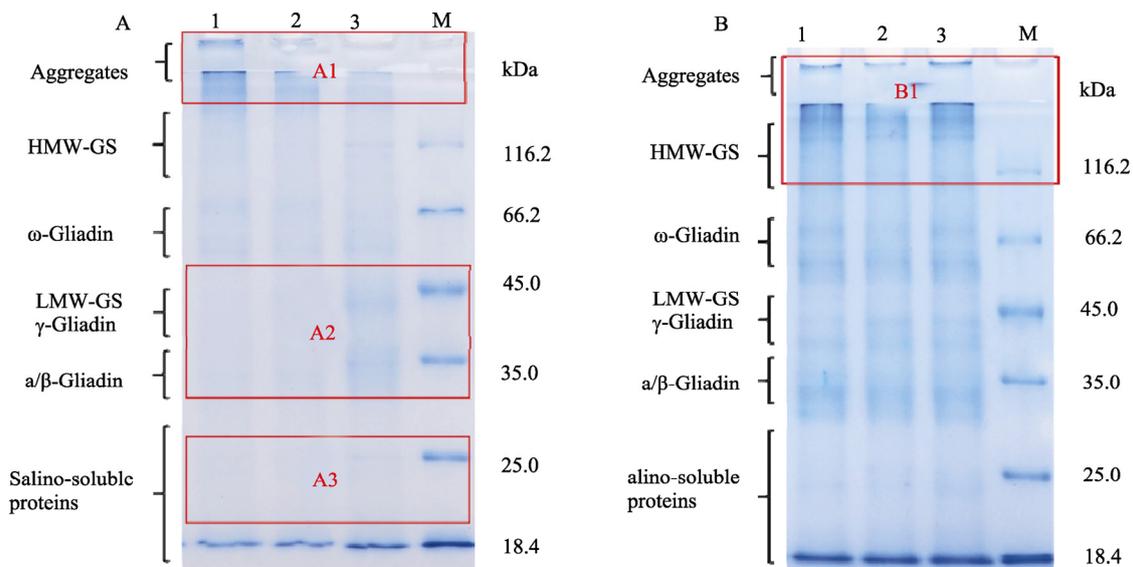
图 5 加热后不同类型玉米淀粉模拟面团的自由巯基、化学键和疏水作用的变化

Fig. 5 Changes of free sulfhydryl group, chemical bond and hydrophobic action of different types of corn starch simulated dough after heating

2.5 面筋蛋白分子量分布分析

采用还原型和非还原型聚丙烯酰胺凝胶电泳分析了不同直支链淀粉比对面筋蛋白的聚集行为。在非还原型聚丙烯酰胺凝胶电泳模式下(图 6 A),在 A1 区域主要含有面筋蛋白聚集体, A2 区域以及 A3 区域主要是 γ -醇溶蛋白、 α/β -醇溶蛋白、低分子量谷蛋白和盐溶性蛋白,显然图 6 A 中,蜡质玉米淀粉面团中的低分子量蛋白含量多,高分子量蛋白含量少,与面团中的二硫键含量对应,蜡质玉米淀粉面团中二硫键含量最少,蛋白聚集程度低。这可能是蜡质淀粉易吸水膨胀,形成“空间位阻”效应,阻碍面筋蛋白之间的交联。另一方面经过加热,蜡质淀粉表面相对于普通和高直链淀粉对面筋聚合物具有较高的粘附性,这些物理吸附作用导致面筋蛋白之间的交联减少,从而抑制了蛋白聚集的形成^[26]。

由还原聚丙烯酰胺凝胶电泳图谱(图 6 B)可以得出,经 DTT 还原后,分子间二硫键断裂,导致 3 种面团蛋白的分子量分布基本没有差别。并且, B1 区域是以高分子量谷蛋白和面筋蛋白聚集体为主,不同类型面团之间条带没有差别,表明面筋蛋白和淀粉之间的相互作用不存在共价键^[27-28]。



注：(A)：非还原条件，(B)：还原条件；M 代表标准分子质量；1、2 和 3 分别代表普通玉米淀粉模拟面团、高直链玉米淀粉模拟面团和蜡质玉米淀粉模拟面团。

Note: (A): Non reducing conditions, (B): reducing conditions; M represents the standard molecular weight; 1, 2 and 3 represent ordinary corn starch simulated dough, high amylose corn starch simulated dough, and waxy corn starch simulated dough, respectively.

图 6 不同类型玉米淀粉模拟面团中面筋蛋白的 SDS-PAGE 图谱

Fig.6 SDS-PAGE map of gluten protein in simulated dough of different types of corn starch

2.6 二级结构分析

面筋的二级结构可以通过分子间 β -折叠、 β -折叠、无规则卷曲、 α -螺旋和 β -转角的内容来表征,图 7 A~B 显示了面筋蛋白的 FTIR 光谱和酰胺 I 带的反卷积结果,在波长为 $1600\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ 处,这段吸收峰因 $\text{C}=\text{O}$ 双键 (70%~85%) 和 $\text{C}-\text{N}$ (10%~20%) 基团的拉伸振动形成。如图 7 A 所示,显示了不同二级结构的内容,3 种面团红外图谱的趋势相似,表明没有产生新的结构^[29]。且面筋中酰胺 I 带的典型分解图如图 7 B 所示,基线校正和高斯平滑后通过反卷积获得 5

个分量。

由表 1 可知,面筋蛋白中 β -折叠结构占主导地位,其含量在 34%左右, Fan Ling 等^[30]对 β -折叠含量的研究结果在 29%~34%范围,与本研究结果基本一致。蜡质玉米淀粉面团面筋蛋白的 α -螺旋低于普通玉米淀粉面团和高直链玉米淀粉面团,并逐渐向 β -转角转变, α -螺旋相较于 β -转角更加有序和稳定^[31],向 β -转角结构转化越多,解聚程度越大,这可能与蜡质玉米淀粉对面筋蛋白聚集的抑制有关,与测定的分子量结果一致。

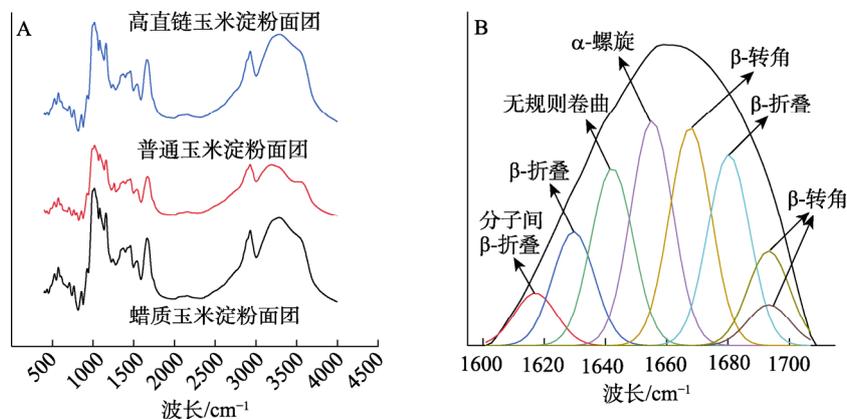
表 1 不同类型玉米淀粉模拟面团中面筋蛋白二级结构含量的变化

Table 1 Changes of secondary structure content of gluten proteins in simulated dough of different types of corn starch

二级结构	蜡质玉米淀粉面团/%	普通玉米淀粉面团/%	高直链玉米淀粉面团/%
分子间 β -折叠	5.58±0.52 ^c	6.22±0.04 ^{ab}	6.50±0.33 ^a
β -折叠	28.44±0.06 ^a	28.35±0.02 ^{ab}	28.41±0.08 ^{ab}
无规则卷曲	15.06±0.46 ^c	16.33±0.11 ^a	16.35±0.14 ^a
α -螺旋	18.75±0.08 ^c	19.17±0.00 ^{ab}	18.97±0.08 ^{bc}
β -转角	32.17±0.96 ^a	29.93±0.13 ^b	29.76±0.47 ^b

注:同一行不同小写字母表示不同类型玉米淀粉模拟面团的面筋蛋白二级结构之间存在显著差异 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicated that there were significant differences in the secondary structure of gluten protein of different types of corn starch simulated dough ($P<0.05$).



注: (A): FTIR 光谱, (B): 酰胺 I 带的反卷积结果。

Note: (A) FTIR spectrum, (B) deconvolution result of amide I band.

图 7 不同类型玉米淀粉模拟面团中面筋蛋白二级结构分析

Fig.7 Secondary structure analysis of gluten protein in simulated dough of different types of corn starch

3 结论

综上所述,不同结构玉米淀粉会不同程度影响面团的物化特性。在加热过程中,高直链玉米淀粉显著增强了面团的粘弹性,面筋蛋白的聚集程度更大,这主要与高直链淀粉较难糊化有关,从而为面团体系提供了更强的结构支撑。由于蜡质玉米淀粉更易糊化,在加热过程中与

面筋蛋白竞争水分,抑制了面筋蛋白的交联,导致面团的粘弹性降低,这是淀粉糊化和面筋部分聚集的共同结果。总之,更高含量的蜡质玉米淀粉可以使面团的流动性和延展性更好,更有利于面团加工品质的调控。本研究为淀粉结构特性调节面团加工的控制策略提供了方法参考。

参考文献:

- [1] 胡晓会. 淀粉对马铃薯面包体系中面筋蛋白网络形成及聚集状态影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
HU X H. Study on the effects of starch on the formation and aggregation state of gluten protein in wheat-potato composite bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [2] ZHOU T T, ZHANG L, ZHAO R X, et al. Effects of particle size distribution of potato starch granules on rheological properties of model dough underwent multiple freezing-thawing cycles[J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111112.
- [3] ZHANG J, LI J W, FAN L P. Effect of starch granule size on the properties of dough and the oil absorption of fried potato crisps[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268: 131844.
- [4] ZHANG D Q, MU T H, SUN H N. Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 176: 345-355.
- [5] ZHANG D Q, MU T H, SUN H N. Effects of starch from five different botanical sources on the rheological and structural properties of starch-gluten model doughs[J]. *Food Research International*, 2018, 103: 156-162.
- [6] KUANG J W, XU K, DANG B, et al. Interaction with wheat starch affect the aggregation behavior and digestibility of gluten proteins[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127066.
- [7] ZOU Y Y, YE F Y, ZHANG Z H, et al. Heat-moisture treatment can modulate all-purpose wheat flour for short dough biscuit making: evidences and mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2024, 451: 139512.
- [8] LIN Q, LIANG W, SHEN H S, et al. Enhanced B-type starch granules proportion modulates starch-gluten interactions during the thermal processing of reconstituted doughs[J]. *Food Chemistry*, 2024, 454: 139712.
- [9] KUANG J W, YANG Q, HUANG J R, et al. Curdlan-induced rheological, thermal and structural property changes of wheat dough components during heat treatment[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 107: 103528.
- [10] LI C L, DHITAL S, GILBERT R G, et al. High-amylose wheat starch: Structural basis for water absorption and pasting properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116557.
- [11] HELLEMANS T, NEKHUZHIIHA H, BOCKSTAELE F V, et al. Variation in amylose concentration to enhance wheat flour extrudability[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95: 102992.
- [12] MCCANN T, HOMER S, ØISETH S K, et al. High amylose wheat starch increases the resistance to deformation of wheat flour dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 440-448.
- [13] ZHAO X H, HOU C D, TIAN M Q, et al. Effect of water-extractable arabinoxylan with different molecular weight on the heat-induced aggregation behavior of gluten[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105318.
- [14] 邝吉卫. 热加工过程中小麦淀粉与面筋蛋白的相互作用机制及模拟面团品质[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
KUANG J W. Mechanisms of wheat starch-gluten interactions during the thermal processing and the quality of simulated dough[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2022.
- [15] ZHANG Y Y, QIN Y N, LIANG Q H, et al. Breaking the temperature limitation of zein-rice starch dough by microwave pre-gelatinization: Morphological, structural and rheological properties of the dough[J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113465
- [16] 张笃芹. 高静压处理淀粉对谷朊蛋白和 HPMC 面团流变学特性影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
ZHANG D Q. Effects of high hydrostatic pressure treated starch on the rheological properties of starch-gluten and starch-HPMC doughs[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [17] 岳红霞, 李欣雪, 程丽婷, 等. 不同分子结构的黄原胶对冷冻面团及面包特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(8): 15-21.
YUE H X, LI X X, CHENG L T, et al. Effect of xanthan gum with different molecular structures on the characteristics of frozen dough and bread[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(8): 15-21.
- [18] 顾雨辰. 高直链玉米粉对面团特性及馒头品质的影响探究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
GU Y C. Study on the effect of high-amylose corn flour on dough characteristics and quality of Chinese steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [19] LI C L, GIDLLEY M J. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced aging of high-amylose wheat bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132673.
- [20] 申慧珊. 面团加工过程中小麦 A、B 淀粉影响面筋蛋白结构转变的机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2024.
SHEN H S. Study on the mechanism of wheat A- and B-starch affecting the structural transformation of gluten protein during dough processing[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2024.
- [21] 陈金凤, 张盛贵, 马云翔, 等. 马铃薯淀粉对低筋粉面团特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 66-71.
CHEN J F, ZHANG S G, MA Y X, et al. Effect of potato starch on properties of low-gluten dough[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(10): 66-71.
- [22] WANG X Y, LIU S Y, AI Y F. Gelation mechanisms of granular and non-granular starches with variations in molecular structures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129(1): 107658.
- [23] EMIDE D, MAGNI C, SAITTA F, et al. Molecular insights into the role of amylose/amylopectin ratio on gluten protein organization[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134675.

- [24] 郭晓丹. 小麦粉吸水速率与其组分的关系及对面团品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
GUO X D. Relationship between water absorption speed and wheat flour composition and its effect on dough quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [25] YAO Y Y, ZHOU C X, WANG J Y, et al. Improving of noodle quality caused by starch-protein interaction of waxy and strong-gluten wheat flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 188: 115394.
- [26] LI X X, FAN M C, HUANG Q L, et al. Effect of wet-media milling on the physicochemical properties of tapioca starch and their relationship with the texture of myofibrillar protein gel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106082.
- [27] LI C F, CHEN G J, RAN C X, et al. Adlay starch-gluten composite gel: Effects of adlay starch on rheological and structural properties of gluten gel to molecular and physico-chemical characteristics[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 121-129.
- [28] ZHOU Y, ZHAO D, FOSTER T J, et al. Konjac glucomannan-induced changes in thiol/disulphide exchange and gluten conformation upon dough mixing[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 163-169.
- [29] XIE X J, LIU Q, CUI S W. Studies on the granular structure of resistant starches (type 4) from normal, high amylose and waxy corn starch citrates[J]. Food Research International, 2006, 39(3): 332-341.
- [30] FAN L, WANG H P, LI M Y, et al. Impact of wheat bran dietary fiber on gluten aggregation behavior in dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128765.
- [31] WANG D Y, LIU L L, WANG B, et al. Preparation of lactic acid bacteria compound starter cultures based on pasting properties and its improvement of glutinous rice flour and dough[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(4): 2090-2101. 