

doi:10.12301/spxb202300297

文章编号:2095-6002(2024)03-0171-10

引用格式:王金梦,孙春晓,吴勃,等.部分水解瓜尔胶的酶法制备及其对面包烘焙特性的影响[J].食品科学技术学报,2024,42(3):171-180.



WANG Jinmeng, SUN Chunxiao, WU Bo, et al. Enzymatic preparation of partially hydrolyzed guar gum and its effect on baking characteristics of bread[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(3):171-180.

部分水解瓜尔胶的酶法制备及其对面包烘焙特性的影响

王金梦¹, 孙春晓¹, 吴勃^{1,2}, 王云龙², 周庆礼¹, 郭庆彬^{1,3,*}, 王昌禄^{1,3,*}

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院, 天津 300457;

2. 杭州保安康生物技术有限公司, 浙江 杭州 310014;

3. 天津科技大学 省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457)

摘要:为研究部分水解瓜尔胶(partially hydrolyzed guar gum, PHGG)对面包烘焙特性的影响,以瓜尔胶(guar gum, GG)为原料,采用酶解法制备 PHGG。在比较 PHGG 和 GG 基本组成差异的基础上,采用质构仪、低场核磁共振仪、差示扫描量热仪和九分嗜好评分法研究 PHGG 添加量对面包烘焙品质及储藏特性的影响。基本组成分析结果表明,与 GG 相比,PHGG 的黏度和分子质量显著下降,分别为 (118.80 ± 0.62) mPa·s、8.1 kDa。烘焙品质分析结果表明,添加 PHGG 对面包比容无显著影响,但可显著降低面包的烘焙损失率,从 $(14.08 \pm 0.77)\%$ 降低至 $(11.73 \pm 1.29)\%$;并赋予了面包更好的色泽。面包储藏特性研究结果表明:在 7 d 储藏期内,PHGG 显著提高了面包的保水率,从 $(77.48 \pm 0.43)\%$ 增加至 $(85.58 \pm 4.15)\%$;改善了面包的内聚性和回复性;促进了面包内部水分的迁移,进而增加了面包内部结构的稳定性,具有延缓面包老化的效果。此外,感官评价结果表明,PHGG 添加组面包的感官评分高于对照组面包。PHGG 添加量(质量分数)为 2.5%~4.5% 时可显著改善面包的烘焙品质、储藏特性和感官品质,研究旨在为 PHGG 在食品加工中的应用提供一定理论参考。

关键词:酶法制备;部分水解瓜尔胶;面包;烘焙品质;储藏特性

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

面包是一种常见的主食及休闲食品,多由精制的小麦粉制成,膳食纤维含量低。随着饮食精细化程度的上升,人们越发关注膳食均衡和膳食纤维的摄入^[1]。膳食纤维的补充有利于降低机体胆固醇水平、调节血糖及增强免疫力^[2]。研究表明,在面包中添加膳食纤维,可以强化面包营养价值,改善风味与品质^[3]。

瓜尔胶(guar gum, GG)是一种重要的多糖类膳食纤维,具有高分子质量、高黏度等特性^[4]。GG 主链由 D-甘露糖残基经 β -1,4 糖苷键连接而成,侧链

由 D-半乳糖残基通过 α -1,6 糖苷键连接在主链上,甘露糖和半乳糖的物质的量比为 2:1^[5]。GG 具有良好的水溶性、增稠性和胶凝特性,可以作为体系稳定剂、增稠剂和改进剂,广泛应用于烘焙制品、饮料等众多食品中^[6]。但由于 GG 分子质量大、黏度高,难以充分发挥膳食纤维的功能,而且会对食品的感官品质和加工性能造成不利影响。因此,需要对 GG 进行酶解,制备分子质量较低的部分水解瓜尔胶(partially hydrolyzed guar gum, PHGG),以提高 GG 在食品工业中的应用价值。

收稿日期:2023-05-17

基金项目:天津市科技计划项目(21ZYJJC00110)。

Foundation: Project of Tianjin Science and Technology Program (21ZYJJC00110)。

第一作者:王金梦,女,硕士研究生,研究方向为食品营养机理与功能评价。

*通信作者:郭庆彬,男,教授,博士,主要从事食品科学与工程方面的研究;

王昌禄,男,教授,博士生导师,主要从事发酵食品与食品新资源开发方面的研究。

PHGG 是一种低分子质量、低黏度的水溶性膳食纤维,其分子结构与 GG 相似,表现出和 GG 相似的生理功能^[7]。PHGG 无色、无味,可溶性膳食纤维含量达到 80%,添加到食品中不会影响食品原本的颜色、气味和口感,是开发强化膳食纤维食品的独特功能成分^[8]。在强化和富集膳食纤维的同时,PHGG 可以改善食品的加工特性。Mudgil 等^[9]发现,PHGG 可以提高小麦面团体系的吸水率和淀粉糊化率,增加面团的黏弹性。胡慧芳等^[10]发现,添加适量的 PHGG 能延长面团的形成时间和稳定时间,并显著延缓馒头老化。Hussain 等^[11]在酸奶中添加 PHGG,可以提高酸奶的酸度,促进 2 种双歧杆菌的增殖。Mary 等^[12]的研究也证实,PHGG 的加入改善了酸奶的流变、质地和理化性能,提高了产品竞争力。目前,PHGG 用于食品的研究多集中于面粉和乳制品,关于 PHGG 影响面包烘焙特性的研究相对较少。

研究拟通过酶解、喷雾干燥技术制备 PHGG,对 GG 和 PHGG 的基本理化指标进行对比。将不同质量分数(0.0.5%、2.5%、4.5%)的 PHGG 添加到面粉中,经面团发酵后烘焙,研究 PHGG 对面包烘焙品质、储藏特性和感官评价的影响,旨在为开发高膳食纤维含量的烘焙产品提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

GG、 β -甘露聚糖酶(酶活 8 000 U/g),杭州保安康生物技术有限公司;DNS 试剂(分析纯),上海远慕生物科技有限公司;BCA 蛋白浓度试剂盒,北京索莱宝生物科技有限公司;硝酸钠(分析纯),天津市化学试剂一厂。

小麦面粉,天津市明耀超市;耐高糖酵母,安琪酵母股份有限公司;日晒自然盐,中盐上海市盐业有限公司;食用油,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;实验用水为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

H9KT05008 型磁力搅拌器,美国 Thermo 公司;RE-2000 型旋转蒸发仪,上海亚荣仪器厂;YC-015 型喷雾干燥机,上海雅程仪器设备有限公司;SUI510 型真空干燥箱,日立(中国)有限公司;NDJ-8S 型黏度计,上海力辰邦西仪器科技有限公司;马弗炉,北京宏大博宇科技有限公司;Infinite 200Pro

型酶标仪,上海安景科技有限公司;LC-20A 型示差高效液相色谱仪,日本岛津公司;ESC1510 型摩卡面包机,美的集团股份有限公司;K35FK602 型苏泊尔电烤箱,浙江苏泊尔股份有限公司;Alpha 1-2 Ld-plus 型色差仪,德国 Marin Christ 公司;TA.XT plus 型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;Kjeltec 8400 型低场核磁共振成像分析仪,丹麦福斯集团公司;DSC Q20 型差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC),美国 TA 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 PHGG 粉的制备

参考 Mudgil 等^[13]的研究方法并稍加修改。称取 β -甘露聚糖酶,在 45 °C 条件下溶于蒸馏水,持续搅拌使其充分溶解,分别过 4 层与 8 层纱布且离心,得到均匀澄清酶液。将酶液的 pH 值调至 5.49,预热到 57 °C,向酶液中加入质量浓度为 10 g/mL 的 GG,充分搅拌,使 GG 与酶液充分反应 3.1 h。反应结束后,立即沸水浴 15 min 灭酶活,得到 PHGG 酶解液。通过旋转蒸发仪将 PHGG 酶解液的固形物含量浓缩至 6.44%,在进风温度 185 °C、进料速度 7.5 mL/min 的参数下进行喷雾干燥,得到 PHGG 粉,置于干燥器中备用。

1.3.2 GG 与 PHGG 理化性质测定

1.3.2.1 水分含量测定

水分含量测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。

1.3.2.2 黏度测定

用蒸馏水分别配制质量浓度为 1 g/mL 的 GG 和 5 g/mL 的 PHGG 溶液,持续搅拌 24 h,张角百分比在 50% 时测定 GG 和 PHGG 的表观黏度。

1.3.2.3 灰分含量测定

灰分含量测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》。

1.3.2.4 蛋白质含量测定

采用 BCA 蛋白浓度试剂盒测定 GG 和 PHGG 的蛋白质含量。

1.3.2.5 还原糖含量测定

还原糖含量测定参考 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》。

1.3.3 GG 与 PHGG 分子质量测定

参照 Lin 等^[14]的方法并稍加修改。流动相在 40 kHz 工作频率、480 kW 功率下超声 30 min。将 GG 和 PHGG 粉溶于流动相,配制成 1 mg/mL 的溶

液,充分溶解后,过0.22 μm 水系滤膜,收集滤液,测定分子质量。色谱条件:色谱柱为 Ultrahydrogel™ 500 column 和 Ultrahydrogel™ DP 120A column 水溶性凝胶柱串联,保护柱为 Ultrahydrogel™ DP guard column,柱温 40 ℃,流动相为 0.1 mol/L 硝酸钠溶液,流速 0.6 mL/min,进样量 20 μL。

1.3.4 PHGG 对面包烘焙品质的影响

1.3.4.1 面包制备

按照质量分数 0、0.5%、2.5%、4.5% 的比例将 PHGG 粉添加到小麦面粉中,混合均匀备用,不添加 PHGG 的小麦面粉为对照组。

取 100 g 混合面粉,依次加入耐高糖酵母 1.2 g、食盐 1.2 g 和温水 60 mL,搅拌均匀,再加入 4 g 油搅拌成团,并分割整形,获得(25.0 ± 0.1) g 面团,然后醒发(温度 37 ℃、湿度 80%,1 h)、焙烤(上、下火 180 ℃,18 min),冷却后备用。

1.3.4.2 面包比容的测定

面包烘焙好后冷却至室温,称重。采用小米置换法测量面包体积。比容计算见式(1)。

$$SV = \frac{V}{m} \quad (1)$$

式(1)中,SV 为面包比容;V 为烘焙后冷却至室温的面包体积,mL;m 为烘焙后冷却至室温的面包质量,g。

1.3.4.3 面包烘焙损失率的测定

参考 Şimşek 等^[15]的方法,利用电子天平测定发酵后面团的质量,然后将烘焙后的面包冷却至室温,脱模称重。烘焙损失率计算见式(2)。

$$\text{烘焙损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中,m₁为烘焙前加入模具的面团质量,g;m₂为烘焙后冷却至室温的面包质量,g。

1.3.4.4 面包色泽的测定

采用白板对色差仪进行校正。将需要测定的面包皮和面包芯依次对准检测孔,启动仪器测量 L* 值、a* 值、b* 值。每个样品测 3 次,结果取平均值。样品组与对照组间的总色泽差值以 ΔE 表示,计算见式(3)。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (3)$$

1.3.5 PHGG 对面包储藏特性的影响

1.3.5.1 面包水分含量的测定

将烘焙好的面包密封完整,4 ℃下储藏,分别于

第 1、7 天取样。参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》规定的方法测定面包芯的水分含量,取样时以面包中心部位为准,平行取 3 个样品。

1.3.5.2 面包质构的测定

参考 Nawrocka 等^[16]的方法并略加修改。将烘焙好的面包密封完整,4 ℃下储藏,分别于第 1、7 天取样。将不同储藏时间点的面包切割成 30 mm × 25 mm × 5 mm 的均匀薄片,采用质构仪进行 TPA 全质构分析。实验参数设定:探头 P/100,测前速度 1 mm/s,测试速度 1.7 mm/s,测后速度 10 mm/s,压缩程度 75%,触发力 0.004 9 N。面包质构特性指标包括:硬度、胶黏性、咀嚼性、回复性以及内聚性。

1.3.5.3 面包水分分布及迁移情况的测试

将烘焙好的面包密封完整,4 ℃下储藏,分别于第 1、7 天取样。准确取小块同等质量的面包芯样品,放在核磁管内,采用 CPMG 脉冲序列测试面包水分分布及迁移情况。实验参数:连续扫描的持续时间 10 000 ms,回波时间 0.2 ms,回波数 2500,扫描次数 16。

1.3.5.4 面包糊化熔的测定

参考 Nawrocka 等^[16]的方法并稍加修改。将烘焙好的面包密封完整,4 ℃下储藏,分别于第 1、7 天取样。将面包芯冷冻干燥,研磨成粉。准确称取 6.0 mg 面包芯粉于小坩埚中,加 3 mL 超纯水,密封,平衡过夜,采用差示扫描量热仪测定面包的糊化熔。实验参数:流速 50 mL/min,升温速率 10 ℃/min,温度范围 20 ~ 120 ℃。

1.3.6 面包的感官评价

面包烘焙后,自然冷却至室温。建立由 10 人组成的感官评价小组,根据九分嗜好评分法,对面包的外观、色泽、风味、口感和整体可接受度 5 个方面进行评分,评价分值满分为 9 分。所得结果去除最大值和最小值后,取平均值。面包的感官评分标准见表 1。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据处理;用 Origin 2022 软件对数据进行分析 and 绘图。实验结果用平均值 ± 标准偏差表示,并用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行显著性分析,P < 0.05 时存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 PHGG 理化组成分析

GG 和 PHGG 的理化组成见表 2。结果表明,

表1 面包的感官评分标准
Tab.1 Sensory rating criteria of bread

评价指标	评分标准	得分/分
外观	表面塌陷,粗糙	1~3
	表面光滑,无明显塌陷,有些许裂纹	4~6
	表面光滑,无明显塌陷,无裂纹	7~9
色泽	呈灰白色	1~3
	呈浅棕色	4~6
	呈金黄色或棕黄色	7~9
风味	有异味或酸味	1~3
	无异味,有轻微甜味	4~6
	有明显的面包香甜味	7~9
口感	较干,容易断裂掉渣	1~3
	较松软,不易掉渣	4~6
	松软,口感绵密	7~9
整体可接受度	很不喜欢	1~3
	一般喜欢	4~6
	喜欢	7~9

GG 经过 β -甘露聚糖酶酶解后,分子质量、黏度及蛋白质含量降低,而灰分和还原糖含量显著增加。黏度的下降与分子质量有关,酶解导致 GG 主链断裂,链长缩短,分子质量降低,黏度随之下降。水分含量的降低可能是由于喷雾干燥的高温环境造成了水分蒸发。PHGG 的蛋白质含量低于 GG,可能是蛋白质的不溶性导致的。在去除酶解液杂质过程中,GG 中的蛋白质从水溶性的 PHGG 中除去,因此,蛋白质含量降低。还原糖含量显著增加,是酶解过程中,GG 分子的主链在 β -甘露聚糖酶的作用下发生断裂,暴露出更多的还原性末端引起的,这与 Mudgil 等^[8]的报道结果一致。

2.2 PHGG 添加量对面包烘焙品质的影响
2.2.1 PHGG 添加量对面包比容和烘焙损失率的影响

不同添加量 PHGG 对面包比容和烘焙损失率

表2 GG 和 PHGG 的理化组成
Tab.2 Physicochemical composition of GG and PHGG

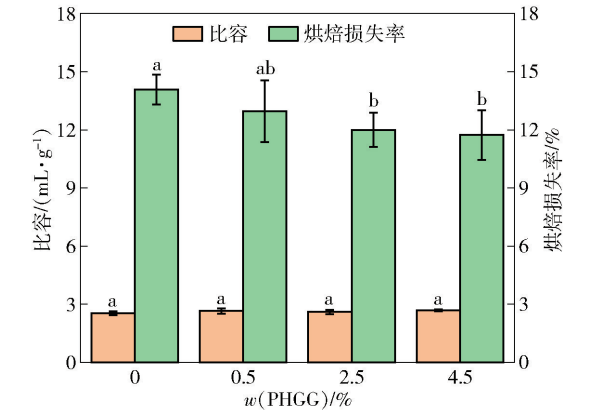
样品	$w(\text{水})/\%$	$\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$w(\text{灰分})/\%$	$w(\text{蛋白质})/\%$	$w(\text{还原糖})/\%$	m/kDa
GG	2.03 ± 0.18	$5\,628.23 \pm 346.02$	0.71 ± 0.02	4.83 ± 0.44	3.80 ± 0.19	593.14
PHGG	2.11 ± 0.34	118.80 ± 0.62	2.68 ± 0.24	2.37 ± 0.33	41.58 ± 0.90	8.12

的影响见图1。由图1可以看出,随着 PHGG 添加量的增加,面包比容无显著变化;但烘焙损失率显著降低,且在 PHGG 添加量为质量分数 2.5% 时达到平稳。这是因为 PHGG 作为一种膳食纤维,含有大量亲水性基团,会吸收水分^[17],因此在焙烤时减少了面包的水分蒸发。

2.2.2 PHGG 添加量对面包色度的影响

不同添加量 PHGG 对面包皮和面包芯色度的影响见表3。PHGG 质量分数为 0、0.5%、2.5% 和 4.5% 时面包色泽变化见图2。随着 PHGG 添加量的增加,面包皮的 L^* 值从对照组的 68.93 ± 0.86 降至 57.82 ± 1.13 ,面包芯的 L^* 值从对照组的 80.61 ± 2.67 降至 75.93 ± 1.40 ,表明 PHGG 显著降低了面包表皮和内芯的亮度,且面包皮 L^* 值降低的幅度较大。 a^* 值和 b^* 值随 PHGG 添加量的增加逐渐上升,表明 PHGG 的添加使面包的色泽更倾向于红色和黄色。这一结果与产品呈现的色泽相符(图2)。这可能是由于面包在高温烘焙过程中,PHGG 与氨基酸或者蛋白质之间发生美拉德反应和焦糖化反应,从而使面包呈现很好的棕黄色^[18]。

色差值 ΔE 反映了各组面包间的颜色差异大小, ΔE 越大,肉眼越能明显观察到色泽的变化^[19]。由表3可得,PHGG 添加量(质量分数)为 2.5%、4.5% 的面包皮的 ΔE 分别为 8.23、13.26。结果表明,与对照组相比,添加量为质量分数 2.5% 和 4.5% 的 PHGG 对面包皮的色泽有明显的影



不同小写字母表示相同指标在不同 PHGG 添加量时数据差异显著($P < 0.05$)。
图1 不同添加量的 PHGG 对面包比容和烘焙损失率的影响
Fig.1 Effect of different dosages of PHGG on bread specific volume and baking loss rate

表 3 不同添加量的 PHGG 对面包色度的影响					
Tab.3 Effect of different dosages of PHGG on bread chromaticity					
样品	$w(\text{PHGG})/\%$	L^*	a^*	b^*	ΔE
面包皮	0	68.93 ± 0.86^a	12.95 ± 0.73^d	37.86 ± 1.08^b	
	0.5	65.34 ± 0.59^b	14.24 ± 0.81^c	40.43 ± 0.52^a	4.60
	2.5	62.84 ± 0.65^c	17.58 ± 0.66^b	40.88 ± 0.80^a	8.23
	4.5	57.82 ± 1.13^d	19.27 ± 0.06^a	41.36 ± 0.54^a	13.26
面包芯	0	80.61 ± 2.67^a	0.87 ± 0.29^c	19.98 ± 1.59^a	
	0.5	78.19 ± 0.73^{bc}	1.37 ± 0.27^{bc}	21.03 ± 0.81^a	2.68
	2.5	78.34 ± 0.80^{ab}	1.54 ± 0.56^b	21.74 ± 3.49^a	2.94
	4.5	75.93 ± 1.40^c	2.37 ± 0.21^a	22.62 ± 1.47^a	3.78

不同小写字母表示同一样品在不同 PHGG 添加量时的数据差异显著 ($P < 0.05$)。

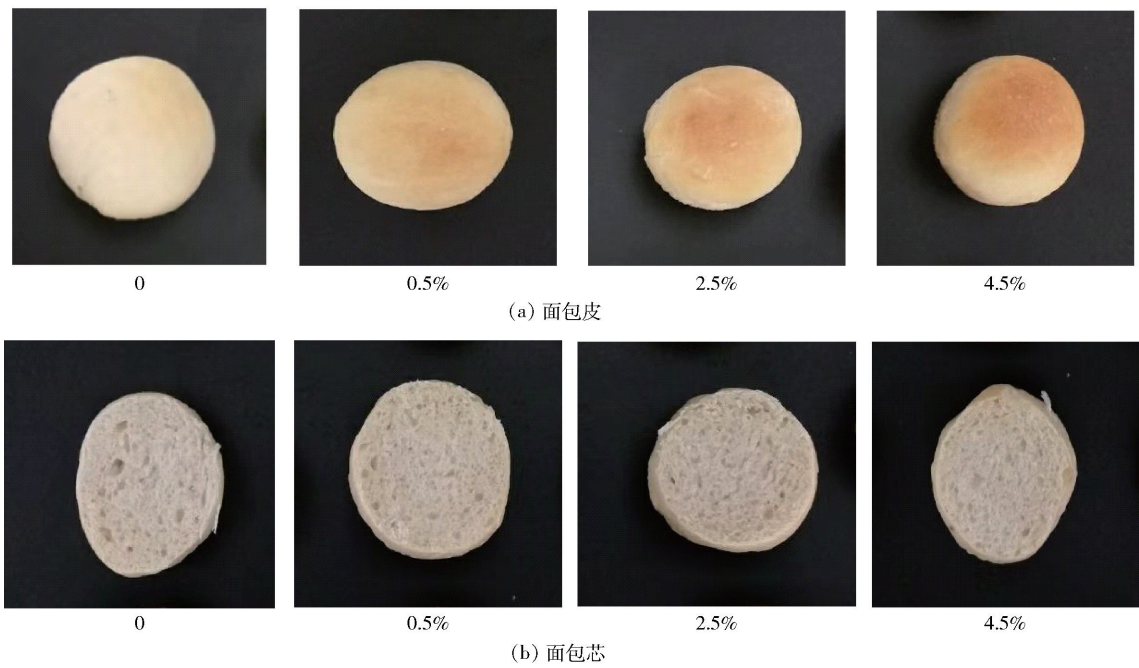


图 2 不同 PHGG 添加量的面包色泽

Fig.2 Bread color with different dosages of PHGG

2.3 PHGG 添加量对面包储藏特性的影响

2.3.1 PHGG 添加量对储藏期面包水分含量的影响

不同添加量 PHGG 对储藏期面包水分含量的影响见表 4。4 组面包的水分含量在储藏 1 ~ 7 d 均呈下降趋势。储藏 1 d 时,与对照组相比,PHGG 添加量为质量分数 4.5% 的面包水分含量最高。储藏 7 d 时,PHGG 组面包的水分含量均高于对照组。其中,添加量(质量分数)为 2.5% 的面包水分含量最高,保水率也最高,分别为 $(32.55 \pm 0.50)\%$ 和 $(85.58 \pm 4.15)\%$ 。结果表明,在 7 d 储藏期内,添加 PHGG 可以提高面包的持水性和保水性。而 PHGG 添加量过高,可能会阻碍面筋蛋白的形成,降

低吸水率^[20],从而导致添加量(质量分数)为 4.5% 的面包保水率下降。

表 4 不同添加量的 PHGG 对储藏期面包水分的影响

Tab.4 Effect of different dosages of PHGG on bread moisture during storage

$w(\text{PHGG})/\%$	$w(\text{水})/\%$		保水率/ $\%$
	储藏 1 d	储藏 7 d	
0	38.04 ± 0.34^b	29.47 ± 0.10^b	77.48 ± 0.43^b
0.5	37.47 ± 0.48^b	29.78 ± 0.83^b	79.50 ± 3.22^{ab}
2.5	38.06 ± 1.26^b	32.55 ± 0.50^a	85.58 ± 4.15^a
4.5	40.38 ± 0.29^a	31.4 ± 0.03^a	77.77 ± 0.49^b

不同小写字母表示同列数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.2 PHGG 添加量对储藏期面包质构特性的影响

面包硬度、胶黏性、内聚性受面团中蛋白质含量、面筋含量等成分影响,决定着面包的质量及口感等^[21]。不同添加量 PHGG 对储藏期面包质构特性的影响见表 5。面包的 5 个指标在储藏 7 d 内呈波动变化趋势。储藏 1 d 时,与对照组相比,PHGG 的添加增加了面包的硬度、咀嚼性和胶黏性,降低了内聚性和回复性。储藏 7 d 时,与对照组相比,PHGG 的添加对面包硬度、咀嚼性和胶黏性影响不明显,提高了面包的内聚性和回复性。其中,PHGG

添加量为 4.5% 的面包内聚性和回复性最大,分别为 0.65 ± 0.02 和 0.35 ± 0.03 。结果表明,在 7 d 储藏期内,PHGG 可提高面包的内聚性和回复性,使面包的抗形变能力和形变恢复能力增强。PHGG 面包内聚性和回复性增加的原因,可能是由于面筋蛋白网络结构受到一定影响。PHGG 中含有较多的亲水性基团,随着 PHGG 添加量的增加,越来越多的水分与 PHGG 结合,使面筋蛋白结合水量减少,蛋白质胶粒的相对浓度增加,分子基团结合更紧密^[22]。

表 5 不同添加量的 PHGG 对储藏期面包质构特性的影响

Tab. 5 Effect of different dosages of PHGG on texture characteristics of bread during storage

<i>t</i> (储藏)/d	<i>w</i> (PHGG)/%	硬度/N	内聚性	咀嚼性/N	胶黏性	回复性
1	0	5.90 ± 1.67 ^b	0.79 ± 0.07 ^a	0.85 ± 0.25 ^b	4.63 ± 0.94 ^b	0.46 ± 0.06 ^a
	0.5	9.28 ± 1.01 ^b	0.65 ± 0.05 ^b	3.66 ± 2.11 ^b	5.99 ± 0.17 ^b	0.32 ± 0.04 ^b
	2.5	17.00 ± 1.38 ^a	0.57 ± 0.01 ^b	7.84 ± 0.09 ^a	9.63 ± 0.69 ^a	0.28 ± 0.00 ^b
	4.5	13.82 ± 0.18 ^a	0.63 ± 0.04 ^b	3.37 ± 0.29 ^b	8.71 ± 0.45 ^a	0.31 ± 0.02 ^b
7	0	11.88 ± 2.45 ^a	0.57 ± 0.01 ^b	4.55 ± 1.19 ^a	6.80 ± 1.26 ^a	0.24 ± 0.00 ^b
	0.5	11.77 ± 0.73 ^a	0.58 ± 0.03 ^b	5.50 ± 0.18 ^a	6.81 ± 0.04 ^a	0.26 ± 0.01 ^b
	2.5	13.26 ± 0.97 ^a	0.58 ± 0.04 ^b	5.39 ± 0.13 ^a	7.61 ± 0.09 ^a	0.27 ± 0.01 ^b
	4.5	16.33 ± 5.31 ^a	0.65 ± 0.02 ^a	6.81 ± 2.88 ^a	10.60 ± 3.76 ^a	0.35 ± 0.03 ^a

不同小写字母表示在同一时间不同 PHGG 添加量时数据差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3.3 PHGG 添加量对储藏期内面包水分分布与迁移的影响

利用低分辨率¹H NMR 测量了不同添加量的 PHGG 面包储藏期的内部水分分布与迁移情况。PHGG 添加量对储藏期面包 T_2 的影响见图 3,横轴表示样品中水分的可移动性,纵轴表示对应弛豫时间下氢质子信号强度,峰面积表示对应种类水分的相对含量^[23]。图 3 中每个曲线上都有 3 个弛豫峰,

代表着样品中水分存在的 3 种形态: T_{21} 表示强结合水(弛豫时间为 0.01 ~ 1 ms), T_{22} 表示弱结合水(弛豫时间为 1 ~ 12 ms), T_{23} 表示自由水(弛豫时间为 40 ~ 250 ms)。 T_2 越小,水分的可移动性越低,表示水分与其他物质的结合力越强^[23]。储藏 7 d 时, T_{22} 弛豫时间峰向左移动(弛豫时间减小),表明质量分数为 4.5% 的 PHGG 的添加可增强面包内部弱结合水与其他物质的结合力,有研究指出,这可能与蛋白

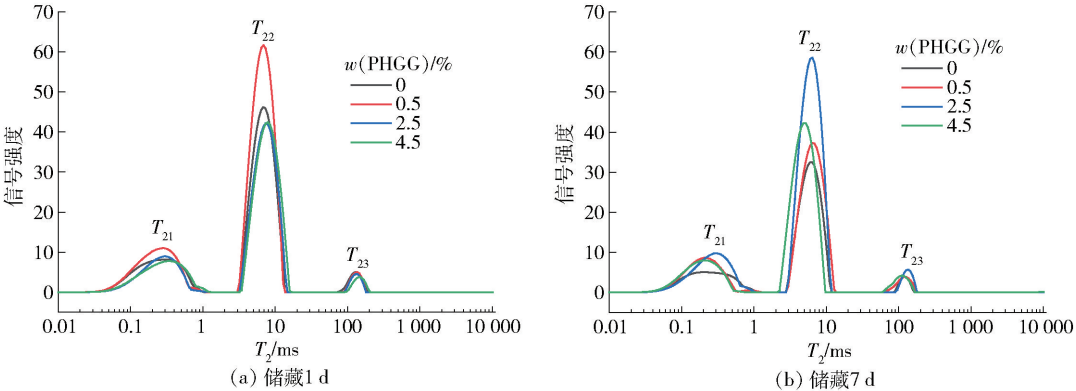


图 3 不同添加量的 PHGG 对储藏期面包 T_2 的影响
Fig. 3 Effect of different dosages of PHGG on bread T_2 during storage

质之间的聚集有关^[24],具体原因和作用机制还需要进行深入研究。

各状态水分的峰面积(A_2)见表 6。随着储藏时间的延长, A_{21} 整体呈下降趋势, A_{22} 呈上升趋势。这种变化的原因是面包内部不同种类水分的迁移和重新分布,可能与储藏期内淀粉结晶的产生有关^[25]。在同一储藏期内,各质子的峰面积占比存在差异。与对照组相比,3 个 PHGG 组面包的 A_{21} 下降,添加质量分数为 0.5% 和 2.5% 的 PHGG 面包中 A_{22} 上升(储藏 1 d),添加质量分数为 4.5% 的 PHGG 面包中 A_{23} 上升(储藏 7 d),表明 PHGG 促进面包内部的强结合水向弱结合水或自由水转变,这与彭博^[22]和 Wang 等^[26]的结果一致。

表 6 储藏期内面包各状态水的峰面积比值

Tab.6 Ratio of peak areas of water content in different states of bread during storage

$w(\text{PHGG})/\%$	储藏 1 d			储藏 7 d		
	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
0	26.44	69.31	4.25	25.69	70.57	3.74
0.5	24.05	73.03	2.92	25.04	70.51	3.39
2.5	24.36	72.08	3.56	21.60	74.91	3.49
4.5	24.50	72.44	3.06	22.60	72.68	4.72

A_{21} 为强结合水的峰面积占比; A_{22} 为弱结合水的峰面积占比; A_{23} 为自由水的峰面积占比。

表 7 不同添加量的 PHGG 对储藏期面包老化的影响

Tab.7 Effect of different dosages of PHGG on bread aging during storage

$t(\text{储藏})/\text{d}$	$w(\text{PHGG})/\%$	$T_0(\text{起始})/^{\circ}\text{C}$	$T_p(\text{峰值})/^{\circ}\text{C}$	$T_c(\text{终止})/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
1	0	45.30 ± 1.69 ^a	49.70 ± 0.00 ^a	55.98 ± 0.17 ^a	0.06 ± 0.02 ^c
	0.5	46.17 ± 1.51 ^a	49.80 ± 1.56 ^a	55.81 ± 0.58 ^a	0.12 ± 0.03 ^b
	2.5	45.25 ± 0.21 ^a	50.45 ± 0.21 ^a	56.95 ± 1.06 ^a	0.19 ± 0.00 ^a
	4.5	45.25 ± 0.35 ^a	49.55 ± 0.35 ^a	58.40 ± 1.70 ^a	0.14 ± 0.00 ^{ab}
7	0	41.15 ± 0.49 ^a	48.15 ± 0.07 ^a	57.90 ± 1.27 ^a	0.87 ± 0.08 ^a
	0.5	41.95 ± 0.07 ^a	48.25 ± 0.64 ^a	57.15 ± 1.63 ^a	0.74 ± 0.05 ^a
	2.5	42.88 ± 0.95 ^a	48.70 ± 0.71 ^a	57.04 ± 1.07 ^a	0.68 ± 0.02 ^a
	4.5	46.25 ± 3.46 ^a	51.80 ± 3.54 ^a	61.05 ± 2.62 ^a	0.38 ± 0.32 ^b

不同小写字母表示同一时间不同 PHGG 添加量时数据差异显著($P < 0.05$)。

2.4 PHGG 添加量对面包感官评价的影响

面包的色泽、口感、风味和整体可接受度反映人们对产品的主观感受和喜爱程度^[29]。面包的感官评价雷达图见图 4,PHGG 添加量对面包感官评价的影响见表 8。与对照组相比,面包配方中 PHGG 的存在显著影响了 5 个评估指标的特征,不同 PHGG 添加量的面包样品之间也存在差异。PHGG 的添加

2.3.4 PHGG 添加量对储藏期内面包老化的影响

面包的变质与面包内淀粉的老化相关。60 ~ 120 ℃ 出现的吸热峰为支链淀粉回生的融解峰,峰面积大小为面包的糊化焓,可反映淀粉的老化程度^[16]。PHGG 添加量对面包糊化焓(ΔH)的影响见表 7。由表 7 可知,随着储藏时间的延长,4 组面包的 ΔH 均增大,表明面包老化程度逐渐加深。在同一储藏期,PHGG 添加量对面包老化程度的影响也有所不同。储藏 1 d 时,PHGG 的添加增加了面包的 ΔH ;储藏 7 d 时,PHGG 的添加降低了面包的 ΔH ,且 ΔH 随着 PHGG 添加量的增加而下降,其中 PHGG 添加量为质量分数 4.5% 的面包 ΔH 由对照组的 (0.87 ± 0.08) J/g 降至 (0.38 ± 0.32) J/g,表明 PHGG 在短期储藏中能够抑制淀粉的老化,延缓面包变质。添加质量分数 2.5% 的 PHGG 对面包的老化无显著改善作用,可能与其含水量最高有关。含水量越高,水分迁移越快,淀粉溶液中的分子碰撞机会增大,从而易于老化的发生^[27]。而 PHGG 添加量为质量分数 4.5% 的面包含水量虽高于添加量 0.5% 的面包,却能显著抑制面包老化,可能是由于较高的 PHGG 添加量促进了面包内部强结合水转变为自由水,阻碍了淀粉与水分结合形成结晶^[28]。

显著提高了面包的色泽、口感、风味和整体可接受度,其中 PHGG 添加量为质量分数 2.5% ~ 4.5% 的面包评分较高(图 4)。PHGG 的添加对色泽和整体可接受度有显著影响,这与面包颜色的深度有关,与色差仪测量的结果一致(表 2)。此外,PHGG 受热后产生了一些挥发性衍生物,在一定程度上丰富了面包的风味。面包的外观呈现出不一样的现象,添

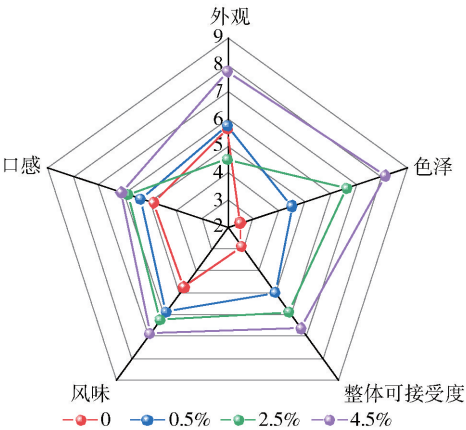


图4 感官评价雷达图
Fig. 4 Radar map of sensory evaluation

表8 不同添加量的 PHGG 对面包感官评价的影响

Tab. 8 Effect of different dosages of PHGG on sensory evaluation of bread

<i>w</i> (PHGG)/%	感官评分/分				
	外观	色泽	风味	口感	整体可接受度
0	5.63 ± 0.52 ^b	2.50 ± 0.53 ^d	4.75 ± 0.46 ^e	4.88 ± 0.64 ^b	2.88 ± 0.64 ^c
0.5	5.75 ± 0.46 ^b	4.50 ± 0.53 ^c	5.88 ± 0.35 ^b	5.38 ± 0.74 ^{ab}	5.00 ± 0.93 ^b
2.5	4.50 ± 0.53 ^c	6.63 ± 0.52 ^b	6.25 ± 0.46 ^b	5.88 ± 0.83 ^a	5.88 ± 0.83 ^{ab}
4.5	7.75 ± 0.71 ^a	8.13 ± 0.64 ^a	6.88 ± 0.35 ^a	6.13 ± 0.83 ^a	6.63 ± 0.52 ^a

不同小写字母表示同列数据差异显著 ($P < 0.05$)。

的烘焙损失率,提高了面包的保水性,赋予面包良好的色泽。在7 d 储藏期内,PHGG 提高了面包的内聚性和回复性,促进面包内部的水分迁移,在一定程度上保持了面包结构的稳定,延缓了面包的老化速度。感官评价结果表明,PHGG 组面包的总分高于对照组面包。综合烘焙特性研究结果,PHGG 添加量(质量分数)为2.5%~4.5%时可显著改善面包的烘焙品质、储藏特性和感官品质。本研究旨在为食品工业更深入地了解 PHGG 在面包中的应用及相关影响提供理论参考。关于 PHGG 如何影响其他类型食品的加工特性、提高食品整体质量有待于更进一步的研究。

参考文献:

[1] VERONESE N, SOLMI M, CARUSO M G, et al. Dietary fiber and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2018, 107(3): 436–444.

[2] RAKMAI J, HARUTHAITHANASAN V, CHOMPREE-DA P, et al. Development of gluten-free and low glycemic index rice pancake: impact of dietary fiber and low-

加量为质量分数2.5%的PHGG组面包外观得分低于对照组,添加量0.5%的PHGG组面包和对照组差别不大,添加量4.5%的PHGG组面包高于对照组。外观的考察标准为表面是否光滑、塌陷和有裂纹存在,观察发现,添加量2.5%组的面包表面有轻微裂纹(图2),故影响了外观评价的得分。

3 结 论

本研究表明,与GG相比,酶解制备的PHGG黏度和分子质量明显降低,还原糖含量明显提高。PHGG的添加显著改变了面包的烘焙特性。与对照组相比,PHGG对面包比容无显著影响,降低了面包

calorie sweeteners on texture profile, sensory properties, and glycemic index[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2021, 1: 100034.

[3] AYALA-SOTO F E, SERNA-SALDÍVAR S O, WELTI-CHANES J. Effect of arabinoxylans and laccase on batter rheology and quality of yeast-leavened gluten-free breads[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 73: 10–17.

[4] LE T A, HUYNH T P. Current advances in the chemical functionalization and potential applications of guar gum and its derivatives[J]. European Polymer Journal, 2023, 184: 111852.

[5] LIYANAGE S, ABIDI N, AULD D, et al. Chemical and physical characterization of galactomannan extracted from guar cultivars (*Cyamopsis tetragonolobus* L.)[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 74: 388–396.

[6] DIANTOM A, CURTI E, CARINI E, et al. Effect of added ingredients on water status and physico-chemical properties of tomato sauce[J]. Food Chemistry, 2017, 236(1): 101–108.

[7] MUDGIL D, BARAK S, PATEL A, et al. Partially hydrolyzed guar gum as a potential prebiotic source[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 207–210.

- [8] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. X-ray diffraction, IR spectroscopy and thermal characterization of partially hydrolyzed guar gum[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(4): 1035–1039.
- [9] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Effect of partially hydrolyzed guar gum on pasting, thermo-mechanical and rheological properties of wheat dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93: 131–135.
- [10] 胡慧芳, 王玉川, 江正强, 等. 低分子质量瓜尔豆胶膳食纤维对面团流变学特性和馒头品质影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(8): 7–12.
- HU H F, WANG Y C, JIANG Z Q, et al. Effects of partially hydrolyzed guar gum on rheological properties and quality of Chinese steamed bread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(8): 7–12.
- [11] HUSSAIN M, AKHTAR S, KHALID N, et al. Hydrolysis, microstructural profiling and utilization of *Cyamopsis tetragonoloba* in yoghurt[J]. Fermentation, 2023, 9(1): 45.
- [12] MARY P R, MUTTURI S, KAPOOR M. Non-enzymatically hydrolyzed guar gum and orange peel fibre together stabilize the low-fat, set-type yogurt: a techno-functional study[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107100.
- [13] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Guar gum: processing, properties and food applications: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(3): 409–418.
- [14] LIN X, CHEN J L, XIAO G S, et al. Extraction, molecular weight distribution, and antioxidant activity of oligosaccharides from Longan (*Dimocarpus Longan Lour.*) pulp[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(3): 701–706.
- [15] ŞİMŞEK S T. Vacuum modification of partial-baked wheat bread: evaluation of the physicochemical, microstructural properties and acrylamide content[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 105: 103467.
- [16] NAWROCKA A, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, MIŚ A, et al. Effect of dietary fibre polysaccharides on structure and thermal properties of gluten proteins: a study on gluten dough with application of FT-Raman spectroscopy, TGA and DSC[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 410–421.
- [17] MIEHLE E, HAAS M, BADER-MITTERMAIER S, et al. The role of hydration properties of soluble dietary fibers on glucose diffusion[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107822.
- [18] ALOTAIBI H N, ANDERSON A K, SIDHU J S. Influence of lutein content of marigold flowers on functional properties of baked pan bread[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2021, 66(2): 162–168.
- [19] SUI X N, YAP P Y, ZHOU W B. Anthocyanins during baking: their degradation kinetics and impacts on color and antioxidant capacity of bread[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(5): 983–994.
- [20] SUI X N, ZHANG Y, ZHOU W B. Bread fortified with anthocyanin-rich extract from black rice as nutraceutical sources: its quality attributes and in vitro digestibility[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 910–916.
- [21] CHOCKCHASAWASDEE S, MENDOZA M C, BEECROFT C A, et al. Development of a gluten free bread enriched with faba bean husk as a fibre supplement[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173(1): 114362.
- [22] 彭博. 糖醇类物质对面团特性及面包品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017:32.
- PENG B. Effects of sugar alcohols on dough properties and bread quality[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017:32.
- [23] PENG B, LI Y, DING S, et al. Characterization of textural, rheological, thermal, microstructural, and water mobility in wheat flour dough and bread affected by trehalose[J]. Food Chemistry, 2017, 233(15): 369–377.
- [24] HILLS B P, TAKACS S F, BELTON P S. The effects of proteins on the proton N. M. R. transverse relaxation time of water[J]. Molecular Physics, 1989, 67(4): 919–937.
- [25] ZHOU L A, MU T H, MA M M, et al. Staling of potato and wheat steamed breads: physicochemical characterisation and molecular mobility[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(10): 2880–2886.
- [26] WANG L, SHI D H, CHEN J, et al. Effects of Chinese chestnut powder on starch digestion, texture properties, and staling characteristics of bread[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2023, 6(2): 82–90.
- [27] 周国燕, 胡琦玮, 李红卫, 等. 水分含量对淀粉糊化和老化特性影响的差示扫描量热法研究[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 89–92.
- ZHOU G Y, HU Q W, LI H W, et al. DSC study of effects of water content on gelatinization and aging of starch[J]. Food Science, 2009, 30(19): 89–92.

- [28] LI J A, KANG J, WANG L, et al. Effect of water migration between arabinoxylans and gluten on baking quality of whole wheat bread detected by magnetic resonance imaging (MRI) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(26): 6507–6514.
- [29] PROTONOTARIOU S, STERGIOU P, CHRISTAKI M, et al. Physical properties and sensory evaluation of bread containing micronized whole wheat flour [J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126497.

Enzymatic Preparation of Partially Hydrolyzed Guar Gum and Its Effect on Baking Characteristics of Bread

WANG Jinmeng¹, SUN Chunxiao¹, WU Bo^{1,2}, WANG Yunlong²,
ZHOU Qingli¹, GUO Qingbin^{1,3,*}, WANG Changlu^{1,3,*}

(1. *School of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;*

2. *Hangzhou Biocom Biotech Co. Ltd., Hangzhou 310014, China;*

3. *National Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)*

Abstract: In order to study the effect of partially hydrolyzed guar gum (PHGG) on the baking characteristics of bread, PHGG was prepared by enzymatic hydrolysis method with guar gum (GG) as raw material. Based on the comparison of basic composition differences between PHGG and GG, the effects of PHGG dosage on the baking quality and storage characteristics of bread were studied by texture analyzer, low field nuclear magnetic resonance analyzer, differential scanning calorimeter and nine-point hobby score. The results of basic composition analysis showed that the viscosity and molecular weight of PHGG decreased significantly compared with GG, which were (118.80 ± 0.62) mPa · s and 8.1 kDa, respectively. The analysis of baking quality showed that the addition of PHGG had no significant effect on the specific volume of bread, and the baking loss rate of bread was significantly reduced from $(14.08 \pm 0.77)\%$ to $(11.73 \pm 1.29)\%$. The color of bread was also improved. The results of storage characteristics of bread indicated that, PHGG significantly increased the water retention rate of bread from $(77.48 \pm 0.43)\%$ to $(85.58 \pm 4.15)\%$ during the 7 d storage period. PHGG also improved the cohesiveness and resilience of bread. It also promoted the migration of water inside the bread, thereby increasing the stability of the internal structure of the bread, and had the effect of delaying the aging of the bread. In addition, the results of sensory evaluation showed that the sensory score of the bread in the PHGG group was higher than that of the control group. The baking quality, storage characteristics and sensory quality of bread could be significantly improved when the PHGG dosage was 2.5%–4.5%, which was expected to provide some reference for the application of PHGG in food processing.

Keywords: enzymatic preparation; partially hydrolyzed guar gum; bread; baking quality; storage characteristics

(责任编辑:张逸群)