DOI:10.12441/spyswjs.20231207004 [文章编号] 1673-1689(2024)10-0078-10

毛竹笋粉馒头的制备及其品质特征研究

梁美媛[2] 杨佳洋[1] 赵萌迪[1] 牛付阁[1] 王效灵[2] 李 哲[1] 胡新裕[1] 杨金来[3,4] 杨慧敏[3,4] 吴良如[3,4] 潘伟春[1*]

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江 杭州 310018; 2. 浙江工商大学信息与电子工程学院,浙江 杭州 310018; 3. 国家林业和草原局竹子研究开发中心,浙江 杭州 310012; 4. 竹林生态与资源利用国家林业和草原局重点实验室,浙江 杭州 310012)

摘要:中国竹笋资源丰富但利用率低。为了提高竹笋利用率,作者以毛竹笋粉为原料,分析不同毛竹笋粉添加量对馒头制备工艺关键参数以及最终产品品质的影响,并开发了一种基于生长区域法和最大熵法的图像分割技术,分析馒头内部气孔分布及其对产品品质的影响。结果表明,毛竹笋粉质量分数为2%时,馒头的综合指标最好。该研究基于计算机视觉算法——图像分割算法,解决了图像中光线明暗程度不均匀的问题,并分析了馒头内部的微观气孔结构,为馒头品质评价提供一种新方法。

关键词:毛竹笋粉;馒头;品质;微孔结构

A Study on Preparation and Quality Characteristics of Moso Bamboo Shoot Powder Steamed Buns

LIANG Meiyuan[2] *YANG Jiayang*[1] *ZHAO Mengdi*[1] *NIU Fuge*[1] *WANG Xiaoling*[2] *LI Zhe*[1] *HU Xinyu*[1] *YANG Jinlai*[3,4] *YANG Huimin*[3,4] *WU Liangru*[3,4] *PAN Weichun*[1*]

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 3. China National Bamboo Research Center, Hangzhou 310012, China; 4. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Bamboo Forest Ecology and Resource Utilization,Hangzhou 310012, China)

Abstract: Bamboo shoots are abundant in China but their utilization rate is low. To enhance the utilization rate of moso bamboo shoots, the author used moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* (*Carr.*) *Mitford* cv. Pubescens) shoots as the raw material, and investigated the impact of varying additions of moso bamboo shoot powder on the key parameters of steamed bun preparation processes and the final product quality. Additionally, an image segmentation technique based on the region-growing method and maximum entropy method was developed to analyze the distribution of pores within the steamed bun and their influence on product quality. The results showed that the steamed buns performed best in terms of overall quality when the moso bamboo shoot powder mass fraction was 2%. This study developed a computer vision algorithm (image segmentation algorithm) to address the issue of uneven light intensity distribution in images, and analyzed the microscopic pore structure inside the steamed buns, providing a novel approach for evaluating the quality of the steamed buns.

Keywords: moso bamboo shoot powder; steamed buns; quality; microporous structure

基金项目:国家自然科学基金项目(32172245);浙江省自然科学基金项目(LY22C200009);国家林业和草原局竹子研究开发中心合作项目(2022330101005585)。

通信作者:潘伟春(1970—),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事食品物理化学研究。Email:panweichun1970@163.com

收稿日期:2023-12-07 **修回日期:**2024-02-13

竹笋营养丰富，富含蛋白质和膳食纤维，其中膳食纤维能有效降低胆固醇和改善肠道菌群[1-3]；另外，所含的多糖以及类黄酮、多酚、甾醇等活性物质能预防和治疗多种疾病[4-8]。但竹笋的利用率不高，以鲜食为主，产品的精深加工和活性物质的分离纯化及其应用研究很少。以中国为例，每年鲜竹笋的市场交易量约1 000万t，仅占其总产量的1/3，导致竹笋售价偏低，竹农种植意愿不强，竹笋资源大量浪费[9]。和其他植物相比，竹子具有适应性强、生长速度快、固定碳能力强等优点[10]。因此，大规模种植竹林能保持水土，有效缓解全球变暖问题，实现碳中和，并为人类提供可食用优质蛋白质。通过开发新技术来拓宽竹笋应用范围以改变目前竹笋供大于求现状，进而提高竹农的经济收入，提升其种植和经营竹林的积极性，是解决当下全球生态危机和粮食危机的有效路径之一。

馒头是中国北方地区的传统主食，但受精深加工的影响，存在营养元素缺失的风险，通过添加外源物提高馒头营养价值是目前主要的解决方案[11-12]。此外，馒头是一种典型的多孔食品[13]，它的稳定性及品质与馒头内部的孔道分布密切相关[14]。因此，馒头内孔道的大小、空间分布有助于馒头原材料的优化以及相关工艺的开发。图像分割技术已广泛应用于医学图像处理、人脸识别、食品检测等领域[15]，有学者使用该技术对馒头图像进行处理以表征馒头孔隙特征信息，建立馒头宏观品质与其微观结构的联系。何胜美等[16]运用*K*-均值算法提取气孔区域，识别加水量和筋力强弱对馒头内部结构的影响。Ajani等[17]利用基于描述子的方法对馒头微观结构进行分类和重建，从集合描述子中获得信息，描述和重建馒头中的孔隙和固体基质。Ali等[18]提出使用U-Net模型来分割原始面包的面团图像，区分孔隙和面团。但使用传统图像分割法对拍摄图片的设备、环境和拍摄角度要求较高，要求样本表面光照明暗程度大体一致。使用深度学习的图像分割方法，则需要通过手动分割数据样本来创建训练数据，费时费力。

根据以上存在的问题，结合竹笋价格低廉、营养丰富等优点，作者提出将竹笋作为馒头的营养添加剂，在改善馒头营养的同时拓展了竹笋应用领域，提高了竹笋的附加值。针对竹笋不易存储、不便运输的缺点，利用离心喷雾干燥技术将新鲜竹笋制成竹笋粉是比较完美的方案，它极大地提升了竹笋在其他食品体系中应用的便捷性[19]。此外，作者还提出了基于区域生长法和最大熵图像分割法的计算机视觉处理技术，分析馒头的孔道微结构，对产品的品质进行标准化。

作者利用粉质仪测定毛竹笋粉-小麦粉混合粉的粉质特性，利用快速黏度分析仪测定毛竹笋粉-小麦粉混合粉的糊化特性，利用质构仪分析馒头的质构特性，利用多项理化指标以及感官评价分析馒头的品质，利用计算机视觉处理技术分析馒头气孔结构，并利用凯氏定氮法测定馒头的蛋白质质量分数及消化率。旨在探究毛竹笋粉质量分数对馒头的制备工艺条件、品质以及蛋白质消化率的影响，为毛竹笋粉馒头的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金龙鱼高筋麦芯小麦粉：益海嘉里食品营销有限公司；毛竹笋粉：制备方法见文献[19]。小麦粉和毛竹笋粉的营养成分见表1。

高活性干酵母：安琪酵母股份有限公司；胰蛋白酶、猪胆盐、胃蛋白酶：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；KCl、KH_2PO_4、$NaHCO_3$、NaCl、$MgCl_2·(H_2O)_2$、$(NH_4)_2CO_3$、HCl、$CaCl_2·(H_2O)_2$、NaOH：国药集团化学试剂有限公司。

表1 小麦粉和毛竹笋粉的营养成分

Table 1 Nutrition composition of wheat flour and bamboo shoot powder

样品	水分质量分数/%	蛋白质质量分数/%	膳食纤维质量分数/%	灰分质量分数/%	脂肪质量分数/%
小麦粉	13.13±0.17	12.05±0.13	3.51±0.18	0.70±0.03	1.48±0.07
毛竹笋粉	7.76±0.09	25.83±0.37	33.29±0.21	8.86±0.05	2.83±0.02

1.2 仪器与设备

电子式粉质仪：JFZD型，北京东孚久恒仪器技术有限公司；电子分析天平：ME204E型，梅特勒托利多仪器（上海）有限公司；快速黏度分析仪：RVATM型，瑞典Perten公司；和面机：SJJ-E08G1型，小熊电器股份有限公司；多功能电热锅：DG-B320型，北京利仁科技股份有限公司；质构仪：TA.XT Express型，英国Stable Micro Systems公

司；色差计：Chroma Meter CR-400型，日本柯尼卡美能达公司；凯氏定氮仪：Kjeltec™ 8100型，丹麦FOSS分析仪器有限公司；台式高速离心机：ROTINA 380R型，德国Hettich公司。

1.3 试验方法

1.3.1 混合粉的配制及粉质的测定

将毛竹笋粉分别以质量分数0（对照）、2%、4%、6%（以小麦粉为基准）加入小麦粉中并混合均匀，称取水分质量分数14%的混合粉300 g，加入粉质仪的和面钵中，参照GB/T 14614—2019《粮油检验小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法》检测面团吸水率，并参照吸水率确定加水量，测定混合粉面团的流变学特性。

1.3.2 糊化特性的测定

准确称取混合粉3.46 g，加入装有25 mL蒸馏水的铝盒中，用旋转桨充分搅拌后，置于快速黏度分析仪上。960 r/min搅拌10 s，形成均匀悬浊液后，再将转速降至160 r/min，并保持该转速直到试验结束。测试初始温度为50 ℃并保持1.0 min，然后以12 ℃/min升温至95 ℃，再在95 ℃下保持2.5 min，最后以12 ℃/min降温至50 ℃并保持2.0 min。每个样品至少重复3次。

1.3.3 馒头制作

由于毛竹笋粉有很强的吸水能力，因此在制作馒头时，毛竹笋粉质量分数越高的混合粉需要的水就越多。取200 g混合粉、2 g酵母和一定量的水（毛竹笋粉质量分数为0：101 mL；质量分数为2%：105 mL；质量分数为4%：108 mL；质量分数为6%：110 mL）。用37 ℃温水将酵母活化后，将混合粉、含酵母的水溶液、水加入和面机中揉制8 min，形成光滑的面团。将面团放入37 ℃醒发箱中进行第一次醒发，约90 min，手动排气10 min。再将面团平分为3个剂子，搓成馒头状后放入醒发箱中进行第二次醒发，约15 min。随后取出并放置于多功能电热锅，将其功率调至最大，蒸制25 min后备用。

1.3.4 馒头质构特性的测定

参考Li等[20]的方法并稍加修改。将含不同质量分数毛竹笋粉的馒头切成厚度为1.5 cm的薄片，取中间切片，利用TPA模式测试产品的质构特性。使用P/36R圆柱形探头，测试的前、中、后速度均为10 mm/s，触发点负载为5 g，压缩比例为50%，每组重复5次。

1.3.5 馒头理化指标的测定

馒头的比容、高径比均参照GB/T 21118—2007《小麦粉馒头》进行测定，利用测量尺测量馒头的几何尺寸。

1.3.6 馒头色差的测定

利用色差计分别测定馒头芯和馒头皮的L^*、a^*、b^*值，并按照公式（1）计算馒头的白度值。

$$W=(100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}})\times 100\% \quad (1)$$

式中：

W——白度值，%；

L^*——馒头的亮度值；

a^*——馒头的红绿值；

b^*——馒头的黄蓝值。

1.3.7 图像分割算法详解

该研究图像分割算法包括图像的亮度调节和阈值分割算法改进。图像的亮度调节依据区域生长[21]，按照一定的准则，逐步加入邻近的像素，当满足一定条件时，区域生长终止。图像的阈值分割算法是在最大熵法的基础上，将图像分为背景和前景，通过增亮较暗部分图像以及图像迭代技术，获取高质量的图片。在此基础上，再利用二值化图像技术计算图像中馒头的孔隙率等参数。

为量化评估气孔检测的结果和分割效果，使用分割结果与标签的交并比作为分割效果性能测试的指标。IoU值代表算法分割与手工标记气孔的交并比，IoU值越大，表明算法分割的效果和手工标记方法重合率高，分割更加准确；反之，则分割准确率越低。IoU值计算见公式（2）。

$$I_{oU}=\frac{T_P}{T_P+F_N+F_P} \quad (2)$$

式中：

I_{oU}——IoU值；

T_P——真正例的比值，代表被正确分割的气孔数占全部测量气孔数的百分比，%；

F_N——假反例的比值，代表未识别的气孔数占全部测量气孔数的百分比，%；

F_P——假正例的比值，代表被错误分割的气孔数占全部测量气孔数的百分比，%。

1.3.8 馒头孔隙率的分析

将馒头切成10 mm左右的均匀薄片，选取中间的两片放置在桌面上，旁边放置直尺（保持平行，对

图像像素尺寸进行标记），将手机（图像采集功能）保持固定高度对桌面上的馒头薄片和直尺进行拍照。使用1.3.7中的改进算法进行图像处理，截取馒头片中心2 cm×3 cm的区域，并用Python软件进行分析，可以得到气孔数、气孔平均面积、气孔密度和孔隙率。

1.3.9　馒头的蛋白质消化率及其质量分数的测定

馒头的蛋白质消化率测试采用两步酶解法，分别模拟胃消化和小肠消化，并用凯氏定氮法测定消化后残留物中蛋白质质量分数。模拟胃液（SGF）和模拟肠液（SIF）的组成见表2。

表2　SGF和SIF的组成

Table 2　Solution composition of SGF and SIF

单位：mmol/L

模拟消化液	KCl浓度	KH_2PO_4浓度	$NaHCO_3$浓度	NaCl浓度	$MgCl_2·(H_2O)_6$浓度	$(NH_4)_2CO_3$浓度	$CaCl_2·(H_2O)_2$浓度	HCl浓度
1.25×SGF	6.9	0.9	25.0	47.2	0.1	0.5	1.5	15.6
1.25×SIF	6.8	0.8	85.0	38.4	0.3	0	0.6	8.4

模拟胃消化：称取添加不同质量分数毛竹笋粉的冻干馒头粉2 g，置于250 mL的锥形瓶中，加入8 mL水和10 mL 1.25×SGF，并混合均匀；然后用2 mol/L的HCl调整混合溶液pH至3.0，记录此时混合溶液的体积；接着加入0.3 mol/L的$CaCl_2·(H_2O)_2$溶液91 μL和胃蛋白酶0.100 g，并用去离子水稀释至1×SGF；将盛有此混合物的锥形瓶置于摇床（37 ℃、120 r/min）中，摇晃2 h，以模拟馒头在胃中的消化；最后用2 mol/L的NaOH调节SGF的pH至7.0，使胃蛋白酶失活。

模拟小肠消化：将1.25×SIF按体积比1∶1加入上述所得的胃食糜中，再加入0.3 mol/L的$CaCl_2·(H_2O)_2$溶液84 μL，猪胆盐0.286 g和胰蛋白酶0.100 g，混合均匀后，继续在摇床中摇晃2 h，摇床参数与模拟胃消化一致。结束后，将样品放入沸水浴中5 min使酶失活。将蛋白质水解样品进行离心（8 000 r/min，10 min），再收集离心管中的沉淀物，将其置于50 ℃烘箱中烘干至质量恒定。

依据凯氏定氮法测定沉淀物中的蛋白质质量浓度及样品中总蛋白质质量浓度，并按照公式（2）和公式（3）分别计算蛋白质的体外消化率及其质量分数。

$$x=\left(1-\frac{w_2}{w_1}\right)\times 100\% \quad (2)$$

式中：

x——蛋白质的消化率，%；

w_1——样品中总蛋白质质量浓度，mg/mL；

w_2——沉淀物中的蛋白质质量浓度，mg/mL。

$$y=(w_1\times V)/m\times 100\% \quad (3)$$

式中：

y——蛋白质质量分数，%；

w_1——样品中总蛋白质质量浓度，mg/mL；

V——样品体积，mL；

m——毛竹笋粉质量，2 000 mg。

1.3.10　馒头的感官评定

馒头的感官评定标准参照GB/T 35991—2018《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》并稍加调整，见表3。选取10名18~24岁接受过馒头感官评价相关知识培训的评价员（男女各5名）对其进行打分。

表3　馒头的感官评定标准

Table 3　Organoleptic evaluation criteria of steamed buns

评价指标	满分	评分标准
比容	20	≥2.8，20分；2.8~1.8，每下降0.1扣1.5分；≤1.8，5分
高径比	5	≥0.7，5分；0.7~0.5，每减小0.05扣1分；≤0.5，1分
弹性	10	强，8~10分；弱，6~7分；不回弹或回弹困难，4~5分
表面色泽	10	较亮，8~10分；稍暗，6~7分；灰暗，4~5分
表面结构	10	表面光滑，8~10分；皱缩、塌陷、有气泡或烫斑，4~7分
内部结构	20	气孔细腻均匀，18~20分；气孔细腻基本均匀，有个别气泡，13~17分；气孔基本均匀，过分细密或有稍多气泡/气孔均匀但结构稍显粗糙，10~12分；气孔不均匀或者结构很粗糙：5~9分
黏性	5	不黏牙，4~5分；稍黏牙，3分；黏牙，2分
食味	10	香气宜人，8~10分；滋味平淡，6~7分；有异味，4~5分

1.4 数据处理

所有试验至少重复3次，所得结果用SPSS 20.0进行数据分析，试验结果以平均值±标准差表示，$P<0.05$为差异显著，$P<0.01$为差异极显著。

2 结果与讨论

2.1 毛竹笋粉质量分数对混合粉粉质特性的影响

毛竹笋粉质量分数对混合粉的粉质特性有较大影响，见表4。随着毛竹笋粉质量分数从0增加到6%，混合粉的吸水率从61.57%上升到67.37%。和面温度（30 ℃）远低于淀粉的糊化温度（约53 ℃），混合粉中小麦淀粉的吸水率忽略不计，该参数主要来自两类物质的吸水：面筋蛋白和竹笋中质量分数高、持水能力及吸胀性好的膳食纤维[22]，其吸水能力远大于面筋蛋白[23]。因此，混合粉中毛竹笋粉质量分数的增加能明显提高吸水率。

同时，混合粉面团的形成时间从7.40 min缩短到5.17 min；稳定时间从15.13 min缩短到7.87 min。这可能是毛竹笋粉中的膳食纤维等降低了混合粉中面筋蛋白的质量分数，并阻碍面筋网络的形成。同时面团稳定时间的缩短表明其筋力减弱，搅拌耐力下降，因此面团粉质指数也随之下降。混合粉面团的粉质指数从173.33降低到108.67，而弱化度从35.00增加到71.67。

2.2 毛竹笋粉质量分数对混合粉糊化特性的影响

如表5所示，随着毛竹笋粉质量分数从0增加到6%时，混合粉的峰值黏度从2.85 Pa·s降到2.63 Pa·s；最低黏度从2.18 Pa·s降到1.72 Pa·s；最终黏度从3.31 Pa·s降到2.88 Pa·s；回生值从1.20 Pa·s降到1.09 Pa·s；峰值时间从6.47 min降到6.22 min；衰减值从0.73 Pa·s增加到0.86 Pa·s；糊化温度从69.60 ℃上升到70.98 ℃。混合粉糊化主要是在水的作用下，加热后颗粒中部分直链淀粉直接溶解到溶液中，同时颗粒内结晶结构消失而溶胀，最后形成黏性的糊状物。面粉的糊化主要受面粉中淀粉质量分数、结构以及直/支链淀粉比例等因素影响[24]。如前所述，添加的竹笋粉降低了混合粉中淀粉的质量分数，使得混合粉的各项黏度值和峰值时间随之减小，这与雷宏等[25]的研究结果一致。衰减值反映了淀粉颗粒的稳定性，该值越大，说明该颗粒的结构越不稳定；而回生值反映温度降低后淀粉分子重结晶的程度[26]。糊化后，毛竹笋粉中的蛋白质和膳食纤维可能和小麦淀粉有较强的相互作用，因此破坏了淀粉结构导致其衰减值升高并阻碍淀粉分子重结晶，导致其回生值降低。竹笋的吸水能力强，高质量分数的膳食纤维能先与淀粉分子和水分子作用，进而提高混合粉的糊化温度。

2.3 毛竹笋粉质量分数对馒头质构的影响

如表6所示，随着毛竹笋粉质量分数从0提高到6%，馒头的硬度从1 400.30 g增加到3 426.94 g；胶着性从1 154.32增加到2 685.72；

表4 毛竹笋粉质量分数对混合粉粉质特性的影响

Table 4 Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the quality characteristics of the mixed powder

毛竹笋粉质量分数/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度	粉质指数
0	61.57±0.31^{d}	7.40±0.36^{a}	15.13±0.42^{d}	35.00±1.00^{d}	173.33±2.52^{d}
2	63.77±0.35^{c}	6.83±0.42^{ab}	10.70±0.36^{c}	54.00±6.00^{c}	130.67±4.51^{c}
4	65.77±0.35^{b}	5.63±1.05^{bc}	8.97±0.64^{b}	59.34±8.14^{b}	121.67±5.69^{b}
6	67.37±0.15^{a}	5.17±0.60^{c}	7.87±0.21^{a}	71.67±2.08^{a}	108.67±4.16^{a}

注：同列不同小写字母代表组间差异显著（$P<0.05$）。

表5 毛竹笋粉质量分数对混合粉糊化特性的影响

Table 5 Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the gelatinization of mixed flour of steamed buns

毛竹笋粉质量分数/%	峰值黏度/（Pa·s）	最低黏度/（Pa·s）	衰减值/（Pa·s）	最终黏度/（Pa·s）	回生值/（Pa·s）	峰值时间/min	糊化温度/℃
0	2.85±0.06^{a}	2.18±0.03^{a}	0.73±0.02^{c}	3.31±0.06^{a}	1.20±0.04^{a}	6.47±0.07^{a}	69.60±0.48^{b}
2	2.76±0.07^{ab}	1.94±0.00^{b}	0.79±0.04^{b}	3.13±0.10^{b}	1.23±0.04^{a}	6.24±0.14^{b}	69.87±0.94^{b}
4	2.69±0.01^{bc}	1.80±0.00^{c}	0.89±0.02^{a}	3.01±0.02^{c}	1.21±0.03^{a}	6.22±0.10^{b}	69.63±0.49^{b}
6	2.63±0.03^{c}	1.72±0.02^{d}	0.86±0.00^{a}	2.88±0.02^{d}	1.09±0.02^{b}	6.22±0.04^{b}	70.98±0.03^{a}

注：同列不同小写字母代表组间差异显著（$P<0.05$）。

咀嚼性从1 171.85增加到2 582.27；但弹性从0.99降低到0.97；内聚性从0.83降低到0.77；回复性从0.51降低到0.45。馒头的硬度和咀嚼性呈负相关，表明这两个参数可用来预判馒头的质构性能。添加毛竹笋粉不利于馒头品质的提高，究其原因，毛竹笋粉的添加破坏了馒头中的面筋网络，抑制了面团发酵时的产气且劣化了其持气量，这一结论可由馒头蓬松度下降和延展性变差得以佐证。其次，竹笋中的膳食纤维与混合粉中的小麦淀粉、蛋白质竞争吸水，导致后两类物质吸收的水分减少，这也会导致馒头硬度的增加。

馒头咀嚼性的增加归因于毛竹笋粉中的竹纤维。当外力施加于馒头时，其所含的竹纤维团能通过形变吸收能量，以提高它的抗形变能力。此外，毛竹笋粉质量分数与馒头弹性指标呈负相关，但不显著（$P>0.05$），这一结果与王璧莹等[27]的研究结果一致。

表6　毛竹笋粉质量分数对馒头质构的影响

Table 6　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the texture properties of steamed buns

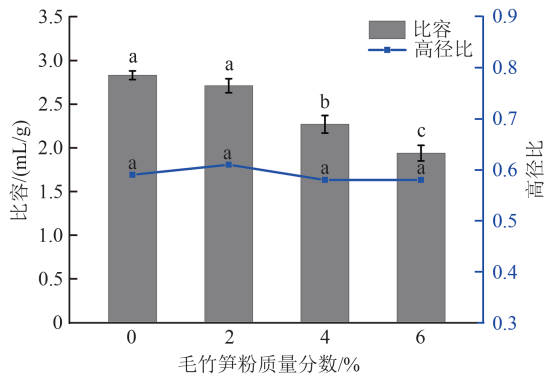
毛竹笋粉质量分数/%	硬度/g	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性
0	1 400.30±25.51^{a}	0.99±0.01^{a}	0.83±0.00^{c}	1 154.32±16.78^{a}	1 171.85±8.69^{a}	0.51±0.00^{c}
2	1 710.23±43.10^{b}	0.99±0.00^{a}	0.83±0.00^{c}	1 423.00±13.90^{b}	1 419.06±17.96^{b}	0.50±0.00^{c}
4	2 825.85±67.12^{c}	0.97±0.01^{a}	0.79±0.00^{b}	2 221.83±58.55^{c}	2 164.22±65.36^{c}	0.47±0.00^{b}
6	3 426.94±73.78^{d}	0.97±0.01^{a}	0.77±0.00^{a}	2 685.72±43.91^{d}	2 582.27±71.73^{d}	0.45±0.01^{a}

注：同列不同小写字母代表组间差异显著（$P<0.05$）。

2.4　毛竹笋粉质量分数对馒头理化指标的影响

比容反映了面团的产气能力和馒头的蓬松程度[28]。随着毛竹笋粉质量分数的增加，馒头的比容显著减小，见图1。与不添加毛竹笋粉的馒头相比，添加毛竹笋粉的质量分数分别为2%、4%和6%时，其比容分别降低8.46%、20.77%和30.77%。因为竹纤维破坏了面团的面筋网络，导致面团的持气力降低和产气量减少，这一结果和杨艺[29]的研究一致。但馒头的高径比没有显著变化，推测添加毛竹笋粉能更好地维持馒头的形状。

毛竹笋粉质量分数还影响馒头的色泽。其质量分数越高，L^{*}值越小，而a^{*}值和b^{*}值显著增高，见表7。这表明馒头的色泽随着毛竹笋粉的添加而发暗、发红和变黄，这可能和毛竹笋粉色泽偏暗红和发黄有关[30]。此外，馒头芯的白度值比馒头皮的小，且这一差异随着毛竹笋粉质量分数的增加而变大，见图2。可能的原因是：1）馒头芯布满气孔，导致其反光能力下降；2）毛竹笋粉在馒头中分布不均一，主要聚集在馒头芯。



不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图1　毛竹笋粉质量分数对馒头比容和高径比的影响

Fig. 1　Effect of moso bamboo shoot mass fraction on the specific volume and height-diameter ratio of steamed buns

2.5　毛竹笋粉质量分数对馒头微孔结构的影响

为了验证本研究中算法的有效性，将其与小波变换分解法[31]、基于遗传算法的灰度图像二阈值分割法[32]和基于改进的北方苍鹰的多阈值图像分割法[33]相比较，分割结果见图3。

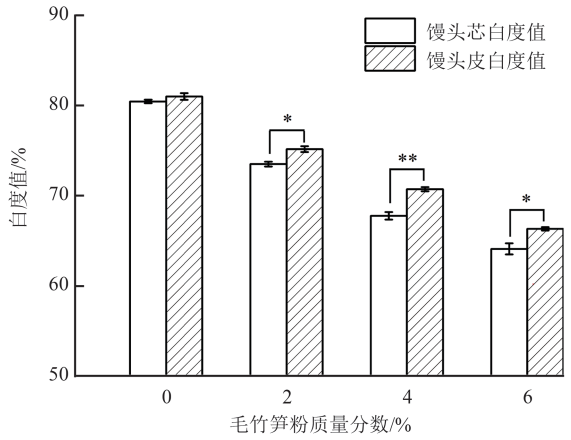
小波变换分解法过度分割样本，对非气孔处过度分割；灰度图像二阈值分割法对于较细小的气孔分割不足，后续会对气孔统计和特征提取造成一定影响；多阈值图像分割法与小波变化分解法存在相同的问题。且这3种算法在明暗程度不均匀的馒头图像上分割效果较差，若想获得较暗部分的气孔，则会有分割过度的结果。结果表明，本研究中的算法既没有过度分割，对细小气孔也有较好地分割，较为准确地分割了数据样本，并能够避免由于图像明暗程度不均匀导致的分割效果差。

表 7　毛竹笋粉质量分数对馒头色差的影响

Table 7　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the color difference of steamed buns

毛竹笋粉质量分数/%	馒头芯色度			馒头皮色度		
	L^*值	a^*值	b^*值	L^*值	a^*值	b^*值
0	85.00±0.21^a	−1.68±0.02^a	12.46±0.09^a	87.42±0.36^a	−1.79±0.06^a	14.14±0.21^a
2	78.91±0.23^b	−0.35±0.03^b	16.05±0.16^b	82.69±0.20^b	−0.20±0.03^b	17.83±0.28^b
4	73.56±0.45^c	0.89±0.01^c	18.40±0.30^c	77.98±0.22^c	1.08±0.06^c	19.27±0.12^c
6	69.71±0.59^d	1.84±0.02^d	19.15±0.51^c	72.68±0.26^d	2.29±0.10^d	19.54±0.17^c

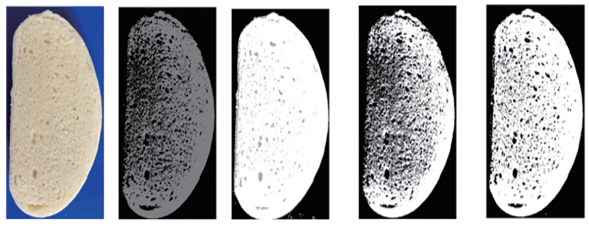
注：同列不同小写字母代表组间差异显著（P<0.05）。



*—差异显著（P<0.05）；**—差异极显著（P<0.01）。

图 2　毛竹笋粉质量分数对馒头芯与馒头皮白度值的影响

Fig. 2　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the whiteness of steamed buns core and crust



(a) 原图　(b) 小波变换分解法　(c) 灰度图像二阈值分割法　(d) 多阈值图像分割法　(e) 本研究算法

图 3　不同算法分割效果对比

Fig. 3　Comparison of segmentation effects of different algorithms

各分割方法分割效果性能测试指标见表 8。文献[28]和文献[30]中的算法分割精度较差，与手工标记气孔图的重合部分较少；文献[29]中的算法虽然精度有所提高，但是对于细小气孔识别能力较差；本研究中的算法比上述文献算法的分割精度都要高，且对细小气孔识别能力较强，可见本研究中的算法有较好的分割能力。

如表 9 所示，随着毛竹笋粉质量分数的增加，馒头切片的孔隙率、孔隙总数、气孔密度均减小，但平均气孔面积变化不显著。此外，馒头的孔隙率和空隙个数呈负相关，表明这两个参数可用来预判馒头的质构性能。因此，毛竹笋粉的添加导致馒头气孔数量减少，进而对馒头的气孔结构产生不利影响。

表 8　不同算法分割精度对比

Table 8　Comparison of segmentation accuracy of different segmentation algorithms

算法	IoU 值
本研究算法	0.850 703
文献[28]	0.704 260
文献[29]	0.828 171
文献[30]	0.747 542

表 9　毛竹笋粉质量分数对馒头气孔特性的影响

Table 9　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the pore characteristics of steamed buns

毛竹笋粉质量分数/%	孔隙率/%	孔隙总数/个	平均气孔面积/mm^2	气孔密度/（个/cm^2）
0	34.88±2.12^a	335±19^a	6.95±1.60^a	55.78±3.24^a
2	29.32±4.03^b	286±11^b	6.48±1.17^a	47.61±1.83^b
4	30.11±1.36^b	281±8^b	6.18±0.62^a	46.89±1.39^b
6	29.73±2.58^b	267±13^b	6.36±0.30^a	44.56±2.11^b

注：同列不同小写字母代表组间差异显著（P<0.05）。

2.6　毛竹笋粉质量分数对馒头蛋白质的消化率及其质量分数的影响

随着毛竹笋粉质量分数的增加，馒头的蛋白质质量分数增加（见图 4），因为毛竹笋粉的蛋白质质量分数明显高于小麦粉（见表 1）。此外，毛竹笋粉质量分数的增加不利于馒头中蛋白质的消化；尤其是毛竹笋粉质量分数为 4% 时，馒头中蛋白质

消化率明显降低。这可能和竹笋中含有草酸、胰蛋白酶抑制剂等化合物有关。

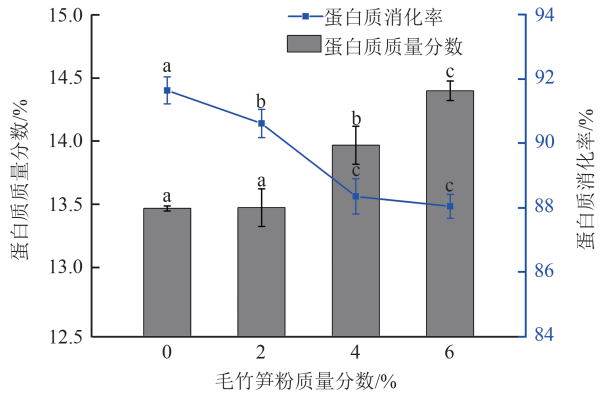


图4　毛竹笋粉质量分数对馒头蛋白质质量分数及其消化率的影响

Fig. 4　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on protein mass fraction and its digestion rate of steamed buns

2.7　毛竹笋粉质量分数对馒头感官的影响

随着毛竹笋粉质量分数的增加，除了食味、黏性和弹性外，各项指标得分及总分与对照组相比均降低，见图5。虽然毛竹笋粉含竹笋特有的香味，有利于食味评分。但其添加量过大，竹笋所含其他气味占据主导地位，不利于食味得分。同时，毛竹笋粉的添加降低了馒头中面筋蛋白的质量分数，破坏面筋网络结构，进而降低馒头的持气力，这些都降低了馒头表面结构和比容的得分。此外，毛竹笋粉的添加破坏了馒头的色泽。但当毛竹笋粉质量分数为2%时，馒头的内部结构得分有所提高。

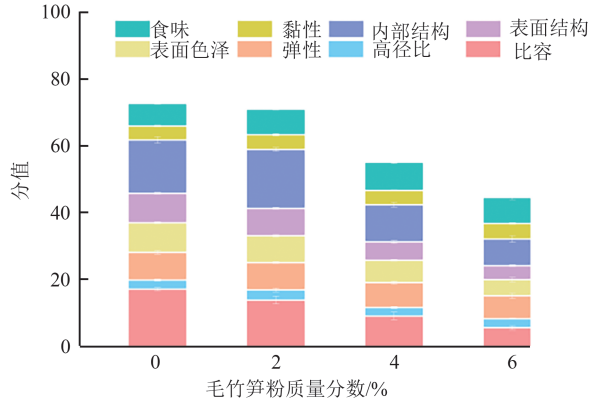


图5　不同毛竹笋粉质量分数对馒头感官的影响

Fig. 5　Effect of moso bamboo shoot powder mass fraction on the sensory evaluation of steamed buns

3　结论

与普通小麦粉相比，毛竹笋粉的淀粉质量分数低，蛋白质和膳食纤维质量分数高，使毛竹笋粉-小麦粉混合粉表现出不同的粉质和糊化特性。此外，毛竹笋粉营养丰富，并含有多种活性成分，将其用于馒头生产，既可以实现竹笋资源的多方面利用，达到竹笋与小麦的营养相互补充的目的，也为健康主食的开发提供了新路径。毛竹笋粉的添加使得馒头蛋白质质量分数升高，蛋白质消化率有所下降。感官评价结果表明，毛竹笋粉馒头具有竹笋特有的清香气味，对馒头味道具有改善作用，毛竹笋粉质量分数为2%时，馒头的综合指标最好。作者研发的图像分割算法解决了图像中光线明暗程度不均匀的问题，并使用孔隙分布特征技术对馒头气孔结构进行了量化评价，结果表明添加毛竹笋粉对馒头气孔结构有不利影响。同时，观察到的气孔结构和硬度、咀嚼性间的相互关系，表明该技术能较好地量化多孔食品的构效关系。

参考文献

[1] WANG N, HUANG S, ZHANG Y, et al. Effect of supplementation by bamboo shoot insoluble dietary fiber on physicochemical and structural properties of rice starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 129: 109509.

[2] HE K H, LI Q, LI Y, et al. Water-insoluble dietary fibers from bamboo shoot used as plant food particles for the stabilization of O/W Pickering emulsion [J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125925.

[3] 徐艳阳，张憋，孙金才，等. 真空冷冻与热风联合干燥草莓[J]. 无锡轻工大学学报，2005，24(1)：45-48.
XU Y Y, ZHANG M, SUN J C, et al. Experimental studies on treatment of strawberries by a combination drying of vacuum freeze and hot-airflow[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2005, 24(1): 45-48.(in Chinese)

[4] 葛青，李杭庆，李鹏，等. 不同粒径竹笋粉的理化性质和功能特性研究[J]. 食品与发酵工业，2022，48(11)：143-149.
GE Q, LI H Q, LI P, et al. Physicochemical properties and functional properties of bamboo shoot powder with different particle sizes [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(11): 143-149.(in Chinese)

[5] WU W J，HU J，GAO H Y，et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics [J]. Food Chemistry，2020，332：127372.

[6] CHONGTHAM N，BISHT M S，PREMLATA T，et al. Quality improvement of bamboo shoots by removal of antinutrients using different processing techniques：a review [J]. Journal of Food Science and Technology，2022，59(1)：1-11.

[7] LI X F，FU B T，GUO J，et al. Bamboo shoot fiber improves insulin sensitivity in high-fat diet-fed mice [J]. Journal of Functional Foods，2018，49：510-517.

[8] 徐圣友，曹万友，宋曰钦，等. 不同品种竹笋蛋白质与氨基酸的分析与评价[J]. 食品科学，2005，26(7)：222-227.
XU S Y，CAO W Y，SONG Y Q，et al. Analysis and evaluation of protein and amino acid nutritional components of different species of bamboo shoots [J]. Food Science，2005，26(7)：222-227.(in Chinese)

[9] 汤彩碟，张甫生，杨金来，等. 非热加工技术在竹笋保鲜及加工中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业，2022，48(4)：307-313.
TANG C D，ZHANG F S，YANG J L，et al. Application of non-thermal processing technologies in bamboo shoots preservation and processing [J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(4)：307-313.(in Chinese)

[10] MENG T T，DING Y，LIU Y，et al. *In situ* lignin adhesion for high-performance bamboo composites [J]. Nano Letters，2023，23(18)：8411-8418.

[11] 丁文平. 小麦加工过程中的营养损失与面粉的营养强化[J]. 粮油加工，2008(5)：87-89.
DING W P. Nutrition loss during wheat processing and the nutritional enforcement for flour[J]. Cereals and Oils Processing，2008(5)：87-89.(in Chinese)

[12] 宋春芳，王燕，张翰之，等. 基于微波加热的馒头介电特性的分析与研究[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(5)：466-472.
SONG C F，WANG Y，ZHANG H Z，et al. Dielectric properties of Chinese steamed bread based on microwave heating[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2017，36(5)：466-472.(in Chinese)

[13] AGUILERA J M. Why food microstructure? [J] . Journal of Food Engineering，2005，67：3-11.

[14] FENG C H，SUN D W. Optimisation of immersion vacuum cooling operation and quality of Irish cooked sausages by using response surface methodology [J]. International Journal of Food Science & Technology，2014，49(8)：1850-1858.

[15] YU Y，WANG C P，FU Q，et al. Techniques and challenges of image segmentation：a review [J]. electronics，2023，12(5)：1199.

[16] 何胜美，陈东升，张艳，等. 运用计算机视觉识别技术进行馒头气孔结构分析[J]. 中国农业科学，2007，40(1)：212-216.
HE S M，CHEN D S，ZHANG Y，et al. Analysis of cell structure of steamed bread by digital image analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica，2007，40(1)：212-216.(in Chinese)

[17] AJANI C K，ZHU Z W，SUN D W. Microstructural classification and reconstruction of the computational geometry of steamed bread using descriptor-based approach[J]. Transport in Porous Media，2022，144(2)：317-336.

[18] ALI S，MAYO S，GOSTAR A K，et al. Automatic segmentation for synchrotron-based imaging of porous bread dough using deep learning approach[J]. Journal of Synchrotron Radiation，2021，28(2)：566-575.

[19] YANG J L，WU L R，YANG H M，et al. Using the major components (cellulose，hemicellulose，and lignin) of *Phyllostachys praecox* bamboo shoot as dietary fiber[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology，2021，9：669136.

[20] LI Q，LIU R，WU T，et al. Interactions between soluble dietary fibers and wheat gluten in dough studied by confocal laser scanning microscopy[J]. Food Research International，2017，95：19-27.

[21] ANSHAD P Y M，KUMAR S S，SHAHUDHEEN S. Segmentation of chondroblastoma from medical images using modified region growing algorithm[J]. Cluster Computing，2019，22(6)：13437-13444.

[22] 刘欣，姜鹏飞，傅宝尚，等. 竹笋膳食纤维的提取、生理功能特性及其在食品中的应用[J]. 食品与发酵工业，2023，49(3)：354-362.
LIU X，JIANG P F，FU B S，et al. Extraction and physiological functionality of dietary fiber from bamboo shoots and its application in food [J]. Food and Fermentation Industries，2023，49(3)：354-362.(in Chinese)

[23] PARK H，SEIB P A，CHUNG O K. Fortifying bread with a mixture of wheat fiber and psyllium husk fiber plus three antioxidants[J]. Cereal Chemistry，1997，74(3)：207-211.

[24] PENTIKÄINEN S，KARHUNEN L，FLANDER L，et al. Enrichment of biscuits and juice with oat β-glucan enhances postprandial satiety[J]. Appetite，2014，75：150-156.

[25] 雷宏，王晓曦，曲艺，等. 小麦粉中的淀粉对其糊化特性的影响[J]. 粮食与饲料工业，2010(10)：8-11.
LEI H，WANG X X，QU Y，et al. Effect of starch in wheat flour on its gelatinization characteristics [J]. Cereal & Feed Industry，2010(10)：8-11.(in Chinese)

[26] 陈书攀，何国庆，谢卫忠，等. 菊粉对面团流变性及面条质构的影响[J]. 中国食品学报，2014，14(7)：170-175.
CHEN S P，HE G Q，XIE W Z，et al. Effect of inulin addition on rheological properties of wheat flour dough and noodle quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2014，14(7)：170-175.(in Chinese)

[27] 王璧莹，白莉，李湘銮，等. 不同竹笋粉添加量的面团特性及面包品质的变化[J]. 现代食品科技. 2023，39：195-203.
WANG B Y，BAI L，LI X L，et al. Changes in the dough properties and bread quality induced by the addition of bamboo shoot powder in different amounts[J]. Modern Food Science and Technology. 2023，39：195-203.(in Chinese)

[28] 张印，赵迪，郭璐楠，等. 复配泡打粉对冷冻面团和速冻馒头品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(10)：1040-1046.
ZHANG Y，ZHAO D，GUO L N，et al. Effect of compounded baking powder on frozen dough and Chinese steamed bread [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2017，36(10)：1040-1046.(in Chinese)

[29] 杨艺. 不溶性膳食纤维的添加对面包品质影响机制的研究[D]. 无锡：江南大学，2019.

[30] 曹连平，王力民，李锡军，等. 色差仪的应用实践[J]. 印染，2004，30(24)：33-38.
CAO L P，WANG L M，LI X J，et al. Practice on color difference instrument[J]. Dyeing and Finishing，2004，30(24)：33-38.(in Chinese)

[31] 张永刚. 基于小波变换的医学影像图像阈值分割实现设计[J]. 贵州大学学报(自然科学版)，2021，38(2)：37-39，43.
ZHANG Y G. Design research of medical image threshold segmentation based on the wavelet transform[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences)，2021，38(2)：37-39，43.(in Chinese)

[32] 黄露，夏军勇，吴庆华，等. 基于遗传算法与二维最大熵的编织袋缺陷检测[J]. 轻工机械，2021，39(5)：69-73，78.
HUANG L，XIA J Y，WU Q H，et al. Woven bag defect detection based on genetic algorithm and two-dimensional maximum entropy[J]. Light Industry Machinery，2021，39(5)：69-73，78.(in Chinese)

[33] 付雪，朱良宽，黄建平，等. 基于改进北方苍鹰优化算法的多阈值图像分割[J]. 计算机工程，2023，49(7)：232-241.
FU X，ZHU L K，HUANG J P，et al. Multi-threshold image segmentation based on improved Northern Goshawk Optimization algorithm[J]. Computer Engineering，2023，49(7)：232-241.(in Chinese)

（责任编辑：闫林红）