

低温等离子体电流强度对糙米食用品质的影响

孟宁^{1,2}, 刘明¹, 刘艳香¹, 管学梅^{1,3}, 张培茵², 谭斌^{1*}, 翟小童¹

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037; 2. 哈尔滨商业大学 旅游烹饪学院, 黑龙江 哈尔滨 150076; 3. 集美大学 食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:针对糙米蒸煮时间长、口感粗糙等问题,应用辉光放电等离子体技术对糙米进行处理,利用质构仪、扫描电镜、傅里叶近红外图谱和X射线衍射仪等分析不同电流强度对米饭蒸煮特性、感官品质、质构特性、微观结构和晶体结构的影响。研究表明:低温等离子体技术在一定程度上可以改善糙米的蒸煮性能和食用品质,显著提高了糙米饭的浸泡吸水率、加热吸水率、体积膨胀率和固形物损失率($P<0.05$),分别增加了3%、30%、50%和0.5%左右,而显著缩短蒸煮时间到24.8 min($P<0.05$);相比于对照组糙米,低温等离子体处理后糙米饭质构特性的硬度、咀嚼性和胶黏性显著减小到1 566.60 g、451和709.11(2.0 A),而感官评分、弹性、黏附性和回复性显著增大,当电流强度在1.5 A时糙米饭质构特性和感官品质最佳($P<0.05$)。通过扫描电镜观察到低温等离子体处理后糙米表面出现凹陷和裂缝,进一步解释了吸水率增加的原因。利用X射线衍射仪分析发现,辉光放电等离子体处理后的糙米结晶度下降,在1.5 A时达到最小值31.19%,但结晶类型未发生改变,仍为典型的A型;傅里叶近红外仪分析发现糙米亲水基团的峰值含量增加,亲水性能增加。综合来看,当电流强度处于1.5 A时糙米的食用品质最佳。研究表明低温等离子体技术在改善糙米食用品质方面具有潜在的应用前景。

关键词:低温等离子体;电流强度;糙米;食用品质

Effect of Low-temperature Plasma Current Intensity on the Edible Quality of Brown Rice

MENG Ning^{1,2}, LIU Ming¹, LIU Yan-xiang¹, ZAN Xue-mei^{1,3}, ZHANG Pei-yin², TAN Bin^{1*}, ZHAI Xiao-tong¹

(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. College of Tourism and Cooking, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, Heilongjiang, China; 3. College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: For the problem of the long cooking time and rough taste of brown rice, the glow discharge plasma technology was used to treat brown rice. Also the texture analyzer, scanning electron microscope, Fourier near-infrared spectrum, and X-ray diffractometer were used to analyze the influence of characteristics, sensory quality, texture characteristics, microstructure and crystal structure caused by different current intensities of rice cooking. The research results showed that low-temperature plasma technology could improve the cooking performance and eating quality of brown rice to a certain extent, and significantly increase the water absorption rate, heating water absorption rate, volume expansion rate and solids loss rate of brown rice ($P<0.05$) by 3%, 30%, 50%, and 0.5% respectively ($P<0.05$). Besides the cooking time of brown rice was shortened to 24.8 min ($P<0.05$). Compared to the brown rice in control group: the hardness, chewiness and adhesiveness of low-temperature plasma treated brown rice were significantly reduced to 1 566.60 g, 451 and 709.11(2.0 A), while the sensory score, elasticity, adhesion and recovery were significantly increased. When the current intensity was 1.5 A, the texture characteristics of brown rice and sensory quality was the best ($P<0.05$). It was observed by scanning electron microscope that there were pits and cracks on the surface of low-temperature plasma treated

基金项目:十三五国家重点研发计划项目(2018YFD0400802)

作者简介:孟宁(1994—),女(汉),硕士研究生,研究方向:烹饪科学。

*通信作者:谭斌(1972—),男,研究员,博士,研究方向:粮食加工与营养。

brown rice, which further explained the increase of water absorption. X-ray diffractometer analysis showed that the crystallinity of glow discharge plasma treated brown rice had decreased, which reached the minimum value of 31.19% at 1.5 A. However its crystal type of had not changed, which was still typical A type. Fourier near infrared instrument analysis found that the peak content of hydrophilic groups in brown rice increased and the hydrophilic properties increased. Taken together, brown rice had the best edible quality when the current intensity was 1.5 A. The research results showed that low-temperature plasma technology had potential applications in improving the edible quality of brown rice.

Key words: low temperature plasma; current intensity; brown rice; edible quality

引文格式:

孟宁,刘明,刘艳香,等.低温等离子体电流强度对糙米食用品质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(7):20-27.

MENG Ning, LIU Ming, LIU Yanxiang, et al. Effect of Low-temperature Plasma Current Intensity on the Edible Quality of Brown Rice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7):20-27.

糙米是由稻谷直接脱壳而成,包括麸皮层、胚及胚乳^[1]。糙米营养价值丰富,除了蛋白质、碳水化合物等基本营养成分外,还含有谷胱甘肽和 γ -氨基丁酸等保健功能因子,但由于糙米皮层含有较多的粗纤维和蜡质层,严重阻碍了蒸煮过程中水分吸收,导致糙米存在口感粗糙、蒸煮时间长、食用不方便等问题^[2]。目前对糙米皮层最常见的处理方法是研磨法,但会导致大量的营养物质损失。除此之外,预糊化法^[3]、萌芽法^[4-5]、酶解法^[6]、超声波处理^[7]、高温流化技术^[8]、乳酸菌发酵法^[9]和超高压处理^[10-11]也是目前常用的处理方法,但仍存在处理时间长、成本高和品质下降严重等问题。因此,寻求一种既可以最大限度保持糙米营养物质又能有效的改善其食用品质的糙米处理方法具有重要的意义。

低温等离子体技术作为一种非热改性方法,凭借其能耗低、安全、操作简便等特点在食品加工领域中引起广泛关注。等离子体作为一种准中性的电离气体,可通过体系中大量的带电粒子、活性成分和紫外线的物理化学作用实现对样品的加工处理^[12]。Chen等^[13]通过对糙米进行不同电压的等离子体处理试验,发现随着处理电压的升高蒸煮时间会出现先上升后下降的趋势,在1 kV时糙米的蒸煮时间最短,仅为17.2 min。随后Chen等^[14]又以长粒籼糙米为研究对象,发现蒸煮时间随着电压增大呈现逐渐减小的趋势。Thirumdas等^[15]通过研究发现此技术可以有效缩短糙米的最佳蒸煮时间,改善糙米的食用品质。而目前国内关于低温等离子体改善糙米食用品质的研究仍处于初级阶段,区别于已有的研究,本试验以长粒香粳稻糙米为研究对象,将糙米置于真空状态下排除其他离化气体的影

响,重点分析不同电流强度的辉光放电等离子体对糙米食用品质的影响,包括糙米饭的感官品质和质构特性,并对不同电离强度处理下糙米的结晶度、微观结构和结构变化进行分析,阐述低温等离子体技术对糙米改性的机理,为低温等离子体技术在糙米加工业中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

长粒香糙米:黑龙江五常市;收获年份:2018年;低温密闭冷藏。

PL3002-IC 电子分析天平:梅特勒托利多公司;DGG-9000 型电热恒温鼓风干燥箱:上海森信试验仪器有限公司;TA.XT2i Plus 质构仪:英国 StableMicro System 公司;RVA4500 快速粘度分析仪:Rigaku;D/max-r B 型 X 射线衍射仪:日本理学公司;XDS 型近红外分析仪:丹麦福斯仪器有限公司;S-300N 型电镜:日本 Hitachi 公司;FW-135 型中草药粉碎机:天津泰斯特公司;QGWB-PM001 全谷物低温等离子体专用振动布料器:河北航兴机械科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 糙米的等离子体处理

首先将样品放入真空度为 3 Pa 的真空腔中除去样品表面的水分和气体,对照样品同样需要真空处理。本试验通过调整不同电流水平(0、0.5、1.0、1.5、2.0 A)对样品进行等离子体处理,以研究不同电流强度对糙米食用品质的影响。每次处理样品为 200 g,作用时间为 2 min。整套装置底部安装有振动机,可以保证所有试验样品接受均匀而全面的处理。

1.2.2 浸泡吸水率

准确称取糙米7份,每份10.00 g,置于容器中加入30 mL蒸馏水,于室温(25℃)条件下浸泡,每隔1 h取样,测定不同电流强度条件下浸泡后的糙米质量,按公式(1)计算浸泡吸水率。

$$\text{浸泡吸水率}/\% = (m_i - m_0)/m_0 \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 为浸泡前糙米质量,g; m_i 为浸泡后糙米质量,g。

1.2.3 糙米的蒸煮特性

蒸煮特性的测定参考王肇慈^[10]的方法。

1.2.3.1 蒸煮时间

使用玻璃板-白芯法进行米饭蒸煮时间的测定。称取5 g样品,加入到250 mL沸水中进行蒸煮。蒸煮时,每隔2 min随机取出10粒米,将其在玻璃板上进行挤压。米粒挤压时无不透明白芯出现的时间为蒸煮时间。

1.2.3.2 加热吸水率

称取5 g样品,加入50 mL纯净水,置于铝盒中并在电饭锅中蒸制至最适蒸煮时间,滤出米粒并冷却至室温(约25℃)后称量。米粒加热吸水率(T)按公式(2)计算。

$$T/\% = (W_i - W_0)/W_0 \times 100 \quad (2)$$

式中: W_i 为样品蒸煮后质量,g; W_0 为原料米质量,g。

1.2.3.3 体积膨胀率

按照1.2.3.2的方法进行样品蒸煮、滤出米粒并冷却至室温(25℃),用体积置换法测定同一份样品蒸煮前、后的体积。样品蒸煮后的体积膨胀率(V)按公式(3)计算。

$$V/\% = (V_i - V_0)/V_0 \times 100 \quad (3)$$

式中: V_i 为样品蒸煮后的体积,mL; V_0 为样品蒸煮前的体积,mL。

1.2.3.4 固形物损失率

按照1.2.3.2的方法进行样品蒸煮后,将米汤倾入已知质量的铝盒中,在105℃下干燥至质量恒定,米粒固形物损失率(S)按公式(4)计算。

$$S/\% = S_i/W_0 \times 100 \quad (4)$$

式中: S_i 为米汤中固形物质量,g; W_0 为原料米质量,g。

1.2.4 感官评价

新鲜煮好的米饭放于白色陶瓷碗中,挑选10名受过专业训练的学生和老师作为评审员(5男5女),每个评审员每次评定5个样品,每天评审次数不超过2次。评价指标有气味、外观(色泽、米粒完整性)、适口

性(软硬度、黏性、弹性、滋味)及整体口感喜好程度。评价指标的选择与描述参考Mestres等^[17]和Zhang等^[18]的方法,评分采用百分制。感官评价指标的描述情况如表1。

表1 糙米饭感官评价指标定义及评分标准

Table 1 The sensory evaluation index definition and scoring standard of brown rice

一级指标 (分值)	二级指标 (分值)	具体特性描述(分值)
气味 (20分)	纯正性、浓郁性 (20分)	具有米饭特有的香气,香气浓郁(18分~20分) 具有米饭特有的香气,米饭清香(15分~17分) 具有米饭特有的香气,香气不明显(12分~14分) 米饭无香味,但无异味(7分~11分) 米饭有异味(0分~6分)
	外观结构 (20分)	色泽 (10分) 米粒完整性 (10分)
	适口性 (30分)	色泽 (10分) 米粒完整性 (10分) 黏性 (10分) 弹性 (10分) 软硬度 (10分)
滋味 (25分)	纯正性、持久性 (25分)	米饭洁白有明显光泽(8分~10分) 米饭呈黄色,稍有光泽(5分~7分) 米饭发灰,无光泽(0分~4分) 米饭结构紧密,米粒完整性好(8分~10分) 米饭大部分结构紧密完整,部分米粒爆开(5分~7分) 米粒干瘪,米粒基本爆开(0分~4分) 滑爽,有黏性,不粘牙(8分~10分) 有黏性,基本不粘牙(6分~7分) 有黏性,粘牙;或无黏性(0分~5分) 米饭有嚼劲(8分~10分) 米饭稍有嚼劲(6分~7分) 米饭疏松、发硬,感觉有渣(0分~5分) 米饭软硬适中(8分~10分) 米饭略硬或略软(6分~7分) 米饭感觉很硬或很软(0分~5分)
	冷饭质地 (5分)	较松散,黏弹性较好,硬度适中(4分~5分) 结团,黏弹性稍差,稍变硬(2分~3分) 板结,黏弹性差,稍硬(0分~1分)
	成团性、黏弹性、硬度 (5分)	

1.2.5 质构测定

5 g糙米蒸煮后使用质构仪测定米饭硬度、黏性等质构特性。测定条件:使用P/36R探头,测前速度为2.0 mm/s,测试速度为2.0 mm/s,测后速度为2.0 mm/s,触发力为20 g,形变50%,两次压缩间隔时间为5 s,平行测定5次,最终结果取5次平行的平均值。

1.2.6 表面微观结构测定

将低温等离子体处理后的糙米固定在载物台上,使用离子溅射仪喷金90 s,大约喷上10 nm厚的金,在扫描电镜下用15 kV的加速电压进行观察。

1.2.7 X射线衍射测定

采用粉碎机将处理后的糙米磨成粉,过100目筛备用。利用X射线衍射仪对糙米粉进行测试得到相应的衍射图谱,测定条件:电压40 kV,电流40 mA,扫描 2θ 范围为 $5^\circ\sim 30^\circ$,步长为 0.02° ,扫描速率为 $3^\circ/\text{min}$ 。

1.2.8 近红外光谱测定

采用旋风磨粉机将处理后的糙米磨成粉,过40目筛备用。使用近红外光谱分析仪进行糙米粉的光谱采集,扫描范围400 nm~2 650 nm,分辨率 8 cm^{-1} ,扫描次数64次,波长间隔2 nm,每个样品重复装样及扫描2次,取平均值。

1.2.9 数据分析

采用软件Excel 2007进行数据分析,结果表示为“平均值 $\pm$ 标准差”。利用SPSS 17.0软件Duncan进行多重比较分析,绘图采用Origin-8.0绘制,所有试验都重复3次。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体电流强度对糙米浸泡吸水率的影响

低温等离子体电流强度对糙米浸泡吸水率的影响见图1。

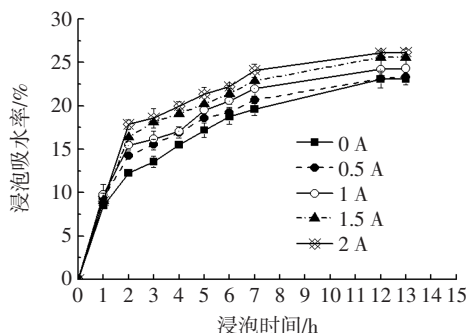


图1 低温等离子体电流强度对糙米浸泡吸水率的影响

Fig.1 Effect of low temperature plasma current intensity on soaking water absorption of brown rice

从图1可以观察到,同一浸泡时间的糙米浸泡吸水率随着低温等离子体电流强度的增加不断增加;1 h内浸泡吸水率均相差不大,此时低温等离子体对其影响不大;浸泡时间在1 h~12 h内糙米的浸泡吸水率呈现逐步上升的趋势,12 h后糙米的浸泡吸水率趋于稳定。

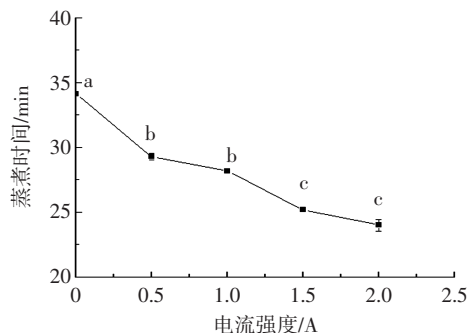
低温等离子体处理后糙米的浸泡吸水率明显高于对照组糙米,这表明低温等离子体促进糙米浸泡吸水,这一趋势是由于等离子体内部的电子、光子等物质破坏了糙米表面的碳碳键,导致糙米表面出现凹陷和裂缝,从而增加了吸水率^[19];而且电流强度越大,蚀刻效果越强,越有利于水分的进入;另外浸泡过程中糙米粒自身吸水膨胀,胚乳中的淀粉内外存在水分梯

度差,导致裂缝出现,也有利于内部淀粉吸收水分^[20]。

2.2 低温等离子体电流强度对糙米蒸煮特性的影响

2.2.1 低温等离子体电流强度对糙米蒸煮时间的影响

低温等离子体电流强度对糙米蒸煮时间的影响见图2。



不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

图2 低温等离子体电流强度对糙米蒸煮时间的影响

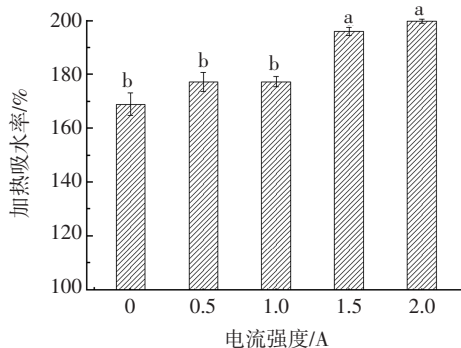
Fig.2 Effects of low-temperature plasma current intensity on the cooking times of brown rice

如图2所示,糙米蒸煮时间随着等离子体产生电流的增加而不断缩短。当电流为2.0 A时,糙米最佳蒸煮时间达到最低(24.8 min),显著低于未处理样品($P<0.05$)。

上述结果与Chen等^[13]试验结果相同。这是因为低温等离子体产生的高能粒子刻蚀了糙米表面的纤维皮层,导致糙米表面产生凹陷和裂缝,使水分更容易渗透到糙米内部,而更强的表面刻蚀效果导致表面比其他样品更亲水,从而加快了淀粉的糊化,缩短了蒸煮时间。

2.2.2 糙米加热吸水率、体积膨胀率和固形物损失率的分析

研究表明吸水率增加可能与谷物表面改性有关^[21]。低温等离子体电流强度对糙米加热吸水率的影响见图3。



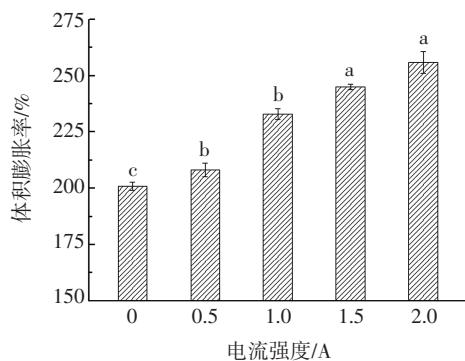
不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

图3 低温等离子体电流强度对糙米加热吸水率的影响

Fig.3 Effects of low-temperature plasma current intensity on the heating water absorption of brown rice

由图3可以看出,糙米的加热吸水率随着电流强度的增加逐渐增加;相比较于对照组,2.0 A时糙米的加热吸水率显著增加了30%($P<0.05$),这可能是由于低温等离子体处理使糙米淀粉和蛋白质结合键发生断裂导致产生更多的水结合位点;也可能是由于淀粉颗粒周围的水分吸收屏障蛋白质基质遭到破坏,因此更有利于水分的吸收。

低温等离子体电流强度对糙米体积膨胀率的影响见图4。



不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

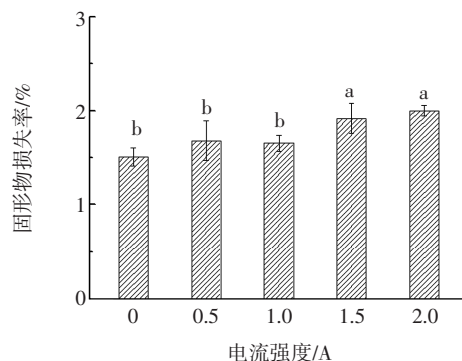
图4 低温等离子体电流强度对糙米体积膨胀率的影响

Fig.4 Effects of low-temperature plasma current intensity on the volume expansion rate of brown rice

如图4所示,糙米经低温等离子体处理后其体积膨胀率显著增加($P<0.05$),相比较于对照组糙米体积膨胀率最高增加了约50%(电流强度2.0 A);蒸煮过程中米饭的体积膨胀与其淀粉糊化溶胀密切相关,糙米

经等离子体处理其吸水率不断增加,蒸煮过程中淀粉粒氢键断裂,淀粉吸水糊化体积增大。

低温等离子体电流强度对糙米固形物损失率的影响见图5。



不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

图5 低温等离子体电流强度对糙米固形物损失率的影响

Fig.5 Effects of low-temperature plasma current intensity on the boiled loss rate of brown rice

由图5可知,当电流强度为1.5 A和2.0 A时,糙米的固形物损失率显著高于其它试验组($P<0.05$)。另有研究表明米汤固形物含量越高,一定程度内其蒸煮时米饭黏弹性越好,食味品质及适口性越好^[22],因此低温等离子体处理对糙米蒸煮品质的改善有积极作用。

2.3 感官评价分析

低温等离子体电流强度对糙米感官品质的影响见表2。

如表2所示,低温等离子体处理对糙米饭感官评

表2 低温等离子体电流强度对糙米感官品质的影响

Table 2 Effects of low-temperature plasma current intensity on sensory quality of brown rice

电流强度/A	气味	外观结构		适口性			滋味	冷饭质地
		色泽	米粒完整性	黏性	弹性	软硬度		
0	14.25±1.26 ^a	6.50±0.96 ^a	5.75±1.50 ^{ab}	6.50±1.91 ^c	6.75±2.63 ^d	6.00±0.82 ^a	17.75±2.36 ^a	2.50±0.58 ^c
0.5	16.00±2.16 ^a	6.50±1.41 ^a	6.75±1.89 ^a	7.00±1.83 ^b	7.25±2.06 ^c	6.25±1.26 ^a	17.50±1.73 ^a	2.75±0.58 ^b
1.0	16.25±2.22 ^a	6.55±1.29 ^a	6.25±0.96 ^{ab}	7.50±0.58 ^a	7.75±0.50 ^a	6.25±0.96 ^a	19.25±2.87 ^a	3.50±0.50 ^{ab}
1.5	16.50±3.16 ^a	7.25±1.26 ^a	6.25±0.50 ^{ab}	7.50±2.38 ^a	7.75±1.71 ^a	6.75±1.26 ^a	19.00±3.46 ^a	3.50±0.58 ^{ab}
2.0	16.25±0.96 ^a	7.50±1.00 ^a	4.75±0.50 ^b	7.55±1.26 ^a	7.50±1.29 ^b	6.00±0.82 ^a	18.00±1.41 ^a	4.00±0.00 ^a

注:同列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

价中气味、色泽、软硬度和滋味不存在显著性影响。

黏性得分随着电流强度的增加显著增加($P<0.05$),当电流强度为2.0 A时,糙米饭感官评价中黏性得分达到7.55分。弹性随着电流强度的增加呈现先增加后减少的趋势,在1.5 A时取得最大值;这是因为等离子体处理使糙米表面出现凹陷和裂缝,导致内部淀粉充分暴露在外,米饭中内容物溶出,黏弹性增加;而电流强度为2 A时,内容物大量溶出,黏性继续增加,

但弹性变差。

由表2可知,糙米的冷饭质地得分随着电流强度的增加显著增加($P<0.05$)。

2.4 质构特性分析

低温等离子体电流强度对糙米质构特性的影响见表3。

由表3可知,相比较于原料糙米,低温等离子体处理后糙米米饭的硬度、咀嚼性和胶黏性显著减小($P<0.05$);

表3 低温等离子体电流强度对糙米质构特性的影响

Table 3 Effects of low-temperature plasma current intensity on the texture characteristics of brown rice

电流强度/A	硬度/g	弹性/%	胶黏性	回复性/%	咀嚼性	内聚性
0	2063.11±599.69 ^a	62.81±16.81 ^b	912.07±307.23 ^a	23.95±2.79 ^a	684.08±358.24 ^a	0.44±0.03 ^a
0.5	1804.28±481.41 ^b	63.60±13.52 ^b	794.92±307.23 ^b	24.18±1.18 ^a	538.07±196.22 ^b	0.44±0.03 ^a
1.0	1729.05±284.83 ^b	66.97±15.72 ^b	734.33±186.01 ^c	23.15±2.84 ^a	487.16±240.15 ^c	0.40±0.04 ^a
1.5	1594.96±478.55 ^c	72.63±12.69 ^a	715.30±234.06 ^c	23.96±1.83 ^a	478.68±242.10 ^c	0.45±0.02 ^a
2.0	1566.60±213.24 ^c	59.50±8.98 ^c	709.11±253.66 ^c	22.98±3.45 ^a	451.34±227.81 ^d	0.43±0.04 ^a

注:同列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

且随着电流强度的增加,糙米饭的硬度、咀嚼性和胶黏性逐渐减小,当电流强度为 2.0 A 时,硬度、咀嚼性和胶黏性降低至 1 566.60 g、451.34 和 709.11 ($P<0.05$)。

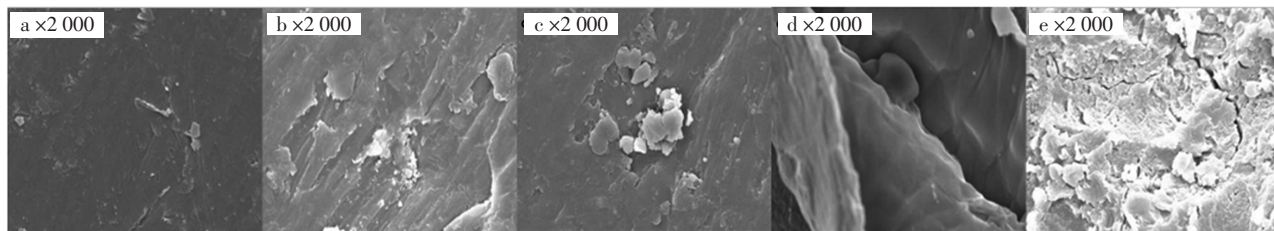
糙米的硬度和咀嚼性高与淀粉颗粒水合作用弱有关^[23],低温等离子体处理使糙米表面产生裂缝和凹陷,打开了吸水通道,使得水分在蒸煮过程中能快速渗透进糙米内部,加快其与淀粉发生水合作用的进程,从而使糙米的硬度和咀嚼性减小;而胶黏性是硬度和内聚性的关联,代表了淀粉分子间作用力的大小^[24],其值的减小说明了低温等离子体处理使得淀粉分子之间作用力减弱,分子结构变得松散,这更有利于水分吸收。

糙米的弹性和回复性均随着电流强度的增加呈现先增加后减小的趋势,当电流强度为 1.5 A 时,糙米饭的弹性达到最大值(72.63%),这是因为处理后糙米表面粗糙,有利于水分吸收,使糙米吸水后弹性增大;而当电流强度为 2.0 A 时,糙米表面的裂缝加深,导致内容物流出较多,不利于米饭内部结构的保持,进一步导致糙米的弹性、回复性下降。

2.5 微观结构分析

低温等离子体电流强度对糙米微观结构的影响见图 6。

如图 6a 所示,对照组糙米表面致密光滑,麸皮层



a. 0 A; b. 0.5 A; c. 1.0 A; d. 1.5 A; e. 2.0 A。

图6 低温等离子体电流强度对糙米微观结构的影响

Fig.6 Effects of low-temperature plasma current intensity on the microstructure of brown rice

形貌无明显变化,表现出天然形态结构。当电流强度为 0.5 A 时,等离子体处理后糙米晶粒表现为裂隙和凹陷,表面呈现出宽而浅的破坏形态,这与 Chen 等^[13]试验结果一致。随着低温等离子体电流强度的增加,糙米表面的粗糙加剧。由图 6d 和图 6e 可以看出,等离子体导致糙米产生裂缝和孔洞,有利于蒸煮时水分的渗透。这可能是高能量的等离子体轰击糙米表面,通过破坏表面共价键实现对糙米表面的蚀刻^[15]。

2.6 近红外分析

低温等离子体处理后糙米粉的傅里叶红外光谱图见图 7。

由图 7 可以看出,糙米在 3 350、2 920、1 650、1 450、1 350、1 250、1 089 cm^{-1} 处出现特征吸收峰,其中 3 350、2 920、1 161 cm^{-1} 和 1 089 cm^{-1} 附近的吸收峰分别代表 O-H、-CH、C-O-C 和 C-O 的伸缩振动^[25],波

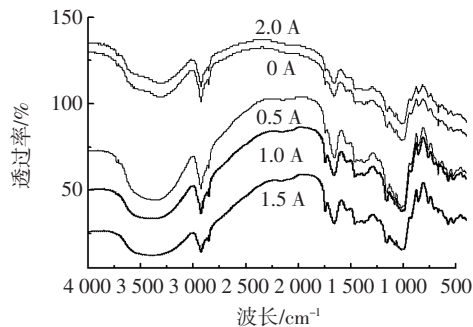


图7 低温等离子体处理后糙米粉的傅里叶红外光谱图

Fig.7 Fourier transform infrared images of brown rice flour treated by low temperature plasma technology

长在 1 450 cm^{-1} 和 1 350 cm^{-1} 附近的吸收峰对应 CH_2 和 CH 的弯曲振动^[26];相比较于对照组样品,处理后样品在 1 650 cm^{-1} 处波峰有所增强,此时的吸收峰归属于水分子中 OH 的弯曲振动^[9,27],这表明糙米经等离子

体处理后亲水基团有所增加,亲水性能得到提高。

2.7 X-射线衍射分析

低温等离子体处理后糙米的X-射线衍射图谱和衍射参数见图8和表4。

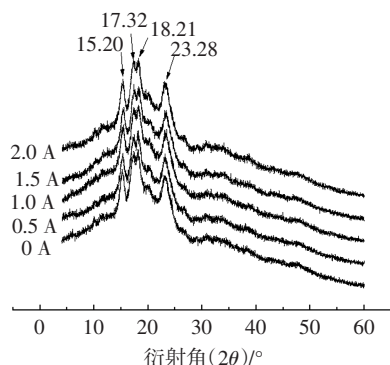


图8 低温等离子体处理后糙米的X-射线衍射图谱

Fig.8 X-ray diffraction pattern of brown rice treated with low temperature plasma

表4 低温等离子体处理后糙米的X射线衍射参数

Table 4 X-ray diffraction parameters of brown rice after low temperature plasma treatment

电流强度/A	结晶类型	结晶度/%
0	A	38.56
0.5	A	38.56
1.0	A	34.78
1.5	A	31.19
2.0	A	35.69

由图8可知,低温等离子体处理后糙米的结晶类型没有发生变化,糙米在衍射角15.19、17.32、18.21°和23.28°时出现较强的特征衍射峰,这是典型的A性淀粉的衍射图谱^[28]。

如表4所示,随着低温等离子体电流强度的增加,结晶度从38.56%(对照糙米)减少到31.19%(1.5 A),这可能是由于反应性等离子体粒子引起的淀粉分子解聚,淀粉的晶体结构被破坏,导致糙米的结晶度降低^[29-30],Chen^[14]和Thirumdas等^[15]也报道了低温等离子体处理后糙米结晶度的降低。相比较于对照组糙米,当低温等离子体电流强度为2.0 A时,糙米中淀粉的结晶度略有降低,但高于1.5 A处理条件下的糙米结晶度。

2.8 讨论

本试验研究发现低温等离子体技术作为一种全新的全谷物加工技术,不仅可以避免糙米加工过程中的浪费,而且提供了更好的食用品质。从工业的角度来看,大米作为世界第二大主食,将该技术应用于米饭烹饪过程中能大大减少能耗,可以用于方便米饭的

制备,而且对电饭煲的设计有一定的指导意义。但新技术在食品加工领域的应用必须是安全无毒的,这就需要对低温等离子体加工的产品进行毒理学等深入研究。另外,低温等离子体技术处理后糙米在贮藏过程中的品质变化还需要进一步研究。

3 结论

本文研究了不同低温等离子体电流强度对糙米食用品质的影响,得出以下结论。

1)随着电流强度的增加,糙米浸泡吸水率、体积膨胀率、加热吸水率和固形物损失率不断增大,而蒸煮时间显著减小($P<0.05$)。

2)低温等离子体处理后糙米饭的弹性和回复性均随着电流强度的增加呈现先增加后减小的趋势,而硬度、咀嚼性和胶黏性逐渐减小。

3)感官评分结果表明,低温等离子体处理后的糙米饭感官评分随着电流强度的增加先增加后降低。相比较于对照组糙米,低温等离子体处理后糙米的黏性、弹性和冷饭质地得分更高。

4)低温等离子体处理后糙米表面出现凹陷和裂缝,晶体结构发生改变,结晶度由对照组的38.56%降至31.19%(1.5 A),但糙米粉的淀粉晶型未发生变化;红外分析结果表明,糙米粉的亲水基团峰值随着电流强度的增大呈现先增大后减少的趋势,低温等离子体处理后亲水性能增强。

综上所述,低温等离子体技术是一种可行的改善糙米食用品质的方式,也进一步证明了低温等离子体技术在全谷物加工领域的应用前景,为低温等离子体改性糙米的产业化开发提供理论依据。

参考文献:

- [1] 齐琳琳,于亮,于勇.糙米的营养价值及其加工技术研究进展[J].中国食物与营养,2015,21(3):68-71.
- [2] SIRISOONTARALAK P, NAKORNPANOM N N, KOAKIETDUM-RONGKUL K, et al. Development of quick cooking germinated brown rice with convenient preparation and containing health benefits[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(1): 138-144.
- [3] 刘庆庆,朱松明,张洁,等.预糊化条件对萌芽糙米蒸煮质构特性及品质的影响[J].农业工程学报,2017,33(21):289-297.
- [4] 刘俊飞,汤晓智,扈战强,等.超声波辅助酶预处理对糙米发芽及发芽糙米理化特性的影响[J].食品科学,2015,36(4):11-18.
- [5] 贾富国,蒋龙伟,张亚雄,等.提高发芽糙米得率的复合酶预处理工艺优化[J].农业工程学报,2016,32(22):289-295.
- [6] 安红周,张瑞莉,孟佳,等.糙米酶解工艺参数的优化研究[J].食品科技,2013,38(3):152-156.
- [7] 扈战强,代飞云,陈琴,等.超声波辅助酶处理对糙米理化特性

- 的影响[J].中国粮油学报,2013,28(5):1-5,23.
- [8] 卜玲娟,李永富,王莉,等.高温流化对糙米蒸煮和食用品质的影响[J].中国粮油学报,2017,32(4):1-5,17.
- [9] 程鑫,李永富,史锋,等.乳酸菌发酵对糙米蒸煮性能和食用品质的影响[J].中国粮油学报,2018,33(5):1-7.
- [10] 胡菲菲.基于超高压的改性技术对糙米理化特性的影响研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [11] 陶虹,夏强,李云飞.超声波与超高压处理对全谷物糙米蒸煮品质和抗氧化活性的影响比较[J].食品工业科技,2017,38(10):91-95,102.
- [12] HOFFMANN C, BERGANZA C, ZHANG J. Cold atmospheric plasma: Methods of production and application in dentistry and oncology [J]. Medical Gas Research, 2013, 3(1): 21-35.
- [13] CHEN H H, CHEN Y, CHANG C H. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice[J]. Food Chemistry, 2012, 135: 74-79.
- [14] CHEN H H. Investigation of properties of long grain brown rice treated by low-pressure plasma[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2484-2491.
- [15] THIRUMDAS R, SARAGAPANI C, AJINKYA M, et al. Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice[J]. Innovative Food Science Emerging Technologies, 2016, 37: 53-60.
- [16] 王肇慈.粮油食品品质分析[M].北京:中国轻工业出版社,2000:297-340.
- [17] MESTRES C, RIBEYRE F, PONS B, et al. Sensory of cooked rice is rather linked to chemical than to physical characteristics of raw grain[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 53(1): 81-89.
- [18] ZHANG X, WANG L, CHENG M, et al. Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 140-146.
- [19] SARANGAPANI C, YAMUNA D R, ROHIT T, et al. Effect of low-pressure plasma on physico-chemical properties of parboiled rice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 452-460.
- [20] 张玉荣,周显青,张秀华,等.大米蒸煮条件及蒸煮过程中米粒形态结构变化的研究[J].粮食与饲料工业,2008(10):1-4
- [21] MOHAPATRA D, BAL S. Cooking quality and instrumental textural attributes of cooked rice for different milling fractions [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73: 253-259.
- [22] 何剑飞,陈召桂.不同品种的大米品质评价分析[J].福建稻麦科技,2009,27(4):31-33.
- [23] ZHOU Z K, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice[J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 491-497.
- [24] 詹耀.超高压处理对糙米物性品质的影响研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [25] 马玉波,徐卫林,范东翠,等.等离子体处理对淀粉性能影响研究[J].武汉科技学院学报,2008,21(6):38-42.
- [26] 蒲华寅.等离子体作用对淀粉结构及性质影响的研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [27] 孙永康.鹰嘴豆抗性淀粉的制备、理化性质和肠道益生特性研究[D].南京:南京农业大学,2014.
- [28] HUNG P V, MORITA N. Physicochemical properties of hydroxypropylated and cross-linked starches from A-type and B-type wheat starch granules[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 59(2): 239-246.
- [29] WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102: 790-798.
- [30] ZHANG Binjia, CHEN Ling, LI Xiaoxi, et al. Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: A structure-functionality relationship[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 228-236.

加工编辑:张立娟

收稿日期:2020-07-29