DOI:10.12441/spyswjs.20240404001 [文章编号] 1673-1689(2024)10-0120-10

莲子红衣黄酮对馒头品质和消化特性的影响

徐 虹 王琮琮 龚凌霄*

(北京工商大学国家粮食产业(副产物食用资源开发)技术创新中心,北京 100048)

摘要:莲子红衣富含多种活性成分,但由于味道苦涩,限制了其在食品中的应用。作者首先制备了质量分数高达90%的莲子红衣黄酮提取物,并将其添加到馒头中,对馒头比容、色泽、质构、感官评价及体外消化特性等指标进行了测定。结果表明,莲子红衣黄酮提取物对α-葡萄糖苷酶具有较强的抑制作用;随着莲子红衣黄酮质量分数的增加,馒头比容先增大后减小,馒头皮和馒头芯的L^*值逐渐降低,硬度、胶着性和咀嚼性逐渐增强,黏性、弹力、弹性及内聚性逐渐减小。感官评价结果表明,添加质量分数0.5%、1.0%的莲子红衣黄酮馒头可接受度较高,没有明显的苦涩味或其他不良风味,形态较好,回弹性较好,咬劲强。另外,莲子红衣馒头能够有效减缓淀粉的水解速率,显著降低快速消化淀粉质量分数,同时增加抗性淀粉质量分数;与普通白面馒头相比,添加质量分数2.0%的红衣黄酮馒头可使预估血糖生成指数(eGI)显著降低,与市售低血糖生成指数(GI)面包的eGI值相近。

关键词:莲子红衣;黄酮类化合物;馒头;体外消化

Effect of Lotus Seed Red-Skin Flavonoids on Quality and Digestibility of Steamed Buns

*XU Hong WANG Congcong GONG Lingxiao**

(National Center of Technology Innovation For Grain Industry (Comprehensive Utilization of Edible by-products), Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The lotus seed red-skin is rich in various bioactive compounds, but its application is limited due to its bitter taste. In this study, a flavonoids-enriched extract with a purity of 90% was prepared and added to steamed buns. The specific volume, color, textural properties, sensory evaluation and *in vitro* digestion characteristics of steamed buns were measured. The results showed that the red-skin flavonoid extract exhibited a strong inhibitory effect on α-glucosidase. With the increase in the mass fraction of lotus seed red-skin flavonoids, the specific volume of the steamed buns first increased and then decreased, while the L^* values of the crust and crumb gradually decreased. Hardness, adhesiveness, and chewiness gradually increased, while stickiness, springiness, elasticity, and cohesiveness gradually decreased. Sensory evaluation showed that steamed buns with 0.5% and 1.0% mass fractions of lotus seed red-skin flavonoids were highly acceptable, with no obvious bitterness or other undesirable flavors, have a better shape, improved resilience, and a stronger bite. Furthermore, lotus seed red-skin steamed buns effectively slowed the starch hydrolysis rate, significantly reducing the content of rapidly digestible starch while increasing the content of resistant starch. Compared with regular white steamed buns, the steamed buns with 2.0% mass fraction of red-skin flavonoids showed a significantly lower estimated glycemic index (eGI), comparable to that of commercially available low-glycemic index (GI) bread.

Keywords: lotus seed red-skin; flavonoids; steamed bun; *in vitro* digestion

---

基金项目:北京市自然科学基金项目(6222002, 6202001)。

通信作者:龚凌霄(1981—),女,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事天然产物与功能性食品、谷物营养与健康研究。E-mail:gonglingxiao@btbu.edu.cn

收稿日期:2024-04-04 **修回日期:**2024-04-24

莲子红衣是位于莲子壳和莲子间的一层红褐色种皮。根据《本草纲目》和《中华药典》记载，其味道苦涩，性凉无毒，入心脾经，具有多种保健功能[1-2]。在莲子的加工生产过程中，为了提升莲子的食用便捷性和适口性，一般会通过机械打磨去除这层红衣。中国在白莲加工过程中每年大约会产生1万t的莲子红衣粉末。由于其味道苦涩，并没有得到有效利用，往往被丢弃在田间地头，既造成了资源浪费又对环境造成了污染[1]。然而，莲子红衣中含有多糖、多酚等生物活性物质，特别是莲子红衣醇提取物可抑制α-葡萄糖苷酶活性，具有良好的开发潜力[2-3]。因此，如果能够充分利用这些副产物，不仅可以提高其综合利用率，还可以减少环境污染。

白馒头的GI值较高，当人体摄入后，淀粉被快速消化，导致餐后血糖水平急剧上升，不适于需要控制血糖的人群食用。为了降低GI值，研究人员尝试向馒头制品中添加麸质、果皮、豆渣等富含活性物质或膳食纤维的原料[4-7]。尽管已有研究将莲子红衣应用于制作莲子红衣戚风蛋糕[8]和莲子红衣肉丸[9]，但尚未有关于将其黄酮类提取物用于主食制作方面的研究。

作者前期研究发现莲子红衣黄酮提取物可以与淀粉通过非共价键结合来抑制淀粉消化。该研究旨在探讨莲子红衣黄酮对α-葡萄糖苷酶的抑制作用及其作为功能性配料加到馒头中的可能性。通过感官品质和淀粉体外消化特性等指标来评价莲子红衣黄酮在开发低GI主食方面的应用潜力，以期为开发调节餐后血糖的功能食品提供新的配料。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

香雪美味富强粉（小麦粉）：沈阳香雪面粉股份有限公司；全麦面粉：河北金沙河面业集团有限公司；高糖型高活性干酵母粉：安琪酵母股份有限公司；胰酶、胃蛋白酶（来源于猪胃黏膜）、转化酶（来源于酿酒酵母）：上海源叶生物科技有限公司；淀粉葡萄糖苷酶（来源于黑曲霉）：上海阿拉丁生化科技股份有限公司；DNS：北京索莱宝科技有限公司；乙酸钠溶液（pH 5.2）：北京雷根生物技术有限公司。

1.2　仪器与设备

全自动和面机：HMJ-A50N1型，小熊电器股份有限公司；质构仪：CT3型，美国Brookfield公司；全自动色差计：DL0402型，厦门德量检测仪器有限公司；电蒸锅：ZN23FC931型，浙江苏泊尔股份有限公司；多功能酶标仪：Synergy H1型，美国Bio-Tek公司。

1.3　试验方法

1.3.1　莲子红衣黄酮的制备及分离纯化

1）莲子红衣黄酮的制备：准确称取一定质量干燥后的莲子红衣粉，粉碎后过60目筛。按料液比1 g∶10 mL加入体积分数60%的乙醇溶液，搅拌均匀后，室温下超声浸提30 min。提取液于8 000 r/min离心15 min，重复此操作2次。合并浸提液并在40 ℃下旋转蒸发浓缩，将浓缩液冷冻干燥获得莲子红衣粗提物。

2）分离纯化：首先对大孔树脂进行预处理，然后采用湿法装填柱子。上样，待样品被D101大孔树脂柱完全吸附后，依次使用水（除杂）、体积分数30%的乙醇（解吸附）洗脱。收集由体积分数30%的乙醇洗脱下来的液体，并对其进行浓缩干燥，最终得到纯化后的莲子红衣黄酮样品，置于低温冷藏环境中备用。

1.3.2　总黄酮质量分数的测定

采用亚硝酸钠-硝酸铝法对莲子红衣粗提物和莲子红衣黄酮的总黄酮质量分数进行测定[10]。标准曲线的测定：精确称取10 mg芦丁标准品置于50 mL容量瓶中，用体积分数95%的乙醇稀释至刻度线，得到质量浓度为0.2 mg/mL的芦丁标准品溶液。分别量取0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 mL芦丁标准品溶液于15 mL试管中，用蒸馏水补至6.0 mL；接着加入0.5 mL质量浓度为5 g/dL的$NaNO_2$溶液，混合均匀后静置6 min；之后加入0.5 mL质量浓度为10 g/dL的$Al(NO_3)_3$溶液，再次摇匀并静置6 min；最后加入5.0 mL质量浓度为4 g/dL的NaOH溶液，并用蒸馏水补至体系总体积为12.5 mL，充分混匀后静置15 min，在510 nm处测定样品的吸光度。采用相同的操作处理待测样品，并根据建立的标准曲线方程计算样品的总黄酮质量分数，单

位以每克样品（以干质量计）含芦丁质量的形式表示（mg/g）。

1.3.3 α-葡萄糖苷酶抑制率的测定

参考文献[11]和[12]的方法并稍加修改，每组加入20 μL不同质量浓度的莲子红衣粗提物、莲子红衣黄酮或阳性对照阿卡波糖溶液，加入40 μL的PBS缓冲液（pH 6.8），随后加入20 μL的α-葡萄糖苷酶（0.35 U/mL）。将混合溶液置于37 ℃孵育10 min，加入40 μL的10 mmol/L对硝基苯-α-D-葡萄糖苷，充分混匀后在37 ℃精确反应20 min。最后加入100 μL浓度为0.2 mol/L的Na_2CO_3溶液终止反应。使用酶标仪测定样品在405 nm处的吸光度。另外，空白组用缓冲液代替样品溶液；对照组用缓冲液代替抑制剂；样品空白组用缓冲液代替α-葡萄糖苷酶反应液。所有试剂和样品均使用0.1 mol/L的PBS缓冲液溶解，所有试验均重复3次。根据式（1）计算各样品的α-葡萄糖苷酶抑制率。

$$I=(1-\frac{A_3-A_2}{A_1-A_0})\times 100\% \quad (1)$$

式中：

I——α-葡萄糖苷酶抑制率，%；

A_0——空白组的吸光度；

A_1——对照组的吸光度；

A_2——样品空白组的吸光度；

A_3——样品组的吸光度。

1.3.4 馒头的制作

取一定质量的小麦粉和全麦粉分别制作白面馒头和全麦馒头。在制作白面馒头时，分别添加质量分数为0、0.5%、1.0%、2.0%（以干面粉质量为基准）的莲子红衣黄酮，以获得含不同质量分数的莲子红衣黄酮强化白面馒头。称取质量分数为1.0%的干酵母（以干面粉计），用温水化开后倒入混合粉中。根据面团的吸水特性加水至质量分数为42.8%。使用和面机揉成光滑面团，常温发酵1 h，然后进行揉面排气，接着进行整形处理，并在相同条件下继续发酵20 min。最后冷水上锅蒸20 min。

1.3.5 馒头比容、扩展比及色泽的测定

馒头蒸熟冷却至室温，然后称其质量。通过小米置换法测定馒头的体积，体积与质量比值即为比容。扩展比是馒头直径和高度的比值[13]。利用色差仪分别测定馒头芯和馒头皮的色差，包括L^*值（亮度值）、a^*值（红绿值）和b^*值（黄蓝值）。

1.3.6 馒头质构的测定

馒头冷却至室温，将其切成2 cm×2 cm×2 cm的均匀馒头块，进行全质构测定[14-15]。测定参数为：探头型号P/36R，压缩程度50%，触发力5 g，测试速度1.0 mm/s，2次循环压缩可恢复时间2 s[16]。每组馒头块重复测试10次，得到硬度、黏性、弹性、内聚性等，结果取平均值。

1.3.7 感官评价

感官评价小组由10名专业的感官评价人员组成，分别对馒头弹性、韧性、表面色泽、表面形态、内部组织结构、滋味口感进行描述和评价，感官评价标准见表1。

1.3.8 体外消化特性的测定

将馒头皮撕下，并将馒头芯切成小块进行冷冻干燥。使用研钵研磨成粉末，密封避光保存以备后续体外消化试验[17-18]。

取0.1 g样品，加入6 mL去离子水，以800 r/min磁力搅拌5 min。随后加入5 mL用0.02 mol/L盐酸溶解的胃蛋白酶，37 ℃酶解30 min，加入5 mL 0.02 mol/L的氢氧化钠和10 mL醋酸钠缓冲液（pH 5.2），混合均匀。然后取0.5 mL样品溶液加入4.5 mL无水乙醇灭酶，上清液用于测定样品消化0 min的葡萄糖质量浓度。接着加入6 mL混合酶溶液（胰酶2 000 U/mL、转化酶300 U/mL、淀粉葡萄糖苷酶95 U/mL）进行体外消化，于37 ℃磁力搅拌，分别在消化后的20、40、60、90、120、180 min取样。0.5 mL样品加入4.5 mL无水乙醇灭酶，于6 000 r/min离心8 min，取上清液测定葡萄糖质量浓度。

葡萄糖标准曲线的绘制：称取100 mg葡萄糖，溶解并定容至100 mL，制得质量浓度为1 mg/mL的葡萄糖标准溶液。分别吸取0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL葡萄糖标准溶液于10 mL容量瓶中，用蒸馏水补至1 mL，加入2 mL DNS试剂后沸水浴5 min，流水冷却至室温后定容，于540 nm处测定吸光度。得到葡萄糖标准曲线方程为：$Y=1.337\ 1X-0.023\ 1$，$R^2=0.999\ 3$，其中Y表示吸光度，X表示葡萄糖质量浓度（mg/mL）。水解率（S）、快速消化淀粉（RDS）质量分数、慢速消化淀粉（SDS）质量分数、抗性淀粉（RS）质量分数分别按公式（2）~（5）计算。

表1　感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria

指标	评价标准	得分
弹性、韧性（20分）	手指按压回弹性好、咬劲强	14~20
	手指按压回弹性一般、咬劲一般	7~13
	手指按压不回弹或按压困难、咬劲差，刀切时掉渣或咀嚼时干硬	0~6
表面色泽（20分）	色泽均匀一致，呈淡黄色或稍带土黄色（样品组呈巧克力棕色）	14~20
	色泽不均匀，呈微黄色或浅灰色	7~13
	色泽灰暗或出现其他异常颜色	0~6
表面形态（20分）	形态好，高度一致，无塌陷或隆起，不歪斜	14~20
	高度不一，轻微塌陷或隆起	7~13
	严重塌陷或隆起，歪斜	0~6
组织结构（20分）	组织细密，蜂窝均匀，无大气孔，无生粉等疙瘩	14~20
	蜂窝微不均匀，有细微气孔	7~13
	蜂窝粗糙，有大气孔，生粉现象严重	0~6
滋味口感（20分）	有纯正的麦香味和轻微莲子红衣味	14~20
	有微苦或微涩等不良滋味	7~13
	有严重苦味、涩味或其他不良滋味	0~6

$$S=0.9\times m_1/m\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S——水解率，%；

m_1——酶解后产生的葡萄糖质量，g；

m——酶解前样品中淀粉总质量，g。

$$R_{DS}=(m_{20}-m_0)\times 0.9/m\times 100\% \quad (3)$$

式中：

R_{DS}——RDS质量分数，%；

m_{20}——酶解20 min时的葡萄糖生成质量，g；

m_0——酶解0 min时的葡萄糖质量，g；

m——酶解前样品中淀粉总质量，g。

$$S_{DS}=(m_{120}-m_{20})\times 0.9/m\times 100\% \quad (4)$$

式中：

S_{DS}——SDS质量分数，%；

m_{120}——酶解120 min时的葡萄糖生成质量，g；

m_{20}——酶解20 min时的葡萄糖生成质量g；

m——酶解前样品中淀粉总质量，g。

$$R_S=1-R_{DS}-S_{DS} \quad (5)$$

式中：

R_S——RS质量分数，%；

R_{DS}——RDS质量分数，%；

S_{DS}——SDS质量分数，%。

1.3.9　eGI值的测定

以反应时间为横坐标、淀粉水解率为纵坐标，绘制淀粉水解曲线。计算0~120 min内馒头样品、参照样品（白面馒头）水解曲线下的面积。按照式（6）计算淀粉水解指数（HI），按照式（7）计算样品的eGI值[18]。

$$H_I=U_1/U_2\times 100 \quad (6)$$

式中：

H_I——淀粉水解指数；

U_1——馒头样品曲线下面积；

U_2——参照样品曲线下面积。

$$e=39.71+0.549\times H_I \quad (7)$$

式中：

e——eGI值；

H_I——淀粉水解指数。

1.3.10　数据处理与分析

用IBM SPSS Statistics 23.0统计软件进行数据处理和显著性分析，分析结果以均值±标准偏差表示。

2　结果与讨论

2.1　总黄酮质量分数

根据芦丁标准曲线Y=18.101 0X−0.006 2（R^2=0.999 6），计算莲子红衣粗提物和莲子红衣黄酮样品中的总黄酮质量分数。其中莲子红衣粗提物中总黄酮质量分数为（340.35±1.95）mg/g，莲子红衣黄酮总黄酮质量分数为（937.19±2.17）mg/g，总黄

酮质量分数提高了 175%。Liu 等[19]发现莲叶中的类黄酮总质量分数为（824.00±5.38）mg/g，稍低于该研究中的莲子红衣黄酮样品。总黄酮质量分数受许多因素的影响，如提取方式、提取溶剂、植物品种和部位等。

2.2 莲子红衣提取物对 α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用

随着莲子红衣黄酮和阳性对照阿卡波糖质量浓度的增加，其对 α-葡萄糖苷酶的抑制率均呈逐渐升高的趋势，见图 1。通过对试验数据进行拟合分析，得出莲子红衣粗提物、莲子红衣黄酮、阿卡波糖对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值分别为 15.338、7.708、1.481 μg/mL。当莲子红衣黄酮的质量浓度达到 12.5 μg/mL 时，其 α-葡萄糖苷酶抑制率接近 80%，与阿卡波糖的抑制率相当。Liu 等[19]发现莲叶黄酮（NLF）具有良好的 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性，当质量浓度为 2.5 mg/mL 时，NLF 对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制活性（分别为 70.28% 和 72.53%）最高，略低于阿卡波糖（分别为 85.16% 和 84.26%）。这与该研究结果稍有差异，可能是由于黄酮类物质组成不同导致的。由于莲子红衣黄酮的酶抑制率显著高于莲子红衣粗提物，因此选择莲子红衣黄酮来探究其对白面馒头淀粉水解率及 eGI 值的影响。

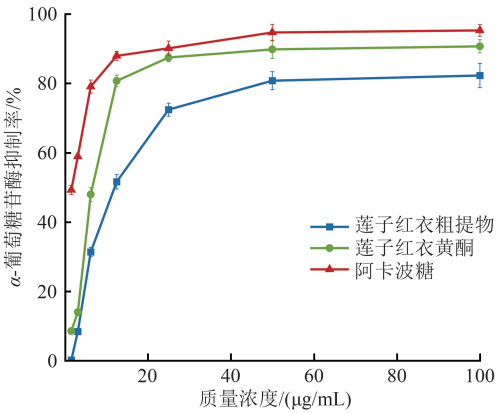


图 1 莲子红衣提取物对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用

Fig. 1 Inhibitory effect of lotus seed red-skin extracton on α-glucosidase

2.3 馒头的内部组织及形貌特征

馒头的内部组织及形貌特征见图 2，从左至右依次为白面馒头、全麦馒头、添加了质量分数 0.5%、1.0%、2.0% 莲子红衣黄酮的馒头（分别标为红衣馒头-1、红衣馒头-2、红衣馒头-3）。白面馒头外形饱满圆润，具有良好的回弹性，内部结构均匀，没有较大气泡。全麦馒头外形较为圆润，相比白面馒头回弹性稍差，内部结构较为均匀，没有大气泡。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头体积逐渐变小，当莲子红衣黄酮质量分数达到 2.0% 时，馒头表皮出现坍陷和皱缩，通过手指触摸和肉眼观察可以发现其内部组织变得更加致密，回弹性也明显变差。这可能是由于莲子红衣黄酮导致气室破裂所致[20]。相比之下，当莲子红衣黄酮的质量分数为 0.5% 和 1.0% 时，红衣馒头仍能保持较好的饱满度和蓬松度，且回弹性较好。



图 2 馒头的内部组织及形貌特征

Fig. 2 Internal structure and morphological characteristics of steamed buns

2.4 馒头的比容、扩展比及色泽

比容是衡量面粉制品质量的重要参数，能够反映其发酵程度和蓬松度[21]。扩展比是指馒头直径与其高度的比值。不同馒头的比容与扩展比见表 2。白面馒头的比容最大，为（2.40±0.02）cm^3/g；随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，比容呈现出先上升后下降的趋势，表明添加高质量分数的莲子红衣黄酮不利于面团膨胀，破坏了馒头的持气性。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，扩展比逐渐增大；当莲子红衣黄酮质量分数为 0.5% 时，其扩展比较白面馒头降低了 11.89%；当红衣馒头的莲子红衣黄酮质量分数达到 1.0% 时，其扩展比较白面馒头降低了 1.40%；当莲子红衣黄酮质量分数达到 2.0% 时，其扩展比较白面馒头增加了 2.10%。

不同馒头皮和馒头芯的色泽见表 3。可以看出，白面馒头的 L^* 值最高，随着莲子红衣黄酮质量

表2　馒头的比容和扩展比

Table 2　Specific volume and diameter-to-height ratio of steamed buns

样品	比容/(cm^3/g)	扩展比
白面馒头	2.40±0.02^{a}	1.43±0.01^{a}
全麦馒头	2.29±0.09^{ab}	1.41±0.04^{a}
红衣馒头-1	2.30±0.22^{ab}	1.26±0.01^{b}
红衣馒头-2	2.34±0.41^{a}	1.41±0.06^{a}
红衣馒头-3	1.90±0.04^{b}	1.46±0.02^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

表3　馒头的色泽

Table 3　Color characteristics of steamed buns

部位	样品	L^*值	a^*值	b^*值
馒头皮	白面馒头	79.66±2.81^{a}	0.94±0.16^{e}	21.04±0.60^{b}
	全麦馒头	75.85±3.06^{a}	3.48±0.46^{d}	24.52±1.04^{a}
	红衣馒头-1	61.35±3.51^{b}	9.99±0.77^{c}	19.58±0.82^{c}
	红衣馒头-2	49.68±2.69^{c}	13.56±0.59^{b}	20.26±0.71^{bc}
	红衣馒头-3	39.96±1.86^{d}	15.11±0.37^{a}	16.94±1.09^{d}
馒头芯	白面馒头	80.70±0.88^{a}	0.73±0.06^{e}	19.20±0.39^{b}
	全麦馒头	74.19±1.37^{b}	3.55±0.38^{d}	23.64±0.66^{a}
	红衣馒头-1	61.19±1.18^{c}	8.58±0.09^{c}	18.02±0.29^{c}
	红衣馒头-2	53.62±1.70^{d}	11.36±0.19^{b}	19.47±0.26^{b}
	红衣馒头-3	43.41±1.09^{e}	13.81±0.26^{a}	19.06±0.37^{b}

注：相同部位的同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

分数的增加，馒头皮和馒头芯的L^*值均逐渐降低，且馒头芯的L^*值高于馒头皮。当莲子红衣黄酮质量分数为0.5%时，红衣馒头皮的L^*值比白面馒头降低了22.99%，馒头芯的L^*值降低了24.18%；当莲子红衣黄酮质量分数为1.0%时，红衣馒头皮的L^*值降低了37.63%，馒头芯的L^*值降低了33.56%；当莲子红衣黄酮质量分数为2.0%时，红衣馒头皮的L^*值降低了49.84%，馒头芯的L^*值降低了46.21%。表明使用全麦粉或加入莲子红衣黄酮都会使馒头变得更暗，尤其是经过蒸制后这种现象更为显著[22]。此外，随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头皮和馒头芯的a^*值均逐渐增大，即逐渐趋于红色，这可能是由于莲子提取物本身的颜色所致。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头皮和馒头芯的b^*值均呈现先升高后降低的趋势，其中莲子红衣黄酮质量分数为1.0%时红衣馒头的b^*值最高。

2.5　馒头的质构

不同馒头的质构结果见表4，全麦馒头、红衣馒头的硬度均高于白面馒头，其中全麦馒头硬度增加了21.42%，红衣馒头-1的硬度增加了24.71%，红衣馒头-2的硬度增加了18.58%，红衣馒头-3的硬度增加了79.13%，这一结果与Wang等[23]的研究结果一致。全麦馒头与红衣馒头的胶着性和咀嚼性表现出类似的趋势。与白面馒头相比，全麦馒头的胶着性增加了29.45%；随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，红衣馒头-1、红衣馒头-2、红衣馒头-3的胶着性分别增加了51.18%、13.98%、60.14%。就咀嚼性而言，全麦馒头比白面馒头增加了18.55%；红衣馒头-1、红衣馒头-2、红衣馒头-3分别增加了46.00%、8.01%、36.03%。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头的黏力显示出逐渐增大的趋势；但黏性、弹力、弹性及内聚性等指标显示出相反的趋势，即随着莲子红衣黄酮质量分数的增加而逐渐减小。其中红衣馒头-3的硬度最高且弹性最低。内聚性反映了馒头芯的收缩力强度，结果表明，随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，其对面筋/淀粉基质稀释作用增强，导致馒头的内聚性降低。但低质量分数的莲子红衣黄酮并未对

表4　馒头的全质构分析

Table 4　Texture profile analysis（TPA）of steamed buns

样品	硬度/g	黏力/g	黏性	弹力	内聚性	弹性/mm	胶着性/g	咀嚼性
白面馒头	578.73±56.80^{c}	2.37±1.27^{a}	0.11±0.06^{a}	0.32±0.01^{c}	0.75±0.02^{b}	10.57±1.04^{a}	436.89±42.68^{c}	45.07±4.28^{cd}
全麦馒头	702.67±110.56^{b}	2.43±1.41^{a}	0.13±0.08^{a}	0.44±0.02^{a}	0.80±0.02^{a}	9.66±0.99^{bc}	565.55±93.85^{b}	53.43±10.16^{bc}
红衣馒头-1	721.75±16.53^{b}	1.50±0.66^{a}	0.15±0.16^{a}	0.35±0.01^{b}	0.79±0.01^{a}	9.99±0.96^{ab}	660.49±126.67^{a}	65.80±18.21^{a}
红衣馒头-2	686.25±46.24^{b}	1.78±0.63^{a}	0.14±0.06^{a}	0.32±0.01^{c}	0.75±0.04^{b}	9.99±0.70^{ab}	497.99±40.49^{b}	48.68±3.94^{bcd}
红衣馒头-3	1 036.69±166.65^{a}	2.50±1.44^{a}	0.11±0.07^{a}	0.30±0.02^{d}	0.67±0.03^{c}	8.96±0.36^{bc}	699.65±125.65^{a}	61.31±10.03^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

原有体系造成太大影响，反而可能通过某种机制强化了蛋白质骨架，避免了过度稀释带来的负面效应[24]。综合质构指标发现，添加质量分数 1.0% 的莲子红衣黄酮的馒头质地较柔软，品质较好。

2.6 感官评价

馒头的表面色泽、表面形态、内部组织结构、滋味口感、弹性、韧性是评价馒头感官品质的重要指标，通过感官评价可以了解人们对莲子红衣馒头的喜欢程度和接受度[25]。不同馒头的感官评价结果见图 3。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头的颜色逐渐加深，但其色泽评分并不存在线性变化趋势，感官评价人员对红衣馒头-1 的色泽评分最高。对红衣馒头-3 的评分明显降低，可能是其颜色过深影响了食欲。另外，红衣馒头-3 在滋味口感方面的评分也最低，这可能是由于莲子红衣特有的涩味及固有风味不受感官评价人员喜爱。在所有感官评价指标中，红衣馒头-3 的得分均最低，其感官评价总分为 67.14 分，比白面馒头降低了 23.33%；红衣馒头-1 的总分为 83.42，仅比白面馒头降低了 4.74%；红衣馒头-2 较白面馒头降低了 11.25%；全麦馒头仅降低了 3.92%，显示出较高的可接受度。总体而言，红衣馒头-1 和红衣馒头-2 的可接受度相对较高，没有明显的苦涩味或其他不良风味，组织较细密，无大气泡，蜂窝均匀，形态也较好，无塌陷，表面色泽均匀一致，回弹性、韧性好，咬劲强。

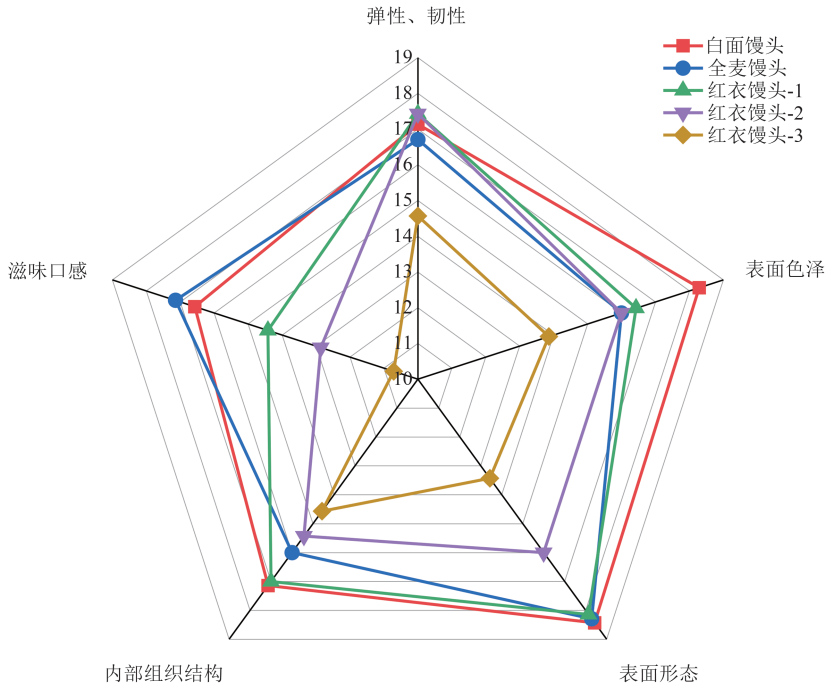


图 3 馒头的感官评价结果

Fig. 3 Sensory evaluation results of steamed buns

2.7 馒头淀粉的体外消化特性

与白面馒头相比，全麦馒头、红衣馒头中淀粉的水解速率均有所降低，其中红衣馒头-3 的淀粉体外消化速率变化最为明显，见图 4。影响淀粉消化的因素包括：1）非淀粉成分阻碍淀粉消化过程；2）食品成分和添加剂通过抑制消化酶或阻碍淀粉和酶之间的接触影响淀粉消化；3）储存引起淀粉凝沉，降低水解率等[26]。红衣馒头水解率低可能是由于其黄酮类化合物对淀粉水解酶具有抑制作用[27]，并通过非共价键与淀粉结合抑制了淀粉的消化[28-29]。不同馒头的淀粉质量分数见表 5。与白面馒头相比，全麦馒头、红衣馒头中 RDS 和 SDS 的质量分数均显著降低，而 RS 的质量分数显著增加。全麦馒头中 RDS 和 SDS 的质量分数较白面馒头分别降低了 35.87% 和 25.82%，RS 的质量分数增加了 215.09%。红衣馒头-1、红衣馒头-2、红

衣馒头-3的SDS质量分数较白面馒头分别降低了30.93%、36.07%和41.51%，RDS质量分数分别降低了56.26%、53.42%和60.87%，而RS的质量分数则分别增加了285.17%、307.33%和352.43%。另外，市面上销售的一款低GI面包，其SDS质量分数比白面馒头低39.43%，RDS质量分数比白面馒头低57.66%，而RS比白面馒头高334.44%，这与红衣馒头-3的结果相近。因此，制作白面馒头时添加莲子红衣黄酮，可显著降低RDS质量分数，增加RS质量分数，并有效降低淀粉水解速率，减缓餐后血糖的上升速度[30]。

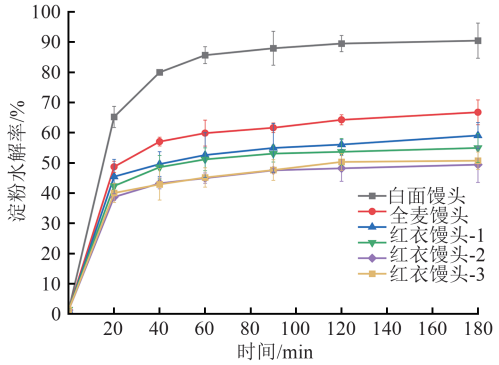


图4　馒头的体外消化率

Fig. 4　*In vitro* digestibility of steamed buns

表5　馒头的淀粉质量分数

Table 5　Starch mass fraction of steamed buns

样品	SDS质量分数/%	RDS质量分数/%	RS质量分数/%
白面馒头	63.99±3.51^{a}	24.28±2.69^{a}	11.73±0.82^{c}
全麦馒头	47.47±1.84^{b}	15.57±1.67^{b}	36.96±0.17^{b}
红衣馒头-1	44.20±5.70^{b}	10.62±1.61^{bcd}	45.18±4.09^{ab}
红衣馒头-2	40.91±3.50^{b}	11.31±0.92^{bcd}	47.78±4.42^{ab}
红衣馒头-3	37.43±3.95^{b}	9.50±0.31^{cd}	53.07±4.26^{a}
低GI面包	38.76±3.11^{b}	10.28±0.33^{c}	50.96±2.78^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.8　不同馒头的eGI值

以白面馒头为参照样品，通过待测样品前120 min水解曲线下面积与参照样品水解曲线下面积的比值计算得出HI，并通过公式（7）计算eGI值。其中GI>70为高GI食物，55<GI≤70为中GI食物，GI≤55为低GI食物[31]。全麦馒头、红衣馒头及低GI面包的eGI值均明显低于白面馒头，其中红衣馒头-3和低GI面包的eGI值在中GI食物范围内，见表6。

表6　馒头的eGI值

Table 6　eGI value of steamed buns

样品	HI	eGI值
白面馒头	100.00	94.61
全麦馒头	71.20	78.73
红衣馒头-1	63.26	74.44
红衣馒头-2	60.94	73.17
红衣馒头-3	54.46	69.61
低GI面包	55.14	69.98

3　结论

作者探讨了莲子红衣黄酮对馒头质构品质、口感及体外消化特性的影响。随着莲子红衣黄酮质量分数的增加，馒头比容先增大后减小，而扩展比逐渐增大；馒头皮和馒头芯的颜色逐渐变深，呈现出更明显的红色；添加质量分数为1.0%的莲子红衣黄酮的馒头质地更加柔软，整体品质较好；添加质量分数为0.5%、1.0%的莲子红衣黄酮馒头的感官可接受度相对较高。与白面馒头相比，全麦馒头、红衣馒头及市售低GI面包中的RDS质量分数较低，而RS质量分数较高，淀粉的水解速率降低。全麦馒头、红衣馒头及市售低GI面包的eGI值均处于较低水平，其中含质量分数2.0%莲子红衣黄酮的馒头和市售低GI面包的eGI值处于中GI食物范围内。结果表明，一方面，莲子红衣黄酮通过抑制淀粉水解酶活力来减缓馒头中淀粉的消化过程；另一方面，还能通过与淀粉分子相互作用来增加淀粉中SDS和RS的质量分数，从而影响淀粉的水解速率。莲子红衣是莲子加工中产生的固体废弃物之一，如果能够得到有效利用将有助于减少环境污染问题。另外，莲子红衣黄酮具有α-葡萄糖苷酶抑制活性，添加后可显著降低馒头的升糖指数。莲子红衣作为一种天然资源，在开发具有调节餐后血糖功能的食品方面具有应用潜力，该研究为丰富低GI主食种类及莲子红衣资源的应用提供了理论依据。

参考文献

[1] 高航，吴楠，高延芬，等. 莲子红衣多糖对胰脂肪酶活性抑制作用的研究[J]. 粮食与油脂，2017，30(5)：87-91.

GAO H, WU N, GAO Y F, et al. Inhibitory effect on pancreatic lipase activity of polysaccharide from lotus seed skin[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(5): 87-91.(in Chinese)

[2] 高航,单雪玉,高延芬,等. 莲子红衣多酚对α-葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品科学技术学报,2016,34(6):36-40,45.
GAO H, SHAN X Y, GAO Y F, et al. Inhibitory effect on α-glucosidase activity of polyphenol from red-skin of lotus seed[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(6): 36-40, 45.(in Chinese)

[3] 高航,高延芬,徐虹. 莲子红衣多糖的分离纯化及结构表征[J]. 食品科学,2016,37(15):94-99.
GAO H, GAO Y F, XU H. Separation, purification and structural characteristics of polysaccharides from red skin of lotus seeds[J]. Food Science, 2016, 37(15): 94-99.(in Chinese)

[4] 董晓琳,马丽苹,边雪洁,等. 甘薯叶粉添加量对面包品质、抗氧化性及淀粉消化性的影响[J]. 食品与发酵工业,2024,50(1):196-203.
DONG X L, MA L P, BIAN X J, et al. Effect of sweet potato leaf powder addition on bread quality, antioxidant properties, and starch digestibility [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 196-203.(in Chinese)

[5] PATHAK D, MAJUMDAR J, RAYCHAUDHURI U, et al. Characterization of physicochemical properties in whole wheat bread after incorporation of ripe mango peel[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 10(3): 554-561.

[6] BELGHITH FENDRI L, CHAARI F, MAALOUL M, et al. Wheat bread enrichment by pea and broad bean pods fibers: effect on dough rheology and bread quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73: 584-591.

[7] SANGNARK A, NOOMHORM A. Effect of dietary fiber from sugarcane bagasse and sucrose ester on dough and bread properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(7): 697-704.

[8] 陈曦,李晓宇,李会,等. 莲子红衣戚风蛋糕的制作及营养成分分析[J]. 食品研究与开发,2021,42(21):41-46.
CHEN X, LI X Y, LI H, et al. Study on development of chiffon cake made with red-skin of lotus seed and analysis of its nutritional ingredients [J]. Food Research and Development, 2021, 42(21): 41-46.(in Chinese)

[9] 王悦,陈曦,姚倩,等. 响应面法优化莲子红衣肉丸加工工艺[J]. 食品工业科技,2019,40(19):170-174.
WANG Y, CHEN X, YAO Q, et al. Optimization of processing technology of lotus seed red-skin meatballs by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 170-174.(in Chinese)

[10] CHEN G L, CHEN S G, XIE Y Q, et al. Total phenolic, flavonoid and antioxidant activity of 23 edible flowers subjected to *in vitro* digestion[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 17: 243-259.

[11] ZHANG Y Y, YANG Z L, LIU G G, et al. Inhibitory effect of chestnut (*Castanea mollissima* Blume) inner skin extract on the activity of α-amylase, α-glucosidase, dipeptidyl peptidase IV and *in vitro* digestibility of starches[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126847.

[12] 杨丽珍. 荔枝壳多酚抑制α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的作用及其机制研究[D]. 广州:华南农业大学,2017.

[13] 郑玉娇,郭晓娜,朱科学. 添加阿拉伯木聚糖酶对荞麦馒头品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2020,39(7):99-104.
ZHENG Y J, GUO X N, ZHU K X. Effects of Arabinoxylanase on the quality of buckwheat Chinese steamed bread [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(7): 99-104.(in Chinese)

[14] 韩西平,张莹,王晴晴,等. 低GI魔芋豌豆蛋白馒头的研制[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2023,51(5):30-36.
HAN X P, ZHANG Y, WANG Q Q, et al. Development of low GI steamed bread prepared with konjac and pea protein[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(5): 30-36.(in Chinese)

[15] TAN J M, LI B, HAN S Y, et al. Use of a compound modifier to retard the quality deterioration of frozen dough and its steamed bread[J]. Food Research International, 2023, 172: 113229.

[16] 索婷,杨书林,林娜,等. 小麦粉特性与生湿面品质的关系研究[J]. 食品与生物技术学报,2024,43(3):54-65.
SUO T, YANG S L, LIN N, et al. Study on relationship between wheat flour characteristics and quality of fresh wet noodles [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(3): 54-65.(in Chinese)

[17] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): 33-50.

[18] 任欣,王林萱,张敏,等. 模拟口腔加工对馒头体外淀粉消化特性的影响[J]. 食品科学技术学报,2022,40(5):129-138.
REN X, WANG L X, ZHANG M, et al. Effect of simulated oral processing on starch digestion characteristics *in vitro* of steamed bread [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(5): 129-138.(in Chinese)

[19] LIU S, LI D, HUANG B, et al. Inhibition of pancreatic

lipase，α-glucosidase，α-amylase，and hypolipidemic effects of the total flavonoids from *Nelumbo nucifera* leaves[J]. Journal of Ethnopharmacology，2013，149(1)：263-269.

[20] MA S，WANG Z，LIU H M，et al. Supplementation of wheat flour products with wheat bran dietary fiber：purpose，mechanisms，and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology，2022，123：281-289.

[21] BAI Z Y，ZHANG Y H，LI H Y，et al. Effects of red kidney bean polysaccharide on the physicochemical properties of frozen dough and the resulting steamed bread quality[J]. Journal of Agriculture and Food Research，2024，16：101063.

[22] WANG Z，MA S，LI L，et al. Synergistic fermentation of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae* to improve the quality of wheat bran dietary fiber-steamed bread[J]. Food Chemistry，2022，16：100528.

[23] WANG C C，YANG Z，GUO X N，et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on the quality of steamed bread and gluten aggregation properties[J]. Food Chemistry，2021，364：130444.

[24] 李晓宁，汪丽萍，田晓红，等. 麦麸膳食纤维及原料麦麸对馒头品质的影响[J]. 食品工业科技，2024，45(3)：75-82.
LI X N，WANG L P，TIAN X H，et al. Effects of wheat bran dietary fiber and raw wheat bran on the quality of steamed bread[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(3)：75-82.(in Chinese)

[25] 刘瑾瑾，朱思明，陆慧玲，等. 番石榴叶提取物对无糖面包品质及抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械，2022，38(10)：210-215.
LIU J J，ZHU S M，LU H L，et al. Effects of Guava leaf extract on the quality and antioxidant capacity of sugar free bread[J]. Food & Machinery，2022，38(10)：210-215.(in Chinese)

[26] YANG Z L，ZHANG Y Y，WU Y W，et al. Factors influencing the starch digestibility of starchy foods：a review[J]. Food Chemistry，2023，406：135009.

[27] QIN C F，CHEN N D，LI J. Detailed investigation on the polyphenols from four *Dendrobium* species against α-glucosidase：an integrated *in vitro* and in silico approach[J]. Arabian Journal of Chemistry，2024，17(3)：105627.

[28] LI J W，SHEN M Y，XIAO W H，et al. Regulating the physicochemical and structural properties of different starches by complexation with tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids，2023，142：108836.

[29] HUANG Y M，WU P，CHEN X D. Mechanistic insights into the influence of flavonoids from dandelion on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of cooked potato starch[J]. Food Hydrocolloids，2022，130：107714.

[30] WANG J R，LIU C，WANG X J，et al. Regulating the quality and starch digestibility of buckwheat-dried noodles through steam treatment[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，195：115826.

[31] 李蔼琪，夏惠，孙桂菊. 低血糖生成指数饮食在2型糖尿病营养管理中的研究进展及应用现状[J]. 食品科学，2024，45(11)：343-350.
LI A Q，XIA H，SUN G J. Progress in diets with low glycemic index for the nutritional management of type 2 diabetes：research and current applications. Food Science，2024，45(11)：343-350.(in Chinese)

（责任编辑：刘冬梅）