

蓬莪术多糖体外抗氧化活性研究

苟学梅¹,王 茜¹,高 刚¹,周永红²,杨瑞武^{1*}

(1.四川农业大学生命科学学院,四川雅安 625014;

2.四川农业大学小麦研究所,四川温江 611130)

摘要:以多年生草本药用植物蓬莪术根茎为原材料,热水浸提法提取多糖,测定蓬莪术多糖的总糖含量、糖醛酸含量和蛋白质含量,并对蓬莪术多糖结构进行红外光谱分析。通过体外抗氧化实验研究蓬莪术多糖对自由基的清除能力以及总还原能力。结果表明,蓬莪术多糖的总糖质量分数为56.13%,糖醛酸质量分数为8.65%,蛋白质质量分数为4.53%。体外抗氧化活性研究结果表明对DPPH自由基、羟基自由基和超氧阴离子有明显清除作用和较强的还原能力,其清除自由基的IC₅₀值分别为0.29、0.44、0.36mg/mL。

关键词:蓬莪术,多糖,抗氧化

Antioxidant activities of polysaccharides from rhizomes of the herb *Curcuma phaeocaulis* in vitro

GOU Xue-mei¹, WANG Qian¹, GAO Gang¹, ZHOU Yong-hong², YANG Rui-wu^{1*}

(1.College of life Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2.Triticeae Research Institute, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China)

Abstract: Water-soluble polysaccharides were obtained from rhizomes on roots of the herb *Curcuma phaeocaulis* Valetton. In addition, the total contents of carbohydrate, uronic acid and protein of *C. phaeocaulis* polysaccharide were measured by chemical methods, and the structural characteristic of CPP was detected by FT-IR spectra. Furthermore, the antioxidant activities of CPP were evaluated on the basis of DPPH, hydroxyl radical, superoxide anion radicals scavenging ability and reducing power *in vitro*. The results showed that the contents of carbohydrate, uronic acid and protein were 56.13%, 8.65% and 4.53%, respectively. The results showed that the CPP possessing remarkable free radical scavenging activity and a good reducing power *in vitro* antioxidant assay. The IC₅₀ values of scavenging free radicals were 0.29, 0.44, 0.36mg/mL, respectively.

Key words: *Curcuma phaeocaulis* Valetton; polysaccharides; antioxidant activity

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)06-0122-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.06.019

近年来对药用植物的研究发现,其含有丰富的多糖类物质,是中医和中药应用的重要物质成分。研究表明,药用植物多糖具有免疫调节^[1-2]、抗肿瘤^[3]、抗病毒^[4]、抗辐射^[5]及降血糖^[6]等方面有众多药理功能,且无毒副作用,有“生物反应调节剂(biological response modifier, BRM)”^[7]之称。因此从药用植物中提取具有生物活性的多糖类物质,具有重要意义和较好的研究前景。

蓬莪术(*Curcuma phaeocaulis* Valetton)是2010年版《中华人民共和国药典》收录的3种基原莪术中的一种,是姜科姜黄属的多年生草本植物,为川产道地药材^[8]。中医认为蓬莪术有破淤、行气、消积和止痛的功效^[9];还有抗癌、抗早孕、抗凝血、抗氧化和保肝等

活性^[10]。蓬莪术的主要有效部位为根茎,其主要活性成分是挥发油和多糖。蓬莪术挥发油具有抗肿瘤、抗炎、抗凝血等作用^[11],已广泛应用于临床。目前有关蓬莪术的研究主要集中在莪术油的药效物质基础和临床应用开发上。然而关于蓬莪术多糖的物理化学性质以及清除自由基活性方面的研究尚未见报道。因此,本实验从蓬莪术根茎中提取多糖,考察其理化性质和体外抗氧化活性,为蓬莪术资源的综合利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

供试材料 采集于四川双流,由四川农业大学生命科学学院杨瑞武教授鉴定为蓬莪术(*Curcuma*

收稿日期:2014-07-03

作者简介:苟学梅(1990-),女,硕士研究生,研究方向:植物化学与成分分析。

* 通讯作者:杨瑞武(1969-),男,博士,教授,主要从事植物系统与进化方面的研究。

基金项目:国家自然科学基金(31270243)。

phaeocaulis Valetton), 洗净于50℃烘干至恒重, 粉碎过60目筛, 干燥保存备用; 抗坏血酸(V_c) 成都科龙化工试剂有限公司; 1,1-二苯基-2-苦味基肼(DPPH) 美国Sigma公司; 重蒸酚 国药集团化学试剂有限公司; 浓硫酸、无水乙醇、石油醚(60~90℃)、葡萄糖等所用其他试剂 均为分析纯; 本实验用水均为自制双蒸水。

FW80型中草药粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司; DHG-9240A型电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司; HWSY11-K型电热恒温水浴锅 北京市长风仪器仪表有限公司; RB-52AA型真空旋转蒸发仪 上海亚荣生化有限公司; H-1650型离心机 长沙湘仪仪器有限公司; DZ-2BC型真空干燥箱 天津泰斯特仪器有限公司; UV-3200PC型紫外分光扫描仪 上海美谱达仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 多糖的提取及纯化 准确称取100g的蓬莪术粉末分别经石油醚和无水乙醇索氏提取5h至无色, 烘干得预处理粉末。准确称取50g预处理粉末, 在预实验的基础上按料液比1:30加入水, 在90℃提取4h, 重复提取两次合并滤液, 旋转蒸发浓缩至400mL后加入95%乙醇至乙醇最终浓度为80%(v/v), 于4℃下醇沉24h, 离心, 沉淀即为蓬莪术粗多糖。将粗多糖溶于50mL双蒸水中, 采用Sevage法(氯仿:正丁醇=4:1, v/v)^[12]除去糖液中的蛋白, 重复多次, 然后流水透析24h, 蒸馏水透析48h, 浓缩透析袋内糖液, 冷冻干燥, 得蓬莪术多糖(CPP)。

1.2.2 化学组成

1.2.2.1 CPP总糖含量的测定 CPP的糖含量采用苯酚硫酸法^[13]测定, 以干燥葡萄糖为标准品。

标准曲线的建立: 准确配制0.40mg/mL葡萄糖标准溶液以及6%的苯酚溶液。分别精密吸取葡萄糖标准溶液1.0~10.0mL至10.0mL容量瓶中加水定容。精密移取各梯度浓度溶液2.0mL于20mL具塞试管中, 依次加入1mL 6%的苯酚溶液和5mL浓硫酸, 振荡混匀, 沸水浴30min。冷却至室温后在490nm处测定吸光值。以吸光值为纵坐标, 对应的葡萄糖浓度(mg/mL)为横坐标制作标准曲线。以超纯水替代标准品溶液作为空白对照, 每组实验平行3次。标准曲线方程为: $y=0.0129x-0.0073$, $R^2=0.9998$ 。

样品的测定: 配制样品溶液, 按照制作标准曲线的操作进行样品的测定, 每组实验平行3次, 求取平均值, 通过样品溶液的吸收值, 根据标准曲线回归方程求出样品中葡萄糖的含量, 按照下式计算各样品中总糖含量:

$$\text{样品中总糖含量}(\%) = \frac{cdv}{m \times 1000} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, c 为样品测定液中葡萄糖的质量浓度(mg/mL); d 为测定液的稀释倍数; v 为测定液的总体积(mL); m 为称取的样品质量(g)。

1.2.2.2 糖醛酸含量测定 糖醛酸含量采用硫酸吡啶法^[14]测定, 以半乳糖醛酸作为标准品。

标准曲线的建立: 准确配制浓度为1.0mg/mL的半乳糖醛酸标准溶液。分别吸取0.02~0.1mL的半乳

糖醛酸标准溶液置于试管中, 补水至1mL。然后缓慢加入6mL硫酸-硼砂溶液, 混合均匀后沸水浴5min。冷水浴冷却至室温后分别加入0.2mL 0.1%的吡啶水乙醇溶液, 沸水浴10min后取出, 冷却至室温后在530nm波长下测定吸光值, 以吸光值为纵坐标, 对应的半乳糖醛酸浓度(mg/mL)为横坐标制作标准曲线。以超纯水替代标准品溶液作为空白对照, 每组实验平行3次。标准曲线方程为: $y=9.6514x+0.0011$, $R^2=0.9987$ 。

样品的测定: 配制样品溶液, 按照制作标准曲线的操作进行样品的测定, 每组实验平行3次, 求取平均值, 通过样品溶液的吸收值, 根据标准曲线回归方程求出样品中糖醛酸的含量, 按照下式计算样品中糖醛酸的含量:

$$\text{样品中糖醛酸含量}(\%) = \frac{cdv}{m \times 1000} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中, c 为供试液中糖醛酸质量浓度(mg/mL); d 为测定液的稀释倍数; v 为测定液的总体积(mL); m 为供试样品的质量(mg)。

1.2.2.3 蛋白质含量测定 蛋白质含量采用王文平的方法^[15]测定, 以牛血清白蛋白为标准品。

标准曲线的建立: 准确配制浓度为100μg/mL牛血清白蛋白标准液, 分别精密移取0.2~1.0mL牛血清白蛋白标准溶液于10mL具塞试管中, 各管补水至1mL, 然后分别加入5mL考马斯亮蓝G-250试剂, 常温下静置15min, 待颜色稳定后, 在595nm处测定吸光值。以吸光值为纵坐标, 对应的可溶性蛋白质含量(μg)为横坐标制作标准曲线。以超纯水替代标准品溶液作为空白对照, 每组实验平行3次。标准曲线方程为: $y=0.0045x-0.0058$, $R^2=0.9983$ 。

样品的测定: 配制样品溶液, 按照制作标准曲线的操作进行样品的测定, 每组实验平行3次, 求取平均值, 通过样品溶液的吸收值, 根据标准曲线回归方程求出样品中可溶性蛋白质的含量, 按照下式计算样品中可溶性蛋白质的含量:

$$\text{样品中可溶性蛋白质含量}(\%) = \frac{md}{M \times 1000} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中, m 为供试液中可溶性蛋白质含量(μg); d 为测定液的稀释倍数; M 为供试样品的质量(mg)。

1.2.3 红外光谱分析 准确称取CPP 1~2mg, 与干燥KBr碾碎混匀, 压成1.0mm薄片, 采用傅里叶转换红外光谱(FT-IR)进行红外光谱检测, 波长扫描范围4000~500cm⁻¹。

1.2.4 抗氧化活性测定

1.2.4.1 DPPH自由基清除活性的测定 参照参考文献^[16]中的方法: 取2mL不同质量浓度的CPP和V_c样品溶液与2mL 0.2mmol/L DPPH乙醇溶液混匀, 静置30min, 517nm处测定吸光度。DPPH自由基清除能力通过以下公式计算:

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = [1 - (A_1 - A_2) / A_1] \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中, A_1 为DPPH与样液反应后的吸光度, A_2 为样品空白的吸光度, A_0 为未加样的DPPH吸光度, 每一

样品平行测三次,取其平均值。

1.2.4.2 羟基自由基清除活性的测定 采用参考文献[17]中的方法,取2mmol/L FeSO₄溶液3mL,加入1mmol/L H₂O₂溶液3mL,再加入6mmol/L水杨酸溶液3mL,立即摇匀,37℃水浴下加热15min后取出,然后加入1.0mL不同质量浓度的样品液,继续水浴加热15min,冷却至室温在520nm下测定吸光度, V_c作为对照。羟基自由基清除能力通过以下公式计算:

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = (A_i - A_j) / (A_c - A_j) \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中, A_i为·OH与样液反应后的吸光度, A_j为样品空白的吸光度, A_c为未加H₂O₂的吸光度,每一样品平行测三次,取其平均值。

1.2.4.3 超氧阴离子自由基清除活性的测定 参考文献[18]中的方法:用0.05mol/L、pH=7.4的PBS缓冲液为溶剂配制3.3×10⁻⁶mol/L核黄素,0.01mol/L蛋氨酸,4.6×10⁻⁵mol/L氯化硝基四氮唑兰(NBT),分别取上述溶液各2.0mL,加入各浓度CPP和V_c溶液1.0mL,混匀光照30min后,在560nm下测定吸光度。超氧阴离子自由基清除能力通过以下公式计算:

$$\text{超氧阴离子自由基清除率}(\%) = (1 - A_i/A_j) \times 100 \quad \text{式(6)}$$

式中, A_i为样液反应后的吸光度, A_j为样品空白的吸光度,每一样品平行测三次,取其平均值。

1.2.4.4 还原力的测定 采用铁氰化钾法参照参考文献[19]。以V_c为对照,将CPP和V_c配制成不同质量浓度的样品溶液,分别取样品溶液2.5mL加入到2.5mL PBS(0.2mol/L, pH6.6)中,再加入1.0mL铁氰化钾(1%, w/v),混匀后50℃水浴20min。冷却至室温加入2.5mL三氯乙酸(10%, w/v),3000r/min离心10min。分别取2.0mL上清液加入2.0mL超纯水,再加入0.5mL三氯化铁(0.1%, w/v),室温放置10min后,700nm处测定光吸收值。吸光值越高表明样品的还原力越强。

2 结果与分析

2.1 CPP的化学组成

苯酚硫酸法测得CPP总糖质量分数为56.13%,硫酸咔唑法测得其中糖醛酸质量分数为8.65%,王小平法测得其蛋白质的质量分数为4.53%。说明蓬莪术多糖是含有少量蛋白的酸性糖。

2.2 CPP的红外光谱

红外光谱是研究多糖官能团的有效手段,如图1

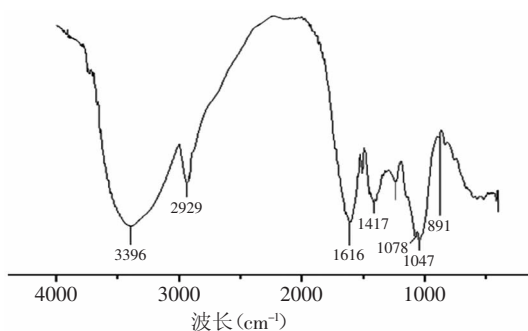


图1 CPP的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of CPP

所示,红外光谱检测结果表明:CPP在3380~3400cm⁻¹处有O-H伸缩振动的吸收峰,2929~2933cm⁻¹处有C-H伸缩振动的吸收峰,这两组峰是糖类的特征吸收峰。1616cm⁻¹附近的吸收峰为C=O非对称伸缩振动峰,1417cm⁻¹附近的吸收峰为C=O对称伸缩振动峰。1100~1000cm⁻¹处的吸收峰是由C-O-C伸缩振动产生,在890cm⁻¹左右出现吸收峰β-糖苷键的特征吸收峰。

2.3 CPP的抗氧化活性

2.3.1 CPP对DPPH自由基的清除作用 DPPH自由基是一种比较稳定的自由基,广泛应用于测定纯抗氧化剂或植物提取物的体外抗氧化活性。由图2可以看出,在低浓度范围内, CPP对DPPH自由基的清除率与质量浓度呈现较好的量效关系,但随着CPP质量浓度的增加,清除率趋于平缓,质量浓度大于0.75mg/mL后, CPP的清除率基本稳定在82.33%,清除DPPH自由基50%时的CPP质量浓度即IC₅₀为0.29mg/mL。较低的IC₅₀值表示CPP较高的DPPH自由基清除能力。

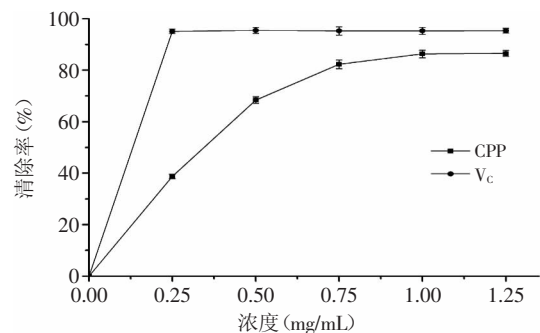


图2 CPP和V_c对DPPH自由基的清除能力

Fig.2 DPPH radical scavenging abilities of CPP and V_c

2.3.2 CPP对·OH的清除作用 羟基自由基是已知的最活泼的活性氧自由基,也是毒性最大的氧自由基,清除羟基自由基的能力是评价抗氧化物质的重要指标。由图3可知CPP有很强的清除羟基自由基的作用,随着质量浓度的增加, CPP的清除能力依次增加。在低浓度范围内, CPP对·OH的清除率与质量浓度呈现较好的量效关系。在相同质量浓度下,小于0.5mg/mL时, CPP清除·OH的能力大于V_c,但大于0.5mg/mL后,对照品V_c的清除能力迅速上升,在1.0mg/mL后, V_c对羟基自由基的清除率接近100%,而CPP对清除羟基自由基有明显的浓度效应关系,当质

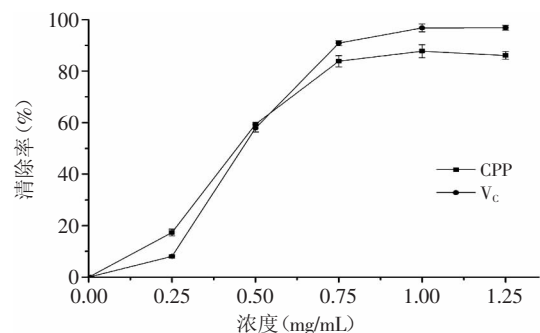


图3 CPP和V_c对羟基自由基的清除能力

Fig.3 Hydroxyl radical scavenging abilities of CPP and V_c

量浓度达到1.0mg/mL时, CPP对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率达到最大值86.13%, 其 IC_{50} 值为0.44mg/mL。

2.3.3 CPP对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除作用 $\cdot\text{O}_2^-$ 即是阴离子, 又是自由基, 性质活泼, 具有很强的氧化性和还原性, 既是氧化剂, 又是还原剂, 过量生成可致组织损伤。图4表明, CPP对超氧阴离子有一定的清除作用, 在低浓度范围内, CPP对超氧阴离子清除作用一直随浓度增加而增大。在1.0mg/mL时达到最大(83.33%), 而后清除率不变, IC_{50} 值为0.36mg/mL, 表明CPP具有较强的 $\cdot\text{O}_2^-$ 清除活性。

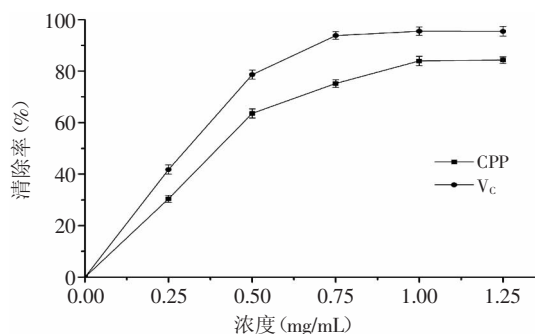


图4 CPP和Vc对超氧阴离子自由基的清除能力

Fig.4 Superoxide anion radical scavenging abilities of CPP and Vc

2.3.4 CPP的总还原能力 抗氧化物质的抗氧化活性与其还原力存在着直接的联系, 还原力越强, 抗氧化性越强。由图5可知, 在小于1.0mg/mL的质量浓度内, CPP的还原力随着浓度的增加而增加; 当浓度为1.0mg/mL时, 吸光度为0.95; 当浓度为1.25mg/mL时, 吸光度为1.01。对于分光光度法而言, 当吸光度高于1.0时, 测量结果的相对误差较大, 故不再进一步增加CPP质量浓度。在已测量的质量浓度内, CPP的还原力不及Vc, 但与浓度呈正相关。

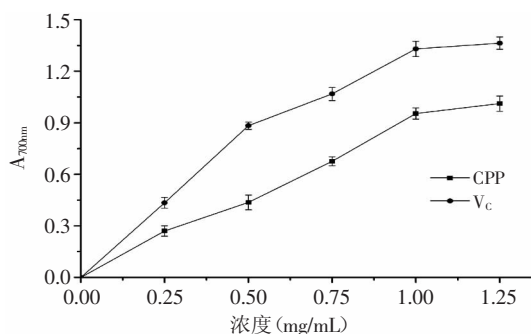


图5 CPP和Vc的还原力

Fig.5 Reducing power of CPP and Vc

3 结论

已有许多研究表明从药用植物中提取的多糖具有很好的抗氧化活性。从杜仲中提取的多糖具有很强的DPPH自由基的清除能力和较强的还原能力, 在相同浓度下清除能力高于维生素C^[20]。从鱼腥草中提取的多糖具有较好的DPPH自由基, 羟基自由基和超氧阴离子自由基的清除活性^[21]。通过本文实验结果

可以发现, 从药用植物蓬莪术中提取的多糖是含有少量蛋白的酸性糖, 具有糖类典型的红外吸收峰, 含有 β 糖苷键。体外抗氧化实验表明, CPP对DPPH自由基、 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 都具有一定清除能力以及较强的还原能力, 随着质量浓度的提高, 清除效果越明显, 清除DPPH、 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 自由基的 IC_{50} 值分别为0.29、0.44、0.36mg/mL。蓬莪术多糖具有明显的抗氧化能力, 可以开发成为高效、低毒的天然抗氧化剂应用于食品及保健领域, 而有关蓬莪术多糖的结构鉴定及抗氧化活性机理有待进一步研究。

参考文献

- [1] 张雅君, 梁忠岩, 张丽霞. 党参粗多糖的组成及其免疫活性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 199-202.
- [2] 姜琛璐, 汤承, 骞宇, 等. 黄芪多糖免疫调节作用研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 327-332.
- [3] Xiang D B, Li X Y. Antitumor activity and immuno-potentiating actions of *Achyranthes bidentata* polysaccharides[J]. Acta Pharmacologica Sinica, 1993, 14(6): 556-561.
- [4] 王春花, 金秧敏, 张燕华, 等. 8种中药多糖及其硫酸化衍生物对新城疫病毒的影响[J]. 中国兽医杂志, 2012, 48(8): 42-45.
- [5] Sun Y L, Tang J, Gu X H, et al. Water-soluble polysaccharides from *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels: Preparation, characterization and bioactivity [J]. International Journal of Biological Macromolecular, 2005, 36(5): 283-289.
- [6] Wu Y, Ou-Yang J P, Wu K, et al. Hypoglycemic effect of *Astragalus* polysaccharide and its effect on PTP1B1[J]. Acta Pharmacologica Sinica, 2005, 26(3): 345-352.
- [7] Leung M Y K, Liu C, Koon J C M, et al. Polysaccharide biological response modifiers[J]. Immunology Letters, 2006, 105(2): 101-114.
- [8] 万德光, 彭成, 卫莹芳, 等. 四川道地中药材志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2005: 449-452.
- [9] Institute of materia medica, Chinese Academy of Medical Sciences, Modern studies on chinese traditional medicines [M]. Beijing: Peking Union Medical college and Beijing Medical University United Press, 1996: 87-90.
- [10] Rasmussen H B, Christensen S B, Kvist L P, et al. A Simple and Efficient Separation of the Curcumins, the Antiprotozoal Constituents of *Curcuma longa*[J]. Planta Medica, 2000, 66(4): 396-398.
- [11] Zeng J H, Xu G B, Chen X. Application of the chromatographic fingerprint for quality control of essential oil from Guangxi *Curcuma kwangsiensis*[J]. Medicinal Chemistry Research, 2009, 18(2): 158-165.
- [12] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [13] Cuesta G, Suarez N, Bessio M I, et al. Quantitative determination of pneumococcal capsular polysaccharide serotype 14 using a modification of phenol-sulfuric acid method[J]. Journal

(下转第130页)

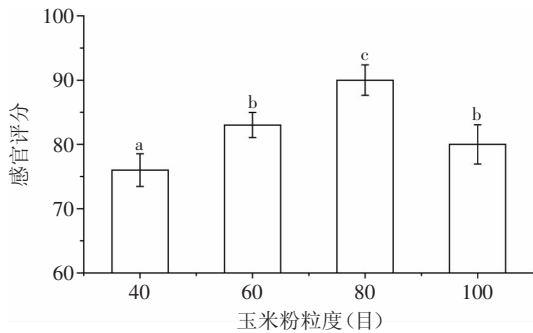


图6 玉米粉粒度对馒头感官评分的影响

Fig.6 Effect of corn particle size on steamed bread sensory quality

明显。玉米粉粒度越小,玉米颗粒可与面团中的淀粉-蛋白质基质结合,使结构更紧密造成馒头坚实度增大,而且玉米粉中不含面筋蛋白,对面团的面筋网络结构产生了一定的稀释作用,面筋网络结构无法很好地扩展,面团持气性差,馒头心内部过于致密,气室不均匀甚至无气孔,而使其硬度增大,比容减小^[17]。

由图6可知,随着玉米粉粒度的减小,混合粉馒头的感官评分先增大后减小,80目的感官评分最高。添加40、60目玉米粉的馒头内部气孔结构较好,但口感粗糙,小麦粉的白色和玉米粉的黄色分布不均匀,添加100目玉米粉的馒头口感相对细腻,色泽均匀,但硬度大,内部气孔小。而且100目的混合粉馒头已识别不出玉米粉颗粒,易使消费者怀疑是否添加玉米粉。添加80目玉米粉的馒头不仅色泽、外观上有玉米粉的特征,而且口感也较好。

3 结论

利用标准筛制备出不同粒度梯度的玉米粉,除了色泽变化显著($p < 0.05$),其水分、粗蛋白含量相差不大。粒度越小,玉米粉持水力越大,越易糊化,糊化温度由40目的95.15℃下降到100目的80.75℃,这说明可以通过调节玉米粉的粒度来控制糊化过程。随着玉米粉粒度的减小,混合粉的吸水率缓慢增大,面团形成时间、面团稳定时间逐渐减小,弱化度增大。添加粒度较小玉米粉的馒头色泽均匀度,表皮光滑度,口感细腻度要优于添加较大粒度的,但其硬度较大,比容较小,40目的比容为2.46g/mL,而100目的比容下降到2.15g/mL。综合考虑得出,适于制作馒头的玉米

粉粒度为80目。

参考文献

- [1] 鲍庆丹. 麸皮粗细度对麸皮馒头品质影响的研究[D]. 郑州:河南工业大学,2010.
- [2] 吴俊,李斌,苏喜生,等. 玉米淀粉的粒度效应与其微观形貌和性能关系研究[J]. 中国粮油学报,2004,19(5):23-26.
- [3] 祁国栋,张炳文,张桂香,等. 超微细处理对糯玉米淀粉加工特性影响的研究[J]. 食品科技,2010,35(3):258-261.
- [4] 傅茂润,赵双,曲清莉,等. 超微粉碎对红米理化性质和加工特性的影响[J]. 食品与发酵工业,2013,39(4):100-104.
- [5] Aamodt A, Magnus EM, Hollung K, et al. Dough and hearth bread characteristics influenced by protein composition, protein content, DATEM, and their interactions[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(3), 214-221.
- [6] Collar C, Santos E, Rosell CM. Assessment of the rheological profile of fibre-enriched bread doughs by response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3), 820-826.
- [7] 弓志青,王文亮,程安玮,等. 不同粒度糯玉米粉物化性质研究[J]. 山东农业科学,2013,45(12):84-86.
- [8] 李春红. 玉米传统食品加工的相关因子研究[D]. 北京:中国农业科学院,2001.
- [9] 石磊,孙娟娟,栾广忠,等. 颗粒度对玉米粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技,35(14):135-138.
- [10] 付海东,吴文福,张虎,等. 基于休比角的粮食含水率测量方法的可行性研究[J]. 农机化研究,2012,34(10):152-155,160.
- [11] 曾洁,张首玉,高海燕,等. 不同粒度玉米粉的性质研究[J]. 食品工业科技,2009,30(5):134-137.
- [12] 潘思轶,王可兴,刘强. 不同粒度超微粉碎米粉理化特性研究[J]. 食品科学,2004,25(5):37-41.
- [13] Fannon J E, Gray J A, Gunawan N, et al. Heterogeneity of starch granules and the effect of granule channelization on starch modification[J]. Cellulose, 2004, 11(2):247-254.
- [14] 胡飞,陈玲,李琳. 马铃薯淀粉颗粒在微细化过程中结晶结构的变化[J]. 精细化工,2002,19(2):114-117.
- [15] 陈志成. 面粉质量和粒度对主食馒头品质影响机理的研究[J]. 粮食加工,2007,32(5):19-22.
- [16] 吴非,韩翠萍. 谷物科学与生物技术[M]. 北京:化学工业出版社,2012:13.
- [17] 李新华,王立群,徐亚平. 玉米面粉面团品质改良技术研究[J]. 沈阳农业大学学报,2002,35(5):370-373.

(上接第125页)

of Microbiological Methods, 2003, 52(1):69-73.

[14] 夏永刚,梁军,杨柄友,等. 麻黄多糖中糖醛酸含量的测定[J]. 中医药学报,2011,39(1):71-73.

[15] 王文平,郭祀远,李琳,等. 考马斯亮蓝法测定野木瓜多糖中蛋白质的含量[J]. 食品研究与开发,2008,29(1):115-117.

[16] 郑大贵,叶青,叶红德,等. DPPH·法评价V_C、异V_C及其衍生物的抗氧化性能[J]. 食品工业科技,2012,33(8):380-383.

[17] 陈莉华,廖微,肖斌,等. 玄参多糖体外清除自由基和抗氧化作用的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(7):86-89.

[18] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase: improved

assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. Analytical Biochemistry, 1971, 44(1):276-287.

[19] 窦娇,郭玉蓉,薛战锋,等. 榨前分离苹果皮多糖的鉴定及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技,2014,35(1):111-115.

[20] 孙曦晓,刘再枝,杜新琦,等. 超声辅助提取杜仲多糖及其抗氧化活性[J]. 植物研究,2014,34(3):428-432.

[21] Tian L M, Zhao Y, Guo C, et al. A comparative study on the antioxidant activities of an acidic polysaccharide and various solvent extracts derived from herbal *Houttuynia cordata* [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2):537-544.