

# 圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干研制及品质分析

李梦琴,赵龙珂,程冰,王箐,赵杰,林顺顺\*

(河南农业大学 食品科学技术学院,河南 郑州 450002)

**摘要:**该文考察圆苞车前子壳粉(PSYLLIUM HUSK POWDER, PHP)、全麦粉、木糖醇、玉米油添加量对饼干品质的影响,通过感官评价优化配方,采用质构特性分析、低场核磁共振分析、偏最小二乘回归分析等手段,探索影响饼干品质的关键因素。结果显示:圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干的最优配方为 PHP 添加量 4.0%、全麦粉添加量 30%、木糖醇添加量 22.5%、玉米油添加量 22.5%;饼干中全麦粉添加量、自由水含量,以及饼干的脆性和咀嚼性质构特征,与饼干感官评分呈显著正相关( $P < 0.05$ ),PHP 的添加有助于感官提升。

**关键词:**圆苞车前子壳粉;全麦粉;酥性饼干;正交试验;品质分析

## Development and Quality Analysis of the Psyllium Husk Powder Whole Wheat Crispy Biscuit

LI Meng-qin, ZHAO Long-ke, CHENG Bing, WANG Zheng, ZHAO Jie, LIN Shun-shun\*

(College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of the addition amounts of psyllium husk powder (PHP), whole meal powder, xylitol, and corn oil on the quality of biscuits, optimized the recipe through sensory evaluation, and explored the key factors affecting the quality of biscuits through texture analysis, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) analysis, partial least squares regression (PLSR) analysis, etc. The results showed that the optimal recipe for PHP whole wheat biscuits consisted of 4.0% PHP, 30% whole wheat powder, 22.5% xylitol and 22.5% corn oil. The addition amount of whole wheat powder, free water content, crispness, and chewiness of biscuits were positively correlated with the sensory score of biscuits ( $P < 0.05$ ), and the addition of PHP was conducive to sensory improvement.

**Key words:** psyllium husk powder (PHP); whole wheat powder; crispy biscuit; orthogonal test; quality analysis

引文格式:

李梦琴,赵龙珂,程冰,等.圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干研制及品质分析[J].食品研究与开发,2022,43(21):67-73.

LI Mengqin, ZHAO Longke, CHENG Bing, et al. Development and Quality Analysis of the Psyllium Husk Powder Whole Wheat Crispy Biscuit[J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 67-73.

圆苞车前子是车前属一年生植物的统称,有 200 多个不同的种类<sup>[1]</sup>。将圆苞车前成熟种子外壳干燥粉碎即圆苞车前子壳粉(psyllium husk powder, PHP)。PHP 起初作为药用资源被开发使用,近年来 PHP 才作为一种食品资源被开发利用,国家卫生和计划生育委员会 2014 年将其列为新资源食品。PHP 含有丰富的粗蛋白、膳食纤维、碳水化合物、微量元素以及天然黏液物

质<sup>[2]</sup>,PHP 膳食纤维含量高达 80%以上,其中水溶性膳食纤维含量约为 70%,这使得 PHP 遇水后能膨胀为体积的 50 倍,结合大量水形成凝胶,能增加饱足感,但不提供热量<sup>[3]</sup>,因此考虑利用 PHP 凝胶特性来改善面团吸水性,生产出品质优良的烘焙食品。此外,圆苞车前子壳纤维是一种肝脏保护剂,富含多种抗氧化成分,具有保肝作用<sup>[4]</sup>。其膳食纤维具有维持肠道屏障、促进

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(31901820);河南省高等学校重点科研项目(20A550010)

作者简介:李梦琴(1965—),女(汉),教授,本科,研究方向:食品科学与农产品加工。

\*通信作者:林顺顺(1985—),女(汉),讲师,博士,研究方向:食品科学与农产品加工。

肠道蠕动、抵御多种毒素、通便的作用<sup>[5]</sup>。PHP还有降低血糖和改善胰岛素抵抗的作用<sup>[6]</sup>。将PHP应用于面粉制品发挥其营养功效是资源开发的一条重要途径。

饼干因其食用简单、方便携带、便于储存等特性深受消费者喜爱,但目前大多饼干高糖、高脂。随着消费者对健康的关注,开发功能型饼干已经成为发展趋势<sup>[7]</sup>。在酥性饼干中采用适量全麦粉代替低筋面粉,可以增加食用者对全谷物的摄入量,降低谷物食品加工过程中粮食资源浪费、营养损失,充分响应“国家全谷物行动计划”。同时木糖醇作为天然甜味剂,在饼干中代替蔗糖可以制作成无糖饼干,木糖醇的代谢不需胰岛素的促进,就能给细胞提供养分和能量。木糖醇具有独特的代谢途径,食用后不会引起血糖的升高<sup>[8]</sup>。研究发现植物当中的天然成分对人体的健康具有重要作用,植物天然成分的研究开发也越来越成为主流趋势。本研究将富含膳食纤维的圆苞车前子壳粉添加于全麦酥性饼干中,探究其对酥性饼干品质的影响,利用天然资源开发一种功能型饼干。圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干不仅增加酥性饼干品种的多样性,也为PHP的开发利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

低筋面粉:潍坊风筝面粉有限责任公司;全麦粉:深圳市海尚国际贸易有限公司;圆苞车前子壳粉:山东禾谷食品有限公司;木糖醇:浙江华康贸易有限公司;玉米胚芽油:西王食品股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

DJJ-160C 经济型电动压面机:永康市海鸥电器有限公司;YXD-Z202 烤箱:广东乐创电器有限公司;TA.XT.Plus 物性测试仪:英国 Stable Micro Systems 公司;Micro MR 核磁共振成像仪:上海纽迈电子科技有限公司。

### 1.3 试验方法

工艺流程:面团调制→面团成型→饼干成型→烘焙→冷却→成品。

基础配方:以混合粉为基准(全麦粉+低筋粉=100%),玉米油添加量 20.0%,木糖醇添加量 20.0%,PHP 添加量 3.0%,此外小苏打添加量 0.5%、食用盐添加量 0.5%、水添加量 20%。

将全麦粉、玉米油、木糖醇、PHP、小苏打和食用盐和水按质量比混合,加入低筋小麦粉,和面 2 min。用压面机将面团辊压成型,面饼厚度为 3 mm,用圆形模具压制成型。将成型的饼干放入烤箱中,上火 160 ℃,下

火 160 ℃,烘烤 24 min(为保证饼干均匀烤制,烤制 12 min 时调整烤盘方向),冷却至室温 25 ℃<sup>[9]</sup>。

### 1.4 试验设计

#### 1.4.1 单因素试验设计

结合基础配方,以全麦粉、PHP、木糖醇、玉米油添加量为自变量,将感官评分作为评定指标,进行优化试验。单因素试验设计方案见表 1。

表 1 单因素试验设计方案

Table 1 Single factor experimental design scheme

全麦粉添加量/%	玉米油添加量/%	木糖醇添加量/%	PHP添加量/%
10	10.0	10.0	1.0
20	15.0	15.0	2.0
30	20.0	20.0	3.0
40	25.0	25.0	4.0
50	30.0	30.0	5.0

#### 1.4.2 正交试验设计

结合单因素试验结果,以全麦粉、PHP、木糖醇、玉米油添加量为自变量,进行四因素三水平正交试验,通过感官评价结果优化试验配方,正交试验设计见表 2。

表 2 正交试验设计因素与水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A 全麦粉 添加量/%	B 玉米油 添加量/%	C 木糖醇 添加量/%	D PHP 添加量/%
1	25	17.5	22.5	3.5
2	30	20.0	25.0	4.0
3	35	22.5	27.5	4.5

### 1.5 感官评定

根据 GB 7100—2015《食品安全国家标准 饼干》<sup>[10]</sup>进行感官评定,选 15 名经过感官评分鉴定培训且有一定感官评价经验的评价员组成感官评定小组,分别从外观、色泽、滋味及口感、组织和杂质 5 个方面进行感官评定,感官评分标准参考陈思沅等<sup>[11]</sup>的方法。感官评分标准见表 3。

表 3 感官评分标准

Table 3 Sensory scoring standards

项目	要求	分值
外观	外形完整,花纹清晰,厚薄基本均匀,不收缩,不变形,不起泡,无裂痕,不应有较大或较多的凹底	0~20
色泽	应呈棕黄色或棕色,色泽应均匀,表面略带光泽,无白粉,不应有过焦、过白的现象	0~20
滋味及口感	香味强无异味,无苦涩味,口感酥松或酥脆,不黏牙	0~20
组织	断面结构应呈多孔状,细密,无大空洞	0~20
杂质	无肉眼可见外来杂质	0~20

### 1.6 质构特性分析

参照邓楚君等<sup>[12]</sup>的方法对饼干进行质构测定,采用柱形探头 P/50,测前速度 1 mm/s、测试速度 1.5 mm/s、测后速度为 1.5 mm/s、压缩程度为 30%。

### 1.7 低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)分析

参考李爽等<sup>[13]</sup>的方法对饼干进行低场核磁共振测定。精确称取 0.800 g 样品,放入直径 25 mm 的核磁共振专用试管,采样点数 140 056,采样频率 200 kHz,采样间隔时间 4 500 ms,重复采样回波时间 0.35 ms,回波数 2 000,重复采样 4 次。

### 1.8 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件对单因素及正交试验进行数据方差分析,显著性水平为 0.05;采用 Origin 2021 软件作图;采用 SIMCA-P 11 软件进行统计数据的回归分析、主成分分析及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 饼干添加物对产品感官品质影响的单因素分析结果

单因素试验结果见图 1。

由图 1 可知,随着全麦粉、PHP、木糖醇、玉米油添

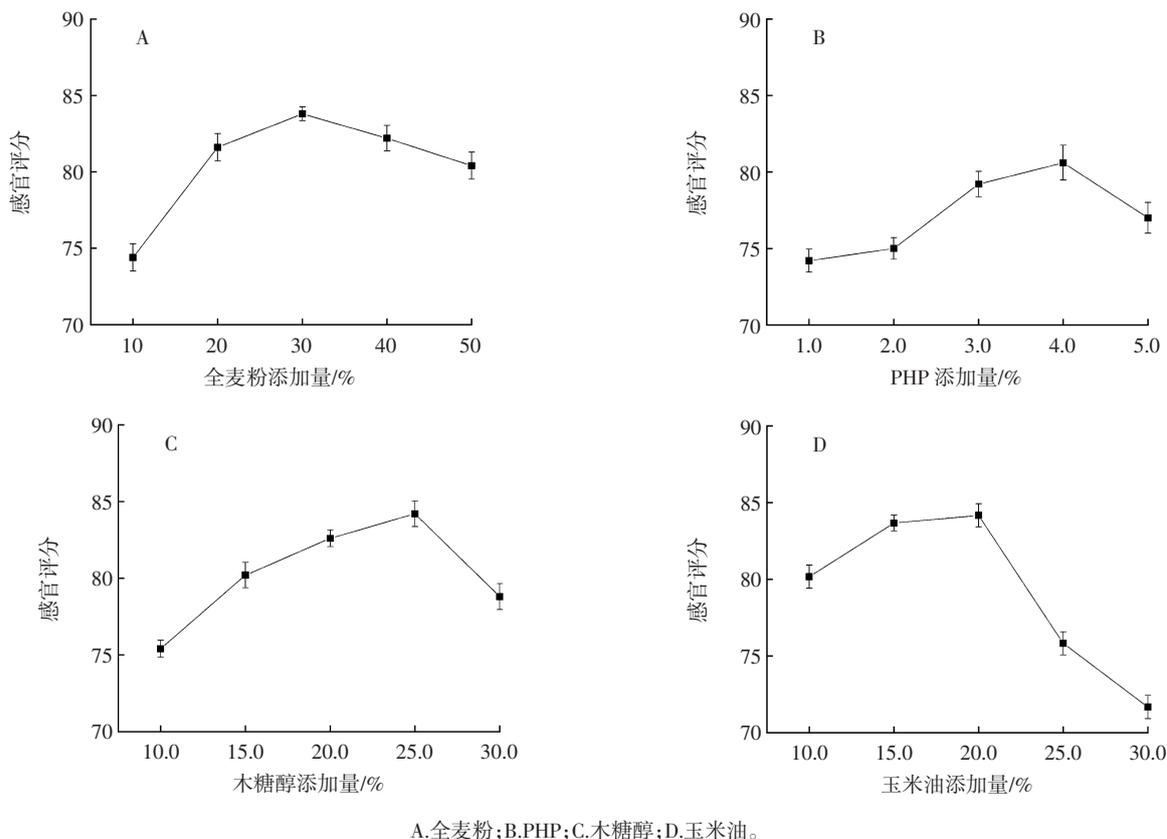


图 1 全麦粉、PHP、木糖醇、玉米油对圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干感官品质的影响

Fig.1 Effect of whole wheat powder ,PHP, xylitol, corn oil on sensory quality of psyllium husk powder whole wheat crisp biscuit

加量的增加,饼干的感官评分均呈先升高后降低趋势。全麦粉添加量 30%、PHP 添加量 4.0%、木糖醇添加量 25.0%、玉米油添加量 20.0%时感官评分均相对较高,对应的饼干外观、色泽、口感、组织结构均较好,感官品质最佳。

### 2.2 圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干配方优化

正交试验结果见表 4。

由表 4 可知,各因素对圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干感官品质的影响顺序为 A>D>B>C,即全麦粉添加量影响最大,其次为 PHP 添加量、玉米油添加量和木

表 4 圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results of psyllium husk powder whole wheat crisp biscuit

试验号	A 全麦粉添加量/%	B 玉米油添加量/%	C 木糖醇添加量/%	D PHP 添加量/%	感官评分
1	25	17.5	22.5	3.5	74.2
2	25	20.0	25.0	4.0	77.5
3	25	22.5	27.5	4.5	76.7
4	30	17.5	25.0	4.5	84.8
5	30	20.0	27.5	3.5	78.3

续表4 圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干正交试验结果

Continue table 4 Orthogonal test results of psyllium husk powder whole wheat crisp biscuit

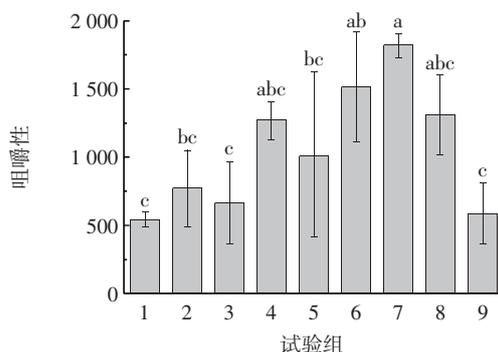
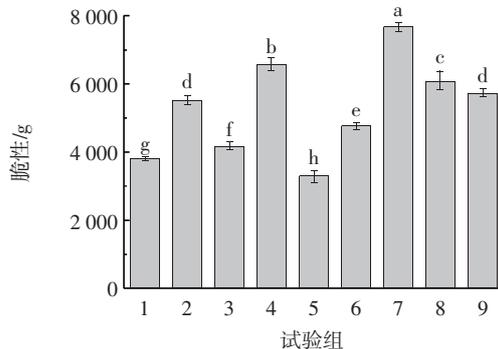
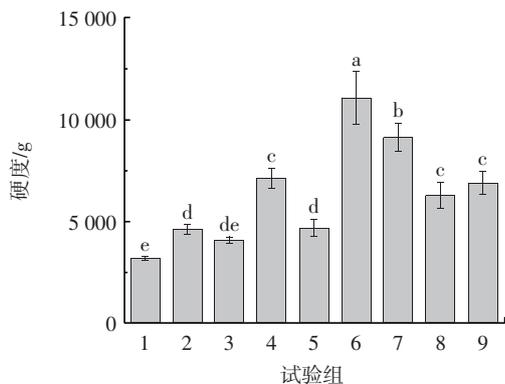
试验号	A 全麦粉 添加量/%	B 玉米油 添加量/%	C 木糖醇 添加量/%	D PHP 添 加量/%	感官 评分
6	30	22.5	22.5	4.0	90.1
7	35	17.5	27.5	4.0	86.4
8	35	20.0	22.5	4.5	81.6
9	35	22.5	25.0	3.5	83.5
$k_1$	76.1	81.8	82.0	78.7	
$k_2$	84.4	79.1	81.9	84.3	
$k_3$	83.8	83.4	80.5	81.0	
R	8.3	4.3	1.5	5.6	
最优水平	$A_2$	$B_3$	$C_1$	$D_2$	
主次因素	$A>D>B>C$				

糖醇添加量,最优组合为  $A_2B_3C_1D_2$ ,该组合在正交试验设计表中为试验组6,感官评分为90.1,感官评分最高,因此选择  $A_2B_3C_1D_2$  为圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干的最优配方。

### 2.3 试验组饼干产品的质构特性分析

评价酥性饼干品质的重要指标有硬度、脆性和咀嚼性<sup>[9]</sup>。硬度反映了饼干的松软程度,饼干的口感随着硬度的增大而越酥脆<sup>[14]</sup>。脆性反映了饼干的松脆程度。咀嚼性是指把饼干咀嚼到能够下咽的状态所需要的能量,反映饼干被咀嚼时对外力的持续抵抗作用,咀嚼性越小,说明饼干越易嚼碎,越没有嚼劲;咀嚼性越大,饼干越难被嚼碎,有硌牙感,口感越差<sup>[15]</sup>。质构特性测定结果见图2。

由图2可知,试验组6饼干硬度显著高于其它试验组的饼干( $P<0.05$ ),说明其酥脆性很好,其脆性和咀嚼性均较好;试验组1饼干硬度和咀嚼性明显低于其它试验组的饼干,脆性也较低,说明其口感较差。这与感官评分一致,试验组6的感官评分最高,试验组1的感



不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图2 质构特性测定结果

Fig.2 Results of measurement of texture characteristics

官评分最低,因此确定最优配方组合为  $A_2B_3C_1D_2$ (试验组6)。

### 2.4 试验组饼干产品的低场核磁共振分析

低场核磁共振是一种快速、无损的检测方法,用于区分食品中水分的状态,掌握水分的迁移规律<sup>[16-18]</sup>。依据样品中水分子的横向弛豫时间  $T_2$  的不同,对食品中不同状态的水分进行区分,可以分为结合水、不易流动水和具有流动性的自由水<sup>[18]</sup>。不同配方酥性饼干正交试验组的横向弛豫时间  $T_2$  的变化见图3。

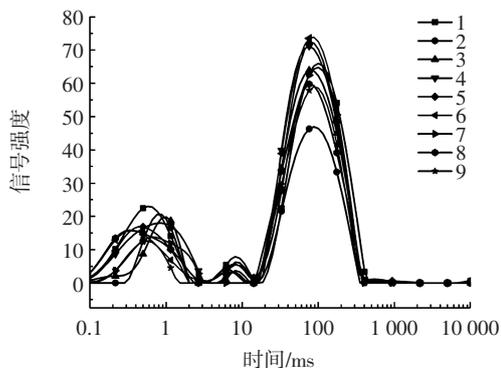


图3 不同配方酥性饼干正交试验组的横向弛豫时间  $T_2$  的变化  
Fig.3 Change of transverse relaxation time  $T_2$  in orthogonal test group of crisp biscuit with different formulations

由图3可知,随着横向弛豫时间的延长,显示出

3个明显的峰,其对应的横向弛豫时间表示饼干中不同状态水分的自由度,弛豫时间越小表明水与饼干中物质结合越紧密,越不容易排出,其值越大,表示水

分的自由度越大越容易排出<sup>[8]</sup>;对应的峰面积表示该部分水分的含量。

不同配方酥性饼干弛豫时间及峰面积分析见表5。

表5 不同配方酥性饼干弛豫时间及峰面积分析

Table 5 Texture analysis of crisp biscuit with orthogonal experimental formula

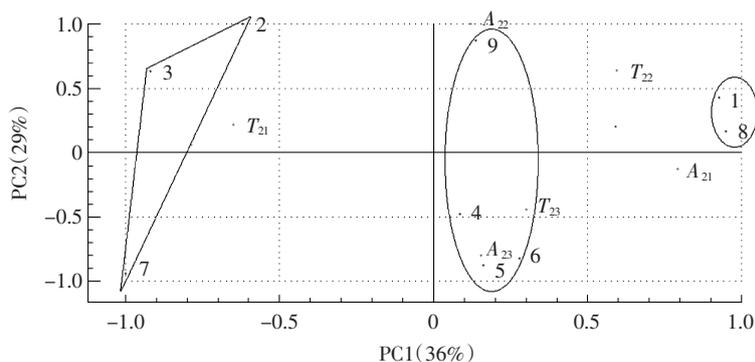
试验组	$T_{21}/\text{ms}$	$T_{22}/\text{ms}$	$T_{23}/\text{ms}$	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$
1	0.56±0.02 <sup>a</sup>	8.37±0.52 <sup>a</sup>	86.18±1.92 <sup>a</sup>	279.60±57.66 <sup>a</sup>	53.55±8.29 <sup>a</sup>	875.80±2.67 <sup>b</sup>
2	0.86±0.02 <sup>b</sup>	5.32±0.20 <sup>c</sup>	84.87±2.83 <sup>a</sup>	177.18±16.87 <sup>cd</sup>	59.68±2.59 <sup>a</sup>	740.47±31.04 <sup>d</sup>
3	1.04±0.10 <sup>a</sup>	6.30±0.30 <sup>b</sup>	77.26±1.53 <sup>b</sup>	184.84±13.21 <sup>bcd</sup>	37.15±3.40 <sup>bc</sup>	866.46±16.36 <sup>b</sup>
4	0.86±0.01 <sup>b</sup>	4.49±0.33 <sup>d</sup>	87.16±1.46 <sup>a</sup>	258.40±25.30 <sup>ab</sup>	43.73±3.17 <sup>b</sup>	969.77±21.31 <sup>a</sup>
5	0.45±0.04 <sup>f</sup>	4.16±0.16 <sup>d</sup>	82.92±6.31 <sup>a</sup>	239.76±27.56 <sup>abc</sup>	22.14±2.72 <sup>d</sup>	959.00±20.05 <sup>a</sup>
6	0.65±0.02 <sup>d</sup>	6.39±0.30 <sup>b</sup>	86.10±1.52 <sup>a</sup>	241.61±38.52 <sup>abc</sup>	15.95±2.21 <sup>d</sup>	951.20±4.10 <sup>a</sup>
7	0.75±0.01 <sup>e</sup>	1.26±0.15 <sup>e</sup>	88.06±0.96 <sup>a</sup>	160.95±29.08 <sup>d</sup>	14.56±2.34 <sup>d</sup>	815.08±7.43 <sup>c</sup>
8	0.34±0.02 <sup>f</sup>	8.19±0.19 <sup>a</sup>	86.35±1.39 <sup>a</sup>	266.09±24.57 <sup>a</sup>	32.48±1.88 <sup>c</sup>	786.82±4.42 <sup>c</sup>
9	0.56±0.03 <sup>e</sup>	6.33±0.41 <sup>b</sup>	84.54±2.26 <sup>a</sup>	220.16±2.89 <sup>abcd</sup>	57.54±3.84 <sup>a</sup>	752.39±27.31 <sup>d</sup>

注: $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 分别表示饼干核磁衰减信号被拟合的3个横向弛豫时间,依次为结合水、不易流动水和自由水; $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 和 $A_{23}$ 分别表示横向弛豫时间对应的峰面积,代表对应状态水分含量;同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

由表5可知,试验组6不易流动水含量较低而结合水和自由水含量较高;试验组3自由水的自由度( $T_{23}=77.26\text{ ms}$ )显著低于其它试验组( $P<0.05$ )。

为了全面分析各试验组间水分自由度和含量的差异,本研究进行了主成分分析,结果见图4。

由图4可知,沿PC1轴方向,9组饼干可分为3类,



1~9为9个试验组; $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 分别表示水分子的横向弛豫时间; $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 及 $A_{23}$ 分别表示水分子横向弛豫时间处的峰面积,代表对应状态水分含量。

图4 不同配方饼干中不同状态水分自由度和含量的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of moisture degree of freedom and content in different states of biscuits with different formulations

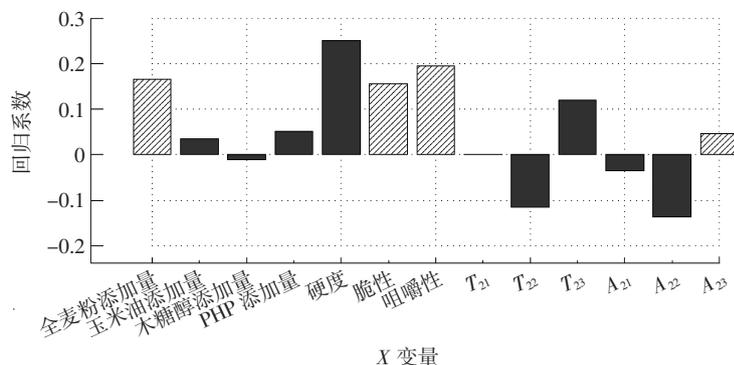
依次为试验2、3、7组→试验4、5、6、9组→试验1、8组;分析发现,试验组1和8明显区别于其它组,是源于其结合水含量( $A_{21}$ )明显高于其它试验组;试验组4、5、6的自由水含量( $A_{23}$ )明显高于其它试验组,结合2.2中的部分内容,发现此3组饼干的全麦粉含量均为30%,说明全麦粉过多或过少均会导致自由水含量( $A_{23}$ )的明显降低。

2.5 影响圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干感官品质的关键因素分析

为深入探究会对圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干

感官产生显著影响的因素,以全麦粉、玉米油、木糖醇和PHP的添加量,饼干的硬度、脆性、咀嚼性,以及不同相态水分的弛豫时间和含量为X变量,饼干感官评分为Y变量,利用Jack-knife不确定度分析计算估计回归系数用于显著变量分析<sup>[9]</sup>,结果见图5。

由图5可知,全麦粉添加量显著影响饼干感官评分。在添加范围内,PHP添加量没有达到显著水平,但其对饼干感官评分呈正相关性,即添加PHP会提升饼干的感官品质。硬度和脆性对饼干感官评分也呈正相关性,且脆性和咀嚼性达到显著水平( $P<0.05$ ),



斜纹柱表示对感官具有显著性差异( $P<0.05$ );实心柱表示对感官的影响无显著性差异( $P>0.05$ ); $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 分别表示水分子的横向弛豫时间; $A_{21}$ 、 $A_{22}$ 及 $A_{23}$ 分别表示水分子横向弛豫时间处的峰面积,代表对应状态水分含量。

图5 饼干成分添加量、质构性质及水分相态特征变量对饼干感官评分的相关性

Fig.5 Correlation between the content of biscuit ingredients, texture properties and characteristic variables of water phase on biscuit sensory score

这说明饼干的感官品质随着其脆性及咀嚼性的数值增加而提高,另外研究结果还表明饼干的感官评分与其自由水的自由度( $T_{23}$ )及含量( $A_{23}$ )也呈正相关,且饼干的感官评分与自由水的含量( $A_{23}$ )呈显著正相关( $P<0.05$ ),这与饼干的润滑感有关,润滑感是一种重要的享受型口感,其对感官评分水平具有直接影响<sup>[19-21]</sup>,而饼干在人体口腔中的润滑感又与其自由水含量有密切的关系,因此饼干中自由水的含量( $A_{23}$ )越高,其对应的感官品质也越好。

### 3 讨论与结论

本研究通过在传统酥性饼干中加入 PHP、全麦粉等,探究了 PHP、全麦粉、木糖醇、玉米油的添加量与饼干感官品质的关系。以感官评分为指标,进行单因素、正交试验,结果表明圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干的最优配方为全麦粉 30%+低筋粉 70%、PHP 4.0%、木糖醇 22.5%、玉米油 22.5%。

研究结果显示,试验组 6 饼干感官评分最高,其次为试验组 7 饼干,对其质构特性进行分析可知试验组 6 的饼干硬度显著高于其它组( $P<0.05$ ),试验组 7 饼干的咀嚼性明显高于其它组,且脆性显著高于其它组( $P<0.05$ )。因此结合感官分析结果及质构特性可知硬度、脆性和咀嚼性数值的升高对圆苞车前子壳粉全麦酥性饼干口感品质具有正向影响,这是由于适宜的硬度可赋予饼干较优的嚼劲和口感,且硬度的增加也会提高饼干的酥脆感。

根据水分状态的自由度( $T_2$ )和含量( $A_2$ ),试验组饼干可明显分为 3 类,即饼干 2,3,7 组→饼干 4,5,6,9 组→饼干 1,8 组;饼干 1 和 8 组区别于其它组是由于其结合水含量( $A_{21}$ )明显高于其它饼干组,结合 2.2 中

部分研究内容,发现试验 1 组的全麦粉和 PHP 含量均最低,试验 8 组的全麦粉和 PHP 含量均最高,说明全麦粉和 PHP 对结合水含量影响较弱,因此木糖醇和玉米油的添加量可能导致饼干中结合水含量( $A_1$ )明显高于其它饼干组,淀粉微粒和面筋蛋白周围的油脂易形成油膜层,蛋白质、淀粉等大分子物质结合水的能力会由于形成的油膜层受到阻碍,因此较低的玉米油添加量会增加饼干中结合水含量,这与买玉花等<sup>[22]</sup>的研究结论一致。分析认为,全麦粉和 PHP 对结合水含量影响不大,但会影响不易流动水的自由度及自由水的含量,全麦粉过多或过少都会导致不易流动水自由度( $T_{22}$ )和自由水含量( $A_{23}$ )降低。

相关性分析结果显示,饼干中全麦粉添加量、自由水含量,以及饼干的脆性和咀嚼性质构特征,与饼干感官评分呈显著正相关( $P<0.05$ ),结合相关研究资料分析认为,出现这种结果的原因可能是水分有助于提升饼干在口腔中润滑感,从而影响感官评分<sup>[19-21]</sup>。尽管在本试验添加量范围内,PHP 的添加对饼干感官评分未达到显著影响,但可以确认,PHP 的添加有助于感官提升。分析原因可能是 PHP 含有 60%以上的阿拉伯木聚糖,该部分是一种半纤维素<sup>[23]</sup>,面团中蛋白质含量的降低和高支化可溶性阿拉伯木聚糖含量的增加相平衡<sup>[24]</sup>,有助于饼干结构的加强。

本研究为未来 PHP 功能性食品的开发提供理论基础,增加了一种新型选择,有助于 PHP 的合理开发利用,具有良好的市场开发前景。

### 参考文献:

- [1] FRANCO E A N, SANCHES-SILVA A, RIBEIRO-SANTOS R, et al. *Psyllium (Plantago ovata Forsk): From evidence of health benefits to*

- its food application[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 166–175.
- [2] 周扬. 圆苞车前子壳粉对肌原纤维蛋白凝胶和乳化特性影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.  
ZHOU Yang. Effects of psyllium husk powder on the gel and emulsification properties of myofibrillar protein[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [3] ABUTAIR A S, NASER I A, HAMED A T. Soluble fibers from psyllium improve glycemic response and body weight among diabetes type 2 patients (randomized control trial)[J]. Nutrition Journal, 2016, 15(1): 86.
- [4] WAHID A, MAHMOUD S M N, ATTIA E Z, et al. Dietary fiber of psyllium husk (*Plantago ovata*) as a potential antioxidant and hepatoprotective agent against CCl<sub>4</sub>-induced hepatic damage in rats[J]. South African Journal of Botany, 2020, 130: 208–214.
- [5] OGATA M, VAN HUNG T, TARI H, et al. Dietary psyllium fiber increases intestinal heat shock protein 25 expression in mice[J]. Nutrition Research, 2017, 39: 25–33.
- [6] 段卉妍, 张琼, 黄晓飞. 圆苞车前子壳在糖尿病中的应用研究进展[J]. 中西医结合研究, 2021, 13(4): 256–259.  
DUAN Huiyan, ZHANG Qiong, HUANG Xiaofei. Research progress of the application of the precoda shell in diabetes mellitus[J]. Research of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2021, 13(4): 256–259.
- [7] SURYAKUMAR G, GUPTA A. Medicinal and therapeutic potential of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.)[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2011, 138(2): 268–278.
- [8] 魏凯娜, 李丽, 梁仲玉, 等. 代糖剂在糖尿病饮食中的应用探究[J]. 食品安全导刊, 2021(18): 21–23, 25.  
WEI Kaina, LI Li, LIANG Zhongyu, et al. Splenda agent application in diabetes diet explore[J]. China Food Safety Magazine, 2021(18): 21–23, 25.
- [9] 王箬, 李梦琴, 林顺顺, 等. 鹰嘴豆全麦粉酥性饼干研制及品质分析表征[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3352–3358.  
WANG Zheng, LI Mengqin, LIN Shunshun, et al. Development and quality analysis and characterization of chickpea whole wheat flour crisp biscuit[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(10): 3352–3358.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 饼干: GB 7100—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Biscuits: GB 7100—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [11] 陈思沅, 韦佳萍, 苏辉兰, 等. 山楂粉火麻仁酥性饼干研制[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 95–99.  
CHEN Siyuan, WEI Jiaping, SU Huilan, et al. Development of crisp biscuit with hawthorn powder and fructus cannabis[J]. The Food Industry, 2021, 42(4): 95–99.
- [12] 邓楚君, 康芳芳, 靳羽慧, 等. 杏鲍菇韧性饼干制备工艺研究[J]. 食用菌, 2017, 39(4): 59–61, 72.  
DENG Chujun, KANG Fangfang, JIN Yuhui, et al. Study on preparation technology of pleurotuseryngii toughness biscuit[J]. Edible Fungi, 2017, 39(4): 59–61, 72.
- [13] 李爽, 赵康云, 王丹, 等. 不同添加量啤酒糟对韧性饼干在贮存过程中品质的影响[J]. 吉林医药学院学报, 2019, 40(4): 253–256.  
LI Shuang, ZHAO Kangyun, WANG Dan, et al. Effect of various amount of brewer's lees on the quality of ductile biscuits during storage time[J]. Journal of Jilin Medical University, 2019, 40(4): 253–256.
- [14] 林丽静, 姜永超, 龚霄, 等. 改性菠萝皮渣膳食纤维添加对饼干品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 135–138.  
LIN Lijing, JIANG Yongchao, GONG Xiao, et al. Effect of biscuit quality by added dietary fiber of modified pineapple pomace[J]. The Food Industry, 2021, 42(2): 135–138.
- [15] 张新雪, 张楷, 程永强, 等. 亚麻籽饼粕饼干的开发及配方优化[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 127–132.  
ZHANG Xinxue, ZHANG Kai, CHENG Yongqiang, et al. Development and formula optimization of flaxseed biscuits[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(2): 127–132.
- [16] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. LF-NMR as a tool for predicting the 3D printability of surimi-starch systems[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131727.
- [17] 李定金, 段振华, 刘艳, 等. 利用低场核磁共振技术研究调味山药片真空微波干燥过程中水分的变化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 116–123.  
LI Dingjin, DUAN Zhenhua, LIU Yan, et al. Variation in water content during vacuum microwave drying of flavored yam chips process analyzed by low-field nuclear magnetic resonance imaging[J]. Food Science, 2019, 40(5): 116–123.
- [18] ZHU Y Y, ZHANG L, LIN Z Y, et al. Effects of cold air dehydration on icefish water dynamics and macromolecular oxidation measured by low-field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 9(2): 736–746.
- [19] LI Z, WEI C X. Morphology, structure, properties and applications of starch ghost: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 2084–2096.
- [20] 李立, 张晓琴, 张昀, 等. 食品口腔摩擦学研究进展[J]. 摩擦学报, 2019, 39(1): 118–129.  
LI Li, ZHANG Xiaoqin, ZHANG Yun, et al. Progress of oral tribology in food[J]. Tribology, 2019, 39(1): 118–129.
- [21] 赵杰, 宋晓燕, 马兵团, 等. 淀粉-乳清蛋白复合条件对体系润滑特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 22–27.  
ZHAO Jie, SONG Xiaoyan, MA Bingtuan, et al. The effect of starch-whey protein compound condition on the lubricating properties of the system[J]. Food Science, 2022, 43(14): 22–27.
- [22] 买玉花, 王彩霞, 贺晓光, 等. 响应面-主成分分析法优化马铃薯饼干配方[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 185–190.  
MAI Yuhua, WANG Caixia, HE Xiaoguang, et al. Optimization of potato biscuits technology by response surface methodology and principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 185–190.
- [23] GRANDITS M, MICHLMAYR H, SYGMUND C, et al. Calculation of substrate binding affinities for a bacterial GH78 rhamnosidase through molecular dynamics simulations[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2013, 92: 34–43.
- [24] RAYMUNDO A, FRADINHO P, NUNES M C. Effect of psyllium fibre content on the textural and rheological characteristics of biscuit and biscuit dough[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2014, 3(2): 96–105.