孙美红,王蓉,高振峰,等.晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工工艺优化及品质评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):124-140.
Sun M H, Wang R, Gao Z F, et al. Optimization of processing technology and quality evaluation of whole sorghum flour sponge cake using Jinbainuo 1 variety[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):124-140.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202504028

晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工工艺优化及品质评价

孙美红[1],王蓉[2],高振峰[3],白文斌[2,4*]

(1.山西农业大学 规划合作部,山西 太原 030031;2.山西农业大学 资源环境学院,山西 晋中 030801;
3.山西农业大学 食品科学与工程学院,山西 太原 030031;4.山西农业大学 高粱研究所,山西 晋中 030600)

摘　要:[目的]开发全高粱面海绵蛋糕产品和鉴选优质食用品种,对拓宽高粱加工利用途径和推动高粱食用化进程具有重要意义。[方法]本研究以全高粱面海绵蛋糕加工为目标,以晋白糯1号食用高粱新品种为供试材料,通过单因素分析、冗余分析(RDA)+相关分析筛选海绵蛋糕品质关键影响因素,采用响应面CCD设计,从原料配方、打发参数、烘焙参数优化3个方面开展了全高粱面海绵蛋糕加工工艺优化,并在此基础上评价了12个不同类型(11个高粱品种的面粉与蛋糕粉)海绵蛋糕的感官品质和葡萄糖释放特性差异。[结果]高粱面粉添加量、鸡蛋添加量、SP蛋糕油添加量、三级打发速度、三级打发时间、烘焙温度、烘焙时间是影响晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工品质的关键因素;全高粱面海绵蛋糕的优选加工工艺为"高粱面粉112.88 g、鸡蛋216.83 g、SP蛋糕油7.18 g、木糖醇50 g、植物油8 g、一级打发转速80 r/min、二级打发转速160 r/min、三级打发转速220 r/min、一级打发时间30 s、二级打发时间60 s、三级打发时间133 s、烘焙温度198 ℃、烘焙时间14.5 min";晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕的升糖指数(GI)为52.14,品尝感官评分为93.67,明显优于其它品种。[结论]晋白糯1号食用高粱新品种在全高粱面低GI海绵蛋糕产品开发中具有明显应用优势,可为高粱基烘焙产品开发提供优质原料;全高粱面海绵蛋糕加工工艺的建立,拓宽了高粱加工利用途径。

关键词:高粱; 海绵蛋糕; 面糊特性; 烘焙品质; 升糖指数
中图分类号:S514　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0124-17

Optimization of processing technology and quality evaluation of whole sorghum flour sponge cake using Jinbainuo 1 variety

Sun Meihong[1], Wang Rong[2], Gao Zhenfeng[3], Bai Wenbin[2,4*]

(*1.Planning and Cooperation Office, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 2. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 3.College of food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 4.Sorghum Research Institute of Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, China*)

Abstract:[Objective]Developing whole sorghum flour sponge cake products and identifying high quality edible sorghum varieties are crucial for diversifying sorghum processing methods and promoting its culinary utilization. [Methods]This study focused on optimizing the processing technology for whole sorghum flour sponge cake using Jinbainuo 1 variety. Key quality-influencing factors were identified through single-factor analysis, redundancy analysis (RDA), and correlation significance analysis. A response surface methodology with central composite design (RSM-CCD)was employed to optimize three critical aspects: ingredient formulation, whipping parameters, and baking conditions. Subsequently, the sensory quality and glucose release charac-

收稿日期:2025-04-14　　**修回日期**:2025-05-23
基金项目:国家谷子高粱产业技术体系高粱产品加工岗(CARS-06-14.5-A30);山西省现代农业杂粮产业技术体系项目(2025CYJSTX03-34);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231C012)
作者简介:孙美红(ORCID:0009-0009-8665-9984),副研究员,E-mail:445621658@qq.com
*通信作者:白文斌(ORCID:0009-0006-8616-2669),研究员,研究方向:高粱栽培与产品加工,E-mail:baiwenbin1983@126.com

teristics of 12 different types of sponge cake (flours of 11 sorghum varieties and wheat) were evaluated. [Results] The key factors influencing processing quality were: sorghum flour content, egg content, SP cake emulsifier content, three-stage whipping speeds, whipping duration, baking temperature, and baking time. The optimal processing parameters were determined as: sorghum flour 112.88 g, eggs 216.83 g, SP cake emulsifier 7.18 g, xylitol 50 g, plant oil 8 g, with whipping parameters (stage Ⅰ: 80 r/min for 30 s; stage Ⅱ: 160 r/min for 60 s; stage Ⅲ: 220 r/min for 133 s) and baking at 198 ℃ for 14.5 minutes. The Jinbainuo 1 sponge cake exhibited superior quality with a glycemic index (GI) of 52.14 and sensory evaluation score of 93.67, which significantly outperformed other sorghum varieties. [Conclusion] The Jinbainuo 1 variety demonstrated significant advantages for developing low-GI whole sorghum flour sponge cakes, providing high-quality raw material for sorghum-based bakery products. The established processing technology expands the potential applications for sorghum utilization.

Keywords: Sorghum, Sponge cake, Batter properties, Baking quality, Glycemic index

高粱是全球农业系统中重要的C4作物,因其抗旱、耐瘠薄、耐盐碱等特性,是中下等和边际农田的主栽作物[1-3]。同时,高粱加工用途广泛,是传统酿造业、饲料加工业、功能食品产业、新型能源产业中主要或极具潜力的原料,但目前国内高粱加工用途狭窄,约80%用于酿造[4-5]。高粱作为曾经的粮食作物,因长期酒食高粱混用和抗营养因子存在导致的口感差、胃部不适问题较为突出,市场消费者认可度低,使其在国家现代粮食安全战略中的作用几乎没有发挥,限制了高粱产业的可持续发展[6-8]。因此,专用食用高粱新品种的选育、鉴选,拓宽高粱加工用途,发挥高粱可作为粮食作物不与主粮争地、争水的优势,对高粱产业高质量可持续发展具有重要意义。

近年来,为提高高粱在食用领域的影响力,育种和食品领域研究者从食用品种选育[9-10]、食用产品加工[11-13]、功能成分挖掘及健康功效研究[14-16]等方面展开了大量研究。经过育种家的多年攻关,目前已选育出晋白糯1号、晋杂12、龙米粱1号、吉杂167、沈杂5号、白粱8号和冀杂5号等食用高粱品种,在一定程度上推动了高粱的食用化进程;食品加工研究者已围绕高粱开发了馒头、高粱饸、面条、粘糕等传统食品[11, 17-18],但同谷子、燕麦、荞麦等杂粮相比其在精深加工产品开发方面还较为落后;从不同高粱品种中挖掘出了植物甾醇、阿魏酸、没食子酸、香草酸、木犀草素和芹菜素、3-脱氧花青素等功能成分等[14-15],但国内多数品种,特别是食用品种的功能成分挖掘程度还较低。另外,随着高粱在干旱、高温、贫瘠区域种植优势和作为食品的功能特性不断凸显,国外开始广泛关注其在健康饮食中的卓越作用,促使高粱食品加工成为国外研究热点。迄今国外已围绕其现有品种资源对高粱酚类物质组成、高粱淀粉加工特性、高粱抗性淀粉形成、高粱消化特性及其在食品加工中的功能特性进行了深入研究[19-21],并开发出了高粱基啤酒、酸奶、面包、威化饼干、冲调粉和膨化食品等休闲产品[22-23],但产品开发中仍存在高粱添加量较少(普遍10%左右)、健康功效不明显、市场占有率低、品种专用化程度低的问题。

海绵蛋糕是利用蛋白和面粉制成的糕点,其结构类似海绵,柔软细腻,因口感风味俱佳,受到广大消费者的青睐[24]。目前国内外研究者已对多种杂粮基(藜麦、谷子、荞麦等)海绵蛋糕配方、加工工艺、产品特性及升糖指数进行了系统研究[25-26],但有关高粱海绵蛋糕的研究还较少,特别是全高粱面海绵蛋糕加工及优质品种鉴选方面还未见报道。因此,本研究以团队选育的食用高粱新品种晋白糯1号为原料[27],通过原料配方、打发参数、烘焙参数优化,建立适宜全高粱面海绵蛋糕的加工工艺,并在此基础上对不同高粱品种全高粱面海绵蛋糕感官品质、葡萄糖释放特性差异进行分析,以鉴选出全高粱面海绵蛋糕加工专用品种,旨在拓宽高粱加工利用途径的同时,提高添加量和加工品种专用化程度。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

11个供试高粱品种晋白糯3号、黑粱120、白粱8号、晋糯3号、晋白糯1号、沈杂5号、晋杂2001、冀杂5号、晋杂22号、辽杂19号种植、收获于山西农业大学高粱研究所东白基地,高粱面粉由实验磨面机磨制,细度80目。木糖醇食品级(郑州静姝烘焙食品有限公司,郑州市);玉米胚芽油(山东圣府第油脂有限公司,曲阜市);SP蛋糕油(广东食品科技有限公司,佛山市);鸡蛋(美特好超市,太原市);蛋糕粉(郑州静姝烘焙食品有限公司,郑州市);α-淀

粉酶(上海源叶生物科技有限公司,上海市);胃蛋白酶(上海源叶生物科技有限公司,上海市);胰蛋白酶(上海源叶生物科技有限公司,上海市);葡萄糖含量检测试剂盒(上海源叶生物科技有限公司,上海市)。

1.2 主要仪器设备

磨面机(6F-P180,湖南省直鑫机械制造有限公司,中国);打发机(KM-908,深圳市康佳智能电器科技有限公司,中国);黏度计(NDJ-8S,上海越平科学仪器有限公司,中国);烤箱(YCD-2H,广州市荣麦烘焙食品机械制造有限公司,中国);质构仪(TA-XTplus,Surface Measurement Systems,英国);便携式色差仪(CR-400,Konica Minolta Holdings,日本);紫外分光光度计(SP2500,上海光谱仪器有限公司,中国);恒温水浴锅(LC-WB-6,湖南力辰仪器科技有限公司,中国)。

1.3 试验方法

1.3.1 晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工配方优化

以高粱面粉100 g,鸡蛋200 g、木糖醇60 g、植物油12 g、SP蛋糕油8 g为基础配方,在常规慢中高三级打发(一级打发转速80 r/min、40 s;二级打发转速180 r/min、60 s;三级打发转速220 r/min、120 s)与200 ℃烘焙16 min条件下,选择面糊特性(黏度、相对密度、乳化稳定性)和蛋糕比容、外观品质(色泽)、质构仪感官品质、感官评分指标,进行单因素试验,分别确定高粱面粉(80、100、150、200、250、300 g)、鸡蛋(100、150、200、250、300、350 g)、木糖醇(40、50、60、70、80、90 g)、植物油(8、10、12、14、16、18 g)、SP蛋糕油(6、8、10、12、14、16 g)用量对海绵蛋糕加工品质的影响。以蛋糕粉为对照,每处理重复3次。

1.3.2 面糊和蛋糕特性指标测定

面糊黏度测定:参照王家宝等[28]的方法,使用黏度计,选择转速60 r/min、4#转子以测定不同处理面糊黏度差异。

面糊相对密度测定:参照孙雅晖等[24]的描述质量差测定方法,测定不同处理面糊密度差异。

面糊乳化稳定性测定:参照王丽超等[29]描述的离心法,测定不同处理面糊乳化稳定性差异。

蛋糕比容测定:参照孙玉清等[30]描述的体积差方法,分析测定不同处理蛋糕产品比容差异。

蛋糕外观色泽测定:采用便携式色差仪(CR-400),测定不同处理蛋糕外观色泽。

蛋糕质构仪感观评价:采用质构仪,选择TPA测试,用P/2圆柱形探头测定蛋糕质构。参数设定为下压形变量50%,测试速度1 mm/s,触发力5 g,2次下压间隔时间5 s。

蛋糕感观评分:参照于书蕾等[26]的方式和评分标准对不同处理蛋糕产品进行感官评分。

1.3.3 晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕打发参数优化

在1.3.1节筛选出的配方基础上,通过单因素试验对打发过程中打发转速及对应时间进行优化,参照1.3.1节描述方法测定不同处理面糊特性和蛋糕品质。打发转速和时间处理设计如下:(1)打发转速:一级转速80、150 r/min;二级转速:160、180 r/min;三级转速:200、220 r/min。(2)打发时间:一级优选转速下30、40、50、60、90 s;二级优选转速下30、60、90、120、150 s;三级优选转速下60、90、120、150、180 s。每处理和试验重复3次。

1.3.4 晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕烘焙参数优化

在1.3.1和1.3.3节筛选出的配方、打发参数基础上,通过单因素试验对海绵蛋糕烘焙过程中的上下火温度和烘焙时间进行优化,参照1.3.1节描述的方法测定不同处理蛋糕的比容、外观品质(色度)、质构仪感官品质指标。烘焙温度、时间设计如下:(1)烘焙温度:上火温度160、170、180、190、200、210 ℃;下火温度160、170、180、190、200、210 ℃。(2)烘焙时间:10、12、14、16、18、20 min。每处理和试验重复3次。

1.3.5 基于RDA及相关显著性分析的影响全高粱面海绵蛋糕加工品质的关键因素筛选

对不同加工参数单因素结果进行冗余分析(RDA)和相关分析,以筛选出影响晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工过程中面糊特性和蛋糕品质的关键影响因素。

1.3.6 响应面CCD设计优化晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工工艺

针对1.3.5节筛选出的影响晋白糯1号全高粱面蛋糕加工过程中面糊特性、蛋糕品质的关键因素(高粱面粉添加量、鸡蛋添加量、SP蛋糕油添加量、三级打发转速、三级打发时间、烘焙温度、烘

焙时间)进行响应面CCD设计,其中因受打发加工设备精密度影响无法实现打发转速的细致优化,因此,选择了除打发速度之外的6种关键因素进行了响应面CCD设计(表1)。

1.3.7　不同类型海绵蛋糕感观品质及葡萄糖体外释放特性差异

采用1.3.1节描述的质构仪测定方法对11个不同高粱品种全高粱面海绵蛋糕进行感观品质分析。参照Zhang等[31]描述的体外消化方法来进行11个高粱品种及蛋糕粉制成的海绵蛋糕的葡萄糖体外释放特性差异分析和升糖指数(GI)计算。每处理和试验重复3次。

1.4　数据分析

采用Excel 2010整理数据,用Origin 18.0软件绘制百分比堆积图,用TBtools v2.310软件绘制热图,用Canoco 5.0软件进行RDA,用SPSS 17.0软件进行Pearson相关分析明确各指标之间关联和邓肯法(Dunnett′s Test)比较不同处理间差异显著性。

2　结果与分析

2.1　晋白糯1号全高粱面蛋糕加工配方单因素优化

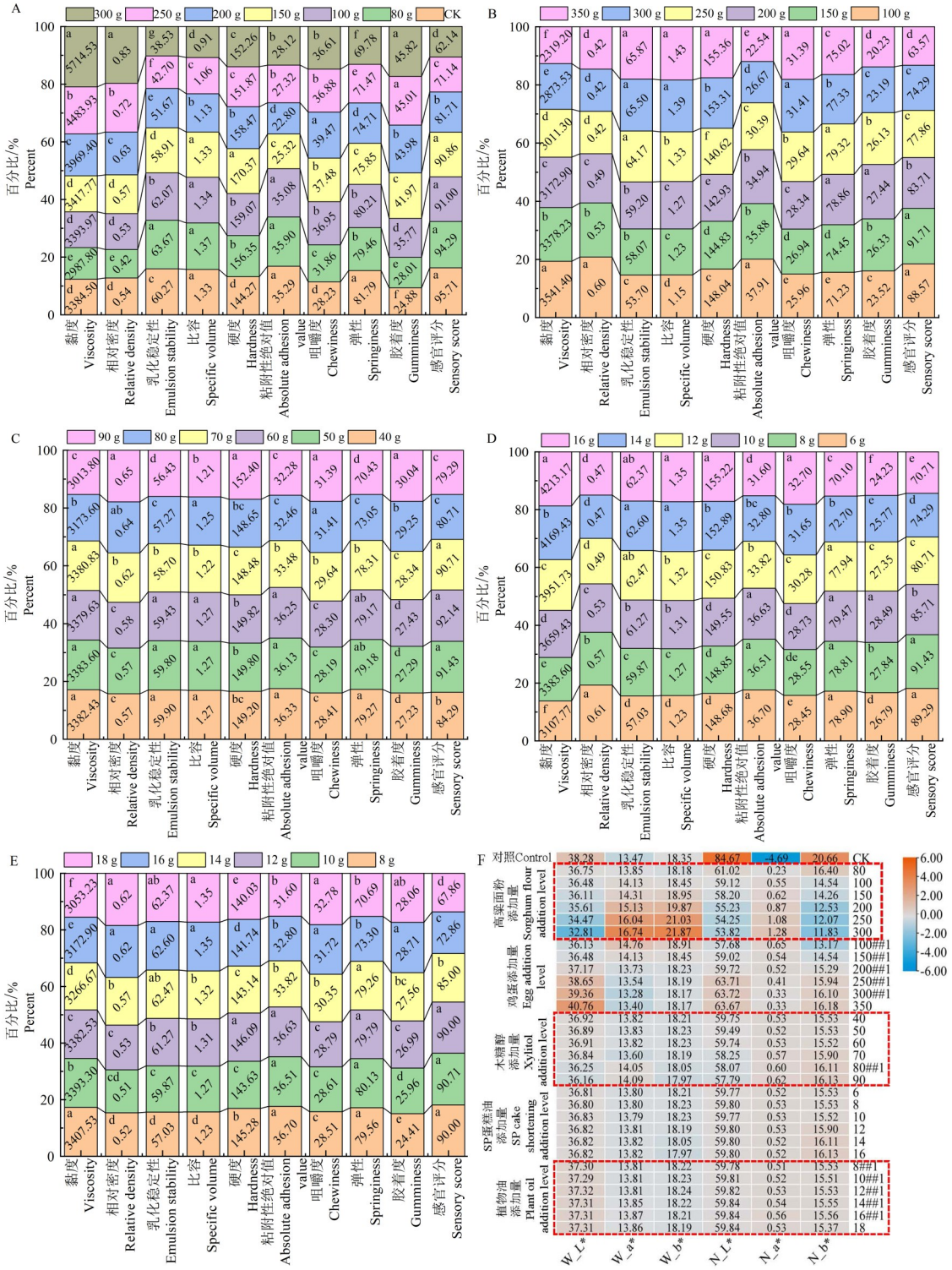
晋白糯1号全高粱面蛋糕配方中,不同原料添加量对海绵蛋糕加工过程中的面糊特性、蛋糕品质存在不同程度的影响(图1)。面糊特性方面,随着高粱面粉、SP蛋糕油添加量的增加,面糊黏度呈现逐渐增加趋势,但随着鸡蛋、木糖醇和植物油添加量的增加却呈现逐下降趋势;面糊相对密度随着高粱面粉、木糖醇、植物油添加量增加呈现增加趋势,但鸡蛋、SP蛋糕油用量的增加会导致面糊相对密度下降;乳化稳定性随着鸡蛋、SP蛋糕油和植物油添加量的增加呈现增加趋势,但过多高粱面粉和木糖醇添加量会导致面糊乳化稳定性下降(图1A～图1E)。蛋糕品质方面,随着不同原料添加量的增加,各处理蛋糕粘附性增加,但感官评分下降;蛋糕比容随高粱面添加量增加呈现下降趋势,随木糖醇用量呈现波动下降,随SP蛋糕油、植物油和鸡蛋用量增加呈现升高趋势;蛋糕咀嚼度,除随高粱面添加量增加呈现先升高后下降趋势外,其它处理均随原料添加量的增加呈现升高趋势;各处理蛋糕硬度变化中,高粱面和植物油作用趋势相似,均随着添加量的增加呈现先升高后下降趋势,但却随着鸡蛋、木糖醇用量的增加呈现先下降后升高趋势,而SP蛋糕油用量的增加则会导致蛋糕硬度逐渐增大;蛋糕弹性随着高粱面、鸡蛋、SP蛋糕油用量的增加呈现先升高后下降趋势,但木糖醇、植物油用量的增加会导致弹性下降;随着高粱面、木糖醇、植物油用量的增加会导致蛋糕胶着度升高,但鸡蛋和SP蛋糕油用量的增加则会导致蛋糕胶着度呈现先升高后下降趋势(图1A～图1E)。蛋糕色泽方面,以高粱面、鸡蛋用量变化影响较大,且随着二者用量的增加,蛋糕外观和内部色泽的L^*值呈现逐渐下降趋势,a^*和b^*值呈现逐渐增大趋势,但配方中其余原料添加量则对蛋糕色泽无明显影响(图1F),说明配方中不同原料添加量对晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工品质存在不同程度影响。

同对照(蛋糕粉)在相同工艺条件下的面糊特性、蛋糕品质相比,晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕配方中高粱面、鸡蛋、木糖醇、SP蛋糕油和植物油添加量优选值分别为:80～150、200～250、50～70、6～8和8～12 g,且优选值范围下晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕的面糊特性及蛋糕品质与对照最为

表1　晋白糯1号海绵蛋糕加工品质关键影响因素响应面CCD设计因素水平

Table 1　Factor levels in response surface CCD design for key influencing factors of processing quality of Jinbainuo 1 sponge cake

	因素 Factors	水平 Level				
		−1	0	1	−α(−1.565085)	α(1.565085)
A	高粱面粉添加量 Sorghum flour addition level	80	115	150	60.22	169.78
B	鸡蛋添加量 Egg addition level	200	225	250	185.87	264.13
C	SP蛋糕油添加量 SP cake emulsifier addition level	6	7	8	5.43	8.57
D	三级打发时间 Three−stage whipping duration	120	135	150	111.52	158.48
E	烘焙温度 Baking temperature	190	195	200	187.00	203.00
F	烘焙时间 Baking time	14	16	18	12.87	19.13



A～F依次为高粱面粉添加量、鸡蛋添加量、木糖醇添加量、SP蛋糕油添加量、植物油添加量、蛋糕色泽；W_L*、W_a*、W_b*表示蛋糕外观色泽；N_L*、N_a*、N_b*表示内部色泽；同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著

A～F: Sorghum flour content, egg content, xylitol content, SP cake emulsifier content, vegetable oil content, and cake color. W_L*, W_a*, W_b*: Surface color parameters; N_L*, N_a*, N_b*: Internal color parameters. Internal color parameters. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences at the 0.05 probability level

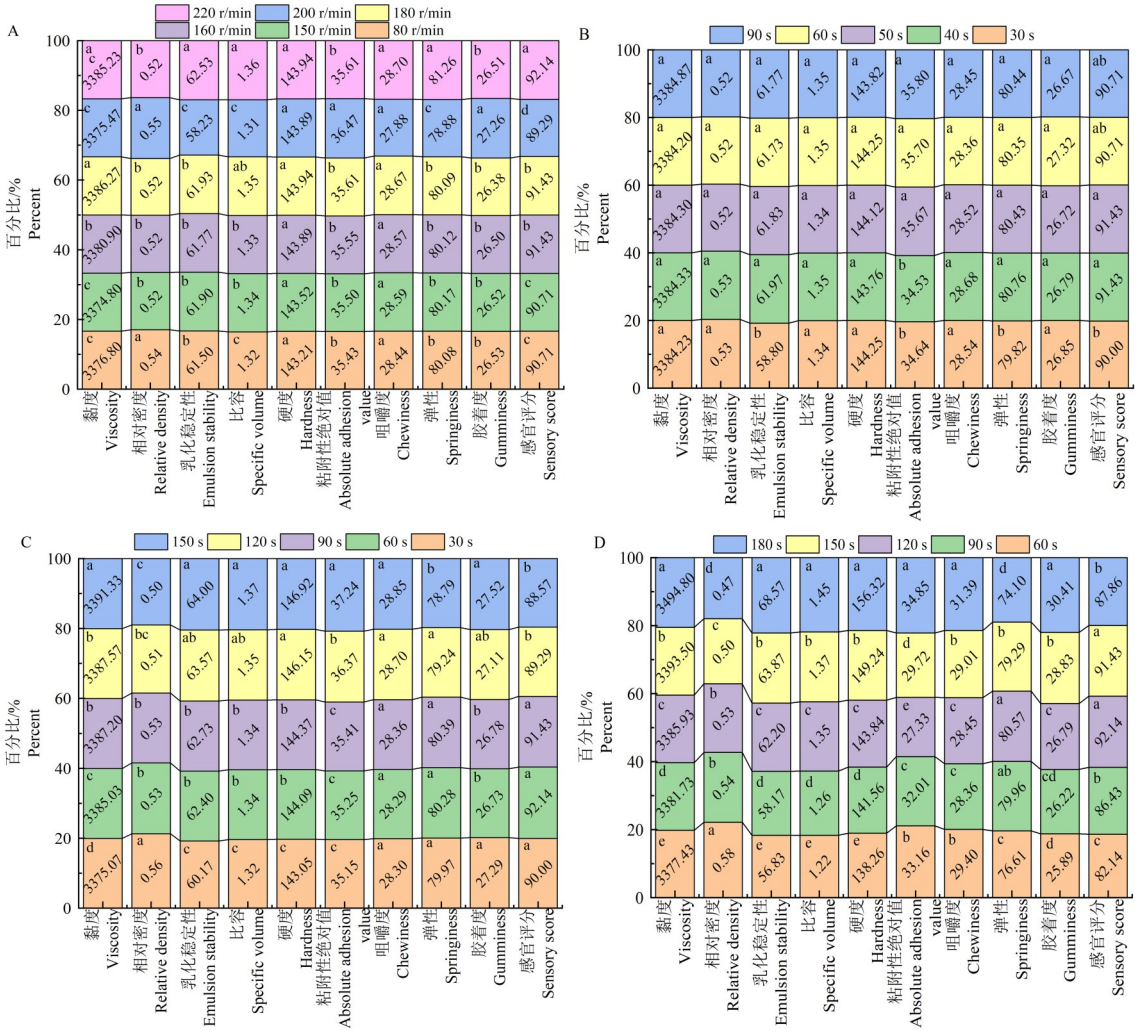
图1 不同原料添加量对晋白糯1号全高粱面蛋糕加工过程中面糊特性、蛋糕品质的影响

Fig.1 Effects of different ingredient contents on batter properties and cake quality during processing of Jinbainuo 1 whole sorghum flour sponge cake

接近,感官评分明显高于其它处理。

2.2　晋白糯1号全高粱面蛋糕打发工艺参数单因素优化

优选配方(高粱面粉100 g、鸡蛋200 g、木糖醇60 g、SP蛋糕油6 g、植物油10 g)基础上基于单因素试验的打发参数优化结果显示:一级打发速度(80、150 r/min)和打发时间对面糊黏度、相对密度、乳化稳定性无明显影响(图2A、图2B);二级打发速度(160、180 r/min)在转速为180 r/min时会显著降低蛋糕咀嚼度,但其打发时间对面糊和蛋糕其它特性无显著影响(图2A);二级优选打发转速160 r/min在打发时间为60 s时的面糊特性和蛋糕品质明显优于30 s,但随着打发时间的进一步延长面糊特性和蛋糕品质则变化不显著(图2C);三级打发速度(200、220 r/min)对面糊乳化稳定性、蛋糕弹性、感官评分有较大影响,其中以220 r/min效果较优,且随着三级转速(220 r/min)打发时间的延长,面糊黏度、乳化稳定性、蛋糕比容、硬度、胶着度呈增加趋势,面糊相对密度呈下降趋势,蛋糕粘附性、弹性、感官评分等指标呈现先升高后下降趋势,并在打发时间增大至180 s和小于120 s时的感官评分下降较为明显(图2A、图2D)。

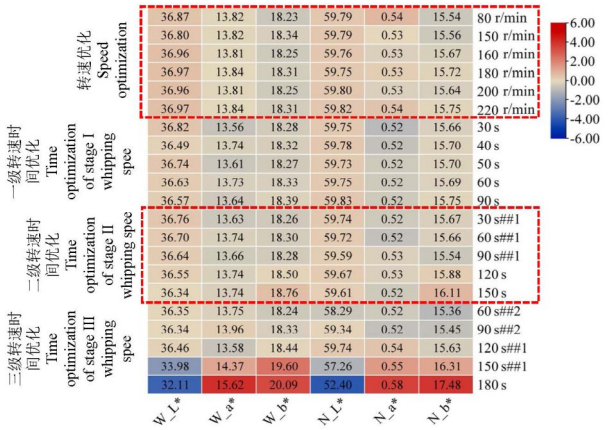


A~D依次为打发转速、一级转速打发时间、二级转速打发时间和三级转速打发时间;同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著

A~D: Whipping speed, Stage Ⅰ whipping duration, Stage Ⅱ whipping duration, and Stage Ⅲ whipping duration. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences at the 0.05 level

图2　面糊不同等级打发速度和时间对晋白糯1号全高粱面蛋糕加工过程中面糊特性、蛋糕品质影响差异

Fig.2　Effects of multi-stage whipping speed and duration on batter properties and cake quality during processing of Jinbainuo 1 whole sorghum flour sponge cake



W_L*、W_a*、W_b*表示蛋糕外观色泽;N_L*、N_a*、N_b*表示蛋糕内部色泽

W_L*, W_a*, W_b*: Surface color parameters; N_L*, N_a*, N_b*: Internal color parameters

图3 面糊不同等级打发速度和时间对晋白糯1号全高粱面蛋糕外观和内部色泽的影响

Fig.3 Effects of multi-stage whipping speed and duration on surface and internal color characteristics of Jinbainuo 1 whole sorghum flour sponge cake

蛋糕色泽方面,以三级转速和打发时间影响较大,当三级转速打发时间增加至150 s时,蛋糕内、外观亮度值(L^*)明显下降,a^*、b^*值明显增加,说明三级打发速度和时间是影响晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工品质的关键因素(图3)。综合面糊特性、蛋糕感官品质和经济效益,选择一级打发优选转速、时间分别为80 r/min、30 s;二级打发优选转速、时间分别为160 r/min、60 s;三级打发优选转速、时间分别为220 r/min、120 s。

2.3 晋白糯1号全高粱面蛋糕烘焙工艺参数单因素优化

在单因素优选配方和打发工艺基础上,烘焙参数单因素优化结果显示:上、下火烘焙温度和时间对蛋糕品质存在不同程度的影响,且上火在190~200 ℃、下火在190~210 ℃时的蛋糕品质和感官评分明显优于其它烘焙温度(图4A、图4B);蛋糕内、外观色泽方面,蛋糕亮度(L^*值)、a^*、b^*值随烘焙温度降低呈现升高趋势,但在感官评分中发现在上火温度低于190 ℃时蛋糕内部结构黏性较大,存在成熟度欠佳,评分为0现象,且表皮易出现开裂、塌陷现象,严重影响其感官品质(图4、图5);在优选上、下火温度(190 ℃)下,随烘焙时间延长蛋糕品质和感官评分呈现先升高后下降趋势,且烘焙时间为14~18 min时感官评分明显优于其它处理(图6)。综合蛋糕感官品质、感官评分,推荐上、下火烘焙温度190~200 ℃和烘焙14~18 min为优选烘焙参数,且以190 ℃和16 min效果更优。

2.4 基于RDA和相关显著性分析的晋白糯1号全高粱面蛋糕加工关键影响因素筛选

从图7的RDA结果可见,从箭头长度来看,高粱面粉添加量(B1)对面糊特性和蛋糕品质具有较大影响,其箭头长度最长;在面糊特性方面,SP蛋糕油添加量(B4)、鸡蛋添加量(B2)、植物油添加量(B5)、三级打发速度(B8)、三级打发时间(B11)等虽然对面糊特性影响小于高粱面粉添加量,但其箭头长度明显长于其它因素,说明相关因素对面糊特性具有较大影响;在蛋糕品质方面,除高粱面添加量外,SP蛋糕油、植物油、三级打发速度、上下火烘焙温度等因素的箭头长度均较长,是影响蛋糕品质的主要因素。

从表2的相关性分析结果可见,本试验条件下蛋糕配方中的高粱面粉、鸡蛋、SP蛋糕油与面糊特性存在显著相关性。在蛋糕内在品质方面,除配方影响较大外,打发参数中的三级打发速度和打发时间影响较大,且打发参数对蛋糕内在品质的影响主要体现在硬度、粘附性、比容,说明三级打发速度和时间对晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工过程中的面糊特性及内在品质具有较大影响。在蛋糕色泽方面,不同因素中配方、烘焙参数有显著影响,其中配方主要影响蛋糕内在色泽、烘焙参数主要影响外观色泽,且高粱面粉、鸡蛋添加量、烘焙温度和时间影响显著;在感官评分方面,不同因素中烘焙温度有显著影响。

因此,综合RDA和相关性分析结果可知,本试验条件下高粱面粉添加量、鸡蛋添加量、SP蛋糕油添加量、三级打发速度、三级打发时间、烘焙温度、烘焙时间是影响晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕加工品质的关键因素。

2.5 基于响应面CCD设计的晋白糯1号全高粱面蛋糕加工工艺优化

响应面CCD设计试验结果显示:86个试验处理中有30个处理产品的感官评分高于90,并以处理1和28的感官评分较优,高于93分(表3)。Ⅲ型平方和因素影响显著性方差分析结果显示:模型显著,失拟项不显著,说明模型及预测结果可靠;因素互作方面,AB、BC、BD、CF、EF互作对面糊

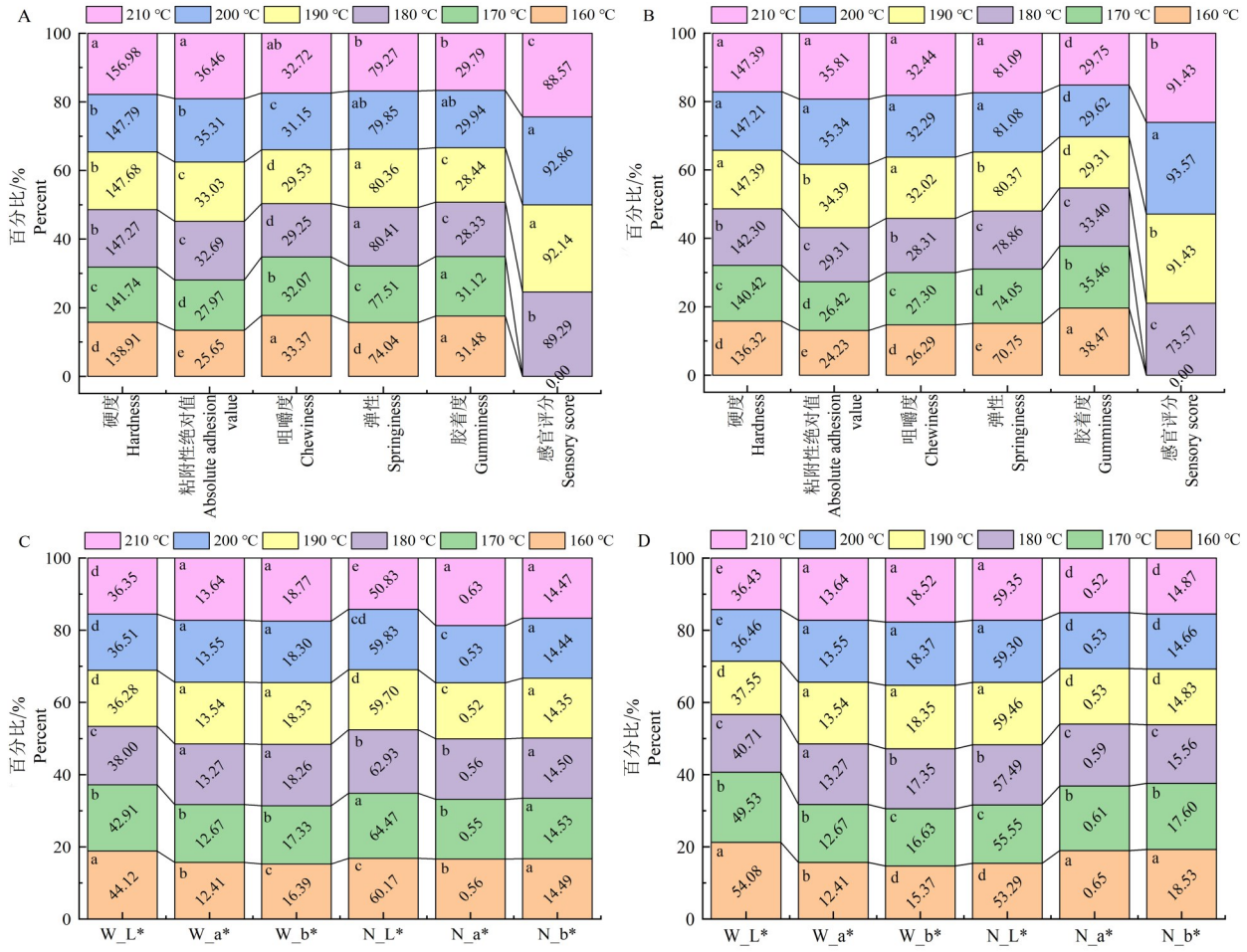
表2　不同加工因素与晋白糯1号全高粱面蛋糕加工品质指标间的相关性分析

Table 2　Correlation and significance analysis between different processing factors and processing quality indicators of Jinbainuo 1 whole sorghum cake

	高粱面粉 Sorghum flour	鸡蛋 Egg	木糖醇 Xylitol	SP蛋糕油 SP cake emulsifier	植物油 Plant oil	一级打发速度 Stage Ⅰ whipping speed	二级打发速度 Stage Ⅱ whipping speed	三级打发速度 Stage Ⅲ whipping speed	一级打发时间 Stage Ⅰ whipping duration	二级打发时间 Stage Ⅱ whipping duration	三级打发时间 Stage Ⅲ whipping duration	上火温度 Upper heat temperature	下火温度 Lower heat temperature	烘焙时间 Baking time
黏度 Viscosity	0.772**	−0.352**	−0.116	0.247*	−0.167	−0.015	0.013	0.091	0.029	0.032	0.024	—	—	—
相对密度 Relative density	0.698**	−0.369**	0.008	−0.346**	−0.008	−0.032	0.038	0.218	0.064	0.039	−0.155	—	—	—
乳化稳定性 Emulsion stability	−0.840**	0.290*	0.213	0.373**	0.358**	0.038	−0.034	−0.327**	−0.134	−0.085	0.255*	—	—	—
比容 Specific volume	−0.768**	0.319**	0.274*	0.448**	0.475**	0.045	−0.036	−0.463**	−0.161	−0.155	0.266*	−0.224	−0.166	−0.045
硬度 Hardness	0.306*	0.152	−0.284*	−0.179	−0.422**	−0.077	0.069	0.360**	0.076	0.133	0.295*	0.304*	0.292*	0.161
粘附性 Adhesiveness	−0.101	−0.003	0.222	0.203	0.387**	0.186	−0.186	−0.398**	0.129	0.262*	0.001	0.246*	0.172	0.050
咀嚼度 Chewiness	0.537**	0.159	−0.093	−0.050	−0.016	−0.080	−0.344**	0.200	−0.052	−0.094	0.062	−0.109	0.159	−0.079
弹性 Springiness	0.526**	0.043	−0.287*	−0.266*	−0.115	0.045	−0.043	−0.093	0.041	0.017	−0.060	0.085	0.212	−0.021
胶着度 Gumminess	0.765**	−0.161	−0.133	−0.232	−0.011	−0.064	0.065	0.000	−0.107	−0.148	0.095	−0.170	−0.310**	−0.035
感官评分 Sensory score	−0.108	−0.124	−0.039	−0.091	−0.111	0.052	−0.056	0.096	0.155	0.210	0.029	0.588**	0.512**	−0.002
W_L*	−0.229	0.160	0.063	0.079	0.125	−0.027	0.020	−0.197	−0.174	−0.242*	−0.129	−0.487**	−0.744**	−0.323**
W_a*	0.639**	−0.173	−0.203	−0.211	−0.216	0.003	−0.002	0.312**	0.145	0.185	0.208	0.412**	0.327**	0.492**
W_b*	0.671**	−0.071	−0.232	−0.210	−0.146	0.001	0.012	0.177	0.103	0.172	0.219	0.397**	0.470**	0.263*
N_L*	−0.430**	0.363**	−0.073	0.029	−0.049	0.038	−0.036	0.133	0.148	0.191	−0.226	−0.199	0.360**	0.142
N_a*	0.901**	−0.300*	−0.073	−0.142	−0.074	−0.022	0.025	0.092	0.001	−0.012	0.041	0.017	−0.079	0.001
N_b*	−0.656**	0.258*	0.266*	0.241*	0.095	0.027	−0.039	−0.091	0.033	0.095	0.184	0.139	−0.316**	−0.029

注：*表示在0.05水平上相关性显著；**表示在0.01水平上相关性显著。

Note：* indicated correlation is significant at the 0.05 level；** indicated correlation is significant at the 0.01 level.



W_L*、W_a*、W_b*表示蛋糕外观色泽;N_L*、N_a*、N_b*表示蛋糕内部色泽;同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著

W_L*, W_a*, W_b*: Surface color parameters; N_L*, N_a*, N_b*: Internal color parameters. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 level

图4 烘焙温度对晋白糯1号全高粱面蛋糕加工品质的影响

Fig.4 Effects of different baking temperatures on processing quality of Jinbainuo 1 whole sorghum flour sponge cake

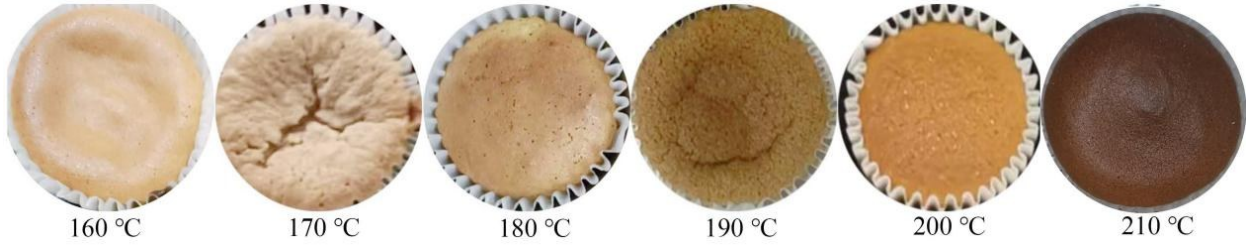
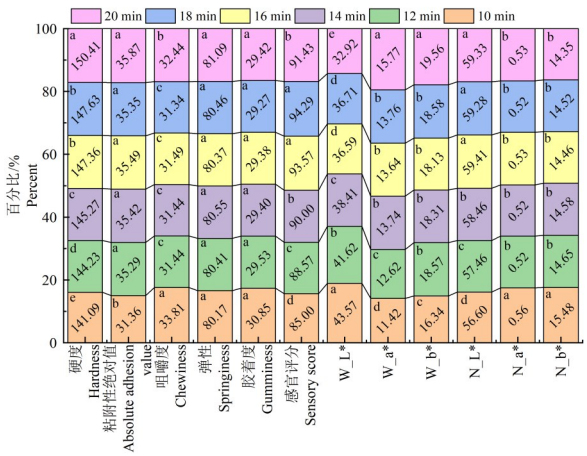


图5 不同烘焙上火温度对晋白糯1号全高粱面蛋糕外观品质的影响

Fig.5 Effects of different upper heating temperatures on appearance quality of Jinbainuo 1 whole sorghum flour sponge cake

黏度特性影响显著($P<0.05$),BD、BF互作对面糊乳化稳定性影响显著($P<0.05$),AF、BD、DF互作对蛋糕弹性影响显著($P<0.05$),AB、CF互作对蛋糕硬度影响显著($P<0.05$),AE、BD、BF互作对蛋糕比容影响显著($P<0.05$),AB互作对蛋糕感官评分影响显著($P<0.05$)。5种关键因素中A^2对面糊黏度、蛋糕感官评分,B^2对蛋糕硬度,D^2对蛋糕比容的影响,明显强于其它因素。另外,从因素两两互作方面来看,受AB和BD互作影响的响应指标数量明显多于其它两两互作因素,说明A、B、D因素以及AB、BD互作是影响晋白糯1号全高粱面蛋糕加工品质的关键互作因素(表4)。



W_L*、W_a*、W_b*表示蛋糕外观色泽;N_L*、N_a*、N_b*表示蛋糕内部色泽;同列不同小写字母表示在0.05水平上差异显著

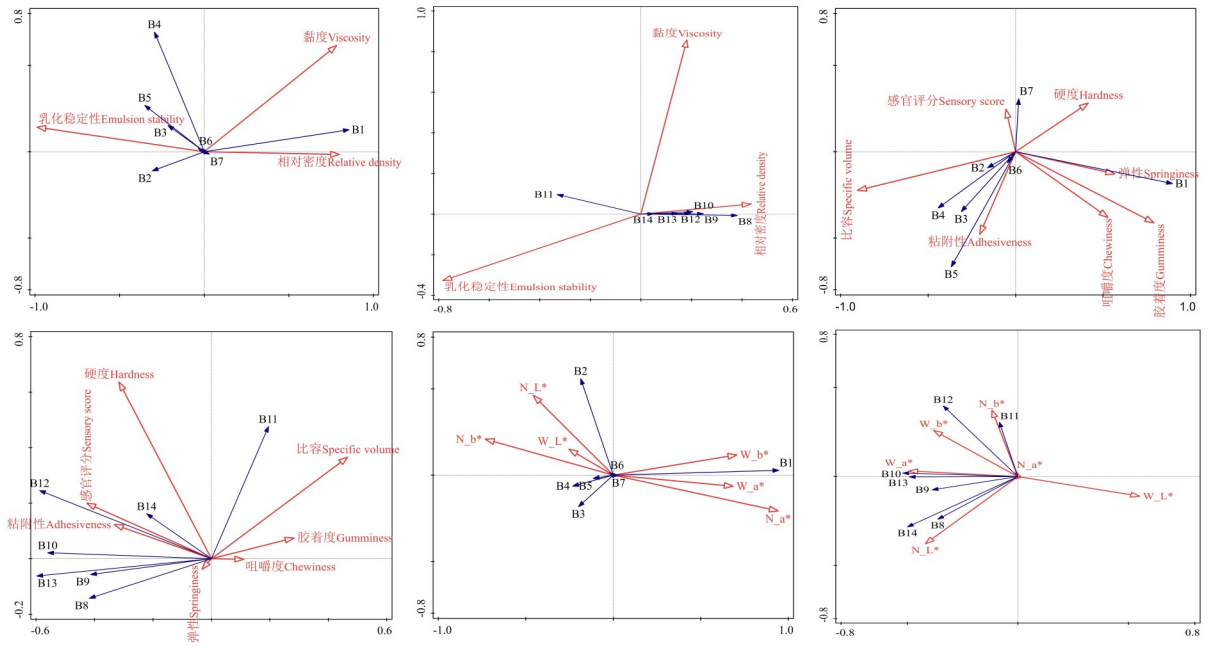
W_L*, W_a*, W_b*: Surface color parameters; N_L*, N_a*, N_b*: Internal color parameters. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences at the 0.05 probability level

图6　烘焙时间对晋白糯1号全高粱面蛋糕加工品质的影响

Fig.6　Effects of baking time on the processing quality of whole sorghum flour cake (Jinbainuo 1)

依据响应面CCD设计试验结果和蛋糕粉蛋糕品质,以黏度值3300～3500、乳化稳定性60～65.83、弹性80～86.51、比容1.35～1.40、硬度140～150、感官评分90～93.65为晋白糯1号全高粱面蛋糕加工优选工艺参数目标,依据模型预估结果(前10),高粱面粉添加量为112.88 g、鸡蛋添加量216.83 g、SP蛋糕油7.18 g、三级打发时间133.11 s、烘焙温度198.57 ℃、烘焙时间14.45 min时的蛋糕感官评分最高为91.69(表5)。另外,因受仪器参数控制精细度限制,选择三级打发时间133 s、烘焙温度198 ℃、烘焙时间14.5 min进行验证试验,实测结果显示:面糊黏度和乳化稳定性分别为3 448.65、63.11;蛋糕弹性、硬度、比容和感官评分分别为82.13、146.39、1.37、92.27,实测结果同预测相比各响应指标误差范围为0.02%～0.82%,误差较小说明优化结果可靠。

综合单因素、响应面CCD设计试验结果、成本因素,推荐晋白糯1号全高粱面蛋糕的优选加工工艺参数为:高粱面粉112.88 g、鸡蛋216.83 g、SP蛋糕油7.18 g、木糖醇50 g、植物油8 g、一级打发转速80 r/min、二级打发转速160 r/min、三级打发



B1～B14依次为高粱面粉、鸡蛋、木糖醇、SP蛋糕油、植物油、一级打发速度、二级打发速度、三级打发速度、一级打发时间、二级打发时间、三级打发时间、上火温度、下火温度、烘焙时间

B1～B14 are sorghum flour, eggs, xylitol, SP cake oil, vegetable oil, Level 1 whipping speed, Level 2 whipping speed, Level 3 whipping speed, Level 1 whipping time, Level 2 whipping time, Level 3 whipping time, top heat temperature, bottom heat temperature and baking time, respectively

图7　不同加工因素与晋白糯1号全高粱面蛋糕加工品质指标间的RDA结果

Fig.7　RDA results between different processing factors and the processing quality indicators of Jinbainuo 1 full sorghum flour cake

转速220 r/min、一级打发时间30 s、二级打发时间60 s、三级打发时间133 s、烘焙温度198 ℃、烘焙时间14.5 min。

表3 六因素响应面CCD设计及试验结果

Table 3 Six factors response surface CCD design and experimental results

序号 Number	A	B	C	D	E	F	黏度 Viscosity	乳化稳定性 Emulsion stability	弹性 Springiness	硬度 Hardness	比容 Specific volume	感观评分 Sensory score
1	−1	−1	1	1	−1	−1	3 011.42	62.71	80.14	157.42	1.46	93.65
2	−1	1	1	1	1	1	2 874.51	64.23	79.37	146.27	1.42	79.42
3	−1	1	1	−1	1	1	2 619.63	63.86	78.15	143.17	1.38	75.25
4	1	−1	1	−1	1	1	3 626.36	57.18	79.72	147.81	1.33	85.72
5	0	0	0	0	0	0	3 559.47	65.83	73.62	149.39	1.43	82.15
6	0	0	0	−1.565	0	0	3 407.59	62.16	83.14	147.51	1.24	90.00
7	−1	1	−1	−1	1	1	2 543.66	61.49	79.31	161.27	1.25	88.35
8	−1	1	−1	−1	−1	−1	2 437.29	63.18	76.33	144.62	1.31	83.25
9	0	−1.565	0	0	0	0	3 674.28	60.42	68.31	169.63	1.38	75.65
10	−1	−1	−1	−1	−1	−1	2 943.17	61.13	81.23	123.59	1.44	89.27
11	1	1	1	1	1	1	3 527.49	64.71	80.52	131.38	1.45	90.75
12	1	1	1	−1	1	1	3 616.93	63.48	82.16	146.71	1.36	92.43
13	1	−1	−1	−1	1	1	3 372.18	61.59	81.33	149.36	1.28	90.25
14	−1.565	0	0	0	0	0	2 310.53	64.18	83.11	128.36	1.38	70.32
15	−1	1	1	−1	−1	1	2 669.58	62.54	82.38	152.68	1.36	85.42
16	0	0	−1.565	0	0	0	3 116.73	61.46	81.27	146.38	1.32	90.25
17	−1	−1	−1	1	−1	−1	2 862.43	64.28	80.35	148.22	1.37	88.74
18	0	0	0	0	0	−1.565	3 446.81	63.79	84.23	145.81	1.35	92.35
19	1	−1	−1	1	1	1	3 618.32	54.41	67.69	153.43	1.26	85.56
20	1	1	−1	1	−1	1	3 458.16	62.19	80.13	148.67	1.24	87.62
21	−1	1	1	−1	−1	−1	2 631.89	64.18	83.29	148.33	1.39	88.65
22	1	−1	−1	−1	1	−1	3 457.43	60.32	79.36	144.35	1.34	90.15
23	−1	−1	1	−1	−1	1	2 916.72	63.24	85.16	147.18	1.36	90.00
24	−1	1	1	1	−1	1	2 817.25	65.19	83.26	149.32	1.41	85.68
25	1	1	−1	1	1	1	3 361.24	60.32	82.46	145.32	1.32	92.75
26	0	0	0	0	0	0	3 397.28	62.14	83.28	144.91	1.35	92.45
27	−1	−1	1	1	1	−1	2 934.19	61.44	79.26	149.27	1.32	87.34
28	0	0	0	0	0	0	3 482.49	63.46	83.19	146.28	1.37	93.45
29	0	0	0	0	0	0	3 589.27	62.78	82.56	145.19	1.36	92.65
30	0	0	0	0	0	1.565	3 401.47	62.49	81.49	147.38	1.37	90.17
31	1	1	1	−1	1	−1	3 462.58	63.19	82.84	146.21	1.36	91.35
32	1	−1	1	1	1	−1	3 647.83	59.44	80.42	149.16	1.37	91.13
33	1.565	0	0	0	0	0	3 726.54	58.61	81.35	151.48	1.32	84.27
34	0	0	0	0	−1.565	0	3 411.53	59.41	80.55	142.28	1.39	85.65
35	−1	−1	−1	−1	−1	1	2 419.35	61.48	78.13	153.56	1.41	70.15
36	1	1	1	1	1	−1	3 379.52	60.47	80.39	147.53	1.32	89.75
37	−1	1	1	1	1	−1	2 639.57	61.48	76.54	149.34	1.34	88.73
38	−1	−1	1	−1	1	−1	2 874.53	60.11	78.52	150.28	1.39	85.64
39	−1	−1	−1	1	−1	1	2 614.29	59.34	79.46	148.39	1.31	87.15
40	1	1	−1	−1	1	−1	3 126.44	58.17	80.25	149.38	1.21	89.43
41	−1	1	−1	−1	−1	1	2 318.32	60.14	77.53	151.26	1.38	85.32

续表

序号 Number	A	B	C	D	E	F	黏度 Viscosity	乳化稳定性 Emulsion stability	弹性 Springiness	硬度 Hardness	比容 Specific volume	感观评分 Sensory score
42	−1	1	1	−1	1	−1	2 633.69	61.18	71.34	152.43	1.39	80.44
43	0	0	0	1.565	0	0	3 419.11	62.35	80.42	148.51	1.29	80.31
44	1	−1	1	1	1	1	3 766.45	56.41	74.28	149.37	1.31	83.61
45	−1	−1	−1	1	1	1	2 941.17	51.34	75.26	141.18	1.33	80.15
46	1	−1	1	1	−1	1	3 712.43	55.93	74.61	143.38	1.29	82.45
47	0	0	0	0	0	0	3 467.19	62.43	81.56	146.71	1.36	92.65
48	0	0	0	0	0	0	3 419.28	63.29	82.44	145.82	1.37	91.43
49	1	1	−1	1	−1	−1	3 372.59	61.46	80.43	144.81	1.34	85.71
50	1	1	1	−1	−1	−1	3 482.11	63.51	82.14	146.22	1.38	90.71
51	−1	−1	1	1	−1	1	3 016.88	61.93	79.86	153.41	1.35	83.71
52	1	1	−1	−1	−1	1	2 948.36	60.24	78.63	149.21	1.32	88.57
53	1	−1	−1	−1	−1	1	3 411.43	57.61	84.16	169.43	1.23	90.86
54	0	0	0	0	0	0	3 386.72	59.14	83.23	156.42	1.34	90.47
55	0	0	0	0	0	0	3 402.51	60.11	81.43	152.18	1.36	91.00
56	1	−1	1	1	−1	−1	3 417.23	57.68	84.69	168.42	1.29	89.47
57	0	0	0	0	0	0	3 391.46	60.21	82.58	138.32	1.35	90.86
58	1	1	−1	−1	−1	−1	3 542.66	56.42	74.51	159.83	1.22	77.86
59	1	1	1	−1	−1	1	3 491.27	57.68	78.33	152.81	1.24	83.14
60	−1	1	1	1	−1	−1	2 633.41	62.57	83.51	151.46	1.39	85.71
61	1	−1	−1	−1	−1	−1	3 428.47	58.23	80.14	153.26	1.34	89.41
62	1	−1	−1	1	1	−1	3 491.23	60.33	78.41	152.62	1.29	85.29
63	−1	1	−1	1	1	1	2 413.65	63.58	79.62	153.67	1.35	85.17
64	1	−1	1	−1	1	−1	3 454.61	61.44	82.52	159.83	1.33	90.71
65	−1	−1	−1	−1	1	−1	2 813.44	64.53	80.36	148.67	1.36	89.29
66	−1	−1	1	1	1	1	2 963.52	65.16	82.41	150.63	1.39	88.35
67	−1	−1	−1	−1	1	1	2 863.14	63.82	81.77	149.31	1.32	85.29
68	−1	1	−1	−1	1	−1	2 413.22	62.41	77.63	154.28	1.33	80.71
69	1	−1	1	−1	−1	−1	3 462.53	58.64	78.33	153.27	1.31	80.29
70	0	0	0	0	0	0	3 395.16	64.58	83.19	147.16	1.38	92.14
71	1	−1	−1	1	−1	−1	3 503.16	57.63	83.22	154.61	1.27	79.29
72	−1	1	−1	1	−1	−1	2 235.78	61.43	81.16	152.33	1.42	80.27
73	1	1	1	1	−1	1	3 517.82	63.27	81.16	154.63	1.35	89.29
74	1	1	1	1	−1	−1	3 523.68	62.91	83.11	152.33	1.31	90.15
75	1	1	−1	−1	1	1	3 462.58	63.14	80.03	141.44	1.24	85.67
76	0	0	1.565	0	0	0	3 569.41	64.16	86.51	149.63	1.39	90.00
77	−1	1	−1	1	−1	1	2 143.16	65.27	83.25	156.81	1.38	85.71
78	−1	−1	1	−1	1	1	2 793.46	61.42	80.52	149.63	1.37	89.15
79	−1	1	−1	1	1	−1	2 342.69	64.38	82.11	153.26	1.46	80.71
80	−1	−1	1	−1	−1	−1	2 649.17	62.18	80.75	149.58	1.39	89.17
81	1	−1	1	−1	−1	1	3 487.19	59.42	76.35	148.61	1.23	90.45
82	1	1	−1	1	1	−1	3 369.52	56.41	82.38	151.33	1.26	89.29
83	0	0	0	0	1.565	0	3 407.51	63.48	83.26	148.52	1.42	92.29
84	0	1.565	0	0	0	0	3 012.46	65.19	76.26	147.61	1.42	90.21
85	1	−1	−1	1	−1	1	3 461.28	56.43	70.36	153.61	1.22	80.17
86	−1	−1	−1	1	1	−1	3 126.54	63.49	74.16	139.53	1.37	85.71

表4 基于Ⅲ型平方和模型的因素方差显著性分析结果

Table 4 Factor variance significance analysis based on type Ⅲ sum of squares model

来源 Source	*P*值 *P*-value					
	黏度 Viscosity	乳化稳定性 Emulsion Stability	弹性 Springiness	硬度 Hardness	比容 Specific volume	感观评分 Sensory score
模型Model	2.44E-28*	0.001 383*	0.000 444*	0.034 023*	2.45E-07*	0.040 904*
A	2.58E-35*	7.27E-06*	0.678 675	0.158 716	9.22E-10*	0.010 634*
B	1.65E-11*	0.000 348*	0.068 453	0.281 027	0.342 491	0.822 934
C	3.73E-08*	0.056 312	0.072 745	0.961 068	0.000 238*	0.156 060
D	0.018 849*	0.634 566	0.569 702	0.922 048	0.140 366	0.615 653
E	0.045 242*	0.553 723	0.197 081	0.159 219	0.676 541	0.335 291
F	0.686 913	0.565 556	0.261 141	0.841 970	0.071 932	0.329 053
AB	0.000 207*	0.169 084	0.114 146	0.005 821*	0.507 347	0.047 406*
AC	0.262 656	0.649 223	0.955 263	0.389 133	0.097 623	0.836 181
AD	0.778 077	0.541 487	0.297 955	0.453 277	0.824 807	0.484 576
AE	0.313 536	0.310 761	0.058 091	0.071 533	0.012 658*	0.057 130
AF	0.302 622	0.809 591	0.010 628*	0.102 251	0.775 970	0.377 728
BC	0.006 784*	0.387 900	0.679 931	0.074 897	0.140 843	0.709 040
BD	0.046 045*	0.034 488*	0.001 060*	0.601 076	0.007 646*	0.229 009
BE	0.359 259	0.816 370	0.762 427	0.986 988	0.775 970	0.743 104
BF	0.489 403	0.016 822*	0.090 405	0.615 499	0.037 564*	0.179 818
CD	0.458 887	0.448 914	0.621 405	0.786 851	0.974 767	0.490 721
CE	0.188 985	0.928 150	0.354 148	0.472 289	0.085 897	0.246 100
CF	0.005 503*	0.447 616	0.882 935	0.024 855*	0.270 790	0.247 858
DE	0.829 555	0.103 576	0.166 387	0.197 808	0.467 937	0.818 690
DF	0.303 678	0.665 780	0.029 514*	0.158 713	0.467 937	0.720 060
EF	0.043 315*	0.844 479	0.414 303	0.219 224	0.140 843	0.958 710
A^2	1.24E-07*	0.301 024	0.761 475	0.113 381	0.472 386	0.001 408*
B^2	0.077 958	0.919 371	5.18E-06	0.004 727*	0.231 285	0.147 655
C^2	0.077 329	0.922 011	0.237 242	0.721 664	0.598 121	0.350 300
D^2	0.380 807	0.640 779	0.949 262	0.720 760	0.000 176*	0.472 909
E^2	0.354 681	0.316 620	0.896 329	0.784 065	0.165 932	0.581 108
F^2	0.460 702	0.903 232	0.523 099	0.987 922	0.737 548	0.191 481
失拟项 Lack of fit	0.051 681	0.398 105	0.597 492	0.163 595	0.052 763	0.106 992

注:*表示模型或因素在0.05水平上差异显著。

Note: * indicated significant differences in the model or factors at the 0.05 level.

2.6 不同品种全高粱面海绵蛋糕的感官品质和葡萄释放特性差异

以小麦蛋糕粉为对照,通过质构仪分析了11个不同高粱品种全高粱面海绵蛋糕产品感官品质,结果显示,晋白糯1号、白粱8号、冀杂5号全高粱面蛋糕产品的感官品质与蛋糕粉产品最为接近(图8、图9);经人工品尝评价,反馈结果表明,晋白糯1号加工产品口感细腻、咀嚼无明显粗糙感、下咽无噎感,综合评分最高为93.67,说明晋白糯1号高粱品种在海绵蛋糕加工中具有明显品质优势(表6)。

通过体外试验,对比分析了11个不同高粱品种在相同磨粉、加工工艺下的海绵蛋糕葡萄糖释放特性差异,结果显示:在相同消化时间下,胃消化阶段各品种蛋糕产品的葡萄糖释放量低于对照(蛋糕粉),其中晋白糯1号较为明显;肠消化阶段,晋白糯1号、晋杂12号、白粱8号蛋糕产品的葡萄糖释放量低于对照,且不同类型海绵蛋糕产品GI



JBN3、HL120、JZ12、BL8、JN3、JBN1、SZ5、JZ2001、JZ5、JZ22、LZ19和CK依次代表晋白糯3号、黑粱120、白粱8号、晋糯3号、晋白糯1号、沈杂5号、晋杂2001、冀杂5号、晋杂22号、辽杂19号和小麦蛋糕粉。图9、图10同

JBN3, HL120, JZ12, BL8, JN3, JBN1, SZ5, JZ2001, JZ5, JZ22, LZ19, and CK respectively represent Jinbainuo 3, Heiliang 120, Bailiang 8, Jinnuo 3, Jinbainuo 1, Shenza 5, Jinza 2001, Jiza 5, Jinza 22, Liaza 19, and wheat cake flour. The same as Fig. 9 and Fig. 10

图8　不同类型蛋糕产品外观形态

Fig.8　Appearance of different cake products

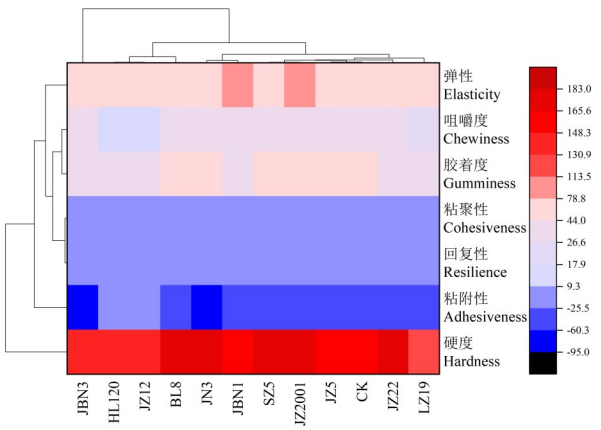


图9　不同高粱品种蛋糕产品的感官品质差异

Fig.9　Sensory quality differences of cake products from different sorghum varieties

值以晋白糯1号较低(52.14),说明晋白糯1全高粱面蛋糕具有良好的缓升糖优势(图10,表6)。

3　讨论

随着人们生活水平提升和健康意识的增强,越来越多的人开始重新审视自身的饮食选择。杂粮作为健康食品的多样选择,日益受到人们的重视,其中杂粮海绵蛋糕作为卫健委广泛提倡的健康烘焙产品之一,受到消费者青睐。近年来,为提高杂粮海绵蛋糕适口性和品质,研究者已对配方中的杂粮添加比例、代糖类型,加工工艺对面糊特性、感官品质的影响及产品的缓升糖效果进行了大量研究[24-26],但有关高粱海绵蛋糕的相关研究却仍然较少,仅尤香玲等[32]对一定添加比例的高粱海绵蛋糕制作进行了初探。

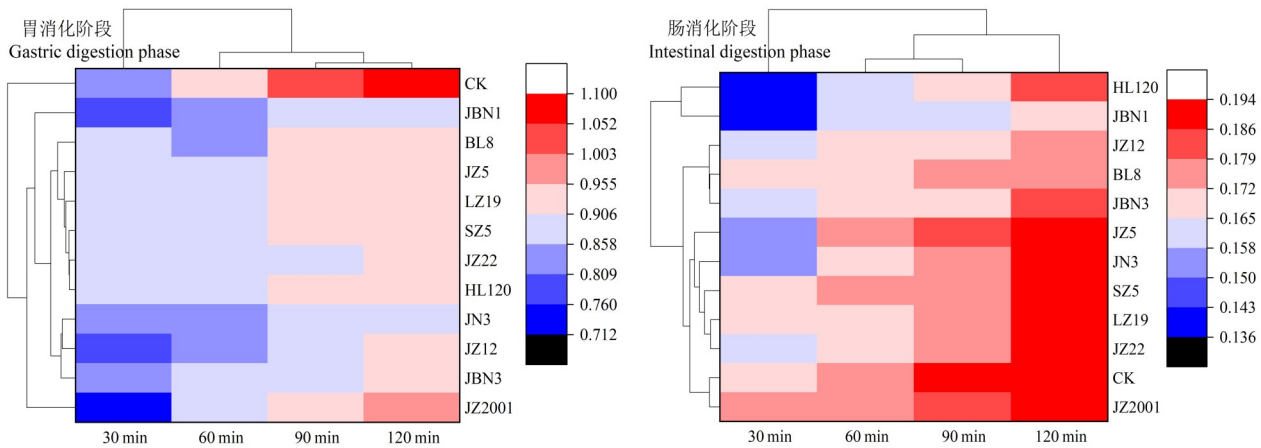


图10　不同类型蛋糕产品的葡萄糖释放特性

Fig.10　Glucose release patterns of different cake products

表5 响应面CCD设计中基于模型计算的优选参数(前10)

Table 5 Top 10 model—based optimized parameters in response surface CCD design

序号 Number	A	B	C	D	E	F	黏度 Viscosity	乳化稳定性 Emulsion stability	弹性 Springiness	硬度 Hardness	比容 Specific volume	感观评分 Sensory score
1	118.41	231.56	6.61	136.40	190.88	17.52	3 338.18	61.94	81.58	148.71	1.36	90.01
2	123.59	244.12	7.66	131.03	194.62	14.88	3 451.54	63.11	80.70	149.47	1.38	90.14
3	143.99	249.70	7.94	150.00	198.09	14.00	3 441.11	62.43	82.56	149.37	1.36	90.53
4	119.47	211.83	6.33	129.26	191.82	14.16	3 448.39	61.88	81.71	147.02	1.37	90.21
5	119.45	236.91	6.28	137.82	195.98	14.58	3 340.34	62.45	81.72	147.93	1.35	90.10
6	112.88	216.83	7.18	133.11	198.57	14.45	3 447.63	62.60	81.46	147.45	1.38	91.69
7	117.20	235.36	6.54	138.41	194.01	17.56	3 342.34	62.66	81.29	148.33	1.35	90.02
8	113.19	227.61	7.49	137.91	192.49	15.68	3 447.31	62.89	82.74	147.77	1.38	90.25
9	114.70	225.96	7.45	131.24	196.43	14.88	3 451.86	62.94	82.24	147.23	1.37	91.01
10	150.00	250.00	8.00	150.00	200.00	14.00	3 412.67	61.70	82.71	146.81	1.37	90.49

表6 不同类型海绵蛋糕品尝评价综合得分及GI值差异

Table 6 Differences in comprehensive scores and GI values of different varieties of sponge cake tasting evaluations

类型 Types	品尝综合评分 Tasting comprehensive rating	GI	类型 Types	品尝综合评分 Tasting comprehensive rating	GI
晋白糯1号 Jinbainuo 1	93.67±0.13b	52.14±0.21f	黑粱120 Heiliang 120	80.43±0.23f	57.64±0.12b
晋白糯3号 Jinbainuo 3	89.11±0.07c	56.16±0.14cd	辽杂19号 Liaoza 19	85.31±0.17e	56.39±0.09c
晋糯3号 Jinnuo 3	90.31±0.11c	54.91±0.09e	沈杂5号 Shenza 5	85.67±0.15e	56.71±0.14bc
晋杂2001 Jinza 2001	85.43±0.17e	57.37±0.12b	冀杂5号 Jiza 5	87.39±0.11d	55.83±0.13d
晋杂22号 Jinza 22	80.17±0.23f	56.41±0.13c	白粱8号 Bailiang 8	86.16±0.07e	54.09±0.11e
晋杂12号 Jinza 12	90.19±0.11c	53.83±0.07e	小麦蛋糕粉 Wheat cake flour	98.27±0.03a	76.39±0.23a

注:不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level.

本研究以全高粱面海绵蛋糕研究为重点,以晋白糯1号食用高粱新品种为原料,通过配方、打发参数、烘焙参数优化,建立了高粱面粉112.88 g、鸡蛋216.83 g、SP蛋糕油7.18 g、木糖醇50 g、植物油8 g、一级打发转速80 r/min、二级打发转速160 r/min、三级打发转速220 r/min、一级打发时间30 s、二级打发时间60 s、三级打发时间133 s、烘焙温度198 ℃、烘焙时间14.5 min的晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕产品加工工艺。同尤香玲等[32]在配方、烘焙工艺、品种等方面存在明显差异,且将高粱面适宜添加量从25%提升至了100%,对充分发挥高粱健康功效具有重要意义。同其它杂粮海绵蛋糕相比,本研究结果在添加量、打发工艺参数、烘焙参数等方面与其它已报道的海绵蛋糕加工工艺存在明显差异,如闫斌等[25]筛选出的小米粉添加量为50%、烘焙温度140 ℃;于书蕾等[26]筛选出的藜麦粉添加量为30%、高速打发6 min、低速打发2 min、150 ℃烘焙40 min;王振丽等[33]筛选出的荞麦粉添加量为20%、160 ℃烘焙30 min等,这些差异充分说明不同种类杂粮海绵蛋糕加工配方及工艺存在明显特异性。另外,本研究过程中发现的烘焙上火温度对海绵蛋糕品质影响较大的结果(图5)与豆康宁等[34]研究结论(烘烤因素对蛋糕品质影响大小顺序依次为:上火温度、烘烤时间、下火温度)相似,说明高品质海绵蛋糕烘焙过程中要重视上火温度参数控制。

以晋白糯1号为原料,建立出全高粱面海绵蛋糕加工工艺后,为保障其工艺的普适性,选择了10个其它高粱品种进行了验证,结果表明上述加工工艺在不同高粱品种间具有良好普适性(图8)。随

后在相同加工工艺条件下评价了不同高粱品种全高粱面海绵蛋糕产品的品质差异和葡萄糖释放特性差异,结果显示:感官品质方面晋白糯1号、白粱8号、冀杂5号较优且与蛋糕粉产品品质接近,其中以晋白糯1号品尝评价综合分值最高为93.67。在葡萄糖释放特性和GI值方面晋白糯1号(GI值52.14)同闫斌[25](小米海绵蛋糕GI值52.7)结果相比较为接近,同王振丽等[33](荞麦-黄豆复配粉GI值33.1)相比存在明显差异,造成这些异同的原因与杂粮海绵蛋糕配方、加工工艺不同关系密切,但均说明杂粮海绵蛋糕具有明显的缓升糖优势。

最后,本研究虽然通过配方优化、打发参数优化、烘焙参数优化建立了全高粱面海绵蛋糕加工工艺,鉴选出了优质加工品种晋白糯1号,并在此基础上通过体外试验明确了其缓升糖效果,但面粉加工方式、代糖类型等因素对加工品质的影响,高温烘焙过程中的营养损失,基于低温长时烘焙的营养成分保留效果,基于动物试验或人体志愿者的缓升糖效果等相关研究还需进一步加强,以期切实开发出一款品质优良、营养成分组成丰富、缓升糖效果明显的低GI全高粱面海绵蛋糕产品,拓宽高粱加工利用途径的同时,为消费者提供新的健康休闲食品,为高粱恢复食用化做好产品、品种和加工技术储备。

4　结论

通过配方、打发参数、烘焙参数优化,建立了高粱面粉112.88 g、鸡蛋216.83 g、SP蛋糕油7.18 g、木糖醇50 g、植物油8 g、一级打发转速80 r/min、二级打发转速160 r/min、三级打发转速220 r/min、一级打发时间30 s、二级打发时间60 s、三级打发时间133 s、烘焙温度198 ℃、烘焙时间14.5 min的晋白糯1号全高粱面海绵蛋糕产品加工工艺,并在此基础上通过品种间对比分析鉴选出全高粱面海绵蛋糕加工优质品种晋白糯1号,其海绵蛋糕产品GI值52.14属低GI食品,可为未来更多低GI杂粮健康食品加工提供参考。

参　考　文　献

[1]张一中.基于转录组和miRNA测序的高粱产量性状杂种优势遗传基础解析[D].太谷:山西农业大学,2022.
Zhang Y Z. Genetic basis analysis of sorghum heterosis for yield traits based on transcriptome and miRNA-seq[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2022.

[2]孙美红,王彩琴,王蓉,等. *Bacillus velezensis* G-1·脂肽悬浮种衣剂的制备及其对高粱丝黑穗病菌的防侵染效果[J].作物学报,2024,50(6):1467-1485.
Sun M H, Wang C Q, Wang R, et al. Preparation of *Bacillus velezensis* G-1·lipopeptide suspension seed coating agent and its anti-infection effect on *Sphacelotheca reiliana* [J]. Acta Agronomica Sinica,2024,50(6):1467-1485.

[3]邹剑秋. 基于1961—2020年FAO数据的世界高粱产业分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(1):1-10.
Zou J Q. World sorghum industry analysis based on 1961-2020 FAO data [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2023,43(1):1-10.

[4]柳青山. 山西杂交高粱育种的研究历程及展望[J].山西农业科学,2023,51(10):1115-1120.
Liu Q S. Research course and prospects of Shanxi hybrid sorghum breeding[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023,51(10):1115-1120.

[5]邹剑秋,王艳秋,柯福来. 高粱产业发展现状及前景展望[J].山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(3):2-8.
Zou J Q, Wang Y Q, Ke F L. Development status and prospect of sorghum industry in China[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition),2020,40(3):2-8.

[6]Gunawan S, Dwitasari I, Rahmawati N, et al. Effect of process production on antinutritional, nutrition, and physicochemical properties of modified sorghum flour[J]. Arabian Journal of Chemistry,2022,15(10):104134.

[7]Keyata E O, Tola Y B, Bultosa G, et al. Premilling treatments effects on nutritional composition, antinutritional factors, and *in vitro* mineral bioavailability of the improved Assosa I sorghum variety (*Sorghum bicolor* L.)[J]. Food Science & Nutrition, 2021,9(4):1929-1938.

[8]Gwekwe B N, Chopera P, Matsungo T M, et al. Effect of dehulling, fermentation, and roasting on the nutrient and anti-nutrient content of sorghum and pearl millet flour [J]. International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources,2024,5(1):1-7.

[9]李继洪,赵德,梁军,等. 优质食用高粱杂交种吉杂167的选育[J].安徽农学通报,2021,27(24):90-91.
Li J H, Zhao D, Liang J, et al. The breeding of high quality edible sorghum hybrid jiza 167[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2021,27(24):90-91.

[10]肖梦颖,张瑞栋,张壮,等. 辽宁省地方高粱品种食用品质性状研究[J].中国农业科学,2019,52(4):591-601.
Xiao M Y, Zhang R D, Zhang Z, et al. Taste quality traits of sorghum landraces from Liaoning Province [J]. Scientia Agricultura Sinica,2019,52(4):591-601.

[11]徐雪娣,徐志祥,杜方岭,等. 适合糖尿病患者食用的高粱馒头配方的研究[J].中国食物与营养,2017,23(7):29-33.
Xu X D, Xu Z X, Du F L, et al. Optimization of sorghum steamed bread formula for patients with diabetes mellitus[J]. Food and Nutrition in China,2017,23(7):29-33.

[12]Stefoska-Needham A. Sorghum and health: an overview of

potential protective health effects [J]. Journal of Food Science,2024,89(S1):A30-A41.

[13]Khoddami A, Messina V, Vadabalija Venkata K, et al. Sorghum in foods: functionality and potential in innovative products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023,63(9):1170-1186.

[14]Nemukondeni N, Mbajiorgu C A, Hassan Z M, et al. Physical characteristics, nutritional composition and phenolic compounds of some of the sorghum landraces obtained in South Africa[J]. Food Research,2022,6(4):312-328.

[15]Xu J W, Wang W Q, Zhao Y. Phenolic compounds in whole grain sorghum and their health benefits[J]. Foods, 2021, 10 (8):1921.

[16]Singh S, Habib M, McClements D J, et al. Exploring the potential of sorghum with reference to its bioactivities, physicochemical properties and potential health benefits[J]. Food & Function,2024,15(24):11847-11864.

[17]赵淑坤. 中国传统的高粱食品[J]. 辽宁农业科学,1987(2): 55-57.
Zhao S K. Traditional sorghum food in China[J]. Liaoning Agricultural Sciences,1987(2):55-57.

[18]谭斌. 粒用高粱的特性及其在食品工业中开发利用前景[J]. 粮食与饲料工业,2007(7):16-19.
Tan B. Properties of grain sorghum and its prospects of utilization in food industry[J]. Cereal & Feed Industry, 2007 (7):16-19.

[19]Zahid M K, Ahmad D, Amin R, et al. Sorghum starch: composition, structure, functionality, and strategies for its improvement[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2025,24(1):e70101.

[20]Haziman M L, Ishaq M I, Qonit M A H, et al. Sorghum starch review: structural properties, interactions with proteins and polyphenols, and modification of physicochemical properties [J]. Food Chemistry,2025,463(Pt 1):139810.

[21]Lin Q, Liang W, Yan M T, et al. Investigating the influence of E-beam irradiated sorghum flour on the structure, physicochemical properties, and processing suitability of sorghum/wheat mixed flour-dough-bread: a related mechanism [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024,94:103676.

[22]Kudita S, Schoustra S, Mubaiwa J, et al. Substitution of maize with sorghum and millets in traditional processing of *Mahewu*, a non-alcoholic fermented cereal beverage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(3): 1421-1431.

[23]Khoddami A, Messina V, Vadabalija Venkata K, et al. Sorghum in foods: functionality and potential in innovative products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023,63(9):1170 - 1186.

[24]孙雅晖,郭萃,张金阳,等. D-塔格糖对海绵蛋糕面糊及其烘焙特性的影响[J]. 食品科学,2025,46(4):60-67.
Sun Y H, Guo C, Zhang J Y, et al. Effect of D-tagatose on characteristics of batter and sponge cake[J]. Food Science, 2025,46(4):60-67.

[25]闫斌.杂粮蛋糕配方研究及血糖效果评价[D].石家庄:河北经贸大学,2020.
Yan B. Study on the formulation of multigrain cake and evaluation of blood sugar effect [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business,2020.

[26]于书蕾,尚珊,臧梁,等. 不同藜麦粉添加量对海绵蛋糕面糊特性及烘焙特性的影响[J]. 食品研究与开发,2024,45(2): 14-21.
Yu S L, Shang S, Zang L, et al. Effects of quinoa flour in different proportions on batter characteristics and baking characteristics of sponge cake [J]. Food Research and Development,2024,45(2):14-21.

[27]孙美红,梁笃,郭琦,等. 优质食用高粱新品种晋白糯1号的选育[J]. 中国种业,2024(8):131-134.
Sun M H, Liang D, Guo Q, et al. Breeding of a new high quality edible sorghum variety Jinbainuo No. 1[J]. China Seed Industry,2024(8):131-134.

[28]王家宝,陈诚,王凤,等. 搅拌时间和乳化剂对海绵蛋糕表面气泡的影响[J]. 食品与机械,2018,34(10):8-13,70.
Wang J B, Chen C, Wang F, et al. Effects of different whipping times and emulsifiers on surface bubbles formation of sponge cake[J]. Food & Machinery,2018,34(10):8-13,70.

[29]王丽超,孙冰玉,张光,等. 米粉海绵蛋糕与麦粉海绵蛋糕特性比较[J]. 农产品加工,2016(23):14-17,20.
Wang L C, Sun B Y, Zhang G, et al. Comparison of properties of sponge cakes prepared from rice flour and wheat flour[J]. Farm Products Processing,2016(23):14-17,20.

[30]孙玉清,田文静,杨新建. 马铃薯全粉对海绵蛋糕品质的影响[J]. 中国食物与营养,2020,26(9):31-36.
Sun Y Q, Tian W J, Yang X J. Effect of potato powder on the quality of sponge cake[J]. Food and Nutrition in China,2020, 26(9):31-36.

[31]Zhang S S, Hu J L, Sun Y G, et al. *In vitro* digestion of eight types of wholegrains and their dietary recommendations for different populations[J]. Food Chemistry,2022,370:131069.

[32]尤香玲,周航,徐向波. 高粱粉海绵蛋糕的研制[J]. 农产品加工,2019(15):5-7.
You X L, Zhou H, Xu X B. Development of sorghum sponge cake[J]. Farm Products Processing,2019(15):5-7.

[33]王振丽,徐明磊. 无糖低GI海绵蛋糕的研制[J]. 食品工业, 2022,43(2):62-66.
Wang Z L, Xu M L. Development of sugar-free and low GI sponge cake[J]. The Food Industry,2022,43(2):62-66.

[34]豆康宁,魏永义,郭明月. 烘烤条件对海绵蛋糕品质影响的研究[J]. 农业机械,2011(20):134-136.
Dou K N, Wei Y Y, Guo M Y. Study on the influence of baking conditions on the quality of sponge cake[J]. Farm Machinery,2011(20):134-136.

(编辑:韩志强)