

佛手益生菌软糖的制备及其体外消化耐受性分析

唐莹^{1,2}, 邹波², 余元善², 李璐², 徐玉娟², 肖更生^{2*}, 吴继军²

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430000) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 富含水果和益生菌的软糖是未来糖果发展的重要方向之一。该研究优化了佛手益生菌凝胶软糖的加工工艺, 并探讨了体外模拟胃肠消化环境对软糖中益生菌存活率的影响。结果表明, 佛手凝胶软糖的硬度、弹性、胶着性、咀嚼性与软糖的感官品质有较为密切的关系, 对软糖感官品质的影响从强到弱为佛手浆添加量、调和温度、调和时间。响应面分析结果显示, 益生菌软糖的最佳工艺为: 佛手浆添加量 12.5%、调和温度 70 °C、调和时间 4 min, 在该工艺条件下, 软糖感官品质最好, 活菌数为 7.6 log CFU/g。体外消化试验显示, 凝结芽孢杆菌具有很好的胃肠道耐受性, 在 pH 1.5~3.5 的人工胃液中活菌数达 6.01 log CFU/g 以上; 人工肠液消化 4 h 后活菌数仅下降 0.27 log CFU/g; 在胆盐浓度 1~4 g/L 时消化 24 h 的活菌数在 6.24 log CFU/g 以上; 在 pH 3.0 的胃液中消化 2 h 后再转入肠液消化 10 h, 活菌数仅下降 0.28 log CFU/g。研究结果可为水果味益生菌软糖的开发提供科学依据。

关键词: 凝结芽孢杆菌; 佛手; 软糖; 响应面; 胃肠道耐受性

文章篇号: 1673-9078(2022)07-256-263

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1089

Preparation of *Citrus medica* 'Fingered' Probiotic Gummies and Analysis of Its *in Vitro* Digestive Tolerance

TANG Ying^{1,2}, ZOU Bo², YU Yuanshan², LI Lu², XU Yujuan², XIAO Gengsheng^{2*}, WU Jijun²

(1.College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China)

(2.Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Gummies rich in fruits and probiotics are one of the important directions for the development of confectionery in the future. This study optimized the processing technology of bergamot probiotic gummies, and explored the effect of *in vitro* simulated gastrointestinal digestion environment on the survival rate of probiotics in gummies. The results showed that the hardness, elasticity, adhesiveness, and chewiness of bergamot gummies were closely related to the sensory quality of the gummies. The effect on the sensory quality of the gummies from strong to weak is the addition amount of bergamot pulp, blending temperature and blending time. The results of response surface analysis showed that the best process for probiotic gummies is: 12.5% of bergamot pulp, blending temperature 70 °C, and blending time 4 min. Under this process condition, the sensory quality of gummies is the best, and the number of viable bacteria is 7.6 log CFU/g. The *in vitro* digestion test showed that *Bacillus coagulans* had good gastrointestinal tolerance, and the number of viable bacteria in artificial gastric fluid with pH 1.5~3.5 reached more than 6.01 log CFU/g; the number of viable bacteria was only decrease by 0.27 log CFU/g after 4 h digestion in artificial intestinal fluid. When the bile salt concentration was 1~4 g/L, the number of viable bacteria after 24 hours of digestion was above 6.24 log CFU/g; digested in gastric gummies at pH 3.0 for 2 h and then transferred to intestinal gummies for digestion 10 h, the number of viable bacteria only

引文格式:

唐莹,邹波,余元善,等.佛手益生菌软糖的制备及其体外消化耐受性分析[J].现代食品科技,2022,38(7):256-263,+300

TANG Ying, ZOU Bo, YU Yuanshan, et al. Preparation of *Citrus medica* 'fingered' probiotic gummies and analysis of its *in vitro* digestive tolerance [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 256-263,+300

收稿日期: 2021-09-29

基金项目: 广东省科技创新战略专项 (2019ZX03); 广东省现代农业产业技术体系创新团队项目 (2021KJ108); 广东省农业科学院学科团队建设项目 (202109TD)

作者简介: 唐莹 (1997-), 女, 硕士生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1685632036@qq.com

通讯作者: 肖更生 (1965-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: guoshuxgs@163.com

decreased by 0.28 log CFU/g. Taken together, the results provided a scientific basis for the development of fruit-flavored probiotic gummies.

Key words: *Bacillus coagulans*; *Citrus medica* ‘Fingered’; gummies; response surface; gastrointestinal tolerance

随着我国健康战略的实施,人们对健康的需求日益强烈。传统糖果已无法满足人们对健康的需求,功能性糖果将是糖果发展的一个重要方向,将水果和益生菌应用到糖果中,可提高糖果的功能。大量研究表明,益生菌是一类对人体健康有益的微生物,具有维持肠道屏障完整性,改善因肠道微生物失衡引起的胃肠道功能紊乱、炎症、免疫力下降以及老年痴呆等^[1,2]。目前,益生菌市场发展迅速,各类益生菌产品琳琅满目,层出不穷。但现有益生菌产品主要以冻干粉以及酸奶等发酵制品为主。糖果在加工过程中温度高,常用的干酪乳杆菌、双歧杆菌、植物乳杆菌、嗜热链球菌等乳酸菌无法存活。凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans*)既能像乳酸菌和双歧杆菌一样,具有促消化、促排便、调节肠道菌群平衡、免疫调节等作用,又具有芽孢菌的抗逆性强、耐高温高压、较好的胃肠道耐受能力和易贮藏等优点^[3-6]。2016年,凝结芽孢杆菌被我国列入《可用于食品的菌种名单》,受到研究者和生产商的关注。

佛手富含多酚、多糖和黄酮类化合物等功效成分^[7],众多研究表明佛手及其化合物具有抗寄生虫^[8]、抗癌^[9]、抗消化不良^[10]、抗炎^[11,12]、抗氧化^[13,14]和预防脂肪肝等作用,在我国传统中草药中加入佛手干果作为佐剂,可用于治疗各种慢性疾病,如呼吸道感染、哮喘和高血压^[15]。将佛手、益生菌和糖果相结合,可以兼具糖果的美味以及佛手和益生菌的功能。

本文通过单因素和响应面优化确定软糖的工艺参数,并探究软糖中凝结芽孢杆菌在胃肠道环境下的耐受能力,可为佛手益生菌软糖的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

佛手,购买于广东省广州市。

凝结芽孢杆菌菌粉(*Bacillus coagulans*),萨宾莎(南京)生物科技有限公司。

LB肉汤培养基、LB琼脂培养基,广东环凯微生物科技有限公司;胃蛋白酶(酶活力3200 U/mg)、猪胰蛋白酶(酶活力4~6 U/mg)、猪胆盐,上海源叶生物科技有限公司;明胶,永信食品配料有限公司。

1.2 仪器与设备

立式蒸汽灭菌锅,上海博讯实业有限公司;

HWS-26型电热恒温水浴锅,上海一恒科学仪器有限公司;PB-10 pH计,德国 Sartorius 公司;超净工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 佛手益生菌软糖的制备

软糖制作工艺流程图见图1。冷冻佛手室温下解冻,置于破壁料理机中,加入2倍质量的纯水打浆,于高压灭菌锅中100℃灭菌4 min备用;明胶用1倍质量的纯水溶胀1~2 h,70℃水浴溶解,备用。将果葡糖浆与蔗糖1:1混合,加热完全融化,加入明胶溶液,搅拌均匀,调节温度,加入佛手浆和凝结芽孢杆菌菌粉,搅拌,在超净工作台上趁热注入软糖模具内,放置3~4 h后得到软糖样品。

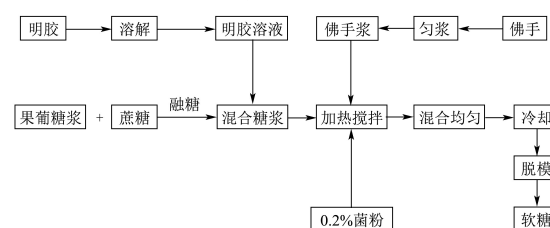


图1 佛手益生菌软糖工艺流程图

Fig.1 The process flow diagram of bergamot probiotic gummies

1.3.2 单因素实验

按原料总质量为100%计,以明胶50%,混合糖浆30%,凝结芽孢杆菌菌粉为总质量的0.2%,选取佛手浆添加量、调和时间、调和温度三个因素进行单因素实验。

1.3.2.1 佛手浆添加量

在调和温度为70℃,调和时间为6 min的条件下,探究不同佛手浆添加量(10%、12.5%、15%、17.5%、20%)对软糖活菌数、质构和感官评定的影响。

1.3.2.2 调和温度

在调和时间为6 min,佛手浆添加量为15%的条件下,探究不同调和温度(60、70、80、90℃)对软糖活菌数、质构和感官评定的影响。

1.3.2.3 调和时间

在调和温度为70℃、佛手浆添加量为15%的条件下,探究不同调和时间(2、4、6、8、10 min)对软糖活菌数、质构和感官评定的影响。

1.3.3 响应面优化

在单因素的基础上,分别以软糖的凝结芽孢杆菌数,硬度、弹性、咀嚼性和胶着性,感官评定为指标,

选取佛手浆添加量 (12.5%)、调和温度 (70 °C)、调和时间 (4 min) 进行响应面设计, 见表 1。

表 1 响应面试验设计

Table 1 Response surface test design

因素	A 佛手浆添加量/%	B 调和温度/°C	C 调和时间/min
-1	10	60	2
0	12.5	70	4
1	15	80	6

1.3.4 凝结芽孢杆菌菌落数的测定

活菌总数测定: 采用倾注法, 将样品用 0.9% 生理盐水逐级稀释到 10^{-5} 、 10^{-6} , 分别取 1 mL 稀释液于平板上, 倾注培养基, 凝固后置于 37 °C 恒温培养 48 h 后观察计数^[16], 活菌数以 log CFU/g 表示。

1.3.5 质构分析

将软糖用于 TPA 质构分析, 测定软糖的硬度、弹性、胶着性和咀嚼性四个质构参数。测试条件如下: 采用 P10 圆柱型探头, 参考, 样品高度为 1 cm, 测前速率为 1 mm/s, 测试及测后速率均为 0.5 mm/s, 压缩形变率为 50%, 测试重复次数为 2 次。每组样品 3 个平行, 取平均值, 保留 2 位小数^[17]。

1.3.6 感官评价

筛选 10 名食品专业人员作为感官评价员, 组成评定小组, 按照 GB/T 16860-1997 的方法进行感官评价。

表 2 佛手软糖的感官评定标准

Table 2 Sensory evaluation standard of bergamot gummies

指标	标准	得分
香气	没有佛手香气, 带有明胶的腥味	1~9
	略有佛手香气, 无明胶的腥味	9~14
	佛手香气浓郁	14~20
口感	口感不细腻, 咀嚼性差, 粘牙	1~9
	口感较细腻, 咀嚼性较好, 略微粘牙	9~14
	口感细腻, 咀嚼性好, 不粘牙	14~20
外观	外观不平整, 有气泡	1~9
	外观较平整, 略有气泡	10~14
	外观平整, 无气泡	14~20
滋味	香甜味较淡	1~9
	佛手苦味较重	10~14
	香甜可口, 佛手香味浓郁	15~20
色泽	色泽不均匀一致, 呈淡黄色, 透明度较低	1~9
	色泽较均匀一致, 呈黄色, 透明度一般	10~14
	色泽均匀一致, 呈金黄色, 透明程度高	15~20

1.3.7 模拟体外消化体系

模拟胃肠消化试验参考 Zhuang 等^[18]和 Jiao 等^[19]的方法。

1.3.7.1 模拟胃液消化试验

配置 PBS 缓冲液 (pH 6.8), 装瓶到锥形瓶中用稀盐酸分别调节 pH 到 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5。121 °C 灭菌 21 min 后, 加入 10 g/L 的胃蛋白酶, 溶解后用 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌。将软糖与生理盐水 1:1 用捣碎机捣碎成浆后, 以 10% (g/g) 的添加量添加至人工胃液中, 置于 37 °C 100 r/min, 恒温摇床进行消化, 于 0、1、2、3 h 后取样检测凝结芽孢杆菌活菌数。

1.3.7.2 模拟肠液消化试验

制备 PBS 缓冲溶液, 用 NaOH 调节 pH 至 7.5。121 °C 高压灭菌 15 min 后添加 10.0 g/L 胰蛋白酶, 充分溶解, 用无菌 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌。将软糖浆以 10% (g/g) 的添加量添加至人工肠液中, 放置 37 °C、100 r/min, 恒温摇床进行消化, 于 0、1、2、3、4 h 后取样检测凝结芽孢杆菌活菌数。

1.3.7.3 模拟胆盐消化试验

取 LB 肉汤培养基, 分别以 0、1、2、3、4 g/L 添加至 LB 肉汤培养基中, 121 °C 灭菌。将软糖浆以 10% (g/g) 的添加量添加至模拟胆液中, 放置 37 °C、100 r/min, 恒温摇床进行消化, 于 0、24 h 后取样检测凝结芽孢杆菌活菌数。

1.3.7.4 模拟胃肠道体系试验

配置 pH 为 3.0 的人工胃液, 配置加有 3 g/L 胆盐的人工肠液, 用无菌 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌。将软糖浆以 10% (g/g) 的添加量添加至人工胃液中, 放置 37 °C、100 r/min 恒温摇床消化 2 h。然后, 从上述已消化 2 h 的人工含菌胃液取 1 mL, 加入到已加如、入 3 g/L 胆盐的人工肠液中, 在 37 °C、100 r/min 的恒温摇床中继续培养。在第 0、2、4、6、8、10 h 时间点进行取样, 检测凝结芽孢杆菌菌数。

1.4 数据处理

使用 Origin 2017、Design 11 软件对数据进行统计分析, 并采用 SPSS 17.0 软件的 ANOVA 方法对结果进行单因素方差分析, $p < 0.05$ 表示样品间具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 佛手浆添加量对软糖质构和感官品质的影响

佛手浆添加量对感官品质的影响见图 2a, 当添加量为 10% 时, 佛手香味较淡, 且带有明胶的腥味; 佛手浆添加量为 15% 及以上时, 软糖呈现出佛手的苦味; 当佛手浆添加量为 12.5% 时, 软糖香甜可口, 佛手香

味浓郁, 感官品质最佳; 由图 2b 可知, 软糖的活菌数随着佛手浆添加量的增加而增加, 可能是佛手浆中的果胶、多糖等物质对凝结芽孢杆菌有一定的保护作用; 由图 2c 和 2d 可知, 佛手浆含量对软糖质构的影响, 软糖的硬度、咀嚼性、胶着性随着佛手浆添加量的增大而增大, 而其弹性随着佛手浆含量的增加而降低。

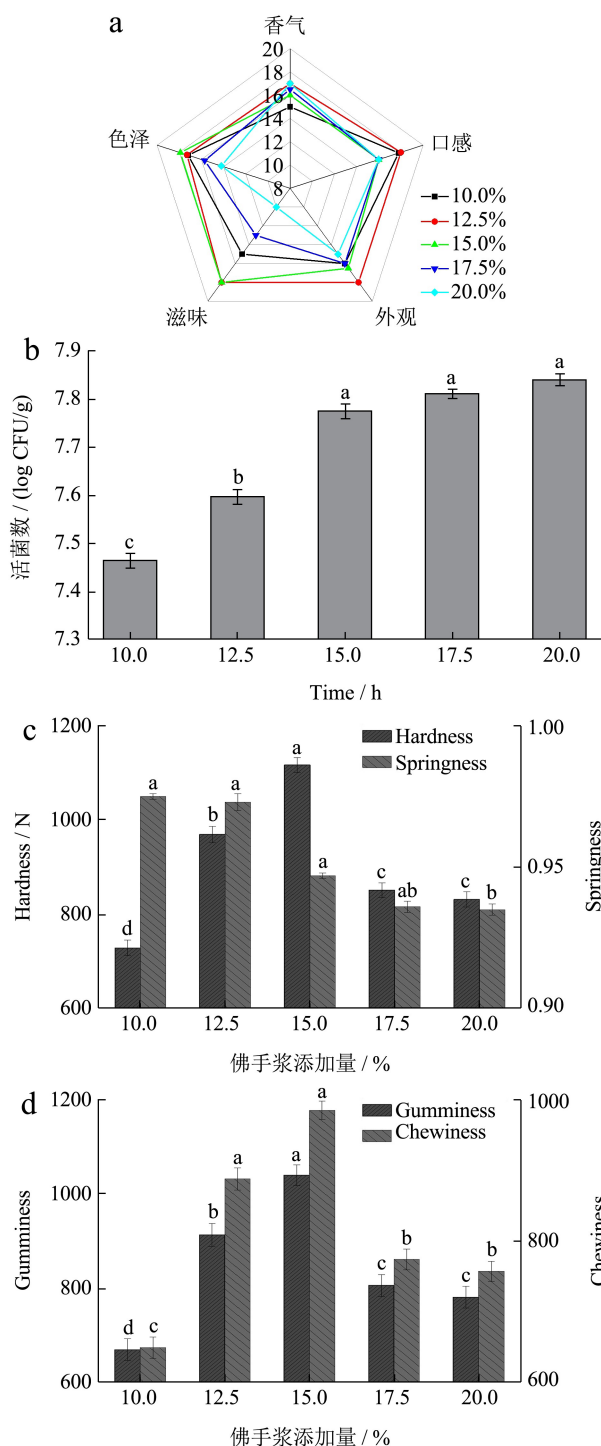


图 2 佛手浆添加量对软糖感官、活菌数和质构的影响

Fig.2 The effect of adding amount of bergamot pulp on sensory, viable cell count and texture of gummies

注: a: 感官品质; b: 活菌数; c 和 d: 质构。图 3、4 同。

2.1.2 调和温度对软糖质构和感官品质的影响

由图 3 可知, 调和温度为 70 °C 时软糖的口感最佳。凝结芽孢杆菌数随着调和温度的增加而逐渐减少, 温度过高不仅会影响益生菌的存活率, 还会破坏明胶的三维网状结构, 导致软糖的硬度、弹性、咀嚼性降低, 影响软糖的感官评价。

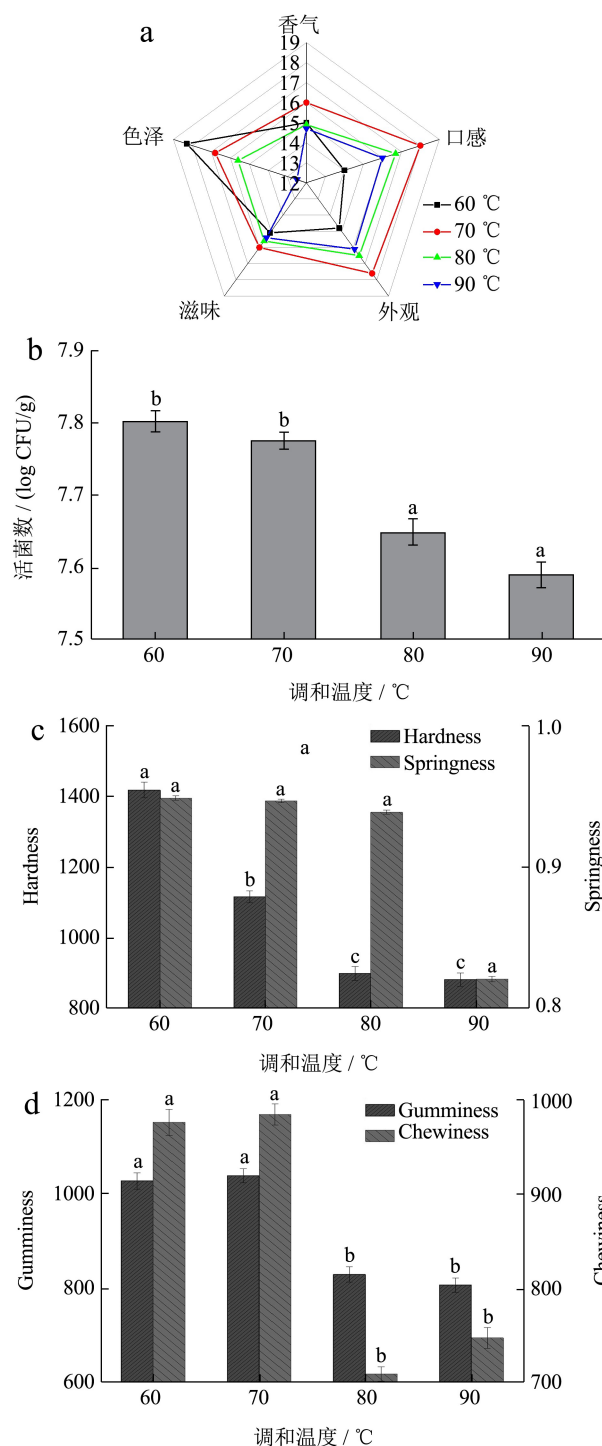


图 3 调和温度对软糖感官品质、活菌数和质构的影响

Fig.3 Effect of blending temperature on sensory, viable cell count and texture of gummies

2.1.3 调和时间对软糖质构和感官品质的影响

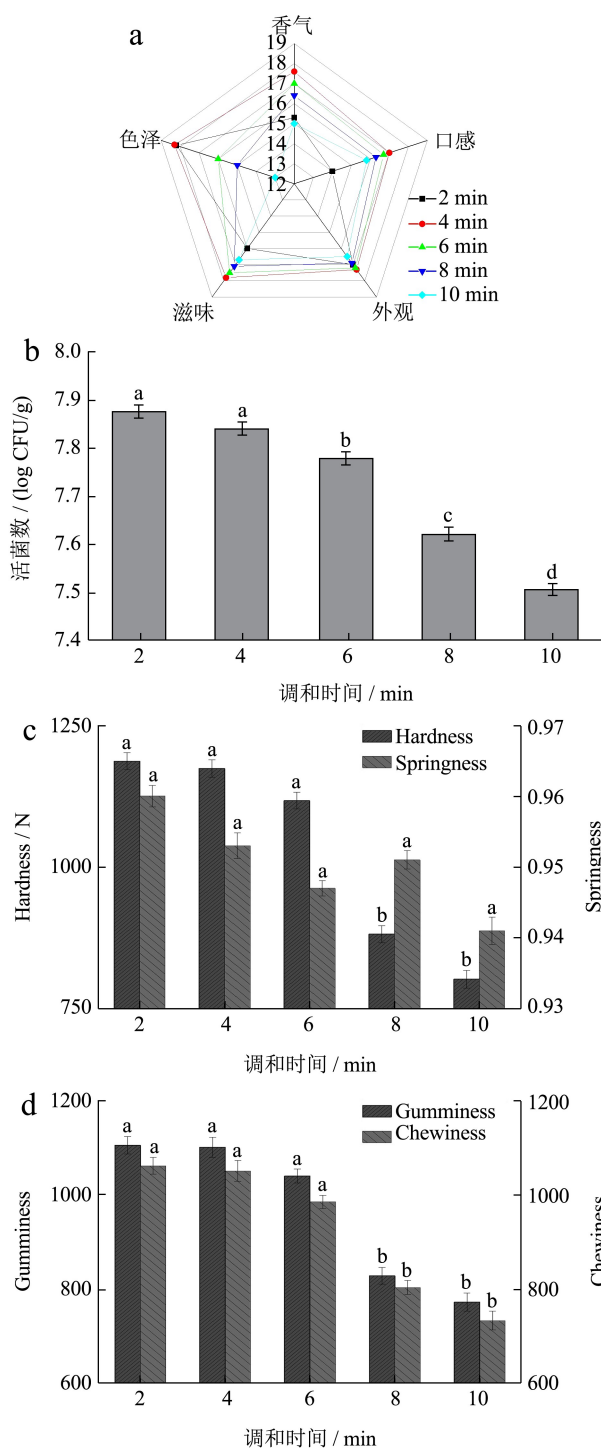


图4 调和时间对软糖感官品质、活菌数和质构的影响

Fig.4 Effect of blending time on sensory, viable cell count and texture of gummies

由图4可以看出,调和4 min时,软糖感官品质最好;活菌数则随着调和时间的延长,存活率逐渐下降;同时调和时间的延长也会对明胶网状结构造成一定的破坏,导致软糖的硬度、弹性、咀嚼性降低,影响软糖的品质。

2.2 响应面实验结果与分析

2.2.1 响应面试验结果

根据单因素试验结果,选择佛手浆添加量(A)、调和温度(B)、调和时间(C)为因变量,感官评分(Y)为响应值,设计三因素三水平的响应面试验,得到的响应面试验结果见表3。

对模型显著性分析见表4。回归方差分析显著性检验表明,该回归模型 $F=7.26$, $p<0.05$,显示模型显著回归,同时,该回归模型的总决定系数 $R^2=0.9032$,可以看出该模型的拟合程度较为准确。可以利用该模型对软糖的感官评分进行分析和优化。

由表4可知,佛手浆添加量、调和温度、调和时间对感官品质的都有极显著的影响。同时,除AB项之外的各个因素的交互作用对感官评分都有非常显著的影响。失拟项 $p=0.3152>0.05$ 模型不显著,表示模型成立,模型预测值与实际值拟合程度高。A、B、C三因素的交互作用对感官评分的影响是显著的,对软糖感官评价的影响为佛手浆添加量>调和温度>调和时间,即 $A>B>C$,与方差分析结果相同。通过回归方程并结合3D曲面图分析得到益生菌软糖的最佳工艺条件为佛手浆添加量12%、调和温度70℃、调和时间4 min,该工艺条件下佛手益生菌软糖的活菌数为7.6 log CFU/g,感官评分为89.9。

表3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface test design and results

编号	A 佛手浆添加量	B 调和温度	C 调和时间	感官评分
1	-1	-1	0	81
2	1	-1	0	75.6
3	-1	1	0	83.5
4	1	1	0	77.6
5	-1	0	-1	85
6	1	0	-1	80
7	-1	0	1	82
8	1	0	1	84
9	0	-1	-1	79
10	0	1	-1	83
11	0	-1	1	77
12	0	1	1	84.1
13	0	0	0	91
14	0	0	0	89
15	0	0	0	89.1
16	0	0	0	89.2
17	0	0	0	95.6

表 4 方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	列 1
Model	431.8	9	47.98	7.26	0.008	**
A	25.56	1	25.56	3.87	0.09	
B	30.42	1	30.42	4.6	0.0691	
C	0.0012	1	0.0012	0.0002	0.9894	
AB	0.0625	1	0.0625	0.0095	0.9253	
AC	12.25	1	12.25	1.85	0.2156	
BC	2.4	1	2.4	0.3634	0.5656	
A ²	92.62	1	92.62	14.01	0.0072	
B ²	187.04	1	187.04	28.29	0.0011	
C ²	46.97	1	46.97	7.11	0.0322	
Residual	46.28	7	6.61			
Lack of Fit	14.51	3	4.84	0.6089	0.6437	
Pure Error	31.77	4	7.94			
Cor Total	478.08	16				

注: *差异显著, $p < 0.05$ 。

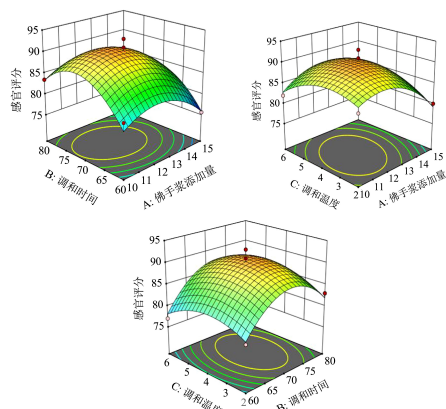


图 5 两两交互作用对软糖感官评分影响的响应面图

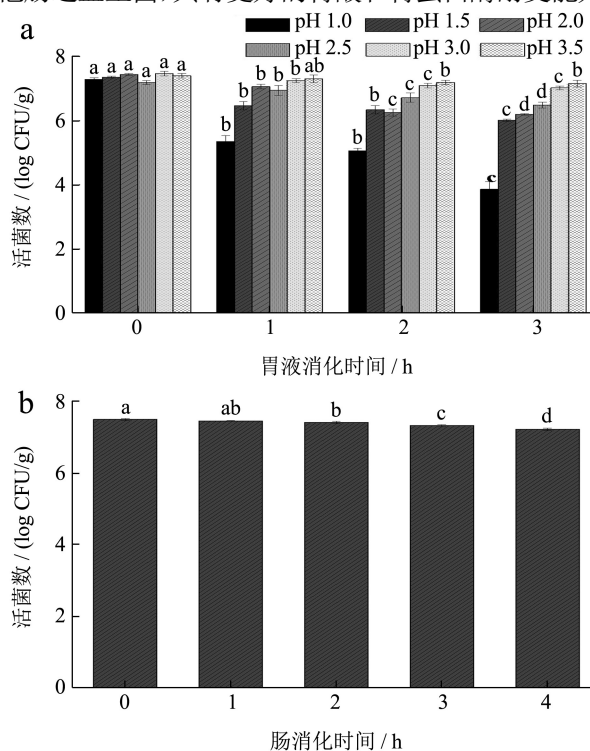
Fig.5 Response surface diagram of the effect of pairwise interaction on sensory score of gummies

2.2.2 益生菌软糖中凝结芽孢杆菌的体外消化耐受能力分析

在通过胃肠道的过程中存活率是益生菌能够使宿主受益的重要标准^[20], 因此肠道益生菌须有较高的胃肠耐受能力, 如在较低 pH 的胃液、较高浓度的胆盐液及较长时间的肠液中能否有较好的存活率, 是判断该益生菌能否成为肠道优势菌的重要标准^[21]。

凝结芽孢杆菌在不同 pH 值胃液中的存活率对益生菌软糖能否产生益生效果具有重要意义。食物摄入后, 在人体胃液中停留时间为 1~3 h^[22], 且 pH 值会上升, 人空腹时的胃液 pH 值可达 1.0^[23], 因此, 选取胃液 pH 1.0~3.5, 消化时间为 3 h 的条件进行试验。由图 5a 可知, 软糖中凝结芽孢杆菌的存活率与胃液 pH 呈正相关, 软糖中的凝结芽孢杆菌在不同 pH 值的胃液

环境中的存活率不相同, 其中在 pH 1.0 消化 3 h 后, 菌群数由 7.28 log CFU/g 下降到 3.86 log CFU/g, 但是在 pH 1.5~3.5 的环境中, 消化 3 h 后, 凝结芽孢杆菌菌群数仍较高, 均达 6.01 log CFU/g 以上。关小莺等^[24]对干酪乳杆菌发酵荔枝汁在 pH 1.5 的胃液进行模拟消化 2 h 后, 存活率不到 50%, 于金慧等^[25]对鲍芹根际乳酸菌进行胃酸耐受性研究, 发现其在 pH 1.5 不能存活。以上结果表明, 凝结芽孢杆菌相比于乳酸菌和其他肠道益生菌, 具有更好的胃酸和胃蛋白酶耐受能力。



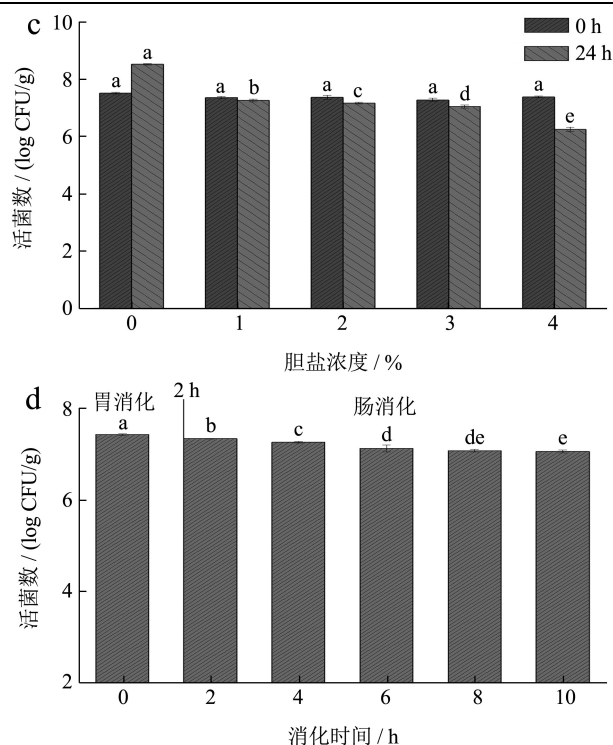


图6 佛手软糖在模拟胃液、肠液、胆盐液及胃肠消化过程中的活菌数

Fig.6 The viable count of bergamot gummies in the process of simulating gastric fluid, intestinal fluid, bile salt fluid and gastrointestinal digestion

注: a: 模拟胃消化; b: 模拟肠消化; c: 模拟胆盐液; d: 模拟胃肠消化过程 (0~2 h: 胃消化; 2~10 h: 肠消化)。

佛手益生菌软糖在肠液中消化 4 h 后, 凝结芽孢杆菌的菌群数仅下降 0.27 log CFU/g, 鞠葛金悦等^[26]发现植物乳杆菌和发酵乳杆菌肠液消化 4 h 后菌群数分别下降 1.05 log CFU/g 和 1.06 log CFU/g, 表明与植物乳杆菌和发酵乳杆菌相比, 凝结芽孢杆菌具有较高的肠道耐受能力。

凝结芽孢杆菌在不同胆盐浓度培养基培养 24 h 后, 测得存活率见图 5c, 其活菌数与胆盐浓度呈负相关, 胆盐浓度越高, 活菌数越低, 凝结芽孢杆菌在 4 g/L 浓度的胆盐条件下菌群数仅下降 1.13 log CFU/g, 表明凝结芽孢杆菌具有较好的胆盐耐受能力。金迅等^[27]和王金果等^[28]对凝结芽孢杆菌进行体外消化, 凝结芽孢杆菌在 0.3%胆盐液中的均达 80%以上, 与本文研究结果一致。郭芸等^[29]发现当胆盐浓度达到 0.25%时, 所有乳酸菌菌株均不能生长。

消化一小时后小肠中的胆盐浓度约为 0.3%^[20], 因此胃肠消化试验中取 3 g/L 的浓度、胃液 pH 3.0 进行试验。凝结芽孢杆菌在胃肠消化体系中消化 12 h 后仍有较高的菌群数, 从 7.34 log CFU/g 仅下降到 7.06 log CFU/g, 凝结芽孢杆菌数在从胃液体系转移至肠液体

系中, 有显著性降低, 在肠液中的存活率与消化时间没有明显变化, 消化 10 h 后, 仍可较好的适应胃肠道环境, 表明凝结芽孢杆菌有较好的胃肠道耐受能力。

3 结论

本实验以佛手益生菌软糖为研究对象, 采用单因素结合响应面优化, 探究佛手浆添加量、调和温度、调和时间等因素对软糖感官、质构和活菌数的影响, 确定软糖的工艺条件为: 佛手浆添加量 12%、调和温度 70 °C、调和时间 4 min, 此时软糖活菌数 7.6 log CFU/g, 具有佛手的清香, 感官评价最好。同时, 探究了软糖中凝结芽孢杆菌的胃肠道耐受能力, 发现其对 pH 1.5 以上的人工胃液, 肠液及胆盐具有较好的耐受性。以上研究可为佛手益生菌软糖的开发提供理论依据。

参考文献

- [1] Bartkiene E, Ruzauskas M, Lele V, et al. Development of antimicrobial gummy candies with addition of bovine colostrum, essential oils and probiotics [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(5): 1227-1235
- [2] Pariya D, ValériE O, Luis M J. Correction to: process optimization for development of a novel water kefir drink with high antioxidant activity and potential probiotic properties from Russian olive fruit (*Elaeagnus angustifolia*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(2): 248-260
- [3] Bomko T V, Nosalskaya T N, Kabluchko T V, et al. Immunotropic aspect of the *Bacillus coagulans* probiotic action [J]. Journal of Pharmacy & Pharmacology, 2017, 69(8): 1033-1040
- [4] 曹江, 翟齐啸, 徐斐. 凝结芽孢杆菌调节肠道健康的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(14): 341-345
- [5] CAO Jiang, ZHAI Qixiao, XU Pei. Research progress of *Bacillus coagulans* regulating gut health [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(14): 341-345
- [6] Cao J, Yu Z, Liu W, et al. Probiotic characteristics of *Bacillus coagulans* and associated implications for human health and diseases [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 64: 103643
- [7] Sui L, Zhu X, Wu D, et al. *In vitro* assessment of probiotic and functional properties of *Bacillus coagulans* T242 [J]. Food Bioscience, 2020, 36(1): 100675
- [7] 薛文娟. 佛手益生菌发酵工艺优化和发酵产物分析[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018
- XUE Wenjuan. Optimization of fermentation process of bergamot by probiotic and analysis of fermentation products

- [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018
- [8] Saifullah M, Yusof Y A, Chin N L, et al. Dissolution profiling and its comparison of natural fruit powder effervescent tablets [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 178: 60-70
- [9] Saifullah M, Yusof Y A, Chin N L, et al. Physicochemical and flow properties of fruit powder and their effect on the dissolution of fast dissolving fruit powder tablets [J]. Powder Technology, 2016, 301: 396-404
- [10] Flores F P, Singh R K, Kerr W L, et al. Total phenolics content and antioxidant capacities of microencapsulated blueberry anthocyanins during *in vitro* digestion [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 272-278
- [11] Silva H D, Joana P, Pinheiro A C, et al. Evaluating the behaviour of curcumin nanoemulsions and multilayer nanoemulsions during dynamic *in vitro* digestion [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48: 605-613
- [12] Kuck L S, Wesolowski J L, Noreña C P Z. Effect of temperature and relative humidity on stability following simulated gastro-intestinal digestion of microcapsules of bordo grape skin phenolic extract produced with different carrier agents [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 257-264
- [13] Mahdi A A, Rashed M, Al-ansi W, et al. Enhancing bio-recovery of bioactive compounds extracted from *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*: optimization performance of integrated of pulsed-ultrasonic/microwave technique [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(13): 1661-1673
- [14] Lee Y K, Kim Y J, Chang Y H, et al. Characterization and storage stability of chlorophylls microencapsulated in different combination of gum Arabic and maltodextrin [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 337-346
- [15] Amer A A M. 佛手果营养成分的分析、酚类化合物提取及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020
- Amer A A M. Study on the analysis of nutritive components, extraction, and application of phenolic compounds from Foshou fruit [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020
- [16] 赵丽娜. 凝结芽孢杆菌的筛选及高密度培养工艺研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017
- ZHAO Lina. Screening of probiotics *Bacillus coagulans* and optimization of its high density cultivation conditions [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017
- [17] 刘飞. 南酸枣凝胶软糖的开发及工厂设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2018
- LIU Fei. The development of *Choerospondias axillaris* gel soft sugar and plant design [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018
- [18] Zhuang G, Wang J, Yan L, et al. *In vitro* comparison of probiotic properties of *Lactobacillus casei* Zhang, a potential new probiotic, with selected probiotic strains [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(10): 1640-1646
- [19] Jiao X, Li B, Qi Z, et al. Effect of *in vitro*-simulated gastrointestinal digestion on the stability and antioxidant activity of blueberry polyphenols and their cellular antioxidant activity towards HepG2 cells [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(1): 61-71
- [20] Armin T, De C J, Cassanta R R, et al. *In vitro* probiotic potential and anti-cancer activity of newly isolated folate-producing streptococcus thermophilus strains [J]. Frontiers in Microbiology, 2018: 1661-1673
- [21] 郭庆丰, 陈林, 马经纬. 凝结芽孢杆菌益生机制及应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(18): 208-213
- GUO Qingfeng, CHEN Lin, MA Jingwei. Research advances in the probiotics mechanism and application of *Bacillus coagulans* [J]. Food Research and Development, 2018, 39(18): 208-213
- [22] 郑柳青. 鼠李糖乳杆菌 LR-ZB1107-01 的益生特性及其高密度培养的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
- ZHENG Liuqing. Study on properties of *Lactobacillus rhamnosus* LR-ZB1107-01 and its high density culture [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [23] 吴丹阳. 凝结芽孢杆菌 T242 益生性及功能特性的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016
- WU Danyang. Study on probiotic properties and functionality of *Bacillus coagulans* T242 [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2016
- [24] 关小莺, 温靖, 肖更生, 等. 干酪乳杆菌发酵荔枝汁在模拟胃肠道中耐受能力及其抑菌性的研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(4): 96-102
- GUAN Xiaoying, WEN Jin, XIAO Gengsheng, et al. Antimicrobial activity of the litchi juice fermented by *Lactobacillus casei* and the strain's tolerance in simulated gastrointestinal tract [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 96-102
- [25] 于金慧, 刘云鹏, 徐贵祎, 等. 鲍芹根际乳酸菌的筛选及耐受性和抗氧化能力评价[J]. 山东农业科学, 2019, 51(11): 74-80
- YU Jinhui, LIU Yunpeng, XU Guiyi, et al. Screening and evaluation of tolerance and antioxidant capacity of *Lactobacillus* in Baoqin rhizosphere [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(11): 74-80