DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.021

绿茶凝胶软糖配方工艺优化及其品质分析

袁涵宇[1],潘春飞[2,3],王艳玲[2,3],苗幼珺[2,3],缪文华[1*]
(1. 浙江海洋大学 食品与药学学院,浙江 舟山 306022;2. 舟山市普陀法雨茶业有限公司,浙江 舟山 316000;3. 浙江冠素堂食品有限公司,浙江 舟山 316000)

摘　要:为响应中国茶叶市场持续增长和茶饮便利性的需求,该研究以绿茶、明胶、变性淀粉、柠檬酸为原料,开发一款兼具良好口感和潜在抗氧化活性的绿茶凝胶软糖。以感官评分、质构特性和色差为评价指标,考察茶浓度、变性淀粉添加量、明胶添加量及柠檬酸添加量对产品品质的影响。单因素试验结果表明:茶浓度为 3%、变性淀粉添加量为 4%、明胶添加量为 12%、柠檬酸添加量为 0.3% 时软糖感官评分较高。采用 Design Expert 13.0 软件进行响应面优化,得到最佳配方为茶浓度 2.8%、变性淀粉添加量 3.8%、明胶添加量 12.4%、柠檬酸添加量 0.3%,该条件下制得的绿茶凝胶软糖感官评分为 87.6,DPPH 自由基清除率为 56.9%,羟基自由基清除率为 38.5%,表明其具有一定的抗氧化活性。成品茶香浓郁、口感丰富、弹性与咀嚼性良好,且微生物及理化指标均符合国家标准。

关键词:绿茶;Box-Behnken 设计;抗氧化活性;功能性软糖;工艺开发

Optimization of Formulation and Processing of Green Tea Gelatin Gummy Candies and Evaluation of Their Quality Characterstics

YUAN Hanyu[1], PAN Chunfei[2,3], WANG Yanling[2,3], MIAO Youjun[2,3], MIAO Wenhua[1*]
(1.School of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 306022, Zhejiang, China;
2. Zhoushanshi Putuo Fayu Chaye Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang, China;
3. Zhejiang Guansutang Food Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the continuous growth of China's tea market and the demand for tea convenience, this study developed a green tea gel gummy with good taste and potential antioxidant activity using green tea, gelatin, modified starch, and citric acid as raw materials. The effects of tea concentration, modified starch addition, gelatin addition, and citric acid addition on product quality were investigated using sensory score, texture properties, and color difference as evaluation indicators. Single-factor experiments showed that sensory scores were higher when the tea concentration was 3%, modified starch addition was 4%, gelatin addition was 12%, and citric acid addition was 0.3%. Response surface methodology using Design Expert 13.0 software was then employed for further optimization. The optimal formula was determined as follows: tea concentration of 2.8%, modified starch addition of 3.8%, gelatin addition of 12.4%, and citric acid addition of 0.3%. Under these conditions, the green tea gel gummy achieved a sensory score of 87.6, with DPPH radical scavenging rate of 56.9% and hydroxyl radical scavenging rate of 38.5%, indicating certain antioxidant activity. The final product exhibited a rich tea aroma, good taste, desirable elasticity and chewiness, and its microbiological and physicochemical indicators met the national standards.

Key words: green tea; Box-Behnken design; antioxidant activity; functional gummy; process development

引文格式:
袁涵宇,潘春飞,王艳玲,等. 绿茶凝胶软糖配方工艺优化及其品质分析[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):174-182.
YUAN Hanyu, PAN Chunfei, WANG Yanling, et al. Optimization of Formulation and Processing of Green Tea Gelatin Gummy Candies and Evaluation of Their Quality Characterstics[J]. Food Research and Development, 2026, 47(17): 174-182.

作者简介:袁涵宇(2001—),男(汉),硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。
*通信作者:缪文华(1983—),男(汉),副研究员,博士,研究方向:食品高质化加工与营养优化。

茶是中国传统饮品，富含氨基酸、茶多酚及抗氧化化合物，具有抗龋齿、减轻炎症、预防高血压等潜在健康益处，且风味独特，深受消费者喜爱[1]。近年来，中国茶产业市场规模持续增长，预计2028年将达5 309.6亿元。伴随消费升级和健康意识提升，年轻消费群体不仅关注茶叶口感，更重视产品的附加值和健康属性。然而，传统饮茶方式存在冲泡繁琐、茶渣残留、茶具清洗不便等缺点。

为克服上述局限，本研究致力于开发一种方便食用、老少皆宜且具保健功能的茶制品。茶叶凝胶软糖作为一种创新形态，融合了茶叶的健康成分与软糖的便利性和适口性，契合当前市场对方便健康食品的需求。凝胶软糖以胶凝剂（如明胶、变性淀粉）和甜味剂为主要原料，经熬煮、浇注和冷却成型，具有质地柔软、富有弹性、水分含量高等特点，易于咀嚼和溶解，适合全年龄段人群。

目前，茶风味软糖的工艺研究相对较少。本研究以绿茶和变性淀粉为主要原料，柠檬酸为酸味剂，明胶为胶凝剂，系统探究茶浓度、变性淀粉添加量、明胶添加量及柠檬酸添加量对绿茶凝胶软糖感官品质、质构特性及抗氧化活性的影响，通过响应面法优化配方，以期为功能性茶软糖开发提供理论依据，拓展绿茶资源深加工途径。

1 材料与方法

1.1 材料试剂

绿茶：舟山市普陀法雨茶业有限公司；蔗糖、变性淀粉、柠檬酸、明胶、柠檬黄（均为食品级）：中衍食品商贸有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH）、无水乙醇、硫酸亚铁（$FeSO_4 \cdot 7H_2O$）、水杨酸、过氧化氢溶液（均为分析纯）：国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

HH-4数显恒温水浴锅：上海力辰邦西仪器科技有限公司；TA300-W质构仪：济南赛成电子科技有限公司；NR10QC色差仪：深圳三恩时科技有限公司；P3紫外可见分光光度计：上海美谱达仪器有限公司。

1.3 绿茶凝胶软糖制备工艺

1.3.1 茶汤提取

参照刘莉[2]的方法，称取3 g绿茶加入97 mL水中，60 ℃浸提20 min，过滤得茶汤。

1.3.2 明胶块熬制

将明胶与水按2∶3（质量比）混合，90~100 ℃搅拌至完全溶解（约1 h，补充搅拌过程中损失的水分，确保搅拌前后总质量不变），冷却切块备用（明胶块中明胶含量为40%）。

1.3.3 蔗糖液制备

将蔗糖加3倍质量的水溶解，持续搅拌，中小火熬煮至微金黄色。

1.3.4 基础配方

通过预试验确定茶溶液（茶浓度3%）添加量为41.5%、变性淀粉添加量为5%、明胶块添加量为24%（即明胶添加量为9.6%）、柠檬酸添加量为0.3%、蔗糖液添加量为30%。

1.3.5 绿茶凝胶软糖熬制

将茶汤加入蔗糖液中，依次加入明胶块、变性淀粉、柠檬酸，80 ℃熬煮1 h得混合糖浆。

1.3.6 浇模与冷却

将糖浆注入模具，室温冷却12 h脱模。

1.4 单因素试验设计

单因素及水平设置如下：茶浓度：1%、2%、3%、4%、5%；变性淀粉添加量：2%、4%、6%、8%、10%；明胶添加量：8%、10%、12%、14%、16%；柠檬酸添加量：0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%。固定基础配方中的3个因素，依次改变另一因素水平（5水平），以感官评分为评价指标[3]。

1.5 响应面优化试验

参照康林芝等[4]的方法并稍作修改，基于单因素结果，采用Box-Behnken设计（Design Expert 13.0）四因素三水平响应面试验，以感官评分为响应值对绿茶凝胶软糖的配方进行优化，因素与水平如表1所示。

表1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	因素			
	A 茶浓度/%	*B* 变性淀粉添加量/%	*C* 明胶添加量/%	*D* 柠檬酸添加量/%
−1	2	2	10	0.2
0	3	4	12	0.3
1	4	6	14	0.4

1.6 感官评价

参考李瑞一等[5]的方法和GB 17399—2016《食品安全国家标准 糖果》制定感官评价标准，如表2所示。

1.7 质构分析（texture profile analysis，TPA）

参照阮鸣等[6]的方法并稍作修改，采用质构仪测定绿茶凝胶软糖的质构特性，参数如下：P/5探头（Φ50 mm），触发力0.5 N，高度20 mm，形变75%，速度60 mm/min。每组平行3次取平均值。

1.8 色差的测定

色差仪校准后，测量绿茶凝胶软糖表面的色差（L^*值、a^*值、b^*值），每个样品测定6个点。其中L^*值代表软糖的亮度；a^*值代表软糖的红绿度；b^*值代表软糖

表 2　绿茶明胶软糖感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for green tea gelatin gummies

指标	评分标准	分值
色泽	鲜艳,有光泽	14~20
	较为鲜艳,略带光泽	7~<14
	暗淡,无光泽	0~<7
结构	完整无变形,紧实光滑无褶皱气泡	14~20
	较完整轻微变形,较紧实光滑有小气泡	7~<14
	缺陷明显变形,软塌褶皱有气泡	0~<7
滋味	茶味明显,清凉感	20~30
	轻微茶味,略清凉	10~<20
	无茶味,无清凉感	0~<10
口感	甜味适中,不粘牙,硬度适中	20~30
	甜味一般,轻微粘牙,硬度一般	10~<20
	无甜味,粘牙,硬度差	0~<10

的黄蓝度。

1.9　体外抗氧化活性的测定

1.9.1　DPPH 自由基清除率

参照杨紫瀚等[7]和 Wang 等[8]的方法并稍作修改。取 2 mL 未凝固糖浆,加入 2 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇液,混合摇匀,室温下避光反应 30 min,测 517 nm 处吸光度。以去离子水为空白对照。DPPH 自由基清除率(M,%)按公式(1)计算。

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

式中:A_0 为对照的吸光度;A_1 为样品的吸光度;A_2 为在与 A_1 相同条件下用乙醇代替 DPPH 溶液的样品吸光度。

1.9.2　羟基自由基清除率

参照杨紫瀚等[7]和 Lim 等[9]的方法并稍作修改。取 2 mL 未凝固糖浆,加入 2 mL 2.5 mmol/L $FeSO_4$,再加入 2 mL 2.5 mmol/L H_2O_2和 2 mL 9 mmol/L 水杨酸乙醇液,混匀后 36.7 ℃孵育 40 min,测定 510 nm 处吸光度。以去离子水为空白对照。羟基自由基清除率(N,%)按公式(2)计算。

$$N = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

式中:A_0 为对照组的吸光度;A_1 为样品的吸光度;A_2 为在与 A_1 相同的条件下用水杨酸乙醇溶液代替 $FeSO_4$ 的样品溶液的吸光度。

1.10　微生物及理化指标测定

参照 GB 17399—2016《食品安全国家标准 糖果》和 SB/T 10021-2017《糖果 凝胶糖果》检测样品的微生物及理化指标。

1.11　数据处理

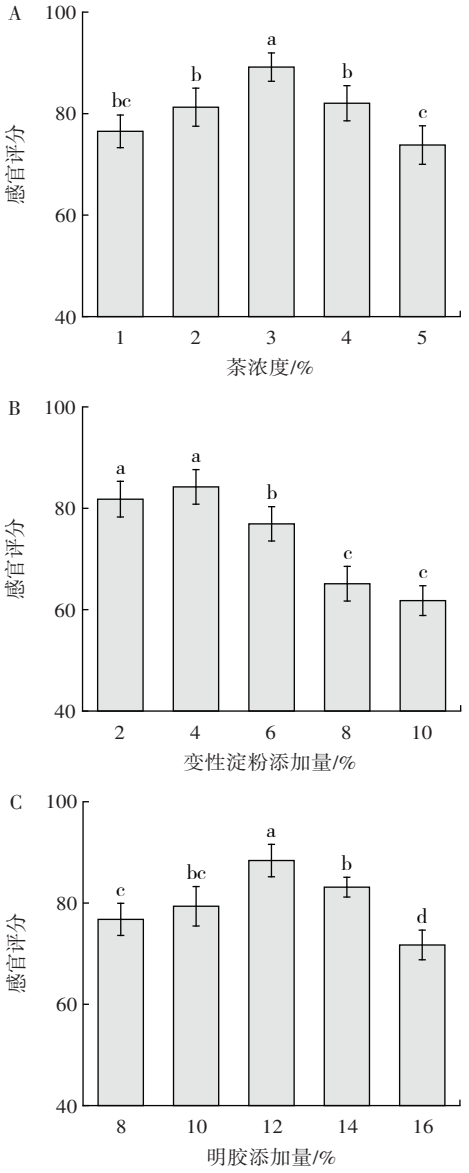
使用软件 IBM SPSS 27 进行显著性分析,使用 Origin 2021 绘制图形。所有试验进行 3 次独立平行试验,结果以平均值±标准差表示。

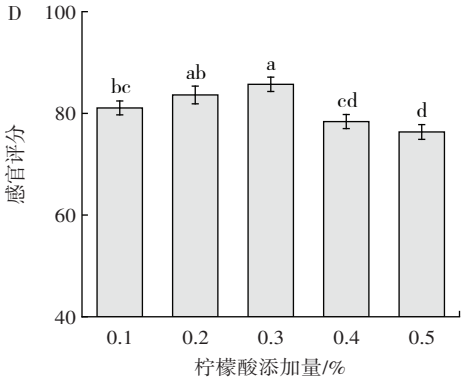
2　结果与分析

2.1　单因素试验结果

感官评价是优化食品配方、理解消费者偏好的关键手段,其评分直接决定消费者的可接受度。茶浓度、明胶、变性淀粉及柠檬酸的添加量均会对绿茶凝胶软糖的感官品质产生影响[10-13]。本研究中各因素对绿茶凝胶软糖感官评分的影响见图 1。

由图 1A 可知,随着茶浓度的增加,感官评分呈现先上升后下降的趋势。当茶浓度过低(1%~2%)时风味不足;茶浓度为 3% 时感官评分最高(89.2),茶香浓郁、色泽鲜艳、组织完整;茶浓度大于 3% 时软糖的苦涩味加重、色泽变暗,导致评分下降。该结果与王未名等[14]在白茶枸杞复合凝胶软糖中的研究结论类似。因此选取茶浓度 2%、3%、4% 进行后续响应面试验。





A. 茶浓度；B. 变性淀粉添加量；C. 明胶添加量；D. 柠檬酸添加量。不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 1 单因素对绿茶凝胶软糖感官评分的影响

Fig.1 Effects of single factors on sensory score of green tea gel gummy

由图 1B 可知，变性淀粉添加量过低（<4%）时绿茶凝胶软糖弹性不足；当变性淀粉添加量为 4% 时，绿茶凝胶软糖通透度好、硬度适中、咀嚼性佳。此时感官评分最高，达到 85.2；但当变性淀粉添加量大于 4% 时，绿茶凝胶软糖感官评分下降。王小媛等[15]在杜仲籽油夹心软糖的研究中发现，当变性淀粉添加量过多时，凝胶软糖硬度增加、透明度下降、口感变差。Li 等[16]的研究同样表明，当变性淀粉添加量过多时，绿茶凝胶软糖的口感会变得黏腻且有颗粒感；当变性淀粉添加量过少时，则会弹性不足，影响软糖的稳定性。因此选取变性淀粉添加量 2%、4%、6% 进行后续响应面试验。

由图 1C 可知，低明胶添加量（8%）会导致绿茶凝胶软糖过软不易成型；明胶添加量为 12% 时感官评分最高（88.8）；明胶添加量大于 12% 时胶质感过强、硬度大、咀嚼性下降。昝川南[17]的研究表明，过量添加明胶会导致口感过硬、缺乏弹性、出现干裂；而添加过少则会导致成型困难、口感过软、缺乏稳定性。因此选取明胶添加量 10%、12%、14% 进行后续响应面试验。

由图 1D 可知，柠檬酸添加量为 0.1% 时绿茶凝胶软糖酸味过淡，感官评分较低；柠檬酸添加量为 0.3% 时绿茶凝胶软糖酸甜适中，口感丰富，感官评分最高（86.1）；但当柠檬酸添加量大于 0.3% 时，绿茶凝胶软糖酸味过重，品质下降，感官评分显著降低。这一结果与田其英[18]在猴头菇琼脂软糖中的研究趋势一致。因此选取柠檬酸添加量 0.2%、0.3%、0.4% 进行后续响应面试验。

2.2 单因素试验对质构特性的影响

TPA 可以通过测量和评估食品的物理特性，如硬度、弹性、咀嚼性和胶黏性，来优化产品品质、改进配方和提高消费者满意度[19]。茶浓度、变性淀粉添加量、明胶添加量、柠檬酸添加量对质构特性的影响见表 3。

表 3 单因素对绿茶凝胶软糖质构特性的影响

Table 3 Effects of single factors on texture properties of green tea gel gummy

因素	水平/%	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
茶浓度	1	0.95±0.02^{a}	3.03±0.19^{a}	3.15±0.27^{a}
	2	0.95±0.04^{a}	3.11±0.12^{a}	3.19±0.27^{a}
	3	0.93±0.04^{a}	2.98±0.13^{a}	3.37±0.28^{a}
	4	0.97±0.02^{a}	3.06±0.17^{a}	3.15±0.30^{a}
	5	0.96±0.04^{a}	3.00±0.20^{a}	3.08±0.27^{a}
变性淀粉添加量	2	0.94±0.02^{a}	2.32±0.77^{e}	2.68±0.16^{c}
	4	0.96±0.02^{a}	3.49±0.13^{d}	3.67±0.16^{b}
	6	0.96±0.03^{a}	4.31±0.41^{a}	4.72±0.38^{a}
	8	0.97±0.03^{a}	4.04±0.40^{b}	4.05±0.23^{b}
	10	0.96±0.02^{a}	3.73±0.20^{c}	4.00±0.19^{b}
明胶添加量	8	0.95±0.02^{a}	2.91±0.19^{ab}	2.81±0.25^{a}
	10	0.98±0.03^{a}	3.26±0.32^{a}	2.32±1.10^{ab}
	12	0.93±0.04^{a}	2.75±0.23^{b}	2.41±1.38^{b}
	14	0.97±0.07^{a}	2.70±0.26^{b}	2.50±0.57^{b}
	16	0.94±0.03^{a}	2.56±0.15^{b}	1.72±0.20^{b}
柠檬酸添加量	0.1	0.96±0.06^{a}	2.94±0.18^{a}	3.06±0.13^{ab}
	0.2	0.98±0.03^{a}	3.09±0.11^{a}	3.18±0.19^{a}
	0.3	0.97±0.03^{a}	2.91±0.11^{ab}	2.80±0.20^{c}
	0.4	0.98±0.02^{a}	2.72±0.17^{b}	2.63±0.18^{c}
	0.5	0.97±0.02^{a}	2.92±0.17^{ab}	2.95±0.12^{bc}

注：不同小写字母表示同一指标各单因素不同水平差异显著（P<0.05）。

由表 3 可知，各因素的不同水平对绿茶凝胶软糖的弹性均无显著影响（P>0.05）。当茶浓度从 1% 增至 5% 时，胶黏性在 2.98~3.11 N 之间波动，咀嚼性在 3.08~3.37 mJ 之间波动，表明茶浓度对绿茶凝胶软糖的质构特性影响不显著（P>0.05）。这是由于茶溶液中的茶多酚、氨基酸等成分与明胶的分子结构交互作用较弱。

随着变性淀粉添加量的增大，绿茶凝胶软糖的胶黏性和咀嚼性呈现出先升高后降低的趋势。变性淀粉添加量从 2% 增加至 6%，胶黏性从 2.32 N 显著升高至最大值（4.31 N）（P<0.05），在变性淀粉添加量为 8% 和 10% 时分别降至 4.04 N 和 3.73 N；咀嚼性从 2.68 mJ 显著升高至最大值（4.72 mJ）（P<0.05），随后在变性淀粉添加量为 8%、10% 时维持在 4.00 mJ 左右。当明胶添加量从 8% 增至 16% 时，胶黏性先升高后降低，在明胶添加量为 10% 时达到最大值（3.26 N）；咀嚼性在明胶添加量为 8% 时达到最高（2.81 mJ），随后呈现出下降趋势，其中明胶添加量为 16% 时咀嚼性最低（1.72 mJ）。明胶在绿茶凝胶软糖中通过形成三维网状结构来提供结构稳定性和弹性，因此明胶的浓度、质量及溶解条件对软糖的质构有显著影响[20]；变性淀粉是一种改性淀粉，经过物理或化学处理后，具有更好的吸水性和凝胶

能力，可以与明胶一起形成混合凝胶，增加绿茶凝胶软糖的口感，从而改善其质构。但二者均存在剂量阈值，过量添加反而会导致凝胶性能下降。

柠檬酸添加量在 0.1%~0.5% 范围内，绿茶凝胶软糖的胶黏性在柠檬酸添加量为 0.2% 时最高（3.09 N），柠檬酸添加量为 0.4% 时最低（2.72 N）；咀嚼性则在柠檬酸添加量为 0.2% 时最高（3.18 mJ），柠檬酸添加量在 0.3% 和 0.4% 时分别显著降低至 2.80 mJ 和 2.63 mJ（$P<0.05$），柠檬酸添加量为 0.5% 时回升至 2.95 mJ。这是由于柠檬酸通过降低绿茶凝胶软糖的 pH 值使明胶分子之间的电荷相互作用减少，从而影响明胶的凝胶强度，导致绿茶凝胶软糖的质构发生变化[21]。

综上所述，茶浓度对绿茶凝胶软糖质构特性影响不显著，而变性淀粉、明胶和柠檬酸的添加量均显著影响产品的胶黏性与咀嚼性，且三者均存在适宜添加范围；过量添加变性淀粉或明胶会导致凝胶性能下降，柠檬酸则通过调节 pH 值影响凝胶强度。因此，在配方优化中应重点控制变性淀粉、明胶与柠檬酸的添加量。

2.3 单因素试验对色差的影响

各因素对绿茶凝胶软糖色差的影响如表 4 所示。

表 4 单因素对绿茶凝胶软糖色差的影响

Table 4 Effects of single factors on color parameters of green tea gel gummy

因素	水平/%	L^*值	a^*值	b^*值
茶浓度	1	27.8±0.33^{ab}	1.63±0.11^{b}	1.61±0.09^{b}
	2	26.45±0.43^{ab}	2.12±0.19^{a}	1.40±0.01^{c}
	3	28.66±0.29^{a}	2.32±0.10^{a}	1.83±0.03^{a}
	4	27.01±0.50^{bc}	1.75±0.14^{b}	1.49±0.03^{bc}
	5	26.97±0.46^{bc}	1.81±0.17^{b}	1.82±0.03^{a}
变性淀粉添加量	2	25.10±1.27^{e}	1.39±0.06^{c}	2.02±0.14^{ab}
	4	26.74±1.10^{b}	1.62±0.14^{b}	2.25±0.15^{a}
	6	25.43±0.63^{d}	1.50±0.06^{bc}	1.61±0.16^{b}
	8	26.32±0.46^{c}	1.90±0.10^{a}	1.66±0.11^{c}
	10	27.70±0.89^{a}	1.58±0.11^{b}	1.89±0.22^{c}
明胶添加量	8	26.45±0.11^{ab}	2.44±0.16^{a}	2.38±0.25^{a}
	10	26.27±0.69^{b}	2.48±0.22^{a}	2.10±0.13^{a}
	12	26.00±0.93^{c}	2.41±0.22^{ab}	2.28±0.24^{a}
	14	25.89±1.12^{c}	2.33±0.26^{b}	1.97±0.25^{a}
	16	26.62±1.06^{a}	2.09±0.44^{c}	2.40±0.33^{a}
柠檬酸添加量	0.1	25.10±1.27^{c}	2.40±0.41^{a}	2.10±0.08^{a}
	0.2	25.43±0.75^{c}	2.13±0.31^{b}	2.03±0.19^{a}
	0.3	26.32±1.13^{b}	2.06±0.22^{b}	1.95±0.37^{a}
	0.4	26.74±1.46^{b}	2.11±0.26^{b}	1.96±0.08^{a}
	0.5	27.90±1.39^{a}	2.03±0.44^{b}	1.83±0.18^{a}

注：不同小写字母表示同一指标各单因素不同水平差异显著（$P<0.05$）。

由表 4 可知，随着茶浓度从 1% 增至 3%，L^*值从 27.8 升至 28.66，之后在茶浓度为 5% 时降至 26.97；a^*值在茶浓度为 2%~3% 时较高，1%、4%、5% 时较低；b^*值在茶浓度为 3% 和 5% 时较高，2% 和 4% 时较低，整体表现为升高趋势。L^*值在变性淀粉添加量为 2% 时最低，10% 时最高，为 27.70；a^*值在变性淀粉添加量为 8% 时达到最高（1.90），2% 时最低（1.39）；b^*值在变性淀粉添加量为 4% 时最高，此后显著降低。L^*值在明胶添加量 8%~14% 范围内逐渐下降，明胶添加量为 16% 时回升至 26.62；a^*值在明胶添加量为 8%~10% 时较高，明胶添加量为 16% 时最低，呈逐渐降低趋势；b^*值则在各水平间无显著差异（$P>0.05$）。L^*值随柠檬酸添加量增加而逐渐升高，柠檬酸添加量为 0.50% 时达到最大值（27.90）；a^*值在柠檬酸添加量为 0.1% 时最高（2.40），柠檬酸添加量为 0.2% 时降至 2.13，此后随添加量变化不显著（$P>0.05$）；而 b^*值在各水平间无显著差异（$P>0.05$），均在 1.83~2.10 之间波动。

综上所述，茶浓度和变性淀粉添加量是影响绿茶凝胶软糖色泽的主要因素，明胶添加量和柠檬酸添加量的影响相对较小。从 L^*值来看，茶浓度为 3% 时 L^*值最高，此时绿茶凝胶软糖色泽最鲜亮；变性淀粉添加量为 4% 时 L^*值为 26.74，处于较高水平，而变性淀粉添加量为 10% 时 L^*值虽更高，但此时感官评分已下降，表明过高的亮度可能与过度添加变性淀粉导致的质地劣变有关。茶浓度为 3% 时 a^*值和 b^*值均达到较高值，这与感官评价中色泽鲜艳的评分标准一致；变性淀粉添加量为 4% 时 b^*值最高，赋予绿茶凝胶软糖适宜的淡黄色调，增强了产品的视觉吸引力。感官评分最高点（茶浓度 3%、变性淀粉添加量 4%、明胶添加量 12%、柠檬酸添加量 0.3%）对应的 L^*值、a^*值、b^*值均处于较优水平，进一步印证了色泽是影响消费者接受度的重要因素。因此，在绿茶凝胶软糖的开发中，应优先控制茶浓度和变性淀粉添加量可以获得理想的色泽品质。

2.4 响应面优化试验

2.4.1 响应面设计与试验结果

在单因素试验结果的基础上，采用 Box-Behnken 设计进行 29 组试验，结果见表 5。

表 5 Box-Behnken 试验设计与结果

Table 5 Box-Behnken experiment design and results

试验号	*A* 茶浓度	*B* 变性淀粉添加量	*C* 明胶添加量	*D* 柠檬酸添加量	感官评分
1	−1	−1	0	0	76.7
2	1	−1	0	0	69.3
3	−1	1	0	0	69.4
4	1	1	0	0	71.5
5	0	0	−1	−1	74.2
6	0	0	1	−1	79.6
7	0	0	−1	1	72.0

续表 5　Box-Behnken 试验设计与结果

Continue table 5　Box-Behnken experiment design and results

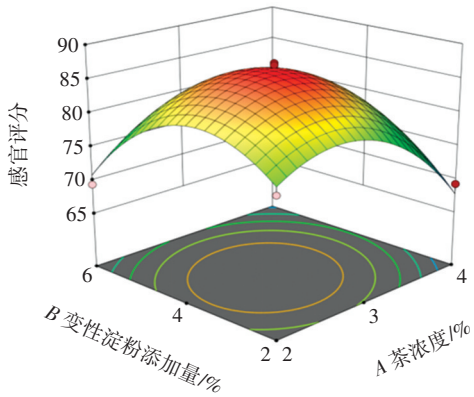
试验号	*A* 茶浓度	*B* 变性淀粉添加量	*C* 明胶添加量	*D* 柠檬酸添加量	感官评分
8	0	0	1	1	75.5
9	−1	0	0	−1	79.2
10	1	0	0	−1	68.7
11	−1	0	0	1	72.9
12	1	0	0	1	71.0
13	0	−1	−1	0	73.1
14	0	1	−1	0	67.3
15	0	−1	1	0	76.4
16	0	1	1	0	77.3
17	−1	0	−1	0	78.5
18	1	0	−1	0	69.7
19	−1	0	1	0	77.8
20	1	0	1	0	72.6
21	0	−1	0	−1	74.5
22	0	1	0	−1	71.0
23	0	−1	0	1	72.9
24	0	1	0	1	72.7
25	0	0	0	0	87.1
26	0	0	0	0	87.3
27	0	0	0	0	85.3
28	0	0	0	0	87.0
29	0	0	0	0	85.9

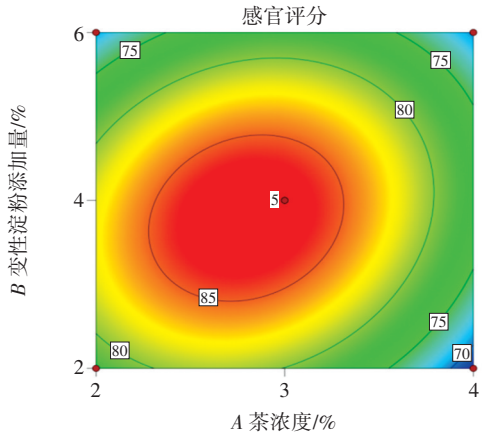
以感官评分（*Y*）为响应值，建立二次多项式回归模型：$Y = 86.52-2.64A-1.14B+2.03C-0.85D+2.38AB-0.9AC+2.15AD+1.67BC+0.83B-0.48CD-7.09A^2-7.74B^2-5.00C^2-6.23D^2$。

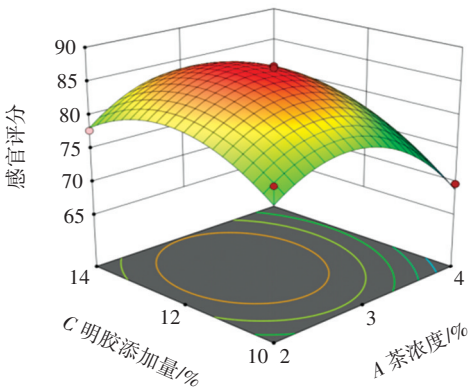
2.4.2　响应面分析

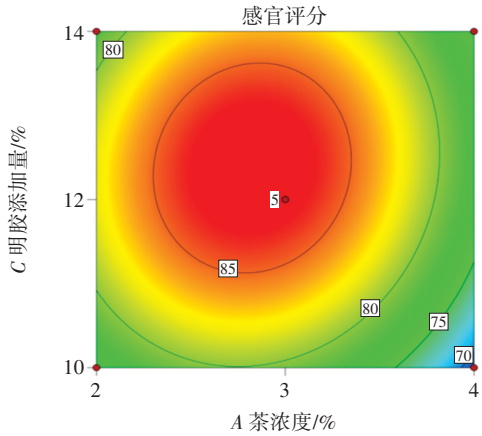
响应面曲线是一个三维图形，通常用于多因素优化问题中，可以直观地展示因变量如何随着自变量的变化而变化；等高线是响应面的二维投影，用来显示因变量在自变量空间中的变化它通过等高线的方式展示因变量在不同自变量值下的相同水平[22]。图中曲面坡度直观反映因素影响程度，等高线形状反映交互作用强弱。各因素交互作用对感官评分的响应面及等高线见图 2。

由图 2 可知，茶浓度与变性淀粉添加量的交互项等高线呈明显椭圆形，表明二者之间存在显著的交互作用；茶浓度与柠檬酸添加量的交互项等高线亦呈椭圆形，交互作用显著。茶浓度与明胶添加量的交互项等高线趋近圆形，交互作用不显著。变性淀粉与明胶添加量的交互项等高线呈椭圆形，虽未达显著水平但接近显著，可能存在一定交互趋势；变性淀粉添加量与柠檬酸添加量的交互项等高线趋近圆形，交互作用不显著；明胶添加量与柠檬酸添加量的交互项等高线趋近圆形，交互作用不显著。









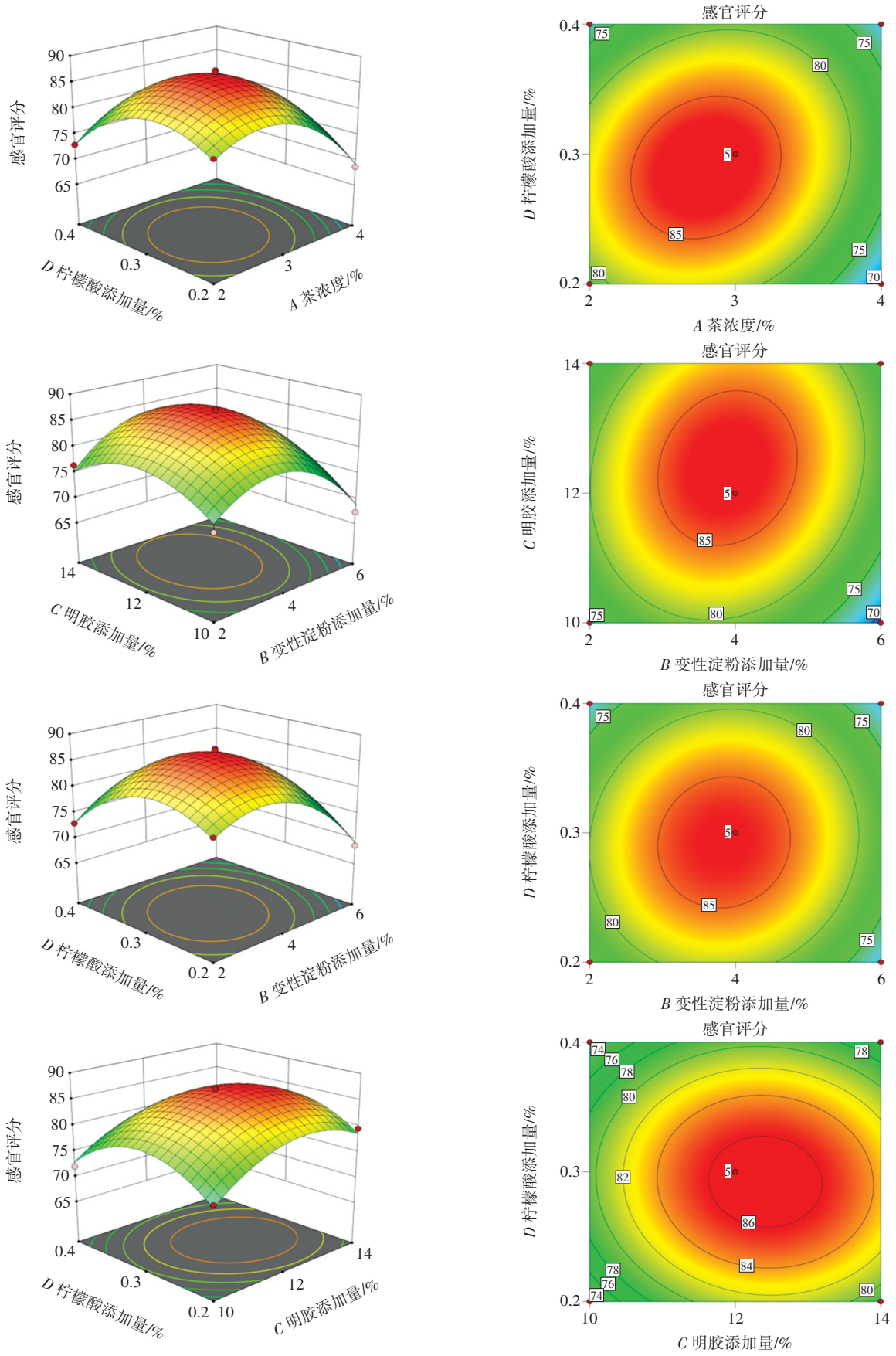


图 2　各因素两两交互对感官评分的响应面及等高线

Fig.2　Response surface and contour lines of pairwise interaction of each factor on sensory scores

2.4.3 模型显著性分析

根据试验结果建立响应面回归数学模型，进行多元线性回归和二项拟合分析，以验证回归模型与各因素间的显著性。回归方程方差分析结果见表6。

表6 响应面回归模型方差分析

Table 6 Analysis of variance for the response surface quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
回归模型	952.78	14	68.06	26.58	<0.000 1
A	83.74	1	83.74	32.70	<0.000 1
B	15.64	1	15.64	6.11	0.026 9
C	49.61	1	49.61	19.38	0.000 6
D	8.67	1	8.67	3.39	0.087 1
AB	22.56	1	22.56	8.81	0.010 2
AC	3.24	1	3.24	1.27	0.279 6
AD	18.49	1	18.49	7.22	0.017 7
BC	11.22	1	11.22	4.38	0.055 0
BD	2.72	1	2.72	1.06	0.320 0
CD	0.902 5	1	0.902 5	0.352 5	0.562 2
A^2	325.99	1	325.99	127.31	<0.000 1
B^2	388.51	1	388.51	151.72	<0.000 1
C^2	162.27	1	162.27	62.37	<0.000 1
D^2	251.49	1	251.49	98.21	<0.000 1
残差	35.85	14	2.56		
失拟项	32.80	10	3.28	4.30	0.086 1
净误差	3.05	4	0.762 0		
总和	988.63	28			

注：P<0.05表示差异显著；P<0.01表示差异极显著。

由表6可知，回归模型P<0.000 1，说明该回归模型达极显著水平；失拟项的F值为4.30，P值为0.086 1（>0.05），不显著，说明非试验因素对结果影响较小；回归模型的相关系数R^2=0.963 7，表明96.37%的数据可用该模型解释；调整系数R^2_{adj}=0.927 5，显示试验结果受试验因素影响的程度为92.75%；变异系数为2.11%，说明模型具有较高的精度和可靠性[23]。此外，从回归方程系数的显著性检验结果可知，一次项A（茶浓度）和C（明胶添加量）对绿茶凝胶软糖感官评分影响极显著（P<0.01），B（变性淀粉添加量）对绿茶凝胶软糖的感官评分影响显著（P<0.05），D（柠檬酸添加量）对绿茶凝胶软糖的感官评分影响不显著（P>0.05）；二次项A^2、B^2、C^2、D^2对产品感官评分影响极显著（P<0.01），交互项AB和AD对产品感官评分影响显著（P<0.05），其余因素的交互对感官评分影响不显著（P>0.05）。影响绿茶凝胶软糖感官评分的因素主次顺序为茶浓度>明胶添加量>变性淀粉添加量>柠檬酸添加量。

2.4.4 模型验证与最优配方

参照高慧颖等[24]的研究，将模型预测的最优配方进行取整以便进行验证，即茶浓度2.8%、变性淀粉添加量3.8%、明胶添加量12.4%、柠檬酸添加量0.3%。以此配方进行3次平行验证试验，所得绿茶凝胶软糖感官评分平均值为87.6，与模型预测值（87.1）相近，验证了模型可靠性。因此，该模型可用于绿茶凝胶软糖配方的优化。按此最佳配方制得的绿茶凝胶软糖成品茶香清新浓郁、不苦涩，质地柔软富有弹性，咀嚼不粘牙。

2.5 成品绿茶凝胶软糖品质分析

2.5.1 体外抗氧化活性

最佳配方工艺制作的成品绿茶凝胶软糖的DPPH自由基清除率和羟基自由基清除率分别为56.9%和38.5%，表明该绿茶明胶软糖具有一定的体外抗氧化活性，这与Shen等[25]的研究结果相似。

2.5.2 微生物及理化指标

依据GB 17399—2016《食品安全国家标准 糖果》和SB/T 10021—2017《糖果 凝胶糖果》对制作的最优配方工艺成品绿茶凝胶软糖进行检测，结果见表7。

表7 成品绿茶凝胶软糖微生物及理化指标

Table 7 Microbial and physicochemical properties of the optimal green tea gelatin gummy

项目	菌落总数/（CFU/g）	大肠杆菌/（CFU/g）	干燥损失质量/（g/100 g）	还原糖含量/（g/100 g）
检测值	310	未检出	28.1	17.7
标准限值	≤1 000	≤102	≤35	≥10

由表7可知，绿茶凝胶软糖的菌落总数为310 CFU/g（≤1 000 CFU/g），未检出大肠杆菌，干燥损失质量为28.1 g/100 g（≤35 g/100 g），还原糖含量为17.7 g/100 g（≥10 g/100 g），各项指标均符合相关国家标准要求[26]。

3 结论

本研究通过单因素和响应面法成功优化了绿茶凝胶软糖配方。当茶浓度为3%、变性淀粉添加量为4%、明胶添加量为12%、柠檬酸添加量为0.3%时，感官评分较高。调整后的配方（茶浓度2.8%、变性淀粉添加量3.8%、明胶添加量12.4%、柠檬酸添加量0.3%）感官评分实测平均值达87.6，与预测值（87.1）高度吻合，证实了模型的有效性；按此最佳配方制得的绿茶凝胶软糖茶香浓郁清新、质地柔软富弹性、咀嚼性好。抗氧化活性测定显示，成品绿茶凝胶软糖的DPPH自由基清除率为56.9%，羟基自由基清除率为38.5%，表明其具备一定的体外抗氧化能力。品质指标检测结果也符合相关国家标准，菌落总数为310 CFU/g，大肠菌群未检出，干燥损失质量为28.1 g/100 g，还原糖含量为17.7 g/100 g。本研究综合利用感官评价、仪器分析及体外抗氧化评价，为开发兼具良好风味、质构、安全性和潜在健康益处的功能性绿茶凝胶软糖提供了可靠的工艺参数和理论依据。

参考文献：

[1] PAN S Y, NIE Q, TAI H C, et al. Tea and tea drinking: China's outstanding contributions to the mankind[J]. Chinese Medicine, 2022, 17(1): 27.

[2] 刘莉 . 茶饮料加工工序及存在的技术问题[J]. 中南农业科技, 2024, 45(11): 105-108.
LIU Li. Processing procedures and existing technical problems of tea drinks[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2024, 45(11): 105-108.

[3] 赵思萱, 姬婧媛, 曾文慧, 等 . 响应面法优化 GABA 代糖果味软糖配方研究[J]. 农产品加工, 2025(3): 1-6, 11.
ZHAO Sixuan, JI Jingyuan, ZENG Wenhui, et al. The response surface method was applied to optimize the formula of GABA substitute confectionery fudge[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2025(3): 1-6, 11.

[4] 康林芝, 刘诗琦, 李少娟 . 响应面法优化香菇软糖的制作工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 122-126.
KANG Linzhi, LIU Shiqi, LI Shaojuan. Optimization of processing technology of *Lentinus edodes* soft sweet by response surface methodology[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 122-126.

[5] 李瑞一, 陈学锋, 陈杭君, 等 . 杨梅软糖制备工艺优化及其降血糖功能分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 80-89.
LI Ruiyi, CHEN Xuefeng, CHEN Hangjun, et al. Optimization of preparation process of bayberry soft candy and analysis of its hypoglycemic function[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 80-89.

[6] 阮鸣, 王嘉蓓, 续晨, 等 . 响应面法优化红枣银耳枸杞凝胶软糖配方工艺[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 238-247.
RUAN Ming, WANG Jiabei, XU Chen, et al. Formula optimization of the jujube, *Tremella*, and goji berry gel gummies using the response surface method[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(9): 238-247.

[7] 杨紫瀚, 吴伟杰, 高原, 等 . 莲藕解酒功能软糖的制备及功效评价[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(2): 404-415.
YANG Zihan, WU Weijie, GAO Yuan, et al. Preparation and efficacy evaluation of *Lotus* root relieving alcoholism functional gel fudge[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(2): 404-415.

[8] WANG L, LUO Y, WU Y N, et al. Fermentation and complex enzyme hydrolysis for improving the total soluble phenolic contents, flavonoid aglycones contents and bio-activities of guava leaves tea[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 189-198.

[9] LIM S, CHOI A H, KWON M, et al. Evaluation of antioxidant activities of various solvent extract from *Sargassum serratifolium* and its major antioxidant components[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 178-184.

[10] LUO T T, HE Y N, JIANG L X, et al. Flavor perception and biological activities of bitter compounds in food[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143532.

[11] SINGH A K, PRAMANIK K, BISWAS A. Constructing a biofunctionalized 3D-printed gelatin/sodium alginate/chitosan tri-polymer complex scaffold with improvised biological and mechanical properties for bone-tissue engineering[J]. Bio-Design and Manufacturing, 2024, 7(1): 57-73.

[12] 陈琨, 李桐, 刘俐璐, 等 . 柠檬酸处理对乳清分离蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(2): 22-27.
CHEN Kun, LI Tong, LIU Lilu, et al. Effect of citric acid cross-processing on the gel properties of whey protein isolate[J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 22-27.

[13] 闫小娟, 张海悦, 徐鹤, 等 . 雪梨百合功能软糖的研制[J]. 食品工业, 2023, 44(11): 26-30.
YAN Xiaojuan, ZHANG Haiyue, XU He, et al. Preparation of functional soft candy of Sydney and lily[J]. The Food Industry, 2023, 44(11): 26-30.

[14] 王未名, 李佳音, 苏淑颖, 等 . 白茶枸杞复合凝胶软糖配方优化及特性评价[J]. 中国茶叶, 2024, 46(7): 17-24.
WANG Weiming, LI Jiayin, SU Shuying, et al. Formula optimization and property evaluation of white tea Lycium barbarum complex gel soft candy[J]. China Tea, 2024, 46(7): 17-24.

[15] 王小媛, 马宝晨, 纵伟 . 杜仲籽油夹心软糖的工艺优化及产品质构分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 131-134.
WANG Xiaoyuan, MA Baochen, ZONG Wei. Optimization of process and texture analysis of *Eucommia ulmoides* seed oil soft sweet[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(6): 131-134.

[16] LI Y, DING G, YOKOYAMA W, et al. Characteristics of annealed glutinous rice flour and its formation of fast-frozen dumplings[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 106-112.

[17] 昝川南 . 食用明胶中微量铬含量测定的方法研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 197-202.
ZAN Chuannan. The research on determination of trace chromium in edible gelatin[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 197-202.

[18] 田其英 . 猴头菇琼脂软糖的工艺优化研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 228-230, 245.
TIAN Qiying. Study on process optimization of soft candy with *Hericium* and agar[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(10): 228-230, 245.

[19] BOLHUIS D P, FORDE C G. Application of food texture to moderate oral processing behaviors and energy intake[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 445-456.

[20] GE H Y, WU Y, WOSHNAK L L, et al. Effects of hydrocolloids, acids and nutrients on gelatin network in gummies[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106549.

[21] DAI H J, LI X Y, DU J, et al. Effect of interaction between sorbitol and gelatin on gelatin properties and its mechanism under different citric acid concentrations[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105557.

[22] 刘欣怡, 李雯清, 马俊, 等 . 低 GI 枸杞芽茶绿豆酥的工艺优化及其品质分析[J]. 食品研究与开发, 2026, 47(9): 106-115.
LIU Xinyi, LI Wenqing, MA Jun, et al. Process optimization and quality analysis of low GI mung bean pastry with goji berry bud tea[J]. Food Research and Development, 2026, 47(9): 106-115.

[23] 杜亚飞, 刘绪, 李维, 等 . Plackett-Burman 联用 Box-Behnken 响应面法优化燕麦米酒发酵工艺[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(13): 132-139.
DU Yafei, LIU Xu, LI Wei, et al. Optimization of fermentation process of oat rice wine based on Plackett-Burman design and Box-Behnken design[J]. Food Research and Development, 2025, 46(13): 132-139.

[24] 高慧颖, 王琦, 赖呈纯, 等 . 基于响应面法优化探讨枇杷花凝胶软糖的制作工艺[J]. 福建农业学报, 2021, 36(8): 964-971.
GAO Huiying, WANG Qi, LAI Chengchun, et al. Optimized formulation of a chewable candy containing loquat flower tea[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(8): 964-971.

[25] SHEN Y, PENG H, BI H R. Insight into the physicochemical characteristics and biological features of dietary polysaccharides extracted from palm kernel cake[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2025, 8(2): 77-88.

[26] 杜钇呈 . 凝结芽孢杆菌软糖的制备与功能评价[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023.
DU Yicheng. Preparation and functional evaluation of Bacillus coagulans gummies[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023.

加工编辑：李文欣
收稿日期：2025-07-27