

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241211003

引用格式: 李少峰, 王贻森, 王海峰, 等. 蓝靛果复合液态饮品的研制及综合评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 144-154.

LI SF, WANG YS, WANG HF, et al. Development and comprehensive evaluation of *Lonicera caerulea* composite liquid beverage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 144-154. (in Chinese with English abstract).

蓝靛果复合液态饮品的研制及综合评价

李少峰¹, 王贻森¹, 王海峰², 张 华^{1*}, 王振宇^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江贝比康生物技术研发有限公司, 牡丹江 157010)

摘要: **目的** 研发一款基于蓝靛果和其他药食同源为原料复合液态饮品(composite liquid beverage, CLB)并作出综合评价。**方法** 基于胆酸盐结合率, 筛选蓝靛果、黑木耳、山楂作为主要原料并进行配比优化。通过单因素实验、响应面实验及电子舌实验来确定配方辅料的添加量, 并测定杀菌前后 CLB 的物性、成分含量及功能特性变化来评价巴氏杀菌的可行性。**结果** 蓝靛果、黑木耳及山楂提取液的最优配比为 20:8:5 (V:V:V); 辅料添加量为: 赤藓糖醇 13.00%、羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC) 0.40%、山梨酸钾 0.03%、大豆多糖 0.50%。CLB 杀菌前后聚合物分散性指数(polymer dispersity index, PDI)均小于 1, 离心稳定系数均大于 90%, 色度 ΔE 小于 2, 具有良好的稳定性。巴氏杀菌前后 CLB 的可溶性固形物、pH、浊度、离心稳定系数、羟基自由基清除率以及活性成分差异不显著, 且具有较好的剪切特性, 表明杀菌方法的可行性, 其黏度值趋近于牛奶(0.01 Pa·s), 且具有良好的饮用口感。**结论** 本研究为拓宽适口性不好蓝靛果的开发和植物源性健康饮品应用提供理论依据。

关键词: 蓝靛果; 胆酸盐结合率; 复合液态饮品; 响应面分析; 感官评价

Development and comprehensive evaluation of *Lonicera caerulea* composite liquid beverage

LI Shao-Feng¹, WANG Yi-Sen¹, WANG Hai-Feng², ZHANG Hua^{1*}, WANG Zhen-Yu^{1*}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Heilongjiang Beibikang Biotechnology Research and Development Co., Ltd., Mudanjiang 157010, China)

ABSTRACT: Objective To develop and comprehensively evaluate the composite liquid beverage (CLB) based on the same source for *Lonicera caerulea* and other medicinal and edible materials. **Methods** Based on the binding rate of cholates, *Lonicera caerulea*, *Auricularia* and *Crataegus pinnatifida* were selected as the main raw materials and the ratio was optimized. Single-factor experiment, response surface experiment and more objective electronic tongue experiment were used to determine the amount of additives in the formulation, and the changes of physical properties, composition content and functional characteristics of CLB before and after sterilization were measured to evaluate

收稿日期: 2024-12-11

第一作者: 李少峰(2001—), 硕士研究生, 主要研究方向为特种食药与生物化工。E-mail: 15276241187@163.com

*通信作者: 张华(1977—), 女, 副教授, 主要研究方向为天然产物功能成分发掘与应用、特种高值化功能性食品研究。E-mail: zhuhua@hit.edu.cn

王振宇(1957—), 男, 教授, 主要研究方向为生物活性物质分离、新资源食品及特种食药开发。E-mail: wzy219001@163.com

the feasibility of pasteurization. **Results** The optimal ratio of extracts of *Lonicera caerulea*, *Auricularia* and *Crataegus pinnatifida* was 20:8:5 (V:V:V). The supplemental amounts of excipients were: Erythrolitol 13.00%, carboxymethyl cellulose (CMC) 0.40%, potassium sorbate 0.03%, soybean polysaccharide 0.50%. Before and after CLB sterilization, the polymer dispersity index (PDI) was less than 1, the centrifugal stability coefficient was more than 90%, and the chroma ΔE was less than 2, which showed good stability. The differences in soluble solids, pH, turbidity, centrifugal stability coefficient, hydroxyl radical scavenging rate, and active ingredients before and after CLB pasteurization were not significant, and it had good shear characteristics, indicating the feasibility of the sterilization method. Its viscosity value approached that of milk (0.01 Pa·s), and it had a good drinking taste. **Conclusion** This study provides a theoretical basis for expanding the development of *Lonicera caerulea* with poor palatability and the application of plant-derived health beverage.

KEY WORDS: *Lonicera caerulea*; bile acid binding rate; composite liquid beverage; response surface analysis; sensory evaluation

0 引言

随着人们生活水平的不断提升, 日常生活中的膳食结构也发生了巨大变化, 长时间的高脂饮食会诱发机体内多种慢性疾病如高血压、高脂血症、非酒精性脂肪肝等的发生, 增加肝脏代谢负担的同时影响脂肪细胞及外周组织的脂肪含量, 同时导致低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)的累积^[1]。体内脂质水平过高时会阻塞血管, 从而导致脂肪肝、动脉粥样硬化^[2]或心血管和脑血管疾病^[3]。长期的脂肪肝可能进一步发展为肝硬化甚至肝癌^[4], 研究发现, 胆酸盐结合能力的提升能够促进脂肪消化和吸收并有助于降低血液中胆固醇水平, 具有潜在的降脂能力^[5-6], 通过模拟人体生理环境, 基于不同天然产物对胆酸盐的结合能力, 从而筛选具有降脂功能的原料, 开发健康食品^[7]。

相较于化学药物, 一些天然产物及其提取物对人体几乎无毒副作用, 在解决亚健康和代谢性疾病问题上有了更好的突破口。近年来, 随着人们的健康意识不断提高, 许多研究都关注植物化学物质的降脂益处。基于胆酸盐结合能力对具有降脂功能的天然产物进行筛选, 其中, 蓝靛果(*Lonicera caerulea*)是忍冬属蓝果忍冬的变种, 含有较高的维生素 C、总酚和总花色苷, 可以促进 ABC 家族蛋白的表达, 从而促进胆固醇降解^[8]; 黑木耳(*Auricularia*)多糖能够吸附血液中的脂肪, 防止脂肪沉积和血栓的形成^[9]; 山楂(*Crataegus pinnatifida*)中的山楂黄酮具有抗动脉粥样硬化、降血脂的功效^[10]。

本研究将传统食药资源与协同理念相结合, 基于胆酸盐结合率确定复合液态饮品(composite liquid beverage, CLB)主要原料, 通过离心沉淀率及感官评价确定辅料及其添加量^[11], 并通过杀菌前后物性指标、主成分含量、羟自由基清除率及流变学特性的变化来综合评价 85 °C 条件

下杀菌 30 min 工艺的可行性, 既保留蓝靛果独特的风味又能为特定人群提供降脂思路, 为蓝靛果产品高值化开发提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

蓝靛果(鲜果)、黑木耳(干果)、山楂(鲜果)、荷叶(*Lotus leaf*)(干果)、魔芋(*Amorphophallus*)(干果)、决明子(*Cassia tora* Linn)(干果)、绞股蓝(*Gynostemma*)(干果)分别取自黑龙江省七台河市勃利县吉兴河林场、黑河市瑷珲山珍生物科技有限公司、山东沂蒙山山楂农家果园、安徽首丰生物科技有限公司、河南珍源食品配料有限公司、亳州市存誉堂健康产业发展有限公司、桂林天堂漓江特产有限公司。

硫酸亚铁、氢氧化钠、硫酸亚铁、甲醇、亚硝酸、硝酸铝、磷酸盐缓冲钠(phosphate buffered sodium, PBS)片剂(分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司); 过氧化氢(分析纯, 南京化学试剂股份有限公司); 铁氰化钾(分析纯, 天津永晟精细化工有限公司); 无水乙醇(分析纯, 天津永大化学试剂有限公司); 盐酸、硫酸(分析纯, 哈尔滨世纪阳光经贸有限公司); 苯酚葡萄糖、芦丁、甘氨酸钠、牛磺胆酸钠、胃蛋白酶、胰蛋白酶(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司); 赤藓糖醇、山梨酸钾(食品级, 山东尊宏生物科技有限公司); 果胶酶、羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)(食品级, 河南中辰生物科技有限公司)。

ALC-210 电子分析天平(精度 0.1 mg, 赛多利斯科学仪器有限公司); H2050R 低温超高速离心机(湖南湘仪实验仪器开发有限公司); KQ-500DE 数控超声波提取器(昆山市超声仪器有限公司); MODEL550 酶标仪(美国 Bio-Rad 公司); SA402 电子舌(日本 Insent 公司); DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒电热恒温鼓风干燥箱有限公司); DH5000A 电热恒温培养箱、FW177 中草药粉碎机(天津市

泰斯特仪器有限公司); R1005 真空旋转蒸发器(郑州长城科工贸有限公司); PHS-3EpH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); T6 紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司); MARS40 高级旋转流变仪(美国赛默飞世尔科技公司); TS7708 分光测色仪(深圳市三恩时科技有限公司); ZS90 纳米粒度、ZETA 电位分析仪(英国 Marlven 公司); 200 电子顺磁共振波谱仪(国仪量子技术有限公司); Vortex-1 漩涡震荡器(上海沪析实业有限公司); DSX-18L-I 手提式高压蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); HH-W600 数显恒温水浴锅(中国金南有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 原料预处理

将用于筛选的 6 种原料清洗粉碎后, 过 40 目筛, 备用。准确称取各原料 10.00 g, 料水比 1:10 (g/mL), 于 50 °C、400 W 条件下超声辅助提取 120 min, 提取 2 次, 离心取上清液, 合并二次上清滤液, 50 °C 旋转蒸发浓缩, 储存在 4 °C 冰箱中备用。

1.2.2 胆酸盐标准曲线的绘制

分别称取甘氨酸胆酸钠 ($M=487.6$) 和牛磺胆酸钠 ($M=537.6$) 适量置于烧杯中, 加 pH 6.3 的 PBS (0.1 mol/L) 缓冲液充分溶解并定容于 100 mL 容量瓶, 摇匀, 配制出对照品溶液; 随后用 PBS 溶液稀释, 得到不同质量浓度梯度的标准溶液。分别取上述不同梯度的标准溶液 2.5 mL 于 10 mL 具塞试管中, 加入 7.5 mL 质量浓度 60% H_2SO_4 , 于 70 °C 水浴 25 min, 取出冰浴 5 min, 用紫外分光光度计测定各个试管中的溶液在 387 nm 处的吸光度, 以胆酸盐浓度为横坐标, 所测吸光度为纵坐标, 绘制甘氨酸胆酸钠、牛磺胆酸钠标准曲线。以上溶液均现配现用。

1.2.3 基于胆酸盐结合率的主成分筛选

取 2 mL 提取物提取液于烧杯中, 向每只烧杯中加入质量浓度 10 mg/mL 的胃蛋白酶溶液(以 pH=6.3 的 0.1 mol/L PBS 缓冲液配制)3 mL 和浓度为 0.01 mol/L 的 HCl 溶液 1 mL, 于 37 °C 恒温振荡培养箱中消化 1 h(模拟胃消化环境); 以 0.1 mol/L 的 NaOH 将溶液调至 pH 为 6.3, 加入 4 mL 10 mg/mL 胰蛋白酶溶液, 于 37 °C 恒温振荡培养箱中消化 1 h(模拟胃肠道环境)。体外消化完成后, 向烧杯中加入 4 mL 甘氨酸胆酸钠和牛磺胆酸钠对照品溶液, 在 37 °C 恒温振荡培养箱中振荡 1 h (90 r/min), 然后在离心机中以 6000 r/min 离心 20 min, 取上清液 2.5 mL 于 10 mL 具塞试管中, 加入 7.5 mL 质量浓度 60% H_2SO_4 , 于 70 °C 水浴 25 min, 取出冰浴 5 min, 在 387 nm 处测定吸光度, 每个样品平行 3 次, 并按式(1)计算结合率^[12]。

$$\text{胆酸盐结合率}/\% = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c_1 为反应溶液中初始胆酸盐质量浓度(mg/mL), c_2 为

反应结束后溶液中剩余的胆酸盐质量浓度(mg/mL)。

1.2.4 CLB 配方优化

(1) 感官评价

感官评价方法参考文献[13]并稍作修改, 10 名专门培训的评价人员(不同地域、不同性别、不同年龄), 对 CLB 从色泽、风味、口感、状态 4 个方面进行感官评价, 总分为 100 分, 评价标准见表 1。

表 1 CLB 感官评分标准
Table 1 CLB sensory evaluation criteria

评定项目	评分标准/分
色泽 (10分)	具有应有的颜色, 蓝紫色或紫红色, 光泽度好(10分)
	颜色正常但略不均匀, 光泽度较好(5~9分)
	颜色过深或过浅, 光泽度一般(1~4分)
	颜色不正常, 过浅, 光泽度不好(0分)
风味 (30分)	自然香气, 香气协调, 无不良气味(30分)
	有果香, 香气较协调, 几乎无不良气味(15~29分)
	无果香, 香气缺乏协调性, 略有不良气味(1~14分)
	香气极度不协调, 不良气味明显, 甜味太淡或太浓(0分)
口感 (50分)	酸甜味适宜, 无涩味, 无异味, 醇厚感明显(50分)
	酸甜味稍浓或稍淡, 几乎无涩味、异味, 醇厚感较明显(20~49分)
	酸甜味较浓或较淡, 略有涩味, 略有异味, 醇厚感稍淡(1~19分)
	酸甜味太浓或太淡, 涩味明显, 有异味, 无醇厚感(0分)
状态 (10分)	液体均匀一致, 口感细腻, 黏稠适中(10分)
	液体较均匀, 口感较细腻, 黏稠适中(4~9分)
	液体稍不均匀, 口感略粗糙, 较黏稠或较稀(1~3分)
	液体明显不均匀, 口感很粗糙, 太稠或太稀(0分)

(2) 单因素实验筛选 CLB 稳定剂和辅料添加量的优化

根据 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》初步确定赤藓糖醇、CMC、山梨酸钾、大豆多糖的添加量, 通过离心稳定率进一步筛选优化。将空管离心管称重, 记作 m_0 (mg); 称取一定质量的样品于离心管中, 得到总质量 m_1 (mg); 在 4000 r/min 条件下离心 20 min 后倒出上清液, 随后称取离心后质量 m_2 (mg)。样品质量为 $(m_1 - m_0)$, 样品离心沉淀质量为 $(m_2 - m_0)$, 随后测得样品离心沉淀率, 见式(2)。

$$C/\% = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

(3) 响应面分析验证及辅料配方确定

响应面实验设计: 以单因素实验为基础, 对 4 个因素进行响应面分析, 以 CLB 的感官评价分数为响应值, 设计

结果见表2。

表2 响应面分析因素与水平设计

Table 2 Response surface analysis factors and horizontal design

水平	因素			
	A(赤藓糖醇添加量)/%	B(CMC添加量)/%	C(山梨酸钾添加量)/%	D(大豆多糖添加量)/%
-1	9	0.1	0.01	0.3
0	12	0.3	0.03	0.5
1	15	0.5	0.05	0.7

(4)电子舌验证 CLB 复配配方

取制备好的蓝靛果提取液、黑木耳提取液、山楂提取液及感官优化前后的 CLB 进行电子舌的测定。

1.2.5 巴氏杀菌对 CLB 的影响

85 °C下杀菌 30 min, 在 CLB 成分和状态稳定的前提下, 利用较低的温度既可杀死病菌又能保持物品中营养物质物性和活性成分不变。

(1)巴氏杀菌对 CLB 物性指标的影响

粒径分析: 参见文献[14]并稍作修改, 在室温下将 1 mL 稀释后的样品加入到以水为介质的准备池中, 在 0.3 nm~10.0 μm 范围内用激光束进行照射。

浊度测定: 先前用蒸馏水将样品稀释 100 倍, 使用分光光度计在 420 nm 下测定 CLB 液态饮品的吸光度水平。吸光度读数的结果与浊度值相关。取 3 次平行实验的平均值。

pH测定: 使用数字 pH 计在环境温度[(25±1) °C]下测量 CLB 液态饮品的 pH。

离心稳定系数测定: 检测波长设为 720 nm, 测定稀释 100 倍 CLB 以及于 4000 r/min 下离心 10 min 后上清液的吸光度值, 得到吸光度 X_1 及 X_2 , 稳定系数 W 为 X_2 和 X_1 的比值, 若 $W \geq 90\%$, 则稳定性较好。

可溶性固形物测定: 参考文献[15]并稍作修改。参照 GB/T 12295—90《水果、蔬菜制品 可溶性固形物含量的测定 折射仪法》, 采用阿贝折光仪对杀菌前后 CLB 中的可溶性固形物进行测定。

色差测定: 参考吕桂芳等[16]的方法, 测定亮度值 L^* 、红度值 a^* 、黄度值 b^* 、饱和度 C^* 、色调 h° , 并计算总颜色变化 ΔE , 观察总颜色的变化。

(2)活性成分测定

①花青素含量测定

采用盐酸甲醇法[17]测定花青素含量, 准确吸取样品 100 μL, 置于 50 mL 容量瓶中, 加入约 40 mL 2%盐酸甲醇溶液, 20 °C 超声水浴处理 20 min, 放置 10 min 至室温后, 用 2%盐酸甲醇溶液定容, 3500 r/min 转速离心 15 min, 取上清液测定吸光度值, 代入公式(3)计算含量。

$$C/\% = \frac{A \times M \times V_1 \times D_F}{\varepsilon \times m \times L} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A 为吸光度; D_F 为样品稀释倍数; M 为矢车菊-3-葡萄糖苷的相对分子质量(449.2); ε 为矢车菊-3-葡萄糖苷的消光系数(26900); m 为样品质量(mg); L 为比色皿光程。

②多糖含量检测

采用苯酚硫酸法[18]测定多糖含量, 在 490 nm 下测得吸光度并绘制标准曲线, 随后吸取 1.0 mL 样品测定液于 20 mL 具塞试管中, 按照绘制标准曲线的方法测定样品吸光度。

③黄酮含量检测

采用芦丁对照法[19]测定 CLB 总黄酮含量, 按照测定标准曲线的方法测定供试品中总黄酮浓度, 代入公式(4)计算样品总黄酮含量。

$$X = \frac{C \times V_1 \times V_3 \times 100}{V_2 \times M \times 1000} \quad (4)$$

式中: X 为试样中总黄酮百分含量, 以芦丁($C_{27}H_{30}O_{16}$)计; C 为标准曲线上读出供试溶液中总黄酮的质量浓度(mg/mL); V_1 为试样定容体积(mL); V_2 为吸取供试液体积(mL); V_3 为显色定容体积(mL); M 为试样取样量(mL)。

(3)杀菌对 CLB 羟基自由基清除率的影响

羟自由基清除率的测定方法参考王英特等[20]并稍作修改, 分别移取不同质量浓度(8.0、4.0、2.0、1.0、0.5 mg/mL)的 CLB 样品 50 μL, 加入 40 μL 0.2 mmol/L $FeSO_4$ 的水溶液、40 μL 的双蒸水和 40 μL 0.1 mol/L 5,5-二甲基-1-吡咯啉-N-氧化物(5,5-dimethyl-1-pyrroline N-oxide, DMPO)的水溶液, 混合均匀后加入 40 μL 0.1% H_2O_2 , 混合后立即取样, 用微量注射器取上清液注入 Teflon 毛细管中, 将毛细管对折, 插入顺磁石英样品管底部, 将样品管插入谐振腔中心位置进行电子顺磁共振光谱法(electron paramagnetic resonance, EPR)检测。

(4)杀菌对 CLB 静态流变学特性的影响

静态流变学特性分析参见尚琪等[21]测定方法, 采用流变仪在 25 °C 下对 CLB 进行静态流变学特性分析, 剪切速率范围为 0.1~100.0 s^{-1} , 观察 CLB 黏度变化。

1.3 数据处理

利用 Excel 2017 软件记录并整理实验数据, 结果以均值±标准偏差表示, 使用 Origin 2024 和 Graphpad prism 8 进行作图和数据分析, 用 Design Expert 13.0 分析实验数据, $P < 0.05$ 为差异显著, 所有结果平行测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 CLB 配方筛选及优化

2.1.1 CLB 主成分的筛选及配比优化

甘氨酸酸钠与牛磺胆酸钠标准曲线的线性方程为: $Y = 11.753X + 0.0111$ (r^2 为 0.99900)、 $Y = 6.9969X - 0.0006$ (r^2 为 0.99918), 说明该标准曲线拟合具有一定的可靠性。

通过查阅降血脂活性成分的相关文献[22], 本研究选取蓝靛果作为 CLB 的主成分, 对具有相同生药量质量浓度(100 mg/mL)的魔芋、绞股蓝、山楂、黑木耳、荷叶、决明子 6 种原料进行筛选, 以蓝靛果提取液为基础, 通过体外模拟胃肠道消化模型, 根据与胆酸盐结合能力, 筛选出具有最佳胆酸盐结合率的提取物。结果如图 1 所示, 最终筛选出蓝靛果、黑木耳及山楂提取液为 CLB 主成分。

将上述筛选出的黑木耳、山楂提取液混合, 通过与胆酸盐的结合能力进行配比筛选, 确定配比后再与蓝靛果提取液进行配比筛选出最终主成分的配比。黑木耳山楂提取液按照上述体积比混合后, 如图 2 所示, 当对应体积比为 8:5 时, 甘氨酸胆酸钠、牛磺胆酸钠两种胆酸盐结合率最高。当对应体积比从 8:5 变化到 2:5 时, 提取液对两种胆酸盐的结合能力均有所下降, 确定黑木耳、山楂添加比例后, 将黑木耳提取液、山楂提取液按照 8:5 的体积混合, 将其与蓝靛果提取液按照 2:5、2:4、2:3、2:2、3:2、4:2 体积比混合, 通过两种胆酸盐结合率进行比较筛

选。当黑木耳山楂复配物提取液与蓝靛果提取液体积比为 2:3 时, 两种胆酸盐结合率最高。因此, 最终筛选出蓝靛果提取液、黑木耳提取液及山楂提取液的最优配比为 20:8:5 ($V:V:V$)。

2.1.2 单因素实验筛选 CLB 稳定剂和辅料添加量的优化

分别在常温(25 °C)及冷藏(0 °C)条件下添加 0.4% 稳定剂筛选出合适的两种稳定剂进行添加量的优化。如图 3 所示, CLB 等量添加 5 种添加剂在常温存放条件下, 与空白对照组(14.19%)相比, 各组离心沉淀率均有所下降, 其中 CMC、黄原胶、三聚磷酸钠、大豆多糖组离心沉淀率分别下降了 33.91%、28.99%、42.34%、38.29%, 稳定剂效果更好; 而在冷藏存放条件下, 与空白对照组(17.19%)相比, 黄原胶(20.07%)与三聚磷酸钠(24.18%)这两组的离心沉淀率反而更高, 表明这两种添加剂受温度影响较大, 在低温条件下更容易发生聚集现象, 而 CMC、大豆多糖组分别下降了 38.46%、46.16%, 效果相对更好, 因此选用 CMC、大豆多糖作为稳定剂。

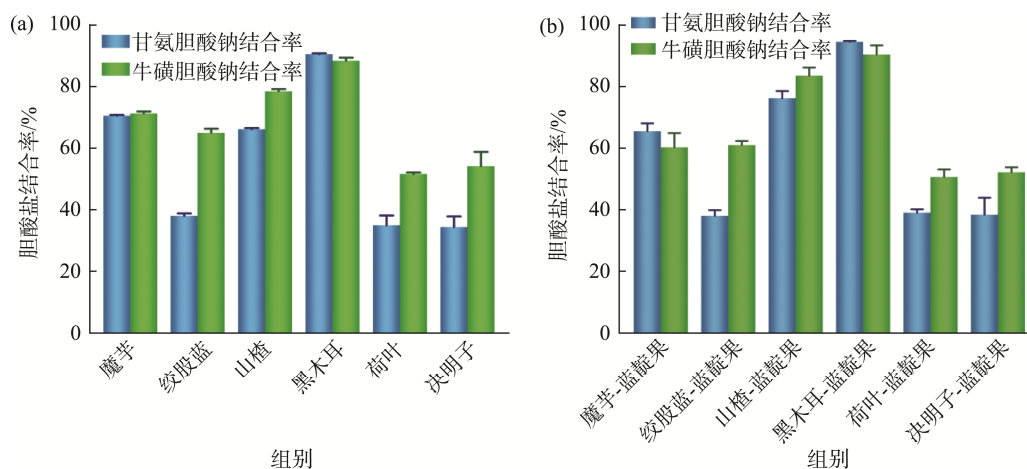


图 1 6 种原料提取物(a)和蓝靛果复配提取物(b)的甘氨酸胆酸钠、牛磺胆酸钠结合率

Fig.1 Binding rates of sodium glycocholate and sodium taurocholate in the extract of 6 kinds of raw materials (a) and the compound extract of indigo fruit (b)

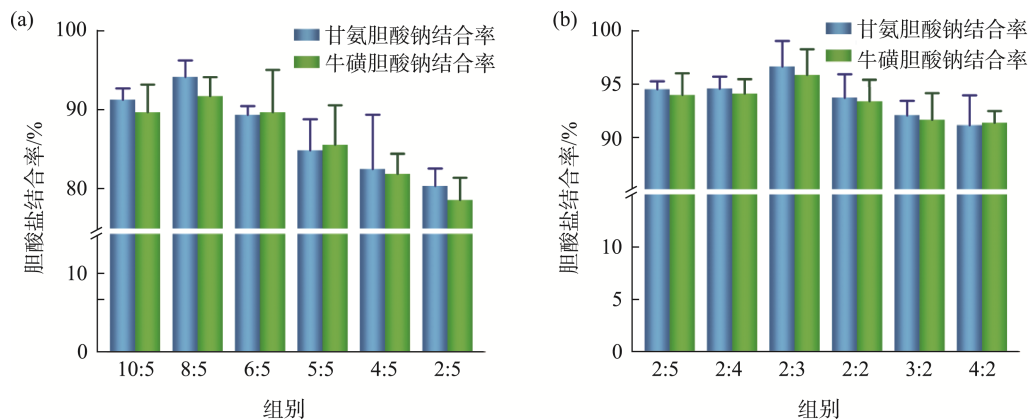


图 2 黑木耳山楂复配物(a)及黑木耳山楂复配物-蓝靛果(b)与两种胆酸盐的结合率

Fig.2 Binding rates of black fungus hawthorn complex (a) and black fungus hawthorn complex-indigo fruit (b) with two bile salts

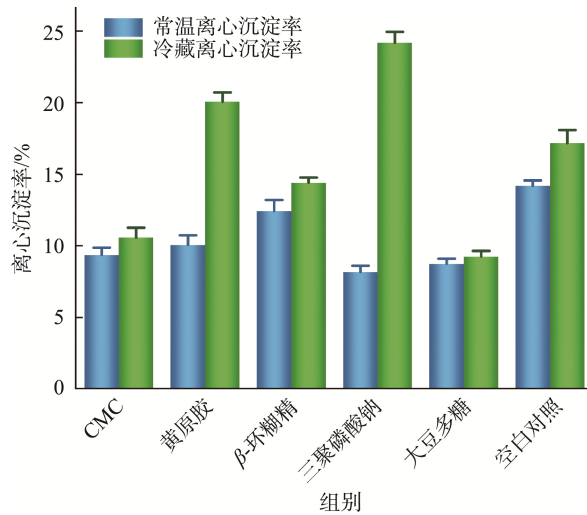


图 3 不同稳定剂添加对 CLB 离心沉淀率的影响
Fig.3 Effects of adding different stabilizers on the centrifugal precipitation rates of CLB

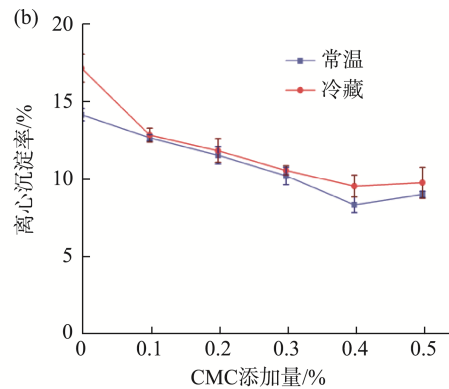
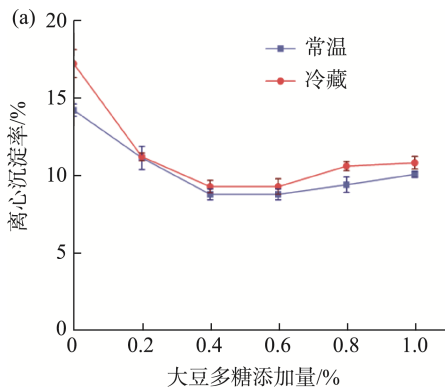


图 4 大豆多糖添加量(a)和 CMC 添加量(b)对 CLB 稳定性的影响

Fig.4 Effects of soybean polysaccharide addition (a) and CMC addition (b) on the stability of CLB

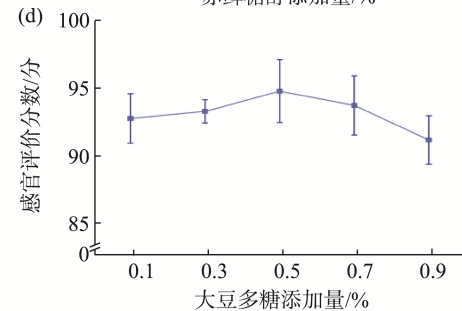
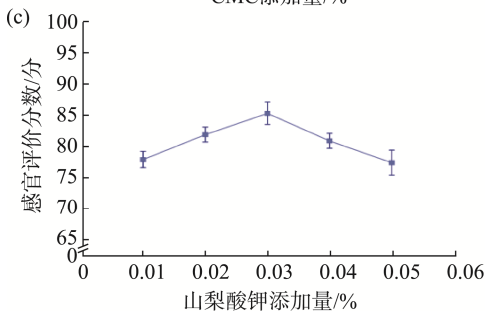
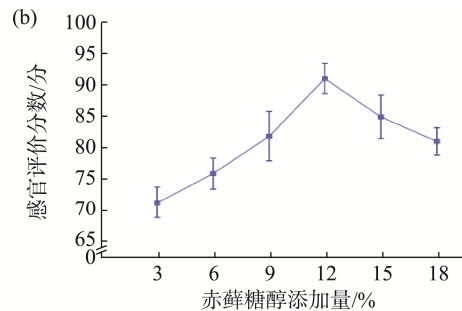
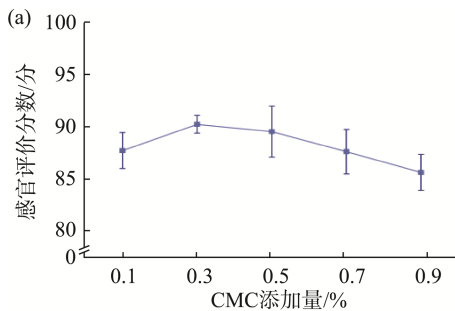


图 5 CMC (a)、赤藓糖醇(b)、山梨酸钾(c)和大豆多糖(d)添加量对 CLB 感官评价分数的影响

Fig.5 Effects of CMC (a), erythritol (b), potassium sorbate (c) and soybean polysaccharide (d) addition on the sensory evaluation score of CLB

通过单因素实验进行稳定剂添加量的优化,如图 4 所示,随着大豆多糖的添加,离心沉淀率在 0.4%~0.8%范围内最低并保持稳定,常温下离心沉淀在 8.75%~9.38%范围内,冷藏时离心沉淀率在 9.25%~10.58%范围内,离心沉淀率逐渐趋于稳定。随着稳定剂 CMC 的添加,CLB 离心沉淀率逐渐下降,在 0.3%~0.5%范围条件下,常温下离心沉淀率在 8.38%~10.23%范围内,冷藏时离心沉淀率在 9.57%~10.59%范围内,离心沉淀率逐渐趋于稳定。因此,CMC 的最佳添加量在 0.3%~0.5%范围内,大豆多糖的最佳添加量在 0.4%~0.8%范围。

通过感官评价分别对 CMC、赤藓糖醇、山梨酸钾、大豆多糖添加量进行优化。其添加量对液态饮品感官评价的影响如图 5 所示,随着 CMC 的添加,感官评分最高为 90.2 分,此时 CMC 添加量为 0.3%。赤藓糖醇添加量由 3% 增加到 12%,感官评分从 71.4 增加到 91.2 分,赤藓糖醇含量继续添加导致 CLB 口味过甜而使感官评分下降。山梨酸

钾的加入量从 0.01%增加到 0.03%时, 感官评分从 78.2 分增加到 85.6 分, 当山梨酸钾添加量为 0.03%时, CLB 口感最为细腻, 厚重。但随着山梨酸钾的继续加入, 感官评分呈现下降趋势, 整体较为浑浊, 黏度较大。当山梨酸钾添加量为 0.05%时会开始出现山梨酸钾的咸味。大豆多糖的添加量为 0.5%时感官评价分数最高, 达到 94.7 分, 可以看出, 大豆多糖的添加对于 CLB 感官评价分数整体都有所提升。因此选择 CMC 的添加量为 0.1%~0.5%, 甜味剂赤藓糖醇的添加量为 9%~15%, 山梨酸钾添加量为 0.02%~0.04%, 大豆多糖的添加量为 0.3%~0.7%进行响应面实验。

2.2 响应面实验及分析验证和辅料配方确定

根据单因素实验结果, 设计响应面实验。表 3 是 29 个实验点的实验结果。以赤藓糖醇添加量(A)、CMC 添加量(B)、山梨酸钾添加量(C)、大豆多糖添加量(D)为自变量, 以 CLB 的感官评分的平均值为响应值。

表 3 响应面实验设计及感官评分
Table 3 Response surface experimental design and sensory evaluation

序号	A	B	C	D	感官评分
1	0	1	-1	0	93.5
2	1	1	0	0	95.3
3	0	0	-1	-1	90.0
4	0	0	1	-1	93.2
5	-1	-1	0	0	91.7
6	0	0	-1	1	92.5
7	1	0	0	-1	93.6
8	0	0	1	1	92.1
9	0	-1	-1	0	91.1
10	1	0	0	1	92.2
11	0	1	1	0	93.4
12	-1	0	0	-1	89.2
13	0	-1	1	0	92.8
14	0	0	0	0	95.6
15	0	0	0	0	94.9
16	0	0	0	0	95.4
17	-1	0	0	1	93.5
18	0	1	0	-1	92.2
19	1	0	-1	0	92.6
20	0	-1	0	-1	91.5
21	1	-1	0	0	90.8
22	0	1	0	1	92.9
23	0	0	0	0	95.8
24	1	0	1	0	92.8
25	-1	0	-1	0	89.8
26	-1	0	1	0	90.4
27	0	0	0	0	95.8
28	0	-1	0	1	92.7
29	-1	1	0	0	90.8

用 Design Expert 13.0 分析实验数据, 见表 4。方差分析结果显示, 模型 $P < 0.01$, 模型极显著。失拟项 $P = 0.1840 > 0.05$, 表明模型稳定。其中回归模型的 $R^2 = 0.9560$, 其拟合度较好, 校正系数 $R^2_{adj} = 0.9120$, 表明本研究中 91.20%的数据可以使用^[23]。所有一次项及二次项, 交互项 AB、AD、CD 均可显著影响响应值($P < 0.05$)^[24]。其中, $F_A = 39.19$ 、 $F_B = 15.57$ 、 $F_C = 7.48$ 、 $F_D = 10.64$, 即各因素对感官评分的影响程度为: $A > B > D > C$ 。

建立各因素以及交互因素对 CLB 的感官评分的回归模型, 二次多项式回归拟合方程如式(5), 对回归模型进行分析, 各因素及其交互作用和平方项显著性的影响。

$$Y = +95.50 + 0.9917A + 0.6250B + 0.4333C + 0.5167D + 1.35AB - 0.14C - 1.42AD - 0.45BC - 0.125BD - 0.9CD - 2.02A^2 - 1.27B^2 - 1.83C^2 - 1.66D^2 \quad (5)$$

式中, Y 为感官评分值, A、B、C、D 为赤藓糖醇、CMC、山梨酸钾、大豆多糖添加量的编码值。

表 4 回归模型方差分析表

Table 4 Analysis of variance table for regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	91.56	14	6.54	21.72	<0.0001	**
A	11.80	1	11.80	39.19	<0.0001	**
B	4.69	1	4.69	15.57	0.0015	**
C	2.25	1	2.25	7.48	0.0161	*
D	3.20	1	3.20	10.64	0.0057	**
AB	7.29	1	7.29	24.21	0.0002	**
AC	0.0400	1	0.0400	0.1328	0.7210	
AD	8.12	1	8.12	26.97	0.0001	**
BC	0.8100	1	0.8100	2.69	0.1233	
BD	0.0625	1	0.0625	0.2076	0.6557	
CD	3.24	1	3.24	10.76	0.0055	**
A ²	26.49	1	26.49	87.97	<0.0001	**
B ²	10.48	1	10.48	34.79	<0.0001	**
C ²	21.80	1	21.80	72.40	<0.0001	**
D ²	17.84	1	17.84	59.24	<0.0001	**
残差	4.22	14	0.3011			
失拟	3.66	10	0.3656	2.61	0.1840	
纯误差	0.5600	4	0.1400			
总离差	95.78	28				

注: ** $P < 0.01$ 为极显著; * $P < 0.05$ 为显著。

赤藓糖醇、CMC、山梨酸钾、大豆多糖 4 个因素交互作用的三维响应面如图 6 所示, 在设定条件范围内可看出因素交互作用较好^[25-26]。

经软件分析, 各因素的添加量为: 赤藓糖醇 13.253%、CMC 0.392%、山梨酸钾 0.031%、大豆多糖 0.488%, 感官评价分数预测值为 95.850。根据响应面实验结果, 对上述参数进行验证。各组分添加量为: 赤藓糖醇 13.00%、CMC 0.40%、山梨酸钾 0.03%、大豆多糖 0.50%, 感官评分为 95.164, 与预测值接近, 进一步验证了实验结果。

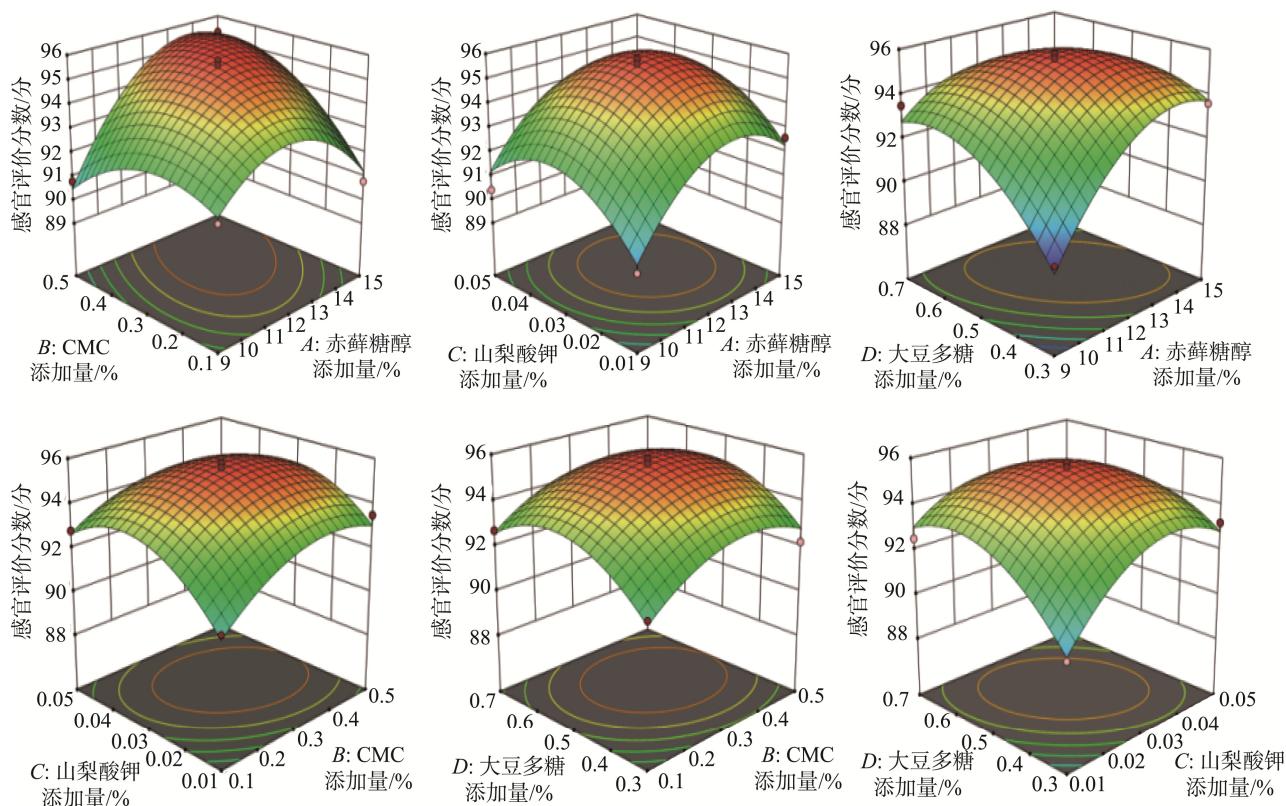


图 6 各因素交互作用影响感官评分的三维响应面
Fig.6 Three-dimensional response surface of the interaction effect of various factors on sensory evaluation

2.3 电子舌验证 CLB 复配配方

如图 7 所示, 复配后的 CLB 咸度响应值(-3.17)相较于黑木耳提取液有所下降; 对其甜味进行分析发现, CLB 甜味相较于 3 种提取物处于中间水平。

复配后的 CLB 经过感官优化后, 各个味觉值得到进一步改善, 相较于优化前 CLB, 感官优化后 CLB 的酸味值(-3.15)、苦味值(-1.15)、涩味值(1.53)都有明显的下降, 而丰富度(-4.23)、甜味(3.15)也都有明显的上升。与感官评价结果相似, 进一步客观印证了感官评价结果。

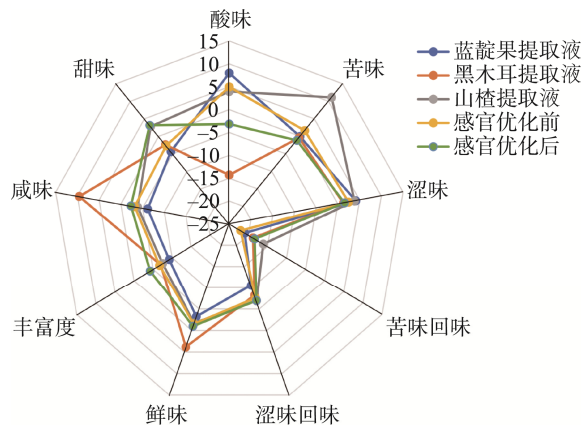


图 7 CLB 电子舌评价雷达图
Fig.7 Evaluation radar image of CLB electronic tongue

2.4 巴氏杀菌对 CLB 的影响

2.4.1 对 CLB 物性的影响

巴氏杀菌前后的 CLB 的粒径分布见图 8, CLB 巴氏杀菌前平均粒径为 913.9 nm, 聚合物分散性指数(polymer dispersity index, PDI)为 0.389, CLB 巴氏杀菌后成分的平均粒径为 927.7 nm, PDI 为 0.315。杀菌前后 PDI 均小于 1, 表明 CLB 在巴氏杀菌前后分布比较均匀, 体系稳定不易聚集成团, 具有良好的稳定性^[27-28]。热处理后虽粒径有所增大, 但差异不显著($P>0.05$)。对比可知 PDI 值由 0.389 下降为 0.315, 表明 CLB 在经过巴氏杀菌后成分的粒径大小分布更均匀, 粒子聚合度分布更窄, 分子量差异变小, 稳定性提高。

由表 5 可知, 热处理后 L^* 有所减小, 可能高温处理使 CLB 发生了氧化作用, 导致 CLB 的亮度值有所下降; 与巴氏杀菌前的样品相比, 巴氏杀菌后样品的 ΔE 为 1.28, 小于 2, 色泽变化不明显与文献报道一致^[29]。

测定 CLB 于巴氏杀菌前后的可溶性固形物、pH、浊度及离心稳定系数, 评价杀菌前后 CLB 稳定性的变化, 如表 6 所示。由结果可知, 巴氏杀菌后 CLB 的离心稳定系数由 90.41% 上升至 95.45%, 各组分中的固形物成分悬浮于 CLB 中, 表明其稳定性增加。CLB 经巴氏杀菌处理后 pH 由 3.45 ± 0.06 变成 3.41 ± 0.01 , 差异不显著($P>0.05$)^[30]。CLB 经巴氏杀菌处理后可溶性固形物含量由 $15.37\% \pm 0.31\%$ 变成 $15.02\% \pm 0.08\%$, 差异不显著($P>0.05$)。CLB 经巴氏杀菌处理

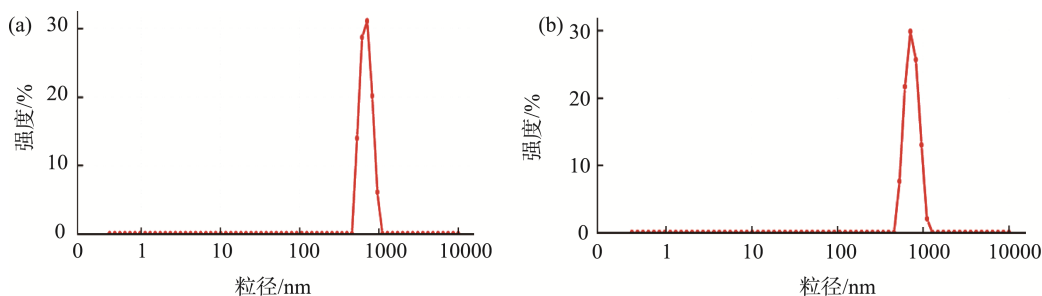


图 8 CLB 巴氏杀菌前(a)和杀菌后(b)粒径分析
Fig.8 Particle size analysis of CLB before (a) and after (b) pasteurization

表 5 巴氏杀菌对 CLB 色度的影响

Table 5 Effects of pasteurization on CLB chromaticity

样品	L^*	a^*	b^*	c^*	h°	ΔE
杀菌前	23.54±0.14 ^a	3.55±0.21 ^a	2.28±0.15 ^a	4.22±0.21 ^a	32.76±2.76 ^b	-
杀菌后	23.43±0.12 ^a	3.49±0.16 ^a	2.36±0.15 ^a	4.23±0.16 ^a	34.04±0.96 ^a	1.28

注: 同一列不同上标字母代表两者之间存在显著性差异($P<0.05$), 表 6 同。

表 6 CLB 液态饮品巴氏杀菌前后基础物性对比表

Table 6 Comparison table of basic physical properties of CLB liquid beverages before and after pasteurization

样品	可溶性固形物/%	pH (25 °C)	浊度	离心稳定系/%
杀菌前	15.37±0.31 ^a	3.45±0.06 ^a	0.145±0.003 ^a	90.41±0.75 ^a
杀菌后	15.02±0.08 ^a	3.41±0.01 ^a	0.124±0.004 ^b	95.45±1.35 ^a

后测浊度时的吸光度由 0.145 ± 0.003 降低至 0.124 ± 0.004 , 差异显著($P<0.05$), 浊度的降低对于液态饮品的稳定性的影响是积极的^[31]。

2.4.2 对 CLB 活性成分含量的影响

杀菌前 CLB 中花青素含量为 (73.2 ± 2.64) mg/100 mL, 杀菌后 CLB 中花青素含量为 (72.3 ± 1.37) mg/100 mL。对比分析发现, CLB 在超高温瞬时杀菌(ultra-high temperature instantaneous sterilization, UHT)后花青素含量出现少量下降, 但并不显著($P>0.05$)^[32]。

杀菌前 CLB 中多糖含量为 (6.03 ± 0.94) Glucose g/100 mL, 杀菌后 CLB 中多糖含量为 (6.12 ± 0.88) Glucose g/100 mL^[33]。对比分析发现, CLB 在巴氏杀菌后多糖含量出现少量上升, 但并不显著($P>0.05$)。杀菌前 CLB 中黄酮含量为

(123.81 ± 4.32) Rutin mg/100 mL, 杀菌后 CLB 中黄酮含量为 (112.85 ± 8.19) Rutin mg/100 mL^[34]。

2.4.3 对 CLB 羟基自由基清除率的影响

本研究利用 EPR 法对 CLB 的羟基自由基清除作用进行研究^[35], 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 光谱具有四重峰, 其峰高比例为 1:2:2:1, 超精细耦合常数为 $a_N=a_H=14.9$ G, 从而判定该峰为羟基自由基捕获峰^[36-37]。可以看出, 各稀释倍数未杀菌和已杀菌的 CLB 样品之间并无显著性差异。对于各待测样品组谱图中的峰高发生显著性改变, 但整体峰形相似, 对比发现空白组由于未加 CLB 导致其羟自由基峰强显著高于其他样品组, 从而表明 CLB 对羟基自由基有一定的清除作用, 仍具有抗氧化特性。

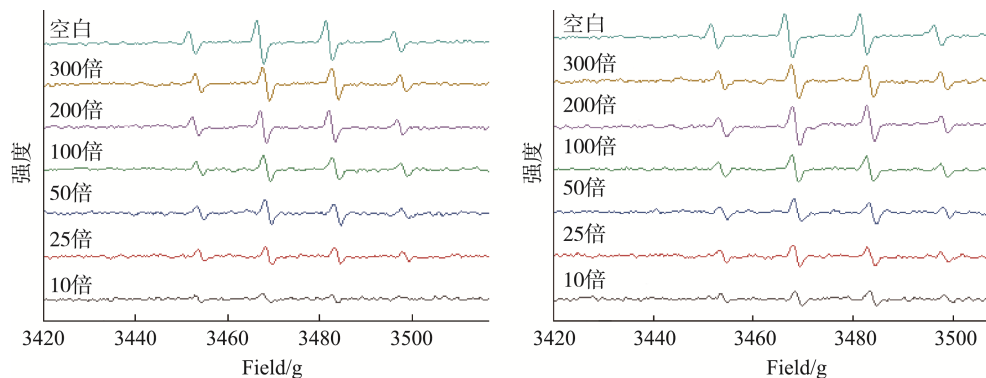


图 9 未杀菌 CLB (a)和已杀菌 CLB (b)光谱
Fig.9 Spectra of unsterilized CLB (a) and sterilized CLB (b)

2.4.4 对 CLB 流变学特性的影响

CLB 杀菌前后的剪切黏度变化如图 10 所示, CLB 杀菌前后黏度值均随剪切速率在 $0.1\sim 100.0\text{ s}^{-1}$ 范围内的不断增大而下降, 这表明 CLB 属于假塑性流体^[38]。由图 10 可知, 随着剪切速率增加, 黏度值变化较为明显, CLB 成分间的稳定结构被打乱, 分子间作用力减小, 导致黏度下降。横坐标增大到 1.0 s^{-1} 之前, 杀菌后 CLB 黏度显著小于杀菌前样品黏度值, 表明杀菌过程较好地增强了样品的稳定性、均一性, 从而降低样品整体黏度值。横坐标增大到 1.0 s^{-1} 及之后, 杀菌前后黏度值基本稳定变化不大, 表明溶液分子间作用力较小且分子量分布较为集中^[39]。杀菌前后黏度值稳定在 $0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 以下, 表明样品中分子粒径较小。杀菌前后样品的黏度值分别为 0.01018 、 $0.01068\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

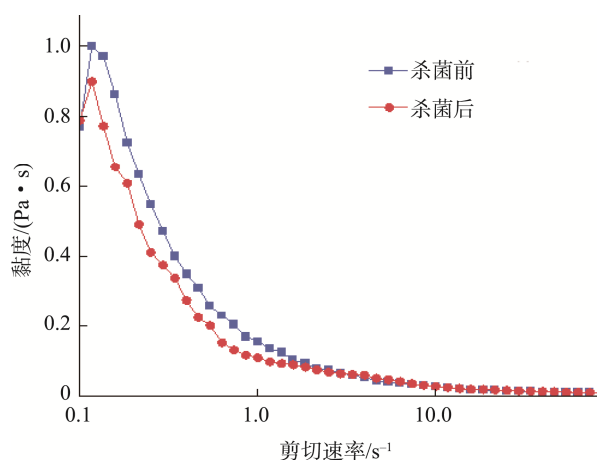


图 10 CLB 剪切黏度分析

Fig.10 Analysis of shear viscosities of CLB

3 结论

通过体外模拟胃肠道消化模型, 结合与胆酸盐结合能力, 筛选出蓝靛果、黑木耳及山楂提取液的最优配比为 $20:8:5 (V:V:V)$ 。通过响应面实验多方位对辅料添加量进行优化, 最终确定辅料添加量为: 赤藓糖醇 13.00% 、CMC 0.40% 、山梨酸钾 0.03% 、大豆多糖 0.50% 。实验过程中, 低温下饮品的离心沉淀率过高, 大豆多糖与 CMC 联用后离心沉淀率显著下降。采用电子舌进一步验证 CLB 复配配方, 复配后的 CLB 口感适中, 与响应面感官评分结果一致, 具有良好的口感和胆酸盐结合能力。

对制备的饮品进行理化指标测定, $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀菌 30 min 对粒度、离心稳定性等物性指标, 花青素、多糖、黄酮活性成分含量、总固形物含量、pH、色度等理化指标, 流变学特性及羟基自由基清除率没有造成显著性差异。基于蓝靛果及药食同源原料开发具有提高胆酸盐结合能力的 CLB, 能够有效地与胆酸盐结合, 从而促进胆固醇降解。既满足特定人群的消费需求, 又符合国家鼓励发展大健康产业政策, 对推动蓝靛果等相关产业发展具有积极作用。

参考文献

- [1] ALVAREZ E, PERSAUD R, SONIEGA-SHERWOOD J, *et al.* Critical illness causing marked hyperlipasemia [J]. *American Journal of Medicine*, 2019, 132(4): e540–e541.
- [2] TRAUGHBER AC, TIMINSKI K, PRINCE A, *et al.* Disulfiram reduces atherosclerosis and enhances efferocytosis, autophagy, and atheroprotective gut microbiota in hyperlipidemic mice [J]. *Journal of the American Heart Association*, 2024, 132(4): e033881.
- [3] SONG Q, KIKUMOTO A, SUN S, *et al.* High fat intake aggravates hyperlipidemia and suppresses fatty liver symptoms induced by a high-sucrose diet in rats [J]. *Food & Function*, 2024, 15: 10516–10526.
- [4] WU L, PENG R, ZHOU J, *et al.* Research progress on non-alcoholic fatty liver disease [J]. *International Journal of Biology and Life Sciences*, 2024, 7(3): 22–25.
- [5] 张振明. 胆汁酸盐对黄羽肉仔鸡小肠黏膜营养转运载体及消化酶的基因表达影响[D]. 西宁: 青海大学, 2022.
ZHANG ZM. Effect of bile salts on gene expression of nutrient transport vectors and digestive enzymes in small intestinal mucosa of yellow-feathered broilers [D]. Xining: Qinghai University, 2022.
- [6] 巫永华, 黄莉莉, 王解语, 等. 深共熔溶剂提取桑黄黄酮及体外降血糖、结合胆酸盐能力分析[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(11): 128–136.
WU YH, HUANG LL, WANG JY, *et al.* Analysis of the ability of deep eutectic solvent to extract Sanghuang flavonoids and hypoglycemic and bile acid *in vitro* [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(11): 128–136.
- [7] BELOBRAJIDIC PD, BROOK H, MARTIN JG, *et al.* β -glucan content and *in vitro* bile-acid binding capacity of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus* spp. [J]. *Food & Function*, 2024, 15: 9880–9887.
- [8] DAI Y, HE Y, MA Y, *et al.* Purification, structural analysis, and hypoglycemic activity of *Auricularia auricula-judae* polysaccharides extracted with natural deep eutectic solvents [J]. *Journal of Functional Foods*, 2024, 122: 106524.
- [9] 李军民, 牛恒立, 谢明全, 等. 山楂黄酮抗动脉粥样硬化及降血脂作用机制研究[J]. *中国临床药理学与治疗学*, 2023, 28(3): 276–282.
LI JM, NIU HL, XIE MQ, *et al.* Study on the anti-atherosclerosis and hypolipidemic mechanism of hawthorn flavonoids [J]. *Chinese Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics*, 2023, 28(3): 276–282.
- [10] DELIGIANNIDOU G, SYGKOUNA A, BERGHE VW, *et al.* Natural products from mediterranean diet: From anti-hyperlipidemic agents to dietary epigenetic modulators [J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2019, 20(10): 825–844.
- [11] MEYERDING GS, HE X, BAUER A. Neuronal correlates of basic taste perception and hedonic evaluation using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) [J]. *Applied Food Research*, 2024, 4(2): 100477.
- [12] 张宝杰, 郑璇, 刘美奇, 等. 山楂生、炒品果胶结构表征和体外降脂作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(21): 253–262.
ZHANG BJ, ZHENG Y, LIU MQ, *et al.* Structural characterization and lipid-lowering effect of hawthorn raw and fried pectin *in vitro* [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(21): 253–262.
- [13] 董荣建, 刘君超, 兰丽春, 等. 应用模糊数学建立黄年糕感官评价模型[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(23): 135–144.
DONG RJ, LIU JC, LAN LC, *et al.* Application of fuzzy mathematics to establish a sensory evaluation model of yellow rice cake [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(23): 135–144.
- [14] 刘艳兰, 谢俊文, 刘爽, 等. 低共熔溶剂提取绿豆皮木质素及其理化性质 [J/OL]. *中国粮油学报*, 1–11. [2024-12-07]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000950>

- LIU YL, XIE JW, LIU S, *et al.* Extraction of lignin from mung bean skin by eutectic solvent and its physicochemical properties [J/OL]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 1-11. [2024-12-07]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000950>
- [15] 吴丽君, 陈宸, 王识超, 等. 再造烟叶浓缩液可溶性固形物含量快速测定方法[J]. 食品工业, 2024, 45(7): 264-270.
WU LJ, CHEN C, WANG SC, *et al.* Rapid determination method for the content of soluble solids in reconstituted tobacco leaf concentrate [J]. The Food Industry, 2024, 45(7): 264-270.
- [16] 吕桂芳, 臧运平, 彭逸, 等. 万寿菊花瓣叶黄素含量与颜色系数的相关性分析[J]. 华中农业大学学报, 2024, 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/42.1181.S.20240529.1418.002>
LV GF, ZANG YP, PENG Y, *et al.* Correlation analysis between lutein content and color coefficient of *Tagetes erecta* L. petals [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/42.1181.S.20240529.1418.002>
- [17] 陈子凡, 董莹, 何思东, 等. 蓝莓及其提取物中花青素检测方法的研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(3): 69-72.
CHEN ZF, DONG Y, HE SD, *et al.* Research on the detection method of anthocyanins in blueberry and its extracts [J]. Food and Food Industry, 2021, 28(3): 69-72.
- [18] 徐清华, 王国明, 谢丽娟, 等. 西洋参花多糖的提取工艺优化及其含量测定[J]. 数理医药学杂志, 2024, 37(11): 806-814.
XU QH, WANG GM, XIE LJ, *et al.* Optimization of extraction process and determination of American ginseng flower polysaccharides [J]. Journal of Mathematical and Physical Medicine, 2024, 37(11): 806-814.)
- [19] 谷传凯. 基于高光谱技术的金线莲多糖与黄酮含量的无损检测[J]. 食品工业科技, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100154
GU CK. Nondestructive detection of polysaccharides and flavonoids of *Clematis chinensis* based on hyperspectral technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100154
- [20] 王英特, 张媛媛, 王昕, 等. 保健酒的配制及其羟基自由基清除率的测定[J]. 山西化工, 2022, 42(1): 9-12.
WANG YT, ZHANG YY, WANG X, *et al.* Preparation of health wine and determination of hydroxyl radical scavenging rate [J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(1): 9-12.
- [21] 尚琪, 赵保堂, 杨富民, 等. 黄原胶与瓜尔豆胶复配对藜麦汁流变学特性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(3): 64-73.
SHANG Q, ZHAO BT, YANG FM, *et al.* Effect of xanthan gum and guar gum on the rheological properties of quinoa juice [J]. Food and Fermentation Science and Technology, 2022, 58(3): 64-73.
- [22] 王刚. 降血脂茶饮及其制备方法, 四川: CN201811109337.0 [P]. 2018-11-27.
WANG G. Hypolipidemic tea and preparation method, Sichuan: CN201811109337.0 [P]. 2018-11-27.
- [23] PHANTU S, SUTTIARPORN P. CMMSE: A comparison of model fitting using different response surface designs for optimizing microwave-assisted simultaneous distillation and extraction in Khlu herbal tea essential oil production [Z]. 2024
- [24] KRABER S. Choosing a response surface design for research [J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2024, 40(1): 26-29.
- [25] TAREK EMRH. Evaluating the prediction power and accuracy of two smart response surface experimental designs after revisiting repaglinide floating tablets [J]. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 2024, 10(1): 1-5.
- [26] OTMAR GEISS, IVANA BIANCHI, HIND EH, *et al.* Particle size analysis of iron hydroxide adipate tartrate (IHAT) in a food supplement: Interlaboratory testing of a dynamic light scattering method [J]. Journal of Food Composition and Analysis (PA), 2024. DOI: 10.1016/j.jfca.2024.106866
- [27] A study on soil particle distribution and nutrient availability in maize-productive zones of Jagtial District, Telangana, India [Z]. 2024.
- [28] SHAN Z, SHIMIN W, QINYAN Y, *et al.* The influence of rolling pressure on the changes in non-volatile compounds and sensory quality of congou bCLBk tea: The combination of metabolomics, E-tongue, and chromatic differences analyses [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100989.
- [29] HUANG H, XIE C, ZHANG F, *et al.* Impact of pH and protein/polysaccharide ratio on phycocyanin-okra polysaccharides complex [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 284(P1): 138049.
- [30] MALLICK A. Study of estimation of hardness of water using pH-meter [J]. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry, 2024, 25(6): 78-86.
- [31] BREA J, VARELA JM, DAUDEY AG, *et al.* High-throughput nephelometry methodology for qualitative determination of aqueous solubility of chemical libraries [J]. SLAS Discovery, 2024, 29(3): 100149.
- [32] YUYAN G, HUAN Z, SHUANG S, *et al.* Anthocyanin: A review of plant sources, extraction, stability, content determination and modifications [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(12): 7573-7591.
- [33] TONG WD. A novel approach to determine residual aldehyde content in conjugated polysaccharides with 3-methyl-2-benzothiazolinonehydrazon (MBTH) by colorimetric method, automation, and HP-SEC [Z]. 2022.
- [34] SUBHI MS, SABRINA C, VÍCTOR C. Recent, advanced sample pretreatments and analytical methods for flavonoids determination in different samples [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2021, 138: 116220.
- [35] ROBERTO LS. EPR free radical scavenging activity on superoxide, hydroxyl and tertbutyl hydroperoxide radicals by common hydrophilic antioxidants: Effect of mixing and influence of glucose and citric acid [J]. European Food Research and Technology, 2023, 247.9: 1-13.
- [36] 李鸿飞, 卿德刚, 张娟, 等. 甘草渣中总黄酮清除·OH 自由基能力的研究[J]. 新疆医科大学学报, 2015, 38(2): 182-183, 186.
LI HF, QING DG, ZHANG J, *et al.* Study on the ability of total flavonoids to scavenge hydroxyl free radicals in licorice residue [J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2015, 38(2): 182-183, 186.
- [37] 李凌甫. 氯化钾调控聚- γ -谷氨酸发酵过程中黏度变化的规律及其机理探究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
LI LF. Potassium chloride regulates the viscosity change during poly- γ -glutamic acid fermentation and its mechanism [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [38] 吴诗雨, 陈楠, 杨文鸽, 等. 不同 pH 值条件下超声波辅助水浴提取对鱼鳞明胶凝胶特性、流变特性和结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 178-185.
WU SY, CHEN N, YANG WG, *et al.* Effect of ultrasonic-assisted water bath extraction on gel properties, rheological properties and structural properties of fish scale gelatin under different pH values [J]. Food Science, 2024, 45(15): 178-185.
- [39] ATUNA RA. Traditional processing methods reduced phytate in cereal flour, improved nutritional, functional and rheological properties [J]. Scientific African, 2022, 15: e01063.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)