

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80946

# 高静压技术对鲜切荒漠肉苁蓉品质及苯乙醇苷提取量的影响

石 硕<sup>1</sup> 李清昕<sup>1</sup> 额尔敦巴雅尔<sup>1</sup> 许万平<sup>2</sup> 董同力嘎<sup>1</sup> 云雪艳<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 乌兰察布实验中学, 内蒙古 乌兰察布 012000)

**摘要:** [目的] 探究高静压处理的压力、时间和切片厚度对鲜切肉苁蓉品质和苯乙醇苷提取量的影响。[方法] 采用单因素结合响应面试验的方法优化高静压处理在肉苁蓉中的应用参数。[结果] 单因素优化结果显示: 随着压力从 100 MPa 升高到 500 MPa 和处理时间从 10 min 延长到 25 min, 肉苁蓉色差值、硬度和苯乙醇苷提取量增加; 随着切片厚度增加 (2~10 mm), 肉苁蓉色差增加, 但硬度和苯乙醇苷提取量降低; 三者最优参数为 200~300 MPa、15~25 min、2~6 mm。响应面优化结果显示, 压力对苯乙醇苷提取量的影响更为显著; 最优条件为压力 294.341 MPa、时间 14.658 min、切片厚度 3.644 mm, 此时苯乙醇苷提取量较高, 为  $(5.35 \pm 0.21)$  mg/g。[结论] 高静压处理的压力作为主要因素改善了肉苁蓉的品质, 并促进了苯乙醇苷的提取, 而切片厚度的减薄效应和处理时间的适度延长作为次要因素影响苯乙醇苷提取量。

**关键词:** 荒漠肉苁蓉; 高压静电技术; 加工品质; 苯乙醇苷

## Effect of high hydrostatic pressure technology on quality and phenylethanoid glycoside extraction amount of freshly cut desert cistanche

SHI Shuo<sup>1</sup> LI Qingxin<sup>1</sup> EERDUN Bayaer<sup>1</sup> XU Wanping<sup>2</sup> DONG Tungalag<sup>1</sup> YUN Xueyan<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Ulanqab Experimental Middle School, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effect of the pressure, time, and section thickness of high hydrostatic pressure treatment on the quality and phenylethanoid glycoside extraction amount of desert cistanche. [Methods] The application parameters of high hydrostatic pressure treatment for cistanche are optimized by single factor experiment combined with response surface optimization. [Results] The results of single factor optimization show that with the increase of pressure (100~500 MPa) and treatment time (10~25 min), the color difference, hardness, and phenylethanoid glycoside extraction amount of cistanche are increased. With the increase of section thickness (2~10 mm), the color difference of cistanche is increased, but the hardness and phenylethanoid glycoside extraction amount are decreased. The optimal parameters are 200~300 MPa, 15~25 min, and 2~6 mm. Response surface optimization results show that pressure has a more significant effect on the extraction amount of phenylethanoid glycoside. The extraction amount of phenylethanoid glycoside is higher at a pressure of 294.341 MPa, a time of 14.658 min, and a section thickness of 3.644 mm, with a value of  $(5.35 \pm 0.21)$  mg/g. [Conclusion] The pressure in high hydrostatic pressure treatment is the primary factor to improve the quality of cistanche and promote the extraction of phenylethanoid glycoside. In contrast, the thinning effect of section thickness and the moderate extension of treatment time are the secondary factors that affect the amount of phenylethanoid glycoside.

**Keywords:** cistanche; high hydrostatic pressure technology; processing quality; phenylethanoid glycoside

基金项目: 内蒙古自然科学基金(编号: 2021MS03060)

通信作者: 云雪艳(1990—), 女, 内蒙古农业大学副教授, 博士。E-mail: yun\_imau@163.com

收稿日期: 2024-09-12 改回日期: 2025-05-08

引用格式: 石硕, 李清昕, 额尔敦巴雅尔, 等. 高静压技术对鲜切荒漠肉苁蓉品质及苯乙醇苷提取量的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 137-148.

**Citation:** SHI Shuo, LI Qingxin, EERDUN Bayaer, et al. Effect of high hydrostatic pressure technology on quality and phenylethanoid glycoside extraction amount of freshly cut desert cistanche[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 137-148.

高静压技术(high hydrostatic pressure, HHP)是一种非热食品加工技术,具有简便、高效和节能等优点。它通过将食品密封在容器中,利用水或油作为传压介质,在常温或温和加热条件下施加 100~1 000 MPa 的压力,处理一定时间后可以有效杀灭微生物<sup>[1]</sup>。在不加热或不添加化学防腐剂的情况下,HHP 处理可有效或部分钝化内源性酶,最大限度保持食品的原有品质,如风味、色泽和营养价值,延长货架期。HHP 的作用机制主要是通过改变微生物细胞膜和细胞壁的结构和形态,影响细胞内酶的活性及细胞内营养物质和废弃物的运输,从而杀死腐败微生物、达到杀菌和延长食品保质期的目的<sup>[1]</sup>。此外,HHP 还能提高蛋白质的可消化性和降低过敏性,对食品中营养成分和风味的影响较小,在食品加工中具有广泛的应用前景。已有学者将压力处理应用于新鲜杏鲍菇<sup>[2]</sup>、鸡腿菇<sup>[3]</sup>、松乳菇<sup>[4]</sup>、重组果蔬块<sup>[5]</sup>等食品的杀菌及保鲜。林佳馨等<sup>[6]</sup>研究发现,杨梅汁经 600 MPa 的 HHP 处理 20 min 并结合隔氧贮藏 7 d 后,果汁中葡糖杆菌属的丰度降低,货架期加速试验预测其在 20 °C 的货架期为 133 d。李靖等<sup>[7]</sup>发现,HHP 技术在 30 d 内可以更好地保留 4 °C 贮藏下刺梨汁的色泽,总酚、维生素 C、抗氧化活性的保留率分别为 93.32%, 52.80%, 93.96%, 均远高于热处理组。另有研究<sup>[8]</sup>表明,HHP 技术能激活性成分的生物合成途径,提高其含量。HHP 技术在改善采后果蔬品质、延缓腐败劣变、维持营养价值等方面具有广阔的应用前景。

肉苁蓉是一种寄生在梭梭根上的列当科植物,主要分布在内蒙古阿拉善盟的贺兰山和马鬃山等地。2021 年,国家市场监督管理总局联合国家卫生健康委员会发布了《按照传统既是食品又是中药材的物质目录管理规定》,将荒漠肉苁蓉正式纳入食药同源类食物的范畴。荒漠肉苁蓉的水分含量丰富,口感清脆微甜,并带有独特的植物香气,具有很高的食用品质。此外,它还具有增强免疫力、抗氧化、降血脂、调节内分泌、促进代谢以及强身健体等多种药用价值。这主要归功于其主要活性成分——苯乙醇苷<sup>[9]</sup>。苯乙醇苷是一种由苯乙醇和糖组成的苷类化合物,具有抗氧化、抗肿瘤<sup>[10]</sup>、调节肠道菌群<sup>[11]</sup>、免疫调节、护肝<sup>[12-13]</sup>和神经保护功能<sup>[14-15]</sup>。其结构中含有芳香环、羟基和酰基,具有很高的稳定性和生物利用度,在功能性食品开发领域的研究已被广泛关注<sup>[16-17]</sup>。然而,在食品加工过程中,新鲜的荒漠肉苁蓉由于水分含量高,易受到微生物污染、氧化褐变、质地软化,难以贮藏。通常需要在采后 48 h 内整株或切片干燥,但高温会导致苯乙醇苷的降解。因此,寻找一种能够在采后有效保留荒漠肉苁蓉品质及其活性成分的技术显得尤为重要。然而,目前尚未有学者将 HHP 技术应用于荒漠肉苁蓉的保鲜,特别是其对鲜切肉苁蓉品质和生物活性物质提取量改善效果的研究。

研究拟以内蒙古阿拉善盟的荒漠肉苁蓉为研究对象,首先探究 HHP 处理的单因素条件(压力、时间和切片厚度)对肉苁蓉品质的影响,并初步优化最佳的单因素参数;进一步,以苯乙醇苷的提取量为考察指标,通过响应面优化试验探究压力、时间和切片厚度的交互作用对苯乙醇苷提取量的影响,确定采后荒漠肉苁蓉的最佳 HHP 处理工艺,以期改善鲜切肉苁蓉的加工贮藏品质提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 试验材料

荒漠肉苁蓉:2023 年秋季采自内蒙古阿拉善盟,3 年生植株,长度和直径分别为 30~40, 5~7 cm;

枧果菊苷标准品(批号 DSTDS003801)、毛蕊花糖苷标准品(批号 DSTDL006101)、肉苁蓉苷 A 标准品(批号 DST221122-051)、异毛蕊花糖苷标准品(批号 DST230218-060):纯度≥98%,成都德思特生物技术有限公司;

聚乙烯包装袋:山东帕斯克新型建材有限公司。

#### 1.1.2 试验仪器

高静压设备:HHP-600 型,包头科发高压科技有限公司;

质构仪:TA-XT2 型,萨默斯科技(上海)有限公司;

高效液相色谱仪:Primaide 型,天美(中国)科学仪器有限公司;

色差计:CR-20 型,日本柯尼美能达有限公司;

高速冷冻离心机:HC-2518R 型,安徽中科中佳科学仪器有限公司。

### 1.2 鲜切荒漠肉苁蓉的制备

将新鲜荒漠肉苁蓉去除杂质、漂洗、去除外鳞叶、切片、拭去表面水分。随后将(50±2) g 的肉苁蓉进行真空包装。

### 1.3 HHP 处理鲜切肉苁蓉的工艺优化试验

1.3.1 HHP 处理流程 不同厚度的肉苁蓉片置于 HHP 处理仓内,利用不同压力和时间进行处理,测定其品质和苯乙醇苷提取量。未经 HHP 处理的新鲜肉苁蓉为对照组,记作 CK;经热处理(蒸制 5 min)的新鲜肉苁蓉为热处理组。

1.3.2 HHP 的单因素优化试验 以压力(100, 200, 300, 400, 500 MPa)、时间(5, 10, 15, 20, 25 min)和肉苁蓉厚度(2, 4, 6, 8, 10 mm)为单因素变量,肉苁蓉品质(失重率、色泽、硬度、感官评分)和苯乙醇苷提取量为评价指标,优化 HHP 处理的最佳单因素工艺参数。在 HHP 处理压力的优化试验中,HHP 处理时间为 15 min,切片厚度为 6 mm。在 HHP 处理时间的优化试验中,HHP 处理压力为

300 MPa,切片厚度为6 mm。在切片厚度的优化试验中,HHP处理压力和时间分别为15 min和300 MPa。

#### 1.4 试验方法

1.4.1 失重率 记录HHP处理前后肉苁蓉样品的质量(已拭去肉苁蓉表面水分),按式(1)计算肉苁蓉的失重率。

$$R_{WL} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$R_{WL}$ ——失重率,%;

$m_0$ ——HHP处理前样品质量,g;

$m_1$ ——HHP处理后样品质量,g。

1.4.2 色泽 使用便携式手持色差仪来测量肉苁蓉的切

面,记录 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ ,并按式(2)计算总色差值。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2}, \quad (2)$$

式中:

$\Delta E$ ——样品与标准白板之间的总色差值;

$L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ——样品的测定值;

$L$ 、 $a$ 、 $b$ ——标准白色板的测定值。

1.4.3 硬度 在肉苁蓉表面均匀取不同部位的方片(1 cm×1 cm),利用质构仪测量样品硬度。测试探头P/2、测前速度2 mm/s、测试速度1 mm/s、测后速度5 mm/s、下压距离80%、两次停留时间5 s、触及力0.5 N<sup>[18-19]</sup>。

1.4.4 感官评价 对肉苁蓉的外观、风味、组织状态、整体可接受度进行评分。评分小组由10名食品专业人员组成,按表1进行评分。

表1 感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

外观	风味	组织状态	整体可接受度	分值
色泽鲜亮,无褐变,整体外观一致	有甜味,略带苦味,无异味	汁液丰富,组织饱满,软硬适中,适合鲜食	很好,非常喜欢	15~20
色泽较亮,无褐变	略有苦味,无异味	汁液较多,软硬适中,适合鲜食	好,比较喜欢	10~15
略微发生褐变	苦味较重,无异味	组织较软,适合鲜食	中等,喜爱一般	5~10
失去光泽,褐变较严重	苦味较重,略带异味	组织变软,口感较差,不可食用	较差,不喜欢	0~5

#### 1.4.5 苯乙醇苷提取量测定

(1) 苯乙醇苷提取:取5 g样品,切碎,置50 mL棕色量瓶中,加入15 mL体积分数为50%的甲醇溶液。超声波振荡提取2 h后,4 ℃、10 000 r/min离心10 min,收集上清液。将上清液倒入圆底烧瓶,52 ℃下旋蒸30 min去除溶剂,用50%甲醇复溶后定容至5 mL,经0.45 μm有机滤膜过滤并收集至样品瓶中备用<sup>[20]</sup>。

(2) 高效液相色谱测试条件:参照魏杰<sup>[20]</sup>的方法。

(3) 标准曲线制作:取对照品松果菊苷、毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷A和异毛蕊花糖苷分别溶于50%甲醇,至质量浓度为0.08 mg/mL。精密吸取混合对照品0.05、0.10、0.50、1.00、5.00、10.00 mL置于10 mL容量瓶中,以50%甲醇溶液稀释至刻度线,摇匀,得到不同浓度的对照品混合液,测定色谱峰面积,以对照品浓度为横坐标( $X$ ),峰面积为纵坐标( $Y$ )进行线性回归,详见表2。

(4) 苯乙醇苷提取量计算:结合标准曲线,对肉苁蓉

中4种苯乙醇苷的提取量进行分析。苯乙醇苷含量为松果菊苷、毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷A和异毛蕊花糖苷含量的总和,按式(3)计算。

$$X = \frac{\rho \times v}{m} \times f, \quad (3)$$

式中:

$X$ ——松果菊苷(毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷A、异毛蕊花糖苷)含量,mg/g;

$\rho$ ——提取液中松果菊苷(毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷A、异毛蕊花糖苷)质量浓度,mg/mL;

$V$ ——提取液定容体积,mL;

$m$ ——松果菊苷(毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷A、异毛蕊花糖苷)提取时称样量,g;

$f$ ——稀释倍数。

#### 1.5 数据处理与分析

试验重复3组平行,使用软件Origin 2021作图,使用软件IBM SPSS Statistics 26统计分析,采用ANOVA分析进行显著性检验( $P < 0.05$ ),结果用平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

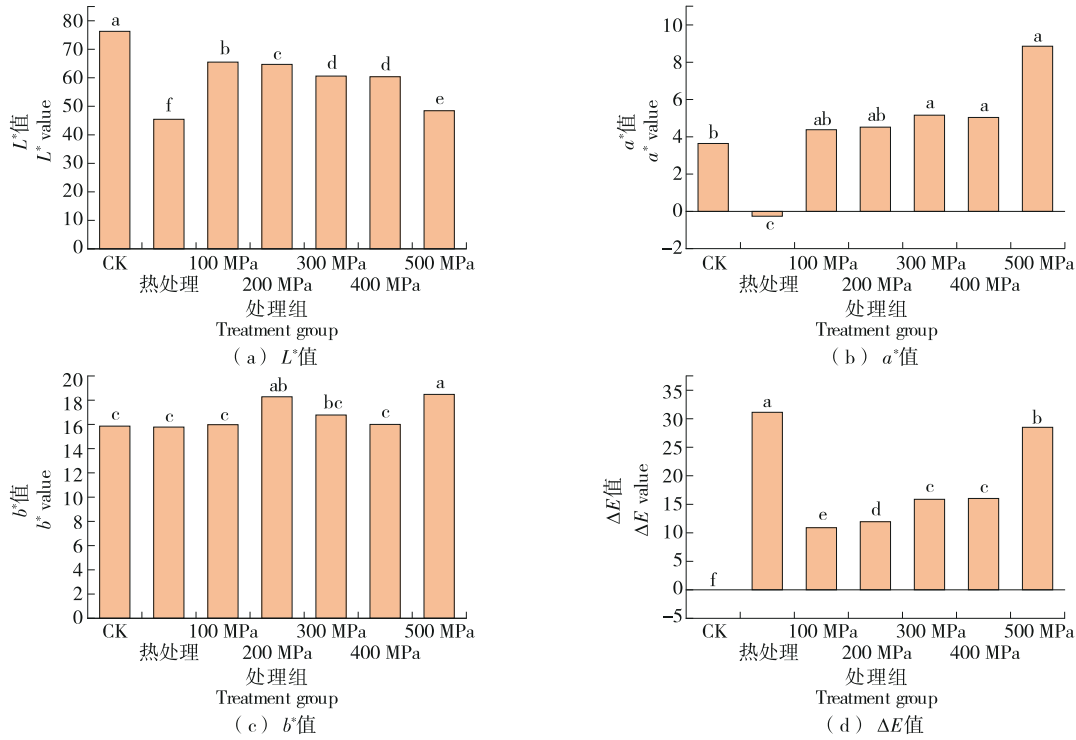
### 2.1 压力对鲜切荒漠肉苁蓉加工特性的影响

2.1.1 色泽 新鲜的荒漠肉苁蓉切面常呈亮黄色或淡紫色,采后内蒙古阿拉善的荒漠肉苁蓉表面均为亮黄色。如图1所示,CK组肉苁蓉表面的 $L^*$ 值和 $b^*$ 值较高, $a^*$ 值较低。经过热处理后,肉苁蓉中发生了美拉德反应,羟基与

表2 标注曲线

Table 2 Linear relationship

标准品	回归方程	$R^2$
松果菊苷	$Y = 1E + 07x - 789.51$	0.999 7
肉苁蓉苷A	$Y = 1E + 07x + 4 133.9$	0.999 6
毛蕊花糖苷	$Y = 1E + 07x - 3 219.7$	0.999 7
异毛蕊花糖苷	$Y = 1E + 07x + 7 587.7$	0.999 5



小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 1 压力对鲜切荒漠肉苁蓉色泽的影响

Figure 1 Effect of pressure on color of freshly cut desert cistanche

氨基化合物生成暗色成分<sup>[21]</sup>,多酚氧化酶引发的褐变速率增加<sup>[22]</sup>,导致L\*值显著下降( $P < 0.05$ );此外,在酶的作用下(如β-葡萄糖苷酶、酪氨酸酶),肉苁蓉中的苷类物质发生酶解或水解,生成绿色物质<sup>[23-24]</sup>,引起a\*值的下降。但与CK组对比,热处理对肉苁蓉b\*值的影响并不显著( $P > 0.05$ )。

经过HHP处理后,肉苁蓉的L\*值呈下降趋势,且下降程度与压力的增加成正比,这是因为HHP处理加剧了肉苁蓉的生理代谢,加速了酶促褐变;且随着压力增大,细胞间隙加大,细胞破坏程度加深,加大了氧气与酶促褐变底物的接触面积,增加了褐变程度。张红敏<sup>[25]</sup>在研究中发现随着超高压强度的增加,鲜切胡萝卜的L\*值下降,与试验结果类似。然而,与CK组和热处理组对比,HHP处理组中肉苁蓉的a\*值增加,当压力为300,400,500 MPa时,肉苁蓉的a\*值显著高于CK组( $P < 0.05$ ),表明褐变加剧。就b\*值而言,与CK组和热处理组对比,经过100,200 MPa的HHP处理后,肉苁蓉的b\*值变化不显著( $P > 0.05$ );然而,随着HHP的压力达到300,400,500 MPa后,肉苁蓉b\*值呈上升、下降、再上升的趋势,这可能与多酚氧化酶在不同压力下的钝化或激活效应有关。

在L\*、a\*和b\*值变化的影响下,不同处理组的肉苁蓉ΔE值均具有显著差异( $P < 0.05$ )。与CK组对比,热处理与500 MPa处理下的肉苁蓉ΔE值变化较大;100~

400 MPa处理的肉苁蓉ΔE值变化较小,色变程度较低,说明该压力范围能较好地维持肉苁蓉的色泽。王琦等<sup>[26]</sup>研究发现,与热炒加工相比,用450 MPa的HHP处理杏鲍菇片能更好地保持色泽。这可能是由于HHP处理对果蔬细胞内的酶存在钝化和高压均质化效应,降解细胞着色物质,减少了对果蔬色泽的破坏<sup>[27]</sup>。

2.1.2 失重率 如图2(a)所示,CK组和热处理组的肉苁蓉失重率最低,二者无显著差异( $P > 0.05$ )。这可能是由于肉苁蓉切面组织疏松,细胞间隙大,蒸制时水蒸气进入细胞间隙,抵消了高温破坏细胞而造成的质量损失。与CK和热处理组相比,经过100 MPa的HHP处理后,肉苁蓉的失重率增加,但无显著差异( $P > 0.05$ );随着压力增加,失重率显著增加,当压力为500 MPa时,失重率达最高值( $P < 0.05$ ),这与高压对肉苁蓉细胞的严重破坏有关,细胞内水分及游离物质流出,造成了更大的质量损失。

2.1.3 硬度 如图2(b)所示,在CK组中,肉苁蓉的硬度最高。经过热处理后,肉苁蓉的细胞膨压损失,细胞间隙扩大,细胞壁中果胶发生β-消除反应而降解,导致硬度显著下降( $P < 0.05$ )。但经过HHP处理后,肉苁蓉的硬度呈下降趋势,但却显著高于热处理组。这一结果表明,与热处理相比,HHP更能保持肉苁蓉的硬度,且随着压力增加,硬度先降低后增加。经过200 MPa的HHP压力处理后,肉苁蓉的硬度值最低,比CK组低了32.24% ( $P <$

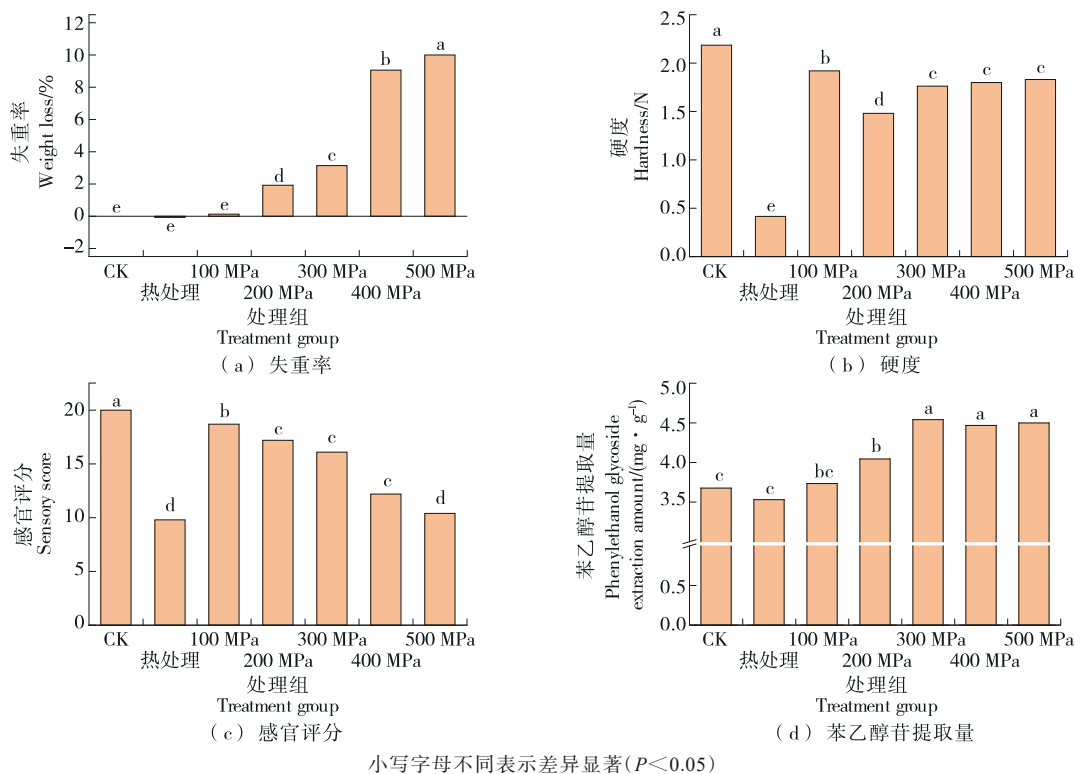


图2 压力对鲜切荒漠肉苁蓉失重率、硬度、感官评分和苯乙醇苷提取量的影响

Figure 2 Effects of pressure on weight loss rate, hardness, sensory scores, and the extraction amount of phenylethanoid glycoside of freshly cut desert cistanche

0.05), 是因为肉苁蓉细胞受到物理损伤, 细胞壁果胶发生酶促或非酶促降解; 但当压力增加到 300, 400, 500 MPa, 肉苁蓉硬度又显著增加, 但三者间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。这与高压促进细胞间气体排出有关, 使细胞间体积压缩, 呈现紧密排列的状态; 此外, 也与果胶酯化度的下降有关。

**2.1.4 感官评分** 如图 2(c) 所示, CK 组肉苁蓉表面色泽鲜亮、组织饱满、汁液丰富、质地爽脆、有甜味, 故感官评分最高。热处理组中, 肉苁蓉的感官评分最低 (9.8 分), 色泽黯淡、组织软化, 口感绵软。HHP 组中, 肉苁蓉的感官评分低于 CK 组, 但始终高于热处理组, 口感绵软, 有焦糊味, 这与褐变程度和水分流失的增加有关。

**2.1.5 苯乙醇苷提取量** 如图 2(d) 所示, 与 CK 组相比, 热处理后苯乙醇苷提取量降低, 但二组无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 可能因为苯乙醇苷对温度敏感, 容易降解, 但因热处理时间较短, 故其降解程度不显著。这与张超等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。周菲<sup>[29]</sup>报道: 4, 20, 37, 50 °C 贮藏 90 d 后, 桂花中苯乙醇苷提取量分别降至初始值的 82.36%, 64.61%, 23.10%, 13.00%。

经过 100~300 MPa 的 HHP 压力处理后, 肉苁蓉中苯乙醇苷提取量上升, 在 300 MPa 时达到峰值, 为 6.33 mg/g。

这与压力增加细胞内传质速率和细胞膜的渗透性、破坏酚类物质与细胞壁间的弱相互作用有关, 促进了苯乙醇苷的萃取途径<sup>[30-31]</sup>。朱玲英等<sup>[32]</sup>发现 HHP 处理后的人参甲醇提取物中总皂苷含量增加了 1 倍。试验中, 当压力增加到 400~500 MPa, 肉苁蓉中苯乙醇苷提取量不再显著增加 ( $P > 0.05$ )。这是由于苯乙醇苷与溶剂体系已平衡, 高压对苯乙醇苷提取量的影响减小, 且高压会提高细胞内杂质的溶出, 影响苯乙醇苷的溶出, 降低了苯乙醇苷的提取量<sup>[33]</sup>。

## 2.2 时间对鲜切荒漠肉苁蓉加工特性的影响

**2.2.1 色泽** 如图 3 所示, 随着时间的延长, 肉苁蓉的  $L^*$  和  $b^*$  值显著下降,  $a^*$  值先下降后上升,  $\Delta E$  值上升 ( $P < 0.05$ ), 表明肉苁蓉的褐变程度增加, 这是因为长时间的 HHP 处理下, 肉苁蓉细胞膜和细胞壁的破坏有关, 细胞运输受阻, 呼吸代谢减慢, 细胞废弃物难以排出, 致褐变相关酶 (如植物多酚氧化酶) 活性增加。该结果与王治同等<sup>[33]</sup>的研究结果类似, 可能与酶促褐变相关酶活性有关。另有研究<sup>[34]</sup>表明, 植物多酚氧化酶活性对压力较为敏感, 例如 HHP 处理 10 min 后, 丽江雪桃的多酚氧化酶活性降低了 50%, 但随着时间增加到 50 min, 其酶活又升高了 1 倍。

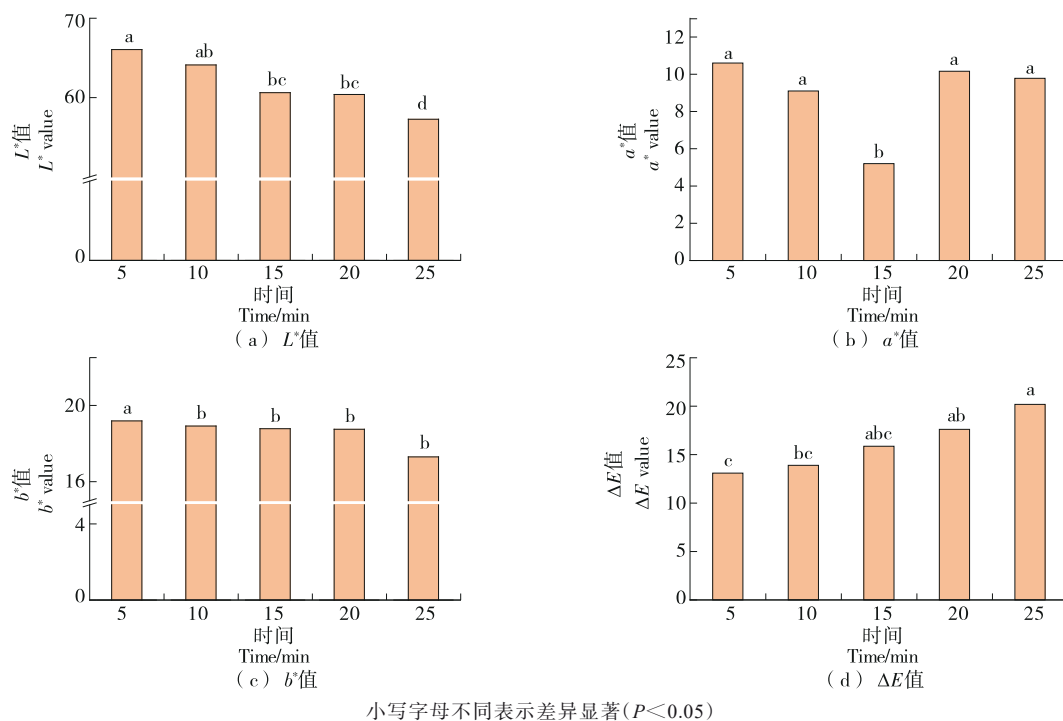


图 3 时间对鲜切荒漠肉苁蓉色泽的影响

Figure 3 Effect of time on color of freshly cut desert cistanche

2.2.2 失重率 如图4(a)所示,随着时间增加,肉苁蓉的失重率先增加后降低,但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在

15 min时,肉苁蓉的失重率最高,这可能是长时间下细胞中的水分被挤出<sup>[35]</sup>。

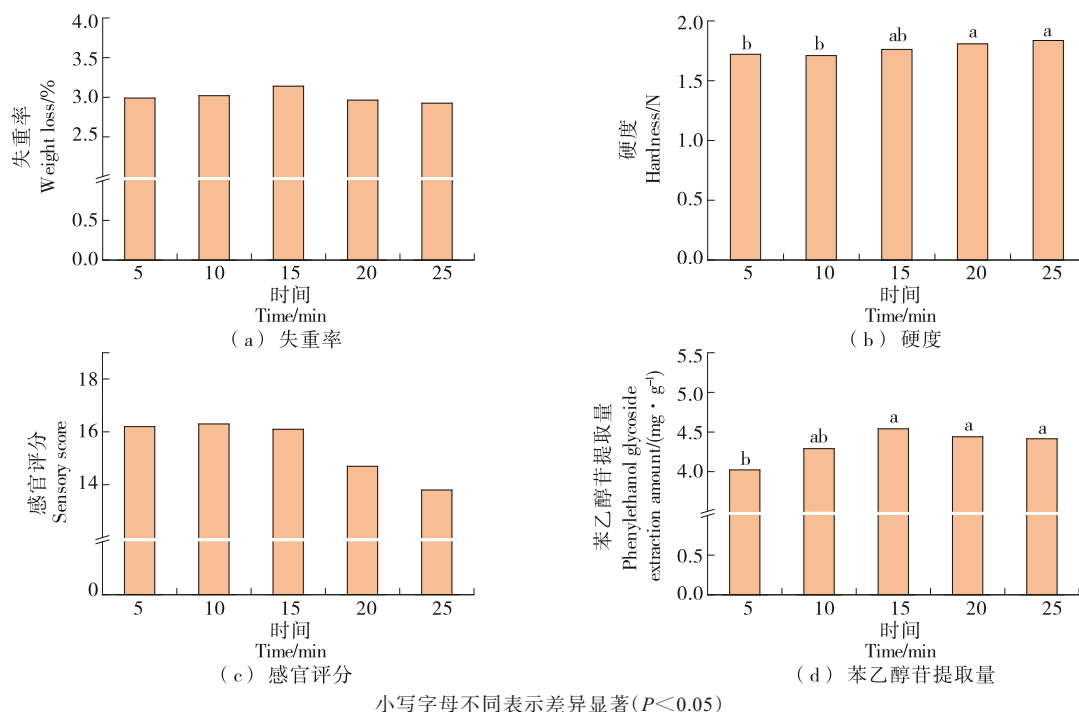


图 4 时间对鲜切荒漠肉苁蓉失重率、硬度、感官评分和苯乙醇苷提取量的影响

Figure 4 Effects of time on weight loss rate, hardness, sensory scores, and the extraction amount of phenylethanoid glycoside of freshly cut desert cistanche

2.2.3 硬度 如图4(b)所示,随着时间由5 min增加到15 min,肉苁蓉的硬度增加,但无显著差异( $P>0.05$ )。当时间为20~25 min时,肉苁蓉的硬度达最大值( $P<0.05$ )。这是因为高压被挤出的水分回流到细胞内,细胞间结合增加,间隙减小,因此硬度增大<sup>[35]</sup>。这与田学智等<sup>[1]</sup>关于HHP在松乳菇中应用的研究结果一致。

2.2.4 感官评分 如图4(c)所示,随着时间增加,肉苁蓉的感官评分由16.3下降到14.3,但变化不显著( $P>0.05$ )。这是因为长时间的高压处理导致肉苁蓉的褐变增加,降低了表观颜色等感官品质;但硬度增加,质地口感等感官品质又提升,因此肉苁蓉的感官评分波动不显著。

2.2.5 苯乙醇苷提取量 如图4(d)所示,随着时间的增加,苯乙醇苷提取量先上升后下降。当时间由5 min增加到15 min时,苯乙醇苷提取量由4.94 mg/g显著上升至6.32 mg/g( $P<0.05$ )。这是由于HHP破坏了肉苁蓉的组织细胞结构,损伤苯乙醇苷水解酶的二级和三级结构,钝化了酶活性。有研究<sup>[36]</sup>表明,HHP具有灭酶效应且受时间影响,例如对HHP处理敏感的酶在几分钟后便失去活

性。马天宇<sup>[37]</sup>研究发现,与对照组对比,HHP处理组的天麻中巴利森苷A和E含量显著增加,归因于HHP可灭活水解酶并保护巴利森苷。另有研究<sup>[38]</sup>表明,在600 MPa、34 °C的条件下,随着时间从5 min增加到60 min,草莓泥中的多酚氧化酶活性从63%下降到8%。随着时间由15 min增加到25 min,肉苁蓉中苯乙醇苷提取量稍有下降( $P>0.05$ )。这是因为长时间下,HHP的灭酶效应和对细胞结构的影响已达极限。

## 2.3 切片厚度对鲜切荒漠肉苁蓉加工特性的影响

2.3.1 色泽 如图5所示,随着切片厚度的升高,肉苁蓉的 $L^*$ 和 $b^*$ 值显著下降、 $a^*$ 值先升高后下降( $P<0.05$ )。当切片较薄时,肉苁蓉的单位失水率较高,表面形成了水膜,故 $L^*$ 值较高;当切片较厚时,肉苁蓉的细胞损伤较小,失水率低,水分迁移及形成的水膜较少<sup>[39]</sup>,且肉苁蓉细胞与氧气接触产生褐变物质的程度较低,故 $L^*$ 和 $a^*$ 值较低。基于高切片厚度对 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 值的影响, $\Delta E$ 值随着切片厚度的增加而增加( $P<0.05$ ),表明切片厚度越大,肉苁蓉色泽的变化更明显。

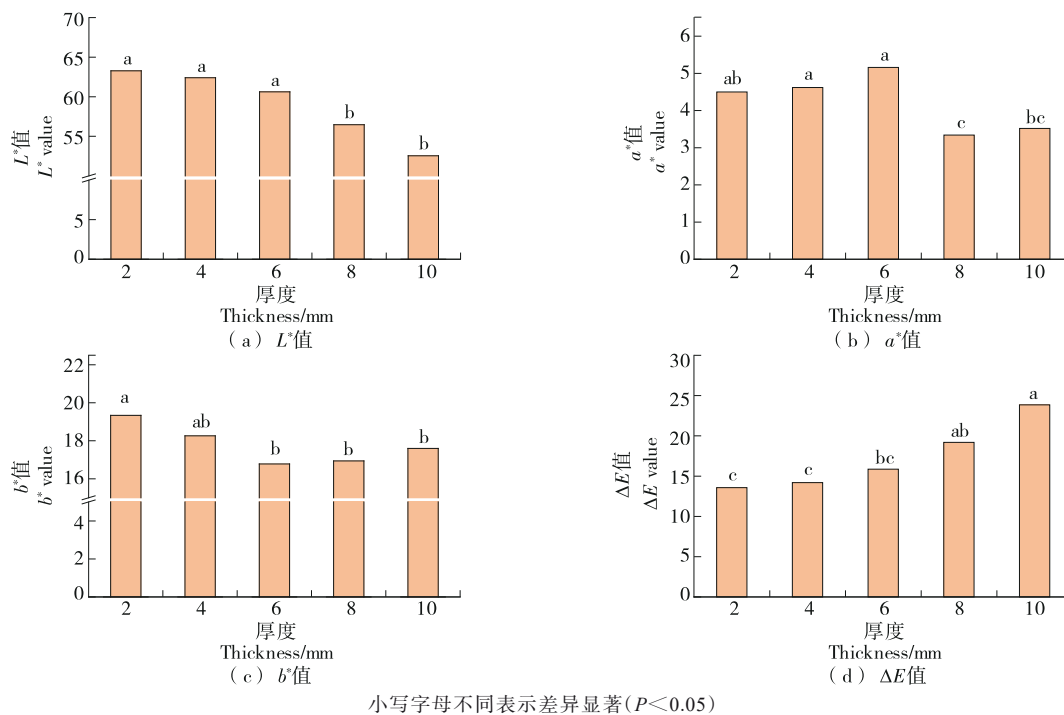


图5 切片厚度对HHP处理鲜切荒漠肉苁蓉色泽的影响

Figure 5 Effects of section thickness on color of freshly cut desert cistanche treated with HHP

2.3.2 失重率 切片厚度决定了单位质量鲜切肉苁蓉的比表面积。肉苁蓉的芯部组织相对于外部更为柔嫩,含水率也更高。切片越薄,芯部与整体的失水差距越大,失水率也越高;而切片越厚,则整体与芯部的失重率差别越小。如图6(a)所示,随着切片厚度的增加,鲜切荒漠肉苁蓉的失重率显著下降( $P<0.05$ )。这是因为HHP处理会

对果蔬细胞结构造成一定的机械损伤,破坏细胞膜的完整性,促进水分从细胞内部流失。对于较薄的切片,由于细胞层数较少,压力可能直接穿透细胞层,使得水分更容易通过损伤的细胞膜、细胞间隙流失,因此失水率会相对较高。然而,对于切片厚度较大的样品,由于细胞层数较多,HHP处理造成的损伤可能在细胞间层形成一定的水

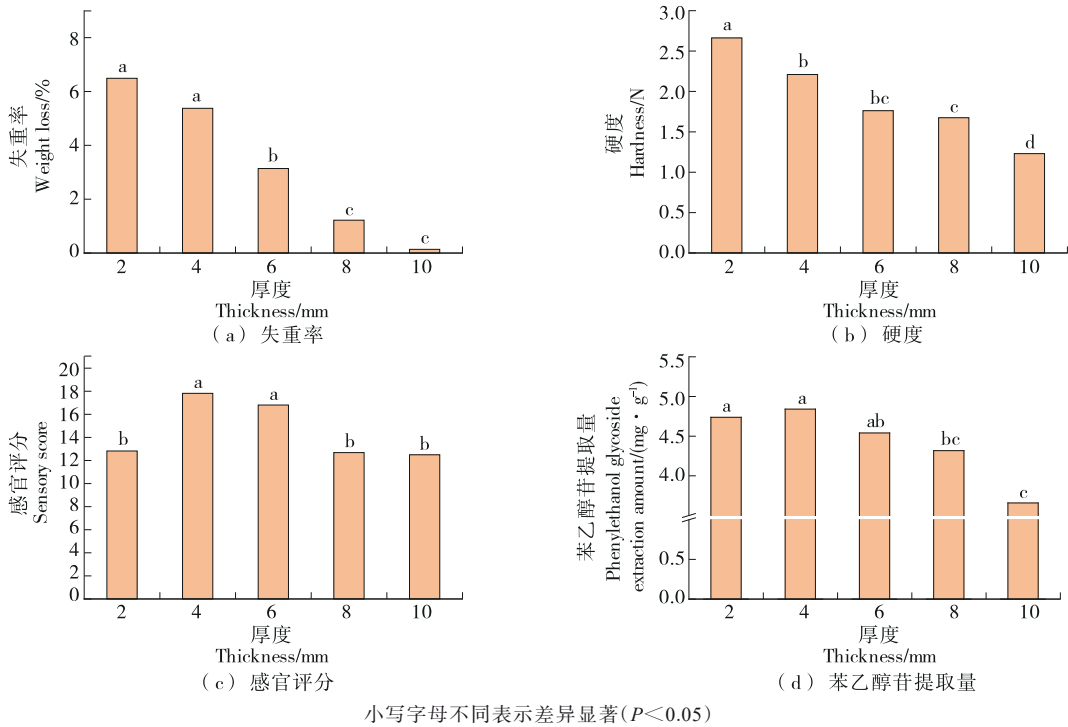


图 6 切片厚度对 HHP 处理鲜切荒漠肉苁蓉失重率、硬度、感官评分和苯乙醇苷提取量影响

Figure 6 Effects of section thickness on weight loss rate, hardness, sensory scores, and the extraction amount of phenylethanoid glycoside of freshly cut desert cistanche treated with HHP

分屏障,减缓了从细胞或细胞间隙水分流失的量<sup>[38]</sup>。

2.3.3 硬度 如图 6(b)所示,HHP 处理下的肉苁蓉组织受到切片厚度带来的压实效应。随着切片厚度的增加,硬度显著下降( $P < 0.05$ )。这是因为在相同单位质量下,较薄切片肉苁蓉受到的压力更大,压实效应越明显,从而使得细胞结构紧密程度相对较高,导致硬度较高<sup>[38]</sup>。

2.3.4 感官评分 如图 6(c)所示,切片厚度对感官评分的影响呈先显著上升、后下降的趋势( $P < 0.05$ )。当厚度较小时,肉苁蓉的口感绵软,当厚度过高时,肉苁蓉的色差较大,故感官评分降低。当厚度为 4~6 mm 时,肉苁蓉的感官评分最高,且二者差异不显著( $P > 0.05$ )。

2.3.5 苯乙醇苷提取量 如图 6(d)所示,当切片厚度为 2~4 mm 时,肉苁蓉中苯乙醇苷提取量变化并不显著( $P > 0.05$ );而当切片厚度逐渐增大,苯乙醇苷提取量下降( $P < 0.05$ )。谢巧等<sup>[40]</sup>和姜辉煌等<sup>[41]</sup>报道,随着厚度的增加,HHP 处理对果蔬组织的破坏程度较低,减小了果蔬细胞与溶剂的接触面积,从而降低了生物活性物质的含量,与试验结果类似。

#### 2.4 HHP 处理的响应面优化试验

根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理,进一步探究压力、时间和切片厚度的交互作用对肉苁蓉中苯乙醇苷提取量的影响,因素水平见表 3,试验方案及结果见表 4。

表 3 响应面试验因素水平表

Table 3 Factors and levels of response surface optimization

水平	A 压力/MPa	B 时间/min	C 切片厚度/mm
-1	200	10	2
0	300	15	4
1	400	20	6

通过软件 Design Expert 13 对数据进行多元回归拟合,以苯乙醇苷提取量为因变量,以 HHP 压力、时间和切片厚度为因素,可得多元回归方程为:

$$Y = 5.34 - 0.211 2A - 0.887B - 0.065C - 0.002 5AB + 0.07BC - 1.86A^2 - 0.732 8B^2 - 0.195 3C^2 \quad (4)$$

表 5 显示,当对二次回归方程进行  $F$  检验时,该回归模型的  $F$  值为 172.04 且  $P < 0.01$ ,表明该模型极显著,而失拟项  $P = 0.873 1 > 0.05$ ,不显著。表明该模型能够准确地反映响应值的变动,失拟程度较低,预测值与实际值之间存在很高的相关性,因此适用于分析和预测 HHP 处理肉苁蓉中苯乙醇苷提取量。 $F$  值显示,各因素对苯乙醇苷提取量的影响顺序为压力  $>$  时间  $>$  切片厚度,在一次项因素中,A 的影响非常显著( $P < 0.01$ ),而在二次项中, $A^2$  和  $B^2$  的影响也非常显著( $P < 0.01$ ),但三者之间的交互效应(AB、AC、BC)均不显著( $P > 0.05$ )。



表4 响应面试验方案及结果

Table 4 Scheme and results of response surface optimization

试验号	A	B	C	苯乙醇苷提取量/ (mg·g <sup>-1</sup> )
1	0	-1	1	4.39
2	0	0	0	5.37
3	0	0	0	5.38
4	0	0	0	5.15
5	0	0	0	5.51
6	-1	0	1	3.46
7	0	-1	-1	4.66
8	0	0	0	5.28
9	1	0	1	2.98
10	0	1	-1	4.29
11	-1	0	-1	3.59
12	-1	1	0	2.87
13	1	0	-1	3.11
14	1	-1	0	2.63
15	-1	-1	0	2.99
16	0	1	1	4.30
17	1	1	0	2.50

表5 响应面试验的方差分析和显著性检验<sup>†</sup>

Table 5 Analysis of variance and significance test of response surface optimization

方差来源	平方和	自由度	均值	F值	P值
A	0.357 0	1	0.357 0	30.04	0.000 9
B	0.063 0	1	0.063 0	5.30	0.054 8
C	0.033 8	1	0.033 8	2.84	0.135 6
AB	<0.000 1	1	<0.000 1	<0.01	0.964 7
AC	<0.000 1	1	<0.000 1	<0.01	1.000 0
BC	0.019 6	1	0.019 6	1.65	0.240 0
A <sup>2</sup>	14.530 0	1	14.530 0	1 222.53	<0.000 1
B <sup>2</sup>	2.260 0	1	2.260 0	190.19	<0.000 1
C <sup>2</sup>	0.160 5	1	0.160 5	13.50	0.007 9
模型	18.400 0	9	2.040 0	172.04	<0.000 1
残差	0.083 2	7	0.011 9		
失拟项	0.012 1	3	0.004 0	0.23	0.873 1
纯误差	0.071 1	4	0.017 8		
总和	18.490 0	16			

<sup>†</sup> R<sup>2</sup>=0.995 5, R<sup>2</sup><sub>Adj</sub>=0.989 7, C.V.%为 0.983 5, 信噪比为 34.597 7。

利用软件根据回归方程绘制了各个因素间的响应面3D和等高线2D图,通过分析拟合响应曲面形状,分析了压力、时间和切片厚度对苯乙醇苷提取量的影响。结果

显示,图7(a)和图7(b)中响应面的曲线陡峭度越高,意味着两个因素之间的交互作用对响应值有更大的影响,而曲线的平坦度则表示交互作用的影响相对较小。当等高

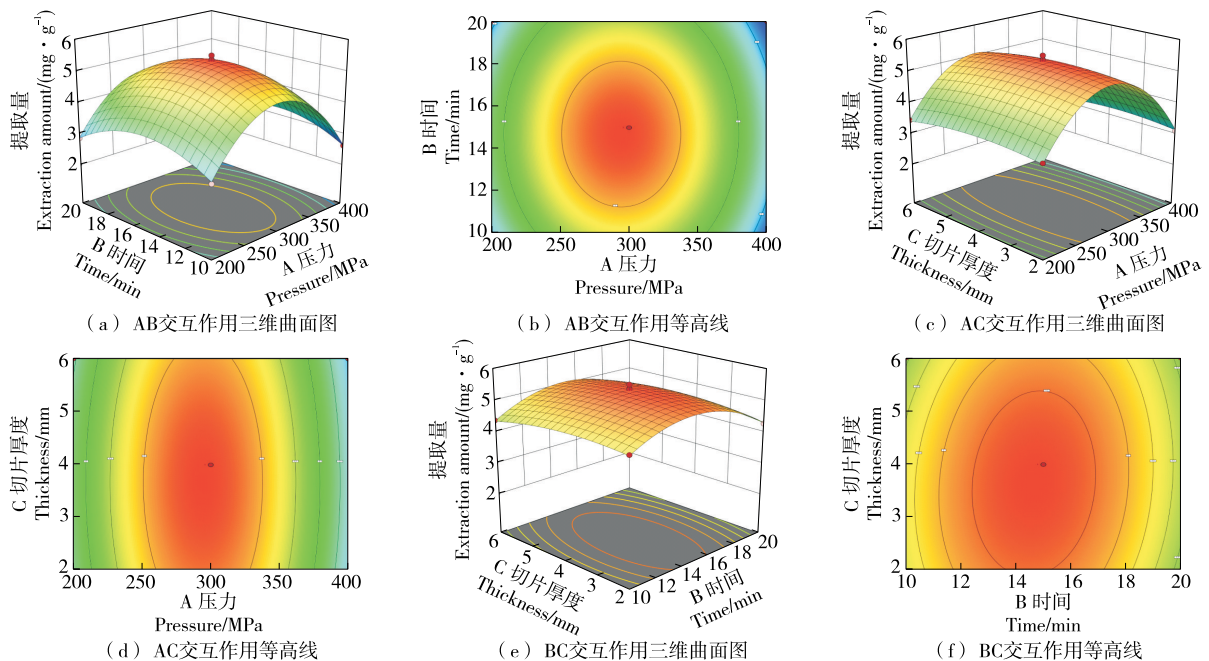


图7 各因素交互作用对肉苁蓉中苯乙醇苷提取量的响应面和等高线图

Figure 7 Response surface and contour map of various factor interactions on the extraction amount of phenylethanoid glycoside from cistanche

线的形态逐渐接近圆形时,这意味着两个因素之间的交互效应逐渐减弱,但当它更接近完整椭圆形时,这种交互效应变得更为明显。与图 7(c)~图 7(f)相比,图 7(a)展示的 3D 曲面图更为陡峭,其等高线更接近椭圆形状,表明压力和时间的交互作用对苯乙醇苷提取量有显著影响,与表 5 的方差分析结果一致。从图 7(e)、图 7(f)可以看出,BC 因素之间(时间与切片厚度)的交互作用对苯乙醇苷提取量影响并不明显,特别是图 7(e)中的曲面图显示得尤为平稳。这表明,在压力固定的情况下,时间与切片厚度之间的交互作用对苯乙醇苷提取量的影响相对较小。根据 Box-Behnken 模型得到预测最佳参数为:压力 294.341 MPa、时间 14.658 min、切片厚度 3.644 mm,此时苯乙醇苷提取量为 5.353 g/mg。考虑到试验可操作性,将最优工艺参数定为:压力 300 MPa、时间 15 min、切片厚度 4 mm,按该工艺进行 3 次验证实验,其苯乙醇苷提取量为 (5.35±0.21) mg/g,与响应面预测模型基本符合,表明最优参数可行。

### 3 结论

该研究对高静压处理中压力、时间和切片厚度对鲜切荒漠肉苁蓉品质和苯乙醇苷提取量进行了分析。结果揭示:随着压力增大,肉苁蓉总色差值增大,硬度呈先降低后增加趋势,感官评分下降,而苯乙醇苷提取量增加;时间 0~25 min 时,硬度、色差、苯乙醇苷提取量均增大,失重率、感官评分无显著变化;切片厚度 2~10 mm 时,色差逐渐增大,硬度、失重率、苯乙醇苷提取量降低,感官评分先升高后降低。基于单因素和响应面试验结果,确定压力、时间、切片厚度的最优参数分别为 300 MPa、15 min、4 mm。后续将进一步聚焦于高静压处理对肉苁蓉微观结构的影响机制,以及探索其他因素如温度、pH 值等与高静压处理的协同作用对肉苁蓉品质和有效成分提取的影响。

#### 参考文献

- [1] 田学智,曹智鸿,江乃相,等. 高静压联合天然抑制剂处理对苹果汁多酚氧化酶活性及相关品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 1-7.  
TIAN X Z, CAO Z H, JIANG N X, et al. Effects of high hydrostatic pressure combined with natural inhibitors on the polyphenol oxidase activity and related quality attributes of cloudy apple juice[J]. Food Science, 2025, 46(2): 1-7.
- [2] 陈三娜,张平平,王娜,等. 超高压处理对即食杏鲍菇的影响[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(5): 54-58.  
CHEN S N, ZHANG P P, WANG N, et al. The influence of ultra high pressure treatment on instant pleurotus eryngii mushrooms [J]. Food Research and Development, 2015, 36(5): 54-58.
- [3] 陈锡威. 鸡腿菇超高压即食产品品质调控[D]. 杭州: 浙江林学院, 2009: 24-27.  
CHEN X W. Namely food of Coprinus comatus (Mull. ExFr.) gray product quality regulation after ultra high pressure technology[D]. Hangzhou: Zhejiang Forestry University, 2009: 24-27.
- [4] 田学智,刘燕,栗瑜婉,等. 松乳菇高静压及热处理工艺开发及贮藏期品质变化研究[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 32-39.  
TIAN X Z, LIU Y, LI Y W, et al. Technological development of high hydrostatic pressure and thermal treatments and storage quality attributes of *Lactarius deliciosus*[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(4): 32-39.
- [5] 袁林,梁旭娟,程瑞华,等. 高静压和热预处理对真空冷冻干燥重组果蔬块品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 201-209.  
YUAN L, LIANG X J, CHENG X H, et al. Effects of high hydrostatic pressure versus thermal pretreatment on the quality of vacuum freeze-dried reconstituted fruit and vegetable cubes [J]. Food Science, 2024, 45(5): 201-209.
- [6] 林佳馨,罗子阳,黄少桐,等. 不同超高静压处理及贮藏过程中杨梅果汁微生物多样性变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 96-106.  
LIN J X, LUO Z Y, HUANG S T, et al. Changes in microbial diversity in bayberry juice under different high hydrostatic pressure treatments and storage conditions[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 96-106.
- [7] 李靖,王嘉祥,陈欢,等. 超高压与热杀菌对刺梨汁贮藏期品质影响的比较[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 101-108.  
LI J, WANG J X, CHEN H, et al. Comparison of the effects of ultra-high pressure and thermal processing on quality changes of *Rosa roxburghii* juice during storage[J]. Food Science, 2022, 43(15): 101-108.
- [8] GARCÍA-OLIVEIRA P, FRAGA-CORRAL M, PEREIRA A G, et al. Solutions for the sustainability of the food production and consumption system[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(7): 1 765-1 781.
- [9] 陈君然,朱星宇,崔瀚元,等. 新疆肉苁蓉不同品种与部位间活性成分差异及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 227-233.  
CHEN J R, ZHU X Y, CUI H Y, et al. Variations of active ingredients and antioxidant activities analysis of *Cistanchedeserticola* from different parts and areas in Xinjiang province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 227-233.
- [10] QI X X, HOU X T, SU D Q, et al. Effect of phenylethanol glycosides from *Cistanchetubulosa* on autophagy and apoptosis in H<sub>2</sub> tumor-bearing mice[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2022, 2 022: 3993445.
- [11] LI Y L, ZHANG Y L, SU X M, et al. Effects of two kinds of extracts of *Cistanchedeserticola* on intestinal microbiota and its metabolism[J]. Foods, 2022, 11(18): 2 897.
- [12] 王富江,屠鹏飞,曾克武,等. 荒漠肉苁蓉总苷对酒精性肝损

- 伤小鼠的保护作用研究[J]. 药学报, 2021, 56(9): 2 528-2 535.
- WANG F J, TU P F, ZENG K W, et al. Protective effects of the total glycosides of *Cistanche deserticola* alcoholic liver injury in mice[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2021, 56(9): 2 528-2 535.
- [13] WANG H C, LI Y Y, BIAN Y F, et al. Potential hepatoprotective effects of *Cistanchedeserticola* Y. C. Ma: integrated phytochemical analysis using UPLC-Q-TOF-MS/MS, target network analysis, and experimental assessment[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 1018572.
- [14] 王璐, 白雨朦, 李晓宇, 等. 肉苁蓉总苷对阿尔茨海默病模型大鼠学习认知功能和氧化应激的影响[J]. 解剖学杂志, 2020, 43(3): 194-199, 275.
- WANG L, BAI Y M, LI X Y, et al. Effects of glycosides of *cistanche* on cognitive function and oxidative stress in rats with Alzheimer's disease[J]. *Chinese Journal of Anatomy*, 2020, 43(3): 194-199, 275.
- [15] CHOI J G, MOON M, JEONG H U, et al. *Cistanches* Herba enhances learning and memory by inducing nerve growth factor[J]. *Behavioural Brain Research*, 2011, 216(2): 652-658.
- [16] 李建辉, 黄家扬, 卫世乾. 复方肉苁蓉保健酒的制备工艺研究[J]. 河南农业, 2023(15): 60-61.
- LI J H, HUANG J Y, WEI S Q. Study on preparation technology of compound *cistanche* health wine[J]. *Agriculture of Henan*, 2023(15): 60-61.
- [17] XU R, CHEN J, CHEN S L, et al. *Cistanchedeserticola* Ma cultivated as a new crop in China[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2009, 56(1): 137-142.
- [18] 崔国梅, 刘丽娜, 田广瑞, 等. 响应面法优化香菇片硬化保脆工艺[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 102-108.
- CUI G M, LIU L N, TIAN G R, et al. Optimization of hardening and crispness preservation process of *Lentinula edodes* slices by response surface methodology[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(12): 102-108.
- [19] 李兴霞, 李越, 杨菲菲, 等. 吸湿性对冻干果蔬产品及其品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- LI X X, LI Y, YANG F F, et al. The effect of hygroscopicity on quality characteristics of different freeze-drying fruit and vegetable products[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(7): 159-165, 173.
- [20] 魏杰. 鲜切肉苁蓉被动气调保鲜及其品质变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 13-14.
- WEI J. Study on passive air conditioning preservation and quality change of fresh-cut *Cistanche*[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 13-14.
- [21] 毕双同. 果蔬加工过程中的褐变及护色措施[J]. 农业与技术, 2018, 38(23): 22-23.
- BI S T. Browning and color protection measures in fruit and vegetable processing[J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(23): 22-23.
- [22] GENOVESE D B, ELUSTONDO M P, LOZANO J E. Color and cloud stabilization in cloudy apple juice by steam heating during crushing[J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(6): 1 171-1 175.
- [23] 段金殿, 宿树兰, 吕洁丽, 等. 药材产地加工传统经验与现代科学认识[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(24): 3 151-3 157.
- DUAN J A, SU S L, LV J L, et al. Traditional experiences and modern cognition on primary processing of traditional Chinese medicinal materials[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2009, 34(24): 3 151-3 157.
- [24] 刘红亮. 从药材性状及化学成分的角度诠释产地初加工“发汗”对厚朴质量的影响[D]. 北京: 中国中医科学院, 2013: 19-22.
- LIU H L. Interpretation of the effect of "sweating" in primary processing in producing area on the quality of *Magnolia officinalis* from the perspective of medicinal material characteristics and chemical composition[D]. Beijing: China Academy of Chinese Medical Sciences, 2013: 19-22.
- [25] 张红敏. 超高压处理对鲜切胡萝卜质地和颜色品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 40-41.
- ZHANG H M. Texture and color changes of fresh-cut carrot after high pressure processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 40-41.
- [26] 王琦, 张平平, 陈三娜, 等. 超高压处理与热处理对杏鲍菇片性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 110-116.
- WANG Q, ZHANG P P, CHEN S N, et al. Effects of ultra high pressure treatment and heat treatment on the properties of *pleurotus eryngii* slices[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(13): 110-116.
- [27] 胡友栋, 励建荣, 蒋跃明. 超高压处理影响果蔬品质的研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 235-240.
- HU Y D, LI J R, JIANG Y M. Research progress on effects of ultra-high pressure technology on quality of fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2009, 30(9): 235-240.
- [28] 张超, 华悦, 廉婧, 等. 肉苁蓉炮制过程中苯乙醇苷类成分含量变化规律研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2022, 29(4): 92-97.
- ZHANG C, HUA Y, LIAN J, et al. Study on variation laws of content of phenylethanol glycosides in *cistanches herba* during processing[J]. *Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine*, 2022, 29(4): 92-97.
- [29] 周菲. 桂花苯乙醇苷生物利用度的影响机制及其基于纳米载体的改善研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 26-27.
- ZHOU F. The bioavailability mechanism analysis and the improvement based on nano-delivery system of phenylethanoid glycosides from *Osmanthus fragrans* flowers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 26-27.
- [30] PRASAD K N, YANG B, ZHAO M M, et al. High pressure extraction of corilagin from longan (*Dimocarpus longan* Lour.)

- fruit pericarp[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 70(1): 41-45.
- [31] HUANG H W, HSU C P, YANG B B, et al. Advances in the extraction of natural ingredients by high pressure extraction technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 33(1): 54-62.
- [32] 朱玲英, 唐雨德, 沈红, 等. 超高压处理对鲜人参微生物及人参皂苷含量的影响[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(4): 564-568.  
ZHU L Y, TANG Y D, SHEN H, et al. Effect of ultra high-pressure processing on microorganisms and ginsenosides of Panax ginseng[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(4): 564-568.
- [33] 王治同, 宋宁, 胥廷良, 等. 超高压处理对软包装辣白菜质构和色泽的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(4): 57-61.  
WANG Z T, SONG N, XU T L, et al. Effect of high pressure processing on color and texture of flexible packaging kimchi [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(4): 57-61.
- [34] 王富海. 丽江雪桃中两种形态多酚氧化酶的酶学性质和钝化效果的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021: 46-50.  
WANG F H. Study on enzymatic properties and passivation effects of two forms of polyphenol oxidase in snow peach of Lijiang[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021: 46-50.
- [35] RASTOGI N K, NGUYEN L T, BALASUBRAMANIAM V M. Effect of pretreatments on carrot texture after thermal and pressure-assisted thermal processing[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(4): 541-547.
- [36] HENDRICKX M, LUDI KHUYZE L, VANDEN BROECK I, et al. Effects of high pressure on enzymes related to food quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(5): 197-203.
- [37] 马天宇. 产地加工对天麻巴利森苷类成分的转化与药材品质形成的影响研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2023: 16-17.  
MA T Y. Effects of the origin processing on the parishes transformation and quality formation of *Gastrodiaerhizoma* [D]. Jinan: Shandong University of Chinese Medicine, 2023: 16-17.
- [38] SULAIMAN A, SOO M J, YOON M M L, et al. Modeling the polyphenoloxidase inactivation kinetics in pear, apple and strawberry purees after high pressure processing[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 147: 89-94.
- [39] 姜宁宁, 马继洋, 张健, 等. 切片厚度和热风温度对沙果切片干制特性、物化性质及抗氧化成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 32-39.  
JIANG N N, MA J Y, ZHANG J, et al. Effects of slice thickness and hot-air temperature on drying characteristics, physico-chemical properties and antioxidants of mulasasiatica nakai slices[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 32-39.
- [40] 谢巧, 栗圣榕, 廖莉, 等. 切片与切段对叠鞘石斛多糖、联苜类化合物及石斛酚提取量的影响研究[J]. 中国药房, 2018, 29(17): 2 376-2 380.  
XIE Q, LI S R, LIAO L, et al. Study on the effects of slice and segment on the extraction amount of polysaccharides, bibenzyl compounds and dendrophenol from dendrobium denneanum [J]. China Pharmacy, 2018, 29(17): 2 376-2 380.
- [41] 姜辉煌, 侯爽, 周祉延, 等.  $L_{16}(4^5)$  正交实验优化鲜生姜黄酮类物质提取工艺[J]. 西部中医药, 2016, 29(5): 37-39.  
JIANG H H, HOU S, ZHOU Z Y, et al. The extraction process of flavonoid substances from fresh ginger optimized by  $L_{16}(4^5)$  orthogonal experiment[J]. Western Journal of Traditional Chinese Medicine, 2016, 29(5): 37-39.