王孟妮, 杨忠琴, 梁梦莹, 等. 芜菁沙棘复合饮料的制备工艺及耐缺氧作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 223−234. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050131

WANG Mengni, YANG Zhongqin, LIANG Mengying, et al. Preparation Process and Hypoxia Resistance of Turnip-Sea Buckthorn Compound Beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 223−234. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050131

· 工艺技术 ·

芜菁沙棘复合饮料的制备工艺及耐缺氧作用

王孟妮[1], 杨忠琴[2], 梁梦莹[2], 余和晏[3], 方　明[1,*], 王战国[1,2], 范维强[4]

（1.成都大学基础医学院护理学院, 四川成都 610106;
2.成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106;
3.茂县中医医院, 四川阿坝 623200;
4.阿坝藏族羌族自治州食品药品检验研究中心, 四川阿坝 624000）

摘　要: 目的：以药食同源植物芜菁和沙棘为原料，开发一种具有耐缺氧作用的功能性饮料，研究其缓解缺氧损伤的作用机制。方法：通过单因素实验及响应面试验优化芜菁沙棘复合饮料配方工艺。建立常压耐缺氧及亚硝酸钠中毒小鼠模型，检测心、脑、肺组织中超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）、谷胱甘肽过氧化物酶（glutathione peroxidase，GSH-Px）活性及丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量，通过 HE 染色和 Western blot 分析缺氧诱导因子-1α（hypoxia-inducible factor-1α，HIF-1α）及白细胞介素-6（interleukin-6，IL-6）表达水平。结果：芜菁沙棘复合饮料最佳配方为沙棘汁 22.0%、芜菁提取液 1.0%、果葡糖浆 7.5%、柠檬酸 0.1%，感官评分 80.5±1.3，理化指标（可溶性固形物 8.00%、总糖 9.12%、总酸 3.31 g/L）符合国家标准；动物实验中，低、中、高剂量组（8.45、16.90、33.80 g/kg·d）显著延长常压缺氧小鼠存活时间 19.92%、19.31%、18.97%（P<0.05），并提高心、脑、肺组织中 SOD、CAT 及 GSH-Px 抗氧化酶活性，降低 MDA 含量。Western blot 结果表明，复合饮料通过抑制 HIF-1α 蛋白表达及 IL-6 释放，缓解氧化应激并调控能量代谢通路。结论：优化得到芜菁沙棘复合饮料制备最佳工艺，可通过增强抗氧化能力并抑制 HIF-1α/IL-6 炎症通路提高机体缺氧耐受力，为功能性食品开发提供理论依据。

关键词: 芜菁, 沙棘, 功能性饮料, 耐缺氧作用

中图分类号: TS275.4　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0223−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050131　　本文网刊:

Preparation Process and Hypoxia Resistance of Turnip-Sea Buckthorn Compound Beverage

WANG Mengni[1], YANG Zhongqin[2], LIANG Mengying[2], YU Heyan[3], FANG Ming[1,*], WANG Zhanguo[1,2], FAN Weiqiang[4]

（1.School of Basic Medical Sciences & School of Nursing, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
2.School of Food and Bioengineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
3.Mao County Chinese Medicine Hospital, Aba 623200, China;
4.Food and Drug Inspection and Research Centre, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Aba 624000, China）

Abstract: Objective: This study aimed to develop a functional beverage using turnip (*Brassica rapa*) and sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), which were traditional medicinal and edible plants, and to investigate its ameliorative effect and potential mechanisms against hypoxia-induced injury. Methods: The formulation of the turnip-sea buckthorn compound

收稿日期: 2025−05−16

基金项目: 阿坝州科学技术局项目（R23YYJSYJ0025, R24YYJSYJ0028）; 四川省科技厅三区人才计划项目（2024-2026）。

作者简介: 王孟妮（1991−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 老年慢性疾病健康管理及医养技术研究, 药食同源中药保健食品研究与开发, E-mail: 212024105400017@cdu.edu.cn。

*** 通信作者:** 方明（1973−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 老年慢性疾病健康管理及医养技术研究, 药食同源中药保健食品研究与开发, E-mail: fangming@cdu.edu.cn。

beverage was optimized using single-factor experiments and response surface methodology. After optimization, mouse models of normobaric hypoxia and sodium nitrite poisoning were established. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GSH-Px), and the level of malondialdehyde (MDA) in heart, brain, and lung tissues were measured. Hematoxylin-eosin (HE) staining and Western blot analysis were performed to assess the expression levels of hypoxia-inducible factor-1α (HIF-1α) and interleukin-6 (IL-6). Results: The optimal formulation was determined to be 22.0% sea buckthorn juice, 1.0% turnip extract, 7.5% high-fructose syrup, and 0.1% citric acid, which yielded a sensory score of 80.5±1.3. The physicochemical indices (including soluble solids at 8.00%, total sugar at 9.12%, and total acid at 3.31 g/L) all complied with relevant national standards. In animal studies, administration of the low-, medium-, and high-dose groups (8.45, 16.90, and 33.80 g/kg·d, respectively) resulted in a significant extension of survival time under normobaric hypoxia by 19.92%, 19.31%, and 18.97% (P<0.05), respectively. Concurrently, the beverage treatment enhanced the activities of antioxidant enzymes (SOD, CAT, and GSH-Px) while reducing the MDA content in the heart, brain, and lung tissues. Western blot analysis further revealed that the compound beverage ameliorated oxidative stress and modulated the energy metabolism pathway via the suppression of HIF-1α protein expression and IL-6 release. Conclusion: The optimized turnip-sea buckthorn compound beverage effectively improved hypoxia tolerance. The underlying mechanism may be associated with the enhancement of antioxidant capacity and inhibition of the HIF-1α/IL-6 inflammatory pathway. These findings provide a theoretical basis for the development of functional foods aimed at mitigating hypoxia-induced damage.

Key words: *Brassica rapa*; *Hippophae rhamnoides*; functional beverage; hypoxia resistance

高原低氧环境对人体健康构成严峻挑战，常引发头痛、疲劳及器官损伤等缺氧症状。随着西藏等高海拔地区旅游业的发展，急性高原反应（AMS）的防治需求日益迫切[1−2]。据统计，56.47% 的平原居民急进海拔 3000 m 以上地区时会出现 AMS，严重者出现微量尿蛋白、血尿等功能障碍，甚至出现肾功能不全，威胁生命健康[3]。目前，高原缺氧的防护策略主要包括阶梯式适应、药物干预及功能性食品辅助等。传统抗缺氧药物如红景天、人参等虽效果明确，但存在资源稀缺、成本高昂的局限性[4−5]。因此，研究开发具有增强缺氧耐受性的药食同源产品，对于构建高原健康防护体系、缓解传统药材生态压力，以及推动藏区功能性食品产业升级具有重要意义。

近年来，大量研究聚焦于从药食同源植物中挖掘具有抗缺氧潜力的天然活性成分。诸多多糖类（如枸杞多糖、黄芪多糖）、黄酮类（如葛根素、芦丁）、多酚类及皂苷类化合物已被证实可通过增强抗氧化酶活性、抑制炎症反应、调节能量代谢等途径显著提高机体缺氧耐受力[6]。例如，研究表明枸杞多糖能延长缺氧小鼠存活时间，其机制与改善线粒体功能和减少氧化损伤密切相关[7]；而红景天苷则通过稳定 HIF-1α 信号通路，增强细胞对缺氧的适应性[8]。这些研究为开发新型耐缺氧功能食品提供了丰富的物质基础和理论依据。

芜菁（*Brassica rapa* L.）广泛分布于西藏等高海拔地区，富含维生素、有机酸、多糖、氨基酸、矿物质及黄酮等营养成分[9−10]，其多糖成分可通过清除自由基[11]、提升抗氧化酶活性[12] 显著延长缺氧模型小鼠存活时间[13]，并改善能量代谢[14]；沙棘（*Hippophae rhamnoides* L.）果实中富含维生素 C、维生素 E、类胡萝卜素、矿物质、植物甾醇及黄酮类化合物等多种生物活性物质[15−16]，具有耐缺氧、抗氧化、增强免疫力、调节血脂等生理功能，其提取物可激活抗氧化信号通路，缓解缺氧诱导的组织损伤[17−21]。本研究以芜菁和沙棘为原料，开发一款营养与功能兼具的复合饮料。通过配方优化，保留原料天然活性成分，并探究其对缺氧相关氧化应激、能量代谢及炎症反应的调节作用。该研究不仅为耐缺氧功能性饮料的研发提供理论支持，同时拓展了芜菁与沙棘的药食同源价值，助力高原健康产品创新及特色农产品资源的高效利用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芜菁　阿坝州松潘县红土村；沙棘　山西省吕梁市；阳性对照药红景天胶囊（批号：国食健注）　四川省佳汇泰生物科技开发有限公司；柠檬酸、果胶　食品级，新疆阜丰生物科技有限公司；果葡糖浆（F55）　温州市盒记食品有限公司；黄原胶、海藻酸钠、羧甲基纤维素钠（CMC）　食品级，河南万邦化工科技有限公司；β-环状糊精、卡拉胶　食品级，绿新（福建）食品有限公司；硫酸　分析纯，成都市科隆化学品有限公司；苯酚　天津市科密欧化学试剂有限公司；无水葡萄糖　上海源叶生物科技有限公司；酚酞　天津聚恒达化工有限公司；氢氧化钠　广西林氏化学试剂有限公司；平板计数琼脂　北京陆桥技术股份有限公司；亚硝酸钠、凡士林　国药集团化学试剂有限公司；钠石灰　上海纳辉干燥试剂厂；谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）试剂盒、丙二醛（MDA）试剂盒、乳酸脱氢酶（LDH）试剂盒、超氧化物歧化酶（SOD）试剂盒、肌酸激酶（CK）试剂盒、过氧化氢酶（CAT）试剂盒　Bioengineering Institute；β-Actin 抗体、HIF-1α 抗体　江苏亲科生物研究中心有限公司；IL-6 抗体　武汉赛维尔生物科技有限公司；昆明雄性小鼠　150 只，4 周龄，SPF 级，体重 18~22 g，成

都达硕实验动物有限公司（许可证号：SCXK（川）2020-0030），饲养条件：温度 23±3 ℃、湿度 55%±15%、12 h 光暗循环。

XSR64 精密电子天平　上海微川精密仪器有限公司；LB-101A 电热鼓风干燥箱　青岛路博宏业环保技术开发有限公司；UPTA-20 超纯水机　上海力辰邦西仪器科技有限公司；RE-1020 旋转蒸发仪　郑州生化仪器有限公司；WB100-2 水浴锅　宁波市鄞州群安实验仪器有限公司；IN-P400M 无菌均质器　山东寻因光电科技有限公司；H1M 多功能微孔板检测仪　广州市达瑞生物技术股份有限公司；BS360S 全自动生化分析仪　Mindray。

1.2　实验方法

1.2.1　芜菁沙棘复合饮料制备工艺流程　a.沙棘果→清洗→捣碎→过滤→沙棘汁；b.芜菁→烘干→水提取→过滤→芜菁提取液；c.沙棘汁、芜菁提取液→混合调配→添加辅料→均质→灌装→灭菌→复合沙棘芜菁饮料。

操作要点：芜菁提取液制备：新鲜芜菁块茎洗净切片（厚度 3 mm），70 ℃ 烘干，按料液比 1∶10 加入纯水，浸泡 6 h 后煎煮 1 h，过滤得到滤液，以上步骤重复两次，合并滤液，旋转蒸发浓缩至 10 g/mL，浓缩液经 5000 r/min 离心 10 min，收集上清液备用。沙棘汁制备：沙棘果实经清洗、去杂后榨汁，过滤去渣，获得沙棘原汁。配方混合：按比例混合芜菁提取液与沙棘原汁，添加果葡糖浆和柠檬酸，加入溶解后的黄原胶与 CMC，搅拌混匀，纯水定容。均质：2000 r/min 均质 2 min，提升体系均匀性及稳定性。灭菌：90 ℃ 水浴灭菌 10 min，冷却后分装，密封即得成品。

1.2.2　复合饮料感官评分表　根据 GB 7101-2022《食品安全国家标准 饮料》[22] 及实验需求，组建了 10 名食品专业人员构成的感官评定小组，对样品的色泽、口感、香气和外观形态进行百分制评价，具体评分细则见表 1。

表 1　芜菁沙棘复合饮料的感官评分标准

Table 1　Sensory evaluation criteria of turnip-sea buckthorn compound beverage

项目	要求
色泽（20分）	色泽均匀明亮，呈现橙色，无杂色（15~20） 色泽一般，偏黄色或偏暗，有杂色（8~14） 色泽失调，颜色呈现黄色或颜色较暗（0~7）
口感（30分）	酸甜适中，无苦涩味，口味清爽（21~30） 酸甜较适中，略带苦涩味，口味较清爽（11~20） 酸甜失调，有明显苦涩味，口味不够清爽（0~10）
气味（30分）	具有沙棘、芜菁两者的果香味，香味均匀协调，无异味（21~30） 果香味较淡，气味基本协调，无异味（11~20） 果香味不协调，有异味（0~10）
形态（20分）	组织状态均匀，无分层、沉淀现象（15~20） 组织状态较均匀，略微有分层或者沉淀现象（8~14） 组织状态不均匀，有明显的分层或者沉淀现象（0~7）

1.2.3　复合饮料配方工艺研究　经预实验确定沙棘汁、芜菁提取液、果葡糖浆、柠檬酸添加量分别为 15%、1.00%、5%、0.10%，此配方下复合饮料感官评分较优，风味协调，酸甜适中。

在单因素实验中分别考察以下变量对感官评分的影响：沙棘汁添加量（10%、15%、20%、25%、30%）：固定芜菁提取液 1.00%、果葡糖浆 5%、柠檬酸 0.10%。芜菁提取液添加量（0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%）：固定沙棘汁 15%、果葡糖浆 5%、柠檬酸 0.10%。果葡糖浆添加量（1%、3%、5%、7%、9%）：固定沙棘汁 15%、芜菁提取液 1.00%、柠檬酸 0.10%。柠檬酸添加量（0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%）：固定沙棘汁 15%、芜菁提取液 1.00%、果葡糖浆 5%。以感官评分为响应值，采用 Box-Bebnken Design 进行配方工艺优化（表 2）。

表 2　芜菁沙棘复合饮料的响应面因素水平表

Table 2　Response surface factors and levels table for turnip-sea buckthorn compound beverage

水平	因素		
	A沙棘汁添加量（%）	B芜菁提取液添加量（%）	C果葡糖浆添加量（%）
−1	15	0.75	5
0	20	1.00	7
1	25	1.25	9

1.2.4　复合饮料成型工艺研究　芜菁沙棘复合饮料因富含果胶和纤维属于浑浊型饮料，存在稳定性差、易沉淀分层的问题[23]。以离心沉淀率为评价指标，对复合饮料稳定剂的复配比例及添加量进行优化。经预实验筛选，选取黄原胶、羧甲基纤维素钠（CMC）和海藻酸钠作为复配稳定剂，稳定剂总添加量为 0.10%。考察不同复配比例及稳定剂添加量对复合饮料稳定性的影响，以确定饮料最佳成型工艺参数。各处理样品充分搅拌混匀后，于 25 ℃ 下静置 1 h，离心（4000 r/min，15 min），按以下公式计算离心沉淀率。

$$离心沉淀率(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_0 为离心管质量；m_1 为 10 mL 饮料与离心管总质量；m_2 为沉淀物与离心管总质量。

1.2.5　指标测定分析方法　参照 GB/T 12143-2008《饮料通用分析方法》[24]，采用折光仪法测定可溶性固形物含量；参考苯酚-硫酸法测定总糖含量[25]；参考 GB/T 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》[26] 中“酸碱滴定法”测定总酸含量；采用 GB 4789.2-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》[27] 测定菌落总数；采用 GB 4789.3-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》[28] 测定大肠杆菌数；参考 GB 29921-2021《食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量》[29] 测定致病菌。

1.2.6　动物实验

1.2.6.1　动物模型建立与给药　参照《保健食品功能

检验与评价方法(2023 年版)》要求,小鼠适应性喂养一周后,随机选取 10 只作为空白对照组(NC),其余小鼠随机分为常压缺氧实验组和亚硝酸钠中毒存活实验组,每个实验组分为 7 个亚组(n=10),包括:缺氧对照组(MC):灌胃不含芜菁与沙棘的空白饮料;阳性对照组(PC):给予红景天胶囊,剂量 10.40 g/kg·d;低剂量组(BH-L)、中剂量组(BH-M)、高剂量组(BH-H):分别灌胃芜菁沙棘复合饮料,剂量依次为 8.45、16.90、33.80 g/kg·d(按人体推荐量的 5、10、20 倍换算);芜菁组(HC):灌胃芜菁提取液,剂量 23.40 g/kg·d;沙棘组(BC):灌胃沙棘提取液,剂量 10.40 g/kg·d。常压缺氧实验组小鼠末次灌胃后 1 h,将各组小鼠分别放入盛有 5 g 钠石灰的磨口瓶内(每瓶 1 只),用凡士林封瓶口确保其不漏气,以呼吸停止为指标,观察小鼠因缺氧而死亡的时间;亚硝酸钠中毒存活实验组小鼠按 200~240 mg/kg BW 剂量腹腔注射亚硝酸钠(注射量为 0.1 mL/10 g),记录动物存活时间。

剂量设置依据《四川省藏药材标准》及《中国药典》[30] 中的人体推荐量。剂量组经口连续给予不同浓度受试样品,对照组给予同等容量溶剂。空白对照组与模型对照组每日灌胃蒸馏水,实验组按对应剂量经口灌胃给药,连续 35 d,给药体积根据小鼠体重动态调整。每 7 d 记录一次体重变化,监测生长状况。第 35 d,除空白对照组外,其余组别分别进行常压缺氧或亚硝酸钠中毒存活模型实验。

1.2.6.2 样品采集 实验结束后,根据《保健食品功能检验与评价方法(2023 年版)》中“耐缺氧检验方法”,将小鼠解剖并采集心、肺、脑组织样本。组织样本迅速用预冷生理盐水漂洗,滤纸吸干表面液体后,置于−80 ℃ 超低温冰箱保存,用于后续生化指标及病理学分析[31]。

1.2.6.3 生化指标测定 取心、肺、脑组织样本,MDA、CAT、SOD、GSH-Px、LDH、CK 活性测定方法及流程参照试剂盒说明进行。

1.2.6.4 组织病理切片的制备和观察 取心肌和肺组织样本,进行苏木精-伊红(HE)染色,于光学显微镜下观察心肌和肺组织的病理形态学改变,评估缺氧及中毒引起的组织损伤程度。

1.2.6.5 蛋白免疫印迹分析 取心肌组织样本冰浴匀浆,4 ℃、12000 r/min 离心 10 min 收集上清液,BCA 法测总蛋白浓度后,进行 SDS-PAGE 电泳及转膜。使用 HIF-1α(1∶1000)、IL-6(1∶1000)和 β-肌动蛋白(1∶5000)一抗及 HRP 标记山羊抗兔/鼠 IgG 二抗(1∶10000),室温孵育后 TBST 洗膜 3 次,显影检测蛋白表达。

1.3 数据处理

所有结果均以平均值±标准差(SD)表示。采用 GraphPad Prism 7.0、ChemiScope 6100、Design-Expert 12 及 ImageJ 1.8、Origin 2019 软件进行单因素方差分析、图像采集、数据分析及绘图。所有结果与正常组相比,“#”表示 $P<0.05$,“##”表示 $P<0.01$,“###”表示 $P<0.001$;与模型组相比,“*”表示 $P<0.05$,“**”表示 $P<0.01$,“***”表示 $P<0.001$,“ns”代表不显著($P>0.05$)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 沙棘汁添加量对复合饮料感官评价的影响

由图 1 可知,当沙棘汁添加量为 20% 时,感官评分最高为 75 分,此时饮料酸甜适中,口感协调性较好,可更好地突出沙棘汁的独特清香。

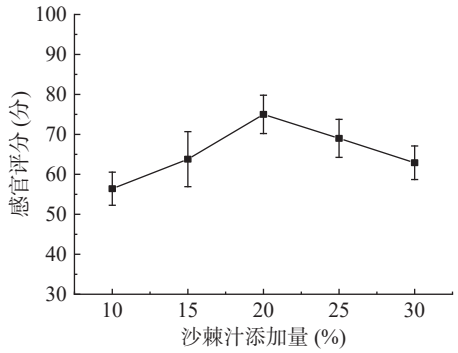


图 1 沙棘汁添加量对复合饮料感官评分的影响

Fig.1 Effect of *Hippophae rhamnoides* juice addition on sensory evaluation of composite beverage

2.1.2 芜菁提取液添加量对复合饮料感官评价的影响 由图 2 可知,随着芜菁提取液添加量的增加,饮料的感官评分呈先升高后下降趋势。当芜菁提取液添加量为 1.0% 时,芜菁和沙棘的风味和口感相互协调,无明显涩味。

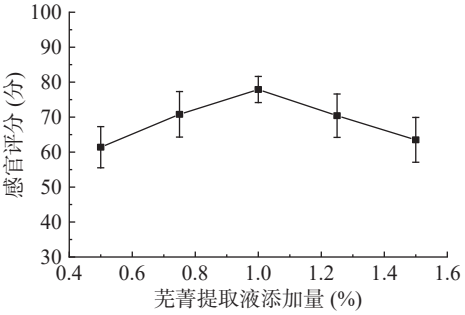


图 2 芜菁提取液添加量对复合饮料感官评分的影响

Fig.2 Effect of the addition of *Brassica rapa* extract on the sensory evaluation of composite beverage

2.1.3 果葡糖浆添加量对复合饮料感官评价的影响

如图 3 所示,随着果葡糖浆的添加,在一定程度上能增加饮料的甜度改善口感。当添加量为 7% 时,饮料的甜度适中,口感细腻,感官评分最高为 79.1 分。但随着果葡糖浆添加量过多时,饮料口感甜腻,感官评分随之下降。

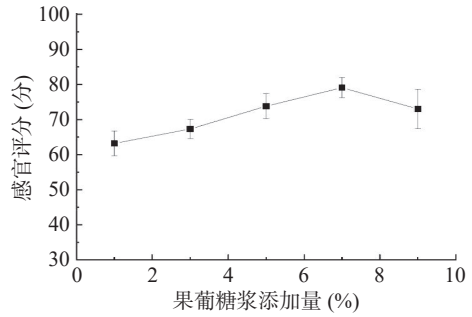


图 3　果葡糖浆添加量对复合饮料感官评分的影响

Fig.3　Effect of glucose syrup addition on sensory evaluation of composite beverage

2.1.4　柠檬酸添加量对复合饮料感官评价的影响　如图 4 所示，当柠檬酸添加量为 0.10% 时，感官评分最高为 76.9 分。柠檬酸添加量过高会导致饮料过酸，不仅产生了尖锐或刺激性的酸感，而且掩盖了饮料中其他芳香物质的风味以及沙棘汁本身的特征性清香与口感，最终导致感官评分下降。

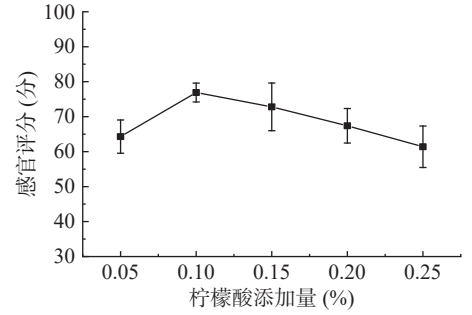


图 4　柠檬酸添加量对复合饮料感官评分的影响

Fig.4　Effect of the addition of citric acid on the sensory evaluation of composite beverage

2.2　响应面试验结果与方差分析

2.2.1　响应面试验结果　响应面优化芜菁沙棘复合饮料配方结果，如表 3 所示，通过表 3 的响应值进行多元回归拟合分析，可得到沙棘汁添加量（A）、芜菁提取液添加量（B）、果葡糖浆添加量（C）的二次多元回归拟合方程如下：$Y=79.18+2.11A+1.41B+2.55C+0.57AB-0.35AC+0.50BC-3.63A^2-5.23B^2-5.25C^2$。

表 3　响应面试验设计及结果

Table 3　Experimental design of the response surface and results

实验号	A沙棘汁添加量(%)	B芜菁提取液添加量(%)	C果葡糖浆添加量(%)	感官评分（分）
1	15	0.75	7	67.0
2	25	0.75	7	69.6
3	15	1.25	7	69.9
4	25	1.25	7	74.8
5	15	1.00	5	65.2
6	25	1.00	5	70.6
7	15	1.00	9	70.7
8	25	1.00	9	74.7
9	20	0.75	5	65.7
10	20	1.25	5	66.3
11	20	0.75	9	70.1
12	20	1.25	9	72.7
13	20	1.00	7	78.9
14	20	1.00	7	79.9
15	20	1.00	7	78.6
16	20	1.00	7	79.9
17	20	1.00	7	78.6

对所得方程进行方差分析，如表 4 所示，该模型极显著（$P<0.01$），失拟项 P 值=0.18（$P>0.05$）不显著，模型回归系数 $R^2=0.987$，说明该模型拟合良好并且具有较高可靠性，可以较好地描述自变量与芜菁沙棘复合饮料感官评分的关系。各因素对芜菁沙棘复合饮料感官评分的影响大小依次为：果葡糖浆添加量（C）>沙棘汁添加量（A）>芜菁提取液添加量（B）。

表 4　响应面二次模型方差和回归系数分析

Table 4　Analysis of variance and regression coefficient of the quadratic model of the response surface

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	425.62	9	47.29	61.07	<0.0001	**
A沙棘汁添加量	35.70	1	35.70	46.10	0.0003	
B芜菁提取液添加量	15.96	1	15.96	20.61	0.0027	
C果葡糖浆添加量	52.02	1	52.02	67.18	<0.0001	**
AB	1.32	1	1.32	1.71	0.2326	
AC	0.49	1	0.49	0.63	0.4525	
BC	1.00	1	1.00	1.29	0.2932	
A^2	55.41	1	55.41	71.55	<0.0001	**
B^2	115.06	1	115.06	148.59	<0.0001	**
C^2	116.16	1	116.16	150.01	<0.0001	**
残差	5.42	7	0.77			
失拟项	3.63	3	1.21	2.71	0.18	
纯误差	1.79	4	0.45			
校正综合	431.04	16				

注：**表示差异极显著，$P<0.01$。

2.2.2　响应面试验各因素交互作用分析　通过 Design-Expert 12 对各因素之间的交互作用进行响应面分析，并绘制响应面曲线图和等高线图（图 5）。三维响应面直观地反映了各个因素对复合饮料感官评分的影响。感官评分随沙棘汁、芜菁提取液及果葡糖浆添加量的增加，均呈现先增大后减小的趋势。综合分析，影响芜菁沙棘复合饮料感官评分的因素顺序为：果葡糖浆（C）>沙棘汁（A）>芜菁提取液（B），与方差分析结果一致。

2.2.3　响应面最优条件预测与验证实验　根据响应面试验结果得芜菁沙棘复合饮料的最优成型工艺条件为：沙棘汁 21.47%、芜菁提取液 1.04%、果葡糖浆 7.48%，此条件下饮料的感官评分预测值为 79.91 分。条件修正后为沙棘汁 22.0%、芜菁提取液 1.0%、果葡糖浆 7.5%，感官评分为 80.5±1.3 分，与预测模型基本相符。

2.3　复合饮料成型工艺研究结果

2.3.1　稳定剂复配结果与分析　经预实验分析，筛选出黄原胶、羧甲基纤维素钠（CMC）及海藻酸钠 3 种稳定剂进行复配，按稳定剂总添加量为 0.1% 添加到饮料中，参考文献 [32]，利用离心沉淀率分析稳定剂比例对饮料的稳定性影响，结果见表 5。

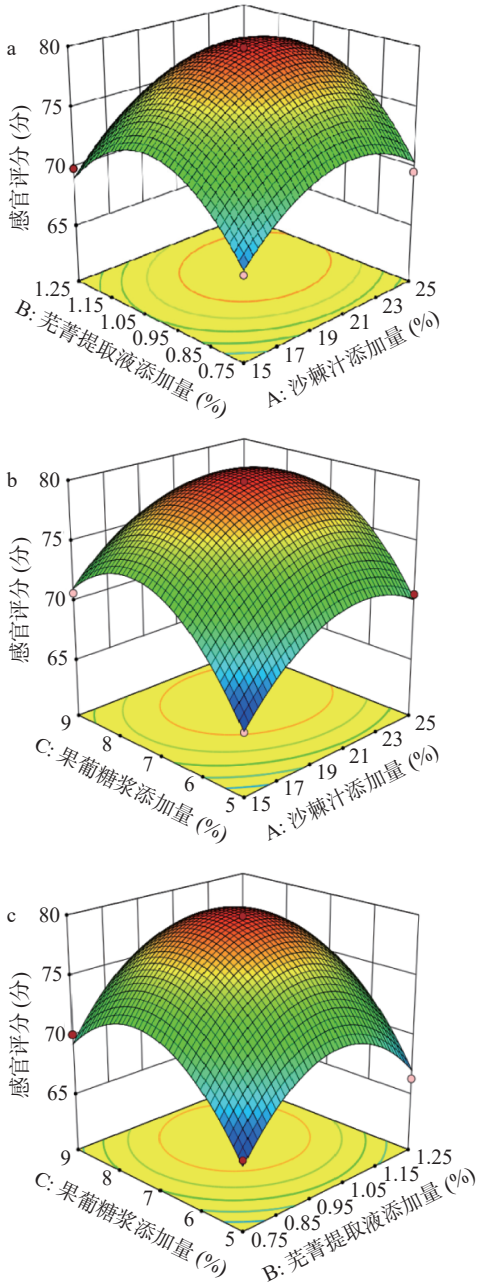


图 5　各因素交互作用对复合饮料感官评分影响的响应面图

Fig.5　Response surface plots of the effect of interaction of factors on sensory scores of composite beverages

表 5　稳定剂复配对复合饮料稳定性的影响

Table 5　Effect of stabiliser mix on the stability of composite beverage

组别	A黄原胶	B羧甲基纤维素钠	C海藻酸钠	离心沉淀率(%)
1	1	2	0	1.24±0.18
2	2	1	0	0.55±0.07
3	1	1	0	0.96±0.22
4	1	0	2	0.88±0.23
5	2	0	1	0.64±0.15
6	1	0	1	1.52±0.32
7	0	1	2	1.21±0.02
8	0	2	1	1.55±0.37
9	0	1	1	1.83±0.37

2.3.2　稳定剂添加量结果与分析　由表 5、表 6 可知，黄原胶与 CMC 的比例为 2∶1 复配时，总添加量 0.15% 时的离心沉淀率最低，故确定其最适添加量为 0.15%。

表 6　稳定剂添加量对复合饮料稳定性的影响

Table 6　Effect of the addition of stabilisers on the stability of composite beverage

组别	稳定剂添加量(%)	离心沉淀率(%)
1	0.05	1.74±0.30
2	0.10	0.58±0.27
3	0.15	0.51±0.32
4	0.20	0.64±0.34
5	0.25	0.76±0.29

2.4　理化指标结果

2.4.1　复合饮料感官评价结果　芜菁沙棘复合饮料整体感官品质良好。产品呈现亮橘黄色，色泽均匀稳定，明亮且富有光泽。其香气特征鲜明，具有芜菁与沙棘独特的复合风味，无异杂气味。在口感方面，饮料香味明显，滋味酸甜可口，风味协调。其组织状态表现为略呈浓稠的液态体系，质地均匀，无肉眼可见的沉淀物或悬浮物。

2.4.2　复合饮料理化指标结果　对芜菁沙棘复合饮料的关键理化指标及微生物安全性进行了检测。微生物指标检测结果显示：菌落总数小于 300 CFU/mL、大肠菌群及致病菌均未检出。结果表明芜菁沙棘复合饮料中的微生物指标均符合 GB 7101-2022《食品安全国家标准 饮料》中对菌落总数和大肠菌群的要求，确保了产品的食用安全性。

理化指标测定结果如表 7 所示。产品中可溶性固形物含量为 8.00%±0.10%。可溶性固形物是影响饮料口感和营养价值的重要指标，赋予饮料适宜的质感和一定的营养基础。主要包括糖类、有机酸、矿物质、维生素等可溶性物质，其中，总糖含量测定值为 9.12%±0.23%。总糖是饮料主要的能量来源和甜味来源，直接影响产品的甜度。总酸含量为 3.31±0.07 g/L。总酸是决定饮料酸味强度和清爽感的关键因素。

表 7　芜菁沙棘复合饮料理化指标测定结果

Table 7　Determination results of physicochemical parameters of turnip-seabuckthorn compound beverage

样品	含量
可溶性固形物(%)	8.00±0.10
总糖含量(%)	9.12±0.23
总酸含量(g/L)	3.31±0.07

2.5　复合饮料对缺氧小鼠的改善作用

2.5.1　对缺氧小鼠存活时间的影响　如图 6 所示，常压缺氧实验中，各灌胃组均显著延长小鼠存活时间（P<0.05），其中低、中、高剂量组、阳性对照组分别延长 19.92%、19.31%、18.97%、20.68%，低、中剂量组小鼠存活时间优于高剂量组，可能是由于芜菁与沙棘的活性成分在低中剂量时更接近最佳生物利用

率[33]；亚硝酸钠中毒实验中，阳性对照组存活时间延长 59.75%（P<0.01），低、中剂量组、芜菁组分别延长 52.32%、51.25%、45.17%（P<0.05）。这与杨永东等[34] 的研究一致，结果显示芜菁沙棘复合饮料可有效增强缺氧耐受能力，且复合配方优于单一成分。

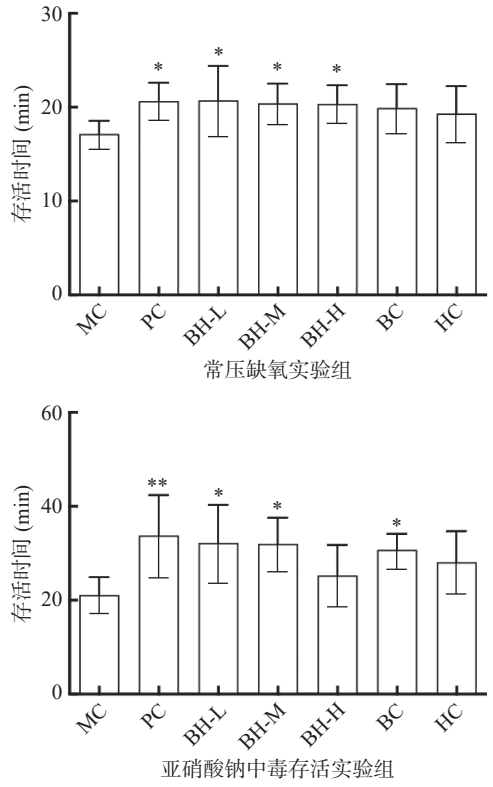


图 6　对缺氧小鼠存活时间的影响

Fig.6　Effect on survival time of hypoxic mice

注：与模型组相比，“*”表示 P<0.05，“**”表示 P<0.01，“***”表示 P<0.001，“ns”代表不显著（P>0.05）；图 7~图 11、图 14 同。

2.5.2　对常压缺氧小鼠心、肺、脑组织氧化应激指标的影响

2.5.2.1　对常压缺氧小鼠心肌组织氧化应激指标的影响　如图 7 结果所示，缺氧环境下，与 NC 组比较，MC 小鼠心肌组织 MDA 含量升高，CAT、SOD、GSH-Px 活性降低。灌胃治疗后，其中 BH-L 组 CAT 活性、BH-M/H 组 SOD 活性（P<0.05）、PC 组与 BH-L 组的 GSH-Px 活性（P<0.01）均显著提升，MDA 含量下降。实验结果表明该复合饮料通过增强抗氧化酶活性，有效缓解心肌氧化应激损伤[35]。

2.5.2.2　对常压缺氧小鼠脑组织氧化应激指标的影响　如图 8 所示，与 NC 组比较，MC 组小鼠脑组织氧化应激指标异常：其中 MDA 含量显著升高（P<0.05），CAT、GSH-Px 含量显著下降（P<0.05），SOD 含量无显著变化。各灌胃组中，PC 组 MDA 含量显著降低（P<0.05）；BH-L 组和 BC 组 CAT 活性提升（P<0.05）；BH-M 组和 HC 组 SOD 含量升高（P<0.05）；PC 组与 BH-M 组 GSH-Px 含量显著升高（P<0.01）。表明该复合饮料能有效缓解脑组织氧化损伤，提升抗氧化能力。

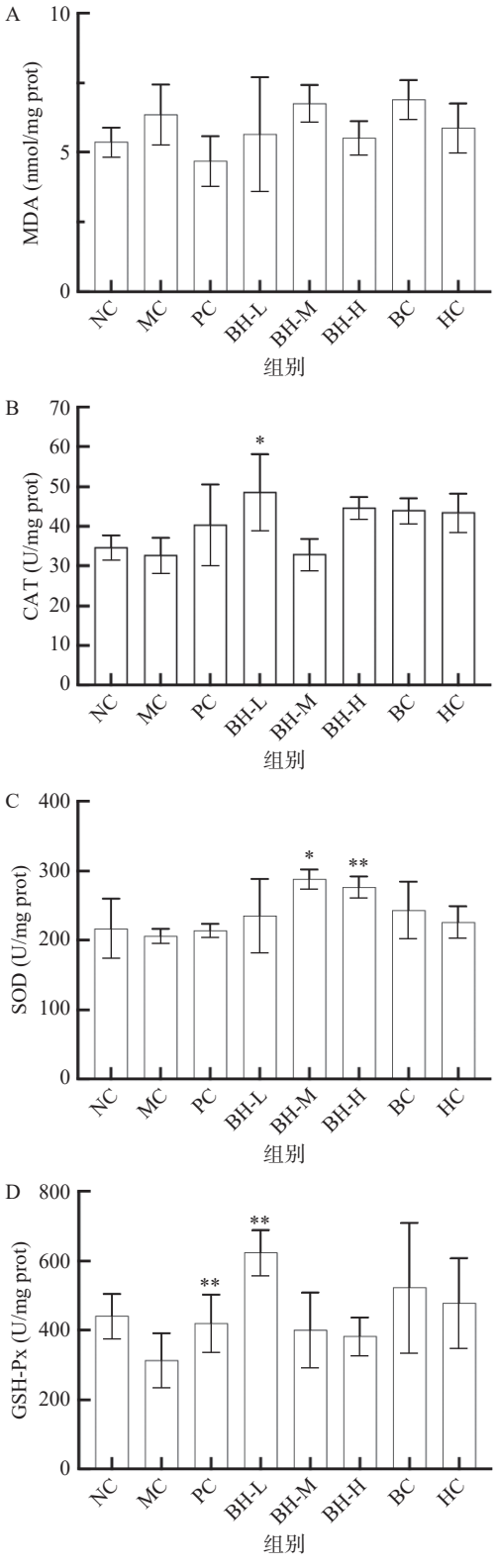


图 7　对常压缺氧小鼠心肌组织氧化应激指标的影响

Fig.7　Impact on oxidative stress indicators in myocardial tissue of mice under normobaric hypoxia

注：A：MDA；B：CAT；C：SOD；D：GSH-Px；与正常组相比，“#”表示 P<0.05，“##”表示 P<0.01；图 8~图 11、图 14 同。

2.5.2.3　对常压缺氧小鼠肺组织氧化应激指标的影响　如图 9 结果所示，MC 小鼠肺组织 MDA 含量显著升高（P<0.01），SOD、CAT、GSH-Px 含量降低。

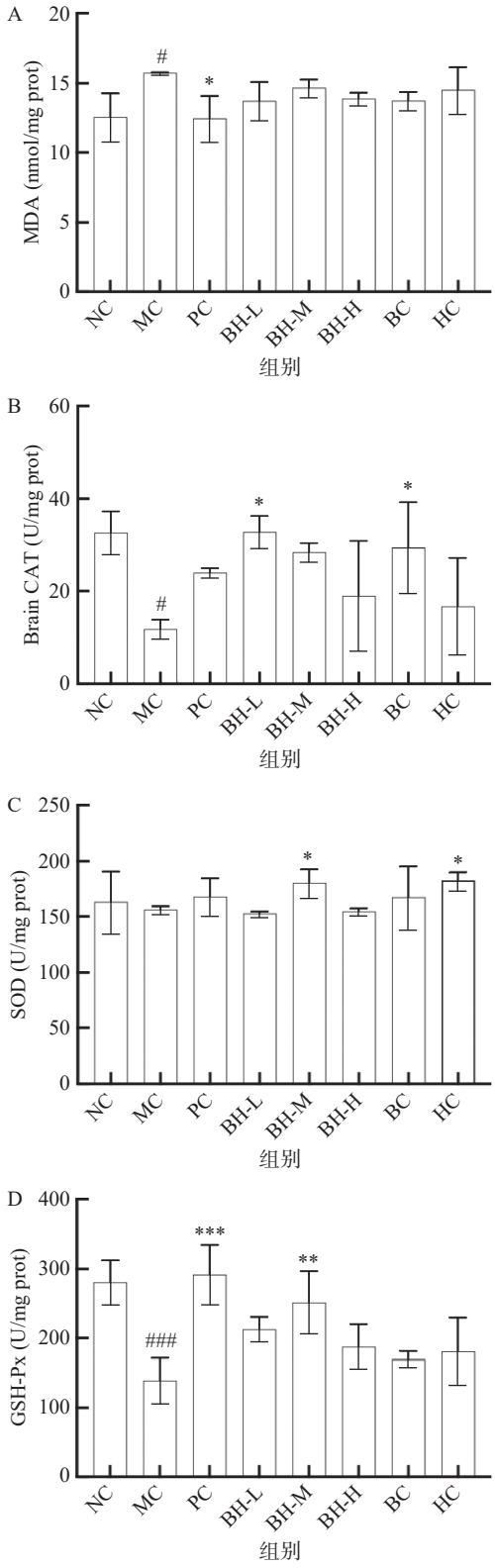


图 8　对常压缺氧小鼠脑组织氧化应激指标的影响

Fig.8　Impact on oxidative stress indicators in brain tissue of mice under normobaric hypoxia

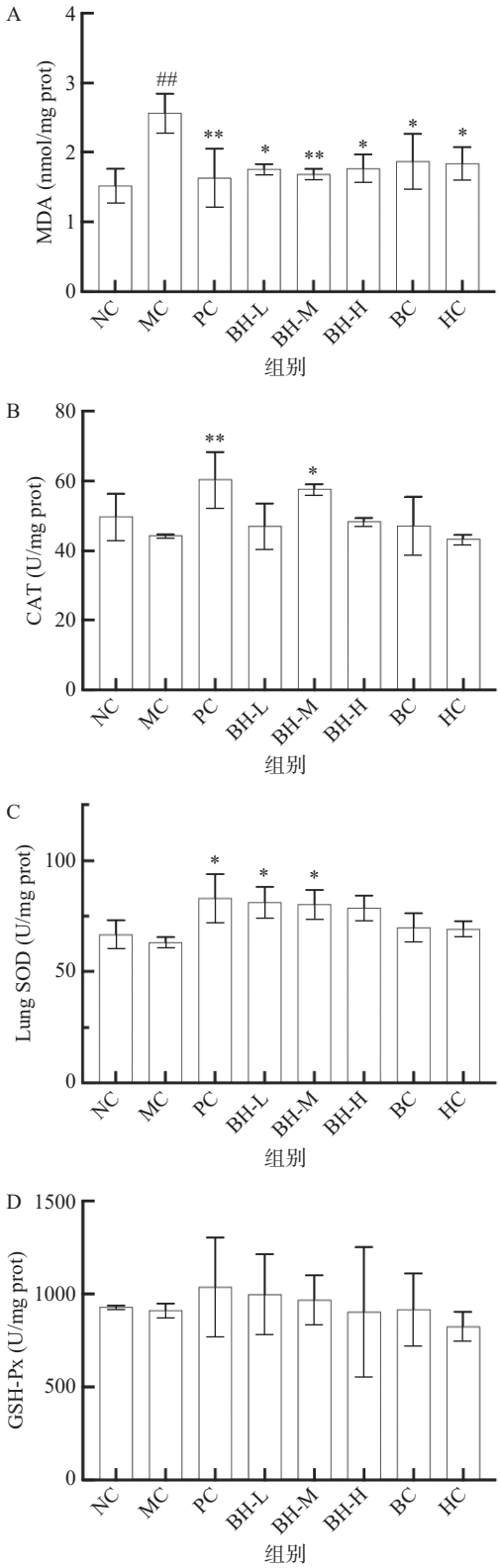


图 9　对常压缺氧小鼠肺组织氧化应激指标的影响

Fig.9　Impact on oxidative stress indicators in lung tissue of mice subjected to normobaric hypoxia

BH 各剂量组、PC 组、BC 组和 HC 组等干预后，MDA 含量显著下降（P<0.05）；PC 组和 BH-M 组 CAT 活性显著提升（P<0.05），BH-L、BH-M 组及 PC 组 SOD 活性显著升高（P<0.05）。表明该复合饮料通过增强抗氧化酶活性、抑制脂质过氧化，减轻缺氧引起的肺组织氧化损伤。

2.5.3　对常压缺氧小鼠心、肺、脑组织 LDH 含量的影响　如图 10A 结果所示，在缺氧实验中，MC 小鼠心肌组织 LDH 活性显著升高（P<0.01），BH-M、BH-H 及 PC 组心肌 LDH 水平显著降低（P<0.05），减少乳酸生成。此外，缺氧导致脑、肺组织 LDH 活性降低（P<0.05），可能是因为 ATP 不足影响酶功能[36]，结

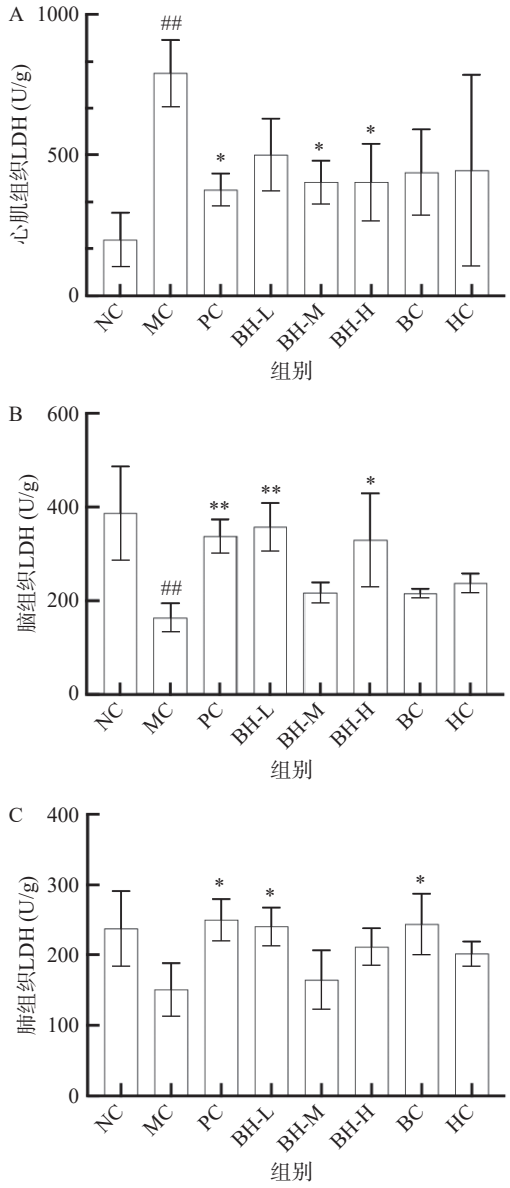


图 10　对常压缺氧小鼠心(A)、脑(B)和肺(C)组织 LDH 含量的影响

Fig.10　Effects on LDH content in heart (A), brain (B) and lung (C) tissues of normobaric hypoxic mice

果见图 10B、图 10C；但 BH-L、BH-H、PC 组显著升高脑组织 LDH 含量（P<0.05），BH-L、PC 和 BC 组改善肺组织 LDH 含量（P<0.05）。表明该复合饮料可通过调控 LDH 活性维持能量代谢，缓解缺氧引发的组织酸中毒及损伤[37−38]。

2.5.4　对常压缺氧小鼠心肌组织 CK 活力的影响　如图 11 所示，芜菁沙棘复合饮料可改善缺氧导致的小鼠心肌损伤。实验结果显示，常压缺氧环境下，MC 小鼠心肌中的 CK 水平显著升高（P<0.01），而 BH-H、PC、HC 组的小鼠 CK 水平降低，效果与红景天胶囊相当。

2.5.5　对常压缺氧小鼠心肌组织和肺组织病理学变化的影响　小鼠心肌组织病理结果见图 12，NC 组小鼠心肌结构完整，无异常；MC 组小鼠心肌纤维断裂、核固缩、间质水肿及炎症浸润，坏死显著，给药后

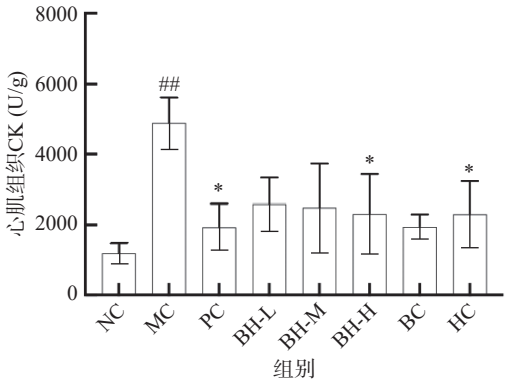


图 11　对常压缺氧小鼠心肌组织 CK 活力的影响

Fig.11　Effect on CK activity in heart tissue of normoxic mice under normal pressure hypoxia

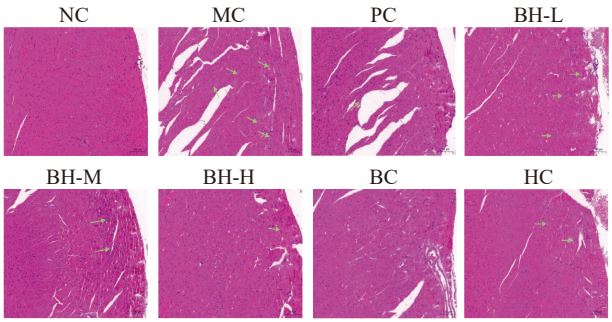


图 12　小鼠心肌组织病理结果(HE, 200×)

Fig.12　Histopathologic findings in mouse myocardium (HE, 200×)

心肌纤维结构恢复完整，水肿和坏死减少，接近正常组水平。表明该复合饮料可有效缓解缺氧导致的心肌损伤。

小鼠肺组织病理结果见图 13，NC 组小鼠肺组织结构完整，肺泡清晰，无炎症；MC 组小鼠肺泡壁增厚、结构破坏，伴炎性细胞浸润及出血，经红景天胶囊和芜菁沙棘复合饮料干预后，肺组织炎症减轻，肺泡结构完整性得到保护，出血减少，效果与红景天相当。表明该复合饮料可有效保护缺氧导致的肺组织损伤。

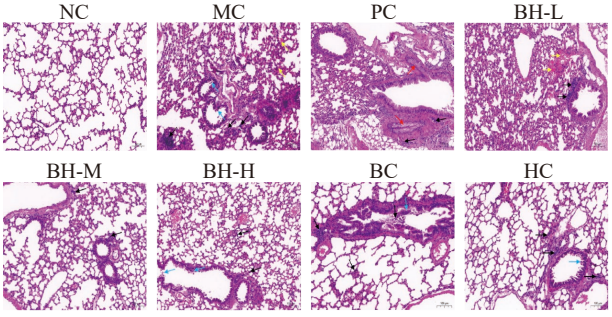


图 13　小鼠肺组织病理结果(HE, 200×)

Fig.13　Histopathologic findings in mouse lungs (HE, 200×)

2.5.6　对常压缺氧小鼠心肌组织 HIF-1α 蛋白及其下游蛋白 IL-6 表达的影响　如图 14 所示，MC 组小鼠心肌组织中 HIF-1α 和 IL-6 蛋白表达水平显著升高

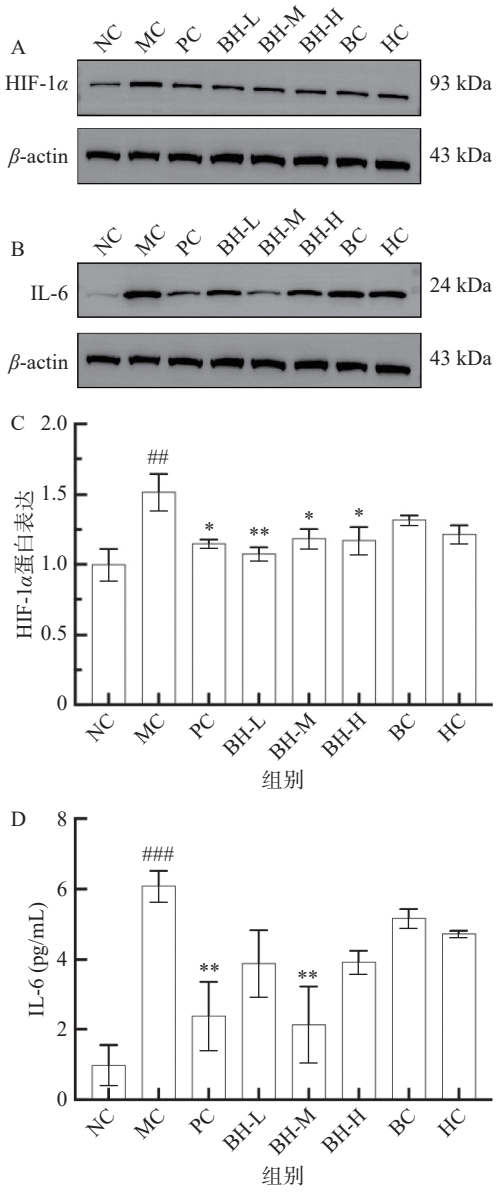


图 14　常压缺氧小鼠心肌组织 HIF-1α 及其下游蛋白 IL-6 表达

Fig.14　Expression of HIF-1α and its downstream protein IL-6 in myocardial tissues of normobaric hypoxic mice

(P<0.01, P<0.001)，说明缺氧加剧炎症反应[39−40]。经芜菁沙棘复合饮料干预后，PC、BH-L 和 BH-M 显著下调 HIF-1α(P<0.05)的表达，其中 PC 和 BH-M 显著下调 IL-6(P<0.01)的表达。表明该饮料可能通过抑制 HIF-1α 的稳定性，减少下游炎症因子 IL-6 释放，从而缓解缺氧应激及炎症，增强组织对缺氧的适应性。

3　结论

芜菁沙棘复合饮料优化后的最佳工艺为沙棘汁 22.0%、芜菁提取液 1.0%、果葡糖浆 7.5%、柠檬酸 0.1%，感官评分为 80.5±1.3 分，风味酸甜适中，色泽均匀。复合稳定剂优化后为黄原胶与 CMC 复配比例 2∶1，添加量 0.15%，离心沉淀率最低，稳定性最佳。芜菁沙棘复合饮料总可溶性固形物 8.00%、总酸 3.31 g/L、总糖 9.12%，微生物指标符合国家标准。动物试验证实芜菁沙棘复合饮料具有良好的耐缺氧作用，低、中、高剂量组显著延长常压缺氧小鼠存活时间(19.92%、19.31%、18.97%)，以及低、中剂量组延长亚硝酸钠中毒存活时间(52.32%、51.25%)，效果优于单一组分；显著提升心、脑、肺组织中 SOD、CAT、GSH-Px 活性，降低 MDA 含量，抑制氧化应激及脂质过氧化；改善心肌纤维断裂、肺泡结构破坏等病理损伤，降低 LDH、CK 活性，缓解乳酸酸中毒，维持能量代谢。Western blot 分析结果显示，通过抑制缺氧诱导因子 HIF-1α 及下游炎症因子 IL-6 蛋白表达，调控 HIF-1α/IL-6 信号通路，协同增强抗氧化能力，改善缺氧应激反应。研究证实芜菁沙棘复合饮料具有显著抗缺氧功能，为药食同源植物开发功能性食品提供理论支持，推动地方特色农产品产业化。需进一步探究其分子作用靶点及信号通路细节。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 赵晓龙, 曾燕, 魏林节. 高原环境对中枢神经系统的影响研究进展[J]. 立体定向和功能性神经外科杂志, 2024, 37(3): 186−192. [ZHAO Xiaolong, ZENG Yan, WEI Linjie. Research progress on the influence of plateau environment on central nervous system[J]. Chinese Journal of Stereotactic and Functional Neurosurgery, 2024, 37(3): 186−192.]

[2] 黄河. 急性高山病和高原红细胞增多症的 microRNA 表达特征及其病理生理学意义研究[D]. 重庆: 中国人民解放军陆军军医大学, 2020. [HUANG He. microRNA expression characteristics and its pathophysiological significance in acute mountain sickness and high altitude polycythemia[D]. Chongqing: Army Medical University, 2020.]

[3] 范玲玲, 尹立, 王式功, 等. 高原健康风险与潜在康养效应研究进展[J]. 中国医药导刊, 2024, 26(8): 755−763. [FAN Lingling, YIN Li, WANG Shigong, et al. Research progress on health risks and potential wellness effects in plateau areas[J]. Chinese Journal of Medical Guide, 2024, 26(8): 755−763.]

[4] GAN Zhengkun, FANG Xiao, YIN Chenglong, et al. Extraction, purification, structural characterization, and bioactivities of the genus *Rhodiola* L. polysaccharides: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 133614.

[5] 代宇鑫. 人参 *PgMYB* 基因家族分析及 *PgMYB2* 功能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022. [DAI Yuxin. Analysis of *PgMYB* gene family of ginseng and study on the function of *PgMYB2*[D]. Changsha: Central South University, 2022.]

[6] 苏保洲. 枸杞子活性成分药理作用研究进展[J]. 江苏中医药, 2022, 54(3): 78−81. [SU Baozhou. Research progress on pharmacological effects of active components of *Lycium barbarum* L[J]. Jiangsu Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 54(3): 78−81.]

[7] 王子晗, 赵安鹏, 牟宏芳, 等. 藏药抗高原缺氧损伤保护作用研究进展[J]. 药学实践杂志, 2022, 40(5): 408−415. [WANG Zihan, ZHAO Anpeng, MU Hongfang, et al. Research progress of Tibetan medicine against plateau hypoxia[J]. Journal of Pharmaceuti-

cal Practice, 2022, 40(5): 408−415.］
［8］ 史新萌, 刘玉萍, 瞿鼎, 等. 抑制 HIF-1α 表达的中药抗肿瘤活性成分研究进展[J]. 药学学报, 2021, 56(10): 2689−2719.［SHI Xinmeng, LIU Yuping, QU Ding, et al. Research progress of anti-tumor components of traditional Chinese medicine inhibiting the expression of HIF-1α[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2021, 56(10): 2689−2719.］
［9］ CAO Qingsui, WANG Ge, PENG Ye. A critical review on phytochemical profile and biological effects of turnip (*Brassica rapa* L.)[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 721733.
［10］ 庄红梅, 王燕, 陈先知, 等. 新疆芜菁肉质根不同发育期代谢组成分鉴定与差异分析[J/OL]. 分子植物育种, 1−26[2026-04-02]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231013.1002.002.［ZHUANG H M, WANG Y, CHEN X Z, et al. Identification and differential analysis of metabolic components in fleshy roots of Xinjiang turnip at different developmental stages[J/OL]. Molecular Plant Breeding, 1−26[2026-04-02]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231013.1002.002.］
［11］ ZHAO Wenjin, ZHANG Wenyi, LIU Lin, et al. Fractionation, characterization and anti-fatigue activity of polysaccharides from *Brassica rapa* L[J]. Process Biochemistry, 2021, 106: 163−175.
［12］ CHU Bingquan, CHEN Chun, LI Jiaojie, et al. Effects of Tibetan turnip (*Brassica rapa* L.) on promoting hypoxia-tolerance in healthy humans[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2017, 195: 246−254.
［13］ ZHOU Yi, LI Zhanqiang. Anti-fatigue activities and phytochemical compositions of turnip (*Brassica rapa* L.) extracts[J]. Pharmacognosy Magazine, 2021, 17(76): 857.
［14］ 陈文彬, 石会玲. 芜菁功能成分及其功能性食品研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 148−156.［CHEN Wenbin, SHI Huiling. Research progress on functional components and functional foods of *Brassica rapa* L[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2025, 16(7): 148−156.］
［15］ GÂTLAN A M, GUTT G. Sea buckthorn in plant based diets. an analytical approach of sea buckthorn fruits composition: Nutritional value, applications, and health benefits[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(17): 8986.
［16］ BOŚKO P, BIEL W, WITKOWICZ R, et al. Chemical composition and nutritive value of sea buckthorn leaves[J]. Molecules, 2024, 29(15): 3550.
［17］ WANG Hao, CHENG Na, WU Qingyuan, et al. Antioxidant activities of sea buckthorn polysaccharides and their potential application in cosmetic industry[J]. Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology, 2024, 1(3): 100023.
［18］ KANIA-DOBROWOLSKA M, BARANIAK J, SIGER A. Sea buckthorn plant as a functional food ingredient, with antioxidant and anti-inflammatory properties[J]. Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria, 2023, 22(4): 477−496.
［19］ WANG Zhen, ZHAO Fenglan, WEI Panpan, et al. Phytochemistry, health benefits, and food applications of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): A comprehensive review[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1036295.
［20］ 安琪, 齐亭亭, 王青山, 等. 沙棘原浆的体外抗氧化、抑菌及免疫调节活性[J/OL]. 现代食品科技, 1−12[2026-04-02]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0221.［AN Q, QI T T, WANG Q S, et al. *In vitro* antioxidant, antibacterial, and immunomodulatory activities of sea buckthorn puree[J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1−12[2026-04-02]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0221.］
［21］ 唐瑜, 张依娜, 邹远荣, 等. 沙棘叶治疗高脂血症的药效物质基础[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(22): 116−122.［TANG Yu, ZHANG Yina, ZOU Yuanrong, et al. Pharmacodynamic material basis of *Hippophae* folium in treatment of hyperlipidemia[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2022, 28(22): 116−122.］
［22］ 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局.《食品安全国家标准 饮料》(GB 7101-2022)[J]. 饮料工业, 2022, 25(4): 1−2.［National Health Commission of China, State Administration for Market Regulation. National standard beverage for food safety (GB 7101-2022)[J]. Beverage Industry, 2022, 25(4): 1−2.］
［23］ 刘磊, 赖婷, 汪浩, 等. 浑浊型龙眼果肉乳酸菌发酵饮料加工工艺优化[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(6): 60−68.［LIU Lei, LAI Ting, WANG Hao, et al. Optimization of processing technology of cloudy Longan beverage fermented by lactic acid bacteria[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(6): 60−68.］
［24］ 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饮料通用分析方法: GB/T 12143-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.［General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. General analytical methods for beverage: GB/T 12143-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.］
［25］ 章笑寒, 施凯允, 金文闻, 等. 黄精多糖检测研究进展[J]. 植物生理学报, 2024, 60(9): 1390−1400.［ZHANG Xiaohan, SHI Kaiyun, JIN Wenwen, et al. Advances in *Polygonatum* polysaccharides determination[J]. Plant Physiology Journal, 2024, 60(9): 1390−1400.］
［26］ 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 12456-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.［National Health Commission of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard determination of total acids in food: GB 12456-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.］
［27］ 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.［National Health Commission of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard food microbiological inspection determination of total bacterial colony: GB 4789.2-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.］
［28］ 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数: GB 4789.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.［National Health and Family Planning Commission, State Administration for Market Regulation. National food safety standard food Microbiology determination coliform bacteria count: GB 4789.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.］
［29］ 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量: GB 29921-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.［National Health Commission of China, State Administration for Market Regulation. National Food safety standard Limits of pathogenic bacteria in prepackaged foods: GB 29921-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.］
［30］ 洪小栩, 宋宗华, 马双成, 等. 2025 年版《中国药典》制修

订情况概述[J]. 中国药品标准, 2025, 26(1): 1−10. [HONG Xiaoxu, SONG Zonghua, MA Shuangcheng, et al. Brief introduction on the development of Chinese pharmacopoeia 2025 Edition[J]. Drug Standards of China, 2025, 26(1): 1−10.]
[31] 国家市场监督管理总局. 保健食品功能检验与评价方法(2023 年版)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [State Administration for Market Regulation. Functional testing and evaluation methods for health food (2023 Edition)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[32] 刘日斌, 张林尚, 唐嘉辉, 等. 黄精留胚米乳功能饮料配方优化及其稳定性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(10): 141−147. [LIU Ribin, ZHANG Linshang, TANG Jiahui, et al. Formula optimization and stability of polygonatum germ rice milk functional beverage[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(10): 141−147.]
[33] 李晓莉, 王斌, 刘嘉麟, 等. 枸杞多糖对小鼠耐常压缺氧能力的影响[J]. 营养学报, 2000, 22(4): 337−340. [LI Xiaoli, WANG Bin, LIU Jialin, et al. Effect of lycii barbarum polysaccharides on antihypoxia capacity in mice[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2000, 22(4): 337−340.]
[34] 杨永东, 李聪颖, 唐策, 等. 藏药蔓菁抗氧化活性多糖的提取及纯化工艺优选[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(7): 7−10. [YANG Yongdong, LI Congying, TANG Ce, et al. Optimization of extraction and purification technology of antioxidant activity polysaccharides from *Brassica rapa* by orthogonal design[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(7): 7−10.]
[35] 常燕云. 高原低氧环境下辣木叶提取物的抗疲劳作用及机制研究[D]. 北京: 军事科学院, 2024. [CHANG Y Y. Anti-fatigue effects and mechanisms of *Moringa oleifera* leaf extract in a high-altitude hypoxic environment[D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2024.]
[36] 周荣易, 王娇娇, 尤月, 等. 黄芩苷对注意缺陷多动障碍大鼠突触体 ATP 酶和 LDH 的影响及对 AC/cAMP/PKA 信号通路的调控作用[J]. 中国当代儿科杂志, 2017, 19(5): 576−582. [ZHOU Rongyi, WANG Jiaojiao, YOU Yue, et al. Effect of baicalin on ATPase and LDH and its regulatory effect on the AC/cAMP/PKA signaling pathway in rats with attention deficit hyperactivity disorder[J]. Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2017, 19(5): 576−582.]
[37] LI Di, REN Jinwei, DU Qian, et al. The anti-hypoxic effects of oat (*Avena sativa* L.) oligopeptides in mice[J]. American Journal of Translational Research, 2021, 13(3): 1657−1666.
[38] 何蕾. 藏紫菀总黄酮的提取纯化及其对减压缺氧小鼠的保护作用和机制研究[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2015. [HE Lei. The extraction and purification technology of total flavnoids from *Aster souliei* franch and study on hypobaric hypoxia protective effect and its mechanism[D]. Lanzhou: Gansu University of Chinese Medicine, 2015.]
[39] 王欣, 翟紫薇, 王智洋, 等. HIF-1α 与心脏能量代谢关系的研究[J]. 中国比较医学杂志, 2025, 35(4): 128−134. [WANG Xin, ZHAI Ziwei, WANG Zhiyang, et al. Relationship between hypoxia-inducible factor-1α and cardiac energy metabolism[J]. Chinese Journal of Comparative Medicine, 2025, 35(4): 128−134.]
[40] 卡德艳木·阿布力米提, 施林, 严飞. 缺氧诱导因子-1α 介导缺氧和氧化低密度脂蛋白环境调控巨噬细胞相关凝集素-1 的表达研究[J]. 中国心血管病研究, 2024, 22(5): 475−480. [KADEYANMU A, SHI L, YAN F. Hypoxia-inducible factor-1α mediates the regulation of macrophage-associated lectin-1 expression under hypoxic and oxidized low-density lipoprotein environments[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Research, 2024, 22(5): 475−480.]