

多酚复合配方缓解小鼠运动疲劳

Effect of polyphenol compound formula on relieving exercise fatigue in mice

付梦凡¹ 张 纯¹ 刘炳浩¹ 刘素稳¹

FU Mengfan¹ ZHANG Chun¹ LIU Binghao¹ LIU Suwen¹

史东林² 刘 京³ 常学东¹

SHI Donglin² LIU Jing³ CHANG Xuedong¹

(1. 河北科技师范学院食品科技学院, 河北 秦皇岛 066000; 2. 河北体育学院, 河北 石家庄 050041;

3. 石家庄以岭药业有限公司, 河北 石家庄 050035)

(1. Hebei Normal University of Science and Technology Institute of Food Science and Technology, Qinhuangdao, Hebei 066000, China; 2. Hebei Institute of Physical Education, Shijiazhuang, Hebei 050041, China; 3. Shijiazhuang Yiling Pharmaceutical, Shijiazhuang, Hebei 050035, China)

摘要:目的:探究蓝靛果多酚、山楂多酚微胶囊、乳铁蛋白和维生素 C 复配剂对缓解疲劳的作用。方法:以肌酸、 β -羟基- β -甲基丁酸钙、1,6-二磷酸果糖、牛磺酸和维生素 B₆、西瓜粉复配比为阳性对照进行小鼠力竭游泳试验,测定疲劳相关指标,并采用 H&E 染色观察脏器微观病理组织情况。结果:各组小鼠体重无显著差异($P>0.05$),较正常组,膳食补充组脏器指数无显著差异($P>0.05$)。多酚复合配方在常温和低温下均显著延长了小鼠游泳时长(分别延长了 106.01% 和 140.94%)($P<0.01$),改善了氧化应激、代谢产物积累和能量代谢,下调了炎症因子分泌($P<0.01$ 或 $P<0.05$),改善了小鼠肌肉中细胞核增多、肝脏中炎症细胞浸润和肾脏中肾小管上皮细胞红肿和脱落等状况。结论:多酚复合配方在低温和常温下均具有缓解运动疲劳的效果。

关键词:多酚复合配方;小鼠;游泳运动;氧化应激;缓解疲劳

Abstract: Objective: This study aimed to explore the fatigue relieving effect of *Lonicera caerulea* Berry polyphenol, hawthorn polyphenol microcapsules, lactoferrin and vitamin C as polyphenol compound formula to alleviate fatigue. **Methods:** The

commercial sports nutrition food with the compound formula of creatine, β -hydroxy- β -methylbutyrate, fructose diphosphate, taurine, vitamin B₆ and watermelon powder was used as the positive control. The experiment of exhaustive swimming in mice was carried out. The fatigue related indexes were determined by the kit, and the microscopic pathological tissues of the organs were observed by H&E staining. **Results:** There was no significant difference in body weight of mice ($P>0.05$). Compared with the normal group, no significant difference in organ index in the dietary supplement group ($P>0.05$) was found. Polyphenol compound formula significantly prolonged the swimming time of mice at room temperature and low temperature by 106.01% and 140.94%, respectively ($P<0.01$). Moreover, oxidative stress, metabolite accumulation and energy metabolism, and down-regulated secretion of inflammatory factors ($P<0.01$ or $P<0.05$) were also improved. It promoted the cell nucleus increase in muscle, inflammatory cell infiltration in the liver, and redness and shedding of tubular epithelial cells in the kidney. **Conclusion:** Polyphenol compound formula can relieve exercise fatigue at low temperature and room temperature.

Keywords: polyphenol compound formula; mice; swimming exercise; oxidative stress; relieve fatigue

基金项目:河北省产业创新团队项目(编号:215A7103D);河北省高等学校科学技术研究项目(编号:ZD2021052);河北省重点研发项目(编号:23317102D)

作者简介:付梦凡,女,河北科技师范学院在读硕士研究生。

通信作者:刘素稳(1981—),女,河北科技师范学院教授,博士。

E-mail: liusuwenyy@163.com

收稿日期:2023-04-17 **改回日期:**2023-09-13

运动性疲劳是由运动引起的短暂性工作能力降低的生理现象^[1]。疲劳与能量消耗、代谢物积累和氧化应激有关^[2]。高强度运动会促进三磷酸腺苷(ATP)消耗,当供能不足时,机体动用肝脏和肌肉中的糖原产生乳酸、尿素氮(BUN)和丙二醛(MDA)等代谢产物,并大量积累,通过脂

质过氧化和破坏抗氧化防御系统,从而引起肌肉疼痛、损伤,甚至引发关节脱落、内分泌失调和心血管疾病。

研究^[3-4]表明,食物中的生物活性成分可以有效缓解运动疲劳,并改善相关疲劳症状。其中,水果多酚更受人们的青睐,因其来源广、生物活性高、副作用少而被广泛应用^[5]。前期研究^[6]表明,蓝靛果多酚可通过减少氧化应激、炎症和骨骼肌细胞凋亡,增加线粒体生物合成和细胞增殖来缓解小鼠的运动疲劳。山楂多酚微胶囊可通过增加抗氧化能力,激活 AMPK 通路来改善疲劳小鼠线粒体功能障碍和细胞代谢,抑制 NF- κ B 炎症通路,并通过提高肠道微生物种类的多样性来发挥抗疲劳作用^[7]。乳铁蛋白是一种铁结合蛋白,具有抗微生物、抗氧化、抗癌、抗炎和调节免疫功能^[8],可减少 BUN,上调 Nrf2/HO-1 信号传导,增加抗氧化能力,降低炎症因子分泌^[9]。维生素 C 是人体必需的微量元素,具有强抗氧化性,可预防氧化应激诱导的肌肉损伤^[10]。目前的研究多为单一活性成分,而在功能食品生产应用中多为复合成分。

研究拟以常温(25℃)和低温(4℃)为试验温度,分析多酚复合配方缓解小鼠游泳运动疲劳的功能作用,考察其在抑制氧化应激,改善基质代谢、能量代谢和降低炎症因子分泌的抗疲劳机制,以期多酚复合配方功能食品开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜燕瓢红山楂:收获日期为 2020 年 9 月,八成熟,去除田间热后贮藏于-20℃,河北承德宽城县;

蓝靛果多酚:食品级,总酚含量为 309.87 mg/g,西安丰足生物科技有限公司;

乳铁蛋白:食品级,保定海康食品制造有限公司;

维生素 C:分析级,上海麦克林生化科技有限公司;

昆明小鼠:清洁级,北京维通利华实验动物技术有限公司;

尿素氮(BUN)试剂盒、丙二醛(MDA)试剂盒、总抗氧化(T-AOC)试剂盒、ATP 含量试剂盒、肌酸激酶(CK)试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒、乳酸(LA)试剂盒、糖原含量试剂盒、一氧化氮(NO)试剂盒、白细胞介素-6(IL-6)试剂盒、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)试剂盒:北京盒子生工科技有限公司;

皮质醇 ELISA 酶联免疫试剂盒:上海江莱生物股份有限公司;

冷冻干燥机:LGJ-15D 型,上海双旭电子有限公司;

全自动喷雾干燥仪:SD-07AG 型,嘉盛(香港)科技有限公司;

旋转蒸发仪:N-1100 型,埃朗科技国际贸易(上海)有限公司;

酶标仪:VERSA 型,北京五洲东方科技发展有限公司;

奥林巴斯生物显微镜:BX53 型,上海维翰光电科技有限公司。

1.2 山楂多酚及微胶囊制备

(1) 山楂多酚制备:采用课题组^[11]前期研究的方法。挑选优质山楂,清洗,打浆,加 70% 酸化(0.1% 盐酸)乙醇,30℃ 恒温提取 1 h。经 40℃ 真空旋转蒸发、AB-8 大孔树脂纯化和冷冻干燥后置于-18℃ 贮藏,多酚提取物中总酚含量为 594.15 mg/g。

(2) 山楂多酚微胶囊制备:根据文献^[12]并修改。将山楂多酚配制为 4% 的多酚芯材溶液,同时制备 8% 的 β -环糊精,8% 的分离乳清蛋白,1% 的阿拉伯胶包埋壁材溶液,并按 $V_{\beta\text{-环糊精}}:V_{\text{分离乳清蛋白}}:V_{\text{阿拉伯胶}}$ 为 1:1:1 混合。按 $V_{\text{芯材}}:V_{\text{壁材}}$ 为 1:3 于 200 r/min 磁力搅拌下乳化 11.4 min,进风温度为 165℃,风机为 25 m³/s,蠕动泵为 5 mL/min,通堵频率为快的条件下进行喷雾干燥。

1.3 动物分组与处理

动物试验方法和目的符合人类的道德伦理标准和国际惯例,小鼠试验符合《实验动物 环境及设施》(GB 14925—2010)。雄性 KM 小鼠 49 只在室内饲养,环境温度(22±1)℃,相对湿度 50%~60%,光照和黑暗各 12 h 循环。适应 1 周后,将小鼠分为 7 组,每组 7 只,分别为正常组(N)、常温模型组(NTM)、常温配方组(NTF)、常温阳性对照组(NTC)、低温模型组(LTM)、低温配方组(LTF)和低温阳性对照组(LTC)。各组分别灌胃相应受试样^[13],正常组和模型组灌胃 20 mL/kg 体重的纯净水^[14],配方组灌胃剂量为 310 mg/kg 体重的复合配方^[7,15](32.26% 蓝靛果多酚,32.26% 山楂多酚微胶囊,32.26% 乳铁蛋白,3.22% 维生素 C)。阳性对照组以 285.72 mg/kg(根据市售产品的食用方法转换计算灌胃剂量)灌胃市售产品,主要成分为 30% 肌酸,30% β -羟基- β -甲基丁酸钙,3% 1,6-二磷酸果糖,6% 牛磺酸,0.48% 钠,0.01% 维生素 B₆,30.51% 西瓜粉。每 2 d 记录体重,补充鼠粮。游泳训练常温组水温为(25±1)℃,低温组水温为(4±1)℃。每 3 d 游泳一次,时间为 3~5 min,适应 2 次游泳后,延长游泳时间,常温组每次延长 4 min,低温组适当延长时间,试验持续 4 周。

1.4 负重游泳和脏器指数

第 4 周最后一次灌胃 1 h 后,进行小鼠负重游泳力竭试验。在小鼠尾部栓上 5 g 的铅块,放入长 70 cm,宽 50 cm,高 40 cm 的水箱中,水深 10 cm 以上,常温组水温为(25±1)℃,低温组水温为(4±1)℃,记录小鼠从开始游泳到沉至底部且 10 s 无法浮上水面的时间^[16]。力竭后立即用颈椎脱臼法处死小鼠,摘取眼球取血,准确切除

小鼠的肝脏、肾脏、脾脏,称重,−80℃密封冻存,并按式(1)计算脏器指数^[17]。

$$c = \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

式中:

c ——脏器指数;

m_1 ——脏器质量,mg;

m_2 ——体重,g。

1.5 生化指标测定

参照试剂盒说明书测定血液中总抗氧化能力(T-AOC)、BUN、BLA、皮质醇(cortisol);肝脏中的丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、肝糖原(LG)水平、NO、IL-6、TNF- α ;肌肉中的ATP、CK、肌糖原(MG)水平。

1.6 苏木精伊红染色(H&E)

用生理盐水冲洗骨骼肌、肝脏和肾脏,于10%多聚甲醛中固定48 h。石蜡切片,H&E染色。酒精脱水,二甲苯进行透明处理,将透明组织块浸入熔化的石蜡中包埋完整,固定于切片机上,骨骼肌组织采用纵切,肝脏组织和肾脏组织采用横切,切成4 μ m厚的薄片,用显微镜观察并拍照,放大倍数为200^[18]。

1.7 数据处理

每组试验最少3组平行取平均值,结果用“平均值±标准偏差”表示。用SPSS21软件进行Duncan's多重比较分析显著性, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 多酚复合配方对小鼠体重及脏器指数的影响

由图1(a)可知,随着时间的延长,小鼠体重不断增加。各组小鼠体重无显著变化,表明补充该配方不会显著改变小鼠的体重,也说明了该配方具备一定的安全性。由图1(b)可知,与正常组相比,模型组中肝脏脏器指数显著增加($P<0.05$),肾脏脏器指数和脾脏脏器指数无显著性差异,配方组和阳性对照组的肝脏脏器指数、肾脏脏器指数和脾脏脏器指数无显著变化。

2.2 多酚复合配方延长小鼠力竭游泳时间

力竭游泳时间长短可较好地反映机体疲劳程度^[19]。由图2可知,与模型组相比,配方组小鼠负重游泳时间显著增加($P<0.01$),常温和低温配方组分别延长了106.01%,140.94%。与阳性对照组相比,配方组小鼠负

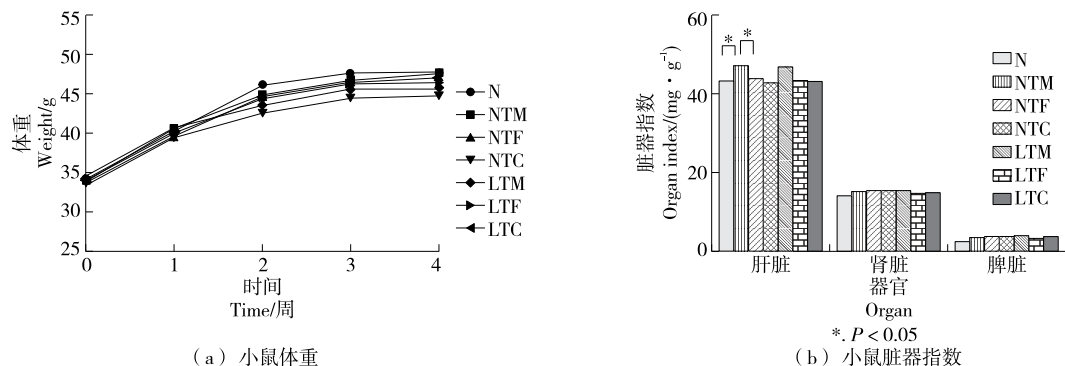


图1 多酚复合配方对小鼠体重及脏器指数的影响

Figure 1 Effects of polyphenol compound functional formula on body weight and organ index of mice ($n=7$)

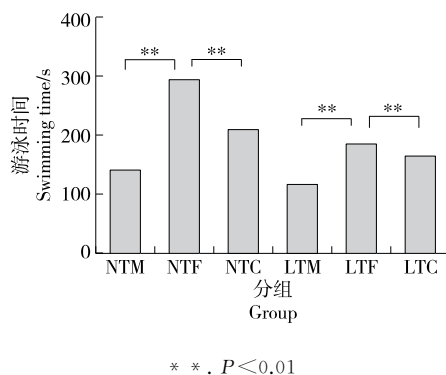


图2 多酚复合配方对小鼠力竭游泳时间的影响

Figure 2 Effects of polyphenol compound formula on exhausted swimming time in mice ($n=7$)

重游泳时间显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$),常温和低温配方组分别延长了82.04%,71.63%。说明在常温和低温环境下,此配方延长了小鼠游泳负重力竭时长,且在试验剂量下优于阳性对照组($P<0.05$)。与常温配方组相比,低温配方组小鼠负重游泳时间差异不显著。说明该配方在常温和低温下均具有一定的抗疲劳作用。有研究^[20]表明,金盏花、黑肋花和越橘提取物能够延长负重游泳时间,提高运动耐受性,与试验结果一致。表明多酚复合配方可以延长小鼠运动时间,提高运动耐力。

2.3 多酚复合配方改善疲劳小鼠氧化应激

长期疲劳会影响机体氧化/抗氧化系统平衡,MDA是脂质过氧化终产物,诱导细胞氧化应激^[21]。通过减少MDA的产生抑制脂质过氧化,可减少细胞损伤并缓解疲

劳^[22]。SOD 能够清除自由基,T-AOC 能直接反映抗氧化水平,二者可反映机体抗氧化水平^[23]。由图 3 可知,与正常组相比,模型组 MDA 显著升高($P<0.01$);与模型组相比,配方组 MDA 含量显著降低($P<0.01$),常温组和低温配方组分别降低了 48.20%,50.87%;与阳性对照组相比,配方组 MDA 显著降低($P<0.01$),常温组和低温配方组分别降低了 20.27%,14.65%。较常温配方组,低温配方组 MDA 含量差异不显著。与正常组相比,模型组 SOD 显著下降($P<0.01$);与模型组相比,配方组 SOD 显著升高($P<0.01$),常温组和低温配方组分别升高了 48.26%,182.88%;与阳性对照组相比,配方组 SOD 显著升高($P<0.01$),常温组和低温配方组分别升高了 19.86%,13.61%;与常温配方组相比,低温配方组 SOD 显著升高($P<0.01$)。与正常组相比,常温组和低温模型组 T-AOC 显著降低($P<0.01$);与阳性对照相比,配方组 T-AOC 显著升高($P<0.01$),常温组和低温配方组分别升高了 33.56%,32.41%;较常温配方组,低温配方组 T-AOC 差异不显著。有研究^[24]表明,火麻仁高 F 多肽提高了 SOD 活性,通过提高抗氧化水平,可缓解运动疲劳,与试验结果一致。说明多酚复合配方可以通过减轻氧化应激缓解运动疲劳。

2.4 多酚复合配方降低疲劳小鼠基质代谢产物积累

剧烈运动导致代谢产物积累和抗氧化酶消耗,使肌肉酸胀,力量不足^[25]。机体剧烈运动,糖原会被过度消耗分解且产生大量乳酸(LA),导致肌肉酸痛^[6]。过度运动后,蛋白质和氨基酸代谢产能旺盛,血液中 BUN 含量升高,大量堆积后运动耐力下降,疲劳产生^[26]。CK 是肌肉损伤的重要标志物^[27],当血液中 CK 水平升高通常表明肌肉有损伤。由图 4 可知,与正常组相比,模型组 BUN、BLA、cortisol 和 CK 有显著升高($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。与模型组相比,配方组的 BUN、BLA、cortisol 和 CK 显著降低($P<0.05$ 或 $P<0.01$),常温配方组的 BUN、BLA、cortisol 和 CK 分别降低了 3.44%,24.32%,8.24%,8.66%,低温配方组分别降低了 25.85%,68.08%,

10.51%,46.85%;与阳性对照相比,常温配方组 BUN,低温配方组 BLA 和 CK($P<0.05$ 或 $P<0.01$)分别降低了 12.21%,39.96% 和 9.52%。与阳性对照相比,配方组 cortisol 显著升高($P<0.01$),常温组和低温配方组分别升高了 25.34%,16.35%。与常温配方组相比,低温配方组的 BLA 和 CK 显著降低了 60.56% 和 20.00% ($P<0.01$);与常温配方组相比,低温配方组 cortisol 显著升高了 13.85% ($P<0.01$)。与常温配方组相比,低温配方组 BUN 下降较多,但差异不显著。综上,多酚复合配方显著降低了 BLA、BUN、cortisol 和 CK 水平。有研究^[28]表明,根皮苷通过显著降低 LA、CK 和 BUN 水平,增加 LG 和 MG 含量,加速有害代谢产物的消除,恢复身体能量,从而缓解疲劳,与试验结果一致。表明多酚复合配方能通过加速代谢物分解来缓解疲劳。其中与常温配方组相比,低温配方组 BLA 和 CK 明显降低,其原因可能是冷水可以调节中枢神经系统来减轻代谢物积累缓解运动疲劳^[29]。

2.5 多酚复合配方改善疲劳小鼠能量代谢水平

ATP 是维持新陈代谢的直接能源,是反映机体运动疲劳的重要指标。肌糖原和肝糖原是糖酵解和能量的底物来源。由图 5 可知,与正常组相比,模型组中 ATP、LG (肝糖原)和 MG (肌糖原)在力竭后含量显著下降($P<0.01$),膳食补充后,配方组的 ATP、LG 和 MG 含量显著上升($P<0.01$),常温配方组的分别升高了 153.33%,320.00%,15.29%,低温配方组的分别升高了 111.11%,290.57%,31.82%。与阳性对照组相比,配方组 ATP 和 LG 显著升高($P<0.01$),常温配方组的分别升高了 80.95%,60.31%,低温配方组分别升高了 18.75%,147.06%。与阳性对照组相比,低温配方组 MG 水平显著升高($P<0.05$),常温配方组 MG 水平差异不显著。与常温配方组相比,ATP、LG 和 MG 差异不显著。综上,多酚复合配方显著增加了 ATP、LG 和 MG 含量。研究^[30]发现,鹰嘴豆多肽通过提高胰岛素分泌,提高乳酸脱氢酶、SOD、谷胱甘肽过氧化物酶活性,减少 BLA,提高肝糖原和肌糖原缓解能量供应机制。试验也表明多酚复合配

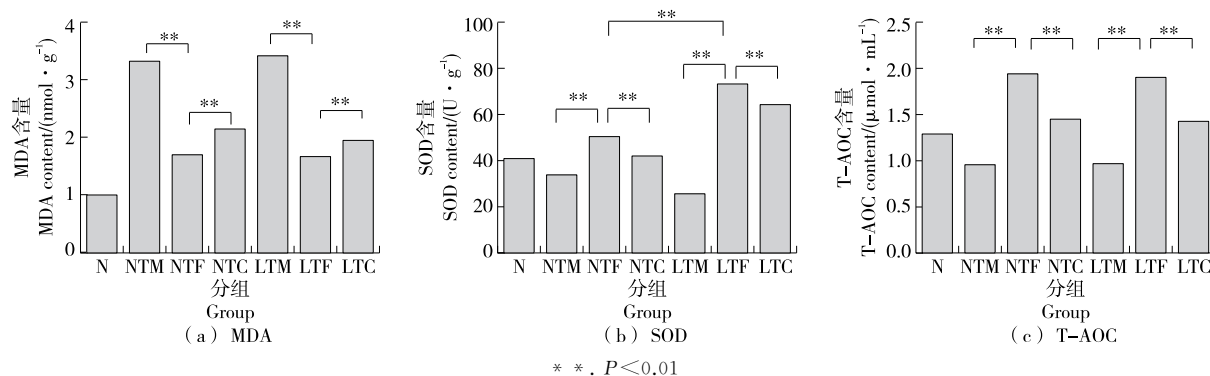


图 3 多酚复合配方对疲劳小鼠氧化应激的影响

Figure 3 Effects of polyphenol compound formula on oxidative stress in fatigue mice ($n=4$)

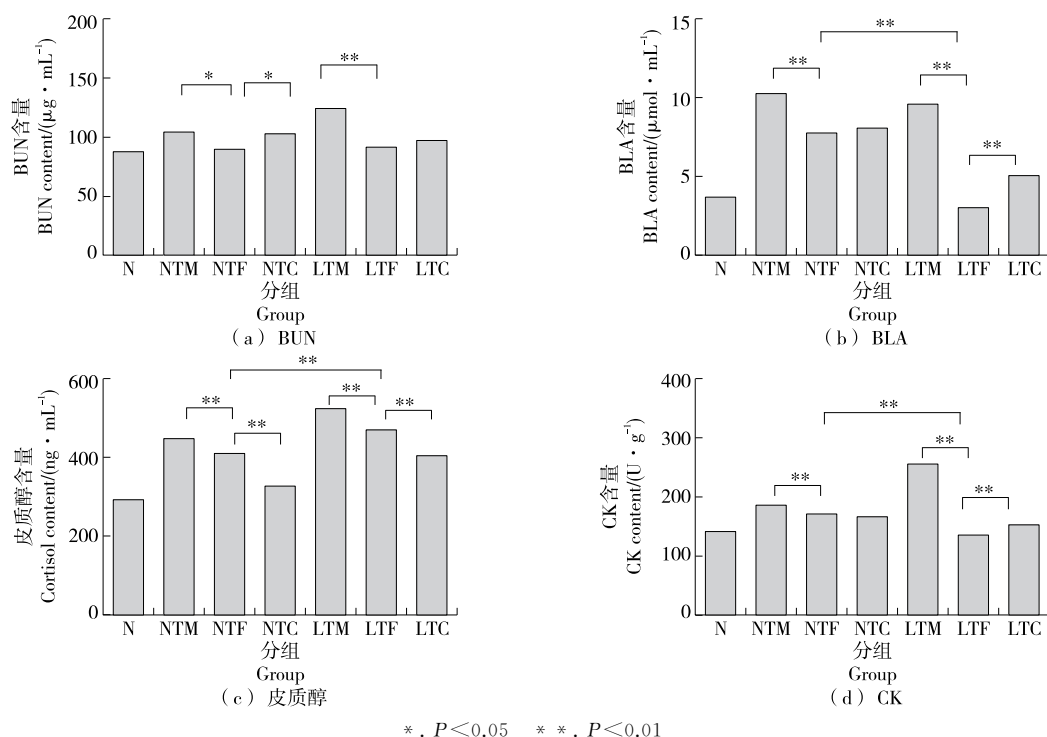


图4 多酚复合配方对疲劳小鼠基质代谢水平的影响

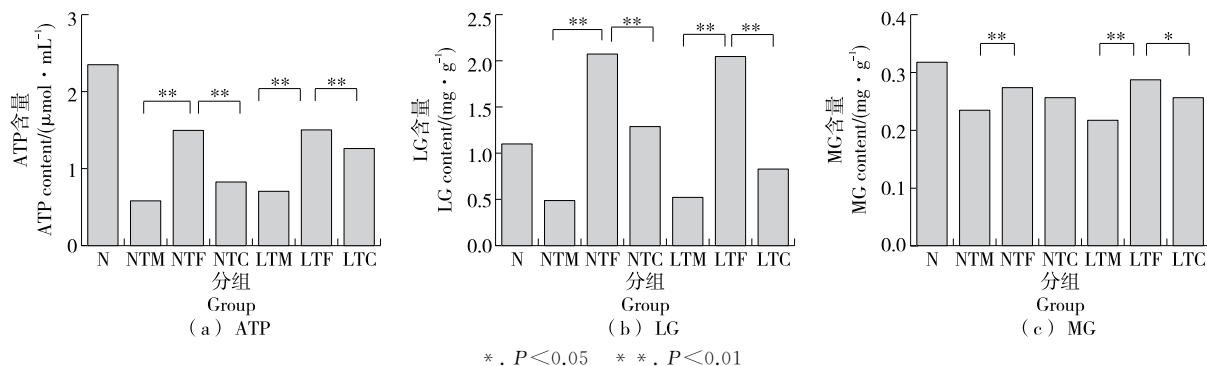
Figure 4 Effects of polyphenol compound formula on matrix metabolism in fatigued mice ($n=4$)

图5 多酚复合配方对疲劳小鼠能量代谢积累的影响

Figure 5 Effects of polyphenol compound formula on energy metabolism accumulation in fatigued mice ($n=4$)

方能通过为机体提供充足的能量缓解运动疲劳。

2.6 多酚复合配方改善疲劳小鼠炎症因子分泌水平

除了氧化应激,高强度运动会使骨骼肌产生 NO,过量的 NO 会影响肌肉收缩能力,运动疲劳还会导致促炎细胞因子(IL-6 和 TNF- α)的表达,降低运动能力^[6]。由图 6 可知,较正常组,模型组中的 NO、TNF- α 和 IL-6 显著升高($P < 0.01$),膳食补充后,配方组和阳性对照组均出现显著下调($P < 0.01$),常温配方组 NO、TNF- α 和 IL-6 分别降低了 71.58%,53.59%和 47.23%,低温配方组的分别降低了 72.82%,54.71%和 32.43%。与阳性对照相比,配方组的 IL-6 显著降低($P < 0.05$),常温组和低温配方组的分别降低了 16.65%和 11.71%,常温配方组 NO 和低温配方组 TNF- α 分别下降了 30.49%,17.23%

($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。与常温配方组相比,低温配方组的 TNF- α 显著降低了 15.45% ($P < 0.01$),NO 和 IL-6 差异不显著。综上,多酚复合配方可以显著降低 NO、TNF- α 和 IL-6 分泌。有研究^[31]表明,寿眉多酚通过降低肝损伤小鼠的 NO、IL-6、IL-12、TNF- α 和 IFN- γ ,升高 SOD、CAT 和 GSH-Px,进一步缓解疲劳,与试验结果一致。表明多酚复合配方可以减少炎症因子分泌缓解运动疲劳。

2.7 多酚复合配方改善疲劳小鼠微观组织状态

由图 7 可知,正常组中肌肉组织排列整齐且紧密,肌纤维分布有序,结构正常,细胞核排列在肌纤维表面。力竭运动后,模型组小鼠骨骼肌出现细胞核增多、聚集且往肌纤维内部移动和纤维间隔增宽的情况,并伴有肌纤维

充血红肿的现象;膳食补充后,配方组和阳性对照组细胞核聚集量减少,纤维间隙增宽现象得到改善,与常温模型组相比,低温配方组细胞核聚集量更少。

短时力竭游泳训练模型,在缺氧状态下会造成肝脏组织和细胞受到损伤^[32]。由图 8 可知,正常组肝细胞排列整齐,中心静脉呈球型且未出现炎症细胞浸润等现象,

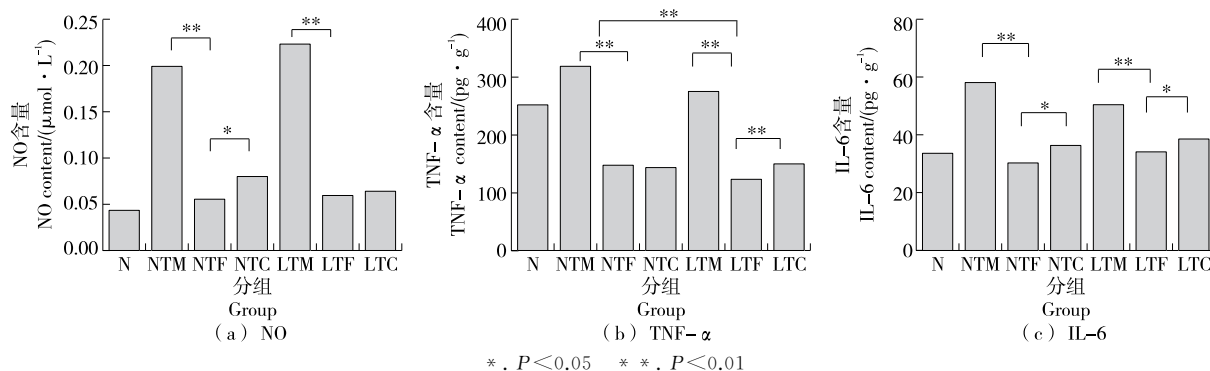


图 6 多酚复合配方对小鼠炎症因子分泌水平的影响

Figure 6 Effects of polyphenol compound formula on inflammation index in mice ($n=4$)

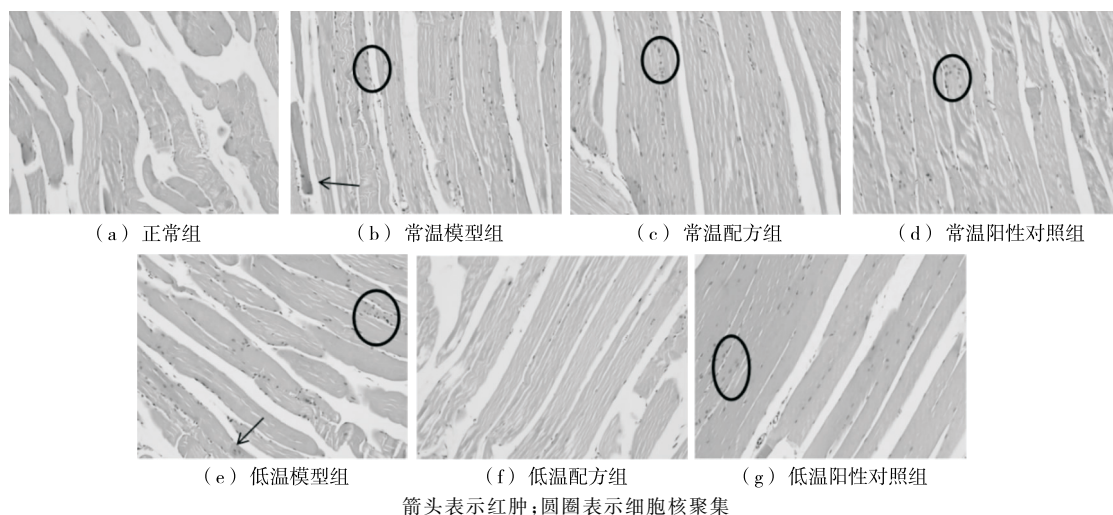


图 7 小鼠肌肉病理染色切片

Figure 7 Pathological staining section analysis of mouse muscle

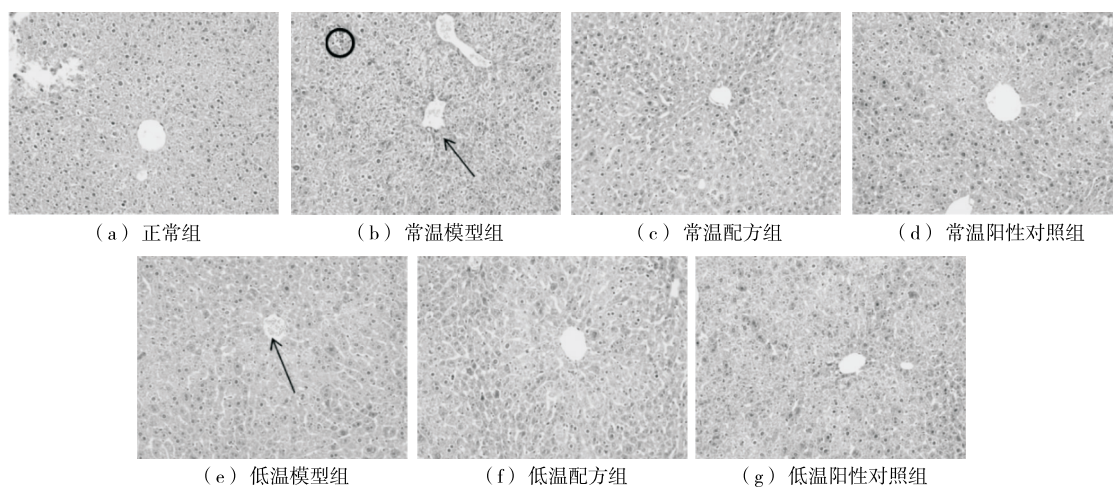


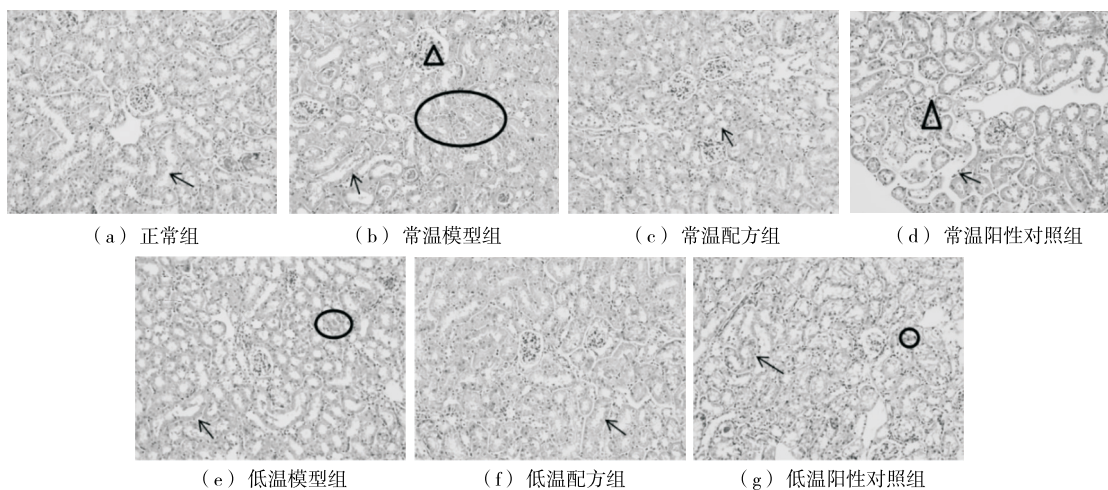
图 8 小鼠肝脏病理染色切片分析

Figure 8 Pathological staining section analysis of mouse liver

呈现完整肝小叶形态;模型组中心静脉发生形变和充血的现象。常温模型组出现炎症细胞浸润,低温模型组肝细胞充血现象较常温模型组强,说明负重力竭游泳和低温可能损伤小鼠的肝组织,膳食补充后配方组和对照组中心静脉充血和炎症细胞浸润等现象得到改善,中心静脉打开,肝细胞大小均匀,与对照组相比,配方组炎症细胞浸润改善更明显。

短时力竭游泳训练模式会使机体由于缺氧造成肾脏

受到损伤^[32]。由图9可知,正常组肾小球结构完整,系膜区未出现增生现象,肾小管上皮细胞排列整齐。负重力竭游泳后,模型组肾小管上皮细胞出现红肿和脱落现象,肾小球内系膜区出现增生现象,低温模型组出现炎症细胞浸润现象。膳食补充后配方组和阳性对照组改善了模型组中的现象,低温对照组炎症细胞浸润现象虽然得到改善,但效果不明显。试验剂量下,与阳性对照组相比,配方组具有更优良的改善效果。



三角表示血管扩张;圆圈表示细胞浸润;黑色箭头表示细胞变性、坏死或脱落

图9 小鼠肾脏病理染色切片分析

Figure 9 Pathological staining section analysis of mouse kidney

3 结论

试验表明,多酚复合配方提高了昆明小鼠力竭游泳时间,提高了超氧化物歧化酶和总抗氧化能力活性,降低了丙二醛、尿素氮、血乳酸、皮质醇和肌酸激酶含量,增加了三磷酸腺苷、肝糖原和肌糖原含量,减少了一氧化氮、肿瘤坏死因子- α 和白细胞介素-6 的分泌,说明多酚复合配方能够改善小鼠的氧化应激水平,降低代谢产物的积累,调节能量代谢,降低炎症因子的分泌,进而起到抗疲劳作用。在常温和低温下多酚复合配方均具有明显缓解运动疲劳的效果,有望应用于开发缓解疲劳的功能食品。多酚复合配方在体外的吸收代谢情况需进一步探究以阐明其作用机制。此外,长期的运动和疲劳还可能引起肠道炎症,这与微生物菌群平衡被破坏有关,还需进行动物试验以进一步研究其作用机制。

参考文献

- [1] 贾前生, 刘远洋, 李丹. 鹰嘴豆低聚肽抗疲劳活性研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 151-155.
- JIA Q S, LIU Y Y, LI D. Study on anti-fatigue activities of chick-pea oligopeptides[J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 151-155.
- [2] CHEN H, MA X, CAO L X, et al. A multi-ingredient formula ameliorates exercise-induced fatigue by changing metabolic

pathways and increasing antioxidant capacity in mice[J]. Foods, 2021, 10(12): 3 120-3 132.

- [3] HAB U, HERPICH C, NORMAN K. Anti-inflammatory diets and fatigue[J]. Nutrients, 2019, 11(10): 2 315-2 339.
- [4] KIM S, JO K, BYUNB S, et al. Chemical and biological properties of puffed *Dendrobium officinale* extracts: Evaluation of antioxidant and anti-fatigue activities [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 73: 104144.
- [5] JIANG Q E, CHAROENSIDDHI S, XUE X F, et al. A review on the gastrointestinal protective effects of tropical fruit polyphenols[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 52: 21-27.
- [6] LIU S W, MENG F N, ZHANG D, et al. *Lonicera caerulea* berry polyphenols extract alleviates exercise fatigue in mice by reducing oxidative stress, inflammation, skeletal muscle cell apoptosis, and by increasing cell proliferation [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 853225.
- [7] YU J C, JIANG W H, WANG S Y, et al. Microencapsulated hawthorn berry polyphenols alleviate exercise fatigue in mice by regulating AMPK signaling pathway and balancing intestinal microflora[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 97: 105255.
- [8] 肖红艳, 兰欣怡, 张佩华. 乳铁蛋白生物学功能研究进展[J]. 中国奶牛, 2021(4): 46-50.
- XIAO H Y, LAN X Y, ZHANG P H. Research progress in biological

- function of Lactoferrin[J]. *China Dairy Cattle*, 2021(4): 46-50.
- [9] MOHAMED O S, ABDEL B N A, SAYED-AHMED M M, et al. Lactoferrin alleviates cyclophosphamide induced-nephropathy through suppressing the orchestration between Wnt4/ β -catenin and ERK1/2/NF- κ B signaling and modulating klotho and Nrf2/HO-1 pathway[J]. *Life Sciences*, 2023, 319: 121528.
- [10] MORIKAWA D, NOJIRI H, ITOIGAWA Y, et al. Antioxidant treatment with vitamin C attenuated rotator cuff degeneration caused by oxidative stress in Sod1-deficient mice[J]. *JSES Open Access*, 2018, 2(1): 91-96.
- [11] LIU S W, YU J C, FU M F, et al. Regulatory effects of hawthorn polyphenols on hyperglycemic, inflammatory, insulin resistance responses, and alleviation of aortic injury in type 2 diabetic rats[J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110239.
- [12] 余金橙, 王淑玉, 崔楠, 等. 山楂多酚微胶囊制备及理化性质分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 222-231.
- YU J C, WANG S Y, CUI N, et al. Preparation and physicochemical properties of hawthornpolyphenol microcapsules [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 222-231.
- [13] 张想, 李立郎, 杨娟, 等. 发酵刺梨果渣膳食纤维润肠通便功能研究[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(2): 30-34.
- ZHANG X, LI L L, YANG J, et al. Study on the moistening and laxative function of dietary fiber from fermented roxburghrose pomace[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2021, 57(2): 30-34.
- [14] 孙鹏鹏, 张秀婷, 阿布杜尔·拉赫曼·安萨里. 玛咖西洋参胶囊对缓解体力疲劳作用[J]. *山东化工*, 2021, 50(15): 37-38, 44.
- SUN P P, ZHANG X T, ABDUR R A. Macaginseng capsule functions in alleviating physical fatigue[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(15): 37-38, 44.
- [15] 刘佳佳, 贺林娇, 马利鑫, 等. 补喂植物多酚对伊犁马 1 000 m 速步赛运动成绩及血气指标的影响[J]. *中国饲料*, 2022(5): 53-57.
- LIU J J, HE L J, MA L X, et al. Effect of supplementary feeding of plant polyphenols on the performance and blood gas index of the 1 000 m sash-walking race of yili horse[J]. *China Feed*, 2022(5): 53-57.
- [16] TUNG Y T, WU M F, LEE M C, et al. Antifatigue activity and exercise performance of phenolic-rich extracts from calendula officinalis, ribes nigrum, and vaccinium myrtillus[J]. *Nutrients*, 2019, 11(8): 1 715-1 731.
- [17] 王嘉佳, 李晓倩, 高山, 等. 核桃多肽复配核桃乳对小鼠抗疲劳及抗氧化作用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 84-91.
- WANG J J, LI X Q, GAO S, et al. Anti-fatigue and antioxidant effect of walnut peptide compound walnut milk on mice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(19): 84-91.
- [18] ZHU H K, XU W Q, WANG N, et al. Anti-fatigue effect of *Lepidium meyenii* Walp. (Maca) on preventing mitochondria-mediated muscle damage and oxidative stress in vivo and vitro[J]. *Food & Function*, 2021, 12(7): 3 132-3 141.
- [19] 任广泉, 许志凌云, 刘金秋, 等. 玉木耳多糖对小鼠的抗疲劳作用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(7): 148-152.
- REN G Q, XU Z L Y, LIU J Q, et al. Anti-fatigue effect of the polysaccharide from *Auricularia cornea* [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(7): 148-152.
- [20] TUNG Y T, WU M F, LEE M C, et al. Antifatigue activity and exercise performance of phenolic-rich extracts from *Calendula officinalis*, *Ribes nigrum*, and *Vaccinium myrtillus* [J]. *Nutrients*, 2019, 11(8): 1 715-1 731.
- [21] ZHU J Q, YI J J, KANG Q Z, et al. Anti-fatigue activity of hemp leaves water extract and the related biochemical changes in mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 150: 112054.
- [22] LI M X, TIAN X Y, LI X L, et al. Anti-fatigue activity of gardenia yellow pigment and cistanchephenylethanol glycosides mixture in hypoxia[J]. *Food Bioscience*, 2021, 40: 100902.
- [23] 韦福忠. 超声辅助低共熔溶剂提取诺丽果渣黄酮及抗小鼠运动疲劳研究[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(3): 105-113.
- WEI F Z. Ultrasonic-assisted extraction of flavonoids from Noni pomace by deep eutectic solvents and its antifatigue in mice[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(3): 105-113.
- [24] ZHU Y, HUANG Y Y, LI M Y, et al. High Fischer ratio peptide of hemp seed: Preparation and anti-fatigue evaluation in vivo and in vitro[J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112534.
- [25] LIU G Y, YANG X, ZHANG J X, et al. Synthesis, stability and anti-fatigue activity of selenium nanoparticles stabilized by *Lyciumbarbarum* polysaccharides [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 179: 418-428.
- [26] ZHU H M, ZENG W B, ZHAO T N, et al. Synthesis and evaluation of 5-aminimidazole-4-carboxamide riboside derivatives as anti-fatigue agents [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, 15(12): 104313.
- [27] XIAO R, WEI Y, ZHANG Y P, et al. Trilobatin, a naturally occurring food additive, ameliorates exhaustive exercise: Induced fatigue in mice: Involvement of Nrf2/ARE/Ferroptosis signaling pathway[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 913367.
- [28] MA C J, DENG Y J, XIAO R, et al. Anti-fatigue effect of phlorizin on exhaustive exercise-induced oxidative injury mediated by Nrf2/ARE signaling pathway in mice [J]. *European Journal of Pharmacology*, 2021, 918: 174563.
- [29] XIAO F Y, KABACHKOVA A V, JIAO L, et al. Effects of cold water immersion after exercise on fatigue recovery and exercise performance-meta analysis [J]. *Frontiers in Physiology*, 2023, 14: 1006512.
- [30] 董静茹, 莫君明, 王升. 鹰嘴豆多肽抗疲劳活性[J]. *食品与机械*, 2023, 39(3): 142-146.
- DONG J R, MO J M, WANG S. Study on the anti-fatigue activity of chickpea peptide[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(3): 142-146.

(下转第 161 页)

- of Chemical and Pharmaceutical Research, 2016, 8: 46-55.
- [25] BASHMIL Y M, ALI A, BK A, et al. Screening and characterization of phenolic compounds from Australian grown bananas and their antioxidant capacity[J]. Antioxidants, 2021, 10: 1 521.
- [26] LI D N, MENG X J, LI B. Profiling of anthocyanins from blueberries produced in China using HPLC-DAD-MS and exploratory analysis by principal component analysis[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 47: 1-7.
- [27] CASTAGNINI J M, BETORET N, BETORET E, et al. Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1 289-1 296.
- [28] AXELLE S M, GIOVEDIE S, ELISABETH D, et al. Evaluation of nutritional and antioxidant properties of the tropical fruits banana, litchi, mango, papaya, passion fruit and pineapple cultivated in Réunion French Island[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 225-233.
- [29] 王娟, 谢静, 张伟, 等. 香蕉皮中6种多酚的HPLC检测及制备工艺研究[J]. 食品工业, 2016, 37(3): 187-190.
- WANG J, XIE J, ZHANG W, et al. Determination and preparation of six polyphenols in banana peel by HPLC method and the influence of extraction condition on components' contents[J]. Food Industry, 2016, 37(3): 187-190.
- [30] HAGERMAN A E, RIEDL K M, JONES G A, et al. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46: 1 887-1 892.
- [31] RICE-EVANS C, MILLER N, PAGANGA G. Antioxidant properties of phenolic compounds [J]. Trends in Plant Science, 1997, 2(4): 152-159.
- [32] CARDULLO N, MUCCILI V, PULVIRENTI L, et al. C-glucosidic ellagitannins and galloylated glucoses as potential functional food ingredients with anti-diabetic properties: A study of α -glucosidase and α -amylase inhibition[J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126099.
- [33] ABDENNACER B, KARIM M, YASSINE M, et al. Determination of phytochemicals and antioxidant activity of methanol extracts obtained from the fruit and leaves of Tunisian *Lycium intricatum* Boiss[J]. Food Chemistry, 2014, 174: 577-584.
- [34] LI H B, WONG C C, CHENG K W, et al. Antioxidant properties in vitro and total phenolic contents in methanol extracts from medicinal plants[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41 (3): 385-390.
- [35] NI M T, HU X, GONG D M, et al. Inhibitory mechanism of vitexin on α -glucosidase and its synergy with acarbose [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105824.
- [36] WU M X, YANG Q X, WU Y W, et al. Inhibitory effects of acorn (*Quercus variabilis* Blume) kernel-derived polyphenols on the activities of α -amylase, α -glucosidase, and dipeptidyl peptidase IV [J]. Food Bioscience, 2021, 43(4): 101224.

(上接第138页)

- [12] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 分体式空调室内气流组织 CFD 仿真优化[J]. 制冷与空调, 2021, 21(11): 41-45.
- HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. CFD simulation and optimization of indoor air flow organization in split air conditioning[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2021, 21(11): 41-45.
- [13] 王少鹏, 张益诚, 罗君, 等. 基于空气制冷系统的高密度冷库降温-维持工况仿真计算特性分析[J]. 船海工程, 2022, 15(5): 37-41.
- WANG S P, ZHANG Y C, LUO J, et al. Simulation calculation of cooling and maintenance condition of high density cold storage based on air refrigeration system[J]. Ship & Ocean Engineering, 2022, 15(5): 37-41.
- [14] 段宇飞, 寿旭日, 童欢, 等. 船用高温冷库气流组织对温度分布的影响[J]. 船舶工程, 2021, 43(12): 126-131, 171.
- DUAN Y F, SHOU X R, TONG H, et al. Effect of air distribution on temperature distribution in marine high temperature cold storage[J]. Ship Engineering, 2021, 43(12): 126-131, 171.
- [15] 沈希, 王晓燕, 黄跃进, 等. 制冷压缩机变工况运行的热力性能研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 15-19.
- SHEN X, WANG X Y, HUANG Y J, et al. Thermodynamic performance of refrigeration compressor running at variable condition[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(6): 15-19.
- [16] 张晟, 张晓虎, 赵亮, 等. 基于 Ergun 方程的菱镁球团填充床层阻力特性实验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 347-352.
- ZHANG S, ZHANG X H, ZHAO L, et al. Experiment of resistance characteristics for magnesite pellets packed bed based on ergun equation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(3): 347-352.

(上接第152页)

- [31] YI R K, WEI Y X, TAN F G, et al. Antioxidant capacity-related preventive effects of Shoumei (slightly fermented *Camellia sinensis*) polyphenols against hepatic injury [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2020, 2 020(19): 1-17.
- [32] 蒋丽, 殷劲. 当归红花汤对糖酵解供能条件下力竭性游泳训练小鼠耐缺氧能力、抗疲劳能力的影响[J]. 中国老年学杂志, 2013, 33(18): 4 492-4 494.
- JIANG L, YIN Q. Effects of Danggui Honghua decoction on hypoxia tolerance and fatigue resistance of exhaustive swimming training mice under glycolysis energy supply condition[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2013, 33(18): 4 492-4 494.