

D-氨基葡萄糖修饰玉米肽的 抗运动性疲劳效应

王晓杰, 杨晶晶

(齐齐哈尔大学 食品与生物工程学院, 黑龙江省玉米深加工理论与技术重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:旨在为玉米糖肽抗疲劳产品的开发提供理论依据, 采用碱性蛋白酶 Alcalase 水解玉米醇溶蛋白制得玉米肽, 再以转谷氨酰胺酶为催化剂, *D*-氨基葡萄糖为酰基受体, 通过酶法糖基化反应修饰玉米肽制备玉米糖肽, 以玉米糖肽为受试样品(低、中、高剂量分别为 125、250、500 mg/kg), 玉米肽为阴性对照(剂量为 500 mg/kg), 对小鼠连续灌胃 28 d 后, 检测小鼠体质量、运动耐力以及疲劳生化指标, 考察玉米糖肽对小鼠生长状况的影响及其对小鼠的抗疲劳效应。结果表明: 实验剂量的玉米糖肽和玉米肽对小鼠生长状况未产生不良影响; 与正常组(灌胃生理盐水)相比, 250 mg/kg 玉米糖肽组小鼠的转棒时间和负重游泳时间分别显著延长至 5.71 倍和 2.48 倍, 而玉米肽组小鼠的转棒时间和负重游泳时间均无显著变化; 与模型组相比, 250 mg/kg 玉米糖肽组小鼠血清乳酸脱氢酶活力、乳酸含量、尿素氮含量以及肝脏丙二醛含量分别降低 30.29%、13.20%、31.59%、50.59%, 肝糖原、肌糖原、谷胱甘肽含量以及超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活力分别增加 18.38%、54.40%、42.20%、31.38% 和 138.63%; 与同剂量的玉米肽相比, 玉米糖肽具有更显著的抗运动性疲劳效果。综上, 酶法糖基化修饰能够显著提高玉米肽的抗疲劳活性, 其机制可能与缓解氧化性损伤、降低体内积聚的乳酸含量和增加肌肉和肝脏中糖原含量有关。

关键词:玉米肽; *D*-氨基葡萄糖; 玉米糖肽; 抗疲劳

中图分类号: TS229; TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2025)05-0027-07

Anti-exercise fatigue effect of *D*-glucosamine modified zein peptides

WANG Xiaojie, YANG Jingjing

(Heilongjiang Key Laboratory of Corn Deep Processing Theory and Technology, College of Food and Biological Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to provide a theoretical basis for the development of anti-fatigue products of zein glycopeptides, zein glycopeptides were prepared by enzymatic glycosylation of zein peptides (prepared by Alcalase-hydrolyzed zein) with transglutaminase as catalyst and *D*-glucosamine as acyl receptor. Zein glycopeptides were used as the test samples (low, medium and high doses of 125, 250 mg/kg and 500 mg/kg, respectively), with zein peptides as the negative control (dose of 500 mg/kg). After 28 d of continuous gavage administration, the body weight, exercise endurance and fatigue biochemical indexes of mice were detected to evaluate the effects of zein glycopeptides on growth of mice and their anti-fatigue effects. The results showed that the experimental dose of zein glycopeptides and zein peptides had no adverse effects on the growth of mice. Compared with the normal group (gavaged with normal saline),

250 mg/kg zein glycopeptides significantly prolonged the rotarod test time and the weight-located swimming time to 5.71 times and 2.48 times, respectively, while the zein peptides group showed no significant changes in these parameters. Compared with the model group, 250 mg/kg zein glycopeptides decreased the activity of

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研创新平台项目(145309330); 黑龙江省植物性食品加工技术优势特色学科“科技攻关”专项项目(YSTSXK202305)

作者简介: 王晓杰(1980), 女, 教授, 博士, 研究方向为粮食、油脂与植物蛋白工程(E-mail) wangxiaojie80@163.com。

lactate dehydrogenase and the contents of serum lactic acid, serum urea nitrogen and liver malondialdehyde by 30.29%, 13.20%, 31.59% and 50.59%, respectively, while increased the contents of liver glycogen, muscle glycogen and glutathione, and the activities of superoxide dismutase and glutathione peroxidase by 18.38%, 54.40%, 42.20%, 31.38% and 138.63%, respectively. Compared with the same dose of zein peptides, zein glycopeptides had a more significant effect on anti-exercise fatigue. In conclusion, enzymatic glycosylation can significantly improve the anti-fatigue activity of zein peptides, which might be related to alleviate oxidative damage, reduce the accumulated lactic acid content in the body and increase the glycogen content in muscle and liver.

Key words: zein peptides; *D*-glucosamine; zein glycopeptides; anti-fatigue

疲劳是一种主观不适的感觉,表现为压倒性的疲倦、虚弱或疲惫感。如果长期累积的疲劳得不到适当的休息或干预,会进一步发展为过度劳累、慢性疲劳综合征,甚至引发过劳死^[1]。近年来,对疲劳的营养干预与治疗逐渐引起了研究者的关注。多项研究表明,从天然食品中提取的活性成分,尤其是生物活性肽/糖肽,在预防和缓解疲劳方面是有效、安全的^[2-3]。

玉米醇溶蛋白作为玉米中主要的贮藏蛋白,是一种被美国食品药品监督管理局(FDA)认定为公认安全(GRAS)的食品成分^[4]。玉米醇溶蛋白含有3/4的疏水性氨基酸残基和1/4的亲水性氨基酸残基^[4],这种独特的氨基酸组成使其在水性体系中溶解度低,且在模拟的胃系统中难以消化^[5],限制了其在食品加工领域中的应用。为了克服这一限制,通常采用物理、化学或酶法对玉米醇溶蛋白进行修饰以改变其构象和结构,从而提升其在食品加工领域的适用性。其中,酶法因具有专一性强、反应条件温和、环境友好等优点而成为常用的改性方法。玉米醇溶蛋白的酶法修饰主要有酶法水解和酶法糖基化^[6-9],而玉米醇溶蛋白的低溶解性成为酶促反应的主要限制条件。为此,本课题组将玉米醇溶蛋白的两种酶法修饰途径有机结合起来,先利用酶法水解反应改善玉米醇溶蛋白的溶解性,再对酶解产物进行酶法糖基化修饰以改善修饰产物的功能性质,使玉米醇溶蛋白溶解性显著改善的同时具有抗氧化、拮抗酒精性肝损伤的生物学功效^[10-12]。基于疲劳产生的“自由基学说”机制^[13-14],推测玉米糖肽也具有较强的抗疲劳功能。但是,目前鲜有研究关注玉米糖肽的抗疲劳活性。因此,本研究以玉米醇溶蛋白为原料,通过酶法水解制备了玉米肽,并通过酶法糖基化反应修饰玉米肽制备了玉米糖肽,并以其灌胃小鼠28 d后,通过转棒实验、负重游泳实验及对疲劳相关生化指标(血清尿素氮含量、血清乳酸含量、血清乳酸脱氢酶活力、肝糖原和肌糖原含量

及肝脏氧化应激参数)的检测,来评价玉米糖肽的抗疲劳效应,以期玉米糖肽抗疲劳产品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

96只雄性ICR小鼠(4~6周龄、18~22 g),长春市亿斯实验动物技术有限责任公司。

转谷氨酰胺酶(1 000 U/g),泰兴市一鸣生物制品有限公司;玉米醇溶蛋白, Sigma公司;碱性蛋白酶Alcalase (5.08×10^5 U/mL),丹麦诺维信公司;*D*-氨基葡萄糖,上海生工生物工程有限公司;乳酸脱氢酶、乳酸、肝/肌糖原、尿素氮、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽(GSH)、丙二醛(MDA)和谷胱甘肽过氧化物(GSH-Px)试剂盒,南京建成生物工程研究所。

DF-I集热式磁力加热搅拌器, TU-1901紫外可见分光光度计, ZB-200疲劳转棒仪, TSE991超低温冰箱, TDL-5-A离心机, ZH游泳箱。

1.2 实验方法

1.2.1 玉米肽的制备

取40 g玉米醇溶蛋白配成底物质量浓度为5 g/100 mL的悬浮液,调节体系pH至8.5,加入底物质量3%的碱性蛋白酶Alcalase,在60℃下酶解2.0 h,酶解过程中通过滴加1 mol/L NaOH维持体系pH稳定。酶解结束后立即沸水浴灭酶10 min, 4 000 r/min离心15 min,取上清液经冷冻干燥后即获得玉米肽。

1.2.2 玉米糖肽的制备

参照文献[15],在玉米肽质量浓度3 g/100 mL、玉米肽与*D*-氨基葡萄糖质量比1:3、pH 7.7、转谷氨酰胺酶添加量55 U/g(以玉米肽质量计)、反应温度44℃条件下糖基化反应7 h,反应物经酶钝化及离心后获得玉米糖肽粗产物。采用截留分子量200 Da纳滤膜,在压力2.0 MPa、温度20℃、纳滤次数5次、每次体积浓缩倍数为2的条件下,对玉米糖肽粗产物进行纯化处理,以去除未反应

的 D-氨基葡萄糖和过量的无机盐,得到玉米糖肽。经分析所制备的玉米糖肽含有(74.75 ± 0.01)% 蛋白质、(14.92 ± 2.43)% D-氨基葡萄糖、(0.73% ± 0.01)% 脂肪、(6.04 ± 0.07)% 灰分和(3.56 ± 0.24)% 水分,分子质量分布小于 427 u 的占比 22.48%,427 ~ 4 259 u 的占比 41.79%,4 259 ~ 6 500 u 的占比 3.32%,大于 6 500 u 的占比 32.41%。

1.2.3 ICR 小鼠的饲养和实验分组

96 只雄性 ICR 小鼠,饲养于相对湿度 50% ~ 60%、室温(25 ± 2)℃ 的实验动物清洁室中,每天保证 12 h 光照和 12 h 黑暗,自由进食和饮水。驯化 1 周后,将小鼠随机分为 6 组,分别为正常组、模型组、玉米糖肽低剂量组(125 mg/kg,简称“糖肽-125 组”)、玉米糖肽中剂量组(250 mg/kg,简称“糖肽-250 组”)、玉米糖肽高剂量组(500 mg/kg,简称“糖肽-500 组”)和阴性对照组(玉米肽,500 mg/kg,简称“玉米肽-500 组”),除模型组 6 只小鼠外,其他组每组 18 只小鼠。在灌胃前,阴性对照组先将玉米肽配成质量浓度为 50 mg/mL 的溶液,3 个玉米糖肽剂量组(低、中、高)分别将玉米糖肽配成质量浓度分别为 12.5、25、50 mg/mL 的溶液,按小鼠每 10 g 体质量给药 0.1 mL 进行灌胃。正常组和模型组均给予生理盐水。每日称小鼠体质量并调整灌胃体积以保证相应的灌胃剂量。整个灌胃周期为 28 d。

1.2.4 小鼠运动耐力的测定

1.2.4.1 转棒实验

分别从 1.2.3 的正常组、3 个玉米糖肽剂量组和阴性对照组中取 6 只小鼠,在末次灌胃 30 min 后将其放在转棒上,调节转棒的速度至 25 r/min,记录小鼠由于肌肉疲劳从转棒上跌落的时间,前 3 次为预实验,从第 4 次开始计时。如果小鼠在 30 min 内未从转棒上跌落,则将其转棒时间记为 30 min。

1.2.4.2 负重游泳实验

分别从 1.2.3 的正常组、3 个玉米糖肽剂量组和阴性对照组中取 6 只小鼠,在末次灌胃 30 min 后,给小鼠负重其体质量 10% 的铅块,将小鼠放入水深不低于 25 cm、水温 25℃ 的游泳箱中,记录小鼠从游泳开始至其头部全部沉入水中 8 s 不能浮出水面的时间,作为小鼠的负重游泳时间。

1.2.5 小鼠疲劳相关生化指标的测定

分别从 1.2.3 的正常组、模型组、3 个玉米糖肽剂量组和阴性对照组中取 6 只小鼠,在末次灌胃 30 min 后,直接取正常组小鼠的血液、肌肉和肝脏,同时将除正常组之外的各组小鼠放入水温 25℃ 的游泳箱中游泳 30 min,休息 60 min 后取其血液、肌肉

和肝脏。从血液中分离出血清后待检,肝脏则用预冷的生理盐水制成 10% 肝匀浆液,3 000 r/min 离心 10 min,取上清液待检。采用试剂盒检测相关生化指标(血清尿素氮含量、血清乳酸含量、血清乳酸脱氢酶活力、肝糖原和肌糖原含量及肝脏氧化应激参数)。

1.2.6 数据处理

所有数据均以“平均值 ± 标准差”表示,用 SPSS Statistics 19.0 进行统计学分析。采用 Duncan 检验进行差异显著性分析, $p < 0.05$ 为差异显著性水平。

2 结果与讨论

2.1 玉米糖肽对小鼠体质量的影响

实验期间每日测定各组小鼠的体质量,通过体质量的变化表征玉米糖肽对小鼠生长情况的影响,结果如图 1 所示。

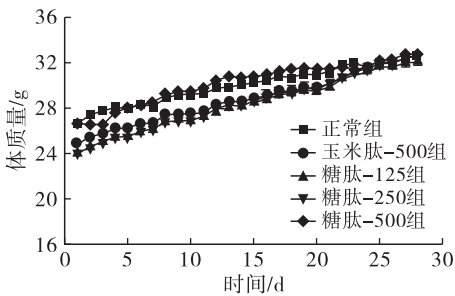


图 1 玉米糖肽对小鼠体质量的影响

Fig.1 Effect of zein glycopeptides on body weight in mice

由图 1 可以看出,随着灌胃时间的延长,各组小鼠的体质量均呈现逐渐升高的变化趋势。在 28 d 实验周期内,3 个玉米糖肽剂量组和阴性对照组小鼠体质量的增加量与正常组小鼠相比无显著性差异($p > 0.05$),表明实验剂量的玉米糖肽和玉米肽没有对小鼠的生长状况产生不良影响。

2.2 玉米糖肽对小鼠运动耐力的影响

2.2.1 对转棒时间的影响

玉米糖肽对小鼠运动耐力的影响如表 1 所示。

表 1 玉米糖肽对小鼠转棒时间的影响

Table 1 Effect of zein glycopeptides on rotarod test time in mice

组别	转棒时间/min
正常组	4.23 ± 4.67
玉米肽-500 组	13.95 ± 11.57
糖肽-125 组	13.98 ± 14.64
糖肽-250 组	24.14 ± 11.73 *
糖肽-500 组	25.58 ± 7.72 **

注: * 表示与正常组相比差异显著($p < 0.05$), ** 表示与正常组相比差异极显著($p < 0.01$)。下同

Note: Compared with normal group, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. The same below

由表 1 可以看出,与正常组相比,3 个玉米糖肽剂量组和玉米肽-500 组小鼠的转棒时间均有不同程度的延长,其中糖肽-250 组小鼠的转棒时间显著延长($p < 0.05$),糖肽-500 组小鼠的转棒时间极显著延长($p < 0.01$)。糖肽-125 组、糖肽-250 组、糖肽-500 组小鼠的转棒时间分别是正常组的 3.30、5.71、6.05 倍。糖肽-500 组小鼠的转棒时间相对于玉米肽-500 组延长了 83.37%,说明玉米糖肽的抗疲劳效果优于玉米肽,可能是玉米糖肽中多肽及糖基部分的协同作用,增强了小鼠的运动耐力,达到了抗疲劳的效果。

2.2.2 对负重游泳时间的影响

负重游泳实验是评估疲劳程度最常用的动物模型,负重游泳时间越长,运动能力越强,疲劳敏感性越低^[16-17]。因此,可以通过负重游泳时间反映小鼠的运动耐力,进而反映玉米糖肽的抗疲劳效果。玉米糖肽对小鼠负重游泳时间的影响如表 2 所示。

表 2 玉米糖肽对小鼠负重游泳时间的影响

Table 2 Effect of zein glycopeptides on weight-located swimming time in mice

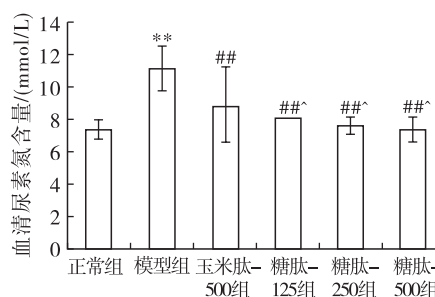
组别	负重游泳时间/s
正常组	47.00 ± 20.48
玉米肽-500 组	53.29 ± 22.72
糖肽-125 组	115.17 ± 70.44 *
糖肽-250 组	116.50 ± 60.02 *
糖肽-500 组	172.33 ± 35.92 **

由表 2 可以看出,与正常组相比,玉米肽-500 组和 3 个玉米糖肽剂量组小鼠的负重游泳时间均延长,其中玉米肽-500 组、糖肽-125 组、糖肽-250 组和糖肽-500 组小鼠的负重游泳时间分别是正常组的 1.13、2.45、2.48 倍和 3.67 倍,说明玉米糖肽的抗运动性疲劳活性优于玉米肽,可能是糖基化修饰产物中玉米肽和糖基的代谢均可以为机体提供能量,提高了小鼠的运动耐力。Feng 等^[18]研究了玉米肽的抗疲劳效应,发现在(0.95 ± 0.09) g/d(相当于 47 500 mg/kg,按小鼠体质量 20 g 计算)的剂量下玉米肽组的负重游泳时间是对照组的 2.3 倍,结合本研究结果,进一步说明玉米糖肽的抗运动性疲劳活性优于玉米肽。同时,与壳寡糖和 D-氨基半乳糖修饰的玉米肽相比^[19-20],在灌胃剂量均为 250 mg/kg 条件下,D-氨基葡萄糖修饰的玉米肽抗运动性疲劳效果更佳,可能是酰基受体的种类影响了玉米肽的糖基化度及产物的分子质量,进而影响了玉米糖肽的生理功能。

2.3 玉米糖肽对疲劳生化指标的影响

2.3.1 血清尿素氮含量

血清尿素氮是蛋白质和氨基酸代谢的主要产物,其含量可以反映肌肉蛋白质的分解代谢状况以及肌肉细胞高强度训练后的损伤状况^[18]。玉米糖肽对小鼠血清尿素氮含量的影响如图 2 所示。



注: ** 表示模型组与正常组相比差异极显著($p < 0.01$); ##表示样品组与模型组相比差异极显著($p < 0.01$); ^表示样品组与正常组相比差异不显著($p > 0.05$)。下同

Note: **. There is a highly significant difference between the model group and the normal group ($p < 0.01$); ##. There is a highly significant difference between the samples group and the model group ($p < 0.01$); ^. There is no significant difference between the samples group and the normal group ($p > 0.05$). The same below

图 2 玉米糖肽对小鼠血清尿素氮含量的影响

Fig. 2 Effect of zein glycopeptides on urea nitrogen content in mice serum

由图 2 可以看出,与正常组相比,模型组小鼠的血清尿素氮含量极显著增加了 51.2% ($p < 0.01$),说明模型组小鼠未能从糖和脂肪的分解代谢中获得足够的能量,使得蛋白质和氨基酸的分解代谢增强,从而导致血清尿素氮含量增加。与模型组相比,玉米肽-500 组及 3 个玉米糖肽剂量组小鼠的血清尿素氮含量均极显著降低($p < 0.01$),尤其是玉米糖肽剂量组,小鼠血清尿素氮含量恢复到正常组的水平,其中糖肽-250 组小鼠血清尿素氮含量降低了 31.59%,说明玉米肽及玉米糖肽均可以显著降低小鼠肌肉蛋白质的分解代谢状况并改善疲劳状态,且玉米糖肽更有效。玉米糖肽效果更优的原因可能是玉米糖肽中功能性短肽和糖基的协同效应所致,肽部分可能被降解为小肽和游离氨基酸,游离氨基酸亮氨酸和丙氨酸等的氧化有助于产生用于肌肉收缩的能量^[21],糖基部分可以直接参与糖代谢的调节,加速糖酵解,减少肌肉蛋白质的消耗,进而减少血清尿素氮的产生。Xu 等^[22]也发现玉米肽具有显著抑制血清尿素氮含量增加的效果,与本研究结果一致。

2.3.2 血清乳酸含量

乳酸是糖在无氧呼吸下的主要代谢产物,体内乳酸堆积过多可引起肌肉酸痛,甚至乳酸性酸中毒,

这是人体疲劳的主要原因^[23-24]。因此,剧烈运动后,血清中的乳酸含量可作为反映机体疲劳程度的一个敏感指标。玉米糖肽对小鼠血清乳酸含量的影响如图 3 所示。

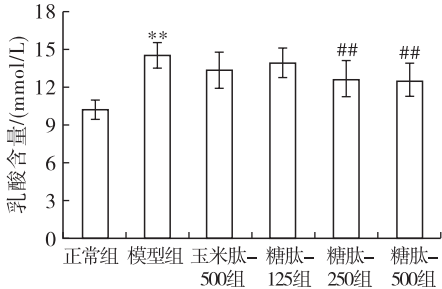


图 3 玉米糖肽对小鼠血清乳酸含量的影响
Fig. 3 Effect of zein glycopeptides on lactic acid content in mice serum

由图 3 可以看出,与正常组相比,模型组小鼠的血清乳酸含量极显著增加了 42.23% ($p < 0.01$),说明由于剧烈的运动,氧化磷酸化可能无法满足小鼠的能量需求,由有氧代谢转向无氧糖酵解或糖原分解,导致大量乳酸堆积,使小鼠运动状态受到影响。与模型组相比,玉米肽-500 组和糖肽-125 组小鼠的血清乳酸含量无显著变化 ($p > 0.05$),而糖肽-250 组和糖肽-500 组小鼠的血清乳酸含量极显著降低 ($p < 0.01$),分别降低 13.20% 和 13.95%,说明玉米糖肽可以抑制血清乳酸的积累和/或促进血清乳酸的清除,从而缓解了小鼠的运动性疲劳,且糖基化修饰改善了玉米肽的抗疲劳效果。

2.3.3 血清乳酸脱氢酶活力

乳酸脱氢酶通过催化乳酸和丙酮酸之间的氧化还原反应,参与厌氧糖酵解和糖异生过程。在厌氧条件下,乳酸脱氢酶催化丙酮酸还原为乳酸,这个反应是乳酸性酸中毒的基础。在力竭运动过程中,由于氧气供应不足,可能会产生过量自由基,从而导致细胞损伤和细胞内酶(包括乳酸脱氢酶)泄漏入血清中^[21]。因此,作为胞浆酶,血清中乳酸脱氢酶活力的升高可以作为反映剧烈运动引起的细胞损伤和肌肉破坏程度的关键指标。玉米糖肽对小鼠血清乳酸脱氢酶活力的影响如图 4 所示。

由图 4 可以看出,与正常组相比,模型组小鼠血清乳酸脱氢酶活力极显著增加了 77.07% ($p < 0.01$),说明剧烈运动后小鼠肌细胞膜的通透性增加,导致乳酸脱氢酶在血清中的浓度升高。与模型组相比,玉米肽-500 组和 3 个玉米糖肽剂量组小鼠血清乳酸脱氢酶活力均极显著或显著降低 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)至正常水平,其中糖肽-250 组降

低了 30.29%,这可能与玉米肽和玉米糖肽富含支链氨基酸有关。人体体外实验已经证实,运动后补充支链氨基酸(BCAA,包括亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸)、苯丙氨酸等可以修复骨骼肌的损伤^[25]。玉米糖肽和玉米肽的氨基酸组成相似,均含有丰富的支链氨基酸^[12],因此两者均具有修复骨骼肌损伤、提高运动能力、缓解肌肉蛋白质分解代谢的作用。

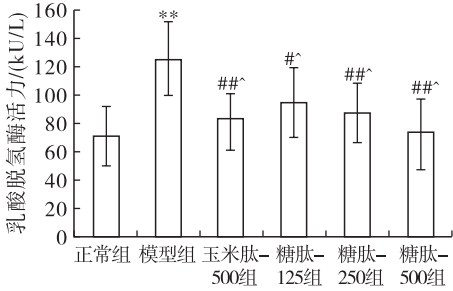


图 4 玉米糖肽对小鼠血清乳酸脱氢酶活力的影响
Fig. 4 Effect of zein glycopeptides on the activity of lactate dehydrogenase in mice serum

2.3.4 肌糖原和肝糖原含量

运动耐力取决于能量的存储,肌糖原和肝糖原是机体内糖原储备的 2 种形式,两者的含量可以直接反映疲劳程度。玉米糖肽对小鼠肌糖原和肝糖原含量的影响如图 5 所示。

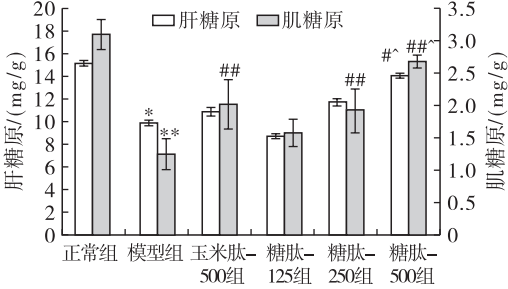


图 5 玉米糖肽对小鼠肌糖原和肝糖原含量的影响
Fig. 5 Effect of zein glycopeptides on the contents of muscle glycogen and liver glycogen in mice

由图 5 可以看出,与正常组相比,模型组小鼠的肌糖原含量极显著降低 ($p < 0.01$),肝糖原含量显著降低 ($p < 0.05$),分别降低了 56.70% 和 34.69%,说明剧烈运动中大量的血糖被消耗时,2 种糖原被分解为葡萄糖来维持机体血糖水平,以满足运动需求。与模型组相比,随着灌胃剂量的增加,玉米糖肽组小鼠的肌糖原和肝糖原含量逐渐增加,糖肽-250 组小鼠的肌糖原和肝糖原含量分别增加 54.40% 和 18.38%。研究表明,补充由氨基酸组成的肽并不能直接为体内糖原的合成提供葡萄糖,但会影响糖原的消耗和补充效率^[3]。Feng 等^[3]报道,豌豆肽可以刺激胰岛素的释放以促进糖原的形成。因此,玉米

糖肽可能通过促进胰岛素分泌来增加糖原含量,这需要进一步实验证实。

2.3.5 肝脏氧化应激参数

高强度和长时间的运动可以产生大量活性氧自由基,这些自由基可以诱导肝脏等组织氧化损伤,而引起肌肉无力和疲劳^[26]。因此,测定肝脏的氧化应激参数(包括 SOD 活力、GSH - Px 活力、GSH 含量和 MDA 含量等)评估肝脏的氧化应激状态,有助于理解运动引起的疲劳机制。玉米糖肽对小鼠肝脏氧化应激参数的影响如表 3 所示。

表 3 玉米糖肽对小鼠肝脏氧化应激参数的影响

Table 3 Effect of zein glycopeptides on oxidative stress parameters in mice liver

组别	SOD 活力/ (U/mg)	GSH - Px 活力/ (U/mg)	GSH 含量/ (mg/mg)	MDA 含量/ (nmol/mg)
正常组	282.36 ± 40.76	400.57 ± 59.68	2.21 ± 0.27	0.98 ± 0.12
模型组	174.81 ± 33.32 **	132.93 ± 45.17 **	1.09 ± 0.45 **	1.70 ± 0.80 **
玉米肽 - 500 组	207.73 ± 33.88	281.26 ± 30.26 ##	0.94 ± 0.13	1.35 ± 0.35
糖肽 - 125 组	213.74 ± 36.43	190.62 ± 73.79	1.17 ± 0.46	1.34 ± 0.23
糖肽 - 250 组	229.66 ± 36.09	317.21 ± 70.77 ##	1.55 ± 0.49 #	0.84 ± 0.17 ###
糖肽 - 500 组	272.74 ± 26.08 ###	379.67 ± 43.78 ###	1.82 ± 0.27 ###	0.84 ± 0.28 ###

由表 3 可知,与正常组相比,模型组小鼠肝脏的 SOD、GSH - Px 活力及 GSH 含量均极显著降低($p < 0.01$),分别降低了 38.09%、66.81%、50.68%,而 MDA 含量极显著增加了 73.47% ($p < 0.01$),说明小鼠经力竭运动后机体内产生大量活性氧自由基,脂质过氧化程度增强,导致运动性疲劳产生。与模型组相比,玉米肽 - 500 组小鼠肝脏中仅 GSH - Px 活力极显著增加($p < 0.01$),而 SOD 活力、GSH 和 MDA 含量差异不显著($p > 0.05$),糖肽 - 250 组小鼠肝脏中 SOD 活力、GSH - Px 活力和 GSH 含量分别增加 31.38%、138.63% 和 42.20%,而 MDA 含量极显著降低了 50.59% ($p < 0.01$),糖肽 - 500 组小鼠肝脏中 4 个检测指标均恢复到正常水平。以上结果说明玉米肽与其共价结合的 D - 氨基葡萄糖的协同作用可缓解运动性疲劳给机体带来的氧化性损伤,提高小鼠的运动能力,且玉米糖肽的效果优于玉米肽,这与糖基化修饰改善了玉米肽的抗氧化能力报道^[11]相一致。

3 结 论

以转谷氨酰胺酶为催化剂,D - 氨基葡萄糖为酰基受体,通过酶法糖基化反应修饰玉米肽制备的玉米糖肽,在 250 mg/kg 剂量下,对小鼠具有显著的

抗运动性疲劳的效果,推测其机制与缓解机体氧化性损伤、降低体内积聚的乳酸含量、增加肌肉和肝脏中的糖原含量有关。

参考文献:

- [1] WAN J J, QIN Z, WANG P Y, et al. Muscle fatigue: General understanding and treatment [J/OL]. Exp Mol Med, 2017, 49 (10): e384 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1038/emmm.2017.194>.
- [2] LU X, CHEN J, HUANG L, et al. The anti - fatigue effect of glycoprotein from hairtail fish (*Trichiurus lepturus*) on BALB/c mice [J/OL]. Foods, 2023, 12(6): 1245 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.3390/foods12061245>.
- [3] FENG T, HUANG Y, TANG Z, et al. Anti - fatigue effects of pea (*Pisum sativum* L.) peptides prepared by compound protease [J]. J Food Sci Technol, 2021, 58 (6): 2265 - 2272.
- [4] TAN H, ZHOU H, GUO T, et al. Zein structure and its hidden zearalenone: Effect of zein extraction methods [J/OL]. Food Chem, 2022, 374: 131563 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131563>.
- [5] JIAO Y, ZHENG X Q, CHANG Y, et al. Zein - derived peptides as nanocarriers to increase the water solubility and stability of lutein [J]. Food Funct, 2018, 9(1): 117 - 123.
- [6] LIU P, LIAO W, QI X, et al. Identification of immunomodulatory peptides from zein hydrolysates [J]. Eur Food Res Technol, 2020, 246(5): 931 - 937.
- [7] HAYAT U, LIU C, RAZA A, et al. In vitro/in vivo identification of zein degraded peptides using HPLC - MS/MS and their safety evaluation [J/OL]. Biomed Mater, 2023, 18 (2): 025007 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/ach411>.
- [8] CHANG Y, JIAO Y, LI D J, et al. Glycosylated zein as a novel nanodelivery vehicle for lutein [J/OL]. Food Chem, 2021, 376: 131927 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131927>.
- [9] WANG X J, ZHENG X Q, LIU X L, et al. Preparation of glycosylated zein and retarding effect on lipid oxidation of ground pork [J]. Food Chem, 2017, 227: 335 - 341.
- [10] 王晓杰, 刘晓兰, 石彦国. 玉米肽的酶法糖基化修饰及产物溶解性的研究 [J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 70 - 74.
- [11] 王晓杰, 童玲, 刘晓兰. 玉米糖肽的体外抗氧化活性 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 166 - 173.
- [12] WANG X J, LIU X L, ZHENG X Q, et al. Preparation of corn glycopeptides and evaluation of their antagonistic effects on alcohol - induced liver injury in rats [J/OL]. J Funct Foods, 2020, 66 (C): 103776 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103776>.
- [13] 周立新. 黑米糠运动食品在足球训练中的抗疲劳功效研究 [J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 233 - 234.

- [14] ZHANG M J, XING L J, WANG Y, et al. Anti - fatigue activities of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murry [J/OL]. Food Sci Technol, 2022, 42: E242703[2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1590/fst.242703>.
- [15] WANG X J, LIU X L, ZHENG X Q, et al. Antagonistic effect of the glycopeptide from zein on acute alcohol - induced liver injury in mice [J/OL]. J Funct Foods, 2022, 92: 105062 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105062>.
- [16] XU X, DING Y, YANG Y, et al. β - Glucan salectan improves exercise performance and displays anti - fatigue effects through regulating energy metabolism and oxidative stress in mice[J/OL]. Nutrients, 2018, 10(7): E858[2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.3390/nu10070858>.
- [17] KAN N W, HO C S, CHIU Y S, et al. Effects of resveratrol supplementation and exercise training on exercise performance in middle - aged mice [J/OL]. Molecules, 2016, 21 (5) : E661 [2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.3390/molecules21050661>.
- [18] FENG Z, WEI Y, XU Y, et al. The anti - fatigue activity of corn peptides and their effect on gut bacteria[J]. J Sci Food Agric, 2022, 102(8): 3456 - 3466.
- [19] 王晓杰, 姜宇航, 曲悦, 等. 壳寡糖糖基化修饰玉米肽的抗疲劳效应[J]. 中国油脂, 2021, 46(8): 39 - 44.
- [20] 夏春荣, 王晓杰, 姜宇航, 等. D - 氨基半乳糖糖基化修饰玉米肽抗疲劳效应的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(5): 62 - 67.
- [21] ZHANG W W, DUAN J C, JI C Y, et al. Preparation and anti - fatigue effects of *Vicatia thibetica* polysaccharide[J]. Pharmacogn Mag, 2022, 18 (77) : 133 - 142.
- [22] XU T C, SUN N X, LIU Y H, et al. Preparation of oligopeptides from corn gluten meal by two enzymes at one step using response surface methodology and investigation of their anti - fatigue activities[J]. Biomed Res, 2017, 28(9): 2948 - 2956.
- [23] LIU Y, ZHOU Y, NIRASAWA S, et al. *In vivo* anti - fatigue activity of sufu with fortification of isoflavones[J]. Pharmacogn Mag, 2014, 10(39): 367 - 373.
- [24] ZHAO Y Q, ZENG L, YANG Z S, et al. Anti - fatigue effect by peptide fraction from protein hydrolysate of croceine croaker (*Pseudosciaena crocea*) swim bladder through inhibiting the oxidative reactions including DNA damage[J/OL]. Mar Drugs, 2016, 14(12): E221[2024 - 04 - 15]. <https://doi.org/10.3390/md14120221>.
- [25] WEBER M G, DIAS S S, DE ANGELIS T R, et al. The use of BCAA to decrease delayed - onset muscle soreness after a single bout of exercise: A systematic review and meta - analysis[J]. Amino Acids, 2021, 53(11): 1663 - 1678.
- [26] LIU X C, LIU M. Anti - fatigue effect of ferulic acid in exercise trained mice [J]. Acta Pol Pharm, 2023, 80 (3) : 473 - 481.
-
- (上接第 26 页)
- [14] PAN Y, XIE Q T, ZHU J, et al. Study on the fabrication and *in vitro* digestion behavior of curcumin - loaded emulsions stabilized by succinylated whey protein hydrolysates[J]. Food Chem, 2019, 287: 76 - 84.
- [15] 胡碧君. 黄芪多糖提取工艺优化及其抗氧化活性研究 [J]. 中国药业, 2018, 27(24): 11 - 14.
- [16] WANG T, JÓNSDÓTTIR R, KRISTINSSON H G, et al. Enzyme - enhanced extraction of antioxidant ingredients from red algae *Palmaria palmata* [J]. LWT - Food Sci Technol, 2010, 43: 1387 - 1393.
- [17] 景言, 刘晓兰, 王今雨, 等. 玉米蛋白水解物的酶法制备及其对结肠炎的缓解作用 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 270 - 278.
- [18] NAKAMURA H, KAWAMATA Y, KUWAHARA T, et al. The nitrogen moieties of dietary nonessential amino acids are distinctively metabolized in the gut and distributed to the circulation in rats[J]. J Nutr, 2017, 147(8): 1537 - 1545.
- [19] 马雪, 郭丽, 马松艳, 等. 玉米黄粉蛋白的功能特性及应用研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(2): 28 - 32.
- [20] 祝婧, 刘磊, 张名位, 等. 不同分子量海鲈鱼胶原蛋白肽组分的功能特性比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30 (12) : 113 - 118.
- [21] 高盼, 韩玉博, 杨永, 等. 原料压榨制油的预处理方式对核桃多肽功能特性和 ACE 抑制活性的影响 [J]. 中国油脂, 2023, 48(9): 83 - 88.
- [22] YU G C, LI J T, HE H, et al. Ultrafiltration preparation of potent bioactive corn peptide as alcohol metabolism stimulator *in vivo* and study on its mechanism of action [J]. J Food Biochem, 2013, 37(2): 161 - 167.
- [23] 李柏航, 沈和定, 朱敏, 等. 瘤背石磺活性多肽制备工艺优化及其抗氧化性探究 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 168 - 173.
- [24] WANG C Y, TIAN J Q, WANG Q. Research progress in structure - activity relationship of food - derived bioactive peptides with functions to improve cardiovascular health [J]. Food Sci, 2010, 31(13): 307 - 311.
- [25] HOFMANN T. Determination of the chemical structure of novel coloured compounds generated during maillard - type reactions[M]// O'BRIEN J, NURSTEN H E, CRABBE M J C, et al. The Maillard reaction in foods and medicine. Amsterdam: Elsevier, 2005: 82 - 88.
- [26] EISERICH J P, SHIBAMOTO T. Antioxidative activity of volatile heterocyclic compounds[J]. J Agric Food Chem, 1994, 42(5): 1060 - 1063.