张振刚, 王峰. 有氧运动联合补充 D-核糖对小鼠抗疲劳和抗氧化的作用 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 368−375. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050117

ZHANG Zhengang, WANG Feng. Effects of Aerobic Exercise Combined with D-Ribose Supplementation on Anti-fatigue and Anti-oxidation in Mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 368−375. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050117

有氧运动联合补充 D-核糖对小鼠抗疲劳和抗氧化的作用

张振刚, 王　峰
（安阳学院, 河南安阳 455000）

摘　要: 研究有氧运动联合补充 D-核糖对小鼠抗疲劳和抗氧化酶活性的影响，将小鼠分为安静对照组、有氧运动对照组、D-核糖对照组、D-核糖+有氧运动组。有氧运动组进行每周进行 6 d 的有氧跑台训练，D-核糖组每日每只灌胃 2 mL 核糖（300 mg/100 g），通过 12 周的规律性有氧跑台训练后，建立小鼠负重游泳抗疲劳动物模型，分别记录小鼠负重力竭游泳时间，并测定小鼠体内肝糖原（hepaticr glycogen，HG）、肌糖原（muscle glycogen，MG）、血糖（blood glucose）、血尿素氮（blood urea nitrogen，BUN）、血乳酸 (bloodlactic acid，BLA）、丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量和总抗氧化能力（total antioxidant capacity，T-AOC）、谷胱甘肽过氧化物歧化酶（glutathione peroxide dismutase，GSH-Px）、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）等活力。结果表明，与安静对照组相比，有氧运动对照组、D-核糖对照组、D-核糖+有氧运动组小鼠负重游泳时间显著增加（P<0.05），同时显著提高了小鼠体内肝糖原、肌糖原和血糖含量（P<0.05），并降低了体内血尿素氮和血乳酸含量（P<0.05）。另外，其抗氧化活性结果表明，与安静对照组相比，有氧运动对照组、D-核糖对照组、D-核糖+有氧运动组的 T-AOC 均增强，SOD、CAT、GSH-Px 活性也都显著升高（P<0.05），MDA 则显著降低（P<0.05）。说明长期规律的有氧运动联合补充 D-核糖能显著提高机体内肝糖原、肌糖原、血糖含量和氧化应激能力，提高机体抗疲劳作用。

关键词: 有氧运动, D-核糖, 抗疲劳, 抗氧化活性
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2022)02−0368−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050117
本文网刊:

Effects of Aerobic Exercise Combined with D-Ribose Supplementation on Anti-fatigue and Anti-oxidation in Mice

ZHANG Zhengang，WANG Feng

（Anyang University, Anyang 455000, China）

Abstract: Study the effects of aerobic exercise combined with D-ribose supplementation on the anti-fatigue and antioxidant enzyme activities of mice, the mice were divided into quiet control group, aerobic exercise control group, D-ribose control group, D-ribose+aerobic exercise group. The aerobic exercise group received aerobic treadmill training for 6 days a week, and the D-ribose group was given 2 mL of ribose (300 mg/100 g) per rat per day. After 12 weeks of regular aerobic treadmill training, an anti-fatigue animal model was established for mice swimming with weight, the time of exhausted swimming was recorded in mice, and hepaticr glycogen (HG), muscle glycogen (MG), and blood glucose in mice, blood urea nitrogen (BUN), blood lactic acid (BLA), malondialdehyde (MDA) content and total antioxidant capacity (T-AOC), glutathione Oxide dismutase (glutathione peroxide dismutase, GSH-Px), superoxide dismutase (SOD), catalase (catalase, CAT) and other activities were measured. The results showed that compared with the quiet control group, the weight-bearing swimming time of mice in the aerobic exercise control group, D-ribose control group, and D-ribose+aerobic exercise group significantly increased (P<0.05), and at the same time the mice's body hepatic glycogen, muscle glycogen and blood sugar content were significantly improved(P<0.05), and the blood urea nitrogen and blood lactic acid content in

收稿日期: 2021−05−17
基金项目: 河南省社会科学联合会调研课题（SKL-2019-2678）。
作者简介: 张振刚（1980−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 体育教育训练学, E-mail: zzgzhangzhengang@163.com。

the body were significantly reduced(P<0.05). In addition, the results of its antioxidant activity showed that compared with the quiet control group, the T-AOC of the aerobic exercise control group, D-ribose control group, D-ribose+aerobic exercise group were all enhanced. The activity of SOD, CAT, GSH-Px also significantly increased (P<0.05), and MDA was significantly reduced (P<0.05). It showed that long-term regular aerobic exercise combined with D-ribose supplementation could significantly increase the liver glycogen, muscle glycogen, blood sugar content and oxidative stress ability in the body, and improve the body's anti-fatigue effect.

Key words: aerobic exercise; D-ribose; anti-fatigue; antioxidant activity

运动性疲劳是指机体在剧烈运动时体内能量降低, 且肌肉力量也随之降低的一种亚健康状态, 机体的抗疲劳性可以通过测定机体维持运动到力竭的时间来表现[1], 当机体长时间进行过度劳动而并未得到及时缓解时, 体内会出现一系列的生理变化, 产生大量的代谢废物如血乳酸、血尿素氮、氧化自由基等, 它们在机体内不断积累进而造成机体运动耐力的暂时下降, 最终产生一定的疲劳感[2], 当机体长时间处于严重疲劳状态时还会伤及部分组织和器官, 进而产生各种疾病[3]。因此, 在过去几十年里, 许多健康营养学者和运动生理学家一直在寻找天然活性物质, 既可以提高运动能力, 还可以缓解疲劳, 并加速体力恢复。实验研究表明, 作用于大脑皮层以及神经中枢的一类抗疲劳化学药物对神经系统、正常生理活动产生不良影响, 甚至对有些化学药物依赖成瘾[4−5], 而 D-核糖在抗疲劳方面与化学药物相比没有任何副作用, 它不仅可以增加机体糖原储备为疲劳时能量消耗提供能源物质, 同时还能减少机体疲劳时产生的代谢废物, 增强免疫力进而调节神经中枢来减缓、消除疲劳[6]。目前, D-核糖已经成为抗疲劳功能性食品的研究热点。

D-核糖是生物体内遗传物质核糖核酸的重要组成物质[7], 在蛋白质、糖原、核酸合成、环核苷酸代谢以及在能量转换反应中均起着重要作用, 一方面它能提高骨骼肌内 ATP 的合成速率, 另一方面提高机体代谢效率, 因而, 其具有增强运动能力修复运动后造成的肌肉损伤和起到缓解疲劳的重要作用。大量研究表明, 补充 D-核糖可以改善延迟性肌肉酸痛[8], 能够显著增强机体肝糖元的储备能力, 缓解运动疲劳的作用[9], 另外缺乏 D-核糖易引起心力衰竭[10], 还有数据表明, 补充 D-核糖可以加速补充 ATP, 延缓疲劳的产生[11−12]。由此可见, 对于 D-核糖的研究具有重要的病理生理学意义和广阔的应用前景。目前, 对于 D-核糖抗疲劳作用的相关研究有一定的报道, 如熊正英等[13] 研究发现补充核糖可以提高大强度耐力运动中血清 NADPH 含量和 G-6-PD 活性, 并增强抗氧化酶的活性, 有利于运动状态下机体内自由基的消除, 丁岩等[14] 研究发现 D-核糖进入机体参与骨骼肌组织内高能磷酸物质代谢, 可促进疲劳小鼠腓肠肌中 ATP 含量的恢复, 延长疲劳小鼠游泳时间, 王亚坤等[15] 研究发现 D-核糖对大鼠运动过程中及恢复期心脏和骨骼肌功能的恢复具有一定的作用, 能够补充运动过程中消耗的 ATP, 袁保辉等[16] 研究发现对急性疲劳中的小鼠, D-核糖及其核糖复方均具有明显的抗疲劳作用。然而这些研究主要集中在提高动物的运动时间或者恢复疲劳速度上, 缺乏一定的研究深度[16−17], 另外, 对于将 D-核糖和有氧运动结合起来研究其对小鼠的抗疲劳作用还未见报道。

因此, 本研究以小鼠为研究对象, 通过补充 D-核糖对小鼠进行规律的有氧跑台训练, 并建立小鼠负重游泳抗疲劳动物模型, 研究有氧运动联合补充 D-核糖对小鼠抗疲劳和抗氧化作用的影响, 以期为开发利用 D-核糖作为运动营养品提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

D-核糖纯度 99.5%　阿拉丁; 肝糖原(Hepaticglycogen, HG)、肌糖原(muscle glycogen, MG)、血糖(blood glucose, BLA)、血尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)、血乳酸(bloodlactic acid, BLA)、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)、谷胱甘肽过氧化物歧化酶(glutathione peroxide dismutase, GSH-Px)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)试剂盒　南京建成生物工程研究所; SPF 级健康昆明系小鼠　80 只, 6 周龄, 体重(20±2)g, 雄性, 河南省实验动物中心, 实验动物使用许可证编号为 SYXK(豫)2011-0001; 喂饲颗粒饲料江苏省协同医药生物工程有限责任公司, 批号: xt013。

ZH-PT 型动物实验跑台　安徽正华生物仪器设备有限公司; DB080 小鼠恒温游泳池　北京智鼠多宝生物科技有限责任公司, 直径 60 cm×高 40 cm; Multiskan GO 全波长酶标仪　Thermo 赛默飞世尔; HH 系列-1 型数显恒温水浴锅　青岛聚创环保集团有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验分组　采用区间分组法, 根据体重将小鼠随机纳入安静对照组(AS)、有氧运动对照组(AE)、D-核糖安静对照组(CS)、D-核糖有氧运动试验组(CE), 每组 20 只, 组间、组内小鼠体重无显著性差异(P>0.05)。各组小鼠在相同条件下进行常规饲养和管理。单笼饲养, 自由摄水、进食。每周一上午 9 点更换垫料, 每日清洗消毒饮水瓶, 室内照明控制为 12 h, 室温(25±2)℃, 湿度 50%~55%。

1.2.2 有氧训练方案 AS 组小鼠每日每只灌胃 2 mL 生理盐水，CS 组每日每只灌胃 2 mL 核糖(300 mg/100 g·bw·d)，均不做任何运动干预，每周灌胃 6 d。AE 组小鼠每日每只灌胃 2 mL 生理盐水，CE 组小鼠每日每只灌胃 2 mL 核糖(300 mg/100 g·bw·d)，每周灌胃 6 d，并进行一周的有氧适应性训练，跑台道长 5.80 m，宽 0.85 m，高 1.20 m，适应性跑台训练方案为 60 min/次，速度为 12 m/min，坡度 0°，6 次/周，周日休息。适应性一周训练结束后进行为期 12 周的规律性有氧跑台训练，小鼠每日上午 10:00 和下午 15:00 开始进行 2 次有氧训练，时长 1.5 h，6 次/周，周日停训。运动方案：跑台坡度 0°，前 30 min 跑步速度 12 m/min，后 60 min 跑步速度 15 m/min[18−19]。

1.2.3 小鼠体重测定 灌胃饲养前和 12 周的规律性有氧跑台训练后，分别称量各组小鼠的体重，并记录。

1.2.4 小鼠负重游泳实验 于最后一次的跑台运动结束后的下一周周一上午 9 点开始进行小鼠负重游泳实验。将 4 组试验中全部小鼠取出，将小鼠尾根部负荷 5% 体质量的铅片，然后将小鼠放入水中游泳，泳池(60 cm×60 cm×40 cm)，水深 30 cm，水温(25±1)℃，用玻璃棒进行搅动水面进行干预，以保证实验结果的有效性，使小鼠保持四肢运动。当小鼠游泳一段时间后沉入水下 10 s 内未能上升到水面，记录所需的时间，该时间为小鼠游泳时间(min)，并及时采取抢救措施，尽量避免小鼠溺水死亡，用吹风机吹干小鼠，放回鼠笼恢复。

1.2.5 小鼠抗疲劳血清生化指标的测定 小鼠负重力竭游泳后，每组实验中各取 10 只小鼠在 2 h 内全部麻醉，进行眼球取血，离心(3000 r/m，10 min，4 ℃)，取上清液，制备血清，备用，剩下的各组小鼠回笼继续饲养。将采血后的小鼠立即取肝脏和股四头肌肉，经生理盐水漂洗后用滤纸吸干，保存，备用。按照试剂盒提供方法检测 HG、MG、BLA、GLU、BUN、MDA 含量。

1.2.6 小鼠抗氧化生化指标的测定 每组剩下 10 只小鼠在负重力竭游泳后的第 2 d 上午 10:00 和下午 15:00 开始进行有氧跑台训练，时长 1.5 h，在下午跑台训练后，2 h 内麻醉全部小鼠，摘除眼球，收集血液，随后在 4 ℃ 环境下离心 10 min(3000 r/min)，采集上清液，低温保存。按照试剂盒提供方法测定 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 活力。

1.3 数据处理

试验测定数据均以“平均值±标准差”表示，采用 Excel 2013 软件进行统计分析，利用 IBM SPSS 22 软件进行独立样本 t 检验，$P<0.05$ 为显著性差异水平，$P<0.01$ 为极显著差异水平。

2 结果与分析

2.1 有氧训练前后小鼠体重的变化

分别在有氧运动实验前后测量小鼠体重，体重数据见表 1，从表 1 中可以看出，实验开始前四组小鼠体重相互间不存在显著差异($P>0.05$)，在通过补充 D-核糖和有氧训练后，四组小鼠体重存在一定的差异，安静对照组(AS 组)与其他三组存在显著差异($P<0.05$)，其体重最高；单独的有氧训练组和单独的补充 D-核糖组都降低了小鼠的体重，这两者间小鼠体重不存在显著差异($P>0.05$)；补充 D-核糖并结合有氧训练组小鼠体重最轻。有氧训练加速了小鼠体内的能量代谢，可以降低小鼠体重，有研究表明，D-核糖通过参与葡萄糖的戊糖旁路代谢系统，促进骨骼肌内 ATP 的生成，提高了机体代谢效率[20−21]，通过灌胃 D-核糖能够降低实验动物体重的增长。Griffiths 等[22] 研究发现，D-核糖的给予会造成大鼠体重降低，由于 D-核糖参与葡萄糖的戊糖旁路代谢系统，因此 D-核糖引起的体重降低可能与体内葡萄糖代谢增加，机体消耗有关。因而，通过有氧训练和补充 D-核糖都能增加小鼠体内的能量消耗，降低小鼠体重。

表 1 小鼠训练前后体重变化

Table 1 Changes in body weight of mice before and after training

组别	试验前体重(g)	试验后体重(g)
安静对照组(AS)	20.51±1.06^{a}	36.29±2.28^{a}
有氧运动对照组(AE)	20.48±1.21^{a}	34.36±2.31^{b*}
D-核糖安静对照组(CS)	20.45±1.14^{a}	34.51±2.17^{b*}
D-核糖+有氧运动试验组(CE)	20.47±1.18^{a}	32.72±2.05^{c**}

注：同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)；与安静对照组比较，*表示差异显著($P<0.05$)，**表示差异极显著($P<0.01$)；表2~表5同。

2.2 有氧训练联合补充 D-核糖对负重游泳时间的影响

小鼠的负重游泳耐力试验是用来评价药物或食物抗疲劳作用的常用试验模型[23]，其游泳时间长短可以客观的反应机体抗疲劳能力的强弱[24]。在有氧训练结束后，对四组小鼠进行负重游泳实验，实验数据见表 2。从表 2 中可以看出，与安静对照组相比，有氧运动对照组、D-核糖对照组和 D-核糖+有氧运动组的小鼠负重游泳时间均有所延长，有氧运动对照组、D-核糖对照组都与安静对照组相比具有显著性差异($P<0.05$)，D-核糖+有氧运动组与安静对照组相比具有极显著性差异($P<0.01$)。D-核糖的抗疲劳作用可能与 D-核糖能够提高肌肉组织中腺嘌呤核苷酸的代谢速度，在高强度运动期间可以提升骨骼肌内腺嘌呤核苷酸的补充速度有关，从而加速了嘌呤核苷酸到 ATP 的转化，以实现对运动过程中能量补充的目

表 2 各组小鼠负重游泳时间

Table 2 Weight-bearing swimming time of each group of mice

组别	负重游泳时间(min)
安静对照组(AS)	11.34±1.56^{a}
有氧运动对照组(AE)	16.46±1.32^{b}
D-核糖安静对照组(CS)	16.37±1.45^{b}
D-核糖+有氧运动试验组(CE)	19.39±2.87^{c**}

的[11,25]。实验结果说明有氧训练和 D-核糖都能提高小鼠运动耐力, 延长小鼠运动时间, 可见在运动过程中通过补充 D-核糖具有缓解疲劳的作用。

2.3　有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠肝糖原、肌糖原的影响

糖原是维持机体运动的重要的供能物质之一, 机体的运动持续性与自身糖原的储备量成正比, 机体持续的高强度运动会大量消耗糖原, 体内的糖原会逐渐分解成乳酸, 当机体内的糖原含量不足以为机体活动提供能量时, 机体就会产生疲劳现象。运动强度和持续运动时间关系着机体内肝糖原和肌糖原的分解速度, 当机体出现持续的剧烈运动, 肌糖原为身体肌肉运动提供能量, 逐渐分解为乳酸, 同时, 机体为维持正常血糖水平, 体内肝糖原会分解成葡萄糖, 其含量也会大幅降低, 因此测定肝糖原和肌糖原的含量是反映机体抗疲劳作用的重要指标之一[26]。从表 3 中可以看出, 安静对照组小鼠体内肝糖原和肌糖原含量都最低, 与其他三组存在显著性差异(P<0.05), D-核糖+有氧运动组与单独的有氧运动组和单独的补充 D-核糖组同样存在显著性差异(P<0.05), 而与安静对照组相比则存在极显著性差异(P<0.01)。实验表明单独的有氧运动组和单独的补充 D-核糖组都显著提高了小鼠体内肝糖原和肌糖原含量。D 核糖是能量物质核苷酸循环中重要的组成成分, 在机体的正常能量代谢和疲劳状态下的能量恢复中补充 D-核糖可以在肌肉组织中实现较快的能量转换, ATP 的恢复可以加快机体疲劳组织的修复, 促进肌肉中酸痛物质的代谢[8]。D-核糖不仅能加速肌肉组织中腺嘌呤核苷酸的代谢, 还能加快高强度运动后骨骼肌中嘌呤核苷酸的恢复, 加速嘌呤核苷酸转化为 ATP, 所以 D-核糖可以及时补充运动过程中消耗的 ATP, 延缓疲劳的产生[15]。说明通过长期的有氧训练和补充 D-核糖都可以提高小鼠体内肝糖原和肌糖原的储备, 而在有氧运动中通过额外补充 D-核糖组更显著地提高了小鼠糖原储备能力, 减缓运动小鼠体内肝糖原和肌糖原的消耗, 从而提高小鼠的运动耐力, 延缓疲劳的出现, 提高机体的运动能力。

表 3　有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠肝糖原、肌糖原含量的影响

Table 3　Effect of aerobic training combined with D-ribose supplementation on the content of liver glycogen and muscle glycogen in mice

组别	肝糖原(mg/g)	肌糖原(mg/g)
安静对照组(AS)	11.35±0.47^{a}	2.17±0.06^{a}
有氧运动对照组(AE)	15.94±0.32^{b}	4.56±0.02^{b}
D-核糖安静对照组(CS)	16.27±0.71^{b}	4.78±0.07^{b}
D-核糖+有氧运动试验组(CE)	19.52±0.75^{c**}	10.45±0.04^{c**}

2.4　有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠血液生化指标的影响

长期规律性的运动可以大大提高机体对胰岛素的敏感性, 提高胰岛素和肌体的亲和力, 增强肌肉对葡萄糖的利用, 起到改善小鼠糖耐量、降低血糖的作用[27]。从表 4 中可以看出, 安静对照组的血糖消耗最大, 血清里的血糖值最低, 为(1.53±0.15)mmol/L, 血糖值最高为 D-核糖+有氧运动组, 为(4.71±0.64)mmol/L, D-核糖安静对照组的血糖值高于单独的有氧运动对照组, 可见补充 D-核糖对提高机体血糖值的贡献大于单独的有氧运动。另外, 四组小鼠之间的血糖值之间相互存在显著性差异(P<0.05), D-核糖+有氧运动组与安静对照组存在极显著性差异(P<0.01)。当机体出现大负荷运动时, 能力无法及时供给时, 糖的无氧代谢和蛋白质代谢将会增加, 从而导致血尿素氮含量从而增加。从表 4 中可以看出, 安静对照组的血尿素氮消耗含量最高, 为(10.76±0.67)mmol/L, 说明该组蛋白质代谢最旺盛, 血尿素氮含量最低为 D-核糖+有氧运动组, 为(5.87±0.69)mmol/L, D-核糖安静对照组的血尿素氮含量显著低于单独的有氧运动对照组(P<0.05), 可见补充 D-核糖能显著提高肌肉组织分解代谢物质的效率。四组小鼠之间的血尿素氮含量相互存在显著性差异(P<0.05), D-核糖+有氧运动组与安静对照组则存在极显著性差异(P<0.01)。血乳酸是糖代谢的中间产物, 其浓度的高低间接反映着组织供氧、供血情况和糖代谢等指标, 机体出现剧烈运动后, 血乳酸含量则会升高。从表 4 中可以看出, 安静对照组的血乳酸积累最多, 为(13.58±0.56)mmol/L, 说明该组消耗的肌糖原最多, 血乳酸含量最低为 D-核糖+有氧运动组, 为(7.46±0.36)mmol/L, D-核糖安静对照组的血乳酸含量显著低于单独的有氧运动对照组, 说明补充 D-核糖能显著加快肌肉组织中乳酸的降解, 利于机体从疲劳中恢复, 另外, 四组小鼠之间的血尿素氮含量相互存在显著性差异(P<0.05), D-核糖+有氧运动组与安静对照组则存在极显著性差异(P<0.01)。因此, 补充 D-核糖结合有氧运动可以加快机体的乳酸清除速度, 提高乳酸的清除能力, 防止乳酸堆积, 从而

表 4　有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠血液生化指标的影响

Table 4　Effect of aerobic training combined with D-ribose supplementation on blood biochemical indicators in mice

组别	血糖(mmol/L)	血尿素氮(mmol/L)	血乳酸(mmol/L)
安静对照组(AS)	1.53±0.15^{a}	10.76±0.67^{d}	13.58±0.56^{d}
有氧运动对照组(AE)	2.64±0.47^{b}	9.53±0.74^{c}	11.26±0.64^{c}
D-核糖安静对照组(CS)	3.67±0.58^{c}	7.54±0.85^{b}	9.85±0.32^{b}
D-核糖+有氧运动试验组(CE)	4.71±0.64^{d**}	5.87±0.69^{a**}	7.46±0.36^{a**}

有利于运动后机体的体力恢复。可能的原因是补充 D-核糖可以跳过 ATP 合成的磷酸戊糖途径的限速步骤，从而增加磷酸核糖焦磷酸(PRPP)的生成速率，促进腺苷酸的合成，当 ATP 的及时补充和恢复，一方面提升了机体抗乳酸的能力，另一方面又使得机体代谢能力加快，清除体内乳酸的能力加快，最终通过提高乳酸代谢的能力来缓解和改善延迟性肌肉酸痛[8,16]。

2.5 有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠体内抗氧化效果的影响

SOD、CAT、GSH-Px 是机体内很常见的三种抗氧化酶，其功能就是清除机体内多余的自由基。为了评价有氧运动和 D-核糖对小鼠的抗氧化效果，对机体内 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 抗氧化活力及 MDA 含量进行了测定，数据结果见表 5，从表 5 中可以看出四组小鼠经过有氧运动后，有氧运动对照组、D-核糖对照组、D-核糖+有氧运动组的 T-AOC 逐渐增强，SOD、CAT、GSH-Px 活性也都明显升高，且都与安静对照组存在显著性差异(P<0.05)。D-核糖+有氧运动组的 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 都与安静对照组存在极显著性差异(P<0.01)，D-核糖+有氧运动组的 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 分别比安静对照组高出 57.12%、94.68%、104.96%、67.36%。MDA作为机体脂质过氧化的代谢产物，是氧化应激水平的一个重要指标，高强度的剧烈运动会导致体内过氧化反应加强，血清中 MDA 含量增加引起细胞膜受损。从表 5 中可以看出安静对照组的 MDA 含量最高，为(8.26±0.68)nmol/mL，安静对照组与其他三组皆存在显著性差异(P<0.05)，与 D-核糖+有氧运动组则存在极显著性差异(P<0.01)，D-核糖+有氧运动组分别比安静对照组降低了 22.28%。

2.6 有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠抗疲劳和抗氧化指标的相关性分析

从表 6 中可以看出，运动时间与 HG、MG、GLU 和 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 抗氧化活性相互间呈现正相关，而与 BUN、BLA、MDA 三个指标都呈现负相关，运动时间与 MG 呈现显著正线性相关性(P<0.05)，可见肌糖原含量在一定程度上对小鼠抗疲劳起着决定作用。另外，HG、MG、GLU 为小鼠抗疲劳的三个重要指标，其与 T-AOC、GSH-Px、SOD、CAT 抗氧化活性指标相互间都呈正线性相关，与 BUN、BLA、MDA 呈现负线性相关。HG 与 GLU、T-AOC、GSH-Px 呈现显著正相关(P<0.05)，HG 与 BLA 呈现显著负相关(P<0.05)；MG 与 T-AOC、SOD 呈现显著正相关(P<0.05)；GLU 与 T-AOC、SOD、CAT 呈现显著正相关，与 GSH-Px 呈现极显著正相关(P<0.01)，与 MDA 呈现显著负相关(P<0.05)，与 BUN、BLA 呈现极显著负相关(P<0.01)；BUN 与抗氧化活性指标都呈现显著负相关性(P<0.05)，可见，提高机体 HG、MG、GLU 含量和 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 抗氧化活性能提高机体抗疲劳作用。

3 讨论

D-核糖是生物体内核酸、核苷酸、维生素及各种核苷酸辅酶的重要组成物质，密切参与机体内核苷类物质、蛋白质和脂肪代谢，它不仅与腺苷酸的形成和 ATP 的生成有着重要关系，同时还是机体新陈代谢最基本的能量来源之一。另外，D-核糖还是构成

表 5 有氧训练联合补充 D-核糖对小鼠机体抗氧化效果的影响

Table 5 Effect of aerobic training combined with D-ribose supplementation on the antioxidant effect of mice

组别	T-AOC(U/mL)	SOD(U/mL)	CAT(U/mL)	GSH-Px(U/mL)	MDA(nmol/mL)
安静对照组(AS)	7.86±0.45^{a}	40.25±6.59^{a}	38.29±5.69^{a}	348.52±11.25^{a}	8.26±0.68^{d}
有氧运动对照组(AE)	9.45±0.52^{b}	55.65±7.32^{b}	46.58±4.68^{b}	366.22±21.56^{b}	7.34±0.47^{c}
D-核糖安静对照组(CS)	10.11±1.08^{c}	69.34±8.47^{b}	58.25±8.57^{c}	495.47±18.47^{c}	6.68±0.59^{b}
D-核糖+有氧运动试验组(CE)	12.35±0.85^{d**}	78.36±7.64^{d**}	78.48±6.21^{d**}	583.29±20.86^{d**}	6.42±0.72^{a**}

表 6 抗疲劳和抗氧化指标的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of anti-fatigue and anti-oxidation indexes

	运动时间	HG	MG	GLU	BUN	BLA	T-AOC	GSH-Px	SOD	CAT	MDA
运动时间	1	0.907	0.977*	0.843	−0.823	−0.886	0.933	0.799	0.893	0.775	−0.751
HG		1	0.925	0.958*	−0.926	−0.975*	0.971*	0.955*	0.923	0.853	−0.949
MG			1	0.920	−0.916	−0.946	0.978*	0.879	0.966*	0.890	−0.827
GLU				1	−0.995**	−0.996**	0.979*	0.995**	0.977*	0.963*	−0.976*
BUN					1	0.986*	−0.971*	−0.985*	−0.985*	−0.986*	0.956*
BLA						1	−0.992**	−.9868	−0.980*	−0.947	0.964*
T-AOC							1	0.958*	0.986*	0.935	−0.925
MDA								1	0.950*	0.945	−0.992**
SOD									1	0.976*	−0.906
CAT										1	−0.902
GSH-Px											1

注：*表示差异显著(P<0.05)；**表示差异极显著(P<0.01)。

磷酸核糖焦磷酸（PRPP）的底物，而 PRPP 又是机体内 ATP、核苷酸等合成的关键物质。许多研究已经证实，通过补充外源性 D-核糖可以催化 6-磷酸葡萄糖脱氢酶的脱氢反应，显著提高 PRPP 水平，从而加快剧烈运动中心肌、骨骼肌合成嘌呤核苷酸的速率，进而提高 ATP 的合成速率[28−30]。另外还有许多研究均已发现，D-核糖在人体心脏及骨骼肌肉内能量恢复方面有着积极的作用，Wei 等[31] 发现在对男大学生进行下肢腹肌锻炼时通过补充 D-核糖可减轻肌肉酸痛，改善肌肉损伤的恢复，并抑制脂质过氧化物的形成；丁岩等[14] 发现 D-核糖进入机体参与骨骼肌组织内高能磷酸物质代谢，可促进疲劳小鼠腓肠肌中 ATP 含量的恢复，延长疲劳小鼠游泳时间；王亚坤等[15] 在进行小鼠负重游泳试验中，通过补充 D-核糖显著提高了小鼠腓肠肌内 ATP 的合成速率和中心肌组织内 ATP 的含量；袁保辉等[16] 通过灌胃 D-核糖对疲劳小鼠生理功能影响试验中发现 D-核糖及其核糖复方均具有明显的抗疲劳作用。本研究结果表明，跟安静对照组相比单独规律的有氧训练组和单独的补充 D-核糖组都降低了小鼠的体重，而补充 D-核糖并结合有氧训练组其小鼠体重显著降低，表明 D-核糖参与了机体内的糖代谢，提高了代谢效率；另外，单独的有氧训练和单独的补充 D-核糖提高了小鼠体内肝糖原和肌糖原含量，而通过有氧运动结合 D-核糖更显著提高了体内肝糖原和肌糖原含量，延长了小鼠游泳运动时间，提高了小鼠运动耐力，有研究已经证实，长期规律的有氧运动能刺激转运载体-4（GLUT4）的表达，使机体将更多的利用脂肪代谢供能，对糖的利用减少，以节省糖原消耗[32]，服用 D-核糖可促进心肌和骨骼肌组织中的 ATP 恢复[17]。

机体在剧烈运动时自由基的大量生成与清除能力下降是导致运动性疲劳和运动性损伤的主要原因之一。国内外研究表明，剧烈运动后自由基产生过多，自由基的强氧化性致使细胞脂膜的去功能化是导致运动性疲劳的重要原因，剧烈的有氧运动时机体自由基增加，对组织细胞造成不利影响而引起运动性疲劳。现有的研究证明，当运动疲劳发生时表现为 MDA、BUN、呈现激增，SOD、GSH-Px、T-AOC 呈现下降[33]，而规律的有氧运动则可以增加机体内抗氧化酶数量，改善血液中的抗氧化能力[34−36]，本次试验中小鼠通过力竭游泳后，从试验结果显示，单独有氧运动对照组、D-核糖对照组、D-核糖+有氧运动组的 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 活性比安静对照组高，且都与安静对照组存在显著性差异（P<0.05），在四组数据中，D-核糖+有氧运动组的 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px活性最高，分别比安静对照组高出 57.12%、94.68%、104.96%、67.36%，而 MDA 含量则最低，为（6.42±0.72）nmol/mL，臧守相[37]、牛友芽[38]、李国杰等[39] 在研究小鼠运动疲劳试验中的结果同样显示，机体在疲劳状态下体内抗氧化酶活性与 MDA 含量变化趋势与本研究结果相似。MDA 作为脂质过氧化的代谢产物，主要引起细胞膜受损伤，MDA 在血清中的含量基本可反映机体脂质过氧化程度，并能间接反映出自由基对机体细胞的损伤程度。从本次研究结果上看，单独有氧运动对照组、D-核糖安静对照组、D-核糖+有氧运动组表面看只是降低了 MDA 含量，其实是规律的有氧运动和补充 D-核糖提高了机体抗氧化酶活性，降低机体脂质过氧化速度，从而降低了剧烈运动后机体内 MDA 含量。

机体在疲劳运动后体内自由基会大量增加，这些过多的自由基没有受到体内抗氧化酶的制约，进而开始攻击机体正常的细胞和组织，造成机体损伤。机体内产生的抗氧化酶在保护细胞和组织免受自由基损伤中发挥着重要的作用，SOD、CAT、GSH-Px 是机体内很常见的抗氧化酶，其功能就是清除体内多余自由基。对于机体的氧化、抗氧化，这些抗氧化酶起着平衡二者作用。机体在疲劳状态下，急需能量的补充使机体产生更多的 ATP，而 D-核糖与 ATP 的生成关系密切，补充 D-核糖能够促使机体细胞和组织内抗氧化酶活性的提高，可以迅速帮助体内的自由基和抗氧化系统重新回到平衡的状态，使得机体在疲劳状态下快速的自我调节和修复从而缓解疲劳。因此，通过测定 T-AOC 活力可反映机体总抗氧化酶的活力状态，并可间接反映机体的脂质过氧化程度，T-AOC 活力水平与机体抗氧化能力呈正相关，与机体脂质过氧化呈负相关。本研究的小鼠抗疲劳和抗氧化指标的相关性分析结果可以看出 HG、MG、GLU 为小鼠抗疲劳的三个重要指标，其与 T-AOC、GSH-Px、SOD、CAT 抗氧化活性指标相互间都呈正线性相关，与 BUN、BLA、MDA 呈现负线性相关，提高机体 HG、MG、GLU 含量和 T-AOC、SOD、CAT、GSH-Px 抗氧化活性能提高机体抗疲劳作用。

4　结论

本研究通过补充 D-核糖对小鼠进行规律的有氧训练，建立小鼠负重游泳抗疲劳动物模型，与安静对照组相比，D-核糖安静对照组和 D-核糖+有氧运动试验组均可以显著地延长小鼠的负重游泳时间（P<0.05），显著地提高小鼠的肝糖原和肌糖原含量，降低血乳酸含量（P<0.05），同时还能显著提高体内抗氧化酶系统活性（P<0.05），降低过量的自由基对机体的损伤并提高了机体的自我调节和修复的能力，从而提高了机体的运动耐力，延缓疲劳的产生，证明补充 D-核糖对机体具有更显著的抗疲劳作用，为未来开发 D-核糖运动营养保健产品提供一定的参考依据。

参考文献

［1］ 张颖捷，杜万红. 国内外抗疲劳研究进展[J]. 实用预防医学，2012, 19(7): 1112−1116. ［ZHANG Y J, DU W H. Research progress on anti-fatigue at home and abroad[J]. Practical Preventive Medicine, 2012, 19(7): 1112−1116.］

［2］ 林楠，钟琳琳，李娜，等. 人参花提取物抗疲劳作用的研究

[J]. 长春中医药大学学报, 2010(26): 336−337. [LIN N, ZHONG L L, LI N, et al. Anti-fatigue effect of ginseng flower extract[J]. Journal of Changchun University of Traditional Chinese Medicine, 2010(26): 336−337.]

[3] FINSTERERJ, MAHJOUB S Z. Fatigue in healthy and disbased individuals[J]. Am J Hosp Palliat Care, 2014, 31(5): 562−575.

[4] 刘军, 乔德才, 刘晓莉. 咖啡因延缓运动疲劳作用及机制研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2018, 37(9): 791−796. [LIU J, QIAO D C, LIU X L. Research progress on the effect and mechanism of caffeine in delaying exercise fatigue[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2018, 37(9): 791−796.]

[5] 金莉英, 姜欣, 张露, 等. 辐照红景天的抗疲劳作用研究[J]. 延边大学农学学报, 2021, 43(1): 62−67. [JIN L Y, JIANG X, ZHANG L, et al. Research on the anti-fatigue effect of irradiated rhodiola[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2021, 43(1): 62−67.]

[6] 袁保辉, 丁琪, 刘桂芹, 等. D-核糖的生理功能及其应用[J]. 中国生化药物杂志, 2016, 36(5): 210−212. [YUAN B H, DING Q, LIU G Q, et al. Physiological function and application of D-ribose[J]. Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics, 2016, 36(5): 210−212.]

[7] 覃懿, 罗想平, 柳春, 等. D-核糖的研究进展[J]. 大众科技, 2018, 20(7): 55−58. [QIN Y, LUO X P, LIU C, et al. The research progress of D-ribose[J]. Popular Science and Technology, 2018, 20(7): 55−58.]

[8] 蔡添伟. D-核糖改善延迟性肌肉酸痛的作用研究 [D]. 北京: 北京体育大学, 2016. [CAI T W. The effect of D-ribose on improving delayed-onset muscle soreness[D]. Beijing: Beijing Sport University, 2016.]

[9] 康丹, 胡馨瑜, 何计国. D-核糖对小鼠抗疲劳作用的影响[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 62−66. [KANG D, HU X Y, HE J G. The effect of D-ribose on the anti-fatigue effect of mice[J]. China Food and Nutrition, 2017, 23(6): 62−66.]

[10] LU Y, JIANGH, ZHANG H, et al. Serum oxidized low density lipoprotein serves as a mediator for the inverse relationship between serum d -ribose and cognitive performance in type 2 diabetic patients[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2021, 171: 91−98.

[11] MAC CARTER D, VIJAY N, WASHAM M, et al. D-ribose aids advancedischemic heart failure patients[J]. International Journal of Cardiology, 2008, 137(1): 79−80.

[12] MELIKE B, STCYR J A, WILLIAM T A. D-ribose aids heart failure patientswith preserved ejection fraction and diastolic dysfunction: A pilotstudy[J]. Ther Adv Cardiovasc Dis, 2015, 9(3): 56−65.

[13] 熊正英, 曲洪刚, 刘海斌. 补充核糖对大强度耐力训练大鼠血清自由基代谢和抗氧化酶活性的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2008(3): 366−367,365. [XIONG Z Y, QU H G, LIU H B. Effects of ribose supplementation on serum free radical metabolism and antioxidant enzyme activities in high-intensity endurance training rats[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2008(3): 366−367, 365.]

[14] 丁岩, 吴丹, 贾占红, 等. D-核糖对疲劳小鼠骨骼肌组织内高能磷酸物质代谢的影响[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2013, 15(9): 1916−1920. [DING Y, WU D, JIA Z H, et al. The effect of D-ribose on the metabolism of high-energy phosphoric acid in the skeletal muscle tissue of fatigued mice[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2013, 15(9): 1916−1920.]

[15] 王亚坤, 孙文敬, 刘敬泽. D-核糖对大鼠负载游泳后胰岛素、去甲肾上腺素、肾上腺素的影响及其抗疲劳、抗缺氧能力研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 591−596. [WANG Y K, SUN W J, LIU J Z. Study on the effects of D-ribose on insulin, norepinephrine and epinephrine after swimming in rats and their anti-fatigue and anti-hypoxia abilities[J]. Food Science, 2008, 29(11): 591−596.]

[16] 袁保辉, 刘桂芹, 刘敏, 等. 复方 D-核糖对小鼠抗疲劳作用的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 349−353. [YUAN B H, LIU G Q, LIU M, et al. Study on the anti-fatigue effect of compound D-ribose on mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 349−353.]

[17] 秦海宏, 王小平, 郭俊生, 等. D-核糖对果蝇抗衰老和小鼠耐缺氧时间的影响[J]. 中国老年学杂志, 2002(1): 49−51. [QIN H H, WANG X P, GUO J S, et al. Effects of anti-aging on drosophila and enduring anoxia time on mice by D-ribose[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2002(1): 49−51.]

[18] 杨星雅, 李鹏飞, 李良, 等. 有氧运动和抗阻运动对肥胖大鼠脂肪组织内质网应激及炎症反应的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(2): 129−137. [YANG X Y, LI P F, LI L, et al. Effects of aerobic exercise and resistance exercise on endoplasmic reticulum stress and inflammation in adipose tissue of obese rats[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2021, 40(2): 129−137.]

[19] OLIVEIRA N R, MARQUES S O, LUCIANO T F, et al. Treadmill training increases SIRT-1 and PGC-1 α protein levels and AMPK phosphorylation in quadriceps of middle-aged rats in an intensity-dependent manner[J]. Mediators of Inflammation, 2014, 2014: 987017.

[20] TAN Z T, WANG X W. Verapamil ribose and adenine enhance resyn-thesis of postischemic myocardial ATP[J]. Life Science, 1994, 55(18): 345−349.

[21] ZIMMER H G, IBEL H. Ribose accelerates the repletion of the ATPpool during recovery from reversible ischemia of the rat myocardium[J]. J Mol Cell Cardiol, 1984, 16(9): 863−867.

[22] GRIFFITHS J C, BORZELLECA J F, CYR J S. Sub-chronic(13-week) oral toxicity study with D-ribose in Wistar rats[J]. Food & Chemical Toxicology, 2007, 45(1): 144−152.

[23] CHEN Y, KONG L D, XIA X, et al. Behavioral and biochemical studies of total furocoumarins from seeds of psoraleacorylifolia in the forced swimming test in mice[J]. J Ethnopharmacol, 2005, 96: 451−459.

[24] PORSOLTR, BERTIN A, JALFRE M. Behavioral despair in mice: A primary screening test for antidepressants arch[J]. Int Pharmacodyn Ther, 1977, 229: 327−336.

[25] 于文兵, 严政, 高丽丽. 嘌呤核苷酸代谢与核糖[J]. 体育与科学, 2002, 23(2): 63−65. [YU W B, YAN Z, GAO L L. Purine nucleotide metabolism and ribose[J]. Sports and Science, 2002,

23(2)：63−65.］
［26］ ZHOU H, CAO J M, LIN Q, et al. Effect of dendrobium of ficinalekimura et migo on substance metabolism and exercise capacity in rats after exercise training[J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences, 2013, 48(19)：1684−1688.
［27］ 李俊. 有氧运动对 2 型糖尿病大鼠血管炎症及 SIRT1/NF-kB 信号通路的影响[J]. 北京体育大学学报，2018，41(5)：57−63.［LI J. Effects of aerobic exercise on vascular inflammation and SIRT1/NF-kB signaling pathway in type 2 diabetic rats[J]. Journal of Beijing Sport University, 2018, 41(5)：57−63.］
［28］ ZARZECZY R, BRAULT J J, ABRAHAM K A, et al. Influence of ribose on adenine salvage after intense muscle contractions[J]. Journal of Applied Physiology, 2001, 91(4)：1775−1781.
［29］ HELLSTEN Y, SKADHAUGEL, BANGSBO J. Effect of ribose supplementation on resynthesis of adenine nucleotides after intense intermittent training in humans[J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2004, 286(1)：182−188.
［30］ BRAULT J J, TERJUNG R L. Purine salvage to adenine nucleotides in different skeletal muscle fiber types[J]. Journal of Applied Physiology, 2001, 91(1)：231−238.
［31］ WEI C, QIU J Q, CAI T W, et al. Effect of D-ribose supplementation on delayed onset muscle soreness induced by plyometric exercise in college students[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2020, 17(1)：239−538.
［32］ PIROLA L, JOHNSTON A M, VAN OBBERGHEN E. Modulation of insulin action[J]. Diabetologia, 2004, 47(2)：170−184.
［33］ 张卓睿，毛迪锐，高晗. 等. 蓝莓花青素对小鼠抗疲劳及体内抗氧化作用[J]. 食品科学，2017，38(21)：207−211.［ZHANG Z R, MAO D R, GAO H, et al. Anti-fatigue and antioxidant effects of anthocyanins from blueberry in mice[J]. Food Science, 2017, 38(21)：207−211.］
［34］ YOL Y, TURGAY F, YIGITTÜRK O, et al. The effects of regular aerobic exercise training on blood nitric oxide levels and oxidized LDL and the role of eNOS intron 4a/b polymorphism[J]. Biochimica et BiophysicaActa(BBA)-Molecular Basis of Disease, 2020, 1866(12)：165913.
［35］ 宋海霞. 长期有氧运动对 2 型糖尿病大鼠抗氧化能力和肝细胞凋亡的影响[J]. 四川体育科学，2019，38(3)：32−35.［SONG H X. Effects of long-term aerobic exercise on antioxidant capacity and hepatocyte apoptosis in type 2 diabetic rats[J]. Sichuan Sports Science, 2019, 38(3)：32−35.］
［36］ 雷志军. 规律有氧运动对老龄大鼠心肌抗氧化酶的影响及基因调控机理的探讨 [D]. 长沙：湖南师范大学，2010.［LEI Z J. The effect of regular aerobic exercise on myocardial antioxidant enzymes and the mechanism of gene regulation in aged rats[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010.］
［37］ 臧守相. 原花青素对小鼠运动性疲劳及抗氧化能力的影响[J]. 世界复合医学，2019，5(3)：25−28.［ZANG S X. Effects of proanthocyanidins on exercise-induced fatigue and antioxidant capacity in mice[J]. World Complex Medicine, 2019, 5(3)：25−28.］
［38］ 牛友芽. 玉竹多糖对小鼠的抗疲劳作用[J]. 天然产物研究与开发，2018，30(7)：1202−1207.［NIU Y Y. Anti-fatigue effect of polygonatumodoratum polysaccharides on mice[J]. Natural Products Research and Development, 2018, 30(7)：1202−1207.］
［39］ 李国杰. 刺五加籽乙醇提取物对小鼠抗运动疲劳作用的影响[J]. 中国油脂，2018，43(9)：75−77.［LI G J. Effect of acanthopanaxsenticosus seed ethanol extract on anti-sports fatigue effect in mice[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(9)：75−77.］