

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.60137

阿胶粉缓解体力疲劳的功能评价与机制探讨

韩 香^{1,2} 郭晓飞^{3,4} 陆晓东^{1,2} 陈雪梅² 胡 博² 王周平^{1,2}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学国家功能食品工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 3. 国家胶类中药工程技术研究中心, 山东 聊城 252200; 4. 聊城市功能性食品研究开发重点实验室, 山东 聊城 252200)

摘要: [目的] 研究以驴皮、冰糖、黄酒为原料制备而成的阿胶粉缓解小鼠体力疲劳的活性机制。[方法] 将 50 只 SPF (specific pathogen free, SPF) 级雄性 BALB/c 小鼠随机分为 5 组 (每组 10 只), 分别为空白阴性对照组、模型阳性对照组与低 [0.67 g/kg]、中 [1.33 g/kg]、高 [2.67 g/kg] 剂量的试验组。除对照组外, 对其余组采用不同剂量的阿胶粉灌胃, 连续灌胃 30 d 后, 分别测定各组试验动物的负重游泳时间及运动后血清尿素、肌糖原、血乳酸、ATP 的含量, 同时对粪便样本中微生物菌群进行基因组测序。[结果] 相对于模型对照组, 低剂量阿胶粉组延长小鼠负重游泳时间显著 ($P < 0.05$), 各剂量组小鼠运动后血清尿素存留量显著下降 ($P < 0.01$), 中、高剂量组小鼠肌糖原的储备量有显著差异 ($P < 0.01$), 小鼠血乳酸水平显著降低 ($P < 0.01$), 中、高剂量组小鼠体内 ATP 的代谢显著提升 ($P < 0.01$); 粪便样本中微生物菌群基因组测序的结果呈现出中剂量组 > 低剂量组 > 高剂量组 > 空白组; 摄入低剂量和高剂量阿胶粉的小鼠肠道微生物菌群呈现出拟杆菌门含量的减少, 而中剂量阿胶粉组的小鼠显著地呈现出厚壁菌属的增加, 对应更好的碳水化合物和脂质代谢能力, 能够为机体提供更多能量从而缓解体力疲劳。[结论] 阿胶粉具有缓解小鼠体力疲劳的活性作用, 并可以改善微生态失调和失衡。

关键词: 阿胶粉; 抗疲劳; 功效; 评价; 肠道菌群; 基因组

Function evaluation and mechanism of Ejiao powder in relieving physical fatigue

HAN Xiang^{1,2} GUO Xiaofei^{3,4} LU Xiaodong^{1,2} CHEN Xuemei² HU Bo² WANG Zhouping^{1,2}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Engineering Research Center for Functional Food, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Gelatin-based Traditional Chinese Medicine, Dong'e Ejiao Co., Ltd., Liaocheng, Shandong 252200, China; 4. Liaocheng Key Laboratory of Functional Food Research and Development, Liaocheng, Shandong 252200, China)

Abstract: [Objective] To investigate the active mechanism of Ejiao powder, prepared from donkey-hide gelatin, rock sugar, and rice wine, in alleviating physical fatigue in mice. [Methods] Fifty specific pathogen-free (SPF) male BALB/c mice were randomly divided into five groups (10 in each group): a blank negative control group, a model positive control group, and three experimental groups receiving low (0.67 g/kg), medium (1.33 g/kg), and high (2.67 g/kg) doses of Ejiao powder. Except for the control group, all other groups were administered different doses of Ejiao powder via gavage for 30 consecutive days. Following administration, weight-bearing swimming time was recorded, and post-exercise serum urea, muscle glycogen, blood lactic acid, and ATP levels were measured. Additionally, the microbial community in fecal samples was analyzed through genome sequencing. [Results] Compared with the model control group, the low-dose Ejiao powder group exhibited a significant increase in weight-bearing swimming time ($P < 0.05$). Serum urea levels after exercise were significantly reduced in all Ejiao-treated groups ($P < 0.01$), while muscle glycogen reserves in the medium- and high-dose groups showed significant differences ($P < 0.01$). Blood lactic acid levels were significantly decreased ($P < 0.01$), and ATP metabolism was significantly enhanced in the medium- and high-dose groups ($P < 0.01$). Genome sequencing of fecal microbiota revealed a ranking of microbial diversity as follows: medium-dose group > low-dose group > high-dose group > blank control group. Mice in the low- and high-dose Ejiao powder

通信作者: 王周平 (1974—), 男, 江南大学教授, 博士。E-mail: wangzp@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2024-09-11 改回日期: 2025-01-13

groups exhibited a reduction in Bacteroidetes, while those in the medium-dose group showed a significant increase in Firmicutes, which corresponded to improved carbohydrate and lipid metabolism, providing more energy to alleviate physical fatigue. [Conclusion] Ejiao powder demonstrated an active effect in alleviating physical fatigue in mice and improved microecological imbalance.

Keywords: Ejiao powder; anti-fatigue; efficacy; evaluate; intestinal flora; genome

随着生活节奏越来越快,不合理的作息规律及生活习惯导致人们出现“不明原因的疲劳”^[1],并且越来越多的成年人正面临着持续性的疲劳。疲劳是一种生活中常见但是机制复杂的疾病^[2],不同类型的疲劳往往症状不同。正常疲劳包括由运动后的肌肉自主退化引起的中枢疲劳^[3]、由代谢造成能量损失从而引发的外周疲劳以及人体心理认知所产生的精神疲劳,这些正常疲劳通常导致脂质代谢途径中 ATP 的过度累积、糖原的加速消耗以及血乳酸及尿素氮的过度积累^[4],进一步加剧机体疲劳感^[5]。此外,与疾病相关的疲劳以及慢性疲劳都归为病理性疲劳。持续性处于疲劳状态会导致机体内分泌失调、免疫力下降甚至引发器质性病变等威胁身体健康的疾病^[6]。常见的疲劳治疗手段通常采用含有激素、神经兴奋剂类的药物治疗,长期服用不仅对身体健康造成危害,也会产生耐药性^[7]。近年来,大量研究表明天然食品成分对缓解疲劳安全有效。例如,含有天然生物活性类黄酮的功能性食品可以缓解由运动所产生的体力疲劳^[8];Yu 等^[9]提出山楂多酚微胶囊可作为功能性食品中潜在的抗疲劳营养补充剂,缓解运动疲劳;Yang 等^[10]也提出枸杞中所含有的多糖可以通过增加肌糖原储备以及调节代谢机制来缓解疲劳。因此,采用营养干预或功能性食品摄入的手段缓解体力疲劳越来越受到重视^[11]。

阿胶为马科动物驴的干燥或新鲜皮经煎煮、浓缩制成的固体胶,最早出现在《神农本草经》,是中国第一批“药食同源”的中药材^[12]。阿胶主要由蛋白质、氨基酸、多肽、多糖、微量元素、维生素以及脂肪酸等物质组成^[13-14],其中,胶原蛋白、肌球蛋白、血红蛋白、血影蛋白等 7 种蛋白质是阿胶的代表性蛋白质^[15]。同时铁作为阿胶中含量最多的微量元素,有显著的补血效果,例如阿胶铁螯合物可以使缺铁性贫血小鼠的血液指标明显恢复^[16]。阿胶中还含有 V_A、V_{B1}、V_{B2} 和 V_E 等维生素,对于维持皮肤健康和抗氧化有着显著效果^[17],此外,阿胶的水解物小分子肽同样具有抗疲劳、抗氧化、增加耐力的作用^[18]。因此,人们致力于研究阿胶及其副产品的其他功效,以期开发除了补血之外更丰富的保健作用。

阿胶粉是由驴皮、冰糖、黄酒等原料经焯皮、化皮、过滤、浓缩、干燥、过筛等工艺制备而成的,与传统阿胶后端需要晾胶、切胶和擦胶的生产工艺存在较大差异,随着物理性状的改变其缓解体力疲劳的能效是否发生变化,及其量效关系和活性机制迫切需要阐明。研究拟以阿胶

粉为研究对象,构建缓解小鼠体力疲劳的评价模型,通过对小鼠负重游泳时间、运动后血清尿素、肌糖原、血乳酸、ATP 含量的测定和肠道菌群基因组测序,从而探究阿胶粉缓解小鼠体力疲劳的活性机制,以期为阿胶粉的综合利用及新型抗疲劳产品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 受试样品

阿胶粉:由驴皮、冰糖、黄酒熬制并粉碎而成,东阿阿胶股份有限公司。

1.2 试验动物及分组

雄性 BALB/c 小鼠:SPF 级,斯贝福(苏州)生物技术有限公司(许可证号为 SCXK(京)2022-0006)。所有试验模块均设对照组、样品组(低剂量组 0.67 g/kg BW,中剂量组 1.33 g/kg BW,高剂量组 2.67 g/kg BW)。各组受试物均用 60 °C 热水溶解配制成对应浓度灌胃,灌胃量为 20 mL/kg BW,对照组灌胃等量蒸馏水。

1.3 主要试剂

尿素氮 BUN 试剂盒、糖原 Gn 试剂盒、腺苷三磷酸 ATP 试剂盒和乳酸 LAC 测定试剂:南京建成生物工程研究所。

1.4 主要仪器

电子天平:ME3002E 型,梅特勒—托利多(香港)有限公司;

全自动生化分析仪:EXC400 型,中原汇吉生物技术股份有限公司;

乳酸葡萄糖分析仪:BIOSN C-Line 型,EKF 诊断控股有限公司;

酶标仪:Thermo1510 型,赛默飞世尔科技公司;

高通量组织研磨器:SCIENTZ-48 型,新芝生物科技股份有限公司;

高速离心机:Eppendorf Centrifuge 5424/5424R 型,德国艾本德股份公司。

1.5 试验方法及指标判定

随着运动时间的延长及强度的增加,机体能量消耗的同时,体内代谢中间产物也将出现较大变化,目前常用方法为通过测定运动后机体肌糖原、血乳酸、血清尿素氮、ATP 等物质的含量,来反映机体运动的疲劳程度^[19],由此将运动试验与生化指标检测相结合评价阿胶粉的抗疲劳活性,并探究其作用机制。参照《保健食品检验与评

价技术规范》2023版中缓解决体力疲劳功能检验方法。SPF级健康雄性 BALB/c 小鼠(体重 18~22 g)在设施屏障内暂养 5 d 检疫完成后,按体重随机分为 5 组(见表 1),每组 10 只,经口灌胃连续给予 30 d。

表 1 动物模型试验分组

Table 1 Group assignment of animal model experiments

组别	处理
模型组	尿素模型
对照组	等量蒸馏水
低剂量组	0.67 g/kg BW
中剂量组	1.33 g/kg BW
高剂量组	2.67 g/kg BW

1.5.1 负重游泳试验 参照《保健食品检验与评价技术规范》2023版中缓解决体力疲劳功能检验方法:末次给受试物 30 min 后,将负重 5% 体重铅皮的小鼠放入水深 35 cm、温度为(25±1.0)℃的游泳箱中进行游泳。记录小鼠从开始游泳到死亡的时间,称为负重游泳时间。

1.5.2 血清尿素 UREA 测定 参照《保健食品检验与评价技术规范》2023版中缓解决体力疲劳功能检验方法:末次给受试物 30 min 后,各组小鼠在 30℃的水中进行 90 min 的不负重游泳,确保四肢持续活动。游泳结束后,让小鼠休息 60 min。然后,从每只小鼠的眼球采集约 0.5 mL 血样,置于 4℃冰箱冷藏 3 h 以促使血液凝固。3 000 r/min 离心 15 min,收集上层血清。对血清样本进行适当稀释后,使用尿素试剂盒检测尿素含量,具体操作按照试剂盒说明进行。

1.5.3 肌糖原 Gn 测定 参照《保健食品检验与评价技术规范》2023版中缓解决体力疲劳功能检验方法:末次给受试物 30 min 后,处死小鼠并进行解剖,去除周围的筋膜、骨骼和皮毛。使用肌糖原试剂盒按照说明书进行检测。

1.5.4 血乳酸 LAC 测定 参照《保健食品检验与评价技术规范》2023版中缓解决体力疲劳功能检验方法:末次给样品 30 min 后,使用毛细管从小鼠的眼内眦采血。随后,各组小鼠在 30℃的水中进行不负重游泳 10 min 后停止。乳酸测定方法:游泳前,采集 20 μL 血样加入含 40 μL 破膜液的离心管中并充分振荡;游泳后立即采集 20 μL 血样,同样处理;休息 20 min 后,再采集 20 μL 血样并进行相同处理。所有样本通过乳酸分析仪测定血液中的乳酸含量。

1.5.5 ATP 测定 末次给样品 30 min 处死小鼠后,对小鼠进行解剖,去除肌肉周围的筋膜、骨骼以及皮毛,将肌肉经生理盐水漂洗后用滤纸吸干,置于含有 3 枚钢珠的 2 mL 离心管中,在高通量组织研磨机中进行匀浆,程序设定为 2 min 40 Hz。匀浆后 5 000 r/min 离心 10 min,取上

层清液。使用 ATP 试剂盒进行检测,检测方法参考试剂盒。

1.6 16S rRNA 测序

每组选取 4 只力竭小鼠,收集其粪便样本送武汉迈特维尔生物科技有限公司进行 16S rRNA 扩增子测序。

1.7 数据分析

试验数据使用 SPSS 进行方差齐性检验。满足方差齐性的数据采用单因素方差分析;非正态或方差不齐的数据首先进行变量转换,若仍不满足条件则使用秩和检验。

2 结果与分析

2.1 负重游泳时间

运动耐力的提升是抗疲劳能力增强最直接的表现,而游泳时间的延长客观地表明了运动耐力的提高,可以直观反映研究对象的抗疲劳试验效果^[20],因此负重游泳时间常被用于评价动物的运动耐力^[21]。按照试验部分所述方法开展动物负重游泳试验,结果显示(表 2),受试样品低剂量组负重游泳时间显著高于对照组($P<0.05$),该受试样品组相比对照组负重游泳时间增加了 19.51%。而受试样品中、高剂量组也可以延长小鼠的负重游泳时间,分别增加了 10.11% 和 11.36%,负重游泳试验结果呈阳性。结果表明,该受试物能够有效地延长小鼠的负重游泳时间,直观地体现出了小鼠运动耐力的增加。刘雅娜等^[22]研究了沙棘多糖对小鼠的抗疲劳作用,其中负重游泳时间结果显示,不同剂量沙棘多糖组相比空白组延长时间不同,表明了不同剂量的沙棘多糖对小鼠的抗疲劳效果也有所不同。

表 2 阿胶粉对小鼠负重游泳时间的影响[†]

Table 2 Effect of Ejiao powder on swimming time of weight-bearing mice

组别	动物数	游泳时间/min	P 值
对照组	10	8.20±1.23	
低剂量组	10	9.80±2.30 [†]	0.042
中剂量组	10	8.90±1.73	0.363
高剂量组	10	8.80±1.32	0.434

† *表示与对照组比较差异显著($P<0.05$)。

2.2 血清尿素水平

血清尿素是机体蛋白质代谢的终产物,运动过程中和运动后机体血清尿素水平的高低可以作为评估运动疲劳的敏感指标。运动过程中,随着运动负荷增加,血清尿素水平呈上升趋势。机体对负荷适应能力和代谢能力较差时,会导致血清尿素及其代谢衍生物的堆积,从而显著增加体内血清尿素含量^[23]。由表 3 可知,与对照组相比,

模型组尿素显著升高,说明试验的模型成立。与剂量组相比,受试物 3 个剂量组间均无显著差异,血清尿素试验结果呈阴性。而与模型组相比,受试物 3 个剂量组中血清尿素含量下降 68.72%~69.41%。结果表明,该受试物能够有效降低血清中的尿素水平,消除运动时尿素对机体的损伤,进而起到缓解体力疲劳的作用。

表 3 阿胶粉对小鼠运动后血清尿素水平的影响[†]

Table 3 Effect of Ejiao powder on the serum urea level of mice after exercise

组别	动物数	尿素 UREA/(mmol·L ⁻¹)	P 值
对照组	10	355.44±199.43**	0.000
模型组	10	809.37±209.14	
低剂量组	10	247.60±20.44**	0.000
中剂量组	10	249.61±28.83**	0.000
高剂量组	10	253.15±26.08**	0.000

† **表示与模型组比较差异显著(P<0.01)。

2.3 肌糖原水平

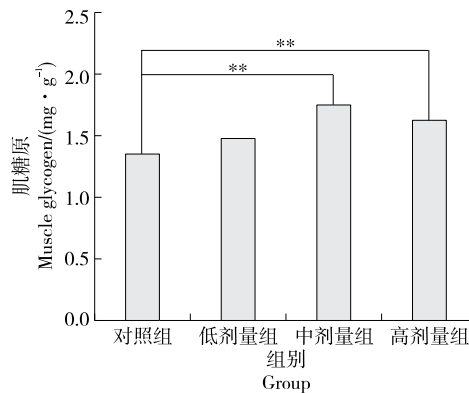
机体的糖原储备越多,耐力越强,运动时间也越长^[24]。运动过程中,保持血糖在一定水平可以提高运动能力。糖原储备水平与运动表现密切相关。运动后,各组织中的糖原消耗显著,导致血糖水平下降^[25]。因此,运动过程维持血糖水平,有助于增强运动能力,缓解体力疲劳。由图 1 可知,与对照组相比,低剂量组肌糖原无显著差异,中、高剂量组肌糖原显著升高 20.74%~29.63%,肌糖原试验结果呈阳性。结果表明,该受试物能够在进行剧烈运动之后,可以为消耗大量血糖的机体提供足够的糖原用以分解,大大提升了小鼠的运动耐力。王江等^[26]研究了野生接骨木果含片的抗运动疲劳作用,其中,肌糖原数据显示,相较于对照组,中、高剂量的野生接骨木果含片组小鼠的肌糖原含量显著增加(P<0.05),表明适宜剂量的野生接骨木果含片能促进小鼠体内糖原的储备。该结果与试验结果相似,即适宜剂量的阿胶粉有利于增强小鼠运动耐力。

表 4 阿胶粉对小鼠运动后血乳酸水平的影响[†]

Table 4 Effect of Ejiao powder on blood lactate level after exercise in mice

组别	动物数	血乳酸值/(mmol·L ⁻¹)			血乳酸曲线下面积	P 值
		游泳前	游泳后 0 min	游泳后 20 min		
对照组	10	3.40±1.32	4.12±1.29	5.98±2.31	138.54±37.22	
低剂量组	10	2.44±0.40	3.93±1.26	2.29±0.96	94.08±24.47**	0.002
中剂量组	10	2.31±1.05	4.76±1.66	1.81±0.62	101.02±24.19**	0.009
高剂量组	10	2.92±1.19	4.25±1.98	1.78±0.61	96.20±32.64**	0.003

† **表示与对照组比较差异显著(P<0.01)。



**表示与模型组比较差异显著(P<0.01)

图 1 受试物对小鼠肌糖原水平的影响

Figure 1 Effect of subject matter on the level of muscle glycogen in mice

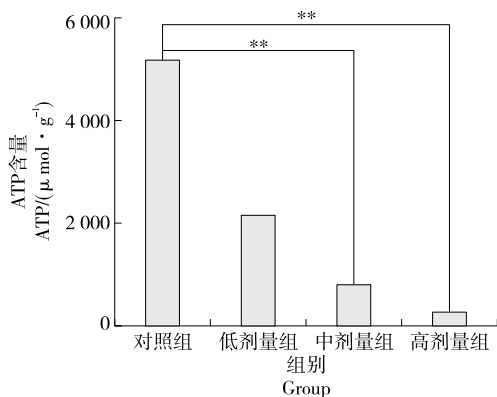
2.4 血乳酸水平

机体运动过量会导致肌肉收缩加剧供氧不足,血糖发生无氧酵解,生成乳酸,而乳酸电离的氢离子使得肌肉与血液的 pH 降低,从而阻碍神经兴奋的传递,产生机体疲劳^[27],因此血乳酸堆积程度与机体疲劳有关,血乳酸堆积越多,机体疲劳程度越严重。由表 4 可知,受试物低、中、高剂量组运动后产生的血乳酸水平显著低于对照组(P<0.01)。表明研究所设计 3 个受试物样品组与乳酸的代谢均有密切联系,在增强相应的代谢活动的同时显著降低了小鼠运动后的血乳酸含量,缓解体内酸痛感,消除体力疲劳,剂量组与对照组相比,血乳酸值降低了 61.71%~70.23%,血乳酸曲线下面积降低了 27.09%~32.09%,血乳酸测定试验结果呈阳性。结果表明,该受试物能够有效地缓解机体内血乳酸的堆积量,在剧烈运动后,增强了机体消除血乳酸的代谢能力,有效地增强了小鼠缓解体力疲劳的能力。

2.5 ATP 水平

ATP 储存程度与正常疲劳中的脂质代谢有关,当进行剧烈运动时,体内的各类 ATP 酶活性降低,使得 ATP 无法快速分解^[28],从而导致机体内 ATP 堆积,最后代谢所能缓解的疲劳更加微弱。由图 2 可知,低、中、高剂量组的 ATP

积累水平都低于对照组,且中、高剂量组的ATP含量显著低于对照组($P < 0.01$),剂量组的ATP浓度较对照组的下降了58.26%~94.8%,ATP测定试验结果呈阳性。结果表明,该受试物能在剧烈运动后增强小鼠体内代谢ATP的能力,维持了体内各类ATP酶的活性,使得机体内ATP的残留量减少,明显增强了小鼠的运动耐力。



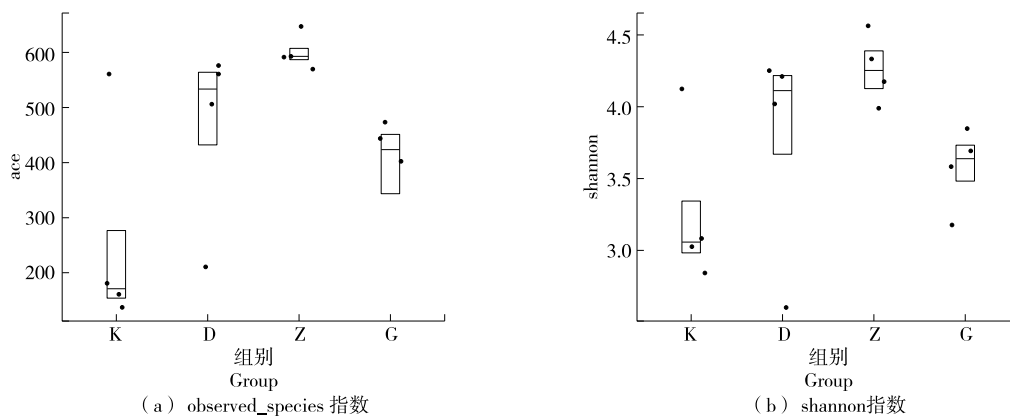
**表示与模型组比较差异显著($P < 0.01$)

图2 受试物对小鼠ATP水平的影响

Figure 2 Effect of subject matter on the level of ATP in mice

2.6 16S rRNA 测序结果

2.6.1 α 多样性指数组间差异分析 如图3所示,与空白组相比,不同剂量阿胶的摄入会导致微生物群落 α 多样性



K. 空白组 D. 低剂量组 Z. 中剂量组 G. 高剂量组

图3 肠道菌群 α 多样性分析结果

Figure 3 Alpha diversity of intestinal flora

3 结论

通过连续灌胃给予阿胶粉30 d后测定小鼠的负重游泳时间、运动后血清尿素、肌糖原、血乳酸和ATP含量,系统分析了阿胶粉缓释体力疲劳的活性作用及其机制。结果显示,低剂量组显著延长了小鼠的负重游泳时间,提高了运动耐力,初步体现了阿胶粉的抗疲劳效果;对于建模

指数升高;与空白组相比较,阿胶干预组小鼠的 α 多样性显著增加,表明阿胶粉的摄入增加了肠道菌群的多样性。

2.6.2 不同组间菌群数量及丰度差异分析 采用 Venn 图分析各组肠道菌群种数差异。一般情况下,为研究各样本的物种组成,对各样本的有效数据根据97%序列相似性原则,进行OTU(operational taxonomic units)聚类,如图4(a)所示,4组样本中的OTU总数为1 066个,空白组、低剂量组、中剂量组和高剂量组的OTU数量分别为750,1 066,1 260,904个。4组共有291个OTU。这一结果表明,力竭游泳可能会扰乱肠道微生物群的平衡,降低肠道细菌的多样性,但摄入阿胶粉可以改善微生态失调和失衡,呈现出中剂量组>低剂量组>高剂量组>空白组的结果。

微生物物种相对丰度堆叠条形图可以直观地揭示微生物群落不同条件下的分布规律和变化趋势。由图4(b)可知,不同浓度阿胶粉的摄入使小鼠的微生物菌群分布发生了变化。相比于空白组,摄入低浓度和高浓度阿胶粉的小鼠呈现出拟杆菌门含量的减少,而中浓度阿胶粉组的小鼠显著地呈现出厚壁菌属的增加。其中,厚壁菌门是肠道中主要的丁酸盐产生菌,也是难以消化的多糖的初级降解菌,因此厚壁菌门表现出更好的碳水化合物和脂质代谢能力。

成功后的血清尿素模型,受试物3个剂量组的组内血清尿素无明显差异,但均明显低于模型组和对照组,表明灌胃阿胶粉后的小鼠对负荷适应能力有明显提高;对于肌糖原指标,与对照组相比,低剂量组肌糖原无显著差异,中、高剂量组肌糖原显著升高,均表明灌胃阿胶粉后的小鼠机体糖原储备水平显著升高,缓解小鼠体力疲劳;对于血

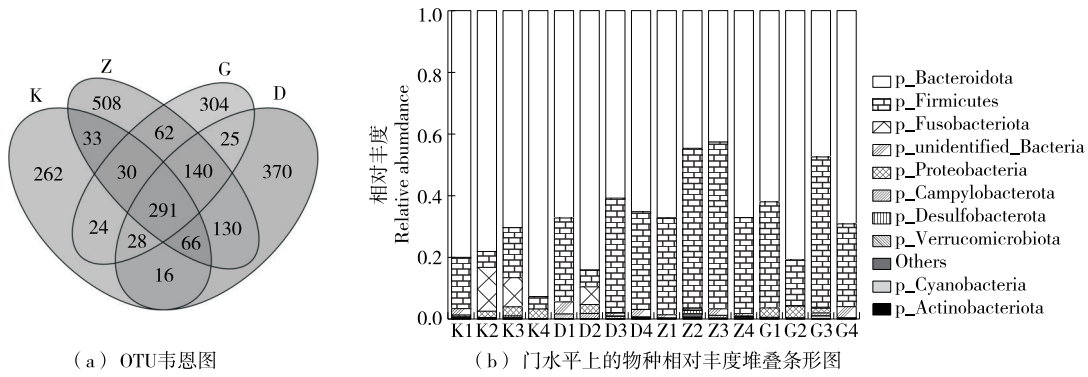


图 4 微生物菌群数量及丰度差异分析

Figure 4 Differential analysis of the number and abundance of microbial flora

乳酸指标,受试物能显著降低小鼠运动后的血乳酸含量,表明灌胃阿胶粉后的小鼠运动后血乳酸堆积显著降低,从而缓解机体疲劳;对于ATP指标,受试物增强小鼠体内代谢ATP的能力,表明灌胃阿胶粉的小鼠脂质代谢加快,有效缓解体力疲劳。

力竭游泳可能会扰乱小鼠肠道微生物群的平衡,降低其肠道微生物的多样性,但摄入阿胶粉可以改善小鼠的微生态失调和失衡,使其肠道菌群发生明显变化,具体表现为后壁菌属和乳杆菌属的比例增加,拟杆菌属的比例减少,影响了短链脂肪酸的合成,肠道菌群多样性的丰度增加,减少了内毒素血症,并减少了运动后炎症的发生。此外,阿胶粉的摄入优化了小鼠肠道微生物的菌群分布,从而降低了杂菌对于肠道菌群的干扰。

阿胶粉具有恢复体力、增强耐力、缓解体力疲劳、改善肠道微生物的作用,在能量代谢方面,长期服用可以提升小鼠运动耐力、增强负荷适应能力、提升肌糖原储备量、减少血乳酸及ATP的堆积,最终达到缓解体力疲劳的效果。

参考文献

[1] LUO C H, XU X R, WEI X C, et al. Natural medicines for the treatment of fatigue: bioactive components, pharmacology, and mechanisms[J]. *Pharmacological Research*, 2019, 148: 104409.

[2] JIANG P, JI X, XIA J, et al. Structure and potential anti-fatigue mechanism of polysaccharides from *Bupleurum chinense* DC [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 306: 120608.

[3] BOYAS S, GUÉVEL A. Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms[J]. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2011, 54(2): 88-108.

[4] LEE M, FADRIQUELA A, ANTONIO J M, et al. Effects of alkaline-reduced water on exercise-induced oxidative stress and fatigue in young male healthy adults[J]. *Processes*, 2022, 10(8): 1 543.

[5] 任盼红, 聂梦俭. 鱼腥草黄酮对运动疲劳大鼠骨骼肌能量代谢的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(11): 302-312.

REN P H, NIE M J. Effects of *Houttuynia cordata* flavonoids on energy metabolism of skeletal muscle in exercise-induced fatigue rats[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(11): 302-312.

[6] 慕英杰. 天然多糖缓解运动疲劳的机制及研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(5): 343-348.

MU Y J. Mechanism and research progress of natural polysaccharide in alleviating exercise fatigue[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(5): 343-348.

[7] 陈丹, 朱薇, 周兴芹. 北五味子水煎液对小鼠抗运动性疲劳的作用机制研究[J]. *西部中医药*, 2023, 36(7): 13-16.

CHEN D, ZHU W, ZHOU X Q. Research on the mechanism of *Beiwuweizi* decoction on sports fatigue in mice[J]. *Western Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2023, 36(7): 13-16.

[8] LIU Y Z, SHEN X F, SHA M X, et al. Natural bioactive flavonoids as promising agents in alleviating exercise-induced fatigue[J]. *Food Bioscience*, 2023, 51: 102360.

[9] 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.

[10] YANG C X, YANG J Y, TAN L, et al. A novel formula comprising wolfberry, figs, white lentils, raspberries, and maca (WFWRM) induced antifatigue effects in a forced exercise mouse model[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 2 022: e3784580.

[11] 殷光玲, 乔子骄, 黄远英. 淫羊藿西洋参复合物缓解小鼠体力疲劳作用[J]. *食品工业*, 2023, 44(11): 114-117.

YAN G L, QIAO Z J, HUANG Y Y. The effect of *Epimedium* and *Panax quinquefolium* complex in alleviating physical fatigue to mice[J]. *The Food Industry*, 2023, 44(11): 114-117.

[12] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 2020年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 197.

Chinese Pharmacopoeia Commission. *Pharmacopoeia of the*

- People's Republic of China 2020: NO. 1[S]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 197.
- [13] 廖峰, 樊雨梅, 帖航, 等. 阿胶蛋白质组学研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 122-129.
- LIAO F, FAN Y M, TIE H, et al. Protein components of protein in *Colla corii asini*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 122-129.
- [14] DU J Y, LIU S, LIANG Q T, et al. Analysis of Heparan sulfate/heparin from *Colla corii asini* by liquid chromatography-electrospray ion trap mass spectrometry[J]. Glycoconjugate Journal, 2019, 36(3): 211-218.
- [15] 房芳, 张九凯, 马雪婷, 等. 基于特征肽段的阿胶中异源性物种鉴别[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 267-273.
- FANG F, ZHANG J K, MA X T, et al. Identification of heterologous species in donkey-hide gelatin based on specific peptides[J]. Food Science, 2019, 40(16): 267-273.
- [16] 李敏, 梁大连, 邵珠德, 等. 阿胶肽—铁螯合物对缺铁性贫血小鼠的初步药效学研究[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(4): 852-854.
- LI M, LIANG D L, SHAO Z D, et al. The effect of ferrous-chelating *Colla corii asini* hydrolysate on iron-deficiency anemia in mice[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica, 2019, 30(4): 852-854.
- [17] 曹菲薇. 阿胶糕及其主要原料阿胶的抗氧化作用及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 5-6.
- CAO F W. Antioxidant effects and its mechanism of E'jiao cake and its main material *Colla corii asini*[D]. Hangzhou, Zhejiang University, 2019: 5-6.
- [18] 张国伟, 马俊华, 梁玉景, 等. 阿胶化学成分及保健作用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 39-43.
- ZHANG G W, MA J H, LIANG Y J, et al. Advances in the chemical components and health effects of *Colla corii asini*[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 39-43.
- [19] 王开银. 巴西莓原花青素的提取工艺及其抗运动疲劳活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2 981-2 988.
- WANG K Y. Research on the extraction technology of acai berry proanthocyanidins and its anti-exercise fatigue activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(9): 2 981-2 988.
- [20] 高慧颖, 姜帆. 龙眼干制前后缓解小鼠疲劳作用的研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(11): 106-110.
- GAO H Y, JIANG F. Anti-fatigue effect of dried and fresh Longan on endurance swimming capacity of mice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(11): 106-110.
- [21] 刘昕. 梔子花黄酮纯化工艺及其抗氧化与抗运动疲劳作用研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 27-34.
- LIU X. Optimization of purification process of flavonoids of Gardenia flower and its anti-oxidant and anti-fatigue effects[J]. China Food Additives, 2023, 34(2): 27-34.
- [22] 刘雅娜, 包晓玮, 王娟, 等. 沙棘多糖抗运动性疲劳及抗氧化作用的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 321-326.
- LIU Y N, BAO X W, WANG J, et al. Anti exercise fatigue and antioxidant of polysaccharide from *Hippophae rhamnoides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 321-326.
- [23] 熊亚茹, 肖丽佳, 谭满意, 等. 某灵芝孢子油软胶囊对小鼠抗疲劳作用[J]. 预防医学情报杂志, 2023, 39(10): 1 225-1 229.
- XIONG Y R, XIAO L J, TAN M Y, et al. Anti-fatigue effect of a ganoderma lucidum spore oil soft capsule on mice[J]. Journal of Preventive Medicine Information, 2023, 39(10): 1 225-1 229.
- [24] 廖艳艳, 王伟毅, 黄晓梅, 等. 蓝莓花青素干预对老龄大鼠肝组织抗氧化功能及凋亡相关基因的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 1-6, 233.
- LIAO Y Y, WANG W Y, HUANG X M, et al. Effect of blueberry extract on hepatic oxidative stress and apoptotic activities in aged rats[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 1-6, 233.
- [25] 李晶, 李瑞刚, 睢博文, 等. 红参和红景天配伍前后主要成分及抗疲劳活性的变化[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(13): 87-96.
- LI J, LI R G, SUI B W, et al. Changes in effective compounds and anti-fatigue activity before and after compatibility of ginseng radix et rhizoma rubra and rhodiola crenulate radix et rhizoma[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2020, 26(13): 87-96.
- [26] 王江, 马彩珍, 李甜, 等. 野生接骨木果含片的制备及其抗氧化、抗运动疲劳作用研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(5): 69-76.
- WANG J, MA C Z, LI T, et al. Preparation of wild elderberry tablets and their antioxidant and anti-exercise fatigue effects [J]. Storage and Process, 2024, 24(5): 69-76.
- [27] 刘文静. 雪樱子石榴复合饮料研制及其抗运动性疲劳作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 203-208.
- LIU W J. Preparation of *Amaranthus caudatus* L. and *Punica granatum* composite beverage and its resisting exercise fatigue effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 203-208.
- [28] 孟令仪, 张晶莹, 隋自洁, 等. 人参林蛙油复方制剂对小鼠缓释体力疲劳作用及ATP酶代谢的影响[J]. 中国卫生工程学, 2019, 18(5): 673-675.
- MENG L Y, ZHANG J Y, SUI Z J, et al. Effects of ginseng forest frog oil compound preparation on weight-bearing swimming time and ATPase metabolism in mice[J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2019, 18(5): 673-675.