

β -羟基- β -甲基丁酸对集训期间跆拳道运动员肌肉的保护

Effect of β -hydroxy- β -methylbutyric acid on muscle protection during taekwondo team training

宋博雅^{1,2} 姜涛¹ 苟波^{1,2} 王启荣³ 刘强⁴ 冯昊天⁵

SONG Boya^{1,2} JIANG Tao¹ GOU Bo^{1,2} WANG Qirong³ LIU Qiang⁴ FENG Haotian⁵

(1. 西安体育学院国家体育总局运动技术分析与技术评定重点实验室, 陕西 西安 710068;

2. 体育智能装备关键技术陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安 710068; 3. 国家体育总局运动

医学研究所, 北京 100029; 4. 西安体育学院研究生部, 陕西 西安 710068;

5. 内蒙古乳业技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 750306)

(1. Key Laboratory of Sports Technology Analysis and Skill Assessment of General Administration of Sport, Xi'an Physical Education University, Xi'an, Shaanxi 710068, China; 2. Engineering Research Center of

Innovative Technology of Intelligent Sports Equipment, Universities of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi

710068, China; 3. Sports Medicine Institute, General Administration of Sport of China, Beijing 100029, China;

4. Graduate Faculty, Xi'an Physical Education University, Xi'an, Shaanxi 710068, China; 5. Inner Mongolia Dairy Technology Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 750306, China)

摘要:[目的]探究跆拳道运动集训期间补充 β -羟基- β -甲基丁酸(HM β)对肌肉保护的影响。[方法]招募选取自愿参与试验的 18 名跆拳道专项队二级以上男性受试者,随机分为试验组与对照组(各 9 人)。试验组周一至周六每日上、下午训练前、后分 4 次(与运动间隙超过 30 min),冲服添加 HM β 功能成分的运动奶粉各 1 袋(25 g/袋, HM β 添加量为 500 mg/袋),对照组摄入等量市售普通奶粉。干预前、后及每周一晨采集血样分析生化指标的变化情况,并进行试验前后跆拳道专项能力的定量测试。[结果]相比于对照组,试验组干预后促炎因子白介素-6 未见明显变化,血浆谷氨酰胺水平显著提升($P < 0.05$),血浆甘氨酸水平未见明显下降;试验组干预后肌红蛋白显著下降($P < 0.05$),血清总胆固醇、甘油三酯及低密度脂蛋白胆固醇水平均显著低于对照组($P < 0.05$),血尿素氮降幅小于对照组;试验组 20 s 原地提膝次数及 30 s 收腹跳次数均有提升,且增幅均超过对照组。[结论]训练期间补充 HM β 可降低炎症程度、改善免疫功能、维持肌细

胞膜稳定性、提高氮存量并强化肌肉重塑能力而发挥保护功能,提高肌肉对训练的适应性,以保障其竞技状态。

关键词: β -羟基- β -甲基丁酸;运动营养补充剂;肌肉损伤;蛋白代谢;炎症因子

Abstract: [Objective] To investigate the effect of β -hydroxy- β -methylbutyrate (HM β) supplementation on muscle protection in taekwondo players during training. [Methods] 18 male subjects above the second level of the Taekwondo special Team who voluntarily participated in the experiment were recruited and divided into experimental and control groups (9 each) according to the conditions. The experimental group consumed one sachet (25 g/bag, the amount of HM β added was 500 mg/bag) of HM β -added milk powder before and after training (with a break of more than 30 min) in the morning and afternoon from Monday to Saturday, while the control group consumed the same amount of commercially available regular milk powder. Blood samples were collected before and after the intervention and on Monday mornings to analyze the changes in biochemical indicators, and quantitative tests of Taekwondo-specific abilities were performed before and after the experiment. [Results] Compared with the control group, the experimental group did not see significant changes in the pro-inflammatory factor interleukin-6, plasma glutamine levels were significantly increased ($P < 0.05$), and plasma glycine levels did not see a significant decrease after

基金项目:国家重点研发计划(编号:2019YFF0301702-02-02)

作者简介:宋博雅,女,西安体育学院实验师,硕士。

通信作者:姜涛(1976—),男,西安体育学院教授,硕士。

E-mail: 13156891@qq.com

收稿日期:2023-08-11 改回日期:2023-12-26

intervention; Myoglobin was significantly decreased in the experimental group after intervention ($P < 0.05$), and serum levels of total cholesterol, triglyceride, and LDL cholesterol were significantly lower than those of the control group ($P < 0.05$). The decrease of blood urea nitrogen was smaller than that of the control group; The number of 20-second in situ knee lifts and the number of 30-second tuck jumps in the experimental group were both improved and increased more than that of the control group.

[Conclusion] HM β supplementation during training can exert protective functions by reducing inflammation, improving immune function, maintaining muscle membrane stability, increasing nitrogen stores, and strengthening muscle remodeling ability, improving muscle adaptability to training to ensure their competitive status.

Keywords: β -hydroxy- β -methylbutyric acid; sports nutrition supplement; muscle damage; protein metabolism; inflammatory factor

跆拳道属于竞争激烈、对抗性强的格斗类重竞技项目,队员主要依靠腿法技术动作结合上肢正拳及步伐移动进行防守与进攻^[1]。随着世界跆拳道运动蓬勃发展及竞赛规则不断修改,对抗性愈加强烈,对体能要求极高^[2]。为提高竞技水平,队员需长期进行高强度、重复性训练以维持较好的竞技状态,但也极易造成骨骼肌损伤,引起肌肉表现下降、活动范围减小等问题而影响后续训练质量。因此,提高肌肉力量又能预防骨骼肌损伤对跆拳道训练至关重要。

运动联合蛋白质补充是促进肌肉生长的最佳手段,两者可协同刺激蛋白合成。同时,骨骼肌损伤修复也与蛋白合成及降解有直接联系。亮氨酸是骨骼肌中唯一能调节蛋白质周转的支链氨基酸,但人体无法合成。 β -羟基- β -甲基丁酸(HM β)是亮氨酸发挥生理功效的关键中间代谢产物,因其在改善肌肉质量、防止肌肉萎缩及对抗肌肉损伤方面有较好潜力,被应用于增强运动表现的营养补充剂和治疗肌肉代谢性疾病如肌少症的辅助剂^[3-6]。HM β 于2011年被原国家卫生部批准为新资源食品原料,用于饲料添加剂、特殊医学用途配方食品及运动营养品中,2017年国家卫计委将其使用范围扩大至饮料类、乳制品、糖果及烘焙食品中。HM β 主要通过保护性、抗分解机制发挥作用,补充HM β 可提高肌肉质量,这与其能上调合成代谢通路又兼顾下调分解代谢通路以刺激蛋白合成有关。HM β 在代谢过程中可转化胆固醇合

成前体以利于修补受损肌细胞膜,阻止蛋白降解。而HM β 的作用机制尚未完全探明,仍缺乏大规模人群研究验证。研究拟参考HM β 推荐摄入量对自愿参与试验的跆拳道队员进行4周干预,旨在观察训练期间补充HM β 对其肌肉保护的影响,并从损伤、炎症及蛋白代谢等角度分析潜在的可能性机制,以期推广HM β 在中国运动员训练、比赛中的科学应用和运动营养品的研发提供依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象及分组

选取18名西安体育学院跆拳道专项二级以上男性为受试对象,通过健康体检,受试对象同时满足以下筛选条件:无糖尿病、高血压、心脑血管疾病隐患且肝肾功能正常;无肌肉关节损伤;不存在牛奶过敏和乳糖不耐受。所有受试者干预前均自愿签署《知情同意书》,并进行身体成分检测及Wingate无氧运动能力测试。根据前测结果随机分为试验组和对照组(每组9人),且经统计分析,两组间各项指标均无显著性差异,队员基本情况见表1。

1.2 试剂、仪器及设备

血清肌红蛋白(Mb)、肌酸激酶(CK)及乳酸脱氢酶(LDH)检测试剂盒:宁波美康生物科技有限公司;

白细胞介素-6、IL-10、白细胞介素-1受体拮抗剂(IL-1R α)试剂盒:武汉华美生物工程有限公司;

全自动生化分析仪:BS-420型,深圳迈瑞医疗器械有限公司;

全自动生化分析仪:7180ISE型,日本日立公司;

高效液相色谱仪:LC-30AD型,日本岛津公司;

串联质谱分析仪:LC-MS8050CL型,日本岛津公司。

1.3 补剂方案

两组队员进行4周(6 d/周)蛋白补充,试验组服用添加HM β 功能成分的运动奶粉(25 g/袋,HM β 添加量为500 mg/袋),对照组服用市售普通奶粉,两组奶粉的营养素及配比均基本接近(表2)。具体补剂方案:周一至周六每日上、下午训练前后30 min各冲服一袋,共4袋/d。试验组通过每日蛋白补充可摄入HM β 2 g。研究^[7]表明, HM β 的半衰期为3 h,每日1.5 g以上才有效果,安全推荐量 ≤ 3 g/d,且分3~6次补充效果最佳,由此确定试验组的补剂方案。试验过程及干预方案均已通过国家体育总局运动医学研究所伦理委员会审批(批准号202104)。两组奶粉不含任何世界反兴奋剂机构所列违禁清单物质。

表1 队员分组及基本情况一览表

Table 1 List of team members' grouping and basic information ($n=9$)

组别	年龄	身高/cm	体重/kg	瘦体重/kg	最大摄氧量/(mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
试验组	19.3 \pm 0.8	188.9 \pm 1.5	72.10 \pm 3.90	65.59 \pm 3.29	45.86 \pm 1.85
对照组	19.2 \pm 0.7	184.0 \pm 1.3	73.79 \pm 2.81	64.31 \pm 1.42	45.77 \pm 2.06

表 2 两组奶粉主要营养成分表

Table 2 Main nutrient composition of milk powder in both groups

项目	每 100 g		营养素参考值(NRV)/%		
	单位	试验组	对照组	试验组	对照组
热量	kJ	1 597	1 554	19	19
蛋白质	g	32.2	32.6	54	54
脂肪	g	2.5	1.2	4	2
碳水化合物	g	56.3	56.2	19	19
钠	mg	550	550	28	28
维生素 A	μg RE	500	500	63	63
维生素 D	μg	7.9	7.9	158	158
维生素 E	mg α-TE	12.50	12.50	89	89
维生素 B ₂	mg	0.80	0.80	57	57
维生素 C	mg	37.5	37.5	38	38
磷	mg	700	38	100	13
钙	mg	1 120	1 100	140	138
锌	mg	2.50	2.50	17	17

表 3 干预期间两组队员膳食摄入评价

Table 3 Evaluation of dietary intake of the two groups during the intervention ($n=9$)

时间	分组	热量/kJ	蛋白质/g	脂肪/g	碳水化合物/g
试验前	试验组	11 987.0±1 315.7	118.3±12.4	80.1±9.3	441.0±58.3
	对照组	10 879.8±1 275.5	107.6±12.6	70.8±12.1	396.0±56.0
第 1 周	试验组	10 743.0±1 203.9	128.4±20.9	74.6±11.4	342.8±42.1
	对照组	10 127.6±1 401.9	126.3±17.9	72.2±10.0	323.2±52.4
第 2 周	试验组	12 014.7±1 321.9	111.8±12.4	75.4±13.4	442.4±57.1
	对照组	11 626.2±1 026.4	108.0±9.6	78.3±10.0	382.7±41.0
第 3 周	试验组	13 094.2±1 122.7	132.3±13.4	90.9±9.7	450.3±42.1
	对照组	12 518.7±1 219.4	128.1±15.3	78.7±9.5	448.2±52.5
第 4 周	试验组	10 977.4±1 597.4	107.7±12.8	84.7±12.2	362.3±62.6
	对照组	10 318.1±1 178.4	103.6±13.6	77.6±10.2	345.4±39.2

表 4 干预期间两组队员睡眠质量监控结果

Table 4 Results of sleep quality monitoring for both groups during the intervention ($n=9$)

时间	组别	恢复指数	睡眠时长/min
第 2 周	试验组	170.67±25.80	424±8
	对照组	234.67±47.23	402±5
第 3 周	试验组	181.10±37.44	430±10
	对照组	177.66±44.76	418±7
第 4 周	试验组	209.10±29.86	417±6
	对照组	211.84±35.72	421±8

介素-1 受体拮抗剂(IL-1Rα)浓度的定量测定;采用高效液相色谱仪及串联质谱分析仪完成血清 21 种氨基酸含量测定。

1.5.2 20 s 提膝次数测试 队员听到指令后进行 20 s 左

1.4 试验监控

干预期间,每周进行 3 d 的膳食营养监控及 2 d 的膳食随机抽查(借助中国营养学会推荐的“大营养家”APP 完成膳食监控与评价);干预开始 1 周后(因设备延迟送达)借助 First Beat 和 Bodyguard 系统分别完成对队员每日训练及睡眠情况的监控与评价。如表 3~表 5 所示,干预期间队员组内与组间各营养素摄入、训练量与训练强度及睡眠质量无明显差异,故排除膳食、训练及睡眠对研究结果的干扰。

1.5 指标测定

1.5.1 血液指标 每周日停训,晚餐后禁食,可饮水,每周一晨进行血样采集。由专业护士采集空腹肘静脉血,离心后分离血清待测,所有血样生化指标检测均由运动创伤医院完成。采用全自动生化分析仪完成血清总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量检测;采用全自动生化分析仪完成血清肌红蛋白(Mb)、肌酸激酶(CK)及乳酸脱氢酶(LDH)含量测定;采用 ELISA 测定法完成血清白细胞介素-6, IL-10、白细胞

右腿交替原地提膝,以髌关节为标准,每一腿高于受试者自身髌关节。

1.5.3 30 s 收腹跳次数测试 队员听到指令后两腿蹬地起跳,上体直立,两腿屈膝上提收至胸腹间;落地后立即再蹬地起,该动作连续重复 30 s。

1.6 统计方法

采用 SPSS 25.0 软件进行数据处理与统计分析,服从正态分布的采用单因素方差分析,不服从正态分布的采用非参数检验比较各指标干预前、后组间差异;采用配对样本 t 检验比较各指标干预前、后组内差异。计量资料以 $\bar{X} \pm s$ 表示,以 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 补充 HMβ 对肌肉损伤标志物的影响

长时间、高强度运动后易诱发运动性骨骼肌微损伤(EIMD),由于肌纤维分解、肌膜完整性被破坏,细胞内容

表 5 干预期间两组队员训练监控结果

Table 5 Training monitoring results for both groups during the intervention (n=9)

时间	组别	最大心率/min ⁻¹	最大过量氧耗/(mL·kg ⁻¹)	训练冲量	训练负荷
第 2 周	试验组	171.88±3.23	48.85±7.40	131.70±12.56	328.29±37.30
	对照组	172.84±3.15	48.66±7.05	141.19±27.26	353.03±46.17
第 3 周	试验组	170.70±3.12	40.80±4.23	108.10±6.42	276.37±79.25
	对照组	165.98±3.70	33.46±5.35	101.61±19.44	290.75±121.28
第 4 周	试验组	166.14±2.78	34.47±4.81	76.36±9.46	225.79±19.07
	对照组	163.76±3.73	31.35±4.15	72.71±10.20	222.49±28.96

物会随肌膜通透性增加而漏至血液^[8]。通过血液生化指标检测可判断骨骼肌受损情况。肌红蛋白(Mb)是肌细胞内负责转运和贮存氧气的蛋白质,血清肌酸激酶(CK)、乳酸脱氢酶(LDH)是肌细胞能量代谢的关键酶。Mb 相对分子质量较小,更易迅速漏出肌细胞,且其发生变化的时间早于 CK 和 LDH 等血清酶,因此 Mb 是早期诊断 EIMD 和肌肉蛋白质分解的敏感指标。由表 6 可知,4 周干预后,对照组血清 Mb 升高。究其原因:长期训练是一个运动连续的过程,血清 Mb 会在集训期间维持较高水平;跆拳道属于竞争激烈的对抗性项目,队员在训练中需多次重复最大用力及爆发力,且持续发力时间较长,因此训练期间队员所承受的运动强度、量较大。而试验组在执行相同训练计划后,血清 Mb 显著降低($P<0.05$),说明补充 HMβ 对 EIMD 具有一定的抵抗及保护作用,与 Tsuchiya 等^[9]的结论一致。该研究以未受训练的男性为受试者,连续 2 周以上补充 HMβ(3 g/d)对预防离心收缩造成的肌肉损伤有积极作用。但也有相反报道^[10],高水平足球运动员进行 10 d 训练结合 HMβ 补充,未发现 Mb 和 CK 明显改变。试验干预后,两组血清 CK、LDH 也未观察到显著性变化,推测这可能与指标采样时间、负荷强度有关,后续需进一步证实。

2.2 补充 HMβ 对血液炎症因子及免疫相关指标的影响

由表 7 可知,干预后两组血清促炎因子 IL-6 均超出正常值范围,且对照组的显著升高($P<0.05$),试验组未见明显变化。IL-6 作为炎症与免疫反应的信使分子,对全身免疫功能起多效作用,不仅能持续炎症反应,还可刺激抗炎因子 IL-10 和 IL-1Ra 的分泌。IL-10 和 IL-1Ra 可从多个水平抵消其他细胞因子功能,发挥抗炎与免疫调节功效。与干预前比,两组血清抗炎因子 IL-10、IL-1Ra 均明显下降($P<0.05$),其值仍处于正常值范围,说明两组队员均存在一定程度的轻微炎症。研究^[11]发现, HMβ 可抑制介导炎症通路的关键信号分子细胞核因子-κB 的激活,从而降低人类食管癌鳞状细胞内 IL-6 过表达,调节体内过度的炎症反应。炎症反应过度会影响氨基酸转运至骨骼肌中,减缓蛋白合成速率。推测试验组补充 HMβ 可能通过抑制促炎因子产生或纠正抗炎/促炎因子平衡而及早干预炎症过程,促进蛋白合成及损伤后肌组织再生。

谷氨酰胺(GLN)是免疫细胞的主要能源,但其无法自行合成。因此,维持血浆 GLN 浓度对免疫细胞活性尤为重要。肌肉不仅是合成和贮存 GLN 的主要场所,也是血浆 GLN 的主要来源。长时间大强度运动,骨骼肌及其他组织增加了对 GLN 的摄取利用,引起血浆 GLN 水平

表 6 干预期间两组队员肌肉损伤标志物水平[†]

Table 6 Levels of muscle damage markers in both groups of players during the intervention (n=9)

组别	Mb/(μg·L ⁻¹)		LDH/(U·L ⁻¹)		CK/(U·L ⁻¹)	
	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后
试验组	50.14±3.12	42.26±1.85*	230.42±12.50	235.34±12.84	207.83±24.10	191.40±25.36
对照组	44.68±6.37	48.04±5.83	244.46±9.77	244.47±18.73	311.48±51.99	287.91±69.93

† * 表示试验组干预前后对比, $P<0.05$ 。

表 7 干预期间两组队员血液炎症因子水平[†]

Table 7 Blood inflammatory factor levels in both groups of players during the intervention (n=9)

组别	IL-10/(pg·mL ⁻¹)		IL-1Ra/(pg·mL ⁻¹)		IL-6/(pg·mL ⁻¹)	
	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后
试验组	305.41±12.77	169.80±14.96*	57.58±3.02	33.66±3.24*	10.03±3.14	11.78±1.94
对照组	315.26±2.90	184.39±3.62#	59.87±0.56	37.69±1.10#	7.40±2.17	18.31±5.37#

† * 表示试验组干预前后对比, $P<0.05$; # 表示对照组干预前后对比, $P<0.05$ 。

下降,使免疫功能受抑制。由表 8 可知,干预后试验组血浆 GLN 水平显著上升($P<0.05$),而对照组的无统计学意义。相比于干预前,对照组血浆甘氨酸(Gly)水平显著下降($P<0.05$),而试验组 Gly 降幅未见显著性差异。Gly 参与蛋白质合成,还具有广谱抗炎、免疫调节及细胞保护功能,可缓解炎症与组织损伤。已有证据^[12]表明,Gly 可激活白细胞及巨噬细胞表面上的甘氨酸门控氯离子通道,诱发氯离子内流而发挥抗炎作用,抑制炎症细胞激活、降低促炎因子及过氧化物的分泌与释放。

综上,相比于对照组,试验组补充 HMβ 对训练期间免疫功能产生有益的正面影响。机体在免疫应激状态下,氨基酸发生重新分配,主要用于合成调控炎症及免疫应答的蛋白质。推测,HMβ 一方面通过增加/维持血浆 GLN 浓度,保障免疫细胞分化增殖所需能量,以此缓解大强度运动引起的免疫抑制,提高队员对训练的适应性。同时,GLN 具有抗分解作用,运动时维持肌肉中充足的 GLN 水平,以利于抵抗蛋白质降解,保护骨骼肌免遭 EIMD,并加快肌肉损伤后的修复再生;另一方面,HMβ 通过节省血浆 Gly 消耗间接抑制促炎因子分泌,削弱炎

症程度,改善机体免疫功能,符合试验中血清炎症因子 IL-6 的变化趋势。

2.3 补充 HMβ 对血脂相关指标的影响

骨骼肌损伤与蛋白合成及降解有直接联系。受损骨骼肌细胞处于负氮平衡状态,即蛋白降解速率超过合成速率。HMβ 在肌细胞中能酯化生成胆固醇合成前体β-羟基-β-甲基戊二酸单酰辅酶 A(HMG-CoA)以对抗细胞蛋白质降解,加快修补应激状态下受损细胞膜^[13-15],且 HMβ 用于合成胆固醇的量取决于肌细胞受损程度。肌肉是 HMβ 代谢的主要靶组织,补充 HMβ 有助于维持细胞内充足的 HMG-CoA,也便于肌肉体积增大过程中肌细胞膜扩张。由表 9 可知,组间比较发现,4 周干预后试验组血脂指标 TC、TG、LDL-C 均显著低于对照组($P<0.05$);组内比较发现,干预后对照组三者均显著升高($P<0.05$),试验组三者未观测到显著性变化。Nissen 等^[16]研究显示,相比于安慰剂组,运动结合 HMβ 补充(3 g/d,持续 3~8 周)能够显著降低受试者 TC 及 LDL-C 含量。因此,在应激状态下补充 HMβ 可能通过增加胆固醇合成前体的分泌水平以维持肌膜稳定,继而发挥肌肉

表 8 干预期间两组队员的氨基酸水平[†]

Table 8 Amino acid levels of two groups during the intervention ($n=9$) $\mu\text{g/L}$

氨基酸	试验组		对照组	
	干预前	干预后	干预前	干预后
丙氨酸	42.22±3.13	48.55±3.26	49.68±2.26	50.09±2.68
精氨酸	16.51±3.15	17.65±1.33	18.63±2.75	18.48±1.74
天冬酰胺	6.66±0.87	8.38±0.26	7.15±0.79	8.40±0.46
天冬氨酸	3.46±0.24	4.58±0.52	3.54±0.16	4.42±0.42
瓜氨酸	6.54±0.74	7.63±0.27	6.40±0.71	7.84±0.29 [#]
谷氨酸	11.56±0.91	17.53±1.22 [*]	12.54±0.79	16.84±0.62 [#]
谷氨酰胺	81.58±10.77	113.15±5.48 [*]	96.64±7.22	114.59±6.90
甘氨酸	40.80±3.02	36.40±1.18	39.00±2.15	32.76±1.04 [#]
组氨酸	15.74±2.68	12.79±0.62	15.04±3.08	14.23±1.24
亮氨酸	11.98±0.64	11.12±0.67 [*]	14.71±0.77	12.62±0.56 [#]
异亮氨酸	24.85±1.39	18.40±1.02 [*]	29.82±1.85	19.93±0.93 [#]
赖氨酸	24.47±4.25	28.68±2.55	29.36±5.57	30.07±2.82
甲硫氨酸	4.45±0.17	5.91±0.36 [*]	4.56±0.34	5.04±0.40
鸟氨酸	8.56±1.88	8.05±0.89	11.06±2.11	8.50±1.13
苯丙氨酸	15.92±0.99	14.01±0.48	14.45±1.24	16.57±0.83
脯氨酸	21.07±1.73	25.06±1.71	24.28±1.85	26.68±1.84
丝氨酸	19.66±1.10	24.72±0.95 [*]	19.95±0.96	22.89±0.77 [#]
苏氨酸	19.71±1.29	21.54±0.82	20.62±0.90	21.05±1.75
色氨酸	15.71±1.39	14.63±1.10	15.63±1.35	14.98±1.57
酪氨酸	9.81±0.96	16.08±0.94 [*]	11.50±0.98	17.56±1.18 [#]
缬氨酸	34.94±1.83	37.63±2.23	41.27±1.93	42.71±2.00

[†] * 表示试验组干预前后对比, $P<0.05$;# 表示对照组干预前后对比, $P<0.05$ 。

表 9 干预期间两组队员血液生化指标水平[†]

Table 9 Blood biochemical index levels of the two groups during the intervention (n=9) mmol/L

组别	TC		TG		LDL-C		BUN	
	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后
试验组	3.49±0.16	3.41±0.13	0.62±0.07	0.71±0.06	2.12±0.14	2.17±0.14	4.91±0.20	4.05±0.22 [*]
对照组	3.80±0.15	3.87±0.15 [△]	0.84±0.12	1.04±0.10 [△]	2.53±0.15	2.63±0.14 [△]	5.69±0.44	4.46±0.33 [#]

† * 表示试验组干预前后对比, P<0.05; # 表示对照组干预前后对比, P<0.05; △表示干预后试验组与对照组对比, P<0.05。

保护作用。

2.4 补充 HMβ 对蛋白代谢及肌肉功能的影响

骨骼肌是机体最大的蛋白质库,其降解主要用于保护结构蛋白与内脏蛋白的相对稳定。组织蛋白降解会引起血中氨基酸的主要终产物尿素氮(BUN)水平升高。BUN作为训练监控中用于评定负荷量的灵敏指标,负荷量越大,BUN增幅越明显,还可反映机体疲劳程度。由表9可知,干预后两组BUN均保持在4~7 mmol/L,说明训练期间队员身体机能状态良好,能适应训练负荷量的安排。相比于干预前,两组BUN均显著下降(P<0.05),且试验组BUN降幅小于对照组,表明两组肌体蛋白质降解减弱/氨基酸分解排泄减少,同时也证明蛋白质沉积增加。试验组补充HMβ在促进正氮平衡,提高氮存量有更好的效果。究其原因:①每次训练前、后30 min内进行蛋白补充,运动后的补剂时间处于“合成代谢窗口期”,能最大限度地刺激肌肉蛋白合成,促进肌糖原恢复以利于抵抗蛋白降解^[17-19]。跆拳道是一项以力量为主结合全身协调能力综合发展的对抗性项目。肌肉是力量的主要承载者,运动联合蛋白补充可协同刺激肌肉蛋白合成,还能产生增肌与肌肉功能增强的慢性生理适应^[20]。20 s原地提膝次数和30 s收腹跳次数是反映跆拳道专项能力的定量评价指标。由表10可知,干预后两组20 s原地提膝次数均略有提高,且试验组增幅超过对照组;30 s收腹跳次数均显著提升(P<0.05),且试验组增幅超过对照组,说明试验组下肢爆发力和力量耐力的提高程度优于对照组,与Nissen等^[16,21]的研究结果相符。②骨骼肌损伤后的重塑能力主要依赖于肌卫星细胞的激活^[22]。胰岛素样生长因子(IGF)是调节肌卫星细胞增殖、分化的主

要生长因子。运动会刺激骨骼肌分泌IGF-1,增加肌肉对氨基酸的摄取,调控蛋白质翻译,从而促进蛋白质净增长,引起肌纤维增粗^[23]。HMβ可上调蛋白合成代谢信号通路,激活介导肌肉适应性肥大的雷帕霉素靶蛋白(mTOR),增加IGF表达;下调泛素-蛋白酶体通路和自噬-溶酶体通路对抗蛋白降解^[24-25]。膳食补充HMβ可明显提高小鼠mTOR及下游效应蛋白p70S6激酶1和eIF4E结合蛋白的磷酸化程度,促进蛋白合成^[26]。青年男性受试者进行6周抗阻训练结合HMβ补充(3 g/d)后,安静状态下生长激素(GH)和IGF-1水平显著增加^[27]。离体试验用IGF-1和亮氨酸刺激肌卫星细胞,p70S6激酶1和eIF4E结合蛋白的磷酸化水平明显提高^[28]。干预后试验组亮氨酸下降幅度低于对照组的。综上,训练期间补充HMβ可能通过上调肌卫星细胞活性而增强骨骼肌损伤后的再生能力;也可能通过减少机体对亮氨酸(HMβ的前体物质)的需求量而提升其促进蛋白平衡中的正向作用,以利于蛋白沉积,从而提高骨骼肌质量与功能。

4 结论

研究表明,训练结合β-羟基-β-甲基丁酸补充能有效预防运动性骨骼肌微损伤,发挥肌肉保护功能,提高肌肉对训练的适应性,以保障队员的竞技状态。其机制可能涉及:①补充β-羟基-β-甲基丁酸通过降低炎症程度,保障免疫细胞能量供应而积极改善免疫功能,以利于蛋白合成;②通过增强肌细胞膜稳定性,调节蛋白代谢而提高氮存量,减少肌肉消耗;③通过增加卫星细胞活性而提高肌肉重塑再生能力,以利于骨骼肌损伤后的快速恢复。但因人体研究受肌肉活检限制,缺少直接的肌源性指标检测,需进一步深入探究其效果机制。

表 10 干预期间两组队员专项能力评价指标变化[†]

Table 10 Changes in the evaluation indexes of the specific abilities of the two groups of players during the intervention(n=9)

组别	20 s 原地提膝次数		30 s 收腹跳次数	
	干预前	干预后	干预前	干预后
试验组	59.89±2.73	63.22±1.47	48.22±1.19	53.89±1.42 [*]
对照组	58.67±2.21	59.00±2.16	48.67±0.89	53.22±1.11 [#]

† * 表示试验组干预前后对比, P<0.05; # 表示对照组干预前后对比, P<0.05。

参考文献

[1] 赵光圣, 刘宏伟. 跆拳道运动教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 140-141.
 ZHAO G S, LIU H W. Taekwondo sports tutorial[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 140-141.
 [2] 薛婷婷, 孙国友, 陆玉林. 近十年跆拳道竞赛规则演变规律及其动因研究[J]. 南京体育学院学报, 2020, 19(2): 65-70.
 XUE T T, SUN G Y, LU Y L. Research on evolution law and motivation of taekwondo competition rules in recent ten years[J].

- Journal of Nanjing Sports Institute, 2020, 19(2): 65-70.
- [3] LIN Z R, ZHAO A Q, HE J G. Effect of β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) on the muscle strength in the elderly population: a meta-analysis [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 13, 9: 914866.
- [4] 黄飞. 亮氨酸对抗阻运动引起的骨骼肌损伤和疼痛的保护作用[J]. *基因组学与应用生物学*, 2020(1): 386-393.
- HUANG F. Protective effect of leucine on skeletal muscle injury and pain caused by resistance exercise[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2020(1): 386-393.
- [5] OKTAVIANA J, ZANKER J, VOGGRIN S, et al. The effect of β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) on sarcopenia and functional frailty in older persons: a systematic review [J]. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 2019, 23(2): 145-150.
- [6] LANDI F, CALVANI R, PICCA A, et al. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate and sarcopenia: from biological plausibility to clinical evidence [J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2019, 22(1): 37-43.
- [7] PRADO C M, ORSSO C E, PEREIRA S L, et al. Effects of β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) supplementation on muscle mass, function, and other outcomes in patients with cancer: a systematic review[J]. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 2022, 13(3): 1 623-1 641.
- [8] 桑培培, 张曼丽, 李婕, 等. 体能训练过程中尿液肌红蛋白升高对有机酸代谢的影响研究[J]. *标记免疫分析与临床*, 2022(5): 790-794.
- SANG P P, ZHANG M L, LI J, et al. Effects of urine myoglobin elevation on organic acid metabolism during physical training[J]. *Labeled Immunoassays and Clinical Medicine*, 2022(5): 790-794.
- [9] TSUCHIYA Y, HIRAYAMA K, UEDA H, et al. Two and four weeks of β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) supplementations reduce muscle damage following eccentric contractions[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2019, 38(4): 373-379.
- [10] HOFFMAN J R, COOPER J, WENDELL M, et al. Effects of beta-hydroxy beta-methylbutyrate on power performance and indices of muscle damage and stress during high-intensity training[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2004, 18(4): 747-752.
- [11] MIYAKE S, OGO A, KUBOTA H, et al. β-hydroxy-β-methylbutyrate suppresses NF-κB activation and IL-6 production in TE-1 cancer cells[J]. *National Library of Medicine*, 2019, 33(2): 353-358.
- [12] 范小庆, 扈金萍. 甘氨酸生理功能与代谢研究进展[J]. *国际药理学研究杂志*, 2018, 45(2): 102-107.
- FAN X Q, HU J P. Physiological function of glycine and its role in metabolism: research advances [J]. *Journal of International Pharmaceutical Research*, 2018, 45(2): 102-107.
- [13] 曾志刚, 郝选明, 邱红. 补充β-羟基-β-甲基丁酸盐(HMB)在运动训练中的生理效应[J]. *中国运动医学杂志*, 2007, 26(1): 120-123.
- ZENG Z G, HAO X M, QIU H. Supplementation of physiological effects of β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) in exercise training [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2007, 26(1): 120-123.
- [14] 张庆. 机能增进补剂 HMB 的补充效用及机制研究[J]. *南京体育学院学报*, 2019, 2(4): 50-58.
- ZHANG Q. Supplement benefits and mechanism of ergogenic aidhmb[J]. *Journal of Nanjing Sports Institute*, 2019, 2(4): 50-58.
- [15] 马友彪, 张海军, 王晶, 等. β-羟基-β-甲基丁酸在畜禽营养中作用的研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2016, 43(10): 2 608-2 614.
- MA Y B, ZHANG H J, WANG J, et al. Research progress on β-hydroxy-β-methylbutyrate in animal nutrition [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2016, 43(10): 2 608-2 614.
- [16] NISSEN S, SHARP R L, PANTON L, et al. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate(HMB) supplementation in humans is safe and may decrease cardiovascular risk factors[J]. *The Journal of Nutrition*, 2000, 130(8): 1 937-1 945.
- [17] 吕武. 体能训练中的膳食营养分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(2): 245-246.
- LU W. Analysis of dietary nutrition in physical training[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(2): 245-246.
- [18] 荆西民. 运动员膳食营养管理研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 222-227.
- JING X M. Research progress on management of athletes' dietary nutrition[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(9): 222-227.
- [19] 曾佳. 竞技运动员营养误区及改善途径[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 218-221.
- ZENG J. Nutrition misunderstanding of competitive athletes and its improvement[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(9): 218-221.
- [20] 崔新雯, 张一民, 汪赞, 等. 长期高强度间歇训练对中年大鼠骨骼肌蛋白合成和降解的影响[J]. *中国体育科技*, 2021(2): 12-19.
- CUI X W, ZHANG Y M, WANG Z, et al. Protein synthesis and degradation in skeletal muscle of middle-aged rats following high intensity interval training[J]. *China Sport Science and Technology*, 2021(2): 12-19.
- [21] WILSON J M, LOWERY R P, JOY J M, et al. The effects of 12 weeks of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate free acid supplementation on muscle mass, strength, and power in resistance-trained individuals: a randomized, double-blind, placebo-controlled study [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(6): 1 217-1 227.
- [22] KASEMKIJWATTANA C, MENETREY J, BOSCH P, et al. Use of growth factors to improve muscle healing after strain injury[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2020, 370: 272-285.
- [23] FERNÁNDEZ-LANDA J, FERNÁNDEZ-LÁZARO D, CALLEJA-GONZÁLEZ J, et al. Effect of ten weeks of creatine monohydrate plus hmb supplementation on athletic performance tests in elite male endurance athletes [J]. *Nutrients*, 2020, 12(1): 193.

(下转第 240 页)

- effects of acetylated mycelia polysaccharides from *Pleurotus djamor*[J]. *Molecules*, 2019, 24(15): 2 698.
- [79] 李顺峰, 许方方, 崔国梅, 等. 不同纯化程度香菇柄多糖的乙酰化修饰及降血糖活性[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(6): 127-133.
- LI S F, XU F F, CUI G M, et al. Acetylation modification and hypoglycemic activity of *Lentinus edodes* stipe polysaccharide with different purification degrees[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(6): 127-133.
- [80] PENG Y Y, ZHANG J H, YANG H L, et al. Acetylation modification and antioxidant activity of polysaccharides from *Agrocybe cylindracea* [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(3): 1 911-1 919.
- [81] REN Y Y, SUN P P, JI Y P, et al. Carboxymethylation and acetylation of the polysaccharide from *Cordyceps militaris* and their α -glucosidase inhibitory activities [J]. *Natural Product Research*, 2020, 34(3): 369-377.
- [82] 邓婕, 牟璐, 童宇航, 等. 硒多糖的制备、结构表征及抗氧化活性的研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(10): 8-15.
- DENG J, MOU L, DONG Y H, et al. Research progress in preparation, structure characterization and antioxidant activity of selenium polysaccharides[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(10): 8-15.
- [83] SIMSEK M, ASIYANBI-HAMMED T T, RASDAQ N, et al. Progress in bioactive polysaccharide-derivatives: a review[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(3): 1 612-1 627.
- [84] 古佩娟, 尹惠双, 胡坤, 等. 硒化猴头菇多糖的制备、结构表征及抗增殖活性[J]. *食品科学*, 2022, 43(22): 68-73.
- GU P X, YIN H S, HU K, et al. Preparation, structural characterization and anti-proliferation activity of selenized *Hericium erinaceus* polysaccharide[J]. *Food Science*, 2022, 43(22): 68-73.
- [85] LI Q, ZHU L F, QI X P, et al. Immunostimulatory and antioxidant activities of the selenized polysaccharide from edible *Grifola frondosa*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10(4): 1 289-1 298.
- [86] 林怡辰. 黑木耳多糖硒对酒精性肝损伤的预防作用及其机制探究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022: 30-77.
- LIN Y C. Preventive effect of *Auricularia auricula* Selenium polysaccharide on alcoholic liver injury and its mechanism [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022: 30-77.
- [87] DONG Z, DONG G, LAI F R, et al. Purification and comparative study of bioactivities of a natural selenized polysaccharide from *Ganoderma lucidum* mycelia[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 190: 101-112.

(上接第 147 页)

- [24] HAN X J, GOH K Y G, WEN X L, et al. The importance of mtorc1-autophagy axis for skeletal muscle diseases [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 24(1): 297.
- [25] 夏志, 赵艳, 丁孝民, 等. 抗阻训练改善骨骼肌衰老的关键基因与信号通路鉴定[J]. *中国体育科技*, 2021, 57(12): 92-100.
- XIA Z, ZHAO Y, DING X M, et al. Identification of crucial differentially expressed genes and signaling pathways in ameliorating skeletal muscle aging by resistance training[J]. *China Sport Science and Technology*, 2021, 57(12): 92-100.
- [26] 尤莉蓉, 赵艳, 尚画雨, 等. β -羟基- β -甲基丁酸对衰老小鼠腓肠肌蛋白质合成的影响研究[J]. *首都体育学院学报*, 2018, 30(5): 466-472.
- YOU L R, ZHAO Y, SHANG H Y, et al. Effects of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate supplementation on protein synthesis in skeletal muscle of aged mice[J]. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 2018, 30(5): 466-472.
- [27] ASADI A, ARAZI H, SUZUKI K. Effects of β -hydroxy- β -methylbutyrate-free acid metabolism on strength, power and adaptability following resistance training [J]. *Nutrients*, 2017, 9(12): 1 316-1 329.
- [28] ARAZI H, TAATI B, SUZUKI K. A review of the effects of leucine metabolite (β -hydroxy- β -methylbutyrate) supplementation and resistance training on inflammatory markers: A new approach to oxidative stress and cardiovascular risk factors[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2018, 7(10): 148.

(上接第 191 页)

- [40] 胡庆国, 张慜, 杜卫华, 等. 不同干燥方式对颗粒状果蔬品质变化的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2006, 25(2): 28-32.
- HU Q G, ZHANG M, DU W H, et al. Effect of different drying methods on the quality changes of the granular fruits and vegetables[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2006, 25(2): 28-32.
- [41] 张裕仁. 板栗热风—真空分段联合干燥的干燥动力学及工艺优化[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 25-36.
- ZHANG Y R. Drying kinetics and process optimization of the persimmon combined hot air and vacuum drying [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 25-36.
- [42] OUYANG M Y, CAO S, HUANG Y Q, et al. Phenolics and ascorbic acid in pumpkin (*Cucurbita maxima*) slices: effects of hot air drying and degradation kinetics [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15: 247-255.
- [43] 钟旭美, 陈铭中, 庄婕, 等. BP 神经网络结合遗传算法优化玫瑰茄火龙果固体饮料工艺条件[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 173-179.
- ZHONG X M, CHEN M Z, ZHUANG J, et al. Optimization of solid beverage process of rosette and dragon fruit by BP neural network combined with genetic algorithms [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(19): 173-179.