

乳清蛋白补充对抗阻运动后氨基酸代谢及疲劳恢复的影响

刘欣源¹ 翁健春¹ 彭田慧^{2,3} 张梦也³ 郭 娴^{1,4*}

1. 北京体育大学运动人体科学学院, 北京 100084

2. 北京体育大学运动医学与康复学院, 北京 100084

3. 北京品酷运动营养技术有限公司, 北京 101100

4. 运动营养北京市高等学校工程研究中心, 北京 100084

[摘要]本研究旨在探究液体乳清蛋白补充剂在男性健身爱好者单次高强度抗阻训练前后服用时,其效果发挥的时间点。本研究通过检测服用补充剂后氨基酸的吸收率,以及运动后肌肉酸痛的改善程度,来明确最佳时机进行营养干预。本次随机、双盲、交叉研究实验共面向北京体育大学招收九名健身男爱好者。每个受试者依次接受两个干预方案,在完成两组相同的高强度抗阻训练试验时,分别接受蛋白质补充(W组)或安慰剂对照(C组)。首次测试前,受试者被随机分配到W组(液体乳清蛋白在运动前1h和运动后立即补充)或C组(等量安慰剂服用)。经过一周的脱洗期后,在第二次测试中,受试者交换干预组。结果发现,蛋白质补充组的氨基酸在运动后的吸收速度明显快于安慰剂组,肌肉酸痛在运动后更明显地得到改善,并且更早地出现。

[关键词]1RM; 蛋白; 表面肌电; 总氨基酸水平; 睾酮皮质醇比值

DOI: 10.33142/jscs.v5i4.17434

中图分类号: R58

文献标识码: A

The Effect of Whey Protein Supplementation on Amino Acid Metabolism and Fatigue Recovery after Resistance Exercise

LIU Xinyuan¹, WENG Jianchun¹, PENG Tianhui^{2,3}, ZHANG Mengye³, GUO Xian^{1,4*}

1. School of Sports and Human Sciences, Beijing Sport University, Beijing, 100084, China

2. School of Sports Medicine and Rehabilitation, Beijing Sport University, Beijing, 100084, China

3. Beijing Pinku Sports Nutrition Technology Co., Ltd., Beijing, 101100, China

4. Sports Nutrition Beijing Higher Education Engineering Research Center, Beijing, 100084, China

Abstract: This study aims to explore the time points at which liquid whey protein supplements exert their effects before and after a single high-intensity resistance training session for male fitness enthusiasts. This study aims to determine the optimal timing for nutritional intervention by measuring the absorption rate of amino acids after taking supplements and the degree of improvement in muscle soreness after exercise. This randomized, double-blind, crossover study recruited nine male fitness enthusiasts from Beijing Sport University. Each participant received two intervention regimens in sequence, and upon completion of two identical high-intensity resistance training trials, received either protein supplementation (Group W) or placebo control (Group C). Prior to the initial test, participants were randomly assigned to either Group W (liquid whey protein supplemented 1 hour before and immediately after exercise) or Group C (an equal amount of placebo). After a one week washout period, in the second test, the subjects exchanged intervention groups. The results showed that the absorption rate of amino acids in the protein supplementation group was significantly faster than that in the placebo group after exercise, and muscle soreness improved more significantly and appeared earlier after exercise.

Keywords: 1 RM; protein; surface electromyography; total amino acids levels; testosterone cortisol ratio

1 研究背景

随着健康生活理念的广泛传播,阻力训练已成为大众增强肌肉力量和改善体能的重要方式。然而,该训练方式尤其在高强度下易导致肌纤维微损伤,可能会造成一些问题,比如会引起局部发炎的情况^[1-3]。我们的身体进行这种锻炼后会产生一定的劳累,而身体的恢复涉及多种代谢途径的协同调控。现有证据表明,氨基酸代谢在这一过程中扮演关键的作用,尤其关系到肌肉的合成与损伤修复的速度^[4]。有关这些方面的内容在学术领域已经有了一定

的研究并成为众多专家关注的问题。

作为优质蛋白来源,乳清蛋白在运动营养补充中应用较多,因为它不仅拥有高生物价的特性,而且消化速度还很快^[5]。乳清蛋白富含的支链氨基酸(Branched-Chain Amino Acids, BCAAs)除了对刺激肌蛋白合成有很好的帮助外,还可以通过亮氨酸激活哺乳动物雷帕霉素靶蛋白信号通路,对蛋白质的降解起到有效的抑制作用^[6-8]。研究显示,如果在抗阻训练后没有及时将外源蛋白补充,就会造成肌蛋白的分解速度比合成速率高,从而造成净蛋白的

平衡为负值^[9,10]。在训练结束后,补充乳清蛋白能反转这一状态,促使合成和代谢,肌肉的适应力也会随之增强^[11]。临床实验表明,乳清蛋白的摄入能使血液中的氨基酸浓度迅速提高,特别是BCAAs,使恢复过程加快^[12-14]。在运动后的窗口期补充,可使血清氨基酸水平在半个小时内得到明显改善,并保持较长的时间^[15,16],进而改善氨基酸利用率、促进平衡,并缓解肌肉损伤^[17,18]。乳清蛋白还具有一定的抗炎与抗氧化潜力,从而进一步支持运动后恢复^[19]。

虽然现有研究已充分证明乳清蛋白在运动恢复过程中具有积极效果,然而目前针对补充时机与其实际功效之间关联的系统研究仍较为欠缺。运动人群对营养补剂的选择往往依赖于对其功效的信任,因此,有必要探究运动后乳清蛋白补充对运动效果及身体机能改善的情况,观察机体蛋白代谢的变化及身体微损伤的恢复情况,对于了解机体氨基酸代谢和疲劳消除具有重要价值。该研究以年轻男性健身人群为研究对象,通过一次性高强度抗阻训练前后的乳清蛋白干预,重点研究补充后氨基酸的吸收动力学特征和缓解延迟性肌肉酸痛的效果,并识别出该营养干预策略产生最佳效果的关键时间范围。为揭示乳清蛋白促进运动恢复的生理路径提供新的实验证据,为专业运动员及大众健身人群制定基于实证的营养补充计划提供科学参考,同时,通过明确最佳补充时间窗口,可进一步优化运动营养方案的实施效率,最终助力机体运动后恢复速率的提升及运动表现的长效改善。

2 研究方法

2.1 实验对象

本研究于北京体育大学范围内招募九名在校青年男性健身爱好者作为受试者。干预启动前,先通过健康检查排除可能影响研究结果的干扰因素,同时采用问卷调研方式,收集受试者的年龄、性别、健康状态等基础信息研究者对问卷进行保密。所有受试者均在充分了解研究内容后,签署知情同意书。具体受试者纳入与排除标准如下:

(1) 纳入标准

- ①年龄介于18~24岁之间的男性。
- ②有一年以上健身习惯,且近三个月每周进行三次及以上的健身活动。
- ③近三个月内未使用蛋白粉或相关营养补剂。

(2) 排除标准

- ①存在影响运动的任何运动禁忌症或其它疾病。
- ②有长期素食的饮食习惯或对乳清蛋白过敏。

2.2 相关实验调查的设计

入选的九名实验对象均需先后经历两种干预条件,并分别完成两次相同的大强度抗阻运动测试。干预方案包括乳清蛋白补充(W组)与安慰剂对照(C组)。在首次测试前,受试者被随机分配至W组或C组:W组于运动前1h及运动后即刻摄入液体乳清蛋白,C组则在相同时点摄入等量安慰剂。经历一周洗脱期后,两组受试者交换干预方案进行第二次测试。

2.3 运动方案

急性抗阻运动包括杠铃深蹲和卧推两项动作。每个动作要进行4或者5组,每组的负荷依据测试的1RM来定,第一组为热身组,具体如图1。



图1 抗阻运动方案

2.4 营养补充方案

W组在抗阻训练前1h及训练后即刻分别补充300ml液体乳清蛋白补剂(每份含蛋白质25.6g,其中亮氨酸2.71g、异亮氨酸1.50g、缬氨酸1.68g);C组在相同时间点补充等体积安慰剂(成分包括麦芽糊精、赤藓糖醇和红茶粉等)。乳清蛋白与安慰剂均由北京品酷运动营养技术有限公司提供。

2.5 测试指标

2.5.1 基础指标

在我们进行实验之前我们需要对实验对象进行基础指标的测量,包括研究对象的身高以及体重,并且相关的数据必须十分的精确并且保留一位小数。身高测量使用校准后的身高仪,受试者赤足直立、背部紧贴立柱,脚跟并拢,记录压板静止时数值(单位:cm)。体重测量使用校准体重秤,受试者稳定站立于秤面,记录最终稳定读数(单位:kg)。

2.5.2 客观疲劳指标

股外侧肌表面肌电测试于运动前,运动后立即,运动后24h,并记录平均动力频率(Mean Power Frequency, MPF)。受试者在测试前先用酒精清洁皮肤,然后取坐位,膝关节屈曲,双腿轻轻抬起,电极沿着肌肉腹肌纤维的方向贴紧。

2.5.3 主观疲劳感受

用视觉模拟量表(Visual Analog Scale, VAS)对运动后即刻、24h和48h的肌肉疼痛程度进行评定。

2.5.4 氨基酸吸收与合成代谢指标

肘静脉血分别采集于锻炼前、锻炼后即刻、30min、2h,在-80℃冻存后离心分离血清。采用酶联免疫吸附法检测血清总氨基酸(Total Amino Acids, T-AA)、睾酮(Testosterone, T)和皮质醇(Cortisol, Cor)浓度,并算得睾酮/皮质醇值(Testosterone to Cortisol Ratio, T/C ratio)。

2.6 统计分析

本研究所有数据均通过 SPSS 26.0 统计软件完成处理, 最终结果以“平均值 $\pm$ 标准差”的形式呈现。在开展统计分析前, 首先对数据进行正态性检验, 确保数据符合参数检验的前提条件; 随后采用重复测量方差分析对数据进行核心统计分析。在重复测量方差分析过程中, 首先执行球形性检验, 以此判断重复测量数据在不同时间点之间是否存在相关性。若球形性检验结果显示相关性具有统计学意义 ($P < 0.05$), 则进一步深入分析时间因素对观测指标的主效应, 同时探究时间因素与分组因素之间的交互效应, 以明确两者是否共同影响指标变化。对于组内比较, 针对同一组内不同时间点的指标差异, 采用事后检验进行两两比较; 对于组间比较, 各观测指标在不同组别间的差异分析则通过单因素方差分析完成。本研究将统计学显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

3 研究结果

3.1 受试者基本信息

如表 1 所示, 本研究为交叉设计, 所有受试者均完成两种干预, 组内基线一致, 年龄、身高、体重均无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 1 受试者基本情况

	W 组 (n=9)	C 组 (n=9)
年龄 (岁)	20.89 $\pm$ 3.06	20.89 $\pm$ 3.06
身高 (cm)	173.00 $\pm$ 4.44	173.00 $\pm$ 4.44
体重 (kg)	71.40 $\pm$ 8.69	71.40 $\pm$ 8.69

3.2 肌电指标的变化情况

由表 2 结果可见, 运动后即刻两组受试者股外侧肌的 MPF 均比运动前显著降低 ($P < 0.05$), 表明高强度抗阻运动诱发了下肢肌肉疲劳。至运动后 24h, 两组 MPF 值均出现回升, 其中 W 组的平均功率频率显著高于 C 组 ($P < 0.05$)。进一步对 MPF 随时间的变化幅度进行分析 (表 3), 结果显示, W 组在运动后 24h 与运动前的 MPF 差值显著小于 C 组, 且恢复至超过运动前基线水平 ($P < 0.05$), 表明补充乳清蛋白可更有效地促进肌肉疲劳的恢复。

表 2 股外侧肌 MPF 的测试结果(Hz)

	W 组 (n=9)	C 组 (n=9)
运动前	102.67 $\pm$ 27.55	95.33 $\pm$ 27.55
运动后即刻	69.29 $\pm$ 19.64#	56.06 $\pm$ 16.60#
运动后 24h	106.68 $\pm$ 24.88*	85.30 $\pm$ 25.30

注: 与运动前相比, #表示 $P < 0.05$; 与对照组相比, *表示 $P < 0.05$ 。

表 3 股外侧肌 MPF 的变化值 (Hz)

	W 组 (n=9)	C 组 (n=9)
运动后即刻与运动前的差值	33.39 $\pm$ 10.20	39.26 $\pm$ 16.96
运动后 24h 与运动前的差值	-4.0 $\pm$ 10.57*	10.03 $\pm$ 13.24

注: 与对照组相比, *表示 $P < 0.05$ 。

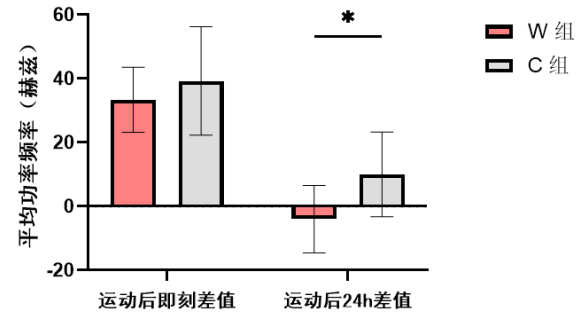


图 2 股外侧肌肌电变化值

注: 与对照组相比, *表示 $P < 0.05$ 。

3.3 肌肉疼痛程度的变化情况

由表 4 结果可见, 与运动后即刻相比, W 组在运动后 24h ($P < 0.05$) 和 48h ($P < 0.001$) 的 VAS 评分均出现显著下降; 而 C 组仅在运动后 48h 才呈现显著降低 ($P < 0.05$)。结果表明, 乳清蛋白干预可更早缓解运动引起的肌肉疼痛, 并加速恢复进程。

表 4 VAS 评分的测试结果

		W 组 (n=9)	C 组 (n=9)
	运动后即刻	3.67 $\pm$ 1.12	4.22 $\pm$ 1.56
VAS 评分	运动后 24h	2.78 $\pm$ 1.20#	3.67 $\pm$ 1.22
	运动后 48h	1.56 $\pm$ 1.13#	2.33 $\pm$ 1.00#

注: 与运动前相比, #表示 $P < 0.05$ 。

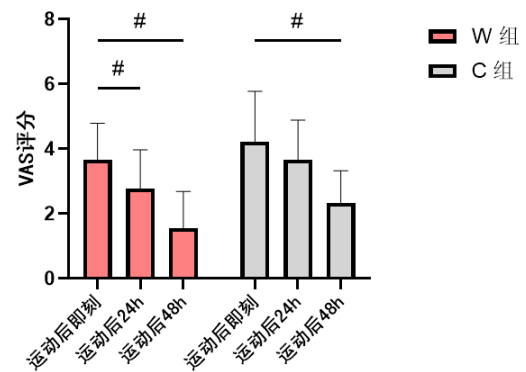


图 3 运动后肌肉酸痛评分值

注: 与运动后即刻相比, #表示 $P < 0.05$ 。

3.4 血清 T-AA 的变化情况

由表 5 结果可见, W 组在不同时间点的血清 T-AA 浓度没有出现显著差异 ($P > 0.05$), 而 C 组在运动后 2h 的血清 T-AA 水平较运动前显著下降 ($P < 0.05$), 表明乳清蛋白干预有助于维持血清 T-AA 浓度的稳定。组间比较显示, 运动后 2h W 组的血清 T-AA 水平显著高于 C 组 ($P < 0.05$)。进一步分析显示, W 组在运动后 30min 时有 88.89% 的受试者血清 T-AA 浓度超过基线水平, 该比例显著高于 C 组的 44.44%, 提示乳清蛋白补充可能促使血清 T-AA 在运动后 30min 左右达到峰值。

表 5 血清 T-AA 的测试结果

	W 组血清总氨基酸值 (n=9) (ug/mL)	C 组血清总氨基酸值 (n=9) (ug/mL)	W 组运动后超过基线水平人数 (n=9) (人)	C 组运动后超过基线水平人数 (n=9) (人)
运动前	62.93±16.09	61.31±8.92	-	-
运动后即刻	64.52±10.72	59.57±14.09	3	2
运动后 30min	61.77±16.83	58.57±10.28	8	4
运动后 2h	63.67±19.65*	54.38±10.32#	5	2

注：与运动前相比，#表示 $P<0.05$ ；与对照组相比，*表示 $P<0.05$ 。

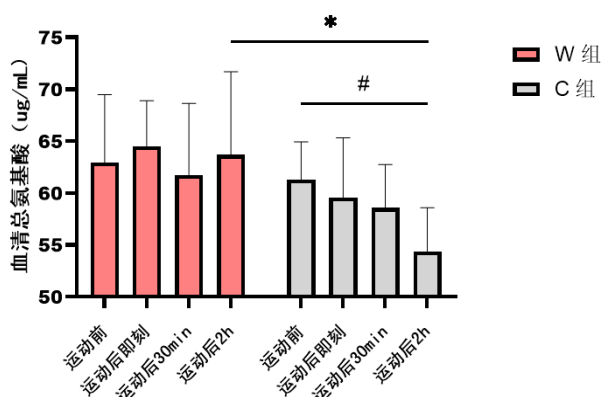


图 4 血清中 T-AA 值

注：与运动前相比，#表示 $P<0.05$ ；与对照组相比，*表示 $P<0.05$ 。

3.5 血清 T/C 比值的变化情况

由表 6 可知，在不同时间段上，两组的血清 T/C 比值均没有显著差异 ($P>0.05$)；W 组和 C 组之间也没有显著差异 ($P>0.05$)。虽然没有统计学的变化，但是可看出 W 组在运动后的恢复趋势高于 C 组。

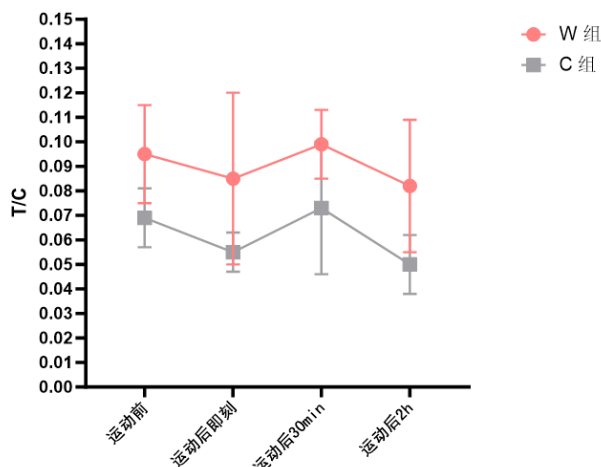


图 5 中 T/C 比值

4 分析与讨论

实验结果显示，无论是氨基酸代谢还是运动后疲劳恢复的相关指标，乳清蛋白干预组都比对照组有显著的优势。肌电分析表明，股外侧肌 MPF 在抗阻训练完成后，两组受试者均有明显下降，反映出肌肉疲劳是由高强度训练所诱发。实验组在 24h 后不仅 MPF 恢复到基线水平，并且

显著高于对照组，而且其变化幅度也明显较小，这表明蛋白质的补充能够有效提高恢复效率，甚至促进超量恢复。这一结果与 Daniel 等多项研究一致，都支持运动后蛋白质摄入对肌力和功能恢复的积极作用^[20-22]。MPF 的改变反映的是肌纤维的收集和神经控制状态，高强度的运动可以使这种协调机制暂时遭到破坏，而蛋白质的及时补充则提供了神经肌肉功能恢复所必需的基础物质^[22]。主观疼痛评分方面，实验组在运动后 24h 和 48h 均呈现显著阶梯式下降，并且比对照组有更大的改善。延迟性肌肉酸痛部分是由于肌纤维微损伤引起的炎症反应^[23]，乳清蛋白中的支链氨基酸除直接参与肌蛋白合成外，还具有调节炎症因子和促进糖原再合成的作用，这可能是其缓解疼痛的重要机制。

血液生化指标进一步支持上述发现。对照组血清 T-AA 浓度在干预后持续下降，而实验组保持稳定，且在运动后 2h 仍显著高于对照组。值得注意的是，实验组有 88.89% 的受试者在干预后 30min T-AA 浓度即超过基线，显著高于对照组的 44.44%，提示乳清蛋白可能在该时间点促使氨基酸浓度达到峰值。其生理机制在于：剧烈运动显著增加氨基酸需求，外源性蛋白质的补充效率直接影响恢复进程。研究表明，抗阻运动后补充蛋白质可在 30min~2h 内提高血清 T-AA 水平，随后逐渐恢复至基线^[24]。蛋白质也有很多种类，不一样的蛋白质他的吸收水平也大同小异，但是蛋白质是怎样合成的，蛋白质的合成就需要乳清蛋白，但是单单依靠乳清蛋白也是无济于补的，酪蛋白对于维持我们的氨基酸起到十分重要的作用，除此之外，它还可以促进我们肌肉蛋白的合成。血清 T-AA 在 30min 内达到峰值，随后回落，与前人结果一致^[26,27]。

在一次抗阻训练中，T 与 Cor 通常同步升高，其比值保持稳定，反映机体应激反应和负荷适应性。该同步变化与下丘脑-垂体-肾上腺轴 (Hypothalamic-Pituitary-Adrenal, HPA) 及下丘脑-垂体-性腺轴 (Hypothalamic-Pituitary-Gonadal, HPG) 的激活有关^[28]。训练负荷和恢复状态常以 T/C 比值的稳定性作为观察指标，如果出现明显下降，说明恢复不足或训练过度。恢复期间，分解代谢标志物皮质水平逐渐降低，而合成代谢类激素 T 趋于上升，这一过程受 HPA 和 HPG 轴的负反馈调节^[28]。乳清蛋白凭借其快速吸收与高 BCAA 含量，可只有我们的氨基酸水平才可以让我们的

皮质醇抑制它的分泌,更好的让我们的肌肉水平与恢复^[29]。然而,长期训练人群由于神经内分泌适应性增强,HPA轴对运动应激的反应减弱,T分泌更趋稳定^[28],这种适应可能削弱外源性营养干预对激素平衡的影响,导致T/C比值在蛋白补充后未发生显著变化^[30-33]。

综上所述,抗阻运动前后补充乳清蛋白可有效提高氨基酸吸收速率,加速肌肉疲劳与疼痛的恢复,且效果在补充后30min内即可显现,为运动营养实践提供了理论依据。

5 结论

青年男性健身爱好者于每次在进行较大运动之前,一定要补充一定量的乳清蛋白例如如果是液体的乳清蛋白可以进行300ml剂量的补充,这些物质会在我们进行剧烈运动后的30min内实现实收,可以让我们的运动不在那么劳累可以有效并高速补充我们的体能,并且会在24h后让我们的身体进行一定的恢复效果。

[参考文献]

- [1]Pitkanen HT,Knuutinen J,Lahti K,et al.Free amino acid pool and muscle protein balance after resistance exercise[J].Med Sci Sports Exerc,2003(35):784-92.
- [2]Phillips SM,Tipton DD,Aarsland A,et al.Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans[J].Am J Physiol,1997(273):E99-107.
- [3]Clarkson PM, Nosaka K,Braun B.Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation[J].Med Sci Sports Exerc,1992(5):512-20.
- [4]Davies RW, Carson BP,Jakeman PM.The Effect of Whey Protein Supplementation on the Temporal Recovery of Muscle Function Following Resistance Training:A Systematic Review and Meta-Analysis[J].Nutrients,2018(10):221.
- [5]Pasiakos SM,Mountain SJ,Young AJ.Protein supplementation in U.S.Military personnel[J].J Nutr,2013(143):1815S-1819S.
- [6]Chang MC,Choo YJ. Effects of Whey Protein, Leucine, and Vitamin D Supplementation in Patients with Sarcopenia:A Systematic Review and Meta-Analysis[J].Nutrients,2023,15(3):521.
- [7]Breen L, Philip A, Witard OC, et al. The influence of carbohydrate-protein co-ingestion following endurance exercise on myofibrillar and mitochondrial protein synthesis[J].J Physiol,2011(589):4011-25.
- [8]Howarth KR,Moreau NA,Phillips SM, et al. Coingestion of protein with carbohydrate during recovery from endurance exercise stimulates skeletal muscle protein synthesis in humans[J].J Appl Physiol,2009(106):1394-402.
- [9]Levenhagen DK,Carr C,Carlson MG, et al.Postexercise protein intake enhances whole-body and leg protein accretion in humans[J].Med Sci Sports Exerc,2002(34):828-37.
- [10]Koopman R,Wagenmakers AJM, Manders RJF, et al.Combined ingestion of protein and free leucine with carbohydrate increases postexercise muscle protein synthesis in vivo in male subjects[J].Am J Physiol,2005(288):E645-53.
- [11]Saunders MJ.Coingestion of carbohydrate-protein during endurance exercise: influence on performance and recovery[J].Int J Sport Nutr Exerc Metab,2007(17):S87-103.
- [12]Mero A,Miikkulainen H,Riski J,et al.Effects of bovine colostrum supplementation on serum IGF-I, IgG, hormone, and saliva IgA during training[J].J Appl Physiol,1997,83(4):1144-51.
- [13]Mero A,Pitk änen HT,P äntinen PJ, et al. Acute serum amino acid responses to one strength training session[J].Med Sci Sports Exerc,1998,30(5):S182.
- [14]Mero A, Pitk änen H,Oja SS,et al.Leucine supplementation and serum amino acids, testosterone, cortisol and growth hormone in male power athletes during training[J].J Sports Med Phys Fitness,1997,37(2):137-45.
- [15]Castell LM,Newsholme EA.The effects of oral glutamine supplementation on athletes after prolonged, exhaustive exercise[J].Nutrition,1997(13):738-42.
- [16]Harris RC, Hoffman JR, Allsopp A, et al. L-glutamine absorption is enhanced after ingestion of L-alanyl glutamine compared with the free amino acid or wheat protein[J].Nutr Res,2012,32(4):272-277.
- [17]Al-Rawhani AH,Adznam SN,Abu Zaid Z,et al.Effectiveness of whey protein supplementation on muscle strength and physical performance of older adults:A systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J].Clin Nutr,2024,43(10):2412-2426.
- [18]Nasimi N, Sohrabi Z,Nunes EA,et al.Whey Protein Supplementation with or without Vitamin D on Sarcopenia-Related Measures:A Systematic Review and Meta-Analysis[J].Adv Nutr,2023,14(4):762-773.
- [19]Piri Damaghi M,Mirzababaei A,Moradi S,et al.Comparison of the effect of soya protein and whey protein on body composition:a meta-analysis of randomised clinical trials[J].Br J Nutr,2022,127(6):885-895.
- [20]Buckley JD,Thomson RL,Coates AM,et al.Supplementation with a whey protein hydrolysate enhances recovery of muscle force-generating capacity following eccentric exercise[J].J Sci Med

Sport,2010,13(1):178-181.

[21]Kim J,Lee C, Lee J.Effect of timing of whey protein supplement on muscle damage markers after eccentric exercise[J].J Exerc Rehabil,2017,13(4):436-440.

[22]West DWD,Abou Sawan S, Mazzulla M, et al.Whey Protein Supplementation Enhances Whole Body Protein Metabolism and Performance Recovery after Resistance Exercise:A Double-Blind Crossover Study[J].Nutrients,2017,9(7):735.

[23]Prokopiadis K, Mazidi M, Sankaranarayanan R, et al.Effects of whey and soy protein supplementation on inflammatory cytokines in older adults: a systematic review and meta-analysis[J].Br J Nutr,2023,129(5):759-770.

[24]Biolo G,Maggi SP, Williams BD,et al.Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans[J].Am J Physiol,1995,268(3):E514-E520.

[25]Lacroix M,Bos C,Léonil J,et al.Compared with casein or total milk protein,digestion of milk soluble proteins is too rapid to sustain the anabolic postprandial amino acid requirement[J].Am J Clin Nutr,2006,84(5):1070-1079.

[26]Soop M,Nehra V,Henderson GC, et al.Coingestion of whey protein and casein in a mixed meal:demonstration of a more sustained anabolic effect of casein[J].Am J Physiol Endocrinol Metab,2012,303(1):E152-E162.

[27]Boirie Y,Dangin M,Gachon P,et al.Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion[J].Proc Natl Acad Sci U S A,1997,94(26):14930.

[28]Kraemer WJ,Ratamess NA.Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training[J].Sports

Med,2005,35(4):339-361.

[29]Pourabbas M,Bagheri R,Hooshmand Moghadam B,et al.Strategic Ingestion of High-Protein Dairy Milk during a Resistance Training Program Increases Lean Mass,Strength,and Power in Trained Young Males[J].Nutrients,2021,13(3):948.

[30]刘猛,莫仕围,秦春莉,等.橘皮素与乳清蛋白的合用对短跑运动员冬训期间血清睾酮、皮质醇水平的影响[J].中国应用生理学杂志,2021,37(06):678-682.

[31]薛博洋.补充不同营养补剂组合对男子 U18 足球运动员赛前准备期体成分、力量和部分生化指标的影响[D].上海:上海体育学院,2018.

[32]刘欣源,彭田慧,郭娴.急性乳清蛋白补充对大强度抗阻运动后氨基酸代谢及疲劳恢复的影响[A].2024 年第一届国际数字体育科学大会论文集(上)[C].广州:广东省体能协会,2024.

[33]李鑫鑫,王雪梅,郭娴.抗阻训练期间乳清蛋白补充改善大学生身体成分及肌肉力量的效果[A].第五届国际体育科学大会论文集(上)[C].广州:广东省体能协会,2024.

作者简介:刘欣源(2000—),女,汉族,甘肃陇南人,硕士在读,北京体育大学运动人体科学学院,研究方向:运动营养与运动表现;翁健春(1998—),男,汉族,江苏南京人,硕士在读,北京体育大学运动人体科学学院,研究方向:运动营养与运动表现;彭田慧(1988—),女,汉族,山东临沂人,硕士,北京体育大学运动医学与康复学院,研究方向:运动营养;张梦也(2001—),男,汉族,北京,硕士,北京品酷运动营养技术有限公司,研究方向:运动营养食品产业;*通讯作者:郭娴(1986—),女,汉族,四川德阳人,博士,副教授,北京体育大学运动人体科学学院,研究方向:运动营养与运动表现。