



# $\beta$ -丙氨酸补充对运动能力的影响

郑剑恒,张秋萍,吴霞红,褚羽丹

**摘要:**运动可引起体内能源物质的消耗并导致内环境的改变,合理使用营养补充剂可以维持生物体内的环境稳态,对高水平运动员竞技成绩的提高起着非常重要的作用。 $\beta$ -丙氨酸是目前受到国内外广泛关注的一种运动营养补剂,作为机体内合成肌肽的限速前体,补充后可增加骨骼肌内肌肽含量,从而增加肌肉对无氧酵解过程中 $H^+$ 堆积的缓冲能力,延缓运动疲劳,提高人体的运动能力和运动表现。本文综述了 $\beta$ -丙氨酸作为运动营养补充剂在人体内的代谢过程及其对不同类型运动影响效果的研究进展,并针对 $\beta$ -丙氨酸的剂量应用、补充方法、不良反应等进行了总结,为该营养补剂在运动领域的应用提供一定的理论依据。

**关键词:**  $\beta$ -丙氨酸;肌肽;运动能力

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2019)03-0099-06

DOI:10.12064/ssr.20190315

## Effect of $\beta$ -alanine Supplementation on Athletic Ability

ZHENG Jianheng, ZHANG Qiuping, WU Xiahong, CHU Yudan

(Shanghai Research Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Exercise can cause the consumption of energy substrates inside the body and lead to changes in the body's internal environment. Rational use of nutritional supplements can maintain the environmental stability inside the living organism. It also plays an important role in improving the sports performance of high-level athletes.  $\beta$ -alanine is a kind of sports nutrition supplement that draws extensive attention at home and abroad. As a rate-limiting precursor of synthetic carnosine in the body,  $\beta$ -alanine can increase the content of carnosine in skeletal muscle. As a result, it increases muscle's ability of buffering  $H^+$  accumulation during anaerobic glycolysis, delays sports fatigue, and improves athletes' sports ability and sports performance. This paper reviews the research progress of the effects of  $\beta$ -alanine as a sports nutrition supplement on body's metabolic process as well as specific sports. This paper also summarizes the dose application, compensation process, and untoward effect of  $\beta$ -alanine, providing a theoretical basis for the application of this nutritional supplement in the field of sports.

**Key Words:**  $\beta$ -alanine; carnosine; sports ability

所谓的“运动机能促进剂”种类繁多,但只有少数获得了科学研究的支持, $\beta$ -丙氨酸便是其中之一<sup>[1]</sup>。 $\beta$ -丙氨酸是一种主要由肝脏产生或来源于食物的非蛋白质氨基酸,在体内可与组氨酸一起由肌肽合成酶催化生成肌肽<sup>[2,3]</sup>。肌肽结构中含有咪唑基团,其酸碱性系数值(pKa=6.83)更加接近生理范围,更易在高强度运动中被迅速启动,发挥以下作用:(1)调节酸碱,防止肌肉酸化;(2)释放调节因子,促进

能量代谢;(3)促进肌浆网钙离子释放;(4)增强免疫力及抗氧化能力<sup>[4,5]</sup>。近年来,针对 $\beta$ -丙氨酸功能的研究逐渐增加,受到了国内外运动学者和营养学者的广泛关注。

## 1 $\beta$ -丙氨酸的体内代谢过程

$\beta$ -丙氨酸进入体内后半衰期一般为25 min,经30~40 min后在血浆中以原型达到浓度峰值,摄入3 h

收稿日期:2019-02-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81472099);上海市体育局重点备战项目攻坚保障研究课题(17J010 & 19J010)。

第一作者简介:郑剑恒,女,博士,助理研究员。主要研究方向:运动营养。E-mail:zhengjh524@sina.com。

作者单位:上海体育科学研究所,上海 200030。



后恢复到基础浓度<sup>[2]</sup>。相比组氨酸,β-丙氨酸的肌肽合成酶 Km 值(米氏常数)更低,作为体内肌肽的限速关键前体,其浓度直接限制体内肌肽的合成速率。大量研究表明,口服补充外源性β-丙氨酸可以显著增加人体内的肌肽浓度,从而起到改善运动机能的作用<sup>[6]</sup>。目前文献认为,通过每日 4~10 g,连续 4~10 周的β-丙氨酸补充后,机体内的肌肽含量可增加 40%~80%。肌肽在人体骨骼肌细胞内一般含量为 5~8 mmol/L,然而即使在基线肌肽含量水平较高的人群中(>12 mmol/L),合理补充外源性的β-丙氨酸仍可以提高肌肉内的肌肽含量,即β-丙氨酸的补充不存在“封顶效应”<sup>[7]</sup>。

血浆中的肌肽主要由肌肽酶进行降解,而骨骼肌中由于不存在该酶,肌肽则相对比较稳定<sup>[8]</sup>。Baguet 等发现,肌肽在肌细胞内合成后的分解较为缓慢,停止补充β-丙氨酸后,由外源补充引起的肌肽增加量一般以每周 2%~4% 的速率递减,9 周后恢复到基础值<sup>[9]</sup>。如果增加值超过原有肌肽水平的 55%,则恢复过程可达 15 周左右。

目前影响β-丙氨酸摄取、代谢、储存的机制研究较少,Stegen 等研究发现,进餐同时服用β-丙氨酸可使比目鱼肌中肌肽含量提高到 64%,而两餐之间补充则仅能够提高肌肽含量至 41%,表明进餐同时补充β-丙氨酸可促进肌肉内肌肽的合成,提示胰岛素可能在肌肽合成的关键环节发挥了作用<sup>[10]</sup>。Mannion 等比较了不同性别人群体内的肌肽含量,发现男性外侧肌中肌肽含量比女性高约 20%~25%,该现象与男女无氧能力的差异有一致性,同时,骨骼肌中的肌肽含量存在随年龄衰老而降低的趋势<sup>[11]</sup>。因此,有研究者推测不同性别、年龄之间的肌肽含量不同可能是由于雄激素在肌肽合成过程中发挥了一定的作用,并通过一系列动物实验予以印证,然而类似的人体实验数据尚未见报道<sup>[12,13]</sup>。

## 2 β-丙氨酸补充对不同类型运动的影响

### 2.1 β-丙氨酸对短时间高强度运动的影响

研究表明,无论受试者为职业运动员,或为未经过系统训练的普通人群,均可通过合理补充β-丙氨酸后提高短时间高强度运动的能力,且未经训练的受试者可能效果更为明显<sup>[14]</sup>。Hill 等首次进行了β-丙氨酸补充对于运动能力影响的研究,发现未经训练的受试者补充β-丙氨酸 4 周及 10 周后,肌肉内肌肽浓度分别增加了 58.8% 和 80.1%,以最大功率的 110% 强度进行自行车骑行测试时,最大输

出功率分别增加了 13% 和 16%,同时,受试者运动至疲劳的时间有所延长<sup>[15]</sup>。其后越来越多的研究设计了不同的运动方案以评价补充β-丙氨酸对不同类型运动能力的影响。Hobson 等针对 15 项研究进行了荟萃分析后发现,补充β-丙氨酸对持续时间为 60~240 s 的运动能力提高效果明显,而针对运动时间少于 60 s 的运动项目,发现补充β-丙氨酸后受试者运动能力并无显著影响<sup>[16]</sup>。Saunders 等在扩大了研究项目数量的基础上,纳入 40 项研究进行了系统性分析,认为β-丙氨酸对持续时间在 30 s 至 10 min 的运动均可能有促进作用<sup>[17]</sup>。目前文献报道中认为,尽管β-丙氨酸对运动能力的改善效果似乎较为微弱(约 0.2%~3%),然而其对于竞争激烈、分秒必争的高水平运动比赛中的运动员成绩提升仍有一定的意义<sup>[18]</sup>。

肌肽增进身体机能的主要机制为缓冲骨骼肌内产生的酸性物质,缓解骨骼肌的酸中毒现象。Harris 等认为肌肉中肌肽对 pH 的缓冲能力大约占总缓冲能力的 10% 左右,通过β-丙氨酸的补充,可使其缓冲肌肉内 pH 的能力增加至 15% 左右<sup>[2]</sup>。在时长为 30 s 至 10 min 的高强度运动过程中,以无氧酵解供能的方式占比例较大,通过补充β-丙氨酸可增加机体对无氧酵解过程中 H<sup>+</sup> 堆积的缓冲能力,从而缓解运动疲劳,提高无氧阈并改善肌肉力量;而导致短期冲刺时运动疲劳的主要原因为机体通过糖酵解途径产生 ATP 的能力下降,ADP 升高,此时酸性物质堆积并非主要影响因素,因此β-丙氨酸的补充对低于 30 s 的运动或此类型的运动能力测试结果并无明显影响。

### 2.2 β-丙氨酸对耐力型运动能力的影响

目前,补充β-丙氨酸对有氧耐力运动的有效性仍不确定,尤其是对于持续时间在 10 min 以上的运动,肌肽含量对各项目的影响报道结论不一。Bellinger 等针对自行车运动员进行试验表明,在周期为 28 d 的β-丙氨酸补充后(每日 6.4 g),10 km 自行车运动员的运动表现相比安慰剂组无显著性差异<sup>[19]</sup>。而 Chung 等对于游泳运动员进行 10 周β-丙氨酸的补充后(前 4 周负荷剂量为每日 4.8 g,后 6 周维持剂量为每日 3.2 g),评价各组运动表现也得到了类似的结论<sup>[20]</sup>。这可能是由于随着运动时间增加,机体代谢转向有氧代谢的途径增强,肌肉的酸中毒程度并不会进一步加重。然而也有观点认为,β-丙氨酸的补充可能益于高强度运动后的耐力性运动, Van Thienen R. 等研究显示,自行车运动员在补充β-丙氨酸 8 周后可提高 30 s 冲刺后的 110 min 的自行车计时成绩<sup>[21]</sup>。

### 2.3 $\beta$ -丙氨酸对运动机能的影响

补充 $\beta$ -丙氨酸对身体运动相关机能的影响一直存有研究争议,如有学者认为 $\beta$ -丙氨酸对肌肉力量或最大摄氧量无显著影响,但另有研究表明通过 $\beta$ -丙氨酸的补充可以提高无氧阈并明显缓解运动疲劳。一项针对运动员的研究发现,经过补充 $\beta$ -丙氨酸4周后,受试者与安慰剂组相比,下蹲力量的改善无显著性差异<sup>[22]</sup>;然而有针对足球训练营运动员的研究发现,虽然补充 $\beta$ -丙氨酸组与安慰剂组相比,60 s的Wingate无氧功测试无明显提高,但补充后运动员明显能够耐受更高的训练负荷量<sup>[23]</sup>,推测对于 $\beta$ -丙氨酸增进机能的作用效果可能还来源于肌肽含量增加了I型和II型肌纤维中的收缩蛋白对于 $\text{Ca}^{2+}$ 的敏感性,以及减少活性氧积累对糖代谢的改善等作用,但具体影响机制仍需进一步探索。不同的研究设计和受试人群可能导致了研究之间的结果存在一定的差异,尽管如此, $\beta$ -丙氨酸的补充对运动机能的影响效果,大多数学者是有正面评价的<sup>[14]</sup>。

### 3 $\beta$ -丙氨酸补充对其他生理指标的影响

近年来研究发现,肌肽可作为有效的神经保护剂,缓解机体神经肌肉疲劳。神经肌肉疲劳是由于工作肌随时间的增加而电活动增加所致,肌肽则能够通过影响金属锌离子和铜离子对氨基酸受体和突触的作用,间接调节神经元的兴奋性,从而调节自主神经系统相关的生理机能<sup>[24]</sup>。Woessner等以自行车测力计测量30名男性补充 $\beta$ -丙氨酸28 d后的心跳稳定阈值强度(The Physical Working Capacity at Heart Rate Threshold, PWCHRT),以考察其对神经肌肉疲劳的影响<sup>[25]</sup>。研究发现 $\beta$ -丙氨酸补充组的PWCHRT值增加了24.2 W,而安慰剂组则增加仅11.2 W,说明 $\beta$ -丙氨酸补充对神经肌肉疲劳的延缓作用具有显著性意义。另一项研究中,Hoffman等以18名军人作为受试对象,以每日6 g共30 d的方案进行 $\beta$ -丙氨酸补充,采用核磁共振测定了补充前后受试者肌肉内和脑内的肌肽含量,结果发现肌肉中的肌肽含量有明显提高,与其他文献报道一致,而脑内肌肽含量并无显著改变<sup>[26]</sup>。然而值得关注的是,补充组的军人在运动测试过程中回答问题的正确率较对照组显著增加,研究者推测 $\beta$ -丙氨酸补充可提高神经认知能力,然而实验结果中补充组受试者脑内的肌肽含量变化较小,一方面可能由于核磁共振的灵敏度不足,而一方面则可能为肌肽进入脑后迅速由肌肽酶分解成了 $\beta$ -丙氨酸及组氨酸,对于 $\beta$ -丙氨酸对神经系统的影响和机制仍有待进一步的研究<sup>[27]</sup>。

肌肽含量的增加可通过降低氧化应激反应,延缓运动疲劳的研究也受到了学者们的广泛关注<sup>[28]</sup>。肌肽的侧链上含有组氨酸残基,其可作为 $\text{H}^+$ 的受体发挥清除自由基、过氧化氢以及单线态氧的作用,另有实验证明肌肽的抗氧化特性还与咪唑环和肽键有关<sup>[29,30]</sup>(见图1)。然而,目前针对 $\beta$ -丙氨酸补充后考察氧化应激指标的实验证据仍较少,且多显示无显著性差异。Smith等在周期为28 d,每天补充4.8 g缓释 $\beta$ -丙氨酸后,发现女性受试者在40 min训练后的抗氧化指标变化与安慰剂组相比并无显著性差异<sup>[31]</sup>,其另一项针对男性受试者的研究也得到了类似的结论<sup>[32]</sup>。尽管如此,他们在研究过程中发现补充 $\beta$ -丙氨酸后机体的脂质过氧化水平明显降低,这说明仅仅考察经典血液抗氧化指标评价补充效果可能过于片面。

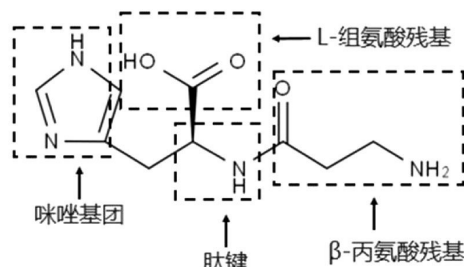


图1 肌肽分子结构中各基团示意图

Figure 1 Schematic Diagram of Each Perssad in Carnosine Molecular Structure

此外,有研究者认为,补充 $\beta$ -丙氨酸对运动机能的促进作用还可能来源于肌肽对糖代谢的影响。Tsio等研究证实,增加肌肽可降低血糖浓度,改善应激压力下的糖代谢紊乱,改善糖耐量和肝糖原、肌糖原下降的现象<sup>[33]</sup>。Lee等在实验中也证实了这一点,连续4周向糖尿病小鼠提供含L-肌肽的饮用水后,发现其血清胰岛素水平上升,血清胰高血糖素和葡萄糖水平下降<sup>[34]</sup>。有推测认为肌肽对于糖代谢的作用机制可能与肌肽降低了机体内的糖皮质激素水平,上调了胰岛素受体和糖皮质激素受体表达,从而起到调节糖代谢关键酶的表达,提高葡萄糖的转运能力有关。

### 4 $\beta$ -丙氨酸补充方法和不良反应

#### 4.1 $\beta$ -丙氨酸的补充方法

目前针对 $\beta$ -丙氨酸补充的研究方案均采取长时间持续补充的方式,以维持肌细胞中的肌肽浓度在较高水平。Hill等研究认为, $\beta$ -丙氨酸补充的一般规律是每天补充4~6 g,2周后可使股外侧肌中肌肽水平增加20%~30%,4周后增加40%~60%,10周则



能够使增量达到 80%<sup>[15]</sup>。另有几项实验方案发现,以每日补充 β-丙氨酸 2~4 g 的低剂量方案,8 周左右可使肌肉内肌肽增加不高于 50%<sup>[35]</sup>,而以每日 4.8~6.4 g 高剂量补充 β-丙氨酸,肌肉内的肌肽含量则可分别提高 60% 和 80%<sup>[36]</sup>。Hoffman 等人对多项研究中 β-丙氨酸总补充量与受试者肌肉中测得的肌肽总增加量进行了综合分析(见图 2)<sup>[7]</sup>。补充 β-丙氨酸对于肌肽合成效果的个体差异较大,因此 Hoffman 等研究认为补充 β-丙氨酸剂量的使用应考虑个体体重,建议每日补充摄入量 50~80 mg/kg<sup>[23]</sup>。然而 Stautemas 等通过给予两组受试者 β-丙氨酸分别为剂量固定和根据体重计算剂量的方案后发现,根据体重计算补充剂量组的受试者血液中药-时曲线下总面积(Area Under Curve, AUC)变异程度并不低于剂量固定组<sup>[23]</sup>。Stellingwerff 等研究认为,在一定时间内,体内肌肽的增加量与 β-丙氨酸的总消耗时间呈剂量反映关系,而不依赖于肌肉类型或每日补充量<sup>[38]</sup>。因此,对于 β-丙氨酸的补充效果,还需考虑具体影响因素,应在使用中进一步观察。

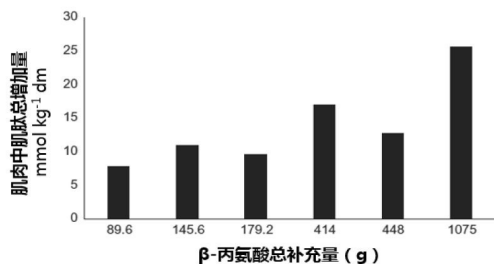


图 2 β-丙氨酸总补充量与肌肉中肌肽总增加量的关系

Figure 2 Relationship Between Total Amount of β-Alanine Supplementation and Total Increase of Carnosine Amount in Muscle

近期国际奥委会对于高水平运动员膳食补充的共识声明中也对 β-丙氨酸的使用方案进行了官方推荐,认为运动员对 β-丙氨酸的日均摄入量上限应不高于 65 mg/kg,根据 β-丙氨酸的代谢动力学曲线,合适的剂量应以每 3~4 h 摄入 0.8~1.6 g 为宜,而补充时间则建议在 10~12 周左右<sup>[39]</sup>。另外,对于不同运动专项的补充方案仍需更多的研究证据予以支撑。

通过膳食也可补充 β-丙氨酸以提高身体内肌肽的含量。研究发现,杂食者体内肌肽含量明显高于素食者。对于素食者来说,通过肝脏中的尿嘧啶降解是体内 β-丙氨酸的唯一来源,体外实验表明,人体内尿嘧啶降解的速率较慢,且生物利用度十分有限,β-丙氨酸的产生远不足以合成浓度水平较高的肌肽。Harris 等研究认为,通过摄入 200 g 左右的鸡胸肉

可补充相当于 0.8 g 剂量的 β-丙氨酸,若需达到推荐剂量(1.6~6.4 g),则运动员需每日摄入 400~1 600 g 鸡胸肉<sup>[2]</sup>。目前,相较膳食摄入,直接补充 β-丙氨酸制剂更加直接有效。

## 4.2 β-丙氨酸补充的不良反应

高剂量单次补充 β-丙氨酸可能导致皮肤刺痛、面红耳赤等短暂而轻微的副作用,该反应对人体无害,约 1 h 左右即可消失<sup>[40]</sup>。为了避免这种副作用,文献中推荐单次服用 β-丙氨酸纯品应不超过 0.8 g,另有报道称 β-丙氨酸与含组氨酸较高的食物(如鸡汤等)同时摄入可能对该副作用有一定的缓解作用。高剂量单次补充 β-丙氨酸纯品时也会导致人体内 pH 值发生迅速变化,尿液中 β-丙氨酸排泄率增高,使得补充效果不理想<sup>[38]</sup>。

近年来,研究及实际应用中多使用 β-丙氨酸的缓释剂型,该剂型可基本消除皮肤刺痛副作用的发生<sup>[41]</sup>。研究发现缓释剂型与普通剂型相比,服用后两者在血液中 β-丙氨酸含量的 AUC 并无显著性差异,但缓释剂型服用后血液内最高浓度则降低为普通剂型的 33%~54%,而服用 3 h 后缓释剂型在血液内的 β-丙氨酸浓度仍可维持在普通剂型同时期的 3~5 倍<sup>[42]</sup>。文献报道血液中 β-丙氨酸的浓度高于 75~85 μmol/L 时可发生皮肤刺痛副作用,普通制剂在服用后 15 min 左右血液浓度即攀升至 82 μmol/L,而缓释剂型在服用后 1 h 内一直维持在 60~75 μmol/L 左右,这也直观解释了 β-丙氨酸缓释剂型消除不良反应发生的原因<sup>[42]</sup>。同时,缓释制剂增加了其在体循环内的滞留时间,并可降低尿排泄量,从而提高了 β-丙氨酸的利用度,增加了体内肌肽的合成率。

另外,研究已证实 β-丙氨酸与牛磺酸在细胞摄取时具有相同的转运载体,因此,血浆中 β-丙氨酸浓度升高可能对牛磺酸的摄取产生竞争抑制作用<sup>[43]</sup>。Kim 等研究表明,由于牛磺酸具有细胞内渗透调节作用,可造成肌细胞中的牛磺酸与肌肽浓度呈中等程度的负相关<sup>[44]</sup>,因此,肌肽浓度的升高容易引起牛磺酸浓度降低<sup>[45,46]</sup>。牛磺酸是机体内一种典型的抗氧化氨基酸,有研究发现,在饮水中加入 3% 的 β-丙氨酸后,肝脏、心脏、脑组织等均表现出了不同程度的牛磺酸水平下降。然而,研究认为,尽管 β-丙氨酸的补充造成了机体的牛磺酸水平在一定程度上的下降,但细胞实验中并未发现脂质过氧化或氧化应激水平上升的现象<sup>[47]</sup>,并建议在 β-丙氨酸的补充过程中可对牛磺酸水平进行检测。目前 β-丙氨酸尚无长期服用的不良反应报道。



## 5 小结

$\beta$ -丙氨酸作为一种运动营养补剂,合理补充后可明显增加肌肉中的肌肽含量,从而促进运动机能。 $\beta$ -丙氨酸针对不同类型的运动作用效果不同,除了缓冲运动诱发的  $H^+$  增加外,其对运动机能的改善还可能通过神经调节、抗氧化、影响糖代谢以及增加骨骼肌对  $Ca^{2+}$  的敏感性等机制发挥作用。 $\beta$ -丙氨酸的补充方法以及其对运动机能的影响评价尚具不确定性,有待进一步研究。全面地认识  $\beta$ -丙氨酸作为运动营养补剂的作用将在运动领域具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Peeling P., Binnie M. J., Goods P. S. R., et al. Evidence-Based Supplements for the Enhancement of Athletic Performance[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2018, 28(2):178-187.
- [2] Harris R. C., Tallon M. J., Dunnett M., et al. The absorption of orally supplied  $\beta$ -alanine and its effect on muscle carnosine synthesis in human vastus lateralis[J]. *Amino Acids*, 2006, 30(3):279-289.
- [3] Dunnett M., Harris R. C. Influence of oral beta-alanine and L-histidine supplementation on the carnosine content of the gluteus medius.[J]. *Equine Vet J Suppl*, 2010, 31(S30):499-504.
- [4] Blancquaert L., Everaert I., Derave W. Beta-alanine supplementation, muscle carnosine and exercise performance [J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2015, 18(1):63-70.
- [5] Black M. I., Jones A. M., Morgan P. T., et al. The Effects of  $\beta$ -Alanine Supplementation on Muscle pH and the Power-Duration Relationship during High-Intensity Exercise[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9:111.
- [6] Trexler E. T., Smith-Ryan A. E., Stout J. R., et al. International society of sports nutrition position stand: Beta-Alanine[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 12,1(2015-07-15), 2015,12(1):30.
- [7] Hoffman J. R., Varanoske A., Stout J. R. Effects of beta-Alanine Supplementation on Carnosine Elevation and Physiological Performance[J]. *Adv Food Nutr Res*, 2018, 84:183-206.
- [8] Boldyrev A. A., Giancarlo A., Wim D. Physiology and pathophysiology of carnosine[J]. *Physiological Reviews*, 2013, 93(4):1803-1845.
- [9] Audrey B., Harmen R., Andries P., et al. Carnosine loading and washout in human skeletal muscles[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2009, 106(3):837-842.
- [10] Sanne S., Laura B., Inge E., et al. Meal and beta-alanine coingestion enhances muscle carnosine loading[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2013, 45(8):1478-1485.
- [11] Mannion A. F., Jakeman P. M., Dunnett M., et al. Carnosine and anserine concentrations in the quadriceps femoris muscle of healthy humans[J]. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 1992, 64(1):47-50.
- [12] Johnson P., Hammer J. L. Histidine dipeptide levels in ageing and hypertensive rat skeletal and cardiac muscles [J]. *Comp Biochem Physiol. B.*, 1992, 103(4):981-984.
- [13] Derave W., Everaert I., Beeckman S., et al. Muscle carnosine metabolism and beta-alanine supplementation in relation to exercise and training[J]. *Sports Med.*, 2010, 40(3):247-263.
- [14] Berti Z. P., Donner A. F., Guerini De S. C. Effects of beta-alanine supplementation on performance and muscle fatigue in athletes and non-athletes of different sports: a systematic review[J]. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 2017, 57(9):1132.
- [15] Hill C. A., Harris R. C., Kim H. J., et al. Influence of beta-alanine supplementation on skeletal muscle carnosine concentrations and high intensity cycling capacity [J]. *Amino Acids*, 2007, 32(2):225-233.
- [16] Hobson R. M., Saunders B., Ball G., et al. Effects of  $\beta$ -alanine supplementation on exercise performance: a meta-analysis[J]. *Amino Acids*, 2012, 43(1):25-37.
- [17] Saunders B., Elliott-Sale K., Artioli G. G., et al.  $\beta$ -alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: a systematic review and meta-analysis[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2017, 51(8):658-669.
- [18] Maughan R. J., Burke L. M., Dvorak J., et al. IOC Consensus Statement: Dietary Supplements and the High-Performance Athlete[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2018, 28(2):104-125.
- [19] Bellinger P. M., Minahan C. L. The effect of -alanine supplementation on cycling time trials of different length [J]. *European Journal of Sport Science*, 2015, 16(7):829-836.
- [20] Weiliang C., Greg S., Anderson M. E., et al. Effect of 10 week beta-alanine supplementation on competition and training performance in elite swimmers[J]. *Nutrients*, 2012, 4(10):1441-1453.
- [21] Van T. R., Van P. K., Vanden E. B., et al. Beta-alanine improves sprint performance in endurance cycling. [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2009, 41(4):898-903.
- [22] Hoffman J., Ratamess N. A., Ross R., et al. Beta-alanine and the hormonal response to exercise[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2008, 29(12):952-958.
- [23] Hoffman J. R., Ratamess N. A., Faigenbaum A. D., et al. Short-duration -alanine supplementation increases train-



- ing volume and reduces subjective feelings of fatigue in college football players[J]. *Nutrition Research*, 2008, 28(1):31-35.
- [24] Boldyrev A. A., Stvolinsky S. L., Fedorova T. N., et al. Carnosine as a natural antioxidant and geroprotector: from molecular mechanisms to clinical trials.[J]. *Rejuvenation Res*, 2010, 13(2-3):156-158.
- [25] Woessner M. N. The effects of 28 days of beta-alanine supplementation on the physical working capacity at heart rate threshold (PWC)[J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2013.
- [26] Hoffman J. R., Landau G., Stout J. R., et al.  $\beta$ -Alanine ingestion increases muscle carnosine content and combat specific performance in soldiers[J]. *Amino Acids*, 2015, 47(3):627-636.
- [27] Hoffman J. R., Stout J. R., Harris R. C., et al.  $\beta$ -Alanine supplementation and military performance[J]. *Amino Acids*, 2015,47(12):2463-2474.
- [28] Prokopieva V. D., Yarygina E. G., Bokhan N. A., et al. Use of Carnosine for Oxidative Stress Reduction in Different Pathologies[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, (4):2939087.
- [29] Kohen R., Yamamoto Y., Cundy K. C., et al. Antioxidant activity of carnosine, homocarnosine, and anserine present in muscle and brain[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1988, 85(9):3175-3179.
- [30] 庞坤,张安世.肌肽、丙氨酸和组氨酸抗氧化性的比较研究[J].*生物资源*,2011,33(4):33-35.
- [31] Smith-Ryan A. E., Fukuda D. H., Stout J. R., et al. The influence of  $\beta$ -alanine supplementation on markers of exercise-induced oxidative stress[J]. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 2014, 39(1):38-46.
- [32] Smith A. E., Stout J. R., Kendall K. L., et al. Exercise-induced oxidative stress: the effects of  $\beta$ -alanine supplementation in women[J]. *Amino Acids*, 2012, 43(1):77-90.
- [33] Tsoi B., He R. R., Yang D. H., et al. Carnosine ameliorates stress-induced glucose metabolism disorder in restrained mice[J]. *Journal of Pharmacological Sciences*, 2011, 117(4):223-229.
- [34] Lee Y. T., Hsu C. C., Lin M. H., et al. Histidine and carnosine delay diabetic deterioration in mice and protect human low density lipoprotein against oxidation and glycation[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2005, 513(1):145-150.
- [35] Harris R. C., Marlin D. J., Dunnett M., et al. Muscle buffering capacity and dipeptide content in the thoroughbred horse, greyhound dog and man[J]. *Comparative Biochemistry & Physiology A Comparative Physiology*, 1990, 97(2):249-251.
- [36] Culbertson J. Y., Kreider R. B., Mike G., et al. Effects of beta-alanine on muscle carnosine and exercise performance: a review of the current literature[J]. *Nutrients*, 2010, 2(1):75-98.
- [37] Stauteamas J., Everaert I., Lefever F. B. D., et al. Pharmacokinetics of  $\beta$ -Alanine Using Different Dosing Strategies[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2018, 5:70.
- [38] Stellingwerff T., Egger A., Buehler T., et al. Effect of two  $\beta$ -alanine dosing protocols on muscle carnosine synthesis and washout[J]. *Amino Acids*, 2012, 42(6):2461-2472.
- [39] Nassis G. P., Sporer B., Stathis C. G.  $\beta$ -alanine efficacy for sports performance improvement: from science to practice[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2016, 51(8): 626-627.
- [40] Trexler E. T., Smith-Ryan A. E., Stout J. R., et al. International society of sports nutrition position stand: Beta-Alanine[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2015, 12(1):30.
- [41] Jacques D., Maurice B., Jacques V., et al. Effect of slow-release  $\beta$ -alanine tablets on absorption kinetics and paresthesia[J]. *Amino Acids*, 2013, 45(4):1015.
- [42] Décombaz J., Beaumont M., Vuichoud J., et al. Effect of slow-release  $\beta$ -alanine tablets on absorption kinetics and paresthesia[J]. *Amino Acids*, 2012, 43(1):67-76.
- [43] Horvath D. M., Murphy R. M., Mollica J. P., et al. The effect of taurine and  $\beta$ -alanine supplementation on taurine transporter protein and fatigue resistance in skeletal muscle from mdx mice[J]. *Amino Acids*, 2016, 48(11): 2635-2645.
- [44] Kim H. J. Comparison of the carnosine and taurine contents of vastus lateralis of elderly Korean males, with impaired glucose tolerance, and young elite Korean swimmers[J]. *Amino Acids*, 2009,36(2):359-363.
- [45] Cuisinier C., Welle J. M. D., Verbeeck R. K., et al. Role of taurine in osmoregulation during endurance exercise [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2002, 87(6):489-495.
- [46] Giannini A. G., Gualano B., Smith A., et al. The Role of  $\beta$ -alanine Supplementation on Muscle Carnosine and Exercise Performance[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2010:1162-1173.
- [47] Panıldar-Karpuzoglu H., Dogru-Abbasoglu S., Balkan J., et al. Decreases in taurine levels induced by  $\beta$ -alanine treatment did not affect the susceptibility of tissues to lipid peroxidation[J]. *Amino Acids*, 2007, 32(1):115-119.

(责任编辑:刘畅)