

牛磺酸对运动能力影响的研究进展

刘和军*

(咸阳师范学院体育学院, 咸阳 712000)

摘 要: 牛磺酸是一种含硫条件性必需氨基酸, 是人和动物机体内不可缺少的一种生理活性物质。牛磺酸对于机体的运动能力有着重要的影响, 目前已被开发成颇具潜力的抗运动性疲劳的营养补充剂, 同时在医药、卫生、保健等领域里也具有广泛商业价值和社会价值。本文在介绍牛磺酸的代谢过程及生理作用的基础上, 重点对目前国内外关于补充牛磺酸与提高人体的运动能力的关系及其作用机制进行总结, 梳理牛磺酸在抗运动性疲劳、改善运动耐力、促进骨骼肌的收缩特性、保护中枢神经系统和有助于运动恢复等方面具有的重要作用, 以期牛磺酸未来的应用提供参考依据。

关键词: 牛磺酸; 运动能力; 抗运动性疲劳; 营养补充剂

Research progress of taurine's influence on athletic ability

LIU He-Jun*

(College of Physical Education, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China)

ABSTRACT: Taurine is a sulfur-containing conditionally essential amino acid, which is an indispensable physiological active substance in human and animal body. Taurine has an important influence on the body's exercise ability. At present, taurine has been developed into a potential nutritional supplement for anti-exercise fatigue. At the same time, taurine also has a wide range of commercial value and social value in the fields of medicine, health care and so on. On the basis of introducing the metabolic process and physiological function of taurine, this paper mainly summarized the relationship between taurine supplement and improving human exercise ability at home and abroad and its mechanism, and combed important role of taurine in anti-exercise fatigue, improving exercise endurance, promoting the contractile characteristics of skeletal muscles, protecting central nervous system and helping exercise recovery, so as to provide references for the future application of taurine.

KEY WORDS: taurine; athletic ability; anti-exercise fatigue; nutritional supplement

0 引 言

牛磺酸(taurine, Tau)是 β -丙氨酸的磺酸类似物, 化学名称为 2-氨基乙磺酸, 分子结构为 $\text{H}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{SO}_3\text{H}$, 是 1827 年首次从牛胆汁中分离出来的一种含硫的非蛋白氨

基酸^[1]。牛磺酸不参与蛋白质代谢, 曾被认为是无功能代谢物。1989 年, GAULL^[2]证实, 牛磺酸是人体的条件必需氨基酸, 对生长发育、运动等方面均有影响。自此国内外对牛磺酸进行了广泛而深入的研究, 发现其对机体具有重要的生理、药理和营养功能, 在人体运动中发挥着极其

基金项目: 咸阳师范学院 2019 年度专项科研基金项目(XSYK19015)

Fund: Supported by the Special Scientific Research Fund of Xianyang Normal University in 2019 (XSYK19015)

*通信作者: 刘和军, 主要研究方向为体育营养。E-mail: feldnewwor@163.com

*Corresponding author: LIU He-Jun, College of Physical Education, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China. E-mail: feldnewwor@163.com

重要的作用^[3]。牛磺酸不仅参与调节机体的物质代谢和能量代谢,还具有清除自由基、调节渗透压、抗氧化功能,保护细胞膜以及维持细胞内钙稳态,减轻钙超载程度,从而保护细胞内骨架结构蛋白,是一种安全、有效的运动营养补剂^[4]。本文在介绍牛磺酸的代谢过程与生理作用的基础上,对牛磺酸提高运动能力的相关研究及机理过程进行了综述,同时对牛磺酸的安全性等方面研究情况进行了概括,以期对牛磺酸产品的进一步研究开发奠定理论基础。

1 牛磺酸的分布、代谢过程与生理作用

牛磺酸的分子结构上含有磺酸基,使得牛磺酸不能够像其他氨基酸一样参与蛋白质的合成,一般以游离形式存在于人及动物的组织细胞和体液中,尤其是在神经元、骨骼肌、腺体等可兴奋组织中浓度更高,而植物和细菌几乎不含牛磺酸。牛磺酸也存在于非兴奋性组织,如血液、肝脏、肾脏、脂肪组织、胰腺等。

牛磺酸是通过一种牛磺酸转运体(taurine transporter, TAUT)被组织吸收的,TAUT 属于 Na^+/Cl^- 依赖的神经递质转运体家族。用于牛磺酸合成的限速酶不存在于骨骼肌中,因此在骨骼肌中牛磺酸水平的维持很大程度上依赖于通过 TAUT 从细胞外摄取^[5]。

人体获取牛磺酸的途径主要有外源性和内源性 2 种方式^[6],外源性主要是从膳食中摄取,适当摄取海洋鱼类、贝类可获取丰富的牛磺酸;内源性牛磺酸的获得是通过人体的自身合成,由半胱氨酸、甲硫氨酸等含硫氨基酸经过一系列酶促反应转化所得。适当补充外源性牛磺酸则可相应减少体内牛磺酸的生物合成,使更多的含硫氨基酸参与蛋白质的合成,相应地提高蛋白质质量,进而提高蛋白质利用率^[7]。牛磺酸在人体内的含量是相对稳定的,主要由尿排出,肾脏组织根据每日膳食摄入的牛磺酸含量对其进行合理的调节,维持体内物质的平衡^[8]。

牛磺酸与心血管系统关系非常密切,具有改善心肌结构重塑,抑制血管平滑肌细胞迁移和增殖、抗心肌纤维化、保护血管内皮细胞和心肌缺血/再灌注损伤,降低心力衰竭等发病率等作用^[9-11]。牛磺酸可以促进视网膜的分化和发育,改善细胞生长条件,维持视网膜正常功能,并延长视网膜细胞生存期^[12-13]。研究表明,牛磺酸与大脑神经细胞的生长发育程度呈明显的剂量-反应关系,说明其在神经细胞的增殖和树突的分化方面有促进作用^[14]。无论是作为神经递质还是营养因子,牛磺酸都能够促进神经系统的发育,对神经系统有重要的保护作用,可以减轻不良应激造成的中枢神经系统损伤^[15]。此外体外实验发现,牛磺酸可以显著促进淋巴细胞的增殖,呈现一定的剂量-反应关系^[16-21]。

2 牛磺酸对运动能力的影响

2.1 牛磺酸抗运动性疲劳的作用

运动性疲劳是指由于运动过度引起的机体运动能力下降,不能维持原有的运动强度。运动性疲劳,在人体中可以分为 2 大类,包括躯体性疲劳和心理性疲劳,它的发生机制主要有自由基损伤说、代谢失调说和内环境稳态失调说等^[22]。如果不重视运动员的运动性疲劳,无法及时有效地消除疲劳,不仅会影响运动员竞技能力和运动成绩的提高,长此以往,还可能诱发运动性损伤和疾病,进而影响运动员身心健康。因此,要采取有效措施和方法及时消除运动性疲劳。

牛磺酸抗运动性疲劳的机制并未完全阐明,但认可度较高的机制主要是:牛磺酸可以通过保护细胞膜,调节渗透压,清除自由基,双向调节 Ca^{2+} 的跨膜转运,参与糖代谢和氨基酸等物质代谢等生物作用机制^[7-8,11]。

2.1.1 抑制自由基的产生

牛磺酸可抑制自由基的产生,保护组织免受氧化剂和自由基的攻击,减少脂质过氧化反应,既是一种细胞保护剂,也可抵抗疲劳,提高运动能力。魏源等^[23]报道,无训练经历的实验大鼠力竭运动前补充牛磺酸,在进行运动后,其红肌线粒体自由基代谢明显受到抑制。表现为脂质过氧化的代谢产物丙二醛(malondialdehyde, MDA)降低,超氧化物歧化酶 Orgotein (superoxide dismutase, SOD)活性增强和还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)含量增加。也有研究证实^[24],牛磺酸可以明显提高小鼠运动后肝、脑匀浆中 SOD 的活性,降低小鼠运动后组织中的 MDA 含量、降低疲劳程度。TAPPAZ 等^[25]认为牛磺酸前体-hypotaurine 可作为运动后羟基自由基($\text{OH}\cdot$)的清除剂并抑制脂质过氧化,从而阻止铁(Fe^{2+})自氧化,促进高细胞毒性物质的转化。

2.1.2 对细胞膜的保护作用和渗透压的调节作用

生物膜是发生脂质氧化的主要部位,其最终产物 MAD 可交联蛋白质和磷脂上的氨基,导致细胞变形,影响细胞膜的理化性质,使其功能受到抑制。然而牛磺酸是细胞膜保护剂,可促进运动后疲劳的消除^[8]。GAULL 等^[2]认为,牛磺酸的保护作用,可能是防止细胞膜的“渗漏”以及离子和水的转移所造成的细胞破裂及死亡。

有研究表明,牛磺酸在海洋无脊椎动物、两栖动物和哺乳类动物渗透压的调节中起相当重要的作用^[26]。BAR 等^[27]的实验结果表明,牛磺酸能调节大鼠和小鼠的骨骼肌、大脑和血小板的渗透压。

2.1.3 调节物质代谢

牛磺酸可以参与机体对糖代谢和氨基酸的调控,补充牛磺酸能够降低机体对血糖的利用。因为血糖的含量与中枢疲劳有很大的关系,当血糖量过低会引起中枢紊乱,发生疲劳。同时,可促进肌细胞对糖和氨基酸的摄取和利

用, 促进葡萄糖转运蛋白 4(glucose transporter type 4, GLUT4)向细胞膜的转位提高骨骼肌对葡萄糖的摄取, 从而促进机体糖原的合成, 减少运动性疲劳的发生。牛磺酸可明显提高运动大鼠血浆支链氨基酸的浓度, 芳香族氨基酸浓度基本保持不变, 从而使芳香族氨基酸与支链氨基酸相比的比值变小, 干扰中枢神经系统中多巴胺及肾上腺素神经传导功能, 以使中枢神经系统保持兴奋状态, 延缓大脑疲劳和减轻疲劳的程度^[28-29]。

2.2 牛磺酸对运动能力的促进作用

2.2.1 改善运动耐力

牛磺酸对于人体的耐力有着促进作用, 通过口服不同剂量的牛磺酸(1~6 g), 可以明显改善人类的耐力表现, 增强机体抵御疲劳的能力^[30-31]。相反敲除全身 *TAUT* 基因的小鼠, 其组织中的牛磺酸水平明显较低, 对运动表现出严重的不耐受特征^[32]。

2.2.2 对骨骼肌的作用

正常含量的牛磺酸可以维持骨骼肌的正常功能。在骨骼肌中, 牛磺酸可以促进骨骼肌的收缩特性, 可以促进 Ca^{2+} 依赖性兴奋-收缩过程, 有助于调节细胞体积, 并帮助细胞抵抗氧化应激反应^[33]。王翔等^[34]研究认为牛磺酸提高肌纤维肌 Ca^{2+} -ATP 酶活性可能是牛磺酸保持肌肉收缩张力的机制之一。

运动后骨骼肌中的牛磺酸含量明显下降, 补充牛磺酸能够维持骨骼肌牛磺酸浓度并上调对抗疲劳的生理耐力, 减缓运动所致的肌肉疲劳^[35-36]。GOODMAN 等^[37]通过饮水给雄性 SD 大鼠补充牛磺酸, 研究牛磺酸对骨骼肌的影响及抵抗疲劳的作用。研究发现牛磺酸可显著增强趾长伸肌的收缩力, 增加肌肉钙素蛋白浓度, 降低 F2-异前列腺素的含量, 在一定程度上保护骨骼肌抵御高频率损伤。

赵鹏等^[38]发现力竭运动前服用牛磺酸可增大大鼠清除自由基能力, 减少氧化应激产物的生成, 保护 Na^+/K^+ -ATP 酶活性, 有利于维持细胞内外环境的稳定, 从而预防骨骼肌的损伤。

2.3 保护中枢神经系统作用

长时间中等强度的运动产生的疲劳以中枢神经系统出现的保护性抑制为主。中枢神经系统中的神经递质参与了这种疲劳的发生, 牛磺酸本身也是一种中枢抑制性神经递质^[39]。刘亚等^[40]发现经过力竭游泳, 与对照组相比, 灌胃牛磺酸的 3 个剂量组小鼠脑中的单胺类神经递质多巴胺(dopamine, DA)和 5-羟色胺的含量都极显著增加, 结果显示牛磺酸具有一定的抵抗中枢神经系统疲劳的作用, 并且其抗中枢神经系统疲劳的作用在某个范围内有一定的剂量效应关系。ROSSATO 等^[41]发现牛磺酸对氧化应激诱导下人神经母细胞瘤的神经保护作用。李良鸣等^[42]研究发现,

补充牛磺酸显著延长大鼠运动至力竭的时间。牛磺酸在特定浓度下的神经保护作用, 可以调节大脑活动, 维持神经膜的完整性并控制钙稳态, 从而通过防止氧化应激来防止细胞死亡^[43]。

2.4 参与脂肪组织代谢

鸢尾素(irisin)是 2012 年发现的一类棕色脂肪以及转化脂肪类型的新激素, 在体育锻炼的刺激下能够提高脂肪组织的生热能力。GABRIELA 等^[44]通过双盲实验发现, 高强度体育锻炼与牛磺酸补充剂相关联, 可使肥胖成年女性锻炼后血浆中鸢尾素浓度增加, 从而优化肥胖个体的能量代谢, 且高强度有氧训练 12 或 16 周后身体成分发生变化, 这或许同补充牛磺酸可以增加运动后肥胖女性皮下白色脂肪组织中的线粒体活性和脂肪酸氧化基因表达有关。

WEN 等^[45]发现牛磺酸缺乏会引起脂肪细胞代谢的不平衡。正常饮食喂养的牛磺酸缺乏模型小鼠表现出更少的腹部脂肪。尽管牛磺酸缺乏时血清胰岛素水平降低, 但腹腔注射葡萄糖后血糖处理率增加, 表明脂肪组织的能量代谢降低。此外, 在运动中观察到血糖处理率增加, 血乳酸水平显著增加了 3 倍以上, 但野生型小鼠没有改变。此现象表明牛磺酸会影响运动过程中脂肪酸和葡萄糖代谢之间的竞争关系。

2.5 牛磺酸与运动恢复

2.5.1 牛磺酸与骨骼肌恢复

运动导致的肌肉损伤(exercise-induced muscle damage, EIMD)是运动训练中较为常见的现象, EIMD 的临床症状主要表现为骨骼肌收缩能力下降、肌肉僵硬和酸痛肿胀。郭刚等^[46]研究了牛磺酸对大鼠离心运动后骨骼肌微损伤的药物干预作用和机制, 结果发现补充牛磺酸对抑制 EIMD 的发生、减轻 EIMD 的程度具有明显的效果, 对离心运动后骨骼肌微损伤有良好的保护作用。MCLEAY 等^[47]发现, 在偏心运动引起的肌肉损伤后, 每天服用 2 次牛磺酸, 并维持 72 h, 可能有助于改善肱二头肌的功能恢复。

DAWSON 等^[48]报道补充牛磺酸可显著增加剧烈运动大鼠的血浆中谷氨酸盐水平, 并阻止运动导致的甲硫氨酸水平下降, 证实了牛磺酸对运动损伤有显著的保护作用。

2.5.2 牛磺酸与运动后心率恢复

运动后心率的恢复水平与运动水平有着密切联系。有学者通过人体自由基代谢水平与运动能力关系的实验得出, 牛磺酸能明显促进运动后心率恢复^[49]。急性运动后牛磺酸组 3 min 恢复心率, 补充牛磺酸后比补充牛磺酸前心率明显降低, 说明牛磺酸与提高运动能力与心脏功能的改善有一定关系, 对改善心率恢复有积极作用, 对提高运动水平有深远意义^[43]。

2.5.3 牛磺酸与运动后红细胞的恢复

红细胞是血液基本功能的重要组成, 在负荷长时间

的训练或剧烈运动过程中会产生大量的 MDA 等不饱和活性醛酮类物质和活性氧,会造成红细胞膜结构的损伤。BERTOLONE 等^[50]通过体内和体外实验发现,牛磺酸能够调节红细胞抗氧化代谢,改善红细胞的储存能量和储存质量的氧化还原标记。蔡建光等^[51]发现过度训练大鼠和喂食 MDA 大鼠都有相似但不同的红细胞形态改变程度,红细胞膜流动性显著降低和红细胞溶血度显著升高。以牛磺酸喂食各对照组后,能有效地逆转由于过度训练和喂食 MDA 对红细胞形态和结构的损伤。

2.5.4 其他恢复

牛磺酸能够抑制自由基生成、保护细胞膜、调节渗透压、对抗脂质过氧化、双向调节 Ca^{2+} 的跨膜转运、调节糖代谢和氨基酸代谢等生理功能,运动前或运动中服用能够有效削弱机体因脂质过氧化而产生的不良影响,缓解运动过程中自由基对细胞膜的攻击,起到抗运动性疲劳的功效,运动后服用可助于因疲劳出现的机体内自由基增多、渗透压失衡、脂质过氧化增强能力增强等相关因子恢复正常水平,也有助于维持能量代谢和 Ca^{2+} 稳态的平衡^[52-54]。

人体合成牛磺酸的能力有限,剧烈运动又可能使其消耗增加。因此,补充牛磺酸满足机体在大负荷训练与竞技条件下的特殊营养需求,帮助运动员运动性疲劳的消除和体能的快速恢复,使运动员保持最佳竞技状态^[49]。

3 牛磺酸的安全性及副作用

牛磺酸是基本安全的,以合理的剂量服用时没有已知的副作用。平均饮食提供约 40~400 mg 牛磺酸,但有研究发现有的国家每天使用 6000 mg。不同运动人员牛磺酸补充量应与运动类型、运动强度有关,也应与其自身的代谢特点有关,如拳击运动员牛磺酸的适宜补充剂量为 1200 mg/d; 每天 1600 mg 补充剂量可能有过度清除体内自由基的不利效应^[55]。

相反,也有实验证明高剂量服用牛磺酸可导致腹泻、胃溃疡等不良反应,但停止服用牛磺酸后,机体可自行痊愈^[8]。若给予大鼠超高剂量的牛磺酸可造成大鼠的肝脾充血肿大,给小鼠服用 20 g/kg 剂量的牛磺酸可达到半数致死量。目前发现,服用安全剂量的牛磺酸只对银屑病患者、癫痫病患者以及无偿代谢性肾上腺皮质功能减退患者有一定影响,对其余群体均无副作用^[56]。

4 结论与展望

牛磺酸具有广泛的生物学功能,不仅参与维持机体内环境的稳定,而且具有保护心血管及视网膜,调节免疫系统、中枢神经系统、消化系统的生理功能。牛磺酸对运动能力的影响主要表现在:明显改善人类的耐力表现、增强机体抵御疲劳的能力、促进骨骼肌的收缩特性、保护中

枢神经系统和脑组织、促进运动恢复等方面。骨骼肌是机体运动的物质基础,也是机体完成运动的直接组织,骨骼肌工作能力的下降是运动性疲劳产生的最直接原因。但目前运动性骨骼肌疲劳方面的研究还多停留在细胞水平(红、白肌纤维),今后应加强从亚细胞水平来研究运动性骨骼肌疲劳的产生和补充牛磺酸对其的影响。从机体的整体性考虑,还应加深和加强牛磺酸对运动能力影响在其他组织器官(如心脏、肝脏、肾脏、肠胃、脑等)方面的研究。

牛磺酸作为一种营养补剂,有着广大的市场,越来越受到教练员和运动员的青睐。但是这也不意味着摄入的越多越好,对于牛磺酸的摄入应当有一定的量。目前对于不同类型和强度的运动员摄入牛磺酸的量,以及何时摄入,摄入时与其他营养补充剂是否有协同或拮抗作用等研究还不深入,对牛磺酸潜在的有益应用也应进一步探索。

参考文献

- [1] 赵玉星, 郭俊霞, 陈文. 牛磺酸改善糖代谢的量效分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 295-301.
ZHAO YX, GUO JX, CHEN W. Dose-effect analysis of taurine in improving glucose metabolism [J]. Food Ind Sci Technol, 2017, 38(21): 295-301.
- [2] GAULL GE. Taurine in pediatric nutrition: Review and update [J]. Pediatrics, 1989, 83(3): 433-442.
- [3] SCHAFFER SW, JONG CJ, RAMILA KC. Physiological roles of taurine in heart and muscle [J]. Biomed Sci, 2010, 17(S1): 773-778.
- [4] DELLA CL, CRICHTON R, DUBURS G, *et al.* The use of taurine analogues to investigate taurine functions and their potential therapeutic applications [J]. Amino Acids, 2002, 23: 367-379.
- [5] CHEN C, XIA SF, HE J, *et al.* Roles of taurine in cognitive function of physiology, pathologies and toxication [J]. Life Sci, 2019, 231: 116584.
- [6] GORMLEY TR, NEUMANN T, FAGAN JD. Taurine content of raw and processed fish fillets/portions [J]. Eur Food Res Technol, 2007, 225(6): 837-842.
- [7] WU G. Important roles of dietary taurine, creatine, carnosine, anserine and 4-hydroxyproline in human nutrition and health [J]. Amino Acids, 2020, 52(3): 329-360.
- [8] 于俊海. 牛磺酸的生物学效应与运动能力的研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2014, 36(3): 25-28.
YU JH. Research on biological effects and exercise ability of taurine [J]. Amino Acids Biotic Res, 2014, 36(3): 25-28.
- [9] 谢楠. 牛磺酸对心血管系统保护作用及发生机制研究综述[J]. 黑龙江医药, 2014, 27(3): 536-539.
XIE N. Effects of taurine on cardiovascular protective effects and mechanism of system [J]. Heilongjiang Med J, 2014, 27(3): 536-539.
- [10] ABEBE W, MOZALFARI MS. Role of taurine in the vasculature: An overview of experimental and human studies [J]. Am J Cardiovasc Dis, 2011, 1(3): 293-311.
- [11] CHEN SS, DU JB, LIANG YF, *et al.* Sulfur dioxide restores calcium homeostasis disturbance in rat with isoproterenol-induced myocardial

- injury [J]. *Histo Histopathol*, 2012, 27(9): 1219–1226.
- [12] 陶天畅, 李根林. 牛磺酸生物学特性及其在视网膜病变治疗中的应用[J]. *眼科新进展*, 2018, 38(2): 179–183.
- TAO TC, LI LG. Taurine for the treatment of retinopathy and its bio-chemical features [J]. *Recent Adv Ophthalmol*, 2018, 38(2): 179–183.
- [13] FROGER N, MOUTSIMILLI L, CADETTI L, *et al.* Taurine: The comeback of a nutraceutical in the prevention of retinal degenerations [J]. *Prog Retin Eye Res*, 2014, 41: 44–63.
- [14] 韩晓滨, 陈学存. 牛磺酸对人脑神经细胞增殖、分化影响的研究[J]. *生理科学进展*, 1992, (4): 53–56.
- HAN XB, CHEN XC. The effect of taurine on the proliferation and differentiation of human brain nerve cells [J]. *Adv Physiol Sci*, 1992, (4): 53–56.
- [15] MENZIE J, PRENTICE H, WU JY. Neuroprotective mechanisms of taurine against ischemic stroke [J]. *Brain Set*, 2013, 3(2): 877–907.
- [16] 刘志媛, 吴高峰, 徐哲, 等. 牛磺酸与肝脏疾病-牛磺酸多种护肝作用的重点阐述[J]. *现代畜牧兽医*, 2013, (3): 60–64.
- LIU ZY, WU GF, XU Z, *et al.* Taurine and liver diseases-the key explanation of taurine's multiple liver protection effects [J]. *Mod Anim Husb Vet*, 2013, (3): 60–64.
- [17] BRANIMIR A, ZLATKOV, DOBRINA D, *et al.* Investigation of some pharmacological effects of caffeine and taurine in food supplements [J]. *Int J Nutr Food Sci*, 2014, 4(1): 43–46.
- [18] 郑英慧, 卢启贵, 黄东红, 等. 牛磺酸治疗通过激活自噬介导对老年大鼠骨量和骨强度的保护作用[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2021, 27(1): 91–95.
- ZHENG YH, LU QG, HUANG DH, *et al.* Protective effects of taurine treatment on bone mass and bone strength in aged rats through activation of autophagy [J]. *China J Osteoporos*, 2021, 1(27): 91–95.
- [19] 刘瑞. 针灸疗法治疗运动性疲劳的抗氧化应激机制探索[J]. *广州中医药大学学报*, 2019, 36(7): 1029–1034.
- LIU R. Anti-oxidative stress mechanism for acupuncture and moxibustion therapy in treating exercise-induced fatigue [J]. *Guangzhou Univ Tradit Chin Med*, 2019, 36(7): 1029–1034.
- [20] 林朝霞, 陈园. 运动饮料对体育运动功能的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(8): 2300–2303.
- LIN ZX, CHEN Y. Effects of sports drinks on sports function [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(8): 2300–2303.
- [21] 袁静, 闰晨静, 周茜, 等. 牛磺酸对抑郁症模型小鼠的预防性干预作用[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 138–143.
- YUAN J, YAN CJ, ZHOU Q, *et al.* Interventional effect of taurine in mouse models of depression [J]. *Food Sci*, 2020, 41(3): 138–143.
- [22] 齐佳. 运动食品能量棒功能与代谢特点的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 7746–7751.
- QI J. Research progress on the function and metabolism characteristics of energy bars in sports food [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(21): 7746–7751.
- [23] 魏源, 罗桂珍, 林石梅, 等. 牛磺酸对力竭运动大鼠白肌线粒体的保护作用[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2002, 25(4): 73–75.
- WEI Y, LUO GZ, LIN SM, *et al.* Effects of taurine on fast muscular mitochondria in rats after exhaustive exercise [J]. *J Nat Sci Hunan Norm Univ*, 2002, 25(4): 73–75.
- [24] 沈芳兰, 张秀珍, 李玉声, 等. 牛磺酸对小鼠抗氧化和 DNA 修复能力的作用[J]. *营养学报*, 1996, 18(3): 258–262.
- SHEN FL, ZHANG XZ, LI YS, *et al.* The effect of taurine on the anti-oxidation and DNA repair ability of mice [J]. *J Nutr*, 1996, 18(3): 258–262.
- [25] TAPPAZ. Taurine biosynthetic enzymes and taurine transporter: Molecular identification and regulations [J]. *Neurochem Res*, 2004, 29: 83–96.
- [26] HUXTABLE RJ. Physiological actions of taurine [J]. *Phys Rev*, 1992, 72(1): 101, 163.
- [27] BAR VZ, GEDIKLI E, YERSAL N, *et al.* Protective effect of taurine against doxorubicin-induced cardiotoxicity in rats: Echocardiographical and histological findings [J]. *Amino Acids*, 2019, 51(10-12): 156–161.
- [28] 李颖卓, 杨敬研, 骆晓峰. 不同剂量牛磺酸对大鼠运动功能的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015, 12: 199–201.
- LI YZ, YANG JY, TUO XF. Effects of different doses of taurine on the motor function of rats [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2015, 12: 199–201.
- [29] 卓长清, 周兵. 蛋白食品对运动员生理功能的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(19): 239–243.
- ZHUO CQ, ZHOU B. Influence of protein food on athletes' physiological function [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(19): 239–243.
- [30] WALDRON M, PATTERSON SD, TALLENT J, *et al.* The effects of an oral taurine dose and supplementation period on endurance exercise performance in humans: A meta-analysis [J]. *Sport Med*, 2018, 48(5): 1247–1253.
- [31] WARSKULAT U, FLOGEL U, HARTWIG HG, *et al.* Taurine transporter knockout depletes muscle taurine levels and results in severe skeletal muscle impairment but leaves cardiac function uncompromised [J]. *FASEB J*, 2004, 18: 577–579.
- [32] ITO T, YOSHIKAWA N, SCHAFFER SW, *et al.* Tissue taurine depletion alters metabolic response to exercise and reduces running capacity in mice [J]. *Amino Acids*, 2014, 3(2): 964680.
- [33] MA Y, MARUTA H, SUN B, *et al.* Effects of long-term taurine supplementation on age-related changes in skeletal muscle function of sprague-dawley rats [J]. *Amino Acids*, 2021, (S1): 1–12.
- [34] 王翔, 魏源. 牛磺酸和/或递增负荷训练对大鼠骨骼肌不同肌纤维线粒体 Ca^{2+} -ATP 酶活性的影响[J]. *浙江体育科学*, 2002, 24(4): 35–38.
- WANG X, WEI Y. Effects of taurine and/or increasing load training on mitochondria Ca^{2+} -ATPase activity of different muscle fibers in rats [J]. *Zhejiang Sports Sci*, 2002, 24 (4): 35–38.
- [35] GALLOWAY SD, TALANIAN JL, SHOVELLER AK, *et al.* Seven days of oral taurine supplementation does not increase muscle taurine content or alter substrate metabolism during prolonged exercise in humans [J]. *Appl Physiol*, 2008, 105(2): 643–651.
- [36] SEIDEL U, HUEBBE P, RIMBACH G. Taurine: A regulator of cellular redox homeostasis and skeletal muscle function [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2019, 63(16): 1800569.
- [37] GOODMAN CA, HORVATH D, STATHIS C, *et al.* Taurine supplementation increases skeletal muscle force production and protects muscle function during and after high-frequency *in vitro* stimulation [J]. *Appl Physiol*, 2009, 107(1): 144–154.
- [38] 赵鹏, 章水均. 牛磺酸对力竭运动大鼠骨骼肌抗氧化能力和三磷酸腺苷活性的影响[J]. *中国基层医药*, 2019, (9): 1029–1032.
- ZHAO P, ZHANG SJ. Effect of taurine on the antioxidant capacity and ATP activity of skeletal muscle in rats with exhaustive exercise [J]. *Clin J*

- Prim Med Pharm, 2019, (9): 1029–1032.
- [39] HELLSTMM G. Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise [J]. J Appl Physiol, 1996, 81: 413–418.
- [40] 刘亚, 章超桦, 杨萍, 等. 马氏珠母贝肉酶解蛋白和牛磺酸对力竭运动后小鼠大脑单胺类神经递质含量的影响[J]. 食品科技, 2010, 35(3): 23–25.
- LIU Y, ZHANG CH, YANG P, *et al.* Effect of enzymatic hydrolyzed animal protein extracted from *Pinctada martensii* and taurine on brain monoamine neurotransmitters of exhausted mice [J]. Food Sci Technol, 2010, 35(3): 23–25.
- [41] ROSSATO RC, PINTO JC, DE OLIVEIRA MC, *et al.* Neuroprotective effect of taurine on human neuroblastoma under induced stress [J]. Alzheimer Dementia, 2020, 16: 252–256.
- [42] 李良鸣, 魏源, 罗桂珍, 等. 牛磺酸对力竭运动时大鼠脑组织自由基代谢的影响[J]. 湖北三峡学院学报, 2000, (5): 82–85.
- LI LM, WEI Y, LUO GZ, *et al.* Influence of taurine and acute exhaustive exercise on free radical mechanism of brain in rats [J]. J China Three Gorges Univ, 2000, (5): 82–85.
- [43] GUAN L, MIAO P. The effects of taurine supplementation on obesity, blood pressure and lipid profile: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Eur J Pharmacol, 2020, (885): 117–120.
- [44] GABRIELA B, CAMILA FC, FLÁVIA GDC, *et al.* Taurine supplementation increases irisin levels after high intensity physical training in obese women [J]. Cytokine, 2019, 123: 154741.
- [45] WEN C, LI F, ZHANG L, *et al.* Taurine is involved in energy metabolism in muscles, adipose tissue, and the liver [J]. Mol Nutr Food Res, 2019, 63(2): 1800536.
- [46] 郭刚, 赵海燕, 宋吉锐. 牛磺酸补充降低大鼠急性离心运动导致的骨骼肌微损伤程度[J]. 天津体育学院学报, 2009, 24(3): 232–235.
- GUO G, ZHAO HY, SONG JR. Taurine supplementation reduces the degree of skeletal muscle micro-damage caused by acute eccentric exercise in rats [J]. J Tianjin Inst Phys Edu, 2009, 24(3): 232–235.
- [47] MCLEAY Y, STANNARD S, BARNES M. The effect of taurine on the recovery from eccentric exercise-induced muscle damage in males [J]. Antioxidants, 2017, 6(4): 79.
- [48] DAWSON RJR, BIASETTI M, MESSING S, *et al.* The cytoprotective role of taurine in exercise-induced muscle injury [J]. Amino Acids, 2002, 22(4): 309–324.
- [49] TAKAHASHI Y, HATTA H. Effects of taurine administration on exercise-induced fatigue and recovery [J]. J Phys Fitness Sports Med, 2017, 6(1): 33–39.
- [50] BERTOLONE L, ROY MK, HAY AM, *et al.* Impact of taurine on red blood cell metabolism and implications for blood storage [J]. Transfusion, 2020, 60(6): 1212–1226.
- [51] 蔡建光, 李彬彬, 唐晖, 等. 过度训练对大鼠红细胞损伤及牛磺酸的保护作用机制研究[J]. 北京体育大学学报, 2013, 36(12): 77–81.
- CAI JG, LI BB, TANG H, *et al.* The damaging mechanisms of erythrocytes in over trained rats and the protection effect from taurine [J]. J Beijing Sports Univ, 2013, 36(12): 77–81.
- [52] 高元元, 赵弘官. 论抗运动性疲劳的营养补充[J]. 体育风尚, 2021, (3): 9–10.
- GAO YY, ZHAO HG. Discussion on the nutritional supplement of anti-exercise fatigue [J]. Sport Style, 2021, (3): 9–10.
- [53] 周娟. 抗运动性疲劳的营养补充研究[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(1): 96–99.
- ZHOU J. Study on nutritional supplement of anti-sports fatigue [J]. Food Ferment Sci Technol, 2020, 56(1): 96–99.
- [54] JAKARIA M, AZAM S, HAQUE ME, *et al.* Taurine and its analogs in neurological disorders: Focus on therapeutic potential and molecular mechanisms [J]. Redox Biol, 2019, 24: 101223.
- [55] MCCARTNEY D, IRWIN C, COX GR, *et al.* The effect of different post-exercise beverages with food on ad libitum fluid recovery, nutrient provision, and subsequent athletic performance [J]. Physiol Behav, 2018, 201: 35–37.
- [56] 赵振宇, 张韶慧. 牛磺酸药理作用的研究新进展[J]. 中国医院药学杂志, 2009, (16): 1390–1393.
- ZHAO ZY, ZHANG SH. New progress in research on pharmacological effects of taurine [J]. Chin Hosp Pharm J, 2009, (16): 1390–1393.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介

刘和军, 主要研究方向为体育营养。
E-mail: feldnewwor@163.com