

γ -氨基丁酸与运动疲劳的相关性研究

顾 坤*

(开封文化艺术职业学院, 开封 475004)

摘 要: 现代竞技体育快速发展, 运动疲劳已成为不可忽视的问题。随着运动医学等学科的发展, 关于缓解运动性疲劳、提高运动成绩的研究越来越多。 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)属于新型资源食品, 在保健食品中有广泛的应用。本文主要综述了近年来 γ -氨基丁酸与运动疲劳相关研究的新进展, 着重介绍了运动疲劳的产生及其机制、GABA 受体及其抗运动疲劳的生理功能、GABA 在中枢神经系统中的分布、GABA 对中枢神经系统的作用、运动疲劳的判断和恢复方法, 目的是研究训练中导致运动疲劳发生的原因。以期为缓解运动疲劳和运动损伤的保健食品的研发提供必要的依据, 达到提高运动员竞技能力及比赛成绩的目的。

关键词: γ -氨基丁酸; 运动疲劳; 恢复方法

Study on the correlation between γ -aminobutyric acid and exercise fatigue

GU Kun*

(Kaifeng Vocational College of Culture and Art, Kaifeng 475004, China)

ABSTRACT: With the rapid development of modern competitive sports, sports fatigue has become a problem that can not be ignored. With the development of sports medicine and other disciplines, there are more and more researches on alleviating sports fatigue and improving sports performance. γ -aminobutyric acid (GABA) is a new type of resource food, which is widely used in health food. In this paper, the recent progress in the research on the relationship between GABA and exercise fatigue was reviewed. This paper mainly introduced the generation and mechanism of exercise fatigue, GABA receptor and its physiological function of anti exercise fatigue, the distribution of GABA in the central nervous system, the role of GABA in the central nervous system, the judgment and recovery methods of exercise fatigue, so as to study the causes of exercise fatigue in training. It hopes to provide the necessary basis for the research and development of sports health food to alleviate sports fatigue and sports injury, so as to improve the competitive ability and performance of athletes.

KEY WORDS: γ -aminobutyric acid; sports fatigue; recovery method

0 引 言

运动疲劳是运动员在训练中不容忽视的问题, 机体一旦出现运动疲劳, 即应该积极缓解, 如不进行机体的合理恢复, 不仅会影响运动员的比赛成绩, 还会导致身体机能障碍。早在 1915 年, 莫桑指出疲劳是由细胞内化学变化

衍生物导致的一种中毒现象^[1]。1982 年, 国际上将疲劳定义为机体生理过程不能在特定水平上持续其机能, 或不能维持预定的运动强度^[2]。

人们对运动疲劳的认识, 是从肌肉组织疲劳等外周疲劳开始的, 众多科学家对外周疲劳进行研究后, 得出了衰竭学说、突变学说、堵塞学说、能量耗竭学说等经典学

*通信作者: 顾坤, 硕士, 主要研究方向为体育教育训练学、学校体育。E-mail: brusjkznl@outlook.com

*Corresponding author: GU Kun, Master, Kaifeng Vocational College of Culture and Art, Kaifeng 475004, China. E-mail: brusjkznl@outlook.com

说^[3]。除了外周疲劳,中枢疲劳也是运动疲劳的一种,而且随着脑科学和神经科学技术的不断发展,中枢疲劳的产生机制也受到了许多科学家的关注,运动疲劳产生的中枢机制及其相关的神经递质研究已然成为人体科学领域的研究热点^[4]。目前对运动疲劳机制的研究,已从单纯的物质能量消耗、代谢产物的堆积,朝着多因素综合作用的方向发展。研究水平也由细胞水平的结构与功能,深入到神经递质、内分泌激素分子等大分子水平^[5]。

γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA),又称氨基酪酸、哌啶酸,是一种广泛存在于动植物的天然生物活性成分。GABA 是 *L*-谷氨酸脱羧经过 *L*-谷氨酸脱羧酶催化,而产生的一种非蛋白质天然氨基酸,其分子式为 $C_4H_9NO_2$ 。在植物中(如豆类、中草药等),GABA 主要存在于根、茎、种子以及组织液中。在动物中,GABA 是脊椎动物中枢神经系统中主要的抑制性神经递质,主要存在于神经组织中,参与神经系统的多种生理功能,对运动、内分泌及生物节律等都起着重要的调节作用,具有与人体健康密切相关的多种生物学功能^[6]。

GABA 因其功能性被大量应用于食品、医药等领域。表 1 是 GABA 在部分食品中的分布^[7]。原卫生部 2009 年公布的新资源食品名录中包括 GABA。GABA 具有较高的生理活性,且应用范围广,被众多食品企业所看重,研发了一系列功能性强、营养价值丰富的产品。富含 GABA 的食品为亚健康人群提供了一种很好的食疗方式。近些年来已有研究的富集 GABA 的食品主要分为谷物制品、奶制品和饮料三类。GABA 在功能性食品的研发方面有良好的前景。

1 运动疲劳的产生及其机制

随着竞技运动水平的不断提升,运动员训练过程中的运动疲劳也在不断增多。运动疲劳是指机体在运动的过程中,运动能力及身体功能暂时下降的正常生理现象^[2]。产生运动疲劳的机制很复杂,一般是由一个或几个因素的相互作用而产生的,一般包括运动强度、持续时间等因素。

根据疲劳部位和产生疲劳的原因,可将运动疲劳分为两类:中枢疲劳和外周疲劳。普遍认为,长时间中等强度的运动所发生的疲劳一般多为中枢疲劳,中枢疲劳是中枢神经系统的保护性抑制,与中枢神经系统内的神经递质改变有关;短时间剧烈运动时出现的疲劳,一般与肌肉中能源物质的消耗以及乳酸代谢产物的堆积有关^[8]。机体在运动时产生的轻度疲劳,可以在运动后的较短时间内恢复;若机体产生中等程度的疲劳,就需要适当地

降低运动强度和持续时间;若机体产生重度疲劳,则应让运动员停止训练或比赛,进行调整休息^[9]。每种类型的疲劳都与高级神经系统发放的控制信号有关,就整个运动过程进行动态研究,有助于加深对运动疲劳机制的理解,积极有效地采取抗疲劳措施,有利于机体疲劳的恢复,从而提高训练成绩。

为了研究运动疲劳的产生机制,研究人员从不同角度阐述了产生运动疲劳的原因:疲劳物质蓄积学说认为,疲劳的产生是由于肌肉收缩时,乳酸、丙酮酸等酸性代谢产物在体内的堆积。肌肉中的糖原和葡萄糖等供能物质在无氧条件下分解为乳酸并进入血液,称为血乳酸,改变机体内环境,影响机体内的正常代谢和肌肉的收缩^[10]。同时丙酮酸在乳酸脱氢酶的作用下会加剧血乳酸的积累程度^[11]。能源物质耗竭学说认为,当肌肉长时间活动时,肌糖原等能源物质的含量下降而又得不到及时补充,因而引发运动疲劳。机体为维持正常的血糖水平,在肌糖原消耗的同时,肝糖原的储备量也会减少^[12-13]。自由基学说认为,一般情况下,机体产生的多余的内源性自由基,可以通过机体自身的自由基清除系统清除,维持细胞不受攻击。但是,当机体清除速率低于生成速率时,多余的自由基会攻击细胞膜的脂质结构和内巯基,使得细胞膜转运功能降低,导致细胞本身受到损伤,从而呈现出机体疲劳的状态^[14]。

2 GABA 受体及其抗运动疲劳的生理功能

2.1 GABA 受体

GABA 受体是指突触后膜上能识别并结合 GABA 的部位。GABA 通过与受体的结合影响细胞膜离子通透性的变化^[15]。GABA 受体包括: $GABA_A$ 受体、 $GABA_B$ 受体以及 $GABA_C$ 受体。 $GABA_A$ 受体存在于细胞膜上,属于促离子型受体,由 19 个亚单位组成^[16]。位于神经元细胞膜上的 $GABA_A$ 受体与 GABA 结合后,使氯离子通道开放,从而引起神经元的抑制作用, $GABA_A$ 受体的激活,是大多数脑区中产生抑制性突触后电位(inhibitory postsynaptic potential, IPSP)的基础^[17-19]。 $GABA_B$ 受体,即 G 蛋白耦联受体,属于促代谢型受体。分布于突触前末梢上的 $GABA_B$ 受体激活后,可抑制钙离子内流;分布于突触后膜的 $GABA_B$ 受体,通过增加三磷酸肌醇和二酰甘油,增加细胞膜对钾离子的导电能力,产生 IPSP^[20-21]。 $GABA_C$ 受体存在于视觉神经通路中,通过开启氯离子通道产生抑制效应,因此其可能在视网膜视杆通路的信息传递和调控中起重要作用^[22]。

表 1 GABA 在食品中的含量分布
Table 1 Content distribution of GABA in food

名称	糙米	栗子	大米胚芽	红薯	绿茶	豆腐乳	苦丁茶	豆豉
GABA 含量/(mg/100 g)	3.80	1.94	25.40	1.41	1.74~17.40	46.95	7.31	118.10

2.2 GABA 抗运动疲劳的生理功能

堀江典子的研究证明^[23], GABA 可抑制疲劳 β 脑电波, 增加放松 α 脑电波, 从而说明 GABA 能使人体更放松, 不容易疲劳。丁园^[24]在研究 GABA 对小鼠游泳力竭的影响时发现, 其可显著提高实验组小鼠的力竭时间, 说明 GABA 可发挥抗身体疲劳的作用。除了抗疲劳作用外, GABA 还具有降血压、镇痛、抗糖尿病、抗癫痫、抗焦虑调节情绪、抗衰老等诸多作用^[25-28]。GABA 在抗运动疲劳方面有着重要的作用, 有助于机体在剧烈运动后的恢复, 减轻机体的疲劳程度。

3 GABA 与中枢疲劳

3.1 GABA 在中枢神经系统中的分布

近年来, 有一些学者对 GABA 在中枢神经系统中的分布做了相关研究。VALENZUELA 等^[29]观察到, 大脑内 20% ~ 40% 的突触以 GABA 作为神经递质。王志锋等^[30]对兔、大鼠和人的研究发现, GABA 神经元分布以黑质和苍白球最高, 其次为下丘脑、上丘、下丘、小脑的齿状核、壳核等。BUIJS 等^[31]的研究发现, 在下丘脑视上核中存在大量的 GABA 神经递质。GABA 广泛分布于中枢神经系统中, 与机体的中枢疲劳密切相关。

3.2 GABA 对中枢神经系统的作用

在机体内, GABA 与 α -酮戊二酸进行转氨基作用生成琥珀酸半醛, 再在琥珀酸半醛脱氢酶的催化下生成琥珀酸, 或在乳酸脱氢酶的作用下分解成 γ -羟基丁酸^[32]。在运动状态下, 随着运动强度以及运动持续时间的增加, 机会因为动脉血氧分压的下降而出现缺氧现象, 使 GABA 的氧化过程减弱, 琥珀酸半醛脱氢酶的活性下降, GABA 降解受阻, 从而造成 GABA 在脑中堆积, 引起突触后抑制^[33]。张业廷^[34]认为, 在短时间的高强度运动后, 机体中 GABA 的浓度升高, 三磷酸腺苷的浓度降低, 二磷酸腺苷浓度升高, 氧化酶活性升高。当机体出现运动疲劳时, 随着体内各种氧化酶活性的降低, GABA 的降解速度减慢, 从而抑制了中枢神经系统的兴奋性。关于大鼠的实验研究表明, 大鼠脑中的 GABA 增高与运动性疲劳的中枢抑制有关^[35]。季浏的研究也表明^[36], 在长时间运动后, 大鼠大脑中 GABA 含量显著增加。GABA 含量的增加意味着大脑保护性抑制的发展, 大脑兴奋性降低, 因而产生中枢疲劳。其原因可能是由于机体在长时间的运动中, 参与供能的蛋白质逐渐增多, 从而使体内的氨基酸代谢增强, 特别是大脑中谷氨酸脱羧酶(glutamic acid decarboxylase, GAD)的活性增强, 谷氨酸在 GAD 的作用下, 生成更多的 GABA^[37]。研究发现^[38-39], 脑组织匀浆离心后, GAD 以游离的形式存在于轴突末梢的胞浆内, 并参与 GABA 的合成。

GABA 的产生在突触前末梢, 分解发生在突触后神经元的胞体部分。机体通过减少兴奋性递质的释放而诱发疲劳。由于目前取样方法和技术的限制, 关于 GABA 的人体实验较少, 而动物实验研究中, 大部分集中在 GABA 总量和 GABA 释放与运动性中枢疲劳的关系上。人脑内 GABA 的总量目前难以准确检测。GABA 较难通过血脑屏障, 因而在外周血液中合成底物检测的准确性也较难验证^[40]。近年来, 基于混沌理论基础的信号处理技术—脑电超慢波落图的应用为 GABA 与运动性疲劳的研究提供了新视角, 但是这一技术的有效性还有待进一步探索^[41]。

4 运动疲劳的判断及恢复方法

4.1 运动疲劳的判断方法

准确判断运动疲劳的程度, 对运动员的训练有重要意义。在训练中一旦出现运动疲劳, 即应引起运动员的重视, 一般可通过主观感觉等简单的方法来评判运动疲劳的程度。运动疲劳分为轻度疲劳、中度疲劳以及极度疲劳。机体轻度疲劳时, 自我感觉无不适, 步态稳健, 能正确执行各种指令; 机体中度疲劳时, 会感觉肌肉酸痛, 步态不稳, 执行指令不够准确; 机体极度疲劳时, 会表现出呼吸表浅加快, 技术动作变形, 执行口令缓慢等表现^[42-44]。除通过主观感觉进行判断以外, 还可结合氧耗量、血乳酸含量的变化、握力、运动后最大血乳酸值等指标进行判断^[45]。

4.2 运动疲劳的恢复方法

在一定的范围内, 运动强度与运动疲劳的产生呈正相关。运动疲劳发生后, 应尽快恢复运动员的身体机能, 良好的恢复有助于提高运动员的训练水平和运动成绩^[46]。目前已经有学者研究营养、中药等干预措施对消除运动疲劳的作用^[47-49]。对营养干预方面的研究, 主要包括葡萄糖、氨基酸的补充。HU 等^[50]研究发现, 在运动前和运动中补充支链氨基酸, 有助于机体体力的恢复。但由于实验因素不易控制, 其结论的可信度尚不能完全肯定。刘雅娜等^[51]研究认为, 补充沙棘多糖, 可以改善运动员的运动表现。康林之等^[52]研究发现仙鹤草提取物可提高小鼠的耐缺氧能力, 缓解其运动疲劳。

有一些学者进行了抗疲劳中药方面的研究。冯毅狮等^[53]对中等强度的运动疲劳模型大鼠的下丘脑神经递质进行了测定, 发现人参皂苷能有效地提高兴奋性神经递质的含量, 同时降低 GABA 等抑制性神经递质的含量, 从而达到抗运动疲劳的效果。张蓉^[54]通过疏肝、健脾中药组与模型组的研究发现, 疏肝、健脾方剂四逆散和四君子汤, 有调节动物海马及纹状体区 GABA 受体蛋白的作用。疏肝中药通过对兴奋性与抑制性神经递质及受体比值的调节, 从而调节人体动与静、兴奋与抑制的生理功能; 健脾中药能够提高机体的能量代谢, 改善运动时机体缺

血、缺氧的状态,清除自由基,保护由于能量代谢不足导致的兴奋性氨基酸对神经元的损伤,进而改善了运动性疲劳所致运动能力下降。

4.2.1 积极性休息及睡眠

积极性休息是指运动员在日常训练时,通过变换运动部位以及运动类型、主动调整运动强度来消除运动疲劳,提高训练效果^[55]。在运动中,运动员身体的各项机能处于高度紧张的状态,运动结束后各项机能仍维持在原来的水平上,一些缓解性的辅助练习,以及深呼吸都有助于调节运动性疲劳。此外,睡眠也有利于缓解运动性疲劳,恢复体能。睡眠不足可使人体内的再生组织系统活动受限,削弱机体免疫系统,会明显增加运动员的疲劳感。催眠休息可在短时间内消除运动疲劳,使运动员恢复运动能力。心理调节也有助于运动疲劳的恢复,运动员通过意念改善机体循环和呼吸系统,让肌肉快速放松,从而消除运动疲劳。另外,也可选择自我暗示等方法进行放松练习^[56-57]。

4.2.2 物理性及营养性恢复

针灸、按摩等物理疗法对高强度运动后的体能恢复有重要作用。胡武清^[58]研究发现,针灸、按摩通过推进大脑皮层的兴奋过程,减少过程间的相互转换,从而缓解运动疲劳诱发的神经调节紊乱,尽快消除运动疲劳。运动前后对运动员的营养补充,也是一项非常重要的内容。王嘉怡等^[59]研究证实,膳食中的蛋白质、脂肪、碳水化合物、矿物质以及维生素的搭配,对运动员身体机能和运动能力的恢复有极大影响。在日常训练中注重食物的科学搭配、增加膳食营养,有利于消除机体的运动疲劳,对运动员运动成绩的提高大有帮助。

5 结 语

目前,产生运动疲劳的机制尚未完全清楚,一般认为有中枢疲劳和外周疲劳。疲劳是机体训练时出现的一种正常现象,运动员应保持良好的心态,正视疲劳。在运动训练中根据运动员各项项目的差异,制定适合的训练计划,有助于达到事半功倍的效果。相信在未来,关于运动疲劳的研究会越来越,为各种科技手段在运动训练中的应用提供参考。

参考文献

- [1] 吴纪饶, 高强. 外周疲劳研究的现状[J]. 中国运动医学杂志, 1993, (2): 93-96.
WU JR, GAO Q. Current status of research on peripheral fatigue [J]. Chin J Sport Med, 1993, (2): 93-96.
- [2] 邓树勋, 洪泰田, 曹志发, 等. 运动生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
DENG SX, HONG TT, CAO ZF, *et al.* Exercise physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [3] 刘建伟, 孟佳珩. 运动补剂的研究现状及其对运动员选择补剂的建议[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(8): 2564-2568.
- [4] LIU JW, MENG JH. Research status of sports tonics and suggestions for athletes to select supplements [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(8): 2564-2568.
- [4] 曹庆雷, 罗明刚. 运动性疲劳生物标志物的研究进展[J]. 四川体育科学, 2017, 36(5): 47-52.
CAO QL, LUO MG. Research progress on biomarkers of exercise-induced fatigue [J]. Sichuan Sport Sci, 2017, 36(5): 47-52.
- [5] 卢丽. 运动疲劳的生理生化机制[J]. 当代体育科技, 2015, 5(13): 12-13.
LU L. Physiological and biochemical mechanism of exercise fatigue [J]. Contemp Sport Sci Technol, 2015, 5(13): 12-13.
- [6] SAIKUSA T, HORINO T, MORI Y. Distribution of free amino acids in the rice kernel and kernel fractions and the effect of water soaking in the distribution [J]. Agric Food Chem, 1994, 42(5): 1122-1125.
- [7] 孙普庆, 张秋霞. 神经递质及其调质在中枢疲劳中的作用机制[J]. 中国中医药, 2010, 8(6): 100.
SUN PQ, ZHANG QX. Mechanism of neurotransmitters and their modulators in central fatigue [J]. Chin J Tradit Chin Med, 2010, 8(6): 100.
- [8] 杨晓磊, 刘亮, 龚玉根, 等. 运动疲劳与氧化应激[J]. 中国中医药现代远程教育, 2020, 18(18): 88-91.
YANG XL, LIU L, GONG YG, *et al.* Exercise fatigue and oxidative stress [J]. Mod Dist Edu Chin Med, 2020, 18(18): 88-91.
- [9] 乔德才, 于昊, 侯莉娟, 等. 大鼠苍白球外侧部 GABA 神经元两类亚型在运动疲劳累积过程中的电活动特征研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 1-8, 125.
QIAO DC, YU H, HOU LJ, *et al.* Electrical activity characteristics of two subtypes of GABA neurons in the lateral globus pallidus of rats during exercise fatigue accumulation [J]. J Shaanxi Norm Univ (Nat Sci Ed), 2019, 47(3): 1-8, 125.
- [10] FLAKOLL PJ, JUDY T, FLINN K, *et al.* Postexercise protein supplementation improves health and muscle soreness during basic military training in Marine recruits [J]. J Appl Physiol, 2004, 96(3): 951-956.
- [11] 刘燕萍. 运动性疲劳及其机制分析[J]. 西安体育学院学报, 2001, (1): 46-47.
LIU YP. Sports fatigue and its mechanism analysis [J]. J Xi'an Inst Phy Ed, 2001, (1): 46-47.
- [12] 周何梦娟, 胡国鹏. 我国运动疲劳研究发展态势、热点演进和展望[J]. 湖北体育科技, 2020, 39(11): 972-976.
ZHOU H MJ, HU GP. Development trend, hot spot evolution and Prospect of sports fatigue research in China [J]. Hubei Sport Sci Technol, 2020, 39(11): 972-976.
- [13] 边新博. 运动性疲劳及恢复手段的探究[J]. 科学大众(科学教育), 2019, (10): 189, 192.
BIAN XB. Research on sports fatigue and recovery methods [J]. Sci Pub (Sci Ed), 2019, (10): 189, 192.
- [14] MARQUEZI ML, ROSCHEL HA. Effect of aspartate and asparagine supplementation on fatigue determinants in intense exercise [J]. Int J Sport Nutr Exere Metab, 2003, 13(1): 65-75.
- [15] 张蓉, 李峰, 王莹莹, 等. 运动性疲劳大鼠谷氨酸、 γ -氨基丁酸受体含量变化及中药的调节作用[J]. 中国中医药信息杂志, 2010, 17(7): 43-45.
ZHANG R, LI F, WANG YY, *et al.* Changes of glutamate and GABA

- receptor contents in exercise-induced fatigue rats and the regulatory effect of traditional Chinese medicine [J]. *Chin J Tradit Chin Med Inf*, 2010, 17(7): 43–45.
- [16] KORPI ER, SINKKONEN ST. GABAA receptor sub types as target for neuropsychiatric drug development [J]. *Pharmacol Ther*, 2006, 109(1-2): 12–32.
- [17] 许海方, 谢陈南, 应晨怡, 等. γ -氨基丁酸 A 受体相关蛋白研究进展[J]. *绍兴文理学院学报(自然科学)*, 2020, 40(3): 78–84.
XU HF, XIE CN, YING CY, *et al.* Research progress of GABA A receptor related proteins [J]. *J Shaoxing Univ Art Sci (Nat Sci)*, 2020, 40(3): 78–84.
- [18] 张岩. 代谢型 γ -氨基丁酸受体激活机制的结构基础[J]. *浙江大学学报(医学版)*, 2020, 49(4): 454.
ZHANG Y. Structural basis of activation mechanism of metabotropic GABA receptor [J]. *J Zhejiang Univ (Med Ed)*, 2020, 49(4): 454.
- [19] 李佳, 王建伟, 王萌, 等. γ -氨基丁酸 A 型受体在七氟醚致新生大鼠远期认知功能障碍中的作用[J]. *新乡医学院学报*, 2020, 37(6): 522–526.
LI J, WANG JW, WANG M, *et al.* The role of GABA type a receptor in sevoflurane induced long-term cognitive impairment in neonatal rats [J]. *J Xinxiang Med Coll*, 2020, 37(6): 522–526.
- [20] 严蓉, 古存, 朱珊珊, 等. B 型 γ -氨基丁酸受体及其应答机制[J]. *国外医学*, 2005, 26(1): 33–35.
YAN R, GU C, ZHU SS, *et al.* Type B GABA receptor and its response mechanism [J]. *Fore Med*, 2005, 26(1): 33–35.
- [21] 姚北海, 刘海军, 周庆, 等. 抗 γ -氨基丁酸 B 受体脑炎一例[J]. *中国神经免疫学和神经病学杂志*, 2020, 27(3): 239–241.
YAO BH, LIU HJ, ZHOU Q, *et al.* A case of anti GABA B receptor encephalitis [J]. *Chin J Neuroimmunol Neurol*, 2020, 27(3): 239–241.
- [22] 乔德才, 李许贞, 杨东升, 等. 力竭运动前后活体大鼠纹状体谷氨酸和 γ -氨基丁酸水平的动态变化[J]. *中国运动医学杂志*, 2011, 30(10): 921–925, 971.
QIAO DC, LI XZ, YANG DS, *et al.* Dynamic changes of glutamate and GABA levels in striatum of living rats before and after exhaustive exercise [J]. *Chin J Sport Med*, 2011, 30(10): 921–925, 971.
- [23] 堀江典子, 菅美奈子, 金武祚. GABA 的功能性[J]. *中国食品添加剂*, 2010, (6): 169–173.
HORIE, KANATO, JIN WZ. Functional properties of GABA [J]. *China Food Addit*, 2010, (6): 169–173.
- [24] 丁园. 牛磺酸、 γ -氨基丁酸对小鼠抗缺氧抗疲劳作用的研究[J]. *内江科技*, 2009, (12): 18.
DING Y. Antihypoxia and anti fatigue effects of taurine and GABA in mice [J]. *Neijiang Sci Technol*, 2009, (12): 18.
- [25] 杨美玉, 杨平平, 申秀娟, 等. 以氨基酸为基础的不同食品组方对小鼠抗疲劳能力的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 94–98.
YANG MY, YANG PP, Shen XJ, *et al.* Effects of different amino acid based food formulations on anti fatigue ability of mice [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(12): 94–98.
- [26] 刘萍, 李芳辉. 猴头菇制剂的抗运动性疲劳功能分析[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(8): 59–61.
LIU P, LI FF. Analysis of anti exercise fatigue function of *Hericium erinaceus* preparation [J]. *Chin Edib Fungi*, 2020, 39(8): 59–61.
- [27] 张秀玲. 金针菇多糖对缓解运动疲劳与调节恢复能力的效果探究[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(8): 56–58.
ZHANG XL. Effect of *Flammulina velutipes* polysaccharide on relieving exercise fatigue and regulating recovery ability [J]. *Chin Edib Fungi*, 2020, 39(8): 56–58.
- [28] 李人, 陶心铭. 运动性疲劳与脑中 γ -氨基丁酸[J]. *中国运动医学杂志*, 1985, (2): 81–86, 129.
LI R, TAO XM. Exercise induced fatigue and brain gamma aminobutyric acid [J]. *Chin J Sport Med*, 1985, (2): 81–86, 129.
- [29] VALENZUELA PL, SÁNCHEZ M GUILLERMO, TORRONTEGI E, *et al.* Validity, reliability and sensitivity to exercise-induced fatigue of a device for the measurement of the brain's direct current potential [J]. *J Strength Condit Res*, 2020, (5): 34–36.
- [30] 王志锋, 乔德才, 郭琪, 等. 玛咖对运动疲劳大鼠纹状体 Glu、GABA 含量以及 PV 阳性神经元和 VGLUT1 表达的影响[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3): 48–56, 125.
WANG ZF, QIAO DC, GUO Q, *et al.* Effects of Maca on the contents of Glu and GABA and the expression of PV positive neurons and VGLUT1 in striatum of exercise-induced fatigue rats [J]. *J Shaanxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 47(3): 48–56, 125.
- [31] BUIJS RM, HOU YX. Ultra structural evidence for intra and extra nuclear projections of GABA [J]. *Neurol*, 1994, (12): 124–125.
- [32] 夏锐, 张希妮, 张燊, 等. 运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 127–132.
XIA R, ZHANG XN, ZHANG S, *et al.* Biomechanical evaluation of exercise-induced fatigue and its relationship with injury [J]. *Med Biom*, 2020, 35(1): 127–132.
- [33] ABDELMALKI A, BONNEAU D, BONNEAU D, *et al.* Administration of a GABAB agonist baclofen before running to exhaustion in the rat: Effects on performance and on some indicators of fatigue [J]. *Int J Sport Med*, 1997, 18(2): 75–78.
- [34] 张业廷. 运动性疲劳产生的中枢机制[J]. *青春岁月*, 2013, (5): 441–442.
ZHANG YT. Central mechanism of exercise-induced fatigue [J]. *Youth*, 2013, (5): 441–442.
- [35] 乔德才, 张吉敏, 侯莉娟, 等. 大鼠苍白球 GABA、Glu 在力竭运动过程中的调控作用研究[J]. *沈阳体育学院学报*, 2015, 34(2): 82–86.
QIAO DC, ZHANG JM, HOU LJ, *et al.* Regulation of GABA and Glu in rat globus pallidus during exhaustive exercise [J]. *J Shenyang Inst Phy Edu*, 2015, 34(2): 82–86.
- [36] 季浏. 运动中心理变化的生化基础[J]. *体育与科学*, 1998, 19(1): 56–58.
JI L. Biochemical basis of psychological changes in sports [J]. *Sport Sci*, 1998, 19(1): 56–58.
- [37] 赵中华. 体育运动中神经—肌肉疲劳研究的新进展[J]. *沈阳体育学院学报*, 2003, (3): 45.
ZHAO ZH. New progress in the study of neuromuscular fatigue in sports [J]. *J Shenyang Inst Phy Ed*, 2003, (3): 45.
- [38] 乔德才, 刘军, 刘晓莉. 运动疲劳的中枢机制研究进展—基于基底神经节-皮层环路紊乱的视角[J]. *北京体育大学学报*, 2014, 37(2): 51–58, 65.
QIAO DC, LIU J, LIU XL. Research progress on central mechanism of exercise fatigue: Based on the perspective of basal ganglia cortical loop disorder [J]. *J Beijing Sport Univ*, 2014, 37(2): 51–58, 65.
- [39] 黄国荣, 刘星. 田径训练中运动疲劳的诊断与恢复[J]. *大众标准化*,

- 2020, (15): 155–156.
- HUANG GR, LIU X. Diagnosis and recovery of sports fatigue in track and field training [J]. *Pub Stand*, 2020, (15): 155–156.
- [40] 崔维刚, 薛玲. 愤怒情绪模型大鼠不同脑区 γ -氨基丁酸 B2 受体表达的变化[J]. *中国比较医学杂志*, 2011, 21(3): 22–26.
- CUI WG, XUE L. Changes of GABA B2 receptor expression in different brain regions of rats with anger emotion [J]. *Chin J Comp Med*, 2011, 21(3): 22–26.
- [41] QI TT, YAN W, CHEN LW. Exercise-induced hemodynamic changes in muscle tissue: Implication of muscle fatigue [J]. *Appl Sci*, 2020, 10(10): 13–18.
- [42] 鞠丽丽, 黄恬. 运动性疲劳的生化机制与恢复方法的综述[J]. *当代体育科技*, 2015, 5(35): 232–233.
- JU LL, HUANG T. Summary of biochemical mechanism and recovery methods of exercise-induced fatigue [J]. *Contemp Sport Sci Technol*, 2015, 5(35): 232–233.
- [43] 王珏. 在全民健身热下运动后放松方法的研究[J]. *当代体育科技*, 2020, 10(17): 250–251.
- WANG J. Research on relaxation methods after exercise under the national fitness craze [J]. *Contemp Sport Sci Technol*, 2020, 10(17): 250–251.
- [44] 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 for anti exercise fatigue [J]. *Food Ferment Technol*, 2020, 56 (1): 96–99.
- [45] 夏锐, 张希妮, 张燊, 等. 运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(1): 127–132.
- XIA R, ZHANG XN, ZHANG S, *et al.* Biomechanical evaluation of exercise-induced fatigue and its relationship with injury [J]. *Med Biomech*, 2020, 35(1): 127–132.
- [46] 林文斌. 运动生物化学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2009.
- LIN WC. *Exercise biochemistry* [M]. Beijing: People's Sports Press, 2009.
- [47] 梁薇, 文眸. 运动性疲劳的中药调理机制研究进展[J]. *现代医药卫生*, 2020, 36(1): 66–70.
- LIANG W, WEN M. Research progress of Chinese medicine conditioning mechanism of exercise-induced fatigue [J]. *Mod Med Health*, 2020, 36(1): 66–70.
- [48] 刘志政, 孔喜良. 中药及其单体在对抗运动性疲劳中的应用[J]. *四川体育科学*, 2020, 39(2): 32–35, 42.
- LIU ZZ, KONG XL. Application of traditional Chinese medicine and its monomers in anti exercise fatigue [J]. *Sichuan Sport Sci*, 2020, 39(2): 32–35, 42.
- [49] 陈辉. 榆黄蘑制剂抗运动性疲劳及提高运动耐力的作用[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(09): 58–60, 64.
- CHEN H. Effect of *Pleurotus citrinopileatus* preparation on anti exercise fatigue and improving exercise endurance [J]. *Chin Edib Fungi*, 2020, 39(9): 58–60, 64.
- [50] HU M, DU J, DU LD. Anti-fatigue activity of purified anthocyanins prepared from purple passion fruit (*P. edulis* Sim) epicarp in mice [J]. *J Funct Food*, 2019, (12): 68–69.
- [51] 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/OL]. *食品工业科技*: 1-11[2020-12-08]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080192>.
- LIU YN, BAO XW, WANG J, *et al.* Study on anti exercise fatigue and antioxidant effect of seabuckthorn polysaccharide [J/OL]. *Food Industry Technology*: 1-11[2020-12-08]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080192>.
- [52] 康林之, 罗云, 邵峰, 等. 仙鹤草不同提取物对小鼠运动性疲劳及耐缺氧能力的影响[J]. *现代中西医结合杂志*, 2020, 29(19): 2094–2097.
- KANG LZ, LUO Y, SHAO F, *et al.* Effects of different extracts from *Agrimonia pilosa* on exercise-induced fatigue and hypoxia tolerance in mice [J]. *Mod J Integrat Chin West Med*, 2020, 29(19): 2094–2097.
- [53] 冯毅舫, 潘华山, 等. 人参皂甙 Re 和人参总皂甙对运动性疲劳大鼠下丘脑 Ach、DA、5-HT 及含 GABA 量的影响[J]. *福建中医药*, 2009, 40(2): 44–46.
- FENG YZ, PAN HS, *et al.* Effects of ginsenoside Re and ginsenoside on Ach, Da, 5-HT and GABA content in hypothalamus of exercise-induced fatigue rats [J]. *Fujian J Tradit Chin Med*, 2009, 40(2): 44–46.
- [54] 张蓉, 李峰, 李维, 等. 中药对疲劳大鼠脑内学习记忆相关递质谷氨酸及 γ -氨基丁酸受体 mRNA 表达的影响[J]. *福建中医药*, 2011, 18(8): 39–41.
- ZHANG R, LI F, LI W, *et al.* Effects of traditional Chinese medicine on the expression of glutamate and GABA receptor mRNA in the brain of fatigue rats [J]. *Fujian Tradit Chin Med*, 2011, 18(8): 39–41.
- [55] CAO B, LIU SJ, YANG L. Changes of differential urinary metabolites after high-intensive training in teenage football players [J]. *Bio Med Res Int*, 2020, (10): 4–5.
- [56] JOHNSON CD, EAGLE SR, NINDL BC. The effects of fatiguing exercise and load carriage on the perception and initiation of movement [J]. *Eur J Sport Sci*, 2020, (3): 96.
- [57] SCHUCH KN, GOVINDARAJAN LN, GUO YL. Discriminating between sleep and exercise-induced fatigue using computer vision and behavioral genetics [J]. *J Neurogenet*, 2020, 3(5): 44–46.
- [58] 胡武清. 针灸疗法消除运动性疲劳与其它疗法的比较[J]. *体育世界(学术版)*, 2020, (3): 176, 51.
- HU WQ. Comparison of acupuncture and moxibustion in eliminating exercise-induced fatigue [J]. *Sport World (Acad Ed)*, 2020, (3): 176, 51.
- [59] 王嘉怡, 潘姝璇, 夏陈, 等. 发芽糙米米糠营养成分和 γ -氨基丁酸分析及缓解体力疲劳功效[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 177–182.
- WANG JY, PAN SX, XIA C, *et al.* Analysis of nutritional components and γ -aminobutyric acid in germinated brown rice bran and its effect on relieving physical fatigue [J]. *Food Sci*, 2019, 40(1): 177–182.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介

顾 坤, 硕士, 主要研究方向为体育教育训练学、学校体育。
E-mail: brusjkznls@outlook.com