

虾青素的生理功能及其在运动中的应用

王美舒*

(青岛农业大学体育教学部, 青岛 266109)

摘 要: 虾青素是一种虾蟹壳色素, 不仅具有超强的抗氧化性, 还具有抗衰老、抗癌、调节免疫系统、预防心血管疾病等作用, 其作用机制主要是消除氧自由基。人体在运动后, 会产生大量自由基, 自由基的积聚会造成细胞坏死、组织器官受损, 故虾青素理论上可以作为运动营养补剂, 缓解运动疲劳以及进行运动性损伤治疗。本文结合近年来国内外虾青素的相关研究, 详细介绍了虾青素的生理功能及其在运动领域的研究应用, 以期对虾青素在运动领域的研究提供一定的理论依据。

关键词: 虾青素; 抗氧化性; 生理功能; 运动

Physiological function of astaxanthin and the application in sports

WANG Mei-Shu*

(Department of Physical Education, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: Astaxanthin is a kind of shrimp and crab shell pigment, which not only has super antioxidant activity, but also has the functions of anti-aging, anti-cancer, regulating immune system and preventing cardiovascular diseases. The mechanism of action is mainly to eliminate oxygen free radicals. After exercising, human body will produce a large number of free radicals. The accumulation of free radicals will cause cell necrosis and damage to tissues and organs. Therefore, astaxanthin can theoretically be used as a nutritional supplement to alleviate sports fatigue and treat sports injury. This paper summarized the physiological function of astaxanthin and the application in sports field based on the related research of astaxanthin at home and abroad in recent years, in order to provide a theoretical basis for the research of astaxanthin in sports field.

KEY WORDS: astaxanthin; antioxidant activity; physiological function; exercise

1 引 言

虾青素(astaxanthin)是叶黄素的一种, 又被称为虾黄质、龙虾壳色素等, 呈紫红色晶体状^[1]。天然虾青素全称为 3, 3'-二羟基-4, 4'-二酮基- β,β' -胡萝卜素, 是类胡萝卜素的含氧衍生物。在生物界, 虾青素广泛分布在甲壳类动物和鲑科鱼类体内, 植物的叶、花、果, 以及火烈鸟的羽毛中等, 并且多以脂肪酸形式存在^[2]。临床动物医学实验研究表明, 虾青素能有效淬灭单线态氧并捕捉自由基, 有着超强的抗氧化性, 其抗氧化性比 β -胡萝卜素高 10 余倍, 比

辅酶 Q10 高 60 多倍, 比天然 VE 高 100 多倍, 被称为“超级 VE”^[3]。同时, 虾青素还具有抗衰老、抗癌、调节免疫系统、预防心血管疾病等作用^[4], 被广泛的应用在多种领域中。

人体在运动后, 会产生大量的自由基^[5], 自由基的积聚将会造成细胞坏死、组织器官受损^[6]。由于虾青素具有极强的清除自由基作用, 故虾青素理论上可作为运动营养补剂, 缓解运动疲劳以及进行运动性损伤治疗。但是, 目前虾青素在运动医学领域中研究相对较少。本文结合近些年国内外关于虾青素应用的研究, 综述了虾青素生理功能

*通讯作者: 王美舒, 主要研究方向为体育运动营养。E-mail: u56245@163.com

*Corresponding author: WANG Mei-Shu, Department of Physical Education, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China. E-mail: u56245@163.com

的作用及其在运动领域的作用机制, 以期对虾青素在运动领域的研究提供一定的理论指导依据。

2 虾青素的生理功能

2.1 超强的抗氧化作用

虾青素是一种具有超强抗氧化活性的链断裂型抗氧化剂^[7]。人体在正常的生理活动时, 可以产生少量的氧自由基。这些自由基在外界的刺激下, 如: 受到化学试剂、紫外辐射等, 将会导致大量的氧自由基产生^[8]。氧自由基被称为健康杀手, 可以引起生物膜系统损害和细胞内氧化磷酸化紊乱, 直接引起机体的疾病、衰老和死亡。研究表明, 虾青素不仅可以淬灭单线态氧, 直接清除氧自由基, 还能阻断脂肪酸的连锁反应^[9]。

Cheng 等^[10]研究了虾青素对高温胁迫下河豚生长性能、生化参数、活性氧产生的影响, 结果表明, 添加 80~320 mg/kg 虾青素的基础饮食, 可以增强河豚的生长、非特异性免疫反应和抗氧化防御系统, 提高了河豚对高温的抵抗力。Johnston 等^[11]用虾青素处理轮虫, 并喂食幼鱼, 发现富含虾青素的轮虫, 可以提高幼鱼的营养含量, 并改善幼鱼的健康。刘晓星^[12]采用分光光度法比较了虾青素与 5 种天然抗氧化剂(叶黄素、番茄红素、 β -胡萝卜素、维生素 E、维生素 C)在清除二磷酸氢脱氢酶(1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和羟自由基的能力, 发现虾青素在油脂抗氧化及清除自由基方面的能力比其他 5 种抗氧化剂都强。

2.2 免疫功能调节作用

在抗原存在时, 虾青素可以促进脾细胞产生抗体, 刺激体内免疫球蛋白的产生, 从而使 T 细胞的作用增强, 对机体免疫功能起到调节作用^[13,14]。Sun 等^[15]研究了 3 种同分异构体的虾青素在小鼠淋巴细胞和腹腔渗出细胞(peritoneal exudate cells, PECs)系统调节免疫反应中的生物活性, 结果表明, 3 种虾青素均能显著促进淋巴细胞的增殖、PECs 的吞噬能力和 NK 细胞的细胞毒性活性。同样, 刘颖芬等^[16]研究了 3 种不同剂量的虾青素对小鼠免疫功能的调节作用, 并通过与喂服植物油作空白对照, 结果表明, 虾青素在单核-巨噬细胞、细胞免疫、体液免疫功能 3 个方面均有增强免疫的功能。

2.3 预防心血管疾病作用

心血管疾病作为目前全球死亡率较高的疾病之一, 其病理特征包括血脂流变学异常、糖耐量受损、高血压以及动脉粥样硬化等, 代谢综合症常呈现为氧化应激^[17,18], 而虾青素具有超强的抗氧化性, 故被用于预防和治疗氧化应激反应的疾病^[19]。Hussein 等^[20]对大鼠进行虾青素的灌胃实验, 通过与空白实验大鼠对照, 发现灌胃 14 d 的大鼠

可以明显降低自发性高血压。Arun Kumar 等^[21]通过对喂食高脂肪果糖饮食(high fat fructose diet, HFFD)的小鼠进行虾青素处理, 与空白小鼠对照, 发现给予虾青素可以激活胰岛素受体, 降低肥胖小鼠的氧化应激、脂肪积累以及促炎细胞因子, 从而提高胰岛素敏感性。此外, 临床试验已证明, 成人连续两周, 每天口服 3.6 mg 虾青素, 能有效预防低密度脂蛋白-胆固醇的氧化^[22], 从而预防心血管疾病的发生。

2.4 其他作用

虾青素同样具有抗癌作用, 通过研究膳食类胡萝卜素摄入量与癌症发病率以及死亡率的关系, 发现癌症的发病率或死亡率会随着胡萝卜素的摄入而呈现下降的趋势^[23]。虾青素可以作为着色剂进行使用^[24], 这是因为虾青素自身有着极强的色素沉积能力, 通常在饲料中添加虾青素, 可以使水生动物色泽鲜艳, 大大提高观赏性能^[25]。虾青素及其衍生物可以通过激活 Nrf2, 保护细胞不被光诱导损伤, 同时可以用于眼部疾病的临床治疗^[26]。有报道指出, 日本大阪大学蛋白质研究中心采用小鼠进行虾青素的研究实验, 结果表明虾青素可以抑制因时差引起的“时差症”, 其抑制效果比褪黑素还要明显^[27]。

3 虾青素在运动领域的应用及其作用机制

人体运动过程中, 肌肉组织对氧的需求会大大增大, 线粒体电子漏产生增加与激活的黄嘌呤途径都加剧了自由基的产生^[28], 体内过剩的自由基将会给机体带来损伤^[29]。虾青素作为新一代的抗氧化物, 具有超强的抗氧化能力及多种生理功效, 在运动中, 可以起到维护中枢神经系统稳定、缓解运动疲劳损伤、增加肌肉力量与耐力等作用, 近些年已经逐步在运动领域中有所研究^[30,31]。

3.1 维护中枢神经系统稳定

中枢神经系统是由脑、脊髓组成, 是人类学习与记忆的基础^[32]。在运动过程中, 产生的氧自由基将会对中枢神经进行氧化性损伤, 从而导致运动性中枢神经疲劳及许多神经系统疾病的发生^[33]。已有大量的研究证明, 帕金森(parkinson disease, PD)综合症以及肌肉萎缩侧索硬化(amyotrophic lateral sclerosis, ALS)等神经系统疾病的主要诱发原因是氧化胁迫^[34]。Grimmig 等^[35]研究了虾青素对降低小鼠 PD 毒性模型的神经毒性的效果, 结果证明, 给小鼠注射 40 mg/kg 虾青素后, 虾青素在中枢神经系统对 1-甲基-4-苯基-1, 2, 3, 6-四氢吡啶(1-methyl-4-phenyl-1, 2, 3, 6-tetrahydropyridine, MPTP)神经衰退性变具有神经保护作用, 从而具有对抗 PD 机制的功能。Ye 等^[36]研究虾青素通过 HO-1/NOX2 轴保护 PC12 细胞免受 MPP+诱导的氧化应激, 结果表明, 虾青素神经保护的分子机制是抑制氧活性

基(reactive oxygen species, ROS)生成、诱导血红素氧合酶(heme oxygenase, HO-1)表达和抑制 NOX2 表达, 虾青素对 PD 患者具有潜在的辅助治疗作用。Masoudi 等^[37]研究了虾青素对严重脊髓损伤成年大鼠的治疗作用, 与对照相比, 虾青素可以减少脊髓损伤后神经元的凋亡, 减轻病理组织损伤, 促进功能恢复, 认为虾青素有望治疗脊髓损伤。

3.2 缓解运动疲劳损伤

人体在运动后, 机体内会产生大量的自由基, 而过量的自由基积聚在体内会引发氧化应激。如果人体不及时将自由基清除掉, 氧化应激将会损伤蛋白质、脂质、DNA 并改变肌肉细胞的功能^[38,39], 同时, 增加的氧化应激通过激活促炎症细胞因子引发炎症, 导致肌肉疼痛、僵硬和损伤^[40]。Yu 等^[41]测试了虾青素膳食抗氧化剂是否可以改善热诱导骨骼肌氧化损伤, 在暴露于 43 °C 热应激下的小鼠成肌细胞 C2C12 中, 通过注射虾青素后, 线粒体作为热诱导活性氧的主要靶点, 并未受到断裂和损伤, 证明了虾青素能保持线粒体的完整性和功能, 改善热诱导骨骼肌的损伤。Aoi 等^[42]研究了虾青素对肌肉脂质代谢的影响, 发现虾青素增加了脂肪酸转位酶与肉碱-棕榈酰转移酶 I(carnitine palmitoyl transferase I, CPT I)在骨骼肌中的共定位, 减少了在运动中 CPT I 对乙酰赖氨酸的修饰, 结果表明, 虾青素在运动过程中通过激活 CPT I 而不是葡萄糖的利用来促进脂肪的分解代谢, 从而提高运动耐力。尹蕾等^[43]探讨了虾青素对小鼠的抗炎作用机制, 通过测定胸腔渗出液中白细胞数、前列腺素 E2(prostaglandin E2, PGE2)和血清中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)的水平, 证明虾青素对多种炎症模型均有改善作用, 其抗炎机制与抑制脂质过氧化反应、抑制 PGE2 的生成有关。

3.3 增加肌肉力量与耐力

氧化应激除了会引起肌肉疼痛、僵硬和损伤外, 还会损伤线粒体膜以及红细胞(red blood cell, RBC)膜^[44,45]。由于人体中 95%的能量是通过线粒体合成的, 损伤后的线粒体膜会使 ATP 合成量降低, 进而使人体供能不足, 导致肌肉能量减少, 出现肌肉疲劳^[46]; 而损伤后的 RBC 膜会降低输氧能力, 使肌肉的有氧运动能力降低, 增加乳酸的产生量, 最终导致肌肉疲劳^[47]。Aoi 等^[48]考察了酯化与非酯化形式的虾青素对小鼠耐力的影响, 结果表明, 虾青素可以增加骨骼肌中 5'-腺苷-磷酸激活蛋白酶的水平, 同时酯化虾青素具有更好的吸收性能, 可以促进能量的产生, 保护组织在运动过程中免受氧化损伤, 从而增加肌肉耐受力, 延长运动时间。Mayumi 等^[49]研究表明, 小鼠口服虾青素可显著降低血乳酸浓度, 减少血浆游离脂肪酸和血糖消耗, 延长游泳力竭时间, 提高运动能力。Liu 等^[50]研究了虾青

素对老年人肌肉的改善作用, 通过将功能性运动训练与虾青素膳食营养相结合, 老年受试者的肌肉力量与耐力比只进行单独运动训练更能得到改善, 并可以弥补限制老年人活动性所导致相关肌肉萎缩的缺陷。

4 虾青素产品在运动领域中的应用前景

虾青素因其具有多种独特的生理功能, 广泛的应用在食品、医药、化妆品、水产养殖、运动营养等领域。目前, 虾青素保健品在国内外均已投资生产, 国外有“astaxanthin(0615)”制剂、虾青素和少量其他类胡萝卜素复合制剂等多种保健品上市, 并还开发了可应用在医药领域的抗感染等口服制剂^[27]。在水产养殖方面, 美国食品药品监督管理局已批准人工合成反式结构的虾青素用作水产养殖的添加剂, 但是, 现在市场上虾青素的售价很高, 其人工合成品的单价已达 2000~2500 美元/kg^[51]。因此进一步的研究工作对探讨的虾青素生物学作用和其在运动医学领域中的应用都有着十分重要的意义。

5 结 语

虾青素作为一种天然色素, 不仅具有超强的抗氧化性, 还具有抗衰老、抗癌、调节免疫系统、预防心血管疾病等作用, 对于生物体的保护具有重要作用。虽然关于虾青素在生物体的生理功能机制探索已有较大进展, 但是虾青素对运动后机体代谢层面小分子的研究仍然较少, 尤其是对于人体作用机制的研究。因此虾青素在运动领域的应用及其作用机制仍需更加深入、系统的研究。

参考文献

- [1] Higuera-Ciupara I, Felix-Valenzuela L, Goycoolea FM. Astaxanthin: A review of its chemistry and applications [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2006, 46(2): 185–196.
- [2] 彭永健, 吕红萍, 王胜南, 等. 天然虾青素的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2017, (4): 193–197.
Peng YJ, Lv HP, Wang SN, *et al.* Present research and prospect on natural astaxanthin [J]. China Food Addit, 2017, (4): 193–197.
- [3] 凌关庭. 虾青素及其抗氧化能力[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
Ling GT. Astaxanthin and its antioxidant capacity [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] Pashkow FJ, Watumull DG, Campbell CL. Astaxanthin: A novel potential treatment for oxidative stress and inflammation in cardiovascular disease [J]. Am J Cardiol, 2008, 101(10): 58–68.
- [5] Davies KJA, Quintanilha AT, Brooks GA, *et al.* Free radicals and tissue damage produced by exercise [J]. Biochem Biophys Res Commun, 1982, 107(4): 1198–1205.
- [6] Slater TF. Free radicals and tissue injury: Fact and fiction [J]. British J Cancer Suppl, 1987, 8: 5.
- [7] 魏东, 严小君. 天然虾青素的超级抗氧化活性及其应用[J]. 中国海洋药物, 2001, 20(4): 45–50.

- Wei D, Yan XJ. Super-antioxidant activity of natural astaxanthin and its application [J]. Chin J Marine Drugs, 2001, 20(4): 45–50.
- [8] Bagchi D, Garg A, Krohn RL, *et al.* Oxygen free radical scavenging abilities of vitamins C and E, and a grape seed proanthocyanidin extract *in vitro* [J]. Res Commun Mol Pathol Pharmacol, 1997, 95(2): 179–189.
- [9] Dose J, Matsugo S, Yokokawa H, *et al.* Free radical scavenging and cellular antioxidant properties of astaxanthin [J]. Int J Mol Sci, 2016, 17(1): 103.
- [10] Cheng CH, Guo ZX, Ye CX, *et al.* Effect of dietary astaxanthin on the growth performance, non-specific immunity, and antioxidant capacity of pufferfish (*Takifugu obscurus*) under high temperature stress [J]. Fish Physiol Biochem, 2018, 44(1): 209–218.
- [11] Johnston RK, Siegfried EJ, Snell TW, *et al.* Effects of astaxanthin on brachionus manjavacas (*Rotifera*) population growth [J]. Aquacult Res, 2018, 49(6): 2278–2287.
- [12] 刘晓星. 虾青素与 5 种天然抗氧化剂的抗氧化活性比较研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- Liu XX. A comparative study of antioxidant activities of astaxanthin and five natural antioxidants [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [13] 武万强, 刘学波. 虾青素生物功能的研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2012, 292(9): 91–96.
- Wu WQ, Liu XB. A review of biological activities of astaxanthin [J]. Acad Period Farm Prod Proc, 2012, 292(9): 91–96.
- [14] Satoh T. Astaxanthin: Health benefits and toxicity [M]. Nutraceuticals: Academic Press, 2016.
- [15] Sun W, Xing L, Lin H, *et al.* Assessment and comparison of *in vitro* immunoregulatory activity of three astaxanthin stereoisomers [J]. J Ocean Univ China, 2016, 15(2): 283–287.
- [16] 刘颖芬, 辛乃宏, 李炳乾, 等. 雨生红球藻虾青素对小鼠免疫调节的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(20): 183–187.
- Liu YF, Xin NH, Li BQ, *et al.* Study of astaxanthin from haematococcus pluvialis on immune regulation function in mice [J]. Food Res Dev, 2017, 38(20): 183–187.
- [17] Holvoet P. Relations between metabolic syndrome, oxidative stress and inflammation and cardiovascular disease [J]. Verh K Acad Geneesk Belg, 2008, 70(3): 193–219.
- [18] 刘晓娟, 陈晓枫, 刘涵, 等. 不同几何构型虾青素的体外抗氧化及对秀丽线虫氧化应激的保护作用[J]. 食品科学, 2017, (12): 1–12.
- Liu XJ, Chen XF, Liu H, *et al.* *In vitro* antioxidant and protective effects on the oxidative stress of elegans [J]. Food Sci, 2017, (12): 1–12.
- [19] Yamashita E. Let astaxanthin be thy medicine [J]. Pharmanutrition, 2015, 3(4): 115–122.
- [20] Hussein G, Goto H, Oda S, *et al.* Antihypertensive potential and mechanism of action of astaxanthin: II. Vascular reactivity and hemorheology in spontaneously hypertensive rats [J]. Biol Pharm Bull, 2005, 28(6): 967–971.
- [21] Arunkumar E, Bhuvanewari S, Anuradha CV. An intervention study in obese mice with astaxanthin, a marine carotenoid—effects on insulin signaling and pro-inflammatory cytokines [J]. Food Funct, 2012, 3(2): 120–126.
- [22] 夏棚如, 曲雪峰, 王茜. 虾青素预防心血管疾病作用的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 1989–1997.
- Xia XR, Qu XF, Wang Y. Research progress of preventive effects of astaxanthin on cardiovascular diseases [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(9): 1989–1997.
- [23] 肖素荣, 李京东. 虾青素的特性及应用前景[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(5): 33–35.
- Xiao SR, Li JD. Features of astaxanthin and its application prospects [J]. Food Nutr China, 2011, 17(5): 33–35.
- [24] 苏铁柱. 虾青素的生理功能及其在运动中的应用[J]. 商洛学院学报, 2014, 28(2): 87–91.
- Su TZ. Physiological function of astaxanthin and its application in sports [J]. J Shangluo Univ, 2014, 28(2): 87–91.
- [25] 钟雨彤. 虾青素的生理功能与应用领域[J]. 科技展望, 2016, 26(23): 290.
- Zhong YT. Physiological function and application of astaxanthin [J]. Technol Outlook, 2016, 26(23): 290.
- [26] Inoue Y, Shimazawa M, Nagano R, *et al.* Astaxanthin analogs, adonixanthin and lycopene, activate Nrf2 to prevent light-induced photoreceptor degeneration [J]. J Pharmacol Sci, 2017, 134(3): 147–157.
- [27] 张新辉, 熊正英. 虾青素的生物学作用及其在运动医学领域中的应用及展望[J]. 四川体育科学, 2008, (2): 19–22.
- Zhang XH, Xiong ZY. Astaxanthin biology function and its in sports medicine domain application and forecast [J]. Sichuan Sport Sci, 2008, (2): 19–22.
- [28] Hammouda O, Chtourou H, Chaouachi A, *et al.* Effect of short-term maximal exercise on biochemical markers of muscle damage, total antioxidant status, and homocysteine levels in football players [J]. Asian J Sports Med, 2012, 3(4): 239.
- [29] Baralic I, Andjelkovic M, Djordjevic B, *et al.* Effect of astaxanthin supplementation on salivary IgA, oxidative stress, and inflammation in young soccer players [J]. Evid-Based Complement Altern Med, 2015.
- [30] Ikeuchi M, Koyama T, Takahashi J, *et al.* Effects of astaxanthin supplementation on exercise-induced fatigue in mice [J]. Biol Pharm Bull, 2006, 29(10): 2106–2110.
- [31] 王冬冬. 补充虾青素对人体急性高强度运动恢复期代谢影响的 ¹H-NMR 研究[D]. 太原: 山西大学, 2017.
- Wang DD. ¹H-NMR study on the metabolic effects of astaxanthin supplementation on recovery period of acute intensive exercise [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.
- [32] McKay R. Stem cells in the central nervous system [J]. Science, 1997, 276(5309): 66–71.
- [33] 王玉敏, 葛永利, 赵丽楠, 等. 虾青素的神经保护作用机制研究进展[J]. 中国药学杂志, 2018, 53(8): 569–573.
- Wang YM, Ge YL, Zhao LN, *et al.* Recent advances in neuroprotective mechanisms of astaxanthin in acute brain injury and neurodegenerative disease [J]. Chin Pharm J, 2018, 53(8): 569–573.
- [34] Blesa J, Trigo-Damas I, Quiroga-Varela A, *et al.* Oxidative stress and Parkinson's disease [J]. Front Neuroanat, 2015, 9: 91.
- [35] Grimmig B, Daly L, Hudson C, *et al.* Astaxanthin attenuates neurotoxicity in a mouse model of Parkinson's disease [J]. Funct Food Health Dis, 2017, 7(8): 562–576.
- [36] Ye Q, Huang B, Zhang X, *et al.* Astaxanthin protects against MPP⁺-induced oxidative stress in PC12 cells via the HO-1/NOX2 axis [J]. BMC Neurosci, 2012, 13(1): 156.

- [37] Masoudi A, Dargahi L, Abbaszadeh F, *et al.* Neuroprotective effects of astaxanthin in a rat model of spinal cord injury [J]. *Behav Brain Res*, 2017, 329: 104–110.
- [38] 王洁, 阮英朝, 吴丽君. 补充虾青素对运动机体的影响[J]. *体育科技文献通报*, 2017, 25(11): 168–169.
Wang J, Ruan YZ, Wu LJ. Effects of astaxanthin supplementation on exercise body [J]. *Bull Sport Sci Technol*, 2017, 25(11): 168–169.
- [39] 吴丽君, 郭新明. 虾青素及运动对人体抗氧化能力, 血乳酸, 血尿酸代谢的影响[J]. *体育科学*, 2017, (1): 62–67, 80.
Wu LJ, Guo XM. Effect of astaxanthin and exercise on antioxidant capacity of human body, blood lactic acid and blood uric acid metabolism [J]. *Chin J Sports Sci*, 2017, (1): 62–67, 80.
- [40] Sallam N, Laher I. Exercise modulates oxidative stress and inflammation in aging and cardiovascular diseases [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2016, (2016): 1–32.
- [41] Yu T, Dohl J, Chen Y, *et al.* Astaxanthin but not quercetin preserves mitochondrial integrity and function, ameliorates oxidative stress, and reduces heat-induced skeletal muscle injury [J]. *J Cell Physiol*, 2019.
- [42] Aoi W, Naito Y, Sakuma K, *et al.* Astaxanthin limits exercise-induced skeletal and cardiac muscle damage in mice [J]. *Antioxid Redox Signal*, 2003, 5(1): 139–144.
- [43] 尹嵩, 尚小玉, 张泽生. 虾青素制品抗炎作用及机制研究[J]. *中草药*, 2010, 41(2): 267–269.
Yin Q, Shang XY, Zhang ZS. Anti-inflammatory effects and mechanism of astaxanthin products [J]. *Chin Tradit Herb Drugs*, 2010, 41(2): 267–269.
- [44] Rocha S, Gomes D, Lima M, *et al.* Peroxiredoxin 2, glutathione peroxidase, and catalase in the cytosol and membrane of erythrocytes under H₂O₂-induced oxidative stress [J]. *Free Radical Res*, 2015, 49(8): 990–1003.
- [45] 杨宏富, 晁珂, 梁明, 等. 吡咯烷二硫代氨基甲酸酯对ALI小鼠肺组织氧化应激及线粒体功能的影响[J]. *中华危重病急救医学*, 2018, (5): 428–433.
Yang HF, Yao K, Liang M, *et al.* Effect of pyrrolidine dithiocarbamate on oxidative stress and mitochondrial function of lung tissue in mice with acute lung injury [J]. *Chin Crit Care Med*, 2018, (5): 428–433.
- [46] 汤昆, 梁慧子, 张滴. 线粒体胆固醇转运蛋白研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2017, 36(3): 255–259.
Tang K, Liang HZ, Zhang L. Research progress of mitochondrial cholesterol transporter [J]. *Chin J Sports Med*, 2017, 36(3): 255–259.
- [47] Wan J, Qin Z, Wang P, *et al.* Muscle fatigue: General understanding and treatment [J]. *Exp Mol Med*, 2017, 49(10): e384.
- [48] Aoi W, Maoka T, Abe R, *et al.* Comparison of the effect of non-esterified and esterified astaxanthins on endurance performance in mice [J]. *J Clin Biochem Nutr*, 2018, 62(2): 161–166.
- [49] Mayumi I, Tomoyuki K, Jiro T, *et al.* Effects of astaxanthin supplementation on exercise induced fatigue in mice [J]. *Biol Pharm Bull*, 2006, 29(10): 2106–2110.
- [50] Liu SZ, Ali AS, Campbell MD, *et al.* Building strength, endurance, and mobility using an astaxanthin formulation with functional training in elderly [J]. *J Cachexia Sarcopen*, 2018, 9(5): 826–833.
- [51] 陈晓琳, 汲霞, 钟志梅, 等. 虾青素的应用前景[J]. *海洋科学*, 2008, 32(5): 87–89, 96.
Chen XL, Ji X, Zhong ZM, *et al.* Application prospects of astaxanthin [J]. *Marine Sci*, 2008, 32(5): 87–89, 96.

(责任编辑: 苏笑芳)

作者简介

王美舒, 主要研究方向为体育运动营养。
E-mail: u56245@163.com