

芸豆促进运动性疲劳恢复的作用机制研究进展

方佳豪 钱海峰 李 言 樊铭聪 王 立

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:合理的膳食干预是缓解运动疲劳的有效途径。芸豆因其高蛋白含量和丰富的生物活性成分,在运动恢复领域展现出巨大的开发潜力。文章综述了芸豆的营养成分及主要活性成分,分析了人体运动过程中的生理变化,阐述了芸豆对运动生理变化的影响,以及对缓解运动疲劳的有益效果,并展望了芸豆在运动营养领域的未来应用和研究方向。

关键词:芸豆;氧化应激;炎症反应;运动疲劳

Research progress on mechanism of kidney bean in promoting recovery from exercise-induced fatigue

FANG Jiahao QIAN Haifeng LI Yan FAN Mingcong WANG Li

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: A reasonable dietary intervention is an effective way to alleviate exercise-induced fatigue. Kidney beans, due to their high protein content and abundant bioactive components, show great potential in the field of exercise recovery. This review summarized the nutritional components and major bioactive components of kidney beans, analyzed the physiological changes occurring during human physical exercise, and elaborated on the effects of kidney beans on these exercise-induced physiological changes, as well as their beneficial role in alleviating exercise-induced fatigue. Furthermore, the review provided an outlook on the future applications and research directions of kidney beans in the field of sports nutrition.

Keywords: kidney bean; oxidative stress; inflammatory response; exercise-induced fatigue

芸豆(*Phaseolus vulgaris* L.)是一种具有丰富营养的食用豆类,其全球种植范围广泛,据联合国粮农组织统计,已有超过90个国家和地区种植芸豆,其种植面积仅次于大豆,是中国出口量最大的特色杂豆作物^[1]。在中国,芸豆的种植分布极为广泛,几乎覆盖所有省区,尤其在东北、华北、西北和西南等高寒冷凉地区,芸豆的种植更为集中^[2]。传统中医学认为,芸豆性温味甘,具有益气补肾、养心安神、健脾胃等功效,其果壳、籽实及根部均可入药。现代研究^[3]表明,芸豆具有显著的抗炎作用,对关节痛、腰痛及神经痛等有一定的缓解效果,具有降血脂、抗肿瘤、预防糖尿病等作用。芸豆中含有多种活性物质,如多肽、抗性淀粉和多酚类化合物,赋予芸豆显著的抗氧化活

性^[4]。芸豆多肽具备抗氧化、降血压、抗肿瘤和改善心血管功能等生理活性,还因其相对分子质量小、空间结构简单、稳定性高、副作用少、易于人体吸收等优势,在现代医学中具有重要的药用价值^[5]。随着中国民众健康意识的不断提升,以植物为主的膳食模式正日益受到推崇。芸豆凭借其富含优质蛋白质、膳食纤维及功能性植物化学成分的特点,加之易于加工的优势,展现出较高的食用价值、加工潜力和经济价值,已成为当前备受关注的研究与应用热点豆类作物。

运动作为引发氧化应激的重要应激源,机体在运动过程中会产生运动性氧化应激损伤。此外,长时间、大强度的运动还可能对机体造成炎症。长时间运动后,运动

基金项目:国家食用豆产业技术体系食品加工与综合利用岗位科学家项目(编号:CARS-08-G19);江苏省高等教育学会专项课题(编号:2024JCSZ33)

通信作者:王立(1978—),男,江南大学教授,博士。E-mail:wangli@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2025-04-16 **改回日期:**2025-08-02

引用格式:方佳豪,钱海峰,李言,等. 芸豆促进运动性疲劳恢复的作用机制研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 206-214.

Citation: FANG Jiahao, QIAN Haifeng, LI Yan, et al. Research progress on mechanism of kidney bean in promoting recovery from exercise-induced fatigue[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 206-214.

疲劳也是普遍现象,需要一种简单而有效的方式满足运动后机体的恢复。芸豆不仅富含多种营养成分,更展现出强大的抗氧化、抗炎和抗疲劳的生物活性。其在缓解运动引起的肌肉损伤、减轻炎症反应、加速疲劳消除方面具有独特优势,能够显著促进运动后的身体恢复过程。文章拟系统梳理芸豆在促进运动恢复方面的相关研究进展,揭示芸豆促进运动恢复的潜在机制和科学依据,为未来开发新型高效的运动营养食品提供理论支撑,推动芸豆从传统食材向功能性运动营养补充剂的转变。

1 芸豆的基本组成与活性成分

1.1 基本营养成分

芸豆的分类方式多样,可依据其原产地、种皮颜色及种植省份等进行划分。芸豆具有均衡的营养素比例和丰富的微量元素,是一种高品质的食用豆类^[6]。芸豆含有20~30 g/100 g蛋白质,67~74 g/100 g碳水化合物,以及相对较少的脂肪(1.5~4.5 g/100 g),其矿物质元素含量达3.5~4.5 g/100 g。此外,芸豆还含有烟酸、类胡萝卜素等多种维生素^[7]。

1.1.1 蛋白质 芸豆的蛋白质组分有醇溶蛋白、球蛋白及清蛋白等多种类型。其中,球蛋白(占比50%~70%)与清蛋白(占比约10%)构成了芸豆蛋白的主要部分。依据沉降系数,球蛋白可进一步区分为7S和11S两个组分,二者均为天然形成的低聚物^[8]。7S组分通常被称为菜豆蛋白,这是一种具有生物活性的糖蛋白,其含量约占豆类总氮含量的50%。相比之下,11S组分的含量则相对较低,仅占总氮含量的10%^[9]。张业辉等^[10]研究证实,在相同试验条件下,芸豆蛋白的凝胶形成能力优于绿豆、红豆及黄豆蛋白,且更易于形成稳定的凝胶结构。这些独特的物理化学特性赋予了芸豆蛋白在食品工业中显著的应用价值。作为营养价值极高的植物蛋白来源,芸豆蛋白中富含包括全部8种人体必需氨基酸的18种氨基酸^[11]。芸豆必需氨基酸组成符合FAO和WHO提出的标准蛋白质模式,且氨基酸评分(AAI)、必需氨基酸指数(EAAI)、营养指数(NI)等指标均高于乳清蛋白和大豆蛋白,具有很高的营养价值^[12]。芸豆可以为人体提供较为全面的氨基酸,促进身体的生长发育和修复,可以是素食者或寻求植物蛋白来源人群的理想选择。

1.1.2 淀粉 芸豆的淀粉含量约为40%~60%,是籽粒中最主要的组分,芸豆含有较多的直链淀粉,这是芸豆作为主食和凝胶类食品加工的主要物质基^[13],同时还含有质量分数为9.16%~18.09%的抗性淀粉^[14]。陈振家等^[15]通过水膜法揭示了芸豆淀粉特性,指出其透明度、溶解性及沉降性等关键参数,正好处于玉米淀粉和马铃薯淀粉的特性谱带之中。杜双奎等^[16]采用湿磨法处理了5种不同颜色的芸豆(花芸豆、小红芸豆、红芸豆、小黑芸豆及小白

芸豆),发现原料品种不同,但提取出的淀粉颗粒形态却高度统一。大颗粒普遍呈卵圆形或肾形,小颗粒则多为圆形。这些芸豆淀粉的溶解度和膨胀度均随温度的上升而提高,属于限制型膨胀淀粉。限制型膨胀淀粉在加热过程中溶解度和膨胀度较低,具有典型的二段膨胀特性,起始糊化温度高,黏度变化复杂。限制型膨胀淀粉富含不可溶性膳食纤维,能够促进肠道蠕动,改善消化功能,并有助于维持血糖稳定,降低胆固醇吸收,从而在体重管理和慢性病预防中发挥积极作用。此外,其低热量特性使其成为健康食品配方中的理想选择,有助于提升食品的质构和口感,同时减少糖、脂肪等高热量成分的使用。

1.1.3 膳食纤维 芸豆的豆皮约占总质量的7.5%~8.0%,是提取膳食纤维的理想来源。其膳食纤维组成中,可溶性部分与不可溶性部分分别为3.5%和19.8%^[17]。与常见的谷物相比,芸豆的膳食纤维含量更为突出。高膳食纤维含量的食物被证实具有多种生理益处,包括促进肠道蠕动、降低血糖和胆固醇等^[18]。佐兆杭等^[19]采用一种将芸豆、黑豆与绿豆的膳食纤维按质量比1:1:1混合配制而成的饲料喂食大鼠。结果表明,杂豆膳食纤维能够改善糖尿病对大鼠胰腺造成的损伤,还能够降低糖尿病模型大鼠血液中的血糖水平。芸豆所含的膳食纤维还可以通过加速食物在肠道内的运行速度,进而降低肠道对部分营养素的吸收效率,这被认为是其具有辅助减肥作用的部分机制。

1.1.4 矿物质 相较于常见的谷类作物以及动物性食品,芸豆属于高钾镁低钠食物,富含钙、磷、钾、镁、铁、铜、锌等多种元素。与鸡肉相比,芸豆的钙含量约为其7倍,铁含量约为其4倍。维生素B族的总含量也高于鸡肉。其中维生素B₁含量约为3.52 mg/100 g,其在人体内可促进肌肉中磷酸肌酸和糖原的合成,其缺乏会导致丙酮酸及乳酸在体内大量堆积,进而使机体容易感到疲劳^[12]。芸豆独特的矿物质和维生素构成,特别是高含量的钙、铁及维生素B₁,使其在补充矿物质、维持能量代谢和预防相关缺乏症方面,相比某些动物性食品具有显著优势。

1.2 主要活性成分

1.2.1 多酚类 芸豆多酚类成分主要富集在皮层部位。孙立兰等^[20]运用高效液相色谱—质谱联用技术分析了芸豆皮中游离多酚组分,并鉴定出19种酚酸类化合物,没食子酸、水杨酸、儿茶素及苯丙氨酸为其主要化合物。从含量上看,儿茶素含量较高,为(425.952±7.652) μg/g,相对含量占比高达76.1%,远高于其他成分。杨贤强等^[21]研究揭示,儿茶素的抗氧化效能显著,是维生素E的20倍,甚至超越了超氧化物歧化酶。儿茶素凭借其强抗氧化性,能够有效清除体内自由基,减少氧化应激对细胞的损伤,从而延缓细胞衰老进程,保护细胞膜和DNA免受氧化损伤。此外,儿茶素还具有多方面的营养功效,如降低胆固

醇和血压,减少动脉粥样硬化的风险;还能抑制炎症反应,增强免疫系统的功能,并促进肠道菌群平衡,长期摄入有助于预防慢性疾病,维持身体健康。

1.2.2 抗氧化肽类 李思楠等^[22]通过超滤技术处理白芸豆多肽(WKBPs),并根据相对分子质量将其划分为4个组分:WKBPs-1(相对分子质量>10 000)、WKBPs-2(5 000<相对分子质量<10 000)、WKBPs-3(3 000<相对分子质量<5 000)以及WKBPs-4(相对分子质量<3 000)。各组分的多肽含量分别为:WKBPs-1含肽段1.65%,WKBPs-2含肽段5.78%,WKBPs-3含肽段5.82%,WKBPs-4含肽段86.25%,表明白芸豆多肽的相对分子质量分布范围主要在3 000以下。肖云等^[23]研究发现,酿酒酵母对豆渣中蛋白质的水解效率最高,且由此获得的白芸豆肽不具有苦涩的风味。王秋明等^[24]以白芸豆豆渣作为研究对象,通过酶解法评估了3种不同酶对生、熟豆渣的酶解效果,并重点关注了所制备多肽的产量和感官特性。得出碱性蛋白酶处理熟豆渣所得的白芸豆多肽具有最优的品质,制备出的芸豆活性肽表现出强大的抗氧化性能。

2 人体运动过程中的生理变化

2.1 氧化应激

运动是诱发氧化应激的一个重要应激源。运动可使机体的耗氧量增加10~20倍,其中约有2%~5%的氧会转化为活性氧^[25]。随着运动时间的延长,活性氧的产生会增多,进而干扰细胞的正常功能,诱发疲劳,最终影响运动表现和机体健康^[26-27]。运动期间,骨骼肌经历快速且频繁的收缩,会导致自由基的生成速率暂时超过机体的清除能力,氧化应激水平升高,进而引发运动性相关损伤^[28]。黄嘌呤氧化酶(XO)可直接参与活性氧的生成过程^[29]。Radak等^[30]研究发现,在无氧运动条件下,特别是急性力竭运动后,XO活性会显著攀升,生成的大量活性氧会对组织造成严重的氧化损伤。此外,运动引起的组织损伤会刺激多种细胞因子释放,进而激活巨噬细胞及中性粒细胞,引发免疫防御反应,这也可能导致活性氧的过度产生^[31]。

2.2 炎症反应

适量的身体运动对维持和提升健康水平十分有益。当运动持续时间过长或强度过高时,反而可能给身体带来负面影响,甚至触发炎症过程。急性高强度运动会对骨骼肌的肌原纤维及其周围的细胞外基质造成超微结构损伤,这种运动性肌肉损伤(EIMD)在损害肌肉正常功能的基础上还会引发炎症反应^[32-33]。当机体经历短时高强度运动且未能获得充分恢复时,这种不平衡状态会增加肌肉骨骼系统损伤的风险。同时,这种状况还会刺激促炎细胞因子,如白细胞介素6(IL-6)、白细胞介素1 β (IL-

1 β)和肿瘤坏死因子 α (TNF- α)的产生与释放。细胞因子能够作用于机体的不同系统,通过与这些系统的相互作用,诱发一系列与运动表现减退相联系的生理反应和临床表现^[34]。De等^[35]研究证实,急性高强度运动能够加剧炎症反应,表现为血液中IL-6水平升高,中性粒细胞的迁移能力增强,以及白细胞向骨骼肌血管的募集增加。通常情况下,剧烈力竭运动会导致更高水平的炎症介质产生,这既增加了运动损伤的风险,也可能提高慢性炎症发生的可能性^[36]。郭林^[37]通过动物试验发现,相较于对照组和一般训练组,大负荷训练组大鼠的机体炎症水平显著升高,其血清中的TNF- α 、IL-6以及肾组织中的TNF- α 、IL-6含量均明显更高。

2.3 运动疲劳

运动性疲劳的产生涉及多方面因素,其内在机制通常被认为与自由基及其他氧化产物的过度积累密切相关^[38]。随着运动持续时间的增加,个体通常会感受到运动性疲劳感的逐步加深,这种感受往往伴随着机体运动能力的相应下降。运动疲劳的内在发生机制涉及多个层面,过程相当复杂。为了便于分析,通常根据导致疲劳的因素所作用的位点、涉及的生物学途径及其作用方式,将疲劳大致划分为外周疲劳和中枢疲劳两大类型。其中,外周疲劳主要指发生在神经肌肉接头及肌肉本身的功能性障碍,导致肌肉收缩能力减弱;而中枢疲劳则通常被理解为中枢神经系统在持续运动过程中,其驱动运动的能力受到抑制或减弱^[39]。关于疲劳成因的探讨,目前的研究重心在于能量耗竭、代谢产物堆积和氧化应激等关键过程。这些过程分别作用于肌肉组织与中枢神经系统,其产生的综合影响是疲劳现象得以形成的基础^[40-42]。

3 人体运动性疲劳的营养干预手段

人体运动性疲劳的缓解措施涉及多个层面,其核心目标在于加速机体的恢复过程并维持运动能力。现阶段缓解方式多样,例如通过食用特定中药、采用冷热水交替浴或进行局部冰敷等物理手段来减轻疲劳感。同时,合理的营养补充策略至关重要。这包括及时摄入碳水化合物以促进肌糖原储备的恢复,补充优质蛋白质以支持肌肉组织的修复,并适当增加抗氧化营养素的摄取。因此,饮食干预的营养补充机制有助于有效清除在运动过程中过量产生的活性氧,进而减轻氧化应激状态对机体组织细胞可能造成的损害。作为一种安全且有效的方法,饮食干预规避了药物可能引发的副作用,可以通过多种途径在缓解运动性疲劳方面发挥着重要作用,其机制主要包括补充能量储备、促进肌肉组织修复以及调节机体代谢过程。运动后,机体对糖原和蛋白质的需求会显著增加,因此,在运动结束后2 h内摄入富含碳水化合物及优质蛋白质的食物显得尤为关键。食品中含有多种能够改

善运动能力并抵抗疲劳的活性成分,例如碳水化合物、蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等。科学合理的饮食策略不仅能够有效提升机体的功能潜力与运动表现,同时也有助于减轻运动性疲劳^[43]。此外,饮食干预能够针对性地补充机体所需的关键营养素,如蛋白质、碳水化合物和矿物质,进而促进能量储备的恢复和肌肉组织的修复。饮食干预具有广泛的适用性,能够满足不同人群及不同运动强度下的营养需求,长期坚持有助于提升机体的整体健康水平。

4 芸豆活性成分在促进运动性疲劳恢复过程中的作用

4.1 抗氧化和抗炎作用

4.1.1 芸豆多酚的抗氧化作用 芸豆富含的酚类化合物被认为是其潜在抗氧化活性的物质基础。这些酚类物质能够通过多种机制清除活性氧,抑制脂质过氧化,从而减轻运动诱发的氧化损伤。DPPH 自由基和 ABTS 自由基的清除能力等体外评估方法可以科学量化芸豆提取物的抗氧化效能^[44-45]。芸豆不同酚类化合物的抗氧化活性表现见表 1。Wu 等^[46]研究发现,芸豆的氧化自由基吸收能力值高于其他多种食物,甚至包括一些普遍认

为富含抗氧化剂的水果。Pitura 等^[47]采用 DPPH 法测定了 6 种不同颜色芸豆的抗氧化活性,结果显示不同颜色种皮间的活性存在显著差异,具体数值分布为 42 280~57 820 mol/100 g。进一步统计分析发现,抗氧化活性与种皮颜色深度呈正相关,该研究结果不仅量化了不同颜色芸豆种皮的抗氧化能力,更明确了颜色可作为筛选高抗氧化活性芸豆资源的潜在生物标记。王何柱等^[48]测定了芸豆种皮的 ABTS 阳离子自由基清除能力,为 260.8 mg/g。进一步分析表明,黑色芸豆的总清除能力最强,白色芸豆的最弱。杜双奎等^[49]选取了 10 种常见的食用杂豆作为研究对象,探讨了提取液所具有的抗氧化活性。结果显示,在所检测的芸豆品种中,花芸豆、小红芸豆、红芸豆、小黑芸豆和小白芸豆的总酚含量均较高,具有较强的抗氧化能力。李琼等^[50]研究发现,芸豆中提取的黄酮类物质对超氧阴离子自由基表现出 21.5% 的抑制效果,同时也能清除 24.42% 的羟自由基。郝瑞林等^[51]研究指出,红芸豆种皮中花色苷含量尤为丰富,最高可达 185.57 mg/100 g,且其种皮提取物对 ABTS 自由基和 DPPH 自由基的清除率分别高达 68.11% 和 90.66%。综合来看,芸豆具有显著的抗氧化活性很大程度上归因于其体内富含多种酚类物质。

表 1 芸豆抗氧化活性的研究进展

Table 1 Research progress on antioxidant activity of kidney beans

样品	测定方法	研究结果	参考文献
芸豆	氧化自由基吸收能力(ORAC)	芸豆的 ORAC 值高于多种食物,包括一些富含抗氧化剂的水果,芸豆具有显著的抗氧化能力	[46]
芸豆种皮	DPPH 自由基清除能力法	6 种芸豆的抗氧化活性范围为 42.28~57.82 mmol/100 g,抗氧化活性与种皮颜色深度呈正相关	[47]
芸豆种皮	ABTS 自由基清除能力法	ABTS 阳离子自由基清除能力为 260.8 mg/g,黑色芸豆种皮的总酚含量最高,白色种皮的最低;不同花色芸豆种皮中游离态黄酮含量为 2.75~194.90 mg/g,黑色芸豆的总花青素含量最高	[48]
10 种食用杂豆	总酚含量测定	不同杂豆粉的总抗氧化能力、DPPH 自由基清除率和总还原力与其总酚含量呈极显著正相关($P<0.01$),杂豆总酚含量越高,总抗氧化能力和总还原力越强,对 DPPH 自由基清除率越高	[49]
红芸豆	对超氧阴离子自由基和羟自由基的抑制/清除率	芸豆种子黄酮类化合物对清除超氧阴离子自由基以及羟自由基均有一定的作用,且在一定范围内对超氧阴离子自由基的清除效果与黄酮浓度呈正比,表明芸豆种子黄酮类化合物具有抗氧化性	[50]
红芸豆种皮	花色苷含量及 ABTS 自由基/DPPH 自由基清除率	低浓度红芸豆种皮花色苷提取物对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除率高于同浓度维生素 C,红芸豆种皮花色苷提取物具有较强的总还原能力;红芸豆种皮花色苷含量丰富,提取物对 ABTS 自由基和 DPPH 自由基清除率较高	[51]

4.1.2 芸豆多肽的抗炎与抗氧化作用 芸豆多肽具有非常良好的抗炎作用。闫力^[52]将芸豆多肽作用于脂多糖(LPS)诱导的细胞,通过 Griess 法检测细胞中的一氧化氮(NO)含量发现,芸豆多肽组分能够抑制细胞产生过量的 NO,并能明显改善 LPS 诱导的细胞形态变化及吞噬能力

下降。同时,多肽组分还能显著拮抗 LPS 诱导的促炎因子(TNF- α 和 IL-6)、促炎介质诱导型一氧化氮合酶(iNOS)以及抗炎因子 IL-10 的 mRNA 表达变化。此外,LPS 处理会触发细胞中核因子- κ B(NF- κ B)信号通路的激活,然而,预先使用多肽组分进行处理则能够有效抑制这

种由 LPS 引发的 NF-κB 信号通路激活。这些试验结果共同表明,红芸豆多肽组分可以通过干预 NF-κB 信号通路来抑制 LPS 诱导的细胞炎症反应,从而达到抗炎的作用。

芸豆多肽具有良好的抗氧化作用。马萍等^[53]研究证实,通过双酶水解技术从紫花芸豆蛋白中提取的一种水溶性活性多肽,能够显著缓解过氧化氢对细胞造成的生存能力下降。该多肽处理能降低细胞内活性氧的积累水平。对过氧化氢诱导的细胞氧化损伤具有明确的保护效应。其潜在的保护机制可能涉及多个层面,包括维持细胞存活、减少活性氧的生成、抑制细胞膜脂质过氧化、下调促凋亡蛋白的合成以及增强细胞内源性抗氧化防御体系的功能,最终达到提升机体整体抗氧化储备和抗氧化目的。

4.2 抗疲劳作用

运动诱导的生理应激会引发一系列连锁反应,造成运动疲劳,而芸豆蛋白肽的介入能够有效干预这一过程,从而显著提升机体的抗疲劳能力^[54-55]。运动后及时补充芸豆多肽可减轻活性氧对细胞结构的潜在损伤,并对中枢神经系统的疲劳状态产生积极的缓解效应。这对于消除疲劳、加速身体机能的恢复具有显著效果^[56-57]。其具体作用机制主要通过以下两个方面实现。

4.2.1 芸豆蛋白肽对能量代谢的促进作用 在运动恢复领域,小分子肽相较于传统蛋白质形式(如游离多肽、氨

基酸或完整蛋白)具有明显优势,其消化吸收效率更高。这种高效性直接转化为更快的恢复进程,帮助机体从大强度运动应激中恢复过来。同时,它还能在分子水平上发挥作用,减少骨骼肌蛋白质的分解流失,有助于维持蛋白质合成与分解的平衡状态,这对保持肌肉量至关重要^[58-59]。因此,在运动后阶段,通过补充源自芸豆蛋白的肽类来为身体提供支链氨基酸,是一种有效的恢复策略。芸豆蛋白肽对能量代谢的促进作用见表 2。芸豆蛋白肽的营养补充不仅能显著缓解运动后的疲劳感,还能优化肌肉组织对氨基酸的吸收与利用效率,减缓肌糖原的消耗速度,并抑制肌肉蛋白质的分解过程。在肌肉细胞内部,这些活性肽会发生氧化脱氨基反应,脱下的氨基与丙酮酸结合,最终生成谷氨酰胺和丙氨酸,这些物质不仅能为身体提供能量,其生成的酮酸还能直接进入三羧酸循环参与能量代谢。值得注意的是,在特定生理条件下,这些肽类本身甚至可以作为直接的能量来源被肌肉利用,这主要得益于其易于吸收和快速利用的特性^[60]。

此外,通过在运动前及运动过程中适时摄入肽类物质,可以延缓或减轻身体可能出现的“负平衡”状态,进而能够显著降低肌肉蛋白质的降解速率。通过促进蛋白质的正常合成过程,可以有效地缓冲过度运动对机体造成的累积性生理影响。这种生理上的积极调节,最终能够帮助身体抵抗疲劳感的产生,维持良好的运动状态^[61-62]。

表 2 芸豆蛋白肽对能量代谢的促进作用及机理

Table 2 Promotion effects and mechanisms of kidney bean protein peptides on energy metabolism		
发挥作用	机理	参考文献
消化吸收效率	小分子肽相较于传统蛋白质形式更易被消化吸收,转化为更快的恢复进程,帮助机体从大强度运动应激中恢复	[58]
提供支链氨基酸	补充源自芸豆蛋白的肽类为身体提供支链氨基酸,缓解运动后疲劳感,优化肌肉组织对氨基酸的吸收与利用效率	[59]
参与能量代谢	活性肽在肌肉细胞内发生氧化脱氨基反应,生成的谷氨酰胺、丙氨酸和酮酸为身体提供能量,并参与三羧酸循环	[60]
延缓“负平衡”状态	运动前及运动过程中摄入肽类物质,可延缓或减轻身体可能出现的“负平衡”状态,降低肌肉蛋白质的降解速率	[61]

4.2.2 芸豆蛋白肽对损伤组织的修复作用 芸豆蛋白肽对损伤组织的修复作用见表 3。芸豆肽具有卓越的抗氧化活性,能够有效干预并抑制体内过渡金属离子(如 Fe²⁺/Fe³⁺, Cu⁺/Cu²⁺)与活性氧簇,特别是超氧阴离子自由基和羟自由基等催化性物质引发的脂质过氧化链式反应。这种抗氧化活性不仅构成了其抗运动性疲劳效应的分子基础,亦为机体细胞提供了关键的防御机制。人体在急性运动应激后,循环系统中血管紧张素 II 浓度会经历快速且显著的升高,该现象通过激活肾素-血管紧张素系统(RAS),导致肾脏血管收缩,进而引发肾血流量(RBF)的显著减少^[63]。此种血流动力学改变使肾脏处于潜在缺血

状态,从而加速 ROS 的产生,并显著增加肾脏组织的脂质过氧化水平(如 MDA 含量升高),对肾脏造成实质性损伤,甚至破坏正常的生物膜结构和功能完整性。同时,线粒体功能障碍会降低三磷酸腺苷(ATP)的合成速率与供给效率,直接导致肌肉收缩能力与工作耐力的大幅减弱。芸豆蛋白肽中富含的支链氨基酸(BCAAs,包括亮氨酸、异亮氨酸和缬氨酸),不仅能有效拮抗运动引发的氧化应激损伤与炎症反应,还能帮助调节并降低运动后血液中乳酸的累积水平,促进其向丙酮酸的转化与进一步代谢。这些生理效应的实现,很大程度上得益于芸豆多肽本身具有的高生物利用度与快速跨膜转运特性。因

表 3 芸豆蛋白肽对损伤组织的修复作用及机理

Table 3 Repair effects and mechanisms of kidney bean protein peptides on damaged tissue		
发挥作用	机理	参考文献
抗氧化作用	芸豆肽能有效抑制过渡金属离子(如 Fe ²⁺ /Fe ³⁺)与活性氧簇(如超氧阴离子自由基、羟自由基)的催化反应,从而抑制脂质过氧化链式反应,减少氧化损伤	[63]
	在急性运动应激后,芸豆肽可降低血管紧张素 II 水平,抑制肾素—血管紧张素系统(RAS)的过度激活,从而减少肾血流量下降引发的氧化应激	[63]
抗炎作用	芸豆肽富含的支链氨基酸(BCAAs)可有效拮抗运动引发的炎症反应,降低炎症因子的释放,减轻组织损伤	[64]
降低乳酸积累	芸豆肽有助于调节运动后血液中乳酸的积累,促进乳酸向丙酮酸的转化,从而加快乳酸的代谢和清除	[64]
营养补充与代谢调节	在能量消耗过大、营养不足时,芸豆肽能够快速补充必需营养物质和活性成分,调节细胞代谢,纠正内环境失衡	[65]

此,当机体因能量消耗过大导致营养不足、内环境失衡时,摄入适量的芸豆多肽能够迅速补充必需的营养物质和活性成分,通过改善细胞的代谢活动,有助于纠正机体功能紊乱的状态,进而促进疲劳感的缓解与消除^[64-65]。

5 总结

近年来,芸豆作为一种兼具多种功能的健康食品,其丰富的营养价值与显著的生物活性日益受到学界和业界的广泛关注。尽管已有大量试验证据支持芸豆具有缓解运动疲劳的潜力,但当前的研究仍存在一些局限性。一方面,现有关于芸豆抗氧化活性的研究多聚焦于抗氧化肽与酚类物质,未来研究可进一步拓展,深入探索芸豆种皮中富含的花青素等成分,并考察不同活性成分之间可能存在的协同增效作用。另一方面,芸豆的加工处理方式对其活性成分的保留率及最终产品的食用品质有着至关重要的影响。因此,未来的研究应当着重于开发创新的芸豆加工工艺,旨在提高其活性成分的生物利用度,同时优化产品的感官特性。通过这些针对性的改进,芸豆有望发展成为运动后缓解疲劳的理想功能性食品。

参考文献

[1] 张思琪,周素梅,侯殿志,等. 湿热处理对红芸豆 γ -氨基丁酸积累、多酚含量和抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 127-134.

ZHANG S Q, ZHOU S M, HOU D Z, et al. Effects of heat moist treatment on γ -aminobutyric acid accumulation, polyphenol content, and antioxidant activity of red kidney beans [J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 127-134.

[2] 赵玉玲,牛燕燕,史彦鹏,等. 豫西北芸豆种质资源主要农艺性状分析及综合鉴定评价[J]. 种子, 2024, 43(8): 79-84, 102.

ZHAO Y L, NIU Y Y, SHI Y P, et al. Identification and comprehensive evaluation on main agronomic characters of *Phaseolus vulgaris* germplasm resources in northwest of Henan Province[J]. Seed, 2024, 43(8): 79-84, 102.

[3] 徐开媛,王默涵,刘金洋,等. 谷氨酸钠协同低温冻融促进发芽芸豆富集 γ -氨基丁酸的机理研究[J]. 食品与发酵工业,

2025, 51(5): 190-196.

XU K Y, WANG M H, LIU J Y, et al. Study on mechanism of γ -aminobutyric acid enrichment in germinated kidney beans with synergy treatment of monosodium glutamate and low-temperature freeze-thaw[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(5): 190-196.

[4] 王佳,王玺,周芳,等. 基于体外发酵模型研究芸豆—蓝靛果复合发酵液对肠道菌群的调节作用[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(8): 211-218.

WANG J, WANG X, ZHOU F, et al. Study on regulation of kidney bean and haskap composite fermentation broth on gut microbiota via *in vitro* fermentation model[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(8): 211-218.

[5] 李琳,陈丹,范晓禹,等. 英国红芸豆抗氧化肽对氧化应激斑马鱼的保护作用研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 70-79.

LI L, CHEN D, FAN X Y, et al. The protective effect of British red kidney bean antioxidant peptides on oxidatively stressed zebrafish[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2): 70-79.

[6] GARCÍA-CORDERO J M, MARTÍNEZ-PALMA N Y, MADRIGAL-BUJADAR E, et al. Phaseolin, a protein from the seed of *Phaseolus vulgaris*, has antioxidant, antigenotoxic, and chemopreventive properties[J]. Nutrients, 2021, 13(6): 1 750.

[7] 王何柱. 不同芸豆营养功能品质及热加工过程量变研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2020: 30.

WANG H Z. Study on nutritional function quality of different kidney beans and quantitative change of thermal processing[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020: 30.

[8] 王紫涵,李岳星,蔡勇建,等. 白芸豆提取物对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 211-216.

WANG Z H, LI Y X, CAI Y J, et al. Effect of white kidney bean extract on the quality of set yogurt[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 211-216.

[9] TANG C H, SUN X, YIN S W. Physicochemical, functional and structural properties of vicilin-rich protein isolates from three *Phaseolus* legumes: effect of heat treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1 771-1 778.

- [10] 张业辉, 黄利华, 王昌盛, 等. 四种常见豆类蛋白特性的研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(2): 137-139, 160.
ZHANG Y H, HUANG L H, WANG C S, et al. Study of property of four common legume protein isolates[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(2): 137-139, 160.
- [11] 王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 基于主成分分析法的贵州芸豆品质评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 48-53.
WANG H Z, ZHU Y, ZHU Y, et al. Quality evaluation of Guizhou kidney beans based on principal component analysis[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 48-53.
- [12] 孔春丽, 段彩苹, 芦晶, 等. 芸豆中的大分子功能组分及其应用研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(12): 8-18.
KONG C L, DUAN C P, LU J, et al. Research progress on functional macromolecules of kidney beans and their applications[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(12): 8-18.
- [13] 朴升虎, 袁洁瑶, 徐丽, 等. 5 种杂豆粉的理化性质及凝胶特性[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 168-172.
PIAO S H, YUAN J Y, XU L, et al. Study on physicochemical and gel properties of five kinds of minor bean flours[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 168-172.
- [14] KAN L J, NIE S P, HU J L, et al. Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars[J]. Food and Chemical Toxicology, 2017, 108: 467-477.
- [15] 陈振家, 狄建兵, 李玉娥. 红芸豆淀粉性质的研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2009, 29(5): 440-443.
CHEN Z J, DI J B, LI Y E. Studies on the characteristics of starch in red kidney bean[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 29(5): 440-443.
- [16] 杜双奎, 王华, 聂丽洁. 芸豆淀粉理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(8): 31-35.
DU S K, WANG H, NIE L J. Study on physical and chemical properties of kidney bean starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(8): 31-35.
- [17] KUTOŠ T, GOLOB T, KAČ M, et al. Dietary fibre content of dry and processed beans[J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 231-235.
- [18] 邢亚静, 张耀文, 李荫藩. 小杂粮营养价值与综合利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 12.
XING Y J, ZHANG Y W, LI Y F. Nutritional value and comprehensive utilization of minor cereals[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 12.
- [19] 佐兆杭, 王颖, 刘淑婷, 等. 杂豆膳食纤维对糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 177-181.
ZUO Z H, WANG Y, LIU S T, et al. Hypoglycemic effect of dietary fiber from a mixture of common Beans (*Phaseolus vulgaris*), black soybeans [*glycine max* (L.) merr] and Mungbeans (*Vigna radiata* L. Wilczek) on diabetic rats[J]. Food Science, 2018, 39(17): 177-181.
- [20] 孙立兰, 王坤, 张友良, 等. 芸豆皮多酚制备、纯化、鉴定及抗氧化脂氧化作用研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 292-300.
SUN L L, WANG K, ZHANG Y L, et al. Preparation, purification, identification and anti-lipid oxidation of kidney bean skin polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 292-300.
- [21] 杨贤强, 徐绯. 茶多酚保健功效研究的新进展[J]. 茶叶, 1992, 18(3): 42-45.
YANG X Q, XU F. New advances in research on the health benefits of tea polyphenols[J]. Chaye Journal of Tea, 1992, 18(3): 42-45.
- [22] 李思楠, 王萌, 安宇, 等. 复合菌种发酵制备白芸豆多肽工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 213-221.
LI S N, WANG M, AN Y, et al. Process optimization and antioxidant activity analysis of white kidney bean polypeptides prepared by composite strain fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 213-221.
- [23] 肖云, 张之翔, 张丽芬, 等. 不同菌种发酵制备白芸豆多肽的研究[J]. 中国酿造, 2009, 28(11): 157-160.
XIAO Y, ZHANG Z X, ZHANG L F, et al. Preparation of peptide from white kidney bean dreg by different fungi[J]. China Brewing, 2009, 28(11): 157-160.
- [24] 王秋明, 赵璿, 杨明洁, 等. 白芸豆多肽和氨基酸鲜味剂的研制[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 270-272.
WANG Q M, ZHAO J, YANG M J, et al. Comparison of different treatment for preparing white kidney beans peptides and amino acid flavor enhancer[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(5): 270-272.
- [25] 胡国鹏, 王人卫. 体育运动中抗氧化补剂的研究现状与思考[J]. 首都体育学院学报, 2012, 24(6): 556-564, 568.
HU G P, WANG R W. Research on antioxidant supplements in sport and exercise[J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 2012, 24(6): 556-564, 568.
- [26] VALKO M, LEIBFRITZ D, MONCOL J, et al. Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease[J]. The International Journal of Biochemistry & Cell Biology, 2007, 39(1): 44-84.
- [27] BO H, JIANG N, MA G D, et al. Regulation of mitochondrial uncoupling respiration during exercise in rat heart: role of reactive oxygen species (ROS) and uncoupling protein 2[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2008, 44(7): 1 373-1 381.
- [28] 高欢, 吴晴, 李洪晨. 筋膜刀干预对赛艇运动员赛前大负荷训练后免疫、炎症和氧化应激水平的影响[J]. 中国体育科技, 2025, 61(2): 14-23.
GAO H, WU Q, LI H C. Effects of fascial knife intervention on immune function, inflammation and oxidative stress in rowers following heavy-load training before competition[J]. China Sport Science and Technology, 2025, 61(2): 14-23.
- [29] STEINBACHER P, ECKL P. Impact of oxidative stress on exercising skeletal muscle[J]. Biomolecules, 2015, 5(2):

- 356-377.
- [30] RADAK Z, ZHAO Z F, KOLTAI E, et al. Oxygen consumption and usage during physical exercise: the balance between oxidative stress and ROS-dependent adaptive signaling[J]. *Antioxid Redox Signal*, 2013, 18(10): 1 208-1 246.
- [31] PEAKE J, SUZUKI K. Neutrophil activation, antioxidant supplements and exercise-induced oxidative stress[J]. *Exercise Immunology Review*, 2004, 10: 129-141.
- [32] CLARKSON P M, NOSAKA K, BRAUN B. Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1992, 24(5): 512-520.
- [33] FATOUROS I G, JAMURTAS A Z. Insights into the molecular etiology of exercise-induced inflammation: opportunities for optimizing performance[J]. *Journal of Inflammation Research*, 2016, 9: 175-186.
- [34] 陈超凡, 陈晓可, 宋以玲, 等. 运动干预对超重或肥胖个体慢性炎症反应影响的系统综述和Meta分析[J]. *中国运动医学杂志*, 2025, 44(3): 225-236.
- CHEN C F, CHEN X K, SONG Y L, et al. Systematic review and meta-analysis on the impact of exercise intervention on chronic inflammatory responses in overweight or obese individuals[J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2025, 44(3): 225-236.
- [35] DE BARCELLOS L A M, GONÇALVES W A, DE OLIVEIRA M P E, et al. Effect of physical training on exercise-induced inflammation and performance in mice[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2021, 9: 625680.
- [36] CERQUEIRA É, MARINHO D A, NEIVA H P, et al. Inflammatory effects of high and moderate intensity exercise-a systematic review[J]. *Frontiers in Physiology*, 2020, 10: 1 550.
- [37] 郭林. 大负荷训练导致大鼠肾脏组织微细结构变化和分子调控机理的探讨[D]. 北京: 北京体育大学, 2005: 20.
- GUO L. Change of renal tissue micro-structure in rats resulted from load training and mechanisms of molecule regulation[D]. Beijing: Beijing Sport University, 2005: 20.
- [38] 蒯海旗, 林文弢. 运动性疲劳的生化分析与消除方法[J]. *中国体育教练员*, 2018, 26(4): 12-13.
- LIN H Q, LIN W T. Biochemistry analysis on sports fatigue and the removal method[J]. *China Sports Coaches*, 2018, 26(4): 12-13.
- [39] 李依娜, 余元善, 肖更生, 等. 植物源活性肽的研究开发概况[J]. *中国果菜*, 2020, 40(11): 48-54.
- LI Y N, YU Y S, XIAO G S, et al. Overview of the research and development of plant-derived active peptides[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(11): 48-54.
- [40] YE Q Q, CHEN K, YANG X C, et al. Facile and moderate immobilization of proteases on SPS nanospheres for the active collagen peptides[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127610.
- [41] SOLEYMANZADEH N, MIRDAMADI S, MIRZAEI M, et al. Novel β -casein derived antioxidant and ACE-inhibitory active peptide from camel milk fermented by *Leuconostoc lactis* PTCC1899: Identification and molecular docking[J]. *International Dairy Journal*, 2019, 97: 201-208.
- [42] YANG J, BAI W D, ZENG X F, et al. Gamma glutamyl peptides: the food source, enzymatic synthesis, kokumi-active and the potential functional properties – a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 339-346.
- [43] 谢斯, 谢林. 食品改善运动能力抗疲劳的机制和功效成分: 以“第十四届全国营养与保健食品科学大会”为例[J]. *核农学报*, 2023, 37(8): 1 704-1 705.
- XIE S, XIE L. The mechanism and functional components of food in improving exercise ability and anti-fatigue: taking the 14th national science conference on nutrition and health food as an example[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(8): 1 704-1 705.
- [44] 王佳, 丁方莉, 安宇, 等. 芸豆—蓝靛果复合发酵液制备工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(3): 222-231.
- WANG J, DING F L, AN Y, et al. Optimization of preparation process and antioxidant activity of kidney bean-haskap composite fermentation liquid[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(3): 222-231.
- [45] BISWAS A, SUTIVISEDSEK N, CHENG H N, et al. Extraction and analysis of antioxidant capacity in eight edible beans[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2012, 10(1): 89-96.
- [46] WU X L, BEECHER G R, HOLDEN J M, et al. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(12): 4 026-4 037.
- [47] PITURA K, ARNTFIELD S D. Characteristics of flavonol glycosides in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed coats[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 26-32.
- [48] 王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 不同花色芸豆种皮酚类化合物组成及抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 204-210.
- WANG H Z, ZHU Y, ZHU Y, et al. Phenolic composition and antioxidant activity of seed coats of kidney beans with different colors[J]. *Food Science*, 2020, 41(12): 204-210.
- [49] 杜双奎, 于修焯, 李志西. 食用杂豆乙醇提取物的体外抗氧化活性研究[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(11): 14-19.
- DU S K, YU X Z, LI Z X. *In vitro* antioxidative activity of ethanol extracts of food legume[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12(11): 14-19.
- [50] 李琼, 施兴凤, 李学辉, 等. 芸豆种子黄酮类化合物的抗氧化性研究[J]. *种子*, 2009, 28(12): 77-79.
- LI Q, SHI X F, LI X H, et al. Study on the inoxidizability of kidney bean seed's flavonoid compound[J]. *Seed*, 2009, 28(12): 77-79.

- [51] 郝瑞林, 梁爱琦, 董倩倩, 等. 响应面法优化红芸豆种皮花色苷的超声波辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 190-196, 203.
- HAO R L, LIANG A Q, DONG Q Q, et al. Optimization of ultrasonic assisted extraction of anthocyanins from seed coat of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using response surface methodology and evaluation of its antioxidant activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(20): 190-196, 203.
- [52] 闫力. 红芸豆生物活性肽的制备、抗氧化和抗炎活性研究[D]. 山西: 山西大学, 2023: 25.
- YAN L. Preparation, antioxidant and anti-inflammatory activities of bioactive peptides from red kidney bean[D]. Shanxi: Shanxi University, 2023: 25.
- [53] 马萍, 程天赋, 郭增旺, 等. 紫花芸豆肽修复 H₂O₂ 对 HepG2 细胞的氧化应激损伤[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 175-182.
- MA P, CHENG T S, GUO Z W, et al. Cytoprotective effect of *Phaseolus vulgaris* peptides against H₂O₂-induced oxidative damage in HepG2 cells[J]. Food Science, 2020, 41(1): 175-182.
- [54] FERNANDO I P S, PARK S Y, HAN E J, et al. Isolation of an antioxidant peptide from krill protein hydrolysates as a novel agent with potential hepatoprotective effects[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 67: 103889.
- [55] ABDELHEDI O, JRIDI M, NASRI R, et al. Rheological and structural properties of *Hemiramphus far* skin gelatin: potential use as an active fish coating agent[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 331-341.
- [56] SONKLIN C, ALASHI M A, LAOHAKUNJIT N, et al. Identification of antihypertensive peptides from mung bean protein hydrolysate and their effects in spontaneously hypertensive rats[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103635.
- [57] KONDRASHINA A, BRODKORB A, GIBLIN L. Dairy-derived peptides for satiety[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 66: 103801.
- [58] PIMENTEL T C, KLOSOSKI S J, ROSSET M, et al. Fruit juices as probiotic foods[J]. Sport Energy Drink, 2019, 50: 483-513.
- [59] KUMAR S, PANDEY G. Biofortification of pulses and legumes to enhance nutrition[J]. Heliyon, 2020, 6(3): 103682.
- [60] TKACZEWSKA J, JAMRÓZ E, KULAWIK P, et al. Evaluation of the potential use of a carp (*Cyprinus carpio*) skin gelatine hydrolysate as an antioxidant component[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 1 038-1 048.
- [61] ZHANG L M, YU D W, REGENSTEIN J M, et al. A comprehensive review on natural bioactive films with controlled release characteristics and their applications in foods and pharmaceuticals[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 690-707.
- [62] ZANELA J, CASAGRANDE M, RADAELLI J C, et al. Active biodegradable packaging for foods containing *Baccharis dracunculifolia* leaf as natural antioxidant[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(7): 1 301-1 310.
- [63] 田京歌, 陈海霞, 陈书涵. 玉米肽的制备及其生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(3): 753-759.
- TIAN J G, CHEN H X, CHEN S H. Advancement of the preparation and bioactivity studies on bioactive corn peptides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 4(3): 753-759.
- [64] MOHANTY D P, MOHAPATRA S, MISRA S, et al. Milk derived bioactive peptides and their impact on human health: a review[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2016, 23(5): 577-583.
- [65] HUANG C C, LIU C C, TSAO J P, et al. Effects of oral resveratrol supplementation on glycogen replenishment and mitochondria biogenesis in exercised human skeletal muscle [J]. Nutrients, 2020, 12(12): 3 721.