

# 沙棘多糖的分离纯化及其抗运动性疲劳作用

刘明杰\*

(沈阳理工大学, 沈阳 110168)

**摘 要:** 运动性疲劳是一种当训练和比赛负荷超过机体所承受的能力时, 产生的短暂的生理机能减退的现象。生物活性成分多糖一般是由多个单糖分子缩合失水而成, 多数是由阿拉伯糖(Ara)、半乳糖(Gal)、甘露糖(Man)和葡萄糖(Glc)组成的中性杂多糖, 具有较大的分子量。沙棘多糖是其中的一种多糖组分, 具有清除自由基、抗氧化、缓解疲劳等作用。通过研究发现沙棘多糖的抗运动疲劳作用具有一定的应用价值, 值得国内外学者进行深入研究。因此本文以沙棘多糖分离纯化技术和运动疲劳机制为基础, 阐述沙棘多糖不同的分离纯化技术和抗运动性疲劳的作用, 以期促进沙棘多糖在抗运动性疲劳方面的发展, 并为解决运动性疲劳问题提供借鉴和参考。

**关键词:** 沙棘多糖; 分离; 纯化; 抗运动性疲劳

## Extraction and purification of seabuckthorn polysaccharide and its effect on anti-motion fatigue

LIU Ming-Jie\*

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

**ABSTRACT:** Anti-motion fatigue is a kind of transient physiological decline when the training and competition load exceeds the ability of the body. The bioactive component polysaccharide is generally made up of many monosaccharides, which are mostly neutral heteropolysaccharides composed of arabinose (Ara), galactose (Gal), mannose (Man) and glucose (GLC), which has a large molecular weight. Seabuckthorn polysaccharide is one of the polysaccharides, which has the functions of scavenging free radicals, antioxidation and relieving fatigue. It is found that the anti fatigue effect of seabuckthorn polysaccharide has certain application value, which is worth further research by domestic and foreign scholars. Therefore, based on the separation and purification technology and the mechanism of exercise fatigue, this paper expounded the different separation and purification techniques and the anti exercise fatigue effects of seabuckthorn polysaccharide, in order to promote the development of seabuckthorn polysaccharide in the anti-motion fatigue and provide reference for solving the sports fatigue problems.

**KEY WORDS:** seabuckthorn polysaccharide; extraction; purification; anti-motion fatigue

## 0 引 言

沙棘属于药食同源植物, 含有丰富的营养物质和生物活性物质。沙棘果实营养丰富, 含有多种维生素、脂肪酸等活性物质和人体所需的各种氨基酸。周浩楠等<sup>[1]</sup>曾对

沙棘的化学成分及药理作用进行了研究, 研究发现沙棘中含有丰富的黄酮类成分、萜类和甾体类化合物、有机酸类及酚类、油和脂肪酸类、生物碱、多糖类、维生素类及微量元素及其他成分。杜晓兰等<sup>[2]</sup>研究了沙棘的综合价值, 研究表明沙棘有丰富的维生素, 既能够有效地清除人体内

\*通信作者: 刘明杰, 硕士, 讲师, 主要研究方向为运动营养。E-mail: davidshiaj@163.com

\*Corresponding author: LIU Ming-Jie, Master, Lecturer, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China. E-mail: davidshiaj@163.com

自由基,还能阻断过氧化反应,同时还能为人体的组织细胞提供所需的营养成分。沙棘中的类黄酮<sup>[3]</sup>成分既可以增加抗坏血酸的稳定性,提高耐受缺氧的能力,降低血清胆固醇;沙棘中的多酚和有机酸物质能够增强毛细血管及止血抗凝的能力,缓解药物毒性、预防应激反应伤害;另外沙棘中的氨基酸成分能促进人体生长发育、改善睡眠、提高记忆力等功效<sup>[4]</sup>。通过国内外研究表明,沙棘及其成分含有极其丰富的营养物质,对研究开发沙棘具有重要的应用价值,并且食源性活性物质成分分离纯化<sup>[5-7]</sup>有多种方法,包括亲水作用层析、凝胶过滤层析、亲和层析、离子交换层析等,大孔吸附树脂已逐渐发展成为分离纯化多糖的重要技术。

沙棘多糖是主要通过提取纯化等方法得到的一种多糖类物质,具有重要的抗氧化、抗病毒及抗衰老的作用<sup>[8-11]</sup>。据相关研究<sup>[12]</sup>表明,沙棘多糖通过调节机体的免疫功能,进而提高机体的免疫能力。国内外研究表明沙棘多糖的提取方法多种多样,主要有热水提取法、超声波辅助法、微波辅助法、碱法和冻溶破壁法<sup>[13]</sup>。目前沙棘多糖的提取研究中采用热水回流法居多。

运动性疲劳<sup>[14]</sup>是一种在运动后产生的正常的生理现象,可以通过采取科学手段进行恢复,从而加快身体的各项机能的恢复。任薇等<sup>[15]</sup>采用体外模型模拟体内环境,通过体外抗氧化活性法测定了沙棘多糖对不同自由基的清除能力及总还原能力的影响,进而了解了沙棘多糖的反应机制。王昕旭等<sup>[16]</sup>以沙棘多糖为研究对象,研究了沙棘多糖在扑热息痛诱导的小鼠药物性肝损伤组织中的作用,发现沙棘多糖既能发挥抗炎活性的作用,还能减轻肝损伤的程度,保护肝脏免受药物的损害。周勇等<sup>[17]</sup>通过将不同浓度的沙棘多糖加入成品酸奶和发酵乳中,研究了沙棘多糖对成品酸奶和发酵乳产品凝胶特性的影响,发现添加沙棘多糖有能够有效地改善发酵乳的凝胶特性及相关理化指标,增强发酵乳风味和组织状态,进而提高发酵乳品质。目前国内外对沙棘多糖的缓解运动疲劳的作用还不深入,尚待开发阶段。

因此,本文利用沙棘多糖的生物活性性质及结构特征,综合国内外对沙棘多糖的研究现状,以沙棘多糖的分离纯化技术和运动疲劳机制为基础,研究沙棘多糖的抗运动疲劳作用。通过评价沙棘多糖的分离纯化及抗运动疲劳作用,以期研究具有缓解运动疲劳作用的保健食品的开发提供参考。

## 1 沙棘多糖的分离纯化

### 1.1 技术原理及特点

提纯方法是将物质中混有的杂质除去而获得纯净物。分离是将相互混在一起的不同物质彼此分开而得到相应组分的各纯净物。分离提纯方法的选择思路是根据分离提纯

物的性质和状态来定的。多糖中含有多种非多糖组分,因此可通过除蛋白、脱色、透析等方法进行除杂,获得均一多糖,然后通过沉淀法、凝胶色谱法、大孔树脂柱分离法等进行分离纯化。沙棘多糖一般是通过沙棘除蛋白、分离纯化技术得到的一种多糖组分。目前多糖的分离纯化技术相对成熟,已经被广泛应用于生产研发、学术研究中,具有相当丰富的应用价值。

### 1.2 沙棘多糖的分离提纯技术

沙棘多糖的分离纯化技术多种多样。根据不同的技术原理及特点,分为常规热水提取、超声波辅助提取和微波辅助提取、酶法提取等。

#### 1.2.1 溶剂提取法

溶剂提取法<sup>[18-20]</sup>根据各种成分在溶剂中的溶解性质,选用对活性成分溶解度大,对不需要溶出成分溶解度小的溶剂,而将有效成分从组织内溶解出来的方法。溶剂提取法包括浸渍法、渗漉法、煎煮法、回流提取法及连续回流提取法等。宋亮等<sup>[21]</sup>采用超声裂解法与热水提取法相结合进行提取沙棘多糖,并用 Sevage 法结合木瓜蛋白酶法除蛋白, Sephadex G-150 进行柱层析,提取并纯化出沙棘多糖冻干纯品,并对其纯度鉴定,发现对巨噬细胞具有明显的促增殖作用。关奇等<sup>[22]</sup>利用水提醇沉法从沙棘中提取多糖,再经初步纯化后,采用琼脂平板扩散法进行抑菌实验,发现沙棘多糖对大肠杆菌、四叠菌等微生物具有一定的抑制作用。目前国内外的研究中,沙棘多糖的提取大多数主要采用溶剂提取法进行,溶剂集中于热水,采用的技术是热水回流法或者与超声相结合。其他溶剂涉及较少,需要进一步的开发与研究,从而扩大溶剂提取法在沙棘多糖提取中的应用。

#### 1.2.2 超声波辅助提取法

超声波辅助提取法<sup>[23-28]</sup>是一种新的技术手段,利用超声在传递中产生“空化效应”,溶出水溶性膳食纤维,更有利于提高提取物质的含量,提高提取纯化效率,缩短提取时间。研究发现超声波辅助法提取的多糖含量明显高于传统提取法,而且操作简便,省时节能。吕志琴等<sup>[29]</sup>采用单因素实验,研究提取时间、功率和料液比对沙棘多糖提取率的影响,进而采用正交实验确定最佳的提取工艺,并与水提法、微波法和酶解法进行对比,从而对超声波辅助提取沙棘多糖的工艺进行优化,发现沙棘果水溶性多糖通过超声波辅助提取的最佳工艺条件是提取功率 100 W,固液比 1:30(m:V),提取时间 45 min,此时多糖的最大得率为 7.35%。目前,应用超声波进行辅助提取沙棘多糖的研究比较少,主要集中于超声波辅助与热水相结合的技术。但超声波作为辅助技术,开拓了沙棘多糖提取技术的领域,但需要进一步研究与其他提取工艺相结合的未知性。

### 1.2.3 酸解法、酶解法和超临界流体萃取法

酸解法是利用多糖易溶于酸性溶液的性质, 将酸性溶液作为提取剂把多糖溶解出来<sup>[30-33]</sup>。酸解法的理论基础和技术原理比较成熟, 已经应用于非常多的研究及实验领域。但目前国内外还未有采用酸解法进行提取分离沙棘多糖的研究, 因此可以通过酸解法的理化性质, 借鉴于其他多糖、果胶的提取技术, 研究沙棘多糖的酸解法提取工艺, 具有一定的应用价值, 可以多方面提高沙棘多糖的提取效率。

酶解法<sup>[34-39]</sup>通常是用生物酶去除一些组织的方法, 可应用在一般的生物实验中。相对于传统的酸水解和碱水解, 酶解法安全, 能被机体吸收利用, 残留物质无害。酶作为专一高效的催化剂, 具有特异性。目前, 在国内外的研究中, 酶解法用于香菇多糖、仙人掌多糖、竹荪多糖等比较多, 还没有用于沙棘多糖的提取。利用酶的催化作用和特异性进行提取分离沙棘多糖, 具有一定的研究价值, 有望成为未来研究的热点。

超临界流体萃取法<sup>[40-43]</sup>是通过超临界温度与临界压力作用, 与待萃取溶质异常相平衡、传递。随着压力和温度的变化, 溶解能力也会发生改变。超临界流体萃取可与其他提取技术相结合, 获得更加有效的提取纯化方法, 并使工艺参数符合工业生产的要求<sup>[44]</sup>。超临界流体萃取法已经成为国内外广泛应用的萃取技术, 工艺相当成熟, 并且对超临界流体萃取法的研究也相当广泛。但目前的研究中对沙棘多糖的提取应用较少。

综上所述, 沙棘多糖的提取工艺还比较局限, 可以通过多方面、多原理、多技术进行提取沙棘多糖, 对未来研究具有重要的价值。

## 2 运动疲劳

### 2.1 运动疲劳机制

运动疲劳<sup>[45-47]</sup>可以由中枢神经系统异常即中枢疲劳, 或者是外周神经系统失调等引起。运动疲劳是由于运动引起的整个机体工作能力下降的现象。疲劳是一种生理现象, 梁薇等<sup>[48]</sup>对运动性疲劳的中药调理机制进行了研究, 研究发现运动会使机体物质、能量耗损、乳酸堆积从而造成机体失衡, 产生运动性疲劳。目前, 引起运动疲劳的因素较多, 运动疲劳种类较多, 缓解运动疲劳的途径也挺广泛。但国内外对于运动疲劳机制的研究多种多样, 说法不一。因此进一步深入研究运动疲劳机制将有利于从根本上解决疲劳性问题, 更快的造福于人类。

### 2.2 沙棘多糖抗运动疲劳

食源性功能食品对于抗疲劳来说是一个巨大的活性成分筛选库, 能够提供糖、蛋白质等能源物质。不仅能够作为自由基清除剂, 还能够提供调节机体能量代谢的多糖

类物质。寡糖和多糖都具有一定的免疫调节能力, 能够增强机体的免疫力, 具有良好的抗运动疲劳作用<sup>[49]</sup>。

刘雅娜等<sup>[50]</sup>通过对沙棘多糖抗运动性疲劳及抗氧化作用的研究, 通过采用沙棘多糖对长时间过量运动小鼠体力疲劳的缓解作用及体外抗氧化作用研究, 发现沙棘多糖既能够缓解体力疲劳, 还能够增强运动能力及抗氧化作用。王海亮<sup>[51]</sup>通过从沙棘中分离沙棘多糖, 经过对沙棘的活性中心化合物进行筛选后, 探讨其对神经系统疾病的药效活性, 发现沙棘多糖有助于理解神经系统疾病的发病机制及影响因素。苏兴田<sup>[52]</sup>通过在蒙古马基础日粮中添加不同剂量的沙棘多糖, 研究了沙棘多糖对运动性能、糖代谢及抗氧化能力的影响, 发现沙棘多糖所含的活性物质不仅可以调节体内的物质代谢, 还能提高其代谢能力, 从而缓解运动后的疲劳, 快速恢复体能。近年来, 国内外对沙棘多糖的抗运动疲劳研究逐渐增多, 对沙棘多糖的应用开辟新的领域。

## 3 结束语

由于沙棘多糖本身的抗氧化等功能, 对抗运动疲劳具有重要的作用。国内外对沙棘多糖的研究较多, 但绝大多数集中于抗氧化、抗炎作用、生物活性及工艺研究等, 对沙棘多糖的分离纯化研究较多, 主要包括响应面优化闪式提取法、超声波优化法等, 但对沙棘多糖的抗运动疲劳作用研究较少。本文主要从沙棘多糖的性质与功能为出发点, 以成分分离纯化技术和抗运动疲劳为着重点, 研究沙棘多糖的不同分离纯化技术, 及抗疲劳运动作用, 发现沙棘多糖因其能够清除自由基, 因此具有能够缓解运动的作用。今后的研究可以充分利用目前国内外的研究, 对沙棘多糖的抗运动疲劳机制进行深入研究分析, 为今后进一步发挥沙棘的资源优势, 利用沙棘多糖开发保健食品和治疗药物等深加工产品提供理论基础, 从而研发出高功效、多功效、口感好而成本低的沙棘多糖成分的复合性食品, 从而满足不同运动人群的需求。

## 参考文献

- [1] 周浩楠, 胡娜, 董琦, 等. 沙棘化学成分及药理作用的研究进展[J]. 华西药学杂志, 2020, 35(2): 211-217.  
ZHOU HN, HU N, DONG Q, et al. Research progress on the chemical composition and pharmacological action of *hippocrepis rhamnoides* [J]. West Chin J Pharm Sci, 2020, 35(2): 211-217.
- [2] 杜晓兰, 王旭旭, 田旭阳, 等. 沙棘综合价值的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(5): 15-16.  
DU XL, WANG XX, TIAN XY, et al. Research progress on the comprehensive value of seabuck-thorn [J]. J Cere Oils, 2020, 33(5): 15-16.
- [3] 黄建, 李欣益, 王昕旭, 等. 沙棘黄酮对地塞米松注射液诱导大鼠糖尿病的影响[C]. 中国免疫学会: 第十三届全国免疫学学术大会摘要汇编, 2018.

- HUANG J, LI XY, WANG XX, *et al.* The effect of seabuckthorn flavonoids on dexamethasone injection induced diabetes in rats [C]. Chinese Society of Immunology: The 13th National Conference on Immunology Abstract, 2018.
- [4] 张晓光. 沙棘果综合利用关键技术研究[Z]. 2009-09-22.  
ZHANG XG. Research on key technologies for comprehensive utilization of seabuckthorn fruit [Z]. 2009-09-22.
- [5] YANG ZT, WANG JQ, SHAH T, *et al.* Development of surface imprinted heterogeneous nitrogen-doped magnetic carbon nanotubes as promising materials for protein separation and purification [J]. *Talanta*, 2021, 224: 121760.
- [6] SOLTANI F, DARABI H, ARAM R, *et al.* Leaching and solvent extraction purification of zinc from mehdabad complex oxide ore [J]. *Sci Report*, 2021, 11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-81141-7.
- [7] 孙艳艳, 黄冬冬, 刘建飞, 等. 大孔吸附树脂技术分离纯化中药多糖的研究进展[J]. *离子交换与吸附*, 2020, 36(4): 375-383.  
SUN YY, HUANG DD, LIU JF, *et al.* Research progress in separation and purification of polysaccharides from traditional Chinese medicine using macroporous adsorption resin technology [J]. *Ion Exch Adsorpt*, 2020, 36(4): 375-383.
- [8] 王蓉, 李胜男, 陈春, 等. 沙棘多糖对巨噬细胞和免疫抑制小鼠的免疫调节作用研究[J]. *中南药学*, 2020, 18(3): 384-388.  
WANG R, LI SN, CHEN C, *et al.* Research on the immunomodulatory effects of seabuckthorn polysaccharides on macrophages and immunosuppressive mice [J]. *Zhongnan Pharm*, 2020, 18(3): 384-388.
- [9] WEI EW, YANG R, ZHAO HP, *et al.* Microwave-assisted extraction releases the antioxidant polysaccharides from seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 123: 280-290.
- [10] WANG HL, BI HT, GAO TT, *et al.* A homogalacturonan from *Hippophae rhamnoides* L. Berries enhance immunomodulatory activity through TLR4/MyD88 pathway mediated activation of macrophages [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 107: 1039-1045.
- [11] ZHANG W, ZHANG XH, ZOU K, *et al.* Seabuckthorn berry polysaccharide protects against carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in mice via anti-oxidative and anti-inflammatory activities [J]. *Food Funct*, 2017, 8(9): 3130-3138.
- [12] 武美馥, 周鸿立. 沙棘多糖的研究进展[J]. *吉林化工学院学报*, 2018, 35(5): 46-49.  
WU MF, ZHOU HL. Research progress of seabuckthorn polysaccharides [J]. *J Jilin Instit Chem Technol*, 2018, 35(5): 46-49.
- [13] 王瑞琴, 杨晓光, 许文婷, 等. 沙棘多糖的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(13): 221-224.  
WANG RQ, YANG XG, XU WT, *et al.* Research progress of sea-buckthorn polysaccharide [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(13): 221-224.
- [14] 张昌奔, 刘丰彬. 冷疗对运动性疲劳影响的研究现状[J]. *福建体育科技*, 2020, 39(6): 9-13.  
ZHANG CB, LIU FB. Research status of the effect of cold therapy on sports fatigue [J]. *Fujian Sport Sci Technol*, 2020, 39(6): 9-13.
- [15] 任薇, 包晓玮, 张志芳, 等. 沙棘多糖清除自由基及抗脂质过氧化作用研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 272-277.  
REN W, BAO XW, ZHANG ZF, *et al.* Study on free radical scavenging and anti-lipid peroxidation of seabuckthorn polysaccharide [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2019, 40(8): 272-277.
- [16] 王昕旭, 王雪, 张晓慧, 等. 沙棘多糖对扑热息痛诱导的小鼠肝损伤保护作用的研究[J]. *中国免疫学杂志*, 2018, 34(7): 972-975.
- WANG XX, WANG X, ZHANG XH, *et al.* Study on the protective effects of seabuckthorn polysaccharides on paracetamol-induced liver injury in mice [J]. *Chin J Immunol*, 2018, 34(7): 972-975.
- [17] 周勇, 李伟, 胡旭东, 等. 沙棘多糖对发酵乳凝胶特性的影响及沙棘多糖酸奶工艺优化[J]. *中国乳品工业*, 2020, 48(7): 26-31.  
ZHOU Y, LI W, HU XD, *et al.* Effect of seabuckthorn polysaccharide on properties of fermented milk gel and optimization of seabuckthorn polysaccharide yogurt process [J]. *Chin Dairy Ind*, 2020, 48(7): 26-31.
- [18] GUO JJ, TUCKER ZD, WANG Y, *et al.* Ionic liquid enables highly efficient low temperature desalination by directional solvent extraction [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 437.
- [19] SOLTANI F, DARABI H, ARAM R, *et al.* Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdabad complex oxide ore [J]. *Sci Report*, 2021, 11(1): 12.
- [20] ROJAS LM, QU Y, HE LL. A facile solvent extraction method facilitating surface-enhanced Raman spectroscopic detection of ochratoxin A in wine and wheat [J]. *Talanta*, 2021, 224: 123.
- [21] 宋亮, 张威, 董仕超, 等. 沙棘多糖的提取纯化及其对巨噬细胞的作用研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(5): 87-92.  
SONG L, ZHANG W, DONG SC, *et al.* Extraction and purification of seabuckthorn polysaccharides and its effects on macrophages [J]. *J Inner Mongol Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2013, 34(5): 87-92.
- [22] 关奇, 杨万政, 温中平. 沙棘果皮、叶中多糖的提取及其抑菌作用研究[J]. *国际沙棘研究与开发*, 2005, (2): 17-20.  
GUAN Q, YANG WZ, WEN ZP. Extraction of polysaccharide from seabuckthorn pericarp and leaves and its bacteriostasis research [J]. *Int Seabuck Res Dev*, 2005, (2): 17-20.
- [23] KVRAC E, KVRAC B. Ultrasonic-assisted extraction method of phenolic compounds in extra-virgin olive oils (EVOOs) by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) [J]. *Separat Sci Technol*, 2021, 56(2): 1-8.
- [24] TAKAHASHI Y, MUKAI K, OHMURA H, *et al.* Changes in muscle activity with exercise-induced fatigue in thoroughbred horses [J]. *Comp Exer Physiol*, 2021, 17(1): 102901.
- [25] QIN LG, YU J, ZHU JM, *et al.* Ultrasonic-assisted extraction of polyphenol from the seeds of *Allium senescens* L. and its antioxidative role in Harbin dry sausage [J]. *Meat Sci*, 2021, 172: 108351.
- [26] TANG N. Image recognition algorithm for exercise fatigue based on FPGA processor and motion image capture [J]. *Microp Micro*, 2021, 81(3): 103756.
- [27] JOHNSON CD, EAGLE SR, NINDL BC, *et al.* The effects of fatiguing exercise and load carriage on the perception and initiation of movement [J]. *Eur J Sport Sci*, 2021, 21(1): 1-29.
- [28] SHIMADA M, SIRIJEERACHAI G, KHUNASINKUN S, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total phenolic compound from leaves of *Chromolaena odorata* L. using response surface methodology [J]. *MATEC Web Conf*, 2021, 333: 12.
- [29] 吕志琴, 童军茂, 陈国刚, 等. 沙棘多糖提取纯化的工艺研究[J]. *农产品加工*, 2013, (6): 41-43, 46.  
LV ZQ, TONG JM, CHEN GG, *et al.* Study on the extraction and purification technology of seabuck-thorn polysaccharides [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2013, (6): 41-43, 46.
- [30] LEE JH, CHOUNG MG. Determination of optimal acid hydrolysis time of

- soybean isoflavones using drying oven and microwave assisted methods [J]. Food Chem, 2011, 129(2): 577–582.
- [31] REZAUL H, HOWARD B. Total cyanide determination of plants and foods using the picrate and acid hydrolysis methods [J]. Food Chem, 2002, 77(1): 107–114.
- [32] KANG LW, MIN CK, JE IK. Study on hydrolysis method for extremely small amount of lipids by organic basic solution, tetramethylammonium hydroxide/methanol and capillary gas chromatographic analysis of fatty acid composition depending on derivatization methods [J]. J Appl Sci, 2002, 2(8): 71–75.
- [33] KANG LW, JAE IK. New hydrolysis method for extremely small amount of lipids and capillary gas chromatographic analysis as N(O)-tert-butyl dimethylsilyl fatty acid derivatives compared with methyl ester derivatives [J]. J Chromatogr A, 1999, 862(2): 199–208.
- [34] PARK YJ, HWANG U, PARK S, *et al.* Optimal bioconversion for compound K production from red ginseng root (C.A.Mayer) by sequential enzymatic hydrolysis and its characteristics [J]. Appl Biol Chem, 2021, 64(1): 297–302.
- [35] TANG W, WU XX, HUANG CX, *et al.* Comprehensive understanding of the effects of metallic cations on enzymatic hydrolysis of humic acid-pretreated waste wheat straw [J]. Biotechnol Biof, 2021, 14(1): 12.
- [36] VERONICA DC, SERGIO H, IRMENE O. Evaluation of steam explosion pretreatment and enzymatic hydrolysis conditions for agave bagasse in biomethane production [J]. Bio Energy Res, 2021, DOI: 10.1007/s12155-021-10245-9.
- [37] SUN SF, YANG HY, YANG J, *et al.* Integrated treatment of perennial ryegrass: Structural characterization of hemicelluloses and improvement of enzymatic hydrolysis of cellulose [J]. Carbohydr Polym, 2021, 254: 12.
- [38] MOTA TR, OLIVEIRA DM, SIMISTER R, *et al.* Design of experiments driven optimization of alkaline pretreatment and saccharification for sugarcane bagasse [J]. Biores Technol, 2021, 321: 124499.
- [39] WU YJ, GE SB, XIA CL, *et al.* Application of intermittent ball milling to enzymatic hydrolysis for efficient conversion of lignocellulosic biomass into glucose [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 136: 110442.
- [40] BOITSOVA TA, BROVKO OS, IVAKHNOV AD, *et al.* Optimizing supercritical fluid extraction of usnic acid from the lichen species *usnea subfloridana* [J]. Russ J Phy Chem B, 2021, 14(7): 1135–1141.
- [41] QAIS AAM, WALEED AA, AMER AM, *et al.* Supercritical fluid extraction of four aromatic herbs and assessment of the volatile compositions, bioactive compounds, antibacterial, and anti-biofilm activity [J]. Environ Sci Poll Res, 2021, DOI: 10.1007/s11356-021-12346-6.
- [42] SUN XC, ZHENG X, TANG Y, *et al.* Supercritical fluid extraction combined with ultrahigh performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry for determination of extractables to evaluate compatibility of drugs with rubber closures [J]. AAPS Pharm Sci Tech, 2021, 22(1): 61–70.
- [43] SANTOS PH, KAMMERS JC, SILVA AP, *et al.* Antioxidant and antibacterial compounds from feijoa leaf extracts obtained by pressurized liquid extraction and supercritical fluid extraction [J]. Food Chem, 2021, 344(1): 128620.
- [44] 张恺容, 解铁民. 超临界流体萃取技术及其在食品中的应用[J]. 农业科技与装备, 2020, (6): 48–49, 52.
- ZHANG KR, JIE TM. Supercritical fluid extraction technology and its application in food [J]. Agric Sci Technol Equip, 2020, (6): 48–49, 52.
- [45] TAKAHASHI Y, MUKAI K, OHMURA H, *et al.* Changes in muscle activity with exercise-induced fatigue in thoroughbred horses [J]. Comp Exerc Physiol, 2021, 17(1): 102901.
- [46] TANG N. Image recognition algorithm for exercise fatigue based on FPGA processor and motion image capture [J]. Microp Microsyst, 2021, 81(3): 103756.
- [47] JOHNSON CD, EAGLE SR, NINDL BC. The effects of fatiguing exercise and load carriage on the perception and initiation of movement [J]. Europ J Sport Sci, 2021, 21(1): 1–29.
- [48] 梁薇, 文晔. 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 on the conditioning mechanism of traditional Chinese medicine for sports fatigue [J]. Mod Med Health, 2020, 36(1): 66–70.
- [49] 陈慧, 马璇, 曹丽行, 等. 运动疲劳机制及食源性抗疲劳活性成分研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 247–258.
- CHEN H, MA X, CAO LX, *et al.* Research progress of sports fatigue mechanism and food-borne anti-fatigue active ingredients [J]. Food Sci, 2020, 41(11): 247–258.
- [50] 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. [2021-01-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080192>.
- LIUYAN, BAO XW, WANG J, *et al.* Anti-exercise fatigue and antioxidant of polysaccharide from *hippophae rhamnoides* [J/OL]. Food Ind Sci Technol: 1–11. [2021-01-28]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080192>.
- [51] 王海亮. 沙棘多糖对神经系统相关疾病的药理学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- WANG HL. Pharmacodynamic study of seabuckthorn polysaccharides on nervous system related diseases [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [52] 苏兴田. 饲料中添加不同水平的沙棘多糖对蒙古马运动性能及糖代谢的影响[J]. 中国饲料, 2020, (13): 53–56.
- SU XT. The effects of different levels of seabuckthorn polysaccharides in feed on the sport performance and sugar metabolism of Mongolian horses [J]. Chin Feed, 2020, (13): 53–56.

(责任编辑: 于梦娇)

## 作者简介

刘明杰, 硕士, 讲师, 主要研究方向为运动营养。

E-mail: davidshiaj@163.com