任长忠，闫金婷，董锐，等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展 [J]. 食品工业科技，2022，43(12)：438−446. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060196

REN Changzhong, YAN Jinting, DONG Rui, et al. Research Progress on Oat Nutrients, Functional Properties and Related Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 438−446. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060196

·专题综述·

燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展

任长忠[1]，闫金婷[2]，董　锐[3]，胡新中[3,*]

（1.国家燕麦荞麦产业技术研发中心，吉林省白城市农业科学院，吉林白城 137000；
2.西安市农产品质量安全检验监测中心，陕西西安 710077；
3.陕西师范大学食品工程与营养科学学院，陕西西安 710119）

摘　要：燕麦是国际国内重要的特色谷物，含有较高的蛋白质、脂肪、可溶性膳食纤维等宏量营养素，也富含燕麦特有的多酚化合物、矿物质、维生素等微量营养素。研究表明，食用燕麦产品可以降低心血管疾病风险的作用，表现在具有降血压、改善动脉粥样硬化、降低餐后血糖水平、增加胰岛素应激反应、抗肿瘤、免疫调节、调节肠道菌群、预防和治疗皮肤炎症、瘦身减肥、平衡心态、解除焦虑等功效。我国形成了比较全面的燕麦系列产品，可以分为大众化传统食品、高附加值产品、低 GI 特膳食品。根据国内外燕麦研究成果，燕麦及其加工产品的功能可以概括为：控糖降脂护血管，美容减肥抗衰老，增强免疫抗疲劳，润肠通便缓焦虑。

关键词：燕麦，营养，功能，产品加工

中图分类号：TS210.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2022)12−0438−09

DOI： 10.13386/j.issn1002-0306.2021060196

本文网刊：

Research Progress on Oat Nutrients, Functional Properties and Related Products

REN Changzhong[1]，YAN Jinting[2]，DONG Rui[3]，HU Xinzhong[3,*]

（1.China Oat and Buckwheat Research Center, Baicheng Academy of Agricultural Sciences, Baicheng 137000, China；
2.Xi'an Agricultural Product Quality and Safety Inspection and Monitoring Center, Xi'an 710077, China；
3.College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China）

Abstract: Oats are important international and domestic specialty crops which contain high level of macronutrients including protein, fat and soluble dietary fiber as well as micronutrients such as polyphenol compounds, minerals, and vitamins. Oat products can reduce the risk of cardiovascular disease, which is manifested in the effects of lowering blood pressure, improving atherosclerosis, lowering postprandial blood sugar levels and insulin response, anti-tumor, immune regulation, regulating intestinal flora, preventing and treating skin inflammation, losing weight, balancing mentality, relieving anxiety, etc. In China, series of oatmeal products have been produced, which can be divided into popular traditional foods, high value-added products and low GI special dietary products. According to the studies of oats, the functions of oats and their processed products are summarized as follows: Protecting blood vessel, lowering blood lipid, anti-aging, anti-fatigue, eliminating constipation and relieving anxiety.

Key words: oat; nutrition; function; product processing

收稿日期：2021−06−23

基金项目：现代农业产业技术体系建设专项资金（CARS-07）；陕西省国际合作基地（2019GHJD-15）。

作者简介：任长忠（1964−），男，博士，研究员，研究方向：谷物育种及加工，E-mail: renchangzhong@163.com。

*** 通信作者：**胡新中（1972−），男，博士，教授，研究方向：谷物加工与营养，E-mail: hxinzhong@126.com。

燕麦是我国重要的特色农作物之一，也是世界及我国第六大粮食作物。燕麦在植物学分类上属于禾本科燕麦属(*Avena* L.)，一般分为带稃型和裸粒型两大类。带稃型燕麦的籽粒带壳，称为皮燕麦(*Avena sativa* L.)，为欧美等国家主要栽培品种，多数饲用，少数食用。裸粒型燕麦的籽粒不带壳，称为裸燕麦(*Avena sativa* ssp. nuda)，是我国的主要栽培品种，占我国燕麦种植的 90% 以上，多数食用，少量饲用。在西方，燕麦主要作为早餐谷物食用，在我国，裸燕麦常被晋冀蒙产区称为“莜麦”，是传统燕麦食品的优质原料[1]。燕麦是优质蛋白质、膳食纤维、矿物质及诸多营养素的来源，主要加工产品包括燕麦片、燕麦面粉(莜面)及面制品、燕麦米、燕麦饮品、燕麦休闲食品等。如今，越来越多的科学研究揭示了燕麦的功能特性，燕麦已成为世界公认的保健食品，市场对燕麦以及燕麦产品的需求在不断增长[2]。本文介绍了燕麦的蛋白质、可溶性膳食纤维(*β*-葡聚糖)、脂肪、矿物质等主要营养物质的基本特性，并从化学物质的功能方面综述了燕麦及其产品的降糖降脂、增强免疫、美容减肥、润肠安神等活性功能，对燕麦产品进行了归纳分类，期待为消费者选择燕麦及其产品提供理论依据和实践参考。

1　燕麦的营养特性

燕麦富含蛋白质、可溶性膳食纤维、不饱和脂肪酸、酚类物质、维生素及矿物质(表 1)，是一种优质的健康谷物。

1.1　蛋白质

燕麦是优质的谷物蛋白质来源。燕麦中的蛋白质含量明显高于其他谷物(表 1)。我国裸燕麦的蛋白质含量范围为 11.2%~19.9%，因品种不同而有一定差异，平均为 14.5%[2]，高于小麦(主要分布区间 10.9%~15.7%)[3]、水稻(4.5%~14.3%)[4] 和玉米(7.6%~12.1%)[5]。燕麦籽粒中蛋白质分布主要集中于皮层、糊粉层细胞中；其中，燕麦皮层中蛋白质占燕麦籽粒总蛋白含量的 44.5%~62.8%[6]。蛋白质分子质量分布范围主要集中在 18.4~25.0 和 25.0~35.0 kDa 两个区间[7]。

从蛋白组成看，燕麦各蛋白组分含量为：球蛋白约为 50.0%~80.0%、谷蛋白 19.0%~22.0%、醇溶蛋白 4.0%~15.0%、清蛋白 1.0%~12.0%[8−9]，球蛋白含量显著高于其他谷物，这是燕麦蛋白氨基酸组成优于其他谷物的重要原因。燕麦球蛋白包括 2 个亚基，分子量分别在 97.4~100 和 43~66.2 kDa 范围内。提取方法和处理条件对球蛋白结构有一定的影响，酸、

表 1　燕麦与其他谷物营养成分对照(每 100 g 谷物中含量)

Table 1　Comparison of nutritional content between oats and other grains (per 100 g grains)

指标	燕麦	小麦	大米	玉米	大麦
水分(g)	8.22	9.57	12.00	10.00	10.09
能量(kJ)	1628	1431	1528	1528	1473
蛋白质(g)	16.89	11.31	7.10	9.40	9.91
脂肪(g)	6.90	1.71	0.66	4.74	1.16
饱和脂肪酸(g)	1.217	0.277	0.180	0.670	0.244
单不饱和脂肪酸(g)	2.178	0.203	0.210	1.250	0.149
多不饱和脂肪酸(g)	2.535	0.750	0.180	2.160	0.506
碳水化合物(g)	66.27	75.90	80.00	74.00	77.72
总膳食纤维(g)	10.60	12.20	1.30	7.30	15.60
矿物质					
钙(mg)	54	32	2	7	29
铁(mg)	4.72	3.19	0.80	2.71	2.50
镁(mg)	177	93	25	127	79
磷(mg)	523	355	115	210	221
钾(mg)	429	432	115	287	280
纳(mg)	2	2	5	35	9
锌(mg)	3.97	3.33	1.09	2.21	2.13
锰(mg)	4.916	3.821	1.090	0.490	1.322
维生素					
维生素B_1(mg)	0.763	0.387	0.070	0.390	0.191
维生素B_2(mg)	0.139	0.108	0.050	0.200	0.114
维生素B_3(烟酸)(mg)	0.961	4.381	1.600	3.630	4.604
维生素B_5(泛酸)(mg)	1.349	0.954	1.010	0.420	0.282
维生素B_6(mg)	0.119	0.368	0.160	0.620	0.260
维生素B_9(叶酸)(μg)	56	38	8	19	23

注：数据来源：USDA数据库。

碱处理条件下球蛋白的酸性和碱性多肽被水解，在加热的条件下蛋白质会出现一定的聚集；酶解可制得具有降血压作用的 ACE 抑制肽等[10]，生物活性得到进一步加强[11]。

从氨基酸组成来看，燕麦总氨基酸含量较高，达 249.9 g/kg，其中支链氨基酸（BACC）含量平均值为 29.6 g/kg，支链氨基酸中最重要的氨基酸之一异亮氨酸（Leu）在燕麦中平均含量达 12.6 g/kg，显著高于其他谷物[12]。

1.2 脂肪

燕麦脂肪含量丰富，含量范围 5.0%~9.0%，是小麦脂肪含量的 2~3 倍。燕麦油脂无明显异味，其平均分子量约为 0.9 kDa[1]，主要由甘油三酯、磷脂、糖脂和甾醇组成。其中磷脂含量为 2.0%~26.0%，其中卵磷脂占 45.0%~51.0%。燕麦油脂中不饱和脂肪酸约占脂肪酸总量的 80%，主要为亚油酸和亚麻酸[13]。

燕麦脂肪对燕麦产品的风味影响显著。完整燕麦籽粒在室温条件下（20 ℃）贮藏一年，脂肪依然稳定[14]；当籽粒被粉碎、或贮藏条件不当时，脂肪酶从细胞中被释放出来，促进脂肪被氧化水解，游离脂肪酸含量显著增加，伴随脂肪的自氧化，挥发性羰基化合物（己醛、戊醛、2,4-癸二烯醛、3,5-辛二烯-2-酮和 1-戊醇等）不断积累，导致产品酸败、口感变差、产品质量降低[15−16]，例如，即食燕麦片中己醛含量达到 5~10 ppm 时，即表现出明显的哈败味[17]。因此，抑制脂肪酶活性对燕麦食品加工非常重要，不仅可以改善食品的风味，防止燕麦磨粉过程中堵塞磨粉机，还可以防止霉变虫蚀，从而提高贮存稳定性、延长产品货架期。这是燕麦食品加工中需要进行灭酶处理的主要原因，也是燕麦有别于其他谷物加工的难点所在。

1.3 碳水化合物

燕麦中的碳水化合物主要为淀粉和膳食纤维，淀粉含量为 50.0%~60.0% 左右，是胚乳中的重要组成部分，β-葡聚糖是燕麦的特征可溶性膳食纤维，含量为 2.5%~8.3%。与其他谷物淀粉有很大不同，燕麦淀粉颗粒较小（直径范围 5.0~5.6 μm），表面光滑，并且有较高的结晶度和短的直链淀粉长度，不易老化[18−19]。燕麦淀粉的糊化温度、热焓值、膨胀势等特征与其他谷物差异不大，但是淀粉粒在糊化过程中易破碎[20]。燕麦直链淀粉重均分子量约为 1.68×10^5 Da，支链淀粉重均分子量主要为 1.36×10^7 Da，少部分支链淀粉重均分子量为 3.19×10^6 Da[21]。燕麦淀粉在经过分离提纯后，仍然含有 0.7%~2.5% 的脂质，这些脂质与支链淀粉形成复合物[22]。通过乙酰化、氧化、磷酸化等化学修饰，能够获得具有新特性的燕麦淀粉，例如水结合能力提高、糊化特性改变等[19]。

燕麦中膳食纤维含量区间 9.9%~22.2%[23]，分为可溶性和不可溶膳食纤维，其中，可溶性膳食纤维 β-葡聚糖比例占总膳食纤维的 40%~45%，占总可溶性膳食纤维的 80.0%~85.0%[24]。β-葡聚糖主要分布于燕麦麸皮和胚乳中，在燕麦麸皮中的含量为 20.0% 左右，分子量在 240.0~2600.0 kDa[25]。在加工过程中，燕麦 β-葡聚糖分子大小、结构、功能特性发生改变，进而影响食品的感官理特性。

1.4 多酚物质

燕麦含有丰富的多酚化合物，从市售燕麦片、燕麦麸等各种燕麦商品中能够检测出 11 类结合酚酸、13 类游离共轭酚酸和燕麦蒽酰胺[26]。燕麦中主要酚酸有阿魏酸（占总酚酸含量的 58.0%~78.1%）、香豆酸（对羟基肉桂酸）、咖啡酸（对羟基桂皮酸）、香草酸、水杨酸（对羟基苯甲酸）和它们的衍生物等[27−28]。燕麦生物碱（Avenanthramides，AVAs），也称为燕麦蒽酰胺，是仅在燕麦中检测到的天然特殊酚类物质，具有环状结构的碱性有机化合物，由邻氨基苯甲酸或邻氨基苯甲酸衍生物的酰胺与羟基肉桂酸或阿魏酸组成[29]，在燕麦中含量范围在 27.5~50.0 mg/kg[26]，主要分布于籽粒外层的麸皮和次级糊粉层。目前，共鉴定出约 35 个燕麦生物碱化合物，其中含量较高的有 3 种：即燕麦生物碱 2c（N-3’,4’-二羟基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸）、燕麦生物碱 2f（N-4’-羟基-3-甲氧基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸）和燕麦生物碱 2p（N-4’-羟基肉桂酰-5-羟基邻氨基苯甲酸）[30]。燕麦生物碱 2c 对碱性和中性条件敏感，2c 和 2p 则相对稳定。燕麦生物碱比其他酚类物质高 10~30 倍以上的抗氧化活性[31]。

1.5 矿物质、维生素和能量

燕麦中主要矿物质以磷和钾为主，也含有较少量的镁和钙。燕麦中存在的微量矿物质钙、铁、镁、磷和锰的含量高于其他谷物，钠含量低（表 1）。燕麦加工过程中碾磨等工艺会对矿物质造成不同程度的损失，例如铁在去壳、碾碎后含量显著降低[32]。

相比其他谷物，燕麦含有高水平的维生素 B_1（硫胺素）、生物素和胆碱，燕麦籽粒中的维生素 E、泛酸、核黄素和叶酸的含量相对较高[2]；燕麦的烟酸和维生素 B_6 的含量相对较低，维生素 B_1、B_5、B_9 都显著高于其他谷物（表 1）。

单位质量燕麦的能量显著高于其他谷物，原因主要是其脂肪含量高。每百克燕麦、小麦、大米、玉米的热量分别为 388.9、341.9、365.0、365.0 kcal。且由于其 β-葡聚糖带来的饱腹性，能够让人体在较低食物摄入水平保持饱腹感及能量输出[33]。

2 燕麦的功能特性

基于燕麦的营养特性，可以将其加工为日常主食、休闲食品、功能食品，同时，也可以用于生产皮肤护理日化用品、抗过敏药物等。美国食品药品监督管理局（FDA）于 1997 年发布燕麦与冠心病的食品标签健康声明（Food Labeling: Health Claims; Oats and Coronary Heart Disease），授权可在食品标签中注明：燕麦可溶性膳食纤维与降低冠心病风险密切相关，推荐每天摄入不少于 40 g 燕麦麸或 60 g 燕麦片

（相当于≥3 g β-葡聚糖）[34]。欧洲食品安全局[35]声称：燕麦 β-葡聚糖已被证明可以降低血液胆固醇，从而降低患（冠状动脉）心脏病的风险。

2.1　控糖、降脂、护血管

食用燕麦及其产品可以降低餐后血糖水平和胰岛素反应。燕麦食品血糖生成指数（GI）较低，燕麦片的 GI 值范围为 55.0~69.0，燕麦窝窝 GI 值为 54.4，燕麦麸为 40.0~60.0，显著低于白面包（GI 值范围为 70.0~88.0）[36]。燕麦降血糖作用主要归因于 β-葡聚糖[37]。因为燕麦 β-葡聚糖粘度很高，可以延缓胃排空速率，减少消化酶对碳水化合物的水解，并且抑制葡萄糖在小肠内的扩散和吸收，下调小肠上皮细胞中的葡萄糖转运蛋白，进而抑制葡萄糖转运[38]，降低葡萄糖输送速率，进而延迟了胰岛素释放[39]。β-葡聚糖的含量和分子量与其血糖调控能力直接相关，含量或分子量越高，其溶液粘度越大，对食靡的延缓胃排空作用越明显。此外，燕麦 β-葡聚糖被肠道菌群酵解产生的代谢产物短链脂肪酸（乙酸、丙酸、丁酸）可以调节 4 型胰岛素敏感性葡萄糖转运蛋白（GLUT-4）的表达，进而降低血糖响应水平[40]。将燕麦 β-葡聚糖添加到其他食品中可以降低食品 GI 值，平均每克 β-葡聚糖能降低 4 个单位的 GI 值[38]。此外，燕麦酚类物质能够抑制 α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶活性，燕麦极性脂质也能降低餐后甘油三酯和游离脂肪酸生成，同时通过提高 GLP-1 等释放来调控血糖水平[41]。

燕麦是降低总胆固醇，尤其是低密度脂蛋白胆固醇的理想食物。燕麦 β-葡聚糖能减少胆汁酸的含量，并通过上调胆固醇 7-α 羟化酶（CYP7A1），激活合成胆固醇，最终降低血液中的低密度脂蛋白胆固醇水平[37]。长期食用燕麦，可减少空腹总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇，并在一定程度上降低甘油三酯[42−43]和载脂蛋白 B[44]，胆固醇可降低 3.0%~10.0%，冠心病风险降低 6.0%~18.0%，从而降低心血管疾病的发病风险。

燕麦多肽、燕麦 AVAs 具有一定的抗动脉粥样硬化作用，从而保护血管正常生理功能。燕麦多肽主要通过降低内皮素-1（ET-1）、肿瘤坏死因子-α（TNF-α）、肾素（Renin）、血管紧张素Ⅱ（ANGⅡ）含量，提高血管舒缓激肽（BK）和一氧化氮（NO）含量，从而发挥降压功效[45]。燕麦生物碱一方面通过上调 p53-p21cip1 通路，抑制视网膜母细胞瘤蛋白磷酸化水平，二是抑制平滑肌细胞增殖和增加一氧化氮的产生，还可以显著提高 LPL mRNA 的表达，增加对血浆脂蛋白中甘油三酯的水解，预防动脉粥样硬化[46−48]。AVAs 可以降低内皮细胞中黏附分子（ICAM-1、VCAM-1 和 E-选择蛋白）表达和促炎细胞因子 IL-6、趋化因子 IL-8 及单核细胞趋化蛋白（MCP）-1 的分泌，通过抗炎作用减轻动脉粥样硬化[47]。

2.2　美容、减肥、抗衰老

燕麦中的 β-葡聚糖、AVAs 等组分具有预防和治疗皮肤炎症的作用。燕麦作为外用皮肤护理产品已经有上百年历史，通常，胶体状的燕麦提取物用于治疗包括皮疹、红斑、烧伤、瘙痒和湿疹等皮肤症状[49]。临床研究结果表明，使用燕麦胶体状提取物产品 1 d 后，即可减轻皮肤干燥、湿疹、刺激感和瘙痒等问题。β-葡聚糖能显著促进表皮再生，修复皮肤屏障，其作用机理可能是改善巨噬细胞向伤口部位的运输、刺激组织肉芽、再上皮化和胶原沉积改善[50]。人体皮肤模型及临床评估研究发现，燕麦 β-葡聚糖能够有效渗入皮肤，增加角质层水合作用，改善皮肤表面的化学特性，使其湿润光滑和柔软，从而减少皱纹深度和高度，以及整体皮肤粗糙度[50]。燕麦生物碱能显著抑制肿瘤坏死因子-α（TNF-α）诱导的 NF-κB 荧光素酶活性，并降低白介素 8（IL-8）的释放，减轻接触性超敏反应和神经源性炎症，降低对皮肤的刺激作用[51]。燕麦生物碱能阻滞皮肤神经末梢感觉信号传递，降低血管通透性，抑制多种炎症因子的释放，起到快速镇痛、止瘙痒、降灼热的作用，改善红斑等临床表现[52]。因此，燕麦是理想的洗浴化妆品生产的优质原料，开发潜力较大。

燕麦的减肥功效主要体现为减少脂肪量积累。摄入燕麦 β-葡聚糖，能够显著降低肠系膜脂肪、肾周脂肪和睾周脂肪量，从而减轻超重者的体重和腰部脂肪堆积，在超重或超重伴 2 型糖尿病人群中，燕麦配合饮食控制的减肥效果明显优于与单纯饮食控制[53−54]。燕麦 β-葡聚糖是燕麦减重作用的主要物质基础，其作用机制是通过粘度特性来延缓胃排空速率并减少营养素的消化或吸收，胃内容物与分泌饱腹激素的肠细胞相互作用增强，会刺激食欲调节相关肽的释放，另外，燕麦 β-葡聚糖可激活肠下丘脑轴，从而增加饱腹感[33]。食用燕麦产品可以增强饱腹感、降低食欲、减少能量摄入，这些功效在超重人群中更加显著[55]。燕麦生物碱（AVAs）通过调节肠道菌群能有效抑制小鼠肥胖，并进一步抑制有害微生物的生长，同时，可以通过减轻氧化应激和炎症来改变体重，并调节饮食引起的肥胖症中的肠道菌群。

燕麦的抗衰老功能主要来源于其所含物质的抗氧化性。燕麦酚类物质含量与抗氧化性显著相关，燕麦生物碱具有很强的抗氧化能力，可以调节抗氧化酶（如超氧化物歧化酶和谷胱甘肽还原酶）的活性[56]。在不同的燕麦生物碱分子中，燕麦生物碱 2c 对超氧自由基和氧自由基清除率高，总抗氧化能力是燕麦生物碱 2p 和 2f 的 1.5 倍[57−58]。AVAs 中含有的 α,β 不饱和羰基与其抗氧化能力息息相关，能够通过激活 Nrf2-ARE 信号通路起到延缓氧化应激反应的效果[59]。

2.3　增强免疫、抗疲劳

燕麦组分具有一定的免疫调节功能。燕麦 β-葡聚糖是一种有效的非特异性免疫激活剂，能激活单核细胞和嗜中性粒细胞的抗菌活性，能刺激巨噬细胞、脾脏细胞[59]、肠上皮细胞、淋巴细胞转化能力和

NK 细胞活性[60], 增强人体、动物机体的免疫能力。燕麦寡肽是有潜力的免疫调节剂, 可以通过增强细胞介导的血清干扰素(IFN)、白介素(IL)、肿瘤坏死因子(TNF)、粒细胞巨噬细胞集落刺激因子(GM-CSF)分泌以及免疫球蛋白(Ig)A、IgG 和 IgM 产生, 巨噬细胞吞噬能力和 NK 细胞活性改善小鼠的先天性和适应性免疫反应, 其剂量范围为 0.3~2.0 g/kg 体重[61]。抗肿瘤功能是燕麦 β-葡聚糖增强机体免疫效果之一。燕麦 β-葡聚糖可以通过调节淋巴细胞和自然杀伤细胞(NK)的活性, 激活巨噬细胞攻击肿瘤细胞; 提高外源性抗体的抗肿瘤活性和单克隆抗体的肿瘤细胞定位效应, 对不同类型肿瘤细胞发挥作用, 显著增加对肿瘤细胞的杀伤作用[62]。对于皮肤癌细胞, 燕麦 β-葡聚糖可以显著提高癌细胞中一种含半胱氨酸的天冬氨酸蛋白水解酶 Caspase-12 的表达, 从而诱导肿瘤细胞凋亡, 对正常细胞没有毒性[63−65]。

燕麦的抗疲劳功能主要体现为增强机体运动耐力。研究表明, 摄入燕麦 β-葡聚糖和燕麦蛋白均可显著提高动物跑步及游泳时长, 同时降低血清中血尿素氮、乳酸、肌酸激酶活性, 并提高非酯化脂肪酸、乳酸脱氢酶、肝糖原含量[66−67]。β-葡聚糖能够通过调节 Nrf2/HO-1/Trx 信号通路改善运动引起的氧化应激反应, 从而对能量代谢和抗氧化防御起到积极作用[68]。燕麦蛋白能减轻离心运动引起的骨骼肌酸痛, 并降低了血浆 IL-6 浓度和血清肌酸激酶、肌红蛋白和 C 反应蛋白含量的升高, 显著抑制损伤性运动后的肢体水肿, 减轻其对肌肉力量、膝关节活动度和垂直跳跃表现的不利影响[69]。燕麦寡肽能够降低大脑中的丙二醛(MDA)和乳酸含量, 增强了脑乳酸脱氢酶(LDH)活性, 并增加了缺氧诱导因子 1α(HIF1α) mRNA 和血管内皮生长因子(VEGF)mRNA 表达水平, 从而提高血液携氧能力和氧利用率, 调节缺氧反应[70]。燕麦 β-葡聚糖、蛋白质或肽类调节运动疲劳或者骨骼肌代谢相关机制尚不十分明确, 需要进一步研究证明。

2.4 润肠通便、缓焦虑

食用燕麦及燕麦产品对消化系统有明显的有益作用。燕麦 β-葡聚糖由于其溶胀和吸水特性, 增加了小肠平滑肌蠕动的频率和幅度, 降低小肠粘膜对葡萄糖的吸收率, 调控血浆胰岛素应激水平, 缩短粪便通过大肠的时间, 增加粪便量和排便次数, 减少有毒有害物质与肠壁的接触时间, 减少其毒害作用; 还可以结合体内胆汁酸, 并通过食物残渣排出体外, 起到降低胆固醇的功效。燕麦 β-葡聚糖的益生元作用体现在其进入近端结肠时高度发酵并产生大量短链脂肪酸(SCFAs), 肠道中 SCFAs 总量从 17.5 mmol/kg 上升至 65.0 mmol/kg[71], 增加肠道中的有益菌双歧杆菌和乳酸杆菌的数量, 降低有害大肠杆菌的数量[72], 预防结直肠癌的发生, 进而发挥对心血管健康[73]、免疫功能[74]、糖尿病[75] 和肥胖症[76] 的潜在影响。燕麦膳食纤维可以有辅助减轻胃炎、胃黏膜发炎等炎症[77], 有效降低放射治疗诱发的炎症[78]。

燕麦具有平衡心态、缓解焦虑作用。燕麦中 AVAs 可以减少人体主动脉平滑肌中一氧化氮的产生, 调节大脑细胞氧化应激状态, 帮助治疗急性或慢性紧张和焦虑。临床研究显示, 燕麦提取物能够提高患有轻度认知障碍的老年人的注意力[79]。燕麦 B 族维生素有助于提高人体血清素水平, 改善情绪、放松心情。每天摄取 100 g 燕麦, 基本能满足身体对维生素 B_1 日需量的 40%, 燕麦可诱导睡眠激素—血清素和褪黑素的产生, 缓和紧绷的肌肉, 平稳紧张的情绪, 缓解失眠[80]。燕麦富含膳食纤维, 减缓消化食物消化速率, 能量缓慢释放, 使血糖维持在稳定水平, 人体保持饱满的精神状态。

3 我国燕麦产品的特点

燕麦产品按照消费方式和场景, 可以分为大众化传统食品、高附加值产品、低 GI 特膳食品。

3.1 大众化传统食品

是消费者日常食用的食品, 包括燕麦面粉及传统莜面系列食品等, 方便化、美味化、主食化和工业化是大众化传统食品未来发展趋势。

燕麦粉也称莜面, 是将燕麦籽粒磨粉制得, 可作为原料加工成多种产品。燕麦面制品是我国最传统的燕麦产品, 制作通常采用三熟工艺, 即燕麦籽粒炒熟、和面时燕麦粉热水烫熟、产品蒸熟[81]。由于不含面筋蛋白, 燕麦粉是乳糜泻患者的优质食物, 美国和欧盟等国都已经官方认可燕麦食品可宣称为无麸质食品。燕麦粉可以制作多种类型的传统面制食品, 如燕麦窝窝、燕麦鱼鱼、燕麦栲栳栳等, 这些产品口味独特, 消费者既能感受到燕麦的优质口感, 其丰富的营养价值也满足了健康需求。燕麦粉约占燕麦总消费量的一半左右, 随着餐饮业的发展和网上消费需求, 消费量不断增加[82]。

3.2 高附加值产品

是指附加值显著提高的燕麦加工产品, 如燕麦片、燕麦米、燕麦乳饮品、燕麦发酵酒类、燕麦饼干、能量棒等休闲食品, 燕麦化妆品等, 营养化、精品化和高值化是高附加值食品的发展趋势。

燕麦片是一种国际化燕麦产品, 它有纯燕麦片、混合燕麦片和复合燕麦片三种产品类型。纯燕麦片又分为即食和快煮两大类, 即食和快熟燕麦片能最大程度保留燕麦中的营养成分, 是典型的全谷物产品。在我国, 燕麦片约占燕麦总消费量的 30%, 并且消费量不断增加, 年增加 10% 以上。

燕麦米是一种新型燕麦产品, 它是将燕麦籽粒灭酶, 打磨去除部分籽粒表皮, 做成食用方式类似大米的燕麦产品。燕麦米可以分为整粒型生燕麦米、破皮型半熟燕麦米及切断型全熟强化燕麦米三种类型。燕麦米约占燕麦总消费量的 10%, 市场增长很快, 燕麦与大米同煮可为燕麦进入主食化提供捷径。

燕麦发酵食品包括燕麦白酒、燕麦啤酒、燕麦甜

醅、燕麦红曲黄酒、燕麦发酵饮料等。燕麦休闲食品包括燕麦乳制品、燕麦手撕肉、燕麦饼干、燕麦脆、燕麦萌动产品等，主要通过酶解、烘焙、挤压膨化等现代工艺加工而成的一类食用方便、健康美味的新型产品。

3.3　低 GI 特膳食品

是以降低餐后血糖水平为主要特征的特殊膳食食品，主要强调产品的功能，而且功效明确，专用化、特需化和功能化是这类产品的未来发展趋势。

燕麦低 GI 特膳食品主要包括燕麦代餐粉、燕麦麸、燕麦肽等，产品富含燕麦 β-葡聚糖、燕麦抗性淀粉、燕麦多肽、燕麦生物碱等成分，具有稳定餐后血糖水平、平抑痛风症状以及降低血脂、降低胆固醇等临床功能，符合消费者对燕麦功能的需求，因而成为近年来燕麦产业新的增长点。

4　展望与结论

我国燕麦产品还存在口感差、产品质量不稳定、加工技术较为落后、创新能力弱、工业化程度不高、知名品牌较少、品牌竞争力还不够、产业高质量发展意识欠缺、杂粮从业人员受教育程度低、宣传杂粮营养健康功能说服力不大等方面的问题，针对以上问题，需要抓住大健康机遇，结合国家发展规划，促进产业升级。

4.1　展望

4.1.1　功能化　根据《中国居民膳食指南 2016》推荐，每天摄入谷薯类食物 250~400 g，其中全谷物和杂豆类 50~150 g，薯类 50~100 g。增加全谷物和燕麦摄入，具有改善血脂异常的作用，有利于降低 2 型糖尿病、心血管疾病、肠癌等与膳食相关的慢性病的发病风险，可减少体重增加的风险。需要在燕麦（多肽、多糖、生物碱）功能成分挖掘与功能验证（糖尿病、糖脂代谢紊乱、心血管、肠道菌群）方面开展研究，为燕麦功能化产品的研发和推广提供坚实的理论支撑。

4.1.2　主食化　消费者在消费主食的同时，也带动了杂粮的消费，而且实现了营养均衡，维护消费者健康。需要在燕麦面制品货架期、燕麦米口感、与其他主食的搭配等方面开展研发，改善食用品质，提高产品方便性。

4.1.3　优质化　随着工业化加工程度不断提升，原料的标准化、优质化成为新的制约因素。需要通过育种、栽培、分选实现原料专用化，满足加工企业对于优质专用原料的需求，解决加工过程中功能物质活性损失的问题。

4.1.4　市场化　我国居民膳食 50% 以上的能量、蛋白质、维生素 B_1、烟酸、锌和镁，40% 的维生素 B_2、铁，30% 的钙都是来自谷薯类及杂豆类食物[36]。与精制谷物相比，全谷物及杂粮杂豆可提供更多的 B 族维生素、矿物质、膳食纤维等营养成分及有益健康的植物化合物，全谷物、薯类和杂粮杂豆的血糖生成指数远低于精制米面。需要以市场需求为导向，通过燕麦营养教育、标准制定，发挥中国人膳食平衡模式的谷类为主是的饮食习惯，补充每日饮食缺乏的膳食纤维，降低三高人群数量。

4.2　结论

燕麦的营养功能物质包括燕麦蛋白质、燕麦不饱和脂肪酸、燕麦 β-葡聚糖、燕麦生物碱、矿物质、维生素等，在控糖降脂、增强免疫、护理肠道等领域有着积极作用，是适宜健康及亚健康人群长期食用的健康谷物。

燕麦的功能活性，根据现有文献和自身研究，可以概括为控糖、降脂、护血管；美容、减肥、抗衰老；增强免疫、抗疲劳；润肠、通便、缓焦虑。

燕麦加工产品按照食用方式，可以分为大众化传统食品、高附加值产品、低 GI 特膳食品，增加燕麦摄入，具有改善血脂异常的作用，有利于降低 2 型糖尿病、心血管疾病、肠癌等与膳食相关的慢性病的发病风险。不同品种及产地、不同加工方式对燕麦营养功能物质影响显著，燕麦加工产品丰富，消费者可以根据自身需要选择适宜的燕麦产品。

参考文献

[1] 任长忠，胡跃高. 中国燕麦学 [M]. 北京：中国农业出版社，2013. [REN C Z, HU Y G. Chinese oats[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013.]

[2] 胡新中，任长忠. 燕麦加工与功能 [M]. 北京：科学出版社，2016. [HU X Z, REN C Z. Oat processing and functions[M]. Beijing: Science Press, 2016.]

[3] 温明星，李东升，陈琛，等. 2008~2018 年长江中下游小麦区试品系品质分析 [J]. 中国农学通报，2020，36(18)：10−15. [WEN M X, LI D S, CHEN C, et al. Wheat varieties in regional test in the middle and lower reaches of the Yangtze River: Quality analysis from 2008 to 2018[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(18): 10−15.]

[4] 路凯，赵庆勇，周丽慧，等. 稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展 [J]. 江苏农业学报，2020，36(5)：1305−1311. [LU K, ZHAO Q Y, ZHOU L H, et al. Research progress on the relationship between rice protein content and eating quality and the influence factors[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(5): 1305−1311.]

[5] DIVYA R, MILA P H E, STEPHEN P M, et al. Changes in corn protein content during storage and their relationship with dry grind ethanol production[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2018, 95(8): 923−932.

[6] YOUNGS V L, PETERSON D M. Protein distribution in the oat (*Avena sterilis* L.) kernel[J]. Crop Science, 1973, 13: 365−367.

[7] 许英一，王宇，林巍. 燕麦蛋白理化性质研究 [J]. 安徽农业大学学报，2018，45(3)：385−388. [XU Y Y, WANG Y, LIN W. Study on physicochemical properties of oat protein[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(3): 385−388.]

[8] 王美玉，梁亚萍，王愈，等. 燕麦蛋白组分分离提取及其 SDS-PAGE 电泳分析 [J]. 粮油食品科技，2018，26(5)：1−5.

[WANG M Y, LIANG Y P, WANG Y, et al. Separation and extraction of oat protein components and analysis by SDS-PAGE[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(5): 1−5.]
[9] THERESA B, STEFANO D A, ELISABETH Z, et al. Nutritional properties of various oat and naked oat cultivars[J]. Journal of Land Management, Food and Environment, 2018, 69(4): 215−226.
[10] 李琳琳. 燕麦球蛋白的凝胶特性研究 [D]. 福州: 福州大学, 2016. [LI L L. Study on the characteristics of oat globulin[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.]
[11] 庞小一, 王静, 张慧娟, 等. 燕麦肽的制备、抗氧化性及其对 α-淀粉酶抑制作用的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 163−168. [PANG X Y, WANG J, ZHANG H J, et al. Study on preparation of oat peptides and its antioxidant activity and inhibition to α-amylase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(20): 163−168.]
[12] 王婧, 李小平, 刘柳, 等. 燕麦等五种谷物的氨基酸含量综合评价[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 438−445. [WANG J, LI X P, LIU L, et al. Principal component anylysis and comprehensive evaluation of amino acids of oat and other four crops[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(4): 438−445.]
[13] 刘军海, 裘爱泳, 朱向菊. 燕麦脂质及其应用[J]. 粮食与油脂, 2003(5): 19−20. [LIU H J, QIU A Y, ZHU X J. Oat lipids and its applications[J]. Cereals & Oils, 2003(5): 19−20.]
[14] LAMPI A, DAMERAU A, LI J, et al. Changes in lipids and volatile compounds of oat flours and extrudates during processing and storage[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 62: 102−109.
[15] 胡新中, 魏益民, 任长忠. 燕麦品质与加工 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [HU X Z, WEI Y M, REN C Z. Oat quality and processing[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
[16] ZHOU M, ROBARDSA K, GLENNIE-HOLMESB M, et al. Oat lipids[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1999, 76(2): 159−169.
[17] PEKKA L, KATJA K, ILKKA L, et al. Effect of heat treatment on lipid stability in processed oats[J]. Journal of Cereal Science, 2003, 37(2): 215−221.
[18] HOOVER R, SMITH C, ZHOU Y, et al. Physicochemical properties of Canadian oat starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 52(3): 253−261.
[19] BERSKI W, PTASZEK A, PTASZEK P, et al. Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 83(2): 665−671.
[20] TESTER R F, KARKALAS J. Swelling and gelatinization of oat starches[J]. Cereal Chemisty, 1996, 73(2): 271−277.
[21] SENAY S, KRISTIN W, JAE-BOM O. Analysis of cereal starches by high-performance size exclusion chromatography[J]. Food Analytical Methods, 2013, 6(1): 181−190.
[22] BEMILLER J, WHISTLER R. Starch chemistry and technology (third edition)[M]. Burlington, MA, USA: Academic Press, 2009.
[23] SHEWRY P R, PIIRONEN V, LAMPI A, et al. Phytochemical and fiber components in oat varieties in the healthgrain diversity screen[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(21): 9777−9814.
[24] MANTHEY F A, HARELAND G A, HUSEBY D J. Soluble and insoluble dietary fiber content and composition in oat[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(3): 417−420.
[25] DAVID M P. Oat antioxidants[J]. Journal of Cereal Science, 2001, 33(2): 115−129.
[26] SOYCAN G, SCHÄR M Y, KRISTEK A, et al. Composition and content of phenolic acids and avenanthramides in commercial oat products: Are oats an important polyphenol source for consumers?[J]. Food Chemistry: X, 2019, 3: 100047.
[27] MATTILA P, PIHLAVA J, HELLSTRÖM J. Contents of phenolic acids, alkyl- and alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(21): 8290−8295.
[28] KOVÁČOVÁ M, MALINOVÁ E. Ferulic and coumaric acids, total phenolic compounds and their correlation in selected oat genotypes[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2007, 25(6): 325−332.
[29] MEYDANI M. Potential health benefits of avenanthramides of oats[J]. Nutrition Reviews, 2009, 67(12): 731−735.
[30] 陈超. 影响燕麦生物碱生物利用率的因素探究与纳米共包埋粒子的构建 [D]. 无锡: 江南大学, 2020. [CHEN C. Study on the factors affecting bioavailability of avenanthramides and construction of nano co-encapsulated particle[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
[31] SUMAYYA P C, BABU G M, MURALEEDHARAN K. Quantum chemical investigation of the antiradical property of avenanthramides, oat phenolics[J]. Heliyon, 2021, 7(2): e6125.
[32] 冯利芳. 内蒙古荞麦、裸燕麦和小米矿物质测定及矿物质谱特征分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [FENG L F. Determination and analysis on minerals profile of common buckwheat, naked oat and millet from Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.]
[33] REBELLO C J, O'NEIL C E, GREENWAY F L. Dietary fiber and satiety: The effects of oats on satiety[J]. Nutrition Reviews, 2016, 74(2): 131−147.
[34] Food and Drug Administration H. Food labeling: Health claims; soluble fiber from certain foods and risk of coronary heart disease. Interim final rule[J]. Federal Register, 2008, 73(37): 9938−9947.
[35] EFSA Panel On Dietetic Products, Nutrition and Allergies NDA. Scientific opinion on the substantiation of a health claim related to barley beta-glucans and lowering of blood cholesterol and reduced risk of (coronary) heart disease pursuant to article 14 of regulation (EC) No 1924/2006[J]. EFSA Journal, 2011, 9(12): 2470.
[36] 冯媛. 加工对燕麦营养品质及消化特性的影响 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [FENG Y. Effect of processing on oats nutritional quality and digestive characteristics[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.]
[37] HO H V, SIEVENPIPER J L, ZURBAU A, et al. The effect of oat beta-glucan on LDL-cholesterol, non-HDL-cholesterol and apoB for CVD risk reduction: A systematic review and meta-analysis of randomised-controlled trials[J]. British Journal of Nutrition,

2016, 116(8): 1369−1382.
[38] JENKINS A L, JENKINS D J, ZDRAVKOVIC U, et al. Depression of the glycemic index by high levels of beta-glucan fiber in two functional foods tested in type 2 diabetes[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2002, 56(7): 622−628.
[39] BECK E J, TOSH S M, BATTERHAM M J, et al. Oat beta-glucan increases postprandial cholecystokinin levels, decreases insulin response and extends subjective satiety in overweight subjects [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2009, 53(10): 1343−1351.
[40] ZHANG K, DONG R, HU X, et al. Oat-based foods: Chemical constituents, glycemic index, and the effect of processing[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(6): 1304.
[41] HOSSAIN M M, TOVAR J, CLOETENS L, et al. Oat polar lipids improve cardiometabolic-related markers after breakfast and a subsequent standardized lunch: A randomized crossover study in healthy young adults[J]. Nutrients, 2021, 13(3): 988.
[42] THIES F, MASSON L F, BOFFETTA P, et al. Oats and CVD risk markers: A systematic literature review[J]. The British Journal of Nutrition, 2014, 112(2): 19−30.
[43] HOLLÆNDER P L B, ROSS A B, KRISTENSEN M. Whole-grain and blood lipid changes in apparently healthy adults: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled studies[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2015, 102(3): 556−572.
[44] WOLEVER T M, TOSH S M, GIBBS A L, et al. Physicochemical properties of oat beta-glucan influence its ability to reduce serum LDL cholesterol in humans: A randomized clinical trial[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2010, 92(4): 723−732.
[45] 马超月. 燕麦多肽的制备及其降血脂和降血压效果研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. [MA C Y. Study on the preparation of oat peptides and its hypolipidemic and anti-hypertensive effects[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.]
[46] DELANEY B, NICOLOSI R J, WILSON T A, et al. *β*-glucan fractions from barley and oats are similarly antiatherogenic in hypercholesterolemic syrian golden hamsters[J]. The Journal of Nutrition, 2003, 133(2): 468−475.
[47] LIU L, ZUBIK L, COLLINS F W, et al. The antiatherogenic potential of oat phenolic compounds[J]. Atherosclerosis, 2004, 175(1): 39−49.
[48] NIE L, WISE M, PETERSON D, et al. Mechanism by which avenanthramide-c, a polyphenol of oats, blocks cell cycle progression in vascular smooth muscle cells[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2006, 41(5): 702−708.
[49] REYNERTSON K A, GARAY M, NEBUS J, et al. Anti-inflammatory activities of colloidal oatmeal (*Avena sativa*) contribute to the effectiveness of oats in treatment of itch associated with dry, irritated skin[J]. Journal of Drugs in Dermatology, 2015, 14(1): 43−48.
[50] DU B, BIAN Z, XU B. Skin health promotion effects of natural beta-glucan derived from cereals and microorganisms: A review[J]. Phytotherapy Research, 2014, 28(2): 159−166.
[51] SUR R, NIGAM A, GROTE D, et al. Avenanthramides, polyphenols from oats, exhibit anti-inflammatory and anti-itch activity[J]. Archives of Dermatological Research, 2008, 300(10): 569−574.
[52] 桑龙燕, 叶皖冰, 向雪岑, 等. 柳兰和燕麦等提取物联合经穴刺激在治疗面部糖皮质激素依赖性皮炎中的应用[J]. 中国美容医学, 2020, 29(5): 120−123. [SANG L Y, YE W B, XIANG X C, et al. Application of acupoint stimulation with extracts of epilobium and oat in the treatment of hormone-dependent dermatitis[J]. Chinese Journal of Aesthetic Medicine, 2020, 29(5): 120−123.]
[53] 吕振岳, 马达, 许洪高, 等. 燕麦 *β*-葡聚糖对高脂饮食小鼠肥胖及肠道菌群影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 5024−5030. [LÜ Z Y, MA D, XU H G, et al. Effect of oat *β*-glucan on obesity and gut microbiota in mice fed high fat diet[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2021, 12(12): 5024−5030.]
[54] 丁程程, 李文芳, 荣爽. 燕麦对饱腹感和体重控制的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 140−146. [DING C C, LI W F, RONG S. Influence of oats on fullness and weight control[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(8): 140−146.]
[55] STEINERT R E, RAEDERSTORFF D, WOLEVER T M. Effect of consuming oat bran mixed in water before a meal on glycemic responses in healthy humans-a pilot study[J]. Nutrients, 2016, 8(9): 1−7.
[56] 付荣. 燕麦生物碱中抗结肠癌活性成分发现及作用机制研究 [D]. 太原: 山西大学, 2020. [FU R. The bioactive agent from avenanthramides and molecular mechanism of anti-colorectal cancer effects[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.]
[57] DAVID M P, MARTHA J H, CHERYLD L E. Oat avenanthramides exhibit antioxidant activities *in vitro*[J]. Food Chemistry, 2002, 79(4): 473−478.
[58] YANG J, OU B, WISE M L, et al. *In vitro* total antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of three common oat-derived avenanthramides[J]. Food Chemistry, 2014, 160: 338−345.
[59] HOU Y, PENG S, SONG Z, et al. Oat polyphenol avenanthramide-2c confers protection from oxidative stress by regulating the Nrf2-ARE signaling pathway in PC12 cells[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2021, 706: 1−10.
[60] RAMAKERS J D, VOLMAN J J, BIORKLUND M, et al. Fecal water from ileostomic patients consuming oat beta-glucan enhances immune responses in enterocytes[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2007, 51(2): 211−220.
[61] ESTRADA A, YUN C H, VAN KESSEL A, et al. Immunomodulatory activities of oat beta-glucan *in vitro* and *in vivo*[J]. Microbiol Immunol, 1997, 41(12): 991−998.
[62] 刘博, 林亲录, 罗非君. 燕麦葡聚糖的生理功能研究进展[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(2): 1−5. [LIU B, LIN Q L, LUO F J. Research progress on physiological functions of oat beta-glucan[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(2): 1−5.]
[63] KOURNIKAKIS B, MANDEVILLE R, BROUSSEAU P, et al. Anthrax-protective effects of yeast beta 1,3 glucans[J]. Medscape General Medicine, 2003, 5(1): 1−13.
[64] XIAO Z, TRINCADO C A, MURTAUGH M P. Beta-glucan

enhancement of T cell IFNupsilon response in swine[J]. Veterinary Immunology and Immunopathology, 2004, 102(3): 315−320.

[65] CHOROMANSKA A, KULBACKA J, REMBIALKOWSKA N, et al. Anticancer properties of low molecular weight oat beta-glucan - an *in vitro* study[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 23−28.

[66] 珠娜, 毛瑞雪, 刘睿, 等. 燕麦肽缓解小鼠体力疲劳作用及机制[J]. 中国公共卫生, 2018, 34(9): 1242−1245. [ZHU N, MAO R X, LIU R, et al. Anti-fatigue effect of oat peptide in mice: An experimental study[J]. Chinese Journal of Public Health, 2018, 34(9): 1242−1245.]

[67] XU C, LV J, LO Y M, et al. Effects of oat *β*-glucan on endurance exercise and its anti-fatigue properties in trained rats[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1159−1165.

[68] XU X, DING Y, YANG Y, et al. *β*-glucan salecan improves exercise performance and displays anti-fatigue effects through regulating energy metabolism and oxidative stress in mice[J]. Nutrients, 2018, 10(7): 1−13.

[69] XIA Z, CHOLEWA J M, DARDEVET D, et al. Effects of oat protein supplementation on skeletal muscle damage, inflammation and performance recovery following downhill running in untrained collegiate men[J]. Food & Function, 2018, 9(9): 4720−4729.

[70] LI D, REN J, DU Q, et al. The anti-hypoxic effects of oat (*Avena sativa* L.) oligopeptides in mice[J]. American Journal of Translational Research, 2021, 13(3): 1657−1666.

[71] LKKI Y M, VIRTANEN E. Gastrointestinal effects of oat bran and oat gum a review[J]. LWT-Food Science and Technology, 2001, 34(6): 337−347.

[72] 吴绍函, 沈群, 谭斌, 等. 燕麦 *β*-葡聚糖对肠道的保健作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 388−390. [WU S H, SHEN Q, TAN B, et al. Research progress in oat *β*-glucan on the health effects of intestinal[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(17): 388−390.]

[73] WONG J M, ESFAHANI A, SINGH N, et al. Gut microbiota, diet, and heart disease[J]. Journal of AOAC International, 2012, 95(1): 24−30.

[74] PURCHIARONI F, TORTORA A, GABRIELLI M, et al. The role of intestinal microbiota and the immune system[J]. European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 2013, 17(3): 323−333.

[75] CANI P D, OSTO M, GEURTS L, et al. Involvement of gut microbiota in the development of low-grade inflammation and type 2 diabetes associated with obesity[J]. Gut Microbes, 2012, 3(4): 279−288.

[76] ARORA T, SHARMA R. Fermentation potential of the gut microbiome: Implications for energy homeostasis and weight management[J]. Nutrition Reviews, 2011, 69(2): 99−106.

[77] VOLMAN J J, MENSINK R P, BUURMAN W A, et al. *In vivo* effects of dietary (1→3), (1→4)-*β*-d-glucans from oat on mucosal immune responses in man and mice[J]. Scandinavian Journal of Gastroenterology, 2011, 46(5): 603−610.

[78] PATEL P, MALIPATLOLLA D K, DEVARAKONDA S, et al. Dietary oat bran reduces systemic inflammation in mice subjected to pelvic irradiation[J]. Nutrients, 2020, 12(8): 2172.

[79] RAMZAN S. Oat: A novel therapeutic ingredient for food applications[J]. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2021: 756−760.

[80] KATHLEEN M, LILY S, VASSO A. The effects of vitamin B in depression[J]. Current Medicinal Chemistry, 2016, 23(38): 4317−4337.

[81] 张燕, 胡新中, 师俊玲, 等. 熟化工艺对燕麦传统食品营养及加工品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(10): 86−91. [ZHANG Y, HU X Z, SHI J L, et al. The effects of three-thermal treatment on nutrient and processing quality of Chinese oat tradition food[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(10): 86−91.]

[82] 任长忠, 胡新中. 中国燕麦荞麦产业“十二五”发展报告[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. [REN C Z, HU X Z. China's oat buckwheat industry "12th Five-Year Plan" development report[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016.]