

粟米功能组分改善糖脂代谢研究进展

王 晗, 陈博睿, 侯殿志, 赵卿宇, 薛 勇, 沈 群*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院 植物蛋白谷物加工北京市重点实验室
国家果蔬加工工程技术研究中心 北京 100083)

摘要 近年来很多研究表明,以粟米为基础的日常饮食具有降血糖、降血脂等功效。粟米中的膳食纤维、蛋白质、多酚等能够改善糖脂代谢紊乱,主要通过抑制相关酶活性,调节胰岛素信号转导通路等改善糖代谢;通过抑制炎症因子水平,调节相关基因表达等改善脂代谢。本文综述粟米调节糖脂代谢的功能组分和相关分子机制,指出研究存在的问题及未来发展方向,为粟米基础研究和产业化开发提供参考。

关键词 粟米;糖脂代谢;机制

文章编号 1009-7848(2022)07-0360-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.07.036

糖代谢异常一般包括糖耐量减低、空腹血糖受损和糖尿病。糖尿病是较为严重的一种糖代谢异常引起的慢性代谢疾病,由血液中血糖浓度过高所致,是多种疾病的主要表现。脂代谢异常指血液中脂质成分代谢水平异常。我国目前约有 1.1 亿糖尿病患者,其中 95% 以上为 2 型糖尿病患者 (Type 2 diabetes, T2D)^[1]。此外,我国成年男性的总胆固醇 (Total cholesterol, TC) 浓度和甘油三酯 (Triglyceride, TG) 浓度分别不低于 6.22 mmol/L 和 2.26 mmol/L 的占比分别为 3.4% 和 13.8%, 成年女性的 TC 浓度和 TG 浓度不低于 6.22 mmol/L 和 2.26 mmol/L 的占比分别为 3.2% 和 8.6%^[2]。

血糖和血脂的代谢异常密切相关,持续高血糖可能会引发糖尿病,血脂异常则可能是糖尿病代谢状态失衡的起因^[3]。研究表明高血糖患者中有 95% 表现为血脂水平异常^[4]。血脂水平和肥胖息息相关,运动量减小和肥胖已成为近年来 T2D 的主要诱发因素之一^[5-6]。肥胖症和 T2D 与人们的日常饮食、生活习惯关系密切^[7]。现在流行的药物 (二甲双胍,注射的胰岛素药物等) 治疗都有一定的副作用,如导致低血糖和肠胃疾病等,因此人们希望通过膳食干预和运动来达到改善糖脂代谢^[8]。

粟米是世界上古老的作物之一,其种植的相关记录可以追溯到公元前 5500 年^[9],它也是世界

传统膳食的主要组成部分^[10-11]。目前世界上常见的粟米主要有珍珠粟 (Pearl millet)、谷子 (Foxtail millet)、龙爪稷 (Finger millet)、圆果雀稗 (Kodo millet)、糜子 (Proso millet) 以及细柄黍 (Little millet)、稗子 (Barnyard millet) 等 (表 1)^[12]。其中,谷子脱壳后的产物为小米,在我国较为常见。粟米还具有良好的抗旱能力,是世界第六大粮食作物,被世界上超过三分之一的人食用,许多非洲和亚洲国家将其作为主食的一种^[13]。粟米不仅富含膳食纤维、酚类物质,还富含矿物质、维生素等微量元素,是多种必需氨基酸的丰富来源,这些丰富的植物化学物质使其成为有益健康的营养源^[14]。

随着人们对膳食健康的关注,粟米在抗炎症、抗肥胖、预防心脏病以及改善糖脂代谢异常等方面的功效成为研究热点。本文重点介绍不同种类的粟米在改善糖脂代谢方面的研究进展。

1 粟米改善糖脂代谢异常

1.1 粟米改善糖代谢异常

动物实验和临床试验表明,摄入粟类全谷物有改善血糖代谢的效果。李慕男^[15]用不同小米或大米含量的基础饲料饲喂高血糖小白鼠 30 d,结果发现,基础饲料组小鼠空腹血糖值升高 5.2%,而小米组仅升高 2.7%;此外,基础饲料组小鼠 40% 死亡,加入 80% 大米的饲料组小鼠 50% 死亡,而所有小米组均无小鼠死亡。这说明与普通饲料和小米混合饲料相比,含 80% 小米的饲料对血糖升高趋势的抑制效果最佳。

收稿日期: 2021-07-09

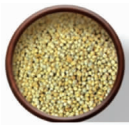









基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-06)

作者简介: 王晗 (1997—), 男, 硕士生

通信作者: 沈群 E-mail: shenqun@cau.edu.cn

表 1 常见粟米及主要分布地

Table 1 Common millet and main distribution areas

粟米中英文品名/学术名称	主要分布地	尺寸	外观	作物外观
珍珠粟(Pearl millet)/ <i>Pennisetum glaucum</i> . L	亚洲(印度)、非洲	长:3~4 mm		
谷子(Foxtail millet)/ <i>Setaria italica</i> . L	亚洲(中国)	直径:2 mm		
龙爪稷(Fiinger millet)/ <i>Eleusine coracana</i> . L	亚洲(中国)、非洲	直径:1~2 mm		
圆果雀稗(Kodo millet)/ <i>Paspalum scrobiculatum</i> . L	亚洲(印尼、越南、泰国等东南亚国家)	长:1.2~9.5 μm		
糜子(Proso millet)/ <i>Panicum miliaceum</i> . L	亚洲(中国)、北美(美国)	长与直径:2~3 mm		
细柄黍(Little millet)/ <i>Panicum sumatrense</i> . L	亚洲(中国、印度、马来西亚)	长:1.8~1.9 mm		
稗子(Barnyard millet)/ <i>Echinochloa crusgalli</i> . L	亚洲(中国)	长:2~3 mm		

Ren 等^[16]以 64 名糖耐量减低患者为研究对象,在每天摄入 50 g 小米加工品持续 12 周后,受试者平均空腹血糖由(5.7±0.9) mmol/L 降至(5.3±0.7) mmol/L,2 h 餐后血糖值由(10.2±2.6) mmol/L 降至(9.4±2.3) mmol/L;此外,受试者平均血清瘦素水平显著升高,胰岛素抵抗明显降低,炎症反应轻微减轻。Vedamanickam 等^[17]的横断面调查,随机选取 150 名 40~60 岁 T2D 患者,将他们分为 70 人非小米饮食组和 80 人小米饮食组。1 年后发现,小米饮食组患者的 BMI 指数、血清脂蛋白含量、空腹血糖以及餐后血糖水平与非小米饮食组患者相比都得到显著改善,TG 升高指数明显降低。Abdelgadir 等^[18]招募 10 名成人 T2D 患者进行为期 6 d 的交叉试验,每名参与者在不同场合摄入 60 g 由不同谷物制作的主食,结果发现与玉米

粥、高粱面包、高粱粥相比,糜子粥受试者的餐后血糖和胰岛素较低。Nambiar 等^[19]对 6 名平均年龄为 20 岁的健康女性进行类似的试验,分别在不同地点给予她们 6 餐 50 g 不同谷物基主食并搭配凝乳,9 d 后试验结束,结果发现摄入珍珠粟面饼的受试者血糖反应最低。Thilakavathy 等^[20]进行为期 2 d 的人群试验,200 名 T2D 患者在不同地点分别摄入全麦沙帕提、100 g 白面包、75 g 粟米沙帕提和 75 g 粟米+30 片葫芦巴叶制作的沙帕提(分别为 1~4 组),结果发现第 3、4 组受试者的餐后血糖反应比第 1、2 组低。Itagi 等^[21]招募 18 名 T2D 患者和健康受试者,在受试者每天饮食中加入 87 g 含 80% 小米的混合谷物,干预 4 周后发现,受试者空腹血糖下降 16%~19%,血清脂质谱水平得到改善。此外,Fatimata 等^[22]发现珍珠粟产品

的胃排空速度明显慢于米饭、土豆或面食。与精米相比,粟米在人体内释放的葡萄糖比例更低,持续时间更长,降低了餐后高血糖的风险^[23-25]。

1.2 粟米改善脂代谢异常

糖代谢异常和脂代谢异常联系紧密,如糖尿病患者往往会出现肥胖症、高血脂等症状。

Murtaza 等^[26]对 5~6 周龄 LACA 小鼠分别喂养普通饲料、高脂饲料(能量摄取脂肪占比 45%)、10%龙爪稷+90%高脂饲料以及 10%龙爪稷麸皮+90%高脂饲料,12 周后发现龙爪稷麸皮组小鼠体重增长减缓,血脂水平、炎症因子和氧化应激水平得到显著改善,并且肥胖基因的表达和盲肠内容物中肠杆菌的丰度都受到显著抑制,说明龙爪稷麸皮对肥胖和相关代谢并发症有一定改善作用。Lee 等^[27]将 AIN-93M 日粮中的玉米淀粉分别由白米粉、小米粉、高粱粉和糜子粉替代,对高脂饮食(High-fat diet,HFD)诱导的高血脂症 SD 大鼠进行为期 5 周的喂养,结果发现与白米组相比,小米

粉和糜子粉组的大鼠血清 TG 浓度和低密度脂蛋白胆固醇(Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-c)浓度显著降低。张佳丽等^[28]将不同剂量(30%,60%,100%)的发芽小米粉添加到饲料中,5 周后发现各剂量组高血脂症小鼠的 TC、TG、LDL-c 水平显著降低,高密度脂蛋白胆固醇(High-density lipoprotein cholesterol,HDL-c)水平显著升高。其中,高剂量组(100%发芽小米粉)小鼠血清中脂质含量变化最明显,中剂量组(60%发芽小米粉)小鼠的肝脏中脂质指标变化最明显。

目前关于粟类全谷物降低血脂的人群膳食干预研究较少。Jali 等^[23]进行的一项随机交叉研究中,给 300 名 T2D 患者每天补充 80 g 以小米为基础的糖尿病饮食持续 90 d,结果发现参与者的 TC、TG 和 LDL-c 浓度分别降低 13.25%,13.51%和 4.5%。全谷物粟类摄入对人体糖脂代谢改善效果的人群试验见表 2。

表 2 粟米调节糖脂代谢人群试验

Table 2 Population experiment of millet regulating glucose and lipid metabolism

粟米种类	干预对象	试验剂量	干预周期	试验结果	参考文献
小米	64 名糖耐量受损患者	小米加工品 50 g/d	12 周	平均空腹血糖、2 h 血糖、胰岛素抵抗 ↓ 血清瘦素水平 ↑ 炎症反应轻微减轻	[16]
小米	300 名 T2D 患者	以小米为基础的混合饲料 80 g/d	90 d	糖化血红蛋白、空腹葡萄糖、胰岛素、TC、TG 和极低密度脂蛋白胆固醇浓度 ↓	[23]
小米、龙爪稷	随机选择 150 名糖尿病患者,80 人(40~55 岁)粟米饮食,70 人(40~60 岁)非粟米饮食	根据国际糖尿病联合会标准	1 年	体重、BMI 水平、血脂、空腹血糖、餐后血糖水平等生化指标均 ↓	[17]
糜子	平均年龄 50 岁,10 名 T2D 患者,平均 BMI=27.5 kg/m ²	60 g 糜子粥、玉米粥、小麦煎饼等不同谷物主食	6 d	糜子粥组的餐后血糖水平和胰岛素水平最低	[18]
珍珠粟	6 名健康女性,平均年龄为 20.5 岁	50 g 珍珠粟、小麦、高粱面饼、绿克粥等	9 d	珍珠粟面饼组受试者餐后血糖反应最低	[19]
圆果雀稗、珍珠粟、小米	200 名 T2D 患者、男女各 100 名,平均年龄为 50 岁	全麦沙帕提 100 g 白面包、75 g 粟米沙帕提、75 g 粟米+30 片葫芦巴叶制作的沙帕提	2 d	加入葫芦巴叶的粟米组餐后血糖反应最低,其次为粟米帕沙提组	[20]

总之,目前研究均显示,粟米可改善肥胖、高脂血症、空腹血糖受损、糖尿病,还有利于保持机体健康、维持稳态,这对糖代谢和脂代谢异常及相关代谢疾病的防治具有重要意义。

2 粟米调节糖脂代谢异常的功能组分

2.1 膳食纤维

粟米中的膳食纤维通过影响相关酶的活性,减少脂质含量,调节肠道菌群丰度,改善葡萄糖耐量等途径调节糖脂代谢。粟米膳食纤维中研究较多的主要有可溶性膳食纤维阿拉伯木聚糖(Arabinoxylan, AX)和不溶性膳食纤维抗性淀粉(Resistant starch, RS)。

AX 主要集中在谷物麸皮中,具有改善糖尿病、结肠癌等疾病的症状和促进肠道中有益菌群繁殖的作用^[29],并能通过减少胆汁酸的再吸收来降低 LDL 和 TC 的含量^[30]。如:龙爪稷中的 AX 通过与酚酸结合显示出高抗氧化性^[31],还可作为控制体重的功能成分^[32]。Saram 等^[32]连续 10 周,每隔 1 d 对小鼠灌胃 0.5 g/kg 和 1.0 g/kg 龙爪稷 AX,结果发现补充 AX 组的小鼠内脏白色脂肪组织、血清 TAGs、TC 和 LDL-c 的含量与高脂饮食 HFD 小鼠相比显著减少,脂质代谢基因 *FASN/PPAR- α* 得到抑制,HFD 小鼠的胰岛素、瘦素和血清脂质水平也得到改善。

机体对 RS 的生物降解主要依靠消化球菌科的瘤胃球菌属,糖尿病大鼠肠道内的瘤胃球菌属相对丰度明显低于正常大鼠^[33]。研究表明 RS 可通过增加大鼠肠道中双歧杆菌和瘤胃球菌属的相对丰度^[34-35]来降低血糖和 TG 含量。Kumari 等^[36]发现,与进食大米 RS 相比,进食小米、糜子、细柄黍中 RS 的大鼠血清 TC 含量显著降低。虽然粟米淀粉含量与常见谷物,如大米、小麦相比并无显著优势,但是其抗性淀粉含量较高,可成为糖代谢疾病患者的理想主食^[37]。

2.2 蛋白质

粟米蛋白氨基酸含量丰富,且过敏性低,是蛋白质、多肽的良好来源^[11]。研究表明粟米的生物活性肽对炎症和氧化应激诱导的疾病具有重要的防治作用^[38],还是二肽基肽酶-4 抑制肽的潜在来源^[39-40]。Agrawal 等^[41]从粟米中分离得到的 14 肽

(SDRLLGPNNQYLPK),羟基自由基、ABTS、Fe²⁺螯合和 DPPH 活性测定表明其具有良好的抗氧化性能。Karu 等^[42]体外试验发现热处理后的糜子蛋白水解物表现出对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用。进一步研究表明粟米醇溶蛋白经高温处理后对上皮细胞代谢有益,上皮细胞功能障碍与代谢综合征(肥胖、糖尿病)有关^[43]。修复上皮细胞功能障碍是目前人体代谢综合征治疗的新方向^[44]。

Fu 等^[45]用熟小米醇溶蛋白(Prolamin from cooked foxtail millet, PCFM) 喂养 HFD 结合链脲佐菌素(Streptozotocin, STZ)诱导的糖尿病小鼠后发现,在 PCFM 组匹配的 269 种代谢物中,有 143 种代谢物水平发生显著变化,并且 PCFM 组的血清代谢谱与正常饲料组相近,提示口服 PCFM 可改善糖尿病所致血糖代谢紊乱;此外,肠道微生物区系组成和血清代谢紊乱也因 PCFM 的降血糖作用得到改善。Choi 等^[46]发现添加小米蛋白的饲料比添加酪蛋白的饲料更能改善遗传型 T2D 的 KK-Ay 小鼠的胆固醇代谢,在显著提高小鼠 HDL-c 浓度的同时,使 LDL-c 水平趋于稳定,提示小米蛋白通过增加脂联素浓度改善胆固醇代谢。

也有人认为粟米对血糖和胆固醇的调节作用不仅是因氨基酸含量高,还可能是因粟米蛋白质被部分消化而产生能被直接吸收的短链肽,进而在调节代谢方面起作用^[38,47]。研究发现小米蛋白经消化酶等水解后,具有如抗氧化、抗菌、降压、抗炎等生理作用^[48-51],主要通过调节相关激素浓度,减少氧化应激,修复上皮细胞功能障碍,抑制血管紧张素转化酶(Angiotensin converting enzyme, ACE)活性等实现。

2.3 酚类化合物

粟米的酚类化合物主要集中在种皮或种皮层^[52],主要以游离组分和结合组分存在,酚酸主要存在于结合组分,而黄酮类物质是游离组分的主要类别^[53]。

酚类化合物可作为抗氧化剂直接增强粟米抗氧化能力,使粟米具有良好的抗氧化性,在抵抗机体的氧化应激方面发挥作用^[54-55]。Li 等^[56]发现谷子多酚不仅使大鼠体内炎症因子水平显著下降,还使 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞死亡率显著降低,

降低了细胞的氧化应激水平,对 HFD 大鼠机体的氧化应激起到神经保护作用,推测小米多酚可能在上调抗氧化酶的表达中起主要作用。Khare 等^[57]将 HFD 诱导 2 周后的瑞士白化小鼠分为 4 组,8 周后发现圆果雀稗多酚提取物组和龙爪稷多酚提取物组小鼠肝脏脂质和 TG 以及肿瘤坏死因子- α (Tumor necrosis factor, TNF- α) 的水平都显著下降;此外,圆果雀稗和龙爪稷多酚提取物均显著阻止胰岛素抵抗标志物 HOMA-IR 的增加。同时,圆果雀稗多酚提取物显著提高胰岛素敏感指数 (Quicki),而圆果雀稗和龙爪稷多酚同时补充可阻止 HFD 小鼠肝脏中糖异生基因的表达。

粟米中以结合状态存在的酚酸主要包括阿魏酸、原儿茶酸、咖啡因酸等。阿魏酸是酚酸的主要成分之一,是粟米中含量丰富的植物化学素,具有抗氧化和抗炎症等功效,对糖尿病、肥胖症、癫痫等多种疾病具有预防和治疗的作用^[58]。Hedge 等^[59]研究发现,与合成抗氧化剂相比,龙爪稷的甲醇提取物(主要为阿魏酸)对糖基化反应具有更强的抑制作用。

粟米中的黄酮类化合物主要包括槲皮素、儿茶素、没食子儿茶素和芹菜素衍生物等^[53]。黄酮类物质可同时对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和晚期糖基化终产物 (Advanced glycation end products, AGEs) 的形成起抑制作用,与治疗 T2D 的常用药物阿卡波糖类似,抑制形式主要包括通过与底物竞争结合位点和不可逆的破坏酶的催化过程等^[60],并且属于天然抑制剂,对人体的危害性相对较小^[61]。Ofosu 等^[62]通过体外试验发现龙爪稷的乙醇提取物(含可溶性酚类物质)对 α -葡萄糖苷酶具有明显的抑制作用[IC₅₀ 值为 (18.07±3.27) $\mu\text{g/mL}$]且效果好于阿卡波糖[IC₅₀ 值 (59.34±3.07) $\mu\text{g/mL}$]。

综上,粟米中的酚类物质主要具有抗氧化剂的功效,能够减少机体氧化应激反应所带来的不良影响,如餐后高血糖、血糖血脂水平异常和炎症因子水平升高等,对于机体糖脂代谢失调的改善、维持稳态等方面具有重要作用。

3 粟米调节糖脂代谢的主要机制

3.1 粟米调节糖代谢的主要机制

3.1.1 抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性 α -

淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶对消化日常饮食中的碳水化合物和体内葡萄糖释放起关键作用,在人体的消化系统和糖代谢过程中扮演重要角色。

胰腺来源的 α -淀粉酶在小肠中将淀粉水解为较小的寡糖,如麦芽糖、鼠李糖、 α -(1-6)极限糊精等,这些寡糖随后在 α -葡萄糖苷酶的作用下降解为葡萄糖,引起人体餐后血糖升高^[63]。 α -葡萄糖苷酶位于小肠刷状缘上,是多糖水解的关键酶之一^[64]。抑制这两种糖代谢相关酶的活性可降低碳水化合物在体内的消化速率,调节餐后的血糖水平,进而改善血糖代谢^[65]。研究发现,糜子的热处理蛋白水解产物对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶有较强的抑制作用^[42]。从龙爪稷蛋白中提取的抑制剂 RBI (一种由 122 个氨基酸残基和 5 个二硫键构成的双功能抑制剂),能够抑制 α -淀粉酶的活性^[66]。粟米中酚类物质也能作为天然抑制剂抑制这两种酶的活性^[52]。从发芽的谷子和糜子中提取的酚类物质具有较强的 α -淀粉酶和 α -淀粉葡萄糖苷酶抑制活性^[67]。

3.1.2 调节胰岛素作用通路 胰岛素信号的转导在整个胰岛素信号通路中起核心作用,胰岛素信号先经过胰岛素受体和胰岛素受体底物,然后将磷脂酰肌醇-3-激酶 (Phosphoinositide-3-kinase, PI3K)/丝、苏氨酸激酶 (Serine threonine kinase, Akt) 系统激活,最终使葡萄糖转运体-4 迁移到细胞膜中,加快葡萄糖进入细胞的进程^[68]。PI3K/Akt 系统是胰岛素控制血糖水平的主要信号通路,将其激活后,可以促进胰岛素敏感性,转运葡萄糖,促进葡萄糖合成和抑制糖异生等途径改善糖代谢^[69]。研究发现给 STZ 诱导的糖尿病小鼠灌胃煮熟的小米分离蛋白 5 周后,小鼠体内磷酸肌醇蛋白激酶 B (Phosphoinositide-protein kinase B, p-AKT)/Akt、PI3K 和胰高血糖素样肽-1R (Glucagon-like peptide-1 receptor, GLP-1R) 水平显著增加,表明 GLP-1R/PI3K 和 Akt 通路被激活,同时小鼠的糖耐量和胰岛素抵抗得到改善,说明熟小米分离蛋白发挥出降糖作用^[69]。

3.1.3 抗炎、抗氧化、抗糖化 糖尿病以高血糖为特征,同时伴有慢性低度炎症反应,在持续高血糖状态下,非酶葡萄糖-蛋白质缩合反应产生的活性物质,或脂质和核酸暴露在还原糖环境中形成糖

基化终产物 (Advanced glycation end products, AGEs), AGEs 在机体内的循环能在各种组织中诱导炎症细胞因子, 炎症细胞因子反过来会刺激氧化应激和更高水平的炎症反应^[70]。鉴于此, 降低体内氧化应激水平, 抑制炎症因子表达和 AGEs 的形成对糖尿病及其并发症的产生和发展具有重要作用。Anis 等^[71]通过体外试验发现稗子的酚类化合物对蛋白质聚集体的形成有一定抑制作用, 对蛋白质糖基化的抑制率达 68.3%。荧光测量结果显示, 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 稗子酚类物质能显著降低晚期糖基化终产物的含量, 并防止糖氧化诱导的蛋白质构象改变。Hu 等^[72]模拟发芽和加热的小米在肠胃中的消化过程, 通过液相色谱-质谱鉴定, 发现 7 种不同长度的新肽段, 这些肽分别具有 7~13 个氨基酸。在 RAW-264.7 细胞模型中, 这 7 种肽使 Caco-2 细胞活性氧的产生受到显著抑制, 同时使谷胱甘肽含量和超氧化物歧化酶活性明显升高, 其中 EDDQMDPMAK (谷氨酸-天冬氨酸-天冬氨酸-谷氨酰胺-蛋氨酸-天冬氨酸-脯氨酸-蛋氨酸-丙氨酸-赖氨酸) 和 QNWDFCEAWPEPCF (谷氨酰胺-天冬酰胺-色氨酸-天冬氨酸-苯丙氨酸-半胱氨酸-谷氨酸-丙氨酸-色氨酸-谷氨酸-脯氨酸-半胱氨酸-苯丙氨酸) 两种肽使 NO、TNF- α 和 IL-6 的抑制作用更明显, TNF- α 和 IL-6 水平均降至 50% 左右。此外, 通过研究谷子对四氧嘧啶诱导的大鼠的氧化应激和血糖反应, 发现谷子饲料组大鼠血清中谷胱甘肽和非酶抗氧化剂水平均显著降低, 推测这与谷子中的酚类物质、植酸活性物质等有关^[73]。

3.2 粟米调节脂代谢的主要机制

3.2.1 抗氧化、抗炎 高脂饮食不仅使机体的脂肪积累增加, 还导致机体氧化应激增强以及促炎细胞因子的过度表达。研究发现小米麸皮中的结合多酚 (Bound polyphenols of inner shell, BPIS) 使脂多糖 (Lipopolysaccharide, LPS) 诱导的裸鼠产生明显的抗炎作用, BPIS 通过阻止炎症因子- κB (NF- κB)-p65 的核转位抑制白介素 IL-6 和 IL-8 的表达, 增强白介素 IL-10 的表达水平; 此外, BPIS 促进 HT-29 细胞中 ROS 的积累, 导致 miR-149 表达增强, miR-149 直接作用于 Akt 的 3' 段非编码区, 阻断 NF- κB 核转位, 最终使 IL-6、IL-8

表达受到抑制, 使机体的炎症反应受阻^[74]。给 HFD 大鼠饲喂小米饲料后, 大脑海马区 TNF- α 、IL-1 β 等炎症因子的表达水平受到显著抑制, 这为 BPIS 通过改善 ROS/miR-149/Akt/NF- κB 轴信号, 并以此为基础发展抗炎药物提供了新的见解。

3.2.2 调节进脂肪代谢相关基因的表达 过氧化物酶体增殖物激活受体 (Peroxisome proliferators-activated receptors, PPARs) 是一种敏感蛋白, 它是核激素受体家族中的配体激活受体, 包括 PPAR α 、PPAR β/δ 和 PPAR γ 3 种亚型^[63]。PPAR γ 与代谢综合征的发生有关, 在炎症反应和脂肪代谢中发挥重要的信使作用, 它与核受体类视黄酮形成异二聚体, 并与基因调控区的特异性反映原件结合, 进而调节相应基因的转录。固醇调节元件合成蛋白 (Sterol regulatory element binding proteins, SREBPs) 对脂质, 特别是胆固醇和脂肪酸的合成起关键作用, 是脂质合成的转录因子^[63]。SREBP-1 α 、SREBP-1c、SREBP-2 是目前已知的 3 种同型 SREBP, 其中, SREBP-1c 能调节脂肪合成相关基因的表达^[75]。活化的 SREBP-1c 诱导 TG 和游离脂肪酸 (Free fatty acid, FFA) 合成途径中的多种酶表达, 进而使 FFA、TG 含量增加, SREBP-1c 对胆汁酸合成途径中的关键酶胆固醇 7 α -羟化酶 (Cholesterol 7 α -hydroxylase, CYP7A1) 的表达有抑制作用, 进而提高 TC 水平^[76-77]。在高脂饲料中添加小米后发现, 大鼠体内 SREBP-1c、脂肪酸合成酶 (Fatty acid synthase, FAS) 和 3-羟基 3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶 (3-Hydroxy-3-methylglutaryl-coenzyme A reductase, HMGCR) 的 mRNA 水平相较 HFD 大鼠显著降低, TC 和 TG 的合成也受到抑制^[78]。高脂饲料中添加圆果雀稗和龙爪稷多酚提取物的小鼠与 HFD 小鼠相比, 体内 PPAR γ 和 SREBP-1c 的表达水平显著降低^[57]。粟米可能通过下调机体内控制脂质生物合成途径和转运通路的相关基因的表达来改善脂代谢。

3.2.3 影响肠道菌群丰度 肠道菌群的丰富度和组成对肝脏胆固醇和脂质代谢有重要作用^[79]。在饮食诱发或遗传型的肥胖动物中, 厚壁菌门与拟杆菌门的比值较高, 两者比例的升高, 将大大促进宿主对能量的吸收, 禁食诱导脂肪细胞因子的产生受到抑制, 使 TG 的储存增加, 饱腹激素的释放

降低^[80]。圆果雀稗多酚提取物的加入可使 HFD 小鼠的厚壁菌门/拟杆菌门比值显著降低^[57],表明圆果雀稗的多酚提取物能改善宿主肠道菌群的丰度,改善 TG、饱腹激素的水平,进而调节脂代谢。此外,盲肠中富含醋酸、丁酸、丙酸等短链脂肪酸(Short chain fatty acids,SCFA),SCFA 通过激活 GPR41 通路来影响脂肪合成,其中丙酸通过抑制

肝脏中 3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶的活性来阻止胆固醇的生成,用含 50%小米的高脂饲料喂养小鼠体内的血清脂肪酸、醋酸、丙酸浓度显著高于 HFD 小鼠^[78],表明高剂量小米的补充摄入有助于增加盲肠中总 SCFA 含量,这可能与小米具有丰富的膳食纤维有关。粟米功能组分改善糖脂代谢分子机制如图 1 所示。

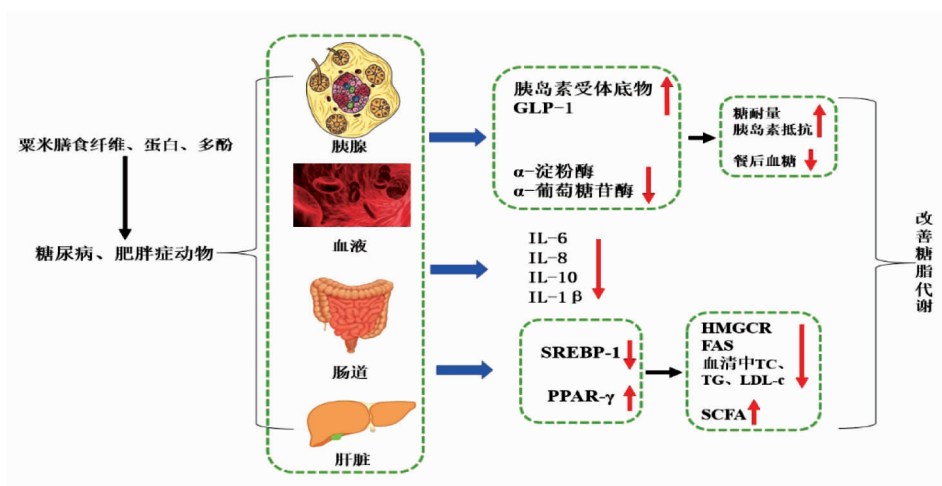


图 1 粟米功能组分改善糖脂代谢的分子机制

Fig.1 Molecular mechanism of improving glucose and lipid metabolism by functional components of millet

4 结语

粟米是一类潜在的功能性食品,具有一定的控制血糖、血脂的功效,主要通过其所含膳食纤维、蛋白质及酚类物质等起作用。目前,珍珠粟的研究成果较多且主要集中在原料品质、产品开发领域,龙爪稷、谷子次之,而对稗子的探究较少。从功能特性研究角度看,以糖脂代谢的研究较多,尤其小米是近年研究的热点。我国是小米的主产国及主要消费国之一,应进一步加大对其功能特性的研究,促进小米消费升级。今后对粟类的研究还需在以下方面做改进:

1) 粟类的营养特性研究 根据《神农本草》《本草纲目》中关于小米的记载,小米的营养功能较多,包括养胃、消渴、利小便等,这些传统认知尚缺乏现代食品科学的支持。尽管大量的动物实验和临床试验对粟米中不同组分调节糖脂代谢的能力给予了肯定,其它功能特性的研究还欠缺。此外,随着精准营养研究的发展,粟米适用人群和适宜摄入量等尚需明确。

2) 粟类改善糖脂代谢的机制还不明确 粟米中的酚类物质改善脂代谢的具体机制,如肠道激素调节、免疫调节、具体的肠道菌群分析等还不清晰;除酚类物质外,粟米中其它成分对细胞中脂质积累的影响机制不明确。热水解蛋白产物对糖脂代谢的调节作用应通过更多的动物模型和临床试验来验证;粟米中多肽的结构与生物活性之间关系研究不充分,如肽链长度不同会导致相关抑制活性受影响等^[81]。

3) 加工方式与粟米功能的关系尚处于起步阶段 目前一些加工方式,如挤压、发酵可以提高小米制品的风味、口感和质量,并减少直链淀粉含量,增加亚油酸、亚麻酸含量^[82]。此外,有试验表明挤压和发酵可以显著增加小米多肽的 ACE 抑制活性和抗氧化能力^[83]。加工方式对同类粟米的营养特性和功能的影响还有较大的研究空间。市场上粟米基的功能性产品较少,研究成果投入生产的比率不足。在保证消费者健康的前提下,应开发多元化粟米产品。此外,粟米基产品和其它天然食

品如何复配,以获得更全面的营养和更好的功效,都值得深入研究。

参 考 文 献

- [1] CHAN J C, ZHANG Y, NING G. Diabetes in China: a societal solution for a personal challenge[J]. *The lancet Diabetes & Endocrinology*, 2014, 2(12): 969-979.
- [2] 余雪. 内脏脂肪指数与糖脂代谢病的相关性研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2016.
- YU X. Study on the relationship between visceral adiposity index and glucolipid metabolic disorders[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2016.
- [3] AHMED N, KHAN J, SIDDIQUI T S. Frequency of dyslipidaemia in type 2 diabetes mellitus in patients of Hazara division[J]. *J Ayub Med Coll Abbottabad*, 2008, 20(2): 51-54.
- [4] MALIHA S, SANULLAH S, MUHAMMAD A A. Prevalence and pattern of dyslipidemia in hyperglycemic patients and its associated factors among Pakistani population[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2016, 23(6): 761-766.
- [5] ZOU C, SHAO J. Role of adipocytokines in obesity-associated insulin resistance[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2008, 19(5): 277-286.
- [6] SYLVETSKY A C, EDELSTEIN S L, WALFORD G, et al. A High-carbohydrate, high-fiber, low-fat diet results in weight loss among adults at high risk of Type 2 diabetes[J]. *Journal of Nutrition*, 2017, 147(11): 2060-2066.
- [7] XI P, LIU R H. Whole food approach for type 2 diabetes prevention[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2016, 60(8): 1819-1836.
- [8] MALLARE J T, KARABELL A H, VELASQUEZ-MIEYER P, et al. Current and future treatment of metabolic syndrome and Type 2 diabetes in children and adolescents[J]. *Diabetes Spectrum*, 2005, 18(4): 220-228.
- [9] ANNOR G A, TYL C, MARCONE M, et al. Why do millets have slower starch and protein digestibility than other cereals?[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66: 73-83.
- [10] AMADOU I, GOUNGA M E, LE G W. Millets: Nutritional composition, some health benefits and processing - A review[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2013, 25(7): 501-508.
- [11] SALEH A S M, ZHANG Q, CHEN J, et al. Millet grains: Nutritional quality, processing, and potential health benefits[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2013, 12(3): 281-295.
- [12] 胡帅, 高金燕, 武涌, 等. 发芽粟米研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(1): 138-146.
- HU S, GAO J Y, WU Y, et al. Research progress on germinated millets[J]. *Journal of Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(1): 138-146.
- [13] CEDRIC H, MATANGUIHAN J B, JADE D A G, et al. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) and its potential for cultivation in the Pacific Northwest, U. S.: A Review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7: 1961.
- [14] CHANDRA D, CHANDRA S, SHARMA P A K, et al. Finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn: A power house of health benefiting nutrients, a review [J]. *Food Science & Human Wellness*, 2016, 5(3): 149-155.
- [15] 李暮男. 小米对高血糖小鼠保健功能及辅助疗效研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2017.
- LI M N. Effect of millet on the health function and adjuvant therapy of hyperglycemic mice[D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2017.
- [16] REN X, YIN R, HOU D, et al. The glucose-lowering effect of foxtail millet in subjects with impaired glucose tolerance: A self-controlled clinical trial[J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1509-1520.
- [17] VEDAMANICKAM R, ANANDAN P, BUPESH G, et al. Study of millet and non-millet diet on diabetics and associated metabolic syndrome[J]. *Biomedicine*, 2020, 40(1): 55-58.
- [18] ABDELGADIR M, ABBAS M, JÄRVI A, et al. Glycaemic and insulin responses of six traditional Sudanese carbohydrate - rich meals in subjects with Type 2 diabetes mellitus [J]. *Diabetic medicine*, 2005, 22(2): 213-217.
- [19] NAMBIAR V S, PATWARDHAN T. Assessment of glycemic index (GI) and glycemic load (GL) for selected traditional millet-based Indian recipes [J]. *International Journal of Diabetes in Developing Countries*, 2015, 35(2): 157-162.

- [20] THILAKAVATHY S, MUTHUSELVI S. Development and evaluation of millets incorporated chappathi on glycemic response in type II diabetics. [J]. Indian Journal of Nutrition and Dietetics, 2010, 47 (2): 42–50.
- [21] ITAGI S K, NAIK R K. Glycolipemic response of millet based mix in diabetics and non-diabetics[J]. Current Research in Biological and Pharmaceutical Sciences, 2012, 1: 41–45.
- [22] FATIMATA C, DANIEL E, ANNA H, et al. Traditional malian solid foods made from sorghum and millet have markedly slower gastric emptying than rice, potato, or pasta[J]. Nutrients, 2018, 10(2): 124.
- [23] JALI M V, KAMATAR M Y, JALI S M, et al. Efficacy of value added foxtail millet therapeutic food in the management of diabetes and dyslipidemia in type 2 diabetic patients[J]. Recent Research in Science and Technology, 2012, 4(7): 3–4.
- [24] TRIVEDI A K, ARYA L, VERMA M, et al. Genetic variability in proso millet [*Panicum miliaceum*] germplasm of Central Himalayan Region based on morpho-physiological traits and molecular markers[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(2): 23.
- [25] SUBRAMANIAN A, NIRMALAKUMARI A, VEERABADHIRAN P. Trait based selection of superior Kodo millet (*Paspalum scrobiculatum* L.) genotypes [J]. Electronic Journal of Plant Breeding, 2010, 1 (4): 852–855.
- [26] MURTAZA N, BABOOTA R K, JAGTAP S, et al. Finger millet bran supplementation alleviates obesity-induced oxidative stress, inflammation and gut microbial derangements in high-fat diet-fed mice[J]. British Journal of Nutrition, 2014, 112 (9): 1447–1458.
- [27] LEE S H, CHUNG I M, CHA Y S, et al. Millet consumption decreased serum concentration of triglyceride and C-reactive protein but not oxidative status in hyperlipidemic rats[J]. Nutrition Research, 2010, 30(4): 290–296.
- [28] 张佳丽, 张爱霞, 赵巍, 等. 发芽粟米对高血脂症小鼠血脂调节和抗氧化作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 37–44.
- ZHANG J L, ZHANG A X, ZHAO W, et al. Effects of germinated millet on blood lipid and antioxidant in hyperlipidemia mice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35 (3): 37–44.
- [29] MENDIS M, SIMSEK S. Arabinoxylans and human health[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 239–243.
- [30] CHANDRASEKARA A, SHAHIDI F. Bioaccessibility and antioxidant potential of millet grain phenolics as affected by simulated *in vitro* digestion and microbial fermentation [J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(1): 226–237.
- [31] OKWUDILI U H, GYEBI D K, OBIEFUNA J A I. Finger millet bioactive compounds, bioaccessibility, and potential health effects—a review[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2017, 35(1): 7–17.
- [32] SARMA S M, SINGH D P, SINGH P, et al. Finger millet arabinoxylan protects mice from high-fat diet induced lipid derangements, inflammation, endotoxemia and gut bacterial dysbiosis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 994–1003.
- [33] BOTELLA H, STADTHAGEN G, LUGO-VILLARINO G, et al. Metallobiology of host-pathogen interactions: An intoxicating new insight. [J]. Trends in Microbiology, 2012, 20(3): 106–112.
- [34] DELZENNE N M, NEYRINCK A M, BCKHED F, et al. Targeting gut microbiota in obesity: Effects of prebiotics and probiotics [J]. Nature Reviews Endocrinology, 2011, 7(11): 639–646.
- [35] FLINT H J, SCOTT K P, LOUIS P, et al. The role of the gut microbiota in nutrition and health[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2012, 9(10): 577.
- [36] KUMARI S K, THAYUMANAVAN B. Comparative study of resistant starch from minor millets on intestinal responses, blood glucose, serum cholesterol and triglycerides in rats[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 75(3): 296–302.
- [37] REN X, CHEN J, MOLLA M M, et al. *In vitro* starch digestibility and *in vivo* glycemic response of foxtail millet and its products. [J]. Food & Function, 2016, 7(1): 372–379.
- [38] MAJID A, MAJID A, POORNIMA P C G, et al. Millet derived bioactive peptides: A review on their functional properties and health benefits[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60 (19): 3342–3351.

- [39] VILCACUNDO R, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, HERNÁNDEZ-LEDESMA B. Release of dipeptidyl peptidase IV, α -amylase and α -glucosidase inhibitory peptides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during *in vitro* simulated gastrointestinal digestion[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 35: 531-539.
- [40] WANG F, YU G, ZHANG Y, et al. Dipeptidyl peptidase IV inhibitory peptides derived from oat (*Avena sativa* L.), buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), and highland barley (*Hordeum vulgare trifurcatum* (L.) Trofim) proteins[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2015, 63(43): 9543-9549.
- [41] AGRAWAL H, JOSHI R, GUPTA M. Isolation, purification and characterization of antioxidative peptide of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) protein hydrolysate[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 365-372.
- [42] KARAŚ M, JAKUBCZYK A, SZYMANOWSKA U, et al. Different temperature treatments of millet grains affect the biological activity of protein hydrolyzates and peptide fractions[J]. Nutrients, 2019, 11(3): 550.
- [43] WEI Y, LIU G, YANG J, et al. The association between metabolic syndrome and vascular endothelial dysfunction in adolescents[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2013, 5(6): 1663-1666.
- [44] CARCAMO-ORIVE I, HUANG N F, QUERTERMOUS T, et al. Induced pluripotent stem cell-derived endothelial cells in insulin resistance and metabolic syndrome[J]. Arteriosclerosis Thrombosis & Vascular Biology, 2017, 37(11): 2038-2042.
- [45] FU Y, YIN R, LIU Z, et al. Hypoglycemic effect of prolamin from cooked foxtail millet (*Setaria italica*) on streptozotocin-induced diabetic mice[J]. Nutrients, 2020, 12(11): 3452.
- [46] CHOI Y, OSADA K, ITO Y, et al. Effects of dietary protein of Korean foxtail millet on plasma adiponectin, HDL-cholesterol, and insulin levels in genetically type 2 diabetic mice [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2005, 69 (1): 31-37.
- [47] CAVAZOS A, ELVIRA G D M. Identification of bioactive peptides from cereal storage proteins and their potential role in prevention of chronic diseases [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2013, 12(4): 364-380.
- [48] AMADOU I, LE G, AMZA T, et al. Purification and characterization of foxtail millet-derived peptides with antioxidant and antimicrobial activities[J]. Food Research International, 2013, 51(1): 422-428.
- [49] XU W, WEI L, QU W, et al. A novel antifungal peptide from foxtail millet seeds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91 (9): 1630-1637.
- [50] CHEN J, DUAN W, REN X, et al. Effect of foxtail millet protein hydrolysates on lowering blood pressure in spontaneously hypertensive rats [J]. European Journal of Nutrition, 2017, 56(6): 2129-2138.
- [51] JI Z, MAO J, CHEN S, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activity of peptides from foxtail millet (*Setaria italica*) prolamins in HaCaT cells and RAW264. 7 murine macrophages [J]. Food Bioscience, 2020, 36: 100636.
- [52] SHOBANA S, SREERAMA Y N, MALLESNI N G. Composition and enzyme inhibitory properties of finger millet (*Eleusine coracana* L.) seed coat phenolics: Mode of inhibition of α -glucosidase and pancreatic amylase[J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1268-1273.
- [53] XIANG J, APEA-BAH F B, NDOLO V U, et al. Profile of phenolic compounds and antioxidant activity of finger millet varieties [J]. Food Chemistry, 2019, 275: 361-368.
- [54] VAN HUNG P. Phenolic compounds of cereals and their antioxidant capacity[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(1): 25-35.
- [55] KUMARI D, MADHUVITH T, CHANDRASEKARA A. Comparison of phenolic content and antioxidant activities of millet varieties grown in different locations in Sri Lanka [J]. Food Science & Nutrition, 2017, 5(3): 474-485.
- [56] LI S, XIAN F, GUAN X, et al. Neural protective effects of millet and millet polyphenols on high-fat diet-induced oxidative stress in the brain[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75(2): 208-214.
- [57] KHARE P, MAURYA R, BHATIA R, et al. Polyphenol rich extracts of finger millet and kodo millet ameliorate high fat diet-induced metabolic al-

- terations [J]. Food & Function, 2020, 11 (11): 9833–9847.
- [58] 王薇薇, 潘奕鸥, 王丽, 等. 谷物中阿魏酸的分布及其生理活性的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(5): 43–48.
- WANG W W, PAN Y O, WANG L, et al. Research advances on the distribution and physiological activity of ferulic acid in grain[J]. Food Grain and Oil Technology, 2019, 27(5): 43–48.
- [59] HEGDE P S, ANITHA B, CHANDRA T S. *In vivo* effect of whole grain flour of finger millet (*Eleusine coracana*) and kodo millet (*Paspalum scrobiculatum*) on rat dermal wound healing[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2005, 43(3): 254–258.
- [60] DEVI P B, VIJAYABHARATHI R, SATHYABAMA S, et al. Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: A review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(6): 1021–1040.
- [61] KUMAR A, METWAL M, KAUR S, et al. Nutraceutical value of finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.], and their improvement using omics approaches[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 934.
- [62] OFOSU F K, ELAHI F, DALIRI E B, et al. Phenolic profile, antioxidant, and antidiabetic potential exerted by millet grain varieties [J]. Antioxidants, 2020, 9(3): 254.
- [63] 史湘铃, 孙桂菊. 亚麻籽调节糖脂代谢作用的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 242–248.
- SHI X L, SUN G J. Recent progress in the regulation of glycolipid metabolism by flaxseeds[J]. Food Science, 2020, 41(13): 242–248.
- [64] JOSHI S R, STANDL E, TONG N, et al. Therapeutic potential of α -glucosidase inhibitors in type 2 diabetes mellitus: An evidence-based review[J]. Expert Opinion on Pharmacotherapy, 2015, 16 (13): 1959–1981.
- [65] AUWAL I M, BESTER M J, NEITZ A W, et al. Rational in silico design of novel α -glucosidase inhibitory peptides and *in vitro* evaluation of promising candidates [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018, 107: 234–242.
- [66] MASKOS K, HUBER-WUNDERLICH M, GLOCK-SHUBER R. RBI, a one-domain α -amylase/trypsin inhibitor with completely independent binding sites [J]. FEBS letters, 1996, 397(1): 11–16.
- [67] PRADEEP P M, SREERAMA Y N. Impact of processing on the phenolic profiles of small millets: Evaluation of their antioxidant and enzyme inhibitory properties associated with hyperglycemia [J]. Food Chemistry, 2015, 169: 455–463.
- [68] KALUPAHANA N S, CLAYCOMBE K J, NAIMA M M. (*n*-3) Fatty acids alleviate adipose tissue inflammation and insulin resistance: Mechanistic insights[J]. Advances in Nutrition, 2011, 2(4): 304–316.
- [69] FU Y, YIN R, GUO E, et al. Protein isolates from raw and cooked foxtail millet attenuate development of type 2 diabetes in streptozotocin induced diabetic mice [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2021, 65(6): 2000365.
- [70] ANGELIKA B, HOFMANN M A, REINHARD Z, et al. AGEs and their interaction with AGE-receptors in vascular disease and diabetes mellitus. I. The AGE concept[J]. Cardiovascular Research, 1998(3): 586–600.
- [71] ANIS M A, SREERAMA Y N. Inhibition of protein glycoxidation and advanced glycation end-product formation by barnyard millet (*Echinochloa frumentacea*) phenolics [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126265.
- [72] HU S, YUAN J, GAO J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory potential of peptides derived from *in vitro* gastrointestinal digestion of germinated and heat-treated foxtail millet (*Setaria italica*) proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(35): 9415–9426.
- [73] HEGDE P S, RAJASEKARAN N S, CHANDRA T S. Effects of the antioxidant properties of millet species on oxidative stress and glycemic status in alloxan-induced rats [J]. Nutrition Research, 2005, 25(12): 1109–1120.
- [74] SHI J, SHAN S, LI H, et al. Anti-inflammatory effects of millet bran derived-bound polyphenols in LPS-induced HT-29 cell via ROS/miR-149/Akt/NF- κ B signaling pathway[J]. Oncotarget, 2017, 8(43): 74582.
- [75] QIN S, YIN J, HUANG K. Free fatty acids increase intracellular lipid accumulation and oxidative stress by modulating PPAR α and SREBP-1c in L-02 cells[J]. Lipids, 2016, 51(7): 797–805.

- [76] ZHANG L, LI H X, PAN W S. Novel hepatoprotective role of Leonurine hydrochloride against experimental non-alcoholic steatohepatitis mediated via AMPK/SREBP1 signaling pathway[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, 110: 571–581.
- [77] VEERAMANI C, ALSAIF M A, AL-NUMAIR K S. Herbacetin, a flaxseed flavonoid, ameliorates high percent dietary fat induced insulin resistance and lipid accumulation through the regulation of hepatic lipid metabolizing and lipid-regulating enzymes [J]. *Chemico-biological Interactions*, 2018, 288: 49–56.
- [78] LI S, YU W, GUAN X, et al. Effects of millet whole grain supplementation on the lipid profile and gut bacteria in rats fed with high-fat diet[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 59: 49–59.
- [79] ZHANG Y, TANG K, DENG Y, et al. Effects of shenling baizhu powder herbal formula on intestinal microbiota in high-fat diet-induced NAFLD rats[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 102: 1025–1036.
- [80] CROVESY L, OSTROWSKI M, FERREIRA D M T P, et al. Effect of *Lactobacillus* on body weight and body fat in overweight subjects: A systematic review of randomized controlled clinical trials [J]. *International Journal of Obesity*, 2017, 41(11): 1607–1614.
- [81] GUPTA S, SHARMA A K, SHASTRI V, et al. Prediction of anti-inflammatory proteins/peptides: an insilico approach[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2017, 15(1): 1–11.
- [82] 谢仲寅, 任欣, 张敏, 等. 小米挤压粉与小米生粉理化性质及营养品质的差异比较[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(22): 13–18, 23.
- XIE Z Y, REN X, ZHANG M, et al. Difference of physicochemical properties and nutritional quality between raw and extruded foxtail millet flour [J]. *Food Industry Technology*, 2019, 40(22): 13–18, 23.
- [83] 侯殿志, 陈静, 沈群. 挤压和发酵对小米多肽 ACE抑制活性及抗氧化作用的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 174–180.
- HOU D Z, CHEN J, SHEN Q. Effect of extrusion and fermentation on ACE inhibitory activity and antioxidant activity of foxtail millet polypeptide [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(5): 174–180.

Advances in Functional Components of Millet to Improve Glucose and Lipid Metabolism

Wang Han, Chen Borui, Hou Dianzhi, Zhao Qingyu, Xue Yong, Shen Qun*

(College of Food Science & Nutritional Engineering, China Agricultural University, Key Laboratory of Plant Protein and Cereal Processing, National Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Processing, Beijing 100083)

Abstract In recent years, many studies have reported that the daily diet based on millet has the effects of lowering blood sugar and blood lipid. It is found that dietary fiber, protein and polyphenols in millet can improve the disorder of glucose and lipid metabolism, mainly by inhibiting the activity of related enzymes and regulating insulin signal transduction pathway, improve lipid metabolism by inhibiting the level of inflammatory factors and regulating the expression of related genes. In this paper, the functional components and related molecular mechanisms of millet and its components regulating glucose and lipid metabolism were reviewed, and the existing problems and directions of millet research were prospected. The review work is intended to provide some new ideas for promoting the basic research and industrialization development of millet.

Keywords millet; glucose and lipid metabolism; mechanism