

刘建垒, 常柳, 段晓亮, 等. 谷子的生产概况及其保健功能与机理研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 389–395. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020114

LIU Jianlei, CHANG Liu, DUAN Xiaoliang, et al. Foxtail Millet: Production Status, Advances in Health Benefits and Its Mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 389–395. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020114

· 专题综述 ·

谷子的生产概况及其保健功能与机理研究进展

刘建垒, 常柳, 段晓亮, 王文娟, 孙辉*

(国家粮食和物资储备局科学研究院粮食品质营养研究所, 北京 102629)

摘要: 谷子因其具有重要的农业工业价值、高营养价值和生物活性成分而备受关注。本文首先介绍了谷子的生产概况, 进而综述了国内外有关谷子保健功能及其机理的研究进展。大量研究表明, 谷子具有抗氧化、降血糖、降血脂、降血压、抗肿瘤、免疫调节、保护肝脏等多种保健功能, 这主要与其功能成分酚类物质、活性肽、膳食纤维、类胡萝卜素、脂肪酸等有关。全面深入了解谷子的保健功能对于引导绿色优质粮油产品消费, 推动粮食产业高质量发展具有重要意义。

关键词: 谷子, 小米, 生产概况, 功能成分, 保健功能, 机理

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)05-0389-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021020114



本文网刊:

Foxtail Millet: Production Status, Advances in Health Benefits and Its Mechanism

LIU Jianlei, CHANG Liu, DUAN Xiaoliang, WANG Wenjuan, SUN Hui*

(Institution of Grain Quality and Nutrition, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 102629, China)

Abstract: Foxtail millet has attracted much attention because of its important agro-industrial value, high nutritional value and biologically active ingredients. This article first introduces the production of foxtail millet, and then reviews the advances on the health benefits and its mechanism of foxtail millet at home and abroad. Numerous studies have shown that foxtail millet has anti-oxidation activity, hypoglycemic activity, hypolipidemic activity, anti-hypertension, anti-tumor, immunoregulation, protecting liver and other health care functions, which is mainly due to its functional components, such as phenolic substances, active peptides, dietary fiber, carotenoids, and fatty acids, etc. A comprehensive and in-depth understanding of the health benefits of foxtail millet has great significance for guiding the consumption of green and high-quality grain and oil products and promoting the high-quality development of the grain industry.

Key words: foxtail millet; millet; production status; functional components; health benefits; mechanism

谷子(*Setaria italica* L.), 又称粟、稷, 属禾本科(Poaceae)狗尾草属(*Setaria*)。谷子起源于中国, 在距今 8000 年前后就已经开始种植^[1], 谷子首先在黄河流域被驯化, 之后传播到全国各地^[2]。谷子具有节水、抗旱性强、适应性广等特点^[3], 使其在旱作农业

中起着十分重要的作用。

谷子脱壳后称为小米(Foxtail millet), 也称粟米, 它富含多种营养物质, 其中, 粗蛋白干基含量可达 12%~14%^[4-6], 且蛋白消化率可达 78% 以上^[7]; 小米的必需氨基酸指数(Essential amino acids index,

收稿日期: 2021-02-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项课题(ZX1927)。

作者简介: 刘建垒(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 粮食品质与标准, E-mail: ljl@ags.ac.cn。

* 通信作者: 孙辉(1971-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 粮食品质与标准, E-mail: sh@ags.ac.cn。

EAAI)可达到 80^[8], 氨基酸比例接近于 FAO/WHO 理想氨基酸标准, 适合人体氨基酸配比^[9], 是替代动物蛋白食品的理想选择^[10]。小米粗脂肪含量在 3.6%~4.5% 之间^[4, 11], 其中, 不饱和脂肪酸含量达 82% 以上^[11]。与其他谷物相比, 小米中膳食纤维含量相对较高, 且 74% 以上为不溶性膳食纤维含量^[12]。小米中维生素含量多且种类丰富, 维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 E 含量均高于小麦粉和稻米, 还含有一般粮食中不含有的维生素 A 和胡萝卜素^[13]。小米中还含有丰富的功能活性物质, 如黄酮、多酚、低聚糖等^[14-15]。

随着生活水平的提高, 人们对营养和健康食物的需求也不断增加。小米是碳水化合物和功能活性成分的丰富来源; 且小米既便宜又容易获得, 可以用于生产各种食品产品^[16], 小米和以小米为基础的强化功能产品对各种与健康有关的问题和慢性疾病具有一定的改善作用^[17], 人们对其关注度也越来越高。

但是, 目前尚缺乏对谷子保健功能及其机理的综合介绍。因此, 本文首先介绍了谷子的生产概况, 进而综述了国内外有关谷子保健功能及其机理的研究进展, 以期对谷子的保健功能有更全面深入的了解, 这对于引导绿色优质粮油产品消费, 推动粮食产业高质量发展具有重要意义。

1 谷子的生产概况

谷子的种质资源丰富, 截止 2022 年 2 月, 国家基因库谷子数据库 (MilletDB) (<https://db.cngb.org/millet>) 收录的谷子品种数达 2540 个, 按米色可分为黄、浅黄、白、灰褐等不同颜色, 其中以黄色系 (黄和浅黄) 小米品种为主, 占全部谷子品种数的 91.8%^[18]。谷子按粒质分为粳型和糯型, 相应的由粳粟和糯粟加工而成的成品粮, 分别称为粳性小米和糯性小米^[19-20]。我国是世界上谷子资源保有量最丰富的国家, 据统计, 我国已鉴定编目的谷子遗传资源有 27059 份, 其中, 国内 26536 份, 国外 523 份; 粳性品种和糯性品种分别占 89.5% 和 10.5%^[21]。

中国是世界上谷子种植面积最大的国家, 占世界总种植面积的 90% 以上^[22]。2020 年 6 月最新出版的《中国农业统计资料 (1949-2019)》^[23] 显示, 1949 年以来, 我国谷子播种面积总体呈下降趋势, 并有三快三慢下降期 (图 1)。第一次, 1955~1960 年, 我国谷子播种面积从 892.9 万公顷下降到 570.4 万公顷, 5 年间下降了 322.5 万公顷; 第二次, 1970~1980 年, 我国谷子播种面积从 691.3 万公顷下降到 387.2 万公顷, 10 年间下降了 304.1 万公顷, 平均每年下降 30.4 万公顷; 第三次, 1983~2005 年, 我国谷子播种面积从 408.7 万公顷下降到 84.9 万公顷, 22 年下降了 323.8 万公顷。此后, 我国谷子播种面积波动相对不大, 维持在 72.1~86.1 万公顷左右。2018 年 10 月, 全国农业技术推广服务中心发布的《2017 年全国农作物主要品种推广情况统计》显示, 2017 年全国谷子主推品种为 151 个, 这些谷子主推

品种的种植面积占 70.2 万公顷。

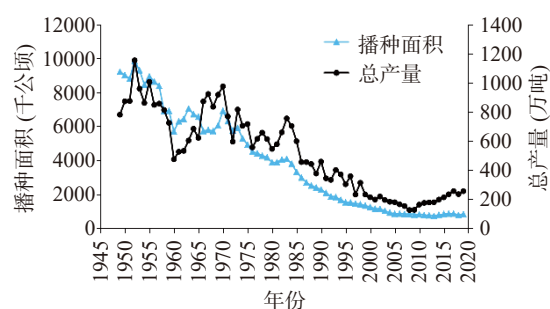


图 1 1949~2019 年我国谷子种植面积、总产量变化
Fig.1 Changes of foxtail millet planting area and total yield in China from 1949 to 2019

从谷子总产量来看, 谷子总产量的变化趋势同总播种面积的变化趋势基本一致, 在 2008 年下降到最低点 125 万吨后, 又逐步回升; 到 2019 年, 全国谷子总产量达 254 万吨 (图 1)。

从谷子单产来看, 1949 年以来, 我国谷子的单产整体呈上升趋势, 特别是 2008 年以后, 谷子单产大幅提升, 从 2008 年的 1495 千克/公顷上升到 2019 年的 3058 千克/公顷 (图 2)。2008 年, 谷子被列入国家现代农业产业技术体系, 科技投入的加大和技术进步的加快, 农业结构调整和市场需求变化, 使谷子产业又面临了一次难得的机遇。到 2019 年, 全国谷子播种面积回升到 83.1 万公顷, 单产也达到了历史最高点。

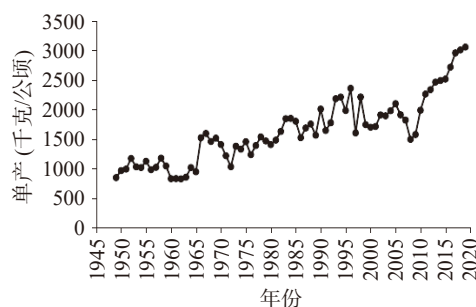


图 2 1949~2019 年我国谷子单产的变化
Fig.2 Changes of foxtail millet yield per unit area in China from 1949 to 2019

从谷子不同种植地区来看, 2012~2016 年平均年种植面积较大的省 (区) 依次是山西省、内蒙古自治区、河北省、陕西省、辽宁省、吉林省、河南省、山东省、甘肃省、黑龙江省、宁夏回族自治区和贵州省, 这 12 个省 (区) 谷子面积占全国谷子总面积的 99%; 其中, 华北最干旱的山西、内蒙古、河北 3 个省 (区) 谷子占全国 68% 的面积和 64% 的产量; 山西省的平均年种植面积居第一位, 河北省的年产量居第一位。各省区间由于自然和生产条件的差异, 单产差异较大, 其中, 吉林、黑龙江、河北单产水平较高; 宁夏、河南、陕西单产水平较低^[21]。刘杰安等^[24] 分析了近 30 年 (1985~2015 年) 我国谷子生产时空变化与区域优势, 发现谷子的优势产区稳定在东北地区中西部、

黄淮海平原中北部和北部中低高原区东南部,具体集中在内蒙东部、东北三省与内蒙接壤的县域、河北大部、河南西北部、山东中部、山西大部、陕西北部、甘肃东部及宁夏中部。

2 谷子的保健功能及其机理

历代医药学著作中都有“药食同源”之说,谷子由于其较高的营养价值,在古代医学中多用作服用中药的引子^[25]。早在《本草纲目》中就记载,小米“煮粥食,益丹田,补虚损,开肠胃”。现代营养学研究也表明,谷子具有抗氧化、降血糖、降血脂、降血压、抗肿瘤、免疫调节、保护肝脏等多种保健功能,以下对国内外有关谷子的保健功能及其机理的研究进展分别进行介绍。

2.1 抗氧化

谷子中含有多种抗氧化活性成分,包括多酚类物质^[14]、蛋白水解物^[26]、类胡萝卜素(主要是全反式叶黄素和全反式玉米黄素)^[27]、可溶性膳食纤维及不溶性膳食纤维(半纤维素 A、半纤维素 B、纤维素、木质素、果胶)^[28]、多糖^[15]等物质,均有较好的自由基清除能力^[29]。通过自由基清除能力和铁还原能力的体外测定,发现小米可溶性膳食纤维的抗氧化活性高于不溶性膳食纤维^[28];小米 β -葡聚糖也具有较弱的 DPPH 自由基清除能力和铁还原抗氧化能力^[15]。小米制品,如添加 30% 的曲奇饼干仍然具有较强的抗氧化活性,还可延长小米制品的货架期^[30];小米谷糠油也能显著提高高血脂型大鼠机体的抗氧化活性^[31]。发芽后小米的抗氧化能力,包括 DPPH 自由基清除能力、 H_2O_2 清除能力、铁还原抗氧化能力及金属螯合能力均显著提升($P<0.05$)^[32-33]。

2.2 降血糖

有研究发现,用 45% 的小米粉和 55% 的精制小麦粉制成的小米饼干,血糖生成指数(glycemic index, GI)仅为 50.8,是糖尿病人的理想食品^[34];一项为期 12 周针对 45 例未经治疗的轻度高血压患者临床干预研究发现,平均每天摄入约 50 g 糙小米代替部分常规主食,也可改善受试者的空腹血糖^[35]。SIREESHA 等^[36]研究发现,连续 30 d 给糖尿病大鼠按 300 mg/kg 体重灌胃小米水提物,可显著降低其空腹血糖水平($P<0.05$)。

小米降血糖的作用与其含有的膳食纤维、脂肪酸及多酚类物质有关。谷子中的不溶性纤维可以有效吸附葡萄糖,延缓葡萄糖扩散,进而促进葡萄糖在胃肠道的吸附。此外,它们能有效抑制 α -淀粉酶活性,阻碍碳水化合物消化,延缓葡萄糖的释放,从而改善胰岛素敏感性,降低糖尿病的风险^[37-38],小米中的不饱和脂肪酸可以同淀粉形成复合物,导致淀粉水解的减少。油酸是一种非常有效的减少淀粉水解量的脂肪酸,而反式油酸的效果不如顺式构象的油酸有效^[39]。脂肪酸与淀粉相互作用的数量和类型对小米的降血糖性能有重要影响。在小米加工过程中,保持

其脂肪酸的存在,并避免其不饱和脂肪酸向反式转变的过程,对于保持小米的降血糖特性非常重要。小米中的多酚也能抑制 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和胰淀粉酶的活性,进而降低小米淀粉的消化速率^[40-42]。

此外,小米水溶性膳食纤维经发酵可以产生短链脂肪酸^[43],短链脂肪酸在维持肠道和代谢健康方面发挥着重要作用,对于预防胃肠道功能障碍、肥胖和 II 型糖尿病具有科学价值^[44]。如,乙酸钠和丙酸钠可显著降低以链脲佐菌素(Streptozotocin, STZ)诱导的糖尿病小鼠的累计进食量,丙酸钠可以显著降低血糖水平(20.65%)和胰岛素抵抗(11.19%),增强 β -胰细胞功能(64.50%)($P<0.05$),提高葡萄糖耐量,对胰腺组织损伤起到改善作用^[45]。

2.3 降血脂

小米具有良好的辅助降血脂功效,添加 10% 和 50% 的小米均可有效减少高脂饮食大鼠肝脏中的脂肪积累,降低血清及肝脏中的甘油三酯和总胆固醇水平;降低血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的水平,增加高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)的水平^[46];当小鼠维持饲料中小米比例为 40% 时,可使阿托伐他汀对高血脂小鼠的治疗时间从 28 d 缩短至 7 d^[47]。

小米水提物、醇提物、小米谷糠油及膳食纤维等成分均具有降血脂的作用。SIREESHA 等^[36]研究发现,连续 30 d 给糖尿病大鼠按 300 mg/kg 体重灌胃小米水提物,表现出明显的降血脂作用,可以显著降低糖尿病大鼠的甘油三酯,总胆固醇、LDL-C 和极低密度脂蛋白胆固醇的水平,增加 HDL-C 的水平($P<0.05$)。谷子乙醇提取物能显著降低 HepG2 细胞脂质积累、总胆固醇和甘油三酯水平($P<0.05$)^[46]。赵陈勇等^[31]研究了小米谷糠油对高血脂型大鼠的血脂水平的影响,发现灌胃 0.5 g/kg 体重的小米谷糠油降血脂效果最好。小米糠膳食纤维经木聚糖酶催化水解后,对胆固醇的结合能力增强到原来的 2.23 倍^[48]。发芽粟米也可有效调节高血脂小鼠的脂质代谢,它能显著降低总胆固醇、甘油三酯及 LDL-C 水平,并显著升高 HDL-C 水平($P<0.05$)^[49]。

小米可能通过调节脂质代谢相关基因的表达或肠道微生物组成来发挥降血脂作用:如,下调与肝脏脂质代谢相关的基因 *SREBP-1C*、*FAS* 及 *HMGCR* 的表达;增加短链脂肪酸(乙酸、丙酸和丁酸等)水平,改善了肠道菌群(降低了厚壁菌门的数量,增加了放线菌的数量)的组成等^[46, 50]。

脂质代谢障碍为动脉粥样硬化的病变基础。LIU 等^[51]研究发现,谷子麸皮中提取的一种过氧化物酶具有潜在的抗动脉粥样硬化作用,它能够减少 ApoE-/-小鼠构建的动脉粥样硬化模型的主动脉病变面积,抑制主动脉壁 *CD36* 和 *STAT3* 的表达,升高血清 HDL-C 浓度;同时抑制 HASMCs 和 THP-1 细胞的脂质吞噬作用,抑制效果分别为 52% 和 49%。这些结果表明谷子麸皮过氧化物酶在预防动脉粥样硬

化发展方面有很大的潜力。

2.4 降血压

糙小米及小米蛋白水解物均具有一定的降血压效果。一项为期12周的针对45例未经治疗的轻度高血压患者临床干预研究发现,平均每天摄入约50g糙小米代替部分常规主食,可显著降低参与者的收缩压(4.13 mmHg, $P=0.022$)和舒张压(3.49 mmHg, $P=0.002$);此外,他们的体重指数、体脂百分比、脂肪量也明显减少;这说明糙小米是一个潜在的营养和功能食品的来源,可能改善高血压和减轻相关的心血管疾病^[35]。此外,CHEN等^[52]研究也发现,将自发性高血压大鼠连续4周按200 mg/kg体重灌胃小米蛋白水解物(特别是生的和挤压的水解物)后,可改善其高血压及相关心血管疾病;给自发性高血压大鼠灌胃100 mg/kg体重的小米米糠蛋白水解物(<1 ku的组分)6 h后,可降低其收缩压约37.8 mmHg^[53]。

小米可通过其蛋白水解肽来抑制血管紧张素转化酶(angiotensin converting enzyme, ACE)和肾素的活性,降低血浆血管紧张素II的含量,进而发挥降血压的作用^[52-53]。灌胃100 mg/kg体重的小米米糠蛋白水解物(<1 ku的组分),可使自发性高血压大鼠ACE活性抑制率达73.667%,肾素抑制率为74%^[53];自发性高血压大鼠连续4周灌胃小米蛋白水解物后,血浆血管紧张素II的含量由(2.85±0.29) ng/mL降低到(1.68±0.48) ng/mL^[52];且经挤压处理的小米蛋白水解多肽ACE抑制活性显著提高($P<0.05$), IC_{50} 值为0.057 mg/kg^[54]。邹智鹏等^[53]从小米米糠蛋白水解物中鉴定出7个ACE抑制小肽序列VALVR、VLER、VVRP、WVGK、FGPK、VLLF和LFGK,具有良好的降血压活性。

2.5 抗肿瘤

小米提取物如多酚、类胡萝卜素及活性蛋白组分等均具有抗肿瘤活性。小米糠内壳结合酚对氧化偶氮甲烷和葡聚糖硫酸酯诱导的小鼠结直肠癌有良好的抑制作用,它能减少肿瘤的数量和体积,保护上皮结构不受损伤^[55]。小米糠结合酚对结肠癌细胞系HT-29及HCT-116细胞的增殖有明显的抑制作用,且在裸鼠模型中也具有抗肿瘤细胞增殖活性^[56-57]。小米提取物(多酚、类胡萝卜素)具有抗恶性细胞增殖的作用,可有效抑制人乳腺癌MAD细胞和人肝癌HepG2细胞的增值^[58]。单树花^[59]利用生物化学技术从米糠蛋白粗提液中获得了单一的抗肿瘤活性蛋白组分,证实该蛋白在细胞水平和裸鼠体内均能发挥抗肠癌作用。

小米糠内壳结合酚通过改变如COX-2、EMRI、PCNA和caspase-3等结直肠癌形成相关的生物标志物;使小鼠肠道菌群趋于正常,并对几个负责17条信号通路的基因进行调控^[55];还可通过抑制结直肠癌细胞增殖,促进细胞凋亡,并通过抑制HCT-8/Fu细胞耐药蛋白表达,增加化疗药物积累,从而显

著提高化疗药物的敏感性^[60]。谷子麸皮中的结合多酚还可通过重编程miR-149介导的有氧糖酵解,在HT-29和DLD1细胞中显示出抗增殖活性^[56-57]。米糠蛋白组分通过诱导肿瘤细胞内产生过量的活性氧发挥其靶向抗肠癌效应;通过诱导结肠癌DLD1在细胞周期G₀/G₁期阻滞而抑制其细胞增殖;通过caspase介导的内源性和外源性凋亡途径诱导结肠癌细胞凋亡;通过拮抗STAT3介导的EMT通路来抑制结肠癌细胞转移^[59, 61]。小米糠过氧化物酶通过阻断甘油磷脂代谢来抑制结肠炎相关结直肠癌的发生^[62]。

2.6 免疫调节作用

全谷物小米、小米麸皮醇提物及小米多肽在细胞水平和动物实验水平均表现出一定的免疫调节作用。如,王菁^[50]研究发现,全谷物小米可有效改善胰岛素抵抗状态下大鼠的血清炎症因子水平,可以降低高脂饮食大鼠血清的脂多糖(LPS)、高敏C-反应蛋白(hs-CRP)及白介素6(IL-6)的浓度。HOSODA等^[63]研究发现小米麸皮甲醇提取物对脂多糖诱导的巨噬细胞(RAW264.7)具有免疫调节作用,能够抑制NO及炎症细胞因子,如肿瘤坏死因子- α (TNF- α)和IL-6的产生。刘剑利等^[64]将小米多肽分为高、中、低剂量组喂饲小鼠,研究了小米多肽对小鼠的免疫调节作用,发现不同剂量的小米多肽有明显的刺激淋巴细胞转化的作用,进而使小鼠淋巴细胞增殖,增强细胞的免疫作用,小鼠巨噬细胞的吞噬功能及脾脏指数也显著提升。

全谷物小米可能通过改善肠道菌群,降低LPS的渗透,改善糖脂代谢及炎症因子的关键基因和蛋白的表达,从而降低由高脂高胆固醇膳食诱导的机体炎症水平^[50]。小米多肽可能主要通过促进机体的细胞免疫水平、增强白细胞吞噬能力、促进免疫器官发育、提高脾脏指数、增加血清溶血素中抗体的含量等,进而调节细胞免疫和体液免疫能力^[64-65]。

2.7 保护肝脏

小米蛋白、小米谷糠蛋白及多肽对肝损伤小鼠的肝脏均具有较好的保护作用。MOHAMMAD^[66]研究发现,摄入未加热小米蛋白膳食和未加热强化小米蛋白膳食,可显著降低D-半乳糖苷诱导的肝损伤小鼠体重,提高其肝重;且小鼠血浆和肝中HDL-C显著提高($P<0.05$),总胆固醇、LDL-C和甘油三酯显著下降($P<0.05$);肝脏组织病理学显示,小鼠肝细胞坏死和恶化现象有所缓解。小米糠多肽对AP-NaNO₂导致小鼠肝癌有明显的抑制作用,可通过辅助提高机体抗氧化能力、促进肝脏酶活性、保护肝细胞膜,从而减轻肝细胞的病变程度^[65]。小米谷糠清蛋白对CCl₄所致的化学性肝损伤及酒精所致酒精性肝损伤具有保护作用,且呈剂量关系;水解谷糠蛋白对酒精所致酒精性肝损伤具有保护作用。这对开发小米保肝食品,预防肝损伤发生及缓解肝损伤病症都有积极

的作用^[67]。

此外,动物实验表明,小米糠膳食纤维对便秘模型小鼠具有一定的增加肠蠕动和促进排便的作用^[68];同时,肠粘膜与粪便的接触时间减少还可降低某些致癌物质的产生,对消化道疾病有一定的预防作用。

3 结论与展望

大量研究表明,谷子及其功能成分(主要是酚类物质、活性肽、膳食纤维、类胡萝卜素、脂肪酸等)具有抗氧化、降血糖、降血脂、降血压、抗肿瘤、免疫调节、保护肝脏等多种保健作用。但是,目前关于小米保健功能的研究,主要还是在细胞水平或动物(小鼠、大鼠)实验水平;虽然也有少数的人群实验报道,但样本量不够多,实验周期不够长;此外,目前的动物实验基本都是基于人工造模,对于正常的健康群体是否同患病群体具有一样的保健效果并不十分明确。因此,谷子及其功能成分对正常健康群体的保健作用还有待进一步阐释;长期食用小米对人群健康的保护作用也有待进一步深入研究。

综上所述,在日常饮食中经常食用小米和以小米为基础的产品有助于保持和增进人体健康。小米和以小米为基础的强化功能产品对各种与健康有关的问题和慢性疾病可能是一个福音。

为更好地发挥谷子的保健作用,今后应充分利用和发挥我国丰富的谷子资源优势,综合开展谷子功能活性成分的高效分离纯化技术研究,深入揭示谷子功效成分的化学结构及其构效关系,并发掘更多的功能活性成分;同时,加强我国谷子深加工产品的开发与利用,研发针对不同人群具有营养与保健作用的新型小米食品,实现谷子资源的高效利用和生产的可持续发展。

参考文献

- [1] 赵志军. 中国农业起源概述[J]. 遗产与保护研究, 2019, 4(1): 1-7. [ZHAO Z J. Introduction of the origin of agriculture in China[J]. Research on Heritages and Preservation, 2019, 4(1): 1-7.]
- [2] WANG C, JIA G, ZHI H, et al. Genetic diversity and population structure of Chinese foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv.] landraces[J]. G3: Genes, Genomes, Genetics, 2012, 2(7): 769-777.
- [3] XU B, GAO X, DONG K, et al. Grain protein content comparison and proteomic analysis of foxtail millet (*Setaria italica* L.) seed response to different drought stress levels[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(2): 1-11.
- [4] YANG X, WANG L, ZHOU X, et al. Determination of protein, fat, starch, and amino acids in foxtail millet *Setaria italica* (L.) Beauv. by Fourier transform near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Food Science and Biotechnology, 2013, 22(6): 1495-1500.
- [5] 杨延兵, 秦岭, 陈二影, 等. 谷子籽粒蛋白质、脂肪、千粒重的遗传变异[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 819-829. [YANG Y B, QIN L, CHEN E Y, et al. Genetic variations of protein content, fat content and TGW in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv.] in China[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(5): 819-829.]
- [6] 李庆春, 吴舒致. 不同品种小米中粗蛋白质含量的普查与评价[J]. 中国粮油学报, 1993, 8(A09): 9-13. [LI Q C, WU S Z. Survey and evaluation of crude protein content in foxtail millet of different varieties[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 1993, 8(A09): 9-13.]
- [7] MOHAMED T K, ZHU K, ISSOUFOU A, et al. Functionality, *in vitro* digestibility and physicochemical properties of two varieties of defatted foxtail millet protein concentrates[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2009, 10(12): 5224-5238.
- [8] 冯耐红, 侯东辉, 杨成元, 等. 不同品种小米主要营养成分及氨基酸组分评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 224-229. [FENG N H, HOU D H, YANG C Y, et al. Evaluation of main nutrients and amino acid components of different varieties of foxtail millet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 224-229.]
- [9] 冯小磊, 史高雷, 张晓磊, 等. 不同小米品种氨基酸与脂肪酸营养含量分析[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 340-344. [FENG X L, SHI G L, ZHANG X L, et al. Analysis of amino acid and fatty acid contents in different varieties of millet[J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 340-344.]
- [10] SACHDEV N, GOOMER S, SINGH L R. Foxtail millet: A potential crop to meet future demand scenario for alternative sustainable protein[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(3): 831-842.
- [11] ZHANG A, LIU X, WANG G, et al. Crude fat content and fatty acid profile and their correlations in foxtail millet[J]. Cereal Chemistry Journal, 2015, 92(5): 455-459.
- [12] 张玲艳. 不同谷子营养成分分析及加工贮藏对其酚含量的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [ZHANG L Y. Nutrition analysis of different millets and effects of processing and storage on their phenolic contents[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [13] 杨月欣. 中国食物成分表标准版(第六版)第一册[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018: 28-37. [YANG Y X. China food composition tables-standard edition (6th edition) volume 1:[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018: 28-37.]
- [14] XIANG J, ZHANG M, APEA-BAH F B, et al. Hydroxycinnamic acid amide (HCAA) derivatives, flavonoid C-glycosides, phenolic acids and antioxidant properties of foxtail millet[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 214-223.
- [15] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Characteristics of β -glucan extracted from raw and germinated foxtail (*Setaria italica*) and kodo (*Paspalum scrobiculatum*) millets[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 141-148.
- [16] 高婧, 梁志宏. 小米功能成分及新产品研发进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 169-177. [GAO J, LIANG Z H. Research progress of millet functional ingredients and new products development[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 169-177.]
- [17] KAUR P, PUREWAL S S, SANDHU K S, et al. Millets: A cereal grain with potent antioxidants and health benefits[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1): 793-806.
- [18] 国家基因库. 谷子数据库[EB/OL]. [2021-6-6]. <https://db.cngb.org/millet/>. [China National GeneBank. Millet DataBase[EB/OL].]

[2021-6-6]. <https://db.cngb.org/millet/>.]

- [19] 全国粮油标准化技术委员会. GB/T 8232-2008 粟[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [National Technical Committee on Grain and Oil of Standardization Administration of China. GB/T 8232-2008 Millet in husk[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [20] 全国粮油标准化技术委员会. GB/T 11766-2008 小米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [National Technical Committee on Grain and Oil of Standardization Administration of China. GB/T 11766-2008 Millet[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [21] 农业农村部小宗粮豆专家指导组. 谷子[EB/OL]. (2018-12-21) [2021-6-6]. <http://mgcic.com/content/4390>. [Expert Steering Group of Minor Grain Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Foxtail millet[EB/OL]. (2018-12-21) [2021-6-6]. <http://mgcic.com/content/4390>.]
- [22] 何红中. 中国古代粟作研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010. [HE H Z. A study on the production of *Setaria italica* Beauv. in ancient times of China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.]
- [23] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农业统计资料(1949-2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 46-66. [Rural Social and Economic Survey Department, National Bureau of Statistics. Agricultural statistics of China (1949-2019)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: 46-66.]
- [24] 刘杰安, 王小慧, 吴尧, 等. 近30年我国谷子生产时空变化与区域优势研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1883-1894. [LIU J A, WANG X H, WU Y, et al. Spatiotemporal variation and regional advantages of foxtail millet production in recent 30 years in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1883-1894.]
- [25] 郭先治. 谷子的医用价值[J]. 山西农业科学, 1984(9): 49. [GUO X Z. The medical value of foxtail millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1984(9): 49.]
- [26] MOHAMED T K, ISSOUFOU A, ZHOU H. Antioxidant activity of fractionated foxtail millet protein hydrolysate[J]. *International Food Research Journal*, 2012, 19(1): 207.
- [27] LIU M, ZHANG Z, REN G, et al. Evaluation of selenium and carotenoid concentrations of 200 foxtail millet accessions from China and their correlations with agronomic performance[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(7): 1449-1457.
- [28] DONG J L, WANG L, LU J, et al. Structural, antioxidant and adsorption properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italica*) bran[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(8): 3886-3894.
- [29] SHARMA N, NIRANJAN K. Foxtail millet: Properties, processing, health benefits, and uses[J]. *Food Reviews International*, 2018, 34(4): 329-363.
- [30] MARAK N R, MALEMNGANBI C C, MARAK C R, et al. Functional and antioxidant properties of cookies incorporated with foxtail millet and ginger powder[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(11): 5087-5096.
- [31] 赵陈勇, 王常青, 许洁, 等. 小米谷糠油降血脂和抗氧化作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 67-70. [ZHAO C Y, WANG C Q, XU J, et al. Study on antioxidation and reducing blood lipid of the millet bran oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(7): 67-70.]
- [32] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 863-870.
- [33] 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.
- [34] ANJU T J, SARITA S. Suitability of foxtail millet (*Setaria italica*) and barnyard millet (*Echinochloa frumentacea*) for development of low glycemic index biscuits[J]. *Malaysian Journal of Nutrition*, 2010, 16(3): 361-368.
- [35] HOU D, CHEN J, REN X, et al. A whole foxtail millet diet reduces blood pressure in subjects with mild hypertension[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 84: 13-19.
- [36] SIREESHA Y, KASETTI R B, NABI S A, et al. Antihyperglycemic and hypolipidemic activities of *Setaria italica* seeds in STZ diabetic rats[J]. *Pathophysiology*, 2011, 18(2): 159-164.
- [37] BANGOURA M L, NSOR-ATINDANA J, ZHU K, et al. Potential hypoglycaemic effects of insoluble fibres isolated from foxtail millets [*Setaria italica* (L.) P. Beauvois][J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, 48(3): 496-502.
- [38] 曹龙奎, 康丽君, 寇芳, 等. 改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 46-52. [CAO L K, KANG L J, KOU F, et al. Structural analysis and *in vitro* inhibitory effect on α -glucosidase activity of millet bran dietary fiber before and after modification[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 46-52.]
- [39] ANNOR G A, MARCONE M, CORREDIG M, et al. Effects of the amount and type of fatty acids present in millets on their *in vitro* starch digestibility and expected glycemic index (eGI)[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 64: 76-81.
- [40] 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.
- [41] PRADEEP P M, SREERAMA Y N. Phenolic antioxidants of foxtail and little millet cultivars and their inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase activities[J]. *Food Chemistry*, 2018, 247: 46-55.
- [42] PRADEEP P M, SREERAMA Y N. Soluble and bound phenolics of two different millet genera and their milled fractions: Comparative evaluation of antioxidant properties and inhibitory effects on starch hydrolysing enzyme activities[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 35: 682-693.
- [43] 郭文奎, 焦月华, 刘飞. 小米和燕麦中水溶性膳食纤维结构表征及对外发酵体系短链脂肪酸的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 190-194. [GUO W K, JIAO Y H, LIU F. Structure and short chain fatty acids produced characteristics by *in vitro* fermentation of water soluble dietary fibers isolated from millet and oats[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(3): 190-194.]
- [44] BLAAK E E, CANFORA E E, THEIS S, et al. Short chain fatty acids in human gut and metabolic health[J]. *Beneficial Microbes*, 2020, 11(5): 411-455.

- [45] 朱晓振, 张茜茜, 孟现尧, 等. 短链脂肪酸改善 2 型糖尿病小鼠胰岛素抵抗和胰腺损伤[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 1-7. [ZHU X Z, ZHANG H H, MENG X Y, et al. Short-chain fatty acids reduced insulin resistance and pancreatic damage in type 2 diabetic mice[J]. Modern Food Science & Technology, 2020, 36(8): 1-7.]
- [46] 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.
- [47] 陈新宇. 小米对小鼠降血脂功效的研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2019. [CHEN X Y. Effect of foxtail millet on lowering blood lipid in mice[D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2019.]
- [48] ZHU Y, HE C, FAN H, et al. Modification of foxtail millet (*Setaria italica*) bran dietary fiber by xylanase-catalyzed hydrolysis improves its cholesterol-binding capacity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 101: 463-468.
- [49] 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 antioxidation in hyperlipidemia mice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 37-44.]
- [50] 王菁. 不同种类及剂量全谷物对糖脂代谢及相关机制的研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. [WANG J. Study on different kinds and doses of whole grains on glucolipid metabolism and its mechanism[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.]
- [51] LIU F, SHAN S, LI H, et al. Treatment of peroxidase derived from foxtail millet bran attenuates atherosclerosis by inhibition of CD36 and STAT3 *in vitro* and *in vivo*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(5): 1276-1285.
- [52] 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.
- [53] 邹智鹏, 王明洁, 刘梦婷, 等. 小米米糠蛋白水解物及其膜分离组分的降血压相关活性研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 31-38. [ZOU Z P, WANG M J, LIU M T, et al. Antihypertensive properties of enzymatic hydrolysate of millet bran protein and its ultrafiltered fractions[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(6): 31-38.]
- [54] 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.]
- [55] YANG R, SHAN S, ZHANG C, et al. Inhibitory effects of bound polyphenol from foxtail millet bran on colitis-associated carcinogenesis by the restoration of gut microbiota in a mice model[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(11): 3506-3517.
- [56] SHI J, SHAN S, LI Z, et al. Bound polyphenol from foxtail millet bran induces apoptosis in HCT-116 cell through ROS generation[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 17: 958-968.
- [57] SHI J, SHAN S, ZHOU G, et al. Bound polyphenol from foxtail millet bran exhibits an antiproliferative activity in HT-29 cells by reprogramming miR-149-mediated aerobic glycolysis[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 56: 246-254.
- [58] ZHANG L Z, LIU R H. Phenolic and carotenoid profiles and antiproliferative activity of foxtail millet[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 495-501.
- [59] 单树花. 小米米糠活性蛋白的制备及其抗结肠癌效应研究[D]. 太原: 山西大学, 2014. [SHAN S H. The preparation and anti-colon cancer effects of active proteins from foxtail millet bran[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.]
- [60] LU Y, SHAN S, LI H, et al. Reversal effects of bound polyphenol from foxtail millet bran on multidrug resistance in human HCT-8/Fu colorectal cancer cell[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 66(20): 5190-5199.
- [61] SHAN S, LI Z, NEWTON I P, et al. A novel protein extracted from foxtail millet bran displays anti-carcinogenic effects in human colon cancer cells[J]. Toxicology Letters, 2014, 227(2): 129-138.
- [62] SHAN S, WU C, SHI J, et al. Inhibitory effects of peroxidase from foxtail millet bran on colitis-associated colorectal carcinogenesis by the blockage of glycerophospholipid metabolism[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(31): 8295-8307.
- [63] HOSODA A, OKAI Y, KASAHARA E, et al. Potent immunomodulating effects of bran extracts of traditional Japanese millets on nitric oxide and cytokine production of macrophages (RAW264.7) induced by lipopolysaccharide[J]. Journal of Uoeh, 2012, 34(4): 285-296.
- [64] 刘剑利, 曹向宇, 李其久, 等. 小米多肽对小鼠免疫调节作用[J]. 中国公共卫生, 2012, 28(1): 44-45. [LIU J L, CAO X Y, LI Q J, et al. Immunoregulation functions of millet peptides in mice[J]. Chinese Journal of Public Health, 2012, 28(1): 44-45.]
- [65] 于书佳. 小米米糠多肽的制备及其功能性的研究[D]. 太原: 山西大学, 2014. [YU S J. Study on preparation and function research of millet bran polypeptides[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.]
- [66] MOHAMMAD M M. 小米膳食对 D-氨基半乳糖诱导的小鼠肝损伤和血脂水平影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. [MOHAMMAD M M. Effect of foxtail millet diet on liver injury and blood lipid profile induced by D-galactosamine in mice[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.]
- [67] 许洁. 小米谷糠蛋白的提取及其保健功能的研究[D]. 太原: 山西大学, 2012. [XU J. Study on extraction of protein from millet bran and its protective effects on liver injury[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2012.]
- [68] 刘敬科, 赵巍, 刘莹莹, 等. 小米米糠膳食纤维制备工艺及通便特性的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(2): 177-181. [LIU J K, ZHAO W, LIU Y Y, et al. Preparation of dietary fiber from millet bran and its catharsis function[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(2): 177-181.]