宋靖仪,张莹予,刘钰,等.谷子(小米)中的酚类物质:组成、生物活性及在加工过程中的变化[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(3):132-140.
Song J Y, Zhang Y Y, Liu Y, et al. The impact of *Setaria italica* (L.) Beauv phenolic compounds composition and processing on its biological functions[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(3):132-140.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202409023

谷子(小米)中的酚类物质:组成、生物活性及在加工过程中的变化

宋靖仪,张莹予,刘钰,朱宇晗,苏彦瑜,吴华*,肖俊松,黄明泉

(北京工商大学 中国轻工业酿酒分子工程重点实验室,北京 100048)

摘　要:谷子是一种高光合效率的C_4模式植物,也是一种耐旱粮食作物,在中国北方有悠久的种植和食用历史。谷子脱壳后的可食用部分称为小米。谷子和小米富含酚类物质,有多种健康功效,是一种有潜力的健康膳食资源。本文系统性调研了近年来有关谷子和小米中的酚类物质、生物活性及其加工方式等方面的研究结果,总结了谷子和小米中的结合态和游离态酚的种类及含量,综述了谷子和小米中酚类物质抗炎抗氧化、降血糖、保护肠道等多种生物活性的研究进展,并探讨了碾磨、发芽、热加工和发酵等加工因素对谷子和小米中酚类物质的影响,以期为谷子和小米酚类物质的深入研究与开发提供理论依据。

关键词:谷子(小米);酚类物质特征;功能活性;加工工艺
中图分类号:S515　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)03-0132-09

Phenolic compounds in *Setaria italica* (L.): composition, bioactivity, and changes during processing

Song Jingyi, Zhang Yingyu, Liu Yu, Zhu Yuhan , Su Yanyu, Wu Hua*, Xiao Junsong, Huang Mingquan

(*China Key Laboratory of Molecular Engineering of Light Industry Brewing, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China*)

Abstract: *Setaria italica* (L.) Beauv is a C_4 model plant with high photosynthetic efficiency and a drought-tolerant grain crop that has been cultivated and consumed in northern China for centuries. The edible part after dehulling is known as millet. Millets are rich in phenolic compounds with various health benefits, making them a potential resource for healthy diets. This article systematically reviewed recent research on phenolic compounds, bioactivity, and processing methods related to millets. It summarized the types and contents of bound and free phenolic compounds in millets grains, discussed the progress in studies on their anti-inflammatory, antioxidant, hypoglycemic, and intestinal protective properties, and examined the effects of processing techniques such as milling, germination, thermal processing, and fermentation on phenolic compounds. The aim was to provide a foundation for future research and development of phenolic compounds in millets.

Keywords: *Setaria italica* (L.) Beauv (foxtail millet), Characteristics of phenolic compounds, Biological activity, Processing

谷子(*Setaria italica* (L.) Beauv)属于禾本科狗尾草属的一年生草本作物,耐旱耐盐碱,是一种高光合效率与高水分利用率的环境友好型C_4模式植物[1]。作为全球最古老的粮食作物之一,谷子最早考古发现于中国北部,已有一万一千年的栽培历史[2]。目前,谷子主要种植于东亚(中国、朝鲜、韩国、日本)、南亚(印度、巴基斯坦、尼泊尔、孟加拉)、东南亚(斯里兰卡、缅甸、泰国、老挝、越南、印

收稿日期:2024-09-11　　**修回日期**:2025-04-07
基金项目:北京市教委一般项目(KM202010011010);国家自然科学基金项目(31871749);2022国家重点研究计划(YFD2101205)
作者简介:宋靖仪(ORCID:0000-0003-0020-1542),博士研究生,E-mail:2050301006@st.btbu.edu.cn
*通信作者:吴华(ORCID:0000-0002-6916-1596),博士,副教授,研究方向:天然产物活性及运用,E-mail:wuhua@btbu.edu.cn

度尼西亚)、西非(马里、尼日尔、布基纳法索、尼日利亚、加纳)、北非(苏丹)、东非(埃塞俄比亚)、南非(南非)和其它地区(马达加斯加),中国和印度是谷子的主要种植区和消费区[3]。谷子外壳色泽丰富,有白色、红色、黄色、棕色、黑色以及杂色等[4]。脱壳后的谷子即为小米,含有12%~15%蛋白质、6%~8%膳食纤维、7%~8%粗脂肪,以及铁、钙和锌等必需矿物质[4]。《本草纲目》中关于小米功效的描述为"肾病宜食之,虚热消渴泄痢,皆肾病也,渗利小便,所以泄肾邪也。降胃火,故脾胃之病宜食之"。相较于大米和小麦,小米富含酚类物质和丰富的抗性淀粉(13%~15%),属低血糖生成指数膳食原料[5]。联合国粮食及农业组织将2023年定为"国际小米年",以肯定包括谷子在内的粟米作为营养丰富的低碳环保农作物对全球农业和人类健康的贡献[6]。

脱壳打磨、挤压、蒸煮、发酵和膨化是提升、改善谷子感官品质的常用加工工艺。这些工艺涉及到的参数,如浸泡或发酵时长、蒸煮温度和烘培压力等会对谷子中的淀粉、纤维素和酚类物质的结构产生影响,尤其是酚类物质相应状态、种类和含量会发生明显变化。诸多研究表明,谷子(小米)的抗氧化、抗炎和免疫调节等多种生理功效都与酚类物质密切相关[7]。本文对谷子(小米)酚类物质的结构、生理活性以及常见加工工艺对其种类含量的影响进行综述,以期为谷子(小米)相关产品开发过程中,保护或提升酚类物质的活性提供理论参考。

1　谷子中的酚类物质

谷子籽粒属于假颖果,由稃壳、种皮、果皮、胚、胚乳和胚芽组成。谷子脱去稃壳、种皮、果皮和胚芽后,余下的(胚和胚乳)即为小米。稃壳、皮层(种皮和果皮)、胚芽、糊粉层和碎小米组成了谷糠。谷糠约占谷子总质量的10%,其中酚类物质约占谷子酚类物质的60%[8]。由于可食用性差,谷糠多用于动物饲料或谷糠油的提取。而可食部分小米中的总酚含量也存在较大差异。如,山东'桃花小米'的总酚含量(1.27×10^2 mg/100g)比'金小米'(1.23×10^2 mg/100g)高[9];以没食子酸(Gallic Acid Equivalents,GAE)为当量,山西'晋谷34号'小米的总酚(1.14×10^2 mg GAE/100g)比'晋谷28号'(7.88×10 mg GAE/100g)约高1.5倍[10];内蒙产的'峰红谷'(6.71×10^2 mg GAE/100g)总酚含量高于'黄金谷'(4.20×10^2 mg GAE/100g)1.6倍,河南的'豫谷01'(4.16×10^2 mg GAE/100g)略高于'豫谷18'(3.82×10^2 mg GAE/100g)[11]。这是由于不同品种谷子中小米部位的多酚合成差异造成。

谷子(小米)中的酚类物质主要为黄酮类与酚酸类化合物(羟基苯甲酸类与羟基肉桂酸类),羟基苯甲酸及其衍生物以咖啡酸、绿原酸、对香豆酸、芥子酸、阿魏酸和异阿魏酸为代表,羟基肉桂酸及其衍生物,以丁香酸、龙胆酸、没食子酸、原儿茶酸、香草酸和对羟基苯甲酸为代表,而谷子和小米中的黄酮类物质主要有槲皮素、表儿茶素、儿茶素、芹黄素、山奈酚、牡荆碱和芦丁[7,12]。某些品种的谷子和小米中还含有一些其它种类的酚类物质,如山西'东方亮'小米中含有辛弗林、香叶木苷、鼠曲草黄素、环桑皮黄素、荭草素、川陈皮素、芒柄花素等[13];河南的'金小米'和'桃花小米'中含有厚朴三酚、奎宁酸和圣草次苷[9];斯里兰卡的谷子中还含有黄杉素、木犀草素、麦黄酮和杨梅酮等[14]。由此可见,谷子和小米中酚类物质的多样性不仅与品种有关,还可能与栽培地域、当地物候有关。

酚类物质依据与谷子中纤维素、半纤维素(木聚糖)、木质素、果胶和蛋白等组分的酯键和醚键连接的强弱呈现出水溶性差异,又可被分为游离态和结合态多酚[11,15]。张玲艳等[11]发现,11种北方谷子中结合酚含量占总酚含量的68%~91%。Chandrasekara[14]也发现谷子中结合酚含量占总酚含量的60%以上。Bora等[16]发现谷子结合酚占总酚含量的95%以上。这些研究表明谷子中的酚类物质主要以结合态的形式存在。由稃壳、种皮、果皮和胚芽等组成的谷糠虽然只占谷子总重量的10%,但酚类物质含量占谷子总酚的60%,其中纤维素、半纤维素和木质素等含量极高,容易通过脂键或醚键连接和酚类物质相结合形成结合态的酚。这可能就是谷子中的结合酚含量高于游离酚的原因。

Xiang等[18]发现中国的4种小米'山西CSF1'、'黑龙江CNF1'、'河南CF1'、'甘肃CF2'中的游离酚含量较高,与结合酚含量相近。以阿魏酸(Ferulic acid,FAE)为当量,Pradeep等[17]发现印度小米

中游离酚(3.09×10^2～3.39×10^2 mg FAE/100g)占总酚含量的80%以上。小米总酚中的游离酚高于或与结合酚相近,可能是因为谷子中谷糠部分不仅酚类物质含量高,且谷糠中的纤维素、半纤维素和木质素等比例较高,容易与酚类物质产生,以结合态形式存在。而在小米中,纤维素等含量较少,结合酚的相对含量降低。

通过对比已有谷子(小米)酚类物质的检测数据(附表1)可见,对香豆酸和阿魏酸是印度和斯里兰卡的谷子(小米)中酚类物质的主要成分,其含量分别在0.80×10^2～1.30×10^2 mg/100g和0.60×10^2～0.90×10^2 mg/100g,中国谷子(小米)中对香豆酸普遍含量较低,含阿魏酸较高的品种为'河南CF1'和'山西CSF1',其含量仅在0.20×10^2～0.30×10^2 mg/100g,远低于国外品种。中国境内'河南YG18'和'山西JG5'的谷子(小米)中香草酸和丁香酸含量均在0.20×10^2 mg/100g左右,显著高于国内其它品种及国外2个品种。这些表明,谷子(小米)酚类物质含量的差异,可能是由品种资源的不同和栽培地的生态环境造成。

2 谷子(小米)中酚类物质的生物活性

谷子(小米)不仅营养丰富,还富含多酚类物质,是优良的药食同源健康饮食资源。从古至今,通过不断的尝试和研究,人们越来越多的发现,谷子(小米)多酚在促进健康和预防疾病方面发挥着重要的作用,如抗炎、抗氧化、调理消化系统,降血糖,降脂和抗癌等多种功效(附件表2)。

2.1 抗炎与抗氧化

炎症是机体清除有害刺激和修复组织损伤所的自发反应,然而过度和长期的炎症反应会降低或破坏机体免疫调节能力,导致受损组织难于修复和代谢紊乱,成为其它疾病的诱因,如糖尿病、肥胖、神经系统疾病、癌症和类风湿关节炎等[21]。

膳食多酚不仅具有较好的抗炎作用,还能提升机体免疫能力,缓解如风湿性关节炎、糖尿病和肥胖等疾病的症状,在大健康产业发展中举足轻重。史江颖等[22]发现0.4～0.6 mg/mL谷糠多酚能显著降低LPS诱导的HT-29系人结肠癌细胞中IL-1β、IL-8和IL-10含量,但对TNF-α含量无明显影响,进一步研究表明谷糠多酚可能是通过上调miR-149表达水平,降低或阻止了Akt/NF-κB通路的激活,从而降低炎症水平,起到抗炎效果。Ren等[23]发现持续12周摄入富含黄酮多酚的小米50 g/d,可明显增加受试者体内能量消耗指示荷尔蒙-瘦素的浓度和降低血液中的IL-6和TNF-α含量。Li等[24]发现小米多酚能够通过调节NF-κB通路,显著降低H_2O_2导致的人神经母细瘤细胞(SH-SY5Y)中NF-κB、IL-1β和TNF-α表达。Ren等[25]的研究还发现小米具有降低阿尔兹海默症发生的风险和保护神经的潜力;进一步研究发现,给糖尿病模型大鼠喂食掺有10%的富含多酚的谷子饲料3周后,可显著降低血液中的IL-6和TNF-α的含量以及NF-κB通路中的关键调控蛋白p65和IκB-α的磷酸化水。由此可见,多酚是谷子和小米发挥抗炎作用的不可缺少的重要组分。

与炎症反应一样,氧化应激也参与了生物体中诸多重要的生物过程,如线粒体呼吸作用中产生的活性氧(ROS),各种免疫细胞或中性粒细胞中的用于防止病原体入侵和消耗恶性细胞的超氧阴离子(O^{2-})等[26]。然而过量的或持续的氧化应激,不仅会导致细胞和组织中产生过量的ROS,促进炎症的发生和加剧,还会引起DNA、蛋白质和脂质的不可逆和永久的损伤,进而导致组织受损,破坏机体的免疫平衡,诱发代谢综合征、心血管疾病、II型糖尿病。

多酚在谷子(小米)抗氧化作用中也发挥了积极的作用[27]。延莎等[28]比较了6种不同米色的小米多酚醇提物,发现小米颜色深浅与小米多酚含量正相关,颜色越深的小米所含的总酚含量越高,且抗氧化活性越强。印度斯里兰卡谷子多酚主要以香豆酸和阿魏酸为主[14]。Palaniswamy等[29]发现20 μg以上的斯里兰卡谷子多酚能显著抑制由H_2O_2诱发的红细胞中膜蛋白的氧化、脂质过氧化并起到延缓溶血的作用,且在20～80 μg范围能形成剂量依赖效应。

由此可见,谷子多酚同时具有良好的抗炎和抗氧化作用,主要可能通过如下2个路径发挥作用:(1)减轻氧化应激的程度,打破其与炎症之间的恶性循环从而发挥抗炎作用。(2)直接参与有关炎症信号通路的调控,如抑制NF-κB/AP-1、激活撕裂原激活蛋白激酶(MAPK)等,控制iNOS、COX-2等酶活性和细胞炎症因子(IL-1β、TNF-α等)的表达。

2.2　降血糖

消渴症是中医诊疗中糖尿病典型的“三多一少”病症,表现为多饮、多食、多尿和消瘦。2016年,世界卫生组织首次发布的《全球糖尿病报告》明确指出全球糖尿病患病率持续升高,增加患者失明、肾衰竭、中风和截肢的风险[30]。合理有效的血糖控制是目前治疗和缓解糖尿病的重要手段,从膳食中寻找和发现具有调控血糖作用的食源性材料具有重要意义[31-32]。

早在1603年谷子就被《本草纲目》记录具有较好的消渴效果,这表明谷子具有调节血糖和缓解糖尿病的作用[33]。Sireesha等[34]人发现单次喂食Ⅱ型糖尿病模型大鼠200~300 mg/kg BW谷子水提物冻干粉,能显著改善餐后6 h的血糖水平,并表现出一定的剂量依赖性。持续30 d喂食300 mg/kg BW谷子水提物冻干粉,能显著改善和调控模型鼠空腹血糖水平,而对正常大鼠无显著影响。Ren等[35]通过体外模拟消化发现谷子能显著减缓淀粉消化率,从而起到降低血糖的作用。随后Ren等[23]通过进一步研究发现每天摄入90 g含有50 g小米的杂粮馒头,持续12周可以显著改善受试者血糖,尤其是餐后血糖。闫巧珍[36]也发现,小米多酚不仅具较好的抗氧化能力,还能抑制α-淀粉酶和α-葡萄糖苷酶活性,从而降低葡萄糖的转化率。王谨[33]发现谷子多酚(谷糠结合态多酚)能显著抑制α-葡萄糖苷酶活性;调节胰岛素抵抗$HepG_2$细胞模型和糖代谢紊乱小鼠模型的糖代谢关键酶的转录表达,促进葡萄糖消耗,从而改善糖代谢紊乱。

谷子多酚在血糖调控中发挥着重要的作用,其可能的主要途径为:(1)抑制α-葡萄糖苷酶和胰淀粉酶的活性,降低碳水化合物转化率或速率;(2)通过调节与胰岛素分泌相关基因信号的表达,从而调节胰岛素分泌和血糖代谢;(3)通过抗氧化作用减少糖代谢异常时产生的过量自由基,从而抑制蛋白质过度糖基化及晚期糖基化终产物(AGEs)的积累,改善代谢紊乱。

2.3　抗结肠癌

2018年世界癌症研究基金会(WCRF/AICR)发布的第3份专家报告明确指出,膳食干预是预防和治疗癌症的有效手段和重要途径,尤其是富含多酚类物质的膳食[37-38]。谷子中某些多酚与一些治疗癌症的药物结构相似,能通过抑制或缓解癌细胞的快速增殖,有效的降低肿瘤的恶性转化。史江颖等[39]发现谷子结合态多酚能够促进结肠癌细胞系HCT-116、人宫颈癌细胞系He-La、人肝癌细胞$HepG_2$和人乳腺癌细胞MCF-7发生凋亡,并具有一定的时间和剂量效应。史江颖等[40]还发现谷子结合态多酚是通过增加人结肠癌细胞系HCT-116中ROS的产生,促进线粒体的膜电位破坏,并促进Caspase信号通路的激活,阻断NF-κB免疫调节信号通路,从而促进癌细胞凋亡。随后史江颖等[41]发现谷子结合态多酚还能够显著促进人结肠癌细胞系HT-29和DLD1中靶向3'-UTR的miR-149的基因表达上调,从而显著降低癌症基因c-myc的蛋白表达,切断了细胞内好氧糖酵解通路中关键蛋白PKM2的表达,最终阻止癌细胞的增殖。Liu等[42]发现喂食发芽的谷子发酵产物,可以显著的降低聚糖硫酸钠(dextran sulfate sodium, DSS)诱导处理的小鼠血清中IL-6和IL-1β含量,维持较好的肠道屏障功能,促进肠道中具有调节免疫功能的有益菌(如瘤胃菌科、Odoribacter、Ileibacterium、Lachnospiraceae NK4A136、Rikenellaceae RC9肠道组和Mucispirillum schaedleri)的相对丰度,同时抑制肠道危害菌的标志细菌(如变形菌门和志贺杆菌门)的增殖,从而维持肠道菌群的稳定性。

2.4　其它生物活性

此外,近年来一些研究还表明谷子多酚在其它方面也具有较好的生物活性。在神经保护方面,Li等[24]和梁婷[9]均发现不同的谷子和小米多酚均能够显著降低H_2O_2导致的人神经母细胞瘤细胞(SH-SY5Y)中NF-κB、IL-1β和TNF-α的蛋白水平。阿尔兹海默症大鼠连续3周食用含有50%小米的饲料后,海马体中的NF-κB、IL-1β、TNF-α含量也显著降低,这说明小米具有着保护神经的作用。

在养胃方面,刺晓琴等[43]发现,谷子结合态多酚预处理能够显著降低酒精造成的胃黏膜上皮细胞GES-1中ROS的上升与凋亡蛋白的产生,并且给Wistar大鼠喂食3周50 mg/kg m_b谷子结合态多酚后,可以显著预防酒精造成的胃黏膜损伤。

在护肝方面,张佳丽等[44]发现给高血脂症小鼠喂食含有30%~60%发芽谷子粉的饲料6周后,小鼠的体重、肝脏血脂水平和氧化程度明显降低,

这与小米萌发过程中大量增加的黄酮类化合物与酚酸类化合物有关。

在抗乳腺癌方面,Zhang等[45]发现,谷子结合态多酚中的牡荆素和丁香酸能够显著下调乳腺癌细胞MDA-MB-231、MCF-7和人正常乳腺上皮细胞MCF-10A中SCD1的蛋白水平,抑制饱和脂肪酸向单不饱和脂肪酸的转化,引发脂质毒性,导致癌细胞的凋亡。

3 加工工艺对谷子(小米)酚类物质的影响

谷子在经过碾磨、热加工、发酵和发芽等一系列加工步骤后,能够显著提升其感官和营养品质,从而转化为更适宜食用的成品。这些不同的加工处理方式会导致谷子中酚类物质的种类和含量发生相应的变化,这些变化在不同程度上影响着谷子的生物活性和健康功效(图1)。

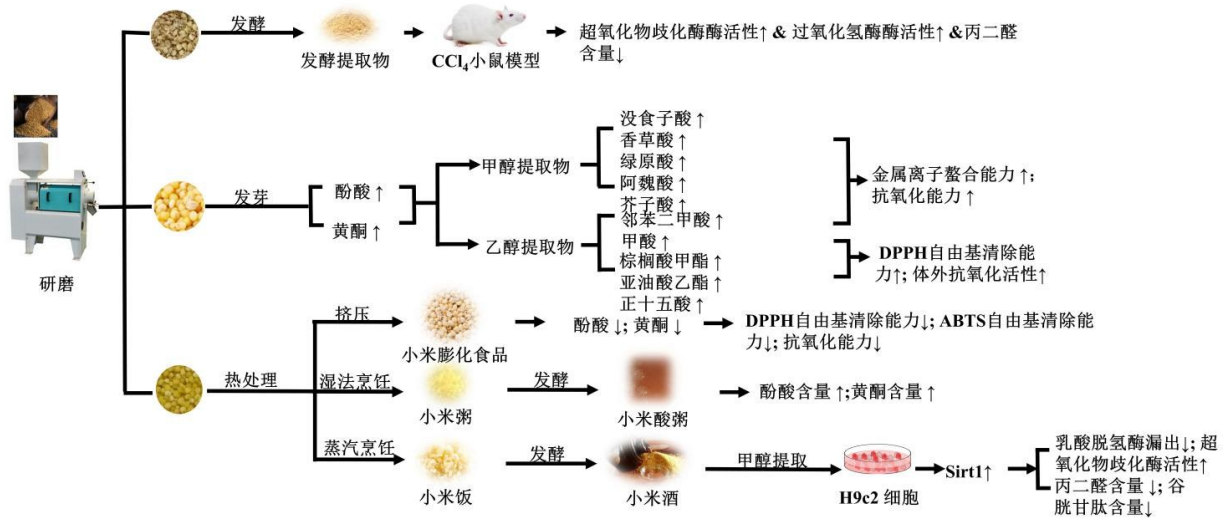

图1 谷子加工流程图

Fig.1 Foxtail millet processing flow chart

3.1 碾磨

碾磨,包括脱壳和抛光,是将谷子转化为精米的关键加工步骤。脱壳过程将谷壳与糙米分离,而抛光则进一步去除糙米皮层及胚,最终得到精米[50]。由于谷子麸皮含有高达60%的谷子酚类物质,碾磨过程中不可避免地会减少谷子中的总酚含量,进而影响其生物活性[27,51]。有研究表明,碾磨后的小米总酚含量从0.052 mg/100 g下降至0.029 mg/100 g[52]。碾磨过程中产生的热可能导致酚类物质氧化,也会影响其抗氧化能力。张艳玲等[11]发现碾磨过程中的产热会使肉桂酸转变为阿魏酸,导致其抗氧化能力显著降低。Chandrasekara等[53]发现碾磨使斯里兰卡谷子中的羟基苯甲酸、羟基肉桂酸和类黄酮总量减少了65%,从而导致谷子对过氧化氢、氧自由基和超氧自由基的清除能力明显降低。

3.2 浸泡与发芽

浸泡是一种传统的种子萌发前处理方法。通过浸泡可以激活细胞壁降解酶,从而软化谷子。这一过程能够弱化多酚与非淀粉多糖之间的结合,释放出结合态多酚[54]。然而,水分的吸收也会活化胚乳中的蛋白质和其它大分子,增加它们与酚类物质的结合,这不仅增加了酚类物质提取的难度,也导致了总酚含量的相对减少。此外,浸泡过程中游离酚的浸出也是酚流失的一个重要原因[55]。Pawar等[52]发现完整小米浸泡12 h后,总酚含量由0.052 mg/100 g降至0.050 mg/100 g,浸泡对脱壳后的小米酚类物质无显著影响。

发芽是浸泡后的另一关键环节,谷子在这一过程中从种子发育成植株。发芽不仅能降低谷子中的抗营养物质含量,提高营养物质的相对含量[56],还能通过一系列生化途径,如氧化磷酸戊糖途径、糖酵解途径等,将碳水化合物转化为酚酸和黄酮类化合物[57]。在这个过程中,谷子中的结合酚与游离酚也会发生相互转化。Pradeep等[58]的研究中观察到,谷子发芽48 h后,酚类物质含量显著增加,特别是没食子酸、香草酸、绿原酸、阿魏酸和芥子酸含量明显上升,且抗氧化能力得到增强。Sharma等[59]的研究也发现,谷子发芽过程中总酚和黄酮含量显著上升,抗氧化能力增强。尽管如

此,关于发芽过程中游离酚与结合酚的具体变化,目前仍需进一步研究。

3.3　热加工

谷子的热加工工艺,包括挤压、湿法烹饪、蒸汽烹饪和烘焙,会以不同方式影响谷子中酚类物质的稳定性和含量[55]。挤压是一种工业化的高温瞬时加工技术,它在高温、高压和高剪切力的条件下进行,能有效钝化谷子中的酶,破坏抗营养因子,裂解淀粉,并使蛋白质变性,提升产品的营养品质[60-61]。然而,这一过程也可能导致酚类物质的氧化或降解。蔡亭等[61]优化了小米的挤压工艺以减少营养物质和多酚的损失,但即使在最佳条件下,小米总酚含量仍下降了12.5%,黄酮降低了25.57%,自由基清除能力和总抗氧化能力分别下降了7.3%、7.2%与13.73%。Bilal等[62]研究发现,发芽和发酵处理后的谷子在挤压后总酚含量显著提高,表明适当的前处理可以减少加工过程中酚类物质的损失。

湿法烹饪、蒸汽烹饪和烘焙是谷子在高温高湿条件下的常见热加工方法,这些方法促进了淀粉和蛋白质的糊化、裂解和变性,释放出结合酚。在加工过程中,无论是释放的结合酚还是原有的游离酚,都可能发生氧化或降解,部分酚类物质也可能随水蒸气流失,导致总酚含量下降[63]。Pawar等[52]研究发现,小米水煮后酚含量有所降低[52]。Pradeep等[58]的研究也表明,蒸汽烹饪和微波处理会降低谷子的多酚含量和总抗氧化能力,但某些酚类物质的含量却有所上升。烹饪前谷子总酚含量为(72.70±2.29) mg FAE/100 g,蒸汽烹饪后升高到(76.22±1.53) mg FAE/100g,微波处理后升高到(104.46±0.96) mg FAE/100 g;烹饪前谷子酚酸含量为(38.6±1.10) mg/100 g,处理后分别降到(17.2±0.31) mg/100g和(30.05±0.66) mg/100 g。烹饪前谷子黄酮含量为(25.20±0.39) mg/100 g,处理后也分别降至(16.56±0.31) mg/100 g和(9.87±0.25) mg/100 g。蒸汽烹饪和湿法烹饪均会导致小米中总酚和总黄酮含量的下降,但湿法烹饪对多酚的保留率更高[51]。

在烹饪小米时,人们有时会添加少量食用碱以缩短熬煮时间并改善口感。然而,Rajeswari等[64]的研究表明,随着碱液浓度的增加,谷子中的酚类物质和黄酮含量加速流失,抗氧化能力减弱。小米煮制成粥后,游离酚和结合酚含量及抗氧化能力均有所下降,美拉德反应和碱性条件下的蛋白质变性可能促进了结合酚的释放,而高温蒸煮则增加了游离酚和结合酚的氧化和降解速率[13]。

3.4　发酵

发酵是一种传统的食品加工方法,它不仅能够改善食品的风味,还能增强其营养特性。通过发酵,谷子中的蛋白质、纤维素和淀粉等大分子的束缚作用减弱,从而增加游离酚的含量,并降低缩合单宁等抗营养因子的水平[65]。经过43.2 h发酵的谷糠中,蛋白质降解和抗氧化活性均达到最高,这一现象可能与蛋白质降解后释放的结合酚有关。发酵产物不仅展现出良好的抗氧化性,还能显著提升CCl_4诱导的小鼠损伤模型中的抗氧化酶活性,降低丙二醛含量,抑制氧化应激[66]。

Diletta等[67]利用乳酸菌和酵母菌对小米进行混合发酵72 h,结果显示总酚含量增加了30%,且发酵提取物能剂量依赖性地减少氧化损伤的人红细胞溶血,表现出优异的抗氧化活性。'内乡红小米'和'新野红小米'发酵制成的黄酒能通过上调Sirt1蛋白,显著改善H_2O_2诱导的心肌细胞氧化应激反应,其中'新野红小米'黄酒的效果尤为突出[68]。经过75 d发酵的红小米黄酒在DPPH自由基清除能力优于维生素C[69]。研究表明,小米粥在32 ℃下发酵20 h制备的小米酸粥总酚含量最高,这一条件可以显著减少煮粥过程中酚类物质的损失[65]。综上所述,发酵过程能显著提升小米产物中酚类物质的含量,并增强其抗氧化性能。

多酚类物质具有热不稳定性,因此在加工方式中如果有热加工或加工时发热的过程,都会造成酚类物质的不同程度的分解,从而导致含量降低。适量的发芽有助于幼苗消耗存储的淀粉和多糖类物质,释放结合酚,从而提高多酚类物质的相对含量。而发酵可以提高酚类物质的含量,一方面是因为微生物消耗了淀粉和多糖,释放结合酚,同时微生物自身也可以合成一些酚类物质。综上所述,不同的加工方式和原理,对谷子或小米中的酚类物质的含量、种类都有不同程度影响。

4　结论

酚类物质具有抗炎、降血糖、抗癌等多种生物学功效,谷子(小米)中酚类物质含量丰富。谷子

(小米)中的多酚状态、种类和含量会受到品种、提取方式和加工工艺的影响。酚类物质在缓解和改善机体慢性炎症性疾病中尤为重要,因此,谷子(小米)是有很高应用前景的营养膳食补充剂。但关于生物活性酚类物质的种类和量效关系,及其作用机制仍需进一步深入探究。

参 考 文 献

[1]Li S D, Dong X K, Fan G Y, et al. Comprehensive profiling and inheritance patterns of metabolites in foxtail millet [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9:1716.

[2]Li X K, Gao J H, Song J Y, et al. Multi-omics analyses of 398 foxtail millet accessions reveal genomic regions associated with domestication, metabolite traits, and anti-inflammatory effects [J]. Molecular Plant, 2022, 15(8):1367-1383.

[3]Prasada Rao K E, de Wet J M J, Brink D E, et al. Infraspecific variation and systematics of cultivated Setaria *Italica*, foxtail millet (Poaceae) [J]. Economic Botany, 1987, 41(1):108-116.

[4]Dharmaraj U, Sathyendra Rao B V, Sakhare S D, et al. Preparation of *Semolina* from foxtail millet (*Setaria italica*) and evaluation of its quality characteristics [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 68:1-7.

[5]Thathola A, Srivastava S, Singh G. Effect of foxtail millet (*Setaria italica*) supplementation on serum glucose, serum lipids and glycosylated hemoglobin in type 2 diabetics [J]. Diabetologia Croatica,2011, 40(1):23-28.

[6]Singh R K, Prasad M. Foxtail millet: a climate-resilient crop species with potential to ensure food and agriculture security amidst global climate change [J]. International Journal of Plant and Environment, 2020, 6(3):165-169.

[7]史江颖.谷糠抗结肠癌结合态多酚的制备及其机制研究[D].太原:山西大学,2018.
Shi J Y. Preparation and mechanism of bound polyphenols from rice bran against colon cancer [D].Taiyuan: Shanxi University, 2018.

[8]Chethan S, Malleshi N G. Finger millet polyphenols: optimization of extraction and the effect of pH on their stability [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2):862-870.

[9]梁婷,陆奕成,刘彤,等. 两种产地黄小米多酚的提取及其对神经细胞氧化损伤的保护作用[J].食品与发酵工业,2022,48(2):139-143.
Liang T, Lu Y C, Liu T, et al. Polyphenols extraction from two kinds of origins of millet yellow and their protective effects on oxidative injury on nerve cells [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(2):139-143.

[10]Zhang L Z, Liu R H. Phenolic and carotenoid profiles and antiproliferative activity of foxtail millet [J]. Food Chemistry, 2015, 174:495-501.

[11]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. Analysis of nutritional components of different millets and effects of processing and storage on phenol content [D]. Wuxi:Jiangnan University, 2017.

[12]Shahidi F, Chandrasekara A. Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion: a review [J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(2): 570-581.

[13]康子悦,沈蒙,葛云飞,等.基于植物广泛靶向代谢组学技术探究小米粥中酚类化合物组成及其抗氧化性[J].食品科学,2021,42(04):206-214.
Kang Z Y, Shen M, Ge Y F, et al. Analysis of phenolic composition in millet porridge using widely-targeted metabolomics and evaluationof antioxidant activity [J]. Food Science, 2021, 42(04):206-214.

[14]Chandrasekara A, Shahidi F. Determination of antioxidant activity in free and hydrolyzed fractions of millet grains and characterization of their phenolic profiles by HPLC-DAD-ESI-MSn J]. Journal of Functional Foods, 2011, 3(3):144-158.

[15]Zhang Y, Bai B, Yan Y, et al. Bound polyphenols from red quinoa prevailed over free polyphenols in reducing postprandial blood glucose rises by inhibiting α-glucosidase activity and starch digestion [J]. Nutrients, 2022, 14(4):728.

[16]Bora P, Ragaee S, Marcone M. Characterisation of several types of millets as functional food ingredients [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2019, 70(6):714-724.

[17]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.

[18]Xiang J L, 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.

[19]刘建垒,常柳,段晓亮,等. 小米营养成分及其贮藏加工稳定性研究进展[J]. 中国食物与营养,2022,28(3):55-62.
Liu J L, Chang L, Duan X L, et al. Research advancement on nutritional compontent of foxtail millet and their stability during storage and processing [J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(3):55-62.

[20]Zhang M, Xu Y F, Xiang J L, et al. Comparative evaluation on phenolic profiles, antioxidant properties and α-glucosidase inhibitory effects of different milling fractions of foxtail millet [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99:103217.

[21]Song Y, Jeong H Y, Lee J K, et al. Enzyme treatment alters the anti-inflammatory activity of the water extract of wheat germ *in vitro* and *in vivo* [J]. Nutrients, 2019, 11(10):2490.

[22]Shi J Y, Shan S H, Li H Q, et al. Anti-inflammatory effects of millet bran derived-bound polyphenols in LPS-induced HT-29 cell *via* ROS/miR-149/Akt/NF-κB signaling pathway [J]. Oncotarget, 2017, 8(43):74582-74594.

[23]Ren X, Yin R Y, Hou D Z, 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.

[24]Li S, Xian F R, 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.

[25]Ren X, Wang L X, Chen Z L, et al. Foxtail millet improves blood glucose metabolism in diabetic rats through PI3K/AKT and NF-κB signaling pathways mediated by gut microbiota [J]. Nutrients, 2021, 13(6):1837.

[26]Gessner D K, Ringseis R, Eder K. Potential of plant polyphenols to combat oxidative stress and inflammatory processes in farm animals [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2017, 101(4):605-628.

[27]Sharma N, Niranjan K. Foxtail millet: properties, processing, health benefits, and uses [J]. Food Reviews International, 2018, 34(4):329-363.

[28]延莎,祁鹏煜,张苏慧,等. 不同米色小米多酚提取物的体外抗氧化活性[J]. 中国粮油学报,2017,32(10):33-38,44.
Yan S, Qi P Y, Zhang S H, et al. Antioxidant activity of polyphenol extracts from different beige millet *in vitro* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(10):33-38, 44.

[29]Palaniswamy S K, Govindaswamy V. Inhibition of metal catalyzed H_2O_2 and peroxyl-AAPH mediated protein, DNA and human erythrocytes lipid oxidation using millet phenolics [J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2017, 26(4):406-414.

[30]World Health Organization. GLOBAL REPORT ON DIABETES [EB/OL], (2016-4-21) [2025-4-5], https://www.who.int/publications/i/item/9789241565257.

[31]Papachristoforou E, Lambadiari V, Maratou E, et al. Association of glycemic indices (hyperglycemia, glucose variability, and hypoglycemia) with oxidative stress and diabetic complications [J]. Journal of Diabetes Research, 2020, 2020:7489795.

[32]Lebovitz H E. Effect of the postprandial state on nontraditional risk factors [J]. The American Journal of Cardiology, 2001, 88(6):20-25.

[33]王瑾. 谷糠结合态多酚对糖代谢紊乱的改善效应及机制研究[D]. 太原:山西大学,2021.
Wang J. Study on the improvement effect and mechanism of rice bran bound polyphenols on glucose metabolism disorder [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.

[34]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.

[35]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.

[36]闫巧珍. 小米多酚提取、分离纯化、组分分析及生物活性的研究[D]. 太原:山西大学,2022.
Ren Q Z. Study on extraction, isolation, purification, component [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2022.

[37]Petimar J, Smith-Warner S A, Rosner B, et al. Adherence to the world cancer research fund/American institute for cancer research 2018 recommendations for cancer prevention and risk of colorectal cancer [J]. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention, 2019, 28(9):1469-1479.

[38]Kroon P A, Faulds C B, Ryden P, et al. Release of covalently bound ferulic acid from fiber in the human colon[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(3):661-667.

[39]史江颖,单树花,李宗伟,等. 谷糠结合态多酚对四种肿瘤细胞增殖的抑制作用[J]. 营养学报,2015,37(2):178-184.
Shi J Y, Shan S H, Li Z W, et al. The inhibitory effects of bound polyphenols from foxtail millet bran on proliferation of four tumor cell lines [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2015, 37(2):178-184.

[40]Shi J Y, Shan S H, Li Z W, 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.

[41]Shi J Y, Shan S H, Zhou G F, 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.

[42]Liu X, Qiu B, Liu W, et al. The preventive effects of fermented and germinated foxtail millet whole grain on kidney damage in a diabetic mouse model [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9:940404.

[43]刺晓琴,刘一志,张立超,等. 谷糠多酚对酒精性胃黏膜损伤的保护作用[J]. 食品科学,2022,43(13):64-71.
La X Q, Liu Y Z, Zhang L C, et al. Protective effect of foxtail millet bran-derived polyphenols on alcohol-induced gastric mucosal injury [J]. Food Science, 2022, 43(13):64-71.

[44]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.

[45]Zhang L C, La X Q, Tian J M, et al. The phytochemical vitexin and syringic acid derived from foxtail millet bran inhibit breast cancer cells proliferation *via* GRP78/SREBP-1/SCD1 signaling axis [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 85:104620.

[46]陆俊,敦惠瑜,向孝哲,等. 体外模拟胃、肠消化对6种黑色食品抗氧化成分及其活性的影响[J]. 食品科学,2018,39(5):47-56.
Lu J, Dun H Y, Xiang X Z, et al. Effect of in vitro simulated gastrointestinal digestion on bioactive components and antioxidant activities of six kinds of black foods [J]. Food Science, 2018, 39(5):47-56.

[47]Srinivasan A, Ekambaram S P, Perumal S S, et al. Chemical characterization and immunostimulatory activity of phenolic acid bound Arabinoxylans derived from foxtail and barnyard millets [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(2):e13116.

[48]Lu Y, Shan S H, Li H Q, 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, 2018, 66(20):5190-5199.

[49]Yang R P, Shan S H, 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.

[50]张竹青,马金成. 糙小米和小米联产工艺探讨[J]. 粮油加工(电子版),2014(3):44-46,57.
Zhang Z Q, Ma J C, Coproduction process of rough millet and millet [J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Version), 2014(3):44-46, 57.

[51]Zhang L Y, Li J Y, Han F, et al. Effects of different processing methods on the antioxidant activity of 6 cultivars of foxtail millet[J]. Journal of Food Quality, 2017:1-9.

[52]Pawar V D, Machewad G M. Processing of foxtail millet for improved nutrient availability [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2006, 30(3):269-279.

[53]Chandrasekara A, Naczk M, Shahidi F. Effect of processing on the antioxidant activity of millet grains [J]. Food Chemistry, 2012, 133(1):1-9.

[54]Li R, Li Z J, Wu N N, et al. Effect of pre-treatment on the functional properties of germinated whole grains: a review [J]. Cereal Chemistry, 2022, 99(2):253-269.

[55]Taylor J R N, Duodu K G. Effects of processing Sorghum and millets on their phenolic phytochemicals and the implications of this to the health-enhancing properties of Sorghum and millet food and beverage products [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(2):225-237.

[56]Wang H, Fu Y X, Zhao Q Y, et al. Effect of different processing methods on the millet polyphenols and their anti-diabetic potential [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9:780499.

[57]Gan R Y, Lui W Y, Wu K, et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: an updated review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 59:1-14.

[58]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.

[59]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.

[60]韩玲玉. 多谷物共挤压加工对其物化及消化特性影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
Han L Y. Study on physico-chemical and *in vitro* digrstive properties of multigrain co-extrusion [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.

[61]蔡亭,汪丽萍,刘明,等. 挤压加工对小米多酚及抗氧化活性的影响研究[J]. 食品工业科技,2014,35(20):102-106.
Cai T, Wang L P, Liu M, et al. Study on the influence of extrusion processing on polyphenols and antioxidant activity of millet [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(20):102-106.

[62]Mushtaq B S, AL-Ansi W, Dhungle A, et al. Influence of pretreatments combined with extrusion on γ-amino butyric acid, nutritional composition and physicochemical properties of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102:103359.

[63]Murador D, Braga A R, Da Cunha D, et al. Alterations in phenolic compound levels and antioxidant activity in response to cooking technique effects: a meta-analytic investigation [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(2):169-177.

[64]Jayaraman R. Effect of alkaline cooking on proximate, phenolics and antioxidant activity of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. World Applied Sciences Journal, 2015, 33(1):146-152.

[65]郭璞,王晓闻,张宏丽,等. 发酵条件对小米酸粥中多酚含量的影响及其主要组分研究[J]. 粮油食品科技,2022,30(2):190-196.
Guo P, Wang X W, Zhang H L, et al. Effect of fermentation conditions on polyphenol content in millet sour congee and research in main components of millet sour congee [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2):190-196.

[66]郭利娜. 枯草芽孢杆菌发酵小米糠产抗氧化活性物质的研究[D]. 南京:南京农业大学,2015.
Guo L N. Study on antioxidant activity material by *Bacillus subtilis* fermentated millet [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

[67]Balli D, Bellumori M, Pucci L, et al. Does fermentation really increase the phenolic content in cereals? A study on millet [J]. Foods, 2020, 9(3):303.

[68]陈林玉. 红小米黄酒化学成分及质量评价研究[D]. 郑州:郑州大学,2022.
Chen L Y. Study on the chemical composition and quality evaluation of red millet rice wine [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[69]李杰,许彬,罗建成,等. 红小米黄酒酿造工艺研究及体外抗氧化活性评价[J]. 中国酿造,2021,40(7):123-129.
Li J, Xu B, Luo J C, et al. rewing technology and *in vitro* antioxidant activity evaluation of red-millet Huangjiu [J]. China Brewing, 2021, 40(7):123-129.

(编辑:韩志强)