



杨焕春,常向彩,孙向东.高粱营养品质及在食品和饲料方面开发应用研究进展[J].黑龙江农业科学,2024(12):96-102.

高粱营养品质及在食品和饲料方面开发应用研究进展

杨焕春¹,常向彩¹,孙向东²

(1. 安顺学院,贵州 安顺 561000; 2. 黑龙江省农业科学院 农产品质量安全研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:高粱曾是我国主要粮食,因适口性差,含有抗营养因子等问题而退出了主食行列。近年来,随着对高粱研究的深入,高粱的价值被重新认识。高粱中的多酚类物质——单宁受到前所未有的重视。随着多种新的酚类衍生物被发现,高粱作为保健食品原料具有较好的发展前景。本文系统概述了不同颜色高粱中新发现的多酚化合物,总结了高粱在饲料、酿酒和食品方面的研究进展及开发应用潜力,展望了高粱的未来研发方向及发展前景,可为高粱在食品及饲料领域的深入开发利用提供参考。

关键词:高粱;营养品质;单宁;食品;饲料;开发应用

高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]为世界上栽培较早的禾谷类作物之一,主要分布在热带干旱和半干旱地区,是亚洲、非洲地区重要的粮食作物和饲料作物,在温带和寒温带也有广泛种植^[1]。高粱具有产量高、抗逆性强(抗旱、抗涝、耐盐碱、耐瘠薄、耐高温和寒冷等)及用途广泛的特点。主要品种有红高粱、白高粱、黑高粱、糯高粱等。高粱在人类的发展史上曾发挥相当重要的作用。在亚洲地区如印度及非洲地区的许多国家,因农业及环境条件不适于种植其他农作物,高粱至今仍是当地居民的重要粮食来源^[2]。美国是目前世界高粱生产第一大国,产量高达 1 137 万 t^[3],这些高粱主要用作饲料^[4]。2021 年全球高粱产量较大的国家排序依次为美国、尼日利亚、墨西哥、埃塞俄比亚、印度、苏丹、阿根廷、巴西、中国和澳大利亚^[3]。高粱在我国是重要的旱地作物,栽培历史悠久。我国高粱单产居世界第 3 位,总产量为 300 万 t 左右,居世界第 9 位^[3]。

高粱籽粒中主要养分含量为:粗蛋白 8%~11%、淀粉 65%~70%、粗纤维 2%~3%、粗脂肪 3%。与其他粮食作物相比,高粱的特点是丹宁含量高,一般含丹宁 0.2%~2.0%。丹宁也称鞣酸,属水溶性多酚化合物,具有强烈的苦涩味,影响适口性。丹宁能与蛋白质和消化酶结合,影响蛋白质和氨基酸的利用率。高粱因其含较多的抗营养因子,我国用作饲料的不多。20 世纪 80 年代以前我国因粮食总产量不足,生活水平较低,高粱饭一度是人们餐桌上的常见主食,但因其适口

性较差,80 年代开始逐渐淡出人们的食谱。近年来研究发现,高粱中的丹宁具有抗氧化作用,对心脑血管疾病有良好的保健作用,高粱食品对过度营养而导致的慢性疾病具有潜在的保健功效,因而越来越受到关注^[5]。我国在高粱育种栽培研究方面水平较高,处于世界前列。本文总结了高粱在饲料、酿酒和食品方面的研究进展及开发应用潜力,展望了高粱的未来研发方向及发展前景,为我国高粱产业发展提供一定参考。

1 高粱营养品质

高粱的营养成分主要有淀粉、蛋白质、纤维素、矿物质、功能活性成分(如多酚、花青素、植物固醇等),从近年在食品和饲料领域发表的研究文献看,主要聚焦于其中的淀粉、蛋白质及多酚研究,故本文仅讨论此三方面研究成果。

1.1 蛋白质

高粱蛋白质含量略高于玉米,但品质较差,因缺乏赖氨酸和色氨酸这两种必需氨基酸,导致氨基酸配比不平衡,营养价值较低。另外,高粱蛋白质的消化率也较低,高粱中的蛋白质以醇溶蛋白为主,因高粱醇溶蛋白分子间交联较多,且蛋白质与淀粉间存在很强的化学键,导致酶难以进入分解,不利于蛋白质和淀粉的消化吸收。尽管已经开发出一些高粱食品,但关于高粱醇溶蛋白功能性方面的研究却很少。高粱蛋白质中含量最多的组分是醇溶谷蛋白(prolamins),被命名为高粱醇溶蛋白(kafirins),这种蛋白存在于胚乳的蛋白质结构中。高粱醇溶蛋白占整个籽粒中蛋白总量

收稿日期:2024-10-25

基金项目:安顺市科技计划项目(安市科农重[2023]01号;安市科平[2023]07号)。

第一作者:杨焕春(1978—),女,硕士,实验师,从事食品质量安全研究。E-mail:541557434@qq.com。

通信作者:孙向东(1965—),男,博士,研究员,从事农产品质量安全风险评估研究。E-mail:xdsun65@yahoo.com。

的 48%~70%,占脱壳籽粒蛋白总量的 80%。这些蛋白可用乙醇提取,而形成交联的高粱醇溶蛋白用乙醇加还原剂提取^[6]。高粱醇溶蛋白是疏水性蛋白,按照分子量大小分为 α -高粱醇溶蛋白(23~27 kDa), β -高粱醇溶蛋白(16, 18 和 20 kDa)和 γ -高粱醇溶蛋白(28 kDa)。含量最丰富的 α -高粱醇溶蛋白占高粱总醇溶蛋白的 80%,位于蛋白质的核心区域,而 β -和 γ -高粱醇溶蛋白则位于外围区域。这两种组分分别占高粱总醇溶蛋白的 7%~8%和 12%^[2]。醇溶蛋白较难消化,高粱的养分利用较差与之有直接关系^[7]。另外,高粱醇溶蛋白还会影响淀粉糊化,导致淀粉的消化性降低^[8-10]。

因高粱醇溶蛋白具有疏水特性,在生产生物聚合物膜和涂料方面有应用潜力^[11-12],也可作为赋形剂应用于医药领域^[13]。另外,因其具有类似玉米醇溶蛋白的黏弹特性,近年来人们开始关注高粱醇溶蛋白的分离提取及其在焙烤食品行业的应用潜力^[2,6,14-15]。有研究表明在焙烤食品中高粱醇溶蛋白可以发挥黏弹性,从而对面团强度和面包体积产生影响^[16],无麸质的高粱面食是乳糜泻患者的绝佳选择^[17]。然而,因高粱醇溶蛋白特殊的组成结构以及疏水特性,如何有效开发利用,特别是作为功能性食品添加剂仍有待深入研究。

对高粱蛋白的化学性质、组织结构以及功能性的研究可促进其在食品中的进一步应用^[2]。有关研究报道了几种提取食品级高粱醇溶蛋白的新方法,包括使用不同的溶剂及复合萃取剂如冰醋酸、盐酸和氢氧化钠等^[4,11,18-19]。在这些方法中,提取高粱醇溶蛋白应用最多的是用含水乙醇和焦亚硫酸钠作为还原剂。而提取原料的要求并不严格,用作饲料的麸皮、由带壳籽粒或脱壳籽粒碾磨的高粱粉,以及蒸馏酒后干燥的高粱等都可用于提取高粱醇溶蛋白^[4,12,20-21]。但由于提取方法及高粱品种不同,获得的高粱醇溶蛋白的化学组成也有差别^[4,18,20]。

1.2 淀粉

淀粉是高粱籽粒中含量最多且最重要的碳水化合物,通常含量为 50%~70%。高粱直链淀粉平均含量为 20%~30%,支链淀粉平均含量为 70%~80%^[22]。直链淀粉含量对高粱淀粉特性具有重要影响。直链淀粉含量低且糊化温度低的高粱品种适合酿酒,酿造时可节水、省时和降低能耗^[23]。高粱淀粉含量与玉米相当,但淀粉颗粒大多被蛋白质包裹,因此其淀粉消化率要低于玉米。因高粱淀粉的消化率低,虽限制了其应用,但可作为理想的减肥食品或减肥食品原料^[24]。另外,高

粱淀粉还可广泛应用于工业领域,作为增稠剂、胶体稳定剂、填充剂和粘合剂^[25],应用于生物塑料、生物燃料和医药产品等领域。高粱胚乳结构、淀粉颗粒大小、直链淀粉和支链淀粉比例、蛋白质和脂类组成、消化条件等都对高粱淀粉的消化性有影响。其中,醇溶蛋白含量对高粱淀粉的消化率影响最大,高粱在蒸煮之后的消化率远低于蒸煮之前。研究发现蒸煮促进了蛋白质之间的相互作用,蒸煮过程中水与醇溶蛋白形成的二硫键降低了淀粉消化率^[26]。在蒸煮和冷却期间高粱醇溶蛋白和淀粉之间的相互作用可能影响了高粱淀粉的凝胶化,蒸煮后高粱醇溶蛋白形成分子量更大的聚合物,抑制了淀粉颗粒的凝胶化,从而降低了高粱淀粉的消化率^[26]。

1.3 丹宁(酚类化合物)

丹宁在过去被认为是一种抗营养因子,后来发现其具有抗氧化作用而成为高粱中最重要的保健成分,因而大量研究都围绕高粱中的丹宁类化合物而展开。与小麦、大麦、谷子、黑麦相比,高粱中的酚类化合物含量最高^[1,27]。因其具有的抗氧化活性,酚类化合物通常被认为是人类食物中需要的组分。丹宁是一种抗营养因子,其作用视其成分及聚合程度有很大差异。流行病学及动物实验研究显示,膳食中添加高粱对心血管疾病具有较好的保健作用,效果比其他谷物都好,另外,高粱对控制体重也有很好的效果^[28]。生化分析显示含高粱全粉的食品可提高抗氧化能力,这种效应可部分归因于高粱中含有的多酚类抗氧化物^[29]。所有高粱品种都含有酚类化合物,其种类和水平与种皮色泽及外种皮色素含量有关^[30]。高粱中主要含有酚酸和黄酮类两种酚类化合物^[28]。高粱中含有的酚酸包括水杨酸、羟基桂皮酸;而从高粱中分离出的黄酮类包括黄烷-3-醇儿茶酸(flavan-3-ol catechin)、黄酮芹菜素(flavones apigenin)和木犀草素(luteolin),这些在棕褐色高粱中是黄酮类的主要成分。另外,其他的黄酮类化合物如总黄酮柚皮素(flavanones naringenin)、圣草酚(eriodytyol)、黄酮醇山奈酚(flavonol kaempferol)和二氢黄酮(flavanonol taxifolin)^[26,30]、黄烷酮类(flavanones)、黄酮醇(flavonols)、类黄酮醇(flavanonols)和黄烷-3-醇(flavan-3-ol)衍生物^[27]也被鉴定出来。在红高粱中,有研究报道鉴定出 4 种苯丙烷单甘油酯(phenylpropane glycerides)^[26]。花青素(anthocyanins)是有色高粱中的主要黄酮类化合物^[27],包括花青素、芹菜素-5-O-葡萄糖苷(apigeninidin-5-O-glucoside)、木犀草素(luteolinidin)、木犀草素-5-O-葡萄糖苷(luteolinidin-5-O-glucoside)

和最常见的 3-脱氧花青素 (3-deoxyanthocyanidin)^[27]。导致 3-脱氧黄酮 (3-deoxyflavonoid) 类化合物积累的生物合成路径是由大多数高粱品种都含有的黄色种子 1 (ys1) 基因控制的^[31]。表 1 列出了不同高粱品种所含的 3-脱氧花青素的含量, Awika 等^[29]指出, 高粱麸皮中的黄酮类化合物组成独特且积累量高, 必然使之成为构成健康饮食的一种引人注目的谷物或者是一种生理活性化合物的来源。

表 1 3-脱氧花青素在不同高粱品种中的含量

品种	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	参考文献
黑高粱	1000~2800	[29]
红高粱	14~680	[35]
柠檬黄高粱	8~108	[36]
黑高粱麸皮	4700~16000	[29]

随着对高粱研究的深入, 越来越多的酚类化合物被分离鉴定出来。Kang 等^[32]分离鉴定了澳大利亚褐色、红色和白色高粱水合甲醇提取物中酚类化合物, 鉴定出 75 种植物化合物, 其中部分属于首次发现^[27]。结果显示, 褐色高粱中酚类物质种类和含量均大幅高于红色和白色高粱; 而白色高粱中羟基脂肪酸含量比其他两种高粱中的含量更高。尽管高粱含有丰富的酚类化合物, 但其基因型和生长环境会影响酚类化合物的含量^[27,29]。

2 高粱在食品和饲料方面的应用

2.1 饲料

高粱籽粒作为饲料历史悠久, 在美国, 所有高粱籽粒均用作饲料; 在法国, 工业发酵饲料消耗了 70% 的高粱。高粱中含有的酚类化合物、醇溶蛋白和植酸这 3 种物质对动物的消化吸收具有不利影响, 上述物质通过类似但不同的机制影响蛋白质的消化吸收及利用率^[33]。目前, 美国、澳大利亚等国已开始种植无丹宁高粱。

高粱籽粒用作家畜和家禽饲料时, 其饲用价值与玉米相近。在我国, 配方饲料中高粱所占的比例极小。以高粱为主的饲料喂养非反刍动物, 其营养价值、适口性, 以及蛋白质的利用率均较低。在胃肠道, 丹宁水解成没食子酸, 部分以 4-氧-甲基没食子酸的形式排泄掉, 其甲基来源为饲料中的蛋氨酸和胆碱。高粱的氨基酸利用率与丹宁含量有直接关系。使用高丹宁含量的高粱配成的饲料养鸡, 饲养效果较差。丹宁含量过高, 会导致鸡的采食量下降, 营养物质的消化率和氮的吸收率降低, 生长受到抑制。研究表明, 单宁含量 3% 的高粱饲料对蛋鸡含氮化合物、淀粉及矿质元素的消化率均有显著抑制作用, 而对脂类的消化

无影响^[34]。大量的研究证实饲喂高单宁高粱会影响肉鸡的生长发育。Dykes 等^[35]研究显示, 用低单宁 ($1.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和高单宁 ($25.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量的高粱饲喂肉鸡, 高单宁比低单宁含量高粱使肉鸡采食量减少约 10.1%, 增重减少 19.6%, 导致饲料转化率降低了 14.1%。丹宁还会影响鸡肉风味, 降低产蛋率和蛋重, 影响蛋壳的质量^[36]。另外, 它还会导致鸡脚畸形呈外向弓状弯曲, 附关节肿大^[37]。因此, 用高粱作为蛋鸡饲料时, 饲料中丹宁含量要低于 0.6%, 否则母鸡产蛋量及蛋重均会下降, 蛋黄中会出现斑点^[38-39]。高粱脱除丹宁的方法包括物理方法、化学方法、添加氨基酸以及使用其他添加剂等。目前培育的低丹宁高粱丹宁含量低于 1%, 但叶黄素含量较低, 用于饲喂肉鸡还需额外补充叶黄素。

关于高粱中单宁的是非问题, 学术界争论已久。有些学者认为随着低单宁高粱育种的成功及推广普及, 以低单宁高粱为主的饲料对畜牧业生产已无不良影响, 单宁不再构成高粱应用的限制因子^[40]。相反, 有的学者认为即使是低单宁品种, 缩合型单宁和酚类物质仍存在, 以高粱为主的饲料喂养肉鸡仍会影响饲料转化率和鸡肉产量^[41]。有研究显示, 高粱籽粒中的单宁还有防病的功效, 在配方饲料中加入 10%~25% 的高粱籽粒, 可有效防止幼禽、幼畜发生肠胃疾病 (如白痢病)^[42-43]。

近年来, 由于畜牧业的迅速发展, 有限的草场资源已不能满足人们的需要。甜高粱茎秆汁液丰富、含糖量高, 青贮后质地细软、适口性极好, 奶牛食用后利用率高, 与青贮玉米相比, 投入少、效益高, 具有较高的饲用价值^[44-46]。甜高粱作为青贮饲料饲喂肉牛增重效果较好, 能够显著增加饲养牛的经济效益^[47-48]。Wu 等^[49]研究表明, 甜高粱青贮饲料组育肥期犍牛平均体重、干物质摄入量 and 饲料转化率都高于玉米青贮组。玉霞^[50]研究也发现, 甜高粱青贮替代 50% 全株玉米青贮时, 更有利于提高泌乳中期荷斯坦奶牛的干物质采食量和瘤胃发酵。饲喂 75% 高粱青贮饲料 (替代玉米青贮饲料) 能够促进瘤胃微生物的生长、提高产奶量和脂肪含量^[51]。

饲草高粱是由高粱与苏丹草等杂交而成的一种草型高粱, 具有巨大的发展潜力, 茎叶连同籽粒可作青饲和青贮饲料。此外, 发展饲草高粱, 可有效保护有限的草场资源, 从而保护环境。

2.2 酿酒

虽然高粱作为人类粮食及畜禽饲料皆不理想, 但因其富含丹宁, 却是酿酒的好原料。适量单

宁对发酵过程中的有害微生物有一定抑制作用,可提高出酒率,单宁最主要的作用是在发酵过程中产生丁香酸和丁香醛等香味物质,使白酒产生芳香风味,但过多的单宁对发酵后期的生香阶段具有抑制作用,导致酸类风味物质无法正常转化,酯类风味物质无法合成^[52]。我国以高粱为原料酿造白酒已有几百年的历史,中国名酒大多是用高粱做主料或做辅料酿制的。我国目前种植高粱主要用于酿酒,高粱总产量的大约 85% 被用来酿酒和酿醋^[53]。高粱品质对酒质和出酒率影响较大,糯高粱是酿酒的最佳原料。酿酒用高粱要有较高的淀粉和单宁含量、较低的蛋白质和脂肪含量。在发酵过程中,淀粉是酒精以及众多风味成分的来源,蛋白质、脂肪、单宁等物质是白酒风味和滋味成分的前体物质^[54]。但是蛋白质含量过高会使发酵过程中杂菌生长旺盛,导致酸度升高,不利于有益微生物的生长代谢,使酒体产生杂味^[55]。高粱中的脂质对白酒品质的影响较大,少量的脂肪能减少酒中的杂味^[56],使酒体香气纯正清爽。高粱脂质易水解生成多种低分子有机酸和脂肪酸,如肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸及油酸、亚油酸、亚麻酸等。脂肪酸经微生物代谢生成的相应酯类或通过非酶反应分解形成的挥发性物质,均具有一定的气味和味觉阈值^[57]。在高温发酵中,不饱和脂质与氧反应生成氢过氧化物,其易断裂生成各种挥发性和非挥发性风味前体物质^[55]。过量的脂肪会使发酵过程升酸快,酸度增加,对微生物生长有抑制作用,从而影响发酵效率。另外,过多的脂质容易使酒体遇冷后变浑浊,影响酒体的感官质量。酿造优质白酒对原料的要求是新鲜、无杂质和无霉变,淀粉和糖分含量较高,蛋白质和单宁含量适中,脂肪含量少,并含有多种维生素及无机元素,果胶含量越少越好^[58]。

研究表明,糯红高粱中含有较高的支链淀粉,更适合作为酿造白酒的原料^[59]。田晓红等^[22]对我国高粱主产区主栽的 20 个高粱品种中淀粉的微观结构、物理特性进行比较研究发现,不同品种间直链淀粉含量、物理特性差异较大,其中仁怀高粱、湖南高粱和湖北阳新两糯高粱未检出直链淀粉,而其余产地的高粱直链淀粉检出值为 9.16%~20.33%。唐玉明等^[60]研究了北方高粱与四川高粱的品质差异,发现无论粳糯,北方高粱的单宁含量普遍较低,支链淀粉占总淀粉的比例也比四川高粱低。袁蕊等^[61]通过对我国南北方 6 个高粱品种理化指标的检测,发现南方栽培的糯红高粱品种国窖红 1 号、青壳洋、泸糯 8 号比 3 种北方高粱的支链淀粉含量高,且易于保水,适于微生物生

长,更适合酿酒。杨乾华等^[62]分析了南北方不同类型高粱酿酒品质的差异,指出两个地区高粱的总淀粉和蛋白质含量均较接近,但南方高粱与北方高粱相比,直链淀粉含量低,单宁含量高,而北方高粱则角质率高。蒸煮研究结果显示,南方高粱的吸水率、糊化率和黏稠度等指标均优于北方高粱^[63],糯高粱的酿酒品质比其他类型的高粱好^[64]。总之,气候条件的差异导致高粱品质不同,南方高粱更适合酿造中国白酒。后续工作应重点研究酿酒过程中,高粱不同成分在微生物作用下代谢产生呈香呈味物质的机理和形成规律,以及不同品质高粱原料对酿酒微生物及白酒品质的影响^[65]。

2.3 食品

传统上,因高粱的适口性较差,高粱用作人类口粮的比例较小,主要集中在非洲等经济落后的国家和地区。近年来,因为高粱可以作为无麸质食品来替代小麦,在美国及其他西方国家,其作为人类粮食消费的数量正在稳步增长^[66]。高粱粉通常与玉米粉、小麦粉、马铃薯粉、木薯粉等按一定比例混合,然后通过不同的工艺制作成各种高粱食品,如红面馒头、面条、面包、发面饼等^[67-68]。通过在饼干、点心及各种食品中掺入高粱米粉,使高粱在西方的消费量不断增大^[69]。不同品种的高粱在西方首先都要经过膨化处理后才用于食品配料。研究显示,膨化可以在降低抗营养因子作用的同时提高高粱的蛋白质及淀粉消化率,并提高可溶性膳食纤维含量^[70],高粱在我国曾一度作为主食供应,随着高粱各种保健功能的明确及高粱食品的深入开发,高粱有望以新的角色重返餐桌。

2.4 医疗保健

近年来,高粱中的多酚类物质研究逐渐成为热点,涵盖了多酚类的分离提取、结构鉴定、理化性质、医疗保健功能等方面研究,展现了良好的开发潜力。高粱麸皮层中含有非淀粉类多糖、类胡萝卜素、酚类化合物等生理活性物质,其中酚类化合物包括酚酸、黄酮类化合物和原花青素,且以高生物活性的 3-脱氧花青素和原花青素为主,而高粱是 3-脱氧花青素已知的唯一天然食物来源^[71-72]。高粱麸皮层的酚类物质含量是全谷物的 6 倍^[73]。高粱类食物相较其他谷物类在减小癌症患病率方面有明显的效果^[29]。Hargrove 等^[74]研究发现,高粱麸皮中原花青素能够抑制芳香化酶的活性,在乳腺癌的治疗方面有应用前景,作者还发现富含原花青素的高粱品种可能通过抑制消化酶活性,阻碍葡萄糖吸收,达到抗糖尿病的目的。蒋依然^[75]

通过分析高粱麸皮原花青素结构发现,儿茶素是构成高粱麸皮原花青素的主要结构单元,具有较强的抗氧化能力,能够诱导肝癌细胞凋亡。Awika 等^[33]证实高粱原花青素在抑制结肠癌细胞的生长方面比葡萄糖原花青素更有效。Mazewski 等^[76]发现高粱等谷物类含有的花青素-3-葡萄糖苷是抑制激酶活性的最强的花青素,对于结肠癌细胞的分裂增殖具有很好的抑制效果。Apea-Bah 等^[77]使用高粱提取物生产了一种富含单宁的饮料,指出单宁高粱配方有可能用于肥胖或糖尿病患者的饮食,因为有很强的饱腹感,延长消化时间,降低了葡萄糖的吸收率。Ashley 等^[78]研究发现,高粱麸皮多酚能够与低聚果糖等益生元协同作用,调节肥胖患者的肠道微生物组成。从红高粱麸皮中提取的 3-脱氧花青素还具有抑制乳腺癌细胞系的增殖活性^[72]。卫鸣^[79]采用亚临界水辅助提取高粱麸皮结合多酚,发现其能通过刺激内源酶活力、降低炎症反应、调节脂质代谢等多途径预防小鼠衰老,通过多途径调节衰老小鼠肠道微环境,维护衰老小鼠肠道健康。王春艳^[80]对高粱多酚提取物组分进行分析,发现其中含有反式阿魏酸等 24 种酚类物质,并制备了具有保健作用的高粱多酚微胶囊。

3 展望

目前,我国高粱主要用于酿酒,只有极少量作为食品和饲料使用。市售高粱加工产品多以传统食品为主,且高粱营养成分含量较低,无法获得满意的保健效果。随着对高粱单宁功效的深入了解,人们需要越来越多色香味俱佳的高粱精深加工产品。从长远发展看,作为嗜好品的白酒消费将减少,用于酿酒的高粱比重将下降,而用于医疗、保健食品及饲料的高粱消费将大幅增加,开发多元化的高粱深加工产品将有广阔的发展前景。

参考文献:

[1] RAGAE S, ABDEL-AAL E S M, NOAMAN M. Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use[J]. Food Chemistry, 2006, 98(1): 32-38.

[2] BEAN S R, IOERGER B P, SMITH B M, et al. Sorghum protein structure and chemistry: implications for nutrition and functionality[M]//ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 2011: 131-147.

[3] 华经产业研究院. 2023 年中国高粱行业发展现状及发展战略规划报告[EB/OL]. (2022-11-24)[2024-05-11]. https://www.sohu.com/a/609500718_121023892.

[4] WANG Y, TILLEY M, BEAN S, et al. Comparison of methods for extracting kafirin proteins from Sorghum distillers dried grains with solubles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(18): 8366-8372.

[5] STEFOSKA-NEEDHAM A, BECK E J, JOHNSON S K, et al.

Sorghum: an underutilized cereal whole grain with the potential to assist in the prevention of chronic disease[J]. Food Reviews International, 2015, 31(4): 401-437.

[6] HAMAKER B R, BUGUSU B A. Overview: sorghum proteins and food quality[C]//BELTON P S, TAYLOR J R N. Workshop on the Proteins of Sorghum and Millets: Enhancing Nutritional and Functional Properties for Africa. South Africa, Pretoria, 2003: 2-4.

[7] HICKS C, BEAN S R, LOOKHART G L, et al. Genetic analysis of kafirins and their phenotypic correlations with feed quality traits, *in vitro* digestibility, and seed weight in grain Sorghum[J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(4): 412-416.

[8] CHANDRASHEKAR A, KIRLEIS A W. Influence of protein on starch gelatinization in sorghum[J]. Cereal Chemistry, 1988, 65: 457-462.

[9] EZEUGU L I, DUODU K G, EMMAMBUX M N, et al. Influence of cooking conditions on the protein matrix of Sorghum and maize endosperm flours [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(3): 397-402.

[10] EMMAMBUX M N, TAYLOR J R N. Properties of heat-treated Sorghum and maize meal and their prolamin proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(3): 1045-1050.

[11] GAO C L, TAYLOR J, WELLNER N, et al. Effect of preparation conditions on protein secondary structure and biofilm formation of kafirin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(2): 306-312.

[12] TAYLOR J R N, SCHOBERT T J, BEAN S R. Novel food and non-food uses for Sorghum and millets[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 44(3): 252-271.

[13] ELKHALIFA A E O, GEORGET D M R, BARKER S A, et al. Study of the physical properties of kafirin during the fabrication of tablets for pharmaceutical applications[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(2): 159-165.

[14] GOODALL M A, CAMPANELLA O H, EJETA G, et al. Grain of high digestible, high lysine (HDHL) Sorghum contains kafirins which enhance the protein network of composite dough and bread[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 352-357.

[15] SCHOBERT T J, BEAN S R, TILLEY M, et al. Impact of different isolation procedures on the functionality of zein and kafirin[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(2): 241-249.

[16] BUGUSU B A, CAMPANELLA O, HAMAKER B R. Improvement of Sorghum-wheat composite dough rheological properties and breadmaking quality through zein addition [J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(1): 31-35.

[17] PALAVECINO P M, CURTI M I, BUSTOS M C, et al. Sorghum pasta and noodles: technological and nutritional aspects[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75 (3): 326-336.

[18] BEAN S R, IOERGER B P, PARK S H, et al. Interaction between Sorghum protein extraction and precipitation conditions on yield, purity, and composition of purified protein fractions[J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(1): 99-107.

[19] TAYLOR J, TAYLOR J R N, DUTTON M F, et al. Glacial acetic acid-a novel food-compatible solvent for

- kafirin extraction[J]. *Cereal Chemistry*, 2005, 82(5): 485-487.
- [20] Da SILVA L S, TAYLOR J R N. *Sorghum* bran as a potential source of kafirin[J]. *Cereal Chemistry*, 2004, 81(3): 322-327.
- [21] OOM A, PETERSSON A, TAYLOR J R N, et al. Rheological properties of kafirin and zein prolamins[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 47(1): 109-116.
- [22] 田晓红,谭斌,谭洪卓,等. 20 种高粱淀粉特性[J]. *食品科学*, 2010, 31(15): 13-20.
- [23] 丁国祥,戴清炳,曾庆曦,等. 不同淀粉结构高粱籽粒的酿酒工艺参数研究[J]. *绵阳经济技术高等专科学校学报*, 1996(4): 4-5.
- [24] 沈舒民. 高粱淀粉结构与功能特性研究及相关性分析[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
- [25] SINGH N, SINGH J, KAUR L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(2): 219-231.
- [26] ORIA MP, HAMAKER B R, SCHULL J M. *In vitro* protein digestibility of developing and mature *Sorghum* grain in relation to α , β , and γ -kafirin disulfide crosslinking[J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 22(1): 85-93.
- [27] DUODU K G, TAYLOR J R N, BELTON P S, et al. Factors affecting *Sorghum* protein digestibility [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38(2): 117-131.
- [28] SVENSSON L, SEKWATI-MONANG B, LUTZ D L, et al. Phenolic acids and flavonoids in nonfermented and fermented red *Sorghum* (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16): 9214-9220.
- [29] AWIKA J M, ROONEY L W. *Sorghum* phytochemicals and their potential impact on human health [J]. *Phytochemistry*, 2004, 65(9): 1199-1221.
- [30] KHAN I, YOUSIF A M, JOHNSON S K, et al. Acute effect of *Sorghum* flour-containing pasta on plasma total polyphenols, antioxidant capacity and oxidative stress markers in healthy subjects: a randomised controlled trial [J]. *Clinical Nutrition*, 2015, 34(3): 415-421.
- [31] DYKES L, ROONEY L W. *Sorghum* and millet phenols and antioxidants[J]. *Journal of Cereal Science*, 2006, 44(3): 236-251.
- [32] KANG J G, PRICE W E, ASHTON J, et al. Identification and characterization of phenolic compounds in hydromethanolic extracts of *Sorghum wholegrains* by LC-ESI-MSn[J]. *Food Chemistry*, 2016, 211: 215-226.
- [33] AWIKA J M. *Sorghum* flavonoids: unusual compounds with promising implications for health [M]//ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 2011: 171-200.
- [34] AWIKA J M, ROONEY L W, WANISKA R D. Anthocyanins from black *Sorghum* and their antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2005, 90(1/2): 293-301.
- [35] DYKES L, SEITZ L M, ROONEY W L, et al. Flavonoid composition of red *Sorghum* genotypes [J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(1): 313-317.
- [36] DYKES L, PETERSON G C, ROONEY W L, et al. Flavonoid composition of lemon-yellow *Sorghum* genotypes [J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(1): 173-179.
- [37] SELLE P H, CADOGAN D J, LI X, et al. Implications of *Sorghum* in broiler chicken nutrition[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2010, 156(3/4): 57-74.
- [38] MAHMOOD S, ALI H, AHMAD F, et al. Estimation of tannins in different *Sorghum* varieties and their effects on nutrient digestibility and absorption of some minerals in caged white leghorn layers [J]. *International Journal of Agriculture & Biology*, 2014, 16: 217-221.
- [39] NYACHOTI C M, ATKINSON J L, LEESON S. *Sorghum* tannins: a review[J]. *World's Poultry Science Journal*, 1997, 53(1): 5-21.
- [40] 金邦荃. 高粱的饲用价值[J]. *饲料研究*, 1995, 18(6): 23-24.
- [41] GUALTIERI M, RAPACCINI S. *Sorghum* grain in poultry feeding[J]. *World's Poultry Science Journal*, 1990, 46(3): 246-254.
- [42] LIU S Y, SELLE P H, COWIESON A J. Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on *Sorghum*-based diets [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, 181(1/2/3/4): 1-14.
- [43] FARRELL D J, PEREZ-MALDONADO R A. Tannins in feedstuffs used in the diets of pigs and poultry in Australia [C]//BROOKER J D. Tannins in livestock and human nutrition: proceedings of an international workshop. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1999: 24-29.
- [44] PEREZ-MALDONADO R A, TRAPPETT P, KEMSLEY M. Australian sorghums in broiler starter and finisher diets [C]//European Poultry Conference, Verona, Italy, 2006.
- [45] 邹剑秋,朱凯,张志鹏,等. 国内外高粱深加工研究现状与发展前景[J]. *杂粮作物*, 2002, 22(5): 296-298.
- [46] 李宁,张元,熊海谦,等. 不同饲用甜高粱品种与青贮玉米产量、品质的比较试验[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(3): 180-184.
- [47] 李珊珊,李飞,白彦福,等. 甜高粱饲用价值及饲喂奶牛技术[J]. *草业科学*, 2017, 34(7): 1534-1541.
- [48] 杨浩哲,蔡海霞,李丽峰,等. 刈割次数对饲用甜高粱产量和品质的影响[J]. *中国奶牛*, 2024(6): 51-54.
- [49] WU C P, HSU T H, WU C Y, et al. In situ rumen degradation of sweet *Sorghum* silage and the effect on growth performance in Holstein steers[J]. *Journal of the Chinese Society of Animal Science*, 2021, 50: 212.
- [50] 玉霞. 甜高粱青贮对奶牛生产性能、血液生化指标及瘤胃功能的影响[D]. 通辽:内蒙古民族大学, 2020.
- [51] 王文颖,张健男,孙闯,等. 甜高粱饲用价值的研究进展[J]. *饲料研究*, 2021, 44(14): 153-156.
- [52] 白晶晶. 青贮甜高粱秸秆饲料饲喂肉牛对比试验[J]. *中国牛业科学*, 2015, 41(1): 37-38.
- [53] LV X K, CHEN L, ZHOU C S, et al. Application of different proportions of sweet *Sorghum* silage as a substitute for corn silage in dairy cows[J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11(6): 3575-3587.
- [54] 崔磊,胡景辉,孙伟,等. 单宁对白酒发酵影响的实验室分析研究[J]. *酿酒科技*, 2022(1): 17-22

- [55] 程度. 酿酒用高粱原料对酱香型白酒品质影响的初步研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [56] 李建平, 郭孝. 国内外饲用高粱生产、科研状况及应用前景[J]. 饲料研究, 2007, 30(10): 68-70.
- [57] 刘茂柯, 唐玉明, 任道群, 等. 酿酒高粱籽粒酿造性状的比较[J]. 中国酿造, 2012, 31(11): 111-114.
- [58] 程度, 曹建兰, 王珂佳, 等. 高粱对酱香型白酒品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 356-364.
- [59] 刘涵, 敖宗华, 王明, 等. 酿酒高粱的研究进展[J]. 酿酒科技, 2016(6): 105-107.
- [60] 唐玉明. 高粱籽粒的酿酒品质研究[J]. 酿酒, 2000, 27(4): 45-47.
- [61] 袁蕊, 敖宗华, 刘小刚, 等. 南北方几种高粱酿酒品质分析[J]. 酿酒科技, 2011(12): 33-36.
- [62] 杨乾华, 丁国祥, 曾富言. 南北方不同类型高粱的酿酒品质差异[J]. 作物品种资源, 1994(4): 32-33.
- [63] 何猛超, 西玉玲, 张德中, 等. 高粱糯性对秦池酱香大回酒品质影响的分析研究[J]. 酿酒科技, 2024(1): 41-47.
- [64] 张福耀, 吴树彪, 柳青山. 影响高粱饲用价值主要内在因素及其对策[J]. 动物营养学报, 2016, 28(1): 1-8.
- [65] 何诚, 丁海龙, 杨平, 等. 南北酿酒高粱蒸煮品质研究[J]. 酿酒科技, 2012(8): 68-70.
- [66] MURTY D S, PATIL H D, PRASADA R K E. et al. A note on screening the Indian sorghum collection for popping quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 1982, 19: 79-80.
- [67] 韦露露, 庞臻, 马凤丽, 等. 高粱在白酒中的应用研究进展[J/OL]. 酿酒科技, 1-10[2024-08-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/52.1051.TS.20240711.1442.002.html>.
- [68] 范国华, 郭瑞峰. 高粱深加工产品的应用现状研究[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(3): 145-148.
- [69] 田静茹, 李雪琴, 陈洁. 高粱粉对面团特性及发面饼品质的影响[J/OL]. 食品研究与开发, 1-12[2024-08-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1231.TS.20240412.1630.004.html>.
- [70] 文志勇, 孙宝国, 梁梦兰, 等. 脂质氧化产生香味物质[J]. 中国油脂, 2004, 29(9): 41-44.
- [71] de MORAIS CARDOSO L, PINHEIRO S S, MARTINO H S D, et al. *Sorghum* (*Sorghum bicolor* L.): nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(2): 372-390.
- [72] SUGANYADEVI P, SARAVANAKUMAR K M, MOHANDAS S. The antiproliferative activity of 3-deoxyanthocyanins extracted from red *Sorghum* (*Sorghum bicolor*) bran through P53-dependent and Bcl-2 gene expression in breast cancer cell line[J]. Life Sciences, 2013, 92(6/7): 379-382.
- [73] AWIKA J M, McDONOUGH C M, ROONEY L W. Decorticating *Sorghum* to concentrate healthy phytochemicals[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(16): 6230-6234.
- [74] HARGROVE J L, GREENSPAN P, HARTLE D K, et al. Inhibition of aromatase and α -amylase by flavonoids and proanthocyanidins from *Sorghum bicolor* bran extracts[J]. Journal of Medicinal Food, 2011, 14(7/8): 799-807.
- [75] 蒋依然. 高粱麸皮原花青素的制备、结构表征及其抗肝癌细胞活性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [76] MAZEWSKI C, LIANG K T, GONZALEZ de MEJIA E. Comparison of the effect of chemical composition of anthocyanin-rich plant extracts on colon cancer cell proliferation and their potential mechanism of action using *in vitro*, *in silico*, and biochemical assays[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 378-388.
- [77] APEA-BAH F B, MINNAAR A, BESTER M J, et al. *Sorghum*-cowpea composite porridge as a functional food, part II: antioxidant properties as affected by simulated *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 307-315.
- [78] ASHLEY D, MARASINI D, BROWNMILLER C, et al. Impact of grain *Sorghum* polyphenols on microbiota of normal weight and overweight/obese subjects during *in vitro* fecal fermentation[J]. Nutrients, 2019, 11(2): 217.
- [79] 卫鸣. 高粱麸皮结合多酚的提取及其对衰老小鼠肠道微环境的调节作用[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [80] 王春艳. 高粱多酚提取、纯化、组分分析及微胶囊制备研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.

Research Advances in Sorghum Quality and Its Application in Food and Feed

YANG Huanchun¹, CHANG Xiangcai¹, SUN Xiangdong²

(1. Anshun University, Anshun 561000, China; 2. Quality and Safety Institute of Agricultural Products, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Sorghum has ever been traditional food in China. However, due to its poor palatability and antinutritional factors, it has withdrawn from the staple foods. Recently, with the advances of research in sorghum, the values of sorghum are rediscovered. The polyphenolic compounds-tannin is unprecedented highly valued. These health protections, precaution and adjuvant therapy effects are beneficial to humans and with discovering of new phenolic compound derivatives, sorghum has a promising prospect as a healthy food raw material. This article systematically summarized the newly discovered polyphenolic compounds in different colored sorghum, summarized the research progress and development potential of sorghum in feed, brewing, and food, and looks forward to the future research and development directions and prospects of sorghum, which can provide reference for the in-depth development and utilization of sorghum in the fields of food and feed in the future.

Keywords: sorghum; nutritional quality; tannin; food; feed; develop applications