

高粱中酚类物质及其功能活性的研究进展

吴丽^{1,2}, 赵钢¹, 邹亮¹, 任贵兴^{2*}

(1. 成都学院生物产业学院, 成都 610106; 2. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 随着生活质量的提高, 人们越来越重视健康饮食, 高粱等杂粮因其独特的植物化学成分而备受消费者的喜爱。本文主要对高粱作为我国乃至世界上一种重要的耐旱粮食作物其含有的原花青素、酚酸、花青素、黄酮等酚类物质的化学结构与分类、提取方法及潜在的保健功能等方面进行了阐述。自由基损伤会引起脂质、DNA、蛋白质、细胞膜等体内大分子损伤, 是多种疾病, 例如老化、癌症、心血管疾病等的诱因。高粱富含多种植物化学成分, 大量研究表明高粱中的这些酚类物质具有抗氧化能力与自由基清除能力。适当补充外源抗氧化剂以改善衰老以及减少疾病的发生已成为目前消费者重点关注的问题, 因而高粱作为一种健康食品具有广阔的应用与开发前景。

关键词: 高粱; 酚类物质; 原花青素; 保健功能

Research progress on phenolic compounds and potential health of sorghum grains

WU Li^{1,2}, ZHAO Gang¹, ZOU Liang¹, REN Gui-Xing^{2*}

(1. Faculty of Biotechnology Industry, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: With the improvement of living standard, people are paying more concern on healthy diet. Due to containing special phytochemicals, minor coarse cereals including sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is becoming the favourite food for consumers. The chemical structure, classification, extract methods and potential impact on human health of phenolic compounds from sorghum, an important drought-resistant crop in China as well as worldwide, were well documented in this review. Oxidative stress which is harmful to lipids, DNA, protein and cell structures, induces the development of chronic and degenerative diseases such as aging, cancer and cardiovascular disease. Numerous studies showed that sorghum phenol extracts had antioxidant and free radical scavenging ability. Appropriate supplementary exogenous antioxidants for prevention of aging and other chronic diseases had become an focused issue for consumers, which made sorghum as a healthy food have a potential application prospect.

KEY WORDS: *Sorghum bicolor* (L.) Moench; phenolic compound; procyanidins; functional health

1 引言

高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)又名蜀黍, 禾科高粱属, 英文名 sorghum, 自古就有“五谷之精”、“百谷之长”

的盛誉。高粱是世界上产量仅次于稻米、小麦、玉米及大麦的第5大粮食作物。

高粱是我国重要的旱粮作物, 种植地域广泛, 以东北、西北、华北种植为多, 资源丰富、价格便宜, 具有很多

*通讯作者: 任贵兴, 研究员, 博士, 主要研究方向为功能成分研究。E-mail: renguixing@caas.cn

*Corresponding author: REN Gui-Xing, Professor, Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.80 South Xueyuan Road, Haidian District, Beijing, China, 100081. E-mail: renguixing@caas.cn

优良性状和综合利用价值。高粱按其性质分为粳性和糯性两种,按粒质分为硬质和软质。籽粒色泽有黄色、红色、黑色、白色或灰白色、淡褐色5种。高粱籽粒中不仅含有丰富的淀粉、蛋白质及脂肪等营养物质还富含多种功能成分,如原花青素、酚酸、黄酮类物质等^[1,2],且不同品种间具有很大的差异。脱壳后的高粱籽粒除可食用、饲用、酿酒、制醋外,还可入药。在中医药应用中,高粱具有和胃、健脾、消积、温中、涩肠胃、止霍乱的功效。

随着人类生活节奏的加快,亚健康等一系列健康问题受到人们的广泛关注。人们越来越希望通过饮食等途径来改变人们的健康状况。据有关报道^[1,3],严重困扰人们健康的一些慢性疾病如心血管疾病、肥胖症、糖尿病等均可通过健康的饮食途径来缓解或预防。谷物食品,尤其是传统意义上的杂粮因含有丰富的多酚类物质,如花青素、原花青素、多酚等,现代研究表明^[4-7],这些多酚类物质具有良好的清除自由基能力。根据自由基学说^[8],引起衰老的主要原因生物大分子被活性氧自由基攻击,从而导致蛋白质损伤、酶失活及核酸损伤,正是这些因素是引起多种慢性疾病的重要原因。高粱尤其是高粱麸皮作为植物多酚的一个重要来源,由于其保健功能受到越来越多的重视与研究^[9]。

2 高粱中的酚类物质

高粱中的酚类物质对人类健康有重要作用。酚类物质是分布最广泛的次生代谢产物,在植物中无处不在。酚类化合物是指芳香烃中苯环上的氢原子被羟基取代所生成的化合物,是芳香烃的含羟基衍生物,因而根据其分子所含的羟基数目可分为一元酚和多元酚;根据分子量可分为酚酸、黄酮类物质及单宁。其中黄酮类物质是酚类物质中最大的一类物质,并进一步细分为花青素、黄烷醇、原花青素、黄酮醇、黄酮、异黄酮等物质^[10]。由于基因与环境的因素,酚类物质的种类与含量在高粱不同品种与地区间的差异很大。在谷物中,高粱中酚类物质含量最高,在一些品种中能达到6%(w/w)^[11],几乎所有的植物酚类物质都能在高粱中发现^[12]。目前,谷物中酚类化合物的提取及产品开发主要集中在谷物外种皮方面的研究,而对谷物籽粒中多酚类化合物的相关研究较少^[13]。

2.1 高粱多酚

高粱多酚是自然界中广泛存在的一大类宝贵的可再生资源。高粱多酚作为一类具有广泛生物活性的天然产物,它与人类的消化、营养、健康具有重要联系。据报道^[13-18],高粱多酚具有抗氧化、抗糖尿病、抗癌、抑菌等功效,已在食品、药品、化妆品等工业领域中得到了广泛的应用。无论从可再生资源的利用及发展绿色化学考虑,还是从与

人类的关系角度看,植物多酚是一类很值得人们关注、研究和开发利用的天然产物。因此,对多酚资源丰富的高粱多酚的研究尤其重要,这为高粱的深加工与开发利用具有重要意义。

2.1.1 高粱多酚的提取

对高粱多酚提取及纯化的研究是对高粱多酚进行深层次研究的基础。根据相似相溶原理,提取植物中多酚类物质,其中原料的贮存、干燥、粉碎、提取溶剂、温度等都可能影响多酚的化学结构和提取效率,从而改变多酚的化学特性和生物活性,使得多酚的提取值与真实值有很大出入。目前溶剂提取是提取高粱多酚最常用的方法,常用的溶剂提取方法有浸渍、微波萃取、回流、溶剂加速萃取、索氏提取法等,此外还有超临界萃取、溶剂加速萃取等先进的提取方法^[19]。用溶剂提取高粱后所得产物是一个组分较为复杂的体系,除了还有常见的酚酸、原花青素、单宁、花青素、黄酮类物质,还会含有色素、蛋白、及其糖类物质。因此对提取后的溶液进行分离与纯化是进行高粱功能活性物质及其保健功能等深层次研究的必要步骤,目前对高粱酚类物质的纯化使用较多的是采用大孔树脂层析法与葡聚糖凝胶色谱法。

2.1.2 高粱多酚含量测定研究概况

多酚含量的测定方法是很多的,可以分为化学分析法、蛋白质结合法、物理测定法3大类。但是每一种测定方法都有其局限性,不能适用于所有测定对象,而且大多数定量方法是相对的。一般测定高粱多酚的方法有Folin-Ciocalteu法、香草醛法、Folin-Denis法、正丁醇盐酸法等,最近使用的高效液相色谱法、液质联用法等先进的仪器设备能准确定量植物多酚的含量^[13-15]。

高粱中酚酸主要以甲酸或肉桂酸衍生物的形式存在,一般以游离态或结合态的形式存在,并主要分布在高粱的外种皮上^[20]。在高粱中已确定广泛存在的酚酸包括丁香酸、原儿茶酸、咖啡酸、对香豆酸及芥子酸^[2,13],其中含量最高的为咖啡酸和对香豆酸^[21]。

2.2 原花青素

原花青素(procyanidins, PC)是由(+)-儿茶素或(-)-表儿茶素为单元通过C₄→C₈和/或C₄→C₆骨架组成的低聚体与高聚体的一大类混合物(B型原花青素),其结构见图1。

原花青素又叫缩合单宁,是黄烷-3-醇和黄烷-3,4-二醇的聚合物^[22]。原花青素的结构由简单到复杂,最简单的原花青素是儿茶素、表儿茶素或儿茶素与表儿茶素形成的二聚体,此外还有三聚体、四聚体等直至十聚体。

原花青素作为缩合单宁,在自然界的植物中广泛存在,原花青素主要存在于高粱的种皮中,并且根据原花青素的含量不同其颜色由白色至棕褐色、黑色有所不同,其中棕褐色麸皮的高粱中含有的原花青素含量最高^[2]。据黄

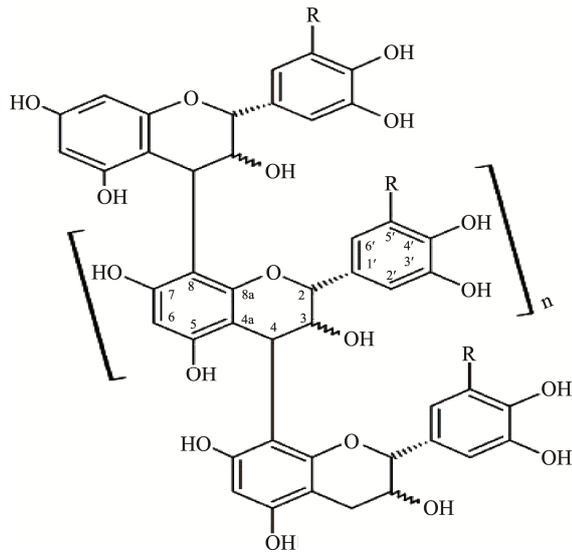


图 1 原花青素化学结构

Fig. 1 The chemical structure of the procyanidins

朝晖等的研究表明,不同种质资源的高粱中原花青素的含量范围为 0.01%~4%^[23]。尽管原花青素在自然界的分布广泛,但具有生理活性的原花青素,为分子量在 300~2000 范围内的低聚体(oligomeric procyanidins, OPC)。这是因为聚合度(degree of polymerization, DP)可能会影响原花青素在体内的利用情况。因此,一般认为较低聚合度的原花青素其生物活性比高聚体原花青素活性强。

2.2.1 原花青素的分类

根据不同的分类标准可将原花青素进行不同的分组。依照原花青素的组成单元的数目的不同,将原花青素分类如下:

(1)单体原花青素(monomeric procyanidins): DP=1 即无色花色素(leucoanthocyanidins)。葡萄籽中含量最多的单体是黄烷-3-醇类(儿茶素类),包括(+)-儿茶素(catechin)、(-)-表儿茶素(epicatechin)、非黄酮类多酚的没食子酸(gallic acid)以及两者的复合物表儿茶素没食子酸酯(epicatechin gallate),其中儿茶素是最常见的单体。其结构式见图 2, 3。

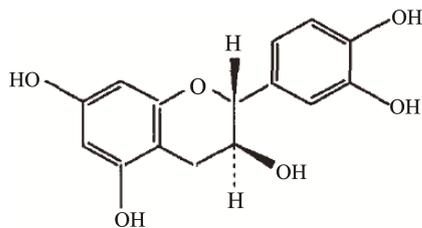


图 2 儿茶素结构式

Fig. 2 Molecular structure of (+)-catechin

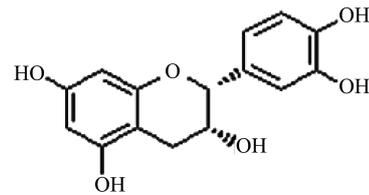


图 3 表儿茶素结构式

Fig. 3 Molecular structure of (+)-epicatechin

(2)低聚(寡聚)原花青素(OPC): $2 \leq DP \leq 10$ 的聚合原花青素^[24]。在原花青素低聚体的研究中,二聚体与三聚体的研究最多。其化学特征与生物活性所进行的研究较为深入。我们的研究表明^[4]使用二氯甲烷/水/甲醇的正相体系在荧光检测器下($\lambda_{ex} = 280 \text{ nm}$, $\lambda_{em} = 323 \text{ nm}$)能够分离出高粱原花青素低聚体中的一聚体至七聚体(图 4)。据报道在高粱原花青素中儿茶素是最常见的单体,而原花青素 B₁ 是最常见的二聚体^[25]。

(3)高聚原花青素(polymeric procyanidins, PPC): 通常是指聚合度 $DP > 10$ 的高聚体。因其化学结构极其复杂,目前对高聚体原花青素的研究甚少^[26]。

根据原花青素组成单元连接键的类型,可将原花青素分为 A 型原花青素与 B 型原花青素。3-黄烷醇(flavan-3-ol)之间以 1 个 $C_4 \rightarrow C_8$ 或 $C_4 \rightarrow C_6$ 位的键相连接为 B 型原花青素。3-黄烷醇(flavan-3-ol)间以 1 个 $C_4 \rightarrow C_8$ 键及 1 个 $O_7 \rightarrow C_2$ 键相连接称为 A 型原花青素^[21]。自然界中存在的原花青素大多为 B 型原花青素, A 型原花青素的分布较小。第 1 个分离结晶出来的双联键型原花青素,称之为原花色素 A-2, 结构式见图 5。

2.2.2 原花青素提取

随着人们对原花青素保健功能认识的深入,对建立一种简捷高效的提取方法的需求越来越强烈。高粱原花青素是一种具有涩味的白色粉末,溶于水、乙醇、甲醇、丙酮等有机溶剂。根据其在不同溶剂中的溶解性能,常采用溶剂萃取法提取和分离原花青素。原花青素物质通常以结合态与蛋白质、纤维素结合在一起,一般不易提取。因此在提取过程中加入适量的酸,能显著提高原花青素的提取率。

2.2.3 原花青素分离与纯化

如何实现原花青素提取物的高效、快速分离与纯化,是目前原花青素纯化研究的重点内容。在提取过程中会有可溶性氨基酸、多糖等物质在原花青素的提取过程中被浸提,因此,必须经过合理有效的纯化措施来实现原花青素的提纯。

大孔吸附树脂(macroporous absorption resin)是近 30 余年来发展起来的一类有机高聚物吸附剂。因其具有较大的吸附能力,洗脱容易、机械强度高,抗污染能力强、

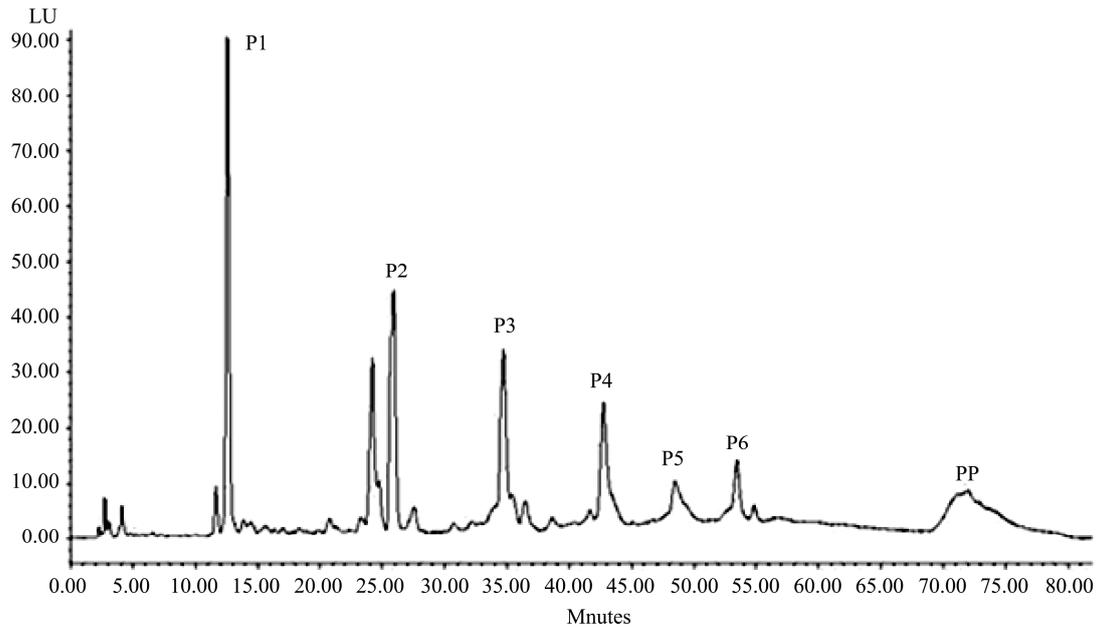


图 4 高粱麸皮原花青素提取物的正相液相色谱图(荧光检测器)。图中 P1-P6 代表原花青素聚合度, 高聚体原花青素(PP) 以单一的峰出现。LU-荧光单位。

Fig. 4 Normal-phase HPLC-FLD trace of proanthocyanidins-rich extract (PARE) from sorghum bran. Labels P1-P6 indicate the degrees of polymerization (DP) of procyanidins in the peaks. Polymeric proanthocyanidins (PP) appear as a single peak at the end of the chromatogram. LU, luminescence units.

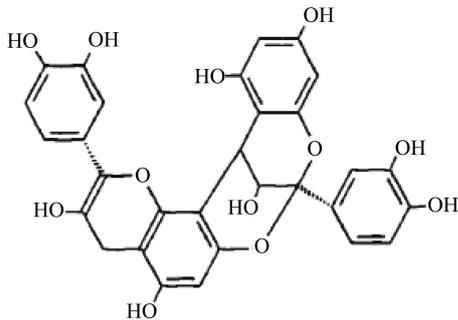


图 5 原花青素 A-2 结构

Fig. 5 The structure of the procyanidins A-2.

再生处理方便等优点。特别是其孔径和孔度大小、极性、等性能都可以人为控制调节, 供任意选择, 大孔吸附树脂层析法在天然产物分离纯化中得到了广泛应用^[27, 28]。AB-8 树脂吸附量大、解吸率高、选择性好, 适于原花青素的分离精制。

经大孔树脂分离得到原花青素的混合物, 经过 Sephadex LH-20 凝胶柱, 根据分子量的大小进一步分离以得到不同聚合度的原花青素。张弛等^[29]的研究表明, 大孔树脂层析法分离纯化原花青素时使用 50% 的乙醇水溶液洗脱得到的洗脱液中原花青素的含量达 71.9%, 将经过大孔树脂层析分离纯化的原花青素粗品经 Sephadex LH-20 凝胶柱分离, 50% 乙醇作为流动相原花青素粗品可纯化至

95% 以上。我们的一项研究表明^[4], 高粱麸皮乙醇提取物, 通过 AB-8 大孔树脂洗脱收集 30% 乙醇洗脱液, 喷雾干燥后获得干粉, 采用 Folin-Ciocalteu 法测定总多酚的含量为 86.9%, 而总的原花青素经正丁醇-盐酸法比色测定含量为 54.68%。Gu 等^[19]的研究证实, 在 B 型原花青素中 (+)-儿茶素为主要的终止链单元 (88%), 其余的为 (-)-表儿茶素占有。

3 高粱酚类物质的生物活性

高粱作为一种古老的粮食作物, 因其含有丰富的酚类物质, 如酚酸、原花青素、花青素等生物活性, 而在近年来逐渐受到消费者的喜爱, 并引起对其深入研究的兴趣。据研究表明^[2, 4, 5, 7, 18], 高粱中的酚类物质具有抗氧化、抗癌、抗糖尿病、抗心血管疾病、减肥等多种功效。

3.1 抗氧化、清除自由基活性

近代研究表明^[8], 自由基损伤会引起脂质、DNA、蛋白质、细胞膜等体内大分子损伤, 是多种疾病, 例如老化、癌症、心血管疾病、肾炎等的诱因。自古以来, 人类利用多酚含量高的中草药治疗炎症、水肿、高血压和防衰老。这表明酚类物质具有抗氧化能力与自由基清除能力。生物体的抗氧化能力与其抗病性及延缓衰老密切相关, 因而从天然植物中寻找有效的抗氧化剂具有广阔的应用前景。适当补充外源抗氧化剂以改善衰老以及减少疾病的发生已成为目前消费者重点关注的问题。

Bagchi 等^[30]研究了原花青素的清除自由基能力, 发现其在一定范围内其抗氧化能力与浓度呈正相关, 其自由基清除能力比 Vc 和 V_E 更有效。朱振勤等^[31]研究了葡萄籽原花青素(grape seeds procyanidins extract) 的抗氧化及对 DNA 氧化损伤的保护作用, 结果表明, 原花青素能有效抑制脂质过氧化, 并能保护 DNA 免受·OH 引起的氧化损伤而防止肿瘤的发生及生长。我们的一项报道表明^[4], 将高粱麸皮原花青素提取物灌胃 D-半乳糖诱发的衰老小鼠, 能有效降低小鼠体内的脂质过氧化水平并能抑制小鼠体内 SOD 酶活性的降低。

3.2 抗心血管疾病

在美国, 心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)是威胁人类健康的一号杀手^[32]。多种流行病学数据^[33, 34]表明食用全粮谷物能显著降低心血管疾病病死率。低密度脂蛋白的氧化被看做是心血管疾病的征兆, 而高粱等谷物中的多酚、黄酮类物质能够阻止低密度脂蛋白的氧化^[35]。谷物麸皮中的植物甾醇被认为能对人体有益, 全谷物中的其他成分, 如多酚类物质及纤维素对心血管疾病的发生有良好的预防作用^[36]。马亚兵等^[33]的研究表明, 葡萄籽原花青素能够降低胆固醇及低密度脂蛋白胆固醇, 能有效预防血栓形成, 从而达到预防心脑血管疾病的发生。

3.3 肿瘤抑制作用

恶性肿瘤是危害人类生命与健康的一类严重疾病, 其防治与治疗已是世界性难题。目前有很多种天然或合成的化学物质在临床研究中表现出肿瘤的化学防御作用。由于合成的化学药物大多具有不良反应, 因此发现与研究天然产物的抗癌抑制作用具有重要意义。

食用全谷物产品具有抗癌作用^[37], 据报道原花青素对皮肤癌、口腔癌、乳腺癌、肺癌、前列腺癌、胰腺癌、胃癌、结肠癌等都有一定的预防或治疗作用^[38]。目前有很多关于高粱提取物抗癌活性的报道, 其研究主要集中在考察其对清除自由基的能力、抑制 DNA 损伤、抑制癌细胞的增殖以及刺激二期酶素酶(phase II enzyme, 一种能够破坏致癌物质的酶)的产生^[10]。Awika 等^[39]研究了不同高粱品种提取物的二期酶形成特性及癌细胞抗增殖特性。最近一项研究表明红高粱麸皮提取物能诱发人体乳腺癌细胞 MCF-7 程序性凋亡并阻止其增殖^[40]。

血管生成(angiogenesis)是肿瘤生长与形成的一个至关重要的因素。血管增生涉及到多个步骤, 虽然刚开始理解细胞与分子机制等控制血管生成, 但是有一点很清楚的是, 血管增生前体与抗血管生成因子之间的平衡控制了新血管形成。在这些血管生成因子中血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)是最重要的一个因素。Wu 等^[4]设置 3 个不同的高粱原花青素剂量组来灌胃

患有肺癌的 C57BL/6J 鼠, 用 ELISA 方法测定 VEGF 蛋白表达量, 结果发现原花青素能显著的抑制 VEGF 表达与转移灶的形成, 且在一定范围内与原花青素的剂量呈现线性相关。原花青素抑制 VEGF 的表达, 能有效抑制肿瘤的生长及转移, 从而达到抗癌功效。

3.4 减肥作用

高粱中含有多种酚类物质, 具有良好的保健作用。有研究报道^[41], 食用高粱具有抗营养作用。高粱中含有较高的单宁(原花青素即为缩合单宁), 当食物或饲料中的单宁含量较高时, 会影响人和动物对蛋白质、纤维素、淀粉和脂肪的消化, 降低食物或饲料的营养价值^[42]。蛋白质消化的降低主要是由于单宁容易与蛋白质形成不易消化的复合物, 而其他营养物质消化率的降低, 则主要是由于单宁对相应的消化促进酶如纤维素酶的活性产生抑制^[43]。Wu 等^[44]的研究表明, 用含有单宁的饲料喂养蛋鸡与不含单宁的饲料相比: 采食量显著降低, 体质量增长率降低, 饲料转化率下降, 净代谢能降低, 蛋白质消化率降低。Wu 等^[45]阐述了单宁之所以能够降低动物采食量是由于单宁能够抑制体内的蛋白质与还原性果糖介导所发生的糖基化反应, 从而使摄入体内的营养物质运输到新机体的效率降低。目前, 肥胖已是严重困扰人们健康的一个重要问题, 在饮食上注意调节安排, 如适量饮食高粱等杂粮、全谷物粗粮食品、适量饮茶(如高粱茶、荞麦茶等)能够调节体内代谢, 有利于身体健康, 高粱作为保健瘦身产品提供广阔的市场前景。

4 高粱深加工

高粱的传统用途是简单地作为粗粮或用作饲料, 随着科学技术的进步, 人们生活需求的多样性, 高粱由于其含有丰富的植化成分, 具有良好的保健作用, 对其的综合加工利用研究方兴未艾。

现在人们正在开始研究高粱作为功能性食品的开发市场。比如利用高粱高原花青素(单宁)含量的特点制作专供糖尿病人的食品, 或制作成保健茶、膨化食品定能深受消费者的喜爱。随着人民生活水平的不断改善, 对天然食用色素的要求也越来越高。高粱因其品种的差异, 其色素含量相差十分悬殊。经过多年研究, 从高粱壳中提取红色素的技术已经应用于工业化生产, 并研制出多种色素产品被广泛应用, 这为高粱副产物的利用拓宽了价值链。此外, 高粱麸皮中原花青素的含量丰富, 采用合适的提取加工工艺获得具有强抗氧化性的原花青素具有重要意义。总之, 高粱的加工领域非常广阔, 增值潜力很大。只要我们深入研究, 定能开拓高粱深加工与应用市场, 高粱必将成为备受人类喜爱的一种谷物食品。

参考文献

- [1] Gujer R, Magnolato D, Self R. Glucosylated flavonoids and other phenolic compounds from sorghum [J]. *Phytochemistry*, 1986, 25(6): 1431–1436.
- [2] Awika JM, Rooney LW. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health [J]. *Phytochemistry*, 2004, 65: 1199–1221.
- [3] Okarter O, Liu RH. Health benefits of whole grain phytochemicals [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2010, 50: 193–208.
- [4] Wu L, Huang Z, Qin P, *et al.* Chemical characterization of a procyanidin-rich extract from sorghum bran and its effect on oxidative stress and tumor inhibition in vivo [J]. *J Agri food Chem*, 2011, 59: 8609–8615.
- [5] Wu L, Huang Z, Qin P, *et al.* Effects of processing on phytochemical profiles and biological activities for production of sorghum tea [J]. *Food Res Inter*, 2013, 53: 678–685.
- [6] Wolniak M. Mechanisms of antioxidative action of anthocyanins [J]. *Farm Pol*, 2002, 20: 931–934.
- [7] Awika JM, Rooney LW, Waniska RD. Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties [J]. *Food Chem*, 2005, 90: 293–301.
- [8] Bagchi K, Puri S. Free radicals and antioxidants in health and disease [J]. *East Mediterr Health J*, 1998, 4(2): 350–360.
- [9] Chung OK, Bean SR, Park SH. Sorghum foods: new health benefits from an ancient grain [J]. *Food Sci (Chin J, ISSN 1002–6630)*, 2004, 25(10): 431–436.
- [10] Taylor J, Belton PS, Beta T, *et al.* Increasing the utilisation of sorghum, millets and pseudocereals: Developments in the science of their phenolic phytochemicals, biofortification and protein functionality [J]. *J Cereal Sci*, 2014, 59(3): 257–275.
- [11] Awika JM, Rooney LW, Wu X, *et al.* Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products [J]. *J Agri Food Chem*, 2003, 51, 6657–6662.
- [12] Krueger CG, Vestling MM, Reed JD. Matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry of heteropolyflavan-3-ols and glucosylated heteropolyflavans in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] [J]. *J Agr Food Chem*, 2003, 51(3): 538–543.
- [13] 王华, 姚亚平, 王毕妮, 等. 高粱籽粒提取物抗氧化活性的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(10): 123–127.
Wang H, Yao YP, Wang BN, *et al.* Antioxidant properties of sorghum groats extract [J]. *Food Ferment Ind*, 2007, 33(10): 123–127.
- [14] Waniska RD. Structure, phenolic compounds, and antifungal proteins of sorghum caryopses technical and institutional options for sorghum grain mold management [J]. *Patancheru Icrisat*, 2000: 72–106.
- [15] Dubey V, Masood N, Luqman S, *et al.* Anticancer efficacy of phenolics based structurally related compounds and their radical scavenging action [J]. *Anal Chem*, 1987, 160: 290–293.
- [16] 周贞兵. 马尾藻多酚与多糖的提取与活性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2002.
- Zhou ZB. Studies on the extraction of polysaccharides and polyphenols from sargassum and its bioactivity test [D]. Nanning: Guangxi University, 2002.
- [17] Dicko MH, Gruppen H, Traoré AS, *et al.* Evaluation of the effect of germination on phenolic compounds and antioxidant activities in sorghum varieties [J]. *J Agri Food Chem*, 2005, 53: 2581–2588.
- [18] Chung IM, Kim EH, Yeo MA, *et al.* Antidiabetic effects of three Korean sorghum phenolic extracts in normal and streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *Food Res Int*, 2011, 44: 127–132.
- [19] Barros F, Dykes L, Awika J, *et al.* Accelerated solvent extraction of phenolic compounds from sorghum brans [J]. *J Cereal Sci*, 2013, 58: 305–312.
- [20] Gu L, House SE, Rooney L, *et al.* Sorghum bran in the diet dose dependently increased the excretion of catechins and micro-bial-derived phenolic acids in female rats [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55: 5326–5334.
- [21] Hahn DH, Rooney LW, Fabion JM. Sorghum phenolic acids and their HPLC separation and relation to fungal resistance [J]. *Cereal Chem*, 1983, 60(4): 255–259.
- [22] Hellström J, Sinkkonen J, Karonen M. Isolation and structure elucidation of procyanidin oligomers from saskatoon berries (*amelanchier alnifolia*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55: 157–164.
- [23] 黄朝晖, 陆平, 孟宪军, 等. 不同产地高粱的原花青素含量测定及其抗氧化活性分析[J]. *食品工业科技*, 2008, 140–142.
Huang ZH, Lu P, Meng XJ, *et al.* Concentration and antioxidant activity determination of sorghum pro-anthocyanidins derived various areas [J]. *Sci Tech Food Ind*, 2008: 140–142.
- [24] Gu L, Kelm M, Hammerstone JF, *et al.* Fractionation of polymeric procyanidins from lowbush blueberry and quantification of procyanidins in selected foods with an optimized normal-phase HPLC-MS fluorescent detection method [J]. *J Agr Food Chem*, 2002, 50(17): 4852–4860.
- [25] Awika JM. Antioxidant properties of sorghum [D]. Texas A&M University, College Station, 2003.
- [26] Gu L, Kelm MA, Hammerstone JF, *et al.* Screening of foods containing proanthocyanidins and their structural characterization using LC-MS/MS and thiolytic degradation [J]. *J Agr Food Chem*, 2003, 51(125): 7513–7521.
- [27] 冯建光, 谷文英. 大孔吸附树脂对大豆异黄酮的吸附与洗脱性能[J]. *无锡轻工业大学学报*, 2003, 22(1): 82–85.
Feng JG, Gu WY. The adsorption and desorption properties of macroporous resins for soybean isoflavone [J]. *J Wuxi Uni Light Ind*, 2003, 22(1): 82–85.
- [28] 冯艳菊, 王林, 郭亚军, 等. 天然产物特殊分离技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2006, 35(7): 545–548.
Feng YJ, Wang L, Guo YJ, *et al.* Development for special separation of natural product [J]. *Appl Chem Ind*, 2006, 35(7): 545–548.
- [29] 张弛, 徐晓云, 潘思轶. 沙棘果原花青素的分离纯化研究[J]. *食品科学*,

- 2005, 26(5): 183–185.
- Zhang C, Xu XY, Fan ST. Study on isolation and purification of procyanidins from seabuckthorn fruit [J]. *Food Sci*, 2005, 26(5): 183–185.
- [30] Bagchi D, Garg A, Krohn RL. Oxygen free radical scavenging abilities of vitamins C and E, and a grape seed proanthocyanidin extract in vitro [J]. *Res Commun Molecul Pathol Pharmacol*, 1997, 95(2): 179–189.
- [31] 朱振勤, 翟万银, 陈季武, 等. 葡萄籽原花青素提取物抗氧化作用研究 [J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 5(1): 98–102.
- Zhu ZQ, Zhai WY, Chen JW, *et al.* Studies on the antioxidation effects of grape seed procyanidins extract [J]. *J East China Nor Uni (Nat Sci)*, 2003, 5(1): 98–102.
- [32] Sestino JJ. Epidemiology of cardiovascular disease in the last decade: treatment options and implications for perfusion in the 21st century [J]. *Perfusion*, 2003, 18(2): 73–77.
- [33] Slavin JL. Mechanisms for the impact of whole grain foods on cancer risk [J]. *J Am Coll Nutr*, 2000, 19(3): 300–307.
- [34] Anderson JW. Whole grain protects against atherosclerotic cardiovascular disease [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [35] Letelier ME, Rodríguez-Rojas C, Sánchez-Jofré S, *et al.* Surfactant and antioxidant properties of an extract from *Chenopodium quinoa* Willd seed coats [J]. *J Cereal Sci*, 2011, 53, 239–243.
- [36] Santos-Buelga C, Scalbert A. Proanthocyanidins and tannin like compounds – nature, occurrence, dietary intake and effects on nutrition and health [J]. *J Sci Food Agr*, 2000, 80(7): 1097–1117.
- [37] Slavin JL, Jacobs D, Marquart L. Grain processing and nutrition [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2000, 40(4): 309–326.
- [38] 杜晓芬, 谢笔钧. 原花青素防癌抗癌作用研究进展 [J]. *天然产物研究与开发*, 2005, 17(6): 822–825.
- Du XF, Xie BJ. Review on the chemopreventive and chemotherapeutic activities of proanthocyanidins [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2005, 17(6): 822–825.
- [39] Awika JM, Yang L, Browning JD, *et al.* Comparative antioxidant, anti-proliferative and phase II enzyme inducing potential of sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2009, 42: 1041–1046.
- [40] Suganyadevi P, Saravanakumar KM, 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 Sci*. 2013, 92: 379–382.
- [41] Al-Mamary M, Al-habori M, Al-Aghbari A, *et al.* In vivo effects of dietary sorghum tannins on rabbit digestive enzymes and mineral absorption [J]. *Nutr Res*, 2001, 21: 1393–1401.
- [42] Yokozawa T, Nakagawa T. Inhibitory effects of Luobuma tea and its components against glucose-mediated protein damage [J]. *Food Chem Toxicol*, 2004, 42(6): 975–981.
- [43] Chang MJ, Bailey JW, Collins JL. Dietary tannins from cowpeas and tea transiently alter apparent calcium absorption but not absorption of protein in rats [J]. *J Nutr*, 1993, 124(2): 283–288.
- [44] Wu X, Monnier VM. Enzymatic deglycation of proteins [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2003, 419(1): 16–24.
- [45] Wu CH, Yen GC. Inhibitory effect of naturally occurring flavonoids on the formation of advanced glycation endproducts [J]. *J Agr Food Chem*, 2005, 53(8): 3167–3173.

(责任编辑: 张宏梁)

作者简介



吴丽, 博士, 主要研究方向为食品功能成分研究。

E-mail: wuli5151@126.com



任贵兴, 研究员, 博士, 主要研究方向为食品功能成分研究。

E-mail: renguixing@caas.cn