

网络出版时间:2015-06-30 13:47

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.08.004

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150630.1347.004.html>

# 粟类作物植物化学物研究进展

郑璐<sup>1,2</sup>, 韩飞<sup>1</sup>, 李爱科<sup>1</sup>, 王兴国<sup>2</sup>

(1 国家粮食局科学研究院, 北京 100037; 2 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

**[摘要]** 我国拥有丰富的粟类作物资源。粟类作物中富含的植物化学物具有潜在降低慢性疾病发病率的功能特性, 是开发功能性食品或作为健康食品配料的良好资源。文章介绍了植物化学物的分类, 综述了粟类作物中植物化学物在籽粒中的分布、种类、含量及功能特性, 系统分析了不同加工方式对植物化学物的影响规律。

**[关键词]** 粟类作物; 植物化学物; 功能特性; 加工方式

**[中图分类号]** S515

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2015)08-0109-07

## Research progress of phytochemicals from millets

ZHENG Lu<sup>1,2</sup>, HAN Fei<sup>1</sup>, LI Ai-ke<sup>1</sup>, WANG Xing-guo<sup>2</sup>

(1 Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037, China;

2 School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** The millets resources are rich in China. Phytochemicals in millets with the potential to reduce the incidence of chronic disease are good resources of nutraceuticals or health food ingredients. In this paper, recent research progresses on the distribution in grains, major categories, contents, health benefits and processing effects of phytochemicals from millets are systematically reviewed, aiming to provide a theoretical basis for food processing industry, home cooking and diet nutritional balance.

**Key words:** millets; phytochemicals; health benefits; processing methods

粟类作物是种子籽粒较小的一类作物的总称, 常见的有珍珠粟(Pearl, *Pennisetum glaucum*)、龙爪稷(Finger, *Eleusine coracana*)、谷子(Foxtail, *Setaria italica*)、糜子(Proso, *Panicum miliaceum*)、小黍(Little, *Panicum sumatrense*)、圆果雀稗(Kodo, *Paspalum scrobiculatum*)、食用稗(Barnyard, *Echinochloa crus-galli*)、台夫(Teff, *Eragrostis tef*)、马唐(Fonio, *Digitaria exilis*)、薏苡(Adlay, *Coix lacryma-jobi*)等<sup>[1-3]</sup>, 是人类最早驯化的一类作物。考古学研究发现, 远在 10 000 多年前新石器时期的中国北部, 糜子就已经被作为主食食用<sup>[4]</sup>。

粟类作物中含有丰富的植物化学物, 已鉴定的酚类物质达 50 余种, 此外还含有丰富的植酸、植物

甾醇和膳食纤维等, 具有潜在降低慢性疾病发病率和促进人体健康的作用<sup>[1,5]</sup>, 将其开发成为功能性食品或作为健康食品的配料, 指导人们进行膳食搭配和适度烹饪可以对人体健康起到促进作用。然而现阶段对粟类作物中植物化学物的研究更加侧重于酚类物质含量及抗氧化性方面<sup>[5-7]</sup>, 对于其他植物化学物的种类、含量报道不多<sup>[8]</sup>, 关于功能特性及加工方式影响方面也有所报道<sup>[9]</sup>, 但相对较少。随着人们对自身健康关注度的提高, 对粟类作物植物化学物的研究将逐渐得到重视。本研究对粟类作物植物化学物的分布、种类、含量、功能特性和加工方式等方面的进展进行了综述, 以为粟类作物植物化学物的全面深入研究提供参考, 并为粟类作物在功能性食品或

[收稿日期] 2014-01-17

[基金项目] 国家粮食公益性行业科研专项(201313011-6)

[作者简介] 郑璐(1990-), 男, 浙江温岭人, 在读硕士, 主要从事粮油营养研究。

[通信作者] 韩飞(1973-), 女, 内蒙古包头人, 副研究员, 博士, 主要从事粮油营养研究。

健康食品配料中的应用开发提供理论依据。

## 1 植物化学物

植物化学物是指在水果、蔬菜、全谷物及其他作物中发现的一种具有生物活性的非营养化合物,迄今为止已发现的植物化学物超过 5 000 种,全谷物中植物化学物主要可分为酚类物质、类胡萝卜素、维生素 E、木质素、植物甾醇、膳食纤维、植酸等,其中以酚类物质的研究为主<sup>[10]</sup>。酚类物质是谷物植物

化学物的主要研究对象,可分为游离型和结合型 2 种。游离型酚类物质的存在形式包括自由酚类物质和共轭型酚类物质;结合型酚类物质则通常与细胞壁高分子聚合物相交联<sup>[11]</sup>。酚类物质按照构成分子基团的不同,又可分为酚酸、黄酮类、芪类、单宁和香豆素,具体分类及典型物质见表 1。流行病学研究表明,这些植物化学物具有抗氧化作用,进而可以保护生物大分子如脂肪、蛋白质和 DNA 免受破坏,具有潜在的抗癌和降低一些慢性疾病发病率等功能<sup>[10,12-13]</sup>。

表 1 酚类物质的分类及其典型物质名称

Table 1 Classification and typical chemicals of phenolics

酚类物质 Phenolic	类别 Category	典型物质 Typical chemicals
酚酸 Phenolic acids	羟基苯甲酸衍生物 Hydroxybenzoic acids	香草酸、丁香酸 Vanilic acid, syringic acid
	羟基肉桂酸衍生物 Hydroxycinnamic acids	阿魏酸、芥子酸 Ferulic acid, sinapic acid
黄酮类 Flavonoids	黄酮醇 Flavonols	槲皮素、山奈酚、杨梅酮 Quercetin, kaempferol, myricetin
	黄酮 Flavones	木犀草素、芹菜素 Luteolin, apigenin
	黄烷醇 Flavanols	儿茶素、表儿茶素 Catechin, epicatechin
	黄烷酮 Flavanones	柚皮素、圣草酚、橙皮素 Naringenin, eriodictyol, hesperitin
	花青素 Anthocyanidins	花青色素、花葵素 Cyanidin, pelargonidin
	异黄酮 Isoflavonoids	三异黄酮、大豆苷元 Genistein, daidzein
芪类 Stilbenesc		
单宁 Tannins		
香豆素 Oumarinst		

## 2 粟类作物中的植物化学物

### 2.1 植物化学物在粟类作物籽粒中的分布

粟类作物中的植物化学物主要分布于外壳及糊粉层中。对龙爪稷酚类物质的研究发现,其外壳中的酚类物质含量为 62 g/kg,去壳籽粒的酚类物质含量仅为 8 g/kg<sup>[14]</sup>。此外,谷壳颜色对植物化学物的含量也有影响。臧盛等<sup>[6]</sup>对 15 种糜子壳中酚类物质的检测发现,糜子外壳颜色越深,其中含有的酚类

物质含量越高。

### 2.2 粟类作物中植物化学物的类别

2.2.1 酚类物质 酚类物质是植物的次级代谢产物,是植物化学物的主要组成部分,其存在形态和含量受到一系列因素的影响,如谷物的种类、品种、谷粒的组成部分、种植的气候条件和耕种水平<sup>[11]</sup>。

酚类物质的鉴定一般采用高效液相色谱法或液质联用法,其他鉴定手段包括核磁共振、紫外光谱等。目前,粟类作物中已鉴定的酚类物质有 50 余种(表 2)。

表 2 粟类作物中主要的酚酸及黄酮类物质

Table 2 Major phenolic acids and flavonoids in millets

粟类作物 Millets	羟基苯甲酸衍生物 Hydroxybenzoic acids	羟基肉桂酸衍生物 Hydroxycinnamic acids	黄酮类 Flavonoids	参考文献 Reference
珍珠粟 Pearl	香草酸甲酯、原儿茶酸、原儿茶醛、对羟基苯甲酸、香草酸、香兰素、没食子酸、水杨酸 Methyl vanillate, protocatechuic acid, protocatechuic aldehyde, p-Hydroxybenzoic acid, vanilic acid, vanillin, gallic acid, hydroxybenzoic acid	芥子醛、咖啡酸、对香豆戊糖、对香豆酸、反式阿魏酸、顺式阿魏酸、芥子酸、肉桂酸 Sinapaldehyde, caffeic acid, p-Coumaryl pentose, p-Coumaric acid, trans-ferulic acid, cis-ferulic acid, sinapic acid, cinnamic acid	4-O 甲基-麦黄酮、芹菜素、杨梅酮、金合欢素、麦黄酮、3,4-2-O 甲基木犀草素、芦丁、槲皮素 4-OMe-tricin, apigenin, myricetin, acacetin, triclin, 3,4-Di-OMe-luteolin, rutin, quercetin	[5,15]
糜子 Proso	没食子酸、香草酸甲酯、原儿茶酸、原儿茶醛、对羟基苯甲酸、对羟基苯甲醛、龙胆酸、香草酸、香兰素、水杨酸 Gallic acid, methyl vanillate, protocatechuic acid, protocatechuic aldehyde, p-Hydroxybenzoic acid, p-Hydroxybenzaldehyde, gentisic acid, vanilic acid, vanillin, hydroxybenzoic acid	绿原酸、咖啡酸、对香豆戊糖、对香豆酸、芥子酸、阿魏酸、反式阿魏酸 Chlorogenic acid, caffeic acid, p-Coumaryl pentose, p-Coumaric acid, sinapic acid, ferulic acid, trans-ferulic acid	芹菜素 Apigenin	[5,16]

续表 2 Continued table 2

粟类作物 Millets	羟基苯甲酸衍生物 Hydroxybenzoic acids	羟基肉桂酸衍生物 Hydroxycinnamic acids	黄酮类 Flavonoids	参考文献 Reference
龙爪稷 Finger	没食子酸、香草酸甲酯、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、丁香酸、龙胆酸、香草酸 Gallic acid, methyl vanillate, protocatechuic acid, p-Hydroxybenzoic acid, syringic acid, gentisic acid, vanillic acid	对香豆酸、反式阿魏酸、反式肉桂酸、咖啡酸、芥子酸、香豆酸 p-Coumaric acid, trans-ferulic acid, trans-cinnamic acid, caffeic acid, sinapic acid, coumaric acid	儿茶素、反式儿茶素、花旗松素-O-己糖苷、没食子儿茶素、原花青素、二聚原花青素 B1、表儿茶素、花旗松素、牡荆素、异牡荆素、杨梅酮己糖苷、杨梅酮、槲皮素-O-戊糖苷、二聚原花青素 B2、芹菜素、木犀草素、槲皮素、山奈酚、柚皮素 Catechin, trans-catechin, taxifolin-O-hexoside, gallocatechin, proanthocyanidins, procyanidin dimer B1, epicatechin, taxifolin, vitexin, isovitexin, myricetin hexoside, myricetin, quercetin-O-pentoside, procyanidin dimer B2, apigenin, luteolin, quercetin, kaempferol, naringenin	[5, 17-21]
圆果雀稗 Kodo	没食子酸、香草酸甲酯、原儿茶酸、原儿茶醛、对羟基苯甲酸、香草酸、香兰素、丁香酸、水杨酸 Gallic acid, methyl vanillate, protocatechuic acid, protocatechuic aldehyde, p-Hydroxybenzoic acid, vanillic acid, vanillin, syringic acid, hydroxybenzoic acid	绿原酸、咖啡酸、对香豆戊糖、肉桂酸异构体、对香豆酸、芥子酸、肉桂酸、反式阿魏酸 Chlorogenic acid, caffeic acid, p-Coumaric acid, sinapic acid, cinnamic acid isomer, p-Coumaric acid, sinapic acid, cinnamic acid, trans-ferulic acid	牡荆素、7-O-葡萄糖苷木犀草素、异牡荆素、槲皮素-O-戊糖苷、芦丁、6-C-葡萄糖基-8-C-阿糖基芹菜素、芹菜素、木犀草素、槲皮素、山奈酚 Vitexin, luteolin-7-O-glucoside, isovitexin, quercetin-O-pentoside, rutin, 6-C-glucosyl-8-C-arabinosyl apigenin, apigenin, luteolin, quercetin, kaempferol	[5, 7, 22]
台夫 Teff			柚皮素、柚皮素-4'-甲氧基-7-O- $\alpha$ -L-鼠李糖苷、圣草酚-3', 7-二甲氧基-4'-O- $\beta$ -D-葡萄糖苷、异鼠李黄素-3-O-鼠李糖苷 Naringenin, naringenin-4'-methoxy-7-O- $\alpha$ -L-rhamnoside, eriodictyol-3', 7-dimethoxy-4'-O- $\beta$ -D-glucoside, isorhamnetin-3-O-rhamnoglucoside	[23]
谷子 Foxtail	没食子酸、香草酸甲酯、原儿茶酸、原儿茶醛、对羟基苯甲酸、对羟基苯甲醛、龙胆酸、香草酸、丁香酸、香兰素 Gallic acid, methyl vanillate, protocatechuic acid, protocatechuic aldehyde, p-Hydroxybenzoic acid, p-Hydroxybenzaldehyde, gentisic acid, vanillic acid, syringic acid, vanillin	对香豆戊糖、对香豆酸、反式阿魏酸、顺式阿魏酸、绿原酸衍生物 2 p-Coumaric acid, trans-ferulic acid, cis-ferulic acid, chlorogenic acid derivative 2	儿茶素、槲皮素-O-戊糖苷、6-C-葡萄糖基-8-C-阿糖基芹菜素、芹菜素 Catechin, quercetin-O-pentoside, 6-C-glucosyl-8-C-arabinosyl apigenin, apigenin	[5]
小黍 Little	没食子酸、香草酸甲酯、对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、香兰素 Gallic acid, methyl vanillate, p-Hydroxybenzoic acid, vanillic acid, syringic acid, vanillin	芥子醛、对香豆戊糖、对香豆酸、芥子酸、反式阿魏酸、顺式阿魏酸、绿原酸衍生物 1、绿原酸衍生物 2 Sinapaldehyde, p-Coumaric acid, p-Coumaric acid, sinapic acid, trans-ferulic acid, cis-ferulic acid, chlorogenic acid derivative 1, chlorogenic acid derivative 2	芹菜素 Apigenin	[5, 24]
食用稗 Barnyard	没食子酸、香草酸、水杨酸 Gallic acid, vanillic acid, hydroxybenzoic acid	芥子酸、肉桂酸 Sinapic acid, cinnamic acid	麦黄酮、木犀草素、芦丁、槲皮素 Tricin, luteolin, rutin, quercetin	[7, 25]
马唐 Fonio	没食子酸、原儿茶酸、香草酸、丁香酸、水杨酸 Gallic acid, protocatechuic acid, vanillic acid, syringic acid, hydroxybenzoic acid	咖啡酸、对香豆酸、阿魏酸、绿原酸、芥子酸 Caffeic acid, p-Coumaric acid, ferulic acid, chlorogenic acid, sinapic acid	芹菜素、木犀草素 Apigenin, luteolin	[22, 26]

酚类物质常用的定量测定方法主要有比色法和高效液相色谱法。比色法主要包括测定总酚含量的福林-酚比色法以及测定总黄酮含量的  $AlCl_3$  法、

SBC 法<sup>[27]</sup>和  $Al(NO_3)_3-NaNO_2-NaOH$  法。Anoma 等<sup>[5]</sup>使用福林-酚比色法和高效液相色谱法测定了圆果雀稗、龙爪稷、谷子、糜子、小黍和珍珠粟中的酚

类物质含量,发现 6 种粟类作物均含有丰富的酚类物质。以自由酚为例,6 种粟类作物中测定并鉴定出 36 种酚类物质,结果表明谷子中的酚类物质种类最丰富,为 19 种,其中羟基苯甲酸衍生物最多,有 10 种,含量最高的为芹菜素,为 125  $\mu\text{g/g}$ ;龙爪稷和圆果雀稗中的酚类物质以黄酮类物质为主,分别占 96.3% 和 59.2%,其中龙爪稷中含有丰富的儿茶素,为 1 611  $\mu\text{g/g}$ ,占酚类物质总量的 85.0%,圆果雀稗以 6-C-葡糖基-8-C-阿糖基芹菜素含量最高,为 61.8  $\mu\text{g/g}$ ;糜子、珍珠粟和小黍中的酚类物质以酚酸为主,分别占 98.4%,89.5% 和 81.2%,糜子中咖啡酸含量最高,为 37.3  $\mu\text{g/g}$ ,珍珠粟中反式阿魏酸含量最高,为 22.1  $\mu\text{g/g}$ ,小黍中对香豆酸含量最高,为 64.3  $\mu\text{g/g}$ ;除谷子和龙爪稷外,结合酚类含量均明显高于游离酚类含量,其中圆果雀稗的自由酚类、酯化酚类、醚化酚类和结合型酚类含量分别达到 16.2,2.02,1.55 和 81.6  $\mu\text{mol/g}$ (微摩尔阿魏酸当量每克)<sup>[5]</sup>。

**2.2.2 植酸** 植酸又称肌醇六磷酸,主要存在于皮壳中,因其可以络合锌、钙、镁、铁等微量元素形成不溶性物质,导致人体对这些微量元素的吸收率下降,故常被视为抗营养因子。然而近年来的研究发现,植酸具有减轻膳食中铅对机体的破坏、降低肝脂肪含量、预防心血管疾病等功能。在对植酸的进一步研究中发现,食物中的植酸含量在 0.25 mg/g 以下对健康最为有益<sup>[28]</sup>。

植酸广泛存在于粟类作物中。Azeke 等<sup>[29]</sup>对糜子发芽过程中植酸含量的测定结果发现,在发芽 10 d 后糜子中植酸含量从 5.7 mg/g 降至 0.85 mg/g,表明发芽过程可以有效降低糜子的植酸含量。由于粟类作物中植酸含量均较高,因此在食用前需经适度的加工处理。

**2.2.3 植物甾醇** 植物甾醇是植物固醇和植物甾烷醇长期积累的产物,与胆固醇的结构相似,只是侧链基团不同。因为植物甾醇与胆固醇竞争形成胶束的形式,抑制了胆固醇的吸收。摄入植物固醇和植物甾烷醇可降低人类血清总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇的含量<sup>[30]</sup>。粟类作物中含有较丰富的植物甾醇。El-Alfy 等<sup>[23]</sup>对台夫乙醇提取物的鉴定发现,台夫中存在  $\beta$ -谷甾醇及其衍生物。韩军花等<sup>[31]</sup>使用气相色谱法对小米中的植物甾醇进行了测定,表明小米中含有  $\beta$ -谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇、 $\beta$ -谷甾烷醇和菜油甾烷醇,其总和达 761.4 mg/kg,这些物质的含量远高于小麦、大米。最新的研究还发现,

$\beta$ -谷甾醇具有抗癌<sup>[32]</sup>、抗炎<sup>[33]</sup>等功能。

**2.2.4 膳食纤维** 膳食纤维通常被认为是一类不能为人体消化吸收,主要由可食性植物细胞壁残余物(纤维素、半纤维素、木质素等)及与之缔合的相关物质组成的化合物,是膳食中必不可少的组成部分,对保持身体健康有重要意义。大量流行病学研究表明,膳食纤维能够降低便秘、憩室炎、肠癌、肥胖、II 型糖尿病、冠心病等慢性病的发生率<sup>[34]</sup>。Devi 等<sup>[19]</sup>研究了 5 种粟类作物的膳食纤维含量,除珍珠粟和糜子外,龙爪稷、谷子和圆果雀稗的膳食纤维含量均在 19% 以上,其中圆果雀稗高达 37.8%,远高于小麦、大米、高粱等作物。

## 3 粟类作物植物化学物的功能特性

### 3.1 抗氧化

全谷物中多种植物化学物被认为具有抗氧化活性,进而可以保护生物大分子如脂肪、蛋白质和 DNA 免受破坏<sup>[13]</sup>。近年来的研究表明,粟类作物中的植物化学物同样具有抗氧化活性。Chandrasekara 等<sup>[35]</sup>研究发现,7 种粟类作物的酚类提取物对低密度脂蛋白均有显著保护作用,其中圆果雀稗中酚类物质的氧化抑制作用最强,0.05 mg/mL 圆果雀稗丙酮提取物相当于 0.2 mg/mL 丁基羟基茴香醚(BHA)。此外,他们还证实了这 7 种粟类作物酚类提取物对 DNA 有保护作用,可有效防止其氧化<sup>[36]</sup>。粟类作物植物化学物的抗氧化特性使其具有潜在的降低慢性疾病风险的能力。

### 3.2 抗菌

粟类作物中的植物化学物具有抗菌功能。Viswanath 等<sup>[20]</sup>对龙爪稷外壳和全粉中酚类物质提取物的抗菌能力进行了研究,结果表明,龙爪稷的酚类物质提取物对蜡样芽孢杆菌和黄曲霉具有抑制作用,其中外壳提取物具有更强的抑制能力。Banerjee 等<sup>[37]</sup>对龙爪稷酚类物质抗菌作用的研究表明,龙爪稷酚类物质对大肠杆菌等 10 种常见菌的增殖均具有抑制作用。

### 3.3 降血糖

粟类作物中的植物化学物具有降血糖功能。Yallanki 等<sup>[38]</sup>对谷子水提物的研究发现,在糖尿病大鼠饮食中加入 300 mg/kg 谷子水提物,喂养 30 d 后,试验组大鼠空腹血糖含量较加入水的对照组下降 70.5%,而此剂量对正常大鼠的空腹血糖含量没有影响。Jain 等<sup>[39]</sup>的研究发现,圆果雀稗提取物也具有降血糖作用,在糖尿病大鼠饮食中加入 500

mg/kg 圆果雀稗乙醇提取物,喂养 15 d 后空腹血糖含量较加入生理盐水的对照组下降了 35.12%。

### 3.4 降血脂

粟类作物中的植物化学物具有降血脂功能。Lee 等<sup>[40]</sup>在高血脂症大鼠饮食中加入相同比例的糜子、谷子或高粱,5 周后糜子、谷子组大鼠的甘油三酯水平明显低于精白米对照组和高粱组,与精白米对照组相比分别降低 29.6% 和 24.9%;此外,谷子组的总胆固醇含量、高密度脂蛋白和低密度脂蛋白含量也低于精白米对照组。Yallanki 等<sup>[38]</sup>的研究也表明,谷子水提物具有降血脂功能。

### 3.5 抑制白内障

白内障是导致失明的三大原因之一,糖性白内障发病机制之一是细胞内的高葡萄糖状态下,醛糖还原酶被激活,大量葡萄糖进入多元醇通路产生山梨醇,山梨醇因不能排出到晶体外而引起细胞膜通透性增加,导致还原型谷胱甘肽、肌醇等物质大量外漏,引起氧化应激,晶状体上皮细胞和纤维细胞受到严重损伤,最终形成了白内障<sup>[41]</sup>。Chethan 等<sup>[18]</sup>发现,龙爪稷中的酚类物质可以有效抑制醛糖还原酶的活性,具有潜在抑制白内障发病的功能。

### 3.6 抗甲状腺肿

甲状腺肿主要是由缺碘引起的一种地方性疾病,可以导致呆小症。Sartelet 等<sup>[26]</sup>的研究发现,马唐黄酮提取物中含有芹菜素和木犀草素,均具有很强的抗甲状腺过氧化物酶活性的作用,可以显著降低其激素生产能力,因而具有抗甲状腺肿的功能。

## 4 加工方式对粟类作物植物化学物的影响

不同加工方式会对粟类作物中的植物化学物含量及功能特性产生影响,粟类作物的加工方式一般有脱壳、热处理、发芽等。

### 4.1 脱壳

由于植物化学物主要存在于粟类作物的外壳中,脱壳将使植物化学物含量不同程度地因皮壳废弃而降低,对其抗氧化性也有较大影响。Anoma 等<sup>[42]</sup>的研究结果表明,与全籽粒相比,脱壳分别导致圆果雀稗、龙爪稷、谷子、糜子、小黍和珍珠粟中的总酚含量降低 78%,21%,65%,72%,35% 和 2%,然而对抗氧化性的影响则无明显的规律性,除羟基自由基清除能力均有所下降外,部分粟类作物脱壳后 DPPH、过氧化氢、氧自由基等的清除能力反而有所上升。

### 4.2 热处理

粟类作物的热处理方法一般为煮、蒸和焙烤。沸水煮会降低粟类作物中的植物化学物含量及抗氧化性。Anoma 等<sup>[42]</sup>研究发现,除龙爪稷煮后的总酚含量明显降低外,其他粟类作物总酚含量并没有显著降低,其抗氧化活性下降与总酚含量降低呈正相关。N'Dri 等<sup>[22]</sup>对珍珠粟和马唐等作物煮制过程中酚类组成及抗氧化性的研究表明,煮后 2 种作物中游离酚类、结合酚类含量均有所降低,抗氧化活性也有所下降,但部分酚酸含量却有所升高。蒸和焙烤则表现出相反的趋势。Pradeep 等<sup>[24]</sup>的研究发现,蒸和焙烤使小黍中的总酚、总黄酮和单宁含量显著升高,并使其抗氧化活性增强,其中焙烤对小黍植物化学物含量升高及抗氧化性增强的影响更明显,在压力为 1.5 kg/cm<sup>2</sup> 下蒸 15 min 会导致小黍中的总酚、总黄酮和单宁含量分别上升 13.0%,22.5% 和 8.9%,DPPH 清除能力由 90.2% 提高到 93.4%;165 ℃ 焙烤 75 s 则导致其总酚、总黄酮和单宁含量分别上升 21.2%,25.5% 和 18.8%,DPPH 清除能力由 90.2% 提高到 95.5%。

### 4.3 发芽

发芽处理是粟类作物中常用的加工方式,发芽会导致其游离型酚类含量增加及结合型酚类含量降低。Subba 等<sup>[43]</sup>的研究发现,龙爪稷发芽 96 h 后游离酚类含量增加,但结合酚类含量则降低了 2 倍,相应地游离酚类抗氧化活性增加了 1.2 倍,结合酚类抗氧化活性则下降了 21.4%。Pradeep 等<sup>[24]</sup>则发现,小黍发芽 48 h 后总酚含量上升 5.4%,DPPH 清除能力由 90.2% 提高到 91.7%。此外,发芽还会导致低聚木糖含量升高、抗氧化活性增强<sup>[44]</sup>及植酸含量降低<sup>[29]</sup>。

## 5 研究展望

粟类作物具有良好的抗旱性,籽粒中含有丰富的蛋白质等营养物质及植物化学物,具有潜在降低慢性疾病发病率等功能特性,但并未得到很好的利用,尤其在发达国家常被用作饲料<sup>[9,45]</sup>。目前将粟类作物开发成为功能性食品或健康食品的配料,指导人们进行合理的膳食搭配和适宜的烹饪加工,可以促进人体健康并增加食物来源,因此具有良好的应用前景。现阶段的研究对粟类作物中植物化学物的组成、含量及其功能特性研究报道不全面,对于粟类作物的研究也更加侧重于珍珠粟、龙爪稷等,还需要更系统深入研究,以期开发功能性食品提供坚

实的理论基础。此外,加工方式对粟类作物中植物化学物及其功能特性影响方面的报道不多,如何在加工过程中保护植物化学物不被破坏,是发挥粟类作物植物化学物功能特性的前提。

### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 黎 裕. 世界粟类作物生产 [J]. *世界农业*, 1992(5): 20-21.  
Li Y. World production of millet crops [J]. *World Agriculture*, 1992(5): 20-21. (in Chinese)
- [3] 陈守良. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.  
Chen S L. *Flora of China* [M]. Beijing, Science Press, 1990. (in Chinese)
- [4] Lu H, Zhang J, Liu K, et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10000 years ago [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(18): 7367-7372.
- [5] Anoma C, Fereidoon S. Determination of antioxidant activity in free and hydrolyzed fractions of millet grains and characterization of their phenolic profiles by HPLC-DAD-ESI-MS<sup>n</sup> [J]. *Journal of Functional Foods*, 2011, 3(3): 144-158.
- [6] 臧 盛, 杨联芝, 王 敏, 等. 15 种糜子壳粉的多酚类化合物的抗氧化活性 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19(9): 139-143.  
Zang S, Yang L Z, Wang M, et al. Antioxidant activity, phenolic compounds content of fifteen strains of proso millet pericarp [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(9): 139-143. (in Chinese)
- [7] Upadhyay R, Jha A, Singh S P, et al. Appropriate solvents for extracting total phenolics, flavonoids and ascorbic acid from different kinds of millets [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(1): 472-478.
- [8] Badau M H, Nkama I, Jideani I A. Phytic acid content and hydrochloric acid extractability of minerals in pearl millet as affected by germination time and cultivar [J]. *Food Chemistry*, 2005, 92(3): 425-435.
- [9] Amadou I, Gounga M E, Le G W. Millets: Nutritional composition, some health benefits and processing-a review [J]. *Emirates Journal of Food & Agriculture*, 2013, 25(7): 501-508.
- [10] Liu R H. Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention; Mechanism of action [J]. *The Journal of Nutrition*, 2004, 134(12): 3479-3485.
- [11] Shahidi F, Naczk M. Phenolics in food and nutraceuticals [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [12] Zhang M W, Zhang R F, Zhang F X, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(13): 7580-7587.
- [13] Liu R H. Whole grain phytochemicals and health [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 207-219.
- [14] Chethan S, Malleshi N G. Finger millet polyphenols; Characterization and their nutraceutical potential [J]. *Am J Food Technol*, 2007, 2(7): 582-592.
- [15] Vanisha S N, Neha S, Mammen D, et al. Flavonoids and phenolic acids from pearl millet (*Pennisetum glaucum*) based foods and their functional implications [J]. *Functional Foods in Health and Disease*, 2012, 2(7): 251-264.
- [16] Kim J K, Park S Y, Yeo Y, et al. Metabolic profiling of millet (*Panicum miliaceum*) using gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC-TOFMS) for quality assessment [J]. *Plant Omics*, 2013, 6(1): 73-78.
- [17] Shobana S, Sreerama Y N, Malleshi N G. Composition and enzyme inhibitory properties of finger millet (*Eleusine coracana* L.) seed coat phenolics; Mode of inhibition of  $\alpha$ -glucosidase and pancreatic amylase [J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(4): 1268-1273.
- [18] Chethan S, Dharmesh S M, Malleshi N G. Inhibition of aldose reductase from cataracted eye lenses by finger millet (*Eleusine coracana*) polyphenols [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2008, 16(23): 10085-10090.
- [19] Devi P B, Vijayabharathi R, Sathyabama S, et al. Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber; A review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(6): 1021-1040.
- [20] Viswanath V, Urooj A, Malleshi N G. Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of finger millet polyphenols (*Eleusine coracana*) [J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(1): 340-346.
- [21] 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.
- [22] N'Dri D, Mazzeo T, Zaupa M, et al. Effect of cooking on the total antioxidant capacity and phenolic profile of some whole-meal African cereals [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(1): 29-36.
- [23] El-Alfy T S, Ezzat S M, Sleem A A. Chemical and biological study of the seeds of *Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter [J]. *Natural Product Research*, 2012, 26(7): 619-629.
- [24] Pradeep S R, Guha M. Effect of processing methods on the nutraceutical and antioxidant properties of little millet (*Panicum sumatrense*) extracts [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1643-1647.
- [25] Watanabe M. Antioxidative phenolic compounds from Japanese barnyard millet (*Echinochloa utilis*) grains [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(11): 4500-4505.
- [26] Sartelet H, Serghat S, Lobstein A, et al. Flavonoids extracted from fonio millet (*Digitaria exilis*) reveal potent antithyroid properties [J]. *Nutrition*, 1996, 12(2): 100-106.
- [27] He X J, Liu D, Liu R H. Sodium borohydride/chloranil-based assay for quantifying total flavonoids [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(20): 9337-9344.

- [28] Coulibaly A, Kouakou B, Chen J. Phytic acid in cereal grains: Structure, healthy or harmful ways to reduce phytic acid in cereal grains and their effects on nutritional quality [J]. *Am J Plant Nutr Fertiliz Technol*, 2011, 1: 1-22.
- [29] Azeke M A, Egielewa S J, Eigbogbo M U, et al. Effect of germination on the phytase activity, phytate and total phosphorus contents of rice (*Oryza sativa*), maize (*Zea mays*), millet (*Panicum miliaceum*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(6): 724-729.
- [30] 周会会, 朱科学, 彭伟, 等. 小麦中植物化学物的研究进展 [J]. *粮食与食品工业*, 2012, 19(1): 41-44, 48. Zhou H H, Zhu K X, Peng W, et al. Research progress of phytochemicals in wheat [J]. *Cereal and Food Industry*, 2012, 19(1): 41-44, 48. (in Chinese)
- [31] 韩军花, 杨月欣, 冯妹元, 等. 中国常见植物食物中植物甾醇的含量和居民摄入量初估 [J]. *卫生研究*, 2007, 36(3): 301-305. Han J H, Yang Y X, Feng M Y, et al. Analysis of phytosterol contents in Chinese plant food and primary estimation of its intake of people [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2007, 36(3): 301-305. (in Chinese)
- [32] Albert A B, Savarimuthu I, Gabriel M P, et al. Chemopreventive potential of  $\beta$ -sitosterol in experimental colon cancer model-an *in vitro* and *in vivo* study [J]. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 2010, 10(1): 24.
- [33] Loizou S, Lekakis I, Chrousos G P, et al.  $\beta$ -sitosterol exhibits anti-inflammatory activity in human aortic endothelial cells [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2010, 54(4): 551-558.
- [34] 李建文, 杨月欣. 膳食纤维定义及分析方法研究进展 [J]. *食品科学*, 2007, 28(2): 350-355. Li J W, Yang Y X. Review in defining dietary fiber and analysis methods [J]. *Chinese Food Science*, 2007, 28(2): 350-355. (in Chinese)
- [35] Chandrasekara A, Shahidi F. Antioxidant phenolics of millet control lipid peroxidation in human LDL cholesterol and food systems [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2012, 89(2): 275-285.
- [36] Chandrasekara A, Shahidi F. Antiproliferative potential and DNA scission inhibitory activity of phenolics from whole millet grains [J]. *Journal of Functional Foods*, 2011, 3(3): 159-170.
- [37] Banerjee S, Sanjay K R, Chethan S, et al. Finger millet (*Eleusine coracana*) polyphenols: Investigation of their antioxidant capacity and antimicrobial activity [J]. *African Journal of Food Science*, 2012, 6(13): 362-374.
- [38] Yallanki S, Ramesh B K, Shaik A N, et al. Antihyperglycemic and hypolipidemic activities of *Setaria italica* seeds in STZ diabetic rats [J]. *Pathophysiology*, 2011, 18(2): 159-164.
- [39] Jain S, Bhatia G, Barik R, et al. Antidiabetic activity of *Paspalum scrobiculatum* Linn. in alloxan induced diabetic rats [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2010, 127(2): 325-328.
- [40] Lee S H, Chung I M, Cha Y S, et al. Millet consumption decreased serum concentration of triglyceride and C-reactive protein but not oxidative status in hyperlipidemic rats [J]. *Nutrition Research*, 2010, 30(4): 290-296.
- [41] 冀立霞, 申竹芳. 糖性白内障渗透性膨胀期相关机制的研究进展 [J]. *中国药理学通报*, 2009, 25(4): 421-424. Ji L X, Shen Z F. The genes related with the osmotic expansion in sugar cataract [J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2009, 25(4): 421-424. (in Chinese)
- [42] Anoma C, Marian N, Fereidoon S. Effect of processing on the antioxidant activity of millet grains [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(1): 1-9.
- [43] Subba R M V S S T, Muralikrishna G. Evaluation of the antioxidant properties of free and bound phenolic acids from native and malted finger millet (ragi, *Eleusine coracana* Indaf-15) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(4): 889-892.
- [44] Rao R S P, Muralikrishna G. Water soluble feruloyl arabinoxylans from rice and ragi: Changes upon malting and their consequence on antioxidant activity [J]. *Phytochemistry*, 2006, 67(1): 91-99.
- [45] Saleh A S M, Zhang Q, Chen J, et al. Millet grains: Nutritional quality, processing, and potential health benefits [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2013, 12(3): 281-295.