

高粱酚类化合物研究进展

杨玲¹, 袁辉², 郭旭凯¹, 段冰¹, 郭睿¹, 邵强¹, 柳青山¹

(1. 山西省农业科学院高粱研究所, 山西 晋中 030600; 2. 山西大同大学, 山西 大同 037009)

摘要:植物多酚因其具有多种保健功能已成为食品营养学的研究热点之一。高粱中含有种类丰富的植物多酚, 特别是中国高粱的一些品种, 其外种皮富含原花青素和花青素类多酚, 但国内相关研究相对匮乏。本文综述了高粱多酚在人类健康中的作用, 以及高粱多酚结构方面的相关研究进展, 旨在为高粱品种的选育和深加工研究提供借鉴。

关键词:高粱; 多酚; 原花青素; 花青素; 抗氧化活性

中图分类号: S514

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)03-0138-04

Research Progress of Phenolic Compounds in Sorghum

YANG Ling¹, YUAN Hui², GUO Xukai¹, DUAN Bing¹, GUO Rui¹, SHAO Qiang¹, LIU Qingshan¹

(1. Sorghum Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Jinzhong 030600; 2. Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract: Plant polyphenols have become a research hotspot in food nutrition. Sorghum is rich in plant polyphenols, especially some varieties of Chinese sorghum, whose outer seed coat is rich in proanthocyanidins and anthocyanidins polyphenols, but the relevant domestic research is relatively scarce. This paper summarizes the role of sorghum polyphenols in human health and the related research progress of the structure analysis of sorghum polyphenols, which is of great significance to the selection and processing of sorghum cultivars.

Key words: Sorghum; Polyphenol; Procyanidins; Anthocyanin; Antioxidant activity

高粱[Sorghum bicolor (L.) Moench]是继小麦、水稻、玉米和大麦之后世界第五大谷类作物, 其籽粒富含淀粉、蛋白质和矿物质等营养成分^[1], 同时相比其他谷物表现出更强的环境耐受性和经济性。高粱籽粒含有丰富的营养物质, 在非洲、亚洲和其他半干旱地区主要作为粮食食用, 在美国、澳大利亚等西方发达国家则主要用于饲料、酒精和工业产品。高粱籽粒还含有多种化学成分, 如多酚类化合物、植物甾醇、高级烷醇和脂^[2], 尽管谷物中酚类化合物的种类十分丰富, 含量也高, 但目前植物多酚作为功能性食品资源的研究仍主要集中在果蔬和茶叶方面, 对于谷物多酚尤其是高粱多酚的研究相对缺乏, 高粱作为营养和功能食品在深加工方面的研究也非常有限。研究表明, 高粱中的化学成分尤其是酚类物质同样具有很强的生物学活性, 具有较大的开发潜力。本文从高酚的开发与利用提供依据。

收稿日期: 2019-09-09

基金项目: 山西“农谷”研发专项(yx2018209); 国家现代农业产业技术体系(CARS-06-13.5-A30)

作者简介: 杨玲(1970-), 女, 副研究员, 从事杂粮加工研究。

1 高粱酚类物质的结构和含量

1.1 原花青素

高粱中的原花青素也称为缩合单宁, 是类黄酮的一个亚类, 为高粱中最重要的组成成分, 主要存在于含有单宁的高粱品种中, 这些品种中的单宁含量较高, 由S和Tannin I基因控制表达^[3]。并且几乎都是聚合型物质, 它们主要是黄烷-3-醇和/或黄烷-3,4-醇的聚合产物^[4-5], 通常高粱原花青素的聚合度(DP)可达10以上, 儿茶素(黄烷-3-醇)是高粱中最常见的单体^[6], 原花青素B₁是高粱中最常见的二聚体^[7]。这些在高粱中发现的单宁, 在其他植物中也同样可以被检测到^[8-10]。原花青素在高粱中的含量范围为0.2~68.0 mg/g, 在棕高粱和黑高粱籽粒中含量较丰富^[11]。研究表明高粱原花青素的含量及活性受季节影响, 因此, 在选育和培育高单宁高粱品种时, 需要考虑环境对单宁含量的影响。高粱原花青素的结构还含有很多不同的链接单元, 并且链接方式多样, 它的结构也许比我们已知的更为复杂。

1.2 酚酸

高粱中的酚酸主要以苯甲酸或肉桂酸的衍生物形式存在。与其他谷物一样,高粱中的酚酸也主要集中在麸皮上。在自然界中,花青素性质比较活泼,活泼的羟基通过结合各种单糖和双糖产生各种稳定花色苷,花色苷中的糖苷基团和游离的羟基团可被酰基化,形成酰基化的花色苷,其稳定性更好。这些可以酰基化花色苷的物质多为酚酸,如对羟基苯甲酸、咖啡酸、阿魏酸、对香豆酸等^[12],阿魏酸是高粱和其他谷类作物中含量最丰富的酚酸^[13]。另外,在高粱中也发现了很多其他种类的酚酸^[14],包括龙胆酸、水杨酸、丁香酸,原儿茶酸、和芥子酸等。高粱中酚酸的含量为135.5~479.40 $\mu\text{g/g}$ ^[15],主要为原儿茶酸(150.3~178.2 $\mu\text{g/g}$)和阿魏酸(120.5~173.5 $\mu\text{g/g}$),以及少量的对香豆酸(41.9~71.9 $\mu\text{g/g}$)、丁香酸(15.7~17.5 $\mu\text{g/g}$)、香草酸(15.4~23.4 $\mu\text{g/g}$)、没食子酸(14.8~21.5 $\mu\text{g/g}$)、咖啡酸(13.6~20.8 $\mu\text{g/g}$)、肉桂酸(9.8~15.0 $\mu\text{g/g}$)和对羟基苯甲酸(6.1~16.4 $\mu\text{g/g}$)。高粱酚酸与其他酚类物质(花青素或单宁)的存在和含量不相关,但是与没有色素的高粱种皮相比,含有色素的某些高粱种皮(含鞣质)中游离的酚酸含量较多。酚酸和其他酚类物质在植物防御害虫和病原体方面有相同的作用,并且通过体外抗氧化试验表现出良好的抗氧化活性^[16],所以酚酸也是高粱抗氧化活性的重要来源,特别是不含色素的白色高粱品种。

1.3 花青素

花青素在水果和蔬菜中的作用已有深入研究,包括高粱在内的大量谷物也含有此类成分。然而,谷物一般都当作主食被人们食用,大量花青素类化合物在磨粉过程中与麸皮一起被丢弃,所以关于谷物中的花青素类型和含量研究的较少。随着人们对健康食品研究的深入,发现某些高粱品种的全谷物面粉可以提供与果蔬相当或更高的体外抗氧化活性,种类也相似,其中矢车菊素、天竺葵素、芍药素、锦葵素、飞燕草素和牵牛花素是最常见的六种花青素^[17],这些花青素在高粱中都存在,不过在不同高粱品种中差异较大,在深红粒和黑粒品种中含量相对较高^[18-19]。高粱中普遍存在的花青素为3-脱氧花青素类化合物,这是一类稀有的植物色素,现在只能从高粱中获得。与广泛分布的花青素相比它们在C-3位缺少羟基,正因为如此3-脱氧花青素对光、热和pH的变化不敏感^[18],因此,高粱作为天然食品着色剂来

源具有很好的开发利用价值。关于3-脱氧花青素的生物利用和代谢途径还不是很清楚,一般认为这是高粱为保护种子免受紫外线辐射伤害而产生的化合物^[20]。目前已有研究表明,在高粱品种中存在较多的3-脱氧花青素为芹菜定和木樨黄定,另外也发现了芹菜定-5-葡萄糖苷、木樨黄定-5-葡萄糖苷和7-O-甲基芹菜定等^[21]。花青素性质活泼,因缺乏合适的标准、有效的提取溶剂和分离技术,限制了花青素的有效定量^[22]。目前还不确定实验分离得到的花青素是天然形式还是主要为溶剂改性的衍生物,高粱中各种花青素的结构和遗传学特性尚有待进一步研究。

1.4 其他酚类化合物

除了以上几类重要酚类化合物外,还从高粱中分离出几种其他酚类化合物,包括柚皮素、橙皮素、槲皮素和杨梅素,同时也发现了相对应的糖苷衍生物^[23-26]。相关实验还证实了紫杉叶素、木犀草素和7-O-甲基木犀草素在高粱中也有少量存在。谷物多酚中的木脂素是一类重要的酚类化合物,已经在许多其他谷物中被发现,但还没有相关实验证明高粱中也存在这类化合物。

2 高粱酚类物质的生物活性

高粱外种皮富含多种酚类物质,这些酚类物质具有很强的生物活性,如抗氧化、防癌抗癌、抑菌杀菌、抑制糖尿病、抗衰老、清除自由基和预防心脑血管疾病等功效,其独特的生物活性,对人类健康具有积极的作用。

2.1 抗氧化性

近年来,抗氧化这一理念出现在各种医疗、保健和护肤等产品上,人们对抗氧化、抗衰老的理解逐渐加强,此方面的研究日趋增多,抗氧化已成为健康领域的一大热门课题。植物多酚具有苯环结构,其在紫外光区具有较强的吸收效果,能够过滤自然光中的紫外光,减少紫外线对生物体的损害。大量研究表明,多酚物质的抗氧化能力与其结构相关^[27],由于多酚类物质含有酚羟基较多,是良好的氢供体,尤其是邻位的酚羟基结构十分容易被氧化生成醌类结构,游离出来的氢能够结合自由基形成稳定的自由基络合物,从而实现清除自由基的效果,同时还可以消耗环境中的氧,进一步阻断了自由基反应的进行。多酚可以与自由基生成相关的酶直接发生反应,阻断自由基的形成。推断其原因,可能与酚羟基螯合作为氧化酶激活剂的金属离子有关^[28-29]。在体外,高

梁多酚提取物具有很强的抗氧化活性。李歌等^[30]将高粱的抗氧化特性应用在防止油脂腐败方面。酿酒高粱籽粒含有丰富的酚类物质,这类物质也大量存在于多种中草药的提取物中,某些高粱品种黄酮含量较高,可以作为优质天然抗氧化剂新资源。万茵等^[31]研究发现酚类含量较少的白高粱也具有较好的抗氧化活性。

2.2 抗癌、抗肿瘤

受自然环境被破坏、人类饮食习惯改变及社会生活节奏加快等种种因素影响,癌症已成为全人类共同面临的最大健康问题。癌症发病率一直呈现增长趋势,关于抗癌、抗肿瘤的研究刻不容缓。大量研究发现,多酚类物质具有一定的抗癌、抗肿瘤作用,可以抑制肿瘤细胞生长。多酚的抗癌机理是多方面的,一方面,多酚能够在细胞癌变的不同阶段遏制癌细胞发育,从而起到抑制癌细胞生长的作用。另一方面,植物多酚类物质能够有效促进细胞染色体的自我修复功能,从而抑制细胞突变的发生。赵彬^[32]以高粱、荞麦、大麦、水稻、小麦五种全谷物为原材料,对其酚类化合物的组成、抗氧化性和抗癌细胞增殖活性进行初步研究,并系统地研究高粱酚类化合物(Phenolic compounds from Sorghum, SP)的抗人结肠癌 Caco-2 细胞增殖活性及其分子机制。结果发现 SP 具有抗 Caco-2 细胞增殖作用,并且存在时间和剂量依赖关系;SP 能够通过诱导 Caco-2 细胞凋亡从而起到抗 Caco-2 细胞增殖作用。

2.3 抑菌、抗病毒

植物多酚对细菌、真菌和病毒都有良好的抑制效果。研究表明,植物多酚抑菌机理可能与多酚对金属离子以及蛋白质的络合有关,通过络合效应可以结合细胞膜蛋白从而抑制蛋白酶,使细胞膜失活。陈华敏^[33]发现从高粱麸中分离纯化的 8-羟基咪喃香豆精和 5-羟基-4',6,7-三甲氧基黄酮有潜在的抗炎特性。此外,植物多酚在防治龋齿方面的研究也获得了良好的效果。现阶段,国内对植物多酚抑菌和抗病毒方面的研究主要集中在葡萄籽和茶多酚上,高粱中多酚的结构与其相似,且含量丰富,具有潜在的替代作用。

2.4 抑制糖尿病、预防心血管疾病

我国研究人员在利用高粱多酚对糖尿病进行辅助治疗和预防心血管疾病方面取得了一定的进展,陈华敏等^[34]研究发现经 AB-8 大孔树脂纯化后的高粱糠中酚类物质可以保护人血红细胞免受 AAPH 损伤;申迎宾等^[35]研究发现辽甜 1 号高粱的

全谷物粉可显著提高血清和肝脏中 T-AOC 水平、CAT 酶活性、GSH-Px 酶活性($P<0.5$),同时显著降低丙二醛水平($P<0.5$),对肝脏有保护作用,但对心脏组织无显著影响。国外学者发现高粱单宁即使在相对低的水平,也可以通过改变淀粉性质极大地影响淀粉的消化率,从而有益于糖尿病人^[36-37]。尚凯宁等^[38]研究发现,高粱单宁与小麦蛋白络合形成了难以被消化酶水解的络合物,从而降低了小麦蛋白的体外消化率。

3 植物多酚提取研究

植物多酚主要有溶剂萃取、超声波辅助提取、沉淀萃取以及超临界流体萃取等提取方法。高粱多酚的提取主要采用溶剂萃取和超声波辅助提取,沉淀萃取和超临界流体萃取很少采用。

3.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法是最简单、应用范围最广的多酚提取方法。根据相似相容原理,提取剂通常是与待提取多酚极性相似的有机溶剂。常见的提取溶剂有甲醇、乙醇、丙酮、水、石油醚等。除极性以外,提取过程中的 pH 值、温度、提取时间也对多酚的提取效果有一定的影响。

3.2 超声波辅助提取法

超声波辅助提取可以有效提高多酚的提取效率,近年来超声波提取工艺广泛应用在植物多酚的提取上,具有成本低、效率高、方便实用等特点。在超声波提取过程中,溶剂在仪器的超声波作用下产生“空化效应”,即空化泡在超声波的作用下震动,当压力达到一定程度时就会爆破,爆破产生的巨大压力会使植物的细胞壁破碎,导致植物液泡中的成分外流,提取更加充分。另外,超声波引起的震动能够增加溶剂和溶质分子之间的运动,使提取更加充分。

3.3 沉淀萃取法

沉淀萃取法的实质是一种多酚的分级方法,将提取后的粗多酚中加入铝、锌、钙、汞等金属离子,使之与多酚络合产生沉淀,将沉淀用酸溶解,再用有机溶剂将多酚萃取出来。

3.4 超临界流体萃取法

超临界流体萃取技术是将超临界流体作为萃取剂,把一种成分(萃取物)从混合物(基质)中分离出来的技术。从 20 世纪 60 年代起广泛应用于天然有机产物的提取。最常用的超临界萃取剂为二氧化碳,同时也可以二氧化碳中夹带水、甲醇、乙醇或丙酮等增加萃取效率。由于二氧化碳

的性质不活泼,使用过程中也较为安全,所以近年来二氧化碳作为理想的萃取剂广泛应用于植物多酚的提取。

4 结 语

综合当前的研究状况,由于不同高粱品种中含有的化学成分不同,特别是多酚类物质,因此有必要建立一种专属性强的方法分析其中的特征性成分,以区分高粱不同品种中多酚的种类,这对高粱品种的选育及高粱加工具有十分重要的意义。中国高粱品种多样,富含酚类等对人体健康有益的植物化学成分,可以作为营养食品开发利用。随着相关科学研究的深入,富含原花青素和花青素的高粱品种未来将成为保健品功效成分提取的重要原料。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Piironen V, Toivo J, Lampi A M. Plant sterols in cereals and cereal products [J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(1): 148-154.
- [3] Hahn D H, Rooney L W. Effect of genotype on tannins and phenols of sorghum [J]. Cereal Chemistry, 1986, 63: 4-8.
- [4] Awika J M, Rooney L W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health [J]. Phytochemistry, 2004, 65(9): 1199-1221.
- [5] Wu Y, Li X, Xiang W, et al. Presence of tannins in sorghum grains is conditioned by different natural alleles of *Tannin1* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(26): 10281-10286.
- [6] Awika J M, Dykes L, Gu L, et al. Processing of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products alters procyanidin oligomer and polymer distribution and content [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(18): 5516.
- [7] Gujer R, Magnolato D, Self R. Glucosylated flavonoids and other phenolic compounds from sorghum [J]. Phytochemistry, 1986, 25(6): 1431-1436.
- [8] 张璐,潘佩佩,陈赛贞. RP-HPLC法同时测定原花青素中儿茶素、表儿茶素、没食子酸、原花青素B₂的含量[J].中国药科大学学报,2016,47(1):54-57.
- [9] 杨清山,张燕,连运河,等.葡萄籽、松树皮和花生衣提取物中原花青素成分研究[J].食品研究与开发,2017,38(10):159-164.
- [10] 陈洋,王冰,玉佳男,等. RP-HPLC-ESI-MS/MS分离鉴定花生红衣原花青素A型和B型二聚体[J].食品科学,2013,34(23):142-146.
- [11] 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.
- [12] 李金星,胡志和.蓝莓花青素的研究进展[J].核农学报,2013,27(6):817-822.
- [13] Adom K K, Liu R H. Antioxidant activity of grains [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(21): 6182-6187.
- [14] Wu G, Bennett S J, Bornman J F, et al. Phenolic profile and content of sorghum grains under different irrigation managements [J]. Food Research International, 2017, 97: 347-355.
- [15] Afify E M M, El-Beltagi H S, El-Salam S M A, et al. Biochemical changes in phenols, flavonoids, tannins, vitamins, β -carotene and antioxidant activity during soaking of three white sorghum varieties [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2012, 2(3): 203-209.
- [16] 梁文仪,陈文静,杨光辉,等.丹参酚酸类成分研究进展[J].中国中药杂志,2016,41(5):806-812.
- [17] 李敏.不同花青素提取物的组成、稳定性及抗氧化性比较研究[D].南京:南京财经大学,2013.
- [18] Dykes L, Rooney W, Rooney L W. Evaluation of phenolics and antioxidant activity of black sorghum hybrids [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(2):278-283.
- [19] Rocchetti G, Chiodelli G, Giuberti G, et al. Evaluation of phenolic profile and antioxidant capacity in gluten-free flours [J]. Food Chemistry, 2017, 228: 367-373.
- [20] Dykes L, Seitz L M, Rooney W L, et al. Flavonoid composition of red sorghum genotypes [J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 313-317.
- [21] Khoddami A, Mohammadrezaei M, Roberts T H. Effects of sorghum malting on colour, major classes of phenolics and individual anthocyanins [J]. Molecules, 2017, 22(10): 1713.
- [22] Lu Y, Foo L Y. Unusual anthocyanin reaction with acetone leading to pyranoanthocyanin formation [J]. Tetrahedron Letters, 2001, 42(7):1371-1373.
- [23] Jeon H S, Chung I M, Ma K H, et al. Analysis of Phenolic Compounds in Sorghum, Foxtail Millet and Common Millet [J]. Korean Journal of Crop Science, 2011, 56(4): 361-374.
- [24] Yang L, Allred K F, Dykes L, et al. Enhanced action of apigenin and naringenin combination on estrogen receptor activation in non-malignant colonocytes: implications on sorghum-derived phytoestrogens [J]. Food and Function, 2015, 6(3): 749-755.
- [25] Shen S, Huang R, Li C, et al. Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications [J]. Molecules, 2018, 23(5): 1203.
- [26] 张海容,王文艳.荧光法研究高粱红色素清除羟自由基活性[J].光谱学与光谱分析,2007,27(3):547-551.
- [27] Manikandan R, Sundaram R, Thiagarajan R, et al. Effect of black tea on histological and immunohistochemical changes in pancreatic tissues of normal and streptozotocin-induced diabetic mice (*Mus musculus*) [J]. Microscopy Research and Technique, 2010, 72(10): 723-726.
- [28] Larrauri J A, Sanchezmoreno C, Sauracallixto. Effect of temperature on the free radical scavenging capacity of extracts from red and white grape peels [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(7): 2694-2697.
- [29] Chen F, Cole P, Mi Z, et al. Corn and wheat-flour consumption and mortality from esophageal cancer in shanxi, (下转第149页)

清除率却强于ZPS-4且差异显著($P<0.05$)。分析已有报道,影响多糖抗氧化活性的因素除了糖醛酸含量,还有硫酸根含量^[12]、羟基数量、单糖组成、糖苷键的连接方式等^[10],故推测造成这一现象是这些其他因素作用的结果,有待于后续多糖结构的深入研究。相对于最低的DPPH·与·OH清除率,ZPS-4却表现出最高 $O_2^{\cdot-}$ 清除率,推测其可能含有较特殊的结构。

对于3个时期的粗多糖,发酵20 d的鲜辣椒粗多糖表现出最高的抗氧化活性,对3种自由基的清除能力多数情况都显著高于同浓度其他两个时期的粗多糖($P<0.05$),这与前述研究所得结果发酵20 d粗多糖所含多糖组分最多、酸性多糖含量最高相符,说明鲜辣椒的原料通过一定时间的发酵作用,其抗氧化活性增强。而继续发酵至40 d后,由于各组分多糖的降解,其抗氧化活性呈现下降趋势。

3 结 论

本研究对地方特色食品鲜辣椒发酵过程中的多糖组成及抗氧化活性进行了初步探讨,结果表明3个发酵时期的多糖组分变化不大,但各组分相对含量有差异。原料多糖中以中性多糖ZPS-1为主,而随着发酵时间的延续,ZPS-1下降明显,推测其可以被发酵体系中的微生物分解利用,而ZPS-N很可能是其分解的中间产物,进一步验证还有待于后续对各组分多糖结构的研究。发酵20 d的鲜辣椒酸性多糖含量最高。

抗氧化研究表明,发酵20 d的多糖组分,3种酸性多糖对自由基的清除能力均显著强于中性多糖,糖醛酸含量与抗氧化性呈现一定正相关,但它并不是唯一影响因素。对于粗多糖,发酵20 d时具有最高的抗氧化活性,这与发酵20 d鲜辣椒

多糖组分最丰富,且酸性多糖含量最高相关。由于按照农家做法,鲜辣椒腌制20 d时就已成熟可以食用,故基于其多糖的含量和活性分析,发酵20 d的鲜辣椒食用价值更高。本研究首次探究了鲜辣椒发酵过程中所含多糖组分和活性的变化,初步得出一定时间的发酵能增强其营养功效,为该传统特色食品营养价值的验证和推广奠定了基础。

参考文献:

- [1] 崔小利,王 薇,阚建全.鲜辣椒纯种发酵的菌株优选[J].食品科学,2014,35(21):149-153.
 - [2] 吴兰芳,蒋爱民,郑开颜,等.基于抗氧化活性的豆豉多糖提取工艺优化[J].食品研究与开发,2016,37(20):37-40.
 - [3] 李素红,王昭曦,姜晓坤,等.超声波辅助法提取玉竹多糖工艺优化研究[J].东北农业科学,2018,43(3):61-64.
 - [4] 张 钟,高红梅,叶林杰.玉米多糖的抗衰老作用[J].中国粮油学报,2017,29(7):18-21.
 - [5] 杨 萍,郑先哲.酶法提取黑甜糯玉米多糖技术初探[J].中国食品添加剂,2012(5):149-153.
 - [6] 何忠梅,管春红,李盛钰.植物乳杆菌C88联合短梗五加多糖抗疲劳作用[J].东北农业科学,2016,41(2):99-103.
 - [7] 王翠竹,张楠淇,王振洲,等.林下参片中总糖、还原糖及糖醛酸的含量测定[J].特产研究,2016,38(3):54-57.
 - [8] 薛丁萍,魏玉西,刘 淇,等.浒苔多糖对羟自由基的清除作用研究[J].海洋科学,2010,34(1):44-47.
 - [9] 刘 洋,郭宇星,潘道东.4种乳酸菌体外抗氧化能力的比较研究[J].食品科学,2012,33(11):25-29.
 - [10] 赵鹤鹏,许秋达,周鸿立.玉米须多糖中糖醛酸含量的测定及抗氧化作用的研究[J].河南工业大学学报,2017,38(4):81-85.
 - [11] 李景艳.乳酸菌胞外多糖的抗氧化活性及其结构[D].无锡:江南大学,2013.
 - [12] 熊双丽,李安林.酸性多糖的最新研究进展[J].食品科技,2010,35(5):80-83.
- (责任编辑:王丝语)
-
- (上接第141页)China[J].International Journal of Cancer,1993,53(6):902-906.
- [30] 李 歌,张 超,苏优拉,等.高粱糠乙醇提取物对4种植物油氧化稳定性的影响[J].食品工业科技,2017,38(3):118-121,126.
 - [31] 万 茵,李益珍,梁玉禧,等.谷物杂粮醇提物体外抑制黄嘌呤氧化酶的作用[J].中国食品学报,2018,18(5):29-36.
 - [32] 赵 彬.典型谷物酚类化合物的抗癌细胞增殖活性及其吸收转运的研究[D].镇江:江苏大学,2017.
 - [33] 陈华敏.高粱糠酚类物质的抗氧化和抗炎活性及模拟小肠吸收的研究[D].广州:华南理工大学,2018.
 - [34] 陈华敏,赖富饶,孙崇臻,等.高粱糠不同存在形态酚类物质的AB-8大孔树脂纯化及对红细胞氧化溶血的保护作用[J].现代食品科技,2017,33(9):63-70,19.
 - [35] 申迎宾.四种谷物多酚抗氧化、降血脂作用评价研究[D].无锡:江南大学,2016.
 - [36] Lemlioglu-Austin D,Turner N D,McDonough C M,et al.Effects of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] crude extracts on starch digestibility,estimated glycemic index (EGI),and resistant starch (RS) contents of porridges[J].Molecules,2012,17(12):11124-11138.
 - [37] Amoako D B,Awika J M.Polymeric tannins significantly alter properties and in vitro digestibility of partially gelatinized intact starch granule[J].Food Chemistry,2016,208:10-17.
 - [38] 尚凯宁,李 敏,刘永乐,等.高粱单宁对小麦蛋白体外消化率及其结构的影响[J].中国食品学报,2017,17(11):216-222.
- (责任编辑:王丝语)