

热加工过程对植物酚类物质结构、含量及 抗氧化活性影响研究进展

Advances in studies on the effects of thermal processing on the structure,
content and antioxidant activity of phenolic compounds in plants

马占倩^{1,2} 吴娜娜² 易翠平¹ 谭斌²

MA Zhan-qian^{1,2} WU Na-na² YI Cui-ping¹ TAN Bin²

(1. 长沙理工大学化学与食品工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国家粮食局科学研究院, 北京 100037)

(1. College of Chemistry and Food Science, Changsha University of Science and Technology,

Changsha, Hunan 410114, China; 2. Academy of State Administration of Grain, Beijing 100037, China)

摘要:文章综述了不同热加工过程对酚类物质结构与抗氧化活性的影响效应, 阐释已发现的主要问题, 瞻望接下来的重点探究思路。

关键词:加工过程; 植物活性物质; 酚类物质; 抗氧化活性

Abstract: The effects of different thermal processing processes on the structure and antioxidant activity of phenolic compounds was reviewed, and the main problems found were discussed in the present study. We looked forward to the next key ideas, and intended to provide a basis for the development and utilization of nutritious food.

Keywords: processing; plant actives; phenolics; antioxidant activity

植物酚类物质是自然存在的一类植物性化学成分, 具有对机体有益的抗氧化活性^[1]。然而, 这些植物性物质需经受不同加工方式处理方可食用。热处理是食品加工和保存中最常用的方法, 除影响食品保质期外, 还会影响食品感官、营养成分和植物化学物质等。热处理可以采取烘焙、蒸煮、挤压和微波加热等多种方式, 其处理程度、模式会改变酚类物质结构、含量及其抗氧化活性等, 从而使营养成分出现不同程度的损失改变食品品质。本文综述了蒸煮、焙烤、微波、挤压等几种常见的热加工方式。

1 植物酚类物质

植物酚类物质是一种芳香环化合物, 含有一个或多个羟

基。最常见的酚类物质有酚酸、类黄酮和花青素等, 结构组成分别如图 1、2 和表 1~3 所示。其中, 酚酸通常分两大类, 一类是从苯甲酸衍生出的含 7 个碳原子的物质, 包括没食子酸、香草酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、水杨酸等; 另一类是从肉桂酸衍生出的含 9 个碳原子的物质, 包括肉桂酸、阿魏酸、咖啡酸、*P*-香豆酸等。类黄酮是由 2 个或 2 个以上芳香环组成的化合物, 每个芳环都有一个或多个由碳桥连接的酚羟基, 大多数黄酮类物质含有苯二烯的结构^[4]。花青素是类黄酮物质中的一种, 是由植物合成的次生代谢产物, 具有封闭三碳桥的双酚结构($C_6-C_3-C_6$), 但其吡喃环的氧所带正电荷的形式与其他类黄酮不同^[5]。酚类物质在稻米、小麦、玉米及其他杂粮类谷物中的含量较为丰富, 尤其是在种皮部位^[6]。酚类物质以自由态、可溶共轭态和结合态等形式存在, 且以结合态为主^[7]。

2 热加工方式对植物酚类物质的影响

文献[8]表明, 热加工可以不同程度地改变分子内部结构、增加或降低酚类物质含量, 并影响其抗氧化活性, 且不同

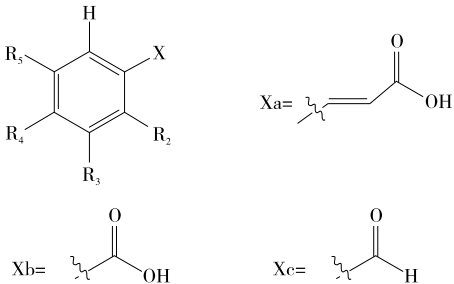


图 1 植物中常见酚酸化合物的基本结构图^[2]

Figure1 Basic structure of common phenolic compounds in plants^[2]

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(编号:2017YFD0401103); 国家自然科学基金项目(编号:31501524)

作者简介:马占倩, 女, 长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:易翠平(1973—), 女, 长沙理工大学教授, 博士。

E-mail: yicp963@163.com

谭斌(1972—), 男, 国家粮食局科学研究院研究员, 博士。

E-mail: tb@chinagrains.org

收稿日期: 2018-07-02

表 1 植物中常见的酚酸化合物^[2]

Table 1 Phenolic acid compounds commonly found in plants ^[2]						
R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	X	代码	名称
H	H	H	H	a	1	肉桂酸
—OH	H	H	H	a	2	<i>O</i> -香豆酸
H	H	—OH	H	a	3	<i>P</i> -香豆酸
H	—OH	H	H	a	4	<i>m</i> -香豆酸
H	—OCH ₃	—OH	H	a	5	阿魏酸
H	—OCH ₃	—OH	—OCH ₃	a	6	芥子酸
H	—OH	—OH	H	a	7	咖啡酸
H	H	H	H	b	8	苯甲酸
—OH	H	H	H	b	9	水杨酸
H	H	—OH	H	b	10	对羟基苯甲酸
H	—OH	—OCH ₃	H	b	11	香草酸
H	—OH	—OCH ₃	—OCH ₃	b	12	丁香酸
H	—OH	—OH	H	b	13	原儿茶酸
—OH	H	H	—OH	b	14	龙胆酸
—OH	—OH	—OH	—OH	b	15	没食子酸
H	—OCH ₃	—OCH ₃	H	b	16	藜芦酸
H	—OCH ₃	—OH	—OCH ₃	c	17	丁香醛
H	—OCH ₃	—OH	H	c	18	香草醛

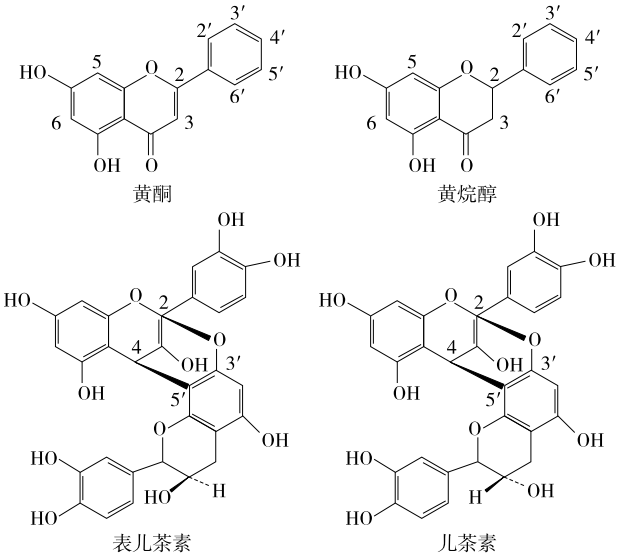


图 2 植物中常见黄酮化合物的基本结构^[3]

Figure 2 Basic structure of common flavonoid compounds in plants^[3]

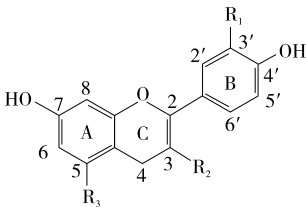


图 3 植物中常见花青素化合物的基本结构^[4]

Figure 3 Basic structure of common anthocyanins compounds in plants^[4]

表 2 植物中常见的花青素^[4]

Table 2 Anthocyanins commonly found in plants ^[4]			
花青素	R ₁	R ₂	R ₃
矢车菊素	OH	OH	
矢车菊素-3-葡萄糖苷	OH	<i>O</i> -β- <i>D</i> -glucose	OH
芍药色素-3-葡萄糖苷	OCH ₃	<i>O</i> -β- <i>D</i> -glucose	OH
矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷	OH	<i>O</i> -β- <i>D</i> -glucose	<i>O</i> -β- <i>D</i> -glucose

的热加工方式对不同种类或不同部位多酚的影响效果不同。分析原因可能包括食物基质中释放出的酚类物质聚合和氧化反应、热降解、高分子量酚醛物质的分解,比如浓缩丹宁和美拉德反应产物等^[9]。因此,明确不同加工方式处理后多酚结构、含量及抗氧化活性的变化情况是非常重要的,这与人体摄入的多酚品质及其在人体中的作用价值密切相关。

2.1 蒸煮处理

蒸煮处理是最常用的一种热加工方法,能显著影响多酚及其抗氧化活性,一般来说,蒸煮过程中酚类物质含量及抗氧化活性都有不同程度的降低,其原因可能是部分酚类物质自溶损失,或是蒸煮操作使酚类物质发生热降解,从而使分子键断裂或重组,改变分子结构^[9]。

2.1.1 蒸煮处理对植物酚类物质结构的影响 蒸煮植物性食物时,其酚类物质的贮存稳定性和降解速率会发生变化,研究^[10]表明蒸煮处理后,酚类物质将发生组成成分的降解或聚合,导致其结构的改变,或产生其他新物质,从而影响其性质。Yasunori 等^[3]发现对木瓜进行蒸煮处理后,提取的原花青素由淡黄色逐渐变为红色,分析原因可能是:① 表儿茶素亚基在热处理过程中减少,但花青素却增加;② 形成了不会被硫酸化降解的新物质;③ 因亚油酸发生过氧化现象,由 1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)、福林酚和 FRAP 方法评价的抗氧化活性增强。该试验还发现,木瓜产品的红色着色主要是由于原花青素的光谱(即结构)变化形成氧化原花青素,并增强了抗氧化活性和抗流感病毒活性。同样 Hiemori 等^[11]用 HPLC-MS 分析技术观察黑米花青素在蒸煮过程中结构的变化,结果如图 4 所示,发现蒸煮过程使黑米花青素产生氨基-3-葡萄糖苷的热降解和原儿茶酸的伴随产物。

Daskalaki 等^[12]利用 HPLC-MS 技术研究发现煮沸(100 ℃,2 h)使橄榄油酚类物质氧化,产生酯醇和羟基酯醇衍生物。研究^[13]报道采用反向液相电喷雾串联飞行时间质谱技术测定荞麦粉在蒸煮过程中对酚类物质的热处理效果,发现酚类物质发生热降解,并产生了儿茶素、表儿茶素和原花色苷等的衍生物及异构体,从而导致加工过程中其抗菌性及抗氧化活性产生退化现象,产生一定的负面影响。

2.1.2 蒸煮处理对植物酚类物质含量及抗氧化活性的影响

蒸煮处理对植物酚类物质含量及抗氧化活性均会产生一定的影响,比如有研究^[14-15]发现采用高温煮制苦荞,不仅会降低苦荞总酚、总黄酮和芦丁含量,同时也会使抗氧化活

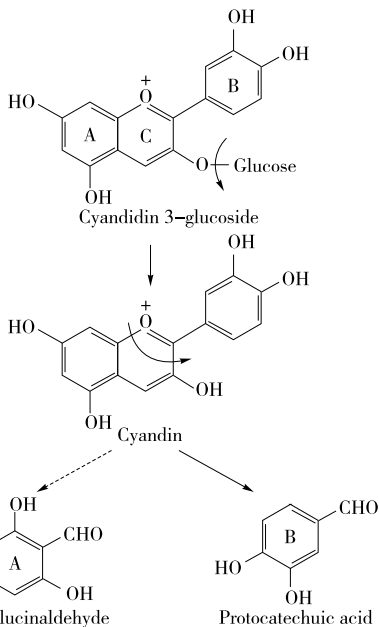


图 4 黑米中花青素-3-葡萄糖苷的热降解示意图
Figure 4 Schematic of the thermal degradation of cyanidin-3-glucoside in black rice

性降低,继续复合高压处理会更显著降低。一些研究还提出在煮制过程中糙米和糙米米糠总酚含量和抗氧化活性均降低。Ahmed 等 选用 10,20,30 min 3 个加热时间点,结果显示蒸制能降低葫芦果酚类物质的含量与抗氧化活性,且两者均随加热时间增加而降低。另外,有学者 蒸制处理了草莓、樱桃、杏、无花果、苹果和橘子,结果发现这 6 种水果的总酚含量和抗氧化活性同样都下降了。综上,在进行蒸煮处理时,加热过长时间会导致酚类物质等活性成分发生降解。

相反,也有蒸煮可以使植物多酚含量和抗氧化活性有所提高的报道。因为蒸煮处理可能会促进酚类物质分子间的相互作用,从而促进游离酚或结合酚的释放,进而使多酚含量或抗氧化活性提高。有学者 发现在大气压蒸制条件下,藜麦中总酚含量及抗氧化活性均有所上升。Bamidele 等 选取 0,5,10,15 min 4 个热烫时间处理 5 种蔬菜,结果表明热烫 5 min 使蔬菜总酚含量和抗氧化活性均显著增加。除此之外,多酚含量和抗氧化活性的提高还可能和植物本身性质等有关系,不同的植物受蒸煮处理的影响效果可能有很大差异。

由此可以看出,蒸煮过程中多酚含量及其抗氧化活性能有一定程度的提高或降低。推测可能的原因:① 酚类物质在蒸煮过程当中,发生热分解、自聚合和氧化;② 大分子多酚的解离;③ 酚类物质在水中自溶;④ 蛋白质等大分子与酚类物质产生交联结构等。总之,蒸煮处理对酚类物质及其抗氧化活性的影响效果不同,这和植物的种类、生长环境以及蒸煮条件等相关。

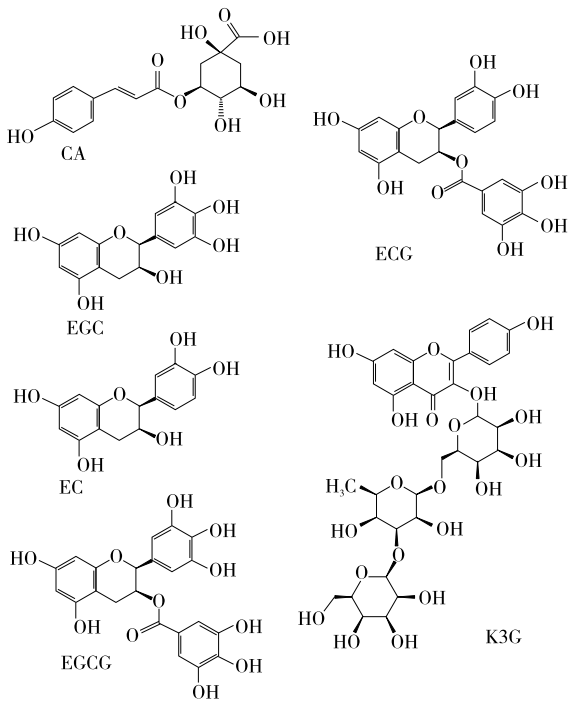
2.2 焙烤处理

焙烤也是日常生活中较为常用的热处理方式,加工程序通过激活抗营养因子,可以提高食品的风味和适口性,提高其营养的生物利用率,从而深受人们的喜爱。但是,焙烤过

程也会影响食品中酚类物质的品质。

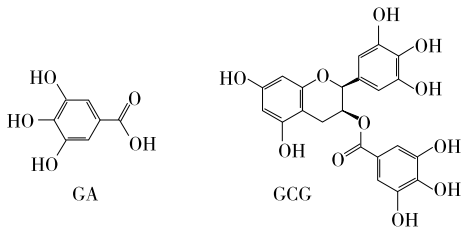
2.2.1 焙烤处理对植物酚类物质结构的影响 有研究 运用气相-质谱联用技术(GC-MS)发现铁观音茶在焙烤过程中,主要的儿茶素衍生物和黄酮醇苷都被分解[图 5(a)],而没食子酸和没食子儿茶素-3-没食子酸酯[图 5(b)]明显积累,分析可能是用相对较高的温度处理,伴随着重复烘焙,挥发性成分发生分解和新产物的转化。同样,Kuo 等 也发现乌龙茶在焙烤过程中,一些直链烷烃和酚酸同样被分解,并伴随一些含氮杂环化合物,如吡咯衍生物的产生,同样可能是发生了新的分解转化(图 6,7)。

综上所述,在目前的研究中,烘焙处理对酚类物质结构的改变方面并没有太多很清晰的报道;相对而言,更多文献报道偏向于研究焙烤有很大的潜力能够释放相关的酚类化合物,可能与多酚的热降解效应导致酚羟基基团的断裂和美拉德反应产物的形成相关,今后需对该方面进行更深度的分析。



CA. 3-对香豆酰奎宁酸 ECG. 表儿茶素没食子酸酯 EGC. 表没食子儿茶素 EC. 表儿茶素 EGCG. 表没食子儿茶素没食子酸酯 K3G. 山奈酚-3-O-葡萄糖基三杨基葡萄糖苷

(a) 含量降低的主要酚类物质



GA. 没食子酸 GCG. 没食子儿茶素-3-O-没食子酸酯

(b) 含量升高的主要酚类物质

图 5 铁观音酚类化合物的化学结构
Figure 5 Chemical structure of Tieguanyin phenolic compounds

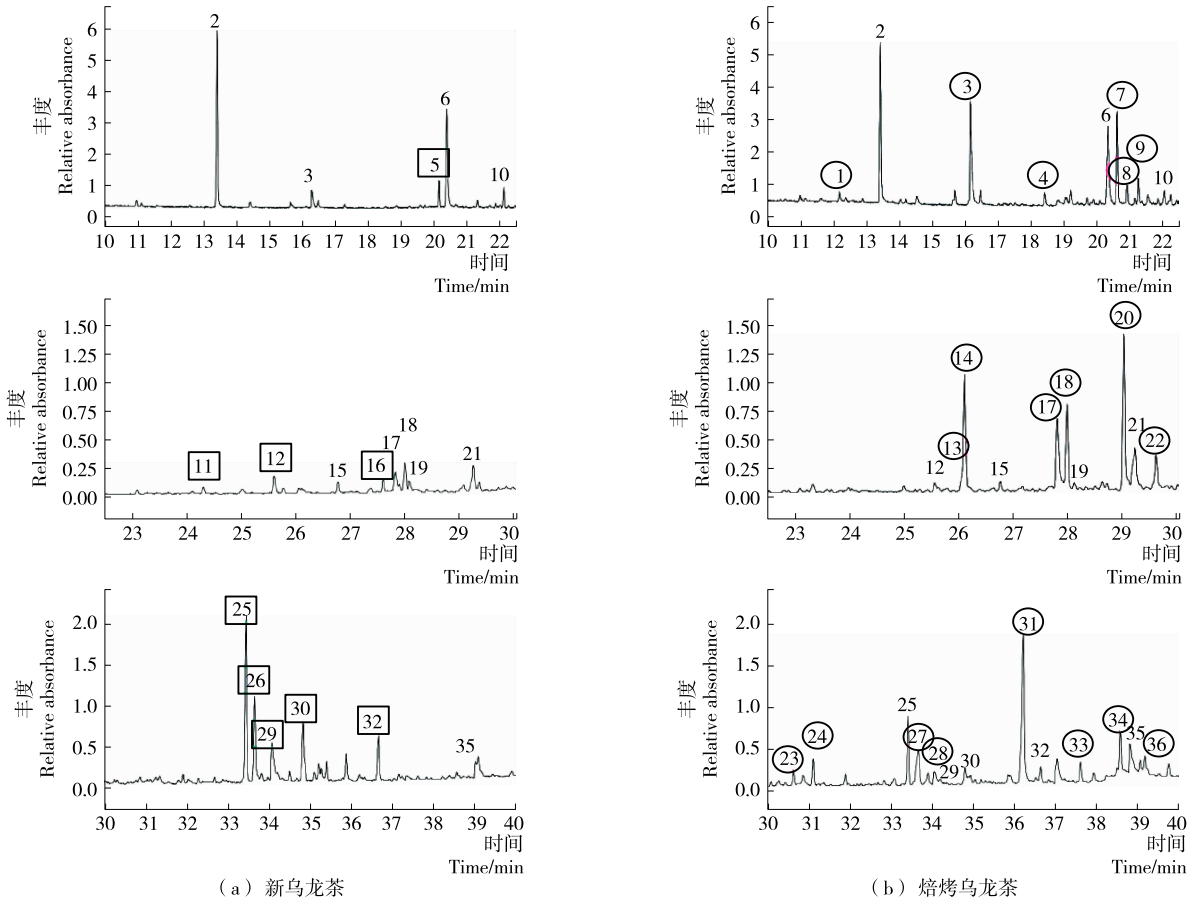


图 6 新鲜和经过焙烤后乌龙茶酚类物质的 GC/MS 色谱图^[25]
Figure 6 GC/MS chromatogram of fresh and baked Oolong tea phenolics^[25]

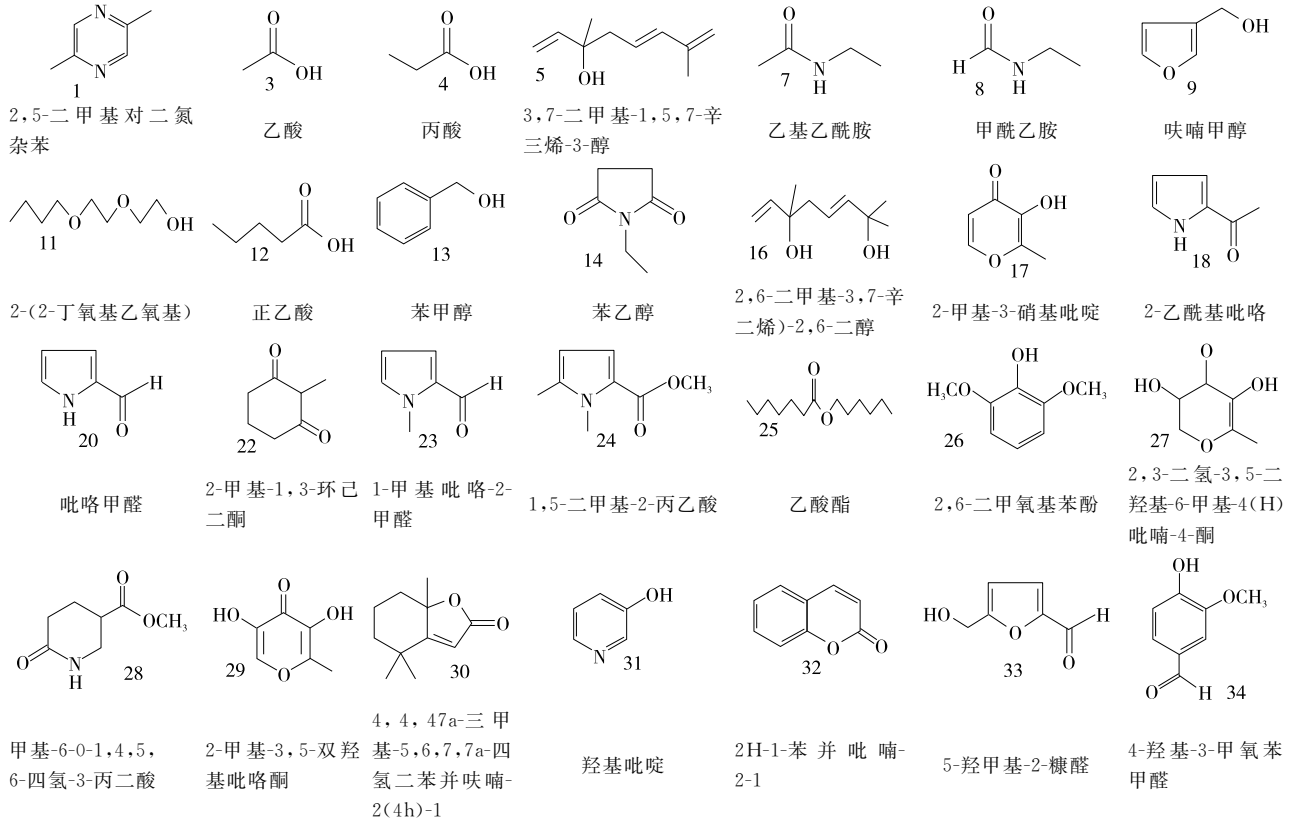


图 7 新鲜和经过焙烤后乌龙茶中所含不同化合物的化学结构^[25]
Figure 7 Chemical structure of different compounds contained in fresh and baked Oolong tea^[25]

2.2.2 焙烤处理对植物酚类物质含量及抗氧化活性的影响

正如 Thanonkaew 等^[16]研究焙烤(150 ℃ ± 2 ℃, 10 min)对泰国大米米糠酚类物质含量及抗氧化活性的影响,结果显示焙烤提高了米糠游离酚酸含量,并释放出更多衍生物,从而导致抗氧化活性的增加。Segev 等^[26]也得出类似的结果,发现焙烤能提高鹰嘴豆种子游离酚含量及其抗氧化活性,可能是焙烤使酚类物质进行选择分解和转化,部分结合酚转变为游离酚^[27]。同样有学者^[28]以白米焙烤面包为对照组,发现添加荞麦、大麦、燕麦以后所制作的面包多酚含量与抗氧化活性均有所提高。另外,酚类物质在焙烤过程中可能选择性地组成新物质,促进了抗氧化活性的提高。有报道^[29]称小麦和高粱的总多酚含量在烘焙时分别增加了 49% 和 20%,抗氧化活性也都有不同程度的提升。

但也有学者却得出相反的结论,如 Hihat 等^[30]研究焙烤法对香菜叶酚类物质含量和抗氧化性的影响,结果显示干燥过程降低了香菜叶总酚含量及其抗氧化活性,可能是焙烤抑制了香菜中不溶性黄酮类化合物的释放^[31]。另外,焙烤处理使杏仁核的酚类成分(总酚类、类黄酮、浓缩丹宁酸和酚酸)在初始阶段明显下降,之后随烘烤温度和持续时间的逐渐增加,抗氧化活性(DPPH、ABTS 自由基清除能力和铁离子还原能力)也明显下降,且美拉德反应产物随烘烤温度和持续时间的增加而增加^[32]。

由以上报道可知,焙烤处理能增加或降低酚类物质含量及其抗氧化活性,烘烤对酚类物质的影响依赖多种因素,包括酚类物质、烘烤配方和加热条件等。焙烤导致游离型酚的明显增加可能是由于共轭或结合酚类物质的释放,从而导致被束缚酚酸的减少。一般来说,烘焙是改善产品中酚酸生物可利用性的好方法,因为有限的酚酸生物可利用性太低,而任何游离型酚类物质的增加都会增加它们的生物活性。

2.3 微波处理

微波加热是一种较为温和的热空气加工方式,对多酚及抗氧化活性的影响与植物活性物质种类、微波条件等密切相关。微波过程中热空气被散发,使其渗入内部,增大分子孔径,促进酚类分子的挥发,分子的碰撞运动使分子键断裂,使多酚结构和组成发生一定的改变,改变抗氧化活性。

2.3.1 微波处理对植物酚类物质结构的影响 研究^[33]结果

表明,较温和的微波加热条件(高温短时间处理)有利于提高植物酚类物质的利用效果,可能与微波短时处理发生热降解和美拉德效应,促进多酚分子间的剧烈碰撞运动,打断酚羟基,使得分子结构产生重排和聚合效应有关,从而使其获得较高含量的酚类物质。

有报道^[34]发现微波加热能使大豆多酚发生热降解,并减小丙烯酰胺等污染物的危害。同样,Fazaeli 等^[35]利用 LC-MS 技术鉴定发现经微波处理后的石榴多酚提取物中主要的酚类物质[花青素 3,5-二葡萄糖苷(Cy3,5)、飞燕草素 3-葡萄糖苷(Dp3)、天竺葵素 3,5-二葡萄糖苷(Pg3,5)、花青素 3-葡萄糖苷(Cy3)、天竺葵素 3-葡萄糖苷(Pg3)和鞣花酸(Ea)]发生降解;但与传统加热方式处理相比,降解程度较低(图 8、表 3),这可能是微波高温处理使得分子结构发生裂解,该试验结论说明用微波代替传统的加热方法可以减少花青素的降解,更好地保留对机体有益的酚类物质。

2.3.2 微波处理对植物酚类物质含量及抗氧化活性的影响

有研究^[21,29,36]报道,微波加热苦瓜、小麦、高粱和荞麦能使总多酚含量和抗氧化活性显著降低。但也有学者^[16]提出不同观点,认为微波加热大米米糠,促进酚类物质与其他内

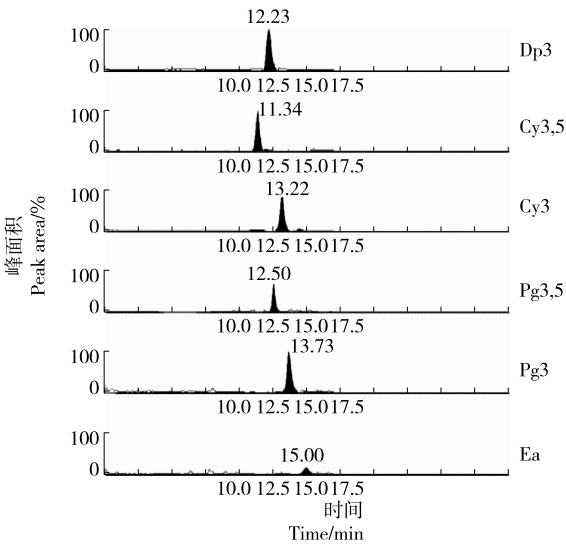


图 8 石榴提取物的离子色谱图^[36]

Figure 8 Extracted ion chromatograms of the analytes in pomegranate^[36]

表 3 高效液相色谱法测定石榴花青素含量^[36]

		花青素/(10 ⁻² mg · L ⁻¹)					总酚/ (mg · L ⁻¹)	鞣酸/ (10 ⁻² mg · L ⁻¹)
方法	压力/kPa	飞燕草素 3- 葡萄糖苷	花青素 3,5- 二葡萄糖苷	花青素 3- 葡萄糖苷	天竺葵素 3,5- 二葡萄糖苷	天竺葵素 3- 葡萄糖苷		
传统加热	7.3	4.88±0.02	5.08±0.01	2.87±0.01	1.37±0.02	0.51±0.003	14.71±0.32	0.30±0.001
	38.5	4.69±0.03	4.59±0.02	2.24±0.01	1.21±0.01	0.32±0.002	13.06±0.28	0.24±0.002
	100.0	3.78±0.02	4.33±0.02	1.80±0.03	0.64±0.01	0.31±0.004	10.87±0.41	0.21±0.001
微波	7.3	6.18±0.04	8.55±0.03	4.15±0.01	2.03±0.02	0.64±0.003	21.55±0.51	0.38±0.001
	38.5	5.22±0.02	8.02±0.04	4.73±0.02	1.34±0.03	0.52±0.005	19.83±0.45	0.39±0.002
	100.0	5.13±0.03	7.41±0.02	3.27±0.01	1.19±0.01	0.47±0.002	17.47±0.42	0.31±0.001

部分子间的相互协同作用,显著提高米糠总酚含量及其抗氧化活性,而 Hihat 等^[30]对香菜叶进行微波干燥,发现微波干燥叶片总酚和总黄酮含量均降低,但采用 ABTS 和 DPPH 分光光度法评价自由基清除活性观察抗氧化活性,发现使用微波技术时,能增加其抗氧化活性。

大部分现有研究主要集中于微波处理对植物酚类物质中抗氧化活性物质含量及其利用率,但对多酚结构影响的报道较少,不同种类间受微波影响的程度也有所不同,且微波处理较为单一化,可结合其他加工方式进行更深层次的研究。

2.4 挤压膨化处理

螺杆挤压膨化是一种将加热蒸煮与挤压成型两种作用有机地结合起来的新技术,短时高温高压会使食品质构发生转变,也会改变食品成分,甚至会促进食品成分间的相互作用。除此以外,挤压膨化处理也能影响植物多酚及其抗氧化活性。

2.4.1 挤压膨化处理对植物酚类物质结构的影响 挤压膨化过程使酚类物质受热和机械运动的影响,可能会导致多酚发生氧化降解和分子结构断裂。有研究^[37]采用 LC-MS 技术发现在某些挤压荞麦样品中,检测到了一些未经过挤压前样品中所没有的酚类物质,如 4-羟基苯甲酸、高香草酸,此结果可能表明挤压过程促使酚类物质分子发生重排和转换,从而形成新物质。Brennan 等^[38]提出高温挤压过程使大麦粉—红豆混合物酚类物质分子结构发生分解,从而导致活性降低或因某种程度的聚合作用导致可提取性降低。Khanal 等^[39]研究发现挤压是一种很有前途的加工工具,可以使原本不易被吸收的大分子量花青素降解,提高蓝莓中重要的单体和低含量的寡聚物含量,增强生物活性。如图 9 所示,HPLC-ESI-MS/MS 结果显示挤压加工使得蓝莓花青素解聚,产生花青素的单体、二聚体、三聚体、四聚体物质。

2.4.2 挤压膨化处理对植物酚类物质含量与抗氧化活性的影响 挤压膨化技术可以使植物酚类物质含量和抗氧化活性降低或增加。有报道^[37,40-42]研究表明挤压膨化过程降低了大麦、荞麦、小米、高粱和发芽糙米的总酚含量和抗氧化活性,并且在挤压膨化荞麦中,检测到 4-羟基苯甲酸、香草酸、儿茶素、阿魏酸、金丝桃苷等酚类化合物。Sarawong 等^[43]也发现香蕉样品经挤压后游离型和结合型酚类物质中的总酚含量和抗氧化活性均下降。分析可能是挤压过程中的高温会导致酚类物质分子结构的分解或改变,从而导致化学反应活性降低或可提取性降低等。但也有学者^[44]发现挤压加工能使大米—黑豆混合面团总酚含量从 29.80 mg GAE /100 g 提高至 77.3 mg GAE /100 g,抗氧化活性从 4.72 mg GAE /100 g 提高到 11.39 mg GAE /100 g。总酚含量的显著增加,可能是挤出的剪切作用导致结合型酚类物质的释放,而挤出对长聚多酚链也产生了解聚作用,从而提高了抗氧化活性。

由以上研究可知,挤压加工过程可能会显著提升植物酚类物质含量和抗氧化活性,可能与挤压膨化造成多酚羟基断裂、分子重排、促进与其他蛋白质和脂质分子间的相互作用

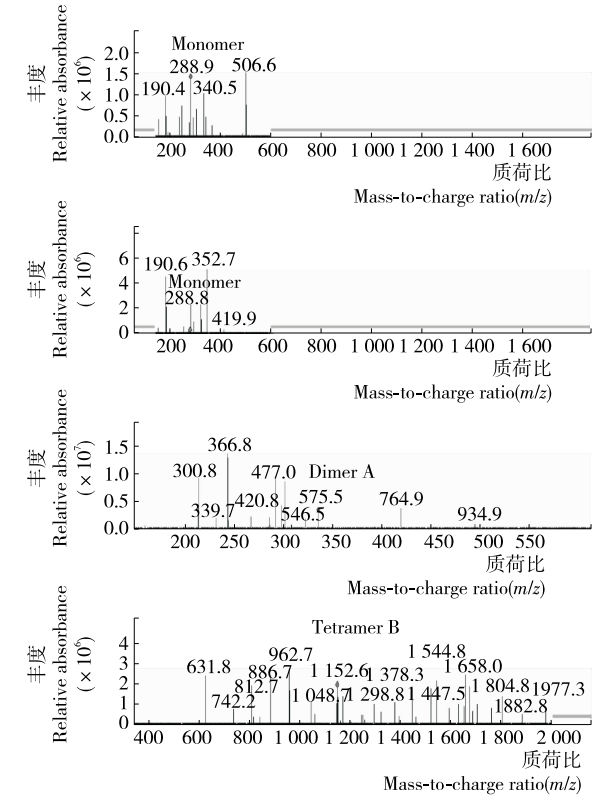


图 9 蓝莓中单粒和某些寡聚物花青素的复合质谱图^[16]
Figure 9 Compound mass spectra of monomeric and certain oligomeric procyanidins in blueberry^[16]

等多种因素有关。但多酚含量与抗氧化活性之间不一定都呈正相关,这与原料品种、挤压条件或检测方式也有关系^[45]。

3 展望

近年来,植物酚类物质受到越来越多的重视和开发,而研究热加工过程对酚类物质的影响作用更是一大热点方向,但依旧存在问题需要解决:

(1) 目前针对大多数多酚的研究主要集中在体外试验,而未对其进行相关体内抗氧化试验的探究,进行相关动物试验具有重要意义,包括酚类物质具体的代谢机制、代谢产物的鉴定、代谢产物的优缺点以及和肠道微生物的相互作用等,这部分内容日后还需进一步深入探究。

(2) 目前大多研究仅停留在热加工对多酚含量及性质的层次,以后可深入了解研究在加工过程中,酚类物质结构性质的变化,以及多酚对生物细胞及基因表达的影响机理。还可综合利用基因组学、蛋白质组学、营养遗传组学、代谢组学等新型手段对植物酚类物质体内抗氧化、糖脂调控、肠道保健机制和代谢进行研究。

(3) 在热加工过程中,应尽可能避免因蒸煮时间过长而导致酚类物质发生更多损失。在一定的试验条件下,烘焙、微波和挤压方式是改善植物酚类物质生物可利用性的有效方法,可以使产品更好地保留对机体有益的酚类物质。

参考文献

- [1] GONG Er-sheng, LUO Shun-jing, LI Tong, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of brown rice varieties[J]. Food Chemistry, 2017, 227(2): 432-443.
- [2] ROBBINS R J. Phenolic acids in foods; an overview of analytical methodology[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(10): 2 866-2 887.
- [3] HAMAUZU Y, KUME C, YASUI H, et al. Reddish coloration of Chinese quince (*Pseudocydonia sinensis*) procyanidins during heat treatment and effect on antioxidant and antiinfluenza viral activities[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2007, 55(4): 1 221-1 226.
- [4] OLAWOYE B, KADIRI O. Optimization and response surface modeling of antioxidant activities of amaranthus virides seed flour extract[J]. Annals, Food Science and Technology. 2016, 17(1): 114-123.
- [5] FLORES F P, SINGH R K, KONG F. Anthocyanin extraction, microencapsulation, and release properties during in vitro digestion[J]. Food Reviews International, 2016, 32(1): 46-67.
- [6] ZHANG Ming-wei, ZHANG Rui-fen, ZHANG Fang-xuan. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(13): 7 580-7 587.
- [7] WILLIAMSON G. Possible effects of dietary polyphenols on sugar absorption and digestion[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2013, 57(1): 48-57.
- [8] TI Hui-hui, ZHANG Rui-fen, LI Qing, et al. Effects of cooking and in vitro digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity[J]. Food Research International, 2015, 76 (Pt 3): 813-820.
- [9] KADIRI O. A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: Effects of cereal processing[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(1): 798-809.
- [10] ROBBINS J R. Phenolic acids in foods; an overview of analytical methodology [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(10): 2 866-2 887.
- [11] HIEMORI M, KOH E, MITCHELL A E. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(5): 1 908-1 914.
- [12] DASKALAKI D, KEFI G, KOTSIUO K, et al. Evaluation of phenolic compounds degradation in virgin olive oil during storage and heating[J]. Journal of Food & Nutrition Research, 2009, 48(1): 31-41.
- [13] VERARDO V, ARRAEZ-ROMAN D, SEGURA-CARRETERO A, et al. Determination of free and bound phenolic compounds in buckwheat spaghetti by RP-HPLC-ESI-TOF-MS: effect of thermal processing from farm to fork[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(14): 7 700-7 707.
- [14] FOWOMOLA M A, AKINDAHUNSI A A. Effects of fermentation on some antinutrients and nutrients contents of sandbox (*Hura crepitans*) seed[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2008, 6(2): 25-28.
- [15] 孙丹, 黄士淇, 蔡圣宝. 不同加工方式对苦荞中总酚、总黄酮及抗氧化性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 141-147.
- [16] THANONKAEW A, WONGYAI S, MCCLEMENTS D J, et al. Effect of stabilization of rice bran by domestic heating on mechanical extraction yield, quality, and antioxidant properties of cold-pressed rice bran oil (*Oryza sativa*, L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(2): 231-236.
- [17] YADAV R, YADAV B S, YADAV R B. Effect of heat processing treatments and extraction solvents on the phenolic content and antioxidant activity of momordica charantia fruit[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2017, 41(4): 130-137.
- [18] AHMED D, EJAZ N, SAEED R, et al. Cooking Effect on Anti-oxidative and Alpha-amylase Inhibitory Potential of Aqueous Extract of Lagenaria siceraria Fruit and its Nutritional Properties[J]. Free Radicals & Antioxidants, 2016, 6 (1): 44-50.
- [19] RABABAH T M, AL-MAHASNEH M A, KILANI I, et al. Effect of jam processing and storage on total phenolics, antioxidant activity, and anthocyanins of different fruits[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2011, 91(6): 1 096-1 102.
- [20] MARKOWSKI J, PLOCHARSKI W, MIESZCZAKOWSKA M. Effect of cultivar and processing on phenolics and antioxidant activity of apple products[J]. Acta Horticulturae, 2007, 744(744): 363-368.
- [21] NICKEL J, SPANIER L P, BOTELHO F T, et al. Effect of different types of processing on the total phenolic compound content, antioxidant capacity, and saponin content of *Chenopodium quinoa* Willd grains[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 139-143.
- [22] BAMIDELE O P, FASOGBON M B, ADEBOWALE O J, et al. Effect of Blanching Time on Total Phenolic, antioxidant activities and mineral content of selected green leafy vegetables[J]. Current Journal of Applied Science & Technology, 2017, 24(4): 1-8.
- [23] CHEN Ying-jie, KUO Ping-Chung, YANG Mei-lin, et al. Effects of baking and aging on the changes of phenolic and volatile compounds in the preparation of old Tieguanyin oolong teas[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 732-743.
- [24] KUO Ping-chung, LAI Yan-yu, CHEN Ying-jie, et al. Changes in volatile compounds upon aging and drying in oolong tea production [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2011, 91(2): 293-301.
- [25] SLADANA Z, TOLGAHAN K, JELENA V, et al. Effects of baking conditions and dough formulations on phenolic compound stability, antioxidant capacity and color of cookies made from anthocyanin-rich corn flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65(2): 597-603.
- [26] SEGEV A, BADANI H, GALILI L, et al. Effects of baking,

roasting and frying on total polyphenols and antioxidant activity in colored chickpea seeds[J]. Food & Nutrition Sciences, 2012, 3(3): 369-376.

[27] MIKULAJOVA A, KOHAJDOVA Z, NEMETH K, et al. Phenolic contents, antioxidant properties, and sensory profiles of wheat round rolls supplemented with whole grain cereals[J]. Acta Alimentaria, 2015, 44(1): 76-85.

[28] ABDEL-AAL E S M, RABALSKI I. Effect of baking on free and bound phenolic acids in wholegrain bakery products[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 312-318.

[29] GAVIRANGAPPA H, KRISHNAPURA S. Bioaccessibility of polyphenols from wheat (*Triticum aestivum*), sorghum (*Sorghum bicolor*), green gram (*Vigna radiata*), and chickpea (*Cicer arietinum*) as influenced by domestic food processing[J]. Agric. Food Chemistry, 2014, 62(3): 11 170-11 179.

[30] HIHAT S, REMINI H, MADANI K. Effect of oven and microwave drying on phenolic compounds and antioxidant capacity of coriander leaves[J]. International Food Research Journal, 2017, 24(2): 503-509.

[31] NUNES J C, LAGO M G, CASTELO-BRANCO V N, et al. Effect of drying method on volatile compounds, phenolic profile and antioxidant capacity of guava powders[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 881-890.

[32] LIN Jau-tien, LIU Shih-chun, HU Chan-chin, et al. Effects of roasting temperature and duration on fatty acid composition, phenolic composition, Maillard reaction degree and antioxidant attribute of almond (*Prunus dulcis*) kernel [J]. Food Chemistry, 2016, 190(1): 520-528.

[33] KHIZAR H, XIAOMING Z, UMAR F, et al. Effect of microwave treatment on phenolic content and antioxidant activity of citrus mandarin pomace[J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 423-429.

[34] ZILIC S, MOGOL B A, AKILLIOGLU G, et al. Effects of extrusion, infrared and microwave processing on Maillard reaction products and phenolic compounds in soybean[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2014, 94(1): 45-51.

[35] FAZAELI M, YOUSEFI S, EMAM-DJOMEH Z. Investigation on the effects of microwave and conventional heating methods on the phytochemicals of pomegranate (*Punica granatum*, L.) and black mulberry juices [J]. Food Research International, 2013, 50(2): 568-573.

[36] ZHANG Min, CHEN Hai-xia, LI Jin-lei, et al. Antioxidant properties of tartary buckwheat extracts as affected by different thermal processing methods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(1): 181-185.

[37] SABOVICS M, BEITANE I, KRUMINA-ZEMTURE G. Effect of germination and extrusion on the phenolic content and antioxidant activity of raw buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Agronomy Research, 2018, 16 (S2): 1 331-1 340.

[38] BRENNAN C, BRENNAN M, DERBYSHIRE E, et al. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(10): 570-575.

[39] KHANAL R C, HOWARD L R, BROWNMILLER C R, et al. Influence of extrusion processing on procyanidin composition and total anthocyanin contents of blueberry pomace[J]. Journal of Food Science, 2010, 74(2): H52-H58.

[40] ALTAN A, MCCARTHY K L, MASKAN M. Effect of extrusion process on antioxidant activity, total phenolics and β -glucan content of extrudates developed from barley-fruit and vegetable by-products[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(6): 1 263-1 271.

[41] PATIL S S, VARGHESE E, RUDRA S G, et al. Effect of extrusion processing on phenolics, flavonoids and antioxidant activity of millets[J]. International Journal of Food Fermentation Technology, 2016, 6(1): 177-184.

[42] CHALERMCHAIWAT P, JANGCHUD K, JANGCHUD A, et al. Antioxidant activity, free gamma-aminobutyric acid content, selected physical properties and consumer acceptance of germinated brown rice extrudates as affected by extrusion process[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(1): 490-496.

[43] SARAWONG C, SCHOENLECHNER R, SEKIGUCHI K, et al. Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour[J]. Food Chemistry, 2014, 143 (1): 33-39.

[44] RANI P, KUMAR A, PUROHIT S R, et al. Impact of fermentation and extrusion processing on physicochemical, sensory and bioactive properties of rice-black gram mixed flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89(1): 155-163.

[45] 赵广河, 张瑞芬, 苏东晓, 等. 全谷物酚类物质及其抗氧化活性研究进展[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 183-196.