

常见热加工方式对食源性活性成分影响的研究进展

谢 博*

海军勤务学院,天津 300450

摘要:食源性活性成分是来自食物并具有调节人体机能,促进人体健康的一类具有生物活性的物质,主要包括生物活性肽、多糖、多酚、黄酮类物质等。热加工方式会引起食源性活性成分在食品中变化,如降解、氧化、美拉德反应等。因此,根据其热稳定性选择合适的加工方式对其应用至关重要。本文在对生物活性肽、多糖、多酚、黄酮类物质进行分类叙述的基础上,综述了杀菌、焙烤、蒸煮三种热加工条件下四种食源性活性成分含量、活性、结构变化的研究进展,以期对其在食品领域的合理利用和食品加工方式的改进提供理论参考。

关键词:食源性活性成分;热加工方式;杀菌;烘焙;蒸煮;生物活性

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2023)8-1457-11

DOI:10.16333/j.1001-6880.2023.8.018

Effect of common thermal processing on food-derived active ingredients: a review

XIE Bo*

Naval Logistics Academy, Tianjin 300450, China

Abstract: Food-derived active ingredients are a kind of bioactive substances which come from food and can regulate human function and promote human health. They mainly include bioactive peptides, polysaccharides, polyphenols, flavonoids. Thermal processing can cause changes of food-derived active ingredients in food, such as degradation, oxidation, Maillard reaction. Therefore, it is very important to select suitable processing methods according to the thermal stability of food-derived active substances. Based on the classification of peptides, polysaccharides, polyphenols and flavonoids, in this paper, the research progress of the content, activity and structure of four kinds of food-derived active ingredients under three kinds of thermal processing conditions: sterilization, baking and cooking were reviewed, which will hopefully provide a theoretical rationale for the rational utilization of food-derived active ingredients in the food field and the improvement of food processing methods.

Key words: food-derived active ingredients; thermal processing method; sterilization; baking; cooking; bioactivity

食源性活性成分是指来源于食物并对于维持和调节机体正常的生命活动具有重要意义的生理活性成分^[1,2]。主要包括活性肽、多糖、多酚、黄酮类物质等天然活性产物。已有研究表明,来源于各种可食资源的活性成分具有抗氧化、抗衰老、抗疲劳、降血糖、消炎杀菌、增强免疫力等众多生物活性^[3-6]。因此,食源性活性成分被广泛应用于各类食品中。

然而,很多食源性活性成分的生物学性质和化学功能性不稳定,且水/油可溶性多变,在应用到食品中会面临高温、高压、辐射等众多复杂的加工环境,其性质变化必然成为加工过程中不可忽视的重

要因素。尤其是热加工,是改善食品品质,延长食品贮藏期的最有效且最广泛的方法之一。但长时间的高温以及水分等因素可能会引起生物活性成分分子结构重排、降解、氧化、聚集等,导致其理化性质和基础结构发生变化,降低它们的生物利用性和生物活性^[6,7]。热加工技术包括热杀菌技术、焙烤、煎炸、蒸煮等,方式不同会使活性物质的含量、结构和活性表现出不同的变化,从而对食品的营养特性影响也就不同。本文主要就热杀菌技术、焙烤、蒸煮对多肽、多糖、多酚、黄酮类化合物的影响进行综述,并提出亟待加强的研究方向,以期为研究者更好地探寻这四种化合物在食品加工过程中的量变规律和生物活性变化以及未来科学营养膳食中的应用奠定理论基础。

1 食源性活性成分

各种可食用资源是多肽、多糖、多酚、黄酮类化合物的良好来源。一些富含蛋白质的动物性食物,如牡蛎、阿胶、动物肝脏等,富含蛋白质的植物性食物,如玛咖、大豆、花生等均是活性肽的良好来源。与多肽相比,多糖的来源更为广泛,各种薯类、谷类

以及蔬菜水果、海鲜肉类都是它的来源,除此之外,木耳、蘑菇等食源性真菌食物,菊粉、茶树花、人参等新食品原料也可以作为多糖的来源。多酚与黄酮的来源主要是食源性植物性以及真菌类食物。而除了食物本身所含的活性成分外,各种食源性活性成分也已被广泛添加到了各种食品中(见表1)。

表1 食源性活性成分来源及应用

Table 1 Source and application of food-derived active ingredients

活性成分 Active ingredient	来源 Source	生物活性 Biological activity	食品中的应用 Application
生物活性肽 Polypeptide	各种富含蛋白质的动植物	抗氧化、抗衰老、抗疲劳、降血脂、促进钙吸收、抗菌等	抗菌漱口香糖 ^[8] 、多肽饮料 ^[9] 、香肠等肉制品 ^[10] 、婴幼儿乳制品
多糖 Polysaccharide	桑葚、枸杞、灵芝、黑木耳、香菇等食源性植物以及食源性真菌食物和鲍鱼、林蛙、牡蛎等食源性动物	免疫调节、抗肿瘤、降血糖、抗氧化、肠道菌群调节、抗辐射等	谷物制品 ^[11] 、肉脯、火腿等肉制品 ^[12] 、乳制品、速溶茶、保健酒等饮料 ^[13]
多酚 Polyphenol	葡萄、花生、桑葚、金银花、茶叶、咖啡、杏仁、浆果、花生、核桃等可食植物中	抗菌抗炎、抑制肿瘤、增强记忆、提高免疫、减肥、抑菌、治疗糖尿病等	作为护色剂、除臭剂、保鲜剂、食品添加剂 ^[14] 广泛应用到肉、谷乳等各类食品中
黄酮 Flavonoid	沙棘、大豆、木耳、杏鲍菇、地瓜、洋葱、蜂胶、野菊花、无花果、枸杞等食源性植物	抗癌、预防心血管疾病、抗细菌、抗病毒、抗氧化、消炎	常作为抗氧化剂、保鲜剂、甜味剂、天然色素、保健食品而被广泛应用 ^[15] ;酸奶 ^[16]

1.1 生物活性肽

生物活性肽是指少于100个氨基酸通过脱水缩合而成,且相对分子质量低于6 kDa的具有生物活性、对人体有益的肽类化合物,包括内源性活性肽和外源性活性肽^[3,17]。研究表明,多肽具有降血压^[18]、抗氧化^[19]、降血脂^[20]、增强免疫力^[21]、抗菌、抗疲劳^[22]、促进钙吸收^[23]等众多生物活性。其活性的产生主要与多肽链中疏水性氨基酸、碱性氨基酸以及芳香族氨基酸的数量、在碳链中所处的位置有关^[18,19]。生物活性肽来源于自然界,且作为多肽药物具有人源蛋白分子的结构,从而在人体中显示非常少的副作用,并且具有分子量小、易吸收等特点,因此,是理想药物的来源,同时也是生产更加安全的食品添加剂的天然资源宝库^[24]。

1.2 多糖

多糖是指由一种或多种单糖通过糖苷键连接而成,具有免疫调节和构成生命机体等重要作用的大分子碳水化合物^[25,26]。多糖的结构、构象以及组成单元、糖苷键类型等是影响多糖种类和功能的主要因素,根据组成单糖种类的不同可以分为同多糖和杂多糖^[26]。多糖因具有抗氧化^[27]、抗真菌^[28]、降血糖^[29]、抗疲劳^[30]、抗肿瘤^[31]等众多生物活性且具有无毒无害等优势,日益成为活跃在食品领域的“新

秀”。

1.3 多酚

多酚是指具有芳烃环及其羟基取代基结构的一类多元酚类次生代谢物,通常与糖或有机酸结合的形式,或者以未结合的低聚物形式存在于各种可食植物中^[32]。基于多酚化学结构的复杂性,可以将其分为黄酮类化合物和非黄酮类化合物;根据结构可分为多酚单体和多酚低聚体或多酚多聚体^[33]。目前研究较多的多酚有茶多酚、花青素以及酚酸、白藜芦醇、类黄酮等。研究表明,多酚类物质具有抑菌^[34]、抗氧化^[35]、降脂^[36]、抗癌^[37]、保鲜等生物活性,这可能与多酚类物质结构上含有众多酚羟基和羰基有关^[38]。

1.4 黄酮类

食源性黄酮类化合物是以C6-C3-C6结构为主链的含氧杂环复杂酚类次生代谢天然产物,与糖类形成糖苷或游离态(苷元)的形式广泛存在于植物中^[1,2]。黄酮分子结构中的酮式羰基是影响黄酮类化合物呈色现象的主要原因。根据结构可以分为异黄酮、黄酮醇、二氢查耳酮、二氢黄酮、黄烷酮、黄酮、黄烷醇等^[39]。研究表明,黄酮类化合物具有抑菌、抗癌、降低血脂、抗癌等多种生物活性,这主要与A环以及B环上酚羟基的位置及数目、C环上的C-2,

3 位双键、C = O 位置、羟基成苷、氮甲基、化合物空间结构等相关^[40-44]。

2 热加工方式对食源性活性成分的影响

大多数工业化食品的生产需要烹饪的食品都

会经过相应的热加工,但食品种类不同,所面临的热加工方式也不一样,对活性物质的影响也就不同(见表 2)。

表 2 常见的热加工方式

Table 2 Common thermal processing methods

热加工方式 Thermal processing method	食品 Food	温度 Temperature	时间 Time
巴氏杀菌 Pasteurization	饮料、面包、乳等	75 ~ 95 °C	15 ~ 16 s
高温杀菌 High temperature sterilization	乳类、肉制品	> 100 °C	15 ~ 20 min
蒸煮 Cooking	谷薯类、蔬菜、肉类	蒸汽或热水加热到 90 ~ 100 °C	> 5 min
焙烤 Baking	面包、饼干、肉类等	空气加热到 > 215 °C	15 ~ 60 min

2.1 杀菌对食源性活性物质活性的影响

热杀菌技术是目前使用最广泛,也是最经济有效的杀菌技术,包括巴氏杀菌和高温杀菌。高温杀菌广泛应用于肉制品和谷类制品等各种食品的保鲜贮藏中,此类食品中含有各种活性成分。巴氏杀菌主要用于果汁、饮料、鲜奶的加工,此类食品中存在的活性物质以多糖、多酚、黄酮类物质居多。

2.1.1 杀菌对多肽的影响

研究表明,杀菌过程中的高温会使蛋白质构象、分子作用力、三维结构等发生一系列的变化,并产生新的多肽。Ma^[45]以聚类分析法对比了巴氏杀菌和超高温杀菌后牛奶中多肽的差异,灭菌奶与巴氏奶多肽种类存在显著差异,且灭菌奶中的多肽多于巴氏奶。这可能是因为超高温杀菌所带来的 135 ~ 140 °C 的温度更能使奶中的蛋白降解为多肽。然而,就多肽本身的结构(氨基酸序列)来说,受温度影响较小,大多数多肽的生物活性与氨基酸序列与氨基酸组成密不可分,因此杀菌过程对多肽活性的影响也相对较小。Li 等^[46]采用 60、80 和 100 °C 处理牛肌红蛋白中多肽 5 min 后发现,牛肌红蛋白酶解的多肽稳定性无显著变化,说明杀菌并不会影响多肽的活性。Sarah 等^[47]为了寻找鉴定猪肉的特异性肽,对猪肉分别进行 100 °C 煮沸 30 min、121 °C 高温高压灭菌 20 min 以及 4 °C 冷藏 30 min 处理,对比发现有四条多肽结构并无变化。

由此可以看出,杀菌一方面会使食物本身所具有的蛋白和多肽降解,产生新的多肽;另一方面杀菌对多肽本身的结构影响不大。

2.1.2 杀菌对多糖的影响

多糖功能受构象结构影响,高温杀菌过程温度

往往高于 100 °C,更容易达到 β -1,4 糖苷键和 β -1,3 糖苷键等的活化能,导致糖苷键断裂,支链脱去或取代,不同程度地影响多糖的支链结构、构象、分子量,进而影响多糖的活性^[48]。例如 Ishimoto 等^[49]采用 135 °C 热处理酵母 β -葡聚糖,发现高温会改变该多糖单螺旋与三级螺旋的结构,最终有效增加了它的可溶性,提高了其活性。高温除了可以改变多糖构象,也会使多糖降解。Luo 等^[50]研究发现适度加热可促进分子的运动性,提高多糖含量,但长时间的高温加热(150 °C)会使多糖发生降解,含量降低。由于结构的变化,单位多糖的抗氧化活性反而升高。与高温杀菌相比,巴氏杀菌温度稍微缓和,但也会引起多糖结构的变化。Rodríguez 等^[51]对芦荟进行了巴氏杀菌,发现芦荟乙酰甘露聚糖在杀菌过程中发生脱乙酰和脱半乳糖反应,甘露寡糖链与甘露聚糖长链之间会形成新的氢键,构象发生变化,进而影响芦荟多糖的生理和营养特性。

由以上报道可知,短时适度的杀菌会促使多糖的降解,引起多糖结构的变化,从而导致多糖活性增强,但过度的加热可能会使多糖活性降低。

2.1.3 杀菌对多酚的影响

多酚存在于大多数热敏性食物中,而杀菌技术是食物提高货架期必不可少的手段。一方面,杀菌过程会使多酚发生异构化反应,氧化还原反应和氧化聚合也会加剧,导致多酚结构发生转变,含量降低,活性降低^[52]。例如 Chen 等^[53]研究了绿茶儿茶素在不同加工条件下的稳定性,其在室温下是稳定的,在 98 °C 下发酵 7 h,降解率为 20%。在 120 °C 高压灭菌 20 min 后,表儿茶素没食子酸酯发生了异构化反应。这表明氧化过程在中间加工温度下可能

是有利的,而在较高加工温度下发生了差向异构化反应,影响其稳定性。Leilson 等^[54]研究发现均匀化步骤可以增加菊苣、香蕉和草莓冰沙中主要花青素的浓度,然而在巴氏杀菌步骤后花青素浓度明显减少。另一方面,多酚也可以减少热处理对食物成分带来的损害。Sun 等^[55]研究了 0.1 mg/L 的儿茶素、染料木黄酮、海藻多酚、邻苯三酚抑制超高温瞬时杀菌甜瓜汁异味程度,几种多酚均可不同程度抑制异味的产生,而以儿茶素与黄豆苷元的组合最值得深入研究。

由以上研究可知,对于热不稳定性的多酚,杀菌可能会导致其降解,含量会降低,但对于热稳定性的多酚,其反而可以被用来保护杀菌过程中不稳定的化合物。

2.1.4 杀菌对黄酮类物质的影响

杀菌过程会使黄酮类物质发生聚合及降解、物质相互转化等复杂的化学反应,如豆制品中的大豆异黄酮(葡萄糖苷、乙酰葡萄糖苷和丙二酰葡萄糖苷异黄酮)在加热过程中可转化为苷元和其他衍生物类型^[56]。此外,Cheng 等^[57]研究了超高压技术、微波联合紫外杀菌技术以及传统热杀菌技术对香椿芽菜品质特性的影响,巴氏杀菌较好地保留香椿芽菜原有色泽及香气成分,但总黄酮的损失率较大(18.39%),高压蒸汽灭菌后香椿各项指标均会降低,相对来说非热灭菌方式能较好地保留食物中的活性成分。Zeng 等^[58]也同样得出采用传统热杀菌(80 °C、15 min)处理血橙汁,总黄酮下降了 5.80%,而微波杀菌能更好地保留营养成分。

虽然非热加工方式可以更好地保留活性成分,但传统杀菌方式又存在着应用广泛、操作简单的特点,因此过滤灭菌和蒸汽灭菌法成为了欧洲药品管理局推荐的最佳灭菌方法。Harjanti 等^[59]采用 0.45 μm 注射器过滤灭菌和 121 °C 高压蒸汽灭菌 15 min 两种方式对由槟榔叶、莪术、莪术提取物组成的中药配方进行灭菌,结果发现,与高压灭菌器灭菌相比,注射器过滤灭菌的酚类和黄酮类化合物含量较低。Mario 等^[60]也得出了相同的结论。这可能是由于植物原料中含有高达一万种属于不同分子量的黄酮类天然化合物,高于膜孔分子量的黄酮被保留在膜表面造成损失。

总的来说,杀菌总会引起黄酮类化合物的降解,但相对传统杀菌方式,非热杀菌方式更好,相对于其他传统杀菌方式,高压蒸汽灭菌更能保留黄酮类物

质。

2.2 焙烤对食源性活性物质活性的影响

焙烤是食品加工和日常生活中常见的热加工方式之一,与灭菌不同的是,长时间的焙烤不仅会带来高温环境,还可以通过各种化学反应改变食品中活性成分的存在形式,进而提高食品的风味、适口性,其中以美拉德最为熟知,研究表明,多肽、多糖、多酚、黄酮均会发生美拉德反应。而除了美拉德反应,也会引起其他化学反应。

2.2.1 焙烤对多肽的影响

活性多肽在结构上都会带有一个游离的氨基,焙烤温度通常超过了多肽分子内和分子间作用键的临界点,会促进游离氨基与糖的还原端上的羧基与会发生美拉德反应,产生天然物质蛋白黑素、中间产物还原酮、挥发性杂环化合物等物质,使多肽活性升高^[61-64]。因此,研究焙烤对的多肽影响尤以美拉德肽的研究最为广泛。如 Yang 等^[64]通过对比五种还原糖的还原性,最终选择木糖与羊骨胶原肽进行美拉德反应,采用响应面试验优化所得最佳条件为木糖与骨胶原肽质量比为 3:1、反应初始 pH 为 12、100 °C 反应 3.5 h,此时反应产物的还原力高达 0.8102。美拉德反应能够增加多肽中疏水性氨基酸的含量,同时也可以改变芝麻多肽的肽键,反应产物类黑精物质和疏水性氨基酸含量越多,抗氧化活性越强。Qian 等^[65]通过对比三种还原糖的还原性发现,木糖还原性最高,最终以木糖与芝麻多肽(1:2)进行反应,其还原力、ABTS⁺ 自由基清除率、DPPH 自由基清除率和羟自由基清除率分别提高了 121.4%、304.5%、81.2%、103.2%。此外,在加热处理下,美拉德肽也会呈现出明显的、持久的肉味、鲜味、烤香和口感特性^[63,66]。因此,对于一些含糖和蛋白质较多的食物,热加工方式明显可以增加多肽的食品加工特性。但也有学者^[67]得出一定的焙烤时间会促进蛋白质三级结构展开,暴露出更多的二级结构,肽键断裂,增加小分子多肽的含量的结论。所以应当合理利用烘焙手段,避免焙烤时间过长带来的不利影响。

2.2.2 焙烤对多糖的影响

连续高温焙烤除了会引发多糖与蛋白类物质之间的美拉德反应之外,还会不同程度地影响多糖的结构和功能。大多数谷类食物如面包、饼干等都会经过焙烤的加工程序,而 β-葡聚糖是谷类中非常重要的活性成分,因此本文以 β-葡聚糖为例说明焙烤

对多糖的影响。 β -葡聚糖是谷物细胞壁的主要组成部分,由纤维三糖和纤维四糖单元通过 β -1,3糖苷键连接而成^[68]。有研究^[69]发现,焙炒处理燕麦-小麦混合粉面团体系,会降解燕麦 β -葡聚糖,从而降低面团中 β -葡聚糖的含量,但其峰值分子量不变。另有研究^[70-72]表明,混合链1,3,1,4- β -D-葡聚糖(β -葡聚糖)的可提取性随焙烤时间的延长而增加,其提取量会显著增加,而 β -葡聚糖的平均分子量则降低。但Ma等^[72]通过McCleary直接测定法测定了焙炒处理后燕麦甜醅中 β -葡聚糖的含量,发现不同烘焙处理时间对 β -葡聚糖影响不大。

由以上研究可知,高温会引起不可溶纤维素降解生成新的 β -葡聚糖,导致新的 β -葡聚糖与降解 β -葡聚糖之间的动态平衡,引发 β -葡聚糖表观测定量降低、增高、不变的现象。但就本质而言,多糖会因为焙烤而降解,而其含量可能增加、减少或不变。

2.2.3 焙烤对多酚的影响

焙烤过程中,由于温度和氧气的作用,多酚更容易发生去糖基化、热分解以及与蛋白质共价交联作用,结合酚损失率可达60%~90%,但焙烤过程也会使细胞壁组分发生降解,提高结合酚的可萃取性,总酚含量便会增加^[73]。Abdel等^[74]研究了全麦面包、曲奇饼和松饼烘焙过程中游离酚酸和结合酚酸的变化。发现烘焙使三种产品中游离酚酸含量增加,而面包中结合酚酸含量下降,饼干和松饼制品中游离酚酸含量略有变化。Gustavo等^[75]也发现烘烤会对糙米、黑米、红米无筋糕点酚类物质含量产生影响。烘烤降低了阿魏酸和对香豆酸的含量,显著提高羟苯甲酸、咖啡酸、咖啡酸和原儿茶酸的提取能力。Garzón等^[76]比较焙烤前后麦芽高粱粉与天然高粱粉制作的曲奇生物活性物质的含量,得出了烘焙过程可提高酚酸的可萃取性,并保持其具有较高的生物活性,麦芽高粱粉制作的曲奇比后者具有更多的游离酚酸。

由此可以推出,焙烤可能会使多酚选择性地热分解和转化,部分结合酚转变为游离酚,总酚含量增加,引起多酚活性的变化,这对功能食品工业有一定的参考价值。此外,高温也会破坏食物中的多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD),延缓水解酶系统的去糖基化和氧化作用从而保护了多酚不被氧化和水解^[59]。

2.2.4 焙烤对黄酮类物质的影响

黄酮类物质作为天然抗氧化剂和活泼化学反应

物热稳定性较差,因此,在焙烤条件下会发生分解。如Guo等^[77]在130℃条件下烘焙红松种籽衣,分别烘焙了10、20、30、40 min,烘焙后总黄酮含量均低于未焙烤组,且不带壳烘焙种籽衣的抗氧化能力强于带壳样品。黄酮类物质也会参与美拉德反应中去,产生黄酮类物质未降解、活性未改变的现象,可将其运用到焙烤食物中去减少不良物质的产生。如Teng^[78]研究了烘烤处理下(180℃,20 min)柚皮素、柚皮苷,橙皮素和二氢杨梅素的稳定性,发现柚皮素和橙皮素未降解,且保持一定的抑菌能力和对ABTS⁺自由基的清除能力,而柚皮苷和二氢杨梅素分别降解了约28.66%及10.18%,但其对烘烤食物中丙烯酰胺和丙二醛有一定的抑制作用。Jing等^[79]研究了马齿苋黄酮类成分对烤牛肉饼中杂环胺(HAs)生成的抑制作用,主要黄酮类成分(芦丁、橙皮苷和黄烷酮)可将10种杂环胺的总含量控制在为 212.73 ± 7.13 ng/g以内。但也有学者得出焙烤会增加黄酮含量的结论。Ravisankar等^[80]利用UPLC串联四极杆质谱仪对发酵和焙烤后的黑麦进行了特性分析和抗氧化性能评价,得出了焙烤可以通过破坏细胞壁,增加黑麦中黄酮-O-糖苷的比例(36%~96%)。

2.3 蒸煮对食源性活性物质活性的影响

焙烤会对水分产生排斥作用,进而影响活性物质的含量与活性,而蒸煮正是以水分或水蒸气为介质进行食品加工的技术。谷薯类食物、罐头、茶饮料、水果蔬菜制品等都需要蒸煮加工。

2.3.1 蒸煮对多肽的影响

对于水溶性多肽来说,蒸煮显然会促进其扩散到加工水中,降低食品中多肽的含量。另一方面,低分子量多肽和富含无规螺旋结构的疏水亚组分是多肽生物活性的主要原因,蒸煮会使肽键水解、二硫键重构等,生成其他新的小分子多肽以及酮类、酚类、醛类等具有清除自由基活性的物质^[81]。Hu等^[82]利用液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)从煮熟的发芽谷子中分离出了7个新的多肽。7种肽均可显著降低Caco-2细胞活性氧生成,增加谷胱甘肽含量和超氧化物歧化酶活性,有两种肽可抑制一氧化氮、肿瘤坏死因子和白细胞介素-6,具有双重抗氧化和抗炎肽的潜在作用。Tatsuki等^[83]用毛细管电泳质谱(CE-MS)和液相色谱质谱(LC-MS)对冻干鸡蛋的蛋清进行分析得出,煮过的蛋白含有的氨基酸浓度是生蛋白的四倍多。由此可以得出,蒸煮会促进食物

中蛋白质的降解,产生新的多肽,有利于更好地发挥食品的功能。

而对于多肽本身来讲,蒸煮对其活性的增加也是有利的。Ashraf 等^[84]研究发现,热处理对于绿豆蛋白水解液的活性影响较大,热处理后,水解液中的肽浓度显著升高,二级和三级结构发生显著变化,且抗氧化活性和抑制胆固醇活性明显升高。Li 等^[85]研究了微波、蒸制、油炸、烤制处理后多肽抗氧化活性的变化,发现加热处理后酸肉粗肽的抗氧化活性提高,且蒸制后活性最好,其次依次是烤制、微波和油炸,这主要与加热处理后-SH 的含量减少有关。

2.3.2 蒸煮对多糖的影响

蒸煮过程由于水分与温度的共同作用会使食品细胞通透性增加,多糖更容易溶解在水中;也会使多糖发生主链降解,含量和活性发生变化^[86,87]。Wojciech 等^[88]采用热烫、煮沸、热烫-乳酸菌发酵三种方式从平菇子实体中分离得到水溶性多糖(WSP)。结果发现热烫不影响 WSP 的含量,煮沸 15 min, WSP 含量显著下降(下降 34.7%)。且通过 ABTS 法和 FRAP 法测定样品的抗氧化能力,得出加工降低了其对乳腺细胞系的抗增殖活性和抗氧化活性。Zhang 等^[89]以蒸煮为主要方式获取芥菜中可溶性多糖,并研究不同加热时间和温度对多糖的影响,结果发现,可溶性多糖的最适温度为 60~80℃,最优时间为 1 min,损失率最低为 28.3%。Svanberg 等^[90]以沸水蒸煮的方式预处理胡萝卜水溶性膳食纤维后,发现其聚合度和黏度均降低。另一方面,有研究^[91]报道称,蒸煮会使食物中存在的多糖降解酶失活,高温和高水分环境提高多糖的溶解度,显著提高多糖的含量,这主要与多糖的键型相关。如与不溶性 β -葡聚糖相比,可溶 β -葡聚糖具有更高的 β -1,4 键以及纤维三糖基单元的比率,分子中的 β -1,4 糖苷键越多,聚合物的溶解度就越低。此外,蒸煮过程中多糖的变化也与水分含量相关。Huth 等^[92]发现,将大麦饲料水分从 15% 增加到 22.5%,将挤压蒸煮温度保持在 150℃, β -葡聚糖含量显著降低 8%,而在 170℃ 下挤压时,将饲料水分增加至 22.5%, β -葡聚糖含量降低 10%。

由以上研究可知,由于高温和水的作用,多糖更容易扩散到加工水中。此外,蒸煮对多糖的影响与蒸煮时间、温度、酶、糖苷键的种类与比例、水分含量相关。

2.3.3 蒸煮对多酚的影响

一般情况下,蒸煮会使含有酯键或糖苷的多酚发生热分解、氧化还原反应、去糖基化等多种反应,但以降解为主。多酚存在着多种降解途径,降解为非自发的吸热反应,与一级反应动力学一致。其机制可能包括黄酮-3-醇之间的非共价相互作用、自氧化二聚体与蛋白质的相互作用以及醌与蛋白质的共价键等^[52,93,94]。因此,在生产、储存和运输过程中,必须考虑多酚物质的变化。以最常见多酚花青素为例,加热条件下,其降解的活化能为 42(花青素-3-葡萄糖基芸香苷)~55 kJ/mol(花青素-3-葡萄糖苷),在 80℃ 下,花青素的半衰期为 32.10 min,花青素-3-葡萄糖基芸香苷为 45.69 min^[95]。蒸煮由于温度高、时间长很容易造成花青素的降解。Hiemori 等^[96]采用高效液相色谱-光电二极管阵列检测和电喷雾质谱联用技术对蒸煮后黑米中的 6 种花青素色素进行了鉴定和定量分析。发现花青素的主要成分是花青素-3-葡萄糖苷和芍药苷-3-葡萄糖苷。用电饭煲、高压锅、煤气灶烹调的米饭均能显著降低花青素含量,产生原儿茶酸。压力蒸煮损失最大的是花青素-3-葡萄糖苷(79.8%),其次是电饭煲(74.2%)和煤气灶(65.4%)。这可能与高温高压环境引起花青素活化能升高,旧键断裂有关。蒸煮除了对花青素会造成破坏之外,对其他的多酚也会产生一定的影响。Ahmed 等^[97]研究煮沸 10、20、30 min 对葫芦果水提物总酚含量、总黄酮含量、抗氧化活性和 α -淀粉酶抑制活性的影响,结果表明葫芦果酚类含量随煮沸时间的延长而急剧下降,且 DPPH 自由基清除能力和 α -淀粉酶抑制活性均降低。

此外,蒸煮处理通过破坏植物的细胞壁,并且以水分子为载体,会促进酚类物质在高温环境下的运动,从而促进结合酚的降解和游离酚的释放,进而使多酚含量和活性提高。Yalnray 等^[98]探讨了煮沸和冷却工艺对麦芽饮料中总酚含量和麦芽汁酚类物质分布的影响,煮沸过程会使非酒精麦芽饮料的多酚含量增加、抗氧化活性升高,然而冷却过程并没有使酚含量和抗氧化活性发生显著的变化。Kim 等^[99]研究了不同温度(80、90、98℃)和时间(0~10 min)水热烫对芝麻特性的影响。发现在所有温度下,总酚和抗氧化活性均显著增加至最大值,并随着进一步热烫时间的延长而迅速降低,其中以 98℃ 热烫 30 s 为最高值。

综上所述,蒸煮一方面会使大分子多酚降解为

游离酚,使多酚自溶于水,而使多酚活性和含量发生升高;另一方面会破坏食物中主要多酚的键型,导致多酚含量下降。

2.3.4 蒸煮对黄酮类物质的影响

在蒸煮过程中,黄酮类化合物会经历双重过程,一方面,由于蒸煮处理,黄酮类化合物会浸出,降低了黄酮在食物中的含量。如 Cuo 等^[100]研究了煮沸、烘烤、油炸等方法对花生营养成分和潜在有害成分含量的影响,黄酮类和酚类等微量元素在煮沸后显著降低,而在烘烤后显著增加。Ma^[101]研究发现苦荞制品经过蒸制、煮制和烤制黄酮含量均有下降,通过体外模拟消化方法,苦荞制品的黄酮释放量显著增加,尤其是结合黄酮含量增加较多。蒸制比煮制和烤制的黄酮释放量增加幅度大,且体外消化后的抗氧化能力较强。Hui 等^[102]采用液相色谱-质谱联用技术分析带皮水煮、带皮蒸制、鲜切和去皮水煮、去皮蒸制五种方式处理后黄酮类物质的变化,发现在带皮水煮、带皮蒸制样品中检测到 18 种黄酮类化合物,但在鲜切和去皮水煮、去皮蒸制样品中没有检测到。在带皮水煮、带皮蒸制样品中,*O*-己糖苷、山柰酚、木犀草素含量均都高于鲜切样品。因此,蒸制和烘焙等不接触水油介质的加工方式可能更适合黄酮发挥作用。

另一方面,黄酮类化合物在蒸煮中的稳定性与其种类和含量有着紧密的联系,主要与黄酮的键型

相关。热不稳定性黄酮类化合物在对应的热加工方式下会发生分解,产生槲皮素 3,4'-二葡萄糖苷、槲皮素等新物质。Zou 等^[103]研究了黄甜竹、毛竹、绿竹、苦竹竹叶 4 种竹叶黄酮在微波、焙烤、蒸制 3 种常见食品热加工过程中的含量变化,发现竹叶黄酮经不同热加工处理后其含量变化有显著差异,蒸制对竹叶黄酮的影响最大,损失率在 34.25% ~ 71.27% 之间,微波最小,黄酮损失率均在 30.0% 以下。Wang 等^[104]以煎炸(200 °C, 46 s)、烘烤(130 °C, 38 min)、水煮(100 °C, 12 min) 3 种热加工处理核桃发现,三种方式都会使黄酮含量增加(40.4%、9.49%、46.8%),但水煮处理黄酮的稳定性最差。

可见,蒸煮会使黄酮含量增加或降低,这主要与黄酮的键型相关,通常来说,氧碳双苷黄酮化合物不耐受微波和焙烤处理,单碳苷黄酮化合物更加耐受焙烤和蒸制处理,氧苷黄酮化合物较耐受微波处理,而双碳苷黄酮化合物在微波条件下稳定性不佳^[103]。如 Wu 等^[105]采用高效液相色谱-质谱联用技术对煮沸、蒸制、微波处理后花椰菜中的 7 种山柰酚苷和 1 种槲皮素苷进行了鉴定和定量分析,得出了煮沸会导致所有黄酮类化合物的大量损失,而蒸汽和微波炉则导致黄酮类化合物的轻微损失甚至增加。酰化的山柰酚苷三或四糖苷似乎更耐家庭烹饪(见表 3)。

表 3 三种热加工方式对食源性活性成分的影响对比

Table 3 Comparison of effects of three thermal processing methods on food derived active ingredients

热加工方式 Hot thermal methods	多肽 Polypeptide			多糖 Polysaccharide			多酚 Polyphenol			黄酮 Flavone		
	含量 Content	活性 Activity	结构 Structure	含量 Content	活性 Activity	结构 Structure	含量 Content	活性 Activity	结构 Structure	含量 Content	活性 Activity	结构 Structure
杀菌 Sterilization	不变或升高	不变	不变或肽键断裂	降低或升高	升高或降低	糖苷键断裂,脱支链或取代基,形成氢键,构象改变	降低	降低	异构化反应、氧化还原反应、氧化聚合	降低	降低	聚合及降解、物质相互转化
焙烤 Baking	降低或升高	升高	肽键断裂,美拉德反应	降低、升高、不变	降低	美拉德反应,糖苷键断裂	结合酚降低,游离酚升高	升高或降低	去糖基化、热分解以及与蛋白质共价交联作用	降低或升高	降低或升高	降解,美拉德反应
蒸煮 Cooking	升高	升高	肽键水解、二硫键重构	降低	降低	主链降解	降低或升高	降低或升高	热分解、氧化还原、去糖基化、蛋白质共价交联作用	降低	升高	降解

3 结论与展望

食源性活性成分广泛存在于各种食物中,且被应用于各种食物中。目前对其热加工方面的研究主要集中在研究食品原材料经热加工处理前后,食源性活性成分的含量、分子结构和生物活性的变化;对比不同热加工方式对食源性活性成分的影响,选择合适的热加工方法,优化热加工条件。而缺乏对热加工处理过程中、处理后食源性活性成分分子机制的研究。为了更好地在食品加工中保留和添加食源性活性成分,需解决以下几个问题:一是多肽、多糖、多酚、黄酮类化合物种类丰富,同类物质也存在结构不同,受热加工影响不同,应依据其加工特性和结构进行分类、系统、深入地研究。二是进一步明确热加工技术对活性成分的影响,开展热加工处理过程中、处理后活性成分增加降低的机制研究,为明确干预手段奠定基础。三是研究不同热加工方法综合应用对活性成分的影响,如超高温瞬时灭菌与烤制、高压蒸汽杀菌与蒸煮等。四是开发新的经济的食品级运载体系和各种高新技术,并应用到热加工过程中,干预活性成分的变化,保护食物中的活性物质。

参考文献

- Chen H, et al. Recent progress in the mechanism behind exercise-induced fatigue and dietary bioactive components against fatigue[J]. *Food Sci(食品科学)*, 2020, 41: 247-258.
- Qu H, et al. Review on the protective effects of food-derived natural compounds on alcohol-induced liver injury[J]. *Food Sci(食品科学)*, 2020, 41: 283-290.
- Chen KJ, et al. Synthesis of silica/polypeptide hybrid nanomaterials and mesoporous silica by molecular replication of sheet-like polypeptide complexes through biomimetic mineralization[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2019, 542: 243-252.
- Chen CH, et al. Progress in extraction, structural characterization and biological activities of bamboo shoot polysaccharide[J]. *Jiangsu J Agr Sci(江苏农业学报)*, 2019, 35: 1513-1520.
- Fábio FDA, et al. Polyphenols and their applications: an approach in food chemistry and innovation potential[J]. *Food Chem*, 2021, 338: 127535.
- Liu JL, et al. Spectroscopy and molecular docking analysis reveal structural specificity of flavonoids in the inhibition of α -glucosidase activity[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 152: 981-989.
- Mwangi WW, et al. Food-grade pickering emulsions for encapsulation and delivery of bioactives[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 100: 320-332.
- Zhao Z, et al. A study of bactericidal efficacy of KSL antimicrobial peptides chewing gum on oral bacteria by 16S rRNA sequencing technique[J]. *Chin J Conser Den(牙体牙髓牙周病学杂志)*, 2017, 27: 387-390.
- Ma SW, et al. Study on preparation and antioxidant activity of mung bean peptide beverage[J]. *J Univ Sci Technol Liaoning(辽宁科技大学学报)*, 2019, 42: 440-447.
- Bingol EB, et al. Effect of nisin-EDTA combinations and modified atmosphere packaging on the survival of *Salmonella enteritidis* in Turkish type meatballs[J]. *CyTA-J Food*, 2018, 16: 1030-1036.
- Zhou JX, et al. The application of oat β -glucan in food industry[J]. *Cereals Oils(粮食与油脂)*, 2020, 33: 26-27.
- Li DL, et al. Preparation study of chicken jerky reconstituted by flammulina velutipes polysaccharide complex[J]. *Mod Food Sci Technol(现代食品科技)*, 2020, 36: 198-205.
- Zhang PL, et al. Bioactivity of polygonatum sibiricum polysaccharide and development of functional food[J]. *Trop Agric Eng(热带农业工程)*, 2019, 43: 207-210.
- Zhang XF, et al. Study on the application of tea polyphenols in food[J]. *Chin J Bioprocess Eng(生物加工过程)*, 2019, 17: 424-429.
- Jin MK, et al. Application of crude flavonoids from yellow maize in beef meatballs fresh-keeping[J]. *Sci Technol Food Ind(食品工业科技)*, 2019, 40: 278-282.
- Li CL. Study on preparation of Radix Glycyrrhiza yogurt[J]. *Sci Technol Food Ind(食品工业科技)*, 2008, 29: 183-185.
- Zhang N, et al. Polypeptides extracted from eupolyphaga sinensis walker via enzymic digestion alleviate UV radiation-induced skin photoaging[J]. *Biomed Pharmacother*, 2019, 112: 108636.
- Mahta M, et al. Structural analysis of ACE-inhibitory peptide (VL-9) derived from *Kluyveromyces marxianus* protein hydrolysate[J]. *J Mol Struct*, 2020, 1213: 128199.
- Fan SH, et al. *In vivo* antioxidant activity and hypolipidemic effect of capsanthin and capsaicin[J]. *Food Sci(食品科学)*, 2021, 42: 201-207.
- Pak VV, et al. Structure-activity relationships of the peptide Ile-Ala-Val-Pro and its derivatives revealed using the semi-empirical AM1 method[J]. *Chem Nat Compd*, 2005, 41: 454-460.
- Li HL, et al. Effects of peptide powder from *Crocodylus siamensis* on enhancing immunity of organism and anti-fatigue effect in mice[J]. *J Xiamen Univ: Nat Sci(厦门大学学报: 自科版)*, 2019, 58: 707-711.
- Solstad RG, et al. Structure-activity relationship studies of shortened analogues of the antimicrobial peptide EeCentrocin 1 from the sea urchin *Echinus esculentus*[J]. *J Pept Sci*, 2020, 26: 1-11.

- 23 Hou T, et al. A pivotal peptide (Val-Ser-Glu-Glu) from duck egg white promotes calcium uptake and structure-activity relationship study[J]. *J Funct Foods*, 2018, 48:448-456.
- 24 Li Y. Current progress and advances of study on bioactive peptides[J]. *Food Ferment Ind(食品与发酵工业)*, 2007, 33:3-9.
- 25 Liu YN, et al. Research Progress on application, extraction, purification and identification of yeast cell wall polysaccharide[J]. *China Anim Husb Vet Med(中国畜牧兽医)*, 2019, 46:3607-3616.
- 26 Fadzai C, et al. Dual-frequency ultrasound-assisted alcohol/salt aqueous two-phase extraction and purification of *Astragalus* polysaccharides[J]. *J Food Process Eng*, 2020, 43:1-10.
- 27 Rizki IF, et al. Antioxidant activity of sulfated polysaccharide extract from green seaweed (*Caulerpa lentillifera*) makassar, indonesia[J]. *Key Eng Mater*, 2020, 840:214-220.
- 28 Qin L, et al. Effects of *Oudemansiella radicata* polysaccharide on postharvest quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and its antifungal activity against *Penicillium digitatum* [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2020, 166:111207.
- 29 Feng YN. Polysaccharide extracted from *Huperzia serrata* using response surface methodology and its biological activity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 157:267-275.
- 30 Ye GY, et al. Comparison of polysaccharides and its hypoglycemic activity from three *Dendrobium* species [J]. *Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发)*, 2020, 5:727-733.
- 31 Li JJ, et al. Purification of a polysaccharide SSP1-1 from *Suaeda salsa* plant and its anti-tumor activity [J]. *Sci Technol Food Ind(食品工业科技)*, 2020, 41:314-319.
- 32 Papuc C, et al. Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat products: classification, structures, sources, and action mechanisms[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2017, 16:1243-1268.
- 33 Zhao M, et al. Interactions between plant polyphenols and intestinal microbiota and their effects on metabolic diseases [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2021, 42:305-313.
- 34 Dzah CS, et al. The effects of ultrasound assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: a review [J]. *Food Biosci*, 2020, 35:1-10.
- 35 Myrna AD, et al. Antioxidant activity and polyphenol composition of sugarcane molasses extract [J]. *Food Chem*, 2020, 314:121-127.
- 36 Villegas NG, et al. Acetone effects on *Buddleja scordioides* polyphenol extraction process and assessment of their cellular antioxidant capacity and anti-inflammatory activity [J]. *Med Chem Res*, 2019, 28:2218-2231.
- 37 Guo L, et al. Antibacterial activity of olive oil polyphenol extract against *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus*; possible mechanisms [J]. *Foodborne Pathog Dis*, 2019, 17:396-403.
- 38 Ma ZQ, et al. Advances in studies on the effects of thermal processing on the structure, content and antioxidant activity of phenolic compounds in plants [J]. *Food Machin(食品与机械)*, 2018, 34:152-159.
- 39 Xu J, et al. Research progress of foodborne flavonoids interfering with diseases by regulating autophagy [J]. *Sci Technol Food Ind(食品工业科技)*, 2020, 41:326-333.
- 40 Sumathy R, et al. Antioxidant activity of flavonoid compounds isolated from the petals of *Hibiscus rosa sinensis* [J]. *J King Saud Univ-Sci*, 2020, 32:2236-2242.
- 41 Cao DD, et al. Antimicrobial lavandulylated flavonoids from a sponge-derived actinomycete [J]. *Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发)*, 2020, 34:413-420.
- 42 Sun JR, et al. Extraction process optimization of flavonoids from *Cornus officinalis* leaves and its antibacterial and antioxidant activity [J]. *Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发)*, 2020, 32:672-680.
- 43 Wang CF, et al. Anti-inflammatory activity *in vitro* of water-extracted fraction of total flavonoids extracted from *Allium monogolicum* Regel [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2019, 40:163-169.
- 44 Zhao XW, et al. Research progress in structure-activity relationship of flavonoids [J]. *Chin Tradit Herb Drugs(中草药)*, 2015, 46:3264-3271.
- 45 Ma YM. Study on peptide mapping of dairy products based on MALDI-TOF [D]. Tianjin: Tianjin University of Science Technology (天津科技大学), 2019.
- 46 Li YY, et al. Influence factors of processing process on the stability of peptides from bovine myoglobin and its application in the authenticity identification [J]. *Food Sci(食品科学)*, 2020, 41:1-8.
- 47 Sarah SA, et al. LC-QTOF-MS identification of porcine-specific peptide in heat treated pork identifies candidate markers for meat species determination [J]. *Food Chem*, 2016, 199:157-164.
- 48 Kök MS, et al. Viscosity of galactomannans during high temperature processing: influence of degradation and solubilisation [J]. *Food Hydrocol*, 1999, 13:535-542.
- 49 Ishimoto Y, et al. Modulation of an innate immune response by soluble yeast β -glucan prepared by a heat degradation method [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 104:367-376.
- 50 Luo F, et al. Effect of heat treatment of oil-tea camellia seed on content and antioxidant activity of polysaccharides in oil-tea camellia cake [J]. *China Oils Fats(中国油脂)*, 2019, 44:41-45.
- 51 Rodríguez RE, et al. Aloe vera as a functional ingredient in

- foods[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2010, 50:305-326.
- 52 Hawi D, et al. Processing influences on food polyphenol profiles and biological activity[J]. Curr Opin Food Sci, 2020, 32:90-102.
- 53 Chen ZY, et al. Degradation of green tea catechins in tea drinks[J]. J Agr Food Chem, 2001, 49:477-482.
- 54 Leilson DOR, et al. Effect of processing on bioactive compounds, physicochemical and rheological characteristics of juçara, banana and strawberry smoothie [J]. Plant Foods Hum Nutr, 2018, 73:222-227.
- 55 Sun YQ, et al. Inhibitory effect of polyphenols on key off-odors in thermally processed muskmelon juice[J]. Food Sci (食品科学), 2020, 41:21-28.
- 56 Ye T, et al. Effect of different sterilization methods on isoflavone profile and quality characteristics of ready -to-eat dried soybean curd(Tofu) [J]. Food Sci(食品科学), 2020, 41:124-130.
- 57 Cheng JJ, et al. A comparative study on quality characteristics of *Toona sinensis* sprouts by different sterilization methods [J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2020, 36:58-68.
- 58 Zeng XF, et al. Effect of sterilization methods on quality and antioxidant activity of blood orange juice during storage[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业), 2019, 45:161-166.
- 59 Harjanti DW, et al. Effects of different sterilization methods of herbal formula on phytochemical compounds and antibacterial activity against mastitis-causing bacteria [J]. Vet World, 2020, 13:1187-1192.
- 60 Mario A, et al. Stability and anti-proliferative properties of biologically active compounds extracted from *Cistus* L. after sterilization treatments[J]. Sci Rep, 2020, 10:1211-1220.
- 61 Liu L, et al. Effect of ultrasound assisted heating on structure and antioxidant activity of whey protein peptide grafted with galactose[J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 109:130-136.
- 62 Zhang Y. Preparation of squid polypeptide and study on antioxidant activity of Maillard products [D]. Zhoushan; Zhejiang Ocean University(浙江海洋大学), 2019:10-39.
- 63 Fabrice BS, et al. Effects of ultrasound-assisted heating on aroma profile, peptide structure, peptide molecular weight, antioxidant activities and sensory characteristics of natural fish flavouring[J]. Ultrason Sonochem, 2020, 65:105055.
- 64 Yang L, et al. Improving of the antioxidant activity of ovine ossein peptide by Maillard reaction[J]. J Shanxi Agr Univ; Nat Sci(山西农业大学学报:自科版), 2017, 37:115-120.
- 65 Qian SH, et al. Study on the effect of Maillard reaction on antioxidant activity of sesame polypeptides[J]. Food Mach(食品与机械), 2018, 34:24-28.
- 66 Wei ZS, et al. The oriented preparation of Maillard reaction peptide from chickpea using GA-BP neural networks[J]. J Chin Inst Food Sci Technol(中国食品学报), 2019, 19:147-153.
- 67 Wang YL. Study on the influence of heating methods on the nutritional components, volatile components and allergenicity of cashew nuts[D]. Nanchang; Nanchang University(南昌大学), 2019.
- 68 Beer MU. Effect of cooking and storage on the amount and molecular weight of (1 leads to 3) (1 leads to 4)-beta-D-glucan extracted from oat products by an *in vitro* digestion system[J]. Cereal Chem, 1997, 74:705-709.
- 69 Djurle S, et al. Effects of baking on dietary fibre, with emphasis on β -glucan and resistant starch, in barley breads [J]. J Cereal Sci, 2018, 79:449-455.
- 70 Liisa J, et al. Effect of processing on the extractability of oat β -glucan[J]. Food Chem, 2007, 105:1439-1445.
- 71 Wang XC, et al. Beta glucan content in highland barley grains and its change influenced by different processing methods [J]. Shandong Agr Sci(山东农业科学), 2019, 51:124-130.
- 72 Ma CR, et al. Effects of roasting on qualities and functional factors of sweet fermented oats[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业), 2019, 45:199-203.
- 73 Indrakumar S, et al. Milling and thermal treatment induced changes on phenolic components and antioxidant activities of pigmented rice flours[J]. J Food Sci Technol, 2019, 56:273-280.
- 74 Abdel-Aal ESM, et al. Effect of baking on free and bound phenolic acids in wholegrain bakery products [J]. J Cereal Sci, 2013, 57:312-318.
- 75 Gustavo HL, et al. Cake of brown, black and red rice: influence of transglutaminase on technological properties, *in vitro* starch digestibility and phenolic compounds[J]. Food Chem, 2020, 318:126480.
- 76 Garzón AG, et al. Effects of baking on γ -aminobutyric acid and free phenolic acids from gluten-free cookies made with native and malted whole sorghum flours [J]. J Food Process Pres, 2020, 44:e14571.
- 77 Guo YQ, et al. Effects of roasting on the bioactive contents and antioxidant activity of korean pine (*Pinus koraiensis*) seed coat [J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技), 2018, 34:159-166.
- 78 Teng J. Changes of representative flavonoids during thermal processing and their impacts on formation and toxicity of AGEs[D]. Shanghai; Shanghai Ocean University(上海海洋大学), 2019.
- 79 Jing J, et al. Inhibitory effects of *Portulaca oleracea* L. and selected flavonoid ingredients on heterocyclic amines in roast beef patties and Density Function Theory calculation of binding between heterocyclic amines intermediates and flavonoids

- [J]. Food Chem, 2021, 336:127551.
- 80 Ravisankar S, et al. Rye flavonoids-Structural profile of the flavones in diverse varieties and effect of fermentation and heat on their structure and antioxidant properties [J]. Food Chem, 2020, 324:126871.
- 81 Liu L, et al. Effect of ultrasound assisted heating on structure and antioxidant activity of whey protein peptide grafted with galactose [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 109:130-136.
- 82 Hu S, et al. Antioxidant and anti-inflammatory potential of peptides derived from *in vitro* gastrointestinal digestion of germinated and heat-treated foxtail millet (*Setaria italica*) proteins [J]. J Agr Food Chem, 2020, 68:9415-9426.
- 83 Tatsuki OB, et al. Effects of feed crops and boiling on chicken egg yolk and white determined by a metabolome analysis [J]. Food Chem, 2020, 327:121-126.
- 84 Ashraf J, et al. Effect of thermosonication pre-treatment on mung bean (*Vigna radiata*) and white kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) proteins: enzymatic hydrolysis, cholesterol lowering activity and structural characterization [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 66:105121.
- 85 Li MY, et al. Comparison of *in vitro* antioxidant activities of fermented meat polypeptides extracted with different methods [J]. Mod Food Sci Technol (现代食品科技), 2020, 36:38-45.
- 86 Yi J, et al. Effect of high-hydrostatic-pressure on molecular microstructure of mushroom (*Agaricus bisporus*) polyphenol-oxidase [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 60:890-898.
- 87 Nie SP, et al. Research progress on structure and functional activities of food-derived polysaccharides [J]. J Chin Inst Food Sci Technol (中国食品学报), 2018, 18:1-12.
- 88 Wojciech R, et al. Effect of processing on the content and biological activity of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus* mushroom [J]. LWT-Food Sci Technol, 2016, 66:27-33.
- 89 Zhang C, et al. Effect of thermal processing on the contents of soluble polysaccharide and VC in shepherd's purse [J]. Farm Prod Process (农产品加工), 2019:46-49.
- 90 Svanberg S, et al. Molecular weight distribution measured by HPSEC and viscosity of water-soluble dietary fiber in carrots following different types of processing [J]. J Agric Food Chem, 1995, 43:2692-2697.
- 91 Goudar G, et al. Effect of processing on barley β -glucan content, its molecular weight and extractability [J]. Int J Biol Macromole, 2020, 162:1204-1216.
- 92 Huth M, et al. Functional properties of dietary fibre enriched extrudates from barley [J]. J Cereal Sci, 2000, 32:115-128.
- 93 Li WF, et al. Effect of hot air drying on the polyphenol profile of Hongjv (*Citrus reticulata* Blanco, cv. Hongjv) peel: A multivariate analysis [J]. J Food Biochem, 2020, 44:e13174.
- 94 Song BJ, et al. Thermal degradation of green tea flavan-3-ols and formation of hetero- and homocatechin dimers in model dairy beverages [J]. Food Chem, 2015, 173:305-312.
- 95 Zoran Z, et al. Kinetics of anthocyanins, phenolic acids and flavonols degradation during heat treatments of freeze-dried sour cherry marasca paste [J]. Food Technol Biotechnol, 2014, 52:101-108.
- 96 Hiemori M, et al. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. *japonica* var. SBR) [J]. J Agr Food Chem, 2009, 57:1908-1914.
- 97 Ahmed D, 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 Radic Anti, 2016, 6:44-50.
- 98 Yalnray Z, et al. Effects of non-alcoholic malt beverage production process on bioactive phenolic compounds [J]. J Food Meas Charact, 2020, 34:1344-1355.
- 99 Kim AN, et al. Effect of water blanching on phenolic compounds, antioxidant activities, enzyme inactivation, microbial reduction, and surface structure of samnamul (*Aruncus dioicus* var. *kamtschaticus*) [J]. Int J Food ence Technol, 2020, 55:1754-1762.
- 100 Guo C, et al. Influence of different cooking methods on the nutritional and potentially harmful components of peanuts [J]. Food Chem, 2020, 316:123-134.
- 101 Ma YC. Effects of thermal processing on functional components, texture of tartary buckwheat products and simulated digestion *in vitro* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- 102 Hui N, et al. Comparison of flavonoids and phenylpropanoids compounds in Chinese water chestnut processed with different methods [J]. Food Chem, 2020, 335:127662.
- 103 Zou XL, et al. Stability analysis of bamboo leaf flavonoids under different thermal processing treatments [J]. J Beijing Forestry Univ (北京林业大学学报), 2016, 38:111-117.
- 104 Wang QH, et al. Effect of heat processing treatments on oxidation and functional components stability of walnuts [J]. J Chin Inst Food Sci Technol (中国食品学报), 2016, 16:66-72.
- 105 Wu XL, et al. Effects of domestic cooking on flavonoids in broccoli and calculation of retention factors [J]. Heliyon, 2019, 5:e01310.