

功率超声富集植物性食品次生代谢产物的 研究进展

徐清清, 刘苗苗, 孙培龙, 孙玉敬*

(浙江工业大学食品科学与工程学院, 杭州 310014)

摘要: 植物次生代谢产物(plant food secondary metabolites, PSMs)具有抗氧化、抗肿瘤和心血管等疾病的功能。超声(ultrasound, US)作为非热处理技术在食品工业中得到了广泛的应用。最近的报道表明, 超声可以作为非生物诱导子, 用于植物生物活性分子的生物合成和积累。使用 US 对水果蔬菜进行清洗或净化, 会对果蔬产生生理压力, 从而刺激活性氧(reactive oxygen species, ROS)的产生, 而 ROS 会引起 PSMs 关键代谢酶的表达和活性的改变, 从而富集 PSMs。本文综合国内外相关文献, 对利用超声技术富集植物次级代谢产物的研究进行综述, 主要介绍了超声诱导多酚化合物、萜类生物合成的规律及其机制, 并对其存在的问题进行了讨论, 同时展望了超声技术在植物次生代谢产物富集上的应用, 以期为超声生物学效应的研究提供参考。

关键词: 超声波技术; 富集; 植物化学素; 植物次级代谢产物; 生物活性

Advances in enrichment of plant food secondary metabolites by power ultrasound

XU Qing-Qing, LIU Miao-Miao, SUN Pei-Long, SUN Yu-Jing*

(College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: Plant food secondary metabolites (PSMS) have anti-oxidation, anti-cancer and anti-cardiovascular functions. Ultrasound (US) as a nonthermal processing technology, has been widely used in food industry. Recent reports indicated that ultrasound (US) could act as abiotic elicitors for the biosynthesis and accumulation of plant bioactive molecules. Use of US to clean or decontaminate fruits and vegetables leads to physical stress, and US stimulates the production of reactive oxygen species (ROS), then changes the expression and activity of key metabolic enzymes of PSMs, and finally results in the enrichment of PSMs. Combined with the related literature domestic and foreign, this paper summarized the research progress of using US technology for the enrichment of plant secondary metabolites and mainly introduced the rules and mechanism of US inducing biosynthesis of polyphenols and erpenoids, discussed the existing problems and prospected the application of ultrasonic technology for the enrichment of plant secondary metabolites, in order to provide references for the study of biological effects of ultrasound.

KEY WORDS: power ultrasound; enrichment; phytochemicals; plant secondary metabolites; biological activity

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31771982)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(31771982)

*通信作者: 孙玉敬, 博士, 副教授, 主要研究方向为超声化学及果蔬营养与健康。E-mail: yjsun01@zjut.edu.cn

*Corresponding author: SUN Yu-Jing, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China. E-mail: yjsun01@zjut.edu.cn

0 引言

果蔬、花卉、茶叶等植物的次生代谢产物(plant secondary metabolites, PSMs), 又称为植物化学素(phytochemicals), 不但可以赋予植物食品特有味道、气味和颜色^[1], 还对人体健康具有有益的作用。一些重要的 PSMs 如紫杉醇和白藜芦醇, 还可以用于治疗不同类型的人类癌症和心血管疾病, 甚至作为抗衰老剂^[2-3]。当前, 全世界对 PSMs 的需求日益增加^[4], 但植物食品中天然合成的 PSMs 含量较低, 供不应求, 因此如何提高果蔬等植物食品中的 PSMs 的含量成为目前科学界和产业界关注的热点。

目前提高植物中 PSMs 合成的方法主要有包括病原体、光、紫外线辐射、伤害和营养缺乏等生物和非生物的方法^[5-6]。超声作为一种新兴非热绿色技术, 因其经济, 使用简单, 操作不需要外部化学试剂和添加剂^[7], 在食品加工和储存领域中已经得到广泛的应用, 如灭菌^[8]、均质^[9]、清洗、消毒^[10-13]、乳化^[14]、冷冻^[15-16]、解冻^[17]、干燥^[18]、过滤、肉的嫩化、酒的陈化、切割、腌渍、微胶囊的制备等, 目前的应用主要是基于其物理效应和化学效应, 但是关于其生物学效应的研究相对较少, 近年来引起了研究人员对其生物学效应的关注。初步的研究发现超声可以作为非生物诱导因子对植物生物活性分子进行生物合成和积累。如 20~400 kHz 的超声波已经应用于水果和蔬菜的清洗, 经过超声处理后, 不仅可以富集有益 PSMs, 还不影响它们的表面质量^[19-20]。超声是微观层面上分子间碰撞的过程。碰撞能量可以通过超声介质传输^[21-22]。因此, 它可以产生强烈的空化效应和其它共生效应, 如高剪切力、搅拌、扰动效应和破碎。超声波具有的“空化效应”可有效刺激种子, 使植物种子发生一系列生理生化变化^[23]。研究表明, 磁场、电场和超声会对植物组织表现出一定的诱导效应^[24], 从而对萌发胚芽生长有调控作用^[25-26]。超声的促生长作用已经在许多植物中被观察到, 包括豌豆、大麦、玉米、小麦、水稻、马铃薯和一些木本植物, 主要对植物种子的萌发及随后幼苗和细根的生长^[27]。有实验表明, 超声作用于酶分子, 可使酶分子的构象发生改变, 进而改变酶的生物学活性^[20], 从而有助于富集次生代谢产物。

鉴于此, 本文综合国内外相关文献, 对利用超声技术富集植物次级代谢产物的研究进展进行综述, 以期超声生物学效应的研究提供参考, 并拓展其在食品工业及家庭中清洗食材方面的功能, 即在清洗的同时实现果蔬等植物食品次生代谢产物的富集。

1 功率超声对多酚类化合物的富集

多酚类化合物是一类重要的植物次生代谢产物, 与水果和蔬菜的抗氧化能力等生物活性密切相关。经常摄食

富含多酚类化合物的植物食品对人体大有益处, 这主要归因于其能够减轻人体细胞氧化应激的能力。当植物暴露于生物和非生物诱导子中, 它们会产生和富集多酚类化合物作为防御反应, 从而提高植物食品中的植物化学素。

1.1 总 酚

由于酚类物质的存在, 果蔬等植物食品通常具有抗氧化等生理功效。功率超声在富集不同的果蔬总酚含量方面显示出不同的潜在的作用, 包括胡萝卜、莴苣和花生仁^[28-31]。

SALES 等^[28]研究表明, 与对照组相比(0.84 mg GAE/g), 超声会增加花生中的总酚至 1.22~1.89 mg GAE/g; CUELLAR-VILLARREAL 等^[30]实验表明, 超声处理胡萝卜中酚类含量, 在贮藏 3 d 后, 增加了 129.2%, 而对照样品中的酚类物质含量保持不变; YU 等^[31]利用低功率超声处理(25 KHz 超声处理 60 和 120 s 后), 在贮藏 2.5 d 后, 生菜样品中酚类化合物分别增加 35.3%和 26.7%。类似地, PINHEIRO 等^[32]将整个番茄果实在(10±0.5) °C 的水浴中, 以 45 kHz 的恒定频率超声处理不同时间, 结果表明, 与未处理样品相比, 所有超声处理的样品显示出最高的总酚含量, 并且进一步发现, 超声波在 10 °C 储存期间可以诱导更高水平的总酚含量。

植物食品经过超声处理后, 样品中酚类物质的增加可能与超声诱发的应激反应有关。超声处理后酚类化合物的富集是由于应激引起的即时和迟发反应的结果。当超声应用于植物食品时, 除了导致生物活性化合物的可萃取性提高, 还会增加呼吸速率, 从而导致刺激活性氧(reactive oxygen species, ROS)的生成^[33-35]。ROS 的增加将导致参与苯丙烷途径的基因的过度表达, 尤其是苯丙氨酸解氨酶(phenylalaninammonialyase, PAL)基因, 而多酚类化合物的产生和富集可能会随着 PAL 活性水平的提高而增加。

1.2 白藜芦醇

二苯乙烯类包括许多化合物, 如白藜芦醇及其糖苷, 它们在心血管疾病和癌症中发挥重要作用^[3], 包括抗癌、抗衰老、抗炎及其降血压的能力。由于合成白藜芦醇的植物种类较少, 花生和葡萄的含量相对较高, 因此利用超声来富集白藜芦醇具有重要意义。研究表明, 在超声波清洗的过程中, 花生仁、葡萄皮、葡萄叶甚至葡萄汁中的白藜芦醇含量都会显著增加^[36-41]。

RUDOLF 等^[37]研究表明经超声处理的花生在 24 h 避光培养后白藜芦醇显著提高, 其中经 39.2 mW/cm² 超声 4 min 的花生避光 36 h 后可得到最高含量的反式白藜芦醇, 为 3.96 μg/g。同样地, SALES 等^[38]发现超声后的花生经避光培养后, 白藜芦醇含量显著提高 16~319 倍。HASAN 等^[36]采用超声处理葡萄皮和叶片来富集白藜芦醇, 结果表明超声处理和进一步孵育可使葡萄皮和叶片中白藜芦醇含

量增加, 分别在 5 min 的超声处理 6 h 和 15 min 的超声处理 3 h 后, 其含量分别增加 7.7 倍和 1.9 倍。在这之后, HASAN 等^[39]对超声处理葡萄果实进行进一步探究, 结果显示经超声处理 5 min, 置于黑暗中 25 °C 孵育 6 h 的葡萄果实制得的葡萄汁中白藜芦醇的含量明显高于对照组。

超声处理葡萄富集白藜芦醇是一种基于白藜芦醇合酶(resveratrol synthase, RS)基因诱导的时间依赖性的过程。白藜芦醇的富集受到白藜芦醇合酶的转录控制, 而超声处理能够引起白藜芦醇合酶活性升高^[31]。

此外, 李淑莹^[42]的研究表明, 相比于单一诱导方式(即应用 US 处理), 超声-苯丙氨酸(ultrasound phenylalanine, US-Phe)双重诱导方式可对花生芽中白藜芦醇的富集产生协同效应, 而紫外线超声(ultraviolet ultrasound, UV-US)双重诱导方式则对白藜芦醇的富集产生拮抗效应。从酶学角度初步分析可知, US 可以提高肉桂酸-4-羟化酶(cinnamate-4-hydroxylase, C4H)和 RS2 种酶的活性; 外源添加前体物质 Phe 能提高 PAL、C4H、4-香豆酸-辅酶 A 连接酶(4 coumarate coenzyme A ligase, 4CL)、类黄酮 3-O-葡萄糖基转移酶(3-o-glucosyltransferase, 3-O-GT)4 种酶的活性, 因此, 相较于采用 US, US-Phe 双重诱导方式能更显著地提高酶的活性, 对白藜芦醇的富集有协同促进作用。但在 UV-US 双重诱导方式中, 发现 PAL、C4H、4CL、RS 活性总体低于单一诱导方式, 说明这种双重诱导方式对花生芽中白藜芦醇富集有拮抗作用^[42]。

1.3 羟基肉桂酸

香豆酸、阿魏酸和咖啡酸是羟基肉桂酸衍生物^[43]。这些化合物具有很强的抗氧化和抗炎作用, 也被用于治疗糖尿病和肥胖相关的健康障碍^[44]。

SALES 等^[29]将花生暴露于 120 mW/cm³ 的超声功率密度下 10~12 min, 然后在 40 cm 的紫外光照射下 10 min, 咖啡酸浓度最高达到 1.6 µg/g; 当花生在 120 mW/cm³ 下超声处理 10~12 min, 然后在距离紫外光 40 cm 处进行 10 min UV 处理时, 可获得最大阿魏酸浓度为 3.8 µg/g。US 和 UV 联合作用对富集花生中香豆酸、阿魏酸和咖啡酸具有协同作用, US 单独或与 UV 联用对花生籽粒中不同类型羟基肉桂酸的富集也有很大影响, 实验发现, US 和 UV 联用工艺的最佳参数可获得 170 µg/g 的香豆酸、2.6 µg/g 阿魏酸^[29]。

1.4 类黄酮

类黄酮, 又称黄酮类化合物, 是植物重要的一类次生代谢产物, 存在于水果、蔬菜、豆类和茶叶等许多食源性植物中。LING 等^[45]研究超声处理(400 W, 6 min)与 0.4% 过乙酸在 20 °C 对枇杷贮藏过程中生理变化的影响, 结果表明, 联合超声和乙酸处理后, 枇杷果实中总黄酮含量在第 3 d 达到最高值, 且高于对照组。这可能是由于超声联合过乙酸在处理枇杷果实的时候, 可以提高多酚氧化酶

(polyphenol oxidase, PPO)和过氧化物酶(peroxidase, POD)的活性。而 PPO 和 POD 是参与苯丙烷途径和氧化过程的重要酶, 从而产生多种具有结构和防御功能的酚类化合物^[46-47]。

此外, 卞紫秀等^[48]研究表明, 利用超声处理可以有效地促进苦荞麦种子的萌发, 从而富集苦荞芽苗中黄酮类化合物。这可能要归因于超声处理能有效激活植物种子萌发的各种酶类的活性^[49], 显著提高种子萌发率, 同时诱导种子中一些生物活性成分的合成^[50-51]。

2 功率超声对萜类化合物的富集

萜类化合物是另一类重要的植物次生代谢产物, 同时具备许多生理活性如驱风、止咳。一些萜类成分还具有重要的药用价值, 如紫杉醇可作为一种天然抗癌药物。

利用功率超声对胡萝卜、人参种子等植物食品进行处理后, 可以引发植物细胞的防御反应, 导致相关酶活性的改变, 从而诱导类胡萝卜素、皂苷类等次生代谢产物的生物合成。

2.1 类胡萝卜素

类胡萝卜素是具有抗氧化性能的四萜类化合物, 可以防止细胞损伤和慢性疾病, 也是植物的色素成分^[52]。

CUELLAR-VILLARREAL 等^[30]在 20 °C, 24 kHz 条件下, 对胡萝卜进行超声处理后发现, 胡萝卜与对照样相比, 类胡萝卜素含量提高 21.1%。NOWACKA 等^[53]研究表明, 超声处理(1200 s, 21 kHz)胡萝卜样品与对照组相比, 总类胡萝卜素浓度增加了 12.5%。贮藏 3 d 后, 对照组和超声处理后的样品中类胡萝卜素含量分别下降 16.4%和 7.6%^[30]。这表明, 在胡萝卜贮藏过程中, 所采用的处理方法有助于类胡萝卜素的保留。类胡萝卜素在植物食品中的降解与脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)等氧化酶的活性有关^[54]。超声处理能去除食物基质中的闭塞氧, 而这正是 LOX 活性所需要的底物。类胡萝卜素在超声处理的植物食品中的保留可以归因于在贮藏过程中低的 LOX 活性, 超声导致 LOX 部分失活以及存在较低的氧可用性。

2.2 皂苷类

人参中含有大量的有益化合物, 如人参皂苷^[55]。孙立军等^[56]利用超声处理促进人参种子的萌发, 超声处理可以提高种子中 2 种重要的酶, 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、POD 的活性, 抑制膜脂过氧化, 从而促进种子的生理成长。此外, 超声可以在细胞上产生机械和化学应力, 诱导植物细胞的防御反应^[57], 导致过氧化氢的产生, 从而刺激皂苷的合成。

2.3 紫杉醇

紫杉醇为二萜类物质, 是一类重要的抗癌剂^[58]。WU

等^[59]采用超声和一种假定的化学诱导子,茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MJ)结合原位溶剂萃取(两相培养),对红豆杉细胞悬浮培养液中紫杉醇进行富集。结果表明,在4周的培养周期内,经2 min US处理1~2次,紫杉醇产量提高了1.5~1.8倍^[59]。对红豆杉细胞悬浮培养液进行低功率和短暴露超声处理,可以潜在增加紫杉醇的积累^[59-60]。超声通过瞬间产生O₂和H₂O₂来诱导紫杉醇的合成,从而诱导茉莉酸(jasmonic acid, JA)合成相关酶的表达^[60]。MJ与US共同作用下, PAL活性的增加,从而导致植物细胞的次级代谢活性增强。此外, MJ与超声联合使用在诱导紫杉醇合成方面也显现出了协同作用^[59]。

3 结论与展望

超声作为一种新兴的非热处理技术,已经广泛应用于食品工业中。低功率的超声处理可以用于水果和蔬菜等农产品的清洗和净化,提高营养价值、保持质量的同时也有效减少从收获、储存到消费的损失。目前的应用主要是基于其物理和化学效应,而关于其生物学效应的研究相对较少。近年来超声作为一种安全高效的生物刺激手段得到国内外学者的关注,研究人员发现超声在清除微生物和农药的同时也有利于富集对人体有益的PSMs。这一发现将会拓展超声在食品领域的应用,在产业界和家庭中也将具有很好的应用前景。但是目前关于超声富集植物次级代谢产物的研究和应用仍处于初级阶段,将来需要将这一技术应用到更多植物食品上来富集PSMs,同时需要更深入的探讨不同种类的植物次级代谢产物的富集生物学机理。

参考文献

- HASAN MM, BASHIR T, BAE H. Use of ultrasonication technology for the increased production of plant secondary metabolites [J]. *Molecules*, 2017, 22(7): 1046.
- HATA K, OSAKI M, DHAR DK, *et al.* Evaluation of the antiangiogenic effect of taxol in a human epithelial ovarian carcinoma cell line [J]. *Cancer Chemother Pharmacol*, 2004, 53(1): 68-74.
- BAUR JA, SINCLAIR DA. Therapeutic potential of resveratrol: The *in vivo* evidence [J]. *Nat Rev Drug Discov*, 2006, 5(6): 493-506.
- AGGARWAL BB, BARTLOW A, BENZIE IFF, *et al.* Herbal medicine: Biomolecular and clinical aspects. Second edition [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- RIBERA AE, ZUNIGA G. Induced plant secondary metabolites for phytopathogenic fungi control: A review [J]. *J Soil Sci Plant Nut*, 2012, 12(4): 893-911.
- GOUVEA DR, GOBBO-NETO L, SAKAMOTO HT, *et al.* Seasonal variation of the major secondary metabolites present in the extract of *Eremanthus matto-grossensis* Less (Asteraceae: Vernoniaeae) leaves [J]. *Quim Nova*, 2012, 35(11): 2139-2145.
- ALARCON-ROJO AD, CARRILLO-LOPEZ LM, REYES-VILLAGRANA R, *et al.* Ultrasound and meat quality: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, (55): 369-382.
- LIN L, WANG XL, LI CZ, *et al.* Inactivation mechanism of *E. coli* O157:H7 under ultrasonic sterilization [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, (59): 104751.
- DA-SILVA LFR, GOMES AD, CASTRO DRG, *et al.* Ultrasound-assisted homogenization and gum Arabic combined to physicochemical quality of cupuacu juice [J]. *J Food Process Preserv*, 2019, 43(9): 14072.
- SAMANI BH, KHOSHTAGHAZA MH, MINAEI S, *et al.* Design, development and evaluation of an automatic fruit-juice pasteurization system using microwave-ultrasonic waves [J]. *J Food Sci Technol*, 2016, 53(1): 88-103.
- WANG JY, LIU QD, XIE BJ, *et al.* Effect of ultrasound combined with ultraviolet treatment on microbial inactivation and quality properties of mango juice [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, (64): 105000.
- KHANDPUR P, GOGATE PR. Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices [J]. *Ultrason Sonochem*, 2016, (29): 337-353.
- CHEN FY, ZHANG M, YANG CH. Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, (63): 104953.
- MODARRES-GHEISARI SMM, GAVAGSAZ-GHOACHANI R, MALAKI M, *et al.* Ultrasonic nano-emulsification-A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, (52): 88-105.
- XU BG, AZAM RSM, WANG B, *et al.* Effect of infused CO₂ in a model solid food on the ice nucleation during ultrasound-assisted immersion freezing [J]. *Int J Refrig*, 2019, (108): 53-59.
- XU BG, ZHANG M, BHANDARI B, *et al.* Infusion of CO₂ in a solid food: A novel method to enhance the low-frequency ultrasound effect on immersion freezing process [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2016, (35): 194-203.
- LI XX, SUN P, JIA JZ, *et al.* Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*) [J]. *Food Sci Technol Int*, 2019, 25(2): 171-181.
- HUANG D, MEN KY, LI DP, *et al.* Application of ultrasound technology in the drying of food products [J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, (63): 104950.
- LIN I, EREL D. Dynamic ultrasonic cleaning and disinfecting device and method [Z]. US, 1992.
- 邢志强, 李立祥, 邱新平, 等. 茶叶中γ-氨基丁酸与L-谷氨酸的HPLC分析方法[J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(3): 147-152.
- XING ZQ, LI LX, QIU XP, *et al.* Determination of γ-aminobutyric acid and L-glutamic acid in tea by HPLC [J]. *Food Ferment Ind*, 2009, 35(3): 147-152.
- AREFI-OSKOU S, KHATAEE A, SAFARPOUR M, *et al.* A review on the applications of ultrasonic technology in membrane bioreactors [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, (58): 104633.
- PILLI S, BHUNIA P, YAN S, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2011, 18(1): 1-18.
- PITTMAN UJ, CAREFOOT JM, ORMROD DP. Effect of magnetic seed treatment on amylolytic activity of quiescent and germinating barley and wheat seeds [J]. *Can J Plant Sci*, 1979, 59(4): 1007-1011.
- CARBONELL MV, MARTINEZ E, AMAYA JM. Stimulation of germination in rice (*Oryza sativa* L.) by a static magnetic field [J]. *Electro*

- Magnetobiol, 2000, 19(1): 121–128.
- [25] KADLEC P, RUBECOVA A, HINKOVA A, *et al.* Processing of yellow pea by germination, microwave treatment and drying [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2001, 2(2): 133–137.
- [26] ALADJADJIYAN A. Physical factors for plant growth stimulation improve food quality [C]// *Food production-approaches, challenges and tasks*, 2012.
- [27] GORDON AG. Beneficial effects of ultrasound on plants-A review [J]. *Ultrasonics*, 1971, 9(2): 81–84.
- [28] SALES JM, RESURRECCION AVA. Maximizing phenolics, antioxidants and sensory acceptance of UV and ultrasound-treated peanuts [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2010, 43(7): 1058–1066.
- [29] SALES JM, RESURRECCION AVA. Phenolic profile, antioxidants, and sensory acceptance of bioactive-enhanced peanuts using ultrasound and UV [J]. *Food Chem*, 2010, 122(3): 795–803.
- [30] CUELLAR-VILLARREAL MD, ORTEGA-HERNANDEZ E, BECERRA-MORENO A, *et al.* Effects of ultrasound treatment and storage time on the extractability and biosynthesis of nutraceuticals in carrot (*Daucus carota*) [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, (119): 18–26.
- [31] YU J, ENGESETH NJ, FENG H. High intensity ultrasound as an abiotic elicitor-effects on antioxidant capacity and overall quality of romaine lettuce [J]. *Food Bioproc Technol*, 2016, 9(2): 262–273.
- [32] PINHEIRO J, ALEGRIA C, ABREU M, *et al.* Influence of postharvest ultrasounds treatments on tomato (*Solanum lycopersicum*, cv. Zinac) quality and microbial load during storage [J]. *Ultrason Sonochem*, 2015, (27): 552–559.
- [33] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance [J]. *Trends Plant Sci*, 2002, 7(9): 405–410.
- [34] MURPHY R, DECOURSEY TE. Charge compensation during the phagocyte respiratory burst [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2006, 1757(8): 996–1011.
- [35] JACOBO-VELAZQUEZ DA, MARTINEZ-HERNANDEZ GB, RODRIGUEZ SD, *et al.* Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(12): 6583–6593.
- [36] HASAN MM, BAEK KH. Induction of resveratrol biosynthesis in grape skins and leaves by ultrasonication treatment [J]. *Korean J Hortic Sci*, 2013, 31(4): 496–502.
- [37] RUDOLF JR, RESURRECCION AV. Elicitation of resveratrol in peanut kernels by application of abiotic stresses [J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(26): 10186–10192.
- [38] SALES JM, RESURRECCION AVA. Maximising resveratrol and piceid contents in UV and ultrasound treated peanuts [J]. *Food Chem*, 2009, 117(4): 674–680.
- [39] HASAN MM, YUN HK, KWAK EJ, *et al.* Preparation of resveratrol-enriched grape juice from ultrasonication treated grape fruits [J]. *Ultrason Sonochem*, 2014, 21(2): 729–734.
- [40] POTREBKO I, RESURRECCION AVA. Effect of ultraviolet doses in combined ultraviolet-ultrasound treatments on trans-resveratrol and trans-piceid contents in sliced peanut kernels [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(17): 7750–7756.
- [41] HASAN MM, CHA M, BAJPAI VK, *et al.* Production of a major stilbene phytoalexin, resveratrol in peanut (*Arachis hypogaea*) and peanut products: A mini review [J]. *Rev Environ Sci Biol*, 2013, 12(3): 209–221.
- [42] 李淑莹. 富含白藜芦醇花生芽油的制备及品质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LI SY. Research on preparation and properties of resveratrol-riched germinated peanut oil [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [43] ZHAO ZH, MOGHADASIYAN MH. Bioavailability of hydroxycinnamates: A brief review of *in vivo* and *in vitro* studies [J]. *Phytochem Rev*, 2010, 9(1): 133–145.
- [44] EL-SEEDI HR, EL-SAID AMA, KHALIFA SM, *et al.* Biosynthesis, natural sources, dietary intake, pharmacokinetic properties, and biological activities of hydroxycinnamic acids [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(44): 10877–10895.
- [45] LING C, XU J, SHAO S, *et al.* Effect of ultrasonic treatment combined with peracetic acid treatment reduces decay and maintains quality in loquat fruit [J]. *J Food Qual*, 2018, (4): 1–8.
- [46] 林媛, 孙钧政, 陈艺晖, 等. 纸片型 1-MCP 对杨桃果实采后病害的抑制与抗病相关酶的诱导[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(6): 1172–1176.
- LIN Y, SUN JZ, CHEN YH, *et al.* Inhibition of postharvest disease and induction of defense-related enzymes by paper containing 1-methylcyclopropene(1-MCP) in *Averrhoa carambola* fruit [J]. *Chin J Trop Crop*, 2016, 37(6): 1172–1176.
- [47] 王云香, 张亚楠, 罗云波, 等. 青霉病对红富士苹果理化品质和抗病系统的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(8): 166–171.
- WANG YX, ZHANG YN, LUO YB, *et al.* Effect of blue mould rot on the quality and resistance systems of apple [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(8): 166–171.
- [48] 卞紫秀, 汪建飞, 王顺民. 超声波处理下苦荞麦萌发及富集黄酮工艺优化研究[J]. *安徽工程大学学报*, 2018, 33(5): 7–13.
- BIAN ZX, WANG JF, WANG SM. Optimization of flavonoid enrichment technology and germination of buckwheat seed by ultrasonic method [J]. *J Anhui Polytechnic Uni*, 2018, 33(5): 7–13.
- [49] 陈力玉, 张淑卿, 李剑峰, 等. 微波辐照对苜蓿种子储存后发芽和幼苗生长生理特性的影响[J]. *原子能科学技术*, 2012, 46(S1): 729–735.
- CHEN LY, ZHANG SQ, LI JF, *et al.* Effect of microwave irradiation on germination and seedling growth physiological characteristics of alfalfa seeds after storage [J]. *Atom Energ Sci Technol*, 2012, 46(S1): 729–735.
- [50] 王顺民, 汪建飞. 超声波处理对苦荞麦萌发、芽苗还原糖和总黄酮含量及抗氧化活性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(1): 161–166.
- WANG SM, WANG JF. Ultrasonic enhancement of tartary buckwheat germination and the production of nutrients in sprouts [J]. *Food Mach*, 2017, 33(1): 161–166.
- [51] 张冬晨, 刘海杰, 刘瑞, 等. 超声波处理对荞麦种子营养物质累积以及抗氧化活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(7): 69–73, 78.
- ZHANG DC, LIU HJ, LIU R, *et al.* Effect of ultrasonic treatment on nutritional accumulation and antioxidant activity of common buckwheat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(7): 69–73, 78.
- [52] DUTTA D, CHAUDHURI UR, CHAKRABORTY R. Structure, health benefits, antioxidant property and processing and storage of carotenoids [J]. *Afr J Food Agric Nutr Dev*, 2011, 4(13): 1510–1520.
- [53] NOWACKA M, WEDZIK M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot

- tissue [J]. Appl Acoust, 2016, (103): 163–171.
- [54] JACOBO-VELAZQUEZ DA, HERNANDEZ-BRENES C, CISNEROS-ZEVALLOS L, *et al.* Partial purification and enzymatic characterization of avocado (*Persea americana* Mill, cv. Hass) lipoxygenase [J]. Food Res Int, 2010, 43(4): 1079–1085.
- [55] MILLER DL, WILLIAMS AR, MORRIS JE, *et al.* Sonoporation of erythrocytes by lithotripter shockwaves *in vitro* [J]. Ultrasonics, 1998, 36(9): 947–952.
- [56] 孙立军, 徐彤, 任跃英, 等. 超声处理对人参种子萌发以及 SOD、POD 的影响[J]. 中国现代中药, 2012, 14(1): 24–28.
SUN LJ, XU T, REN YY, *et al.* Influence of the ultrasonic treatment on the preliminary study of ginseng seeds and the influence of SOD, POD [J]. Mod Chin Med, 2012, 14(1): 24–28.
- [57] LIN LD, WU JY, HO KP, *et al.* Ultrasound-induced physiological effects and secondary metabolite (saponin) production in *Panax ginseng* cell cultures [J]. Ultrasound Med Biol, 2001, 27(8): 1147–1152.
- [58] WANI MC, TAYLOR HL, WALL ME, *et al.* Plant antitumor agents. VI. The isolation and structure of taxol, a novel antileukemic and antitumor agent from *Taxus brevifolia* [J]. J Am Chem Soc, 1971, 93(9): 2325–2327.
- [59] WU J, LIN L. Enhancement of taxol production and release in *Taxus chinensis* cell cultures by ultrasound, methyl jasmonate and *in situ* solvent extraction [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2003, 62(2-3): 151–155.
- [60] WU JY, GE XC. Oxidative burst, jasmonic acid biosynthesis, and taxol production induced by low-energy ultrasound in *Taxus chinensis* cell suspension cultures [J]. Biotechnol Bioeng, 2004, 85(7): 714–721.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



徐清清, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬营养学。

E-mail: xuqingqing2709@163.com



孙玉敬, 博士, 副教授, 主要研究方向为超声化学及果蔬营养与健康。

E-mail: yjsun01@zjut.edu.cn

“动物性食品加工与质量安全”专题征稿函

当前我国经济飞速发展, 人们对动物性食品的要求也不再仅仅是数量上的追求, 正在向质量要求进行转变, 然而目前国内动物性食品在各个方面仍需要进行完善。因此, 如何解决这些问题, 使动物性食品安全真正得到保障, 已显得尤为重要。

鉴于此, 本刊特别策划了“动物性食品加工与质量安全”专题, 由东北农业大学食品学院许晓曦教授担任专题主编。专题将围绕现代化加工与副产物综合利用技术、质量安全与检测技术、营养及风味成分分析技术、污染防控与危害分析、法律法规和发展政策几方面, 或您认为本领域有意义的问题综述及研究论文均可, 专题计划在 2021 年 5 月出版。

本刊主编国家食品安全风险评估中心吴永宁研究员与本专题主编许晓曦教授特邀请有关食品领域研究人员为本专题撰写稿件, 综述、研究论文和研究简报均可。请在 2021 年 3 月 1 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。再次感谢您的关怀与支持!

投稿方式(注明专题**动物性食品加工与质量安全**):

网站: www.chinafoodj.com(备注: 投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者

登录-注册投稿-投稿栏目选择“2020 专题: **动物性食品加工与质量安全**”)

邮箱投稿: E-mail: jfoodsqa@126.com(备注: **动物性食品加工与质量安全**专题投稿)

《食品安全质量检测学报》编辑部