DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2017.04.001

超声空化效应对食品品质影响研究进展

孙建霞[1]，梅洲雄[1]，白卫滨[2]，李杏华[1]，姜桂传[3]，丁利君[*1]

(1. 广东工业大学 轻工化工学院，广东 广州 510006；2. 暨南大学 食品科学与工程系，广东 广州 510006；3. 山东农业工程学院 食品科学与工程系，山东 济南 250100)

摘要：超声波是指频率高于 20 kHz 的机械波，其特点是频率高、波长短、功率大、穿透力强。作为一种非热加工技术，超声波目前已应用于食品加工的各个领域，如乳化、晶化、均质、剪切、清洗、水解、催陈、提取、杀菌、钝酶等。与传统的热加工技术相比，超声波具有设备简单、无化学残留，、处理时间短、耗能少、产热低、对食品品质影响少等优势。然而，近年来研究发现，由于超声波的“空化效应”，高强度、长时间的超声处理也会使食品色泽、香气、风味、营养物质以及质地等方面发生改变，影响了产品的外观品质，降低了食品的食用价值。作者综述了目前国内外有关此方面的研究进展，以期为超声波技术在食品加工中的进一步应用提供理论基础和技术指导。

关键词：超声波；食品品质；负面影响；空化效应

中图分类号：TS 205.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689(2017)04—0337—06

Research Progress on the Effects of Ultrasonic Cavitation on Food Quality

SUN Jianxia[1]，*MEI Zhouxiong*[1]，*BAI Weibin*[2]，*LI Xinghua*[1]，*JIANG Guichuan*[3]，*DING Lijun*[*1]

(1. Faculty of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510006, China; 3. Department of Food Science and Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan 250100, China)

Abstract: Ultrasound generally refers to mechanical waves with a frequency of 20 kHz or more exhibiting high frequency, short wavelength and strong penetrability. As a non-thermal food processing technique, ultrasound has been applied in various fields of food processing such as emulsification, crystallization, homogenization, cutting, cleaning, hydrolysis, extraction, accelerating aging, enzyme and microbial inactivation, etc. Compared with the conventional thermal techniques, ultrasound presents many advantages such as simple device, no chemical residues, short processing time, lower energy consumption, minimal thermal effects, less influence on food quality, and so on. However, the color, aroma, texture and nutrition of food would be affected by the high-power and

收稿日期：2016-06-30

基金项目：国家自然科学基金项目(31201402)；山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011NY016)；国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD36B04)。

作者简介：孙建霞(1978—)，女，山东招远人，工学博士，副教授，主要从事农产品加工及贮藏工程研究。E-mail：jxsun1220@163.com

*** 通信作者**：丁利君(1965—)，女，湖南长沙人，教授，主要从事农产品加工与贮藏工程研究。E-mail：ddddlj@foxmail.com

引用本文：孙建霞，梅洲雄，白卫滨，等. 超声空化效应对食品品质影响研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2017，36(04)：337-342.

long-time processing of ultrasonic cavitation,which negatively affected the appearance and edibility of food. This article mainly reviewed the global progress in this field,providing the theoretical basis and technical support for further application of ultrasound in food processing.

Keywords: ultrasound,food quality,unfavorable influence,cavitation

近年来，随着消费者对食品的营养、安全、新鲜、方便和功能性方面的要求越来越高,绿色、健康的消费理念深入人心,非热加工作为一种新兴的食品加工技术，以其能较好地保持食品固有营养成分、质构、色泽、新鲜度和延长货架期等优势逐渐受到业界的重视。食品非热加工技术,主要包括超高压、超声波、高压脉冲电场、高压二氧化碳、电离辐射、脉冲磁场等,目前主要应用于食品的杀菌与钝酶[1-2]。与传统的“热加工”技术相比,非热加工具有环保、节能等优势。美、加、法、德、日等国家已经通过非热加工技术的食品安全评价,并获准该技术在果蔬、肉制品、水产品等领域进行商业应用。一些非热加工技术如超高压、高压二氧化碳等在发达国家已经得到了产业化应用。

超声波作为非热加工技术中一种重要手段,因其设备简单、无化学残留、安全性能高、产热低、耗能少、对食品品质影响少等优点,在食品行业得到越来越广泛的关注。超声波是一种频率在 20 kHz 以上的弹性机械波,其在弹性介质中传播具有频率高、波长短、功率大、穿透力强等特点[3]。应用在食品加工中的超声波频率通常在 20~100 kHz,称为功率超声。功率超声波能够在液体中产生“空化效应”。所谓“空化效应”是指液体在超声波的作用下,激活或产生空化泡,并使空化泡振荡、增长和爆裂,在极短的时间内产生约 5 000 K 高温和 50 MPa 高压,此过程伴随着强烈的冲击波和 400 km/h 的微射流[4]。功率超声波能够利用超声振动能量,在食品介质中产生强大的剪切力和局部的高温,从而使物质的组织结构、性状和组成发生改变。

目前,关于超声波技术的研究已经在食品的各个领域展开,如辅助提取、助滤、灭菌、钝酶、干燥、冻融、清洗、均质、乳化、酒类发酵和催陈、肉的嫩化、食品添加剂的合成、食品品质检测和分子改性等[5]。然而最近有研究表明,高强度的超声波在应用于液体食品加工过程中,由于空化泡破裂产生的局部高温高压、高速射流以及空化效应产生的过氧化氢等能促进食品内部成分发生不利的变化,造成食品色泽、香气、风味、营养物质以及质地等方面的改变,影响了产品的外观和质量品质,降低了食品的食用价值[6-7]。具体如图 1 所示。

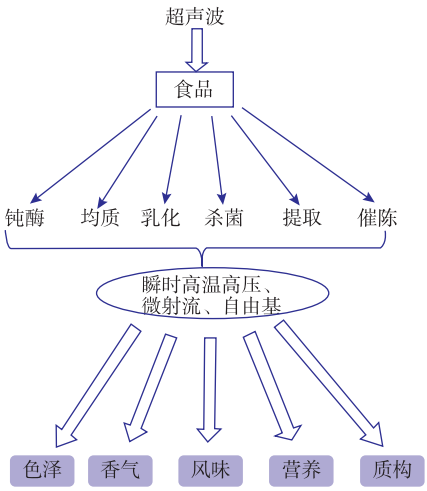


图 1　超声波空化效应对食品品质的影响

Fig. 1　Effect of ultrasound cavitation on food quality

1 超声波对食品色泽的影响

食品的色泽是构成食品感官品质的一个重要因素。赏心悦目的色泽能引起人们的食欲,如红色的草莓、紫色的葡萄、橙色的橘子。因此,保持或赋予食品以良好的色泽是食品科学技术中的重要问题。研究发现食品在加工过程中会发生颜色的改变，在一些食品体系中，普通的热加工会发生 Maillard 反应使产品颜色发生改变。超声波的热效应虽然很小,但连续的超声也会使食品发生非酶褐变,褐色物质随着处理时间的增加而增多[8]。另一方面,对于有颜色的果蔬类产品,持续的超声作用下产生的自由基会使色素类物质发生降解。

Vercet 等[8]比较了热处理和压热超声处理的牛奶中的非酶促褐变行为,研究发现两种加工方式的非酶促褐变的方式不一样,经超声处理后的样品中 5-羟甲基糠醛的含量明显高于热处理,且生成速率

要快,从而褐变色素的产量也更高。Gómez -López[9]等人在研究超声波对橙汁货架期产品品质的影响中发现,超声能适当延长橙汁的货架期并有杀菌作用,但超声会影响果汁的色泽,产品经处理后 L^* 值增加,a^* 值下降,b^* 值保持不变，且抗坏血酸的含量有所下降。Tiwari 等人对超声波处理过程中产品品质的变化做了大量研究。在研究超声波处理新鲜橙汁颜色变化时发现,果汁的亮度受超声输出功率的影响很大，当使用输出功率为 40%时 L^* 值会增加，但输出功率达到 100%时,L^* 值反而会下降[10]。在对草莓汁进行超声处理研究中发现,草莓汁经频率 20 kHz、最大输出功率 1 500 W,功率调节范围 40%~100%、处理时间 0~10 min 的超声处理后,花色苷和维生素 C 的质量分数最大分别下降了 3.2%和 11%,产品颜色发生了明显变化,分析发现这种颜色的改变与草莓汁中花色苷以及维生素 C 含量的下降均具有一定的相关性[11]。Caminiti 等[12]人在用超声波处理苹果汁和红莓汁混合果汁时,同样发现果汁中花色苷的含量会下降,降低了产品的可接受程度。超声波处理还可以导致富含类胡萝卜素的产品颜色发生改变,Adekunte 等[13]发现超声处理导致了番茄汁 Hunter 色值(L^*,a^*,b^*)的降低,以及 TCD 和 CI 的增加，使番茄汁的色泽产生了肉眼可观察到的变化。原因可能是超声波的空化作用加快了介质中的化学反应,导致了类胡萝卜素的异构化作用,从而使番茄汁的颜色发生改变。

超声波之所以会影响液体体系的色泽,可能原因为超声的空化效应使产品内部发生了一系列的物理、化学和生化的反应,增加了扩散速率,分散聚合物,破坏了产品中的色素物质。

2 超声波对食品风味的影响

食品风味(Flavor)是指摄入口腔的食品,刺激人的各种感觉受体,使人产生的短时的、综合的生理感觉。它是食品感官质量的重要指标之一,主要包括味道(taste)与香气(aroma)。

味道是我们的舌头和口腔对食物和饮品的反应，味道主要涉及的是酸甜苦辣咸以及鲜味(Umami)和矿物味等。食品中的表现味道的物质虽然很少,但能使食品呈现出不同的特征。研究发现,超声波处理会使食品中的味道发生部分改变。Walkling-Ribeiro 等[14]采用热超声和脉冲电场对橙汁进行联合处理,结果发现其感官品质和高温瞬时杀菌的橙汁基本接近,但感官评定的时候却略有金属味,分析可能是超声的过程中金属离子迁移到果汁中。

Pingret 等[15]研究了超声波处理后葵花油中的风味物质的变化，并用 EPR (electron paramagentic resonance)证明了超声波处理过程中有自由基的存在,通过固相微萃取分析,发现油脂氧化生成了戊醛、己醛、糠醛等物质使样品产生异味。Chemat 等[16]对精炼葵花籽油进行超声辐射处理,研究发现超声波对样品的脂肪酸组成没有明显的影响,但会使葵花籽油产生腐臭的气味,并发现有己醛和柠檬精油的产生,说明样品发生了一定的氧化,对油品的风味产生了一定的负面影响。研究者通过对超声后脂肪酸的组成及降解产物的分析发现,油脂的酸价和过氧化值的增加导致了风味物质的损失,使油品产生异味，进一步研究发现这和超声作用产生的空化效应有密切关系[17-18]。

食品的香气是由脂肪烃、含氧衍生物、芳香族化合物、含氮衍生物、含硫化合物产生的,这些化合物含量很低且对热不稳定[20]。香气是食品极为重要的品质特征,传统的高温杀菌会导致食品中挥发性组分和维生素的损失，而超声波作为非热加工方法,在合适的参数下,可以最大限度的减少食品中挥发性物质的损失,很好的保持食品原有的香气成分。然而目前有研究发现,超声作为一种辅助催陈方式,如果处理超过一定的时间也会影响食品的香气。这是因为超声波的空化作用产生的自由基可以加速乙酸乙酯的水解、羟醛缩合等反应,通过化学反应间接影响芳香化合物的含量,从而影响食品的香气[20]。Zheng 等[21]人研究超声催陈青梅酒发现,360 W 超声处理 50 min 后的青梅酒的感官评分要低于的处理 30 min 的,这与酒中风味物质特别是酯类物质的减少有关。Šimunek 等[22]分别研究了大功率超声波和巴氏杀菌处理后苹果汁和苹果酒的香气物质和感官品质,通过气相色谱分析发现超声波处理能产生新的香气物质,但也能使原本的香气物质消失,而且芳香物质比巴氏杀菌的对照组少。

3 超声波对食品营养及生物活性物质的影响

超声波对食品营养的影响是双重的，一方面，

适当的超声处理能破坏细胞膜，使胞内物质渗出；另一方面，超声波空化效应产生局部的高温高压以及自由基，使对氧化敏感的营养物质如维生素 C、花色苷、类胡萝卜素、酚类物质降解。

Hamed 等[23]在研究超声对橙汁中 VC 影响实验中发现，超声波能加速 VC 的降解，且其降解符合一级反应动力学，这可能与超声加速 VC 的氧化有关。Sun 等[24]研究了超声波处理对 β-胡萝卜素稳定性影响时发现，β-胡萝卜素的降解速率随超声温度的增加而加快，而且在-5~15 ℃范围内符合一级动力学，在 25 ℃符合二级动力学。Cheng 等[25]人比较了热处理和超声处理后草莓酱的营养物质变化(VC、总酚和总花青素)，发现合适参数下的超声处理能最大限度保留草莓酱中生物活性物质，但随着超声时间的延长和超声功率的增大，营养物质的含量也会下降，这是超声过程中所产生的自由基所导致的降解。另外，超声波用于辅助提取鸡肝中的叶黄素的研究中发现，在非皂化的条件下超声波提取率最高，但是在皂化的条件下超声会引起叶黄素的降解[26]。模拟体系下的研究还发现，超声波处理还会引起虾青素以及番茄红素的降解[27]。

超声波预处理用于水果干燥，可以加快干燥速率，缩短干燥时间，降低干燥温度、有效节省能源，然而研究发现长时间的超声处理增加了水果中可溶性固形物、有机酸、总酚、花青素、类黄酮物质以及抗氧化活性的损失，原因是超声波处理增加了组织的多孔性和渗透性[28]。

综上所述，长时间、大功率的超声处理不利于产品营养物质的保持，原因与超声过程中空化效应引起的自由基、微射流、局部高温高压、机械作用导致的营养物质的降解有关。

4 超声波对食品质构的影响

质地是反映食品品质的重要指标之一，被广泛用来表示食品的组织状态、口感和美味感等[29]，食品的质地属性来源于食品的结构，其中所包含的各营养成份如脂质、蛋白质和淀粉等对质地的影响都很大。在食品加工的过程中，这些组成和结构的变化会引起食品硬度、粘弹性等的改变，进而对质地造成一定的影响。

研究表明超声波处理对淀粉相对分子质量、表面结构、结晶结构与凝胶质构特性、流变特性、热性质、粘度、透明度、反应性能均具有明显影响[30]。适当的超声波处理还可改善面筋蛋白结构和功能；促进脂肪颗粒的尺寸减小，起到乳化效果；降低肉类食品的剪切力和咀嚼力，具有显著的嫩化作用[31]。

然而有研究显示，高强度、长时间的超声处理可能会对食品质构产生不利的影响。余海霞等[36]人研究超声波嫩化鱿鱼时发现，在相同的超声功率下，处理超过一定程度，肉样的剪切力随着超声频率和超声时间增加而上升，这说明高强度的超声将不利于肉的嫩化处理。Chang 等[32]也有类似的发现：超声波处理牛肉样品超过 50 min 后，样品的硬度会急剧的增加，粘性、弹性、粘结性、胶黏性和咀嚼度都有相同的趋势，而且与未超声处理的对照组相比，超声处理对牛肉样品的质构也没有改善。Brncic 等[33]研究超声预处理干燥苹果片时发现，使用超声波预处理（50%的输出功率）能极大地缩短干燥时间，并且能增加苹果片的硬度和脆度，然而当输出功率为 100%时，其硬度达到 217.90 N，这显然是不合适的，所以在加工的过程中要控制好超声功率的输出，以达到最佳的效果。采用超声辅助冷冻花椰菜实验中发现，当超声强度在 0.250~0.412 W/cm^2 之间，样品的硬度、弹性、凝聚性、咀嚼性、颜色以及抗坏血酸含量都得到改善，然后超过 0.412 W/cm^2，品质急剧下降[34]。在对苹果(Fuji)进行超声辅助渗透脱水实验中发现，与对照组相比，超声波处理后的苹果硬度损失最大(22%)，电镜观察发现超声波处理后的苹果组织细胞变形和细胞结构破损程度最严重[35]。超声波辅助提取过程中还会使物料中的多糖发生降解或聚合，使其内部流变学性能和生物活性发生改变。用高强度超声来处理不同来源(马玲薯、木薯、玉米)的淀粉和多糖的黏度，结果黏度下降。从结构上分析原因为相对分子质量下降，用核磁共振表征发现这些淀粉和多糖保持了原有的结构，并没有新的化学基团产生[27]。Cheng 等[25]人还发现与对照及热处理相比，超声波处理显著降低了草莓酱的粘稠度。除此之外，超声波处理也会给乳化的产品带来一些负面影响，超声过程温度的升高和微射流都会使乳化剂不稳定[37]。

5 展 望

超声波的空化作用产生的物理和声化效应对食品组分结构存在某些潜在的破坏性。人们在应用

超声波技术的同时往往忽略了应用过程中的一些负面影响，因此在加工过程中如何合理地设置超声波的频率、振幅、功率、时间、温度等因素，尽量减少由于空化效应带来的负面影响将是今后研究的重点。另外目前对于超声波引起食品品质改变的具体机制尚未完全阐述清楚，大多只停留在对食品品质改变的结果的统计上，因此深入研究超声参数功率、时间等与空化效应、以及自由基产生的相关性、自由基与营养物质损失之间的相关性，阐明食品成分改变原因、变化途径以及具体作用机制，将是今后研究的方向。

尽管食品超声技术是一种节能、环保的食品杀菌和加工技术，被广泛的应用于食品加工的各个领域，然而与传统的热加工相比，该技术仍存在许多问题，如由于超声波在空气中衰减快，且空气中的声阻与物料的声阻不匹配，限制了超声波在食品加工领域的进一步发展，另外超声波在单独应用于食品杀菌过程中还存在杀菌不彻底等缺点，因此还不能直接大规模应用于工业生产。相信随着食品工业的发展，以及超声波换能器设计技术的进步，超声波技术的应用前景将更为广阔。

参考文献：

[1] KNORR D，ADE-OMOWAYE B，HEINZ V. Nutritional improvement of plant foods by non-thermal processing [J]. **Proceedings of the Nutrition Society**，2002，61(2)：311-318.

[2] ZHANG Min，WANG Liping. Research progress on prepared food sterilization technology [J]. **Journal of Food Science & Biotechnology**，2012(8)：785-792.(in Chinese)

[3] CHENG X，ZHANG M，XU B，et al. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials：A review[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**，2015，27：576-585.

[4] SUSLICK K S，EDDINGSAAS N C，FLANNIGAN D J，et al. Extreme conditions during multibubble cavitation：Sonoluminescence as a spectroscopic probe[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**，2011，18(4)：842-846.

[5] PINGRET D，FABIANO-TIXIER A S，PETITCOLAS E，et al. First investigation on ultrasound-assisted preparation of food products：sensory and physicochemical characteristics[J]. **Journal of Food Science**，2011，76(2)：287-292.

[6] DANIELLA PINGRET，ANNE-SYLVIE，FABIANO-TIXIER，et al. Degradation during application of ultrasound in food processing：A review[J]. **Food Control**，2013，31(2)：593-606.

[7] KHANDPUR P，GOGATA P R. Effect of novel ultrasound based processing on the nutrition quality of different fruit and vegetable juices[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**，2015，27：125-136.

[8] VERCET A，BURGOS J，LOPEZ B P. Manothermosonication of foods and food-resembling systems：effect on nutrient content and nonenzymatic browning[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2000，49(1)：483-489.

[9] GOMEZ L V M，ORSOLANI L，MARTINEZ Y A，et al. Microbiological and sensory quality of sonicated calcium-added orange juice[J]. **LWT – Food Science and Technology**，2010，43(5)：808-813.

[10] TIWARI B K，MUTHUKUMARAPPAN K，O'DONNELL C P，et al. Colour degradation and quality parameters of sonicated orange juice using response surface methodology[J]. **LWT – Food Science and Technology**，2008，41(10)：1876-1883.

[11] TIWARI B K，O'DONNELL C P，PATRAS A，et al. Anthocyanin and ascorbic acid degradation in sonicated strawberry juice[J]. **Journal of Agricultural & Food Chemistry**，2008，56(21)：10071-10077.

[12] CAMINITI I M，NOCI F，MUNOZ A，et al. Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend[J]. **Food Chemistry**，2011，124(4)：1387-1392.

[13] ADEKUNTE A O，TIWARI B，CULLEN P J，et al. Effect of sonication on colour，ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice[J]. **Food Chemistry**，2010，122(3)：500-507.

[14] WALKLING R M，NOCI F，CRONIN D A，et al. Shelf life and sensory evaluation of orange juice after exposure to thermosonication and pulsed electric fields[J]. **Food and Bioproducts Processing**，2009，87(2)：102-107.

[15] PINGRET D，DURAND G，ROCKENBAUER A，et al. Degradation of edible oil during food processing by ultrasound：electron paramagnetic resonance，physicochemical，and sensory appreciation[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2012，60(31)：7761-7768.

[16] CHEMAT F, GRONDIN I, COSTES P, et al. High power ultrasound effects on lipid oxidation of refined sunflower oil [J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2004, 11(5): 281-285.

[17] CRAVOTTO G, BICCHI C, MANTEGNA S, et al. Extraction of kiwi seed oil: Soxhlet versus four different non-conventional techniques[J]. **Natural Product Research**, 2011, 25(10): 974-981.

[18] TABARAKI R. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of natural antioxidants from rice bran using response surface methodology[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2011, 18(6): 1279-1286.

[19] 胡爱军, 郑捷. 食品超声技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[20] RATOARINORO N, WILHELM A M, BERLAN J, et al. Effects of ultrasound emitter type and power on a heterogeneous reaction[J]. **Chemical Engineering Journal**, 1992, 50(1): 27-31.

[21] ZHENG X, ZHANG M, FANG Z, et al. Effects of low frequency ultrasonic treatment on the maturation of steeped greengage wine[J]. **Food Chemistry**, 2014, 162(11): 264–269.

[22] SIMUNEK M, JAMBRAK A R, PETROVIC M, et al. Aroma profile and sensory properties of ultrasound treated apple juice and nectar[J]. **Food Technology & Biotechnology**, 2013, 51(1): 101-111.

[23] HAMED M M T, NIKNAM S M. Investigation of the effect of ultrasound on ascorbic acid of fresh orange juice [C].The 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition(IChEC 2011). 2011.

[24] SUN Y, MA G, YE X, et al. Stability of all-trans-β-carotene under ultrasound treatment in a model system: Effects of different factors, kinetics and newly formed compounds[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2010, 17(4): 654-661.

[25] CHENG X F, ZHANG M, ADHIKARI B. Changes in quality attributes of strawberry purees processed by power ultrasound or thermal treatments[J]. **Food Science and Technology Research**, 2014, 20(5): 1033-1041.

[26] SUN T, XU Z, JS G. Ultrasound assisted extraction in quantifying lutein from chicken liver using high-performance liquid chromatography [J]. **Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical & Life Sciences**, 2006, 830(1): 158-160.

[27] SUN Yujing, YE Xingqian. The recent advances on power ultrasound in food industry and sonochemical effects of food compositions[J]. **Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology**, 2011(9): 120-133.(in Chinese)

[28] MOTHIBE K J, ZHANG M, NSOR-ATINDANA J, et al. Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: drying rates, quality attributes, and shelf life extension[J]. **Drying Technology An International Journal**, 2011, 29(14): 1611-1621.

[29] CHEN L, OPARA U L. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods-a review [J]. **Journal of Food Engineering**, 2013, 119(3): 497-507.

[30] ZHANG Min, WU Na, DONG Jiamei, et al. Effects of different modification on physicochemical properties and granule structure of rice starch[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2013, 29(1): 19-23.(in Chinese)

[31] CHEMAT F. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction [J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2011, 18(4): 813-835.

[32] CHANG H, XU X, ZHOU G, et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing[J]. **Food and Bioprocess Technology**, 2012, 5(1): 285-297.

[33] BRNCIC M, KARLOVIC S, RIMAC B S, et al. Textural properties of infra red dried apple slices as affected by high power ultrasound pre-treatment[J]. **African journal of biotechnology**, 2010, 9(41): 6907-6915.

[34] YING X, MIN Z, ADHIKARI B. Ultrasound assisted immersion freezing of broccoli (Brassica oleracea L. var. botrytis L.)[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2014, 21(5): 1728-1735.

[35] YUN D, ZHAOB Y. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji)[J]. **Journal of Food Engineering**, 2008, 85(1): 84-93.

[36] SORIA A C, VILLAMIEL M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**, 2010, 21(7): 323-331.