

高压脉冲电场在苹果汁加工中的应用研究进展

Research progress on the pulsed electric field applied to apple juice processing

蒋 宝

JIANG Bao

(渭南职业技术学院, 陕西 渭南 714026)

(Weinan Vocational & Technical College, Weinan, Shaanxi 714026, China)

摘要:在分析高压脉冲电场技术(PEF)对苹果微形态特征的影响及杀菌钝酶效果的基础上,重点综述了 PEF 技术对苹果汁品质的影响所取得的最新进展及存在的问题,并对今后的研究方向进行了展望,为 PEF 技术更好地应用于苹果汁的加工提供研究依据。

关键词:高压脉冲电场;苹果汁;微生物;酶;品质

Abstract: On the basis of the analysis of the effects of PEF on apple micro-morphological characteristics, sterilization and enzyme inactivation efficacy, the latest process in effects of PEF on quality of apple juice, and existing problems was reviewed. Moreover, the future research direction of it was also prospected, providing the better application of PEF in the future apple juice processing.

Keywords: PEF; apple juice; microorganism; enzyme; quality

中国的苹果产量现居世界第一,苹果年产量占世界总产量的 40% 以上。其中苹果浓缩汁是最主要的加工产品,也是仅次于橙汁的世界第二大果汁消费品。目前,中国 90% 以上的浓缩苹果汁出口到国际市场,浓缩苹果汁已成为中国重要的出口农产品之一。苹果汁因富含糖类、V_C、果胶及多酚等营养成分而受到消费者喜爱。通常在苹果汁的工业化生产中,为了延长鲜榨苹果汁的保质期和确保其安全性,通常选用热处理来进行灭菌。传统的热杀菌方式能够有效地杀灭苹果汁中的各种腐败微生物、病原菌并钝化酶的活性,但对苹果汁的品质影响较大。为了克服传统热杀菌技术存在的不足,近几年出现了非热杀菌技术。在诸多非热杀菌技术中,高压脉冲电场(pulsed electric field, PEF)杀菌技术因其较好的应用特性而被业内专家广泛关注,被视为最具发展潜力的杀菌技术之一。PEF 处理不会造成原料温度的升高,既可以确保食品中的微生物数量在安全标准之内,又能最大限

度地降低热杀菌技术对食品品质的不利影响,此外,还可以在在一定程度上改善食品的品质,而且耗能低、处理时间短,在果汁深加工中表现出了独有的优势。

近 20 年来,国内外学者将 PEF 技术在橙汁^[1-4]、苹果汁^[5]、葡萄汁^[6-7]、蓝莓汁^[8-9]、西红柿汁^[10]和葡萄酒^[11]等果蔬制品的加工中应用研究较多。影响 PEF 杀菌效果的因素包括处理参数(处理温度、处理时间、电场强度、脉宽、单双极性、频率等)、介质条件(产品组分、pH 值、电导率等)和微生物性质(微生物种类、浓度、生长期等)三大类^[14-15]。本文在收集相关文献报道的基础上,着重就 PEF 技术在苹果加工中的应用研究现状进行综述,以期 PEF 技术更好地应用于苹果加工产品提供研究依据。

1 PEF 处理对苹果微形态特征的影响

研究证明经适当的 PEF 处理能提高苹果的出汁率,促进苹果中多酚等生物活性物质的提取^[16],从而有助于降低加工过程中果实的浪费,提升苹果汁的品质。为进一步揭开上述研究结果的作用机理,国内外学者围绕着 PEF 处理对苹果微形态特征的影响开展了相关的研究。Bazhal 等^[17]研究表明:PEF 处理可导致苹果果实细胞发生质壁分离,细胞膜通透性增加,细胞液外渗;PEF 处理降低了苹果果实细胞膜孔洞的直径,增加了孔洞的密度。Lohani 等^[18]对发酵过程中苹果渣进行 PEF 处理,并通过电镜扫描发现:PEF 处理后细胞的纤维结构发生断裂,部分细胞器呈不规则形状。马理姣^[19]研究证实:随着 PEF 处理强度的不断增大,果肉细胞结构逐渐松散、排列变得无序,而且细胞壁出现明显的破裂和卷曲。类似的研究结果在葡萄^[20]、橙子^[21]等水果上也有发现。

关于 PEF 处理对果实组织外在形态和内在结构影响的机理,目前以电穿孔理论为主。该理论认为外加电场可以影响细胞膜的正常结构和膜上孔洞的大小,改变细胞膜的通透性,导致小分子物质通过孔洞进入细胞,随着小分子物质的逐渐增多,细胞体积不断膨胀,膨胀至一定程度后,细胞膜就会破裂,导致细胞内物质外漏,最终表现为果实的出汁率和

基金项目:陕西省科学技术发展研究计划项目(编号:2015KJXX-98);渭南市科技发展计划项目(编号:2015KYJ-4-3)

作者简介:蒋宝(1981—),男,渭南职业技术学院副教授,博士。

E-mail: treebaojiang@163.com

收稿日期:2017-09-05

多酚等活性物质的浸提率均有所增加^{[10]58-59}。

2 PEF 处理对苹果汁中微生物的影响

PEF 杀菌试验的指示微生物包括金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)、大肠杆菌 O(157)(*E. coli* O157:H7)、单核细胞增生李斯特氏菌(*L. monocytogenes*)和酵母菌等。目前,学者们已围绕 PEF 对果蔬的杀菌效果进行了深入的研究,但以苹果及其制品为研究对象的报道并不多。李静等^[22]利用 PEF 对接种于苹果清汁中的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的钝化的研究表明:随着处理时间、电场强度和果汁电导率的增大,PEF 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的钝化效果增加,其中 PEF 处理对后者的钝化效果更显著;此外,选用 PEF 处理大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的临界电场强度分别为 16.4, 15.9 kV/cm。但 Damar 等^[23]报道金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的临界处理电场强度分别为 11.30~11.72, 11.21~12.19 kV/cm;Grah1 等^[24]认为大肠杆菌的临界处理电场强度应为 11.9~14.2 kV/cm。造成上述研究结果差异的原因可能是微生物菌株和 PEF 处理条件的不同;钟葵等^[25]的研究表明:PEF 处理可以降低苹果汁中细菌、霉菌和酵母菌的数量,从而延长苹果汁的贮藏期,但是 PEF 对微生物的杀灭效果有限,降低不到 2 个对数,主要原因是目前 PEF 系统所用电场参数还不够大。故下一步需要进一步完善和优化 PEF 处理果汁的技术参数。

PEF 处理能够杀灭微生物,在一定处理参数下这种破坏是不可逆的。目前关于 PEF 杀菌机理的假说主要有介电击穿和电穿孔 2 种理论。介电击穿理论认为,随外加电场不断增加,跨膜电位相应提高,膜内外不同电荷彼此吸引导致细胞膜的厚度降低,当电位差达到临界崩解电位差 V_c 时,细胞膜就开始崩解,细胞膜上孔洞开始形成,当孔洞的面积占细胞膜的总面积很少时,细胞膜的崩解是可逆的。当细胞膜长时间受到超过临界电场强度的作用时,就会使膜大面积崩解,由可逆变为不可逆,最终导致微生物死亡。电穿孔理论认为,微生物细胞在外加电场作用下蛋白质结构和细胞膜的双磷脂层发生变化,随着电场强度的增大,膜孔逐渐由疏水性变为亲水性,即细胞膜通透性增加,各种小分子物质透过细胞膜渗入细胞内,随着小分子物质的增多细胞体积膨胀,膨胀至一定程度细胞膜就会破裂,细胞内容物外渗,细胞死亡^{[1]59-69[10]32-40}。

3 PEF 对苹果汁中酶的影响

苹果汁易发生褐变反应,由诱人的金黄色变成棕褐色,色值下降,感官和营养品质降低。果汁的褐变主要是由酶促褐变引起的,而多酚氧化酶(PPO)是发生酶促褐变的主要酶,所以在苹果汁加工过程中,如何最大程度地抑制 PPO 活性一直是国内外专家研究的重点问题。马理娇^{[19]11-15}选用脉冲电压为 25 kV/cm、脉冲频率为 530 Hz、脉冲宽度为 8 μ s 和停留时间为 45 s 的 PEF 参数处理苹果汁,结果显示 PPO 的抑制率达到 51.86%。Bi 等^[26]研究了苹果汁中 PPO 和过氧化物酶(POD)在 PEF 作用下的失活情况,结果表明,随着 PEF 电场强度和处理时间的增加,鲜苹果汁中的 PPO 和 POD 活性不断降低,当脉冲电场强度为 35 kV/cm、脉冲升

时为 2 μ s 时,苹果汁中的 PPO 和 POD 几乎被完全钝化。Riener 等^[27]报道了经 50 $^{\circ}$ C 热水预处理后的苹果汁在脉冲电场强度为 40 kV/cm 和处理时间为 100 μ s 时,苹果汁中的 PPO 和 POD 活性分别降低 71% 和 68%。Sanchez-Vega 等^[28]采用类似的处理手段,也将苹果汁中 PPO 的活性降低了 70%。

目前,关于 PEF 对酶的钝化机理尚不清楚。一种观点认为 PEF 可以钝化酶是因为酶的结构受到了不同程度的破坏。另外一种观点认为 PEF 能影响酶的活性中心,导致酶发生部分或者完全失活^{[1]192-3}。众所周知,酶的活性部位是酶起作用的主要位置,PEF 通过影响活性部位进而影响了酶的活性。到底是哪一种需进一步证实。

4 PEF 对苹果汁品质的影响

苹果汁为热敏性产品,采用传统的热力杀菌会降低苹果汁品质,特别是新鲜度。为最大限度地保持苹果汁的品质和新鲜度,国内外学者在开展 PEF 处理对苹果汁杀菌钝酶研究的基础上,进一步对 PEF 处理后苹果汁品质的变化进行了富有成效的研究。

4.1 PEF 对苹果汁理化品质的影响

理化品质是苹果品质的重要组成部分,理化指标又是衡量苹果理化品质的依据^[29]。苹果汁相关的理化指标主要包括出汁率、可溶性固形物、总酸、浊度和 pH 等。出汁率作为果汁重要的技术经济指标,它的高低主要取决于原料自身的加工性状和加工设备的压榨性能。Turk 等^[30]研究表明,经 PEF 处理后苹果出汁率由 71.1% 增加至 76.3%,其他学者也选用不同品种的苹果,采用不同的果实前处理方式和 PEF 处理参数获得了类似的研究结果,不同之处就在于出汁率的增加程度有所不同^[31-33]。果汁的 pH 与病原微生物繁殖密切相关。研究^{[5]87-89[19]45-46[34-35]}表明,在对果汁分别进行巴氏和 PEF 处理前后,果汁的 pH 均无显著性变化;而 Sanchez-Vega 等^[28]的研究证实,与未处理鲜果汁相比,PEF 和超高温灭菌处理均在一定程度上增加了果汁的 pH,但超高温灭菌处理影响程度更显著;此外,Charles-Rodriguez 等^[36]的研究还显示,果汁 pH 的变化与加工处理温度直接相关,当果汁处理温度超过 85 $^{\circ}$ C 时,果汁 pH 会增加,而较低的 pH 有利于抑制果汁中病原微生物的繁殖,所以相对于高温灭菌,PEF 处理有利于保持果汁的化学稳定性。

含酸量与果汁的风味特点密切相关。有研究^[28,35,37]表明,PEF 处理前后,果汁的总酸含量无显著变化,而超高温灭菌和巴氏杀菌均显著降低了果汁的总酸含量,所以 PEF 处理较好地保持了果汁的含酸量。经巴氏杀菌和超高温灭菌处理后,果汁的可溶性固形物含量有不同程度的下降,尤其以超高温灭菌处理下降最为显著,而 PEF 处理前后果汁的可溶性固形物含量均无显著变化^[28,34]。所以 PEF 处理技术不仅有效提高了果汁的出汁率,而且较好地保持了处理前后果汁的 pH、总酸和可溶性固形物含量。果汁浊度与果汁中颗粒的浓度直接相关,通常依据果汁浊度不同将苹果汁分为清汁和浊汁。浊度主要受果汁中果胶含量及果胶相对分子质量、热处理温度、果汁 pH 值和原料的前处理方式等因素

的影响^[31,38]。Turk 等^[30]研究表明,与未经处理鲜果汁相比,经 PEF 处理后的果汁浊度有所降低;钟葵等^[25]研究表明,与未处理鲜榨果汁相比,PEF 处理后的果汁浊度无显著性变化,但巴氏处理后的果汁浊度显著增加。所以与果汁的巴氏杀菌相比,PEF 处理能有效控制加工过程中果汁的浊度;此外,Grimi 等^[31]的研究还表明,与先将苹果切成薄片后再进行 PEF 处理(先切再 PEF 处理)相比,直接进行 PEF 处理(先 PEF 处理再切成薄片)可以显著地降低果汁的浊度。至于 2 种处理方法所造成果汁浊度差异的原因目前尚不清楚,可能是由于 2 种处理方法下苹果薄片的结构有所不同导致。Grimi 等^[31]和 Araya-Farias^[39]的研究结果均表明:经 PEF 处理后的苹果比未经 PEF 处理的苹果更容易切成薄片,所以经 PEF 处理后再进行切割能有效保护细胞壁的完整性,尤其是细胞壁中的果胶颗粒被较好地保留。

4.2 PEF 对苹果汁营养品质的影响

多酚类物质具有抗氧化活性,尤其是其所含的类黄酮类物质能够预防心血管疾病和癌症的发生^[40-41],所以能否增加果汁中酚类物质的含量以此来提高果汁的营养价值,也是评价果汁提取方法的重要依据。Grimi 等^[31]研究表明,经 PEF 处理后果汁的总酚含量和抗氧化能力(ABTS 法)均显著高于未处理果汁,Turk 等^[30]也获得了类似的研究结果。Aguilar-Rosas 等^[35]研究表明,与未经处理鲜果汁相比,经 PEF 和高温杀菌(即 90 ℃、30 s)后果汁中总酚含量分别下降了 14.49% 和 32.2%,即相对于传统的巴氏杀菌,PEF 杀菌能有效地降低杀菌过程中果汁中酚类物质含量的损失,Noci 等^[34]的研究也获得了类似的研究结论。此外,Noci 等^[34]的研究还证实,经 PEF 处理后,果汁的抗氧化能力略低于未作任何处理的对照和低温巴氏杀菌处理 1(即 72 ℃、26 s)的果汁,但显著高于高温巴氏杀菌 2(即 94 ℃、26 s)。综上所述:① PEF 处理前后果汁的总酚含量和抗氧化能力的变化与脉冲电场强度等 PEF 处理参数直接相关^[26];② 与 PEF 处理比较,随着巴氏杀菌温度的提高,果汁中总酚含量的下降幅度不断增加;③ 与高温巴氏杀菌相比,PEF 处理对果汁中总酚的保护有明显优势,但与低温巴氏杀菌相比,PEF 处理对果汁中总酚的保护又失去了优势。Gardner 等^[42]认为果汁在巴氏杀菌过程中总酚含量的下降主要与果汁受到高温胁迫有关。Schilling 等^[32]利用 HPLC-MS 检测出,PEF 处理前后果汁中 15 种主要单体酚含量和果汁的抗氧化能力(TEAC 法、FRAP 法和 DPPH 法)无显著变化。

V_C 是苹果汁中另一种重要的营养物质。马理姣^{[19]46}研究表明,经 PEF 处理后,果汁中 V_C 含量有所下降,但差异并不显著。究其原因可能是脉冲电场使还原型 V_C 发生氧化所致。Bi 等^[26]选用不同 PEF 处理参数(电场强度为 0~35 kV/cm、处理时间为 2 μs 和 0.2 μs)对果汁中 V_C 含量的变化进行研究,发现当电场强度在 25~35 kV/cm,处理时间为 2 μs 和 0.2 μs 时,相对于未经 PEF 处理的果汁,处理后的果汁中 V_C 含量显著下降,当电场强度为 30 kV/cm、处理时间为 2 μs 时,果汁中 V_C 下降达到 36.6%;但由于电场强度的不同所引起的 V_C 含量的变化在彼此间并不显著,类似的研究

结果在西瓜汁和番茄汁中也有报道^[43-44]。而 Akdemir Evrendilek 等^[45]对复原苹果汁进行 PEF 处理(30 kV/cm、94 μs)后,发现果汁中 V_C 含量并无变化,可能是由于试验样品不同导致,因为复原果汁来源于浓缩果汁。Odriozola-Serrano 等^[46]对草莓汁的研究表明,PEF 处理(35 kV/cm)对果汁中 V_C 含量没有任何影响,主要是由于草莓汁的 pH 比西瓜汁和苹果汁要低,较强的酸性有助于 V_C 的稳定存在,Tannenbaum 等^[47]也获得了类似的研究结果。

4.3 PEF 对苹果汁感官品质的影响

感官特性是评价苹果汁品质的重要方法之一,包括风味、口感和色泽等方面,反映了人们的主观喜好,是对苹果汁理化品质分析的重要补充。

褐变可降低苹果汁品质,导致果汁色泽下降,营养成分和风味流失。鲜榨果汁的褐变包括酶促褐变和非酶促褐变。Sanchez-Vega 等^[28]研究显示,超高温灭菌和 PEF 处理均能导致果汁色泽发生变化,但 PEF 处理前后果汁色泽变化幅度相对较小,廖小军^{[5]89-90}也获得了类似的研究结果。马理姣^{[19]44-48}的研究表明,与未经 PEF 处理的对照相比,PEF 处理能有效抑制果汁的酶促褐变,并增加果汁的色值;随着 PEF 处理中脉冲电场强度的逐渐增加(5~30 kV/cm),果汁在贮藏过程中(1~4 h)的褐变指数(BI)增加速率呈下降趋势,色值的下降速率则呈上升的趋势。Noci 等^[34]的研究显示,与巴氏杀菌相反,PEF 处理前后果汁的非酶褐变指数(NBI)没有显著性变化。所以果汁色泽很容易受到不同处理技术的影响,且影响程度与处理技术的参数密切相关。廖小军^{[5]90-93}研究表明,经 PEF 处理后果汁的风味与对照更为接近,而巴氏杀菌处理前后果汁风味差异较大,带有明显的蒸煮味;Turk 等^[30]认为,PEF 处理增强了果汁的果香味,对果汁的风味质量有改善作用;Aguilar-Rosas 等^[35]进一步研究表明,苹果汁中主要的 8 种香气物质,除乙酸乙酯外,其他 7 种物质经巴氏杀菌处理后含量下降幅度均超过 PEF 处理的果汁,尤其是乙酸含量在经巴氏杀菌后含量变为 0。所以 PEF 处理对果汁主要香气物质的影响在定性定量方面均小于巴氏杀菌处理。

5 展望

相对于传统的加热杀菌技术,PEF 杀菌技术在苹果汁的杀菌钝酶方面表现出一定的优势,能起到显著改善果汁品质的作用。过去 10 多年,国内外学者就 PEF 处理对苹果汁加工过程中的杀菌钝酶效果和对品质的影响进行了不同深度的研究,并取得了一定的进展,但是还存在一些有待研究的内容,主要集中在:① 需要通过研究明确 PEF 技术杀菌钝酶的机理^[48];② 为了便于不同研究者彼此间比较研究结果和加强对于 PEF 处理后果汁品质的可追溯性,应该不断优化简化操作程序,提高 PEF 处理技术的标准化程度,尤其需要与工厂化生产紧密结合;③ 通过研究阐明 PEF 技术对产品中功能性物质影响的动力学特点及该过程中功能性物质的转化规律;④ 需进一步明确 PEF 处理对果汁产品安全性的影响及经 PEF 处理后产品在货架期的品质变化情况。

参考文献

- [1] BUCKOW R, NG S, TOEPFL S. Pulsed electric field processing of orange juice: A review on microbial, enzymatic, nutritional, and sensory quality and stability[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2013, 12: 455-467.
- [2] AGCAM E, AKYILDIZ A, AKDEMIR EVRENDILEK G. A comparative assessment of long-term storage stability and quality attributes of orange juice in response to pulsed electric fields and heat treatments[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2016, 99: 90-98.
- [3] AGCAM E, AKYILDIZ A, AKDEMIR EVRENDILEK G. Comparison of phenolic compounds of orange juice processed by pulsed electric fields (PEF) and conventional thermal pasteurization[J]. *Food Chemistry*, 2014, 143(143): 354-361.
- [4] AGCAM E, AKYILDIZ A, AKDEMIR EVRENDILEK G. Effects of PEF and heat pasteurization on PME activity in orange juice with regard to a new inactivation kinetic model[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165(20): 70-76.
- [5] 廖小军. 高压脉冲电场系统及其杀菌灭酶效果与对苹果汁品质影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 38-93.
- [6] AKDEMIR EVRENDILEK G, CELIK P, AGCAM E, et al. Assessing impacts of pulsed electric fields on quality attributes and furfural and hydroxymethylfurfural formations in apple juice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2016, 40(5): 1-10.
- [7] 胡秦佳宝, 刘璇, 毕金峰, 等. 非热加工与传统热处理对苹果汁品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 102-107.
- [8] LÓPEZ-ALFARO I, GONZÁLEZ-ARENZANA L, LÓPEZ N, et al. Pulsed electric field treatment enhanced stilbene content in Graciano, Tempranillo and Grenache grape varieties[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3 759-3 765.
- [9] DELSMART C, CHOLET C, GHIDOSI R, et al. Effects of pulsed electric fields on Cabernet Sauvignon grape berries and on the characteristics of wines [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7(2): 424-436.
- [10] 陶晓赞. 高压脉冲电场 (PEF) 对蓝莓汁品质及杀菌机理探究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015: 32-59.
- [11] VALLVERDÚ-QUERALT A, ODRIOZOLA-SERRANO I, OMS-OLIU G, et al. Impact of high-intensity pulsed electric fields on carotenoids profile of tomato juice made of moderate-intensity pulsed electric field-treated tomatoes[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 3 131-3 138.
- [12] SALDAÑA G, CEBRIÁN G, ABENOZA M, et al. Assessing the efficacy of PEF treatments for improving polyphenol extraction during red wine vinifications[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 39: 179-187.
- [13] DARRA N E, RAJHA H N, DUCASSE M A, et al. Effect of pulsed electric field treatment during cold maceration and alcoholic fermentation on major red wine qualitative and quantitative parameters[J]. *Food Chemistry*, 2016, 213(15): 352-360.
- [14] 叶丽珠, 龚雪梅, 陈锦权. PEF 处理对冷冻浓缩西瓜汁品质影响的研究[J]. *贵州大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(6): 52-58.
- [15] 颜文旭, 张姗姗, 公群. 高压脉冲电场杀菌多物理场特性研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(2): 1-6.
- [16] TURK M F, BARON A, VOROBIEV E. Effect of pulsed electric fields treatment and mash size on extraction and composition of apple juices[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(17): 9 611-9 616.
- [17] BAZHAL M I, NGADI M O, RAGHAVAN G S V, et al. Textural changes in apple tissue during pulsed electric field treatment[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 249-253.
- [18] LOHANI U C, MUTHUKUMARAPPAN K. Application of the pulsed electric field to release bound phenolics in sorghum flour and apple pomace [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 35: 29-35.
- [19] 马理娇. 脉冲电场纯化 PPO 对苹果制品的影响及酶纯化机理的初探[D]. 扬州: 扬州大学, 2015: 2-48.
- [20] CHOLET C, DELSART C, PETREL M, et al. Structural and biochemical changes induced by pulsed electric field treatments on Cabernet Sauvignon grape berry skins: Impact on cell wall total tannins and polysaccharides[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(13): 2 925-2 934.
- [21] PLAZA L, SANCHEZ-MORENO C, DE ANCOS B, et al. Carotenoid and flavanone content during refrigerated storage of orange juice processed by high-pressure, pulsed electric fields and low pasteurization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 834-839.
- [22] 李静, 肖健夫, 陈杰, 等. 高压脉冲电场对苹果汁中大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的钝化效果[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(8): 41-45.
- [23] DAMAR S, BOZOGLU F, HIZAL M, et al. Inactivation and injury of *Escherichia coli* O157: H7 and *Staphylococcus aureus* by pulsed electric fields[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2002, 1(18): 1-6.
- [24] GRAHL T, MARKL H. Killing of microorganisms by pulsed electric fields[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, 45(1/2): 148-157.
- [25] 钟葵, 廖小军, 梁楚霖, 等. 脉冲电场和热处理对鲜榨苹果汁贮藏期品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(8): 49-54.
- [26] BI Xiu-fang, LIU Feng-xia, RAO Lei, et al. Effects of electric field strength and pulse rise time on physicochemical and sensory properties of apple juice by pulsed electric field[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 17(17): 85-92.
- [27] RIENER J, NOCI F, CRONIN D A, et al. Combined effect of temperature and pulsed electric fields on apple juice peroxidase and polyphenoloxidase inactivation[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(2): 402-407.
- [28] SANCHEZ-VEGA R, MUJICA-PAZ H, MARQUEZ-MELENDEZ R, et al. Enzyme inactivation on apple juice treated by ultra-pasteurization and pulsed electric fields technology[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2009, 33(4): 486-499.
- [29] 聂继云, 李志霞, 李海飞, 等. 苹果理化品质评价指标研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(14): 2 895-2 903.
- [30] TURK M F, VOROBIEV E, BARON A. Improving apple juice expression and quality by pulsed electric field on an industrial scale[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 49(2): 245-250.

- [31] GRIMI N, MAMOUNI F, LEOVKA N, et al. Impact of apple processing modes on extracted juice quality: Pressing assisted by pulsed electric fields[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(1): 52-61.
- [32] SCHILLING S, ALBER T, TOEPFL S, et al. Effects of pulsed electric field treatment of apple mash on juice yield and quality attributes of apple juices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(1): 127-134.
- [33] CARBONELL-CAPELLA J M, PARNIAKOV O, BARBA F J, et al. "Ice" juice from apples obtained by pressing at subzero temperatures of apples pretreated by pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 187-194.
- [34] NOCI F, RIENER J, WALKLING-RIBEIRO M, et al. Ultra-violet irradiation and pulsed electric fields (PEF) in a hurdle strategy for the preservation of fresh apple juice[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 141-146.
- [35] AGUILAR-ROSAS S F, BALLINAS-CASARRUBIAS M L, NEVAREZ-MOORILLON G V, et al. Thermal and pulsed electric fields pasteurization of apple juice: Effects on physico-chemical properties and flavour compounds[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 41-46.
- [36] CHARLES-RODRÍGUEZ A V, NEVAREZ-MOORILLÓN G V, ZHANG Q H, et al. Comparison of thermal processing and pulsed electric fields treatment in pasteurization of apple juice [J]. Food and Bioproducts Processing, 2007, 85 (2): 93-97.
- [37] ORTEGA-RIVAS E, ZÁRATE-RODRÍGUEZ E, BARBOS-ACÁNOVAS G V. Apple juice pasteurization using ultrafiltration and pulsed electric fields[J]. Food and Bioproducts Processing, 1998, 76(4): 193-198.
- [38] 赵光远, 王璋, 许时婴. 浑浊苹果汁加工中影响果汁浊度因素的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(5): 76-79.
- [39] ARAYA-FARIAS M. La clarification du jus de pomme par électroflottation[D]. Quebec: Université Laval, 1999: 58-62.
- [40] EBERHARDT M V, LEE C Y, LIU Rui-hai. Antioxidant activity of fresh apple[J]. Nature, 2000, 405: 903-904.
- [41] HOLLMAN P C H. Evidence for health benefits or plant phenols: local or systemic effects? [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 81(9): 842-852.
- [42] GARDNER P T, WHITE T A C, MC PHAIL D B, et al. The relative contributions of vitamin C, carotenoids and phenolics to the antioxidant potential of fruit juices[J]. Food Chemistry, 2000, 68(4): 471-474.
- [43] OMS-OLIU G, ODRIOZOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Effects of high-intensity pulsed electric field processing conditions on lycopene, vitamin C and antioxidant capacity of watermelon juice[J]. Food Chemistry, 2009, 115 (4): 1 312-1 319.
- [44] ODRIOZOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, HERNÁNDEZ-JOVER T, et al. Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments [J]. Food Chemistry, 2009, 112(1): 258-266.
- [45] AKDEMIR EVRENDILEK G, JIN Z T, RUHLMAN K T, et al. Microbial safety and shelf-life of apple juice and cider processed by bench and pilot scale PEF systems[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(1): 77-86.
- [46] ODRIOZOLA-SERRANO I, SOLIVA-FORTUNY R, MARTIN-BELLOSO O. Impact of high-intensity pulsed electric fields variables on vitamin C, anthocyanins and antioxidant capacity of strawberry juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 93-100.
- [47] TANNENBAUM S R, ARCHER M C, YOUNG V R. Food Chemistry[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1985: 488-493.
- [48] 赵伟, 杨瑞金, 张文斌, 等. 高压脉冲电场对食品中微生物、酶及组分影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2010, 26 (3): 153-157.

(上接第153页)

参考文献

- [1] XU Li-shan, ZHANG Yao-jie, WANG Li-zhi. Structure characteristics of a water-soluble polysaccharide purified from dragon fruit (*Hylocereus undatus*) pulp[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 146: 224-230.
- [2] MENG Qing-ran, LI Ying-hao, XIAO Tian-cun, et al. Antioxidant and antibacterial activities of polysaccharides isolated and purified from *Diaphragma juglandis fructus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 431-437.
- [3] WU Li-chen, HSU Hsiu-wen, CHEN Yun-chen, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya[J]. Food Chemistry, 2006, 95(2): 319-327.
- [4] 梁英, 金迪, 李丹丹, 等. 黄芩多糖的免疫调节活性[J]. 中国食品学报, 2017, 17(2): 23-27.
- [5] HU Jie, JIA Xue-jing, FANG Xiao-bin, et al. Ultrasonic extraction, antioxidant and anticancer activities of novel polysaccharides from Chuanxiong rhizome[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 85: 277-284.
- [6] 王雪, 丁金龙, 黄苇, 等. 火龙果皮中果胶的提取及其结构研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(3): 102-106.
- [7] 李敏晶, 刘昌雨, 刘远, 等. 3种脱色方法对多棘海盘车多糖的脱色效果[J]. 贵州农业科学, 2014(3): 147-149.
- [8] 赵艳, 王白娟, 杨青松, 等. 红雪茶多糖过氧化氢脱色工艺优化[J]. 南方农业学报, 2016, 47(5): 710-714.
- [9] 汪鹏荣, 陈文静, 韦凤, 等. 红曲多糖的过氧化氢法脱色工艺研究[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2012, 35(2): 203-208.
- [10] 石硕, 孙丽娜, 仙靓, 等. 神仙草叶多糖提取及过氧化氢脱色工艺研究[J]. 现代中药研究与实践, 2017, 31(3): 50-54.
- [11] 韦媛媛, 刘阳, 龚帅, 等. 积雪草多糖的脱脂工艺研究[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(2): 90-94.
- [12] 殷洪梅, 尚强, 萧伟. 金银花多糖脱蛋白方法的研究[J]. 中草药, 2010, 41(4): 584-586.
- [13] 高洁, 董文宾, 王勇, 等. 山皂荚多糖的提取工艺及抑菌活性[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 145-149.
- [14] 李彪, 董刚, 巩红冬, 等. 瑞香狼毒花多糖提取工艺优化及其抑菌活性研究[J]. 西藏大学学报: 自然科学版, 2017, 32(1): 17-25.