

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014752

引用格式:梁亚男,叶发银,雷琳,等.苹果汁褐变控制技术研究进展[J].食品与发酵工业,2018,44(3):280-286.

LIANG Ya-nan, YE Fa-yin, LEI Lin, et al. Advance in browning control technology of apple juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(3):280-286.

苹果汁褐变控制技术研究进展

梁亚男¹, 叶发银¹, 雷琳¹, 赵国华^{1,2*}

1(西南大学 食品科学学院, 重庆, 400715) 2(重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆, 400175)

摘 要 苹果加工是全球水果加工业的重点,其中苹果汁是苹果加工业最重要、产量最大的产品。苹果汁的色泽是其重要的质量指标,是消费者判断其质量的重要依据。苹果汁的颜色质量主要决定于其在生产过程中的褐变情况。根据其褐变机理,苹果汁的褐变主要包括酶促褐变与非酶褐变。由于苹果原料富含酚类化合物和活性较高的多酚氧化酶,酶促褐变是其主要的褐变方式。因此,控制苹果汁的褐变,尤其是酶促褐变,对保障其质量和消费者接受性具有重要意义。该文在查阅大量文献的基础上,对苹果汁褐变机理(酶促褐变与非酶褐变)、褐变控制技术(物理控制技术、褐变抑制剂的添加及其他控制技术)进行了全面综述。同时对该领域存在的问题及今后的发展方向进行了阐述。

关键词 苹果汁;褐变;控制;技术

褐变(browning)是食品加工过程中常发生的重要变化之一,根据其机制可分为酶促褐变与非酶褐变。前者常通过多酚氧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸氧化酶等对食品中多酚和抗坏血酸氧化而导致,后者主要包括 Maillard 反应和焦糖化反应等^[1]。褐变与产品质量的关系因产品不同而异,如焙烤食品需要发生一定程度的褐变,而褐变对果汁、果酱等产品的消费者接受性有不利的影响^[2]。苹果汁是苹果的主要加工产品之一。据 FAO 统计,2014 年全球苹果产量约为 8 463 万 t,中国是世界苹果生产大国,其种植面积与产量均居世界第一。事实表明褐变是影响苹果汁品质的关键因素,因此褐变的研究对苹果汁质量保障具有重要意义。研究表明,苹果汁褐变包括酶促褐变与非酶褐变,且发生的阶段不同^[3]。也有大量关于苹果汁褐变控制的研究,且取得了很好的进展。本文在查阅近 10 年有关文献的基础上,对苹果汁褐变的机理和控制的方法技术进行文献综述。

1 苹果汁褐变机理

按照发生机制,苹果汁的褐变分为酶促褐变和非

酶褐变,其中酶促褐变是主要机制^[4]。酶促褐变主要发生在苹果汁生产的前端工序,如破碎、榨汁、过滤等阶段,而非酶褐变主要发生在杀菌、浓缩及后期贮藏过程中^[3]。

1.1 酶促褐变

虽然多酚氧化酶(EC 1.14.18.1, EC 1.10.3.1)^[4-6]、过氧化物酶和抗坏血酸氧化酶都可能催化食品酶促褐变反应,但目前研究一致认为苹果汁的酶促褐变主要是由多酚氧化酶催化所致。多酚底物、氧气以及多酚氧化酶是该酶促褐变的 3 要素^[7]。多酚氧化酶诱导的酶促褐变的机制主要包括 3 步^[8]:(1)一元酚邻位羟基化形成邻二酚;(2)邻二酚氧化成邻苯二醌;(3)醌类自身聚合或与食品其他成分(氨基酸、蛋白质等)聚合形成黑色素^[9-10]。苹果多酚氧化酶是一种含铜金属蛋白,其催化特性与来源有很大关系^[8](表 1)。由表 1 可见苹果中 PPO 的适宜催化温度和催化 pH 值分别为 28~45 ℃和 4.0~6.6。苹果汁中发生酶促褐变的多酚底物主要包括绿原酸、儿茶素和表儿茶素^[11]。图 1 为 3 种酚类物质酶促褐变反应式。3 种物质在不同品种中含量不同,绿原酸含量为 1.39~281.66 μg/g,儿茶素含量为 4.65~31.00 μg/g,表儿茶素含量为 18.86~413.94 μg/g^[12]。研究发现,体系 pH 值、V_C 含量、总酚含量、单宁含量、多酚氧化酶活性是影响苹果汁酶促褐变的主要因素,其影响力强弱顺序为 pH > PPO 酶活性 > 单宁含量 > V_C 含量 > 总酚含量。其中苹果汁 pH 值、PPO 活性

第一作者:硕士研究生(赵国华教授为通讯作者, E-mail: zhaoguohua1971@163.com)。

基金项目:果蔬典型加工过程中品质功能劣变与保质减损及其调控机理(2016YFD0400204-2);重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目(cstc2014pt-gc8001)

收稿日期:2017-05-12, 改回日期:2017-07-18

与褐变呈正相关,而 V_c 含量、总酚含量和单宁含量与褐变呈负相关^[7]。

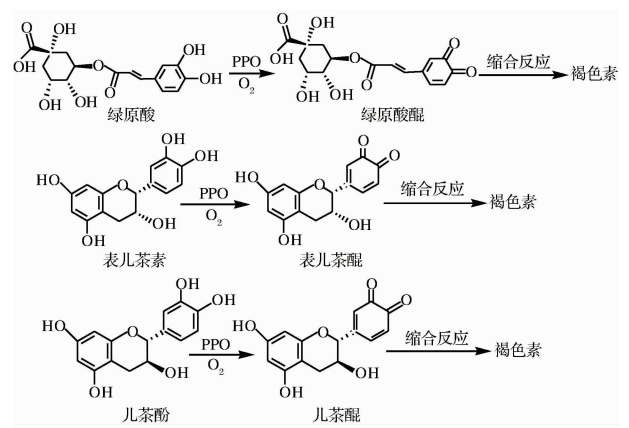


图 1 苹果中酚类物质的酶促褐变反应式
Fig. 1 Enzymatic browning reaction equations of phenolic in apple

1.2 非酶褐变

非酶褐变包括美拉德 (Maillard) 反应、酚类物质氧化变色、焦糖化褐变和抗坏血酸氧化褐变等几种类型^[20]。其中,发生在 α -氨基酸和还原糖之间的 Mail-lard 反应是苹果汁非酶褐变的核心机制^[21],其反应强度主要受到以下因素影响:加热温度、加热时间、水分含量、还原糖含量、氨基酸含量、贮藏温度和贮藏时间等。其中,加热温度、加热时间、还原糖含量、氨基酸含量、贮藏温度和贮藏时间与褐变呈正相关,而水分含量与褐变的关系较为复杂,在一定范围内水分含量越高,褐变越剧烈,但过高的水分含量会稀释反应物,使反应速率下降^[22]。还原糖和氨基酸是美拉德反应的 2 个主要反应物,在一定条件下,两者的浓度越高越容易发生非酶促褐变。苹果中主要的可溶性糖有果糖、蔗糖、葡萄糖和山梨醇,在苹果中占总糖含

表 1 不同品种苹果 PPO 的最适催化条件及热稳定性

Table 1 Optimum catalytic conditions and thermal stability of PPO in different varieties of apple

苹果品种	最适温度/℃	最适 pH 值	热稳定性	参考文献
富士	30	4.0	60 ℃ 较 30 ℃ 活性降低 50.47%	[13]
	30	5.0	60 ℃ 以上迅速失活	[14]
	28	6.6	80 ℃ -1.1 min 失活 50%	[15]
粉红女士	30	4.5	90 ℃ -3 min, 失活 92%	[16]
嘎拉	45	6.0	80 ℃ -280 s; 90 ℃ -240 s; 100 ℃ -200 s 完全失活	[17]
红星	28	6.2	60 ℃ , 相对活性降至 20%	[18]
金帅	40	5.0	80 ℃ -30 min 失活 88.92%	[19]

量为:44% ~ 53% ,19% ~ 44% ,6% ~ 26% 和 3% ~ 10%^[23],其中葡萄糖是参与美拉德反应的主要还原糖;含量较高的氨基酸有天冬氨酸、丙氨酸、谷氨酸、和异亮氨酸等,其含量分别为 19 ~ 85,5 ~ 15,2 ~ 10 和 1 ~ 8 $\mu\text{g/g}$ ^[24]。

2 苹果汁褐变控制技术

由于苹果汁的褐变主要是酶促褐变,因此,目前开发的有关褐变控制技术也基本是抑制酶促褐变反应。按操作方式机制的不同褐变控制技术可主要分为物理控制、化学控制和生物控制 3 种类型。

2.1 苹果汁褐变的物理控制技术

所有苹果汁褐变物理控制技术的基本原理是利用不同的物理手段使多酚酶促氧化关键要素 (多酚氧化酶、多酚和氧气) 缺失从而达到抑制褐变的目的。常见的物理控制手段包括钝化催化褐变反应的多酚氧化酶、脱除多酚氧化酶的底物、降低苹果汁中的氧气以及脱除已经形成的深色物质等^[39]。表 2 列

举了苹果汁生产过程中控制褐变的物理技术。

表 2 中所列举的物理控制从作用机制上可分为 3 大类:钝化多酚氧化酶、控制生产过程中氧气含量及吸附苹果汁中褐色物质和多酚。其中热处理是用于稳定食品的最广泛的方法,具有破坏微生物和灭活酶的能力,VALDERRAMA 等^[40]在 75 ℃ 处理 10 min 后获得苹果 PPO 的完全失活。在 55 ℃ 下 60 min,浑浊苹果汁中 PPO 活性的最大降低为 27.9%^[41]。但热处理会导致热敏营养物的破坏,维生素,风味,颜色,质地,碳水化合物和其他水溶性成分的损失^[2]。因此,非热处理技术控制褐变对果汁工业的发展有重要作用。近年来,超声处理、脉冲处理、高压二氧化碳处理、超高压处理等非热处理技术正逐步发展。超声结合热处理可以显著降低苹果中 PPO 的活性^[25],但超声会引起新鲜苹果汁中总酚、黄酮和绿原酸的含量降低,同时降低了苹果汁的抗氧化活性^[27]这与 ABID^[42]等的研究结果相符。

表 2 苹果汁褐变物理控制技术

Table 2 Physical technology to control apple juice browning

名称	处理条件	处理效果	文献
钝化多酚氧化酶			
热处理	75 ℃	D_T -value = 22.0 min	[25]
热处理	8.3 ~ 85 ℃	L^* = 60.40	[26]
声热处理	1.3 W/g; 72 ℃	D_T -value = 4.3 min	[25]
超声处理	33 ℃; 1.3 W/g	D_T -value = 48.8 min	[25]
超声处理	2.0 W/cm; 15 ℃; 10 min	NEBI:0.26→0.21	[27]
脉冲光-超声波	0.73 J/cm; 0.017 5 J/mL	贮藏 12 d BI/BI ₀ = 1.01	[28]
热蒸汽	65 ~ 70 ℃; 15 ~ 20 s	20℃保存 1 h 混浊苹果汁的色差 $\Delta E < 0.5$	[29]
高压二氧化碳灭酶处理	25 ~ 65 ℃; 20 MPa; 20 min	RA = 0	[6]
温热处理	65 ℃; 20 min	RA = 38.6%	[6]
HPP	500 MPa; 6 min	BD 值 = 0.147	[30]
HPP	600 MPa; 3 min	L^* = 57.11	[26]
HTST	110 ℃; 8.6 s	BD 值 = 0.147	[30]
PEF	40 ℃; 30 kV/cm	RA = 52%	[31]
PEF	60 ℃; 35 kV/cm	RA = 6.9%	[32]
超高压均质	300 MPa; 20 ℃	L^* :59.55→60.16	[33]
PE/PVP 特制膜-超滤	PES:PVP = 3.5	多酚除去率达 40%	[10]
电渗析-双极膜-温热处理	pH = 2; 45℃; 4min	RA = 0	[34]
控制 O ₂ 含量			
螺旋压榨	真空度 15 × 10 ³ Pa	带式压榨 L^* = 14.89; 螺旋压榨 L^* = 43.62	[29]
氮气阻氧	N ₂ 置换厌氧培养箱中的 O ₂	60 min 内 410 nm 处吸光度为 0.28	[35]
真空脱气	50 ~ 60℃; 3 ~ 6 min	溶解氧浓度低于 3 mg/L	[12]
吸附			
Optipore SD-2 树脂	0.1241 苹果汁:1 g 树脂;30 ℃	深色化合物去除 80%;绿原酸去除 40%	[36]
活性炭	80 目;0.015 g/mL; 25 ℃	透光率 83.4%	[37]
交换离子纤维	充分震荡	酚类吸附量 67.263 mg/g	[38]

注: D_T -value:钝化 90% 的 PPO 活性所需时间;NEBI:褐变指数;BI/BI₀:给定存储时间的褐变指数与初始褐变指数的比值;RA:PPO 剩余活性;BD:褐变程度值; L^* :亮度;HPP:高压处理;HTST:超高温瞬时灭菌;PEF:脉冲电场;PES:聚醚砜;PVP:聚乙烯吡咯烷酮。

除了单独使用各项抗褐变技术,将各个技术结合起来或许更能提高处理效果。例如表 2 中提到的脉冲光结合超声波,PE/PVP 特制膜结合超滤,电渗析结合双极膜结合温热处理。物理控制技术是常用的褐变抑制技术,它具有见效快、无污染的优点,但能耗较高、部分技术对仪器设备的要求较高。

2.2 苹果汁褐变的化学控制技术

当今果汁市场的发展趋势限制了合成添加剂的使用,开发天然无害的褐变抑制剂成为工业发展和消费者的共同需求,表 3 列出一些褐变抑制剂或者天然产物提取物。

根据控制褐变的原理,可将酶促褐变抑制剂分为还原剂、抗氧化剂、螯合物、络合物和酶抑制剂^[4]。还原剂能和体系中的氧气发生反应,从而清除氧气,组织苹果汁中酚类物质被氧化;酶抑制剂能抑制多酚氧化酶的活性;络合物和螯合物通过和多酚氧化酶的 Cu²⁺ 结合使多酚氧化酶失去催化能力;抗氧化剂可

以清除引起果蔬褐变和衰老的活性氧自由基,抑制过氧化。亚硫酸盐是传统的褐变抑制剂。但因其易引起患有呼吸道疾病的个体出现过敏反应而被美国食品药品监督管理局(FDA)禁用^[54]。因此抑制褐变的亚硫酸盐替代品对饮料工业的发展有重要意义。目前已经发现许多天然产物表现出令人满意的抑制褐变活性。如表 3 中列举的各类褐变抑制剂。除亚硫酸盐替代品之外,还有其他天然化合物已被证实对苹果汁的褐变有抑制效果。如表 3 中所示的洋葱、蜂蜜、橙皮和麦麸等都对苹果汁或其他苹果制品的褐变有抑制效果。

化学技术抑制苹果汁褐变主要是利用添加剂的作用。这种技术的优点是见效快、成本低、能耗低且种类丰富,其缺点是这些添加剂可能对苹果汁颜色和风味产生影响。若是改变了原有的产品特性则应慎重使用。之后的研究可探究出这些天然产物抑制褐变的功能成分,将功能成分提取出来制成一种天然的

食品添加剂应用于食品工业中。

表 3 抑制苹果汁褐变的化学添加剂

Table 3 Chemical additives that inhibit browning of apple juice

类别	名称	添加剂量	效果	文献
还原剂	亚硫酸钠	0.1 mmol/L	RA = 40%	[1]
	洋葱汁	2.5%	L^* : 51.62→53.87	[43]
	皱叶酸模种子提取物	0.3 mg/mL	L^* : 86→94	[44]
酶抑制剂	乳清分离蛋白	10 g/L	RA = 20%	[45]
	蜂蜜提取物	3.5 g/L	IC ₅₀ (g/L) < 0.87	[4]
	咖啡酸苯乙基酯	2.8 g/L	IC ₅₀ (g/L) = 1	[4]
	L-半胱氨酸	0.19 g/L	IC ₅₀ (g/L) < 0.06	[4]
	4-己基间苯二酚	0.19 g/L	IC ₅₀ (g/L) < 0.06	[4]
	植酸	0.1 mmol/L	RA = 0.8%	[1]
	亚氯酸钠	3.0 mmol/L	RA = 0	[46]
	麦麸白蛋白水解物	1%	RA = 60%	[47]
	蜂蜜	5% ~ 10%	OD _{420nm} : 1.7→0.75	[48]
络合物	麦芽糖基-β-环糊精	90 mmol/L	Kc = 4.09 mmol/L	[5]
螯合剂	香豆素(1,2-苯并吡喃酮)	0.004 mg/L	RA = 27%	[49]
	洋葱汁	2.5%	L^* : 51.62→53.87	[43]
	植酸	0.1 mmol/L	RA = 0.8%	[1]
抗氧化剂	植酸	0.1 mmol/L	RA = 0.8%	[1]
	抗坏血酸	0.1 mmol/L	RA = 15%	[1]
	香豆素(1,2-苯并吡喃酮)	0.004 mg/L	RA = 27%	[49]
	橙皮提取物	2%	RA = 10%	[50]
	绿茶提取物	3 g/L	RA = 4%	[51]
	草大戟素-抗坏血酸	0.01% ~ 0.05%	L^* = 27.1	[52]
	谷胱甘肽	0.08%	RA = 0.2	[53]

注:RA:PPO 剩余活性; L^* :苹果汁的亮度值;IC₅₀ (g/L):达到 PPO 抑制程度半数最大值所需的抑制剂量浓度;OD₄₂₀:苹果汁在 420 nm 处吸光度;Kc:麦芽糖基-β-环糊精与苹果汁中酚类物质的络合常数。

2.3 苹果汁褐变的生物控制技术

除物理控制技术及化学控制技术控制苹果汁褐变之外,生物控制技术因控制效果好、不会对苹果汁本身的特性造成影响而逐渐成为研究热点。目前抑制苹果汁褐变的生物技术有蛋白酶的抑制作用、基因工程技术和乳酸菌代谢产物等。PARPINELLO 等^[9]研究了商业葡萄糖氧化酶-过氧化氢酶系统(GOX)在苹果泥保存期间对氧的去除和褐变控制效果。结果显示,GOX 能将苹果泥中的溶解氧含量降低至低水平(去除 99% 氧),并且显示出控制非酶促褐变的能力。除在加工过程中脱除苹果中溶解氧和酶底物之外,选用不易发生酶促褐变的苹果品种作为加工原料是一种很好的防止苹果制品发生酶促褐变的方法。一些研究计划试图利用常规育种和基因工程的方法培育出低酶促褐变的苹果栽培品种^[55]。例如反义 RNA 和基因沉默技术,已被研究作为开发具有抗褐变性质的新基因型的手段。SuperMac, SJCA16 和 EdenTM 是开发的苹果基因型中的一部分。具有抗褐变性质的新苹果基因型有利于市场对增值产品开发的需

求不断增长,同时通过减少使用抗褐变化学处理剂而使加工成本最小化。谷云等^[56]从豌豆发酵液中筛选到 5 株可以抑制莲藕褐变的乳酸菌。乳酸菌代谢产生的酸、醇、酮、过氧化氢等物质有较强的抗氧化性和络合金属离子的能力,能在一定程度上抑制褐变。

2.4 褐变控制技术在苹果汁加工各环节中的应用情况

纵览苹果汁的生产工艺(图 2),其在不同工艺环节上褐变的主要类型也不尽相同。章金英^[57]认为在破碎和压榨过程中主要为酶促褐变,而在巴氏杀菌过程和后续的贮藏过程主要为非酶褐变(美拉德反应)。上述各类方法抑制褐变的机制其在苹果汁不同生产环节上的适用性各不一样,有些方法甚至只能用于特定的环节。图 2 给出了这些方法在苹果汁加工特定工艺的应用情况。上述论述的是单一方法对苹果汁褐变的控制效果,在实际生产中,可根据具体的产品要求和生产条件灵活选择褐变控制技术,可使用单一技术控制褐变或者将多种技术结合来抑制苹果汁褐变。

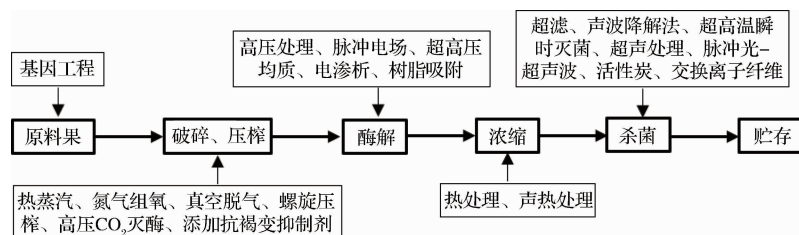


图2 褐变控制在苹果汁生产环节的应用情况

Fig. 2 The application of browning control technology in apple juice production

4 结语

近年来,对于苹果汁褐变抑制的研究取得了巨大的成就。生产技术的改进、天然褐变抑制剂的开发和各类褐变抑制技术的组合使用都为实际生产提供了理论依据。就对苹果汁褐变接下来的研究来看以下几个方面亟待加强:(1)对苹果汁非酶促褐变的机理的研究相对匮乏,包括发生非酶褐变的化学成分,条件等方面;(2)褐变抑制剂的安全性及对苹果汁风味营养的影响需要进一步探索;(3)脱除原料中褐变底物方面的研究几乎是空白的,这是有效控制加工过程中褐变程度的技术之一。

参考文献

- [1] DU Yun-jian, DOU Si-qi, WU Sheng-jun. Efficacy of phytic acid as an inhibitor of enzymatic and non-enzymatic browning in apple juice [J]. Food Chemistry, 2012, 135: 580 - 582.
- [2] VAIKOUSI H, KOUTSOUMANIS K, BILIADERIS C G. Kinetic modelling of non-enzymatic browning of apple juice concentrates differing in water activity under isothermal and dynamic heating conditions [J]. Food Chemistry, 2008, 107(2): 785 - 796.
- [3] 周亚平. 苹果浓缩汁非酶褐变影响因素的研究[D]. 青岛:莱阳农学院, 2006.
- [4] ROSA L, ALVAREZ-PARRILLA E, MOYERS-MONTOYA E, et al. Mechanism for the inhibition of apple juice enzymatic browning by palo fierro (desert ironweed) honey extract and other natural compounds [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 269 - 276.
- [5] LOPEZ-NICOLAS J M, NUNEZ-DELICADO E, PEREZ-LOPEZ A J, et al. Reaction's mechanism of fresh apple juice enzymatic browning in the presence of maltosyl- β -cyclodextrin [J]. Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry, 2007, 57(1-4): 219 - 222.
- [6] NIU SHUANG, XU Zeng-hui, FANG Yu-dan, et al. Comparative study on cloudy apple juice qualities from apple slices treated by high pressure carbon dioxide and mild heat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(1): 91 - 97.
- [7] 赵光远,蔡照磊,钟明辉. 苹果的酶促褐变及其影响因素[J]. 食品与发酵科技, 2009, 45(02): 36 - 37.
- [8] QUEIROZ C, MENDES LOPES M L, FIALHO E, et al. Polyphenol oxidase: characteristics and mechanisms of browning control [J]. Food Reviews International, 2008, 24(4): 361 - 375.
- [9] PARPINLLO G P, CHINNICI F, VERSARI A, et al. Preliminary study on glucose oxidase-catalase enzyme system to control the browning of apple and pear purees [J]. LWT-Food Science and Technology, 2002, 35(3): 239 - 243.
- [10] BORNEMAN Z, KMEN V G, NIJHUIS H H. Selective removal of polyphenols and brown color in apple juices using PES/PVP membranes in a single ultrafiltration process [J]. Separation and Purification Technology, 2001, 23(22): 53 - 61.
- [11] GARCIA-TORRES R, PONAGANDLA N R, ROUSEFF R L, et al. Effects of dissolved oxygen in fruit juices and methods of removal [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2009, 8: 409 - 423.
- [12] 冉军舰. 苹果多酚的组分鉴定及功能特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [13] 宋莲军,唐贵芳,赵秋艳,等. 富士苹果多酚氧化酶的提取及特性的研究[J]. 浙江农业科学, 2009(4): 789 - 793.
- [14] 于佳,袁翠美,马文秀,等. 富士苹果多酚氧化酶特性研究[J]. 中国野生植物资源, 1999, 18(4): 13 - 16.
- [15] 黄建韶,张洪,田宏现. 苹果中多酚氧化酶的性质[J]. 食品与机械, 2001(3): 21 - 22.
- [16] 唐贵芳. 粉红女士苹果多酚氧化酶特性及其苹果汁防褐变方法的研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2009.
- [17] 王琼波,陈琦,冯金丹. 嘎拉苹果多酚氧化酶性质及其抑制方法研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(6): 118 - 121.
- [18] 仲飞. 红星苹果多酚氧化酶某些特性及其抑制剂的研究[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 184 - 186.
- [19] 付聿成,王妮妮,杜金华. 金帅苹果多酚氧化酶提取及部分酶学特性研究[J], 食品工业科技, 2006, 27(2): 118 - 121.

59-62.

- [20] 王锋,李鹏军,哈益明. 浓缩苹果汁生产中褐变因素及其控制措施的探讨[J]. 食品科技,2006(4):85-87,91.
- [21] ZHU Da-zhou, JI Bao-ping, EUM H L, et al. Evaluation of the non-enzymatic browning in thermally processed apple juice by front-face fluorescence spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 272-279.
- [22] 徐辉艳. 果汁非酶褐变及其影响因素的研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2011, (4): 103-106.
- [23] 梁俊,郭燕,刘玉莲,等. 不同品种苹果果实中糖酸组成与含量分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2011,39(10): 163-170.
- [24] 姜宏,左利民,周洁,等. 反相高效液相色谱法评价烟台苹果中游离氨基酸[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版, 2014,27(2): 111-116.
- [25] SULAIMAN A, SOO M J, FARID M, et al. Thermosonication for polyphenol oxidase inactivation in fruits: Modeling the ultrasound and thermal kinetics in pear, apple and strawberry purees at different temperatures [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 165: 133-140.
- [26] YI J, KEBEDE B T, DANG D N H, et al. Quality change during high pressure processing and thermal processing of cloudy apple juice[J]. LWT-Food Science and Technology. 2017, 75: 85-92.
- [27] SUN Yu-jing, ZHONG Lie-zhou, CAO Lian-fei, et al. Sonication inhibited browning but decreased polyphenols contents and antioxidant activity of fresh apple (*Malus pumila* mill, cv. Red Fuji) juice [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2015, 52(12): 8336-8342.
- [28] FERRARIO M, GUERRERO S. Effect of a continuous flow-through pulsed light system combined with ultrasound on microbial survivability, color and sensory shelf life of apple juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 214-224.
- [29] GENOVESE D B, ELUSTONDO M P, LOZANO J E. Color and cloud stabilization in cloudy apple juice by steam heating during crushing [J]. Journal of Food Science, 1997, 62(6): 1171-1175.
- [30] ZHAO Liang, WANG Yong-tao, QIU Dan-dan, et al. Effect of ultrafiltration combined with high-pressure processing on safety and quality features of fresh apple juice [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(11): 3246-3258.
- [31] SCHILLING S, SCHMID S, JAGER H, et al. Comparative study of pulsed electric field and thermal processing of apple juice with particular consideration of juice quality and enzyme deactivation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(12): 4545-4554.
- [32] GINER J, GIMENO V, BARBOSA-CANOVAS G V, et al. Effects of pulsed electric field processing on apple and pear polyphenol oxidases. Food Science and Technology International, 2001, 7(4): 339-345.
- [33] SALDO J, SUAREZ-JACOBO á, GERVILLA R, et al. Use of ultra-high-pressure homogenization to preserve apple juice without heat damage [J]. High Pressure Research, 2009, 29(1): 52-56.
- [34] QUOC A L, MONDOR M, LAMARCHE F, et al. Effect of a combination of electrodialysis with bipolar membranes and mild heat treatment on the browning and opalescence stability of cloudy apple juice [J]. Food Research International. 2006, 39(7): 755-760.
- [35] 田玉庭. 源于澳洲青苹果的多酚氧化酶(PPO)特性及阻氧抑制技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.
- [36] ATAC B, GOMEN V. Adsorption of dark colored compounds in apple juice-effects of initial soluble solid concentration on adsorption kinetics and mechanism [J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(1): 108-124.
- [37] 李银花,李洪燕. 活性炭吸附对苹果汁色值的影响[J]. 现代食品科技. 2011, 27(7): 799-801.
- [38] 李佩艳,仇农学. 离子交换纤维吸附去除浓缩苹果汁中总酚的研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2005, 33(3): 94-98.
- [39] ACEVEDO N, SCHEBOR C, BUERA M P. Water-solids interactions, matrix structural properties and the rate of non-enzymatic browning [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4): 1108-1115.
- [40] VALDERRAMA P, MARANGONI F, CLEMENTE E. Effect of heat treatment on the activity of Peroxidase (POD) and polyphenol oxidase (PPO) in apple (malus comunis) [J]. Ciência E Tecnologia De Alimentos, 2001, 21(3): 321-325.
- [41] GUI Fen-qi, WU Ji-hong, CHEN Fang, et al. Inactivation of polyphenol oxidases in cloudy apple juice exposed to supercritical carbon dioxide. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1678-1685.
- [42] ABID M, JABBAR S, WU T, et al. Qualitative assessment of sonicated apple juice during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 39(6): 1299-1308.
- [43] LEE B, SEO J D, RHEE J, et al. Heated apple juice supplemented with onion has greatly improved nutritional quality and browning index [J]. Food Chemistry, 2016, 201: 315-319.
- [44] SUH H, PARK S, PARK S. Inhibition of browning on fresh apple juices by natural phytochemicals from rumex crispus L. seed [J]. Journal of the Korean Society for Apple Biological Chemistry, 2011, 54(4): 524-530.
- [45] YI Jian-hua, DING Yong. Dual effects of whey protein i-

- solates on the inhibition of enzymatic browning and clarification of apple juice [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2014, 32(6): 601–609.
- [46] HE Qiang, LUO Ya-guang, CHEN Pei. Elucidation of the mechanism of enzymatic browning inhibition by sodium chlorite [J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(4): 847–851.
- [47] CAMPAS-RIOS M D J, MERCADO-RUIZ J N, VALDEZ-COVARRUBIAS M A, et al. Hydrolysates from wheat bran albumin as color-adding agents and inhibitors of apple polyphenol oxidase. [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2012, 36(4): 470–478.
- [48] GACCHE R N, SHINDE B T, DHOLE N A, et al. Evaluation of floral honey for inhibition of polyphenol oxidase-mediated browning, antioxidant and antimicrobial activities [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2009, 33(5): 693–706.
- [49] THADA R, CHOCKALINGAM S, DHANDAPANI R K, et al. Extraction and quantitation of coumarin from cinnamon and its effect on enzymatic browning in fresh apple juice: a bioinformatics approach to illuminate its anti-browning activity [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(22): 5 385–5 390.
- [50] GONZALEZ-GOMEZ D, CARDOSO V, BOHOYO D, et al. Application of experimental design and response surface methodology to optimize the procedure to obtain a bactericide and highly antioxidant aqueous extract from orange peels [J]. *Food Control*, 2014, 35(1): 252–259.
- [51] KLIMCZAK I, GLISZCZY SKA-WIG O A. Green tea extract as an anti-browning agent for cloudy apple juice [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017, 97(5): 1 420–1 426.
- [52] TAO J, ZHU Q, QIN F, et al. Preparation of steppogenin and ascorbic acid, vitamin E, butylated hydroxytoluene oil-in-water microemulsions: Characterization, stability, and antibrowning effects for fresh apple juice [J]. *Food Chemistry*. 2017, 224: 11–18.
- [53] WU S. Preparation of canned apple juice using glutathione as an enzymatic and non-enzymatic browning inhibitor [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2017, 41(1).
- [54] BUTA J G, MOLINE H E, SPAULDING D W, et al. Extending storage life of fresh-cut apples using natural products and their derivatives [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(1), 1–6.
- [55] JOSHI A P K, RUPASINGHE H P V, PITTS N L, et al. Biochemical characterization of enzymatic browning in selected apple genotypes [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2007, 87(5): 1 067–1 074.
- [56] 谷云, 汤少华, 周丽, 等. 防褐变作用乳酸菌的筛选及其发酵条件研究 [J]. *中国食品学报*. 2014, 14(3): 72–77.
- [57] 章金英. 苹果汁加工工艺中果汁褐变控制 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.

Advance in browning control technology of apple juice

LIANG Ya-nan¹, YE Fa-yin¹, LEI Lin¹, ZHAO Guo-hua^{1,2*}

1(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2(Chongqing Engineering Research Centre of Regional Foods, Chongqing 400715, China)

ABSTRACT Apple processing industry is a major fruit processing industry in the world. Apple juice is the most important and productive production in apple processing industry. The color of apple juice is a critical quality index used in consumers' judgement of the quality of apple juice. The color is mainly affected by its browning in the process. According to its browning mechanism, browning of apple juice mainly includes enzymatic browning and non-enzymatic browning. Due to the high content of phenolic compounds and high activity of polyphenol oxidase in raw apples, enzymatic browning is the main browning cause. Therefore, the control of apple juice browning, especially enzymatic browning, is of great significance to protect its quality and improve consumers' acceptance. On the basis of an extensive review of relevant literature, this paper summarizes the mechanism of apple juice browning including enzymatic browning and non-enzymatic browning, as well as browning control technology including physical control technology, browning inhibitor and other control technologies. Moreover, the problems in this field and the future development direction are also proposed.

Key words apple juice; browning; control; technology