

复合酶解制备甜橙全果浊汁工艺优化

Optimization the technology of preparation of whole sweet orange cloudy juice by complex enzymatic

孙俊杰¹ 付复华^{1,2} 李绮丽²

SUN Jun-jie¹ FU Fu-hua^{1,2} LI Qi-li²

(1. 湖南大学研究生院隆平分院, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院农产品加工研究所, 湖南 长沙 410125)
(1. Longping Branch Graduate School, Hunan University, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Hunan Agricultural Product Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

摘要:以甜橙全果为原料制备甜橙全果浊汁,通过单因素试验和正交试验,以全果浊汁的出汁率和悬浮稳定性为指标,用果胶酶和蛋白酶进行酶解处理,得出酶解最优工艺条件为:果胶酶添加量 0.01%,蛋白酶添加量 0.2%,酶解时间 40 min,酶解温度 40 ℃,该条件下果浆含量 30%的全果果汁的出汁率为 83.27%,660 nm 处的 OD 值为 0.431。该复合酶解方法能显著提高甜橙全果果汁的出汁率并使果汁保持较好的悬浮稳定性,经酶解后,果浆含量 20%和 30%的全果果汁具有较好的感官品质。

关键词:甜橙;全果浊汁;果胶酶;蛋白酶

Abstract: The whole sweet orange cloudy juice was produced for investigation in the current study. Treated with pectinase and protease, one-factor-at-a-time and orthogonal array design methods were used to optimize hydrolysis conditions based on juice yield and suspension stability. The optimum conditions were as follows: pectinase amount 0.01%, protease amount 0.2%, the enzymolysis time 40 min, and the enzymolysis temperature 40 ℃. In these conditions, the 30% puree content whole fruit juice yield was up to 83.27%, and the absorbance at 660 nm was 0.431. The results showed that the enzymatic treatment could improve the juice yield greatly and remain the cloudy juice good suspension stability. After the enzymatic treatment, the 20% and 30% puree content whole fruit juice could preserve good organoleptic properties.

Keywords: sweet orange; whole fruit cloudy juice; pectinase; protease

柑橘汁是采用柑橘类果实制取的一类果汁,其色泽优

美,营养丰富,口味芳香宜人,是世界上最受欢迎、贸易量最大的果汁产品^[1-2]。中国柑橘栽种面积和产量均居世界之首,然而由于中国用于制汁的橙类品种少、产量低且成熟期不集中等原因,橙汁不能自足,80%依赖进口^[3-4]。柑橘榨汁后,残留的果渣占果实质量的 40%~50%,这些皮渣除了少量的用于提取香精油、果胶及黄酮物质外,大部分没有得到合理的利用,既浪费了资源,又污染了环境^[5-6]。目前对柑橘皮渣研究和利用的报道较多,高彦祥等^[7]以锦橙皮渣为原料,将皮渣经超微粉碎后果胶酶和纤维素酶酶解制取天然的饮料浑浊剂;韩春然等^[8]以橘皮为原料,对其进行乳酸发酵并与柑橘果肉混合,开发一种新型的果酱;刘新等^[9]以橘子酒加工产生的果渣为原料,采用纤维素酶和果胶酶混合酶对果渣酶解工艺进行研究,提高了橘瓣的出汁率并减少了橘子酒加工中果渣的排放;尹颖等^[10]取温州蜜柑、胡柚的皮及榨汁后的果渣,采用酸提醇沉的方法制备低分子柑橘果胶,并研究其理化性质和抗前列腺癌功效。

研究发现,柑橘皮渣富含可溶性糖、酸、果胶、粗脂肪、粗纤维、维生素、氨基酸和矿物质等营养成分^[11-12],具有抗氧化、抗炎、预防心血管疾病等诸多生理活性^[13-14]。

若能将皮渣完整地保留在果汁中制备柑橘全果果汁,则既满足将柑橘原料“吃干榨尽”的原则,又不失为一种开发新型柑橘果汁产品的方法。本试验拟以甜橙全果为原料,通过破碎匀浆和均质处理,研究果胶酶和蛋白酶复合酶解制备全果浊汁的最佳酶解条件,并优化甜橙全果浊汁的制备工艺。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

果胶酶:酶活 10 万 U/g,江苏锐阳生物科技有限公司;
酸性蛋白酶:酶活≥50 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司。

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201303076);国家重点研发计划(编号:2017YFD0400701)

作者简介:孙俊杰,男,湖南大学在读硕士研究生。

通信作者:付复华(1978—),男,湖南省农业科学院副研究员,博士。

E-mail: fhfu686@163.com

收稿日期:2017-05-22

1.1.2 主要仪器设备

料理机:JYL-C012 型,中国九阳股份有限公司;
电子天平:EL204-IC 型,瑞士梅特勒-托利多公司;
紫外可见分光光度计:UV-1800 型,岛津仪器(苏州)有限公司;
高速分散器内切式匀浆机:XHF-D 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;
恒温培养摇床:THZ-100 型,上海一恒科学仪器有限公司;
高速冷冻离心机:AVANTI J-26XP 型,美国 Beckman 公司;
恒温水浴锅:KQ-700DE 型,昆山市超声仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 柑橘全果果汁的制备 挑选新鲜、饱满、无腐烂、无病斑的甜橙,经磨油处理后用料理机破碎,得到全果果浆,将全果果浆与鲜榨甜橙汁按不同比例混合,经匀浆机和高压均质机使其中果肉继续均质细化,对不同全果浆与橙汁配比的全果果汁进行初步的感官评价筛选,确定最佳浆汁配比,得甜橙全果果汁初液。并对筛选出的全果果汁进行果胶酶和蛋白酶复合酶解处理。

1.2.2 全果果汁的感官评价 根据评价员的筛选原则,填写调查表,从中挑选出了 9 名食品科学研究方向的研究生对全果果汁进行感官评价^[15]。以市面上销售的果汁为基础,对这 9 名评价员进行针对性的培训(包括基本培训和专业培训)。评价果浆含量分别为 0%(即纯甜橙鲜榨果汁),10%,20%,30%,40%,50%的全果果汁,所有的样品随机摆放,评价员评价每个样品的味道、外观、颜色、香气和总体接受度 5 个指标并打分^[16],打分区间为 1~10 分,1 分为最不喜欢,10 分为最喜欢。此感官评价在酶解工艺前后各进行 1 次。

1.2.3 单因素试验 以全果果汁的出汁率和悬浮稳定性为指标,分别考察果胶酶添加量(以全果果浆质量的百分比计)(0.0%,0.005%,0.01%,0.02%,0.03%),蛋白酶添加量(以全果果浆质量的百分比计)(0.0%,0.05%,0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%),酶解温度(20,30,40,50,60℃),酶解时间(20,40,60,80,100 min)这 4 个因素对出汁率和悬浮稳定性的影响。当选定某一因素进行单因素试验时,其余各个因素的条件为:果胶酶添加量 0.01%,蛋白酶添加量 0%,酶

解温度 40℃,酶解时间 60 min。设置空白对照,进行 3 次重复试验。

1.2.4 正交试验 根据单因素试验的结果,每个因素选取 3 个水平,以出汁率和悬浮稳定性为考察指标,进行 3 次重复试验。

根据实际需要,考虑到本试验的原则是在保证悬浮稳定性的前提下,尽量提高全果汁的出汁率,设定如下评价指标:综合评价指标=出汁率×70%+OD 值×30%,按照综合评价指标来衡量正交试验结果。

1.2.5 出汁率的测定 将酶解后全果果汁离心取上清液,所得清汁质量占酶解前全果果汁质量的百分比。

1.2.6 悬浮稳定性的测定 采用比色法^[17],取 10 g 全果果汁样品,于 3 000 r/min 离心 30 min,所得上清液在 660 nm 处测 OD 值,以蒸馏水为空白对照。

1.2.7 数据分析 采用 Excel 建立数据库,用 SPSS 22.0 软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 酶解前感官评价结果

由表 1 可知,当纯甜橙鲜榨汁中配入一定比例的果浆制成全果果汁时,其口感、外观、色泽、总体接受度均有下降,说明一定比例果浆的加入对果汁的品质造成了一定的影响。果浆含量为 10%时,全果果汁的总体接受度不理想;当果浆含量达到 40%,50%时,由于果浆含量较高使得全果果汁过于黏稠,导致外观和总体接受度指标下降较明显。当果浆含量为 20%,30%时,大部分指标较纯鲜榨果汁虽略有下降,但仍有较好的可接受度。考虑到全果的最大利用率,采用全果果汁中果浆的含量均为 30%。

2.2 单因素试验

2.2.1 果胶酶添加量对酶解效果的影响 由图 1 可知,在一定的范围内,全果果汁的出汁率随着果胶酶添加量的增加而增大,当果胶酶的添加量达到 0.02%时,出汁率最大(82.42%)。当果胶酶的添加量>0.02%时,出汁率无显著变化;全果果汁的悬浮稳定性随着果胶酶添加量的增大而降低,当果胶酶的添加量>0.02%时,全果果汁的悬浮稳定性无明显变化。考虑到添加果胶酶的主要目的是为了增加出汁率,因此,采用加酶量 0.01%,0.02%,0.03%作为正交试验的 3 个水平。

表 1 酶解前感官评价[†]

Table 1 Sensory evaluation before enzymatic hydrolysis conditions (n=6)					
果浆含量/%	口感	外观	色泽	香气	总体接受度
0	8.87±0.23 ^a	8.96±0.29 ^a	8.17±0.18 ^a	7.83±0.19 ^{bc}	8.85±0.28 ^a
10	7.52±0.20 ^c	7.67±0.11 ^{bc}	8.12±0.23 ^a	7.56±0.27 ^{cd}	6.67±0.27 ^{cd}
20	8.02±0.19 ^b	7.97±0.31 ^b	7.52±0.23 ^b	8.23±0.12 ^{ab}	7.33±0.13 ^b
30	7.58±0.20 ^c	7.84±0.31 ^b	7.64±0.17 ^b	8.49±0.26 ^a	7.38±0.24 ^b
40	7.34±0.18 ^{cd}	7.24±0.13 ^{cd}	7.33±0.24 ^b	7.89±0.27 ^b	7.03±0.16 ^{bc}
50	7.05±0.19 ^d	6.96±0.23 ^d	6.67±0.24 ^c	7.33±0.17 ^d	6.43±0.19 ^d

[†] 采用邓肯式新复极差法测验,同列数据肩标不同小写字母分别表示差异显著(α=0.05)。

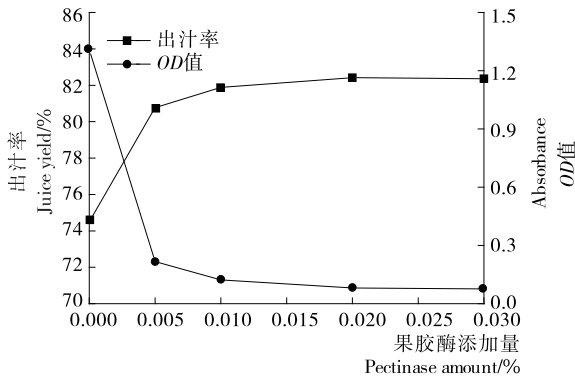


图 1 果胶酶添加量对酶解效果的影响

Figure 1 Effect of pectinase amount on juice yield and suspension stability

2.2.2 蛋白酶添加量对酶解效果的影响 由图 2 可知,在一定的范围内,随着蛋白酶添加量的增大,全果果汁的出汁率也有所提高,但增幅较小,在蛋白酶的添加量为 0.2% 时,出汁率达到最大(82.84%),当蛋白酶的添加量继续增大时,出汁率无明显变化;在一定的范围内,随着蛋白酶添加量的增多,全果果汁的悬浮稳定性增大,当蛋白酶的添加量>0.3% 时,悬浮稳定性不再有显著变化。因此,采用加酶量 0.1%,0.2%,0.3% 作为正交试验的 3 个水平。

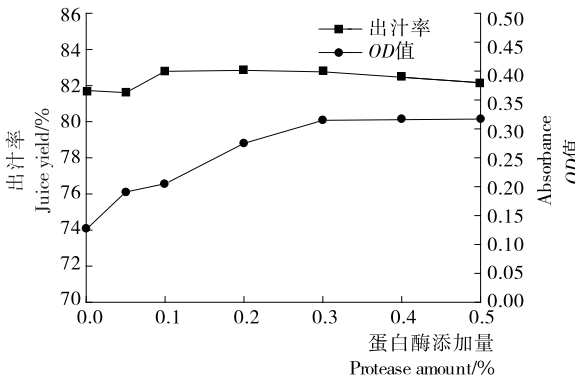


图 2 蛋白酶添加量对酶解效果的影响

Figure 2 Effect of protease amount on juice yield and suspension stability

2.2.3 酶解时间对酶解效果的影响 由图 3 可知,在一定的范围内,全果果汁的出汁率随着酶解时间的延长而增大,在酶解时间为 60 min 时达到最大值(81.98%),随着酶解时间继续延长,出汁率虽略有下降但无显著变化;全果果汁的悬浮稳定性随着酶解时间的延长而降低,在前 40 min 降低幅度明显,在 40 min 以后,悬浮稳定性降低幅度减缓。综合考虑生产成本等因素,采用 40,60,80 min 作为正交试验的 3 个水平。

2.2.4 酶解温度对酶解效果的影响 由图 4 可知,酶解温度为 20~50 ℃ 时,全果果汁的出汁率随着温度的升高而增大,在 50 ℃ 时,出汁率达到最大值(83.05%),而温度到达 60 ℃ 时,出汁率又开始下降。这是因为随着温度的升高,果胶酶的活性也随之升高,达到最适温度时,果胶酶的催化能力最高,但温度过高时,果胶酶的催化能力又会下降^[18-19];全果

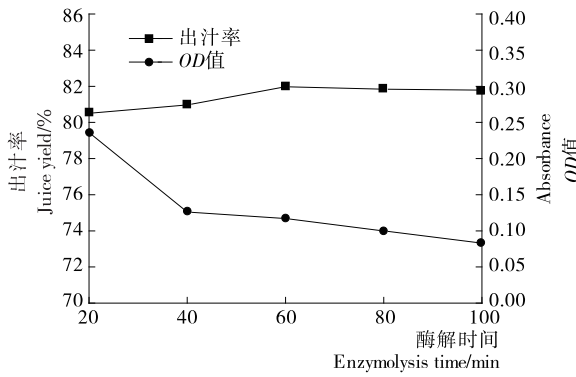


图 3 酶解时间对酶解效果的影响

Figure 3 Effect of enzymolysis time on juice yield and suspension stability

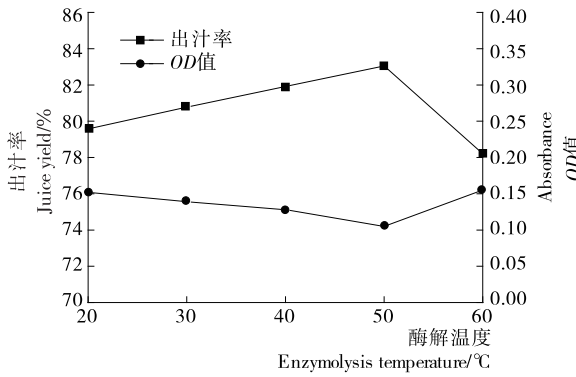


图 4 酶解温度对酶解效果的影响

Figure 4 Effect of enzymolysis temperature on juice yield and suspension stability

果汁的悬浮稳定性在 20~60 ℃ 时呈现先下降后升高的趋势,在 50 ℃ 时悬浮稳定性最差。考虑较高温度对果汁口感的影响,采用 35,40,45 ℃ 作为正交试验的 3 个水平。

2.3 正交试验

2.3.1 正交试验因素水平确定 正交试验因素水平见表 2。

表 2 复合酶解正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels in the orthogonal array design for optimizing composite enzyme hydrolysis conditions

水平	A 果胶酶 添加量/%	B 蛋白酶 添加量/%	C 酶解 时间/min	D 酶解 温度/℃
1	0.01	0.1	40	35
2	0.02	0.2	60	40
3	0.03	0.3	80	45

2.3.2 正交试验结果及分析 由表 3 可知,复合酶的酶解工艺中,影响全果果汁综合评价指标的主次因素依次为:A>D>C>B,最佳工艺组合为 A₁B₂C₁D₂,即果胶酶添加量 0.01%,蛋白酶添加量 0.2%,酶解时间 40 min,酶解温度 40 ℃。最佳工艺组合不在正交表组合中,在最优组合条件下进行验证实验,结果为:全果果汁的出汁率 83.27%,OD 值 0.431,综合评价指标达到了 0.712,优于正交表组合,达到了优化效果。

表 3 复合酶酶解正交试验出汁率结果及分析

Table 3 Orthogonal array design and results of juice yield for optimizing composite enzyme hydrolysis conditions

试验号	A	B	C	D	出汁率/ %	OD 值	综合评价 指标
1	1	1	1	1	82.56	0.387	0.694
2	1	2	2	2	83.30	0.390	0.700
3	1	3	3	3	83.99	0.214	0.652
4	2	1	2	3	84.18	0.083	0.614
5	2	2	3	1	83.57	0.195	0.644
6	2	3	1	2	83.10	0.308	0.674
7	3	1	3	2	83.45	0.071	0.606
8	3	2	1	3	83.45	0.104	0.615
9	3	3	2	1	82.95	0.150	0.626
k_1	0.682	0.638	0.661	0.654			
k_2	0.644	0.653	0.647	0.660			
k_3	0.616	0.651	0.634	0.627			
R	0.067	0.015	0.028	0.033			

2.3.3 正交试验出汁率和悬浮稳定性方差分析 由表 4 可知,果胶酶添加量、酶解时间、酶解温度 3 个因素对出汁率影响显著,蛋白酶添加量对出汁率影响不显著。由表 5 可知,果胶酶添加量、蛋白酶添加量、酶解时间、酶解温度 4 个因素对悬浮稳定性的影响皆显著。

表 4 复合酶酶解正交试验出汁率方差分析表

Table 4 Analysis of variance for juice yield with various composite enzyme hydrolysis conditions ($n=3$)

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
A	0.000 066 22	2	0.000 033 11	7.170	0.005
B	0.000 003 645	2	0.000 001 823	0.395	0.680
C	0.000 0	2	0.000 094 98	20.568	0.000
D	0.000 0	2	0.000 0	36.629	0.000
误差	0.000 083 12	18	0.000 004 618		

表 5 复合酶酶解正交试验悬浮稳定性方差分析表

Table 5 Analysis of variance for suspension stability with various composite enzyme hydrolysis conditions ($n=3$)

来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
A	0.226	2	0.113	330.552	0.000
B	0.013	2	0.007	19.216	0.000
C	0.051	2	0.025	73.941	0.000
D	0.082	2	0.041	119.863	0.000
误差	0.006	18	0.000		

2.4 酶解后感官评价

在最佳酶解工艺条件下,对酶解后不同果浆浓度的全果果汁的感官评价结果见表 6。果浆含量为 10%的全果果汁在酶解后出现了分层现象,一定程度上影响了其外观、颜色、总体接受度等指标,所以各项指标得分均较低。当果浆含量为 20%和 30%时,相比其他果浆含量的全果果汁,在口感、

表 6 酶解后感官评价[†]

Table 6 Sensory evaluation after enzymatic hydrolysis conditions

果浆含量/%	味道	外观	颜色	香气	总体接受度
10	6.52±0.17 ^b	5.67±0.16 ^c	5.83±0.17 ^c	6.17±0.18 ^c	5.50±0.18 ^d
20	7.23±0.26 ^a	7.50±0.17 ^a	7.83±0.18 ^a	6.67±0.20 ^b	7.08±0.23 ^a
30	7.35±0.18 ^a	7.67±0.16 ^a	7.17±0.18 ^b	6.83±0.17 ^{ab}	6.93±0.26 ^{ab}
40	6.85±0.18 ^b	6.75±0.17 ^b	7.02±0.13 ^b	7.17±0.14 ^a	6.67±0.23 ^{bc}
50	6.68±0.17 ^b	6.82±0.22 ^b	7.67±0.24 ^a	6.83±0.22 ^{ab}	6.33±0.16 ^c

[†] 采用邓肯式新复极差法测验,同列数据肩标不同小写字母分别表示差异显著($\alpha=0.05$)。

外观、色泽和总体接受度等方面有较高的得分。而当果浆含量达到 40%和 50%时,由于酶解后果汁仍较黏稠,所以其味道、外观等指标受到一定的影响。综上所述,在最佳酶解工艺下,果浆含量为 20%或 30%时的全果果汁在感官评价中得到较高的分数,具有更好的感官品质。

3 结论

果胶酶和蛋白酶的复合酶在一定工艺条件下能有效提高甜橙全果果汁的出汁率并使果汁保持较好的悬浮稳定性,此工艺条件为:果胶酶添加量 0.01%,蛋白酶添加量 0.2%,酶解时间 40 min,酶解温度为 40 ℃。此条件下果浆含量 30%的全果果汁的出汁率为 83.27%,660 nm 处的 OD 值为 0.431。经此工艺酶解后,果浆含量为 20%和 30%的全果果汁具有较好的感官品质。

后续将对甜橙全果果浆与其他果蔬汁的复配进行研究。

参考文献

[1] 单杨. 柑橘全果制汁及果粒饮料的产业化开发[J]. 中国食品学报, 2012, 12(10): 1-8.

[2] 叶富饶, 冯娇. 柑橘属果汁脱苦方法研究进展[J]. 饮料工业, 2013, 16(7): 8-12.

[3] 谢一顾, 匡伟明, 李娜, 等. 湖南几种冰糖橙优株果实制汁适应性及橙汁质量的评价[J]. 中国南方果树, 2016, 45(1): 43-45.

[4] 谢姣, 王华, 马亚琴. 几种柑橘品种制汁适应性评价研究[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 153-157.

[5] 付复华, 李忠海, 单杨, 等. 柑橘皮渣综合利用技术研究进展

[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 178-184.

[6] MARIA Marcella ttipodo, FRANCESCO Lanuzza, GIUSEPPE Micali, et al. Citrus waste recovery; a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed[J]. Bioresource Technology, 2004, 91(2): 111-115.

[7] 高彦祥, 方政. 酶解锦橙皮渣制取饮料浑浊剂的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 193-197.

[8] 韩春然, 张帅, 叶瞰昊. 乳酸发酵橘皮果酱的研制[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(12): 122-124.

[9] 刘新, 李新生, 吴三桥, 等. 响应面法优化柑橘果渣酶解工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 86-90.

[10] 尹颖, 陆胜民, 陈剑兵, 等. 柑橘皮渣制备低分子果胶及其抗癌活性的评价[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(3): 614-618.

[11] 张其圣, 陈功, 吴厚玖. 酶法处理柑橘果渣回收果汁技术与中试试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 340-346.

[12] 高彦祥, 方政. 柑橘类果汁加工副产品综合利用研究进展[J]. 饮料工业, 2005, 8(1): 1-7.

[13] 薛山. 柑橘皮渣中非水溶性抗氧化膳食纤维提取工艺优化[J].

食品与机械, 2016, 32(8): 151-155.

[14] 耿敬章, 刘军海, 吴三桥. 柑橘皮渣橘皮苷的提取及其抑菌性质研究[J]. 食品工业, 2014, 35(8): 87-91.

[15] 袁亚宏, 王周利, 李彩霞, 等. 鲜榨苹果汁的理化特性和感官品质相关性[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 1-5.

[16] OLUWASEUN P Bamidele, MOFOLUWASO B Fasogbon. Chemical and antioxidant properties of snake tomato (*Trichosanthes cucumerina*) juice and Pineapple (*Ananas comosus*) juice blends and their changes during storage[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 184-189.

[17] ZHANG Hui, WANG Zhang, XU Shi-ying. Optimization of processing parameters for cloudy ginkgo (*Ginkgo biloba* Linn.) juice[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 1 226-1 232.

[18] CAPOUNOVA D, DRDAK M. Comparison of some commercial pectic enzyme preparations applicable in wine technology [J]. Czech J Food Sci, 2002, 20(4): 131-134.

[19] 卢锋波, 刘桂玲, 王烁, 等. 响应面法优化果胶酶酶解提取黑莓花色苷的工艺参数[J]. 食品科学, 2010, 31(16): 11-15.

(上接第 136 页)

[8] GAMAGAE S U, SIVAKUMAR D, WIJESUNDERA R L C. E-valuation of post-harvest application of sodium bicarbonate-incorporated wax formulation and *Candida oleophila* for the control of anthracnose of papaya [J]. Crop Protection, 2004, 23 (7): 575-579.

[9] EL-MOUGY N S, EL-GAMAL N G, ABD-EL-KAREEM F. Use of organic acids and salts to control postharvest diseases of lemon fruits in Egypt[J]. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 2008, 41(7): 467.

[10] 白昌华, 田世平, 欧毅, 等. 涂蜡甜橙贮藏期间果皮中烯醇类香气成分的变化(简报)[J]. 植物生理学通讯, 1994(4): 272-274.

[11] 王玉玲, 蓝炎阳. 三种果蜡在芦柑保鲜的应用研究[J]. 福建热作科技, 2012(3): 18-21.

[12] 姜楠, 王蒙, 韦迪哲, 等. 果蜡保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2015(2): 596-601.

[13] 王文果. 涂蜡对柑桔类果实货架期的保鲜效果及经济价值[J]. 中国农村科技, 2005(8): 18.

[14] 曾凯芳. 套袋, SA 和 INA 对芒果 (*Mangifera indica* L) 果实采后抗病性和品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 19.

[15] KNIGHT T G, KLIEBER A, SEDGLEY M. Structural basis of the rind disorder oleocellosis in Washington navel orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) [J]. Annals of Botany, 2002, 90 (6): 765-773.

[16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.

[17] 李芋萱, 曾凯芳, 邓丽莉. 外源 L-Arg 处理对蜜橘果实贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2015(24): 313-318.

(上接第 143 页)

[13] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151-159.

[14] AKPMAR E K, BICER Cetinkaya F. Modeling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 75(4): 308-315.

[15] BRUCE D M. Exposed layer barley drying-three model fitted to new data up to 150 °C [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1985, 32: 337-347.

[16] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying [J]. Drying Technology, 2002, 20 (7): 1 503-1 513.

[17] WANG Zheng-fu, SUN Jun-hong, LIAO Xiao-jun, et al. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace[J]. Food Research International, 2007, 40: 39-46.

[18] 杨玲, 陈建, 杨屹立, 等. 甘蓝型油菜籽热风干燥特性及其数学模型[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 144-146.

[19] 种翠娟, 朱文学, 刘云宏, 等. 胡萝卜薄层干燥动力学模型研究

[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 24-29.

[20] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 387-392.

[21] PETERMAN M A, CLINE D J, HANSON T R, et al. Coloration characteristics of mechanically processed channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fillets held in refrigerated storage for seven days[J]. Journal of Applied Aquaculture, 2013, 25(3): 239-247.

[22] VARNALIS A I, BRENNAN J G, MACDOUGALL D B. The influence of blanching and initial drying on the permeability of the partially dried layer to water vapour[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(4): 369-378.

[23] 黄枝梅. 南瓜热风干燥特性与动力学模型[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(1): 23-27.

[24] LIU Li-jun, WANG Yu-xin, ZHAO Dan-dan, et al. Effect of carbonic maceration pre-treatment on drying kinetics of chilli (*Capsicum annuum* L.) flesh and quality of dried product[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(9): 2 516-2 527.