

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.036

局部块冰式两级冷冻浓缩制备高浓度苹果醋

Study on two-stage partial block freeze concentration to prepare high content apple cider vinegar

李湘勤¹钟瑞敏²门戈阳²单 斌²廖彩虎²LI Xiang-qin¹ZHONG Rui-min²MEN Ge-yang²SHAN Bin²LIAO Cai-hu²钟平娟³吴蓝洁²黄钻元²ZHONG Ping-juan³WU Lan-jie²HUANG Zuan-yuan²

(1. 韶关学院物理与机电工程学院, 广东 韶关 512005; 2. 韶关学院英东食品科学与工程学院, 广东 韶关 512005;
3. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330000)

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China; 2. Henry Fok School of Food Science and Technology, Shaoguan University, Shaoguan, Guangdong 512005, China; 3. State Key Lab of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

摘要:采用自主研发 50 L 渐进式局部块冰冷冻浓缩中试设备浓缩可溶性固形物含量为 5.0 °Brix 的苹果醋,通过调节搅拌速度和冷媒温度,综合能耗、时间等因素,探究两级浓缩最佳工艺条件并对其夹带进行有效回收,同时采用固相微萃取—气相色谱质谱联用技术研究苹果原醋、各级浓缩复原液、两级夹带液、夹带回收液及终极夹带的芳香物质变化。结果表明,50 kg 5.0 °Brix 的苹果醋在 -10 °C 静置冻结 3 h 再转入 -16 °C,搅拌速度 900 r/min, 21 h 可得 12.5 °Brix 的浓缩液 14.74 kg; 50 kg 12.5 °Brix 的果醋 -16 °C 保持 4 h 后转入 -24 °C, 900 r/min, 28 h 可得 25 °Brix 浓缩液 15.11 kg, 两级浓缩耗电量分别为 72, 135 kW·h。经测定,苹果醋中芳香物质有 14 种,含量较高的特征组分有苯甲醛、辛酸、4-乙苯酸-2-丁基酯、苯乙醇、乙酸苯乙酯等,经一级浓缩后芳香物质保留率为 80.23%, 二级浓缩保留率为 87.73%, 苹果醋最终经两级浓缩复原后芳香物质保留率可达 70.39%, 总损失率为 2.61%。因此通过两级浓缩,同时对夹带回收循环利用,可得到浓度较高及芳香物质保留较高的苹果醋。

关键词: 苹果醋; 冷冻浓缩; 夹带回收; 芳香成分

基金项目: 广东省公益研究与能力建设专项(编号:2015A010107018); 韶关学院校级科研项目(编号:SY2016KJ01)

作者简介: 李湘勤,男,韶关学院讲师,硕士。

通信作者: 钟瑞敏(1967—),男,韶关学院教授,硕士生导师,博士。E-mail: 2557563933@qq.com

收稿日期: 2019-04-23

Abstract: Used the self-developed 50 L progressive partial block freeze concentration pilot equipment to concentrate the soluble solid content of 5.0 °Brix apple cider vinegar. By adjusting the stirring speed and the cold medium temperature, comprehensive energy consumption, time and other factors, explored the optimum technological conditions of the two-stage and recycle liquid entrainment effectively. And at the same time, used solid-phase micro extraction-gas chromatography mass spectrometry to explore the changes of aromatic substances in the difference of apple original vinegar, all levels of concentrated compound liquid, two-stage entrainment solution, entrainment recovery solution and ultimate entrainment. Results: The apple cider vinegar 5 °Brix 50 kg -10 °C still keep 3 h and then turn to -16 °C, stirring speed 900 r/min, 21 h after get 12.5 °Brix concentrate 14.74 kg. The 50 kg of 12.5 °Brix vinegar -16 °C keep into -24 °C after 4 h, 900 r/min, after 28 h can get 25 °Brix concentrate 15.11 kg. The two levels of concentrated power consumption were 72 kW·h and 135 kW·h, respectively. There were 14 kinds of aromatic substances in apple cider vinegar, and the characteristic components with high content were benzaldehyde, octanoic acid, 4-ethylphenyl-2-butyl ester, benzene ethanol, phenyl-ethyl acetate, etc. The retention rate of aromatic substances after primary concentration was 80.23%, and the retention rate of secondary concentration was 87.73%. The retention rate and total loss rate of apple cider vinegar were 70.39% and 2.61%, respectively. Therefore, the concentration device can obtain the apple cider vinegar with a higher concentra-

tion and a higher retention of aromatic substances effectively by two-stage concentration of apple cider vinegar and recycling the entrainment, and it has to be useful for further improvements to the equipment and other materials.

Keywords: apple cider vinegar; freeze concentration; entrainment recovery; aromatic substances

冷冻浓缩是根据水与冰之间两相固液平衡原理,将料液中的水分以冰晶形式分离出来的一种在常压和冰点温度下操作的低温浓缩过程,特别适用于浓缩热敏性液体食品和其他避免芳香成分损失的产品^[1]。与膜浓缩分离操作相比,冷冻浓缩几乎避免了微生物对料液的影响,而且能量消耗仅为蒸发浓缩的 1/3~1/6,是一种低能耗的浓缩方法^[2]。根据料液中冰核形成和去除方式的不同,冷冻浓缩可分为悬浮式和渐进式两大技术体系^[3]。渐进式浓缩装置结构相对简单,操作方便,冰晶在结晶罐中形成片状或环状,与浓缩液较易分离,同时可减少因冰晶夹带引起的溶液损失,该技术已成为国内外低温浓缩研究的重要发展方向,并演化出多种渐进式浓缩设备,如管式、局部块冰式、整体块冰式等,并在果汁^[4-5]、咖啡^[6-7]、牛奶^[8]、生物制药^[9]、海水淡化^[10]等领域有广泛的应用。

苹果醋是众多果醋中产量最大的品种^[11],但受苹果原汁总糖含量及工业醋酸菌耐受酒精度的双重影响,醋酸含量一般为 5% 左右,水分占了绝大部分,因此在运输、贮存过程中不仅要投入大量包装容器和仓库容积,运输成本较高。若实现苹果醋浓缩后贮运,则可大大降低成本,为企业带来显著经济效益。苹果醋是典型的热敏性物料,若采用蒸发浓缩则会损失大量芳香成分,根据前期试验发现,反渗透等膜浓缩技术并不适用于浓缩苹果醋中分子量较小的醋酸。目前,国内外有关苹果醋冷冻浓缩的研究报道十分匮乏,试验拟采用自行设计的 50 L 渐进式局部块冰冷冻浓缩设备将初始可溶性固形物为 5.0 °Brix 苹果醋原液浓缩 5 倍至 25.0 °Brix,通过调节冷媒温度、搅拌速度,同时综合考虑耗电量等因素选取最优浓缩条件,对比一次性浓缩与两级浓缩效果及原醋、一级浓缩液、二级浓缩液及各级夹带芳香物质变化,旨在为该浓缩设备的改进和浓缩饮料工业化生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

苹果醋:可溶性固形物为 5.0 °Brix,广东某饮料公司;

氯化钠:AR 级,台山市粤侨化工厂;

叔丁醇:色谱纯,99.5%,天津市康科德科技有限公司。

1.2 仪器设备

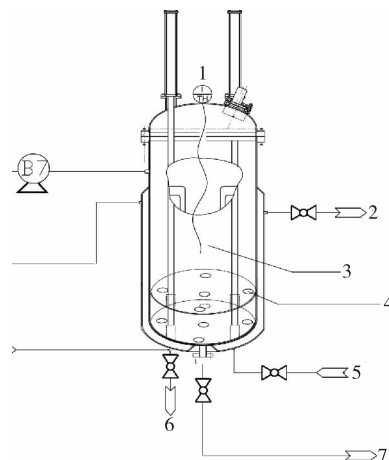
渐进式局部块冰冷冻浓缩装置(见图 1):韶关学院广

东高校粤北特色食品工程技术开发中心自行设计;

高精度折光仪:RX-5000 α 型,日本 ATAGO 公司;

固相微萃取头:50/30 μ m DVB/CAR/PDMS 57328-U 型,美国 SUPELCO 公司;

气相色谱—质谱联用仪:QP-5000 型,日本岛津公司。



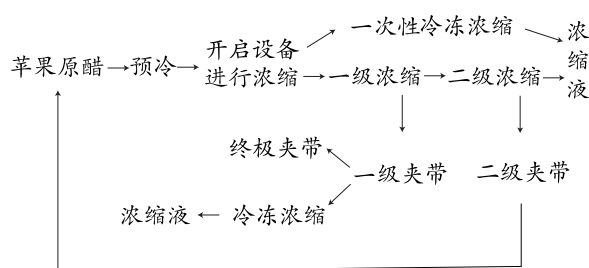
1. 温度检测 2. 融冰水出口 3. 热电偶线 4. 冰块溶解液漏出孔 5. 融冰水进口 6. 冷媒释放口 7. 浓缩液出口

图 1 渐进式局部块冰冷冻浓缩装置

Figure 1 Partial block-freeze concentration apparatus of progressive

1.3 试验方法

1.3.1 苹果醋冷冻浓缩工艺流程



取初始温度 0 °C,可溶性固形物为 5.0 °Brix 的料液 50 kg 泵入浓缩结晶罐中进行分级浓缩,一级浓缩 2.5 倍至 12.5 °Brix 时结束,收集浓缩液 50 kg 进行二级浓缩至目标浓度 25.0 °Brix,结束浓缩,收集浓缩液,转为解冻阶段,每批次浓缩做两次平行,每小时取样测定浓度及芳香成分。待冰环完全解冻,收集夹带液,各级夹带液同样进行浓缩回收处理。

苹果醋夹带回收浓缩:冷媒温度 -8 °C,保持 1 h 后冷媒温度调至 -14 °C,开启搅拌 900 r/min。

1.3.2 苹果醋一级、二级冷冻浓缩操作

(1) 浓缩前期:前期试验表明若一开始就搅拌,结晶罐中易出现无法附着在罐壁形成冰环的大量冰沙,因此

一级浓缩(FC1)料液在正式浓缩前试验在-8,-10,-12,-14,-16℃下,二级浓缩(FC2)在-14,-16,-18℃条件下,不开搅拌进行静置降温,综合时间及冰晶纯度选择最佳静置降温温度及时间。

(2) 浓缩后期:改变冷媒温度和搅拌速度,综合时间、耗电量、浓缩液质量、夹带液浓度与质量等因素,得到一级浓缩最佳冷媒温度和搅拌速度。由于二级浓缩料液浓度较高,故在最大搅拌速度 900 r/min 下选择最佳冷媒温度,记录总耗电量,同时每隔 1 h 测定料液可溶性固形物含量及芳香成分,记录浓缩结束所用时间。

1.3.3 苹果醋可溶性固形物含量测定 采用高精度折光仪测定。

1.3.4 芳香物质测定

(1) 固相微萃取将各级浓缩样品分别用蒸馏水稀释复原至原醋浓度,夹带液原浓度不作处理各精密移取 5 mL,在 15 mL 顶空瓶中加入 0.1 mL 叔丁醇作为内标物质,1 g NaCl,在 50℃条件下平衡 10 min,固相微萃取头插入顶空瓶中萃取 40 min。

(2) 色谱条件:根据文献[12]修改如下,选择 Rxi-5SilMS(30 m×0.25 mm,0.25 μm)石英毛细管柱,进样口温度 250℃,传输线 230℃,载气 He,流量控制方式为线速度,流速 1 mL/min,分流进样,分流比 10:1。

(3) 质谱条件:根据文献[12]修改如下,电离方式 EI,离子源温度 250℃,质量扫描范围 35~450 amu,间隔时间 0.3 s,发射电流 100 μA,检测电压 0.91 kV。

1.4 数据处理

苹果醋冷冻浓缩过程数据采用 Origin 7.5 软件绘制成图,芳香物质采用通过随机自带的 NIST14S.lib 质谱库进行检索鉴定,以叔丁醇为内标物质,各芳香物质含量采用峰面积归一化法和内标含量计算结果。

2 结果与分析

2.1 苹果醋一级浓缩

冷冻浓缩初期先设定-10℃静置冻结 3 h,待形成较坚硬致密的冰层后,再开启搅拌。由表 1 及图 2 可知,随着冷冻浓缩的进行,苹果醋浓度在逐渐增加,同时冰晶也在生长,随着浓缩的进行产生的冰晶将溶质分子包裹在

其中,形成所谓的夹带。若要得到高浓度浓缩液,低浓度夹带液,控制料液的降温速率和搅拌速度非常关键^[13-14]。当转速为 600 r/min 时,温度越高,冻结越慢,温度越低,冻结越快,达到目标浓度所用时间也越短。但温度过低,如在-20℃时夹带液质量和浓度都相对较高,在-16℃条件下冻结得到的浓缩液质量则相对要多,夹带液浓度也较低。这是因为温度越低,料液释放潜热需要的面积越大,导致浓缩罐内的冰晶以树枝状方式生长,并在主枝干上产生越来越多的分枝,各级分枝的末端间隙又可以很容易地包裹住溶质分子^[15],并且冰晶周围的溶质分子没有足够的时间扩散到主体溶液中,使溶质被冰晶裹挟在其中,所以冻结温度不宜过高也不宜过低。

在相同冻结温度(-16℃)时,900 r/min 条件下得到的浓缩液质量要大于 600 r/min 的,600 r/min 的要大于 300 r/min 的,夹带液则相反。在 300 r/min 的搅拌速度下,不仅时间和耗电量增加,而且目标浓缩液质量较少,夹带液浓度也较高。这是因为增加搅拌速度,可加快主体料液温度的降低和溶液浓度的增加,但是随着冷冻浓缩的进行,料液逐渐被浓缩,在液膜界面附近的溶液浓度越来越高,使得大量料液中的水分子向晶体的迁移变得困难,影响夹带晶体生长。搅拌速度越高传质效果越好,越有利于晶体形成过程中产生的相变热传递到主体溶液中,并且料液体系不会产生持续过冷现象,有利于减小浓差极化现象,加快主体溶液与冷媒间的传热效率^[16-19]。但随着浓缩的进行夹带冰环的厚度增加,传热效率下降,则浓度增加开始变平缓。

综上可得,50.00 kg 初始可溶性固形物含量为 5.0°Brix 的苹果醋一级冷冻浓缩最佳条件为:冷媒温度-10℃静置保持 3 h 后下调冷媒温度至-16℃,搅拌速度 900 r/min。21 h 后得到 12.5°Brix 的一级浓缩液 14.74 kg,夹带冰环溶解后得到 1.9°Brix 的一级夹带液 34.47 kg,耗电量为 72 kW·h。

2.2 苹果醋二级冷冻浓缩

前期多次试验发现,-16℃静置 4 h 有利于苹果醋二级浓缩后期冰晶附着生长。由图 3 可以看出,二级浓缩后期在一定范围内,冻结温度越低,物料浓度增加越

表 1 一级浓缩结果
Table 1 Results of the primary concentration

冷媒温度/ ℃	搅拌速度/ (r·min ⁻¹)	浓缩时间/ h	浓缩液质量/ kg	浓缩液可溶性固形 物含量/°Brix	夹带质量/ kg	夹带液可溶性固形 物含量/°Brix	耗电量/ (kW·h)
-12	600	27	21.05	10.3	28.55	1.2	74
-16	600	22	14.37	12.5	34.90	2.0	73
-20	600	19	13.76	12.5	35.38	2.2	74
-16	300	27	12.57	12.5	36.37	2.5	84
-16	900	21	14.74	12.5	34.47	1.9	72

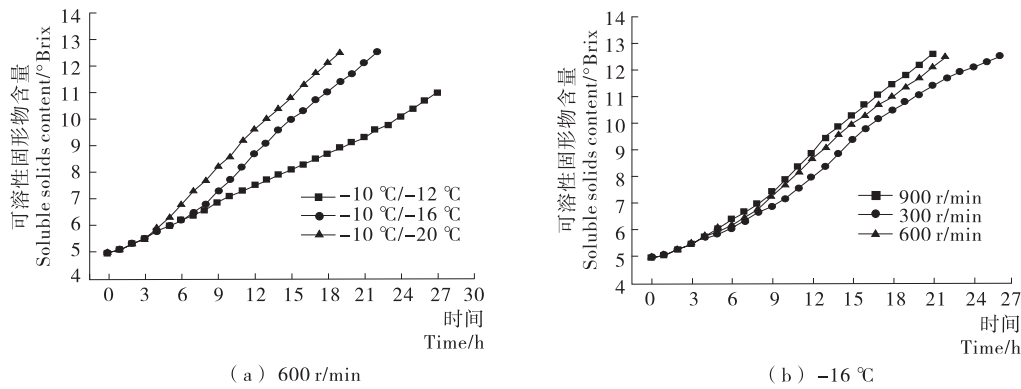


图 2 不同冻结条件下苹果醋浓度的变化

Figure 2 The change of apple cider vinegar concentration under different freezing conditions

大,在不同冷媒温度下,浓度增加趋势基本相同,且随着浓缩的进行,物料浓度的增加均趋于平缓。增加搅拌速度可以消除浓差极化现象,二级浓缩的初始浓度大于一级浓缩,料液黏度增加,水分扩散系数变小,不利于主体溶液中的水分向冰晶表面转移,同时冰晶附近的溶质难以扩散到主体溶液中,溶液中的水和溶质难以分离,所以在设备最大搅拌速度 900 r/min 下,选择不同冷媒温度进行降温浓缩。由图 3 还可以看出,在 12.5 °Brix 的料液浓度下结合冷冻浓缩机组可达冷媒温度下限(−24 °C),说明−24 °C 温度下省时省电,且可相对较多地得到目标浓缩液,夹带液浓度也较低。−20,−22 °C 下的冷媒温度在浓缩后期产生的温差动力可能不足以提供料液足够的冷量,推动浓缩继续进行导致获得的目标浓缩液较少,夹带较大,后期可改进冷冻浓缩机组可达的温度下限,提高浓缩效率。

由表 2 可知,初始可溶性固形物含量为 12.5 °Brix 的苹果醋二级浓缩最佳工艺条件如下:第一阶段冷媒温度

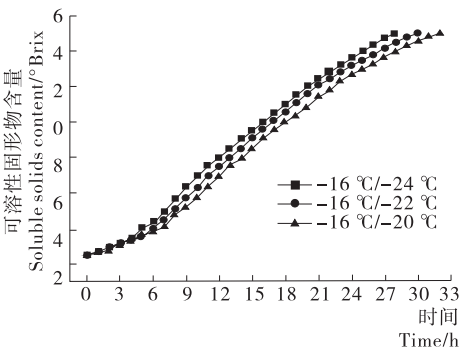


图 3 900 r/min 条件下冷媒温度对苹果醋浓度的影响

Figure 3 Changes of concentration of apple cider vinegar at 900 r/min

−16 °C 保持 4 h,第二阶段冷媒温度由 −16 °C 下调为 −24 °C,搅拌速度为 900 r/min。28 h 后得到 25.0 °Brix 的二级浓缩液 15.11 kg,夹带冰环溶解后得到 6.7 °Brix 的二级夹带液 32.81 kg,耗电量为 135 kW · h。

表 2 二级浓缩结果

Table 2 Results of the secondary concentration

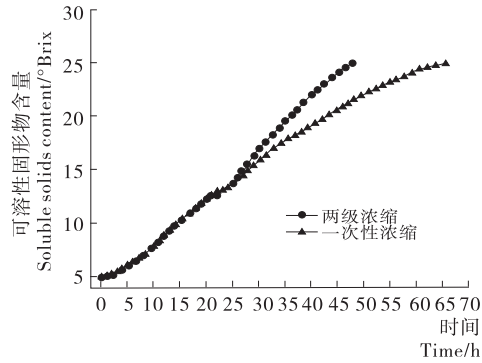
冷媒温度/ °C	搅拌速度/ (r · min ^{−1})	浓缩时间/ h	浓缩液质量/ kg	浓缩液可溶性固形 物含量/°Brix	夹带质量/ kg	夹带液可溶性固形 物含量/°Brix	耗电量/ (kW · h)
−20	900	32	12.90	25	35.02	7.4	139
−22	900	30	13.47	25	34.67	7.5	140
−24	900	28	15.11	25	32.81	6.7	135

2.3 苹果醋一次性冷冻浓缩与两级浓缩对比结果

从图 4 可以看出,在搅拌速度同为 600 r/min 的前 21 h,两种方式的物料浓度变化趋势基本相同,之后一次性浓缩搅拌速度增大为二级浓缩的转速,其降温速率明显趋于平缓,浓度变化也逐渐变小,而两级浓缩中二级浓缩料液降温速率和浓度变化增大,最终得到目标浓度液所需时间也明显低于一次性浓缩,质量也大于一次性浓缩。这是因为一次性浓缩后期生成的冰环逐渐变厚,传

热系数变小,结冰速率降低,充分说明在冷冻浓缩过程中冰环厚度的增加明显降低了冷媒冷量的传递,而分级浓缩则可以有效解决因冰环增厚带来的浓缩效率降低的问题,大大提高了生产效率。

通过试验可知,冷冻浓缩特别是分级进行浓缩对于苹果醋有较好的效果,而在浓缩后期或浓缩高浓度低冰点的料液时,设备则需要能提供更高的冷媒温度,但自主研发的设备仍属前期探索中,在冷媒温度下限,料液各部



两级浓缩曲线中的拐点为二级浓缩降温点

图 4 一次性浓缩与两级浓缩过程中苹果醋浓度的变化

Figure 4 Changes of concentration of apple cider vinegar during one-time concentration and two-stage concentration

位温度探测点配备,温度探头精密度等方面都需要进一步完善。基于前期苹果醋料液各浓度冰点测定已完成,最佳的浓缩过程即为根据料液浓度的变化动态来改变冷媒温度,保持与料液合理的温度差进行浓缩,将是进一步探索的方向。

2.4 苹果醋夹带回收浓缩

一级夹带浓度低,仅回收即可,条件为:第一阶段

−8℃维持1h,然后将冷媒温度调至−14℃,搅拌速度900 r/min,经30 h后可以得到可溶性固形物含量为6.9 °Brix的回收液7.51 kg,可溶性固形物含量为0.1 °Brix的终极夹带液21.66 kg,耗电量99 kW·h。

2.5 苹果醋浓缩液及夹带液芳香成分分析

通过比较和分析不同苹果醋样品中芳香物质变化,可以评价冷冻浓缩对苹果醋质量的影响。将苹果原醋(5.0 °Brix)、苹果醋一级浓缩复原液(5.0 °Brix)、苹果醋二级浓缩复原液(5.0 °Brix)、二级夹带(6.7 °Brix)、一级夹带(1.9 °Brix)、夹带回收液(6.9 °Brix)以及终极夹带(0.1 °Brix)等样品进行芳香物质的GC-MS比较分析。经测定,苹果原醋主要有14种芳香物质,包括6种酯类、2种醇类、2种醛类、2种酸类、2种酚类。其中含量相对较高的特征组分有苯甲醛、辛酸、4-乙苯酸-2-丁基酯、苯乙醇、乙酸苯乙酯等,其他芳香物质成分含量较低^[20]。苹果原醋经过一级浓缩后芳香成分保留率为80.23%,二级浓缩芳香成分保留率为87.73%,总保留率为70.39%,二级夹带及夹带回收液由于其浓度较高仍保留大量芳香物质,可回收与原液混合进行循环浓缩利用。终极夹带因其质量浓度较低仅0.10%,且芳香成分仅占2.61%,可舍弃。因此苹果醋两级浓缩后芳香成分总损失率即终极夹带液中的芳香成分仅为2.61%。

表 3 苹果醋冷冻浓缩前后及其夹带芳香物质含量变化

Table 3 The aroma composition changes in vinegar and ice samples before and after concentration								μg/L
化合物名称	原醋	一级浓缩复原液	二级浓缩复原液	二级夹带	一级夹带	夹带回收液	终极夹带	损失/%
叔丁醇(内标)	81	81	81	81	81	81	81	—
乙酸-3-甲基酯	172	157	136	114	59	103	3	1.74
乙酸-2-甲基酯	48	38	33	35	17	126	0	0.00
4-乙苯酸-2-丁基酯	25	19	21	21	15	18	3	12.00
苯甲醛	1 701	1 257	1 197	1 147	228	1 098	0	0.00
己酸	123	104	99	44	40	38	0	0.00
2-乙基-1-己醇	103	89	32	33	31	31	67	65.05
苯乙醇	383	346	302	389	30	309	0	0.00
辛酸	1 494	1 237	1 086	1 036	481	955	0	0.00
乙酸苯乙酯	888	721	579	610	280	610	21	2.36
丁香酚	22	14	12	16	12	19	0	0.00
2,4-二叔丁基苯酚	44	39	31	26	15	23	16	36.36
雪松醇	5	5	5	3	2	2	3	60.00
邻苯二甲酸二异丁酯	18	16	14	12	8	10	2	11.11
邻苯二甲酸二丁酯	63	41	35	34	30	33	18	28.57
合计	5 089	4 083	3 582	3 520	1 266	3 375	133	2.61

3 结论

50.00 kg 初始可溶性固形物含量为 5.0 °Brix 的苹果原醋,一级冷冻浓缩最佳工艺条件为:冷媒温度-10 °C 保持 3 h 后下调冷媒温度至-16 °C,搅拌速度 900 r/min。21 h 后得到 12.5 °Brix 的一级浓缩液 14.74 kg,夹带冰环溶解后得到 1.9 °Brix 的一级夹带液 34.47 kg,耗电量为 72 kW·h。50.00 kg 初始可溶性固形物含量为 12.5 °Brix 的苹果醋二级浓缩最佳工艺条件为:冷媒温度-16 °C 保持 4 h 后下调冷媒温度至-24 °C,搅拌速度为 900 r/min。28 h 后得到 25.0 °Brix 的二级浓缩液 15.11 kg,夹带冰环溶解后得到 6.7 °Brix 的二级夹带液 32.81 kg,耗电量为 135 kW·h。苹果原醋经过一级浓缩后芳香成分保留率为 80.23%,二级浓缩芳香成分保留率为 87.73%,总保留率为 70.39%,终极夹带质量浓度较低仅 0.10%,且芳香成分仅占 2.61%。后续可改进试验所用设备对苹果醋进行三级及以上浓缩。

参考文献

- [1] LIU Ling, MIYAWAKI O, HAYAKAWA K. Progressive freeze concentration of tomato juice[J]. Food Sci. Technol Int Tokyo, 1999, 5(1): 108-112.
- [2] HUIGE N J J, THIJSEN H A C. Production of large crystals by continuous ripening in a stirred tank[J]. Crystal Growth, 1972, 13-14: 483-487.
- [3] SÁNCHEZ J, RUIZ Y, J AULEDA M, et al. Review: Freeze concentration in the fruit juices industry[J]. Food Science and Technology International, 2009, 15(4): 303-315.
- [4] SÁNCHEZ J, RUIZ Y, RAVENTÓS M, et al. Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 644-651.
- [5] AIDER M, DE HALLEUX D. Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1 768-1 775.
- [6] MORENO F L, RAVENTÓS M, HERNÁNDEZ E, et al. Block freeze-concentration of coffee extract: Effect of freezing and thawing stages on solute recovery and bioactive compounds[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 158-166.
- [7] MORENO F L, HERNÁNDEZ E, RAVENTÓS M, et al. A process to concentrate coffee extract by the integration of falling film and block freeze-concentration[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 88-95.
- [8] SÁNCHEZ J, HERNÁNDEZ E, AULEDA J M, et al. Review: Freeze concentration technology applied to dairy products[J]. Food Science and Technology, 2011, 17(1): 5-9.
- [9] AIDER M, HALLEUX D. Cryoconcentration technology in the bio-food industry: Principles and applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(3): 679-685.
- [10] WILLIAMS P M, AHMAD M, CONNOLLY B S, et al. Technology for freeze concentration in the desalination industry[J]. Desalination, 2015, 356: 314-327.
- [11] 中国产业信息网. 2014 年中国果醋行业产量、规模统计分析回顾[DB/OL]. (2015-08-17) [2019-03-29]. <http://www.chyxx.com/industry/201508/336730.html>.
- [12] 门戈阳, 钟瑞敏, 廖彩虎, 等. 中试规模局部块冰式冷冻浓缩苹果醋芳香成分的变化[J]. 现代食品科技, 2016(11): 222-224.
- [13] QIN Frank, CHEN Xiao-dong, SHASHINI R, et al. Heat transfer and power consumption in a scraped-surface heat exchanger while freezing aqueous solutions[J]. Separation and Purification Technology, 2006(48): 150-158.
- [14] MARTEL G J. Influence of dissolved solids on the mechanism of freeze-thaw conditioning [J]. Water Research, 2000, 34(2): 657-662.
- [15] 于涛, 马军. 冷冻浓缩水处理工艺中冰晶纯度影响因素分析[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2005, 21(5): 572-578.
- [16] 江华, 余世袁. 低聚木糖溶液冷冻浓缩时冰晶生长动力学研究[J]. 林产化学与工业, 2007, 27(3): 53-56.
- [17] 李亚. 糖汁冷冻浓缩技术的初步应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008: 17-18.
- [18] 李艳敏, 赖健. 荔枝果汁冷冻浓缩结晶速率的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 32-34.
- [19] 叶丽珠. 荔枝汁冷冻浓缩的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009: 22-27.
- [20] ALBERTI A, SANTOS P T, ZIELINSKI A A, et al. Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 436-443.

(上接第 130 页)

- [7] 刘鑫. 哲学视角下的太极养生文化研究[J]. 中州体育·少林与太极, 2015, 8(8): 13-16.
- [8] 屈云东, 朱力, 毛寒. 视觉信息跨媒介传达的形态演变及其生成逻辑探究[J]. 湘潭大学学报: 哲学社会科学版, 2018, 42(6): 146-150.
- [9] 吕孝龙. 阴阳变易, 生生不息: 论《易经》中朴素辩证法思想的美学价值[J]. 云南师范大学学报: 哲学社会科学版, 1990,

33(3): 58-65.

- [10] 吴余青. 朴拙之美: 包装设计中传统文化元素的创新与应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 110-113.
- [11] 毛寒, 刘静茹. 宫廷剧《延禧攻略》中的传统美学探究[J]. 湖南包装, 2018, 33(6): 61-64.
- [12] 罗兵. 徽州建筑符号在徽酒包装设计中的应用探析[J]. 包装工程, 2017, 39(10): 82-87.