

鲜榨柠檬汁大孔树脂脱苦工艺的优化

Optimization on conditions of debittering of fresh squeezed lemon juice by using macroporous resin

高 佳 朱永清 贺红宇 罗芳耀 黄 驰

GAO Jia ZHU Yong-qing HE Hong-yu LUO Fang-yao HUANG Chi

(四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川 成都 610066)

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Sichuan Academy
of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China)

摘要:以工业生产中鲜榨柠檬原汁为试材,通过单因素试验和 Box-Behnken 响应面分析确定了鲜榨柠檬原汁的 R6 大孔树脂脱苦最优工艺条件。结果表明:大孔树脂添加量、作用时间和吸附温度对鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除具有重要影响。在树脂添加量 4 g/100 g,作用时间 47 min,吸附温度 31 ℃,摇床转速 120 r/min, pH 值为柠檬汁自然 pH 条件下,柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素实际脱除率分别达 84.50% 和 40.62%,与模型预测值接近。脱苦条件优化后,鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的含量均显著降低,口感上无明显苦味。

关键词:柠檬汁;大孔树脂;脱苦;柚皮苷;柠檬苦素

Abstract: The optimal process conditions for R6 macroporous resin on industrial freshly squeezed lemon juice has been investigated, through one-factor-at-a-time tests and response surface analysis based on Box-Behnken design. The results showed that all debitterizing conditions under investigation influenced seriously the naringin and limonin in lemon juice. Under the optimal debitterizing conditions, i.e. 4 g/100 g of resin, adsorption at 31 ℃ for 47 min, rotation at 120 r/min in juice pH 3.0±0.5 solutions, the actual debitterizing rate of naringin and limonin were 84.50% and 40.62% respectively, and this was close to the predicted value. Naringin and limonin contents in lemon juice were significant reduced after the optimized processing and it tasted no obvious bitter.

Keywords: lemon juice; macroporous resin; debitterizing; naringin; limonin

基金项目:四川省财政基因工程专项(编号:2011JYGC12-033);四川省科技计划项目(编号:2011HH0036)

作者简介:高佳,女,四川省农业科学院农产品加工研究所副研究员,博士。

通讯作者:朱永清(1968—),男,四川省农业科学院农产品加工研究所副研究员,博士。E-mail: zhuyongqing68@sina.com。

收稿日期:2015—11—14

饮料制造是世界柑橘加工产业的主要发展方向之一,但柑橘加工后由类黄酮(以柚皮苷为主)和类柠檬苦素(以柠檬苦素为主)等苦味物质引起的“后苦味”现象已成为制约该产业发展的技术难题,其中以柠檬和柚类柑橘品种更为突出^[1-3]。目前,解决柑橘类果汁苦味难题的方法主要包括物理法和生物法两大类,各种方法优缺点不同,但在工业生产中仍以物理法中的吸附脱苦法应用最成熟和广泛^[2-5]。

国外关于柑橘类果汁树脂吸附脱苦的研究起步早,技术较为成熟,而中国起步较晚^[2-3,5]。近年来众多中国学者针对橙汁^[6-7]和柚汁^[8-12]等柑橘品种筛选了系列优良国产树脂材料,但关于鲜榨柠檬汁的研究未见相关报道。因此,本研究在前期工作基础上,以优选出的 R6 树脂为脱苦材料^[13],采用摇床模拟拟震式接触技术脱苦^[9],通过单因素试验和 Box-Behnken 响应面分析考察树脂添加量、作用时间、吸附温度等主要因素对工业生产中鲜榨柠檬原汁脱苦效果的影响,旨在优化得出适宜于生产推广的柠檬原汁树脂吸附脱苦最优工艺条件,进一步指导生产应用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

柠檬鲜榨原汁:品种名为尤力克,四川省安岳县绿海源科技开发有限公司;

大孔树脂 R6:非极性苯乙烯型,陕西蓝深特种树脂有限公司;

柚皮苷:纯度>98%,上海晶纯实业有限公司;

柠檬苦素:纯度>98%,上海晶纯实业有限公司;

无水乙醇、氯仿、氢氧化钠、二甘醇、柠檬酸、2,4-二硝基苯肼、浓硫酸、三氯化铁、对二甲氨基苯甲醛、石油醚:分析纯,成都市科龙化工试剂厂。

1.2 主要仪器设备

恒温振荡水浴锅:SHA-B 型,常州国华电器有限公司;

冷冻离心机:5810R 型,德国 Eppendorf 公司;
紫外可见分光光度计:TU-1810 型,北京普析通用仪器有限公司;
振荡培养箱:BSD-150 型,上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

1.3 试验方法

1.3.1 树脂预处理 参照文献[13]。
1.3.2 单因素试验设计 根据前期试验结果,选取对鲜榨柠檬原汁脱苦效果较好的 R6 树脂进一步开展静态脱苦单因素试验。柠檬汁原有 pH 值为 3.0 ± 0.5 ,为便于所开发的工艺在其工业生产中能直接应用,避免因柠檬汁原有 pH 值改变而引起絮凝等化学反应^[9],本试验中不再调节 pH 值。前人^[9]研究结果表明转速快慢对苦味物质吸附的影响不大,因此本试验确定采用 120 r/min 的转速开展脱苦试验。

(1) 树脂添加量:设定不同的树脂添加量 0,1,2,3,4,5,6,7,8 g/100 g,作用时间 60 min,作用温度 20 ℃,以柚皮苷和柠檬苦素脱除率为评价指标,确定适宜的鲜榨柠檬原汁树脂脱苦添加量。

(2) 作用时间:设定不同的树脂作用时间 0,5,10,15,20,25,30,45,60,90,120 min,树脂添加量为 4 g/100 g,作用温度 20 ℃,以柚皮苷和柠檬苦素脱除率为评价指标,确定适宜的鲜榨柠檬原汁树脂脱苦作用时间。

(3) 作用温度:设定不同的作用温度 10,20,30,40,50 ℃,树脂添加量为 4 g/100 g,作用时间为 60 min,以柚皮苷和柠檬苦素脱除率为评价指标,确定适宜的鲜榨柠檬原汁树脂脱苦作用温度。

1.3.3 响应面分析 在单因素试验基础上,以树脂添加量、作用时间、作用温度为影响因素,以柚皮苷和柠檬苦素脱除率为响应值,采用 Box-Behnken 响应面分析法进行试验,筛选鲜榨柠檬原汁脱苦的最优工艺条件,并进行验证实验。

1.3.4 相关指标的测定方法

(1) 柚皮苷含量的测定:采用 Davis 法^[14],测得柚皮苷标准曲线方程为 $y=1.566\ 32x+0.003\ 03$, $R^2=0.999$ 。

(2) 柠檬苦素含量的测定:采用对二甲氨基苯甲醛比色法^[15],测得柠檬苦素标准曲线方程为 $y=0.001\ 8x-0.008\ 9$, $R^2=0.992$ 。

(3) 柚皮苷和柠檬苦素脱除率计算公式为:

$$D = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

D——脱除率,%;

C₀——柠檬汁中柚皮苷、柠檬苦素含量,mg/mL;

C₁——树脂脱苦后柠檬汁中柚皮苷、柠檬苦素含量,mg/mL。

1.3.5 数据分析试验结果 采用 SPSS 软件进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。单因素试验每处理设 3 个平行,结果取平均值。响应面分析试验结果采用 Design-expert 7.0 统计软件进行回归分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 树脂添加量对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响 R6 大孔树脂对鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除率随树脂添加量的增加而提高,且当树脂添加量大于 1 g/100 g 时对柚皮苷的脱除率明显高于对柠檬苦素的脱除率(图 1)。统计分析表明,当树脂添加量大于 7 g/100 g (柚皮苷脱除率达 95.01%)时,增加树脂添加量柚皮苷脱除率无显著性增长;当树脂添加量大于 5 g/100 g(柠檬苦素脱除率达 48.77%)时,增加树脂添加量柠檬苦素脱除率无显著性增长($P<0.05$)。由此表明,当大孔树脂 R6 添加量为 1~5 g/100 g 时对鲜榨柠檬汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除呈快速增长期;当树脂添加量大于 5 g/100 g 时,对柚皮苷和柠檬苦素的脱除率增长趋于平缓,此结果与唐辉等^[9,12]的研究一致。感官评定表明,当树脂添加量达到 2%时,品尝脱苦后的柠檬原汁苦味较淡;当树脂添加量大于 3%时,口感上已无明显苦味;但随着树脂添加量的增加,柠檬汁色泽、香味和酸味逐渐变淡。综合考虑脱苦率和感官评定结果,结合经济性和对营养成分的保留等因素,选择树脂添加量为 2~4 g/100 g 作后续研究。

2.1.2 树脂作用时间对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响 大孔树脂 R6 对鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除率随树脂作用时间的延长而升高,且对柚皮苷的脱除率显著高于对柠檬苦素的脱除率(图 2)。当作用时间为

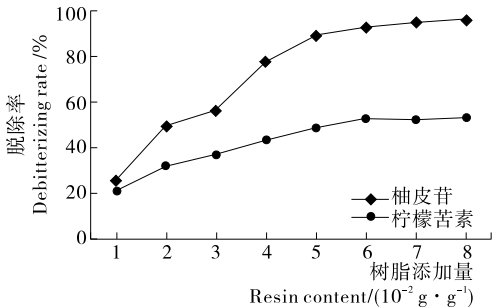


图 1 R6 树脂添加量对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响
Figure 1 Effect of including different amount of R6 resin on the debitterizing rate

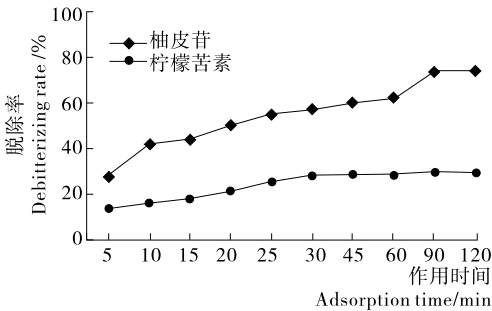


图 2 R6 树脂作用时间对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响
Figure 2 Effect of adsorption time of R6 resin on the debitterizing rate

0~30 min 时,柚皮苷和柠檬苦素的脱除率急剧增加;30~120 min时,柚皮苷(57.21%~74.07%)和柠檬苦素(28.38%~29.58%)的脱除率增加趋势转为平缓。树脂作用时间过短,不能保证树脂与果汁间充分接触,达到最佳的脱苦效果。但延长树脂作用时间,将在一定程度上损失果汁中的营养物质,一些酸性营养成分与树脂长时间接触,也会导致果汁 pH 值发生改变,引发果汁产生沉淀^[2,12]。同时,延长作用时间在生产上也会延长操作周期,增加生产成本。因此,综合考虑确定以 30~60 min 作为树脂作用时间进行后续研究。

2.1.3 吸附温度对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响 大孔树脂 R6 对鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除率随树脂吸附温度的升高而升高,且对柚皮苷(49.8%~63.87%)的脱除率显著高于对柠檬苦素(19.37%~30.14%)的脱除率(图 3),表明苦味物质在树脂上吸附是吸热过程,升温有利于吸附^[12]。但吸附温度对鲜榨柠檬汁中柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响变化趋势较小^[9,12]。为降低生产成本,减少高温对品质的破坏,选择 20~40 ℃ 的吸附温度作进一步研究。

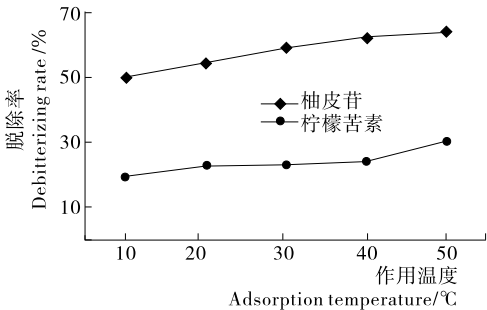


图 3 R6 树脂吸附温度对鲜榨柠檬原汁柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响

Figure 3 Effect of adsorption temperature of R6 resin on the debitterizing rate

2.2 响应面优化分析

2.2.1 响应面试验设计及结果 综合考虑单因素试验结果,以树脂添加量、作用时间和吸附温度为自变量,以柚皮苷和柠檬苦素的综合脱苦率为响应值进行 Box-Behnken 响应面试验设计,试验设计方案及试验结果见表 1。

2.2.2 模型建立与方差分析 对表 2 中试验结果进行回归分析,并建立响应面回归模型,得到柚皮苷和柠檬苦素脱除率的回归方程分别为:

$$Y_1 = -113.58 + 36.306\,56X_1 + 1.258\,988X_2 + 5.270\,085X_3 - 0.136\,32X_1X_2 - 0.144\,37X_1X_3 + 0.013\,043X_2X_3 - 2.419\,84X_1^2 - 0.009\,53X_2^2 - 0.088\,87X_3^2, \tag{2}$$

$$Y_2 = 34.169\,54 - 14.119X_1 + 0.413\,43X_2 + 0.4794\,49X_3 + 0.005\,175X_1X_2 + 0.134\,127X_1X_3 - 0.001\,54X_2X_3 + 2.370\,207X_1^2 - 0.005\,15X_2^2 - 0.014\,05X_3^2. \tag{3}$$

对式(2)、(3)进行回归模型变量分析及系数显著性检验。由表 3 可知,柚皮苷脱除率回归方程的回归效果极显著($P<0.001$),模型决定系数 $R^2=0.989\,3$,调整后为 0.986 8,失拟项不显著($P=0.310\,7>0.05$);柠檬苦素脱除率回归方

表 1 响应面因素水平编码表

Table 1 Coding of factors and levels in response surface analysis

水平	X ₁ 树脂添加量/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	X ₂ 作用时 间/min	X ₃ 吸附温 度/℃
-1	2	30	20
0	3	45	30
1	4	60	40

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken design and experimental results

编号	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁ 柚皮苷脱 除率/%	Y ₂ 柠檬苦素 脱除率/%
1	0	1	-1	65.79	30.75
2	0	0	0	72.92	33.34
3	-1	-1	0	51.54	33.54
4	-1	1	0	68.52	30.13
5	1	1	0	85.73	37.27
6	0	0	0	74.97	36.18
7	-1	0	1	53.69	27.42
8	0	0	0	75.96	34.05
9	1	0	1	74.80	40.55
10	0	0	0	76.75	33.69
11	0	0	0	75.63	33.34
12	0	-1	1	58.72	32.82
13	1	-1	0	76.93	40.38
14	0	-1	-1	59.59	31.37
15	0	1	1	72.75	31.28
16	1	0	-1	77.07	40.07
17	-1	0	-1	50.19	32.30

表 3 柚皮苷脱除率回归模型方差分析[†]

Table 3 Variance analysis for naringin removal rate with various debitterizing conditions

来源	Y ₁		Y ₂	
	F 值	P 值	F 值	P 值
模型	71.943 040	<0.000 1***	8.365 418	0.005 3**
X ₁	382.173 000	<0.000 1***	55.732 070	0.000 1***
X ₂	98.582 020	<0.000 1***	3.459 804	0.105 2
X ₃	2.503 627	0.157 6	0.268 817	0.620 1
X ₁ X ₂	6.232 381	0.041 2*	0.008 837	0.927 7
X ₁ X ₃	3.106 887	0.121 3	2.638 451	0.148 3
X ₂ X ₃	5.705 341	0.048 3*	0.078 130	0.787 9
X ₁ ²	9.188 034	0.019 1*	8.672 985	0.021 6*
X ₂ ²	7.218 679	0.031 2*	2.069 404	0.193 4
X ₃ ²	123.927 400	<0.000 1***	3.046 519	0.124 4
失拟项	1.661 905	0.310 7	3.183 464	0.146 3

[†] ***. 差异极显著, $P<0.001$; **. 差异高度显著, $P<0.01$; *. 差异显著, $P<0.05$ 。

程的回归效果高度显著($P<0.01$),相关系数 $R^2=0.914\ 9$,调整后为 $0.895\ 3$,失拟项不显著($P=0.146\ 3>0.05$),说明模型拟合程度好,有实际应用意义。

通过对模型回归系数的显著性检验结果可知,树脂添加量对柚皮苷和柠檬苦素脱除率均有极显著影响($P<0.001$);作用时间只对柚皮苷脱除率有极显著影响($P<0.001$),对柠檬苦素脱除率影响不显著($P>0.05$);作用温度对柚皮苷和柠檬苦素脱除率的影响均不显著($P>0.05$)。结合 F 值可知,3 个因素对柚皮苷脱除率影响的大小顺序表现为树脂添加量>作用时间>吸附温度;对柠檬苦素脱除率影响的大小顺序为树脂添加量>作用时间>吸附温度。

2.2.3 响应面交互作用分析 由表 3 可知,树脂添加量和作用时间,作用时间和吸附温度的交互作用对柚皮苷脱除率有显著影响($P<0.01$),而树脂添加量和吸附温度间的交互作用对柚皮苷脱除率影响不显著($P>0.05$);3 个因素相互间的交互作用对柠檬苦素的影响均不显著($P>0.05$)。

本试验对于其他情况的交互作用暂不讨论,只分析对柚皮苷和柠檬苦素脱除率有显著影响的交互作用。

由图 4 可知,当作用温度一定时,随着树脂添加量和作用时间的增加,柚皮苷脱除率逐渐升高。大孔吸附树脂对苦味物质的吸附发生在颗粒活性位点所构成的表面上,依靠范德华力,吸附能力的大小与树脂的比表面积和孔径有关^[3]。因此,增加树脂添加量同时延长作用时间,增大了树脂的比表面积和接触时间,有利于苦味物质的吸附。由图 5 可知,当树脂添加量一定时,柚皮苷脱除率随温度的升高呈先上升

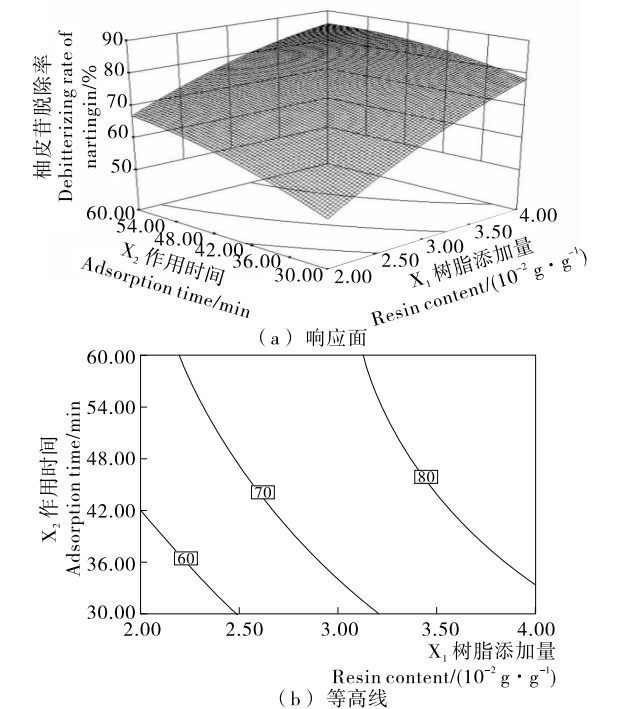


图 4 树脂添加量和作用时间交互影响柚皮苷脱除率的响应面图和等高线图

Figure 4 Response surface plot and contour plot showing the interactive effects of resin content and adsorption time on naringin removal rate

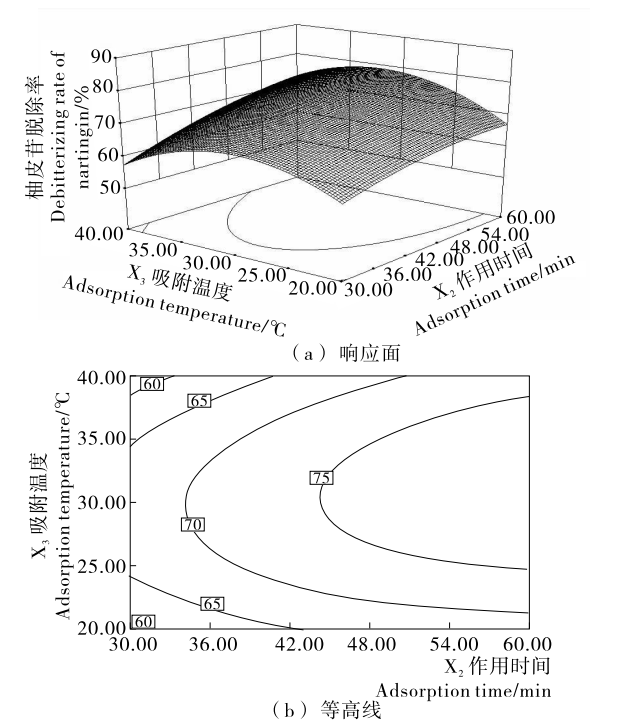


图 5 作用时间和吸附温度交互影响柚皮苷脱除率的响应面图和等高线图

Figure 5 Response surface plot and contour plot showing the interactive effects of adsorption time and adsorption temperature on naringin removal rate

后下降的趋势;当吸附温度达到 $30\ ^{\circ}\text{C}$ 左右时,柚皮苷脱除率随着作用时间的延长脱除效果最明显。

2.2.4 脱苦工艺条件验证 为使柚皮苷和柠檬苦素脱除率达到最大值,采用 Design-expert 7.0 统计软件对工艺参数进行优化分析,得出 R6 大孔树脂对鲜榨柠檬汁理论最优脱苦工艺条件为树脂添加量 $4\ \text{g}/100\ \text{g}$,作用时间 $46.81\ \text{min}$,吸附温度 $30.91\ ^{\circ}\text{C}$,此条件下脱苦预测值为柚皮苷脱除率 84.46% ,柠檬苦素脱除率 40.79% 。根据理论推荐的脱苦工艺和实际操作的方便性进行验证实验,重复 3 次,结果取平均值。考虑到试验实际操作的可性,将各参数调整为树脂添加量 $4\ \text{g}/100\ \text{g}$,作用时间 $47\ \text{min}$,吸附温度 $31\ ^{\circ}\text{C}$ 的条件下,R6 大孔树脂对鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素的脱除率分别达到 84.50% 和 40.62% ,该结果与理论预测值相近,试验误差较小,表明该方程与实际结果拟合程度较好。

3 结论

(1) 本研究通过单因素试验和响应面分析确定了 R6 大孔树脂对鲜榨柠檬原汁最优脱苦工艺条件为:树脂添加量 $4\ \text{g}/100\ \text{g}$,作用时间 $47\ \text{min}$,吸附温度 $31\ ^{\circ}\text{C}$,摇床转速 $120\ \text{r}/\text{min}$,柠檬汁 pH 为自然 pH,此条件下柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素脱除率分别达 84.50% 和 40.62% 。经过优选出的脱苦工艺加工处理后,鲜榨柠檬原汁中柚皮苷和柠檬苦素含量均显著降低,口感上无明显苦味。

(2) 树脂添加量、作用时间和吸附温度对柚皮苷和柠檬

苦素的脱除率影响程度不同,对柚皮苷脱除率的影响程度大于对柠檬苦素的影响。从试验结果也可以得出 R6 树脂对于柚皮苷的脱除效果更好,对柠檬苦素的脱除率相对较低。目前中国产树脂对柑橘类果汁的脱苦应用研究报道多集中在对柚皮苷的脱除效果上,不同树脂材料种类在不同柑橘品种上的脱除效果差异较大^[8-9,11-12];从已报道^[7,10]的树脂对柑橘类果汁柠檬苦素的脱苦效果来看,多数树脂对柠檬苦素的脱除率普遍低于其对柚皮苷的脱除率。而柠檬苦素类苦味物质在果汁中的苦味阈值很低,比柚皮苷苦味更明显^[16]。因此,开发和筛选对柠檬苦素类苦味物质具有更强吸附作用的树脂材料,或采用多种脱苦方法组合应用,对解决柑橘类果汁脱苦问题十分重要。

参考文献

[1] RIBEIRO M H, SILVEIRA D, FERREIRA-DIAS S. Selective adsorption of limonin and naringin from orange juice to natural and synthetic adsorbents[J]. *European Food Research and Technology*, 2002, 215(6): 462-471.

[2] 孙兰萍. 柑桔类果汁苦味物质的脱除研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(1): 97-100.

[3] 刘青茹, 高彦祥. 柑桔汁脱苦降酸方法研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(13): 127-133.

[4] KOLA O, KAYA C, DURAN H, et al. Removal of limonin bitterness by treatment of ion exchange and adsorbent resins[J].

Food Science and Biotechnology, 2010, 19(2): 411-416.

[5] 许少丹, 谢婧. 柑橘类果汁脱苦技术研究进展[J]. *饮料工业*, 2012, 15(6): 15-19.

[6] 程绍南, 方修贵, 叶春勇, 等. 国产 HB801 吸附树脂对柑桔汁脱苦效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 1992(3): 22-27.

[7] 高彦祥, 陈静, 李绍振, 等. 大孔吸附树脂对橙汁的脱苦效率[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(3): 71-74.

[8] 张怡, 曾红亮, 冯翀, 等. 柚汁树脂脱苦工艺的研究[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(3): 562-566.

[9] 唐辉, 肖仔君, 钟瑞敏, 等. 大孔树脂对长坝柚汁脱苦工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2012(23): 276-280.

[10] 黄高凌, 钟晓婷, 倪辉, 等. 吸附脱苦对琯溪蜜柚汁中类胡萝卜素含量的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(1): 172-177.

[11] 张颖. 梁平柚柚汁吸附脱苦工艺研究[J]. *贵阳学院学报: 自然科学版*, 2014, 9(2): 74-76.

[12] 唐辉, 钟瑞敏, 肖仔君. D101 树脂对澄清柚汁脱苦的工艺条件优化[J]. *食品与机械*, 2015, 31(3): 219-223.

[13] 贺红宇, 高佳, 朱永清, 等. 商业树脂对鲜榨柠檬汁的脱苦效果[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(3): 248-252.

[14] 李和生, 王鸿飞, 周石磊, 等. 柑橘类果汁中柚皮苷的分析[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4): 76-79, 90.

[15] 田庆国, 丁霄霖. 测定橘核中柠檬苦素类似物的分光光度法[J]. *分析测试学报*, 1999, 18(5): 45-46.

[16] 王松林, 彭荣, 崔榕, 等. 类柠檬苦素生物转化与脱苦研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(9): 279-283.

(上接第 135 页)

[3] 魏银花, 申迎宾, 王立, 等. 紫米多酚提取工艺及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2013, 29(3): 111-115.

[4] FARAH S, BETA T. Saskatoon and wild blueberries have higher anthocyanin contents than other manitoba berries [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(26): 10 832-10 838.

[5] VAN D, PIVONKA E. Overview of the health benefits of fruit and vegetable consumption for the dietetics professional [J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2000(10): 1 511-1 521.

[6] WU Xian-li, ALEXANDER G S. Mitigation of Inflammation with Foods[J]. *Agric. Food Chem.*, 2012, 60: 6 703-6 717.

[7] WU Xian-li, KANG Jie, XIE Cheng-hui, et al. Dietary blueberries attenuate atherosclerosis in apolipoprotein e-deficient mice by upregulating antioxidant enzyme expression[J]. *Journal of Nutrition*, 2010(7): 1 628-1 632.

[8] 吴林. 中国蓝莓 35 年[J]. *吉林农业大学学报*, 2016, 38(1): 1-11.

[9] 史海芝, 刘惠民. 国内外蓝莓研究现状[J]. *江苏林业科技*, 2009(4): 48-51.

[10] KALT W, BLUMBERG J B, MCDONALD J E, et al. Identification of anthocyanins in the liver, eye, and brain of blueberry-

fed pigs[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(3): 705-712.

[11] PRIOR R L, WU Xian-li, GU Li-wei, et al. Purified berry anthocyanins but not whole berries normalize lipid parameters in mice fed an obesogenic high fat diet[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2009, 53(11): 1 406-1 418.

[12] 郭嵩光, 王振镒. 邻苯三酚自氧化—化学发光法测定 SOD 活性[J]. *植物生理学通讯*, 1989(3): 54-57.

[13] 王钦博, 杨焱, 刘艳芳, 等. 一年生和两年生桑黄子实体的成分和生物活性[J]. *食用菌学报*, 2010, 17(2): 71-75.

[14] 吴斯琴毕力格, 包勒朝鲁, 那生桑. 沙棘药理作用研究进展[J]. *中国药业*, 2015, 24(1): 95-96.

[15] 邹宇晓, 刘学铭, 廖森泰, 等. 荔枝壳花青素对大鼠佐剂性关节炎的治疗作用研究[J]. *营养学报*, 2010(3): 257-260.

[16] ZIKRI N, RIEDL M, WANG Li-shu, et al. Black raspberry components inhibit proliferation, induce apoptosis and modulate gene expression in rat esophageal epithelial cells[J]. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 2009, 61(6): 816-826.

[17] BOIVIN D, BLANCHETTE M, BARRETTE S, et al. Inhibition of cancer cell proliferation and suppression of TNF-induced activation of NF kappa B by edible berry juice[J]. *Anticancer Research*, 2007, 27(2): 937-948.