

金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺优化

Optimization on freezing concentration of aqueous extracts from *Anoetochilus roxburghii* rhizome

王文成^{1,2} 陈梅英³ 陈锦权⁴

WANG Wen-cheng^{1,2} CHEN Mei-ying³ CHEN Jin-quan⁴

(1. 漳州职业技术学院食品与生物工程, 福建 漳州 363000; 2. 农产品深加工及安全福建省高校应用工程技术中心, 福建 福州 350002; 3. 福建农林大学经济管理学院, 福建 福州 350002; 4. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002)

(1. Zhangzhou Institute of Technology, Food and Biological Engineering, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 2. Deep Processing of Agricultural Products and The Safety of Application Engineering Technology Center, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. College of Economics and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 4. Department of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

摘要:以组培采摘后剩余的金线莲残留的根茎为研究对象, 对其水提后的提取液进行冷冻浓缩。以冰晶夹带率、冷冻浓缩速率作为评价指标, 通过响应面分析来确定金线莲根茎提取液冷冻浓缩的最佳工艺。结果表明: 在冷媒—浓缩物温度差 5 °C, 刮刀速率 45 r/min, 浓缩时间 13.5 h 的条件下, 冰晶夹带率为 0.891 0%, 浓缩平均速率为 0.953 6 mg/(mL·h), 综合分值为 0.796 1, 综合评价指标最高。

关键词:金线莲; 冷冻浓缩; 悬浮式; 冰晶夹带率; 浓缩速率

Abstract: The freezing concentration of aqueous extracts from the residual rhizome of *Anoetochilus roxburghii* has been investigated. The loss rate caused by entrainment of ice crystals and the rate of the freezing concentration were selected as the evaluation indexes to design the optimization of processing by the response surface methodology. The experimental results showed that the most ideal process were as the followed; the temperature difference between refrigerant and concentration 5 °C, scraper speed 45 r/min, and freeze concentration time, 13.5 h. Under the conditions, the loss rate caused by entrainment of ice crystals was 0.891 0% and the rate of the freeze concentration was 0.953 6 mg/(mL·h), and the comprehensive score was 0.796 1, which was the best comprehensive evaluation

score in all.

Keywords: *Anoetochilus roxburghii*; freeze concentration; suspension; loss rate; concentration rate

金线莲是中国传统的珍贵药材, 功效奇特, 在南方地区民间多有食用^[1]。目前组培金线莲时多摘取金线莲的茎部进行培植, 剩余的叶片常被烘干出售, 而根茎部分往往由于加工后成色不好, 被丢弃, 造成极大浪费。冷冻浓缩是一个物理过程, 它涉及到将溶液中溶剂水冻结成冰并除去的过程。该处理可以有效地应用到食品加工领域^[2]。比较其他浓缩方式, 蒸发浓缩不可避免地会产生风味的损失和热敏性物质的破坏; 膜分离技术亦存在设备贵和运行费高, 以及运行中膜容易堵塞的问题。而冷冻浓缩由于在低温操作, 能够最大程度保护溶液在浓缩过程中的有效成分, 因此近年来该技术用于生物提取物浓缩的研究屡见不鲜^[3]。值得指出的是尽管冷冻浓缩优点不少, 但冰晶包埋造成的夹带损失是冷冻浓缩过程中不可避免的问题, 冰晶生成过快容易造成夹带率上升, 过慢则又使冷冻浓缩过程显得效率太低而不利于推广应用^[4-5], 陈梅英等^[6]采用相场模拟方法从微观的角度论证存在最佳冷冻时间范围, 结果证明可以通过控制过冷时间和过冷度来降低冰晶夹带率; 方婷等^[7]采用冰晶生长动力学模型方法拟合出最佳的冰晶生长时间, 该模型可为建立冰晶增长的质量、热量传递之间的平衡提供一定的理论依据和试验参考。但这些研究主要的侧重点在于通过对冰晶生长的控制来达到降低冰晶夹带率的目的。而在实际的企业生产过程中, 是可以牺牲一部分的冰晶夹带损失利益来换取提高生产速率的需要。因此本研究拟从冷冻浓缩效率角度

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31101327); 高等学校博士学科点专项科研基金博导类资助课题(编号:20123515110016); 福建省中青年教育科研项目 A 类课题(编号:JA13385); 漳州职业技术学院科研计划资助项目(编号:ZZY1305)

作者简介:王文成, 男, 漳州职业技术学院讲师, 硕士。

通讯作者:陈锦权(1954—), 男, 福建农林大学教授, 博士, 博士生导师。E-mail: chenjq6613@163.com

收稿日期:2015-12-11

出发,选取冰晶夹带率、浓缩速率作为参数指标,引入模糊数学中指标隶属度原理,选择最优的冷冻浓缩时间,旨在为今后企业生产应用提供有益的参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

金线莲:台湾品种金线莲组培摘剪后剩余根茎,漳州南靖闽星生态项目区。

1.1.2 试剂

葡萄糖、苯酚、硫酸:分析纯,南京化学试剂股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

冷冻浓缩机组(见图1):本课题组自制,采用悬浮式浓缩工艺设计^[6],配有结晶罐和生长罐,冰晶生长后经中心排冰法排出;

紫外可见分光光度计:UV-1800PC-DS2型,上海美谱达仪器有限公司;

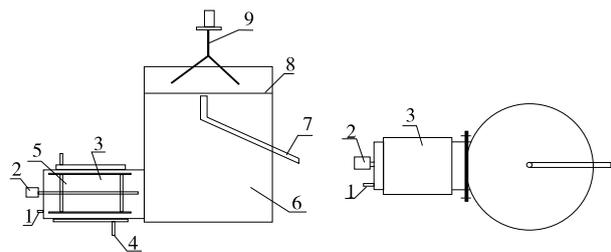
恒温水浴锅:HH-6型,常州国华电器有限公司;

分析天平:BSA224S型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

真空干燥箱:DZF-6021型,上海精宏实验设备有限公司;

自动纯水蒸馏器:SZ-II型,上海嘉鹏科技有限公司;

榨汁机:JYL-D055型,九阳股份有限公司。



1. 物料进口 2. 驱动装置 3. 结晶罐 4. 冷媒进出口 5. 刮刀
6. 冰晶生长罐 7. 冰晶体排出 8. 液面 9. 液面搅拌器

图1 试验冷冻浓缩系统示意图

Figure 1 Schematic drawing of experimental freeze concentration system

1.3 方法

1.3.1 试液制备及多糖测定 取工厂金线莲组培后剩余残留根茎10 kg,清洗后阴凉处沥水12 h后打散均匀,以每份500 g为一组,分20组,粉碎研磨后加水定容至10 L,经75℃,65 min,并以此为冷冻浓缩原液进行浓缩。抽取不同冷冻浓缩时间段的金线莲提取液测定其多糖量,测定重复3次,测量结果取平均值。多糖测定方法采用苯酚—硫酸法^[8]。

1.3.2 综合指标 运用隶属度综合评分法以冰晶夹带率、浓缩速率含量值为指标对金线莲根茎水浸提工艺法进行综合评分,其中:

(1) 冰晶夹带率:冰晶夹带率反映的是冰晶中含有的被

浓缩物的含量,其值越小说明浓缩过程中原料的损失越少。冰晶夹带率按式(1)计算:

$$I = \frac{C_{ice}}{C_0} \quad (1)$$

式中:

I ——冰晶夹带率,%;

C_{ice} ——冰晶中测得的多糖含量,mg/mL;

C_0 ——初始测得的多糖含量,mg/mL。

(2) 浓缩平均速率:浓缩平均速率反映浓缩快慢的指标,其值越大表示浓缩一定量的金线莲提取液时间越短。浓缩平均速率按式(2)计算:

$$C_t = \frac{C_0 - C_t}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:

C_t ——浓缩速率,mg/(mL·h);

C_0 ——初始测得的多糖含量,mg/mL;

C_t ——测定时多糖含量,mg/mL;

Δt ——浓缩时间,其值等于冰晶生成时间和浓缩时间之和,h。

为了让结果更为客观准确,本试验提取液在冷冻浓缩之前均统一冷却至5℃,同时参考以往发表的相关文献^[9],单级浓缩多浓缩至1.5~2.5倍较为理想,故本次浓缩时间也多在此范围内选择。

评分值按式(3)计算:

$$l = \frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (3)$$

式中:

l ——评分值;

c_i ——指标值;

c_{\min} ——指标最小值;

c_{\max} ——指标最大值。

因为冰晶夹带率 I 越小越好,所以按式(4)计算

$$l = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (4)$$

最后按式(5)进行加权得浓缩工艺的综合分。

$$S = al_1 + bl_2 \quad (5)$$

式中:

S ——综合分;

l_1 ——指标1的隶属度;

l_2 ——指标2的隶属度;

a ——指标1的权值;

b ——指标2的权值。

本试验考虑以冰晶夹带率为主要指标,浓缩速率为次要指标,于是取 $a=0.6, b=0.4$ 。考虑到检测的差异性,以上指标的检测重复3次,测量结果取平均值^[10]。

1.3.3 单因素试验设计

(1) 冷媒—浓缩物温度差对冰晶夹带率和浓缩速率的影响:将试验条件固定为刮刀速度10 r/min、浓缩时间10 h,分别调整冷媒—浓缩物温度差为1,3,5,7,9℃,测定其冰晶夹带率和浓缩速率。

(2) 刮刀速率对冰晶夹带率和浓缩速率的影响:将试验

条件固定为浓缩时间 10 h、冷媒—浓缩物温度差为 5 ℃,分别调整刮刀速率为 10, 20, 30, 40, 50 r/min, 测定其冰晶夹带率和浓缩速率。

(3) 浓缩时间对冰晶夹带率和浓缩速率的影响: 将试验条件固定为冷媒—浓缩物温度差为 5 ℃、刮刀速率 40 r/min, 分别测定在浓缩时间为 10, 12, 14, 16, 18 h 时, 其冰晶夹带率和浓缩速率。

1.3.4 数据处理方法 采用 Design-Expert.V8.0.5 软件对试验数据进行回归分析, 多项式模型方程拟合的性质由决定系数 R^2 表达, 统计学的显著性用 F 值检验。

2 结果与分析

2.1 单因素结果分析

2.1.1 冷媒—浓缩物温度差对冰晶夹带率和浓缩速率的影响 由图 2 可知, 冰晶夹带率和浓缩速率两指标均与冷媒—浓缩物温度差呈正相关关系, 当温度差为 1 ℃ 时, 由于温度差太小所以尽管冰晶夹带低, 但是由于冷传导过低导致冰晶结冰量太小, 因而浓缩速率极低。随着温度差的逐步增加, 浓缩速率显著增快, 冰晶夹带率也随之快速上升。从这 5 组数据上看, 当温度差为 5 ℃ 时, 综合分值最高, 因此选取冷媒—浓缩物温度差为 5 ℃ 进入下一轮筛选。

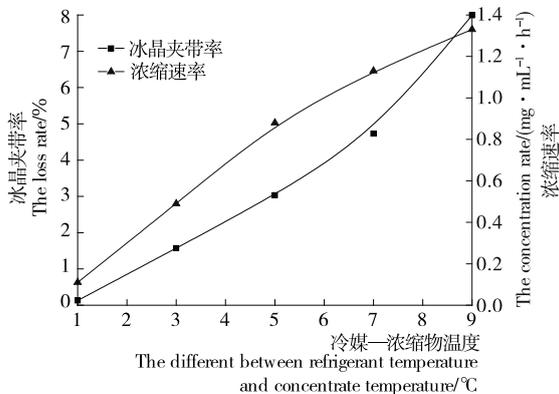


图 2 冷媒—浓缩物温度差对冰晶夹带率和浓缩速率的影响
Figure 2 Influences of the difference between refrigerant temperature and concentrate temperature on the loss rate and concentration rate

2.1.2 刮刀速率对冰晶夹带率和浓缩速率的影响 由图 3 可知, 刮刀速率在 10~40 r/min 增速的过程中, 可以很明显地看到冰晶夹带率的降低, 这是由于在冷冻浓缩过程中, 如果结冰过快将导致浓缩物来不及排出而被包埋入冰晶中^[11], 因此此时刮刀速率对冰晶夹带率起主要作用。当超过 40 r/min 以后, 刮刀速率越快其刮下的冰晶颗粒就越细越多, 表面积也越大, 大量的溶质包夹在冰晶与冰晶之间, 这增加了分离的难度, 造成了冰晶夹带率的逐渐平稳趋势^[12]。从浓缩速率上, 刮刀速率在 40 r/min 之前, 在相同制冷量的情况下, 一方面制冷量的传递取决于传导介质, 冰在内表壁形成后越及时刮除, 越有助于冷量的更快传导; 另一方面随着刮刀转速的增加, 其消耗功率必然增加, 动能转化为热能, 从而影响到制冷的效果。这两种因素分别从正反两方面共

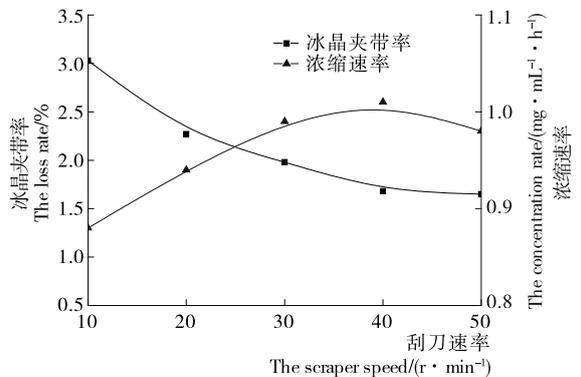


图 3 刮刀速率对冰晶夹带率和浓缩速率的影响
Figure 3 Influences of the scraper speed on the loss rate and concentration rate

同影响浓缩速率。因此可以看到在达到 40 r/min 以后, 后者对浓缩速率的影响上升为主要作用, 浓缩速率小幅下降。从这 5 组数据上看, 当刮刀速率为 40 r/min 时, 综合分值最高, 因此选刮刀速率为 40 r/min 进入下一轮筛选。

2.1.3 浓缩时间对冰晶夹带率和浓缩速率的影响 在悬浮式冷冻浓缩的过程中, 存在着两个现象, 一个是小冰晶变大冰晶的奥斯特瓦尔德效应, 由于表面积减少, 有利于降低分离时冰晶的夹带含量, 另外一个现象是随着冷冻浓缩过程的推进, 浓缩物的浓度将越来越浓, 冰晶夹带也就相应增加^[13]。在浓缩初期由于冰晶数量不多, 生长罐中有足够的空间满足冰晶融化生长, 小冰晶变大冰晶对冰晶夹带的影响要大于浓度增加对冰晶夹带的, 因此从图 4 可以看出随着浓缩时间的增加冰晶夹带率呈现先降低的趋势。随着浓缩时间的推移浓缩物浓度增加, 其影响也超过小冰晶变大冰晶的影响, 所以冰晶的夹带就逐渐上升。从浓缩速率上看, 10~12 h 的过程中, 随着浓缩时间的延长, 浓缩速率变化不是很明显, 但过了 12 h 以后浓缩速率有逐渐降低的趋势, 且这降幅有加大的趋势, 这是因为浓缩的推进, 生长罐中冰晶越来越多, 冰晶与冰晶间缝隙减少, 溶液流动性减少, 不利于整体浓缩过程的推进。从这 5 组数据上看, 当浓缩时间为 14 h 时, 综合分值最高, 因此选浓缩时间为 14 h 进入下一轮筛选。

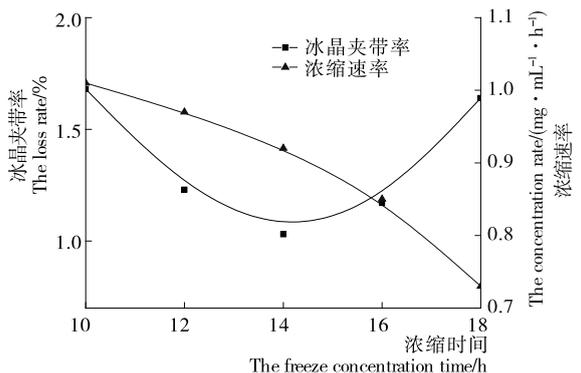


图 4 浓缩时间对冰晶夹带率和浓缩速率的影响
Figure 4 Influences of the freeze concentration time on the loss rate and concentration rate

2.2 响应面法优化试验结果

在单因素试验的基础上,选取冷媒—浓缩物温度差为5℃、刮刀速率40 r/min和浓缩时间14 h作中心点,对金线莲根茎水提工艺进行响应面法优化。以综合评分为响应值,进行三因素三水平响应面分析试验,优化金线莲根茎冷冻浓缩工艺条件。试验因素和水平见表1。

响应曲面试验方案及结果见表2。

表1 响应面分析因子及水平表

Table 1 Factors and levels applied of response surface method (RSM) analysis

编码水平	X ₁ 冷媒—浓缩物 温度差/℃	X ₂ 刮刀速率/ (r·min ⁻¹)	X ₃ 浓缩时间/h
-1	3	30	12
0	5	40	14
1	7	50	16

表2 试验设计及其结果

Table 2 Experimental design and results

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	冰晶夹带 率/%	浓缩平均速率/ (mg·mL ⁻¹ ·h ⁻¹)	冰晶夹带 率隶属度	浓缩平均速 率隶属度	综合分 S
1	-1	1	0	0.428 0	0.538 0	1.000 0	0.087 9	0.635 2
2	0	-1	-1	2.278 0	0.841 0	0.298 2	0.535 7	0.412 8
3	0	0	0	0.942 0	0.842 0	0.805 0	0.537 2	0.722 4
4	0	0	0	1.011 0	0.891 0	0.778 8	0.609 6	0.740 9
5	1	0	-1	2.473 3	1.155 2	0.224 1	1.000 0	0.590 1
6	1	-1	0	3.064 0	1.068 0	0.000 0	0.871 2	0.348 5
7	0	1	-1	0.773 3	0.889 3	0.869 0	0.607 1	0.743 1
8	-1	-1	0	1.430 0	0.478 5	0.619 9	0.000 0	0.433 5
9	0	1	1	0.753 3	0.677 9	0.876 6	0.294 6	0.606 6
10	0	0	0	1.027 0	0.921 0	0.772 8	0.653 9	0.756 2
11	0	0	0	0.917 0	0.951 0	0.814 5	0.698 3	0.790 6
12	1	1	0	1.464 0	0.802 0	0.607 0	0.478 1	0.574 0
13	0	0	0	0.899 0	0.971 0	0.821 3	0.727 8	0.805 2
14	1	0	1	2.453 3	0.877 3	0.231 7	0.589 3	0.414 9
15	-1	0	-1	0.780 0	0.575 2	0.866 5	0.142 9	0.574 1
16	-1	0	1	0.890 0	0.532 0	0.824 7	0.079 1	0.547 0
17	0	-1	1	2.553 3	0.641 6	0.193 7	0.241 1	0.345 6

2.3 最优条件的确定及模型验证

2.3.1 响应曲面分析 利用 Design-Expert.V8.0.6 软件对试验数据进行回归分析,得回归方程:

$$S=0.76-0.033X_1+0.13X_2-0.051X_3+0.00595X_1X_2-0.037X_1X_3-0.017X_2X_3-0.13X_1^2-0.13X_2^2-0.10X_3^2 \quad (6)$$

方程中各项系数绝对值的大小直接反映了各因素对响应值的影响程度,系数的正负反映了影响的方向^{[14]156-160}。从方程式(6)中可以看出 X₂在综合分评价的影响上最大,且更多地体现在单因素影响上,其与 X₁、X₃交互作用均很小(方差分析 P>0.05),在剔除不显著 X₁X₂和 X₂X₃后得到新的回归方程:

$$S=0.76-0.033X_1+0.13X_2-0.051X_3-0.037X_1X_3-0.13X_1^2-0.13X_2^2-0.10X_3^2 \quad (7)$$

由表3可知,该模型项 P值<0.000 1,说明模型高度显著;3个自变量(冷媒—浓缩物温度差、刮刀速率、浓缩时间)与响应值(S)之间均关系显著(P<0.05),失拟度 0.82>0.1,表明模型可信度高,试验数据与模型不相符合的情况不显著,而且调整确定系数与预测确定系数之差(Adj-R²-Pre-R²)<0.2,说明模型的试验值与预测值相关性较高,模型准

确^{[14]146-160}。回归方程的 R²=0.975 3与校正 R²_{adj}=0.956 2相近,表明金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺综合评分试验值和预测值有较好的拟合度,可用于试验结果的预测^[15]。从数据上看 X₂、X₃、X₁²、X₂²、X₃²对金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺综合评分曲面效应影响极其显著,X₁X₃、X₁影响显著,影响金线莲根茎水提工艺的3个影响因素的主次顺序为:X₂>X₃>X₁,即刮刀速率>浓缩时间>冷媒—浓缩物温度差。

2.3.2 金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺参数优化 以综合评分作为响应值,利用 Design-Expert.V8.0.6 软件对试验数据进行最优化分析,得到当冷媒—浓缩物温度差为4.81℃,刮刀速率44.72 r/min,浓缩时间13.53 h时,综合分最高,为0.800 555。刮刀速率固定(X₂=44.72),当冷媒—浓缩物温度差为4.8~5.0℃,浓缩时间为13.6~13.8 h时,综合分最高,增加和减少温度差,延长或缩短浓缩时间,金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺综合评分值均减少,见图5(a)。此外,金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺综合评分较高值落在两坐标编码值的中间偏下区域。响应面等高线在该范围内相对较为密集,坡度较为陡峭,表明响应值(金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺综合评分)对冷媒—浓缩物温度差和浓缩时间交

互作用的改变较为敏感,见图 5(b)。

考虑到实际操作的方便,取冷媒—浓缩物温度差为 5℃,刮刀速率 45 r/min,浓缩时间 13.5 h 时,进行 3 次验证性实验,取 3 次均值得冰晶带来率为 0.891 0 mg/mL,浓缩平均速率为 0.953 6 mg/(mL·h),得综合分值为 0.796 1,试验值与预测值接近,验证了该模型的可靠性。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Variance analyses for the regression model

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型项	0.380 000	7	0.054 000	50.86	<0.000 1	* *
X ₁	0.008 600	1	0.008 600	8.11	0.019 2	*
X ₂	0.130 000	1	0.130 000	122.23	<0.000 1	* *
X ₃	0.021 000	1	0.021 000	19.42	0.001 7	* *
X ₁ X ₃	0.005 483	1	0.005 483	5.17	0.049 1	*
X ₁ ²	0.072 000	1	0.072 000	67.47	<0.000 1	* *
X ₂ ²	0.077 000	1	0.077 000	72.21	<0.000 1	* *
X ₃ ²	0.043 000	1	0.043 000	40.61	0.000 1	* *
残差	0.009 547	9	0.001 061			
失拟度	0.004 822	5	0.000 964	0.82	0.594 4	
纯误差	0.004 726	4	0.001 181			
总变异	0.390 000	16				

† * . 表示显著; * * . 表示非常显著; R² = 0.975 3, R_{adj}² = 0.956 2, R_{pred}² = 0.929 4。

3 结论

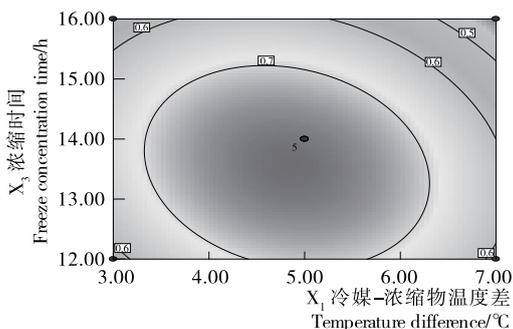
(1) 在单因素试验的基础上,通过响应面中心组合设计试验得出:在设定考察的 3 个因素及考量的区域中刮刀速率对金线莲根茎提取液冷冻浓缩工艺的综合提取效果影响最大,浓缩时间次之,冷媒—浓缩物温度差最小。该结论客观上支持了工业上可以通过加大温度差及刮刀速率的组合来换取浓缩速率的提升,使悬浮式冷冻浓缩工业化应用成为可能的观点。

(2) 建立了金线莲根茎水提工艺的综合分与浓缩时间、冷媒—浓缩物温度差、刮刀速率的二次多项式回归模型,得到最佳工艺参数。并经实验验证,实验值与理论值是吻合的,证明了该模型的合理可靠性。

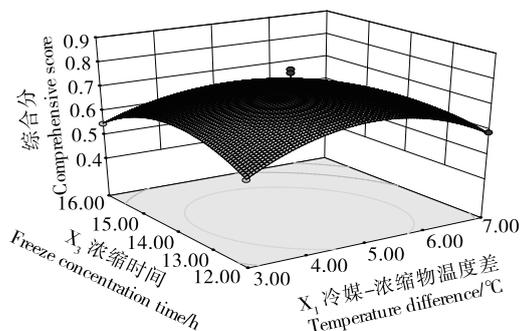
(3) 不足之处:指标隶属度作为一种研究方法,具有一定的直观性,但各指标权值的判断难以界定,不同的权值亦将部分影响到最终的结果。今后如需推广至企业化生产,则需按照实际情况从原料损耗和生产效率成本的角度去设计权值,以提高该法的效率和准确性。

参考文献

- [1] 陈梅英,冯力,欧忠辉,等.基于相场法的液态食品冷冻浓缩冰晶生长数值模拟[J].农业工程学报,2014,30(3):231-237.
- [2] 何屹,邢黎明,王兴海,等.栀子提取液冷冻浓缩工艺研究[J].吉林中医药,2013,33(9):937-938.
- [3] 陈梅英,王文成,陈锦权.相场法模拟冷冻浓缩过程冰晶生长的可行性探讨[J].江西农业学报,2010,22(3):137-139.
- [4] 李照禄,饶建平,方婷,等.悬浮式冷冻浓缩中试装置及改进研究[J].食品与机械,2014,30(1):127-129.
- [5] 陈梅英,陈永雪,王文成,等.冷冻浓缩过程冰晶生长的相场法模拟[J].福建农林大学学报:自然科学版,2010,39(5):548-551.
- [6] 方婷,陈锦权,唐凌,等.橙汁冷冻浓缩动力学模型的研究[J].农业工程学报,2008,24(12):243-248.
- [7] 林丽清,黄丽英,钟添华,等.金线莲多糖的分离纯化与含量测定[J].中国医院药学杂志,2007,27(8):1 037-1 039.
- [8] 王文成,陈锦权,陈梅英,等.西红柿汁的多级冷冻浓缩研究[J].河南科技大学学报:自然科学版,2011,32(1):58-61.
- [9] 张黎黎,张文,吕珍珍,等.响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J].农业工程学报,2011,27(3):369-374.
- [10] 于真真,方婷,陈锦权,等.西瓜汁冷冻浓缩工艺条件的优化[J].食品与机械,2011,27(1):121-123.
- [11] 陈锦权,李彦杰,孙沈鲁,等.高压脉冲电场结合冷冻浓缩生产浓缩绿茶汤工艺优化[J].农业工程学报,2014,30(2):260-268.
- [12] 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):121-123.
- [13] 徐向宏,何明珠.试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M].北京:科学工业出版社,2010.
- [14] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008:134-136.



(a) 等高线



(b) 响应面

图 5 冷媒温度差和浓缩时间对冷冻浓缩工艺综合评分 S 的影响

Figure 5 Influences of the different between refrigerant temperature and concentrate temperature and freeze concentration time on comprehensive score (S) of freeze concentration