

雪莲果超声波辅助渗透脱水工艺参数的优化

石启龙, 赵 亚, 郑亚琴

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 以渗透脱水温度、时间、蔗糖质量分数、超声波功率和处理时间为因素, 以失水率(water loss, WL)和固形物增加率(sugar gain, SG)为指标, 通过单因素试验, 研究雪莲果的渗透脱水工艺参数。以渗透脱水温度、时间、蔗糖质量分数、超声波处理时间为因素, 以WL、SG和二者比值(WL/SG)为指标, 通过二次回归正交旋转组合试验设计建立雪莲果超声波辅助渗透脱水过程中各响应值(WL、SG和WL/SG)与各因素之间的回归方程, 并得到超声波辅助渗透脱水的最优工艺参数。结果表明, 超声波辅助处理可显著提高雪莲果渗透脱水效果; 影响WL的因素主次顺序是温度>时间>蔗糖质量分数>超声波处理时间; 影响SG的因素主次顺序依次是渗透脱水时间>超声波处理时间>温度>蔗糖质量分数; 影响SG/WL的因素主次顺序是渗透脱水时间>蔗糖质量分数>超声波处理时间>温度。雪莲果超声波辅助渗透脱水的最佳工艺参数为渗透脱水温度41℃、时间1.7h、蔗糖质量分数60.18%、超声波处理时间35min。在此组合参数条件下, SG/WL平均值为0.059。

关键词: 雪莲果; 渗透脱水; 超声波; 响应面

Process Parameter Optimization for Ultrasonic-assisted Osmotic Dehydration of Yacon

SHI Qi-long, ZHAO Ya, ZHENG Ya-qin

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The current study aimed to use response surface methodology to optimize process parameters for the osmotic dehydration of yacon under the assistance of ultrasonic. A series of one-factor-at-a-time experiments were conducted to investigate the effects of osmotic dehydration time and temperature, ultrasonic power, sucrose concentration and ultrasonic treatment time on water loss (WL) and solid gain (SG). Further, quadratic regression orthogonal rotation combination design was used to model WL, SG and WL/SG ratio with respect to osmotic dehydration time and temperature, sucrose concentration and ultrasonic treatment time, and the three models developed were analyzed by response surface methodology. Ultrasonic assistance was found capable of enhancing the osmotic dehydration of yacon. In terms of the importance in affecting WL, the four investigated process parameters ranked in the following order: osmotic dehydration temperature, osmotic dehydration time, sucrose concentration, and ultrasonic treatment time, and the order for affecting SG was osmotic dehydration time, ultrasonic treatment time, osmotic dehydration temperature, and sucrose concentration, and for affecting WL/SG ratio osmotic dehydration time, sucrose concentration, ultrasonic treatment time, and osmotic dehydration temperature. The optimal ultrasonic-assisted osmotic dehydration parameters were osmotic dehydration temperature of 41 °C, osmotic dehydration time of 1.7 h, sucrose concentration of 60.18 %, and ultrasonic treatment time of 35 min. Under the optimal process conditions, An average SG/WL ratio of 0.059 was achieved.

Key words: yacon; osmotic dehydration; ultrasound wave; response surface methodology

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)14-0124-06

雪莲果(*Smallanthus sonchifolius*)为菊科向日葵属双子叶草本多年生植物, 原产于安第斯山脉。自2004年以来先后在云南、海南、山东、河南、新疆等省区引种成功, 其种植规模及产量逐年增加。雪莲果含有

20多种人体必需的氨基酸和大量可溶性纤维, 属低热食品; 且富含钾、钙、锌、铁、镁等微量元素, 具有清肝解毒、降血压、养颜美容和提高人体免疫力等功效。而且雪莲果富含果寡糖, 是人体内双歧杆菌繁

收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 山东省高校科技计划项目(J09LC75)

作者简介: 石启龙(1974—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬和水产品加工及贮藏。E-mail: qilongshi@sdu.edu.cn

殖所需要的最佳营养成分^[1-2]。但是雪莲果采收后,果寡糖很快发生部分水解,影响了雪莲果保健作用的发挥;而且雪莲果极易出现褐变和腐烂等现象,在一定程度上限制了它的推广。因此对雪莲果进行深加工是其保鲜的重要途径之一。

渗透脱水可以在较短的时间内除去果蔬中的水分而不损坏其组织结构,经过渗透脱水的产品仍具有原果蔬应有的风味、色泽、质构、营养及感官品质。此外渗透脱水也可以作为果蔬加工的一种前处理方式,与干燥、冷冻、杀菌、罐藏等方法组合使用,因此得到了国内外食品界的广泛关注^[3-4]。

由于渗透脱水仅靠细胞膜两端的渗透压差来促进传质,所以静止的渗透脱水是个比较缓慢的过程,为了加速渗透脱水过程中固-液传递,高静水压、高压脉冲、超声波、真空、离心等高新技术被应用在果蔬渗透脱水中,对提高物质迁移速率取得了显著进展^[5-6]。超声波作为一种物理能量形式,可使介质粒子振动,这种振动在亚微观范围内引起超声空化现象,从而使固液体体系中的液体介质的质点运动增加,固体(生物体)内部结构变化,使微孔扩散得以强化。国内外学者已经将超声波用于强化苹果、胡萝卜、樱桃番茄、龙眼等果蔬渗透脱水过程^[7-11],而对雪莲果渗透脱水尤其是超声波辅助渗透脱水进行研究尚未见报道。本实验以雪莲果为原料研究其渗透脱水工艺,以期对雪莲果的加工保藏提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 材料

雪莲果、白砂糖、食盐等均为市购。

1.2 仪器与设备

AUY220 型分析天平 日本岛津公司; JJ200 精密电子天平 常熟测试仪器厂; 101-2 型电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司; WYT-4 手持式折光仪 成都泰华光学有限公司; SK3300LH 型超声波清洗机 上海科导超声仪器有限公司; HH-6 数显恒温水浴锅 龙口市先科仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 雪莲果渗透脱水的单因素试验

1.3.1.1 温度对雪莲果渗透脱水的影响

雪莲果清洗、去皮、切片(大约 3mm)后,取(20 ± 1)g 放于温度分别为 20、30、40、50、60℃ 的渗透液中,在蔗糖和 NaCl 质量分数分别为 50% 和 5%、料水比 1:10(g/mL)条件下渗透脱水 3h。然后取出,除去表面水分,测定渗透脱水前后雪莲果的固形物含量和含水率。试验平行 3 次,结果取平均值。

1.3.1.2 渗透时间对雪莲果渗透脱水的影响

雪莲果清洗、去皮、切片(大约 3mm)后,取(20 ± 1)g 放于渗透液中,在温度 40℃、蔗糖和 NaCl 质量分数分别为 50% 和 5%、料水比 1:10 条件下分别渗透脱水 1、2、3、4、5 h。然后取出,除去表面水分,测定渗透脱水前后雪莲果的固形物含量和含水率。试验平行 3 次,结果取平均值。

1.3.1.3 蔗糖质量分数对雪莲果渗透脱水的影响

雪莲果清洗、去皮、切片(大约 3mm)后,取(20 ± 1)g 分别放于蔗糖质量分数为 30%、40%、50%、60%、70% 的渗透液中,在温度 40℃、NaCl 质量分数 5%、料水比 1:10 条件下,渗透脱水 3h。然后取出,除去表面水分,测定渗透脱水前后雪莲果的固形物含量和含水率。试验平行 3 次,结果取平均值。

1.3.2 超声波处理对雪莲果渗透脱水的影响

通过预试验,对预处理后的雪莲果分别进行常压渗透脱水(温度 40℃,蔗糖、NaCl 质量分数分别为 60%、5%,时间 2h)、真空辅助渗透脱水(真空度 0.06MPa 处理 30min,再进行常压渗透脱水)和超声波辅助渗透脱水(超声波频率 40kHz,功率 110W 处理 30min,再进行常压渗透脱水)处理。结果表明,超声波辅助渗透脱水的效果好于常压渗透脱水及真空辅助渗透脱水。为进一步考察超声波功率、处理时间对雪莲果渗透脱水的影响,进行如下试验:雪莲果清洗、去皮、切片(大约 3mm)后,取(20 ± 1)g 在超声波频率 40kHz、超声波功率分别为 110、160W 下处理 5、15、25、35、45、55、65min,处理后的样品放于渗透液中(温度 40℃,蔗糖和食盐质量分数分别为 60% 和 5%,料水比 1:10)处理 2h。然后取出,除去表面水分,测定渗透脱水前后雪莲果的固形物含量和含水率。试验平行 3 次,结果取平均值。

1.3.3 超声波辅助渗透脱水最优工艺参数研究

采用二次回归正交旋转组合试验设计^[12]探讨各参数对雪莲果渗透脱水效果的影响,确定超声波辅助渗透脱水的最优工艺参数。变量包括渗透脱水温度、渗透脱水时间、蔗糖质量分数、超声波处理时间为因素,响应值包括失水率(water loss, WL)、固形物增加率(sugar gain, SG)和二者比值(WL/SG)。试验因素及水平编码值如表 1 所示。

表 1 超声波辅助渗透脱水工艺二次回归正交旋转组合试验因素水平编码

Table 1 Factors and levels in response surface analysis

变量	符号	编码值				
		-2	-1	0	1	2
渗透脱水温度/℃	X_1	30	35	40	45	50
渗透脱水时间/h	X_2	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
蔗糖质量分数/%	X_3	50	55	60	65	70
超声波处理时间/min	X_4	15	20	25	30	35

1.4 指标及其测定方法

1.4.1 失水率(WL)^[13]

$$WL = \frac{m_0 \times w_0 - m_1 \times w_1}{m_0}$$

式中： m_0 为雪莲果初始质量/g； w_0 为雪莲果初始含水率/%； m_1 为渗透脱水处理后雪莲果的质量/g； w_1 为渗透脱水处理后雪莲果的含水率/%。

1.4.2 固形物增加率(SG)^[13]

$$SG = \frac{m_1 \times s_1 - m_0 \times s_0}{m_0}$$

式中： m_0 为雪莲果初始质量/g； s_0 为雪莲果初始固形物含量/%； m_1 为渗透脱水处理后雪莲果的质量/g； s_1 为渗透脱水处理后雪莲果的固形物含量/%。

1.5 统计分析

采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析^[14]。

2 结果与分析

2.1 雪莲果渗透脱水的单因素试验

2.1.1 温度对雪莲果渗透脱水的影响

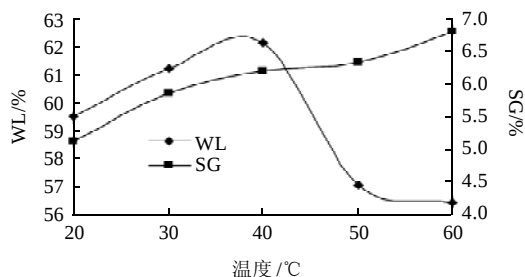


图1 温度对雪莲果渗透脱水的影响

Fig.1 Effect of osmotic dehydration temperature on WL and SG

由图1可以看出, WL随着温度升高先增加,至40℃左右时达到最高,之后随着温度升高迅速下降。SG随着温度升高而增加。温度的确定应在保证产品感官品质的前提下,获得较高的WL。考虑到温度过高(>45℃)时,物料可能会产生酶促褐变,风味物质也会有所损失,造成果蔬的感官品质下降^[15]。因此,在后续优化试验设计中选温度40℃为零水平。

2.1.2 渗透时间对雪莲果渗透脱水的影响

由图2可以看出,在2h内,随着渗透时间的延长,WL几乎呈线性增加,之后随着渗透时间的延长,WL变化不大。渗透脱水初期,体系两相的可溶性固形物含量相差较大,所产生的压力差较大,故WL较大,

随着渗透时间的延长,体系两相的渗透压差变小,WL逐渐减慢,最后几乎不变。SG随着渗透脱水时间的延长而增加,4h时达到最大值,之后随着时间延长,SG逐渐降低。因此,在后续优化试验设计中选时间2h为零水平。

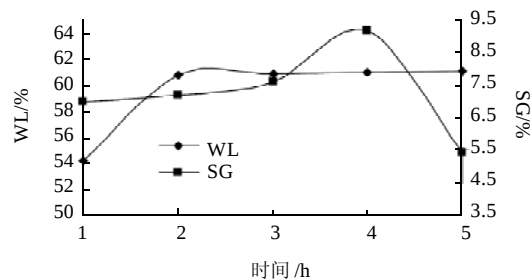


图2 时间对雪莲果渗透脱水的影响

Fig.2 Effect of osmotic dehydration time on WL and SG

2.1.3 蔗糖质量分数对雪莲果渗透脱水的影响

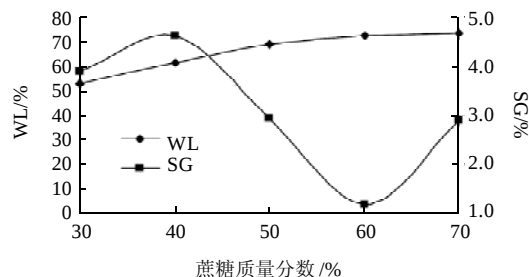


图3 蔗糖质量分数对雪莲果渗透脱水的影响

Fig.3 Effect of sucrose concentration on WL and SG

由图3可以看出, WL随蔗糖质量分数的提高而增大,由Fick扩散方程可知,扩散速率取决于浓度梯度,浓度差越大,扩散速度越快,物料的脱水速度就随之加快。随着蔗糖质量分数的增加,SG先增加后减少,至蔗糖质量分数为60%时达到最小,而后随着蔗糖质量分数增加呈增加趋势。随着蔗糖浓度增加,果蔬内外渗透压差增大,因此SG增加,而后随着糖液浓度增加,渗透体系黏度增大,导致扩散系数不断降低,因此SG逐渐降低。当渗透液中蔗糖质量分数超过60%时,由于果蔬细胞内外浓度差过大,造成渗透作用远远大于脱水效应,因此糖液渗透作用占主导地位,导致固形物增加率呈逐渐增大的趋势。因此,在后续优化试验设计中选蔗糖质量分数60%为零水平。

2.2 超声波处理对雪莲果渗透脱水的影响

由图4可以看出,WL与SG在5~25min内均随超声作用时间延长而增加,由于超声作用时间越长,其产生的空化作用时间越长,即强化传质作用时间越长。

之后 WL 基本保持不变,这可能是由于超声波处理 25min 时,果蔬破坏的程度恰有利于水分的渗出。而 SG 随超声波处理时间的延长迅速下降,至 35min 后又开始上升。超声波在液体中产生的瞬态空化泡绝热收缩至崩溃瞬间,泡内可产生高温和高压,导致自由基形成及产生强大冲击波和射流,从而起到了破碎细胞的作用;同时果蔬在超声场内水分的内部扩散增加,超声波振动对毛细管水有泵吸附作用,加快水分向外迁移;可使物料产生自热,降低物料中水分的黏性^[7]。此外,在 15~45min 范围内,超声波功率为 110W 时的 WL 和 SG 均比功率 160W 高。综上所述,超声预处理促进了雪莲果的脱水作用。选择超声波输出功率 110W,超声波处理时间范围 15~35min。

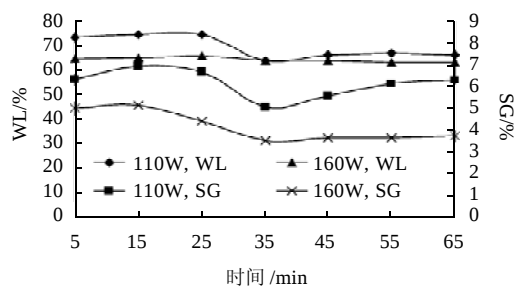


图4 超声波处理对雪莲果渗透脱水的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment time and power on WL and SG

2.3 超声波辅助渗透脱水最优工艺参数研究

2.3.1 回归方程及参数分析

二次回归正交旋转组合试验设计结果见表2,对试验结果进行统计分析,得到各响应值的二次回归方程回归系数(表3)。

通过剔除不显著项,得到各指标的回归方程:

$$Y_1 = 65.5597 + 2.1821X_1 + 1.6587X_2 + 1.3871X_3 + 0.4562X_4 - 0.4182X_1^2 - 0.4470X_2^2 - 0.7956X_1X_3 - 0.6044X_1X_4 + 1.2444X_2X_3 (R^2=0.928);$$

$$Y_2 = 5.1564 + 0.4554X_2 - 0.1746X_4 + 0.6080X_1^2 + 0.3543X_2^2 + 1.0918X_3^2 + 0.5269X_1X_2 (R^2=0.938);$$

$$Y_3 = 0.0789 + 0.0048X_2 - 0.0032X_3 - 0.0032X_4 + 0.0099X_1^2 + 0.0058X_2^2 + 0.0164X_3^2 + 0.0089X_1X_2 (R^2=0.937)$$

以上各方程均通过 F 检验, $F > F_{0.01}$, 回归方程显著,此方程在本试验中有意义,能够反映实际情况。失拟检验均不显著,说明没有不可忽视的因素存在对响应值产生影响,此回归方程足以反映试验中产品指标的变化。通过对 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 回归系数的检验可知,影响 Y_1 主次顺序依次为渗透温度、渗透时间、蔗糖质量分数(均极显著)、超声波处理时间(显著),影响 Y_2 主次顺序依次为渗透时间(极显著)、超声波处理时间(显著)、渗透温度、蔗糖质量分数,影响 Y_3 主次顺序依次为渗透时间(极显著)、蔗糖质量分数、超声波处理时间(显著)、渗透温度。

表2 二次正交旋转组合试验设计方案及结果

Table 2 Quadratic regression orthogonal rotation combination design and corresponding results

试验号	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1 (WL)/%	Y_2 (SG)/%	Y_3 (SG/WL)
1	-1	-1	-1	-1	59.52	6.33	0.106
2	-1	-1	-1	1	60.86	7.01	0.115
3	-1	-1	1	-1	61.00	6.44	0.106
4	-1	-1	1	1	61.22	7.05	0.115
5	-1	1	-1	-1	60.83	6.47	0.106
6	-1	1	-1	1	62.50	6.78	0.108
7	-1	1	1	-1	68.58	4.27	0.062
8	-1	1	1	1	70.02	5.55	0.079
9	1	-1	-1	-1	66.98	6.62	0.099
10	1	-1	-1	1	67.14	5.48	0.082
11	1	-1	1	-1	66.65	5.85	0.088
12	1	-1	1	1	67.95	5.24	0.077
13	1	1	-1	-1	66.76	6.10	0.091
14	1	1	-1	1	67.42	6.94	0.103
15	1	1	1	-1	69.93	4.11	0.059
16	1	1	1	1	71.21	4.71	0.066
17	-2	0	0	0	60.72	6.40	0.105
18	2	0	0	0	67.15	4.48	0.067
19	0	-2	0	0	60.35	5.67	0.094
20	0	2	0	0	67.29	6.90	0.103
21	0	0	-2	0	64.14	6.21	0.097
22	0	0	2	0	68.51	4.25	0.062
23	0	0	0	-2	64.92	2.31	0.036
24	0	0	0	2	66.36	3.67	0.055
25	0	0	0	0	64.31	3.77	0.059
26	0	0	0	0	65.47	3.55	0.054
27	0	0	0	0	66.66	3.78	0.057
28	0	0	0	0	67.78	2.79	0.041
29	0	0	0	0	67.16	2.62	0.039
30	0	0	0	0	66.08	2.63	0.040
31	0	0	0	0	66.17	2.31	0.035
32	0	0	0	0	65.40	3.34	0.051
33	0	0	0	0	65.45	3.41	0.052
34	0	0	0	0	66.69	3.58	0.054
35	0	0	0	0	65.65	3.49	0.053
36	0	0	0	0	65.32	3.41	0.052

表3 回归方程系数

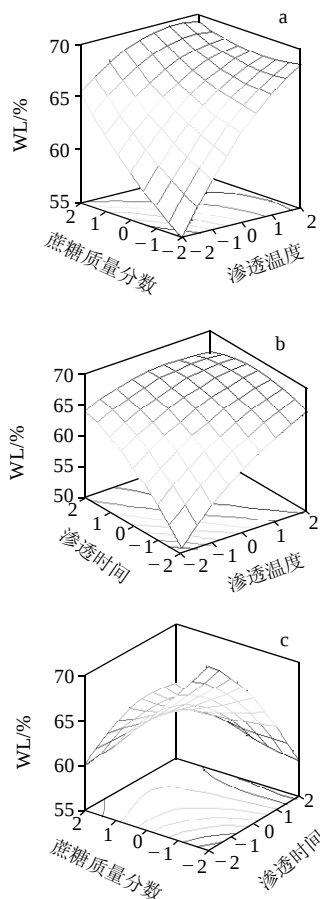
Table 3 Regression equation coefficients

回归系数		Y_1	Y_2	Y_3
常数项	b_0	65.5597**	5.1564**	0.0789**
	b_1	2.1821**	0.1354	-0.0010
	b_2	1.6587**	0.4554**	0.0048**
	b_3	1.3871**	-0.0813	-0.0032*
	b_4	0.4562*	-0.1746*	-0.0032*
二次项	b_{11}	-0.4182*	0.6080**	0.0099**
	b_{22}	-0.4470*	0.3543**	0.0058**
	b_{33}	0.1793	1.0918**	0.0164**
	b_{44}	0.0080	-0.1032	-0.0015
	b_{12}	-0.7956**	0.5269**	0.0089**
交互项	b_{13}	-0.6044*	-0.0031	0.0006
	b_{14}	-0.0794	0.0419	0.0009
	b_{23}	1.2444**	0.0631	-0.0008
	b_{24}	0.1269	0.0231	0.0001
	b_{34}	0.0256	0.0456	0.0007
R^2		0.928	0.938	0.937

注: b 为多项式系数; 1 为渗透温度、2 为渗透时间、3 为蔗糖质量分数、4 为超声波处理时间。*. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$ 。

2.3.2 响应面分析

2.3.2.1 渗透脱水温度和蔗糖质量分数的交互作用对 WL 的影响



所有固定水平为零水平。

图5 温度、时间和蔗糖质量分数对 WL 影响的响应面图

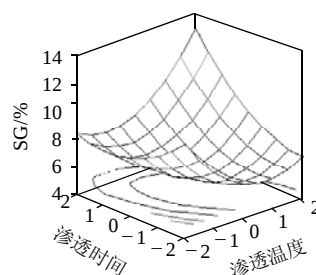
Fig.5 Response surface plots for the pairwise effects of osmotic dehydration temperature, osmotic dehydration time and sucrose concentration on WL

由图 5a 可以看出,当超声波处理时间、渗透时间为零水平时,随着蔗糖质量分数的增加,WL 呈接近线性增加,这一点可由表 3 中的回归系数看出。而随着温度的升高,WL 迅速增加。对于 WL 而言,温度与蔗糖质量分数之间存在极显著的交互作用($P < 0.01$)。

由图 5b 可以看出,蔗糖质量分数、超声波处理时间、渗透时间均为零水平时,WL 随着温度的升高、时间的延长而增加。对于 WL 而言,温度与时间之间存在极显著交互作用($P < 0.01$)。

由图 5c 可以看出,当温度、超声波处理时间均为零水平时,WL 随着蔗糖质量分数的增加及渗透脱水时间的延长而增加。对于 WL 而言,渗透时间与蔗糖质量分数之间存在显著的交互作用($P < 0.05$)。

2.3.2.2 渗透脱水温度和时间的交互作用对 SG 的影响



固定水平为零水平。

图6 温度和时间对 SG 影响的响应面图

Fig.6 Response surface plots for the pairwise effects of osmotic dehydration temperature and osmotic dehydration time on SG

由图 6 可以看出,当蔗糖质量分数、超声波处理时间均为零水平时,SG 随着温度的升高而降低,至零水平左右达到最低值,之后随着温度的升高而增加。SG 随着渗透时间的延长而缓慢增加。温度和时间的交互作用会促进糖的吸收。对于 SG 而言,渗透温度与渗透时间之间存在极显著的交互作用($P < 0.01$)。

2.3.3 雪莲果渗透脱水工艺参数的优化及验证

采用 Matlab 7.0 软件对回归方程进行求解,得到各响应值取得极值时各自变量的编码值: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 编码值分别取 -0.9286、2.00、2.00、2.00 时,WL 取最大值 77.47%; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 编码值分别取 0.1878、-0.8493、0.0203、2.00 时,SG 取最小值 4.20%。由于 WL、SG 取极值时对应的编码值不一致,所以对 Y_3 (SG/WL)求解,得出当编码值分别取 0.2279、-0.6064、0.0358、2.000 时,SG/WL 取最小值 0.065,对优化的工艺参数进行 4 次验证实验,得到 SG/WL 平均值为 0.059 ($P > 0.05$),说明回归方程可用来预测雪莲果超声波辅助渗透脱水过程。

将工艺参数优化后的编码值回代,得到实际工艺参数:渗透温度 41℃、渗透时间 1.7h、蔗糖质量分数 60.18%、超声波处理时间 35min。

3 结论

3.1 影响 WL 的因素主次顺序是温度>时间>蔗糖质量分数>超声波处理时间;影响 SG 的因素主次顺序依次为渗透脱水时间>超声波处理时间>温度>蔗糖质量分数;影响 SG/WL 的因素主次顺序是渗透脱水时间>蔗糖质量分数>超声波处理时间>温度。

3.2 雪莲果超声波辅助渗透脱水的最佳工艺参数:渗透脱水温度 41℃,渗透脱水时间 1.7h,蔗糖质量分数

60.18%，超声波处理时间 35min。此条件下，SG/WL 平均值为 0.059。

参考文献：

- [1] 钱林, 丁长河, 李里特, 等. 雪莲果的化学组分及其功能特性[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(6): 179-180.
- [2] 李卓亚. 雪莲果化学成分及其药理研究的进展[J]. 食品与药品, 2007, 9(6A): 41-43.
- [3] 张慇. 生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] 曹晖, 张慇. 高新技术在果蔬渗透脱水中的应用研究[J]. 扬州大学烹饪学报, 2007, 24(3): 55-58.
- [5] 邱伟芬. 果蔬渗透脱水的研究进展及应用前景[J]. 食品科技, 2000 (4): 31-32; 30.
- [6] 董全, Michele Marcotte, 陈宗道, 等. 真空 - 脉冲真空和常压下蓝莓渗透脱水的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 92-95.
- [7] 李媛, 刘通讯, 叶盛英, 等. 超声波预处理对胡萝卜渗透脱水技术初探[J]. 食品工业科技, 2003, 24(7): 26-28.
- [8] SIMAL S, BENEDITO J, SANCHEZ E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(3): 323-336.
- [9] 张平安, 叶盛英, 李雁, 等. 超声波强化龙眼渗透脱水研究[J]. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 25(2): 101-103.
- [10] 董红星, 相玉琳, 王树盛, 等. 超声场作用下胡萝卜渗透脱水质量传递规律研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(2): 189-193.
- [11] 赵彩青, 汪政富, 胡小松. 超声波预处理对樱桃番茄渗透脱水影响研究[J]. 食品工业科技, 2008(3): 149-150.
- [12] 刘魁英. 食品研究与数据分析[M]. 3 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
- [13] EREN İ, KAYMAK-ERTEKİN F. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 344-352.
- [14] 王颀. 试验设计与 SPSS 应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.