

崔春兰,郑虎哲,顾立众,等. 响应曲面分析法优化发酵黑大蒜制作工艺[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):306-309,319.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.12.098

响应曲面分析法优化发酵黑大蒜制作工艺

崔春兰, 郑虎哲, 顾立众, 单露华

(江苏食品药品职业技术学院,江苏淮安 223003)

摘要:以新鲜大蒜为材料,以总多酚、还原糖生成量作为评价指标,在单因素试验基础上根据中心组合试验设计原理,采用 3 因素 5 水平响应曲面分析法对黑大蒜发酵工艺进行优化。通过响应曲面试验及回归分析,得出黑大蒜发酵最佳工艺条件为:第一发酵阶段温度 79 ℃,第二发酵阶段时间 45 h,第四发酵阶段温度 52 ℃。在此条件下,预测总多酚、还原糖生成量分别为 6.15 g/kg、9.03%。经验证,总多酚和还原糖生成量分别达到 6.01 g/kg、8.63%,表明由响应曲面法获得的二次模型方程能较好地预测试验结果及优化条件。

关键词:发酵黑大蒜;制作工艺;总多酚;抗氧化能力;响应曲面分析法

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)12-0306-04

大蒜是葱科葱属植物蒜(*Allium Sativum* L.)的鳞茎,是药食两用的食物,被称为“植物药之最”^[1];但生吃过量大蒜,易耗血、影响视力,对胃肠道也有刺激作用,所以,患有胃炎、胃溃疡、十二指肠溃疡、肾炎、心脏病等疾病的人不宜多吃生大蒜。发酵黑大蒜别称发酵黑蒜、黑大蒜等,最初是日本三重大学于 1998 年首次研发的新产品。发酵黑大蒜是用新鲜的生蒜带皮或去皮后放在高温高湿的发酵箱里,经过自然发酵制成的食品,在保留生大蒜原有成分的基础上,将生大蒜的抗氧化、抗酸化功效提高了数十倍,同时将新鲜大蒜的蛋白质转化为人体必需的 17 种氨基酸,对增强人体免疫力、恢复人体疲劳起到积极作用,味道酸甜,食后无蒜味,不上火,是速效性的保健食品^[2]。但是如果发酵处理稍微不慎,会导致发酵后生成的黑大蒜功能性成分不发生明显变化,特别是抗氧化物质的含量几乎没有太多变化^[3]。本试验在单因素试验的基础上,探讨发酵条件对黑大蒜制作过程中各种营养成分、抗氧化成分生成效果的影响,旨在为进一步开发具有保健功效的食品添加剂、功能性饮料、健康功能性食品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验所用的大蒜为 14~16 瓣大蒜,将市售大蒜去土、去杂质,用于制作发酵黑大蒜。恒温恒湿培养箱(可控温度范围:10~90 ℃;可控湿度范围:10%~95%;可控时间范围:0~999 h)。

1.2 发酵工艺

1.2.1 单因素试验 根据黑大蒜的发酵原理,进行发酵条件对总多酚生成的单因素分析,具体如下:

处理 1:第一阶段温度分别为 70、80、90 ℃,湿度分别为

70%、80%、90%,发酵时间分别为 70、80、90 h;第二阶段选择温度 50 ℃,湿度 80%,时间 50 h;第三阶段选择温度 85 ℃,湿度 80%,时间 20 h;第四阶段:选择温度 50 ℃,湿度 40%下发酵 80 h;第五阶段选择 25 ℃,放置 100 h。

处理 2:第一阶段温度为 80 ℃,湿度 80%,时间 80 h;第二阶段温度分别为 40、50、60 ℃,湿度分别为 70%、80%、90%,发酵时间分别为 40、50、60 h;第三阶段选择温度 85 ℃,湿度 80%,时间 20 h;第四阶段选择温度 50 ℃,湿度 40%下发酵 80 h;第五阶段选择 25 ℃,放置 100 h。

处理 3:第一阶段温度为 80 ℃,湿度 80%,时间 80 h;第二阶段选择温度 50 ℃,湿度 80%,时间 50 h;第三阶段温度分别为 80、85、90 ℃,湿度分别为 70%、80%、90%,发酵时间分别为 20、30、40 h;第四阶段选择温度 50 ℃,湿度 40%下发酵 80 h;第五阶段选择 25 ℃,放置 100 h。

处理 4:第一阶段温度为 80 ℃,湿度 80%,时间 80 h;第二阶段选择温度 50 ℃,湿度 80%,时间 50 h;第三阶段选择温度 85 ℃,湿度 80%,时间 20 h;第四阶段温度分别为 40、50、60 ℃,湿度分别为 30%、40%、50%,发酵时间分别为 70、80、90 h;第五阶段选择 25 ℃,放置 100 h。

1.2.2 响应曲面优化试验设计 在单因素试验基础上,进一步优化发酵条件对黑大蒜制作过程中各种营养成分、抗氧化成分生成效果的影响,利用 SAS 9.1、STATISTICA 6.0 软件,设计 3 因素 5 水平响应试验,选取影响最大的因素,即第一阶段温度、第二阶段时间以及第四阶段温度,分别以 X_1 、 X_2 、 X_3 表示,每个自变量的低、中、高试验水平分别以 -2、-1、0、1、2 进行编码,以总多酚($Y_{\text{总多酚}}$)、还原糖($Y_{\text{还原糖}}$)生成量为响应值。各因素水平见表 1。

1.3 总多酚与还原糖含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 法测定总多酚含量,用没食子酸(gallic acid)作标准曲线,样品总多酚含量以达到同样吸光度所需的没食子酸质量(g/kg)表示^[4]。采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[5]测定还原糖含量。

收稿日期:2014-12-17

基金项目:江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(编号:201413104003Y);江苏省青蓝工程。

作者简介:崔春兰(1976—),女,吉林珲春人,硕士,主要从事功能性食品开发及研究。E-mail:tigercl@163.com。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

发酵黑大蒜是在高温高湿环境下长时间自然发酵而成的保健食品,即发酵过程不是利用微生物发酵,而是在高温高湿条件下,大蒜自身组织遭到破坏后,自身物质发生了物理化学反应,特别是美拉德反应起了关键作用^[1]。美拉德反应是十分复杂的化学过程,反应历程、反应产物的性质及结构受氨基酸及糖种类、性质的影响,还与反应时 pH 值、温度、相对湿度、时间以及金属离子等有关。

单因素试验中,按照发酵原理及各阶段的发酵特点,将黑大蒜发酵过程分为 5 个阶段,其中第一阶段是制作发酵黑大蒜的关键环节,通过反复试验发现,如果温度低于 70 ℃,则容易减缓黑大蒜发酵速度;温度高于 90 ℃,则抑制黑大蒜发酵,降低黑大蒜的糖含量、抗氧化能力。另外,当发酵湿度高于 95% 时,容易引起黑大蒜腐烂;当发酵湿度低于 70% 时,黑大蒜发酵效果不佳。因此第一阶段的发酵条件设定为:发酵温度 60 ~ 90 ℃,湿度 70% ~ 95%,发酵时间 60 ~ 90 h。第二阶段是消除大蒜特有的辛辣味的过程,也是将大蒜中硫磺类化合物蒜氨酸转换为 *S*-烯丙基-*L*半胱氨酸亚砷等有机硫化物的过程。如果这一阶段中发酵温度低于 40 ℃或发酵时间少于 40 h,会残留很多辛辣味,影响口感;如果发酵温度超过 60 ℃或发酵时间超过 60 h,容易引起美拉德反应不完善,使“黑”大蒜变为“褐”大蒜。第二阶段的发酵条件设定为:发酵温度 40 ~ 60 ℃,湿度 70% ~ 95%,发酵时间 30 ~ 60 h。第三阶段是将大蒜逐渐转变为“黑”大蒜的过程。如果这一阶段温度低于 80 ℃,将导致大蒜内部发酵不完全,容易引起大蒜变褐色;如果温度高于 95 ℃,会烧焦大蒜表皮,影响口感。发酵时间低于 20 h 或高于 40 h,都会影响黑大蒜的物性、糖含量、酸含量等。第三阶段的发酵条件设定为:发酵温度 80 ~ 95 ℃,发酵湿度 70% ~ 95%,发酵时间 20 ~ 40 h。第四阶段是发酵完善阶段。如果发酵温度超过 60 ℃或发酵湿度超过 50%,容易导致大蒜表面烤焦;如果发酵温度低于 40 ℃或发酵湿度低于 30%,影响大蒜的口感、弹性。第四阶段的发酵条件设定为:发酵温度 40 ~ 60 ℃,发酵湿度 30% ~ 50%,发酵时间 60 ~ 90 h。第五阶段是后熟阶段,放置于 20 ~ 30 ℃阴凉处自然成熟 3 ~ 5 d,发酵的黑大蒜不仅没有新鲜大蒜的辣味、臭味,而且口感柔软,甜味、酸味适中。

2.2 响应曲面优化试验

2.2.1 优化试验设计 通过单因素试验对总多酚生成过程的主要因素进行初步摸索,最终确定 3 个关键因素,即第一阶段温度、第二阶段时间以及第四阶段温度,进行三元二次回归旋转正交组合设计,其中,第一阶段温度 79 ℃;第二阶段时间 45 h;第四阶段温度 52 ℃为反应中心点,重复 3 次(表 1)。

2.2.2 总多酚优化模型的组建 为了检验回归方程的有效性,进一步确定各因素对响应值总多酚生成量的影响程度,对回归模型进行了方差分析,结果见表 2、表 3。由表 2 可知,第一阶段温度的一次项、第一阶段温度的二次项、第二阶段时间的二次项对总多酚生成量的影响达到极显著水平($P < 0.001$);第二阶段时间的一次项、第四阶段温度的一次项、第四阶段温度的二次项对总多酚生成量的影响有较显著水平

表 1 响应曲面分析 3 因素 5 水平设计及试验结果

试验 编号	因素			响应值	
	第一阶段 温度(℃)	第二阶段 时间(h)	第四阶段 温度(℃)	总多酚含量 (g/kg)	还原糖含量 (%)
1	75(-1)	36(-1)	45(-1)	4.73 ± 0.21	8.00 ± 0.51
2	85(1)	36(-1)	45(-1)	5.50 ± 0.54	8.35 ± 0.31
3	75(-1)	36(-1)	55(1)	4.94 ± 0.24	8.16 ± 0.41
4	85(1)	36(-1)	55(1)	5.57 ± 0.31	8.97 ± 0.25
5	75(-1)	60(1)	45(-1)	4.98 ± 0.12	6.56 ± 0.41
6	85(1)	60(1)	45(-1)	5.66 ± 0.34	6.90 ± 0.28
7	75(-1)	60(1)	55(1)	5.07 ± 0.28	5.96 ± 0.31
8	85(1)	60(1)	55(1)	5.44 ± 0.27	7.75 ± 0.41
9	80(0)	48(0)	50(0)	6.35 ± 0.41	9.12 ± 0.48
10	80(0)	48(0)	50(0)	6.40 ± 0.35	9.16 ± 0.61
11	80(0)	24(-2)	50(0)	4.99 ± 0.31	8.48 ± 0.47
12	80(0)	72(2)	50(0)	5.10 ± 0.41	7.48 ± 0.34
13	80(0)	48(0)	40(-2)	5.58 ± 0.38	7.69 ± 0.41
14	80(0)	48(0)	60(2)	5.91 ± 0.38	8.56 ± 0.24
15	70(-2)	48(0)	50(0)	3.91 ± 0.28	5.22 ± 0.26
16	90(2)	48(0)	50(0)	5.43 ± 0.34	7.03 ± 0.31

注:其他条件:第一阶段湿度 90%,时间 70 h;第二阶段温度 50 ℃,湿度 90%;第三阶段温度 90 ℃,湿度 90%,时间 20 h;第四阶段湿度 40%,时间 80 h;第五阶段温度 25 ℃,时间 100 h。

($P < 0.05$);各因素的交互项对总多酚生成量的影响均不显著。从各因素的 P 值可知,3 个因素对黑大蒜中总多酚生成量的影响依次为第一阶段温度(X_1) > 第二阶段时间(X_2) > 第四阶段温度(X_3)。

利用软件对表 2 中试验数据进行多元回归分析,以总多酚生成量($Y_{\text{总多酚}}$)为因变量,第一阶段温度(X_1)、第二阶段时间(X_2)、第四阶段温度(X_3)为自变量,建立回归方程:

$$Y_{\text{总多酚}} = -143.93 + 2.944 125X_1 + 0.325 99X_2 + 0.861 125X_3 - 0.017 05X_1^2 - 0.000 729X_1X_2 - 0.002 309 X_2^2 - 0.002 25X_1X_3 - 0.000 854 X_2X_3 - 0.006 3X_3^2. \quad (1)$$

对此二元回归模型进行方差分析,观察到模型的确定系数 R^2 为 0.957 2,说明模型拟合程度良好, R^2 修正值为 0.927 2,表明与确定系数 R^2 具有很高的一致性;变异系数为 3.764 6%,说明试验重复性良好。回归方程显著性检验 F 值为 14.92 ($P < 0.01$),表明回归方程达到极显著,可用该模型来预测发酵黑大蒜制作过程中总多酚生成量。

响应面图形是响应值对各试验因素所构成的三维空间的曲面图,从响应面分析图上可以找出最佳参数以及各参数之间的相互作用^[5]。利用 STATISTICA 6.0 软件对数据进行二次多元回归拟合,所得到的二次回归方程的响应面图如图 1 所示。第一阶段温度、第二阶段时间以及第四阶段温度交互作用对响应值的影响可以从图中直观地反映出来,并确定各个因素的最佳水平。图中的等高线形状可以反映交互作用大小,当等高线形状为椭圆形时表示交互作用显著,当等高线形状为圆形则表示交互作用不显著^[5]。从图 1-a 可以看出,第一阶段温度较低时,随着第二阶段时间增加,总多酚生成量增大,当第二阶段时间超过 55 h,总多酚生成量反而降低。当第二阶段时间小于 55 h 时,第一阶段温度对总多酚生成量影响较小,当第二阶段时间增高到 50 ℃左右,随着第一阶段温度

表 2 回归模型系数及方差分析结果

来源	总多酚含量			还原糖含量		
	回归系数	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值	回归系数	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
常数项	-143.930 000	-6.97	0.000 4	-177.219 375	-3.35	0.015 5
<i>X</i> ₁	2.944 125	8.25	0.000 2	4.335 875	4.74	0.003 2
<i>X</i> ₂	0.325 990	2.79	0.031 6	0.043 594	0.15	0.889 0
<i>X</i> ₃	0.861 125	2.78	0.031 9	0.338 625	0.43	0.684 1
<i>X</i> ₁₁	-0.017 050	-8.47	0.000 1	-0.030 150	-5.85	0.001 1
<i>X</i> ₂₂	-0.002 309	-6.61	0.000 6	-0.002 014	-2.25	0.065 5
<i>X</i> ₃₃	-0.006 300	-3.13	0.020 3	-0.010 150	-1.97	0.096 6
<i>X</i> ₁₂	-0.000 729	-0.61	0.561 3	0.002 021	0.67	0.530 8
<i>X</i> ₁₃	-0.002 250	-0.79	0.459 4	0.009 550	1.31	0.238 3
<i>X</i> ₂₃	-0.000 854	-0.72	0.498 6	-0.001 104	-0.36	0.728 8
<i>R</i> ²	0.957 2 **			0.918 0 **		
修正 <i>R</i> ²	0.927 2			0.860 6		

表 3 利用回归模型预测总多酚以及还原糖最佳提取工艺条件及预测值

反应 响应值	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	预测的最佳反应条件			预测值
			第一阶段 温度(℃)	第二阶段 时间(h)	第四阶段 温度(℃)	
总多酚	14.92	0.001 9	81.9	48.3	50.4	6.33 g/kg
还原糖	7.46	0.011 9	81.5	37.2	53.0	9.36%

增大到 82 ℃ 左右时,总多酚生成量达到最大值,再增加第一阶段温度,总多酚生成量反而降低。单因素试验研究结果表明,如果第一阶段温度低于 70 ℃,则容易延迟发酵速度;温度高于 90 ℃,则抑制发酵,造成总多酚生成量和抗氧化能力降低。这与罗仓学等对液态黑蒜发酵工艺研究结果^[1]类似。

由图 1 - b 可以看出,第一阶段温度和第四阶段温度两因素交互作用显著。当第一阶段温度较低时,随着第四阶段温度增加,总多酚生成量先增加后保持不变;当第一阶段温度 84 ℃ 左右,第四阶段温度达到 50 ℃ 左右时,总多酚生成量达到最高。由图 1 - c 可知,第二阶段时间和第四阶段温度之间交互作用不显著,总多酚生成量在一定范围内随着发酵时间和温度升高而增大。当第二阶段时间达到 50 h 左右时,总多酚提取量达到最大值。Kim 等在研究黑大蒜制作过程中温度对总多酚、总黄酮类化合物生成的影响时,也得到了类似的结果^[7]。最佳反应条件是第一阶段温度 81.9 ℃,第二阶段时间 48.3 h,第四阶段温度 50.4 ℃,用回归方程式(1)计算总多酚生成量为 6.33 g/kg(表 3)。

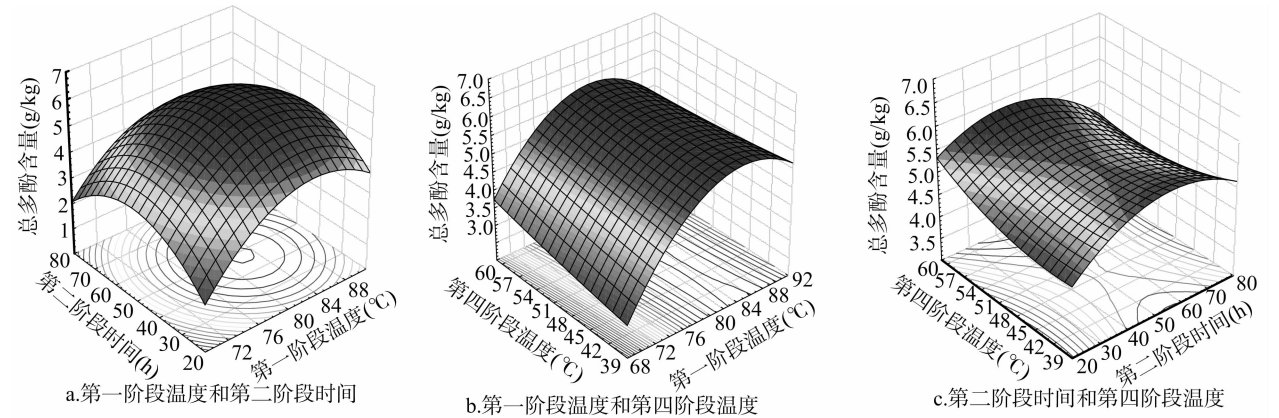


图1 三因素交互作用对发酵黑大蒜中总多酚生成量影响的响应曲面图

2.2.3 还原糖优化模型的组建 Kang 等研究表明,新鲜大蒜经过长时间的发酵、成熟,大蒜中所含的蛋白质被分解为氨基酸,碳水化合物被分解为单糖类^[8]。因此,发酵后的黑大蒜味道甜酸、美味可口,也可以当作甜品食用。另外,在高温发酵条件下,氨基酸的肽键、蛋白质的 α - 氨基和糖类发生褐变,最终生成黑大蒜。在这一过程中,还原糖含量、发酵温度、水分含量以及发酵时间直接影响黑大蒜品质。因此,在黑大蒜制作工艺中,还原糖生成量成为判断黑大蒜品质的重要标志性产物之一。为了检验回归方程的有效性,进一步确定各因素对响应值还原糖生成量的影响程度,对回归模型进行了方差分析(表 2、表 3)。由表 2 可知,第一阶段温度的一次项、二次项对还原糖生成量的影响达极显著水平(*P* < 0.001);各

因素的交互项对总多酚提取量影响均不显著。从各因素的 *F* 值可知,3 个因素对黑大蒜中还原糖生成量的影响依次为第一阶段温度(*X*₁) > 第四阶段温度(*X*₃) > 第二阶段时间(*X*₂)。用软件对表 2 中数据进行多元回归分析,以还原糖生成量(*Y*_{还原糖})为因变量,第一阶段温度(*X*₁)、第二阶段时间(*X*₂)、第四阶段温度(*X*₃)为自变量,建立回归方程:
$$Y_{\text{还原糖}} = -177.219\,375 + 4.335\,875X_1 + 0.043\,594X_2 + 0.338\,625X_3 - 0.030\,150X_1^2 + 0.002\,021X_1X_2 - 0.002\,014X_2^2 + 0.009\,55X_1X_3 - 0.001\,104X_2X_3 - 0.010\,15X_3^2. \quad (2)$$
对此二元回归模型进行方差分析,观察到模型的确定系数 *R*² 为 0.918 0, *R*² 修正值为 0.860 6,表明与确定系数 *R*² 具有较高的一致性;变异系数为 6.687%,说明试验重复性良

好。回归方程显著性检验 F 值为 7.46 ($P < 0.05$), 表明回归方程较显著, 可用该模型来预测未知条件下黑大蒜还原糖生成量。

根据回归方程, 作响应曲面, 考察拟合响应曲面的形状, 分析第一阶段温度、第二阶段时间、第四阶段温度对还原糖生成量的影响 (图 2)。由图 2 可知, 3 个因素对还原糖生成量的影响与总多酚生成量变化规律相似。即在考察的变量水平在一定范围内, 随着第一阶段温度的增加, 还原糖生成量逐渐增大 (图 2-a); 同样, 还原糖生成量在一定范围内随第四阶

段温度的增加而增大, 当其水平越过一定值后, 还原糖生成量随之降低 (图 2-b)。由图 2-c 可知, 相比第四阶段温度, 第二阶段时间对还原糖生成量影响较小, 各因素的 F 值也证明了这个结果 (表 2)。罗仓学等在研究液态黑蒜发酵工艺时得到了类似的结果, 即在较高温度条件下容易造成降低可溶性糖含量和抗氧化能力^[1]。根据图 2, SAS 9.1 软件, 得出最佳反应条件是第一阶段温度 81.5 °C, 第二阶段时间 37.2 h, 第四阶段温度 53.0 °C, 用回归方程 (2) 计算还原糖生成量为 9.36% (表 3)。

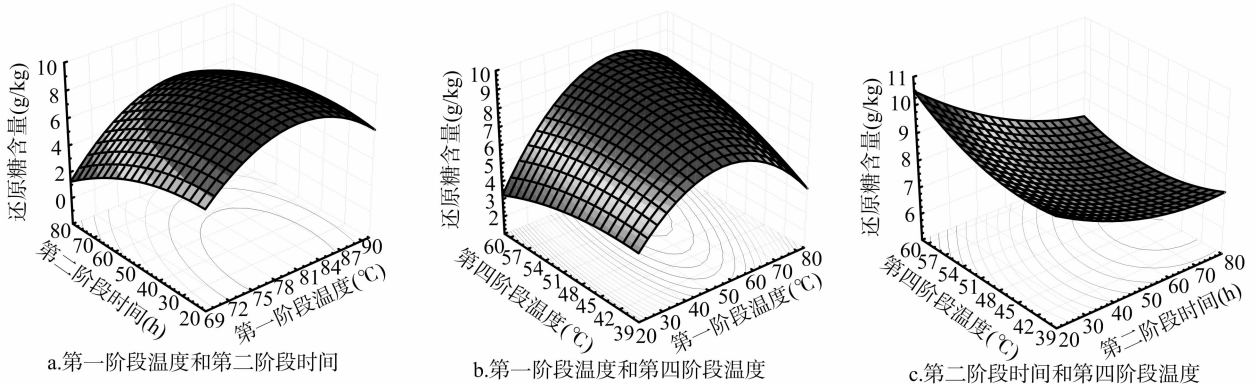


图2 三因素交互作用对发酵黑大蒜中还原糖生成量影响的响应曲面图

2.2.4 最佳提取条件的确定和验证 对回归方程进行分析, 得出最优工艺参数范围为: 第一阶段温度 81.5 ~ 81.9 °C, 第二阶段时间 37.2 ~ 48.3 h, 第四阶段温度 50.4 ~ 53.0 °C, 最终优化后工艺参数确定为: 第一阶段温度 79 °C, 第二阶段时间 45 h, 第四阶段温度 52 °C (图 3)。为了验证响应面法的可靠性, 在优化条件下重复 3 次, 得出总多酚生成量、还原糖生

成量平均值分别为 6.01 g/kg、8.63% (表 4), 该试验值与理论值 (6.15 g/kg、9.03%) 非常接近, 说明试验结果与模型拟合良好, 利用响应曲面分析法优化黑大蒜制作工艺中大量生成功能性物质的发酵工艺参数准确可靠, 具有可行性。值得注意的是利用新鲜大蒜制作黑大蒜过程中显著提高了总多酚、还原糖含量, 与对照组相比, 分别提高 4 倍、12 倍 (表 4)。

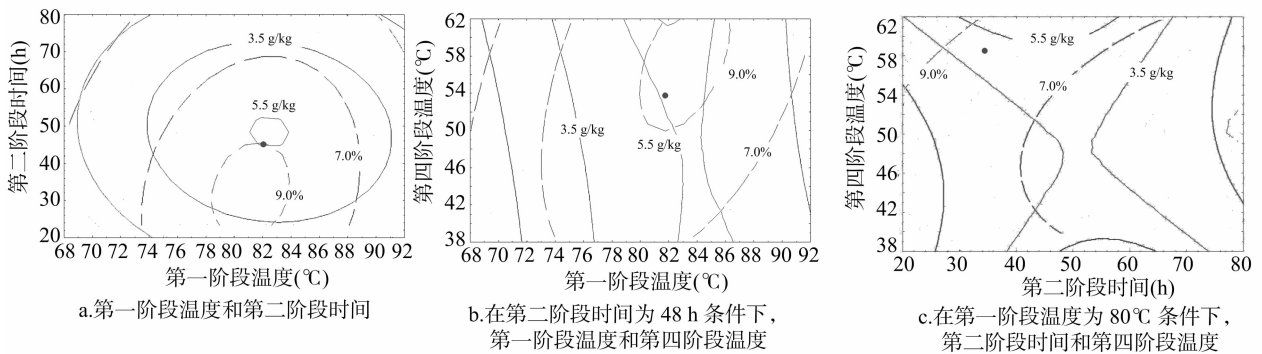


图3 各两因素交互作用对黑大蒜中总多酚和还原糖生成量影响的叠加等高线图

表 4 优化的最终反应条件下总多酚及还原糖生成量

反应响应值	优化的最终反应条件			最大响应值		对照 (新鲜大蒜)
	第一阶段温度 (°C)	第二阶段时间 (h)	第四阶段温度 (°C)	预测值	验证值	
总多酚	79	45	52	6.15 g/kg	(6.01 ± 0.1) g/kg	(1.51 ± 0.3) g/kg
还原糖	79	45	52	9.03%	(8.63 ± 0.2) %	(0.7 ± 0.1) %

3 结论

我国大蒜产量居世界首位, 约占世界大蒜总产量的 1/4; 但我国大蒜相关产品科技含量和附加值较低。新鲜大蒜作为

食品原料, 含有对人体健康有益的成分, 具有很好的药用价值和开发利用前景。本试验以新鲜大蒜为原料, 采用高温、高湿条件下自然发酵技术, 在单因素试验基础上, 利用 SAS 9.1、
(下转第 319 页)

处理产品中有不同程度的降低,且低温产品中二甲基三硫的降低率低于高温产品,后者在真空干燥过程中全部损失,裂解变为小分子硫化物是导致其含量下降的可能原因;部分真空干燥产品中的呋喃类物质含量下降,但同时新增 2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪等多种吡嗪类化合物,这些物质具有坚果香气,且香气阈值低,对香气体系有重要的贡献作用^[13];新鲜样品中原有的 2-甲氧基-3-仲丁基吡嗪在 60 ℃ 及以上芥菜干制产品中损失较多。

3 结论

本试验在真空度为 0.1 MPa 条件下,采用 50、60、70、80、90 ℃ 真空干燥芥菜,利用顶空固相微萃取结合 GC-MS 检测真空干燥芥菜中的香气物质,结果表明,真空干燥条件下,反式-2-壬烯-1-醇、4-甲基环己醇、2-甲基环戊醇、1-甲基环庚醇、薄荷醇等醇类新增,叶醇和 1-戊烯-3-醇相对含量在真空干燥过程中明显升高,成为真空干制产品最主要的醇类化合物;异戊醛、巴豆醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛等在真空加热过程中全部消失,二正戊醛、2-甲基正丁醛在真空过程中新增;新鲜芥菜中原有的甲基壬基甲酮在真空干燥过程中全部消失,促进了 3-甲基-2-庚酮、3-戊烯-2-酮、甲基庚烯酮等的合成;真空干燥丰富了芥菜中酸类化合物成分,2-甲基-4-戊烯酸和己酸为真空干制品中主要的酸类成分;真空干燥过程中消失的烃类化合物有溴代环庚烷、(一)柠檬烯、2-甲基萘和 2,6-二叔丁基苯醌;芥菜干制产品中二甲硫醚和二甲基二硫相对含量大幅提高,同时新增 2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪等多种具有焙烤香气的吡嗪类化合物。

与其他温度处理相比,80 ℃ 真空干燥有效提高了醇类化合物的含量,较好地保留了醛类和酯类化合物,增加了烃类化合物的种类,合成具有焙烤香气的吡嗪类化合物。因此,样品

载样量为 50 g、真空度为 0.1 MPa、干燥温度为 80 ℃ 获得的芥菜干制品具有较好的风味和香气,这为后期芥菜干制工艺的开发提供了良好的研究基础。

参考文献:

- [1] Cui H L, Li X J, Wang G Q, et al. Acetolactate synthase proline (197) mutations confer tribenuron-methyl resistance in *Capsella bursa-pastoris* populations from China[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2012, 102(3): 229-232.
- [2] 张艳芬,姜丽,蒋娟,等. 包装方式对冷藏芥菜的保鲜效果[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(5): 1118-1120.
- [3] 张玉先,刘宏云,苗帅,等. 地黄真空干燥试验研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 1-7.
- [4] 李瑜,许时婴. 蒜片热风 and 真空干燥工艺研究[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 168-170.
- [5] 郭华,侯冬岩,回瑞华,等. 芥菜挥发性化学成分的分析[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 254-256.
- [6] 薛妍君,张丽,冯莉,等. 芥菜芳香成分的固相微萃取条件优化与分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 328-333.
- [7] 何聪聪,苏柯冉,刘梦雅,等. 基于 AEDA 和 OAV 值确定西瓜汁香气活性化合物的比较[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 279-285.
- [8] 黄明泉,孙宝国,田红玉,等. 叶醇的研究进展[J]. 北京工商大学学报:自然科学版, 2005, 23(2): 1-5.
- [9] 陈双. 中国黄酒挥发性组分及香气特征研究[D]. 镇江:江南大学, 2013.
- [10] 张亚利,胡文利,胡永红. 木瓜属新品系果实的维生素 C、总酚及香气成分分析[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 110-114.
- [11] 范远景,王林,董万领,等. SPME-GC/MS 法测定红茶及红茶粉中的挥发性[J]. 现代食品科技, 2012, 28(9): 1231-1235.
- [12] 关旭,刘鑫,李国臣,等. 异佛尔酮的生产、应用及市场前景[J]. 化工科技市场, 2005(8): 5-8.
- [13] 周斌,任洪涛. 烘焙时间对云南小粒咖啡挥发性成分影响的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 236-244.
- [14] 王宇,李海,李海,等. 黑蒜抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2008(10): 58-60.
- [15] Bae S E, Cho S Y, Won Y D, et al. Changes in S-allyl cysteine contents and physicochemical properties of black garlic during heat treatment[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 55(1): 397-402.
- [16] Renard C C, Baron A, Guyot S, et al. Interactions between apple cell walls and native apple polyphenol: quantification and some consequences[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2001, 29: 115-125.
- [17] Zheng H Z, Kim Y I, Chung S K. A profile of physicochemical and antioxidant changes during fruit growth for the utilisation of unripe apples[J]. Food Chemistry, 2012, 131(1): 106-110.
- [18] 崔春兰,郑虎哲,顾立众,等. 响应曲面分析法优化苹果渣中多酚类物质的果胶酶辅助提取工艺[J]. 现代食品科技, 2013(9): 2235-2240.
- [19] Kim J S, Kang O J, Gweon O C. Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(1): 80-86.
- [20] Kang J R, Lee S J, Kwon H J, et al. Establishment of extraction conditions for the optimization of the black garlic antioxidant activity using the response surface methodology[J]. The Korean Society of Food Preservation, 2012, 4: 577-585.

(上接第 309 页)

STATISTICA 6.0 软件,建立二次多项数学模型,通过响应曲面分析法优化黑大蒜制作工艺,使其大量生成对人体有保健作用的总多酚、还原糖等物质。本研究结果表明,最佳发酵工艺条件为:第一阶段温度 79 ℃;第二阶段时间 45 h;第四阶段温度 52 ℃。其他辅助条件为第一阶段湿度 90%,时间 70 h;第二阶段温度 50 ℃,湿度 90%;第三阶段温度 90 ℃,湿度 90%,时间 20 h;第四阶段湿度 40%,时间 80 h;第五阶段 25 ℃,时间 100 h。回归分析和验证试验表明了该响应面法的合理性和可行性。

参考文献:

- [1] 罗仓学,苏东霞,陈树雨. 液态黑蒜发酵工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013(18): 292-297.
- [2] 祝炳俏,吴海歌,刘媛媛,等. 黑蒜抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2008(10): 58-60.
- [3] Bae S E, Cho S Y, Won Y D, et al. Changes in S-allyl cysteine contents and physicochemical properties of black garlic during heat treat-