

马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸微波萃取工艺参数优化及应用

吴文福¹, 陈俊轶¹, 成荣敏^{2*}, 毕宏达³

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学化学学院, 长春 130012;
3. 吉林大学食品科学与工程学院, 长春 130062)

摘要: 为了优化马铃薯生全粉不饱和脂肪酸的微波萃取工艺, 该试验采用软件 Design-Expert 8.05 分析以及响应面法来优化马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸微波萃取工艺, 得出马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸的萃取模型 $p=0.0001 < 0.01$, $R^2=0.9398$, 并确定马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸最佳萃取工艺: 萃取温度 81°C , 萃取时间 11 min, 萃取溶剂中丙酮占比 0.8025, 料液比 3.25:1, 各因素对不饱和脂肪酸质量分数影响大小分别为: 丙酮占比>料液比>萃取温度>萃取时间, 实测不饱和脂肪酸质量分数为 1.081 mg/g 和拟合方程的预测值 1.084 mg/g 基本一致。将该优化方案应用于热风干燥温度对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸含量影响的分析中, 结果表明: 随着干燥温度的升高, 亚油酸质量分数显著增加 ($P<0.05$), 总不饱和脂肪酸质量分数增加 ($P<0.05$)。优化试验为热风干燥条件对马铃薯品质影响的研究提供了理论依据。

关键词: 微波; 萃取; 优化; 响应面; 马铃薯生全粉; 不饱和脂肪酸; 甲酯化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.035

中图分类号: TS255.1 TS210.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-06-0278-07

吴文福, 陈俊轶, 成荣敏, 毕宏达. 马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸微波萃取工艺参数优化及应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 278—284. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.035 http://www.tcsae.org

Wu Wenfu, Chen Junyi, Cheng Rongmin, Bi Hongda. Optimization of microwave-assisted extraction parameter for unsaturated fatty acids in raw potato flours and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 278—284. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.035 http://www.tcsae.org

0 引言

2015年农业部正式提出马铃薯主粮化战略, 到2020年中国马铃薯的种植面积预计将达到660万 hm^2 以上。生鲜马铃薯容易腐烂变质, 将其干燥加工处理后更有利于储运^[1]。常规的加工方法是将其制成雪花全粉和颗粒全粉, 这样的做法一是能耗高, 二是由于生产过程中剧烈的热处理, 会使其糊化度大幅提高, 后续的加工性能变差, 不利于其在传统中式主食中的应用。将马铃薯不经过蒸煮, 直接热风干燥处理对其淀粉糊化度影响低, 后续加工性能好, 并且在实际生产中容易实施。但干燥加工过程会导致马铃薯品质变化^[2-3], 焦中高等^[4]发现热风干燥温度的升高可使杏仁及其油脂中饱和脂肪酸含量增加而不饱和脂肪酸含量减少; 张玉荣等^[5]的研究表明, 玉米在热风干燥时随着温度的升高, 脂肪酸值增加, 过氧化物酶(Peroxidase, POD)活力下降。

不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)是马铃薯中的主要脂肪酸, 是非常重要的膳食脂肪酸, 同时也是人体必需的营养物质。其具有重要的生理功能^[6], 不仅能够促进身体发育和智力增长^[7], 而且还具有降低血液中胆固醇和甘油三酯的含量, 改善血液微循环, 提高免疫

力, 预防心血管疾病^[8]的作用。目前, 不饱和脂肪酸的提取方法主要有索氏提取、超声波提取、微波萃取^[9]、超临界萃取^[10]等。这些提取方法或多或少存在着用时长, 试剂用量大, 提取效率、精密度低以及选择性差等问题。

以新鲜马铃薯为原料通过热风干燥制成生全粉, 利用响应面法优化微波萃取不饱和脂肪酸的最佳工艺条件。微波萃取技术的优越性不仅在于降低了试验操作费用和生产成本, 更重要的是这种技术符合“绿色”环保的要求^[11-12]。它具有以下特点: 1) 省时节能, 加热迅速。2) 可对特定组分进行针对性加热, 选择性强。3) 试剂用量少, 污染少。4) 产率及回收率高。5) 过程易于控制。影响微波萃取的因素有萃取温度、萃取时间、萃取溶剂等等^[13], 在单因素试验的基础上选取影响显著的条件作为试验因素, 通过 Design-Expert 8.05 建立模型, 利用响应面进行分析得出最优方案^[14-16], 以保证最大程度地提取出不饱和脂肪酸。响应面法(response surface method)是一种用于拟合优化多因素与响应值函数关系的技术, 目前已成功应用在生物技术等诸多领域, 例如提取条件的优化^[17-20], 蛋白酶的生产等^[21]。

在获得最优萃取工艺后, 将其应用于热风干燥温度对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸含量的影响研究中, 确定适宜的干燥条件。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 马铃薯生全粉

制备方案: 鲜马铃薯(早大白)清洗、去皮、切丁

收稿日期: 2017-11-29 修订日期: 2018-03-02

基金项目: 粮食收储保质降耗关键技术与装备开发 2016YFD0401001

作者简介: 吴文福, 教授, 博士生导师, 研究方向: 农业机械测试与控制技术, 农产品加工技术。Email: wwfzlb@126.com

*通信作者: 成荣敏, 高级工程师, 研究方向: 农产品品质检测。

Email: chengrm@jlu.edu.cn

(10 mm×10 mm×10 mm) 后进行热风干燥, 设定干燥温度为 50 °C, 干燥风速为 1 m/s, 直至含水率降到 0.1 g/g (湿基) 以下, 再将其粉碎, 过孔径为 0.150 mm 的标准筛。

1.1.2 试剂

食用盐, 亚油酸 97%, α -亚麻酸 97% (*aladdin*), 油酸 97%, 正己烷, 丙酮, 浓硫酸, 甲醇均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司), 氮气 99.99%。

1.1.3 仪器

TANK 微波消解仪 (济南海能仪器股份有限公司), 6890N 气相色谱仪 (安捷伦科技有限公司), JDKY-I 型薄层干燥试验台 (长春吉大科学仪器设备有限公司), OS-200 轨道式振荡器 (杭州奥盛仪器有限公司), TG16K 离心机 (长沙东旺实验仪器有限公司), SC-15 数控超级恒温槽 (宁波新芝生物科技股份有限公司), CHD100 切丁机 (山东银鹰炊具机械有限公司), 控制型试管研磨机 (IKA 艾卡仪器设备有限公司), MD200 氮气吹扫仪 (杭州奥盛仪器有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

采用 Design-Expert 8.05 的 Central Composite Design 中心设计响应面法优化微波萃取马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸工艺, 求得回归方程, 找到马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸萃取最优方案^[22]。

在单因素试验的基础上, 选取了对不饱和脂肪酸萃取影响显著的 4 个变量 (萃取温度、萃取时间、丙酮在正己烷溶液中的体积占比 (以下简称丙酮占比)、料液比 (萃取溶剂毫升数: 物料克数)) 为试验因素, 因素水平编码见表 1。

表 1 萃取条件的因素水平编码

Table 1 Factors and Levels of Extraction Conditions Encoding

水平 Level	因素 Factors			
	萃取温度 Extraction temperature $X_1/^\circ\text{C}$	萃取时间 Extraction time X_2/min	丙酮占比 Proportion of acetone volume X_3	料液比 Liquid-solid ratio $X_4/(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$
-2	65	10	0.00	1.5
-1	70	15	0.25	2
0	75	20	0.50	2.5
1	80	25	0.75	3
2	85	30	1.00	3.5

1.3 不饱和脂肪酸的提取

将 6.000 0±0.000 5 g 马铃薯生全粉放入微波消解罐内, 根据表 1 中 X_3 、 X_4 的参数依次加入 9~21 mL 丙酮和正己烷, 在振荡器上 180 rpm 振荡 10 min 使物料充分混合, 再放入微波消解仪中微波消解, 根据表 1 中 X_1 、 X_2 的参数进行微波萃取。待程序结束仪器冷却后将罐内溶液转移至离心管中, 3 000 r/min 离心提取不饱和脂肪酸。

1.4 不饱和脂肪酸的测定

1.4.1 甲酯化

因要分析的物质沸点较高, 进行色谱测定时, 要将

萃取出的不饱和脂肪酸转化成沸点较低而且在色谱图中峰形也较明显的不饱和脂肪酸甲酯, 本试验将萃取出的物质采用酸催化甲酯化方法 (浓硫酸: 甲醇体积比为 1: 20) 在 80 °C 水浴甲酯化 1 h。

1.4.2 标准曲线的绘制及样品测定

用内标法找出 3 种不饱和脂肪酸对应的保留时间, 绘制出标准曲线, 将所有待测样品进行气相色谱测定 (GC), 记录结果。并验证最佳萃取工艺以及标准品的回收率。标准曲线公式如下公式 (1) ~ (3)。

$$Y_{\text{亚油酸}}=418.6X_{\text{亚油酸}}-4.477 R^2=0.991 9 \quad (1)$$

$$Y_{\text{油酸}}=299.4X_{\text{油酸}}-5.214 R^2=0.991 3 \quad (2)$$

$$Y_{\alpha\text{-亚麻酸}}=542.1X_{\alpha\text{-亚麻酸}}-3.976 R^2=0.993 5 \quad (3)$$

Y 为样品中脂肪酸的色谱峰面积, X 为对应脂肪酸的质量分数, mg/g。

GC 测定采用 FID 氢火焰离子检测器, 色谱柱 HP-5 (30 m×0.32 mm×0.25 μm), 进样口温度: 200 °C, 分流比 20: 1, 检测器温度: 290 °C, 进样量 1 μL , 柱温: 初始温度 150 °C, 保持 1 min; 20 °C/min 升到 200 °C, 保持 1 min; 3 °C/min 升到 230 °C, 保持 1 min; 20 °C/min 升到 240 °C, 保持 1 min, 载气: 高纯氮气, 流量 1.2 mL/min。

2 微波萃取工艺优化结果与分析

2.1 数据及 ANOVA 分析

将甲酯化后的样品进行气相色谱分析, 查看每一组试验中不饱和脂肪酸对应的峰面积, 再利用公式 1、2、3, 将峰面积折算成不饱和脂肪酸质量分数, 并以总不饱和脂肪酸质量分数为响应值, 对萃取温度、萃取时间、丙酮占比、料液比 4 个因素进行优化。结果如下表 2、表 3 所示。

试验通过 ANOVA 分析, 结果如下表 3 所示, 模型的 P 值=0.000 1<0.01, 试验所选用的模型具有高度的显著性, 具有统计学意义, 可信度高。决定系数 $R^2=0.939 8$, 表明回归方程可以较好地描述各因素与响应值之间的真实关系。失拟项 $P=0.625 1>0.05$ 不显著, 说明拟合程度良好, 试验误差小。

利用软件中的 Optimazation-Numerical 功能确定马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸萃取工艺的优化方案为: 萃取温度 81 °C, 萃取时间 11 min, 萃取溶剂中丙酮占比 0.802 5, 料液比 3.25: 1。通过 Optimazation- Numerical-Solutions 预测不饱和脂肪酸的质量分数为 1.084 mg/g。按照该优化方案的试验条件, 对马铃薯生全粉样品依照步骤 1.3 和 1.4 进行了 3 次实测, 取数据均值, 得出不饱和脂肪酸含量为 1.081 mg/g, 实测值和拟合方程的预测值 1.084 mg/g 基本一致。通过比较 P 值的大小 (P 值越小, 影响越显著), 可以得出各因素对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数影响大小分别为: 丙酮占比>料液比>萃取温度>萃取时间, 模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_3X_4 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 和 X_4^2 为显著因素 ($P<0.05$ 为显著, 反之则不显著), 表明各

因素对响应值的影响不是简单的线性关系,而是呈现二次函数关系,因素间存在交互作用^[23]。

表2 试验设计及响应值表
Table 2 Design scheme and results of experiment

试验号 Test number	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	总不饱和脂肪酸的 质量分数 Mass fraction of sum of unsaturated fatty acids/(mg·g ⁻¹)
1	-1	-1	-1	-1	0.707 3
2	1	-1	-1	-1	0.781 0
3	-1	1	-1	-1	0.683 4
4	1	1	-1	-1	0.745 6
5	-1	-1	1	-1	0.887 6
6	1	-1	1	-1	0.955 9
7	-1	1	1	-1	0.826 5
8	1	1	1	-1	0.904 5
9	-1	-1	-1	1	0.747 4
10	1	-1	-1	1	0.866 6
11	-1	1	-1	1	0.734 8
12	1	1	-1	1	0.819 8
13	-1	-1	1	1	0.984 3
14	1	-1	1	1	1.040 4
15	-1	1	1	1	0.953 9
16	1	1	1	1	1.002 9
17	-2	0	0	0	0.818 0
18	2	0	0	0	1.012 5
19	0	-2	0	0	0.995 6
20	0	2	0	0	0.822 2
21	0	0	-2	0	0.638 1
22	0	0	2	0	0.992 5
23	0	0	0	-2	0.760 2
24	0	0	0	2	1.040 9
25	0	0	0	0	1.034 8
26	0	0	0	0	0.968 9
27	0	0	0	0	0.991 9
28	0	0	0	0	0.942 0
29	0	0	0	0	0.990 6
30	0	0	0	0	0.931 4

2.2 自变量对响应值影响分析

经多元回归拟合后,得到马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数响应值 Y 对 X_1, X_2, X_3, X_4 的多元二次回归方程如下公式 4, 响应曲面见下图 1。

$$Y = -5.082 07 + 0.117 73 * X_1 + 0.032 533 * X_2 + 1.247 36 * X_3 + 0.419 63 * X_4 + 0.077 928 * X_3 X_4 - 7.125 37 \times 10^{-4} * X_1^2 - 7.764 84 \times 10^{-4} * X_2^2 - 0.684 74 * X_3^2 - 0.085 994 * X_4^2 \quad (4)$$

图 1a、1e 表明: 料液比对马铃薯生全粉中不饱和脂

肪酸含量影响显著, 随料液比增大呈现先增大后减小的趋势, 其原因是随着料液比的增大, 物料和溶剂的浓度差越大, 渗透压越大, 油脂越容易析出^[24]; 而料液比过大, 又会增加微波破碎细胞的阻力, 使细胞破碎程度下降, 从而降低脂肪酸得率^[25-26]; 图 1b 表明: 丙酮占比对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸含量的影响显著, 随着丙酮占比的增大呈现先增大后减小的趋势, 其原因是介电常数低的溶剂其微波萃取效果好于介电常数高的溶剂^[27-28]。选择萃取剂不仅要满足一般萃取剂的要求, 还应满足在微波中对微波透明或至少透明度远高于水的要求, 所以萃取剂的选择要在温度和透明度之间找到一个平衡点。丙酮介电常数高 (介电常数 20.70), 受微波影响而升温快, 而正己烷在达到萃取温度时的萃取效率高, 却由于介电常数小 (介电常数 1.58) 而很难达到适宜温度, 就达不到萃取效果, 所以将丙酮和正己烷混合作为萃取溶剂, 既能保证温度又能保证萃取效率^[13]; 图 1d 表明: 萃取时间对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸含量影响较小, 综合考虑能效问题, 萃取时间越短越好; 由图 1f 可知, 马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸含量随萃取温度的增大而提高, 这是因为一定的高温使马铃薯细胞破裂, 有利于细胞内部和细胞间的油脂释放出来, 而丙酮的沸点为 56 °C, 依据微波消解仪性能的要求, 萃取时为了防止压力过高, 反应温度不宜高过其沸点的 1.5 倍。

表3 回归模型的显著性检验结果
Table 3 Regression model coefficient test

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	0.38	14	16.74	<0.000 1
X ₁	0.040	1	24.6	0.000 2
X ₂	0.017	1	10.71	0.005 1
X ₃	0.20	1	120.8	<0.000 1
X ₄	0.062	1	38.53	<0.000 1
X ₁ X ₂	1.163×10 ⁻⁴	1	0.086	0.773 4
X ₁ X ₃	4.913×10 ⁻⁴	1	0.27	0.613
X ₁ X ₄	4.589×10 ⁻⁵	1	0.038	0.847 2
X ₂ X ₃	2.385×10 ⁻⁴	1	0.17	0.689 8
X ₂ X ₄	1.234×10 ⁻⁴	1	0.062	0.806 4
X ₃ X ₄	1.518×10 ⁻³	1	4.78	0.048 4
X ₁ ²	8.704×10 ⁻³	1	5.33	0.035 6
X ₂ ²	0.010	1	6.32	0.023 8
X ₃ ²	0.050	1	30.64	<0.000 1
X ₄ ²	0.013	1	7.38	0.015 9
残差 Residual	0.024	15		
失拟项 Lack of Fit	0.015	10	0.83	0.625 1
纯误差 Pure Error	9.241×10 ⁻³	5		
总和 Cor Total	0.41	29		

2.3 回收率结果

回收试验结果如下表 4, 显示标准品的回收率为 96.54%~100.85%, 证明标准品的回收率较好。

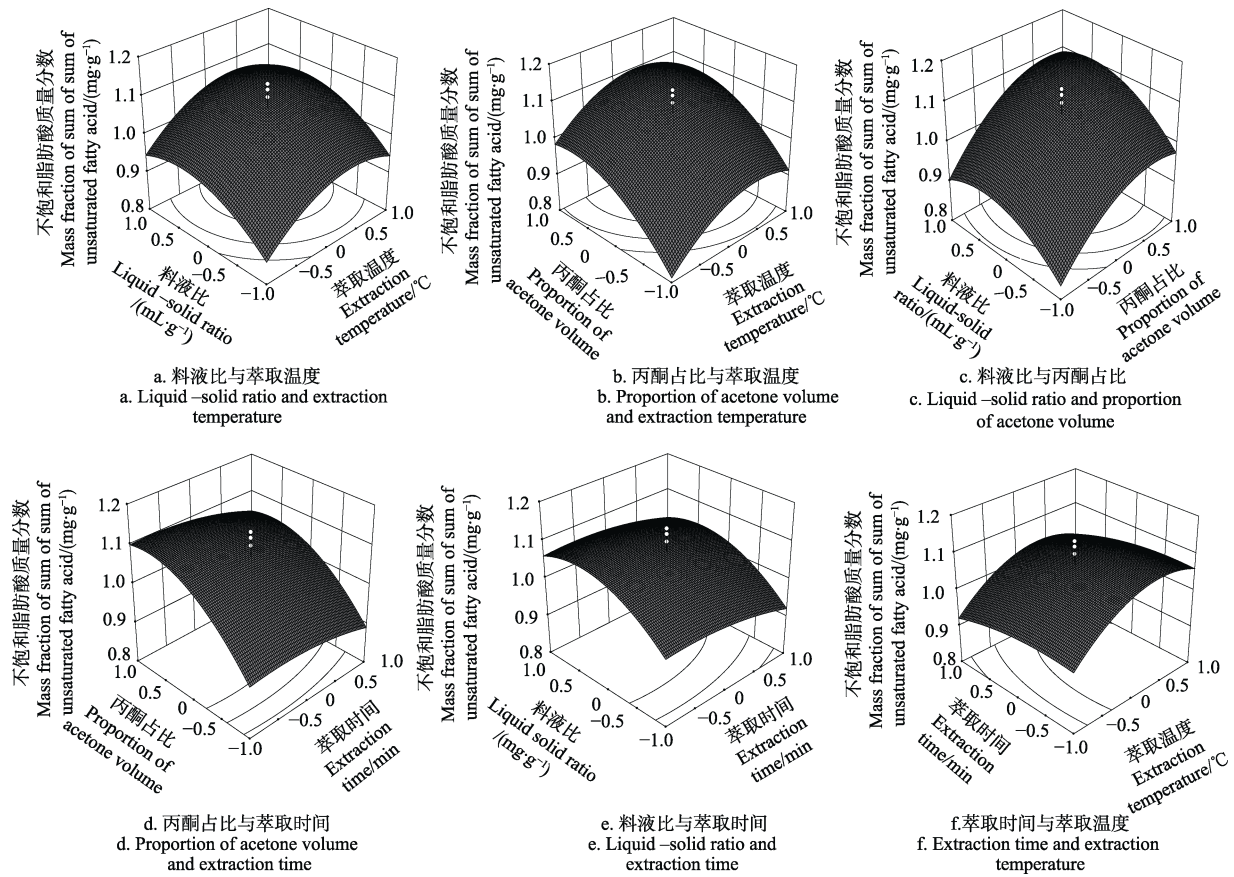


图 1 各因素对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数影响的响应面图

Fig.1 Response surface of various factor on the quality score of unsaturated fatty acids in raw potato flours

表 4 回收试验结果

Table 4 Recall experiment results

检测项目 Test Items	样品底值 Sample bottom value/(mg·g ⁻¹)	添加量 Add amount/mg	测量值 Measurements/(mg·g ⁻¹)	回收率 Recovery rate/%
亚油酸 Linoleic acid	0.586	0.163	0.752	100.85
油酸 Oleic acid	0.101	0.188	0.279	96.54
α-亚麻酸 Alpha-linolenic acid	0.07	0.173	0.245	100.82

3 优化方案应用

选定微波萃取工艺条件：萃取温度 81 °C，萃取时间 11 min，萃取溶剂中丙酮占比 0.802 5，料液比 3.25 : 1，用于分析不同的干燥温度对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸的影响。

挑选新鲜马铃薯，将护色好的马铃薯丁进行热风干燥，其他条件均恒定，选用不同的热风温度（50、60、70、80、90 °C）进行干燥，直至含水率降到 0.1 g/g（湿基）以下结束烘干并研磨成粉。利用以上得出的最优微波萃取方案把不同温度下的热风干燥烘干后的马铃薯逐个分析^[29]，绘制出每种不饱和脂肪酸对应的标准曲线得出定量结果下表 5。

由表中数据和单因素方差分析及 Duncan 多重比较分析得出：通过不同的热风干燥温度烘干得到的马铃薯生

全粉中不饱和脂肪酸含量不同，尤其是亚油酸含量随温度升高显著增加 ($P < 0.05$)，油酸和亚麻酸的含量相对于亚油酸很少，变化趋势不明显，总不饱和度随干燥温度升高显著增加 ($P < 0.05$)。引起这种变化主要有 2 个原因：一方面是脂肪分解产生甘油和脂肪酸，另一方面是脂肪酸不断地生物合成^[30]。其中合成方面，乙酰辅酶 A 从头合成棕榈酸，棕榈酸通过延长碳链形成硬脂酸，硬脂酸通过脱氢形成油酸、亚油酸和α-亚麻酸^[31-32]。就营养角度考虑，可根据干燥温度的调整改变马铃薯中脂肪酸组成，提高不饱和脂肪酸比例。

表 5 马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数试验结果

Table 5 Test results for mass fraction of unsaturated fatty acids in raw potato flours

类别 Type	温度 Temperature/°C				
	50	60	70	80	90
亚油酸 Linoleic acid	0.696±0.002	0.727±0.003	0.831±0.007	0.947±0.003	1.059±0.002
油酸 Oleic acid	0.277±0.002	0.291±0.002	0.298±0.009	0.320±0.002	0.412±0.001
α-亚麻酸 Alpha-linolenic acid	0.083±0.002	0.086±0.003	0.091±0.004	0.090±0.002	0.092±0.002
总不饱和脂肪酸 Sum of unsaturated fatty acids	1.056±0.002	1.104±0.005	1.220±0.011	1.357±0.006	1.563±0.004

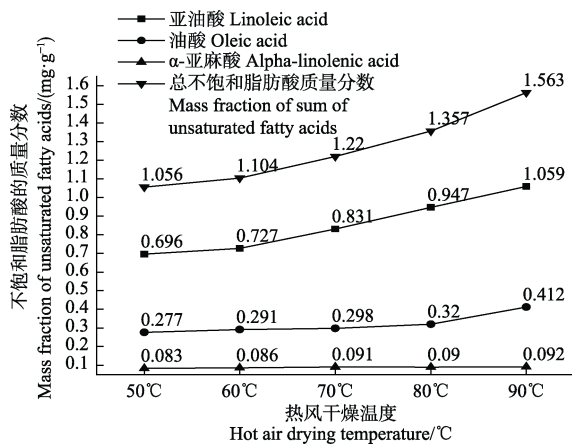


图2 马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数随热风干燥温度的变化趋势图

Fig.2 Changes in quality score of unsaturated fatty acids in raw potato flours with hot air drying temperature

5 结论

1) 通过 Design-Expert 8.05 和响应面法分析结果表明模型 $P=0.0001 < 0.01$, $R^2=0.9398$, 具有高度显著性。失拟项 $P=0.6251 > 0.05$ 不显著, 说明拟合程度良好, 试验误差小。

2) 根据模型确定马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸最佳萃取工艺条件为: 萃取温度 81°C , 萃取时间 11 min, 萃取溶剂中丙酮占比 0.8025, 料液比 3.25:1。各因素对马铃薯生全粉中不饱和脂肪酸质量分数影响大小分别为: 丙酮占比 > 料液比 > 萃取温度 > 萃取时间。预测不饱和脂肪酸质量分数响应值为 1.084 mg/g , 实测不饱和脂肪酸质量分数响应值为 1.081 mg/g 。回收率在 $96.54\% \sim 100.85\%$, 证明标准品的回收率较好。

3) 把优化后的萃取方案应用在热风干燥温度对马铃薯生全粉不饱和脂肪酸含量影响的分析中, 结果表明随着干燥温度升高, 不饱和脂肪酸含量增加 ($P < 0.05$), 其中亚油酸含量显著增加 ($P < 0.05$)。一方面可能是高温引起脂肪的氧化分解生成甘油和脂肪酸, 另一方面是脂肪酸通过乙酰辅酶 A 不断地进行生物合成。

[参 考 文 献]

- [1] Liu P, Sun S, Hou H, et al. Effects of fatty acids with different degree of unsaturation on properties of sweet potato starch-based films[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61(10): 351–357.
- [2] Wu Z G, Xu H Y, Ma Q, et al. Isolation, identification and quantification of unsaturated fatty acids, amides, phenolic compounds and glycoalkaloids from potato peel[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2425–2429.
- [3] 柴玉华, 谭克竹. 基于近红外分析技术检测大豆脂肪酸含量的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 238–241. Chai Yuhua, Tan Kezhu. Measurement of soybean fatty acid content by near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the

Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(1): 238–241. (in Chinese with English abstract)

- [4] 焦中高, 吕真真, 刘杰超. 苦杏仁去皮热风干燥适宜温度提高油脂品质[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 262–268. Jiao Zhonggao, Lu Zhenzhen, Liu Jiechao, Zhang Chunling, Liu Hui, Yang Wenbo, Wang Sixin. Suitable hot air drying temperature improving quality of apricot kernel oil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 262–268. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张玉荣, 周显青. 热风 and 真空干燥玉米的品质评价与指标筛选[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 346–352. Zhang Yurong, Zhou Xianqing. Quality evaluation and parameter selection of maize by hot-air and vacuum drying[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 346–352. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王萍, 张银波, 江木兰. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 中国油脂, 2008, 33(12): 42–46. Wang Ping, Zhang Yinbo, Jiang Mulan. Research advance in polyunsaturated fatty acid[J]. China Oils & Fats, 2008, 33(12): 42–46. (in Chinese with English abstract)
- [7] Rapoport S I, Rao J S, Igarashi M. Brain metabolism of nutritionally essential polyunsaturated fatty acids depends on both the diet and the liver[J]. Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids, 2007, 77(5–6): 251–261.
- [8] Erkkil A A, De-Mello V D F, Riserus U, et al. Dietary fatty acids and cardiovascular disease: An epidemiological approach[J]. Progress in Lipid Research, 2008, 47(3): 172–187.
- [9] 李核, 李攻科, 张展霞. 微波辅助萃取技术的进展[J]. 分析化学, 2003, 31(10): 1261–1268. Li He, Li Gongke, Zhang Zhanxia. Development of microwave assisted extraction[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2003, 31(10): 1261–1268. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈虹, 张承红. 超临界流体萃取及其在我国的研究应用进展[J]. 化学进展, 1999, 11(3): 227–228. Chen Hong, Zhang Chenhong. progress in research and applications of supercritical fluid extraction in china[J]. Progress in Chemistry, 1999, 11(3): 227–228. (in Chinese with English abstract)
- [11] Bai X L, Yue T L, Yuan Y H, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from apple pomace using response surface methodology and HPLC analysis[J]. Journal of Separation Science, 2015, 33(23–24): 3751–3758.

- [12] 骆健美, 卢学英, 张敏卿. 微波萃取技术及其应用[J]. 化工进展, 2001, 20(12): 46—49.
Luo Jianmei, Lu Xueying, Zhang Minqing. microwave aided extraction technique and its application[J]. Chemical Industry & Engineering Progress, 2001, 20(12): 46—49. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘川生, 王平, 王立飞等. 微波萃取技术在天然药物提取中的研究进展[J]. 中国天然药物, 2003, 1(3): 187—192.
Liu Chuansheng, Wang Ping, Wang Lifei, et al. Research and development on the microwave extraction technique in natural resources medicine[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2003, 1(3): 187—192. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张豪, 乙引, 洪鲲, 等. 响应面法优化酶促脂肪酸甲酯化工艺条件[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 125—130.
Zhang Hao, Yi Yin, Hong Kun, et al. Optimization of lipase-catalyzed methyl esterification of fatty acids by response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 125—130. (in Chinese with English abstract)
- [15] 易军鹏, 朱文学, 马海乐等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 103—110.
Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *Paeonia suffruticosa* Andr. seeds with response surface analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 103—110. (in Chinese with English abstract)
- [16] Huang P, Xie M Y, Nie S P, et al. Study on microwave-assisted extraction of polysaccharides from spores of *ganoderma atrum* with response surface analysis[J]. Food Science, 2007, 28(10): 200—203.
- [17] 杨炳南, 张小燕, 赵凤敏等. 不同马铃薯品种的不同加工产品适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 301—308.
Yang Bingnan, Zhang Xiaoyan, Zhao Fengmin, et al. Suitability evaluation of different potato cultivars for processing products[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 301—308. (in Chinese with English abstract)
- [18] Shi X Q, Chang K C, Schwarz J G, et al. Optimizing pectin extraction from sunflower heads by alkaline washing[J]. Bioresource Technology, 1996, 58(3): 291—297.
- [19] 林建原, 季丽红. 响应面优化银杏叶中黄酮的提取工艺[J]. 中国食品学报, 2013, 13(2): 83—90.
- [20] 任国艳, 詹永献, 郭金英等. 响应面优化草鱼鱼鳔酶溶胶原蛋白的提取工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 154—157.
- [21] Thys R S, Guzzon S O, Brandelli A. Optimization of protease production by *Microbacterium* sp. in feather meal using response surface methodology[J]. Process Biochemistry, 2006, 41(1): 67—73.
- [22] 张雯雯, 张弘, 郑华, 等. 余甘子核仁油的微波辅助萃取工艺优化及脂肪酸组成分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 13—18.
Zhang Wenwen, Zhang Hong, Zheng Hua, et al. Microwave-assisted extraction and fatty acid composition analysis of oil from *phyllanthus emblica* L. Seeds[J]. Food Science, 2013, 34(20): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [23] Myers R H, Montgomery D C. Response Surface Methodology: Process and Product in Optimization Using Designed Experiments[M]. USA. John-wiley, 2009, 59(3): 284—286.
- [24] 张佰清, 李龙杰, 张艳艳. 响应面法优化微波辅助提取树莓籽油工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(4): 92—96.
- [25] 李攻科, 杜甫佑, 肖小华. 微波辅助萃取技术在中药现代化中的应用[J]. 精细化工, 2007, 24(12): 1184—1191.
Li Gongke, Du Fuyou, Xiao Xiaohua. Application of microwave-assisted extraction in the modernization of chinese traditional medicine[J]. Fine Chemicals, 2007, 24(12): 1184—1191. (in Chinese with English abstract)
- [26] Li Y, Chen X, Yan Y, et al. Optimal extraction technology of polysaccharides from red kidney bean using ultrasonic assistant with enzyme[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 293—301.
- [27] Du S. Extracting job's-tears seed oil from semen coicis with microwave-assisted extraction[J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2006, 21(2): 79—81.
- [28] Ghasemzadeh A, Jaafar H Z E, Rahmat A, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of zerumbone from *Zingiber zerumbet* L. rhizome and evaluation of antiproliferative activity of optimized extracts[J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 5—15.
- [29] Liu Z, Wang J, Zhang Z. Effects of different hot-air drying temperature on drying characteristics and quality of scallops[J]. Food Industry, 2012, 15 (8) : 37—40.
- [30] Slocombe S P, Cornah J, Pinfieldwells H, et al. Oil accumulation in leaves directed by modification of fatty acid breakdown and lipid synthesis pathways. [J]. Plant Biotechnology Journal, 2010, 7(7): 694—703.
- [31] Slabas A R, Fawcett T. The biochemistry and molecular biology of plant lipid biosynthesis[J]. Plant Molecular Biology, 1992, 19(1): 169—191.
- [32] Li Yonghua, Beisson F, Riekhof W. Metabolism of acyl lipids in *chlamydomonas reinhardtii*[J]. Plant Journal, 2015, 82(3): 504—522.

Optimization of microwave-assisted extraction parameter for unsaturated fatty acids in raw potato flours and its application

Wu Wenfu¹, Chen Junyi¹, Cheng Rongmin^{2*}, Bi Hongda³

(1. College of Biology and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China; 3. College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

Abstract: In 2015, the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China formally put forward the strategy of using potatoes as the staple food. Potato is one of the most productive crops in China. However, fresh potato is easy to go moldy in storage. Fatty acid is an important component for quality of food. Most of the fatty acid in potato is unsaturated fatty acid which is the necessary nutrient of the human body and has an important physiological function. In this research, we have conducted an orthogonal experiment to determine extraction temperature, extraction time, the proportion of acetone and the solid-liquid ratio for microwave-assisted extraction of unsaturated fatty acid from raw potato flours. The content of unsaturated fatty acid in each group of experiment was tested by the gas chromatographic method. After all the data were acquired, the microwave-assisted extraction process of the unsaturated fatty acid in the raw potato flours was optimized by virtue of Design-Expert 8.05 Analysis and Response Surface Method. Then the optimized program was used for studying the influence of the hot air drying temperature on the content of unsaturated fatty acid of potato. The results allowed us to develop the extraction model ($P=0.0001 < 0.01$, $R^2=0.9398$) of unsaturated fatty acids in raw potato flours. By use of the model, the optimum extraction technology of unsaturated fatty acids in raw potato flours was obtained and they were, the extraction temperature was 81 °C, the extraction time was 11 min, the volume ratio of acetone in the extraction solvent was 0.8025, and the solid-liquid ratio was 3.25:1. The effects of various factors on the content of the unsaturated fatty acids were as follows: the volume ratio of acetone > the solid-liquid ratio > the extraction temperature > the extraction time, and the predicted value of the content of unsaturated fatty acid in the raw potato flours was 1.084 mg/mL. After getting the average value from three replicated tests for the optimal extraction process, the actual value of the content of the unsaturated fatty acid in the raw potato flours was 1.081 mg/g, which confirmed the predicted response value. In the application of optimization scheme, the drying of raw potato flours was operated by making use of different temperature (50, 60, 70, 80 and 90 °C), and the determination showed that, with the increase of the drying temperature, the content of total unsaturated fatty acids had been increased ($P < 0.05$), therein, the content of linoleic acids had also been increased significantly ($P < 0.05$), and the content of oleic acids and linolenic acids had been also increased, which has been not increased significantly by comparing with the content of linoleic acids. Such change can be attributed to two reasons: on the one hand, the lipolysis had produced the glycerol and fatty acid, on the other hand, the fatty acid has constantly been biosynthesized. Through the research on the influence of hot air drying temperature on the quality of raw potato flours, the optimal hot air drying temperature was obtained according to the index of content of unsaturated fatty acid to realize the optimal quality of raw potato flours after drying so as to promote the strategy of taking potato as the staple food.

Keywords: microwave; partition; optimization; response surface; raw potato flours; unsaturated fatty acid; methyl esterification.

Copyright of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering is the property of Chinese Society of Agricultural Engineering and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.