

## 层次分析法多指标评价优选柠檬真空干燥工艺

徐磊<sup>1,2,3</sup>, 崔秀明<sup>1,2,3</sup>, 熊吟<sup>1,2,3</sup>, 杨野<sup>1,2,3</sup>, 曲媛<sup>1,2,3</sup>, 王承潇<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 昆明理工大学生命科学与技术学院, 云南昆明 650500; 2. 国家中医药管理局三七资源可持续发展利用重点实验室, 云南昆明 650500; 3. 云南省三七资源可持续发展利用重点实验室, 云南昆明 650500)

**摘要** [目的] 优选柠檬真空干燥最佳工艺。[方法] 以新鲜柠檬为原料, 采用单因素试验和正交试验, 以总黄酮、总酚、维生素 C 及柠檬香精油为指标, 采用层次分析法考察真空干燥温度、真空度和柠檬片厚度对真空干燥工艺的影响, 优选柠檬有效成分的真空干燥工艺。[结果] 柠檬真空干燥最优工艺条件为温度 70 ℃、真空压 0.06 MPa、切片厚度 4 mm。按该工艺条件进行 3 组平行试验, 结果显示各指标含量分别为香精油 (5.40 ± 0.20) μg/g, 维生素 C 为 (598.90 ± 12.60) μg/g, 总黄酮为 (11.46 ± 0.17) mg/g, 总酚为 (19.07 ± 0.11) mg/g, 与理论值相符。[结论] 优选的干燥工艺条件下加工的柠檬片产品外观更佳, 且其营养价值更高。

**关键词** 柠檬; 营养成分; 真空干燥; 层次分析法; 多指标评价

中图分类号 S-03 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)07-0013-05

## Multi-index Evaluation of Ultrasonic Extraction Techniques Optimization of Lemon by Analytic Hierarchy Process

XU Lei<sup>1,2,3</sup>, CUI Xiu-ming<sup>1,2,3</sup>, XIONG Yin<sup>1,2,3</sup> et al (1. College of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500; 2. The Key Laboratory for Sustainable Development and Utilization of Pseudo-ginseng Resources, State Administration of Traditional Chinese Medicine of the People's Republic of China, Kunming, Yunnan 650500; 3. Yunnan Province Key Laboratory for Sustainable Development and Utilization of Pseudo-ginseng Resources, Kunming, Yunnan 650500)

**Abstract** [Objective] The aim was to optimize the vacuum drying condition for lemon. [Method] Fresh lemon was used as raw material and single factor orthogonal experiment was employed. AHP (Analytical Hierarchy Process) method was used to investigate the effects of drying process (vacuum drying temperature, vacuum degree and slice thickness) on the multiple indexes of flavonoids, total phenol, vitamin C and lemon essential oil. [Result] The optimum extraction process conditions was temperature of 70 ℃, vacuum pressure of 0.06 MPa, and slice thickness of 4 mm. Parallel experiments showed that the index of content was as followed: lemon essential oil (5.40 ± 0.20) μg/g, vitamin C (598.90 ± 12.60) μg/g; total flavonoids (11.46 ± 0.17) mg/g; total phenol (19.07 ± 0.11) mg/g, which were corresponded to the theoretical value. [Conclusion] The optimization of drying process was stable and feasible.

**Key words** Lemon; Nutrition; Vacuum drying; The AHP method; Multi-index evaluation

柠檬是芸香科柑橘属的常绿小乔木, 富含维生素 C、维生素 B<sub>1</sub>、维生素 B<sub>2</sub>、柠檬酸、苹果酸、柠檬烯及钙、磷、铁等多种微量元素<sup>[1]</sup>, 具有极高的营养价值和药用价值。近年来, 干制柠檬片受到众多消费者的青睐, 但目前市场上销售的柠檬片多通过烘干或晒干法加工, 产品不但出现干缩、变形及褐变现象, 维生素等多种热敏性成分含量也大大降低。而真空干燥由于在真空负压条件下进行, 不仅能使水的沸点降低, 使柠檬干燥所需要的温度降低, 保护了一些挥发性和热敏性成分; 还能减少物料与空气的接触机会, 能避免污染和氧化变质, 大大增加其商品价值, 还能降低能耗<sup>[2]</sup>。而且近年来对柠檬干燥工艺的研究, 往往只是以柠檬单一有效成分如总黄酮、柠檬精油<sup>[3]</sup>、维生素 C<sup>[4]</sup> 等来评价柠檬干燥工艺, 以单一有效成分优化的工艺条件并不能使低温真空干燥柠檬的价值达到最高。

层次分析法 (AHP)<sup>[5]</sup> 是美国著名运筹学家 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初提出的一种多指标权重决策分析方法, 能够有效地将决策者的判断推理与实际相结合, 对所有因素相对于上一级的总目标按重要性进行加权。其基本思想与中药不同有效成分对中药发挥疗效及质量评价的不同重要性相同。顾志荣等<sup>[6]</sup> 用 AHP 和 BPNN 结合模型优化当

归烟熏加工工艺; 李慧等<sup>[7]</sup> 利用层次分析法结合多指标正交试验优选酒炖女贞子炮制工艺; 牛广俊等<sup>[8]</sup> 用层次分析法多指标评价优选金花茶超声提取工艺; 杨铭等<sup>[9]</sup> 用层次分析法结合 CRITIC 法研究复方自身清颗粒提取工艺; 石振武等<sup>[10]</sup> 则详细介绍了如何运用层次分析法来确定指标的权重系数。这表明层次分析法在中药等加工评价中起到了至关重要的作用, 将这种方法运用到食品加工多指标评价中, 对食品加工综合评价也能得到较好的应用。笔者以新鲜柠檬为原料, 系统地研究了真空干燥温度、真空度及柠檬片厚度对柠檬片真空干燥特性和理化品质的影响, 主要考察指标包括总黄酮<sup>[11]</sup>、总酚<sup>[12]</sup>、柠檬香精油<sup>[13-14]</sup> 及维生素 C<sup>[15]</sup>, 以层次分析法多指标评价确定柠檬真空干燥最优工艺条件。

## 1 材料与方法

**1.1 材料** 新鲜柠檬购自云南省昆明市水果市场; 福林酚、没食子酸、芦丁、甲醇、无水乙醇、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠等 (分析纯), 购自云南泽浩商贸有限公司。

**1.2 仪器** HWS24 型电热恒温水浴锅 (上海一恒科学仪器有限公司), QY 切片机 (浙江温州顶历医疗器械有限公司), DZF-6020 型真空干燥箱 (上海博迅实业有限公司医疗设备厂), TDZ5-WS 离心机 (湖南湘仪实验室仪器开发有限公司), RE-5205 旋转蒸发器 (上海亚荣生化仪器厂), 电子天平 (上海浦春计量仪器有限公司), DGG-9123AD 型电热恒温鼓风干燥箱 (上海森信实验仪器有限公司), BL10-250A 超声波清洗机 (上海比朗仪器有限公司), UV-2600 紫外-可见分光光度计 (日本岛津公司)。

**基金项目** 云南省科技计划项目 (2015RA080); 昆明理工大学分析测试基金项目 (2017M20152218001)。**作者简介** 徐磊 (1992—), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 研究方向: 中药研究与开发。\* 通讯作者, 讲师, 博士, 从事中药外用制剂研究。**收稿日期** 2017-08-25

### 1.3 方法

**1.3.1 工艺流程。**柠檬清洗→晾干表面水分→切片→称重→均匀平铺于物料盘上→真空干燥。操作要点:柠檬初始含水量采用 GB 50093—2010 法进行测定,3 组平行试验的湿基含水量分别为 89.5%、91.1%、91.1%,故取平均含水量为 90.57%。在试验中不断观察柠檬片干燥情况,当柠檬片干燥至含水率 10%<sup>[16]</sup>时停止干燥。

**1.3.2 单因素考察。**从真空干燥温度、真空度和柠檬片厚度 3 个方面对柠檬进行了单因素试验考察,试验条件见表 1。

表 1 柠檬真空干燥工艺单因素考察试验设计

Table 1 The design table for lemon vacuum drying process of single factor experiment

水平 Level	因素 Factor		
	温度 Temperature// °C	真空度 Vacuum pressure//MPa	切片厚度 Slice thick- ness//mm
1	50	0.05	2
2	60	0.06	3
3	70	0.07	4
4	80	0.08	5

**1.3.3 正交试验优化设计。**在单因素试验考察的基础上,以 Central-composite 试验设计原理,综合单因素试验结果,采用 3 因素 3 水平的正交分析方法<sup>[17]</sup>优化柠檬真空干燥工艺。

**1.3.4 指标测定。**

**1.3.4.1 总黄酮含量测定。**取 1 g 干燥柠檬粉末,加入 200 mL 70% 乙醇溶液,浸泡 30 min,50 °C 回流提取 60 min,过滤,滤渣再加入 150 mL 70% 乙醇溶液,50 °C 回流提取 45 min,过滤。合并 2 次滤液,用旋转蒸发器浓缩至 100 mL 以内,再用 70% 乙醇定容至 100 mL,备用<sup>[18]</sup>。以芦丁作标准品,采用  $\text{NaNO}_2 - \text{Al}(\text{NO}_3)_3 - \text{NaOH}$  方法,在 500 nm 波长处以 70% 乙醇空白试剂为参比测定吸光度。

**1.3.4.2 总酚含量测定。**称取 1 g 干燥柠檬粉末,加入 20 mL 95% 甲醇溶液,于 30 °C、250 W 条件下超声提取 30 min,4 °C、10 000 r/min 离心 10 min,取上清液,滤渣再加入 20 mL 95% 甲醇溶液,重复上述步骤,合并滤液,用 95% 甲醇溶液定容至 50 mL,备用<sup>[16]</sup>。以没食子酸作标准品,采用福林-酚比色法<sup>[19]</sup>,在 765 nm 波长处以 95% 甲醇溶液为空白对照测定吸光度。

**1.3.4.3 柠檬皮精油含量测定。**称取 3 g 破碎度为 3 mm 的干燥柠檬皮,采用索氏提取法,用适量石油醚 60 °C 回流提取 30 min,比较提取前后圆底烧瓶质量差值(试验前后的圆底烧瓶在 103 °C 下烘干至恒重)<sup>[20]</sup>。

**1.3.4.4 维生素 C 含量测定。**称取 1 g 干燥柠檬粉末于研钵中,加入 10 mL 1% HCl,匀浆,转移到 50 mL 容量瓶中,定容,混匀,移至离心管中,离心 10 min,上清液即为待测柠檬提取液。以维生素 C 作为标准品,在 243.4 nm 波长处以蒸馏水为参比测定吸光度<sup>[21]</sup>。

**1.3.5 AHP 法确定柠檬真空干燥的多指标权重<sup>[22]</sup>及工艺。**

**1.3.5.1 建立评价目标树。**评价目标可以通过多指标性成

分来反映,而多指标性成分主要包括总黄酮、总酚、柠檬香精油及维生素 C 这 4 个指标,由此建立柠檬真空干燥工艺评价的目标树见图 1。

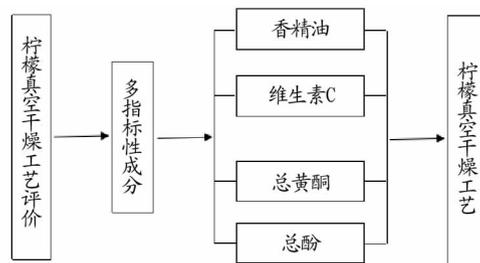


图 1 柠檬真空干燥工艺评价目标树

Fig. 1 The target tree for lemon vacuum drying process evaluation

**1.3.5.2 构成两两比较优先矩阵。**比较统一层次目标的相对重要性,并构成两两比较矩阵。目标树图各层次评分标准见表 2。目标树中 4 项目标成对比较的判断优先矩阵见表 3。

表 2 目标树图各层次评分标准

Table 2 Evaluation standard of target tree at different levels

相对重要性 Relative importance	定义 Define
1	同等重要
3	稍重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	绝对重要
2,4,6,8	以上重要性的中间值
倒数 The bottom	若 $i$ 与 $j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ , 则 $j$ 与 $i$ 的重要性之比为 $1/a_{ij}$

表 3 成对比较的判断优先矩阵

Table 3 Decision matrix of paired comparison

指标 Index	香精油 Lemon essential oil	维生素 C Vitamin C	总黄酮 Total flav- onoids	总酚 Total phenol
香精油 Lemon essential oil	1	2	3	5
维生素 C Vitamin C	1/2	1	2	3
总黄酮 Total flavonoids	1/3	1/2	1	1
总酚 Total phenol	1/5	1/3	1	1

**1.3.5.3 计算初始权重系数及归一化权重系数。**初始权重系数  $w_i'$  及归一化权重系数  $w_i$  计算公式为:

$$w_i' = \sqrt[m]{a_{i1} \times a_{i2} \cdots \times a_{im}}$$

$$w_i = w_i' / \sum_{i=1}^m w_i'$$

**1.3.5.4 权重系数随机一致性检验。**为了检验各指标权重有无逻辑性混乱,引入一致性指标 CI 进行检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}$$

式中,  $\lambda_{\max}$  为最大特征根,计算公式为:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} \times w_j / w_i \right)$$

相应的平均随机一致性指标  $RI^{[23]}$  如下:矩阵阶数为 1、2、3、4、5、6、7、8、9 时,  $RI$  分别为 0、0.58、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41 和 1.45。

当  $CR < 0.1$  时,说明各指标判断优先矩阵满足一致性要求,即求得的权重系数合理有效。

**1.3.5.5 计算指标综合评分(V)**。综合评分按如下公式计算:综合评分(V) = 香精油含量  $\times 100 \times w_1$  + 维生素 C 含量  $\times 100 \times w_2$  + 总黄酮含量  $\times 100 \times w_3$  + 总酚含量  $\times 100 \times w_4$ 。

表 4 温度对柠檬真空干燥的影响

Table 4 The influence of temperature on the vacuum drying for lemon

温度 Temperature// $^{\circ}C$	香精油 Lemon essential oil// $\mu g/g$	维生素 C Vitamin C $\mu g/g$	总黄酮 Total flavonoids mg/g	总酚 Total phenol mg/g	综合评分 Comprehensive score//分
50	3.1 $\pm$ 0.3	961.3 $\pm$ 57.8	11.19 $\pm$ 0.16	15.16 $\pm$ 1.24	335.71
60	6.3 $\pm$ 0.2	844.5 $\pm$ 32.8	10.98 $\pm$ 0.37	16.23 $\pm$ 2.28	341.19
70	5.7 $\pm$ 0.3	652.2 $\pm$ 19.4	9.79 $\pm$ 0.21	16.89 $\pm$ 0.03	298.02
80	4.0 $\pm$ 0.2	603.2 $\pm$ 17.5	10.07 $\pm$ 0.12	17.04 $\pm$ 1.24	330.94

**2.2.2 真空度对柠檬真空干燥的影响**。固定温度和切片厚度分别为 70  $^{\circ}C$ 、3 mm,由表 5 可知,柠檬真空干燥最优真空度为 0.07 MPa。

表 5 真空压对柠檬真空干燥的影响

Table 5 The influence of vacuum degree on the vacuum drying for lemon

真空压 Vacuum degree MPa	香精油 Lemon essential oil// $\mu g/g$	维生素 C Vitamin C $\mu g/g$	总黄酮 Total flavonoids mg/g	总酚 Total phenol mg/g	综合评分 Comprehensive score//分
0.05	5.4 $\pm$ 0.4	616.6 $\pm$ 20.2	12.81 $\pm$ 0.10	16.38 $\pm$ 1.01	360.83
0.06	5.7 $\pm$ 0.3	652.2 $\pm$ 19.8	9.79 $\pm$ 0.21	16.89 $\pm$ 0.03	298.02
0.07	8.0 $\pm$ 0.5	689.1 $\pm$ 34.1	9.78 $\pm$ 0.26	20.45 $\pm$ 0.46	365.71
0.08	10.7 $\pm$ 0.3	749.1 $\pm$ 27.5	9.72 $\pm$ 0.17	17.35 $\pm$ 0.49	333.89

**2.2.3 切片厚度对柠檬真空干燥的影响**。固定温度和真空度分别为 70  $^{\circ}C$ 、0.06 MPa,由表 6 可知,柠檬真空干燥最优切片厚度为 4 mm。

表 6 切片厚度对柠檬真空干燥的影响

Table 6 The influence of thickness on the vacuum drying for lemon

切片厚度 Slice thickness mm	香精油 Lemon essential oil// $\mu g/g$	维生素 C Vitamin C $\mu g/g$	总黄酮 Total flavonoids mg/g	总酚 Total phenol mg/g	综合评分 Comprehensive score//分
2	8.4 $\pm$ 0.2	415.4 $\pm$ 18.9	9.51 $\pm$ 0.26	16.70 $\pm$ 1.24	314.96
3	5.7 $\pm$ 0.3	652.2 $\pm$ 19.8	9.79 $\pm$ 0.21	16.89 $\pm$ 0.03	298.02
4	5.4 $\pm$ 0.3	605.1 $\pm$ 20.8	11.69 $\pm$ 0.17	19.00 $\pm$ 0.20	374.27
5	4.7 $\pm$ 0.1	550.7 $\pm$ 10.3	12.30 $\pm$ 0.08	19.16 $\pm$ 0.25	359.19

**2.3 正交试验优化柠檬真空干燥工艺结果** 选择真空干燥温度、真空度及切片厚度作为考察因素(表 7),以柠檬总黄酮、总酚、香精油和维生素 C 作为考察指标,结合单因素考察的测试范围,采用 Minitab 16 设计正交试验优化方案。

由表 8 可知,3 个因素对柠檬真空干燥影响为  $C > A > B$ 。方差分析表明,因素 A 和 C 对柠檬真空干燥的影响具有显著性( $P < 0.05$ ),且切片厚度对其影响最大,温度次之。结合极差分析,选择  $A_3$  和  $C_2$  水平;因素 B 在试验水平范围内对其影响不显著,从材料成本和设备要求考虑,选择  $B_1$  水平。

## 2 结果与分析

**2.1 各指标权重系数** 经计算得到各指标权重系数为:  $w_1 = 0.487 2$ ,  $w_2 = 0.274 0$ ,  $w_3 = 0.133 0$ ,  $w_4 = 0.105 8$ 。而  $CR = 0.012 (< 0.1)$ ,说明求得的权重系数合理有效。

### 2.2 柠檬真空干燥的单因素试验结果

**2.2.1 温度对柠檬真空干燥的影响**。固定真空压力和切片厚度分别为 0.06 MPa、3 mm,由表 4 可知,柠檬真空干燥最优温度为 60  $^{\circ}C$ 。

表 7 柠檬真空干燥正交试验因素与水平

Table 7 The factors and levels for lemon vacuum drying orthogonal analysis

水平 Level	温度(A) Temperature $^{\circ}C$	真空压(B) Vacuum degree MPa	厚度(C) Slice thick- ness//mm
1	50	0.06	3
2	60	0.07	4
3	70	0.08	5

表 8 正交试验设计方案与结果  
Table 8 Orthogonal experiment results analysis

试验号 Test code	因素 Factors				评价指标 Evaluation index				综合评分 Compre- hensive score 分
	A	B	C	D	香精油 Lemon essential oil// $\mu\text{g/g}$	维生素 C Vitamin C $\mu\text{g/g}$	总黄酮 Total flavonoids $\text{mg/g}$	总酚 Total phenol $\text{mg/g}$	
1	1	1	1	1	$3.1 \pm 0.3$	$961.3 \pm 57.8$	$11.19 \pm 0.16$	$15.16 \pm 1.24$	335.71
2	1	2	2	2	$4.8 \pm 0.2$	$972.1 \pm 49.6$	$10.98 \pm 0.13$	$18.36 \pm 1.87$	367.15
3	1	3	3	3	$5.9 \pm 0.3$	$873.5 \pm 42.1$	$10.27 \pm 0.15$	$16.38 \pm 1.19$	334.11
4	2	1	2	3	$2.9 \pm 0.1$	$923.1 \pm 48.6$	$12.18 \pm 0.19$	$17.23 \pm 1.74$	369.72
5	2	2	3	1	$6.3 \pm 0.3$	$802.3 \pm 40.8$	$9.21 \pm 0.11$	$19.76 \pm 1.56$	353.84
6	2	3	1	2	$7.2 \pm 0.4$	$687.4 \pm 39.6$	$9.73 \pm 0.16$	$17.57 \pm 1.82$	334.49
7	3	1	3	2	$4.7 \pm 0.2$	$550.7 \pm 33.7$	$12.30 \pm 0.12$	$19.16 \pm 1.52$	359.19
8	3	2	1	3	$8.0 \pm 0.3$	$689.1 \pm 40.5$	$9.78 \pm 0.13$	$20.45 \pm 1.88$	365.71
9	3	3	2	1	$9.7 \pm 0.5$	$692.3 \pm 38.7$	$11.54 \pm 0.17$	$20.12 \pm 1.79$	385.79
$k_1$	345.7	354.9	345.3	358.4					
$k_2$	352.7	362.2	374.2	353.6					
$k_3$	370.2	351.5	349.0	356.5					
R	24.6	10.8	28.9	4.8					

故确定柠檬真空干燥最佳工艺为  $A_3B_1C_2$ , 即温度  $70^\circ\text{C}$ , 真空压  $0.06\text{ MPa}$ , 切片厚度  $4\text{ mm}$ 。为了验证最优工艺的可行性, 按优选的最优工艺条件再次进行 3 次平行试验。结果表明: 香精油含量为  $(5.4 \pm 0.2)\ \mu\text{g/g}$ ; 维生素 C 为  $(598.9 \pm 12.6)\ \mu\text{g/g}$ ; 总黄酮为  $(11.46 \pm 0.18)\ \text{mg/g}$ ; 总酚为  $(19.07 \pm 0.11)\ \text{mg/g}$ 。该结果与正交试验结果吻合, 证明优选的工艺条件稳定、可行。

**2.4 柠檬真空干燥与热风干燥样品外观和含量比较** 采用温度  $70^\circ\text{C}$ 、切片厚度  $4\text{ mm}$  条件对柠檬样品进行热风干燥处理, 测定干燥样品 4 种组分含量: 香精油为  $(8.1 \pm 0.2)\ \mu\text{g/g}$ ; 维生素 C 为  $(389.6 \pm 10.8)\ \mu\text{g/g}$ ; 总黄酮为  $(12.75 \pm 0.09)\ \text{mg/g}$ ; 总酚为  $(13.81 \pm 0.05)\ \text{mg/g}$ 。按上述综合评分为  $326.75$ , 显著低于真空干燥。柠檬真空干燥和热风干燥样品横切和纵切面见图 2、3。



横切面



纵切面

图 2 柠檬真空干燥

Fig.2 The vacuum drying for lemon



横切面



纵切面

图 3 柠檬热风干燥

Fig.3 The hot air drying for lemon

由图 2、3 可知,与真空干燥相比,相同条件下,采用热风干燥的柠檬由于直接暴露在空气环境中,被氧化而导致褐变更严重,加工的柠檬片颜色更深。而且其细胞结构受损严重,产品表面发生严重变形,柠檬片体重收缩较大。故与热风干燥相比,采用真空干燥加工的柠檬片具有更好的产品外观,商业价值更高。

### 3 结论与讨论

烘干法加工的柠檬,产品外表不但出现干缩、变形及褐变现象,且维生素等多种热敏性成分含量也大大降低。该研究表明,采用真空干燥工艺,可有效避免变形、褐变<sup>[24]</sup>等问题,同时大幅保留了柠檬中有效成分含量,能够很好地替代传统干燥方式,适合工业及商品需求<sup>[25]</sup>。

层次分析法是一种多指标多准则评价方法,它将一个大的评估目标分解为一个多级指标,对于每级中各因素的相对重要性给出判断。其优点在于能够综合考虑评价体系中各指标重要性而使各指标权重系数趋于合理,从而对评估目标进行合理评价。

试验以柠檬中的主要活性成分总黄酮、总酚、柠檬香精油及维生素 C 为考察指标,采用层次分析法结合正交试验,对柠檬真空干燥工艺,如干燥温度、真空压、切片厚度进行了系统的考察和优化。在单因素试验中,真空干燥温度对所考察的 4 种有效成分的影响结果表明,随着温度升高,香精油和维生素 C 的含量基本呈降低的趋势。柠檬香精油的主要成分为柠檬烯和柠檬醛,同维生素 C 一样均为易氧化和易挥发性成分,故其含量都随真空干燥温度的升高而逐渐降低;而黄酮类成分对热的稳定性较差,其含量随温度升高而降低;总酚含量随温度升高基本呈增加的趋势,一方面可能是由于温度相对升高使多酚氧化酶活性降低,另一方面可能是由于高温会打破高聚物间的共价键,促使结合态的总酚转变为游离态,更易释放<sup>[16]</sup>。真空干燥压力对其影响结果表明,随着真空压增大,香精油和维生素 C 的含量逐渐增大,是由于真空度越高,易氧化成分越不易被氧化;真空度越高,热不稳定性成分相同温度下更不稳定,所以其总黄酮含量随真空度升高而降低;真空度对总酚含量变化的影响基本同温度。切片厚度对其影响结果表明,香精油和维生素 C 等易氧化、易挥发性成分含量随切片厚度增大而呈降低的趋势,而总黄酮和总酚含量随切片厚度增大而升高。研究表明,在温度 70 ℃、真空压 0.06 MPa、切片厚度 4 mm 的条件下,柠檬片中活性成分含量较高,且显著高于常规干燥产品。该研究表明,采用多指标加权评价法,可对柠檬的干燥工艺做出全面和完整的评估,在很大程度上规避了单指标考察的局限性和

片面性,是一种合理和精准的食品加工工艺研究方法。

### 参考文献

- [1] 谢振文,张帮奎,徐雪令,等.真空冷冻干燥柠檬片工艺参数优化研究[J].食品与发酵科技,2010,46(3):51-54.
- [2] 刘勇献,苏娅.高水分玉米低温真空干燥新技术研究及应用[J].粮食储藏,2006,35(6):20-23.
- [3] 高俊燕,朱春华,李进学,等.柠檬加工综合利用的研究进展[J].亚热带农业研究,2009,5(1):64-68.
- [4] 常婷婷,张欣,熊伟成,等.柠檬片热风干燥工艺参数优化[J].农产品加工·学刊,2013(8):34-37.
- [5] AHN B S. The analytic hierarchy process with interval preference statements[J]. Omega,2017,67:177-185.
- [6] 顾志荣,潘新波,王亚丽,等.基于 AHP 和 BPNN 结合模型优化当归烟熏加工工艺[J].中国新药杂志,2014(22):2664-2670.
- [7] 李慧,刘其南,张丽,等.基于层次分析法及多指标正交试验优选酒炖女贞子炮制工艺[J].中草药,2016,47(16):2832-2837.
- [8] 牛广俊,陈清英,朱思,等.用层次分析法多指标评价优选金花茶超声提取工艺[J].经济林研究,2015(1):119-122.
- [9] 杨铭,周昕,谢瑞芳,等.用层次分析法结合 CRITIC 法研究复方自身清颗粒提取工艺的多指标权重[J].药学服务与研究,2009,9(1):36-39.
- [10] 石振武,赵敏.运用层次分析法确定指标的权重[J].科技和产业,2008,8(2):23-25.
- [11] 于玉涵.柠檬中黄酮类化合物和辛弗林的检测和含量特征分析[D].重庆:西南大学,2011.
- [12] CIE SLIK E, GREDA A, ADAMUS W. Contents of polyphenols in fruit and vegetables[J]. Food chemistry,2006,94(1):135-142.
- [13] ABOELHADID S M, MAHROUS L N, HASHEM S A, et al. In vitro and in vivo effect of *Citrus limon* essential oil against sarcoptic mange in rabbits[J]. Parasitology research,2016,115:3013-3020.
- [14] BABA E, ACAR Ü, ÖNTAS C, et al. Evaluation of *Citrus limon* peels essential oil on growth performance, immune response of Mozambique tilapia *Oreochromis mossambicus* challenged with *Edwardsiella tarda*[J]. Aquaculture,2016,465:13-18.
- [15] 刘义武,王碧.柠檬营养成分与综合利用研究进展[J].内江师范学院学报,2012,27(8):46-51.
- [16] 王蓉蓉,丁胜华,李高阳,等.柠檬片热风干燥特性及品质研究[J].食品科技,2016(5):48-53.
- [17] ŠUMIĆ Z, VAKULA A, TEPIĆ A, et al. Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM)[J]. Food chemistry,2016,203:465-475.
- [18] 刘斌,石任兵,王伟.蒲黄总黄酮提取方法研究[J].中成药,2002,24(2):88-90.
- [19] 曹艳萍,代宏哲,曹炜,等. Folin-Ciocalteu 比色法测定红枣总酚[J].安徽农业科学,2008,36(4):1299-1302.
- [20] 孙绪兵,沈庆.柠檬皮中香精油溶剂浸提工艺优化[J].湖北农业科学,2013,52(16):3920-3921.
- [21] 郑京平.水果、蔬菜中维生素 C 含量的测定——紫外分光光度快速测定方法探讨[J].光谱实验室,2006,23(4):731-735.
- [22] 王晖,陈丽,陈垦,等.多指标综合评价方法及权重系数的选择[J].广东药学院学报,2007,23(5):583-589.
- [23] 任爱农,卢爱玲,田耀洲,等.层次分析法用于中药复方提取工艺的多指标权重研究[J].中国中药杂志,2008,33(4):372-374.
- [24] MICHALSKA A, WOJDYŃO A, LECH K, et al. Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies[J]. Food chemistry,2016,207:223-232.
- [25] DA SILVA G D, BARROS Z M P, DE MEDEIROS R A B, et al. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum[J]. LWT-Food Science and Technology,2016,74:114-119.

## 科技论文写作规范——结果

利用图、表及文字进行合乎逻辑的分析。务求精练通顺。不需在文字上重复图或表中所具有的数据,只需强调或阐述其重要发现及趋势。