

## 干燥方式对菊苣叶多酚含量和抗氧化活性的影响

尚红梅 王雪昭 潘丹 杨忠富 马培东 吴成扬

(吉林农业大学 动物科学技术学院, 长春 130118)

**摘要** 为研究不同干燥方式对菊苣(*Cichorium intybus* L.)叶多酚含量及抗氧化活性的影响,通过测定阴干、冻干和不同温度热风干燥处理过程中菊苣叶多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)活性变化、干燥叶中黄酮和总酚含量,以及多酚提取液 DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力,确定菊苣叶最佳干燥方法。结果表明:1)经不同干燥方式干制的菊苣叶多酚含量差异很大,可能是干燥过程中剩余 PPO 活性和酚热敏性 2 个因素综合作用的结果;2)综合考虑黄酮、总酚含量 2 项指标,60 °C 热风干燥最优,冻干次之,阴干最差;3)菊苣叶的 DPPH 自由基、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力 3 项抗氧化指标与黄酮含量和总酚含量均呈显著正相关( $R^2 \geq 0.888$ ,  $P < 0.05$ )。为保留菊苣叶干燥样品中较高的多酚含量和抗氧化活性,建议采用 60 °C 热风干燥法干制菊苣叶。

**关键词** 菊苣;叶;干燥方式;多酚;抗氧化活性

中图分类号 S 609<sup>+</sup>.2

文章编号 1007-4333(2015)01-0096-07

文献标志码 A

## Effects of drying methods on the polyphenol content and antioxidant activities of chicory leaf

SHANG Hong-mei, WANG Xue-zhao, PAN Dan, YANG Zhong-fu, MA Pei-dong, WU Cheng-yang

(College of Animal Science and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract** The study was aimed to investigate the impacts of different drying methods on the polyphenol content and antioxidant activities of chicory leaf. The change of polyphenol oxidase (PPO) activity during drying process, the flavonoid and total polyphenol content of dry chicory leaf were measured, and the DPPH free radical, ABTS<sup>+</sup>· free radical scavenging capacity and reducing power of the polyphenol extraction from chicory leaf were also determined under different drying methods including air drying, freeze drying and hot air drying at different temperatures so as to obtain the optimum drying method. The results showed from the following aspects. 1) The content of polyphenol in chicory leaf processed by different drying methods was significantly different, which could be due to a combination of residual PPO activity and heat sensitivity of polyphenol during the drying process. 2) When the flavonoid content and total polyphenol content were taken into account, hot air drying at 60 °C was the best result, freeze drying was the second and air drying was the last one. 3) The DPPH free radical scavenging capacity, ABTS<sup>+</sup>· free radical scavenging capacity and reducing power all had a significant positive correlation with the flavonoid and total polyphenol content in chicory leaf ( $R^2 \geq 0.888$ ,  $P < 0.05$ ). In order to have the higher polyphenol content and antioxidant activity in dry chicory leaf, the hot air-drying at 60 °C was a recommended drying method for chicory leaf.

**Key words** chicory; leaf; drying methods; polyphenol; antioxidant activities

植物多酚(包含黄酮)广泛存在于植物体内,主要存在于植物的皮、根、叶和果中,是植物的次生代谢产物<sup>[1-2]</sup>。多酚具有良好的抗氧化活性,能有效清

除体内自由基、抑制脂质过氧化以及保护机体生物大分子等<sup>[2-3]</sup>。菊苣(*Cichorium intybus* L.)为菊科菊苣属多年生草本植物,其地上部分、根和种子可入

收稿日期: 2014-04-06

基金项目: 吉林省教育厅高校科研春苗人才培养计划(201447); 吉林省科技发展计划青年科研基金(20100144); 国家级大学生创新创业训练计划(201210193011); 吉林农业大学大学生科技创新基金(2013ZR0507, 2012ZR0504)。

第一作者: 尚红梅, 讲师, 博士研究生, 主要从事饲草资源开发与利用研究, E-mail: shangmei2000@163.com

药<sup>[4-5]</sup>,具有清热解毒、利尿消肿、保肝降脂和促进消化等功效<sup>[6]</sup>。菊苣叶中含有绿原酸、菊苣酸和黄酮等多酚物质,此类物质在菊苣药效功能中发挥着重要作用<sup>[7-8]</sup>。因此在贮藏与加工中,尽可能保留更多的多酚含量对于菊苣药用价值的保持具有重要意义。

植物类药材在采摘后,除部分鲜用外,在贮藏和运输过程中,常会发生虫蛀、霉变等变质现象而无法满足临床需要,因此采后必须要对药材进行初加工,干燥是避免此类变质现象发生的一种有效的初加工方法<sup>[9]</sup>。干燥处理能抑制物质的呼吸等生理作用,减少营养物质损失和微生物活动,有利于物质的保藏<sup>[3]</sup>。在多种干燥方法中,空气干燥法具有简单易行、成本低的优点。然而空气干燥耗时较长,活性成分多酚在药材干燥过程中极易发生变性或失活<sup>[10]</sup>,比如植物体内普遍存在的多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)能氧化多酚类物质形成醌类聚合物,减少植物中多酚类物质的含量<sup>[11-12]</sup>,从而降低药材的抗氧化等生物活性<sup>[13]</sup>。本研究通过比较阴干、冻干和不同温度下热风干燥对菊苣叶中酚类物质含量和抗氧化活性的影响,同时监测各种干燥方式下PPO活性的变化,以期找到一种较有利于减少多酚损失的干燥方式,旨在为菊苣药材的初加工提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用菊苣品种为欧洲菊苣(*Cichorium intybus cv. europe*),于2011年5月20日在吉林农业大学牧草园内播种,行距20 cm,株距15 cm,开花期取全株茎生叶作为试验材料。

### 1.2 主要仪器及药品

101-3AB型电热鼓风干燥箱,天津泰斯特仪器有限公司;FD-1B型冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;KQ-100KDE型高功率数控超声波清洗仪,昆山市超声仪器有限公司;HGBTWTS3型组织捣碎机,美国WARING COMMERCIAL公司;3K30型高速台式冷冻离心机,德国SIGMA公司;752型紫外分光光度计,上海现科分光仪器有限公司。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、水溶性VE(Trolox),东京化成工业株式会社;没食子酸、芦丁、2,2'-联氨-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS),上海阿拉丁公司;铁氰化钾、三氯乙酸、三

氯化铁、亚硝酸钠、碳酸钠、过硫酸钾和硝酸铝等均为国产分析纯药品。

### 1.3 试验处理

新鲜菊苣叶洗净、吸干表面水分,分别进行阴干、冻干和热风干燥处理。每个处理称取叶片50 g,设5个重复。其中阴干处理为将叶片置于通风良好、干燥、无阳光直射的室内进行干燥,室内相对湿度45%,温度20℃;冻干处理在冷冻干燥机内(-43℃)进行;热风干燥处理在电热鼓风干燥箱内进行,分别设定温度为40、50、60、70、80、90、100和120℃。

对于每种干燥方式,在干燥过程中定时取样(最初每隔0.5 h取1次样,接近干燥时每隔0.1 h取1次样)测定叶片含水量,监测干燥情况,同时取样测定PPO活性,研究干燥过程中PPO相对活性降低速率,为最适干燥方式的筛选提供依据。最后将干燥样品粉碎,过0.45 mm筛,4℃条件下保存待测多酚类物质含量和抗氧化活性。每次检测设3个重复。

### 1.4 测定指标及方法

#### 1.4.1 含水量测定

采用恒重法,按照GB 5009.3—2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》<sup>[14]</sup>方法进行测定。

#### 1.4.2 PPO活性测定

PPO的提取和测定参照文献<sup>[15]</sup>方法,略作修改。取菊苣叶样品1 g(根据当时所取样品含水量和原鲜叶含水量折算为鲜叶质量,即相当于取鲜叶样品1 g),加入10 mL磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH 7.0, 4℃),用组织捣碎机匀浆,于12 000 r/min、4℃冷冻离心20 min,提取上清液,即为PPO酶液。取0.5 mL PPO酶液,加入2.5 mL焦性没食子酸溶液(40 mmol/L),对照用磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH 7.0)代替PPO酶液。混匀后立即在330 nm波长下测定吸光值(OD),每隔20 s读数1次,依据曲线最初直线段的斜率计算酶活性。酶活性单位以每克样品每分钟OD变化0.001来表示,按下式计算:

$$\text{酶活性}(U/g) = \Delta OD \times D / (0.001 \times FW \times t)$$

式中: $\Delta OD$ 为反应时间内吸光值的变化; $D$ 为稀释倍数,即提取的总酶液为反应系统内酶液体积的倍数; $FW$ 为样品重,g; $t$ 为反应时间,min。

将新鲜菊苣叶PPO酶活性((1 881.70 ± 32.83)U/g)定为100%,其他条件下菊苣叶的酶活性与其相比较计算相对酶活性,%。

菊苣叶干燥过程中 PPO 活性降低速率可以反应干燥过程中 PPO 的失活速度,按下式计算:

PPO 相对活性降低速率(%/h)=(新鲜菊苣叶 PPO 相对活性-干燥菊苣叶 PPO 相对活性)/菊苣叶干燥消耗时间

#### 1.4.3 菊苣叶多酚类物质的提取及含量测定

参照张利娟等<sup>[16]</sup>的方法,略作修改。采用超声波辅助法提取,取待测样品 1 g,加入 25 mL 95 % 乙醇提取液,20 °C、100 W 超声处理 60 min,取滤液即为菊苣叶多酚类物质提取液(以下简称提取液),立即放入-40 °C 保存,所有样品提取完后同时测定黄酮及总酚含量。每个指标的分析均设 3 次重复。

1)总酚含量测定。采用 Folin-Ciocalteu 比色法<sup>[8]</sup>。标准曲线的制备:精密称取没食子酸 0.005 g,用蒸馏水定容至 50 mL,制备质量浓度为 100 μg/mL 的标准溶液。精确量取上述标准液 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mL 于 10 mL 容量瓶中,各加水 6 mL,摇匀,再加 0.5 mL 福林试剂,充分摇匀,1 min 之后,加入 20 % 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液 1.5 mL,混匀,用蒸馏水定容至刻度,75 °C 水浴 10 min,自然冷却至室温,以相应试剂为空白,在 765 nm 处测定吸光度,建立标准曲线,得线性回归方程为:Y = 0.152 1 X + 0.009 7(R<sup>2</sup> = 0.999 1),式中,X 为没食子酸溶液质量浓度,μg/mL,Y 为 OD<sub>765 nm</sub> 值。

吸取提取液 0.1 mL,按标准曲线步骤反应后,测定吸光度,结果以菊苣叶干基中含有相当于没食子酸的毫克数表示,单位为 mg/g。

2)黄酮含量测定。参照卞杰松等<sup>[17]</sup>和蔡文国等<sup>[18]</sup>的方法进行,略作修改。标准曲线的制备:精密称取芦丁标准品 0.025 g,用 75 % 乙醇溶解并定容至 50 mL,制备质量浓度为 0.5 mg/mL 的标准溶液。精确量取上述标准液 0、0.4、0.8、1.2、1.6 和 2.0 mL 于 10 mL 刻度试管中,加无水乙醇至 5 mL,摇匀,加入 5 % 的 Na<sub>2</sub>NO<sub>2</sub> 溶液 0.3 mL,摇匀放置 6 min,再加入 10 % 的 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 溶液 0.3 mL,摇匀放置 6 min,最后加 1 mol/L 的 NaOH 溶液 4 mL,用无水乙醇补至刻度,摇匀放置 10 min 后,以无水乙醇为空白,在 510 nm 处测定吸光度,建立标准曲线,得线性回归方程为:Y = 0.007 4X + 0.017 5(R<sup>2</sup> = 0.999 3),式中,X 为芦丁溶液质量浓度,μg/mL,Y 为 OD<sub>510 nm</sub> 值。

吸取提取液 1 mL,按标准曲线步骤反应后,测定吸光度,结果以菊苣叶干基中含有相当于芦丁的

毫克数表示,单位为 mg/g。

#### 1.4.4 抗氧化活性测定

1)DPPH 自由基清除能力测定。测定方法参照文献<sup>[18-19]</sup>,略作修改。标准曲线的制备:取浓度为 0、200、400、600、800 和 1 000 μmol/L 的 Trolox 标准液 0.1 mL 加入 10 mL 试管中,加入 3.9 mL DPPH(0.1 mmol/L,用甲醇溶解,现配现用)反应液。用相同体积的 95 % 的乙醇作空白对照。在暗处反应 30 min 后测定波长为 515 nm 的吸光度,得到线性回归方程:Y = -0.000 6X + 1.309 2(R<sup>2</sup> = 0.999 3),式中:X 为 Trolox 标准液浓度,μmol/L,Y 为 OD<sub>515 nm</sub> 值。

取 0.1 mL 提取液加入 10 mL 的试管中,加入 3.9 mL DPPH 反应液,按标准曲线步骤反应后,测定吸光度。最后按制作的标准曲线将菊苣叶 DPPH 自由基清除能力表示为每克菊苣叶(干质量)所具有的清除能力相当于 Trolox 的微摩尔数,单位为 μmol/g。

2)ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力测定。测定方法参照文献<sup>[1,19-20]</sup>,略作修改。ABTS<sup>+</sup>·溶液的配制:将 5 mL、7 mmol/L ABTS<sup>+</sup>·溶液和 88 μL 的 140 mmol/L 过硫酸钾混合,在室温、避光条件下反应 12 h,得到 ABTS 储备液,使用时用 10 mmol/L、pH 7.4 的磷酸盐缓冲液稀释成工作液,使其在室温下,734 nm 处的吸光度为(0.70 ± 0.02)。

标准曲线的制备:取浓度为 0、20、40、60、80 和 100 μmol/L 的 Trolox 标准液 0.3 mL 加入 10 mL 试管中,加入 ABTS 反应溶液 3 mL,反应 30 min,测定波长为 734 nm 的吸光度。按 Trolox 浓度(X, μmol/L)和吸光度(Y, OD<sub>734 nm</sub>)绘制成标准曲线:Y = -0.004 9 X + 0.629 1(R<sup>2</sup> = 0.999 2)。

取 0.3 mL 提取液的稀释液(体积比为 1:3)加入 10 mL 试管中,加入 ABTS 反应溶液 3 mL,按标准曲线步骤反应后,测定吸光度。最后按制作的标准曲线将菊苣叶 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力表示为每克菊苣叶(干质量)所具有的清除能力相当于 Trolox 的微摩尔数,单位为 μmol/g。

3)还原力测定。测定方法参照文献<sup>[1,21]</sup>,略作修改。标准曲线的制备:取浓度为 0、200、400、600、800 和 1 000 μmol/L 的 Trolox 标准液 1 mL 加入 2.5 mL 磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L,pH 6.6)和 2.5 mL 铁氰化钾溶液(1%),混合物在 50 °C 条件下水浴 20 min,冷却后加入 2.5 mL 三氯乙酸溶液

(10%), 混合物于 3 000 r/min 离心 10 min, 取该混合物的上清液 2.5 mL, 加入 2.5 mL 去离子水和 0.5 mL 氯化铁(0.1%)溶液, 在 700 nm 波长处测吸光度, 以乙醇溶液为空白。按 Trolox 浓度( $X$ ,  $\mu\text{mol/L}$ )和吸光度( $Y$ ,  $\text{OD}_{700\text{ nm}}$ )绘制成标准曲线:  $Y=0.0011X+0.0817(R^2=0.9992)$ 。

取 1 mL 提取液, 按标准曲线步骤反应后, 测定吸光度。最后按制作的标准曲线将菊苣叶还原力表示为每克菊苣叶(干质量)所具有的还原力相当于 Trolox 的微摩尔数, 单位为  $\mu\text{mol/g}$ 。

### 1.5 数据统计与分析

试验数据经 Excel 2003 初步整理后, 采用 SPSS 17.0 统计软件进行方差分析, 采用 Tukey 法进行多重比较; 用 Regression-curve 程序对处理温度效应进行回归分析, Correlate-bivariate 程序分析

指标间相关性。数据以“平均值±标准误”表示,  $P<0.05$  为差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥方式下菊苣叶多酚含量

不同干燥方式下菊苣叶多酚含量如表 1 所示。60 °C 热风干燥样品中黄酮和总酚含量均最高, 与 70 °C 热风干燥样品中的黄酮和总酚含量无显著差异( $P>0.05$ ), 显著高于阴干、冻干和其他温度热风干燥样品中的黄酮和总酚含量( $P<0.05$ )。除 40 和 120 °C 热风干燥样品外, 冻干和其他温度热风干燥样品中的总酚、黄酮含量均显著高于阴干样品( $P<0.05$ )。所以对于菊苣叶活性成分多酚的保留, 综合考虑黄酮和总酚含量 2 项指标, 60 °C 热风干燥最优, 冻干次之, 阴干最差。

表 1 不同干燥方式下菊苣叶的多酚含量

Table 1 Polyphenol content of chicory leaf under different drying methods

干燥方式 Drying methods	温度/ °C Temperature	$\omega$ (黄酮)/(mg/g) Flavonoid content	$\omega$ (总酚)/(mg/g) Total polyphenol content
阴干 Air-drying	20	8.58±0.12 f	13.49±0.58 g
冻干 Freeze-drying	-43	18.01±0.22 bc	23.40±0.62 bc
热风干燥 Hot air-drying	40	10.32±0.24 ef	16.52±0.84 efg
	50	16.87±0.84 c	20.40±0.56 cd
	60	21.28±0.60 a	26.81±0.87 a
	70	19.26±0.22 ab	24.13±0.15 ab
	80	17.29±0.43 bc	22.46±0.62 bc
	90	14.13±0.39 d	19.29±0.23 de
	100	10.79±0.40 e	16.63±0.83 ef
	120	9.13±0.38 ef	14.03±0.03 fg

注: 同列数据后相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ ), 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下表同。

Note: In the same column, values with the same small letters mean no significant difference ( $P>0.05$ ), while with the different small letters mean significant difference ( $P<0.05$ ). The same as below

不同干燥方式下 PPO 活性降低速率、干燥时间及干燥叶含水量如表 2 所示。除冻干和 40 °C 热风干燥处理的 PPO 相对活性降低速率无显著差异外( $P>0.05$ ), 其他干燥方式下 PPO 相对活性降低速率均有显著差异( $P<0.05$ ), 其中阴干处理 PPO 相对活性降低速率最小, 说明阴干过程中 PPO 失活速度较慢。对于热风干燥, 随着干燥温度的增加, PPO 相对活性降低速率线性升高( $R^2=0.930$ ,  $P=$

0.000), 说明温度越高, PPO 越容易失活。不同干燥方式下干燥样品的含水量在 9.36%~12.54% 之间, 阴干样品含水量较高, 高于冻干和热风干燥样品的含水量。热风干燥样品时, 随着干燥温度的增加, 干燥样品含水量线性降低( $R^2=0.931$ ,  $P=0.000$ )。对于干燥时间而言, 不同干燥方式相互间有显著差异( $P<0.05$ ), 阴干样品所需干燥时间((192.60±0.15)h)最长, 冻干样品次之((28.27±0.09)h), 热

风干燥样品时,随着干燥温度的增加,干燥样品所需时间线性降低( $R^2=0.832, P=0.000$ )。这是由于

温度越高,水分运动越剧烈,越有利于水分的散失<sup>[3]</sup>,使得菊苣叶含水量越低,所需干燥时间越短。

表2 不同干燥方式下PPO活性降低速率、干燥时间及干燥叶含水量

Table 2 Reduction speed of PPO relative activity, drying time and moisture content of dry leaf under different drying methods

干燥方式 Drying methods	温度/℃ Temperature	PPO相对活性降低速率/(%/h) Reduction speed of PPO relative activity	干燥时间/h Drying time	干燥叶含水率/% Moisture content of dry leaf
阴干 Air drying	20	0.43±0.01 i	192.60±0.15 a	12.54±0.18 a
冻干 Freeze drying	-43	3.08±0.03 h	28.27±0.09 b	12.07±0.31 abc
热风干燥 Hot air drying	40	3.14±0.06 h	15.47±0.12 c	12.27±0.12 ab
	50	9.80±0.26 g	9.80±0.06 d	12.07±0.13 abc
	60	13.11±0.06 f	7.27±0.12 e	11.66±0.15 bc
	70	17.00±0.04 e	5.60±0.13 f	11.46±0.13 c
	80	30.41±0.18 d	3.47±0.09 g	10.56±0.19 d
	90	35.43±0.34 c	2.53±0.12 h	10.42±0.12 d
	100	60.47±0.41 b	1.53±0.09 i	9.57±0.14 e
	120	84.23±0.35 a	1.27±0.08 i	9.36±0.16 e

## 2.2 不同干燥方式下菊苣叶的抗氧化活性及相关性分析

由图1可知,对于DPPH自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力3项抗氧化指标,60℃热风干燥处理样品的值均最高,冻干样品次之,阴干样品最低。方差分析表明,60℃热风干燥样品的DPPH自由基清除能力显著高于冻干样品、阴干样品和其他温度热风干燥样品的相应值( $P<0.05$ );对于ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力2项抗氧化指标,60℃热风干燥样品与冻干样品无显著差异( $P>0.05$ ),但显著高于阴干样品和其他温度热风干燥样品的相应抗氧化活性( $P<0.05$ )。所以对于抗氧化活性,综合考虑DPPH自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力3项指标,60℃热风干燥较好、冻干次之,阴干较差。

由图1可知,随着热风干燥温度的增加,菊苣叶DPPH、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力均呈现先升高后降低的趋势,这与黄酮、总酚含量的变化趋

势一致。相关分析发现(表3),黄酮含量、总酚含量与DPPH、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力均呈显著正相关( $R^2\geq 0.888, P<0.05$ ),且3种抗氧化活性测定方法间呈显著正相关( $R^2\geq 0.948, P<0.05$ )。

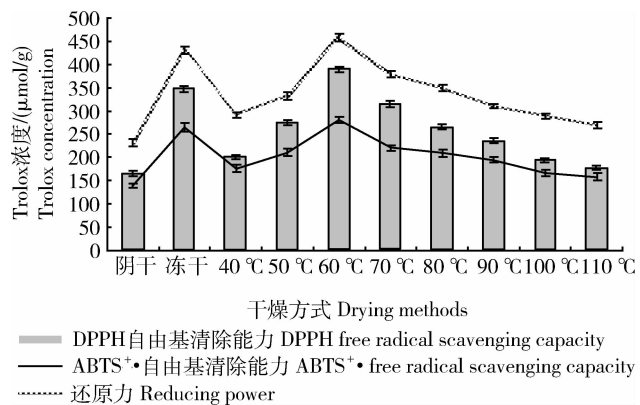


图1 阴干、冻干及不同温度热风干燥对菊苣叶抗氧化活性的影响

Fig. 1 Effect of air drying, freeze drying and hot air drying at different temperatures on the antioxidant activities of chicory leaf

表 3 菊苣叶多酚含量及抗氧化活性的相关分析

Table 3 Correlation analysis between the polyphenol content and antioxidant activities of chicory leaf

指标 Index	黄酮含量 Flavonoid content	总酚含量 Total polyphenol content	DPPH 自由基 清除能力 DPPH free radical scavenging capacity	ABTS <sup>+</sup> · 自由基 清除能力 ABTS <sup>+</sup> · free radical scavenging capacity	还原力 Reducing power
黄酮含量 Flavonoid content	1.000				
总酚含量 Total polyphenol content	0.956*	1.000			
DPPH 自由基清除能力 DPPH free radical scavenging capacity	0.945*	0.942*	1.000		
ABTS <sup>+</sup> · 自由基清除能力 ABTS <sup>+</sup> · free radical scavenging capacity	0.888*	0.912*	0.962*	1.000	
还原力 Reducing power	0.912*	0.922*	0.971*	0.948*	1.000

注: \* 表示相关性显著 ( $P < 0.05$ )

Note: \* means significant correlation ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同干燥方式比较

PPO 是植物体内普遍存在的一种酶,能氧化多酚类物质形成醌类聚合物,减少植物中多酚类物质的含量。菊苣叶采收后,PPO 的失活需要一个过程。不同干燥方式样品多酚含量呈现较大差异,可能与干燥过程中 PPO 的作用及其作用时间 2 个因素有关,PPO 相对活性降低速率可以在一定程度上反映以上 2 个因素的综合作用。尚红梅等<sup>[14]</sup>通过研究发现,菊苣 PPO 活性在 35 °C 时最大,并随着温度的升高逐渐下降。热风干燥温度范围为 40 ~ 120 °C,较高的温度使得 PPO 活性降低,且随着干燥温度的增加,PPO 相对活性降低速率线性升高 ( $R^2 = 0.930, P = 0.000$ ),从而使得菊苣叶多酚损失较少。阴干(20 °C)过程中,PPO 始终保持一定活性,经测定,干燥 48 h 时,还保持着  $(46.86 \pm 1.45)\%$  的相对活性,144 h 以后,PPO 相对活性才降低到  $(22.14 \pm 0.64)\%$  左右,即使到菊苣叶完全干燥时,PPO 仍然保持  $(17.54 \pm 0.93)\%$  的相对活性;整个阴干过程中,PPO 相对活性降低速率只有  $(0.43 \pm 0.01)/(\%/h)$ ,说明 PPO 在阴干条件下较为稳定,失活需要的时间较长,因而菊苣叶多酚在 PPO 的作用下损失较多,导致阴干样品总酚、黄酮含量均较低。冻干(-43 °C)过程中 PPO 相对活性

降低速率为  $(3.08 \pm 0.03)/(\%/h)$ ,显著高于 ( $P < 0.05$ ) 阴干处理,说明在低温条件下 PPO 的活性受到一定程度的抑制。

热风干燥过程中,菊苣叶黄酮和总酚的含量并未随着温度的升高而升高,而是呈现先升高后降低的趋势,总酚和黄酮含量均在 60 °C 热风干燥处理时最高,均在 120 °C 时出现最低值。这可能与酚类物质的热敏性有关,据文献报道,当温度升高到 70 °C 以上时酚类物质会受热分解<sup>[10,22-23]</sup>。可见在本试验条件下,不同干燥方式处理后多酚含量的差异,至少是干燥过程中剩余 PPO 活性和因温度不同导致酚热敏性差异 2 个因素综合作用的结果。

#### 3.2 抗氧化活性及相关性分析

最常用的评价活性成分体外抗氧化活性的方法有 DPPH 自由基清除能力、ABTS<sup>+</sup>· 自由基清除能力和还原力测定等<sup>[16]</sup>。其中 DPPH 能形成稳定的醇溶性自由基,而 ABTS<sup>+</sup>· 能形成稳定的水溶性自由基,二者常用来评价抗氧化物质清除自由基的能力。还原力从另一方面反应体系的抗氧化活性,抗氧化物质的抗氧化活性是由其将  $Fe^{3+}$  络合物还原为  $Fe^{2+}$  络合物的能力表示<sup>[2]</sup>。具有还原能力的物质能够还原脂质过氧化过程中产生的中间体,从而表现其抗氧化作用<sup>[24]</sup>。

本研究发现,黄酮含量、总酚含量与 DPPH、ABTS<sup>+</sup>· 自由基清除能力和还原力均呈显著正相

关( $R^2 \geq 0.888, P < 0.05$ ),这与前人研究报道相符<sup>[13,16,25]</sup>,且3种抗氧化活性测定方法间呈显著正相关( $R^2 \geq 0.948, P < 0.05$ )。说明菊苣叶中的黄酮和总酚类化合物对菊苣叶抗氧化活性有很大的贡献;DPPH、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力和还原力可以用来评价菊苣叶的抗氧化活性。

综上所述,不同干燥条件下,菊苣叶多酚含量差异很大,可能是干燥过程中剩余PPO活性和因温度不同导致的酚热敏性差异2个因素综合作用的结果,综合考虑黄酮、总酚含量2项指标,60℃热风干燥最优,冻干次之,阴干最差。由相关性分析可知,菊苣叶的抗氧化活性与其中的黄酮和多酚含量均呈显著正相关( $R^2 \geq 0.888, P < 0.05$ )。因此,为保留菊苣叶干燥样品中较高的多酚含量和抗氧化活性,建议采用60℃热风干燥法干制菊苣叶。

## 参 考 文 献

- [1] 王玉婷,陈奕,李雨波.干燥方式对香蕉片总多酚含量及其抗氧化性的影响[J].食品科学,2013,34(23):113-117
- [2] 杨小兰,袁娅,郭晓晖,等.超高压处理对不同品种猕猴桃浆多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2013,34(1):73-77
- [3] 郭泽美,任章成,陈腾,等.干燥方式对葡萄皮多酚及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2013,34(11):117-121
- [4] 吐尔逊娜依·迪力夏提,穆拉丁·库热西,阿不都拉·阿巴斯.菊苣茎乙醇提取物抑菌活性研究[J].食品科学,2009,30(11):80-82
- [5] 中华人民共和国卫生部药典委员会.中华人民共和国药典(第1部)[M].北京:化学工业出版社,2005:217
- [6] 王俭珍,崔健.牧草菊苣及其利用潜力Ⅱ利用价值和开发潜力[J].草业科学,2010,27(2):150-156
- [7] 华春,李建玲,周峰,等.菊苣中菊苣酸提取工艺优化[J].食品科学,2011,32(20):126-129
- [8] 尚红梅,陈诚,刘祥,等. Folin-Ciocalteu 比色法测定菊苣中多酚的含量[J].草业科学,2013,30(9):1445-1448
- [9] 张家春,林绍霞,罗文敏,等.中药材干燥技术现状及发展趋势[J].贵州科学,2013,31(2):89-93
- [10] 涂宗财,张璩,王辉,等.不同干燥方式对玫瑰茄水提物成分及活性的影响[J].食品科学,2013,34(21):47-50
- [11] Cheng X F, Zhang M, Adhikari B. The inactivation kinetics of polyphenol oxidase in mushroom (*Agaricus bisporus*) during thermal and thermosonic treatments[J]. Ultrason Sonochem, 2013,20(2):674-679
- [12] 常成,李保云,尤明山,等.小麦籽粒多酚氧化酶提取方法的比较研究[J].中国农业大学学报,2005,10(5):40-43
- [13] Bennett L E, Jegasothy H, Konczak I, et al. Total polyphenolics and anti-oxidant properties of selected dried fruits and relationships to drying conditions[J]. J Funct Foods, 2011, 3(2):115-124
- [14] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.3—2010, 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社,2010:1
- [15] 尚红梅,韩淑君,陈诚,等.菊苣根多酚氧化酶的酶学特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(11):179-184,190
- [16] 张利娟,师俊玲.无核白葡萄热风干燥过程中总酚与抗氧化活性的变化[J].食品科学,2013,34(5):55-59
- [17] 卞杰松,冯纪南,谭巧燕,等.马鞭草中总黄酮的超声波辅助提取及其抗氧化活性研究[J].宝鸡文理学院学报:自然科学版,2013,33(1):22-27
- [18] 蔡文国,吴卫,代沙,等.不同种质鱼腥草总酚、黄酮含量及其抗氧化活性[J].食品科学,2013,34(7):42-46
- [19] LI H, WANG X Y, LI Y, et al. Polyphenolic compounds and antioxidant properties of selected China wines[J]. Food Chem, 2009,112(2):454-460
- [20] Zhang A, Fang Y, Wang H, et al. Free-radical scavenging properties and reducing power of grape cane extracts from 11 selected grape cultivars widely grown in China[J]. Molecules, 2011,16(12):10104-10122
- [21] Soong Y, Barlow P J. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds[J]. Food Chem, 2004,88(3):411-417
- [22] Daniel D L, Huerta B E B, Sosa I A, et al. Effect of fixed bed drying on the retention of phenolic compounds, anthocyanins and antioxidant activity of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L)[J]. Ind Crop Prod, 2012,40:268-276
- [23] Ciou J Y, Lin H H, Chiang P Y, et al. The role of polyphenol oxidase and peroxidase in the browning of water caltrop pericarp during heat treatment[J]. Food Chem, 2011,127(2):523-527
- [24] Zhao H F, Chen W F, Lu J, et al. Phenolic profiles and antioxidant activities of commercial beers[J]. Food Chem, 2010,119(3):1150-1158
- [25] Breksa A P, Takeoka G R, Hidalgo M B, et al. Antioxidant activity and phenolic content of 16 raisin grape (*Vitis vinifera* L) cultivars and selections[J]. Food Chem, 2010,121(3):740-745