DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.05.031

干燥工艺对姜黄中姜黄素类化合物和挥发油的影响

Effect of drying technology on curcumin compounds and volatile oil in *Curcuma longa* L.

田思慧[1] 董春萍[2] 王车礼[2]

TIAN Si-hui[1] *DONG Chun-ping*[2] *WANG Che-li*[2]

(1. 常州大学石油化工学院,江苏 常州 213164;2. 常州大学药学院,江苏 常州 213164)

(1. *School of Petroleum and Chemical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu* 213164, *China*;2. *School of Pharmacy, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu* 213164, *China*)

摘要:研究了不同的干燥温度(60,80,100,120,150 ℃)、时间(2,4,6,8,10 h)对姜黄中姜黄素类化合物及挥发油的影响,从而进一步探讨姜黄在实际干燥过程中温度的选择。将姜黄在不同温度(60～150 ℃)下干燥一定时间(0～10 h),利用超声波辅助萃取法萃取姜黄素类化合物,水蒸气蒸馏法提取姜黄挥发油,并分别计算两者的得率,通过气相色谱—质谱法(GC-MS)测定姜黄挥发油的组成。结果表明:干燥过程中,姜黄素和姜黄挥发油成分变化较大,实际生产时应根据应用目的选择适宜的处理条件。

关键词:姜黄;温度;时间;姜黄素类化合物;挥发油

Abstract: In order to explore the change law of curcumin compounds and turmeric volatile oil in the drying process, the effects of different drying temperatures (60, 80, 100, 120, 150 ℃), time (2, 4, 6, 8, 10 h) on Curcumin compounds and turmeric volatile oil in Curcuma were studied. The selection of temperature in the actual drying process was further discussed. Curcuma was extracted by ultrasonic assisted extraction method for a certain time (0～10 h) at different temperatures (60～150 ℃), and the volatile oil of Curcuma was extracted by steam distillation. The yield of the two was calculated respectively. The composition of the volatile oil of ginger was determined by GC-MS. The results showed that the components of curcumin and Curcuma volatile oil changed greatly during drying. In practice, the suitable treatment conditions should be selected according to the different application purposes.

Keywords: turmeric; temperature; time; curcumin compounds; volatile oil

姜黄(*Curcuma longa* L.)是姜黄属植物[1],是提取姜黄挥发油和姜黄素类化合物的重要植物资源[2-3]。姜黄挥发油主要由倍半萜类物质和酚类物质组成,主要活性成分的结构见图 1(a)[4],其中,姜黄酮类物质(芳姜黄酮、α-姜黄酮、β-姜黄酮)能够有效清除自由基,抑制癌细胞的繁殖等药理作用[5-7],临床上,已将姜黄挥发油作为抗癌药物投入使用[8-11]。研究[12]表明,姜黄挥发油具有明显的热不稳定性,随着加热温度的升高,挥发油组成发生极大的变化。

姜黄素类化合物是指双去甲氧基姜黄素(BDMC)、去甲氧基姜黄素(DMC)和姜黄素(Cur),姜黄素类化合物组成如图 1(b)所示。姜黄素类化合物也具有抗氧化、抗炎、抗癌、清除自由基、抗微生物以及保护心脑血管系统、调节消化系统、利肝等多方面的药理作用[13-15]。此外,姜黄素类化合物 3 种物质的药理活性也存在差异,在抗癌、抗炎及抗氧化等方面,Cur 活性最强;在降血脂方面,DMC 活性最强;在保肝利肝等方面,BDMC 活性最强,姜黄素为一种不稳定性物质,3 种物质中 DMC 对姜黄素的稳定作用最强,为姜黄素的天然稳定剂[16]。当从姜黄中提取姜黄素类化合物时,产物为 3 种物质组成的混合物,其组成比例受多种因素影响,如生长环境、采后初加工方式、干燥温度及时间等。

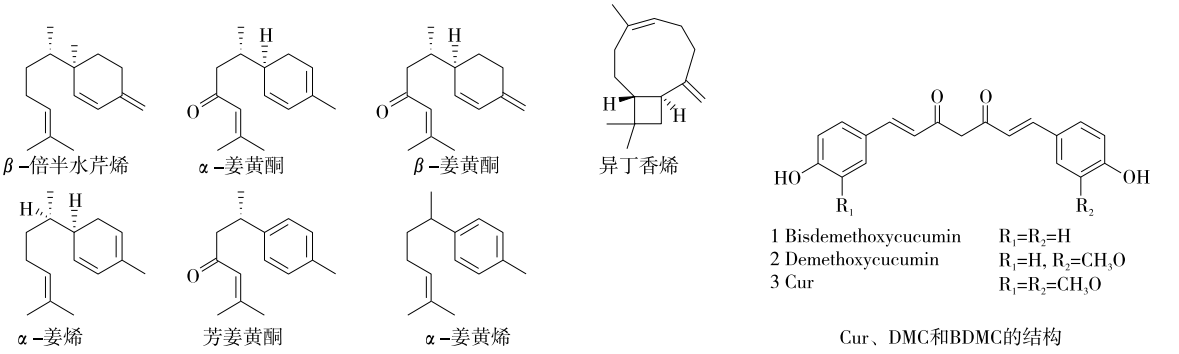
中药材干燥作为初加工过程中不可或缺的步骤之一,也是影响中药材质量的重要环节之一。调查发现对

基金项目:江苏省教育厅面上项目(编号:19KJB480004);江苏省前瞻性联合研究项目(编号:BY2012091);中石化联合研发项目(编号:411024)

作者简介:田思慧,女,常州大学在读硕士研究生。

通信作者:王车礼(1963—),男,常州大学教授,博士。E-mail:clwang@cczu.edu.cn

收稿日期:2021-03-09



（a）主要物质化学结构　　（b）姜黄素类化合物组成

图 1　姜黄挥发油中主要物质化学结构和姜黄素类化合物组成

Figure 1　Chemical structure of main substances in turmeric volatile oil and composition of curcumin compounds

姜黄有关的初加工研究较少，尤其是初加工时温度的选择往往参差不齐，例如，羊青等[17]在研究中使用 60 ℃对姜黄进行干燥处理；强悦越等[18]在姜黄挥发油成分研究中使用 80 ℃对姜黄进行预处理。目前相关研究往往集中在干燥方式对于成分的影响[19-22]，姜黄挥发油和姜黄素类化合物的研究往往集中在药理活性或者提取工艺方面，有关干燥温度及时间对两者的影响研究较少。但是姜黄素类化合物和姜黄挥发油均为光、热不稳定性物质，受温度及时间的影响较大，有关姜黄挥发油及姜黄素类化合物热稳定性的有一定研究及报道[12,17]，但是在温度和时间的影响下，两者的动态变化未见报道，其他姜黄属科植物如温莪术挥发油的动态变化已有报道[23]。因此，研究拟探究不同干燥温度及时间对于姜黄内主要成分的影响，以期为提高姜黄产品品质，规范姜黄采后初加工提供一定理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

姜黄：2019 年 5 月份采购于四川省犍为县，经鉴定为姜黄（*Curcuma longa* L.）的根茎（含水率≤ 8%），并贮藏在阴凉干燥处；

纯水：实验室自制；

甲苯、无水乙醇、冰醋酸、丙酮：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；

乙腈：色谱纯，上海星可高纯溶剂有限公司；

姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素标准品：纯度≥98%，四川维克斯生物科技有限公司。

1.2　仪器与设备

电子天平：LQ-A20001 型，上海五鑫衡器有限公司；

电热恒温油浴锅：DF-101S 型，常州金坛良友仪器有限公司；

气相色谱—质谱联用仪：GCMS-QP2010 型，日本岛津公司；

挥发油提取器：HAHFY0500 型，千马实验设备有限公司；

中草药破碎机：SE-750 型，永康市圣象电器有限公司；

鼓风干燥箱：DHG-9070A 型，上海鳌珍仪器制造有限公司；

高效液相色谱仪自动进样：Agilent LC-1260 型，美国安捷伦公司；

超声波清洗机：JS-031SD 型，深圳市超洁科技实业有限公司；

高速离心机：TD16G 型，盐城市凯特实验仪器有限公司。

1.3　姜黄粉末的制备

选取姜黄根茎，使用中草药破碎机破碎，筛选出 40～60 目的姜黄粉末，使用鼓风干燥机对姜黄进行处理。分别选取温度为 60，80，100，120，150 ℃，处理时间为 2，4，6，8，10 h 的姜黄粉末。将所得的姜黄粉末放置于干燥器中进行冷却，并称量重量，待检测其主要成分含量。

1.4　姜黄中姜黄素类化合物的提取与测定方法

1.4.1　姜黄素类化合物的提取　根据文献[24]修改如下：称取热处理后的姜黄粉末 1.00 g 于 150 mL 锥形瓶内，加入 30 mL 的 90%乙醇超声提取（功率为 400 W，40 ℃）15 min，离心机转速为 9 000 r/min，离心 10 min，重复提取 3 次，合并上清液于 100 mL 棕色容量瓶中，用 90%的乙醇定容至刻度。

1.4.2　姜黄素类化合物标准溶液的制备　分别精密称取 5 mg 的 Cur、DMC、BDMC 标准品，一起放入 10 mL 棕色容量瓶中并用甲醇定容至刻度。再通过等梯度稀释，配制成 1，2，20，40，100，200，300，500 mg/L 的混合标准液。

1.4.3　姜黄素类化合物测定的液相条件　根据文献[24]修改如下：液相色谱柱：Poroshell 120 EC-C_{18}（4.6 mm×150 mm，4 μm），流动相为乙腈—pH 3.5 磷酸水（$V_{乙腈}$：$V_{磷酸水}$=45：55），流速 1.0 mL/min，柱温 25 ℃，紫外灯波长 425 nm，进样量 20 μL，检测时间 11 min。

1.4.4　姜黄素类化合物得率的计算　将提取的姜黄素类化合物溶液稀释一定倍数后,在上述色谱条件下进样分析,根据标准曲线计算溶液中 Cur、BDMC、DMC 的质量浓度,按照式(1)计算提取率。

$$X = \frac{C \times V \times N}{m} \times 100\%\ , \quad (1)$$

式中:

X——姜黄中 Cur、BDMC、DMC 得率,%;

C——测定液中 Cur、BDMC、DMC 的质量浓度,g/mL;

V——提取液体积,mL;

N——稀释倍数;

m——姜黄质量,g。

1.5　姜黄挥发油的提取与测定方法

1.5.1　姜黄挥发油的提取及得油率计算　根据文献[25]修改如下:取热处理后的姜黄粉末 20.00 g,加入 9.5 倍量水,浸泡 0.5 h,水蒸气蒸馏法提取 7 h,收集挥发油,避光冷藏保存备用。挥发油得油率按式(2)计算。

$$X = \frac{V}{m} \times 100\%\ , \quad (2)$$

式中:

X——姜黄中姜黄挥发油得率,%;

V——提取出挥发油的体积,mL;

m——姜黄质量,g。

1.5.2　姜黄挥发油气相色谱—质谱测定前处理　准确吸取提取出的姜黄挥发油 0.20 mL,加入丙酮 1.80 mL,使用 0.45 μm 滤膜进行过滤,进行气相色谱—质谱分析得挥发油的总离子流。经过 NIST 谱库检索和人工解析,查阅文献鉴定化合物,并以峰面积归一法计算各色谱峰的相对含量。

1.5.3　姜黄挥发油测定的气相色谱—质谱条件　参照文献[26]。

2　结果与讨论

2.1　热处理条件对姜黄素类化合物的影响

2.1.1　姜黄素类化合物标准曲线的绘制　BDMC、DMC 和 Cur 标准品的色谱图如图 2 所示,BDMC 的保留时间为 7.380 min,DMC 的保留时间为 8.291 min,Cur 的保留时间为 9.305 min,3 种化合物能够实现基线分离。以峰面积为纵坐标(Y),测定浓度为横坐标(X),绘制标准曲线,分别得到 BDMC、DMC 和 Cur 三者的回归方程及相关系数,BDMC、DMC 和 Cur 标准曲线方程见表 1。

2.1.2　姜黄素类化合物得率的变化　姜黄素类化合物是一种光敏性很强的物质,并且在高温条件下极不稳定[17]。如图 3 所示,犍为县产的姜黄中提取出的姜黄素类化合物中 Cur 的占比最多,DMC 次之,BDMC 最少。在 60 ℃的热处理温度下,随着热处理时间的推移,姜黄中的

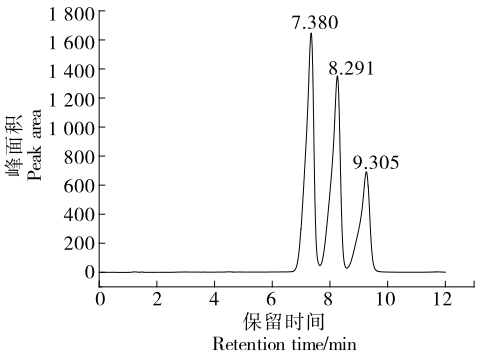


图 2　BDMC、DMC 和 Cur 标准品的色谱图

Figure 2　Chromatograms of BDMC, DMC and Cur standards (425 nm)

表 1　BDMC、DMC 和 Cur 标准曲线方程

Table 1　Calibration curves equations of BDMC, DMC and Cur

名称	回归方程	R^2	适用范围/(mg·L^{-1})
BDMC	$y=155.57x+112.04$	0.999 6	1～500
DMC	$y=121.28x+361.21$	0.999 3	1～500
Cur	$y=85.112x-294.31$	0.999 6	1～500

BDMC 得率呈先上升后下降的趋势,4 h 时达到顶峰。在 80 ℃ 和 100 ℃的热处理温度下,BDMC 得率在前 2 h 也呈上升趋势,之后随着时间的推移,得率逐渐下降。当热处理温度为 120 ℃和 150 ℃时,随着时间的延长,BDMC 得率一直呈下降趋势。在 60 ℃的热处理温度下,DMC 得率在前 4 h 内呈些许上升的趋势,之后逐渐下降。当热处理温度≥ 80 ℃时,随着时间的延长,DMC 得率呈下降趋势。姜黄中 Cur 在经过热处理之后,得率一直呈下降趋势,当热处理温度≥ 100 ℃时,下降幅度增大。结合图 1 中姜黄素类化合物的化学结构,推测可能存在 3 种物质之间的转化,对姜黄进行热处理时,DMC 和 Cur 的结构上的甲氧基基团脱落从而转变为 BDMC,造成 BDMC 得率上升,但是随着热处理温度的进一步升高,热处理时间的延长,姜黄素类化合物的主体结构受到影响,从而带来姜黄素类化合物得率的整体下降。以上结果表明,在热处理温度为 60 ℃和 80 ℃,热处理时间≤ 4 h 时,姜黄素类化合物的损失较少。

2.2　热处理条件对姜黄挥发油得率及其组成成分的影响

2.2.1　姜黄挥发油得率的变化　如图 4 所示,在不同的热处理温度下,随着时间的推移,姜黄挥发油得率呈下降趋势。当热处理温度为 60 ℃时,姜黄挥发油得率在前2 h 内几乎保持不变,2 h 之后呈下降趋势。当热处理温度≥ 80 ℃时,姜黄挥发油得率呈下降趋势,热处理温度越高,下降幅度越大。

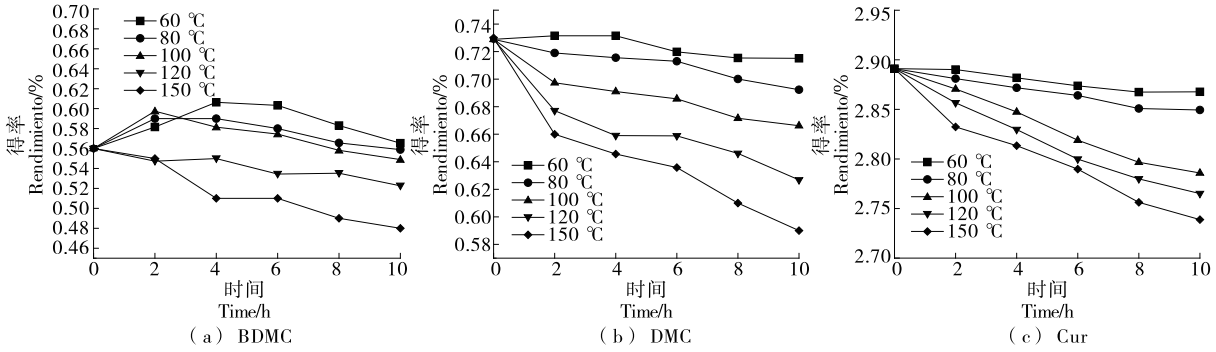


图 3　不同温度及时间下姜黄素类化合物得率的变化

Figure 3　Changes of the yields of curcumin compounds at different temperatures

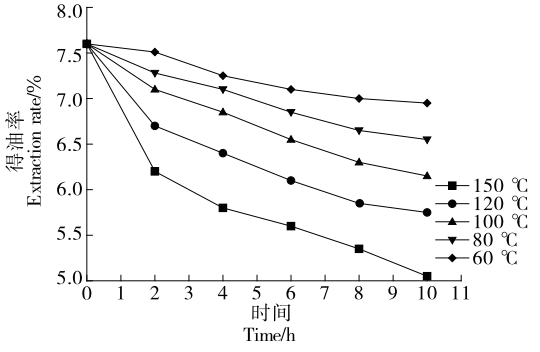


图 4　不同温度和时间下姜黄挥发油得率的变化

Figure 4　Changes of the yields of turmeric volatile oil at different temperatures and time

2.2.2　热处理条件对姜黄内挥发油成分的影响　由图 4 可知，在不同的热处理温度下，当热处理时间达到 10 h 时，挥发油得率下降幅度趋于平缓(150 ℃除外)，遂将处理时间定为 10 h，并对挥发油化学成分进行分析，挥发油中相对百分含量＞0.05%的成分如表 2 所示。

由表 2 可知，发现未经热处理(对照)的姜黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有 8 种，占总体的 90.27%；经 60 ℃热处理后的姜黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有 12 种，占总体的 90.37%；80 ℃热处理的姜黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有 15 种，占总体的 92.93%；100 ℃热处理的姜黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有13种，占总体的90.20%；120℃热处理的姜

表 2　不同温度下姜黄挥发油组成及相对含量

Table 2　Composition and relative content of turmeric volatile oil at different temperatures

名称	保留时间/min	相对百分含量/%					
		150 ℃	120 ℃	100 ℃	80 ℃	60 ℃	对照
α-蒎烯	3.310	0.06	—	—	—	—	—
β-月桂烯	3.665	0.07	0.04	0.02	0.06	0.05	0.04
β-侧柏烯	3.785	0.10	—	—	—	—	—
桉树脑	3.995	1.47	0.07	0.63	1.08	0.46	0.72
2-长松针烯	4.115	2.99	0.87	0.27	0.07	0.12	0.06
萜品油烯	4.360	—	—	0.69	1.87	0.87	1.59
篙酮	4.455	—	0.01	0.02	0.02	0.01	0.39
2-(4-甲基苯基)丙-2-醇	4.885	0.35	0.41	0.50	0.60	0.59	0.24
反式-α-佛手柑烯	5.730	0.12	0.31		—	—	—
异丁香烯	6.415	2.98	1.41	0.86	1.34	1.63	1.90
1,2,3,4,4a,5,8,9,12,12a-十氢化萘-1,4-亚甲基苯并环癸烯	6.430	0.45	0.51	0.59	—	—	—
α-香柠檬烯	6.470	0.41	2.40	0.55	1.00	0.30	0.12
反式-β-金合欢烯	6.495	—	—	—	—	0.70	0.87
高香叶烯	6.520	0.73	0.47	0.75	—	—	—
ALPHA-律草烯	6.585	—	—	—	0.25	0.22	—
α-姜黄烯	6.660	6.27	6.24	6.43	7.74	7.08	3.46
柯巴烯	6.720	1.87	—	—	—	—	—

续表 2

名称	保留时间/min	相对百分含量/%					
		150 ℃	120 ℃	100 ℃	80 ℃	60 ℃	对照
姜烯	6.745	9.74	7.76	14.55	18.54	14.27	15.85
β-没药烯	6.815	3.25	2.58	2.72	2.74	3.11	—
β-倍半水芹烯	6.859	13.94	14.52	15.40	17.15	15.00	10.49
未鉴别	6.935	1.26	—	—	—	—	—
橙花叔醇	6.955	—	—	—	—	—	0.72
α-萜品醇	7.003	—	—	—	—	—	0.14
桉油烯醇	7.015	—	—	—	—	0.12	—
反-橙花叔醇	7.035	0.47	0.45	0.42	1.05	1.78	0.31
3,3,5,5-三甲基环戊烯	7.060	0.19	0.21	0.05	0.04	—	—
2-甲基-2-十三烷基苯	7.090	0.55	0.83	0.78	0.69	0.77	—
未鉴别	7.150	—	—	—	—	0.32	—
未鉴别	7.175	0.10	0.81	—	—	—	—
β-姜黄烯	7.190	1.74	2.36	1.87	—	—	—
α-反式香柠檬烯	7.220	—	—	—	0.35	0.25	0.24
3,7-二甲基-6-辛烯-1-炔基-3-醇	7.305	—	1.69	0.47	0.63	—	—
α-没药醇	7.380	—	—	1.60	1.54	1.31	0.03
α-雪松烯	7.415	—	—	—	—	0.54	—
α-法呢烯	7.423	—	—	—	—	—	0.49
芳姜黄酮	7.480	12.73	14.24	13.86	14.46	14.86	13.78
α-姜黄酮	7.525	12.94	16.26	10.93	10.59	19.17	32.57
β-姜黄酮	7.670	14.96	13.78	12.02	10.08	9.40	10.73
1,1′-乙基二十氢化萘	7.860	0.18	2.06	2.35	1.13	1.34	0.87
未鉴别	7.885	—	—	—	0.34	0.50	0.92
未鉴别	7.905	0.66	0.59	0.56	0.54	0.63	0.55
α-松油醇	7.925	0.15	0.13	0.12	0.01	—	—
未鉴别	7.935	0.28	—	—	—	—	—
二环己基丙二腈	7.955	—	0.49	0.51	0.40	0.29	—
2,3,3a,4,7,7a-六氢化-2,2,4,4,7,7-l六甲基-茚	7.990	1.01	2.01	2.76	2.62	1.42	0.85
7,8-二氢紫罗兰酮	8.125	0.83	0.17	0.57	0.50	0.43	0.18
β-檀香醇	8.320	—	—	—	—	—	0.11
3-癸烯-2-酮	8.805	—	—	3.16	0.20	0.30	—
异柠檬醇	8.010	0.14		—	—	—	—
丙烯酸异冰片酯	8.045	0.74	0.15	0.13	0.20	0.18	—
2-甲基-2-苯基十三烷	8.100	—	1.18	2.55	0.04	—	—
未鉴别	8.215		—	0.08	0.15	0.21	—
2,6-二甲基-6-硝基-2-庚-4-酮	8.270	0.12	—	—	—	—	—
2-硝基-2-丙烯基-环己烷	8.295	—	0.15	0.15	0.16	0.25	—
未鉴别	8.410	0.50	0.14	0.16	0.20	0.22	—
缬草烷酮	8.485	0.10	—	—	—	—	—
1,7,7-三甲基双环[2.2.1]庚-2-基 3-甲基-2-丁烯酸酯	8.565	0.10	0.08	0.08	0.12	0.17	—
2,5-二甲基-3,4-双(1-甲基乙基)-3-己烯	8.805	0.52	0.33	0.27	—	—	—
未鉴别	9.045	0.04	0.03	0.03	0.08	0.11	—
合计		95.07	98.81	94.56	98.61	98.43	98.04

黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有 14 种，占总体的 88.49%；150 ℃热处理后的姜黄挥发油中相对含量在 1%以上的成分有 14 种，占总体的 87.15%。由此可见，当热处理温度为 80 ℃时，姜黄挥发油中的主要成分的种类较多，占总体含量较高。

不同热处理温度对姜黄挥发油中具有药理活性成分的影响也各有差异，如热处理温度的升高使得异丁香烯的相对含量呈下降趋势，但在 150 ℃时翻倍增加；而对于 α-姜黄烯、姜烯和 β-倍半水芹烯，80 ℃的热处理温度可以获得较高的相对含量；随着热处理温度的升高，芳姜黄酮和 β-姜黄酮的相对含量整体呈缓慢上升的趋势，而姜黄挥发油中占比最高的 α-姜黄酮的相对含量却出现明显的下降，结合图 1(a)中这几种成分的化学结构，推测热处理使得热敏性成分 α-姜黄酮发生分解及转化，使得芳姜黄酮和 β-姜黄酮的相对含量上升。此外，每个热处理温度下，姜黄挥发油中一些成分的相对含量降低甚至消失，同时伴随着一些特异性成分的出现，这些现象表明姜黄挥发油内存在热敏性物质，经过热处理后会发生受热分解，姜黄挥发油内成分具体发生怎样的热分解及转化，还在进一步的研究中。

目前姜黄挥发油中具有药理活性的成分主要为 6 种化合物即 α-姜黄烯、β-倍半水芹烯、姜烯、芳姜黄酮、α-姜黄酮和 β-姜黄酮[27－28]，结合图 4 和表 2 的结果，接下来探究 60 ℃和 80 ℃下，不同热处理时间对这 6 种主要成分的影响，结果见图 5。由图 5 可知，当热处理时间为 4 h 时，检测出 6 种主要成分的相对百分含量之和最高，且热处理温度为 80 ℃时的结果优于 60 ℃。热处理温度为80 ℃，时间为 4 h 时，姜黄挥发油 GC-MS 总离子流图如图 6 所示。

3　结论

通过高效液相色谱对姜黄素类化合物进行分析检测发现：当处理温度≤80 ℃，反应时间≤4 h 时，此时提取出的姜黄素化合物的中双去甲氧基姜黄素含量上升，去甲氧基姜黄素和姜黄素含量持平，并且姜黄素整体稳定性较好。此时提取出的姜黄素类化合物在保肝利肝等方面的药效会更好。通过气相色谱—质谱法对姜黄挥发油进行成分检测并分析发现：温度及时间对于挥发油的影响较大，当温度为 80 ℃，时间为 4 h，此时挥发油得率损失较少，且挥发油中主要药理活性成分(α-姜黄烯、β-倍半水芹烯、姜烯、芳姜黄酮、α-姜黄酮和 β-姜黄酮)的相对含量占比较高，在此温度和时间下得到的姜黄挥发油抗炎抗菌的效果会更好。后续可以对相应温度及时间下所提取的姜黄素类化合物和姜黄挥发油的药理活性进一步进行验证，并对两者成分的转化机理进行进一步研究。

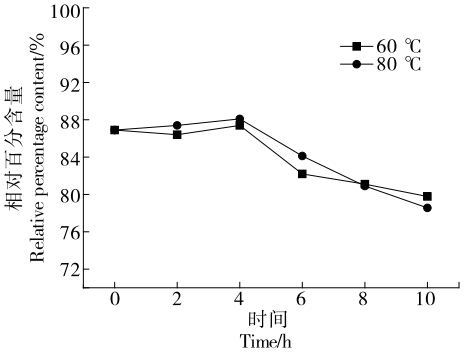


图 5　60 ℃和 80 ℃下 6 种主要成分的相对百分含量之和

Figure 5　Sum of relative content of six main components at 60 ℃ and 80 ℃

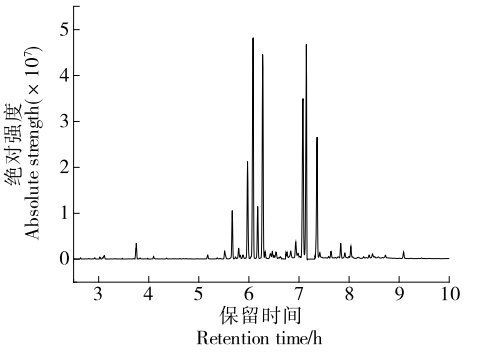


图 6　热处理条件为 80 ℃，4 h 时姜黄挥发油的总离子流图

Figure 6　Total ion flow diagram of turmeric volatile oil at 80 ℃, 4 h

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 2015 版. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 74.

[2] ZHOU Dong-hu, WANG Xue-min, YANG Ming-ming, et al. Combination of low concentration of (—)-epigallocatechin gallate (EGCG) and curcumin strongly suppresses the growth of non-small cell lung cancer in vitro and in vivo through causing cell cycle arrest[J]. Int J Mol Sci, 2013, 14(6): 12 023-12 036.

[3] AGGARWAL B B, YUAN Wei, LI Shi-you, et al. Curcumin-free turmeric exhibits anti-inflammatory and anticancer activities: Identification of novel components of turmeric[J]. Mol Nutr Food Res, 2013, 57(9): 1 529-1 542.

[4] RAINA V K, SRIVASTAVA S K, SYAMSUNDAR K V, et a1. Rhizome and leaf oil composition of Curcuma longa from the lower himalayan region of northern India[J]. Journal of Essential Oil Research, 2005, 17(5): 556-559.

[5] 杜青云, 宁旺榕. 姜黄挥发油降低人体面部皮肤粗糙度的研究[J]. 海峡药学, 1999(1): 31-33.

[6] 薛月萃, 周英, 康颖倩, 等. 姜黄挥发油的研究进展[J]. 华西药学杂志, 2016, 31(2): 212-215.

[7] LI Shi-you, WEI Yuan, DENG Guang-rui, et al. Chemical composition and product quality control of turmeric (*Curcuma longa* L.)[J]. Pharmaceutical Crops, 2011, 5(1): 28-54.

[8] 刘英, 张霄程, 陈启文. 姜黄素对结直肠癌细胞增殖、凋亡的作用机制研究[J]. 现代消化及介入诊疗, 2020, 25(11): 1 475-1 479.

[9] HAMLD H A, MUTAZAH R, YUSOFF M M, et al. Comparative analysis of antmxldant and antxprohferatwe activities of Rhodomyrtus tomentosa extracts prepared wlth various solvents[J]. Food and Chemmal Tomcology, 2017, 108: 451-457.

[10] GONG Hai-yan, HE Li-juan, LI Shao-yu, et al. Antarmcrobial, antlblofilm and antltumor actwltles of essential ml of Agastache rugosa from Xmjlang, China[J]. Saudl Journal of Blologmal Sciences, 2016, 23(4): 524-530.

[11] JAN S, KHAN M R. Antlpyretlc, analgesm and ant-inflammatory effects of Kmkxla ramoslssima[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 182: 90-100.

[12] 郃佳, 邹俊波, 史亚军, 等. 姜黄挥发油热稳定性研究及其抗氧化剂筛选[J]. 中国药学杂志, 2019, 54(15): 1 237-1 244.

[13] 方月娟, 夏道宗, 王思为, 等. 高良姜总黄酮对营养性肥胖合并高脂血症大鼠减肥降脂作用研究[J]. 中华中医药杂志, 2015, 30(8): 2 907-2 910.

[14] CHEN Bin, ZHANG You-zhi, WANG Yang, et al. Curcumin inhibits proliferation of breast cancer cells through Nrf2-mediated down-regulation of Fen1 expression[J]. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology, 2014, 143: 11-18.

[15] 张婧菲, 韩红丽, 沈明明, 等. 姜黄素类化合物的体外抗氧化活性及其对鸡红细胞氧化损伤的保护作用[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 96-105.

[16] 赵欣, 王爱里, 袁园, 等. 姜黄中姜黄素, 去甲氧基姜黄素, 双去甲氧基姜黄素的光稳定性分析[J]. 中草药, 2013, 44(10): 1 338-1 341.

[17] 羊青, 晏小霞, 王茂媛, 等. 不同产地姜黄挥发油的化学成分及其抗氧化活性[J]. 中成药, 2016, 38(5): 1 188-1 191.

[18] 强悦越, 韦航, 方灵, 等. 福建姜黄挥发油化学成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(1): 147-153.

[19] 康显杰, 杜伟锋, 凌珏, 等. 3种干燥方法对片姜黄挥发油的影响[J]. 中成药, 2017, 39(9): 1 900-1 903.

[20] 白秀蓉. 不同干燥方法对荆芥药材中5种有效成分含量的影响和评价[J]. 中国药师, 2020, 23(12): 2 476-2 479.

[21] 韩刚, 崔静静, 毕瑞, 等. 姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素稳定性研究[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(22): 2 611-2 614.

[22] 李会伟, 刘培, 钱大玮, 等. 不同干燥方法及其影响因子对玄参药材初加工过程品质形成的影响[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(22): 4 417-4 423.

[23] 张玉秀, 黄娴, 冯剑, 等. GC-MS分析不同干燥程度温莪术根茎挥发油的动态变化[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(3): 70-74.

[24] 吴妙鸿, 强悦越, 吴艺杰, 等. 姜黄中姜黄素类化合物提取工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4 328-4 334.

[25] 刘江, 樊钰虎, 王泽秀, 等. 响应面法优化姜黄挥发油提取工艺及其化学成分研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(10): 70-76.

[26] 卢彩会. 姜黄挥发油的成分分析及性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018: 6-7.

[27] 孙秀燕, 李秀琴, 王金辉, 等. 姜黄挥发油抗癌活性成分研究[J]. 中草药, 2006, 37(7): 982-983.

[28] 蒋建兰, 丁洪涛, 苏鑫, 等. 基于组效关系的姜黄挥发油抗肿瘤活性成分辨识研究[J]. 分析化学, 2012(10): 1 488-1 493.

(上接第88页)

[18] LIANG Long, WEI Lu-lu, FANG Gui-gan, et al. Prediction of holocellulose and lignin content of pulp wood feedstock using near infrared spectroscopy and variable selection[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 2019, 225: 117515.

[19] LIU Jin-ming, LI Nan, ZHEN Feng, et al. Rapid detection of carbon-nitrogen ratio for anaerobic fermentation feedstocks using near-infrared spectroscopy combined with BiPLS and GSA[J]. Applied Optics, 2019, 58(18): 5 090.

[20] STONE R W K A. Computer aided design of experiments[J]. Technometrics, 1969, 11(1): 137-148.

[21] LEARDI R, NRGAARD L. Sequential application of backward interval partial least squares and genetic algorithms for the selection of relevant spectral regions[J]. Journal of Chemometrics, 2004, 18(11): 486-497.

[22] CHANG Chihh-chung, LIN Chih-jen. LIBSVM: A library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 1-27.

[23] CAO Jie, ZHU Shi-jie, LI Chao, et al. Integrating support vector regression with genetic algorithm for hydrate formation condition prediction[J]. Processes, 2020, 5(519): 519.

[24] STOCKL A, LICHTI F. Near-infrared spectroscopy (NIRS) for a real time monitoring of the biogas process[J]. Bioresource Technology, 2018, 108(1): 1 249-1 252.