

· 基础研究 ·

不同熟化时期白木香果皮挥发性成分的研究[△]张香¹, 刘娟^{2*}, 袁媛², 杨全¹, 周良云¹, 杨健², 王健², 赵玉洋², 黄璐琦^{1,2*}

1. 广东药科大学 中药学院, 广东 广州 510006; 2. 中国中医科学院 中药资源中心, 北京 100500

[摘要] 目的: 对白木香果皮6个不同熟化时期的挥发性成分进行分析, 以期发现白木香非药用部位中沉香类成分, 挖掘白木香果皮潜在价值, 为实现白木香非药用部位的可持续开发利用奠定理论基础。方法: 本实验采用超声提取技术提取白木香果皮中挥发性成分, 借助气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析不同熟化程度果皮的挥发性成分。结果: 共检测到207种化合物, 包括萜类、甾类、脂肪酸、生物碱、烷烃及烯烃等; 其中, 检测到的倍半萜类成分包括桉叶烷型、愈创木烯型和螺旋烷型倍半萜, 均为沉香的特征性成分; 进一步分析表明白木香果皮熟化的第Ⅲ期倍半萜类成分及单萜相对质量分数最高分别达1.17%、0.66%, 而生育酚则在Ⅲ期后下降到检测限下。结论: 本研究将为全面合理开发白木香非药用部位及白木香可持续利用奠定基础。

[关键词] 不同熟化时期; 白木香; 果皮; 挥发性成分

[中图分类号] R284.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2019)06-0753-06

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20181210007

Volatile Components of *Aquilaria sinensis* Pericarp in Different Maturity PeriodsZHANG Xiang¹, LIU Juan^{2*}, YUAN Yuan², YANG Quan¹, ZHOU Liang-yun¹, YANG Jian², WANG Jian², ZHAO Yu-yang², HUANG Lu-qi^{1,2*}

1. School of Traditional Chinese Medicine, Guang Dong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

[Abstract] **Objective:** To discover the agarwood components in non-medicinal parts of *Aquilaria sinensis*, the volatile components of *A. sinensis* pericarp in six maturation periods were analyzed. The study aims at discovering the potential value of the pericarp and laying a theoretical foundation for the sustainable development and utilization of the non-medicinal parts of *A. sinensis*. **Methods:** In our work, ultrasonic extraction technology was used to extract the volatile components of the peels of *A. sinensis*. Meanwhile, the gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the pericarp in different degrees of maturity. **Results:** 207 compounds were detected by GC-MS, including terpenes, steroids, fatty acids, alkaloids, alkanes, olefins and the other ingredients. In addition, characteristic sesquiterpenes of agarwood including eudesmane, guaiane and agarospiropane types component were detected. Furthermore, sesquiterpenes and monoterpenoids were mainly accumulated in the third maturity period of *A. sinensis* pericarp, the content of which was 1.17% and 0.66%, respectively. However, the content of tocoferol was declined to the detection limit after the third maturity period of *A. sinensis* pericarp. **Conclusion:** The study will lay a foundation for rational development and sustainable utilization of non-medical parts of *A. sinensis*.

[Keywords] different stages of maturity; *Aquilaria sinensis*; pericarp; volatile components

白木香 *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg 为瑞香科 Thymelaeaceae 沉香属热带及亚热带常绿乔木, 为中国特有的珍稀濒危药源植物, 其含树脂的干燥木材作为国产沉香使用^[1-2]。沉香在传统医药、宗教、香

[△] [基金项目] 国家自然科学基金项目(81603236); 中央本级重大增减支项目(2060302); 中国中医科学院中药资源中心自主选题研究项目(ZZXT201904)

* [通信作者] 黄璐琦, 教授, 博士生导师, 研究方向: 中药资源与分子生药学; Tel: (010)64014411-2955, E-mail: huanluqi01@126.com

刘娟, 博士, 研究方向: 药用植物与分子生药学; Tel: (010)64087964, E-mail: juanliu126@126.com

料领域用途广泛,但其形成速度极为缓慢,导致野生资源被过度砍伐^[3-4]。近年来,白木香人工种植面积逐渐增加,如何实现白木香非药用部位的开发与可持续利用对推动沉香行业发展具有重要意义。

目前,人工种植的白木香林每年可生产大量果实,其果皮具有特殊香味,研究表明白木香果皮含有葫芦素型四环三萜、黄酮、甾醇及沉香特征性成分倍半萜等成分,具有抗肿瘤及抗菌等活性^[5-8]。本课题组通过前期白木香基地调研,发现熟化后白木香果皮具有类似沉香的气味。研究表明,陈皮在熟化(又称陈化)过程中挥发油组分发生很大改变^[9-10],然而关于白木香果皮熟化方面的研究及应用未见报道。本研究首次报道白木香果皮6个不同熟化时期挥发性成分的差异,为全面合理开发白木香非药用部位奠定理论基础。

1 材料与仪器

白木香果实采自广东省东莞市白木香基地,根据果皮不同的熟化时期分为Ⅰ期(新鲜采摘期)、Ⅱ期(30℃,湿度30%,放入密闭容器熟化48h)、Ⅲ期(30℃,湿度30%,放入密闭容器熟化96h)、Ⅳ期(30℃,湿度30%,放入密闭容器熟化144h)、Ⅴ期(30℃,湿度30%,放入密闭容器熟化15d)和Ⅵ期(30℃,湿度30%,放入密闭容器熟化20d)(图1),每个时期6批样品。去除果实内的种子,果皮冷冻干燥后打粉备用。

TRACE 1310/TSQ 8000 型气相色谱质谱联用仪(美国 Thermo 公司);石英毛细管柱(TG-5 MS, 30 m×0.25 mm×0.25 μm, 美国 Thermo 公司);万分之一天平(瑞士梅特勒公司);SB-800 DTD 型超声波清洗仪(宁波新芝生物科技股份有限公司);球磨机(MM 400 混合型球磨机, Retsch 公司);乙酸乙酯为分析纯。



图1 不同熟化时期的白木香果皮

2 方法

2.1 供试品溶液的制备

精密称取果皮粉末0.1 g,置于2 mL离心管中,精密加入乙酸乙酯1.5 mL,密封管口,样品于室温下浸泡过夜;超声(40 kHz)冷提45 min, 12000 r·min⁻¹,离心10 min,称重,加乙酸乙酯补足失重,取上清液置于新的离心管中,氮吹浓缩至溶剂挥干,精密加入乙酸乙酯200 μL,充分震荡混匀后用0.22 μm聚四氟乙烯(PTFE)滤膜滤过,得续滤液,即供试品溶液,4℃储存,备用。

2.2 GC-MS 条件

GC条件在前人基础上优化^[11],色谱柱为TG-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)石英毛细管柱。进样口温度为250℃,不分流;载气为高纯度氮气(纯度≥99.999%),柱流量N₂,进样量1 mL·min⁻¹。升温程序:从50℃开始以10℃·min⁻¹升到155℃,保留15 min;再以8℃·min⁻¹升到280℃,保留10 min。

MS条件:离子源为EI源,电离电压70 eV,离子源温度250℃,质量扫描范围m/z为50~500。

2.3 数据统计分析

样品总离子流图导入赛默飞GC-MS Trace Finder 3.3软件,在与NIST 2.2质谱库比对结果中,当色谱峰强度>1×10⁵,质谱图与NIST质谱库的质谱图正向比对结果大于500的峰确定为所鉴别的物质。自动质谱解卷积和识别系统(AMDIS)软件用于自动去卷积后分析色谱峰的纯度和保留时间-特征离子列表的获取,根据该软件提取峰面积^[12]。本研究采用主成分分析(PCA),在建模前,对数据进行pareto预处理,之后通过SIMCA 14.1软件进行分析。

3 结果

3.1 不同熟化时期白木香果皮化学成分分类

应用 GC-MS 技术对各样品成分进行分析, 通过 Trace Finder 3.3 工作站处理样品总离子流图, 清除背景及图谱重叠的干扰, 结合 NIST 2.2 数据库标准信息比对, 对色谱峰进行鉴定, 并采用峰面积归一化法计算各化合物的相对质量分数。分析结果显示, 不同熟化时期共比对出 207 种化合物, 包括单萜 5 个、倍半萜 16 个、二萜 2 个、三萜 2 个、甾体 14 个、类萜 4 个、生物碱 15 个、脂肪酸 46 个、烷烃 60 个、烯炔 4 个及其他类化合物 39 个(表 1), 其中烷烃与脂肪酸在果皮中的种类与含量最高, 与前人报道一致^[8,13]。对 6 个阶段不同成分的含量比例进行分析(图 2), 结果表明, 单萜、三萜在未熟化前(I 期、II 期)含量低于检测限, 而随着熟化时间增加, 单萜与三萜含量先上升后下降; 甾体成分在 II 期产生, 在 VI 期含量最高, 分析发现甾体成分最后时期主要增加的是麦角甾醇, 可能与陈化后期微生物代谢物增加有关; 倍半萜在未熟化前(I 期)含量极低, 而随着熟化时间增加, 含量逐渐增加, 在熟化 96 h 后含量最高(III 期), 之后下降; 类萜则在熟化后 144 h 后含量较低(IV 期、V 期、VI 期, 相对质量分数 < 0.11%)。以上结果均表明, 在果皮熟化过程, 化学成分组成与含量发生明显变化, 其中萜类相关的

代谢变化突出, 而沉香中最重要的成分之一为倍半萜, 因此作者有必要对以上萜类成分进行进一步分析。

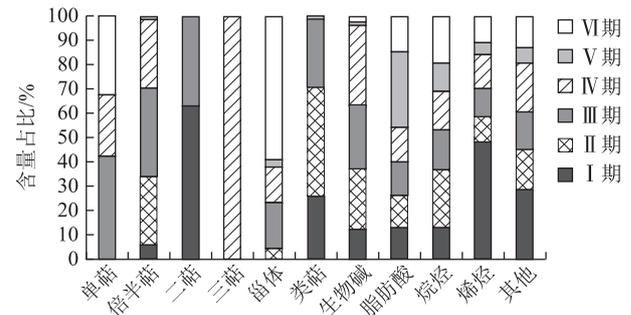


图2 不同种类化学成分在6个熟化时期含量的百分比

3.2 不同熟化时期果皮中萜类及沉香特征性成分分析

由于白木香果皮熟化过程中萜类代谢变化显著, 作者对其中的 5 类成分进一步分析(图 3)。结果表明, 倍半萜、单萜分别随着熟化程度增加含量升高, 到 III 期含量最多; 而类萜则在 III 期后含量极速下降; 三萜仅在 IV 期能检测到, 其他时期都在检测限下; 甾体类成分在最后熟化 VI 期含量最高, 其中麦角甾醇含量高达 8.45%, 可能与熟化后期微生物代谢有关。该实验检测到的类萜成分为角鲨烯、 α -生育酚、 γ -生育酚、 g -生育酚(表 2); 角鲨烯是合成三萜和甾体的重要前体, 随着熟化过程的进行, 角鲨烯含量先升高后下降, 表明熟化促进萜类代谢途径上游通

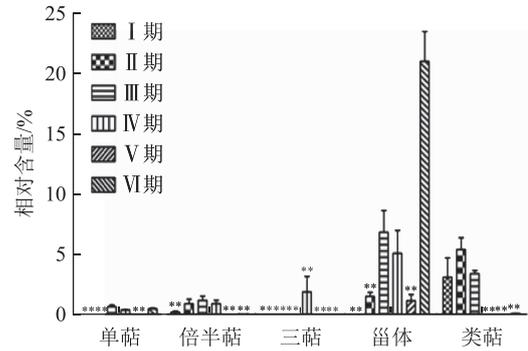
表 1 不同熟化时期白木香果皮化学成分含量与数目

类别	I 期		II 期		III 期		IV 期		V 期		VI 期	
	A/%	B/个										
单萜	0	0	0	0	0.66	2	0.39	2	0	0	0.50	2
倍半萜	0.19	6	0.90	7	1.17	8	0.91	6	0	0	0.03	1
二萜	1.15	1	0	0	0.68	1	0	0	0	0	0	0
三萜	0	0	0	0	0	0	1.89	2	0	0	0	0
甾体	0	0	1.50	2	6.82	5	5.07	4	1.16	2	20.97	6
类萜	3.10	3	5.32	4	3.63	2	0	0	0.01	1	0.10	1
烷烃	15.90	9	29.38	15	20.25	18	19.33	22	14.66	26	23.64	26
脂肪酸	29.39	3	31.46	9	32.65	9	32.35	12	72.88	17	33.23	19
生物碱	3.67	1	7.45	3	7.91	6	9.64	4	0.44	4	0.71	4
其他类	41.39	11	24.31	11	22.55	13	28.84	15	9.47	10	18.55	17

注: A. 相对质量分数; B. 化合物数目。

路产生角鲨烯,而后随着下游三萜与甾醇形成,角鲨烯不断被消耗,至IV期后其含量下降;生育酚为重要的抗氧化剂,在I、II期含量较多,III、IV期含量下降直至检测限下,表明熟化后期过氧化程度增加,而过氧化可以激活沉香萜类代谢等^[14]。

倍半萜类化合物是沉香特征性成分之一^[15],在不同熟化时期中共检出16种倍半萜类成分(见表3)。I期倍半萜含量极低,主要为桉叶烷型倍半萜;II期到IV含量较I期显著性增加,倍半萜种类更加丰富,除了桉叶烷型倍半萜外还增加了愈创木烯型和螺旋烷型倍半萜,倍半萜的种类及含量在III期最多,而后下降。



注: ** $P < 0.01$ 。

图3 不同熟化时期白木香果皮5种萜类成分含量比较($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

表2 不同熟化时期果皮中类萜成分的含量

编号	化合物名称	分子量	分子式	相对质量分数					
				I	II	III	IV	V	VI
1	Squalene(角鲨烯)	410	C ₃₀ H ₅₀	0.617	0.575	2.822	0	0.005	0.104
2	α -Tocopherol(α -生育酚)	430	C ₂₉ H ₅₀ O ₂	1.995	1.200	0	0	0	0
3	γ -Tokoferol(γ -生育酚)	410	C ₂₈ H ₄₂ O ₂	0.492	0.263	0	0	0	0
4	g -Tokoferol(g -生育酚)	416	C ₂₈ H ₄₈ O ₂	0	3.280	0.810	0	0	0

表3 不同熟化时期果皮中倍半萜成分含量

编号	化合物名称	分子量	分子式	相对质量分数					
				I	II	III	IV	V	VI
1	3, 5, 5, 9-tetramethyl-5, 6, 7, 8, 9, 9a-hexahydro-1H-benzo [7] annulene	204	C ₁₅ H ₂₄	0	0	0.163	0	0	0
2	agaruspirol(沉香螺醇)	222	C ₁₅ H ₂₆ O	0	0.115	0.093	0.152	0	0
3	β -eudesmol(β -桉叶醇)	222	C ₁₅ H ₂₆ O	0	0	0.032	0.122	0	0
4	1-isopropyl-4, 8-dimethylspiro [4.5] dec-8-en-7-ol	222	C ₁₅ H ₂₆ O	0	0	0	0.418	0	0
5	β -eudesmene(β -桉叶烯)	204	C ₁₅ H ₂₄	0	0.097	0.362	0.002	0	0
6	α -guaiene(α -愈创木烯)	204	C ₁₅ H ₂₄	0	0.027	0	0	0	0
7	<i>O</i> -ethyl-2, 4a, 8a-trimethyl-8-oxotetradecahydrophenanthrene-2-carbothioate	306	C ₂₀ H ₃₂ O ₂ S	0	0	0.417	0	0	0
8	(+)-Calarene(白菖烯)	204	C ₁₅ H ₂₄	0	0.272	0	0.197	0	0
9	7-isopropyl-1, 4a-dimethyl-1, 2, 3, 4, 4a, 9, 10, 10a-octahydrophenanthrene	256	C ₁₉ H ₂₈	0	0.187	0	0	0	0
10	γ -eudesmol(γ -桉叶醇)	222	C ₁₅ H ₂₆ O	0.083	0.047	0.058	0	0	0
11	(+)-valencene(瓦伦烯)	204	C ₁₅ H ₂₄	0.002	0	0	0	0	0
12	4a-methyl-1-methylene-7-(propan-2-ylidene)decahydronaphthalene	204	C ₁₅ H ₂₄	0.008	0	0	0	0	0
13	longofolene(长叶烯)	204	C ₁₅ H ₂₄	0.007	0	0	0	0	0
14	1, 3a, 4, 5a-tetramethyl-1, 2, 3, 3a, 5a, 6, 7, 8-octahydrocyclopenta [c] pentalene	204	C ₁₅ H ₂₄	0.035	0.153	0.048	0.018	0	0
15	β -isocomene	204	C ₁₅ H ₂₄	0.057	0	0	0	0	0
16	2-(3, 8-dimethyl-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-octahydroazulen-5-yl)propan-2-ol	222	C ₁₅ H ₂₆ O	0	0	0	0	0	0.032

3.3 主成分分析

采用主成分分析(PCA)法分析不同熟化时期的白木香果皮成分,将各化合物相对质量分数数据矩阵归一化处理后导入SIMCA 14.1软件中进行PCA-X判别分析,结果如图4所示。在建立模型时,拟合参数 $Q^2(\text{cum})=0.791$, $R^2X(\text{cum})=0.875$,当 $Q^2>0.5$ 与 R^2X 接近1时,表示白木香果皮不同熟化时期挥发性成分分离效果好。当熟化时间超过2 d后(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ期),白木香果皮的成分结构发生明显变化,尤其超过10 d后(Ⅴ、Ⅵ期),白木香果皮中成分发生了显著变化(图4)。

进一步分析前4个时期的化学成分特征,又建立了这4个时期化学成分的PCA图,发现Ⅲ、Ⅳ期与其他熟化时期明显分开,化学成分发生显著改变,Ⅰ期和Ⅱ期成分变化较小;在建立模型时,拟合参数 $Q^2(\text{cum})=0.69$, $R^2X(\text{cum})=0.805$,当 $Q^2>0.5$ 与 R^2X 接近1时,表示分离效果好(图5)。

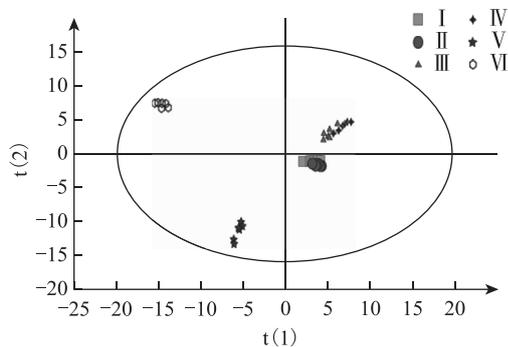


图4 6个熟化时期白木香果壳主成分分析结果(PCA-X)

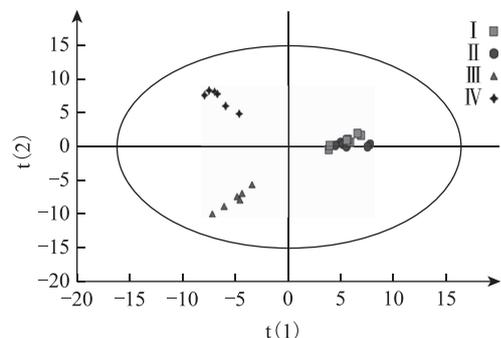


图5 I~IV期白木香果壳主成分分析结果(PCA-X)

4 讨论

白木香结香部位主要有倍半萜类化合物、2-(2-苯乙基)色酮、芳香族化合物、三萜类化合物等^[15-17]。本研究发现,熟化后白木香果实中存在大

量萜类成分,但种类、数目分布因熟化时间不同而有所差异。倍半萜、单萜、三萜分别随着熟化程度增加含量先升高后降低,而类萜则在Ⅲ期后含量极速下降。进一步对沉香特征性成分倍半萜进行分析,发现沉香螺醇、 β -桉叶烯、 β -桉叶醇等均在新鲜期含量低于检测限,而熟化Ⅱ-Ⅳ期含量均显著增加;个别倍半萜如 α -愈创木烯仅在Ⅱ期时被检测到,之后含量均在检测限下,该成分可能是其他倍半萜的前体。

PCA分析结果表明,Ⅴ、Ⅵ期的白木香果壳成分发生明显变化,可能因熟化后期微生物增多有关;在前4个时期中,Ⅰ、Ⅱ期与Ⅲ、Ⅳ期的白木香果壳成分可明显区分,说明熟化48 h后白木香果壳的代谢流发生明显改变。研究结果表明,白木香果皮熟化96 h所含沉香特征性成分的种类与含量最丰富,可在此条件基础上进行进一步优化与开发。

此外,在临床上白木香果壳提取物具有清除DP-PH自由基、抑制络氨酸酶活性的作用^[18],这可能与白木香果壳富含维生素E(生育酚)有关;而在香精与香料行业中,白木香果壳中的辛酸、肉豆蔻酸与水杨酸苄酯等脂质类成分经过加工可制成香料,如人造食用香精或花香香料^[19-20]。本研究结果则提示,不同熟化程度的果皮成分变化较大,可根据后期提取目的不同,选择不同熟化程度的白木香果皮,为全面合理开发白木香非药用部位实现白木香的可持续利用奠定基础。

参考文献

- [1] 傅立国. 中国植物红皮书——稀有濒危植物[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 670-671.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 185-186.
- [3] OKUDERA Y, ITO M. Production of agarwood fragrant constituents in *Aquilaria calli* and cell suspension cultures [J]. *Plant Biotechnol J*, 2009, 26(3): 307-315.
- [4] 张争, 杨云, 魏建和, 等. 白木香结香机制研究进展及其防御反应诱导结香假说[J]. *中草药*, 2010, 41(1): 156-159.
- [5] 徐维娜, 高晓霞, 郭晓玲, 等. 白木香果皮挥发性成分及抗肿瘤活性的研究[J]. *中药材*, 2010, 33(11): 1736-1740.
- [6] 张兴, 陶美华, 陈玉婵, 等. 白木香果皮中的五个葫芦素类化合物及其细胞毒活性[J]. *天然产物研究与开发*, 2014, 26(3): 354-357.
- [7] 张兴, 陶美华, 陈玉婵, 等. 白木香果皮化学成分及其生物活性研究[J]. *中草药*, 2013, 44(10): 1248-1252.
- [8] 林峰. 白木香果实和花的化学成分研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.

(下转第763页)

甾酮、总皂苷及氨基酸的含量存在显著性差异,为法菲亚药材的质量控制与评价提供了理论依据。

参考文献

- [1] 高辉,马小军,温学森,等.法菲亚属植物化学成分和药理活性研究进展[J].中国中药杂志,2006,31(21):1749-1752.
- [2] OLIVEIRA F, AKISUE G, AKISUE M. Contribuição para o estudo para o estudo farmacognóstico do Ginseng brasileiro, *Pfaffia paniculata* (Martius) Kuntze, An [J]. Farm Quimica, 1980, 20: 261.
- [3] 卞庆亚,罗崇念,马小军.国外对法菲西研究进展[J].中草药,2002,33(5):附1-附2.
- [4] CRISTINA P K, DE S M F E, GOKITHI A, et al. Effects of *Pfaffia paniculata* (Brazilian ginseng) extract on macrophage activity [J]. Life Sci, 2006, 78(12): 1287-1292.
- [5] GOSMANN G, GATTUSO S, GATTUSO M, et al. Botanical (morphological, micrographic), chemical and pharmacological characteristics of *Pfaffia* species (amaranthaceae) native to south Brazil [J]. Rev Bras Cienc Farm, 2003, 39(2): 141-147.
- [6] ZIMMER ALINE R, BRUXEL F, BASSANI VALQUÍRIA L, et al. HPLC method for the determination of ecdysterone in extractive solution from *Pfaffia glomerata* [J]. J Pharmaceut Biomed, 2006, 40(2): 450-453.
- [7] 陈哲,路娟,彭纪铭,等.柱前衍生 RP-HPLC 法同时测定法菲亚中 14 种水解氨基酸[J].药学实践杂志,2017,35(2):130-133.
- [8] Tóth N, Szabó A, Kacsala P, et al. 20-Hydroxyecdysone increases fiber size in a muscle-specific fashion in rat [J]. Phytomedicine, 2008(15): 691-698.
- [9] FELIPE D F, BRAMBILLA L Z S, PORTO C, et al. Phytochemical analysis of *Pfaffia glomerata* inflorescences by LC-ESI-MS/MS [J]. Molecules, 2014, 19(10): 15720-15734.
- [10] SHIOBARA Y, INOUE S S, KATO K, et al. A nortriterpenoid, triterpenoids and ecdysteroids from *Pfaffia glomerata* [J]. Phytochemistry, 1993(32): 1527-1530.
- [11] 凌征柱,杨东爱,马小军,等.引种栽培法菲亚与原产地法菲亚主要成分的比较研究[J].时珍国医国药,2006,17(12):2649-2650.
- [12] 李正理.植物制片技术[M].2版.北京:科学出版社,1987:88-138.
- [13] 蓝祖裁.法菲亚引种栽培及化学成分与药理研究概况[J].北方园艺,2011(19):155-157.
- [14] 林太凤,赵梦柯,王妍鸣,等.氨基酸检测技术研究进展[J].安徽农业科学,2015,18(43):16-19.
- [15] 王殿波,陈斌,单舒筠,等.不同生境及地区哈蟆油药材中氨基酸成分比较分析[J].中国现代中药,2012,14(2):8-11.

(收稿日期:2018-11-06 编辑:王笑辉)

(上接第757页)

- [9] 陈荣荣.不同陈化年份广陈皮中香气活性组分鉴定[D].杭州:浙江大学,2017.
- [10] 陈聪聪.广陈皮陈化过程中微生物群落多样性解析及代谢物成分变化分析[D].广州:华南理工大学,2017.
- [11] 陈怀琼.白木香通体结香技术的初步评价[D].北京:北京协和医学院,2011.
- [12] 孙敬茹,卜俊玲,赵欢,等.四种姜黄属药用植物根茎和块根挥发性代谢物的多元数据比较分析[J].药学学报,2018,53(8):1215-1224.
- [13] 梅文莉,林峰,戴好富.白木香花和果实挥发油化学成分的 GC-MS 分析[G].海南省首届黎族药物学术交流会议论文集,2008.
- [14] ZHANG Z, ZHANG X, YANG Y, et al. Hydrogen peroxide induces vessel occlusions and stimulates sesquiterpenes accumulation in stems of *Aquilaria sinensis* [J]. Plant Growth Regul, 2014, 72(1): 81-87.
- [15] CHEN HQ, WEI JH, YANG JS, et al. Chemical constituents of agarwood originating from the endemic genus *Aquilaria* plants [J]. Chem Biodivers, 2012, 9(2): 236-250.
- [16] JAYACHANDRAN K, SEKAR I, PARTHIBAN KT, et al. Analysis of different grades of agarwood (*Aquilaria malaccensis* Lamk.) oil through GC-MS [J]. IJNPR, 2015, 5(1): 44-47.
- [17] 杨峻山.沉香化学成分的研究概况[J].天然产物研究与开发,1997,10(1):99-103.
- [18] 李浩华,章卫民,陈玉婵,等.白木香果皮提取物清除 DPPH 自由基能力及抑制酪氨酸酶活性的研究[J].中国民族民间医药,2014,23(8):36-38.
- [19] 夏铮南,王文君.香料与香精[M].北京:中国物资出版社,1998:173-175,217-227.
- [20] 孙宝国,郑福平,刘玉平.香料与香精[M].北京:中国石化出版社,2000:54-55,270-274.

(收稿日期:2018-12-10 编辑:戴玮)