

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200045

文冠果花精油组分研究

袁玮琼¹ 胡建忠² 武艺¹ 殷丽强² 韩雪¹ 王晓雪¹ 吕兆林^{3,4}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 水利部水土保持植物开发管理中心, 北京 100037; 3. 北京林业大学公共分析测试中心, 北京 100083; 4. 林业食品加工与安全北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】研究3种花色文冠果花精油化学组成,探究精油中化合物构成的异同。【方法】以白色、粉色、紫色3种花色的文冠果花瓣为原料,提取得到文冠果花精油,利用气质联用技术(GC-MS)对精油的成分进行分析。【结果】不同颜色的文冠果花精油得率在0.042%~0.050%之间,得率较高的是白色花,为(0.048±0.002)%。3种花色精油中共检测到96种化合物,其中白色花精油检测到的62种化合物,其主要成分为二十一烷(31.46%)、二十四烷(14.16%)、二十烷(7.55%)、壬醛(7.28%)、诱虫烯(4.84%)、植酮(4.83%);粉色花精油检测到的65种化合物,其主要成分为二十一烷(31.96%)、四十四烷(20.83%)、壬醛(6.72%)、十八烷(3.86%)、植酮(3.76%)、十六烷(3.30%);紫色花精油检测到的47种化合物,其主要成分为二十一烷(30.33%)、三十六烷(25.09%)、二十四烷(14.44%)、二十烷(7.42%)、叶绿醇(3.95%)、十六烷(3.28%)。烃类物质在3种精油中的百分含量显著高于其他几类物质($P < 0.05$)。对3种精油中的29种共有化合物进行主成分分析(PCA),可简化为2个主成分,累计方差贡献率达98.112%,可反映样品的绝大部分信息。【结论】不同花色文冠果花精油的得率和化合物组成存在一定差异,在得率方面,白色花精油高于其他花色,但差异并不显著($P > 0.05$);在精油组分方面,粉色花精油化合物种类多于其他花色精油,每种精油中的主要化合物种类与百分含量也存在较大差异。本研究为文冠果花精油的开发利用提供了数据支撑。

关键词: 文冠果花;精油;化合物;主成分分析

中图分类号: S718.43; S789.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)09-0111-11

引文格式: 袁玮琼, 胡建忠, 武艺, 等. 文冠果花精油组分研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 111-121. Yuan Weiqiong, Hu Jianzhong, Wu Yi, et al. Essential oil composition of *Xanthoceras sorbifolium* flower [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(9): 111-121.

Essential oil composition of *Xanthoceras sorbifolium* flower

Yuan Weiqiong¹ Hu Jianzhong² Wu Yi¹ Yin Liqiang² Han Xue¹ Wang Xiaoxue¹ Lü Zhaolin^{3,4}

(1. School of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Seabuckthorn Development of Water Resources Management Center, Beijing 100037, China;

3. Analysis Test Center of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

4. Beijing Key Laboratory of Forestry Food Processing and Safety, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The chemical composition of essential oil from flowers with different colors of *Xanthoceras sorbifolium* was studied, and the similarities and differences of the compounds in the essential oil were investigated. [Method] The essential oil was extracted from the petals of *X. sorbifolium* in white, pink and purple. The components of essential oil were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). [Result] The yield range of essential oil of the three flowers was between 0.042%–0.050%. The higher yield was white flower, which was (0.048±0.002)%. The 96 volatile compounds were detected in three kinds of essential oil. Among the 62 compounds detected by white flower essential oil, the main

收稿日期: 2020-02-20 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 水利部水土保持植物开发管理中心项目(2019HXFWSWXY006)。

第一作者: 袁玮琼。主要研究方向: 天然产物提取与功能性食品开发。Email: ywq1998qm@126.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学生物学院。

责任作者: 吕兆林, 博士, 副教授。主要研究方向: 天然产物提取与功能性食品开发。Email: zhaolinlv@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

components were heneicosane (31.46%), tetracosane (14.16%), eicosane (7.55%), 1-nonanal (7.28%), muscalure (4.84%), perhydrofarnesyl acetone (4.83%); among the 65 compounds detected by pink flower essential oil, the main components were heneicosane (31.96%), tetratetracontane (20.83%), 1-nonanal (6.72%), octadecane (3.86%), perhydrofarnesyl acetone (3.76%), hexadecane (3.30%); among the 47 compounds detected by purple flower essential oil, the main components were heneicosane (30.33%), hexatriacontane (25.09%), tetracosane (14.44%), eicosane (7.42%), phytol (3.95%), hexadecane (3.28%). The content of hydrocarbons in the three kinds of essential oil was significantly higher than that of other types of substances ($P < 0.05$). Principal component analysis (PCA) of 29 common compounds in the three kinds of essential oil can be simplified into two principal components, and the cumulative variance contribution rate was 98.112%, which can reflect most of the information on the samples. [Conclusion] There are some differences in the yield and compound composition of the essential oil in *X. sorbifolium* flower with different colors. In terms of yield, white flower essential oil is higher than other color flower essential oil, but the difference is not significant ($P > 0.05$). In terms of essential oil components, there are more types of compounds in pink flower essential oil than that in other flowers, and there are also large differences in the types and relative contents of the main compounds in each kind of essential oil. This study provides data support for the development and utilization of essential oil extracted from the petals of *X. sorbifolium*.

Key words: *Xanthoceras sorbifolium* flower; essential oil; compound; PCA

文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)是无患子科文冠果属落叶小乔木。文冠果原产中国北方,是我国特有的珍稀木本油料及能源植物^[1]。主要分布于我国秦岭、淮河以北,内蒙古以南,东起辽宁,西至青海,南至河南及江苏北部等地^[2],生长于海拔 550 ~ 1 500 m 处的荒坡、沟谷和丘陵地带^[3]。文冠果具有结实早,产量高,抗寒抗旱能力强以及适应性极强的特点,被我国北方广泛用于防风固沙,涵养水源。

当前对于文冠果的研究大多集中在繁育^[4-5]、遗传^[6-7]、油脂^[8-9]等方面,尤其在油脂方面有大量的报道。研究发现文冠果种子中富含多种营养物质,种仁含油率可达 66.39%,种仁油中的不饱和脂肪酸含量占 90% 左右^[10],还含有植物甾醇、生育酚等多种营养物质^[11-12]。文冠果种仁油还具有多种生理功能,如抗氧化、预防动脉粥样硬化、抗肿瘤等功效^[13-15]。文冠果花是文冠果生长发育过程中的一个重要器官,花期在每年的 4—6 月之间,花朵可以散发清新、宜人的芬芳气味,具有一定观赏价值。按照其颜色和形态可以分为单瓣白花型、单瓣粉花型、重瓣紫花型和重瓣黄花型^[16]。但目前对于文冠果花的研究则鲜见报道。

植物精油是广泛存在于植物体内的一类具有芳香气味的油状液体的总称^[17],通过压榨、蒸馏、萃取等方式从植物的花、叶部位提取得到。精油不仅具有芳香气味,还具有抗氧化^[18]、抗菌^[19]等功效,广泛应用于化妆品、医药以及食品工业,这其中起决定性作

用的是精油中所含有的具体化学成分。近年来大量的文献报道了从不同花中提取得到的精油组分,如玫瑰(*Rosa damascena*)^[20]、牡丹(*Paeonia suffruticosa*)^[21]、石榴(*Punica granatum*)花^[22]等。文冠果作为一种丰富的植物资源,其花朵可以被应用于植物精油开发研究,然而关于文冠果花精油的提取以及组分研究的相关文献还未见报道。

本研究利用吕兆林等^[23]自主研发的精油提取装置提取获得文冠果花精油,对产自于内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗花果营林场的 3 种不同花色的文冠果花进行精油提取,分析不同颜色花的精油得率,利用 GC-MS 分析精油的化学组成,以期开发一种新的植物精油产品,为促进文冠果产业的发展提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 材 料

采集来自内蒙古自治区赤峰市翁牛特旗花果营林场 3 种不同花色的文冠果花—白花(WF)、粉花(PF)、紫花(ZF),样品信息见表 1,将花瓣自然阴干,用粉碎机粉碎至 10 ~ 20 目,装于密封袋中,冷冻保存,备用。正己烷(分析纯)为北京化工厂生产;无水硫酸钠;水为双蒸馏水。

1.2 精油提取

利用吕兆林等^[23]发明的精油提取装置(图 1)提取得到文冠果花精油。提取装置包括圆底烧瓶、冷凝管和提取器,提取器包括连接管、V 型管、两通阀,

表1 样品信息表

Tab. 1 Sample information table

编号 No.	样品 Sample	采摘时花期 Flowering phase at picking time	含水率 Water content/%	采集时间 Picking time
1	白花 White flower (WF)	盛花期 Full bloom	82.35 ± 2.03	2019年5月中旬 Mid May, 2019
2	粉花 Pink flower (PF)	盛花期 Full bloom	80.07 ± 1.27	2019年5月中旬 Mid May, 2019
3	紫花 Purple flower (ZF)	盛花期 Full bloom	85.17 ± 2.92	2019年5月中旬 Mid May, 2019

V型管中装有有机溶剂和水;圆底烧瓶的烧瓶口与提取器的连接管的接口相连,冷凝管与提取器的V型管接口相连,V型管底部设有两通阀。准确称取一定质量的文冠果花粉,置于2 L圆底烧瓶中,按照液料比为20 mL/g加入双蒸馏水,加热回馏6 h以后,分离出有机相(正己烷),用无水硫酸钠进行干燥,再用旋转蒸发器脱除正己烷(水浴温度35 ℃),得到文冠果花精油。精油得率的计算公式如下:

$$X = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为精油的得率(%); m_1 为精油的质量(g); m_2 为干基原料花的质量(g)。

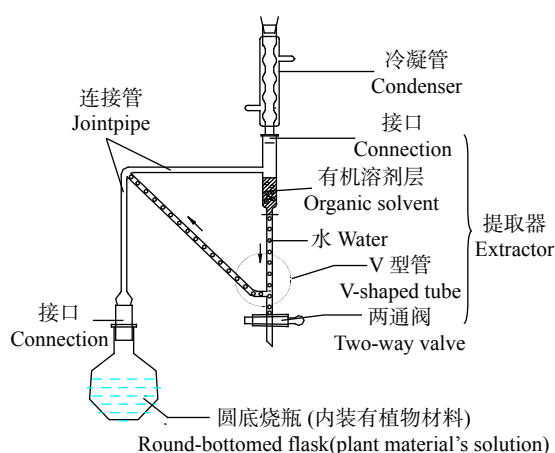


图1 精油提取装置图

Fig. 1 Extraction device of essential oil

1.3 GC-MS 检测文冠果花精油组成

将精油用正己烷溶解,配制成5.0 g/L的溶液,进行GC-MS测试。

气相色谱条件为色谱柱:Rtx-5MS型毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。升温程序:初始温度60 ℃,保持2 min,然后以3 ℃/min的速率升至200 ℃;以20 ℃/min速率升至250 ℃,保持时间5 min;继续以15 ℃/min速率升至280 ℃,保持时间10 min。载气为高纯氦气,流速为1 mL/min,分流进样,进样量1 μL,分流比40:1,进样口温度280 ℃。

质谱条件:电子轰击(EI)离子源电子能量为70 eV,电子倍增器电压为1.00 kV,质荷比扫描范围30~550。离子源温度250 ℃,接口温度为250 ℃。

定性分析:利用NIST11和NIST11s标准质谱库对采集到的质谱图进行检索,并结合保留指数综合定性。

定量分析:采用色谱峰面积归一化法计算各化合物的百分含量。

1.4 数据处理

所有实验重复3次,数据呈现平均值 ± 标准差。采用SPSS19.0进行统计学分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同花色文冠果花精油得率对比

如表2所示,不同花色的文冠果花的精油得率有所不同,得率较高的是白色花,较低的是紫色花,但3种花色间的精油得率无显著差异($P > 0.05$)。相较于文献报道的牡丹花精油(得率为0.010%)^[21],芍药花精油(得率为0.033%)^[24],苦水玫瑰花精油(得率为0.039%)^[25],文冠果花精油得率较高。不同颜色的文冠果花在生长过程中对于光的吸收程度不同,颜色较深的花瓣相较于颜色浅的花瓣吸收了更多的太阳光辐射,一定程度上会对花瓣造成光损伤,影响花瓣中精油的含量^[26]。在花型方面,紫花属于重瓣形,花瓣较为密集,内部的花瓣由于受到外部花瓣的遮挡,接受的太阳辐射较少。此外,品种、生境、花期、植株密度等,都是影响植物花朵精油含量的重要因素^[27]。

表2 文冠果花精油得率

Tab. 2 Essential oil yield of *X. sorbifolium* flower

样品 Sample	WF	PF	ZF
精油得率 Essential oil yield /%	0.050 ± 0.002 ^a	0.048 ± 0.002 ^a	0.042 ± 0.008 ^a

注:平均值 ± 标准差($n = 3$);相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。Notes: mean ± SD ($n = 3$). Identical letters indicate not significant difference ($P > 0.05$).

2.2 不同花色文冠果花精油成分对比

3种不同花色文冠果花提取到的精油化合物的种类依次为:白色62种、粉色65种、紫色47种。表3对上述文冠果花精油的化合物进行了统计,3种文冠果花精油共得到96种化合物。其中白色文冠果花精油鉴定出62种化合物,其主要成分为二十一烷(31.46%)、二十四烷(14.16%)、二十烷(7.55%)、壬

表3 不同花色文冠果花精油组分

Tab. 3 Essential oil composition of *X. sorbifolium* flower with different colors

化合物种类 Compound type	保留指数 Retention index	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	百分含量 Percentage content/%			
				WF	PF	ZF	
醇类 Alcohol	868	3-己烯-1-醇 3-hexen-1-ol	C ₆ H ₁₂ O	0.23		0.18	
	868	叶醇 Leaf alcohol	C ₆ H ₁₂ O		0.21		
	868	2-己烯-1-醇 2-hexen-1-ol	C ₆ H ₁₂ O		0.18	0.17	
	860	正己醇 Hexyl alcohol	C ₆ H ₁₄ O	0.29	0.17	0.14	
	960	1-庚醇 1-heptanol	C ₇ H ₁₆ O	0.04			
	969	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	2.58	1.72	1.50	
	964	6-甲基-5-庚烯-2-醇 6-methyl-5-hepten-2-ol	C ₈ H ₁₆ O	0.06			
	995	3-甲基-1-庚醇 3-methyl-1-heptanol	C ₈ H ₁₈ O	0.07			
	995	2-乙基己醇 2-ethyl-1-hexanol	C ₈ H ₁₈ O	0.04			
	1 059	正辛醇 1-octanol	C ₈ H ₁₈ O	0.49	0.34	0.20	
	1 082	芳樟醇 Linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	0.88	0.32	1.09	
	1 179	香茅醇 Citronellol	C ₁₀ H ₂₀ O		0.11		
	1 071	2,3,4,5-四甲基环戊-2-烯醇 2,3,4,5-tetramethylcyclopent-2-en-1-ol	C ₉ H ₁₆ O			0.05	
	1 072	3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇 3,7-dimethyl-1,5,7-octatrien-3-ol	C ₁₀ H ₁₆ O			1.18	
	1 136	苯乙醇 Phenylethyl alcohol	C ₈ H ₁₀ O	0.06		0.06	
	1 175	黄瓜醇 2,6-nonadien-1-ol	C ₉ H ₁₆ O	0.08			
	1 159	1-壬醇 1-nonanol	C ₉ H ₂₀ O	1.64	0.59	0.63	
	1 143	α -松油醇 α -terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	0.08	0.05	0.19	
	1 230	2,6,6-三甲基环己-2-烯-1-甲醇 2,6,6-trimethylcyclohex-2-ene-1-methanol	C ₁₀ H ₁₈ O	0.32	0.19	0.04	
	1 228	香叶醇 Geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	0.15	0.07	0.18	
	1 593	β -桉叶醇 β -eudesmol	C ₁₅ H ₂₆ O			0.07	
	1 457	十二醇 1-dodecanol	C ₁₂ H ₂₆ O	0.20			
	1 556	十三醇 1-tridecanol	C ₁₃ H ₂₈ O		0.07		
	1 656	1-十四醇 1-tetradecanol	C ₁₄ H ₃₀ O		0.15		
	1 710	合金欢醇 3,7,11-trimethyl-2,6,10-dodecatrien-1-ol	C ₁₅ H ₂₆ O	0.25		0.09	
	1 563	3,7,11-三甲基-1-十二烷醇 3,7,11-trimethyl-1-dodecanol	C ₁₅ H ₃₂ O	0.14	0.14	0.09	
	2 045	叶绿醇 Phytol	C ₂₀ H ₄₀ O	1.48	1.34	3.95	
	1 996	3,7,11,15-四甲基十六烷-1-醇 3,7,11,15-tetramethyl-1-hexadecanol	C ₂₀ H ₄₂ O		0.07		
	醇类总百分含量 Total alcohol percentage content				9.08	5.72	9.81
	醛类 Aldehyde	905	正庚醛 Heptaldehyde	C ₇ H ₁₄ O	0.08	0.09	0.05
1 104		壬醛 1-nonanal	C ₉ H ₁₈ O	7.28	6.72	2.30	
1 186		2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛 2,3-dihydro-2,2,6-trimethylbenzaldehyde	C ₁₀ H ₁₄ O	0.15	0.14	0.06	
1 204		癸醛 Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	0.04			
1 303		2,6,6-三甲基-1-环己烯基乙醛 2,6,6-trimethyl-1-cyclohexene-1-acetaldehyde	C ₁₁ H ₁₈ O	0.09	0.08		
1 402		十二醛 Dodecyl aldehyde	C ₁₂ H ₂₄ O	0.06			
1 502		十三醛 Tridecanal	C ₁₃ H ₂₆ O		0.04		
1 499		可卡醛 Cocal	C ₁₃ H ₁₆ O	0.22	0.11		
1 663		α -戊基肉桂醛 Amylcinnamaldehyde	C ₁₄ H ₁₈ O			0.13	
1 601		肉豆蔻醛 Tetradeanal	C ₁₄ H ₂₈ O	2.48	1.43	0.14	
1 701	十五醛 Pentaaldehyde	C ₁₅ H ₃₀ O		0.03	0.12		

表 3(续)
Tab.3 (continued)

化合物种类 Compound type	保留指数 Retention index	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	百分含量 Percentage content/%		
				WF	PF	ZF
	1 800	十六醛 Hexadecanal	C ₁₆ H ₃₂ O	1.21	2.58	
	1 999	十八醛 Octadecanal	C ₁₈ H ₃₆ O	0.17	0.21	0.19
		醛类总百分含量 Total aldehyde percentage content		11.78	11.43	2.99
酮类 Ketone	938	甲基庚烯酮 6-methyl-5-hepten-2-one	C ₈ H ₁₄ O	0.05	0.05	
	952	3-辛酮 3-octanone	C ₈ H ₁₆ O			0.06
	1 097	3,5,5-三甲基-3-环己烯-1-酮 3,5,5-trimethyl-3-cyclohexen-1-one	C ₉ H ₁₄ O	0.05	0.04	
	1 097	异佛尔酮 Isophorone	C ₉ H ₁₄ O	0.1	0.07	0.03
	1 240	2-戊基-2-环戊烯-1-酮 2-pentyl-2-cyclopenten-1-one	C ₁₀ H ₁₆ O	0.1	0.07	
	1 199	优葛缕酮 2,6,6-trimethylcyclohepta-2,4-dien-1-one	C ₁₀ H ₁₄ O	0.95	0.87	0.28
	1 251	2-十一酮 2-undecanone	C ₁₁ H ₂₂ O	0.18	0.13	
	1 267	2-(2-丁炔基)环己酮 2-(2-butyryl)-cyclohexanone	C ₁₀ H ₁₄ O	0.19		
	1 054	2,3,4,5-四甲基-2-环戊烯酮 2,3,4,5-tetramethyl-2-cyclopenten-1-one	C ₉ H ₁₄ O	0.72	0.48	
	1 069	4-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮 4-(1-methylethyl)-2-cyclohexen-1-one	C ₉ H ₁₄ O			0.09
	1 161	1-(1,4-二甲基-3-环己烯-1-基)乙酮 1-(1,4-dimethyl-3-cyclohexen-1-yl)-ethanone	C ₁₀ H ₁₆ O			0.05
	1 119	马苳烯酮(s)-verbenone	C ₁₀ H ₁₄ O			0.25
	1 268	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮 2,6,6-trimethyl-2-cyclohexene-1,4-dione	C ₉ H ₁₂ O ₂		0.04	
	1 440	大马士酮 Damascenone	C ₁₃ H ₁₈ O	0.48	0.30	0.31
	1 321	六氢假紫罗酮 2,6-dimethylundecane-10-one	C ₁₃ H ₂₆ O		0.06	
	1 557	β -甲基紫罗兰酮 1-(2,2,6-trimethylcyclohex-1-en-1-yl)-1-penten-3-one	C ₁₄ H ₂₂ O	0.07		
	1 648	2-十五酮 2-Pentadecanone	C ₁₅ H ₃₀ O		0.02	
	1 420	香叶基丙酮 Geranylacetone	C ₁₃ H ₂₂ O	0.23	0.23	0.14
	1 449	2-十三酮 2-tridecanone	C ₁₃ H ₂₆ O	0.09	0.10	
	2 046	2-十九烷酮 2-nonadecanone	C ₁₉ H ₃₈ O	0.05		
1 754	植酮 Perhydrofarnesyl acetone	C ₁₈ H ₃₆ O	4.83	3.76	3.02	
2 161	3-十二烷基呋喃-2,5-二酮 3-dodecyl-2,5-furandione	C ₁₆ H ₂₆ O ₃	0.28			
1 902	法尼基丙酮 Farnesyl acetone	C ₁₈ H ₃₀ O		0.05		
2 139	去氢表雄酮 Dehydroepiandrosterone	C ₁₉ H ₂₈ O ₂		0.47		
		酮类总百分含量 Total ketone percentage content		8.37	6.74	4.23
烃类 Hydrocarbon	816	2,5,5-三甲基-2-己烯 2,5,5-trimethyl-2-hexene	C ₉ H ₁₈	0.38	0.22	0.20
	1 185	2,8-二甲基十一烷 2,8-dimethylundecane	C ₁₃ H ₂₈			0.05
	1 339	β -波旁烯 β -bourbonene	C ₁₅ H ₂₄		0.06	
	1 313	十三烷 Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	1.69	1.07	0.14
	1 612	十六烷 Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	4.12	3.3	3.28
	1 512	十五烷 Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	1.44	1.06	0.22
	1 386	(+)-香橙烯(+)-aromadendrene	C ₁₅ H ₂₄	0.08		
	1 711	十七烷 Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	0.44	0.45	0.20
	1 746	3-甲基十七烷 3-methylheptadecane	C ₁₈ H ₃₈		1.01	
	1 810	十八烷 Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	0.93	3.86	0.27
	1 910	十九烷 Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	0.14		
	1 900	1-十九烯 1-nonadecene	C ₁₉ H ₃₈	0.91	0.12	

表 3(续)
Tab.3 (continued)

化合物种类 Compound type	保留指数 Retention index	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	百分含量 Percentage content/%		
				WF	PF	ZF
	2 009	二十烷 Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	7.55		7.42
	2 351	诱虫烯 Muscalure	C ₂₃ H ₄₆	4.84	2.58	
	2 109	二十一烷 Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	31.46	31.96	30.33
	2 407	二十四烷 Tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	14.16	0.73	14.44
	2 208	二十二烷 Docosane	C ₂₂ H ₄₆		2.52	
	3 600	三十六烷 Hexatriacontane	C ₃₆ H ₇₄		2.05	25.09
	3 997	四十烷 Tetracontane	C ₄₀ H ₈₂		1.44	
	4 395	四十四烷 Tetratetracontane	C ₄₄ H ₉₀		20.83	
		烃类总百分含量 Total hydrocarbon percentage content		68.14	73.26	81.64
酯类 Ester	1 878	棕榈酸甲酯 Methyl hexadecanoate	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	0.10		
	2 034	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	2.41	1.24	1.02
	1 908	邻苯二甲酸二异丁酯 Diisobutyl phthalate	C ₁₆ H ₂₂ O ₄		0.20	
	1 779	肉豆蔻醇乙酸酯 Tetradecyl acetate	C ₁₆ H ₃₂ O ₂		0.31	
		酯类总百分含量 Total ester percentage content		2.51	1.75	1.02
其他 Others	1 040	2-戊基呋喃 2-amylfuran	C ₉ H ₁₄ O	0.05		
	1 114	4-乙基苯酚 4-ethylphenol	C ₈ H ₁₀ O	0.03		
	1 125	3,6-二氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃 4-methyl-2-(2-methylprop-1-enyl)-3,6-dihydro-2H-pyran	C ₁₀ H ₁₆ O			0.06
	1 371	乙烯基癸酸 Vinyl decanoate	C ₁₂ H ₂₂ O ₂		0.14	
	1 787	2-乙基己酸酐 2-ethylhexanoic acid anhydride	C ₁₆ H ₃₀ O ₃	0.04	0.07	
	1 633	2,6-二叔丁基苯醌 2,6-di-tert-butyl-p-benzoquinone	C ₁₄ H ₂₀ O ₂		0.32	
	2 159	十二烯基丁二酸酐 2-dodecen-1-yl succinic anhydride	C ₁₆ H ₂₆ O ₃		0.57	0.25
		其他总百分含量 Other total percentage content		0.12	1.10	0.31

醛(7.28%)、诱虫烯(4.84%)、植酮(4.83%); 粉色文冠果花精油鉴定出 65 种化合物, 其主要成分为二十一烷(31.96%)、四十四烷(20.83%)、壬醛(6.72%)、十八烷(3.86%)、植酮(3.76%)、十六烷(3.30%); 紫色文冠果花精油鉴定出 47 种化合物, 其主要成分为二十一烷(30.33%)、三十六烷(25.09%)、二十四烷(14.44%)、二十烷(7.42%)、叶绿醇(3.95%)、十六烷(3.28%)。

2.3 不同花色文冠果花精油挥发性化合物类别差异分析

对不同花色文冠果花精油化合物成分进行分类, 精油中主要有 6 类化合物, 分别是醇类、醛类、酮类、烃类、酯类和其他。图 2、图 3 分别对不同类别的化合物进行对比分析。

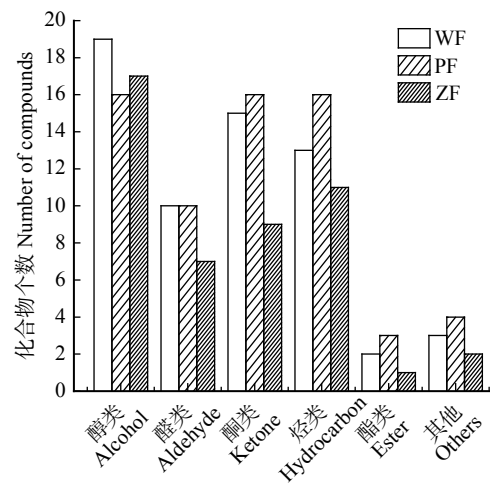
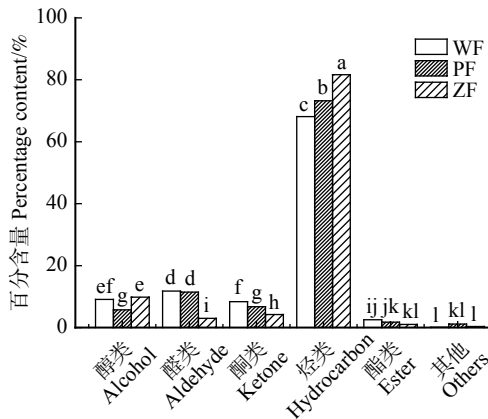


图 2 不同花色文冠果花精油不同类别的化合物个数对比
Fig. 2 Comparison in the number of different types of compounds among different colors of essential oil of *X. sorbifolium* flowers



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters in the picture indicate significant differences ($P < 0.05$)。

图3 不同花色文冠果花精油不同类别化合物含量对比

Fig. 3 Comparison in different types of compounds of essential oil for varied colors of *X. sorbifolium* flowers

白色文冠果花精油共检测到 19 种醇类(9.08%)物质, 10 种醛类(11.78%)物质, 15 种酮类(8.37%)物质, 13 种烃类(68.14%)物质以及 2 种酯类(2.51%)物质。粉色文冠果花精油检测到 16 种醇类(5.72%)物质, 10 种醛类(11.43%)物质, 16 种酮类(6.74%)物质, 16 种烃类(73.26%)物质和 3 种酯类(1.75%)物质。紫色文冠果花精油检测到 17 种醇类(9.81%)物质, 7 种醛类(2.99%)物质, 9 种酮类(4.23%)物质, 11 种烃类(81.64%)物质以及 1 种酯类(1.02%)物质。

烃类物质在 3 种精油中的百分含量皆显著高于其他几类($P < 0.05$), 且紫色花中的显著高于粉色花显著高于白色花精油($P < 0.05$), 但是烷烃类化合物阈值较高^[28], 对总体气味的贡献不大, 烃类物质百分含量高的原因可能是起保护作用的花瓣表面蜡质层, 而蜡质层的主要成分为烷烃类化合物^[29], 长链烷烃类化合物在常温下难挥发, 最终使得检测结果中烃类物质的百分含量较高。醛类物质方面白色花与粉色花百分含量相当($P > 0.05$)且显著高于($P < 0.05$)紫色花精油, 醛类物质阈值较低^[28], 具有较强的挥发性和脂肪香味。醇类物质在紫色和白色花精油中的百分含量显著高于粉色花($P < 0.05$), 醇类通常具有柔和的芳香、植物香。酮类与酯类物质在白色花精油中百分含量最高, 酮类化合物一般具有花果香味。

影响花朵颜色的因素有很多, 花瓣中的色素, 如花青素、类胡萝卜素、类黄酮等, 同时各种生态因子, 如光照、温度、湿度、土壤养分含量, 会影响花瓣细胞的 pH 值、酶、糖含量、花青素的稳定性等, 进而影响花色素的合成或者导致有些花色素的分子结构改变, 造成花瓣呈现出不同的颜色^[30-32]。上述这些因素相应也会影响从花瓣中提取所得的精油中化合物成

分, 导致不同花色文冠果花精油成分产生差异。

2.4 主成分分析

主成分分析法(PCA)采用一种数学降维的方法, 用几个综合变量来代替原来众多的变量, 使这些综合变量尽可能地代表原来所有变量的信息量, 且彼此之间互不相关^[33]。利用 SPSS19.0 软件对 3 种花色文冠果花精油成分中的共有化合物进行 PCA 分析, 3 种精油中有 29 种共有化合物, 具体化合物信息及其百分含量见表 4。

29 种共有化合物的特征值和贡献率见下表 5, 成分载荷矩阵分析结果见表 6。根据特征值大于 1 的原则, 共分析出 2 个主成分, 贡献率分别为 69.247%、28.864%, 累计贡献率达到了 98.111%, 说明这两个主成分能够反映原始变量的绝大部分信息, 分析结果将原有文冠果花中的 29 种共有化合物降到了 2 个不相关的主成分, 达到了降维的目的。

由表 6 分析得出: 第一主成分(PC1)中载荷较高的化合物主要有正己醇(飘逸的杂醇油果、酒精气味)、1-辛烯-3-醇(蘑菇、薰衣草、玫瑰香气)、正辛醇(水果、玫瑰、蘑菇气味)、壬醇(新鲜的脂肪玫瑰橙花香、柑桔味)、2,6,6-三甲基环己-2-烯-1-甲醇、植酮(油性草药、茉莉、芹菜、木香)、大马士酮(苹果、玫瑰、蜂蜜、烟草甜味道)、肉豆蔻醛(脂肪蜡状琥珀香、柑橘皮、麝香、水果味)、十六烷、2,5,5-三甲基-2-己烯和邻苯二甲酸二丁酯(微弱的脂肪味); 第二主成分(PC2)中载荷较高的正影响化合物主要有正庚醛(草药味)、二十一烷、十八烷和十七烷, 载荷较高的负影响化合物有芳樟醇(甜嫩新鲜的花香, 似铃兰香气)、 α -松油醇(松萜烯、丁香、柑橘、木质、花香味)、香叶醇(温和、甜的玫瑰花气息)、叶绿醇(花香、脂粉、蜡状味道)和二十四烷。

利用 SPSS19.0 软件对 3 种精油进行主成分分析时, 按照剔除最小特征值的主成分对应的最大特征向量的变量原则, 每次剔除一个变量, 然后对剩余变量进行主成分分析, 分别可以得到样品得分图(图 4)和主成分载荷图(图 5)。分析不同花色精油得分情况发现: PC1 得分最高的是白色花, PC2 得分最高的是粉色花。载荷图中的第一象限集中分布了大量的物质, 其他几种物质零星分布在其他象限。由图 4 可以看出 3 种花色的文冠果精油分布于不同的象限内, 表明 3 种精油存在较大的差异。

3 结 论

由实验可知, 不同颜色的文冠果花精油得率不尽相同, 白色花的精油得率相对较高, 但 3 种花色的文冠果花精油得率无显著差异($P > 0.05$)。利用

表4 不同花色文冠果花提取精油共有成分

Tab. 4 Common compounds of essential oil for different colors of *X. sorbifolium* flowers

序号 No.	化合物 Compound	百分含量 Percentage content/%		
		WF	PF	ZF
1	正己醇 Hexyl alcohol	0.29	0.17	0.14
2	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	2.58	1.72	1.50
3	正辛醇 1-octanol	0.49	0.34	0.20
4	芳樟醇 Linalool	0.88	0.32	1.09
5	1-壬醇 1-nonanol	1.64	0.59	0.63
6	α -松油醇 α -terpineol	0.08	0.05	0.19
7	2,6,6-三甲基环己-2-烯-1-甲醇 2,6,6-trimethyl-2,4-cycloheptadien-1-one	0.32	0.19	0.04
8	香叶醇 Geraniol	0.15	0.07	0.18
9	3,7,11-三甲基-1-十二烷醇 3,7,11-trimethyl-1-dodecanol	0.14	0.14	0.09
10	叶绿醇 Phytol	1.48	1.34	3.95
11	正庚醛 Heptaldehyde	0.08	0.09	0.05
12	壬醛 1-nonanal	7.28	6.72	2.30
13	2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛 2,3-dihydro-2,2,6-trimethylbenzaldehyde	0.15	0.14	0.06
14	肉豆蔻醛 Tetradecanal	2.48	1.43	0.14
15	十八醛 Octadecanal	0.17	0.21	0.19
16	异佛尔酮 Isophorone	0.10	0.07	0.03
17	优葛缕酮 2,6,6-trimethylcyclohepta-2,4-dien-1-one	0.95	0.87	0.28
18	大马士酮 Damascenone	0.48	0.30	0.31
19	香叶基丙酮 Geranylacetone	0.23	0.23	0.14
20	植酮 Perhydrofarnesyl acetone	4.83	3.76	3.02
21	2,5,5-三甲基-2-己烯 2,5,5-trimethyl-2-hexene	0.38	0.22	0.20
22	十三烷 Tridecane	1.69	1.07	0.14
23	十六烷 Hexadecane	4.12	3.30	3.28
24	十五烷 Pentadecane	1.44	1.06	0.22
25	十七烷 Heptadecane	0.44	0.45	0.20
26	十八烷 Octadecane	0.93	3.86	0.27
27	二十一烷 Heneicosane	31.46	31.96	30.33
28	二十四烷 Tetracosane	14.16	0.73	14.44
29	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	2.41	1.24	1.02
合计 Total		81.83	62.64	64.63

表5 主成分的特征值和贡献率

Tab. 5 Characteristic values and contribution rates of principal components

主因子 Principal factor	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	20.082	69.247	69.247
2	8.371	28.864	98.112
3	0.547	1.887	99.999
4	0	0.001	100.000

表6 主成分载荷矩阵

Tab. 6 Principal component load matrix

序号 No.	化合物 Compound	成份 Composition	
		1	2
1	正己醇 Hexyl alcohol	0.979	0.151
2	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	0.991	0.136
3	正辛醇 1-octanol	0.898	0.439
4	芳樟醇 Linalool	0.202	-0.973
5	壬醇 1-nonanol	0.994	-0.084
6	α -松油醇 α -terpineol	-0.360	-0.933
7	2,6,6-三甲环己-2-烯-1-甲醇 2,6,6-trimethylcyclohex-2-ene-1-methanol	0.869	0.493
8	香叶醇 Geraniol	0.199	-0.979
9	3,7,11-三甲基-1-十二烷醇 3,7,11-trimethyl-1-dodecanol	0.508	0.829
10	叶绿醇 Phytol	-0.509	-0.856
11	植酮 Perhydrofarnesyl acetone	0.936	0.352
12	香叶基丙酮 Geranylacetone	0.533	0.841
13	大马士酮 Damascenone	0.992	-0.115
14	优葛缕酮 2,6,6-trimethylcyclohepta-2,4-dien-1-one	0.636	0.769
15	异佛尔酮 Isophorone	0.830	0.462
16	十八醛 Octadecanal	-0.762	0.545
17	2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲醛 2,3-dihydro-2,2,6-trimethylbenzalhyde	0.612	0.783
18	壬醛 1-nonanal	0.632	0.769
19	正庚醛 Heptaldehyde	0.285	0.903
20	肉豆蔻醛 Tetradecanal	0.866	0.498
21	二十四烷 Tetracosane	0.432	-0.891
22	二十一烷 Heneicosane	0.274	0.955
23	十八烷 Octadecane	-0.287	0.947
24	十七烷 Heptadecane	0.516	0.856
25	十五烷 Pentadecane	0.783	0.618
26	十六烷 Hexadecane	0.998	-0.030
27	十三烷 Tridecane	0.836	0.545
28	2,5,5-三甲基-2-己烯 2,5,5-trimethyl-2-hexene	0.990	0.061
29	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	0.995	0.095

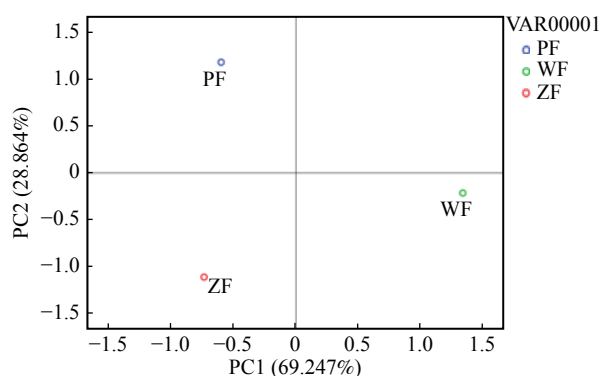


图4 样品得分图

Fig. 4 Sample score chart

GC-MS 对文冠果花精油成分进行分析, 从不同花色的文冠果花精油中检测到了 96 种化合物, 粉色花精油中的化合物种类较多于其他花色的精油, 所有的化合物中包括 29 种共有化合物。3 种精油中化合物的种类主要包括醇类、醛类、酮类、烃类、酯类这 5 类, 而烃类物质的百分含量显著高于其他几类 ($P < 0.05$)。通过 PCA 分析, 将文冠果花精油中的共有化合物成功降维, 得到的两个主成分的差异性在香气的体现上分别为水果、玫瑰香和木质、草香等香气。本研究首次对 3 种不同花色文冠果花精油进行了分析, 以期为开发文冠果花产品, 促进文冠果产业的发展提供数据支撑。

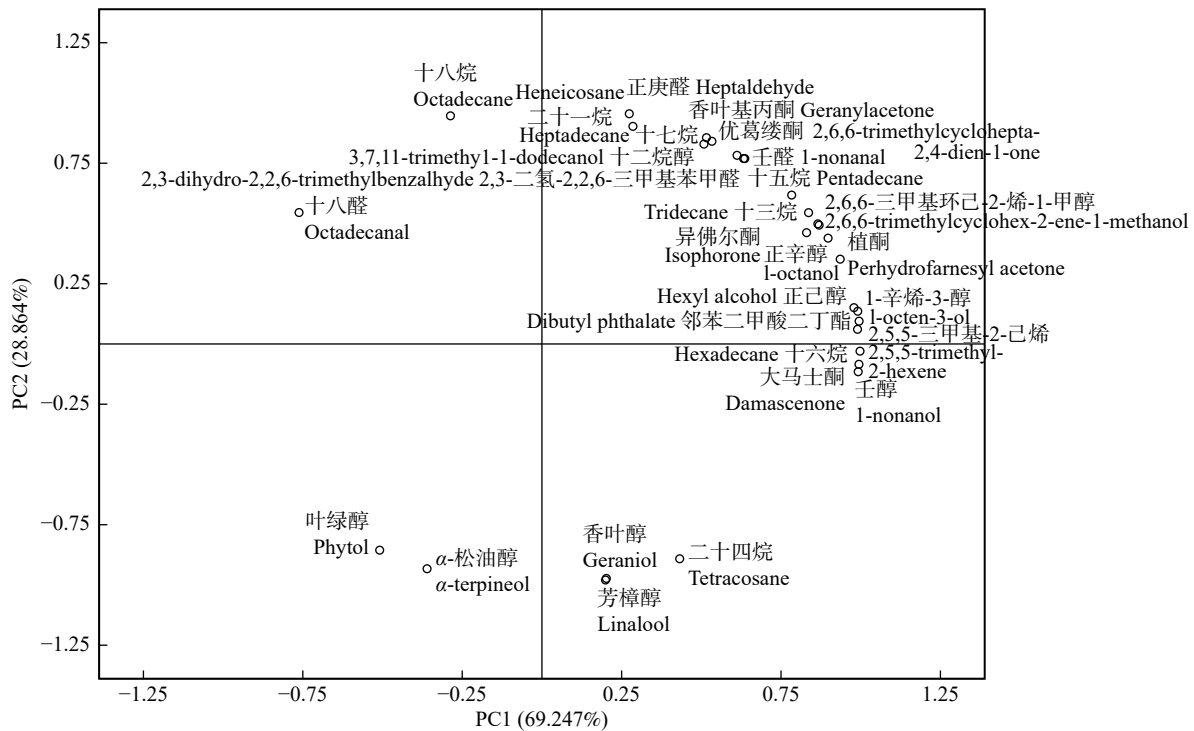


图 5 29 种化合物在主成分上的载荷图

Fig. 5 Load diagram of 29 components on the principal component

参 考 文 献

- [1] 敖妍, 段劫, 于海燕, 等. 文冠果研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 197-203.
Ao Y, Duan J, Yu H Y, et al. Research progress on *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 197-203.
- [2] Wang Q, Yang L, Ranjitkar S, et al. Distribution and in situ conservation of a relic Chinese oil woody species *Xanthoceras sorbifolium* (yellowhorn)[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, 47(11): 1450-1456.
- [3] 朱仁斌. 中国特有植物文冠果 (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) 的谱系地理研究与应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Zhu R B. Phylogeography of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge, an endemic plant to China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [4] 柴春林, 柴春山, 戚建莉, 等. 西北干旱区文冠果不同繁育技术研究[J]. 林业资源管理, 2018(3): 101-106.
Chai C L, Chai C S, Qi J L, et al. Different propagation technologies for *Xanthoceras sorbifolia* in arid area of northwest China[J]. *Forestry Resource Management*, 2018(3): 101-106.
- [5] 刘祯悦, 阮成江, 王莉, 等. 文冠果种仁油脂脂肪酸形成的多基因协同调控[J]. 分子植物育种, 2019, 17(6): 1834-1842.
Liu L Y, Ruan C J, Wang L, et al. Coordinated regulation of multigenes formed by fatty acids in kernel oil of *Xanthoceras sorbifolium*[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(6): 1834-1842.
- [6] 黄炎子, 宋美华, 郭永恒, 等. 文冠果不同交配组合种实性状变异及综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 42-56.
Huang Y Z, Song M H, Guo Y H, et al. Variation and comprehensive evaluation of fruit and seed phenotypic traits of different mating combinations in *Xanthoceras sorbifolium*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(1): 42-56.
- [7] Shen Z, Duan J, Ma L. Genetic diversity of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge germplasm using morphological traits and microsatellite molecular markers[J/OL]. *PLoS ONE*, 2017, 12(6): e0177577 [2019-10-02]. <http://DOI:10.1371/journal.pone.0177577>.
- [8] Yu H, Fan S, Bi Q, et al. Seed morphology, oil content and fatty acid composition variability assessment in yellow horn (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) germplasm for optimum biodiesel production[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 97: 425-430.
- [9] Wu Y, Yuan W, Han X, et al. Integrated analysis of fatty acid, sterol and tocopherol components of seed oils obtained from four varieties of industrial and environmental protection crops[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 154: 112655.
- [10] Li J, Zu Y G, Luo M, et al. Aqueous enzymatic process assisted by microwave extraction of oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) seed kernels and its quality evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(4): 2152-2158.
- [11] 刘俊义, 赵茜茜, 张志宇, 等. 文冠果种仁油中甾醇的抑菌活性及其机理初探[J]. 中国油脂, 2016, 41(10): 29-33.
Liu J Y, Zhao Q Q, Zhang Z Y, et al. Antibacterial activity and its mechanism of sterol from kernel oil of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. *China Oils and Fats*, 2016, 41(10): 29-33.
- [12] 赵芳, 李桂华, 刘振涛, 等. 文冠果油理化特性及组成分析研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 45-49.
Zhao F, Li G H, Liu Z T, et al. Study on physicochemical properties and composition of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge oil[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural*

- Science Edition), 2011, 32(6): 45–49.
- [13] Zhang S, Zu Y G, Fu Y J, et al. Supercritical carbon dioxide extraction of seed oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) and its anti-oxidant activity[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(7): 2537–2544.
- [14] 王颖, 姜生, 孟大利, 等. 文冠果的化学成分与生物活性研究进展[J]. *现代药物与临床*, 2011, 26(4): 269–273.
- Wang Y, Jiang S, Meng D L, et al. Advances in study on chemical and biological activity of *Xanthoceras sorbifolia*[J]. *Drugs & Clinic*, 2011, 26(4): 269–273.
- [15] Cao L Q, Li D D, Hong D, et al. Study on the extraction and antibacterial properties of phytosterol from the shinyleaf yellowhorn seed oil[J]. *Natural Product Research and Development*, 2010, 84(3): 505–506.
- [16] 敖妍. 木本能源植物文冠果类型划分、单株选择及相关研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- Ao Y. Type classification, individual selection and relevant studies on woody energy plant *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [17] 孙嘉怡. 牡丹花瓣精油化学成分及其抗氧化能力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Sun J Y. The study on chemical composition and antioxidant ability of essential oil from tree peony petal [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [18] Tohidi B, Rahimmalek M, Arzani A. Essential oil composition, total phenolic, flavonoid contents, and antioxidant activity of *Thymus* species collected from different regions of Iran[J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 153–161.
- [19] Khanjari A, Bahonar A, Noori N, et al. In vitro antibacterial activity of *Pimpinella anisum* essential oil and its influence on microbial, chemical, and sensorial properties of minced beef during refrigerated storage[J]. *Journal of Food Safety*, 2019, 39(4): 1–8.
- [20] Baydar H, Schulz H, Krüger H, et al. Influences of fermentation time, hydro-distillation time and fractions on essential oil composition of damask rose (*Rosa damascene* Mill.)[J]. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 2008, 11(3): 224–232.
- [21] 于荟, 马文平, 刘延平, 等. 顶空-气相色谱-质谱法分析牡丹鲜花精油中的挥发性成分[J]. *食品科学*, 2015, 36(18): 167–171.
- Yu H, Ma W P, Liu Y P, et al. Analysis of volatile components in peony essence oil by headspace gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2015, 36(18): 167–171.
- [22] 贾秀稳, 张立华, 李先如, 等. 石榴花精油成分分析及清除自由基能力评价[J]. *食品科学*, 2015, 36(24): 152–155.
- Jia X W, Zhang L H, Li X R, et al. Analysis of the chemical constituents of essential oil from pomegranate flower and evaluation of its free radical scavenging ability[J]. *Food Science*, 2015, 36(24): 152–155.
- [23] 吕兆林, 张柏林, 姚永红, 等. 一种植物精油提取装置及用该装置制备竹叶精油的方法: 200910180620.7[P]. 2010–04–14.
- Lü Z L, Zhang B L, Yao Y H, et al. A plant essential oil extraction device and a method for preparing bamboo leaf essential oil using the device: 200910180620.7[P]. 2010–04–14.
- [24] 权春梅, 周光皎, 朱勇, 等. 水蒸气蒸馏法提取芍花精油研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2017, 14(8): 8–11.
- Quan C M, Zhou G J, Zhu Y, et al. Study on the extraction of peony essential oil by steam distillation[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2017, 14(8): 8–11.
- [25] 周学森, 蒋玉梅, 毕阳, 等. 苦水玫瑰精油提取及其成分的GC/MS分析[J]. *食品工业科技*, 2009, 30(11): 226–229.
- Zhou X S, Jiang Y M, Bi Y, et al. Extraction of essential oil from Ku-shui rose and component analysis by GC/MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2009, 30(11): 226–229.
- [26] 师生波, 贲桂英, 韩发. 不同海拔地区紫外线B辐射状况及植物叶片紫外线吸收物质含量的分析[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 529–535.
- Shi S B, Bi G Y, Han F. Analysis of UV-B radiation status and contents of UV-absorbing substances in plant leaves in different altitude areas[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1999, 23(6): 529–535.
- [27] 翟轩. 薰衣草生长发育及物质组分配积动态研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- Zhai X. Study on the dynamic growth and components accumulation of *Lavandula angustifolia* [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011.
- [28] 贾培培, 王锡昌. 蒸制和煮制方式下中华鳖裙边挥发性气味成分分析[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(6): 66–89.
- Jia P P, Wang X C. Analysis of odor components derived from Chinese soft-shelled turtle (*Trionyx sinensis*) calipash cooked by steaming and boiling[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(6): 66–89.
- [29] 徐静, 王美玲, 李婷婷, 等. 烟草叶片表面蜡质成分及含量研究[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(4): 140–145.
- Xu J, Wang M L, Li T T, et al. Composition and content of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaf cuticular waxes[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(4): 140–145.
- [30] 戴思兰, 洪艳. 基于花青素苷合成和呈色机理的观赏植物花色改良分子育种[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(3): 128–141.
- Dai S L, Hong Y. Molecular breeding for flower colors modification on ornamental plants based on the mechanism of anthocyanins biosynthesis and coloration[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 128–141.
- [31] 程怡. 月季‘仙境’花色色素组分及影响花色呈色因子分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- Cheng Y. *Rosa hybrida* pigment composition and rose in bloom process physiological characteristics of the study [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014.
- [32] 陈晓琼, 张红宇, 徐培洲, 等. 有色稻中花色素、原花色素以及黄酮含量的分析[J]. *分子植物育种*, 2008, 6(2): 245–250.
- Chen X Q, Zhang H Y, Xu P Z, et al. Analysis of content of anthocyanidins, proanthocyanidins and flavone in color rice[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2008, 6(2): 245–250.
- [33] Monahan A H. Nonlinear principal component analysis by neural networks: theory and application to the Lorenz system[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(4): 821–835.

(责任编辑 赵勃 吴娟
责任编辑 许凤)