

文章编号: 1674-7054(2020)02-0163-07

大羽藓形态学性状及挥发性成分的 GC-MS 分析

秦鑫婷^{1,2,3}, 杨琳⁴, 许琼玉³, 胡旭⁵, 王新广^{1,3}, 张莉娜^{1,2,3}

(1. 海南大学热带生物资源教育部重点实验室, 海口 570228; 2. 海南大学环南海陆域生物多样性研究中心, 海口 570228; 3. 海南大学生命科学与药学院, 海口 570228; 4. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 5. 海南大学园艺学院, 海口 570228)

摘要: 为探究传统中药大羽藓的形态学特征及挥发性化学成分, 以海南黎母山的大羽藓 (*Thuidium cymbifolium* (Dozy et Molke.) Dozy et Molke.) 为研究材料, 对其形态性状进行了描述, 比较了该种与 4 个近缘种或变种的形态差异, 并采用石油醚快速溶剂萃取技术结合 GC-MS 法对其挥发性物质进行萃取和化学成分分析。共鉴定出 31 种挥发性成分, 占总组分的 91.1%, 主要成分类型包括酯类 (25.48%), 萜类 (22.64%), 酮类 (20.64%) 及甾醇类 (10.61%); 主要成分为丁酸丁酯 (18.96%)、4-庚酮 (10.90%)、角鲨烯 (10.75%) 和 3-甲基-4-庚酮 (9.74%)。

关键词: 大羽藓; 形态学性状; 挥发性成分; 气相色谱-质谱

中图分类号: Q 949.35; R 284.1

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rds wxb.2020.02.006

苔藓植物是介于藻类和维管植物之间的高等植物类群, 被划分为苔类植物门 (Marchantiophyta)、藓类植物门 (Bryophyta) 和角苔门 (Anthocerotophyta) 3 大门类, 全世界约有 21 000 种^[1-2]。苔藓植物在数量上仅次于被子植物, 但具有个体微小、结构简单、种间常混杂生长、形态上不易区分等特点, 物种鉴定较困难, 而且难以做到大量采集, 因而该类群化学成分的研究及应用受到极大制约。目前, 全世界仅对不足其物种总量 10% 的苔藓植物 (以苔类为主) 开展了化学成分的研究, 分离和发现了大量为该类群所特有的结构新颖的次生代谢产物, 表现出多样而显著的生物活性^[3-5]。苔藓植物次生代谢产物中含有丰富的萜类、联苳、双联苳、黄酮类及脂肪酸衍生物等, 被认为是苔藓植物具有抗细菌、抗真菌和抗病毒等活性的物质基础^[6-8], 多种化合物还表现出抗肿瘤、抗氧化、昆虫拒食、调节植物生长以及预防有害生物体等生物学功能^[7-10]。苔藓植物被誉为生物活性天然产物的宝库, 然而对这一类群的研究和应用还十分匮乏, 具有非常大的开发潜能。大羽藓 (*Thuidium cymbifolium* (Dozy et Molke.) Dozy et Molke.) 隶属于藓类植物门羽藓科 (Thuidiaceae) 羽藓属 (*Thuidium*), 多生于海拔 400 ~ 1 400 m 的热带和亚热带山地森林, 分布于我国中部、东部及西南部^[11]。该种为我国传统药用植物资源, 可全草入药^[12-13]。大羽藓不仅植株矮小, 而且在形态上与同属的种类十分接近不易区分, 尤其是与大羽藓分布区一致或分布区相重叠的一些种, 如灰羽藓 (*T. pristocalyx* (Müll.Hal.) A.Jaeger)、绿羽藓 (*T. assimile* (Mitt.) A.Jaeger) 及短肋羽藓 (*T. kanedae* Sakurai) 等, 在野外采集时仅凭借肉眼无法将它们准确鉴别, 在室内通过显微镜观察标本进行鉴定也具有一定难度, 而分类上的困难严重阻碍了人们对该物种在化学成分和药用方面的进一步了解及应用。因此, 笔者对大羽藓的形态学性状进行了描述, 阐明该种及其近缘种的形态差异, 同时采用 GC-MS 法对其

收稿日期: 2019-11-05

修回日期: 2020-01-30

基金项目: 海南省自然科学基金项目 (318MS018); 国家自然科学基金项目 (31760054); 海南省高等学校科学研究项目 (Hnky2017ZD-6); 海南大学热带农林学院生物学学科优秀研究生培养项目

第一作者: 秦鑫婷 (1991-), 女, 海南大学生命科学与药学院 2017 级硕士研究生。E-mail: 2049115100@qq.com

通信作者: 张莉娜 (1971-), 女, 博士, 副教授。研究方向: 苔藓植物学。E-mail: zhanglina@hainanu.edu.cn

挥发性成分进行分析,旨在为大羽藓作为药用植物资源的开发利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样本采集 大羽藓样本采自海南琼中黎族苗族自治县黎母山,经海南大学生命科学与药学院张莉娜副教授鉴定,凭证标本保存于“海南大学环南海生物多样性与生态环境研究中心”(表 1)。

表 1 大羽藓标本采集信息

Tab. 1 Information of sampling of *Thuidium cymbifolium* from Limu Mountain in Hainan

序号 No.	采集时间 Collection time	采集号 Collection No.	地点及生境 Place, substratum	海拔及经纬度 Altitude, latitude & longitude
1	2017-07	张莉娜等 20170721-105	海南省琼中县黎母山林场到黎母山 主峰路上,溪边石生	1 147 m 19°10'56.92", 109°44'57.49"
2	2017-09	张莉娜等 20170901-29	海南省琼中县黎母山三星岭主峰路上, 路边湿石壁	411 m 19°10'38.82", 109°41'47.41"
3	2017-09	张莉娜等 20170901-48	海南省琼中县黎母山林场大河沟,岩面薄土	543 m 19°10'19.00", 109°41'39.00"

1.2 形态学观察 大羽藓形态学和解剖学特征的观察和拍摄采用 Olympus SZX7 体式显微镜及配备的 Olympus DP22 显微数码相机,以及 Olympus BX41 光学显微镜及配备的 Olympus DP72 显微数码相机。野外生境照片采用数码相机 Sony ILCE-6000 拍摄。

1.3 挥发性物质提取 取生物量最大的样本(张莉娜等 20170901-48)去除枯枝和杂质,于 45 °C 烘箱烘干,粉碎后过 40 目筛,样品密封保存,用于挥发性物质萃取和 GC-MS 实验。取样本粉末于 ASE150 快速溶剂萃取仪(美国 Thermo Fisher Scientific)中 70 °C 萃取 3 次,溶剂为石油醚,沸程为 60 ~ 90 °C。萃取液于旋转蒸发仪浓缩,4 °C 冰箱保存。

1.4 GC-MS 分析条件 采用美国 Agilent-7890B-7000B 型气相色谱-质谱仪。气相色谱条件: HP-5MS 弹性石英毛细管柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 载气为氮气,柱流量 2.2 mL·min⁻¹; 进样口温度 280 °C; 辅助加热器 300 °C; 压力 8.231 7 psi, 总流量 24 mL·min⁻¹, 隔垫吹扫流量 3 mL·min⁻¹; 分流比 20: 1, 分流流量 20 mL·min⁻¹。质谱条件: 采用 EI 源, 电离电压为 70 eV, 离子源温度为 250 °C, 扫描范围为 10 ~ 500 amu, 进样量 1.0 μL。

1.5 数据统计与分析 对表 1 中各样本的居群进行形态学性状观察和测量,并结合前人的研究结果^[11,14-15]进行形态学数据的修订;挥发性物质经 GC-MS 分析后获得的总离子流图通过 NIST 谱库对各峰进行检索,并采用峰面积归一化法计算各化合物的相对百分含量,结合人工谱图解析,分别对各色谱峰加以确认。

2 结果与分析

2.1 大羽藓形态学性状 从图 1A ~ 1T 可知,大羽藓植物体中等至大型,黄绿色至暗绿色,老时黄褐色,常交织成大片状生长。茎匍匐,长达 20 ~ 25 cm,规则二至三回羽状分枝。枝长 15 ~ 25 mm,两侧小枝密生可多达 25。茎横切面呈椭圆形,直径 300 ~ 450 μm;表皮为多层厚壁细胞,黄褐色,皮层细胞较大,壁稍厚,中轴略有分化但不显著。鳞毛密生茎和枝上,披针形至线形,具分枝,细胞表面常具单疣,顶端细胞有 2 ~ 4 个疣。茎叶干燥时疏松贴生,湿时倾立,内凹且具纵褶,基部三角状卵圆形或阔三角形,先端突趋窄成狭长披针形,进而延伸为 6 ~ 15 个矩形至短线形单列细胞组成的长毛尖,毛尖极易折断;叶长 1.5 ~ 3.0 mm,宽 0.6 ~ 0.8 mm;叶边缘下部常背卷或背曲,上部平展具细齿或近全缘;中肋长达披针形尖部,背面具疣或鳞毛;中部细胞壁厚,卵状菱形至椭圆形,10 ~ 25 μm × 5 ~ 10 μm,细胞背面中部常具单个刺状疣;先端细胞光滑或具微疣。枝叶内凹,卵形至长卵形,具短尖;长 0.5 ~ 0.75 mm,宽 0.35 ~ 0.5 mm;叶边

具细齿; 中肋长达叶片 2/3 处; 中部细胞圆形至卵状菱形, $7 \sim 14 \mu\text{m} \times 7 \sim 10 \mu\text{m}$, 背面具单个刺状疣; 先端细胞具 2~4 个疣。假根生于茎腹面, 呈束状生长, 棕红色或棕褐色。雌雄异株。孢子体未见。



图 1 大羽藓形态学性状

A. 生境; B. 干燥植株一段; C. 植株腹面观 (示茎叶); D & K. 茎叶; E. 茎叶毛尖; F. 茎叶中部横切面 (示中肋); G. 枝叶; H. 茎叶上部细胞; I. 茎叶中部细胞; J. 茎叶基部细胞; L. 小枝叶; M. 枝叶上部细胞; N. 枝叶中部细胞; O. 枝叶基部细胞; P. 茎横切面; Q. 鳞毛; R. 叶边缘具齿; S. 刺状疣; T. 枝叶中肋具疣。凭证标本: 张莉娜等 20170901-48。

Fig. 1 Morphological characteristics of *Thuidium cymbifolium*

A. Habitat. B. Portion of a dry sterile plant. C. Ventral view of sterile plant (showing stem leaves). D & K. Stem leaves. E. Ciliate apex of stem leaf. F. Cross-section of median part of stem leaf (showing costa). G. Branch leaf. H. Apical cells of stem leaf. I. Median cells of stem leaf. J. Basal cells of stem leaf. L. Small branch leaf. M. Apical cells of branch leaf. N. Median cells of branch leaf. O. Basal cells of branch leaf. P. Cross-section of stem. Q. Paraphyllium. R. Margin of leaf serrulate. S. Spinous papilla. T. Costa with papilla on branch leaf. All from L.-N. Zhang et al. 20170901-48.

大羽藓为世界广布种, 但主要生长在热带和亚热带山区, 习生于阴湿石面或附生于树干基部, 在腐木、倒木或腐殖质土上也常见。

2.2 挥发性成分分析 按前述实验方法和条件进行 GC-MS 分析后, 获得大羽藓挥发性成分总离子流图见图 2, 鉴定和分析结果见表 2。由表 2 可知, 从海南大羽藓挥发性成分中共分离出 40 种物质, 鉴定出 31 种化合物, 占总组分的 91.1%, 其主要成分类型包括酯类 (25.48%), 萜类 (22.64%), 酮类 (20.64%) 及甾醇类 (10.61%), 其中丁酸丁酯 (18.96%)、4-庚酮 (10.90%)、角鲨烯 (10.75%) 和 3-甲基-4-庚酮 (9.74%) 等 4 种化合物含量较高。

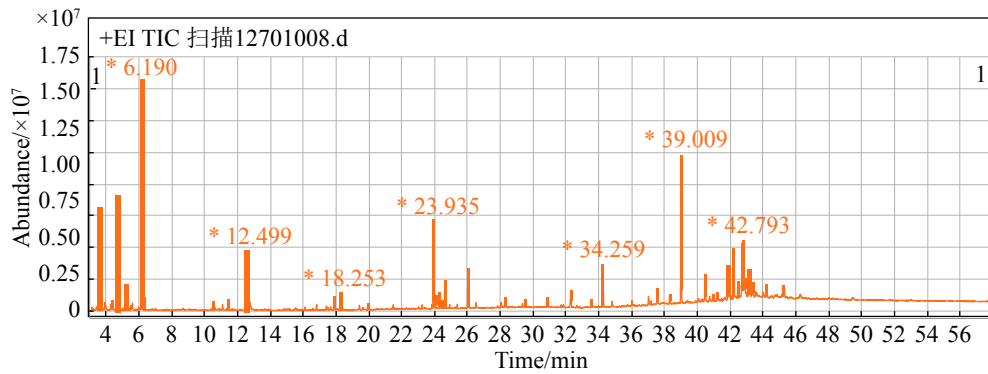


图2 大羽藓挥发性成分的总离子流色谱

Fig. 2 Total ion current of volatile constituents from *Thuidium cymbifolium*

表2 大羽藓挥发性成分分析

Tab. 2 Compounds identified of volatile constituents from *Thuidium cymbifolium*

编号 No.	保留时间/min Retention time	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	相对含量/% Relative content
1	6.19	Butanoic acid, butyl ester 丁酸丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	18.96
2	3.603	4-Heptanone 4-庚酮	C ₇ H ₁₄ O	10.90
3	39.009	Squalene 角鲨烯	C ₃₀ H ₅₀	10.75
4	4.637	4-Heptanone, 3-methyl 3-甲基-4-庚酮	C ₈ H ₁₆ O	9.74
5	23.935	Neophytadiene 新植二烯	C ₂₀ H ₃₈	5.46
6	12.499	Butane, 1,1-dibutoxy 丁醛二丁基乙缩醛	C ₁₂ H ₂₆ O ₂	3.90
7	42.21	Stigmasterol 豆甾醇	C ₂₉ H ₄₈ O	3.75
8	42.709	未鉴定		3.42
9	42.793	γ-Sitosterol γ-谷甾醇	C ₂₉ H ₅₀ O	3.05
10	41.865	Campesterol 菜油甾醇	C ₂₈ H ₄₆ O	3.03
11	34.259	Phthalic acid, di(2-propylpentyl) ester 二-N-2-丙基戊基邻苯二甲酸酯	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	2.68
12	26.023	Phthalic acid, butyl hept-4-yl ester 邻苯二甲酸4-庚基 丁酯	C ₁₉ H ₂₇ O ₄	2.66
13	43.133	β-Amyrin β-香树素	C ₃₀ H ₅₀ O	2.49
14	5.213	Hexanal, 2-ethyl 2-乙基己醛	C ₈ H ₁₆ O	2.10
15	24.641	3,7,11,15-Tetramethyl-2-hexadecen-1-ol 叶绿醇	C ₂₀ H ₄₀ O	1.66
16	40.454	Hentriacontane 三十一烷	C ₃₁ H ₆₄	1.48
17	18.253	未鉴定		1.30
18	42.465	Tettriacontane 三十四烷	C ₃₄ H ₇₀	1.09
19	17.918	α-Farnesene α-金合欢烯	C ₁₅ H ₂₄	0.99
20	44.198	γ-Sitostenone γ-扶桑甾醇氧化物	C ₂₉ H ₄₈ O	0.78
21	37.567	未鉴定		0.76
22	24.348	未鉴定		0.75
23	41.228	未鉴定		0.74
24	6.296	2-Hexenal, 2-ethyl 2-乙基-2-己烯醛	C ₈ H ₁₄ O	0.73

续表 2 Tab. 2 continued

编号 No.	保留时间/min Retention time	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	相对含量/% Relative content
25	44.201	未鉴定		0.64
26	43.372	Lup-20(29)-en-3-one 羽扇烯酮	C ₃₀ H ₄₈ O	0.62
27	28.289	未鉴定		0.52
28	4.374	Propanoic acid,2-methyl-,2- methylpropyl ester 异丁酸异丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.51
29	30.916	Tricosane 二十三烷	C ₂₃ H ₄₈	0.51
30	40.932	未鉴定		0.46
31	10.52	Benzene,(1,1-dimethylbutyl) (1,1-二甲基丁基)苯	C ₁₂ H ₁₈	0.44
32	33.563	Pentacosane 二十五烷	C ₂₅ H ₅₂	0.42
33	41.228	未鉴定		0.42
34	42.888	β -Amyrone β -香树脂酮	C ₃₀ H ₄₈ O	0.41
35	24.044	2-Hexadecene,3,7,11,15-tetramethyl-,[R-[R*,R*-(E)]] 3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯	C ₂₀ H ₄₀	0.39
36	32.307	Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester 己二酸二辛酯	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	0.38
37	29.51	Docosane 二十二烷	C ₂₂ H ₄₆	0.37
38	24.488	1,2-Benzenedicarboxylic acid bis(2-methylpropyl) ester 邻苯二甲酸二异丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	0.29
39	38.31	Nonacosane 二十九烷	C ₂₉ H ₆₀	0.29
40	19.929	(1R,3Z,7Z,11S)-1,5,5,8-Tetramethyl-12-oxabicyclo[9.1.0] dodeca-3,7-diene 环氧化蛇麻烯II	C ₁₅ H ₂₄ O	0.26

3 讨 论

3.1 大羽藓与近缘种的形态学性状比较 与大羽藓有较近的亲缘关系且在我国南部热带和亚热带山区广泛分布的羽藓属种类有灰羽藓原变种 (*T. pristocalyx* var. *pristocalyx*^[15])、灰羽藓南亚变种 (新拟) (*T. pristocalyx* var. *orientale* (Mitt. ex Dixon) Touw = 南亚羽藓 *T. orientale* Mitt. ex Dixon^[15])、绿羽藓和短肋羽藓^[11, 14-16]。这些种及变种通常具有的共同特征是: 植物体大, 粗壮, 淡黄绿色至暗绿色, 交织成片状生长。茎匍匐或倾立, 二至三回羽状分枝; 鳞毛密生, 常分枝, 多具齿。茎叶干燥时贴生, 卵形至三角状卵形, 具明显长皱褶; 叶边常下部背卷, 上部平展具齿; 中肋粗壮, 长达叶片 2/3 至叶尖或稍突出; 枝叶干燥时紧贴, 不卷曲; 叶细胞卵形、卵状菱形至椭圆形, 细胞厚壁, 常具单疣。蒴柄略粗, 孢蒴长卵形或圆柱形, 蒴盖具长的喙状尖。对大羽藓及其近缘种的鉴别需要借助显微镜进行细致地解剖和分类, 包括观察鳞毛的有无、叶形态差异以及植物体茎与叶的解剖学和细胞学特征等。

上述 5 个种 (或变种) 形态十分相似而难以区分, 是由于这些种或变种之间在形态性状上具有连续变异的特点, 如茎上鳞毛缺失到密生, 茎叶具短尖至长披针形尖进而形成长毛尖, 叶细胞具单疣至多疣、星状疣等, 这些种类的主要形态性状变化及种间差异见表 3。在地理分布上大羽藓主要分布于各大洲热带及亚热带山区, 灰羽藓原变种分布在亚洲大部分地区及太平洋岛屿, 灰羽藓南亚变种分布于亚洲热带地区、中国南部及日本, 短肋羽藓主要分布在中国、朝鲜和日本, 绿羽藓分布于中国、日本、俄罗斯、欧洲和北美洲。目前在海南岛有分布记录的是大羽藓、灰羽藓原变种及灰羽藓南亚变种。之前报道在中国南部山区有分布的拟灰羽藓 (*T. glaucinoides* Broth.)^[11, 16] 在中国实际为灰羽藓南亚变种, *T. glaucinoides* 已被归并为 *T. pristocalyx* var. *samoanum* (Mitt.) Touw^[15], 该变种在中国没有分布记录, 应予以排除。

表3 大羽藓及其近缘种的形态学比较

Tab. 3 Morphological comparison of *Thuidium cymbifolium* and other closely related *Thuidium*

性状 Characters	大羽藓 <i>T. cymbifolium</i>	灰羽藓原变种 <i>T. pristocalyx</i> var. <i>pristocalyx</i>	灰羽藓南亚变种 <i>T. pristocalyx</i> var. <i>orientale</i>	绿羽藓 <i>T. assimile</i>	短肋羽藓 <i>T. kanedae</i>
茎上鳞毛 Stem paraphyllia	密生	缺失或稀少	密生	密生	密生
茎叶 Stem leaves					
形状 Shape	三角状卵形或基部呈心形的三角形	卵形至三角状卵形	三角状卵形至三角形	三角状卵形或基部呈心形的三角形	三角状卵形至三角形
边缘 Margin	下部多背卷或背曲, 上部具齿或近全缘	平展或微内曲, 具齿	多背卷, 具齿	下部多背卷, 上部具齿或近全缘	平展至背卷, 上部具齿
先端 Apical part	狭长披针形, 具6~10 (~15)个单列细胞组成的毛尖	锐尖, 无毛尖	长渐尖, 无毛尖	狭长披针形, 具2~7 (~10)个单列细胞组成的毛尖	狭长披针形, 具3~10 (~13)个单列细胞组成的毛尖
中肋 Costa	达披针形尖部, 背面具刺状疣或鳞毛	达叶片2/3处, 背面平滑或具少数疣	达叶片3/4处, 背面具刺状疣	消失于叶尖下, 背面具疣	达披针形尖部, 背面具刺状疣
中部细胞 Median cells	多角形、卵状菱形至椭圆形, 具单疣	卵形至卵状菱形, 具1~6个疣或单个星状疣	卵形至椭圆形, 具1~3个疣	卵形至椭圆形, 具单疣	卵状菱形至椭圆形, 具2~4个疣或单个星状疣
枝叶 Branch leaves	卵形至长圆状卵形, 具短尖, 中肋达叶片2/3处	卵形至阔卵形, 具短尖, 中肋达叶片2/3处	卵形至阔卵形, 具短尖, 中肋达叶片2/3处	阔卵形至卵状三角形, 具短尖, 中肋达叶片2/3~4/5处	卵形至长圆状卵形, 具短尖, 中肋达叶片2/3~4/5处
内雌苞叶边缘 Inner perichaetial leaves	具多数长纤毛	具齿, 无纤毛	具齿, 无纤毛	具齿, 无纤毛	具多数长纤毛

3.2 挥发性成分与生物活性 为避免不同生境或不同季节对大羽藓挥发性成分产生影响, 本研究选取一个居群的植株作为研究材料, 在体式显微镜下认真挑选去除其他藓类及杂质, 获得了少量可供实验的样本。以石油醚快速溶剂萃取法结合 GC-MS 法对样本的挥发性物质进行化学成分分析, 获得了较满意的结果, 不仅分离得到多种挥发性成分, 而且萜类化合物的种类和含量均较高。

藓类植物因细胞中缺乏油体, 其挥发性成分的总含量通常比苔类少, 而三萜、甾体、脂肪族物质如酮、醛、醇、烷烃、脂肪酸及其衍生物较丰富^[17]。本研究发现海南产大羽藓挥发性成分除了含有较多种类或数量的酯、酮、醛及饱和烷烃外, 萜类化合物有 8 种, 含量达 22.64%, 主要为三萜化合物。这些已知的萜类化合物具有重要的生理或药理活性, 如角鲨烯是生物体内胆固醇、激素及维生素合成的前体, 具有抗氧化、抗菌、抵御紫外线、抗肿瘤以及预防和治疗心血管疾病等功能^[18], 已经被广泛应用在医疗、保健品、化妆品等领域。 β -香树素是五环三萜类化合物, 与其异构体 α -香树素被报道存在于药用植物和橄榄科植物的油性树脂中, 具有抗炎症、抗细菌、真菌、病毒感染和抑制肿瘤细胞等作用, 也可用于治疗糖尿病等^[19]。新植二烯在本研究的萜类成分中含量仅次于角鲨烯, 该化合物也具有较好的止痛、退热、消炎、抗菌和抗氧化功能^[20]。藓类植物挥发性成分中还含有较丰富的甾体类化合物^[3], 本研究从大羽藓分离出豆甾醇、 γ -谷甾醇、菜油甾醇等植物甾醇的含量达到 10.61%。这些甾醇化合物能通过降低胆固醇而减少心血管病的风险, 还有较强的抗炎、抗氧化及抗癌功效, 也已被广泛使用在临床医学、药物合成、保健食品和畜禽养殖等方面^[21]。此外, 多项研究显示大羽藓对细菌和真菌的生长有抑制作用, 如印度产大羽藓乙醇提取物可抑制肺炎杆菌、变形杆菌、绿脓杆菌、黑曲霉、串珠镰刀菌及甘薯丝核菌等细菌或真菌的生长^[22]; 贵州产大羽藓乙醇提取物对金黄色葡萄球菌、志贺氏痢疾杆菌、流行性感胃杆菌、根霉和曲霉有不同程度的抑菌性^[23]; 黑龙江产大羽藓乙醇或丙酮提取物对小麦赤霉病菌、葡枝根霉、灰色梨孢和链格孢等植物病原菌的生长具有显著的抑制作用^[24]。

综上所述, 从大羽藓挥发性成分中鉴定出多种具有生物活性的化合物, 这些丰富的萜类、植物甾醇和

酯类等, 应是该种在治疗烫伤中起到抗菌、消炎及镇痛等作用的物质基础。此外, 大羽藓为世界广布种和苔藓植物群落优势种, 具备探索人工培养及扩繁等开发技术的条件, 有望在人类疾病治疗或农作物病害防治中成为可深入开发的抗菌药物资源。

致 谢: 海南大学分析测试中心在 GC-MS 测试中提供了帮助; 海南大学生命科学与药学院罗先群教授在实验过程中给予了指导。一并致谢!

参考文献:

- [1] FREY W, STECH M. Marchantiophyta, Bryophyta, Anthocerotophyta [M]//FREY W (Ed.). Syllabus of plant families - A. Engler's Syllabus der Pflanzenfamilien, 13th ed., Part 3: Bryophytes and seedless vascular plants. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 2009: 13 – 263.
- [2] SÖDERSTRÖM L, HAGBORG A, VON KONRAT M, et al. World checklist of hornworts and liverworts [J]. *PhytoKeys*, 2016, 59: 1 – 828.
- [3] 娄红祥主编. 苔藓化学与生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 61 – 307.
- [4] ASAKAWA Y, LUDWICZUK A, NAGASHIMA F. Phytochemical and biological studies of bryophytes [J]. *Phytochemistry*, 2013, 91: 52 – 80.
- [5] CHEN F, LUDWICZUK A, WEI G, et al. Terpenoid secondary metabolites in bryophytes: chemical diversity, biosynthesis and biological functions [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2018, 37(2-3): 210 – 231.
- [6] BANERJEE R D, SEN S P. Antibiotic activity of bryophytes [J]. *The Bryologist*, 1979, 82(2): 141 – 153.
- [7] KLAVINA L, SPRINGE G, NIKOLAJEVA V, et al. Chemical composition analysis, antimicrobial activity and cytotoxicity screening of moss extracts (moss phytochemistry) [J]. *Molecules*, 2015, 20(9): 17221 – 17243.
- [8] VOLLÁR M, GYOVAI A, SZÜCS P, et al. Antiproliferative and antimicrobial activities of selected bryophytes [J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1520 – 1534.
- [9] FERNANDES A S, MAZZEI J L, EVANGELISTA H, et al. Protection against UV-induced oxidative stress and DNA damage by Amazon moss extracts [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 2018, 183: 331 – 341.
- [10] ASAKAWA Y, LUDWICZUK A. Chemical constituents of bryophytes: structures and biological activity [J]. *Journal of Natural Products*, 2018, 81(3): 641 – 660.
- [11] 吴鹏程 (主编). 中国苔藓志·第六卷: 油藓目, 灰藓目 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 240 – 250.
- [12] 吴征镒 (主编). 新华本草纲要 (第三册) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990: 764 – 773.
- [13] 衣艳君. 中国药用苔藓植物资源 [J]. *中草药*, 2000, 31(8): 624 – 628.
- [14] WATANABE R. A revision of the family Thuidiaceae in Japan and adjacent areas [J]. *The Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 1972, 36: 171 – 320.
- [15] TOUW A. A taxonomic revision of the Thuidiaceae (Musci) of tropical Asia, the western Pacific, and Hawaii [J]. *The Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 2001, 91: 1 – 136.
- [16] 吴德邻, 张力 (主编). 广东苔藓志 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2013: 427 – 429.
- [17] SARITAS Y, SONWA M M, IZNAGUEN H, et al. Volatile constituents in mosses (Musci) [J]. *Phytochemistry*, 2001, 57(3): 443 – 457.
- [18] LOZANO-GRANDE M A, GORINSTEIN S, ESPITIA-RANGEL E, et al. Plant sources, extraction methods, and uses of squalene [J]. *International Journal of Agronomy*, 2018: 1 – 13.
- [19] VÁZQUEZ L H, PALAZÓN J, NAVARRO-OCANA A, et al. The pentacyclic triterpenes, α , β -amyrins: a review of sources and biological activities [M]//RAO V (Ed.). *Phytochemicals – A global perspective of their role in nutrition and health*. Rijeka: InTech, 2012: 487 – 502.
- [20] SWAMY M K, ARUMUGAM G, KAUR R, et al. GC-MS based metabolite profiling, antioxidant and antimicrobial properties of different solvent extracts of Malaysian *Plectranthus amboinicus* leaves [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017: 1 – 10. doi: 10.1155/2017/1517683
- [21] 谢心美, 郝海鑫, 何剑斌. 植物甾醇的生理功能及其应用 [J]. *草业科学*, 2013, 30(12): 2105 – 2109.
- [22] BODADE R G, BORKAR P S, Md SAIFUL ARFEEN, et al. In vitro screening of bryophytes for antimicrobial activity [J]. *Journal of Medicinal Plants*, 2008, 7(S4): 23 – 28.
- [23] 吴昆, 肖春旺. 贵州 4 种藓类植物的抑菌作用比较 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 1998, 16(4): 25 – 28.
- [24] 沙伟, 韩继臣. 16 种苔藓植物对植物病原菌的抑菌性研究 [J]. *食品科技*, 2009, 34(5): 213 – 217.