广西植物 Guihaia Aug. 2026, 46(8): 1405-1418 http://www.guihaia-journal.com

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202511049
阙彩霞, 杨燕妮, 王再花, 等, 2026. 金钗石斛不同开花时期挥发性物质成分与超微结构特征分析 [J]. 广西植物, 46(8): 1405-1418.
Que C X, Yang Y N, Wang Z H, et al., 2026. Analysis of volatile components and ultrastructural characteristics of *Dendrobium nobile* at different flowering stages [J]. Guihaia, 46(8): 1405-1418.

金钗石斛不同开花时期挥发性物质成分与超微结构特征分析

阙彩霞[1], 杨燕妮[2*], 王再花[3], 肖亦瑶[4], 彭 莺[1], 张浥琨[1], 付传明[2], 黄宁珍[2]

(1. 顺德职业技术大学, 中国 广东 佛山 528300; 2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室, 中国 广西 桂林 541006; 3. 广州市农业农村科学院, 中国 广州 510335; 4. 密苏里大学, 美国 哥伦比亚 65211)

摘 要: 为探究金钗石斛(*Dendrobium nobile*)花朵香气生物合成与释放机制,该研究通过整合顶空固相微萃取(HS-SPME)、气相色谱-质谱(GC-MS)联用分析及扫描电子显微镜(SEM)观察技术,系统分析不同开花时期的挥发性成分动态变化与花器官细胞超微结构特征。结果表明:(1)在开花第 1 天至第 14 天,对每日定时采集的样本进行挥发性成分的动态监测,共鉴定出 26 种主要香气成分,以醇类和酯类为主,醛类、萜烯类和酮类次之;萜烯类化合物的相对含量在第 6 天达到峰值,此时 β-石竹烯(26.80%)、正辛醇(17.00%)和正辛醛(13.01%)为主要组分。(2)不同部位挥发性成分分析显示,唇瓣与蕊柱是主要的挥发性物质释放部位。(3)对花瓣超微结构的观察发现,唇瓣上表皮腺毛长且密集,无气孔分布,腺毛间充满分泌物,表明其表皮毛及细胞的分泌功能显著强于其他部位。因此,金钗石斛花茶原料宜优先选择唇瓣与蕊柱,并于盛花后第 6 天采收,以最大限度保留关键芳香成分。该研究结果不仅为金钗石斛花茶的精准采收与标准化加工提供了科学依据和量化参考,也为其他兰科芳香药用植物的香气品质调控与高效利用提供了可借鉴的技术范式。

关键词: 金钗石斛, 挥发性物质, 超微结构特征, HS-SPME-GC-MS, 扫描电镜

中图分类号: Q946 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3142(2026)08-1405-14

Analysis of volatile components and ultrastructural characteristics of *Dendrobium nobile* at different flowering stages

QUE Caixia[1], YANG Yanni[2*], WANG Zaihua[3], XIAO Yiyao[4], PENG Ying[1], ZHANG Yikun[1], FU Chuanming[2], HUANG Ningzhen[2]

收稿日期: 2026-02-04 **接受日期**: 2026-02-24

基金项目: 广东省普通高校重点领域项目(2024ZDZX3073); 广东省普通高校重点领域项目(2023-KJZX056); 广西自然科学基金面上项目(2025GXNSFAA069846); 广西植物研究所基本业务费资助项目(桂植业 23011); 2024 年"八桂之光"访学研修计划项目(科技人才专项)(桂科发〔2025〕35 号); 广东省省部级科研平台开放课题(2023KJXJ029)。

第一作者: 阙彩霞(1983—),硕士,副教授,研究方向为兰科植物育种与栽培技术,(E-mail)quecaixia@163.com。

* **通信作者**: 杨燕妮,博士,主要从事园艺植物种质资源创新与利用研究,(E-mail)yangyanni219@126.com。

(1. *Shunde Polytechnic University*, Foshan 528300, Guangdong, China; 2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Functional Phytochemicals and Sustainable Utilization*, *Guangxi Institute of Botany*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. *Guangzhou Academy of Agricultural and Rural Sciences*, Guangzhou 510335, China; 4. *University of Missouri*, Columbia 65211, USA)

Abstract: To explore the biosynthesis and emission mechanisms of the floral aroma in *Dendrobium nobile*, this study systematically analyzed the dynamic changes of volatile components and the ultrastructural characteristics of the perianth cells at different flowering stages by integrating headspace solid-phase microextraction (HS-SPME), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis and scanning electron microscope (SEM) observation techniques. The results were as follows: (1) Through dynamic monitoring of volatile components from samples collected daily from day 1 to day 14 of flowering, a total of 26 main aroma components were identified, mainly alcohols and esters, followed by aldehydes, terpenes, and ketones. Content of terpenes peaked on day 6, with β-caryophyllene (26.80%), 1-octanol (17.00%), and octanal (13.01%) being the dominant components. (2) The analysis of the volatile components of different parts of *D. nobile* revealed that the labellum and the column were the main sites for the release of volatile substances. (3) Ultrastructural observation of petals showed that the upper epidermis of the labellum had long and dense glandular trichomes without stomata, and the spaces between the glandular trichomes were filled with secretions, confirming that the secretory function of the epidermal trichomes and cells in labellum was significantly stronger than those in other parts. Therefore, the raw materials for *D. nobile* flower tea should prioritize the collection of the labellum and the column, and be harvested on day 6 after full bloom to maximize the retention of key aromatic components. The results of this study not only provide a scientific basis and quantitative indicators for the precise harvesting and standardized processing of *D. nobile* flower tea, but also offer a technical paradigm for the aroma quality regulation and efficient utilization of other fragrant medicinal plants in the Orchidaceae family.

Key words: *Dendrobium nobile*, volatile components, ultrastructural characteristics, HS-SPME-GC-MS, scanning electron microscope

金钗石斛(*Dendrobium nobile*)为兰科石斛属多年生附生草本,其花姿雅致、香气馥郁,兼具观赏价值与滋阴清热、益胃生津等传统药用功效,近年更被开发为高附加值花茶原料(何鹏飞等,2025)。其花药用价值虽受推崇,但由于产量低,市场价格高,因此消费者对其品质要求较高。曲继旭等(2018)对金钗、鼓槌、铁皮和紫皮4种石斛干花的氨基酸组分及挥发性成分进行了系统分析与比较,发现金钗石斛干花的营养价值高于其余3种,且四者挥发性成分差异显著,部分成分兼具香气特征与丰富药理活性。然而,迄今关于其花香物质的动态积累规律及其生物合成与释放机制的研究仍十分有限。

挥发性有机化合物(volatile organic compounds,VOCs)是构成花香的核心物质基础,其种类与含量直接决定香气品质与药理活性。近年来,因提取方法不同,相关研究结果差异显著:杨渊等(2023)采用正己烷-水蒸馏提取法获得金钗石斛盛花期的57种化学成分,主要成分为棕榈酸、棕榈酸乙酯、亚油酸乙酯、石竹烯等;王培育等(2026)采用顶空进样结合GC-MS法提取金钗石斛盛花期4种挥发性物质,分别是β-石竹烯、荜澄茄油烯、罗勒烯和3-蒈烯;曹桦等(2021)采用SPME-GC-MS联用技术检测出金钗石斛盛花期31种化学成分,主要成分为β-石竹烯(20.7%)。但是,上述研究均聚焦于盛花期单一时点,未考察花期进程对花香成分动态变化的影响。这种差异不仅源于提取溶剂极性与固相微萃取头涂层的选择,更凸显一个关键科学盲区:盛花期是持续3~5 d的动态过程,单点采样难以捕捉香气形成的代谢拐点。颜沛沛等(2021)分析了金钗石斛盛花期1 d内6个时间点的香气释放规律,香气释放量在9:00最高、15:00最低,香气成分中相对含量最高的是己醛。尽管该研究揭示了香气释放呈"晨高午低"的日节律,但时间尺度仍局限于单日。相比之下,茉莉花(*Jasminum sambac*)(Yu et al., 2017)、梅花(*Prunus mume*)(赵印泉等,2010)、玉兰(*Magnolia denudata*)(李晓颖等, 2019)、桂花

(*Osmanthus fragrans*)(邹晶晶等,2017)、玫瑰(*Rosa rugosa*)(冯立国等,2008)等植物的研究已系统阐明花香成分在开花全过程中的动态变化规律及其生物学机制,为花卉育种与芳香植物开发利用提供了科学依据和技术支撑。这些研究强烈提示,金钗石斛花香形成同样受时序性代谢调控,但迄今尚无覆盖初花至凋谢全程的动态监测研究。

此外,植物花香释放与其表皮结构密切相关。施婷婷等(2020)通过对桂花花被片超微结构观察发现,其香气成分首先在细胞质体中形成聚集体,随后这些聚集体穿过细胞壁,并最终通过表皮细胞表面密布的褶皱结构向外散发出来;林智成(2008)发现烟叶腺毛和腺毛分泌物与烟叶香气前体物的产生密切相关,叶片上腺毛的密度及发育状况与烟叶香气等品质特性相关。张钰莹等(2023)对 4 种石斛属植物整花分析显示,萜烯类与酯类是共有主成分。其他芳香植物中,玉兰外轮花被片以萜烯为主,内轮花被片以酯类为主(李晓颖等,2019),表明花被片存在功能分化,且该现象具有普遍性。然而,目前关于金钗石斛花被片细胞超微结构的研究尚属空白。

本研究以金钗石斛开花全过程(第 1 天至第 14 天)的花器官为材料,采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(HS-SPME-GC-MS)动态顶空采样与扫描电镜(scanning electron microscope,SEM)超微结构观察相结合的方法,通过系统解析花器官不同部位释放的挥发性代谢物,揭示花香合成与释放的细胞学显微位点,并整合化学与形态学数据,拟探讨以下问题:(1)金钗石斛花香的物质基础及其在开花过程中的时空变化规律与形成机制;(2)对唇瓣、翼瓣(侧萼片与花瓣)及旗瓣(中萼片)进行超微结构观察,从细胞学层面揭示花香合成与释放的显微位点;(3)基于化学与形态学整合分析,确定花茶加工最佳采收窗口,并为香花型石斛兰分子育种提供关键靶点与理论依据。

1　材料与方法

1.1 试验材料及取样处理

金钗石斛(原产贵州野生种组培苗)种植于广东省广州市中国科学院华南植物园荫棚内,2023 年 4 月 1 日至 14 日,选择生长健壮、开花正常的 3 株金钗石斛作为采集对象,每天上午 9:00 采集花朵样品。选择同一植株第 1 天开花至第 14 天开花(即将凋谢)的花朵样品(图 1),进行接下来的 HS-SPME-GC-MS 挥发性成分及其含量测定。所有样本均取 3 个生物学重复,迅速在液氮中冷冻,并在 -80 ℃下保存,以备进一步分析。将样品去除花柄,采摘后迅速将样品放置于 20 mL 顶空瓶中,用聚四氟乙烯隔垫铝盖密封,进行香气测定(即采即测),重复 3 次。

为探究金钗石斛花朵各部位对整花挥发性有机物的贡献,于开花第 6 天上午 9:00 采集新鲜花朵,分别取唇瓣、翼瓣、旗瓣和蕊柱 4 个部位,每部位设置 3 个重复,在称量质量后,逐一进行香气成分测定。

图片展示了金钗石斛从开花后第 1 天至第 14 天的开花过程,标尺 = 1 cm。
The pictures show the flowering process of *D. nobile* from day 1 to day 14 after flowering, bar = 1 cm.

图 1　金钗石斛开花及取样过程
Fig. 1　Flowering and sampling process of *Dendrobium nobile*

1.2 测定条件

1.2.1 HS-SPME 测定条件　从 -80 ℃ 冰箱中取出样品,立即在液氮中研磨以保持其完整性,随后将样本涡旋以确保均匀。准确称取每份样本约 500 mg,转移至顶空瓶(安捷伦科技有限公司,美国)。将 20 mL 螺纹顶空进样瓶(安捷伦科技有限公司,美国)置于 80 ℃下预热并保持平衡 25 min。使用 SPME 固相微萃取纤维头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS,美国 Supelco 公司)萃取前,在气相色谱质谱联用仪(Agilent 7890A-5975C)进样口中 250 ℃下老化 3 min,载气流量为 1 mL · min^{-1},再自动插入预热平衡的顶空瓶上方 40 mm 处进行顶空萃取 15 min,振摇 20 s,停 2 s,纤维头搅拌速度 25 mm · s^{-1},此时瓶中的挥发性成分在顶空和萃取头达到平衡。将 SPME 萃取头立即置于气相色谱进样口(瑞士思特斯分析仪器有限公司 CTC Analytics AG),在 250 ℃下热解析 2 min,无延迟时间进样(袁婕俐等,2023)。

1.2.2 色谱条件　色谱柱为 DB5-MS(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。高纯度氦气(99.999%)为载气,不分流,载气流速 1 mL · min^{-1},进样口温度 250 ℃。程序升温设置如下:初始温度为 40 ℃,保持 5 min,以 20 ℃ · min^{-1}的速度升至 250 ℃并保持 10 min(施婷婷等,2020; 和肖营等,2024)。

1.2.3 质谱条件　EI 源电压为 70 eV,离子源温度为 250 ℃,接口温度为 250 ℃,质量扫描范围为 *m/z* 30~300,全扫描模式检测(袁婕俐等,2023;和肖营等,2024)。

1.3 挥发性成分分析

1.3.1 定性分析　在获得化合物的色谱图和质谱图后利用 MassHunter 软件通过检索 NIST17 标准谱库质谱图库,并结合相关文献,确定金钗石斛鲜花挥发性物质的化学成分,从而对其挥发性成分进行定性分析,并根据人工图谱解析及相关文献对鉴定的化合物进行检查(王元成等,2022;袁婕俐等,2023)。

1.3.2 定量分析　确定样品中挥发性成分后,再根据离子流峰面积归一化法,计算各成分的相对含量(王元成等,2022;袁婕俐等,2023)。

1.4 超微结构观察

表面超微结构观察:分别采集第 1、7、14 天开花的新鲜花瓣,蒸馏水快速漂洗并吸干后,分别在唇瓣、翼瓣、旗瓣距基部 10 mm 和边缘 5 mm 处切取 4 mm × 4 mm 两小块,正、反面各取 1 片。样品以导电胶固定于金属台,Cressington 108 离子溅射仪镀金 60 s,随即在日立 SU8010 场发射扫描电镜下完成观察和图像采集(郭艳红等,2022)。

内部结构及三维形貌分析:采集第 1、4、9、12、14 天开花的新鲜花瓣,投入 FAA 固定液,减压抽真空至材料完全下沉;4 ℃静置固定 48 h;经 30%→50%→70%→80%→90%→100%梯度乙醇脱水后,叔丁醇置换 2 次,真空干燥;干燥样品粘台、喷金,最终在同一台日立 SU8010 场发射扫描电镜下观察并拍照记录(施婷婷等,2020)。

2 结果与分析

2.1 金钗石斛花挥发性成分种类含量的动态变化

为探究金钗石斛开花周期挥发性成分的种类与相对含量动态变化,本研究系统检测了开花第 1 天至第 14 天的挥发性成分,并对每种成分的含量进行统计。结果(图 2)表明,开花周期内,主要挥发性成分种类大致相同,以醇类和酯类含量为主,其次是醛类、萜烯类和酮类。在开花早期,酯类和醇类处于较高水平;随开花进程,醇类和酯类含量呈先下降后上升趋势,而萜烯类则先迅速上升后逐渐下降,并在第 6 天达到最高,差异明显(图 3)。醛类化合物含量变化趋势不明显,相对含量维持在 15%~25%之间,酮类化合物则随开花进程逐步上升。以上结果表明金钗石斛开花过程中,释放的代谢产物,处于动态变化的过程。

2.2 金钗石斛花挥发性成分变化规律

为了解金钗石斛开花周期内(第 1 天至第 14 天)挥发性种类含量变化,以开花第 1、6、12 天的石斛花主要挥发性成分为例进行分析(表 1)。对比 3 个时期石斛花总离子流图丰度变化(图 4),从开花初期到盛花期其挥发性成分的总含量变化呈上升趋势。

开花第 1 天,挥发性成分中正辛醇(27.60%)和甲酸辛酯(27.60%)相对含量最高,其次为正己醛、罗勒烯、4-壬烯醛和乙酸辛酯,相对含量分别为 8.00%、6.30%、6.00%、5.70%。其余成分相对含量均低于 2.5%,其中较高的依次为月桂烯(2.45%)、*β*-石竹烯(1.94%)、4-苯基-2-丁酮(1.89%)、榄香烯(1.35%)和 *α*-松油醇(1.29%),合计占 18.80%。

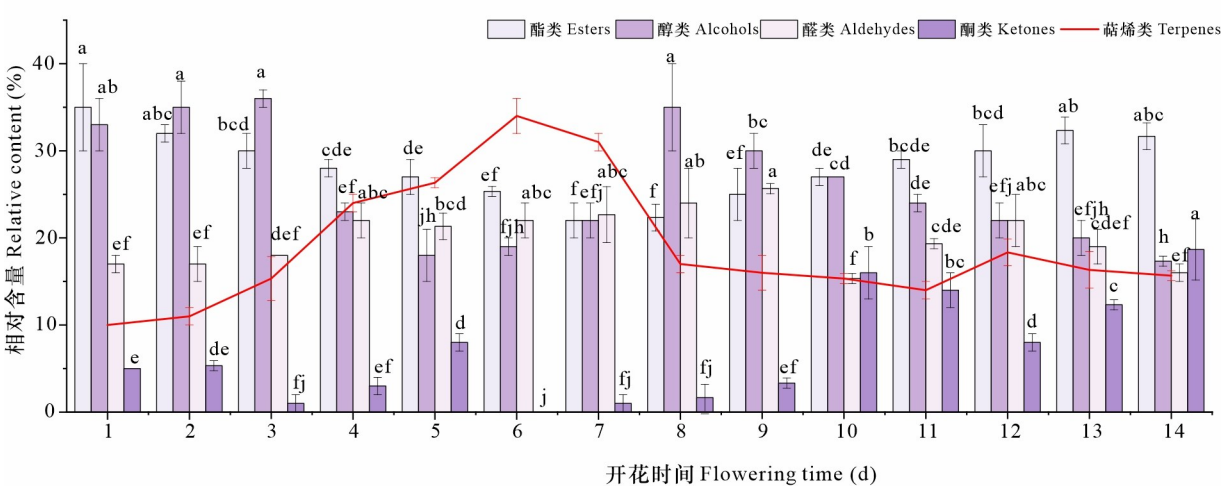


图 2　金钗石斛花挥发性成分含量变化

Fig. 2　Changes of volatile component content of *Dendrobium nobile* flowers

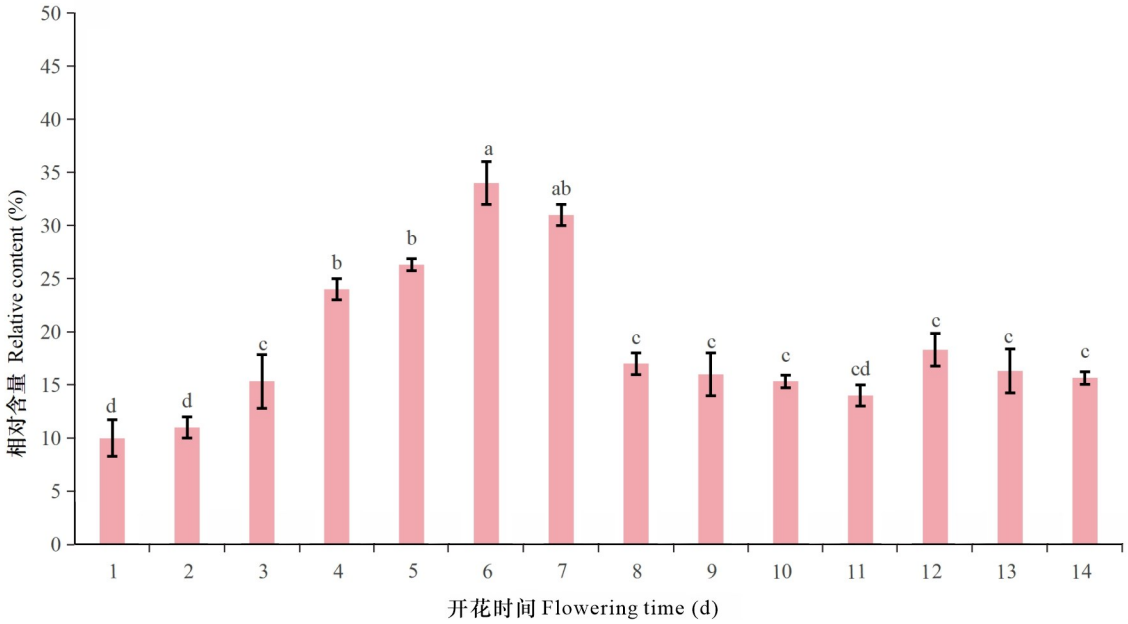


图 3　金钗石斛花萜烯类化合物含量变化

Fig. 3　Changes of terpene compound content of *Dendrobium nobile* flowers

开花第 6 天，其主要挥发性成分为 β-石竹烯（26.80%）和正辛醇（17.00%），它们的相对含量最高，其次为正辛醛、乙酸辛酯、榄香烯，相对含量分别为 13.01%、9.60%、6.80%。其余 21 种成分相对含量均低于 4%，较高的依次为 1-壬醇（3.55%）、甲酸辛酯（3.27%）、正己醛（3.21%），合计占 26.80%。

开花第 12 天，其挥发性成分中乙酸辛酯（22.50%）和罗勒烯（15.40%）的相对含量最高，其次为正辛醇、正己醛和 2-十三烷酮，相对含量分别为 12.80%、8.40%、7.30%。其余 21 种成分中 β-石竹烯（5.12%）相对含量较高，其次为榄香烯（4.12%）和正辛醛（3.27%），合计占 33.60%。

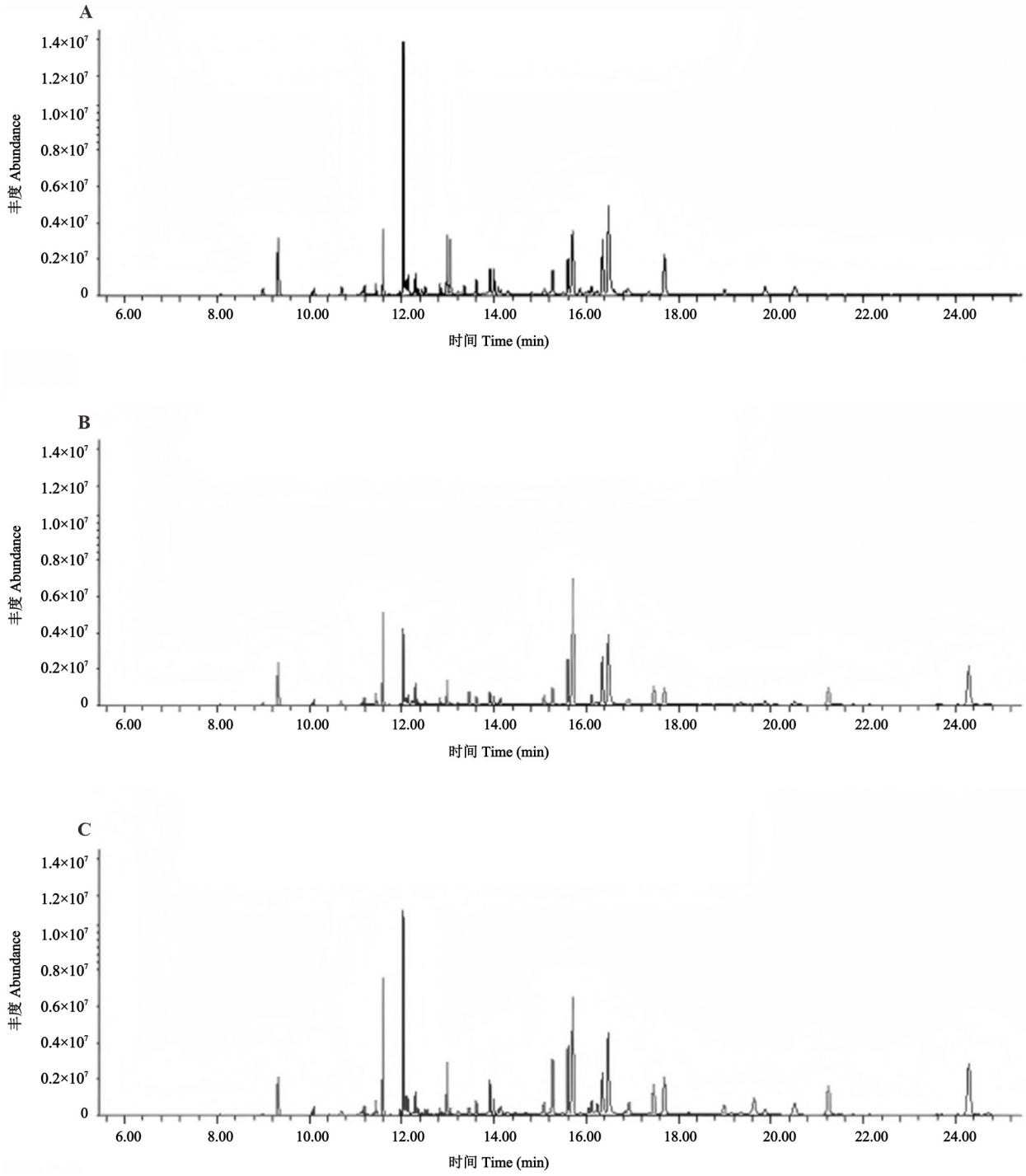
2.3 金钗石斛不同部位挥发性成分分析

为探究金钗石斛花朵各部位对整花挥发性有机物的贡献，于开花第 6 天上午 9:00 采集新鲜花朵，精确称量唇瓣、翼瓣、旗瓣和蕊柱 4 个部位的质量。结果显示，单朵花中旗瓣质量最大，占整花质量的 36.36%，翼瓣占 31.50%，唇瓣占 24.85%，

表 1 金钗石斛整花 3 个开花时期挥发性成分

Table 1 Volatile components in *Dendrobium nobile* whole flowers at three flowering stages

保留时间 Retention time (min)	化合物 Compound	CAS 号 CAS number	第 1 天 Day 1 (%)	第 6 天 Day 6 (%)	第 12 天 Day 12 (%)
8.068	戊醛 Pentanal	110-62-3	1.12	1.98	1.73
8.418	对二甲苯 *p*-Xylene	106-42-3	0.34	0.56	0.11
9.322	正己醛 Hexanal	66-25-1	8.00	3.21	8.40
10.046	叶醇 (*Z*)-hex-3-en-1-ol	928-96-1	0.26	0.33	0.27
10.098	正己醇 1-Hexanol	111-27-3	0.95	1.04	1.15
11.108	正庚醇 Heptan-1-ol	111-70-6	0.66	0.53	0.34
11.192	1-辛烯-3-醇 Oct-1-en-3-ol	3391-86-4	0.96	0.32	1.06
11.439	正辛醛 Octanal	124-13-0	1.02	13.01	3.27
11.592	罗勒烯 Ocimene	13877-91-3	6.30	2.23	15.40
12.034	正辛醇 1-Octanol	111-87-5	27.60	17.00	12.80
12.034	甲酸辛酯 Octyl formate	112-32-3	27.60	3.27	2.26
12.299	月桂烯 Myrcene	123-35-3	2.45	2.59	1.65
12.351	正壬醛 Nonanal	124-19-6	0.88	1.08	2.23
12.898	1-壬醇 1-Nonanol	143-08-8	0.43	3.55	2.15
12.985	4-壬烯醛 Non-4-enal	37423-42-0	6.00	1.73	1.73
13.051	乙酸辛酯 Octyl acetate	112-14-1	5.70	9.60	22.50
13.218	癸醛 Decanal	112-31-2	0.16	0.22	2.52
13.357	α-松油醇 α-Terpineol	10482-56-1	1.29	1.11	1.03
13.834	乙酸(*Z*)-5-十二烯醇酯 Dodec-5-enyl acetate	16676-96-3	0.22	0.13	0.42
13.998	4-苯基-2-丁酮 Benzylacetone	2550-26-7	1.89	1.32	1.01
14.089	4-苯基-2-丁醇 4-Phenyl-2-butanol	2344-70-9	0.97	0.23	0.32
15.091	榄香烯 (−)-β-Elemene	33880-83-0	1.35	6.80	4.12
16.052	2-十三烷酮 2-Tridecanone	593-08-8	0.51	0.13	7.30
16.119	β-石竹烯 β-Caryophyllene	87-44-5	1.94	26.80	5.12
16.241	惕各酸异丁酯 Isobutyl tiglate	61692-84-0	0.42	0.22	0.23
18.991	2-十九烷酮 2-Nonadecanone	629-66-3	0.98	1.02	0.88



A-C 分别代表开花第 1、6、12 天。

A-C represent days 1, 6 and 12 of flowering, respectively.

图 4　金钗石斛整花 3 个开花时期挥发性成分总离子流图

Fig. 4　Total ion chromatograms of volatile components of *Dendrobium nobile* whole flowers at three flowering stages

蕊柱占比最小,为 7.29%。将称重后的石斛花各部位放置于顶空瓶中,分别测试其在相同条件下 GC-MS 总离子流图,由图 5 可知,金钗石斛花唇瓣总离子流图与整花总离子流图相近。

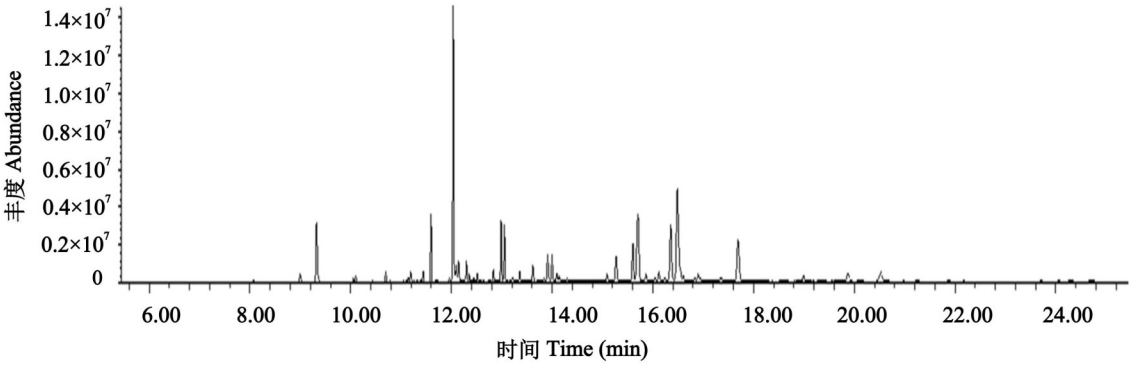


图 5 金钗石斛花唇瓣总离子流图

Fig. 5 Total ion chromatogram of the labellum of *Dendrobium nobile* flowers

蕊柱和唇瓣均检测出 26 种挥发性有机化合物(表 2),翼瓣仅检测出正辛醇、乙酸辛酯、正壬醛、1-壬醇和罗勒烯 5 种物质,旗瓣共检测出对二甲苯、罗勒烯、4-壬烯醛、乙酸辛酯和 2-十九烷酮 5 种物质。综合 4 个部位的总离子流图分析,结果显示,占整花质量 67.86%的翼瓣和旗瓣共检测出 8 种挥发性物质,整花的挥发性物质主要来源于唇瓣和蕊柱。对金钗石斛花挥发性成分进行分析归类,挥发性成分种类最多的为醇类,共检测出 8 种。

2.4 超微结构观察

2.4.1 *新鲜花瓣超微结构分析* 为了进一步验证金钗石斛花挥发性成分的主要来源,对新鲜的金钗石斛花瓣进行了感官分析和超微结构分析。肉眼观察发现开花初期花瓣厚实,颜色鲜艳,唇瓣上表皮靠近基部处表皮毛长而密集,下表皮光滑,翼瓣和旗瓣上下表皮均光滑。随着花朵开放时间的推进,翼瓣、旗瓣逐渐干瘪,反卷,颜色变淡明显,唇瓣形状和颜色变化不大(图 1)。

新鲜唇瓣表皮扫描电镜结果(图 6)显示,表皮细胞因失水而凹陷,排列紧密。其中,上表皮毛长而密集,毛与毛之间充满着分泌物质,将表皮毛粘结在一起(图 6:A、B)。随着开花时间的推进,表皮毛逐渐变短,上表皮细胞和表皮毛因为分泌物质不断堆积,着色不匀,成斑驳状,后期暗色斑块增多(图 6:C、D)。唇瓣下表皮毛短而少,后期也会出现暗色斑块,但较上表皮少,着色相对均匀(图 6:E、F)。

翼瓣表皮扫描电镜结果(图 7)显示,表皮细胞因失水而凹陷,排列紧密,上、下表皮细胞光滑,无表皮毛。随着开花时间的推进,上、下表皮均出现暗色斑块,但较唇瓣少,且上表皮(图 7:A)颜色略深于下表皮(图 7:B)。

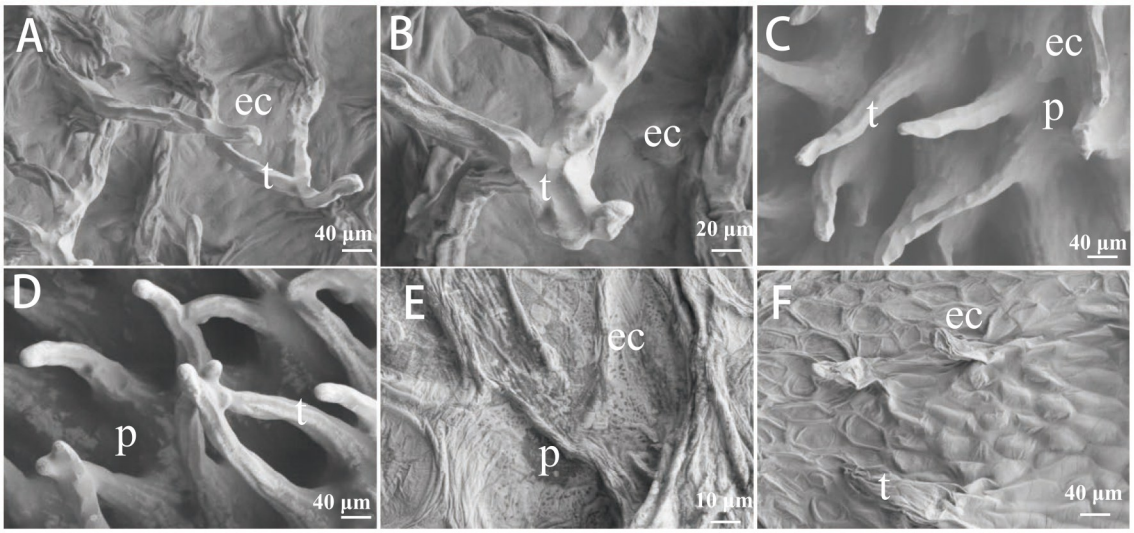
显微观察显示,同一开花时间,唇瓣暗色斑块显著多于翼瓣,说明唇瓣表皮毛及细胞分泌功能显著高于翼瓣。花瓣上表皮的暗色斑块多于下表皮,说明上表皮细胞有更强的分泌功能。该发现进一步验证了气相色谱质谱检测结果,唇瓣是整花产生挥发性物质的主要来源之一,所以金钗石斛花茶的最佳采摘部位是唇瓣。优先采摘唇瓣并快速低温干燥,可最大限度保留萜烯与芳香酯等关键致香成分,提升花茶的甜润度与花香持久性,同时为后续育种提供高香表型选择标准。

2.4.2 *固定花瓣超微结构特征* 金钗石斛花瓣扫描电镜结果显示,其表皮细胞为扁平形,细胞稍向上凸起,排列紧密。所有表皮着色均匀,未见暗色斑块,说明表皮毛和表皮细胞产生的分泌物被固定液溶解。花朵开放初期,含水量较高,固定后表皮毛出现干瘪、变形现象(图 8:A、F)。唇瓣上表皮细胞多为规则的长条形,表皮毛密集,由多个细胞组成,并在不同开花时期呈现规律性的变化:开花第 1 天表皮毛最长(图 8:A),达 352 μm;随着开花时间增长,腺毛逐渐变短(图 8:B-E),甚至后期还出现表皮毛分叉现象(图 8:E),但未见气孔。与上表皮相比较,唇瓣下表皮的细胞较大(图 9:A、B),成不规则的五边形,表皮毛少、短而粗(图 9:B、D),但有气孔分布(图 9:C)。经固定后,翼瓣和旗瓣相似,肉眼难辨。扫描电镜结果显示,翼(旗)瓣上、下表皮非常相似,无法用肉眼辨别(图 10)。翼(旗)瓣上、下表皮光滑,细胞致密且具气

表 2　金钗石斛花不同部位的主要香气成分检出

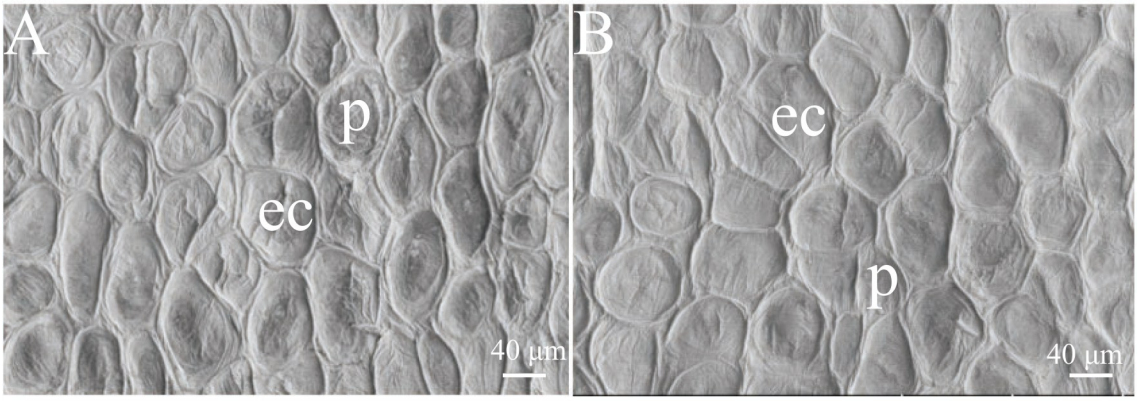
Table 2　Main aroma components detected in different parts of *Dendrobium nobile* flowers

保留时间 Retention time (min)	化合物 Compound	CAS 号 CAS number	唇瓣 Labellum (%)	翼瓣 Wing flap (%)	旗瓣 Flag flap (%)	蕊柱 Column (%)
8.068	戊醛 Pentanal	110-62-3	2.43	—	—	1.11
8.418	对二甲苯 *p*-Xylene	106-42-3	0.21	—	0.11	0.15
9.322	正己醛 Hexanal	66-25-1	6.87	—	—	9.52
10.046	叶醇 (*Z*)-hex-3-en-1-ol	928-96-1	0.32	—	—	0.25
10.098	正己醇 1-Hexanol	111-27-3	1.05	—	—	0.87
11.108	正庚醇 Heptan-1-ol	111-70-6	0.41	—	—	0.26
11.192	1-辛烯-3-醇 Oct-1-en-3-ol	3391-86-4	1.09	—	—	1.44
11.439	正辛醛 Octanal	124-13-0	1.04	—	—	1.11
11.592	罗勒烯 Ocimene	13877-91-3	5.74	37.55	44.21	6.13
12.034	正辛醇 1-Octanol	111-87-5	25.44	23.55	—	22.76
12.034	甲酸辛酯 Octyl formate	112-32-3	28.97	—	—	27.34
12.299	月桂烯 Myrcene	123-35-3	2.58	—	—	2.22
12.351	正壬醛 Nonanal	124-19-6	0.97	10.78	—	0.42
12.898	1-壬醇 1-Nonanol	143-08-8	0.32	11.67	—	0.62
12.985	4-壬烯醛 Non-4-enal	37423-42-0	7.11	—	22.57	5.43
13.051	乙酸辛酯 Octylacetate	112-14-1	5.77	16.45	17.75	6.04
13.218	癸醛 Decanal	112-31-2	0.33	—	—	0.51
13.357	α-松油醇 α-Terpineol	10482-56-1	1.03	—	—	1.32
13.834	乙酸(*Z*)-5-十二烯醇酯 Dodec-5-enyl acetate	16676-96-3	0.33	—	—	0.52
13.998	4-苯基-2-丁酮 Benzylacetone	2550-26-7	2.88	—	—	4.12
14.089	4-苯基-2-丁醇 4-Phenyl-2-butanol	2344-70-9	1.03	—	—	2.12
15.091	榄香烯 (−)-β-Elemene	33880-83-0	1.02	—	—	1.11
16.052	2-十三烷酮 2-Tridecanone	593-08-8	0.42	—	—	0.61
16.119	β-石竹烯 β-Caryophyllene	87-44-5	0.98	—	—	1.42
16.241	惕各酸异丁酯 Isobutyl tiglate	61692-84-0	0.55	—	—	0.56
18.991	2-十九烷酮 2-Nonadecanone	629-66-3	1.11	—	14.36	2.04



A、**B**. 第 1 天上表皮; **C**. 第 7 天上表皮; **D**. 第 14 天上表皮; **E**、**F**. 第 14 天下表皮; **t**. 表皮毛; **ec**. 表皮细胞; **p**. 斑块。
A,**B**. Upper epidermis on day 1; **C**. Upper epidermis on day 7; **D**. Upper epidermis on day 14; **E**, **F**. Lower epidermis on day 14; **t**. Trichome; **ec**. Epidermal cell; **p**. Patch.

图 6 新鲜唇瓣表皮显微结构
Fig. 6 Microstructure of fresh labellum epidermis



A. 上表皮; **B**. 下表皮; **ec**. 表皮细胞; **p**. 斑块。
A. Upper epidermis; **B**. Lower epidermis; **ec**. Epidermal cell; **p**. Patch.

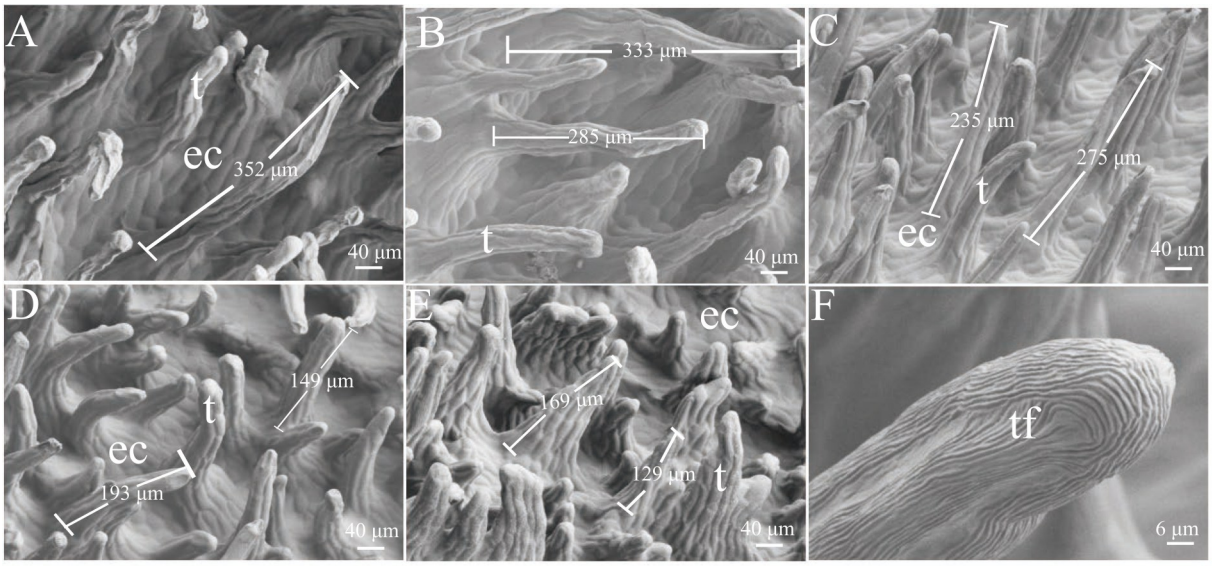
图 7 开花第 14 天翼瓣显微结构
Fig. 7 Microstructure of wing flap on day 14 of flowering

孔,大小与唇瓣下表皮(图 9:C)相似,上、下表皮均有气孔(图 10)。

3 讨论

3.1 金钗石斛不同花期挥发性成分动态变化

不同的品种、栽培方式、产地、季节及环境等因素均会影响植物挥发性成分的组成与含量(张钰莹等,2023)。值得注意的是,当前关于植物挥发性成分的研究普遍采用“峰面积归一化法”来计算各组分的相对含量。该方法仅以各组分峰面积占总峰面积的比例表示其相对丰度,无法反映挥发性物质的实际绝对释放量;当总挥发量受采样时间、环境温度或植株生理状态等因素影响而波动时,相对含量的变化可能掩盖组分真实浓度的增减趋势。本研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术对



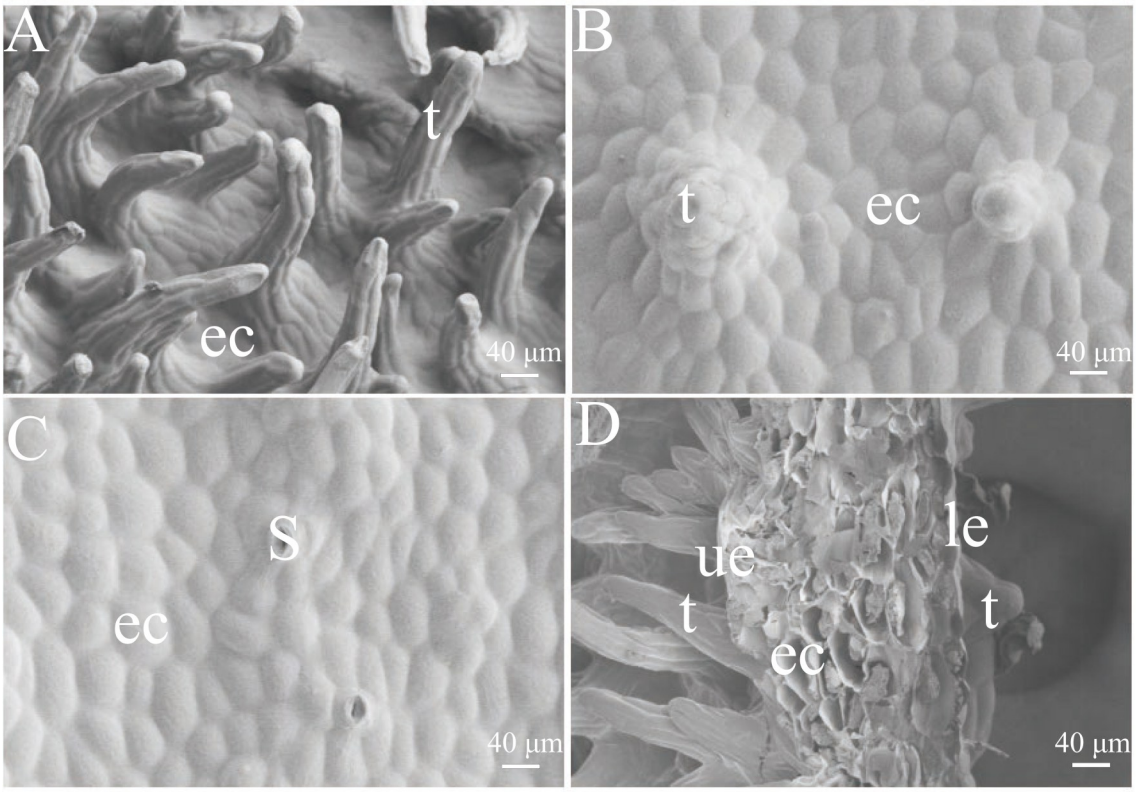
A–E. 开花第 1、4、9、12、14 天表皮毛超微结构；**F**. 开花第 1 天表皮毛超微结构；**t**. 表皮毛；**ec**. 表皮细胞；**tf**. 表皮毛褶皱。
A–E. Ultrastructure of trichomes on days 1, 4, 9, 12, 14 of flowering; **F**. Ultrastructure of trichomes on day 1 of flowering; **t**. Trichome; **ec**. Epidermal cell; **tf**. Trichome fold.

图 8　唇瓣上表皮表皮毛
Fig. 8　Trichomes of the upper epidermis of labellum

整花挥发性成分进行全花期动态监测，共鉴定出 26 种化合物。在金钗石斛整个开花周期内，萜烯类成分（包括 β-石竹烯、罗勒烯、榄香烯、月桂烯等）持续存在，但其相对含量呈动态变化。尤为重要的是，开花第 6 天 β-石竹烯含量陡增至26.80%，达到峰值，这与曲继旭等（2018）、杨渊等（2023）、曹桦等（2021）和王培育等（2026）的研究结果相似，但相对含量不同，说明金钗石斛花挥发成分因提取方式不同而差异显著，同时受采摘时间及环境因素包括温度、光照、湿度及花朵自身的生理状态等影响。这些因素可能通过影响花朵的代谢活动、挥发性物质的合成与分解等过程来影响挥发性物质的变化。

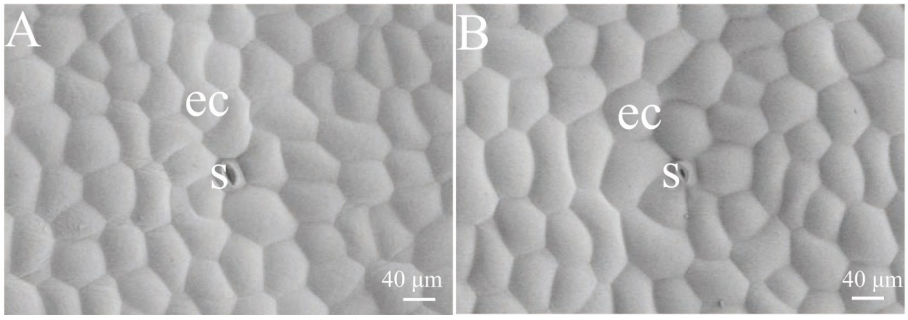
3.2 金钗石斛花香物质合成的主要部位

本研究通过扫描电镜观察，发现金钗石斛全花具有芳香腺结构，其中唇瓣与蕊柱是主要的芳香物质来源部位。唇瓣能够合成油类物质并进行短暂储存，随后通过表皮细胞及其外壁的毛状结构向外分泌，表明其具有高度发达的腺毛系统，本研究结果与 Wang 等（2025）的研究结论一致。近年来，兰科植物腺毛发育与次生代谢调控的分子机制研究取得显著进展。这类分泌结构可以在萝藦科花冠环、马兜铃科花被筒、天南星科肉穗花序附属物以及兰科植物的唇瓣中找到（崔长杰等，2015；程璐璐等，2015）。这种特殊腺体产生的挥发油往往很快被释放，在较短时间内挥发掉，也有的种类可能在细胞内呈现为小滴状，短暂储存（尚富德，2004）。植物花瓣（或花被片等）的挥发性花香物质一般都是通过其表皮细胞挥发的，而且为了更好地扩散挥发物，表皮细胞还会特化出专门的结构，如气孔、毛状体等（孔凡丽和包海鹰，2015；施婷婷等，2020）。在分子层面，有研究发现 MYB（myeloblastosis）转录因子与萜类合成酶（terpene synthase，TPS）基因家族在兰科植物腺毛发育及次生代谢中发挥关键调控作用。例如，Wang 等（2025）在齿瓣石斛中，整合基因组与单细胞转录组分析，鉴定出多个 MYB 和碱性螺旋-环-螺旋（basic helix-loop-helix，bHLH）转录因子与花香、色素合成基因共表达，参与表皮细胞及毛状体的分化调控；杨渊等（2023）和 Yang 等（2025）在鼓槌石斛、细茎石斛等兰科植物中发现，TPS 基因家族参与萜类挥发物的生物合成过程；Wang（2014）和刘莉成等（2021）的研究表明，该基因家族的表达水平与腺



A. 上表皮；**B**. 下表皮；**C**. 下表皮气孔；**D**. 横截面；**t**. 表皮毛；**ec**. 表皮细胞；**s**. 气孔；**ue**. 上表皮；**le**. 下表皮。
A. Upper epidermis; **B**. Lower epidermis; **C**. Stoma of lower epidermis; **D**. Cross section; **t**. Trichome; **ec**. Epidermal cell; **s**. Stoma; **ue**. Upper epidermis; **le**. Lower epidermis.

图 9 唇瓣上、下表皮显微结构对比
Fig. 9 Comparison of the microstructure of the upper and lower epidermis of labellum



A. 上表皮；**B**. 下表皮；**ec**. 表皮细胞；**s**. 气孔。
A. Upper epidermis; **B**. Lower epidermis; **ec**. Epidermal cell; **s**. Stoma.

图 10 翼瓣和旗瓣显微结构
Fig. 10 Microstructure of wing and flag flaps

毛密度及分泌物含量存在显著相关性。这些研究为揭示兰科植物腺毛发育与次生代谢的分子调控网络提供了重要理论依据。

3.3 金钗石斛花香代谢的关键转变阶段

挥发性成分对花香的贡献不仅取决于其相对含量,更受其香气阈值的影响。徐坚旺等(2023)

研究表明，萜烯类和酯类化合物通常具有较低的香气阈值，即使在极低浓度下也能被嗅觉感知。其中，β-石竹烯作为金钗石斛花的主要赋香成分，香气阈值仅为 64 μg · kg^{-1}，具有典型的丁香花香气，属于双环倍半萜类化合物，兼具平喘、祛痰、抗炎及抗焦虑、抗抑郁等药理活性，广泛应用于香精配制和定香剂生产（Yoo & Jwa, 2019；张钰莹等，2023）。此外，罗勒烯呈现花香、草香并伴有橙花油气息，具有浓郁甜香味；榄香烯为三环倍半萜烯，具有清新温润木香，略带郁金甜香，香气阈值为 8.6 μL · L^{-1}，具有抗炎、抑菌及抗氧化功能；月桂烯则具有镇痛、抗炎和抑制分解代谢的作用，香气阈值为 13~15 μL · L^{-1}（王元成等，2022）。

本研究结果显示，β-石竹烯相对含量在开花第 6 天陡增至 26.80%，随后快速下降；乙酸辛酯则在第 12 天升至 22.50%，呈现明显的从萜烯代谢到酯类代谢转变的特征。与此同时，金钗石斛花朵在盛开第 6 天总离子流峰面积达到峰值，表明整体挥发活性最强，此时相对含量的升高直接对应绝对释放量的最大化，花香最为浓郁。这一代谢模式与玫瑰、桂花等芳香植物的花期特征高度吻合（冯立国等，2008；施婷婷等，2020）。这种时序变化遵循植物次生代谢的“底物竞争”与“酶活更迭”规律。盛花期初期，质体中甲基赤藓糖醇磷酸（methyl erythritol phosphate，MEP）途径活跃，TPS 高表达，驱动β-石竹烯等萜类大量合成；第 6 天后，随着花瓣衰老启动，脂氧合酶（lipoxygenase，LOX）途径被激活，细胞膜脂降解并释放醛类与醇类前体，在醇酰基转移酶（alcohol acyltransferase，AAT）作用下转化为酯类（如乙酸辛酯），同时萜烯合酶活性受反馈抑制下调。因此，第 6 天是萜烯合成途径占绝对主导的代谢转折点，也是香气品质达到峰值的关键时间与细胞学基础。综上所述，开花第 6 天是金钗石斛花朵采收品质的最佳时期。该发现不仅为花茶精准采收提供了量化标准，也为通过调控 MEP/TPS 途径定向提升香气品质提供了关键时序靶点。

4　结论

本研究采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法，对金钗石斛开花第 1 天至第 14 天的挥发性成分进行了定性和相对定量分析，明确其花香成分种类和动态变化。整花共检测出 26 种挥发性化合物，主要以醇类和酯类含量为主，其次是醛类、萜烯类和酮类；不同部位挥发性成分分析显示，蕊柱和唇瓣均检测出 26 种，翼瓣和旗瓣各检测出 5 种，表明挥发性物质主要来源于唇瓣和蕊柱。开花过程中各成分含量动态变化表明，萜烯类持续存在，第 6 天 β-石竹烯含量达 26.80%。扫描电镜观察结果显示，金钗石斛花的挥发性成分主要来源于唇瓣。唇瓣上表皮腺毛长且密集，腺毛间含丰富分泌物；翼瓣与旗瓣的表皮光滑无毛，分泌物少。据此推测，唇瓣可通过上表皮腺毛将萜烯类和芳香酯类主动分泌并暂存于毛外被中，形成可缓释的香气库；下表皮通过气孔与薄壁细胞协同调节气体交换与水分，防止香气反向扩散。未来，可结合荧光标记、原位质谱成像或转录组分析，验证萜类合成基因表达，进一步阐明芳香释放机制。因此，在提升香气品质的花茶加工中，唇瓣与蕊柱为理想原料，最佳采收期为开花后第 6 天。

参考文献：

Cao H, Xu F, Lu L, et al., 2021. GC-MS analysis of volatile components in flowers of four kinds of fragrant *Dendrobium* species [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 37(13): 56-62. [曹桦, 许凤, 陆琳, 等, 2021. 4 种香花型石斛花朵挥发性成分 GC-MS 分析 [J]. 中国农学通报, 37(13): 56-62.]

Cheng L L, Chen M, Leng P S, et al., 2015. Effect of different temperature levels on the emission of terpenoid volatile compounds in *Ocimum basilicum* ‘Purple Ruffles’ [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 30(2): 78-82. [程璐璐, 陈敏, 冷平生, 等, 2015. 不同温度对紫罗勒萜烯类挥发物释放的影响 [J]. 北京农学院学报, 30(2): 78-82.]

Cui C J, Zou P, Kuang Y F, et al., 2015. Research advances on the osmophores in plants [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 23(6): 710-716. [崔长杰, 邹璞, 匡延凤, 等, 2015. 植物气味腺研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报, 23(6): 710-716.]

Feng L G, Sheng L X, Zhao L Y, et al., 2008. Changes of the aroma constituents and contents in the course of *Rosa rugosa* Thunb. flower development [J]. Scientia Agricultura Sinica, 41(12): 4341-4351. [冯立国, 生利霞, 赵兰勇, 等, 2008. 玫瑰花发育过程中芳香成分及含量的变化 [J]. 中国农业科学, 41(12): 4341-4351.]

Guo Y H, Yan H J, Zhang T, et al., 2022. The analysis of the relationship between disease resistance and leaf and petal ultrastructure of *Rosa* plants [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 44(4): 852-858. [郭艳红, 晏慧君, 张婷, 等, 2022. 蔷薇属植物抗性与叶片和花瓣超微结构相关性分析 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 44(4): 852-858.]

He P F, Gao M, Wang Y X, et al., 2025. Research progress on the pharmacological effects of *Dendrobium nobile* [J]. Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 46(7): 104-107. [何鹏飞, 高敏, 王胤骁, 等, 2025. 金钗石斛药理作用研究进展 [J]. 云南中医中药杂志, 46(7): 104-107.]

He X Y, Shen L Y, Lü C, et al., 2024. Changes of volatile components during the contamination of four molds in rice were analyzed based on SPME-GC-MS [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 39(5): 172-180. [和肖营, 沈玲意, 吕冲, 等, 2024. 基于 SPME-GC-MS 分析稻谷遭受 4 种霉菌浸染期间挥发性物质成分的变化 [J]. 中国粮油学报, 39(5): 172-180.]

Kong F L, Bao H Y, 2015. *Empetrum nigrum* secretory tissue microscopic structure features and volatile components analysis [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 35(8): 1587-1596. [孔凡丽, 包海鹰, 2015. 岩高兰分泌组织显微结构特征及其挥发性成分分析 [J]. 西北植物学报, 35(8): 1587-1596.]

Li X Y, Wu J K, Wang H J, et al., 2019. Analysis of volatile components in whorl tepals of *Magnolia denudata* 'Feihuang' during its development [J]. Acta Horticulturae Sinica, 46(10): 2009-2020. [李晓颖, 武军凯, 王海静, 等, 2019. '飞黄'玉兰花发育期各轮花被片挥发性成分分析 [J]. 园艺学报, 46(10): 2009-2020.]

Lin Z C, 2008. Studies on trichome density and aroma constituents of burley tobacco [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology: 1-71. [林智成, 2008. 白肋烟烟叶腺毛密度与致香物质的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学: 1-71.]

Liu L C, Liu C C, Wu Q N, 2021. Research progress of plant glandular trichomes [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 52(3): 883-893. [刘莉成, 刘潺潺, 吴啟南, 2021. 植物腺毛的研究进展 [J]. 中草药, 52(3): 883-893.]

Qu J X, He Y X, Sun Z R, et al., 2018. Comparison of amino acids and volatile constituents in four kinds of *Dendrobium* flowers [J]. Modern Chinese Medicine, 20(4): 387-394. [曲继旭, 贺雨馨, 孙志蓉, 等, 2018. 四种石斛花氨基酸和挥发性成分比较 [J]. 中国现代中药, 20(4): 387-394.]

Shang F D, 2004. A study on the biology of *Osmanthus fragrans* Lour. [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 1-97. [尚富德, 2004. 桂花(*Osmanthus fragrans* Lour.)生物学研究 [D]. 南京: 南京林业大学: 1-97.]

Shi T T, Yang X L, Wang L G, 2020. Dynamic characteristics of floral components and anatomical observation of petals in three cultivars of *Osmanthus fragrans* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 44(4): 12-20. [施婷婷, 杨秀莲, 王良桂, 2020. 3 个桂花品种花香组分动态特征及花被片结构解剖学观测 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 44(4): 12-20.]

Wang G D, 2014. Recent progress in secondary metabolism of plant glandular trichomes [J]. Plant Biotechnology, 31(5): 353-361.

Wang J, Zhou Y, Zhang M C, et al., 2025. Resolving floral development dynamics using genome and single-cell temporal transcriptome of *Dendrobium devonianum* [J]. Plant Biotechnology Journal, 23(8): 2997-3011.

Wang P Y, Luo W H, Yan P P, et al., 2026. Analysis of the volatile components of 6 *Dendrobium* flowers by GC-MS [J]. Molecular Plant Breeding, 24(14): 4788-4796. [王培育, 罗维鸿, 颜沛沛, 等, 2026. 基于 GC-MS 的 6 种石斛花挥发性成分分析 [J]. 分子植物育种, 24(14): 4788-4796.]

Wang Y C, Zhang M, Zhou X X, et al., 2022. Floral volatile components from five *Dendrobium* species based on SPME-GC-MS [J]. Forest Research, 35(1): 132-141. [王元成, 张萌, 周晓星, 等, 2022. 基于 GC-MS 的五种石斛花朵挥发性成分鉴定与差异性分析 [J]. 林业科学研究, 35(1): 132-141.]

Xu J W, Jiang H D, Chen T G, et al., 2023. Analysis of volatile components in six species of *Dendrobium* flowers based on GC-MS [J]. Guangxi Sciences, 30(6): 1226-1236. [徐坚旺, 江海都, 陈泰国, 等, 2023. 基于 GC-MS 的 6 种石斛花朵挥发性成分分析 [J]. 广西科学, 30(6): 1226-1236.]

Yan P P, Ye W, Jiang J L, et al., 2021. Diurnal variation of floral scents emitted from *Dendrobium nobile* Lindl. [J]. Subtropical Agriculture Research, 17(3): 179-183. [颜沛沛, 叶炜, 江金兰, 等, 2021. 金钗石斛花香气日变化规律 [J]. 亚热带农业研究, 17(3): 179-183.]

Yang Y, Yang Q Y, Wang D C, et al., 2023. Analysis of volatile components in *Dendrobium officinale*, *Dendrobium nobile* and lily flowers [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 39(25): 139-146. [杨渊, 杨秋悦, 王大昌, 等, 2023. 铁皮石斛、金钗石斛及百合鲜花挥发性成分分析 [J]. 中国农学通报, 39(25): 139-146.]

Yang Y N, Gong J Y, Nong R R, et al., 2025. Terpene synthase (TPS) family member identification and expression pattern analysis in flowers of *Dendrobium chrysotoxum* [J]. Horticulturae, 11(6): 566.

Yoo H J, Jwa S K, 2019. Efficacy of β-caryophyllene for periodontal disease related factors [J]. Archives of Oral Biology, 100: 113-118.

Yu Y, Lyu S H, Chen D, et al., 2017. Volatiles emitted at different flowering stages of *Jasminum sambac* and expression of genes related to α-farnesene biosynthesis [J]. Molecules, 22: 546.

Yuan J L, Jin X L, Zhang Z, et al., 2023. Volatility components of *Michelia crassipes* tepals at different flowering stages [J]. Acta Horticulturae Sinica, 50(5): 1095-1109. [袁婕俐, 金晓玲, 张峥, 等, 2023. 紫花含笑不同开花时期花被片的挥发性成分分析 [J]. 园艺学报, 50(5): 1095-1109.]

Zhang Y Y, Xu F, Cao H, et al., 2023. GC-MS analysis of volatile components of four *Dendrobium* flowers [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 51(11): 1273-1282. [张钰莹, 许凤, 曹桦, 等, 2023. 4 种石斛属花朵挥发性成分 GC-MS 分析 [J]. 山西农业科学, 51(11): 1273-1282.]

Zhao Y Q, Pan H T, Zhang Q X, et al., 2010. Dynamics of fragrant compounds from *Prunus mume* flowers [J]. Journal of Beijing Forestry University, 32(4): 201-206. [赵印泉, 潘会堂, 张启翔, 等, 2010. 梅花花朵香气成分时空动态变化的研究 [J]. 北京林业大学学报, 32(4): 201-206.]

Zou J J, Cai X, Zeng X L, et al., 2017. Changes of aroma-active compounds in different cultivars of *Osmanthus fragrans* during flowering [J]. Acta Horticulturae Sinica, 44(8): 1517-1534. [邹晶晶, 蔡璇, 曾祥玲, 等, 2017. 桂花不同品种开花过程中香气活性物质的变化 [J]. 园艺学报, 44(8): 1517-1534.]

(责任编辑 邓斯丽 王登惠)