

基于HS-SPME-GC-MS的药用甘草叶香气成分比较研究

周筱美¹, 杜珍珠^{2*}, 黄刚¹, 徐文斌¹, 阎平¹

¹石河子大学生命科学学院/绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室, 新疆 石河子

²石河子大学分析测试中心, 新疆 石河子

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月21日

摘要

目的: 比较3种药用甘草叶不同生长时期的香气成分。方法: 采用顶空固相微萃取气相色谱质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)对三种甘草(乌拉尔甘草、胀果甘草、光果甘草)的幼嫩和成熟叶片进行分析, 结合主成分分析与偏最小二乘法判别(PLS-DA)分析进行成分比较。结果: 共鉴定出148个香气成分; 其中, 醇类、萜类和酯类化合物最丰富; 醇类化合物相对百分含量为胀果甘草 > 乌拉尔甘草 > 光果甘草, 萜类和酯类化合物的相对百分含量为乌拉尔甘草 > 胀果甘草 > 光果甘草。以VIP > 1.8为标准共筛选出19个关键差异成分。胀果甘草中醇类总量最高, 乌拉尔甘草中醛类、酮类等成分总量较高。结论: 该方法适用于甘草香气成分分析, 种间及生长时期的差异为甘草叶资源开发与药效研究提供依据。

关键词

药用甘草, HS-SPME-GC-MS, 香气成分, 种间差异

Comparative Study on Aroma Components of Medicinal Licorice Leaves Based on HS-SPME-GC-MS

Xiaomei Zhou¹, Zhenzhu Du^{2*}, Gang Huang¹, Wenbin Xu¹, Ping Yan¹

¹Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-Basin System Ecology, College of Life Science, Shihezi University, Shihezi Xinjiang

*通讯作者。

文章引用: 周筱美, 杜珍珠, 黄刚, 徐文斌, 阎平. 基于 HS-SPME-GC-MS 的药用甘草叶香气成分比较研究[J]. 分析化学进展, 2026, 16(2): 130-139. DOI: 10.12677/aac.2026.162015

²Laboratory Equipment Department, Shihezi University, Shihezi Xinjiang

Received: April 19, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 21, 2026

Abstract

Objective: To compare the aroma components of three medicinal licorice leaves at different growth stages. **Methods:** Headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was used to analyze young and mature leaves of three licorice species (*Glycyrrhiza uralensis*, *Glycyrrhiza inflata*, *Glycyrrhiza glabra*). Component comparison was performed using principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA). **Results:** A total of 148 aroma components were identified; among them, alcohols, terpenes, and esters were the most abundant. The relative percentage of alcohols was *Glycyrrhiza inflata* > *Glycyrrhiza uralensis* > *Glycyrrhiza glabra*, whereas terpenes and esters were *Glycyrrhiza uralensis* > *Glycyrrhiza inflata* > *Glycyrrhiza glabra*. Nineteen key differential components were selected using VIP > 1.8 as the criterion. *Glycyrrhiza inflata* had the highest total content of alcohols, while *Glycyrrhiza uralensis* had relatively higher total amounts of aldehydes, ketones, and other compounds. **Conclusion:** This method is suitable for analyzing licorice aroma components, and interspecies and growth stage differences provide a basis for licorice leaf resource development and pharmacological studies.

Keywords

Medicinal Licorice, HS-SPME-GC-MS, Aroma Components, Interspecific Differences

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

甘草是豆科甘草属植物，其药用历史悠久，具有清热解毒、补脾益气、润肺化痰、缓急止痛、调和诸药等功效[1]-[5]。乌拉尔甘草、胀果甘草和光果甘草被《中华人民共和国药典》收录为药用种[6]。传统用药仅聚焦于根茎且对生长年限有特定要求，地上部分(尤其叶片)尚未实现有效开发。为推动甘草全株综合利用、提升经济价值同时减少栽培废弃物，开发叶片作为潜在药用部位具有重要探索价值。

为明确甘草叶萜烯类等活性成分的药理功能(抗炎、抗氧化等) [7] [8]，推动茎叶从副产物转为药用/工业原料，实现“根-叶”协同利用，提升资源利用率；揭示香气成分在甘草抵御逆境及病虫害中的作用机制[9]，为抗逆品种选育提供理论支撑；构建“皂苷-黄酮-挥发性成分”多维度品质评价体系，完善甘草品质标准[10] [11]；推动叶提取物在香精香料、功能性食品等领域的开发，延伸产业链，助力产业多元化升级。本研究聚焦药用甘草叶香气物质的种特异性与功能价值，兼具资源学、生态学及产业应用多重意义。

传统香气成分提取方法(如水蒸气蒸馏、溶剂萃取)存在操作复杂、耗时久、溶剂污染等弊端[12] [13]。而顶空-固相微萃取(HS-SPME)技术兼具无溶剂、富集效率高、操作简便的优势，搭配气相色谱-质谱联用(GC-MS)的高分离度与高灵敏度特性，已成为植物香气成分分析的优选技术[14]-[16]。综上所述，本研

究采用 HS-SPME-GC-MS 法, 系统分析三种药用甘草叶片不同生长时期的香气成分物质比较研究, 筛选核心特征标志物。明确甘草叶片香气成分的动态变化规律, 为甘草种质资源综合开发利用、药用开发、品质评价体系构建、栽培优化及产业升级提供关键科学依据。

2. 材料与方 法

2.1. 实验材料

本研究于 2025 年分别采集来自石河子大学试验场种植二年的胀果甘草、乌拉尔甘草和光果甘草的幼叶和成熟叶材料。凭证标本存于石河子大学植物标本馆(SHI)内。

2.2. 仪器与方 法

主要仪器: Agilent7890A-5975C 型气相色谱 - 质谱联用仪(美国 Agilent 公司)、AUW120D 型十万分之一电子天平(济宁市裕泽工业科技有限公司)、100 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头、20 mL 带聚四氟乙烯垫片顶空进样瓶。

样品处理: 新鲜甘草叶片清洗后自然晾干, 剪碎至粒径约 3 mm 的颗粒备用。

萃取头老化: 按生产商 Supelco 公司要求, 将 100 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头置于 GC 进样口, 270 $^{\circ}\text{C}$ 老化 60 min 后使用[12] [13]。

HS-SPME 条件: 称取 2 g 样品置于 20 mL 顶空进样瓶, 加盖密封后放入加热装置, 预热 5 min; 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温吸附 30 min 后, 将萃取头插入 GC 进样口, 270 $^{\circ}\text{C}$ 解析 5 min, 通过 Agilent7890A-5975C 气相色谱 - 质谱联用仪(GC-MS)进行成分采集。

质谱条件: 电子轰击(EI)离子源; 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$, 传输线温度 250 $^{\circ}\text{C}$; 激活电压 1.5 V, 无溶剂延迟; 质量扫描范围 m/z 35-600。色谱条件: 采用 AgilentHB-5ms 色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm); 进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$, 不分流进样。柱温程序: 初温 50 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min, 以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 80 $^{\circ}\text{C}$, 再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 110 $^{\circ}\text{C}$, 最后以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min, 总分析时长 27 min。载气为氦气(纯度 99.999%), 流速 1.0 mL/min [14] [17]。

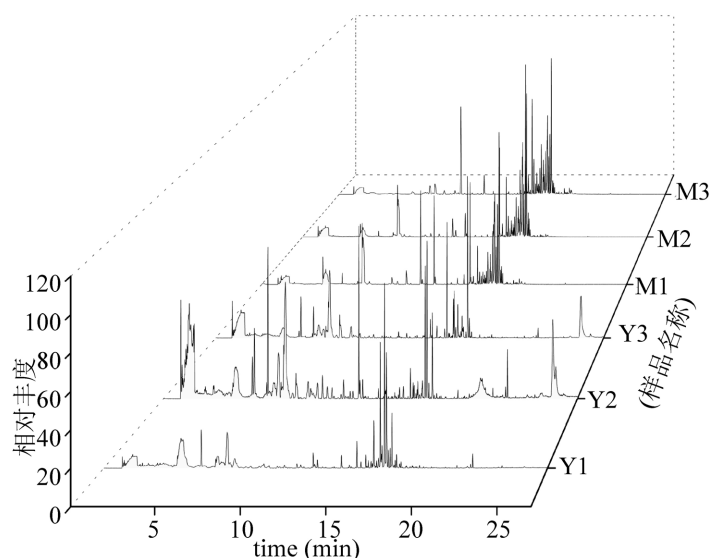
2.3. 数据处理

样品 GC-MS 分离解析后, 将扫描质量图谱中的有效色谱峰, 在 NIST 谱库中进行检索定性定量化合物, 以匹配度达到 80%的化合物为结果, 取 3 个平行结果的平均值。去除非香气成分, 对色谱峰的峰面积使用归一法定量统计, 得出各个香气成分的相对含量。运用 Excel 2019 与 SPSS 22.0 对结果进行整理, 使用 SIMCA 14.1 和 Origin 2021, 以 VIP > 1.8 为标准进行影响差异的主要成分筛选[18]。

3. 结果与分 析

3.1. 药用甘草叶香气成分总离子流图

采用 HS-SPME-GC-MS 法对药用甘草(光果甘草、乌拉尔甘草、胀果甘草)幼叶与成熟叶香气成分提取与分析, 构建 GC-MS 离子流图(图 1), 结果显示, 检测时间 0~25 分钟, 成分信号主要集中在 10~25 分钟, 0~10 分钟信号较弱。同一甘草物种中成熟叶的离子流信号(相对丰度、峰数量)显著强于幼叶, 说明成熟叶的化学成分种类更丰富和含量更高。光果甘草、乌拉尔甘草香气成分的最大面积峰保留时间与峰面积的信号丰富度(峰密集度、强度)高于胀果甘草, 且该差异在成熟叶中更明显。此图直观反映了甘草不同物种、叶龄间的香气化学成分呈现较大差异, 为其药用成分的叶龄或物种关联性分析提供了依据, 也为后续香气成分鉴定与核心标志物筛选奠定基础。



注: Y1: 胀果甘草幼叶; Y2: 乌拉尔甘草幼叶; Y3: 光果甘草幼叶; M1: 胀果甘草成熟叶; M2: 乌拉尔甘草成熟叶; M3: 光果甘草成熟叶。

Figure 1. HS-SPME-GC-MS ion chromatogram of medicinal licorice sample

图 1. 药用甘草样品 GC-MS 离子流图

3.2. 药用甘草叶香气成分总含量及种类差异分析

三种药用甘草(胀果甘草、乌拉尔甘草、光果甘草)叶的香气成分共检出 148 种, 涵盖胺类、醇类、萜类、醛类等 10 余类, 香气成分组成与相对含量存在显著种间及叶龄(幼叶/成熟叶)差异。分析结果如下表。

Table 1. Statistics of the types and relative contents of medicinal licorice aroma compounds

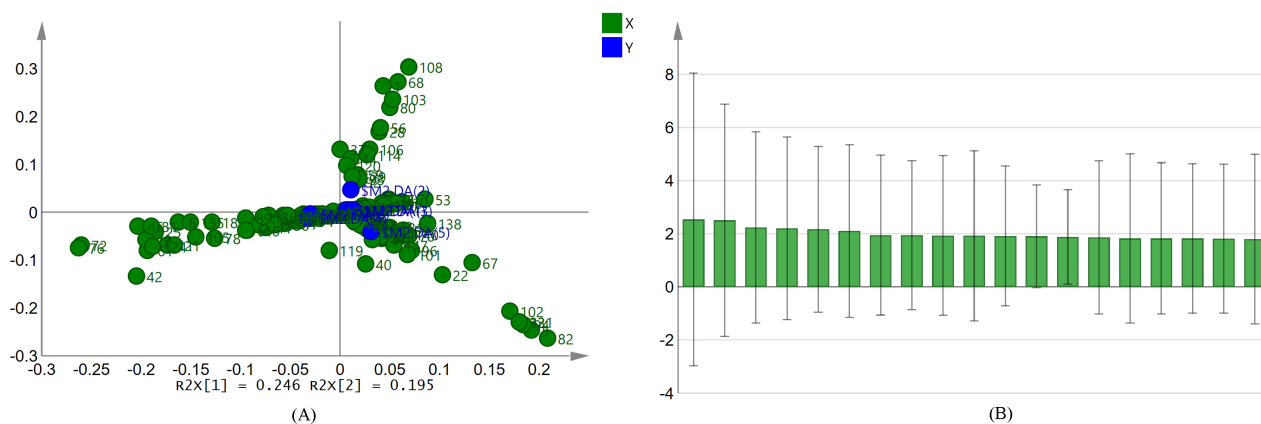
表 1. 药用甘草香味物质种类与相对含量统计表

物质类型	香味物质种类与相对含量/%											
	光果甘草				乌拉尔甘草				胀果甘草			
	幼叶	种类数	成熟叶	种类数	幼叶	种类数	成熟叶	种类数	幼叶	种类数	成熟叶	种类数
酯类	7.89	6	6.35	3	70.77	10	37.98	15	34.65	12	82.76	10
烷烃类	2.11	1	109.98	2	0	0	37.92	2	-	-	15.61	4
萜类	162.38	25	204.54	8	317.18	20	430.47	25	354.43	17	433.1	20
醛类	3.2	3	28.18	1	3.52	3	77.95	3	101.22	3	53.94	3
醇类	33.2	5	11.6	1	58.46	4	76.48	3	103.07	4	113.69	5
胺类	-	-	73.57	1	-	-	6.11	1	-	-	0.94	1
芳香烃类	72.7	1	2.24	1	10.11	1	13.78	1	-	-	16.02	1
酚类	0.69	1	-	-	-	-	-	-	0.78	1	-	-
炔酸类	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.43	1
炔烃类	-	-	-	-	-	-	-	-	1.22	1	-	-
酮类	-	-	55.38	1	-	-	-	-	1.27	1	-	-
脂肪酸类	-	-	-	-	-	-	-	-	2.01	1	-	-
合计	282.17	42	491.84	18	460.04	38	680.69	50	598.65	40	719.49	45

三种药用甘草幼叶到成熟叶的香味物质在种内和种间的变化特征及规律如表 1 所示。光果甘草种类数从 42 降至 18 种, 相对含量从 282.17 升至 491.84, 烷烃类含量激增; 乌拉尔甘草种类数从 38 种升至 50 种、相对含量从 460.04 升至 680.69, 萜类物质提升显著; 胀果甘草相对含量从 598.65 升至 719.49、种类数从 40 增至 45 种。成熟叶中, 胀果甘草相对含量最高、乌拉尔甘草种类数最多; 幼叶中, 光果甘草种类数最多、胀果甘草相对含量较高。三种甘草成熟叶香味物质相对含量普遍高于幼叶, 仅光果甘草成熟叶种类数明显下降。同时, 光果甘草仅幼叶含酚类(0.69)、高含量芳香烃类(72.7); 成熟叶酚类消失、芳香烃类骤降(2.24); 炔酸/炔烃/酮类全叶期均无。乌拉尔甘草仅含少量芳香烃类(幼叶 10.11、成熟叶 13.78), 炔酸/炔烃/酮类/酚类全叶期均无。胀果甘草幼叶含炔烃类(1.22)、酮类(1.27)、酚类(0.78); 成熟叶这些物质消失, 新增炔酸类(3.43); 芳香烃类仅成熟叶有(16.02)。即少量物质并非三种药用甘草物种共有, 仅在特定物种的特定叶龄零散存在。

3.3. 主成分和偏小二乘法判别(PLS-DA)分析

依据三种药用甘草的香味物质平均相对百分含量数据的成分散点分布与样品的相关性发掘出引起三种甘草差异的成分, 从载荷图(图 2(A))可知, 化合物 108(三甲基(2-甲基-1-亚丙基)环丙烷), 76(古巴烯), 82(佛术烯), 与中心原点的距离最远, 偏离程度较高, 为差异最明显的体现。



注: SM3.DA (1): 光果甘草幼叶; SM3.DA (2): 光果甘草成熟叶; SM3.DA (3): 乌拉尔甘草幼叶; SM3.DA (4): 乌拉尔甘草成熟叶; SM3.DA (5): 胀果甘草幼叶; SM3.DA (6): 胀果甘草成熟叶

Figure 2. Distribution diagram of medicinal licorice leaf load (A) and statistical chart of components with VIP > 1.8 (B)

图 2. 药用甘草叶载荷分散图(A)与 VIP > 1.8 成分统计图(B)

Table 2. Statistics of Components with VIP > 1

表 2. VIP 值大于 1 成分统计表

号	编号	VIP 值	香气物质	类别
1	17	2.53822	对伞花烃	芳香烃
2	53	2.5047	1,3,8-对薄荷三烯	萜类
3	42	2.23566	α -愈创木烯	萜类
4	45	2.20224	β -月桂烯	萜类
5	108	2.16895	三甲基(2-甲基-1-亚丙基)环丙烷	烷烃类
6	82	2.10206	佛术烯	萜类

续表

7	5	1.94926	(E)-2-己烯-1-醇	醇类
8	68	1.94805	3,6,6-三甲基二环[3.1.1]庚-2-烯	萜类
9	81	1.93608	1-甲基-4-异丙叉基环己烯	萜类
10	61	1.92524	香橙烯	萜类
11	1	1.91847	二甲胺	胺类
12	124	1.90416	4-己烯-1-醇乙酸酯	酯类
13	72	1.88047	石竹烯	萜类
14	94	1.86539	瓦伦亚烯	萜类
15	10	1.82431	3-己烯-1-醇, (Z)-	醇类
16	8	1.82424	3-己烯-1-醇	醇类
17	23	1.82323	(E)-2-己烯醛	醛类
18	121	1.81533	(Z)-3-己烯-1-醇乙酸酯	酯类
19	73	1.801	顺-菖蒲烯	萜类
20	103	1.67453	5-甲基-3-庚酮	酮类
21	135	1.64915	丁酸己酯	酯类
22	102	1.64424	δ -杜松烯	萜类
23	21	1.63252	(E)-2,6-二甲基-2,6-辛二烯醛	醛类
24	76	1.57997	古巴烯	萜类
25	80	1.56562	2-乙烯基-1,1-二甲基-3-甲基环己烷	萜类
26	3	1.56226	3-甲基-1,5-戊二醇	醇类
27	11	1.55618	(Z)-3-己烯-1-醇	醇类
28	138	1.51682	顺式-3-己烯基- α -甲基丁酸酯	酯类
29	99	1.42361	β -蒎烯	萜类
30	98	1.39636	α -蒎烯(芹子烯)	萜类
31	25	1.3709	十二醛	醛类
32	78	1.27872	1-乙烯基-1-甲基-2-(1-甲基乙烯基)-4-异丙叉基环己烷	萜类
33	100	1.27568	β -蒎烯(芹子烯)	萜类
34	56	1.26751	(E,Z)-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	萜类
35	4	1.26109	1-辛烯-3-醇	醇类
36	28	1.18364	壬醛	醛类
37	79	1.18165	1-乙烯基-1-甲基-2,4-双(1-甲基乙烯基)环己烷[1S-(1 α ,2 β ,4 β)]-	萜类
38	67	1.12956	3,6,6-三甲基二环[3.1.1]庚-2-烯	萜类
39	49	1.11344	γ -松油烯	萜类
40	105	1.06973	(1R,2S,6S,7S,8S)-8-异丙基-1-甲基-3-亚甲基三环[4.4]癸烷	烷烃类
41	89	1.06503	1,2,4a,5,6,8a-六氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙烯基)萘,[1S-(1 α ,4 $\alpha\beta$,8 $\alpha\alpha$)]-	萜类
42	22	1.036	2-己烯醛	醛类

为了进一步比较筛选出影响差异的主要成分,对数据进行VIP值的筛选,以VIP > 1为标准,得到42个成分,如表2所示,分别是17(对伞花烃),53(1,3,8-对薄荷三烯),42(α -愈创木烯),45(β -月桂烯),108(三甲基(2-甲基-1-亚丙基)环丙烷),82(佛术烯),5((E)-2-己烯-1-醇),68(3,6,6-三甲基二环[3.1.1]庚-2-烯),81(1-甲基-4-异丙叉基环己烯),61(香橙烯),1(二甲胺),124(4-己烯-1-醇乙酸酯),72(石竹烯),94(瓦伦亚烯),10(3-己烯-1-醇,(Z)-),8(3-己烯-1-醇),23((E)-2-己烯醛),121((Z)-3-己烯-1-醇乙酸酯),73(顺-菖蒲烯)等。进一步对数据进行VIP > 1.8为标准进行筛选,如图2(B)所示,综合考虑,影响这6个甘草样品的主要差异成分共有19个。

4. 讨论

4.1. 三种药用甘草叶片挥发性成分的差异特征

本研究采用HS-SPME-GC-MS技术,系统解析了胀果甘草、乌拉尔甘草、光果甘草3种药用甘草幼叶期与成熟期的叶片香气成分,共鉴定出148种香气成分。其中醇类、萜类和酯类为三类甘草叶片的核心优势组分,这与2021年Wang等在甘草属植物挥发性代谢组的研究结论基本一致[19]。通过PCA、聚类分析及PLS-DA等多元统计方法,筛选出19个区分不同甘草种及生长阶段的关键差异性化学成分,结果表明,不同甘草种间及同一物种不同生长阶段的叶片香气成分存在显著分化,胀果甘草叶片中醇类物质相对含量最高,乌拉尔甘草以醛类、酮类物质为特征性组分,光果甘草的萜类与酯类组成呈现独特的种间特异性;同时,幼叶期与成熟期的挥发性成分存在明显的时序性变化,反映了甘草叶片次生代谢随生长发育的动态调控特征。

4.2. 关键差异化合物的生物活性与甘草药效的关联分析

针对筛选出的19个核心差异化合物(如对伞花烃、石竹烯、佛术烯等),结合已有文献报道的生物活性,系统阐释其与不同甘草种成分特征的关联,为甘草的药用价值提供化学层面的支撑。

对伞花烃(*p*-Cymene)作为本研究中关键的差异单萜类化合物,是区分不同甘草种的重要化学标志物。已有研究证实,对伞花烃具有广谱的抗菌、抗炎及驱虫活性:在抗菌方面,其可通过破坏细菌细胞膜完整性、抑制能量代谢,显著抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等致病菌的生长及生物膜形成[20];在抗炎方面,对伞花烃可通过抑制NF- κ B和MAPK信号通路,减少促炎因子释放,发挥显著的抗炎镇痛作用[21];在生态层面,对伞花烃对植食性昆虫具有强烈的驱避作用,是植物防御系统的重要组成成分[22]。本研究中,乌拉尔甘草叶片检测到较高含量的对伞花烃,这与其传统应用中抗菌消炎的药理活性高度契合,为乌拉尔甘草的药用功效提供了直接的物质基础。石竹烯(β -Caryophyllene)是广泛存在于药用植物中的倍半萜类化合物,也是本研究中胀果甘草的特征性差异组分。大量研究表明,石竹烯兼具抗氧化、镇痛、抗炎及抗菌多重活性:其可通过激活TRPV1受体发挥长效镇痛作用,同时作为CB2受体激动剂[23],参与调节机体免疫炎症反应;此外,石竹烯对多种植物病原菌具有抑制作用,是植物抵御生物胁迫的核心防御物质[23][24]。胀果甘草中石竹烯的高积累,不仅解释了其在极端荒漠环境中较强的抗逆防御能力,也为胀果甘草叶片的抗菌、抗炎药用开发提供了科学依据。佛术烯(Eremophilene)属于倍半萜类化合物[25][26],是光果甘草的特征性差异成分。研究证实,佛术烯具有显著的抗炎、抗肿瘤活性,同时可通过激活植物防御信号通路,增强植物对病原菌的抗性[27]。光果甘草中高丰度的佛术烯,不仅是其传统药用中抗炎功效的物质基础,也反映了其独特的生态适应策略,为光果甘草叶片的药用开发提供了新的方向。

此外,三类甘草中富集的醇类、醛酮类等差异组分也具有明确的生物活性:胀果甘草中高含量的芳樟醇、香叶醇等醇类物质,具有强效的抗菌、驱虫及抗氧化活性[28];乌拉尔甘草中富集的醛酮类成分可能是其抗炎、抗氧化活性的核心来源。这些差异化合物的组成特征,共同构成了不同甘草种的化学表型,

直接关联了其药用功效与抗逆特性，为甘草种质资源的精准评价提供了重要依据。

4.3. 成分差异的生理代谢与生态适应性机制解析

从植物生理代谢与生态适应性角度，深入解析不同甘草种及生长阶段的成分差异，有助于揭示甘草属植物的演化适应策略。

(1) 生长阶段差异的生理代谢机制：从幼叶期到成熟期，甘草叶片挥发性成分的时序性变化，是植物生长发育过程中次生代谢精准调控的结果。幼叶期是植物组织快速生长、易受昆虫取食与病原菌感染的脆弱阶段，此时叶片高含量积累萜类、醇类等防御性挥发性物质，可通过挥发形成化学屏障，直接抵御生物胁迫，保护幼嫩组织[27][29]；进入成熟期后，植物能量分配向生殖生长倾斜，叶片挥发性成分发生动态调整，酯类和部分醛酮类成分比例上升，这一变化既维持了基础防御功能，又优化了代谢资源分配，保障植株正常生长发育[30]，是植物在长期演化中形成的适应性代谢策略。

(2) 种间差异的生态适应性机制：三种甘草的挥发性成分种间差异，是其长期适应不同生境的演化结果。胀果甘草主要分布于我国西北极端干旱的荒漠地带，其叶片高含量的醇类、萜类物质不仅具有强效的抗菌驱虫活性，还可通过调节叶际微环境增强细胞膜稳定性，提升植株的抗旱、抗逆能力[31][32]，适应荒漠极端生境；乌拉尔甘草多生长于草原、荒漠草原过渡带，其富集的醛酮类成分具有较高的化学活性，可在复杂的生物互作中发挥更强的信号作用，提升植株对多变环境的适应能力[33]；光果甘草多见于绿洲、河谷等相对湿润的生境，其独特的萜酯类组成，可有效降低挥发性损失、维持代谢稳定性，适应湿润生境的环境特征[7][34]。这种化学分化是甘草属植物适应不同生态位、实现种群繁衍的重要分子基础，为理解植物适应性进化机制提供了典型案例。

4.4. 基于成分差异的甘草叶片资源差异化开发建议

基于三种甘草叶片的挥发性成分特征与生物活性差异，本研究提出更具针对性、可落地的资源开发策略，为甘草叶片资源的高值化利用提供科学指导：胀果甘草：重点开发天然抗菌驱虫类产品依托胀果甘草叶片高醇类、高石竹烯等强抗菌驱虫活性成分的特征，可重点开发天然农用生物农药、食品防腐剂、抗菌类药用原料。相较于化学农药，基于胀果甘草的生物制剂具有环境友好、不易产生抗药性的优势，可用于农业病虫害绿色防控；同时，其高含量的醇类物质可开发为天然抗菌剂，应用于食品保鲜、口腔护理等领域。乌拉尔甘草：重点开发抗炎类药用与保健产品针对乌拉尔甘草叶片富集醛酮类、对伞花烃等抗炎活性成分的特征，可重点开发抗炎类中药制剂、功能性保健品、天然抗氧化剂。可将其用于呼吸道炎症、皮肤炎症等疾病的辅助治疗，同时开发抗氧化类保健品，拓展其药用与保健价值，实现乌拉尔甘草资源的多元化利用。光果甘草：重点开发天然香料与化妆品原料基于光果甘草叶片独特的萜酯类香气成分与佛术烯等活性组分，可重点开发高端天然香料、化妆品保湿剂、食品添加剂。其萜酯类成分具有清新的香气，可用于高端香水、护肤品的调香；同时，结合其抗氧化、抗炎活性，可开发抗衰老护肤品，实现光果甘草叶片资源的高附加值利用。

此外，本研究结果也为甘草的种质评价、优良品种选育提供了化学指标，可通过筛选高活性成分含量的种质资源，培育药用价值高、抗逆性强的甘草品种，推动甘草产业的可持续发展。

5. 结论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 法系统分析了三种药用甘草幼叶和成熟叶香气成分，鉴定出 148 个香气成分，其中醇类、萜烯类和酯类为优势类别。种间差异显著，19 种特征成分可作为鉴别的核心标志物；叶片生长时期的香气成分数量分布趋势，叶中醇类、萜类和酯类成分丰富。研究结果明确了甘草叶片种

间及生长时期的香气成分分布规律, 为甘草的资源综合利用及相关产品研发提供了科学依据。

基金项目

国家自然科学基金项目(32160317); 石河子大学自主资助支持专项(自然科学(ZZZC2022122))。

参考文献

- [1] 黄明进, 王文全, 魏胜利. 我国甘草药用植物资源调查及质量评价研究[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(8): 947-952.
- [2] 李倩, 高海荣, 郭九峰. 甘草主要化学成分及药效活性与环境关系研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2019(9): 150-154.
- [3] 李洋, 贾志鹏, 赵毓杰, 等. 光果甘草内生真菌的分离及其次级代谢产物活性研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2024, 26(11): 2996-3005.
- [4] 王波, 王丽, 刘晓峰, 等. 中药甘草成分和药理作用及其现代临床应用的研究进展[J]. 中国医药, 2022, 17(2): 316-320.
- [5] 金雨静, 黄世敬. 论甘草在张仲景方药体系中的核心作用[J]. 北京中医药大学学报, 2024, 47(7): 917-923.
- [6] 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, 2025.
- [7] 黄奕文, 张国栋, 张以涵, 等. 几种单萜类化合物对蚜虫的生物活性研究进展[J]. 农药学报, 2025, 27(5): 763-780.
- [8] 彭文波, 朱欢, 郑琪, 等. 广藿香油中新型螺环倍半萜成分研究[J]. 药学学报, 2025, 61(1): 261-265.
- [9] 钱沈安, 胡政, 于伊楠, 等. 1-辛烯-3-醇对禾谷镰刀菌的抑制活性及作用机理[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 93-101.
- [10] 邓桃妹, 彭灿, 彭代银, 等. 甘草化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的探讨[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(11): 2660-2676.
- [11] 高明文, 崔国栋, 张彩枝, 等. 合理利用甘草资源[J]. 内蒙古草业, 2008, 20(4): 40-41.
- [12] 陈康健, 王喆之. GC-MS 分析丹参不同部位中的挥发性成分[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 66-70.
- [13] 罗晓锋, 颜沛沛, 叶炜, 等. 6 种榕属植物挥发性成分比较分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(3): 414-419.
- [14] Vázquez-Torres, M., Rivera-Portalatín, N. and Cabrera-Asencio, I. (2025) GC-MS Based Phytoconstituents Profiling, Toxicity Assessment, and Potential of *Genipa americana* L. Leaf Extracts as Natural Insecticides against Striped Mealybugs *Ferrisia* sp. *Journal of Natural Pesticide Research*, **12**, Article ID: 100123. <https://doi.org/10.1016/j.napere.2025.100123>
- [15] 李国明, 李守岭, 白燕冰, 等. GC-MS 法分析瑞丽椒样薄荷精油化学成分[J]. 热带农业科学, 2017, 37(10): 84-88.
- [16] Soleimani, M., Daryasari, A.P., Ghorbani, A., Hejri, O.M. and Mazaheri, R. (2014) Analysis of the Volatile Compounds in *Thymus vulgaris* L. Using Improved HS-SPME-GC-MS and Comparison with Conventional Methods. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, **17**, 1233-1240. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2014.958548>
- [17] Du, Z., Xu, W., Wang, Y., Ma, Z., Yan, P., Huang, G., et al. (2025) A Method for the Identification and Evaluation of *Glycyrrhiza* Germplasm Based on DNA Barcodes and Leaf Micromorphology. *Flora*, **324**, Article ID: 152680. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152680>
- [18] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 232-239.
- [19] Wang, C., Chen, L., Cai, Z., Chen, C., Liu, Z., Liu, S., et al. (2021) Metabolite Profiling and Transcriptome Analysis Explains Difference in Accumulation of Bioactive Constituents in Licorice (*Glycyrrhiza uralensis*) under Salt Stress. *Frontiers in Plant Science*, **12**, Article 727882. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727882>
- [20] Joshi, M., Tewari, G., Pande, C., Kharkwal, G.C., Tewari, L.M., Joshi, V., et al. (2025) Metabolite Profiling and Evaluation of Antioxidant, Antidiabetic, and Antibacterial Potential of *Thymus linearis* Benth. Supported by Molecular Docking and PASS Prediction. *Scientific Reports*, **16**, Article No. 2494. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32317-y>
- [21] Teotia, A., Bashir, S., Malik, T., Mohan, A., Tariq, M., kumar, A., et al. (2025) Sustainable Management of Bovine Mastitis Caused by Major Pathogens (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Streptococcus agalactiae*, and *Streptococcus uberis*) Using Medicinal Plants: A Review. *Dairy Science and Management*, **2**, Article No. 19. <https://doi.org/10.1186/s44363-025-00010-0>

- [22] Saini, P., Mishra, P. and Patni, V. (2025) Distribution of Metabolites and Phytochemicals in Galled and Non-Galled Foliar Tissues of *Microcos paniculata* L. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-025-01281-3>
- [23] Altundag, A. and Harbi, E. (2025) Potential Role of Terpenes in Recovery from Olfactory Dysfunction with Olfactory Training: A Review. *Molecular Biology Reports*, **52**, Article No. 700. <https://doi.org/10.1007/s11033-025-10795-7>
- [24] Yasaghi, M., Dolatabadi, S.B., Yamchi, A., Tabarraei, A., Moradi, A. and Hosseini, S.D. (2025) Insights into the Antiviral Mechanisms of β -Caryophyllene: Inhibiting Viral Spread and Its Synergy with Acyclovir. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, **25**, Article No. 245. <https://doi.org/10.1186/s12906-025-04964-1>
- [25] McCartney, M.M., Roubtsova, T.V., Yamaguchi, M.S., Kasuga, T., Ebeler, S.E., Davis, C.E., *et al.* (2017) Effects of *Phytophthora ramorum* on Volatile Organic Compound Emissions of Rhododendron Using Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **410**, 1475-1487. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0789-5>
- [26] Kasote, D.M., Nawaz, M.A., Usman, K., Ullah, N. and Alsafran, M. (2024) A Critical Review on *Pulicaria* Species Occurring in Qatar: Traditional Uses, Phytochemistry and Biological Activities. *Phytochemistry Reviews*, **23**, 1623-1674. <https://doi.org/10.1007/s11101-024-09932-0>
- [27] Yuyama, K.T., Fortkamp, D. and Abraham, W. (2017) Eremophilane-Type Sesquiterpenes from Fungi and Their Medicinal Potential. *Biological Chemistry*, **399**, 13-28. <https://doi.org/10.1515/hsz-2017-0171>
- [28] Mimica-Dukic, N., Bozin, B., Sokovic, M. and Simin, N. (2004) Antimicrobial and Antioxidant Activities of *Melissa officinalis* L. (Lamiaceae) Essential Oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **52**, 2485-2489. <https://doi.org/10.1021/jf030698a>
- [29] Kesselmeier, J. and Staudt, M. (1999) Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An Overview on Emission, Physiology and Ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **33**, 23-88.
- [30] Tholl, D., Boland, W., Hansel, A., Loreto, F., Röse, U.S.R. and Schnitzler, J. (2006) Practical Approaches to Plant Volatile Analysis. *The Plant Journal*, **45**, 540-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2005.02612.x>
- [31] Lopes, A.S., Dias, T.J., Henschel, J.M., da Silva, J.H.B., de Oliveira Sousa, V.F., Targino, V.A., *et al.* (2024) Methyl Jasmonate Mitigates Drought Stress in Purple Basil by Enhancing Photosynthesis and Secondary Metabolism. *Journal of Plant Growth Regulation*, **44**, 233-246. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11392-x>
- [32] Li, Y., Jiang, D., Liu, X., Li, M., Tang, Y., Mi, J., *et al.* (2023) Multi-Omics Analysis Provides Crucial Insights into the Drought Adaptation of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **71**, 5391-5402. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c07163>
- [33] Liu, J., Zhang, R., Xing, G., Zhao, W., Zhang, A. and Liu, J. (2025) Unraveling the Flavor Characteristics and Antioxidant Capacities of Foxtail Millet Beverages Fermented by Liqueur Koji: Varietal Differences and Commonalities. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **19**, 9560-9577. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03589-9>
- [34] 许金露, 周丹丹, 林晓燕, 等. 奇蒿中倍半萜类化学成分研究[J]. 中药材, 2025(10): 2520-2525.