

兰 英,沈晓凤,严铸云,等. 不同地理种源丹参根系分泌物的 GC-MS 比较分析[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):301-305.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.089

不同地理种源丹参根系分泌物的 GC-MS 比较分析

兰 英,沈晓凤,严铸云,王 海,何冬梅,王苏琴,任 波,陈 新

(成都中医药大学中药资源系统研究与开发利用省部共建国家重点实验室培育基地/
中药材标准化省部共建教育部重点实验室,四川成都 611137)

摘要:为了阐明丹参根系分泌行为与遗传和环境的关系,以不同地理(四川省、山东省、河南省)种源丹参组培苗和根段材料,分别进行无菌和沙土培养。并利用 GC-MS 技术对丹参根系分泌物进行组分分析,从组培和盆栽丹参根系分泌物中分别检测出 19 种、36 种物质,其中组培丹参根系分泌物以酚类、酯类为主。各种源丹参根系分泌物中有其特殊的成分,但所有分泌物中均含有十六烷棕榈酸、硬脂酸油醇酯、松油醇等,只是含量不同。土培条件下,根系分泌物中烃类、醇类、醛类在种类及含量上均有所增加,而酚类、酯类明显减少,尤其是酚类物质,增加 2 种酸类、2 种甾醇类和 1 种萘胺、2 种酰胺类组分,但未检出组培丹参根系分泌物中的 1 种酮类和 3 种脂肪胺类物质。研究表明,丹参根系分泌物的组成和相对含量受遗传和环境的影响,其中有机酸、甾醇类和酰胺类是环境胁迫下的主要分泌物,本研究结果将为提高丹参根际土壤养分高效利用提供一定参考。

关键词:丹参;根系分泌物;组培法;土培法;气相色谱-质谱

中图分类号: R284.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)01-0301-05

根系分泌物是植物与环境相互作用的媒介,在植物间、植

物与微生物间的相互作用中具重要的生态学意义^[1],其组成受遗传和环境的双重调控,在植物根系化感作用及根际营养调控中起着重要作用^[2-3]。研究表明三七^[4]、人参^[5]、西洋参^[6]、地黄^[7]、苍术^[8]等的根系分泌物具化感作用。丹参(*Salvia mihiorrhiza* Bge.)是多地栽培的药用植物,其中四川、河南、山东是丹参药材的道地产区^[9]。已有研究表明,丹参虽具广泛的土壤适应性,但不同产地丹参的有效成分和无机元素含量差异明显,并与遗传特性及土壤因子相关^[10-13]。本

收稿日期:2015-02-04

基金项目:国家自然科学基金(编号:81173493)。

作者简介:兰 英,女,重庆人,硕士研究生,主要从事中药资源与开发利用研究。E-mail:m15882139601@163.com。

通信作者:严铸云,教授,博士生导师,主要从事道地药材品质形成与调控研究。E-mail:edtcmyan@126.com。

[4] Cluis C P, Burja A M, Martin V J. Current prospects for the production of coenzyme Q₁₀ in microbes[J]. Trends in Biotechnology, 2007, 25(11): 514-521.

[5] Gaby A R. The role of coenzyme Q₁₀ in clinical medicine: part II: cardiovascular disease, hypertension, diabetes mellitus and infertility[J]. Alternative Medicine Review, 1996, 1(3): 168-175.

[6] Ghirlanda G, Oradei A, Manto A, et al. Evidence of plasma CoQ₁₀ - lowering effect by HMG-CoA reductase inhibitors: a double-blind, placebo-controlled study[J]. Journal of Clinical Pharmacology, 1993, 33(3): 226-229.

[7] 贾静雪,薛 毅,吴仲寅. 辅酶 Q₁₀ 在实验性大鼠口腔溃疡愈合中的抗氧化作用[J]. 中华口腔医学杂志, 2013, 48(增刊 1): 64-67.

[8] 钱 雪,王祖巧,韩国平,等. 辅酶 Q₁₀ 的药理与应用[J]. 食品与药品 A, 2006, 8(1): 16-19.

[9] 张继忠,迟莉丽,沈亚领. 辅酶 Q₁₀ 的生产及在医学领域中的应用[J]. 上海应用技术学院学报:自然科学版, 2004, 4(4): 301-305.

[10] 马 菊,石 宁. 食品中应用辅酶 Q₁₀ 的研究进展[J]. 食品科技, 2009, 34(2): 18-21.

[11] 陶志杰,王改玲,李 妍. 辅酶 Q₁₀ 的制备及应用新进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(9): 9-11.

[12] 李聚海,岳田利,袁亚宏. 辅酶 Q₁₀ 超声波破碎法提取工艺条件

研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2007, 35(5): 207-211.

[13] 朱志春,郑 毅,朱中南,等. 超声波破碎法提取辅酶 Q₁₀ 研究[J]. 海峡科学, 2012(2): 17-19.

[14] 吕春茂,李英华,安艳秋,等. 辅酶 Q₁₀ 几种提取工艺的优化研究[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 132-135.

[15] 邱卫华,刘 萍,钟桂芳,等. 粟酒裂殖酵母中辅酶 Q₁₀ 的提取和测定方法[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(11): 31-35.

[16] 李祖明,常 平,高丽萍,等. 酶法辅助超声波法提取类球红细菌辅酶 Q₁₀ 条件优化[J]. 微生物学杂志, 2014, 34(1): 47-52.

[17] 李祖明,李 健,惠伯棣,等. 高效液相色谱-串联质谱法分离鉴定类球红细菌红色素[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(8): 76-80.

[18] 张可君,张 媛. 探析反相高效液相色谱法测定注射用辅酶 Q₁₀ 冻干乳的含量[J]. 北方药学, 2014, 11(4): 12-13.

[19] 何小稳,黎 承,鲁燕妮,等. HPLC 辅助滴定法测定含辅酶 Q₁₀ 保健食品中过氧化值[J]. 中国热带医学, 2013, 13(2): 141-143.

[20] 王燕萍,戴晓健,李 亮,等. LC-MS/MS 法测定人血浆中的辅酶 Q₁₀ [J]. 药物分析杂志, 2010, 30(12): 2251-2257.

[21] 夏书芹,许时婴. 吐温 80 增溶-紫外分光光度法测定辅酶 Q₁₀ 脂质体的载量及包封率[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(10): 131-135.

试验以四川省、河南省、山东省种源丹参为试验材料,研究不同遗传背景丹参在 MS 培养基和盆栽过程中根系分泌物的差异,旨在为深入研究丹参根系分泌物产生机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

丹参种源于 2012 年 12 月分别采自四川中江石泉乡、山东临沂吕匡镇、河南方城拐河镇 3 个不同产区,根段繁殖,翌年开花后,经鉴定均为唇形科植物丹参。沙土盆栽,完整挖出植株根系,剥取距离根表 0~4 mm 内的土壤约 200 g,置阴凉处自然风干,研磨,过 60 目筛备用^[14]。

组培苗取上述盆栽植物作外植体,经组织培养获取丛生芽,于 1/2MS + 0.5 mg/L NAA + 0.2 mg/L IBA (含蔗糖 1.5%,琼脂 0.8%,pH 值 5.8~6.0),温度(25±2)℃,光照度约 5 000 lx,光照时间 11 h/d 条件下培养 50 d 后,取其根部的培养基备用^[15-16]。

1.2 试剂与仪器

仪器:Agilent GC6890/MSD5973 气相色谱-质谱联用仪;JA5003 型电子天平(上海良平仪器仪表有限公司);KQ5200 超声仪(昆山市超声仪器有限公司);RE5203 旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂);TDZ5-WS 台式低速离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)。

试剂:乙酸乙酯(分析纯)(成都科龙试剂化工厂,批号 20130718),二氯甲烷(成都科龙试剂化工厂,批号 2013093001),甲醇(分析纯)(成都科龙试剂化工厂,批号 20110415),无水硫酸钠(分析纯)(成都科龙试剂化工厂,批号 20130705)。

1.3 试验方法

1.3.1 培养基中根系分泌物的提取 选取长势一致的丹参组培苗(山东),剥离其根部附近的培养基,等分成 3 份,分别置于圆底烧瓶中,一份加入 200 mL 蒸馏水及 100 mL 乙酸乙酯于 90℃ 加热融化后回流提取 30 min;另一份加入相同的溶剂后于 100 W、40℃ 超声提取 30 min,放置冷却后,分别分离乙酸乙酯层,将琼脂层重新转入原烧瓶中,用 1 mol/L NaOH 将 pH 值调至 9,各加入 100 mL 乙酸乙酯,分别以上述同样的方法提取 30 min,合并各样品 2 次乙酸乙酯提取液;最后一份培养基中加入 200 mL 甲醇,于 100 W、40℃ 超声提取 45 min,以 5 000 r/min 离心 10 min,分离上清液;将 3 份提取液用无水硫酸钠脱水后,于 35℃ 减压浓缩至干,以二氯甲烷溶解并定容至 1 mL,用于 GC-MS 分析,确定提取方案。以最佳方法分别制备山东、四川、河南丹参组培苗根系分泌物供试液。并以未使用过的 MS 培养基制备空白供试液。

1.3.2 根际土壤浸提液的制备 分别称取 3 种丹参根际土各约 50 g,置 500 mL 锥形瓶中,按 1:5 比例加入蒸馏水,于 30℃ 超声提取 30 min,离心,上清液用 1 mol/L HCl 调 pH 值至 4,以等体积的乙酸乙酯萃取 2 次,分离乙酸乙酯层,水相用 1 mol/L NaOH 调节 pH 值至 9,再用等体积乙酸乙酯萃取 2 次,合并 2 次所得乙酸乙酯萃取液,用无水硫酸钠脱水后,于 35℃ 减压浓缩至干,以二氯甲烷溶解并定容至 1 mL,作供试品溶液^[14,17-20]。并从加入蒸馏水开始同时制备空白供试液。

1.3.3 根系分泌物的 GC-MS 测定 提取的根系分泌物用

气相色谱-质谱联用仪(Agilent GC6890/MSD5973)进行分析。色谱条件:色谱柱 db-35:(30 m×0.25 mm,0.25 μm);载气:He;分流比:2:1;柱恒流:1 mL/min;进样量:1 μL;进样口温度:260℃。升温程序:组培根分泌物的程序升温条件:初始温度 60℃,以 10℃/min 升温到 300℃,保持 16 min;土培根分泌物程序升温条件:初始温度 100℃,以 5℃/min 升温到 150℃,再以 3℃/min 升温到 270℃,然后以 5℃/min 升温到 300℃,保持 10 min。质谱条件:电离方式:EI,电子能量:70 eV,离子源温度:230℃;四极杆温度:150℃;质量扫描范围:20~500 amu;采集方式:SCAN 扫描。

2 结果与分析

2.1 组培苗根系分泌物的提取方法

按“1.3.3”节中的 GC-MS 条件对 3 种不同提取方法得到的丹参组培苗根系分泌物进行分析,并扣除空白试液,得其总离子流图(图 1)。由图 1 可见,3 种提取液中均能检测出丹参组培根系分泌物,但从其所含组分的种类及含量上比较,乙酸乙酯回流提取法(S1)检测出的组分最多,各组分含量更高;其次是乙酸乙酯超声提取法(S2);而甲醇超声提取法(S3)检测出的组分最少。因此,确定乙酸乙酯回流提取法(S1)用于本试验丹参组培苗根系分泌物的样品制备方法。

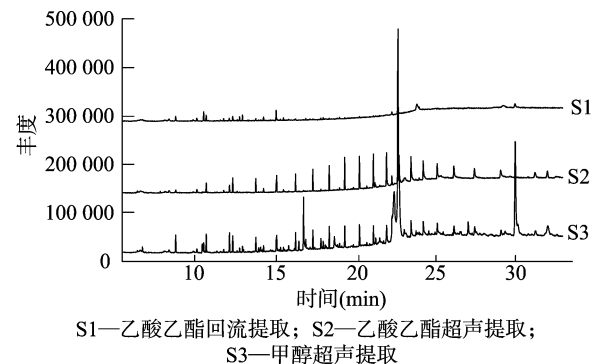


图1 不同方法提取丹参组培苗根系分泌物的 GC-MS 总离子流图

2.2 丹参组培苗根系分泌物的组成分析

按“1.3.3”节中的 GC-MS 条件对 3 个不同地理种源丹参组培苗根系分泌物进行分析,并扣除相应的空白试液,得到其总离子流图(图 2);对各成分的质谱图进行计算机质谱库(NIST08)检索及人工解析,确定化合物结构,根据质谱离子流图的峰面积,应用峰面积归一化法确定各化合物的相对含量。3 个不同种源的丹参组培苗根系分泌物共鉴定了 19 种成分,主要包括 7 大类成分,均以酯、酚类成分最为丰富,相对含量较高,其次分别是烃、醇、胺类(表 1)。但各类组分的组成和含量有所不同,其中山东组培苗根系分泌物中酯类成分最为丰富,占总检出量的 28.02%,其次是酚类(22.78%),主要以 4-乙炔基-2-甲氧基苯酚、硬脂酸油醇酯、十六烷棕榈酸等酚、酯类成分为主,含量高达 41.48%。十六烷棕榈酸成分在山东种源的组培苗根际含量较高,约为河南和四川的 2 倍,而邻苯二甲酸二甲酯则相反,在河南省和四川省种源组培丹参根际含量为山东的 2 倍左右,硬脂酸油醇酯为山东省和四川省组培苗根系分泌物共有组分,但在山东种源组培丹参根际中的含量约为四川的 3 倍。2-(4-甲基-3-环己烯

基)-2-丙醇(松油醇)为山东和河南根际培养基的共有组分,含量相近。而河南省、四川省组培苗根系分泌物中均以酚类成分含量最大,分别高达 25.11%、25.53%;其次是酯类成分,相对含量分别为 15.14%、21.23%,均以 4-乙烯基-2-甲氧基苯酚、邻苯二甲酸二甲酯、6,10,14-三甲基-2-十五烷酮、二十六烷、*N,N*-二甲基苄胺等组分含量较高,9-十八碳烯酰胺仅存在于河南和四川根际培养基中,而正十五烷为河南省特有组分,但含量较低。

2.3 土培丹参根系分泌物的组成分析

按“1.3.3”节中的 GC-MS 条件对 3 个产地丹参沙土盆栽苗根系分泌物进行分析,并扣除相应的空白试液值,得到其

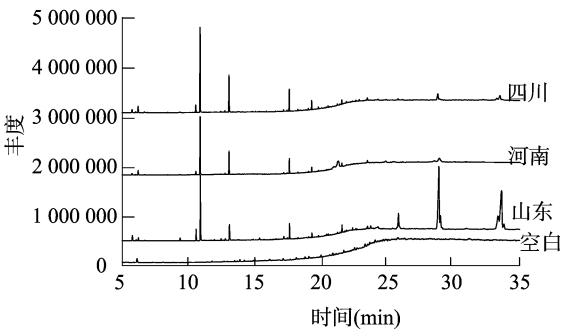


图2 不同地理种源丹参组培苗根系分泌物的 GC-MS 总离子流图

表 1 不同地理种源丹参组培苗根系分泌物组分分析

序号	时间 (min)	化合物名称	分子式	相对含量(%)		
				山东省	河南省	四川省
1	6.01	苯酚	C ₆ H ₅ OH	3.41	3.85	4.36
2	6.19	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	2.90	2.36	2.62
3	6.37	<i>N,N</i> -二甲基苄胺	C ₉ H ₁₃ N	4.97	4.69	5.16
4	7.08	苯甲醇	C ₇ H ₈ O	2.76	2.58	2.43
5	9.35	2-(4-甲基-3-环己烯基)-2-丙醇(松油醇)	C ₇ H ₁₂ O	2.34	3.27	—
6	10.07	2-苯氧基乙醇	C ₈ H ₁₀ O ₂	4.75	5.96	5.53
7	10.72	4-乙烯基-2-甲氧基苯酚	C ₉ H ₁₀ O ₂	19.37	21.26	21.17
8	11.41	十五烷	C ₁₅ H ₃₂	—	1.83	—
9	11.76	十二烷基二甲基叔胺	C ₁₄ H ₃₁ N	3.74	2.72	3.65
10	13.05	邻苯二甲酸二甲酯	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	4.23	10.38	11.72
11	17.16	十七烷	C ₁₇ H ₃₆	3.88	2.85	3.77
12	17.61	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	C ₁₈ H ₃₆ O	6.52	9.73	8.69
13	19.13	<i>N</i> -甲基- <i>N</i> -十四烷基苄胺	C ₂₂ H ₃₉ N	2.47	2.12	1.38
14	19.29	二十二烷	C ₂₂ H ₄₆	3.32	3.73	3.21
15	21.56	二十六烷	C ₂₅ H ₅₂	5.42	5.28	6.34
16	23.49	邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	1.68	2.03	1.74
17	25.85	9-十八碳烯酰胺	C ₁₈ H ₃₄ NO	—	2.65	2.29
18	28.89	十六烷棕榈酸	C ₃₂ H ₆₄ O ₂	10.62	2.73	3.49
19	33.65	硬脂酸油醇酯	C ₃₆ H ₇₀ O ₂	11.49	—	4.28
分离化合物数				19	22	20
鉴定化合物数				17	18	17
百分含量(%)				93.87	90.02	91.83

总离子流图(图 3);对各化学成分质谱图进行计算机质谱库(NIST08)检索及人工解析,确定化合物结构,根据质谱离子流图的峰面积,应用峰面积归一化法确定各化合物的相对含量(表 2)。

从沙土盆栽丹参的根际土壤浸提液中共鉴定出 35 种物质(表 2),其中山东丹参根际土壤浸提液中鉴定出 24 种成分,占总检出成分的 84.54%;河南丹参鉴定出 30 种,占 86.11%;四川丹参鉴定出 34 种化合物,占 88.57%。3 种丹参的盆栽根际土壤浸提液中均包括烃、醇、酯、酚、醛、酸、酰胺、胺类成分,其中烃类成分最丰富,含量最高,主要为 15~29 个碳原子的直链烷烃,其中长链的烷烃(如二十六烷、二十九烷)为优势组分,与杨先国等的报道^[15]相似。而正十八烷、正十九烷、环氧十六烷和稠环芳烃蒎烯为四川丹参特有的根系分泌物组分,但含量均较低;正十五烷为河南丹参根系分泌物中特有组分,这与其组培苗根系分泌物相同;1-十六烯为山东和四川丹参共有的根系分泌成分。其次分别是酯类、醇类、酸类及酰胺类,酯类成分主要为苯甲酸酯类衍生物,其中

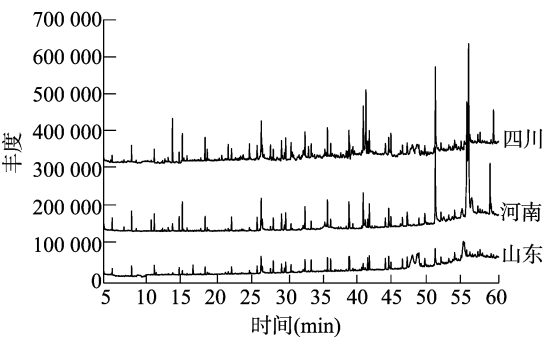


图3 不同地理种源丹参土培苗根系分泌物的GC-MS总离子流图

邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸正丁异辛酯在 3 种源丹参根系分泌物含量较高,而邻苯二甲酸二甲酯、己二酸二辛酯仅在河南和四川丹参中检出,且含量均较低;3 种丹参根系分泌物中都含有 3 种有机酸,均以棕榈酸含量最高;而酰胺、酚类成分中芥酸酰胺、油酸酰胺两烯酸酰胺及苯酚为三者共有组分,且含量较高,9-十八碳烯酰胺、2,6-二叔丁基对甲酚仅在河

表 2 不同地理种源丹参土培苗根分泌物的组分分析

序号	时间 (t/min)	化合物名称	分子式	相对含量(%)		
				山东省	河南省	四川省
1	3.57	苯酚	C ₆ H ₅ OH	2.04	7.7	4.51
2	7.66	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	2.70	2.02	1.73
3	10.48	十五烷	C ₁₅ H ₃₂	—	0.45	—
4	13.5	2,6-二叔丁基对甲酚	C ₁₅ H ₂₄ O	—	2.47	4.80
5	14.91	邻苯二甲酸二甲酯	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	—	1.34	1.42
6	15.12	1-十六烯	C ₁₆ H ₃₂	0.47	—	1.45
7	18.09	2,6,10,14-四甲基十六烷	C ₂₀ H ₄₂	1.76	0.78	1.64
8	18.45	十八烷	C ₁₈ H ₃₈	—	—	1.52
9	21.44	十九烷	C ₁₉ H ₄₀	—	—	0.83
10	21.92	2-氧代十八烷酸甲酯	C ₁₉ H ₃₆ O ₃	2.26	2.42	1.44
11	24.47	二十烷	C ₂₀ H ₄₂	2.35	2.33	2.16
12	25.56	7-十六碳烯醛	C ₁₆ H ₃₀ O	2.88	2.69	1.84
13	26.15	十六酸(棕榈酸)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	5.79	4.28	4.78
14	26.31	邻苯二甲酸正丁异辛酯	C ₂₀ H ₃₀ O ₄	4.70	4.35	3.96
15	27.87	3-甲氧基壬酸	C ₁₀ H ₁₉ O ₃	2.75	1.47	1.69
16	29.04	邻苯二甲酸丁基十一烷基酯	C ₂₃ H ₃₆ O ₄	1.94	1.63	1.24
17	29.65	邻苯二甲酸二丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	6.15	3.79	1.81
18	30.41	二十二烷	C ₂₂ H ₄₆	2.43	1.74	1.90
19	32.38	E-3-十九碳三烯-5,14-二醇	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	4.47	3.11	2.05
20	32.9	1,2-环氧十六烷	C ₁₆ H ₃₂ O	—	—	1.27
21	33.28	二十三烷	C ₂₃ H ₄₈	2.38	1.15	1.78
22	35.6	2-己基-1-庚醇	C ₁₆ H ₃₄ O	3.88	3.72	2.25
23	36.06	二十四烷	C ₂₄ H ₅₀	4.65	1.60	1.03
24	38.29	蒎烯	C ₁₈ H ₁₈	—	—	0.58
25	39.23	己二酸二辛酯	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	—	0.34	0.50
26	40.7	油酸酰胺	C ₁₈ H ₃₅ NO	2.62	5.47	7.25
27	41.35	N-苯基-2-萘胺	C ₁₆ H ₁₃ N	2.56	1.07	1.14
28	41.56	二十六烷	C ₂₆ H ₅₄	5.56	5.43	5.03
29	43.87	二十七烷	C ₂₇ H ₅₆	4.58	0.67	0.85
30	44.33	(Z,Z)-2,13-十八碳二烯-1-醇	C ₁₈ H ₃₄ O	5.44	4.62	4.37
31	44.55	9-十八碳烯酰胺	C ₁₈ H ₃₄ NO	—	3.65	2.53
32	44.65	二十九烷	C ₂₉ H ₆₀	3.78	3.73	4.56
33	50.99	芥酸酰胺	C ₂₂ H ₄₃ NO	6.40	7.05	7.10
34	58.55	豆甾醇	C ₂₉ H ₄₈ O	—	1.82	1.74
35	59.08	植物甾醇	C ₂₉ H ₅₀ O	—	3.22	6.44
分离化合物数				32	37	39
鉴定化合物数				24	30	34
百分含量(%)				84.54	86.11	88.57

南和四川丹参根系分泌物中检出,其余成分相对含量较低。此外,河南省和四川省丹参根系分泌物中均检出了豆甾醇和植物甾醇,而山东丹参根系分泌物中未见此类成分。

2.4 组培和土培丹参根系分泌物的比较

组培和土培丹参的根系分泌物中均以烃类、醇类、酯类最丰富,含量较大。除苯酚、苯甲醛、9-十八碳烯酰胺及部分直链烷烃(十五烷、二十二烷、二十六烷)外,其他类型的根系分泌物成分差异较大。从化合物种类来看,组培丹参根系分泌物中特有 1 种酮类(6,10,14-三甲基-2-十五烷酮)和 3 种脂肪胺类(*N,N*-二甲基苄胺、十二烷基二甲基叔胺、*N*-甲基-*N*-十四烷基苄胺)成分,且相对含量较大;而土培丹参根系分泌物中未检出酮类,增加了 2 种有机酸(棕榈酸、3-甲氧基壬酸)、2 种酰胺(油酸酰胺、芥酸酰胺)和 2 种甾醇

类(豆甾醇、植物甾醇),且含量较高。从各组分含量变化上,根系分泌物中烃类、醇类、醛类的种类及含量,土培较组培丹参均有所增加,而酚类、酯类组分土培较组培明显减小,尤以酚类物质最明显。

3 讨论

植物根系分泌物的研究方法种类繁多,但各有不足,原因在于植物根系分泌物含量较少,收集困难,组分复杂难以分离、纯化。目前,已发现的植物根系分泌物主要包括烃类、酚酸及其衍生物类、醛酮类、萜类、生物碱类等,其复杂的种类和结构决定了其作用途径的多样性^[21]。本试验采用无菌组培法和盆栽土培法培养不同种源丹参,比较分析了不同种源丹参在组培和土培条件下根系分泌物组成的差异。结果发现,

丹参的根际分泌行为与遗传和环境密切相关。无菌全营养组培条件下,以酯、酚类为主,但不同种源丹参还存在一些特有组分,这些主动分泌的物质其生物学意义有待进一步研究。沙土培养下,丹参根系分泌物增加了有机酸、酰胺及甾醇类成分,原因是植物在逆境胁迫条件下,导致植物生理代谢障碍或组织损伤,使植物主动或被动向根际环境释放各种化学物质,增加根分泌物数量和种类以适应环境胁迫。其中有机酸的增加,与文献报道营养胁迫下植物会分泌有机酸以活化根际养分结果^[2-3]一致,而酰胺及甾醇类与植物根际养分吸收的关系未见相关报道。

植物根分泌物组分复杂,其种类、数量与植物的种类、发育阶段、营养状况、根际微生态环境及生长环境等有密切关系^[21],植物通过代谢产生的根分泌物,一部分作为化感物质影响植物的生长,如已有研究报道称植物根系分泌的二十九烷(油菜)^[22]、十六酸(苍术)^[8]、植醇、1-氯十六烷、二十烷(重茬大豆)^[23]、十六烷(橡树)^[24]、十九烷(桉树)^[25]、邻苯二甲酸丁酯十一烷基酯(大蒜)^[26]等对植物生长起着一定程度的抑制作用。另一部分主要用来适应不良环境,如植物缺磷时,植物根系可通过有机酸、质子或磷酸水解酶分泌量增加,大大提高根际土壤中难溶性养分的溶解度,从而提高养分的有效性,改善植物缺磷状态^[27-28]。本试验发现丹参在土培条件下,根系分泌物中新增有机酸、酰胺及甾醇类成分,且烃类、醇类、醛类组分含量均有所增加,其生态学意义有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Bais H P, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. Annual Review of Plant Biology, 2006, 57: 233 - 266.
- [2] Hao W Y, Ren L X, Ran W, et al. Allelopathic effects of root exudates from watermelon and rice plants on *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* [J]. Plant and Soil, 2010, 336 (1/2): 485 - 497.
- [3] Wurst S, Wagenaar R, Biere A, et al. Microorganisms and nematodes increase levels of secondary metabolites in roots and root exudates of *Plantago lanceolata* [J]. Plant and Soil, 2010, 329 (1/2): 117 - 126.
- [4] 游佩进, 王文全, 张媛, 等. 三七根区土壤提取物对三七幼苗的化感作用 [C]. 全国第8届天然药物资源学术研讨会论文集, 2008: 528 - 531.
- [5] 宋宇加. 人参根系分泌物及根际土壤中化感物质的分离与鉴定研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.
- [6] 王玉萍, 赵杨景, 邵迪, 等. 西洋参根系分泌物的初步研究 [J]. 中国中药杂志, 2005, 30 (3): 70 - 72.
- [7] 郜峰, 洪冲, 陈红歌, 等. 地黄根系分泌物生物活性研究及化感物质的鉴定 [J]. 江西农业学报, 2010, 22 (3): 131 - 134.
- [8] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 等. 苍术根茎及根际土水提取物生物活性研究及化感物质的鉴定 [J]. 生态学报, 2006, 26 (2): 528 - 535.
- [9] 彭成. 中华道地药材 [M]. 北京: 中国中医药出版社, 2011: 892 - 893.
- [10] 张琦. 丹参质量与土壤无机元素的相关性初步研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2009.
- [11] 严铸云, 张琦, 杨新杰, 等. 丹参无机元素特征及其生长土壤理化性质的研究 [C] // 2010 年中国药学会大会暨第十届中国药师周论文集, 2010.
- [12] 杨新杰, 万德光, 林贵兵, 等. 丹参脂溶性成分的地域分布特点分析 [J]. 中草药, 2010, 41 (5): 809 - 812.
- [13] 杨新杰, 万德光, 刘敏, 等. 丹参水溶性成分的地域分布特点分析 [J]. 天然产物研究与开发, 2011, 23 (4): 684 - 688.
- [14] 严铸云, 戴国君, 马云桐, 等. 丹参内生真菌与其有效成分的相关性研究 [C]. 第九届全国药用植物及植物药学术研讨会论文集, 2010.
- [15] 杨先国, 刘塔斯, 陈斌, 等. 丹参根际土壤浸提物的 GC - MS 分析 [J]. 中国农学通报, 2013, 29 (10): 173 - 177.
- [16] 李明军, 刘杰, 周娜, 等. 裕丹参愈伤组织诱导、继代及植株再生的研究 [J]. 中草药, 2008, 39 (7): 1078 - 1081.
- [17] 单成钢, 王志芬, 苏学合, 等. 丹参组织培养研究进展 [J]. 现代中药研究与实践, 2007, 22 (3): 54 - 57.
- [18] 李汛, 段增强. 植物根系分泌物的研究方法 [J]. 基因组学与应用生物学, 2013, 32 (4): 540 - 547.
- [19] Hao Z P, Wang Q, Christie P, et al. Allelopathic potential of watermelon tissues and root exudates [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112 (3): 315 - 320.
- [20] Wu H, Haig T, Pratley J, et al. Allelochemicals in wheat (*Triticum aestivum* L.): cultivar difference in the exudation of phenolic acids [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49 (8): 3742 - 3745.
- [21] Yu J Q, Matsui Y. Phytotoxic substances in root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, 20 (1): 21 - 31.
- [22] 张红, 高亚军, 安蓉. 油菜根系分泌物的 GC - MS 检测方法研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2014 (3): 290 - 295.
- [23] 韩丽梅, 王树起, 鞠会艳, 等. 大豆根分泌物的鉴定及其化感作用的初步研究 [J]. 大豆科学, 2000, 19 (2): 119 - 125.
- [24] 尹玉莲, 王文斌, 吴小平, 等. 橡胶树根际土壤浸提液的 GC - MS 分析 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (2): 437 - 440.
- [25] 陈秋波, 彭黎旭, 贺利民, 等. 刚果 12 号桉树根及根际土壤中化感物质的成分分析 [J]. 热带农业科学, 2002, 22 (4): 28 - 34.
- [26] 周艳丽, 程智慧, 孟焕文. 大蒜根系分泌物对不同受体蔬菜的化感作用 [J]. 应用生态学报, 2007, 18 (1): 81 - 86.
- [27] Tang H, Li X, Zu C, et al. Spatial distribution and expression of intracellular and extracellular acid phosphatases of cluster roots at different developmental stages in white lupin [J]. Journal of Plant Physiology, 2013, 170 (14): 1243 - 1250.
- [28] Kouas S, Debez A, Slatni T, et al. Root proliferation, proton efflux, and acid phosphatase activity in common bean (*Phaseolus vulgaris*) under phosphorus shortage [J]. Journal of Plant Biology, 2009, 52 (5): 395 - 402.