浙 江 农 林 大 学 学 报，2014，**31**(2)：264 – 271
Journal of Zhejiang A & F University
doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2014.02.015

干旱-复水处理对迷迭香挥发性有机化合物释放规律的影响

刘　芳，许改平，吴兴波，丁倩倩，郑　洁，张汝民，高　岩

（浙江农林大学 林业与生物技术学院，浙江 临安 311300）

摘要：为了探讨干旱胁迫对迷迭香 *Rosmarinus officinalis* 挥发性有机化合物(volatile organic compounds，简称 VOCs)释放规律的影响，采用称量控水法对迷迭香进行干旱胁迫试验，设置轻度、中度、重度干旱水平、复水和对照。结果表明：干旱胁迫下迷迭香 VOCs 释放总量减少，但种类增加；轻度、中度、重度处理 VOCs 总量分别是对照的 99.6%，69.4%，43.2%。迷迭香 VOCs 主要是萜烯类化合物，占总量的 46.0%以上；各干旱处理萜烯类化合物相对含量与对照比分别增加了 14.4%，17.01%，23.7%，其中单萜类相对含量呈增加显著；干旱胁迫明显诱导 C6 绿叶性挥发物和醛类化合物的释放。复水处理萜烯类百分含量和单萜类百分含量比重度处理稍有下降，仍显著高于对照、轻度和中度处理。图 3 表 1 参 30

关键词：植物学；干旱胁迫；复水；迷迭香；脂氧合酶；挥发性有机化合物；绿叶性气体；单萜

中图分类号：S718.43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2014)02-0264-08

Effect of drought stress and re-watering on emissions of volatile organic compounds from *Rosmarinus officinalis*

LIU Fang, XU Gaiping, WU Xingbo, DING Qianqian, ZHENG Jie, ZHANG Rumin, GAO Yan

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To better understand the effects of water limitations on the emission of volatile organic compounds (VOCs), VOC emissions from *Rosmarinus officinalis* were determined under drought stress and after re-watering. Results showed that with drought stress *R. officinalis* VOC emissions and lipoxidase activity were strongly affected with the degree of influence dependent on the stress level and time. At the beginning of the drought stress period, lipoxidase activity increased slightly; midway through, the activity reached a peak; then it declined. Drought stress reduced *R. officinalis* VOC emissions, but induced new VOCs including 2-hexenal, leaf alcohol, sorbaldehyde, and n-decanal. Also, *R. officinalis* increased terpene emissions, especially monoterpenes, to reduce drought stress damage. [Ch, 3 fig. 1 tab. 30 ref.]

Key words: botany; drought stress; re-water; *Rosmarinus officinalis*; lipoxidase; volatile organic compounds (VOCs); green leaf volatiles (GLVs); monoterpenes

园林植物是维系城市生态平衡的重要因素，自然环境的干旱胁迫会使植物体内细胞脱水，造成水分亏缺而导致植物受害[1]。干旱胁迫是众多环境胁迫因子中最常见的一种[2]，对植物的生长发育会产生不同程度的影响。在现代化的城市绿化中，选择观赏性好、抗性强的观赏植物，对节约水资源改善土壤干旱、半干旱的现状具有重要意义。植物挥发性有机化合物(volatile organic compounds，简称 VOCs)通常指分子质量小于 250，沸点小于 340 ℃，从植物地上部分(如叶、花和芽等)表面散发的多种微浓度的挥

收稿日期：2013-01-16；修回日期：2013-05-18

基金项目：国家自然科学基金资助项目(30972397，31270756)；浙江农林大学科研发展基金资助项目(2010FR058)

作者简介：刘芳，从事植物生理生态研究。E-mail: sijiali1987lu@126.com。通信作者：高岩，教授，博士，从事植物生理生态等研究。E-mail: gaoyan1960@sohu.com

发性次生代谢物质[3]。植物 VOCs 在生态系统中占有重要地位，它是重要的化学信息传递物质[4-5]，在调节植物的生长、发育和繁衍，抵御环境胁迫及预防动物和昆虫的危害等[3-10]方面具有重要作用。非生物胁迫会明显影响植物 VOCs 的合成与释放，Ibrahim 等[11]和 Hartikainen 等[12]均研究发现，高温胁迫会诱导欧洲白桦 *Betula pendula* 和欧洲山杨 *Populus tremula* 释放大量的异戊二烯、萜类和 C6 绿叶性气体(green leaf volatiles，GLVs)；光照—黑暗转换处理会诱导欧洲黑杨 *Populus deltoides* 叶片大量释放己烯醛和乙醛等[13]。干旱对 VOCs 释放规律的影响呈现多样性，Staudt 等[14]在对栓皮栎 *Quercus suber* 的研究中发现，适度干旱胁迫导致单萜类化合物的释放量增加 30%，而 Lavoir 等[15]发现，干旱胁迫下冬青栎 *Quercus ilex*。释放的单萜是对照处理的 55%。Blanch 等[16]研究发现干旱导致冬青栎萜烯类释放量增加 33%，而相同干旱条件下地中海白松 *Pinus halepensis* 萜烯类释放量降低了 38%。迷迭香 *Rosemarinus offcinalis*，又名情人草，原产地为欧洲、北非及地中海沿岸，主要分布在法国、突尼斯、摩洛哥和保加利亚。迷迭香枝叶气味浓烈，抗旱性极强，是一种被广泛应用的园林芳香植物，可用于花坛绿地片植、丛植、孤植或作为配材，用于镶边，亦可用作小绿篱或花篱，国外多用于花境配材。近几年，迷迭香的研究多集中在其有效成分提取工艺[17]、抗氧化物功能[18]和精油组分分析[19]等方面。关于干旱胁迫下迷迭香 VOCs 释放规律与抗旱机制之间的关系未见报道。因此，本研究采用称量控水法模拟干旱胁迫，利用动态顶空气体循环法和热脱附-气相色谱-质谱联用技术(TDC-GC-MS)测定了干旱胁迫及复水后迷迭香 VOCs 成分的变化；同时，测定了迷迭香叶片脂氧合酶(LOX)活性的变化，以期从迷迭香释放 VOCs 角度揭示它对干旱胁迫的适应机制，为进一步研究植物释放 VOCs 对非生物胁迫的响应机制提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料及处理

供试材料为迷迭香 2 年生实生苗(江苏省宿迁谊园花卉盆景苗木公司提供)，苗高约为 20 cm。2012 年 4 月栽置于盛有培养土[m(泥炭)∶m(沙土)∶m(蛭石)=1∶2∶1，干质量 1.8 kg]的花盆中(盆径为 18 cm，盆高为 20 cm)，1 株·盆$^{-1}$，盆栽苗置于温室中，在充足的水分条件下培养恢复 1 个月后实施控水处理。选取长势一致、枝条数相同的盆栽苗 24 盆，分别进行干旱胁迫处理，设正常浇水(对照，75%田间持水量)、轻度干旱(60% 田间持水量)、中度干旱(40% 田间持水量)和重度干旱(20% 田间持水量)等 4 种处理，6 盆·处理$^{-1}$。采用称量法控制土壤水分含量，每天傍晚进行称量并补充各处理消耗的水分。4 d 测定 1 次脂氧合酶活性，重复 3 次。干旱胁迫处理 24 d 后，对重度干旱进行复水处理，每天测定脂氧合酶活性，复水共 6 d。

1.2　实验方法

酶液提取：称取迷迭香枝条第 5~8 片叶片 0.5 g，加入适量预冷的 0.05 mol·L^{-1} 的 pH 7.8 磷酸缓冲溶液，充分冰浴研磨后，定容至 25.0 mL。4 ℃下 1 万 r·min^{-1} 离心 20 min，回收上清液用于脂氧合酶活性测定，重复 3 次。

脂氧合酶活性的测定参照 Hatanaka 等[20]的方法。底物配制：将 0.1 mL 吐温 20 加入到 2.0 mL 0.2 mol·L^{-1} 的硼酸缓冲液(pH 9.0)中并混匀，滴加 0.1 mL 亚油酸后充分混匀，再加入 0.2 mL 1.0 mol·L^{-1} 氢氧化钠溶液并保证此时的溶液澄清，然后加入上述硼酸缓冲液 18.0 mL，再加水定容至 50.0 mL，−20 ℃保存备用。3.0 mL 反应体系中含有 0.1 mL 底物、2.8 mL 磷酸缓冲液(0.1 mol·L^{-1}，pH 7.0)和 0.1 mL 酶液，测定反应体系 3 min 内在 234 nm 波长处吸光度的变化。酶活性定义：234 nm 波长处，以亚油酸为底物，3.0 mL 反应体系吸光度 1 min 增加 0.1 为 1 个酶活单位。

1.3　VOCs 采集及分析方法

VOCs 的采集：干旱胁迫处理 24 d 及复水第 6 天，选取株型相似、枝条数相同的迷迭香，3 盆·处理$^{-1}$，采用 QC-2 型大气采样仪通过动态顶空气体循环采集法收集 VOCs，气体流量 0.1 m^3·min^{-1}，采样时间20 min。采用 TDS-GC-MS 分析迷迭香 VOCs 成分。仪器及参数设置条件参照 Gao 等[21]的方法。

TDS(TD3 型，GERSTEL，德国)工作条件：载气压力 20 kPa；进样口温度 250 ℃；热脱附温度 250 ℃，10 min；冷阱温度−100 ℃，3 min；进样时冷阱骤然升至 260 ℃。

GC(7890A 型，Agilent，美国)工作条件：色谱柱为 30 m × 250 μm × 0.25 μm 的 HP-5MS 柱；升温程序：初始温度 40 ℃，保持4 min 后，以 6 ℃·min^{-1} 速率升至 250 ℃，保持 3 min 后，以 10 ℃·min^{-1} 的速率升至 270 ℃，保持 5 min。

MS(5975C 型，Agilent，美国)工作条件：电力方式为 EI，电子能量为 70 eV，质量范围为 28~450，接口温度为 280 ℃，离子源温度为 230 ℃，四级杆温度为 150 ℃。

1.4 数据分析

采用 NIST2008 谱库检索，采用峰面积表示 VOCs 成分的相对含量。使用 Oringin 8.0 和 SPSS 软件进行数据处理、图表制作及统计分析，方差分析采用 Duncan 新复极差法。

2 结果和分析

2.1 脂氧合酶的变化

不同强度的干旱胁迫处理对迷迭香脂氧合酶活性存在显著差异($P<0.05$，图 1)。轻度干旱处理的脂氧合酶活性与对照无显著差异；中度干旱和重度干旱处理 16 d 和 12 d 时，脂氧合酶活性达到最大值，与对照相比分别增加了 0.96 和 1.04 倍($P<0.01$)，随后脂氧合酶活性开始下降。

复水后，脂氧合酶活性开始增加(图 2)，复水第 1 天脂氧合酶活性比未复水时增加 9.2%，但仍低于对照；第 2 天脂氧合酶活性达到最大值，与对照相比增加了 17.7%；复水第 4 天，脂氧合酶活性又下降到对照的 91.2%，至复水第 6 天，脂氧合酶活性较第 4 天稍有增加，但仍低于对照。

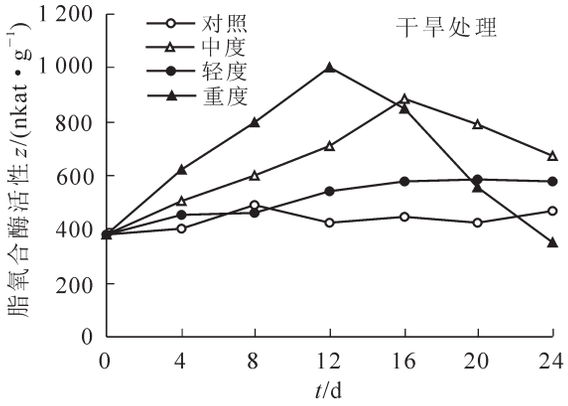

图 1 干旱胁迫对迷迭香脂氧合酶活性的影响

Figure 1 Effects of drought stress on LOX activity in *Rosemarinus offcinalis*

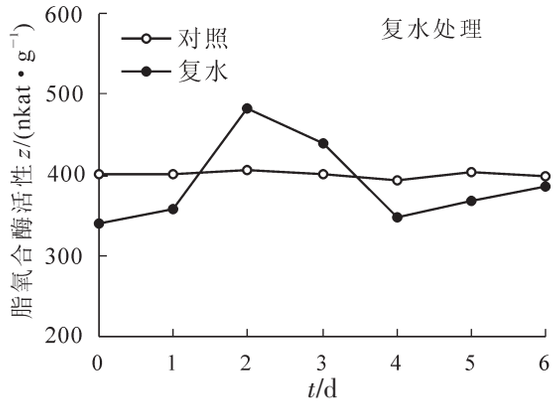

图 2 复水对迷迭香脂氧合酶活性的影响

Figure 2 Effects of re-watering on LOX activity in *Rosemarinus offcinalis*

2.2 迷迭香 VOCs 成分分析

采用 TDS-GC-MS 联用技术对不同干旱胁迫处理及复水后迷迭香释放的 VOCs 组分进行分析(图3)，共鉴定出了57 种化合物(表 1)。轻度、中度、重度干旱处理的迷迭香 VOCs 总量分别是对照的 99.2%，67.2%和 43.2%；随着干旱胁迫程度的增加，轻度干旱、中度干旱、重度干旱各处理萜烯类总量下降，但其相对含量增加，与对照相比分别增加了 14.4%，17.0%和 23.7%，其中单萜相对含量与对照相比分别增加了 21.9%，28.2%和 37.2%；与对照相比，各干旱处理迷迭香醇类总量及相对含量均下降；对照、轻度干旱、中度干旱、重度干旱各处理的迷迭香酮类相对含量分别为 15.28%，12.70%，18.30%，14.22%；各处理的迷迭香醛类相对含量均高于对照；干旱胁迫下新增加了 10 种物质，其中新增加了 2 种 C6 绿叶性气体(GLVs)：2-己烯醛和叶醇；3 种醛类化合物：2-己烯醛、山梨醛和癸醛。

复水后，迷迭香 VOCs 总量与重度干旱相比增加了 29.4%，为对照的 55.3%；萜烯类和单萜类相对含量与对照相比分别增加了 21.7%和 33.3%，两者与重度干旱相比分别下降了 1.8%和 3.8%；醛类化合物释放总量及相对含量与对照和重度干旱相比均显著降低，醇类和酮类化合物释放量与重度干旱相比变化不显著。

3　讨论和结论

脂氧合酶通过催化具有顺,顺-1,4-戊二烯结构的不饱和脂肪酸的加氧反应，生成含氧挥发性有机化合物(oxygenated volatile hydrocarbons，OVOCs)，其中包括绿叶性气体（GLVs）[3]。动物取食、病原菌侵害和机械损伤均能诱导植物大量释放 GLVs[22-23]，这些化合物都具有提高植物受损伤器官抵御细菌侵害的功能，可以作为植物体内的信号物质来增加防御，提高植物体的抗逆性[24-25]。干旱胁迫诱导产生大量活性氧(reactive oxygen species， ROS)，活性氧破坏细胞膜结构，使得细胞内游离不饱和脂肪酸增加，进而促使脂氧合酶活性升高，催化产生大量的 OVOCs。本研究发现，随着干旱胁迫的进行，各处理的脂氧合酶活性均增加。在对挥发性有机化合物(VOCs)各组分进行分析时发现，干旱诱导产生了 3 种醛类物质和 2 种 C6-GLVs，这些物质的相对含量增加，这与脂氧合酶活性增加呈现相关性；并且轻度干旱和中度干旱处理的 3-己烯-2-酮含量明显高于对照，此时这 2 个处理的脂氧合酶活性也高于对照，两者存在相关性；复水后，脂氧合酶活性降低，干旱胁迫诱导产生的 2-己烯醛、山梨醛和癸醛也同时消失。轻度干旱处理酯类相对含量是对照的 1.66 倍，而中度干旱和重度干旱处理的酯类相对含量均下降，可能是因为轻度干旱下脂氧合酶活性最高，催化生成大量酯类，另一种可能的原因是，迷迭香体内具有储存 VOCs 的结构[26]，轻度干旱下酯类物质储存结构中释放出来，而中度干旱和重度干旱处理储存的 VOCs 在干旱早期或已经释放，具体原因有待于进一步研究。

萜烯类化合物是植物次生代谢产生的种类最多、释放量最大的 VOCs，对植物体起到重要的保护作用[22, 27]。本研究发现各干旱处理的迷迭香萜烯类百分含量均有较大增加，一方面是因为萜类化合物沸点较低，干旱诱导气孔关闭时，它们可以通过非气孔途径向外界排放[28]；另一方面，当非生物胁迫发生时，植物体内会通过增加萜烯类化合物的释放来缓解胁迫压力[3, 27-28]。Simpraga 等[29]

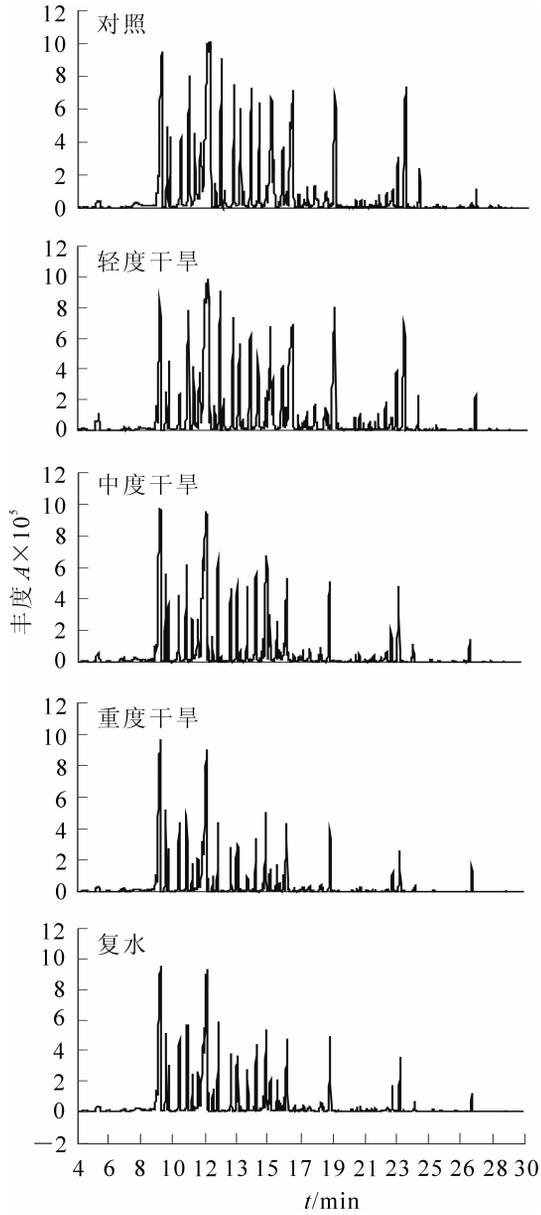

图 3　不同处理的迷迭香挥发性有机化合物总离子流图

Figure 3　Total ion current of volatile organic compounds (VOCs) of *Rosemarinus offcinalis* under drought stresses

表 1　迷迭香挥发性有机化合物的主要成

Table 1　Main components of the volatile organic compounds (VOCs) from *Rosemarinus offcinalis*

t /min	挥发性有机物	分子式	分子量	峰面积 $A\times10^6$				
				对照	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	复水
5.18	3-己烯-2-酮 3-hene-2-one	$C_6H_{10}O$	98	2.47 ± 0.03	8.58 ± 0.01	5.40 ± 0.11	1.40 ± 0.01	2.28 ± 0.01
6.66	2-己烯醛 (E)-2-hexenal	$C_6H_{10}O$	98	–	–	1.03 ± 0.01	1.09 ± 0.02	–
6.78	叶醇 leaf alcohol	$C_6H_{12}O$	100	–	1.07 ± 0.02	1.17 ± 0.02	0.89 ± 0.01	0.63 ± 0.01
7.42	α-蒎烯 α-pinene	$C_{10}H_{16}$	136	3.79 ± 0.03	0.78 ± 0.02	3.83 ± 0.10	1.66 ± 0.11	1.40 ± 0.04
8.19	山梨醛 sorba ehyde	C_6H_8O	96	–	–	–	0.51 ± 0.00	–
8.47	三环烯 tricyclene	$C_{10}H_{16}$	136	–	–	0.56 ± 0.00	0.74 ± 0.01	0.70 ± 0.01
8.69	侧柏烯 thujene	$C_{10}H_{16}$	136	9.68 ± 0.23	7.74 ± 0.41	6.64 ± 0.21	6.02 ± 0.12	7.71 ± 0.19
8.91	β-蒎烯 β-pinene	$C_{10}H_{16}$	136	79.85 ± 3.44	48.72 ± 2.68	73.56 ± 4.95	76.26 ± 6.18	78.93 ± 5.36

表 1（续）

t/min	挥发性有机物	分子式	分子量	峰面积 $A\times10^6$				
				对照	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	复水
9.24	樟烯 camphene	$C_{10}H_{16}$	136	16.82 ± 1.11	8.82 ± 0.89	16.41 ± 1.55	15.13 ± 2.02	16.83 ± 2.58
9.39	伞柳醇 umbellulol	$C_{10}H_{16}O$	152	12.50 ± 1.87	15.12 ± 2.07	9.64 ± 1.01	6.56 ± 0.66	7.99 ± 0.89
10.00	桧烯 sabinene	$C_{10}H_{16}$	136	15.46 ± 1.29	9.52 ± 1.06	14.30 ± 2.03	12.48 ± 1.69	14.21 ± 1.87
10.52	月桂烯 myrcene	$C_{10}H_{16}$	136	50.11 ± 3.48	53.59 ± 4.08	26.28 ± 2.22	14.81 ± 1.23	19.90 ± 2.10
10.80	水芹烯 phellandrene	$C_{10}H_{16}$	136	18.93 ± 1.07	17.50 ± 2.04	8.78 ± 0.67	4.64 ± 0.21	6.79 ± 0.24
10.88	蒈烯 3-carene	$C_{10}H_{16}$	136	–	–	1.19 ± 0.02	0.79 ± 0.00	0.75 ± 0.00
11.12	α-萜品烯 α-terpinene	$C_{10}H_{16}$	136	23.81 ± 2.34	21.41 ± 2.45	10.65 ± 1.67	5.49 ± 0.19	8.16 ± 0.98
11.37	伞花烃 o-cymene	$C_{10}H_{14}$	134	–	93.77 ± 7.33	55.02 ± 3.89	19.40 ± 1.22	36.31 ± 1.32
11.56	α-萜品醇 α-terpineol	$C_{10}H_{18}O$	154	96.79 ± 7.92	7.80 ± 0.11	1.08 ± 0.01	20.77 ± 2.03	25.12 ± 1.98
11.99	罗勒烯 ocimene	$C_{10}H_{16}$	136	4.82 ± 0.66	11.63 ± 0.98	6.35 ± 0.93	3.51 ± 0.06	5.48 ± 0.08
12.35	β-萜品烯 β-terpinene	$C_{10}H_{16}$	136	50.44 ± 4.22	52.84 ± 3.98	19.77 ± 1.76	10.44 ± 1.05	16.44 ± 1.08
13.08	萜品油烯 terpinolene	$C_{10}H_{12}$	132	32.63 ± 2.87	33.23 ± 3.48	15.09 ± 0.94	7.91 ± 0.56	11.70 ± 1.86
13.44	里那醇 linalool	$C_{10}H_{18}O$	154	32.06 ± 3.04	29.88 ± 2.65	15.82 ± 1.44	6.08 ± 0.72	9.43 ± 0.57
13.59	蒿萜酮 eucarvone	$C_9H_{16}O$	140	3.42 ± 0.22	2.25 ± 0.43	1.71 ± 0.18	0.43 ± 0.01	8.64 ± 1.00
14.07	菊油环酮 chrysanthenone	$C_{10}H_{14}O$	150	39.76 ± 2.94	29.38 ± 1.69	17.32 ± 1.03	6.31 ± 0.08	7.23 ± 0.11
14.39	松香芹醇 pinocarveol	$C_{10}H_{16}O$	152	1.11 ± 0.02	1.78 ± 0.03	1.46 ± 0.01	0.62 ± 0.00	1.02 ± 0.02
14.53	樟脑 camphor	$C_{10}H_{16}O$	152	26.99 ± 1.93	19.95 ± 2.03	20.43 ± 1.49	7.91 ± 0.99	11.96 ± 1.02
14.74	异龙脑 isoborneol	$C_{10}H_{18}O$	154	0.56 ± 0.00	0.56 ± 0.01	0.71 ± 0.01	20.20 ± 2.03	0.54 ± 0.00
14.93	松香芹酮 pinocarvone	$C_{10}H_{14}O$	150	2.12 ± 0.02	4.71 ± 0.08	3.36 ± 0.05	1.26 ± 0.11	2.12 ± 0.12
15.21	龙脑 borneol	$C_{10}H_{18}O$	154	44.98 ± 2.87	39.91 ± 3.18	47.86 ± 3.96	2.81 ± 0.02	29.22 ± 2.77
15.28	松莰酮 pinocamphone	$C_{10}H_{16}O$	152	4.18 ± 0.44	1.13 ± 0.04	3.18 ± 0.62	2.94 ± 0.17	3.78 ± 0.32
15.34	4-萜品醇 4-carvomenthenol	$C_{10}H_{18}O$	154	10.84 ± 0.87	12.45 ± 1.03	7.97 ± 0.06	8.34 ± 0.33	4.85 ± 0.11
15.64	2-蒎烯-4-酮 2-pinen-4-one	$C_{10}H_{14}O$	150	1.09 ± 0.09	–	0.91 ± 0.00	2.86 ± 0.11	–
15.81	草蒿脑 estragole	$C_{10}H_{12}O$	148	–	–	2.04 ± 0.04	3.22 ± 0.05	3.30 ± 0.03
15.87	顺式萜品醇 cis-terpineol	$C_{10}H_{18}O$	154	17.34 ± 1.22	14.03 ± 1.83	9.11 ± 0.79	–	6.98 ± 0.77
16.03	癸醛 n-decanal	$C_{10}H_{20}O$	156	–	–	1.32 ± 0.22	–	–
16.06	桃金娘烯醇 myrtenol	$C_{10}H_{16}O$	152	3.14 ± 0.19	4.94 ± 0.36	1.62 ± 0.09	–	–
16.28	反式马鞭草烯酮 rans-verbenone	$C_{10}H_{14}O$	150	24.59 ± 1.43	24.21 ± 2.64	34.97 ± 2.92	21.18 ± 1.88	26.42 ± 1.59
16.33	2-烯丙基-4-甲基苯酚 2-allyl-4-methylphenol	$C_{10}H_{12}O$	148	–	–	0.91 ± 0.00	3.22 ± 0.11	0.90 ± 0.01
16.77	香茅醇 citronellol	$C_{10}H_{20}O$	198	2.13 ± 0.23	2.78 ± 0.09	1.21 ± 0.11	0.79 ± 0.01	1.16 ± 0.04
16.92	百里香酚甲醚 ethylthymylether	$C_{11}H_{16}O$	164	–	0.48 ± 0.00	–	–	–
17.08	蒈醇 caranol	$C_{10}H_{18}O$	154	1.75 ± 0.12	1.28 ± 0.07	0.96 ± 0.06	–	0.44 ± 0.00
17.29	桃金娘烷醇 myrtanol	$C_{10}H_{16}O$	136	4.17 ± 0.11	4.01 ± 0.21	2.76 ± 0.22	–	1.44 ± 0.02
17.70	香叶醇 lemonol	$C_{10}H_{18}O$	154	8.37 ± 0.17	12.45 ± 0.88	4.44 ± 0.65	1.98 ± 0.06	2.24 ± 0.06
18.27	柠檬醛 guaniol	$C_{10}H_{16}O$	152	3.52 ± 0.33	17.39 ± 0.32	0.84 ± 0.00	2.29 ± 0.17	1.77 ± 0.03
18.34	香芹酮 carvone	$C_{10}H_{14}O$	150	3.31 ± 0.21	–	2.94 ± 0.07	2.34 ± 0.08	1.80 ± 0.07
18.41	菊酸甲酯 methyl chrysanthemate	$C_{11}H_{18}O_2$	182	1.43 ± 0.04	3.94 ± 0.15	1.31 ± 0.06	0.56 ± 0.00	0.92 ± 0.02
18.87	乙酸龙脑酯 bornyl acetate	$C_{12}H_{20}O_2$	196	44.36 ± 3.77	70.24 ± 7.86	22.72 ± 2.83	14.18 ± 1.93	21.38 ± 1.77
19.06	菊酸乙酯 chrysanthenyl acetate	$C_{12}H_{18}O_2$	194	0.74 ± 0.01	1.31 ± 0.10	1.03 ± 0.07	–	–
20.06	乙酸桃金娘烯酯 myrtenyl acetate	$C_{12}H_{18}O_2$	194	1.46 ± 0.10	2.76 ± 0.21	0.65 ± 0.02	–	0.49 ± 0.01

表 1（续）

t/min	挥发性有机物	分子式	分子量	峰面积 $A\times10^6$				
				对照	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	复水
20.35	冰片烯 bornylene	$C_{10}H_{16}$	136	1.28 ± 0.04	2.96 ± 0.05	1.27 ± 0.01	0.49 ± 0.00	0.70 ± 0.04
20.90	香茅醇乙酸酯 citronellyl acetate	$C_{10}H_{18}$	138	0.49 ± 0.03	6.75 ± 0.31	0.43 ± 0.02	–	0.53 ± 0.01
21.23	乙酸异洋薄荷酯 isopulegol acetate	$C_{10}H_{18}O$	154	3.32 ± 0.21	1.61 ± 0.01	0.61 ± 0.01	0.41 ± 0.00	0.58 ± 0.01
21.82	乙酸香叶酯 geraniol acetate	$C_{10}H_{14}O$	150	2.64 ± 0.20	2.78 ± 0.25	0.90 ± 0.02	–	1.00 ± 0.11
22.20	顺式马鞭草烯酮 cis-verbenone	$C_{10}H_{14}O$	150	10.45 ± 1.03	7.40 ± 0.31	5.16 ± 0.43	0.72 ± 0.05	1.36 ± 0.07
22.46	丁香油酚甲醚 eugenol methylether	$C_{11}H_{14}O_2$	178	9.52 ± 0.67	13.70 ± 1.02	5.19 ± 0.48	3.03 ± 0.28	4.45 ± 0.22
22.93	反式石竹烯 trans-caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	204	44.75 ± 3.89	39.11 ± 2.77	20.27 ± 1.88	8.09 ± 0.88	12.75 ± 1.11
23.64	香叶基丙酮 dihydropseudoionon	$C_{13}H_{22}O$	194	1.35 ± 0.21	1.07 ± 0.07	0.92 ± 0.01	–	–
23.72	顺式石竹烯 cis-caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	204	6.71 ± 0.44	6.06 ± 0.28	2.83 ± 0.10	1.16 ± 0.05	1.75 ± 0.06

说明："–"表示未检测到化合物。

在对欧洲山毛榉 *Fagus sylvatica* 的研究中发现，停止浇水 10 d 后，山毛榉净光合速率下降，几天之后单萜类的释放总量减少，但分配到单萜合成途径中碳的比例却是增加的，说明植物体能够通过增加单萜类的释放来降低光合氧化伤害[30]；Lavoir 等[15]发现：干旱胁迫下冬青栎释放的单萜是对照处理的 55%。本研究同样表明：各干旱处理单萜类释放总量均减少，但单萜类相对含量却随着干旱程度的加深呈现明显的增加趋势，说明迷迭香能够通过增加单萜类的释放来抵御干旱胁迫。

综上所述：干旱能够诱导脂氧合酶酶活性增加，催化合成更多的 GLVs 及醛类 VOCs；干旱导致迷迭香 VOCs 释放总量下降，却诱导迷迭香合成新的 VOCs 成分，且萜烯类的释放比例呈增加的趋势。研究表明：迷迭香能够通过增加 GLVs、醛类和萜烯类化合物的释放来有效缓解干旱胁迫造成的伤害，提高迷迭香的抗旱性。园林植物在生长发育的过程中，不可避免的会受到环境的胁迫，而干旱胁迫是最常见的一种，研究园林植物的抗旱性机理对于园林植物的养护管理意义重大，并且，迷迭香 VOCs 的释放规律研究可以为迷迭香的园林配置，尤其是芳香植物园配置提供科学依据。

参考文献：

[1] NIINEMETS U. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **260**: 1623 – 1639.

[2] CRAMER G R, URANO K, DELROT S, *et al*. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective [J]. *BMC Plant Biol*, 2011, **11**: 163. doi:10.1186/1471-2229-11-163.

[3] LORETO F, SCHNITZLER J P. Abiotic stresses and induced BVOCs [J]. *Trends Plant Sci*, 2010, **15**(3):154 – 166.

[4] BALDWIN I T, HALITSCHKE R, PASCHOLD A, *et al*. Volatile signaling in plant-plant interactions: talking trees in the genomics era [J]. *Science*, 2006, **311**: 812 – 815.

[5] 左照江，张汝民，高岩. 植物间挥发物信号的研究进展[J]. 植物学报, 2009, **44**(2): 245 – 252.
ZUO Zhaojiang, ZHANG Rumin, GAO Yan. Research advances in volatile signals among plants [J]. *Chin Bull Bot*, 2009, **44**(2): 245 – 252.

[6] 林富平，周帅，马楠, 等. 4 个桂花品种叶片挥发物成分及其对空气微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报，2013，**30**(1): 15 – 21.
LIN Fuping，ZHOU Shuai，MA Nan, *et al*. Volatile organic compounds in leaves of *Osmanthus fragrans* and their ef-

fect on airborne microorganisms[J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(1): 15 – 21.

[7] 孔垂华，徐涛，胡飞，等. 环境胁迫下植物化感作用及其诱导机制[J]. 生态学报，2000，**20**(5)：849 – 854.
KONG Chuihua, XU Tao, HU Fei, *et al*. Allelopathy under environmental stress and its induced mechanism [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 849 – 854.

[8] THEIS N, LERDAU M. The evolution of function in plant secondary metabolites [J]. *Int J Plant Sci*, 2003, **164**: 93 – 102.

[9] ARIMURA G, OZAWA R, KUGIMIYA S, *et al*. Herbivore-induced defense response in a model legume: two-spoted spider mites, tetranychus urticae, induce emission of (E)-β-ocimene and transcript accumulation of (E)-β-ocimene synthas in *Lotus japonicus* [J]. *Plant Physiol*, 2004, **135**: 1976 – 1983.

[10] TUMLINSON J H, LAIR C G. Biosynthesis of fatty acid amide elicitors of plant volatiles by insect herbivores [J]. *Arch Insect Biochem Physiol*, 2005, **58**(2): 54 – 68.

[11] IBRAHIM M A, MÄENPÄÄ M, HASSINEN V, *et al*. Elevation of night-time temperature increases terpenoid emissions from *Betula pendula* and *Populus tremula* [J]. *J Exp Bot*, 2010, **61**: 1583 – 1595.

[12] HARTIKANINEN K, NERG A, KIVIMÄENPÄÄM, *et al*. Emissions of volatile organic compounds and leaf structural characteristics of European aspen (*Populus tremula*) grown under elevated ozone and temperature [J]. *Tree Physiol*, 2009, **29**: 1163 – 1173.

[13] KARL T, CURTIS A J, ROSENSTIEL T N, *et al*. Transient releases of acetaldehyde from tree leaves-products of a pyruvate overflow mechanism [J]. *Plant Cell Environ*, 2002, **25**: 1121 – 1131.

[14] STAUDT M, ENNAJAH A, MOUILLOT F, *et al*. Do volatile organic compound emissions of Tunisian cork oak populations originating from contrasting climatic conditions differ in their responses to summer drought[J]. *Can J For Res*, 2008, **38**: 2965 – 2975.

[15] LAVOIR A V, STAUDT M, SCHNITZLER J P, *et al*. Drought reduced monoterpene emissions from *Quercus ilex* trees: results from a throughfall displacement experiment within a forest ecosystem[J]. *Biogeosci Discuss*, 2009, **6**: 863 – 893

[16] BLANCH J S, PENUELAS J, LLUSIA J. Sensitivity of terpene emissions to drought and fertilization in terpene-storing *Pinus halepensis* and non-storing *Quercus ilex* [J]. *Physiol Plant*, 2007, **131**(2): 211 – 225.

[17] 王珲，高慧媛，张振秋，等. 中药迷迭香化学成分的分离与鉴定[J]. 中国现代中药，2011，**13**(1): 23 – 25.
WANG Hui, GAO Huiyuan, ZHANG Zhenqiu, *et al*. Isolation and identification of chemical constituents from *Rosmarinus officinalis* L.[J]. *Modern Chin Med*, 2011, **13**(1): 23 – 25.

[18] 袁干军，李沛波，杨慧. 迷迭香中鼠尾草酸的抗 MRSA 活性研究[J]. 中国现代应用药学，2012，**29**(7)：571 – 574.
YUAN Ganjun, LI Peibo, YANG Hui. Anti-MRSA activity of carnosic acid in rosemary [J]. *Chin J Mod Appl Pharm*, 2011, **29**(7): 571 – 574.

[19] 黄宏妙，郭占京，卢汝梅，等. 迷迭香挥发油提取工艺优化及其化学成分分析[J]. 湖北农业科学，2012，**51**(11)：2321 – 2324.
HUANG Hongmiao, GUO Zhanjing, LU Rumei, *et al*. Optimization of extraction technology of volatile oil from rosemary and analysis on the chemical constituents of volatile oil [J]. *Hubei Agric Sci*, 2012, **51**(11): 2321 – 2324.

[20] HATANAKA A. The biogeneration of green odour by green leaves [J]. *Phytochemistry*, 1993, **34**(5): 1201 – 1218.

[21] GAO Yan, JIN Youju, LI Haidong, *et al*. Volatile organic compounds and their roles in bacteriostasis in five conifer species [J]. *J Integrat Plant Biol*, 2005, **47**(4): 499 – 507.

[22] LAOTHAWORNKITKUL J, PAUL N D, VICKERS C E, *et al*. Isoprene emissions influence herbivore feeding decisions [J]. *Plant Cell Environ*, 2008, **31**: 1410 – 1415.

[23] 周帅，林富平，王玉魁，等. 樟树幼苗机械损伤叶片对挥发性有机化合物及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物生态学报，2012，**36**(7)：671 – 680.
ZHOU Shuai, LIN Fuping, WANG Yukui, *et al*. Effects of mechanical damage of leaves on volatile organic compounds and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *Cinnamomum camphora* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2012, **36**(7): 671 – 680.

[24] VAAHTERA L, BROSCHE M. More than the sum of its parts-how to achieve a specific transcriptional response to

abiotic stress [J]. *Plant Sci*, 2011, **180**(3): 421 – 430.

[25] BRUCE T J A, WADHAMS L J, WOODCOCK C M. Insect host location: a volatile situation[J]. *Trends Plant Sci*, 2005, **10**(6): 269 – 274.

[26] 左照江, 张汝民, 王勇, 等. 冷蒿挥发性有机化合物主要成分分析及其地上部分结构研究[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(4): 462 – 468.
ZUO Zhaojiang, ZHANG Rumin, WANG Yong, *et al*. Analysis of main volatile organic compounds and study of aboveground structures in *Artemisia frigida* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(4): 462 – 468.

[27] NIINEMETS U, LORETO F, REICHSTEIN M. Physiological and physicochemical controls on foliar volatile organic compound emissions [J]. *Trends Plant Sci*, 2004, **9**(4): 180 – 186.

[28] BRILLI F, BARTA C, FORTUNATI A, *et al*. Response of isoprene emission and carbon metabolism to drought in white poplar (*Populus alba*) saplings [J]. *New Phytol*, 2007, **175**: 244 – 254.

[29] SIMPRAGA M, VERBEECK H, DEMARCKE M, *et al*. Clear link between drought stress, photosynthesis and biogenic volatile organic compounds in *Fagus sylvatica* L.[J]. *Atmospheric Environ*, 2011, **45**: 5254 – 5259.

[30] DELFINE S, LORETO F, PINELLI P, *et al*. Isoprenoids content and photosynthetic limitations in rosemary and spearmint plants under water stress [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, **106**: 243 – 252.

浙江农林大学在加纳合作共建竹加工企业

2013 年 12 月 8 日，浙江农林大学非洲农林研究院、浙江德清莫干山竹胶板有限公司和加纳 GWIRA 地区传统管理委员会三方在德清签署“关于在加纳共和国共建竹加工示范企业的合作框架协议”。这项协议的签署，标志着中国首家竹产业合作示范工厂落户西非加纳共和国的工作迈出了坚实的一步。

框架协议的主要目标是通过三方联合，在技术研究、政策、与当地土著居民合作以及中国境外企业绿色发展的研究和示范方面形成优势互补、相互支持和互利互惠的合作格局，实现该示范企业的正常生产和运转，实现企业赢利，带动当地就业和居民增收，同时提高企业履行社会责任的意识，树立中国在非企业负责任和绿色发展的形象。根据这一协议，三方将着重在推动加纳竹产业政策制定和改革、提高竹子企业社会责任和环境保护意识、开展人员培训和能力建设、开展竹子加工和培育技术的适应性研究等 4 个方面开展工作。

据介绍，该竹加工企业将建设成为中国境外企业由消耗木材等自然资源到绿色可持续发展的转变、中国绿色竹产业在非洲落地和发展的示范工厂。

非洲农林研究院　新闻中心