

# 不同耐旱型马尾松家系幼苗针叶挥发物组分对干旱胁迫的响应

谢俊康, 陈虎, 杨章旗\*, 吴东山

(广西壮族自治区林业科学研究院, 广西林业实验室, 广西优良用材林资源培育重点实验室,  
广西马尾松工程技术研究中心, 南宁 530002)

**摘要:** 为探明抗旱型和干旱敏感型马尾松家系幼苗在干旱胁迫下针叶挥发物的变化特征, 该研究采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术, 分别对抗旱型和干旱敏感型马尾松幼苗不同阶段(正常培育、轻度干旱、重度干旱、干旱复水)的针叶挥发物组分和相对含量进行测定。结果表明: (1) 检测和鉴定出马尾松幼苗松针挥发物组分 16 种, 其中单萜组分 5 种( $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、月桂烯、柠檬烯、异松油烯), 倍半萜组分 9 种( $\gamma$ -榄香烯、胡椒烯、 $\beta$ -榄香烯、长叶烯、石竹烯、葑草烯、 $\alpha$ -摩勒烯、 $\gamma$ -摩勒烯、 $\delta$ -杜松烯), 酯类组分 2 种(甲酸芳樟酯、乙酸龙脑酯)。(2) 不同类型马尾松针叶挥发物组成基本相同, 且主要由单萜和倍半萜组成, 相对含量较高的化合物有 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、石竹烯等, 主要化合物(相对含量 $>1\%$ )的相对含量差异不显著。(3) 在轻度干旱胁迫下, 敏感型家系针叶挥发物中单萜组分的相对含量急剧下降, 其中 $\alpha$ -蒎烯和 $\beta$ -蒎烯的相对含量由未经干旱胁迫状态下的 39.671%和 14.383%分别下降至 16.855%和 5.048%。抗旱型家系在干旱胁迫下针叶挥发物中单萜相对含量有所降低(下降幅度远小于敏感型家系), 且在干旱复水后单萜组分相对含量上升, 有恢复至未经干旱胁迫状态下的趋势。(4) 抗旱型马尾松幼苗在干旱胁迫时松针挥发物组分相对含量变化小, 干旱敏感型马尾松幼苗在干旱初期针叶挥发物组分急剧变化以适应外部胁迫。针叶中单萜组分( $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯)在干旱胁迫下的响应程度是敏感型和抗旱型家系最显著的差别。该研究为马尾松针叶挥发物响应干旱胁迫机理研究奠定了基础, 为马尾松抗旱育种提供了思路。

**关键词:** 马尾松, 干旱胁迫, 挥发物, 组分, 相对含量

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号:

## Response of volatile components in needles of different drought tolerant families of *Pinus massoniana* seedlings to drought stress

XIE Junkang, CHEN Hu, YANG Zhangqi\*, WU Dongshan

(Guangxi Laboratory of Forestry, Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Guangxi Pinus Massoniana Research Center of Engineering Technology, Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530002, China)

**Abstract:** To investigate the variation characteristics of needle volatile compounds in seedlings from drought-resistant and drought-sensitive *Pinus massoniana* families under drought stress, this

**项目基金:** 国家重点研发计划子课题“南带速生优质抗旱马尾松新品种选育”(2022YFD2200202-4); 广西优良用材林资源培育重点实验室自主课题资助项目(2023-A-01-01)。

**第一作者:** 谢俊康(1993—), 硕士, 工程师, (E-mail) junkangxie@163.com。

**\*通信作者:** 杨章旗, 博士, 教授级高级工程师, (E-mail) yangzhangqi@163.com。

study used solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry to determine the components and relative contents of needle volatiles in drought-resistant and drought-sensitive *Pinus massoniana* seedlings at different stages (normal cultivation, mild drought, severe drought, and drought rewatering). The results were as follows: (1) Sixteen kinds of volatile components from pine needles of *Pinus massoniana* seedlings were detected and identified, including five monoterpenes ( $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene, myrcene, limonene, and terpinolene), nine sesquiterpenes ( $\gamma$ -elemene, copaene,  $\beta$ -elemene, longipinene, caryophyllene, humulene,  $\alpha$ -muurolene,  $\gamma$ -muurolene, and  $\delta$ -cadinene) and two esters (linalyl formate and bornyl acetate). (2) The components of needle volatiles in seedlings of drought sensitive and drought resistant *Pinus massoniana* families were basically the same, mainly composed of monoterpenes and sesquiterpenes. The compounds with relatively high relative contents include  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene, caryophyllene, etc., and there is no significant difference in the relative contents of the main components (relative content greater than 1%). (3) Under mild drought stress, the relative content of monoterpene components in needle volatiles of sensitive families decreased sharply, and the relative contents of  $\alpha$ -pinene and  $\beta$ -pinene decreased from 39.671% and 14.383% in the unstressed state to 16.855% and 5.048%, respectively. Under drought stress, the relative content of monoterpenes in needles of drought resistant families decreased (the decline range was much smaller than that of sensitive families), and the relative content of monoterpenes increased after drought rehydration, tending to return to the state without drought stress. (4) The relative content of volatile components in pine needles of drought resistant *Pinus massoniana* seedlings changed little under drought stress, while those of volatile components of pine needles of drought sensitive *Pinus massoniana* seedlings changed sharply in the early stage of drought to adapt to external stress. The response of monoterpene components ( $\alpha$ -pinene and  $\beta$ -pinene) in needles to drought stress was the most significant difference between sensitive and resistant families. This study laid a foundation for the study of the mechanism of *Pinus massoniana* needle volatiles in response to drought stress, and provided ideas for *Pinus massoniana* drought resistance breeding.

**Key words:** *Pinus massoniana*, drought stress, volatiles, component, relative content

马尾松 (*Pinus massoniana*) 是广泛分布于我国南方的用材和树脂兼用树种, 其具有速生、丰产、耐贫瘠等优良特性, 在工业用材、林产品加工、森林资源发展及生态服务功能中具有不可替代的作用 (杨章旗, 2015; 杨章旗等, 2018)。作为马尾松主要产区之一, 广西因地形条件与季风活动等因素的综合作用, 容易出现降雨量时空分布不均的情况, 导致局部灾害性干旱气候的形成 (李耀先等, 2009; 邹成林等, 2019)。干旱不仅会严重降低马尾松的造林成活率, 导致大量苗木死亡, 造成巨大的经济损失, 还会显著制约林木的生长速度, 使马尾松的成材周期延长, 进一步影响其在工业用材与生态服务等方面功能的发挥。

目前, 研究人员对马尾松的抗旱研究已取得了一定的进展, 研究方向主要集中在光合特性、生理指标、生物调控、抗性筛选等关键领域。在马尾松苗木生理响应方面, 研究人员围绕干旱胁迫下苗木光合特性及相关生理指标的变化展开了深入探讨。从光合速率、气孔导度、蒸腾作用, 以及脯氨酸含量、可溶性糖含量、丙二醛含量等生理指标入手, 分析了干旱胁迫对马尾松苗木生理代谢的影响, 为理解马尾松的抗旱生理机制提供了重要依据 (王好运等, 2018; 胡晓健等, 2020; 邓秀秀等, 2020; 张金凤等, 2021)。在生物调控措施方面, 菌根化对马尾松苗木抗旱能力的促进作用与机理成为研究热点, 菌根能够通过改善苗木根系吸收

水分和养分的能力、调节苗木体内的激素平衡等途径, 有效提高马尾松苗木的抗旱性, 为马尾松抗旱造林提供了新的技术思路(王艺等, 2019; 王艺和涂桂英, 2021; 李敏等, 2022)。此外, 研究人员通过苗期干旱试验和大田试验对不同种源(刘建兵等, 2010; 韩文萍等, 2021)和不同家系(杜明凤等, 2017; 唐生森等, 2018; 黄荣海等, 2018)的马尾松进行了抗旱性能评价, 筛选出抗旱性较强的优良种质资源。然而, 在抗旱指标的选择上, 多数研究仅关注单一或少数生理指标, 缺乏对多指标综合考量及指标间关联性的深入分析, 难以全面、准确地评价马尾松的抗旱能力。

挥发性物质是植物生长过程中重要的一类化合物, 植物可以通过调整挥发性物质释放量及化学组成来应对各种生物或非生物胁迫。挥发性物质对于干旱胁迫有较明显的响应, 樟(Cinnamomum camphora)幼苗受到干旱胁迫后, 其挥发物种类和释放量增加(周帅, 2012)。迷迭香(Rosmarinus officinalis)受到干旱胁迫后有新的挥发物形成并且挥发物释放量下降(刘芳等, 2014)。桦树(Betula pendula)受到干旱胁迫后会增加 $\alpha$ -蒎烯和桉烯释放(胡书婧和张汝民, 2022)。马尾松也会调节针叶挥发物的相对含量以响应干旱胁迫, 全文选和丁贵杰(2017)的研究表明马尾松幼苗受到干旱胁迫后针叶中单萜类化合物相对含量先降低后逐渐升高, 倍半萜类化合物相对含量则先升高再逐渐降低。不同耐旱型马尾松在干旱胁迫过程中外观形态和生理指标存在差异(汪挺, 2021), 但是不同耐旱型马尾松家系幼苗在干旱胁迫过程中挥发物组成变化规律尚未被报道。

本研究以抗旱型和干旱敏感型两种马尾松家系幼苗为材料, 通过固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)分别对抗旱型和干旱敏感型马尾松幼苗在不同干旱阶段下(正常培育、轻度干旱、重度干旱、干旱复水)针叶挥发物组分和相对含量进行测定, 拟探讨以下问题: (1) 马尾松幼苗针叶挥发物组成特点; (2) 不同耐旱型马尾松家系幼苗针叶挥发物响应干旱胁迫的差异; (3) 针叶挥发物作为抗旱性筛选指标的可行性。本研究旨在为马尾松抗性育种及抗旱机理研究提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地为广西壮族自治区林业科学研究院苗圃大棚, 该区域地理坐标为 108°20'32"—108°21'10" E, 22°50'22"—22°50'40" N, 海拔 80 m。属于亚热带季风气候, 年平均气温 21.6 °C, 年平均湿度为 80%, 雨季主要集中在 5—9 月, 旱季主要集中在 10 月至次年 4 月(汪挺等, 2020)。

### 1.2 实验材料

基于前期马尾松幼苗抗旱家系筛选试验结果(汪挺等, 2020), 筛选出马尾松高度抗旱家系 19-242 和干旱敏感型家系 19-223 作为实验材料。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 试验设计

将 1 年生马尾松幼苗移栽至育苗盆中, 放入相同量的初始 pH 值为 5.14, 田间持水率为 29.59%的马尾松林下黄心土。干旱试验开始前正常浇水与管护, 保持土壤处于湿润状态。

选择生长状况良好、长势均匀的干旱敏感型和抗旱型马尾松家系[1.5年生, 苗高为(55±5) cm, 地径为(5.3±0.5) mm]各36株。采用随机区组试验设计, 设置3个随机区组, 每组各12个单株。对试验幼苗开展持续干旱试验, 在干旱处理至第0、第10和第15天时土壤相对含水量分别为76.3%、57.5%和30.8%, 分别属于湿润(75%~80%, CK), 轻度干旱(55%~60%, MD)和重度干旱(30%~35%, SD), 在干旱处理15 d后进行复水至湿润状态后48 h(RW)(汪挺, 2021), 分别在这4个时间点取适量针叶进行挥发物组分及相对含量的测定。

1.3.2 针叶挥发物组分分析

采用 SPME-GC-MS 对针叶挥发物的化合物组成及相对含量大小进行测定(国田等, 2020)。取相同处理下的3株幼苗针叶, 混合、剪碎后称取0.50 g 放置于10 mL 顶空瓶中, 然后加入适量的无水硫酸钠(干燥剂), 插入老化处理后的 SPME 萃取头, 在75℃恒温浴锅内萃取15 min 后, 在 Bruker 气相色谱三重四级杆质谱仪(SCION SQ-TQ)中解析3 min 后进行 GC-MS 分析, 每个处理3次重复。气相色谱条件: 程序升温方法为在初始温度40℃下保持5 min, 然后以5℃·min<sup>-1</sup>的升温速度升至150℃, 再以2℃·min<sup>-1</sup>的升温速度升至160℃, 最后以10℃·min<sup>-1</sup>的升温速度升至250℃后保持5 min。色谱柱为DB-5毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm), 检测器为氢火焰离子检测器(FID), 载气为高纯氮气(99.999%), 不分流。进样口和检测器温度均为250℃。柱前压为49.5 Pa, 柱流量为1 mL·min<sup>-1</sup>。质谱条件: 电子轰击源为EI, 电子能量70 eV, 离子源温度250℃, 接口温度250℃, 扫描质量范围40~450, 扫描间隔0.5 s, 扫描时间设置为46 min。

1.4 数据处理

通过将所得质谱图与系统中NIST数据库的标准图谱比对并结合相关文献对针叶挥发物组分进行定性分析(谢俊康等, 2021)。采用面积归一化法对针叶挥发物组分进行定量分析。通过 IBM SPSS 25 软件进行独立样本 *t* 检验及方差分析。采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 松针挥发物组分分析

表1 马尾松幼苗松针挥发物组分及相对含量

Table 1 Components and relative contents of volatiles from pine needles of *Pinus massoniana* seedlings

| 序号<br>NO. | 成分<br>Component               | 分子式<br>Molecular<br>formula                    | 相对含量 Relative content (%) |                               |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|           |                               |                                                | 敏感型<br>Sensitive type     | 抗旱型<br>Drought resistant type |
| 1         | $\alpha$ -蒎烯 $\alpha$ -Pinene | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 39.67±3.608a              | 45.598±6.283a                 |
| 2         | $\beta$ -蒎烯 $\beta$ -Pinene   | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 14.38±4.039a              | 10.518±3.337a                 |
| 3         | 月桂烯 Myrcene                   | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 1.876±1.002a              | 1.026±0.114a                  |
| 4         | 柠檬烯 Limonene                  | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 2.856±1.753a              | 5.030±0.950a                  |
| 5         | 异松油烯 Terpinolene              | C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>                | 0.625±0.219a              | 0.679±0.074a                  |
| 6         | 甲酸芳樟酯 Linalyl formate         | C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub> | 2.380±1.348a              | 0.274±0.134a                  |
| 7         | 乙酸龙脑酯 Borneyl acetate         | C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub> | 0.792±0.371b              | 1.924±0.497a                  |

|    |                                   |                                 |               |               |
|----|-----------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|
| 8  | $\gamma$ -榄香烯 $\gamma$ -Elemene   | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 1.019±0.107a  | 0.485±0.317a  |
| 9  | 胡椒烯 Copaene                       | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 0.437±0.291a  | 0.400±0.160a  |
| 10 | $\beta$ -榄香烯 $\beta$ -Elemene     | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 2.138±0.690a  | 1.232±0.739a  |
| 11 | 长叶烯 Longipinene                   | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 0.466±0.140a  | 0.551±0.243a  |
| 12 | 石竹烯 Caryophyllene                 | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 10.467±2.567a | 14.255±2.928a |
| 13 | 葎草烯 Humulene                      | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 3.126±1.343a  | 4.539±1.808a  |
| 14 | $\alpha$ -摩尔烯 $\alpha$ -Muulolene | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 4.152±1.829a  | 4.930±1.749a  |
| 15 | $\gamma$ -摩尔烯 $\gamma$ -Muulolene | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 0.838±0.770a  | 0.162±0.156a  |
| 16 | $\delta$ -杜松烯 $\delta$ -Cadinene  | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> | 2.010±0.823a  | 1.161±0.860a  |

注：相同字母表示在 0.05 水平差异不显著。

Note: The same letters indicate no significant differences at 0.05 level.

通过 SPME-GC-MS 检测马尾松针叶挥发物化学组成和相对含量，结果如图 1 所示。共检测和鉴定出马尾松幼苗针叶挥发物组分共 16 种，其中单萜组分有 5 种（ $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、月桂烯、柠檬烯、异松油烯），倍半萜组分有 9 种（ $\gamma$ -榄香烯、胡椒烯、 $\beta$ -榄香烯、长叶烯、石竹烯、葎草烯、 $\alpha$ -摩尔烯、 $\gamma$ -摩尔烯、 $\delta$ -杜松烯），酯类组分 2 种（甲酸芳樟酯、乙酸龙脑酯）。表 1 显示了未经干旱处理（CK）的敏感型及抗旱型马尾松家系幼苗针叶挥发物的组分及相对含量。马尾松针叶挥发物的主要由单萜和倍半萜组成（相对含量大于 80%），其中相对含量最高的组分是 $\alpha$ -蒎烯（约 40%），相对含量较高的组分有 $\beta$ -蒎烯、柠檬烯、石竹烯、葎草烯、 $\alpha$ -摩尔烯等。干旱敏感型和抗旱型家系的针叶挥发物组分基本一致，抗旱型家系针叶挥发物中 $\alpha$ -蒎烯、柠檬烯、石竹烯的相对含量略高于干旱敏感型家系。干旱敏感型家系针叶挥发物中 $\beta$ -蒎烯、月桂烯的相对含量略高于抗旱型家系。独立样本 *t* 检验显示，除抗旱型家系针叶中乙酸龙脑酯相对含量显著高于干旱敏感型家系外，其余组分的差异均不显著。

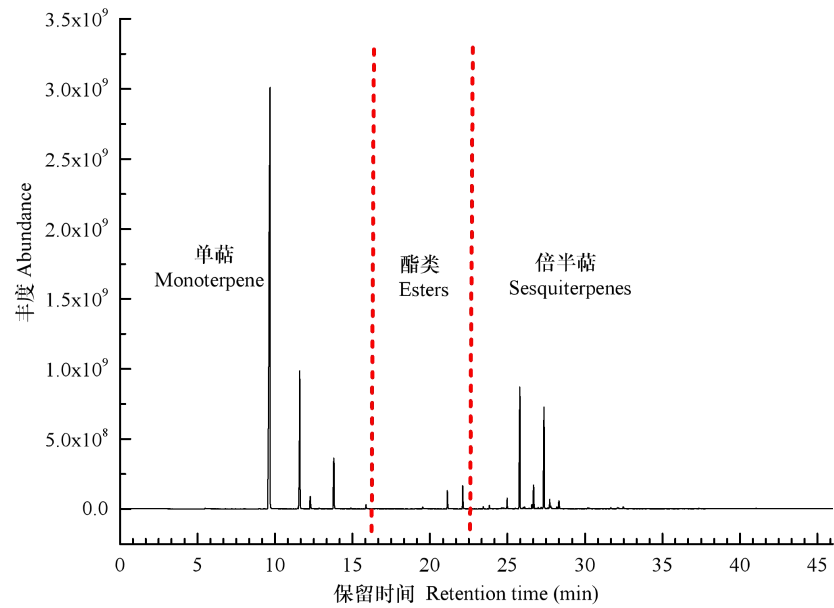


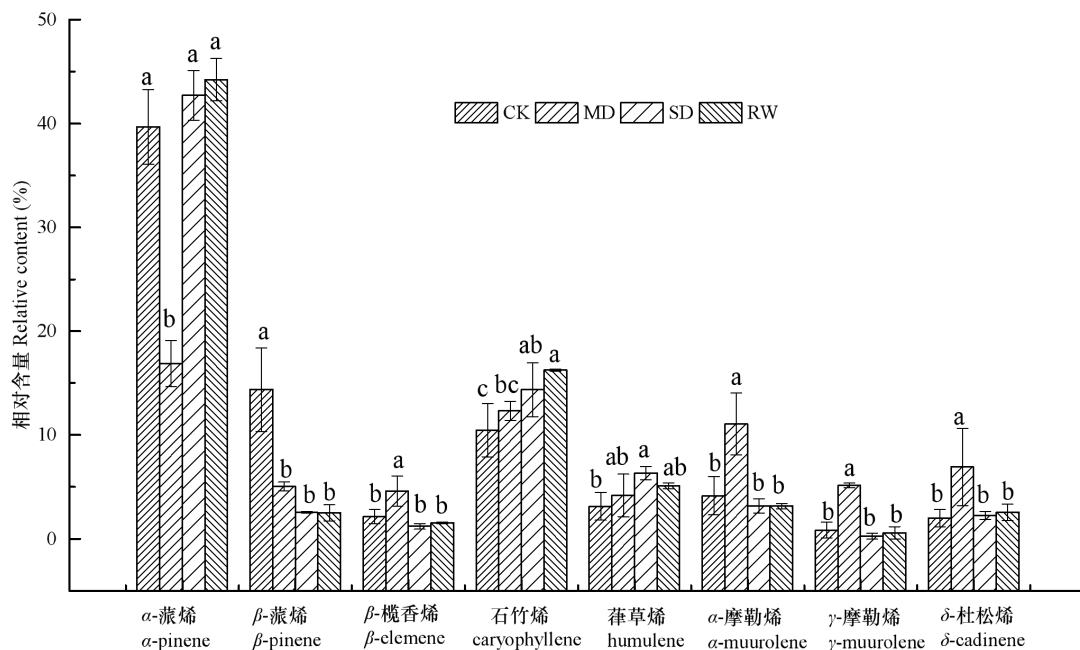
图 1 针叶挥发油 SPME-GC-MS 离子流图谱

Fig. 1 SPME-GC-MS ion chromatogram of pine needle volatiles

2.2 干旱胁迫对松针挥发物的影响

### 2.2.1 干旱胁迫对干旱敏感型家系松针挥发物的影响

图 2 展示了不同干旱胁迫阶段干旱敏感型家系主要针叶挥发物相对含量大小的变化情况。CK 状态下针叶中 $\beta$ -蒎烯的相对含量显著高于 MD、SD 和 RW。在 MD 状态下，针叶中 $\alpha$ -蒎烯的相对含量显著低于 CK、SD 和 RW； $\beta$ -榄香烯、 $\alpha$ -摩尔烯、 $\gamma$ -摩尔烯和 $\delta$ -杜松烯的相对含量均显著高于 CK、SD 和 RW；在 SD 状态下，针叶中石竹烯和葑草烯的相对含量均显著高于 CK。在 RW 状态下，针叶中石竹烯相对含量显著高于 CK 和 MD。在 MD 状态下，干旱敏感型家系的针叶中 $\alpha$ -蒎烯和 $\beta$ -蒎烯等单萜组分的相对含量急剧下降， $\beta$ -榄香烯、石竹烯、 $\alpha$ -摩尔烯、 $\gamma$ -摩尔烯和 $\delta$ -杜松烯等倍半萜组分的相对含量显著上升。持续干旱至 SD 状态时， $\alpha$ -蒎烯的相对含量开始上升， $\beta$ -蒎烯的相对含量持续下降，石竹烯和葑草烯的相对含量持续上升， $\beta$ -榄香烯、 $\alpha$ -摩尔烯、 $\gamma$ -摩尔烯和 $\delta$ -杜松烯的相对含量开始下降。结束干旱后复水至 RW 状态后，干旱敏感型马尾松家系主要针叶挥发物相对含量与 SD 状态下的差异不显著。



相同字母表示在 0.05 水平差异不显著，CK、MD、SD、RW 分别代表正常培育、轻度干旱、重度干旱、干旱复水，下同。  
The same letters indicate no significant differences at 0.05 level, CK, MD, SD, and RW stand for normal cultivation, mild drought, severe drought, and drought rewetting respectively, the same below.

图 2 干旱胁迫对干旱敏感型家系主要松针挥发物的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on main pine needle volatiles in drought sensitive families

### 2.2.2 干旱胁迫对抗旱型家系松针挥发物的影响

图 3 展示了不同干旱胁迫阶段抗旱型家系主要针叶挥发物相对含量大小的变化情况。在 CK 状态下，针叶中 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯的相对含量均显著高于 MD 和 SD， $\alpha$ -摩尔烯的相对含量显著高于 RW，石竹烯和葑草烯的相对含量均显著低于 MD、SD 和 RW， $\delta$ -杜松烯的相对含量显著低于 MD 和 SD。在 MD 状态下，抗旱型家系的针叶中 $\alpha$ -蒎烯和 $\beta$ -蒎烯等单萜组分的相对含量有所下降，石竹烯、葑草烯和 $\delta$ -杜松烯等倍半萜组分的相对含量有所上升。持续干旱至 SD 状态时，各主要针叶挥发物组分相对含量的变化均不大，与 MD 状态下差异均不显

著。结束干旱后复水至 RW 状态后，抗旱型马尾松家系针叶挥发物中 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯等单萜组分的相对含量有所上升，石竹烯、葎草烯、 $\alpha$ -摩尔烯和 $\delta$ -杜松烯等倍半萜组分的相对含量有所下降。

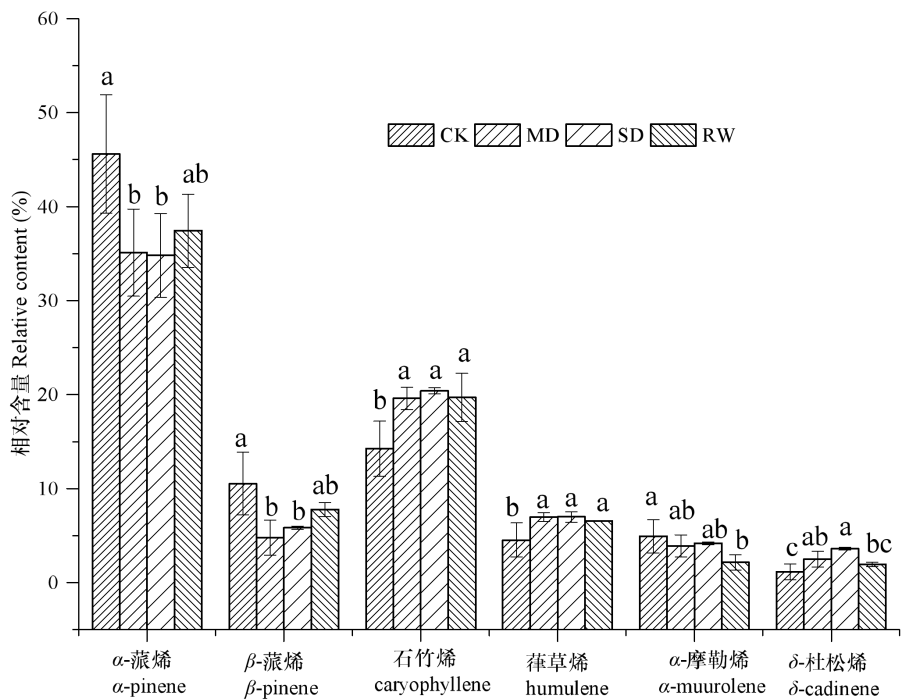


图 3 干旱胁迫对抗旱型家系主要松针挥发物的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on main pine needle volatiles in drought resistant families

### 2.2.3 干旱敏感型和抗旱型家系应对干旱胁迫时松针挥发物响应的差异

对比干旱敏感型和抗旱型马尾松家系幼苗在应对干旱胁迫时针叶挥发物变化的差异，不难发现，当受到干旱胁迫时，两类家系马尾松幼苗针叶挥发物组分基本不变，但是相对含量有较大变化，总体趋势为单萜组分的相对含量均下降，倍半萜组分的相对含量均上升。但是，干旱敏感型家系在 MD 状态下单萜组分显著下降，其中 $\alpha$ -蒎烯的相对含量由 CK 状态下的 39.671%下降至 16.855%， $\beta$ -蒎烯的相对含量由 CK 状态下的 14.383%下降至 5.048%。抗旱型家系在干旱胁迫初期单萜组分也有所下降，但是下降幅度较小，其中 $\alpha$ -蒎烯的相对含量由 CK 状态下的 45.598%下降至 35.111%， $\beta$ -蒎烯的相对含量由 CK 状态下的 10.518%下降至 4.776%。持续干旱至 SD 状态时，干旱敏感型家系针叶挥发物中单萜相对含量又显著上升，抗旱型家系针叶挥发物相对含量与 CK 状态下基本一致。干旱复水阶段抗旱型家系针叶挥发物组分有恢复至 CK 状态下的趋势。针叶中单萜组分（ $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯）在干旱胁迫下的响应程度是敏感型和抗旱型家系最显著的差别。

## 3 讨论与结论

针叶挥发物是马尾松的代谢产物，在马尾松在受到生物或非生物胁迫时发挥重要作用。黄霖等（2024）研究了马尾松幼苗不同部位的挥发物组成，在针叶挥发物中共发现了 24 种化合物，其中含量较高的化合物有 $\alpha$ -蒎烯（68.857%）、石竹烯（10.295%）、 $\beta$ -蒎烯（3.468%）等。全文选和丁贵杰（2017）的研究发现马尾松针叶挥发物中化合物共 13 种，其中相对含

量较高的化合物有 $\alpha$ -蒎烯(31.54%)、石竹烯(23.06%)和 $\alpha$ -水芹烯(14.35%)。在本研究中,共检测和鉴定了针叶挥发物 16 种,相对含量较高的化合物有 $\alpha$ -蒎烯、石竹烯和 $\beta$ -蒎烯。针叶挥发物的化合物种类丰富度和相对含量差异可能由材料来源和取样时间差异引起。马尾松针叶挥发物的主要由单萜和倍半萜组成,其中单萜的相对含量高于倍半萜,相对含量较高的单萜和倍半萜化合物分别为 $\alpha$ -蒎烯和石竹烯。Xie 等(2022)通过水蒸气蒸馏法提取了马尾松针叶的精油,发现马尾松精油中主要化合物与本研究针叶挥发物一致。

马尾松挥发物的释放会受到环境变化的影响,在不同条件下可以合成与释放不同组合的萜类挥发物。李玲玉等(2020)研究表明,在短期干旱实验中,马尾松针叶中单萜烯和倍半萜烯的排放水平提升,分别是未受胁迫时的 2.9 倍和 2.0 倍。全文选和丁贵杰(2017)的研究结果表明马尾松幼苗受到干旱胁迫后针叶挥发物变化的总体情况为单萜类化合物相对含量先下降后上升,倍半萜类化合物相对含量先上升后下降。本研究与上述研究结果基本一致。但是,本研究通过进一步对比不同耐旱型马尾松家系幼苗在对于干旱胁迫时响应情况,发现了两点主要区别:第一点为 MD 阶段的变化幅度,第二点为持续干旱过程的波动情况。具体表现为干旱敏感型家系在 MD 阶段单萜类化合物降幅大,且在持续干旱至 SD 阶段干旱敏感型家系单萜类化合物又迅速上升(波动大)。抗旱型马尾松家系在 MD 阶段单萜组分的相对含量下降幅度较小,持续干旱至 SD 阶段针叶挥发物各组成与 MD 阶段基本保持一致,且在干旱复水后单萜、倍半萜相对含量有恢复至未胁迫状态下的趋势。

基于干旱敏感型和耐旱型马尾松家系针叶挥发物组分的相对含量对于干旱胁迫的响应有着明显的差异这一特点,可将针叶挥发物组成变化纳为松树抗旱性评价指标,开展挥发物在胁迫过程中的变化情况的研究或将成为优质种质资源选择的新途径。针叶挥发物是马尾松次生代谢产物,它的合成、释放受到基因及环境等因素的调控。造成不同耐旱型马尾松家系响应干旱胁迫时挥发物化学组分相对含量差异的关键因素仍需进一步研究探讨。

马尾松幼苗在受到干旱胁迫时,针叶挥发物中单萜组分的相对含量会下降,倍半萜组分的相对含量会上升。干旱敏感型家系在 MD 状态下单萜组分急剧下降,持续干旱至 SD 过程中各组分相对含量变化显著;抗旱型家系在 MD 状态下单萜组分下降幅度小,且在持续干旱过程中各组分相对含量变化不明显。不同耐旱型马尾松家系在干旱胁迫下,针叶挥发物组分相对含量变化趋势有所差别,研究马尾松在非生物胁迫过程中针叶挥发物的变化情况可为抗性育种提供新的思路。

## 参考文献

- DEN XX, SHI Z, XIAO WF, et al., 2020. Effects of drought and shading on growth and photosynthetic characteristics of *Pinus massoniana* seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(8): 2735-2742. [邓秀秀, 施征, 肖文发, 等, 2020. 干旱和遮荫对马尾松幼苗生长和光合特性的影响 [J]. *生态学报*, 40(8): 2735-2742.]
- DU MF, DING GJ, ZHAO XZ, 2017. Responses to continuous drought stress and drought resistance of different masson pine families [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(6): 21-29. [杜明凤, 丁贵杰, 赵熙州, 2017. 不同家系马尾松对持续干旱的响应及抗旱性 [J]. *林业科学*, 53(6): 21-29.]
- GUO T, XIA XY, ZHANG N, et al., 2020. Analysis of aroma components and characteristics of different fermentation modes of blueberry

- wine by headspace solid phase microextraction gas mass spectrometry [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 40(10):150-159. [国田, 夏晓雨, 张娜, 等, 2020. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同发酵方式蓝莓酒的香气物质成分及特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 40(10): 150-159.]
- HAN WP, DING GJ, BAO B, 2012. Physiological and ecological responses of *Pinus massoniana* seedling from different provenances to drought stress [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 32(5): 25-29. [韩文萍, 丁贵杰, 鲍斌, 2012. 不同种源马尾松对于干旱胁迫的生理生态响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 32(5): 25-29.]
- HU SJ, ZHANG RM, 2022. Roles of volatile organic compounds in plant adaptation to stress and physiological ecology [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 39(6):1378-1387. [胡书婧, 张汝民, 2022. 挥发性有机化合物在植物适应胁迫及生理生态中的作用 [J]. 浙江农林大学学报, 39(6): 1378-1387.]
- HU XJ, YANG CX, TAN SC, et al., 2020. Effects of drought stress on proline and endogenous hormones content in *Pinus massoniana* seedlings from different provenances [J]. South China Forestry Science, 48(6): 24-28, 53. [胡晓健, 杨春霞, 谭世才, 等, 2020. 干旱胁迫对不同种源马尾松幼苗中脯氨酸及内源激素含量的影响 [J]. 南方林业科学, 48(6): 24-28, 53.]
- HU L, XIE JK, CHEN H, et al. 2025. Analysis of volatile compounds in different parts of *Pinus massoniana* seedling [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 1-18. [黄霖, 谢俊康, 陈虎, 等. 2025. 马尾松幼苗不同部位挥发性化合物组分分析 [J/OL]. 分子植物育种, 1-18.]
- LI LY, ALEX B. GUENTHER, GU DS, et al., 2020. Impact of short-term drought stress on volatile organic compounds emissions from *Pinus massoniana* [J]. China Environmental Science, 40(9): 3776-3780. [李玲玉, Alex B. Guenther, 顾达萨, 等, 2020. 短期干旱胁迫对马尾松排放挥发性有机物的影响 [J]. 中国环境科学, 40(9): 3776-3780.]
- LI M, ZHAO XZ, WANG HY, et al., 2022. Effects of drought stress and ectomycorrhizal fungi on the root morphology and exudates of *Pinus massoniana* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 58(7): 63-72. [李敏, 赵熙州, 王好运, 等, 2022. 干旱胁迫及外生菌根菌对马尾松幼苗根系形态及分泌物的影响 [J]. 林业科学, 58(7): 63-72.]
- LI YX, CHEN CM, LIN M, 2009. Analysis of regional drought in Guangxi [J]. Journal of Tropical Meteorology, 25(S1): 125-131. [李耀先, 陈翠敏, 林墨, 2009. 广西区域干旱的分析研究 [J]. 热带气象学报, 25(S1): 125-131.]
- LIU JB, TANG Q, RAO XH, 2010. Effects of drought stress on seedling growth of *Pinus massoniana* from different provenances [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 37(2): 40-42, 47 [刘建兵, 唐强, 饶晓辉, 2010. 干旱胁迫对不同种源马尾松苗木生长的影响 [J]. 湖南林业科技, 37(2): 40-42, 47]
- LIU F, XU GP, WU XB, et al., 2014. Effect of drought stress and re-watering on emissions of volatile organic compounds from *Rosmarinus officinalis* [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 31(2): 264-271. [刘芳, 许改平, 吴兴波, 等, 2014. 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 [J]. 浙江农林大学学报, 31(2): 264-271.]
- MO RH, DING GJ, LUO XY, et al., 2018. Response to sustained drought of seedlings of different families of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Forest and Environment, 38(4): 473-480. [莫荣海, 丁贵杰, 罗仙英, 等, 2018. 不同家系马尾松苗木对持续干旱的响应 [J]. 森林与环境学报, 38(4): 473-480.]
- QUAN WX, DING GJ, 2017. Dynamic of volatiles and endogenous hormones in *Pinus massoniana* needles under drought stress [J]. Scientia Silvae Sinicae, 53(4): 49-55. [全文选, 丁贵杰, 2017. 干旱胁迫下马尾松幼苗针叶挥发性物质与内源激素的变化 [J]. 林业科学, 53(4): 49-55.]
- TANG SS, TANG X, WU DS, et al., 2018. Drought resistance comparison of different *Pinus massoniana* family [J]. Journal of Forest and Environment, 38(2): 222-228. [唐生森, 唐鑫, 吴东山, 等, 2018. 不同马尾松家系抗旱性评价 [J]. 森林与环境学报, 38(2):

222-228.]

- WANG HY, WU F, WU CM, et al., 2018. Growth and physiological responses of seedlings with different leaf shapes to drought and re-watering in *Pinus massoniana* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 46(1): 1-6. [王好运, 吴峰, 吴昌明, 等, 2018. 马尾松不同叶型幼苗对干旱及复水的生长及生理响应 [J]. 东北林业大学学报, 46(1): 1-6.]
- WANG T, 2021. Evaluation on drought resistance of *Pinus massoniana* in the second-generation seed orchard and research on physiological and molecular mechanism in response to drought [D]. Guilin: Guangxi normal University: 17-46. [汪挺, 2021. 马尾松二代种子园家系抗旱性评价及响应干旱的生理与分子机制研究 [D]. 桂林: 广西师范大学: 17-46.]
- WANG T, TAN JH, LI P, et al., 2020. Selection of drought-tolerant *Pinus massoniana* families at the seedling stage from a second-generation seed orchard [J]. Journal of Forest and Environment, 40(6): 627-635. [汪挺, 谭健晖, 李鹏, 等, 2020. 二代种子园马尾松苗期耐旱型优良家系的筛选 [J]. 森林与环境学报, 40(6): 627-635.]
- WANG Y, TU GY, 2021. Effects of drought and rewatering on physiological properties of five species of *Pinus massoniana* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 41(4): 20-30, 46. [王艺, 涂桂英, 2021. 干旱复水对 5 种马尾松菌根化苗木生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 41(4): 20-30, 46.]
- WANG Y, YANG KL, 2022. Response of mycorrhizal *Pinus massoniana* seedling on growth morphology to drought and rewatering [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 35(8):1794-1801. [王艺, 杨凯来, 2022. 菌根化马尾松苗生长形态对干旱及复水响应 [J]. 西南农业学报, 35(8): 1794-1801.]
- WANG Y, ZHANG C, DING GJ, et al., 2019. Effect of water stress on physiology and photosynthesis properties of ectomycorrhizal *Pinus massoniana* seedlings [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 39(4): 1-8. [王艺, 张弛, 丁贵杰, 等, 2019. 干旱胁迫对马尾松菌根化苗木水分生理和光合特性的影响 [J]. 浙江林业科技, 39(4): 1-8.]
- XIE JK, CHEN H, TAN JH, et al., 2021. Effects of exogenous signal substances on the volatiles of pine needles in *Pinus massoniana* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 41(10): 29-36. [谢俊康, 陈虎, 谭健晖, 等, 2021. 外源信号物质对马尾松幼苗松针挥发物的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 41(10): 29-36.]
- XIE JK, YANG ZQ, FENG YH, et al., 2022. Optimization of extraction process of pine needle essential oil by response surface methodology and its chemical composition analysis [J]. Bioresources, 2022, 17(4): 5890-5904.
- YANG ZQ, 2015. Research Progress of High Rosin Genetic Improvement and Breeding Strategy of *Pinus massoniana* [J]. Guangxi Forestry Science, 44(4): 317-324. [杨章旗, 2015. 马尾松高产脂遗传改良研究进展及育种策略 [J]. 广西林业科学, 44(4): 317-324.]
- YANG ZQ, FENG YH, TAN J H, et al., 2018. Advanced generation breeding strategy of *Pinus massoniana* in Guangxi [J]. Guangxi Forestry Science, 47(3): 251-256. [杨章旗, 冯源恒, 谭健晖, 等, 2018. 广西马尾松高世代育种策略研究 [J]. 广西林业科学, 47(3): 251-256. ]
- ZHANG JF, CHEN PZ, SUN XB, et al., 2021. Effects on photosynthetic and resistant physiological characteristics of *Pinus massoniana* seedlings under drought stress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 37(1): 32-38. [张金凤, 陈佩珍, 孙晓波, 等, 2021. 干旱对马尾松幼苗光合作用及相关生理的影响 [J]. 中国农学通报, 37(1): 32-38.]
- ZHOU S, 2012. The Effect of abiotic stresses on volatile organic compounds and chlorophyll fluorescence in *Cinnamomum camphora* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University: 29-33. [周帅, 2012. 非生物胁迫对香樟挥发物及荧光特性的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学: 29-33.]
- ZOU CL, TAN H, ZHENG DB, et al., 2019. Identification and evaluation of drought tolerance of different maize varieties during

flowering stage in Guangxi [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 37(2): 136-143. [邹成林, 谭华, 郑德波, 等, 2019. 广西玉米品种开花期抗旱性鉴定与评价 [J]. 干旱地区农业研究, 37(2): 136-143.]