

DOI: 10.5846/stxb201807311631

童炳丽, 刘济明, 熊雪, 陈敬忠, 黄小龙, 李丽霞. 米槁-绿壳砂林药间作系统可行性分析. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Tong B L, Liu J M, Xiong X, Chen J Z, Huang X L, Li L X. Feasibility analysis of *Cinnamomum migao*-*Amomum villosum* forest-medicinal herb intercropping system. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

## 米槁-绿壳砂林药间作系统可行性分析

童炳丽, 刘济明\*, 熊雪, 陈敬忠, 黄小龙, 李丽霞

贵州大学林学院, 贵阳 550025

**摘要:** 为了充分利用米槁林下空间, 从化感效应的角度研究人工米槁林下土壤水浸提液对绿壳砂生长状况的影响, 探索米槁与绿壳砂建立间作经营系统的可能性。以绿壳砂为受体, 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液为供试液, 设置 6 个浓度 0、0.5、1、5、10、50 mg/mL 的水浸提液处理绿壳砂, 对绿壳砂种子萌发和幼苗生理生化指标进行测定, 以此探讨米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂生长的影响。结果表明: 米槁两种土壤水浸提液对绿壳砂种子的萌发大体上呈现低浓度促进高浓度抑制的浓度效应, 但随着浓度的变化, 差异不显著; 米槁林间土壤水浸提液对绿壳砂幼苗的总生物量及苗高都表现出显著的促进作用, 呈先增加后缓慢减小的趋势, 根际土壤水浸提液则在高浓度时表现出抑制作用。从化感效应综合指数看出, 2 种水浸提液对可溶性蛋白质含量、游离脯氨酸(Pro)含量、土壤脲酶(S-UE)活性表现为抑制作用, 其余都为促进作用, 且林间土壤的促进效果强于根际土壤。应用 GC-MS 从米槁根际土壤与林间土壤中分别鉴定出 18 种化合物, 虽含有酚酸和烷烃类等化感物质, 但在一定浓度范围内, 对绿壳砂种子萌发、幼苗生长没有明显的抑制作用, 且在米槁林土水浸提液处理下表现出更强的适应性。因此, 在米槁林下套种绿壳砂时采取幼苗移栽法, 构建米槁-绿壳砂林药间作经营体系具有一定可行性。

**关键词:** 米槁; 绿壳砂; 根际土壤; 林间土壤; 林药间作

## Feasibility analysis of *Cinnamomum migao*-*Amomum villosum* forest-medicinal herb intercropping system

TONG Bingli, LIU Jiming\*, XIONG Xue, CHEN Jingzhong, HUANG Xiaolong, LI Lixia

College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** To make full use of the space under the *Cinnamomum migao* forest, the effects of soil water extracts in an artificial *C. migao* forest on the growth of *Amomum villosum* were studied from the perspective of the allelopathic effect, and the possibility of establishing an intercropping system for *C. migao* and *A. villosum* was explored. *A. villosum* as the acceptor, and the rhizosphere and forest soil water extracts were used as the test solution, six water extracts at concentrations of 0, 0.5, 1, 5, 10, 50 mg/mL were used to treat *A. villosum*, and the germination of the *A. villosum* seeds, the growth of the seedlings, and the soil enzyme activities were studied. We also investigated the effects of *C. migao* soil rhizosphere soil and forest soilwater extract on the growth of *A. villosum*. The results showed that the germination of *A. villosum* extracts by the two soil water extracts of *C. migao* were inhibitory at high concentrations, but stimulatory under low concentrations, with no significant differences. Forest soil of *C. migao* water extract had a significant effect on the total biomass and seedling height of the *A. villosum* seedlings; it increased first and then slowly decreased. The rhizosphere soil water extract was inhibiting at high concentrations. Thus, based on the synthetic allelopathic index, the two aqueous extracts have inhibitory effects on soluble protein content, free proline (Pro) content, and soil urease (S-UE) activity, and the rest

基金项目: 贵州省林业科研课题(黔林科合[2010]重大 04 号); 贵州省科技计划(黔林科合[2015]3023-1 号)

收稿日期: 2018-07-31; 网络出版日期: 2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Karst0623@163.com

are promoting effects. The promoting effects of forest soil are stronger than the rhizosphere soil. The GC-MS was used to identify 18 compounds from the rhizosphere and forest soils of *C. migao*. However, it contained allelochemicals such as phenolic acids and alkanes, it had no obvious inhibitory effect on seed germination and seedling growth of *A. villosum* over a certain concentration range, and it showed stronger adaptability under the treatment of forest soil of *C. migao* water extracts. Therefore, it is possible to adopt the seedling transplanting method when planting *A. villosum* under the *C. migao* forest and constructing the forest-medicinal herb intercropping system of the *C. migao*-*A. villosum*.

**Key Words:** *Cinnamomum migao*; *Amomum villosum*; rhizosphere soil; forest soil; forest-medicinal herb intercropping

米槁(*Cinnamomum migao*)是贵州近年来重点发展的民族特色药材之一,为樟科(Lauraceae)樟属的常绿植物<sup>[1-2]</sup>,属多年生高大乔木,其干燥成熟的果实又名大果木姜子,主要分布于滇、黔、桂三省交界地,为贵州省十大苗药之一,主治胃痛腹痛、胸闷呕吐及风湿关节疼痛等<sup>[3]</sup>。近年来,米槁作为药用植物、香料等被大量使用,造成米槁资源的过度开发利用,野生资源日益匮乏。已有研究表明米槁种子、果皮与叶片中含有大量的萜类、酚酸类等具化感潜力的物质,且对某些林下植物生长有明显的抑制作用<sup>[4-6]</sup>,导致了一定程度的资源浪费。

本文选用的间作植物为绿壳砂(*Amomum villosum*),属姜科多年生常绿草本植物,名贵中药材,其果实、果皮及叶又具有行气调中、消食、温脾、健胃、安胎等功效<sup>[7]</sup>,具有较高药用价值。贵州南北盘江、红水河流域一带绿壳砂主要是作为香料专用型植物种植<sup>[8]</sup>,其生长发育期内需要一定蔽荫,喜高温多湿气候环境<sup>[9]</sup>。按其生物学、生态学特性在高大乔木之间间作绿壳砂,即可充分利用光能、热能、又可充分利用土地资源与空间,是进行林药间作的又一尝试。目前,米槁与绿壳砂间作及林内生态效益国内还尚未见报道。

林药间作种植模式不仅能提高林地土壤肥力、改善土壤理化结构、改善林内光照强度和促进植物的生长,而且还能有效地利用空间资源,提高单位面积的生态和经济效益<sup>[10-12]</sup>。如何选择间作植物是实现林药间作的重要因素<sup>[13]</sup>。然而,影响林药间作因素中,除间作物种需要在占据不同生态位实现对光温水肥气热充分利用外,物种间是否存在化感作用也是影响间作系统成功与否的关键因素。例如,潘丹等<sup>[14]</sup>发现核桃叶片水浸提液对黄芩的生长具有一定促进作用,适合于高密度间作套栽在核桃林下。经课题组调查发现,在罗甸地区自然条件下存在米槁-绿壳砂的自然群落,并且绿壳砂生长良好,说明米槁与绿壳砂复合种植存在可能性。若能合理利用人工米槁林下空间,不仅能提高土地利用效率,更能推进药用植物种植结构多元化。本试验主要从米槁土壤浸提液对受体植物绿壳砂的发芽率、渗透物质及抗氧化酶活性等几个方面的影响,以此探讨米槁土壤浸提液对绿壳砂种子萌发及幼苗生长的化感效应,为探索米槁野外生境及人工林下套种绿壳砂提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

绿壳砂种子和幼苗于2017年6月购买于云南省鹤庆县香砂仁育苗基地,幼苗苗龄3个月,米槁根际土壤(以下简称根土)和林间土壤(以下简称林土)采自贵州省罗甸县罗书乡6年生米槁人工林,以上物种均由贵州大学林学院刘济明教授鉴定。

### 1.2 土壤样品采集

沿所选植株树干根部挖取沟面,去除土壤表层的腐殖质,在距主干20—30 cm处,用内径10 cm的土钻分层挖取距地表0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm的根系土样,采集各层直径0.1—0.5 cm的细根,用抖落法获取其上粘附的土壤作为根际土壤。林间土壤采集于米槁林间未被枝叶遮蔽范围处挖取土壤剖面,用内径10 cm的土钻分层挖取距地表0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm的土壤。分别将3个不同点相应层次的根际土壤样和林间土壤分别充分混匀,去掉大石粒、须根及可见的土壤动物(如蚯蚓)等,装袋带回。将带回米槁根

土及林土自然风干后,分别等量充分混合待用。

### 1.3 供试液制备

取过 2 mm 筛的根土、林土各 50 g,蒸馏水按照料液比体积为 1:10 拌匀浸泡,常温下置于摇床振荡 24 h,分别用 10 层纱布过滤浸提液,4000 r/min 离心 20 min 后取上清液,即为 0.1 g/mL 母液。将母液进行以下 2 种配置:(1)将母液分别配制 0.5、1、5、10、50 mg/mL 浓度梯度 5 个,用蒸馏水作为对照(CK)用于生物检测,置于 4℃ 冰箱中备用。(2)另取母液用甲醇浸提液反复浸提 3 次,混合上清液,分别过 0.45 μm 孔径滤膜抽滤并旋转蒸发,并用乙酸乙酯洗脱,4℃ 保存,用于 GC-MS 成分分析。根土—甲醇浸提—乙酸乙酯洗脱相记为 RSME;林土—甲醇浸提—乙酸乙酯洗脱相记为 WSME。

### 1.4 实验设计

#### 1.4.1 种子萌发试验

采用培养皿滤纸法,培养皿置于高压灭菌锅中 120℃ 消毒,在培养皿中铺 2 层定量滤纸,每个培养皿选择 100 粒大小均匀一致的种子,分别加入 5 mL 不同浓度的供试液,浓度梯度配置是 0、0.5、1、5、10、50 mg/mL,每个处理 3 个重复,置于 25℃ 人工气候培养箱中,每天补充等量相应的各处理供试液保持培养皿湿润,从种子着床后第 14 d 统计绿壳砂种子发芽数,计算发芽率,发芽势。

#### 1.4.2 幼苗生长试验

育苗采用盆栽法并置于温室内,栽培土源于贵州大学林学院苗圃,经晒干、碾碎、消毒灭菌过筛后分别装入花盆中(25 cm×20 cm),于当年 6 月底将购买的苗龄 3 个月的绿壳砂幼苗挑选长势良好,且较为一致的幼苗移栽至花盆中,按照 1.4.1 中的 6 个浓度梯度处理绿壳砂幼苗,每个处理 6 次重复,每个重复 2 株幼苗。为保证幼苗正常生长存活,缓苗处理 1 个月后,挑选长势一致、无病害植株用于化感试验,此时苗龄为 4 个月。

#### 1.4.3 指标测定

发芽率、发芽势<sup>[15]</sup>:发芽率=发芽种子数/供试种子总数×100%;发芽势=发芽达到高峰值时发芽的种子数/供试种子总数×100%,并对数据进行化感效应指数(RI)计算<sup>[16]</sup>,当  $T \geq C$  时,  $RI = 1 - C/T$ ;当  $T < C$  时,  $RI = T/C - 1$ 。其中,  $C$  为对照,  $T$  为处理值,  $RI$  为化感效应指数,  $RI \geq 0$  为促进作用,  $RI < 0$  为抑制作用,绝对值大小与作用强度一致。

化感强度计算:参考张子龙和沈玉聪<sup>[17]</sup>的方法计算平均化感指数来比较各测定指标间的化感作用强弱。

$$MSIR = \frac{\sum_{i=1}^n ai}{n}$$

式中,  $R$  为平均敏感指数(M)的级别或层次,  $a$  为数据项,  $n$  为该级别或层次数据(RI)的总个数。当  $MSI > 0$  时为促进,当  $MSI < 0$  时为抑制,绝对值的大小与作用强度(敏感性)一致。

苗高:每个处理选取 3 株,利用卷尺和游标卡尺测量并记录其苗高。

生物量:实验结束后将不同浓度处理的 3 个重复冲洗干净,烘箱 105℃ 杀青 20 min,80℃ 烘干至恒重,用电子天平称量。

渗透物质:可溶性糖含量与可溶性淀粉含量采用蒽酮比色法;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法、游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮显色法。

抗氧化系统:丙二醛(MDA)含量采用 TBA 显色法测定;叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性用 NBT 光还原法测定<sup>[18]</sup>。

土壤酶指标:酸性磷酸酶(S-ACP)、多酚氧化酶(S-PPO)、脲酶(S-UE)、过氧化氢酶(S-CAT)采用试剂盒进行测定(北京索莱宝生物科学技术有限公司),方法与结果计算参照试剂公司方案。

化学成分鉴定及相似度比较:根土与林土洗脱相进样量均为 1 μL,不分流(HP6890/5975CGC/MS 联用仪)。毛细管柱为 AB-INOWAX(30 m×0.25 μm×0.25 mm),初始温度 45℃,保持 2 min 后升温至 240℃(以

5℃/min 匀速升温),保持 14 min,总共运行时间为 55 min。汽化室温度 250℃;载气为高纯 He(99.999%);柱前压 7.64 psi,载气流量

1.0 mL/min,溶剂延迟时间:5.0 min。质谱条件:离子源为 EI 源,离子源温度 230℃,四极杆温度 150℃,电子能量 70 eV,发射电流 34.6 μA,倍增器电压 1612 V,接口温度 280℃,质量范围 29—500 amu。对总离子流图中的各峰经质谱计算机数据系统检索及核对 Nist2005 和 Wiley275 标准质谱图,确定挥发性化学成分,用峰面积归一化法测定了各化学成分的相对质量分数。

借鉴 Jaccard 相似系数公式<sup>[19]</sup>,比较根土与林土化合物的相似度。

$$J = c / (a + b + c) \%$$

式中,a 为根土中特有组分数目,b 为林土中特有组分数目,c 为根土与林土中共有组分的数目(a,b 所代表组分归一化百分含量大于 1%,c 所代表两个共有组分中至少有一个的归一化百分含量大于 1%)。

#### 1.4.4 数据处理

采用 Microsoft Excel2010 和 SPSS20.0 统计软件进行分析,并采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验,Duncan's 新复极差法进行多重比较,分析不同处理间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 米槁根土与林土水浸提液对绿壳砂种子的生物活性测定

由表 1 可知,随着米槁根土和林土水浸提液浓度的升高,绿壳砂种子的发芽率呈现出先增加而后逐渐减小的变化趋势。当根土水浸提液浓度为 10 mg/mL 时,绿壳砂种子的发芽率达到最大值。虽然化感效应指数(RI)均<0,对种子的发芽率表现出一定的抑制作用,但在各米槁根土和林土水浸提液处理下的绿壳砂种子发芽率与 CK 间均无显著差异。发芽势随着各水提液浓度的增加未呈现明显变化规律。米槁根土水浸提液各浓度处理下,种子发芽势均低于 CK 处理,没有显著差异,化感效应指数(RI)均<0,表现出抑制作用。林土水浸提液各浓度处理下,经 1、10 和 50 mg/mL 3 个浓度处理后的种子发芽势大于等于 CK 处理,差异显著( $P < 0.05$ ),且化感效应指数(RI)均>0,表现出促进作用。

表 1 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂种子的生物活性测定

Table 1 Determination of bioactivity of *A. villosum* seeds from rhizosphere soil and forest soil of *C. migao* aqueous extract

|                  | 浓度/(mg/mL)<br>Concentration | 发芽率<br>Germination rate | RI    | 发芽势<br>Germination vigor | RI    |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|-------|--------------------------|-------|
| 根际土壤             | CK                          | 50.00aA                 | —     | 30.00aA                  | —     |
| Rhizosphere soil | 0.5                         | 41.11aA                 | -0.18 | 21.11aA                  | -0.3  |
|                  | 1                           | 38.89aA                 | -0.22 | 25.56aA                  | -0.15 |
|                  | 5                           | 45.56aA                 | -0.09 | 20.00aA                  | -0.33 |
|                  | 10                          | 46.67aA                 | -0.07 | 22.22aA                  | -0.26 |
|                  | 50                          | 38.89aA                 | -0.22 | 25.56aA                  | -0.15 |
| 林间土壤             | CK                          | 50.00aA                 | —     | 30.00abA                 | —     |
| Forest soil      | 0.5                         | 45.56aA                 | -0.09 | 25.56abA                 | -0.15 |
|                  | 1                           | 46.67aA                 | -0.07 | 34.44aA                  | 0.13  |
|                  | 5                           | 51.11aA                 | 0.02  | 26.67abA                 | -0.11 |
|                  | 10                          | 48.89aA                 | -0.02 | 30.00abA                 | 0     |
|                  | 50                          | 46.67aA                 | -0.07 | 34.44abA                 | 0.13  |

相同字母表示没有显著性差异,不同小写字母之间表示差异显著( $P < 0.05$ )

绿壳砂种子经根土水浸提液处理后,发芽率和发芽势的化感效应指数(RI)均为负值,且大多在-0.2—-0.5 范围。达最大值后,随着浓度的增加,抑制力越明显,可说明米槁根土水浸提液对绿壳砂种子萌发具有较强的抑制作用,且对降低种子发芽数和延迟种子发芽周期均有一定作用。绿壳砂种子经林土水浸提液处理

后,发芽率的化感效应指数(*RI*)虽大多为负值,但多接近 0,这一定程度上说明林土水浸提液对绿壳砂种子的发芽率没有明显化感抑制效应。林土水浸提液在 1 和 50 mg /mL 两个浓度对绿壳砂种子的发芽势表现出明显的促进作用。

2.2 米槁根土与林土水浸提液对绿壳砂幼苗生物量与苗高的影响

由表 2 可知,米槁根土和林土水浸提液处理下,绿壳砂的总生物量与苗高均随浸提液浓度升高呈现先增加后减小的趋势。米槁根土和林土水浸提液处理下,绿壳砂生物量高于对照组 CK,化感效应指数(*RI*)均>0,表现为促进作用,存在极显著差异( $P<0.01$ )。根土水浸提液处理下,低浓度 0.5—5 mg /mL 对绿壳砂幼苗的苗高有促进作用,差异显著( $P<0.05$ ),而高浓度处理 10—50 mg /mL 对苗高有抑制作用,但无显著差异。与对照组 CK 相比,5 个浓度林土水浸提液对苗高均存在差异显著( $P<0.05$ ),化感效应指数(*RI*)均>0,有促进作用,呈现先增加后减小的趋势,5 mg /mL 处理达到最大值 25.16 mg /mL。整体而言,绿壳砂的总生物量与苗高随着米槁根土与林土浸提液浓度的增加,大体呈现出低促高抑的现象。由此可推断,低浓度的土壤浸提液可促进植物生长。

表 2 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂幼苗生物量与形态的影响  
Table 2 Effect of *A. villosum* on biomass and seedling height from rhizosphere soil and forest soil of *C. migao* aqueous extract

|                          | 浓度<br>Concentration/( mg/mL) | 总生物量<br>Total biomass/g | RI    | 苗高<br>Seedling height/cm | RI    |
|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------|--------------------------|-------|
| 根际土壤<br>Rhizosphere soil | CK                           | 3.54±0.06cBC            | —     | 20.22±1.41bA             | —     |
|                          | 0.5                          | 4.09±0.19bAB            | 0.13  | 22.97±1.22abA            | 0.12  |
|                          | 1                            | 4.54±0.17aA             | 0.22  | 23.97±0.33aA             | 0.16  |
|                          | 5                            | 4.08±0.15bAB            | 0.13  | 21.97±0.83abA            | 0.08  |
|                          | 10                           | 3.87±0.34bcBC           | 0.08  | 19.77±2.87bA             | −0.02 |
|                          | 50                           | 3.52±0.25cC             | −0.01 | 19.52±3.10bA             | −0.03 |
| 林间土壤<br>Forest soil      | CK                           | 3.54±0.06cB             | —     | 20.22±1.41bA             | —     |
|                          | 0.5                          | 4.74±0.22abAB           | 0.25  | 23.28±2.04abA            | 0.13  |
|                          | 1                            | 4.81±0.98aA             | 0.26  | 22.58±1.74abA            | 0.1   |
|                          | 5                            | 4.66±0.21bcAB           | 0.24  | 25.16±1.68aA             | 0.2   |
|                          | 10                           | 3.78±0.64bcAB           | 0.06  | 23.72±2.89abA            | 0.15  |
|                          | 50                           | 3.65±0.97bcAB           | 0.03  | 22.66±2.99abA            | 0.11  |

绿壳砂仁为草本植物,地径和冠幅不纳入生长指标测定范围

2.3 根土和林土水浸提液对绿壳砂种子的发芽和幼苗生长响应的差异分析

为直观比较两种土壤水浸提液对绿壳砂的影响,故从形态生长上进行差异比较分析。从图 1 可知,林土水浸提液对绿壳砂种子的发芽率、发芽势、总生物量及苗高的作用效果比根土水浸提液更为显著,且在浓度 5 mg /mL 浸提液处理下效果最佳。由此可知,较根土而言,林土水浸提液对绿壳砂种子促进作用更显著或抑制作用更小。

2.4 米槁根土与林土水浸提液对绿壳砂幼苗渗透物质的影响

由表 3 可知,米槁根土水浸提液处理下,绿壳砂可溶性蛋白质含量最大值在根土 5 mg /mL 下为 1.99 mg/g · FW,除 50 mg /mL 处理外其他各个浓度处理均与对照组间存在显著差异( $P<0.05$ );绿壳砂可溶性糖含量各处理下均高于对照组,根土 5 mg /mL 处理下可溶性糖含量最高,达 3.59 mg/g · FW,且与对照组间具有显著差异( $P<0.05$ );绿壳砂游离脯氨酸含量均极显著低于对照组,根土 5 mg /mL 处理下为最大(61.28 μg/g · FW),此后随着浸提液浓度增大而减少。米槁林土水浸提液处理下,绿壳砂幼苗可溶性蛋白质含量随浓度升高而降低,林土 0.5 mg /mL 处理下略高于对照组,但无明显差异;绿壳砂幼苗可溶性糖含量均高于对照组,但彼此间数值较为接近,无显著差异;绿壳砂游离脯氨酸含量随林土水浸提液浓度升高,呈现先增加后减缓的趋势,各处理值均高于对照值,体现出一定累积现象,5—50 mg /mL 处理与对照组间存在极显著差异( $P<0.01$ )。

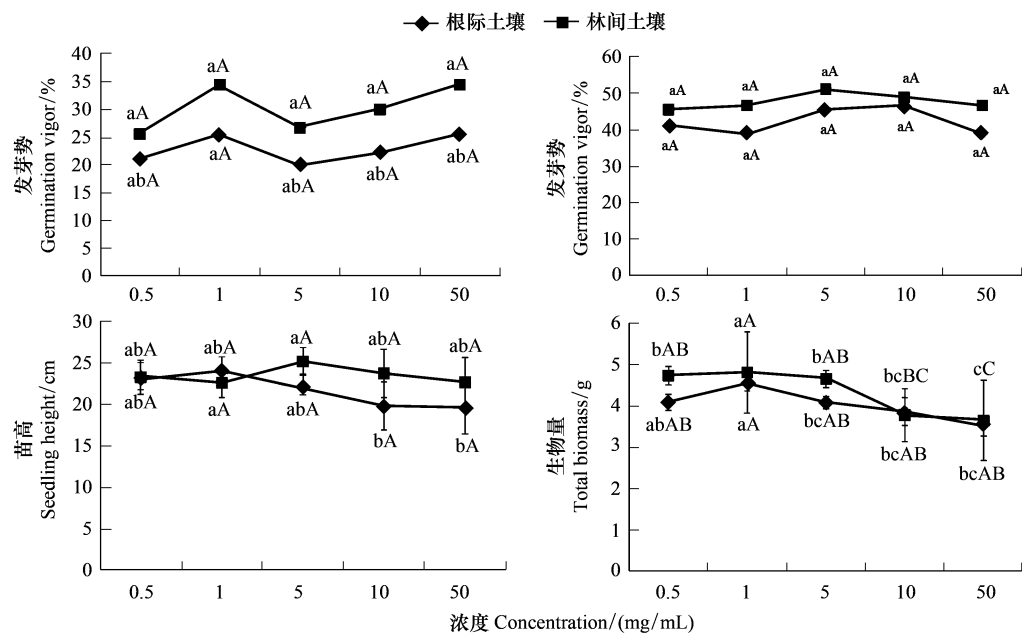


图1 根际土壤和林间土壤水浸提液对绿壳砂种子的发芽和幼苗生长响应的差异分析

Fig.1 Difference analysis of response of rhizosphere soil and forest soil of *C.migao* water extract to seed germination and seedling growth of *A.villosum*

相同字母表示没有显著性差异,不同小写字母之间表示差异显著( $P<0.05$ )

表3 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对砂仁幼苗渗透物质的影响

Table 3 Effect of osmotic substances on *A.villosum* seedlings from rhizosphere soil and forest soil of *C.migao* aqueous extract

|                  | 浓度<br>Concentration/<br>(g/mL) | 可溶性蛋白含量<br>Soluble protein content/<br>(mg/g FW) | 可溶性糖含量<br>Soluble sugar content/<br>(mg/g FW) | 游离脯氨酸含量<br>Free proline content/<br>(μg/g FW) |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 根际土壤             | CK                             | 1.42±0.07bB                                      | 2.18±0.36dC                                   | 87.78±0.57aA                                  |
| Rhizosphere soil | 0.5                            | 1.26±0.09cC                                      | 2.63±0.23bcBC                                 | 59.84±1.73bB                                  |
|                  | 1                              | 1.31±0.02cC                                      | 3.06±0.30bAB                                  | 60.56±0.51bB                                  |
|                  | 5                              | 1.99±0.06aA                                      | 3.59±0.07aA                                   | 61.28±0.89bB                                  |
|                  | 10                             | 1.91±0.08aA                                      | 2.31±0.25cdC                                  | 36.01±0.71cC                                  |
|                  | 50                             | 1.72±0.14aAB                                     | 2.73±0.07bcBC                                 | 18.94±0.67dD                                  |
| 林间土壤             | CK                             | 1.42±0.07aA                                      | 2.18±0.36aA                                   | 87.78±0.57cC                                  |
| Forest soil      | 0.5                            | 1.54±0.09aA                                      | 2.47±0.35aA                                   | 88.54±1.01cC                                  |
|                  | 1                              | 1.21±0.13abAB                                    | 2.25±0.09aA                                   | 89.05±1.68cC                                  |
|                  | 5                              | 1.12±0.20bcAB                                    | 2.28±0.11aA                                   | 114.89±3.09aA                                 |
|                  | 10                             | 0.95±0.06cB                                      | 2.25±0.61aA                                   | 105.96±0.85bB                                 |
|                  | 50                             | 0.97±0.12cB                                      | 2.40±0.83aA                                   | 104.27±2.28bB                                 |

2.5 米槁根土与林土水浸提液对砂仁幼苗MDA含量和SOD酶活性的影响

由图2可知,米槁根土和林土水浸提液处理下,绿壳砂幼苗MDA含量及SOD酶活性均呈先升高后降低趋势。根土水浸提液处理下,MDA含量在5mg/mL浓度下为最大值57.91(根土10mg/mL),与对照组间极显著相关,其余浓度与对照组差异不大;SOD酶活性除根土0.5mg/mL(289.73U/gFW)外,其余值均高于对照处理,酶活性最高达326.09U/gFW(根土5mg/mL),说明绿壳砂幼苗在根土水浸液处理下表现出一定的自我调节机制。林土水浸提液处理下,绿壳砂幼苗MDA含量除林土0.5mg/mL(42.29μmol/gFW)外,其余处理值均显著高于对照水平,林土5mg/mL(49.37μmol/gFW)处理下MDA含量最高;除0.5mg/mL外,各

浓度处理下绿壳砂 SOD 酶活性均显著高于对照水平,最大值为 311.71 U/gFW(林土 5 mg/mL);说明当 SOD 酶活性升高后,MDA 含量积累相应减少,很可能是超氧阴离子被清除后,细胞膜质膜透性开始恢复。

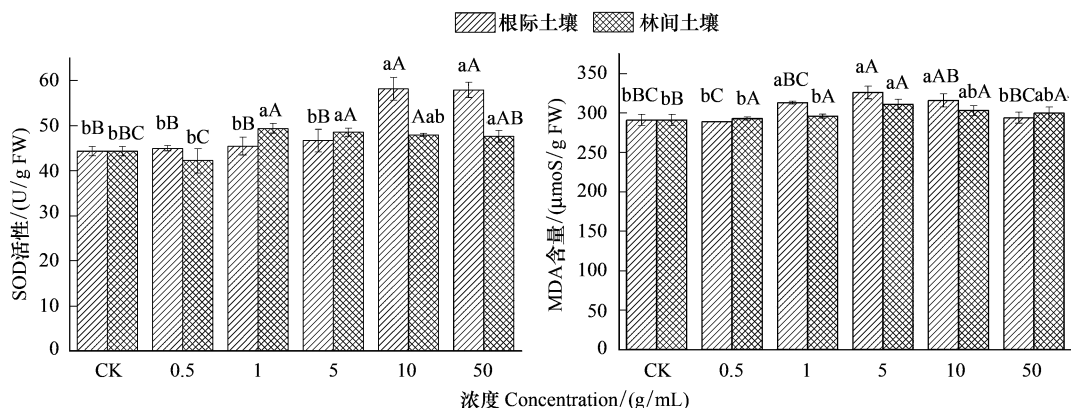


图2 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂幼苗 MDA 含量和 SOD 酶活性的影响

Fig.2 Effect of MDA content and SOD enzyme activity on *A. villosum* seedlings from rhizosphere soil and forest soil of *C. migao* aqueous extract

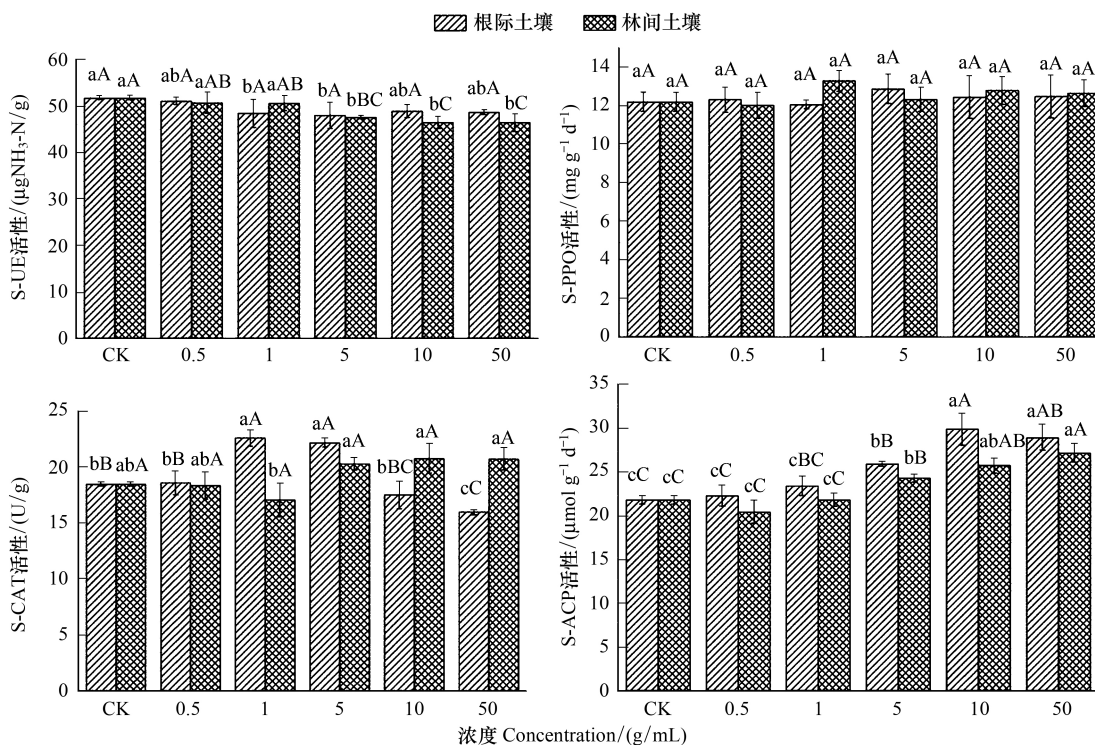


图3 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对砂仁幼苗土壤酶活性的影响

Fig.3 Effect of soil enzyme activity on *A. villosum* seedlings from rhizosphere soil and forest soil of *C. migao* aqueous extract

## 2.6 米槁根土与林土水浸提液对砂仁幼苗土壤酶活性的影响

由图3可知,米槁根土水浸提液处理下,绿壳砂 S-UE 活性体现出轻微的抑制效应,其无明显变化规律,且均略低于对照处理(51.77  $\mu\text{gNH}_4^{3-}\text{N/g}$ ),说明绿壳砂 S-UE 活性在根土水浸提液作用下变化不敏感,但受到一定抑制;绿壳砂 S-PPO 活性随浸提液浓度升高大体呈现逐渐增加的趋势,且所有处理间均无显著差异,说明根土水浸提液能使绿壳砂 S-PPO 活性增强,但作用力不大。而绿壳砂 S-CAT 活性对根土水浸提液具有低促

高抑的效应;绿壳砂 S-ACP 活性随根土水浸提液浓度的升高不断增强,且均高于对照水平  $21.81\text{ }\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,最大值为  $29.87\text{ }\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$  (根土  $10\text{ mg}/\text{mL}$ ),与对照差异极显著,说明根土水浸提液的施加促进了绿壳砂土壤中 S-ACP 的活力。米槁林土水浸提液作用下,绿壳砂 S-UE 活性变化趋势同根际土壤一致,对脲酶具有一定抑制作用,且总体作用强于根土;绿壳砂 S-PPO 活性变化不显著,最小值  $12.02\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$  (林土  $0.5\text{ mg}/\text{mL}$ )、最大值  $13.29\text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$  (林土  $1\text{ mg}/\text{mL}$ ) 均为低浓度处理,说明林土水浸提液能促进绿壳砂 S-PPO 活性增强; $0.5\text{--}1\text{ mg}/\text{mL}$  处理下绿壳砂 S-CAT 活性低于对照水平 ( $18.49\text{ U/g}$ ),但差异不显著,随着浓度升高 S-CAT 活性高于对照组;而绿壳砂 S-ACP 活性也表现出了同 S-CAT 类似的趋势,但随着浓度的增加, S-ACP 活性增长速度更快,说明米槁土壤水浸提液对绿壳砂 S-ACP 活性同样有高浓度促进的效应。

2.7 米槁根土与林土水浸提液对绿壳砂幼苗的化感作用

由表 4 可知,2 种水浸提液对绿壳砂幼苗的化感作用中,一、二、三级敏感指标大多为正值,少量为负值,总体表现为促进作用。由一级指标可知,除可溶性蛋白质、游离脯氨酸含量与土壤脲酶活性表现为抑制效应,其余指标均显示米槁土壤水浸提液对绿壳砂生长为促进作用,且林土水浸提液的促进作用更强。从二级指标可看出,2 种水浸提液对绿壳砂植物生理指标均有轻微抑制作用,但对绿壳砂形态生长及土壤酶活性均为促进作用。从三级指标可看出,土壤水浸提液均对绿壳砂生长表现为促进作用,林土水浸提液促进效果强于根土水浸提液。

表 4 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂幼苗的化感作用(1)

| Table 4 The allelopathy of <i>A.villosum</i> seedling from rhizosphere soil and forest soil of <i>C.migao</i> water extract(1) |                      |                                 |                                                   |                                            |                                                           |                                                  |                                                            |                                                          |                                                                         |                                                          |                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 一级敏感指数 First order sensitivity index( M1)                                                                                      |                      |                                 |                                                   |                                            |                                                           |                                                  |                                                            |                                                          |                                                                         |                                                          |                                                                                |
| 水浸提液<br>Water extract                                                                                                          | 生物量<br>Biomass/<br>g | 苗高<br>Seedling<br>height/<br>cm | 可溶性<br>蛋白质<br>Soluble<br>protein/<br>(mg/g<br>FW) | 可溶性糖<br>Soluble<br>sugars/<br>(mg/g<br>FW) | 游离脯氨酸<br>Free proline<br>/( $\mu\text{g}/\text{g}$<br>FW) | 丙二醛<br>MDA<br>/( $\mu\text{mol}/\text{g}$<br>FW) | SOD 活性<br>SOD<br>Activity<br>/( $\text{U}/\text{g}$<br>FW) | S-UE 活性<br>S-UE<br>Activity<br>/( $\text{ug}/\text{g}$ ) | S-PP 活性<br>S-PP<br>Activity<br>/( $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ) | S-CA 活性<br>S-CAT<br>Activity<br>/( $\text{U}/\text{g}$ ) | S-ACP 活性<br>S-ACP A<br>ctivity<br>/( $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ) |
| 根际土壤<br>Rhizosphere soil                                                                                                       | 0.11                 | 0.06                            | -0.10                                             | 0.22                                       | -0.46                                                     | 0.11                                             | 0.05                                                       | -0.05                                                    | 0.02                                                                    | 0.03                                                     | 0.07                                                                           |
| 林间土壤<br>Forest soil                                                                                                            | 0.17                 | 0.14                            | -0.19                                             | 0.06                                       | -0.12                                                     | 0.05                                             | 0.03                                                       | -0.07                                                    | 0.03                                                                    | 0.05                                                     | 0.08                                                                           |

2.8 米槁根际土壤与林间土壤化学成分鉴定结果

经质谱计算机数据系统检索及核对 Nist2005 和 Wiley275 标准质谱图,RSME 法所得化合物共计 18 种,所占总类百分比分别为 59.99%,相对含量超过 1%的有 14 种,含量最高的化合物为棕榈酸,达 13.05%;WSME 法所得化合物共计 18 种,所占总类百分比分别为 63.72%,相对含量超过 1%的有 13 种,含量最高的化合物为十五烷,达 13.42%。其中含量超过 1%的成分具体组成情况详见表 6,其中 1 个萜类(十二醛)、3 个酚酸类(油酸、硬脂酸、棕榈酸)、5 个烷烃类(十七(碳)烷、十五烷、正二十三烷、正十八烷、正十九烷)为根土和林土中共有成分(>1%)。为了更好比较米槁根土与林土中化学组分归一化百分含量大于 1%的组分的相似程度(J),本研究参考 Jaccard 相似系数公式,计算相似度。在甲醇浸提,乙酸乙酯洗脱下,两者相似系数为 58.82%,两种土壤化学组分种类差异不大,但物质含量上有差异。整体而言,根土含酚酸和萜类物质较多,但林土相对含量普遍高于根土。

3 讨论

本研究表明,米槁根土和林土水浸提液对绿壳砂种子的发芽和幼苗生长的影响存在差异,两种土壤浸提液均对绿壳砂种子萌发存在不同程度的抑制作用,但差异都不显著,其中林土水浸提液对绿壳砂的发芽率、生物量及苗高的抑制效果比根土水浸提液更弱,并且林土在一定浓度下比对照组更能促进绿壳砂的发芽势。种

子发芽效果的好坏直接决定植物个体更新、生存和群体数量<sup>[20-21]</sup>,生长和生物量为表征植物对胁迫适应性的重要指标<sup>[22-23]</sup>。因此,探究米槁根土和林土水浸提液对绿壳砂种子发芽效果、幼苗生长及生物量的影响是实现林药间作的关键一步。

表 5 米槁根际土壤与林间土壤水浸提液对绿壳砂幼苗的化感作用(2)

| 水浸提液<br>Water extract | 三级敏感指数<br>Tertiary sensitivity<br>index( M <sub>3</sub> ) | 二级敏感指数 Secondary sensitivity index( M <sub>2</sub> ) |                           |                        |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
|                       |                                                           | 形态指标                                                 | 植物生理指标                    | 土壤酶活性                  |
|                       |                                                           | Morphological index                                  | Plant physiological index | soil enzyme activities |
| 根际土壤 Rhizosphere soil | 0.02                                                      | 0.09                                                 | -0.04                     | 0.02                   |
| 林间土壤 Forest soil      | 0.05                                                      | 0.16                                                 | -0.03                     | 0.02                   |

表 6 米槁根际土壤与林间土壤不同萃取相化学组分(含量大于 1%)相似性比较

Table 6 Similarity comparison on chemical components ( content greater than 1% ) of different extraction phases in rhizosphere soil and forest soil of *C.migao*

| 物质成分<br>Material composition                                                                   | 相对含量 Relative content/ % |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|
|                                                                                                | RSME                     | WSME  |
| 十二醛 Dodecanal                                                                                  | 3.77                     | 5.62  |
| 十七(碳)烷 Heptadecane                                                                             | 3.46                     | 3.05  |
| 十五烷 Pentadecane                                                                                | 5.71                     | 13.42 |
| 硬脂酸 Stearic acid                                                                               | 4.79                     | 5.49  |
| 油酸 Oleic acid                                                                                  | 3.59                     | 1.13  |
| 正二十三烷 Tricosane                                                                                | 3.73                     | 3.08  |
| 正十八烷 Octadecane                                                                                | 4.29                     | 3.72  |
| 正十九烷 Nonadecane                                                                                | 3.78                     | 7.13  |
| 棕榈酸 Palmitic acid                                                                              | 13.05                    | 9.8   |
| 1,3-丁二醇 1,3-Butanediol                                                                         | 1.67                     | —     |
| 2,3-丁二醇 2,3-Butanediol                                                                         | 1.42                     | —     |
| 乙酰基-2-羟基-2-甲基-5-双环异丙基-[4.3.0]壬烷<br>7-Acetyl-2-hydroxy-2-methyl-5-sopropylbicyclo[4.3.0] nonane | 1.37                     | —     |
| 正二十一烷 Heneicosane                                                                              | 2.98                     | —     |
| 己内酰胺 Caprolactam                                                                               | 3.89                     | —     |
| 二十四烷 Tetracosane                                                                               | —                        | 1.69  |
| 十六烷 Hexadecane                                                                                 | —                        | 2.82  |
| 正二十二烷 Docosane                                                                                 | —                        | 1.9   |
| 棕榈酸甲酯 Methyl palmitate                                                                         | —                        | 1.83  |
| 相似性系数 Similarity Coefficient                                                                   | 58.82                    |       |

“—”表示未检测出该物质

植物体内渗透物质含量和抗氧化酶活性往往能较为直接地反映植物体受害程度<sup>[24-25]</sup>,无论是在外界环境胁迫下还是正常生长过程中,均能产生大量的活性氧,如果不能及时清除将会对植物细胞产生严重的毒害作用<sup>[26]</sup>。在米槁根土与林土水浸提液处理下渗透物质、抗氧化系统、土壤酶活性均发生了不同程度改变。随着米槁根土水浸提液浓度的升高,绿壳砂幼苗的可溶性蛋白和可溶性糖含量显著高于对照,游离脯氨酸含量则显著下降;但随着林土水浸提液浓度的上升,除可溶性蛋白含量有所降低,其余都呈上升趋势,差异不显著。说明绿壳砂幼苗在米槁根土水浸提液处理下,适应性较林土水浸提液强。绿壳砂幼苗能通过可溶性糖与游离脯氨酸参与体内渗透势的调节减轻对自身的伤害,这与杨延杰等的研究结论较为类似<sup>[27]</sup>。

因米槁根际与林间土壤中物质组成和含量的不同,可能导致两种水浸提液对绿壳砂幼苗的作用机制和作用趋势的差异。MDA 是生物膜系统脂质过氧化产物之一,因此其含量高低能直接指示细胞膜脂过氧化以及

植物受胁迫的程度<sup>[28]</sup>。随着米槁根土水浸提液浓度升高,绿壳砂幼苗 SOD 酶活性呈逐渐升高趋势,MDA 含量则相应降低;在林土水浸提液处理下,绿壳砂幼苗 MDA 含量及 SOD 酶活性均呈先升高后降低趋势。当低浓度的化感物质对植物产生较弱的胁迫作用,这反而会启动植物的应激机制从而增加抗氧化酶活性以消除多余的过氧化产物<sup>[29]</sup>;然而本研究中根土水浸提液在高浓度 10mg/mL 下,受体植物绿壳砂虽有较高的 SOD 酶活性,但其 MDA 含量仍显著高于对照处理。这可能是由于单纯提高 SOD 活性反而会导致其过量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 不能被进行进一步消耗而会对植物造成伤害<sup>[21]</sup>。

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶,可以作为评价土壤肥力水平的指标<sup>[30-31]</sup>。米槁根土和林土水浸提液对绿壳砂幼苗 S-UE 活性、S-PPO 活性、S-CAT 活性(除根际土壤)均呈现出低促高抑现象,与徐冬梅等<sup>[32]</sup>用外源酸对 S-UE 和 S-ACP 活性研究的变化规律一致。对 S-ACP 活性、S-CAT(除根际土壤)活性则表现为不断增加趋势,而余世金等<sup>[33]</sup>研究了茯苓栽培场的土壤酶变化,发现 4 种土壤酶活性均呈下降趋势。这与本研究的结论截然不同,原因可能是土壤酶活性与绿壳砂生长状况之间的紧密联系,米槁林下种植绿壳砂,在一定浓度范围内,土壤中的化感物质还未对绿壳砂植物体的生长造成明显抑制作用。化感综合效应指数(SE)是用来衡量化感作用类型及其强度的重要指标之一,被广泛应用于各类型的化感实验<sup>[34,16]</sup>。从化感综合效应指数分析的结果看,米槁根土和林土水浸提液对绿壳砂幼苗的生理指标表现为轻微抑制作用,但对其他指标的作用趋势总体是促进作用,并且在林土水浸提液处理下对绿壳砂的促进效果更好。

本试验应用 GC-MS 对米槁化学成分鉴定后发现米槁根土和林土中含量超过 1%的化学组分相似度较高,林土成分所占种类百分比普遍高于根土,并且含酚酸和烷烃类物质较多,证明米槁根土及林土中均含有一定的化感物质。植物在生长发育过程中不断与根土溶液进行着物质与能量的交换,通过各种途径(如地上部分淋溶、根系分泌、植物残体分解等)进入根际区的源于植物自身的化学物质,直接影响着根际区土壤中微生物的群落结构,最终对植物自身的生长发育产生影响<sup>[35]</sup>。从上述的分析中发现,米槁林土水浸提液对绿壳砂种子促进作用更显著或抑制作用更小,推测较林土相比,根土更容易累积化感物质,而林土则因为通过根系分泌物以及残根腐烂等方式进入环境中的化感物质浓度较低,在一定程度上可以促进林下物种的生长发育,并且综合两种水浸提液对绿壳砂生长响应的差异和化学成分分析可知,在实际经营中应在米槁林叶遮蔽范围外的空闲区种植绿壳砂植株。

综上所述,本研究表明米槁根土和林土中含有一定的化感物质,但米槁根土水浸提液和林土水浸提液在一定浓度范围内,对受体植物绿壳砂种子萌发、幼苗生长没有明显的抑制作用。米槁根土水浸提液对绿壳砂种子萌发和幼苗生长具有更明显的潜在促进效应,在一定程度上提高了绿壳砂的抗逆性和适应性。因此,在米槁林下套种绿壳砂时应在米槁林叶遮蔽范围外的空闲区间进行幼苗移栽,在合理的经营管理模式下,实现米槁—绿壳砂林药间作经营模式是可行的。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈丽, 马琳, 朱海燕, 杨小生. 大果木姜子的化学成分. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(15): 108-110.
- [2] 张小波, 周涛, 郭兰萍, 黄璐琦, 江维克, 杨占南, 马超一. 苗药大果木姜子挥发油成分变化及其地理分布. 生态学报, 2011, 31(18): 5299-5306.
- [3] 邱德文, 李鸿玉, 赵山, 刘宁, 刘正仁. 米槁的本草学研究. 中国医药学报, 1993, 8(2): 19-20, 26-26.
- [4] 李天祥, 王静康. 超临界 CO<sub>2</sub> 萃取大果木姜子精油的研究. 中药材, 2003, 26(3): 178-180.
- [5] 周涛, 杨占南, 江维克, 艾强, 郭培果. 民族药大果木姜子果实挥发油成分的变异及其规律. 中国中药杂志, 2010, 35(7): 852-856.
- [6] 池馨, 刘济明, 欧国腾, 文爱华, 廖晓峰. 大果木姜子浸提液对艾纳香幼苗的化感作用研究. 广东农业科学, 2014, 41(17): 21-24.
- [7] 郭本森, 陈耀武, 汪婉芳. 绿壳砂仁和阳春砂仁开花结实生物学特性的初步研究. 植物分类与资源学报, 1980, 2(4): 459-467.
- [8] 张亦诚, 雷朝云, 卢加举, 敖茂宏, 雷石富, 陈古强. 香料砂仁的生物学特性及栽培技术. 中国野生植物资源, 2013, 32(3): 67-69.
- [9] 周再知, 郑海水, 杨曾奖, 尹光天. 橡胶与砂仁间作小气候特点初探. 生态学杂志, 1994, 13(1): 27-31.
- [10] 张燕, 樱井美希, 杨光, 武田修己, 陈美兰, 朱寿东, 王凌, 郭兰萍. 不同小生境对苍术生长和 4 种挥发油的影响. 中国中药杂志, 2015,

- 40(21): 4142-4148.
- [11] Dai C C, Chen Y, Wang X X, Li P D. Effects of intercropping of peanut with the medicinal plant *Atractylodes lancea* on soil microecology and peanut yield in subtropical China. *Agroforestry Systems*, 2013, 87(2): 417-426.
- [12] 黄璐琦, 郭兰萍. 中药资源生态学. 上海: 上海科学技术出版社, 2009.
- [13] 史艳财, 李承卓, 邹蓉, 陈宗游, 骆文华, 柴胜丰. 中药材间作种植模式研究进展. *北方园艺*, 2012, (16): 180-183.
- [14] 潘丹. 核桃化感作用对黄芩种子萌发和幼苗生长的影响研究. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [15] Moshatati A, Gharineh M H. Effect of grain weight on germination and seed vigor of wheat. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, 4(8): 458-460.
- [16] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181-187.
- [17] 张子龙, 侯俊玲, 王文全, 张志信, 张仕秀. 三七水浸液对不同玉米品种的化感作用. *中国中药杂志*, 2014, 39(4): 594-600.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 张晓琳, 付英姿, 褚培肖. 杰卡德相似系数在推荐系统中的应用. *计算机技术与发展*, 2015, 25(4): 158-161, 165-165.
- [20] 申时才, 徐高峰, 张付斗, 金桂梅, 刘树芳, 杨艳鲜, 张玉华. 红薯叶片浸提液对 5 种主要农田杂草种子萌发及幼苗生长的化感作用. *生态学报*, 2017, 37(6): 1931-1938.
- [21] 曾凯, 刘琳, 蔡义民, 孙飞达, 陈有军, 陈冬明. 高寒沙化草地中先锋灌木根系水浸提液对 4 种高原牧草的化感效应分析. *西北植物学报*, 2017, 37(7): 1312-1322.
- [22] Lu H Y, Liu J Z, Kerr P G, Shao H B, Wu Y H. The effect of periphyton on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa*) in paddy area. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 74-80.
- [23] 孙洪刚, 刘军, 董汝湘, 姜景民, 刁松峰, 李彦杰. 水分胁迫对毛红椿幼苗生长和生物量分配的影响. *林业科学研究*, 2014, 27(3): 381-387.
- [24] Milone M T, Sgherri C, Clijsters H, Navari-Izzo F. Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50(3): 265-276.
- [25] 王芳, 常盼盼, 陈永平, 彭云玲, 方永丰, 王汉宁. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响. *草业学报*, 2013, 22(2): 178-186.
- [26] 马旭俊, 朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展. *遗传*, 2003, 25(2): 225-231.
- [27] 杨延杰, 王晓伟, 赵康, 陈宁, 林多. 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6074-6080.
- [28] 姚侠妹, 纪敬, 岳剑云, 谢田田, 邓楠, 史胜青, 江泽平, 常二梅. ABA 对盐胁迫下侧柏活性氧代谢及其相关基因表达的研究. *西北植物学报*, 2017, 37(1): 105-114.
- [29] Ding J, Sun Y, Xiao C L, Shi K, Zhou Y H, Yu J Q. Physiological basis of different allelopathic reactions of cucumber and figleaf gourd plants to cinnamic acid. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(13): 3765-3773.
- [30] 刘俊第, 林威, 王玉哲, 姜婧, 方熊, 易志刚. 火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响. *生态学报*, 2017, 38(15): 5374-5382.
- [31] Duke S O. Weeding with allelochemicals and allelopathy—a commentary. *Pest Management Science*, 2007, 63(4): 307-307.
- [32] 徐冬梅, 刘广深, 许中坚, 刘维屏. 模拟酸雨组成对棉花根际土壤水解酶活性的影响. *土壤通报*, 2003, 34(3): 216-218.
- [33] 余世金, 孙慧群, 王萍, 吴唤玲. 茯苓栽培场土壤微生物区系与酶活性变化初探. *安徽农业科学*, 2009, 37(16): 7585-7588.
- [34] 缪丽华, 王媛, 高岩, 季梦成. 再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用. *生态学报*, 2012, 32(14): 4488-4495.
- [35] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 陈保冬, 朱永官, 曾燕, 付桂芳, 付梅红. 苍术根茎及根际土水提物生物活性研究及化感物质的鉴定. *生态学报*, 2006, 26(2): 528-535.