

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201412008

冯剑, 刘强, 王瑾, 等. 干旱胁迫和化感作用对榄仁树幼苗生长、光合作用及生理生化的影响 [J]. 广西植物, 2016, 36(8):969-979
FENG J, LIU Q, WANG J, et al. Effects of drought stress and allelopathy on growth, photosynthesis and physio-biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings [J]. *Guihaia*, 2016, 36(8):969-979

干旱胁迫和化感作用对榄仁树幼苗生长、 光合作用及生理生化的影响

冯 剑^{1,2}, 刘 强^{1*}, 王 瑾¹, 阮长林¹, 罗忻武¹, 张晓楠¹

(1. 热带动植物生态学省部共建教育部重点实验室, 海南师范大学 生命科学学院, 海口 571158;
2. 中国医学科学院 & 北京协和医学院 药用植物研究所海南分所, 海口 571103)

摘 要: 该研究通过榄仁树幼苗的盆栽实验, 用称重控水法设置 3 个水平的土壤水分含量 (分别占田间持水量的 75%~80%、50%~55%、30%~35%) 和 2 个浓度水平的木麻黄凋落物浸提液, 研究不同土壤干旱程度及不同浓度木麻黄凋落物浸提液对榄仁树生长、光合作用及生理生化的影响。结果表明: 随着幼苗生长期的延长, 土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗存活率和株高增长有一定影响。60 d 胁迫后显著减小了幼苗叶片数、叶面积、叶片含水量及叶片的生物量。15~60 d 期间幼苗的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (C_{cond})、蒸腾速率 (T_r) 均显著减小, 而幼苗叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 呈先减后增的变化。幼苗的水分利用率 (WUE) 和气孔限制值 (L_s) 显著增加, 是导致光合作用降低的主要原因。干旱和木麻黄凋落物浸提液能显著增加榄仁树幼苗的叶片和根的细胞膜透性、Peroxidase (POD) 活性及叶片 Superoxide dismutase (SOD) 活性。二元方差分析表明, 土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树的生长、光合作用及生理生化的影响有明显的交互作用且表现出一定的拮抗作用。该研究结果可为构建混交林型海防林提供参考。

关键词: 干旱胁迫, 化感作用, 榄仁树幼苗, 光合作用, 生理生化特征

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)08-0969-11

Effects of drought stress and allelopathy on growth, photosynthesis and physio-biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings

FENG Jian^{1,2}, LIU Qiang^{1*}, WANG Jin¹, RUAN Chang-Lin¹,
LUO Xin-Wu¹, ZHANG Xiao-Nan¹

(1. Key Laboratory for Tropical Animal and Plant Ecology of State Education Ministry, College of Life Sciences, Hainan Normal University, Haikou 571158, China; 2. Hainan Branch Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Science & Peking Union Medical College, Haikou 570311, China)

Abstract: We conducted a pot experiment with *Terminalia catappa* seedlings to study the impacts of drought and allelopathy on growth, photosynthesis and physio-biochemical characteristics of seedlings. In this case, we set three levels of soil moisture content (water supply range of 75%–80%, 50%–55% and 30%–35% water-holding capacity) controlled by weighing the pots with soil and seedlings and two concentration levels of leachates of *Casuarina equisetifolia* litter. The

收稿日期: 2014-12-05 修回日期: 2015-03-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAC18B04) [Supported by National Key Technology R & D Program of China (2012BAC18B04)].

作者简介: 冯剑 (1990-), 男, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究, (E-mail) jianfenghn@126.com.

*通讯作者: 刘强, 教授, 博士生导师, 主要从事恢复生态学、生物地球化学和生态系统功能动态研究, (E-mail) hnsylq@163.com.

results showed that drought stress and litter leachates affected the survival rate and the height growth of *Terminalia catappa* with the seedlings growing. It significantly reduced numbers, areas, water content and biomass of leaves after 60 d dual stresses. It also significantly reduced the net photosynthesis (P_n), stomatal conductance (C_{cond}) and transpiration rate (T_r), but inter-cellular CO_2 concentration (C_i) decreased early and increased later. The water use efficiency (WUE) of the seedlings and the stomatal limitation value significantly increased, which might be the main reason to cause the decline of photosynthesis of seedlings. The dual stresses also increased the cell membrane penetrability and the activity of peroxidase (POD) in roots and leaves, as well as the activity of superoxide dismutase (SOD) in leaves. Analysis of variance indicated that there was interaction, which was antagonistic to certain extent, between the drought stress and allelopathy of *Casuarina* litter leachates on the growth, photosynthesis and physio-biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings. In short, this study will provide a reference for construction of mixed forest as windbreak.

Key words: drought stress, allelopathy, *Terminalia catappa* seedlings, photosynthesis, physio-biochemical characteristics

干旱是影响植物生长和发育的主要环境因子之一 (Ceccarelli et al, 2007)。土壤水分含量偏离植物所需水分适宜范围将会影响植物生长状况、形态结构与生理生态过程 (Wang et al, 2009; Kjellgren et al, 2009)。海岛地区与内陆地区相比, 造林立地条件较为恶劣, 沿海地区常年海风和光照强度大, 能加速土壤水分的蒸发等客观因素决定了海岛造林难度要远远大于内陆地区 (陈闻等, 2013)。目前, 我国海南岛沿海防护林树种主要以纯木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*) 海防林为主, 由于木麻黄枯枝落叶等凋落物分解或雨水淋溶释放出的化感物质影响自身和其它植物的生长, 老化后造成大面积的林窗, 严重造成土壤水分含量的不均衡分布 (林武星, 2009)。

当将海南岛乡土树种榄仁树 (*Terminalia catappa*) 引入木麻黄海防林以形成混交林型海防林, 榄仁树幼苗需要克服两大困难: 一是木麻黄的化感作用对苗木的影响。冯剑等 (2014) 的研究表明, 木麻黄根、木麻黄凋落物及林下表层土壤的水浸提液都能降低榄仁树幼苗的存活率, 影响幼苗株高、叶和根生物量; 3 种浸提液均显著降低处理 15~45 d 期间幼苗的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (C_{cond})、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r), 且显著增加幼苗水分利用率 (WUE); 第 60 天时 3 种木麻黄浸提液能显著增加幼苗叶片、根的 Pro 含量, 使得幼苗根系组织细胞膜通透性增加, 而木麻黄根浸提液能显著增加幼苗叶 SOD、根 CAT 含量, 同时凋落物浸提液会显著降低幼苗根 POD 含量。二是水分的缺失影响苗木的生长。由于海岸带沙土保水不易, 混交种植在木麻黄林下的榄仁树幼苗根系尚不发达, 还没能伸展到沙土深层的湿润处, 容易遭遇干旱胁迫。因此, 本研究以盆栽榄仁树幼苗为材料, 旨在探讨土

壤干旱及木麻黄凋落物化感作用双重胁迫的共同作用对榄仁树幼苗生长、光合作用及生理生化的影响, 为沿海防护林混交造林提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

所用榄仁树种子采自海南省琼海市潭门港石碗村海岸带 (19°14'24.20" N, 110°36'56.00" E)。木麻黄凋落物、海岸沙土 (基质) 采自海口市桂林洋滨海木麻黄海防林地 (20°00'01" N, 110°31'18" E), 并将其在室内阴干, 过筛去杂。以木麻黄凋落物: 蒸馏水 (1 kg : 4 L) 的比例浸泡 24 h, 过滤得到浓度为 250 g · L⁻¹ 的浓缩液, 保存于 4 °C 冰箱。土壤基本理化性质: 田间持水量为 19.48%, pH4.8, 全氮为 0.393 g · kg⁻¹, 全磷为 0.119 g · kg⁻¹, 全钾为 4.786 g · kg⁻¹, 总盐为 0.659 g。

1.2 方法

选取饱满的榄仁树种子在沙质基质中萌发至子叶完全展开, 且出现 1~2 片真叶 (约 40 d), 期间水分供应充足, 待用。

2014 年 7 月 2 日至 10 月 1 日期间在室内进行试验, 挑选生长一致健壮的榄仁树幼苗 162 株分别转移至装有 0.8 kg 沙土的塑料杯中 (60 mm × 80 mm × 150 mm), 胁迫开始前 30 d, 浇灌充足水分, 确保苗木生长同步, 8 月 1 日开始进行控水。采用二因素完全随机区组设计, 设置正常控水 (C)、中度干旱 (M)、严重干旱 (S) 3 个水分处理 (土壤沙土含水量分别占田间持水量的 75%~80%、50%~55% 及 30%~35%) 和浇灌浓度为 125 和 62.5 g · L⁻¹ 的两种木麻黄凋落物浸提液 (L1 和 L2), 以正常控水浇灌

蒸馏水为对照组(NC)。共设 7 个处理组,每处理 6 株幼苗,重复 3 次,共计 126 株。利用称重法控制各处理的土壤含水量,隔天 18:00 称重,根据所测耗水量补充水分到欲控水平,胁迫处理时间为 60 d。

1.3 测定方法

1.3.1 幼苗存活率测定 在实验过程中时刻记录榄仁树幼苗的存活数,并计算存活率。

1.3.2 生长指标测定 干旱期间每隔 15 d 测定幼苗的株高、基茎、叶片数、叶含水量、叶面积,用 LI-3000C 叶面积仪测定,胁迫结束后收集幼苗,测定根、茎、叶的鲜重、干重。

1.3.3 生理生化指标测定 ①光合作用相关指标:每隔 15 d 各处理随机选择 4 株植株,每株 3 片叶子(成熟度相似),用美国 Gene 公司生产的 Li-6400XT 光合仪于上午 9:00–11:00 测定光合作用,光合有效辐射(PAR)设置为 $1\ 000\ \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 CO_2 浓度为 $400\ \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,流速为 $500\ \text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 。②膜系统伤害指标:采用相对电导率法测定。③抗氧化系统的保护酶活性:SOD 酶活性用 NBT 法,CAT 酶活性用紫外吸收法,POD 酶活性用愈创木酚法。其中②、③每个处理随机选择 3 株根、叶,重复 3 次测定(李合生等,2000)。

1.4 数据处理

利用 Excel 和 SPSS17.0 软件对所得数据进行描述性统计、显著性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗成活率的影响

图 1 为土壤干旱与木麻黄凋落物浸提液各处理组合榄仁树幼苗 60 d 后存活率,严重干旱和高浓度木麻黄凋落物浸提液 SL1 组显著小于对照组,比对照组降低了 16.7%,而严重干旱和低浓度凋落物浸提液 SL2 组、中度干旱和高浓度凋落物浸提液 ML1 组及正常控水和高浓度凋落物浸提液 NL1 组存活率分别降低了 11.1%、5.6%、11.1%。说明土壤干旱与木麻黄凋落物浸提液对幼苗存活率有一定影响,且土壤水分含量越低,浸提液浓度越大,影响程度就越强烈。研究中发现第 15 天时幼苗出现死亡。这说明干旱和木麻黄凋落物浸提液能伤害处理初期的幼苗,且干旱程度越大,伤害越明显。

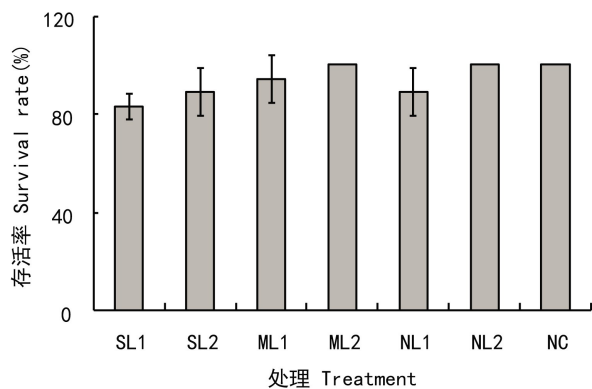


图 1 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树存活率的影响 SL1, SL2. 严重干旱下浇灌 $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (高浓度)和 $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (低浓度)木麻黄凋落物浸提液; ML1, ML2. 中度干旱下浇灌 $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 木麻黄凋落物浸提液; NL1, NL2. 正常控水下浇灌 $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 木麻黄凋落物浸提液; NC. 对照组。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母则差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Fig. 1 Effects of drought and *Casuarina equisetifolia* litter leachates on the survival rate of *Terminalia catappa* seedlings SL1, SL2. Irrigated concentration of $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ of *Casuarina equisetifolia* litter leachates at severe drought; ML1, ML2. Irrigated concentration of $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ of *C. equisetifolia* litter leachates at moderate drought; NL1, NL2. Irrigated concentration of $125\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $62.5\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ of *C. equisetifolia* litter leachates at normal control; NC. Control. Different letters mean significant differences ($P < 0.05$), same letters mean insignificant differences ($P > 0.05$). The same below.

2.2 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗生长特征的影响

2.2.1 榄仁树幼苗基径、株高增长的变化 从表 1 看出,随着幼苗生长期的延长,各处理组幼苗株高、基茎均逐渐增加,4 个时段内幼苗的株高有显著变化,而幼苗基茎在后 2 个时段变化显著。第 15 天、第 45 天时严重干旱和木麻黄浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和木麻黄浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水和高浓度浸提液 NL1 组的幼苗株高均显著小于对照组(NC),且 ML2 组幼苗株高显著大于 NL1 组,可能是凋落物浸提液浓度或是浇灌量引起的。第 30 天严重干旱低浓度浸提液 SL2 组、中度干旱木麻黄浸提液 ML1 和 ML2 组幼苗株高均显著小于正常控水低浓度浸提液 NL2 组和对照组。到第 60 天时严重干旱和木麻黄浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和木麻黄浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水低浓度浸提液 NL2 组的幼苗株高均显著小于正常

表 1 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗株高、基茎增长的影响

Table 1 Effects of drought and *C. equisetifolia* litter leachates on the plant height and basal diameter growth of *T. catappa* seedlings

处理 Treatment		15 d	30 d	45 d	60 d
株高 (mm) Plant height	SL1	148.1 ± 24.7bc	157.1 ± 28.6ab	161.8 ± 29.0c	171.7 ± 34.3b
	SL2	148.8 ± 27.6bc	154.8 ± 26.6b	159.5 ± 27.1c	166.5 ± 36.5b
	ML1	148.2 ± 26.2bc	153.1 ± 26.3b	161.9 ± 24.9c	171.6 ± 24.8b
	ML2	138.3 ± 21.5c	145.8 ± 23.7b	153.9 ± 24.4c	165.3 ± 27.5b
	NL1	164.9 ± 24.7ab	173.4 ± 27.4a	185.8 ± 28.4ab	200.0 ± 33.2a
	NL2	148.9 ± 20.1bc	156.9 ± 20.8ab	167.6 ± 21.6b	176.6 ± 21.9b
	NC	167.8 ± 28.2a	172.2 ± 26.6a	183.3 ± 28.0a	197.1 ± 27.1a
	基茎 (mm) Basal diameter	SL1	3.09 ± 0.40a	3.26 ± 0.43a	3.30 ± 0.47ab
SL2		3.14 ± 0.31a	3.31 ± 0.31a	3.38 ± 0.32ab	3.42 ± 0.34ab
ML1		3.52 ± 0.64a	3.64 ± 0.64a	3.70 ± 0.64ab	3.74 ± 0.63ab
ML2		3.38 ± 0.46a	3.67 ± 0.43a	3.73 ± 0.43a	3.80 ± 0.41a
NL1		3.37 ± 0.37a	3.44 ± 0.36a	3.54 ± 0.37ab	3.70 ± 0.32ab
NL2		3.22 ± 0.42a	3.26 ± 0.39a	3.27 ± 0.31b	3.31 ± 0.32b
NC		3.28 ± 0.72a	3.42 ± 0.79a	3.53 ± 0.82ab	3.73 ± 0.78ab

表 2 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗叶片特征的影响

Table 2 Effects of drought and *C. equisetifolia* litter leachates on the leaf characteristics of *T. catappa* seedlings

处理 Treatment	叶片数 Leaf number	叶面积 Leaf area (cm ²)	叶长度 Leaf length (mm)	最大宽度 Max width (mm)	叶片含水量 Leaf water content (%)
SL1	5.53 ± 1.50b	15.7 ± 5.5b	9.6 ± 3.4abc	2.9 ± 0.4c	0.88 ± 0.01b
SL2	5.60 ± 1.35b	16.7 ± 7.7b	9.5 ± 3.7bc	2.9 ± 0.7c	0.90 ± 0.02b
ML1	5.44 ± 1.36b	13.3 ± 5.8b	7.1 ± 2.8d	2.9 ± 0.6c	0.90 ± 0.03b
ML2	5.94 ± 0.85b	19.2 ± 11.5ab	9.9 ± 3.9abc	3.1 ± 0.6bc	0.90 ± 0.03b
NL1	7.31 ± 0.79ab	25.9 ± 7.5a	11.6 ± 4.5a	4.1 ± 0.8a	0.90 ± 0.01b
NL2	6.19 ± 0.98b	23.1 ± 14.5ab	11.1 ± 4.5ab	3.5 ± 0.9b	0.89 ± 0.01b
NC	7.43 ± 1.87a	20.0 ± 5.8ab	7.8 ± 2.7cd	3.4 ± 0.6b	0.93 ± 0.01a

控水高浓度浸提液 NL1 组和对照组。而基茎随干旱程度增加,各处理组呈“减增减”的变化,第 45 天、第 60 天变化为中度干旱低浓度浸提液 ML2 组显著大于 NL2 组,其它处理组无显著变化($P>0.05$),基茎的这种变化可能更有利于幼苗适应环境。这说明随着榄仁树幼苗生长期的延长,土壤干旱与木麻黄凋落物浸提液会显著影响幼苗的株高增长。

2.2.2 榄仁树幼苗叶片特征及其生物量的变化 从表 2 看出,60 d 胁迫后各处理组间幼苗叶片数、叶面

积、叶最大宽度及叶片含水量有显著差异。严重干旱和木麻黄浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和木麻黄浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水和木麻黄浸提液的 NL1 和 NL2 组榄仁树幼苗叶片数、叶片含水量显著小于对照组。幼苗叶面积、叶片长度、叶最大宽度以正常控水条件下最大,与对照组比分别增加了 18.4%、31.3%、10.5%,这可能是浇灌了凋落物后表层土壤粘性增大,能有效降低土壤水分的蒸发。正常控水高浓度浸提液 NL1 组幼苗的叶面积和叶

表 3 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗生物量的影响

Table 3 Effects of drought and *C. equisetifolia* litter leachates on the biomass of *T. catappa* seedlings

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight (g)			干重 Dry weight (g)		
	根 Root	茎 Stalk	叶 Leaf	根 Root	茎 Stalk	叶 Leaf
SL1	0.32 ± 0.10b	0.95 ± 0.20a	0.59 ± 0.35c	0.06 ± 0.02a	0.17 ± 0.06a	0.12 ± 0.08b
SL2	0.35 ± 0.11b	1.19 ± 0.40a	0.91 ± 0.48abc	0.09 ± 0.05a	0.24 ± 0.14a	0.20 ± 0.11ab
ML1	0.45 ± 0.17ab	1.04 ± 0.12a	0.75 ± 0.47bc	0.09 ± 0.05a	0.20 ± 0.04a	0.16 ± 0.11ab
ML2	0.58 ± 0.25ab	0.99 ± 0.50a	1.21 ± 0.92abc	0.11 ± 0.08a	0.27 ± 0.14a	0.28 ± 0.15ab
NL1	0.70 ± 0.43ab	1.32 ± 0.53a	1.62 ± 0.72a	0.07 ± 0.02a	0.24 ± 0.04a	0.31 ± 0.14a
NL2	0.62 ± 0.37ab	1.22 ± 0.27a	1.10 ± 0.31ab	0.05 ± 0.02a	0.20 ± 0.06a	0.20 ± 0.07ab
NC	0.77 ± 0.38a	1.36 ± 0.28a	1.48 ± 0.60ab	0.10 ± 0.04a	0.27 ± 0.11a	0.30 ± 0.13a

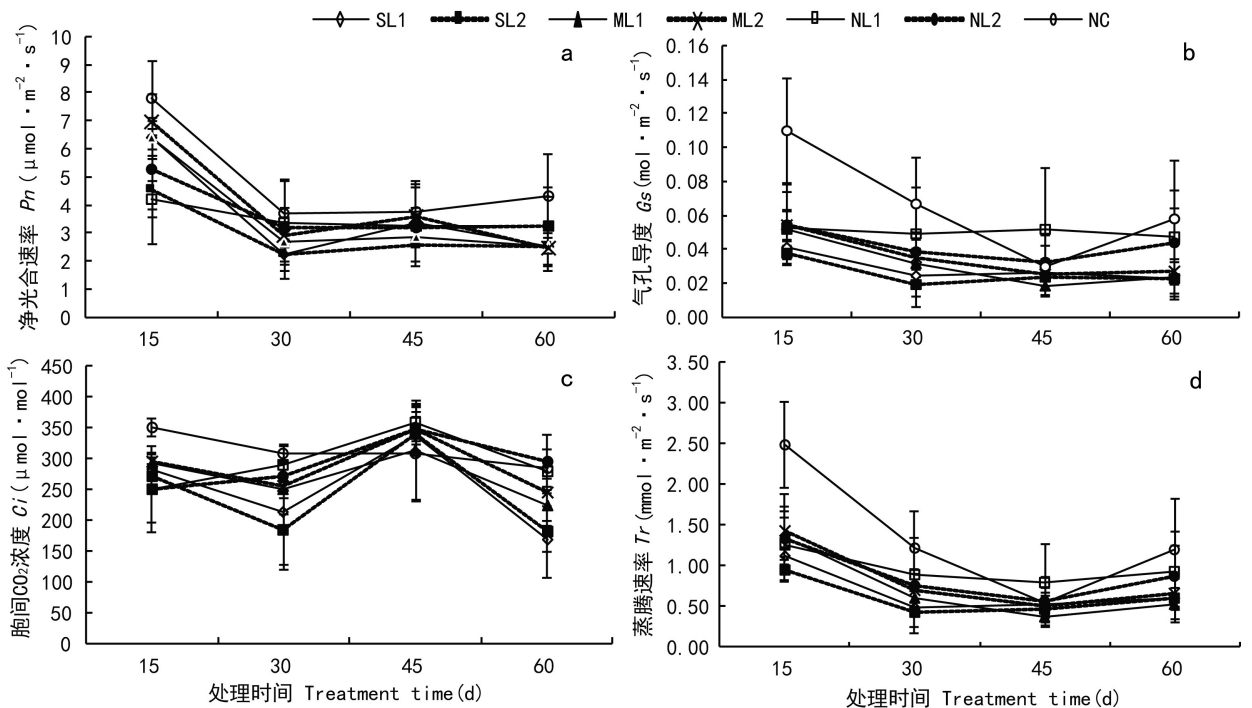


图 2 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树光合参数的影响

Fig. 2 Effects of drought and *Casuarina equisetifolia* litter leachates on the photosynthetic parameters of *Terminalia catappa* seedlings

最大宽度显著大于严重、中度干旱和木麻黄浸提液的 SL1、SL2、ML1 和 ML2 组, 而正常控水高浓度浸提液 NL1 组幼苗的叶片长度显著大于中度干旱高浓度浸提液 ML1 组和对照组, 这可能是因为幼苗的叶片数、叶面积、长度和最大宽度的减小有效地降低了水分的蒸发。

表 3 显示, 严重土壤干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组幼苗根鲜重显著小于对照组, 而榄仁

树幼苗叶片鲜重和干重表现为严重土壤干旱高浓度凋落物浸提液 SL1 组显著小于正常控水下高浓度浸提液 NL1 组和对照组, 随着土壤干旱程度的加大叶生物量呈减小趋势。

2.3 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗生理生化的影响

2.3.1 榄仁树幼苗叶片光合特性的变化 图 2:a 为榄仁树幼苗在干旱与木麻黄凋落物浸提液影响下

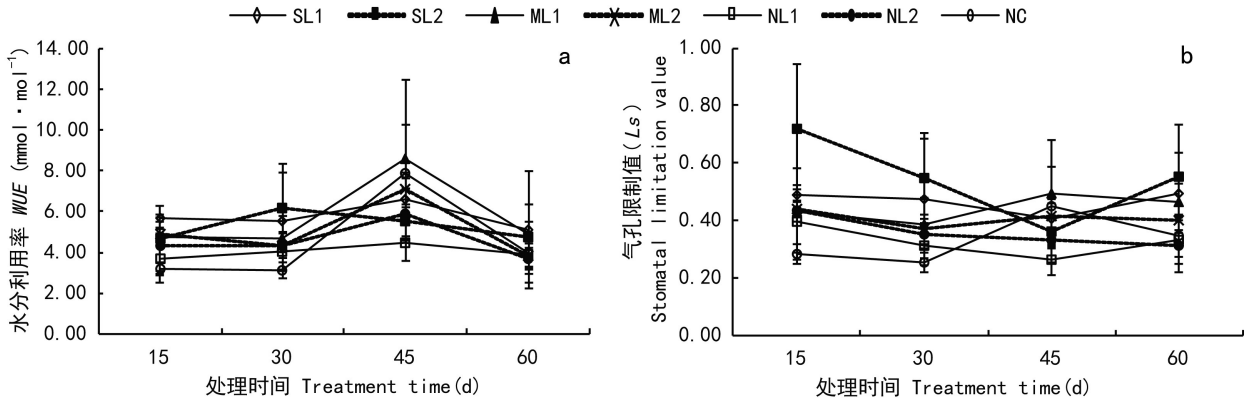


图3 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树水分利用率 (WUE) 和气孔限制值 (L_s) 的影响

Fig. 3 Effects of drought and *Casuarina equisetifolia* litter leachates on the WUE and L_s of *Terminalia catappa* seedlings

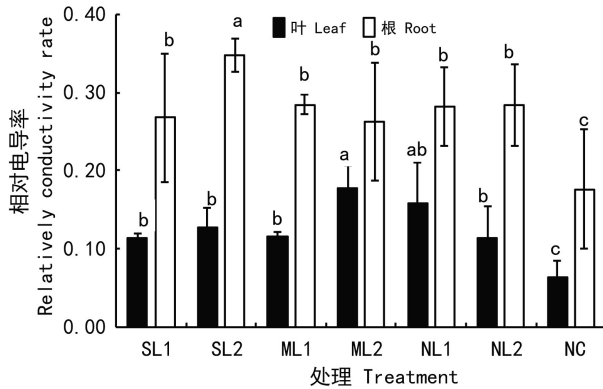


图4 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗细胞膜透性的影响

Fig. 4 Effects of drought and *Casuarina equisetifolia* litter leachates on the permeability of cell membrane of *Terminalia catappa* seedlings

60 d 的净光合速率 (P_n) 变化, 随生长期延长各处理组幼苗的 P_n 逐渐减小, 且实验组均小于对照组。第 15 天严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组、正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组及中度干旱高浓度浸提液 ML1 组的 P_n 均显著小于对照组, 各实验组间也存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中严重干旱高浓度浸提液 SL1 组及中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组显著大于严重干旱低浓度浸提液 SL2 组及正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组。第 30 天严重干旱与凋落物浸提液的 SL1 和 SL2、中度干旱与凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组的 P_n 显著小于对照组, 实验组间也有显著差异 ($P <$

0.05), 其中严重干旱与凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组 P_n 显著小于正常控水与凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组及中度干旱与凋落物浸提液的 ML2 组。到第 45 天后各组间的 P_n 差异减小, 严重干旱和低浓度凋落物浸提液 SL2 组和中度干旱和高浓度浸提液 ML1 组显著小于中度干旱和高浓度浸提液 ML2 组和对照组, 且 SL1 组 P_n 显著小于 SL2 组。而到 60 d 时实验组 P_n 均显著小于对照组。冯剑等 (2014) 研究 60 d 内木麻黄浸提液榄仁树幼苗 P_n 的影响呈倒“V”变化, 与本文研究的 P_n 变化趋势有所差别, 可能是因为处理条件不同, 双重胁迫引起变化较为显著。土壤干旱与木麻黄凋落物浸提液影响对榄仁树幼苗气孔导度 (C_{cond}) 的变化如图 2; b 所示, 第 15 天各实验组幼苗 C_{cond} 显著小于对照组, 随着干旱程度加大变化越显著。实验组间幼苗 C_{cond} 也有显著差异 ($P < 0.05$), 表现严重干旱低浓度凋落物浸提液 SL2 组显著小于中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组、正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组。第 30 天时严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水和低浓度浸提液 NL2 组显著小于对照组, 且其它实验组间有显著差异 ($P < 0.05$)。第 45 天时中度干旱和低浓度凋落物浸提液 ML1 组显著小于对照组, 而实验组间幼苗的 C_{cond} 差异显著 ($P < 0.05$), 到第 60 天时严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组及中度干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组幼苗 C_{cond} 显著小于正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组和对照组。这表明土壤干旱及木麻黄凋落物浸提液处理幼苗可以降低幼苗 C_{cond} 。

表 4 土壤水分和木麻黄凋落物浸提液浓度及其交互作用对榄仁树幼苗各项参数影响的二元方差分析
Table 4 Various parameter with soil moisture and concentration of *C. equisetifolia* litter leachates as well as the interactions of the two by two-way ANOVA

参数 Parameter	土壤水分 Soil moisture		木麻黄凋落物浸提液浓度 <i>C. equisetifolia</i> litter leachates		交互作用 Interaction	
	F	P	F	P	F	P
株高 Plant height	13.333	* *	11.256	* *	2.810	ns
基茎 Basal diameter	16.626	* *	1.762	ns	3.031	*
叶片数 Leaf number	8.161	* *	0.496	ns	3.447	*
叶面积 Leaf area	13.719	* *	0.781	ns	2.735	ns
最大叶宽 Max width	24.203	* *	1.608	ns	24.203	* *
叶片电导率 Leaf conductivity rate	1.572	ns	1.004	ns	15.253	* *
根电导率 Root conductivity rate	4.671	*	1.551	ns	3.682	*
净光合速率 P_n	8.814	* *	0.116	ns	8.654	* *
气孔导度 C_{cond}	32.702	* *	0.001	ns	5.093	* *
胞间 CO_2 浓度 C_i	34.371	* *	34.469	* *	5.445	* *
蒸腾速率 T_r	21.387	* *	0.088	ns	3.661	*
水分利用率 WUE	38.230	* *	0.961	ns	7.377	* *
气孔限制值 L_s	122.074	* *	9.172	* *	13.263	* *

注: ns 表示差异不显著 ($P>0.05$); * 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平显著。

Note: ns means insignificant differences at $P>0.05$; * means significant differences at $P<0.05$; ** means significant differences at $P<0.01$.

榄仁树幼苗叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 随生长期的变化如图 2:c 所示, 干旱与木麻黄凋落物浸提液处理幼苗叶片 C_i 呈降—增—降的趋势。第 15 天实验组幼苗 C_i 显著小于对照组, 且实验组间幼苗 C_i 也有显著差异 ($P<0.05$), 主要为中度干旱和浸提液的 ML1 和 ML2 组显著大于正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组。第 30 天严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水和低浓度凋落物浸提液 NL2 组 C_i 显著小于对照组。但到第 45 天时实验组幼苗叶片 C_i 增大, 且高于对照组, 正常控水和高浓度凋落物浸提液 NL1 组显著小于对照组, 而其它组间无显著差异 ($P>0.05$)。第 60 天严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度土壤干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组幼苗 C_i 显著小于正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组及对照组。

幼苗叶片 T_r 变化与 C_{cond} 变化类似如图 2:d, 第 15 天、第 30 天实验组幼苗叶片 T_r 显著小于对照组, 且实验组间也有显著差异 ($P<0.05$) 表现为严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组 T_r 显著小于

正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组及中度干旱和低浓度凋落物浸提液 NL2 组, 第 15 天实验组与对照组无显著差异 ($P>0.05$), 但到第 60 天时严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组及中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组幼苗 T_r 显著小于对照组, 且严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组 T_r 显著小于正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组。结果表明土壤干旱及木麻黄凋落物浸提液处理幼苗可以降低幼苗 T_r 。

2.3.2 榄仁树幼苗叶片水分利用率 (WUE) 和气孔限制值 (L_s) 的变化 本研究的 WUE 和 L_s , 分别采用 P_n/T_r 、 $1-C_i/C_a$ 求的。土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗 WUE 的影响如图 3:a 所示, 幼苗 WUE 在第 15~30 天期间维持在 $3.1\sim 6.18\text{ mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的范围内, 经统计分析, 实验组幼苗 WUE 显著大于对照组, 且实验组间也存在显著差异 ($P<0.05$), 到第 45 天幼苗 WUE 整体增大, 各处理组表现为正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组及严重干旱和低浓度凋落物浸提液 NL2 组 WUE 显著小于中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组和

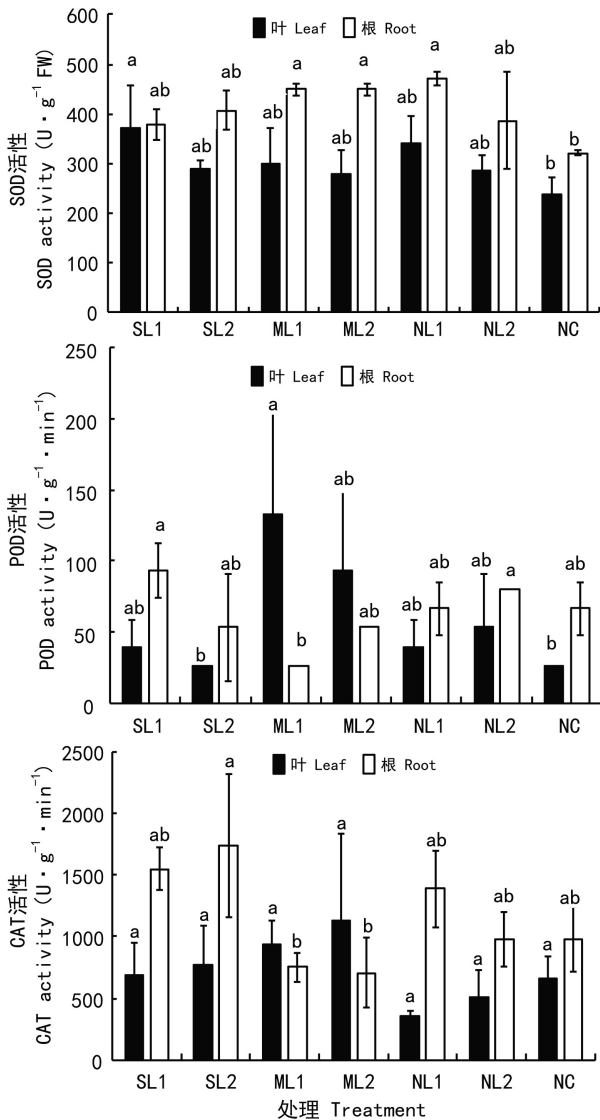


图5 干旱和木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗 SOD、POD 及 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of drought and *C. equisetifolia* litter leachates on activity of SOD, POD and CAT of *T. catappa* seedlings

对照组。第60天时严重土壤干旱 L1、L2 浸提液组及中度干旱 L1 浸提液组幼苗 *WUE* 显著大于对照组。幼苗 *WUE* 出现这样变化的可能原因是在土壤干旱程度及木麻黄凋落物化感物质的影响下幼苗生长过程需要调整生理方面的变化,以便适应生存环境。这表明土壤干旱及木麻黄凋落物浸提液能提高幼苗的水分利用率,处理前期(15~30 d)幼苗更为明显。

Ls 的变换如图 3:b,第15天、第30天时实验组幼苗叶片光合作用的气孔限制值均大于对照组,随

着干旱程度加剧和木麻黄凋落物浸提液影响,其值越大,且实验组间也存在显著差异($P < 0.05$)。第45天时 *Ls* 的异常变化,主要为严重干旱和低浓度凋落物浸提液 NL2 组、正常控水和凋落物浸提液的 NL1 和 NL2 组的 *Ls* 显著小于对照组,其它实验组与对照组无显著差异($P > 0.05$),可能是外界环境 CO_2 浓度恒定各处理组土壤水分和浸提液导致幼苗叶片胞间 CO_2 浓度急剧增大所致,或者是叶肉细胞羧化能力降低造成。而到第60天时,幼苗的 *Ls* 变化与前两个时间段相似,严重干旱和凋落物浸提液的 SL1 和 SL2 组、中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组显著大于对照组。这表明土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液会增加气孔限制值 *Ls*,可以确定的是光合作用降低是由于气孔限制引起,并非是对光能利用率降低所致,与前期研究一致。

2.3.3 榄仁树幼苗细胞膜透性的变化 图4显示,土壤干旱和浇灌木麻黄凋落物浸提液对榄仁树幼苗的叶片和根的细胞膜透性有一定影响。两种因素共同作用60 d后,实验组幼苗叶片和根的电导率均显著大于对照组,其中叶片的相对电导率以中度干旱和低浓度凋落物浸提液 ML2 组最高,比对照组提高了66.7%,且与其它实验组 SL1、SL2、ML1 及 NL2 有显著差异($P < 0.05$)。而严重干旱和低浓度凋落物浸提液 SL2 组幼苗根的电导率最高,比对照组提高了48.6%,与其它实验组也存在显著差异($P < 0.05$)。不同处理组间幼苗的叶片、根的电导率有所差异,整体上实验组根的电导率大于叶片,可能是根系直接参与细胞膜内外离子的运输,对周围的环境更为敏感。

2.3.4 榄仁树幼苗 SOD、POD 及 CAT 酶活性变化

图5显示,严重干旱和高浓度凋落物浸提液的 SL1 组幼苗叶片 SOD 酶显著大于对照组,比对照组增大了44.1%,其它实验均呈增大趋势。而中度干旱和凋落物浸提液的 ML1 和 ML2 组及正常控水和高浓度凋落物浸提液 NL1 组幼苗根 SOD 显著大于对照组,分别比对照组增大了31.6%、40%、40%,且其它组也呈增大趋势。榄仁树幼苗叶片 POD 活性表现为中度干旱和高浓度凋落物浸提液 ML1 组显著大于严重干旱和低浓度凋落物浸提液 SL2 组和对照组,比对照组增大了80%。实验组幼苗根 POD、CAT 及叶片 CAT 与对照组无显著差异($P > 0.05$),但幼苗根 POD 和 CAT 实验组间有显著差异($P < 0.05$)。这与冯剑等(2014)研究木麻黄浸提液对榄仁树幼苗

表 5 土壤水分和木麻黄凋落物浸提液浓度的叠加效应的比较分析

Table 5 Comparative analysis of additive effects of soil moisture and concentration of *C. equisetifolia* litter leachates

参数 Parameter	SL1	SONL1	<i>P</i>	SL2	SONL2	<i>P</i>	ML1	MONL1	<i>P</i>	ML2	MONL2	<i>P</i>
电导率 Conductivity rate	0.19	0.45	**	0.23	0.43	**	0.20	0.41	**	0.22	0.38	**
SOD 酶活性 SOD activity	374.5	761.3	**	347.4	691.0	**	374.4	757.6	**	364.9	687.3	*
POD 酶活性 POD activity	66.7	120.0	ns	40.0	133.3	**	80.0	140.0	ns	73.3	153.3	**
CAT 酶活性 CAT activity	1 116.0	2 266.7	*	1 254.7	2 133.3	ns	842.6	1 445.4	ns	918.7	1 312.0	ns
净光合速率 <i>P_n</i>	2.38	5.20	**	2.48	5.70	**	2.44	5.97	**	2.47	6.48	**
气孔导度 <i>C_{cond}</i>	0.022 8	0.055 8	**	0.023 0	0.064 5	**	0.023 8	0.066 7	**	0.027 1	0.075 4	**
胞间 CO ₂ 浓度 <i>C_i</i>	203.4	441.3	**	185.5	456.0	**	232.6	475.4	**	247.5	490.0	**
蒸腾速率 <i>T_r</i>	0.60	1.24	**	0.607 4	1.388 1	**	0.54	1.49	**	0.65	1.65	**
水分利用率 <i>WUE</i>	5.00	8.93	**	4.71	8.46	**	4.71	8.46	**	3.83	8.37	**
气孔限制值 <i>L_s</i>	0.46	0.93	**	0.54	0.91	**	0.44	0.85	**	0.39	0.82	**

注: SONL1, SONL2. 单独的严重干旱与单独浇灌 125 g · L⁻¹ 和 62.5 g · L⁻¹ 木麻黄凋落物浸提液的加和; MONL1, MONL2. 单独的中度干旱与单独浇灌 125 g · L⁻¹ 和 62.5 g · L⁻¹ 木麻黄凋落物浸提液的加和。ns 表示差异不显著; * 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平显著。

Note: SONL1, SONL2. Additive value of 125 g · L⁻¹ and 62.5 g · L⁻¹ of *C. equisetifolia* litter leachates at severe drought; MONL1, MONL2. Additive value of 125 g · L⁻¹ and 62.5 g · L⁻¹ of *C. equisetifolia* litter leachates at moderate drought. ns means insignificant difference at *P*>0.05; * means significant differences at *P*<0.05; ** means significant differences at *P*<0.01.

酶活性的影响有所差别,可能是土壤干旱和化感双重胁迫下,使得幼苗及时清除体内的活性氧,幼苗根叶 SOD 含量升高,而 POD 更多地转移到叶片参与调节。这表明干旱和木麻黄凋落物浸提液能显著增加榄仁树幼苗叶片 SOD、POD 及根 SOD 酶活性。

2.4 干旱胁迫和木麻黄凋落物浸提液浓度交互作用对榄仁树幼苗指标的方差分析

从表 4 可以看出,*F* 值越大则对参数变化所起的作用就越大。比较 *F* 值的大小可以看出,土壤含水量是影响榄仁树幼苗各项参数的主要因素,木麻黄凋落物浸提液浓度对各参数影响不大,而土壤含水量与木麻黄凋落物浸提液浓度的交互作用对各项参数有显著影响。

3 讨论与结论

干旱胁迫是制约植物生长的主要逆境因子之一,干旱对植物存活、生长、形态特征、光合等生理生化方面均有显著影响。植物的化感作用是制约植物生长的又一主要逆境因子(Li et al, 2012; Cummings et al, 2012),显著影响植物生长及生理生化。但由

于植物所生长的环境是受非生物和生物多种条件共同制约的(Kissoudis et al, 2014; Ramegowda et al, 2015),从单一的胁迫评价植物的抗性存在一定偏差和缺少准确性。本研究从干旱和化感两个因素探讨榄仁树苗木生长及生理生化的影响,能较真实地反映生境条件对苗木的影响,但此类相关研究较少,主要是干旱胁迫和外源激素对小麦化感潜力诱导调控与表达、渗透胁迫对化感作用生物测定物的影响(支金虎和左胜鹏, 2009; 支金虎等, 2009; 杨莉等, 2011)。表 5 结果显示,两种干旱和两种木麻黄凋落物浸提液浓度共同胁迫下,榄仁树幼苗电导率、光合参数均极显著小于单独干旱和单独木麻黄凋落物浸提液浓度下的叠加值,而幼苗 POD 酶活性在严重干旱和中度干旱下浇灌 62.5 g · L⁻¹ 木麻黄凋落物浸提液显著小于相应单独处理的叠加值, CAT 酶活性仅在严重干旱浇灌 125 g · L⁻¹ 浸提液下有相似结果,说明干旱和化感两种胁迫共同作用表现出相互拮抗的效应,且随着胁迫程度加强有增大趋势。

植物生长和形态特征等指标是植物受多种环境因子作用的最终表现(Mienie & de Ronde, 2008)。油松、槐树等幼苗在不同土壤干旱下株高、基茎和叶

片形态特征能明显受到土壤水分含量的影响(黄华等,2004)。本研究表明,干旱都会显著影响幼苗的株高、叶片数、叶面积等指标。在木麻黄小枝浸提液浇灌青皮幼苗、木麻黄凋落物浸提液浇灌榄仁树幼苗研究中发现木麻黄浸提液对幼苗株高、叶面积有抑制作用或有减小的趋势。Bhatt et al(2010)研究了 *Chukrasia tabularis*, *Terminalia myriocarpa* 和 *Trema orientalis* 水浸提液能显著抑制盆栽稻发芽、生长及生物量产量,而在本研究中双重胁迫中木麻黄凋落物浸提液浓度则对榄仁树幼苗株高有显著影响,且干旱和木麻黄浸提液对幼苗茎基、叶片数和叶宽度均有交互作用。叶片相对含水量(RWC)是反映植物体内赖以生存的水分状况(米海莉等,2003)。本研究表明,土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液能显著降低叶相对含水量,但实验组间无显著差异,叶片相对含水量维持在88%~90%,说明榄仁树幼苗具有很强的保水能力。

干旱或化感等逆境能使植物的光合速率受到抑制,*Sorghum bicolor* 花期前进行干旱胁迫,导致幼苗光合作用降低,衰老期出现花二色基因型的特征(Beyel & Brüggemann,2005)。本研究表明,干旱及木麻黄凋落物浸提液处理均能显著降低幼苗 P_n 、 C_{cond} 、 Tr 、 C_i 呈先减后增的趋势,这与前期研究的结果一致。从本研究对干旱和木麻黄凋落物浸提液进行二元方差分析可知,干旱程度对幼苗光合作用起主导影响,而125和62.5 g·L⁻¹两种浓度木麻黄凋落物浸提液间无显著差异。 P_n 降低的有气孔限制和非气孔限制两方面因素,当 P_n 和 C_i 两者同时减小, P_n 的下降主要是由 C_{cond} 引起的,否则 P_n 的下降要归因于叶肉细胞羧化能力的降低(Farquhar & Sharkey,1982)。气孔限制值变化更能说明光合作用降低的影响因素,而本研究表明气孔限制值的增加,进一步验证了土壤干旱和木麻黄凋落物浸提液降低幼苗光合作用的原因是气孔限制所致,这与对沙棘、高山柳、麻疯树等植物光合研究的结果一致。幼苗水分利用率变化也和气孔限制值相似,处理前期变化更为显著。本研究表明,干旱和浇灌木麻黄凋落物浸提液会显著增加榄仁树幼苗的叶片和根的细胞膜透性,且幼苗根的相对电导率变化程度大于叶片,干旱和木麻黄凋落物浸提液能显著增加榄仁树幼苗叶片SOD、POD及根POD活性,这与Cui et al(2011)研究核桃根系分泌物对turnip(*Brassica rapa*)的结果相似。因此,对于植物与环境关系的研

究更要注重两种或多种因子对植物的共同影响,这样才能清晰地解释和解决如造林困难立地的植物响应问题。两个或多个逆境胁迫因子共同作用时,对植物的影响未必是简单的叠加或是增强的协同效应,也会有减弱的拮抗作用,本研究结果显示了这种情况的存在。

参考文献:

- BEYEL V, BRÜGGEMANN W, 2005. Differential inhibition of photosynthesis during pre-flowering drought stress in *Sorghum bicolor* genotypes with different senescence traits [J]. *Physiol Plant*, 124:249-259.
- BHATT BP, SINGH JK, BAROOAH L, et al, 2010. Phytotoxic influence of agroforestry tree species on food crops in eastern himalaya, India [J]. *Allel J*, 25:485-495.
- CAI HX, WU FZ, YANG WQ, 2011. Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix paraqpleisia* and *Hippophae rhamnoides* seedlings [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(9):2 430-2 436. [蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤, 2011. 干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 31(9):2 430-2 436.]
- CECCARELLI S, GRANDO S, BAUM M, 2007. Participatory plant breeding in water-limited environments [J]. *Exp Agric*, 43:411-435.
- CHEN W, ZHAO Y, YE ZQ, et al, 2013. Growth and physiological characteristics of five island tree species with drought stress [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 30(4):490-498. [陈闻, 赵颖, 叶正钱, 等, 2013. 干旱胁迫对5个海岛树种生长及生理特性的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 30(4):490-498.]
- CUI C, CAI J, JIANG ZM, et al, 2011. Effects of walnut (*Juglans regia* L.) root exudates on germination, seedling growth and enzymatic activities of turnip (*Brassica rapa* L.) [J]. *Allel J*, 28:237-249.
- CUMMINGS JA, PARKER IM, GILBERT GS, 2012. Allelopathy: a tool for weed management in forest restoration [J]. *Plant Ecol*, 213:1 975-1 989.
- FARQUHAR GD, SHARKEY TD, 1982. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 33(3):317-345.
- FENG J, LIU Q, WANG J, et al, 2014. Effects of leachates of *Casuarina equisetifolia* on growth and physiological and biochemical characteristics of *Terminalia catappa* seedlings [J/OL]. *Guihaia*. <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20140618.1526.015.html>. [冯剑, 刘强, 王瑾, 等, 2014. 木麻黄浸提液对榄仁树幼苗生长和生理生化的影响 [J/OL]. *广西植物*. <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20140618.1526.015.html>.]
- HUANG H, LIANG ZS, HAN RL, et al, 2004. Growth and drought tolerance of *Pinustabulaeformis* under water deficit [J]. *J NE For Univ*, 19(2):1-4. [黄华, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等, 2004. 干旱胁迫条件下油松幼苗生长及抗旱性的研究 [J]. *西北林学院学报*, 19(2):1-4.]
- KISSOUDIS C, VAN DE WIEL C, VISSER RGF, et al, 2014. Enhancing crop resilience to combined abiotic and biotic stress through the dissection of physiological and molecular crosstalk [J]. *Front Plant Sci*, 5:207.
- KJELGREN R, WANG LX, JOYCE D, 2009. Water deficit stress re-

- sponses of three native Australian ornamental herbaceous wild-flower species for water-wise landscapes [J]. *Hortic Sci*, 44(5): 1 358-1 365.
- LI HS, SUN Q, ZHAO SJ, et al, 2000. Experiments theory and technology of plant physiology biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press: 164-261. [李合生, 孙群, 赵世杰, 等, 2000. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社: 164-261.]
- LI L, ZHANG Y, WANG CQ, et al, 2012. Effects of *Casuarina equisetifolia* leachates on photosynthesis of *Vatica mangachapoi* Blanco seedlings [J]. *Allelopathy J*, 29(2): 231-240.
- LIN WX, 2009. Effect of *Casuarina equisetifolia* autotoxicity on endogenous hormones [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 25(19): 100-103. [林武星, 2009. 木麻黄自毒作用物对其幼苗内源激素的影响 [J]. 中国农学通报, 25(19): 100-103.]
- MI HL, XU X, LI SH, et al, 2003. Effects of drought stress on system of defense enzymes and RWC and membrane electrolyte in *Cynanchum komarovii* seedlings [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 23(11): 1 871-1 876. [米海莉, 许兴, 李树华, 等, 2003. 干旱胁迫下牛心朴子幼苗相对含水量, 质膜透性及保护酶活性变化 [J]. 西北植物学报, 23(11): 1 871-1 876.]
- MIENIE A, DE RONDE JA, 2008. A comparison of drought stress and heat stress in the leaves and tubers of 12 potato cultivars [J]. *S Afr J Sci*, 104: 156-159.
- RAMEGOWDA V, SENTHIL-KUMAR M, 2015. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination [J]. *J Plant Physiol*, 176: 47-54.
- WANG H, SIOPONGCO J, WADE LJ, et al, 2009. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress [J]. *Environ Exp Bot*, 65: 338-344.
- YANG L, WANG MY, HAN M, et al, 2011. Effect of osmotic stress on bioassay of allelopathy [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(4): 783-787. [杨莉, 王明炎, 韩梅, 等, 2011. 渗透胁迫对化感作用生物测定的影响 [J]. 西北植物学报, 31(4): 783-787.]
- ZHI JH, MA YQ, ZUO SP, 2009. Inducible regulation of allelopathic potential in different wheat genotypes under drought and prohydrojasmon (PDJ) treatment [J]. *Chin J Eco-Agric*, 17(6): 1 156-1 161. [支金虎, 马永清, 左胜鹏, 2009. 干旱胁迫与外源激素 PDJ 对不同基因型小麦化感潜力的诱导调控 [J]. 中国生态农业学报, 17(6): 1 156-1 161.]
- ZHI JH, ZUO SP, 2009. Effect of water deficit and PDJ on allelopathic expressing of different wheat genotypes [J]. *Acta Agric Boreal Sin*, 18(3): 78-83. [支金虎, 左胜鹏, 2009. 水分胁迫与 PDJ 对不同基因型小麦生长及化感表达的影响 [J]. 西北农业学报, 18(3): 78-83.]

(上接第 1007 页 Continue from page 1007)

- SI RGL, WANG MJ, LIU XJ, et al, 2014. Seed dormancy mechanism and breaking techniques of two varieties of *Phalaris arundinacea* L. [J]. *J NE For Univ*, (05): 47-51. [斯日古楞, 王明玖, 刘雪娇, 等, 2014. 2 个品种藨草种子破眠方法的比较 [J]. 东北林业大学学报, 05: 47-51.]
- SONG JZ, LI PP, FU WG, 2012. Effect of water stress and rewatering and physiological and biochemical characteristics of *Phalaris arundinacea* [J]. *Acta Prat Sin*, 21(2): 62-69. [宋家壮, 李萍萍, 付为国, 2012. 水分胁迫及复水对藨草生理生化特性的影响 [J]. 草业学报, 02: 62-69.]
- THORNBUR JP, 2003. Chlorophyll-proteins: Light-harvesting and reaction center components of plants [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 26(4): 127-158.
- WANG Z, 2002. Plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press: 128-131. [王忠, 2002. 植物生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社: 128-131.]
- XIU GF, ZHANG FD, LI TL, et al, 2011. Influence of environmental factors on seed germination of *Phalaris paradoxa* and *Phalaris minor* [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(7): 1 458-1 465. [徐高峰, 张付斗, 李天林, 等, 2011. 环境因子对奇异藨草和小子藨草种子萌发的影响 [J]. 西北植物学报, 31(7): 1 458-1 465.]
- YANG Y, CAO Y, ZHANG SJ, 2015. Effects of soil moisture regime on rhizomatic germination and young shoot growth of *Carex cinerascens*. [J]. *J Ecol Rur Environ*, 31(2): 180-187. [杨阳, 曹响, 张素娟, 2015. 水分条件对灰化苔草根茎萌发及幼苗生长的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 02: 180-187.]
- ZHANG H, ZHANG YL, GAO K, 2012. Preliminary study on the dormancy mechanism and dormancy breaking methods in *Phalaris arundinacea* seeds [J]. *Chin J Grassl*, 34(6): 7-12. [张浩, 张永亮, 高凯, 2012. 藨草种子休眠机理与休眠破除方法初探 [J]. 中国草地学报, 6: 7-12.]
- ZHANG YL, WANG XY, LIU Y, et al, 2014. Effect of different NPK fertilizer rates on the ion absorption and distribution of reed Canarygrass (*Phalaris arundinacea*) under salt stress [J]. *Acta Agr Sin*, (6): 1 318-1 323. [张永亮, 王学愿, 刘杨, 等, 2014. 盐胁迫下氮磷钾肥对藨草离子吸收与分布的影响 [J]. 草地学报, 6: 1 318-1 323.]