

铝镁钙复合作用对杉木幼苗叶片丙二醛(MDA)含量及抗氧化酶活性的影响

严绍裕 (福建林业职业技术学院, 福建南平 353000)

摘要 [目的]研究不同铝、镁、钙复合处理对杉木幼苗叶片丙二醛(MDA)含量及抗氧化酶活性的影响。[方法]以1年生不同耐铝型杉木实生苗为研究对象,采用正交试验设计,设置铝、镁、钙复合共计16个处理,研究铝、镁、钙复合处理对不同耐铝型杉木幼苗叶片MDA含量和抗氧化酶活性的影响。[结果]耐铝型杉木幼苗叶片MDA含量与敏感型相比其含量较低;耐铝型杉木幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性受铝离子的影响较快,而敏感型受镁离子影响较快;耐铝型杉木幼苗叶片过氧化物酶(POD)活性受钙离子的影响最快,且随着时间的增加其影响作用逐渐增大,而敏感型杉木幼苗叶片POD活性受铝离子的影响最快,且影响作用逐渐增大;耐铝型杉木幼苗叶片过氧化氢酶(CAT)活性受镁离子的影响最快,钙离子则对敏感型的影响最快,随着胁迫处理时间的延长,不同耐铝型杉木幼苗叶片CAT活性的主要影响因素均为铝离子。[结论]该研究可为杉木铝毒害作用的研究提供一定的理论基础。

关键词 杉木幼苗;铝毒;铝镁钙复合作用;丙二醛;抗氧化酶活性

中图分类号 S718.43 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)25-0092-04

Effects of Combined Effects of Aluminum, Magnesium and Calcium on MDA Content and Antioxidant Enzyme Activities in Leaves of Chinese Fir Seedlings

YAN Shao-yu (Fujian Forestry Vocational Technical College, Nanping, Fujian 353000)

Abstract [Objective] To study the effects of combined effects of aluminum, magnesium and calcium on MDA content and antioxidant enzyme activities in leaves of Chinese fir seedlings. [Method] The effects of aluminum, magnesium and calcium on the MDA content and antioxidant enzyme activity in the leaves were studied by orthogonal experiment design with 16 treatments of aluminum, magnesium and calcium combined with 1 year old Chinese fir seedlings. [Result] The content of MDA in leaves of aluminum tolerant Chinese fir seedlings was lower than that of sensitive ones. The activity of SOD in leaves of aluminum tolerant Chinese fir seedlings was affected by aluminum ions faster, while sensitive type was more affected by magnesium ions. The effect of calcium ion on the POD activity in leaves of Chinese fir seedlings was the most important, and with the increase of time, the effect of POD in leaves of sensitive Chinese fir seedlings was the fastest, and the effect increased gradually. The effect of magnesium ion on the CAT activity in leaves of aluminum resistant Chinese fir seedlings was the fastest, and the calcium ion had the fastest effect on the sensitive type. With the prolonged stress treatment time, the main factors affecting the CAT activity in leaves of different aluminum resistant Chinese fir seedlings were aluminum ions. [Conclusion] The study provides theoretical basis of the study of aluminum toxicity of Chinese fir.

Key words Chinese fir seedlings; Aluminium toxicity; The compound effect of aluminum, magnesium and calcium; Malondialdehyde; Antioxidant enzyme activity

我国南方土壤大多以酸性为主,酸性土壤面积占全国土壤面积的22.7%^[1]。酸雨和不合理的耕作方式等进一步加剧了土壤酸化,土壤酸化对植物生长发育会产生严重的破坏作用^[2]。酸性土壤对植物生长发育的影响主要来源于酸性土壤中的活性铝,研究表明土壤pH下降,活性铝浓度会随之增大,进而危害植物生长发育^[3]。目前,铝毒害对植物影响的研究多从植物形态、细胞结构、代谢酶活性、光合呼吸作用和营养元素含量等方面进行。玉米幼苗受铝毒害影响后主要表现为抑制侧根生长,降低生物量^[4-5];铝毒害对细胞结构的影响则主要表现在破坏细胞骨架^[6]、细胞壁变硬变厚^[7-8]、细胞膜僵化^[9]等;植物光合速率和呼吸作用受铝毒害影响也表现出降低的趋势^[10];铝离子总体上对钙离子、镁离子、钾离子等阳离子的吸收和利用产生抑制作用^[11]。

杉木[Cunninghama lanceolata(Lamb.) Hook]是我国南方重要的经济速生用材树种^[12],广泛分布于福建、湖南等16个省区。我国南方土壤以红壤为主,土壤富铝化严重,其中杉木受铝毒害作用明显。前人研究表明钙离子与镁离子对铝毒害均存在不同程度的缓解作用^[13],但目前关于铝、钙和镁复合作用对杉木幼苗丙二醛(MDA)含量和抗氧化酶活性影响的研究较少。笔者以不同耐铝型(耐铝型和敏感型)杉

木1年生幼苗为材料,采用正交试验设计,利用水培方式对杉木进行铝、钙、镁复合处理,分析不同耐铝型杉木幼苗MDA含量和抗氧化酶活性特征,以期对杉木铝毒害作用的研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料 供试材料为福建省尤溪国有林场3代林的2个不同耐铝型[耐铝型(RN)和敏感型(MG)]杉木1年生幼苗,选取长势良好且一致的幼苗作为供试苗木,采用水培方式进行处理。容器为4L黑色塑料小桶。

1.2 试验设计 采用正交试验设计,2种耐铝型幼苗分别进行1组正交试验,每个处理3次重复,每个重复种植3株,共计288株(表1、2)。采用完全营养液配方对杉木幼苗驯化30d,期间每15d更换1次营养液。复合处理的铝、钙和镁分别以AlCl₃、CaCl₂和MgSO₄的形态加入到营养液中,营养液配方为大量元素:KNO₃ 0.51 mg/L、Ca(NO₃)₂·4H₂O 0.82 mg/L、KH₂PO₄ 0.136 mg/L、MgSO₄·7H₂O 0.49 mg/L;微量元素:H₃BO₃ 2.86 μmol/L、MnCl₂·4H₂O 1.81 μmol/L、ZnSO₄·7H₂O 0.22 μmol/L、CuSO₄·5H₂O 0.08 μmol/L、H₂MoO₄ 0.062 3 μmol/L、Fe-EDTA(Fe-EDTA由FeSO₄·7H₂O和EDTA-2Na分别称取2.78g和3.73g定容至500mL,每升营养液中加入2.5mL)。

驯化结束后,将每个处理分别换上相应的营养液进行处理,期间每15d更换1次营养液。于试验处理后0、15、30和

作者简介 严绍裕(1966—),男,福建尤溪人,高级工程师,硕士,从事森林培育研究。

收稿日期 2018-04-26

45 d 取样,分别标注为 T₀、T₁、T₂ 和 T₃。

表 1 正交试验因素及水平

Table 1 Orthogonal test factors and levels mg/L

水平 Level	因素 Factor		
	铝 Aluminium	镁 Magnesium	钙 Calcium
1	0	0	0
2	66.67	12.32	27.75
3	133.35	24.65	55.49
4	200.02	36.97	110.98

表 2 正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design mg/L

处理 Treatment	铝 Aluminum	镁 Magnesium	钙 Calcium
D ₁	0	0	0
D ₂	66.67	12.32	27.75
D ₃	133.35	24.65	55.49
D ₄	200.02	36.97	110.98
D ₅	0	24.65	27.75
D ₆	66.67	36.97	0
D ₇	133.35	0	110.98
D ₈	200.02	12.32	55.49
D ₉	0	36.97	55.49
D ₁₀	66.67	24.65	110.98
D ₁₁	133.35	12.32	0
D ₁₂	200.02	0	27.75
D ₁₃	0	12.32	110.98
D ₁₄	66.67	0	55.49
D ₁₅	133.35	36.97	27.75
D ₁₆	200.02	24.65	0

1.3 测定指标及方法 MDA 含量(μmol/g)采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定^[14];超氧化物歧化酶(SOD)活性[U/(g·min)]采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定^[14];过

氧化氢酶(CAT)活性[U/(g·min)]采用紫外吸收法测定^[14];过氧化物酶(POD)活性[U/(g·min)]采用愈创木酚法测定^[14]。

1.4 数据整理与分析 采用 Excel 2003、SPSS 18.0 软件对数据进行整理和统计。

2 结果与分析

2.1 铝、镁、钙复合作用对 MDA 含量的影响 由图 1-RN 可知,耐铝型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理下叶片 MDA 含量表现不同的特征。其中 D₁、D₂、D₄、D₇、D₁₀、D₁₂、D₁₃ 和 D₁₆ 处理叶片 MDA 含量随着胁迫时间的增加呈逐渐上升的趋势,均在胁迫 45 d 时达到最大值,与初始值相比分别提高了 120%、80%、93%、85%、43%、96%、133% 和 84%;D₃、D₆、D₈、D₁₁ 和 D₁₄ 处理叶片 MDA 含量则呈先上升后下降的趋势,最大值均出现在胁迫处理后的 30 d;D₅ 和 D₉ 处理叶片 MDA 含量也呈先上升后下降的趋势,不同的是 D₅ 和 D₉ 处理的最大值出现在胁迫处理后的 15 d;与其他处理不同,D₁₅ 处理叶片 MDA 含量呈先上升后下降再上升的趋势。

由图 1-MG 可知,敏感型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片 MDA 含量表现不同的特征。其中 D₁ 和 D₂ 处理叶片 MDA 含量随着胁迫时间的增加呈先上升后下降再上升的趋势;D₄、D₇ 和 D₁₂ 处理下叶片 MDA 含量随着胁迫时间的增加呈逐渐增大的趋势,处理 45 d 时达到最大值,与初始值相比分别提高了 119%、155% 和 153%;D₃、D₅、D₆、D₈、D₉、D₁₀、D₁₁、D₁₄、D₁₅ 和 D₁₆ 处理叶片 MDA 含量随着胁迫时间的增加呈先上升后下降的趋势,除 D₅ 处理的最大值出现在 15 d,其他处理的最大值均出现在处理后 30 d;D₁₃ 处理 MDA 含量随着胁迫时间的增加呈逐渐下降的趋势,胁迫 45 d 后达到最低值,与初始值相比降低了 37%。

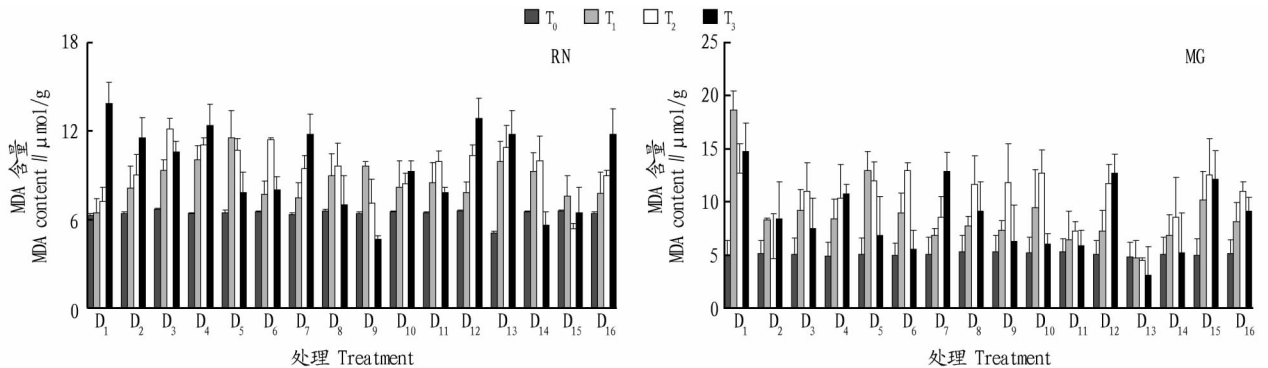


图 1 铝、镁、钙复合作用对 MDA 含量的影响

Fig. 1 The effect of aluminum, magnesium and calcium on the content of MDA

由图 1 可知,不同耐铝型杉木幼苗叶片 MDA 含量表现为耐铝型相比敏感型而言对环境变化具有较低的敏感度,主要表现为杉木幼苗叶片 MDA 含量的变化幅度较为缓和。

2.2 铝、镁、钙复合作用对抗氧化酶活性的影响

2.2.1 铝、镁、钙复合作用对 SOD 活性的影响。由图 2-RN 可知,耐铝型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片 SOD 活性表现出不同的特征。就不同处理而言,D₁、D₂、D₃、D₄、D₅、D₆、D₇、D₈、D₉、D₁₀、D₁₁、D₁₂ 和 D₁₅ 处理叶片 SOD 活性均表现

出随胁迫处理时间的增加呈先下降后上升再下降的趋势,在处理 30 d 叶片 SOD 活性出现不同程度的增加,与 15 d 时相比分别提高了 5.64%、9.18%、4.49%、7.33%、11.21%、12.18%、18.92%、13.21%、8.64%、11.40%、15.01%、4.55% 和 0.90%;D₁₄ 处理叶片 SOD 活性随胁迫处理时间的增加呈逐渐降低的趋势,与初始值相比,45 d 时 SOD 活性降低了 20.59%;D₁₆ 处理叶片 SOD 活性随胁迫处理时间的增加则呈先上升后下降的趋势,其中最大值出现在处理 15 d。

由图2-MG可知,敏感型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片SOD活性表现出不同的特征。就不同处理而言, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 、 D_9 、 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{13} 和 D_{16} 处理叶片SOD活性均表现出随胁迫处理时间的增加呈先下降后上升再下降的趋势,在处理后30d叶片SOD活性出现不同程度的增加,与15d时相比分别提高了4%、12%、7%、11%、11%、12%、28%、10%、15%、18%、11%、22%、1%和2%; D_{14} 处理叶片SOD活性随胁迫处理时间的增加呈逐渐降低的趋

势,与初始值相比,45d时SOD活性降低了2%; D_{15} 处理叶片SOD活性随胁迫处理时间的增加则呈先上升后下降的趋势,其中最大值出现在处理15~30d期间。

由图2可知,不同耐铝型杉木幼苗叶片SOD活性表现为耐铝型相比敏感型而言具有较高的活性。以 D_2 处理为例,耐铝型杉木幼苗和敏感型杉木幼苗SOD活性在处理后的15、30和45d均表现出耐铝型SOD活性高于敏感型,分别高出3.25%、5.69%和4.42%。

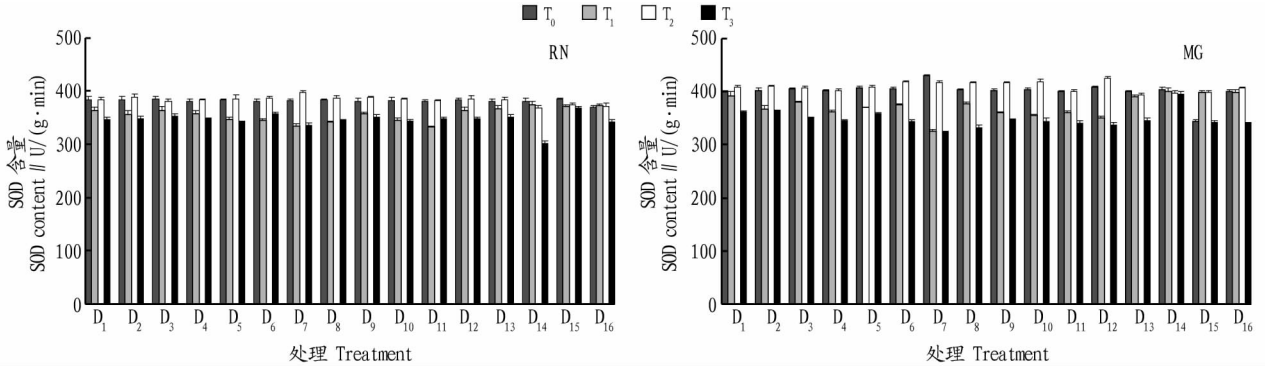


图2 铝、镁、钙复合作用对SOD活性的影响

Fig. 2 The effect of aluminum, magnesium and calcium on the activity of SOD

2.2.2 铝、镁、钙复合作用对POD活性的影响。由图3-RN可知,耐铝型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片POD活性表现出相似的特征。 D_1 和 D_3 处理叶片POD活性最大值出现在胁迫后30d, D_1 处理叶片POD活性30d时比0、15和45d时分别高出117.77%、0.31%和87.55%, D_3 处理叶片POD活性30d时比0、15和45d时分别高出170.62%、20.16%和66.94%; D_2 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_8 、 D_9 、 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{13} 、 D_{14} 、 D_{15} 和 D_{16} 处理叶片SOD活性的最大值出现在胁迫后15d; D_7 处理叶片POD活性则随着胁迫处理时间的增加呈先上升后下降再上升的趋势,最大值出现在处理后15d。

大值则出现在15d; D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_9 、 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 、 D_{13} 、 D_{14} 和 D_{15} 处理叶片POD活性随着胁迫处理时间的增加呈先上升后下降的趋势,其中 D_1 、 D_3 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_9 、 D_{10} 、 D_{11} 和 D_{13} 处理叶片POD活性最大值出现在15d,以 D_1 处理为例,15d时叶片SOD活性比0、30和45d分别高出271.11%、39.52%和101.45%; D_2 、 D_4 、 D_{12} 、 D_{14} 和 D_{15} 处理叶片POD活性最大值则出现在30d时,以 D_1 处理为例,30d时叶片SOD活性比0、15和45d分别高出271.11%、39.52%和101.45%。

由图3-MG可知,敏感型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片POD活性表现出不同的特征。就不同处理而言, D_8 和 D_{16} 处理叶片POD活性随着胁迫处理时间的增加呈先上升后下降再上升的趋势,其中 D_8 最大值出现在45d, D_{16} 最

由图3可知,不同耐铝型杉木幼苗叶片POD活性表现为耐铝型相比敏感型而言敏感度较低。以 D_{13} 处理为例,在处理后15、30和45d均表现出耐铝型SOD活性低于敏感型,分别降低167.26%、237.66%和136.94%。

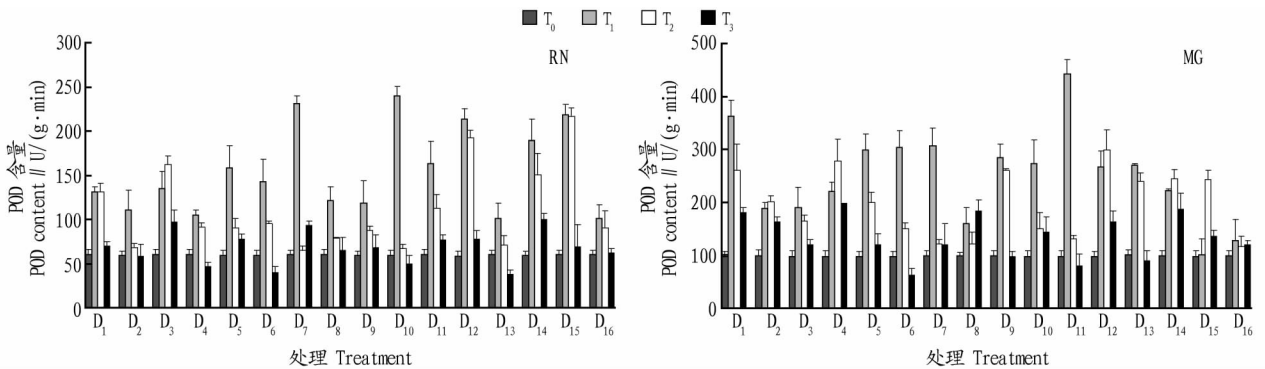


图3 铝、镁、钙复合作用对POD活性的影响

Fig. 3 The effect of aluminum, magnesium and calcium on the activity of POD

2.2.3 铝、镁、钙复合作用对CAT活性的影响。由图4-RN可知,耐铝型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片CAT活

性表现出不同的特征。就不同处理而言, D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 、 D_9 、 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 和 D_{14} 处理叶片CAT活性均随着胁迫处理时间

的增加呈递增的趋势,至 45 d 时达到最大值,与初始值相比分别高出 5 393.55%、4 376.32%、4 436.36%、2 500.00%、3 743.59%、5 522.22%、2 974.36%、2 557.14%和 2 706.00%; D_1 、 D_3 、 D_4 和 D_{15} 处理叶片 CAT 活性均随着胁迫处理时间的延长呈先上升后下降的趋势,其中 D_1 和 D_{15} 处理在 15 d 时达到最大值, D_3 和 D_4 处理的最大值出现在处理后 30 d; D_2 、 D_{13} 和 D_{16} 处理叶片 CAT 活性均随着胁迫处理时间的延长呈先上升后下降再上升的趋势。

由图 4-MG 可知,敏感型杉木幼苗不同铝、钙、镁复合处理叶片 CAT 活性表现出不同的特征。就不同处理而言, D_7 、 D_8 、 D_{10} 、 D_{11} 、 D_{12} 和 D_{13} 处理叶片 CAT 活性均随着胁迫处理

时间的增加呈递增的趋势,至 45 d 时达到最大值,与初始值相比分别高出 405.58%、407.30%、869.35%、354.89%和 787.85%; D_1 、 D_3 、 D_5 和 D_{16} 处理叶片 CAT 活性均随着胁迫处理时间的延长呈先上升后下降的趋势,其中 D_1 、 D_3 和 D_5 处理叶片 CAT 活性的最大值出现在处理后 30 d, D_{16} 的最大值则出现在 15 d; D_2 、 D_4 、 D_6 、 D_9 、 D_{14} 和 D_{15} 处理叶片 CAT 活性均随着胁迫处理时间的延长呈先上升后下降再上升的趋势。

由图 4 可知,不同耐铝型杉木幼苗叶片 CAT 活性间整体差异较小。其中值得注意的是, D_{10} 处理耐铝型杉木叶片 CAT 活性高于敏感型,处理 15、30 和 45 d 时耐铝型杉木叶片 CAT 活性比敏感型分别高出 2.40%、73.59%和 42.53%。

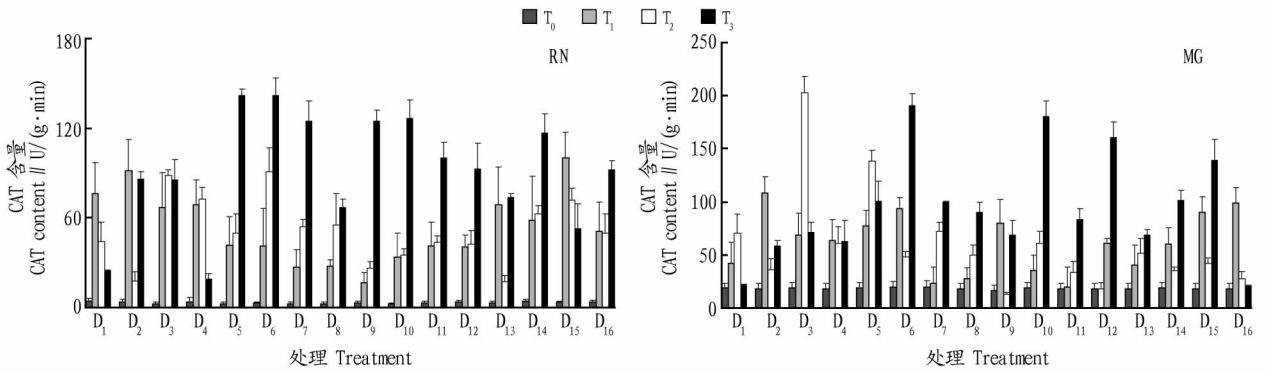


图 4 铝、镁、钙复合作用对 CAT 活性的影响

Fig. 4 The effect of aluminum, magnesium and calcium on the activity of CAT

3 讨论与结论

MDA 是氧自由基作用于脂质发生过氧化反应的一种产物^[15],能与细胞内各种成分发生反应^[16],且具有细胞毒性。另外 MDA 能够抑制细胞保护酶活性和降低抗氧化物的含量,从而加剧膜脂过氧化^[17]。研究表明在植物组织多种酶和膜系统遭到破坏时,MDA 含量会大幅度提高^[18]。因此,MDA 能够反映植物组织抗氧化能力的强弱。在植物抗性生理研究中,MDA 含量能够衡量植物对外部逆境的抵御能力^[19]。该研究发现耐铝型杉木幼苗叶片 MDA 含量与敏感型相比其含量较低。

植物保护酶系统在清除超氧自由基、 H_2O_2 和过氧化物以及阻止或减少羟基自由基形成等方面发挥着重要作用^[20-21]。SOD 是植物细胞中清除活性氧自由基最重要的酶类之一,CAT 是细胞过氧化体中清除 H_2O_2 的重要酶类,其他细胞器中产生的 H_2O_2 进入过氧化体中也能够被 CAT 清除^[22]。POD 广泛存在于植物中,在不同种植物、不同生长发育期和不同组织器官间 POD 活性差异显著,且功能多样^[23]。逆境下植物抗氧化酶保护系统中的 POD 增多,以清除体内活性氧,降低活性氧的积累来降低逆境胁迫对植物的伤害^[24],POD、SOD 与 CAT 这 3 种酶相互协调,使植物体内活性氧自由基处于相对稳定的水平^[25-26]。该研究发现铝、钙、镁不同复合处理对杉木幼苗叶片 POD、SOD 与 CAT 活性存在不同程度的影响。不同耐铝型杉木抗氧化酶活性系统表现出不同的规律特征,其中耐铝型杉木幼苗叶片 SOD 活性受铝离子的影响较快,而敏感型受镁离子影响较快,值得注

意的是在胁迫 45 d 时 2 种不同耐铝型杉木幼苗叶片 SOD 活性受钙离子影响最快;就 POD 活性而言,耐铝型杉木幼苗叶片 POD 活性受钙离子的影响最快,且随着时间的增加其影响作用逐渐增大,而敏感型杉木幼苗叶片 POD 活性受铝离子的影响最快,且影响作用逐渐增大;就 CAT 活性而言,耐铝型杉木幼苗叶片 CAT 活性受镁离子的影响最快,钙离子则对敏感型的影响最快,随着胁迫处理时间的延长,不同耐铝型杉木幼苗叶片 CAT 活性的主要影响因素均为铝离子。

参考文献

- [1] 刘强,郑绍建,林咸永. 植物适应铝毒胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 应用生态学报,2004,15(9):1641-1649.
- [2] 章爱群,贺立源,赵会娥,等. 磷铝协同作用对玉米苗期生物学性状和营养学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(1):48-52.
- [3] 黄娟,孔国辉,夏汉平. 铝毒与有机酸和磷的关系[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(4):498-503.
- [4] 许玉凤,曹敏建,王文元,等. 玉米耐铝毒的基因型筛选[J]. 玉米科学,2004,12(1):33-35.
- [5] GARCIA-OLIVEIRA A L, POSCHENRIEDER C, BARCELÓ J, et al. Breeding for Al tolerance by unravelling genetic diversity in bread wheat [M]//PANDA S K, BALUSKA F. Aluminum stress adaptation in plants. Heidelberg:Springer International Publishing, 2015.
- [6] 刘强,李晓红,李蕴,等. 铝胁迫对油菜叶片光合特性的影响[J]. 井冈山大学学报(自然科学版),2008,29(1):14-15.
- [7] 陈泰林,钱春梅,张建军,等. 植物铝胁迫响应机制的研究进展[J]. 热带农业科学,2010,30(2):37-48.
- [8] DORNELES A O S, PEREIRA A S, ROSSATO L V, et al. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth[J]. Ciencia rural,2016,46(3):506-512.
- [9] 任立民,刘鹏,谢忠雷,等. 植物对铝毒害的抗性研究进展[J]. 土壤通报,2008,39(1):177-181.
- [10] 贺根和,刘强,彭水娥. 铝胁迫对野生油茶光合特性的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(7):1593-1595.

从该研究结果来看,马尾松凋落叶化感物质非常复杂,可能同时存在促进和抑制2种作用的物质。在特定浓度条件或其他环境因素条件下,可以使化感作用表现出促进或抑制作用,同时不同的化感物质可能存在一定的选择性和针对性。因此,对于马尾松凋落叶水提液化感作用机制需要通过化感效应活性物质的提取及鉴别工作加以揭示。

4 结论

根据马尾松凋落叶水提液化感作用对各牧草最终发芽率、发芽速率、株高和根长的影响,以及综合效应指数分析,不同牧草在马尾松树下生长的适应性表现为:豆科牧草为羽扇豆>大豆>禾本科牧草为杂交狼尾草>多年生黑麦草。就4种牧草总体而言则为羽扇豆>杂交狼尾草>多年黑麦草>大豆。而且羽扇豆在不同浓度下表现出的综合化感效应指数数值最小,都在0附近,说明马尾松凋落叶的化感作用对羽扇豆的影响最小,所以这4种牧草中,最适宜在马尾松树下生长的牧草品种为豆科的羽扇豆。

参考文献

- [1] 曹光球,林思祖,王爱萍,等. 马尾松根化感物质的生物活性评价与物质鉴定[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(6):686-689.
- [2] 曾冀,赵志刚,郭文福,等. 马尾松化感作用的生物测定[J]. 林业实用技术,2009(11):33-34.
- [3] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [4] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J]. 中国水土保持科学,2011,9(6):65-70.
- [5] 徐义保,查轩,黄少燕. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失研究进展[J]. 亚热带水土保持,2011,23(4):40-43.
- [6] 陈静,张虹鸥,吴旗韬. 广东山区林下经济发展初探[J]. 林业经济问题,2014,34(3):268-274,280.
- [7] 顾晓君,曹黎明,叶正文,等. 林下经济模式研究及其产业发展对策[J]. 上海农业学报,2008,24(3):21-24.
- [8] 彭少麟,邵华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. 应用生态学报,2001,12(5):780-786.
- [9] 王树起,韩晓增,乔云发. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的

- [10] 黄登银. 不同密度马尾松林下植被和土壤性质[J]. 防护林科技,2009(2):21-23.
- [11] 康冰,刘世荣,史作民,等. 南亚热带人工马尾松林下植物组成特征及主要木本种群生态位研究[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1786-1790.
- [12] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2323-2331.
- [13] 徐义保,查轩,黄少燕. 南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失研究进展[J]. 亚热带水土保持,2011,23(4):40-43.
- [14] 郭晓敏,牛德奎,刘苑秋,等. 江西省不同类型退化荒山生态系统植被恢复与重建措施[J]. 生态学报,2002,22(6):878-884.
- [15] 郭志民. 退化马尾松群落恢复与重建途径的研究[J]. 林业科技,2000,25(6):1-3.
- [16] 刘满强,胡锋,何园球,等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报,2003,40(6):937-944.
- [17] 王爱萍,林思祖,杜玲,等. 马尾松根分泌物对杉木种子的化感效应[J]. 福建林学院学报,2003,23(3):232-235.
- [18] 段剑. 马尾松根系分泌物的化学组成及其化感作用研究[D]. 南昌:江西农业大学,2014.
- [19] 张腾. 马尾松和杉木对植物的化感作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [20] 张丹丹,沈浩,杨季云,等. 芒果叶片水提液对我国南方6种牧草的化感作用[J]. 南方农业学报,2015,46(1):160-165.
- [21] 曾任森. 化感作用研究中的生物测定方法综述[J]. 应用生态学报,1999,10(1):123-126.
- [22] BRUCE WILLIAMSON G, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of chemical ecology,1988,14(1):181-187.
- [23] 皇甫超河,陈冬青,王楠楠,等. 外来入侵植物黄顶菊与四种牧草间化感互作[J]. 草业学报,2010,19(4):22-32.
- [24] LIN W X, KIM K U, SHIN D H. Rice allelopathic potential and its modes of action on Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) [J]. Allelopathy journal,2000,7(2):215-224.
- [25] 钟宇,张健,杨万勤,等. 不同土壤水分条件下生长的巨桉对紫花苜蓿的化感作用[J]. 草业学报,2009,18(4):81-86.
- [26] 韩丽梅,王树起,鞠会艳,等. 大豆根茬腐解产物的鉴定及化感作用的初步研究[J]. 生态学报,2000,20(5):771-778.
- [27] 郑丽,冯玉龙. 紫茎泽兰叶片化感作用对10种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报,2005,25(10):2782-2787.
- [28] 方芳,郭水良,黄华,等. 开花期加拿大一枝黄花水浸提液对3种作物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物研究,2007,27(5):569-573.

(上接第95页)

- [11] LANDA CONTRERAS R, TREJO TÉLLEZ L I, GÓMEZ MERINO F C, et al. Concentración de cationes en frijol común en respuesta a aluminio[J]. Terra latinoamericana,2010,28(2):119-127.
- [12] 李佩琴. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2017.
- [13] 陈荣府,沈仁芳. 水稻(*Oryza sativa* L.)铝毒害与耐性机制及铝毒害的缓解作用[J]. 土壤,2004,36(5):481-491.
- [14] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [15] 蔡永萍. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014.
- [16] JIANG M Y, JING J H. Generation of hydroxyl radical in plants and its relation to the initiation of lipid peroxidation[J]. Plant physiology communications,1993,29(4):300-305.
- [17] SONG Y J, DIAO Q N, QI H Y. Putrescine enhances chilling tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) through modulating antioxidant systems[J]. Acta physiologiae plantarum,2014,36(11):3013-3027.
- [18] GÜÇLÜ K, KİBRİSLİ OĞLU G, ÖZYÜREK M, et al. Development of a fluorescent probe for measurement of peroxy radical scavenging activity in biological samples[J]. J Agric Food Chem,2014,62(8):1839-1845.

- [19] 陈志刚,张红蕊,周晓红,等. 铝胁迫对黑麦草根抗氧化酶活性和丙二醛含量的诱导特征研究[J]. 土壤通报,2012(2):391-395.
- [20] 曾韶西,王柔. 低温光照下与黄瓜子叶叶绿素降低有关的酶促反应[J]. 植物生理学报,1991(2):177-182.
- [21] LECKIE D G, GOUGEON F A. Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis[J]. Remote sensing of environment,2003,85(3):355-369.
- [22] 魏颖颖,王凤龙,钱玉梅,等. 烟草和黄瓜花叶病毒互作中过氧化氢酶的动态变化[J]. 植物病理学报,2005,35(4):359-361.
- [23] 房玉林,宋士任,张艳芳,等. 不同品种葡萄抗霜霉病特性与叶片 POD、PPO 活性关系的研究[J]. 西北植物学报,2007,27(2):392-395.
- [24] ZHAO F Y, GUO S L, ZHANG H, et al. Expression of yeast SOD2 in transgenic rice results in increased salt tolerance[J]. Plant science,2006,170(2):216-224.
- [25] MIRZAEI M, MOIENI A, GHANATI F. Effects of drought stress on the lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars[J]. Journal of agricultural science & technology,2013,15(3):593-602.
- [26] 李西,王丽华,刘尉,等. 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较[J]. 生态学报,2014(5):1189-1197.