

土壤含水量对极小种群毛枝五针松幼苗抗氧化活性的影响

康洪梅, 张珊珊, 杨文忠*, 方波

(云南省林业科学院, 国家林业局云南珍稀濒危森林植物保护和繁育重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 为探究水分对毛枝五针松(*Pinus wangii*)幼苗生理特性的影响, 对不同土壤含水量下幼苗松针的抗氧化活性进行了研究。结果表明, 土壤含水量为田间持水量的40%~80%时, 其POD、SOD和CAT活性较强; 随着处理时间的延长, 细胞质膜渗透性减弱, 抗逆性变弱; 脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量均以20%~40%的田间持水量较高; 处理30 d后丙二醛含量随着土壤含水量的增加而提高, 在土壤含水量为田间持水量的40%时, 丙二醛含量最低, 抗逆性最强。因此, 人工培育幼苗时, 土壤水分过多的时间尽量不要超过30 d, 控制土壤水分田间最大持水量的30%~50%, 这样能提高幼苗存活率。

关键词: 毛枝五针松; 土壤含水量; 幼苗; 生理特性

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.009

Effects of Soil Water Content on Antioxidant Activities of *Pinus wangii* Seedlings

KANG Hong-mei, ZHANG Shan-shan, YANG Wen-zhong*, FANG Bo

(Key Laboratory of Rare and Endangered Forest Plant of State Forestry Administration, Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201, China)

Abstract: In order to explore the effects of soil water content on physiology characters of *Pinus wangii* seedlings, the antioxidant activities in pine needles were studied under different soil moisture. The results showed that the activities of POD, SOD, CAT were high under 40%–80% of field capacity. With prolong of time, the permeability of cell plasma membrane reduced, and stress resistance weakened. The contents of proline, soluble sugar and soluble protein were high under 20%–40% of field capacity. Malondialdehyde (MDA) content was gradually increased with the increment of soil water content for 30 d. When soil water content was 40% of field capacity, MDA content was the lowest and stress resistance of seedlings was the strongest. Therefore, the survival of seedlings could be improved under 30%–50% of field capacity, and the seedlings grown in too much soil water did not over 30 days.

Key words: *Pinus wangii*; Soil water content; Seedling; Physiological character

毛枝五针松(*Pinus wangii*)隶属于松科(Pinaceae)松属, 是国家II级重点保护野生植物^[1-2], 按IUCN地方濒危等级标准评价属于“极危种CR”^[3], 并被列入极小种群拯救保护计划, 加强毛枝五针松的保护

十分迫切。开展种苗繁育及相关研究是保护野生资源和物种保存的基础, 但目前毛枝五针松种苗繁育面临存活率低的问题, 一方面导致当地对毛枝五针松的加工利用仍然依赖天然资源, 使有限的野生资

收稿日期: 2015-05-20 接受日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460119); 国家林业局珍稀濒危物种野外救护与人工繁育项目(2014YB1004, 2015YB1021); 云南省极小种群物种拯救保护项目(2015SX1001); 云南省应用基础研究青年项目(2013FD075)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31460119), the Project for Wild Rescue and Breeding of Rare and Endangered Species of State Forestry Bureau (Grant No. 2014YB1004, 2015YB1021), the Rescuing and Conserving Program of Species with Extremely Small Population in Yunnan (Grant No. 2015SX1001), and the Youth Program for the Applied Basic Research in Yunnan (Grant No. 2013FD075).

作者简介: 康洪梅(1987~), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事植物生殖生理学和植物生殖生物学研究。E-mail: kanghongmei2005@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wzyang2004@126.com

源承受巨大压力;另一方面种苗补给不足,使不断退化的野生种群难以得到恢复和复壮。

土壤水分是植物生长和发育最关键的生态因子之一,水分过多或干旱都会影响植物的生长和发育。毛枝五针松分布于海拔1350~1700 m的石灰岩山地、石山岩坡和悬崖峭壁,土壤多为石灰岩风化的红色石灰岩土,土壤瘠薄缺水,因此水分对毛枝五针松的生长起关键作用。目前仅对毛枝五针松进行了野生资源调查^[4],并对12种五针松属植物的亲缘关系进行了分析^[5]。对毛枝五针松的苗木培育、关键生态因子等的研究还未见报道。本文对7个水分梯度下毛枝五针松幼苗的SOD、POD、CAT活性、脯氨酸、可溶性糖以及MDA含量进行测定,以揭示水分对毛枝五针松幼苗生长的影响,为确定毛枝五针松培育的最佳土壤水分含量,为制定合理的栽培管理措施提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料毛枝五针松(*Pinus wangii*)于2011年9月从云南省麻栗坡县采种,经2012-2014年育苗移栽至花盆中(土壤为圃地土:营养土:珍珠岩=3:1:1,于2014年6月10日选取35株株高、长势相对均匀的2年生实生苗作为材料)。

为减小其他气候因素的影响,试验从2014年6月11日至10月30日在气候相对稳定的温室大棚中进行。所有幼苗干旱半个月后(6月25日)测定土壤田间最大持水量(称量法),然后按田间最大持水量的5%、10%、20%、40%、60%、80%、100%设置7个水分梯度进行处理,每处理5盆共5次重复,每盆1株苗,隔1 d进行土壤水分补充,精确控制水分直至试验结束。7月30日第一次采样,8月29日第二

次采样,10月8日第三次采样,每次采样随机取每株植株松针。

1.2 方法

株高和冠幅用直尺测量,过氧化物酶活性(POD)测定采用愈创木酚比色法^[6];超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性采用试剂盒(上海生工生物)进行测定;脯氨酸(Pro)含量测定采用茚三酮显色法,丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[7];可溶性糖含量测定采用蒽酮法^[6];可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝法^[8]。

1.3 数据处理

采用SPSS 19.0软件对数据进行多因素方差分析,对时间和土壤水分分别比较和交互检验,以 $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。采用单因素方差分析,对时间和土壤水分分别进行显著性分析。采用Microsoft Excel 2007软件绘制图表。

2 结果和分析

2.1 对保护酶的影响

POD活性 双因素方差分析表明(表1),毛枝五针松松针POD活性在处理时间、土壤水分及其交互作用下的差异均极显著($P<0.01$)。从图1可见,处理后30~100 d,毛枝五针松松针的POD活性明显降低。随土壤相对含水量的增加,松针POD活性呈现先增加后降低的趋势。处理30 d,以土壤相对含水量为80%的POD活性最高,差异显著($P<0.05$),而土壤相对含水量为5%的最低;处理60 d,以土壤相对含水量为40%的POD活性最高,土壤相对含水量为5%的最低,差异显著($P<0.05$);处理100 d,以土壤相对含水量为40%的POD活性最高,土壤相对含水量为100%的最低。因此,土壤相对含水量

表1 毛枝五针松生理性状与时间、土壤水分间的方差分析(F)

Table 1 Two-Way ANOVA (F) between physiological characters and time, soil moisture

变量 Variation	自由度 df	过氧化物酶 POD	超氧化物歧化 酶 SOD	过氧化氢 酶 CAT	脯氨酸 Proline	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	丙二醛 MDA
时间 Time (A)	2	278.473**	7.769**	0.409	24.423**	26.140**	139.227**	16.530**
土壤水分 Soil moisture (B)	6	15.255**	2.102	5.360**	1.208	4.001**	12.662**	0.384
A×B	12	11.807**	3.746**	1.286	1.236	1.901	4.217**	3.145**

**: $P<0.01$.

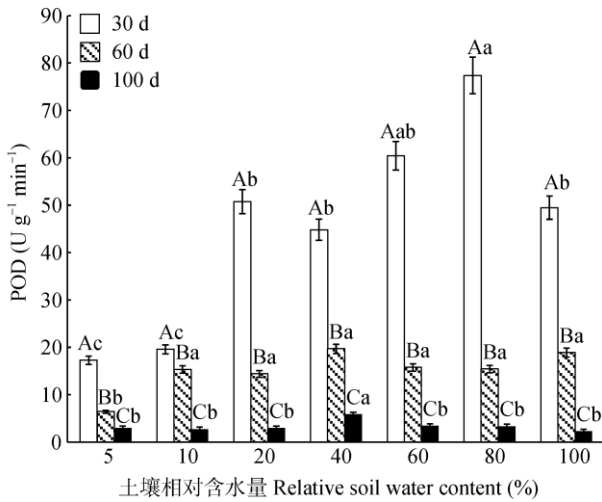


图1 土壤水分含量对毛枝五针松松针POD活性的影响。柱上不同大、小写字母分别表示处理时间和土壤水分间差异显著($P < 0.05$)。以下图表同。
Fig. 1 Effect of soil water content on POD activity of *Pinus wangii* needles. Different capital and small letters upon column indicate significant differences at 0.05 level among treatment time and soil moisture, respectively. The same is following Tables and Figures.

为40%~80%时的POD活性较高,毛枝五针松的抗逆性也相对较强。

SOD活性 双因素方差分析表明,处理时间、

水分时间交互作用的SOD活性差异均极显著($P < 0.01$),土壤水分间的差异不显著($P > 0.05$)(表1)。单因素方差分析表明,处理后30 d、60 d和100 d,不同土壤含水量处理的SOD活性差异显著($P < 0.05$),随处理时间的增加,毛枝五针松松针的SOD活性为先下降再上升。处理60 d的松针SOD活性显著低于处理30 d和100 d后的;随着土壤相对含水量的增加,松针SOD活性呈现先上升后下降再上升的变化趋势。处理30 d,以土壤相对含水量为20%的SOD活性最高,土壤相对含水量为80%的最低;处理60 d,以土壤相对含水量为40%的SOD活性最高,土壤相对含水量为10%的最低;处理100 d,以土壤相对含水量为10%的SOD活性最高,达 33.67 U g^{-1} ,土壤相对含水量为5%的最低,仅 10.51 U g^{-1} (图2)。从处理时间综合分析,当土壤含水量为40%时,SOD活性均相对较高,表现抗逆性较强。

CAT活性 土壤水分处理对CAT活性有极显著差异($P < 0.01$),时间和时间与水分交互作用的差异不显著($P > 0.05$)(表1);处理后30 d和60 d,土壤含水量对CAT活性的差异显著($P < 0.05$),而处理100 d的差异不显著($P > 0.05$)。随着处理时间的延长,松

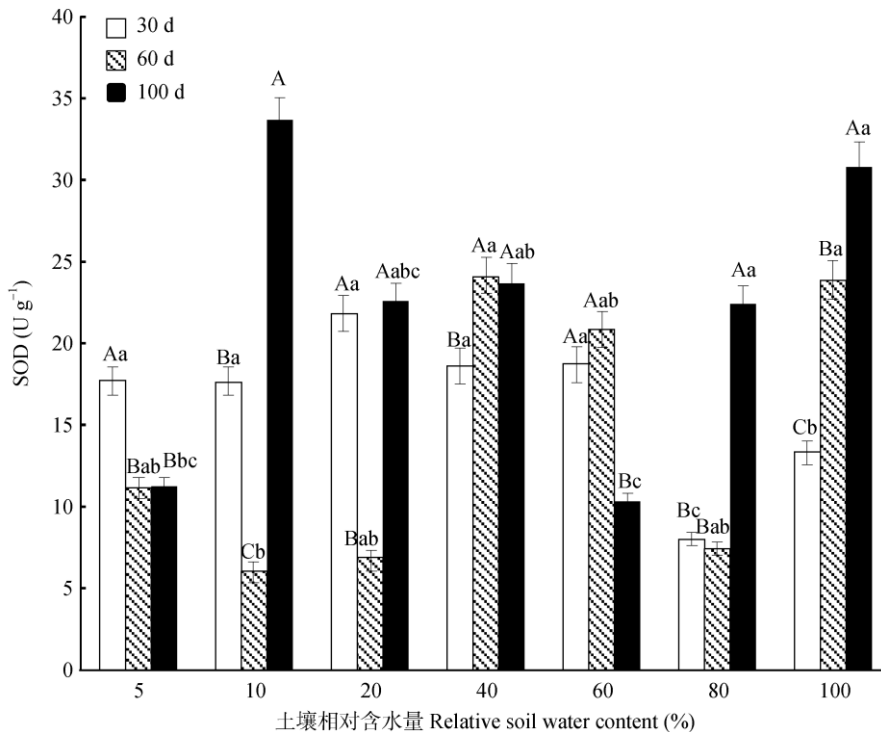


图2 土壤水分含量对毛枝五针松松针SOD活性的影响
Fig. 2 Effect of soil water content on SOD activity of *Pinus wangii* needles

针的CAT活性表现为先提高后下降;随着土壤相对含水量的增加,松针的CAT活性也呈先上升后下降的趋势。不同处理时间均以土壤相对含水量为40%

的CAT活性最高,土壤相对含水量为100%的最低(图3)。可见,土壤相对含水量为40%时毛枝五针松的抗逆性较强。

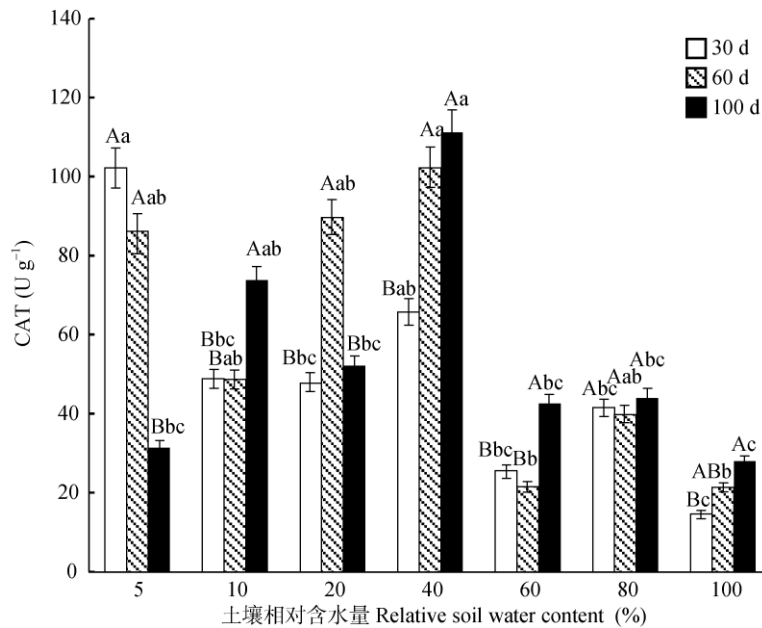


图3 土壤水分含量对毛枝五针松松针CAT活性的影响

Fig. 3 Effect of soil water content on CAT activity of *Pinus wangii* needles

2.2 对松针质膜渗透调节物的影响

脯氨酸含量 土壤相对含水量为20%~40%的毛枝五针松松针脯氨酸含量较高。不同时间对脯氨酸含量影响显著,而处理100 d时,不同时间的脯氨酸含量存在显著差异($P < 0.05$),处理30 d和60 d,土壤水分的影响差异不显著(表2)。随着处理时间的增加,脯氨酸含量逐渐降低,30 d所有水分梯度的脯氨酸含量均最高,最高值达 15.40 mg g^{-1} ,100 d时最低,仅为 1.09 mg g^{-1} ;而土壤相对含水量增加,松针脯氨酸含量总体呈先下降后上升的趋势。双因素方差分析表明,脯氨酸含量仅在处理时间上差异极显著($P < 0.01$),土壤水分和水分时间交互作用的影响均不显著(表1)。处理30 d时土壤相对含水量为20%的脯氨酸含量最高,而60 d后土壤相对含水量为40%的脯氨酸含量最高,处理100 d后土壤相对含水量为5%的脯氨酸含量最高,土壤相对含水量为60%的最低。这在一定程度上说明毛枝五针松的抗逆性随着处理时间的增加,抗逆性逐渐降低。

可溶性糖含量 随处理时间的增加,毛枝五

针松可溶性糖含量逐渐降低,土壤相对含水量为10%~40%的可溶性糖含量最强。双因素方差分析表明可溶性糖含量在时间和土壤水分含量下的差异均极显著($P < 0.01$),但二者的交互作用下差异却不显著(表1)。3个处理时间下,可溶性糖含量在不同土壤水分下有显著差异($P < 0.05$),处理30 d和60 d均以土壤相对含水量为40%的可溶性糖含量最高,处理100 d以土壤相对含水量为20%的可溶性糖含量最高,30 d土壤相对含水量为100%的最低,60 d和100 d土壤相对含水量为80%的可溶性糖最低(表2)。

可溶性蛋白质含量 水溶性蛋白含量在20%~60%土壤相对含水量时较高,此时更利于毛枝五针松的生长。水溶性蛋白含量受时间和土壤水分含量的影响均极显著($P < 0.01$),但二者交互作用却不显著(表1)。处理30 d和60 d,不同土壤水分下可溶性蛋白含量存在显著差异($P < 0.05$),而处理100 d,土壤水分对水溶性蛋白含量影响不显著。处理60 d时,不同土壤水分的可溶性糖含量均最高,以土壤相对含水量为60%的最高,达 16.99 mg g^{-1} ;而处理

30 d,以土壤相对含水量为60%的最大,为9.32 mg g⁻¹;处理100 d,水溶性蛋白质含量以土壤相对含水量为20%的最大,仅3.14 mg g⁻¹(表2)。

丙二醛含量 单因素方差分析表明(表2),水分梯度间的丙二醛含量差异显著($P<0.05$);处理时间和时间与水分交互作用的差异极显著($P<0.01$),但总体上土壤水分的影响不显著(表1)。随处理时间的延长,丙二醛含量先增加后下降,处理60 d,各土壤水分梯度下的丙二醛含量均较30 d和100 d的高,但差异不显著;随土壤相对含水量的增加丙二

醛含量总体表现为上升。处理30 d以土壤相对含水量为80%的丙二醛含量最高,土壤相对含水量为20%的最低。处理60 d的丙二醛含量以土壤相对含水量5%时最高,土壤相对含水量为40%的最低。处理100 d的丙二醛含量变化不大,以土壤相对含水量为5%的最高,土壤相对含水量为100%的最低。丙二醛的产生对逆境状态下的植物造成伤害,多出现在土壤水分含量过高和过低状态下,因此土壤相对含水量为20%~60%时,毛枝五针松的抗逆性更强。

表 2 土壤相对含水量对毛枝五针松渗透调节物质的影响

Table 2 Effect of soil water content on osmoregulation substances in *Pinus wangii*

渗透调节物质 Osmoregulation substance	时间 Day	土壤相对含水量 Relative soil water content (%)						
		5	10	20	40	60	80	100
脯氨酸 Proline (mg g ⁻¹)	30	13.84±4.02Aa	6.88±1.34Aa	15.40±1.38Aa	8.53±7.33Aa	14.19±6.62Aa	14.75±1.76Aa	15.28±3.70Aa
	60	8.61±3.69Ba	4.87±2.32ABa	8.96±2.27Ba	10.23±5.30Aa	2.16±0.98Ba	3.98±1.07Ba	2.14±0.43Ba
	100	6.45±0.68Ba	2.53±0.26Bc	2.44±0.79Cc	1.39±0.12Bcd	1.09±0.01Bd	3.96±0.30Bb	1.87±0.04Bcd
可溶性糖 Soluble sugar (mg g ⁻¹)	30	3.67±0.64Bab	4.61±1.53Bab	2.25±0.58Cb	4.94±0.29Ba	4.17±1.24Aab	3.02±0.90Aab	2.13±0.51Bb
	60	5.83±0.30Aa	6.16±0.11Aa	6.29±0.08Aa	6.32±0.33Aa	4.92±0.13Ab	4.24±0.09Ac	5.25±0.05Ab
	100	4.81±0.28ABa	5.24±0.06ABa	4.31±0.16Bb	3.86±0.11Bbc	3.85±0.12Abc	3.62±0.11Ac	4.29±0.19Ab
可溶性蛋白质 Soluble protein (mg g ⁻¹)	30	6.46±0.94Ba	6.82±1.22Ba	6.85±1.32Ba	9.10±1.12Ba	9.32±0.63Ba	0.59±0.42Bb	6.52±1.21Ba
	60	12.69±1.41Aa	13.23±1.84Aa	13.28±1.99Aa	16.66±1.67Aa	16.99±0.95Aa	3.85±0.66Ab	12.78±1.82Aa
	100	2.83±0.95Ca	2.99±0.59Ca	3.14±0.68Ca	2.99±0.70Ca	1.87±0.04Ca	3.09±0.88Aa	2.09±0.19Ca
丙二醛 MDA (mg g ⁻¹)	30	19.11±0.49Cb	18.79±1.29Bb	18.93±1.21Cb	33.96±9.53Aab	35.81±6.92Aab	41.13±8.31Aa	37.35±1.95Aab
	60	44.71±1.37Aa	39.85±2.79Aab	37.74±0.90Abc	34.01±3.46Abcd	35.19±2.2A2bcd	31.57±1.62Bd	32.49±2.38Bcd
	100	27.35±3.09Ba	22.18±0.56Bab	26.96±2.43Ba	22.89±2.78Bab	21.96±0.49Bab	20.08±1.21Cb	19.46±0.55Cb

3 结论和讨论

毛枝五针松分布于石灰岩山地或石山岩坡和悬崖峭壁,水分是极其重要的生态因素。本文对毛枝五针松幼苗在不同土壤水分(田间持水量的5%、10%、20%、40%、60%、80%、100%)下的水分生理特性进行了研究。由于育苗困难,幼苗存活率低,为节约有限的幼苗,本研究没有进行植株的生物量测定。研究表明,土壤相对含水量为40%~80%的毛枝五针松松针的POD活性更高,SOD和CAT活性均以土壤相对含水量为40%的最高。POD、SOD和CAT是植物细胞防御系统中重要的保护酶类,能有效清除植物代谢过程产生的活性氧,从而防止活性氧引起的膜脂过氧化伤害,与植物抗逆性密切相关,它们的活性变化是检测植物组织状态的重要指标^[9-10]。水稻(*Oryza sativa*)苗期的SOD、POD活性受温度因素显著影响^[11],植物的光合作用和膜质抗氧化作用也与抗氧化酶息息相关^[12-13]。毛枝五针松

松针的脯氨酸含量在土壤相对含水量为20%~40%时较高,土壤相对含水量为10%~40%时的可溶性糖含量较高。细胞中脯氨酸和可溶性糖的积累也与植物的抗逆性密切相关^[14-15],植物在逆境下通常会积累大量的脯氨酸,从而提高自身的抗逆性^[16],它们在逆境胁迫下对植物细胞起渗透调节作用^[17]。土壤相对含水量为20%~60%时松针的水溶性蛋白质含量较高;可溶性蛋白质是植物遭受逆境胁迫时的保护物质,其含量提高能明显增强细胞的抗性^[18]。松针的丙二醛含量在土壤相对含水量为20%~60%时较低。丙二醛(MDA)是植物细胞内自由基与质膜发生过氧化反应所产生的终产物,会加剧膜的损伤,因此常作为植物抗性生理研究中的一个常用指标^[19]。棒叶落地生根(*Kalanchoe tubiflora*)在干旱处理后MDA含量明显升高,复水后降低^[20]。因此,毛枝五针松生长的最适土壤含水量为田间持水量的40%,此时的抗逆性也最强。生长在石灰岩或石灰岩风化土壤中,长期干旱缺水,这对毛枝五针松的

生存是极大的考验,尤其是对幼苗的存活和生长。

不同植物对土壤水分的需求不同,本研究结果表明毛枝五针松的最适土壤水分为田间持水量的40%。土壤含水量为80%和60%更利于银杏(*Ginkgo biloba*)的光合作用^[21],土壤需水量远高于毛枝五针松。苍晶等^[11]的研究表明在22%~25%土壤含水量下,3个小麦(*Triticum aestivum*)品种的生理生化指标及返青率均处于较高水平,比毛枝五针松的需水量小。郎莹^[22]对山杏(*Armeniaca sibirica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)的研究表明,土壤水分过高或过低都不利于植株的高效用水,最适范围为田间最大持水量的60%~85%,土壤需水量均大于毛枝五针松。陈志国^[23]的研究表明玉米(*Zea mays*)在不同生长发育时期对土壤水分的需求量不同,播种时耕层土壤保持田间持水量的60%~70%能够保证良好的出苗,幼苗阶段应控制土壤水分为田间持水量的60%左右,拔节孕穗期土壤水分保持田间持水量的70%~80%为宜,抽穗开花期需要保持田间持水量的80%左右为最好,玉米各阶段的土壤需水量均远高于毛枝五针松。唐劲驰等^[24]的研究表明茶树(*Camellia sinensis*)正常生长的土壤需水量为田间最大持水量的75%,远高于毛枝五针松。曹昀等^[25]认为,水分亏缺对菖蒲(*Acorus calamus*)萌发和幼苗生长均有影响。毛枝五针松的土壤需水量比农作物小,但比长期生活在干旱环境中的植物要大。

本研究对极小种群植物毛枝五针松幼苗的培育具有指导意义。毛枝五针松作为IUCN极度濒危种,又是极小种群植物,应该优先保护,野外调查其种群极小,更新慢,林下无幼苗。人工采种繁育的幼苗存活率低。根据其生长环境的特殊性,为提高幼苗存活率,我们认为毛枝五针松在幼苗阶段应控制土壤水分为田间最大持水量的30%~50%,同时增加其他保育措施,如控制温度、光照和土壤pH等因素,为扩大其种群规模,有效地保护极小种群植物毛枝五针松打下基础。

参考文献

[1] China State Council of the People's Republic of China. The first batch of list of national key protected wild plants [J]. Plants,

1999(5): 4-11.

中华人民共和国国务院. 国家重点保护野生植物名录(第一批) [J]. 植物杂志, 1999(5): 4-11.

- [2] Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Flora of Yunnan, Vol. 4 [M]. Beijing: Science Press, 1986: 18.
中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志, 第4卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 18.
- [3] GUO H J. Implement conservation of extremely small population spices [J]. Yunnan For, 2009, 30(5): 7.
郭辉军. 认真实施极小种群物种保护 [J]. 云南林业, 2009, 30(5): 7.
- [4] ZHOU Y, JIANG H, YANG W Z, et al. Study on stock of *Pinus wangii*, an extremely small population species [J]. J W China For Sci, 2012, 41(3): 80-83. doi: 10.3969/j.issn.1672-8246.2012.03.014.
周云, 蒋宏, 杨文忠, 等. 极小种群植物毛枝五针松的野生资源状况研究 [J]. 西部林业科学, 2012, 41(3): 80-83. doi: 10.3969/j.issn.1672-8246.2012.03.014.
- [5] LIU G F, DONG J X, JIANG Y, et al. Analysis of genetic relationship in 12 species of section *Strobos* with ISSR markers [J]. J For Res, 2005, 16(3): 213-215. doi: 10.1007/BF02856817.
- [6] LI H S, SUN Q, ZHAO S J, et al. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment [M]. Beijing: China Higher Education Press, 2000: 184-227.
李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 184-227.
- [7] ZHANG Z L, QU W J, LI X F. Plant Physiology Experimental Guide [M]. 4th ed. Beijing: China Higher Education Press, 2009: 20-60.
张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导 [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 20-60.
- [8] CHEN J X, WANG X F. Plant Physiology Experiment Guide [M]. Guangzhou: South China University of Science and Technology Press, 2005: 119-123.
陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 119-123.
- [9] KUK Y L, SHIN J S, BURGOS N R, et al. Antioxidative enzymes offer protection from chilling damage in rice plants [J]. Crop Sci, 2003, 43(6): 2109-2117. doi: 10.2135/cropsci2003.2109.
- [10] PEI B D, ZHANG W, SHI R X. Biochemical mechanism of cold-resistance of two breeds of winter wheat [J]. J Shanxi Agri Univ, 2000, 20(3): 288-290.
裴宝弟, 张雯, 史瑞雪. 冬小麦寒害和抗寒性生化机理研究 [J]. 山西农业大学学报, 2000, 20(3): 288-290.
- [11] WANG L, CAI Q H. Impacts of cold stress on activities of SOD and POD of rice at seedling stage [J]. Hunan Agri Sci, 2011(11): 56-58,62. doi: 10.3969/j.issn.1006-060X.2011.11.017.
王兰, 蔡千蕙. 低温胁迫对水稻苗期SOD、POD活性的影响 [J]. 湖

- 南农业科学, 2011(11): 56–58,62. doi: 10.3969/j.issn.1006-060X.2011.11.017.
- [12] HABIBI G, HAJIBOLAND R. Photosynthetic characteristics and antioxidative responses in three species of Crassulaceae following drought stress [J]. *J Sci Islam Repub Iran*, 2010, 21(3): 205–212.
- [13] CAO X Q. The effect of membrane-lipid peroxidation on cell and body [J]. *Prog Biochem Biophys*, 1986, 2(1): 17–23.
- [14] GARAHAM D, PATTERSON B D. Responses of plants to low non-freezing temperatures: Proteins metabolism, and acclimation [J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1982, 33(1): 347–372. doi: 10.1146/annurev.pp.33.060182.002023.
- [15] Nayyar H, Walia D P. Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid [J]. *Biol Plant*, 2003, 46(2): 275–279. doi: 10.1023/A:1022867030790.
- [16] CANG J, LI H W, YU J, et al. Effect of soil water content on physiological characteristics of wheat during overwintering period [J]. *J NE For Univ*, 2013, 44(1): 39–44.
苍晶, 李怀伟, 于晶, 等. 土壤水分含量对小麦越冬期生理特性的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 44(1): 39–44.
- [17] KARMARKAR S V. Analysis of wastewater for anionic and cationic nutrients by ion chromatography in a single run with sequential flow injection analysis [J]. *J Chromatogr A*, 1999, 850(1/2): 303–309. doi: 10.1016/S0021-9673(99)00145-4.
- [18] YU J, ZHANG L, CUI H, et al. Physiological and biochemical characteristics of Dongnongdongmai 1 before wintering in high-cold area [J]. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(11): 2019–2025. doi: 10.3724/SP.J.1006.2008.02019.
于晶, 张林, 崔红, 等. 高寒地区冬小麦东农冬麦1号越冬前的生理生化特性 [J]. *作物学报*, 2008, 34(11): 2019–2025. doi: 10.3724/SP.J.1006.2008.02019.
- [19] PAN R Z. *Plant Physiology* [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 5–200.
潘瑞炽. *植物生理学* [M]. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 5–200.
- [20] LUO Y L, BI T J, SU Z L, et al. Physiological response of *Kalanchoe tubiflora* leaves to drought stress and rewatering [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2014, 22(4): 391–398. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.04.010.
罗银玲, 毕廷菊, 苏志龙, 等. 棒叶落地生根对干旱与复水的生理响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2014, 22(4): 391–398. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.04.010.
- [21] JING M, CAO F L, WANG G B, et al. The effects of soil water contents on photosynthetic characteristics of Ginkgo [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2005, 29(4): 83–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.04.020.
景茂, 曹福亮, 汪贵斌, 等. 土壤水分含量对银杏光合特性的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2005, 29(4): 83–86. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.04.020.
- [22] LANG Y. Effects of soil water on light response process of photosynthesis of three tree species [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011: 6–20.
郎莹. 土壤水分对 3 个树种光合作用光响应过程的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2011: 6–20.
- [23] CHEN Z G, GAO S R, WANG H X. The influence of soil moisture on growth and development of corn [J]. *Mod Agri*, 2014(1): 8–9. doi: 10.3969/j.issn.1001-0254.2014.01.003.
陈志国, 高树仁, 王宏祥. 土壤水分对玉米生长发育的影响 [J]. *现代化农业*, 2014(1): 8–9. doi: 10.3969/j.issn.1001-0254.2014.01.003.
- [24] TANG J C, LI J L, TANG H, et al. Photosynthetic characteristics and water use efficiency of tea plant under different soil moisture condition [J]. *Chin Agri Sci Bull*, 2014, 30(1): 248–253.
唐劲驰, 黎健龙, 唐颢, 等. 土壤水分胁迫对不同茶树品种光合作用及水分利用率的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(1): 248–253.
- [25] CAO Y, WANG G X. Effects of soil water content on germination and seedlings growth of sweet flag [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(5): 1748–1755. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.05.010.
曹昀, 王国祥. 土壤水分含量对菖蒲(*Acorus calamus*)萌发及幼苗生长发育的影响 [J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1748–1755. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.05.010.