

DOI: 10.5846/stxb201505271061

田丽, 王孝安, 李晓炜. 毛乌素沙地优势灌丛对两种松树幼苗的保育作用. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Tian L, Wang X A, Li X W. Nurse effects of dominant shrubs on the seedlings of two *Pinus* species in the mu us sandy land in Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

## 毛乌素沙地优势灌丛对两种松树幼苗的保育作用

田 丽<sup>1,2,\*</sup>, 王孝安<sup>1</sup>, 李晓炜<sup>2</sup>

1 陕西师范大学生命科学院, 西安 710062

2 榆林学院生命科学院, 榆林 719000

**摘要:**本研究选择毛乌素沙地优势灌丛柠条(*Caragana intermedia*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)和沙柳(*Salix psammophila*)作为保育植物,选择两年生油松(*Pinus tabulaeformis*)和樟子松(*Pinus sylvestris*)幼苗作为目标植物,将其分别种植在开阔地、柠条、紫穗槐和沙柳 4 种微生境下,连续 3a 监测油松和樟子松幼苗的存活和生长动态,从而确定毛乌素沙地优势灌丛是否对植物幼苗的定居有促进作用。结果表明:柠条、紫穗槐和沙柳冠层下光照强度、大气温度和土壤温度都显著低于开阔地,致使土壤湿度增高,油松幼苗总存活率均显著高于开阔地,而樟子松幼苗总存活率仅紫穗槐冠层下显著高于开阔地( $P < 0.05$ )。紫穗槐冠层下油松和樟子松幼苗总存活率均最高( $P < 0.05$ ),外来种紫穗槐可选为保育植物。保育灌丛下松树幼苗的主枝生长良好,并未受到抑制,但第一年主枝生长长度最小。光照强度和土壤湿度是决定主枝生长长度的重要因素。保育灌丛高度和冠幅面积与油松和樟子松幼苗存活率呈显著正相关( $P < 0.05$ )。固氮灌丛(紫穗槐和柠条)对松树幼苗存活有持续的促进作用,但柠条冠幅结构紧密,可能因为对光的竞争,减弱了促进作用。沙柳灌丛下松树幼苗的存活率较低。油松幼苗具有一定程度的耐阴性,樟子松幼苗喜光性强,保育灌丛下油松幼苗存活率显著高于樟子松幼苗( $P < 0.05$ )。总的来说,保育灌丛对松树幼苗的定居有促进作用,保育植物技术可作为一种有效的恢复措施,应用在毛乌素沙地的植被恢复中来。但是,保育灌丛的选择要考虑是本土种或外来种,以及灌丛的高度、冠幅大小、冠幅结构和化学效应,恢复物种的选择要考虑其自身的生物学特性及其与保育植物的相互作用。

**关键词:**保育灌木;松树;促进作用;恢复;毛乌素沙地

## Nurse effects of dominant shrubs on the seedlings of two *Pinus* species in the mu us sandy land in Northwest China

TIAN Li<sup>1,2,\*</sup>, WANG Xiao'an<sup>1</sup>, LI Xiaowei<sup>2</sup>

1 College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

2 College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China

**Abstract:** Over-grazing, mining, and inappropriate agricultural management practices combined with repeated drought events in the Mu Us sandy land in northern part of Shaanxi, Northwest China, have caused severe desertification. This landscape-scale degradation has significantly declined the possibility of natural ecosystem recovery. These conditions warrant ecological restoration of these areas to allow the re-development of sustainable ecosystems. Seedling establishment is the most crucial stage in a restoration project. In the Mu Us sandy land, restoration efforts might have been largely limited owing to the soil moisture deficiency, temperature fluctuations, high light intensities, low soil fertility, competition, allelopathy, herbivory, and wind. Several restoration techniques have long been used to alleviate these problems; however, their application has been restricted by low seedling and plant survival as well as high cost. Thus, developing novel, low-cost, and efficient restoration techniques is necessary. Plant-plant interaction effects provided by nurse plants can significantly

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(09JK839);榆林市科技计划项目(2015CXY-03)

收稿日期:2015-05-27; 网络出版日期:2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianli820312@126.com

increase or decrease the seed germination rates and establishment of seedlings under their canopies. Therefore, this study primarily aimed to determine the ability of shrubs to be used as a restoration tool in the Mu Us sandy land. Two-year-old seedlings of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus sylvestris* were planted under the canopies of three shrub species (*Caragana intermedia*, *Amorpha fruticosa*, and *Salix psammophila*) or in open areas with no shrubs as a control; the objective was to determine whether the presence of shrubs facilitated the establishment of pine seedlings, which was assessed three times over three consecutive growing seasons, in the Mu Us sandy land. The height and canopy spatial area of shrubs were measured. The microclimate conditions (light intensity, air and soil temperatures, as well as soil moisture) were recorded in the four microhabitats, that is, under the canopy of each of the three shrubs and in areas without the shrubs (control). The near-surface light intensity as well as air and soil temperatures were lower under the shrubs, which led to higher soil moisture; because of these conditions, the survival rates of *P. tabulaeformis* seedlings growing under the canopy of the shrub species were higher than those of the seedlings growing in the control area ( $P < 0.05$ ). However, the survival rates of *P. sylvestris* seedlings were higher only under the canopy of *A. fruticosa* ( $P < 0.05$ ). The survival rates of *P. tabulaeformis* and *P. sylvestris* seedlings were the highest under the canopy of *A. fruticosa* ( $P < 0.05$ ). Thus, the exotic species, *A. fruticosa*, could be used successfully as a nurse plant. Increased plant height and canopy area of nurse shrubs might improve the establishment of pine seedlings. The leguminous shrubs (*C. intermedia* and *A. fruticosa*) showed continuous facilitation of seedling establishment during moderate drought stress (summers of 2012, 2013, and 2014), but the presence of a dense and small shrub, *C. intermedia*, reduced the rate of seedling establishment possibly because of the competition for light. In 2012, *S. psammophila* also facilitated seedling establishment, but an unknown effect led to a high mortality rate for seedlings growing under their canopy. A noteworthy finding was that the growth of the two pine species was not inhibited when they were planted under the three shrubs. Pine seedlings had the shortest leader shoot lengths in 2012, with light intensity and soil moisture as important factors that controlled their length. The shade-tolerant species, *P. tabulaeformis*, had a higher seedling survival rate than that of *P. sylvestris*. In conclusion, nurse-shrub facilitation can be used as an effective restoration strategy in the Mu Us sandy land. However, the successful use of shrubs as nurse plants depends on their origin and morphological characteristics and ecological effects; the selection of target species depends on their tolerance of shade and their interaction with nurse plants.

**Key Words:** nurse shrub; pine; facilitation; restoration; Mu Us sand land

保育植物(nurse plant)是那些能够在其冠幅下辅助(facilitation)其他目标物种(target species)生长发育的物种,它主要通过对目标物种的种子萌发或者幼苗定居提供较好的微环境(如调节光照、温度、土壤水分、养分、防风以及防止动物啃食等),并通过植物种间的正效应使目标物种成功定居,从而有效缩短恢复时间<sup>[1-4]</sup>。近些年,国际恢复生态学界已开始将保育植物技术应用于植被恢复中并取得了一些成效<sup>[5-9]</sup>,其中Castro等是最早将天然保育植物应用于生态恢复中的,在四年的实验中保育灌木并没有抑制两种山地松的生长,反而使其死亡率下降<sup>[5-6]</sup>。我国对保育植物技术在植被恢复中的应用研究还很少,主要集中在南亚热带退化生态系统中<sup>[2]</sup>,而对退化沙地生态系统的相关研究还未见报道。

从古文献记载、地学、古生物学、考古发掘和树木年代学等方面研究证实毛乌素沙地历史时期曾有大量松属乔木分布,森林植被也构成过毛乌素沙地的顶级群落<sup>[10]</sup>。现代毛乌素沙地受干旱、多风等自然因素影响,以及人为不合理的开垦、放牧和开矿等原因,使原本脆弱的生态系统遭到严重的破坏,沙尘暴频发,荒漠化严重,植被退化迅速,从而大大降低该沙区自然恢复的可能性<sup>[11-12]</sup>。在人工植被恢复工程中幼苗的定居是关键阶段<sup>[13]</sup>,但沙区土壤水分含量低、养分贫瘠、温差大、光照强、竞争、化感、捕食和多风等多种因素限制幼苗的定居。人们采用过许多不同的植被恢复技术,如人工造林、林分改造、以及宫胁造林法,与之相匹配还发展了使用营养杯、保水剂、遮阴等技术。但是这些恢复技术,代价大、风险高、有时甚至加速了植被的退化<sup>[14-18]</sup>。因此,该沙区迫切需要发展能维持生态系统功能和服务的新型低成本而又有效的恢复技术。

毛乌素沙地的优势物种是灌木,种类非常丰富,共25科,50属,92种,其中豆科(Leguminosae)种类最

多<sup>[19]</sup>。吕荣等<sup>[20]</sup>进行了为期 14 年的造林试验,从五种针叶树种中筛选出毛乌素沙地针叶树造林的首选树种是樟子松(*Pinus sylvestris*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)。因此,本研究选择毛乌素沙地优势灌丛豆科的柠条(*Caragana intermedia*)和紫穗槐(*Amorpha fruticosa*),杨柳科(Salicaceae)的沙柳(*Salix psammophyila*)作为保育植物,选择两年生油松和樟子松幼苗作为目标植物,将其分别种植在开阔地、柠条、紫穗槐和沙柳 4 种微生境下,连续 3a 监测油松和樟子松幼苗的存活率和主枝生长长度,从而确定毛乌素沙地优势灌丛是否对松树幼苗的定居有促进作用,保育植物技术是否可应用到毛乌素沙地生态系统的植被恢复中来。该研究不仅能加强植物间正效应的作用方式及作用机理的了解,也为在环境条件较为恶劣、植被较为脆弱的地区发展有效的生态恢复方法提供了重要指引。

## 1 研究区自然概况

陕西省榆林市北部风沙区地处毛乌素沙地东南缘,位于 107°20′—111°11′ E, 37°20′—39°22′ N,海拔 1200—1600m,属温带半干旱大陆性季风气候区。年平均气温 6.0—8.5℃,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2847.2—3418.2℃。全年日照时数 2768—2991h,太阳总辐射量 135.6—144.3MJ/cm<sup>2</sup>,无霜期 134—153d。全年降水量 250—440mm,60%~75%降水量集中于 7~9 月,水热同期。土壤为风沙土。

毛乌素沙地最有代表性和分布最广的类群是沙生植被,其类型十分丰富多样。沙生植物群落优势种以灌木为主,主要包括油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条、沙柳、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、踏郎(*Hedysarum leave*)等。紫穗槐是外来种,其除具防风固沙,水土保持的作用之外,还具有高的经济价值,所以在毛乌素沙地被广泛种植,无生物入侵的危险<sup>[19]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 物种的选择

为了研究毛乌素沙地优势灌丛的保育作用,本试验选择在该沙区分布广、数量多,且具有耐寒、耐旱和防风固沙能力的当地优势灌木种柠条和沙柳作为保育植物。为了研究外来种在毛乌素沙地是否仍具有保育作用,本试验选择唯一外来种紫穗槐作为保育植物。柠条属豆科锦鸡儿属,冠层结构紧密;紫穗槐属豆科紫穗槐属,冠层结构松散;两者均具固氮作用。沙柳属杨柳科柳属,冠层结构较松散,具有化感作用。该沙区在人工植被恢复工程中,油松和樟子松是造林的首选树种,并被广泛种植<sup>[20]</sup>。因此本试验选择油松和樟子松幼苗作为目标植物。油松和樟子松属松科(Pinaceae)松属,均为阳性树种,但油松幼苗具有一定程度的耐荫特性,樟子松幼苗却喜光性强。本次恢复试验所需的乔木幼苗均由陕西省榆林市种苗站苗圃基地提供,移栽前其在苗床上已生长 2 年。

### 2.2 试验设计

本试验设置 3 个 30×100m<sup>2</sup>的样方,每个样方之间间隔 200m。在每个样方内分别选择柠条、紫穗槐和沙柳作为保育灌木,开阔地作为对照,共 4 种微生境。本试验于 2012 年 3 月 14—24 日期间,从榆林市种苗站苗圃基地裸根移植两年生油松和樟子松幼苗作为目标植物,分别将其种植在 4 种微生境下。每种微生境下种植油松和樟子松幼苗各 30 株,总计种植松树幼苗 3 个样方×4 个微生境×2 个树种×30 株/树种=720 株。样方内 3 种保育灌木随机选择,以每株灌木中心为圆心,冠幅为半径,在灌木冠幅覆盖边缘的内侧有东、南、西、北 4 个种植位点,选择在灌木冠层下北侧位点进行种植<sup>[5-6]</sup>,每一株灌木冠层下种植一株松树幼苗,开阔地种植位点随机选择。于 2012 年 6 月,逐个检查已种植的松树幼苗,剔除由于移植造成死亡的幼苗。

### 2.3 环境指标测定

本试验测量了 4 种微生境下影响松树幼苗成功定居的环境指标有光照强度(lx)、大气温度(℃)、土壤温度(℃)和土壤湿度(%),每个环境指标 5 个重复。从 2012 年 8 月 6 日~15 日,选择晴朗无云日,使用 HOBO Pendant 型光强/温度自动记录仪,每个微生境随机抽取 5 个样点,各放置 1 个监测探头,探头距地表距离

10cm,测定光照强度和大气温度;将监测探头埋于地表 10cm 处,测定土壤温度。HOBO Pendant 型光强/温度自动记录仪从 10:00~16:00,间隔 15min,进行连续记录。每一种微生境随机抽取 5 个样点,除去土壤上层的干土层,使用 Hydra 型土壤水分/温度记录仪,测量湿土层 10cm 处的土壤湿度,每个样点重复测量 3 次。

#### 2.4 保育灌木和松树幼苗生长指标测定

为了研究灌木植株高度和冠幅大小对松树幼苗存活与生长的影响,本试验随机选择柠条、紫穗槐和沙柳灌木各 20 株,测定每株最高枝条的长度,估算灌木最大高度;最初野外调查发现 3 种灌木的冠幅形状都几乎接近于圆形,因此测定每株冠幅的最大直径,估算冠幅最大面积。

于 2012 年 8 月、2013 年 8 月和 2014 年 8 月,3 次统计松树幼苗的存活数,并计算总存活率和年度存活率。总存活率是第三年存活数与移栽后总存活数之比;年度存活率是当年存活数与前一年存活数之比。同时用钢卷尺 3 次测定并记录存活的每株油松和樟子松幼苗的主枝生长长度。

#### 2.5 数据分析

采用 SPSS13.0 中一般线性模型 (GLM) 进行重复测量的方差分析分析松树幼苗存活率和主枝生长长度数据, GLM 中测量时间 (Date: 2012 年、2013 年和 2014 年) 为随机因子, 种植微生境 (Microhabitat: 开阔地、柠条、紫穗槐和沙柳) 为主因子。4 种微生境间松树幼苗的存活率、光照强度、大气温度、土壤温度和土壤湿度的差异, 3 种灌木间植株高度、冠幅面积的差异均采用 Tukey's 检验。灌木生长指标、环境因子与松树幼苗存活率和主枝长度的相关关系采用 Pearson 指数进行分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 松树幼苗的存活分析

##### 3.1.1 不同微生境下松树幼苗总存活率分析

不同微生境下油松和樟子松幼苗总存活率见图 1。紫穗槐、柠条和沙柳冠层下油松幼苗总存活率均显著高于开阔地的 ( $P < 0.05$ ), 紫穗槐冠层下油松幼苗总存活率最高 ( $P < 0.05$ ), 柠条和沙柳冠层下油松幼苗总存活率间无显著差异。樟子松幼苗总存活率仅在紫穗槐冠层下显著高于开阔地的 ( $P < 0.05$ ), 柠条和沙柳冠层下樟子松幼苗总存活率最低。开阔地上油松幼苗的总存活率显著低于樟子松幼苗的; 柠条和沙柳冠层下油松幼苗总存活率显著高于樟子松幼苗的 ( $P < 0.05$ ); 紫穗槐冠层下油松和樟子松幼苗总存活率间无显著差异。

##### 3.1.2 不同微生境下松树幼苗年度存活率分析

柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地四种微生境下, 油松和樟子松幼苗分别在 2012 年、2013 年和 2014 年里的年度存活率动态变化见图 2。在连续三年里, 紫穗槐冠层下油松幼苗每年的年度存活率基本均显著高于开阔地的 ( $P < 0.05$ ), 说明紫穗槐对油松幼苗有持续的促进作用; 樟子松幼苗仅第一年的年度存活率显著高于开阔地的 ( $P < 0.05$ ), 这可能与樟子松幼苗喜光性强有关。柠条冠层下油松幼苗第三年年度存活率显著低于开阔地的 ( $P < 0.05$ ), 而樟子松幼苗第二年年度存活率就已开始显著低于开阔地的 ( $P < 0.05$ ); 沙柳冠层下油松和樟子松幼苗年存活率在第二年开始均已显著低于开阔地的 ( $P < 0.05$ ); 说明柠条和沙柳在第二年开始逐渐减弱对松树幼苗的促进作用。

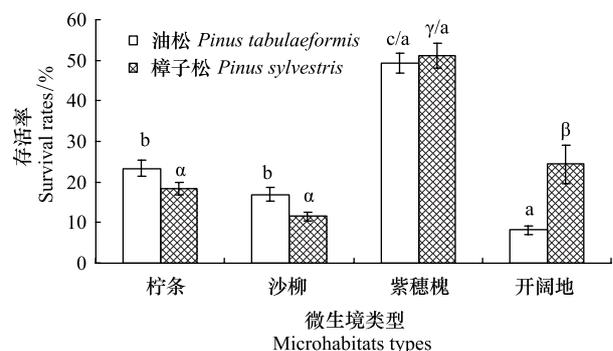


图 1 不同微生境下松树幼苗的总存活率

Fig.1 Total survival rate of Pine seedlings under the canopy of three shrub species or in open areas

平均数±标准误 ( $n = 3$ ); 不同英文字母表示油松幼苗存活率在不同微生境间存在显著性差异; 不同希腊字母表示樟子松幼苗存活率在不同微生境间存在显著性差异; 不同字母表示不同微生境下油松和樟子松幼苗存活率间存在显著差异; ( $P < 0.05$ , Tukey test)

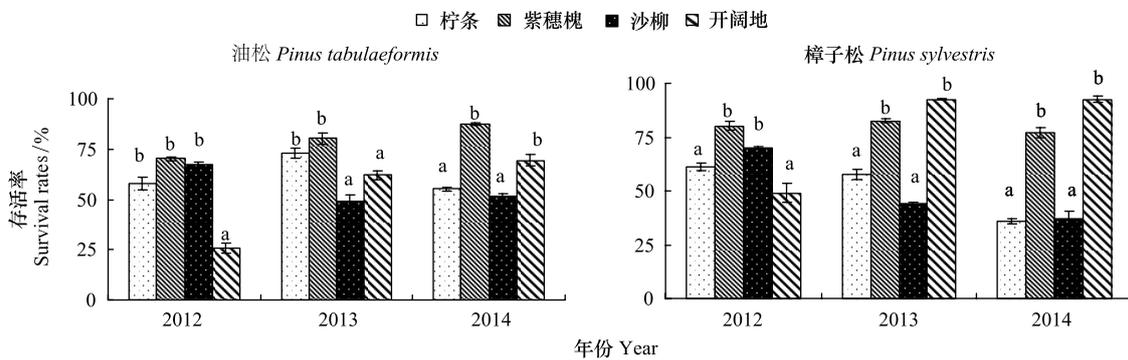


图2 不同微生境下松树幼苗的年度存活率

Fig.2 Annual survival rate of Pine seedlings under the canopy of shrub species or in open areas in three consecutive growth seasons

误差线为平均数±标准误(n=3);误差线上的字母不同表示不同处理间存在显著性差异(P<0.05, Tukey test)

### 3.1.3 微生境和时间对松树幼苗存活率的影响分析

微生境和时间对松树幼苗存活率的一般线性模型的重复测量方差分析结果见表1。结果分析表明微生境(柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地)对油松和樟子松幼苗的存活率有显著的影响( $P<0.05$ ),但时间(2012年、2013年和2014年)及其时间与微生境的交互作用均对油松和樟子松幼苗存活率无显著影响,说明在本次恢复试验进行期间,微生境对松树幼苗定居的作用不随时间的变化而发生改变。

表1 微生境和时间对松树幼苗存活率的一般线性模型的重复测量方差分析结果

Table 1 Results of repeated measurements GLM analysis on survival of pine seedlings

变异来源 Sources of variation	自由度 df	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>		樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	
		方差检验值 F	差异显著性 Sig.	方差检验值 F	差异显著性 Sig.
时间 Date	2	152.783	0.072	202.548	0.053
时间×微生境 Date ×Microhabitat	7	2.656	0.081	4.367	0.066
误差 Error	191				
截距 Intercept	1	464.814	0.000	513.642	0.000
微生境 Microhabitat	3	<b>4.432</b>	<b>0.013</b>	<b>6.142</b>	<b>0.002</b>
误差 Error	96				

时间 = 2012年、2013年和2014年;微生境 = 柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地;  $n=3$ ;  $P<0.05$  的效应用粗体表示

### 3.2 松树幼苗的生长分析

油松和樟子松幼苗主枝生长的平均长度在保育灌木(( $6.96\pm 0.61$ )cm和( $7.06\pm 0.45$ )cm)和开阔地(( $6.76\pm 1.10$ )cm和( $7.25\pm 1.57$ )cm)间均无显著差异(见表2),说明保育灌木冠层下松树幼苗的主枝生长良好,并未受到抑制。

表2 不同微生境和不同时间的松树幼苗主枝生长长度

Table 2 The leader shoot length of Pine seedlings under different microhabitats in three consecutive growth dates

主枝生长长度 Leader shoot length/cm	微生境 Microhabitat	时间 Time			平均值 Mean
		2012年	2013年	2014年	
油松幼苗 <i>P. tabulaeformis</i> seedlings	柠条 <i>Caragana</i>	4.11±0.18a	6.85±0.94b	8.36±0.30c	6.96±0.61a
	紫穗槐 <i>Amorpha</i>	4.36±0.30a	7.9±0.83b	8.90±0.27c	
	沙柳 <i>Salix</i>	4.51±0.27a	7.38±0.52b	7.62±0.67b	
	开阔地 Open	4.58±0.52a	7.56±0.37b	8.13±0.29c	
樟子松幼苗 <i>P. sylvestris</i> seedlings	柠条 <i>Caragana</i>	4.51±0.25a/α	5.95±0.30b/α	6.03±1.03c/β	7.06±0.45a
	紫穗槐 <i>Amorpha</i>	4.08±0.45a/α	8.82±0.50b/β	9.67±0.63c/γ	
	沙柳 <i>Salix</i>	4.31±0.25a/α	5.36±0.32b/α	5.84±0.23b/α	
	开阔地 Open	4.20±0.21a/α	8.10±0.34b/β	9.45±0.51c/γ	

平均数±标准误(n=3);不同英文字母表示不同时间(2012年、2013年和2014年)间存在显著性差异,灌木和开阔地间存在显著性差异;不同希腊字母表示柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地间存在显著性差异( $P<0.05$ , Tukey test)

微生境和时间对松树幼苗主枝生长长度的一般线性模型的重复测定方差分析结果见表 3。结果表明松树幼苗主枝生长长度随测量时间不同而存在显著差异( $P<0.05$ )。松树幼苗第一年主枝生长长度在保育灌木和开阔地均最小(见表 2),这可能因为移栽时松树幼苗的根系受到损伤,无法从土壤中充分吸收养分所致。油松幼苗主枝生长长度在不同微生境间无显著差异。但樟子松幼苗主枝生长长度受测量时间和微生境交互作用的显著影响( $P<0.05$ ),说明随着时间的变化微生境对樟子松幼苗主枝生长长度的影响是不同的。在紫穗槐冠层下和开阔地樟子松幼苗主枝生长长度最大。

表 3 微生境和时间对松树幼苗主枝生长长度的一般线性模型的重复测定方差分析结果

Table 3 Results of repeated measurements GLM analysis on leader shoot length of Pine seedlings after three growing seasons

变异来源 Sources of variation	自由度 df	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>		樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	
		方差检验值 F	差异显著性 Sig.	方差检验值 F	差异显著性 Sig.
时间 Date	2	<b>38.82</b>	<b>0.002</b>	<b>20.48</b>	<b>0.003</b>
时间×微生境 Date × Microhabitat	7	5.65	0.078	<b>4.367</b>	<b>0.036</b>
误差 Error	204				
截距 Intercept	1	4.81	0.042	9.07	0.000
微生境 Microhabitat	3	1.83	0.054	6.14	0.014
Error 误差	350				

时间=2012年、2013年和2014年;微生境=柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地; $n=3$ ;  $P<0.05$ 的效应用粗体表示

### 3.3 保育灌木生长指标对松树幼苗存活与生长的影响分析

柠条、紫穗槐和沙柳 3 种优势灌木的植株高度和冠幅面积的比较分析表明,紫穗槐植株最高,沙柳居中,柠条最低(见图 3a);冠幅面积的差异与高度的变化相似(见图 3b)。

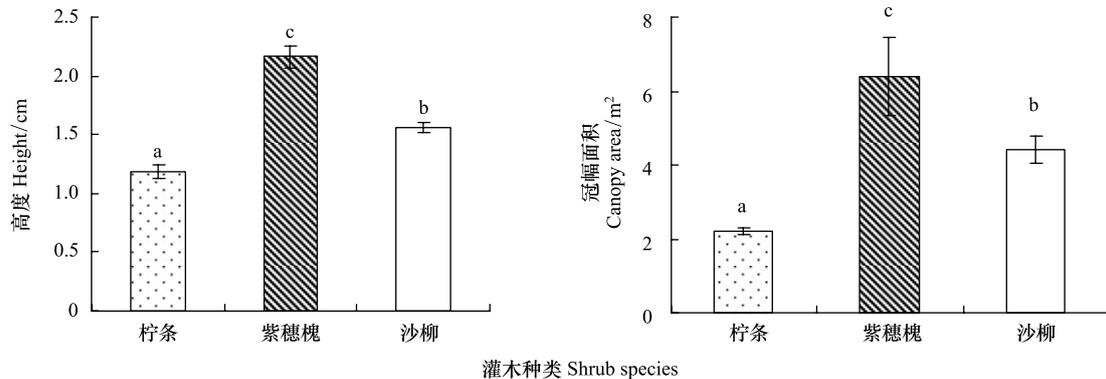


图 3 3 种灌木高度和冠幅面积的对比分析

Fig.3 The compared analysis of height and canopy area of three shrub species

误差线为平均数±标准误( $n=20$ );误差线上的字母不同表示不同处理间存在显著性差异( $P<0.05$ , Tukey test)

保育灌木生长指标与松树幼苗存活与生长的相关分析结果见表 4。结果表明保育灌木的植株高度和冠幅面积均与松树幼苗的存活率呈显著正相关( $P<0.05$ )。在本次恢复试验中,紫穗槐植株最高,冠幅面积最大(见图 3a-b),冠层下松树幼苗的存活率也最高(见图 1),这可能因为高而大的保育灌木可为松树幼苗的定居提供较为优越、稳定的微环境。保育灌木高度和冠幅面积与松树幼苗主枝长度间均不相关,这可能因为它们不是决定松树幼苗主枝生长的关键因素。

### 3.4 环境因子对松树幼苗存活与生长的影响分析

#### 3.4.1 不同微生境下环境因子的分析

柠条、紫穗槐、沙柳和开阔地 4 种微生境下环境指标之间的对比分析见图 4。结果表明,柠条、紫穗槐和沙柳冠层下光照强度均显著低于开阔地。紫穗槐冠层下光照强度最大(见图 4a)。3 种灌木冠层下大气温度

都显著低于开阔地,紫穗槐下温度最高(见图 4b)。土壤温度的变化趋势和大气温度相似(见图 4c)。3 种灌木对下层土壤湿度产生不同的影响,沙柳冠层下土壤湿度最高,柠条和紫穗槐冠层下次之,但二者与开阔地间均无显著差异(见图 4d)。

表 4 保育灌木生长指标与松树幼苗存活与生长的相关分析

Table 4 Correlation analysis on height and canopy area of dominant nurse shrub and survival and growth of Pine seedlings

相关系数 Correlation coefficient	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>		樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	
	存活率 Survival rates	主枝长度 Leader shoot length	存活率 Survival rates	主枝长度 Leader shoot length
高度 Height	0.681 *	-0.233	0.542 *	0.110
冠幅面积 Canopy area	0.568 *	0.246	0.631 *	-0.152

\* 显著相关 0.05 水平

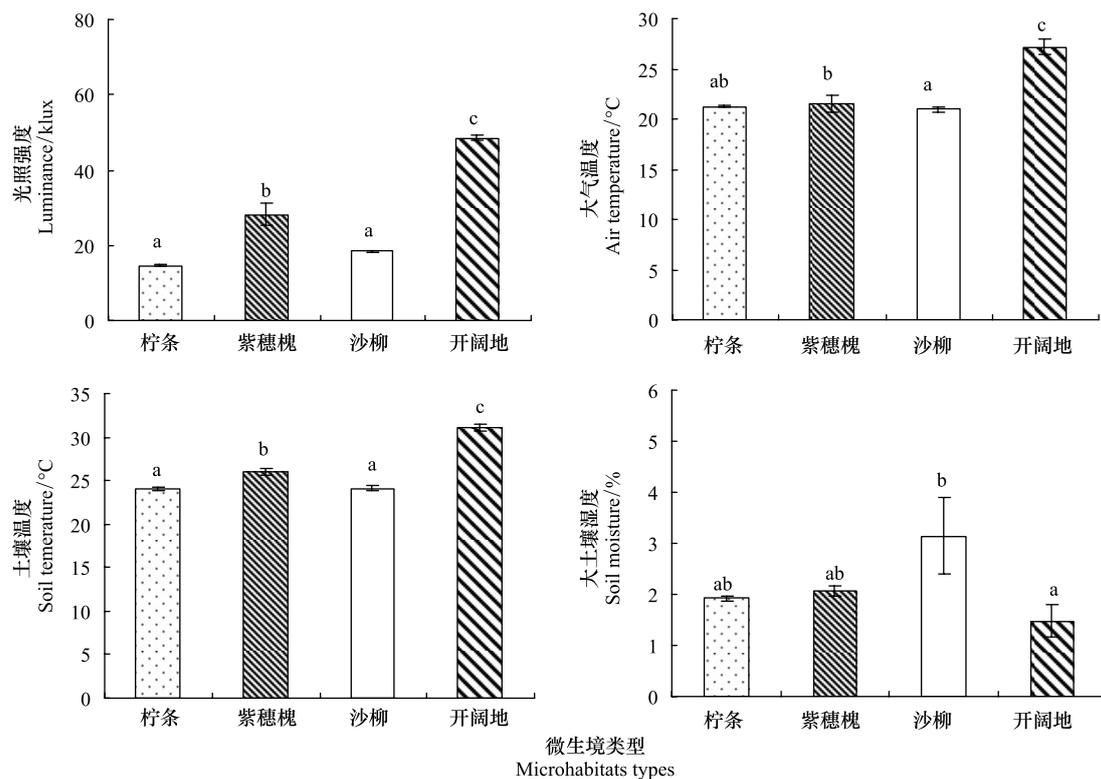


图 4 不同微生境下环境因子的对比分析

Fig.4 The compared analysis of microclimate conditions under the canopy of shrub species or open areas

a=光照强度,b=大气温度,c=土壤温度,d=土壤湿度;误差线为平均数±标准误(n=5),误差线上的字母不同表示不同处理间存在显著性差异( $P<0.05$ ,Tukey test)

### 3.4.2 保育灌木下环境因子对松树幼苗存活与生长的影响分析

保育灌木下环境因子与松树幼苗存活与生长的相关分析结果见表 5。结果表明,光照强度与油松和樟子松幼苗的存活率均呈显著正相关( $P<0.05$ ),紫穗槐冠层下光照强度最大(见图 4a),松树幼苗的存活率也最大(见图 1)。光照强度与油松幼苗的主枝长度不相关,这可能与油松幼苗具有一定耐阴性有关。光照强度与樟子松幼苗的主枝长度呈极显著相关( $P<0.01$ ),紫穗槐下光强最大(见图 4a),其冠层下樟子松幼苗的主枝生长长度也最大(见表 2)。土壤湿度与松树幼苗的主枝长度均显著正相关( $P<0.05$ )。总的来说,保育灌木冠层下的光照强度和土壤湿度可能是决定松树幼苗存活与生长的重要因素。

表 5 保育灌木下环境因子与松树幼苗存活与生长的相关分析

Table 5 Correlation analysis on environmental factors under dominant shrub species and survival and growth of Pine seedlings

相关系数 Correlation coefficient	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>		樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	
	存活率 Survival rates	主枝长度 Leader shoot length	存活率 Survival rates	主枝长度 Leader shoot length
光照强度 Light density	0.455 *	0.275	0.504 *	0.740 **
大气温度 Air temperature	0.075	-0.226	-0.241	-0.086
土壤温度 Soil temperature	-0.082	0.056	0.119	0.366
土壤湿度 Soil moisture	0.382	0.464 *	0.246	0.431 *

\* \* 极显著相关 0.01 水平, \* 显著相关 0.05 水平

## 4 讨论

### 4.1 保育植物的促进作用

保育植物可显著的增加或减少下层的种子萌发和幼苗定居<sup>[21-22]</sup>。但许多研究表明保育植物可促进下层幼苗定居,而且在地中海区域植被恢复中已得到成功应用<sup>[5-8,23]</sup>。胁迫梯度假说(The “stress – gradient” hypothesis)认为保育植物的促进作用在干旱生态系统中比在地中海区域更加普遍存在<sup>[1]</sup>。但是,关于干旱和沙地生态系统中保育植物的促进作用是否存在仍然有许多争论。一些研究者认为与开阔地相比,保育灌木冠层下有较高的植物多样性和物种存活率<sup>[9,24]</sup>,因为保育灌木可提供较好的微环境,对下层植物定居产生促进作用<sup>[1,22]</sup>,从而有效缩短植被恢复时间。另一些研究者却持相反的意见<sup>[25-28]</sup>。因此,本试验的首要目的就是要验证毛乌素沙地优势灌木柠条、紫穗槐和沙柳作为保育植物,是否会对当地两种松树的恢复产生促进作用。在本次植被恢复试验中,与开阔地相比,保育灌木柠条、紫穗槐和沙柳,均增加了松树幼苗的存活率(图 1—2),而且持续 3 年的恢复时间里,保育灌木对松树幼苗存活率的促进作用一直保持不变(表 1),松树幼苗的主枝生长长度也未受到抑制(表 2—3)。本研究结果证实保育灌木的促进作用在毛乌素沙地的植被恢复中是存在的,进一步支持了胁迫梯度假说。同时,说明保育植物技术是可以作为一种新型的恢复措施被应用在毛乌素沙地的植被恢复与重建中。

### 4.2 保育植物的选择

在植被恢复工程中,如何选择合适的保育植物是至关重要的,因为它决定着恢复工程的成败与否<sup>[7-8]</sup>。一般来说,本地植物最适宜被选为保育植物,因为它们能为幼苗定居提供更好的环境条件<sup>[24,29]</sup>。而外来种忌于生物入侵的危险,很少被选为保育植物,但也不乏外来种作为保育植物被成功应用在植被恢复中的例子<sup>[30-31]</sup>。毛乌素沙地外来种紫穗槐,因其高的经济价值和防风固沙作用被广泛种植。本次恢复试验,不同灌木中紫穗槐冠层下松树幼苗存活率是最大的(图 1),说明外来种紫穗槐是可以在毛乌素沙地植被恢复中被选为保育植物的。

保育植物的选择还需考虑保育植物的保育效应,而影响保育效应的因素有很多<sup>[1]</sup>。本研究中保育灌木的高度和冠幅面积与松树幼苗的存活率呈显著相关(表 4),说明保育植物植株高度和冠幅大小会影响保育效应。许多研究表明,保育效应一定程度上还取决于保育植物所提供的遮阴水平<sup>[8,32]</sup>,而遮阴水平又与保育植物冠幅的形态结构有关<sup>[1]</sup>。同时,保育效应也与保育植物的化学效应有关,例如具有固氮能力的保育植物可促进幼苗定居<sup>[1]</sup>,而具有化感作用的灌木就可能减弱这种促进作用<sup>[7]</sup>。本研究中紫穗槐和柠条都具有固氮能力,它们均增加了松树幼苗的存活率(图 1—2),这与前人的研究结果是一致的<sup>[1]</sup>。但它们却因冠幅形态结构的差异,保育效应也有所不同。

紫穗槐冠幅形态结构疏松,下层光照强度、大气和土壤温度都高(图 4a-b-c)。同时,紫穗槐植株高,冠幅面积大(图 3a-b),这使它为下层幼苗定居提供了更加有利和稳定的微生境条件<sup>[33-34]</sup>。所以这可能是紫穗槐下松树幼苗存活率最高的原因(图 1)。

柠条冠幅形态结构紧密,下层光照强度、大气和土壤温度都较低(图 4a-b-c)。同时,柠条植株低,冠幅面积小(图 3a-b)。有些研究表明,保育植物所创造的遮阴水平可能会对目标植物的存活产生负效应<sup>[7-8]</sup>。本研究中柠条冠层下松树幼苗的存活率显著低于紫穗槐,可能因为其所创造的遮阴水平,使较低的光照强度成为松树幼苗定居的限制因子。保育灌木下光照强度与松树幼苗的存活率显著相关(表 5)也证实了这一点。

当保育植物具有化感作用时,植物与植物之间的相互作用就变的更加复杂<sup>[7]</sup>。在本次植被恢复实验中,生长初期(2012 年 8 月)沙柳增加了松树幼苗的存活率(图 2),这是因为与开阔地相比,沙柳冠层为松树幼苗的定居创造了相对稳定的微生境条件。但生长后期沙柳冠层下松树幼苗的死亡率明显增加(见图 2),主枝生长长度也较小(见表 2),其原因可能是化感作用,但在本次研究中并不能确定,后续研究会用蒸馏水浸泡沙柳的根系和叶获取浸提液,设计可控实验来研究浸提液对松树幼苗存活和生长是否会产生生化抑制效应。

总的来说,毛乌素沙地保育灌木可改善下层光照强度、大气温度、土壤温度和土壤湿度,进而创造稳定的微生境条件,促进松树幼苗的定居。固氮类灌木柠条和紫穗槐对松树幼苗的存活率均有持续促进作用,但是柠条冠幅的形态结构小且紧密,其冠层下松树幼苗在生长后期出现死亡,一定程度减弱促进作用<sup>[29]</sup>,说明保育灌木冠层结构的不同决定着下层幼苗的存活。沙柳与开阔地相比,其对第一年松树幼苗的存活率有促进作用。第二年开始,沙柳冠层下松树幼苗出现死亡,直接减弱保育灌木的促进作用,其原因可能是化感作用,但有待进一步证实。在人工植被恢复工程中,保育植物的选择需考虑是本土种还是外来种,以及灌木的高度、冠幅大小、冠幅形态结构和化学效应。

#### 4.3 目标物种的选择

植物间的保育效应不仅取决于保育植物,还取决于目标物种。因此,如何选择合适的目标植物也可直接影响植被恢复的成败与否<sup>[24]</sup>。Gómez-Aparicio 等研究表明耐阴物种对保育植物的响应比不耐阴的要强<sup>[7]</sup>。尽管植物间存在促进作用,但目标物种对环境因子有低的忍耐性时,其存活率也会降低<sup>[24]</sup>。在本次研究中,油松幼苗具有一定程度的耐荫性,因此在柠条和沙柳冠层下油松幼苗存活率显著高于樟子松幼苗的(图 1),而且光照强度与油松幼苗的主枝长度也不相关(表 5),这说明在毛乌素沙地植被恢复中乔木树种的选择要考虑其生物学特性及其与保育植物的相互作用。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Callaway R M. Positive Interactions and Interdependence in Plant Communities. Netherlands: Springer, 2007: 15-280.
- [ 2 ] 任海, 杨龙, 刘楠. 保育植物理论及其在南亚热带生态恢复中的应用. 自然科学进展, 2007, 17(11): 1461-1466.
- [ 3 ] 秦先燕, 谢永宏, 陈心胜. 湿地植物间竞争和促进互作的研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(1): 117-123.
- [ 4 ] 张炜平, 王根轩. 植物邻体间的正相互作用. 生态学报, 2010, 30(19): 5371-5380.
- [ 5 ] Castro J, Zamora R, Hódar J A, Gómez J M. Use of Shrubs as nurse plants: A New Technique for Reforestation in Mediterranean Mountains. Restoration Ecology, 2002, 10(2): 297-305.
- [ 6 ] Castro J, Zamora R, Hódar J A, Gómez J M, Gómez-Aparicio L. Benefits of using shrubs as nurse plants for reforestation in Mediterranean Mountains: A 4-year study. Restoration Ecology, 2004, 12(3): 352-358.
- [ 7 ] Gómez-Aparicio L, Zamora R, Gómez J M, Hódar J A, Castro J, Baraza E. Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. Ecological Applications, 2004, 14(4): 1128-1138.
- [ 8 ] Sánchez-Velásquez L R, Quintero-Gradilla S, Aragón-Cruz F, Pineda-López M R. Nurses for *Brosimum alicastrum* reintroduction in secondary tropical dry forest. Forest Ecology and Management, 2004, 198(1/3): 401-404.
- [ 9 ] King E G. Facilitative effects of *Aloe secundiflora* shrubs in degraded semi-arid rangelands in Kenya. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 358-369.
- [ 10 ] Wu B L, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China. Journal of Arid Environments, 2002, 50(3): 429-444.
- [ 11 ] 雷雅凯, 郭伟, 张军红, 贺丹. 毛乌素沙地气候与植被变迁. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 242-247.
- [ 12 ] Ohte N, Koba K, Yoshikawa K, Sugimoto A, Matsuo N, Kabeya N, Wang L H. Water utilization of natural and planted trees in the semiarid desert of Inner Mongolia, China. Ecological Application, 2003, 13(2): 337-351.

- [13] Grubb P J. The maintenance of species-richness in plant communities; the importance of the regeneration niche. *Biological Reviews*, 1977, 52(1): 107-145.
- [14] 任海, 彭少麟. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社, 2001: 146-163.
- [15] 王仁卿, 张淑萍, 葛秀丽. 利用宫肋森林重建法恢复和重建山东森林植被. *山东林业科技*, 2002, (4): 3-7.
- [16] Maestre F T, Bautista S, Cortina J, Bellot J. Potential for using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. *Ecological Application*, 2001, 11(6): 1641-1655.
- [17] SER. The SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration, Science and Policy Working Group, 2004.
- [18] Van Andel J, Aronson J. *Restoration Ecology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2005: 84-198.
- [19] 李新荣. 毛乌素沙地灌木资源区系特征及其保护对策. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 146-152.
- [20] 吕荣, 刘朝霞, 李维向. 毛乌素沙地固沙造林针叶树种选择的研究. *中国沙漠*, 1998, 18(1): 81-86.
- [21] Soliveres S, DeSoto L, Maestre F T, Olano J M. Spatio-temporal heterogeneity in abiotic factors modulate multiple ontogenetic shifts between competition and facilitation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2010, 12(3): 227-234.
- [22] Jankju M. Role of nurse shrubs in restoration of an arid rangeland; effects of microclimate on grass establishment. *Journal of Arid Environments*, 2013, 89: 103-109.
- [23] Rousset O, Lepart J. Positive and negative interactions at different life stages of a colonizing species (*Quercus humilis*). *Journal of Ecology*, 2000, 88(3): 401-412.
- [24] Padilla F M, Pugnaire F I. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(4): 196-202.
- [25] Tielbörger K, Kadmon R. Temporal environmental variation tips the balance between facilitation and interference in desert plants. *Ecology*, 2000, 81(6): 1544-1553.
- [26] Huber-Sannwald E, Pyke D A. Establishing native grasses in a big sagebrush-dominated site: an intermediate restoration step. *Restoration Ecology*, 2005, 13(2): 292-301.
- [27] Anthelme F, Michalet R. Grass-to-tree facilitation in an arid grazed environment (Air Mountains, Sahara). *Basic and Applied Ecology*, 2009, 10(5): 437-446.
- [28] Noumi Z, Chaieb M, Michalet R, Touzard B. Limitations to the use of facilitation as a restoration tool in arid grazed savanna: a case study. *Applied Vegetation Science*, 2015, 18(3): 391-401.
- [29] Liu X Z, Lu Y C, Xue Y, Zhang X Q. Testing the importance of native plants in facilitation the restoration of coastal plant communities dominated by exotics. *Forest Ecology and Management*, 2014, 322: 19-26.
- [30] Ewel J J, Putz F E. A place for alien species in ecosystem restoration. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(7): 354-360.
- [31] Yang L, Liu N, Ren H, Wang J. Facilitation by two exotic *acacia*: *acacia auriculiformis* and *acacia mangium* as nurse plants in South China. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(8): 1786-1793.
- [32] Hastwell G T, Facelli J M. Differing effects of shade-induced facilitation on growth and survival during the establishment of a chenopod shrub. *Journal of Ecology*, 2003, 91(6): 941-950.
- [33] Maestre F T, Cortina J. Do positive interactions increase with abiotic stress? a test from a semi-arid steppe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2004, 271(S5): S331-S333.
- [34] Gómez-Aparicio L. The role of plant interactions in the restoration of degraded ecosystems: a meta-analysis across life-forms and ecosystems. *Journal of Ecology*, 2009, 97(6): 1202-1214.