

研究報告

施肥、光環境及植株密度對木賊葉木麻黃 初期生長之影響

黃俊元^{1,2)} 謝漢欽³⁾ 陳朝圳⁴⁾ 陳建璋^{4,5)}

摘要

臺灣東部海岸地區屬於沙岸類型之海岸林，常因颱風暴潮造成林木死亡產生孔隙，影響海岸防風林之保安功能。為了提供東部海岸易受暴潮危害之高風險地區造林方法，以及發展具實務性之直播造林育林體系，本文目的為探討施肥、光環境及植株密度對木賊葉木麻黃幼苗初期生長之影響。試驗結果顯示，以保護管凹地直播育苗系統培育之幼苗，其初期生長施3~5 g緩效性肥料，可有效促進幼苗生長，符合實務作業之需；施肥證實顯著促進幼苗初期生長，但對1年生苗木，施追肥並無促進生長之效。1年生苗木經間拔試驗1年後，間拔處理之平均地徑淨生長為 2.5 ± 0.0 cm (對照組 1.8 ± 0.1 cm)，樹高淨生長為 161 ± 2 cm (對照組 142 ± 4 cm)，樹冠幅淨生長為 119 ± 2 cm (對照組 91 ± 4 cm)，以及主幹之平均傾斜角度為 $6^\circ \pm 0^\circ$ (對照組 $10^\circ \pm 1^\circ$)，除樹高外，其他處理間均具有顯著差異。保護管內的相對光度需 $> 40\%$ ，才能提供幼苗初期生長所需的光照強度。本研究成果可提供海岸林直播造林之實務作業參考，可有效促進幼苗生長及形態品質，提高造林成效。

關鍵詞：木賊葉木麻黃、直播、施肥、相對光度。

黃俊元、謝漢欽、陳朝圳、陳建璋。2020。施肥、光環境及植株密度對木賊葉木麻黃初期生長之影響。台灣林業科學35(2):143-60。

¹⁾ 國立屏東科技大學生物資源博士班，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Graduate Institute of Bioresources, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuefu Rd., Neipu, Pingtung 91201, Taiwan.

²⁾ 林業試驗所太麻里研究中心，96341臺東縣太麻里鄉大王村橋頭6號 Taimali Research Center, Taiwan Forestry Research Institute, 6 Chiaotou, Dawang Village, Taimali, Taitung 96341, Taiwan.

³⁾ 林業試驗所森林經營組，10066台北市南海路53號 Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

⁴⁾ 國立屏東科技大學森林系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Forestry, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuefu Rd., Neipu, Pingtung 91201, Taiwan.

⁵⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: zzzjohn@mail.npust.edu.tw

2019年12月送審 2020年6月通過 Received December 2019, Accepted June 2020.

Research paper

Effects of Fertilization, Light Environment, and Seedling Density on the Initial Growth of *Casuarina equisetifolia*

Chun-Yuan Huang,^{1,2)} Han-Ching Hsieh,³⁾ Chaur-Tzuhn Chen,⁴⁾
Jan-Chang Chen^{4,5)}

【 Summary 】

Coastal forests are located on sandy shores on the east coast of Taiwan, where they are often hit by storm surges causing trees to die and producing gaps that impact the protective functions of the forests. To offer a method of afforestation in areas of high risk of damage from storm surges in eastern coastal areas and develop a practical silvicultural technique for the direct seeding for afforestation, this study investigated the effects of fertilization, the light environment, and seedling density on the initial growth of *Casuarina equisetifolia*. Seedlings were cultivated by the silvicultural regime of indentation seeding with seed shelters fertilized with 3~5 g of controlled-release fertilizer. Results revealed that this method was able to efficiently promote the initial growth of seedlings, which was sufficient for practical operations. The initial growth of seedlings was promoted by fertilizer, but no significant differences were found between top-dressing and no top-dressing treatments for 1-yr-old seedlings. At 1 yr after the experiment of thinning of 1-yr-old seedlings, in addition to the tree height, we found that saplings exhibited a significant growth increment under thinning treatment with 2.5 ± 0.0 cm in average basal stem diameter (vs. 1.8 ± 0.1 cm in the control), 161 ± 2 cm in tree height (vs. 142 ± 4 cm in the control), 119 ± 2 cm in canopy diameter (vs. 91 ± 4 cm in the control), and $6^\circ \pm 0^\circ$ in the angle of inclination of the trunk (vs. $10^\circ \pm 1^\circ$ in the control). The relative light intensity in the tube of the seed shelter required over 40% which was vital for the initial growth of seedlings. Results of this study offer application of practical operations for direct seeding of coastal forests, which can efficiently promote seedling growth, morphological quality, and seedling establishment.

Key words: *Casuarina equisetifolia*, direct seeding, fertilization, relative light intensity.

Huang CY, Hsieh HC, Chen CT, Chen JC. 2020. Effects of fertilization, light environment, and seedling density on the initial growth of *Casuarina equisetifolia*. Taiwan J For Sci 35(2):143-60.

緒言

木麻黃(*Casuarina* spp.)原產於澳洲、東南亞及太平洋群島，由於栽種用途廣及適應性佳，現已廣泛分佈於熱帶及亞熱帶地區，估計全球8%的土地均能適應生長(Chen et al. 1998, Potgieter et al. 2014)。臺灣海岸地區因環境惡劣，1897年引進木麻黃栽植，因可快

速營造海岸防風林，成為海岸林主要之先驅樹種，但其林分具有早衰現象及天然更新障礙，劣化林分形成孔隙影響保安功能，林分孔隙需再次實施栽植造林，以維海岸防災及保護之效益(Chen and Lu 1988, Ho et al. 2001, Wang et al. 2008)。因此，海岸林若能發展木麻黃直播

造林，應可減輕第一線林帶之造林負擔。直播造林的優點在於費用較栽植造林低，直播苗根系完整及適應力佳，但最大的缺點為實施條件嚴格，成效難以預期(Putman and Zasada 1986, Graber 1988, Wennström et al. 1999, Pétursson and Sigurgeirsson 2005)。國內於台中武陵廢耕地及高雄六龜崩場地進行臺灣赤楊(*Alnus formosana*)、大葉溲疏(*Deutzia pulchra*)、密花苧麻(*Boehmeria densiflora*)及刺蔥(*Zanthoxylum ailanthoides*)等直播試驗，結果顯示直播成效不佳(Hu et al. 2018, Chiu and Kuo 2020)，另於高屏流域崩場地進行青楓(*Acer serrulatum*)、臺灣檫(*Zelkova serrata*)、臺灣赤楊、臺灣白蠟樹(*Fraxinus formosana*)及棟樹(*Melia azedarach*)等直播造林之選種試驗，發現臺灣白蠟樹及棟樹適合直播(Tsai et al. 2015)，而在新竹海岸林直播海欖果(*Cerbera manghas*)、欖仁(*Terminalia catappa*)、瓊崖海棠(*Calophyllum inophyllum*)、棟樹及臺灣海桐(*Pittosporum pentandrum*)等，以海欖果的發芽率28%為最高，其餘樹種均< 20% (Wang et al. 2019)，顯然直播於國內仍處於探索之階段，仍無一種可行性高之直播方法提供造林實務之應用。

利用促進機制改善不良環境已被證實是復育劣化地的成功策略(Martelletti et al. 2018)，芬蘭人於1970年使用兩端中空的圓錐形塑膠罩，將播種後的種子罩住，改善種子生育地之微環境，增加塑膠罩內空氣及土壤中的溼度及溫度，可促進種子發芽及幼苗生長(Dominy and Wood 1986)，而凹地微環境能促進毛細管作用及減少蒸散作用，增加土壤水分(Heikkilä 1977, Bergsten 1988)。為發展木賊葉木麻黃(*Casuarina equisetifolia*)之直播造林方法，須瞭解影響木麻黃之天然更新障礙因素，根據研究發現土壤水分不足、高溫、枯落物堆積、雜草競爭及林下光度不足等為更新限制的主要因子(Lin et al. 2009, Hata et al. 2010, Liu and Sheu 2014, Deng et al. 2015)。Huang et al. (2019)藉由適當地點、時機及播種環境處理，排除或降低天然更新限制因子的影響，選擇臺東太麻里海岸地區地被植物覆蓋率< 10%之無林木孔隙，

並於初冬時進行木賊葉木麻黃直播試驗，並融入此樹種幼苗喜好於小凹地生長的特性，播種於人為之10 cm深凹洞(indentations)，同時於凹洞內放置種子保護管(seed shelters)，並在幼苗生長初期施肥，試驗1年後，保護管凹地直播處理之幼苗建立率(81%)顯著優於對照組(0%)，利用促進機制發展保護管凹地直播育苗系統，使幼苗能在有利的環境生長，以播種的方式成功培育幼苗。

保護管凹地直播育苗系統雖能成功培育木賊葉木麻黃，但在實務作業之中仍有許多問題有待探討。植物生活史以幼苗時期的死亡率最高，幼苗時期可說是最易受害的生長階段(Clark and Clark 1984, Sun et al. 2012)，而直播造林也是幼苗時期的死亡率最高，因此直播育苗系統在播種策略上，播種點(sowing spots)以撒入多量種子的策略，使播種點內萌發足夠的幼苗數量，以因應最易受害的幼苗期，但播種點內過多的株數，對幼苗的生長及形質，是否因個體間的競爭而產生影響，有其必要釐清；此直播育苗系統已證實施肥是促進幼苗初期生長必要的措施，但施肥量與施肥次數悠關造林成本及幼苗生長質量，也需進一步探討；另外，對環境友善的保護管也是本直播育苗系統發展的重點項目，但保護管材質的透光性是否對幼苗的生長有所影響，也是需要瞭解的重要課題。因此，本研究主要目的為(1)瞭解不同施肥量對木賊葉木麻黃幼苗生長之影響；(2)評估間拔(thinning)及追肥(top-dressing)對1年生苗木是否具有促進生長及形質之效；(3)探討不同保護管材質的透光性對幼苗生長的影響。本研究即針對這些疑惑，探討施肥量、植株密度及光環境對木賊葉木麻黃初期生長之影響，研究目的期能增進保護管凹地直播育苗系統的實務性，作為今後臺灣東部海岸地區直播造林作業之參考。

材料與方法

一、試驗區域環境概況

試驗區域(東經121°00'35.6"；北緯22°36'30.8")位於臺東太麻里溪北側海岸之防風保安林，林地地勢平坦，土壤為砂質土，以木賊

葉木麻黃為主要造林樹種，但經多次颱風侵襲後許多造林木死亡產生孔隙。依據鄰近林業試驗所太麻里研究中心2014~2018年之氣象資料顯示，試驗地區近5年年均溫為24.2°C，最高溫7月，平均33.6°C，最低溫2月，平均16.2°C；每年平均相對濕度78%，以5月的平均相對濕度81%最高，12月75%最低；每年平均降雨量為1925 mm，主要降雨來自於梅雨及颱風季節所帶來的豪雨。

二、不同施肥量之直播試驗

2016年12月於臺東太麻里溪口北側海岸約1.2 km之木麻黃防風林，選擇地被植物覆蓋率< 10%之無林木孔隙為試區(Fig. 1)，試區外臨海面約5 m處設有消坡塊(四腳林克塊)。試驗樹種為木賊葉木麻黃，種子於2016年10月在臺東市濱海地區之木麻黃防風林採集。試驗前使用臺東太麻里海岸地區之砂土於溫室內進行種子發芽率檢定，3重複，每個重複100粒種子，觀察一個月，種子發芽率為51% (本研究後續之發芽率檢定均採用相同的方法)。試區地形為北高南低之平緩斜坡，海拔最高為10 m，試區

面積490 m² (Fig. 2A)，採用隨機完全區集設計 (randomized complete block design; RCBD)，沿著斜坡梯度設置3個區集(11×14 m)，區集之間相隔1 m，區集內6個樣區，進行0(對照組)、1、3、5、7及9 g等6種施肥處理，使用緩效性肥料(新好康多1號180天，N-P-K = 14-11-13，Hi-Control®, Shizuoka, Japan; 本研究後續之各項試驗均採用相同品牌的肥料，施肥量參考該品牌之盆栽植物施用基準)，樣區為4×5 m，樣區間隔1 m，樣區內30個(5×6)播種點(sowing spots)，播種點間距為1×1 m，播種方式使用保護管凹地直播方法(Fig. 3)，2016年12月中旬播種，使用白色紙杯割除杯底製成紙筒作為保護管(Table 1)，當保護管內小苗萌發1個月後，2017年2月上旬於管內施肥，試驗自2016年12月至2018年2月止。

三、1年生苗木間拔及追肥試驗

2018年2月於不同施肥量之直播試區內進行1年生苗木間拔及追肥試驗，選取試區中段之苗高均質區域劃設新的試區(Fig. 1)，試區面積276 m² (Fig. 2B)。本試驗使用混合巢式和跨

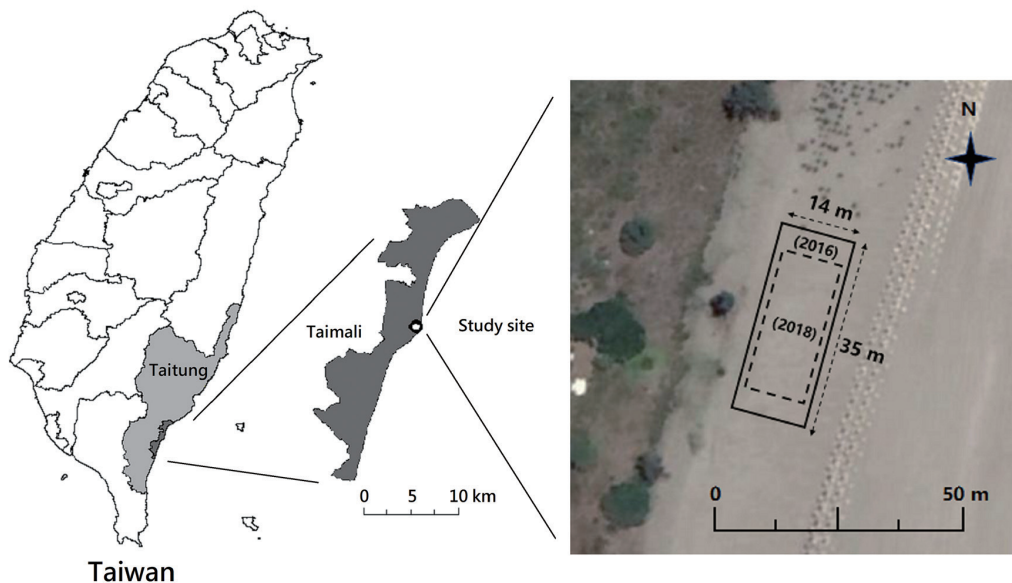


Fig. 1. Study site in the coastal forest of Taimali, Taitung, Taiwan. The solid line indicates the area of the fertilization experiment in December 2016, and the dotted line indicates the area of the thinning and top-dressing experiment in February 2018.

越劃分方法之設計(Li et al. 2011)，試區劃分成4個重複區(block)，區集(5×12 m)內配置間拔(有、無)及追肥(有、無)之二因子2×2處理，區集之間相隔1 m，先依巢氏劃分方法，各區集內劃分2個樣區(plot)，隨機分配間拔及無間拔處理(對照組)，樣區(5×5 m)內有36個(6×6)播種點，樣區之間相隔2 m，再依跨越劃分方法，各樣區內再劃分2個小區(subplot)，逢機配置追肥及無追肥處理(對照組)，並跨越所有重複區及間拔因子，小區(2×5 m)內有18個(3×6)播種點，小區之間間隔1 m。本試驗試區內8個播種點無苗木(不列入試驗統計)，係不同施肥量試驗期間，播種點內未萌發或幼苗枯死，因此試區內具有1年生苗木的播種點數量為280個(Fig. 2B)，為避免各因子處理之苗木具有顯著差異，試前統計分析2×2參試因子處理之1年生苗木高平均值差異檢定，在5%顯著水準下各因子處理間苗木高無顯著差異。2018年2月進行試驗，先將各播種點的保護管移除，並選擇各播種點內生長最佳之1株苗木掛牌標示，間拔處理之播種點內僅留掛牌的苗木，其餘苗木使用修枝剪切除，因樹幹基部位於10 cm深之凹洞，修枝剪自樹幹基部分上方約7 cm處切除，再覆土與地面切齊，避免切除後之苗木再度萌芽影響試

驗(間拔作業不可使用“拔除”方式移除苗木，因拔除方式勢必造成留存木之根系嚴重受損或死亡)，無間拔處理為播種點內所有幼苗保留，僅選擇生長最佳之1株苗木掛牌標示；追肥處理則於播種點東側樹冠幅緣滴水線處，每個播種點施20 g緩效性肥料，對照組不施追肥，試驗至2019年6月止。

四、紙筒及竹筒保護管之直播試驗

2018年1月於不同施肥量之直播試區南側約10 m外，選擇地被植物覆蓋率20~30%之無林木孔隙設置試區，本試驗使用的木賊葉木麻黃種子，2017年10月於臺東市海岸地區之木麻黃防風林採集，試驗前種子發芽率為39%。本試驗採用保護管凹地直播方法(Fig. 3)，使用紙筒及竹筒為保護管進行比較試驗(Table 1)，每種保護管均設置1個帶狀樣區(7.5×46 m)，樣區內劃分4個小區(7.5×10 m)，小區之間間隔2 m。小區內設置36個(6×6)播種點，播種點間距為1.5×2 m，2018年1月中旬播種，同年2月下旬於具有小苗之保護管內施緩效性肥料3 g(施肥量參考肥料品牌之盆栽植物施用基準)，試驗期間至2018年11月止。為驗證林地使用紙筒及竹筒保護管所培育的幼苗，是否因

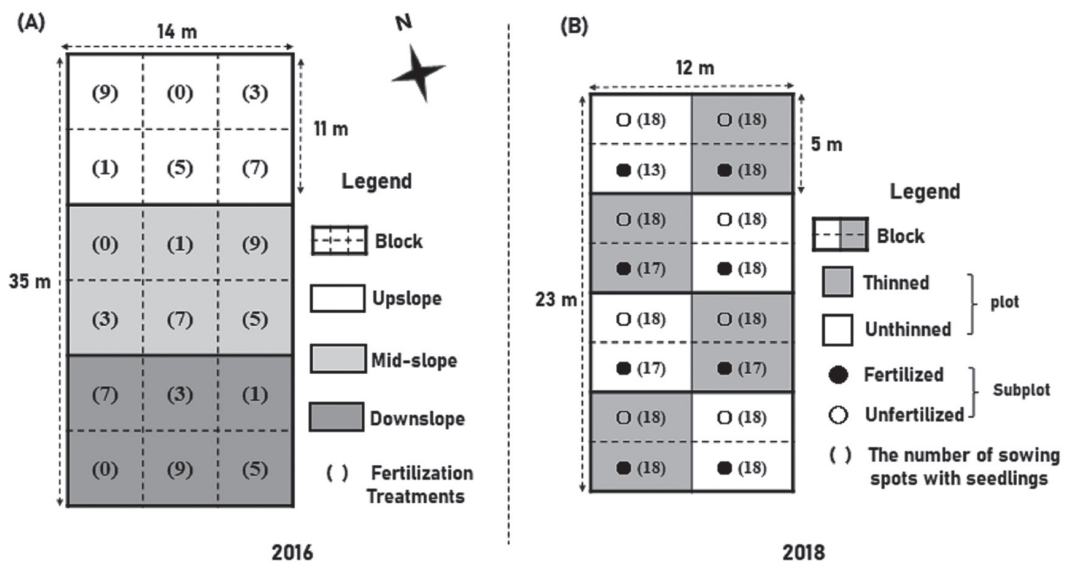


Fig. 2. Illustration of the experimental design in December 2016 and February 2018.

Table 1. Two kinds of seed shelters used in the direct-seeding experiment

Type	Shape	Size (cm)	Property
Paper tube	Cone	16 cm height 6 cm top diameter 9 cm bottom diameter 0.04 cm thickness	A paper tube was made of a paper cup, the bottom of which was removed. The interior of the tube had a plastic lining layer made of polyethylene. The relative light intensity in the tube was $45 \pm 3\%$.
Bamboo tube	Cylindrical	16 cm height 5~7 cm diameter 0.5~1 cm thickness	A bamboo tube was made of <i>Bambusa vulgaris</i> and opened at both ends. The relative light intensity in the tube was $21 \pm 4\%$.

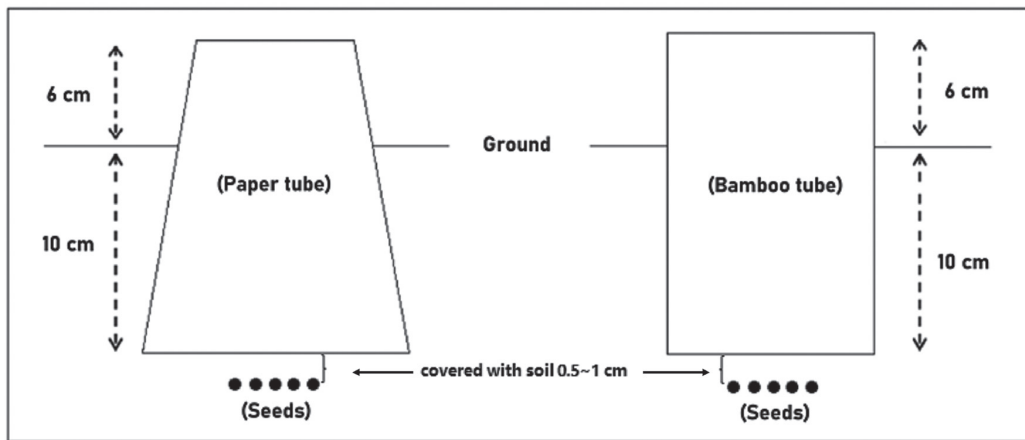


Fig. 3. This study used the method of indentation seeding with seed shelters by making an indentation ca. 10 cm deep in the ground. Fifty seeds were sown which were covered with about 0.5~1 cm of soil. A seed shelter was placed in the indentation. The gap of the outside of the seed shelter was backfilled with soil that was level with the ground (Huang et al. 2019).

保護管管內之相對光度(relative light intensity)差異，影響幼苗的初期生長，因此於2018年7月在林業試驗所太麻里研究中心苗圃，以遮光網進行直播遮光試驗，探討幼苗的初期生長與相對光度的相關性。遮光試驗使用遮光網設置2個邊長1.2 m的正方形陰棚，自上午9時至下午5時，使用3組光照計(LI-250A Light meter, USA)，每半小時測定1次，同時測定2個陰棚與棚外之光照強度，每次測量3次取平均值，測量結果2個陰棚之平均相對光度分別為26及51%。每個陰棚(處理)內放置20個方形育苗盆(L8×W8×H14 cm)，5個育苗盆為1重複，4重複，每個育苗盆內設置1個播種點，播種30粒種子，播種後覆土0.5 cm，試驗期間充分澆水，試驗至2018年11月止。

五、生長性狀之調查方法

(一) 不同施肥量之直播試驗

本試驗以播種點為計量單位，播種點內不論長出幾株幼苗，調查時視同1株幼苗之概念(Palmerlee and Young 2010)，調查樣區內「有幼苗發生的播種點數量(A)」、「有幼苗存活的播種點數量(B)」，以及「播種點數量(C)」，統計調查單位內的幼苗發生率(seedling emergence percentage = $A/C \times 100\%$)、幼苗存活率(seedling survival percentage = $B/A \times 100\%$)及幼苗建立率(seedling establishment percentage = $B/C \times 100\%$)。播種點內幼苗需全數死亡才判定為死亡數，經調查為死亡數之播種點，若該播種點再度萌發幼苗仍視為

死亡數，不列入統計分析。本試驗於苗齡2個月(2017年2月)、7個月(2017年7月)及14個月(2018年2月)進行幼苗發生、存活及建立率調查，而在苗齡7及14個月增加苗高測量(僅調查播種點內最高的1株幼苗)。

(二) 1年生苗木間拔及追肥試驗

2018年2月進行間拔及追肥試驗，並於苗齡15個月(2018年3月)、21個月(2018年9月)及28個月(2019年4月)調查苗木(掛牌標示)之存活率、地徑、樹高、樹冠幅及株數，苗齡30個月(2019年6月)使用坡度計測量苗木(掛牌標示)之樹高50 cm處之傾斜角度(angle of inclination)。

(三) 紙筒及竹筒保護管之直播試驗

本試驗之各項調查與第(一)項不同施肥量之直播試驗採用相同的調查方法，並於苗齡1個月(2018年2月)、5個月(2018年6月)及10個月(2018年11月)調查幼苗發生、存活及建立率，以及苗高；苗圃之直播遮光試驗於2018年7~11月期間，每月調查幼苗發生、存活及建立率，以及苗高。

六、統計分析

直播試驗之幼苗發生、存活及建立率等百分位數之資料，經角度轉換(*arcsine transformed*)後進行統計分析(Prieto-Rodao et al. 2019)，各項試驗之平均值(±標準誤)仍以原始資料表示(Oliet et al. 2005)。不同施肥量之直播試驗採用二因子變異數分析(*two-way analysis of variance; two-way ANOVA*)，事後檢定(*post hoc*)使用Tukey's honest significant difference (HSD)比較處理間差異；為瞭解7及14個月之苗高生長量與肥料量的關係性，以各施肥處理之平均苗高為依變數，施肥量為自變數進行曲線迴歸分析；1年生苗木間拔及追肥試驗使用二因子變異數分析，進行間拔及追肥因子處理間之存活率、淨生長量(地徑、樹高、樹冠幅)及樹幹傾斜之差異檢定；不同類型保護管及直播遮光試驗，使用t檢定進行幼苗發生、存活及建立

率，以及苗高之差異檢定。以上各項試驗之檢定使用SPSS Statistics 26.0進行統計分析。

結果

一、不同施肥量之直播試驗

2016年12月播種至苗齡14個月期間，Fig. 4顯示不同施肥處理於不同苗齡之幼苗發生、存活及發生率在5%顯著水準下均無顯著差異。不同施肥處理之幼苗發生率於苗齡2個月時均達到最高(Fig. 4A)，其中以對照組(0 g)及7 g處理(100±0%)最高，9 g處理最低(93±5%)。苗齡7個月之幼苗存活率(Fig. 4B)，除了0及9 g處理<90%外，1~7 g處理均>95%，苗齡14個月之存活率，1~7 g處理>94%，高於9 g處理(90±9%)，以0 g處理(83±5%)最低。苗齡7個月之幼苗建立率(Fig. 4C)，1~7 g處理>90%，0及9 g處理<90%；苗齡14個月之建立率，以7 g處理(96±3%)最高，1~5 g處理介於91~92%，而0及9 g處理分別為84±12及83±5%為最低。

不同施肥處理苗齡7個月之苗高(Fig. 5)，分別為21±3 (0 g)、33±3 (1 g)、38±4 (3 g)、40±3 (5 g)、44±3 (7 g)及41±6 cm (9 g)，施肥處理對苗高有顯著的主要效應($p < 0.05$)，以對照組(0 g處理)之苗高(21±3 cm)最差，並與1~9施肥處理具有顯著差異，其中以7 g處理(44±3 cm)之苗高最高，顯著高於1 g處理，與3、5及9 g處理間無顯著差異，而1、3、5及9 g等處理之間也無顯著差異；苗齡14個月之苗高，分別為48±12 (0 g)、66±2 (1 g)、72±7 (3 g)、72±3 (5 g)、81±8 (7 g)及80±4 cm (9 g)，施肥處理間有顯著的主要效應($p < 0.05$)，施肥處理以7 g處理(81±8 cm)顯著高於0 g處理(48±12 cm)，兩者間具有顯著差異，但1~9 g處理之間均無顯著差異。Figure 6A為苗齡7個月之平均苗高及施肥量的關係曲線圖，隨著施肥量增加，苗高呈現曲線型式生長($R^2 = 0.921$)，7~9 g處理之苗高生長曲線逐漸緩降，當施肥9 g用量時，其苗高不增反減；Fig. 6B為苗齡14個月苗高與施肥量之關係，與苗齡7個月之曲線型式生長類似($R^2 = 0.870$)。

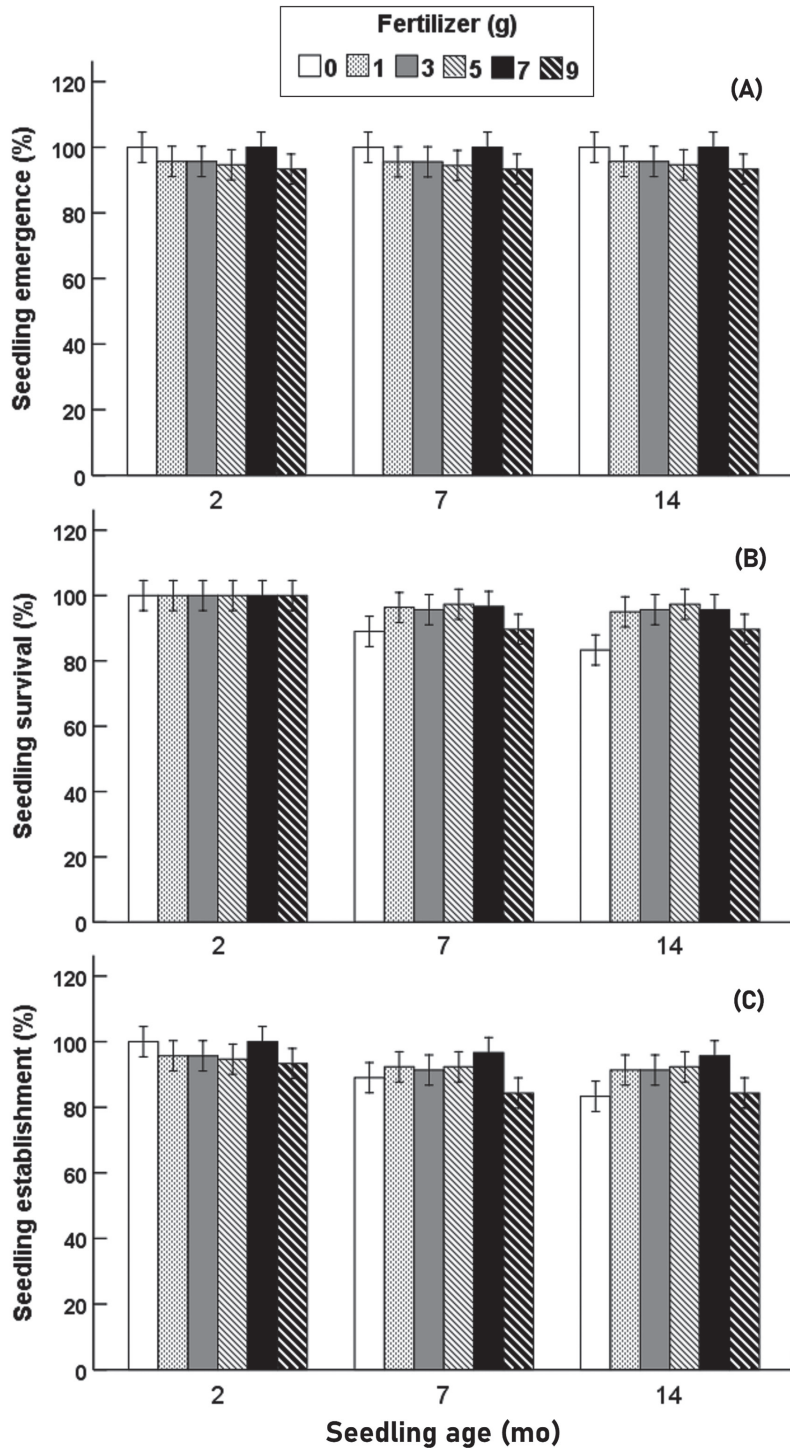


Fig. 4. Responses of seedling emergence, survival, and establishment of *Casuarina equisetifolia* at 2, 7, and 14 mo old among different fertilization treatments. Variations among treatments were not significant at the 0.05 level. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 3$).

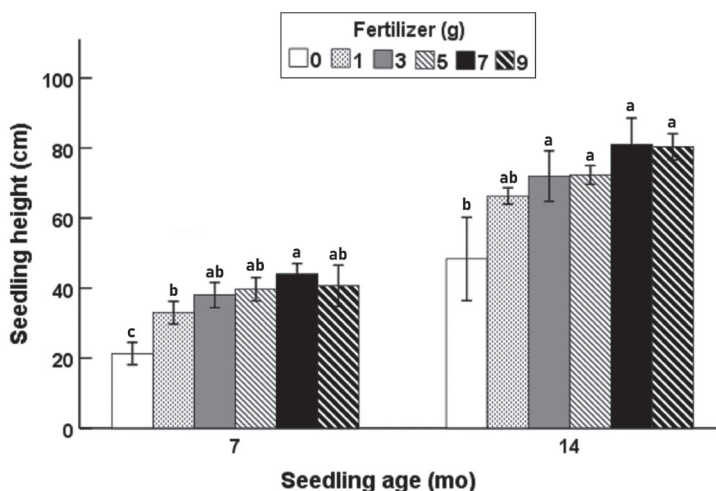


Fig. 5. Responses of the main effects of different fertilization treatments on the mean seedling height of *Casuarina equisetifolia* at 7 and 14 mo old. Vertical bars with different letters (a, b, and c) indicate significant differences at the 0.05 level among treatments at the same seedling age. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 3$).

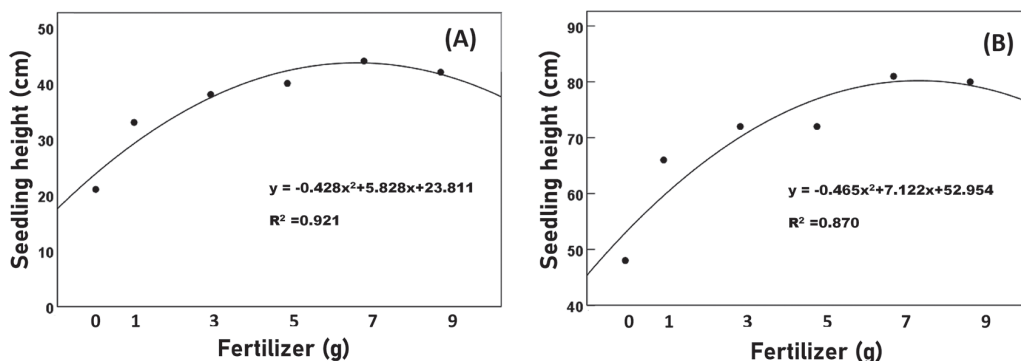


Fig. 6. Mean seedling height of *Casuarina equisetifolia* at 7 (A) and 14 mo old (B) and the different amounts of fertilizer by a curvilinear regression.

二、1年生苗木間拔及追肥試驗

Table 2為間拔及追肥試驗1年期間，苗齡15至28個月苗木之生長表現。苗齡21個月，間拔處理之生長表現高於無間拔處理，追肥與無追肥處理生長表現無多大差距；苗齡28個月，間拔處理之地徑(3.4±0.0 cm)、樹高(239±5 cm)及樹冠幅(172±2 cm)均高於無間拔處理，而追肥與無追肥處理之地徑分別為3.0±0.1及3.0±0.2 cm，樹高為227±6及230±6 cm，樹冠幅各為156±7及152±8 cm。試驗1年後，無間拔處理之播種點苗木平均僅減少1株為6±0株，而追肥及無追肥處

理之播種點苗木仍維持4±1株。

間拔及追肥試驗之存活率及淨生長量差異檢定結果如Table 3。苗齡15個月之苗木經間拔試驗1年後(苗齡28個月)，間拔處理的存活率為99±1%，無間拔處理為100±0% (Fig. 7A)，處理間無顯著差異($p = 0.182$)；間拔0.5年後(苗齡15~21個月)之淨生長量，間拔處理之地徑、樹高及樹冠幅的淨生長量均優於對照組(Fig. 7B-D)，分別相差0.4、20和21 cm，處理間均具有顯著差異($p < 0.05$)；間拔1年後(苗齡15~28個月)之淨生長量，間拔處理之地徑、樹高及樹冠幅淨生長量

Table 2. Growth performance of *Casuarina equisetifolia* seedlings at 15, 21, and 28 mo old in the thinning and top-dressing experiment (mean \pm standard error, $n = 8$)

Seedling age (mo)	Treatment	Basal stem age (mo)	Height (cm)	Canopy diameter (cm)	No. of seedlings
15	Unthinned	0.8 \pm 0.0	76 \pm 3	45 \pm 2	7 \pm 0
	Thinned	0.9 \pm 0.0	78 \pm 4	53 \pm 3	1 \pm 0
	Unfertilized	0.9 \pm 0.0	79 \pm 3	51 \pm 3	4 \pm 1
	Fertilized	0.9 \pm 0.0	75 \pm 4	47 \pm 3	4 \pm 1
21	Unthinned	2.0 \pm 0.0	187 \pm 4	129 \pm 3	6 \pm 0
	Thinned	2.4 \pm 0.1	210 \pm 6	158 \pm 4	1 \pm 0
	Unfertilized	2.2 \pm 0.1	201 \pm 7	142 \pm 7	4 \pm 1
	Fertilized	2.2 \pm 0.1	196 \pm 7	145 \pm 6	4 \pm 1
28	Unthinned	2.7 \pm 0.0	218 \pm 4	136 \pm 3	6 \pm 0
	Thinned	3.4 \pm 0.0	239 \pm 5	172 \pm 2	1 \pm 0
	Unfertilized	3.0 \pm 0.2	230 \pm 6	152 \pm 8	4 \pm 1
	Fertilized	3.0 \pm 0.1	227 \pm 6	156 \pm 7	4 \pm 1

Table 3. Significance of the main effects and their interactions on seedling survival and the net growth of *Casuarina equisetifolia* at 21 and 28 mo old in the thinning and top-dressing experiment. Analyses were performed using general linear models. Values with $p < 0.05$ are in bold

Seedling age (mo)	Main effects and interaction terms ¹⁾	Survival		Basal stem diameter		Height		Canopy diameter	
		$F_{1,3}$	p	$F_{1,3}$	p	$F_{1,3}$	p	$F_{1,3}$	p
21	Thinning (T)	1.000	0.391	75.000	0.003	12.502	0.038	18.615	0.023
	Top-dressing (T-d)	1.000	0.391	6.000	0.092	0.088	0.786	3.888	0.143
	T \times T-d	1.000	0.391	3.000	0.182	0.101	0.771	1.117	0.368
28	Thinning (T)	3.000	0.182	89.286	0.003	5.890	0.094	34.256	0.010
	Top-dressing (T-d)	0.000	1.000	2.667	0.201	0.052	0.835	4.866	0.115
	R \times T-d	0.000	1.000	0.333	0.604	0.018	0.901	1.798	0.272

¹⁾ Main effects: thinning (thinned or unthinned) and top-dressing (fertilized or unfertilized).

分別為2.5 \pm 0.0、161 \pm 2和119 \pm 2 cm，優於對照組1.8 \pm 0.1、142 \pm 4和91 \pm 4 cm (Fig. 7B-D)，其中地徑及樹冠幅之處理間具有顯著差異($p < 0.05$)。苗齡15個月之苗木經追肥試驗1年後(苗齡28個月)，追肥與無追肥處理的存活率均為99 \pm 1% (Fig. 8A)，處理間無顯著差異($p = 1.000$)；追肥0.5年後(苗齡15~21個月)之淨生長量，追肥及無追肥處理之地徑、樹高及樹冠幅等淨生長量差距不大(Fig. 8B-D)，在5%顯著水準下處理間均無顯著差異；追肥1年後(苗齡15~28個月)之淨生長量，追肥處理之地徑、樹高及樹冠幅淨生長量

分別為2.2 \pm 0.1、152 \pm 6和109 \pm 6 cm，對照組為2.1 \pm 0.1、151 \pm 4和102 \pm 6 cm (Fig. 8B-D)，處理間差異未達5%顯著水準；在5%顯著水準下間拔與追肥因子間無交互作用。

2019年6月使用坡度計調查間拔與追肥試驗15個月後之苗木(苗齡30個月)主幹傾斜度，結果間拔與追肥因子間無交互作用效應($p = 0.495$)，間拔有顯著的主要效應($p < 0.05$)，間拔處理之苗木主幹的傾斜角度6° \pm 0°顯著低於無間拔處理10° \pm 1° (Fig. 9A)；追肥無顯著主要效應($p = 0.319$)，追肥及無追肥處理之苗木主幹

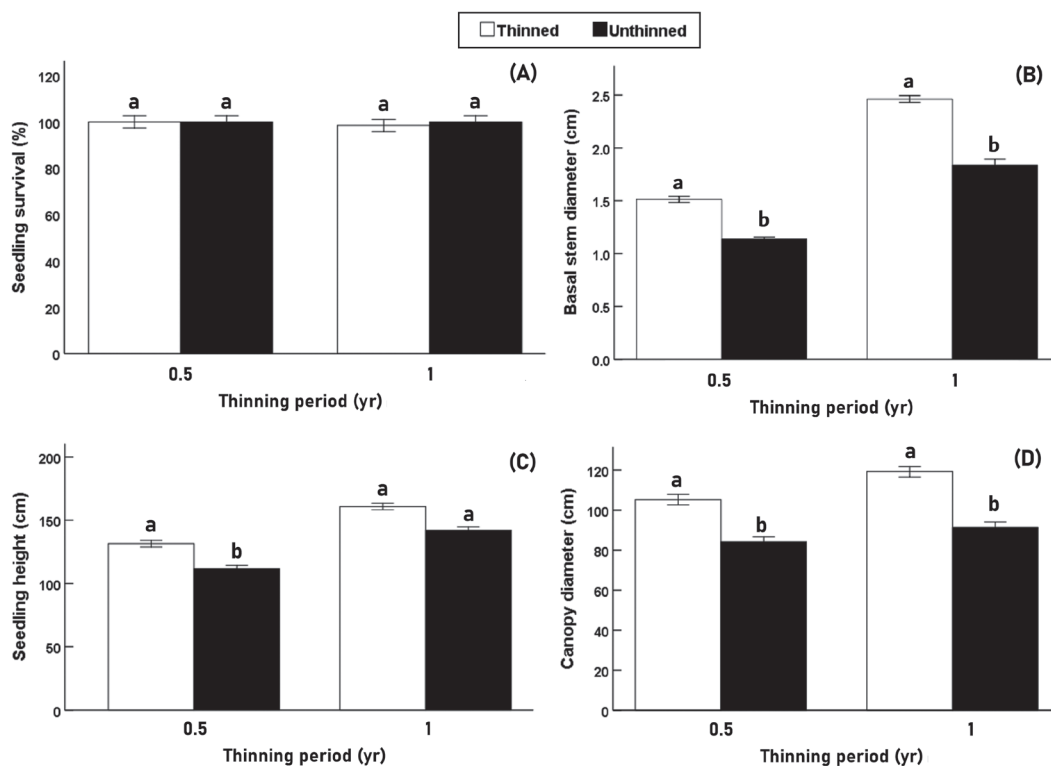


Fig. 7. Net growth of *Casuarina equisetifolia* seedlings at 0.5 and 1 yr after the thinning experiment. Vertical bars with different letters (a and b) indicate significant differences at the 0.05 level among treatments at the same seedling age. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 8$).

傾斜角度均為 $8^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (Fig. 9B)。

三、紙筒與竹筒保護管之直播試驗

2018年1月進行紙筒與竹筒保護管的直播試驗結果，直播1個月後處理間之幼苗發生率均達到最高(Fig. 10A)，紙筒及竹筒處理各為 96 ± 1 及 $86 \pm 5\%$ ，處理間無顯著差異($p = 0.87$)；苗齡5個月之幼苗存活率(Fig. 10B)，紙筒處理($69 \pm 8\%$)優於竹筒處理($29 \pm 4\%$)，處理間有顯著差異($p < 0.05$)，苗齡10個月之存活率，竹筒處理($12 \pm 3\%$)低於紙筒處理($64 \pm 9\%$)，處理間有顯著差異($p < 0.05$)，此時之幼苗建立率(Fig. 10C)，紙筒處理($62 \pm 9\%$)優於竹筒處理($11 \pm 2\%$)，兩者有顯著差異($p < 0.05$)；紙筒及竹筒處理於苗齡5個月之苗高分別為 15 ± 1 及 16 ± 1 cm (Fig. 10D)，至苗齡10個月各為 44 ± 2 及 36 ± 4 cm，各階段之苗高差異未達

5%顯著水準。苗圃直播遮光試驗結果，苗齡4個月時，相對光度26與51%處理的幼苗發生率分別為 90 ± 6 及 $100 \pm 0\%$ (Fig. 11A)，兩者無顯著差異($p = 0.134$)；苗齡4個月之幼苗存活率(Fig. 11B)，51%處理($80 \pm 8\%$)優於26%處理($33 \pm 9\%$)，處理間有顯著差異($p < 0.05$)，而同齡之幼苗建立率(Fig. 11C)，51%處理($80 \pm 8\%$)優於26%處理($30 \pm 10\%$)，彼此有顯著差異($p < 0.05$)；苗齡4個月之苗高(Fig. 11D)，51%處理(12 ± 0 cm)高於26%處理(8 ± 1 cm)，處理間有顯著差異($p < 0.05$)。

討論

一、施肥量對幼苗初期生長之影響

由於海岸砂地塩分高又貧瘠，而且鹽分會降低植物之光合效率，而在低鹽環境中施肥可更有效

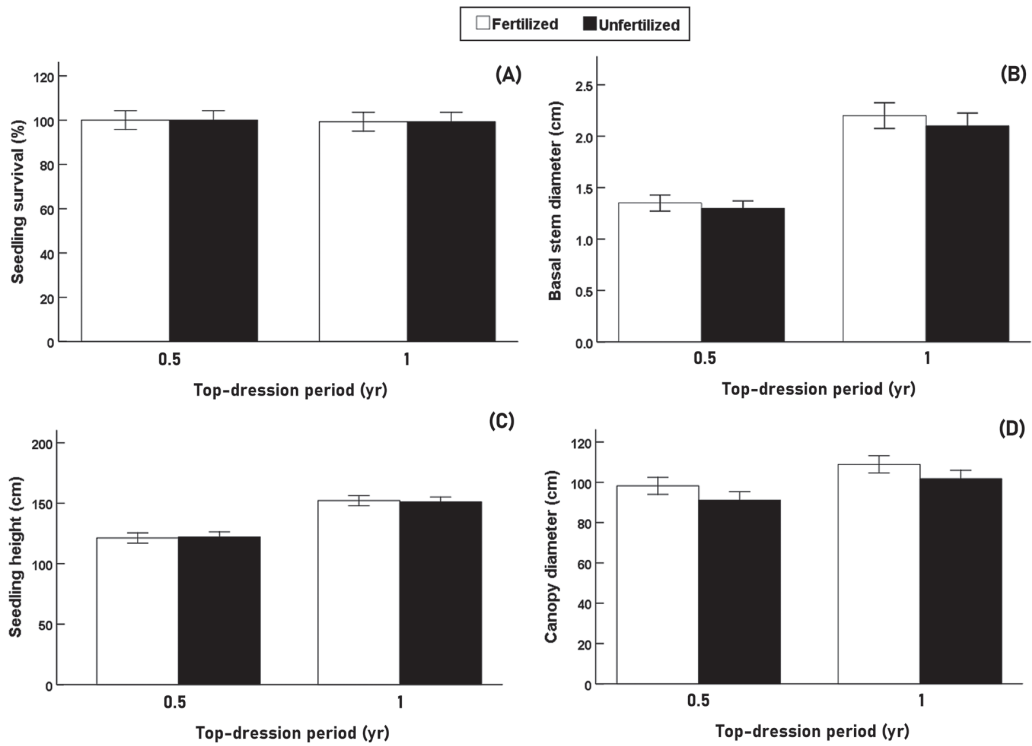


Fig. 8. Net growth of *Casuarina equisetifolia* seedlings at 0.5 and 1 yr after the top-dressing experiment. Variations among treatments were not significant at the 0.05 level. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 8$).

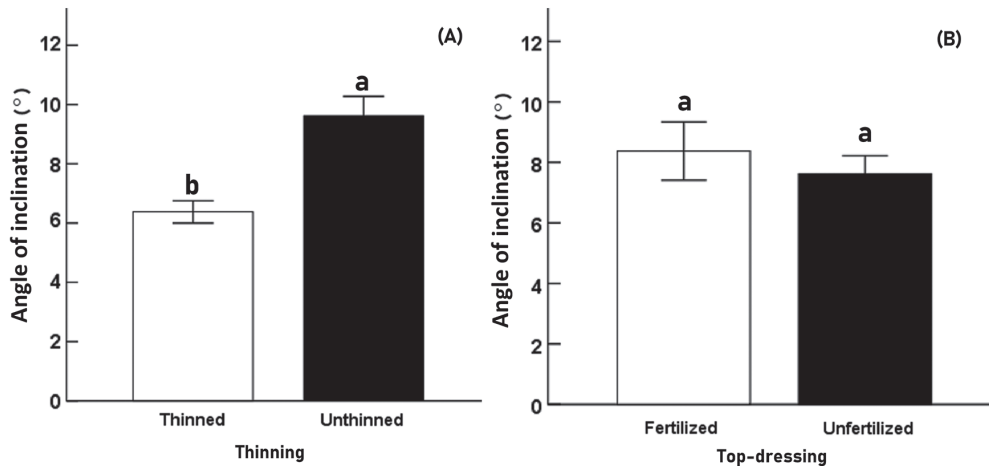


Fig. 9. Angle of inclination of the trunk of *Casuarina equisetifolia* seedlings at 15 mo after the thinning and top-dressing experiment. Vertical bars with different letters (a and b) indicate significant differences at the 0.05 level among treatments. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 8$).

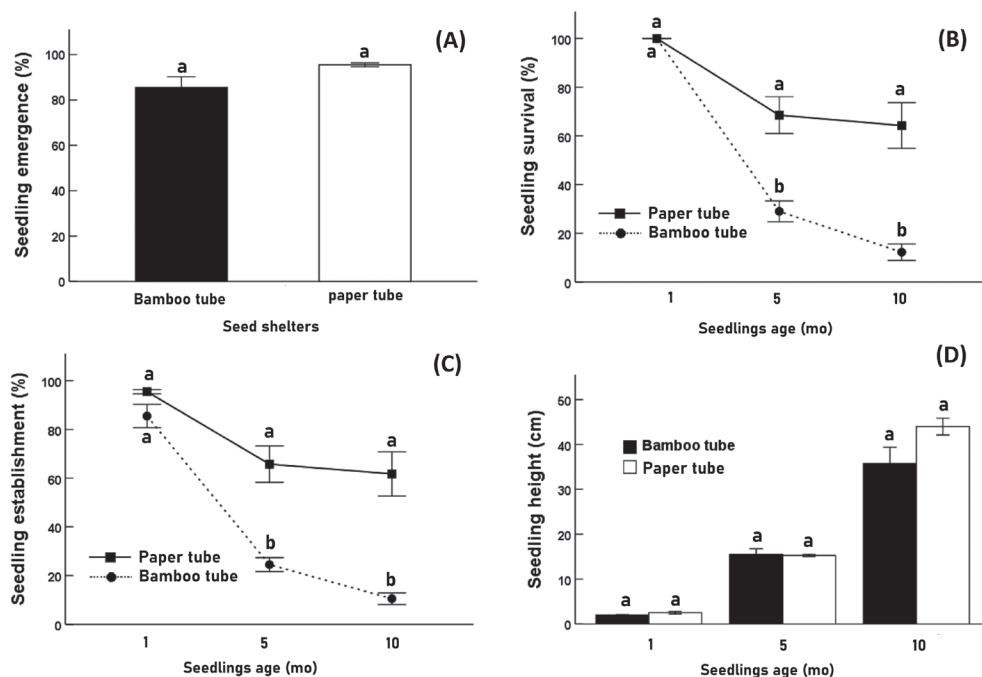


Fig. 10. Responses of seedling emergence, survival, establishment, and height of *Casuarina equisetifolia* in different seed shelters. Vertical bars with different letters (a and b) indicate significant differences at the 0.05 level among treatments. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 4$).

促進幼苗生長(Duan and Chang 2017)，施肥是育林的重要經營方法，已被廣泛認為能夠促進幼苗生長(Khasa et al. 2005)。本研究不同施肥量的試驗結果，再度證實木賊葉木麻黃的小苗於苗齡2個月時，可藉由緩效性肥料促進生長，提高海岸逆境之生存能力(Huang et al. 2019)。小苗施肥半年後，隨著施肥量增加，苗高呈現曲線型式生長($R^2 = 0.921$)，0~1 g施肥量的苗高為 $21 \pm 3 \sim 33 \pm 3$ cm，3~9 g施肥量的苗高($38 \pm 4 \sim 44 \pm 3$ cm)之生長曲線緩慢，且彼此之間無顯著差異，顯示3~9 g施肥量對幼苗生長促進效果類似，而7~9 g施肥量的苗高生長曲線漸緩，苗高不增反減；施肥1年時，苗高生長與施肥量之關係與施肥0.5年時類似，施肥0~1 g的苗高為 $48 \pm 12 \sim 66 \pm 2$ cm，施肥3~9 g的苗高($72 \pm 7 \sim 81 \pm 8$ cm)無顯著差異。整體而言，幼苗施肥0.5或1年後，3~9 g施肥量對促進幼苗生長較0~1 g佳，由生長曲線可知9 g施肥量已超過幼苗生長所需養分之需求，不符實務所需。使用緩效性肥料是本直播育苗系統必要的育

苗措施，試驗顯示幼苗施肥1年，施肥1~9 g的苗高無顯著差異，但重要的是幼苗生長最初的6個月表現，苗齡7個月之苗高以施肥7 g(44 ± 3 cm)最高與3、5 g無顯著差異，但顯著高於1 g (21 ± 3 cm)，因7 g施肥量對苗齡1~2個月的小苗屬於多肥程度，因此實務上需考量施肥成本及適量為原則，建議施肥量3~5 g即可有效促進幼苗生長，符合直播造林初期之需。

二、間拔及追肥對苗木生長之影響

本試驗為確保每個播種點能夠萌發足夠的幼苗，播種點以播種50粒種子，提高幼苗數量，因此直播1年後，每個播種點平均有7株苗木，但因播種點的空間及資源有限，幼苗個體之間必然發生競爭，優點可藉競爭作用淘汰弱苗，但缺點幼苗長期競爭結果，在播種點內多株苗木的樹幹基部已產生擠壓，恐對幼苗生長及形質產生不良的影響。在森林發展中疏伐被認為具有深遠的影響(Daume and

Robertson 2000)，它能促進林木生長及品質 (Juodvalkis et al. 2005)，而未疏伐的林分，林木密度高具有強烈的種內競爭，林木的生長受到限制(Woodruff et al. 2002, Nguyen et al. 2019)，藉由疏伐選擇性移除林木，可使林分符合更理想的生態結構，為一種有效的森林經營方法(Brown et al. 2019)。因此，當林木之生態棲位(ecological niche)越接近時，競爭現象會越明顯，競爭結果直接衝擊到林木的健康(Weatherley 1963, Wei et al. 2013)。本試驗透過間拔如同疏伐概念，降低單位面積的株數密度，試驗結果間拔可有效排除個體間的競爭，能夠促進苗木生長，間拔後苗木主幹之平均傾斜角度($6^\circ \pm 0^\circ$)顯著優於對照組($10^\circ \pm 1^\circ$)，有效促進苗木形質，避免主幹傾斜對生長產生不良的影響，且可回到植穴單株之造林方式，利於後續造林撫育之經營管理。另外追肥試驗結果，追肥與無追肥處理之淨生長量，兩者間無顯著差異，根據Cheng et al. (1996)於澎湖海岸林地及Huang et al. (2017)於臺東太麻里溪洪氾

區林地，進行1年生木賊葉木麻黃施肥試驗結果，施肥1~2年後對其生長量並無顯著促進效果，顯然對苗高近80 cm之1年生木賊葉木麻黃種子苗而言，可能因根部可與放線菌*Frankia*及菌根菌共生(Yen et al. 2006)，已不需施肥就可獲取生長所需的養分。

保護管的作用在於避免凹洞內砂土崩落或外來物落入凹洞內，影響幼苗生長，同時保護管具有擋風之效，可改善幼苗生長之微環境，促進生長及存活率(Oliet et al. 2019)，但現階段保護管非100%可分解，為避免衍生環保問題，當幼苗生長至一定高度，便可將保護管移除收回，根據近年來執行保護管凹地直播育苗系統的經驗，若於12~1月期間播種，待翌年5~6月，0.5年生的苗高可達20~40 cm，可於颱風來臨前將保護管移除，避免保護管因暴潮沖蝕造成環保問題。另外，間拔何時進行最適當？若於12~1月期間播種，間拔要等幼苗1年生後進行，原因在於臺灣東部海岸地區，每年颱風季節期間易受暴潮沖蝕，接著冬季強勁的東北季風盛行，在前述期間

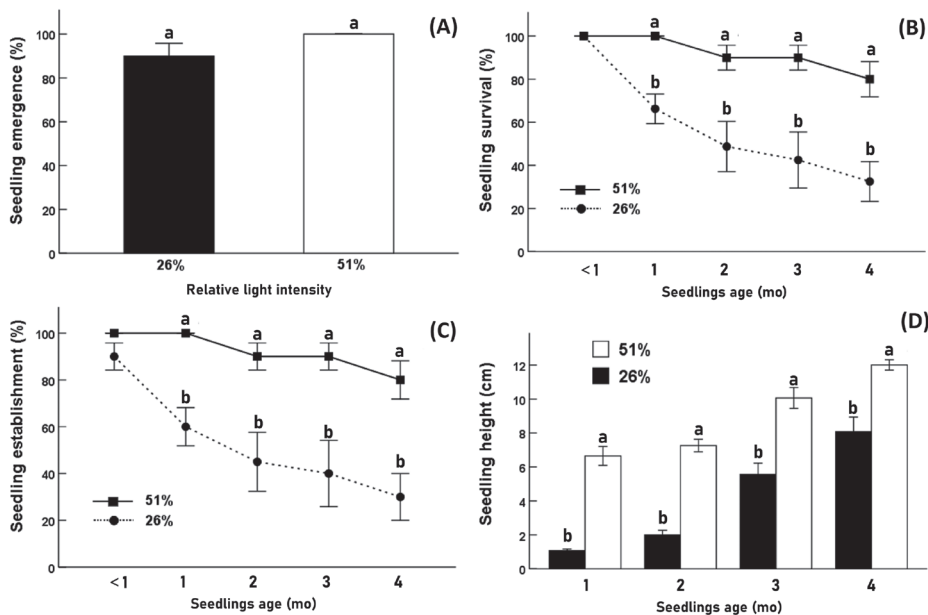


Fig. 11. Responses of seedling emergence, survival, establishment, and height of *Casuarina equisetifolia* at different relative light intensities. Vertical bars with different letters (a and b) indicate significant differences at the 0.05 level among treatments. Vertical bars represent the standard error of the mean ($n = 4$).

內播種點內維持多株植株，叢生的幼苗比單株更具抗災及抗風性，建議於苗木1年生後之早春2~3月期間，執行間拔是最佳的時機。

三、保護管內光照強度對幼苗生長的影響

在熱帶森林內光量的有效性是影響植物生長、繁殖及生存最主要的環境資源(Kuo et al. 1999)，因此生育地內光度強弱是影響植物光合作用最重要的因素，光量的改變也是資源分配與影響植物生長表現之關鍵因子(Larcher 2003, Yu et al. 2009)。本研究比較紙筒及竹筒保護管之直播試驗結果，2種保護管的幼苗發生率均 > 85%，兩者間無顯著差異，顯然小苗萌發不受此2種保護管材質的影響，然而經現場觀察竹筒保護管的小苗於苗齡2個月內可正常生長，但隨著時間的增長，植株陸續出現纖細、倒伏及死亡情形，其生長勢明顯不及紙筒保護管的幼苗。試驗顯示苗齡5個月時，竹筒保護管的存活率(29±4%)顯著低於紙筒保護管(69±8%)，顯然竹筒保護管的幼苗初期生長受到某種因子的影響。因此，由竹筒保護管幼苗的生長初期呈現的外觀特徵，認為竹筒材質之透光性低，造成保護管之管內相對光度低(21±4%)，推測幼苗初期生長可能受到光量不足的影響。雖然大多數種子發芽過程不需高光度，尤其小粒種子發芽後，小苗可於低光度正常生長，但小苗越過1~2月的稚苗期，隨著個體增長，所需之最適相對光度需提高至30~50%，之後若無足夠的光量，幼苗的生長會受到影響(Kuo 2010)，如此可合理解釋竹筒保護管內小苗初期生長不受影響，但越過稚苗期後，幼苗生長得不到足夠的光量，因而導致存活率低，反觀紙筒保護管之相對光度為45±3%，光量充足幼苗能夠正常生長。

為證實木賊葉木麻黃幼苗初期生長與生育環境之光照強度有關，經直播遮光試驗結果，幼苗生長於相對光度26%之遮光環境，其樹高及成活率均顯著低於相對光度51%，苗齡4個月時，相對光度26%之存活率(33±9%)更顯著低於相對光度51% (80±8%)。Zimmermann et al. (2016)的研究顯示，木賊葉木麻黃小苗(苗齡2個月)於低光環境培育4個月後，死亡率風險增加4倍，

Deng et al. (2015)的研究發現在低光林下，木賊葉木麻黃更新苗的高生長會受到抑制，另外Liu and Sheu (2014)研究發現生育地內的相對光度 > 40%，木賊葉木麻黃幼苗生長高度不受影響，並與全光照下的幼苗生長無差異，但相對光度 < 40%，幼苗生長受到抑制，與本研究之遮光試驗結果一致。另外，Sharew and Hairston-Strang (2005)使用多種不同透光度的tree shelters比較幼苗生長，發現透光度高的shelters具有較佳的高生長。因此，由直播遮光試驗結果及文獻佐證，證實木賊葉木麻黃幼苗初期生長及存活受到光照強度的影響，由於竹筒保護管透光性差，導致管內相對光度低，造成幼苗生長不佳及存活率低。另外，為何紙筒與竹筒保護管林地試驗之苗高於苗齡5及10個月時無顯著差異，原因在於竹筒保護管部份少量幼苗，對低光環境耐受性較佳而能存活，當其苗高接近保護管上端時，便不受保護管的影響，因此生長勢幾乎與紙筒保護管幼苗一樣。雖然凹洞結合保護管能營造幼苗有利的生育環境，但凹洞內的相對光度卻較一般平地低許多，因此保護管材質對光量的影響，更直接影響幼苗生長之生育環境，建議使用不同類型的保護管，其相對光度需 > 40%，以免影響直播成效。

四、保護管凹地直播育苗系統成效及實務應用

Lin et al. (2009)檢測木賊葉木麻黃不同時期之種實兩種子，種子發芽率介於40~60%，並在21天後完全停止發芽。2016年12月及2018年1月之直播試驗結果，兩試驗之幼苗發生率於播種1個月後 > 90%，2個月達到最高，分別為97%及91%，另外2015年12月於臺東海岸地區直播試驗也是如此(Huang et al. 2019)。直播試驗結果顯示，播種1個月後，超過90%的播種點具有幼苗，剩餘無幼苗之播種點，之後幾乎無幼苗萌發，而播種點未能萌發幼苗的原因，除保護管遭動物移除或破壞外，也有可能為種子覆土太淺或種子遭受啃食。因此，在直播造林實務作業時，建議可於播種1個月後，仍無幼苗萌發的播種點，可立即補播，提高直播成效。本研究於地被植物覆蓋率 < 10%之直播試驗結果，第1年幼苗建立率達到90%，具有良好的直播成效，2年生苗木存活率仍高達99%，

樹高約為230 cm，可達造林初期之目標。直播試驗成效良好的主要原因，係2017~2019年試驗期間，試驗地未受颱風直接侵襲，根據1949~2018年中央氣象局的颱風歷史紀錄，臺東地區平均4年會遭受颱風侵襲1次，其中強烈、中度及輕度颱風的機率分別為40、30和30%，顯然臺灣東部海岸林第一線林帶並非年年遭受颱風危害，因此使用保護管凹地直播育苗系統造林，仍有很高的機率達到造林的目標。

結論

本研究於臺東海岸林第一線林帶孔隙臨海之處，研發木賊葉木麻黃直播育苗方法，經保護管凹地直播育苗系統之試驗結果，研究成果可提供海岸林直播造林之實務作業參考，能夠有效促進幼苗生長及形態品質，提高造林成效。直播1年後，幼苗發生、存活及建立率分別高達 97 ± 1 、 93 ± 3 及 $90 \pm 3\%$ ，經施肥的苗高可達 $66 \pm 2 \sim 81 \pm 8$ cm，建議施用3~5 g緩效性肥料，可有效促進幼苗生長；為避免播種點內多株苗木之生長競爭，可藉由間拔作業排除競爭，有效促進留存木之生長及優良形質，1年生苗木經間拔1年後，2年生苗木之存活率高達 $99 \pm 1\%$ ，苗木地徑、樹高及樹冠幅達到 3.4 ± 0.0 、 239 ± 5 及 172 ± 2 cm。本研究是國內海岸林地區使用保護管凹地直播育苗系統，成功大量培育木賊葉木麻黃之種子苗，並結合施肥及造林撫育技術，達到直播造林的初期目標，本直播育苗系統尤其適用臺灣東部海岸林易受暴潮為害之地，提供一種可行性高的直播造林方法。

謝誌

本研究承蒙林務局臺東林區管理處106年度委託辦理試驗計畫之經費補助(計畫編號：10654)，以及兩位審查委員對本研究的寶貴修正建議，謹此致謝。

引用文獻

Bergsten U. 1988. Pyramidal indentations as a

microsite preparation for direct seeding of *Pinus sylvestris* L. *Scand J Forest Res* 3:493-503.

Brown GW, Murphy A, Fanson B, Tolsma A. 2019. The influence of different restoration thinning treatments on tree growth in a depleted forest system. *For Ecol Manage* 437:10-6.

Chen TF, Lu CM. 1988. The growth and stand biomass of *Casuarina* plantation at Miao-Li coastal sand-dune. *Bull Taiwan For Res Inst New Series* 3(1):333-43. [in Chinese with English summary].

Chen TH, Shen BH, Chang CT. 1998. Accumulation of stand biomass and nutrient content of *Casuarina* plantations in the Suhu coastal area. *Taiwan J For Sci* 13(4):335-49. [in Chinese with English summary].

Cheng WE, Horng FW, Chen TH. 1996. The response of four windbreak trees to fertilization during planting in Penghu. *Taiwan J For Sci* 11(3):303-13. [in Chinese with English summary].

Chiu CA, Kuo CI. 2020. Exploratory research on direct seeding of *Alnus formosana* for reforestation of abandoned farmlands in Wuling. *Q J For Res* 41(2):115-31. [in Chinese with English summary].

Clark DA, Clark DB. 1984. Spacing dynamics of a tropical rain forest tree: evaluation of the Janzen-Connell model. *Am Nat* 124:769-88.

Daume S, Robertson D. 2000. A heuristic approach to modelling thinning. *Silva Fenn* 34:237-49.

Deng SL, Hwang JL, Chang YH, Hsu JT. 2015. Feasibility of natural regeneration of *Casuarina* in Sihhu lowland coastal windbreaks. *Q J Chin For* 48(3):205-20. [in Chinese with English summary].

Dominy SWJ, Wood JE. 1986. Shelter spot seeding trials with Jack pine, black spruce and white spruce in northern Ontario. *For Chron* 62(5):446-50.

- Duan M, Chang SX. 2017.** Nitrogen fertilization improves the growth of lodgepole pine and white spruce seedlings under low salt stress through enhancing photosynthesis and plant nutrition. *For Ecol Manage* 404:197-204.
- Graber R. 1988.** Stem quality of white pine established by seeding in furrows and by planting. *North Appl For* 5(2):128-9.
- Heikkilä R. 1977.** Destruction caused by animals to sown pine and spruce seed in northern Finland. *Comm Inst For Fenn* 89(5):1-35. [in Finnish with English abstract].
- Ho KY, Chen TH, Yang JC. 2001.** Morphological phylogeny of natural provenances of *Casuarina equisetifolia*. *Taiwan J For Sci* 16(4):285-93. [in Chinese with English summary].
- Hata K, Kato H, Kachi N. 2010.** Litter of an alien tree, *Casuarina equisetifolia*, inhibits seed germination and initial growth of a native tree on the Ogasawara Islands (subtropical oceanic islands). *J For Res* 15(6):384-90.
- Huang CY, Chen CT, Hsieh HC, Chen FH, Ou SH, Chen JC. 2019.** Effect of seed shelters, concave ground seeding, and fertilizing schemes on the growth of *Casuarina equisetifolia* seedlings. *Q J For Res* 41(1):29-48. [in Chinese with English summary].
- Huang CY, Lin HY, Chang CC. 2017.** Initial growth performance and fertilization effect among eight broad-leaved species on the floodplain of Taimali stream in Taitung. *Q J For Res* 39(1):57-69. [in Chinese with English summary].
- Hu YW, He YT, Ma FJ, You HM. 2018.** A study on the methods for landslide revegetation in Taiwan. *Taiwan J For Sci* 40(4):289-98. [in Chinese with English summary].
- Juodvalkis A, Kairiukstis L, Vasiliauskas R. 2005.** Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. *Eur J For Res* 124(3):187-92.
- Khasa DP, Fung M, Logan B. 2005.** Early growth response of container-grown selected woody boreal seedlings in amended composite tailings and tailings sand. *Bioresource Technol* 96(7):857-64.
- Kuo SR. 2010.** Cultivation of high-quality nursery stock - the management of light and nutrients. *For Res Newsl* 8(6):4-10. [in Chinese].
- Kuo YL, Yang YL, Wu SM. 1999.** Morphological and photosynthetic plasticity to light regimes in seedlings of six tropical tree species at Kenting, Taiwan. *Taiwan J For Sci* 14(3):255-73.
- Larcher W. 2003.** *Physiological plant ecology*. New York: Springer. 513 p.
- Li SI, Huang WJ, Wang YW. 2011.** Split-plot design and strip-block design. *Crop Environ Bioinform* 8:209-16. [in Chinese with English summary].
- Lin JS, Chen YM, Wang GW, Liao TS, Yang KY, Chen CI, et al. 2009.** Natural regeneration of *Casuarina* spp. at Taichung Harbor area. *Q J For Res* 31(2):47-60. [in Chinese with English summary].
- Liu CP, Sheu BH. 2014.** Study on the natural regeneration by self-sown seeds in mature *Casuarina* spp. stands. *Q J For Res* 36(1):7-16. [in Chinese with English summary].
- Martelletti S, Lingua E, Meloni F, Freppaz M, Motta R, Nosenzo A, Marzano R. 2018.** Microsite manipulation in lowland oak forest restoration results in indirect effects on acorn predation. *For Ecol Manage* 411:27-34.
- Nguyen TT, Tai DT, Zhang P, Razaq M, Shen HL. 2019.** Effect of thinning intensity on tree growth and temporal variation of seed and cone production in a *Pinus koraiensis* plantation. *J For Res* 30(3):835-45.
- Oliet JA, Blasco R, Valenzuela P, de Blas MM, Puértolas J. 2019.** Should we use meshes or solid tube shelters when planting in Mediterranean semiarid environments? *New For* 50(2):267-82.
- Oliet JA, Planelles R, Artero F, Jacobs DF.**

- 2005.** Nursery fertilization and tree shelters affect long-term field response of *Acacia salicina* Lindl. planted in Mediterranean semiarid conditions. For Ecol Manage 215(1-3):339-51.
- Palmerlee AP, Young TP. 2010.** Direct seeding is more cost effective than container stock across ten woody species in California. Native Plants J 11(2):89-102.
- Pétursson JG, Sigurgeirsson A. 2005.** Direct seeding of boreal conifers on freely drained andosols in southern Iceland. Iceland Agric Sci 16(17):15-28.
- Potgieter LJ, Richardson DM, Wilson JRU. 2014.** *Casuarina*: biogeography and ecology of an important tree genus in a changing world. Biol Invasions 16(3):609-33.
- Prieto-Rodao E, Ricker M, Siebe C. 2019.** A cost-benefit evaluation of direct seeding with and without protector for two native tree species in a tropical rainforest. Restor Ecol 27(2):247-53.
- Putman WE, Zasada JC. 1986.** Direct seeding techniques to regenerate white spruce in interior Alaska. Can J Forest Res 16:660-4.
- Sharew H, Hairston-Strang A. 2005.** A comparison of seedling growth and light transmission among tree shelters. North J Appl For 22(2):102-10.
- Sun IF, Hwong JL, Chen MC, Tsao TM, Huang CC, Fu JS, Huang TH. 2012.** The effect of different thinning intensity on regeneration of native tree species in *Cryptomeria japonica* plantation forest. Q J Chin For 45(1):13-30.
- Tsai ST, Chen CT, Lin CY, Chen WC. 2015.** Analyzing the vegetation restoration of landslides in the Gaoping River basin. Q J For Res 37(4):229-48. [in Chinese with English summary].
- Wang GW, Hong ST, Chen TH, Liao TS, Chen YM, Chen CI, Huang SY. 2019.** Effects of gaps in seed germination of coastal tree species. Taiwan J Biodivers 21(3):149-66. [in Chinese with English summary].
- Wang GW, Liao TS, Chen CI, Yang KY, Lin JS, Chen YM, Shiu LS. 2008.** Response of water stress on *Casuarina equisetifolia* seedlings. Q J For Res 30(2):31-44. [in Chinese with English summary].
- Weatherley AH. 1963.** Notions of niche and competition among animals with special reference to freshwater fish. Nature 197:14-7.
- Wei CH, Chen CT, Peng BS, Lee CC, Chen JC. 2013.** Assessing measures of tree competition by using ground-based LiDAR. J Photogram Remote Sensing 16(4):279-87. [in Chinese with English summary].
- Wennström U, Bergsten U, Nisson JE. 1999.** Mechanized microsite preparation and direct seeding of *Pinus sylvestris* in boreal forests a way to create desired spacing at low cost. New For 8(2):179-98.
- Woodruff DR, Bond BJ, Ritchie GA, Scott W. 2002.** Effects of stand density on the growth of young Douglas-fir trees. Can J For Res 32(3):420-7.
- Yen CH, Chou MC. 2006.** Effects of nodules and mycorrhiza on the N-fixation of *Casuarina equisetifolia* with different nutrient treatments. Taiwan J For Sci 21(4):523-30. [in Chinese with English summary].
- Yu CW, Liou SW, Yang JC, Kuo SR. 2009.** Photosynthesis and chlorophyll fluorescence of broad-leaved tree seedlings grown under various light intensities and fertilizer levels. Q J Chin For 42(2):267-82. [in Chinese with English summary].
- Zimmermann TG, Andrade ACS, Richardson DM. 2016.** Experimental assessment of factors mediating the naturalization of a globally invasive tree on sandy coastal plains: a case study from Brazil. Aob Plants 8:plw042. doi:10.1093/aobpla/plw042.