

行政院農業委員會林務局
新竹林區管理處

「推廣林下經濟發展作物-馬藍適宜
栽培生長環境探討」
結案成果報告

主辦機關：行政院農業委員會林務局新竹林區管理處

投標廠商：國立宜蘭大學

中華民國 110 年 10 月

目錄

摘要

第壹章、計畫基本資訊	1
1-1.計畫緣起及目的	1
1-2.計畫期程	1
1-3.計畫概述	1
第貳章、計畫執行構想與重要工作項目	5
2-1.本年度目標	5
2-2.重要工作項目	5
第參章、材料與方法	9
3-1.研究地點	9
3-2.研究區域生態氣候	9
3-3.樣區設置.....	11
3-4.樣區調查	13
1. 馬藍生長調查	13
2. 不同試驗條件(以人工協助栽植及對照組)樣區選取及經營.....	43
3. 葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析.....	47
4. 研擬以馬藍作為林下經濟栽植之評估	60
第肆章、結論	80
第伍章、參考文獻	82
附錄 1、期初報告審查意見與回覆.....	84
附錄 2、期中報告審查意見與回覆.....	85
附錄 3、期末報告審查意見與回覆.....	88

圖次

圖 1、本研究試驗地位於新北市三峽區(121.4811 E, 24.9083 N)	9
圖 2、本研究區域範圍自 2000-2020 年之生態氣候圖	10
圖 3、研究方法流程圖.....	10
圖 4、闊葉樹林設置 10m*10m 的正方形林分樣區，並劃分為田字型 4 個地被樣區	12
圖 5、柳杉林長條形樣區，由林緣向林內依箭頭方向往林內方向設置次樣區.....	13
圖 6、各樣區相對光度變化.....	19
圖 7、各樣區紫外光相對光度變化.....	19
圖 8、各樣區紅光/近紅外光比相對光度變化.....	20
圖 9、不同類型林分各時期調查之馬藍單位面積株數密度	26
圖 10、各時期調查之不同類型林分馬藍基徑	28
圖 11、不同類型林分各時期調查之馬藍株高	30
圖 12、不同光環境之馬藍植株密度	39
圖 13、不同光環境之馬藍葉部鮮重	39
圖 14、不同光環境之馬藍莖部鮮重	40
圖 15、不同光環境之馬藍植株葉部與莖部總鮮重	40
圖 16、不同光環境之馬藍植株每平方公尺葉部總鮮重	42
圖 17、不同光環境之馬藍植株每平方公尺莖部總鮮重	42
圖 18、不同光環境之馬藍植株每平方公尺葉部與莖部總鮮重	43
圖 19、於研究試驗區域標記(a)為扦插苗與(b)為種子苗	44
圖 20、人工協助栽植扦插與種子苗基徑生長之時間變化趨勢	45
圖 21、人工協助栽植扦插與種子苗株高生長之時間變化趨勢	46
圖 22、人工協助栽植扦插與種子苗株存活率之時間變化趨勢	47
圖 23. 靛苷及靛藍檢量線	49

圖 24、靛苷及靛藍化學結構與轉換過程	49
圖 25、(A) 靛苷、(B) 靛藍之層析圖譜.....	50
圖 26、2021/1/19 三峽馬藍葉子(A)以 280 nm 偵測、(B)以 620 nm 偵測、(C) 乙醇可溶部以 280 nm 偵測、(B) 乙醇可溶部以 620 nm 偵測之層析圖 譜	51
圖 27、三峽馬藍葉子不同季節靛藍含量變化圖	51
圖 28、2020/12/3 礁溪馬藍葉子(A)以 280 nm 偵測、(B)以 620 nm 偵測之層 析圖譜	53
圖 29、礁溪馬藍葉子不同季節靛藍含量變化圖.....	54
圖 30、2021/5/19 礁溪馬藍葉子(A)以 280 nm 偵測、(B)以 620 nm 偵測之層 析圖譜.....	55
圖 31、礁溪馬藍葉子不同採集日靛苷含量變化圖.....	56
圖 32、8/30 三峽藍泥(A)以 280 nm 偵測、(B)以 620 nm 偵測之層析圖譜	58
圖 33、三峽藍泥不同製作日靛藍含量變化圖.....	60
圖 34、本研究樣區內植被種類出現較為廣泛的前十大植物種類.....	62
圖 35、本研究樣區內植被種類相對覆蓋率較高的前十大植物種類	62
圖 36、DCA 第一及二軸之序列與各植被物種的分布.....	64
圖 37、馬藍種子發芽試驗	67
圖 38、馬藍種子採集後立即播種，發芽環境溫度為 15-25°之累積發芽率與每日 發芽率變化.....	67
圖 39、馬藍種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種，發芽環境溫度為 15-25°之 累積發芽率與每日發芽率變化.....	68
圖 40、馬藍種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種，調整發芽環境溫度為 20-30 °C 之累積發芽率與每日發芽率變化.....	69

圖 41、馬藍扦插苗繁殖培育，(a)插穗準備、(b)修整插穗之切口與(c)將插穗插植於沙床.....	70
圖 42、扦插繁殖之馬藍苗木.....	70
圖 43、馬藍植株密度與單株馬藍葉重相關性，以及最大潛在單株葉部生產力圖.....	72
圖 44、三峽地區以林下環境作為培育馬藍之場域與一般業者以遮蔭網建置的培育區.....	76

表次

表 1、三峽地區馬藍生育地溫度資料(單位:°C).....	14
表 2、三峽地區馬藍生育地相對濕度資料(單位:%)	14
表 3、三峽地區馬藍生育地冠層鬱閉度與光環境資料	16
表 4、各樣區之坡度與坡向一覽表.....	17
表 5、三峽地區馬藍生育地土壤含水率及土壤溫度資料.....	21
表 6、上木與冠層樣區調查結果.....	23
表 7、三峽地區馬藍生長性狀資料統計值摘要.....	24
表 8、不同類型林分馬藍株數密度 ANOVA 分析表.....	27
表 9、不同類型林分馬藍基徑 ANOVA 分析表.....	29
表 10、不同類型林分馬藍株高 ANOVA 分析表	31
表 11、三峽地區開花株數與平均花朵數資料統計值摘要	31
表 12、馬藍生物量鮮重平均值與標準差一覽表	34
表 13、馬藍生物量乾重、乾量基準及濕量基準含水率平均值與標準差一覽表	35
表 14、馬藍植株含水率、葉綠素與葉氮含量平均值與標準差一覽表	37
表 15、人工協助栽植扦插與種子苗基徑 ANOVA 分析統計值摘要表	45
表 16、人工協助栽植扦插與種子苗株高 ANOVA 分析統計值摘要表.....	47
表 17、單位重量三峽馬藍葉子中靛藍之含量及靛苷理論之含量.....	52
表 18、單位重量礁溪馬藍葉子中靛藍之含量及靛苷理論之含量.....	54
表 19、單位重量礁溪馬藍葉子中靛苷之含量.....	56
表 20、單位重量林場馬藍葉子中靛苷之含量.....	57
表 21、三峽藍泥中靛藍之含量.....	59
表 22、降趨對應分析之各軸統計值.....	63
表 23、降趨對應分析第一軸及第二軸與環境因子間之相關性分析結果.....	64
表 24、與馬藍相似生長環境之指標植物.....	65

表 25、馬藍培育的過程、採藍時間與季節管理.....	75
表 26、經營模式比較表.....	79

摘要

馬藍(*Strobilanthes cusia*)為爵床科馬藍屬之植物，為天然染工藝與生物醫藥之重要材料資源，亦為早期台灣早期出口的重要經濟作物之一。近年來，隨著林下經濟政策之發展，與教育推廣下再現藍染工藝，馬藍愈發受到社會大眾對天然製品的喜愛與重視，在台灣各處開展馬藍種植與利用的熱潮。然而鮮少不同的林下環境對馬藍生長的影响資料，故本研究以新北市三峽地區為研究區域，針對馬藍之生長性狀、生物量及環境因子調查。本研究區域的馬藍覆蓋率平均約為29.5%，林分組成為台灣中低海拔常見的闊葉樹林與一部分的柳杉人工林，利用鬱閉度計與光學儀器測定量化林冠特徵。林分冠層鬱閉度約65.7-90.2%，顯示馬藍的生長區域的基本條件林分冠層需鬱閉，但要有光透入的林下環境與相當濕潤的環境。生育地需要土壤深厚、肥沃、保水良好，有機質較多處分布範圍涵蓋潮濕林下至森林邊緣，馬藍的株數密度與生產量分析結果，在闊葉樹林分-低光度(光度<5%)有最高的密度，並具有較高的莖葉生產力表現。透過植被調查，本研究區域與馬藍共生的植物共有38科40屬42種，與馬藍共生的植被物種包括廣葉鋸齒雙蓋蕨、觀音座蓮、火炭母草、駁骨丹、筆筒樹、生根卷柏、南海鱗毛蕨、樓梯草、柏拉木與山桂花等物種，可作為選擇馬藍栽培環境的指標植物。比較扦插苗與種子苗，基徑的生長變化在季節間較幅度小，10個月觀察株高生長率增加分別約為129.8%與82.9%，觀測期間扦插苗有較高存活率，種子苗的存活率約44%。馬藍靛苷與靛藍含量的可以280 nm及620 nm作為靛苷及靛藍之偵測訊號。由各時期藍泥中靛藍含量變化，可以初步推論不同季節製作的藍泥的靛藍含量，以春季(4月)時較高，夏、秋季次之，冬季則較低，此結果與馬藍葉子測得的靛藍含量之變化趨勢相近。馬藍的培育方式，建議採行扦插繁殖，以每平方公尺栽植約40株較為適當。可收較穩定的馬藍莖葉。本研究區的馬藍生產力，每公頃約可收穫935 kg的莖葉鮮重。三峽淺山區氣候與已鬱閉的林分下環境，

適合需求低光環境的馬藍生長，當地藍染從業者充分的利用林分冠層所提供的遮蔭，其採藍的模式與扦插繁殖的方式，適合做為未來推廣為林下經濟經營之模式。

第壹章、計畫基本資訊

1-1.計畫緣起及目的

藍染植物是提煉傳統染印工藝藍靛所必需的重要原料植物，臺灣藍泥的製作品質受到各界的肯定。馬藍(*Strobilanthes cusia*)是臺灣早期在北部山區廣為栽植的多年生草本藍染植物，新竹林區管理處轄管海拔 400 至 600 公尺的三峽淺山地區土壤深厚且水分充足，相當適合馬藍的生長。

目前林下經濟政策發展區位正是適合藍染植物生長的重要環境，林下的環境與光度，受到林分樹種組成的影響具有相當大的變異性，因此藉由科學方法瞭解藍染植物的生長環境資料，是復育藍染植物與提升植物性染料品質的關鍵基本資訊。

為提升馬藍植物的生產良級品質，以提供充足藍泥供應市場需求，爰就新竹林區管理處轄管三峽地區建立關於馬藍植群生長環境監測資料，以分析適宜生長環境，進一步建立馬藍應用的經濟發展模式，遂辦理本計畫案。

1-2.計畫期程：自決標日起至 110 年 10 月 31 日止。

1-3.計畫概述：

在政府的輔導、各界傳統工藝家與學者們努力推廣下，十餘年的深耕努力，在 2000 年後臺灣邁入一個新的植物藍染紀元，並透過青農的新創發想，為臺灣植物染事業注入嶄新的發展活力，成為臺灣另類的創新經濟力。然而在植物染從業人口的增加下，臺灣現有的藍靛產量卻無法滿足市場需求，使臺灣面臨無藍靛染料可用的窘境。藍染植物的復育迫在眉睫，臺灣推行的林下經濟政策，正是適合藍染植物生長的重要區位，林下的環境與光度，受到林分樹種組成的影響便具有相當大的變異性，因此藉由科學方法瞭解藍染植物的生長環境資料，是復育藍染植物與提升植物性染料品質的關鍵基本資訊。藍染是一種運用天然植物做為染

料的植物染，又名草木染、天然染。藍染主要經過提取自植物之汁液，制液，後對纖維布料上色，染於織物上，就是所謂的藍染。藍染植物是製作藍靛染料的傳統印染工藝材料，可作為藍染植物有多種，包括爵床科(*Acanthaceae*)的馬藍、豆科(*Fabaceae*)的木藍(*Indigofera tinctoria*)、蓼科(*Polygonaceae*)的蓼藍(*Polygonum tinctorium*)與十字花科(*Cruciferae*)的菘藍(*Isatis tinctoria*)等植物，其分佈亦遍及世界各地，因此許多國家在各自不同的文化中形成多元的藍染文化與產業技術。

馬藍於清朝時引進，藍染產業可追溯自 17 世紀末，1634 年即有中國渡海來台的農民在臺灣種植藍草，並於 1635 年收成。根據《臺海使槎錄》文獻記錄，藍靛染料生產外銷曾高居臺灣第三大出口經濟產物，藍染植物是臺灣重要特用作物、傳統工藝產業與重要文化資產(馬芬妹，2010)。如在《物產志·貨之屬》中，「菁澱」列名於糖之後者，菁澱即是可提煉藍靛染料的作物概稱，顯示有相當的重要性(蔡承豪，2012)。臺灣的藍染植物來自於「福建」，有大藍、小藍，俗名菁，其中藍即閩地所稱之馬藍。而後日治時期調查紀錄，將藍染植物以日式漢語命名為木藍與山藍。藍染植物大多喜好生長於山區之陰濕地，而根據山區與平地的生長環境特性，可分為適宜栽植於山區的山藍(大菁)，與平地的木藍(小菁)。臺灣地理環境氣候與福建類似，故移民引進山藍、木藍植物並積極開發種菁製靛。藍染植物臺灣大致可分為成中北部丘陵地多，山谷凹地潮濕溫暖，栽種亞熱帶植物的爵床科山藍；中南部日照充足，氣溫偏高，加上平原廣大，栽種熱帶植物的豆科木藍。明鄭時期開墾曾文溪以北，並於「埔」種植了俗稱「菁仔」的木藍植物，其中「埔」則是平地、空地的意思，因此台南六甲地區有「大菁埔」、「菁埔寮」等古地名。臺灣北部地區約於 1800 年以後，開始大規模種植山藍，此時進入藍靛業的巔峰期，並自新竹縣的新埔、桃園縣的大溪與新屋、新北市的林口與三峽地區漸漸向山區擴張，藍靛業也藉此擴大規模(國立臺灣工藝研究中心)。其中三峽地區有九成以上的山區，這樣的環境相當適合種植山藍植物，並孕育品質優良的染料，讓三峽的藍染產業聞名全台，同時也享譽國際。從馬藍所提煉出來

的藍靛(indigo)，又稱為菁靛、靛青、澱菁、藍靛、藍澱等，因用其所染出的織品色澤優美、可耐髒污，故廣泛為人所選用(蔡承豪，2012)。馬藍也是客家族群中藍布衫常用的藍色染料作物，極具文化傳統特色與發展潛力(李瑞英，2015)。臺灣藍靛染料品質染後不易褪色且能泛出特殊光澤的特性，在貿易市場價格高，是出口重要的產業，在許多城鎮發展形成染布行業與布商店，如三峽老街林立的舊染坊建物。傳統的染料多係來自染料植物，直到 19 世紀初德國化學家阿道夫·馮·拜爾(Adolf von Baeyer)成功合成了靛藍發明合成染料，同時也衝擊傳統的藍染產業。近年來，天然的植物藍靛產品逐漸重新受到世人的重視，2006 年聯合國教科文組織 (United Nations Educationnel, Scientific and Cultural Organizatio, UNESCO)召開 International Symposium / Workshop on Natural Dyes，推動天然植物染色的世界觀。臺灣植物染，中斷 80 幾年，1992 年的 921 大地震，由國立臺灣工藝研究所將技術帶入災區，重建植物染的觀光產值基礎(臺灣文化創意產業學會)。

馬藍除了做為染料以外，亦為黑擬蚊蝶和枯葉蝶的幼蟲食草，在生態上是重要的植物資源。另外馬藍中富含許多獨特的天然化合物成分，使其根、莖、葉均具藥用價值，中藥材的「板藍根」是指十字花科的松藍的根部，臺灣則以馬藍的根，莖作為板藍根藥材使用，習稱為「南板藍根」，是許多中成藥的主要原料，但未被歷代本草收載。「青黛」則是指爵床科的馬藍、寥科的寥藍、十字花科的松藍或豆科的木藍，利用其莖與葉加工的成品，以乾燥葉作為大青葉入藥，是臨床上的常用中藥，具有清熱解毒，涼血、定驚之效，常用於溫毒發斑、血熱吐衄、胸痛咳血、口瘡、疔腮、岷痺、小兒驚痛等，其主要成分為靛藍與靛玉紅具有抗腫瘤活性及抗菌作用(陳建志等，2010;農委會藥用植物主題館網站)。馬藍為台灣本島產之藥用植物，作為中藥主要使用馬藍葉，在鎮痛、抗炎，解熱及治療肝損傷等亦有良好效果，陸續有相關研究顯示應可將馬藍開發為新的藥物的潛在價值。

藍染是重要的工藝加工技術，歷經採菁、浸泡、製藍、取藍與建藍等過程，由馬藍莖葉中提煉出藍靛。藍染中的各種的染製技法，像是絞染、夾染、蠟染與型染，可將各種物料染製成為服飾等生活用品，像是各式暖簾、桌墊布、浴服料等(江美玲，2018)。各種染色方法有其技巧，絞染係利用繩子細綁緊要留白的地方，將布料浸染完後被捆綁處便會是白色的，是基本的染色法。夾染，與絞染相似，將細綁的繩子改用筷子或是板子夾住要留白的部分。蠟染，先以溶解的蠟液在布上畫出圖案，已使染色劑無法染色，染完後用水煮脫蠟，圖案創作自由度高。型染則使用防染糊(黃豆糊)或防水紙，來防止染色以創造圖案。日本的政府相當支持傳統工藝，每年都會補助傳統工藝產業振興協會 10 億日元(陳美芬、謝正餘，2009)，日本的德島「阿波藍」與沖繩即有相當多的工藝技術支援中心和各小型的工藝作坊，藍染的商品也因應年輕人，推出更種時尚款式衣服、牛仔褲、內搭褲與球鞋等商品，以及各式樣的藍染文創商品。亦有雕刻工匠合作製原創彩繪木品將靛藍染料與漆藝風格用於木製品，開創屬藍染應用的新技術。以藍染為主題的旅遊行程鎖定以體驗藍染產品為重要核心價值，成為該地區推廣藍染的重要觀光產業特色。日本政府在 2021 年主辦的奧運會，更以藍染為主題，可見日本政府對於藍染文化的重視。

因此本研究計畫針對馬藍生長進行調查，透過環境微氣候數據監測、植被調查及馬藍生長量調查，掌握藍染植物的適生環境，並透過不同試驗條件(以人工協助栽植及對照組)樣區選取及經營試驗，蒐集科學資料連結葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析，評估馬藍作為林下經濟栽植之適宜環境栽植評估及指標物種，提供作為林下經濟物種之經營模式的重要依據。

第貳章、計畫執行構想與重要工作項目

2-1.本年度目標

(一)馬藍生長調查

1. 環境微氣候數據監測
2. 植被調查及馬藍生長量調查
3. 不同試驗條件(以人工協助栽植及對照組)樣區選取及經營
4. 葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析

(二)研擬以馬藍作為林下經濟栽植之評估

1. 適宜環境栽植評估及指標物種
2. 作為林下經濟物種之經營模式

2-2.重要工作項目

1.馬藍生長調查

(1)環境微氣候數據監測

為瞭解馬藍生育地的微氣候環境，本計畫規劃於試驗觀測期間針對所選定馬藍生長樣區域，進行環境微氣候數據資料之蒐集，包括溫度、相對溼度、冠層鬱閉度、土壤水分及土溫等微氣候因子之觀測。

溫度：記錄環境溫度，瞭解馬藍生長區溫度平均值、最高溫、最低溫與標準差。

相對溼度：紀錄相對溼度，瞭解馬藍適生區域相對濕度變化。

冠層鬱閉度：評估冠層鬱閉度，使用球形凹鏡面的鬱閉度計(spherical densiometer)量測冠層鬱閉度，量測高度為 1 m，配合樣區設置量化冠層鬱閉度，藉以提供後續分析使用。

土壤溫度及土壤水分：使用土壤溫度/水分感測器蒐集資料，提供土壤的水分含

量與土壤溫度對馬藍生長分析使用。

(2) 植被調查及馬藍生長量調查

本計畫以爵床科馬藍為主要的研究對象，其為多年生草本植物，生長於林下、山谷或溪邊濕地，故採行草本植被之調查方式。

植被調查：為瞭解馬藍生育環境之植被種類，本計畫規劃於三峽地區馬藍生育區內沿林道設定調查樣區，規劃於林緣至林下區分 3 種不同冠層環境梯度，各重複 5 次，樣區採矩形方式設置，長 10m、寬 10m，每一樣區面積為 0.01 公頃，共設置 15 樣區，進行樣區內地被植物種類與植物覆蓋度(%)調查，並紀錄樣區上木之樹種。

馬藍生長量調查：由日治初期的藍染產業調查可以瞭解馬藍的生長量是後續生產藍泥的關鍵，生長量的變化可以會受到生育地的影響明顯，致使每公頃約可生產馬藍生葉重量變異相當大，但如果遇風雨打壞，全無收成。因此本計畫於樣區設置完成後，每季進行馬藍之生長量調查，測量樣區內馬藍之基徑與株高，並以第一次調查資料作為基準，計算株高與基徑之淨生長量。每一季以標準木法，選取各冠層環境梯度下之馬藍植株進行生物量調查。採取樣本植株於現場依莖及葉二部分，進行各部鮮重之測定，並將葉部拍照測量其葉面積。完成後依根、莖及葉密封入夾鏈袋，放入攜帶式冰桶，以低溫保存攜回實驗室，並將各部位組織分別放入紙袋中，以烘箱 $72\pm 3^{\circ}\text{C}$ 烘至恆重(約 72 小時，植體之乾重需進行重複測量，直至取得恆重)，並秤取各部位之乾重。將前揭之生長量調查項目，進行生長季各部位生長分析，瞭解各季之馬藍生長變化。

2. 不同試驗條件(以人工協助栽植及對照組)樣區選取及經營

馬藍因為其分生能力優良，故多採扦插繁殖，而查閱以往文獻，顯示馬藍亦

有使用種子進行栽植的紀錄，春清明前下種，至秋收成，連根頭拔起。馬藍分布在水資源豐富、土壤深厚、溫暖潮濕的氣候環境，適宜在土質肥沃的地方生長。馬藍的生長受到環境條件、生長季節、收成季節等因子影響而有所差異。本計畫為評估馬藍作為林下經濟栽植之植物之可行性，因此規劃透過人工協助栽植方式，進行種子苗與分生苗培育，將透過不同試驗條件以人工協助栽植經營方式與馬藍生育地(對照組)之生長情況進行比較，瞭解馬藍種子苗與分生苗之生長情況，預定以種子及分生繁殖法，培育馬藍之苗木，並作為後續研究分析使用之材料。

3. 葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析

葉片(藍泥)收穫估算：制取靛青(靛藍)，藍之色素含量較多部位以葉子為主，故以先前所測定的馬藍植株鮮重與生物量，配合每季透過葉片製作染泥的收穫量，進行葉片(藍泥)收穫估算，以瞭解季節對於藍泥的產量影響。

靛苷含量分析：靛苷(Indican)為藍草植物建藍過程中重要的指標化合物，亦是藍泥主要色素—靛藍素(Indigo)的前驅物。因此，本計畫參考 Maugard 等人(2002)及 Warzecha 等人(2007)之方法透過高效能液相層析串聯質譜儀分析技術，針對馬藍中的靛苷進行分析與定量，並進一步分析製藍後藍泥中靛藍素之含量，藉此探討馬藍葉子中靛苷含量與製藍後藍泥中靛藍素含量之關係。

首先，將凍乾後之馬藍葉子或藍泥(100 mg)浸泡於 10 mL 50% MeOH/H₂O 中，並輔以超音波震盪 30 min。續將萃取液離心 5 min 後，取上清液進行靛苷及靛藍素含量之分析。將 25 μ L 萃取液以 C18 管柱進行管柱層析，並以液相層析串聯質譜儀進行分析。沖提液為不同極性之 MeOH/H₂O 混合溶液，首先，以 0.85 mL/min 之流速於 10 min 內將 15% MeOH/H₂O 之沖提液提升至 25% MeOH/H₂O，續於 20 min 內將 25% MeOH/H₂O 之沖提液提升至 30% MeOH/H₂O，接著，以 30% MeOH/H₂O 之沖提液維持 10 min，再於 15 min 內將 30% MeOH/H₂O 之沖提液提升至 85% MeOH/H₂O。此外，進行定量之靛苷及靛藍素檢量線所需的化合物則

分離並純化自馬藍葉子及藍泥。

4.研擬以馬藍作為林下經濟栽植之評估

(1)適宜環境栽植評估及指標物種

為瞭解馬藍的宜環境栽植評估及指標物種，將前揭所蒐集的微氣候資料與植被調查所得到的資料，進行環境資料分析、植生密度、優勢度、相對密度與地被層相對覆蓋度計算。指標物種透過各樣區之植物名錄，配合馬藍生長量資料進行分析，建立馬藍適生環境的指標物種資訊。

(a)植生密度：單位面積上之株數。

(b)優勢度：草本植物以覆蓋度計算。

(c)地被層相對覆蓋度： $(\text{某一物種之覆蓋度總和} / \text{所有物種之覆蓋度總和}) \times 100\%$

(2)作為林下經濟物種之經營模式

本計畫規劃將選擇與生育地相似的生育環境，栽植馬藍，並蒐集栽培之馬藍生長量資訊與微氣候資料，藉由科學儀器測量各種環境因素與生長性狀變化量，以瞭解栽培環境之基本資料，以統計方法分析，與視覺化方式呈現馬藍植物栽培之適生環境資訊，計畫所獲得之數據成果可提供馬藍之種植與管理參考，作為林下經濟物種之經營模式。

第參章、材料與方法

3-1. 研究地點

本研究試驗地位於新北市三峽區之安坑里山區(121.4811 E, 24.9083 N, 圖 1)，研究區域範圍內具有人工林造林地與低海拔闊葉林，造林樹種以柳杉(*Cryptomeria japonica*)為主，海拔自 400 至 510 公尺。本區域由於以往三峽地區藍染產業相當興盛，因此藍草業者在山區經營藍草田種植馬藍，作為產業原料的來源，致使馬藍於此區域且廣泛分布於林下生長，表示此區域為馬藍適生之生育地，因此選擇當地林下已生長多年的馬藍生育區作為樣區進行調查。

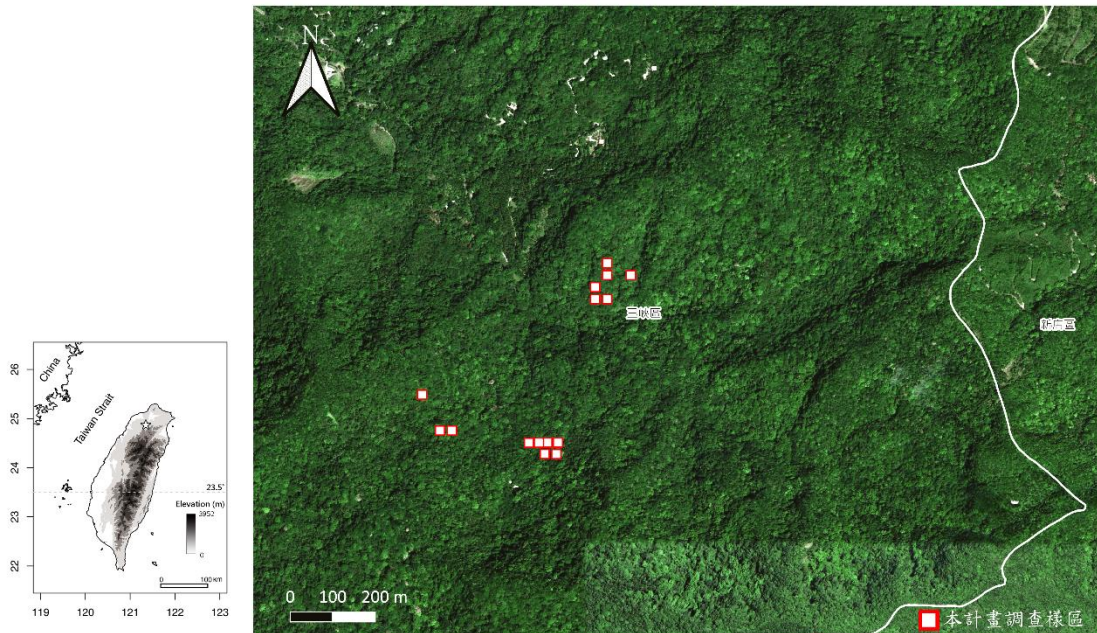


圖 1、本研究試驗地位於新北市三峽區(121.4811 E, 24.9083 N)

3-2. 研究區域生態氣候

本計畫之研究區域範圍內，並無氣象站資料，因此使用國家災害防救科技中心所提供的網格式氣象資料，依據本試驗樣區的空間位置，進行資料的萃取，進行生態氣候圖的繪製，做為表示研究區域氣候情況之依據。本區域的年雨量達 3731 mm，比台灣年平均降雨量約 2500 mm，還要高出許多，顯示本區之降雨量

相當豐沛。雨量在本區是以8月份最高，達529.3 mm，3月份最少，僅有183.6 mm。溫度部分，本區平均溫度為20.5°C，是以7月份最高，達27.2°C，1月份最低，僅有12.8°C。本區域的氣候並沒有明顯的乾季，僅呈現冬末春初有雨量較少的情況(圖2)。

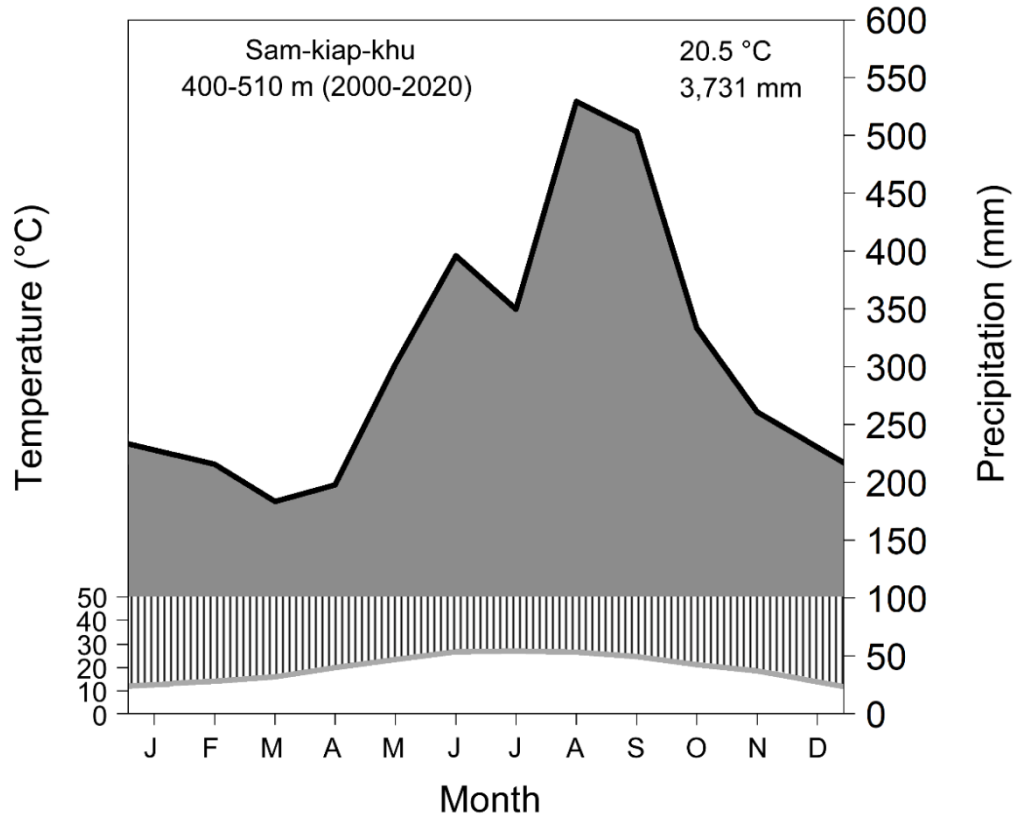


圖2、本研究區域範圍自2000-2020年之生態氣候圖。

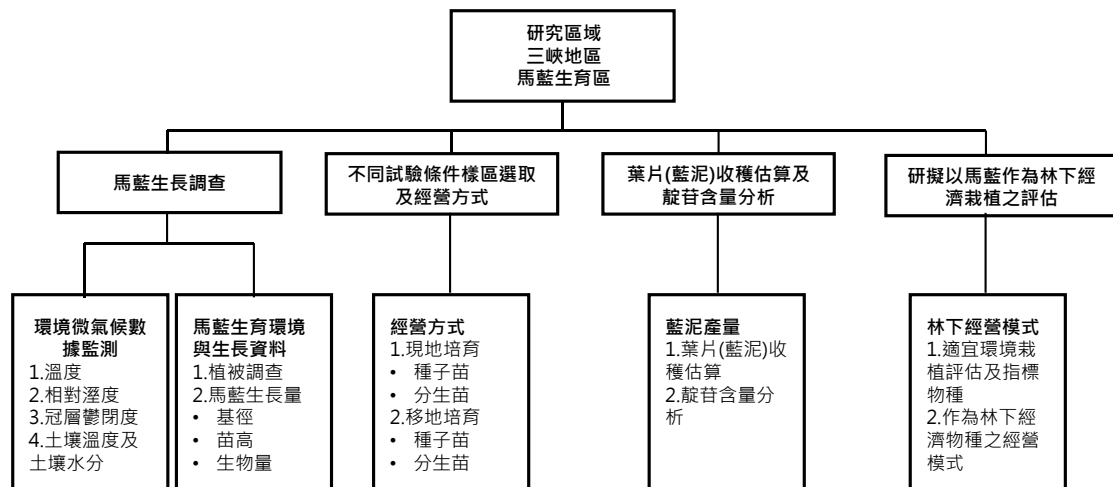


圖3、研究方法流程圖。

3-3.樣區設置

本區的上方林木冠層以闊葉林及針葉樹柳杉人工林為主要組成，為調查馬藍生育環境、生長與生物量，分別於2種林分進行樣區之設置。光環境資料以鬱閉度計、光度計量器、紫外線照度計與紅光/近紅外光比例計，蒐集林分光度資料。樣區設置時，先初步就鬱閉度計觀測資料與現地情況設定林分冠層環境為高、中與低光環境，之後透過光度計量器、紫外線照度計與紅光/近紅外光比例計儀器量化數值，比較上方植被冠層覆蓋情況對於馬藍生長之影響。

為評估不同冠層環境梯度對於馬藍生長的影響，針對本研究區闊葉林分與柳杉人工林分進行不同光環境的評估。本計畫考量未來可提供做為林下作物栽培的基本環境條件參考，試驗樣區設置於研究區域內選取不同光度環境條件，分別於闊葉林分中設置9個林分樣區，於柳杉人工林設置6個林分樣區，全數樣區於2020年11月17日完成，共設置15個0.01公頃之林分樣區。各林分樣區內設置4個5m x 5m的地被樣區組成(後稱之為次樣區)，於每一個次樣區調查馬藍與共生植被覆蓋度。其中闊葉林樣區則由4個地被樣區組成田字型之樣區(圖4)，柳杉林分樣區由4個5m x 5m所形成的10m x 10m長條形樣區(圖5)，即每樣區面積為0.01公頃，樣區設置時同時記錄各樣區坡度、坡向及地表沖蝕是否發生。

本研究之馬藍調查樣區範圍較小，對於林分特徵表現之代表性不足，因此於研究區域內之闊葉樹與柳杉造林地，另外依光度環境分類設置3個20m x 20m上木調查樣區，蒐集上木冠型及冠長等資料，瞭解上木對日照的主要遮蔽成因。

1.林分樣區設置方法

第一種形式(田字型樣區)：主要於闊葉林區中之林內，樣區之設置以選擇以林下地被植物具較多馬藍處為基礎，設置10m x 10m的正方形樣區，因闊葉林林分組成結構變異大，共設置9個林分樣區。先選定樣區中心點並釘入膠管為中心標，設置5m x 5m單元樣區，由中心標位置依地形縱向各拉5m水平距之縱線，

並釘塑膠標竿，基於此2標竿點，以工字型方式進行設置樣區以塑膠管4個角標，形成田字形單元樣區，重複四次設置4個位置鄰的樣區，以面對上坡處右上角為次樣區1順時鐘方向為象限2-4樣區。

第二種形式(長條形樣區)：主要於柳杉人工林區中，林分組成結構較均質，考量林下透光度對林下馬藍生長與分布影響，自林道兩側設置6個採長條形5m x 20m樣區。第1個次樣區於林道旁進行設置，先設置一條5m長的邊界，垂直向林內方向水平延伸20m，每5m以水管做標記，作為次樣區的邊界點，再由林道旁依序標記1、2、3、4次樣區。

2.馬藍基徑與株高生長的調查樣區設置

馬藍基本性狀特徵之調查，係以樣區內生長之馬藍群落為主要調查對象，於次樣區內選擇有馬藍生長之區域設置一個50cm x 50cm的調查樣區，並將每個樣區的設置地點四周以竹篾並噴紅漆做標記，以作為後續監測馬藍植株株數、莖基徑、株高與開花情形使用之樣區。

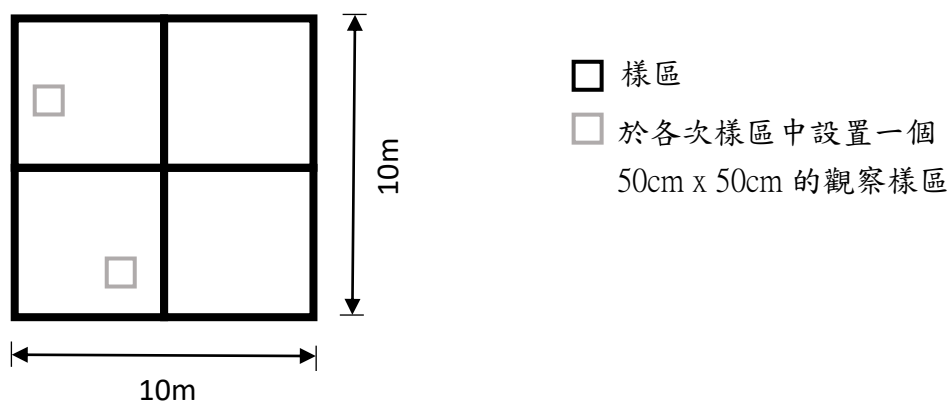


圖4、闊葉樹林設置10m x 10m的正方形林分樣區，並劃分為田字型4個地被樣區

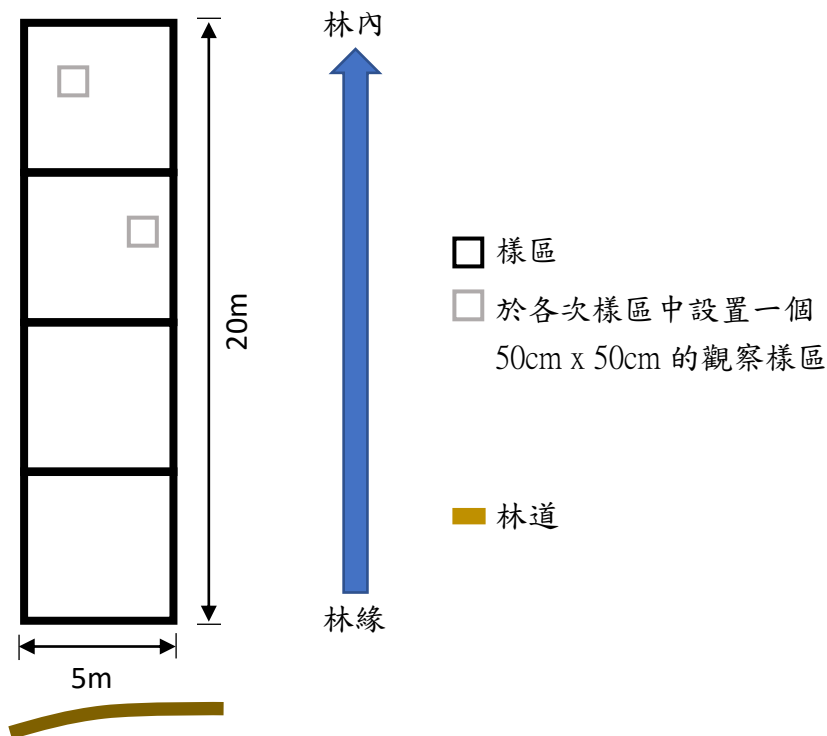


圖 5、柳杉林長條形樣區，由林緣向林內依箭頭方向往林內方向設置次樣區

3-4. 樣區調查

1. 馬藍生長調查

(1) 環境微氣候數據監測

a. 溫度：環境溫度記錄，使用高精度溫濕度記錄器(THD-8, Jetec electronics co., TW.)，進行試驗區的溫度及濕度資料蒐集。將現地所蒐集的資料，透過 R 軟體撰寫程式獲取馬藍生育地溫度平均值、最高溫、最低溫與標準差。溫度資料自 2020 年 11 月開始紀錄，截至 2021 年 9 月，就目前所蒐集資料的平均溫度為 20.5°C ($\text{sd}=6.0$)，最低溫度出現在 2021 年 1 月份為 12.8°C ，最高溫度出現在 2021 年 7 月份為 27.9°C (表 1)。

b. 相對溼度：同樣由溫濕度記錄器紀錄現地的相對濕度資料，由資料顯示本區的相對濕度相當高，平均值為 89.0% ($\text{sd}=3.4$)，相對溼度最小值出現在 5 月份 86.3% ，

最大值則是 6 月份為 94.9%(表 2)。

表 1、三峽地區馬藍生育地溫度資料(單位:°C)

	2020					2021					
Month	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mean	16.5	14.0	12.8	14.0	16.1	20.0	23.5	26.8	27.9	27.0	26.8
sd	3.0	3.4	3.4	3.7	3.6	3.2	2.2	1.8	2.5	2.2	2.1
min	14.7	4.5	3.4	3.9	5.0	9.4	14.5	15.6	16.5	14.3	13.3
max	21.5	21.5	20.1	24.4	22.9	25.3	27.2	28.1	29.0	28.1	27.8

表 2、三峽地區馬藍生育地相對濕度資料(單位:%)

	2020					2021					
Month	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mean	86.2	87.9	91.6	90.5	88.0	87.2	86.3	94.9	86.3	88.2	87.6
sd	8.7	10.0	10.7	11.0	11.1	9.6	9.5	7.1	7.0	8.2	9.1

c.冠層鬱閉度：冠層鬱閉度的測量，使用球形凹鏡面的鬱閉度計(spherical densiometer, Model-C, Lemon, 1957)量測冠層鬱閉度，量測高度為 1 m，於樣區內進行四個方向樹冠鬱閉度的測定，並計算由上方冠層所覆蓋比例，評估樣區之鬱閉度，以避免造成人為誤差，每次測定時均固定由相同人員測定。鬱閉度範圍自 65.7-90.2%，平均為 82.3%(sd=6.2)(表 3)。

d.光環境：於樣區內以光度計量器(Light mater, LI-250, LI-COR, USA)搭配光量子感測器(Quantum Sensor, LI -190, LI-COR, USA)、UV 測量儀(LightScout Foot-Candle Meter)與 R/FR 測儀(LightScout Red/Far Red Meter)量測林分樣區林下

光環境數據。於各林分樣區中心點測量一次及 4 個角點量測記錄，蒐集樣區林分內之光度(light intensity, LI)、紫外光照度(UV light, UV)與紅光/近紅外光比值(Red to far red light ratio, RFR)，以及於同一時間於林外空曠處之進行測定，作為計算相對光度之依據。相對光度平均為 5.9%(sd=8.5)，紫外線的照度平均為 2.7FC(sd=3.2)，紅光/近紅外光比值平均為 0.7(sd=0.1)。植被調查時建議同時記錄馬藍樣區坡度、坡向及地表沖蝕是否發生，結果如表 4 所示，以本生育地坡度自 0°-23°，坡向以北面坡居多，少數坡向為東、東北與西向。自 2020 年 11 月設置樣區觀察自 2021 年 9 月，各研究樣區未發現明顯的地表沖蝕(表 4)。

表 3、三峽地區馬藍生育地冠層鬱閉度與光環境資料

Plot	Stand type	Canopy closure(%)		UV(FC*)		RFR ratio**		Relative*** light intensity	
		Mean	sd	Mean	sd	Mean	sd	Mean	sd
1	闊葉樹林	65.7	11.1	11.6	2.3	0.6	0.3	17.3	21.1
2	闊葉樹林	90.2	3.7	6.5	1.4	0.3	0.1	33.5	85.3
3	闊葉樹林	83.4	3.7	4.8	0.5	0.5	0.2	7.2	6.7
4	柳杉林	86.2	1.5	0.7	0.3	0.7	0.1	3.6	4.8
5	柳杉林	85.9	2.7	1.1	0.4	0.8	0.1	2.5	1.4
6	柳杉林	86.7	4.7	1.7	1.5	0.7	0.1	1.6	0.8
7	柳杉林	86.9	1.7	0.6	0.4	0.8	0.1	1.9	1.1
8	柳杉林	85.5	3.7	1.4	1.3	0.7	0.1	3.6	2.2
9	柳杉林	83.5	2.3	0.7	0.1	0.8	0.1	1.9	0.9
10	闊葉樹林	82.9	1.4	0.8	0.2	0.6	0.0	0.9	1.7
11	闊葉樹林	80.5	4.7	1.3	1.0	0.7	0.1	3.5	3.1
12	闊葉樹林	81.0	3.4	1.5	0.7	0.7	0.1	1.1	0.4
13	闊葉樹林	70.5	11.2	7.1	1.7	0.6	0.2	7.6	9.0
14	闊葉樹林	83.6	1.8	0.5	0.3	0.7	0.1	0.6	0.2
15	闊葉樹林	81.1	1.4	0.5	0.3	0.8	0.1	1.4	0.9

*FC=10.76LUX(每單位面積所接收到的光通量)

** The ratio between red 660 nm and NIR 730 nm

*** The unit of relative light intensity is percent (%)

表 4、各樣區之坡度與坡向一覽表

Plot	Stand type	Slope(°)	Aspect (°)	地表沖蝕情形
1	闊葉樹林	22	East(110)	無
2	闊葉樹林	18	West(264)	無
3	闊葉樹林	0	West(270)	無
4	柳杉林	13	North(0)	無
5	柳杉林	11	North (0)	無
6	柳杉林	5	North (0)	無
7	柳杉林	0	North (0)	無
8	柳杉林	14	North (0)	無
9	柳杉林	14	North (0)	無
10	闊葉樹林	23	North (0)	無
11	闊葉樹林	18	North (0)	無
12	闊葉樹林	6	North (0)	無
13	闊葉樹林	0	Northeast (40)	無
14	闊葉樹林	10	Northeast (36)	無
15	闊葉樹林	0	Northeast (26)	無

光環境的測量，經常會受到光的不確定而有明顯的變異存在，例如調查時間、天氣不同與林下環境的光斑會影響光強度值的評估，因此會進行多點的測量，並同步的在林分外空曠處蒐集完全沒有林冠影響的光強度值，進行相對光度的計算。將前揭所蒐集到的光度、紫外線光度與紅光/近紅外光比值，進行相對光度的計算，並與鬱閉度計資料，一併提供做為光環境分類的依據。由鬱閉度計的測定，可以初步的掌握林分鬱閉的概況，但由於鬱閉度計的測量在判斷時，由於樹冠葉子會因為距離遠近、林下環境、天候狀況與觀測員的主觀判斷，具有較多的不確

定性。透過光度計量化的數值，可以較客觀透過感測器所偵測的光強度，本次研究利用光度計量器測量馬藍生育地之光強度，光度計顯示馬藍生育地的相對光度分布在 0.6~33.5%之間，在第 1、2、3 與第 13 樣區地的相對光度有較大的標準差(表 3)，顯示上方冠層覆蓋情況較不均勻，具有明顯的孔隙，其他樣區的相對光度則小於 5%(圖 6)，表示本研究區馬藍生育地的林分是高度鬱閉的情況，此與台灣闊葉林下相對光量為 1~5%相符 (王子定, 1974)。本研究亦嘗試利用紫外光光度計，測量林下紫外光的狀況，並藉由相對光度計算，可發現在第 1、2、6、8 與第 13 樣區，紫外光的相對光度較高且變異大，顯示有較多的紫外線未被上方冠層攔截而進入到樣區內(圖 7)。紅光/遠紅外光是植物光合作用反應的重要光波長，在晴朗的中午前後，自然日光的紅光與遠紅光的比率相等接近於 1，植物會針對紅光/遠紅光的比例，調節植物體葉部與莖部的生長表現。一般紅光為短波輻射，較容易被上層樹冠層吸收，而不易達到林冠下層，缺乏紅光能量的林冠下層植物光合作用反應機制會因此進行調整。本研究嘗試以參考光度計量器與紅光/近紅外光比值所計算的相對光度，進行光環境的區分，結果顯示相對紅光/近紅外光比值可較明確的將光的環境進行區分(圖 8)，因此藉由紅光/近紅外光比值的相對光度將 1、2、3、13 與 15 樣區分類為闊葉樹林分-高光度(對應鬱閉度平均值為 77.4%，相對光度 16.4%)，10、11、12、14 樣區分類為闊葉樹林分-低光度(對應鬱閉度平均值為 81.4%，相對光度 1.5%)，而 4、5、6、7、8、9 樣區分類為針葉樹林分-低光度(對應鬱閉度平均值為 85.7%，相對光度 2.5%)，提供後續相關分析使用。

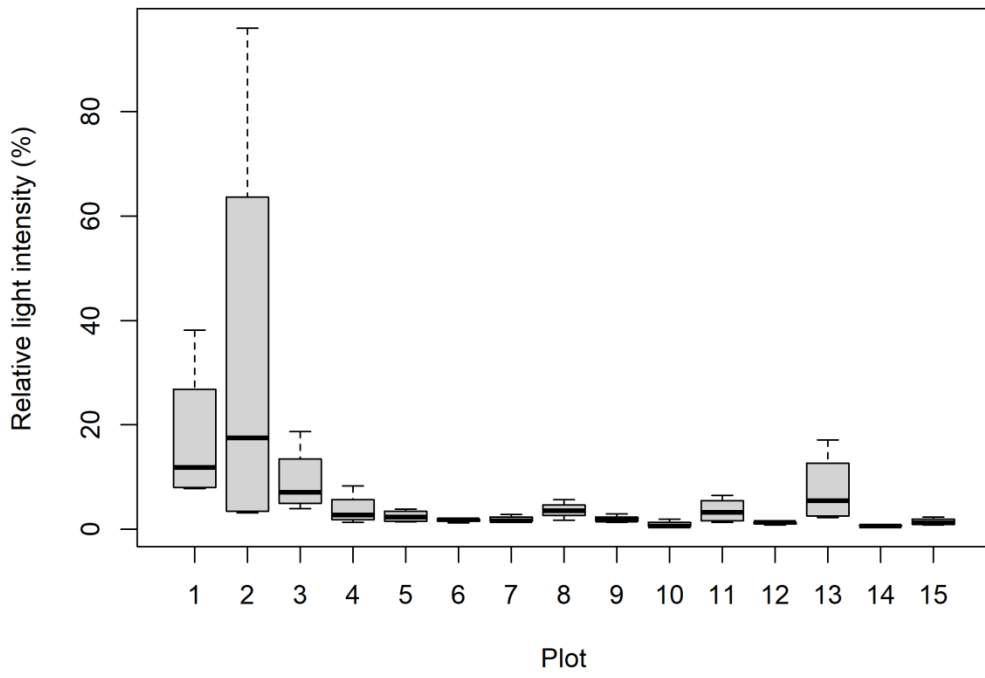


圖 6、各樣區相對光度變化。

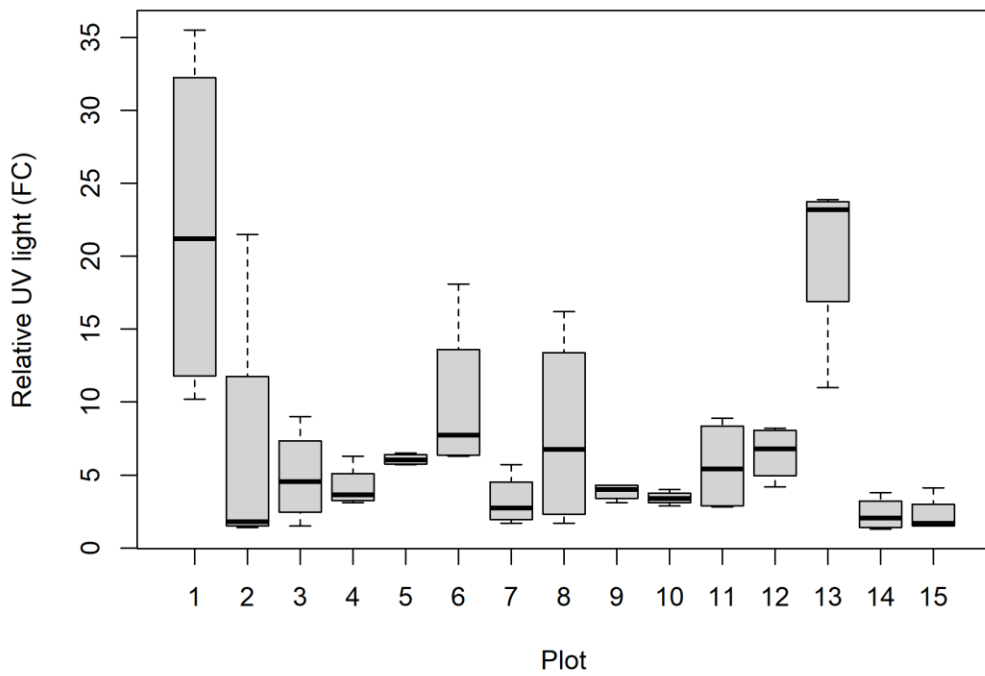


圖 7、各樣區紫外光相對光度變化。

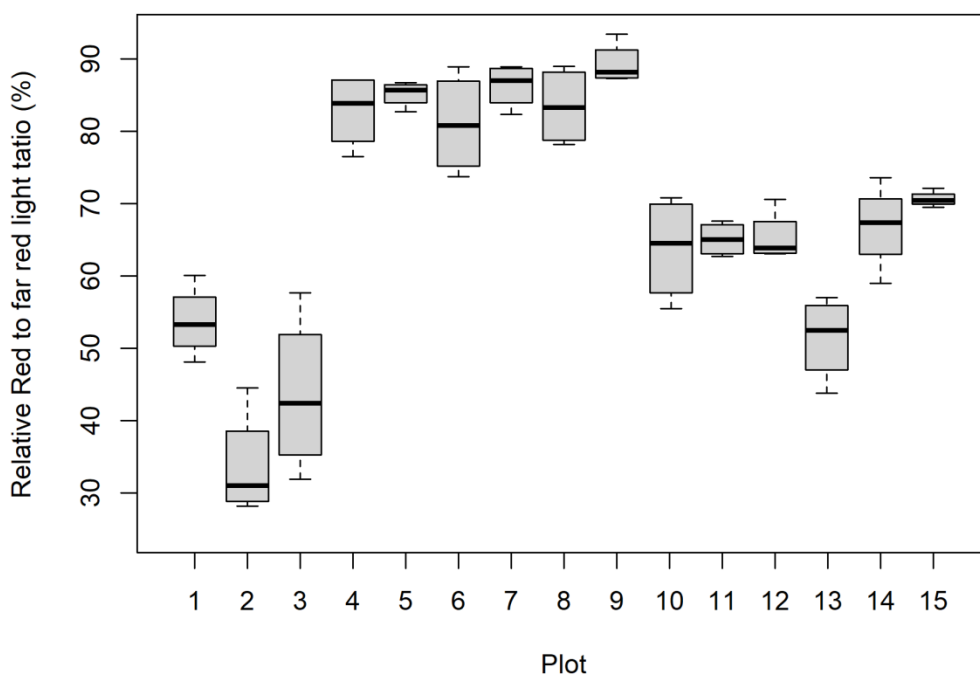


圖 8、各樣區紅光/近紅外光比相對光度變化。

e.土壤溫度及土壤水分：分別於每一季進行土壤溫度與水分之測量，蒐集每一樣區之資料，使用土壤溫度計(LT PTM-816 筆型溫度計)與土壤水分感測器(LT PMS-714 土壤水分計)蒐集土壤表層 10 公分之土壤溫度及土壤水分資料。本區域土壤層 10 公分處平均土壤含水率為 10.1-16.9%，土壤溫度 16.5-25.2°C(表 5)。

表 5、三峽地區馬藍生育地土壤含水率及土壤溫度資料

Plot	Soil moisture content				Soil temperature			
	(%)				(°C)			
	202011	202102	202106	202109	202011	202102	202106	202109
1	8.2	8.9	10.4	10.3	15.7	16.3	24.6	25.3
2	9.2	9.6	10.2	10.2	16.9	15.9	24.1	23.8
3	9.1	10.0	10.6	10.6	16.3	15.9	23.8	24.2
4	9.2	7.7	8.1	8.8	16.8	17.5	24.1	24.7
5	13.8	11.2	12.6	13.4	17.3	17.4	23.2	23.3
6	13.6	13.2	12.7	13.2	17.2	18.1	23.2	23.5
7	9.6	10.1	11.7	12.5	17.4	17.7	23.3	23.6
8	11.1	11.4	12.5	13.2	16.7	17.5	23.8	24.6
9	8.6	10.4	11.8	12.4	16.5	17.6	23.8	24.2
10	8.5	6.7	7.7	7.9	17.2	16.0	24.7	24.5
11	12.3	8.1	8.6	8.7	17.6	16.0	24.7	25.2
12	8.0	11.3	13.3	13.5	17.4	16.0	24.3	24.6
13	10.6	9.7	11.0	11.5	17.2	16.0	24.5	24.7
14	18.5	12.4	16.6	16.9	17.1	14.8	24.6	25.0
15	10.5	10.6	12.2	12.7	17.0	15.1	24.3	25.1
Mean	10.7	10.1	11.3	11.7	17.0	16.5	24.1	24.4
sd	2.8	1.7	2.2	2.3	0.5	1.0	0.5	0.6

f. 上木與冠層調查結果

依據光度測定結果，於馬藍調查樣區範圍內分別於三種光度環境中，分別就闊葉樹林分-高光度、闊葉樹林分-低光度與針葉樹林分-低光度設置 3 個 20m x

20m 上木與冠層調查樣區，分別於 2020 年 11 月與 2021 年 9 月調查樣區內胸高直徑級大於 5cm 以上的林木，調查項目包括上木樹種、株數、胸徑、樹高、枝下高與冠幅等，結果如表 6。林分的胸高直徑以針葉樹林分-低光度最大，胸高直徑為 34.2cm (sd=8.7)，闊葉樹林分-高光度最小 20.5cm (sd=15.9)；樹高以針葉樹林分-低光度最大，樹高為 26.6m (sd=10.3)，闊葉樹林分-高光度最小 7.7m (sd=3.0)。樣區的株數密度反映林分的疏密程度，可配合枝下高與冠幅，可以瞭解林分冠層結構的狀況，闊葉樹林分-低光度的樣區中有許多小型的林木與上層大型上層林木，因此枝下高較低 2.0m (sd=1.0)，冠幅大且變異大 5.7m (sd=3.9)，針葉樹林分-低光度樣區中，有少許的林下植物，造成枝下高有較高的變異情形 3.7m (sd=3.4)。2 期的調查結果，各林分在經過一個生長季後樣區中的樣木的各項目皆有增長的趨勢，顯示於三峽地區馬藍的生長並不會影響上木的生長表現。

表 6、上木與冠層樣區調查結果

調查時間	項目	闊葉樹林分	闊葉樹林分	針葉樹林分
		高光度	低光度	低光度
2020/11	胸徑(cm)	20.5(15.9)	25.2(22.2)	34.2(8.7)
	樹高(m)	7.7(3.0)	15.5(13.1)	26.6(10.3)
	枝下高(m)	2.7(0.4)	2.0(1.0)	3.7(3.4)
	冠幅(m)	4.1(1.6)	5.7(3.9)	5.6(1.0)
	株數密度 (n/ha)	900	1625	800
2021/09	胸徑(cm)	20.9(16.0)	25.4(22.1)	34.6(8.4)
	樹高(m)	7.9(2.9)	15.7(13.0)	26.7(10.5)
	枝下高(m)	2.7(0.6)	1.7(0.8)	3.7(3.5)
	冠幅(m)	4.4(1.7)	5.8(4.2)	5.6(1.2)
	株數密度 (n/ha)	900	1625	800
	主要組成樹種	江某、山香圓 紅楠、水同 木、白匏子、 黃藤等	山香圓、稜果 榕、紅楠、牛 奶榕、台灣山 桂花、筆筒樹 等	柳杉、稜果 榕、山香圓、 紅楠、水同木 等

(2)馬藍生長量調查

a.馬藍生長性狀

馬藍係屬於多年生草本植物，本計畫之馬藍生長量調查資料以樣區為單位，為減少人為判斷造成對馬藍生長量調查的偏差，在各樣區中之 4 個次樣區(5m x 5m)中，於首次調查時於地被樣區內馬藍生長範圍各設置 1 個 50cm x 50cm 生長量調查樣區，每個樣區位置不固定，共有 64 個生長量調查樣區，於選定之生長量調查樣區之四個角落以竹籤及噴漆標示。而後每一季調查之調查樣區都為固定位置，調查時間規劃每一季進行依次，分別於 2020 年 11 月、2021 年 2 月與 2021 年 6 月，生長量調查蒐集記錄馬藍株數(number of plant)、基徑(stem base diameter)、株高(height)、開花株數(number of flower)等馬藍生長性狀。

將 2021 年 9 月現地調查之馬藍株數，以面積換算成每平方公尺之密度，以利後續比較，由馬藍生長量調查結果顯示，整體平均密度為 24.3 n./m^2 ($\text{sd}=14.8$)，密度最大值為 80 n./m^2 ，密度最低可能沒有馬藍覆蓋。馬藍基徑依調查結果顯示，整體平均基徑為 4.5 mm ($\text{sd}=2.1$)，基徑最大值為 20.3 mm ，基徑最小為 0.8 mm 。馬藍株高依調查結果顯示，整體平均株高為 32.5 cm ($\text{sd}=15.8$)，株高最大值為 175.0 cm ，株高最小為 3.2 cm (表 7)。

表 7、三峽地區馬藍生長性狀資料統計值摘要

	株數密度 (n./m ²)	基徑 (mm)	株高 (cm)
Mean	24.3	4.5	32.5
Min	0.0	0.8	3.2
Max	80.0	20.3	175.0
sd	14.8	2.1	15.8

b. 馬藍株數密度

2020 年 11 月調查時以闊葉樹林分中的馬藍植株密度平均為 25.4 n/m^2 ($\text{sd}=13.1$)，以柳杉林中的密度最小 20.7 n/m^2 ($\text{sd}=11.0$) (圖 9)。2021 年 2 月調查時闊葉樹林分中的馬藍植株密度同樣為 25.4 n/m^2 ($\text{sd}=16.5$)，柳杉林之密度則是有下降的現象，分別為 14.6 n/m^2 ($\text{sd}=10.2$)，推測應與部分植株死亡有關。於 2021 年 6 月調查時，由於經過馬藍的開花與下種季節，二種林分內的馬藍植株密度皆有明顯的增加，以闊葉樹林分中密度增加至 31.3 n/m^2 ($\text{sd}=19.8$)，柳杉林分中的密度則是增加至 19.8 n/m^2 ($\text{sd}=12.8$)。2021 年 9 月調查時，二種林分內的馬藍植株密度些微的減少，以闊葉樹林分中密度減少為 29.2 n/m^2 ($\text{sd}=15.9$)，柳杉林分中的密度則是減少至 16.6 n/m^2 ($\text{sd}=9.0$)，減少原因自現場觀察係因為當年新生馬藍的幼苗與老齡的植株死亡所造成。馬藍的株數密度的 ANOVA 分析結果，顯示在不同類型林分間有顯著差異(表 8)，進一步以事後比較 Tukey HSD 檢定各處裡間差異，結果顯示闊葉樹林分的馬藍株數密度大於柳杉林分的馬藍株數 ($p<0.001$)。

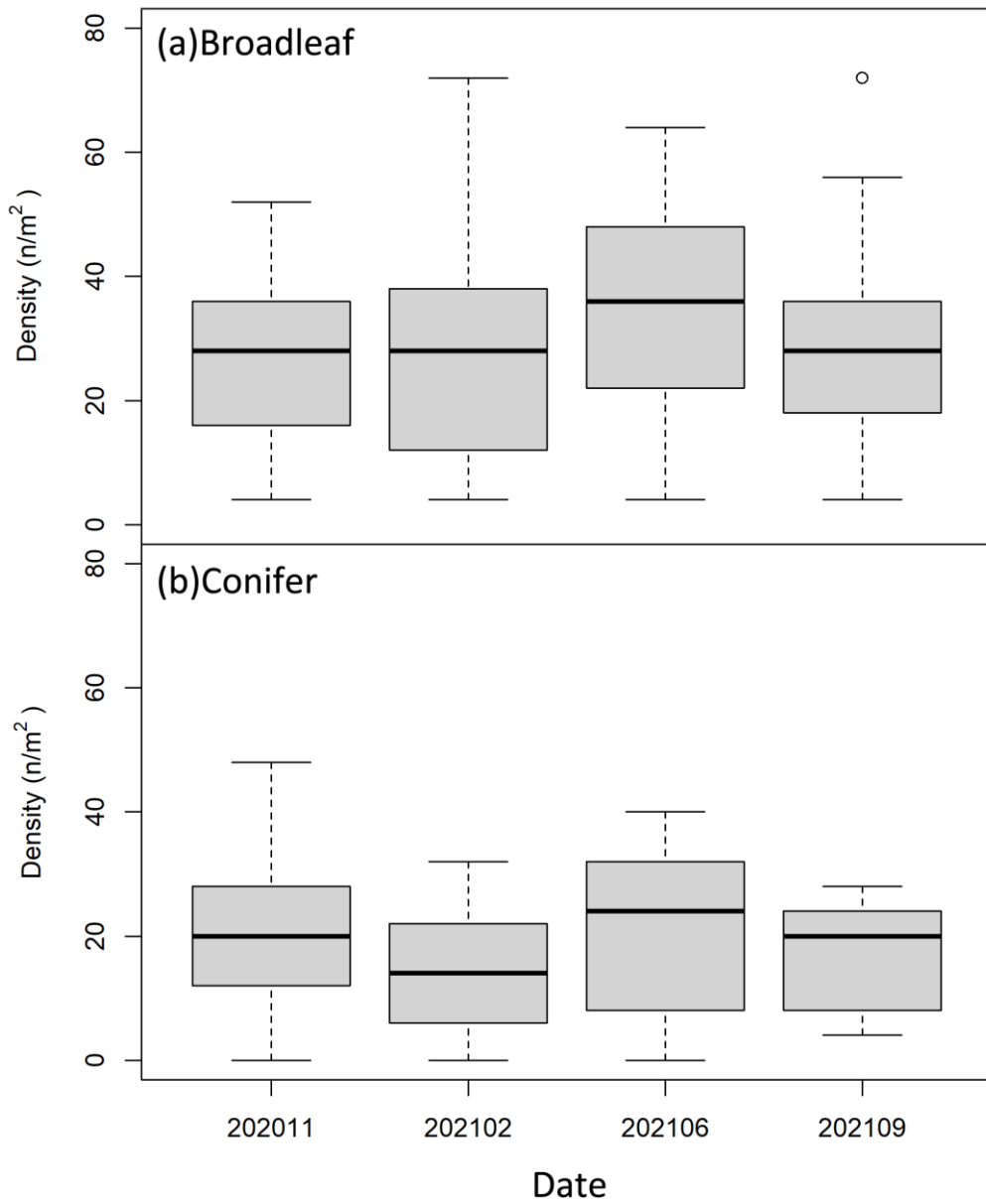


圖 9、不同類型林分各時期調查之馬藍單位面積株數密度。

* 圖中之。為資料中的離群值

表 8、不同類型林分馬藍株數密度 ANOVA 分析表

	DF	Sum Sq	F value	Pr(>F)
Season	3	1132	1.98	0.116
Forest type	1	7516	39.62	<0.001
Season x Forest type	3	348	0.61	0.607
Residuals	215	40780		

c. 基徑

由於密度在時間上有明顯的變化，主要是因為苗木死亡與更新小苗，而導致苗木的數量有所減少與增加，因此基徑與株高的生長變化，係扣除死亡苗木與更新小苗的部分再進行統計分析。依據馬藍生長量調查結果顯示，馬藍各區的基徑變化在時間上變化不明顯，於 2020 年 11 月調查時闊葉樹林分中的基徑為 4.0 mm (sd=1.6)，在柳杉林分中的基徑為 4.2 mm (sd=1.9)；於 2021 年 2 月調查時闊葉樹林分中的基徑為 4.2 mm (sd=1.7)，在柳杉林分中的基徑為 4.7 mm (sd=2.3)；於 2021 年 6 月調查時闊葉樹林分中的基徑為 4.1 mm (sd=1.7)，在柳杉林分中的基徑為 4.9 mm (sd=2.3)。於 2021 年 9 月調查時闊葉樹林分中的基徑為 4.2 mm (sd=1.9)，在柳杉林分中的基徑為 5.1 mm (sd=2.5)(圖 10)。馬藍的基徑在不同類型林分間與季節間皆有顯著差異(表 9)，進一步以事後比較 Tukey HSD 檢定各處裡間差異，結果顯示生長在柳杉林分的馬藍基徑大於闊葉樹林分的馬藍基徑 ($p<0.001$)。季節的變異主要出現在柳杉林分中，柳杉林的馬藍基徑差異主要來自基徑隨著時間的生長的增加，自 2020 年 11 月自 2021 年 9 月實際的平均基徑以增加 9 mm。

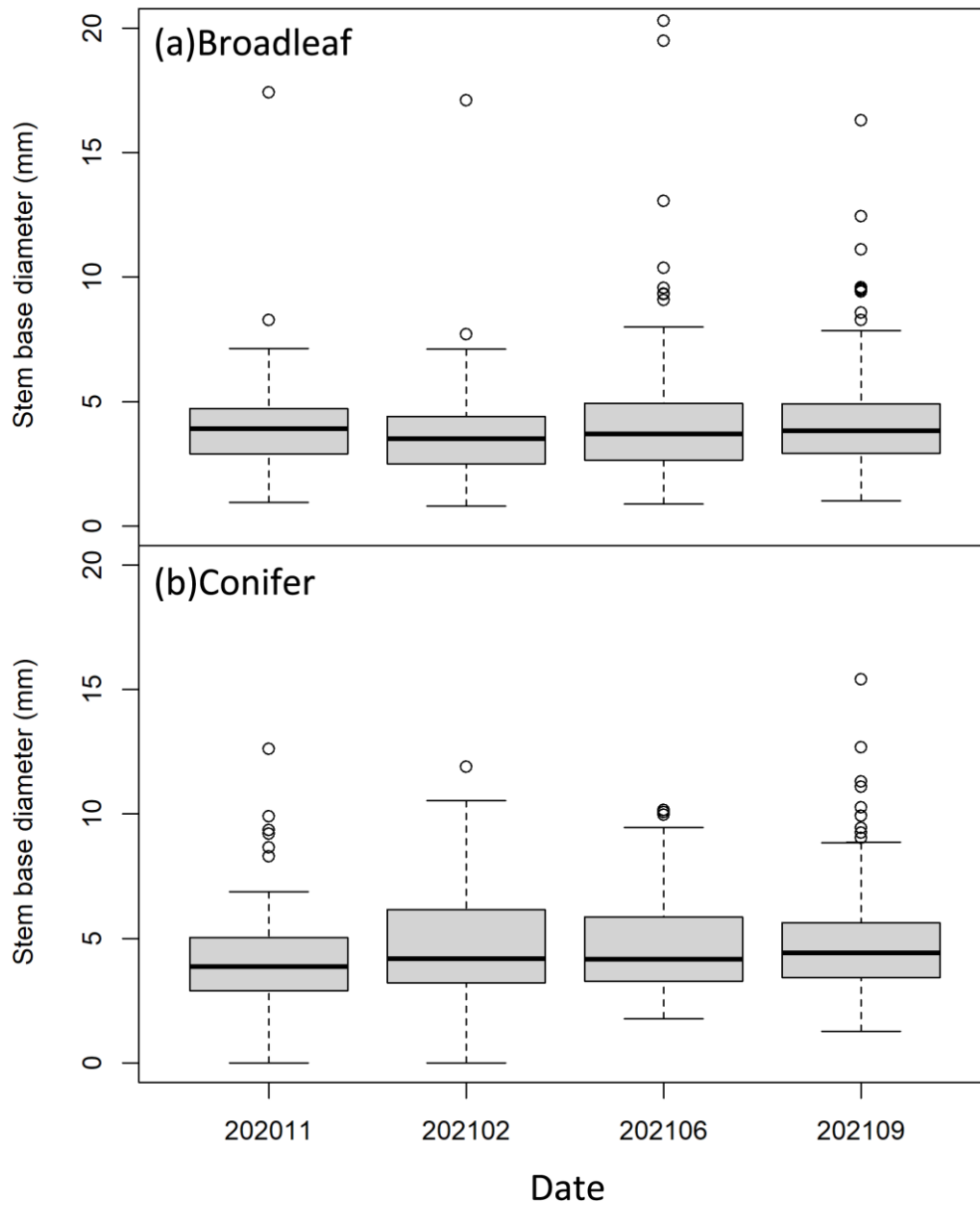


圖 10、各時期調查之不同類型林分馬藍基徑。

* 圖中之。為資料中的離群值

表 9、不同類型林分馬藍基徑 ANOVA 分析表

	DF	Sum Sq	F value	Pr(>F)
Season	3	51.6	3.76	0.010
Forest type	1	136.0	29.74	<0.001
Season x Forest type	3	20.6	1.95	0.051
Residuals	1321	6038.2		

d.株高

依據馬藍株高的調查結果顯示，於 2020 年 11 月調查時闊葉樹林分中的株高為 28.8 cm (sd=20.4)，在柳杉林分中的株高為 36.9 cm (sd=23.6)；於 2021 年 2 月調查時闊葉樹林分中的株高為 30.8 m (sd=21.1)，在柳杉林分中的株高為 38.7 cm (sd=23.3)；於 2021 年 6 月調查時闊葉樹林分中的株高為 32.8 cm (sd=24.7)，在柳杉林分中的株高為 41.2 cm (sd=26.8)。於 2021 年 9 月調查時闊葉樹林分中的株高為 33.7 cm (sd= 18.6)，在柳杉林分中的株高為 42.5 cm (sd= 30.0)(圖 11)。馬藍的株高在不同類型林分間有顯著差異(表 10)，進一步以事後比較 Tukey HSD 檢定各處裡間差異，結果顯示柳杉林分的馬藍株高大於闊葉樹林分的馬藍株高 ($p<0.001$)。

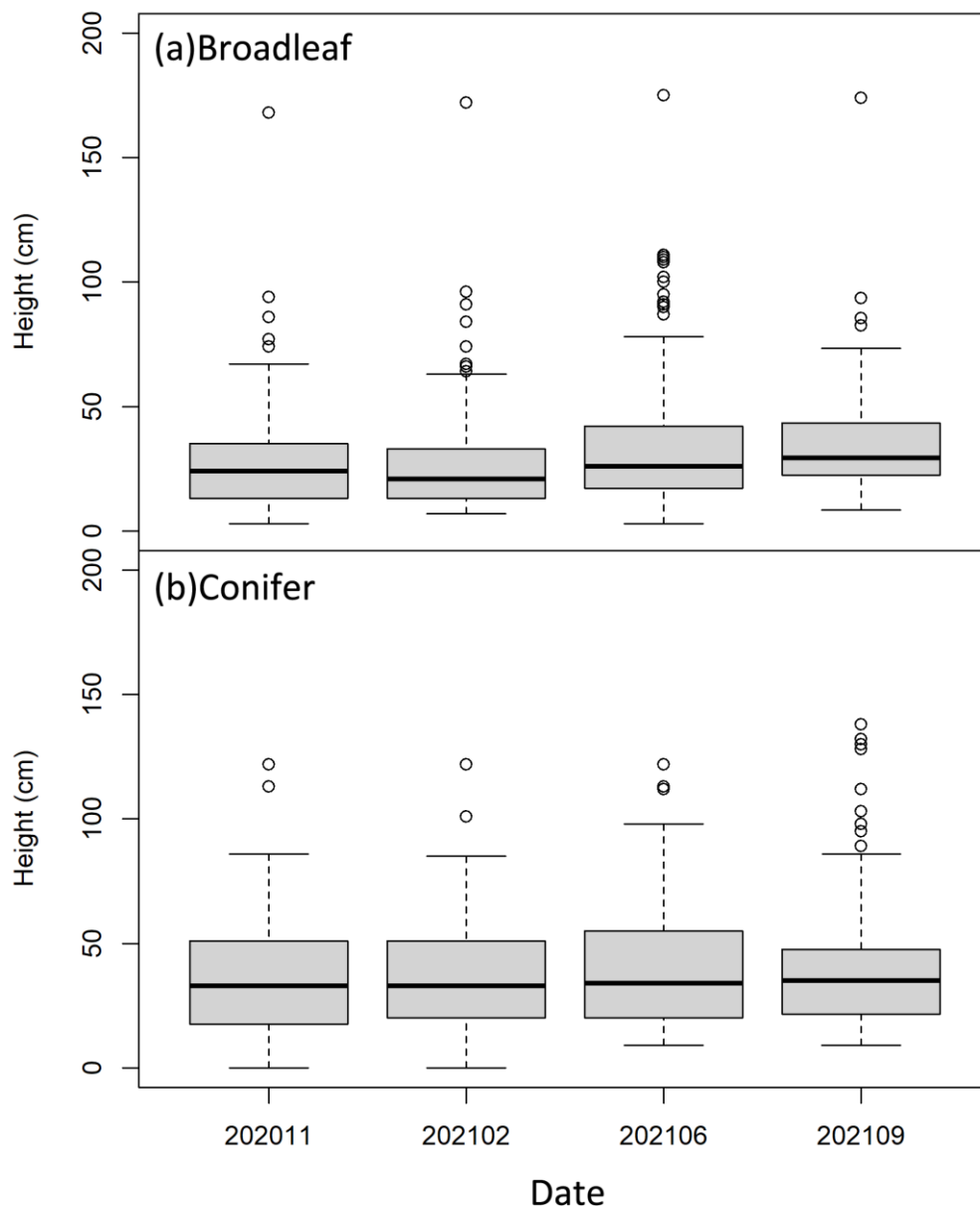


圖 11、不同類型林分各時期調查之馬藍株高。

* 圖中之。為資料中的離群值

表 10、不同類型林分馬藍株高 ANOVA 分析表

	DF	Sum Sq	F value	Pr(>F)
Season	3	5160	3.13	<0.001
Forest type	1	28147	51.23	0.024
Season x Forest type	3	1322	0.80	0.492
Residuals	1321	725776		

e. 開花株數與平均花朵數

馬藍的花為藍紫色，花冠筒短圓柱形，開花時間約落於 11 月至 1 月初。於本計畫調查期間亦針對馬藍開花狀況進行調查，開花株數與花朵數針對整個樣區(包含 4 個次樣區)進行計數，依據 2020 年 11 月的現地調查資料，結果顯示平均開花株數為 17.9 株(sd=21.9)，最大開花株數可達 93 株，每株平均每株開花株數 3.3 朵(sd=3.5)，最多可達 15.1 朵(表 11)。

表 11、三峽地區開花株數與平均花朵數資料統計值摘要

	開花株數	平均每株花朵數
Mean	17.9	3.3
Min	0.0	0.0
Max	93.0	15.1
sd	21.9	3.5

(3) 馬藍生物量調查

為瞭解馬藍的生物量基本資料與其對於不同光度環境的生長反應，研究方法採取平均木法進行，本研究以樣區為基礎，於現地先行計算各 50cm x 50cm 之馬藍生長量樣區之平均株高與基徑結果，為不干擾 50cm x 50cm 的生長量變化，樣

本不選取 50cm x 50cm 內之植株，由次樣區內其他位置選擇各 3 株平均木作為生物量調查之樣木，於現場量測葉片數量、葉片厚、葉片重、莖長度、基部中央直徑、總重、葉綠素、氮含量。並將植株葉片與莖部一一分離，透過數位相機拍攝記錄葉片大小與面積，並將莖部與葉部放置於封口袋中，以攜帶式冰箱低溫儲藏，帶回研究室以 $72\pm 3^{\circ}\text{C}$ 進行連續 72 小時烘乾處理，烘乾後進行樣本重量之量測，重複三次測定，重量變化不超過 0.01 g 時是為恆重，將重量數據進行含水率與生物量分析。由於馬藍業者常以馬藍的新鮮重量作為評估製藍之重要基準，因此本研究之含水率計算分別依乾量基準與濕量基準計算，公式如次：

乾量基準(dry basis)：

$$W_d = \frac{W_f - W_0}{W_0} \times 100\%$$

濕量基準(wet basis)：

$$W_w = \frac{W_f - W_0}{W_f} \times 100\%$$

式中之 W_f 為試材鮮重， W_0 為試材絕乾重

本研究區於設立時於樣區周圍有特別公告樣區內為實驗區，以避免馬藍業者採集與登山客活動時的干擾，因此自 2020 年 11 月至 2021 年 9 月可完整蒐集馬藍的植株葉、莖與根部的生長情形。因此生物量測定以 2021 年 9 月所蒐集的資料進行 ANOVA 分析，結果顯示，森林類型在植株鮮重的葉部($p=0.001$)、莖部($p=0.008$)、根部($p=0.001$)及總重($p=0.002$)，與乾重的葉部($p=0.003$)、莖部($p=0.009$)、根部($p=0.008$)及總乾重($p=0.028$)，在各樣區之間都有顯著的差異存在，顯示馬藍於本試驗研究區的生長環境中存在著明顯的變異性。

馬藍植株單株的葉部鮮重平均為 10.3 g (sd=5.4)，範圍約自 3.3 g–20.8 g (表 10)；葉部乾重平均為 1.3 g (sd=0.9)，範圍約自 0.4 g–2.8 g (表 12)。馬藍植株單株的莖部鮮重平均為 6.5 g (sd=4.4)，範圍約自 1.7 g–16.2 g；莖部乾重平均為 1.3

g (sd=0.7), 範圍約自 0.2g – 3.7 g。馬藍植株單株的根部鮮重平均為 2.8 g (sd=1.8), 範圍約自 1.1 g – 6.2 g; 根部乾重平均為 0.9 g (sd=0.8), 範圍約自 0.3g – 2.7 g。馬藍植株單株的總鮮重平均為 19.6 g (sd=10.3), 範圍約自 6.2 g – 43.3 g; 總乾重平均為 3.5 g (sd=2.1), 範圍約自 0.9g – 8.0 g (表 13)。

表 12、馬藍生物量鮮重平均值與標準差一覽表

Plot	Fresh weight				
	Density (n/m ²)	Leaf (g)	Stem (g)	Root (g)	Total (g)
1	23.2(11.0)	13.3(5.0)	11.5(5.9)	4.3(1.5)	29.1(10.2)
2	47.0(30.0)	3.3(2.3)	1.7(1.0)	1.3(1.4)	6.2(6.2)
3	30.1(16.8)	9.6(2.5)	4.2(0.9)	2.1(0.7)	15.9(3.5)
4	25.0(3.8)	3.9(2.5)	2.2(0.9)	1.2(0.6)	7.3(3.6)
5	13.3(6.1)	14.6(5.7)	6.6(4.6)	4.3(2.6)	25.5(11.1)
6	22.4(5.2)	16.8(13.3)	9.7(9.1)	3.3(2.7)	29.8(24.6)
7	21.0(11.5)	13.5(8.2)	12.9(10.5)	3.4(3.2)	29.4(22.0)
8	10.0(6.9)	12.2(8.2)	6.7(5.0)	2.5(2.1)	21.3(13.5)
9	8.1(4.6)	20.8(7.7)	16.2(9.8)	6.2(5.2)	43.3(19.8)
10	20.0(12.7)	3.7(2.6)	1.7(0.7)	1.1(0.6)	6.5(2.8)
11	28.1(11.8)	7.9(3.2)	4.8(1.5)	2.0(1.1)	14.7(4.8)
12	26.0(16.5)	8.3(5.7)	4.6(5.8)	2.5(1.7)	15.3(10.8)
13	29.3(7.6)	7.4(1.9)	5.1(2.4)	2.6(1.0)	15.1(4.9)
14	31.0(19.7)	10.1(4.2)	5(2.3)	3.3(1.4)	18.5(6.8)
15	29.2(5.0)	9.9(8.5)	5.9(3.9)	2.7(1.8)	18.5(9.3)
平均	24.3(14.8)	10.3(5.4)	6.5(4.4)	2.8(1.8)	19.6(10.3)

表 13、馬藍生物量乾重、乾量基準及濕量基準含水率平均值與標準差一覽表

Plot	Dry mass				The plant water content*	
	Leaf	Stem	Root	Total	Dry	Wet
	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)
1	1.9(0.8)	1.8(0.9)	1.2(0.5)	4.9(1.8)	489.1(223.3)	83.0(5.3)
2	0.4(0.3)	0.2(0.1)	0.3(0.4)	0.9(0.7)	744.3(1197.4)	88.2(12.8)
3	1.2(0.3)	0.7(0.2)	0.5(0.2)	2.4(0.5)	567(153.4)	85.0(3.5)
4	0.4(0.3)	0.3(0.2)	0.3(0.2)	1.1(0.6)	585.3(1022.9)	85.4(8.2)
5	1.7(0.7)	1.4(0.4)	1.1(0.9)	4.2(1.6)	518.5(261.4)	83.8(8.9)
6	2.1(1.9)	1.7(1.7)	0.9(0.8)	4.7(4.2)	493.4(838.3)	83.1(10.4)
7	1.7(1.2)	2.5(2.8)	2.7(5.9)	6.9(6.6)	336.9(353.7)	77.1(18.3)
8	1.5(1.1)	1.3(1.1)	0.7(0.7)	3.4(2.7)	483.2(430.7)	82.9(21.7)
9	2.8(1.1)	3.7(3.5)	1.5(1.1)	8.0(5.3)	411.2(216.3)	80.4(8.9)
10	0.4(0.3)	0.3(0.2)	0.3(0.2)	1.0(0.6)	418.3(392.5)	80.7(16.1)
11	0.9(0.4)	1(0.4)	0.6(0.3)	2.5(0.9)	479.7(264.2)	82.8(8.3)
12	1.4(0.8)	1.4(1.2)	0.8(0.5)	3.6(2.2)	358.4(292.9)	78.2(9.3)
13	0.9(0.3)	0.8(0.5)	0.6(0.3)	2.4(0.9)	463.7(222.1)	82.3(4.9)
14	1.4(0.6)	1(0.4)	0.9(0.4)	3.2(1.3)	482.3(575.5)	82.8(7.5)
15	0.9(0.5)	0.9(0.7)	0.7(0.4)	2.5(1.5)	679.4(1206.5)	87.2(8.24)
平均	1.3(0.9)	1.3(0.7)	0.9(0.8)	3.5(2.1)	500.7(510.1)	82.9(10.1)

*The plant water content includes leaf, stem, and root.

(a)乾量基準含水率與濕量基準含水率

含水率資料以 2021 年 9 月調查結果進行計算，為考量馬藍的相關資訊配合後續的靛苷含量分析，因此本計畫馬藍植株含水率(moisture content)的計算是依乾量含水率進行計算，結果顯示單株的葉部含水率平均為 705 % (sd=103.4)，範圍約自 491.0%–967.5 %。馬藍植株單株的莖部含水率平均為 451.1 % (sd=102.3)，範圍約自 225.9 %–645.3%。馬藍植株單株的根部含水率平均為 268.6 % (sd=78.0)，範圍約自 220.2 % – 338.0%。馬藍植株全株的總含水率平均為 500.7% (sd=510.1)，範圍約自 336.9 % – 744.3%。

含水率同時考量以濕量基準進行計算，計算結果顯示單株的葉部含水率平均為 87.4 % (sd=1.6)，範圍約自 83.1%–90.6 %。馬藍植株單株的莖部含水率平均為 81.2 % (sd=4.1)，範圍約自 69.3 %–86.6%。馬藍植株單株的根部含水率平均為 70.2 % (sd=14.1)，範圍約自 20.2 % – 77.5%。馬藍植株全株的總含水率平均為 82.9% (sd=10.1)，範圍約自 77.1 % – 88.2%。

(b)馬藍葉部的氮含量與葉綠素含量測定

馬藍葉部的氮含量與葉綠素含量，使用手持式葉氮測量儀(N-Pen N100)及葉綠素含量測量儀(使用 SPAD-502)進行量測等數值，測量葉片選取外觀正常，無大面積(約超過整個葉部 50%)的蟲蛀或枯損情形的成熟葉做為樣本，每片測定 5 次取平均值。馬藍植株單株的葉綠色含量值平均為 51.6 (sd=5.0)，範圍約自 40.3–59.4。馬藍植株單株的葉氮含量值平均為 1.59 (sd=0.06)，範圍約自 1.45– 1.67 (表 14)。

表 14、馬藍植株含水率、葉綠素與葉氮含量平均值與標準差一覽表

Plot	Chlorophyll (value*)	Nitrogen (NDGI**)
1	56.4(3.5)	1.62(0.12)
2	43.1(8.3)	1.45(0.05)
3	47.3(3.7)	1.50(0.08)
4	53.8(2.9)	1.67(0.05)
5	59.4(2.7)	1.63(0.05)
6	47.3(4.0)	1.57(0.12)
7	53.4(5.4)	1.65(0.09)
8	54.3(3.9)	1.62(0.10)
9	57.3(3.3)	1.60(0.05)
10	40.3(3.1)	1.50(0.09)
11	51.1(2.5)	1.62(0.04)
12	52.2(3.4)	1.60(0.05)
13	52.7(4.2)	1.65(0.04)
14	52.2(6.8)	1.50(0.09)
15	53.0(7.9)	1.57(0.09)

*SPAD 502 所測定的數值(value)為利用 650nm 和 940nm 兩個波長下的光密度差

**N-pen 所測定的 NDGI 數值(value)為利用 560nm 和 780nm 兩個波長下的光密度差與和的比值

(d)環境因子與馬藍生產量之關係

將馬藍之生物量與植株密度進行生產量之估計，並依先前以光度計與紅光/近紅外光比值的相對光度，將光環境區分為三種，分別為闊葉樹林分-高光環境、闊葉樹林分低光環境與針葉樹林分-低光環境。分析時將樣區資料光環境進行分組，瞭解環境因子與馬藍生產量之關係。一般藍染工作者在採藍時，多於馬藍生

育地尋找馬藍成熟葉、葉色較為深色且葉型較大的葉片進行摘採，主要以收集馬藍的生物量為主，因此通常會前往馬藍生長較為密集的地點，進行馬藍莖葉的蒐集。本研究依藍染工作者採藍的習慣，就馬藍植株的密度、葉部鮮重、莖部鮮重與總鮮重在不同光環境下的變化進行分析。結果顯示，馬藍的株數密度在闊葉樹林分-低光環境有最高的密度為 36.4 n/m^2 ($\text{sd}= 17.3$)，並經 ANOVA ($p= 0.003$) 與事後比較 Tukey HSD 檢定，在不同光環境下株數密度有顯著差異，密度大小分別為闊葉樹林分-低光環境=闊葉樹林分-高光環境 (29.0 n/m^2 ($\text{sd}= 19.8$)) > 針葉樹林分-低光環境 (19.0 n/m^2 ($\text{sd}= 13.2$)) (圖 12)。馬藍的葉部鮮重在三種光環境下經 ANOVA ($p= 0.276$) 分析，並沒有顯著的差異，葉部鮮重大小分別為針葉樹林分-低光環境 (9.2 g ($\text{sd}= 8.8$)) = 闊葉樹林分-低光環境 (8.1 g ($\text{sd}= 4.4$)) = 闊葉樹林分-高光環境 (5.6 g ($\text{sd}= 5.6$)) (圖 13)。馬藍的莖部鮮重在針葉樹林分-低光環境有最高的重量為 8.1 g ($\text{sd}= 5.1$)，並經 ANOVA ($p= 0.010$) 與事後比較 Tukey HSD 檢定，在不同光環境下株數密度有顯著差異，莖部鮮重大小分別為針葉樹林分-低光環境=闊葉樹林分-低光環境 (5.8 g ($\text{sd}= 3.5$)) > 闊葉樹林分-高光環境 (3.9 g ($\text{sd}= 2.3$)) (圖 14)。馬藍植株總鮮重在針葉樹林分-低光環境光環境有最高的重量為 18.2 g ($\text{sd}= 12.9$)，並經 ANOVA ($p= 0.027$) 與事後比較 Tukey HSD 檢定，在不同光環境下株數密度有顯著差異，總鮮重大小分別為針葉樹林分-低光環境=闊葉樹林分-低光環境 (13.8 g ($\text{sd}= 6.5$)) > 闊葉樹林分-高光環境 (9.4 g ($\text{sd}= 7.3$)) (圖 15)。

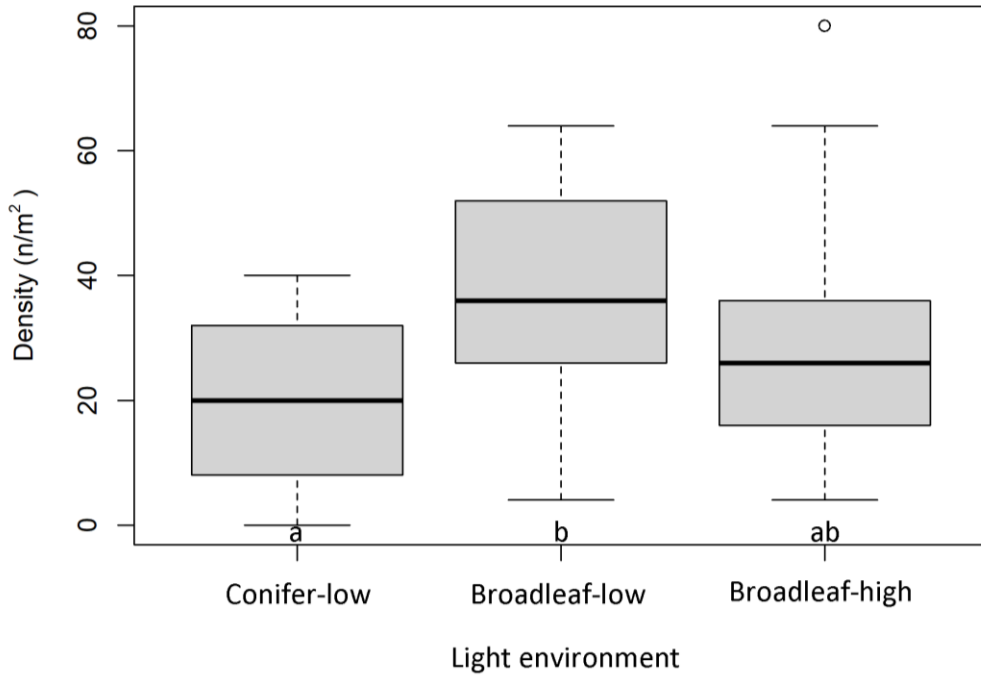


圖 12、不同光環境之馬藍植株密度

* 圖中之。為資料中的離群值

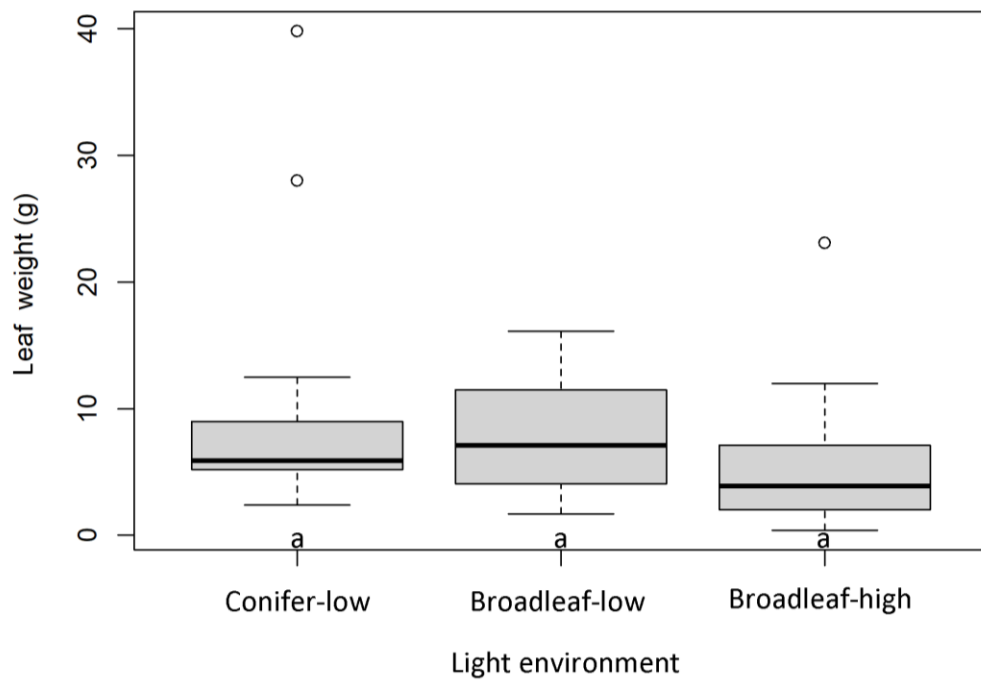


圖 13、不同光環境之馬藍葉部鮮重

* 圖中之。為資料中的離群值

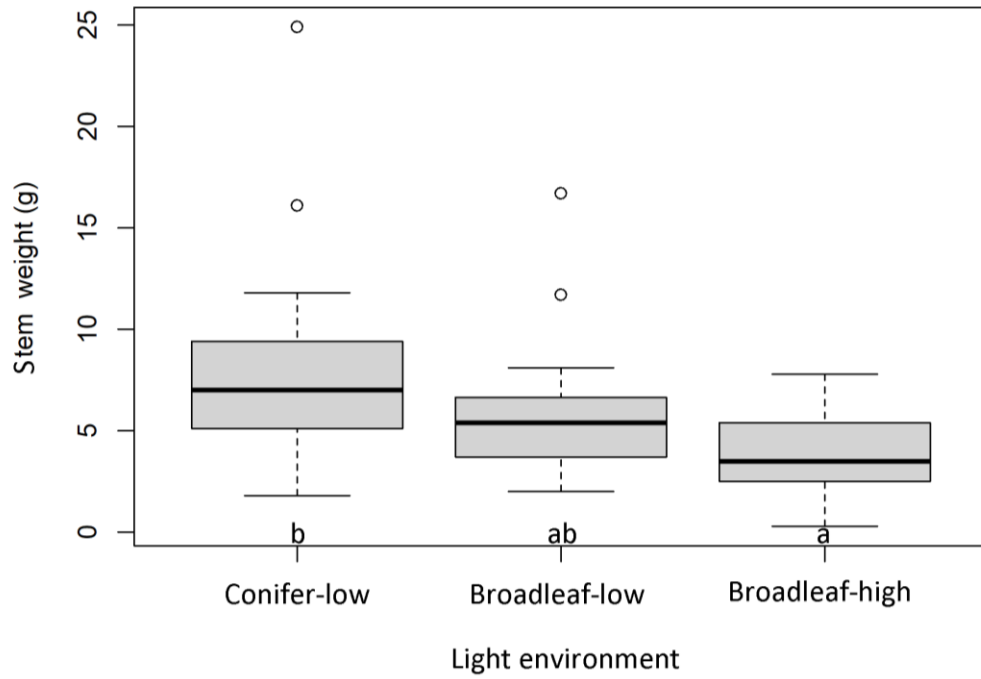


圖 14、不同光環境之馬藍莖部鮮重

* 圖中之。為資料中的離群值

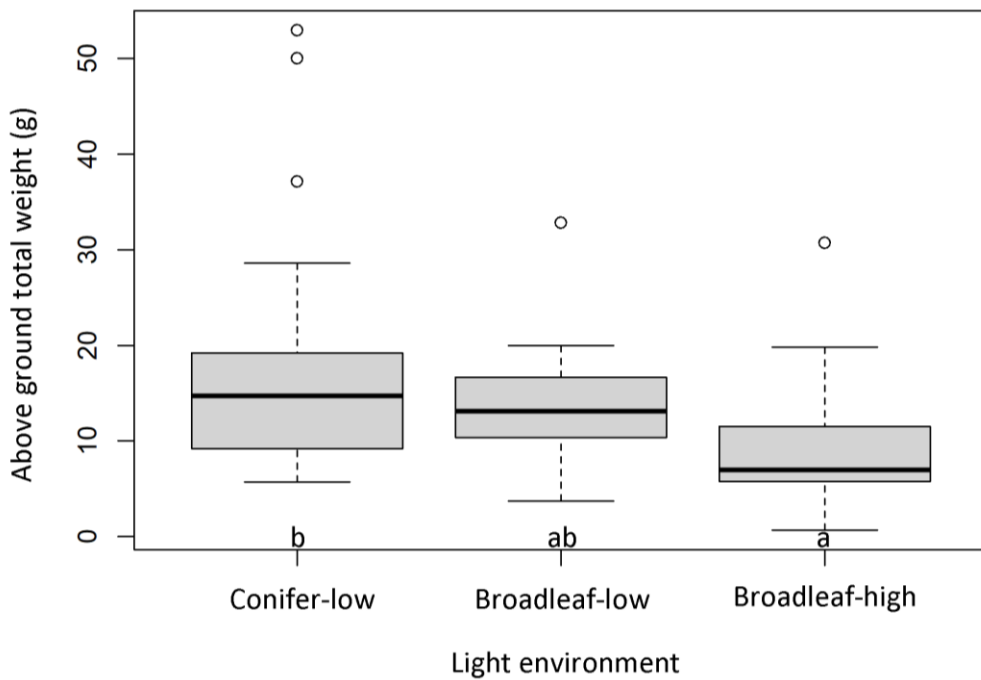


圖 15、不同光環境之馬藍植株葉部與莖部總鮮重

* 圖中之。為資料中的離群值

進一步將馬藍植株葉部鮮重及總鮮重與植株密度進行相乘，可以推估每平方公尺的馬藍植物群落的葉部鮮重及總鮮重。結果顯示馬藍每平方公尺的葉部鮮重在三種光環境下經 ANOVA($p=0.048$)分析，具有顯著的差異，以中度光環境的單位面積生產力最高為 317.0 g (sd= 253.0)，單位面積葉部鮮重大小分別為闊葉樹林分-低光環境>針葉樹林分-低光環境(167.6 g (sd= 184.9) = 針葉樹林分-高光環境(166.5 g (sd= 175.0))(圖 16)。馬藍每平方公尺的莖部鮮重在三種光環境下經 ANOVA($p=0.122$)分析，無顯著的差異，單位面積莖部鮮重大小分別為針葉樹林分-低光環境(160.2 g (sd= 166.0) = 闊葉樹林分-低光環境(212.1 g (sd= 157.1) = 闊葉樹林分-高光環境(108.9 g (sd= 71.9))(圖 17)。馬藍每平方公尺的總鮮重生產力在三種光環境下經 ANOVA($p=0.046$)分析，具有顯著的差異，以闊葉樹林分-低光環境的單位面積生產力最高為 528.4 g (sd= 350.3)，單位面積葉部鮮重生產力分別為闊葉樹林分-低光環境>針葉樹林分-低光環境(327.8 g (sd= 345.0) = 闊葉樹林分-高光環境(272.5 g (sd= 226.5))(圖 18)。由以上分析，可以瞭解馬藍在低光的環境中在葉部與莖部的生長有相對較佳表現。植物對光照有不同的適應性，與闊葉樹林相比在柳杉林中的直射光與散射光立地係數較低，較低的林下光照使植物的生長受到限制(林文雄等，2002)。本研究另外蒐集紅光/近紅外光比值的相對光度資料作為輔助，可以將林下環境的光環境進一步進行區分。馬藍的葉部在闊葉樹林分-低光環境可以有最佳的生長，總鮮重也同樣是在闊葉樹林分-低光環境具有最高的單位面積生產力。

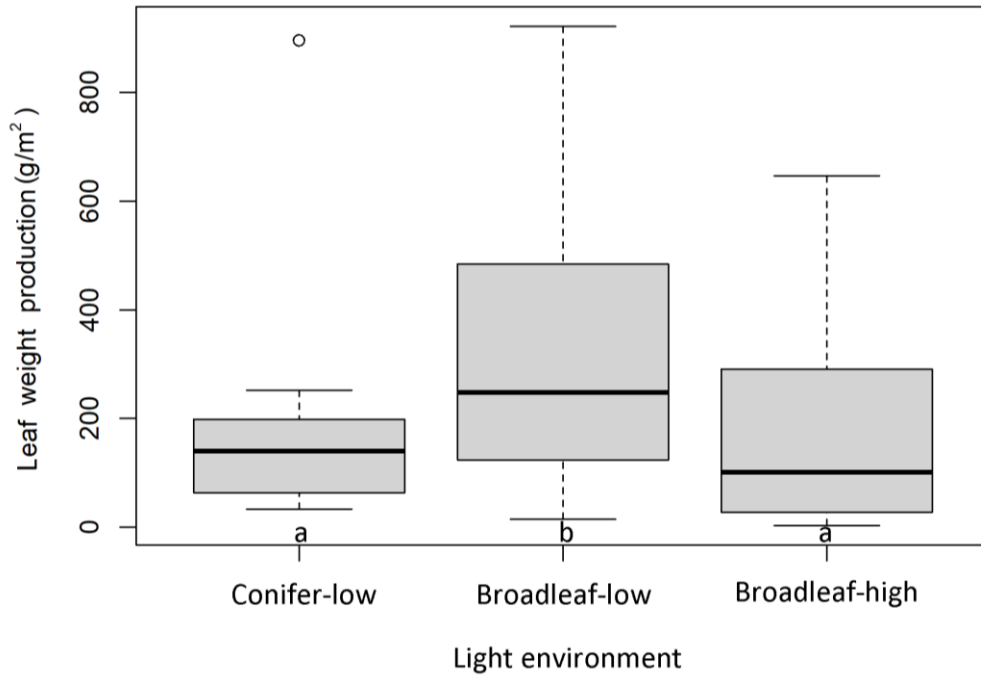


圖 16、不同光環境之馬藍植株每平方公尺葉部總鮮重

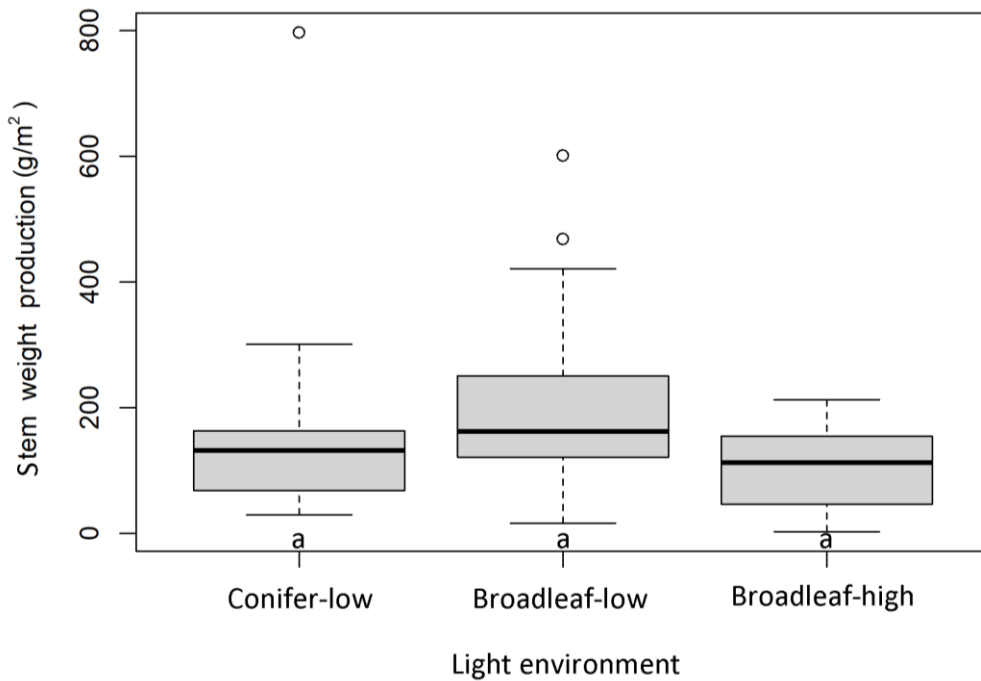


圖 17、不同光環境之馬藍植株每平方公尺莖部總鮮重

* 圖中之。為資料中的離群值

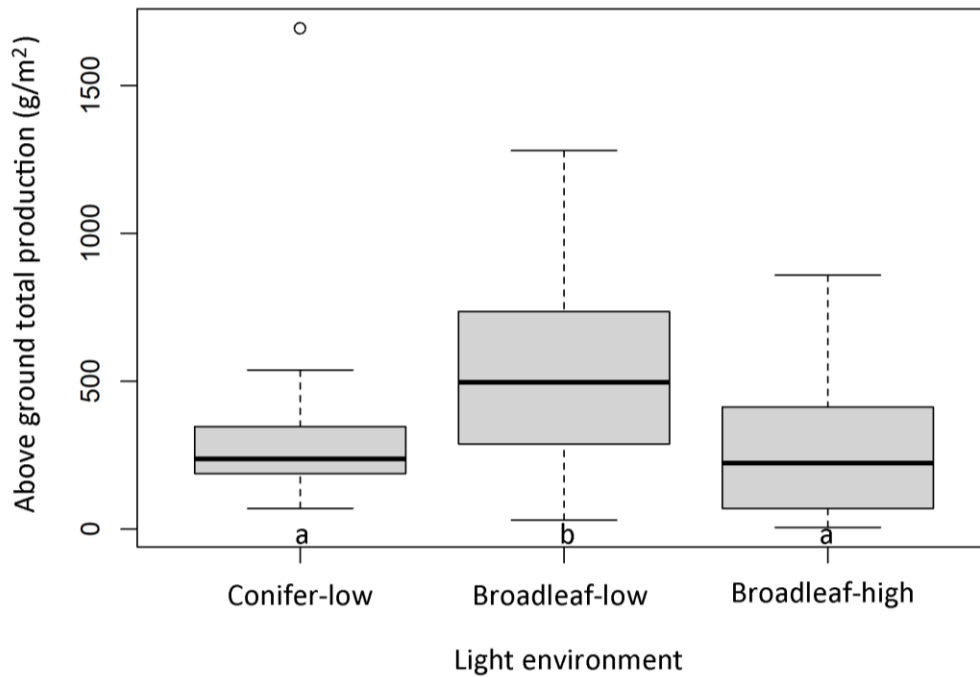


圖 18、不同光環境之馬藍植株每平方公尺葉部與莖部總鮮重

* 圖中之。為資料中的離群值

2.不同試驗條件(以人工協助栽植及對照組)樣區選取及經營

為瞭解以人工協助栽植之馬藍生基徑與株高生長情形，以提供後續經營與推廣做為參考之依據。本研究比較 2 種不同苗木的馬藍生長速率，因此透過 2020 年 11 月同一時期所扦插苗與種子苗進行觀測。本計畫於研究區域內，標記扦插苗與種子苗各 50 株，並將所選苗木旁打上標記(如圖 19a、19b)，黃色膠帶者為扦插苗，藍色膠帶者為種子苗，於每季量測苗木的基徑及株高。



圖 19、於研究試驗區域標記(a)為扦插苗與(b)為種子苗

扦插苗的依據現場調查資料顯示，平均選用約 7.0 mm (sd=0.95) 大小的馬藍莖部頂端組織作為扦插的材料。基徑觀測結果顯示(圖 20)，扦插苗的基徑變化較平緩，自 2020 年 11 月(秋季)、2021 年 2 月(冬季)至 2021 年 9 月，平均基徑變化不大分別為 7.0 mm (sd=0.94)、7.0 mm (sd=0.95)、7.3 mm (sd=1.07) 與 7.3 mm。將第一期的觀測資料作為基礎，進行相對生長率的計算，冬季的基徑與秋季(2020 年 11 月)未有明顯的變化，至春季基徑增加僅約 4.3%。主要由於馬藍的扦插苗使用已經達到一定基徑大小的組織，於 2021 年 9 月調查結果顯示在扦插後並不會有明顯的基徑生長量增加。而種子苗的基徑具有隨著時間逐漸增加的趨勢，自 2020 年 11 月、2021 年 2 月、2021 年 6 月至 2021 年 9 月，平均基徑自 3.1 mm (sd=0.92)、3.4 mm (sd=0.82)、4.3 mm (sd=1.35) 與 3.9 mm (sd=1.4)。自 2020 年 11 月至 2021 年 6 月期間，隨著時間的基徑增加平均增加 1.0 mm，相對生長率增加約分別為 7.8% 與 38.7%。2021 年 9 月所調查的苗木基徑有下降的趨勢，主要因為許多的幼苗死亡，而留存的苗木的平均基徑較小所致，將 2021 年 6 月與 2021 年 9 月的基徑進行 t-test 檢定，是不具有顯著差異($t = -1.38, p = 0.186$)。將所蒐集的生長資料進行 ANOVA 分析結果顯示(表 15)，兩種苗木在季節與類型的交互作用並沒有顯著性，但是在季節及森林類型間具有顯著的差異。如前所述，差異的來源主要是繁殖的方法上的差異，扦插苗的基徑是已經具有一定大小，已發展一段

時間的植物組織，而種子苗則是仍然在生長階段的植物組織，故具有較大幅度的基徑生長表現。

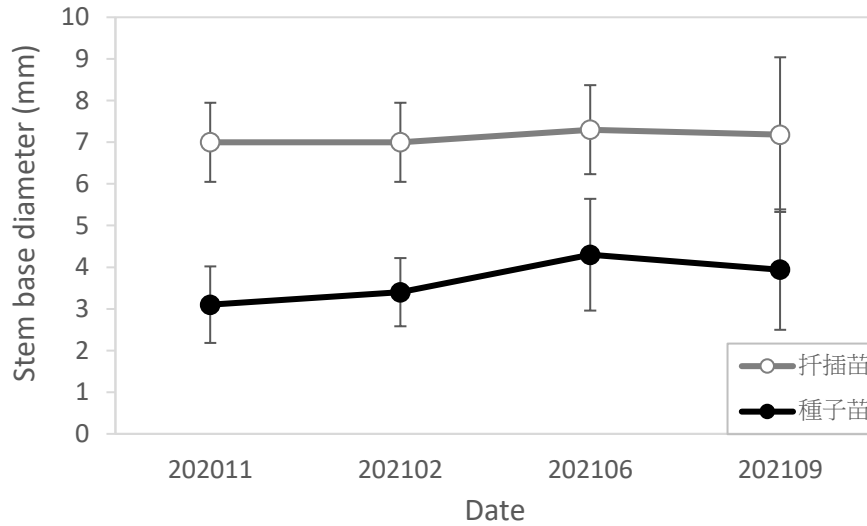


圖 20、人工協助栽植扦插與種子苗基徑生長之時間變化趨勢

表 15、人工協助栽植扦插與種子苗基徑 ANOVA 分析統計值摘要表

	DF	Sum Sq	F value	Pr(>F)
Season	3	29.4	6.97	<0.001
Plant type	1	949.8	676.01	<0.001
Season x Plant type	3	8.9	2.12	0.097
Residuals	314	441.2		

株高觀測結果顯示(圖 21)，扦插苗與種子苗的株高變都相當明顯，扦插苗自 2011 年 11 月，平均株高自 8.8 cm (sd=3.2)，範圍自 3.0 - 17.0 cm；於 2021 年 2 月平均株高 9.4 cm (sd=3.3)，範圍自 3.0 - 18.0 cm；於 2021 年 6 月平均株高 18.9 cm (sd=9.5)，範圍自 5.0 - 48.0 cm，於 2021 年 9 月平均株高 21.6 cm (sd= 10.8)，範圍自 7.0 - 64.0 cm，將第一期的觀測資料作為基礎進行相對生長率的計算，於冬季時及翌年夏季分別約增加 7.0%、114.8%與 129.8%。而種子苗的株高具有隨

著時間逐漸增加的趨勢，自 2011 年 11 月，平均株高自 13.5 cm (sd=8.0)，範圍自 5.0 - 45.0 cm；於 2021 年 2 月平均株高 13.6 cm (sd=6.3)，範圍自 5.0 - 48.0 cm；2021 年 6 月平均株高為 24.7 cm (sd=10.7)，範圍自 11.0 - 56.0 cm，隨著時間的增加，在冬季幾乎沒有增加，而到了翌年的春季平均增加 11.2 cm，相對生長率增加約 82.9%；2021 年 9 月平均株高為 23.5 cm (sd=7.3)，範圍自 13.0 - 40.0 cm。由苗高分布的範圍可瞭解種子苗的平均苗高降低，主要受到部分的大苗死亡所影響。將所蒐集的生長資料進行 ANOVA 分析結果顯示(表 16)，兩種苗木在季節與森林類型的交互作用並沒有顯著性，但是在季節及森林類型間具有顯著的差異。

觀測期間扦插苗死亡數量總計為 10 株，存活率約 80%，種子苗死亡株數總計為 28 株，存活率約 44%(圖 22)。觀測的結果顯示種子苗相對於扦插苗有較高的死亡率發生，推論可能因為自種子開始發展的幼苗，在幼年期可能較容易遭受動物、昆蟲與環境逆境等外力影響，造成幼苗死亡，致使種子苗的存活率相對於扦插苗，呈現較低的情形。從觀測資料的株高生長與死亡的情形可以瞭解，馬藍的扦插苗的高度，一般選用約 8.8 cm(sd=3.2)的材料，在扦插苗的株高相對生長量比種子苗快速，因此在將馬藍視為作物經營時，一般採行的是透過扦插的方式進行，可以保存母株的優良特性，在短時間內獲取較多的植物組織生長量，亦可避免種子苗在生長期間的高死亡率的問題，對於經營管理上有較佳效益。

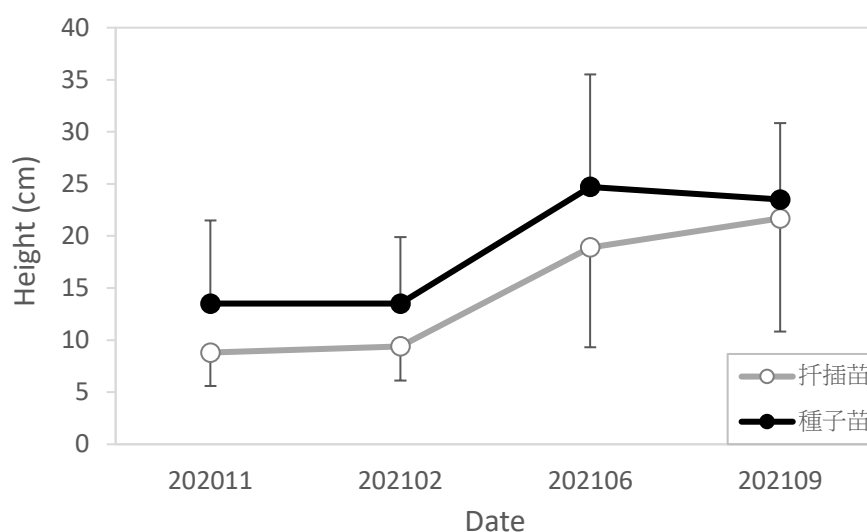


圖 21、人工協助栽植扦插與種子苗株高生長之時間變化趨勢

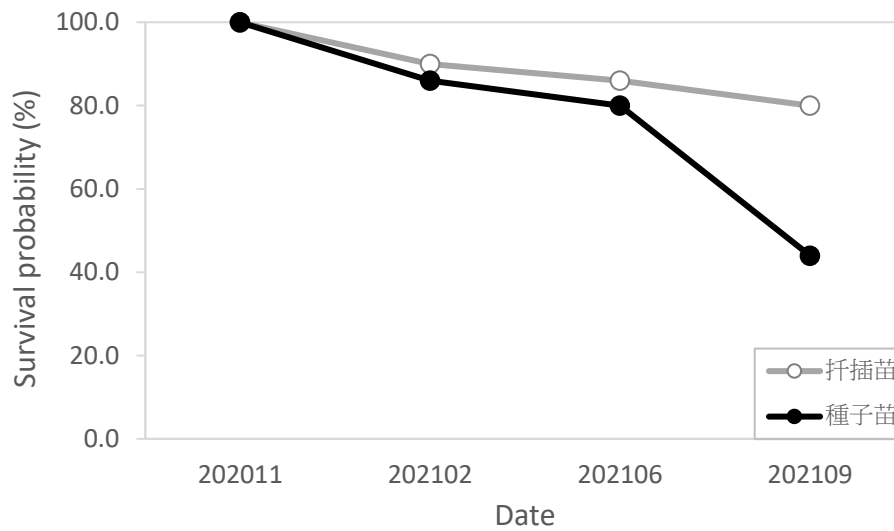


圖 22、人工協助栽植扦插與種子苗株存活率之時間變化趨勢

表 16、人工協助栽植扦插與種子苗株高 ANOVA 分析統計值摘要表

	DF	Sum Sq	F value	Pr(>F)
Season	3	9661.3	51.29	<0.001
Plant type	1	1507.0	24.00	<0.001
Season x Plant type	3	137.5	0.73	0.534
Residuals	314	19839.9		

3. 葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析

a. 樣品及製備方法

本次計畫分析之試材為三峽馬藍葉子、礁溪馬藍葉子及三峽藍泥，分別收集不同時間點的葉子及藍泥分析其靛苷及靛藍含量的差異。其中，三峽馬藍葉子採集自新北市三峽區，挑選成熟葉，以 95% 乙醇浸泡保存及運送，接著將葉子取出，進行凍乾並磨碎後，取絕乾重約 100 mg 葉子加入 5 mL DMSO，超音波振盪 30 min，

以 9000g 離心 10 min 後取上清液，以上步驟重複兩次後進行分析，而浸泡過葉子的乙醇溶液則是經減壓濃縮及凍乾後，配製成 10 mg/mL 的樣品進行分析。而礁溪馬藍葉子則採集自宜蘭縣礁溪鄉，挑選成熟葉，將其凍乾與磨碎後，取絕乾重約 100 mg 葉子加入 5 mL DMSO，超音波振盪 30 min，以 9000g 離心 10 min 後取上清液，以上步驟重複兩次後進行分析。三峽藍泥則是取絕乾重約 10 mg 藍泥加入 5 mL DMSO，超音波振盪 30 min，以 9000g 離心 10 min 後取上清液，上述步驟重複兩次後進行分析。

此外，研究過程中發現，靛苷極易變質，當葉子組織經過破壞後，便會開始轉變成其他物質。因此，為解決此問題並良好地測得靛苷含量，在 2021 年 5 月以後採集的礁溪馬藍葉子，另外以鮮葉直接萃取。挑選成熟鮮葉（100 mg），加入 10 mL DMSO 進行萃取，超音波振盪 30 min，以 9000g 離心 10 min 後取上清液後進行分析，另外取部分鮮葉放置於 105°C 烘箱，七天後測量其絕乾重並計算含水率。

b. 靛苷及靛藍含量分析

為能準確分析每個月樣品中的靛苷及靛藍含量，試驗以固定量的沒食子酸做為內標準品進行成分含量之校正基礎，此可以避免液相層析儀的氙燈隨著時間衰弱所造成的實驗誤差。於配製好的樣品中以 1:99 的比例加入 10 mg/mL 沒食子酸，並混合再進行分析。接著將馬藍葉子、馬藍乙醇可溶部及藍泥樣品以液相層析儀串聯光電二極體陣列偵測器（Agilent 1200 HPLC-PDA）搭配逆向層析管柱（Cosmosil 5C18-AR-II, 4.6 mm (I.D.) × 250 mm (L), 5 μm）進行成分分離，注射量為 60 μL，並以 280 nm 及 620 nm 為偵測波長，藉以偵測靛苷及靛藍之訊號。另以靛苷及靛藍做為標準品進行檢量線的建立（圖 23），用以分析樣品中靛苷及靛藍含量。

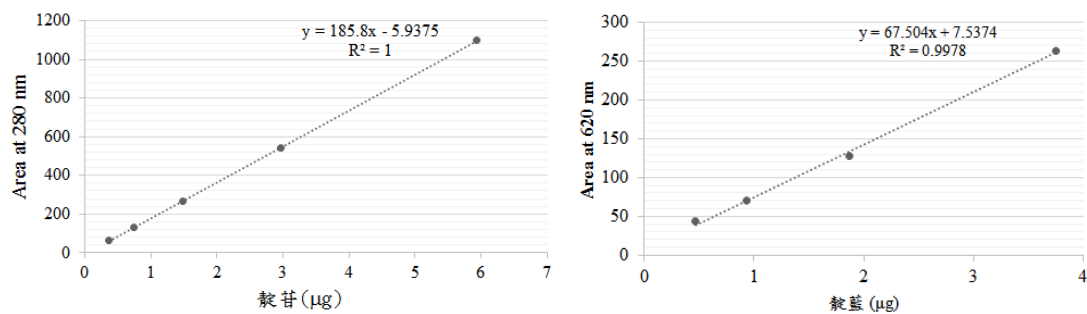


圖 23. 靛苷及靛藍檢量線

誠如前述，由於靛苷容易變質，在馬藍葉子樣品未能偵測到靛苷的情況下，藉由下列化學式推論，兩莫耳的靛苷約可產生一莫耳的靛藍(圖 24)，因此藉由靛藍的含量回推其莫耳數，莫耳數乘以兩倍後再乘上靛苷分子量，估算靛苷的理論含量。

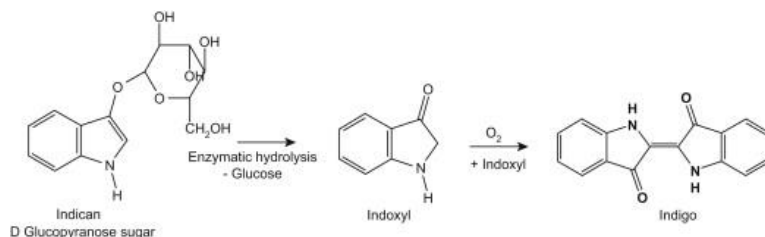


圖 24、靛苷及靛藍化學結構與轉換過程

c. 分析結果

(1) 馬藍葉子中靛苷與靛藍含量分析

由 280 nm 偵測之液相層析圖譜 (圖 25A) 得知，於 12 min 出現之吸收峰即為內標準品沒食子酸之訊號；於 20 min 出現之吸收峰即為靛苷之訊號。由 620 nm 偵測之液相層析圖譜 (圖 25B) 得知，於 77 min 出現之吸收峰即為靛藍之訊號，因此本試驗藉由 280 nm 及 620 nm 分別偵測靛苷及靛藍之訊號。

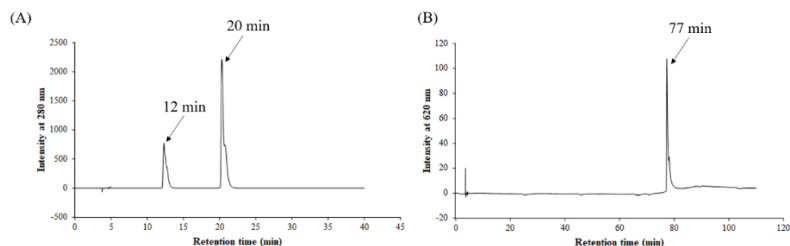


圖 25、(A) 鞣苷、(B) 鞣藍之層析圖譜。

由於三峽地理位置較遠，運送過程漫長且無法冷凍保存，因此嘗試將葉子以乙醇浸泡保存，待寄送至實驗室後進行分析。試驗結果顯示，以 2021/1/19 採集之三峽馬藍葉子樣品液相層析圖譜為例，由 280 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 26A）於 12 min 處有沒食子酸之訊號，但在 20 min 處卻無鞣苷的訊號，顯示樣品中未能偵測到鞣苷；而由 620 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 26B）於 77 min 處有鞣藍之訊號。同時，測量乙醇可溶物中鞣苷與鞣藍含量之結果顯示，以 1/19 採集之三峽馬藍葉子乙醇可溶物液相層析圖譜為例，由 280 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 26C）於 12 min 處有沒食子酸之訊號，但在 20 min 處仍看不到鞣苷的訊號，顯示樣品中未能偵測到鞣苷；而由 620 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 26D）於 77 min 處有鞣藍之訊號，但其訊號非常微弱，遠低於葉片中測量到的鞣藍含量，因此忽略不計。

綜觀三峽馬藍葉子各樣品的層析圖譜皆未能發現鞣苷之訊號，推測可能為鞣苷的性質不穩定，本試驗的萃取方法可能導致鞣苷在環境中變質，進而反應形成鞣藍；而各樣品的層析圖譜皆能發現鞣藍之訊號，進一步計算鞣藍吸收峰之吸收面積後，將其代入圖 23 之檢量線公式後，回推單位重量三峽馬藍葉子中鞣藍之含量，測得不同時間點之三峽馬藍葉子的鞣藍含量及鞣苷理論含量（表 17），而由三峽馬藍葉子不同季節之鞣藍含量變化圖（圖 27）可以看出其鞣藍含量在春季較高，夏季和冬季數值接近，但略低於春季。然因計畫執行時間限制之故，未能分析入秋後的變化，未來若能將其補足，便可以更清楚馬藍葉子四季之鞣藍含量變化。

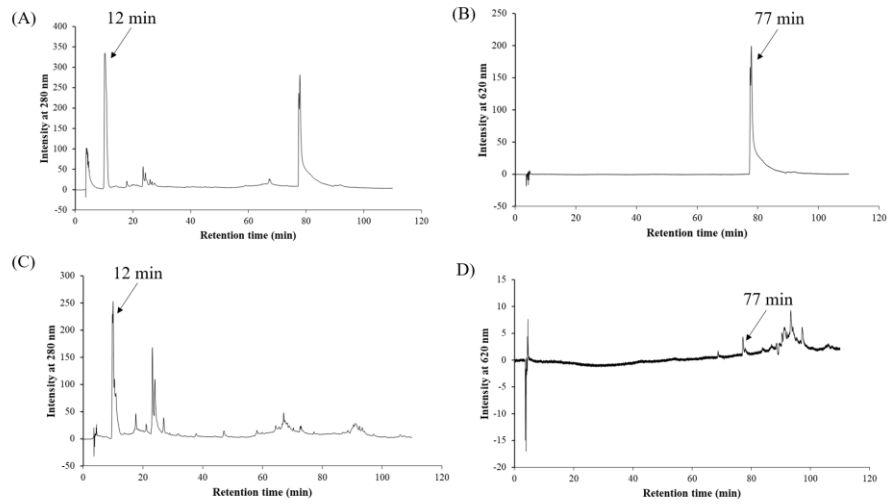


圖 26、2021/1/19 三峽馬藍葉子 (A) 以 280 nm 偵測、(B) 以 620 nm 偵測、(C) 乙醇可溶部以 280 nm 偵測、(D) 乙醇可溶部以 620 nm 偵測之層析圖譜。

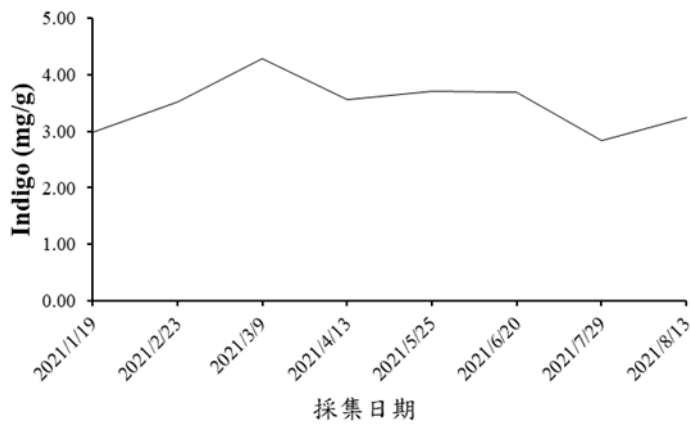


圖 27、三峽馬藍葉子不同季節靛藍含量變化圖。

表 17、單位重量三峽馬藍葉子中靛藍之含量及靛苷理論之含量

三峽馬藍葉子採集時間	靛藍波鋒面積 (mAU*min)	分析試樣中靛藍含量 (μg)	萃取時葉子重量 (mg)	葉子中靛藍含量 (mg/g^{a})	校正後葉子中靛藍含量 (mg/g^{b})	靛苷之理論含量 (mg/g^{b})
2021/1/19	255.8	619.20	101.02	6.13	2.99	6.73
2021/2/23	258.3	625.50	101.79	6.14	3.52	7.93
2021/3/16	261.6	633.69	100.74	6.29	4.28	9.64
2021/4/13	243.3	588.05	101.40	5.80	3.56	8.02
2021/5/25	247.9	599.51	101.01	5.94	3.71	8.35
2021/6/20	231.4	558.36	100.36	5.56	3.69	14.07
2021/7/29	194.2	465.49	101.14	4.60	2.84	10.82
2021/8/13 ^c	142.1	335.61	103.63	3.24	3.24	12.35

^a: 以乙醇萃取後的葉子絕乾重量為基礎

^b: 以乙醇萃取後的葉子絕乾重量加上乙醇萃取物的重量為基礎

^c: 葉子未浸泡乙醇，直接凍乾後萃取並分析

由於三峽地理位置離宜蘭大學檢驗實驗室較遠，無法及時測得新鮮馬藍葉子的靛苷及靛藍含量，為使試驗更臻完善，另外採集距離較近之礁溪馬藍葉子進行分析。以 2020/12/3 採集的礁溪馬藍葉子樣品液相層析圖譜為例，由 280 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 28A）於 12 min 處有沒食子酸之訊號，但在 20 min 處卻看不到有靛苷訊號出現（亦比對過其他 UV 波段的訊號，並未找到符合的吸收峰），顯示樣品中未能偵測到靛苷；而由 620 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 28B）於 77 min 處有靛藍之訊號。各樣品的層析圖譜皆能發現靛藍之訊號，進一步計算各樣品之靛藍吸收峰之吸收面積後，將其代入圖 23 之檢量線公式後，回推單位重量

礁溪馬藍葉子中靛藍之含量，測得不同時間點之礁溪馬藍葉子的靛藍含量整理如表 18，而由礁溪馬藍葉子不同季節之靛藍含量變化圖（圖 29）可以得出與三峽相近的趨勢，其靛藍含量在春季較高，夏季次之，冬季則較低，但其變化較為明顯。然因計畫執行時間限制之故，未能分析入秋後的變化，未來若能將其補足，便可以更清楚馬藍葉子四季之靛藍含量變化。

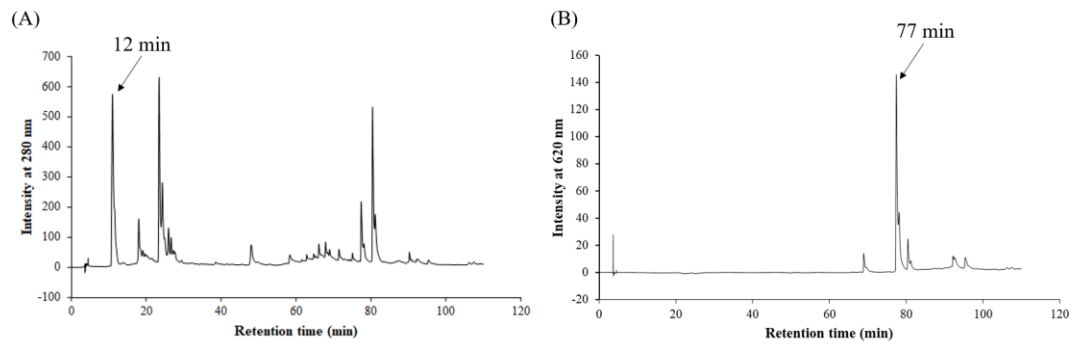


圖 28、2020/12/3 礁溪馬藍葉子 (A) 以 280 nm 偵測、(B) 以 620 nm 偵測之層析圖譜。

表 18、單位重量礁溪馬藍葉子中靛藍之含量及靛苷理論之含量

礁溪馬藍 葉子 採集時間	靛藍 波鋒面積 (mAU*min)	分析試樣中 靛藍含量 (μg)	萃取時 葉子重量 (mg)	葉子中 靛藍含量 ($\text{mg}/\text{g}^{\text{a}}$)	靛苷之 理論含量 ($\text{mg}/\text{g}^{\text{a}}$)
2020/12/3	75.97	170.67	103.09	1.66	3.74
2021/1/13	47.64	100.01	102.92	0.97	2.18
2021/1/29	140.70	332.10	104.23	3.19	7.18
2021/2/20	85.41	194.22	100.89	1.93	4.35
2021/3/15	190.90	457.28	101.52	4.50	10.13
2021/4/29	366.91	896.25	109.01	8.22	18.51
2021/5/19	274.19	665.02	101.36	6.56	14.77
2021/6/21	216.96	522.28	104.75	4.99	11.24
2021/7/19	249.68	603.89	102.80	5.87	22.40
2021/8/16	186.42	446.12	105.99	4.21	16.05

^a: 以葉子絕乾重量為基礎

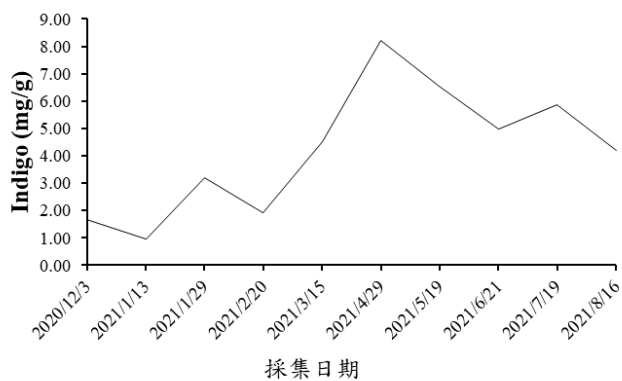


圖 29、礁溪馬藍葉子不同季節靛藍含量變化圖。

由前述結果可知，由於靛苷於葉子中的不穩定性，以葉子採集後並進行冷凍乾燥之前處理程序無法有效測得葉子中之實際靛苷含量。為了能測得馬藍葉子中靛苷之含量，因此改善萃取方法，在 2021 年 5 月後礁溪馬藍葉子另外採用鮮葉直接萃取（不進行冷凍乾燥）進行分析。以 2021/5/19 採集的礁溪馬藍葉子樣品液相層析圖譜為例，由 280 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 30A）於 12 min 處有沒食子酸之訊號，在 20 min 處已可見到靛苷之訊號，而由 620 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 30B）於 77 min 處雖有靛藍之訊號，但其訊號已非常微弱。

由此顯示，前述結果中因靛苷容易變質，進而改成採集鮮葉並當天直接萃取及分析，從結果中已可以看到靛苷的訊號，而靛藍成分則已非常微量，甚至可忽略不計，顯示此方法的確能有效偵測到靛苷，可供未來追蹤鮮葉中靛苷含量之參考。而由各樣品的層析圖譜皆能發現靛苷之訊號，進一步計算各樣品之靛苷吸收峰之吸收面積後，將其代入圖 23 之檢量線公式後，回推單位重量礁溪馬藍葉子中靛苷之含量，測得不同時間點之礁溪馬藍葉子的靛苷含量整理如表 19，從結果中可以得知 5 月至 8 月間馬藍葉子的靛苷含量介於 2-5 mg/g。因目前收集的樣品數較少，尤其缺少秋、冬季的資料，目前尚無法從礁溪馬藍葉子不同採集日之靛苷含量變化圖（圖 31）看出趨勢。

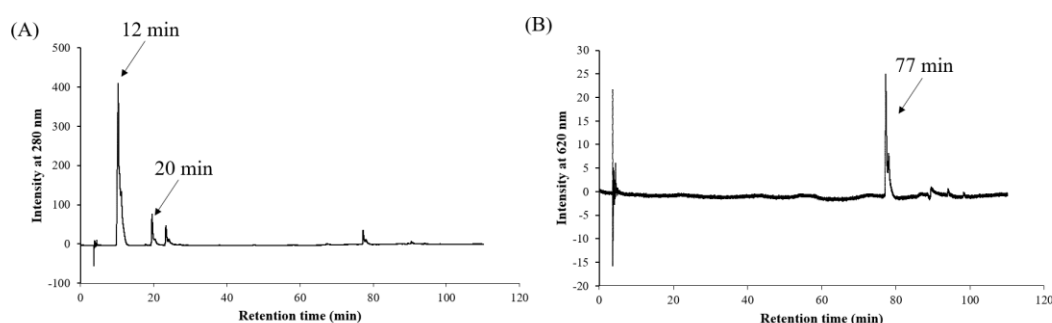


圖 30、2021/5/19 礁溪馬藍葉子 (A) 以 280 nm 偵測、(B) 以 620 nm 偵測之層析圖譜。

表 19、單位重量礁溪馬藍葉子中靛苷之含量

礁溪 馬藍葉子 採集時間	靛苷 波鋒面積 (mAU*min)	分析試樣 中靛苷量 (μg)	萃取時 鮮葉重量 (mg)	含水率 (%)	萃取時 葉子絕乾重 (mg)	靛苷含量 (mg/g^{a})
2021/5/19	42.19	82.85	190	555.21	29.00	2.86
2021/6/21	132.87	125.77	159.55	450.11	29.00	4.34
2021/7/19	69.04	67.94	103.47	31.25	2.17	7.36
2021/8/16	104.89	100.41	109.50	20.26	4.96	16.79

^a: 以葉子絕乾重量為基礎

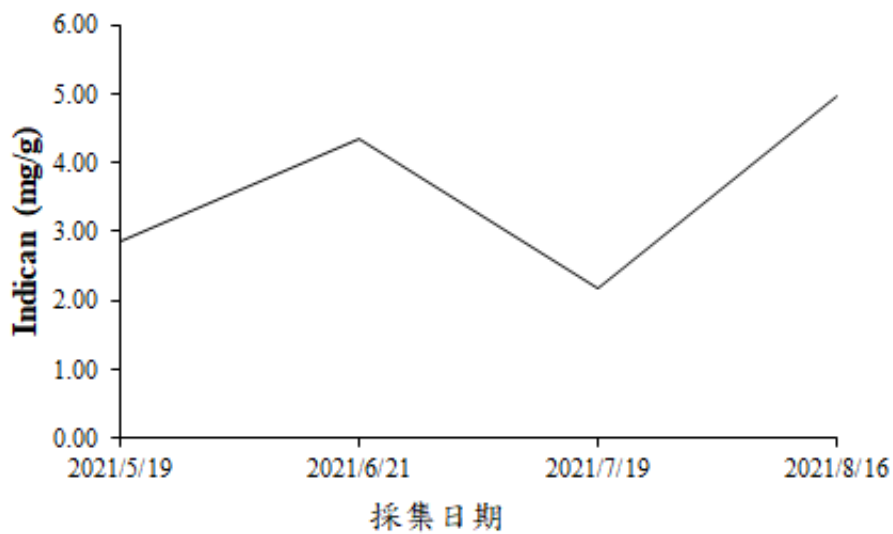


圖 31、礁溪馬藍葉子不同採集日靛苷含量變化圖。

由表 18 及表 19 於同一採集時間之分析結果（2021/5/19 以後採集之樣品）可知，實際分析之靛苷含量遠比由靛藍推算之靛苷含量還低許多，顯示以推算法得到之靛苷含量可能會有高估之疑慮，亦或是除了靛苷外，可能有其他中間產物（如吲哚酚、Indoxyl）之存在而未予以評估，此值得日後進行深入探討。此外，由試驗結果得知靛苷於葉子中雖然容易變質，但為了探討馬藍於三峽生長環境

中，靛苷與生長量及環境因子的關係，必須先瞭解於長距離運送下，最佳之保存方法。因此，試驗另以宜蘭大學實驗林場種植的馬藍葉子進行試驗。將馬藍葉子分為立即萃取及冷藏 6 h 再萃取兩組進行分析。將兩組測得之馬藍葉子的靛苷含量整理如表 20，從結果中可以看出兩種方式並無明顯差異，因此可將馬藍葉子從採集並冷藏運輸，於 6 h 內再進行萃取與分析，並不會影響靛苷含量的試驗結果。

表 20、單位重量林場馬藍葉子中靛苷之含量

宜大林場 馬藍葉子 處理方法	靛苷 波峰面積 (mAU*min)	分析試樣中 靛苷量 (μg)	萃取時 鮮葉重量 (mg)	含水率 (%)	萃取時 葉子絕乾重 (mg)	靛苷含量 (mg/g^a)
立即萃取	71.90	70.53	106.81	447.35	19.51	3.61
冷藏 6 h 再萃取	91.90	44.32	50.92	336.64	11.66	3.80

^a: 以葉子絕乾重量為基礎

可就目前測定靛苷與靛藍的過程，探討影響因子與利用冷鏈技術的時間，綜合上述結果可知，在最初以冷凍乾燥或酒精浸泡之馬藍葉子中無法檢出靛苷；然而，若直接改以鮮葉或冷藏保存 6 h 內之葉子進行萃取及分析，即能檢出靛苷。由此顯示，馬藍葉子一旦受到外力破壞後，葉子中的酵素即會開始作用，將靛苷轉化形成靛藍等衍生物。因此，若要良好地分析馬藍葉子中靛苷的含量必須以未受外力破壞之鮮葉，或短暫冷藏保存之葉子進行分析。而在未來，若要針對馬藍葉子中靛苷成分之追蹤或相關品質檢驗，便可參考本計畫之結果加以進行。

(2) 藍泥中靛苷與靛藍含量分析

以 8/30 收集的三峽藍泥樣品液相層析圖譜為例，由 280 nm 偵測之液相層析圖譜（圖 32A）於 12 min 處有沒食子酸之訊號，但在 20 min 處卻看不到有靛苷的訊號出現，顯示樣品中未能偵測到靛苷；而由 620 nm 偵測之液相層析圖譜（圖

32B) 於 77 min 處有靛藍之訊號。各樣品的層析圖譜皆能發現靛藍之訊號，進一步計算各樣品之靛藍吸收峰之吸收面積後，將其代入圖 23 之檢量線公式後，回推單位重量三峽藍泥中靛藍之含量，測得不同時間製作之三峽藍泥的靛藍含量並整理如表 21。由於製藍過程主要目的即是將靛苷盡可能完全轉換成靛藍，並將其純化，因此分析結果僅有靛藍屬正常現象。而由各時期藍泥中靛藍含量變化可知，秋季 9 月至 11 月中靛藍含量變化不大 (17–24 mg/g)，然而 11 月下旬藍泥的靛藍含量則增加至 51 mg/g，時值開花期，或許亦跟其生理變化有關，值得後續加以探討，冬季 12 月中藍泥靛藍含量急劇下降至 6 mg/g，春季 4 月中藍泥的靛藍含量則增加至 53 mg/g，而夏季 7、8 月時製作的藍泥靛藍含量則在 26-31 mg/g。由三峽藍泥不同製作日靛藍含量變化圖 (圖 33) 可以初步推論不同季節製作的藍泥的靛藍含量，以春季及開花期的較高，夏、秋季次之，冬季則較低，此結果與馬藍葉子測得的靛藍含量之變化趨勢相近。

一般而言，製藍過程中，收穫的藍泥重量約為馬藍葉子重的 1/10 倍，因此若將分析得到的藍泥中靛藍含量除以 10 後，將可得到葉子中靛藍的推測含量，由表 21 中葉子中靛藍推測含量與表 1 中校正後葉子中靛藍含量兩者互相比對後，發現數值十分接近，約在 1-5 mg/g 之間，且兩者測得的季節變化趨勢相近，顯示若以本研究中以凍乾法預處理馬藍葉子，再分析馬藍葉子中的靛藍含量，便可推估製藍後藍泥的靛藍含量，此應可作為判斷藍泥中靛藍含量多寡的依據。

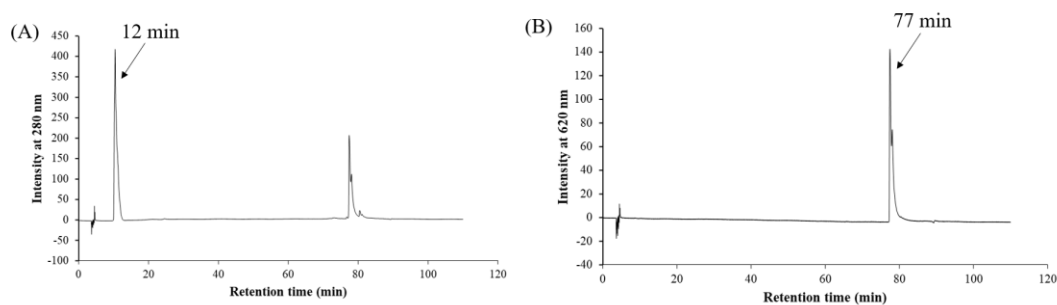


圖 32、8/30 三峽藍泥 (A) 以 280 nm 偵測、(B) 以 620 nm 偵測之層析圖譜。

表 21、三峽藍泥中靛藍之含量

三峽藍泥 製作時間	靛藍 波峰面積 (mAU*min)	分析試樣中 靛藍含量 (μg)	萃取時 藍泥重量 (mg)	藍泥中 靛藍含量 (mg/g^{a})	葉子中 靛藍推測含量 (mg/g^{b})
2020/8/30	102.32	236.38	10.72	22.05	2.21
2020/9/8	98.53	226.92	10.90	20.82	2.08
2020/9/15	80.03	180.80	10.68	16.93	1.70
2020/9/22	88.82	202.73	10.60	19.13	1.91
2020/9/28	100.78	232.55	10.34	22.49	2.25
2020/9/28	111.07	258.20	10.72	24.09	2.41
2020/11/10	93.75	215.00	10.18	21.12	2.11
2020/11/23 (開花中)	218.26	525.52	10.28	51.12	5.11
2020/12/15	31.73	60.35	10.09	5.98	0.60
2021/4/20	229.80	554.31	10.54	52.59	5.26
2021/7/2	141.20	333.34	10.71	31.12	3.11
2021/8/3	119.80	279.96	10.94	25.59	2.56

^a: 以藍泥絕乾重量為基礎

^b: 以馬藍葉子絕乾重量為基礎

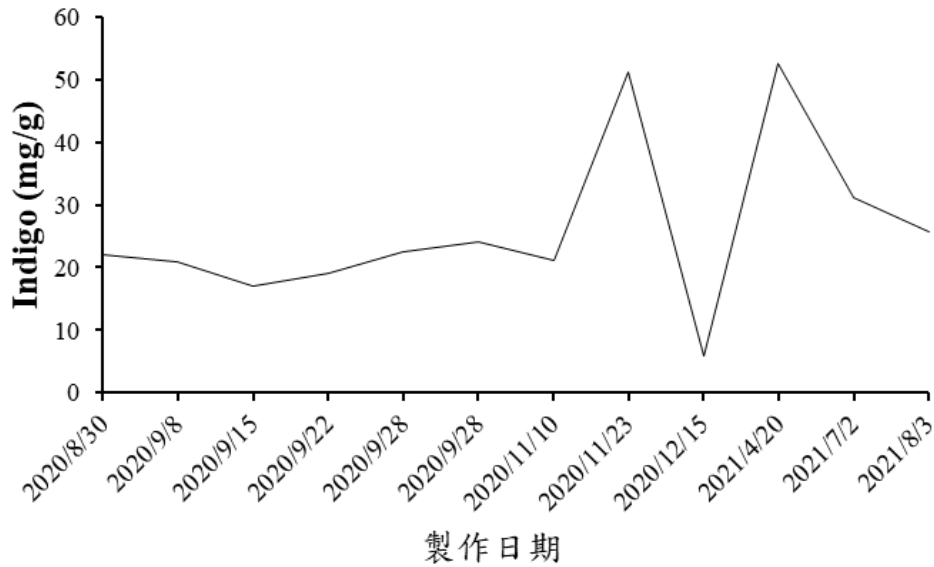


圖 33、三峽藍泥不同製作日靛藍含量變化圖。

4. 研擬以馬藍作為林下經濟栽植之評估

(1) 適宜環境栽植評估及指標物種

a. 樣區植被調查

本研究係針對與馬藍共同生長在同一生育地植被的關係，並非植群分析，所以分析上，採用降趨對應分析法(Destrended correspondence analysis, DCA)，此方法主要將樣區或物種資料，是將原始之資料矩陣，分析植物覆蓋度或是種類數量求解主要變異方向，並將樣區與物種繪製在 2 個主要的變異軸向上呈現其座標位置，植被組成相近似的樣區會趨近在一起，而差異較大的會距離較遠(蘇鴻傑，1987)，將樣區或物種以二度空間之分布呈現聚集的情形，可作為樣區或物種分群之參考(陳子英等，2010)。降趨對應分析可與環境因子結合，藉由環境因子與 DCA 序列軸的相關性高低，推估環境因子與植被間的關係。為瞭解馬藍與生育區內植被的關係，樣區植被調查取樣以 5m × 5m 的多樣區法，本研究的對象馬藍為多年生的草本植物，一般草本植物以評估覆蓋度為主，因此於各個次樣區內進行地被植物覆蓋度的調查，共評估 60 個次樣區植被覆蓋度，在記錄樣區之植物資料時，同時利用前述鬱閉度計、土壤濕度與土壤溫度等儀器蒐集樣區的環境

資料，作為後續分析植被與環境相關性時使用。

樣區調查結果顯示，本研究區域共紀錄維管束植物 38 科 40 屬 42 種，馬藍 (*Strobilanthes cusia*)、山羊耳(*Symplocos glauca*)、山豬肉(*Meliosma rhoifolia*)、月桃(*Alpinia zerumbet*)、火炭母草(*Polygonum chinense*)、台灣根節蘭(*Calanthe speciosa*)、瓜馥木(*Fissistigma oldhamii*)、樓梯草(*Elatostema lineolatum*)、冷清草 (*Elatostema lineolatum* var. *majus*)、姑婆芋(*Alocasia macrorrhiza*)、穿鞘花 (*Amischotolype hispida*)、菝契(*Smilax china*)、黑星紫金牛(*Ardisia virens*)、駁骨丹 (*Buddleja asiatica*)、南海鱗毛蕨(*Dryopteris varia*)、廣葉鋸齒雙蓋蕨(*Diplazium dilatatum*)、樹杞 (*Ardisia sieboldii*)、雞屎樹(*Lasianthus obliquinervis*)、黃藤 (*Calamus quiquetinerivius*)、山棕(*Arenga tremula*)、生根卷柏(*Selaginella doederleinii*)、粗毛鱗蓋蕨(*Microlepia strigosa*)、鳥巢蕨(*Asplenium nidus*)、萊氏線蕨(*Colysis wrightii*)、觀音坐蓮(*Angiopteris lygodiiifolia*)、筆筒樹(*Sphaeropteris lepifera*)、香蕉(*Musa paradisiaca*)、山香圓(*Turpinia formosana*)、山桂花(*Doraena japonica*)、長梗紫苧麻(*Oreocnide pedunculata*)、青楓(*Acer serrulatum*)、柏拉木 (*Blastus cochinchinensis*)、水同木(*Ficus fistulosa*)、水金京(*Wendlandia formosana*)、九節木(*Psychotria rubra*)、白匏仔(*Mallotus paniculatus*)、台灣山桂花(*Maesa perlaria*)、中國柃木(*Eurya chinensis*)、稜果榕(*Ficus septica*)、牛奶榕(*Ficus erecta* var. *beeheyana*)、九芎(*Lagerstroemia subcostata*)、楓香(*Liquidambar formosana*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)。

為瞭解馬藍與各植物物種在各樣區的優勢度，草本植物可以透過頻率與覆蓋度進行分析，掌握共生的植物種類，以及與其競爭的植物種類。本研究的樣區設計，當初以具有馬藍出現的位置為樣區設置中心，因此馬藍在 60 個次樣區皆有分布，次者為廣葉鋸齒雙蓋蕨有 57 區有出現之紀錄，第三為冷清草有 53 區有出現之紀錄(圖 34)。相對覆蓋率以各物種在有紀錄的樣區覆蓋度與樣區數量為基礎所計算，平均相對覆蓋率則以樓梯草最高可達 30.8%，次著是馬藍為 29.5%，第

三是廣葉鋸齒雙蓋蕨為 15.5%(圖 35)。

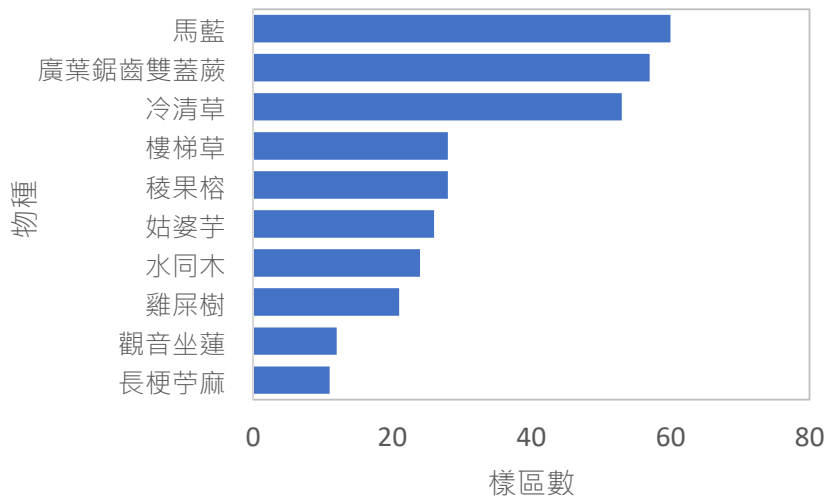


圖 34、本研究樣區內植被種類出現較為廣泛的前十大植物種類。

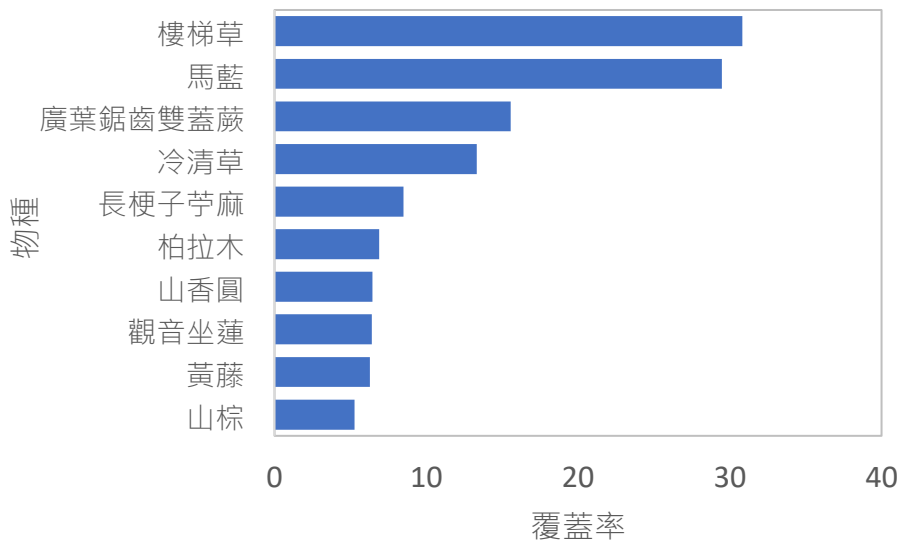


圖 35、本研究樣區內植被種類相對覆蓋率較高的前十大植物種類。

依降趨對應分析之結果，植群分布序列與環境因子之相關性，以及不同植群型態間的相似關係。第一軸的特徵值(eigenvalue)為 0.30、第二軸為 0.14、第三軸為 0.13(表 22)，得知第一軸對植群分布的重要性最高，表示樣區在分布序列的位置主要依據第一軸的軸長標準偏差值來排列，第二重要的為第二軸，故將第一軸及第二軸的分布序列圖來了解植被種類間的相似關係。由所選定 2 個 DCA 分析的軸與環境因子的相關係數分析結果顯示，DCA 的第一軸與第二軸與土壤溫度、

鬱閉度及相對紅光/近紅外光比值的相關性達到顯性水準，土壤溫度在第一軸及第二軸反應一致，皆為正相關；相對紅光/近紅外光比值與第一軸及第二軸，則呈負相關；樹冠鬱閉度則是與第一軸呈現正相關，而與第二軸呈現負相關的趨勢，與兩軸的相關性不一致狀況而無法歸納出明顯的對應關係(表 23)。由 DCA 所分析的兩個軸繪製成圖(圖 36)，並將樣區與各植物物種標示於各軸相對應的位置，結果發現環境因子中的土壤溫度對於樣區植群的分布確有較顯著的影響。與馬藍生育地環境相似的物種包括廣葉鋸齒雙蓋蕨、觀音座蓮、火炭母草、駁骨丹、筆筒樹、生根卷柏、南海鱗毛蕨、樓梯草、柏拉木與山桂花。由這些植物物種的特性，可歸納馬藍生長在中、低海拔山區潮濕有遮蔭的林下，土壤深厚、肥沃、保水良好，有機質較多處。由圖中土壤溫度所繪製的軸向延伸，可以瞭解馬藍生長環境條件界於樓梯草(喜歡生長在潮濕而有陽光的森林邊緣)至南海鱗毛蕨(喜歡生長在有點乾燥的林緣道路邊坡，表 24)之間，其生長的土溫較相似於駁骨丹、生根卷柏、筆筒樹與香蕉樹。

表 22、降趨對應分析之各軸統計值

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
Eigenvalue	0.30	0.15	0.14	0.14
Decorana value	0.31	0.19	0.13	0.08
Axis lengths	2.46	1.75	1.72	1.51

表 23、降趨對應分析第一軸及第二軸與環境因子間之相關性分析結果

	DCA1	DCA2	r	P value
Soil humidity	0.06	-0.99	0.26	0.111
Soil temperature	0.99	0.15	0.48	0.004
Canopy closure	-0.97	0.25	0.32	0.042
Relative UV	0.67	-0.73	0.20	0.256
Relative RFR ratio	-0.84	-0.53	0.40	0.006
Slope	-0.25	0.96	0.14	0.568
Direction	0.95	-0.28	0.24	0.190

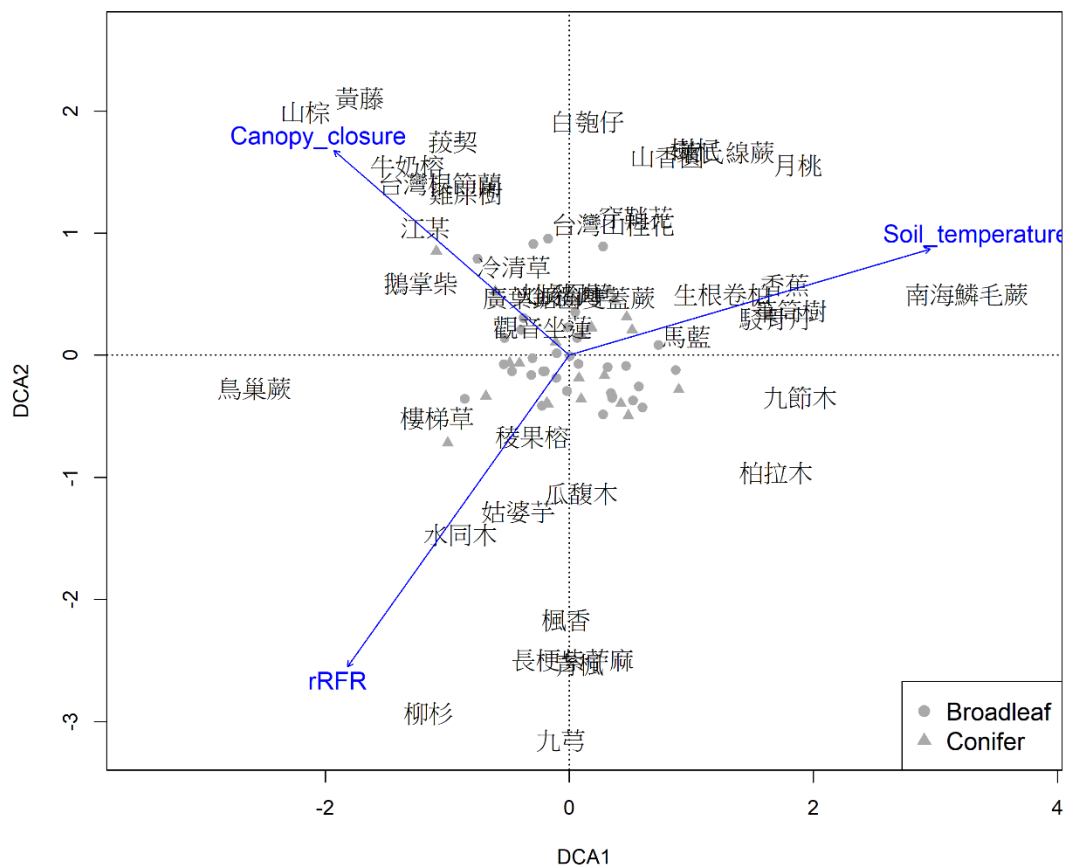


圖 36、DCA 第一及二軸之序列與各植被物種的分布

表 24、與馬藍相似生長環境之指標植物

物種	生育地環境特性
廣葉鋸齒雙蓋蕨	台灣低海拔山區潮濕有遮蔭的林下或山坡上極為常見。
觀音座蓮	臺灣低海拔山區常見，尤喜山谷潮濕處。
火炭母草	台灣淺山地區常見，水分供應較充裕之開闊地、溪谷兩旁和道路附近。
駁骨丹	臺灣全島低海拔山麓，河床向陽地區或斷崖及貧瘠地區。
筆筒樹	臺灣全島山麓之山谷及陰濕地矮林中。
生根卷柏	臺灣全島低海拔山地，陰濕處或林陰地帶。
南海鱗毛蕨	臺灣全島低海拔常見之蕨類，喜歡生長在有點乾燥的林緣道路邊坡。
樓梯草	廣泛分布於全島山地，喜好潮濕而有陽光的溪谷或森林邊緣。
九節木	全島低海拔山區闊葉林下普遍可見的野生植物，喜溫暖潮濕且耐陰性極強。
柏拉木	臺灣全島森林中山坡、山谷的疏密林下潮濕的路旁或灌叢中。
山桂花	臺灣全島闊葉樹森林底層陽光充足處，土壤深厚、肥沃、保水良好，有機質較多處。

(2)作為林下經濟物種之經營模式

a.馬藍苗木繁殖培育方式

本研究自三峽地區採集馬藍的種子與植株，透過移地培育方式，瞭解馬藍透過種子苗與扦插培育方式 2 種經營模式，在繁殖期間會遇到的狀況，以提供後續作為林下經濟物種之經營模式之參考。

(a) 種子苗

種子發芽試驗，馬藍的種實於 2021 年 2 月分於三峽研究區域採集，蒐集的馬藍種實攜回實驗室將果莢去除，並將種子進行清理作業去除雜質，依國際種子檢查規則(1995)所列的相關程序規定，進行發芽試驗(germination test, 圖 37)，以瞭解種子馬藍種子發芽潛力與發芽勢。本研究嘗試評估以種子進行馬藍栽培的可行性，種子發芽試驗分為 2 個時間進行，(1)種子採集後立即播種與(2)將種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種。本計畫採用發芽床試驗方法中的紙上法，將濾紙鋪於培養皿中，並給予適當水分將濾紙澆濕後將 100 顆馬藍種子放於濾紙上，重複 5 次。發芽環境設定為 15-25°C，濕度 70%，日照 12 小時，每日給予適當水分與進行觀察與紀錄發芽株數，每日發芽種子挑離，試驗時間 30 天。待發芽試驗結束後計算發芽率(germination rate)與發芽勢(germination potential)。

發芽率：係在指定的發芽條件下，正常發芽種子數目的比率。公式如下：

$$germination\ rate(\%) = \frac{\sum GS}{N} \quad (1)$$

GS 為試驗期間的種子發芽總數，N 為試驗種子的數量。

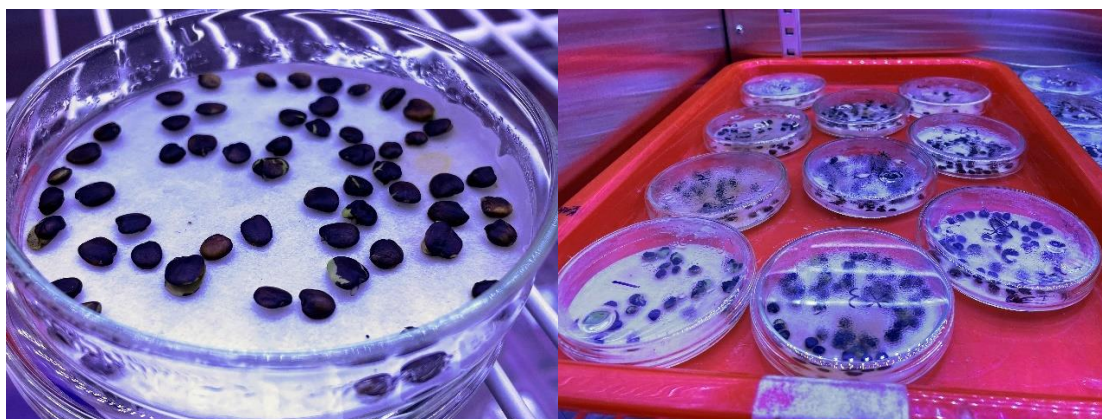


圖 37、馬藍種子發芽試驗

發芽試驗結果，分為(1)種子採集後立即播種與(2)將種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種 2 種試驗處理。

在種子採集後立即播種的發芽試驗結果，發芽環境設定為 15-25°C，濕度 70%，日照 12 小時，馬藍種子平均發芽率為 61.8%(sd=9.3)，種子播種後第 4-5 日即可發芽，最高率的發芽天數出現在第 9-13 天(圖 38)。

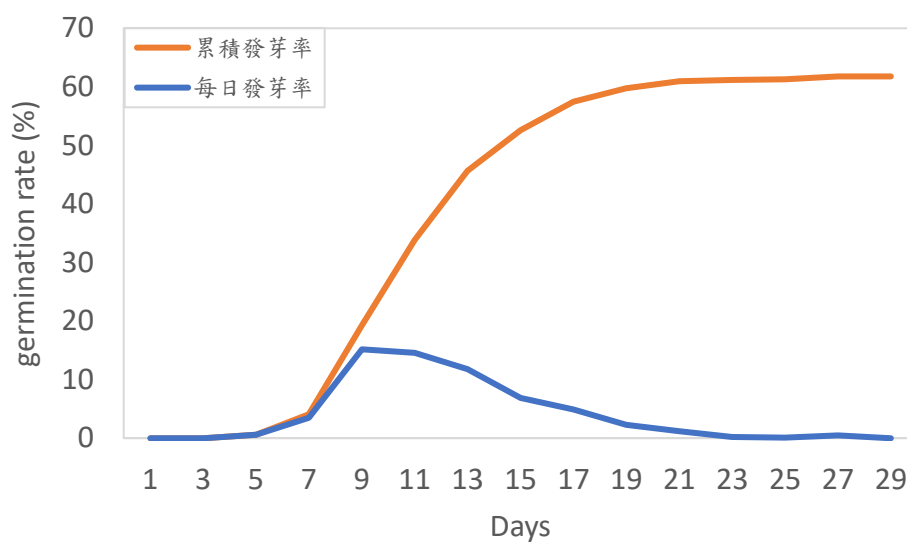


圖 38、馬藍種子採集後立即播種，發芽環境溫度為 15-25° 之累積發芽率與每日發芽率變化

將種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種的發芽試驗結果，發芽環境設定為 15-25°C，濕度 70%，日照 12 小時，馬藍種子平均發芽率為 23.6%(sd=19.4)，種子播種後延遲於第 11 日發芽，最高率的發芽天數出現在第 13-15 天(圖 39)。經過低溫保存的種子，發芽率相較於採集後直播的處理有明顯的降低。本研究另外將一部分經過保存之種子，放置於發芽環境設定為 20-30°C，濕度 70%，日照 12 小時，觀察種子的發芽情形，結果在較高溫環境條件下，馬藍種子平均發芽率為 61.0%(sd=3.4)，溫度的提高使種子於播種第 3-5 日發芽，最高率的發芽天數出現在第 13-15 天(圖 40)。

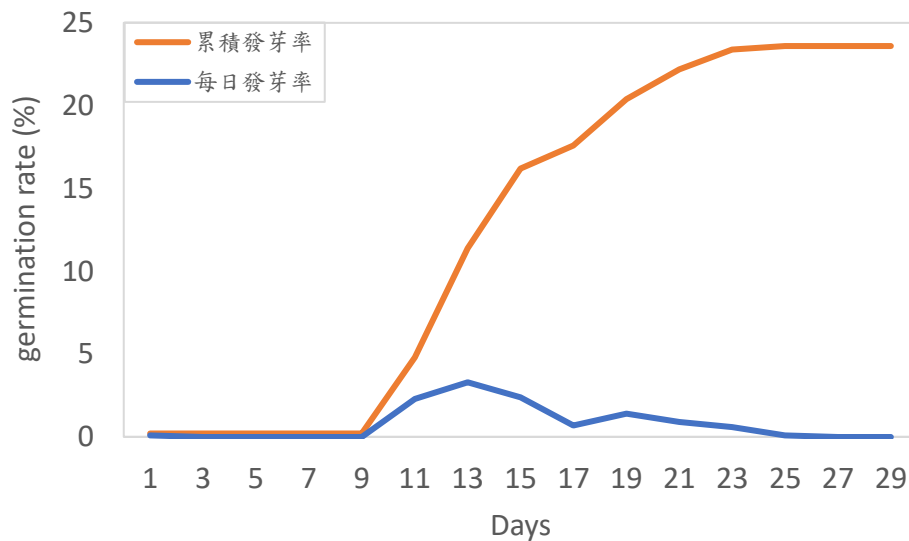


圖 39、馬藍種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種，發芽環境溫度為 15-25°之累積發芽率與每日發芽率變化

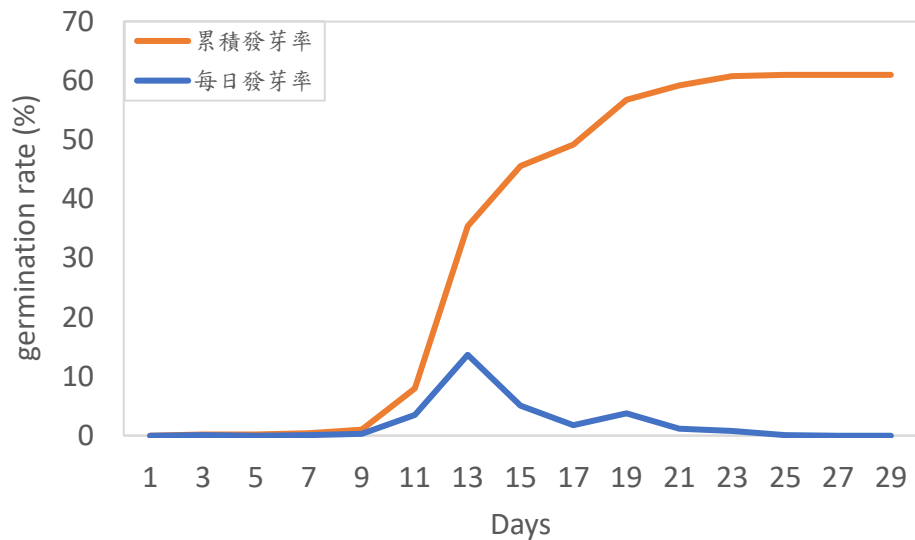


圖 40、馬藍種子保存於 5°C 冰箱 6 個月後進行播種，調整發芽環境溫度為 20-30 °C 之累積發芽率與每日發芽率變化

由發芽試驗的結果，馬藍的種子不具有休眠特性，播種後短時間內即可發芽，亦可進行冷藏保存，而保存後的種子需要以較高溫的環境條件進行發芽，可使發芽率與種子採集後立即播種的發芽率相似。因此建議若要以馬藍種子進行苗木的培育，可於種子採集後隨即播種，若有種子保存的需求，播種時間應該於夏季平均溫度較高時播種，方可收得較佳的發芽成效。

(b) 扦插苗

扦插苗的苗木同樣採集自三峽的研究區域範圍內，依照於馬藍生育地現場觀察插穗規格進行扦插材料的準備，插穗長約 8.0-9.0 cm 與直徑約 7mm，於 2021 年 2 月扦插於位於國立宜蘭大學大礁溪實驗林場溫室內的沙床(圖 41a)，並將插穗的切口進行修整(圖 41b)，並將插穗插植於沙床，以及進行葉部進行修剪(圖 41c)，以減少水分散。扦插苗的觀察與野外觀察的數量相同，以 50 枝作為一個重複，總共做 3 次重複，總計扦插共 150 枝，試驗期間紀錄插穗存活與生長情形。至 2021 年 9 月的觀測結果，平均的插穗成活率可達 96.7%(sd=0.6)，顯示使用

扦插做為馬藍苗木培育繁殖的方法，具有良好的成效。馬藍扦插苗木於 2021 年 4 月進行換棚與移至簡易陰棚，至 2021 年 9 月苗木平均直徑為 6.9 mm (sd=1.5)，株高為 38.4 cm (sd=25.2)，株高最大值為 85.3 cm，株高最小為 11.0 cm。與現地觀察的扦插馬藍株高相似(圖 42)。



圖 41、馬藍扦插苗繁殖培育，(a)插穗準備、(b)修整插穗之切口與(c)將插穗插植於沙床



圖 42、扦插繁殖之馬藍苗木

b. 最適栽植密度

栽培植物產量構成要素(yield components)，通常指影響該作物收穫與利用的關鍵因素，可依作物類型分為以收穫營養器官或種實為目的植物，例如小麥以收穫種實為主，因此栽培植物產量構成要素由單位面積穗數，每穗粒數和粒重三個因素構成。作物的種類不同，其產量構成因素也不同(楊志維等, 2011)。

Danalatos et al. (2007)對禾本科植物的栽植密度的研究結果，顯示禾本科分蘗數隨著密度上升而增加，但當栽植密度上升至 10,000 n/ha 分蘗數即不再增加，當密度提高至 20,000 n/ha 時甚至出現分蘗數減少現象，顯示栽植密度對農作物生長性狀及生理代謝具有一定程度影響。本研究的馬藍以採收植物的葉部為主要收穫產品，因此單位面積上的葉重，為重要的產量構成要素，而單位面積上栽植的馬藍株數密度，會影響整個生育期間馬藍葉部生產和積累有機物的總量。

適當的栽植密度可透栽植的經驗或是科學數據分析的方式，尋求最佳產量構成要素的組合。將現地調查所蒐集到的資料，株數密度(n/m^2)與葉部重量進行散布圖的繪製，可發現單株馬藍葉重隨著密度的增加而有減少的趨勢，顯示馬藍葉部生產量要素受到密度的相互制約，在單位面積上的馬藍株數增至一定程度以後，每株馬藍葉量就有減少的趨勢，顯示單位面積上的馬藍生產力亦有其一定的承載力。因此，將馬藍規劃推廣作為林下經濟作物，實須考量適當地栽植密度。由株數密度與單株葉部重量的相關性，可以瞭解馬藍的葉量會隨者植株密度增加而產生減少的情形。將特定株數密度下最大的單株葉量，視為該株數密度最大的潛在生產力，將這些觀測資料繪製成迴歸線，可作為每一株數密度層級的最大葉量生產上限。並將其配合株數密度與單株葉部重量的相關性，尋找兩條迴歸線的交會點，即可尋找到較適當的栽植株數密度。由圖 43，可觀察兩條迴歸線交會的位置，結果顯示馬藍栽植密度在考量最大生產力的情形下，以每平方公尺栽植約 40 株較為適當。這個結果與現地調查的結果相似，在闊葉樹林分-低光環境其馬藍的株數密度為 $36.4 n/m^2$ ($sd=17.3$)。陳世雄(2005)針對本土中草藥選種育種及

GAP 栽培研究，進行馬藍的植株密度與產量分析，結果顯示 30 cm × 10 cm 的栽植密度(約為 33.3 n/m²)莖葉收穫量最大。林務局花蓮林區管理處於大農大富造林地，委託青陽農園辦理「林下作物-山藍栽培試驗」，不同的栽植密度以 33-40 n/m²可達到較佳生長條件(林務局花蓮林區管理處，2020)。

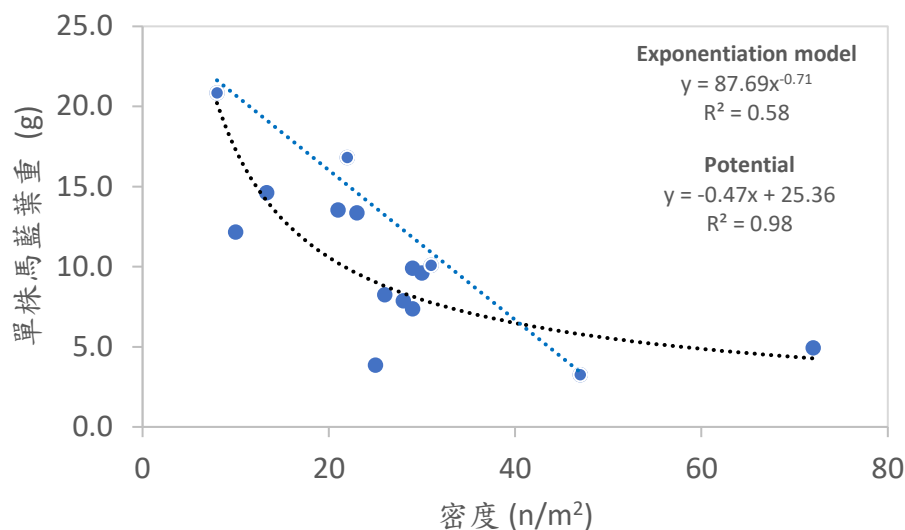


圖 43、馬藍植株密度與單株馬藍葉重相關性，及最大潛在單株葉部生產力圖。

c. 經營模式

馬藍培育的過程、採藍時間與季節管理(表 25)，馬藍的苗木培育方式可以採用種子與扦插的形式進行，然而利用種子的方式進培育，所需的時間相對較長，馬藍是以收穫營養器官的作物類型，因此植物葉部的生產量是相當重要的栽培植物產量構成要素，是於經營實必須考量的重要因素。本章節以研究所蒐集的資料歸納各種形式經營作業方法，瞭解各種方式的優缺點，以提供後續推廣作為林下經濟作物之參考。

馬藍的種子生產一年僅有一次，以種子進行培育需於 1-2 月份進行種子採集工作，種子不具休眠性，可於播種後發芽。種子亦可保存，但保存後的種子需要於 20-30°C 溫度環境進行發芽，可獲較高的發芽率。利用種子播種的作業方式相對於扦插較為省工且經濟效益高。但種子苗的培育時間相對於扦插苗較長，且在

野外進行直播，幼苗容易受到干擾會造成存活率較低的情形。若採行播種培育，必須在經營期間有相對較多的田間照顧作業。另外以種子培育苗木可能會有較多的植株遺傳變異，將對於產量的穩定性會具有一定的影響。馬藍在許多文獻中，以扦插方式進行培育較多，其可保持母株生長性狀，且培育時間短，其生長量可在於當年達到多次採收的目標。與三峽地區當地耆老諮詢，表示馬藍的種植大部分皆以扦插的方式進行，雖然種子量相當的多，但不予以採收而令其自然於生育地進行更新。

依據本研究的藍靛素分析結果(圖 29 與圖 33)，顯示 4 月的藍靛素含量最高，可以做為馬藍的採收時間依據。一般馬藍的採集一年有 2 次，由於開花會使靛藍的色素降低，通常在開花季節會在 11 月開始，所以會在開花前有一次的採集。另外一次的採集，會在 4-6 月的區間，主要會與馬藍生育地的溫度變化有關，在比較低溫的地方，開花的時間會早一點，因此隔年也就可以在 4 月的時候進行採集，而較溫暖的地方因為開花時間相對較晚，就會使稍微延遲採集馬藍的時間。馬藍採集的管理，是影響產量的關鍵，可以觀察馬藍分布的密集程度，在比較密集的地方，在大植株下方也會有許多的小植株，所以可以適當對較大的馬藍植株進行疏葉，可以促進小苗的生長；密度較低的地方，在採集藍葉後可以進行扦插，補充馬藍的株數與生產量。另外，生育地上若有比較大型的蕨類遮擋馬藍小苗時，可以適當的修剪蕨類的葉子，減少馬藍小苗生長受到遮蔽，而影響後續莖葉的生長。

近年來，在台灣興起以植物染為主題的觀光產業，一般會以馬藍植物的栽植、製藍與染色實作，當作主的解說材料對遊客進行導覽。馬藍可依經營的方法而產生不同收穫成果，台灣淺山坡地林相一般為雜木林，必須移除強勢雜草與藤蔓，初期致使林下光線較強，造馬藍成長較為不穩定，需待林內樹木增強遮蔽率後，馬藍才會較有生長成效(林務局花蓮林區管理處，2018)。因此大部分需投入較多人力，經營方式較為集約，但可透過田間管理，使馬藍的生長較為均質且不會受

到其他植物競爭的影響。各區的馬藍栽植經營模式不同，其中以三峽的馬藍培育最符合林下經濟的條件。三峽地區業者，充分運用三峽淺山地區的氣候條件與森林形成的林下微環境，作為馬藍生長時所需求的低光環境(圖 44a)。馬藍栽植初期需要適當的低光環境，選擇已經鬱閉的林分，充分利用林下環境的馬藍栽植，可減少初期蔭網架設的成本，經營管理期間可以較為粗放且較不需密集的田間作業，但相對的馬藍生長狀況變異程度較高，由於林下會與其他的植物競爭，致使空間分布較不均勻，採摘作業受到天候的影響明顯。其他區的業者通常採行以遮光網培育馬藍，以人工輔助架設蔭網，營造類似於林下光度的環境，但會增加經營初期支出成本。例如苗栗地區卓也藍染與花蓮青陽農園(圖 44b)，顯示兩種不同的經營模式各有其優缺點(表 25)。

表 25. 馬藍培育的過程、採藍時間與季節管理

馬藍培育	採藍時間	季節管理
<p>種子</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 於 1-2 月採集種子後植播。 ● 種子可保存，可藏至較為溫暖的 6-8 月再行播種。 	<p>時間管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 清晨有露水時採收，不然馬藍葉片容易凋萎轉黑。 ● 現在可以冷鍊技術，對採摘的藍葉提供運送過程的保鮮。 	<p>生長管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 馬藍生長期需水較多，適合溫暖潮濕之林下環境。若以人工輔助，需要遮蔭網減低光強度。 ● 高溫多濕季節，容易使根部腐爛，進而造成植株死亡，須注意積水與田間管理。
<p>扦插</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 馬藍最佳扦插時間為開花前的 11 月份。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 一年可採收 2 次，通常於每年 6-7 月與 11 月。 	<p>摘葉管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 馬藍摘葉時可自頂端摘去大部分葉片，上部應適當保留具有芽點之莖節，以利植株重新長葉。 ● 當枝葉被採收後，植株需水較多，須注意水分管理，以促進發芽長葉。
<p>植株更新</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 馬藍為多年生草本植物，約可連續收穫葉、莖三年，爾後逐漸衰退，植株各部位生長產量下降，建議整株挖除重新栽種。 	<p>種子採收</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 馬藍一般於 11-12 月開花，種子必須於開花後的 1-2 月份採集。 	<p>扦插管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 11 月的採收會將老莖剪成短節，節上包含 3~4 個芽，就成為地插條。



圖 44、三峽地區以林下環境作為培育馬藍之場域與一般業者以遮蔭網建置的培育區

d. 馬藍每公頃經濟收益評估

本研究藉由試驗所蒐集的相關資料，進行馬藍生產潛力的初步評估，就馬藍的生長環境，以三峽地區所測得的光度資料，顯示馬藍生育地的相對光度分布在 0.6~33.5%之間，以闊葉樹林分-低光環境(對應鬱閉度平均值為 81.4%，相對光度 1.5%)的馬藍株數密度(36.4 n/m^2)與單位面積馬藍葉產量最高(317.0 g/m^2)。三峽地區以林下環境作為培育馬藍的田區，天然的环境馬藍必須與其他的植物競爭，依調查結果馬藍的平均覆蓋率為 29.5%。

本研究以 1 公頃為經營單位進行試算馬藍生產之葉重量，結果如次：

經營單位：1 公頃= 10000 m^2

馬藍覆蓋率為：29.5%

單位面積的葉重量： 317.0 g/m^2

每公頃馬藍生產之葉重量= $317.0 \text{ g/m}^2 \times 10,000 \text{ m}^2 \times 29.5\%=935 \text{ kg/ha}$ 。

本研究以 1 公頃為經營單位進行試算馬藍生產之莖葉重量，結果如次：

經營單位：1 公頃=10000m²

馬藍覆蓋率為：29.5%

單位面積的莖葉重量：528.4 g/m²

每公頃馬藍生產之莖葉重量=528.4 g/m² x 10,000 m² x 29.5%= 1558.7 kg/ha。

於三峽地區林下進行馬藍培育，假設每年可以採收 2 次，第一次於開花前的冬季約 11 月進行採收作業並同時進行扦插繁殖，第二次的採收於翌年的 6-7 月份進行，經營管理採較粗放的方式，依上述計算結果初估每公頃約可生產 935 kg。於花蓮大農大富造林地栽植的產能換算，以較為相近的栽植密度 40 n/m² 株計算，每次 25m² 馬藍枝葉採收量可達 7.1 kg(林務局花蓮林區管理處，2020)，放大到 1 公頃單位面積產量可以收 2840 kg，同樣每年可收兩次進行計算，可收 5680 kg。參考日本德島的寥藍收穫資料，集約管理的田間栽植，每年每公頃約可收穫葉部鮮重 4160 kg(日本農林水產省)。

本研究於坊間蒐集市售藍泥價格，1kg 售價約 371-1418 元，平均為 909.1 元。將三峽地區林下經營所收穫的馬藍葉鮮重，參考林務局花蓮林區管理處(2020)報告中的將藍葉製作為藍泥的轉換率約 1 成，進行每公頃馬藍轉換為藍泥的經濟收益，以每年 2 採收，進行評估以三峽地區林下所生長的馬藍，進行藍泥生產的經濟總收益，結果如次：

每公頃總收益=馬藍每公頃葉重 x 製作藍泥轉換率 x 藍泥平均市價 x 採收次數

每公頃總收益=935 kg/ha x 0.1 x 909.1 元/kg x 2 = 170,001.7 元/ha

*未包含製藍程序相關成本

依據本研究的調查結果，以林下環境經營之馬藍，一年採收 2 次馬藍葉子，每公頃可 935 kg，粗收益約 170,001.7 元，而整體莖葉可以產生 1558.7 kg，

馬藍的莖葉根全株皆有不同的用途，若可開發其他馬藍莖葉相關產品，應可再增加林下栽植馬藍之粗收益。

經營管理模式

依據林務局花蓮林區管理處於分別於 106-109 年，分別於花蓮地區的淺山區的開闢地、溪流地、林下區與大農大富造林地，進行馬藍栽植試驗的結果進行比較，結果顯示馬藍的生育地區要一定程度的遮蔭，否則會使栽培的馬藍葉部生長產黃化與生乾化現象，影響後續製藍時色素的品質(花蓮林區管理處，2018, 2020)。蔡承豪(2012)對於嘉義藍靛產業的研究中，表示馬藍的種植非常忌諱陽光直射，其適合於低海拔背陽山谷坡地，雜樹林下略透陽光之潮濕地，以及山溝溪流旁邊的腐質土中繁殖，如《臺灣通史》言：「山藍：亦名大青。山地多產，壟田甚肥」。若需要於平地經營馬藍相對需要集約的管理，由花蓮地區的研究結果表示林木樹種較不適合光度過低的陰香造林地下栽植，在無患子造林地下栽植較為適合。當平地的林分若光度較高時，馬藍種植區容易滋生雜草、藤蔓過度干擾山藍成長時，須適度介入移除，顯示於平地以農作的模式，需要投入整地、挖洞、種植、除草、施肥等相關成本，投入人力需 1700 小時，人事費用約佔總生產成本的 80%。

三峽地區的馬藍利用林下環境進行培育，在自然情況下馬藍的生長收穫量，雖然每公頃的收穫量僅為集約經營的 16.4%，但生產過程較為友善，三峽的採藍業者並不像集約經營者會將馬藍定期全面的收割，而是採取馬藍植株部分的莖葉，作為後續製藍的材料，留存的莖部可以再次生長出葉子，並可抑制雜草的生長，減少除草的成本。將農作式經營與林下經營模式之初期投入、繁殖方式、採收方式、每公頃覆蓋率、產量、田間作業、優勢與劣勢整理為表 26 提供參考。

表 26、經營模式比較表

經營方式	農作式經營	林下經營
初期投入	需投入架設遮蔭網，建構馬藍生育環境	運用林分冠層鬱閉後環境條件
繁殖方式	多採行扦插繁殖	多採行扦插繁殖 同時藉由馬藍行天然下種更新
採收方式	全面收割	採取部分馬藍莖葉
每公頃 覆蓋率	100%	29.5%
產量	每平方公尺植株密度為 33-40 株 每公頃約可收穫 5680 kg	每平方公尺植株密度為 36.4 株 每公頃約可收穫 935 kg
田間作業	需要投入整地、挖洞、種植、除草、施肥等相關成本。	需於林地中進行扦插
優勢	管理採收方便、收穫量高	粗放經營、友善環境
劣勢	投入人事成本高	成本相對較低、產量僅約集約適 經營 16.4%

三峽淺山區氣候與已鬱閉的林分下環境，適合需求低光環境的馬藍生長，藍染從業者充分的利用林分冠層所提供的遮蔭，定期至生育地採集馬藍葉子，並同時施行扦插，充分運用馬藍生長特性與強力分生能力，在採集的同時兼顧新增馬藍植株提供下一次葉子採收。林下環境是馬藍適合生長生育地環境，透過扦插繁殖技術，所經營馬藍的生產作業方式，可大幅的減輕人力經營管理的成本，適合做為未來推廣為林下經濟經營之模式。配合前述完成之適宜環境栽植評估，與計劃期間蒐集的資料，將馬藍植物栽培之適生環境資訊，進行林下經濟物種之經營模式評估，以提供馬藍之種植與管理參考。

第肆章、結論

- 1.本研究區域的馬藍覆蓋率平均約為 29.5%，林分組成為台灣中低海拔常見的闊葉樹林與一部分的柳杉人工林，經過長時間的監測，掌握區域的平均溫度為 20.5°C及相當豐沛的降雨量(3731 mm)，林分冠層鬱閉度約 65.7-90.2%，顯示馬藍的生長區域的基本條件是需要鬱閉(光度<5%)，但要有光透入的林下環境與相當濕潤的環境
- 2.對於馬藍適生的光環境評估，除了使用鬱閉度計進行評估外，可以使用光度計與相對紅光/近紅外光比值輔助更能掌握林下的光環境條件。
- 3.馬藍的株數密度與生產量，在不同的光環境下有不一樣的表現，株數密度是在闊葉樹林分-低光度下有最高的密度，並具有較高的莖葉生產力表現。
- 4.樣區調查結果顯示，本研究區域與馬藍共生的植物共有 38 科 40 屬 42 種，顯示本區與馬藍共生的植被種類相當的豐富，透過降趨對應分析，可歸納出馬藍的生育地環境，會需要樹林底層陽光充足，土壤深厚、肥沃、保水良好，有機質較多處分布範圍涵蓋潮濕林下至森林邊緣。
- 5.馬藍適生的栽培環境，可選擇林分密度較高已經鬱閉的淺山闊葉樹林，並觀察林分地被有無指標植物，包括廣葉鋸齒雙蓋蕨、觀音座蓮、火炭母草、駁骨丹、筆筒樹、生根卷柏、南海鱗毛蕨、樓梯草、柏拉木與山桂花等物種。
- 6.比較扦插苗與種子苗，在冬季的其間生長量低，主要的生長出現在春季。基徑與株高生長量，基徑的生長變化在季節間較幅度小，而在株高生長的變化較大，扦插苗與種子苗相對高生長率增加分別約為 129.8%與 82.9%，觀測期間扦插苗有較高存活率，種子苗的存活率約 44%。
- 7.馬藍靛苷與靛藍含量的可以 280 nm 及 620 nm 作為靛苷及靛藍之偵測訊號。由各時期藍泥中靛藍含量變化，可以初步推論不同季節製作的藍泥的靛藍含量，以春季(4 月)的較高，夏、秋季次之，冬季則較低，此結果與馬藍葉子測得的靛藍含量之變化趨勢相近。
- 8.馬藍的培育方式，建議採行扦插繁殖，以每平方公尺栽植約 33-40 株較為適當。

可收較穩定的馬藍莖葉，利用種子繁殖，可於開花結實後採集種子進行直播，若需要儲藏種子，則需要於氣候較溫暖的月份，進行播種可改善種子的發芽率。

9.本研究區的馬藍生產力，每公頃約可收穫 935 kg 的莖葉鮮重，透過樣區調查資料，配合每年 2 次的採藍評估總收益約可達每公頃 170001.7 元。馬藍全株皆可使用，葉為提煉靛藍素的重要資材，其根為中藥材的南板藍根，青黛也是馬藍莖葉所產製的重要中藥材。台灣目前有許多中藥材是仰賴進口輸入，未來要發展臺灣自己的中藥材產業，本次研究的量化資料，可提供做為未來評估經濟產量的重要基本資訊。

10.三峽淺山區氣候與已鬱閉的林分下環境，適合需求低光環境的馬藍生長，當地藍染從業者充分的利用林分冠層所提供的遮蔭，其採藍的模式與扦插繁殖的方式，適合做為未來推廣為林下經濟經營之模式。建議可以規劃推行林下經濟認證，推廣馬藍的栽植，可以達到友善環境、增加馬藍產量與採集安全性的目的。另外，以往是傳統的製藍透過現地的青礬製作，會產生許多的雜質，在推廣時可以考慮自動化設備導入的配套，與推動藍靛素品質認證，以提升製藍的品質。

第五章、參考文獻

林文雄、林登秋、陳毓禎、紀正良(2002)台灣東北部三種相鄰林分林下光照環境之比較。林業研究季刊 24 (3): 49~58。

江美玲(2018) 藍染傳統工藝的創新經營：以臺灣三義、日本德島兩地為例。國立屏東科技大學客家文化產業研究所，碩士論文，150 頁。

李瑞英(2015)美濃九芎林藍染產業鏈之研究。國立高雄師範大學客家文化研究所，碩士論文，131 頁。

馬芬妹 (2010) 臺灣藍染工藝產業的變遷與新發展。臺灣文獻，61:2，p153-188。

陳美芬，謝正餘(2009)，沖繩藍染的工藝產業發展與經營。商水學報，2，123-131。

陳建志、劉倩君、黃文盈、林傳福、詹雅玲、顏雅玟(2010)馬藍化學成分之研究。長庚科技學刊，149-156。

陳子英、洪宗泰、陳建忠、邱宗儀、謝光普、楊勝任、宋梧魁、魯丁慧 2010 綠島植群之多變量分析。國家公園學報。20(1):53-67。

陳世雄(2005)本土中草藥選種育種及 GAP 栽培研究。中醫藥年報，23 (7)，257-278。

蔡承豪 (2012) 嘉義地區藍靛業的發展與變遷(18世紀初~1920年代)。臺灣文獻，63:3，p151-199.

楊志維、簡禎佑、林佩瑩、林孟輝 (2011) 播種量及栽植株距對水稻桃園 3 號農藝性狀與產量之影響。桃園區農業改良場研究彙報 70：1-12。

蘇鴻傑。1987。森林生育地因數及其定量評估。中華林學季刊 20(1):1-14。

林務局花蓮林區管理處(2020)「林下作物-山藍栽培試驗」委託研究計畫成果報告書。

農委會藥用植物主題館網站，

<https://kmweb.coa.gov.tw/subject/subject.php?id=37232>

國立臺灣工藝研究中心，https://www.ntcri.gov.tw/dnatypelist_196_12.html (visited website at 20200531)

臺灣文化創意產業學會，

<http://www.meworks.net/meworksv2a/meworks/page1.aspx?no=36144>(visited
website at 20200531)

日本農林水產省，

https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/tokusan_nousaku/index.html

Danalatos, N.G., S.V. Archontoulis, and I. Mitsios. (2007) Potential growth and biomass productivity of *Miscanthus X giganteus* as affected by plant density and N-fertilization in central Greece. *Biomass Bioenergy* 31:145-152.

Maugard, T., E. Enaud, A. de la Sayette, P. Choisy, and M. D. Legoy (2002) Beta-glucosidase-catalyzed hydrolysis of indican from leaves of *Polygonum tinctorium*. *Biotechnol. Prog.* 18(5):1104-1108.

Warzecha, H., A. Frank, M. Peer, E. M. J. Gillam, F. P. Guengerich, and M. Unger (2007) Formation of the indigo precursor indican in genetically engineered tobacco plants and cell cultures. *Plant Biotechnol. J.* 5(1):185-191.

期初報告審查意見與回覆

審查意見	回覆
許原瑞委員	
1.馬藍具耐蔭特性，可作林下栽植，推廣為林下經濟栽植及經營模式時，應遵守不影響林木生長，不干擾林地，不施化學肥料，不施農藥等原則。	1. 遵照委員意見辦理。
2.植被調查時建議同時記錄生育地坡度、坡向及地表沖蝕是否發生，上木(林緣、柳杉、闊葉林)冠型及冠長等資料瞭解上木對日照的主要遮蔽成因。	2. 感謝委員建議，本研究會同時對生育地坡度、坡向及地表沖蝕的觀測紀錄，並調查上木冠型及冠長等資料。
3.圖 9 中(一)、(4)葉片(藍泥)收穫估算及靛苷含量分析共 2 次，分別於 3 月及 9 月，次二次時間此樣分析的依據是什麼?是否與一般馬藍葉片收穫利用季節相符。(Page 12:每季收穫估算)	3. 感謝委員建議，圖 9 中之馬藍藍泥收穫估算及靛苷含量分析，主要是將每季採取的馬藍製作成藍泥後，每 2 季的藍泥於 3 月及 9 月進行分析，馬藍採收葉子的季節與靛苷含量間的相關性，是為本研究的重點之一，期望透過科學分析瞭解最是馬藍的生長收穫時間。
4.建議計畫執行開始及結束時對各調查樣區之上木進行生長監測，以瞭解林下栽植馬藍對主林木生長之影響。(可於鄰近地區設置對照組樣區→即未栽植或擾動之森林)。	4. 謝謝委員指教，依所提建議參考辦理。

期中報告審查意見與回覆

審查意見	回覆
劉永豐委員	
<p>1. 三峽的地理環境資源，相當適宜馬藍的生長，因此蘊育染料產業與文化，在化學染料被發明後，傳統染產業逐漸沒落，但近年來發現化學染色對於環境會產生嚴重的污染，因此世界各國開始重視對於環境較為友善的天然染，在聯合國教科文組織也積極地推廣，台灣有相當良好藍染生產品質與文化歷史，是可以好好的發展。目前台灣的藍染多以體驗式經濟發展，在馬藍的生產量需求有一定的限制，但在藥用的部分，馬藍的靛玉紅素是板藍根的原料，對於是新冠一號中重要的成分，另外製藍過程中的青黛也是中藥重要的藥材，但最近中藥材進口的限制，是可以好好透過馬藍發展台灣本土藥材的時機。</p>	<p>1. 感謝委員提供寶貴資訊。</p>
蔡佳彬委員	
<p>1.本研究的面向相當多，也都達成既定的目標，予以肯定。</p> <p>2.研究報告中，第9頁不同試驗條件樣區選取及經營方式，在種子發芽的部分就結果的呈現沒有休眠性且立即發芽，可以在經營模式中評估直播的經營可行性。</p> <p>3.上木樹種的資料，建議胸徑、株數密度，以了解林份狀況。</p> <p>4.林分環境的科學描述對於一般農民較不易瞭解，建議可以什麼樹種，幾年生的方式表示，對於未來的推廣也較容易對林農說明。</p> <p>5.生長調查，馬藍的苗木更新與死亡快速，請團隊於文本中補充說明如何追蹤？</p>	<p>1. 感謝委員給予肯定</p> <p>2. 遵照委員意見辦理，將補充於期末報告中。</p> <p>3. 遵照委員意見辦理。</p> <p>4. 遵照委員意見辦理，將補充於期末報告中。</p> <p>5. 遵照委員意見辦理，將補充於期末報告中。</p>

<p>6.請補充說明第 22 頁的資料是哪一次調查的結果。</p> <p>7.為何會植物的含水率會大於 100%?請於文本中說明含水率的計算基準。</p> <p>8.請團隊補充製藍過程中從靛苷到靛藍的步驟。</p>	<p>6. 相關資料於期末報告中已更新為 2021 年 9 月調查之資料。</p> <p>7. 本研究為考量一般馬藍製藍使用乾量基準含水率進行計算，因此會大於 100%，於期末時會同時計算乾量與濕量基準含水率。</p> <p>8. 遵照委員意見辦理，將補充於期末報告中。</p>
<p>劉景國委員</p>	
<p>1.研究中植群調查結果，與馬藍共生的植物大多為低海拔潮濕植物，可提供做為相當不錯的指標植物參考，在第 53 頁表 22 有些植物為中海拔，建議以低海拔表示即可。</p> <p>2.建議可請現地的耆老，瞭解以前馬藍栽植的方式，作為研究與未來推廣相關的參考資料。</p> <p>3.建議可以比較本區域與其他區域馬藍成分的差異。</p> <p>4.馬藍的植株年齡可能與靛藍含量有關，可以思考兩者的關係。</p>	<p>1. 謝謝委員指教，依所提建議參考辦理。</p> <p>2. 遵照委員意見辦理，與耆老請教之栽植方式將補充於期末報告中提供參考。</p> <p>3. 本研究以三峽地區馬藍生長與栽培環境為主，不同區域成分分析需要更進一步分析，建議可由後續相關研究計畫進行。</p> <p>4. 謝謝委員指教，本年度計畫先以完成建立靛苷及靛藍含量基本分析技術，爾後可提供後續相關研究使用。</p>
<p>林純徵委員</p>	
<p>1.建議在研究報告中補充馬藍工藝性與藥性相關資料。</p> <p>2.請團隊幫忙在期末時呈現馬藍培育的過程、採藍時間與季節管理相關資訊。</p> <p>3.請團隊思考如何將資料轉化為推廣資料，簡要的說明適合的林分類型、指標植物、環境資料等。</p> <p>4.請團隊嘗試瞭解馬藍的環境承載量。</p>	<p>1. 謝謝委員指教，依所提建議於期末報告中新增相關資料。</p> <p>2. 遵照委員意見辦理，會於期末報告中呈現。</p> <p>3. 謝謝委員指教，依所提建議於期末報告中整理相關資料。</p> <p>3. 謝謝委員建議，透過株數密度方式呈現馬藍承載量。</p>
<p>謝立忻技正</p>	
<p>1.花蓮林區管理處與嘉義大學，在先前</p>	<p>1. 遵照委員意見辦理，會於期末報告</p>

<p>已經馬藍栽培的研究案，以具有一些基礎資料及成果，建議可參考其相關研究資料，與本研究三峽地區的資料進行比較。</p>	<p>中呈現。</p>
<p>吳學平召集人</p>	
<p>1.馬藍作為林下經濟作物，研究簡報中有呈現初步的經濟收益部分，請問馬藍一年可以採收幾次，建議可在加入經濟評估的因子中。</p> <p>2.請在期末報告中補充摘要的部分。</p> <p>3.第 53 頁的小結請在排版上要有層次，較容易閱讀。</p> <p>4.建議可就目前測定靛苷與靛藍的過程，探討影響因子與利用冷鏈技術的時間。</p> <p>5.本期中報告審查通過。</p>	<p>1. 謝謝委員建議，會於期末報告中呈現。</p> <p>2. 謝謝委員建議，會於期末報告中補充。</p> <p>3. 謝謝委員建議，會於期末報告中修正。</p> <p>4. 謝謝委員建議，會於期末報告中嘗試探討。</p> <p>5. 謝謝委員</p>

期末報告審查意見與回覆

審查意見	回覆
蔡佳彬委員	
<p>1.本研究的資料相當豐富，也進行了適當分析與成果呈現，文本中有幾個部分的錯漏字，請團隊修正，另外第 25、27 與 29 頁，統計分析的敘述，建議修正語意，使文本較容易閱讀。</p> <p>2.種子苗與扦插苗的比較，因為 2 種苗木的性質不同，請團隊思考比較的基準。</p> <p>3.第 54 頁顯示靛藍的濃度在 4 月時最高，建議未來推廣，可以從本次研究的科學數據，做為經營管理馬藍的參考資料。</p> <p>4.第 69 頁中扦插苗的培育栽植，建議可以補充扦插苗的發根時間資訊。</p> <p>5.文本中的統計資料，建議可以補充蒐集的時間點。</p>	<p>1.感謝委員給予肯定，遵照委員意見修正。</p> <p>2.遵照委員意見辦理，本研究為瞭解扦插苗與種子苗 2 種不同苗木在同時期的馬藍生物量變化，因此透過 2020 年 11 月同一時間進行扦插與播種的苗木，針對其生長速率進行比較，相關文字說明將補充於期末報告中。</p> <p>3.遵照委員意見辦理。</p> <p>4.本次研究因為一部分在現地進行扦插，而移地栽培之成活率相當高，因此未特別紀錄發根時間，委員提供寶貴建議，可提供做為未來栽培時觀察紀錄項目參考。</p> <p>5.遵照委員意見辦理，會補充於報告中。</p>
劉永豐委員	
<p>1.馬藍的採收時間，一般一年有 2 次，通常在開花季節會在 11 月開始，開花會使靛藍的色素降低，所以會在開花前有一次的採集。另外一次的採集，會在 4-6 月的區間，主要會與馬藍生育地的溫度變化有關，在比較低溫的地方，開花的時間會早一點，因此隔年也就可以在 4 月的時候進行採集，而較溫暖的地方因為開花時間相對較晚，就會使稍微延遲採集馬藍的時間。</p>	<p>1.感謝委員提供寶貴建議，會將開花與採集時間資訊補充於報告中。</p>

<p>2.馬藍採集的管理，是影響產量的關鍵，一般我自己會觀察馬藍分布的密集程度，在比較密集的地方，在大植株下方也會有許多的小植株，所以可以適當對較大的馬藍植株進行疏葉，可以促進小苗的生長；密度較低的地方，在採集藍葉後可以進行扦插，補充馬藍的株數與生產量。另外，生育地上若有比較大型的蕨類遮擋馬藍小苗時，可以適當的修剪蕨類的葉子，減少馬藍小苗生長受到遮蔽，而影響後續莖葉的生長。</p> <p>3.有關於清冠一號中的北板藍根，其實臺灣的南板藍根在一些研究顯示其的功能是相似的，目前由中國醫藥大學在測試兩者的異同。馬藍是重要的中藥材，目前有許多是仰賴進口輸入，未來要發展臺灣自己的中藥材產業，本次研究的量化資料，是未來評估經濟產量很重要的基本資訊。</p> <p>4.青黛也是相當重要的中藥材，現在三峽地區的採藍主要以採集野生的為主，採集時進入山區還是會有一些危險，建議可以透過林下經濟的模式，推廣馬藍的栽植，可以達到友善環境、增加馬藍產量與採集安全性的目的。另外，以往是傳統的製藍透過現地的青礬製作，會產生許多的雜質，在推廣時可以考慮自動化設備導入的配套，以提升製藍的品質。</p> <p>5.馬藍透過種子栽培也是一個途徑，種子的處理可以再進一步篩選，可以提高種子的發芽率。</p>	<p>2.感謝委員提供寶貴建議，會將現地經營管理方式補充於報告中。</p> <p>3.感謝委員提供寶貴建議，國產中藥對於馬藍的推廣，也是相當重要的誘因之一，會補充於報告中。</p> <p>4.感謝委員提供林下經濟馬藍栽植的經驗，會補充於報告中。</p> <p>5.感謝委員提供寶貴資訊，本研究種子以發芽試驗試驗進行，種子的選汰可以增加發芽率，相關建議會補充於報告中。</p>
--	---

劉景國委員	
<p>1.本研究的樣區調查林分主要以柳杉造林地與周圍的次生闊葉林為主，可以從成果資料明確看到豐富的資料，指標植物可以提供未來推廣時，編寫手冊的參考資訊。</p> <p>2.建議可瞭解花蓮林區管理處的馬藍計畫中，生育地上木是哪些種類。</p> <p>3.文本中有提到「國寶級」的生物種類，建議團隊考量適當性。</p>	<p>1. 感謝委員提供寶貴建議，本計畫相關資料爾後可做為後續推廣之手冊參考資訊。</p> <p>2. 有關花蓮栽植馬藍試驗林分的上木，有一般闊葉樹次生林、平地造林的無患子與陰香。</p> <p>3. 遵照委員意見修正。</p>
林純徵委員	
<p>1.建議團隊可以期末報告劉永豐委員提供現場經驗的相關資訊，寫入報告中。</p> <p>2.團隊本研究中許多的資訊，未來可以提供推廣時製作圖卡，描述栽培環境、面積、設施的重要參考資料。</p>	<p>1. 遵照委員意見辦理，會將劉委員寶貴經驗寫入報告中。</p> <p>2. 感謝委員提供寶貴建議，本計畫相關資料爾後可做為後續推廣圖卡之參考資訊。</p>
吳學平召集人	
<p>1.馬藍作為林下經濟作物，除了葉子部分的經濟收益，建議團隊也可以嘗試蒐集相關資料，評估馬藍其他部位的產值，提供做為未來推廣的參考資訊。</p> <p>2.請團隊依期末審查建議修正文本，並適當加入委員提供之相關資訊。</p> <p>3.本期末報告審查通過。</p>	<p>1. 謝謝委員建議，於期末報告後蒐集馬藍其他部位相關產品資訊，所使用之植物部位與製程相較於提煉藍靛素複雜，難以估計，為避免呈現錯誤資訊，建議可以再另案針對經濟效益深入研究。</p> <p>2. 遵照委員建議辦理，適當加入委員提供相關資訊於期末報告。</p> <p>3. 謝謝委員</p>