

出國報告（出國類別：進修）

農委會農業菁英培訓-氣候變遷對於 植群分布之衝擊

服務機關：林務局農林航空測量所

姓名職稱：徐新武技士

派赴國家：美國

出國期間：106年9月1日至110年8月31日

報告日期：110年11月12日

目次	
摘要.....	2
壹、目的.....	3
貳、過程.....	4
一、修習課程及重要時間.....	4
二、研究成果.....	4
參、心得與建議.....	19
一、進修方面心得與建議.....	19
二、研究方面心得與建議.....	20

摘要

氣候變遷所造成的影響已毋庸置疑，不僅對植物個體的生存產生影響，亦對植群的分布產生了衝擊，在這當中首當其衝且特別容易受害者為高緯度及中高海拔地區，臺灣地處海島，其所受之衝擊更加敏銳，然而此種氣候變遷對於生態系會造成的可能影響仍存在著許多不確定性，因此聯合國政府間氣候變遷特別委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 要求各國應評估其國內各生物相在氣候變遷狀況下所可能產生之變動與衝擊，並提出可能的解決方案，以維護全球生物相之完整。目前許多植物已經開始遷移他們的地理分布範圍，以因應持續不斷的氣候變遷，然而氣溫影響物種分布範圍亦受其他因素限制，許多植群分布模式的研究指出，氣候變遷對林木生殖的影響是決定樹種分布的主要限制，更有許多學者指出，物種分布模式必須整合其傳播及遷移的過程方能精確預測未來植群分布的範圍，然而高溫引起的生殖失敗常常被植群分布模式所忽略，因為此種資料難以獲得且隨不同物種而有差異，尤其是壽命較長且須數十年才達生殖成熟期的林木，當林木達成熟期，其巨大的個體使得控制溫度對生殖失敗影響的試驗難以進行，本研究利用溫度對花粉活力的影響替代此可行性不高的試驗，進行溫度對生殖失敗影響之試驗，並利用種子發芽試驗了解氣候變遷情境下對苗木更新之影響，本研究之目標在於：一、建立溫度對生殖成功率及苗木更新率的反應曲線；二、利用前項生殖成功率及苗木更新率加上林木成熟年齡及種子傳播距離等因子，建立物種遷移模式，期望本研究可增進物種分布模式之精確率，並提供其他研究所需之氣候變遷情境下生殖生物學之資料，更進一步提供精確資料予政府制定政策所需，並用以調整氣候變遷調適策略。

壹、目的

全球氣候變遷對植物分布之影響為眾所皆知之問題，且已成為重要之生物保育議題，雖說物種對於氣候變遷有個別之反應，但卻很少模式能準確預測物種的分布，植物生態學家均同意氣候對於植物分布之影響非常的巨大，尤以特定之溫度及水分狀況為最，並針對此議題發表一些不同生態尺度之研究報告，進而發展出一些生物地理學模式(Biogeographic model)，主要可分下列幾種：一、利用相關性的方法(Correlative approach)；二、以過程為基礎的方法(Process-based approach)；三、混合以上 2 種方法，但卻少有模式可精確預測物種之分布。若要提高生物地理學模式的準確性可由下列兩條件來達成，首要為以種為單位來進行模式之推估，因單一物種可獨立顯示出對氣候改變之反應，再者為利用上述第二種以過程為基礎之模式，因為此模式可模擬植物對生物及非生物因子之反應，利用植物生理及生殖機制與氣候環境之參數來建構模式，本研究即利用此方式來建構物種遷移速度之模式，以四種北美洲常見的針葉樹種 Engelmann spruce (*Picea engelmannii*), Lodgepole pine (*Pinus contorta*), Ponderosa pine (*Pinus ponderosa*), Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii*)為材料，期望能透過研究，提供模擬樹種在氣候變遷情境下遷移所需之資訊，並建立物種遷移模式，更精確來說主要有下列三項目標：

- 一、以花粉活力試驗作為林木生殖成功之指標，建立目標樹種生殖成功機率的溫度反應曲線。
- 二、以種子發芽試驗作為林木拓殖至新領域之指標，建立目標樹種更新機率的溫度反應曲線。
- 三、以前述兩項指標，再加上林木成熟年齡及種子傳播距離等考量，發展物種遷移模式。

貳、過程

進修之過程，將依下列二項來描述：一、修習課程及重要時間點；二、研究成果。

一、修習課程及重要時間點

- (一) 於 106 年 9 月至 110 年 8 月 4 年期間共計修習 141 學分，包括植物系統模式、植物生理生態學、研究問題分析、氣候變遷脆弱度分析、植物繁殖、原生植物生產、生態氣候學、生態模擬、植群生態學、獨立研究、博士論文研究等。
- (二) 於 107 年 9 月 10 至 13 日通過博士班資格考筆試(Qualifying Written Exam)，並於 9 月 18 日通過資格考口試(Qualifying Oral Exam)。
- (三) 108 年 10 月 14 日通過博士候選人資格考。

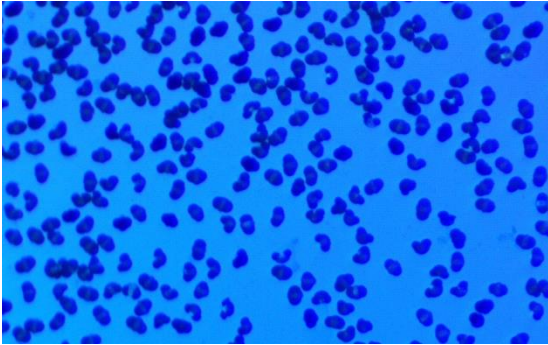
二、研究成果

- (一) 四種針葉樹花粉於不同溫度下之發芽試驗。
由於時間不足，未能完成花粉發芽試驗之發芽率計算、花粉管長度測量及其資料分析，在此僅呈現不同樹種之花粉於不同溫度下發芽之照片。

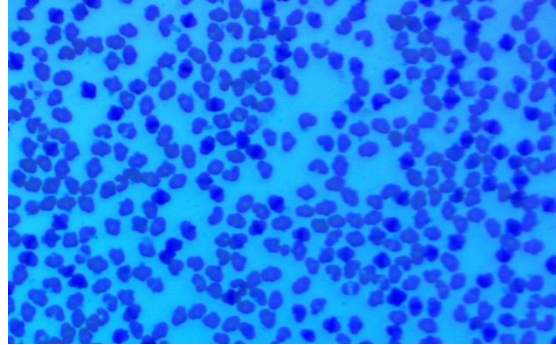
1. Lodgepole pine (*Pinus contorta*)

圖 1 中照片可見，Lodgepole pine 在 5°C 下無任何花粉發芽，10°C 可見非常少一部分花粉發芽，且花粉管非常的短，15°C 時花粉發芽的比例增加了，但花粉管仍短，20°C 至 30°C 時，花粉發芽之比例相當的高且花粉管的長度也很長，至 35°C 時，發芽的比例降低許多，但花粉管似乎仍有相當的長度，最後至 40°C 時，仍有非常少比例的花粉發芽，花粉管非常的短，雖無實際發芽率及花粉管長度資料，但仍可預期花粉發芽之溫度反應曲線為一鐘形分布，其最適發芽溫度為 20 至 30°C 之間。

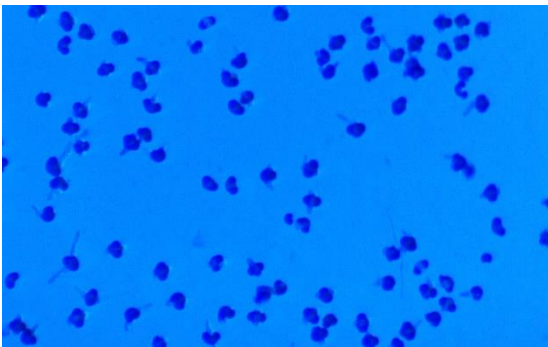
(a) 5°C



(b) 10°C



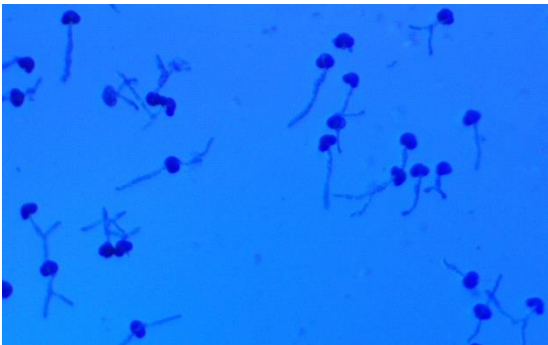
(c) 15°C



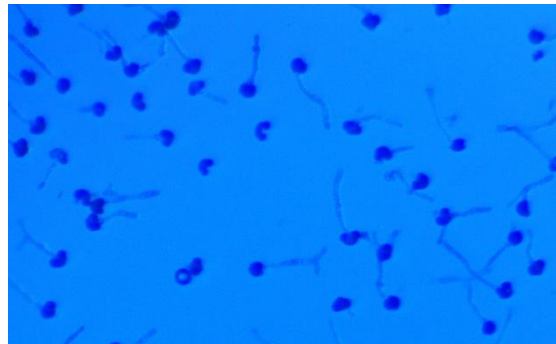
(d) 20°C



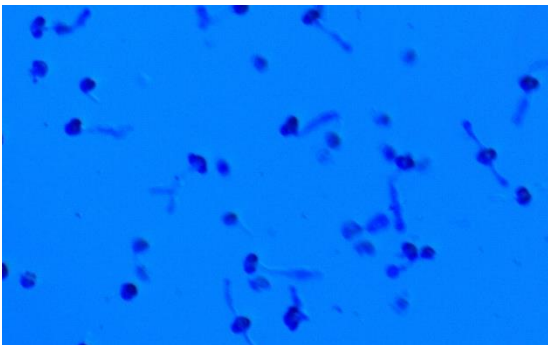
(e) 25°C



(f) 30°C



(g) 35°C



(h) 40°C

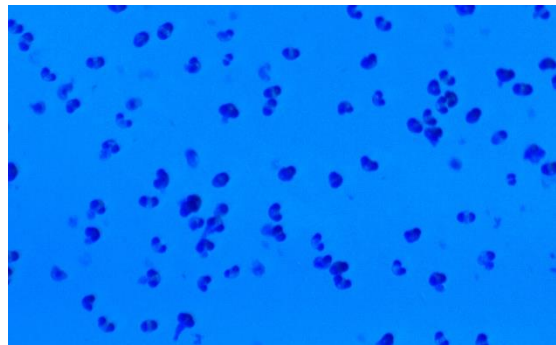
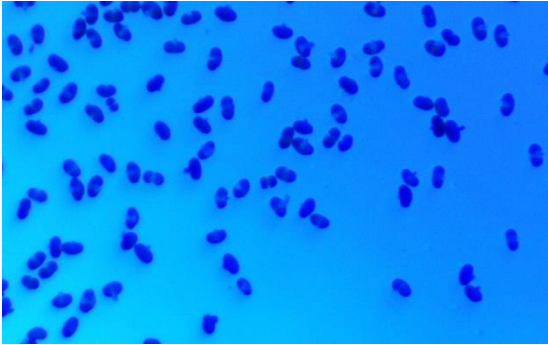


圖 1 Lodgepole pine (*Pinus contorta*)花粉於 5 至 40°C 之發芽狀況

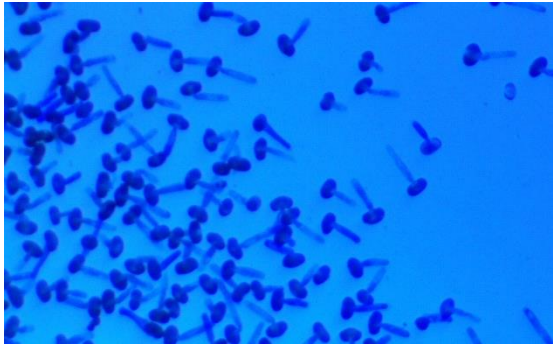
2. Engelmann spruce (*Picea engelmannii*)

圖 2 中照片可見，Engelmann spruce 在 5°C 下即可見非常少一部分花粉發芽，10°C 時花粉發芽之比例即相當的高，且花粉管亦達一定之長度，15°C 至 25°C 時，花粉發芽之比例仍相當高，但比例似乎較 10°C 時少，惟花粉管的長度較 10°C 時長，30 至 35°C 時，發芽的比例降至非常的低，花粉管非常的短，最後至 40°C 時，幾乎無花粉發芽，雖無實際發芽率及花粉管長度資料，但仍可預期花粉發芽之溫度反應曲線亦為一鐘形分布，其最適發芽溫度為 10 至 20°C 之間，相較於 Lodgepole pine，其最適溫度較低。

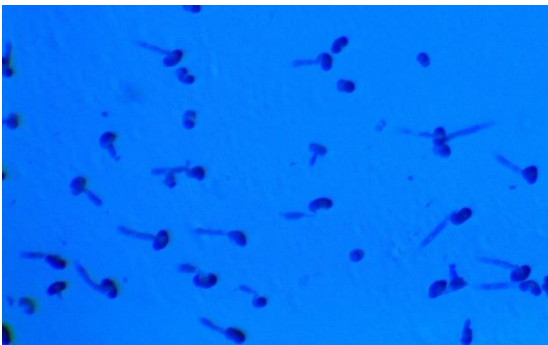
(a) 5°C



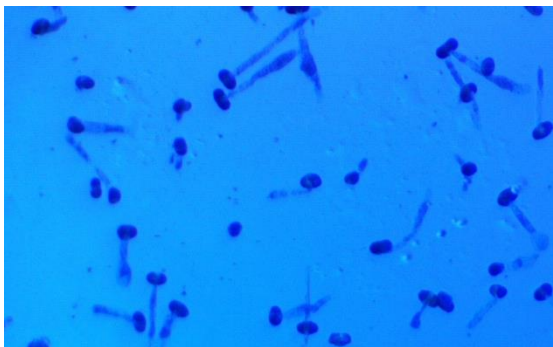
(b) 10°C



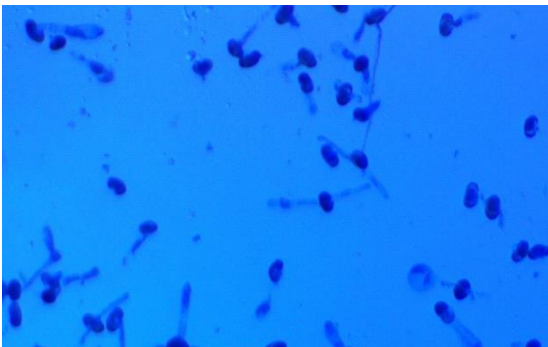
(c) 15°C



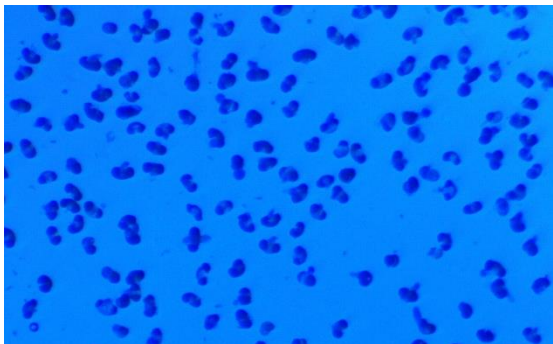
(d) 20°C



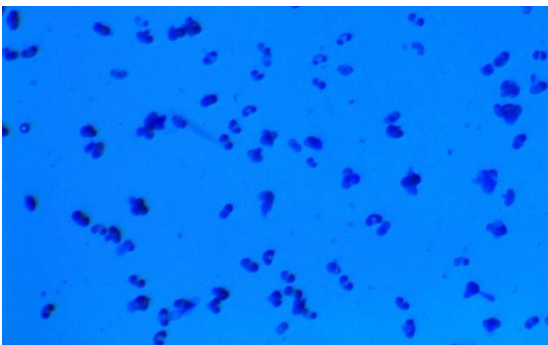
(e) 25°C



(f) 30°C



(g) 35°C



(h) 40°C

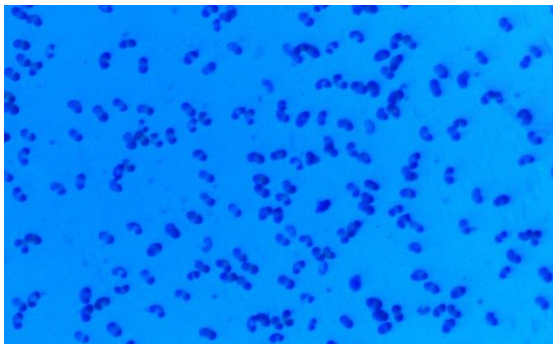
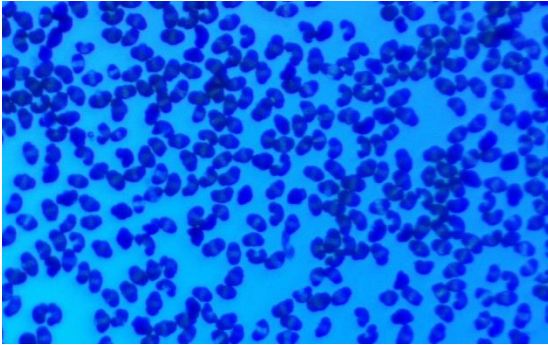


圖 2 Engelmann spruce (*Picea engelmannii*)花粉於 5 至 40°C 之發芽狀況

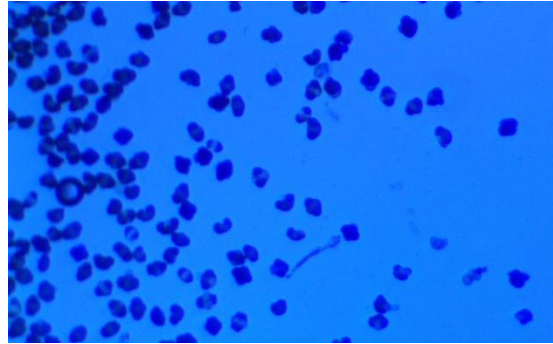
3. Ponderosa pine (*Pinus ponderosa*)

圖 3 中照片可見，Ponderosa pine 在 5°C 至 10°C 下無任何花粉發芽，可見非常少一部分花粉發芽，且花粉管非常的短，15°C 至 25°C 時花粉發芽的比例均相似，但花粉管仍短，30°C 至 35°C 時，花粉發芽之比例相當的高且花粉管的長度也很長，最後至 40°C 時，仍有一定比例的花粉發芽，雖無實際發芽率及花粉管長度資料，但仍可預期花粉發芽之溫度反應曲線為一鐘形分布，其最適發芽溫度為 30 至 35°C 之間，相較於 Lodgepole pine 和 Engelmann spruce，其最適溫度屬較高。

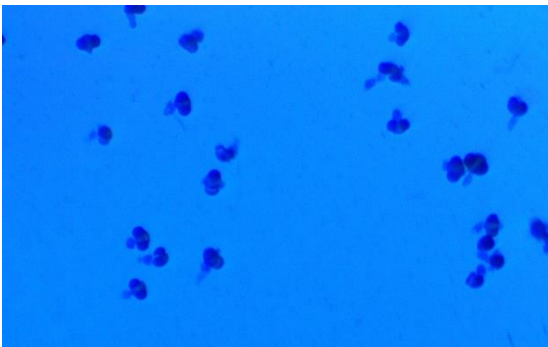
(a) 5°C



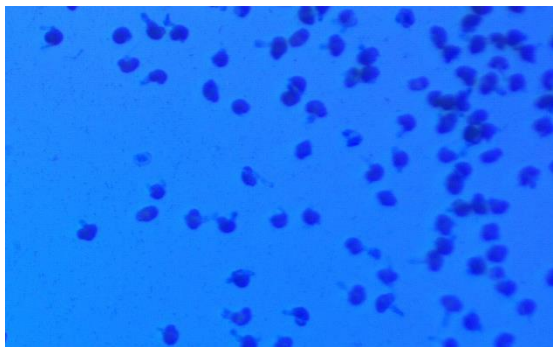
(b) 10°C



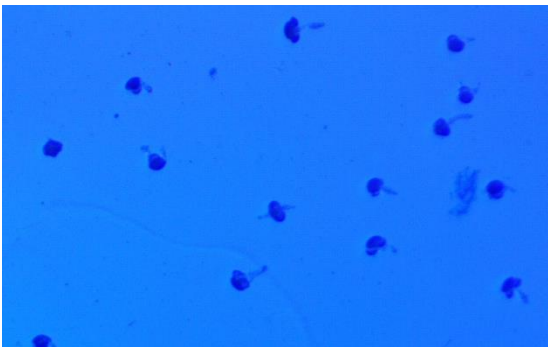
(c) 15°C



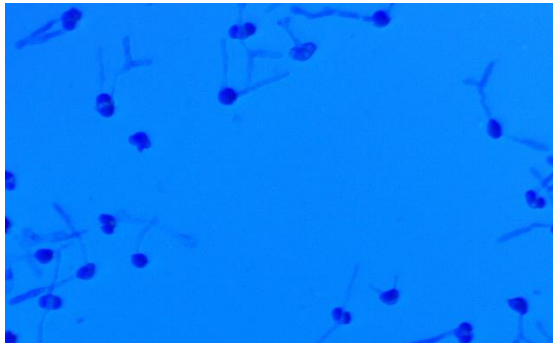
(d) 20°C



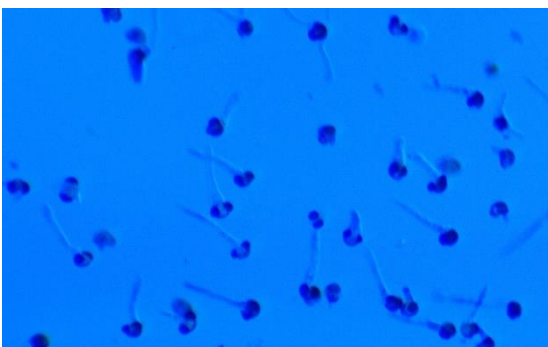
(e) 25°C



(f) 30°C



(g) 35°C



(h) 40°C

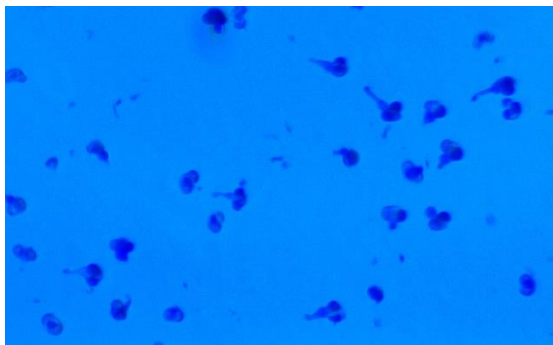
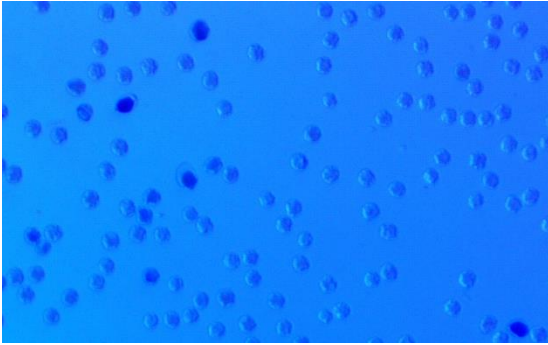


圖 3 *Ponderosa pine (Pinus ponderosa)* 花粉於 5 至 40°C 之發芽狀況

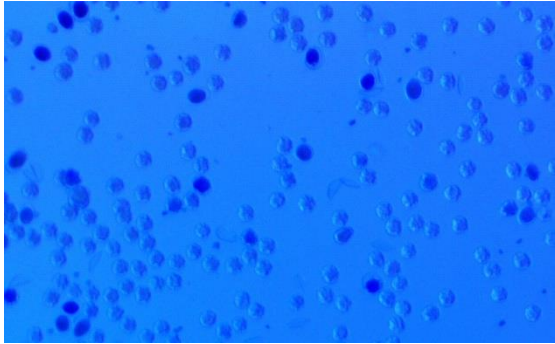
4. Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii*)

Douglas-fir 的花粉與其他三者非常的不同，不管是花粉形狀或是發芽行為都非常的不同，Douglas-fir 的花粉管需要 4 至 5 週才會出現，故在實驗期間不會看到花粉管，所以必須以其他的標準來判斷是否發芽，根據其他研究，可依花粉膨脹的長度是否大於 2 倍花粉原本的直徑做為是否發芽的標準，圖 4 中照片可見，Douglas-fir 花粉在 5°C 和 10°C 下幾乎沒有花粉膨脹，15°C 時花粉膨脹的比例增加了，但膨脹的長度似乎未達 2 倍花粉原本直徑，20°C 至 35°C 大部分的花粉都膨脹，且長度大於 2 倍花粉原本直徑，至 40°C 時，花粉膨脹的比例減少了，膨脹的長度似乎亦較短，雖無實際發芽率及膨脹長度資料，但仍可預期花粉發芽之溫度反應曲線為一鐘形分布，其最適發芽溫度為 20 至 35°C 之間，相較於其他樹種，其最適溫度範圍較為寬廣。

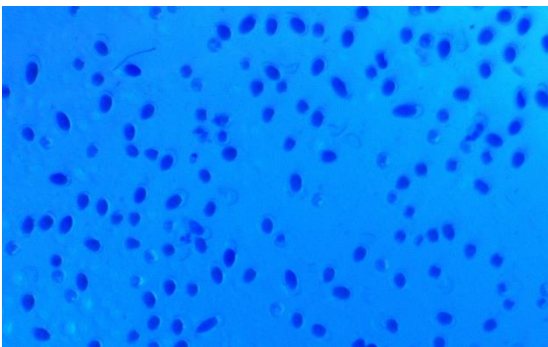
(a) 5°C



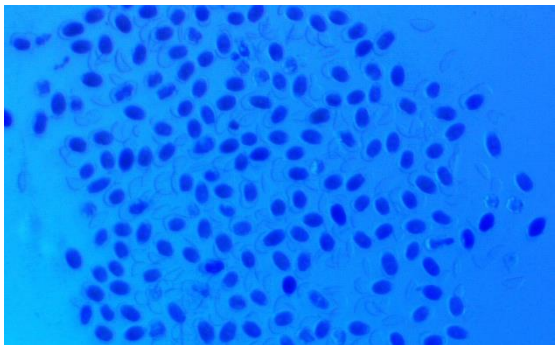
(b) 10°C



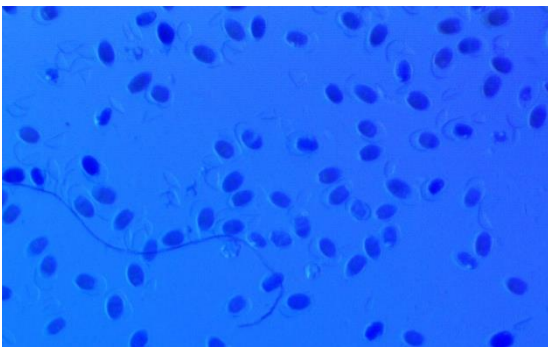
(c) 15°C



(d) 20°C



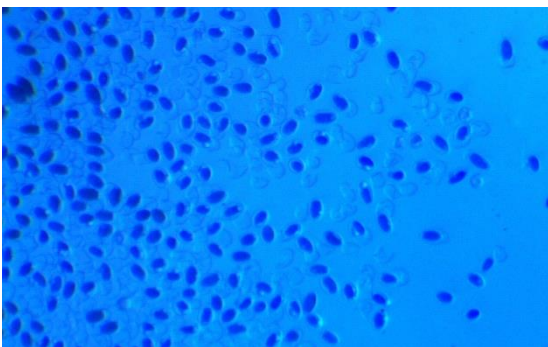
(e) 25°C



(f) 30°C



(g) 35°C



(h) 40°C

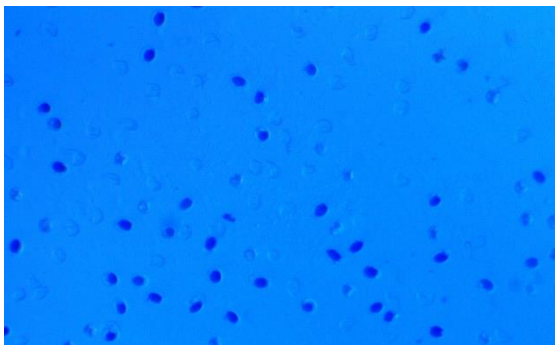


圖 4 Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii*)花粉於 5 至 40°C 之發芽狀況

(二) 四種針葉樹種子於不同溫度下之發芽試驗。

1. Lodgepole pine (*Pinus contorta*)

圖 5 顯示 Lodgepole pine 種子發芽的最適溫度介於 20°C 至 25°C 之間，當發芽溫度從最適溫度向高溫或低溫的方向移動時，往低溫方向移動時，種子發芽率下降的速度較往高溫方向移動時為快；在最適溫度及極度高溫或低溫時，不同海拔來源之種子其發芽率沒有統計學上的顯著性，不同海拔來源種子之發芽率的顯著差異僅發生在溫度偏離最適溫度但是在溫度上下極限的範圍內。

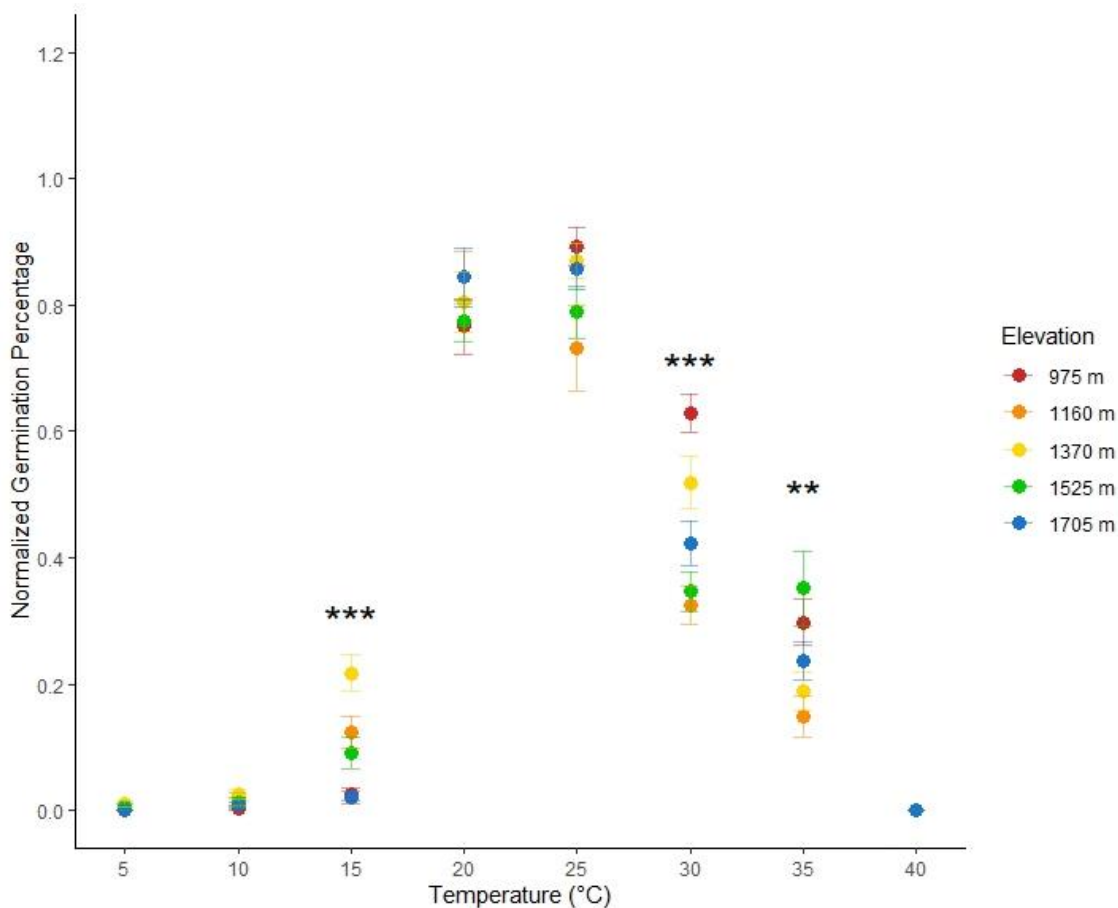


圖 5 不同海拔 Lodgepole pine (*Pinus contorta*)種子於 5 至 40°C 之發芽率

2. Engelmann spruce (*Picea engelmannii*)

圖 6 顯示 Engelmann spruce 種子發芽的最適溫度亦介於 20°C 至 25°C 之間，當溫度從最適溫度上升至 30°C 或下降至 15°C 時，發芽率下降不多，但是當溫度接近上下極限時，發芽率下降非常的多；在 25°C 和 40°C 時，不同海拔來源之種子其發芽率沒有統計學上的顯著性，Lodgepole pine 和 Engelmann spruce 結果的主要差異在於不同海拔來源之 Engelmann spruce 種子發芽率在最低溫時有顯著差異，其原因為最低海拔之 Engelmann spruce 種子其發芽率在 5°C 時略高於其他海拔。

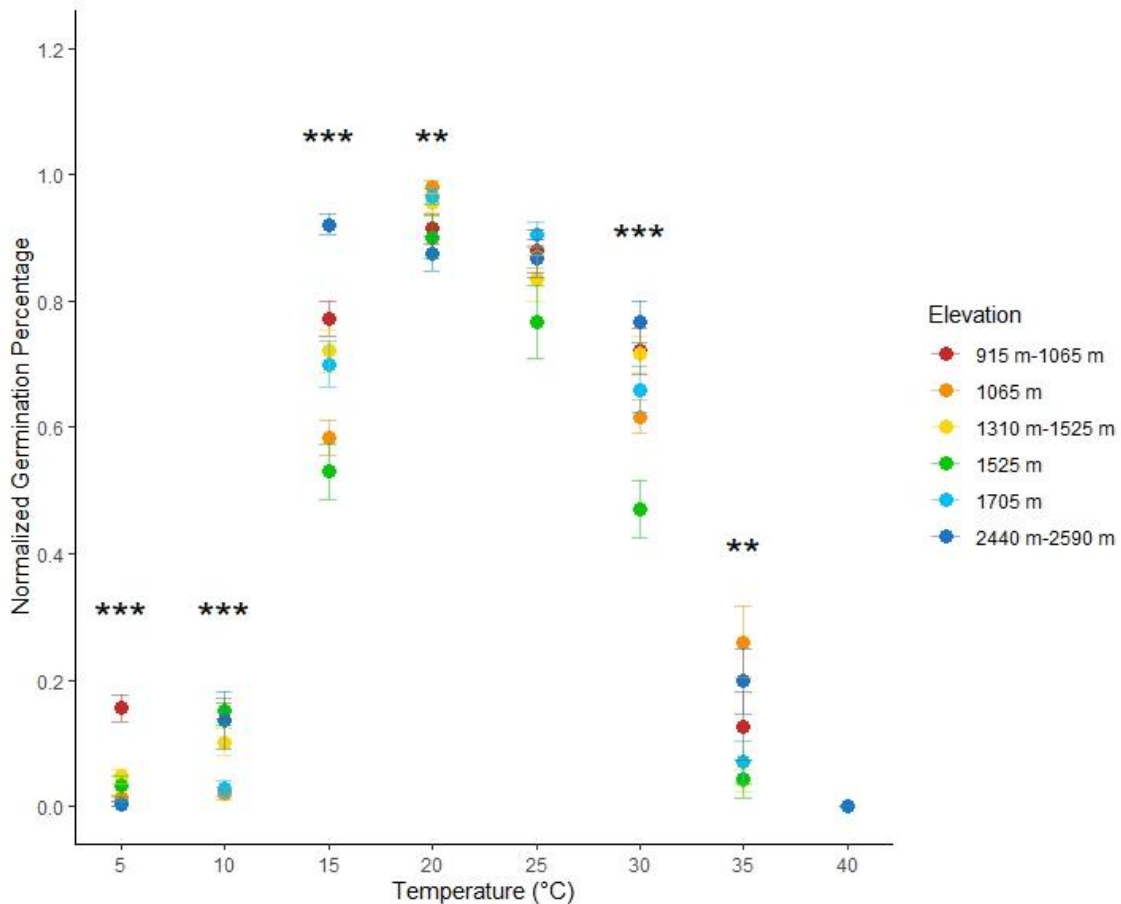


圖 6 不同海拔 Engelmann spruce (*Picea engelmannii*)種子於 5 至 40°C 之發芽率

3. Ponderosa pine (*Pinus ponderosa*)

圖 7 顯示 Engelmann spruce 種子發芽的最適溫度介於 20°C 至 30°C 之間，在 20°C、35°C 和 40°C 時，不同海拔來源之種子其發芽率沒有統計學上的顯著性，不同海拔來源之 Ponderosa pine 種子發芽率在最 5°C 至 15°C 時有顯著差異，其原因為最高海拔之 Ponderosa pine 種子其發芽率在這三個溫度時略高於其他海拔。相較於其他樹種 Ponderosa pine 有較為寬廣的最適溫度，但是最適溫度的總體發芽率較其他物種為低。

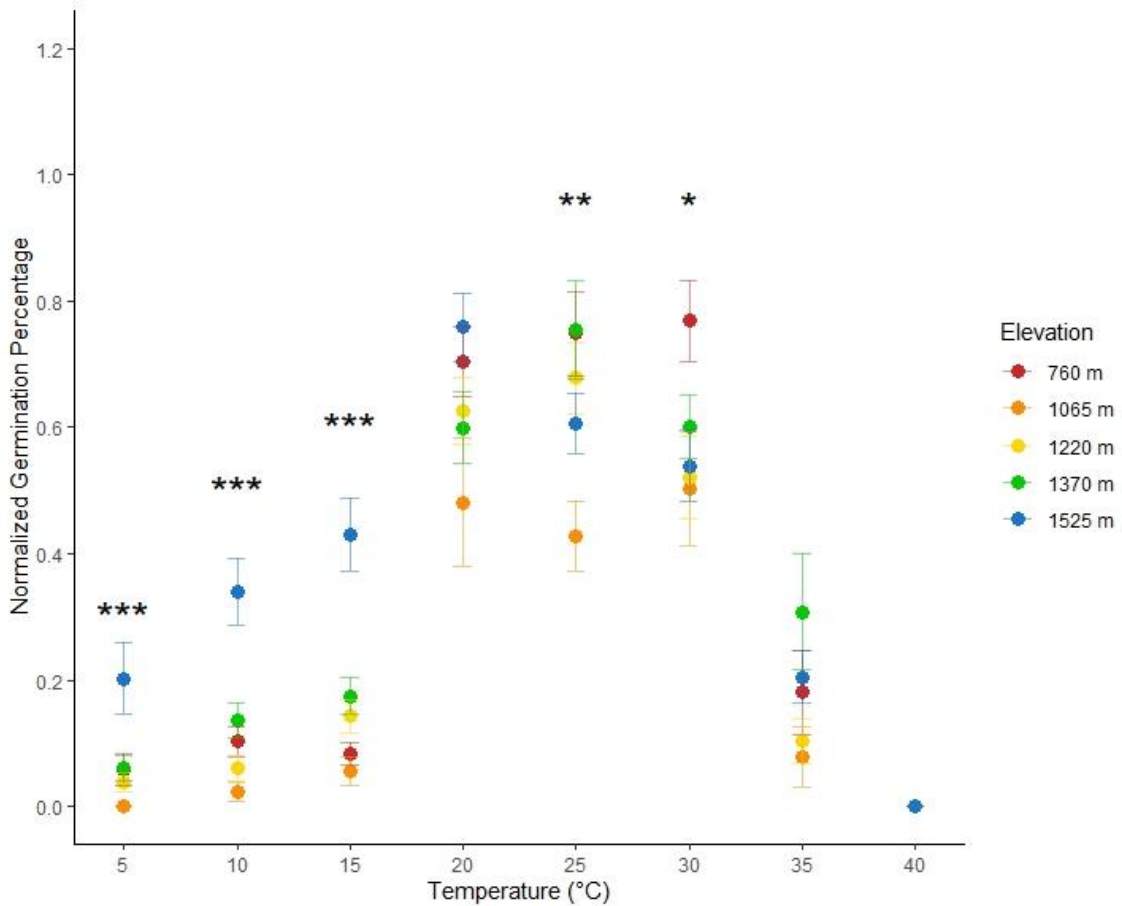


圖 7 不同海拔 Ponderosa pine (*Pinus ponderosa*)種子於 5 至 40°C 之發芽率

4. Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii*)

圖 8 顯示 Douglas-fir 種子發芽的最適溫度為 25°C，當溫度高於 20°C 時，不同海拔來源之種子其發芽率沒有統計學上的顯著性，除了 25°C 有些微的顯著性外。

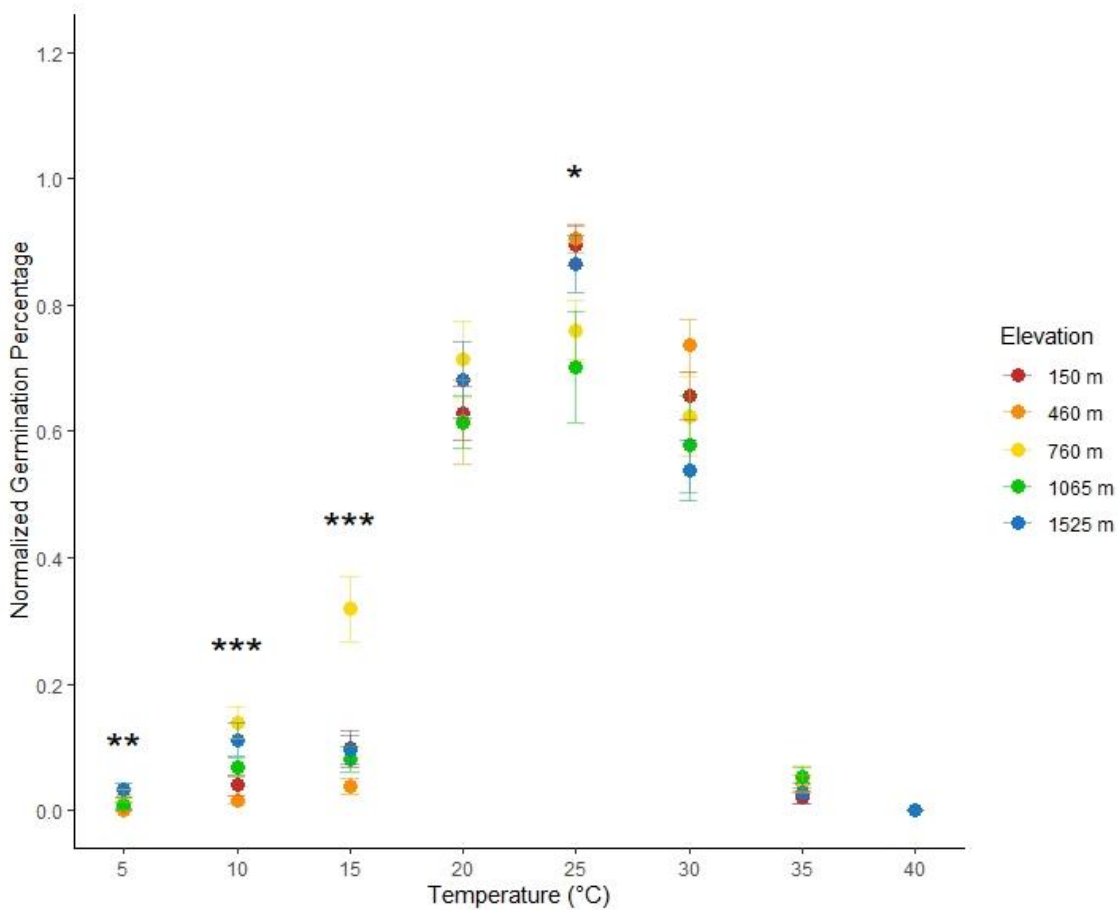


圖 8 不同海拔 Douglas-fir (*Pseudotsugamenziesii*)種子於 5 至 40°C 之發芽率

由前述結果看來，可歸納下列二項結論，首先，各樹種種子發芽的溫度反應曲線不盡相同，可能與其原生地範圍及其氣候有關，例如：若屬於高海拔之樹種，較低的發芽溫度是可以預期的，反之低海拔樹種亦然；其次，同一樹種不同海拔的種子，其最適發芽溫度相似，但當溫度趨向於其最高及最低極限時，不同海拔之相同樹種種子呈現顯著不同之發芽率，主要原因可能與其生態可塑性(phenotypic plasticity)有關。

(三) 物種遷移模式

本研究擬以前述兩項溫度反應曲線，再加上林木成熟年齡及種子傳播距離等考量，發展物種遷移模式，然亦因時間不足未能完成，但仍完成概念模式之建立(圖 9)，本模式為一動態模式，透過時間和空間來描述狀態變數(state variables)為某一過程的函數，通常為一變化率(rates)，所以這個函數包含了狀態變數和變化率，變化率會造成狀態變數增加或減少，而狀態變數控制變化率的幅度；物種遷移模式牽涉到植物的生活史長短、種子品質、種子生產和傳播距離，因此在這個模式中，物種遷移速度為狀態變數，其定義為在特定時間內(例如，年)遷移的距離(例如，公里)，其單位為公里/年，而植物的生活史長短、種子品質、種子生產和傳播距離等因子在本模式中則被簡化為生殖失敗、種子發芽率、苗木更新率、林木成熟年齡及種子傳播距離等過程，這些過程在模式中皆為造成物種遷移速度改變的變化率，且都受到溫度變化的影響，而溫度的變化則隨不同的氣候變遷情境而有所不同，前述二項溫度反應曲線可引進此模式中，並帶動物種遷移速度的改變，至於林木成熟年齡及種子傳播距離則透過文獻收集獲得，本模式亦可透過 Monte Carlo Simulation 來探討模式的敏感性(sensitivity)和氣候變遷下之不確定性(uncertainty)；另外，氣候變遷的速度(velocity)可由不同氣候變遷模擬中獲得，並與物種遷移速度比較即可知此物種是否來得及隨氣候變遷移動，進而評估在氣候變遷下其是否屬易受害物種。

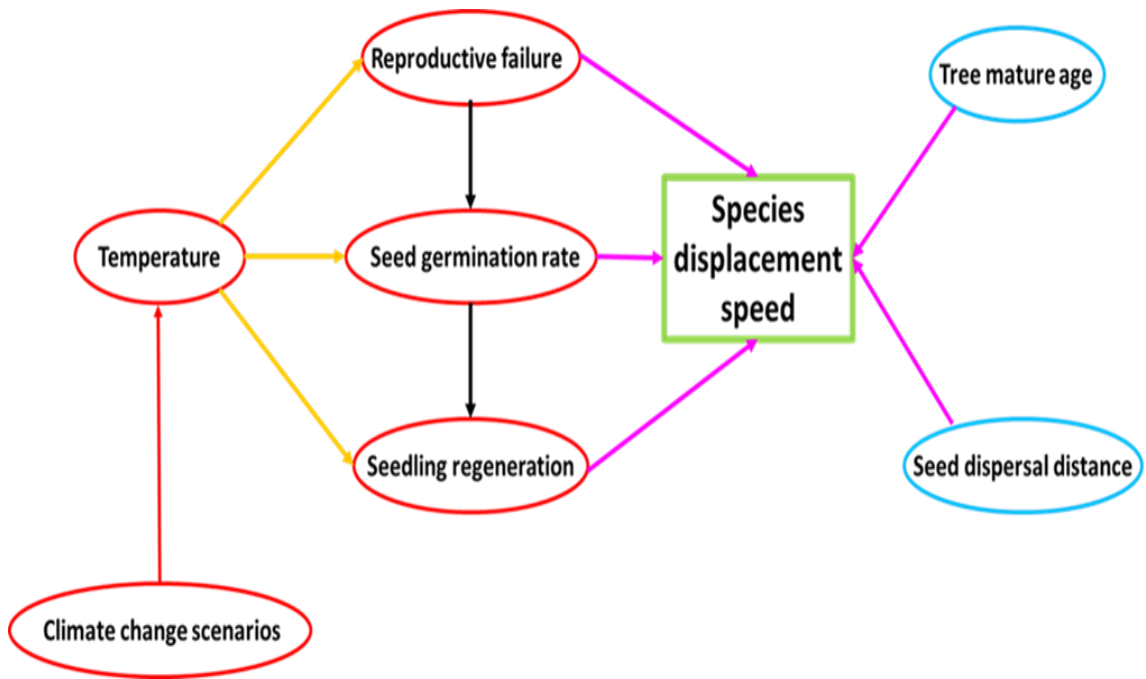


圖 9 物種遷移之概念模式

參、心得與建議

一、進修方面心得與建議

(一) 進修期間

博士班的前二年基本上就是一邊修課，一邊構思研究計畫的執行，第三年開始才真正進行研究，雖公務人員訓練進修法中規定，進修期間最長為四年，但四年完成博士班實屬不容易，尤以自然科學更難以掌握，試驗研究對象均跟隨自然的律動，特定的現象僅發生在特定的時間點，且每年僅一次，實非我們想加速進行研究就可以縮短時間，若再遇到非我們所可以掌控的突發狀況，情形更是雪上加霜，例如這二年的 COVID-19 全球大流行，對我的進修與研究有著莫大的衝擊，原本四年的計畫已經不容易達成，經此次的突發事件，許多實驗皆無法如期完成，更遑論撰寫論文，因此未來如仍有意選送優秀同仁出國進修博士班，四年上限是值得思考的問題，要不然不僅浪費國家培訓人才的美意，亦浪費大家的時間，不僅未能為國舉才，反而損失人才。

(二) 補助相關

國家選送優修人才出國進修之相關補助皆有法律規定，對此我無任何意見，但是相關補助金額之訂定是否有定期檢視，並隨通貨膨脹逐年調整？我不知道其他留學國家如何，若以我所在的留學國家美國來說，現行之補助金額，實屬不足，對此我亦無太大意見，畢竟相關法條均條列在案，我亦同意以此條件出國，但是我不能理解的是，當申請人獲得國外大學認可，並獲頒獎學金時，為何政府可以告知申請人僅能於國外獎學金及政府獎學金二擇一，有何法條如此規定？況且若我選擇國外獎學金，未來當我返國盡義務時，所需服義務的時間一天也不會少，政府獎學金已不足，而申請人憑自己的努力獲得獎學金以貼補不足，反而是種懲罰，此種情形值得相關單位思考。

二、研究方面心得與建議

(一) 研究對象應以物種為單位

從前述花粉及種子發芽資料看來，不同樹種的發芽行為有相當大的差異，其差異甚至存在於相同樹種但是不同海拔來源的花粉或種子間，因此，未來針對氣候變遷對物種分布影響之研究應以物種為單位，更精確之模擬甚至需要考量海拔之分布，但以物種為單位進行模擬之前仍須了解其分布環境，此樹種多為純林，或混淆林?若為混淆林，其混淆之比例為何?混淆之樹種為何?進而考量彼此之競爭行為，並帶入模式當中，以增加模式的準確性。

(二) 應用機器學習(Machine learning)於研究中

本研究有很大一部分是在進行生殖生物學的研究，包括花粉及種子的發芽試驗，而此種試驗的特質就是大量的樣本數量，大量的樣本需要一段時間內每天的觀察並拍照，再加上不同溫度下的處理，累積了成千上萬的照片及數據資料，需要大量的人工來判讀與分析，此時若可引進機器學習的技術，發展出自動化判讀發芽之種子及花粉，可節省大量的人力，並將研究方法帶向另一個應用層次。

(三) 將開花物候學引入模式中

許多植群分布模式的研究指出，氣候變遷對林木生殖的影響是決定樹種分布的主要限制，更有許多學者指出，物種分布模式必須整合其傳播及遷移的過程方能精確預測未來植群分布的範圍，然而高溫引起的生殖失敗常常被植群分布模式所忽略，因為此種資料難以獲得且隨不同物種而有差異，尤其是壽命較長且須數十年才達生殖成熟期的林木，當林木達成熟期，其巨大的個體使得控制溫度對生殖失敗影響的試驗難以進行，本研究利用溫度對花粉活力的影響替代此可行性不高的試驗，進行溫度對生殖失敗影響之試驗，並利用種子發芽試驗了解氣候變遷情境下對苗木更新之影響，以增進物種分布模式的準確性，然而另有研究指出，開花物候學對於物種分布有決定性的影響，其原因為氣候暖化可使開花物候混亂，進而導致其開花時間與潛在的授粉者(如蜜蜂)孵化時間不同步，若無授粉者，即使有開花，但其果實及種子的

品質及數量勢必受影響，進而影響種子的傳播及物種的遷移，另開花時序混亂亦代表著該物種將暴露在不同於以往的氣候條件下，導致其生長及生殖受到影響，此部分已包含在本研究中，因此若能了解開花物候學的變動，更將增加本模式之準確性，但是本研究樹種的開花物候資料闕如，缺少開花物候資料帶給我們的啟示就是累積此種資料是迫切需要的，我們應該開始並持續累積開花物候的資料，未來若可獲得此種資料，將其帶入本模式中是可行的。