

# 假設情境及其在氣候變遷上之應用

圖、文：馮豐隆 / 中興大學森林系教授

假設情境係指對未來世界可能狀況的合理且一致的描述，假設情境的發展、建立、使用，於本文中皆予說明，更以森林生物生態系為考慮對象，討論氣候變遷對森林林型及碳吸存的影響，並以氣象及社會經濟為基線在各種不同假設情境下的影響變化。

## 一、假設情境 (Scenarios)

假設情境係指未來世界可能狀況的合理且一致的描述 (Carter et al., 1994)，或 Webster 詞典所稱“未來發展的藍圖”。

假設情境與預測 (forecast) 之不同在於前者討論的是合理的未來狀況，後者則討論最可能的未來狀況。合理的未來是假設情境理想的部分，其伴隨著未來發展的範圍，而此兩者皆具內部一致的現象 (internal consistency)。而假設情境與推測 (projection) 之不同，則在於前者係討論一組相關變數的合理未來狀況，而推測一般是目前趨勢的簡單外推。一般針對單一變數而言，推估是內部一致。

## 二、假設情境的發展

沒有任何假設情境會變成真，這並不是說任何假設情境都不好，而是該假設情境需要具有對所知限制不相衝突的可能性，與目前期望一致的合理性，假設情境亦具有預測明顯未來的功效。然而，合理的發展是吾人所認為一定範圍內的變化，一個好的假設情境應與吾人目前的認知一致，即認為未來會像

過去和現在一樣的趨勢，但未來其質與量，往往又不能與目前一樣。所以，假設情境的發展須全面的掌握，瞭解歷史的趨勢，符合國際間相互比較與創意。其實，真實世界並不一定具備這些假設情境。因為有許多不同的組織創造了不少地區性、全球性的假設情境，所以一般可由文獻取得使用。

許多國家發展，如農業、工業發展計畫與建設計畫等，皆須事先設定國家層級的假設情境來幫忙國家決策者，發展可能適應的方案與長期策略，以達更好境界。

假設情境可以用來做衝擊評估與適應性評估 (impact and adaptation assessment)。假設在某一人口成長率與經濟發展速率下，亦有以農業生產、林地消失來設定其假設情境，以了解森林及土地利用部門對大氣CO<sub>2</sub> 吸存釋放的衝擊。在森林部門裡土地利用、水資源利用、林木的需求、大氣的組成與分解、自然保育政策與經濟、技術組織的改變，皆是適應性、容納量的重要考量。

## 三、假設情境的建立

假設情境一般是基於專家判釋、趨勢外推、國際比較和模式的操作。過去歷史的發展是對未來發展的好導引，然而應用時，需要避免簡單的外推。宜了解觀測現象的趨勢，面對過去發展的形態是適當外推所必需的。

模式在假設情境的發展中相當重要，如樹種組成、林分結構、林分生長、森林演替、

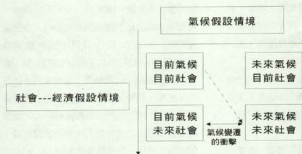


圖1：氣候與社會經濟的假設情境的現況未來影響情形 (Richard, 1998)

人口結構、人口成長、價格改變、經濟結構。模式無法產生完整假設情境，然假設情境需要模式才可以填具其內的細部資料，如人口模式可以配合其他模式所提供死亡率和生產力，更而獲得年齡分布。此模式包括描述狀況、功能與變遷，馬可夫過程（黃志成，1998；馮豐隆，2002）、半馬可夫過程（馮豐隆，2002）、孔隙模式（Feng & Lee, 2000）與細胞自動化（李宜德、馮豐隆，2001）。

#### 四、假設情境的使用

社會—經濟假設情境係用來提供當氣候變遷時，對內容衝擊的推算，亦即衝擊分析（impact analysis），一般由一部門或一個系統（如農業、林業、產業、健康）的現況開始，其次再針對氣候干擾和對該部門，或系統的衝擊（如較多收穫，更多霍亂的病例）。IPCC以社會經濟假設情境使用於氣候影響時，來考慮其現況及未來，則關係如（圖1）。

針對氣候變遷的衝擊研究，如何去發展假設情境的社會經濟參數，使假設情境與衝擊分

析結合一起，是非常重要的。其實，De Jouvenal (1967) 即利用假設情境進行模擬。森林生物與生態系會隨時間而有所變化，這些變化有時來自於社會—經濟（Socio-economic）因子、自然氣候變遷，有時來自酸雨的非氣候

變數的人為干擾，而一般較能掌握其變化趨勢者，大體是以(1)氣象基線；(2)社會—經濟基線來預測。

#### 五、氣象基線 (Climatological baseline)

所謂氣象假設情境，即氣象狀況的假設情境。如年平均溫度、七月最高溫、一月最低溫、年雨量、夏季雨量、冬季雨量的增減。

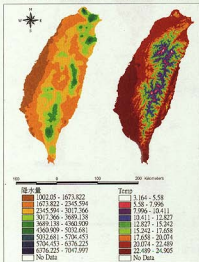
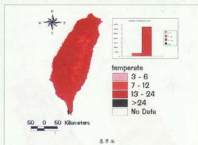


圖2：台灣年平均降雨量與年平均溫度分布情形

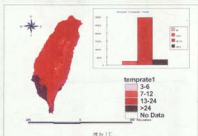
氣象的稀少極端事件如暴風雨、乾旱，對森林生態系影響相當大，一般人很難去使用短期的氣象資料來做精確的量化推估，所以此項頻率次數的記錄是愈長愈好。

現舉\*馮豐隆、高堅泰（2001）應用Holdridge生態區模式於台灣CO<sub>2</sub>濃度之加倍的假設情境下，蒸發散量、溫度變化的情形為例，來加以說明之。

假設情境評估CO<sub>2</sub>模式濃度增加、溫度亦隨之增加，由張隆男（1998）提出我國長期氣候分析與氣候變遷模擬中，台灣地區溫度上升趨勢為1.19℃/100Yr.，所以我們便模擬當溫度增加1℃時，台灣生態區之變化情形，而在「氣候變遷對水資源影響評估與適應策



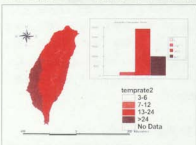
基準面



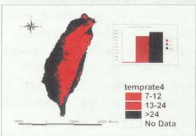
增加1℃

略研擬（童慶斌，1998）」一文提到，目前一般預測大氣CO<sub>2</sub>濃度增加為兩倍時，全球溫度約將上升1.5至4.5℃，我們便假設CO<sub>2</sub>濃度增加1倍時，溫度亦隨之增加2℃或4℃時，依Holdridge原則，台灣林型、生態區劃分之區域、種類、位置與面積會如何變化？而在降雨量方面，因自然變化週期振幅較大，較難斷定台灣各區之變化趨勢，但就整體而言，無明顯之變化。現謹就溫度增加1℃、2℃、4℃時台灣的植生分布情形，加以說明。

高堅泰、馮豐隆（2001）利用40m x 40m網格DEM、26個氣象站、818個雨量站資料，以趨勢面法、克立金法等點推面之空間推估方法，配合1km x 1km網格圖，推估全台灣每

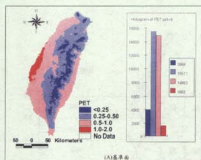


假設當CO<sub>2</sub>濃度增加1倍時，增加2℃

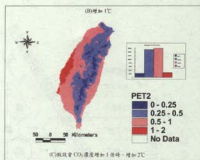


假設當CO<sub>2</sub>濃度增加為2倍時，增加4℃

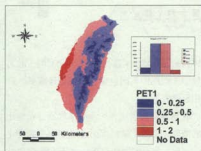
圖3：台灣地區平均溫增加1℃、2℃、4℃時，依區分原則繪製之溫度分布圖（馮豐隆、高堅泰，2001）



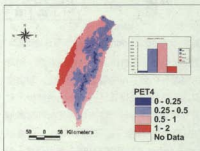
(A)基準面



(C)假設當CO<sub>2</sub>濃度增加1倍時，增加2°C



(B)增加1°C



(D)假設當CO<sub>2</sub>濃度增加為2倍時，增加4°C

圖4：台灣地區平均溫度的基準面(A)與增加1(B)、2°C(C)、4°C(D)時，潛在土壤水分蒸發散損失總量比例值分布圖

1km 網格單元之年平均溫度、年平均降雨量分布圖（如圖2）。過程中以Holdridge模式，將年平均溫度區分成24°C以上、12~24°C、6~12°C、3~6°C、1.5~3°C等5區，則整個台灣年平均溫度分布情形與溫度增加1°C、2°C、4°C時台灣的年平均溫度分布圖，如（圖3）。

至於Holdridge分類的另一準則，潛在的土壤水分蒸發散損失總量比例（PET ratio）為蒸發散量（PET）／年平均降水量，而蒸發散量與生物溫度比例關係為58.93，這樣在溫度增加1°C、2°C、4°C時，其依0.15、0.25、

0.50、1.00、2.00、4.00、8.00、16.00、32.00加以區分，則其整個台灣PET ratio分布情形，如（圖4）。

若利用Holdridge生態區分類模式（圖5），以台灣地區過去30年之氣象、雨量、溫度資料加以區等構成台灣地區Holdridge生態區分類地圖（圖6），與3種假設情境（溫度增加1°C、2°C、4°C），構成之台灣Holdridge生態區的種類、面積及各生態區分佈圖如（圖7）相比較，其生態區網格數與面積分布情形如表1所示。由（表1）吾人可知以過去台灣30-40年來的平均溫度、雨量與濕度來推算之生育

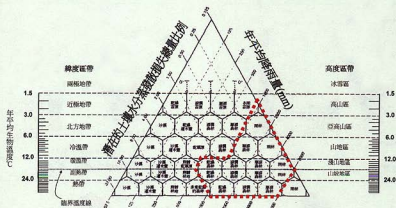


圖5：台灣地區之Holdridge理論生態區分類範圍圖

地因子分佈，配合Holdridge原則區劃，則其生態區有10類，而熱帶濕潤森林區、熱帶潮濕森林與熱帶乾燥森林區所佔比例較少，但當溫度增加後，這三區所佔的比例則逐漸增加，而北方地帶（亞高山）雨林、冷溫帶（山區）雨林、冷溫帶（山區）潮濕森林、副熱帶雨林、副熱帶乾燥森林，這五區所佔的

比例則逐漸減少，當溫度增加至4°C時，北方地帶（亞高山）雨林與副熱帶乾燥森林，則相形消失！

在各種假設情境下，台灣生態區分布變化的情形，可由（圖7）看出其生態區分類變化的情形。當溫度增加4°C時，副熱帶乾燥森林與北方地帶（亞高山）雨林則完全消失。

Holdridge 生態區	基準面積	比例	溫度升高 1°C面積	比例	溫度升高 2°C面積	比例	溫度升高 4°C面積	比例
北方地帶 (亞高山)雨林	5500	0.1528%	3000	0.0834%	500	0.0139%	0	0.0000%
冷溫帶 (山區)雨林	218300	60.656%	152500	4.2373%	96900	2.6924%	26300	0.7308%
冷溫帶(山區) 潮濕雨林	82800	2.3006%	102500	2.8480%	82800	2.3006%	32500	0.9030%
副熱帶雨林	174600	4.8514%	109300	3.0370%	85300	2.3701%	49300	1.3698%
副熱帶乾燥 雨林	160000	4.4457%	206900	5.7488%	22900	0.6363%	0	0.0000%
副熱帶潮濕 雨林	1463488	40.6639%	1440188	40.0165%	1395388	38.7717%	1166000	32.3980%
副熱帶濕潤 雨林	1367600	37.9996%	1216400	33.7984%	927500	25.7711%	420000	11.6699%
熱帶乾燥雨林	300	0.0083%	10200	0.2834%	25200	7.0020%	403000	11.1976%
熱帶潮濕雨林	4800	0.1334%	9900	0.2751%	34800	0.9660%	170700	4.7430%
熱帶濕潤雨林	121600	3.3787%	348100	9.6722%	700900	19.4749%	1331188	36.9878%
合計	3598988	100.0000%	3598988	100.0000%	3598988	100.0000%	3598988	100.0000%

表1：當溫度增加1°C、2°C、3°C時，Holdridge之生態區類別網際數、面積分布情形表

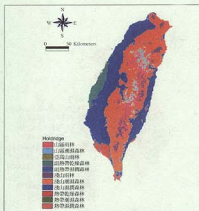


圖6：台灣地區之Holdridge生態分類圖

往後，宜考慮以工業革命前(1857年)之 $\text{CO}_2$ 濃度至2000年 $\text{CO}_2$ 濃度的年增加率，來估計 $\text{CO}_2$ 濃度達1857年的2倍時氣候會怎麼變動。工業革命前1857年， $\text{CO}_2$ 濃度為280 ppm，2000年時為355 ppm，以目前之 $\text{CO}_2$ 年增加率來估計，至2020年時， $\text{CO}_2$ 之濃度將達1857年時的2倍(560 ppm)。

美國國家大氣研究中心(NCAR)的全球氣候系統模式(Climate System Model, CSM)，包括大氣圈、海洋圈、生物圈、冰雪圈及岩石圈等五大氣候系統，當給定適當的邊界條件時，即可構成模擬系統的大氣環流模式(CCM3)、海洋環境模式、地表植被模式、海冰模式。

NCAR使用其氣候系統模式(CSM)做過許多種氣候情境之模擬，僅舉下列幾個與本研究計畫有相關之氣候情境模擬個案為例，詳細之說明請參考NCAR氣候系統模式(CSM)之網站，其站名為<http://www.cgd.ucar.edu/csm/experiments/>：

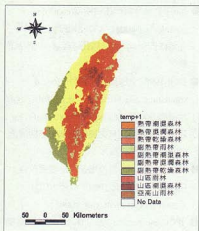
- 300年之現今氣候控制模擬(control integration, case b003)： $\text{CO}_2$ 濃度設定為現今之值(355 ppm)，且整個模擬過程中維持不變。
- 1870-1998之歷史事件模擬(historical simulation, case b018.15)：使用1870年之海水溫度及當時之 $\text{CO}_2$ 濃度(280 ppm)為起始點，隨後逐年之模擬則依實際觀測之 $\text{CO}_2$ 濃度值來更新。
- 130年之1%  $\text{CO}_2$ 濃度增量全球變遷模擬(自355 ppm起，即1990年代起， $\text{CO}_2$  warming experiment, case b006)。
- IPCC Business-as-Usual (BAU)的氣候情境模擬(21st century simulations run, case s020)。

## 六、社會—經濟 (Socio-economic)

### 1、範疇

社會經濟假設情境是指人口的狀況、多寡和經濟的假設情境，包括一個國家的人口、年齡、健康、性別、價值觀、態度、宗教、教育、居住的地方、生活的方式。也包括生產毛額、收入分配、經濟部門的相對重要性、進口、出口、失業人口、儲蓄、土地使用、水資源使用等等。

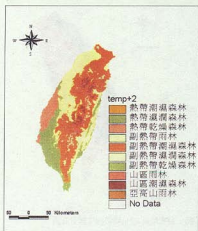
社會經濟也包括技術、立法、文化、決策過程等，其實也包括環境改變所導致的社會經濟改變、土地使用改變、土地惡質化、優質化、自然保護等。決策須考慮社會經濟變數，而這些變數須對改變反應敏感，且得知改變時該變數變化的速度，除由衝擊和適應研究外，與專家腦力激發，文獻回饋皆是決定社經變數的重要方法。然重要的是該變數在



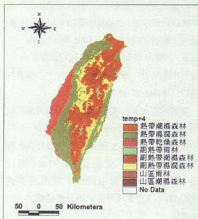
(A)溫度增加1°C的假設情境時  
改變時能所考慮的系統部門須具敏感性 (sensitivity) 和適應性 (adaptability)。

## 2、基線 (baseline)

社經基線包括目前內容、不同林型的位  
置、有關文獻地覆圖 (land cover map)，一  
般這些圖是最適當的資訊。因為植生圖  
(vegetation maps)，一般是表示潛在的植生  
狀況 (亦即假設沒有人類干擾發生時的植生  
分布狀況)，而不是實際的植生 (actual vege-  
tation)，若沒有地覆圖時，則高解析度衛星  
影像及航空照片，是建立地覆圖最值得信賴  
的方法。沒經過驗證而基於區域或國家層級  
的專家所判釋的地覆統計，通常不值得信  
任。全球、地區的地覆資料收集一直在進  
行，可提供此方面的資料來源，如IGBP-  
DIS、以1km x 1km土地覆蓋圖製作為計畫重  
點 (Townshend, 1992) 和歐盟TREES計畫  
(JRC, 1996)。除了林型圖外，林地土壤圖



(B) 溫度增加2°C的假設情境時



(C)溫度增加4°C的假設情境時

圖7：溫度增加1°C、2°C、4°C的假設情境時，  
台灣Holdridge生態區的種類、面積及各生態  
區分布圖

(尤其深度和組織) 或森林所在的地形狀況，  
皆是解說森林分布、預測森林未來可能發生  
狀況的重要資訊。



除了氣象和土地利用外，大氣 $\text{CO}_2$ 增加的效應與工業都市的空氣污染，對森林皆會有影響。當 $\text{CO}_2$ 濃度增加，則森林增加光合作用和有效率的水利用（一般2倍 $\text{CO}_2$ 濃度會增加30%的光合作用），若養分充分的話，則會增加森林生長量（Wang and Polglase, 1995）。

因為假定全球大氣都是混合均勻，任何全球監測站資料，皆可與由IPCC表裡 $\text{CO}_2$ 增加的假設情境一樣地使用。

燃燒化石燃料和由肥料中氮（N）的揮發會造成植生淨生產量（NPP）的增加（Townsend et al., 1995）。N分解後，雖具有促進植物生長之效果，但亦相信其是增加空氣中一半 $\text{CO}_2$ 的禍首，若此分解長期進行的話，則伴隨硫（S）分解（Sulphur, acid rain）而來的是會導致生態系變質、林木死亡及損失（Schulze et al., 1989）。N分解率可由酸雨量測系統，N氣釋出來源與擴散—分解模式等整合知識來推算。

高濃度的 $\text{O}_3$ 與 $\text{SO}_2$ 決定森林生長（McLanghlin & Downing, 1995），此現象一般發生於都市與工業中心，尤其是在特殊的地區性地形與氣象，且在太陽下曝曬，會導致污染物累積。

長期養分效應，由於林木收穫，取走了林地的生物量，尤其在熱帶國家，林木的輪伐期短、土壤容易變質瘠。

另外，若有森林病蟲害、雜草和火災發生的趨勢存在，也需要加以考慮，可與氣象變化關連起來，建立模式。

社經基線需要包括森林目前經營狀況，以及與森林工作有關的森林產業。

森林經營包括收穫政策—皆伐或擇伐、輪伐期長度、栽植樹種、調整控制森林栽植與收穫、施肥與病蟲害、目前林產物需求等，皆需要以正式或非正式加以量化，才方便模擬比對。

## 七、森林碳吸存

到底森林能由大氣中吸收多少 $\text{CO}_2$ ？1989年，美國應用能源署（Applied Energy Services）承接—電力供應與世界能源工廠計畫，計畫要求計算Connecticut州燃碳的新火力發電廠，釋出 $\text{CO}_2$ 的補償費用。而此補償經費未來將成為森林計畫的基金，以補償溫室氣體的排放，並進行碳森林（Carbon forestry）與碳吸存（Carbon sequestration）的評估。計畫中，利用許多不同來源的資料和土地利用的趨勢，來擬定不同的假設情境，以推估碳吸存的潛能。

而整個計畫係以推估在火力發電廠34年壽命，地景將會是如何改變，計畫如何經營森林，以發揮碳吸存的工作，值得注意的是在做長期推估時，風險與不確定性是一直存在的。

其實，政治、經濟或人口趨勢，往往無法預測。主要參數的改變對長期間的預測、推估，有很大的影響。研究者對特殊種類森林的生物量，須好好選擇其推估預測的模式。另外一些小誤差，可能會釀成大誤差。所以，一般的研究只可說是推估近似值，尚不是真值。

各國為履行其在氣候條款（climate treaty）所規定的任務時，碳吸存模式（Carbon sequestration model）的發展應用是相當有用



的工作。

自從工業時代石化燃料使用後，目前空氣中的CO<sub>2</sub>濃度約高於工業革命前之25%，且以每年0.4%的速度在增加，而由石化燃料釋出之CO<sub>2</sub>量約為1950年前的3.6倍。未來這一世紀，人類所引起的溫室效應（全球溫暖化），將有一半是來自CO<sub>2</sub>，現估計每年約有21.8億噸的CO<sub>2</sub>係由工業流程中釋出，約佔全球人為引起的CO<sub>2</sub>釋出的78%。

森林消失是另一增加CO<sub>2</sub>濃度的主因，在熱帶每年約有1,700萬公頃林木被砍伐，且釋出CO<sub>2</sub>。因為森林消失而釋出的CO<sub>2</sub>約有64,000萬噸（6.4億，約佔全球CO<sub>2</sub>釋出量的22%）。

#### 八、預測的限制（limits of predictability）

林木由發芽到伐採收穫，需要經過許多年，天然林與原始林的位置分布或樹種組成的改變，皆須經過幾個世紀才有可能，而人工林則在短短一、二十年內即可。所以，發展可以模擬數個世紀可信賴的氣候與社會經濟假設情境是不可能的。預測這些因子的改變，不能只依非常精緻的單一模式跑一次即可得到，因為推估長期的資料，其可信度往往是值得懷疑的。可同時應用粗放與簡單的模式於過去狀況的測試，以提供改變的幅度與改變型態的瞭解。

生產力的改變，可在數月、數天內受氣候、環境、經營改變而發生。林業部門有關固定設施的投資，如道路、木工廠、紙漿材，都是數個月即可完成。但是森林部門的假設情境以20~100年為推估基準是比較合理的。

森林的樹種組成、林分結構，除受氣候變

遷影響外，亦受水和土地利用、酸雨、林木需求和經營措施等的影響，此說明森林質與量的改變、酸雨皆會導致環境健康受損，其他土地利用需求增加，則森林地將減少。當農業生產量、需求量增加，林木需求增加，都將影響林地及其供應量的增加；森林減少，亦會造成森林部門質與量的改變。

#### 九、時間裡的點或連續假設情境

（point-in-time or continuous scenario）

許多森林生長過程，其反應速率相對地都比較慢，假設情境過程裡利用連續轉換（continuous transient）方式，較時間點方式來得妥當。何況連續轉換方式的假設情境所得結果，亦可表示獨立的時間點資料（Solomon, 1986）。使用馬可夫過程、半馬可夫過程、孔隙模式與細胞自動機等技術皆是解決連續轉換問題的重要工具。

#### 十、結論

氣候變遷時，社會、經濟環境，亦將因受到衝擊而產生有別於現在的狀況，未來的部門或系統之大小與結構將不同於現在。未來的系統，對衝擊與適應的質與量的反應，應有別於現在系統，這在假設情境中宜加以考量。首先，須先認定那些變數對變遷反應較敏感，再針對該變數進行分析在未來幾年可能的改變，再於假設情境中研擬衝擊與適應分析，引用文獻所提的假設情境，或利用歷史趨勢分析，地理分類來促進假設情境的研擬，若時間允許的話，使用一個以上的假設情境加以模擬更好！

引用文獻（請逕洽作者）

