

山地植群區帶劃分與潛在植被預測—— 氣候－植群分類方案的應用

內政部營建署雪霸國家公園管理處自行研究報告

中華民國九十三年十二月

093-301020500G-031

山地植群區帶劃分與潛在植被預測— 氣候－植群分類方案的應用

Regionalized mountain vegetation and predicted potential vegetation—
The application of climate-vegetation classification scheme

研究人員：邱清安

內政部營建署雪霸國家公園管理處自行研究報告

中華民國九十三年十二月

目次

| | |
|----------------------------|-----|
| 表次..... | II |
| 圖次..... | III |
| 摘要..... | IV |
| 第一章 前言..... | 1 |
| 第二章 植群 – 氣候分類方案之回顧..... | 2 |
| 一、Budyko 方案..... | 2 |
| 二、Köppen 方案..... | 2 |
| 三、Thornthwaite 方案..... | 4 |
| 四、Kira 方案..... | 7 |
| 五、Holdridge 方案..... | 10 |
| 七、Walter 方案..... | 12 |
| 八、Box 方案..... | 13 |
| 第三章 材料與方法..... | 16 |
| 第四章 結果與討論..... | 17 |
| 一、氣候 – 植群分類指標之計算與繪製..... | 17 |
| 二、與前人研究之分類結果的比較..... | 27 |
| 三、臺灣在應用氣候 – 植群分類方案的問題..... | 28 |
| 第五章 結論與建議..... | 36 |
| 第六章 引用文獻..... | 37 |

表次

| | |
|--|----|
| 表 1. Köppen 氣候分類方案..... | 3 |
| 表 2. Thornthwaite 潤濕指數(MI)所代表之氣候型及其季節性分布.... | 6 |
| 表 3. Thornthwaite 潛在蒸發散量(PET)所代表之氣候型及其副型 | 6 |
| 表 4. Kira 劃分溫度氣候帶的指標..... | 8 |
| 表 5. 中國主要植被類型的 Kira 氣候指標的幅度..... | 9 |
| 表 6. Kira 的乾燥度指數在各氣候類型中的值域範圍 | 9 |
| 表 7 中國植被地帶的氣候指標範圍和界限 | 10 |
| 表 8. Walter 之地帶生物群系(zonobiome)..... | 13 |
| 表 9. 極端最低溫與其可能優勢植被形相..... | 15 |
| 表 10. 實際出現於臺灣之 Holdridge 生命帶類型與面積 | 22 |
| 表 11. 臺灣山地植群之帶狀分化及溫度範圍..... | 25 |
| 表 12. 各種用來模擬植群類型的技術..... | 35 |

圖次

| | |
|---|----|
| 圖 1. Holdridge 生命帶分類法..... | 11 |
| 圖 2. 臺灣 Holdridge 生命帶之(a)年平均生物溫度(BT) ; (b)年平均降水量(Py) ; (c)年平均潛在蒸發散量比例(PER)..... | 19 |
| 圖 3. 臺灣之 BT、P、PER 氣候參數可能出現於 Holdridge 生命帶之範圍..... | 20 |
| 圖 4. 臺灣之 Holdridge 生命帶的類別圖..... | 21 |
| 圖 5. Holdridge 之各種生命帶類型於臺灣之分布。紅色部分為數值高程模型(DEM) ; 藍色部分為 Holdridge 之 a ~ m 生命帶類型..... | 23 |
| 圖 6. 依 Holdridge 生物溫度(BT)與 Kira 溫量指數(WI)所劃分之植群帶的分布圖 | 26 |
| 圖 7. 依 BT 與 WI 所劃分之植群帶的面積比較 | 26 |
| 圖 8. 依 Su(1984b)劃分臺灣中部中央山脈西側山地植群帶之設定.. | 30 |
| 圖 9. 依劉春迎(1999)劃分中國主要植被類型之設定..... | 30 |
| 圖 9. 依劉春迎(1999)劃分中國主要植被類型之設定..... | 31 |
| 圖 10. 依倪健(1997)劃分中國植被地帶之設定 | 31 |
| 圖 10. 依倪健(1997)劃分中國植被地帶之設定 | 32 |
| 圖 11. 植群樣區調查資料轉檔程式..... | 34 |

摘要

一、研究緣起

氣候－植群分類模型基於任何地區的主要植群是現時環境因子之反映的概念，認為氣候佔決定性角色(Tuhkanen, 1980)，特別是熱量和水分及二者的配合狀況(Woodward, 1987; Brovkin *et al.*, 1997; Masuda, 2000)，植群生態學也認為主要的植群類型表現著植物界對主要氣候類型的反應，每個氣候類型或分區都有一套相應的植群類型(Whittaker, 1975)。

二、研究方法及過程

本研究首先回顧重要的氣候－植群分類方案，說明各方案在臺灣運用的可能性後，選取 Holdridge 生命帶方案(Holdridge, 1947, 1967)，及 Kira 氣候指標(Yim & Kira, 1975, 1976; Yim, 1977)，以臺灣各月平均氣溫、降水分布圖為分析材料，進行此兩方案氣候參數之計算與植群類別之劃分與繪製，並討論其在臺灣應用時可能存在的問題，以做為未來研究植群與氣候之關係的參考。

三、重要發現

在進行氣候－植群之類型的劃分時，不可能考慮所有的氣候因子及其間的交互作用，在實務上可獲取的氣候資料亦常有限制，因此常以劃分之目的為導向。Holdridge 方案以簡單易得的氣溫與降水資料，即能計算出 3 個氣候參數，並以簡單易懂的蜂巢狀生命帶圖解進行植群之劃分，因此廣為相關研究所使用，本文利用 GIS 計算並繪製臺灣之 Holdridge 氣候參數及其生命帶，認為 Holdridge 方案之尺度過大，且生命帶與植物群系的命名並不適用於臺灣這一類亞熱帶高山島嶼。本文同時也繪製了 Holdridge 生物溫度(BT)與 Su(1984b)使用之 Kira 溫量指數(WI)在臺灣的劃分結果，指出兩者計算方式的不同，及對應植群類型之值域的差異；由於 Holdridge 方案將水平緯度帶與垂直海拔帶之氣候指標值視為相同意義，但山區與全球性帶狀氣候之典型仍有所不同(Lydolph, 1985)，因此應用於全球尺度的 Holdridge 生命帶方案並不適用於亞熱帶高山島嶼的臺灣，Kira 方案則較為適用於本地。

四、主要建議事項

均質的生態系單元對環境變化具有較一致的反應，也便於管理措施之擬定，因此對生態系分類為科學研究與經營管理的基礎工作，其中氣候－植群分類方案為最常被用來分類生態系的方法之一。由本報告結果以下分別提出立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議：雪霸國家公園管理處

未來研究臺灣之氣候與植群的關係，由氣候著手之面向來看，應找出適於本地的氣候－植群分類方案，或加以修正之；在植群研究方面則可藉由整合植群樣區地面調查資料，進行植群類別之劃分。

長期性之建議：雪霸國家公園管理處

對氣候與植群之對應性的連結技術則待進一步之探討，以做為未來潛在植群圖、氣候變遷等研究的基礎。本研究同時認為未來遙感探測(remote sensing, RS)資料可提供許多植群與氣候之有用訊息，地理資訊系統(GIS)則能在空間分析與資料整合上發揮強大的作用。

關鍵詞：氣候－植群分類方案、Holdridge、Kira、溫量指數

第一章 前言

環境與生物之關係的研究長久以來一直受到生態學、氣候學、地理學的關注，尤其近年來全球變遷議題的興起，以氣候代表環境變遷、以植群代表陸地生態系的簡化方式，被大量地用來探究過去、現在、未來之環境，也成為國際地圈－生物圈計畫(international geosphere-biosphere programme, IGBP)的重點研究項目，各種預測模型被大量的提出(Franklin, 1995; Guisan & Zimmermann, 2000)，這些模型首先面臨的問題是氣候與植群之關係的建立。研究氣候與植群之關係的模型可概分為靜態(static)、動態(dynamic)兩大類，靜態模型係基於氣候－植群間處於平衡狀態之概念上，而動態模型則更為強調氣候－植群間交互作用的過程(Peng, 2000)。雖然動態模型已包括了氣候－植群之靜態平衡而更為貼近真實生態系(Pickett *et al.*, 1994)，但也因此須要更多的氣候－植群交互作用之背景知識(Brovkin, 2002)，然現實上目前大部分的植群/生態系之動態機理(mechanisms)仍不甚清楚(Foley *et al.*, 1998)，且僅有少數的生物種類對環境改變之動態反應曾被研究過，因此靜態模型仍為目前研究氣候－植群關係的常用方法(Woodward & Cramer, 1996)。Peng(2000)將靜態模型分為氣候－植群分類模型(climate-vegetation classification models)與植物功能型模型(plant functional type models)兩大類，Cramer & Leemans(1993)在研究氣候變遷對植群之影響時，即分別以 Holdridge(1947, 1967)生命帶(life zone)及 Box(1981)植物功能型(plant functional type)為兩者之代表。

氣候－植群分類模型基於任何地區的主要植群是現時環境因子之反映的概念，認為氣候佔決定性角色(Tuhkanen, 1980)，特別是熱量和水分及二者的配合狀況(Woodward, 1987; Brovkin *et al.*, 1997; Masuda, 2000)，植群生態學也認為主要的植群類型表現著植物界對主要氣候類型的反應，每個氣候類型或分區都有一套相應的植群類型(Whittaker, 1975)。本研究首先回顧重要的氣候－植群分類方案，說明各方案在臺灣運用的可能性後，選取 Holdridge 生命帶方案(Holdridge, 1947, 1967)，及 Kira 氣候指標(Yim & Kira, 1975, 1976; Yim, 1977)，以臺灣各月平均氣溫、降水分布圖為分析材料，進行此兩方案氣候參數之計算與植群類別之劃分與繪製，並討論其在臺灣應用時可能存在的問題，以做為未來研究植群與氣候之關係的參考。

第二章 植群－氣候分類方案之回顧

將複雜的氣象與/或氣候狀態歸類為相對均質的類別是十分困難的，但至今已有超過 100 種以上的氣候分類系統被發表(Essenwanger, 2001), Critchfield(1983) 將氣候分類系統區分為三種類別：(1)經驗系統(empirical system)—基於大氣元素之觀測特徵的分類，(2)起源系統(genetic system)—反映氣候之起因的差異，(3)應用系統(applied system)—依特殊目標而劃分。本研究之目標在探討氣候與植群之關係，因此僅回顧上述應用系統中與植群有關之重要的氣候分類方案，此類氣候分類方案通常包含數個氣候參數，且可藉由量化的氣候參數劃分植群之型或區或帶(types/regions/zones)。

一、Budyko 方案

Budyko(1974)曾以淨太陽輻射量(net solar radiation)做為劃分植群的關鍵能量因子，影響植群的水分因素則淨輻射量與降水量之比值的乾燥輻射指數(radiative index of dryness)予以表示，輻射量雖能強烈影響植群之生產力(productivity)，但這些參數在臺灣廣大的山區是無法取得的。

二、Köppen 方案

Köppen 基於植物學家與氣候學家之背景，認為植物可綜合反映不同氣候元素之影響進而扮演類似氣象觀測儀器之角色，其原始靈感來自於氣候與植群圖之明顯的對稱性與一致性(symmetry and regularity)，因此依據長期對植物與氣候之分布關係的觀察，於 1884 年首次歸納出經驗法則作為氣候分區之標準，並於 1931 年出版其修正方案(Tuhkanen, 1980)。由於 Köppen 係經驗主觀性地判定各氣候型之邊界，因此後續不斷有研究者提出修正方案，其中 Trewartha(1980)之修正版本最被廣為使用，如 Lydolph(1985)所著”The Climate of the Earth”、Bailey(1995)所著”Description of the Ecoregions of the United States.”；但 von Wissmann(1961)經日本與中國大陸的實作分析，認為 Köppen 方案在東亞地區的應用仍有其缺點，且基於此方案主要興趣在於植群及其界線，即氣候帶與植群帶之一致性，因而依據氣溫、降水對 Köppen 方案加以修正並劃分為 23 型(引自 Essenwanger, 2001，如表 1)：

表 1. Köppen 氣候分類方案(整理自 Essenwanger, 2001, 32-35pp.)

| Temperature Boundary | Precipitation classes | special features | Type | climatic type |
|--|--|--|-----------|--|
| Tropics: Coldest months > 13 | A. Equatorial. Moist (rain) throughout the year | | A | Rain forest, equatorial |
| | F. Moist with weak dry spell | | F | Rainforest with weak dry spell |
| | T. Dry: subtype S = Steppe subtype D = Desert boundary moist to S: Winter rain $r = 2t$; Summer rain $r = 2(t + 14)$ | | T | Savanna, green rainy, monsoon forest climate |
| | S. Steppe: boundary moist to D: Winter rain $r = t$; Summer rain $r = t + 14$ | | S | Tropical steppe climate |
| | W. Winter dry | | W | Tropical desert climate |
| Warm moderate: Coldest months > 2 | D. Desert | u. Air is moist | Du | Tropical desert with moist air |
| | | a. Summer hot | Fa | Laurel forest climate of the East side |
| | F. Moist with weak dry spell | b. Summer cool (boundaries: warmest months = 23) | Fb | Climate of the laurel and summer green forest of the West side |
| | T. Dry: subtype S = Steppe subtype D = Desert boundary moist to S: Winter rain $r = 2t$; Summer rain $r = 2(t + 14)$ | w. Winter dry | Tw | Warm hard leaf and forest climate |
| | S. Steppe: boundary moist to D: Winter rain $r = t$; Summer rain $r = t + 14$ | s. Summer dry | Ts | Summer dry, hard leaf and forest climate |
| Cool moderate: Annual temperate > 4 | | | S | Summer dry, hard leaf and forest climate, Warm moderate Steppe II D, moderate desert |
| | F. Moist with weak dry spell | | F | Moist climate of summer green and coniferous forest (in Europe by the -3 boundary into beech and oak tree separated) |
| | | w. Winter dry | Tw | Winter dry climate of wintergreen and coniferous forest |
| | T. Dry: subtype S = Steppe subtype D = Desert boundary moist to S: Winter rain $r = 2t$; Summer rain $r = 2(t + 14)$ | s. Summer dry | Ts | Cool summer dry climate of summer green and coniferous forest |
| | S. Steppe: boundary moist to D: Winter rain $r = t$; Summer rain $r = t + 14$ | | S | Cool moderate Steppe |
| Boreal: Warmest month = +10 | D. Desert | | D | Cool moderate Desert |
| | F. Moist with weak dry spell | | F | Moist coniferous climate |
| | T. Dry: subtype S = Steppe subtype D = Desert boundary moist to S: Winter rain $r = 2t$; Summer rain $r = 2(t + 14)$ | w. Winter dry | Tw | Winter dry coniferous climate |
| | S. Steppe: boundary moist to D: Winter rain $r = t$; Summer rain $r = t + 14$ | | S | Boreal Steppe |
| | D. Desert | | D | Boreal Desert |
| . Subarctic: Warmest month = 0 | | | | Tundra climate |
| . Permanent frost (icecap) | | | | Permanent Frost (icecap) |
| | | h. Highlands (altitude effect on temperature) | | |

Notes: r is the monthly precipitation amount (in mm) and t is the monthly mean temperature (in).

Köppen 分類法極為重視年降水量與最冷月、最暖月之平均溫度，並以其豐富的野外觀察經驗做為氣候區劃分之主觀判定依據，但其乾燥氣候的標準大半是人為的、未考慮海拔高度對溫度與氣候分類的影響、不適用於小範圍的地區(陳正改, 1995; 倪健, 1998; Lydolph, 1985), 另外由於 Köppen 分類法及其修正版本之命名方式係採用氣候型態, 無法確知其對應的植群類型, 因此暫不列入本研究之分析。

三、Thornthwaite 方案

Thornthwaite 認為 Köppen 分類僅依據月、年平均氣溫與月、年累積降水, 忽略了植物生長的水分效應, 同時也隨著氣象觀測儀器的進展, 在後續的氣候分類方案中加入了氣溫與降水複合效應的潤濕因子(moisture factor)作為分類參數。Thornthwaite 與 Köppen 均是在尋求氣候分類與植群帶的一致性, 其概念上最大差異在於評估降水的有效性與季節性(Essenwanger, 2001)。

Thornthwaite 在 1931 年首先發表其氣候分類方案, 並於 1948 年發表其修正後的分類方案, 兩方案強調的概念均為氣候的有效性(climatic efficiency), 即氣候對植物群落生長的承載(capacity)(Tuhkanen, 1980), 同時其用以表示氣候有效性的指標也由 1931 年舊方案的有效降水指數(precipitation efficiency index; P-E)與有效溫度指數(temperature efficiency index; T-E), 改為 1948 年新方案的潤濕指數(moisture index; MI)與潛在蒸發散量(potential evapotranspiration; PET), 主要原因是由於 P-E 與 T-E 指數不能完全表明土壤中水分平衡的關係, 故不能適用於計算有效降水(陳正祥, 1957)。潛在蒸發散量(PET)的概念實由植物的熱量與水分收支而出發(Essenwanger, 2001), 也被後來許多其他氣候分類方案採用(Tuhkanen, 1980), 可視為氣候－植群相關分析與分類的綜合指標(倪健&宋永昌, 1998)。有關 Thornthwaite 分類法之計算方式如下(Thornthwaite, 1948)：

Thornthwaite Classification (1931)

$$P - E = \sum_1^{12} 115 \left(\frac{P_i}{T_i - 10} \right)$$

$$T - E = \sum_1^{12} 115 \left(\frac{T_i - 32}{4} \right)$$

P : 月平均降水量(inch)

T : 月平均氣溫()

Thornthwaite Classification (1948)

$$PET = \sum_1^{12} 1.6 \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (I = 0 \sim 160)$$

$$a = 0.000000675I^3 - 0.0000771I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad (a = 0 \sim 4.25)$$

$$MI = HI - 0.6AI = \frac{100S - 60D}{n}$$

$$s = 157.76 - 66.44 \log E$$

PET : 潛在蒸發散量(cm)

T_i : 月平均氣溫()

HI 為潮濕指數(humidity index) ; $HI = 100S / n$

AI 為乾燥指數(aridity index) ; $AI = 100D / n$

P : 月降水量(cm)

n_i : 月需水量(the water need , 可用 PET_i 來代表)

$$S : \text{剩水量}^1 ; S = \sum_1^{12} P_i - n_i$$

$$D : \text{缺水量} ; D = \sum_1^{12} n_i - P_i$$

s : 有效溫度集中於夏季的百分率(summer concentration in percentages of thermal efficiency)

E : 潛在蒸發散量(inch) ; $E = PET / 2.54$

Thornthwaite 新分類法之必要參數包括月均溫、月降水量、月潛在蒸發量，其中潛在蒸發散量雖可由複雜的緯度、日射量、風速等因子間接計算求得，但這些計算因子在山區同樣難以取得，同時 Essenwanger(2001) 也指出雖然 Thornthwaite 方案可說明植物生長與活力的資訊，但其以 4 個字母可組合出高達 120 種氣候型並不符現實。臺灣山區之氣象站多無蒸發量之觀測資料，即便有也

¹ Thornthwaite(1948)認為某季剩餘 6 inches 的水，可抵銷另一季 10 inches 之缺水，因此計算剩水量與缺水量須以土壤貯水量為 0 或 10 inches 之月份為起點。

十分不可信，因此在計算 MI 時有實際之困難，同時 Thornthwaite 對氣候型之命名並無植群之對應性，如氣候型 AA'ra'代表熱帶、重濕性、全年不缺水、有效溫度不集中於夏季，無法得知其對應的植群狀態，因此不適於應用在本地山區植群區劃之相關研究。

表 2. Thornthwaite 潤濕指數(MI)所代表之氣候型及其季節性分布(Thornthwaite, 1948)

| Climatic type | MI | Seasonal type | AI |
|-------------------------------------|-----------|--|-------------|
| A perhumid | > 100 | r little or no water deficiency | 0 ~ 16.7 |
| B₄ humid | 80 ~ 100 | s moderate summer water deficiency | 16.7 ~ 33.3 |
| B₃ humid | 60 ~ 80 | w moderate winter water deficiency | 16.7 ~ 33.3 |
| B₂ humid | 40 ~ 60 | s₂ large summer water deficiency | > 33.3 |
| B₁ humid | 20 ~ 40 | w₂ large winter water deficiency | > 33.3 |
| C₂ moist subhumid | 0 ~ 20 | | |
| Seasonal type | | | |
| C₁ dry subhumid | -20 ~ 0 | r little or no water deficiency | 0 ~ 10 |
| D semiarid | -40 ~ -20 | s moderate summer water deficiency | 10 ~ 20 |
| | | w moderate winter water deficiency | 10 ~ 20 |
| | | s₂ large summer water deficiency | > 20 |
| E arid | -60 ~ -40 | w₂ large winter water deficiency | > 20 |

表 3. Thornthwaite 潛在蒸發散量(PET)所代表之氣候型及其副型(Thornthwaite, 1948)

| Potential evapotranspiration (cm) | Temperature efficiency (type) | Summer concentration (%) | Summer concentration (type) |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 114.0 | A' | 48.0 | a' |
| 99.7 | B' ₄ | 51.9 | b' ₄ |
| 85.5 | B' ₃ | 56.3 | b' ₃ |
| 71.2 | B' ₂ | 61.6 | b' ₂ |
| 57.0 | B' ₁ | 68.0 | b' ₁ |
| 42.7 | C' ₂ | 76.3 | c' ₂ |
| 28.5 | C' ₁ | 88.0 | c' ₁ |
| 14.2 | D' | | d' |
| | E' | | |

四、Kira 方案

Kira 在 1942 年考察中國東北大興安嶺之落葉松與白樺森林時，發現當時極為通用之 Köppen 氣候分類法無法反映此類植群，因此將最早記載於歐洲地理學之積溫觀念應用於植群生態學，氏於 1945 年採用溫量指數(warmth index, WI)及乾濕度指數(humidity/aridity index, K)做為熱量和水分指標，無論是垂直地帶性或水平地帶性，其植群分布的 WI 界線值都是一致的；氏並於 1948 年提出寒冷指數(coldness index, CI)以說明常綠闊葉樹的分布北界，而在寒溫帶和溫帶植群中，WI 起主導作用而 CI 值則沒有限制意義(徐文鐸，1985；方精雲，1995)。劉春迎(1999)以 Kira 三項指數研究與中國植被主要類型之關係，表明溫量指數及乾燥度指數與植被分布格局相關密切，其氣候指標的幅度如表 5、6；Su(1984b)研究臺灣山地植群帶即以 Kira 之溫量指數為劃分依據。Kira 的分類指標主要是根據熱量指數：溫量指數(WI)、寒冷指數(CI)，及乾濕度指數(K)，其計算方式如下(Yim & Kira, 1975, 1976; Yim, 1977)：

$$WI = \sum_1^{12} (T_i - 5) \quad \text{若 } T_i \geq 5$$

$$CI = -\sum_1^{12} (5 - T_i) \quad \text{若 } T_i < 5$$

T_i 為第 i 個月之月平均溫度()

$$K = \frac{P_y}{WI + 20} \quad \text{若 } WI \leq 100$$

$$K = \frac{2P_y}{WI + 140} \quad \text{若 } WI > 100$$

P_y 為平均年降水量(mm)

徐文鐸(1983)於 Kira 分類指標的基礎上提出濕度指數(humidity index, HI)，認為 HI 是限制中國草原地理分布的主要因子：

$$HI = \frac{P_y}{WI}$$

倪健(1997)也曾提出 Kira 氣候指數之修正版本：生物溫暖指數(biological warmth index, BWI)、生物寒冷指數(biological coldness index, BCI)、生物乾濕度指數(biological aridity/humidity index, BK)，各植被地帶的氣候指標範圍和界限如

表 7, 相關計算如下 :

$$BWI = \sum_1^{12} (T_i - 10) \quad \text{若 } T_i \geq 10$$

$$BCI = -\sum_1^{12} (10 - T_i) \quad \text{若 } T_i < 10$$

T_i 為第 i 個月之月平均溫度()

$$BK = \frac{P_y}{WI + 40} \quad \text{若 } WI \leq 80$$

$$K = \frac{2P_y}{WI + 120} \quad \text{若 } WI > 80$$

P_y 為平均年降水量(mm)

表 4. Kira 劃分溫度氣候帶的指標(Kira, 1945, 1948)。

| 溫度氣候帶 Thermal climatic zones | 溫暖指數 WI(Kira, 1945) |
|---------------------------------|-------------------------|
| 近極冰雪帶 Arctic nival zone | 0 |
| 寒帶 Arctic zone | 0 ~ 15 |
| 亞寒帶 Subarctic zone | 15 ~ 55 (1948 年版本為 45) |
| 寒溫帶 Cool-temperate zone | 55 ~ 100 (1948 年版本為 85) |
| 暖溫帶 Warm-temperate zone | 100 ~ 180 |
| 亞熱帶 Subtropical zone | 180 ~ 240 |
| 熱帶 Tropical zone | > 240 |

表 5. 中國主要植被類型的 Kira 氣候指標的幅度(整理自劉春迎, 1999)

| 植被類型 Vegetation types | 溫暖指數 Warmth index(WI) | 寒冷指數 Coldness index(CI) | 乾濕度指數 Humidity / aridity index(K) |
|---|-----------------------------|-------------------------------|---|
| 1. 熱帶雨林、季雨林 Tropical rain forest, monsoon forest | 200 ~ 240 | 0 | 5.9 ~ 12.7 |
| 2. 亞熱帶南部常綠闊葉林 Southern subtropical evergreen broadleaf forest | 170 ~ 200 | 0 | 7.8 ~ 10.0 |
| 3. 亞熱帶北部常綠落葉闊葉混交林 Northern subtropical evergreen deciduous broadleaf mixed forest | 120 ~ 170 | -6 ~ -3 | 6.6 ~ 8.1 |
| 4. 暖溫帶落葉闊葉林 Warm-temperate deciduous broadleaf forest | 80 ~ 120 | -44 ~ -11 | 4.5 ~ 7.1 |
| 5. 溫帶針闊葉混交林 Temperate coniferous-broadleaf mixed forest | 50 ~ 80 | -109 ~ -61 | 6.4 ~ 10.1 |
| 6. 北方針葉林 Boreal coniferous forest | 30 ~ 50 | -156 ~ -132 | 6.6 ~ 8.5 |
| 7. 山地寒溫帶針葉林 Subalpine coniferous forest | 30 ~ 55 | -40 ~ -14 | 7.8 ~ 14.3 |
| 8. 溫帶草原 Temperate steppe | 40 ~ 80 | -110 ~ -40 | 3 ~ 8 |
| 9. 溫帶荒漠 Temperate desert | 64 ~ 90 | -82 ~ -48 | 0.7 ~ 2.9 |
| 10. 高寒草原 Alpine steppe | 5 ~ 23 | -115 ~ -72 | 5.3 ~ 11.5 |
| 11. 高寒草甸 Alpine meadow | 7 ~ 21 | -93 ~ -62 | 13.3 ~ 18.7 |
| 12. 高寒荒漠 Alpine desert | 0 ~ 3 | -172 ~ -131 | 1.1 ~ 4.2 |

表 6. Kira 的乾燥度指數在各氣候類型中的值域範圍(劉春迎, 1999)

| 氣候類型 Climatic types | Thornthwaite 的濕度指標 Thornthwaite's moisture index (MI) | Kira 的乾燥指數 Kira's humidity / aridity index (K) |
|------------------------|--|---|
| A 過濕 | > 100 | > 14.5 |
| B4 濕潤 | 80 ~ 100 | 12.5 ~ 14.5 |
| B3 濕潤 | 60 ~ 80 | 11 ~ 12.5 |
| B2 濕潤 | 40 ~ 60 | 9 ~ 11 |
| B1 濕潤 | 20 ~ 40 | 7.5 ~ 9 |
| C2 中濕 | 10 ~ 20 | 6 ~ 7.5 |
| C1 低濕 | -20 ~ 0 | 4 ~ 6 |
| D 半乾 | -40 ~ -20 | 2.5 ~ 4 |
| E 乾燥 | -60 ~ -40 | > 2.5 |

表 7 中國植被地帶的氣候指標範圍和界限(倪健, 1997)

| 植被地帶 Vegetation zones | 氣候指標 Meteorological indexes | | |
|--|--------------------------------|-------------------------|-----------------|
| | 生物溫暖指數 | 生物寒冷指數 | 生物乾溼度指數 |
| | BWI (month) | BCI (month) | BK (mm / month) |
| I 寒溫帶針葉林地帶 Cold-temperate (boreal) coniferous forest zone | 15 ~ 25 | -200 ~ -160 | 7 ~ 8.5 |
| II 冷溫帶針闊葉混交林地帶 Cold-temperate mixed coniferous-broadleaved forest zone | 25 ~ 50 | -160 ~ -80 | 6.5 ~ 10 |
| III 暖溫帶落葉闊葉林地帶 Warm-temperate deciduous broadleaved forest zone | 50 ~ 80 | -80 ~ -25 | 6 ~ 10 |
| IV 亞熱帶常綠闊葉林地帶 Subtropical evergreen broadleaved forest zone | 80 ~ 150 | -25 ~ 0 | 10 ~ 15 |
| V 熱帶雨林季雨林地帶 Tropical rain forest & monsoon forest zone | 150 ~ 200 | 0 | 12 ~ 16 |
| VI 溫帶草原地帶 Temperate steppe zone | 25 ~ 50 | -150 ~ -60 | 2 ~ 6 |
| VII 溫帶荒漠地帶 Temperate desert zone | 10 ~ 80 | -120 ~ -50 | 0 ~ 3.5 |
| VIII 青藏高原高寒植被地帶 Tibetan high-cold plateau zone (Mountain Coniferous forest- Alpine meadow-Alpine Steppe-Alpine desert subzone) | 10 ~ 0; 5 ~ 0 | -60 ~ -120; -160 ~ -200 | 16 ~ 18; 8 ~ 1 |

五、Holdridge 方案

Holdridge(1947, 1967)認為氣候可客觀反映當地自然植群，因此使用 3 個氣候參數：年平均生物溫度(annual biotemperature, BT)、年平均降水量(average total annual precipitation, Py)、年平均潛在蒸發散量比例(annual potential evapotranspiration ratio, PER)製成蜂巢狀圖解(如圖 1)，定義出 37 種生命帶，藉以表現氣候數值與生命帶或植物群系(plant formations)之對應關係，其中 BT 可與海拔帶(altitudinal belts) 緯度區(latitudinal regions)相對應，而 PER 則可反映出濕度

級(humidity provinces)。以下為 Holdridge 生命帶的氣候參數，其中年平均生物溫度(BT)，係以月平均氣溫計算，與 Holdridge(1967)以時氣溫之原始計算方式略有差異：

$$BT = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_i \quad (0 \leq T_i \leq 30, T_i \text{ 為月平均氣溫, 單位 } ^\circ\text{C})$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{12} P_i \quad (P_i \text{ 為月降水量, 單位 mm})$$

$$PER = \frac{PET}{P_y} = \frac{58.93 \times BT}{P_y} \quad (PET \text{ 即潛在蒸發散量, 為 } BT \text{ 之函數})$$

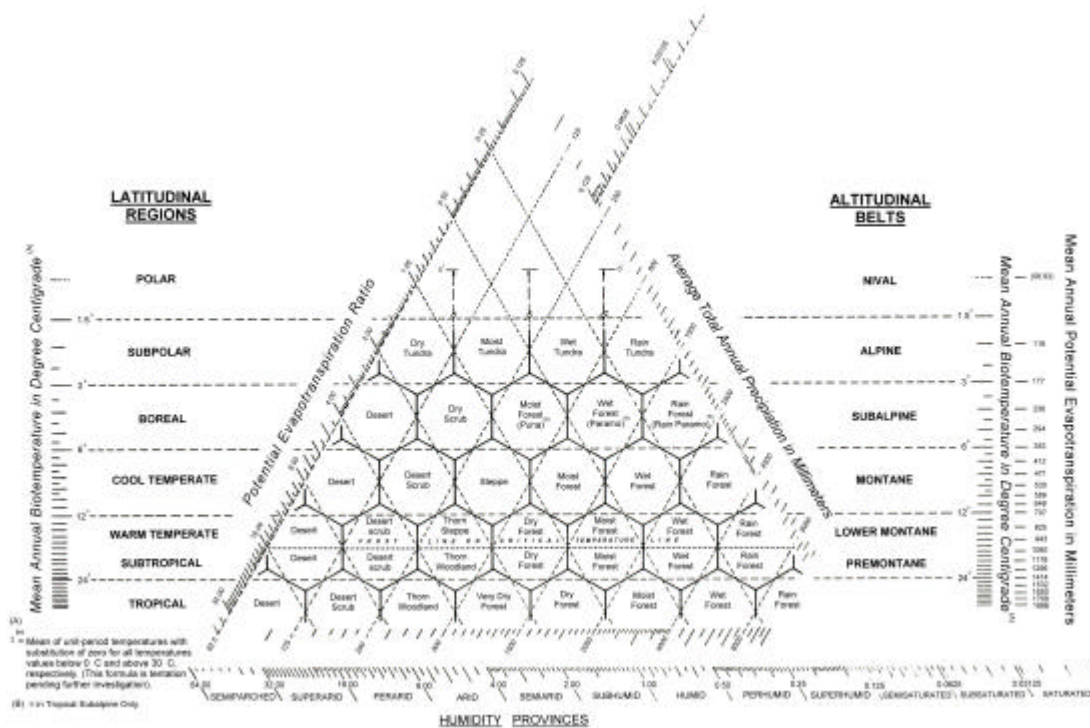


圖 1. Holdridge 生命帶分類法(重繪自 Holdridge, 1967, figure 1)

Holdridge 生命帶方案以氣象站基本觀測項目之氣溫及降水資料，即可計算出其 3 個氣候指標，藉以闡明自然植群之類型，因其所使用之氣候參數易於氣象觀測資料獲得，且圖示化分類簡單易懂(Holdridge, 1967)，目前仍為研究生態系分類、生物多樣性、氣候變遷等議題常用之選擇(如 Lugo *et al.*, 1999; Powell *et al.*, 2000; Yue *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2003)。馮豐隆&高堅泰(2001)、羅悅心&關秉宗(1999)即曾分別結合 GIS、第五代中尺度數值氣候模式(5th Generation Penn.

State/NCAR Mesoscale Model, MM5), 以 Holdridge 生命帶探討氣候變遷對臺灣植物群系之影響, 然臺灣為面積約僅 36,000 km² 之高山島嶼, 是否適用於全球性、大尺度的 Holdridge 生命帶方法仍待更進一步的實作研究。

六、Troll & Pfaffen 方案

Troll & Pfaffen(1963,引自 Essenwanger, 2001)方案之主要目標係供農業使用, 欲在植物生長、植群與氣溫、降水、濕度間建立連繫, 重視氣溫的年內變異振幅、水陸分布與南北半球的差異, 因此極為重視氣候的季節律動, 並依據以下三類氣候因子組合其氣候分類方案(Tuhkanen, 1980):

- (一)光照季節(illumination seasons): 指輻射與光照, 主要由緯度控制。
- (二)溫度季節(thermal seasons): 指溫度, 主要由緯度、水陸分布、海拔控制。
- (三)水分季節(hygric seasons): 指降水量與濕潤期, 主要由大氣環流控制。

Troll & Pfaffen 分類法涉及大氣環流, 且許多氣候類別與界線的劃分係依據植群差異而非氣候因子, 在對自然植群覆蓋未能透徹瞭解的地區在應用上自有其困難(Essenwanger, 2001), 因此不適用於本研究臺灣區域性氣候研究。

七、Walter 方案

Walter(2002, 7th ed.)參考 7 個起源的氣候帶 (genetic climate belts)², 在其多次改版的巨著"Vegetation of the Earth."將全球劃分為 9 個地帶生物群系 (zonobiome, 表 8), 地帶生物群系是以地帶性的植群型與土壤型為特徵, 藉由大量的生態氣候圖描繪於大尺度地圖上來達成, 於測站密度低處則亦參考植群圖,

² (A) the equatorial rain zone (on both sides of the tropical convergence zone);
(B) the summer rain zone on the margins of the tropics (trade wind zone);
(C) the subtropical dry regions (high pressure areas of the horse latitudes);
(D) the subtropical winter rain regions (partly only regarded as transition region between C and E);
(E) the temperate zone with year-round precipitation in the region of the predominant west winds;
(F) the subpolar zone (with weak easterly winds);
(G) the polar zone.

至於地帶生物群系之邊界如何劃分則未明確闡述，因此帶有明顯的主觀成分 (Tuhkanen, 1980)，在實務上因其無明確的數值區分可做為生態系分類之依據，而難以在研究臺灣氣候與植群之關係時使用。

表 8. Walter 之地帶生物群系(zonobiome)(整理自 Walter, 2002, pp. 78-80)

| Zonobiome (ZB) | Zonal soil type | Zonal vegetation type |
|---|---|--|
| ZB I Equatorial ZB with diurnal climate, humid tropical ZB | Equatorial brown clays (ferralitic soils, latosols) | Evergreen tropical rain forest without seasonal change |
| ZB II Tropical ZB with summer rains, humido-arid tropical ZB | Red clays or red earths (fersialitic soils) | Tropical deciduous forests or savannas |
| ZB III Subtropical ZB with desert climate, hot-arid ZB; very little rain | Serozemes, sierozemes (grey or red earths, raw soils, saline soils) | Subtropical desert vegetation (stony landscapes) |
| ZB IV ZB with summer drought and winter rain, arido-humid (Mediterranean climate) | Mediterranean brown earths (fossil terra rossa) | Sclerophyllic woody plants (sensitive to ground forests) |
| ZB V Warm temperate climate (oceanic), humid ZB; mild maritime | Yellow or red forest soils, slightly podsollic soils | Temperate evergreen forests (lauriphylllic), frost sensitive |
| ZB VI Typical temperate ZB with short periods of frost, nemoral ZB | Forest brown earths and grey forest soils | Nemoral broadleaf-deciduous forests (bare in winter, frost resistant) |
| ZB VII Arid-temperate ZB with cool winters, continental ZB | Chernozems to serozems (raw soils) | Steppe to desert with cold winters (frost resistant), short, hot summers |
| ZB VIII Cold temperate ZB with cool summers and long winters, boreal ZB | Podsols (raw humus-bleached earths) | Boreal coniferous forests (taiga), (very frost resistant) |
| ZB IX Arctic (including Antarctic), with very short summers, polar ZB | Tundra humus soils with solifluction (permafrost soils) | Tundra vegetation (treeless) |

八、Box 方案

Box(1981)綜合研究各種植群生態模型與生活型(life forms)後，認為決定植物型分布界線的 8 個主要生物氣候變量為：最熱月平均氣溫(Tmax)、最冷月平均氣溫(Tmin)、月平均溫度的變幅(DTY)、平均年降水量(Py)、年溼度指數(MI)、最高月降水量(Pmax)、最低月降水量(Pmin)、最熱月平均降水量(PTmax)，並依植物之特徵以植物生活型做為植群單元，由此產生了世界物候外貌生物群區類型及

其相關的優勢植物型，奠定了鑑別可能的基本植物和植群功能型的可靠基礎(倪健，1998)。Box(1981)所使用的 8 個主要生物氣候變量如下：

最暖月平均氣溫(mean temperature of the warmest month, Tmax ())

最冷月平均氣溫(mean temperature of the coldest month, Tmin ())

月平均溫度的變幅(annual range of mean monthly temperature, DTY ())

平均年降水量(average annual precipitation, Py ())

年溼度指數(annual moisture index, MI = Py / Thornthwaite PET-based)

最高月降水量(highest average monthly precipitation, Pmax (mm))

最低月降水量(lowest precipitation monthly precipitation, Pmin (mm))

最熱月平均降水量(average precipitation of the warmest month, PTmax (mm))

黃任伯(2002)曾以本方案模擬氣候變遷對臺灣中部地區植物型之影響，但僅以和社、對高岳兩測站之氣象資料作為模擬研究之對象。本方案雖可反映更多植群物候和季節形相(vegetation phenology and seasonal physiognomy)的季節型式解析(Box, 1981)，但其植物的生活型劃分，及生活型與氣候變數之隸屬計算方式頗為複雜，本文暫不予討論。

九、Woodward 方案

Woodward(1987)於其專著”Climate and Plant Distribution”認為氣候是限制植物分布的最主要因素，但 Holdridge(1967)與 Box(1981)之方案都非建立在基礎的植物生理上(Woodward & Williams, 1987)，渠認為植物生長期的長度、溫度、最低氣溫、雨量是與植群分布最為密切的指標，因此其分類方案主要是依據最低溫度、年降水量、水分平衡來劃分植群類型，表 9 為 Woodward 認為在極端最低溫下可能之優勢植群形相。

表 9. 極端最低溫與其可能優勢植被形相(Woodward, 1987)

| Minimum temperature Range() | Phenomenon | Expected physiognomy |
|------------------------------|---------------------------|--|
| > 15 | Temperature not limiting | Broad-leaved evergreen when rainfall adequate |
| -1 ~ 15 | Chilling | Broad-leaved evergreen when rainfall adequate |
| -15 ~ 0 | Freezing and supercooling | Broad-leaved evergreen |
| -40 ~ -15 | Freezing and supercooling | Broad-leaved deciduous |
| < -40 | Freezing and supercooling | Evergreen and deciduous needle-leaved (coniferous) |

Woodward 分類法重視極端氣候對植物之影響，然其應用尺度較大、極端最低溫等資料在許多山區氣象站並未觀測，且目前臺灣對植物於極端氣候之反應仍未建立足夠的背景資料，而不適用於臺灣山地植群與氣候之研究。

第三章 材料與方法

本文使用通過檢定程序之長期氣象資料(邱清安等, 2004), 結合迴歸分析與地理統計方法(Geostatistics)推估而得之 100 m 網格的各月平均氣溫、降水分布圖(邱清安&林博雄, 2004)為材料, 選取可能適用於臺灣之植群－氣候分類方案(包括 Kira、Holdridge 方案), 進行相關的氣候指標計算與植群類別劃分; 相關計算與製圖以地理資訊系統軟體 ArcGIS 8.1 及 Spatial Analyst 模組為操作平台進行, 同時以 ArcGIS 8.1 之 Toolbox 將全部圖層統一定義為 TWD67 基準之 TM 二度分帶座標。

第四章 結果與討論

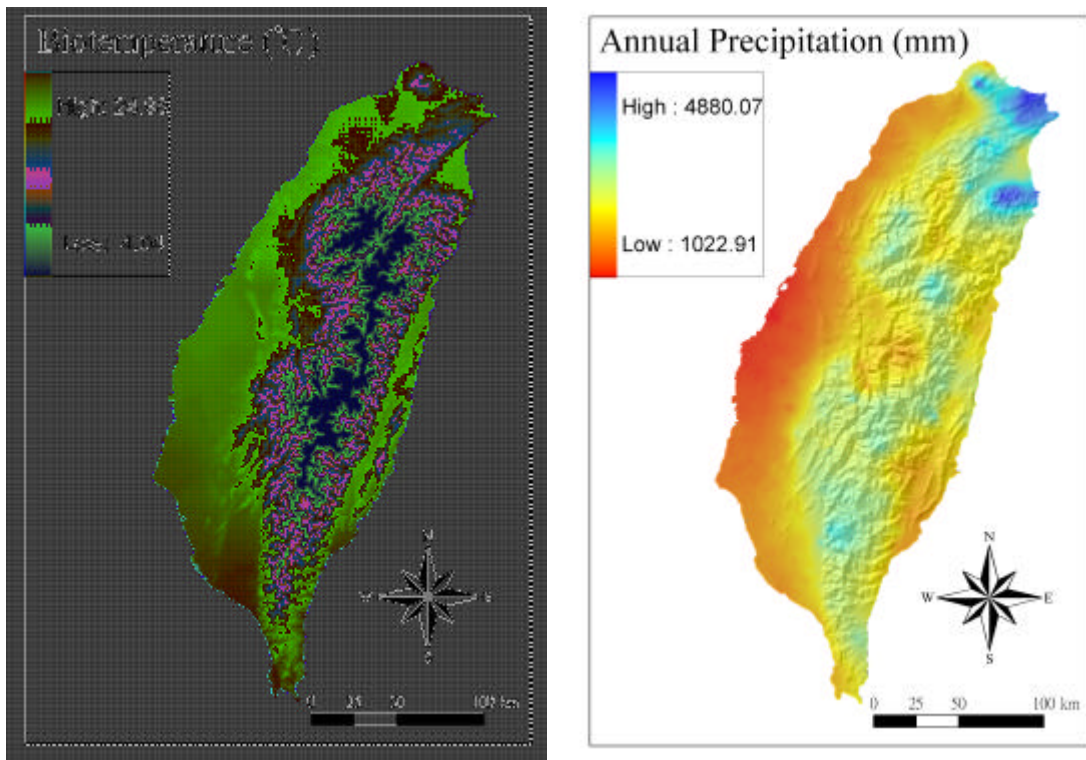
一、氣候 – 植群分類指標之計算與繪製

(一) Holdridge 生命帶之製圖結果

本研究利用臺灣各月平均氣溫、降水分布圖計算 Holdridge 生命帶方案的 3 個氣候參數，結果顯示 BT 之範圍介於 24.98 ~ 4.04(圖 2-a)，對應於 Holdridge 方案海拔帶的平地與亞高山(subalpine)之間，及其緯度區的熱帶與北方(boreal)之間；P 之範圍介於 4880.07 ~ 1022.91(圖 2-b)，PER 之範圍介於 1.31 ~ 0.08(圖 2-c)，對應於 Holdridge 方案濕度級的亞潤濕(subhumid)與半飽和(semisaturated)之間；將此 3 個參數之範圍標示於 Holdridge 生命帶圖示上，顯示最多可能有 17 種生命帶出現於臺灣(如圖 3)。進一步依據 Holdridge 定義將臺灣 100 m 網格之 BT、P、PER 值指定到所屬之蜂巢狀生命帶並加以製圖，發現實際出現於臺灣之生命帶僅有 13 種(如圖 4、表 10)，其中圖 3 之右上角粉紅色部分是 Holdridge 未定義之更潮濕的區域與生命帶，本文依其氣候參數併入於最相近的亞高山北方雨林(Subalpine Boreal Rain Forest)。圖 5 及表 10 為依 Holdridge 生命帶方案所劃分出之臺灣各類生命帶，其中亞高山北方雨林(Subalpine Boreal Rain Forest，圖 5-a)僅出現於玉山、雪山、南湖大山等高山頂峰附近；山地涼溫帶潮濕森林(Montane Cool-Temperate Wet Forest，圖 5-b)，主要位於海拔 2,000 ~ 2,400 m 以上之中央山地軸；山地涼溫帶雨林(Montane Cool-Temperate Rain Forest，圖 5-c)分布於七家灣溪集水區稜脊下方與濁水溪上游；淺山暖溫帶雨林(Low-Montane Warm-Temperate Rain Forest，圖 5-d)分布於七星山、金瓜石、大元山附近；淺山暖溫帶潮濕森林(Low-Montane Warm-Temperate Wet Forest，圖 5-e)則沿著山地涼溫帶潮濕森林向下延伸至海拔 1,100 ~ 1,600 m 的中央山地；淺山暖溫帶潤濕森林(Low-Montane Warm-Temperate Moist Forest，圖 5-f)僅於丹大溪、卡社溪間之加年瑞山附近 1,400 m 左右山麓；山前亞熱帶雨林(Premontane Subtropical Rain Forest，圖 5-g)僅於淺山暖溫帶雨林金瓜石、大元山下方之山麓附近；山前亞熱帶潮濕森林(Premontane Subtropical Wet Forest，圖 5-h)沿著淺山暖溫帶潮濕森林向下延伸，廣泛分布於全臺山前坡地；山前亞熱帶潤濕森林(Premontane Subtropical Moist Forest，圖 5-i)廣泛分布於全臺丘陵平原；山前亞熱帶乾燥森林

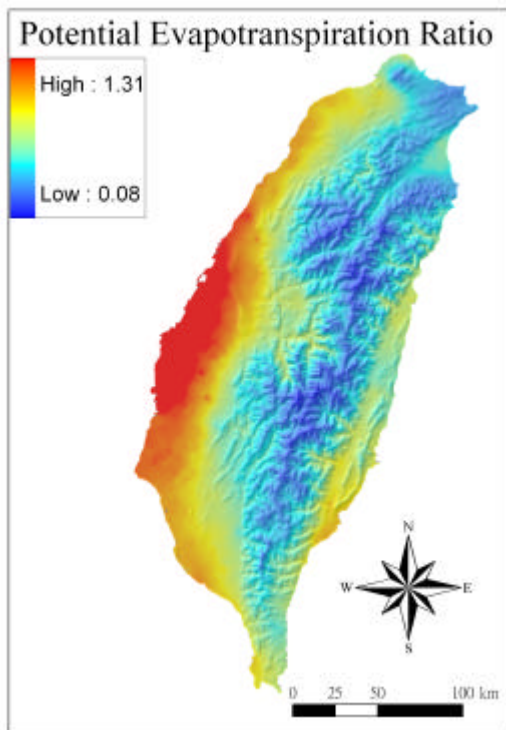
(Premontane Subtropical Dry Forest, 圖 5-j)位於彰化、雲林近海低地；熱帶潮濕森林(Tropical Wet Forest, 圖 5-k)僅出現於金瓜石山的前亞熱帶雨林臨海之局部地區；熱帶潤濕森林(Tropical Moist Forest, 圖 5-l)則夾於山前亞熱帶潤濕森林與山前亞熱帶潮濕森林之間；熱帶乾燥森林(Tropical Dry Forest, 圖 5-m)分布於彰化、雲林山前亞熱帶乾燥森林靠內陸一帶。綜上所述，淺山暖溫帶潮濕森林(圖 5-e)、山前亞熱帶潮濕森林(圖 5-h)、山前亞熱帶潤濕森林(圖 5-i)三類合計佔臺灣面積 81.76%，由圖 4、圖 5 可看出 Holdridge 生命帶概略地反映出臺灣之氣候變異，但其中仍存在一些不合理之處，如山前亞熱帶乾燥森林(圖 5-j)分布於彰化雲林沿海，而熱帶乾燥森林(圖 5-m)卻在更內陸呈帶狀分布；另如熱帶潤濕森林(圖 5-l)處於兩種亞熱帶森林(圖 5-h、圖 5-i)之間亦不合理。另 Holdridge 生命帶方案之 BT 可與海拔帶、緯度區相對應，許多研究忽略山區海拔帶之氣溫變異(Liu *et al.*, 1998)，僅計算水平之緯度區的氣溫變化，此在大尺度區域研究時或能適用，但對臺灣顯著的山地氣溫與植群變化卻有嚴重之偏差，Holdridge(1967)估算海拔帶之生物溫度係採用氣溫海拔遞減率-6 /1,000 m, 但由於本文使用的月平均氣溫分布圖，係以所有測站之氣溫－海拔迴歸模型為主，再疊合其殘差空間推估值而來，因此可較 Holdridge(1967)更準確估算全臺各網格之 BT。

Cramer & Leemans(1993)認為 Holdridge 方案最大的優點在於完全的數量化分類依據，而有利於電腦之應用，但 Holdridge 生命帶未能顯示植群對氣候之反饋(feedback)(Yates *et al.*, 2000)，亦未考慮生理之改變，僅能顯示大尺度的生命帶反應(Chen *et al.*, 2003)，即使僅做為靜態的氣候－植群分類模型，在使用時常須加以修正(張新時, 1993；Lugo *et al.*, 1999)，而 Prentice(1990)將其改良後在全球應用的精度仍不超過 60%。倪健(1998)認為 Holdridge 方案以氣溫之 0 及 30 做為植物生長之溫度上下限亦值得商榷，也未考慮水平帶和山地帶之 BT 的差異，以 $BT = 18$ 作為劃分亞熱帶和暖溫帶之霜線(frost line)不是對任何地區都適用，Lugo *et al.*(1999)即以實際的長期日最低氣溫(daily minimum air temperature)來決定美國之霜線的分布。Liu *et al.*(1998)認為 Holdridge 方案潛在蒸發散量(PET)與土壤水份、空氣濕度、風速等因子有關，而非僅為 BT 單一因子之函數，定義 $PET = 58.93 \times BT$ 僅是基於有限觀測的半經驗函數(pseudo-empirical function)而非物理原理(Cramer & Leemans, 1993)，與 Thornthwaite(1948)方案相較，Holdridge 方案之 PET 在高海拔地區較低，在亞熱帶、熱帶地區則較高(Tuhkanen, 1980)。



(a)

(b)



(c)

圖2. 臺灣 Holdridge 生命帶之(a)年平均生物溫度(BT) ; (b)年平均降水量(Py) ; (c)年平均潛在蒸發散量比例(PER)。

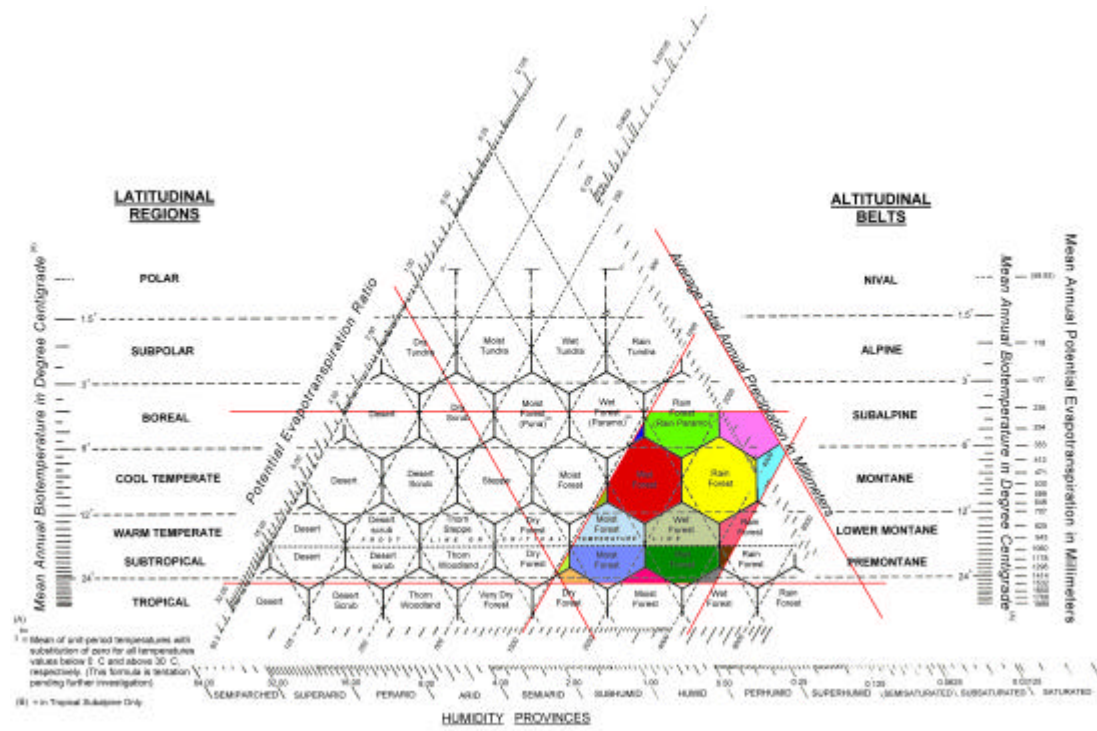


圖 3. 臺灣之 BT、P、PER 氣候參數可能出現於 Holdridge 生命帶之範圍。

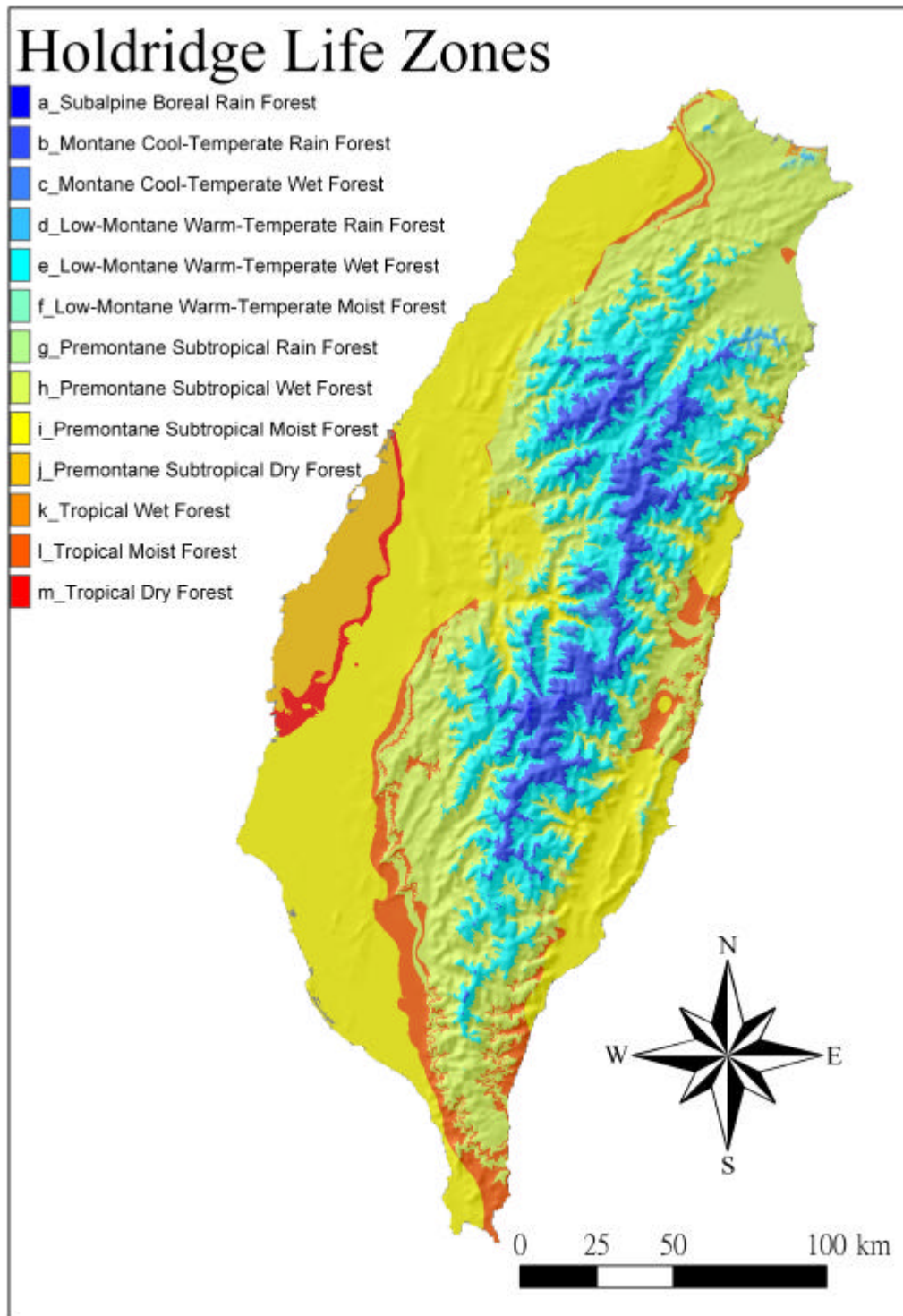


圖 4. 臺灣之 Holdridge 生命帶的類別圖

表 10. 實際出現於臺灣之 Holdridge 生命帶類型與面積

| 代碼 code | 生命帶 life zone | 面積(ha) area | 百分率(%) percent |
|------------|--|----------------|-------------------|
| a | 亞高山北方雨林 Subalpine Boreal Rain Forest | 2,327 | 0.06 |
| b | 山地涼溫帶雨林 Montane Cool-Temperate Rain Forest | 238,526 | 6.62 |
| c | 山地涼溫帶潮濕森林 Montane Cool-Temperate Wet Forest | 15,896 | 0.44 |
| d | 淺山暖溫帶雨林 Low-Montane Warm-Temperate Rain Forest | 8,734 | 0.24 |
| e | 淺山暖溫帶潮濕森林 Low-Montane Warm-Temperate Wet Forest | 662,207 | 18.37 |
| f | 淺山暖溫帶潤濕森林 Low-Montane Warm-Temperate Moist Forest | 1,610 | 0.04 |
| g | 山前亞熱帶雨林 Premontane Subtropical Rain Forest | 6,951 | 0.19 |
| h | 山前亞熱帶潮濕森林 Premontane Subtropical Wet Forest | 1,082,869 | 30.03 |
| i | 山前亞熱帶潤濕森林 Premontane Subtropical Moist Forest | 1,202,641 | 33.36 |
| j | 山前亞熱帶乾燥森林 Premontane Subtropical Dry Forest | 139,820 | 3.88 |
| k | 熱帶潮濕森林 Tropical Wet Forest | 1,808 | 0.05 |
| l | 熱帶潤濕森林 Tropical Moist Forest | 207,441 | 5.75 |
| m | 熱帶乾燥森林 Tropical Dry Forest | 34,703 | 0.96 |

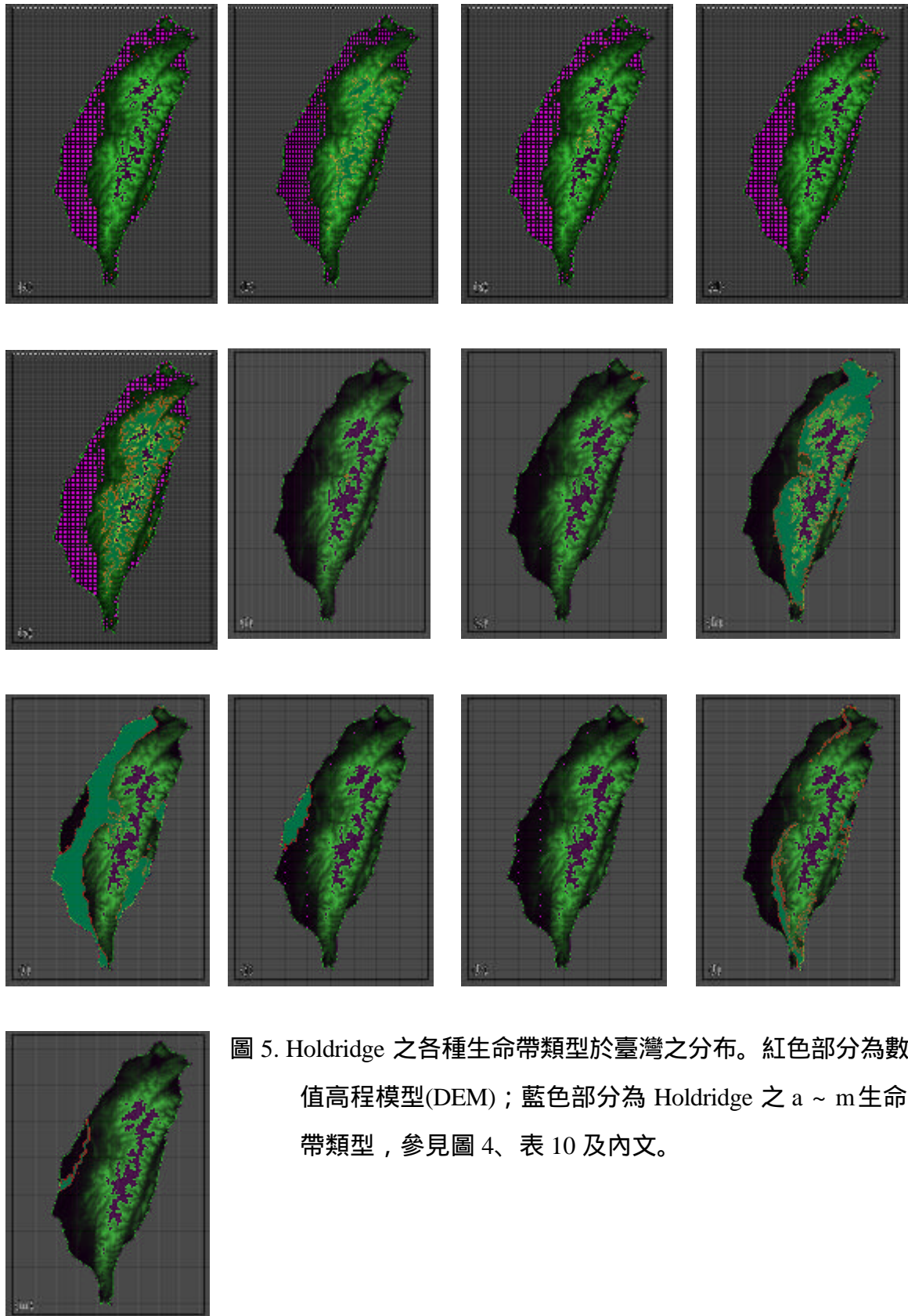


圖 5. Holdridge 之各種生命帶類型於臺灣之分布。紅色部分為數值高程模型(DEM)；藍色部分為 Holdridge 之 a ~ m 生命帶類型，參見圖 4、表 10 及內文。

(二)以 Kira 溫量指數(WI)應用於 Su(1984b)山地植群帶之製圖結果，及其與 Holdridge 生命帶之比較

Su(1984b)曾以年平均溫度及溫量指數來設定臺灣山地植群帶之分布範圍，雖然 Su(1984b)之山地植群帶劃分主要是以熱量為依據，而 Holdridge(1967)生命帶則同時考慮熱量與水分，但由於當水分因子尚不至對植物生長形成明顯之限制時，植群之變異主要仍由熱量因子所控制(Liu *et al.*, 1998)，因此 Su(1984b)與 Holdridge(1967)之熱量劃分方式在山地植群變異上仍具有比較的價值。Su(1984b)使用的 Kira 溫量指數(WI)與 Holdridge(1967)之 BT 兩者均屬積溫(accumulated temperature)之生長度日法(degree days)，較簡單的平均溫度(mean temperature)，對植物生長有更直接的關係(Cramer & Leemans, 1993)，也較傳統的生長日數法(calendar days)具有更高的精確性(Wang, 1960)，但 WI 與 BT 兩者計算方法並不相同，WI 加總了某地全年內各月平均氣溫大於 5 之度數，BT 則總計了 0 ~ 30 間的度數。另外由於 Su(1984b)與 Holdridge(1967)對植群之命名術語不同，因此本研究由兩者之海拔帶與氣候帶的對應關係，定義出可茲比較之術語基準(如表 11)。圖 6 為臺灣山地植群依 Su(1984b)之 WI 與 Holdridge(1967)之 BT 所劃分植群帶的比較，圖 7 為兩者各植群帶所佔之面積的比較，其中依 Holdridge 之 BT 所劃分出的亞高山帶範圍遠少於 Su 之 WI，僅出現於玉山、阿里山、雪山、南湖大山等山峰頂點附近；涼溫帶範圍則是 BT 大於 WI；兩者之暖溫帶範圍大致相當；BT 所劃分出的熱帶範圍亦遠少於 WI，僅分布於臺灣南部平原與近海區域。綜合言之，Kira 溫量指數(WI)與 Holdridge 生物溫度(BT)均可用來代表植物/植群生長發育之熱量需求，但兩者仍有明顯之差異，此雖與兩者之計算方式的不同有關，但更大的差別在於兩者定義各植群類型之積溫的值域不同所致。Holdridge 方案起源於中美洲熱帶的哥斯大黎加(Costa Rica)，在應用上卻屬於全球性大尺度的植群 – 氣候分類方案，因此對區域性之氣候 – 植群關係可能不適用，張新時(1993)認為 Holdridge 方案在中國大陸應用時須加以修正，羅悅心&關秉宗(1999)也指出臺灣高海拔山區因有低溫多雨之特點，由 Holdridge 生命帶模式觀之，可能屬於特殊地帶，並不一定適用；而 Kira 溫量指數係起源於日本，經溫帶林、亞熱帶、地中海型氣候、中國，及西太平洋等地的應用(Yim & Kira, 1975, 1977；Kira, 1977；Itow, 1988；Federici & Pignatti, 1991；Kira, 1991；倪健, 1997；劉春迎, 1999)，顯示其更適用於位處東南亞的臺灣。

表 11. 臺灣山地植群之帶狀分化及溫度範圍(取自 Su, 1984b ; Holdridge, 1967 , 灰底部分為兩者之對應帶)

| Su(1984b) | | | | | | | Holdridge(1967) | | | |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Altitude zone 海拔帶 | Vegetation zone 植群帶 | Alt.(m) 海拔高度 | Tm() 年均溫 | WI() 溫量指數 | Equivalent Climate 相當氣候 帶 | Area(ha)(%) 面積比例 | BT() 生物溫度 | latitudinal regions 緯度區 | Altitudinal belts 海拔帶 | Area(ha)(%) 面積比例 |
| - | - | - | - | - | - | - | < 1.5 | Polar 極地 | Nival 冰雪帶 | - |
| Alpine 高山帶 | Alpine vegetation 高山植群帶 | >3600 | <5 | <12 | Subarctic 亞寒帶 | 205 (0.01) | 1.5-3.0 | Subpolar 亞極地 | Alpine 高山帶 | - |
| Subalpine 亞高山帶 | Abies zone 冷杉林帶 | 3100-3600 | 5-8 | 12-36 | Cold- temperate 冷溫帶 | 21713 (0.60) | 3.0-6.0 | Boreal 北方 | Subalpine 亞高山帶 | 3674 (0.10) |
| Upper montane 山地上層帶 | Tsuga-Picea zone 鐵杉雲杉林帶 | 2500-3100 | 8-11 | 36-72 | Cool- temperate 涼溫帶 | 174283 (4.83) | 6.0-12.0 | Cool- temperate 涼溫帶 | Montane 山地帶 | 279569 (7.75) |
| Montane 山地帶 | Quercus (upper) zone 櫟林帶(上層) | 2000-2500 | 11-14 | 72-108 | Temperate 溫帶 | 309899 (8.60) | 12.0-17.0 | Warm- temperate 暖溫帶 | Lower-montane 淺山帶 | 640604 (17.77) |
| | Quercus (lower) zone 櫟林帶(下層) | 1500-2000 | 14-17 | 108-144 | Warm- temperate 暖溫帶 | | | | | |
| Submontane 山地下層帶 | Machilus-Castanopsis zone 楠櫟林帶 | 500-1500 | 17-23 | 144-216 | Subtropical 亞熱帶 | 2303327 (63.88) | 17.0-24.0 | Subtropical 亞熱帶 | Premontane 山前帶 | 2412304 (66.91) |
| Foothill 山麓帶 | Ficus-Machilus zone 榕楠林帶 | <500 | >23 | >216 | Tropical 熱帶 | 796106 (22.08) | > 24.0 | Tropical 熱帶 | - | 269382 (7.47) |

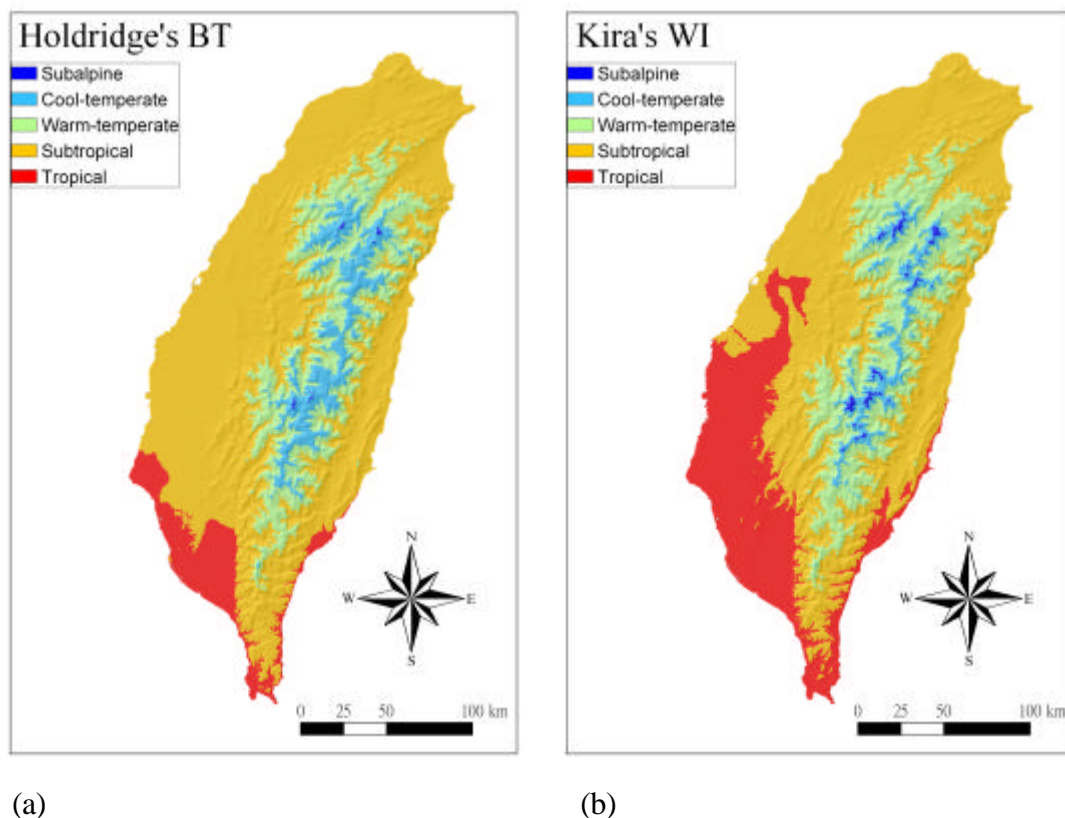


圖 6. 依 Holdridge 生物溫度(BT)與 Kira 溫量指數(WI)所劃分之植群帶的分布圖。

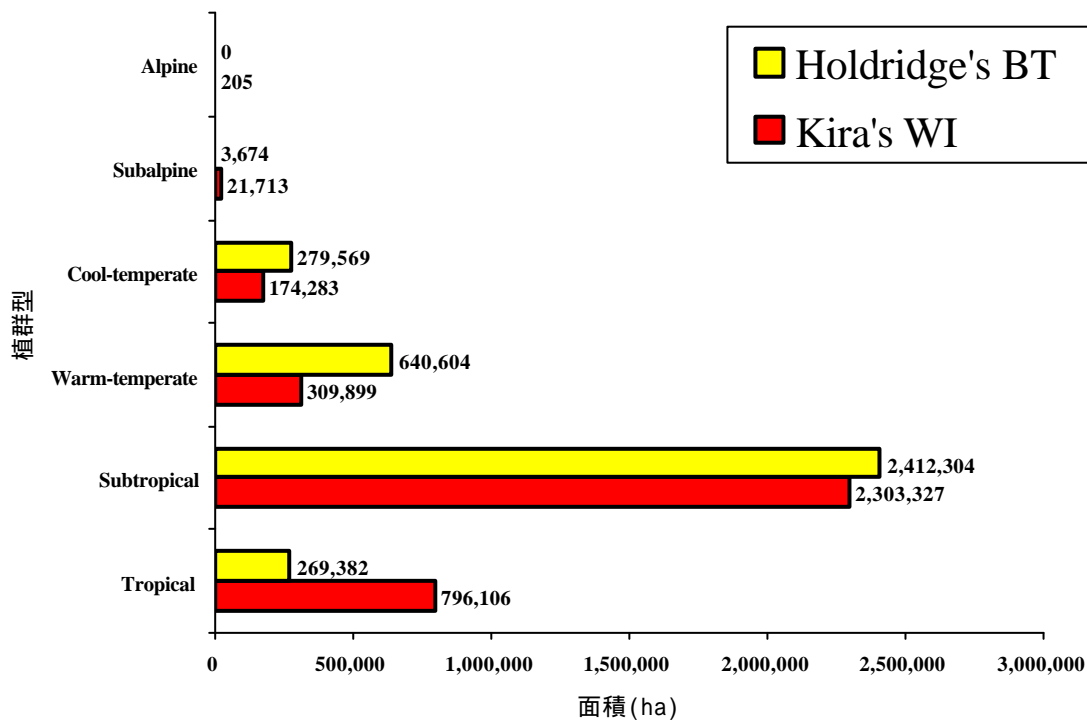


圖 7. 依 BT 與 WI 所劃分之植群帶的面積比較。

二、與前人研究之分類結果的比較

馮豐隆&高堅泰(2001)、羅悅心&關秉宗(1999)均曾以 Holdridge 生命帶劃分臺灣之植群，Su(1984b)亦曾以 Kira 溫量指數(WI)應用於山地植群帶之劃分，本研究與其差別之處在於：

(一) 測站資料與估計方法

本研究採用臺灣所有測站與 1960~2002 年長期氣象數據之通過檢定程序的資料(邱清安等, 2004)，篩選出 219 個氣溫測站(觀測記錄大於 7 年)及 877 個降水測站(觀測記錄大於 12 年)資料，以 100 m 數值高程模型(digital elevation model, DEM)結合迴歸分析與地理統計方法推估之月平均氣溫、降水分布圖(邱清安&林博雄, 2004)，本研究採用之氣候空間推估應較馮豐隆&高堅泰(2001)使用 26 個測站之氣溫資料以趨勢面法(Trend method)估計氣溫、使用 818 個測站之降水資料以克利金法(Kriging)推估降水量，及羅悅心&關秉宗(1999)研究臺灣中部高山(1,700 m 以上)使用 3 個測站與第五代中尺度數值氣候模式(MM5)之估計值為精細。Su(1984a,b)研究臺灣山地植群帶則使用觀測記錄大於 5 年的氣象站資料，且其山地植群之帶狀分化與溫度範圍僅適用於臺灣中部中央山脈西側，渠並認為其他地區的海拔高度範圍，宜由表 11 之溫量指數加以轉換(蘇鴻傑, 1992)。

(二) 網格大小

馮豐隆&高堅泰(2001)使用 1 km 網格，羅悅心&關秉宗(1999)使用 MM5 模式，其網格大小應至少在 5 km 以上。而本研究之網格大小為 100 m，較能闡明臺灣山岳地形之氣候與植群的急劇變化。Su(1984a, b)研究臺灣山地植群帶係先蒐集臺灣中部各林帶分布及海拔範圍，並由迴歸分析加以設定植群帶與溫度梯度之關係，並未使用 GIS 等技術探究臺灣三維表面的氣候空間與植群關係。

(三) 生命帶類型

本文採用 Holdridge(1967, figure 2)以 $BT = 18$ 為界線，代表可用來劃分暖溫帶與亞熱帶之霜線(frost line)、關鍵溫度線(critical temperature line)的意見，區別出在臺灣佔有 86.11%面積的暖溫帶 – 亞熱帶之生命帶類型，故較馮豐隆&高堅泰(2001)所劃分出 10 型為細；但本文對羅悅心&關秉宗(1999)所論及之各生命帶類型間的過渡型則不予討論，因為本文目的在研究更基本的問題—Holdridge 方案的生命帶類型是否適用於臺灣。

三、臺灣在應用氣候 – 植群分類方案的問題

Lugo *et al.*(1999)曾提出生態系分類方案的要件，包括：(1)基於地理參照(geo-referenced)資料、(2)盡可能客觀、(3)盡可能反映最嚴密的生態系趨動力、(4)階層式的(hierarchical)、(5)便於擴展或縮減複雜尺度(expanding or contracting complexity scale)、(6)能用於預測全球氣候變遷研究、(7)具全球適用性、(8)可驗證其有效性、(9)符合氣候分類與植群功能之原理、(10)能接受有利於分析的新資料。本研究藉由 Holdridge 生命帶及 Kira 方案的繪製及上述的比較討論，可發現目前臺灣在應用氣候 – 植群分類方案的一些問題：

(一)氣候 – 植群分類方案之選用

至今已有超過 100 種以上的氣候分類系統被發表(Essenwanger, 2001)，其中與植物/植群有關之重要的氣候 – 植群分類方案，多被使用於全球性大尺度的應用。臺灣依 Trewartha(1980)修正之 Köppen 方案為無乾季之潤濕亞熱帶(Akin, 1991)，亦位處東南亞之典型的季風區(Lydolph, 1985)，Kira(1991)即認為由於西藏喜馬拉雅高地之影響，亞洲大陸東岸及東南岸缺乏 在世界其他地區能藉以區隔溫帶林與潮濕熱帶的亞熱帶乾燥帶(subtropical dry belt)。探究現有氣候 – 植群分類方案在本地實作繪製與其適用性，不能免除氣候參數的選用與估算，Box(1981)認為 Holdridge 方案之氣候指標過於簡化，Prentice(1990)也認為 Köppen(1931)、Thornthwaite(1948)、Troll & Paffen(1963)等方案，比 Holdridge 方案更能說明氣候對植物的乾旱壓力與季節變化。然相對的，愈複雜的模型可能更貼近真實狀態，但所需之資料愈多愈精細，在實務上某些氣候參數並不易獲得或估計，比如潛在蒸發散量(PET)為植物可利用水分的良好指標(Masuda, 2000)，其中 Penman(1956)之 PET 估算式被認為最具合理性(Tuhkanen, 1980)，但其風速、淨輻射等多項估算因子卻極不易取得；另外，最低氣溫對植物生長有關鍵性的影響(Woodward & Williams, 1987)，此類氣候資料由臺灣山區的氣象測站同樣難以取得。審諸前述各氣候 – 植群分類方案，其氣候參數能在臺灣山區可得者，Kira 方案殆無問題，且 Su(1984b)曾依 Kira 之溫量指數(WI)劃分臺灣之山地植群帶而廣被接受，Kira 方案在溫帶林、亞熱帶、地中海型氣候、中國，及西太平洋等地的應用(Yim & Kira, 1975, 1977；Kira, 1977；Itow, 1988；Federici & Pignatti, 1991；Kira, 1991；倪健，1997；劉春迎，1999)，顯示其對植群之指示效果良好，應可適用於位處東南亞的臺灣高山島嶼植群之劃分。

(二)氣候參數與植群類型之對應

Box(1980)指出植群 – 環境模型(vegetation-environment model)包含三個成分：1. 植群亞模型(vegetation submodel) – 能描繪植物及植群多樣性的植群分類方案；2. 環境亞模型(environmental submodel) – 一組用來描述有效環境及限制植群分布的環境變數；3. 生態模型(ecological model) – 對可聯繫植群型、環境變數之關係，及可說明植物之環境變數、生態關係的量化值進行某種排序。Cha(1995)認為全球自然植群繪製系統包含三個亞系統：1. 推估點狀測站氣候資料為全面性的網格資料；2. 植群型的分類(vegetation type classification)；3. 繪製潛在自然植群圖；因此繪製臺灣潛在植群圖之基本要件包括氣候圖層、植群類型、及二者對應關係的聯繫，亦即找出具植群生態意義的氣候參數、適於臺灣應用且能與氣候參數相對應的植群類別，及建立二者間良好對應性的技術。

本研究基於氣候為最高階之環境因子，而於氣候代表控制植群分布之環境因子之前提下，已有全臺灣之各月平均氣溫、降水量的三維氣候圖層，圖 8、9、10 分別為依 Su(1984b)劃分臺灣中部中央山脈西側山地植群帶、劉春迎(1999)劃分中國主要植被類型、倪健(1997)劃分中國植被地帶之設定所繪製的臺灣植群帶。由圖 8 及圖 9 可知，Su(1984b)及劉春迎(1999)雖皆為使用溫量指數(WI)劃分植群帶，但據以劃分植群的溫量指數(WI)範圍並不一致，且劉春迎(1999)之研究偏向中國水平性的植群帶區劃，較不符於臺灣高山島嶼之植群現況，如其所稱之北方針葉林並不適用於臺灣，其暖溫帶落葉闊葉林在臺灣亦屬少見。倪健(1997)則認為 BWI 對中國大陸西南部高山、亞高山高寒地區的植群與氣候關係指示性較強；BCI 則對亞熱帶和熱帶的指示性很好，夠較好區分亞熱帶南部及熱帶地區；由熱量指數和降水量綜合得出的 BK，對中國西乾旱、半乾旱區以至全中國的植被分布與水分、熱量因子的關係分析有較好的應用價值，但在中國北方的寒溫帶、溫帶和暖溫帶地區，採用 5 的 KIRA 溫暖指數(WI)、寒冷指數(CI)和徐文鐸的濕度指數(HI)比其所提出之生物氣候指標更符合實際情況；而在南方地區以 10 為界的 BCI 則更清楚地劃分熱帶和亞熱帶各植被地帶，尤其是對西南部亞高山地帶，同樣，BWI、BK 也具有較好指示性。對於 Kira 寒冷指數、乾濕度指數在臺灣的適用性亦應予以討論。

由本文(表 11、圖 8 及圖 9)及 Cramer & Leemans(1993)、Yates *et al.*(2000)、Pan(2003)之研究可知，不同的氣候 – 植群分類方案便有不同的分類準則，產生的植群類型之名稱與定義常有不同，進行比較前的對照轉換仍不免有主觀成分，

如何定義出適於臺灣的氣候－植群類型仍待檢討。

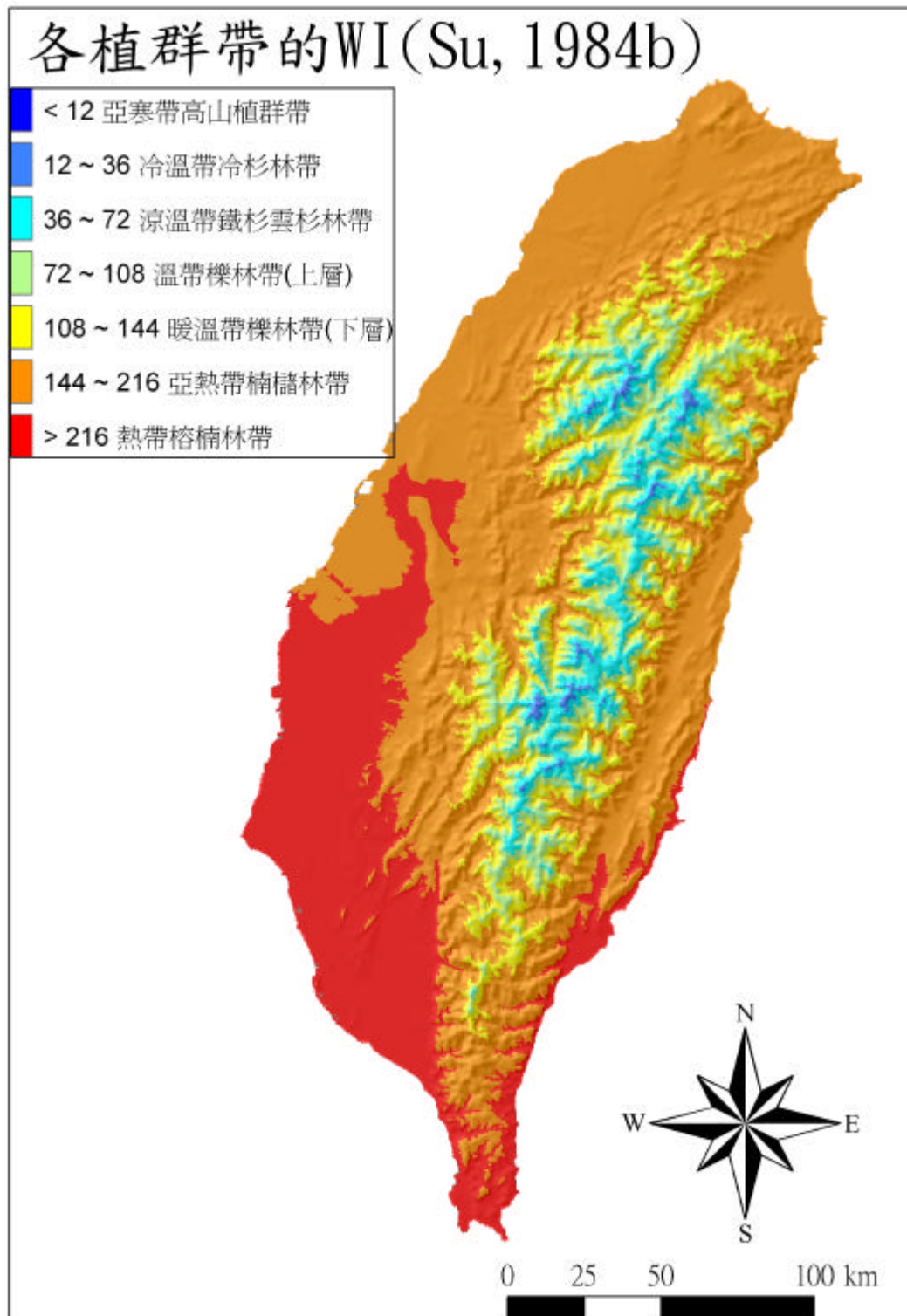


圖 8. 依 Su(1984b)劃分臺灣中部中央山脈西側山地植群帶之設定

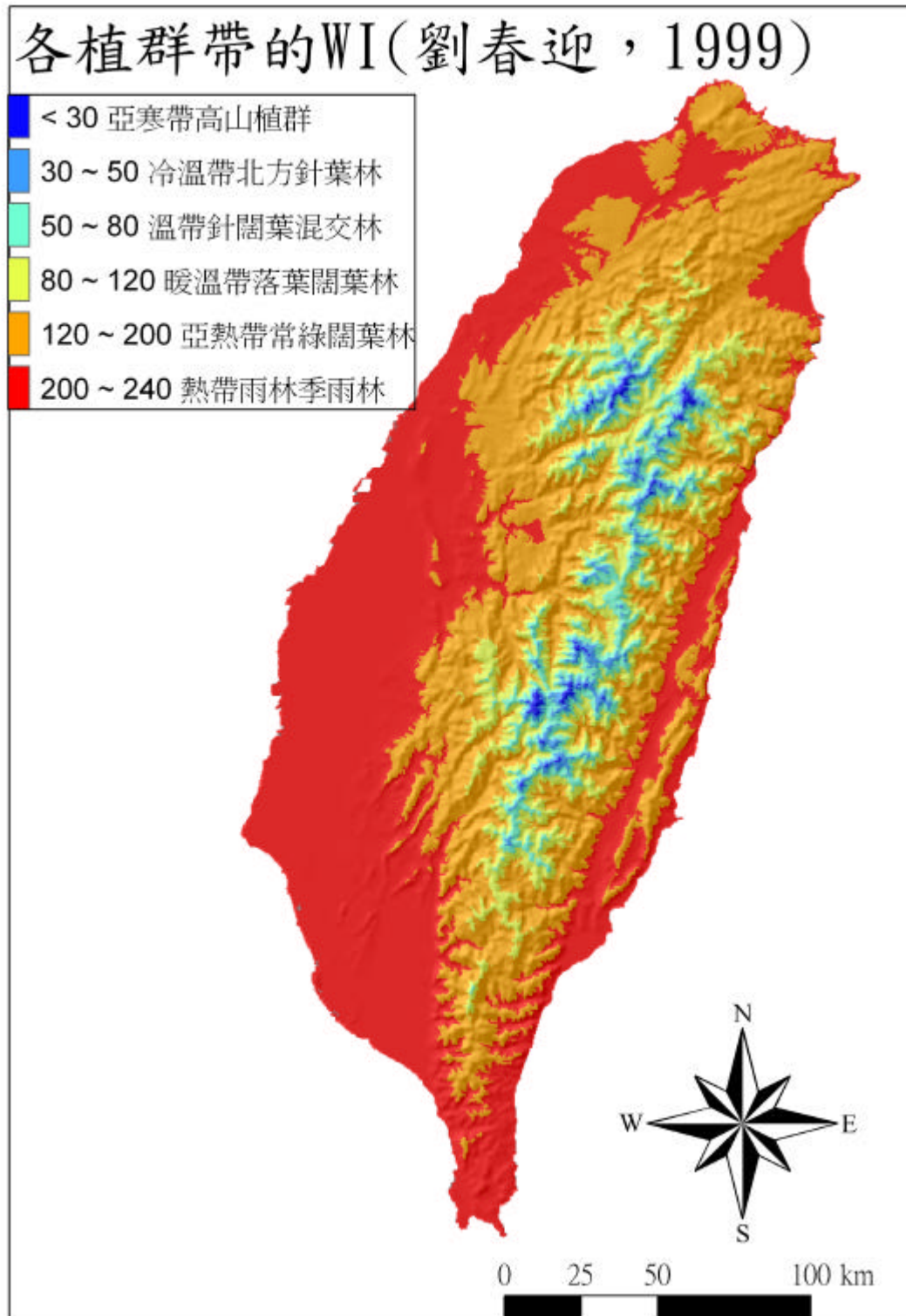


圖 9. 依劉春迎(1999)劃分中國主要植被類型之設定

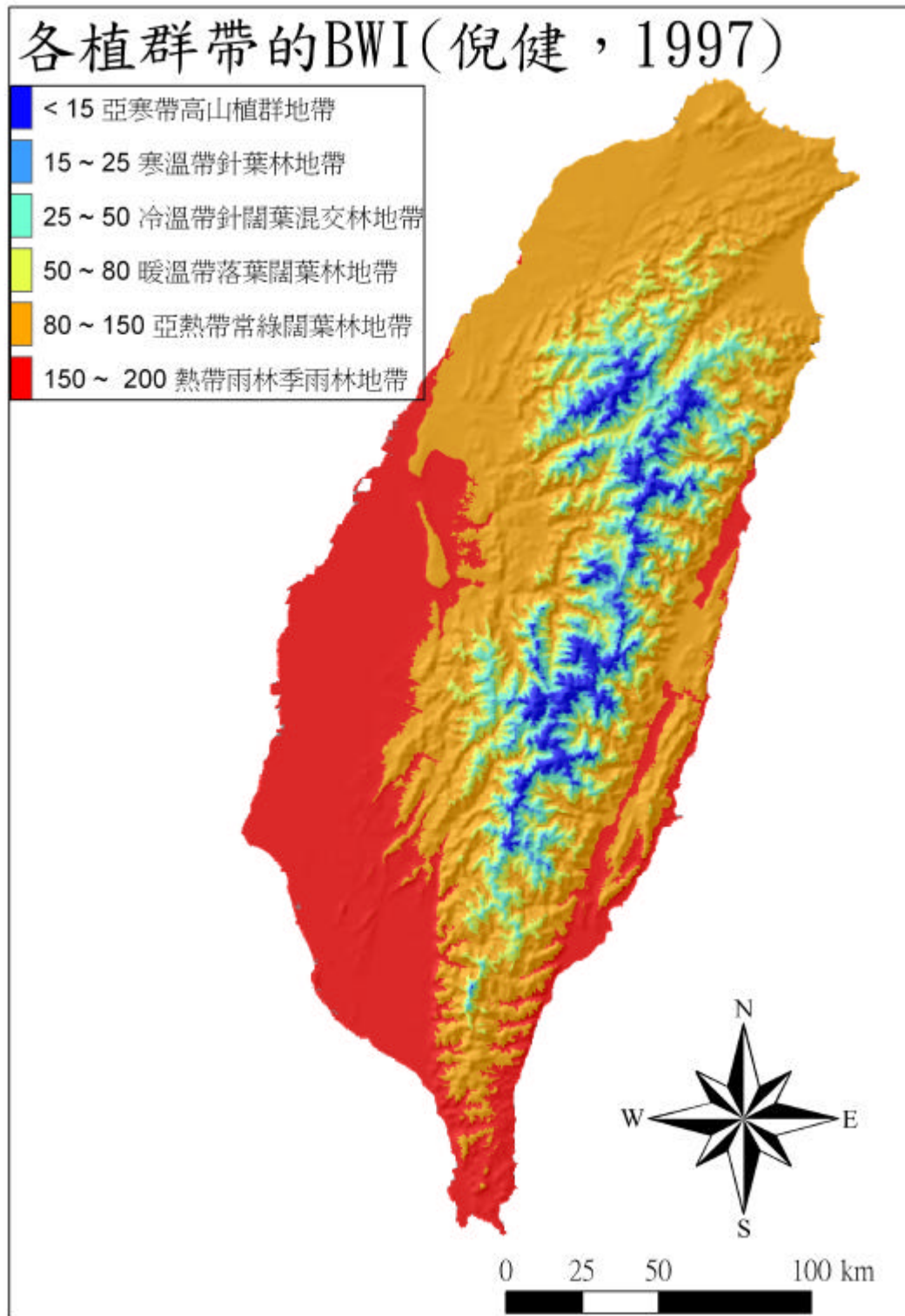


圖 10. 依倪健(1997)劃分中國植被地帶之設定

(三)氣候－植群類型之命名問題

Holdridge(1967)將生命帶視為植物群系(plant formation)之同義詞，但其所劃分出之生命帶/植物群系的術語多與臺灣植群研究所慣用者相異，比如亞高山北方雨林約相當於 Su(1984b)之亞高山冷溫帶冷杉林帶，而山地涼溫帶潮濕森林約相當於 Su(1984b)之上層山地涼帶鐵杉雲杉林帶，二者之差異主要是由於 Su(1984b)以森林樹種組成分進行植群帶之命名，而 Holdridge(1967)則以植群之形相(physiognomy)為生命帶命名，在應用上 Holdridge 方案所能提供的訊息遠不及 Su(1984b)來得貼切，且不易表明植群類型，如亞高山北方雨林、山地涼溫帶潮濕森林這類的名詞，並不易被理解，甚至造成混亂。有關臺灣植群帶之劃分，曾有多位學者(曾昭璇，1993；陳玉峰，1995；徐國士等，2001)以偏重植物地理學之植物區系形相為出發點進行劃分，不在本研究討論之列，以下僅列出與山地垂直氣候為劃分依據較為有關之部分：

1. Wang(1962)依據海拔高度，將臺灣之植群帶分為森林與高山寒原，其中森林可細分為熱帶闊葉林帶、亞熱帶闊葉林帶、溫帶針葉林帶、寒帶針葉林帶，高山寒原可細分為刺柏灌叢帶、山頂裸岩帶。
2. 柳楨(1968)依據形相、組成分子、生態環境因子，將臺灣之植群群系分為熱帶疏林、海岸林、熱帶雨林、暖溫帶雨林、暖溫帶山地針葉樹林、冷溫帶地針葉樹林、亞高山針葉林、高山寒原。
3. Su(1984b)依據海拔高度、溫量指數等，將臺灣中部山地植群帶劃分為榕楠林帶、楠櫛林帶、櫟林帶、鐵杉雲杉林帶、冷杉林帶、高山植群帶。
4. 黃威廉(1993)將臺灣自然植被劃分為熱帶雨林、紅樹林、海岸林、雨綠林、山地雨林、季風常綠闊葉林、常綠闊葉林、常綠落葉闊葉混交林、落葉林、針葉常綠落葉闊葉混交林、常綠針葉林。
5. 劉業經等(1994)雖以植物群系為出發點，但依渠等之島本部區之樹木分布亦可概分為疏林群系、海岸林群系、熱帶雨林群系、硫磺泉植物群系、亞熱帶與暖溫帶雨林群系、暖溫帶山地針葉樹林群系、冷溫帶山地針葉樹林群系、亞高山針葉林群系、寒原群系。
6. 吳征鎰(1998)將臺灣植被分帶區分為紅樹林、海岸林、低地常綠闊葉林、山地

楠栲林、亞高山針葉林、高山灌叢。

本文認為臺灣之植群帶劃分仍須參考地面樣區調查資料，遂以 2003 年版的臺灣維管束植物編碼索引（<http://taiwanflora.sinica.edu.tw/chinese/cindex.html>；彭鏡毅，1996）為植物統一編碼之依據，發展植群樣區調查資料轉檔程式(如圖 11)進行整合分析，未來將進一步參考美國、中國之國家植群分類系統(Anderson *et al.*, 1998; 吳征鎰，1983)擬定適合本地植群的架構。



圖 11. 植群樣區調查資料轉檔程式

(四)氣候、植群之對應性的連結技術

Franklin(1995)將預測植群繪製的方法分為三大類：(1)布林(分離)法(Boolean (discrete) methods)；(2)參數法(parametric methods)；(3)機器學習法(machine-learning methods)。表 12 為各種用來模擬植群類型的技術。

表 12. 各種用來模擬植群類型的技術(Franklin, 1995)

| Dependent variable | Independent Variables | | |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Continuous | Mixes | Categorical |
| Continuous | Regression models | ANCOVA | ANOVA |
| | Regression <i>tree</i> | MANCOVA | MANOVA |
| | GLM | <i>Regression tree</i> | <i>Regression tree</i> |
| | | GLM | GLM |
| Categorical | MLC | MLC with priors | Contingency table |
| | Logit (GLM) | Logit (GLM) | Logit (GLM) |
| | Discriminant analysis | GAM | GAM |
| | GAM | <i>Classification tree</i> | <i>Classification tree</i> |
| | <i>Classification tree</i> | <i>Neural networks</i> | <i>Neural networks</i> |
| | | <i>Genetic algorithms</i> | <i>Genetic algorithms</i> |
| | | <i>Expert systems</i> | <i>Expert systems</i> |

Notes: (M)AN(C)OVA: (Multivariate) Analysis of (Co-)Variance; MLC: maximum likelihood classification; GAM: general additive models; GLM: general linear models.

Source: Modified from Strahler *et al.*, 1980, who modified it from Wrigley, 1979; author additions italicized.

(五)缺乏可驗證的資料

比較不同的氣候 – 植群分類方案之結果，應有可供驗證之資料，Lugo *et al.*(1999)評估 Holdridge 方案在美國之適用性時，即以其製圖結果與衛星影像分類圖、Bailey(1995)生態區(ecoregion)、BIOME 模型輸出(Prentice *et al.*, 1992)、潛在植群圖相(potential vegetation map)比較，然臺灣之植群圖預計在 2008 年完成(陳明義等，2004)，亦尚無全臺之遙測影像植群分類結果，在目前仍缺乏可茲驗證的資料。

第五章 結論與建議

在進行氣候－植群之類型的劃分時，不可能考慮所有的氣候因子及其間的交互作用，在實務上可獲取的氣候資料亦常有限制，因此常以劃分之目的為導向。Holdridge 方案以簡單易得的氣溫與降水資料，即能計算出 3 個氣候參數，並以簡單易懂的蜂巢狀生命帶圖解進行植群之劃分，因此廣為相關研究所使用，本文利用 GIS 計算並繪製臺灣之 Holdridge 氣候參數及其生命帶，認為 Holdridge 方案之尺度過大，且生命帶與植物群系的命名並不適用於臺灣這一類亞熱帶高山島嶼。本文同時也繪製了 Holdridge 生物溫度(BT)與 Su(1984b)使用之 Kira 溫量指數(WI)在臺灣的劃分結果，指出兩者計算方式的不同，及對應植群類型之值域的差異；由於 Holdridge 方案將水平緯度帶與垂直海拔帶之氣候指標值視為相同意義，但山區與全球性帶狀氣候之典型仍有所不同(Lydolph, 1985)，因此應用於全球尺度的 Holdridge 生命帶方案並不適用於亞熱帶高山島嶼的臺灣，Kira 方案則較為適用於本地。

均質的生態系單元對環境變化具有較一致的反應，也便於管理措施之擬定，因此對生態系分類為科學研究與經營管理的基礎工作，其中氣候－植群分類方案為最常被用來分類生態系的方法之一。綜上所述，未來研究臺灣之氣候與植群的關係，由氣候著手之面向來看，應找出適於本地的氣候－植群分類方案，或加以修正之；在植群研究方面則可藉由整合植群樣區地面調查資料，進行植群類別之劃分；同時對氣候與植群之對應性的連結技術則待進一步之探討，以做為未來潛在植群圖、氣候變遷等研究的基礎。本研究同時認為未來遙感探測(remote sensing, RS)資料可提供許多植群與氣候之有用訊息，地理資訊系統(GIS)則能在空間分析與資料整合上發揮強大的作用。

第六章 引用文獻

- 方精雲(1995)吉良龍夫與生態學的發展。生態學雜誌 14(2)：70-75。
- 吳征鎰(1983)中國植被。北京：科學出版社。共 1375 頁。
- 邱清安、林博雄(2004)由測站資料推估臺灣之氣溫與降水之空間分布。投稿於大氣科學(已接受)。
- 邱清安、林博雄、謝旻耕(2004)臺灣地區氣象測站之詮釋資料與日氣溫、日降水量之資料檢定。投稿於氣象學報(已接受)。
- 柳樞(1968)臺灣植物群落分類之研究()臺灣植物群系之分類。林試所研究報第 166 號。26 頁。
- 倪健(1997)KIRA 指標的拓展及其在中國植被與氣候關係研究中的應用。應用生態學報 8(2)：161-170。
- 倪健(1998)植被－氣候分類指標及其應用。生態學雜誌 17(2)：33-44。
- 倪健、宋永昌(1998)中國亞熱帶常綠闊葉林優勢種及常見種分布與 Kira 指標的關係。生態學報 18(3)：248-262。
- 徐文鐸(1983)東北地帶性植被建群種及常見種的分布與水熱關係的研究。植物學報 25：264-274。
- 徐文鐸(1985)吉良的熱量指數及其在中國植被中的應用。生態學雜誌 3：35-39。
- 徐國士、宋永昌、呂勝由(2001)臺灣植被類型圖說。國立臺灣科學教育館。167 頁。
- 張新時(1993)研究全球變化的植被－氣候分類系統。第四紀研究 2：157-169。
- 陳正改(1995)天氣與氣候學。明文書局。第 230-232 頁。
- 陳正祥(1957)臺灣之氣候與氣候分區。臺大實驗林林學叢刊第 7 號。174 頁。
- 陳玉峰(1995)臺灣植被誌(第一卷)：總論及植被帶概論。玉山社。303 頁。
- 陳明義、方國運、前秋豐(2004)臺灣植群多樣性調查與製圖計畫之推動，第二屆臺灣植群多樣性研討會論文集，台北市，林務局。第 1-8 頁。
- 彭鏡毅(編)(1996)臺灣維管束植物編碼索引。行政院農業委員會，臺北市。共 164 頁。

- 馮豐隆、高堅泰(2001)Holdridge 生態區分類方法在臺灣的應用與模擬。林業研究季刊 23(1) : 83-100。
- 黃任伯(2002)以大氣候與植物型之關係模擬氣候變遷對臺灣中部地區植物型之影響。國立臺灣大學森林學系碩士論文。76 頁。
- 黃威廉(1993)臺灣植被。中國環境科學出版社 294 頁。
- 劉春迎(1999)KIRA 指標在中國植被與氣候關係研究中的應用。植物生態學報 23(2) : 125-138。
- 劉業經、呂福原、歐辰雄(1994)臺灣樹木誌。國立中興大學農學院叢書，共 923 頁。
- 羅悅心、關秉宗(1999)氣候變遷對臺灣中部山區植物群系之影響(一)以 Holdridge 生物區帶模式評估。臺大實驗林研究報告 13(3) : 241-253。
- 蘇鴻傑(1992)山地植群帶與地理氣候區。「臺灣生物資源調查及資訊管理研習會」論文集(彭鏡毅編)。中央研究院植物研究所專刊第十一號 : 39-53。
- Akin, W. E. 1991. Global Patterns: Climate, Vegetation, and Soils. University of Oklahoma Press, Norman, 370pp.
- Anderson, K. H., P. J. Bartlein and R. S. Webb (1998) Late Quaternary climate change in eastern north America: a comparison of pollen-derived estimates with climate model results. Quaternary Science Reviews 17: 587-606.
- Bailey, R. G. (1995) Description of the Ecoregions of the United States. USDA Forest Service Miscellaneous Publication 1391. Washington, D.C.
- Box, E. O. (1981) Macroclimate and Plant Forms: a Introduction to Predictive Modeling in Phytogeography. Hague: Dr. W. Junk Publishers. 258pp.
- Brovkin, V. (2002) Climate-vegetation interaction. Journal de Physique IV – Proceedings 12: 10-57.
- Brovkin, V., A. Ganopolski and Y. Svirezhev (1997) A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studie. Ecological Modelling 101: 251-261.
- Budyko, M. I. (1974) Climate and Life (English ed. by D. H. Miller). New York: Academic press. 508pp.
- Cha, G. S. (1995) Potential natural vegetation distribution of the world based on the modified Kira scheme. Journal of Japanese Forestry Society 77(5): 455-462.

- Chen, X., X. S. Zhang and B. L. Li (2003) The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and Planetary Change* 38: 327-337.
- Cramer, W. P. and R. Leemans (1993) Assessing impacts of climate change on vegetation using climate classification systems. In: Lolomon, A. M. and H. H. Shugart (eds.). *Vegetation Dynamics & Global Change*. pp. 190-217. Chapman and Hall, New York.
- Critchfield (1983) *General Climatology*. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, NJ, 446pp.
- Essenwanger, O. M. (2001) *World Survey of Climatology. General Climatology 1C: Classification of Climates*. Amsterdam: Elsevier. 113pp.
- Federici, F. and S. Pignatti (1991) The warmth index of Kira for the interpretation of vegetation belts in Italy and SW. Australia two regions with Mediterranean type bioclimates. *Vegetatio* 93: 91-99.
- Foley, J. A., S. Levis, I. C. Prentice, D. Pollard and S. L. Thompsons (1998) Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology* 4: 561-579.
- Franklin, J. (1995) Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography* 19(4): 474-499.
- Guisan, A. and N. E. Zimmermann (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
- Holdridge, L. R (1947) Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105: 367-368.
- Holdridge, L. R. (1967) *Life Zone Ecology*. San Jose, Costa Rica: Tropical Science Center. 54pp.
- Ito, S. (1988) Species diversity of mainland- and island forests in the Pacific area. *Vegetatio* 77: 193-200.
- Kira, T (1991) Forest ecosystems of east and southeast Asia in a global perspective. *Ecological Research* 6: 185-200.
- Kira, T. (1945) A new climatic zonation in eastern Asia as a basis of agricultural geography. Kyoto: Horticultural Institute, Kyoto Imperial University. 24pp (in Japanese)
- Kira, T. (1977) A climatological interpretation of Japanese vegetation zones. In: Miyawaki, A. and R. Tuxen (eds.). *Vegetation Science and Environmental Protection*. Maruzen, Tokyo. pp. 21-30.
- Kira, T. (1948) On the altitudinal arrangement of climatic zones in Japan. *Kanti-Nogaku* 2: 143-173. (in Japanese)

- Köppen, W. (1931) *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: DeGruyter. 388pp.
- Liu, P. J., A. Kondoh and N. Takeuchi (1998) Study of changes in life zone distribution in north-east China by climate-vegetation classification. *Ecological Research* 13: 355-365.
- Lugo, A. E., B. R. Dodson, T. S. Smith and H. H. Shugart (1999) The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography* 26: 1025-1038.
- Lydolph, P. E. (1985) *The Climate of the Earth*. Roman & Allanheld, Totowa, 386pp.
- Masuda, K. (2000) A note on the climatic factors controlling the global distribution of vegetation. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University* 35: 21-30.
- Pan, Y., X. Li, P. Gong, C. He, P. Shi and R. Pu (2003) An integrative classification of vegetation in China based on NOAA AVHRR and vegetation-climate indices of the Holdridge life zone. *International Journal of Remote Sensing* 24(5): 1009-1027.
- Peng, C. (2000) From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling* 135: 33-54.
- Penman, H. L. (1956) Estimating evaporation. *Transaction of American Geophysical Union* 37(1): 43-50.
- Pickett, S. T. A., G. Kolasa and C. G. Jones (1994) *Ecological Understanding: the Nature of Theory and the Theory of Nature*. Academic Press, New York. 206pp.
- Powell, G. V. N., J. Barborak and S. M. Rodriguez (2000) Assessing representativeness of protected natural areas in Costa Rica for conserving biodiversity: a preliminary gap analysis. *Biological Conservation* 93: 35-41.
- Prentice, K. C. (1990) Bioclimatic distribution of vegetation for general circulation model. *Journal of Geophysical Research* 95(D8): 11,811-11,830.
- Prentice, K. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud and A. M. Solomon (1992) A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* 19: 117-134.
- Su, H. J. (1984a) Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (). Analysis of the variations in climate factors. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 17(3): 1-14.
- Su, H. J. (1984b) Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (). Altitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 17(4): 57-73.

- Su, H. J. (1985) Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (). A Scheme of geographical climatic regions. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 18(3): 33-44.
- Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review* 38: 57-94.
- Trewartha, G. T. (1980) *An Introduction to Climate*, 5th ed. New York: McGraw-Hill. 416pp.
- Troll, C. and K. Pfaffen (1963) Seasonal climate of the Earth. In: Landsberg, H. E., H. Lippmann, K. H. Pfaffen and C. Troll (eds.) *World Map of Climatology*. Berlin: Leipzig.
- Tuhkanen, S. (1980) *Climatic Parameters and Indices in Plant Geography*. Almqvist and Wiksell International, Sweden, 110pp.
- von Wissmann, H. (1961) Stufeb der guertel der vegetation und klimas in Hochasien und seinen Randgebieten. *Erdkunde* 15: 19-44.
- Walter, H. (2002) *Walter's Vegetation of the Earth: The Ecological Systems of the Geo-Biosphere*. 4th, Completely Revised and Enlarged Edition. Springer-Verlag, Berlin. 527pp.
- Wang, Y. J. (1960) A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41:785-790.
- Whittaker, R. H. (1975) *Classification of Plant Communities*. Hague: W. Junk, 408pp.
- Woodward, F. I. (1987) *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press, Cambridge, 174pp.
- Woodward, F. I. and B. G. Williams (1987) Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio* 69: 189-197.
- Woodward, F. I. and W. Cramer (1996) Plant functional types and climatic change: introduction. *Journal of Vegetation Science* 7:306-308.
- Yates, D. N., T. G. F. Kittel and R. F. Cannon (2000) Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change* 44: 59-87.
- Yim, Y. J. (1977) Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. . Distribution of tree species along the thermal gradient. *Japanese Journal of Ecology* 27: 177-189.
- Yim, Y. J. and T. Kira (1975) Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. . Distribution of some indices of thermal climate. *Japanese Journal of Ecology* 25: 77-88.

- Yim, Y. J. and T. Kira (1976) Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula. . Distribution of climatic humidity/aridity. Japanese Journal of Ecology 26: 157-164.
- Yue T., J. L. Liu, S. E. Jorgensen, Z. Gao, S. Zhang and X. Deng (2001) Change of Holdrige life zone diversity in all of China over half a century. Ecological Modelling 144: 153-162.