

# 由測站資料推估台灣 之氣溫與降水之空間分布

邱清安<sup>1</sup> 林博雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>雪霸國家公園管理處、中興大學森林學系

<sup>2</sup>台灣大學大氣科學系

(中華民國九十三年五月十六日收稿；中華民國九十三年九月八日定稿)

## 摘 要

氣溫及降水是決定生態系、植群之類型與空間分布之重要環境因子，如何利用分散的氣象測站資料推估出合理的氣候空間，以滿足各種環境生態模式應用上的需要，仍是迫切但尚待解決的全球問題。本研究以經過資料檢定程序的 219 個氣象站及 877 個雨量站資料做為空間推估分析所依據之點狀氣候資料，結合數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，以測站海拔、座標先行建立各月氣溫之迴歸模型，再套疊殘差之空間推估結果，可大幅提高氣溫推估之精確度，尤其在測站稀少的山區。降水空間推估方面，經交叉驗證(cross validation)之誤差均方根(Root Mean Square Error, RMSE)比較各種不同推估方法後，以先將資料對數轉換後再進行一般克利金(Ordinary Kriging, OK)推估之結果最佳。本研究與奧勒岡州立大學 PRISM 模型(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)、中央氣象局氣候圖集之結果相比對，發現除了山區一些極值差異外，其空間分布特徵是一致的，部分差異來源可能是選用測站和其資料品質的不同所造成。本文之結果可與其他生態和植被參數結合來繪製台灣地區詳細之生態氣候圖，最後本文也檢討空間推估在區域氣候研究尚待努力之方向。

**關鍵詞：**空間推估、數值高程模型、一般克利金法、氣候圖集

## 一、前 言

氣候為決定生態系、植群之類型與分布的主要環境因子(Tuhkanen, 1980; Walter, 2002)，其中氣溫及降水兩項是氣象測站的基本觀測項目，也是最為重要的生態環境因子，但由於氣

象測站只能在某些特定位置取得資料，因而常有採樣不足或是空間分布不均等情況發生。如何由空間點狀分布的氣象測站資料推估成面化空間的氣候分布狀態(簡稱氣候空間)，是水分平衡、水資源管理、氣候變遷、農業生產等研究議題的基本需求，也是許多生態、水文數值模

型的必要參數(Hevesi *et al.*, 1992a; Daly *et al.*, 1994; Boer *et al.*, 2001; Drogue *et al.*, 2002)。

推估某一生態現象之空間分布，通常透過資料內插方法以離散樣本來估算未取樣點之屬性值或是建立最適的連續性表面，以求得任一位置之同類資料(McCoy and Johnston, 2001; 甘, 2001)。以點狀的測站氣象資料來探求三維表面的氣候空間，就氣溫而言，其與海拔高度存在顯著且不同型式的溫度遞減效應可供換算(Rolland, 2003)。降雨則較氣溫不易進行空間推估，尤其是山區降雨的空間分布依存於大氣狀態以及地形起伏，局部地形複雜度以及山區測站偏少等原因，都造成山區降雨空間分布推估的困難(Prudhomme and Reed, 1999; Marquez *et al.*, 2003)。氣候空間推估方法包括徐昇法(Thiessen Polygon)、趨勢面法(Trend surface)、距離反比權重法(Inverse Distance Weighting, IDW)、曲線尺規法(Spline)、地理統計法(Geostatistics)等，其中最常被運用與廣為接受之空間推估方法當屬「地理統計法」(Martinez-Cob, 1996)，或常被簡化稱之為「克利金法(Kriging)」。

中央氣象局氣候圖集(1991)的氣象空間推估(等值線)是收錄局屬站和合作站資料，先經過電子計算機的客觀分析(Objective Analysis)程序篩選過濾(曾, 1992)，再進行測站填圖然後由人工主觀分析繪製等值線而得，這一空間氣候圖集的製作並未引用地理資訊系統數據來進行地理統計法的推估。邱等(2004)曾針對台灣地區1960 ~ 2002年之日平均氣溫和降水觀測記錄值，進行品質檢定和測站詮釋資料正確性的篩選，本文將進一步使用上述資料結合由農林航測所以方格定點錄存之40 m平面解析度的數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)，透過

地理統計空間推估方法來重新檢視台灣地區氣溫與降水氣候值之空間分布；第二節作者首先回顧「克利金(Kriging)」法原理和運用案例；第三節說明本文分析資料之來源，和以DEM為輔助變數下的8種空間推估方法，及推估結果驗證準則、定義座標系統；第四節為本研究所推估的台灣本島地區各月份平均氣溫與降水之空間分布，並與農業試驗所套用PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model, Daly, 2001)模式之推估結果(郭等, 2002)以及中央氣象局(1991)氣候圖集的異同進行討論；第五節總結本文之推估結果，並展望其未來的應用與提出尚待研究之問題。

## 二、地理統計學原理簡介及其在氣候空間推估研究案例

地理統計學之精神在於「在空間中鄰近的資料通常比相離較遠的資料具有較高的相似性或相關性」之觀察，其概念最早由南非礦業工程師Krige等人為探勘Witwatersrand地區的金礦所提出，其後Matheron(1963)提出區域化變數(regionalized variable,  $Z(x)$ )為理論基礎，目前被廣泛應用於環境污染擴散、地下水、降雨分布等有關空間變數分布之推估(黃等, 1998)。克利金(Kriging)法乃是利用已知點 $x_i$ 與推估點 $x_0$ 之空間相關性來決定目標變數( $Z(x)$ )的權重係數 $\lambda_{0i}$ ，據以推估未知點 $x_0$ 之推估值 $Z(x_0)^*$ ，這一推估數值具有最佳線性不偏估計(Best Linear Unbiased Estimate)之特性，並存在著所謂本質假設(intrinsic hypothesis)，即空間中任兩個位置之隨機變數 $Z(x)$ 與 $Z(x+h)$ 之變異數只與兩點之相對距離( $h$ )有關：

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = m(h)$$

$$Var[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h)$$

其中， $E[.]$ 是期望值， $m(h)$ 指 $h$ 之簡單函數式， $h$ 是已知點與推估點的相對距離， $Var[.]$ 則是變異數。在此一假設中，定義出一個新的函數 $\gamma(h)$ ，稱之半變異元(semi-variance)。以某一現象之半變異元 $\gamma(h)$ 與相對距離 $h$ 所繪之關係為試驗半變異圖(experimental variogram)，試驗半變異圖為不連續觀測點所繪製，不具空間連續性，於實際應用時需以連續的函數模式—理論半變異圖(theoretical variogram)加以套配(fitting)，才能完整地表達其空間之變異結構關係(如圖 1)。

數值高程模型(DEM)所包含的地理地形資訊，經常做為氣候空間推估的「輔助資訊」(secondary information; Boer *et al.*, 2001)，比如氣溫對海拔高度存在顯著的遞減相關，降水與

地形的相關則在各地分析結果並不一致，但仍可歸納出以下幾點特性：

1. 降雨隨海拔增加而增加(Barry, 1992) — 海拔高度可做為輔助資訊。
2. 背風坡之雨蔭效應(rainshadow effect; Colinaun, 1994) — 方位可做為輔助資訊。
3. 降雨受地形起伏影響(Marquinez *et al.*, 2003) — 坡度可做為輔助資訊。
4. 降雨和水氣來源及其方向有關(Droque *et al.*, 2002) — 相對於海岸之距離與鋒面方向可做為輔助資訊。

Goovaerts(2000)以 3 種單變數分析法以及使用海拔做為輔助資訊的 4 種多變數分析法，推估葡萄牙南部 Algarve 之降雨空間，其結果顯

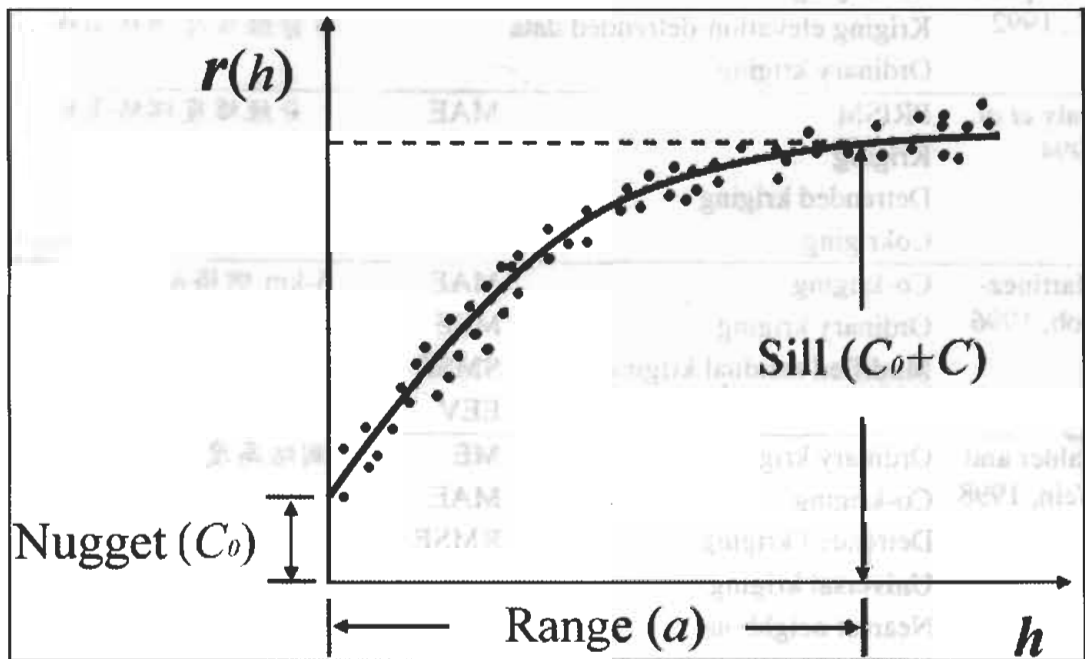


圖 1 半變異圖及其參數(Range 指半變異元隨相對距離之增加而增加的影響範圍；Sill 指半變異元達到水平漸近線之閾值；Nugget 係碎塊效應，指半變異圖中， $h = 0$ 時在  $y$  軸上的截距，原因可能是測量誤差或小範圍空間變異所產生之誤差)，黑點為不連續觀測點，曲線為正定之連續的理論半變異圖函數。

表一 推估氣候空間之相關研究(本報告整理)。r 是相關係數；PAEE 是 percent average estimation error 縮寫；RMSE 是 root mean square error 縮寫；ME 是 mean error / bias 縮寫；MAE 是 mean absolute error 縮寫；MSE: mean square error 縮寫；MPE 是 maximal prediction error 縮寫；SMSE/MSSE 是 standardized MSE 縮寫；EEV 是 estimation on error variance 縮寫；SD 是標準偏差；CV 是變異係數；R<sup>2</sup> 是決定係數，adj R<sup>2</sup> 是進行線性迴歸之調整後決定係數，其餘名稱參見本文第一節。

作者	方法	評估參數	輔助變數
Chuan and Lockwood, 1974	Regression	r	8-km 半徑內的平均高度
Creutin and Obled, 1982	Nearest neighbor Arithmetic mean Spline functions Kriging Gandin interpolation Empirical orthogonal functions	r	測站高度
Hevesi et al., 1992b	IDW Regression Kriging Cokringing	PAEE RMSE SMSE	1000-ft 網格高程
Phillips et al., 1992	Co-kriging Kriging elevation-detrended data Ordinary kriging	CV	測站高度 5 分經緯度網格高程
Daly et al., 1994	PRISM Kriging Detrended kriging Cokringing	MAE	5 分經緯度網格高程
Martinez-Cob, 1996	Co-kriging Ordinary kriging Modified residual kriging	MAE MSE SMSE EEV	5-km 網格高程
Nalder and Wein, 1998	Ordinary kriging Co-kriging Detrended kriging Universal kriging Nearest neighbour Inverse distance squared GIDS	ME MAE RMSE	測站高度
Pardo-Iguzquiza, 1998	Co-kriging Kriging with external drift Ordinary kriging Thiessen	ME MSE MSSE	4-km 網格高程

Prudhomme , 1999	Ordinary kriging	ME	1-km 網格之坡向
	Modified residual kriging Regression	RMSE	
Goovaerts, 2000	Collocated ordinary kriging	MSE	1-km 網格高程
	Kriging with external drift		
	Simple kriging with varying local mean		
	Ordinary kriging		
	Thiessen IDW Linear regression		
Ninyerola <i>et al.</i> , 2000	Regression + GIS	$R^2$	海拔 緯度 陸性率 太陽輻射 雲因子
Price <i>et al.</i> , 2000	Spline	ME	1-km 網格高程與座標
	IDW	RMSE	
Boer <i>et al.</i> , 2001	Co-kriging	MSE	DEM 網格高程與座標
	Trivariate regression kriging	MPE*	
	Ordinary kriging Spline		
Jeffrey <i>et al.</i> , 2001	Spline	RMSE	0.05° 經緯度網格高程與 座標
	Ordinary kriging	MAE	
		ME	
		$R^2$	
Droque <i>et al.</i> , 2002	PLUVIA	ME	DEM windowing process: 723 parameters
	Extended collocated co-kriging	MAE	
	Kriging with external drift	SD	
Marquinez <i>et al.</i> , 2003	Regression + GIS	ME	200-m 經緯度網格高程 距海與西岸之距離 亞集水區之高程與坡度
		MAE	
		Adjusted $R^2$	

示以降雨資料佐以海拔高程之分析優於單以降雨資料之分析。Boer *et al.* (2001) 以海拔高程做為輔助因子之推估結果也優於未考慮海拔高程

者，Martinez-Cob (1996) 亦發現在少量測站之區域，結合修正殘差(modified residual) kriging 方法比未加入迴歸的其他 kriging 方法更可降低空

間推估的不確定性。表一為山區氣溫與降水分布之氣候空間推估之相關研究，藉由這些空間推估方法之比較整理，作者在下一節說明台灣地區氣溫與降水空間推估的較合適方法。

### 三、資料來源與分析方法

本研究以 1960 ~ 2002 年之 1,728 個氣象站資料經由測站詮釋資料檢定和氣象觀測數據品質檢定程序(邱等, 2004)，分別取日平均氣溫有效觀測記錄大於 7 年(219 個氣溫站)及日降水量有效觀測記錄大於 12 年(877 個雨量站)之測站資料，計算其各月之平均氣溫與降水量，以做為空間推估分析所依據之點狀氣候資料。高程資料採用農委會航測所製作之 40m 網格數值高程模型(DEM)，並經空值修補，再重取樣為 100m 之 DEM 網格。

「合宜的採樣點分布」是所有空間推估方法的基本需求，但是對於地形崎嶇的台灣地區仍然有應用上的限制，因此作者參酌表一的氣候空間推估相關研究，決定以最基本且最常用的地理統計法「一般克利金法」(Ordinary Kriging, 以下簡稱 OK)為基準，並以 DEM 高程做為輔助變數，採用可能具有改善推估精確度潛力的協同克利金法(CoKriging, 以下簡稱 COK)做為比對；此外，結合了以下三種不同的統計處理方法：

- (1) 非等向性(anisotropy, 以下以 ani-代表)
- (2) 降趨(detrending, 以下以 det-代表)
- (3) 迴歸殘差(modified residual kriging, 以下以 reg-代表)

進行 8 種不同空間推估方法的評估比較，其中包含針對氣候資料進行常態檢驗並採用對數轉

換(log transformation, 以下以 log-代表)等 2 種方法。

有關測站氣候資料常態檢驗及其與海拔、X 座標、Y 座標之線性迴歸分析，以統計軟體 SPSS 10.1 為分析工具；氣候空間之估算與繪圖以目前使用最廣之地理資訊系統軟體 ArcGIS 8.1 及其 Spatial Analyst 和 Geostatistical Analyst 等模組(參考網站：<http://www.esri.com/>)為操作平台。推估結果之驗證可分為分組驗證與交叉驗證(cross validation)，然當樣本數不多而基於統計要求時，將無法另外篩選出驗證組，只好選擇交叉驗證法(Pardo-Iguzquiza, 1998)，由於本研究之山區樣本數有限，因此本研究採用交叉驗證法，驗證準則以氣候空間推估中最常用的，且對極端錯誤估值較敏感的誤差均方根(Root Mean Square Error, 以下簡稱為 RMSE)為評估依據(Price *et al.*, 2000)。為了探討郭等(2002)套用 PRISM 模型推估台灣月平均氣溫、降水量分布與本文結果之差異，本研究以 ArcGIS 8.1 之 Toolbox 將全部圖層統一定義為目前 GIS 圖層最常見的 TWD67 大地基準之 TM 二度分帶座標(TWD67 大地基準(Taiwan Datum 1967)係以虎子山為三角測量基準；TM 二度分帶座標係台灣地區採用之經差二度分帶橫麥卡脫(TM)投影座標系統，座標原點為中央經線(121 度)與赤道之交點，橫座標西移 250,000 m)；此外，為了與中央氣象局(1991)氣候圖集相互比較，本研究也將氣溫和降水量等值線數化後，再以折點取樣進行插值計算全台各網格之月平均氣溫與降水量。

### 四、結果與討論

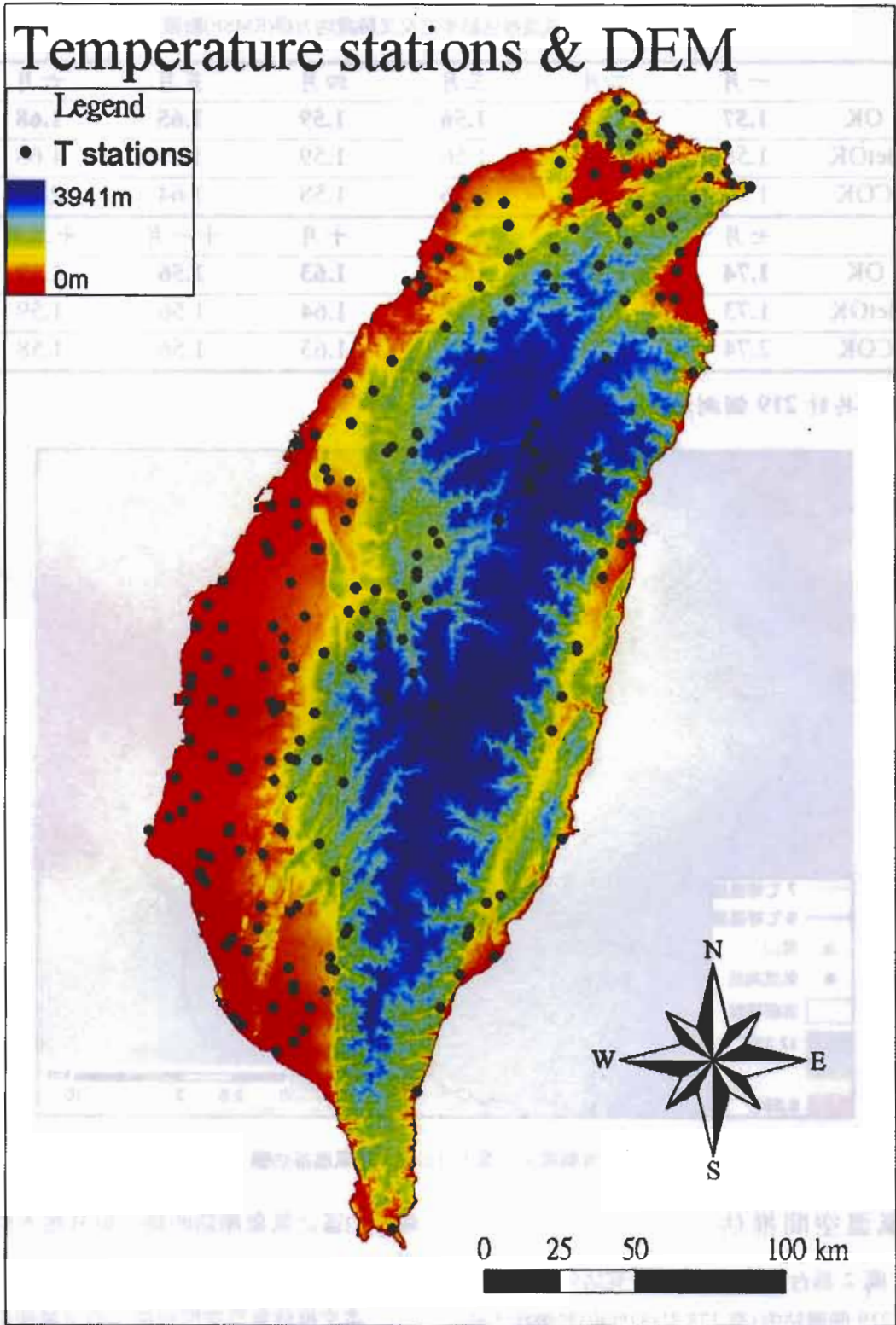


圖2 臺灣數值高程模型(DEM)與有效記錄大於7年之氣溫測站分布。

表二 各月平均氣溫推估結果之交叉驗證均方根(RMSE)數值。

	一月	二月	三月	四月	五月	六月
OK	<b>1.57</b>	<b>1.54</b>	<b>1.56</b>	<b>1.59</b>	<b>1.65</b>	<b>1.68</b>
detOK	1.58	1.54	1.56	1.59	1.65	1.68
COK	1.57	1.54	1.56	1.58	1.64	2.64
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
OK	<b>1.74</b>	<b>1.70</b>	<b>1.67</b>	<b>1.63</b>	<b>1.56</b>	<b>1.59</b>
detOK	1.73	1.70	1.67	1.64	1.56	1.59
COK	2.74	2.70	1.67	1.63	1.56	1.58

註：共計 219 個測站。

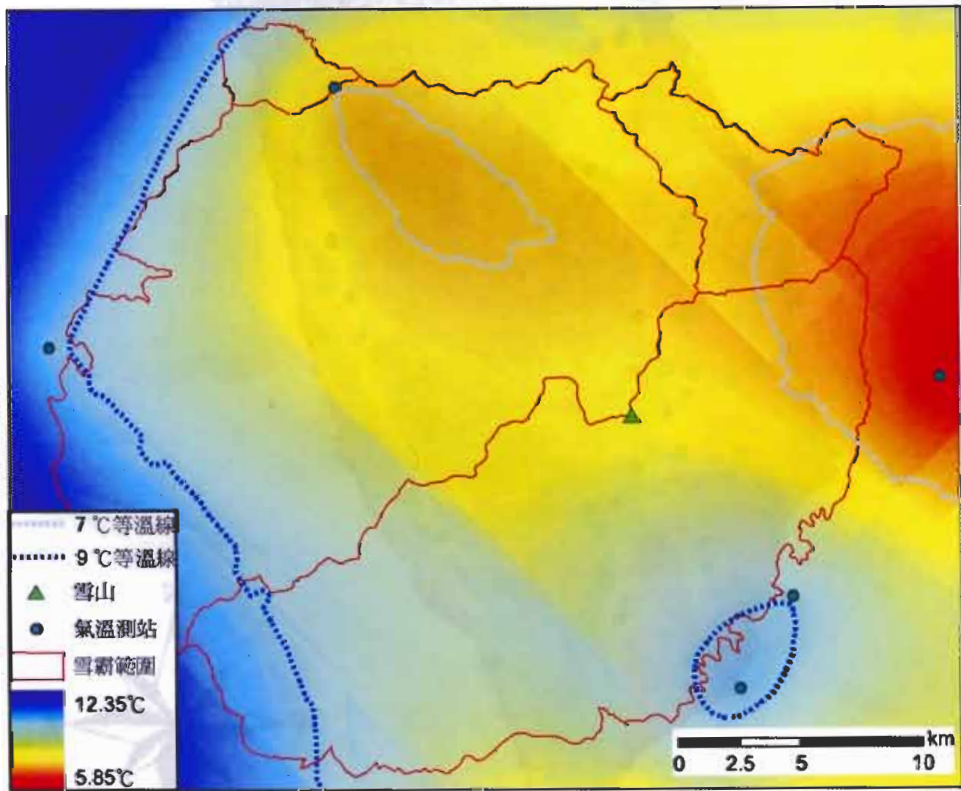


圖 3 雪霸國家公園 1 月份之 OK 氣溫推估圖。

### (1) 氣溫空間推估

圖 2 為台灣 DEM 與氣象測站分布圖，在全島 219 個測站中，有 178 站(81%)位於海拔 500 m 以下，海拔 1,000 m 以上僅有 22 站(10%)，

顯示山區之氣象測站的稀少與分布不均的事實。

本文推估氣溫空間除採用最常被使用與計算簡單的 OK 之外，由於氣溫隨緯度增加而明



顯下降，因此嘗試以 detOK 進行估算，並且由於氣溫隨海拔升高而明顯下降，因此也嘗試以 COK 進行估算。表二為以上 3 種不同的氣溫空間推估結果，交叉驗證之 RMSE 約為 1.7°C，與 Price *et al.* (2000)、Boer *et al.* (2001)、Jeffrey *et al.* (2001) 等報告之推估誤差相當或更低。然而，交叉驗證的使用必須小心，因其為所有樣本之估算誤差的平均值，且易受樣本分布差異所影響(Journel and Rossi, 1989; Prudhomme and Reed, 1999)。以圖 3 雪霸國家公園範圍(760m ~ 雪山 3,886 m)之 OK 推估結果來看，因其園區內與周邊之測站稀少且無高於 2200 m 之測站資料可用，如以氣溫遞減率-0.5°C/100 m (戚, 1970)來計算，雪山一月氣溫約在-3.86°C，與 OK 推估值 7.55°C 差異極大。

氣溫隨緯度及海拔增高而遞減乃為對流層

大氣的特性，並且台灣深受季風氣候影響(吳與陳, 1993)，中央山脈東西兩側之氣溫亦可能有差異，因此本研究以氣溫為反應變數(response variable)，以測站海拔、X 座標、Y 座標為預測變數(predictor variable)，以向後(backward)逐步迴歸法建立複線性迴歸式(表三)。本文推估氣溫空間除了以表三之氣溫迴歸式來計算全台之氣溫分布之外，同時再套疊可說明氣溫局部變異的迴歸殘差之 OK 推估結果，此法亦即 Boer *et al.* (2001) 之 trivariate regression-kriging 推估法。圖 4 為雪霸國家公園之 1 月份氣溫推估圖，其結果較 OK 等地理統計推估更為合理，因此作者認為以測站海拔、座標先行建立氣溫之迴歸模型，再將殘差進行空間推估，可大幅提高氣溫推估之精確度，尤其在測站稀少的山區。圖 5 為上述方法所得到的台灣逐月之平均氣溫推估結果。

表三 各月平均氣溫(T1 ~ T12)之迴歸式。括號內斜體字為進行線性迴歸之調整後決定係數(adjusted R2)。

$$T1 = 57.398 - 0.00461E + 0.00001038X - 0.0000163Y \quad (0.938)$$

$$T2 = 64.407 - 0.00444E + 0.000008993X - 0.0000186Y \quad (0.944)$$

$$T3 = 66.225 - 0.00436E + 0.00000571X - 0.0000181Y \quad (0.941)$$

$$T4 = 56.226 - 0.00472E - 0.0000044X - 0.0000122Y \quad (0.956)$$

$$T5 = 46.342 - 0.00511E - 0.00000863X - 0.00000705Y \quad (0.961)$$

$$T6 = 34.397 - 0.00541E - 0.0000047X - 0.00000215Y \quad (0.963)$$

$$T7 = 28.622 - 0.00568E \quad (0.958)$$

$$T8 = 28.288 - 0.00565E \quad (0.959)$$

$$T9 = 32.747 - 0.00535E - 0.00000767X - 0.0000015Y \quad (0.959)$$

$$T10 = 44.389 - 0.00498E - 0.00000567X - 0.00000694Y \quad (0.948)$$

$$T11 = 49.22 - 0.00476E - 0.0000015X - 0.0000103Y \quad (0.945)$$

$$T12 = 52.256 - 0.00469E + 0.000005803X - 0.0000133Y \quad (0.940)$$

註：E 為海拔高度。X 與 Y 為 TM 二度分帶座標，台灣位於  $149,000 < X < 351,000$ ； $2,422,000 < Y < 2,800,000$ 。E、X、Y 單位均為 m。

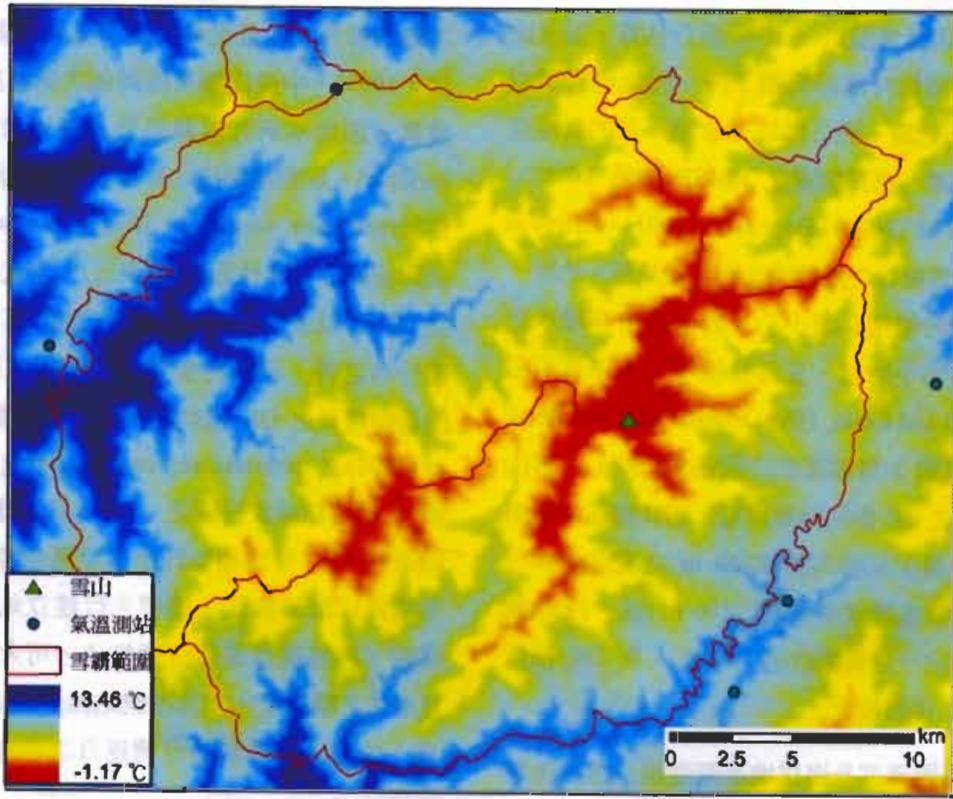


圖 4 雪霸國家公園 1 月份之 trivariate regression-kriging 氣溫推估圖。

理論上推估區域氣候應建立在已定義好的均質區上，然一旦分區後，在繪製推估結果時其邊界之等值線可能無法咬合 (merging isohyets) (Drogue et al., 2002)，因此表三係使用全島資料進行迴歸建模。表三的迴歸式已經可以滿足台灣地區各月平均氣溫 95% 左右的變異 ( $p$  value < 0.01)；就海拔 (E 變數) 而言，各月份的氣溫海拔遞減率在  $-4.36 \sim -5.68$  °C/1000m 間，夏季之遞減率較冬季為高；以表三之經度 (X 變數) 來看，台灣島嶼地形之氣溫於冬季期間由西向東漸增，反之，於夏季由東向西漸增；以表三之緯度 (Y 變數) 而言，全年各月平均氣溫一致呈現由南向北漸減，與全球尺度之氣溫隨緯度增加而降低之現象一致。

## (2) 降水空間推估

圖 6 為台灣 DEM 與降水測站分布圖，在全島 877 個測站中，有 760 站 (87%) 位於海拔 500m 以下，海拔 1,000m 以上僅有 62 站 (7%)，和圖 2 都顯示山區測站的稀少與分布不均的現象。鑑於防災目的、水文模式等應用層面及科學研究之需求，降水空間的推估研究比氣溫受到更廣泛的重視。許多學者注意到降水與地理地形因子存在顯著關係 (Daly et al., 1994; Pardo-Iguzquiza, 1998; Drogue et al., 2002)，台灣地區尚無相關文獻以坡度、坡向、遮蔽率、距海遠近等複雜的地形因子來探討和建立降水預測模型。

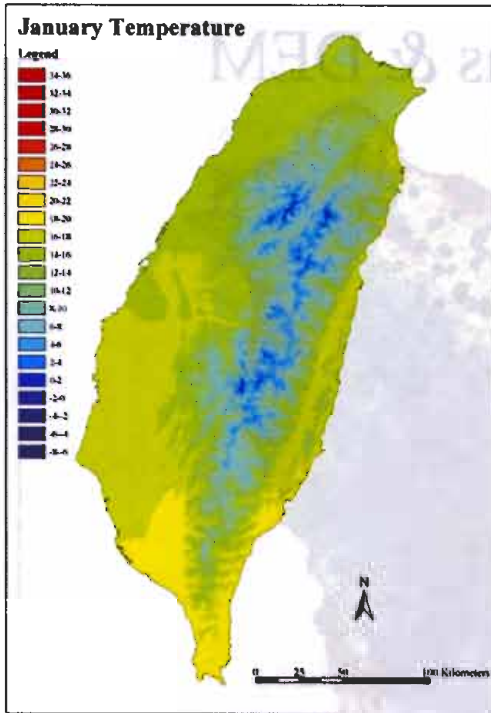


圖 5(a) 1 月份平均氣溫推估圖。

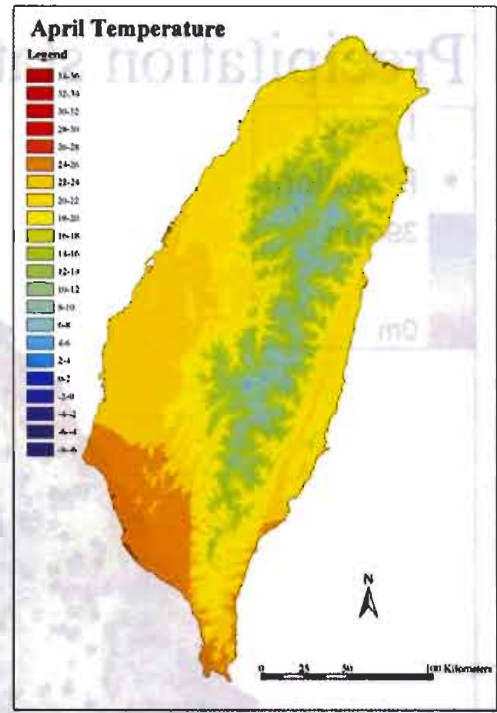


圖 5(b) 4 月份平均氣溫推估圖。

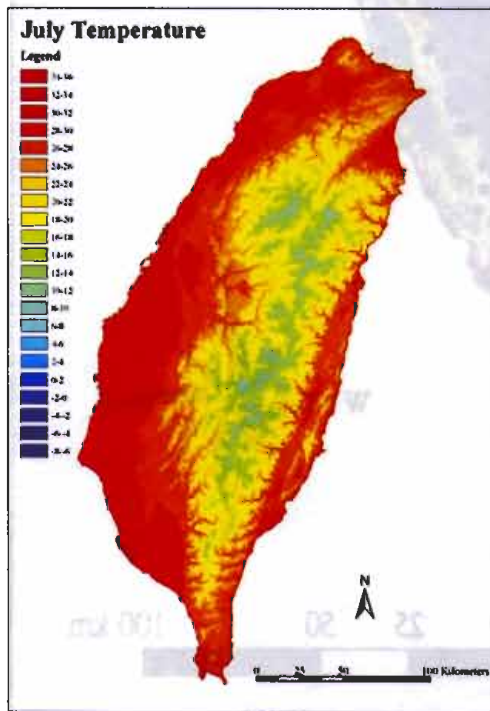


圖 5(c) 7 月份平均氣溫推估圖。

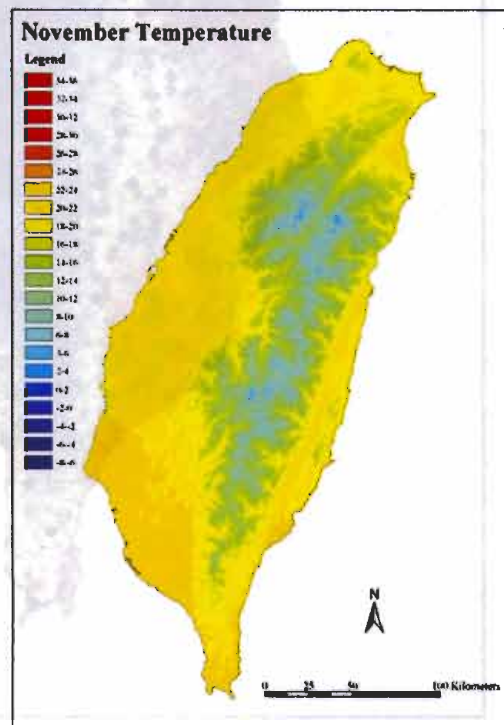


圖 5(d) 11 月份平均氣溫推估圖。

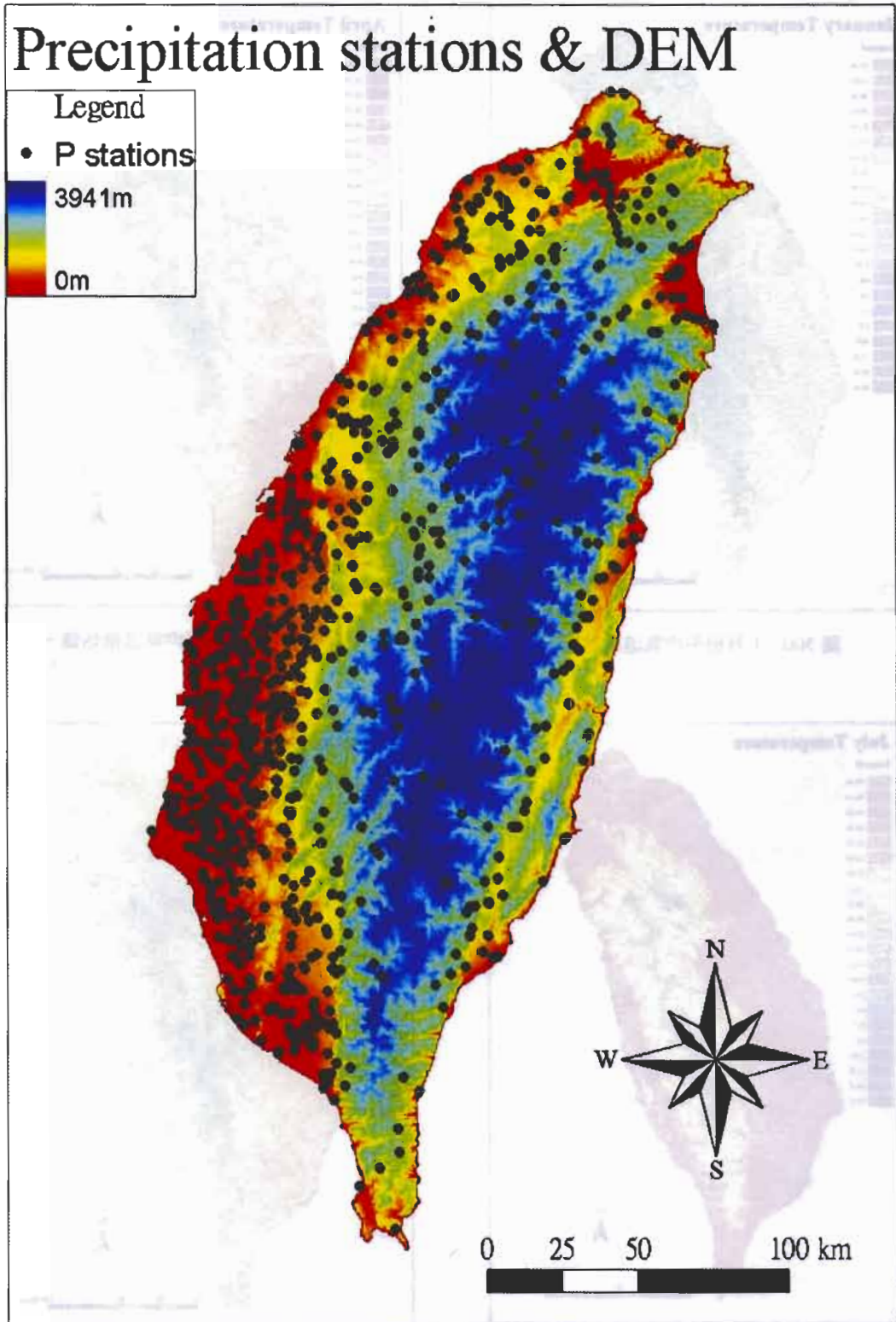


圖 6 台灣數值高程模型(DEM)與有效記錄大於 12 年之降水測站分布。

表四 各月平均降水對海拔高度(E)、X 座標、Y 座標進行線性迴歸之調整後決定係數 (adjusted R<sup>2</sup>)，粗體表示以向後(backward)逐步迴歸法所得數據。

	一月	二月	三月	四月	五月	六月
E	0.078	0.169	0.197	0.261	0.454	0.113
X	<b>0.591</b>	<b>0.574</b>	<b>0.477</b>	<b>0.319</b>	<b>0.165</b>	<b>0.025</b>
Y	<b>0.413</b>	<b>0.610</b>	<b>0.672</b>	<b>0.477</b>	<b>0.059</b>	<b>0.134</b>
EX	<b>0.591</b>	<b>0.599</b>	<b>0.524</b>	<b>0.432</b>	<b>0.488</b>	<b>0.199</b>
EY	0.443	0.690	0.768	<b>0.636</b>	0.471	<b>0.298</b>
XY	<b>0.627</b>	0.720	0.716	0.500	0.165	<b>0.143</b>
EXY	0.628	<b>0.755</b>	<b>0.782</b>	<b>0.637</b>	<b>0.488</b>	<b>0.298</b>
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
E	0.022	0.050	0.081	0.035	0.012	0.034
X	0.066	0.018	<b>0.459</b>	<b>0.591</b>	<b>0.525</b>	<b>0.534</b>
Y	0.418	0.261	<b>0.010</b>	<b>0.086</b>	<b>0.185</b>	<b>0.308</b>
EX	0.131	<b>0.103</b>	<b>0.462</b>	<b>0.597</b>	<b>0.546</b>	<b>0.539</b>
EY	0.487	0.363	0.083	0.105	<b>0.185</b>	<b>0.315</b>
XY	0.461	0.325	<b>0.652</b>	<b>0.661</b>	<b>0.527</b>	<b>0.545</b>
EXY	<b>0.505</b>	<b>0.388</b>	0.652	<b>0.671</b>	<b>0.549</b>	<b>0.549</b>

作者首先建立測站之月降水量的複線性迴歸(表四)，單以海拔為(E 變數)為預測變數時，海拔僅能解釋 1.2 ~ 45.4%的降水變異，因此降水與海拔並不存在簡單相關的梯度關係。如果以向後逐步迴歸分析來決定海拔、X 座標、Y 座標之預測變數組合時，迴歸模型之解釋量則提高到 29.8 ~ 78.2%間，但顯然仍較前述之氣溫迴歸模型為低，同時複迴歸模型之解釋量於夏季明顯較冬季為少，Droque *et al.*(2002)歸因於夏季期間山區因為地形舉升效應降低了低層大氣穩定度而形成對流胞，此外台灣的夏季還多了「颱風」這一項非地形因子。

由表五各種推估法之交叉驗證的 RMSE 來看，整體而言以 logOK 為最佳，換言之，降水資料經由 log 轉換後的 OK 地理統計推估，反而

優於非等向性、降趨等處理方法，推論此係由於臺灣之中央山地高山林立造成阻隔，使非等向性、降趨等方法無法擷取一致之趨勢所致。COK 可勉強看出推估結果與山區起伏之關係，但 COK 須同時計算主要、輔助變數之變異圖(direct-variogram)及二者之交叉變異圖(cross-variogram)函數，在實際操作時運算需求極高，且其結果在 GIS 之推估圖層繪製時幾乎不可能完成。綜上所述，本研究選用交叉驗證 RMSE 整體誤差最低的 logOK 來推估台灣各月降水空間(如圖 7)，各月之推估結果的誤差與相關研究報告(Boer *et al.*, 2001)相當或更低。

圖 8 顯示台灣之全年降水量介於 1,023 ~ 4,880 mm 之間；夏半年(4 ~ 9 月)降水量介於 854 ~ 2,979 mm 間，主要受到西南季風之影響明顯集中於西南部，尤其中央山脈南段之西側迎風

表五 各月平均降水推估結果之交叉驗證 RMSE 值。

	一月	二月	三月	四月	五月	六月
OK	17.75	21.97	19.34	26.93	31.47	47.96
detOK	17.60	22.55	18.03	27.04	31.46	47.96
logOK	<b>17.51</b>	<b>21.80</b>	<b>19.26</b>	<b>26.83</b>	<b>31.39</b>	<b>47.86</b>
aniOK	17.60	21.96	19.46	27.39	31.62	45.36
COK	17.75	21.97	19.34	26.92	31.47	47.95
detCOK	17.60	22.56	19.36	27.42	31.45	47.95
logCOK	17.51	21.80	19.26	26.83	31.37	47.86
aniCOK	17.72	21.93	19.62	29.02	33.42	46.07
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
OK	42.90	53.72	42.91	37.27	23.47	18.66
detOK	42.65	48.39	50.04	42.18	24.36	18.75
logOK	<b>42.20</b>	<b>53.07</b>	<b>42.68</b>	<b>37.34</b>	<b>23.43</b>	<b>18.30</b>
aniOK	41.98	51.21	46.06	38.91	23.99	18.59
COK	42.90	53.72	42.43	37.27	23.47	18.66
detCOK	41.10	46.96	49.85	42.20	24.37	18.76
logCOK	42.21	53.07	43.76	37.37	23.43	18.30
aniCOK	41.95	51.12	48.09	40.38	23.89	18.73

註：共計 877 個測站。

坡面(圖 9)；冬半年(10 ~ 3月)降水量介於 99 ~ 3,138 mm 間，因受東北季風之影響明顯集中於東北部及鄰近山區，並沿中央山脈東側往南而遞減(圖 10)。圖 11 為夏半年佔全年降水量之百分率，顯示出台灣基本的降水分布型式強烈受到冬夏季風之影響，雲嘉南高屏一帶平原之降水集中於夏季，最極端的地區夏季降水佔全年降水之 94%，強烈顯示乾濕季分明，而台灣東北一帶夏季降水僅佔全年約 40%，顯示其為全年均濕型氣候，甚至冬季雨水較夏季為多。

### (3) 本文結果與其他文獻推估結果之比較

表六整理了本研究與農業試驗所 PRISM 推估的差異；在月平均氣溫推估上，兩者在逐月的趨勢是相似的，如果以年平均氣溫之差異值(圖 12)來看，本研究在中北部中高海拔之山脈稜脊低估於 PRISM 約 3°C，而在中央山脈南段東側山坡則高估於 PRISM 約 2°C，此為兩種不同方法估計理論上的差異；以全島各月平均氣溫而言，本研究採用之 trivariate regression-kriging 較低於 PRISM 約 0.63°C。在降水量推估方面，兩者 1 ~ 12 月之趨勢也是相似的，以年降水量之差異值(圖 13)來看，本研究在中高海拔稜脊與東北坡低估於 PRISM 約 2000 mm，而在北部之鹿皮山、蘭嶼山一帶及南部北大武山、

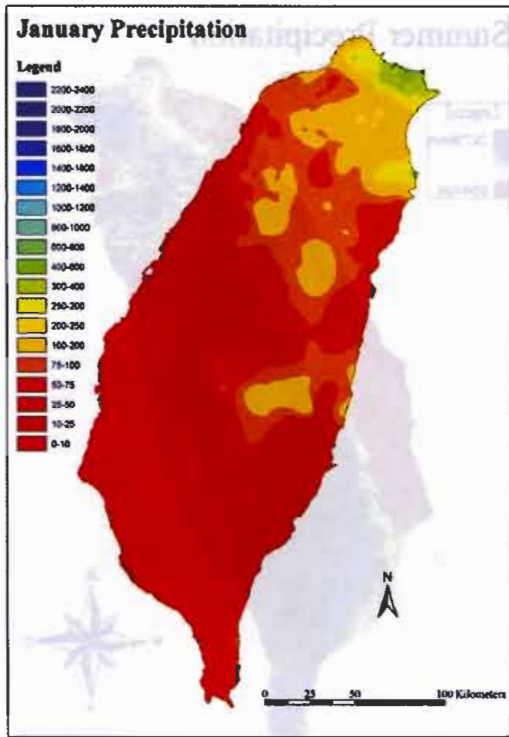


圖 7(a) 1 月份平均降水推估圖。

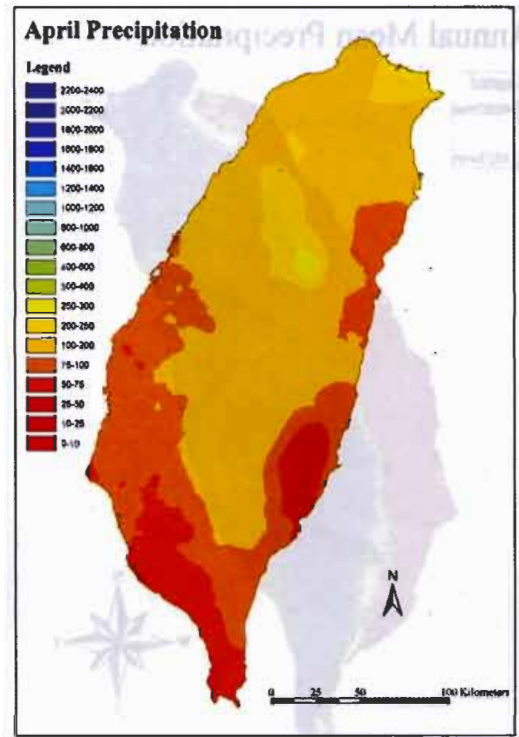


圖 7(b) 4 月份平均降水推估圖。

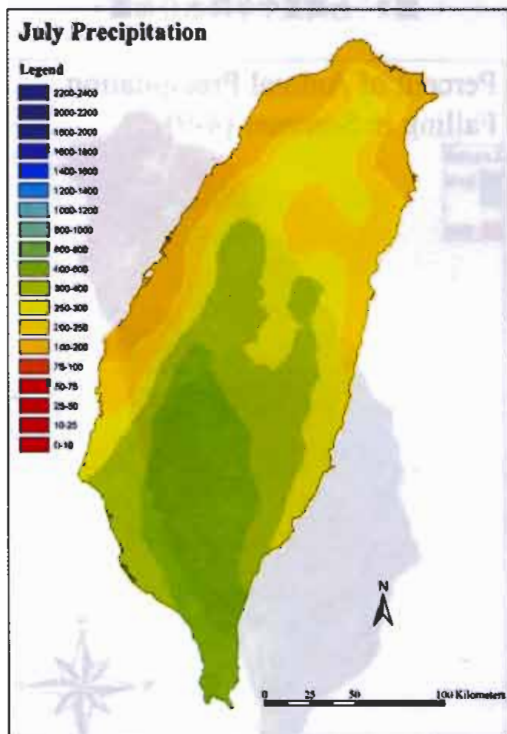


圖 7(c) 7 月份平均降水推估圖。

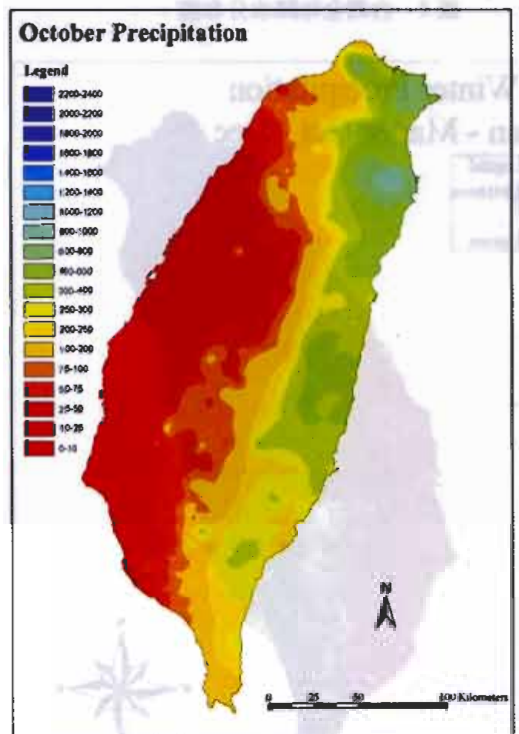


圖 7(d) 10 月份平均降水推估圖。

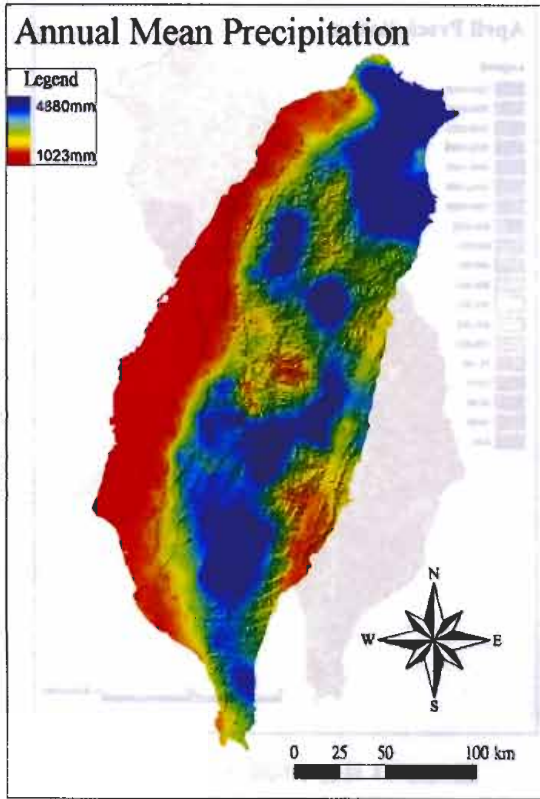


圖 8 台灣全年降水分布圖。

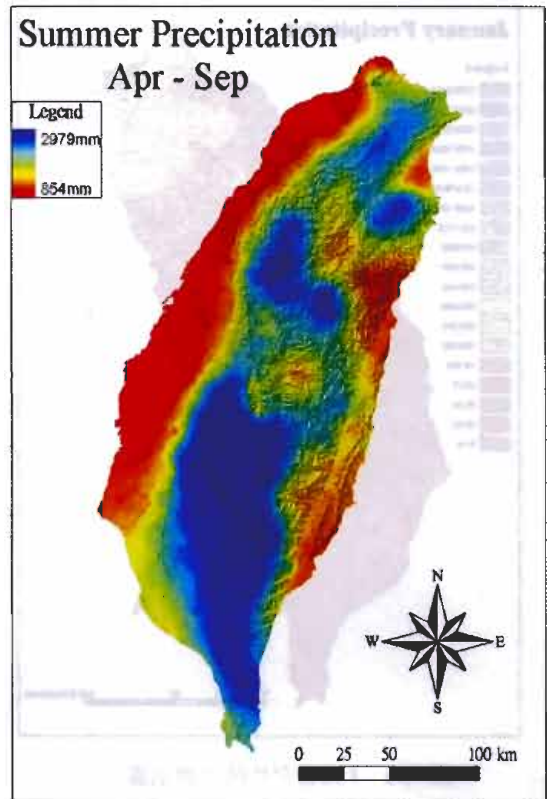


圖 9 台灣夏半年降水分布圖。

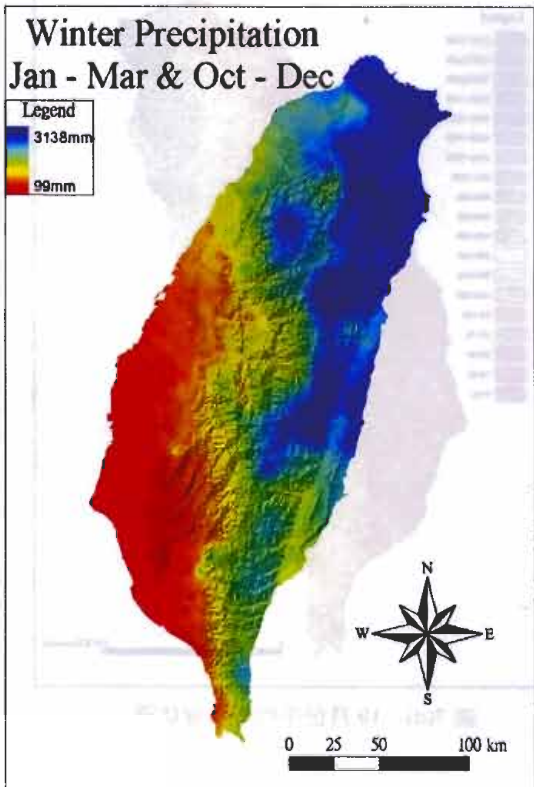


圖 10 台灣冬半年降水分布圖。

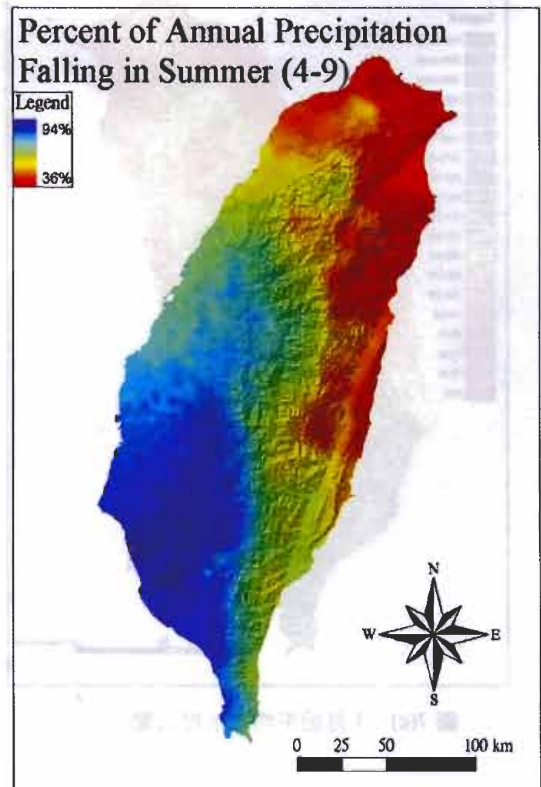
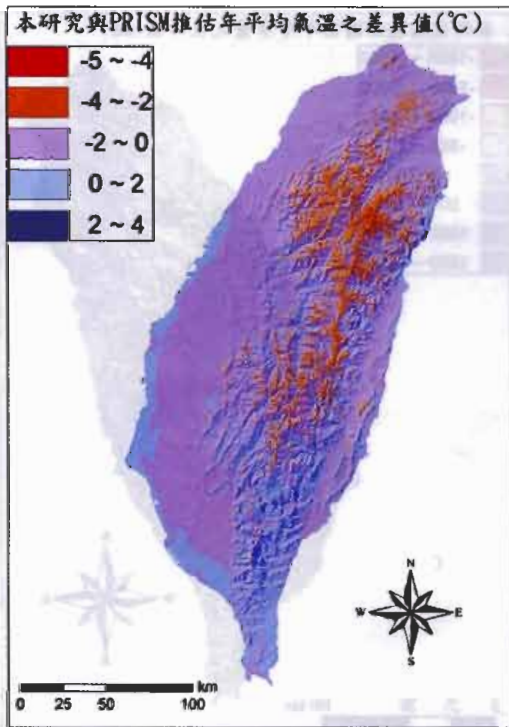


圖 11 夏半年佔全年降水之比率



表六 本研究與 PRISM 推估之比較。

	本研究	PRISM
資料來源	1960 ~ 2002 年，計 1728 站逐日資料	1971 ~ 2000 年，計 1132 站逐日資料
檢定方法	連續無變化、高低值界限 (邱等, 2004)	資料之標準偏差值
代表氣候狀態之氣象記錄	T: 有效記錄期 >7 年 P: 有效記錄期 >12 年	記錄連續 15 年且每月資料超過 15 天
有效測站數	T: 219 站 P: 877 站	T: 107 站 P: 701 站
推估方法	T: trivariate regression-kriging P: logOK	PRISM
網格大小	100m	500m



12 本研究與 PRISM 推估年平均氣溫之差異值 (°C)。

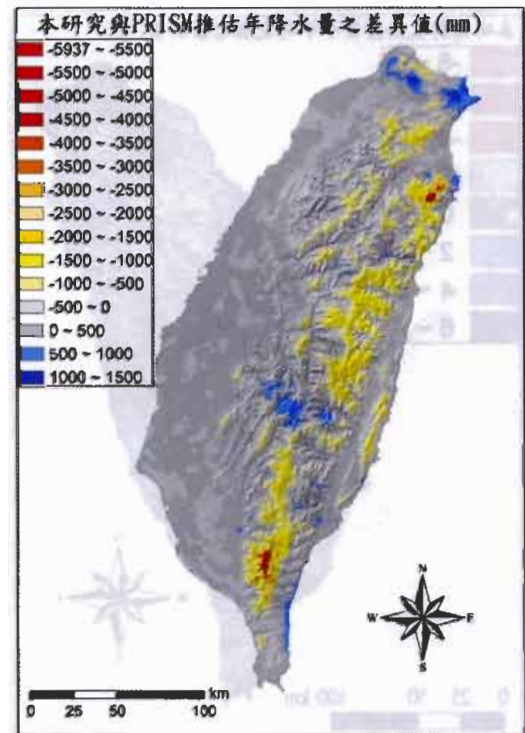


圖 13 本研究與 PRISM 推估年降水量之差異值 (mm)。

南大武山一帶也是低估約 4500 mm，此為兩種方法採用之原始測站資料上的差異；以全島各月平均降水量而言，本研究採用之 logOK 推估值較低於 PRISM 約 12.73 mm。整體而言，不論及原始點狀測站資料之差異的影響，本研究與 PRISM 兩者之推估結果的空間分布特徵是一致的，但是本研究的氣象資料是經已濾除掉極端不合理的 17.6%測站與 8.3%觀測數據之檢定程序(邱等，2004)而得。

本研究圖 5 與中央氣象局氣候圖集之各月平均氣溫比較，均可明顯看出氣溫隨緯度與海拔增高而遞減，但本文之結果更能看出山區地形變化對氣溫之影響；以年平均氣溫之差異值(圖 14)來看，本研究在高海拔稜脊線低估於氣

候圖集，但在蘭陽溪上游等山區谷地高估於氣候圖集，此為本文應用了 DEM 高程來解釋氣溫變異所造成，就全島各月平均氣溫而言，本研究之結果較高於氣候圖集約 0.02 °C。在降水量方面，兩者逐月之趨勢也是相似的，以年降水量之差異值(圖 15)來看，本研究在阿里山、出雲山、和平溪上游低估於氣候圖集約 1000 mm，作者認為是兩種方法採用之原始測站資料上的差異，如以各月平均降水量來看，本研究之結果較低於中央氣象局氣候圖集約 4.64 mm，但本研究消弭了若干山區局地極端值現象，南部夏季降水的空間分布也較為廣闊均勻，作者認為資料品質檢定的步驟，是推估山地雨量是否真正出現極端值的必要步驟。

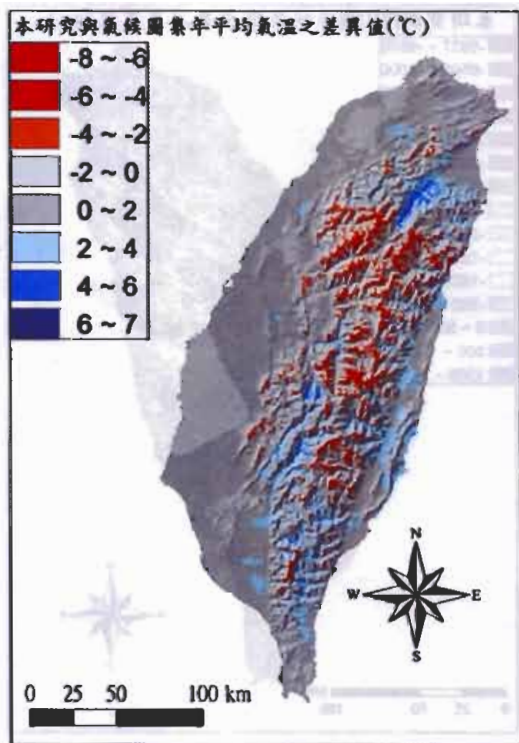


圖 14 本研究與氣候圖集年平均氣溫之差異值(°C)。

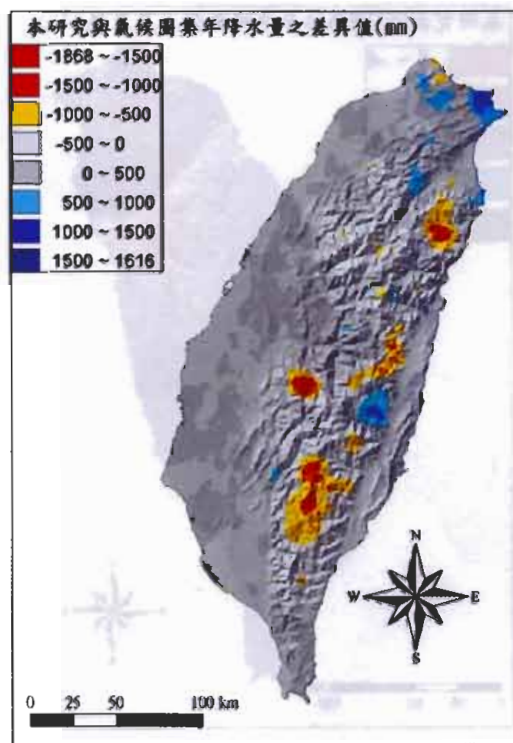


圖 15 本研究與氣候圖集年降水量之差異值(mm)

## 五、結論與討論

如何利用點狀測站資料推估出合理的氣候空間，以滿足各種環境生態模式應用上的需要，是一項迫切但尚待解決的理論研究與實務驗證問題。有關氣候空間推估方法之選定，目前都鎖定在氣候與海拔、經緯度、坡度、坡向、與水體距離、環境封閉度、地表植生等因子之關係探究。然而一套富有彈性的推估方法來通盤應用在不同氣象因子的空間推估，仍然有待發展與測試，同時也要兼顧現實上資訊的可得性與準確性的需求程度(Courault and Monestiez, 1999)。本研究首次以測站詮釋資料與氣象資料的品質確認為啓端，透過 DEM 資料解析度來嘗試探討台灣島嶼地形的氣溫降水空間推估；月平均氣溫方面，作者認為海拔高度和地理座標之複線性迴歸，可以闡明台灣全島整體性的氣溫變異，而迴歸殘差值之 OK 估算則可用以說明局部地區的氣溫差異，此二圖層之套疊結果更能合理解釋台灣三維表面的氣溫空間與其變異。由於影響降雨之變因極為複雜，線性迴歸、非等向性、降趨及 COK 等方法均未能全面性解釋台灣之降水空間，其中對測站降水資料先予以 log 轉換後可有效降低估計誤差，且 OK 運算需求遠遠較 COK 為低，因此選用 logOK 來推估台灣各月降水空間，其推估結果提供整體性概觀地降雨分布樣式，可用以描述某一無測站之區域的環境背景，相對於少而不均的山區測站降雨資料，本文所獲得之結果仍具參考價值。

本研究在月平均氣溫與月降水量之推估結果與 PRISM 之推估結果、中央氣象局氣候圖集的空間分布特徵是一致的，其應用尺度僅適用於中尺度空間之研究，對局部地形所造成之氣

候特性，如霜袋效應、雨陰效應等模擬能力仍有所不足。本研究之結果可用以繪製任意地點之生態氣候圖，亦可輕易轉化為溫濕指數等植群-氣候指標或應用於台灣氣候分類系統之研究(Tuhkanen, 1980; Walter, 2002; 倪健, 1997)。

本研究尚有許多細節值得日後逐項加以探討，包括(1)測站資料之樣本大小、均質性、篩選法則、分布與轉換型式，(2)輔助變數之選定與組合及其建模，(3)各種推估模型之理論架構、參數設定與結果比較。將月平均、年平均的資料處理改為應用在侵台颱風個案的逐時降水空間推估，也是下一步的研究方向。

## 誌謝

本文係於內政部營建署保育自行研究計畫 092-301020500G-021「雪霸國家公園氣候環境之研究」項下支援完成，承中央氣象局資料提供，及逢甲大學地理資訊系統研究中心劉怡萱小姐等人之協助，謹致由衷謝忱。

## 參考文獻

- 中央氣象局，1991：中華民國台灣地區氣候圖集第一冊。交通部中央氣象局，台北市，94 頁。
- 甘順吉，2001：空間指數與內插方法之相關性研究。國立中興大學土木系研究所碩士論文，54 頁。
- 吳明進，陳幼麟，1993：台灣的氣候分區。大氣科學，21(1)，55-66。
- 邱清安，林博雄，謝旻耕，2004：台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。
- 林博雄，徐仲毅，簡振和，2002：風場變形對地面降水觀測造成偏差之個案探討。大氣科學，30，241-258。
- 倪健，1998：植被-氣候分類指標及其應用。生態學雜誌，17(2)，33-44。

- 戚啓勳, 1970: 台灣山地氣溫之特徵。氣象學報, 16(3), 13-23。
- 郭鴻裕, 劉滄琴, 劉禎祺, 朱猷良, 葉明智, 徐承原, 陳淑慧, C. Daly, 2002: 台灣地區氣象資料空間化作業。2002 中華地理資訊學會年會暨學術研討會論文集。私立逢甲大學, 台中市。
- 曾文雯, 1992: 中央氣象局自動氣象資料處理系統之現況研究。氣象學報, 38, 119-138。
- 黃文政, 楊富堤, 游山峰, 1998: 區域化變數理論在水資源領域應用之探討。第九屆水利工程研討會論文集。國立中央大學, 桃園。
- Barry, G. B., 1992: Mountain Weather and Climate. 2nd ed. Routledge, New York. 432pp.
- Boer, E. P. J., K. M. de Beurs and A. D. Hartkamp, 2001: Kriging and thin plate splines for mapping climate variables. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(2), 146-154.
- Chuan, G. K. and J. G. Lockwood, 1974: An assessment of topographical controls on the distribution of rainfall in the central Pennines. *Meteorological Magazine*, 103, 275-287.
- Colinvaux, P., 1994: Ecology 2. Wiley & Sons, Inc., New York. 688pp.
- Courault, D. and P. Monestiez, 1999: Spatial interpolation of air temperature according to atmospheric circulation patterns in southeast France. *International Journal of Climatology*, 19, 365-378.
- Creutin, J. D. and C. Obled, 1982: Object analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resources Research*, 18(2), 413-431.
- Daly, C., 2001: Climate Mapping with PRISM. OSU-SCAC., Oregon. 49pp.
- Daly, C., R. P. Neilson and D. L. Phillips, 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 140-158.
- Droge, G., J. Humbert, J. Deraisme, N. Mahr and N. Freslon, 2002: A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *International Journal of Climatology*, 22, 599-613.
- Goovaerts, P., 2000: Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Hevesi, J. A., A. L. Flint and J. D. Istok, 1992a: Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, Part I: structure analysis. *Journal of applied meteorology*, 31, 661-676.
- Hevesi, J. A., A. L. Flint and J. D. Istok, 1992b: Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, Part II: Isohyetal maps. *Journal of applied meteorology*, 31, 677-688.
- Jeffrey, S. J., J. O. Carter, K. B. Moodie and A. R. Beswick, 2001: Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Environmental Modelling & Software*, 16, 309-330.
- Journel, A. G. and M. E. Rossi, 1989: When do we need a trend model in kriging? *Mathematical Geology*, 21(7), 715-739.
- Marquinez, J., J. Lastra and P. Garcia, 2003: Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 270, 1-11.
- Martinez-Cob, A., 1996: Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. *Journal of Hydrology*, 174, 19-35.
- Matheron, G., 1963: Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246-1266.
- McCoy, J. and K. Johnston, 2001: Using ArcGis Spatial Analyst. ESRI., New York. 230pp.
- Nalder, I. A. and R. W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climate Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 211-225.

- Ninyerola, M., X. Pons and J. M. Roure, 2000: A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, **20**(14), 1823-1841.
- Pardo-Iguzquiza, E., 1998: Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography. *International Journal of Climatology*, **18**, 1031-1047.
- Phillips, D. L., J. Dolph and D. Marks, 1992: A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, **58**, 119-141.
- Price, D. T., D. W. McKenney, I. A. Nalder, H. F. Hutchinson and J. L. Kesteven, 2000: A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **101**, 81-94.
- Prudhomme, C. and D. W. Reed, 1999: Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: a case study in Scotland. *International Journal of Climatology*, **19**, 1337-1356.
- Rolland, C., 2003: Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in alpine regions. *Journal of Climate*, **16**, 1032-1046.
- Tuhkanen, S., 1980: *Climatic Parameters and Indices in Plant Geography*. Almqvist and Wiksell International, Sweden. 110pp.
- 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.

# **Spatial Interpolation of Air Temperature and Precipitation from Meteorological Stations at Taiwan.**

**Ching-An Chiu<sup>1</sup>**

**Po-Hsiung Lin<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Shei Pa National Park · Department of Forestry, National Chung Hsing University**

**<sup>2</sup>Department of Atmospheric Science, National Taiwan University**

**(Manuscript received 16 May 2004 ; in final form 08 September 2004)**

## **ABSTRACT**

Temperature and precipitation are important environmental factors to determine the types and spatial distribution of ecosystem and vegetation. The technique of estimating reasonable spatial distribution from the separated meteorological station data for ecological model applications, are the critical but not solved completely issue in the world. We used the 219 meteorological stations and the 877 rainfall stations which had passed quality checking procedure as the base for spatial interpolation. Combining with Digital Elevation Model (DEM) database, the regression among the elevation, coordinates and monthly-average temperature at the meteorological stations were calculated first. Then they were overlay by the interpolated results of regression residual method to get the best spatial estimation of air temperature. The result improved substantially the spatial precision of air temperature, especially at the mountainous area where had sparse meteorological stations. After the comparison of different methods relayed to the cross validation of root mean square error (RMSE), we found the logarithmic transform of precipitation data combined with Ordinary Kriging (OK) method provided the best result of precipitation spatial interpolation. The results in this study were compared to The Parameter-elevation Regressions in Independent Slopes Model (PRISM) of Oregon State University and the atlas of climate made by Central Weather Bureau. The spatial patterns among these sources were similar to each other, except the extreme values at mountain areas. It might be caused by the selection of meteorological stations and different data quality process. The results in this study could be combined with other ecosystem and vegetation parameters for making detailed eco-climate diagrams at Taiwan. We also gave discussion on the future work of spatial interpolation for regional climate research.

**Key word : Spatial interpolation · Digital elevation model · Ordinary Kriging method · Atlas of climate**