

利用 MM5 模式評估台灣地區風能蘊藏量之研究

林和毅

空軍氣象聯隊氣象中心

摘要

自 1970 年代能源危機發生以後，歐美等先進國家即積極研究開發各種替代能源，以取代日漸枯竭的石化燃料，再加上近來環保意識的抬頭，以及全球溫室效應的日趨嚴重，使得綠色能源的開發，成了人類永續發展的課題之一。而風能即是一種有待開發的綠色能源。台灣地區雖缺乏傳統能源，但地處東亞季風盛行區域，具有良好的風能發展環境。

根據風能公式，風能與風速的三次方成正比，所以風速是風能計算的重要因子。由於測站的分布不均，而且資料密度不足，使用測站資料所做的研究結果並無法清楚地呈現出台灣地區風場的分布情形。所以進一步使用中尺度區域氣象模式「MM5」來進行模擬，以取得高解析度（10km 網格），分布均勻的氣象場資料。然而，對於模擬的結果，我們並不能直接使用，畢竟對於地形多變的台灣而言，模式中網格解析度、地形資料與參數化等因素，皆會影響模擬的結果。因此，在本研究中，又再將模擬結果與觀測值做相關分析，並配合測站觀測值，使用客觀分析的方法加以修正，以補充其小尺度現象之遺漏。最後利用此調整值計算出台灣地區平均風能密度的分布，以供台灣地區的風能評估分析之用。

(2001 年 7 月 10 日收稿；2001 年 8 月 3 日定稿)

一、前言

風能的利用自古就有，但是風的穩定性不高，又有地形、區域以及季節上的限制，所以在風能的供給上並不充分。因此工業革命之後，就被穩定性高的石化能源取代了。雖然石化燃料具有穩定性高又價格低廉的特性，但是它的蘊藏量有限，況且使用石化燃料還會造成空氣污染與溫室氣體的排放。自 1970 年代發生全球能源危機之後，歐美等先進各國便積極開發新的替代能源，在兼顧環保與抑制溫室效應的考慮下，新能源的開發傾向於發展具有再生性強，又無污染的方向，那就是綠色能源。

另一方面，1997 年年底，「氣候變化綱要公約締約國大會」所通過的「京都議定書」，決議要求各國對於溫室氣體的排放予以減量。面對傳統能源具有高污染性以及有限的儲存量，而新興的核能發電也仍有安全上的疑慮與核廢料污染的問題，

因此，發展一種乾淨而且又取之不盡的綠色能源，是人類當前對於永續發展與環境保護這個課題的重要工作之一。

由於台灣本身缺乏傳統性能源，就國內的能源結構而言，超過 96% 的發電燃料都需仰賴進口，如燃油、燃煤、燃氣及核能等，而剩下的 4% 為水力發電，但已達開發的極限。再者，以台灣 1996 年使用能源所排放的 CO_2 總量 170.8 百萬噸為例，其中火力發電所造成的排放量佔 35%，在因應全球減少溫室氣體的要求下，有必要以綠色能源逐步取代傳統燃料發電，以減少台灣地區溫室氣體的排放。

台灣四面環海，地處東亞季風盛行區域內，冬季有強勁的東北季風，夏季則有豐沛的西南氣流，常年風向穩定，風速不小，非常具有發展風能的潛力。尤其在西部沿海地區以及離島各地，整年風速均很大，而且風向也頗為穩定，平均風速均超過 4 m/s 以上（中央氣象局氣候資料年報，

1993~1998)，顯示台灣擁有豐富的風能資源。

國內有關風能的開發，雖然於1980年初期，政府在促進能源多元化的政策下，由經濟部能源委員會委託資助工研院能資所進行研究開發。在工研院能資所所主導的計劃中，曾經在新竹湖口設置了小型的風車陣進行試驗，也在澎湖離島地區、台灣西部海岸地區做過研究評估。而過去的做法都是在該地區架設測站，進行密集性的觀測，然後再做風力資料的分析與風力潛能的評估，並做風力發電的模擬與效益比較。由於過去風能研究評估僅限於區域性的方式，只對某一區域進行密集性的資料收集，然後再以此份資料進行該區域之風能評估。但是所估算出的風能仍屬區域性片段性的資料，更嚴重的是根本就不知道當地是否為風力潛能最高之地區，所以當務之急就是要評估出全台灣地區風能蘊藏量之分布圖來。可惜的是目前並無台灣全區風能蘊藏分布的研究。倘若依照以往的研究方法，評估全台灣風能分布的情形，就得於台灣各地廣設測站，進行密集觀測。就人力、經費以及時間上來看根本無法達成。縱使中央氣象局於全台已有不少(26個)的測站，也有長期的觀測資料，但是有許多的測站設置於都會區內或附近地區，或者在複雜地形的山上，所受到的地域性影響太大，而且測站地點周圍多為不適合設置風力發電廠的區域，所以氣象局測站的資料對於風能的研究並不適當。另一方面，由於台灣地形變化複雜，地形因素對氣象場(尤其是風場)的影響頗大，若單純利用測站資料內插出全區資料又過於平滑。因此若想利用中央氣象局測站資料進行全國風能的評估分析，恐怕無法正確地表現潛藏的風能。

由於測站分布不均，對於關鍵區域的資料又密度不足，所以利用測站資料所做的分析，無法表現出台灣全區的風能分布。因此，本研究針對這個問題，使用 PSU (Pennsylvania State University) / NCAR (National Center for Atmospheric Research) 中尺度數值模式 MM5 (Fifth-

generation Penn. State/Near Mesoscale Model) 配合 ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) / TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere Programme) 之同化資料進行三維風場的模擬，以取得高解析度且分布均勻的風場資料。由於台灣多變的地形，使用模式模擬不但可以得到大尺度東亞季風的風場特徵，也有助於我們取得以地形變化為主的風場資料，這樣的資料可以較準確地進行分析風場與估算風能。但是此乃模式模擬的結果資料，仍然須要將模式結果與觀測資料做個驗證，以求其客觀性。關於驗證的方法，除了基本的相關比較外，更進一步利用客觀分析的方法，對模擬結果進行調整，以期得到更接近於實際的資料，使得風能的評估更為準確。本研究希望能分析評估出全台灣地區的風能分布，做出一份可供政府決策單位與業界參考的平均風能分布資料。

本研究主要在於使用 MM5 中尺度的數值模式進行三維風場的模擬，使用最近一年(1997) ECMWF / TOGA 的資料做為模式之初始場及邊界條件。然後針對模擬結果進行分析與風能估算。最後利用中央氣象局所屬的各地測站資料進行校驗。所以本研究的重點是著重在模式的建立和風能評估方法之開發與測試。

本文對於 MM5 的模擬過程將不做詳述，以下只說明如何將模擬結果轉換成研究所需的資料，並進一步介紹為使資料更接近真實而使用的客觀分析方法，接著介紹如何計算風能。之後對模擬結果進行分析，並配合觀測值，將結果做比較和驗證，然後再進行初步的風能評估分析。最後說明研究所得的結論與展望。

二、研究分析方法

以下將依計算程序分別說明如何使用 MM5 所模擬的結果推算等高面資料的方法，以及針對模式輸出資料的調整所要運用的客觀分析法，最後介紹如何利用資料重新擬合風速的威布爾分布 (Weibull distribution)，以計算風能。

2.1 等高面氣象場資料計算

對於傳統的氣象資料而言，垂直向的分層多以氣壓面來分隔，而本研究所使用的模式 MM5，是使用追隨地勢的 σ 坐標(參見圖1)，但它仍然是以氣壓值來定義， σ 的定義如下

$$\sigma = \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (2-1-1)$$

其中， P 為該層氣壓， P_t 為模式最頂層氣壓(在此設定為 100hPa)， P_s 為地面氣壓。

然而我們在計算風能時，因為風力機高度的要求，所需要的是離地面一固定高度層之氣象場資料，所以我們要將 σ 層的資料轉換為定高度層的資料。在這裡為了配合風能密度的計算，我們需要推算某高度的風速和空氣密度。

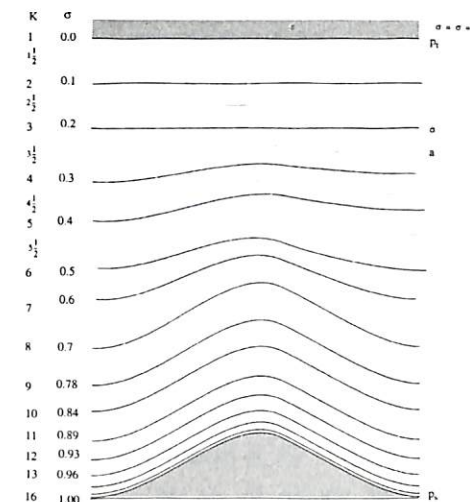


圖1 MM5 模式垂直向追隨地勢坐標示意圖。

首先，利用下面之流體靜力平衡方程式(2-1-2)以及氣體狀態方程式(2-1-3)，推導得到一可以代表某 σ 層離地面高度的方程式。

$$dP = -\rho g dZ \quad (2-1-2)$$

$$P = \rho RT \quad (2-1-3)$$

$$Z_{\sigma 1} = -\frac{RT_{\sigma 1}}{g} \cdot \ln \frac{P_{\sigma 1}}{P_s} \quad (2-1-4)$$

在上述方程式中， g 為重力加速度， R 為氣體常數，兩者分別是 $9.8 (m \cdot sec^{-2})$ 和

$287 (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$ 的常數。而 $T_{\sigma 1}$ 、 $P_{\sigma 1}$ 、 P_s 分別都可從模式結果中得到。

接著，根據邊界層中風隨高度呈對數變化(Log Wind Profile)的關係(Stull, 1988)，如圖2所示，以方程式表示為

$$\frac{\bar{M}}{u_*} = \left(\frac{1}{k}\right) \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (2-1-5)$$

其中， \bar{M} 代表風速， u_* 代表摩擦速度， $(1/k)$ 是一個比例常數，而 Z_0 稱為空氣動力粗糙高度(aerodynamic roughness length)，根據參考資料(圖3)，在此假設為 0.2 公尺。利用比值關係，可以進一步得到兩個不同高度層的風速比例關係

$$\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} = \frac{\ln(Z_1/Z_0)}{\ln(Z_2/Z_0)} \quad (2-1-6)$$

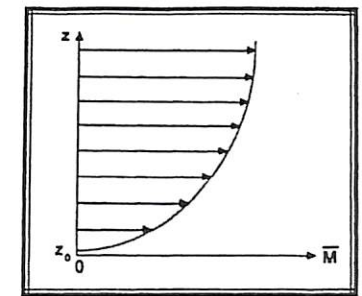


圖2 Log Wind Profile 示意圖，風速隨高度成指數變化。

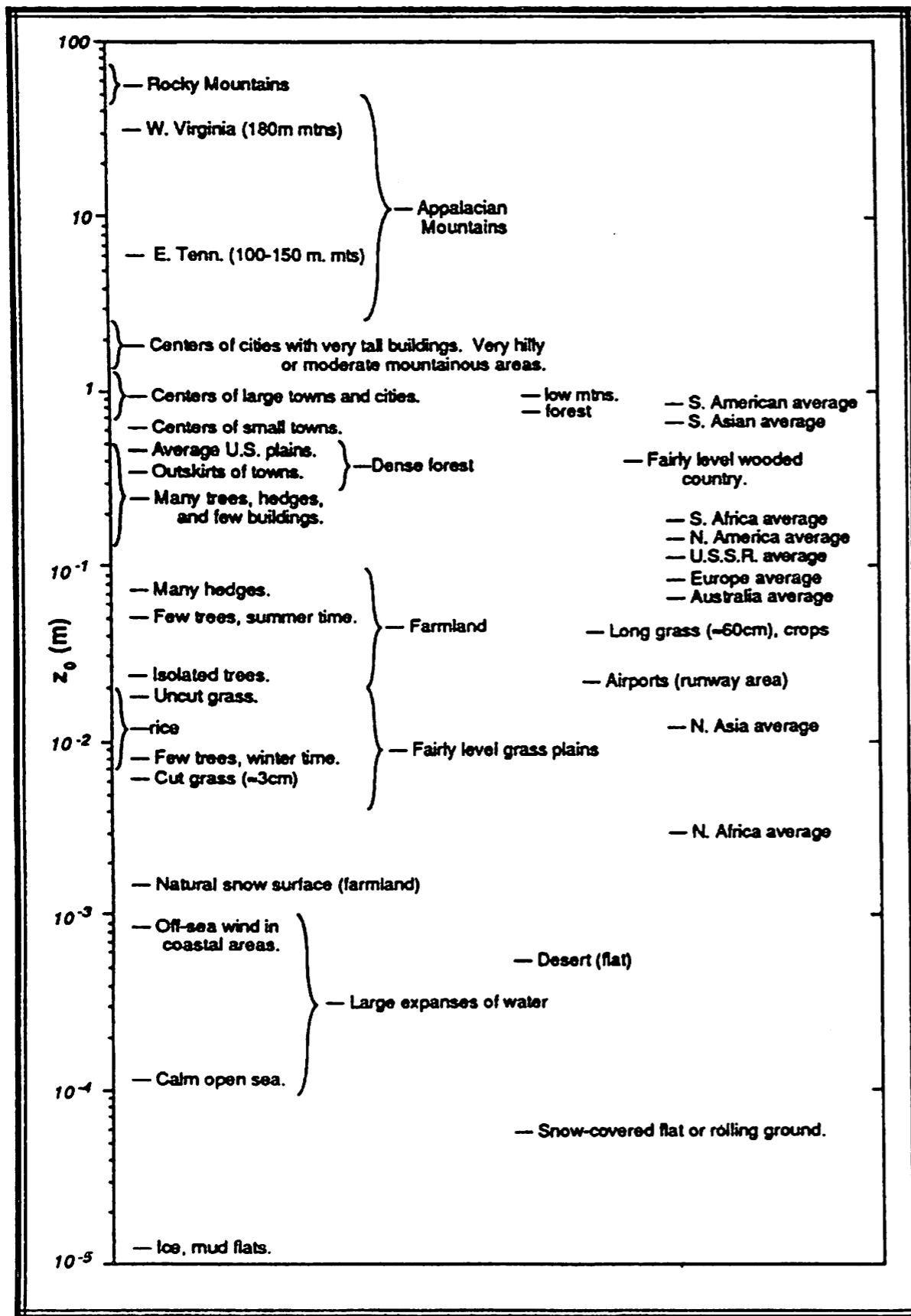


圖3 空氣動力粗糙高度分類圖。(摘自 Stull, 1988)

因為我們先前已求得 Z_{σ_1} ，也有東西向的風速 U_{σ_1} 和南北向的風速 V_{σ_1} ，所以離地 h 公尺高的風速就是

$$U_h = U_{\sigma_1} \cdot \frac{\ln(h/Z_0)}{\ln(Z_{\sigma_1}/Z_0)} \quad (2-1-7)$$

$$V_h = V_{\sigma_1} \cdot \frac{\ln(h/Z_0)}{\ln(Z_{\sigma_1}/Z_0)} \quad (2-1-8)$$

另外，還有離地 h 公尺高的空氣密度需要推算。首先利用濕絕熱遞減率溫度隨高度之變化關係式，由地面向上每公里下降 6.5 度的關係得到離地 h 公尺高的溫度

$$T_h = T_{\sigma_1} + \frac{(Z_{\sigma_1} - h)}{1000} \times 6.5 \quad (2-1-9)$$

然後再利用 (2-1-2) 式和 (2-1-3) 式推導得到離地 h 公尺高的壓力

$$P_h = P_s \cdot \exp\left(-\frac{g h}{R T_h}\right) \quad (2-1-10)$$

所以最後就可得到離地 h 公尺高的空氣密度

$$\rho_h = \frac{P_h}{R T_h} \quad (2-1-11)$$

這些經過換算的氣象場資料，將在之後的風能計算中使用到。

2.2 客觀分析的方法

一般而言，客觀分析都是用來將分布不規則的測站觀測值內插到均勻且規則的網格上，以利分析使用。而且客觀分析可以使氣象場的資料保持內在一致 (internally consistent)，並且具有濾波 (filtering) 和除錯的功能。在此我們將使用客觀分析中 Cressman (1959) 的逐步訂正法做為模式值的調整方法。以下是本研究的做法說明。

首先如圖 4 所示，測站 k 周圍的 4 個格點以 1、2、3、4 表示，A 點的 Z 值可由 3、4 兩點的值做線性內插得到。同理，B 點的 Z 值可由 1、2 兩點的值做線性內插得到。接著，測站 k 點上的模式值 Z_k^{u-1} 可由 A、B 兩點的值內插得到。經推導，先在 x 方向使用 Lagrange 線性內插公式，然後為在 y 方向再用 Lagrange 線性內插公式得到

$$Z_k^{u-1} = Z_1^{u-1} + (Z_4^{u-1} - Z_1^{u-1}) \frac{\Delta y}{d} + (Z_2^{u-1} - Z_1^{u-1}) \frac{\Delta x}{d} - (Z_2^{u-1} - Z_3^{u-1} + Z_4^{u-1} - Z_1^{u-1}) \frac{\Delta x \Delta y}{d^2} \quad (2-2-1)$$

其中 d 代表網格間距， Δx 和 Δy 的定義如圖 4 所示。

再來，求測站 k 上觀測值 $Z_{obs,k}$ 對第 $(u-1)$ 次調整的模式值 Z_k^{u-1} 的偏差 D_k^{u-1} ，

$$D_k^{u-1} = Z_{obs,k} - Z_k^{u-1} \quad (2-2-2)$$

對於模式中的格點 (i, j) 而言，第 $(u-1)$ 次的訂正值可用各測站上 D_k^{u-1} 的加權平均表示，即

$$C_{ij}^{u-1} = \frac{\sum_k W_k D_k^{u-1}}{\sum_k W_k} \quad (2-2-3)$$

其中 W_k 是測站 k 的權重函數，而 Cressman (1959) 所使用的權重函數為

$$W_k = \frac{R^2 - r_k^2}{R^2 + r_k^2} \quad r_k < R \quad (2-2-4)$$

其中影響半徑 R 是事先給定的， r_k 是測站 k 到格點 (i, j) 的距離。至於影響半徑 R 的決定這裡依據主觀的經驗法，設為 500 公里。

所以最後的修正值 Z_{ij}^u 就是

$$Z_{ij}^u = Z_{ij}^{u-1} + C_{ij}^{u-1} \quad (2-2-5)$$

如此重複 (2-2-1) 至 (2-2-5) 的過程數次，可調整出較平滑的修正值。

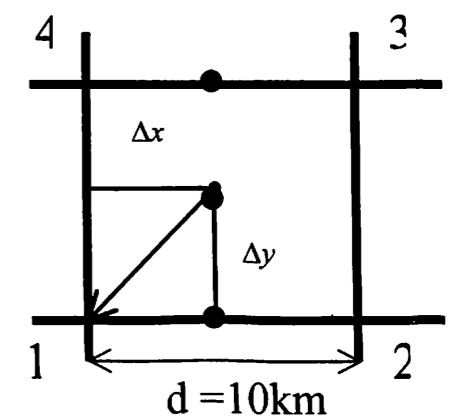


圖4 利用線性內插法計算測站位置上的模式值。

2.3 風能計算

有關風能的計算必須使用到一些動力學、統計學與大氣邊界層氣象學等的知識，在相互配合使用下，推導出一系列的風能計算公式。

2.3.1 風能公式：

首先，根據動能公式：

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-3-1)$$

當密度為 ρ ，速度為 v 的空氣塊，在時間 t 內流過截面積 A 所具有的能量通量 F 為

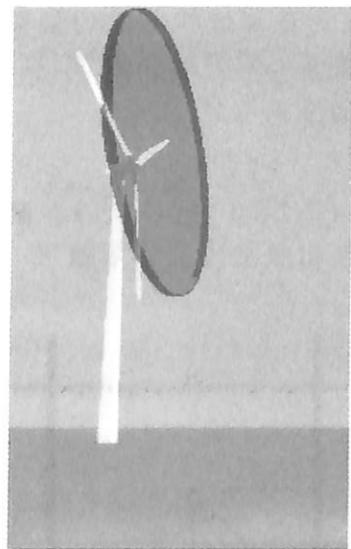
$$F = \frac{1}{2}\rho v^3 At \quad (2-3-2)$$

所以在單位時間內流過該截面積的風能（示意圖參見圖5），即為風功率 P ，

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (2-3-3)$$

在風力工程上，(2-3-3) 式稱為風能公式。

由上述方程式可見，風能大小與氣流通過的截面積、空氣的密度以及氣流的速度三次方成正比關係，其中又以風速最為重要，因此風速測量的準確度對風能潛力的估計有決定性的影響。



© DWWTMA 1998

圖5 風功率示意圖。

(摘自 <http://www.windpower.dk/>)

2.3.2 風速概率分布：

風速分布一般為正偏態分布。在統計學上有許多概率分佈函數可用來模擬風速

的分佈（如 Rayleigh distribution, log-normal distribution, Γ -distribution, 及 Weibull distribution 等，參考朱瑞兆, 1993），其中以威布爾分布（Weibull distribution, 圖6）被普遍認為最適合對風速作統計描述的概率分佈模式。

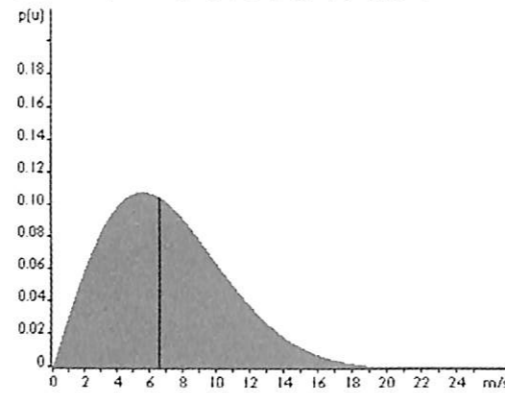


圖6 Weibull distribution 之範例。其中 α 為 2，風速平均值為 6.7 m/s。

風速 v 的威布爾分布概率密度函數 $f(v)$ 可表示成

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2-3-4)$$

其中 α 為無因次的形狀參數（shape parameter）， β 為尺度參數（scale parameter），因次同速度。

然而對於威布爾分布參數 α 及 β 的估計，可根據風速資料的不同情況選擇不同的方法。本研究則是利用平均風速（ \bar{v} ）和最大風速（ v_{max} ）來估計威布爾分布參數的。

根據 T 時間內觀測到的十分鐘最大風速值和平均風速值，可經由下面經驗公式估計 α 值

$$\alpha = \frac{\ln(\ln T)}{\ln(0.9v_{max}/\bar{v})} \quad (2-3-5)$$

T 一般取為 60 分。

而 β 值可由下式求得

$$\beta = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/\alpha)} \quad (2-3-6)$$

其中 Γ 表示 Gamma 函數，定義為

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2-3-7)$$

2.3.3 風能密度：

在單位時間內垂直通過單位截面積的風能，即為風能密度 W ，

$$W = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (2-3-8)$$

若 ρ 的單位為 $kg \cdot m^{-3}$ ， v 的單位為 $m \cdot sec^{-1}$ ，則 W 的單位為 $watt \cdot m^{-2}$ 。

但是年平均風能密度並不能單單只使用一年的觀測記錄來計算表示，而是需要多年的平均才能正確地反映該地點的風能資源狀況。所以當我們知道了在 T 時間長度內風速 v 的概率分布 $f(v)$ 後，平均風能密度 \bar{W} 就是

$$\bar{W} = \int_0^\infty \frac{1}{2}\rho v^3 f(v) dv \quad (2-3-9)$$

風速分布 $f(v)$ 在研究了風速的統計特徵後，可以用一定的概率分布型式來擬合，可大大地簡化計算的過程。

然而實際上，可提供使用的風能是要以風力渦輪機所可以產生的量來計算的，因此，有效風能密度則是要計算「啟動風速 v_1 」到「停機風速 v_2 」之間的風能資源，所以有效風能密度 \bar{W}_c 為

$$\bar{W}_c = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2}\rho v^3 f(v) dv \quad (2-3-10)$$

在這裡我們所假定的風力渦輪機啟動風速 v_1 和停機風速 v_2 ，是以丹麥 Bonus Energy A/S 公司 (<http://www.bonus.dk/>) 所生產的風力渦輪機為例，啟動風速和停機風速分別為 $3 m \cdot sec^{-1}$ 和 $25 m \cdot sec^{-1}$ 。

在模式模擬完成後，即可利用本文 2.1 所介紹之方法處理分布均勻且高解析度（ 10×10 km）的模式網格資料，將 σ 坐標的資料轉換成所需的固定高度面資料，在這裡我們設定架置高 30 公尺的風力渦輪機以為風能輸出，所以 (2-1-7) ~ (2-1-11) 式中的 h 值就代入 30 進行計算。經過如此的處理，便擁有了離地 30 公尺高的氣象場資料，可以作為初步的台灣地區風場分析與風能估算。

但是模擬結果可否符合現實狀況，就得另外針對模擬結果進行校驗的工作。除檢查模擬結果的可信度外，並以 2.2 所介

紹的客觀分析方法進行調整，以期得到更接近真實的資料。為了檢視模式結果與觀測值的關係，還有模式結果調整後的情形，所以將觀測值分別和模式值以及客觀分析值做相關分析，以求了解之中的差別，並探討其中隱含的意義，這將在下一章的分析中進行說明。

若調整值在經過分析後，可確定為較具可信度的資料時，即以該份資料進行風能評估分析，利用 2.3 節的風能計算方法，求出台灣地區的平均風能功率分布。

三、模擬結果的校驗

過去有關中尺度模擬的研究表示 MM5 模式的模擬頗具可信度 (Anthes et al., 1982, Kuo and Anthes, 1984; Chen et al., 1999; Brown et al., 1999; Chien et al., 1997...)，但是模式本身具有相當多的物理參數化選擇或設定，對於不同狀況會有不同反應，另外模式中的地形表現更是影響近地面層模擬結果的重要因素之一。由於本研究所用模式的解析度（10km）與地表表現上的因素，使得模擬結果無法呈現小於 10 公里的小尺度現象，尤其是針對地形多變的台灣而言，有必要針對模擬結果進行檢驗。

3.1 觀測值與模式值的相關分析

本研究是以中央氣象局分布於全台的 26 個測站，1997 年的逐時風速資料進行比較。首先我們得找出對應於測站經緯度上之模式格點的輸出資料，這裡使用本文 2.1 節中的 (2-1-6) 式先推算出 10 公尺等高面的風場資料，好與測站值條件相等以利比較，之後再使用 2.2 節中的 (2-2-1) 式內插出 26 個測站位置上的模式值，接著和觀測值做相關分析比較（表 1）。

本次比較中，分別做了兩種觀測值與模式值的資料相關，兩種資料的差異說明及使用原因如下：

1. 原始資料的相關：完整的觀測值與模式值逐時資料，但其中淡水、彭佳嶼、東吉島、玉山等測站並無完整逐時資料，所以在比較時會將相對時間的模式值拿掉。這是最基本的相關。

2. 日平均的相關：針對逐時的風速資料而言，它代表著每小時的瞬間風速值，但是不見得就為整個小時內的所有瞬間風速值，有可能比其他瞬間風速來得大或小，成為資料中高頻的訊號，而利用平均值可以減少突出的現象，使得資料更為平滑，所以這裡採用日平均的方法來使資料常模化。

初步來看，第 1 類相關所表現的結果，只有新竹、梧棲、恆春、彭佳嶼、澎湖、東吉島等六個站有大於 0.6 的相關係數外，其餘都頗為偏低，尤其是位於東部與中央山脈山區的測站。這樣的結果似乎不佳，我們初步推測可能是模式地形表現的關係，從圖 7 可看出，地形多變的台灣在模式中的地勢變化，只以一個中央山脈表示，大家熟知的陽明山、花東縱谷、海岸山脈都未呈現，所以使得大部分測站的相關係數都不高，因此我們質疑模擬結果是否具有當地的代表性。之前我們提到過中央氣象局的測站多設置於都會區內，或是複雜地形的山上，所以測站觀測值可能是複雜地形上的小擾動，可算是小尺度的天氣資料。就模式而言，因解析度的關係，無法模擬這麼細的情形，所以相關結果普遍不佳，因此可知道補充模式中複雜地形的小尺度表現是很重要的。而第 2 類資料的相關係數則大幅提昇，使得大部分的測站皆有較佳的相關，主要是因為日平均值能夠平緩資料中高頻的訊息而保留住較大（綜觀）尺度之天氣系統，所以使得相關係數得以變大。此項相關中有一半的測站達到相關係數 0.6 以上，表示說本研究中所使用的 MM5 模式，其實對於台灣地區中尺度及以上系統之風場的模擬有著不錯的表現。概括而言，台灣西部與離島的相關係數較高，東部較差一點，而山區則是非常不理想。初步認為主要是模式在地形資料的解析度不若台灣實際地形的變化度，而低層風場的變化又主要以地形的機械效應為主，網格解析度 10 公里之下，仍有很多因地形產生的亂流，觀測值可以測得，模式則無法模擬，所以才造成較大的落差。而蘭嶼與彭佳嶼則因為測站的

海拔高度太高，並且模式無法解析這兩個小島，以致相關係數偏低。

3.2 觀測值與模式調整值的相關分析

模式的模擬雖然有其物理特性可循，但仍有部分因素未能掌握，因此需要以實際觀測值加以補充，以取得一筆更接近於真實情形的模擬資料。接下來便利用本文 2.2 節所介紹的客觀分析之逐步訂正法，對於模式輸出結果加以調整。由於客觀分析可以使氣象場的資料保持內在一致（internally consistent），並且具有濾波（filtering）和除錯的功能。所以使用這種方法來調和模式值和觀測值，以產生一組兼具小尺度特性的資料。

模式值在本研究中連續訂正了 3 次，得到一份新的模式調整值資料，然後仿照 3.1 節中的做法，先內插出 26 個測站位置上的模式調整值後，再和測站觀測值做相關比較並分析（表 1）。同樣的也分做兩類資料進行相關分析，以比較調整前後的差異。

從第 1 類資料相關看來，逐步訂正的方法確實有使相關係數提高，但是在山區的相關非但沒有改善，反而更低。對於這樣的結果，在比較 3.1 節的第 1 類資料相關後，我們仍然得到與 3.1 節中相同的推測。但是除了可能是測站所在位置的山區地形較為複雜，而模式無法精細表現外，另外使得山區的相關不升反降的原因，可能就是因為這些山區測站彼此相鄰，在調整值的權重上，相互影響的比例很高，本身又具低相關，才會使得相關係數更降。

最後日平均的相關相較於 3.1 節中的日平均相關結果是有更好，相關係數超過 0.6 的測站由 13 個增到 16 個，但改善有限，唯山區仍然不佳。雖然在調整之後的相關係數未有太大的提升，但是逐步訂正的方法仍然能將綜觀尺度以下的天氣系統的訊息導引進來，使模擬的結果更接近真實的大氣。

3.3 校驗總結

本研究所使用的 MM5 模式本身對於氣象預報就具備相當好的模擬能力，在本文中對於台灣西部沿海與離島地區的氣象

場模擬也有不錯的表現，雖然在東部與山區的模式較差，事實上這些偏差和本研究所設定的模式地形資料與地表特性有關。參見圖 7 可明顯地看出模式中的地形高度分布，由於台灣西部沿海本身地勢就較平坦，地形起伏不大，模式所表現的地形特性與其相符，所以能有較佳效果的模擬。而對於北台灣的基隆、竹子湖、鞍部、淡水、台北等站附近的模擬何以較差的原因，在這也是可以得到理解的。由圖 7 中可以清楚地看到模式中台北附近的地形是沒有什麼變化的，但事實上我們知道當地有大屯山、陽明山、七星山等一千公尺左右的山區與台北盆地等地形變化，而模式中卻是一個由雪山山脈順勢而下的地形，並且在主要的陽明山地區也不過只有一百多公尺的起伏罷了，這樣的地形表現當然對該區域的模擬有所影響。此外，東部的模擬結果同樣受到地形表現不夠詳盡的因素所影響。模式中東部山勢由中央山脈向太平洋一路遞減，但是當地明顯的地形特徵就有花東縱谷與海岸山脈，如此的差異性，模式難以表現出地形的效應，所以東部的相關係數才會比較低。相同的道理，可以用來解釋為何山區測站的相關係數都很低的原因，主要也是因為山區地形的變化過於複雜的緣故。

另外要探討的是離島地區的相關係數，由表 1 可明顯發現離島的測站中澎湖與東吉島的相關係數都很高，但是比較有問題的就是彭佳嶼和蘭嶼兩個測站。對於這兩個測站我們分別推論出個別兩種情形，首先針對彭佳嶼，其實它本身以模式值所做的相關已算不錯，但是以模式調整值所做的相關都變低了，事實上它在做調整時受到東北部測站值的影響，基本上這些東北部地區的測站本身相關係數就不高了，但又鄰近彭佳嶼，在權重上的影響就比較大了。另外的蘭嶼測站又是不同狀況了，它在模式值調整前後所做的各類相關幾乎沒有什麼改變，可知道它的調整值並不受附近測站的影響，而本身的模式值相關就不高，乃是受到模式中地形與地表呈現的影響。同時參照圖 7 與圖 8，可以看

到模式中蘭嶼的位置附近不但沒有地形起伏（地形高度等值線為零），而且地表特性還被歸類為海洋，雖然具有高相關的澎湖在模式中也歸為海洋，但是澎湖本身地勢平坦，所受影響不大，可是蘭嶼本身就擁有較高的地勢（測站海拔高度 324 公尺），所以模擬結果就有明顯的影響了。

綜觀而言，模式資料經調整後確實能有較高的相關，但是對於相關係數仍低的地區，也並非模式模擬的成效不好，對於該測站的所在位置與週遭環境有必要深入去了解，以探求為何造成模擬與觀測差異過大的原因。

在此也對我們所使用的 MM5 模式做個總結與操作上的檢討。雖然於本文最開始時已揭示 MM5 具有相當好的模擬能力，但是面對不同的狀況與需求時，仍然需要針對不同的個案進行模式的測試，方能找出最適當的模式設定。以本研究所使用的模式而言，提出幾點改進的建言，以供未來在風能評估模式上的改善。首先就模式所設定的網格解析度提出建議，若時間許可或是未來電腦運算速度增快，或者已進入更細部的區域風能評估之時，可將解析度提高至 5×5 km，或者在 MM5 模式操作過程中加入雷文（Rawin）這項步驟（參見圖 9。雷文之工作主要是將地面、船舶及探空資料內插到水平內插所得的結果中，以加強中小尺度的特徵。）。另外針對台灣地區的需求，若能使用一套更詳細的地形地表資料，以詳盡表現台灣的地形效應，相信能夠模擬出更完善的氣象場資料，期望這樣的作法能提高風能評估的準確度。

四、模式調整值之分析與使用

本節中將先介紹模擬結果調整前後的差異，以及資料調整後所呈現出的台灣地區風速分布情形，最後即可利用此份資料進行風能功率計算，並評估出台灣地區較具風能發展潛力的區域。

4.1 平均風速分布

首先我們以逐月的月平均風速分布圖來進行模擬結果調整前後差異的比較。圖

10和圖11分別為模式模擬的逐月月平均風速分布和資料調整後的逐月月平均風速分布，逐月逐圖兩相比較之後，發現資料調整後的逐月月平均風速的分布值普遍比較小。表示說模擬結果有高估的現象，而這種情形的產生是因為模式中所表現的地形太過平滑，使得地表摩擦作用不夠強烈，導致邊界層的風所受的摩擦力較小的緣故，因而模式所模擬的風速就比較大。但是模式模擬的逐月月平均風速分布（圖10）和資料調整後的逐月月平均風速分布（圖11）大致的分布形式是差不多的，大概只有數值上的差異。

另外在分析逐月平均風速變化之時，發現其中八月（圖10和圖11）的風速分布相較於七月（圖10和圖11）和九月（圖10和圖11）有忽然變大的情形，而且分布的形式也比較不同。並且這種情況都存在於資料調整前後的結果上，表示說連觀測資料本身也是於八月時有忽然變大的情形。其實這和1997年八月裡有不少颱風經過台灣附近有關，參見圖12，有將近六、七個熱帶氣旋通過我們所設定的MM5模式模擬區域，甚至有一個颱風通過台灣，因此使得八月的平均風速提高不少，也使得風速分布的情形異於七月及九月。

我們分析台灣地區整年的風速分布情形，發現夏季五、六、七、八月（圖11）中風速超過3 m/s的土地面積不多，除了八月因颱風造成該月風速較大外，普遍來說風速不大，多在4 m/s左右，所以夏季的風能開發潛力就比較弱，只有新竹、東北角與高屏一帶較具有開發的潛力。另外針對一月到四月、九月到十二月這八個月風速較大的月份分析評估風能開發的潛力區域的話，較具有優勢的多為西部沿海一帶與澎湖離島地區。一般而言，從十月到次年之三月的六個月間，風速較大，較適合發展風能。若再以先前我們所提的風力渦輪機啟動風速3 m/s做為標準，來規劃值得應用風能之區域，參考以調整後資料所做的年平均風速分布圖（圖13），可以根據等值線3 m/s以上區域的分布得到這樣的結論，台南以北的西部沿海一帶、澎

湖離島地區、恆春附近與東北角一帶等，風速都不小，具有豐富的風能蘊藏，頗值得發展風力發電。

4.2 風能分布

在檢視過我們所模擬的風場資料後，即可進入本研究的最後階段——「平均風能密度計算」。此時我們便以調整後的模式輸出資料為主，找出每個網格點上逐月的風速極大值與平均值，然後代入(2-3-5)與(2-3-6)式，求得 α 、 β 值後，再代入(2-3-4)式，重新擬合出每個網格上的風速概率分布（Weibull distribution） $f(v)$ ，之後再利用(2-3-10)式計算出有效風能密度 $\overline{W_e}$ ，其中 ρ 值是使用模擬之月平均空氣密度。使用上述的做法，我們可以得到逐月的有效風能密度分布，乃本研究的主要研究成果，但由於計算所得的數值為風能功率值，適合工程師使用，這裡將不做細部的探討與分析。

就適合發展風能的時間來看，一月到三月及十月到十二月間的風能密度較高，較具豐富的風能蘊藏量。其中八月的風能密度分布相較於七月、九月有忽然提高情形，這和1997年八月裡有不少颱風經過台灣附近有關，我們在先前已提及過八月裡風速變大的原因。劇烈的天氣變化，使得八月的風速極值變大，而且本研究只使用一年的資料，忽然變大的極值所佔之比例相對提升，進而影響整個八月的風速概率擬合，所以才造成八月的風能密度激增。所以說，完整的風能研究評估需要以長時間的資料進行，方可具有客觀性。但是本研究之分析則可評估1997年台灣地區風能之蘊藏量，圖14則為台灣地區1997年的年平均風能密度分布圖，從這裡大概就可以看出台灣什麼地方比較具備風能開發的潛力了。

五、結論

對於本文的研究分析結果，分別針對模式測試與風能評估兩方面做出結論。首先針對模式方面，結論如下：

1. 針對本文所使用的中尺度數值模式模擬方法，在經過測試之後，先後對其

資料進行檢驗和調整，已經使其具備相當的可信度。而該資料的計算使用，更做到過去的風能研究辦法所不能達成的工作，即全台灣地區的風能蘊藏量評估。

2. MM5模式模擬的結果，大致上相當不錯，而且在配合客觀分析的調整修正之後，使得氣象場的資料更具可信度。不過需要注意的是針對地形較複雜的區域，所模擬的結果仍有限制。在此順便提出建議，就模式而言，若能補充山區複雜的地形資料，或於模式操作過程中加入雷文的步驟，應可模擬出更好的結果；就測站觀測資料而言，若能再取得複雜地形及沿海附近的其他測站資料加入比較與調整，也應該可以使結果更為客觀。

針對風能評估方面，結論如下：

1. 根據模擬並修正後的結果顯示，十月至次年三月是最具風能開發價值的時間。而夏季則在台灣東北部及高屏流域到恆春半島一帶有較豐富之風能資源。
2. 另外根據模擬計算的結果，較具風能開發潛能的地區有台南以北的西部沿海一帶、澎湖離島地區、恆春半島附近與東北角一帶等。
3. 新竹、苗栗、台中一帶的外海為台灣本島地區風能密度最高的地區。利用離岸式的風力渦輪機進行風力發電，除了可以開發豐富的風能資源，又可解決設置電廠的土地問題，值得參考。

參考文獻

- 中央氣象局，「氣候資料年報」，中央氣象局，1993-1998。
- 朱瑞兆等，1993：應用氣候手冊。明文書局，494pp。
- 呂世宗、陳世照，「七美離島長期風能源推演評估研究」，中華氣象環境研究中心，73年9月。
- 陳家琦，1999：福建沿岸春末夏初背風坡深對流發生機制之探討。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。

曾忠一，1997：氣象資料同化。渤海堂文化公司，594pp。

楊國祥、何齊強與陸漢城，1997：中尺度氣象學。明文書局，278pp。

Anthes, R. A. and T. T. Warner, 1978: Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045-1078.

Blackadar, A. K., 1979: High resolution models of the planetary boundary layer. *Advances in Environmental Science and Engineering*, **1**, No. 1, Pfafflin and Ziegler, Eds., Gordon and Breach Sci. Publ., New York, 50-85.

Brown, M. J., J. D. Locatelli, M. T. Stoelinga, and P. V. Hobbs: 1999: Numerical modeling of precipitation cores on cold fronts. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1175-1196.

Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1493-1513.

Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 767-787.

Grell, G. A., J. Dudhia, D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale modeling system (MM5). NCAR technical note, NCAR/TN938+STR, 121pp.

Lin, Y., L., 1993: Orographic effects on airflow and mesoscale weather system over Taiwan. *TAO*, **14**, 381-420.

Pielke, R. A., 1974: A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 115-139.

Reisner, J. M., and P. K. Smolarkwicz, 1994: Thermally forced low Froude number flow past three-dimensional obstacles. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 117-133.

Smith, R. B., 1980 : Linear theory of stratified hydrostatic flow past an isolated mountain. *Tellus.*, 32, 1634-1654.

Smith, R. B., 1989 : Hydrostatic airflow over mountains. *Adv. Geophys.*, 31, 1-41.

表1 本文所做之各組相關係數列表

	測 站	原始		daily mean	
		model	Obj	model	Obj
西 部	基 隆	0.450	0.526	0.604	0.637
	竹子湖	0.389	0.498	0.504	0.603
	鞍 部	0.458	0.489	0.637	0.612
	淡 水	0.413	0.485	0.573	0.555
	台 北	0.369	0.454	0.553	0.615
	新 竹	0.665	0.684	0.777	0.777
	梧 棲	0.748	0.798	0.858	0.880
	台 中	0.461	0.583	0.663	0.727
	嘉 義	0.335	0.486	0.574	0.612
	永 康	0.525	0.642	0.708	0.734
	台 南	0.524	0.645	0.704	0.732
	高 雄	0.375	0.474	0.592	0.592
恆 春	0.631	0.649	0.759	0.738	
東 部	宜 蘭	0.278	0.421	0.480	0.514
	蘇 澳	0.418	0.416	0.580	0.512
	花 蓮	0.368	0.400	0.590	0.568
	成 功	0.589	0.607	0.772	0.787
	台 東	0.273	0.352	0.528	0.534
	大 武	0.508	0.521	0.700	0.700
離 島	彭佳嶼	0.697	0.659	0.661	0.618
	澎 湖	0.831	0.868	0.907	0.932
	東吉島	0.831	0.855	0.900	0.923
	蘭 嶼	0.370	0.373	0.428	0.430
山 區	日月潭	0.125	0.119	0.255	0.203
	阿里山	0.270	0.216	0.496	0.400
	玉 山	0.270	0.188	0.335	0.251

Model 欄表該類資料的觀測值與模式值之相關係數；

obj 欄表該類資料的觀測值與調整值之相關係數。

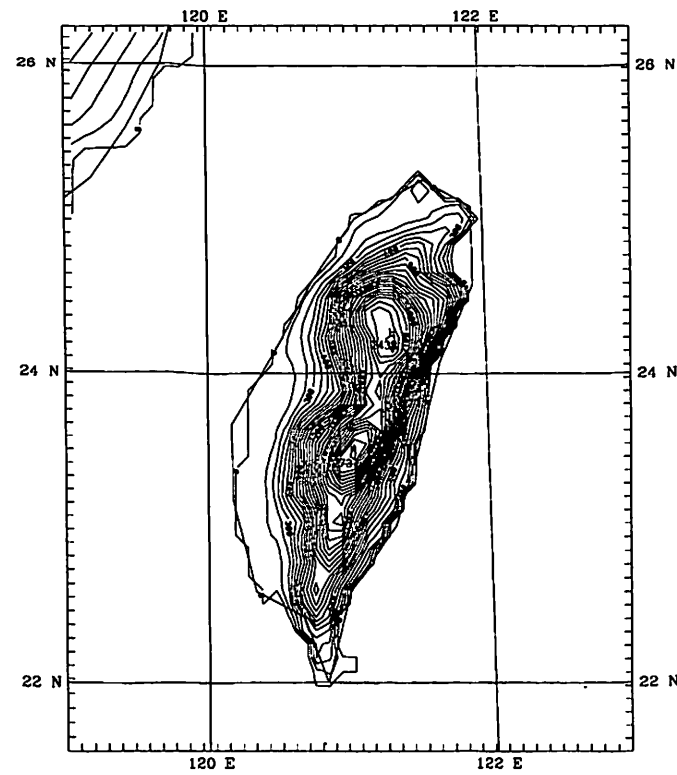


圖7 本研究中MM5模式使用於domain 3之地形高度分布。

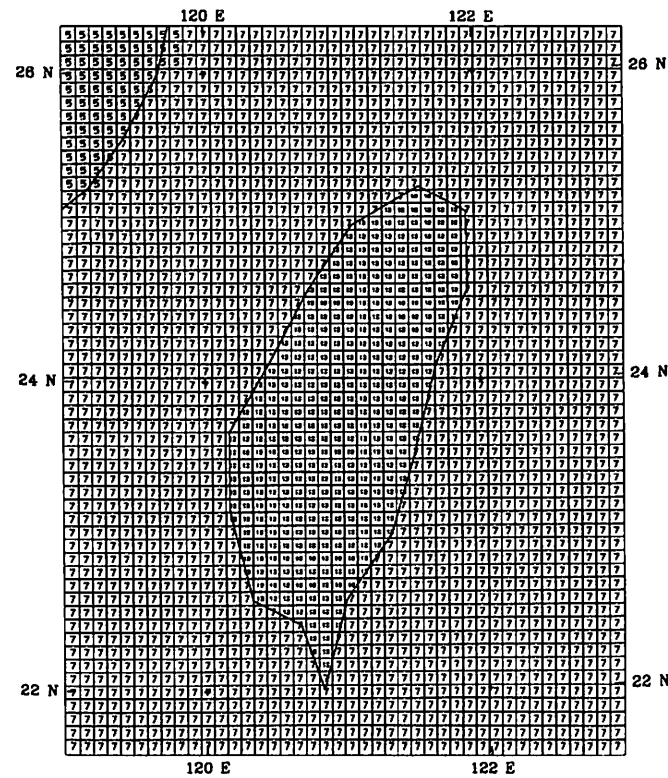


圖8 本研究中MM5模式使用於domain 3之地表特性分布。

網格點上數字代表的地表特性，「5」為針葉林區、「7」為水區、「12」為熱帶及副熱帶林區。

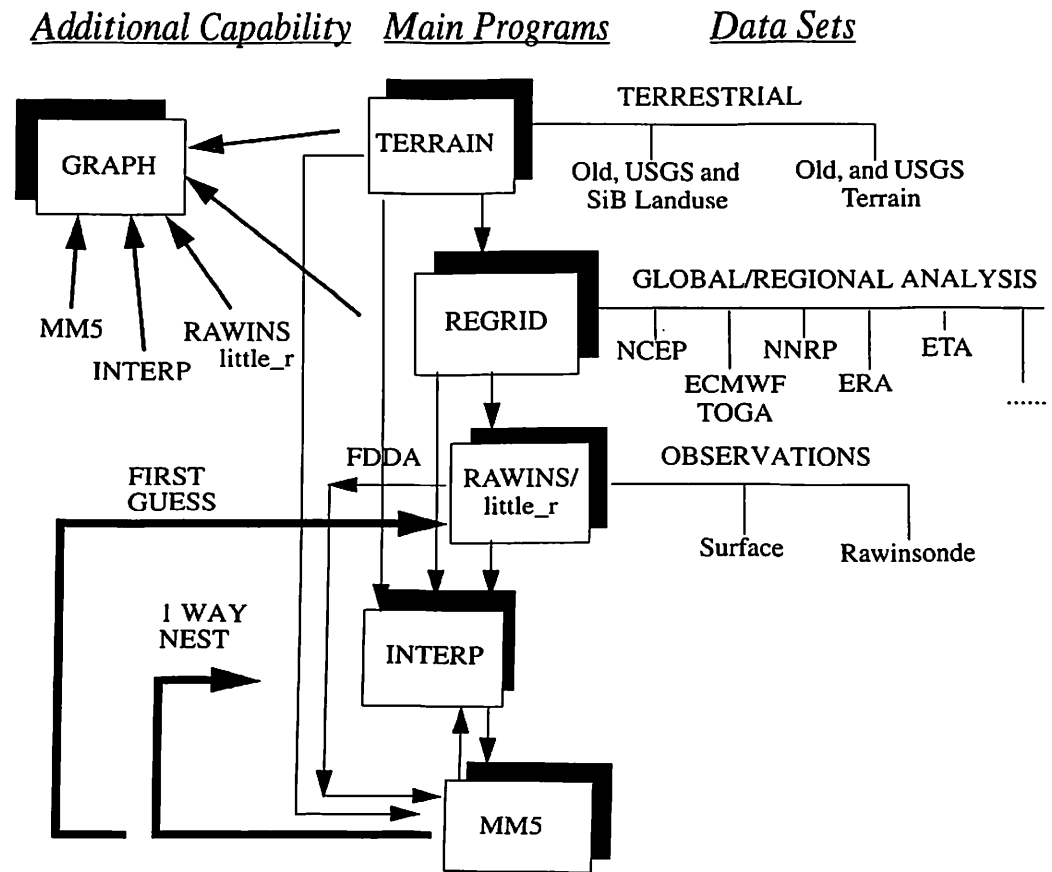


圖9 MM5模式操作流程圖。

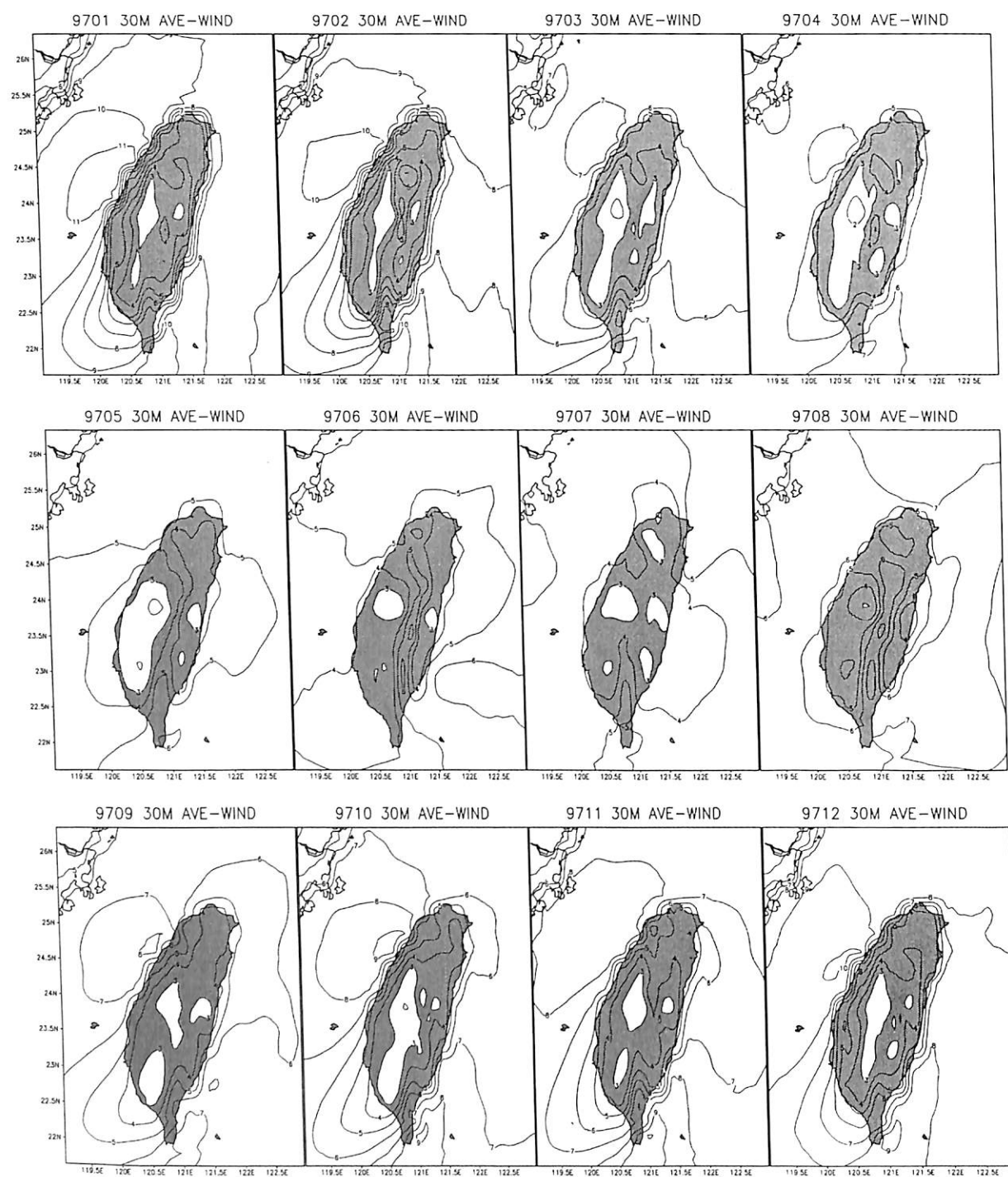


圖 10 MM5 模擬之 1997 年逐月平均風速分布。陰影區為台灣地區風速達 3m/s 之土地面積。

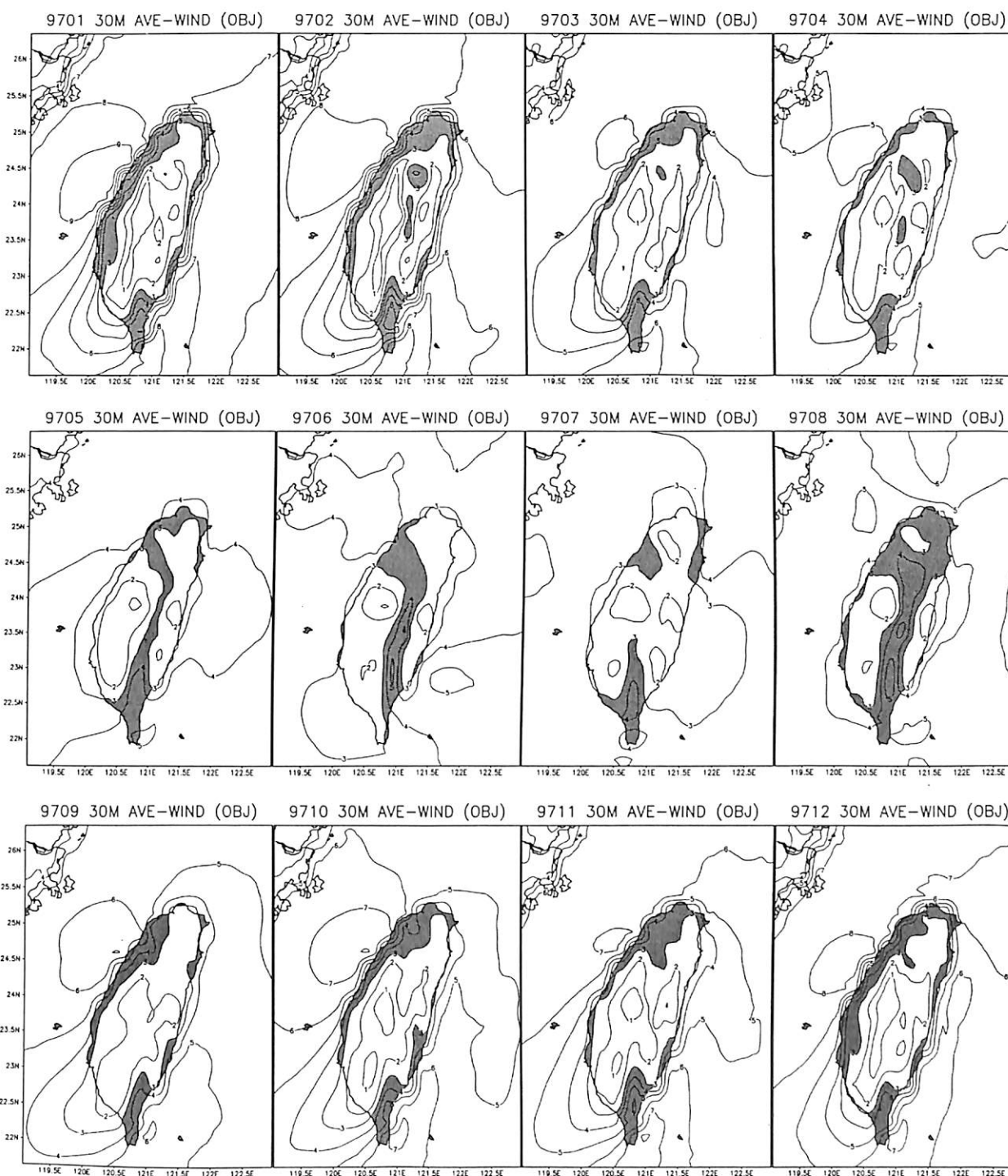


圖 11 客觀分析後之 1997 年逐月平均風速分布。陰影區為台灣地區風速達 3m/s 之土地面積。

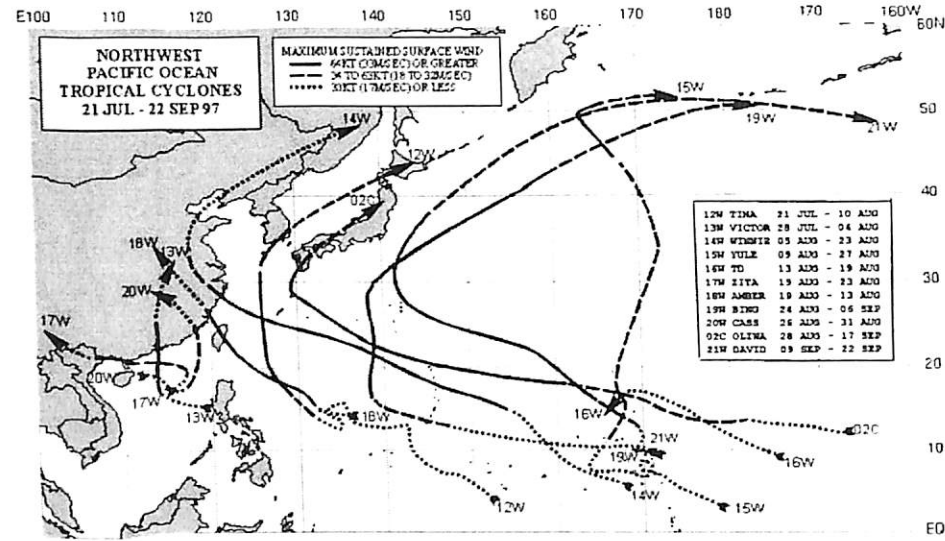


圖 12 1997年7月21日至9月22日間，西北太平洋上熱帶氣旋移動路徑圖。(摘自 <http://www.npmoc.navy.mil/>)

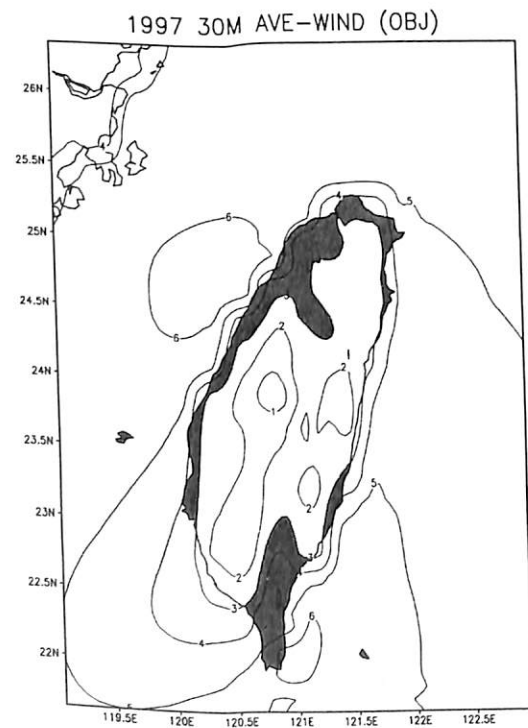


圖 13 客觀分析後之 1997 年年平均風場。陰影區為台灣地區年平均風速達 3m/s 之土地面積。

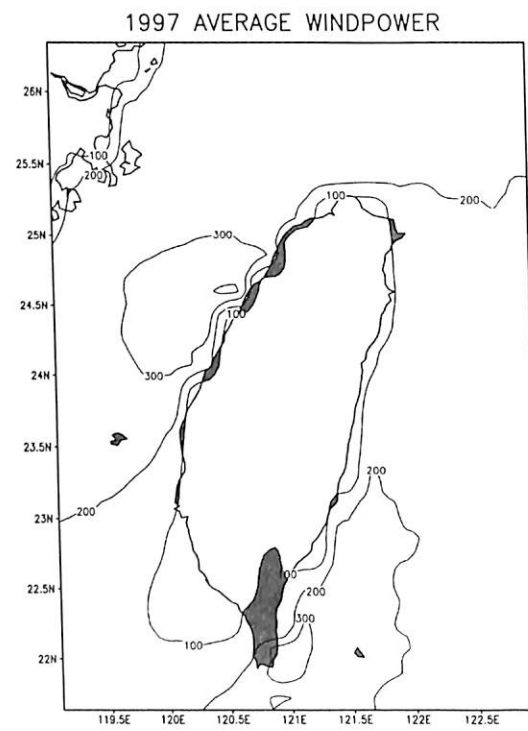


圖 14 客觀分析後之 1997 年年平均風能密度場 ($watt \cdot m^{-2}$)。陰影區為台灣地區平均風能密度達 $100 watt \cdot m^{-2}$ 以上之土地面積。

Using mesoscale meteorological model to construct the surface wind climatology for the assessment of wind power plant locations in Taiwan

He-Yi Lin

Weather Central, Weather Wing, CAF ROC

Abstract

In order to reduce the release of greenhouse gases and to minimize the nuclear hazard, the best way is to utilize the green energy, such as hydroelectricity, solar energy, and wind energy. Taiwan is located in the region of prosperous East Asia monsoon. It is no doubt that Taiwan is one of the most potential regions to develop wind-energy.

To correctly assess the potential of wind-energy over the entire Taiwan area, we need high horizontal resolution wind data due to the complexity of the topography over Taiwan. This is a highly time-consuming and a very costly task. In this study, a numerical model simulation approach was proposed to accomplish this goal. The model used in this study is the Mesoscale-meteorological Model version 5 (MM5) of the National Center for Atmospheric Research (NCAR).

The model simulated wind fields are objectively adjusted to the observational state by using the Cressman (1959) objective analysis method. The objectively adjusted data are used to calculate the storage of wind-energy over the entire Taiwan. Finally, the achievement is used to optimize the locations of the wind turbines.