風能評估技術應用與發展現況

陳美蘭
工研院能環所/新能源技術組

摘要

以目前一般大型風力發電機的啟動風速是 3～4 m/s 為基本要件，一個好的場址除了一定要具備最基本要件外，良好且穩定的風能亦是風力發電開發場址首要條件。風力發電場日益增多的情況下，風能較佳的場址已不像以往那麼容易尋得，故風力發電設置前有關場址的風能評估與規劃更需要審慎的評估。本文章將介紹目前國外進行風能評估最常被使用之技術與方法，以及如何透過風能評估技術來預估場址的潛在風能與年發電量。

一、前言

說到風力發電目前發展的技術，大家往往都會想到風力機的大型化技術，其實自 1980 年代風力發電發展以來，許多先進國家紛紛成立政府研究機構，除了積極發展風力機本身的機電研究外，特別是針對風能資源的多寡進行國家型計畫，研究屬於地區性的風力潛能，以提供風電開發業者作為後續開發與規劃時初步的參考依據。畢竟一個好的場址必須具備的首要開發條件就是風能良好且風能穩定，目前國外有很多研究機構或是風力發電顧問公司都有從事場址細部規劃的可行性評估工作，以風力發電機的使用年限 20 年為觀點，如何確保一個場址的潛在風能可以使未來的 20 年風力機運轉穩定，透過專業的審慎評估與規劃，不但對風電開發業者的投資有保障，對融資銀行也是一種擔保證明，對於國家整體推動風力發電之設置也是不可或缺的研究。

依照區域的大小把風能評估研究區分成以下三種基本的類型或是步驟：

- 大區域風能初步鑑定（ Preliminary Area Identification）

  此步驟是依據風速資料、地形地貌、周遭環境等關鍵因子評估出大區域範圍具有的風力資源，其中有關風速資料的部分除了鄰近地區有現成的觀測資料或是氣象資料外，在此階段也可以架設新的風速塔以蒐集長期觀測資料或是利用數值模式模擬大區域風場分佈情況。

- 小區域風能預估（Area Wind Resource Evaluation）

  直接透過風速量測方法或是鄰近地區既有風速資料來分析局部地區之

風能特性，也是風力發電開發規劃時必須要審慎考量的最主要依據， 在此階段直接進行風速量測最主要的目的是為了：

- 決定或是證實某些特定區域是否有足夠的風能，並進一步去證明特定場址的調查研究結果。
- 區別分類相對可開發的潛在場址。
- 進行評估與挑選風力機前必須取得代表性的資料。
- 篩選潛在風力機安裝的位址。

• 單一場址風力機設置規劃（Micro-siting）

此為風能評估的最後一個步驟，主要的目的是為了量化當小尺度區域的風越過山丘地區時的風場變化，由於近地表面的風受地形地貌影響很大，所以透過 Micro-siting 技術可以提供風力機佈置位址最佳化的功能，在同樣的土地面積與相同數量的風力機機組條件下，以達風力發電場最大發電量為宗旨。

任何一個風電開發業者進行開發前置作業時，都不可忽略前三項類型或是步驟，其中第一類型通常都是以國家為區域單位而進行大範圍的風能評估研究，國外許多政府都是以國家型研究計畫委託相關研究機構進行評估，而評估結果可提供給有興趣開發之業者作為第一步風能鑑定的參考依據，才進行後續第二步及第三步之細部規劃與評估。本文主要是針對第一種類型的風能評估研究介紹其基本概念與方法。

二、基本概念

隨著風力機技術的提升，風力機組單機容量越來越大型化，除了葉片長度變長之外，輪轂高度（hub height）也不斷往上延伸，以擷取更多的風能。所以為了能得到某一特定區域某一高度範圍的風速資料，除了蒐集鄰近既有氣象觀測站資料加以分析外，還有就是架設固定高度風速觀測塔進行長期觀測或利用數值模式進行風場模擬，後者雖然是快速又經濟的作法，但仍須實際觀測資料來進行驗證，才能提高模擬結果的準確性。以台灣為例，未來風電開發除了朝離岸式發展外，勢必要往內陸、台地及丘陵發展，雖然這些地區風況可能不及沿海地區來得優良，加上受遮蔽物以及地形效應影響，卻更需要詳細的評估風能，才能確認是否有開發價值，所以為了提高台灣地區風速資料的空間解析度，作為後續推動或開發風力發電場之參考依據，以及為了滿足 2010 年 2,159MW 風電開發目標找尋具風能潛力之場址，透過此風能評估方法即可得知

風力資源分佈情形。透過圖 1 流程圖介紹此風能評估方法的基本概念如下，並於下節詳述個別方法：

- 中尺度模擬(Meso-scale Modeling)

  首先，將現成的全球氣象網格資料針對特定地區利用氣象模式進行風場分析，可以提高空間資料的解析度，彌補觀測資料的不足。

- 風速量測(Wind Measurement)

  第二，因為不同的風速大小會直接影響風力機的發電量，所以直接架設風速塔進行長期觀測是最準確的方法，透過實際觀測資料進行風能特性分析，例如風速大小機率分佈情形（韋伯分佈圖）、風向統計（風花圖）等，並作為中尺度模擬結果的驗證。

- 小尺度模擬(Micro-scale Modeling)

  中尺度模擬結果與風速量測結果都可以透過中尺度模擬得到小區域場址風力潛能與年發電量預估值，作為後續單一風場規劃與評估依據。另外，為了得到大區域範圍風力資源分佈資料，必須考量風場受地形地貌或是障礙物的影響，透過特定的經驗公式或是小尺度區域評估軟體分析局部較為複雜區域的風能特性，以改善中尺度模擬準確性。

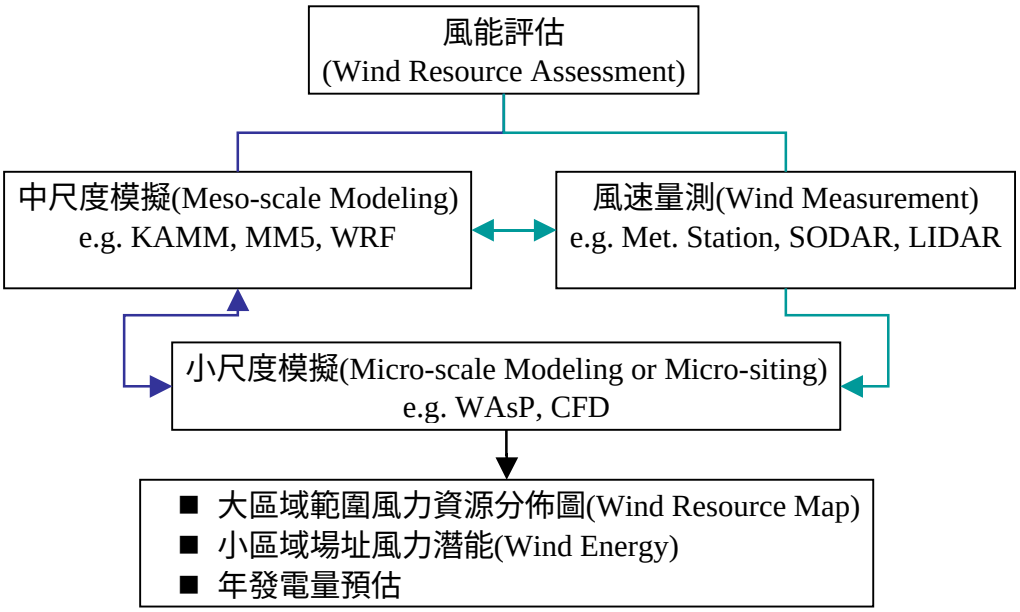


圖 1、風能評估流程圖

三、Wind Measurement

大部分的觀測站是為了氣象監測而設置，設置地點通常位於非空曠地區，觀測高度多侷限於地表 10 m 左右，其觀測之風速易受建築物及地貌所影響。所以為了量測風力機輪轂高度（hub height）的實際風速大小，以下介紹兩個方法。

- 風速塔

  架設 60m 高以上的固定鐵塔，在鐵塔不同高度處（例如 10m、30m、50m、60m 等）安裝風速計與風向計，進行至少一年以上的觀測，獲得風速及風向之時序列（Time series），才能進行風能特性分析（包含年季變化、日夜變化等）。另外，風速資料品質與正確性也是非常重要的，風速資料的可用率必須在 95%以上，否則此觀測資料則不具代表性。若發生觀測資料遺漏的現象，則必須利用鄰近觀測資料以特定相關性加以彌補資料不足之處，以提升資料的可靠度，才能再進一步作為評估之用。

- SODAR (SOund Detection And Ranging) 與 LIDAR (LIund Detection And Ranging)

  若沒有經費設置 60m 高以上的風速塔進行長期觀測，可以利用 10m～30m 高的風速塔搭配 SODAR 以及 LIDAR 等觀測儀器（參見**錯誤! 找不到參照來源。**），將 SODAR 或是 LIDAR 在不同高度所量測到的數據，透過與風速塔間的相關性來推估風速塔所在的不同高度或是特定風力機機型輪轂高度（hub height）的風速，此法可以減少觀測經費的支出。

  - SODAR 基本原理

    主要是利用都卜勒聲波進行 u、v、w 三個方向的量測[2,3,4]（參見**錯誤! 找不到參照來源。**），SODAR 可以量測超過 200m 高度以上的風速資料，通常都是用向量來表示，所以風速大小表示如下：

$$V_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} \qquad V_{Sodar} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\int_0^T u dt\right)^2 + \left(\frac{1}{T}\int_0^T v dt\right)^2}$$

    因為風速塔風速大小表示為：

$$V_{cup} = \frac{1}{T}\int_0^T V dt = \frac{1}{T}\int_o^T \sqrt{u^2 + v^2}\, dt$$

所以 SODAR 與風速塔風速資料之間的相關性如下[1]：

$$V_{Sodar} = \alpha V_{cup}$$

其中α<1 且 0.98<α<0.995，跟大氣穩定度、地表粗糙度、觀測高度有關。

■ LIDAR 基本原理

利用光波對大氣懸浮粒子進行不同高度之風速量測[5]，量測方式主要是以平面為主（參見**錯誤! 找不到參照來源。**），可量測高度決定如下：

$$H = h_0 + p' \cos(30.6°)$$

其中

h_0 is the initial vertical displacement of the laser heads(~2m)

p' is the focal length

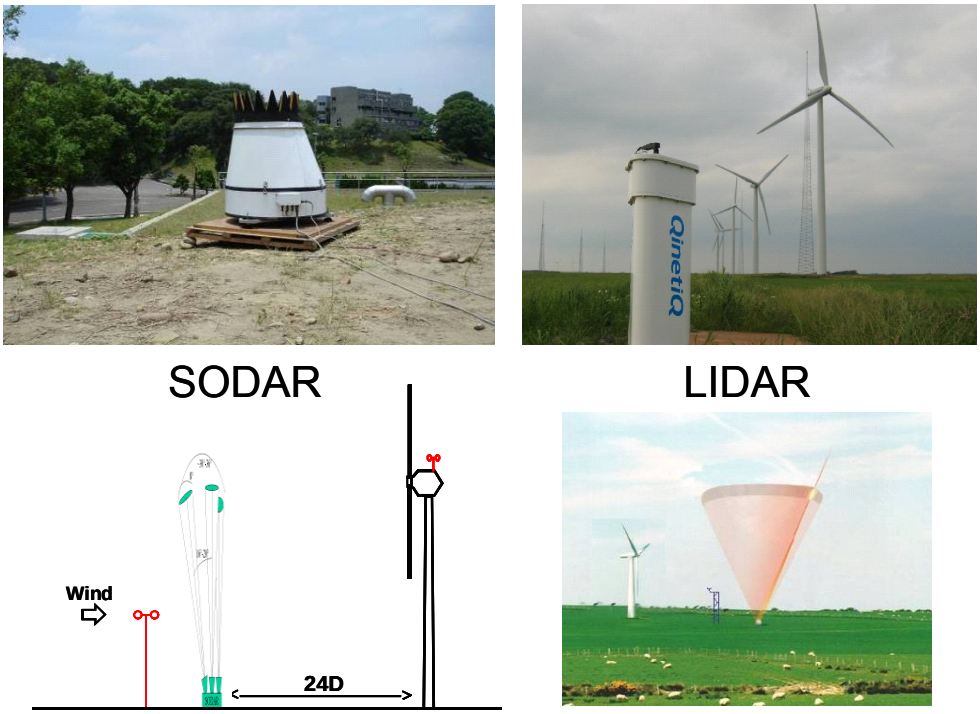


圖 2、SODAR 與 LIDAR 示意圖[1]

四、Meso-scale modeling + Micro-scale modeling

目前最普遍被使用於風力資源評估的 Meso-scale models 有 KAMM（Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model）、MM5（The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model）、WRF（Weather Research and Forecasting Modeling）等。中尺度模式結合小尺度模式進行風場模擬分析是目前評估大區域風力潛能的主要做法，而且丹麥 RISØ 國家實驗室利用 KAMM/WAsP Method（參見圖 3）目前已完成許多國家政府所委託之風能評估研究案（例如歐盟、美國、中國、日本以及最近完成的埃及等等）。

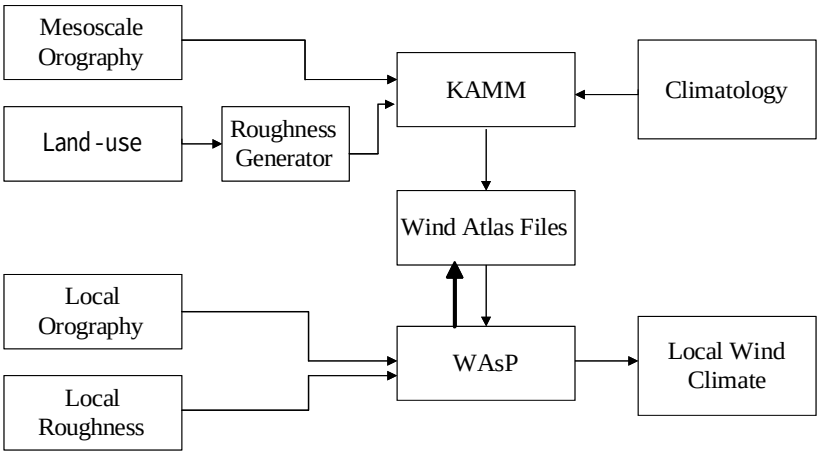


圖 3、KAMM/WAsP Method[6]

- 中尺度模式（Meso-scale modeling）

數值天氣模式的基本原理如下：

■ 基本控制方程(動量方程、連續方程、狀態方程、熱力方程、水汽方程)

動量方程（Equation of Motion）

$$\frac{d}{dt}\vec{V}_H = -\alpha\nabla P - 2\vec{\Omega}\times\vec{V} + \vec{g} + \vec{F} \qquad (\vec{V}_H = u\hat{i} + v\hat{j})$$

$$\alpha\frac{\partial P}{\partial t} + g = 0$$

連續方程（Continuity Equation）

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla\cdot\vec{V} = 0$$

狀態方程（Equation of State）

$$P = \rho RT$$

熱力方程（Thermodynamic Equation）

$$\dot{Q} = c_v \frac{dT}{dt} + P\frac{d\alpha}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dP}{dt}$$

水汽方程（Water Vapor Equation）

$$\frac{dq}{dt} = \frac{S}{q}$$ S=source or sink

- 動力過程：靜力與非靜力數值模式選項、可壓縮流體連續方程式。
- 物理設定：模式對於不同的大氣物理過程提供許多不同的選擇，包括降水的物理過程、地表能量的收支、地表邊界層的處理和大氣輻射的物理過程。

以 KAMM 為例，其基本原理是初始假設具靜力、地轉基本狀態與特定風速與位溫垂直剖面，利用大尺度網格資料（NCEP/NCAR reanalysis data）進行時序模擬分析，或是採用 Statistical-dynamical downscaling 的方式進行狀態分析。Statistical-dynamical downscaling 的方法首先是定義大尺度天氣類別概況（weather class profiles），接著進行中尺度模式模擬，最後平均模式模擬結果，來構成區域之風能特性；以圖 4 三種不同的類別為例進行風場模擬，而平均方法如下式公式，三種不同的結果即如圖 5 所示。

$$\bar{u}(x,y) = \frac{\sum f_i(x,y)u_i(x,y)}{\sum f_i(x,y)}$$

其中

$\bar{u}(x,y)$ 是指在 100m 高之平均風速

$f_i(x,y)$ 是 wind class i 的發生機率

$u_i(x,y)$ 是 wind class i 在 100m 高之風速大小

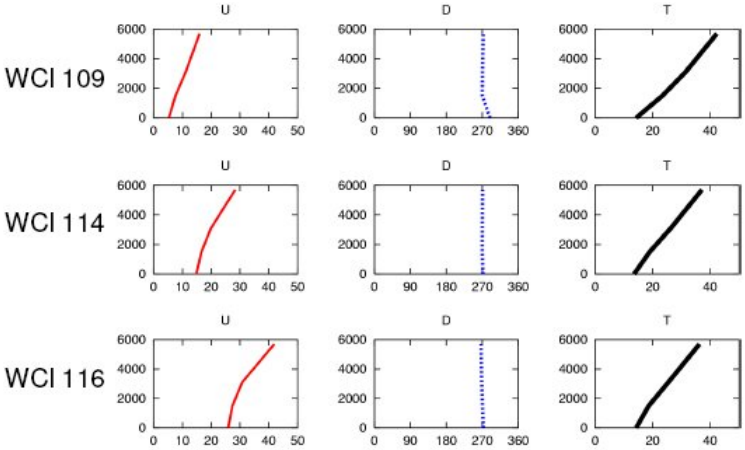
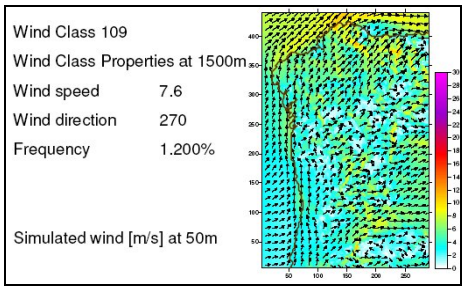
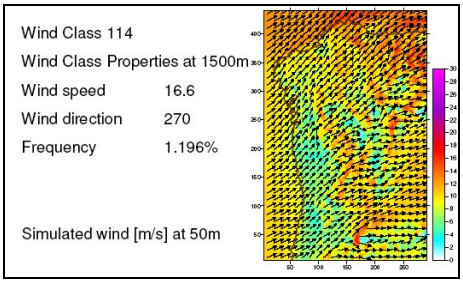


圖 4、三種不同 wind class profiles 的例子[6]

(a) Example wind class 109 simulations



(b) Example wind class 114 simulations



(c) Example wind class 116 simulations

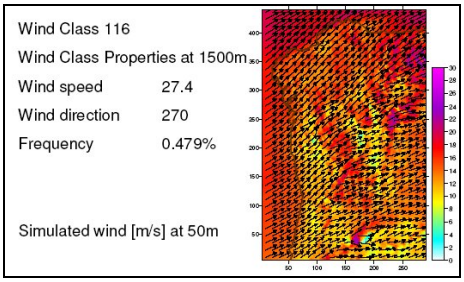


圖 5、三種不同 wind class profiles 模擬結果 (a)Example wind class 109 simulations；(b) Example wind class 114 simulations；(c) Example wind class 116 simulations[6]

• 小尺度模式（Micro-scale modeling）

目前最普遍的作法是利用 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)風能評估軟體，另外，也可運用許多小尺度模式（例如 MS-Micro,4 and Raptor,5 Raptor-NL,6 as well as CFD models）進行評估。

WAsP 小尺度區域風能評估軟體的主要方法請參見圖 6 流程圖，利用測站（包含氣象局、機場或是風速塔等）長期觀測資料，移除測站周圍之地理特性（地形、粗糙度及障礙物）之影響，獲得當地之基本風能分布；再考慮場址之地理特性，以評估其風力資源；也可更進一步考慮風力機型式、數量及配置，以推估年發電量及作最佳化分析。

移除測站周圍地形、障礙物與粗糙度等地理因素之影響，可更精確地評估其風力資源，包括不同高度及背景粗糙度下之平均風速（Mean wind speed）及風能密度（Mean power density），以及各方位之韋伯分布（Weibull）與尺度參數（A & k）。不同高度風速可以用下列的經驗公式來推估：

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

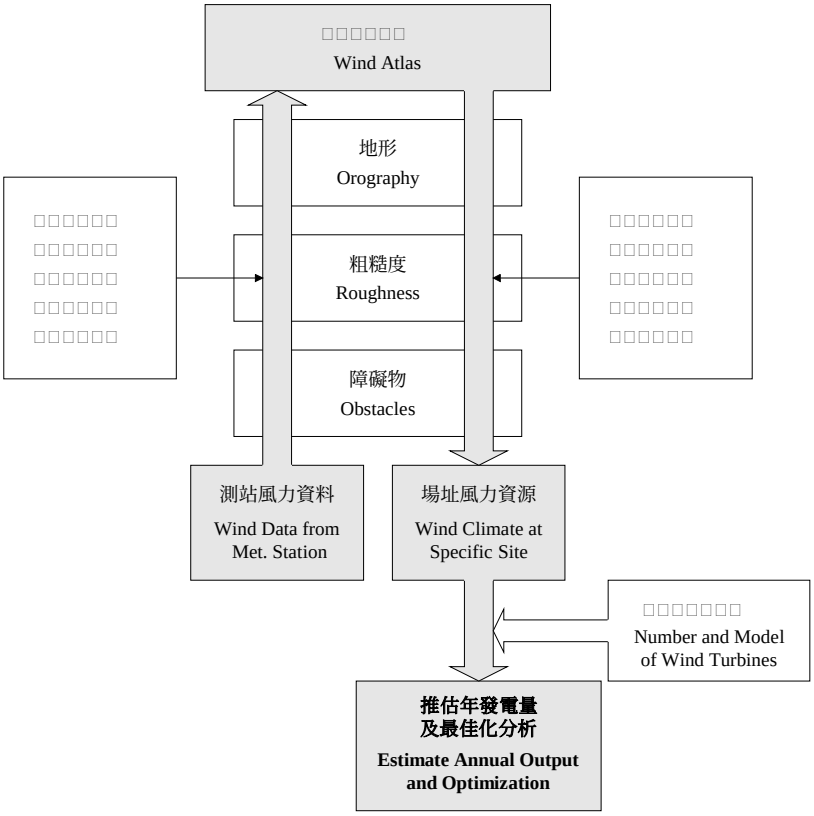


圖 6、WAsP 分析評估流程圖[7]

五、結論討論

透過上述風能評估技術可以解決風力預測所遭遇障礙，進而評估出潛在的風能分佈（參見圖 7），例如中央氣象局氣象模式尺度過大，直接使用精度不足；現場觀測之風速站，限於經費架設密度不足；大型風電場可能會設置於較複雜之地形上。在風能評估技術上，依據國外研究及應用的經驗，如何避免因障礙物產生擾流及地形地貌對於風力機安全的影響也都是需考量的因素，所以對於風速資料品質要有很強的判斷能力，畢竟地形地貌的改變可是影響近地表面風速變化甚鉅，如果只是透過經驗公式計算出年發電量的預估值，評估結果的參考價值也不會太高。

目前台灣已開發或已規劃的風電開發案都是以西部沿海地區風能較佳為主，除了離岸式風力發電外，地形比較複雜的內陸地區將是未來發展的重點。對於比較複雜的地形之評估方式，丹麥 RISØ 國家實驗室是利用ΔRIX 的指標來提醒 WAsP 的結果是否有高估或低估風能的現象，讓評估的過程中可以更加小心以提高準確性。除此之外，目前為了改善 WAsP 風能評估軟體應用於複雜地形的準確性，目前也已發展一個新的 2D Flow model[8,9]，提升 WAsP 風能評估軟體應用在陡峭地形上的準確性，而另一個重點是也可避免複雜地形所引發的流場導致風力機損毀。

以往我們曾利用 WAsP 風能評估軟體將同一風速塔不同高度（10m、20 m、30 m、50 m、60 m）的風速資料推估計算 67m 之發電量，結果發現每層的預估值都不一樣，而且越低層有越高估的現象，據丹麥 RISØ 國家實驗室技術人員表示，WAsP 風能評估軟體發生此現象的原因可能有三：1）此評估場址可能是屬於較複雜之地形；2）要重新確認使用 WAsP 風能評估軟體的過程中是否有誤；3）風速資料是否可用率太低，觀測的過程中遺失太多資料，尤其是剛好集中在同一時段，會導致評估的不準確。另外一個例子是在葡萄牙北部的一個場址，此場址剛好有好幾座風速塔，研究發現不同位置的風速塔評估同一個場址的結果亦不同，所以如何選用最佳風速塔位置的資料來進行此場址評估也是一門很重要的技術與經驗。上述這些寶貴的經驗分享值得我們去思考，在進行場址評估或是規劃時，確實應當有足夠的專業技術與能力，才能使得評估結果更具參考價值。

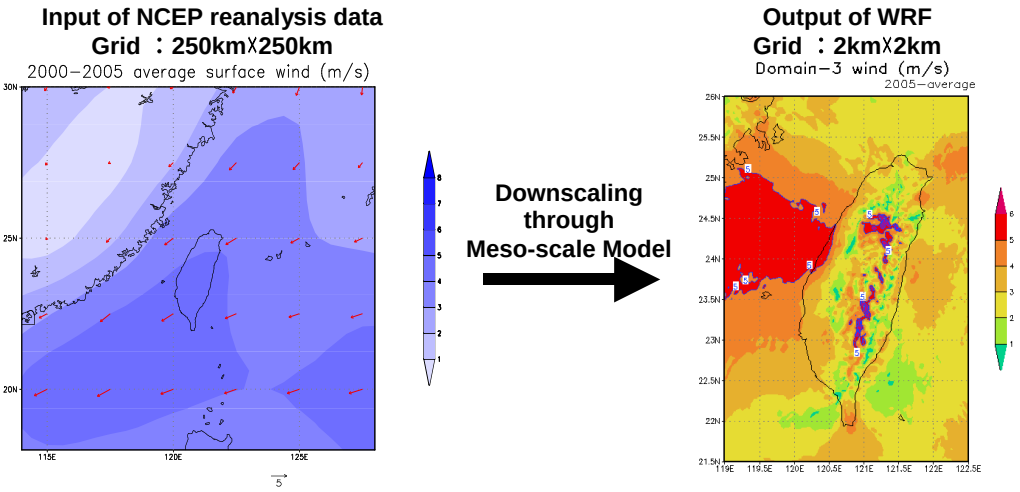


圖 7、大區域範圍風力資源分佈圖

六、參考文獻

1. Ioannis Antoniou and Hans E. Joergensen, “Comparing SODAR to Cup Anemometer Measurements.”
2. Panofsky HA, Tennekes H, Lenshow DH, Wyngaard JC. The characteristics of turbulent components in the surface layer under convective situations. Boundary Layer Meteorology 1977, 11: 355- 361
3. Antoniou I, Jørgensen HE, Petersen SM. Remote sensing of the wind speed for wind energy purposes using a sodar. Proceedings EWEC 2001 Copenhagen, 757-761.
4. Kristensen L. Can a cup anemometer underspeed? A heretical question. Boundary-Layer Meteorology 2002, 103: 163-172.
5. Jørgensen et al. (2004) Site wind field determination using a CW Doppler lidar comparison with cup anemometers at Risø. In: Proceedings. Special topic conference: The science of making torque from wind, Delft (NL), 1921 Apr 2004. (Delft University of Technology, Delft, 2004) p. 261266
6. Frank, H.P.; Rathmann, O.; Mortensen, N.G.; Landberg, L., The numerical wind atlas - the KAMM/WAsP method. Ris?R-1252(EN) (2001) 60 p.
7. Mortensen, N.G.; Heathfield, D.N.; Myllerup, L.; Landberg, L.; Rathmann, O., Wind atlas analysis and application program: WAsP 8 help facility. (2004) 333 topics
8. Corbett, J.-F., The new WAsP flow model: A fast, linearized mixed spectral integration model applicable to complex terrain. 2. PhD seminar on wind energy in Europe, Ris?(DK), 4-5 Oct 2006. Unpublished
9. Mortensen, N.G.; Bowen, A.J.; Antoniou, I., Improving WAsP predictions in (too) complex terrain. In: Proceedings (online). 2006 European Wind Energy Conference and Exhibition, Athens (GR), 27 Feb - 2 Mar 2006. (European Wind Energy Association, Brussels, 2006) 9 p