

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

風力發電廠區風速及發電量統計預報系統開發
**Assessment of dynamical statistical forecast model establish and
analysis for wind power short term prediction**

計畫編號：992001INER056

受委託機關(構)：財團法人氣象應用推廣基金會

計畫主持人：陳重功

核研所聯絡人員：盧仲信

聯絡電話：(02) 2349-1328

E-mail address：chern@rdc.cwb.gov.tw

報告日期：99 年 12 月 31 日

目 錄

| | |
|------------------------|----|
| 目 錄 | i |
| 中文摘要 | 1 |
| 英文摘要 | 2 |
| 壹、計畫緣起與目的 | 3 |
| 一、風能預報的發展現況 | 3 |
| 二、台灣地區的風能開發 | 4 |
| 三、計畫目標 | 4 |
| 貳、研究方法與過程 | 6 |
| 一、資料與處理方法 | 6 |
| 二、模式架構與運算方法 | 9 |
| 三、模式開發、測試分析 | 11 |
| 參、主要發現與結論 | 16 |
| 一、全年風速、風能統計預報之開發 | 16 |
| 二、預報作業流程的規劃與結構 | 18 |
| 三、研發結論 | 19 |
| 肆、參考文獻 | 22 |
| 表 | 24 |
| 圖 | 27 |

中文摘要

本研究使用台電澎湖中屯之風機組觀測之風速、風能資料，與中央氣象局的區域動力數值預報模式 NFS (Non-hydrostatic Forecast System) 的預報產品，應用動力統計預報 MOS(Model Output Statistics) 技術對風速進行預報模式建立與預報後再進行風能未來 48 小時預報的全年各季成果評估。

模式開發時 NFS MOS 風速模式的解釋度(R^2)，約處於 0.8 至 0.5 間，而獨立測試時的相關係數值，則處於 0.9 至 0.6 之間，顯示預報趨勢的合理性。而預報誤差在建模與測試時的比較下，約降低了 1m/s(近乎 30%)的準確度。當轉換為預報風能時，預報的趨勢性隨預報時段增加，呈現較快的下降。預報誤差部份，透過風能、風速的轉換方程，建模與測試誤差範圍值，約各處於 150kw~240kw 與 150kw~300kw 之間。最大誤差增加比率可達到 25%。

而全年建模各季的風速模式評比， R^2 與模式開發期間近似，RMSE 部份約調降 1.5m/s。風能轉換上，約在 60~180kw 間，相對降低最少 33%。此應由於經選取合格的觀測資料所得到的結果。其間冬半年的季表現比夏季優。

因此，強化風速預報準確度與找到更適當的風能、風速轉換描述，是提升風能管理運用最值得深入研發的課題。

關鍵詞：動力統計預報，風能預報

Abstract

In this study, the data of wind speed and wind power of Taipower wind generators (CT01~08) in Penghu county, and the forecast products of CWB NFS are employed to develop the NFS MOS wind speed forecast model for the following 48-hour, then converting to forecast wind power by the CT01 power -wind curve for the spring season. Also, the assessments between model training and forecast periods are discussed.

The NFS MOS wind model explained variance vary from 0.8 to 0.5, and the independent forecast shows a significant forecast tendency as shows the correlation from 0.9 to 0.6. The forecast accuracy of forecast case reduces 30% (1m/s) in comparison with the RMSE of model training period. This situation of NFS MOS wind forecast is also response in the forecast wind power, which is converted from forecast wind. The RMSEs of model training and forecast periods are from 150kw to 240kw and from 150kw to 300kw, respectively. It shows 25% forecast error increase for the independent forecast case in respect to model training.

In comparison with development stage, the final modeling performances for all seasons have the same R² range, but the RMSE reduced 1.5m/s. As the wind power assessment, the fitting RMSE range is within 60~180kw, which reduce 33% with respect to development period. The data quality plays most important rule.

As a matter of fact to improve the forecast accuracy of wind power forecast, both to increase the wind forecast accuracy and to provide a more suitable power-wind curve are the fundamental basis for our forecast scheme.

Keywords: MOS, wind power forecast

壹、計畫緣起與目的

風能源之於大自然，雖然取之無盡，卻也難於調度管理。為因應趨緩全球氣候環境變遷與面臨能源罄竭之困難處境，低排碳、低污染之能源的開發與管理，已成為未來應用發展的基調。歐美先進國家早於上世紀末，已著手經營此一未來。

一、風能預報的發展現況

風能預報是很重要的風能管理運作之參考工具。因此，能有效地提供預報準確度高，且夠長的預報時效資訊，是能源使用管理上的重點服務需求。現今風能預報技術的發展以歐洲的 ANEMOS 計畫 (development of A NExt generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of Onshore and offshore wind farms) 的推動與成效最顯著。其中主要部份之預報架構理念，為動力數值模式-統計預報模式進行降尺度的風能預報設計運用，亦即所謂的 MOS 預報技術。此乃借重動力數值模式的超前預報為依據，再透過統計預報的特性來調降預報誤差，以提高預報的準確度[1, 2]與可信度。

然而，近年來隨著綠色能源對經濟與環境的未來期許之影響下，更形突顯出能源調度管理對預報應用的需要。而藉由配合協助能源供需調度與節約成本效益的目標考量下，至使預報模式開發技術的應用導向，以能提供預報的不確定性(uncertainty)與預報風險評估(prediction risk assessment)為預報服務的主要參考重點[3]。因而衍生出借重系集(Ensemble)動力數值預報概念的系集預報系統[4]，以及以機率預報[5]型式的預報模式被開發出來，以因應現況的預報管理決策之參考要求。

二、台灣地區的風能開發

台灣地區而言，氣候地理位置處於東亞季風區，全年約可分為冬半年的東北季風，及夏半年的西南季風，且加以台灣地區之中央山脈的縱貫布置，使氣流更加迅速流動，增進風能的可用效率。

根據中研院能資所利用中央氣象局對風的觀測資料研究所得的台灣地區風能密度分布。國內主要的風能蘊藏區域包括：北部從桃園的大園到新屋沿海，新竹的新豐到香山一帶，苗栗的後龍至苑裡沿海一帶；整個中部沿海，自通宵、大甲、經梧棲、大肚，一直到彰濱與麥寮沿海一帶；及南部的嘉南沿海與屏東墾丁等地。而台灣電力公司早已有計劃的進行風力規劃與風力機組的設置。區域涵括：核一廠、核三廠、大潭電廠、台中電廠，桃園大園觀音、新竹香山及台中港等區，以及澎湖等地區。亦將風能投入地方的配電調度運用。

風力發電機組所能產生的發電量，取決於當地所蘊含風能之多寡。因此，風力電廠業者在運轉策略上，有其事先預測與評估未來幾天風能所能提供之發電量及其發電機組運轉的時程配置之必要性。而目前台灣地區對於風能的管理運用，應是處於開發與建立管理機制的時機。氣象的動力數值模式具有向前數日的預報功能，而在預報的過程中，亦隨預報時間的增加而形成預報誤差的累積；但經由結合統計模式的共同應用，足以提升對風能預報的未來數日的產質預估，及預估的準確度品質。

三、計畫目標

此研究的目標是建立台灣風力發電廠之風能預測。提供未來

二天 (未來 48 小時) 內的發電廠區的風機組之風速與風能之預測。

研究之技術內容主要依據歐洲 ANEMOS 所引述之 advanced model output statistics，及隸屬美國氣象局之 MDL(Meteorological Development Laboratory)所應用之動力統計預報作業 MOS (Model Output Statistics)模式。MOS 模式主要功能在於有效的降低動力數值模式預報，隨預報時效增長而遞增的線性系統性預報誤差(linear systematic forecast error)。

計畫主要目的在於運用 MOS 模式，評估風能短期預報之動力統計預報系統的開發技術與其預期提升風能預報的精確效益。當然，亦是藉此奠定風能預報顯示系統中之統計預報作業系統之模型基礎。同時，更帶領台灣風能應用管理邁向國際級的水平與地位。

貳、研究方法與過程

本計畫在於應用動力統計預報模式(MOS)，進行對特定風機組開發二日(未來 12 至 48 小時)內逐時的時平均風速與風能的預報。此一方法在於借重動力數值模式的超前預報潛能，加上結合統計模式的應用，達到降低數值模式產生的預報系統性誤差，以提升預報的準確度；並直接的對於被預報變數進行預報推估。以下茲就技術開發過程，逐一探討如后。

一、資料與處理方法

本研究中採用的資料部份，主要是中央氣象局的短期區域動力數值模式(NFS/Non-hydrostatic Forecast System)的歷史預報產品，及現行台電公司的風機組的觀測風速與同時對應的風能紀錄資料。資料特徵與處理過程，詳敘於后：

(一)、風機資料的收集、整理與分析

本研究的風機資料，主要由台灣電力公司所提供；計有桃園觀園(20 座風機組/代號簡稱 TY)、台中港(18 組/TH)及澎湖中屯(8 組/CT)。資料期間 TY 為 2008 年 1 月至 2009 年 12 月的逐筆風速(m/s)、風能(kw)的連續紀錄(最大發電量約 1530KW)，原始紀錄時間間隔為 6 分鐘。而 TH 的資料期間為 2009 年 1 月至 2010 年 4 月，CT 為 2009 年 1 月至 2010 年 5 月，時間間隔均為 6 分鐘。此三廠區的風機組的最大發電量約制定於 12m/s 以上，發電量值各別約為 1530kw(TY)、2020kw(TH)及 620kw(CT)。而最低的發電起動風速約在 3~3.5m/s 間。

1.各廠區的觀測風速、風能對應分布評比

基本上，此三個發電廠區所用的風機產自不同的製造商。所以，所得的風速與風能分布(Wind Power Curve)亦截然不同，且表現的差異很大。圖 1(a)、(b)及(c)分為 CT 的第 1 號(CT01)、TY 的第 1 號(TY01)與 TH 第 18 號(TH18)風機組 12 月的風速與風能分布情形。除了各地的風速分布不同外，最主要的是風速與風能的對應性是否較接近單一對應。其中以 CT01 的情境最佳，雖有少數明顯的離群分布存在；而 TY01 的分布在 5-10m/s 之間，特定風速的應風能值最大區間，可以落差約 500kw。TH18 的情形更為嚴重。所以，若以 TY 與 TH 的所建立的 Wind Power Curve 的預報對應參考客觀性，就顯得可用性有待思量。

2.時平均資料的轉換過程

由於上述的評比情境，因此本計畫選用 CT 廠址的風機觀測進行預報模式的研發。圖 2 為 CT01-08 各個風機的地理位置分布情。在技術開發中，本研究均以 CT01 的春季(2-4 月)為主要研討目標。由資料調查表 1 顯示只有春季有完整的 2 年資料，能夠進行以 2009 年的 2-4 月資料來建立模式，並以 2010 年的 2-4 月資料進行模式預報的獨式校驗。

觀測資料先進行離群分布值(見圖 3(a)原始分布)的過濾處理，主要以：

- (1). 風速 $\leq 2.85\text{m/s}$ ，風能值定為 0kw，
- (2). $2.85\text{m/s} < \text{風速} \leq 12.5\text{m/s}$ ，及風能值 $\leq 50\text{kw}$ 的觀測紀錄均刪除，
- (3). 風速 $> 12.5\text{m/s}$ ，及風能值 $\leq 580\text{kw}$ 的觀測均刪除，

(4). $2.85\text{m/s} < \text{風速} \leq 12.5\text{m/s}$, 建立以風速的二次方來描述風能的方程, 經此方程在風速區間的值, 計算出對應的風能值與觀測風能值的整體之 Root Mean Square Error(RMSE)誤差量值。以此 RMSE 值的正、負 2.5 倍為合理接受區間, 過濾除相對應於對應風能值合理範圍區間外的觀測資料。

完成上述的資料過濾後, 進一步製作時的平均資料, 以過去 1 小時內的所有每 6 分鐘的觀測值的算術平均值來代表; 例如由 0 點 6 分起之每分鐘觀測值(不含 0 點 0 分的紀錄)至 1 點 0 分(包含)止的平均值, 記錄為 1 點的過去 1 小時平均觀測值。若所選定的該小時內的觀測量, 少於該有的半數, 則該小時均值定義為資料缺失。對於小時內區間之定義, 為滿足 MOS 模式的涵蓋預報區間的必要條件限制。由圖 3(b)中可明確的呈現出時資料的分析效果。

此處藉由圖 4 來突顯出對風機作業與觀測資料一致的重要性。圖 4(a)、(b)、(c)及(d)分別為 CT01 的 2009 年 3、4、5 月及 2010 年 4 月的時資料分布, 明顯地 2009 年 4 月有 2 條風能觀測曲線, 綠圈曲線與前一月相同, 而紅圈曲線則與後一月之後的分布一致。當然, 若風機效能經調整後, 造成觀測資料性質的斷層, 會嚴重導致模式開發的缺陷, 以至於預報能力降低或失控。

(二)、動力數值模式資料部份

本研究所使用的動力數值模式, 為中央氣象局現行預報作業的 NFS 區域數值模式之 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 的網格產品。由於此模式

已發展成熟，目前作業狀態近乎完全符合“凍結”的條件。所使用的網格點見圖 2 中之黃色空心圓圈。主要數值模式預報之變數取自 500 百帕(mb)以下之各個標準層場（見文件[6]文中之表四所列），並加入各層的風速、東西風分量(u)和南北風分量(v)的一、二和三次方等項目(見表 4)，為新增加的參考預報因子變數。1 號風機需用的預報因子，則經由最近之相鄰 4 個網格點的 NFS 預報變數值，內插至風機所在位置。NFS 的預報作業為每日二次，分別於 08LST(Local Standard Time；即 00Z)，及 20LST (12Z)，本研究模式開發時採用預報時段由 12 小時至 48 小時，每 6 小時預報間隔的輸出產品。而正式建立作業用模式時，則採用每 3 小時預報間隔的輸出產品。模式開發所使用的資料期間，完全與風機資料期間符合。

二、模式架構與運算方法

本研究中所採取的預報流程，主要參考 H.-P. Waldl [2]與 Atsushi Hashimoto[8]所規劃的風能預報程序。主要使用 NFS MOS 進行風速預報，再透過風速對應由觀測資料所產生的風速轉換風能的關係式，將預報之風速換算為相對應的預報風能。

風能統計預報模式的基礎架構，主要在於建立風速預報用的迴歸預報方程，及找出風速、風能的對應轉換方式。在建立預報方程部份，適切的相關因子篩取與模式預報方程組合的穩定性是重要的考量；而風能與風速的轉換關係上，降低轉換的誤差度，亦即提升對應的準確度，是必要的條件。

(一)、模式的建立與運用

本研究的目標在於建立每日二次以 NFS 動力模式預報未

來 12 至 48 小時，每隔 1 小時間隔之風能預報模式，模式研發時則以每隔 3 小時之結果，進行模式評比與說明。研究中所採取的架構為，以各預報時段之動力數值模式所預報的各層場內插在站址上的各式變數為參考預報因子，透過 Forward 選取過程完成複式迴歸方程的因子篩選(詳述於文件[7])，建立起 MOS 所需之各個相對時段的被預報觀測風速值的最佳預報方程。而在逐時的觀測風能所需建立的各個預報方程時，若特定的數值模式啟動時間(00Z 或 12Z)所預報的時段點(每 6 或 3 小時間隔)未正好對正時，本研究採取以前、後時段中最接近要被預報的觀測風速時間點為對應數值模式的預報時段點。

本研究為進行模式建立與獨立測試之資料區隔，主要採用 2009 年 2、3、4 月(春季)的風機觀測風速資料來建立 NFS MOS 預報模式，再使用 2010 年的 2、3、4 月資料進行獨立預報測試與校驗。當然，雖然由圖 4 發現此二個期間之資料組，對風能已算為不同性質的資料組；且 2009 年 4 月份的資料亦會影響建模的關係組成；但限於資料的不足，需謹慎處理可能延伸的問題。然而從 MOS 的角度而論，僅用 1 年的春季建模的客觀性極低，容易突顯出強烈的年際變化，與季內變化性質上的差異。若能以 3 至 5 年的資料建立預報模式，不僅強化模式的客觀性，且所選取出的預報因子亦較為適切，具預報事件的物理意含，而預報結果也會顯示出較高的穩定性。

(二)、Wind Power Curve 的方程

由於前一節所述及 2009 年春季的風能資料存在性質不連續的情形，且此處所建立的風能轉換方程的目的在於準備模式

獨立測試時應用。此處採取了 2 組方案，第 1 組擷取風速在 2.85~13.5m/s 間的時平均風速、風能資料，以風速的一次與二次方來描述風能，所得轉換曲線與資料分布見於圖 5(a)，所得方程如下：

$$\text{風能}=3.255\times(\text{風速})^2+17.47\times(\text{風速})+107.7$$

風能的變異解釋度($R^2/\text{Explain Variance}$)達到 98.6%，但當風速 < 4m/s 時對應風能轉換值為 0kw，與觀測不符合；而且在 8m/s 以下及以上，呈現轉換過強(略高估)及過弱(略低估)，在風速值 > 12.3m/s 時完全無法正確描述實際風能值。因此，採用方案 2 來分析，在相同的資料範圍內，風速值由 2.85~7.5m/s 間以風速的二次及一次方建立轉換方程，在風速值由 6.5~13.5m/s 間，以風速的一、二及三次方項建立方程。圖 5(b)顯示在各自的區段內的對應幾近完美。所以應用時採取

1. 2.85~7m/s：

$$\text{風能}=7.38\times(\text{風速})^2+35.5\times(\text{風速})+45.69 \quad / R^2=96.9\%$$

2. 7~13.5m/s：

$$\text{風能}=2.03\times(\text{風速})^3+56.1\times(\text{風速})^2+420.6\times(\text{風速})+1046 \\ / R^2=99.3\%$$

圖 5(b)中顯示，較方案 1 中的缺點，均得到適切的描述調整，較符合實際的對應分布情形。因為預報模式的建立，以季節來劃分，所以相對應的風能轉換方程，亦隨各個不同風機建立各季的轉換方程。

三、模式開發、測試分析

風能模式開發主要有風速 NFS MOS 動力統計模式的開發，與風能轉預報兩個技術部份。本研究以數值模式在 00Z、12Z

每 6 小時間隔所建立的 MOS 為主，進行以風能轉換方案 1 及 2 的比較與選定；再進行鑑定以 6 及 3 小時數值模式輸出間隔，所建立的風能預報模式間的評比，以確認模式建立研發與作業版本的一致性。以下茲就各題案評比進行分析。

(一)、風能統計預報模式的建立與分析

本段主要分為風速統計模式的建立，與風能轉換方程的選取分析。

1. 風速統計預報模式分析

圖 6(a)及(b)分別為 CT01 的春季(2、3、4 月)時平均風速在 00Z(藍線)、12Z(紅線)的建模(2009 年)及獨立預報測試(2010 年)的風速相關程度(R^2 、Correlation/實線)與誤差程度(RMSE/點線)。建模期間的 00Z 與 12Z 的 R^2 由 12 小時至 48 小時的每 3 小時間隔的預報分布，顯示此二數值模式啟始時間的預報趨勢是一致的，12~36 小時間數值約維持在 0.6 至 0.8 之間，36 小時之後緩降至 0.5~0.6 間。相對於測試期間(圖 6(b))，相關係數由 12 至 48 小時間，呈現處於 0.9 至 0.7 之間約略遞減的變化走勢。

同時 RMSE 的建模變化，顯示風速誤差值由 3m/s 附近隨時段增長，而漸增至 4m/s(見圖 6(a))。測試期間的變化較大，約呈現隨預報時段加長而變大的趨勢，誤差值約處於 3~5.5m/s 間。

2. 風能轉換方程的選取分析

圖 7(a)及(b)分別為 CT01 的春季(2、3、4 月)時平均風能在 00Z(藍線)、12Z(紅線)的建模(2009 年)的預報風能相關

程度(Correlation)與誤差程度(RMSE)的隨預報時段分布情形。其中實線代表風能轉換方案 2(含風速三次方及二次方)，而虛線則是代表方案 1(含風速二次方)。圖中明顯的反應出，方案 2 的相關係數值的分布，平均較方案 1 高出約 0.2，意謂方案 2 的風能預報趨勢更符合實際狀況。而 RMSE 亦呈現同樣的結果，預報誤差值方案 2 較方案 1 平均約少了 30kw。而方案 2 在 00Z 及 12Z 的 RMSE 變化，由 150kw 隨預報時段增長，漸加到 210kw。若以 CT 風機最大風能產生極限 600kw 為基準。預報誤差比率在 25%至 33% 間。

圖 8(a)與(b)則完全與圖 7(a)與(b)的標示是一致的，唯其代表獨立預報測試的結果。相關係數部份大致和建模的情境相近，但 RMSE 部份，雖然方案 2 的預報校驗誤差較方案 1 的優些，但相對於建模期間不僅各時段的變化度加大，且誤差值約落在 150kw 至 270kw 之間。相形地顯出預報誤差比率變為在 25%至 45% 間。

經由方案 1 和方案 2 的評比後，以下的模式開發選定用方案 2 的風能轉換策略。

3.數值模式資料時距 6 與 3 小時之比較

本節的目的在於驗證，數值模式提供建模的資料間隔由上述 6 小時改為 3 小時的變化合理性探究。圖 9(a)及(b)分別為模式開發案例中風速統計預報，在建模期間之 00Z(藍線)及 12Z(紅線)的 6 小時間隔(虛線)與 3 小時間隔(實線)兩組模式的各別 R^2 與 RMSE 分布情形。圖中呈現間隔縮小時，由於提供了資料的對應性，分布變化形式顯得更加平滑了；部

份的時段點有些提升了相關程度，亦有些反而略微降低了。可能主要出於數值模式與實際觀測間，天氣系統移動相位的調整改變所致。

而圖 10(a)與(b)則所代表的形式與圖 9(a)與(b)是一樣的，除了圖 10 是引用獨立預報驗證案例的數值外。大致上的描述是一致的，但由 RMSE 的情形是當數值資料間隔加細後，預報誤差變化平均有降低些，主要是因為模式預報平穩多了。

圖 11 及 12 則為風能預報部份的間隔差異評比。圖 11(a)及(b)與圖 10(a)及(b)代表形式上一致，均是建模期間的比較，但 R^2 則以 Correlation 代之。基本上在建模期間的形式都有一致的效果，即數值預報資料間隔加細後，分布均顯得平滑(穩)些。但是原先討論的變化範圍變化很少。

圖 12(a)與(b)則是代表風能預報在獨立測試期間的變化比較。相較於風速部份，似乎風能的預報平均狀態並無顯著的進步。但仍然證實預報因子的資料供給間隔加細，在本研究所使用的資料種類上，是有提升預報穩定性果效。

4.單點時間的預報校驗

經由以上的研發歷程，確定了預報作業開發的模式規劃。本節將進一步的探討對某一時間的各個預報時段的預報果效分析。

圖 13(a)、(b)、(c)及(d)為 CT01 春季 20LST(下午 8 點)的 00Z12h(小時)、12Z24h、00Z36h 與 12Z48h 的建模期間(綠圈)與獨立預報測試期間(紅圈)的預報與觀測時平均風對應

散布情境。由圖中顯示隨預報時段增加，分布的散落程度漸形變大。在 10m/s 以下，無論建模與測試階段均有風速預報略顯過強的情形，而大於 10m/s 以上約略呈現建模期間，較對應的平均分散狀態，而測試期間的形勢顯出預報風速呈現預報不足。當然上述的預報過強或不足的狀況，會隨著預報時段的增長而狀況加強。

圖 14(a)、(b)、(c)及(d)則呈現著與圖 13(a)、(b)、(c)及(d)相同預報時段的風能預報情形。綠實點代表建模期間的風能觀測，綠圈是建模的預報風能值；紅實點代表測試期間的觀測風能，而紅圈則是測試預報。圖中建模(綠實點)期間與測試(紅實點)期間的觀測風能分布明確呈現不同的對應曲線；建模階段明顯有二條曲線的分布，其中一條與測試階段有重疊的情形，顯明風機作業調整過，或許所建的模式受此資料影響，造成測試期間的預報穩定性降低。

圖 14 各圖中顯出和圖 13 各圖一致的結果，即以 10m/s 上、下劃分，明顯得到 10m/s 以下風能轉換預報有過高的現象。而大於 10m/s 以上，由分布的情形並不明確有預報不足的特性，推測是風能存在著上限值的限制，所以風速預報不足的反應，並沒有清楚呈現在風能預報分布上。

參、主要發現與結論

透過上述的開發步驟與分析，並確立風能統計預報的方法。按計畫的目標，對全年進行風能統計預報系統的模式開發，並進行預報作業流程的規劃。

一、全年風速、風能統計預報之開發

對於年預報的開發，由於風機觀測資料的品質及資料的長度，與模式開發需求的頗有出入。因此，此處針對選定的澎湖中屯廠區的 8 部風機(CT01~CT08)，進行全年風速與風能的統計預報模式建模式。由表 1 中各風機資料的狀況分析，採用 2009 年 5、6 月定為梅雨季，7、8 及 9 月為颱風季(或夏季)，10、11 月為秋季，12 及 2010 年 1 月為冬季、2010 年 2、3、4 月定為春季等五季。其中有部份月份不同的風機組資料呈現嚴重的缺失，均做記號於表中。此外，由於季節性環流強弱的不同，資料中風速較強的分布，亦在不同季各不相同。或某些預報時間點，處於靜風狀態。所以，由於資料量的不足，會導致某些時段模式無法建立情形，但屬極少數的時段。

(一)各季風速模式的建立

圖 15 至圖 19 分別 CT01~CT08 各個風機組，冬、春、梅雨、颱風及秋季的建模的模式基本特徵分析。而圖中的(a)、(b)分別代表 00Z 的各風機組的建模 R^2 及 RMSE，隨預報時段的變化；(c)、(d)則是代表 12Z 的各項各別表現。

基本上，無論 R^2 或 RMSE 均是隨預報時段增加而變弱。冬季的風速模式 R^2 表現，在 00Z 及 12Z 的變化，約落在 0.7~0.88，而隨時段變化的轉折，00Z 及 12Z 則是有不同趨勢

度；而 RMSE 部份，00Z 及 12Z 均處於 1.7 至 3m/s 間。春季建模的 R^2 表現，對於 00Z 及 12Z 的變化，約落在 0.7~0.88 間，而隨時段變化的轉折，亦同樣呈現不同演化趨勢度；RMSE 部份，00Z 及 12Z 均處於 2 至 4m/s 間，較冬季的建模趨勢度降低，同時誤差度加大。

梅雨季的模式 R^2 表現，00Z 及 12Z 的分布約處在 0.53~0.84 之間，其中少部份風機的表現起伏的程度較不一致。RMSE 部份，00Z 時落在 1.5 至 3m/s 之間，12Z 亦顯現相似的情形。颱風季的變化，00Z 與 12Z 的 R^2 變化，上限約落在 0.8~0.9 之間，而最弱關係部份風機可至 0.4 上下。RMSE 在 00Z 及 12Z 均處於 1.5 至 3m/s 之間，僅 CT05 風機組的表現，似乎均在最低限隨時段而演化。

秋季是建模表現，整體風機組變化最一致的季節。00Z 時 R^2 變化在 0.7~0.9 間，12Z 則是在 0.78~0.92 間。而 RMSE 二者均約處於 1.7~3m/s 間。綜觀冬半年的演化變化較整體上較一致，但夏半年時各機組約略顯出各自獨特的變化演進趨勢。此外，吾人也發現到這些變數的演化情形，00Z 與 12Z 的變化趨勢，有 12 小時的變化關係存在，但秋季此現象不明顯。

(二)各季風能轉換預報的評比

圖 20 至圖 24 分別 CT01~CT08 各個風機組，冬、春、梅雨、颱風及秋季的風能轉換預報模式的基本特徵分析。同樣各圖中的(a)、(b)分別代表 00Z 的各風機組的風能轉換預報的相關係數(Cor./Correlation)及 RMSE，隨預報時段的變化；(c)、

(d)則是代表 12Z 的各項各別表現。由於，透過預報風速轉換為風能，所以明顯地風能的季節性分布變特性和風速的是一致的，即各項查驗變數冬半年整體變化較一致，夏半年時則是變化度較大，且突顯出各別風機的各自特性。

冬季 00Z 與 12Z 的 Cor.變化，約在 0.7~0.9 之間，RMSE 在 90~180kw 間起伏。春季，00Z 與 12Z 的 Cor.變化，均在 0.75~0.92 之間，RMSE 則是在 90~180kw 間振盪，和冬季的預報能力近似。梅雨季 00Z 的 Cor.變化值處於 0.7~0.92 間，而 12Z 則變化上限可達到 0.8 多，但部份風機及時段可下探至 0.6；RMSE 部份，00Z 變化值在 65~150kw 間，12Z 則相同落在此區間。夏季的變化情形，無論是 00Z 或 12Z，亦是 Cor.或 RMSE 均表現的分散變化度均較冬半年大。Cor.約在 0.6~0.95 間，RMSE 約在 60~150kw 之間。秋季的表現是最佳的，Cor.的部份在 00Z 約為 0.7~0.93，12Z 則是由 0.8~0.93 間；RMSE 對 00Z 與 12Z 時均落在 60~130 到 150kw 間。

同樣的 00Z 和 12Z 各自的演化變化間，仍明確的隱含著 12 小時變化的趨勢相關性。

二、預報作業流程的規劃與結構

表 2 中所陳列的是風速、風能的統計作業流程結構。主要分為二個區域：風速預報及風能轉換預報。表中詳列輸出與輸入的資料需求。此二區域的結構，仍是資料輸入、運算處理與產品輸出，三個功能區。

風速運算部份的流程較為繁複，大意上是程序啟動後，風速預報方程檔會先被載入程序，進行所需的數值模式鑑定、模

式中需用變數場量的匯整，接著編列出整個預報方程檔中，所有的(包含各個測站)預報因子明細。接著載入對應的數值模式預報產品，按場量匯整需求增加所需的場量，完成後再依預報因子明細所列，逐個挑選定製:由格點場量資料內插至機組所在位置(座標點)。全部完成後，再次載入預報因子檔，給了逐個報方程所需預報因子挑出，代入方程中配合各因子的係數，運算出方程所定義的風速值。風能部份就按三個功能區進行，只是每組轉換包含 2 條方程式。

而表 3 為被預報元，即風速的模式條碼，各條碼編輯定義亦詳細記載於表中；表 4 為預報因子，即所需之數值動力模式的內容條碼定義。作業流程必需依靠各個編碼的定義，去執行每個動作。

三、研發結論

綠色能源的開發是個改不了的趨勢，然而預報是有效的管理能源最好的策略。有參考價值的預報指引的開發，是很迫切的事件，必需重視。有參考價值的預報指引，應該建立在以提供準確的演化趨勢，未見得是在預報的精準度上挑戰。當然，準確度的精準程度，應是追求進步的動力而非成敗。在透過此一研發計畫的探索後，對於本課題的幾個要項陳述於后：

(一)、本研發的結果顯示在 00Z 和 12Z，相互表現出存在日、夜變化的因素在預報模式的化中。在全年預報模式開發，各季的風速建模 RMSE 值均較研發春季案例的為低；相對應的也帶出，全年各季的風能建模之 RMSE 值的誤差比率，約控制在 15%至 25%帶，亦較開發時的春季案例 25%至

33%進步許多；此原因應是開發案例中 4 月資料品質不佳所產生的模式不穩定所致。若預期預報明年的獨立預報，期待誤差比率該落在 25%至 35%。

- (二)、各個季節的表現，確實各有不同的特性。在模式的預報與觀測值的相關度、預報的誤差振盪程度與同季中全部整體風機組的散布情形，都具各別的特徵；大至上夏季較分散，冬季較集中，而風速的預報能力看似夏季較冬季好些。當然，透過風能轉換這類現象也反應在風能的分布上。
- (三)、本研發計畫主要的目標，在於研發建立風速與風能的統計預報系統技術。由於受限於風機觀測資料的過短與觀測品質有待加強等因素，只得以一年(或一季)的資料建模，模式缺乏對年際變化的調整。但要如此設計的預報模式達於可用，則需待有合乎條件的資料，重建預報模式後才能正式預報作業。
- (四)、風速與風能的對應 Wind Power Curve 分布，依各廠區、風機製造、操作設定、各季節的區域氣候特徵等人為或自然的因素而形成單機的觀測的獨特性。
- (五)、對於風機資料應用的要求上，風機運作的狀態應該要處於“凍結”狀態，即一經測試調整完成後，應保持單一狀態。如此預報建模才有預報應用之意義，亦才能有效的選取最佳的模式。
- (六)、由於一般風速觀測設備在風機風扇正後方，且很靠近。是否由於風機運作轉動，而對風速觀測影響有多少，需進一步評估。因本研發的前題是，假設風機上的風速觀測值是

絕對正確的。是否風速觀測應設置獨立的系統，避開風機運作的影響，會更準確的提升風速預報？

(七)、觀園(TY)、台中港(TH)的風機組之風能與對應風速分布，過於散落的情形。是否是必然的現象，由於此二風機組高度、風扇尺度、發電量等均不一樣。若吾人以機械的運動慣性檢視三個廠區不同機型的風機之風能、風速分布時，是否存在風速改變後，但由於風機的慣性會有反應落後的情形？若假設成立，發電量越大(高度越高，扇片越大)的風機觀測，狀況就越嚴重。

(八)、上述的風能風速觀測問題，能得到進一步的確認與改善，新的穩定資料將可提供，更精密設計規劃預報模式或方法來處理，以提升預報的應用可信度。

綠色能源的整體發展，能夠確立氣象預報應用的需求與功用，是迎向能源新紀元的共同趨向。經由此一研討，也深一層的共識這是透過各方科技技術的結合，達到落實技術於本土化的應用與適用上。在此感謝提供此一研發機會，對本土綠能瞭解與預報有進一步的實質研習。

肆、參考文獻

1. Giebel, G., Kariniotakis, G., and Brownsword R., “The State-of-the-Art in Short-Term Prediction of Wind Power – A literature Review”, Anomos Report v.1.1, EU FP5 Contract ENK5-CT-2002-00665, 2003.
2. Waldl, H.-P., and G. Giebel: The Quality of a 48-Hours Wind Power Forecast Using the German and Danish Weather Prediction Model. Wind Power for the 21st Century, EUWEC Special Topic Conference, Kassel (DE), 25-27 Sept 2000.
3. Kariniotakis, G., et al., “Next Generation Short-Term Forecasting of Wind Power Overview of the ANEMOS Project”, Scientific Proceedings, European Wind Energy Conference, 27 February – March, Athens, Greece, 2006.
4. Lang, S., Möhrlen, C., Jørgensen, J., Ó Gallachóir, B. and McKeogh, E., “Application of a Multi-Scheme Ensemble Prediction System for wind power forecasting in Ireland and comparison with validation results from Denmark and Germany”, Scientific Proceedings, European Wind Energy Conference, 27 February – 2 March, Athens, Greece, 2006.
5. Pinson P, and Kariniotakis G., “Conditional prediction intervals of wind power”. IEEE Transactions on Power Systems 2010; in press.
6. 陳重功、羅存文、王惠民與賀介圭, “中央氣象局統計預報系統的發展”. 氣象學報, 41, 2000, p18-33.
7. Neter, J., W. Wasserman, and M. H. Kutner, Applied linear regression models · Richard D. Irwin INC. · Homewood · Illinois · 547pp, 1983.

8.Hashimoto A., Y. Hattori, and Kadokura S., “The Forecasting System for Wind Power Generation Combined Use of Numerical and Statistical Models”, The WRF User’s Workshop, NCAR, June 23~27, 2008.

表 1. CT01~8 各風機 2009 年 1 月 2010 年 5 月的風速、風能觀測資料品質狀態記錄。

| 年/月 | 風機編號 | | | | | | | |
|---------|------------------------------|----|---------------------------------|-----|-----|--------------------|-----|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 2009/01 | 與200905合 亦不測錄 (WDS 最後) | | | | | 上限 530kw ≥10m/s | | |
| 2009/02 | 與200905合 亦不測錄 (WDS 最後) | | | | | 2-tail 大類 (不嚴重) | | |
| 2009/03 | 與200905合 亦不測錄 (WDS 最後) | | | | | | | |
| 2009/04 | 與200905合 亦不測錄 (WDS 最後) | | | | | | | |
| 2009/05 | | | | | | | | 上限 300kw |
| 2009/06 | | | | | | | | 上限 300kw |
| 2009/07 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | | 上限 300kw |
| 2009/08 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | | |
| 2009/09 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | 缺資料 | |
| 2009/10 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | 缺資料 | |
| 2009/11 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | 缺資料 | |
| 2009/12 | | | 2-tail 大類 ≥600kw & ≥15m/s | | | | | |
| 2010/01 | | | | | | | | |
| 2010/02 | | | | | | | | |
| 2010/03 | | | | | | | | |
| 2010/04 | | | | | | | | |
| 2010/05 | | | | | | | | 缺資料 |
| 資料刪除 | 考量 刪除 | 過濾 | 不採用 | 梅雨季 | 颱風季 | 秋季 | 冬季 | 春季 |

表 2. 風速、風能統計預報作業流程架構。

| 程序 | 處理流程 | 輸入 | 輸出 |
|------|----------------------------------|--------------------|---------|
| 風速預報 | 資料輸入 | ⓐ預報方程 | |
| | 預報因子分析：產生指定預報因子需求 | | |
| | 資料載入 | ⓑ數值模式線上報產品 | |
| | 數值產品場量運算 | | |
| | 測站預報因子處理：內插至測站點，及填充(數值)指定之需求預報因子 | | |
| | 預報方程載入 | ⓐ預報方程 | |
| | 預報方程運算 | | |
| | 預報指引輸出 | | &風速預報指引 |
| 風能預報 | 風能預報資料載入 | ⓐ風能轉換方程 ⓑ風速預報指引 | |
| | 風能轉換計算 | | |
| | 風能預報輸出 | | &風能預報指引 |
| | | | |

表 3. 統計預報系統的被預報元（風速）的編碼對照表。

| ssssbbeYYYyy(例: WICT11201WDS01A) | | |
|---|---|---|
| ssss 測站代碼 | bbee 季節起止月份 | YYYyy 預報元代碼 |
| 風機組編碼： WFCIX: 中屯麻走第 X 組風機 WF: Wind Forecast CT: 中屯 TY: 觀園 TH: 台中港 . . | bb: 預報季節起始月份 ee: 預報季節截止月份 統計預報作分季如下: 冬季: 12月-01月 春季: 02月-04月 梅雨季: 05月-06月 颱風季: 07月-09月 秋季: 09月-11月 | YYY: 預報元變數 WDS: 風速 WPW: 風能 . yyy: .1 小時時段: 08-24-07:A-P-X A=07:06-08:00LST B=08:06-09:00LST . P=23:06-00:00LST . X=06:06-07:00LST |

表 4. 統計預報系統的預報元（數值模式產品）的編碼對照表。

| cccfffttggg1rr1gr2rr2pppwwlammindx (例：MOS0150S000500TRS46STACT10) | | |
|--|--|---|
| CCC 統計模式 | ffft 預報時段 | ggg1rr1gr2rr2 NWP 模式網格、範圍 |
| PFP: 完全模式(PerfectProg) MOS: 模式輸出統計 (Model Output Statistik) . . | xx: 全部預報場(僅用於 PFP) 12: 預報段為 12h 24: .. 36: .. 48: .. 混 NWP 模式支援預報時 段而定 . | 發展模式(ggg1rr1)與 預報模式(ggg2rr2): gg: 05(CWB 區域數值預 報模式-NFS) rr(某數值模式代碼- 隨任務需求加碼) rr: yy(上述數值模式的網 格與獲取範圍之代碼) |
| Otin 起首/落後之數值模式起始 | | 如 0500 代表：CWB 區域數 值模式(NFS)的網格(5°5km) 的全部輸出範圍 網格轉換： 由 g1rr1 轉換至 g2rr2 |
| 在同一 ff 預報時段，相對於起首 lo 的起首(-012)落後 (+012)的 lo 起始之因子資料。(功能在於調整數值模式預 報的向位是)本研發未使用，定為 XXXX | | |
| ppp 單位 | ww 變數場 | |
| TRS: terrain surface MSL: mean sea level 00: 1000 百帕 850: 850 百帕 700: 700 百帕 500: 500 百帕 008: 850-1000 百帕 007: 700-1000 百帕 005: 500-1000 百帕 857: 700-850 百帕 855: 500-850 百帕 705: 500-700 百帕 50A: 500 百帕以下平均值 50a: 500 百帕以下垂直積 分平均值 55A: 850 百帕以下平均值 lo 數值模式起始 | 01: 高度 08: 氣壓 15: 露點溫度 16: 溫度 17: T-Td 47: 垂直速度(m/s) 48: 東西風 49: 南北風 50: 輻合數 51: 渦度 57: 垂直速度(ipa/h) 60: 溫度平流 62: 渦度平流 63: K 指數 64: T 指數 65: Mkh/mix 66: 位溫平流 67: 位溫 68: Q 等位溫 69: Q 等位溫平流 70: 溫度平流 71: 溫度輻合 80: 低雲量 81: 中雲量 | 82: 高雲量 83: 總雲量 85: 混合比 87: 比濕 88: 相對濕度 89: XSW 可降水量 90: 12 小時模式預 報量積雨雨量 91: 降水效率 98: 積雪降水 94: 大尺度降水 本研發增加 37: 水平風 38: 東西風 39: 南北風 46: 水平風 52: 水平風動能 53: 東西風動能 54: 東西風動能 55: 南北風動能 |
| MOS 模式建立於 00 或 12Z 的動力數值模式初始 時段的預報場 | mmmm 因子拆取 PCA: 主要成份 AVG: 區域平均值 BGP: 鄰近單站 STA: 內插至測站 hmc: 相鄰插值 如台北測站附近相鄰 4 個網格點 SGRC11-4 為： 1: 左下 2: 右下 3: 左上 4: 右上 AVCT10 此 4 點平均 STACT10: 內插至台北測站經、緯位 置 | |

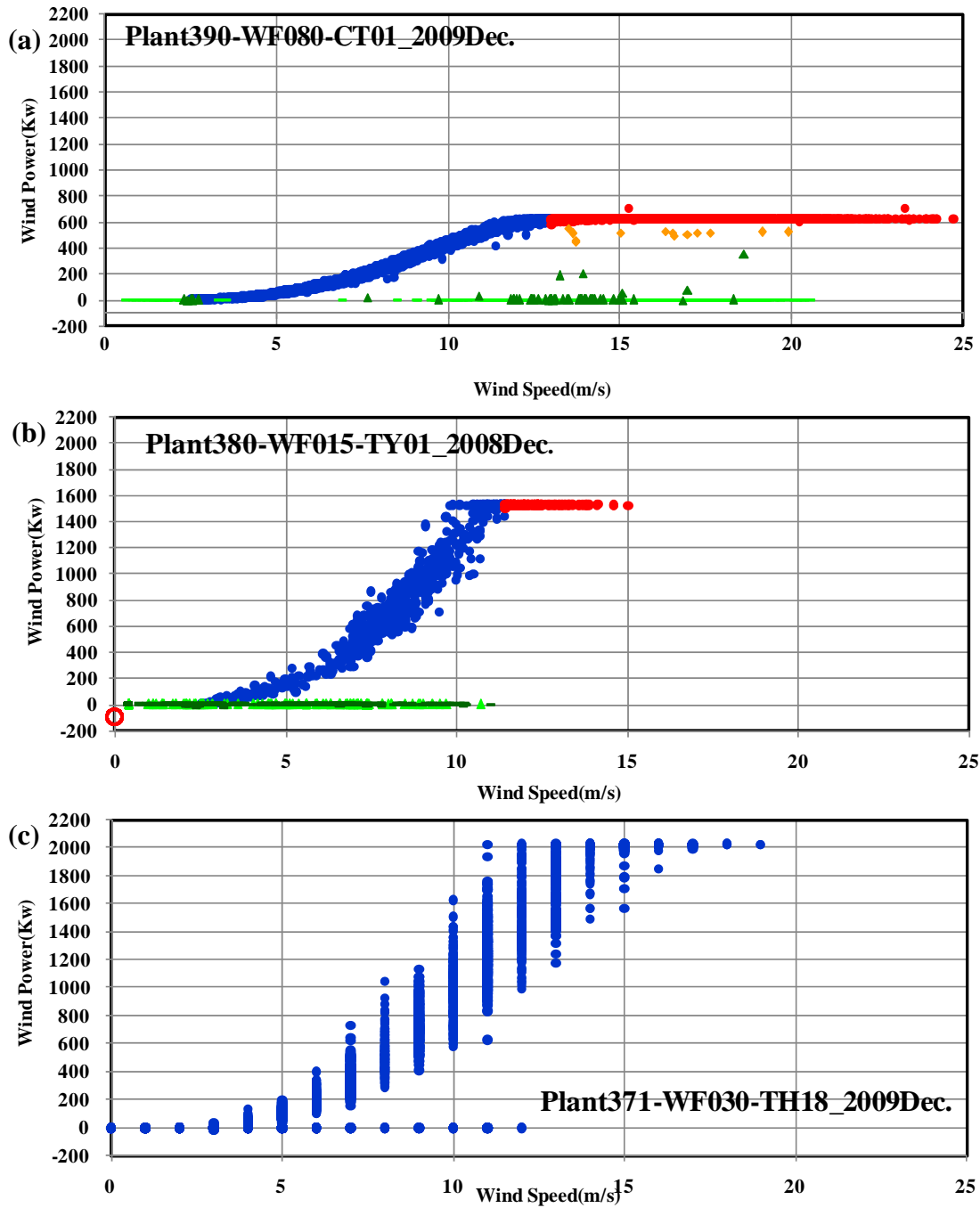


圖 1. (a)中屯-2009 年 12 月、(b)觀園-2008 年 12 月及(c)台中港-2009 年 12 月的觀測風能-風速分布。

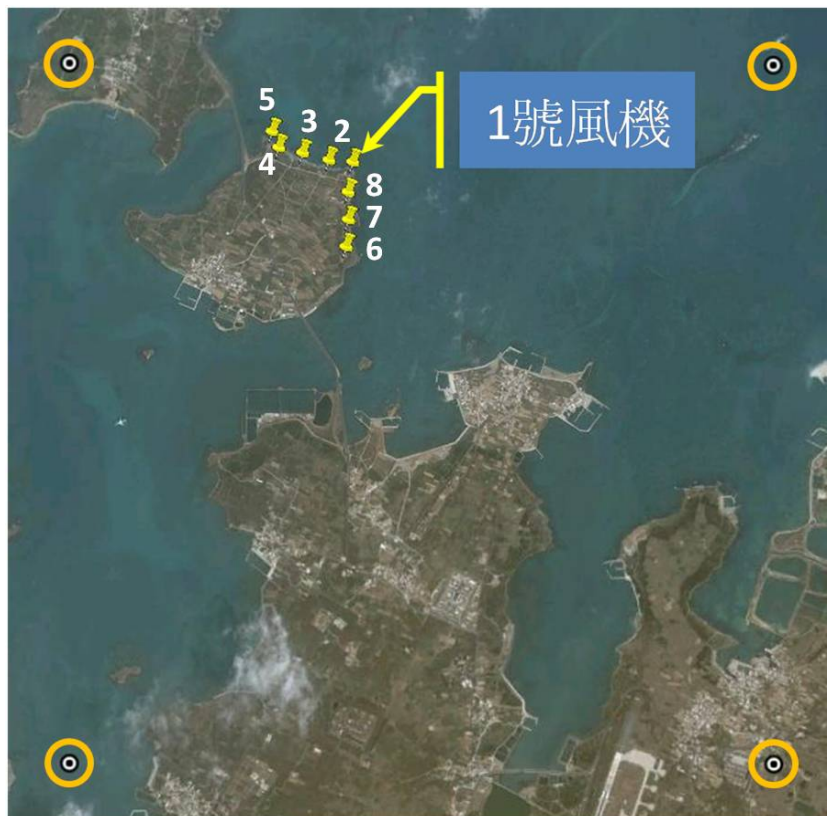


圖 2. 中屯廠風機組 1~8 之位置，空心黃圈為 CWB NFS 動力數值模式鄰近電廠之網格點。

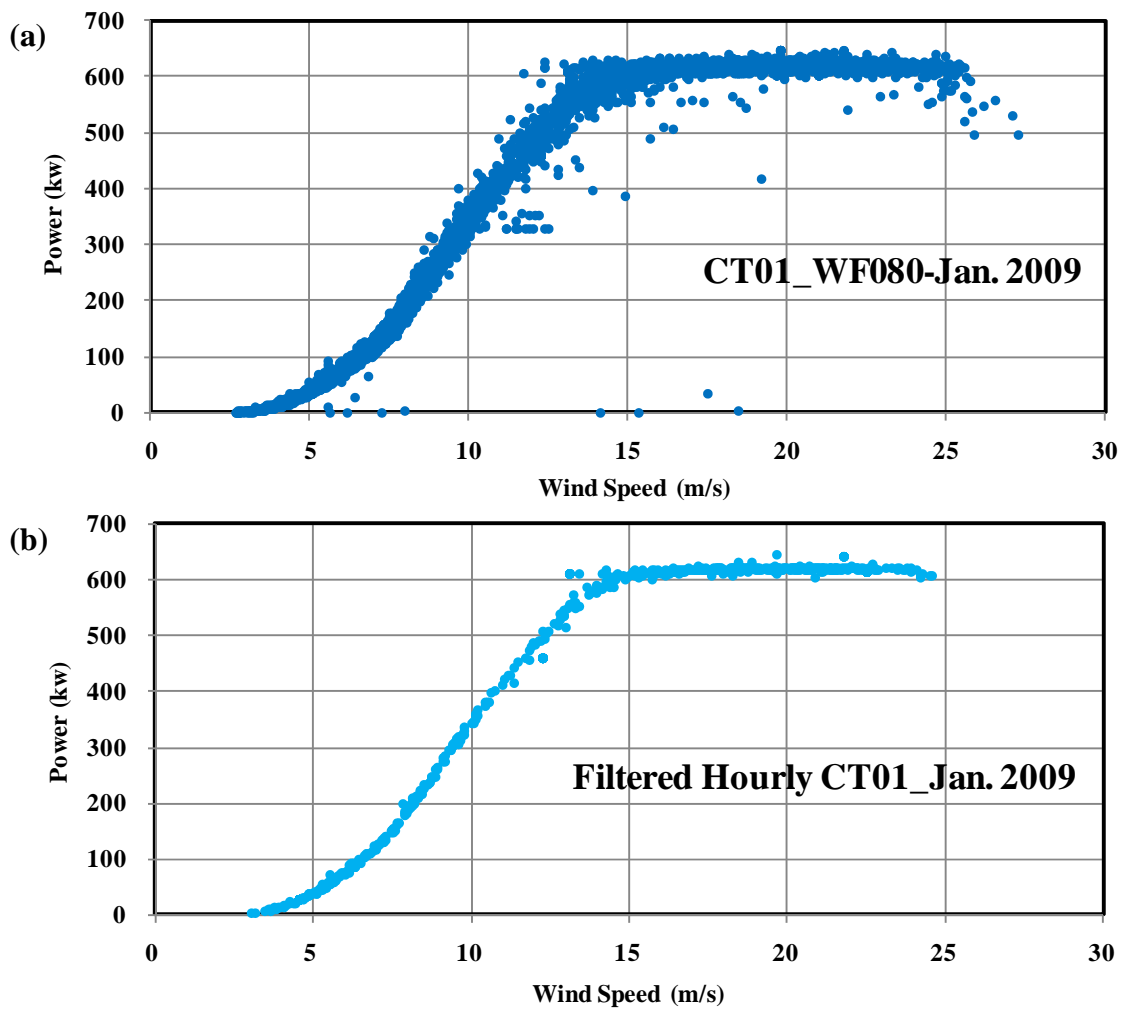


圖 3. 中屯 1 號風機組 2009 年 1 月的觀測風速-風能分布：(a)原始觀測記錄、(b)經過濾及時平均處理後之分布。

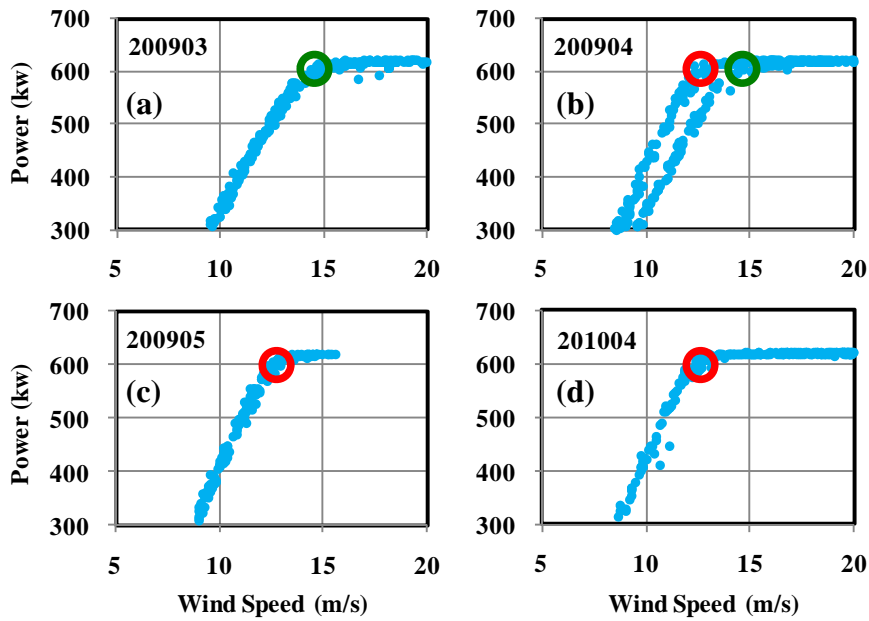


圖 4. 2009 年(a)3、(b)4、(c)5 月及(d)2010 年 4 月各月的時平均風速-風能分布。綠圈為風機調整前分布，紅圈為風機調整後之分布。

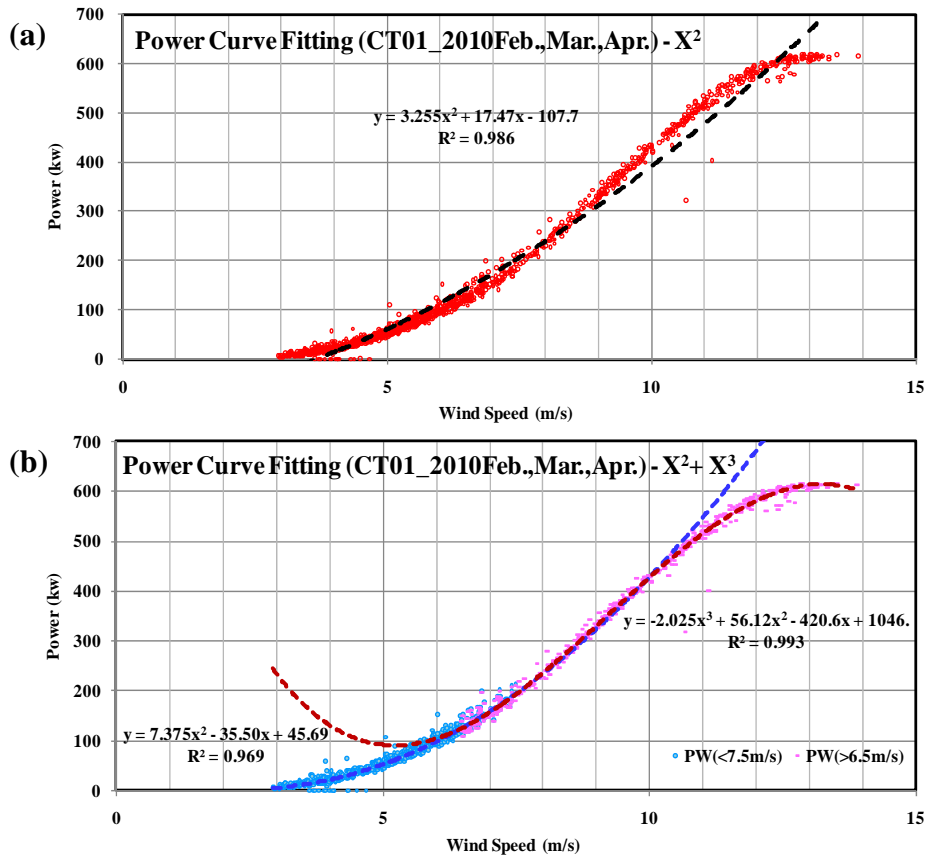


圖 5. 中屯 1 號機 2010 年 2~4 月觀測時資料之轉換對應方程式分布情形。(a)為方案 1：2.85~13.5m/s 間，以單一二次風速方程式描述、(b)方案 2：2.85~7.5m/s 間以二次風速描述，及 6.5~13.5m/s 間以三次風速方程描述之分布比較。

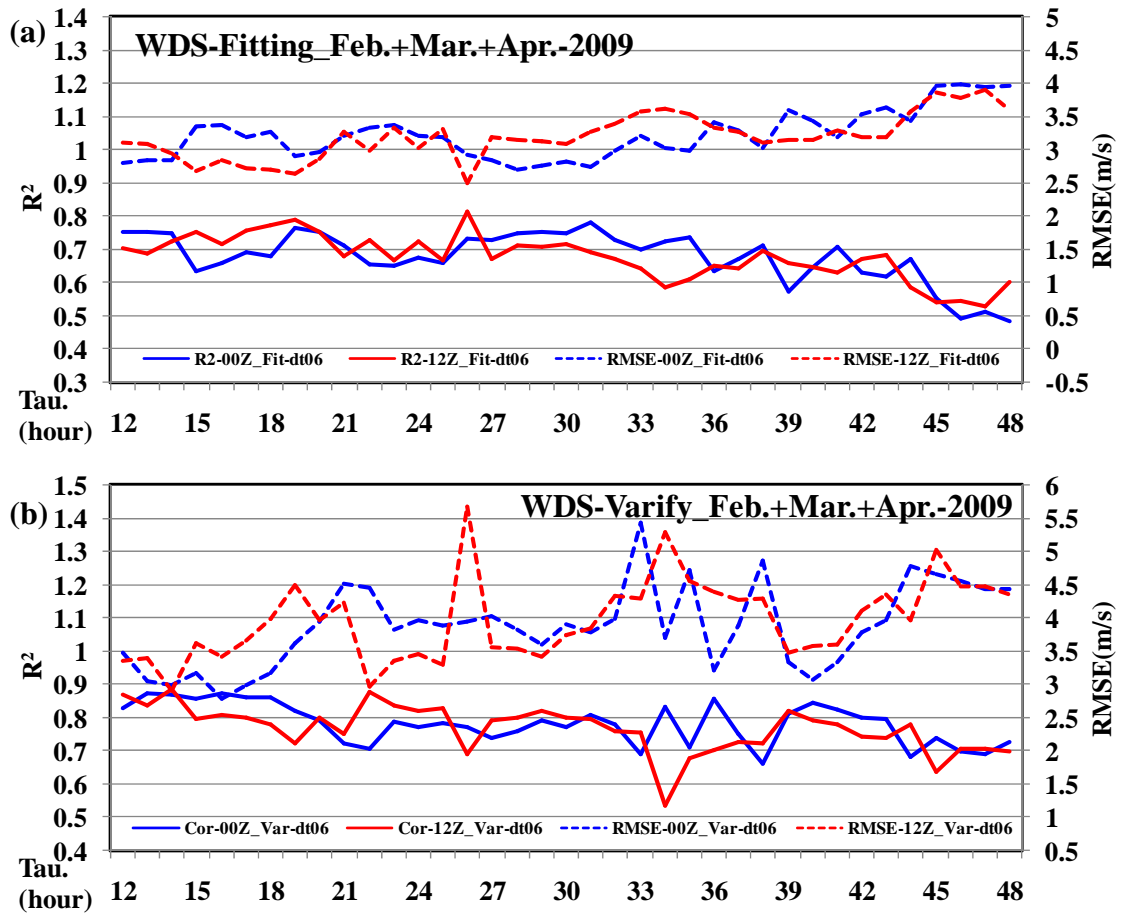


圖 6. CT01 的 MOS 風速預報逐時段演化情形。(a)為建模時-2009 年 2~4 月及 (b)測試時-2010 年 2~4 月之相關程度(實線)與 RMSE(虛線)，藍色代表 00Z、紅色為 12Z。

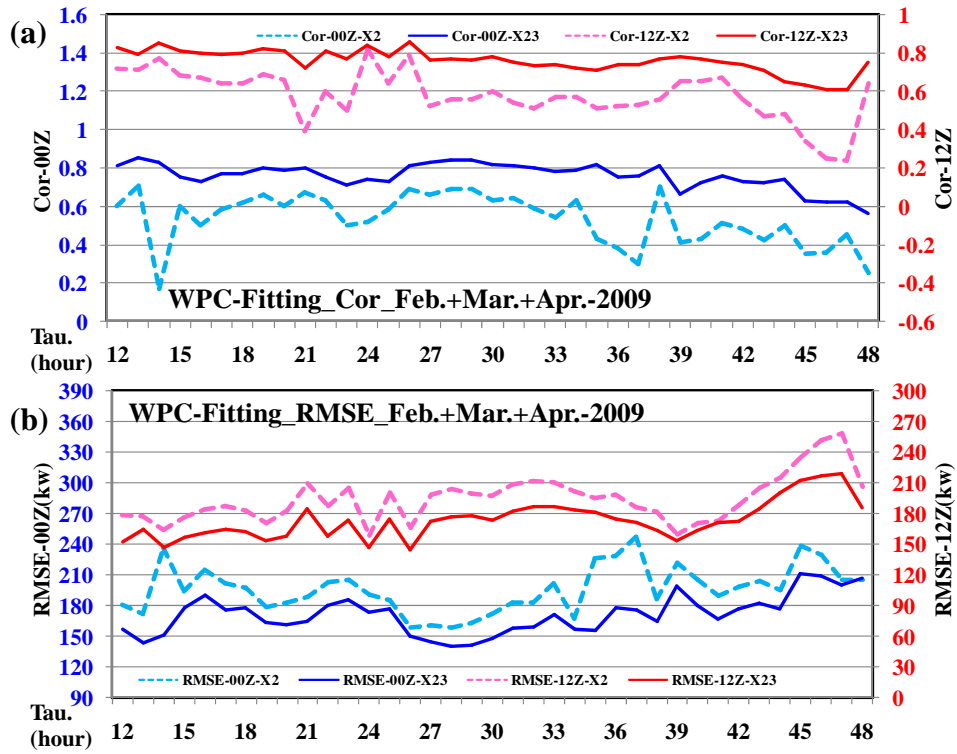


圖 7. 為建模時-2009 年春季之風能轉換預報逐時段分布情形。(a)為相關程度(Cor.)、(b)為 RMSE 之變化，藍色為 00Z 而紅色為 12Z，虛(實)線代表方案 1(2)。

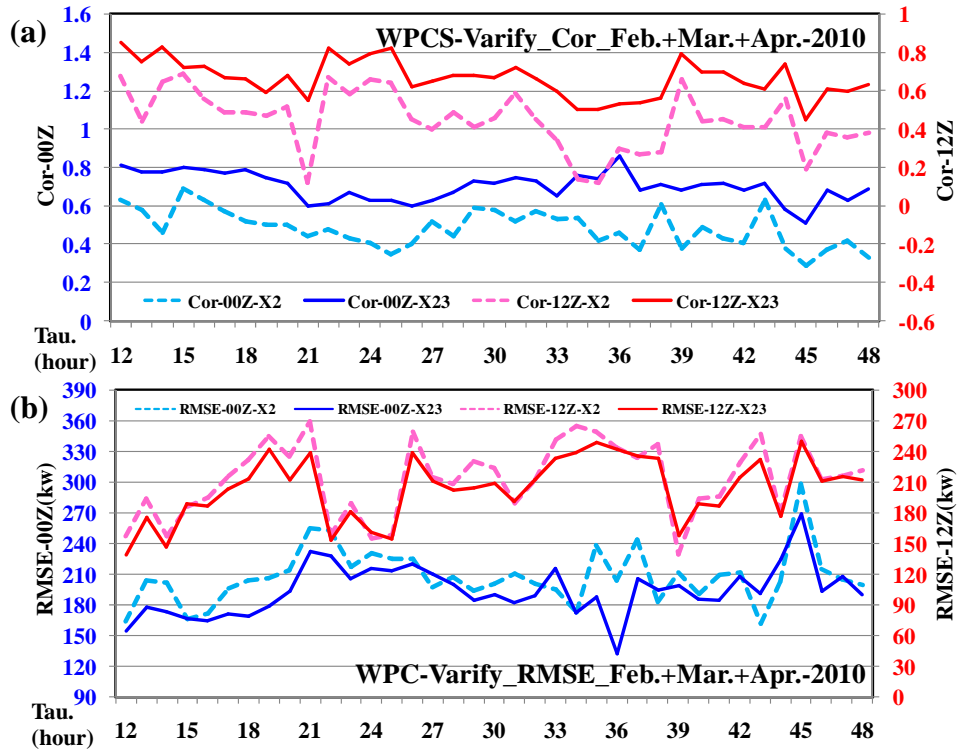


圖 8. 同圖 7 之描述，但為 2010 年春獨立測試之分布。

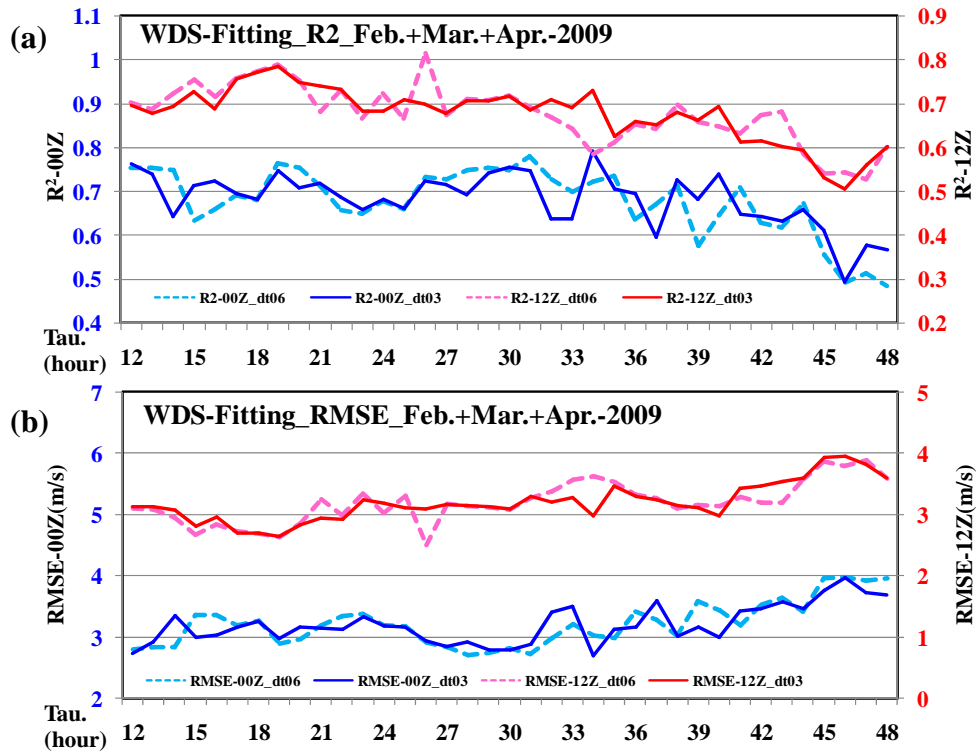


圖 9. 為建模時-2009 年春季風速預報逐時段分布情形。(a)為相關程度 (Cor.)、(b)為 RMSE 之變化，藍色為 00Z 而紅色為 12Z，虛(實)線代表預報因子提供間隔為 6(3)小時。

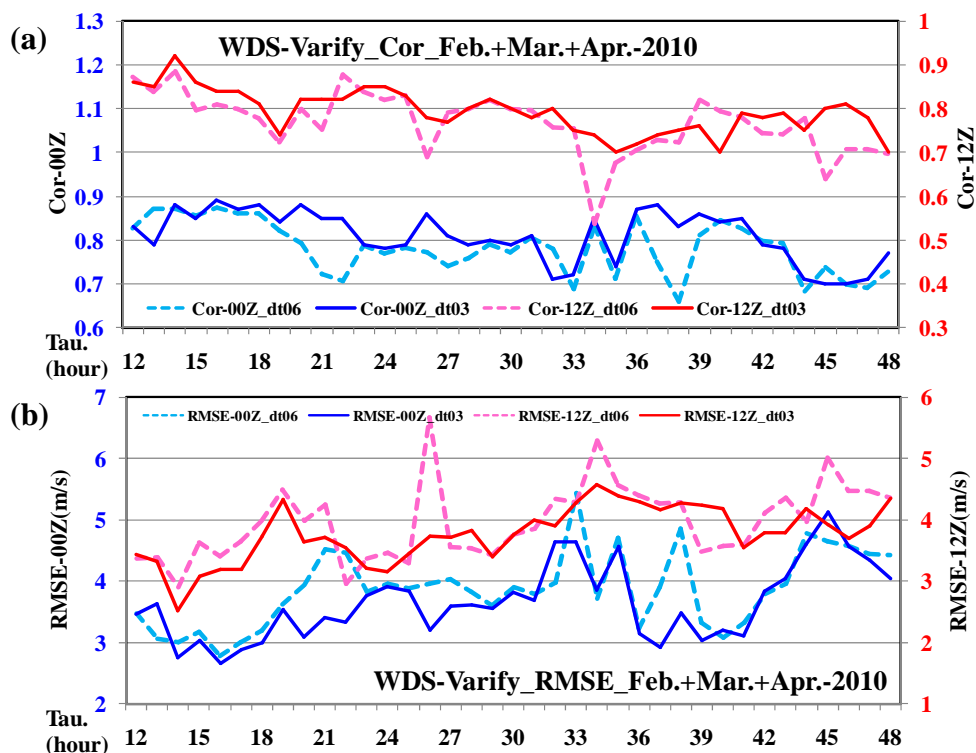


圖 10. 同圖 9 之描述，但為 2010 年風速預報春獨立測試之分布。

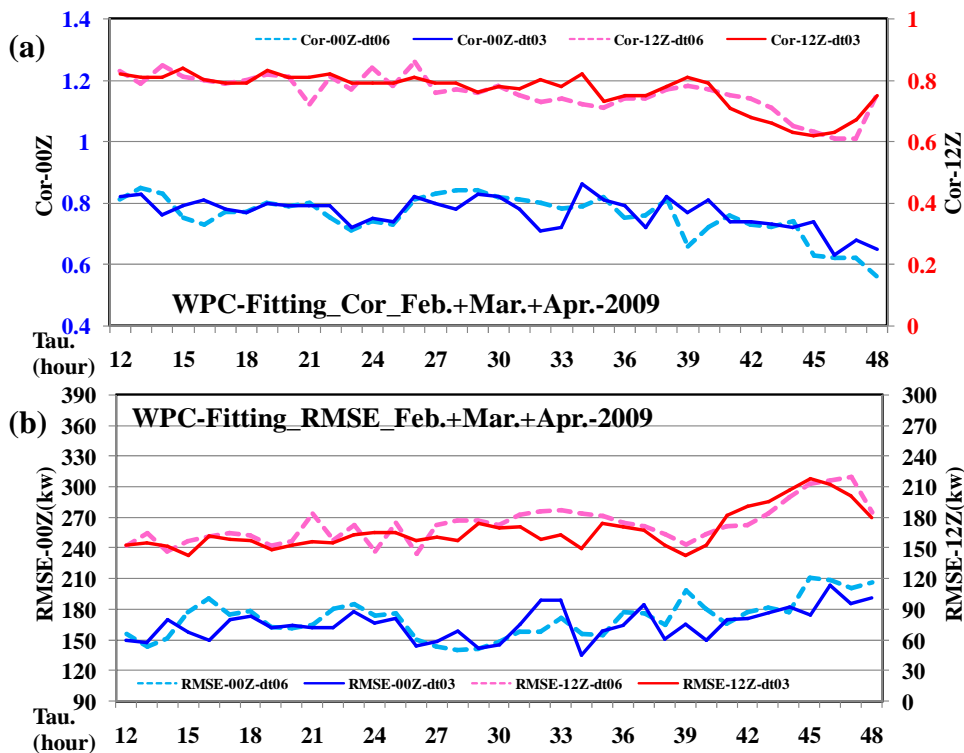


圖 11. 為建模時-2009 年春季風能轉換預報逐時段分布情形。(a)為相關程度(Cor.)、(b)為 RMSE 之變化，藍色為 00Z 而紅色為 12Z，虛(實)線代表預報因子提供間隔為 6(3)小時。

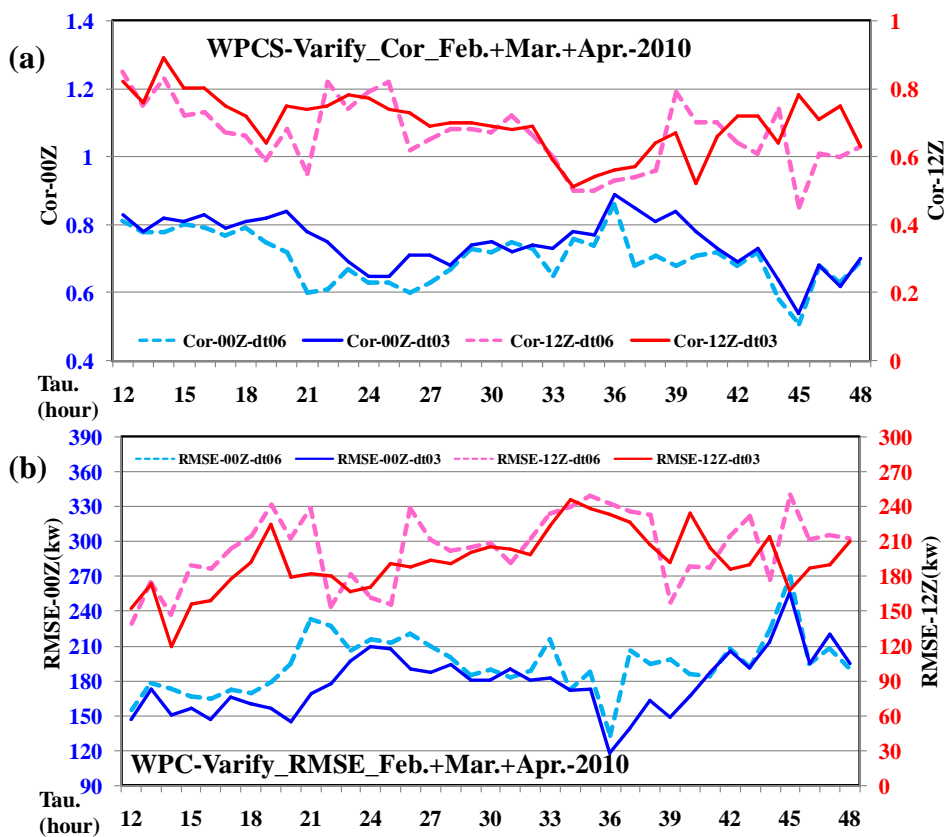


圖 12. 同圖 11 之描述，但為 2010 年風速預報春獨立測試之分布。

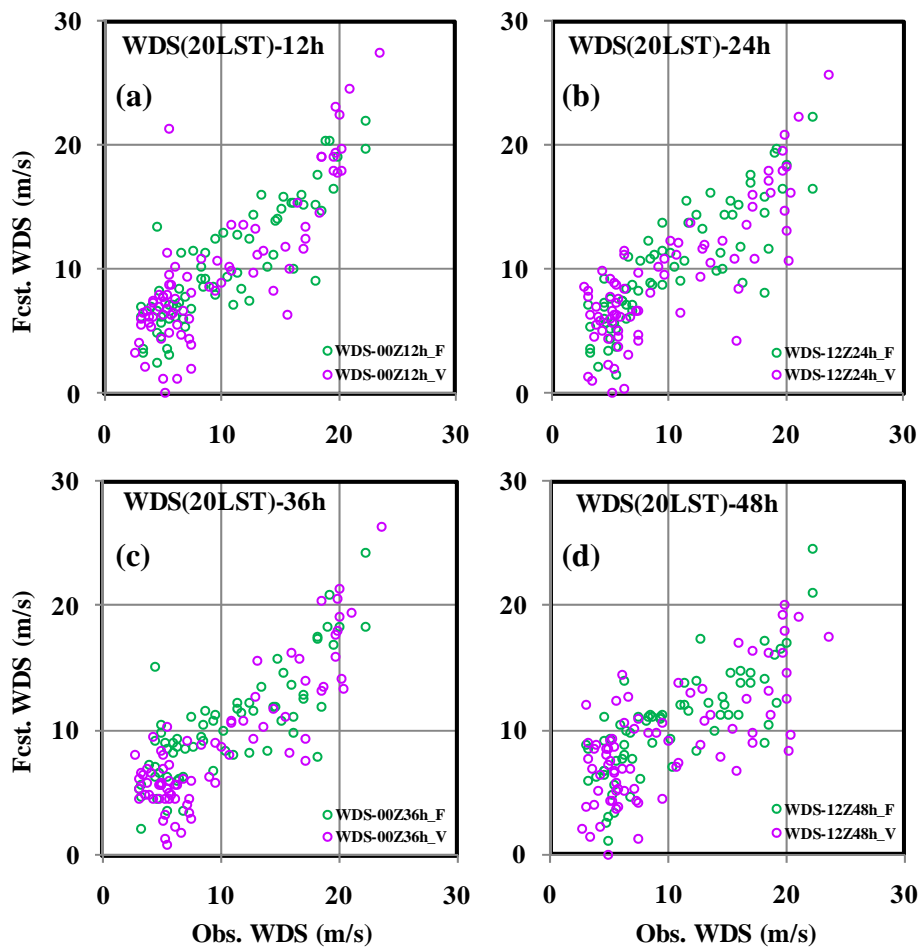


圖 13. 2009 年(建模/綠圈)及 2010 年(測試/紅圈)春季的(a)00Z12h、(b)12Z24h、(c)00Z36h 及(d)12Z48h 風速預報與觀測的對應分布。

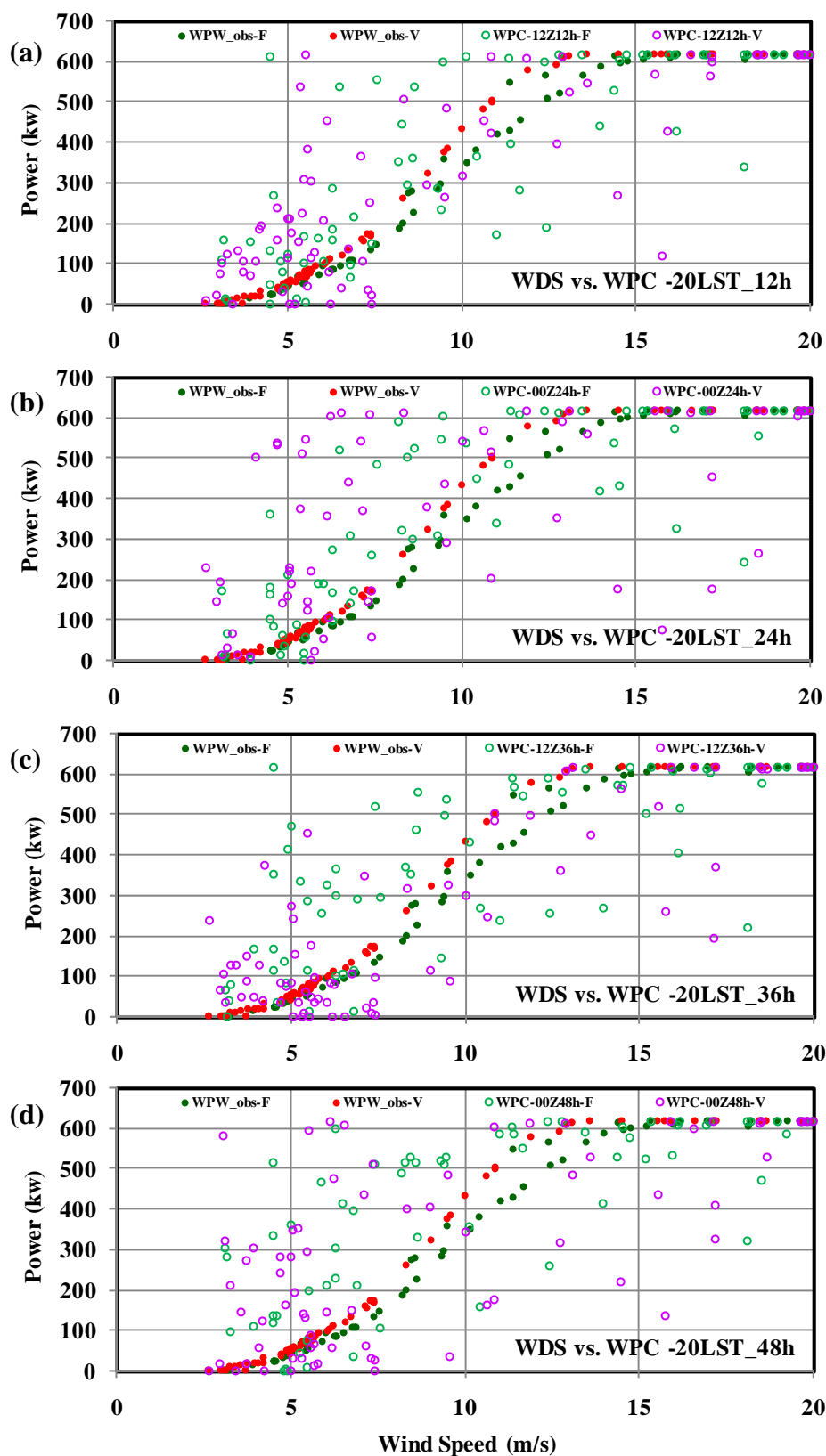


圖 14. 2009 年(建模/綠色)及 2010 年(測試/紅色)春季的(a)00Z12h、(b)12Z24h、(c)00Z36h 及(d)12Z48h 風能預報(空心圓圈)與觀測(實心圓)的對應分布。

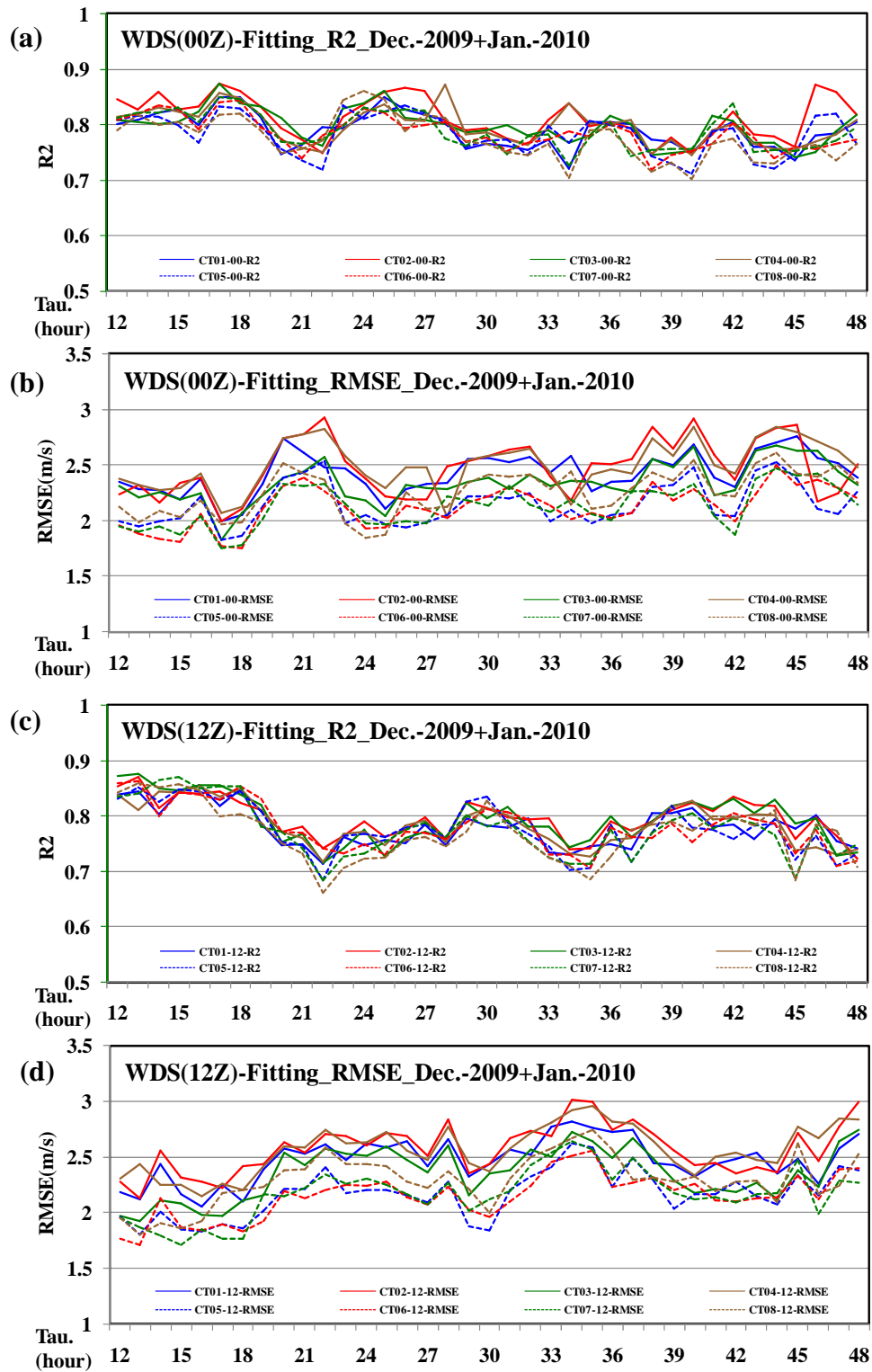


圖 15. 2009 年 12 月至 2010 年 1 月(冬季)CT01~08 各風機的風速逐時段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

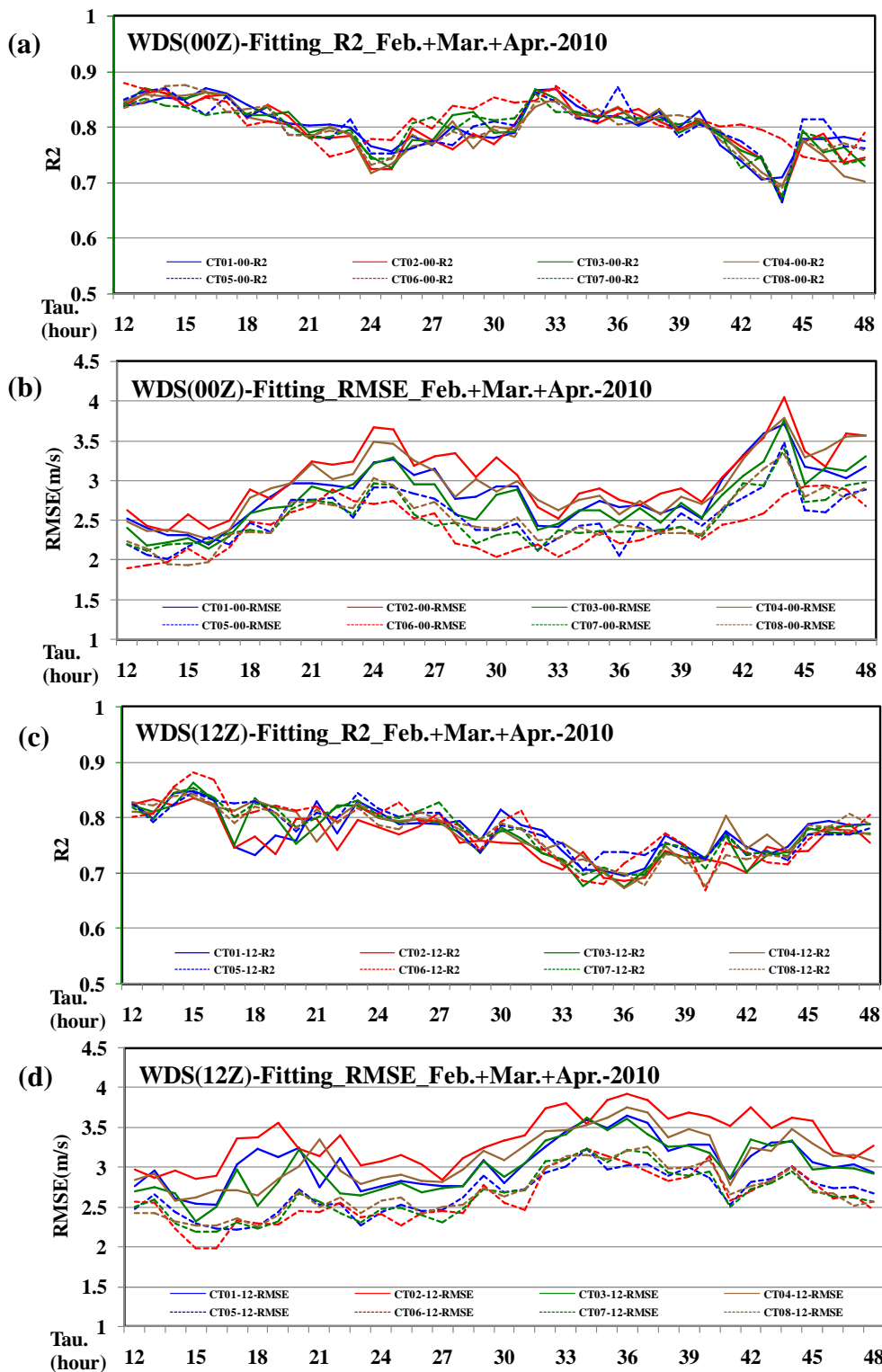


圖 16. 2010 年 2~4 月(春季)CT01~08 各風機的風速逐時段建模資訊分布，
 (a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

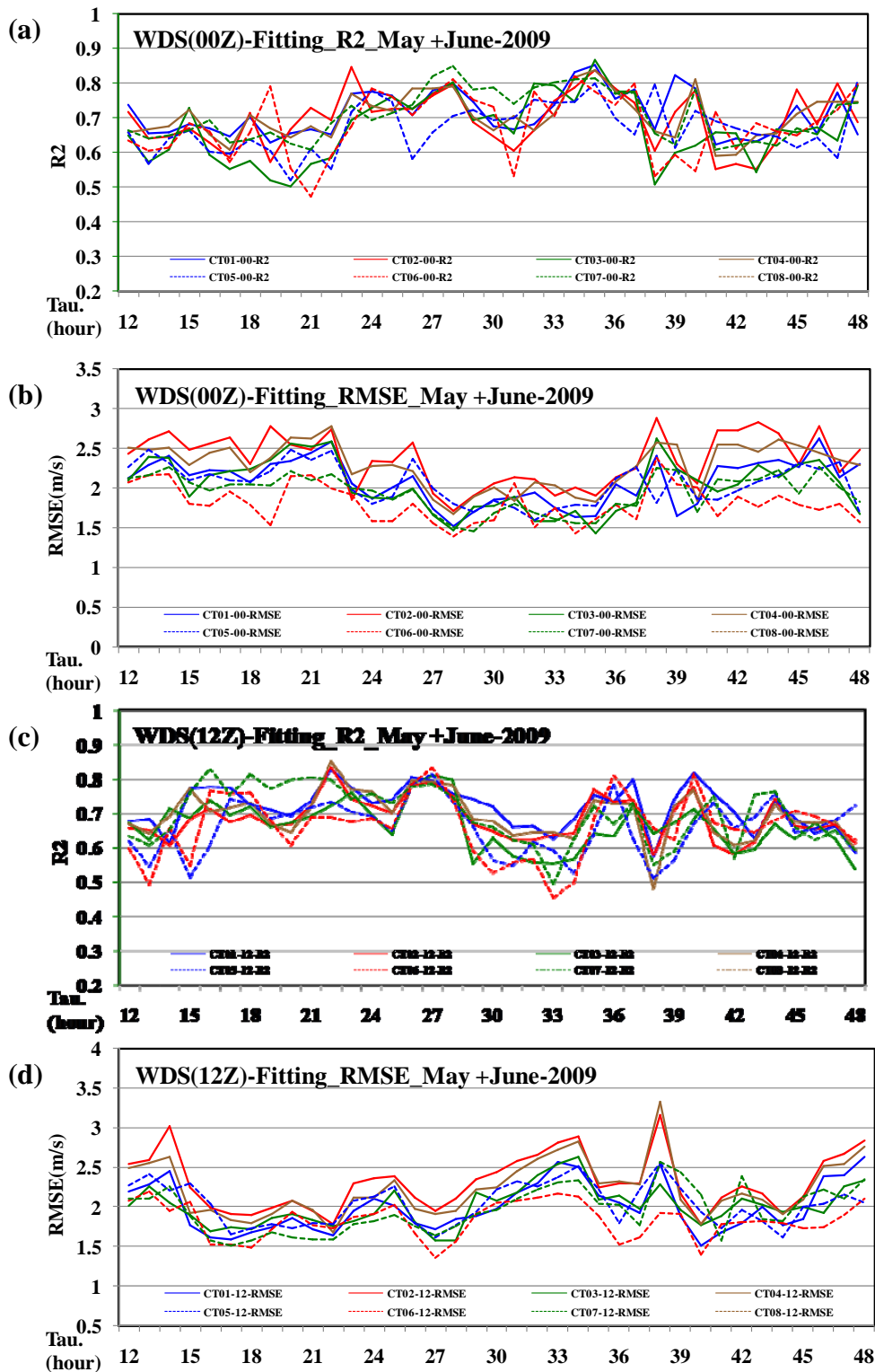


圖 17. 2010 年 5、6 月(梅雨季)CT01~08 各風機的風速逐時段建模資訊分布, (a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現, 而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

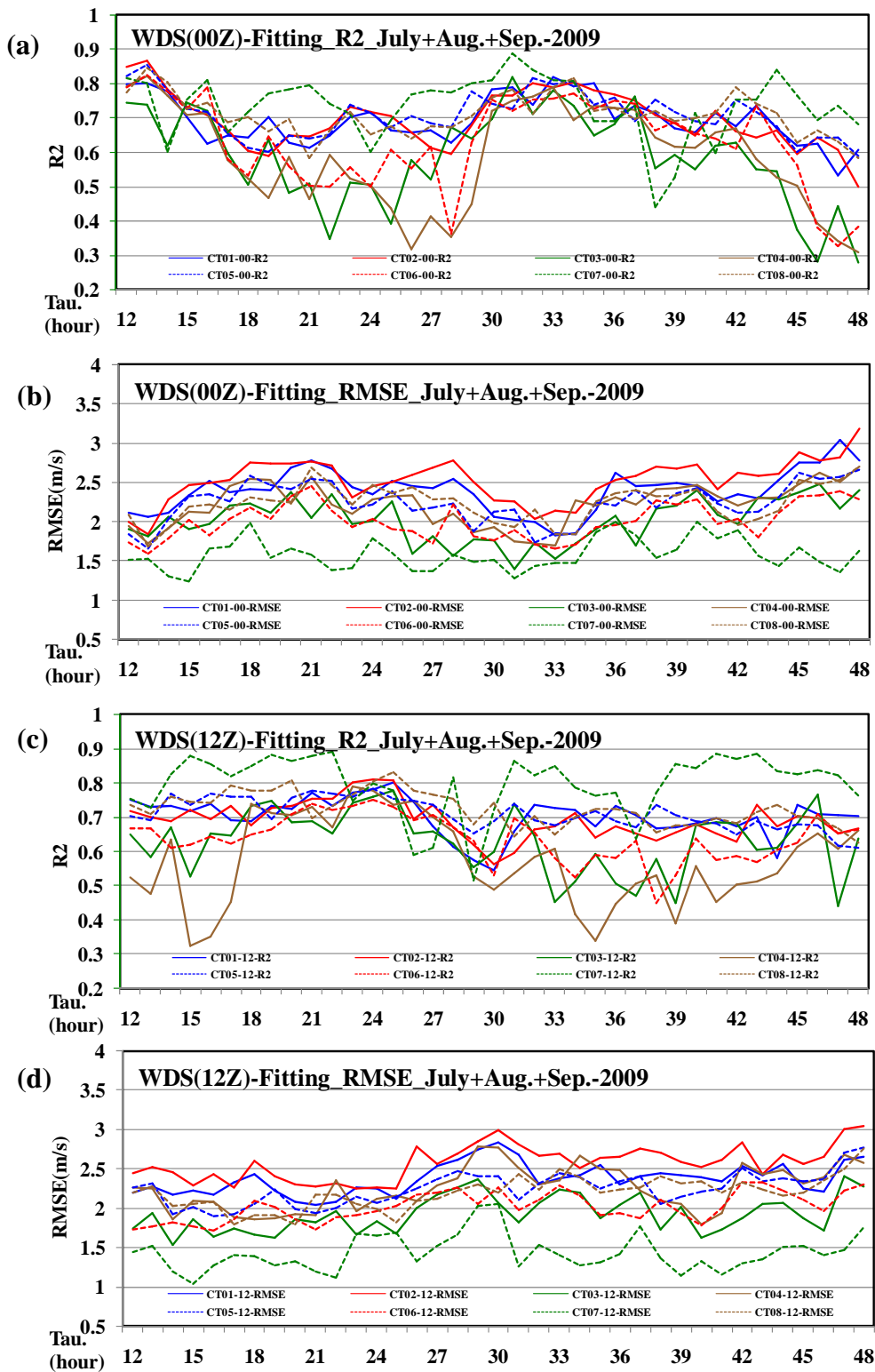


圖 18. 2010 年 7~9 月(颱風季)CT01~08 各風機的風速逐時段建模資訊分布, (a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現, 而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

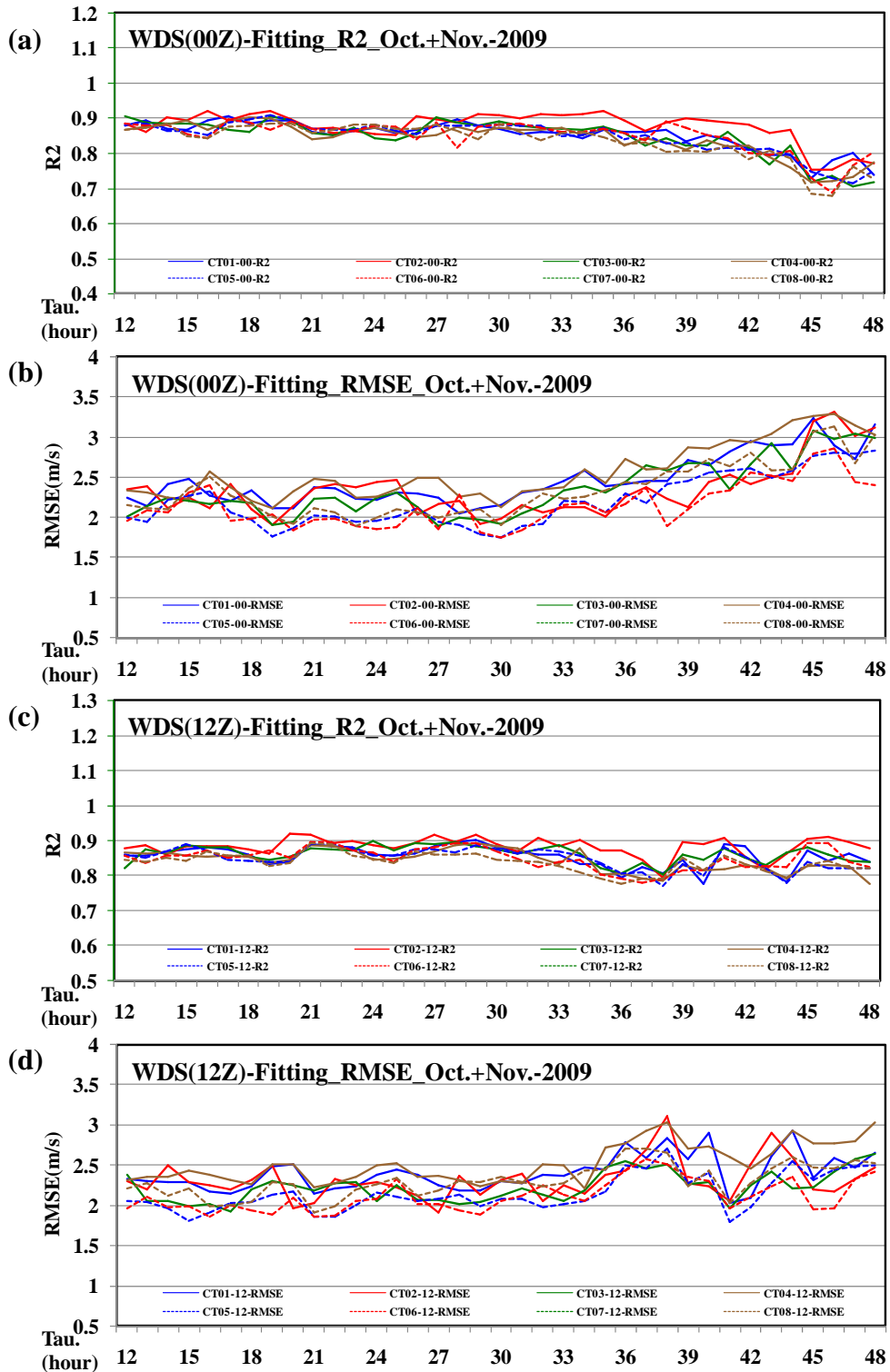


圖 19. 2010 年 10、11 月(秋季)CT01~08 各風機的风速逐时段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

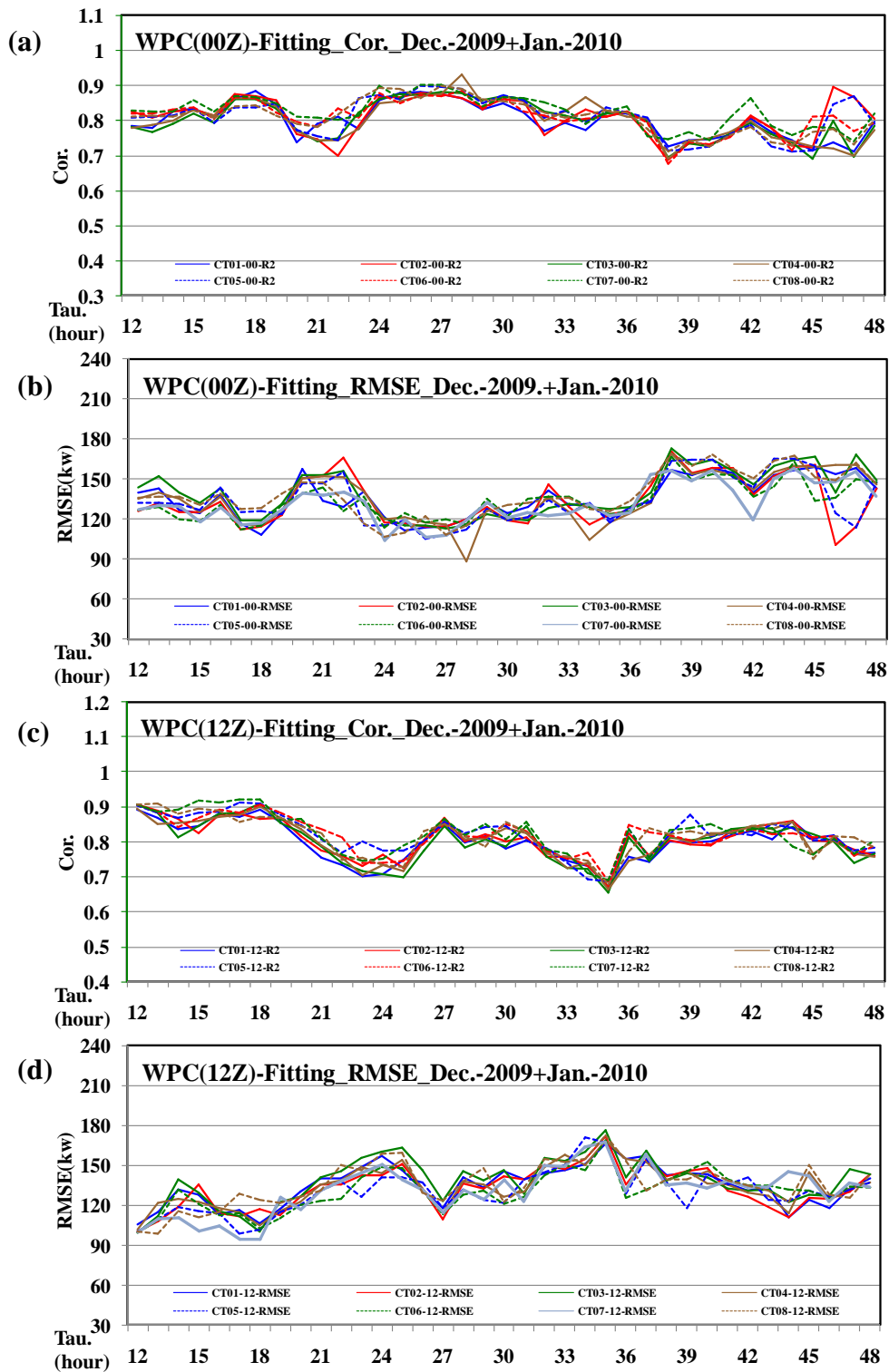


圖 20. 2009 年 12 月至 2010 年 1 月(冬季)CT01~08 各風機的風能逐時段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

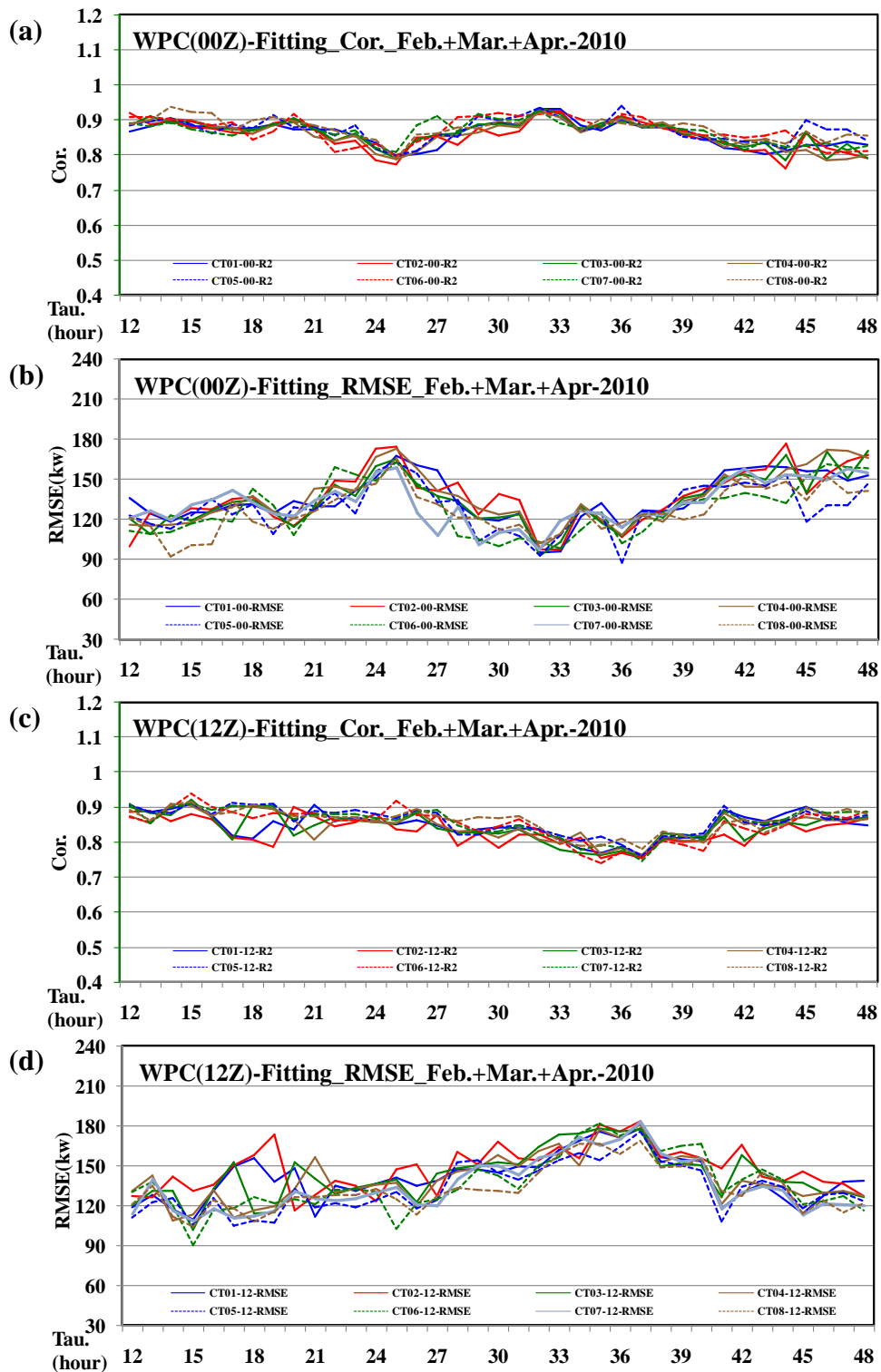


圖 21. 2010 年 2~4 月(春季)CT01~08 各風機的風能逐時段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

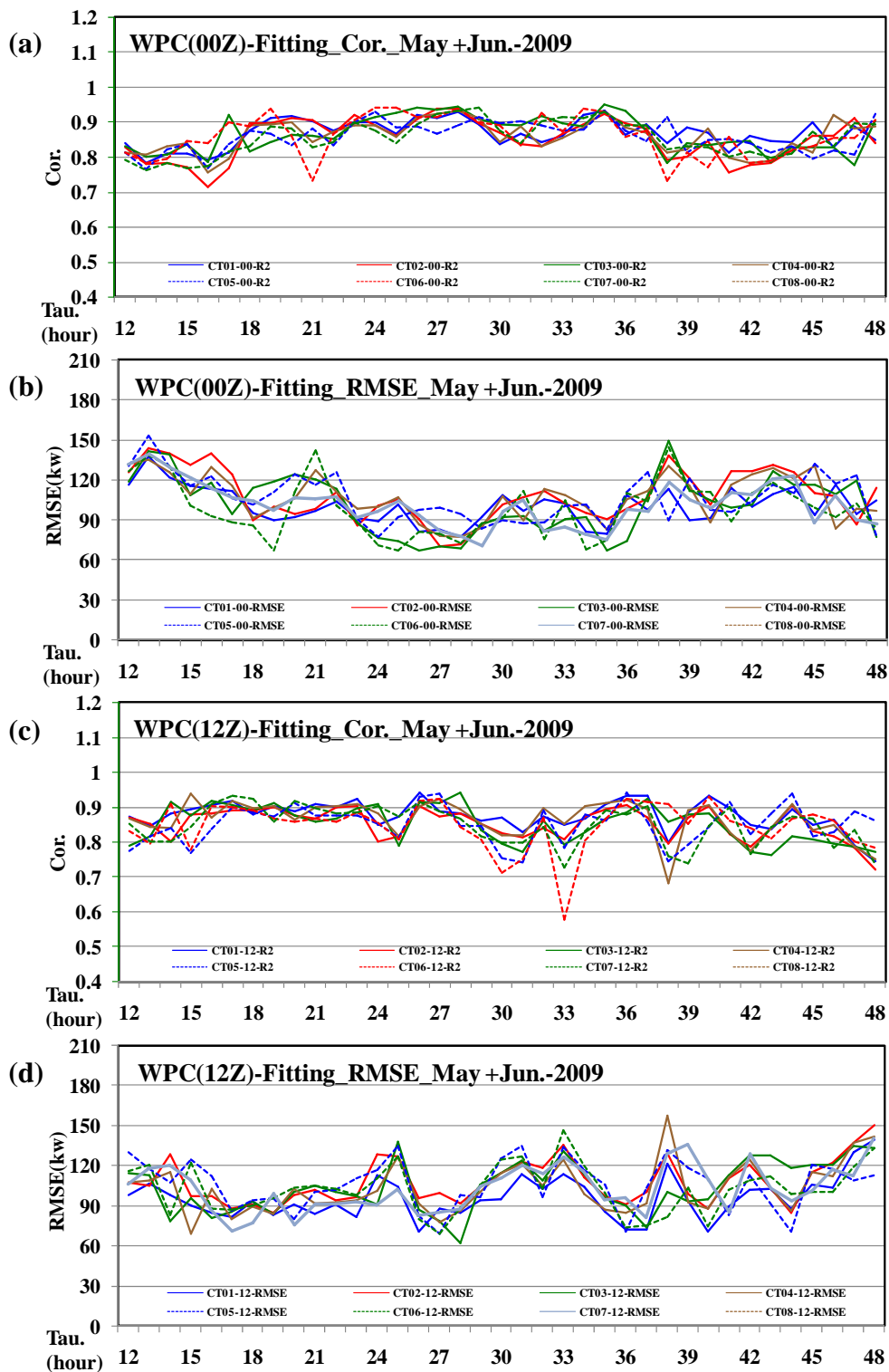


圖 22. 2010 年 5、6 月(梅雨季)CT01~08 各風機的風能逐時段建模資訊分布, (a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現, 而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

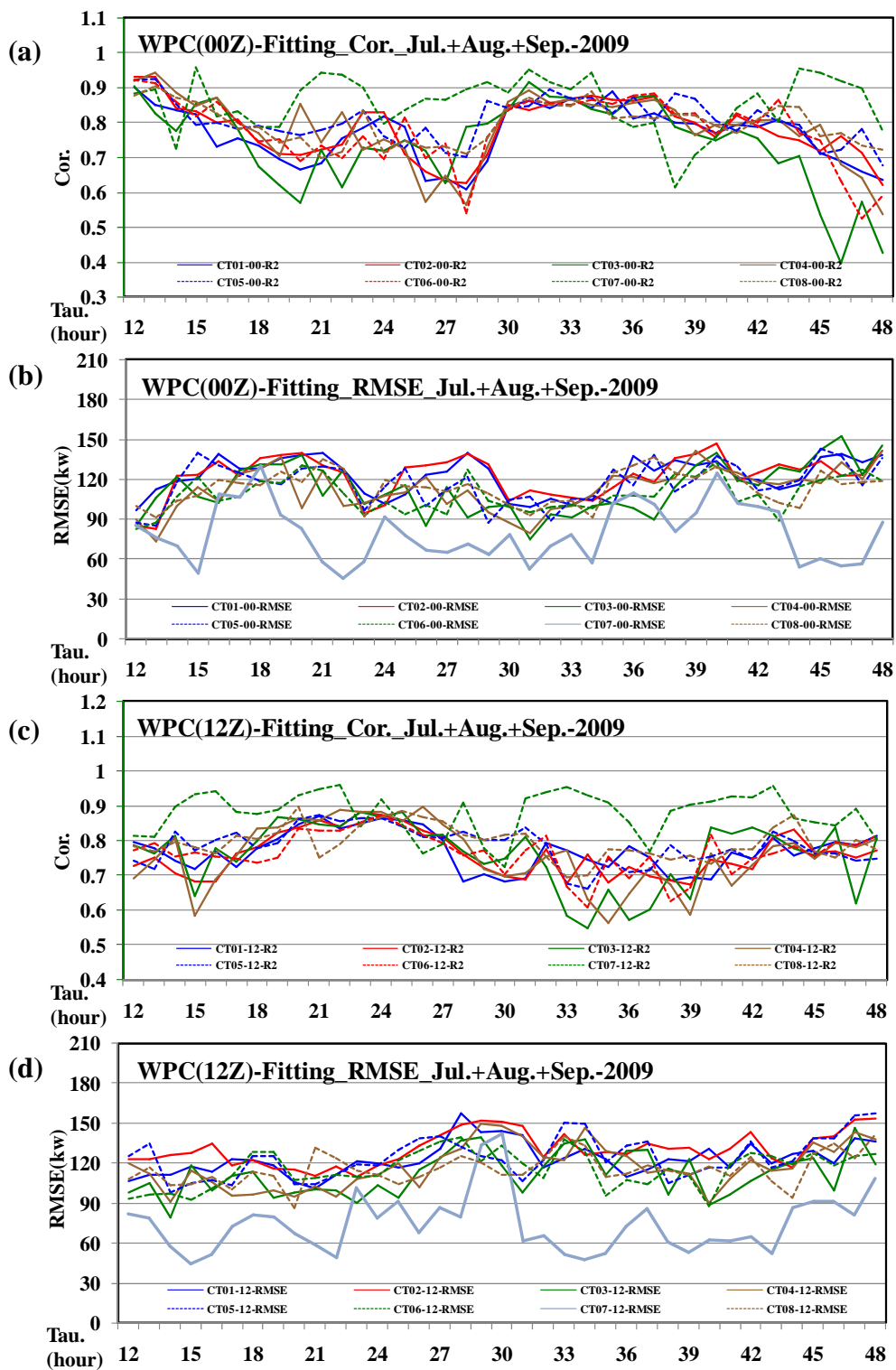


圖 23. 2010 年 7~9 月(颱風季)CT01~08 各風機的風能逐時段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。

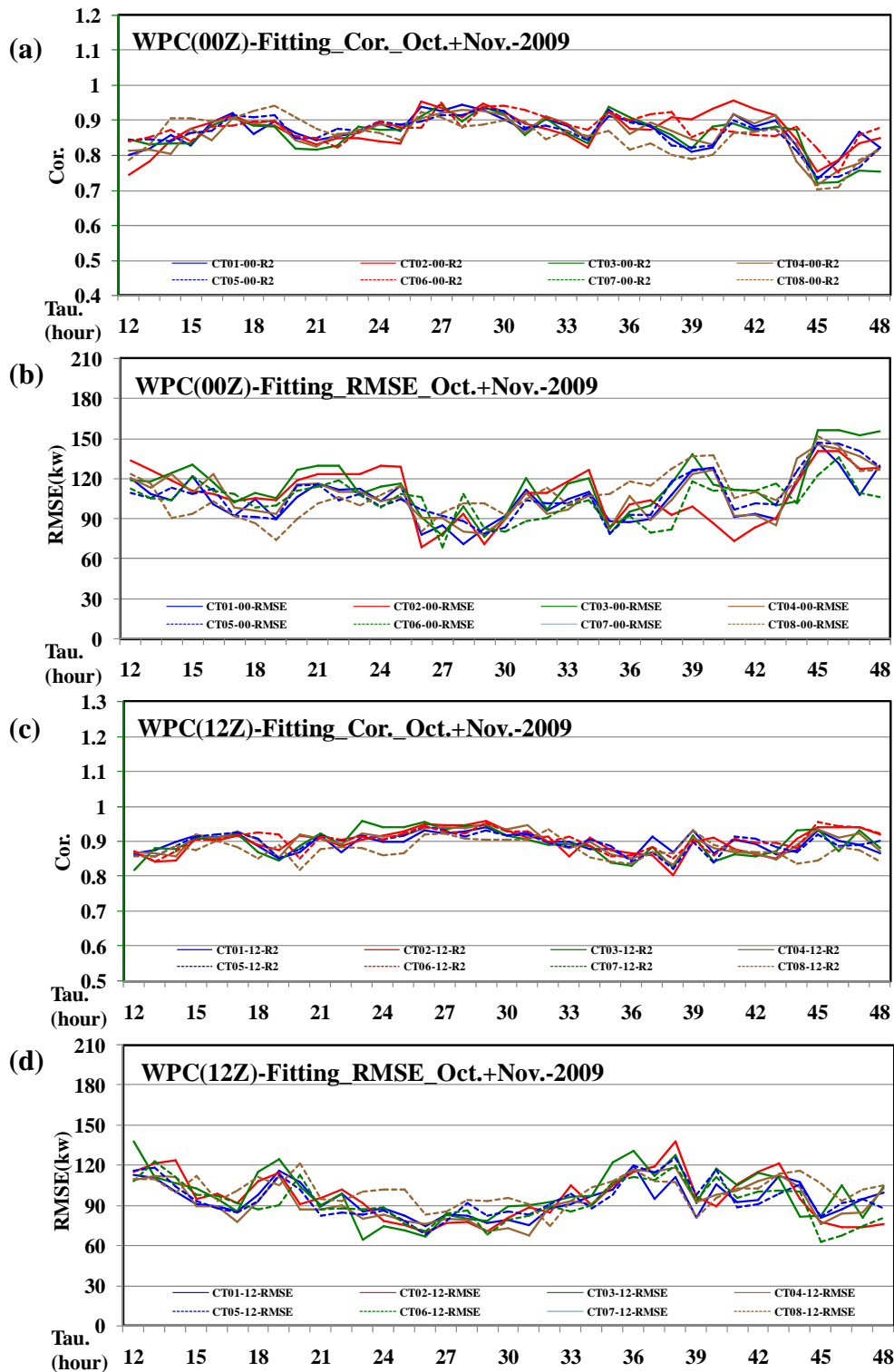


圖 24. 2010 年 10、11 月(秋季)CT01~08 各風機的風能逐時段建模資訊分布，(a) R^2 、(b)RMSE 在 00Z 的表現，而(c)、(d)則為代表 12Z 的表現。