

氣候變遷下台灣風速與風力發電之評估

Assessment of Impact of Climate Change on Wind Speed and Wind Power in Taiwan

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

陳俊龍*

Chen, Chun-Lung

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張倉榮

Chang, Tsang-Jung

摘 要

近年來因全球暖化，氣候變遷議題受到國際上極度重視，為了減低此衝擊，再生能源評估與技術被積極的開發，台灣的風力發電有著極為良好的潛勢，但此資源亦會受到氣候變遷對環境的衝擊，因此為了長期發展，勢必進行氣候變遷對風能衝擊影響評估。跨政府氣候變遷委員會於 2014 年發布了第五次評估報告中，有新的未來情境，使各國大型研究室的全球環流模式資料得到了更新。因此本研究將使用中央氣象局的測站資料配合更新後的十五個全球環流模式資料，針對三個未來時期以及三個未來情境進行平均風速以及風力發電量的評估。其結果為隨著時間的前進，風速以及風機發電量會產生微幅的降低之機會是較高的。

關鍵詞：氣候變遷，第五次評估報告，風速，風機發電量。

ABSTRACT

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) renewed future scenarios of Representative Concentration Pathways (RCPs) on the Fifth Assessment Report (AR5) in 2014. According to the new future scenarios, the data of General Circulation Models (GCMs) have been updated. This study uses hourly wind speed of Central weather bureau stations combining four GCM data to project wind speed and wind power with three RCPs during three different future periods. The results show that mean wind speed and wind power will be more likely to decrease.

Keywords: Climate Change, Fifth Assessment Report, Wind Speed, Wind Power.

*通訊作者，台大生物環境系統工程學系博士班研究生，10617 台北市大安區羅斯福路四段 1 號，d98622004@ntu.edu.tw

一、前言

自十八世紀工業革命後，人類大量地使用化石燃料(fossil fuel，如煤、石油與天然氣等)，並且科技的發達令人口快速增加，因而製造了大量的溫室氣體(二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物等)，這些溫室氣體增加造成了地球表面溫度上升，加速了全球溫室效應，進而導致了氣候發生異常，為了減緩全球暖化，世界各國開始關注氣候變遷這個議題，想辦法降低溫室氣體的排放量，並且開始發展再生能源。

目前眾多再生能源中，風力發電有著技術理論較為成熟、對環境衝擊較低等優點，近年來的發展相當快速。而台灣位處於東亞季風帶，夏季有西南季風以及熱帶氣旋，冬季則有強勁的東北季風，因此擁有良好的發電潛勢[7]，在離岸風場顧問公司 4C offshore 的評估中，全球的前 20 大風場，有 17 個位於台灣海峽，且有 10 個位於台灣的領海[13]。

雖然台灣風力發電的前景看好，但近年來溫室效應對氣候的影響越來劇烈，發生全球暖化、海水平均水位上升、極端降雨以及乾旱事件增加、颱風生成頻率及時間異常等現象，氣候的改變可能會影響風力發電最重要的因子—風速，因此在發展風力發電時，自不能忽略氣候變遷對風速的影響。

為了評估氣候變遷對全球的衝擊，國際間成立跨政府氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)以評估氣候變遷所帶來的影響，此單位會評估人口、工業、環境、社會經濟等因素，給出不同的未來情境以供各國大型氣候相關研究室來模擬全球未來氣候，再將這些研究室的資料統整起來給研究較小區域的研究單位進行降尺度後的評估[15]。

目前國際間風能結合氣候變遷的研究大多數是根據 IPCC 於 2007 年的第四次評估報告(Fourth Assessment Report, AR4)所提出之未來情境所進行的研究[4, 9-11]，而 IPCC 於 2014 年提出了第五次評估報告(Fifth Assessment Report, AR5)中，根據資料的更新、技術的進步提出了更

有可信度之未來情境，因此本研究希望可以利用 AR5 之資料進行未來台灣風速以及發電量的變化。

二、研究方法

2.1 風速分布

本研究所使用之資料為氣象站的逐時風速資料，為了有效評估一時期之風速參數，必須簡化風速序列，因此本研究使用在台灣之風速評估中誤差最低，也最常被使用的韋伯風速分佈來評估[1, 3, 5, 6, 12]，其機率密度函與累積機率分佈函數如下所示：

$$f(v) = \frac{k}{v} \left(\frac{v}{c}\right)^k \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots\dots (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \dots\dots\dots (2)$$

其中 $F(v)$ 為風速累積機率函數， $f(v)$ 為風速機率密度函數， k 為形狀參數， c 為尺度參數， v 為風速(m/s)。形狀參數與尺度參數可以將風速序列用大概似法進行參數迭代運算：

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{1/k} \dots\dots\dots (4)$$

其中 v_i 為時間階段 i 的風速， n 為非零風速資料點的個數。

一旦計算出 k, c 也可以藉由動差法推估平均風速，其式子如下：

$$\bar{v} = c \times \Gamma(1+1/k) \dots\dots\dots (5)$$

2.2 發電量評估模式

風力發電是將風能轉換成機械能，再將機械能轉換成電能，風力發電機廠商會在一個標準的

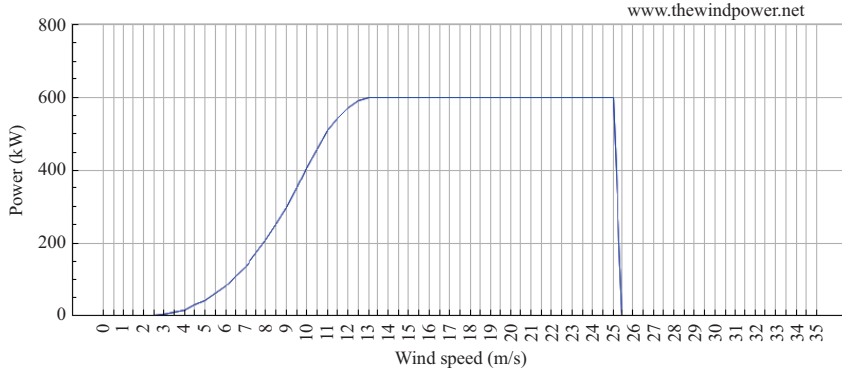


圖 1 Enercon E40-600kW 的標準性能曲線[16]

環境下量測出各風速對應的風機發電量，稱之為標準性能曲線，本研究所使用的風機型號為中屯風力發電廠的 Enercon E40-600kW，其率定功率為 600kW，扇葉直徑為 43.7m，其標準性能曲線如圖一所示[15]，小於切入風速 V_i (Cut-in velocity) 即 3m/s 時，風機尚未開始轉動，發電量為零，大於切入風速時會開始運轉，並隨著風速上升增加其發電量，當運轉到率定風速 V_R (Rate velocity) 13m/s 時，開始輸出率定功率 P_R (Rated power)，直到風速大於切出風速 V_O (Cut-out velocity) 時，為避免風力過大，造成風機受損，故會將風機停止運轉。

為了計算方便，可將切入風速與率定風速間的曲線以四次方程式回歸表示之[2, 6, 7]，即以下式形式進行計算：

$$P(V) = \begin{cases} 0 & V < V_i \\ (a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4)P_R & V_i \leq V < V_R \\ P_R & V_R \leq V \leq V_O \\ 0 & V \geq V_O \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

以 Enercon E40-600kW 為例，其中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分別為 -0.2511、0.1794、-0.04818、0.00621、-0.00023。

得知標準性能曲線後便進行發電量推估，當運轉一段時間 t 之後發電量 E_w 可表示如下：

$$E_w = t \int_{V_i}^{V_O} P(V) f(V) dV \dots\dots\dots (7)$$

並可結合韋伯分布之參數轉換為下式：

$$E_w = tP_R \int_{V_i}^{V_R} (a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 + a_4V^4) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV \dots\dots\dots (8)$$

$$+ tP_R \int_{V_R}^{V_O} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV$$

2.3 氣候變遷模式

由於未來氣候無法得知，故跨政府氣候變化委員會於 2013 年的第五次評估報告根據科技、人口、工業、環境、社會經濟、國際情勢等因素，給出了四個未來情境為四種代表濃度路徑 (Representative Concentration Paths, RCPs)，分別為 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5，其代表相較於工業化前(1750 年)每平方公尺的輻射強迫力(Radiative Forcing)在 2100 年會增加 2.6、4.5、6.0、8.5 瓦，而二氧化碳濃度則分別為 421、538、670 與 936 ppm。其中 RCP2.6 為溫室氣體增加相對較低的情境，為最樂觀的情境；RCP4.5 認為各國會盡力做到溫室氣體減量的目標，在二十一世紀末的大氣輻射力會達到較為穩定的狀態；RCP6.0 與 RCP4.5 較為相近，但各國並沒有盡力減少溫室氣體；RCP8.5 則是對環境衝擊最大的情境，其為世界各國並無節制溫室氣體的排放。其中 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 為 IPCC 建議優先評估的，因此本研究也使用這三個情境進行推估 [15, 17]。

各國大型研究室可利用這些未來情境模擬與評估未來氣候情況，其透過全球環流模式 (Global Circulation Models, GCMs) 進行模擬，全球環流模式為依據牛頓力學與熱力學、大氣運行原理、熱量傳遞、海洋、地表、雲、冰等互動關係，配合溫室氣體排放情境當作其初始場進行模擬評估。目前已有二十多種全球環流模式，但各模式皆有不同的考量因素，也因此在做氣候變遷評估研究時，會使用複數的 GCMs，使其較不會因單一模式的設定不適合模擬區域所造成評估誤差。

2.4 降尺度模式

由於全球環流模式為全球尺度，礙於現今計算機的計算能力，模擬之解析度會受到限制，大多數 GCMs 的解析度約為 2 經度乘 2 緯度，台灣在這些 GCMs 中只有二至六個網格的資料，因此這些資料之尺度無法評估一般用於風力發電之風場，故勢必進行空間降尺度，使資料可用以評估。

目前降尺度方法大致可分為二類，分別為動力降尺度 (Dynamical Downscaling) 與統計降尺度 (Statistical Downscaling)。動力降尺度是將 GCMs 模擬出來之各種結果作為邊界條件，再結合區域氣候模式 (Regional Climate Model, RCM) 進行數值模擬以得到較細網格之結果；統計降尺度則選擇與小區域的目標氣候值，相關的大尺度 GCMs 所模擬出來的氣候因子，透過轉換方程式建立大尺度網格值與目標值的關係。一般而言，動力降尺度方法過程需要大量之數值求解，運算量較龐大，在考量效率之因素下，本研究採用統計降尺度方法進行評估。

由於評估的是氣候，因此在進行統計降尺度時，大多是評估一整個時期的統計特性，而台灣位處於東亞季風帶，各季節之氣候大不相同，因此大多都是評估一時期之各月份的統計特性，本研究使用之統計降尺度模式為 Pryor (2014) 所使用之多變數線性公式 [8]，其公式如下所示：

$$c_j = a_1 \times \overline{PG}_j + a_2 \times \overline{\zeta}_j + a_3 \times \sigma(\zeta)_j \dots\dots\dots (9)$$

$$k_j = a_4 \times \overline{PG}_j + a_5 \times \sigma(PG)_j + a_6 \times \overline{\zeta}_j + a_7 \times \sigma(\zeta)_j + a_8 \dots\dots\dots (10)$$

其中 j 代表月份， k 、 c 為韋伯分布的形狀參數以及尺度參數， PG 為最大海平線壓力梯度之平均，最大海平線壓力梯度是由各月份中，對應的網格點與鄰近八個網格點所計算出來的， $\sigma(PG)$ 為最大海平線壓力梯度之標準差， ζ 為一時期內 500hPa 高度之平均相對渦度， $\sigma(\zeta)$ 為一時期內 500hPa 高度之相對渦度的標準差， a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_8 則是回歸參數，即此模式可建立 GCMs 參數與同時期之各月的相關性。

三、結果與討論

本研究使用中央氣象局的八個測站逐時風速資料轉換為月的韋伯分佈參數，並假設測站位置上 Enercon E40-600kW 風機，進行風速以及發電量之氣候變遷評估，將 1985 年至 2015 年之資料作為基期進行降尺度之參數檢定，並驗證推估結果是否與實際風速符合，在將之用以推估 IPCC AR5 中十五個 GCMs 所評估的三個未來時期，分別為未來近期 (2016 年至 2035 年)、未來中期 (2046 年至 2065 年)、未來長期 (2081 年至 2100 年)。並將各 GCMs 所得到的平均風速變化量以及風力發電量之結果整合，將之以基期 (1986 年至 2015 年) 比較以得到其變化量，再將之以平均值、累積分布的 10 百分位值和 90 百分位值呈現，其平均值為評估未來較有可能之趨勢，10 百分位值以及 90 百分位值之差值代表各模式評估之結果之差異大小，為討論此模式評估未來之不確定性。

3.1 研究使用之資料

觀測資料方面，本研究使用台灣中央氣象局測站逐時風速資料，於北部、中部、南部、東部各選擇兩個測站，並盡量選取較不受地形干擾之測站，為彭佳嶼、新竹、東吉島、嘉義、蘭嶼、高雄、花蓮、成功這八個測站，基期各月份之平均風速列於表 1，由表 1 可得知北部的彭佳嶼測站、新竹測站、西部離岸的東吉島測站以及東部

表 1 各測站於基期之各月份平均風速(m/s)

	彭佳嶼	新竹	東吉島	嘉義	蘭嶼	高雄	花蓮	成功
一月	8.16	3.09	10.98	2.34	7.56	2.33	2.79	3.91
二月	7.92	2.86	9.77	2.28	7.22	2.30	2.71	3.57
三月	7.33	2.47	8.37	2.15	7.08	2.25	2.69	3.31
四月	6.83	2.12	6.62	1.93	7.07	2.13	2.48	2.97
五月	6.16	1.87	5.46	1.90	7.40	2.13	2.25	2.61
六月	6.04	2.02	5.62	2.33	8.82	2.32	2.40	2.36
七月	6.98	1.96	5.32	2.33	8.06	2.52	2.58	2.53
八月	6.59	1.88	5.04	2.11	7.60	2.41	2.49	2.59
九月	7.00	2.37	6.30	1.81	6.82	2.21	2.51	3.20
十月	7.90	3.35	9.97	1.72	7.87	1.94	2.83	4.17
十一月	8.09	3.28	10.33	1.80	8.17	1.93	2.78	4.19
十二月	8.27	3.36	11.30	2.14	7.89	2.12	2.89	4.18
平均	7.27	2.55	7.92	2.07	7.63	2.22	2.62	3.30

的成功測站受到季節的影響較大，可明顯看出冬季時的風速高於夏季時的風速，而離島的彭佳嶼測站以及東吉島測站的風速相當大，整年平均風速皆在 7m/s 以上。嘉義測站、高雄測站、花蓮測站可能由於測站位置離海岸較遠，使得粗糙度較大且建築物及地形起伏較為複雜，風速較離島要小的多，其平均風速約為 2.5m/s，而蘭嶼測站位於台灣南部偏東離岸，受到季風影響較西岸要小，因此雖然平均風速約為 7.6m/s，但受到季節影響較小。

氣候變遷資料方面，是由 IPCC-DDC(IPCC Data Distribution Centre)[14]下載，下載參數為 500hPa 東西向風速、500hPa 南北向風速、海平面壓力，情境為 historical、RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 四種，historical 情境為過去情境資料，本研究所使用之年份為 1985 至 2005，而 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 為未來情境資料，本研究所使用之年份為 2100 年以前之資料，資料尺度皆為月平均資料。GCM 選擇方面是選擇資料較為齊全的十五個 GCMs，其模式名稱與模擬網格解析度如表 2 所示。

3.2 降尺度模式驗證

為了評估此模式所推導之風速結果和實際

表 2 全球環流模式之解析度

模式名稱	網格數	單網格大小 (經度*緯度)
BBC_CSM	128 × 64	2.8125° × 2.8125°
BNU-ESM	128 × 64	2.8125° × 2.8125°
CCSM4	288 × 192	1.25° × 0.9375°
CNRM-CM5	256 × 128	1.406° × 1.406°
CSIRO-Mk3.6.0	192 × 96	1.875° × 1.875°
CanESM2	128 × 64	2.8125° × 2.8125°
FIO-ESM	128 × 64	2.8125° × 2.8125°
GFDL-CM3	144 × 90	2.5° × 2°
GISS-E2-H	144 × 90	2.5° × 2°
HadGEM2-ES	195 × 145	1.85° × 1.24°
IPSL-CM5A-LR	96 × 96	1.875° × 3.75°
MIROC-ESM	128 × 64	2.8125° × 2.8125°
MPI-ESM-LR	192 × 96	1.875° × 1.875°
MRI-CGCM3	320 × 160	1.125° × 1.125°
NorESM1-M	144 × 96	2.5° × 1.875°

風速是否符合，本研究將基期之參數帶入模式中進行驗證，以分析各 GCMs 之誤差，因此將八個測站各 12 個月份共 96 筆資料進行觀測之平均風速與模式所得到之平均風速以加入 1:1 線之散點圖呈現，如圖 2 所示，並將其以均方根誤差(Root mean squared error, RMSE)評估其模式是否偏差太多，並將 RMSE 結果置於表 3，其 RMSE 公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (V_{sim,i} - V_{obs,i})^2} \dots\dots\dots (11)$$

其中 V_{sim} 為模式所模擬之風速， V_{obs} 為觀測之風速。

由圖 2 及表 3 可得知 15 個 GCMs 評估結果觀測資料與模擬資料大致上為符合的，其 RMSE 大多介於 0.3 至 0.4 之間，少部分 GCMs 誤差較大，如 BBC_CSM 模式、BNU-ESM 模式、GFDL-CM3 模式、MIROC-ESM 模式，大多都是中高風速有部分點偏離較大，其中 GFDL-CM3 模式為偏差最多的，其 RMSE 為 0.688，但整體來說還在可接受之範圍內。

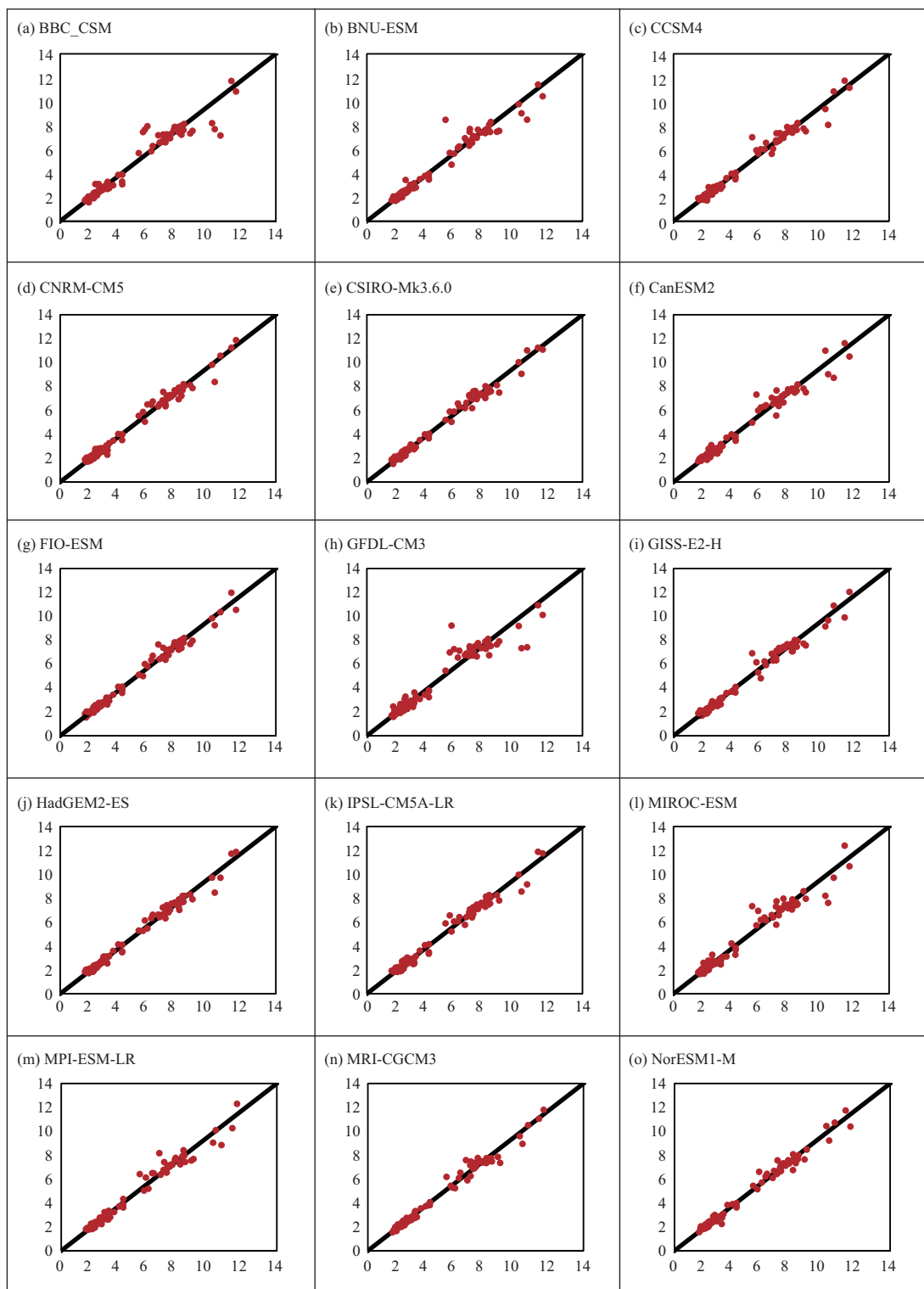


圖 2 15 個 GCMs 在八個測站各 12 個月份之散點圖，黑色斜線為 1:1 線，橫軸為觀測之平均風速(m/s)，縱軸為模式輸出之平均風速(m/s)。

表 3 15 個 GCMs 在基期之驗證誤差

模式名稱	均方根誤差
BBC_CSM	0.646
BNU-ESM	0.516
CCSM4	0.396
CNRM-CM5	0.336
CSIRO-Mk3.6.0	0.315
CanESM2	0.443
FIO-ESM	0.311
GFDL-CM3	0.688
GISS-E2-H	0.373
HadGEM2-ES	0.315
IPSL-CM5A-LR	0.367
MIROC-ESM	0.534
MPI-ESM-LR	0.416
MRI-CGCM3	0.331
NorESM1-M	0.322

3.3 未來之平均風速推估

圖 3 至圖 10 為十五個 GCMs 評估各測站之平均風速變化量之平均在未來之結果，於未來近期，大部份的測站之平均風速變化量評估都是下降不到 1%，只有少數測站如東吉島的 RCP2.6 情境以及 RCP4.5 情境、成功測站的 RCP4.5 情境下降幅度到 1.5% 左右，也有部分結果是上升的，但其幅度不到 0.1%；未來中期的評估大多也下降低於 1%，部分情況下降幅度超過 1%，集中在新竹、東吉島、大武三站，其中下降幅度最大為東吉島測站在 RCP4.5 情境所評估的 2.47%，少部分結果為些微上升的，但皆在 0.4% 以下；未來長期大多評估也是下降的，其整體下降幅度較未來近期以及為來中期要大，但大多在 3% 以下，其中東吉島測站以及成功測站下降幅度較大，三個情境中皆下降超過 1%，在 RCP8.5 情境甚至下降超過 3%，有少部份情況為微幅上升的，但上升幅度皆未超過 0.4%，其中高雄測站則評估皆是上升的。以整體趨勢來看，大部分的狀況皆是隨著時間前進而風速下降，包括彭佳嶼、東吉島測站為三個情境皆是此情況，新竹、花蓮、成功測站則是有兩個情境為此種狀況，而嘉義、蘭嶼這兩個測站為三個未來情境呈現不同趨勢，高雄測站則是出

現未來近期為平均風速下降，而未來長期為平均風速上升之情形。

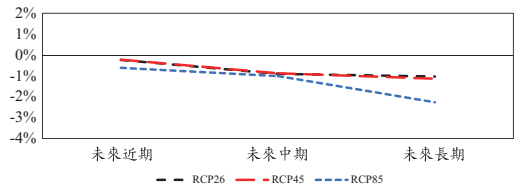


圖 3 彭佳嶼測站平均風速變化量的平均之未來推估

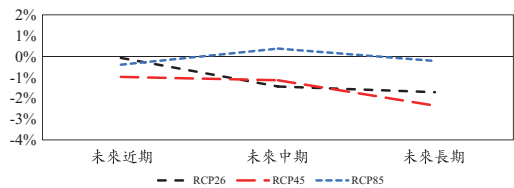


圖 4 新竹測站平均風速變化量的平均之未來推估

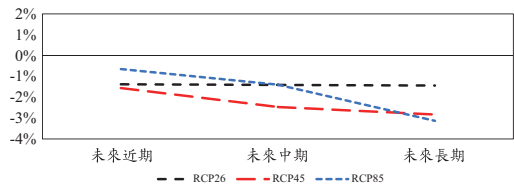


圖 5 東吉島測站平均風速變化量的平均之未來推估

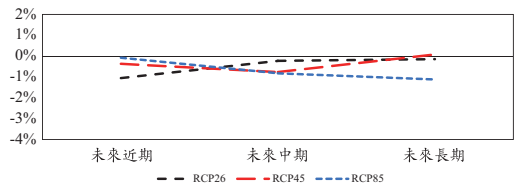


圖 6 嘉義測站平均風速變化量的平均之未來推估

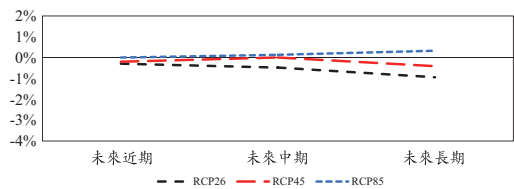


圖 7 蘭嶼測站平均風速變化量的平均之未來推估

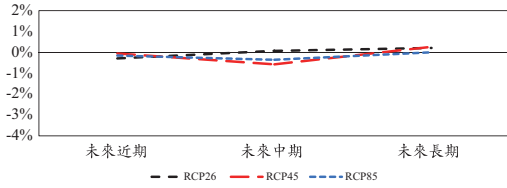


圖 8 高雄測站平均風速變化量的平均之未來推估

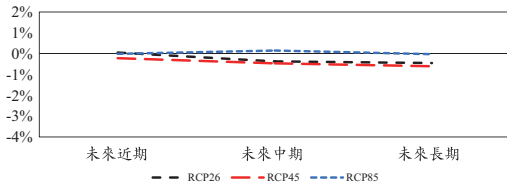


圖 9 花蓮測站平均風速變化量的平均之未來推估

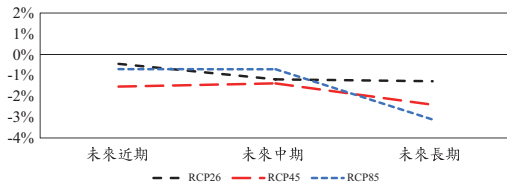


圖 10 成功測站平均風速變化量的平均之未來推估

圖 11 至圖 18 為十五個 GCMs 評估各測站未來之平均風速變化量的 10 百分位值以及 90 百分位值之結果，在評估未來之不確定性的結果中，未來近期之不確定性較小，其 10 百分位值以及 90 百分位值兩者差距在全部測站都在 10% 以內，大多數結果皆在 5% 以內；在未來中期，多數情況的不確定性皆較未來近期要大，但其差距大多在 10% 以下，只有新竹、東吉島、成功三個測站有出現超過之情形；到了未來長期，其不確定性較前兩個時期要大，差距最大之情況有超過 30%，出現在新竹測站的 RCP8.5 情境。整體來看，大多數皆出現隨著時間前進，其不確定性越高之情形，其中 RCP2.6 未來情境較不明顯，但隨著情境產生的衝擊變嚴重，不確定性也越來越高，到 RCP8.5 模式時最明顯。測站比較方面，蘭嶼、高雄、花蓮三個測站未來評估之不確定性較低，大多情況 10 百分位值以及 90 百分位值差距皆在 5% 以內；而新竹、東吉島、成功三個測站未來評估之不確定性較高，其最大之差距皆超過 20%。

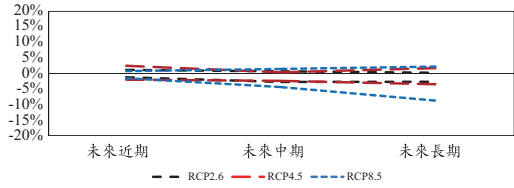


圖 11 彭佳嶼測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

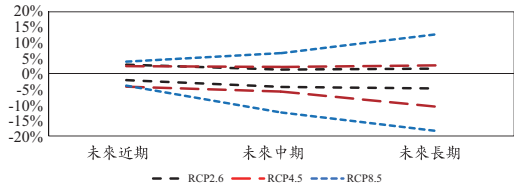


圖 12 新竹測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

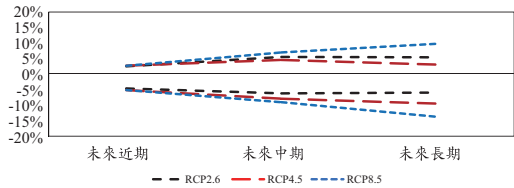


圖 13 東吉島測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

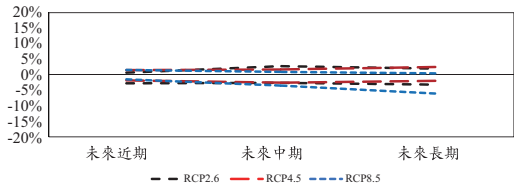


圖 14 嘉義測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

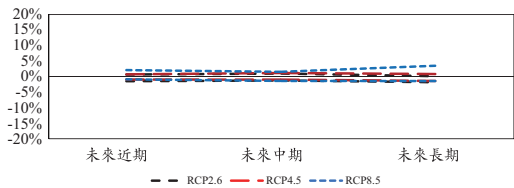


圖 15 蘭嶼測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

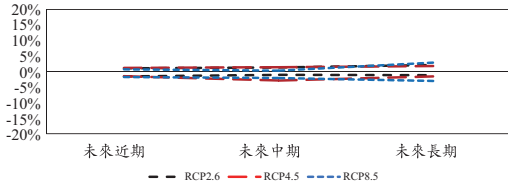


圖 16 高雄測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

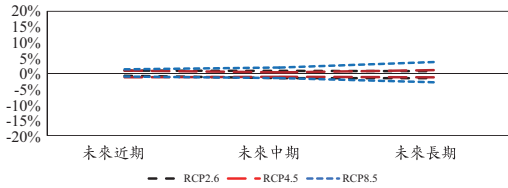


圖 17 花蓮測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

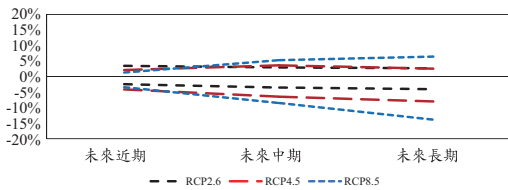


圖 18 成功測站平均風速變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

3.4 未來之風力發電量推估

圖 19 至圖 26 為十五個 GCMs 評估各測站之風力發電量變化之平均在未來之結果，於未來近期，大部份的測站之風力發電量變化量為下降的，其幅度較平均風速變化量要大，但大多在下降 3%以內，新竹、嘉義、成功三個測站的下降量較高，但也在 5%以內，而蘭嶼測站評估其發電量微上升的，最大幅度有達 1%；在未來中期之評估與未來近期類似，也是只有蘭嶼測站評估其發電量是些微上升的，但幅度未達 0.5%，其餘測站則是下降較多，但也在 5%以內；未來長期則是變化量較前兩個時期要大，但大多測站也是下降的，下降較多的為新竹及成功兩個測站，在成功測站有出現下降 6%的結果，而些微上升的測站只有高雄測站，但其幅度不到 1.5%。整體來

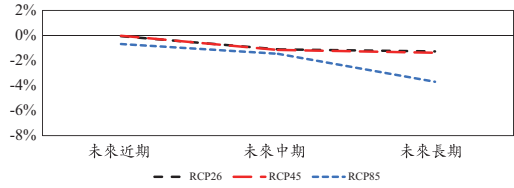


圖 19 彭佳嶼測站平均風速變化量的平均之未來推估

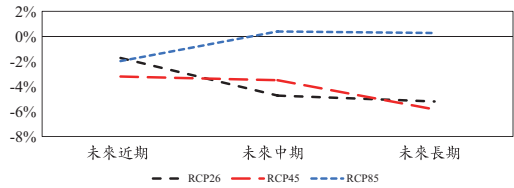


圖 20 新竹測站風力發電量變化量的平均之未來推估

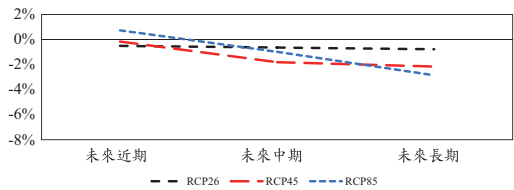


圖 21 東吉島測站風力發電量變化量的平均之未來推估

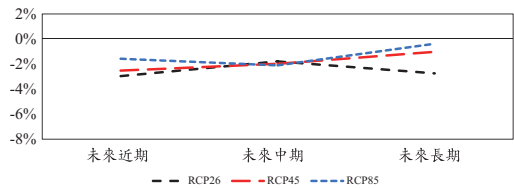


圖 22 嘉義測站風力發電量變化量的平均之未來推估

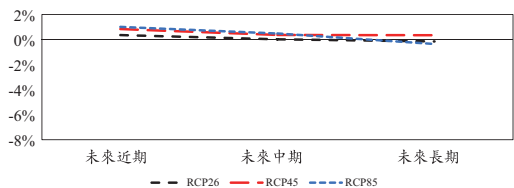


圖 23 蘭嶼測站風力發電量變化量的平均之未來推估

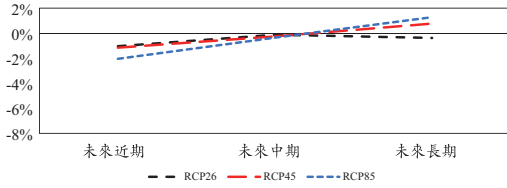


圖 24 高雄測站風力發電量變化量的平均之未來推估

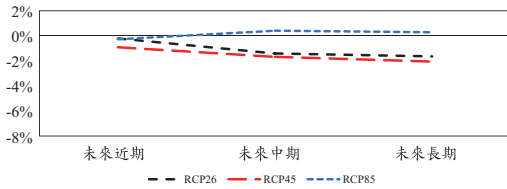


圖 25 花蓮測站風力發電量變化量的平均之未來推估

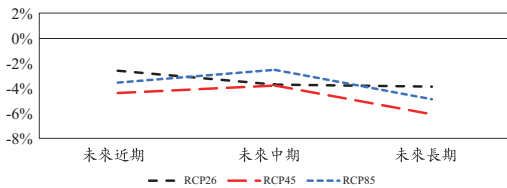


圖 26 成功測站風力發電量變化量的平均之未來推估

看，其趨勢與平均風速之趨勢是相似的，大多測站皆是隨著時間前進而發電量越來越低，包含彭佳嶼、東吉島、蘭嶼三個測站的三個未來情境、新竹及花蓮的兩個未來情境皆是，而嘉義以及高雄測站則是有機會隨著時間而發電量變大，但跟基期相比其發電量還是降低或是持平的。

圖 27 至圖 34 為十五個 GCMs 評估各測站未來之風力發電變化量的 10 百分位值以及 90 百分位值之結果，風力發電變化量在未來近期中不確定性較小，其 10 百分位值以及 90 百分位值差距皆在 15% 以內，在未來中期新竹以及成功測站有出現超過 20% 之情形；而未來長期又較前兩個時期之不確定性要大，在成功測站的 RCP8.5 情境有出現超過 40% 之差值，新竹測站的 RCP8.5 情境則出現 55% 的差值。整體來看其趨勢與平均風速之趨勢相似，皆是隨著情境產生的衝擊變嚴

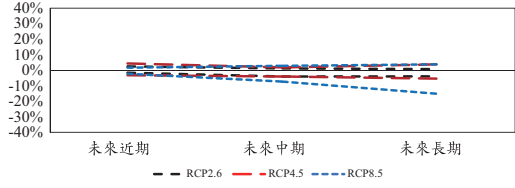


圖 27 彭佳嶼測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

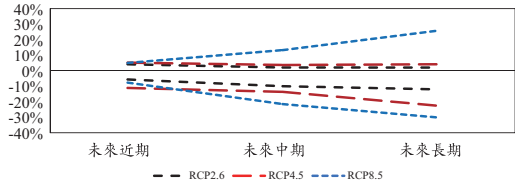


圖 28 新竹測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

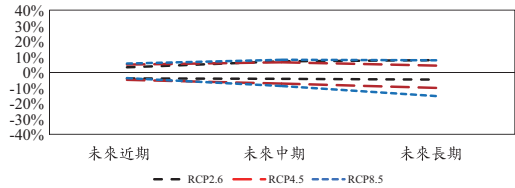


圖 29 東吉島測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

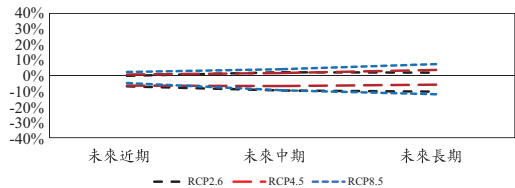


圖 30 嘉義測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

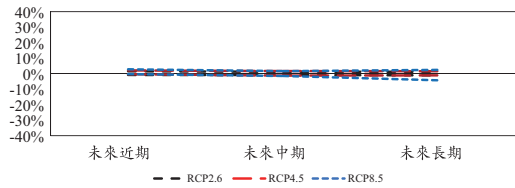


圖 31 蘭嶼測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

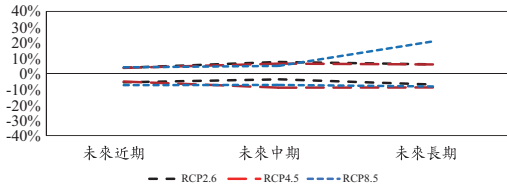


圖 32 高雄測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

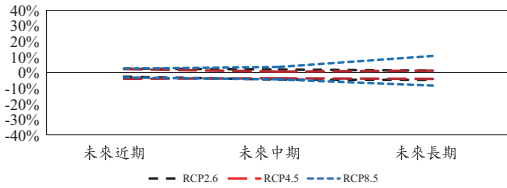


圖 33 花蓮測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

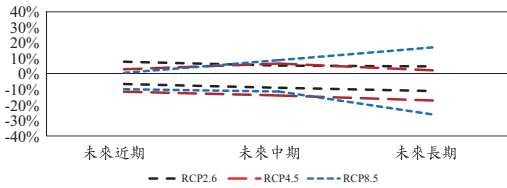


圖 34 成功測站風力發電量變化量的 10 百分位值及 90 百分位值之未來推估

重，不確定性也跟著增加，但其增減幅度較平均風速之幅度為大，在未來長期的 RCP8.5 情境變的最高。測站中只有蘭嶼測站未來評估之不確定性較低，其差值皆在 10% 以內；彭佳嶼以及嘉義測站次之，差值皆在 20% 以內，新竹以及成功兩個測站則是不確定性較高，其在不確定性較低之情形，也有超過 10% 之差值，而最大差值皆超過 40%。

四、結論

本研究使用中央氣象局的八個測站風速資料結合使用 IPCC AR5 未來情境的十五個 GCMs 資料進行未來三個時期以及三種不同的未來情境之平均風速以及發電量推估，並將之與現今之數據計算其變化量，並分析其平均值以及累積分

布的 10 百分位值和 90 百分位值，用以評估氣候變遷對台灣風能的衝擊，而得出以下之結論。

- (1) 整體來看，台灣的平均風速未來是些微下降的，只有高雄測站在未來長期為微幅增加的，台灣的風力發電量在未來也是些微下降，只有在蘭嶼測站的未來近期、未來中期以及高雄測站的未來長期會微幅增加，但兩者下降幅度並不大，平均風速下降比例皆在 4% 內，而發電量下降比例皆在 6% 內。
- (2) 台灣的平均風速會隨著時間前進而漸漸下降，風力發電量與平均風速呈現差不多的趨勢，但下降幅度較大。
- (3) 隨著情境產生的衝擊變嚴重，各 GCMs 結果的差異也越來越大，代表評估的不確定性變得越來越高，在 RCP2.6 情境中，各時期的平均風速以及發電量變化量之不確定性較小，而在 RCP8.5 情境的長期評估中，此模式的不確定性為最大的。

五、參考文獻

1. 朱佳仁，2006，「風工程概論」，科技圖書。
2. 杜逸龍，2009，「風力發電機發電量之推估」，國立台灣大學生物環境系統工程學系博士論文。
3. 莊月璇，2001，「台灣地區風速機率分佈之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文。
4. 陳俊龍，2009，「氣候變遷對台灣地區風能之影響評估」，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文。
5. Chang, T.J., Chen, C.L., Tu, Y.L., Yeh, H.T., Wu, Y.T., (2015) Evaluation of the climate change impact on wind resources in Taiwan Strait. *Energy Conversion and Management*, 95, 435-445.
6. Chang, T.J., Tu, Y.L., (2007), Evaluation of capacity factor of WECS using chronological and probabilistic wind speed data: a case study

- of Taiwan. *Renewable Energy*, 32, 1999-2010.
7. Chang, T.J., Wu, Y.T., Hsu, H.Y., Chu, C.R., Liao, C.M., (2003), Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 28, 851-871.
 8. Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., (2014), Hybrid downscaling of wind climates over the eastern USA. *Environmental Research Letters*, 9, 024013.
 9. Pryor, S.C., Schoof, J.T., Barthelmie, R.J., (2005), Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. *Climate Research*, 29, 183-198.
 10. Pryor, S.C., Schoof, J.T., Barthelmie, R.J., (2005), Empirical downscaling of wind speed probability distributions. *Journal of Geophysical Research*, 110, D19109.
 11. Sailor, J.D., Michael, S., Melissa, H., (2008), Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renewable Energy*, 33, 2393-2406.
 12. Tu, Y.L., Chang, T.J., Hsieh, C.I., Shih, J.Y., (2010), Artificial neural networks in the estimation of monthly capacity factors of WECS in Taiwan. *Energy Conversion and Management*, 51, 2938-2946.
 13. 4C offshore, Global Offshore Wind Speed Rankings. (<http://www.4coffshore.com/windfarms/windspeds.aspx>)
 14. IPCC Data Distribution Centre. (<http://www.ipcc-data.org/>)
 15. IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/>)
 16. Wind energy database. (<http://www.thewindpower.net/>)
 17. 臺灣氣候變遷推估與資訊平台。 (<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/index.aspx>)

收稿日期：民國 105 年 4 月 28 日
修正日期：民國 105 年 7 月 7 日
接受日期：民國 105 年 8 月 8 日