

利用中尺度大氣模擬探討臺灣東北季風時期 北部丘陵對西海岸風場之影響

陳盈如¹ 李承祐^{2*} 蔡原祥³ 苗君易⁴

摘 要

臺灣冬季東北季風帶來相當豐沛之風力資源，然而穩定季風資源因臺灣複雜山脈地形而改變了各地風場，當東北風觸碰臺灣陸地即受到臺灣北部丘陵以及高聳且南北走向的中央山脈阻擋，山脈阻擋影響導致背風側臺灣西部風場的改變，本研究利用WRF中尺度數值預報模擬針對臺灣冬季東北季風時期在西部海岸的風場變化進行模擬分析，經由模擬可發現在東北季風觸碰到臺灣北部丘陵後，因地形阻擋而將氣流阻擋於北部及東北部山區，進而影響臺灣北部之局部氣壓，經模擬結果發現臺灣北部海域在風向為正北風時，臺灣西部沿岸最大風速之區域約在苗栗外海；隨大陸性冷高壓壟罩臺灣時，臺灣北部海域風向轉為東北風，而西部沿岸最大風速之區域移往臺中外海；大陸性冷氣團漸離臺灣過後，臺灣東部以及北部海域風向轉為東風，而西部沿岸最大風速之區域由臺中再度北移至西北沿岸，本研究經由局部氣壓場之差異發現造成臺灣西部海岸之風速差異的原因在於不同風向以及臺灣地形之交互作用所致。

關鍵詞：WRF數值預報模擬，東北季風，地形效應

1. 前 言

臺灣缺乏天然資源且高度依賴化石燃料進口，因此發展再生能源為能源政策首要之務，臺灣因得天獨厚的地理條件，由中央氣象局歷年於約10 m高度之風場量測中統計而可得東北季風可達全年度之70%且其恆常風之風速可達50-55 kts (25-28 m/s)，而陣風風速甚至可達65-70 kts (33-36 m/s) (Liu, 1984)，可見東北季風可提供穩定且高速之風能資源。然而臺灣地形特徵較為複雜，位於島中央之中央山脈為由北

至南走向，在東北風觸碰至臺灣陸地後，即被山脈阻擋，據Pierrehumbert and Wyman (1985)利用數值方法簡化阿爾卑斯山脈之模擬研究，藉由無因次化山區半山寬以及最高高度探討影響地形阻擋之參數如Rossby Number與Froude Number，發現在迎風面底層因地形阻擋而使氣流堆積，而於迎風面底層產生局部高壓，高層則為局部低壓，進而使氣流沿高山抬升，因此認為臺灣西部海岸在東北季風越過山脈後風場會造成一定程度之影響。

吳政忠等(2005)利用NCEP (National Centers

¹國立成功大學航空太空工程學系 博士後研究員

²國立成功大學航空太空工程學系 研究員

³國立高雄科技大學海事資訊系 助理教授

⁴國立成功大學航空太空工程學系 教授

*通訊作者，電話：06-2757575 #63659，電郵：ivanlee552@yahoo.com.tw

收到日期: 2022年11月14日

修正日期: 2023年05月05日

接受日期: 2023年05月18日

for Environmental Prediction)發展之非靜力區域波譜模式MSM(Mesoscale Spectral Model)模擬東北季風時期，以每小時輸出一模擬數據，加強底層之模擬密度，於氣壓高度850 hPa以下內插12層，首先以去除臺灣地形保留中國東南沿海地形之情況進行模擬，結果顯示福建沿海仍受地形之影響而產生擾動，臺灣附近海域氣壓場與風場不受地形影響，風場較中國東南沿岸均勻；另外相反地去除中國東南沿海地形保留臺灣地形，其結果顯示臺灣附近海域受到地形影響十分明顯，因此可歸納出中國東南丘陵與臺灣中央山脈地形對於東北季風時期臺灣海峽低層強風均有影響，而臺灣地形對於臺灣地區臺灣海峽沿岸影響較深。

吳政忠等(2004)將東北季風時期以彭佳嶼測站的風向作為東北季風各階段之依據，係因彭佳嶼測站的位置位於臺灣北部海面，在冬季季風時期並未受到臺灣地形影響。在大陸性冷氣團靠近臺灣前，並未具有明顯天氣系統主導，臺灣地區風場紊亂不定；隨大陸性冷氣團靠近臺灣，彭佳嶼測站盛行西北風至北風，風面所及之處風速漸增；隨大陸性高壓中心壟罩臺灣，臺灣北部海面風向轉變為東北風；最後在大陸性冷氣團漸離臺灣四周後，風向轉為東風且風速降低。本研究將參考吳政忠等(2004)研究，在東北季風四階段探討臺灣西部海岸因地形影響之風場變化。

2. 研究方法

WRF (Weather Research and Forecast)天氣預報模式為近年來各國氣象單位廣泛使用中尺度氣象預報模式及大氣模擬系統，應用於尺度數公尺至數千公里之大氣研究(Skamarock *et al.*,

2008)，WRF為一非靜力平衡之動力模式且基於不可壓縮之尤拉方程(如後式1至3)，而位溫方程式如後式4 (Ooyama, 1990；Lehner, 2012)。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot V_u - \frac{\partial(p\phi_u)}{\partial x} + \frac{\partial(p\phi_x)}{\partial x} = F_U \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot V_v - \frac{\partial(p\phi_v)}{\partial y} + \frac{\partial(p\phi_y)}{\partial y} = F_V \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot V_w - g\left(\frac{\partial p}{\partial \eta} - \mu\right) = F_W \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \nabla \cdot \theta = F_\Theta \quad (4)$$

前式(1)至(4)中 t 為時間、 x 與 y 為水平方向之座標、 p 為氣壓、 ϕ 為重力位(geopotential)、 u 與 v 分別代表 x 與 y 分量之風速、 F_U 、 F_V 、 F_W 、 F_Θ 為 U 、 V 、 W 、 Θ 四變數下基於subgrid-scale turbulence scheme (sgs)、the 6th-order diffusion scheme (diff6)、Rayleigh damping (rayl)與the radiation parameterization (subscript rad)四模式下之受力項。

WRF 模式模擬將利用 WPS (WRF Preprocessing System)進行模擬環境創建與設置，其中WPS包含geogrid、ungrib以及metgrid三程式(Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research, 2012)。Geogrid定義出模擬區域範圍、將投影地圖設置於計算域中以及將不同地表數據資料(如土壤種類、地表地形型態、地表地形高度等)插值至模擬網格中；Ungrib將全球觀測數據提取觀測數據做為初始場；Metgrid將由ungrib所提取的初始場之全球觀測氣象場資料水平插值置於geogrid所定義的模擬區域以及地形當中。為求大氣模擬之準確性，本研究模擬結果將再以同位於第四層網巢之中央氣象局局屬測站¹之觀測數據進行比對參考。

¹ Taiwan Central Weather Bureau, "Wu Xin Weather Station." [Online]. Available: <https://e-service.cwb.gov.tw/wdps/obs/state.htm>.

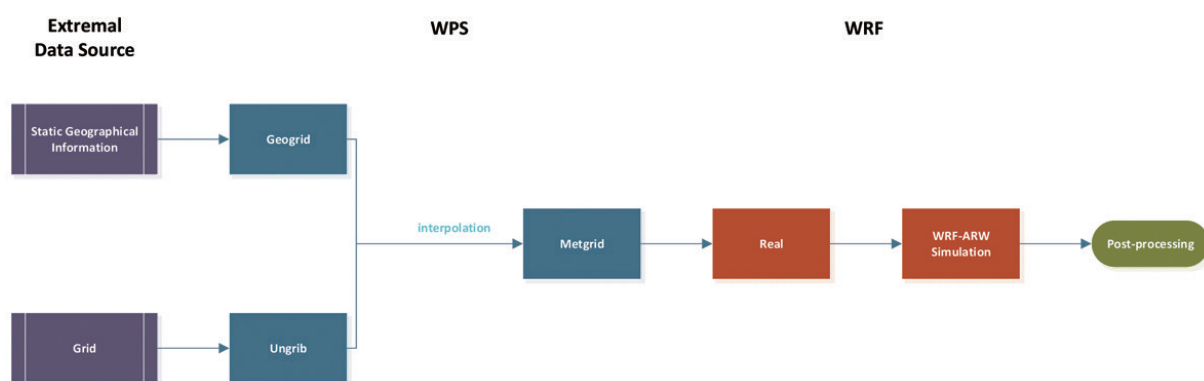


圖1 WRF模擬流程圖

(Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research, 2012)

3. 數值模擬參數設置

本次研究選取臺灣冬季東北季風案例進行模擬研究，模擬初始條件取用美國NCEP之最終全球資料同化系統之全球觀測數據²，其觀測資料之水平解析度為 $1^{\circ}\text{E} \times 1^{\circ}\text{N}$ 、每6小時一筆、垂直方向自地面至10 hPa共26層。WRF模擬採用4層網巢，4層網巢分布如圖2，四層網巢範圍大小逐漸降低，網格解析度方面隨網巢逐漸縮

小而提升，由第一層自第四層分別為27公里、9公里、3公里、1公里。模擬區域內地形解析度採用30弧秒(約800公尺)，並使用蘭伯特地圖投影(Lambert conformal conical projection)方式將地表特徵顯示於模擬區域地圖上(第四網巢地形解析度如圖3)。

在本研究之WRF現實大氣模擬中，以下列物理參數進行模擬：微物理參數法(Microphysics Scheme)採用WSM5 scheme (Hong

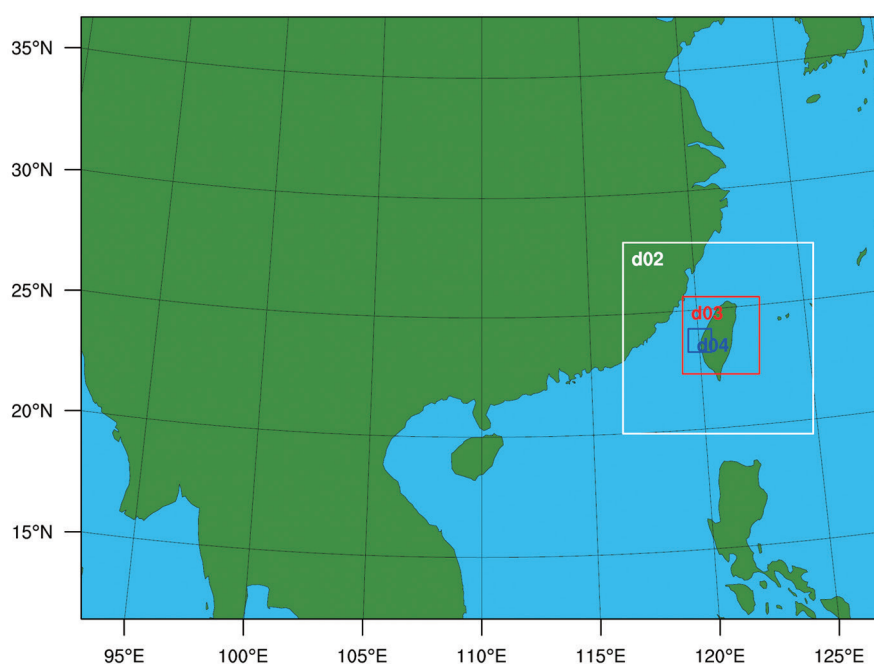


圖2 WRF模擬四層網巢位置分布

² NCAR and UCAR, "NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999". [Online]. Available: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!description>.

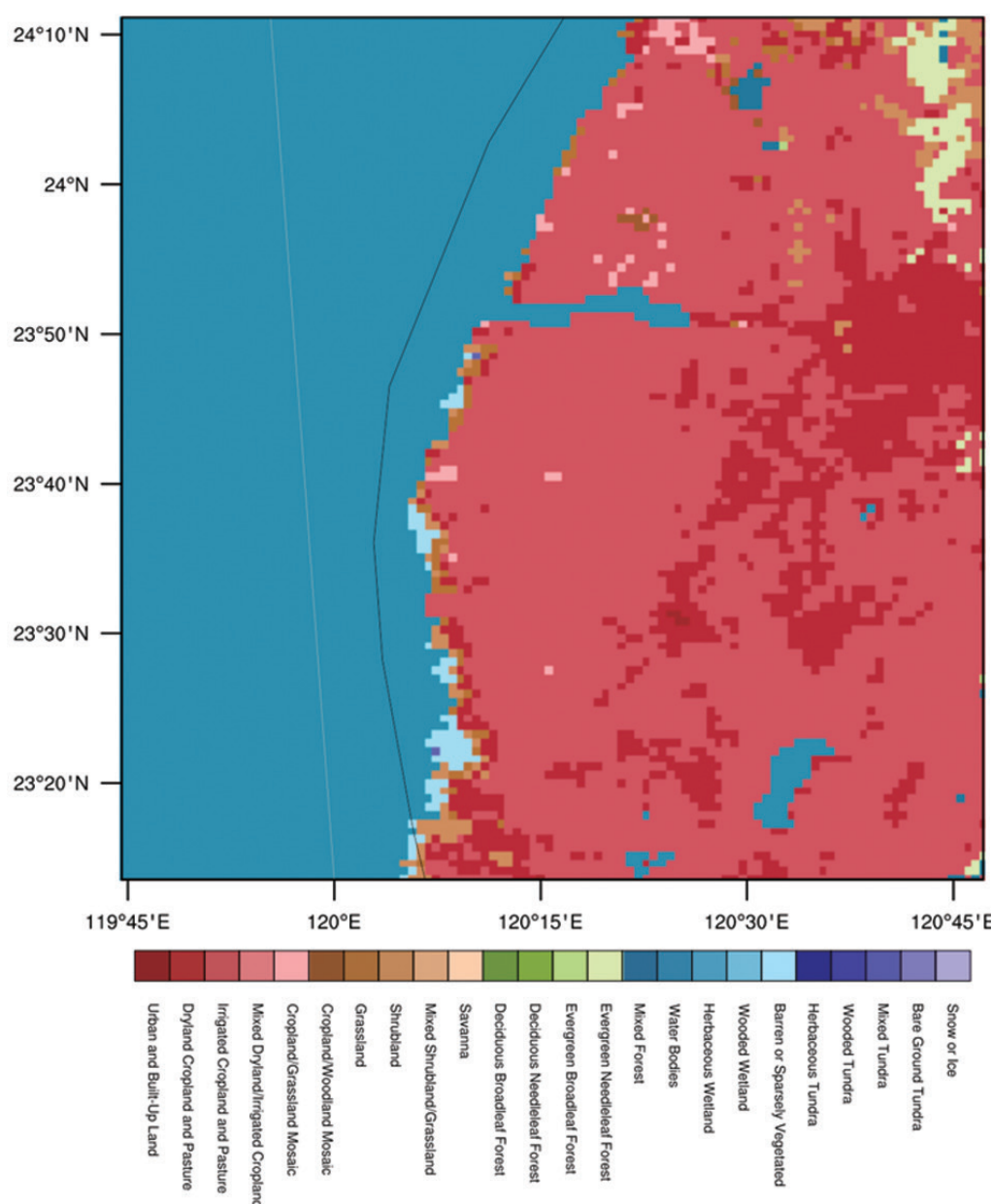


圖3 WRF模擬30弧秒地形解析度

et al., 2004)，本參數法為一較完整雲物理方案，因其可考慮大氣中較多樣水物粒子的存在及較完整的雲輻射過程(汪鳳如與陳建河，2018)；積雲參數法(Cumulus Parameterization)採用Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)；邊界層參數法部分，本研究考量因白天與夜間因地表輻射熱差異造成大氣混和程度有所差異，故在邊界層參數法部分採取日間與夜間不同之模擬策略，日出之後採用Yonsei University Scheme (Wilson and Fovell, 2014)參數法，夜間則採用

Nakanishi-Niino scheme (Nakanishi and Niino, 2019)；長波輻射參數法(Long-Wave Radiation Scheme)採用 RRTM scheme (Mellor and Yamada, 1974)，短波輻射參數法(Short-Wave Radiation Scheme)採用 Dudhia scheme (Mellor and Yamada, 1982)。經中尺度大氣模擬後本研究未考慮模擬之可信度，故將模擬結果與地面之中央氣象局測站進行比對，比對參數在於以下三者：大氣壓力、氣溫與風速三者，中央氣象局觀測數據與模擬比較圖分別列於後圖4至圖6，由圖4至圖

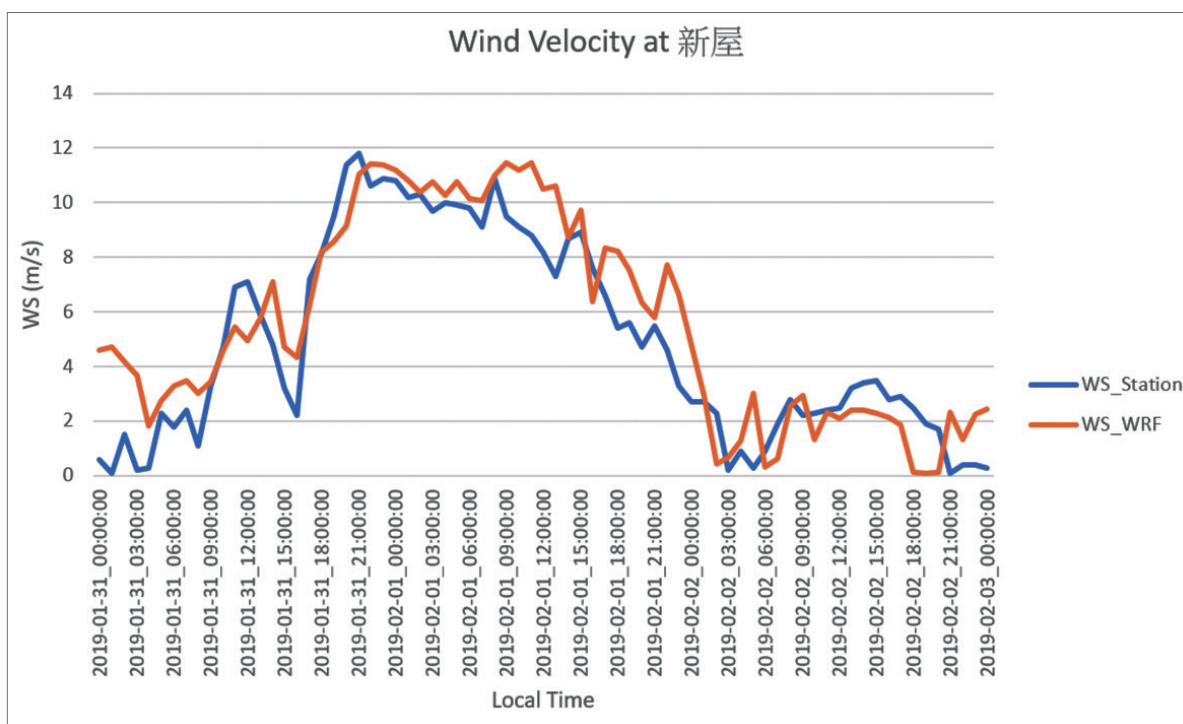


圖4 模式模擬風速與中央氣象局觀測數據比較圖

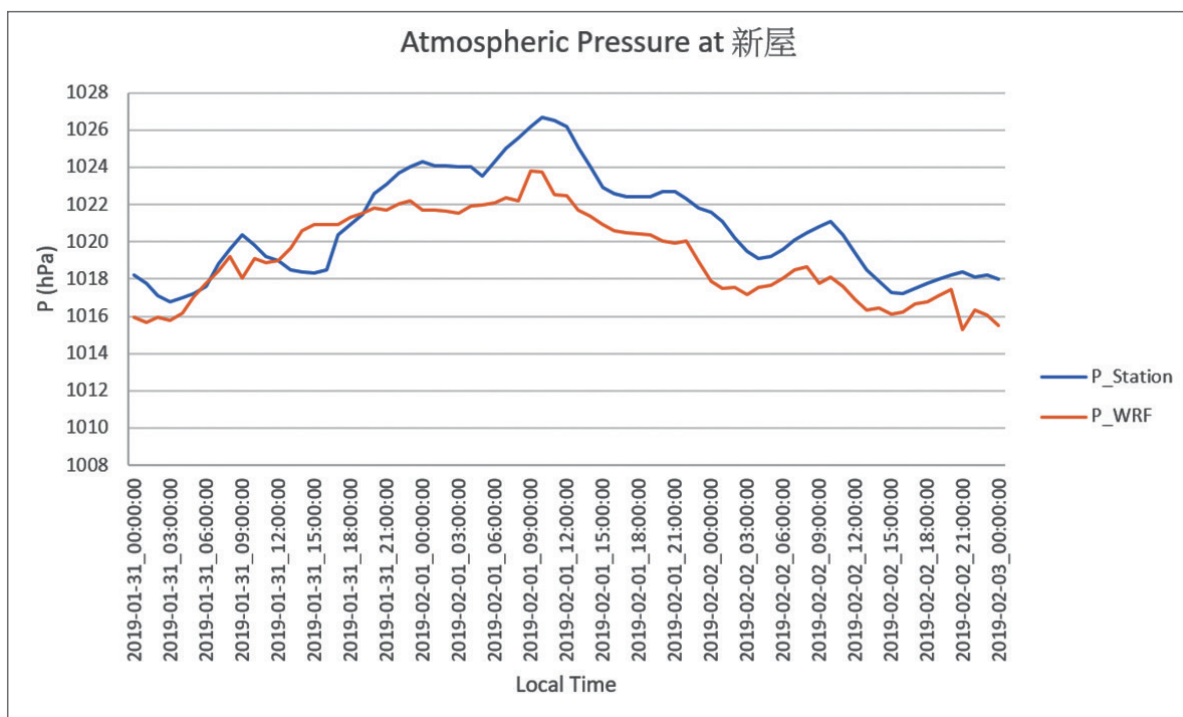


圖5 模式模擬大氣壓力與中央氣象局觀測數據比較圖

6比對結果可見在圖6風速模擬之誤差程度平均僅在10%以內，然而本研究在大氣壓力以及氣溫模擬上，僅利用溫度與大氣壓力之變化界定大陸性冷氣團高壓之位置以及移動到各觀察地

點之時段以進而探討風場變化，故在圖4模式模擬風速與中央氣象局觀測數據比較圖圖5之比較上以探討溫度以及氣壓之變化趨勢為主。本研究為考量風力發電設備對於地表風場模擬數

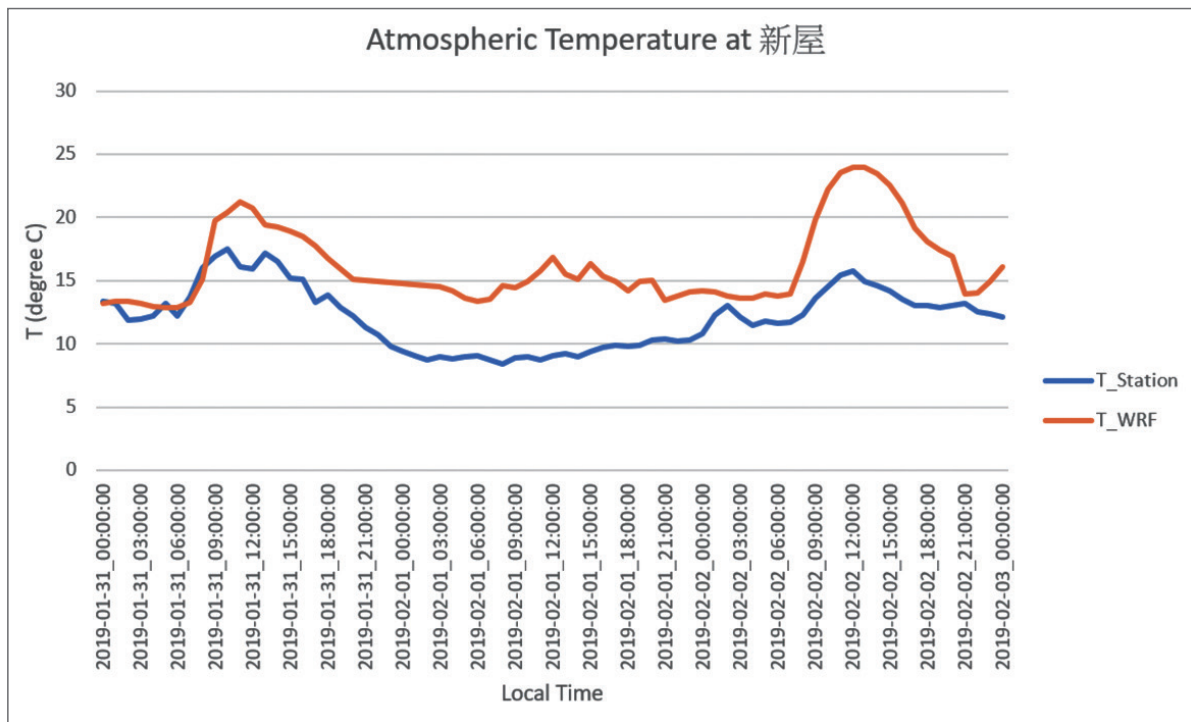


圖6 模式模擬大氣溫度與中央氣象局觀測數據比較

值敏銳程度較大，除上述在夜間以及日間所設置之行星邊界層條件有所不同外，更在近地表(低於300 m AGL (above ground level))增加網格密度以達到模擬大氣邊界層效應之結果，網格密度加密由氣壓高度1,013.25 hPa起，間隔每2至3 hpa (換至公尺約17-25 m)進行加密，至計算氣壓高度至約等於300 m AGL止，因此在300 m AGL以內可達12層。

4. 模擬結果討論

首先探討模擬個案2019年01月31日00:00Z至2019年02月02日00:00Z，本研究採用吳政忠等(2004)所探討之東北季風階段進行風場之探討。圖7可見臺灣島上空風向較為紊亂且風速較為緩慢，天氣系統逐漸開始改變；此時大陸性冷高壓逐漸靠近臺灣，臺灣北部海面開始轉變至西北風與北風之型式，且風速逐漸上升，然而受臺灣島地形阻擋，觸碰到臺灣島北部之氣流分別吹至臺灣島東西兩岸，然而因高壓過境

致使臺灣東部氣壓梯度力較為強烈，故臺灣東北部沿岸之風速略高於臺灣海峽北側(如圖8)；待大陸性冷高壓壟罩臺灣上空，臺灣北部海面風向轉變至東北風，由圖9可見北部海域之東北風接觸臺灣地形後因山脈與丘陵阻擋，臺灣東部沿海呈現局部高壓，而臺灣西部背風側出現相對低壓，亦因地形阻擋臺灣西部風速較低，然而因西部呈現局部低壓，故臺灣海峽風速較高於東側沿岸；高壓中心逐漸遠離臺灣，臺灣東部與北部海域之風向逐漸由東北風轉變至東風，並降低風速，在吹拂東風時亦受到臺灣島地形阻擋之影響，臺灣西部仍為局部低壓，臺灣海峽風速較高於東側沿岸，然而值得注意的是在臺灣北部風向轉變至偏東風時，臺灣南部海面與巴士海峽出現較高風速(如圖10)。

因地形阻擋而造成在地點位置不同而產生局部低壓或高壓，而局部高低壓亦會產生局部風速高低，因此本研究採用第二網集繪製地面高度之等風速圖探討局部高低壓對於臺灣西部海岸風場之影響，其中地面高度係將高度設置

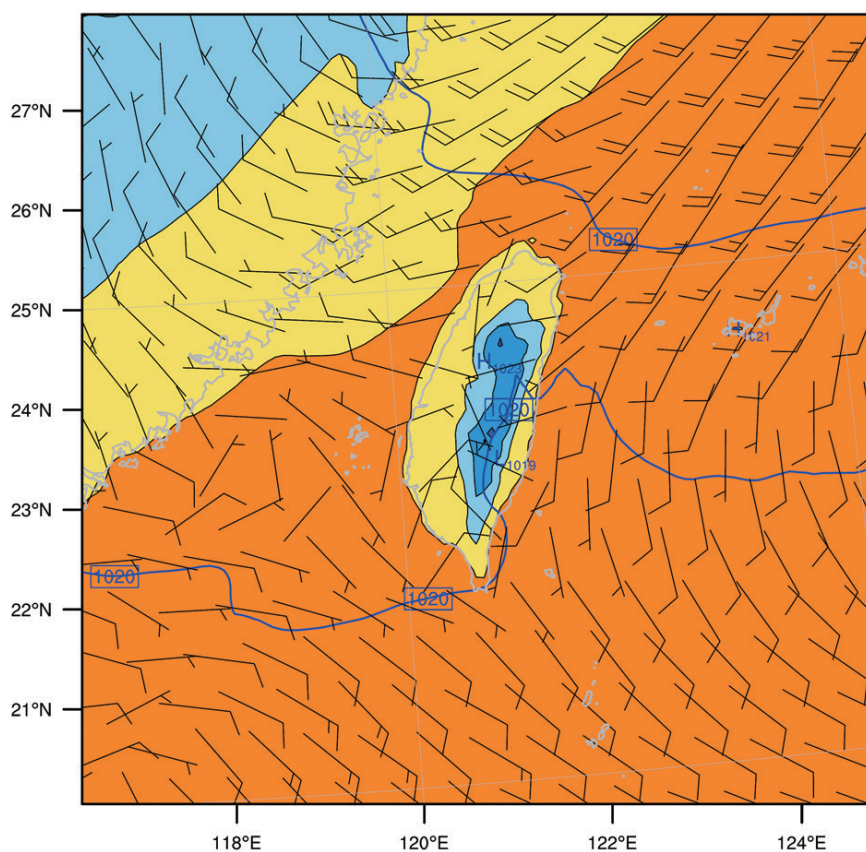


圖7 2019年01月31日 0000Z模式模擬臺灣地區風場與等壓線分布圖(其中底圖顏色為氣溫)

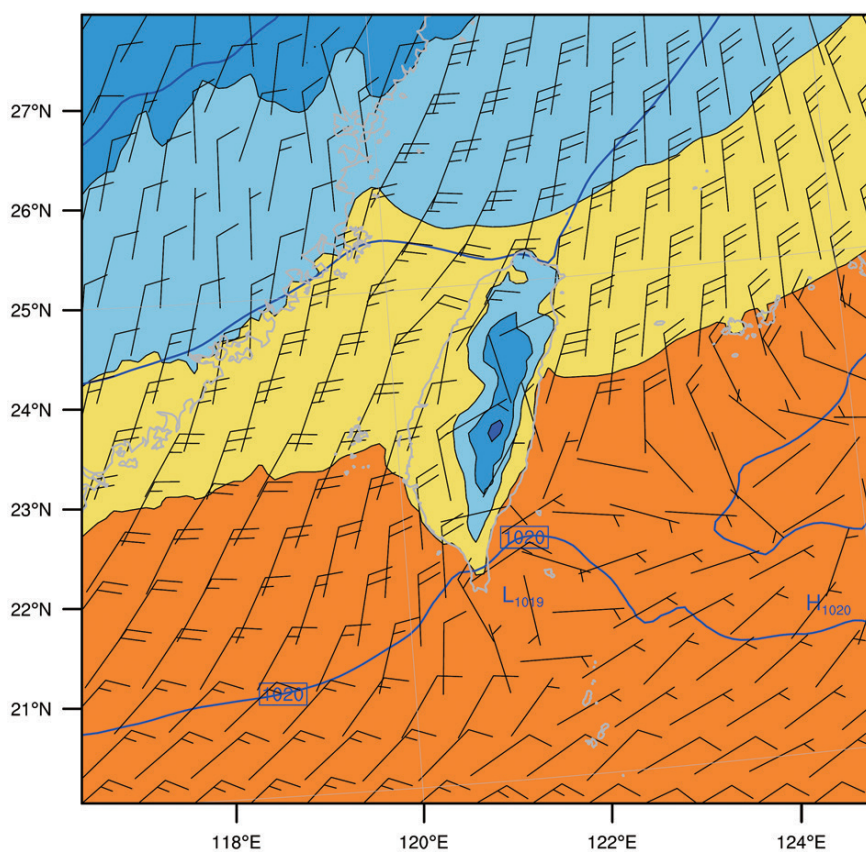


圖8 2019年01月31日 1100Z模式模擬臺灣地區風場與等壓線分布圖(其中底圖顏色為氣溫)

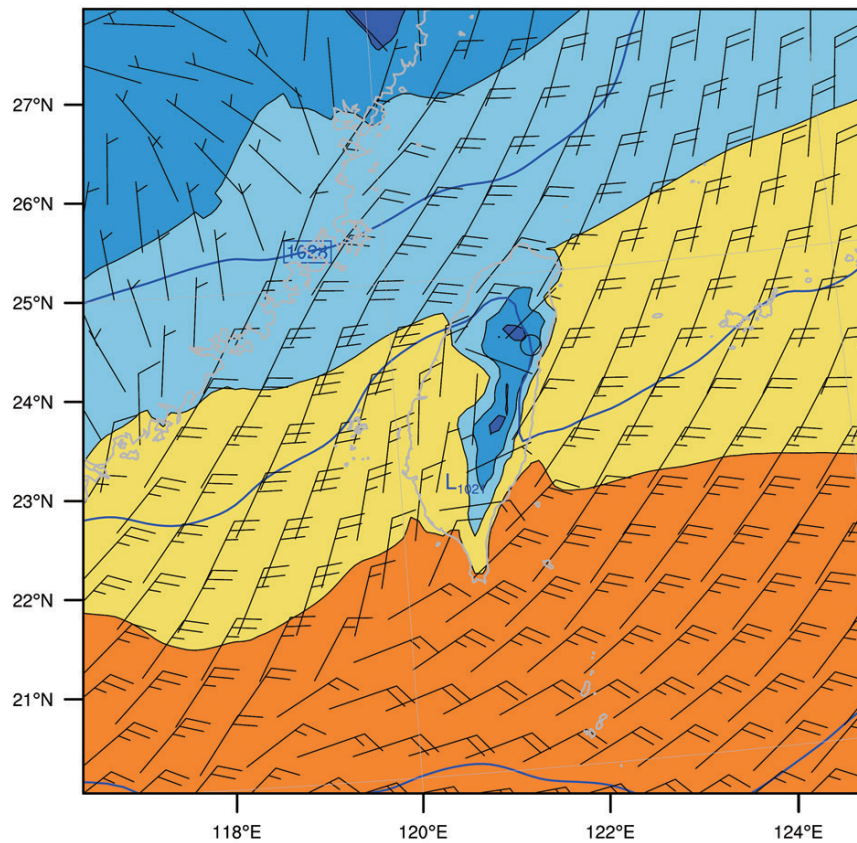


圖9 2019年02月01日 0100Z模式模擬臺灣地區風場與等壓線分布(其中底圖顏色為氣溫)

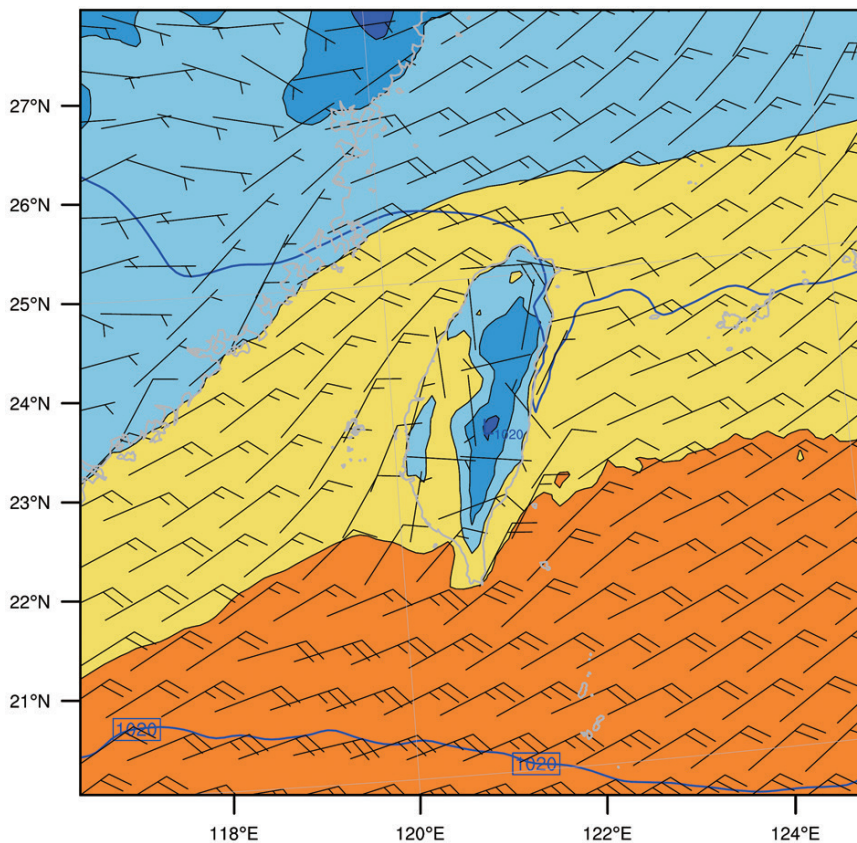


圖10 2019年02月01日 1200Z模式模擬臺灣地區風場與等壓線分布(其中底圖顏色為氣溫)

為國際民航組織所定義之理想大氣1,013.25 hPa所位於之氣壓高度。由圖11可見在天氣系統轉換期時，風向紊亂且風速較低，臺灣各地尚不受地形影響；隨冷高壓靠近，臺灣北部海域吹拂北風，北風觸碰到臺灣北部地形後堆集於北部海域，並且驅動臺灣島局部壓力差沿氣壓梯度方向增強臺灣西北部沿岸風速(如圖12)，約在新竹苗栗外海出現局部風場風速最強區域；至冷高壓壟罩臺灣上空，臺灣北部海域轉變為東北風，並且風速更為增強，臺灣海峽沿岸最高風速區域轉移至臺中外海(如圖13)，並且此最高風速區直至大陸冷高壓遠離臺灣後才逐漸移動。大陸性冷高壓離開臺灣島四周後，臺灣各地風速逐漸降低，而臺灣西部沿岸風速最強勁地區逐漸向北轉移，因臺灣東部及東北部海域之風向轉由靠近東北東風以及東風，故地形因素轉至北部山區阻擋而加速臺灣西北部沿岸

風速(如圖14)。

再者探討第二個東北季風模擬案例，本案例模擬2016年11月26日00:00Z至2019年11月29日00:00Z為兩大陸性冷氣團接續報到，進而探討前述四階段是否能適用，圖14顯示冷氣團南下之初，臺灣島嶼其東南部風向不穩定，且太平洋上以及巴士海峽仍吹拂以太平壓高壓主導之東風，而臺灣海峽已吹拂西北風至北風；圖15顯示臺灣北部海域均吹拂北風為主，且北部山脈對於冷高壓所主導之北風產生了阻擋，故可見圖15中在北部陸地地形形成局部高壓的情形，並且因局部高壓的形成，致使氣流接觸北部山脈後由臺灣島東西兩岸之南方吹，因此於臺灣島東西兩岸所觀測到的風向均與北部海面所不同；2016年11月27日00:00Z至2016年11月28日00:00Z前，為首個大陸型高壓所產生風速最強之時刻(如圖16)，11月28日00:00Z時(如圖

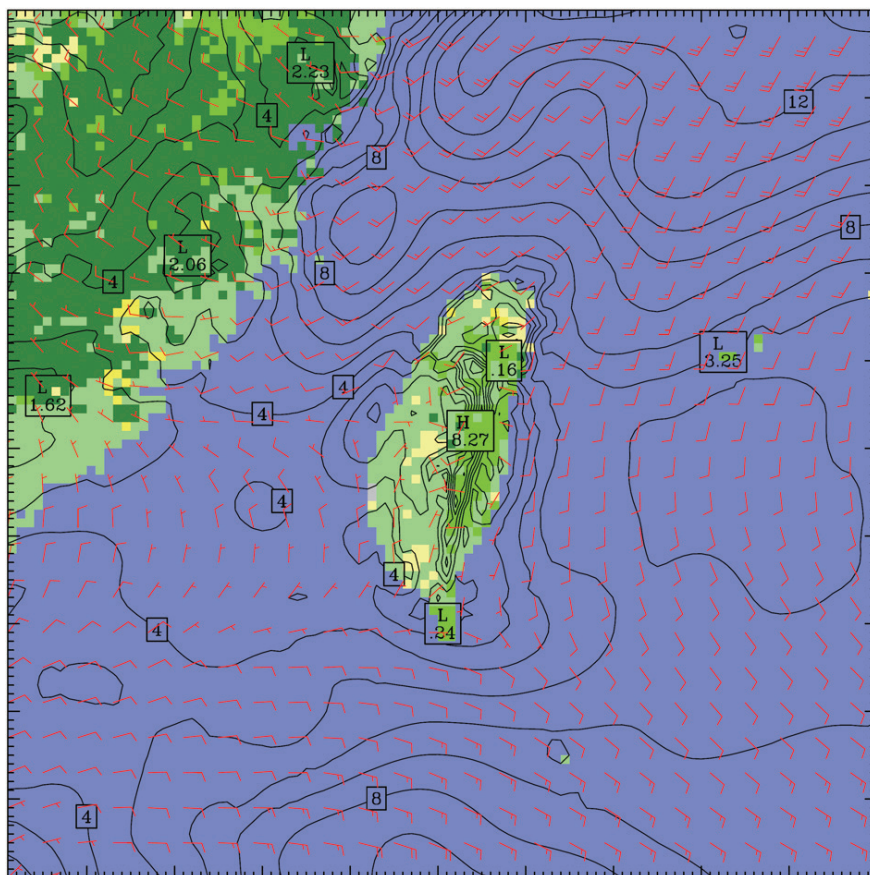


圖11 模式模擬2019年1月31日0000Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

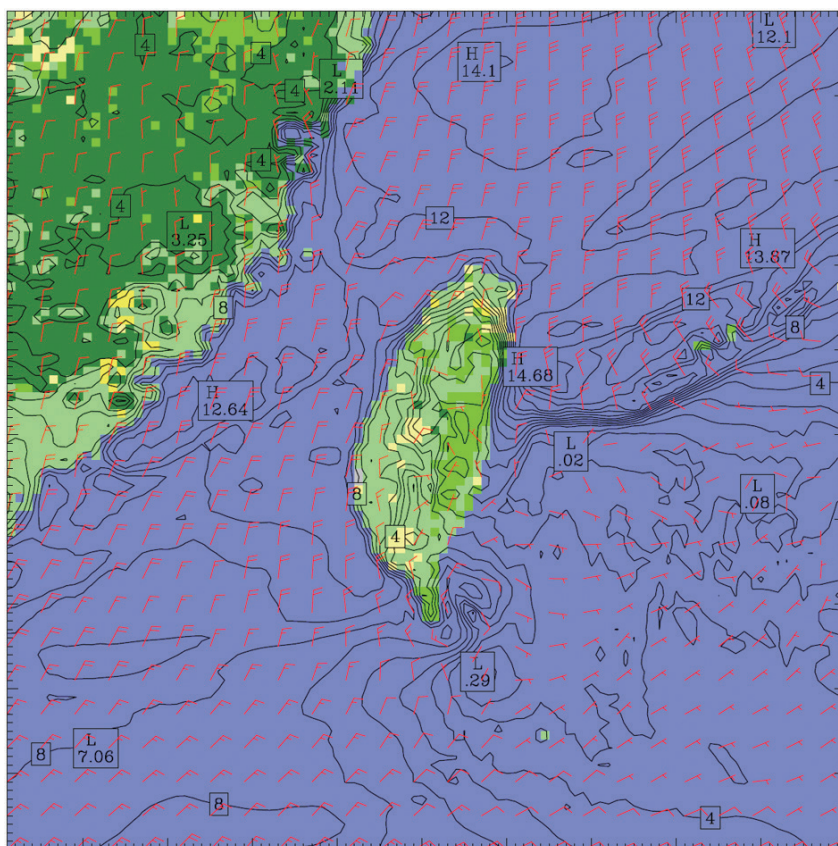


圖12 模式模擬2019年1月31日1000Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

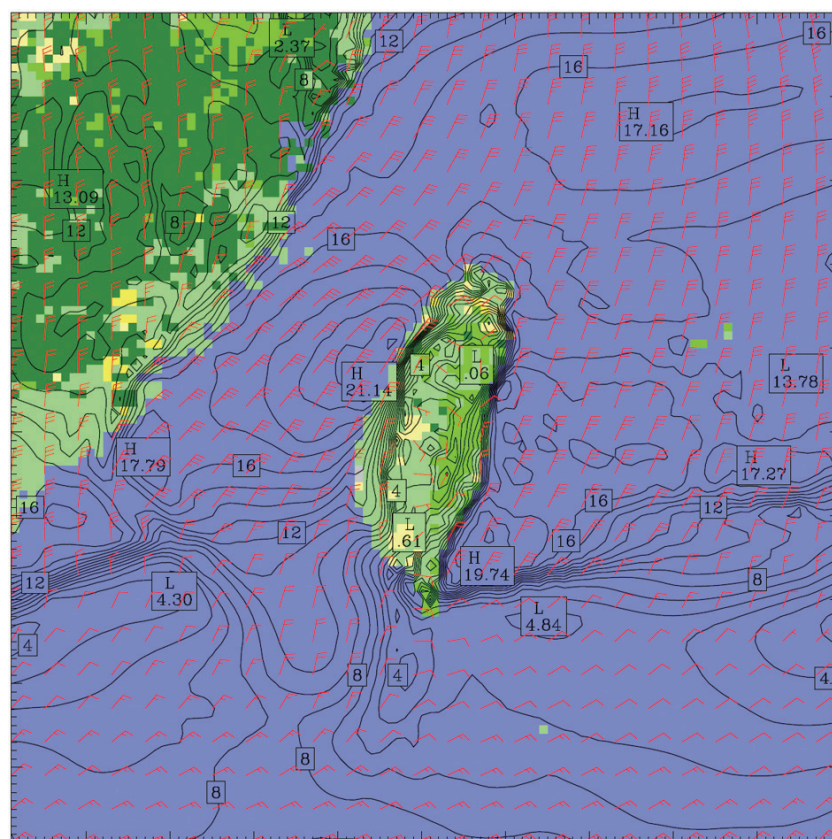


圖13 模式模擬2019年1月31日1600Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

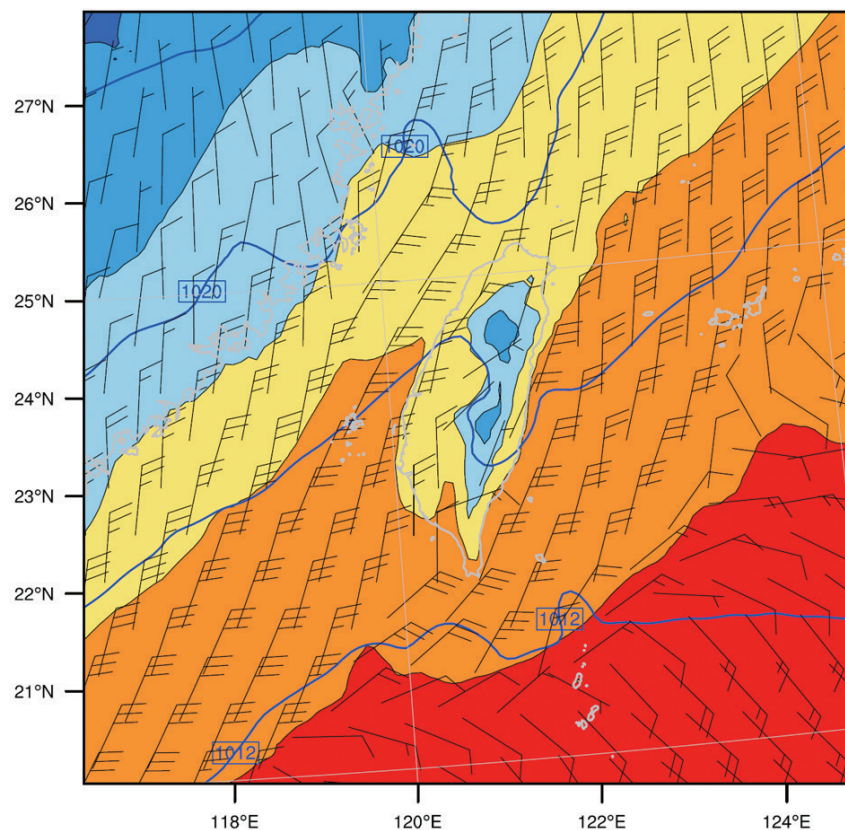


圖16 模式模擬2016年11月27日00:00Z氣壓及風場圖(其中底圖顏色為氣溫)

17)可見因首個大陸型高壓逐漸遠離而風速稍微降低，且北部海面上風場以東北為主，至28日06:00Z第二個大陸型高壓移入後，風速隨即再次上升，然而值得注意的是，雖然第二個大陸型高壓移入，但臺灣北部海面風向並未明顯改變，仍以東北風為主(如圖18)。

在等風速圖探討方面，大陸性冷氣團壟罩臺灣上空後，與前一個案所觀察到相同之臺灣西部海岸最高風速因局部氣壓高低而移動的現象，本案例雖然為兩接連之大陸性冷高壓南下，但由後圖21至圖23可見此高風速區移動未隨著冷高壓南下而再度南移，而是僅與風向相關。

5. 結論與建議

本研究經由中尺度大氣模擬發現臺灣東北季風時期西部海岸之風速差異之成因，為不

同風向之來流風場與各地山脈交互作用所致之局部壓力場差異。在臺灣北部海域風向為北風時，北風觸碰臺灣北部山區後堆積而成為局部高壓，而位於相對背風面之臺灣中西部沿岸為相對低壓，因局部壓力場之差異使堆積於臺灣北部山區氣流繞山而加速，約於苗栗外海出現最大風速；隨大陸性冷高壓壟罩臺灣時，臺灣北部海域風向轉為東北風，而西部沿岸最大風速之區域移往臺中外海；大陸性冷氣團漸離臺灣過後，臺灣東部以及北部海域風向轉為東風，東風因臺北西北大屯山區之阻擋，繞山運動至臺灣西部海岸，局部壓力場產生了變化，局部高壓由臺灣北部山區轉移至臺北大屯山區之東部以及東北部，因此西部最高風速區域由臺中逐漸向北移轉至桃園外海。

本研究之目的乃利用中尺度大氣模擬探討臺灣因地形阻擋而導致東北季風時期西海岸之風速差異，進而提供臺灣風能設置參考，風

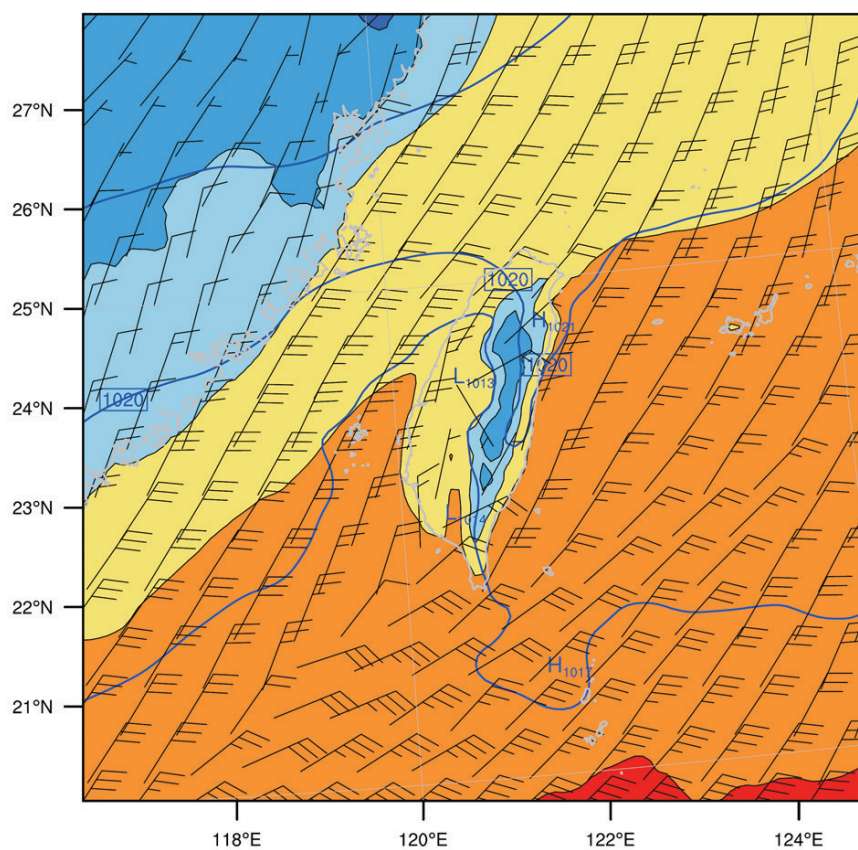


圖17 模式模擬2016年11月27日18:00Z氣壓及風場圖(其中底圖顏色為氣溫)

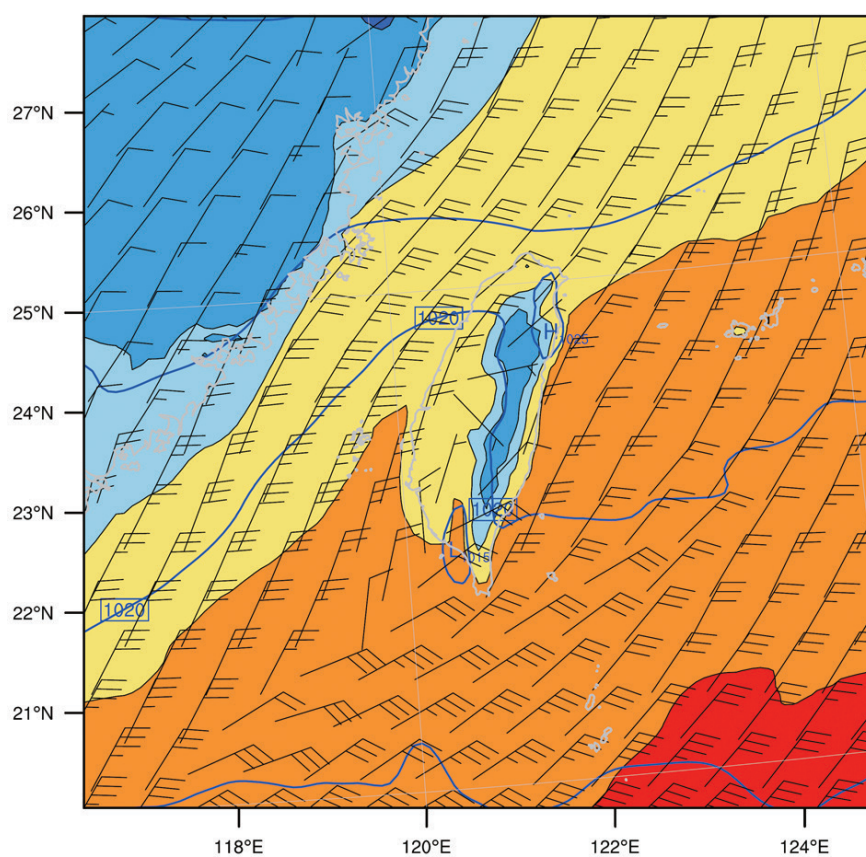


圖18 模式模擬2016年11月28日00:00Z氣壓及風場圖(其中底圖顏色為氣溫)

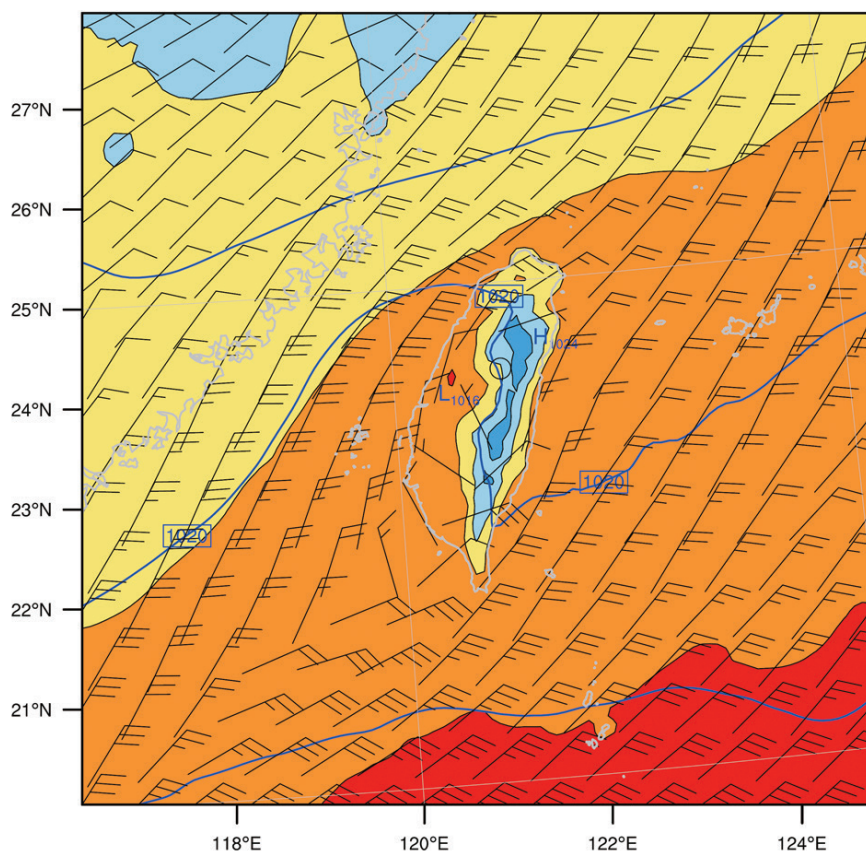


圖19 模式模擬2016年11月28日06:00Z氣壓及風場圖(其中底圖顏色為氣溫)

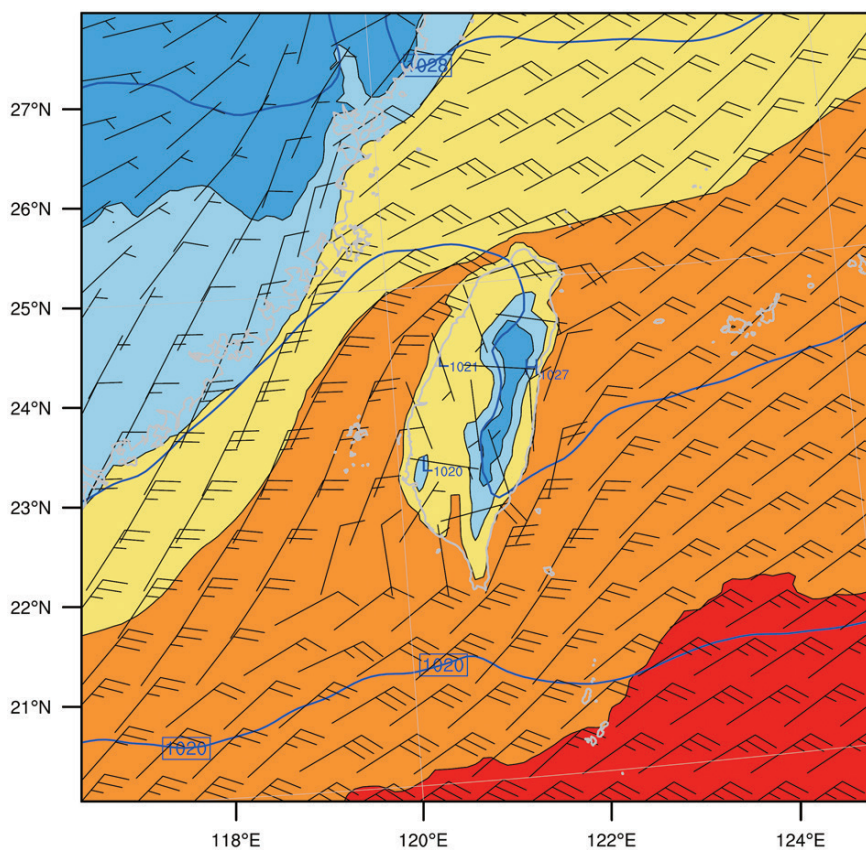


圖20 模式模擬2016年11月29日00:00Z氣壓及風場圖(其中底圖顏色為氣溫)

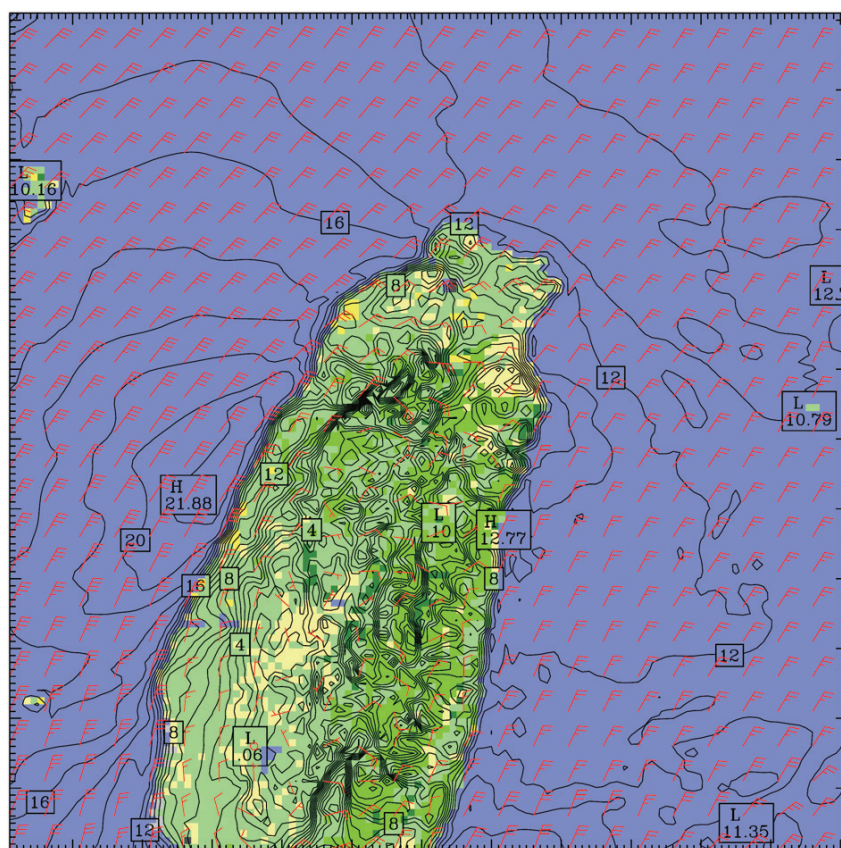


圖21 模式模擬2016年11月28日00:00Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

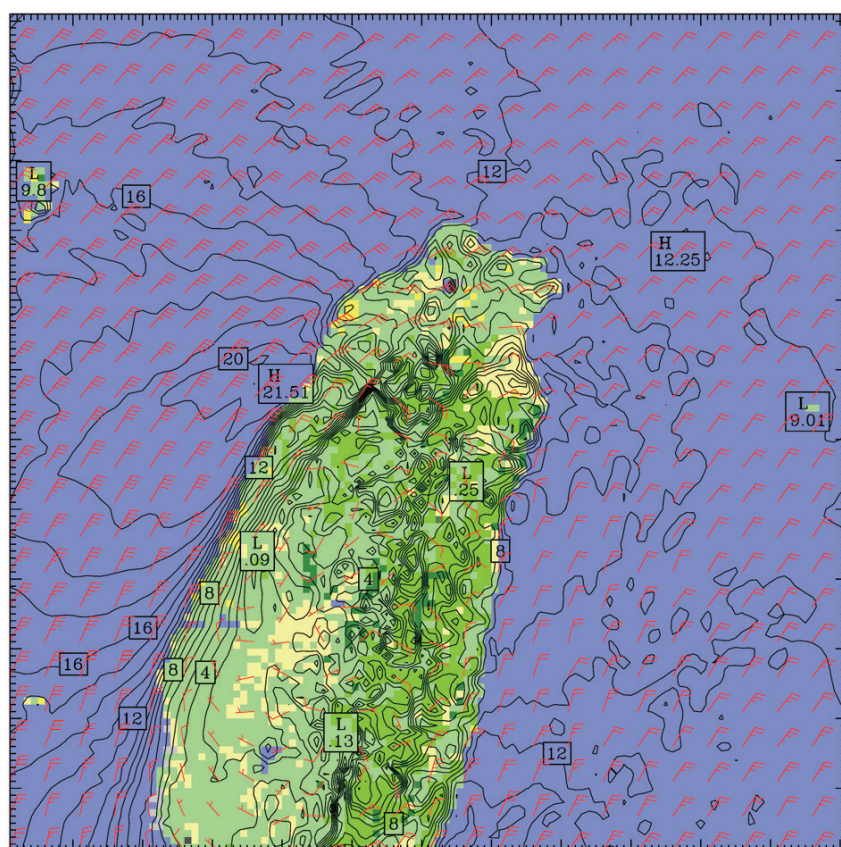


圖22 模式模擬2016年11月28日06:00Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

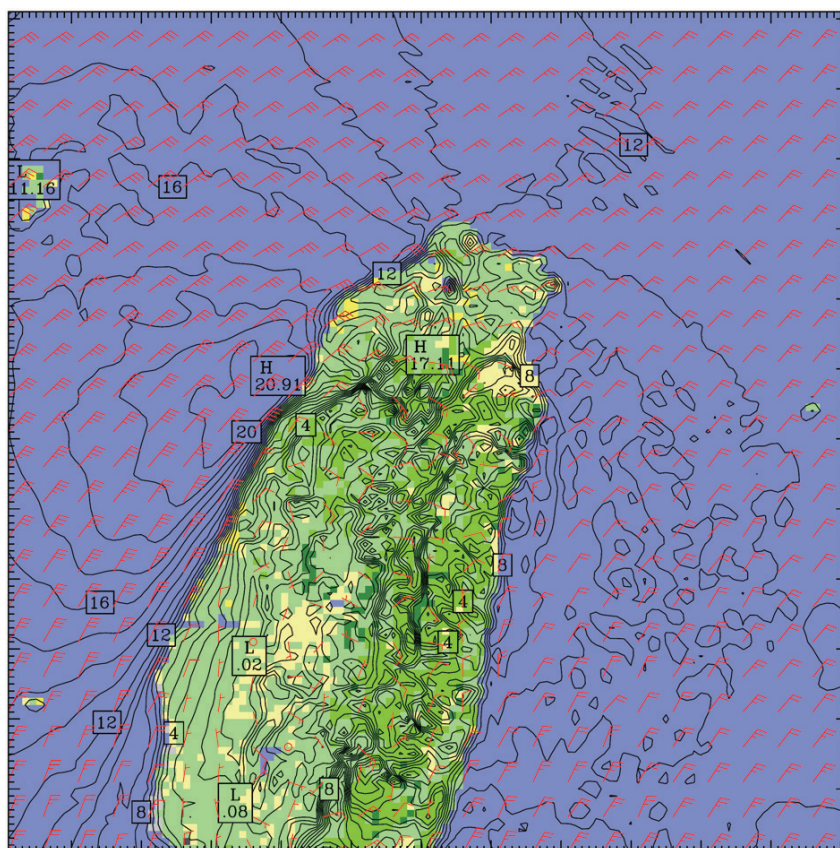


圖23 模式模擬2016年11月28日12:00Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

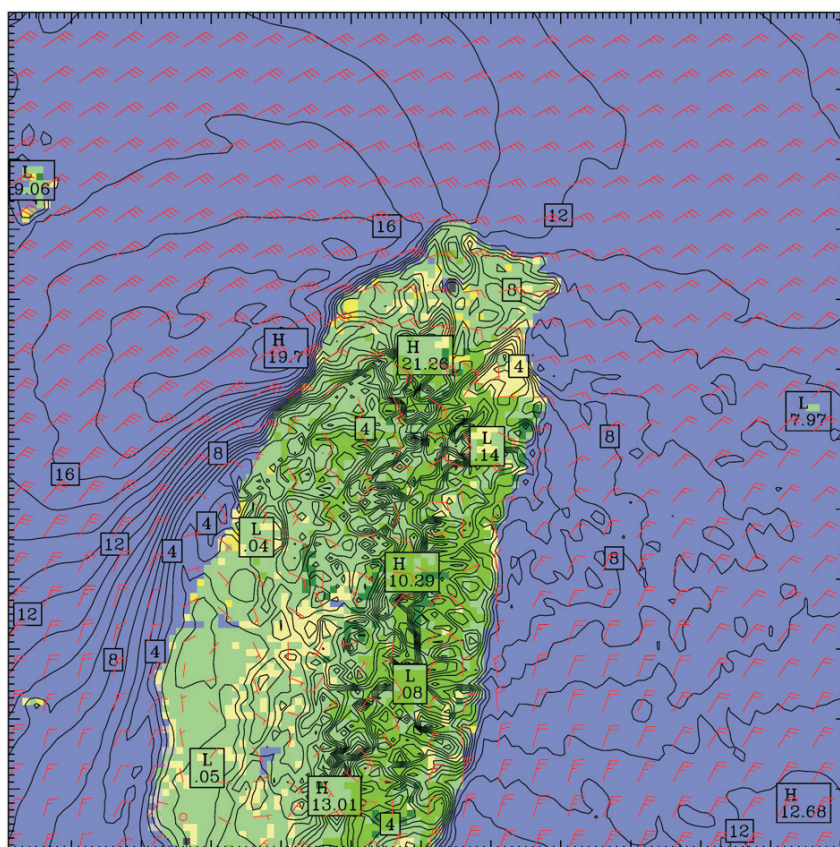


圖24 模式模擬2016年11月28日18:00Z地表高度之等風速圖(等風速線單位為m/s)

能設施之設置雖取決於風速高低，然而偶有聽聞強烈的大氣紊流造成風機設施產生危害之消息，雖於中尺度之大氣模擬確已觀察出臺灣地形之阻擋造成之臺灣海峽風速差異效應，卻無法利用中尺度進行小尺度之大氣紊流進行探討，故未來研究將以中尺度模擬所得地形效應之時間以及區域，利用現有風場測量裝置進行分析，進而探討臺灣西部風場之小尺度大氣紊流現象，並利用小尺度大氣紊流分析提供相關結構分析輸入初始條件進而進行安全分析。

參考文獻

- 吳政忠、呂芳川、陳文定、鄭竹齋與莊漢明，2004。“東北季風時期臺灣海峽強風成因之研究”，天氣分析與預報研討會，no. 100。
- 吳政忠、呂芳川、陳文定、趙尊憲與莊漢明，2005。“冬季臺灣附近海域強風預報研究”，天氣分析與預報研討會，no. 35。
- 汪鳳如與陳建河，2018。“WSM5雲物理方案於CWB-GFS的評估測試”，天氣分析與預報研討會，108, Sep.。
- Hong, S. Y., J. Dudhia and S. H. Chen, 2004. “A Revised Approach to Ice Microphysical Process for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation,” *Mon. Wea. Rev.*, vol. 132, pp. 103-132.
- Kain, J. S., 2004. “The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update.” *J. Appl. Meteor.*, vol. 43, pp. 170-181.
- Lehner, M., 2012. “Observations and Large-Eddy Simulations of the Thermally Driven Cross Basin Circulation in a Small, Closed Basin,” Ph.D. Thesis, University of Utah.
- Liu, K. Y., 1984. “An Investigation of Strong Winds and A Determination of Extreme Wind Speeds of Northwest Taiwan,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 11, pp. 19-27.
- Mellor and Yamada, 1974. “A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers.” *J. Atmos. Sci.*, vol. 31, pp. 1791-1806.
- Mellor and Yamada, 1982. “Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems.” *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 20, pp. 851-875.
- Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research, 2012. “ARW Version 3 Modeling System User’s Guild”.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2019. “Development of an Improved Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer,” *J. Meteor. Soc. Japan*, vol. 87, pp. 895-912.
- Ooyama, K. V., 1990. “A Thermodynamic Foundation for Modeling the Moist Atmosphere,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 47, pp. 2580-2593.
- Pierrehumbert, R. T. and B. Wyman, 1985. “Upstream Effect of Mesoscale Mountains,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 42, no. 10.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008. “A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research.
- Wilson, T. and R. Fovell, 2014. “Improvements in Modeling Persistent Fog,” Conference on Mountain Meteorology, 16th, San Diego.

The Wind Field Study on the West Coast of Taiwan During the Northeast Monsoon Period Using Mesoscale Atmosphere Simulation

Yng-Ru Chen¹ Cheng-Yu Lee^{2*} Yuan-Shiang Tsai³ Jiun-Jih Miao⁴

ABSTRACT

The northeast monsoon accompanies abundant wind resources in the winter of Taiwan. However, the wind field caused by the monsoon varies in different regions due to the complex topography, especially at the lee side of Central Mountain Range. When the wind coming from the northeast reaches the land, the terrain influences the wind field and causes the wind field changes at the lee side of the central mountain. The present study utilized the mesoscale numerical atmospheric simulation to explore the topographical barrier effect in the west region of Taiwan. The simulation results discover that the northeast monsoon is blocked by the northern and northeastern mountainous terrain. It caused the regional atmospheric pressure fluctuated and the pressure fluctuation prompted the regional wind field changed. When the continental anticyclone is approaching Taiwan from the north, the highest wind speed along the western coast of Taiwan occurs near the offshore of Miaoli; When the continental anticyclone covers Taiwan, the wind direction changes from north to the northeast in the northern ocean of Taiwan, and the highest wind speed along the western coast takes place by the offshore of Taichung; After the continental anticyclone passes Taiwan, the wind direction at the eastern and northern ocean of Taiwan turns east and the highest wind speed happens on the northwest coast. The simulation results show that the main reason for the regional wind field change is the atmospheric pressure fluctuation that is caused by the topographical barrier effect.

Keywords: WRF Numerical Simulation Model, Northeast Monsoon, Topographical Barrier Effect.

¹Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University. Postdoctoral fellow.

²Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University. Researcher.

³Department of Maritime Information and Technology, National Kaohsiung University of Science and Technology. Assistant Professor.

⁴Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University. Distinguished Professor.

*Corresponding Author, Phone: +886-(0)6-2757575 #63659,
E-mail: ivanlee552@yahoo.com.tw

Received Date: November 14, 2022

Revised Date: May 05, 2023

Accepted Date: May 18, 2023