

運用 WRF 模擬臺灣中北部地區低能見度及低雲幕現象之個案研究

任亦偉、王信富、陳文情

空軍氣象聯隊

摘要

本研究利用 WRF 數值模式(the Advanced Research WRF, ARW)模擬 2012 年 02 月 28 日出現於臺灣中北部地區之低能見度及低雲幕個案，並探討此低能見度及低雲幕個案對臺灣中北部地區及機場天氣之影響。

分析當時綜觀大氣環境顯示，2 月 27、28 日台灣地區為東北季風天氣型態，2 月 28 日 08 時於臺灣東部外海生成一道鋒面，之後於 20 時持續加深向東移動；分析桃園、中壢(中央大學)、新竹、清泉崗等測站觀測資料顯示，自 2 月 28 日 08 時鋒面自臺灣東部外海生成後，各測站之溫度原先受東北季風影響持續下降，但自中午 11 時起，各測站溫度陸續出現短暫回升情形，幅度約 2-3°C，之後又開始下降，氣壓則呈現升-降-升，而風向則出現北-南-北風向之不連續現象；另依據中壢地區民眾實際拍攝資料顯示，當日下午中壢地區 13 至 14 時曾出現類似滾軸雲(roll cloud)之天氣現象，持續時間約 1~2 小時，因此研判 2 月 28 日自中午 12 時至下午 17 時臺灣中北部地區大氣出現短暫之不連續現象，應由密度流(density current)現象所造成，而中壢地區出現之滾軸雲，研判應為密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象。分析各測站實際觀測能見度及雲幕高資料顯示，密度流於 2 月 28 日中午起移入各測站後，桃園、新竹等海拔高度較低測站(桃園約為 33 公尺，新竹約為 8 公尺)，能見度及雲幕高度無明顯變化，但中壢(中央大學)、清泉崗等海拔高度較高測站(中央大學約為 150 公尺，清泉崗約為 200 公尺)，能見度及雲幕高度皆明顯下降，顯示本次個案密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象自密度流高度一半(約 150 公尺)左右開始往上發展，對於近底層(<100 公尺)之大氣則無明顯影響，此與過去之相關研究結果一致。

分析 WRF 數值模式位溫剖面資料顯示，模擬之密度流其厚度約為 300 公尺，移速約為 20-25m/s，此與本次個案實際測站觀測資料評估之數據近似，分析模式相當位溫剖面資料顯示，2 月 28 日中午 12 時至下午 17 時臺灣中北部地區出現相當位溫不連續現象，研判此應為密度流之空氣秉性與環境不同所造成；分析模式二維風場擾動及擾動動能(TKE)剖面資料顯示，二維風場擾動及擾動動能持續由北往南傳遞，顯示密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象以波動方式傳遞能量形成滾軸雲，持續造成海拔高度較高測站(中壢、清泉崗)之能見度及雲幕高度不佳，由此顯示 WRF 數值模式對於此密度流之個案有不錯之掌握能力。

關鍵字：密度流、滾軸雲、WRF 數值模式、低能見度與低雲幕

一、前言

密度流(density current)為一種發生於大氣邊界層之天氣現象，對於東亞及台灣地區而言，密度流較容易出現於冬春二季，原因在於密度流發生主因之一為近地表有冷空氣逸入於暖空氣下方，而冬春二季之東北季風天氣型態正好為密度流提供冷空氣來源。滾軸雲(roll cloud)常伴隨於密度流生成時，其生成原因主要為當密度流往下游傳遞時，在其前緣之上半部由於 Kelvin-Helmholtz 不穩定機制，導致大氣之邊界層有擾動及不穩定現象，因有雲系生成。本研究利用 WRF 數值模式(the Advanced Research WRF, ARW)模擬 2012 年 02 月 28 日出現於臺灣中北部地區之低能見度及低雲幕個案，並探討此低能見度及低雲幕個案對臺灣中北部地區及機場天氣之影響。

二、研究工具及方法

WRF 數值模式是由美國國家大氣研究中心(National Center of Atmosphere Research, NCAR)及美國國家環境預測中心(National Center of Environment Prediction, NCEP)等氣象單位共同研發之數值模式，為

一完全可壓縮以及非靜力模式，採用 F90 語言編寫。水平方向採用 Arakawa C 網格點，垂直方向則採用地勢追隨座標(σ)，在時間積分方面採用三階或者四階的 Runge-Kutta 演算法。WRF 模式不僅適合進行理想性模擬，亦可應用於真實天氣的個案模擬及探討。本研究將 WRF 設定為四層巢狀網格，水平解析度分別為 27、9、3 及 1 公里，垂直解析度為 45 層，初始場及邊界條件使用 NCEP GFS 全球模式，其水平解析度為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，模式預報時間為 24 小時，相關模式細部設定請參閱表一。

為研究此密度流個案對臺灣中北部地區及機場之影響，針對桃園(RCGM)、新竹(RCPO)、及清泉崗(RCMQ)三機場 101 年 02 月 28 日 08 至 20 時之逐時觀測資料作分析，機場資料由空軍氣象聯隊提供，另從中央大學「大氣邊界層暨空氣污染實驗室」網頁擷取 101 年 02 月 28 日 10 米自動氣象觀測塔資料，各機場相關地理位置及測站海拔高度如圖 1 所示。

三、觀測資料分析

(一) 綜觀環境分析

分析 NCEP GFS $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 網格點資料顯示，101 年 2 月 27 日 12Z 臺灣地區為東北季風天氣形態，2 月 28 日 00Z 時一風場輻合帶於臺灣東部外海生成，此輻合帶於生成後中心氣壓持續下降，於 2 月 28 日 12Z 時形成一鋒面帶向東移動，此時臺灣地區依舊為東北季風天氣型態（圖 2.a-c）。925hPa 風場、溫度場、重力位高度、相對溼度、及輻合輻散場顯示，101 年 2 月 27 日 12Z 時臺灣地區風場以東北向風為主，相對濕度偏高，風場無明顯輻合輻散；101 年 2 月 28 日 00Z 時一風場輻合帶自琉球群島一帶向西南延伸經臺灣地區至南海一帶，臺灣地區附近相對濕度偏高，風場輻合輻散現象較 2 月 27 日 12Z 明顯（圖 3.a-d）。850hPa 風場、溫度場、重力位高度、相對溼度、及輻合輻散場顯示，101 年 2 月 27 日 12Z 時臺灣地區風場以東南向風為主，相對濕度偏高，大陸東南沿海一帶風場輻合較明顯；101 年 2 月 28 日 00Z 時東南風速較 2 月 27 日 12Z 強，且大陸東南沿海一帶風場輻合帶向東移動至臺灣海峽一帶（圖 4.a-d）。500hPa 風場、溫度場、重力位高度、及渦度場顯示，101 年 2 月 27 日 12Z 時臺灣地區位於正渦度為主，101 年 2 月 28 日 00Z 時有一槽線位於華南一帶，向東移動，至 101 年 2 月 28 日 12Z 時槽線通過臺灣地區，臺灣地區由正渦度轉為負渦度（圖 5.a-c）。

(二) 各測站觀測資料分析

圖 6 及圖 7.a-d 分別為桃園機場(RCGM)及新竹機場(RCPO)101 年 02 月 28 日 08 時至 20 時各氣象要素變化，二機場之海拔高度分別為 33 及 8 公尺。圖中顯示，桃園、新竹機場 02 月 28 日晨間風場以北向風為主，能見度約為 2000 至 3000 公尺，雲幕高約 400 至 600 英尺，溫度持續下降，而氣壓持續上升，二場皆有降雨現象；桃園機場約自 1130 時起、新竹機場自 1100 時起天氣開始變化，風場由北向風開始轉為南向風，風速亦較晨間為弱；氣溫原本開始回升，最高至 15°C ，回升幅度達 2°C ，但於 1330 時又開始下降，另相對溼度原開始下降，最低降至 91%，但約於 1310 時則又開始上升；能見度及雲幕高則開始回升，最高分別至 5000 公尺及 1600 英尺，之後桃園、新竹機場分別於 1400 時及 1330 時後風場又轉回北向風，風速亦逐漸增強，能見度及雲幕高亦逐漸下降。分析風場資料顯示，受東北季風天氣系統影響，桃園與新竹機場原以北向風場為主，但自 1100 時起至 1400 時止，風場轉為南向風場，1400 時之後又轉回北向風場；再分析二機場之溫度、相對濕度資料顯示，1100 時前二機場溫度皆持續下降，但自 1100 時至 1400 時，二機場溫度呈現短暫性回升又下降，相對溼度先下降後上升，二者相位為 180 度，1400 時之後溫度及相對濕度則同時下降。依據上述資料顯示，

約 1100 時，臺灣地區由於轉南風，空氣變較為溫暖，因此測站溫度上升，濕度下降，至 1400 時，後方一股冷空氣快速逸入，因此，風場又轉為北風，溫度下降，濕度上升，如此劇烈之冷暖空氣交會造成了大氣邊界層極易出現不穩定帶，研判此不穩定帶即與密度流(density current)現象有關。

圖 8.a-d 為清泉崗機場(RCMQ)101 年 02 月 28 日 08 時至 20 時各氣象要素變化，圖中顯示，清泉崗機場 02 月 28 日晨間風場亦以北向風為主，能見度約為 2000 至 3000 公尺，雲幕高約 200 英尺，而氣壓持續上升，亦有降雨現象；約自 1200 時起，天氣開始變化，風場由北向風開始轉為南向風，風速亦較晨間為弱；氣溫剛開始為回升，最高至 14°C ，回升幅度達 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，但約於 1450 時又下降，而相對溼度則並未如桃園、新竹機場有明顯變化，此為其值得特別討論之處；能見度一開始先回升，最高至 5000 公尺，約於 1300 時開始明顯下降，於 1450 時達最差，僅 100 公尺，雲幕高亦於 1430 時達最差，僅 50 至 100 英尺，於晚間 1800 時雲幕及能見度始緩慢回升。

圖 9 為中央大學 101 年 02 月 28 日 10 米自動氣象觀測塔資料(擷取自中央大學「大氣邊界層暨空氣污染實驗室」網頁)，圖中顯示，晨間風場以北向風場為主，溫度持續下降，而氣壓持續上升，有降雨現象；約自 1130 時起天氣開始變化，風場由北向風開始轉為南向風，風速亦較晨間為弱；氣溫開始回升，最高至 15°C ，回升幅度達 2°C ，另相對溼度原開始下降，最低降至 91%，但約於 1310 時則又開始上升，氣溫原本開始回升，最高至 $14\sim 15^{\circ}\text{C}$ ，回升幅度達 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，但約於 1330 時開始劇烈下降，最低達 $10\sim 11^{\circ}\text{C}$ ，下降幅度達 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，但相對溼度不同於桃園、新竹機場，反而近似於清泉崗機場無明顯變化，約為 98%；之後約於 1400 時及 1330 時後風場又轉回北向風，風速亦逐漸增強。

依相關研究顯示，若大氣近地面層存在逆溫層，則適合密度流存在並會往下游傳遞，圖 10(a-d)分別為 101 年 02 月 27 日 12Z 及 02 月 28 日 00Z 板橋(46692)、馬公(46734)之探空資料，圖中顯示，101 年 02 月 27 日 12Z 時板橋測站 1.5km 以下無逆溫層，約 1.5 至 2.0km 存在一逆溫層，101 年 02 月 28 日 00Z 時板橋測站從地面至 3.0km 皆為逆溫層，顯示逆溫層有加厚趨勢；馬公測站則顯示逆溫層皆存在於 0.5 至 1.5km 之高度，依以上資料分析顯示，中北部地區近地面層皆存在一逆溫層，適合密度流存在並會往下游傳遞。

依據上述各氣象要素分析，此次密度流個案抵達新竹、桃園、清泉崗機場時間分別約為 1330、1350、及 1430 時，依此速度推算，此次

密度流個案約以 20~25m/s 之速度朝東南東方向移動。

四、數值模式模擬結果

(一) 模式模擬綜觀環境分析

圖 11(a-d)為模式模擬之 2km 以下位溫(θ)及風場垂直剖面圖，模式網格解析度為 1km，其中垂直方向風場(w)放大 10 倍，圖中以各測站之經緯度為參考點，切南北方向剖面，圖左側為南方，圖右側為北方，時間則選擇密度流大約抵達各測站時間，新竹機場(RCPO)約為 101 年 02 月 28 日 1330 時，桃園機場(RCGM)及中壢地區約為 1350 時，清泉崗機場(RCMQ)則約為 1430 時。圖中顯示，模式模擬當密度流抵達新竹、桃園機場及中壢地區時，當地位溫約為 288 至 290K，密度流抵達清泉崗機場時，當地位溫約為 290 至 292K，且由新竹、桃園機場及中壢地區之垂直剖面圖中(圖 10a-c)，發現模式已模擬出密度流現象之部份特徵，包括密度流前方之頭部(head)有突出現象，經分析模擬之密度流其厚度約為 300 公尺，移速約為 20-25m/s，此與本次個案實際測站觀測資料評估之數據近似。

圖 12(a-d)為模式模擬之 2km 以下相當位溫(θ_e)及風場時間序列圖，模式網格解析度為 1km，其中垂直方向風場(w)放大 10 倍，時間自 101 年 02 月 28 日 00Z 至 12Z，各圖以各測站之經緯度為參考點，其中(a)參考點為桃園機場(RCGM)(b)參考點為中壢(c)參考點為新竹機場(RCPO)(d)參考點為清泉崗機場(RCMQ)。圖中顯示，自各測站實際天氣開始變化時間(桃園機場、中壢約自 1130 時，新竹機場約自 1100 時，清泉崗機場約自 1200 時)起，相當位溫數值持續增加，顯示大氣中水氣含量增加，此與各機場所觀測到之溫度回升現象一致，而待密度流通過後，另一波較乾冷空氣抵達各測站時，各機場溫度及氣壓持續上升，模式模擬之相當位溫變化亦與觀測相符。

(二) 模式模擬 TKE 資料分析

密度流特徵之一為大氣邊界層擾動動能(disturbance kinetic energy, TKE)將明顯增加，原因為冷空氣逸入暖空氣下方，舉昇冷空氣，大氣邊界層出現垂直運動，因此密度流出現時，亦將伴隨大氣垂直速度震盪現象。圖 13(a-d)為模式模擬之 2km 以下擾動動能(J/kg)及風場垂直剖面圖，模式網格解析度為 1km，其中垂直方向風場(w)放大 10 倍，時間自 101 年 02 月 28 日 00Z 至 12Z，各圖以各測站之經緯度為參考點，其中(a)參考點為桃園機場(RCGM)(b)參考點為中壢(c)參考點為新竹機場(RCPO)(d)參考點為清泉崗機場(RCMQ)。圖中顯示，密度流抵達各測站之時間前後，垂直速度風場及擾動動能皆出現震盪現象，顯示密度流所引發之大氣

邊界層不穩定或擾動現象以波動方式傳遞能量形成滾軸雲，持續造成海拔高度較高測站(中壢、清泉崗)之能見度及雲幕高度不佳，由此顯示 WRF 數值模式對於此密度流之個案有不錯之掌握能力。

五、結論

本研究利用 WRF 數值模式(the Advanced Research WRF, ARW)模擬 2012 年 02 月 28 日出現於臺灣中北部地區之低能見度及低雲幕個案，並探討此低能見度及低雲幕個案對臺灣中北部地區及機場天氣之影響。

分析當時綜觀大氣環境顯示，2 月 27、28 日台灣地區為東北季風天氣型態，2 月 28 日 08 時於臺灣東部外海生成一道鋒面，之後於 20 時持續加深向東移動；分析桃園、中壢(中央大學)、新竹、清泉崗等測站觀測資料顯示，自 2 月 28 日 08 時鋒面自臺灣東部外海生成後，各測站之溫度原先受東北季風影響持續下降，但自中午 11 時起，各測站溫度陸續出現短暫回升情形，幅度約 2-3°C，之後又開始下降，氣壓則呈現升-降-升，而風向則出現北-南-北風向之不連續現象；另依據中壢地區民眾實際拍攝資料顯示，當日下午中壢地區 13 至 14 時曾出現類似滾軸雲(roll cloud)之天氣現象，持續時間約 1~2 小時，因此研判 2 月 28 日自中午 12 時至下午 17 時臺灣中北部地區大氣出現短暫之不連續現象，應由密度流(density current)現象所造成，而中壢地區出現之滾軸雲，研判應為密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象。分析各測站實際觀測能見度及雲幕高資料顯示，密度流於 2 月 28 日中午起移入各測站後，桃園、新竹等海拔高度較低測站(桃園約為 33 公尺，新竹約為 8 公尺)，能見度及雲幕高度無明顯變化，但中壢(中央大學)、清泉崗等海拔高度較高測站(中央大學約為 150 公尺，清泉崗約為 200 公尺)，能見度及雲幕高度皆明顯下降，顯示本次個案密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象自密度流高度一半(約 150 公尺)左右開始往上發展，對於近底層(<100 公尺)之大氣則無明顯影響，此與過去之相關研究結果一致。

分析 WRF 數值模式位溫剖面資料顯示，模擬之密度流其厚度約為 300 公尺，移速約為 20-25m/s，此與本次個案實際測站觀測資料評估之數據近似，分析模式相當位溫剖面資料顯示，2 月 28 日中午 12 時至下午 17 時臺灣中北部地區出現相當位溫不連續現象，研判此應為密度流之空氣秉性與環境不同所造成；分析模式二維風場擾動及擾動動能(TKE)剖面資料顯示，二維風場擾動及擾動動能持續由北往南傳遞，顯示密度流所引發之大氣邊界層不穩定或擾動現象以波動方式傳遞能量形成滾軸雲，持續造成海拔高度較高測站(中壢、清泉崗)之能見度及雲幕高度不佳，由此顯示 WRF 數值模式對於此密度流之個案有不錯之掌握能力。

參考文獻

- Burk, S. D., and W. T. Thompson, 1989: A vertically nested regional numerical weather prediction model with second-order closure physics. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2305–2324.
- Christie, D.R., K.J. Muirhead and A.L. Hales, 1979: Intrusive density flows in the lower troposphere: A source of atmospheric solitons. *J. Geophys. Res.*, **84**, 4959–4970.
- Crook, N. A., 1988: Trapping of low-level internal gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1533–1541.
- Droegemeier, K. K., and R. B. Wilhelmson, 1985: Three-dimensional numerical modeling of convection produced by interacting thunderstorm outflows. Part I: Control simulation and low-level moisture variations. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2381–2403.
- Haase, S. P., and R.K. Smith, 1989a: The numerical simulation of atmospheric gravity currents. Part I: Neutrally-stable environments. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, **46**, 1–33.
- _____, 1989b: The numerical simulation of atmospheric gravity currents. Part II: Environments with stable layers. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, **46**, 35–51.
- Jin, Y., S. E. Koch, Y.-L. Lin, F. M. Ralph, and C. Chen, 1996: Numerical simulations of an observed gravity current and gravity waves in an environment characterized by complex stratification and shear. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 3570–3588.
- Reisner, J., R.J. Rasmussen, and R.T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1071–1107.
- Zhang, D.-L., and R. A. Anthes, 1982: A high-resolution model of the planetary boundary layer—sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1594 – 1609.

表一 相關模式細部設定

WRF模式設定				
	D01	D02	D03	D04
水平解析度(km)	27	9	3	1
水平網格點	300x200	196x196	208x226	208x226
垂直解析度	45	45	45	45
大氣垂直穩定度	靜力	非靜力	非靜力	非靜力
微物理	WSM5	WSM5	WSM5	WSM5
邊界層	MYJ_TKE	MYJ_TKE	MYJ_TKE	MYJ_TKE
積雲參數法	KF	KF	KF	KF



圖 1. 各機場相關地理位置及測站海拔高度。

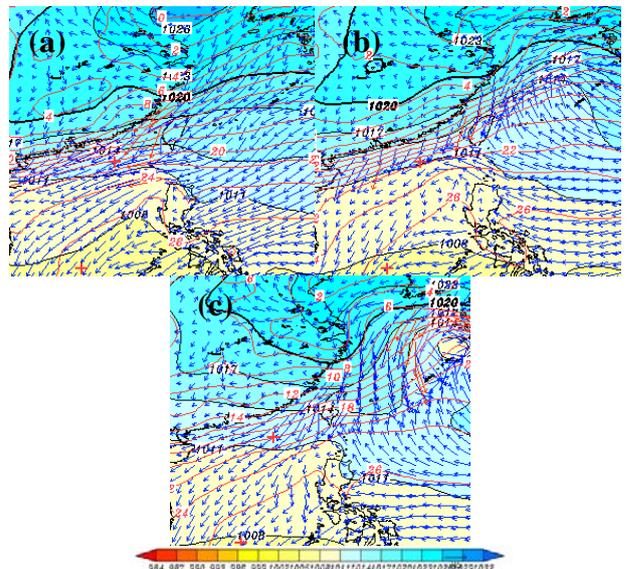


圖 2. NCEP GFS 地面網格點資料，其中著色區及黑實線為海平面氣壓場(hPa)，紅實線為溫度場(°C)，箭頭為風標，時間分別為(a)2月27日1200UTC(b)2月28日0000UTC(c)2月28日1200UTC。

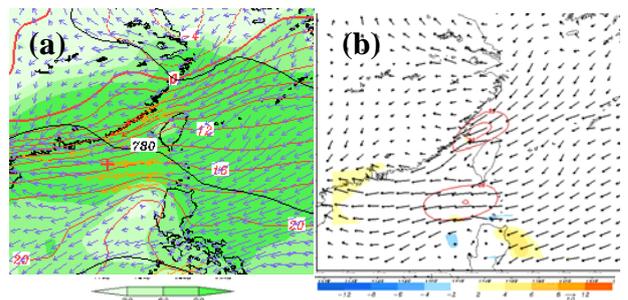


圖 3. 925hPa 風場、溫度場、相對溼度、及輻合輻散場，其中左圖著色區為相對濕度、紅實線為溫度場、黑實線為重力位高度、箭頭為風標，右圖著色區為輻合輻散場，暖色系為輻合，冷色系為輻散，(a)與(b)時間為101年2月27日12Z時，(c)與(d)時間為101年2月28日00Z時。

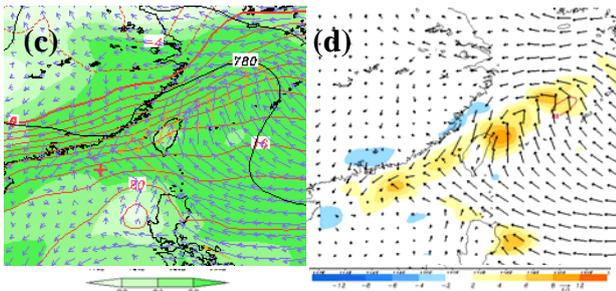


圖 3. (續)

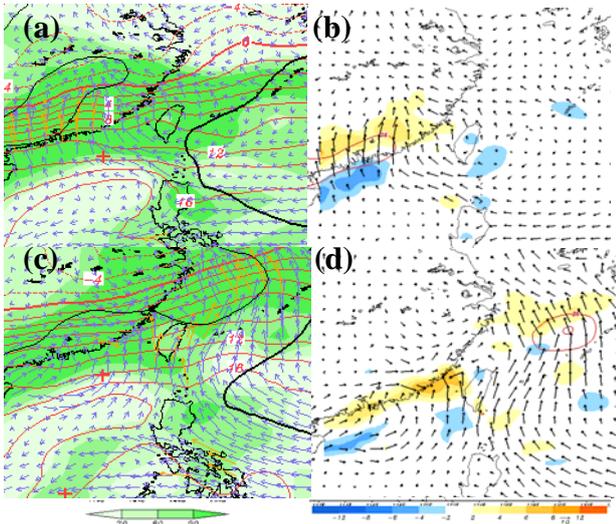


圖 4. 同圖 3，但為 850hPa。

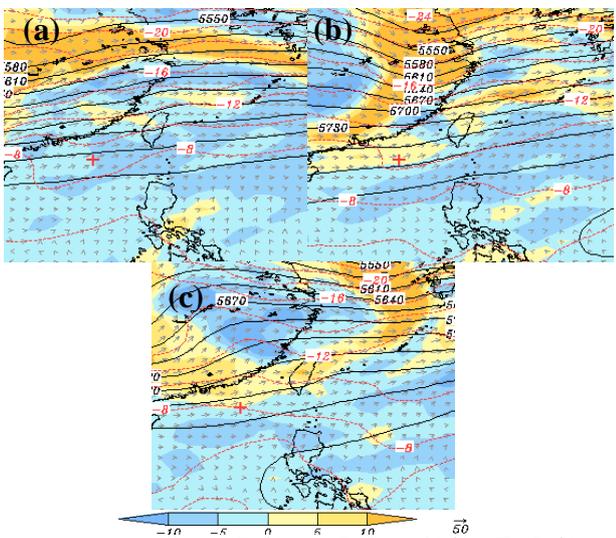


圖 5. 500hPa 風場、溫度場、重力位高度、及渦度場，其中著色區為相對渦度，暖色系為正渦度，冷色系為負渦度、紅實線為溫度場、黑實線為重力位高度、箭頭為風標，右圖著色區為輻合輻散場，時間分別為(a)101 年 2 月 27 日 12Z 時(b)101 年 2 月 28 日 00Z 時(c)101 年 2 月 28 日 12Z 時。

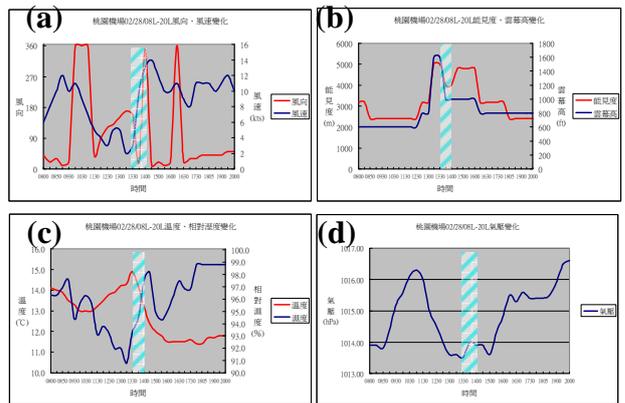


圖 6. 桃園機場(RCGM)101 年 02 月 28 日 08 時至 20 時各氣象要素變化，其中(a)紅線表示風向(°)、藍線表示風速(kts)(b)紅線表示能見度(m)、藍線表示雲幕高(ft)(c)紅線表示溫度(°C)、藍線表示相對溼度(%) (d)藍線表示氣壓(hPa)。圖中藍色區段時間為 1340 至 1400 時，研判約為密度流抵達該地區時間。

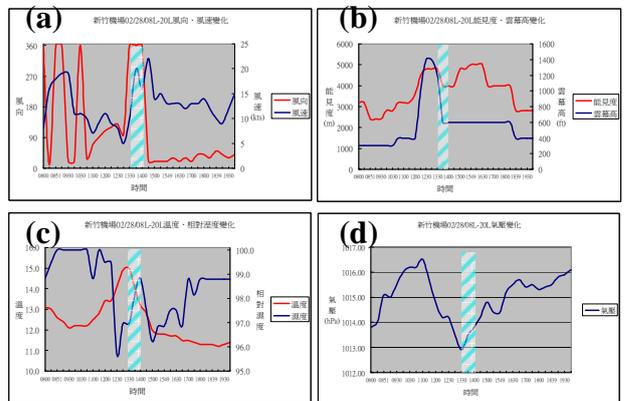


圖 7. 同圖 6，但為新竹機場(RCPO)資料，圖中藍色區段時間為 1320 至 1340 時，研判約為密度流抵達該地區時間。

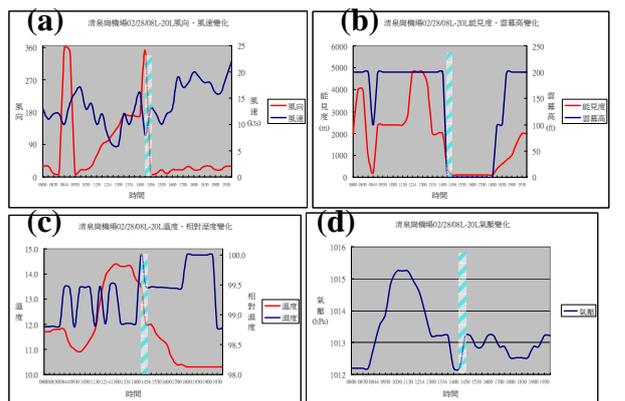


圖 8. 同圖 6，但為清泉崗機場(RCMQ)資料，圖中藍色區段時間為 1420 至 1440 時，研判為密度流通過該地區時間。

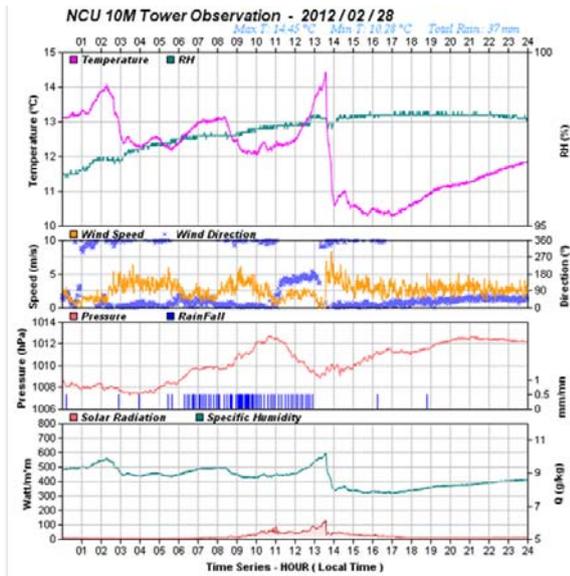


圖 9. 中央大學 101 年 02 月 28 日 10 米自動氣象觀測塔資料(擷取自中央大學「大氣邊界層暨空氣污染實驗室」網頁)。

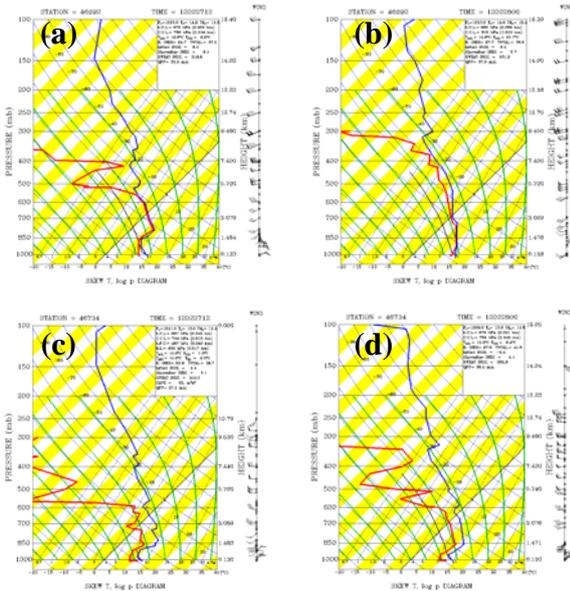


圖 10. 板橋(46692)、馬公(46734)之探空資料，其中 (a)、(c)為 101 年 02 月 27 日 12Z，(b)、(d)為 02 月 28 日 00Z。

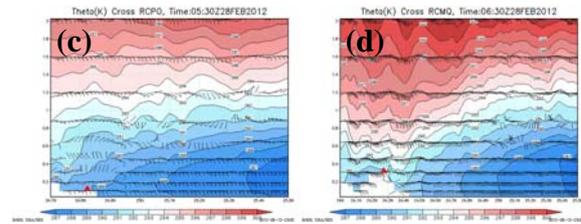
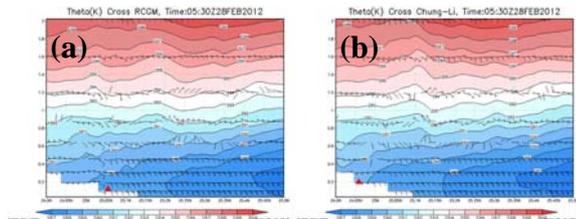


圖 11. 模式模擬之 2km 以下位溫(θ)及風場垂直剖面圖，模式網格解析度為 1km，其中垂直方向風場(w)放大 10 倍，各圖以各測站之經緯度為參考點，切南北方向剖面，圖左側為南方，圖右側為北方，時間則選擇密度流大約抵達各測站時間，各圖中紅色三角形即代表各參考點位置，其中(a)參考點為桃園機場(RCGM)、時間為 1350 時(b)參考點為中壢、時間為 1350 時(c)參考點為新竹機場(RCPO)、時間為 1330 時(d)參考點為清泉崗機場(RCMQ)、時間為 1430 時。

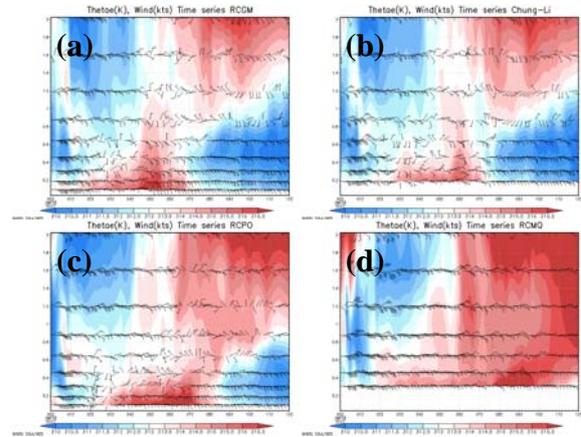


圖 12. 模式模擬之 2km 以下相當位溫(θ)及風場時間序列圖，模式網格解析度為 1km，其中垂直方向風場(w)放大 10 倍，時間自 101 年 02 月 28 日 00Z 至 12Z，各圖以各測站之經緯度為參考點，其中(a)參考點為桃園機場(RCGM)(b)參考點為中壢(c)參考點為新竹機場(RCPO)(d)參考點為清泉崗機場(RCMQ)。

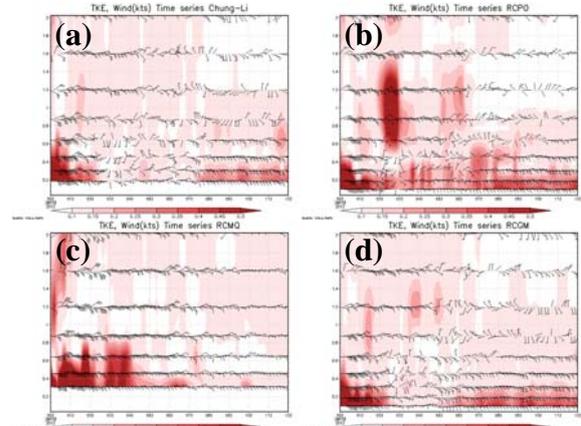


圖 13. 同圖 12，但為模式模擬之 2km 以下擾動動能(TKE)及風場時間序列圖。