

龍王颱風(2005)侵台期間降雨之數值模擬研究

殷鴻群¹ 汪建良² 何台華³

¹空軍氣象聯隊

²國防大學理工學院環境資訊及工程學系

³龍華科技大學通識教育中心

摘要

本研究使用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting model)模擬龍王颱風(2005)侵台期間之降雨,與中央氣象局所屬測站及軍用機場之降雨資料進行統計分析,以評估 WRF 模式對於颱風之降雨預報能力,瞭解如何有效運用此一模式,提供國軍各單位所需之氣象預報。

在本研究中,使用公正預兆得分(ETS, Equitable Threat Score)及相關係數,針對不同微物理及積雲參數化組合,進行龍王颱風侵台期間 25 小時累積雨量模擬校驗。結果顯示,使用 Ferrier 微物理參數化及 Betts-Miller-Janjic 積雲參數化之組合,模式對累積降雨(≥ 50 mm)模擬有最佳的表現,ETS 約為 0.3-0.4。而在搭配 Grell-Devenyi 積雲參數化的組合下,降雨模擬表現不佳,ETS 約為 0.2-0.3,主要因素在於路徑預報不正確。而在模擬與觀測累積雨量之相關係數檢驗上,則以 WSM 5-class 微物理參數化及 Betts-Miller-Janjic 積雲參數化之組合的 0.70 為最佳。

以時雨量及雷達回波的時序變化,檢驗模式對於特定機場降雨模擬之結果,顯示 WRF 模式對局部地區降雨,在定性上具備預報應用的參考價值。例如,針對颱風過山後,氣流過山影響台灣西部局部地區降雨之特性,WRF 模式可以定性地模擬。但定量上,對於雨量大小及降雨時機的預報應用,則有待進一步的研究。

關鍵字:龍王颱風、WRF 模式、降雨模擬、ETS、Bias

一、前言

國軍軍用機場或陣地遍佈全台,在颱風侵襲前,國軍氣象作業單位必須預報各地風力雨量等資訊,以提供於各地指揮官,在維持戰力的前提之下,進行必要的防颱準備措施,以避免國軍人員及裝備安全受到威脅。因台灣地形屬南北狹長,東西寬度較窄,其間又有高聳的中央山脈阻隔東西,如此複雜地形因素交互影響下,常造成颱風預報作業的困難。

本研究使用 WRF 模式(Weather Research and Forecasting model)進行龍王颱風之降雨,蒐集中央氣象局所屬測站及軍用機場之降雨資料進行統計分析。藉由模擬測試和分析結果,評估 WRF 模式對於颱風之降雨預報能力,瞭解如何有效運用此一模式,提供國軍各單位所需之氣象預報,同時也能瞭解到 WRF 模式降雨預報之限制。

二、研究方法

本研究,首先蒐集中央氣象局(Central Weather Bureau, 簡稱 CWB)自動觀測站以及空軍機場,每小時的雨量資料納入分析,先進行龍王颱風侵台期間實際雨量分佈統計。然後,將 WRF 模式輸出之降雨與之比較,評估模式結果在降雨分佈及雨量與觀測之一致性。再利用 Schaefer (1990)提出的 ETS 及 Bias,進行雨量值校驗,且計算模擬與觀測累積雨量之相關係數,進一步的評估 WRF 模式的預報能力及分析其限

制。

ETS 是在計算除了模式與觀測事件皆無發生外且不是隨機猜中的情況下,模式正確預測事件發生的機率,ETS 分數愈高代表模式事件預報愈準確,其定義如(1)式所示,算式中之相關參數如圖 1 所示。

$$ETS = \frac{H - R}{F + O - H - R} \quad (1)$$

其中 H 代表預報與觀測皆有事件發生的次數, F 為預測事件發生的次數($F=H-Z$), O 為觀測事件發生的次數($O=H-Y$), N 為 H 、 Y 、 Z 、 W 之和, R 為隨機可正確預測事件發生的次數($R=FO/N$)。必須注意的是,當所有預測皆指出事件將發生時, F 與 N 相等,而 O 與 H 相等,則隨機可正確預測事件發生的次數(R)將等於 O ,使得 ETS 等於 0。此即為 ETS 排除預報為隨機猜中之特性。以本研究之應用而言,當模式預報所有地區皆為降雨事件時,其 ETS 必為 0,表示模式對於預報正確與否並無貢獻,亦即沒有預報技巧。

Bias 是模式預測事件發生次數(F)與觀測事件發生次數(O)之比值,其定義如(2)式所示。

$$Bias = \frac{F}{O} \quad (2)$$

當 Bias 大於 1 時,代表模式高估事件次數,小於 1

時，則代表模式低估事件次數。綜合 ETS 與 Bias 的結果，並分析觀測與模擬之雨量分佈相關性，以及與氣象雷達觀測降水特性相互比較，來判斷 WRF 模式降雨模擬的正確性。

本研究在實驗設計方面，採三重巢狀網格 (Nested Grid) 架構進行數值模擬，水平網格解析度分別為 45 km (d01 表示 domain 1)、15 km (d02 表示 domain 2) 及 5 km (d03 表示 domain 3)。所使用的初始場資料，為 NCEP (美國國家環境預報中心, National Center for Environmental Prediction) 每 6 小時的 FNL 全球分析場資料 (1°×1° 解析度)。搭配不同物理參數化組合 (如表 1)，進行敏感度測試，以評估何種物理參數化組合，能得到最佳降雨模擬結果。

三、物理參數化敏感度分析

使用 ETS、Bias、及相關係數等，評估物理參數化組合的累積降雨模擬。另外，為評估模式對於伴隨颱風之對流雨帶等結構模擬之優劣，模式輸出之水相量場，將轉換為最大回波圖，再與 CWB 雷達回波觀測比較。

(一)、降雨事件模擬之分析

本研究中，數值模擬之起始時間為 2005 年 9 月 30 日 00 UTC，而所謂的「颱風侵台期間」，是以 CWB 所觀測之雷達回波資料為依據，自颱風雨帶影響台灣陸地開始，到台灣本島完全脫離颱風雨帶降雨影響為止。就龍王颱風而言，侵台期間是自 2005 年 10 月 1 日 13 UTC 至 2 日 13 UTC 止，共計 25 小時。在此期間內，各測站的累積雨量即是用來與模式輸出降雨比較的基準，進行 ETS 及 Bias 計算。ETS 的高低，是用來檢驗模式正確預報降雨發生的機率；而 Bias 是用來檢驗模式降雨預報次數是否有高估或低估現象。綜合 ETS 與 Bias 的結果，進而評估各實驗組在降雨預報上的表現。

為進行 ETS 與 Bias 的計算，必須先定義降雨事件及用以比較的觀測點。本研究設定 16 種降雨門檻值，分別為 0.3、2.5、5、10、15、25、35、50、70、80、90、100、110、120、130、140 mm。以累積雨量大於或等於某一門檻值，作為降雨事件成立的標準，用來評估模式對各個門檻值降雨量的預報能力。而全台灣本島區域內，用以與模式輸出雨量比較的觀測點有 384 個，包含 CWB 之自動雨量觀測站及空軍機場。用以與這些觀測點資料比較者，是取自最接近觀測點的模式 d03 格點資料。因為模式輸出格點資料之水平空間解析度約為 2.5 km，所以在未進行客觀分析的情形下，以最接近之格點資料與觀測點比較，是可以接受的處理方式。

各實驗組的 ETS 和 Bias，相對於各門檻值的分

佈如圖 2 及圖 3 所示。當降雨門檻設在 0.3~5 mm 間 (圖 2)，各實驗組 ETS 是 0，Bias 則稍大於 1.0。由第 2 節 ETS 的介紹中得知，此為 ETS 排除預報為隨機猜中之特性。亦即，當模式預報所有地區皆為降雨事件時，其 ETS 必為 0。這表示模式對於預報正確與否並無貢獻，亦即沒有預報技巧。但由 Bias 接近於 1.0 看來，模式對於降雨事件是略為高估，並非預報不正確。當降雨門檻設在 0.3~5 mm 間 (圖 2)，各實驗組 ETS 是 0，Bias 則稍大於 1.0。

當降雨門檻提高至 35~50 mm 間 (圖 2)，YWB、YFK、YFB 及 YFG 的 ETS 介於 0.2~0.3 之間，尤其是 YFB 在降雨門檻 50 mm 時，ETS 高於 0.3 以上。另外，YWK 在降雨門檻 35 mm 的 ETS，是介於 0.1~0.2 之間。但在降雨門檻提高至 50 mm 時，ETS 是介於 0.2~0.3 之間。而 YWG 在降雨門檻 35~50 mm 間，ETS 介於 0.1~0.2 之間，較其它實驗組為小。由各實驗組 Bias 分析，隨著降雨門檻調高到 50 mm，除了 YWG 保持 Bias 接近於 1.0 之外，其餘各實驗組之 Bias 均逐漸增加至 1.5，亦即高估降雨事件。

當降雨門檻提高至 100 mm 之後，ETS 及 Bias 分析中 (圖 3)，清楚發現 YWB、YFK 和 YFB 的 ETS 為 0.3~0.4 之間。其中以 YWB 和 YFK 的 ETS 最接近 0.4。不過 YWB 和 YFK 的 Bias 是高於 1.5；而 YFB 的 Bias，則是介於 1.0~1.5。另 YWK 及 YWG 的 ETS 介於 0.2~0.3 之間；YWK 的 Bias 是高於 1.5，而 YWG 的 Bias 則是低於 1.0。YFG 的 ETS 介於 0.1~0.2 之間，且在降雨門檻提高為 70 mm 之後，其 ETS 有愈來愈低趨勢，且 Bias 是小於 1.0。

綜合 ETS 和 Bias 分析，在模擬累積降雨量的物理參數化組合中，Ferrier 微物理法比 WSM 5-class 微物理法來的好；Betts-Miller-Janjic 積雲參數化比 Kain-Fritsch 及 Grell-Devenyi 積雲參數化來的好。而使用 Ferrier 微物理法搭配 Betts-Miller-Janjic 積雲參數化組合，模式在不同降雨門檻值均有較高之 ETS，且 Bias 較接近於 1.0。而在搭配 Grell-Devenyi 積雲參數化中，模式模擬累積降雨量，在不同的降雨門檻值中，ETS 較低，且 Bias 是低於 1.0。這指出，就本研究之龍王颱風個案而言，使用 Ferrier 微物理法搭配 Betts-Miller-Janjic 積雲參數化組合，會得到最佳模式模擬累積降雨量結果。另搭配 Grell-Devenyi 積雲參數化的設計組合，將導致模式模擬累積降雨量結果不佳，且會有低估降雨的情形。主要原因在於使用 Grell-Devenyi 積雲參數化之實驗組所模擬的路徑，較最佳路徑偏南 (圖略)，以致於明顯地低估降雨事件。

比較各組模擬與實際累積降雨量的相關係數 (表 2)，以 YWB 的相關係數為最高，達 0.7；其次為 YFK 及 YFB，相關係數為 0.65；YWG 及 YFG 則最低，分別為 0.54 及 0.46。由上述分析得知，使用 Grell-Devenyi 積雲參數化的實驗組，降雨表現不

佳。

(二)、軍用機場降雨分析

防衛作戰中，不論在任何危險天氣影響下，仍應掌握有利於我方執行戰備警戒之時機。而模式預報結果經由氣象人員判讀分析後，可讓指揮官瞭解天氣可能之演變，以便調整兵力部署，迅速恢復戰備狀態。以龍王颱風個案為例，從清泉崗機場時雨量分析(圖略)，在實際觀測與模擬的資料中，該地區都出現同樣無顯著降水的時段。由模擬的雷達回波圖中(圖4)，清楚的在中央山脈西側清泉崗機場附近，出現弱降水回波的區域，與該地區較小之降雨一致。同時也與實際雷達回波(圖5)出現之降水空窗區域相仿。若能適當運用此一模擬結果作為預報之依據，則當地指揮官便可有效掌握恢復戰備的時機。以下，進一步地利用模式資料，分析清泉崗機場上空出現降水空窗的可能原因。

藉由分析模擬的垂直風速之垂直剖面(圖略)，清楚的看到，當颱風中心過山後，中央山脈西側出現顯著的下沉氣流，導致此一時間內不易有對流發展。另由氣塊軌跡圖分析(圖6)，氣流是從台灣東南外海北上，在進入陸地後橫越中央山脈。從AA'剖面(圖7)分析發現，當氣流進入陸地後，每條氣塊軌跡線均沿著地形移動、爬升及下沉。從圖6中CC'剖面上，相當位溫於積分48至52小時的變化(圖略)，中央山脈東側底層等位溫線隨著時間沿地形抬升。對照圖6中BB'剖面的軌跡圖分析(圖8)，也可發現在山脈東側，各氣塊軌跡是沿著地形抬升，並於西側下沉。另於AA'方向剖面上，也可以看到，在積分51至52小時間，其位溫(圖9)在山脈東側是向上增加，而等相當位溫線(圖10)則平行地形。這表示在山脈東側，氣流約為濕絕熱上升。而在山脈西側，可看到等位溫線(圖9)及等相當位溫線(圖10)均沿著地形下降，表示氣流約為乾絕熱下沉。此一越山氣流使得水氣的分佈，在山脈西側比東側乾燥(圖9)，且西側水氣隨時間減少。由此分析中可推論，氣流沿著地形抬升及下沉，導致水氣分佈出現東西方向的差異，使得山脈西側對流不易發展，可用來解釋清泉崗機場出現降水空窗的現象。

四、分析與討論

使用公正預兆得分(ETS)針對不同物理參數組合進行25小時累積雨量模擬校驗。使用Ferrier微物理參數化及Betts-Miller-Janjic積雲參數化之組合，模式對累積降雨(≥ 50 mm)模擬有最佳的表現，ETS約為0.3~0.4。而在搭配Grell-Devenyi積雲參數化的組合下，降雨模擬表現不佳，ETS約為0.2~0.3，主要因素在於路徑預報不正確。模擬與觀測累積雨量之相關係數檢驗上，則以WSM 5-class微物理法及Betts-Miller-Janjic積雲參數化之組合的0.70為最佳。當然，在此必須強調，本研究之結果僅是針對龍王颱風個案，未來必須再增加個案，

才能有更進一步的結論。

以時雨量及雷達回波的時序變化，檢驗模式對於特定機場降雨模擬之結果，WRF模式對局部地區降雨，在定性上具備預報的潛力，但定量上有必要於未來的研究中加以改進。針對氣流過山影響局部地區降雨之特性，WRF模式是可以定性地模擬。雖模式模擬颱風強度與觀測有所落差，但仍不影響累積雨量分佈特性，顯示颱風強度並不一定會直接影響降水多寡，而是與移動路徑、地形交互作用等較為相關。

另外，本研究模擬的颱風強度，只達中度颱風標準，與實際有落差。在未來研究中，須以不同的模擬策略進行研究，如資料同化等方式，使模擬的颱風強度更接近於實際狀況。然而，即便能使模式颱風增強，是否就代表路徑及降雨模擬可一併得到好的模擬，仍須做更多的測試分析，才能加以論證。而從不同方式的模擬分析過程，協助我們更能深入了解颱風侵台時，台灣地區發生的降雨強度和時空分佈，也能提昇颱風侵台降雨預報能力，以及降低颱風所帶來的災害。

將各項氣象資料整合運用於定量降水預報，是當前防災的重要議題之一。Vasiloff et al. (2007)建議將衛星、雷達遙測資料，與數值預報模式整合，以進一步提升定量降水預報準確性。由於國軍已規劃建構偏極化雷達，如於未來能結合中央氣象局和民航局現有雷達站，建構高密度雷達觀測網，將其資料應用於數值模式中，透過縝密的研究分析及評估，進一步地提升台灣地區定量降水預報的準確率，是國軍氣象作業單位未來精進颱風預報的方向之一。

誌謝

本研究在國科會研究計畫編號NSC95-2625-Z-262-001及NSC96-2111-M-262-001支持下完成。感謝空軍航空技術學院魏志憲在七股雷達資料處理上的協助。

參考文獻

- 簡芳菁、洪景山、張文錦、周仲島、林沛練、林得恩、劉素屏、繆璿如、陳致穎，2006：WRF模式之敏感度測試，第二部分：定量降水預報校驗，大氣科學，第34期，第3卷，261-276。
- Schaefer, J. T., 1990: The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill, *Weather and Forecasting*, Vol. 5, No. 4, 570-575.
- Vasiloff, S. V., Seo, D. J., Howard, K. W., Zhang, J., Kitzmiller, D. H., Mullusky, M. G., Krajewski, W. F., Brandes, E. A., Rabin, R. M., Berkowitz, D. S., Brooks, H. E., McGinley, J. A., Kuligowski, R. J., and Brown, B. G., 2007: Improving QPE and Very Short Term QPF, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 88, No. 12, 1899-1911.

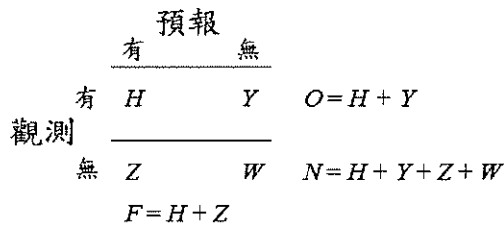


圖 1. ETS 相關參數示意圖，修訂自 Schaefer (1990)及簡等人(2006)。

表 1 物理參數化組合表

參數化 組別	邊界層參數化	微物理參數化	積雲參數化
YWK	YSU	WSM 5-class	Kain-Fristsch
YWB	YSU	WSM 5-class	Betts-Miller-Janjic
YWG	YSU	WSM 5-class	Grell-Devenyi
YFK	YSU	Ferrier	Kain-Fristsch
YFB	YSU	Ferrier	Betts-Miller-Janjic
YFG	YSU	Ferrier	Grell-Devenyi

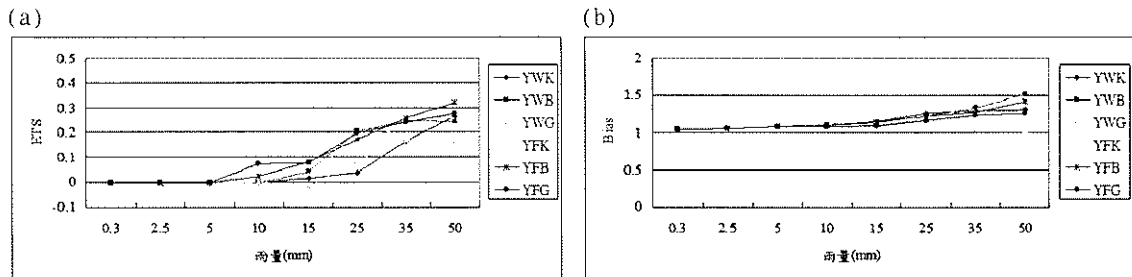


圖 2. 各物理參數化組合在不同降雨門檻(≤ 50 mm)的(a)ETS及(b)Bias。

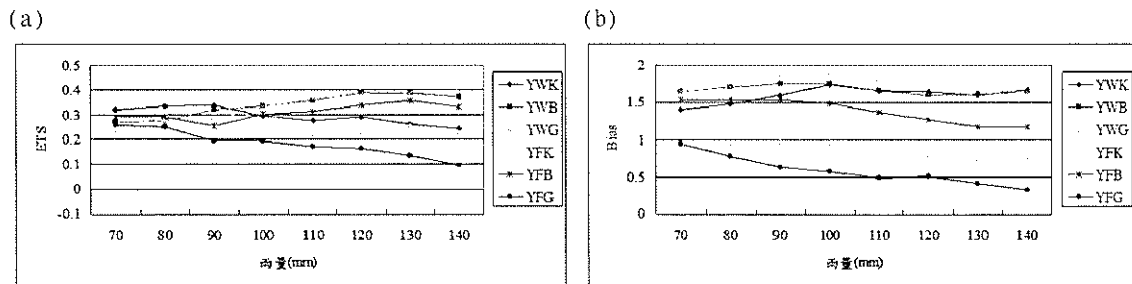


圖 3. 各物理參數化組合在不同降雨門檻(≥ 70 mm)的(a)ETS及(b)Bias。

表 2. 各物理參數化組合 d03 模擬累積雨量與實際累積雨量之相關係數。

物理參數化組別	YWK	YWB	YWG	YFK	YFB	YFG
相關係數	0.58	0.70	0.54	0.65	0.65	0.46

YWB_d03 04UTC02OCT2005 MAX-REFLECTIVITY (dBZ)

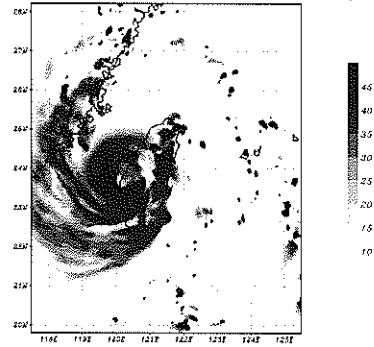


圖 4. 2005 年 2 月 04 UTC YWB d03 模擬之最大雷達回波圖，灰階為雷達回波 dBZ 值。

2005 OCT 02 03:58UTC RCCC 0.5° PPI

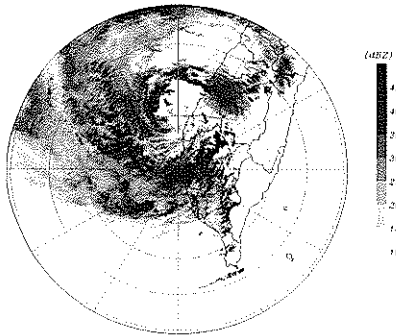


圖 5. 2005 年 10 月 2 日 0358 UTC 中央氣象局七股雷達站 PPI 雷達回波圖，灰階為雷達回波 dBZ 值。

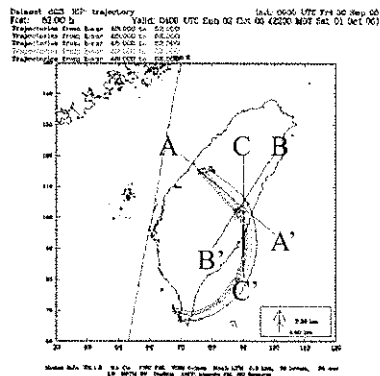


圖 6. YWB d03 模式積分第 52 小時為基準，於中部地區取 5 個高度為 100 m 氣塊，以每 10 分鐘輸出之資料，進行 5 小時之氣塊逆軌跡分析。

Dataset: ywb 5DP trajectory Init: 05:00 UTC Fri 30 Sep 05
From: 02:00 h Value: 0400 UTC Sun 02 Oct 05 (2200 MDT Sat 01 Oct 05)

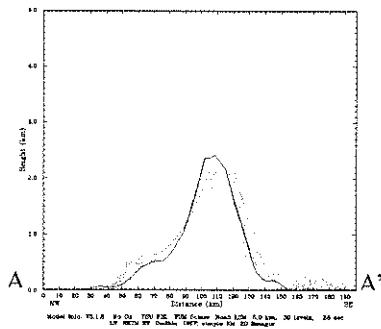


圖 7. 以圖 6 中 AA' 為基準，做積分第 48 至 52 小時之氣塊逆軌跡剖面圖（各氣塊之逆軌跡投影至 AA' 橫切面）。

Dataset: d03 RPP trajectory Init: 00:00 UTC Fri 30 Sep 05
From: 02:00 h Value: 0400 UTC Sun 02 Oct 05 (2200 MDT Sat 01 Oct 05)

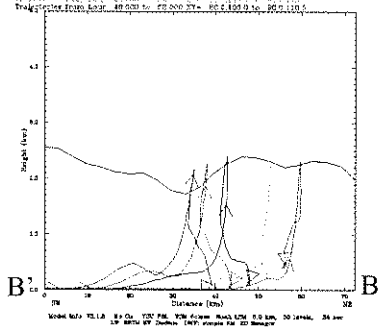


圖 8. 以圖 6 中 BB' 為基準，做積分第 48 至 52 小時之氣塊逆軌跡剖面圖（各氣塊之逆軌跡投影至 BB' 橫切面）。

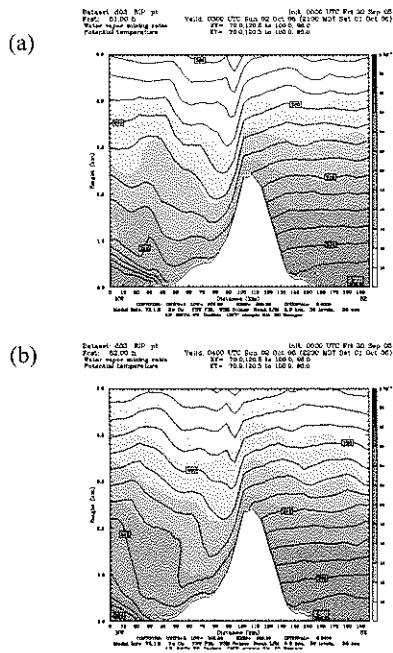


圖 9. 以圖 6 中 AA' 為基準，取 YWB d03 模擬積分(a) 51 及(b) 52 小時位溫（等值線間距 2 K）及水氣混合比（灰階，單位 k/kg）剖面圖。

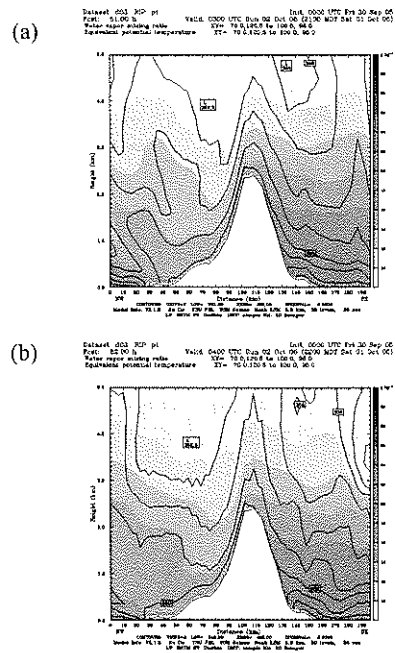


圖 10. 以圖 6 中 AA' 為基準，取 YWB d03 模擬積分(a) 51 及(b) 52 小時相當位溫（等值線間距 2 K）及水氣混合比（灰階，單位 k/kg）剖面圖。