

中央氣象局全球預報模式之地表過程的更新評估測試

汪鳳如

氣象科技研究中心

中央氣象局

摘要

本研究首先採用 1987 年 FIFE (First ISLSCP Field Experiment) 觀測實驗 (Sellers et al. 1992) 提供之長達 5 個月的區域平均資料 (Betts et al. 1993)，以獨立 (stand-alone) 的單維測試對本局及新版地表模式進行評估測試。測試結果顯示本局目前作業版地表過程所模擬之地表蒸散受氣候層影響甚劇，無法掌握實際觀測的變化趨勢，新版地表過程對蒸散量的估計雖有乾季低估，濕季高估的系統性偏差，但整體的趨勢變化與實際情況較為接近。

以 2002 年七月及十二月為代表，進行土壤模式於三維大氣模式的冬夏季評估測試，測試結果顯示新版土壤模式對七月陸面蒸發量的估算明顯減少，相對的可感熱增多，對北半球平均溫度場造成的影響於是低層增暖中高層偏冷，至於十二月的影響則相對減小，整體而言，和作業版模式目前溫度偏差相比的結果是正負影響均有，但初始土壤濕度的敏感測試，顯示此參數的設定對多層土壤模式的應用效果仍有相當調整空間。

一、前言

近二十年已有愈來愈多的研究指出地表過程不僅在大尺度環流模式扮演重要角色 (Mintz 1981)，同時在區域模式及中尺度模式亦不可輕忽其影響 (Avisar and Pielke 1989)。因此較詳細的地表過程已在不斷發展中，基於對土壤、植物及大氣系統內動量、熱量及水氣傳送的逐步了解，地表過程並開始涵蓋地表覆蓋物的影響 (Deardorff 1978; Pan and Mahrt 1987; Noilhan and Planton 1989)，對於更進一步的地表過程，甚至包含了較複雜的生物圈與輻射效應在其中的交互作用，同時牽涉到更多的物理參數 (Dickinson 1984)。

本局全球模式目前使用的地表過程參數化仍為簡單的單層土壤模式 (bucket model)，為提升模式的預報品質，所以本局全球作業模式計畫將土壤模式做一更新，為了同時顧全物理的詳實及實際作業的限制，本次更新選用了 Pan and Mahrt (1987) 發展的多層土壤模式為更新的版本，此模式在 Chen (1996) 所做的比較研究中，以精簡的物理架構表現出和較複雜模式相抗衡的模擬結果。

在更新之前，我們首先以獨立 (stand-alone) 的單維測試進行評估，於 1987 年進行的 FIFE (First ISLSCP Field Experiment) 觀測實驗 (Sellers et al. 1992) 可提供長達 5 個月的區域平均資料 (Betts et al. 1993)，資料不僅包含密集的低層大氣變數，可提供為地表過程的環境作用力，同時涵蓋相關的地表通量及土壤溫度、溼度等觀測，可作為診斷依據。本研究希望藉此難得的觀測資料，對本局及新版地表模式的表現提供一客觀的評估，同時經由敏感測試的執行，預期對模式特性及限制能有進一步的了解，測試結果描述於第三節。

另外，土壤模式應用於實際大氣預報模式時，將會和大氣環境產生複雜的交互作用，我們很難預估此新版土壤模式在一個非完美大氣模式中的結果，所以進一步以三維測試作評估，測試的設計及結果描述於第四節。

文中第二節將對本局及新版地表模式作簡略介紹，最後第五節為結論。

二、地表模式

2.1 CWB 單層土壤模式

CWB 全球作業模式的地表過程是由一單層土壤模式作處理，此土壤模式將傳統的單層模式 (Manabe 1969) 額外增加了一氣候層。此模式的預報變數包含地表溫度 (T_g) 及土壤含水量 (W_g)，預報方程中除了考慮地表與大氣界面上各物理通量的淨收支，另外還考慮了來自於氣候層的恢復力 (restoring force)，此作用力使得預報值不會偏離氣候場太遠，其大小和調整時間尺度 (τ) 有關，目前的設定為 $100/2\pi$ 小時。

蒸散量計算方法如 (1) 式，當 W_g 超過 W_{max} 時以蒸散潛勢 E_p (potential evaporation rate) 估算， W_g 小於 W_{max} 時則以此二者之比值 (β) 和蒸散潛勢共同決定， W_{max} 定為 20mm。

$$Evap = \beta \cdot E_p = \beta \cdot (q_s(T_g) - q_a) \cdot \rho \cdot c_h u_* \quad (1)$$

$$\beta = \frac{W_g}{W_{max}}$$

2.2 新版多層土壤模式

此次引進之新版多層土壤模式乃根據 Mahrt and Pan (1984) 發展的二層土壤模式所建立，同時增加了植物覆蓋效應 (Pan and Mahrt 1987) 及較為複雜的植物阻尼效應 (canopy resistance) (Ek and Mahrt 1991; Noilhan and Planton 1989; Jacquemin and Noilhan 1990)。

此模式的預報變數涵蓋了各土壤層的土壤溫度及單位體積土壤含水比例 (volumetric soil moisture content)，此外植物 (canopy) 表面承接水量，地表溫度及雪的厚度均在此模組內預報。其中地表土壤溫度是參考 Mahrt and Ek (1984) 的方法，利用線性化的地表能量平衡方程式作診斷。至於土壤內每一層溫度的變化則是由土壤熱力擴散效應決定，各土壤層的單位體積土壤含水比例則根據 Darcy's Law 作預報。

此版多層土壤模式除了涵蓋較詳實的物理過程，對土壤溫度及含水量做預報，另外還考慮了植物覆蓋 (canopy) 的影響，因此地表至大氣的蒸散量是由三個部分共同決定：

$$Evap = E_{dir} + E_c + E_t \quad (2)$$

(2) 式中第一項 E_{dir} 為土壤表面的直接蒸散，根據

Betts et al. (1997) 的測試，在此版土壤模式中採用 Mahfouf and Noilhan (1991) 的方法，根據單位體積土壤可用含水比例及蒸散潛勢估計，蒸散潛勢的估算則參考 Penman 提出的方法 (Pan 1990)，同時加入植物的阻尼效應 (Jacquemin and Noilhan 1990)。(2) 式中的第二項為植物表面水分的再蒸散，第三項為透過植物根部上傳水分的蒸散 (evapotranspiration) 作用，並考慮了四種植物阻尼因子 (Jacquemin and Noilhan 1990)。

三、單維實驗

3.1 實驗資料及初始條件設定

單維實驗使用的資料選自 1987 年的 FIFE (First ISLSCP Field Experiment) 實驗 (Sellers et al. 1992)，實驗選用的時間序列資料從 1987 年 6 月 1 日至 10 月 16 日，其間距為 30 分鐘 (Betts et al. 1993)。本單維實驗大氣部分的作用 (forcing) 完全由觀測提供，包括近地面 10m 處大氣的風場、溫度場、溼度場、雨量及太陽長短波輻射通量，另外觀測還可提供地表溫度及 10cm 和 50cm 深層土壤溫度作為初始值及之後的校驗參考，可供校驗的還有地面可感熱通量、潛熱通量及地面熱通量 (ground heat flux) 等資料。

土壤模式的單維實驗積分間距則配合觀測資料密度設定為 30 分鐘，積分過程所有的大氣作用全部由觀測提供，積分時間長達五個月，橫跨了不同乾濕氣候特性的季節，所以土壤水文的長期變化是一觀察重點。

土壤溫度初始場是以 6 月 1 日當時地表溫度及土壤深層 10 公分和 50 公分處的觀測值內插至各層中間位置 (2.5cm, 52.5cm, 150cm)，土壤層下邊界 3 公尺處的溫度則參考 Chen (1996) 以 1987 年地面 10 公尺大氣年平均溫度給定，其值為 13.3°C 。土壤的單位體積含水比例則參考觀測設定為 0.34。新版土壤模式尚牽涉到不少和土壤及覆蓋植物相關的物理參數，其設定均參考 Chen (1996)。

3.2 實驗結果比較

整個實驗期間 (6 月 1 日至 10 月 16 日) 觀測的降水分佈情形如圖 1a，主要兩波降水分別發生在六月下旬及八月中，另外在九月上旬也有一些較為明顯的零星降水。從各層 (2.5cm, 50cm, 140cm) 觀測之單

位體積土壤含水比例的季節變化(圖 1b)，可以清楚看到表層土壤受蒸發及降水的影響，其含水量有非常大幅度的波動，配合降水的發生，在六月底及八月中有兩個高峰值，九月中有一個較小的峰。中層土壤含水量的變化則較為緩和，但在非雨期受根部傳遞蒸散作用影響，可看到較明顯減少，至於最底層土壤的含水量變化，在整段期間只有緩慢減小的微弱改變。

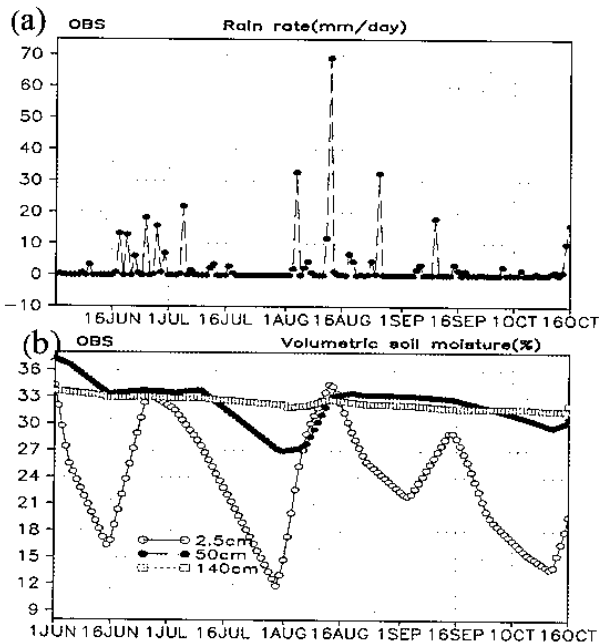


圖 1 (a) 日平均觀測雨量 (b) 觀測土壤單位體積含水比例。

(a) 蒸發量

首先將觀察的焦點放在日平均蒸發量的長期變化，作業版(OPS)土壤模式(圖 2a)整體平均與觀測沒有太大的偏離，但是在七月底、九月底及十月等枯水期，均有明顯高估的情形。新版(NEW)土壤模式(圖 2b)則顯然對於長期的變化趨勢有較符合觀測的掌握。

進一步比較兩模式土壤濕度的變化，由於兩版模式對於土壤濕度的預報變數是不相同的，所以我們僅將觀察重點放在濕度的變化趨勢，可以發現作業版土壤濕度(ground wetness)的變化趨勢(圖 3a)受氣候層相當大的影響，所以七月底時，當新版土壤模式的土壤單位體積含水比例(圖 3b)如觀測(圖 1b)不斷往下降，作業模式的土壤濕度只有微微減弱，同樣的情形在十月更為明顯，新版土壤模式的土壤含水比例因為久未下雨逐漸減少，但作業版模式受較高的

氣候層含水量影響，沒有下降反而比八月升高。此處作業版土壤含水量變化與實際觀測的差異，部分解釋了前面提到之七月與十月蒸發量的過大偏差。作業版土壤模式於七月底高估蒸發量的另一可能原因，和作業版模式估算飽和蒸發量的方法於乾熱環境有高估偏差有關(Pan 1990)。

綜合而言，作業模式受氣候場影響過大，整體趨勢完全受氣候場主導，偏差特性取決於

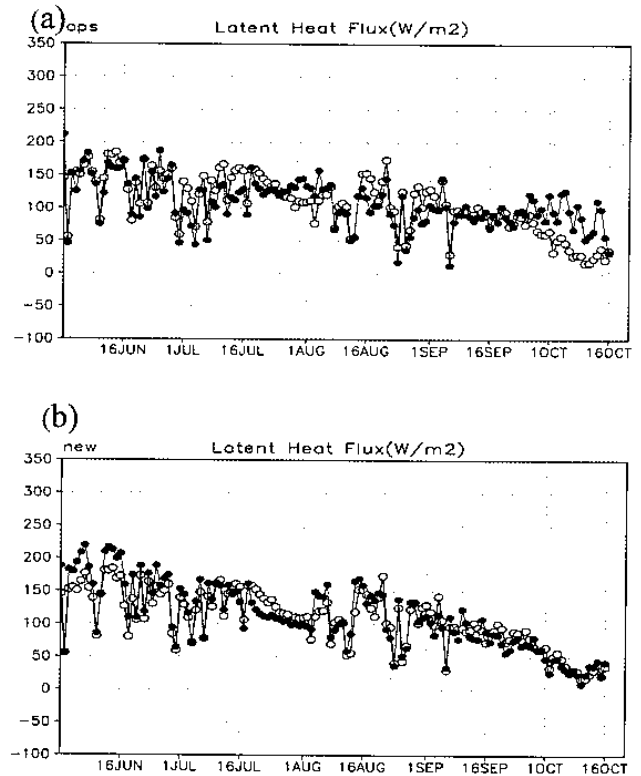


圖 2 觀測(空心圓線)及模擬(實心圓線)的日平均潛熱通量 (a) OPS 版 (b) NEW 版

當時天氣和氣候場的相關。新版模則是在濕季有高估蒸發的偏差，而乾季是低估，但長時間整體變化趨勢和實際觀測有很好的吻合。

(b) 地面溫度

不論是作業版或新版地表模式，對地表溫度日平均變化的模擬(圖未示)均和觀測有非常好的相似性，於七月底因為較大的太陽輻射能量及較小的蒸發而達最高溫，十月底則因為越來越小的太陽入射量，地表溫度逐漸下降至最低，由於在積分實驗過程中，大氣輻射通量是由觀測提供，所以地表溫度日平均變化的整體趨勢與觀測相近是可預期的。但在局部時段則會因為模式特性差異導致不同能量平衡點，例如七月下旬和十月，作業版有較明顯低估，新版模式則是

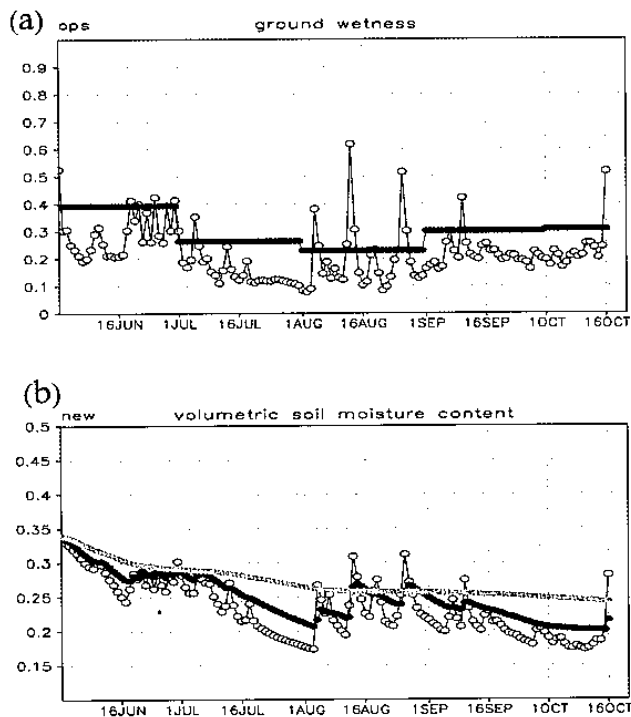


圖 3 (a) OPS 版土壤可用水比例 (圈線為表層, 實線為氣候層) 及 (b) NEW 版三層土壤單位體積含水比例 (圈線為表層, 往上依次為第二及第三層)。

高估。此差異正是反應兩模式對地表能量分配的不同, 新版模式在此段時間因較低的蒸發使得地表有較高溫度, 因此以較高可感熱比例與大氣交換能量, 作業版模式在此段時間則是以潛熱的方式主導。

3.3 敏感測試

以上測試結果顯示新版模式的確較能掌握水文變化的實際趨勢, 不過此模式正因為考慮了較完整的物理過程, 所以牽涉到較多物理參數, 以下針對兩個較重要的參數做敏感測試, 藉此觀測資料進一步瞭解新版模式的限制。

(a) 植物覆蓋率

前面測試的植物覆蓋率是參考 Chen(1996)以 NDVI 五年的平均值設定, 為瞭解此參數值的影響, 將植物覆蓋率設定為 0。

以蒸發量的日平均變化做比對, 當植物覆蓋率為零時, 其蒸發在潮濕期 (六月初、六月底、八月初及八月中) 大幅上升 (圖 4a), 乾燥期 (七月底, 九月下旬至十月中) 則顯著降低, 顯示植物覆蓋影響土壤水分蒸發在時間上的配置, 沒有植物的裸地只能靠土

壤表層的蒸發, 潮濕期的直接蒸發使得土壤表層水分迅速減少, 所以枯雨期裸地只有表層少量的直接蒸發, 植物覆蓋使得蒸發來自於表層及深層土壤植物根部的水分傳輸, 即使乾燥期也能透過根部傳輸吸收到深層土壤的水分, 所以植物使得地表水分蒸發變得較和緩而持續。

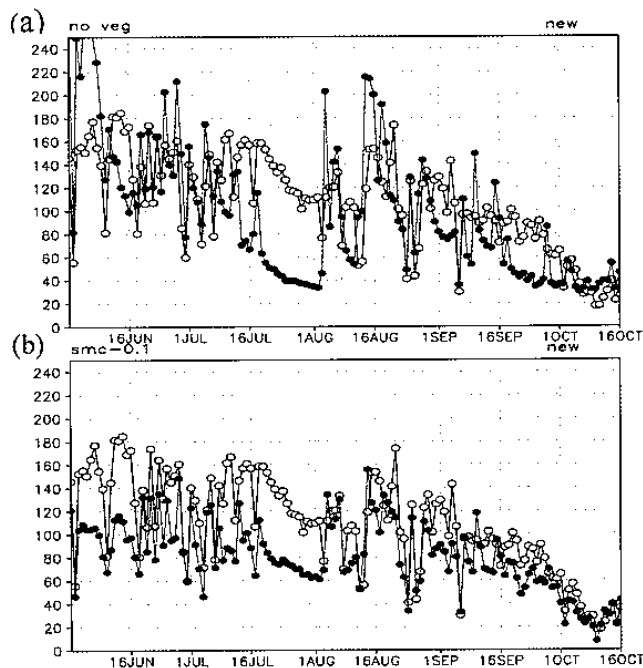


圖 4 (a) 植物覆蓋率為零 (b) 土壤單位體積含水比例減少 0.1 敏感測試之日平均潛熱通量 (W/m^2)。

所以 NEW 版模式在濕季高估及乾季低估的原因有可能是植物覆蓋率過小, 使得表層直接蒸發比例過大, 過於迅速地將水分帶走。

(b) 土壤含水量初始場

控制組的設定是參考積分起始點 (6 月 1 日) 的觀測, 設定三層土壤的單位體積含水量均為 0.34, 敏感測試則將三層均減為 0.24。

同樣以蒸發量為比較參考, 發現初始含水量的減弱, 其影響甚至橫跨整個實驗期 (圖 4b), 雖然八月中一場大於 60mm/day 的降水使得土壤含水差距減小, 之後的蒸發差異較為降低, 但是影響仍看得見。

四、三維實驗

當土壤模式應用於實際大氣模式做預報時, 將會和大氣環境產生交互作用, 來自於大氣的影響, 例如太陽輻射, 降雨等, 均是影響土壤模式反應的重要因

子，土壤模式的輸出反應，又將直接回饋給大氣，如此非線性的交互影響，使我們必須以三維測試作進一步評估。

4.1 模式介紹及初始場和背景場設定

三維實驗採用目前於中央氣象局作業之 T120L30 版本全球波譜模式，至於模式詳細的動力及物理過程介紹可參考 Liou et al.(1997)。

三維實驗設計以七月及十二月代表夏季及冬季，分別從 2002 年 7 月 1 日及 12 月 1 日開始進行一整個月的預報模擬實驗，實驗進行中各組維持每天四次（6 小時一次）資料同化分析，模式預報的影響藉由猜測場帶入分析場，可累積模式的影響。

控制組採用作業版的單層土壤模式（OPS），測

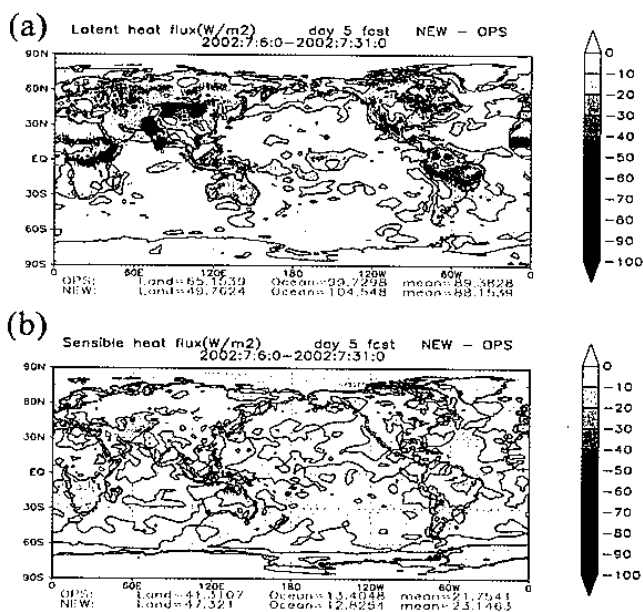


圖 5 2002 年七月第五天預報之 (a) 潛熱及 (b) 可感熱月平均。

試組採用第二節介紹的多層土壤模式（NEW），在此實驗中設定多層土壤模式為二層（10cm 和 190cm），土壤濕度的初始場則從作業模式的土壤含水量（W_g）重新換算至單位體積土壤含水比例

$$(\theta = \frac{W_g}{W_{max}} \cdot (\theta_f - \theta_w) + \theta_w)$$

。在此實驗採用的全球土壤分佈 (Zobler 1986)，共分為 9 種，植物種類的全球分佈來自 GCIP (Global Continental-Scale International Project) 共計 13 種。另一重要參數，植物覆蓋率則選用來自於衛星資料 NDVI(normalized

Difference Vegetation Index)換算得到的五年平均值，共計 12 個月資料。

4.2 結果比較

(a) 七月測試結果

分析七月全球蒸發量（圖 5a）及可感熱通量（圖 5b）於二個實驗的差值（NEW-OPS），可看到大部分的陸塊上都是負區，也就是說新版多層土壤使得陸面蒸發量減少，全球平均而言 OPS 版的陸面蒸發約為 65W/m²，NEW 版的陸面蒸發大約只有 49W/m²，相對的，在幾塊主要蒸發減少區，均可看到可感熱顯著的增加，同時陸面平均降雨量從 2.56mm/day 降為 2.10mm/day。

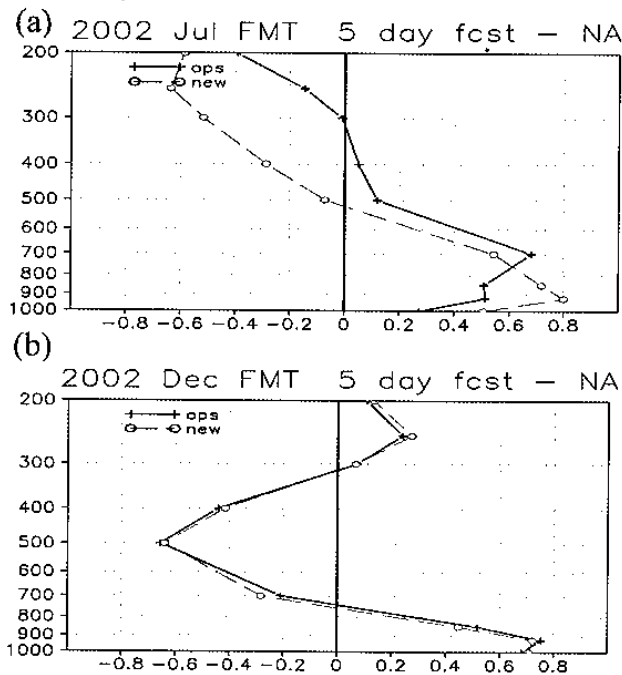


圖 6 2002 年 (a) 七月及 (b) 十二月的北半球第五天預報之溫度偏差月平均 (K)。

NEW 版對地面熱量分配比例的改變反應在溫度場的垂直結構示於圖 6，以七月北半球（NA，20-80N,0-360E）平均來看（圖 6a），NEW 版測試結果低層大氣增暖，850mb 以下低層大氣的第五天預報從原有 0.3-0.5 度的暖偏差，增加為 0.5-0.8 度，對中高層大氣的影響則是偏冷，使中層大氣(850mb-400mb)原來的暖偏差減少，至於 400mb 以上的高層大氣原來即是冷偏差，因此變得更冷。由於可感熱透過渦流傳送對低層大氣有直接加熱的作用，而蒸發則需透過邊界層將水氣往上传送後，經由對流上升產生凝結才釋放潛熱，因此其對大氣溫度的影響主要在中高層，而

此區 (NA) NEW 版較 OPS 版增加了 3.46 W/m^2 的可感熱，蒸發量則減少了約 5.77 W/m^2 ，因此猜測下邊界能量的改變主導了此處溫度場偏差在垂直結構上的變化。

(b) 十二月測試結果

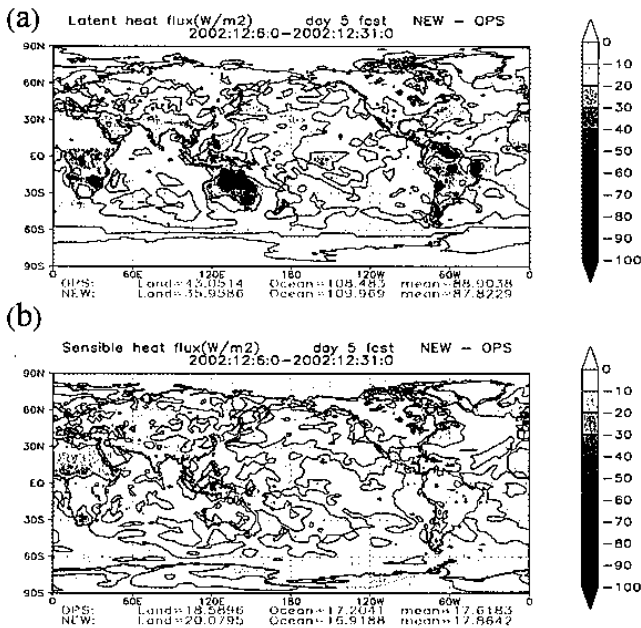


圖 7 2002 年十二月第五天預報之 (a) 潛熱及 (b) 可感熱月平均。

北半球在十二月進入冬半球，太陽輻射提供的能量大為降低，由於大部分的陸塊分佈在北半球，使得全球陸面平均蒸發量在十二月比七月小很多，從七月的 65 W/m^2 減為 43 W/m^2 ，NEW 版模式造成的影響，使陸面蒸發約減少 8 W/m^2 ，是七月的一半。從蒸發量差值 (NEW-OPS) 的分佈 (圖 7a) 可以看到北半球 45 度以北的陸面有大範圍微弱正值，這和二個模式對於雪上蒸發的處理有關，至於陸面上較顯著的負值區主要分佈在南半球，相對的，在這些區域有較明顯的可感熱正區 (圖 7b)。

北半球 (NA, 20-80N) 溫度場偏差相較於七月，NEW 版模式對北半球溫度場偏差的影響 (圖 6b) 幾乎可以忽略，事實上此區的下邊界平均能量也相當接近。

4.3 敏感測試

從單維測試的經驗，初始土壤濕度場對蒸發模擬有長時間的影響，於是設計另一組測試，將初始土壤可用含水量變為 1.2 倍，重新進行七月模擬實驗，以

進一步瞭解初始土壤濕度在三維模式的調整空間。

以北半球 (20-80N) 第五天預報的溫度場偏差 (圖 8) 作為比對參考，原來 NEW 版在低層造成的增暖使其最大偏差從 0.5 K 增加為 0.8 K ，但敏感測試 (NEW1) 結果，調高初始土壤濕度使得低層最大偏差減為

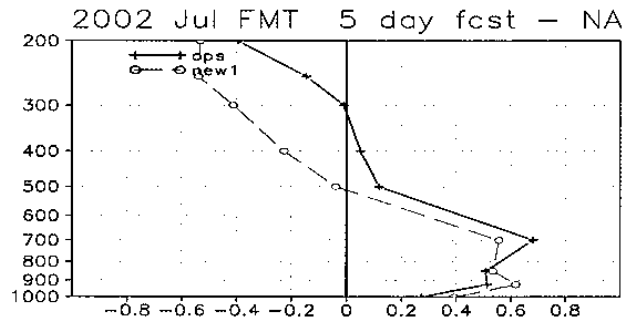


圖 8 2002 年七月敏感測試 (初始土壤濕度) 的 NA 第五天預報之溫度偏差月平均。

0.6 K ，同時高層的負偏差從 -0.6 K 降為 -0.5 K ，所以 NEW 版模式在高層及低層的負面影響在調高土壤濕度後都得到了舒解，至於 NEW 版對中層原是降低其暖偏差的正面影響則稍稍減小。配合下邊界能量場的分析，顯示此區 (NA) 的蒸發量比 NEW 版控制組增加了約 2.1 W/m^2 ，可感熱則減少了約 1.7 W/m^2 ，所以透過土壤濕度的調整，有效的提高了蒸發量，於中高層的凝結潛熱釋放，降低了中高層的負偏差，可感熱減少也同時減低了低層的溫度正偏差。

五、結論

單維測試環境提供了觀測初始場及大氣環境場，讓我們能清楚瞭解二版土壤模式的基本差異，OPS 版的土壤模式基本上受氣候場影響過甚，無法忠實反應實際大氣變化，NEW 版模式較能掌握長時間蒸發量變化趨勢，不過有雨季高估乾季低估的系統性誤差，同時從敏感測試進一步瞭解到多層土壤模式的限制，植物覆蓋率及初始土壤濕度等參數的設定對模擬結果有很持續性的影響。

土壤模式與三維大氣模式結合的冬夏季模擬測試，以 2002 年七月及十二月為代表，以結合資料同化處理的預報方式各進行了一個月測試，測試結果顯示新版土壤模式對七月陸面蒸發量的估算明顯減少 (約 16 W/m^2)，相對的可感熱增多，對北半球溫度場

造成的影響於低層增暖中高層偏冷。至於十二月的影響則由於佔較大部分陸地的北半球於十二月地表溫度降低使整個陸面蒸發減緩許多，NEW 模式造成的影響相對也小了许多。整體而言，和 OPS 模式原溫度偏差相比的結果是正負面影響均有。

初始土壤濕度調高的敏感測試，讓我們進一步體認到，此參數的設定對新版土壤模式的應用結果仍有很大的調整空間。此次敏感測試只是簡單地將整體土壤可用含水量調整為 1.2 倍，若能對土壤濕度在平面空間的分佈有更精確描述，相信能使多層土壤模式潛含的物理特性有較合理的表現。

參考文獻

- Avisar, R., and R. Pielke, 1989: A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Mon. Weather Rev.*, **117**, 2113-2136.
- Betts, A. K., J. H. Ball, and A. C. M. Beljaars, 1993: Comparison between the land surface response of the ECMWF model and the FIFE-1987 data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **119**, 975-1001.
- Betts, A. K., Fei Chen, Kenneth E. Mitchell, and Zavisla I. Janjic, 1997: Assessment of land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta model using FIFE data., *Mon. Weather Rev.*, **125**, 1896-2916.
- Chen, F., K. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H.-L. Pan, V. Koren, Q. Duan, and A. Betts, 1996: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations, *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268.
- Deardorff, J. W., Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, **83**, 1889-1903.
- Dickinson, R. E., 1984: Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models, in *Climate Processes and Climate Sensitivity*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 29, edited by J. E. Hansen and T. Takahashi, pp. 58-72, AGU, Washington, D. C.
- Ek, M., and L. Mart, 1991: OSU 1-D PBL model user's guide, Dep. Of Atmos. Sci., Oreg. State Univ., Corvallis, Oreg.
- Jacquemin, B., and J. Noilhan, 1990: Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set, *Boundary Layer meteorol.*, **52**, 93-134.
- Liou, C.-S., J.-H. Chen, C.-T. Terng, F.-J. Wang, C.-T. Fong, T.E. Rosmond, H.-C. Kuo, C.-H. Shiao, and M.-D. Cheng, 1997: The second-generation global forecast system at the central Weather Bureau in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **12**, 653-663.
- Mahrt, L., and H. L. Pan, 1990: Atwo-layer model of soil hydrology, *Boundary Layer Meteorol.*, **29**, 1-20.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation, 1, The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Mon. Weather Rev.*, **97**, 739-774.
- Mintz, Y., 1981: The sensitivity of numerically simulated climates to land surface boundary conditions, *Proc. JSC Study Conf. on Land Surface Processes in Atmos. GCM*, Greenbelt, Md.
- Noilhan, J., and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land surface Process for meteorological models, *Mon. Weather Rev.*, **117**, 536-549.
- Pan, H.-L., and L. Mahrt, 1987: Interaction between soil hydrology and boundary-layer development, *Boundary Layer Meteorol.*, **38**, 185-202.
- Pan, H.-L., 1990: A Simple parameterization scheme of evapotranspiration over land for the NMC medium-range forecast model, *Mon. Weather Rev.*, **118**, 2500-2512.
- Sellers, P. J., F. G. Hall, G. Asrar, D. E. Strelbel, and F. F. Murphy, 1992: An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE), *J. Geophys. Res.*, **97**, 18,345-18,371.