

1998 年夏季季風肇始期間 南海地區之熱力與水氣分析

林松錦¹ 施佩君² 郭勉之²

¹ 國立中央大學大氣物理研究所

² 中央氣象局

(中華民國九十二年八月二十八日收稿；中華民國九十二年十一月十一日定稿)

摘 要

本研究利用 1998 年南海季風實驗所提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 經緯度網格資料，將 1998 年夏季季風的肇始過程分成三個階段，經由熱力與水氣變數場的分析，來了解南海地區夏季季風肇始的過程，以及季風肇始發展期間南海南北部的環流特徵與差異。

分析結果顯示，在 1998 年南海夏季季風肇始發展過程中，南海北部的大氣大多呈現對流不穩定的形勢，第一階段鋒前西南氣流造成低層強烈的水氣輻合，第二階段之後鋒面遠離且太平洋副熱帶高壓東退，來自孟加拉灣的西南氣流夾帶大量暖濕水氣使得南海北部在整個季風肇始期間都是有利於對流的狀況。而在南海南部，不同的是在第一與第二個階段，因水氣量的不足，造成夏季季風已在南海北部盛行時，南海南部地區卻沒有較明顯的變化。一直到第三個階段，太平洋副熱帶高壓完全退出南海，而華南低壓中心移入南海北部的低壓帶，與強盛的熱帶西南氣流結合，在南海南部形成強烈的西風與大量的水氣集結，低層對流不穩定度快速增加，以致於產生旺盛的對流。顯示南海南北部在肇始期間最主要的差異即在於水氣的多寡與到達的時間。

關鍵詞：夏季季風肇始，南海季風實驗，熱力與水氣分析

一、前 言

東亞夏季季風具有各種不同時空尺度的環流分量，季風主要分量相互作用，造成季風環流結構在向北演進的過程中逐漸改變，呈現有

爆發、維持及季節性移動等階段性發展的特徵。南海位處東亞陸地和西太平洋的交界，亦為印度洋和西太平洋的過渡地帶，使其成為熱帶東南氣流、西南氣流、中緯度鋒面系統和南半球越赤道流的交匯區域。由於地理位置的獨特，

南海被視為是東亞夏季季風最早肇始的地區 (Tao and Chen, 1987; Lau and Yang, 1997)。南海夏季季風肇始為多重尺度的環流調節過程，而該地區的季風肇始可視為低層西南暖濕氣流向北推進的開端，對東亞地區初夏鋒面降水之季節轉型顯然有重大的影響。在夏季時期，大氣熱源分佈型態受到行星尺度環流系統和區域綜觀尺度環流系統所影響。夏季季風的發展，涉及熱帶西南氣流、鋒面系統和西北太平洋副熱帶高壓的活動，而熱帶和中緯度之間的交互作用使其環流演變更形複雜。

南海是亞洲季風區中，中緯度鋒面系統可以南下至低緯熱帶的唯一地區，Chang and Chen (1995)認為中緯度鋒面系統南下，鋒前西南氣流可帶動熱帶水氣經由南海北進，激發夏季季風肇始。對於東亞夏季季風和梅雨鋒面之間的相互關係，林(1996)則認為孟加拉灣西南氣流提供南亞反氣旋向北及向西發展的熱力機制，並牽動西風噴流和東亞主槽的變動。進而反應到鋒面系統南侵，從而突破南海北界，而有熱帶水氣涌北進而和鋒面系統交匯，觸發夏季季風肇始。郭與林(2001)及郭(2002)的研究也發現，在1979~1998的20年中有17年的季風肇始期間，在華南地區都伴隨有鋒面系統的活動。東亞鋒面系統南下，南海北部西南氣流的增強是否可做為南海季風肇始的訊號，仍有一些爭議。然而Lin and Kueh (2003)的模式診斷分析顯示，南海北部鋒面雲系中對流活動所造成的擾動，則有可能提供南海中南部對流系統發展所需的中尺度誘發機制。

為了解東亞夏季季風的肇始過程，1998年5-6月在南海地區進行了南海季風實驗(South China Sea Monsoon Experiment, 簡稱SCSMEX; Lau et al., 2000)，之後許多學者也針對此年的季

風肇始過程做了不同的研究分析與討論。Li and Wu (2000) 著重在大尺度環流的特性和其變化，指出在夏季季風發生之前，華南沿海地區有鋒面運動造成的降雨，但不能當成是南海夏季季風開始的前兆，不過仍然認為季風肇始前的鋒前西南氣流和鋒面降水在夏季季風肇始過程中扮演重要角色。Shao and Qian (2000) 認為季風肇始過程西南風首先在南海北部發展並向南推進，爾後再由南向北發展。Chan et al. (2000) 的分析顯示，在季風肇始之前，中、低對流層變得不穩定且CAPE (convective available potential energy) 值大幅增加。Ding and Liu (2001) 指出1998年南海夏季季風肇始具有兩階段發展，第一階段為南海北部西南氣流遽增，中緯度鋒面所帶來的冷空氣活動對此階段的季風肇始具有激發作用。第二階段南海海域的全面性肇始，主要為熱帶機制。Johnson and Ciesielski (2002) 也對南海北部第一階段季風肇始過程的環流特徵做了分析，但都沒有進一步說明兩階段發展之間的關聯及南海南北部區域環流的差異。

南海地區夏季季風肇始受到中緯度天氣系統與熱帶擾動系統間交互的影響，南海北部因受中緯度綜觀尺度天氣系統影響，呈現中緯度系統和季風西南氣流交替作用的混合特性；中南部地區則呈現相對較單純的熱帶西南季風爆發特性。因此，季風肇始原因複雜且難以界定，而北部與中南部具不同的環流特性但卻又相互影響，期間動力與熱力作用亦是重要的研究主題。本文將就Ding and Liu (2001) 所提出南海南北部兩階段肇始過程，利用1998年南海季風實驗所提供的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 經緯度網格資料，經由熱力與水氣變數場(如：大氣的穩定度、可降水量、水氣傳輸、水氣輻散場及 Q_1 熱源與 Q_2 水氣匯

等)的分析,來探討 1998 年夏季季風肇始過程中南海北部和南部地區大氣熱力結構與水氣場的特徵及差異。Tao and Chen (1987)指出,東亞地區在春末夏初大範圍雨季的發展與演變過程,亦即夏季季風由南往北的肇始過程,主要受到西太平洋副熱帶高壓的發展所影響。南海地區的夏季季風肇始,普遍以對流活動的劇增及高低層流場的改變做為判斷的依據。因此,本文之目的不在於強調南海地區夏季季風肇始由北往南的發展過程,而在於探討南海地區全面性肇始之前南海北部和南部地區大氣狀態的特徵及差異。

二、1998 年東亞夏季季風肇始期間之綜觀天氣分析

1998 年東亞夏季季風肇始屬郭與林(2001)所分類的第三類型,這一類型相當普遍,季風肇始期間在華南沿海地區有鋒面活動,且鋒面西端伴隨有氣旋式環流。Ding and Liu (2001)以 850hPa 西風增強及降水遽增來定義季風肇始,指出第一階段肇始在 5 月第 4 候的南海北部西南風爆發,而第二階段肇始為 5 月第 5 候的南海海域全面性爆發,太平洋副熱帶高壓亦同時呈現兩階段退出南海地區的特性。他們認為第一階段肇始和孟加拉灣氣旋迅速發展及中緯度鋒面冷空氣的南侵有關。Li and Wu (2000)以南海全面性的西南風爆發及太平洋副熱帶高壓全面退出南海地區,定義 5 月 21 日為 1998 年夏季季風肇始日。Shao and Qian (2000)以低對流層西南風及高層東風增強,定義 5 月 25 日為 1998 年夏季季風肇始當天。Chan et al. (2000)同樣以 850hPa 緯向風場轉向及降水遽增來定義 1998 年夏季季風肇始日期,由於資料先經 5 日權重滑動平

均,所定義的肇始日為 5 月 25 日。郭與林(2001)及郭(2002)依據 850hPa 流場分佈、太平洋副熱帶高壓東退以及南海地區的對流活動,將 5 月 18~25 日定義為 1998 年南海夏季季風肇始時期。以上各研究所定義的 1998 年南海季風肇始時間均在 5 月 15 日至 5 月 25 日之間,本文參考 Lin and Kueh (2003),以對流雲系發展的特徵為依據,再將 1998 年季風肇始過程約略分成三個階段。

第一階段為鄰近季風肇始時期至南海北部季風肇始,即 5 月 15 日至 5 月 19 日。在此階段,東亞地區冷空氣活動頻繁,鋒面西端雲系延伸至華南沿海-南海北部,沿著 20°N 在鋒面雲帶的暖空氣區域中有對流雲系陸續發展,至於南海中南部(15°N 以南)則維持晴空狀態。第二階段為過渡時期,約為 5 月 20 日至 5 月 22 日期間。在此階段,鋒面雲帶東移並減弱,爾後部分殘餘鋒面雲系滯留在台灣-菲律賓東方洋區。南海北部的對流活動逐漸減緩,而南海中部開始有對流雲系發展。在這同時,四川盆地附近有新的雲系發展並向南移動,此雲系伴隨著地面低壓中心而發展。第三階段為南海全面性季風肇始,約為 5 月 23 日至 5 月 25 日期間。在這段時期,南海中南部有中尺度對流系統(mesoscale convective system, 簡稱 MCS)生成,在南海北部鄰近海南島地區對流活動則呈減弱趨勢。到 5 月 25 日,南海海域已為大量雲系所籠罩,較強對流雲系約沿著 10°N 附近分佈。本節將以此三個階段為基礎,說明南海區域綜觀環境的天氣狀態。

圖 1 為 5 月 15 日至 25 日部份時間的日本氣象廳地面天氣圖分析。第一階段的第一波鋒面在 5 月 15 日 0000UTC 南下至華南沿岸(圖 1a),並於 5 月 16 日 0000UTC 東移出海,鋒後

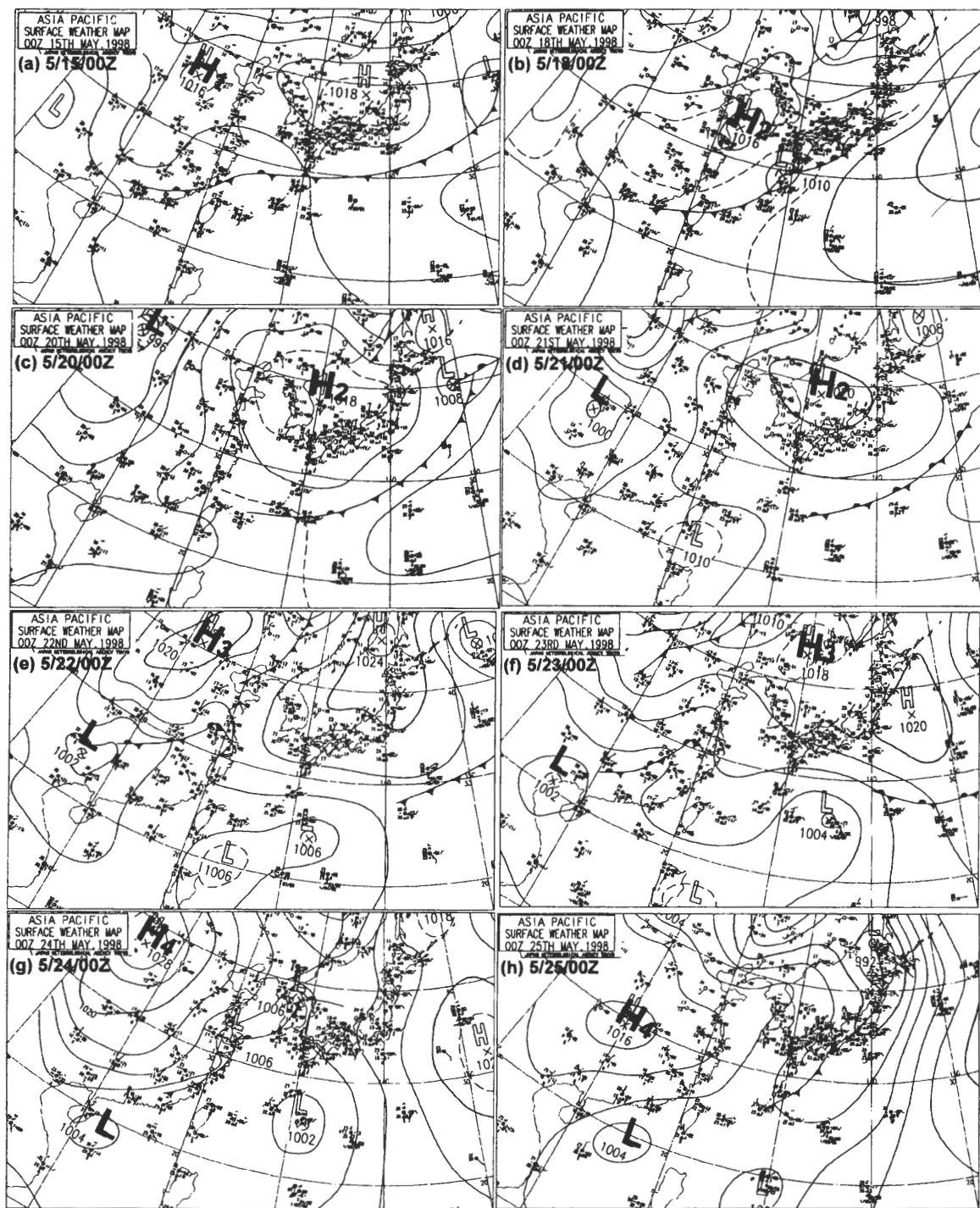


圖 1 1998 年 5 月 15 日至 25 日部份時間的日本氣象廳地面天氣圖分析，日期標示在天氣圖之左上角。

之冷高壓 H_1 亦隨之東移並減弱(圖略)。在 5 月 17 日 0000UTC 有一高壓南下至 30°N 附近, 爾後向東北位移, 其伴隨之鋒面在 5 月 18 日 0000UTC 向東移到台灣東方洋面並呈滯留狀態, 鋒面西端經過台灣而延伸到華南沿海(圖 1b), 此即第一階段的第二波鋒面。在這一階段期間, 南海地區的綜觀大氣環境尚無明顯變化。

這一階段的兩波鋒面系統, 在華南地區分別伴隨不同的高空綜觀形勢(圖略)。在 5 月 15 日 0000UTC 至 16 日 0000UTC 期間, 地面高壓 H_1 伴隨著 850hPa 冷中心東移, 致使在 850hPa 等壓面上, 華南地區地面鋒面附近處於較大溫度梯度和潮濕的區域。在 5 月 17 日 0000UTC 至 5 月 18 日 0000UTC 期間, 地面冷高壓 H_2 (圖 1b)伴隨著 850hPa 溫度槽東移, 華南地區 850hPa 溫度梯度減弱, 風場分佈逐漸轉為以西南風為主。因此, 第二波鋒面西段雲系是在 850hPa 潮濕區和較強南來氣流的環境中發展, 並不具有明顯的溫度梯度。然而在南海北部地區, 第一波鋒面雲系的高層為西-西南風和西北風的分流區, 構成有利於 MCS 生成的高層環境, 第二波鋒面西端雲系則主要處於高層西風的環境, 顯現低層氣流形勢對鋒面西段雲系的發展相當重要。

第二階段最主要的變化是低壓系統(L)的發展。5 月 20 日 0000UTC, 在北方高緯度地區東移冷鋒之南端暖空氣區域有一個低壓中心形成(圖 1c), 此後 L 伴隨著其東南方的雲系持續向東南位移, 到 5 月 21 日 0000UTC, L 中心已位移到 30°N 以南進入四川盆地(圖 1d)。在這段時期, H_2 持續向朝鮮半島東北方移動並微幅增強; 爾後高壓中心逐漸減弱, 並在 5 月 21 日 1800UTC 消散(圖略)。在此過程中, 華中-華南地區處於 L 和 H_2 之間, 東西向氣壓梯度增大, 因而造成

南風分量的增強。隨後在 5 月 22 日 0000UTC, 冷高壓 H_3 在 40°N 以北迅速東移, 同時 L 由四川盆地向南移出, 在其東北方新生一道鋒面(圖 1e)。在地面低壓 L 中心所處的高層環流形勢並無明顯的槽脊結構(圖略), L 之發展主要發生在中低對流層。南海北部的綜觀形勢在這一階段已有明顯改變, 從華南沿海至南海北部出現相對低壓帶, 沿著 20°N 呈東西向分佈, 5 月 21 日 0000UTC 時在巴士海峽附近形成一個低壓中心(圖 1d)。之後, 巴士海峽的局地小低壓東移、消散, 而在台灣-菲律賓東方洋區的殘餘鋒面雲系中, 陸續有局地小低壓新生和消散(圖 1e)。

在第三階段, 即 5 月 23 日 0000UTC 至 5 月 25 日 0000UTC 期間, 東亞陸地區域和南海海域的綜觀天氣形勢均發生明顯變化。在 5 月 23 日 0000UTC, H_3 東移出海, L 和其東北方鋒面均向南移動(圖 1f)。隨後又有一強勢冷高壓 H_4 迅速南下(圖 1g), 高壓中心在兩天左右的時間由 45°N 附近南移到 30°N , 並在 5 月 25 日 0000UTC 大幅減弱(圖 1h)。在 H_4 向南入侵階段, 鋒面東移出海, 華南地區仍然有較強的冷平流, 致使華南沿岸維持較大溫度梯度。L 中心進入東京灣, 經過海南島並持續東移, 成為南海北部低壓帶的一個局地地面低壓中心。5 月 24 日 0000UTC, 當強勢冷空氣 H_4 南下之際, 高層雖有高緯槽線與強風軸之發展, 但在南海地區的高層風場形勢並無明顯之特徵(圖略)。

圖 2 為季風肇始過程三個階段的時間平均 1000hPa 等壓面高度場與風場分析, 高度場分析顯示在南海與華南地區等高線在第一階段呈南北走向(圖 2a), 至第二、三階段時太平洋副熱帶高壓完全東退出南海地區, 等高線逐漸轉成東西走向(圖 2b, c)。當第三階段季風全面肇始時, 在南海北部地區高度場明顯的減弱並形成

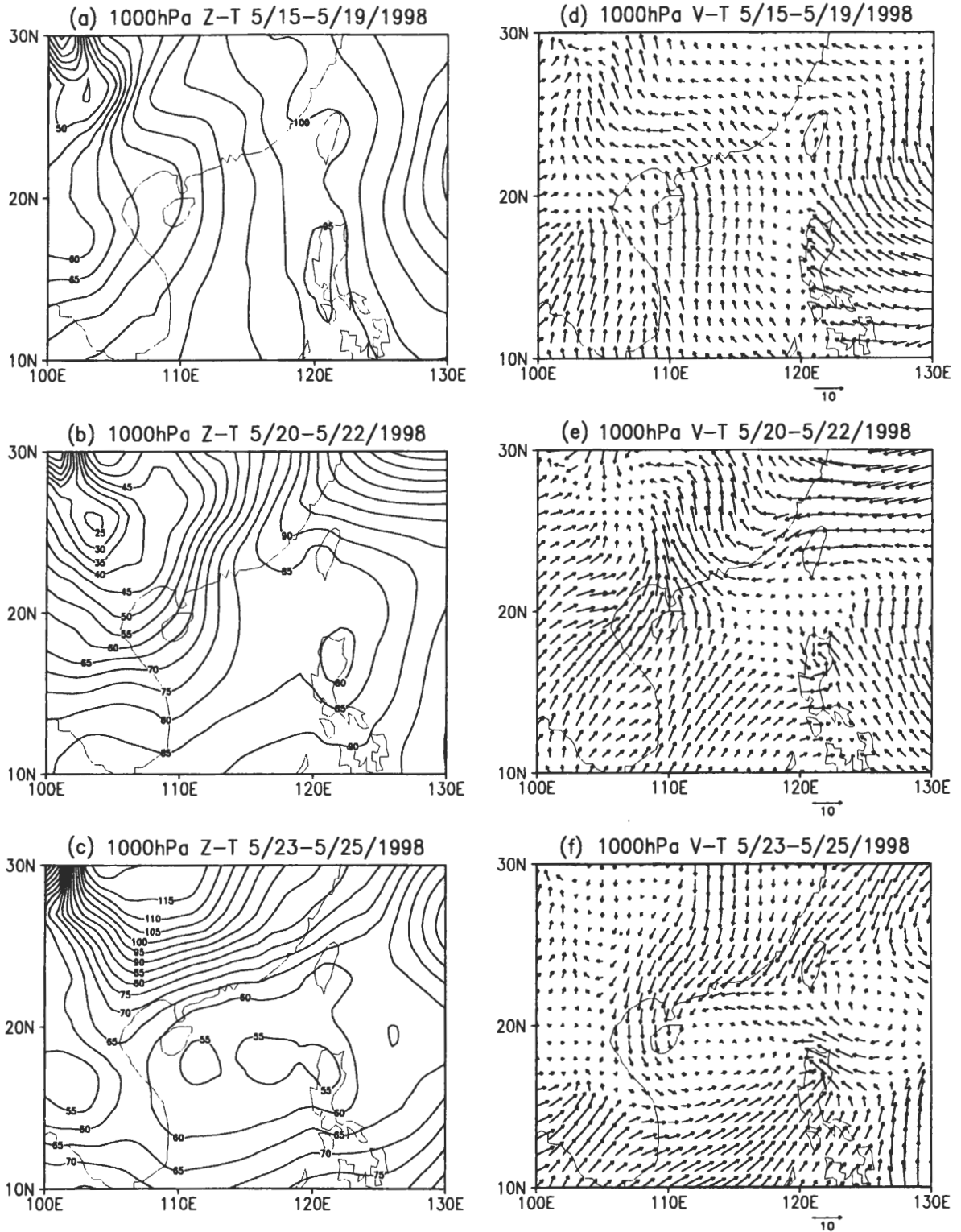


圖 2 1998 年 5 月 15 日至 25 日季風肇始過程三階段時間平均之 1000hPa 等壓面高度場(a, b, c)與風場分析(d, e, f)。等高線間隔為 5m，風場圖右下方之向量長度代表 10ms⁻¹。

一低壓帶，而在華南地區則是呈現高度場增強的趨勢(圖 2c)。從風場分析來看，在第一階段南海地區主要受到南/西南氣流及副熱帶高壓外圍的東南氣流所主宰(圖 2d)，從第二階段開始漸漸的轉變為南風與西南風(圖 2e)。至第三階段，因受南海北部之低壓帶的影響，來自孟加拉灣的西南氣流在整個南海中南部地區形成強大之西南/西氣流(圖 2f)。Lin and Kueh (2003)的模式診斷分析結果顯示，在前兩階段南海北部的對流潛熱釋放對於南海北部低壓帶的形成與維持扮演重要角色，透過質量場與風場的調整，間接地加強了南海中南部的西南氣流。

三、分析結果與討論

本文所採用的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 經緯度網格分析資料係取自 SCSMEX Data Center (設於中國氣象局網站<http://www.cma.gov.cn/>)，網格分析資料包括每日四次(00Z、06Z、12Z 及 18Z)之高度場、水平風場、溫度場、比濕、相對濕度、海平面氣壓及地面氣壓，在垂直方向包含 1000、925、850、700、500、400、300、250、200、150、100 hPa 共 11 層。原始資料含跨 1998 年 5 月 1 日至 6 月 30 日，分析區域為 $70^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ ， $10^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 。為探討夏季季風肇始過程南海北部與南部地區的環流特徵與差異，南海北部與南海南部區域平均計算的範圍分別為 ($110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ ， $15^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$) 與 ($110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ ， $10^{\circ}\text{N} \sim 15^{\circ}\text{N}$)。

由前一節的分析討論，可大致了解 1998 年夏季季風肇始過程三個階段的綜觀天氣形勢。本節將進一步分析南海地區大氣穩定度及水氣場的分佈與演變，最後再討論 Q_1 熱源與 Q_2 水氣匯(Yanai et al., 1973)的轉變。

(一)大氣穩定度分析

圖 3 為季風肇始過程三個階段在南海北部(NSCS)與南海南部(SSCS)的時間及區域平均位溫、相當位溫及飽和相當位溫的垂直剖面分析。區域平均位溫的分析顯示，在整個季風肇始過程中，位溫的垂直分佈在南海的南北部幾近完全相同，都是屬於靜熱力穩定的狀態。而在第一階段，南海南部區域平均 1000hPa 相當位溫大約在 354K 左右，較南海北部的 360K 為低，且可看出在南海北部低層斜率較大，顯示此時南海北部的大氣對流不穩定度較南海南部為大(圖 3a, d)。1000hPa 飽和相當位溫的南北差異雖然相對較小，但仍顯示南海北部的大氣潛在穩定度較南海南部為大。

在第二階段南海南北部的 1000hPa 相當位溫都有些微的增加，由 1000hPa 風場(圖 2e)可知此時受到西南氣流所夾帶之水氣的影響，南海南部的對流不穩定度或潛在穩定度雖也可看出有些許的增加，但仍較南海北部為穩定(圖 3b, e)。從逐日的分析來看(圖略)，低層相當位溫的增加主要發生在 5 月 22 日。對照地面天氣圖(圖 1e)，發現此時在華南的低壓系統及伴隨在其東北方的鋒面有向東南方移動的趨勢，有助於西南氣流的增強及水氣的傳送。

當第三階段南海地區季風全面肇始，南海北部的 1000hPa 相當位溫及飽和相當位溫都略有些微增加，低層潛在穩定度並沒有明顯的改變，對流不穩定度則略有增強(圖 3c)。和前一階段相較，南海南部的 1000hPa 相當位溫及飽和相當位溫都有明顯的增加，分別增加了約 10K 及 8K(圖 3f)。低層潛在穩定度雖然沒有明顯的增強，但對流不穩定度則明顯增強許多。由於位溫並沒有明顯的改變，顯示此時南海南部的的水氣有突然增加的趨勢。若從逐日的分析來看(圖略)，南海南部低層對流不穩定度的遽

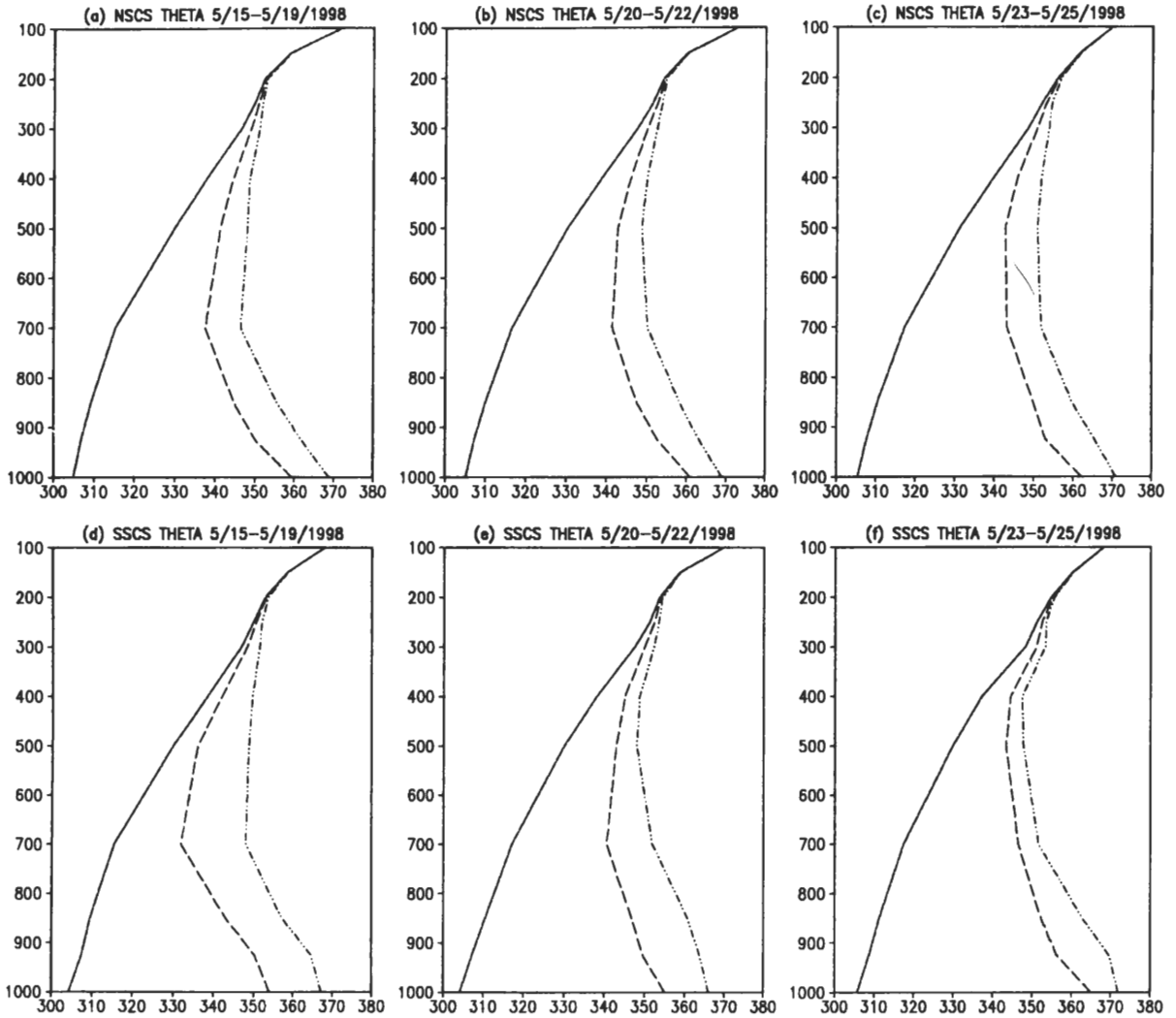


圖 3 1998 年 5 月 15 日至 25 日季風肇始過程三階段南海北部(a, b, c)與南海南部(d, e, f)的時間及區域平均位溫(實線)、相當位溫(虛線)及飽和相當位溫(點虛線)的垂直剖面分析，單位為 K。

增，主要發生在 5 月 24 日。直至 5 月 25 日季風全面肇始之後，產生旺盛對流，整個南海地區的大氣狀態因對流釋放不穩定度而漸趨緩和。

(二)水氣場分析

此處利用大氣可降水量 $\left(\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q dp\right)$ 、水氣傳輸 $(q\vec{v})$ 及水氣輻散場 $(\nabla \cdot q\vec{v})$ 的分析來探

討南海地區水氣的來源及傳輸的過程，式中之 q 為比濕，垂直積分之氣壓上下限分別為 100hPa 與 1000hPa。

圖 4 為季風肇始過程三個階段的时间平均大氣可降水量與 925hPa 水氣傳輸的分析。大氣可降水量的分析顯示，在肇始過程的第一階段可明顯的看到有一最大值位在中南半島北端，濕舌由中南半島向東北方延伸至南海北部地區

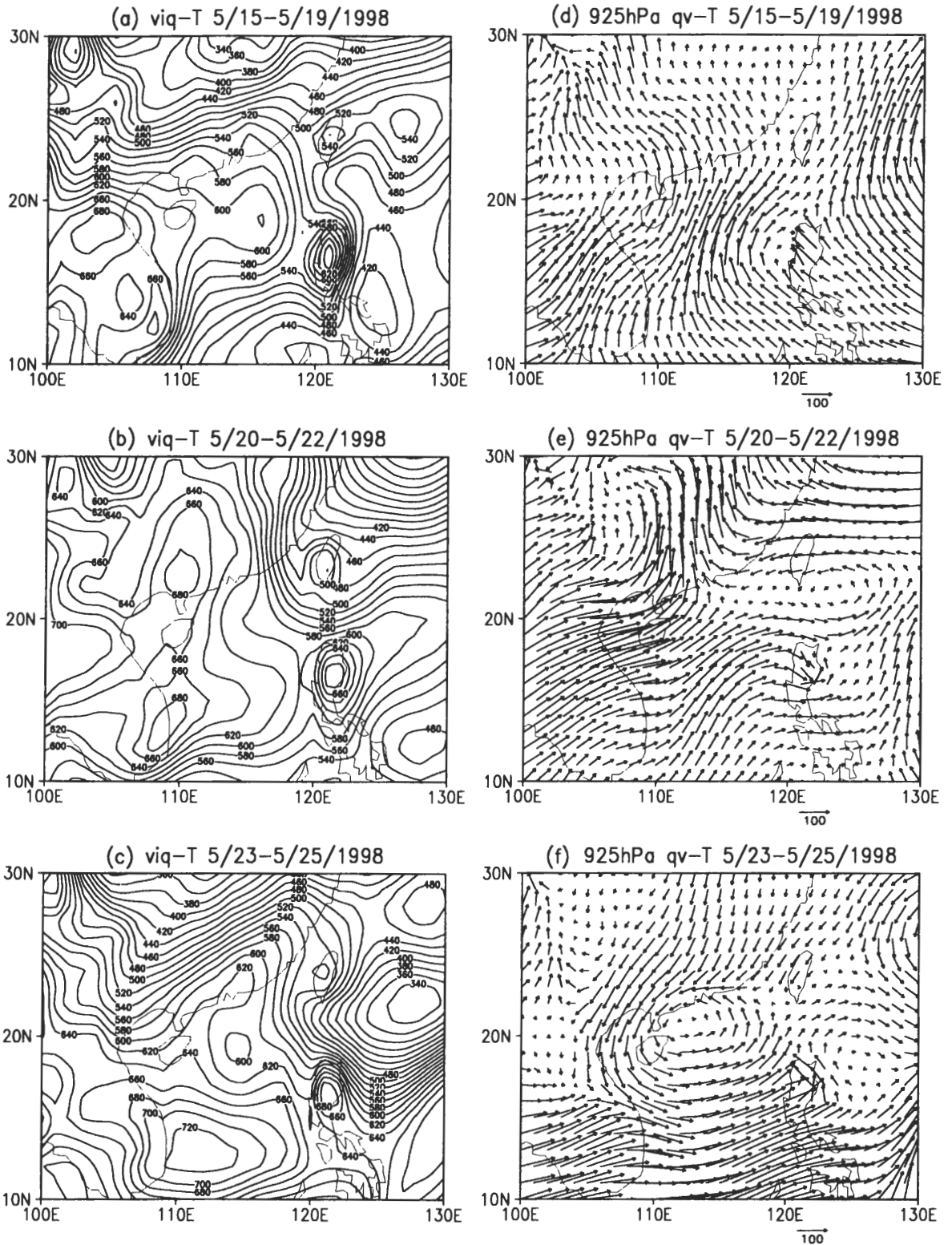


圖 4 1998 年 5 月 15 日至 25 日季風肇始過程三階段時間平均之大氣可降水量(a, b, c)與 925hPa 水氣傳輸(d, e, f)分析。可降水量之等值線間隔為 20gm^2 ，水氣傳輸分析圖右下方之向量長度代表 $100\text{kg}^{-1}\text{ms}^{-1}$ 。

(圖 4a)。到肇始過程第二階段，中南半島北端依然存在著最大值，但不同的是水氣最大值分佈區開始往東南及往東北方延伸，故在華南沿海與南海中南部存在著次極大值區(圖 4b)。至第三階段季風全面肇始，水氣最大值分佈區由中南半島略向東南延伸到南海南部(圖 4c)。此時南海南部水氣含量達到最大值，對照前述 1000hPa 地面相當位溫突然的增加可以說明主要

為水氣的貢獻，而對流不穩定度的增強加上大量的水氣集結足以顯示了此時南海南部地區夏季季風肇始開始發展。

配合可降水量的分佈來看水氣的傳輸過程，在第一階段南海地區水氣傳輸主要來自孟加拉灣的西南氣流及副熱帶高壓外圍環流的東南氣流(圖 4d)，大氣水氣含量的分佈主要沿著鋒面(圖 4a)。在肇始過程第二階段，副熱帶高

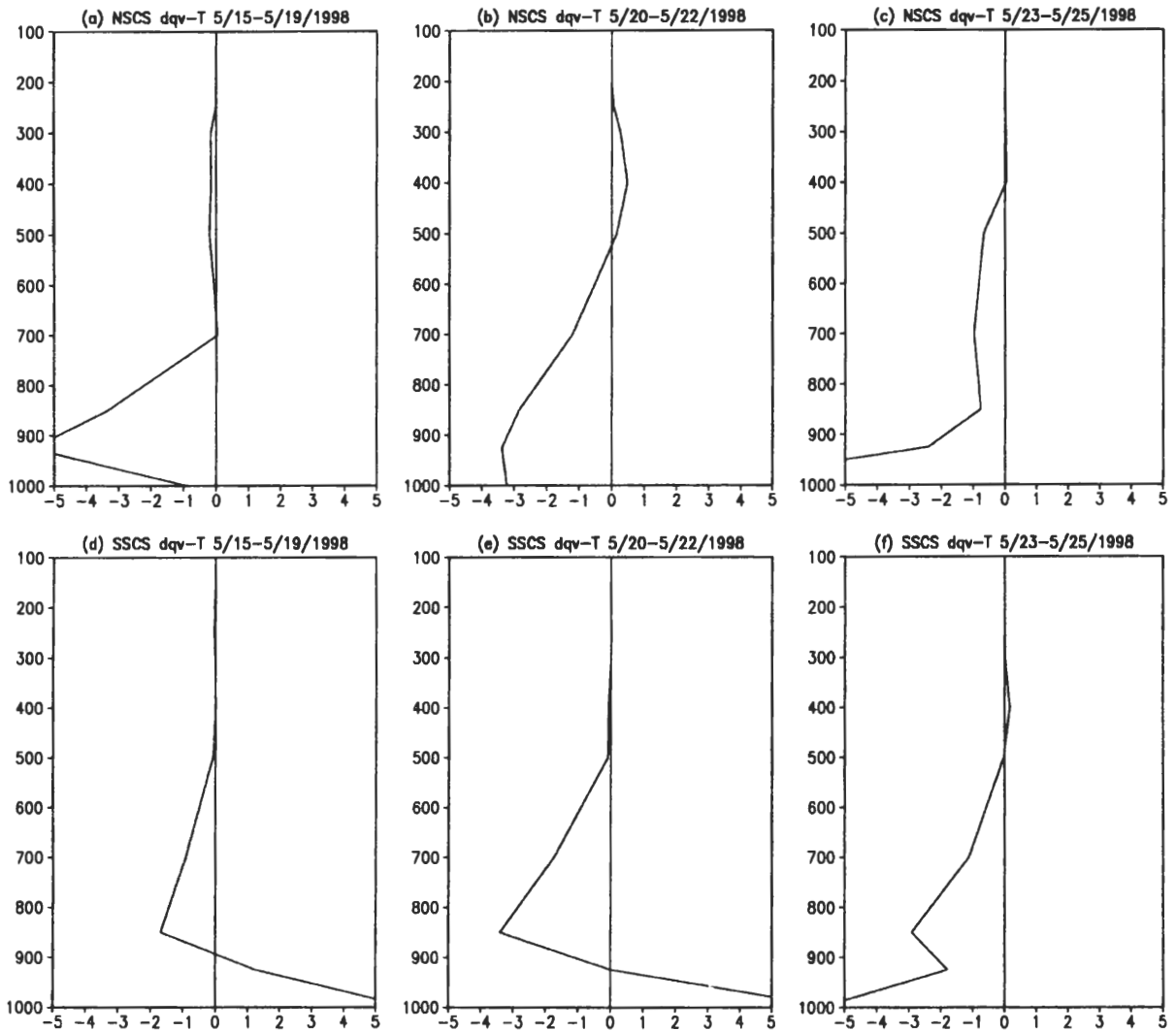


圖 5 1998 年 5 月 15 日至 25 日季風肇始過程三階段南海北部(a, b, c)與南海南部(d, e, f)的時間及區域平均水氣輻散場垂直剖面分析，單位為 10^{-8}s^{-1} 。

壓逐漸東退，來自東南方的水氣來源減少，來自孟加拉灣的水氣傳輸有增強的趨勢(圖 4c)，此時西南風開始盛行且有逐漸偏西風的狀態，而此西南風的水氣傳輸方向與大氣中的可降水量呈現一致的分佈。直到肇始過程的第三階段，從孟加拉灣而來的強盛偏西氣流，加上受到南海北部低壓帶的影響，在南海中南部形成強大的西風氣流，因而造成大量的水氣在南海南部集結(圖 4c, f)。

再從圖 5 南海南北部區域平均水氣輻散場的垂直分佈來看，在肇始過程第一階段南海北部低層大氣已經有非常明顯的水氣輻合情形，輻合最大值發生在 925hPa 高度(圖 5a)。水氣的輻合主要是受鋒面系統的影響，鋒前暖濕的西南氣流與副熱帶高壓外圍的東南氣流造成水氣的集結及旺盛的鋒前對流。到第二階段時鋒面遠離，強烈的低層水氣輻合雖稍減緩，但可以注意到此時水氣輻合的狀況已同時向上及向下延伸，向上約至 500hPa，而在 500hPa 以上中高層則呈現輻散的情形(圖 5b)，顯示此時的對流已不再是因鋒面抬升所造成的鋒前對流。而在南海南部地區，前兩個階段近地層都依然呈現明顯水氣輻散的狀況，水氣輻合則發生在 850hPa 以上(圖 5d, e)。到了第三階段季風全面肇始後，南海南部低層的水氣輻合才開始明顯發展起來，在低層(925hPa)以下呈現明顯的水氣輻合情形，但在中高層輻散情形並不明顯(圖 5f)。而在南海北部，近地層的水氣輻合雖有明顯的增強，中層的水氣輻合情形雖向上發展至 400hPa，但可以看得出從 850hPa 以上水氣輻合有減弱的趨勢。

在肇始過程的第二階段從孟加拉灣來的水氣依然在南海北部地區造成水氣輻合，但隨著

華南地區低壓系統的向東南移動(圖 1d, e 及圖 2b)，南海南部低層的水氣輻散狀況有些微減少的趨勢(比較圖 5d 及 5e)。直到肇始過程第三階段，低壓系統移至海南島東方併入南海北部的低壓帶(圖 1f, g, h)，使得從孟加拉灣傳播而來的暖濕西風氣流在整個南海地區形成水氣的集結(圖 4c)。從圖 5f 水氣輻散的垂直分佈來看，南海南部最大水氣輻合是發生在 1000hPa 地面及 850hPa。來自孟加拉灣的西南氣流所帶來的暖濕空氣是主要的機制，而低壓系統及其伴隨鋒前的水氣輻合則扮演了增強的角色。

(三)熱源 Q_1 與水氣匯 Q_2 分析

此處利用熱源 Q_1 與水氣匯 Q_2 的分析來探討夏季季風肇始期間南海地區大氣加热的特性。圖 6 為季風肇始過程三個階段南海南北部的時間及區域平均熱源(Q_1/c_p)與水氣匯(Q_2/c_p)垂直剖面分析。南海北部在季風肇始過程第一階段，在對流層高層及低層分別有 Q_1 與 Q_2 的最大值區，顯示此時已有對流活動發生(圖 6a)。而在南海南部，雖然在中層有加熱之跡象，但在低層 800hPa 以下 Q_2 則為明顯負值的情形(圖 6d)，中層加熱並非直接來自對流潛熱釋放之效應。在第二階段南海北部依然有對流活動，但近地層 Q_2 略轉為負值且可看出 Q_2 最大值由第一階段的 850hPa 提升到 700hPa，高層的加熱作用也有減緩的現象， Q_1 極大值由 300hPa 移至 500hPa(圖 6b)，顯示對流活動沒有像第一階段那麼深厚。在南海南部和第一階段類似，還沒有明顯的改變。到了第三階段季風全面肇始，在南海北部仍然維持有對流發展的情形(圖 6c)，在南海南部地區則明顯看出低層 $Q_1 < Q_2$ 而高層則 $Q_1 > Q_2$ (圖 6f)。可知此時南海南部已有旺盛的對流活動，可以推

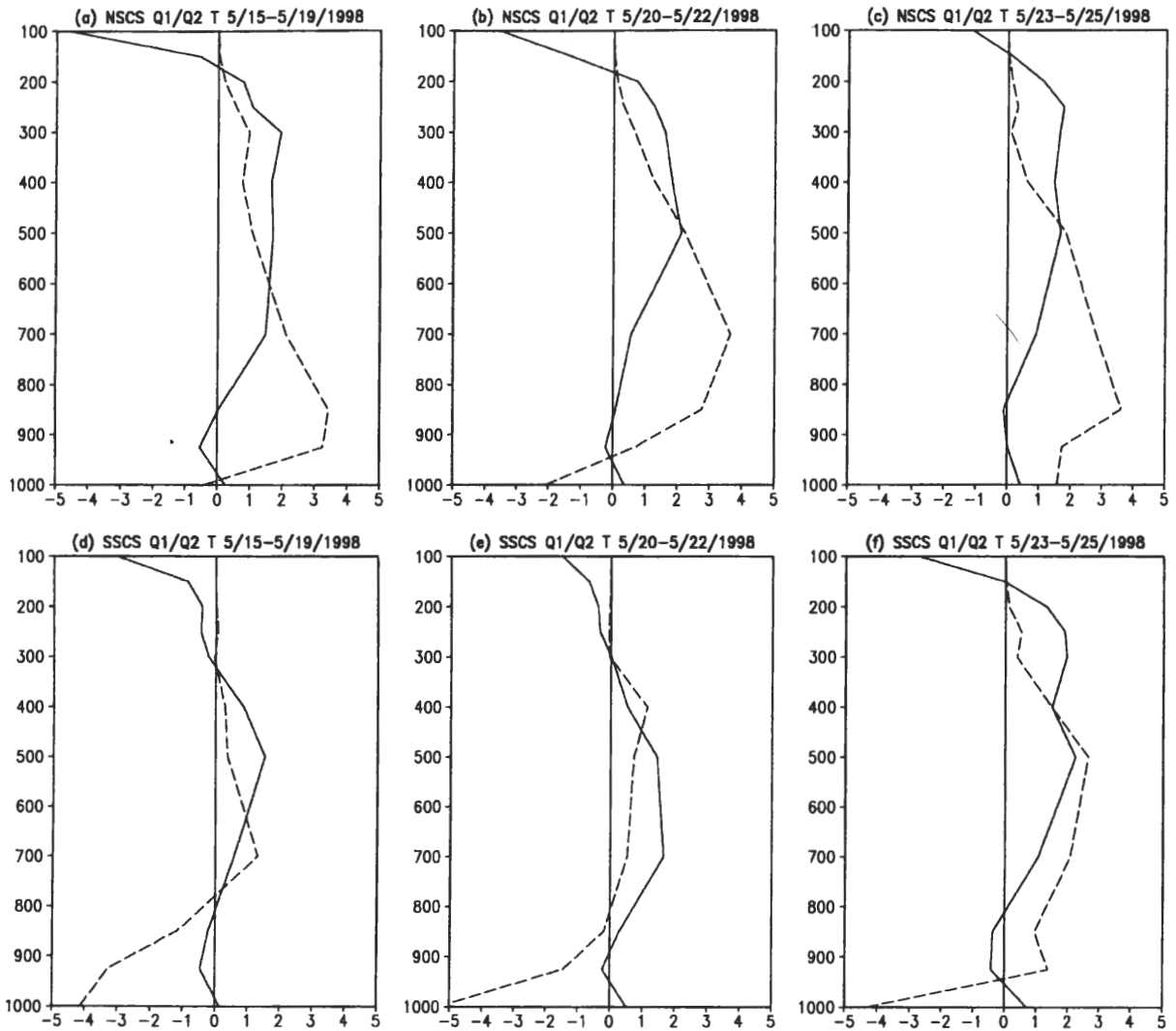


圖 6 1998 年 5 月 15 日至 25 日季風肇始過程三階段南海北部(a, b, c)與南海南部(d, e, f)的時間及區域平均熱源(Q_1/c_p , 實線)與水氣匯(Q_2/c_p , 虛線)垂直剖面分析, 單位為 K/day 。

斷此時的南海南部開始受到副熱帶高壓東退與低層來自孟加拉灣暖濕西南氣流的影響, 促使深厚的對流活動。在中層亦可見有 Q_1 與 Q_2 的極值且非常相近, 可知此時還有些許層狀雲系的發展。

基本上來說, 在南海北部地區, Q_2 在低層大多是維持是正值的情況。而從 Q_1 來看, 在

肇始過程前期有鋒面接近時, 對流發展較高, 而到了後期南海全面肇始的時候, 對流發展也呈現較深的狀況。而南海南部地區在肇始過程的前期 Q_2 在低層大多為負值, 到了全面肇始之後才漸趨轉變為正值的狀態。進一步從第三階段逐日的區域平均垂直分佈剖面圖來看, 在南海北部地區從 5 月 23 日到 25 日低層 Q_2 皆為正值的狀況(圖略)。但南海南部在 5 月 23 日低層

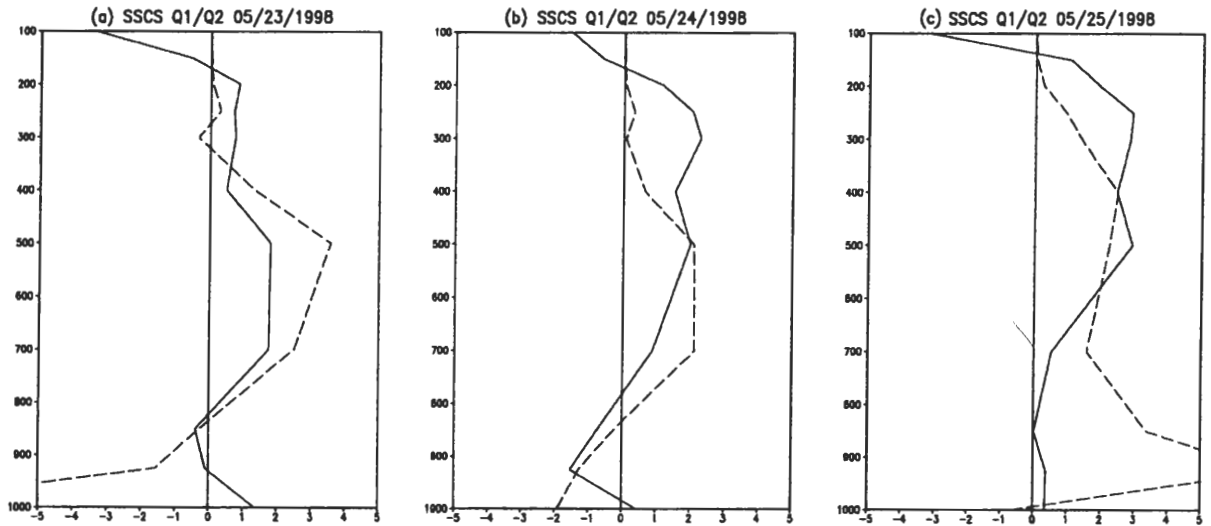


圖 7 1998 年 5 月 23 日至 25 日南海南部的時間及區域平均熱源(Q_1/c_p ，實線)與水氣匯(Q_2/c_p ，虛線)垂直剖面分析，單位為 K/day 。

Q_2 則是非常明顯的負值(圖 7a)，到了 5 月 24 日負值減小(圖 7b)，直到 5 月 25 日全面肇始開始才明顯的看到低層 Q_2 轉變為正值情形(圖 7c)，南海南部的對流亦開始呈現發展較深的趨勢。

四、結 論

東亞夏季季風肇始受到中緯度天氣系統與熱帶擾動系統交互的作用，而南海北部與南部又具有不同的環流特性且又相互影響，因而造成發生在南海地區季風肇始的原因複雜且難以界定。1998 年南海季風實驗密集的觀測，提供了探討南海夏季季風肇始過程進一步的觀測資料。本研究以 Ding and Liu (2001) 所提出南海南北部兩階段肇始的觀點，參考郭與林(2001)及郭(2002)對東亞夏季季風肇始的定義及南海地區對流活動發展的特性，將 1998 年夏季季風的肇始過程分成三個階段，分析熱力與水氣變數場，

來了解南海地區季風肇始的過程，以及季風肇始期間南海南北部的環流特徵與差異。

從季風肇始期間大氣穩定度的變化可看出在整個季風肇始的過程中，南海南北部的位溫垂直分佈幾乎沒有什麼變化。在南海北部地區，相當位溫也幾近無太大變化，低對流層大氣的熱力結構從鄰近南海北部季風肇始到南海地區全面肇始一直保持對流不穩定的狀態。而在南海南部地區，在肇始過程第一、二階段低對流層大氣不穩定度並沒有明顯的變化，一直到第三階段南海全面肇始對流不穩定度才有明顯的增強。此時太平洋副熱帶高壓已完全退出南海，來自孟加拉灣的暖濕氣流使得南海南部地區水氣量大增，近地層相當位溫及低層對流不穩定度也大幅增強。

水氣場的分析方面，從可降水量的分佈與水氣傳輸的方向可看出一致的情形。在肇始過程的第一階段，華南沿海有鋒面活動，鋒前西南氣流與副熱帶高壓外圍的東南氣流在南海北

部地區匯集，主要水氣分佈從中南半島沿鋒面向東北方向延伸。到肇始過程第二階段，鋒面遠離，南海地區漸轉為盛行西南偏西風，水氣傳遞的方向與可降水量的分佈也漸轉向東南方向發展。直到季風在南海地區全面肇始的第三階段，受南海北部低壓帶的影響，來自孟加拉灣的暖濕西南氣流在南海地區形成強大西風氣流，尤其是在南海南部最為明顯，而同時在南海南部大氣可降水量也達到最大值。

水氣輻散場分析顯示，在肇始過程的三個階段，南海北部地區的低對流層皆有水氣輻合的狀況，尤其在第一階段因受鋒面系統影響，水氣輻合更是明顯。第二階段因無鋒面作用，雖然低層水氣輻合稍減緩，但因大氣水氣量多，加上高層有輻散現象，因此仍然呈現對流旺盛的狀況。而在此之前，南海南部地區因近地層並無水氣輻合情形，對流不易發展。直到肇始過程第三階段，南海南部近地層才有明顯的水氣輻合情形。

從熱源與水氣匯的分析可以看出，在整個季風肇始時期南海北部地區皆有對流的存在。在第一階段鋒面影響較大，從第二階段開始主要受西南/西氣流的影響。而在南海南部地區則到第三個階段才明顯可看出代表對流發展的 Q_1 與 Q_2 的極值分佈出現。

圖 8 為東沙島(20°42'N, 116°43'E)和南沙太平島(10°23'N, 114°22'E) 在南海季風實驗期間的地面觀測分析，分別來說明南海北部和南部在季風肇始過程中季節轉變的特性。圖 8a, b 為東沙島 ISS(Integrated Sounding System)地面觀測的時間序列，在 5 月 15 日至 5 月 20 日期間有一波密集強降水期，即前文中所指的第一階段兩波鋒面雲系在華南沿岸-南海北部發展的時期，爾後僅在 5 月 24 日第三階段南海季風全面肇始後再出現強降水。相對濕度的變化和降水事件有良好一致性，5 月 15~30 日之間相對濕度都維持在 80%以上，6 月之後更提高至 85%以上。地面風速風向分析顯示，南海北部的風

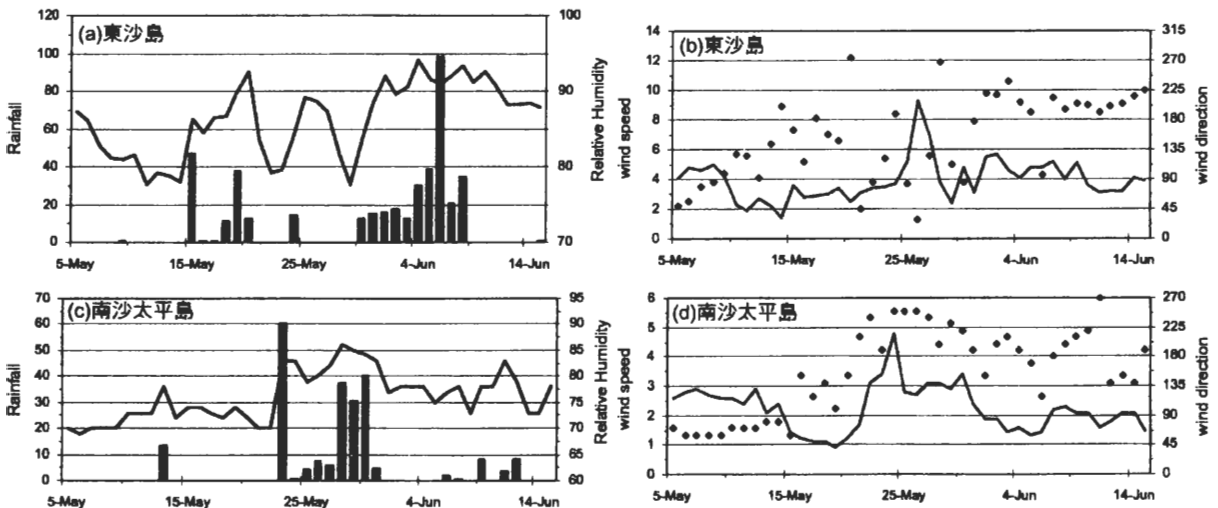


圖 8 1998 年 5 月 5 日至 6 月 15 日期間東沙島(a, b)與南沙太平島(c, d)地面觀測時間序列。左圖為日累積雨量(粗長條線，單位為 mm)及日平均相對濕度(實線，單位為%)，右圖為日平均風向(黑點)及風速(實線，單位為 ms^{-1})。

場在 5 月 15~30 日期間，南風分量逐漸增加，雖然風向變化幅度較大，但多為東南風，風速呈現微幅增加趨勢，與圖 2 的 1000hPa 風場分析一致。期間僅 5 月 24~26 日發生風速顯著增強而風向大幅改變，由南風轉為北-北東風，顯然受到強烈冷高壓南下的影響(圖 1g, h)。直到 5 月 30 日之後，南海北部的風場才真正進入一穩定的盛行西南風。

圖 8c, d 為南沙太平島的地面觀測時間序列，觀測資料呈現相當顯著的季節性轉變，清楚說明西南季風爆發的過程。在 5 月中旬之前僅 5 月 13 日出現短暫降水，5 月 23 日出現的強降水事件和在南沙群島附近強烈的 MCS 發展有直接的關係(圖略)。5 月 25 日季風肇始伴隨著降水遽增現象，至 5 月底為密集強降水時期。在季風肇始密集降水發生的同時，相對濕度也顯著增加。季風肇始後，相對濕度也都維持在 80%以上，和季風肇始前相較，明顯地提升許多。這與前述第三階段南海南部水氣量劇增的分析結果完全一致。地面風向風速的季節轉變特性也較南海北部明顯，5 月上旬南沙太平島處於副熱帶高壓脊線的南方，地面盛行東東北風。在 5 月中旬轉為微弱東南風，顯示副熱帶高壓環流勢力明顯減弱，在 5 月 19~24 日，風速急遽增強，風向迅速轉為西南風。

總括來說，從 1998 年夏季季風肇始過程的三個階段發展來看，南海北部的大氣大多呈現對流不穩定的形勢，故有旺盛的對流。從第一階段中緯度鋒面系統的作用，鋒前西南氣流帶來的水氣造成低層強烈輻合，到第二階段之後鋒面遠離且太平洋副熱帶高壓東退，使得南海北部盛行著西南風，此西南氣流所夾帶的大量暖濕水氣使得南海北部在整個季風肇始期間

皆形成有利於對流的狀況。Chan et al. (2000)認為南海北部低層原本就存在著對流不穩定度，在第一階段鋒前暖濕的西南氣流與鋒面的抬升作用固然是主要的對流機制，但高層的分流顯然也提供對流再往上發展的條件。而在南海南部不同的地方是，在第一與第二個階段，因水氣量的不足，造成夏季季風已在南海北部盛行時，南海南部地區卻沒有較明顯的變化。一直到肇始過程的第三個階段，太平洋副熱帶高壓完全退出南海，而華南低壓中心移至海南島東方海面融入南海北部的低壓帶，與強盛的熱帶西南氣流結合，在南海南部形成強烈的西風與大量的水氣集結，低層對流不穩定度快速增加，以致於產生旺盛的對流。由上述可知，南海北部在季風肇始期間最主要的差異即在於水氣的多寡與到達的時間。當然，南海北部的對流活動對低壓帶的形成與維持扮演重要角色，而低壓帶又進一步促成來自孟加拉灣西南氣流的增強及在南海南部的的水氣輻合。而若從逐日的分析來看，5 月 23 日與 24 日之前，在南海的南部地區各項分析場依然沒有促使對流的條件，直到 5 月 25 日才可以看出有明顯的變化，故此時象徵了夏季季風肇始在南海地區完全的展開。

誌 謝

本研究承國科會經費補助(專題研究計畫 NSC90-2111-M-008-041)，南海季風實驗網格分析資料取自設於中國氣象局網站之 SCSMEX Data Center，地面觀測資料由 SCSMEX 台灣計畫辦公室提供，謹此誌謝。

參考文獻

- 林博雄，1996：東亞夏季季風與梅雨鋒。國立台灣大學大氣科學研究所博士論文，154頁。
- 郭勉之，2002：東亞夏季季風肇始之探討。國立中央大學大氣物理研究所博士論文，222頁。
- 郭勉之與林松錦，2001：南海夏季季風-肇始定義與環流特徵。大氣科學，**29**，141-170。
- Chan, J. C.L., Y. Wang., and J. Xu, 2000: Dynamic and thermodynamic characteristics associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 367-380.
- Chang, C.-P., and G. T.-J. Chen, 1995: Tropical circulation associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3254-3267.
- Ding, Y., and Y. Liu, 2001: Onset and the evolution of the summer moon over the South China Sea during SCSMEX field experiment in 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 255-276.
- Johnson, R.H., and P.E. Ciesielski, 2002: Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the Northern South China Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 561-578.
- Lau, K.-M., Y. Ding, J.T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S.C. Tsay, and P.H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1261-1270.
- Lau, K.-M., and S. Yang, 1997: Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 141-161.
- Li, C., and J. Wu, 2000: On the onset of the South China Sea summer moonsoon in 1998. *Adv. Atmos. Sci.*, **17**, 193-204.
- Lin, S.C., and M.T. Kueh, 2003: A modeling diagnosis of the development of mesoscale convective systems over the South China Sea during the summer monsoon onset in 1998. *TAO*, **14**, in press (December issue).
- Shao, H., and Y. Qian, 2000: Main features of regional circulation variation during onset of the South China Sea summer monsoon in 1998. *Adv. Atmos. Sci.*, **17**, 322-338.
- Tao, S.-Y., and L.-X. Chen, 1987: A review of recent research on the East Asian monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, C.-P. Chang and T. N. Krishnamurti Eds., Oxford Univ. Press, 60-92.
- Yanai, M., S. Esbensen, and J.-H. Chu, 1973: Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 611-627.

Thermodynamic and Moisture Analyses over the South China Sea during the Summer Monsoon Onset in 1998

Song-Chin Lin¹ Pei-Chun Shih² Mien-Tze Kueh²

¹ Institute of Atmospheric Physics, National Central University

² Central Weather Bureau

(Manuscript received 28 August 2003 ; in final form 11 November 2003)

ABSTRACT

By dividing the whole evolution of the 1998 summer monsoon onset process into three stages and using $1^\circ \times 1^\circ$ grid observations provided by the SCSMEX (South China Sea Monsoon Experiment) Data Center, this study performs thermodynamic and moisture analyses to investigate the differences in the circulation features over the northern and the southern South China Sea (SCS).

Over the northern SCS, analysis results find the lower troposphere is convectively unstable during the entire onset period. The favorable atmospheric conditions for convection are attributed to low-level moisture convergence caused by the frontal southwesterly flow during the first stage, and the retreat of western Pacific subtropical high and warm-moist southwesterly flow from the Bay of Bengal during the later stages. While summer monsoon are prevailing over the northern SCS during the early two stages, the lower tropospheric conditions are still not favorable for the development of convection over the southern SCS due to lack of moisture. Until the third stage, when subtropical high retreats completely from the SCS and the low pressure system over southern China moves southeastward and embeds itself in the low pressure zone over the northern SCS, strong tropical southwesterly flow brings in ample amount of moisture and causes moisture convergence over the southern SCS under the influences of the low pressure zone. Deep convections bloom due to sudden increase of low-level convective instability. The major factors that influence the onset process over the northern and the southern SCS seem to be the amount of moisture and the time of the arrival of moisture.

Key words : Summer monsoon onset, South China Sea Monsoon Experiment, Thermodynamic and moisture analyses