莆田市 2023 年颱風“杜蘇芮”特大暴雨成因分析

黃麗娜[1,5*] 梁寶元[1] 任賽賽[2] 陳詩琳[3] 林東鈞[1] 鄭清傑[1] 鮑瑞娟[4,5]

福建省莆田市氣象局[1] 福建省莆田市荔城區氣象局[2] 福建省莆田市城廂區氣象局[3]

福建省災害性天氣重點實驗室[4] 中國氣象局海峽災害天氣重點開放實驗室[5]

(中華民國 113 年 7 月 10 日收稿；中華民國 114 年 2 月 11 日定稿)

摘 要

本文利用多種觀測資料和 NCEP、ERA5 再分析資料，應用常規診斷、平滑、濾波、功率譜分析等方法，從多尺度背景、物理量異常性、地形作用、觸發機制等方面分析了由 2023 年 5 號颱風“杜蘇芮”引發的莆田市極端特大暴雨的成因，主要結論如下：（1）特大暴雨是在天氣系統配置合理、次季節背景有利、中尺度系統適時出現等多尺度系統協同作用下由 2 個階段特大暴雨以“無縫對接”的形式組成。高空槽移動緩慢、西太副高偏強、菲律賓高壓脊穩定是第一階段特大暴雨的關鍵配置，南海季風低壓與菲律賓高壓脊的存在及中低層活躍的季風急流是第二階段特大暴雨的關鍵配置；高層南亞高壓斷裂及伴隨的福建上空輻散形勢對 2 個階段暴雨都有重要動力作用。500 hPa 位勢 20-30 天 和 30-50 天、熱帶對流 30-50 天和 10-20 天等低頻擾動及傳播提供特大暴雨有利的次季節背景。（2）“列車效應”和持續短時強降水的有利环境条件包括環境大氣對流不穩定、假相當位溫暖平流、地面中尺度輻合線和低空西南風急流走向一致；福建颱風登陸後期季風特大暴雨的觸發條件除了經典模型的條件外，地面中尺度輻合線和“西濕東乾”露點鋒也可觸發對流發展；地面中尺度輻合線、MCS“適時”出現是两个阶段特大暴雨 “無縫對接” 的實現条件。地形對特大暴雨的作用主要體現在水汽通量輻合、迎風坡動力抬升、向岸風輻合抬升，三面環山向南開口地形與低層南風急流和東南風急流的配置是此次暴雨中心形成的主要原因。(3)福建上空持續異常強的水汽和動力條件是極端暴雨的關鍵因素，其中 200 hPa 輻散與隨後 12 小時降水有較好對應關係。(4)福建熱帶氣旋特大暴雨經驗模型、物理量持續異常對颱風本體和極端暴雨預報有參考價值；颱風南部有夏季風急流、地面中尺度輻合線、對流層中下部露點鋒的形勢下應考慮季風特大暴雨的可能性；颱風本體特大暴雨與季風特大暴雨“無縫對接”時應警惕大範圍洪澇災害的發生。

關鍵字：極端暴雨、次季節擾動、異常度、列車效應、露點鋒、“無縫對接”

*通訊作者：黃麗娜（lenah@163.com）

一、前言

颱風特大暴雨勢必造成嚴重洪澇、城市內澇、山體滑坡等災害。福建近 15 年的觀測事實表明，颱風登陸後的局部特大暴雨時常發生，但區域性（1 個地級市以上）特大暴雨發生概率較少，這是由特大暴雨的中尺度特徵及地形特殊性造成。一場區域性颱風特大暴雨，必須在內部因素和外部因素達到“天時地利”條件時方能發生。內部因素包括颱風結構及內核對流情況，外部因素包括環境大氣條件和下墊面條件（陳聯壽等，2017）。內部因素影響颱風登陸前後暴雨的落區及強度，外部環境條件和下墊面條件不但對颱風登陸前後的暴雨有影響，更是登陸後期尾流暴雨的強度、落區及雨程分佈的重要影響因素。外部環境條件演變是颱風暴雨預報最重要的關注點，其中西南季風湧、西風槽、高空急流等天氣系統是最常見影響系統，這些系統尤其是西南季風湧的參與常常使暴雨時間延長並形成特大暴雨，如“碧利斯”（0604）、“榴槤”（0103）（程正泉等，2012；盧珊等，2012）。外部因素中的下墊面條件強烈影響福建颱風暴雨的時空分佈，地形性暴雨是福建颱風的一大特色，地形作用包括動力作用和雲物理作用。動力對福建颱風暴雨的作用包括動力抬升和中尺度輻合線或漸近線輻合兩種情況。動力抬升引起降水增幅形成一些常見的暴雨中心，主要由向坡風或喇叭口地形引起，已被大量觀測事實和模式試驗證實（林小紅等，2016；蔡義勇等，2016；左平昭等，2016；趙玉春等，2017；林小紅等，2023；崔夢雪等，2023）；中尺度輻合線或漸近線由山水組合地形旋生而成。對福建颱風降水起向坡風作用的大地形有太姥山、戴雲山、博平嶺，這 3 個山脈常使東風和東南風急流沿山脈東側爬升，造成太姥山東側的柘榮、戴雲山東側的仙遊、永春、安溪和博平嶺東側的南靖和平和等暴雨中心；起喇叭口收縮作用的地形有福鼎沙埕灣、汀江 2 處的半環形地形，這 2 處地形曾造成 1990 年 12 號颱風“楊希”在柘榮出現暴雨中心和 1996 年 8 月 8 日閩西特大暴雨中心（林毅等，1997）。山水組合地形使氣流遇高山形成分支、沿山脈邊緣的水系繞流後匯合產生中尺度輻合線、漸近線或地形性渦旋，降水在這些中尺度系統處增幅，福建常見的山水組合地形有鷲峰山與閩江、博平嶺和玳瑁山與九龍江，前者使羅源、連江、長樂一線出現暴雨增幅，後者使九龍江平原出現暴雨增幅。微物理過程主要通過高層積雨雲中播撒效應（Seeding effect）使暴雨增幅（Houze，2012；陳聯壽等，2017），高層如果沒有冰相粒子，降水會顯著減弱，目前關於福建

地形影響颱風暴雨的雲物理作用的研究還比較少。

預報員在瞭解了颱風暴雨的影響因素及降水增幅的常見要素之後，仍然很難把握颱風特大暴雨能否發生、特大暴雨的雨程分佈和落區（任福民等，2019）。模式產品在這方面表現不佳且預報員對模式的訂正能力不足，具體表現在：全球模式預報降水偏弱導致漏報；區域模式預報降水偏強、暴雨範圍偏大導致空報；全球模式與區域模式預報的強降水中心不一致導致既空又漏；模式間不一致及同家模式預報不穩定等諸多因素均影響預報員訂正能力。訂正能力不足更深層次原因在於業務人員對區域性特大暴雨的形成條件和觸發機制認識不足。關於颱風特大暴雨的形成條件，林新彬、劉愛鳴等（2013）曾歸納颱風倒槽型、本體型和後部型 3 類特大暴雨的概念模型，為福建預報員提供了很好的預報經驗，但特大暴雨為小概率事件，已有的概念模型是通過曾經出現的少量個例歸納而成，隨著年限增加及觀測網加密，樣本量必然增多，必然出現概念模型之外的情形，顯然，這種情形下，傳統的概念模型就不適用，如果此時模式表現不佳（一致性和穩定性欠佳），即使有個別模式預報出特大暴雨，預報員也很難信其有。

2023 年 7 月 28 日，受 5 號颱風“杜蘇芮”影響，福建省莆田市出現大範圍的特大暴雨（簡稱 7.28 特大暴雨，以下類同），全市 915815 人受災，緊急避險轉移 10475 人，緊急轉移安置 9518 人；農作物受災面積 10751.32 公頃，其中絕收面積 1701.76 公頃；倒塌房屋 1146 間，損壞房屋 5332 間，直接經濟損失 23.95 億元，占 2023 年全市國民經濟總量 0.75%。根據福建省氣象災害風險評估模型評估，此次暴雨過程屬極端高危險事件。如此嚴重的災害過程，摸清其影響系統特點、物理量異常特徵及觸發機制，有助於豐富完善福建省颱風特大暴雨概念模型，提升預報員的預報經驗及對模式產品的訂正能力，為此，本文利用 NCEP/NCAR 和 ERA5 再分析資料、雷達、加密自動觀測站、常規觀測資料，從多尺度背景、多要素特徵及觸發機制等方面研究莆田 7.28 特大暴雨的形成機理，以期為今後颱風極端暴雨的預報提供參考。

二、資料與方法

資料來源：（1）降水資料使用福建省地面加密氣象觀測資料。（2）常規高空觀測資料。（3）美國國家環境預報中心(NCEP)和美國國家大氣研究中心(NCAR)發佈的大氣環流逐 6 h 再分析資料，要素包括位勢高度、風和垂直速度場等，水準解析度 2.5°×2.5°，用於分析高空環流形勢

和物理量診斷。（4）NOAA 日平均向外長波輻射（簡稱 OLR），用於診斷大尺度環流特徵。（5）歐洲天氣預報中心提供的再分析資料 ERA5，資料網站(https://cds.climate. copernicus.eu/cdsapp)，空間解析度 0.25°×0.25°，時間分辨 1 h，要素包括風場、垂直速度、比濕和格點降水，用於診斷水汽通量和水汽通量散度，格點降水與 NCEP 計算的高層散度綜合診斷降水的動力條件。（6）中國氣象局 BABJ 發佈的“杜蘇芮”颱風逐時颱風路徑資料。（7）福建長樂雷達站逐 6 min 組合反射率和 RAMMB 熱帶氣旋網頁（https://rammb-data.cira.colostate.edu)4 KM 紅外衛星增強圖像。

物理量異常度：參考 Grumm and Hart（2001）和鐘敏、車欽等（2020）和張霞（2020）的做法，用標準化距平法診斷水汽通量散度、散度、垂直運動等物理量異常度，具體計算如下：

$$N=(X-\mu)/\sigma \tag{1}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中 X 為要素值，μ為計算日前後 2 d 共 5 d 氣候態平均值，σ為計算日前後 2 d 共 5 d 氣候態標準差，n為樣本數，本文的氣候態用 1991—2020 年，n=30。N 為某一時刻要素值對歷史同期平均值的偏離程度，即異常度。N 值大小可用來判定降水事件的可能嚴重程度，N 的絕對值越大，表明要素與歷史同期平均值的偏離程度越高。

濾波與週期分析：濾波是氣象研究中常用的一種資料處理方法。本文採用 Lanczos 濾波器對 NCEP 日平均要素場做帶通濾波以獲得次季節尺度信號；採用 25 點平滑對 ERA5 小時要素場做空間濾波，將中小尺度系統從大尺度系統中分離出來；採用功率譜分析關鍵區低頻週期特徵。

Lanczos 濾波器對氣象要素進行濾波處理可以從氣象要素時間序列中分離出特定時間尺度的氣象要素，以提取不同時間尺度的氣象要素序列，計算公式如下：

$$y(t)=\omega(t)*x(t)=\sum_{\tau=-n}^{n}\omega(\tau)*x(t-\tau) \tag{3}$$

其中 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分別為 t 時刻氣象要素時間序列的輸入和濾波後輸出，$\omega(t)$ 為濾波器的權重函數，可表示為：

$$\omega(t)=\left(\frac{\sin 2\pi f_2 t}{\pi t}-\frac{\sin 2\pi f_1 t}{\pi t}\right)\frac{\sin\frac{\pi t}{n}}{\frac{\pi t}{n}},t=-n,\cdots 0,\cdots n) \tag{4}$$

其中f_1和f_2為左右兩側截斷頻率，為了達到較好的帶通濾波效果，本文取 n=121。10-20 d 帶通濾波時，f_1=1/20，f_2=1/10；20-30 d 帶通濾波時，f_1=1/30，f_2=1/20；30-50d 帶通濾波時，f_1=1/50，f_2=1/30。

功率譜是以傅裡葉變換為基礎的頻域分析方法，根據不同頻率波的方差貢獻診斷出主要週期，從而確定序列隱含的顯著週期（魏鳳英，1999）。

中尺度採用 25 點平滑低通濾波(夏大慶等，1983)，即：

$f=\bar{f}+f'$，

$\bar{f}_0=[(1-s_1)(1-s_2)-s_1s_2/2]^2\cdot f_0+1/2[s_1(1-s_2)+s_2(1-s_1)][(1-s_1)(1-s_2)+s_1s_2/2]\cdot\sum_{i=1}^{4}f_i+1/4[s_1(1-s_2)+s_2(1-s_1)]^2\cdot\sum_{i=5}^{8}f_i+s_1s_2/4\cdot[(1-s_1)(1-s_2)+s_1s_2/2]\sum_{i=9}^{12}f_i+s_1s_2/8\cdot[s_1(1-s_2)+s_2(1-s_1)]\cdot\sum_{i=13}^{20}f_i+[s_1s_2/4]^2\sum_{i=21}^{24}f_i$,

其中 $f_{(i)}$ 為 i 點實況場要素，$\bar{f}$ 為平滑濾波後的要素值，f' 為擾動要素場，格點標號見圖 1。

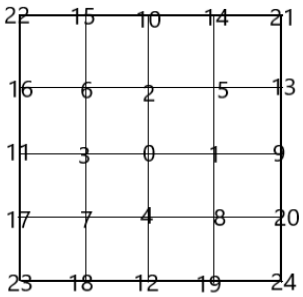

圖 1：格點標號

$\bar{f}_0$為濾波運算子，(i) 為格點座標（見圖 1），s_1、s_2 為平滑係數，分別取為$\frac{1}{2}$和$\frac{1}{3}$。運用上述公式得到幾乎全部的 2～5 倍格距波和最少 60%的 6～8 倍格距波，本文使用格點資料的格距約為 28 km，這相當於從原始氣象場中獲得中 50-200 km 尺度大小的中尺度波動。

定義：任意 24 h 雨量超過 250 mm 定義為特大暴雨；參照福建省天氣預報技術手冊（2013）和朱豔萍等（2007）等劃分標準，將颱風眼壁暴雨和螺旋雨帶暴雨合稱為“本體暴雨”，將距離颱風或熱帶低壓中心 250 km 或以上、由颱風與西南季風共同作用下的強降水稱為“季風暴雨”。

壓能場：低緯地區壓能場分析可以克服地轉近似不完全適用的問題，比分析氣壓場更合適，壓能能 $E=g*Z'+1/2*V^2$，E 相當於氣壓場中位能和動能之和，Z’表示等壓面上某一位置的高度與該等壓面平均高度的偏差，等 E 密集區類似于高緯度鋒區(陳瑞閃，2002)。

三、特大暴雨特徵

2023 年第 5 號颱風“杜蘇芮”於 7 月 21 日 8 時（北京時）在菲律賓以東洋面生成，生成後向西北偏西方向移動，28 日 9 時 55 分以強颱風級在福建省晉江市沿海登陸，登陸點距莆田約 70 km，“杜蘇芮”登陸後滯留福建時間長達 10 h，滯留期間颱風強度介於強颱風和強熱帶風暴級別，於 7 月 28 日 22 時離開福建省，7 月 29 日 08 時在安徽境內減弱為熱帶低壓，中央氣象臺對其停止編號，路徑見圖 2(a)。

受“杜蘇芮”影響，福建省莆田市出現大面積特大暴雨。本次過程具有累計雨量大、特大暴雨範圍廣、大雨強累計時間長、極端性突出等特徵。全市 62.9%的鄉鎮（34 個）任意 24 h 最大雨量達特大暴雨量級（圖 2b），特大暴雨範圍之廣和累計雨量之大均超過莆田市有區域站記錄以來的所有暴雨過程；全市 2/3 以上測站出現了 7 h 以上短時強降水（20 mm·h^{-1}）,其中莆田站 13 h，仙遊站 9 h（圖 2c）；全市多個測站、多個歷時雨量刷新歷史記錄,莆田站任意 24 h 最大雨量刷新福建省最高記錄。

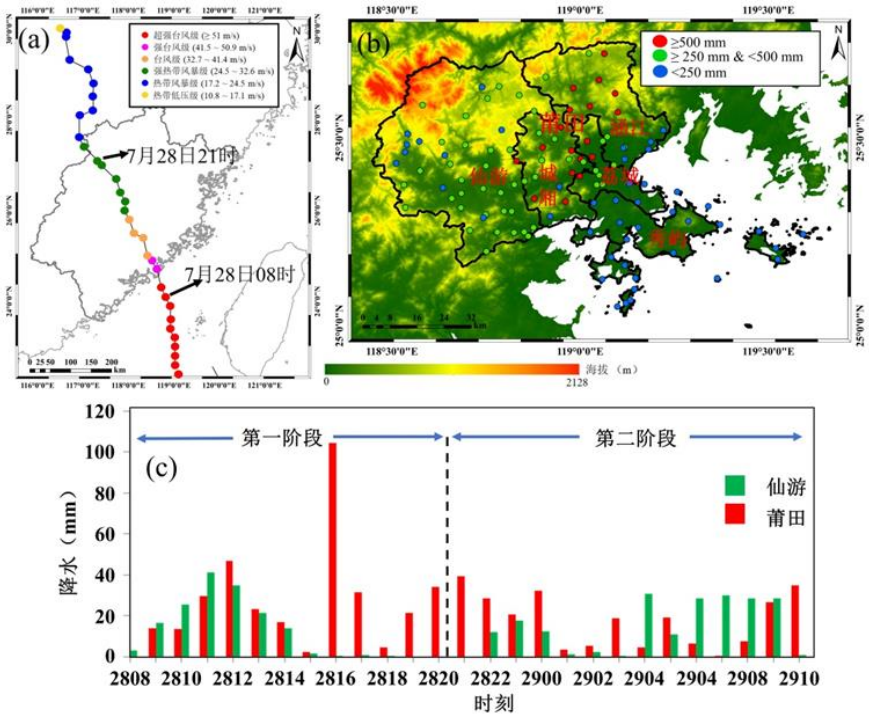

圖 2：2305 颱風 28 日 0 時至 29 日 08 時移動路徑(a)；2023 年 7 月 28 日 08 時至 7 月 29 日 10 時莆田市任意 24 小時最大雨量分佈（b，圓點為測站位置，黑色粗線為縣區界）；莆田和仙遊 2 個國家級氣象觀測站 7 月 28 日 08 時至 29 日 10 時逐時雨量（c，橫坐標：北京時，縱坐標：雨量，單位： mm，綠線為仙遊站，紅線為莆田站）

四、天氣尺度系統組態和次季節尺度背景

(一) 天氣尺度系統組態

從圖 3 可以看出暴雨發生期間 500 hPa 的系統組態：(1) 颱風環流東強西弱，颱風中心東半部風速維持 30 m·s^{-1} 以上，西半部風速僅 20 m·s^{-1} 左右，28 日 08 時東南風和西南風急流之間有強的氣旋式切變。(2) 颱風中心北側有副高，西北側有冷空氣。7 月 28 日 08 時至 29 日 08 時，颱風北側的副高脊線穩定在北緯 35°N 附近，西伸脊點穩定在 107-110°E 之間，同時內蒙至川東有一高空槽，槽內有冷空氣滲漏至北緯 32°N 以北地區，冷槽和副高脊的配置導致颱風登陸後移速慢，在福建滯留時間長，有利於本體暴雨的長時間維持。(3) 500 hPa 颱風低壓 584 dgpm 線與副高週邊的 588、592 等值線的距離分別穩定在 300 km 和 600 km 附近，導致本體暴雨期間莆田上空東南風和偏南風急流持續維持，急流風速 500 hPa 達 30 m·s^{-1} 以上，850 hPa 達 16-22 m·s^{-1}，急流除了提供暴雨區水汽外，也使颱風獲得潛能，有利於颱風低壓陸上維持（陳聯壽等，2017；Dong M Y et al.，2010），同時也為暴雨提供動能（陳瑞閃，2002）。(4) 菲律賓與颱風“卡努”之間始終有一高壓脊線存在，脊區的

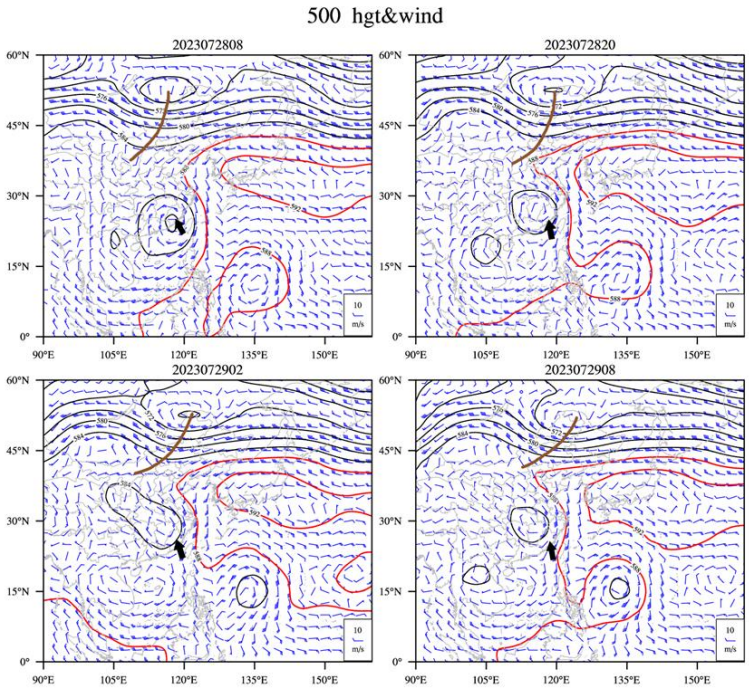

圖 3：2023 年 7 月 28 日 08 時至 29 日 08 時（北京時，以下類同）500 hPa 高度場和風場（實線為位勢高度，單位：dgpm，紅線為 588 和 592 等值線；棕線為高空槽；黑色實心箭頭指向莆田市大致位置）

位勢高度與 588 線對應，高壓脊與“杜蘇芮”之間的位勢梯度使南海偏南風急流與颱風東側南風急流連為一體，兩支急流提供暴雨需要的動力和水汽條件。(5) 28 日 20 時至 29 日 08 時，廣西至越南有閉合的季風低壓環流，該低壓為第二階段暴雨進一步提供水汽。中低層急流對暴雨意義也可以從圖 4 的水汽輸送及壓能場診斷：從 28 日 08 時至 29 日 02 時，有 3 條水汽輸送通道向莆田輸送水汽，分別是東南風急流通道、南風急流輸送通道和西南風急流輸送通道，其中 28 日 08 時和 14 時三條通道上的通量都比較強，28 日 20 時和 29 日 02 時西南風和南風通道上的輸送更明顯；壓能場上，4 個時次莆田上空 850 hPa 均有明顯的壓能場鋒區，表明暴雨發生有較好的動能條件。

從圖 5 可以看出特大暴雨發生期間 200 hPa 福建上空輻散形勢：從 28 日 20 時至 29 日 08 時，南亞高壓 1256 dgpm 斷裂，福建處於東環高壓西側，28 日 08 時至 28 日 20 時，福建上空有明顯的偏南風和西南風輻散形勢，30°N 附近的東海地區有明顯的 16 $m \cdot s^{-1}$ 以上的風速核，福建處於風速核的入口區處；相比之下，27 日 20 時無明顯的輻散風場，29 日 08 時仍有偏南風和西南風輻散，但 16 $m \cdot s^{-1}$ 以上風速核已消失。從散度場和格點降水量可以看出，

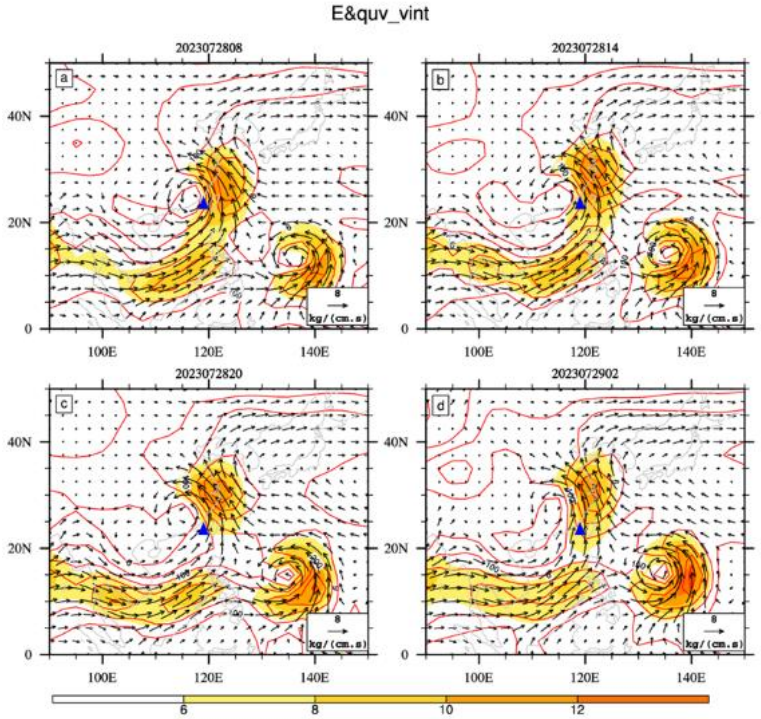

圖 4 ：2023 年 7 月 28 日 08 時-29 日 02 時 1000-400 hPa 整層水汽輸送通量（陰影，單位：$Kg \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$）和水汽輸送通量向量（箭頭），850hPa 壓能場（單位：$m^2 \cdot s^{-2}$，平均高度取 1440gpm）

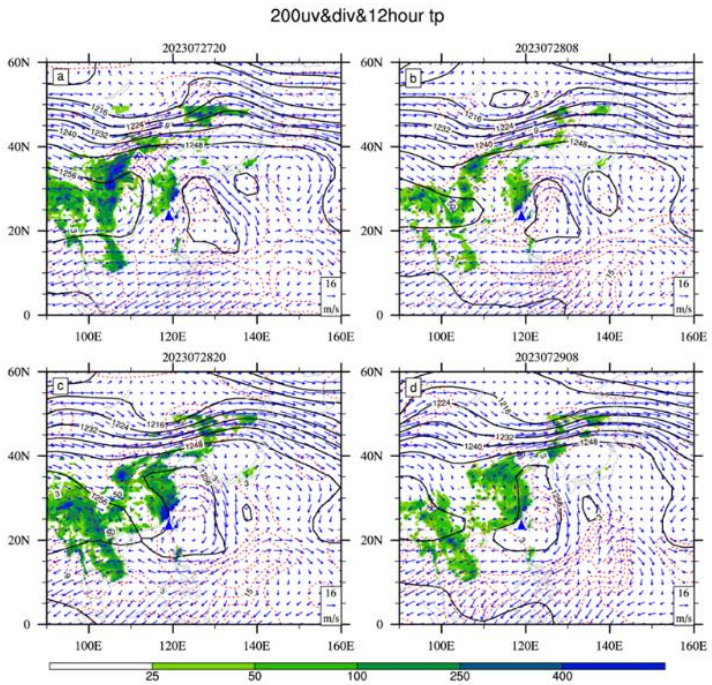

圖 5：2023 年 7 月 27 日 20 時-29 日 08 時 200 hPa 高度場、風場、散度場和未來 12 h 累計雨量（黑色實線為位勢高度，單位：dgpm，僅顯示高於 1212 dgpm 部分；紅色虛線為散度場，單位：s^{-1}，僅顯示高於 $3s^{-1}$ 部分；陰影區為 12 h 累計雨量；藍色實心三角形頂角指向莆田市大致位置）

高層輻散與未來 12 h 降水有較好對應關係，28 日 08-20 時，福建沿海散度均為輻散，對應的未來 12 h 累計格點雨量均在 400 mm 以上，27 日 20 時和 29 日 08 時散度值低於 3，對應的未來 12 h 格點雨量均在 100 mm 以下，莆田市自動站雨量記錄到的強降水主要發生時段為 28 日 08 時至 29 日 10 時的觀測事實（圖 2c）也驗證了高層輻散形勢對強降水的前兆意義。

(二)次季節尺度背景

上一節分析表明，暴雨發生期間 500 hPa 颱風中心西北面的冷槽和北面的副高脊、低空南風急流持續維持對暴雨的意義，下面分析上述系統維持的次季節尺度背景特徵。

分析 2023 年 7 月份 10-20、20-30 和 30-50 等 3 個頻率高度場和 OLR 場低頻天氣圖發現，500 hPa 低頻高度場 20-30 天 105～115°E 範圍和 30～50 天 30～40°N 度範圍分別存在自北向南和自東向西傳播現象，OLR 場 10-20 天和 30～50 天熱帶低頻振盪存在向西北傳播和東北傳播現象。關鍵區高度場功率譜見圖 6，由圖 6 可見熱帶對流存在明顯 10-20 天和 30-50 天低頻振盪，高度場的低頻信號不如熱帶對流，但仍有較明顯的 10-20 天、20-30 天和 30-50 天振盪，其中 10-20 低頻高度場經過普

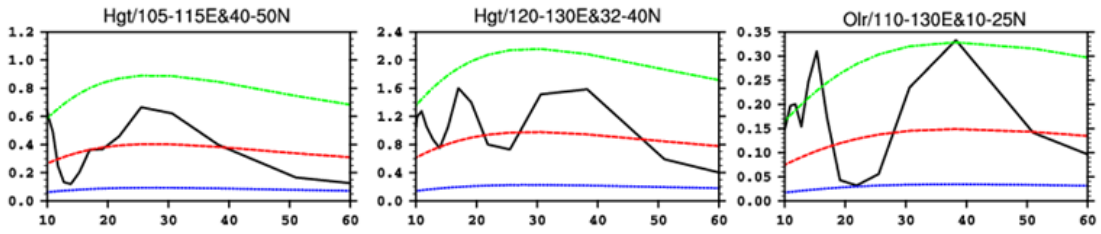

圖 6：105-115˚E/40-50˚N 500 hPa 高度場(a)、120-130˚E/32-40˚N 500 hPa 高度場(b)和 110-130˚E/10-25˚NOLR 場(c)功率譜 (黑色實線表示譜密度，彩色虛線表示 α=0.05 紅噪聲檢驗及上下置信區間)

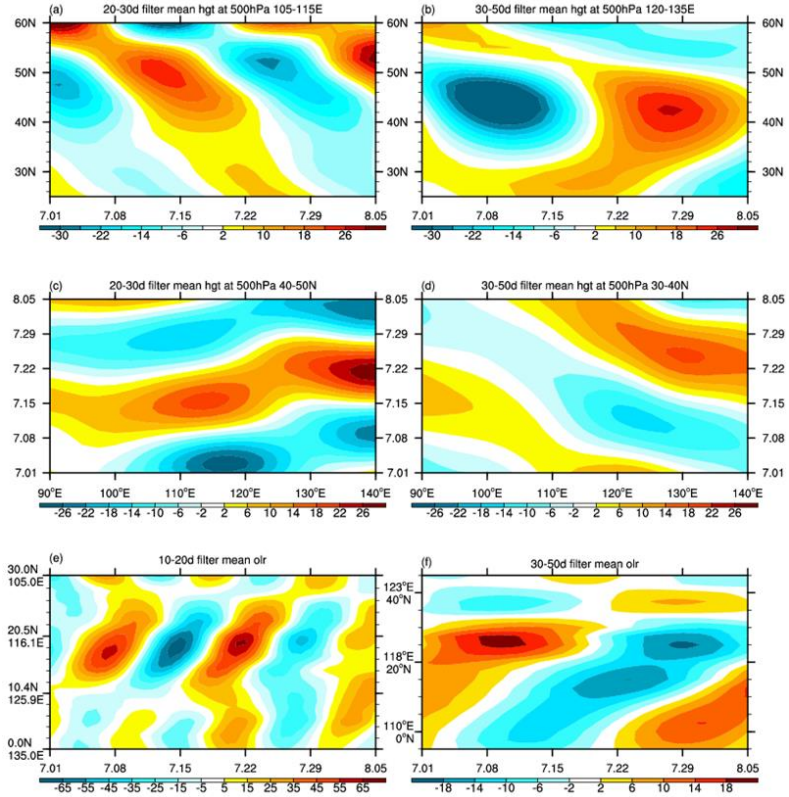

圖 7 ：2023 年 7 月 1 日至 8 月 5 日低頻要素時間演變（a：500 hPa 105-115˚E 平均高度場 20-30 天緯度-時間剖面；b：500 hPa 120-135˚E 平均高度場 30-50 天緯度-時間演變；c:500 hPa 40-50˚N 平均高度場 20-30 天經度-時間演變；d:500 hPa 30-40˚N 平均高度場 30-50 天經度-時間演變，a-d 單位，dgpm；e：10-20 天 0˚-30˚N /135˚E -105˚E 低頻 OLR 時間演變；f:30-50 天 5˚S-45˚N /105˚E -130˚E 低頻 OLR 時間演變，單位：W·m^{-2}）

查，關鍵區（120-130˚E/20-30˚N）振盪傳播現象不明顯，所以下文分析低頻振盪時間演變時，高度場僅列出 20-30 天、30-50 天的演變。

由圖 7a 和 7c 可以看出，第一個關鍵區（105-115˚E/40-50˚N）20-30 天振盪由 60˚N 以北的擾動向南傳播引起，東西向傳播不明顯，27～29 日負位相已傳播至 35～45˚N，對應該時段颱風中心西北側的高空槽；由圖 7b 和 7d 可以看出第二個關鍵區（120-

130°E/32-40°N）30-50 天振盪及西傳現象，但南北向傳播現象不明顯，7 月 27～29 日正位相西傳至 120°E 以及西，對應颱風北側副高脊線的穩定維持；由圖 7e 可以看東亞熱帶 10～20 天低頻振盪及其向西北傳播現象，7 月 6 候，熱帶低頻對流活躍在南海至中國東南沿海一帶；由圖 7f 可以看熱帶對流 30-50 天振盪及其向東北傳播現象，7 月 8 日和 7 月 29 日福建至廣東沿海一帶（116-120°E/18-28°N）低頻對流呈反位相狀態，7 月 8～15 日，對流活躍在赤道附近，隨後向東北方向傳播，7 月 27～29 日，負位相傳播至福建至廣東沿海，對應季風低壓的形成和低空急流的維持，颱風南部低空急流緊跟北隨是第一階段和第二階段特大暴雨“無縫對接”的重要背景。

綜合上述天氣尺度和次天氣尺度分析可知，颱風登陸後其東北側副高穩定、西北側有冷空氣、東南側有高壓脊，如此“東阻西槽”的系統組態導致颱風中心移動緩慢、環流東強西弱和颱風中心東側南風或東南風急流維持，持續而強勁的偏南風急流有利颱風低壓陸上維持，颱風移速慢疊加南風急流導致本體暴雨持續時間長達 11 h；850hPa 西南風、東南風和偏南風三支急流及伴隨的水汽輸送提供暴雨區豐富水汽及動能條件，季風低壓及其與菲律賓高壓形成的低空急流額外提供了第二階段特大暴雨所需的水汽和熱力條件；200 hPa 南亞高壓斷裂，東環高壓西側偏南風和西南風分流和東海風速核入口區等有利的高層輻散形勢對 2 個階段暴雨都有重要動力作用，高層輻散與未來 12 h 降水有較好對應關係；500 hPa 中高緯南傳的 20-30 天高度場、西傳的 30-50 天高度場和東北傳的熱帶 30-50 天對流及西北傳的東亞西北太平洋 10-20 天對流等 4 種低頻擾動提供特大暴雨有利的次季節尺度背景。以往討論的福建颱風特大暴雨僅本體暴雨型或後部暴雨型中的一種且沒有季風低壓參與，本次過程的環流形勢具有兩類暴雨型“無縫對接”的特點且有季風低壓參與、迭加的次季節有利位相多達 4 種，因此，產生的暴雨持續時間更長、累計雨量更大。

五、物理量條件異常性分析

上述分析表明，天氣形勢和次季節背景均非常有利於 7 月 28 日福建中部沿海持續強降水發生。然而，天氣尺度和次季節尺度的有利配置並不意味著會出現極端降水（俞小鼎，2012）。物理量異常診斷是探究異常降水成因的常見方法，物理量異常診斷多用比較法，將異常降水過程與史上重大過程或歷史氣候態做物理量對比，以診斷發生極端降水的可能性。其中歷史氣候態比較法為近年來診斷華北降水異常性的常見方法。孫軍等（2012）、鐘敏等

（2020）、張霞等（2020,2021）等用此方法診斷華北、河南等地區極端暴雨過程的物理量異常性，認為標準差倍數與降水異常有明顯相關，由多個環境物理量參數異常度組建的極端暴雨綜合指數對極端暴雨落區預報有正技巧。由於天氣系統及次季節尺度分析無法判斷降水的極端性，歷史氣候態比較法又具有計算便捷、業務獲取方便的特點，同時能克服不同時期環境參數值差異較大、各參數的距平百分率差異亦較大的缺點，下面就水汽及動力參數的異常性特徵做詳細診斷。

(一)水汽條件分析

從 7 月 28 日 02 時至 7 月 28 日 08 時的水汽通量和水汽通量散度距平標準差（圖 8）可以看出：（1）850 hPa 至 925 hPa 從東經 100°E 至福建沿海強的季風水汽輸送通量(圖 8 中黑色方框)，925 hPa 100°E-120°E 範圍的越赤道氣流。（2）850 hPa 和 925 hPa 在特大暴雨發生前 6 h（圖 8a、圖 8d）至即將發生時（圖 8b、圖 8e），莆田市上空（圖中紅色箭頭附近）水汽通量散度負距平達-4～-7σ（σ 指氣候標準差），登陸後水汽通量散度 850 hPa 轉為正距平（圖 8c），但 925 hPa -3σ 輻合異常持續至 29 日 02 時。

(二) 動力條件分析

第 4 章已經初步分析了 200 hPa 福建上空的輻散形勢，下麵用動力參數異常度做更詳細診斷。首先，在 200 hPa 散度場上，28 日 02 時至 28 日 08 時（圖 9a，圖 9b），從東海至南海北部為明顯輻散區，福建沿海輻散異常度達 5～11σ。這一時段 850 hPa 散度場上福建全省均表現為輻合, 福建中北部沿海為強輻合中心(圖 9c，圖 9d），2 個時次異常度分別為-7～-11σ。28 日 14 時(圖略)至 29 日 02 時，高層輻散低層輻合均有所減弱，850 hPa 28 日 20 時甚至出現正距平，只有 200 hPa 持續維持 3σ 以上的異常度。500 hPa 和 850 hPa 垂直速度場上（圖 10），暴雨期間福建省有強上升運動，上升中心的異常度低於-9σ，在最強降水發生前及發生時甚至低至-13σ。

綜合以上分析可見，在特大暴雨發生前 6 h 至結束前 2 h，福建上空異常偏強（異常度超過±3σ）且持久的水汽輸送、水汽輻合及動力條件是莆田 7.28 極端暴雨的關鍵因素，其中 200 hPa 輻散、500 hPa 上升運動及 925 hPa 水汽通量輻合 3 個參量的異常度和持續性最明顯。

（三）地形對水汽輸送及動力抬升的影響

1.地形對水汽輸送的影響

過莆田（119ºE ，25ºN）用經向和緯向垂直剖面診斷水汽通量、水汽通量散度

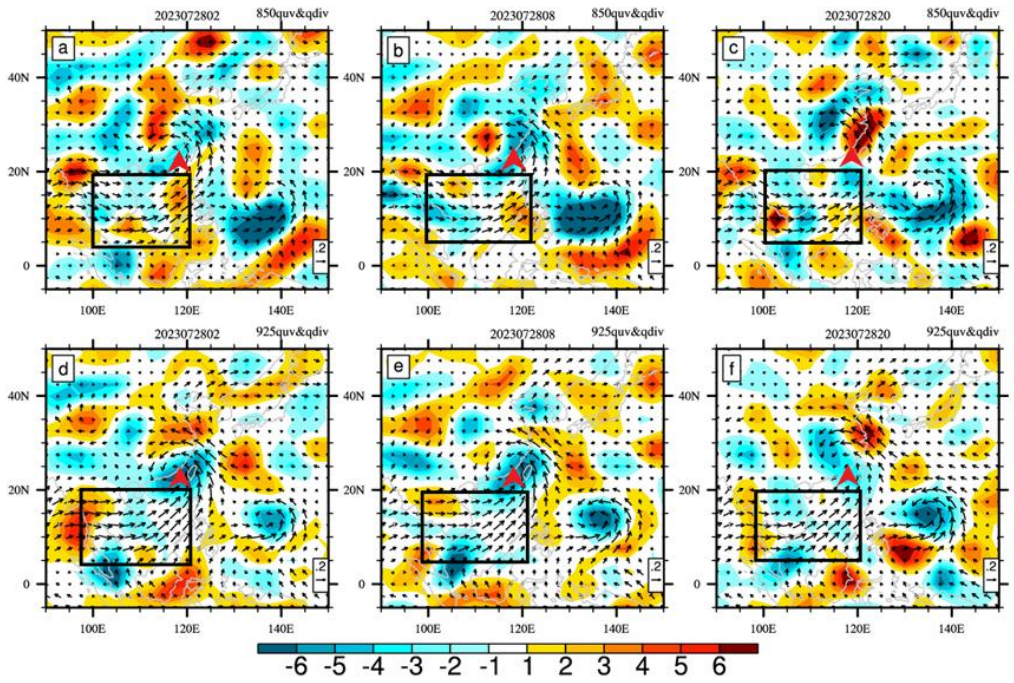

圖 8：2023 年 7 月 28 日 02 時、28 日 08 時和 28 日 20 時 850 hPa 和 925 hPa 水汽通量距平、水汽通量散度距平標準差倍數（圖上方標注時間為北京時，右上角標注層次，向量為水汽通量，單位：$Kg{\cdot}cm^{-1}{\cdot}s^{-1}$，陰影為距平標準差倍數，黑色方框為 100°E-120°E、5°N-20°N 範圍，紅色箭頭指向莆田市大致位置）

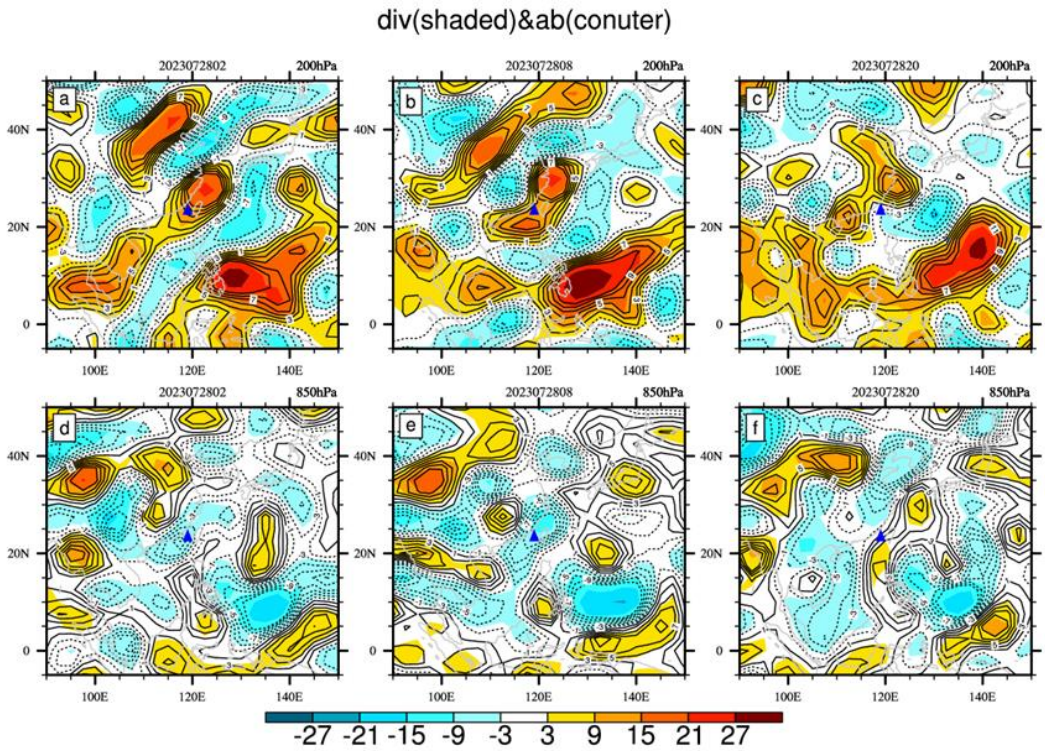

圖 9：2023 年 7 月 28 日 02 時、28 日 08 時 200hPa 和 850hPa 散度場及散度距平標準差倍數（陰影為散度場，單位：$10^{-6}s^{-1}$；黑線為距平標準差倍數，圖上方標注北京時，右上角標注層次，藍色箭頭指向莆田市）

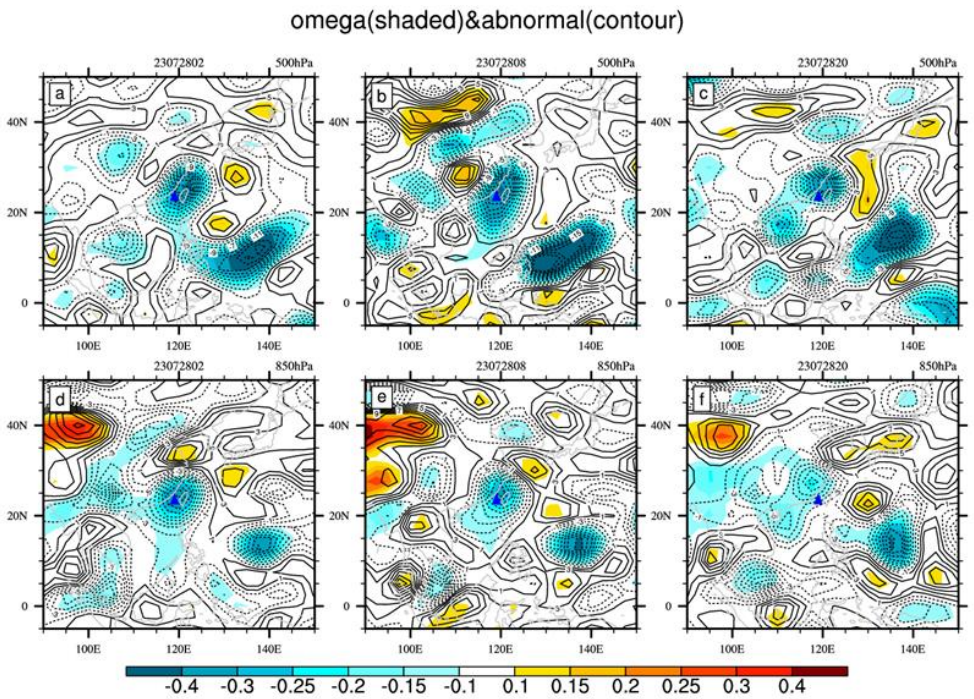

圖 10：2023 年 7 月 28 日 08 時和 1999 年 10 月 9 日 08 時 500 hPa 和 850 hPa 垂直運動及距平標準差倍數（陰影為垂直速度，單位：$Pa\cdot s^{-1}$；黑線為距平標準差倍數，圖上方標注為北京時，右上角標注層次；藍色箭頭指向莆田市）

和垂直速度見圖 11。在 119ºE 經線經向風剖面圖上，山脈海拔接近 850 hPa，7 月 28 日 08 時颱風尚未登陸時，南風尚未到達 25˚N，最強的水汽輻合位於 24˚N～25˚N 之間（圖 11a），強輻合中心為颱風眼壁附近強的上升運動區，與地形關係不大。28 日 14 時，颱風中心位於莆田西側，莆田市與颱風中心相距 30～105 km，莆田仍處於颱風的眼壁附近，有很強的上升運動，此時南風已經到達山前（圖 11b），北高南低的地形阻擋對流層下層水汽使其在地形迎風坡（南側）形成輻合，山前水汽通量散度達$-20g\cdot(cm^2\cdot hPa\cdot s)^{-1}$，而在地形的背風一側（北面），水汽輸送通量和水汽通量散度明顯弱於山前；沿 25˚N 剖面圖上也存在同樣的現象，28 日 14 時（圖 11e），福建上空 850 hPa 以下為東南風急流，山脈阻擋了颱風週邊及副熱帶高壓南側的水汽向內陸輸送，使對流層下層水汽在地形迎風坡一側（東側）形成輻合，大於 10 $g\cdot(cm^2\cdot hPa\cdot s)^{-1}$ 的水汽通量在地形迎風坡處向上伸，1000～850 hPa 上，地形迎風坡處有 $-20*10^{-5}$ ～ $-16*10^{-5}g\cdot(cm^2\cdot hPa\cdot s)^{-1}$ 水汽輻合中心存在，山后的水汽通量和通量輻合明顯弱於山前(圖 11e)。可見，28 日 14 時，眼壁附近強的上升運動加上南風和東風均受到地形阻擋抬升出現水汽通量輻合，導致莆田市東部的涵江、荔城、城廂等地(位置見圖 2b)有很強的暴雨，從 28 日 16 時～17 時雷達反射率及降水時間演變

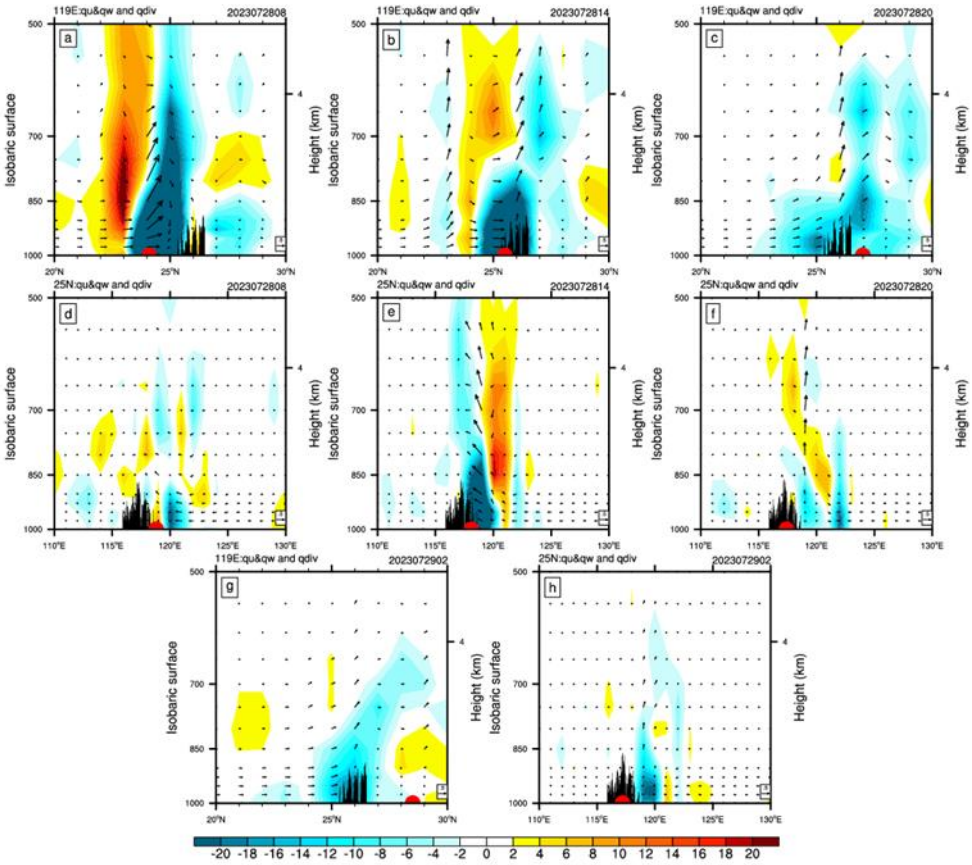

圖 11：過強降水中心的水汽通量（向量，單位：g·(cm·hPa·s)$^{-1}$）和水汽通量散度（陰影，單位：10^{-5}g·(cm·hPa·s)$^{-1}$）緯度高度（a、b、c、g）和經度高度（d、e、f、h）剖面（紅色實心半圓表示該時次颱風中心的緯度或經度，黑色陰影區表示地形）

圖（圖 12）也可以看出，該時段白沙站整點小時雨量達 63 mm，莆田站超過 100 mm。由圖 11 可以看出地形對南風的阻擋抬升及低層水汽通量輻合一直維持到 29 日 02 時，之後水汽輻合變弱，降水也隨之減小。山前迎風坡一帶維持強而深厚的水汽輸送和水汽輻合，利於強降水持續並達特大暴雨。從緯度剖面圖上還可以看出，28 日 20 時至 29 日 08 時，儘管颱風中心一路北上，山脈北側距離颱風中心更近但低層水汽通量輻合中心仍位於山前，山后（北面）南風和水汽通量輻合都比較弱，表明地形對莆田市夜裡季風暴雨的增幅作用。

2.地形對暴雨的動力作用

地形的動力作用一方面表現在相同經度有無地形區域垂直運動的差異上。下面取有地形影響的涵江山區（119ºE、26ºN）和無地形影響的南部平原（119°E、25°N）兩個點做垂直速度時間演變（圖 13），圖 13 顯示，有地形影響的涵江山區 28 日 08 時～29 日 08 時在中低層一致維持較強上

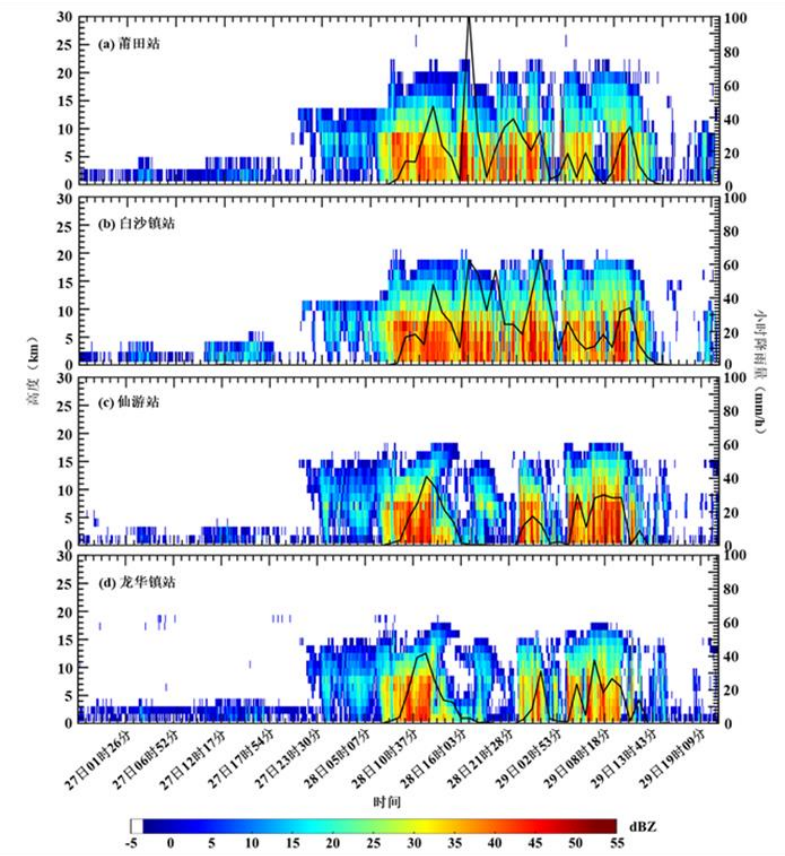

圖 12：莆田、白沙、仙遊、龍華 4 個測站雷達反射率（左側縱坐標:回波高度，單位：公里）和小時雨量（右側縱坐標，單位：毫米）時間演變

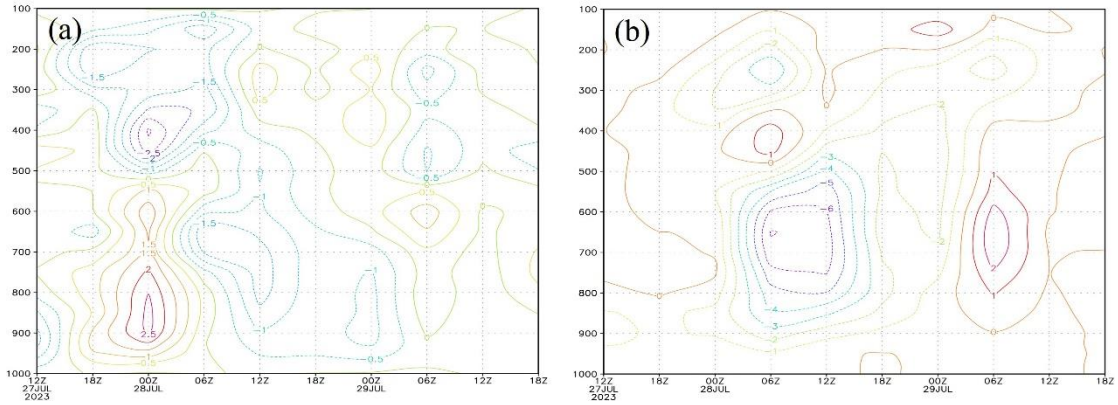

圖 13：垂直速度高度時間剖面圖（等值線，單位：$Pa\cdot s^{-1}$，a 表示山區，b 表示平原，橫坐標表示世界時）

升運動，尤其以 28 日 14 時最強，中心達 -7 $Pa\cdot s^{-1}$。而無地形影響的南部平原地區，上升運動雖維持，但強度較山區明顯偏弱，只有-1.5$Pa\cdot s^{-1}$，因此，小時雨強、累積降水均以有地形影響的地區更強。

地形對暴雨動力作用還表現在相近緯度降水分佈的東西差異上。圖 12 為莆田、仙遊 2 個國家級觀測站和涵江區白沙、仙

遊縣龍華 2 個山區的區域觀測站的逐時降水和測站上空的雷達回波強度演變情況，以上 4 個測站中，莆田站位於市東部的興化平原中心位置，仙遊站位於市西部的東西鄉平原中心位置，白沙屬莆田市東部山區站，龍華屬莆田市西部山區站。從圖 12 可以看出 15-20 時對流東強西弱。這個階段降水東西差異是由地理位置和地形差異兩方面造成。地理位置方面，興化平原是三灣（興化灣、平海灣和湄洲灣）向北部和中部山區的過渡區，14-20 時在颱風中心東側、東南側地面有很強的東南風或偏南風，東南風過三灣後在興化平原形成向岸輻合，原來弱的雨帶移至興化平原對流會加強；仙游東西鄉平原因離海岸線較遠無明顯的向岸風輻合，對流至此不會加強，甚至由於摩擦而減弱。此外，興化平原至涵江北部山區合起來地勢呈三面環山（圖 2b）向南開口形狀，仙遊中西部地勢呈三面環山向東開口形狀，南風風場對向南開口的地形有利，對向東開口的地形影響不大。總之，15-20 時降水東強西弱是由東部地區更有利的向岸風輻合條件和向南開口的環山地形造成。

六、中尺度影響系統分析

（一）列車效應

從第 3 章及圖 2 可以看出降水時間尺度及空間分佈上的中尺度特徵，分析雷達組合反射率(圖 14)和紅外衛星增強圖像（圖 15）可以看出 7 月 28 日 15 時至 29 日 08 時持續帶狀 MCS 影響莆田，“列車效應”明顯。由於受 MCS 的持續影響，福建東部沿海強降水分佈呈東北西南走向的

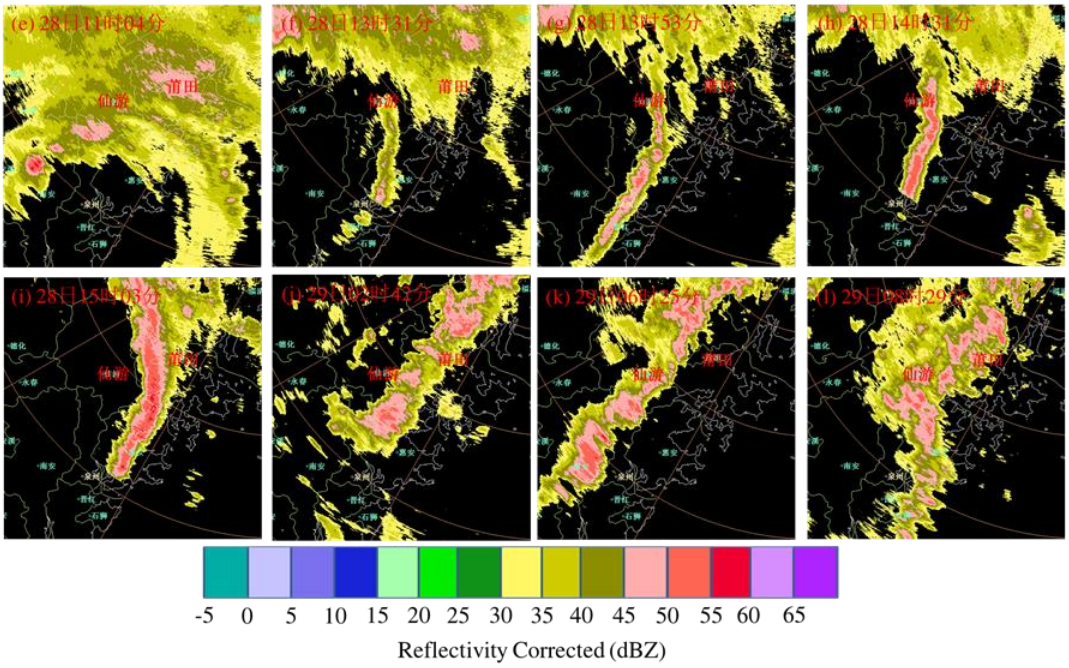

圖 14：2023 年 7 月 28 日 15 時至 29 日 09 時福州雷達站組合反射率

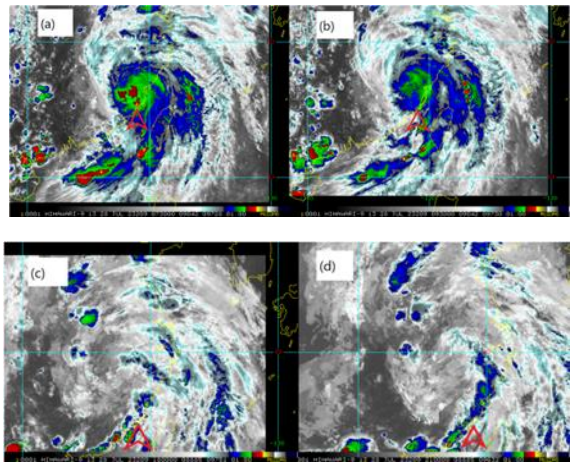

圖 15：2023 年 7 月 28 日 15 時至 7 月 29 日 05 時衛星圖像（a：7 月 28 日 15 時 30 分；b:7 月 28 日 17 時 30 分；c：7 月 29 日 02 時；d：7 月 29 日 05 時，紅色箭頭指向莆田市）

帶狀分佈，期間莆田市累計降水量≥500 mm 共有 9 個網站，最大累計降水量約 626.8 mm，最大雨強約 134.8 $mm \cdot h^{-1}$。從圖 12 可以看出莆田站和白沙站在 28 日 15 時起持續的強回波，仙遊站和龍華站在 29 日 02 時起持續強回波，強回波高度和逐時降水存在起伏，但時間間隔短，表明“列車效應”期間多個中尺度系統影響這些地區。

（二）列車效應的背景場特徵

孫繼松等（2012，2013）、王文等（2013）研究表明，“列車效應”與重力波的傳播有關，重力波對強對流天氣發展起觸發機制的作用。重力波經過已經產生對流的天氣區時，對流強度會發生週期性變化。重力波可以用物理量的鏈式分佈來診斷，實際業務中，預報員更需要瞭解什麼樣條件下“列車效應”才可能發生。孫繼松等（2013）和 Piani（2000）認為，在環境大氣為對流不穩定、地面中尺度輻合線與低空急流方向一致、假相當位溫暖平流的環境條件下，可以激發重力波並可能出現“列車效應”，其中對流不穩定是對流發展的環境條件，中尺度輻合線與低空急流脈動是慣性重力波的激發條件，是“列車效應”的初始對流起源，兩者方向一致使對流組織成“列車”，低空急流和假相當位溫暖平流使重力波在傳播過程能夠從背景場獲得能量，造成“列車效應”的維持和發展。下面分別分析這 3 個條件。

從 7 月 28 日 08 時至 29 日 02 時福州站探空圖（圖 16），福州站 700 hPa 以下存在假相當位溫逆溫層，低層東南風和西南風風速超過 12 米/秒，說明環境大氣對流不穩定、低層持續南風急流。圖 17 為 7 月 28 日 14 時至 29 日 02 時 850hPa 風場和假相當位溫場，可以看出 28 日 14 時至 28 日 20 時莆田市北側假相當位溫冷槽和南側

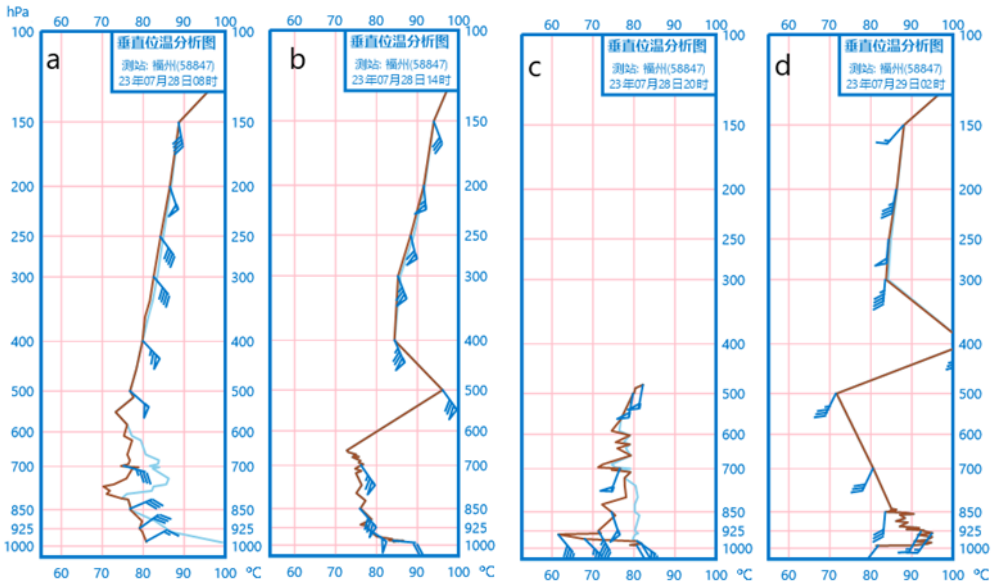

圖 16：2023 年 7 月 28 日 08 時至 29 日 02 時福州站垂直位溫分析圖（a：28 日 08 時；b：28 日 14 時；c：28 日 20 時；d：29 日 02 時。棕線為假相當位溫，藍線為飽和假相當位溫）

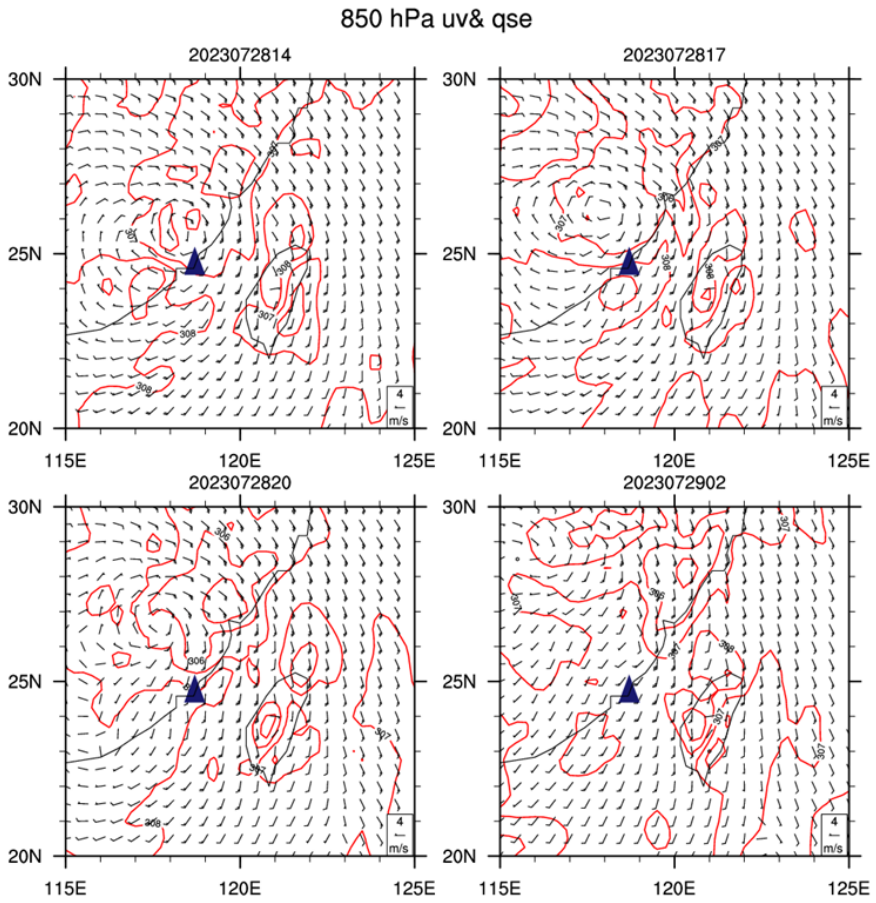

圖 17：2023 年 7 月 28 日 14 時至 29 日 02 時 850 hPa 風場和假相當位溫場（a：28 日 14 時；b：28 日 17 時；c：28 日 20 時；d：29 日 02 時，單位：K；黑色等腰三角形頂角指向莆田市）

假相當位溫暖脊，即 28 日白天至上半夜福建沿海存在假相當位溫暖平流。圖 18 為地面流場，從原始場看不出 28 日 14 時至 29 日 02 時福建沿海的中尺度輻合線，經過 25 點平滑濾波後的流場上卻可以看出，原始場海岸線附近一致的西南氣流中包含東北西南走向的中尺度輻合線，該輻合線與西南急流方向一致，對重力波起觸發作用，同時配合低空急流，組織對流排列成“列車”。可見，28 日下午至 29 日淩晨“列車效應”的 3 個條件都滿足，滿足這些條件的時間完美銜接了降水過程的 2 個階段，颱風本體暴雨和季風暴雨實現“無縫對接”。

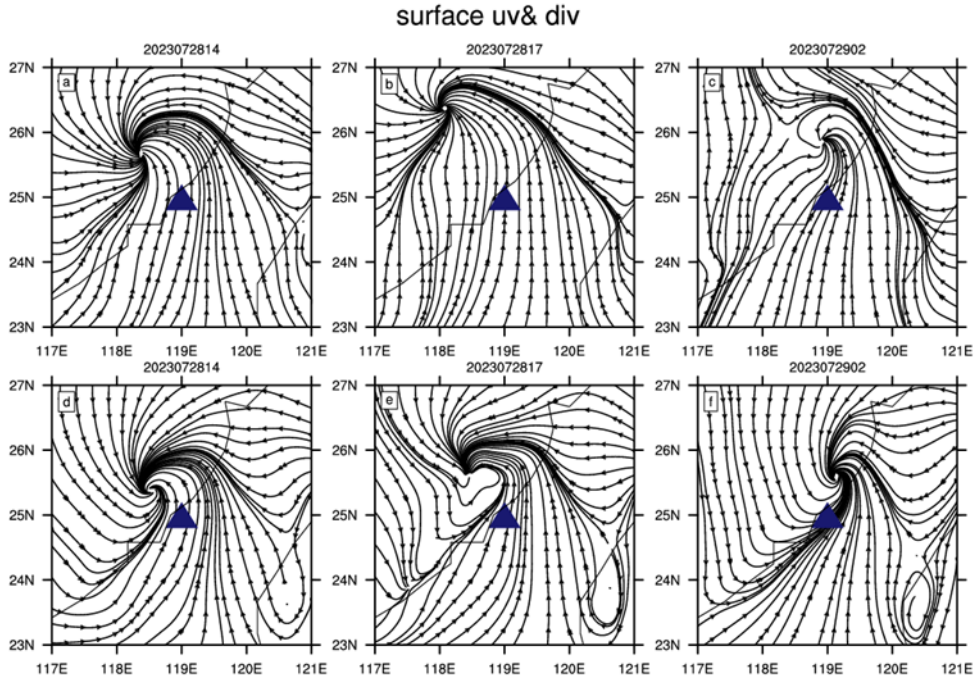

圖 18：2023 年 7 月 28 日 14 時至 29 日 02 時地面 10 米流場（a-c 為原始場，d-f 為濾波場，實三角形頂角指向莆田市）

（三）觸發條件

上述分析表明天氣尺度、次季節尺度及中尺度背景、地形與背景場的配置均有利於莆田市大暴雨發生，對於颱風登陸後期的季風暴雨，天氣尺度動力抬升和地形抬升及中尺度輻合線都可以觸發不穩定能量釋放和對流發展，但僅靠上述條件不足以驅動長達 10 h 的連續暴雨，颱風西部的“乾涼”空氣入侵與南風急流形成的露點鋒和切變線是福建颱風後部特大暴雨經典模型的主要觸發條件，第 3 章分析表明，28～29 日並沒有高空槽或冷空氣影響福建，說明存在其它條件替代了“乾涼”空氣入侵，上一節分析的中尺度輻合線是條件之一。對 119°E 和 25°N 分別做經向和緯向垂直剖面後發現，7 月 28 日 18 時至

29 日 05 時(圖 19)，25°N 剖面 500 hPa 以下 119°E-124°E 範圍存在一條傾斜向下露點鋒，低層（850 hPa 以下）119°E 以西 t-td 為低於 2°C的濕區，以東為高於 6°C的乾區，傾斜向下的露點鋒到 29 日淩晨 5 時仍然存在，梯度有所減弱，水準結構呈西濕東乾，與以往西乾東濕結構相反。中尺度輻合線及露點鋒的形成原因有待今後進一步研究。

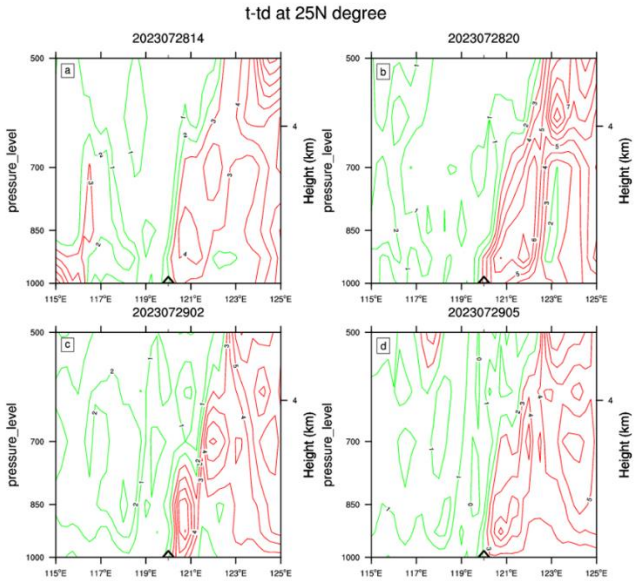

圖 19：7 月 28 日 14 時至 29 日 05 時 25ºN 溫度露點差緯度-高度剖面（a、b、c、d 分別為 7 月 28 日 14 時、7 月 28 日 20 時、7 月 29 日 02 時和 7 月 29 日 05 時，單位：℃）

七、結論與討論

本文利用多種觀測資料和 NCEP、ERA5 再分析資料，從降水特徵、影響系統、物理量異常特徵、地形作用、中尺度特徵等方面分析了 2023 年第 5 號颱風“杜蘇芮”引發的莆田市大範圍特大暴雨過程的成因，得出以下結論：

（一）本次極端過程是在天氣尺度系統有效配置和非常有利的次季節尺度背景下發生。颱風登陸後其東北側副高、西北側冷空氣、東南側高壓脊組成“東阻西槽”的系統組態，導致颱風中心移速緩慢、環流東強西弱和颱風東側持續而強勁的南風或東南風急流，持續的南風急流利於颱風低壓陸上維持，颱風移速慢疊加南風急流使颱風本體階段暴雨持續時間長達 11 h；850 hPa 西南風、東南風和偏南風三支急流及伴隨的水汽輸送提供暴雨區豐富水汽及動能條件；季風低壓及其與菲律賓高壓形成的低空急流額外提供了第二階段特大暴雨所需的水汽和熱力條件；200 hPa 南亞高壓斷裂，

東環高壓西側偏南風和西南風分流和東海風速核入口區等有利的高層輻散形勢對 2 個階段暴雨都有重要動力作用；500 hPa 中高緯南傳的 20-30 天高度擾動、西傳的 30-50 天高度擾動和東北傳的熱帶 30-50 天對流及西北傳的東亞西北太平洋 10-20 天對流等 4 種低頻擾動提供特大暴雨有利的次季節尺度背景，熱帶對流低頻振盪及北傳也是颱風本體暴雨和颱風後部季風暴雨實現“無縫對接”的重要背景。以往討論的福建颱風特大暴雨僅本體暴雨型或後部暴雨型中的一種且沒有季風低壓參與，本次過程的環流形勢具有兩類暴雨型“無縫隙”對接的特點且有季風低壓參與、迭加的次季節有利位相多達 4 種，因此，產生的暴雨持續時間更長、累計雨量更大，暴雨範圍更廣。

（二）物理量診斷、物理量異常度分析表明：在特大暴雨發生前 6 h 至結束前 2 h，福建上空異常偏強（異常度超過 3 倍標準差）且持久的水汽輸送、水汽通量輻合、高層輻散、低層輻合、上升運動是莆田 2305 颱風極端暴雨的關鍵因素，其中 200 hPa 輻散、500 hPa 上升運動及 925 hPa 水汽通量輻合 3 個參量的異常度和持續性最明顯， 200 hPa 輻散與未來 12 h 降水有較好對應關係。

（三）地形在此次過程中的作用主要體現在迎風坡動力抬升、水汽通量輻合、向岸風輻合抬升 3 個作用。地形造成降水增幅主要發生在 7 月 28 日下午到 29 日淩晨：興化平原至涵江北部山區三面環山向南開口地形與低層南風急流和東南風急流配置使興化平原中西部至涵江山區處於動力抬升區和水汽通量輻合區，導致該區域降水增幅；三面環山地形還使雨團至此少動，導致該區域強降水間歇時間短，累計雨量大；地面強勁的東南風過三灣（興化灣、平海灣和湄洲灣）產生的向岸輻合使興化平原降水強；莆田市涵江區東北部山區及興化平原中西部處於向南開口的環山地形處，南風急流下應考慮這些地方為暴雨中心。

（四）28 日下午至 29 日上午受線狀 MCS 的持續影響，有明顯“列車效應”，環境大氣對流不穩定、假相當位溫暖平流、福建沿海地面中尺度輻合線和低空西南風急流走向一致等 3 個條件是“列車效應”的有利背景，低空西南風急流維持及地面中尺度輻合線“適時”出現使颱風本體暴雨和季風暴雨實現“無縫對接”；中尺度系統

分析及溫度露點差診斷發現，福建颱風登陸後期季風特大暴雨的觸發條件除了經典模型中颱風西部“乾涼”空氣入侵和天氣尺度切變線外，地面中尺度輻合線和“西濕東乾”露點鋒也可以觸發對流發展。

（五）颱風極端暴雨預報難度相當大，福建颱風特大暴雨經驗模型對 TC 本體特大暴雨預報有參考價值；大氣次季節振盪有利位相、物理量持續異常對極端暴雨預報有參考價值；颱風南部有夏季風急流緊跟北隨、地面東北西南走向的中尺度輻合線、對流層中下部露點鋒等多尺度系統組態的形勢下應考慮發生季風特大暴雨的可能性；TC 本體暴雨與季風暴雨“無縫對接”時應警惕大範圍洪澇災害的發生。

後記

本研究在福建省自然科學基金項目（面上）2022J011074、中國氣象局複盤專項 FPZJ2024-066、福建省自然科學基金項目（面上）2022J01441 支持下完成。

八、參考文獻

王文、程攀，2013：一次暴雨過程數值模擬與診斷分析。氣象與環境學報，29，01−11。

王新敏、蘇愛芳、張霞等，2022：2021 年 7 月 17−22 日河南特大暴雨過程成因及預報難點分析。全國高影響天氣監測預報服務技術複盤。

左平昭、王偉偉、葉冬雲等，2016：一次颱風後部中尺度暴雨的動力機制分析與模擬試驗。氣象學報，44，793−799。

任福民、楊慧，2019：1949 年以來我國颱風暴雨及其預報研究回顧與展望。暴雨災害，38，526−540。

朱豔萍、馬昌明、劉愛鳴等，2007：福建省颱風後部暴雨物理量診斷分析。氣象研究與應用，28(增刊 II)，48−49。

林小紅、吳 巍、韓 美等，2016：登陸閩東北颱風暴雨落區差異的成因對比分析。自然災害學報，25，48−55。

林小紅、楊舒楠、王健治等，2023：過臺灣島的颱風所引發的東南沿海地區的暴雨特徵分析。氣象，49，1097−1107。

林新彬、劉愛鳴、林毅等，2013：福建省天氣預報技術手冊。氣象出版社，64−73。

林毅、劉愛鳴、潘寧，第 29 屆中國氣象學會年會 S1 災害天氣研究與預報論文集。

林毅、劉愛鳴等，1997：9608 颱風週邊對流雲團造成閩南暴雨成因分析。氣象，33，35−38。

俞小鼎，2012：2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析。氣象，38，1313−1329。

夏大慶、鄭良傑、董雙林等，1983：氣象場的幾種中尺度分離算子及其比較。大氣科學，7，303−311。DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1983.03.08。

孫軍、湛芸、楊舒楠等，2012：北京 721 特大暴雨極端性分析及思考(二)極端性降水成因初探及思考。氣象，38，1267−1277。

孫繼松、何娜、郭銳等，2013：多單體雷暴的形變與列車效應傳播機制。大氣科學，37，137−148。

陳聯壽、許映龍，2017：中國颱風特大暴雨綜述。氣象與環境科學，40，3−10。

陳瑞閃，2002：颱風。福建科學技術出版社，329、569−573。

崔夢雪、向純怡、張晗昀等，2023：颱風“杜蘇芮”（２３０５）引發福建極端強降水的特徵分析。海洋氣象學報，43，11−20。

張霞、王新敏、栗晗等，2020：基於環境參數的極端暴雨指數構建及其應用。氣象，46，879−912。

張莉萍、李棟樑、李瀟，2014：氣候變暖背景下南海夏季風建立和結束日期及與其強度的關係。熱帶氣象學報，30，1037−1047。

程正泉、陳聯壽、李英，2012：登陸熱帶氣旋與夏季風相互作用對暴雨的影響。應用氣象學報，23，660−671。

黃麗娜、高建芸、蔣玉雲等，2018：福建省 5 到 1440 分鐘不同短歷時降雨事件的年最大雨強時空分佈特徵及可能原因。大氣科學（臺灣出版），46，247−289。

趙玉春、王葉紅，2017：2013 年“蘇力”颱風西行登陸引發閩南大暴雨成因的模擬研究。氣候與環境研究，22，365−380。

蔡義勇、高珊、潘寧等，2016：福建颱風暴雨突增機理分析及海峽地形影響模擬。第 33 屆中國氣象學會年會交流文集。

盧珊、王黎娟、管兆勇等，2012：低緯季風湧影響登陸颱風“榴槤”和“碧利斯”暴雨增幅的比較。大氣科學學報，35，175−185。

魏鳳英，1999：現代氣候統計診斷與預測技術。氣象出版社，77−82。

鐘敏、車欽、張濛濛等，2020：華中區域極端降水天氣形勢及物理量異常度特徵。氣象，46，503−516。

DONG M Y, CHEN L S, LI Y，et al, 2010: Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones. J Atmos Sci, 67, 3541−3558．

Houze, R. A., Jr., 2012: Orographic effects on precipitating clouds. Rev. Geophys., 50, RG1001, doi:10.1029/2011RG000365.

Piani C, Durran D, Alexander M J, et al. 2000. A numerical study of three-dimension gravity wave triggered by deep tropical convection and their role in the dynamic of the QBO [J]. J. Atoms. Sci., 57 (22):3689–3702.

Sperber K R, Slingo J M, Inness P M, et al, 1997: On the maintenance and initiation of theintraseasonal oscillation in the NCEP/NCAR reanalysis and in the GLA and UKMOAMIP simulations. Climate Dyn., 13, 769−795.

Analysis of the Causes of 2023 Typhoon “Doksuri”Severe Torrential Rain in Putian City

Li-Na Huang[1,5*] Bao-Yuan Liang[1] Sai-Sai Ren[2] Shi-Lin Chen[3] Dong-Jun Lin[1]
Qing-Jie Zheng[1] Run-Juan Bao[4,5]
[1] Putian Meteorological Bureau of Fujian
[2] Licheng Meteorological Bureau of Fujian
[3] Chengxiang Meteorological Bureau of Fujian
[4] Fujian Key Laboratory of Severe Weather and Key Laboratory of Straits Severe Weather
[5] Chian Meteorological Administration

(manuscript received 10 July 2024; in final form 11 February 2025)

Abstract

Based on multi-source observation data, as well as NCEP, ERA5 reanalysis data, this paper analyzed the causes of the severe torrential rain in Putian triggered by typhoon “Doksuri”（2023 No.5） from the aspects of multi-scale background, physical anomalies, topographic effects and triggering mechanism by applying conventional diagnosis, smoothing, filtering, power spectrum analysis and other methods. Following conclusions were achieved: (1) The severe torrential rain is composed of two phases in form of "seamless docking" under the synergistic effect of multiscale systems such as rational weather system configurations, favorable subseasonal backgrounds, and the timely emergence of mesoscale systems. Slow movement of the upper-level trough, the stronger West Pacific subtropical high and stable Philippine high ridge are the key configurations of the first stage of heavy rain. The existence of South China Sea monsoon low and Philippine high ridge and active monsoon jet in the middle and low levels are the key configurations of the second stage of heavy rain. The upper-level South Asian high break and the associated divergence over Fujian played an important dynamic role in both phases of the rainstorm. Low-frequency disturbances and their propagation as 20-30 days, 30-50 days of 500hPa height and 30-50 days, 10-20 days of tropical convection provide favorable subseasonal background for the heavy rain and important condition for the two stages of heavy rain "seamless".(2) Three favorable environmental conditions, namely, unstable ambient atmospheric convection, pseudo-equivalent warm advection, mesoscale convergence line and

consistent trend of low-level southwest wind jet, made the appearance of "train effect" and sustained short-term heavy precipitation in Putian City. In addition to the trigger conditions of the classical model of heavy monsoon rain after Fujian typhoon landfall, convective development can also be triggered by the surface mesoscale convergence line and the "west-wet-east-dry" dew point front. The surface mesoscale convergence line and mesoscale convective system(MCS) appeared "timely" to achieve "seamless docking" between the first stage and the second stage of heavy rain. The effect of topography on heavy rainfall is mainly reflected in the water vapor flux convergence, the windward slope dynamic uplift and the onshore wind convergence uplift. The topography of the eastern Putian surrounded by mountains on three sides opening to the south, and the configuration of the south wind jet and southeast wind jet at low level are the main reasons why the rainstorm center occurred. (3) The persistence of anomalously strong water vapor and dynamical conditions over Fujian is a key factor for extreme rainstorms. The divergence at 200 hPa corresponded well with the next 12 hours of precipitation. (4) The Fujian Tropical cyclone heavy rain empirical model and the persistent anomaly of physical quantity have reference value for forecasting heavy rain of typhoon itself and extreme rainstorm respectively. The possibility of monsoon heavy rain should be considered under the situation of summer monsoon jet in the south of the typhoon, surface mesoscale convergence line of northeast-southwest trend and dew point front of middle and lower troposphere. The occurrence of widespread flood disasters should be vigilant when typhoon noumenon heavy rain and monsoon heavy rain "seamlessly docking".

Keywords: severe torrential rain, subseasonal disturbance, anomaly degree, train effect, dew point front, "seamless docking". doi: 10.53106/025400022025065301001

*Corresponding author: Li-Na Huang (E-mail: lenah@163.com)