

## 西南氣流實驗期間之降水特徵與相關環境型態

童崇旗<sup>1</sup> 周仲島<sup>2</sup>

<sup>1</sup>空軍第五基地天氣中心

<sup>2</sup>國立臺灣大學大氣科學系

### 摘要

梅雨期為台灣地區主要雨季之一，在這段時期盛行的西南季風常為位在迎風面的台灣西南部地區帶來豪(大)雨。本研究利用中央氣象局劇烈天氣監測系統(Quantitative precipitation estimation segregation using multiple sensors, QPESUMS)與台灣電力公司整合閃電偵測系統(Total lightning detection system, TLDS)資料，探討西南氣流實驗期間台灣西南部地區之降水特徵。並利用高時間解析度探空資料進行環境型態特徵之分析。最後討論降水特徵與其相關環境型態間的關聯。

結果顯示，盛行於此期間之降水系統可依據其初生之區域分成三大類：陸生型、海生型以及混合型，其中又以前兩類為主要族群，且兩者個案數發生比率相當，分別有 18 個和 17 個。於發展時間上，陸生型主要起始於日間，其發展延時較短。海生型則多於夜間生成，並擁有較長的延時。此外，陸生型多與午後雷雨系統密切相關並有明顯日變化訊息，海生型則無。平均而言，陸生型之降水特徵為系統集中，含較大的對流性降水比率與閃電密度。海生型則常為大範圍的降水並伴隨較大比率的層狀性降水與較小的閃電密度。陸生型多發生於西南氣流較弱的弱綜觀環境下，伴隨有較高的對流可用位能(Convective available potential energy, CAPE)與較低的對流抑制能(Convective inhibition, CIN)；而海生型則多發展於強盛的西南氣流與較濕潤的大氣條件下，且伴隨著較小的 CAPE 與較大的 CIN。

關鍵字：梅雨期、西南季風、西南氣流實驗、午後雷雨、日變化、對流性降水、層狀性降水、對流可用位能、對流抑制能

### 一、前言

2008年5月15日至6月30日期間，西南氣流實驗(Southwest Monsoon Experiment, SoWMEX)；又稱為地形引發季風降雨實驗, Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment, TiMREX)在台灣舉行，這是一個國際型的場域實驗，集結了至少五個國家(台灣、美國、加拿大、日本與韓國)的科學家與學生之力而成。此實驗的主要目標區域被設定在台灣西南部的沿海平原與山區，實驗目標在於增進對西南季風流(簡稱為西南氣流)盛行時，導致劇烈降雨系統的物理過程的認知。更具體而言，此實驗計畫的預期目標如下：

- (1) 了解梅雨鋒面系統扮演的角色與鋒前盛行之西南氣流的動力及熱力特徵。
- (2) 探究與對流初生相關之邊界層過程。
- (3) 研究與劇烈降雨事件相關之中尺度對流

系統(Mesoscale convective system, MCS)的微物理特徵。

- (4) 檢驗地形效應與中尺度對流系統激生與再發展的海陸分布情況。
- (5) 開發雷達資料同化技術與增進西南氣流盛行期之定量降水估計與預報能力。

誠如以上列舉之諸多科學議題有待我們持續致力研究與探討，本研究的焦點則主要被設定在探論2008年梅雨季之降水特徵與西南氣流盛行下之相關環境型態。

### 二、資料與分析方法

#### (一) 資料選取

##### a. QPESUMS

劇烈天氣監測系統乃整合多項氣象儀器，主要奠基於台灣本島的四座中央氣象局所屬氣象雷達(五分山、花蓮、七股與墾丁)觀測的產品。藉由結合四座各自獨立運作的雷達所觀測到的資料，本系統提供了多項降

水相關資訊，如：垂直最大回波、最低可用仰角回波與三維卡式座標回波等。本研究中採用了最低可用仰角回波資料，藉由簡單的經驗式： $Z = aR^b$  回推估計出近地表的降水量，其中  $Z$  是雷達觀測之反射率因子，以  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$  為單位；而  $R$  則是降雨率，單位  $\text{mm h}^{-1}$ ；係數  $a$  和  $b$  則參考 Xin et al. (1997) 分別選用 32.5 和 1.65。

欲檢驗並對台灣西南部地區的氣候降水特徵能有精簡而忠實的描繪，哈莫圖(Hovmöller diagram)是十分理想的選擇(在此僅展示某時段為例，見圖 1)。藉著將研究區域平均的雷達反演降雨率隨時間序列依序呈現，可以清楚地得到一個整體的降水趨勢(特別在降水系統的移動方面)。被選取來進行哈莫圖分析的研究區域為一個和經緯度平行的四邊形，此區域的經向邊界為東經  $119.5^\circ$  和  $121^\circ$ ，緯向邊界則為北緯  $22.5^\circ$  和  $23.5^\circ$ ，這些邊界圍成了一個長約 155 公里(東西向)，寬約 110 公里的矩形(圖 2a)。圖 2b 顯示了所選取的研究區域包含有從最西邊的海洋(台灣海峽)至最東邊的山區(中央山脈)四種不同的地勢型態，進而提供檢驗降水系統和地形間之相關性的機會。

除此之外，本研究還利用三維回波資料分析降水系統中的對流性與層狀性降水比率以做為其一降水特徵指標，於此，我們沿用了 Steiner et al. (1995) 所發表的客觀區分法。從屏東探空站在實驗期間所觀測到資料的平均結果得到，台灣西南部地區於梅雨期的融解層( $0^\circ\text{C}$  層)氣候值落於 4.8 公里高處，為了避免區分時受到層狀性降水區中常觀測到的雷達亮帶訊息的污染，我們採取 3 公里等高面的回波資料進行此項區分作業。

#### b. 探空

實驗期間，在台灣本島與其周邊離島所設置的諸個探空站構成了一個中尺度探空觀測網。為檢驗實驗區域內大氣環境的熱力特徵，我們選用了三個設置於海拔較低處的地基探空站(永康、屏東、恆春)的觀測資料(圖 2a)，對流可用位能(此後簡稱為 CAPE)和對流抑制能(此後簡稱為 CIN)被運算出做為檢視環境狀態是否利於對流系統發展的重要指標。另一方面，固定每日施放四次的船舶探

空(台灣海峽南部)則被用以檢驗實驗區域上游環境的垂直結構。

#### c. 閃電觀測

利用整合閃電偵測系統所提供的資料，我們累加了每小時的閃電次數以代表閃電頻率( $\text{h}^{-1}$ )，進一步將此頻率值除以降水區域之面積(由最低可用仰角回波資料提供)，即可得到逐時的降水系統閃電密度( $\text{h}^{-1} \text{km}^{-2}$ )。

#### (二) 個案選取與分類

以下本文中所有的討論皆針對 5 月 19 日至 6 月 26 日此一 39 天的時間區段。此兩個日期也分別為整個實驗間九個密集觀測期(Intensive observation period, IOP)中 IOP-1 的開始與 IOP-9 的結束，意即此段期間囊括了整個實驗的重點降水時段，預期所有的重要資訊皆包含於此間內。圖 3 為船舶探空於該時段間觀測到的垂直風剖結構(以距平方式呈現)。從該圖的 850 hPa 高度層上下之風變情況可將實驗期分成五個階段：

- (1) 季風建立期(5月27日以前)。
- (2) 西風盛行期(5月27日至6月6日)。
- (3) 季風間歇期(6月6日至6月9日)。
- (4) 南風盛行期(6月9日至6月19日)。
- (5) 季風歇止期(6月19日以後)。

若將這些階段和整個實驗期的降水情況總覽(見於 Jou and Lee, 2008。未於本文中展示)相互比照則可發現一存在於降水系統和盛行氣流間的巧妙關聯：多數非 IOP 期間觀測到的日間雷暴伴隨著較弱的低層背景環境西南氣流(地面至 700 hPa 高度)；相反地，除了 IOP-3 期間受到梅雨鋒西南移影響而呈現的負南風距平外，其餘的顯著降水期皆於低層觀察到盛行強烈西南氣流。

為了選擇出主要的目標降水系統來進行更詳細而量化的特徵統計分析，我們藉由設定一個門檻值以排除一些較微弱而無組織性的系統，研究區域內連續三小時的平均降雨率大於  $5.5 \text{ mm h}^{-1}$  (以雷達回波反演計算，此降雨率所對照的雷達回波強度約為 27 dBZ) 的時間區段皆被保留，經此過程後，總共取得三十四個降水長度至少三小時以上且具相當強度的顯著連續降水期(Significant continuous rainfall periods, SCRP)，這些 SCRP 共占前述本研究選取的討論時段的 40%。

以客觀定量方法獲取 SCRP 後,接著藉由主觀定性觀察這些時段的哈莫圖與單張雷達時序圖,一些發展行為互異的系統被區分成各自獨立的不同個案,依此,我們取得了四十件於系統演化上具一致性的個案以進行統計分析。最終,這四十件個案再依據其個別主體系統的初生區域分成陸生型、海生型和混合型(同時具陸生與海生系統)三大類。

### 三、結果與討論

上述四十件具相當強度的降水個案即本研究用以進行降水特徵統計與綜觀環境檢驗之主要備選樣本,其中一件陸生型個案因閃電資料闕漏而予以排除,最後三十九件個案的組成陸生型與海生型各十七件,混合型五件。以下的討論以陸生型和海生型這兩類主要族群為主。

#### a. 降水特徵

儘管陸生型與海生型兩種個案的發生數目相當(分別為十八件和十七件),海生型個案的總時數(206 小時)卻幾乎將近是陸生型個案(118 小時)的兩倍,顯示海生型個案平均發展延時明顯較陸生型個案為長(見表 1)。再者,若我們以上、下午六點為界將一日分成日間與夜間兩時段(如圖 4),圖 4a 顯示,幾乎所有陸生型個案的發展皆起始於白日,僅一件例外(6/16);相對地,將近八成的海生型個案發展起始於夜間。圖 4b 為兩種類型個案發展時間於一日內二十四小時的分布情形之比較,圖中顯示兩者之分布迥異:陸生型個案於一日中各時段的發展機率變異性較大(從最低 0%到最高 15%);海生型於一日中各時段的發展機率則相對平均許多,最高與最低之機率差距僅 4%。此外,陸生個案於日間的發展機率有隨時間逐漸增加的趨勢,從下午兩點左右起開始有較明顯的發展機率的攀升情形,一直到了下午四點出現機率極大值;海生型個案則無明顯變化趨勢,換言之,一日之中的各時段皆有發展海生型個案的機會。

表 1 為降水特徵的相關統計。平均而言,陸生型個案的閃電密度及對流性降水區比率皆較海生型為大,唯閃電頻率較低。此結果並不難理解,主要由於海生型個案多為降水面積廣闊的系統,一旦將閃電頻率除以降水

面積求取閃電密度時,陸生型個案具高度閃電活動與發展劇烈之對流系統的特性便隨即顯現出來,對流性降水的比率當然也較大。

#### b. 環境型態

統整前文述及之三個月於平原區的地基探空測站資料,整個研究時段的CAPE值和CIN值序列皆被計算出來,並以三站平均的結果呈現於表 2。結果指出:整體而言,當大氣環境具有較高對流激生的潛能時(即高CAPE值),底層也常提供有助於氣塊向上舉升的相對較大浮力(CIN的絕對值較小)。

由圖 5 中可見研究區域上游區域(台灣海峽南部)的環境狀態,此圖為兩種類型個案發展期間所有的船舶探空資料分別進行合成分析後的結果。結果顯示不論在陸生型或海生型個案發展期間,中低對流層(1000至300 hPa 高度)皆普遍盛行西南風。平均而言,海生型個案發展期間上游5.5公里(約500 hPa高度處)以下的西風和南風分量強度都較陸生型為強。再者,陸生型個案發展期間上游的垂直風切最大值(南風和西風分量皆然)都發生於約三公里高度(700 hPa)處;在海生型個案方面,西風分量垂直風切相對較為深厚(1000至600 hPa)而南風分量垂直風切則相對淺薄(1000至850 hPa)。在此要特別提到,於海生型個案發展期間,南風分量的垂直剖面結構於近850 hPa高度處顯示了一個明顯的低層噴流(Low level jet, LLJ)訊息,此現象與台灣區域中尺度實驗(Taiwan area Mesoscale Experiment, TAMEX)的研究成果頗為一致(Chen and Yu 1988, Chen et al. 2006)。此外,於對流層中層處(700至400 hPa),海生型個案的南風分量垂直風切大小( $4 \text{ m s}^{-1}$ )則約莫為陸生型( $2 \text{ m s}^{-1}$ )的兩倍。

圖 6 中展示兩種類型個案上游大氣熱力垂直剖面結構的個別合成結果(位溫 $\theta$ 和相當位溫 $\theta_e$ )。平均而言,陸生型個案發展時的近海表位溫較海生型略高 1 K。另一方面,海生型個案發展時上游的中層大氣則具較高的溼度。

#### c. 降水日變化

圖 7 提供我們討論降水的日變化議題所需的資訊。相當高的頻率(30%)顯示午後對流激生起始於下午兩點,隨著時間經過,頻率

最大值於下午四點出現在山腳處。觀察高降水頻率的空間分布情形可見午後對流有隨時間有逐漸東移的傾向,但系統卻很少到達海拔較高的山區處。

海面上則顯示了相當不一樣的特徵。概略而言,具一定大小的頻率 15%(圖中綠色)在清晨四點時開始出現於沿海平原處,隨後緩慢向內陸移動並消散於山腳處,接續著為海生個案的最大發生頻率值於清晨六點左右出現在遠海處,後來一直到下午六點的半日中皆陸續有系統生成於海上並向陸地移動。

### 四、結論

本研究中,我們檢驗並探討了 2008 年西南氣流實驗期間台灣西南部地區的降水特徵和相關環境型態。透過定性和定量等方法,總共四十件具相當強度的降水個案被選取並區分為陸生、海生和混合三種類型。

整體而言,大多數的陸生型個案發生於日間而海生型個案多發生於夜間並具較陸生型近多一倍的時間延時。不論是個案於一日間各時段的發展機率分布情況(圖 4b)或降水機率日變化哈莫圖(圖 7)皆一致顯示陸生型個案與午後熱對流之間存在密切關聯性;相反地,海生型個案於一日間各時段的發展機率十分相當。此外,海生型個案由於降水面積寬廣而具較高的閃電頻率(逐時累積總次數);陸生型個案則展現了較高的閃電密度和較大的對流性降水區域比率,顯示陸生型個案中的對流活動相對活躍。若嘗試將降水特徵與相關的大氣環境特徵做一連結,則可歸納出兩種不同的環境型態及其後所隱含的物理機制:其一為適宜陸生型個案發展的環境型態,具高CAPE值、相對微弱的上游西南氣流和較乾燥的大氣對流層;另一種為適合海生型個案發展的環境型態,具較強烈的綜觀環境強迫機制,包含相對低的CAPE值、強烈西南風和豐沛的水氣。此與世界其他季風地區場域實驗的研究結果相仿,如:巴西(Halverson et al. 2002)和澳洲(May and Ballinger 2007)等。

### 參考文獻

- Chen, G. T.-J., and C.-C. Yu, 1988: Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan during Mei-Yu season. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 884-891.
- , C.-C. Wang, and D. T.-W. Lin, 2006: A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 874-896.
- Halverson, J. B., T. M. Rickenbach, B. Roy, H. Pierce, and E. R. Williams, 2002: Environmental characteristics of convective systems during TRMM-LBA. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1493-1509.
- Jou, B. J.-D., and W.-C. Lee, 2008: An overview of SoWMEX/TiMREX operation. *Proceeding Abstract, 1<sup>st</sup> SoWMEX/TiMREX Science Workshop*, Taipei, Taiwan, 12-13.
- May, P. T., and A. Ballinger, 2007: The statistical characteristics of convective cells in a monsoon regime (Darwin, northern Australia). *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 82-92.
- Steiner, M., R. A. Houze Jr., and S. E. Yuter, 1995: Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 355-371.
- Xin, L., G. Recuter, and B. Larochele, 1997: Reflectivity-rain rate relationship for convective rainshowers in Edmonton. *Atmos. Ocean*, **35**, 513-521.

表1 平均降水特徵

	延時 (h)	閃電頻率 (h <sup>-1</sup> )	閃電密度 (h <sup>-1</sup> km <sup>2</sup> )	對流 面積占比 (%)
全部個案	9.6	94.6	0.092	59.1
陸生型個案	6.6	48.5	0.181	64
海生型個案	12.1	112.9	0.024	53.6
混合型個案	11.8	189.1	0.024	61.1

表2 平均環境特徵

	CAPE (Jkg <sup>-1</sup> )	CIN (Jkg <sup>-1</sup> )	0-3km 高度 東西風分量 垂直風切 (m s <sup>-1</sup> )	0-3km 高度 東西風分量 垂直風切 (m s <sup>-1</sup> )	0-3km 高度 垂直風切 (m s <sup>-1</sup> )
全部個案	1769.6	-19.3	3.8	1.4	3.93
陸生型個案	2036.9	-16.5	3.0	3.4	5.92
海生型個案	1127.8	-24.2	4.1	0.5	5.37
混合型個案	2989.2	-10.5	5.3	1.0	6.9

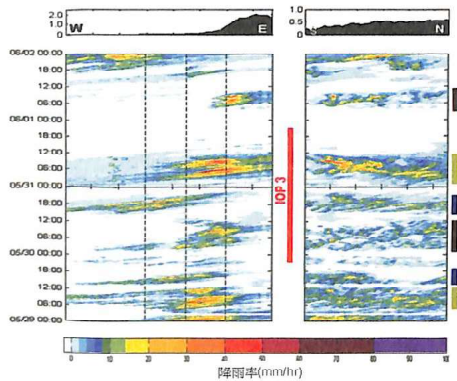


圖1 雷達反演降雨率哈莫圖(5/29至6/2)。時間為國際標準時(UTC),右側色條為本研究所選取之個案標記,不同顏色表不同類型:深紅色為陸生型,藍色為海生型,綠色則為混合型(關於詳細選取與分類方法請見本文)。

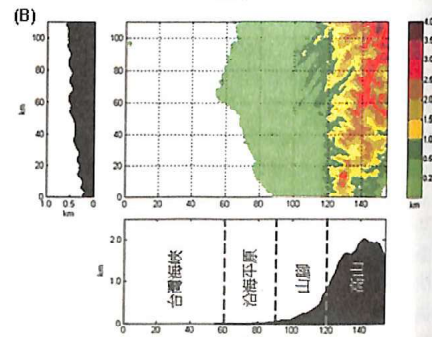
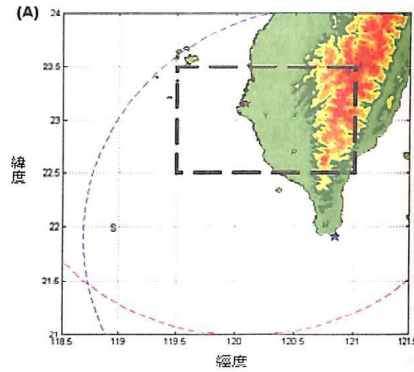


圖2 (A)黑色矩形為本研究所選取之區域。七股雷達和墾丁雷達所在位置分別以紅色和藍色星形標示,紅色和藍色的圓弧線則為兩座雷達的觀測範圍。字母 H、P 和 Y 則分別為恆春、屏東和永康地基探空站,字母 S 則為船舶探空於實驗期間內的平均位置所在。(B) 研究區域地形圖。經向與緯向的地形平均結果分別列於地形圖下方和左方。

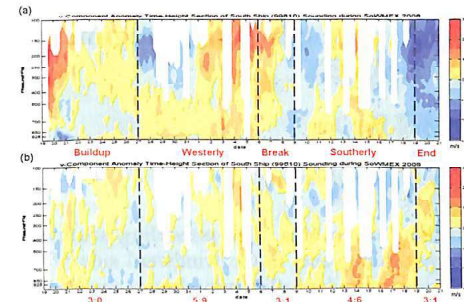


圖3 船舶探空時間-高度序列圖(5/19至6/21)。(A) 東西風分量距平:正值為西風,負值為東風。(B) 南北風分量距平:正值為南風,負值為北風。兩圖間標示依低層風變所分出的五個季風階段,圖底下則顯示各階段中陸生型和海生型個案數比。

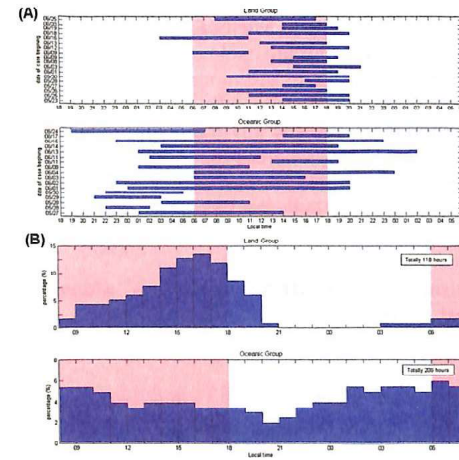


圖4 (A) 個案發展時間和 (B) 個案於一日內各時段的發展機率。上為陸生型個案,下為海生型個案,背景顏色依日間和夜間分別紅色和藍色,時間標示為地方時(LT)。

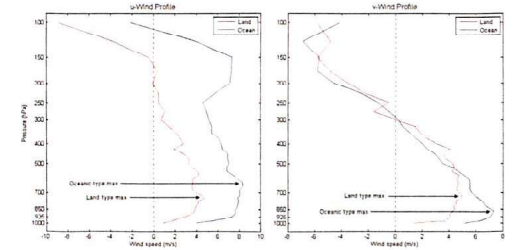


圖5 船舶探空平均合成東西風分量(左)及南北風分量(右)垂直結構。紅線表陸生型個案,藍線表海生型個案。

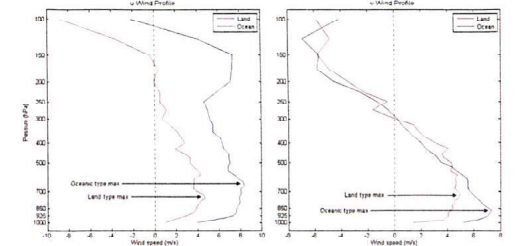


圖6 船舶探空平均合成位溫(虛線)和相當位溫(實線)垂直結構。紅線為陸生型個案,藍線為海生型個案。

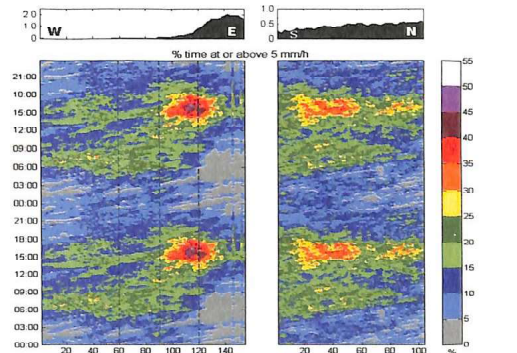


圖7 降水特徵日變化哈莫圖。顏色為發生降雨率大於 5 mm h<sup>-1</sup> 的機率。時間標示以地方時(LT),並重複展現兩日。

## Precipitation characteristics and associated environment regimes during SoWMEX/TiMREX

Chong-Chi Tong<sup>1</sup> Ben Jong-Dao Jou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*The 5th Weather Center, Weather Wing, CAF*

<sup>2</sup>*The Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University*

### Abstract

Mei-Yu season is one of the main rainy seasons in the Taiwan area. The prevailing southwest monsoon flow during this period frequently causes heavy rain events in the windward side of the southwestern Taiwan. In this study, the composited hybrid scan radar reflectivity data of the Central Weather Bureau (CWB)'s Quantitative Precipitation Estimation Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS) system and the lightning data of the Taiwan Power Company (Taipower)'s Total Lightning Detection System (TLDS) were used to examine the precipitation characteristics in southwestern Taiwan during the 2008 Mei-Yu season. In addition, the SoWMEX/TiMREX field campaign provided high temporal resolution sounding data for documenting the environment condition. The relations between the precipitation characteristics and their associated environment regimes were explored.

A total of 40 rainfall events were identified in the 2008 Mei-Yu season. Based on the initiation location, the precipitation events can be classified into three types: land, oceanic and mixed. The former two types are evenly distributed (18:17) and occupy most of the cases. In terms of the time of development, the land events usually begin in the daytime with shorter duration. In contrast, the oceanic events have their initiations in the nighttime and persist longer. Most of the land events are related to the afternoon thunderstorms and reveal pronounced diurnal cycle signal. In terms of spatial distribution, on the average, the land type precipitating systems are more concentrated with higher fraction of convective precipitation and higher lightning density while the oceanic type usually consists of widespread area of stratiform precipitation. For the environmental conditions, the land events are associated with larger CAPE and smaller CIN, whereas the oceanic events are associated with smaller CAPE and higher CIN. Otherwise, the composited soundings show that the oceanic type has a much stronger and moister southwesterly flow over the lower troposphere than the land type.

**Key word:** Mei-Yu season 、 southwest monsoon 、 SoWMEX/TiMREX 、 afternoon thunderstorm 、 diurnal cycle 、 CAPE 、 CIN