

亞洲地區與麻六甲海峽的閃電分布特徵

王凱群^{1,2} 周昆炫³

¹中國文化大學地學研究所 ²中央氣象局預報中心 ³中國文化大學大氣科學系

摘 要

本研究主要為分析亞洲地區與麻六甲海峽的閃電分布特徵，同時，也將探討其形成的物理機制為何。使用的閃電資料為美國華盛頓大學開發的全球閃電監測網(World Wide Lighting Location Network, WWLLN)。時間的選擇上則以 2005~2019 年，共 15 年的閃電資料。WWLLN 為一種連續運行的地面閃電定位系統，在全球超過 70 個閃電監測系統，因此可以對日夜變化進行採樣。此閃電監測系統能偵測到數千公里以外的閃電訊號，而這些閃電訊號是以雲對地閃電(Cloud-to-Ground, CG)為主。氣象資料分析的部分則是使用歐洲中期天氣預報中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析資料 (ERA5)，所選用的時間同樣為 2005~2019 年(共 15 年)，並且使用逐時的資料進行分析；變數部分則為降水場、地面 10 米風場，其水平解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。本研究將比對麻六甲海峽閃電密度的訊號與氣象資料是否有相互對應的海陸風機制，加以驗證閃電活動與海陸風輻合的關聯性。

初步的研究結果顯示，亞洲地區閃電最活躍的地點為麻六甲海峽海域附近，而陸地上則是相對較弱的閃電密度，這是因為海洋提供了較暖濕的空氣向大氣輸送，這些水氣促使深對流發展，因而造成較高的閃電密度。另外，我們也分析了 15 年閃電分布的氣候平均與年際、季節、逐月及逐時的變化。分析顯示這些變化都呈現相同的結果：1、間熱帶輻合區(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)，隨著季節有南北振盪的現象，夏季及秋季隨著 ITCZ 北移至中國大陸的華中一帶，冬季及春季則往南移至北緯 10 度線以南，因此，閃電密度的振盪，會隨著熱帶雲簇的南北移動而改變。2、推測熱帶地區的深對流會持續到半夜，白天的時候相對較弱，這與熱帶地區的盛行風向有關，並且和海陸風環流也有關係。所以主要的特徵分布來自於較有利環境發展的海陸風環流及地形效應。

關鍵字：閃電活躍區域、麻六甲海峽、海陸風環流

一、前言

本研究主要分析亞地區的閃電分布特徵，同時，也將探討形成此分布特徵及週期變化的物理機制。根據分析之結果將閃電資料與氣象資料結合，探討季風環流與海陸風環流等大氣流場對閃電活躍區的影響為何。

儘管在過去的研究中閃電資料的應用甚多，但大多都是分析純閃電資料為主，並推測

可能的大氣運作機制，關於氣象資料的分析與討論，是相對缺乏的。同時，在比較早期的閃電分析資料中，是以單一的衛星資料進行分析(例如：Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)，但受限於低軌道衛星資料的限制，必須透過長時間的合成，才能拼湊出完整的閃電資料。

因此，本研究將使用全球閃電監測網 (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) 的閃電資料，是 2005 年華盛頓大學所開發的閃電資料，為一種連續運行的地面閃電定位系統，在全球超過 70 個閃電監測系統，因此可以對日夜變化進行採樣，無需執行閃電圖像偵測 (Lightning Image Sensor, LIS) 所需的長時間合成。同時，也將使用歐洲中期氣象中心的氣象資料說明閃電活躍區與海陸風等大氣環流的分布特徵。

二、資料與方法

(一) 閃電資料

本研究所使用之閃電資料為 2005 年華盛頓大學所開發之 WWLLN 閃電資料，這些閃電監測系統能偵測極低頻率的無線電波 (Abarca et al. 2011)。當然，也有許多的研究使用衛星閃電探測資料 (Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Lightning Image Sensor (LIS)/Optical Transient Detector (OTD))，來計算每年的閃電頻率。此外，本研究也使用衛星偵測的閃電資料與 WWLLN 地基的閃電資料相比，進而得出不同年份的調整係數 (Adjustment factor, AF)，來重新計算本研究中不同年份的閃電頻率 (DeMaria et al. 2012; Pan et al. 2014; Zhang et al. 2015)。其計算方式為 WWLLN 閃電密度的年平均資料與衛星偵測的閃電氣候資料的比值，這樣的方法類似 (Pan et al. 2014, Lin and Chou 2020)。圖 1 為衛星所偵測的閃電資料圖，可以發現在洋面上的結果是比較不完整的；而圖 2 則是使用調整係數過後的結果，可以發現有較完整的閃電密度，但是，2008 年以前的偵測效率是有限的，因為在偵測初期系統建立是不完整的。因此，連續的地面數據提供了較詳細的日夜變化及季節內或年際時間尺度的分析。

(二) 氣象資料

另外，本研究也使用歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts, ECMWF) 的再分析資料 (ERA5)，其中，所選用的時間為 2005~2019 年 (共 15 年)，並且使用逐時的資料針對海陸風進行分析；變數部分則為降水場、地面 10 米風場，其水平解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，此網格解析度的資料應該能解析出麻六甲海峽附近不同地表狀態下導致的局地環流差異。因此，本研究特別分析麻六甲海峽閃電密度的訊號與氣象資料是否有相互對應的海陸風機制，加以驗證閃電活動與海陸風輻合的關聯性。

三、初步結果

首先，圖 3 為麻六甲海峽的地理位置與海峽兩側的地形分布特徵，資料來源是 Ronald et al. (2017)，由圖中得知，麻六甲海峽是西北向東南延伸的狹長型海峽，而兩邊的陸地為棉蘭和吉隆坡。此外，西側的蘇門答臘山脈達到 3466 公尺的高度，而東部的山脈僅在馬來西亞中北部一小部分達 1000 公尺或更高。從新加坡到吉隆坡，該海峽僅約 75 公里，但逐漸向西北端開放 300 公里，直到向西北端的印度洋開放為止。在一年中的大部分時間裡，平均海表溫度約為 30.8°C (NOAA/OAR/ESRL PSD 2017)。

本研究將探討亞洲地區的年際、逐月、季節等變化特性，再將麻六甲海峽的極值區分為三個區域：R1 ($3.5\sim 4.0^\circ\text{N}$, $99.5\sim 100.5^\circ\text{E}$)、R2 ($3.5\sim 4.0^\circ\text{N}$, $98.0^\circ\sim 99.0^\circ\text{E}$) 及 R3 ($3.5\sim 4.0^\circ\text{N}$, $101.0\sim 102.0^\circ\text{E}$)，來比較海上與陸上年際至日夜變化的閃電密度的差異特性，就麻六甲海峽而言，閃電密度的最大值是出現在該海峽的上空，其值約 $150 \text{ flashes}/\text{km}^2\text{yr}^{-1}$ ，如圖 4 所示。

(一) 年際變化的閃電密度

從圖 5 中顯示，閃電密度較高的地方大約都集中在各陸地旁的沿岸或海上，例如：華南沿岸、菲律賓西側的海岸及南北緯 10 度間的島嶼，這可以說明海上有比較深厚的水氣促使深對流發展，因而造成明顯的閃電密度，並隨著年份不同，在空間分布的特徵上也不同。

(二) 季節變化的閃電密度

圖 6 顯示四季的閃電密度變化，分別為春季(3、4、5 月)、夏季(6、7、8 月)、秋季(9、10、11 月)和冬季(12、1、2 月)，由季節循環來看，可以明顯看出間熱帶輻合區(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)，隨著季節有南北振盪的現象，夏季及秋季隨著 ITCZ 北移至中國大陸的華中一帶，冬季及春季則往南移至北緯 10 度線以南，因此，可以推測閃電活躍區的位置，會隨著熱帶雲簇的南北振盪，而有所改變。

(三) 逐月變化的閃電密度

由圖 7 可知，也可以看見明顯的逐月變化，甚至和季節循環一樣，呈現南北振盪的現象。當然，從 1 至 3 月來看，閃電密度也呈現南移的現象，也移至北緯 10 度以南的區域，這和季節循環有一致的規律；4 至 6 月和 7 至 9 月則顯示出閃電密度有北移的趨勢，同時，也順著 ITCZ 往北，造成閃電密度北移；12 至 1 月的閃電密度則順著 ITCZ 的雲帶往南移動至北緯 10 度以南區域，同時，也可以發現閃電密度訊號在冬季月份時，呈現較弱的訊號，這是因為在冬季時，沒有明顯的熱對流系統。

(四) 日夜變化的閃電密度

前述所說大多都是討論年際到逐月的變化，因此，我們想更精確了解閃電密度對麻六甲海峽的特徵，因此，將特別選定麻六甲海峽周遭三個區域進行比較。圖 8 顯示麻六甲海峽的日夜變化的時間分布，可以發現絕大部分的閃電密度從 14 LST 開始形成並持續到 23 LST，此結果顯示熱帶地區的深對流會持續到半夜，此外，可以發現白天的時候閃電發生情況相對較弱，此現象可能與熱帶地區的盛行風場與局地的海陸風環流有關。

圖 9 中的 R1 顯示，在夜間至隔日上午有明顯的閃電密度，此外，在 2 月到 5 月和 8 月至 10 月也呈現較高的閃電密度，這表示麻六甲海峽的對流大多都發生在夜間至上午期間，這與 Mapes et al. (2003a)所提出的海陸風不對

稱性有著相同的結果；同時，熱帶地區深對流通常發生的時間為 2 月到 5 月和 8 月至 10 月，因此，可以推測在麻六甲海峽有極高的閃電密度是因為海陸風所導致的結果。再者，由年-時的閃電密度分布圖得知，中午至晚間全年的閃電密度訊號皆低於夜間至上午，而年的部分出現全年都有明顯的閃電訊號，這顯示出麻六甲海峽全年有顯著的深對流訊號。至於年-月的閃電密度分布圖來說，2006 年 9 月和 2015 年 4 月有較高的閃電密度出現，推測這可能是天氣系統經過所形成的深對流有關。

在 R2，也就是棉蘭地區，可以發現閃電密度的分布與 R1 海峽上的結果相比呈現反相位的情況，由月-時的閃電密度分布圖可明顯看出閃電主要是集中在傍晚至晚間，同樣的在 2 月到 5 月和 8 月至 10 月也有較明顯的閃電訊號，由年-時的閃電密度分布圖來說，基本上也是全年都呈現較高的閃電密度，相較於 R1(純海上)其閃電密度相對較低，但是，主要也集中在傍晚至晚間，至於年-月的閃電密度分布圖的部分則沒有明顯的閃電發生，由 R2 和 R1 得知，閃電密度是由西向東傳播，且由陸地往海上移動，並透過海上提供較暖濕的水氣加深了對流雲的發展，因而形成較多的閃電密度。

R3 則顯示了吉隆坡地區的閃電密度分布狀態，由月-時的閃電密度分布圖可以看出閃電主要是集中在中午過後並持續一段時間，同樣的也在 5 月和 10 月有較明顯的閃電發生，與 R1 及 R2 相比，閃電密度明顯減少很多，且同樣為西向東傳的形式，可見閃電在傳播的過程中碰到了陸地，少了海水提供的熱源，就會減弱對流雲的發展，所以，陸地就呈現閃電密度較弱的情況，至於年-時的閃電密度分布圖變化就相對更弱了，雖然全年都能呈現閃電密度，但畢竟是陸地，因此閃電密度較弱，在年-月的閃電密度分布圖則顯示，並沒有太多的閃電出現。

由以上的三個區域比較發現，海上的閃電密度相對於陸地呈現較高的特徵，並且呈現日夜變化的循環形式，圖 9 更可以確認麻六甲海峽的閃電密度是因海陸風不對稱的結果所導致，間接驗證了 Mapes et al. (2003)和 Holle et al. (2017)所提出的理論相似。但是，前述所說都是針對閃電密度進行分析，相關氣象資料的分析是相對缺乏的，因此，在後續研究中，將使用歐洲氣象預報中心的逐時資料來討論氣象要素對於閃電密度的關聯性。

四、 討論與結論

綜上所述，亞洲地區的閃電分布主要是位於西南側的麻六甲海峽，這個區域有明顯的西南季風及海陸風環流，因而造成此區域的閃電密度有顯著日夜變化的訊號。但是，早期的研究中幾乎都是運用閃電資料推測大氣物理機制，鮮少有直接對氣象資料進行分析，又因為衛星資料的不完整，造成氣象資料的應用也相對較少。然而，就現階段而言，即時的閃電觀測資料越來越豐富，也有較完整的偵測系統，對於氣象資料的應用也隨之增加。

然而，前面的內容提到日夜變化的觀點強調了麻六甲海峽的特徵：(1)整個晚間到次日上午持續的閃電密度有最大值。(2)夜間的閃電密度最大值與陸地區域有一定程度的差異，而周圍的陸地區域的閃電密度最大值均發生在 1400 至 2000 LST 之間。正如前人所指出的那樣，會受到明顯的海陸風特性影響。對於全球氣候尺度上的分布，也是息息相關的，例如，Laing et al. (2011)指出，整個熱帶地區的對流，都會受到赤道凱爾文波在時間尺度上的影響，以及 Madden-Julian 振盪 (Madden Julian Oscillation, MJO)在較長時間尺度上的作用。MJO 在調節整個海洋大陸(不僅是麻六甲海峽)的閃電活動中也有著重要的作用(Virts et al. 2013)。

雖然，過去對於亞洲地區的閃電分布特徵多是利用衛星閃電的資料推測降水(Venugopal et al. 2016, Kikuchi and Wang 2008)及海陸風環流(Mapes et al. 2003)等大氣現象，他們說明了對流性降水與海陸風的差異會對閃電密度造成日夜變化，不過，這是他們推測可能的大氣現象，並沒有用氣象資料佐證。因此，本研究雖然以亞洲地區的為主，但要發現較小尺度上的變化特徵，就必須將區域縮小，以本研究而言，將會著重在麻六甲海峽地區，利用閃電資料結合海陸風環流，加以討論閃電分布特徵的日夜變化，並證明閃電密的日夜變化是海陸風差異所造成。

五、 參考文獻

- Abarca, S. F., K. L. Corbosiero, and T. J. Galarneau Jr., 2010: An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *J. Geophys. Res.*, 115, D18206.
- Holle, R. L., and Murphy M. J. 2017: Lightning over three large tropical lakes and the strait of Malacca: exploratory analyses. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 4559–4573.
- Kikuchi, K., and B. Wang, 2008: Diurnal precipitation regimes in the global tropics. *J. Climate*, 21, 2680–2696.
- Laing, A. G., R. E. Carbone, and V. Levizzani, 2011: Cycles and propagation of deep convection over equatorial Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2832–2853.
- Lin, S.-J., and K.-H. Chou, 2020: The Lightning Distribution of Tropical Cyclones over the Western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 148, 4415–4434.
- Mapes, B. E., T. T. Warner, and M. Xu, 2003: Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part III: Diurnal gravity waves and

nocturnal convection offshore. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 830–844.

Pan, L., X. Qie, and D. Wang, 2014: Lightning activity and its relation to the intensity of typhoons over the Northwest Pacific Ocean. *Adv. Atmos. Sci.*, 31, 581–592.

Ronald, L., H. and Martin, J. M.: Lightning over Three Large Tropical Lakes and the Strait of Malacca: Exploratory Analyses. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 4559–4573.

Venugopal, V., K. Virts, J. Sukhatme, J. M. Wallace, and B. Chattopadhyay, 2016: A comparison of the fine-scale structure of the diurnal cycle of tropical rain and lightning. *Atmos. Res.*, 169, 515–522.

Virts, K. S., J. M. Wallace, M. L. Hutchins, and R. H. Holzworth, 2013: Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 1381–1391.

Zhang, W., Y. Zhang, D. Zheng, and X. Zhou, 2012: Lightning distribution and eyewall outbreaks in tropical cyclones during landfall. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 3573–3586.

六、 附圖

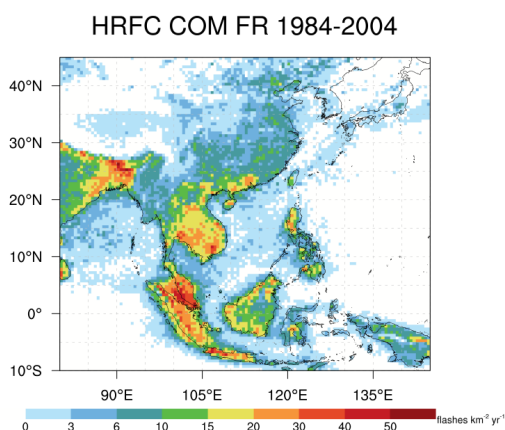


圖 1：1984~2004 年 TRMM LIS/OTD 亞洲地區年平均閃電密度空間分布圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

Lightning Frequency in 2005-2019 for Asia Region

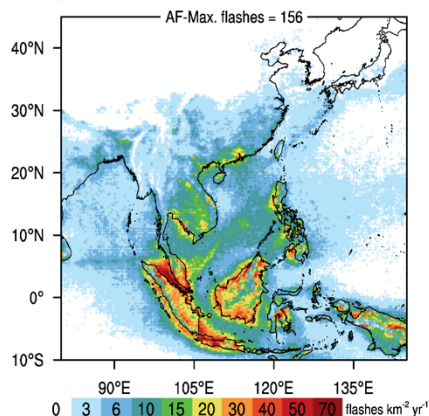


圖 2：2005~2019 年 WWLLN 亞洲地區年平均閃電頻率圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

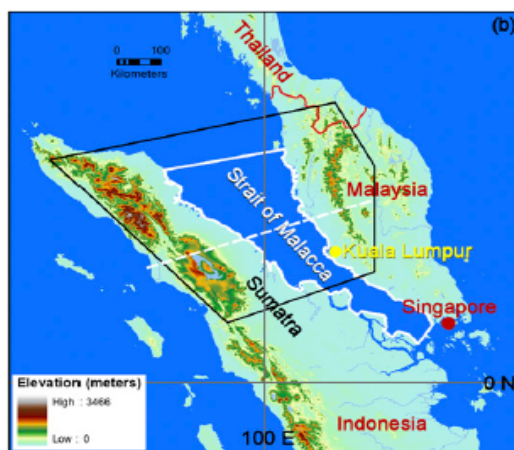


圖 3：麻六甲海峽地理位置分布圖。摘錄自 Holle and Murphy (2017) 的圖 1b。

Lightning Frequency in 2005-2019 for Malacca Strait

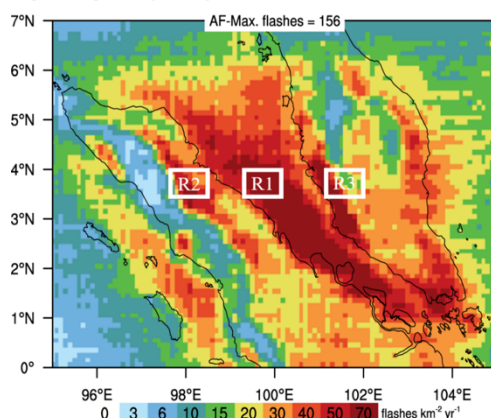


圖 4：2005-2019 年 WWLLN 麻六甲海峽的閃電密度圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 及所選區域，分別為 R1(海峽上, 3.5~4.0°N, 99.5~100.5°E), R2(棉

蘭, 3.5~4.0°N, 98.0~99.0°E), R3(吉隆坡, 3.5~4.0°N, 101.0~102.0°E)。

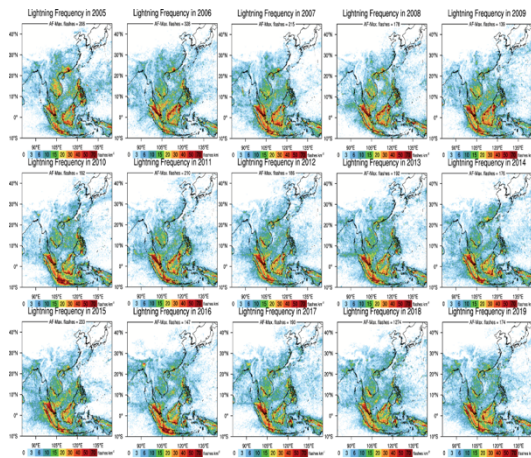


圖 5：2005~2019 年 WLLN 亞洲地區逐年的閃電密度圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

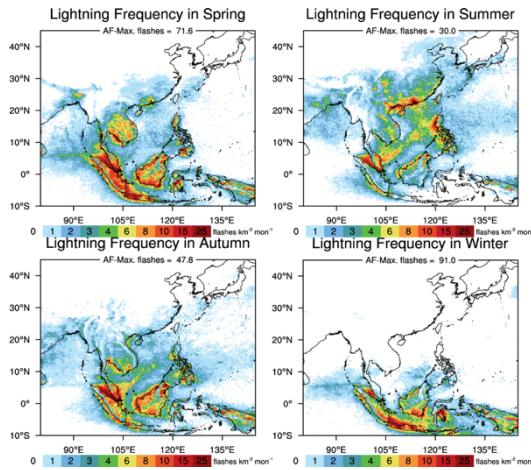


圖 6：2005~2019 年 WLLN 亞洲地區四季的閃電密度圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，分別為春季(3、4、5月)、夏季(6、7、8月)、秋季(9、10、11月)和冬季(12、1、2月)。

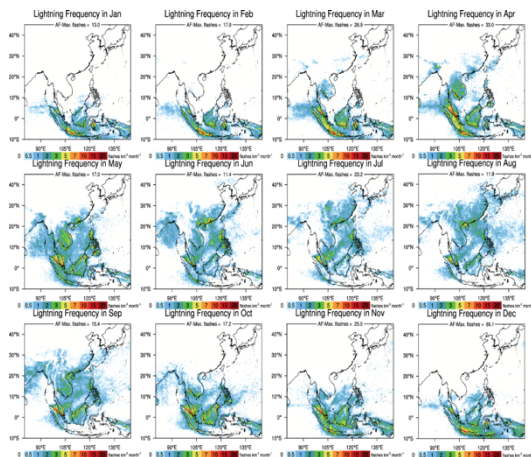


圖 7：2005~2019 年 WLLN 亞洲地區逐月的閃電密度圖，單位為 $\text{flashes km}^{-2} \text{ mon}^{-1}$ 。

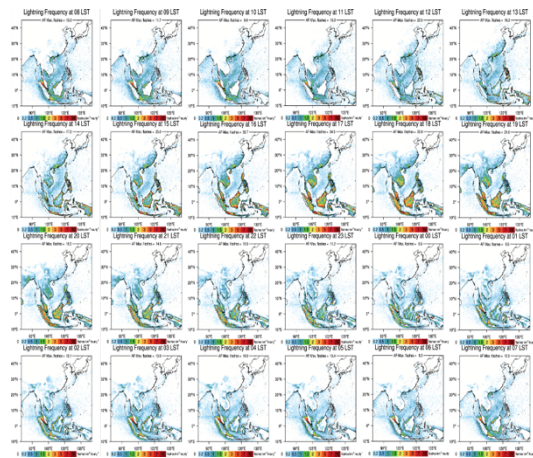


圖 8：2005~2019 年 WLLN 亞洲地區逐時的閃電密度圖，分別為 08 LST~07 LST。

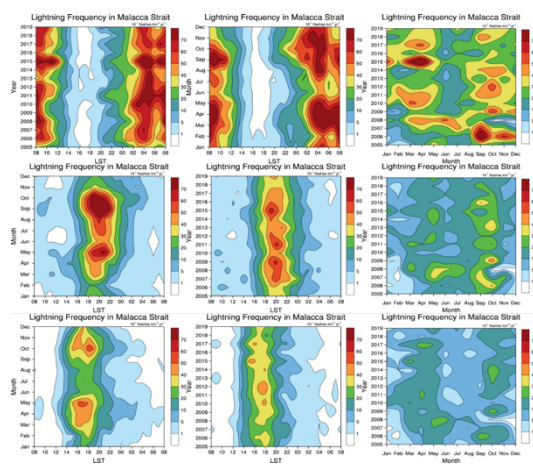


圖 9：2005~2019 年 WLLN 閃電密度分布圖，單位為 $10^{-1} \text{flashes km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，第一列為 R1，第二列為 R2，第三列為 R3，由左至右分別為月-時-年-時及年-月的閃電密度分布圖。