

聖嬰現象在森林砍伐引起海洋大陸降水變異所扮演的角色：對於 NCAR CESM 的模擬分析

蔣濬濂 李庭慧 羅敏輝

國立臺灣大學大氣科學系

(中華民國 110 年 5 月 31 日收稿；中華民國 111 年 4 月 11 日定稿)

摘要

聖嬰與南方震盪 (ENSO) 對於海洋大陸的降水量會產生年際性的影響，而過去研究指出森林砍伐造成的地表變遷會使當地氣候長期平均降水量增加。藉由給定觀測海溫的 CESM 大氣與陸地耦合模式，本研究欲了解森林砍伐造成的降水量的變化在不同 ENSO 相位時之差異，並透過地表能量收支平衡、雲輻射效應、溼靜能與環流場的分析，來探討在不同 ENSO 相位下森林砍伐的效應不同之原因。在十一月至次年一月期間，當 ENSO 呈現 La Niña 相位時，森林砍伐所造成的降水量增加幅度明顯小於 Neutral 與 El Niño 年。而 El Niño 時，森林砍伐所造成的降水量增加幅度則僅略小於 Neutral。在主要的分析中，我們比較了 Neutral、El Niño、La Niña 三種環境條件下的森林砍伐效應。在 La Niña 時的局部性環流與降水量增加幅度呈現同向的變化趨勢。但其他變數諸如地表輻射能量收支、地表溫度、地表可感熱通量、地表潛熱通量、雲輻射強迫、行星邊界層高度等，與降水量增加幅度的關係不顯著，甚至有反向的關係。由陸地區域與近海區域之間共同構成的局部性環流可以透過近地面的水氣通量輻合將水氣帶入陸地區域，而此局部性環流的強度在 La Niña 時有明顯的減弱，顯示局部性環流可能為主導森林砍伐後降水量增加幅度的一個重要因素。La Niña 氣候狀態下低層較乾、中層較溼的水氣環境，以及森林砍伐後較小的上升風速增幅，使得 La Niña 在森林砍伐後的近地面向上水氣傳輸增幅顯著較小，使得低、中層大氣的水氣量增幅更少，垂直積分總溼靜能較 Neutral 時更低。相對於 Neutral 森林砍伐造成的氣候反應，La Niña 時由森林砍伐造成的氣候反應更不利於降水。相較之下，在 El Niño 的環境下，森林砍伐所造成的溼靜能、垂直風速以及降水量增幅皆與 Neutral 時無顯著差異。

關鍵字：海洋大陸、ENSO、聖嬰、森林砍伐、地表變遷

一、前言

海洋大陸 (Maritime Continent, MC) 地區在近年來歷經了大規模的森林砍伐 (Hansen et al., 2013), 大多為農業或都市開發等行為。由於森林砍伐會改變地表型態, 並對區域性氣候產生影響。從水循環的角度而言, 森林砍伐會改變降水特徵 (Lawrence and Vandecar, 2015; Pielke et al., 2006), 而海洋大陸地區的森林砍伐會造成更高的降水量 (Chen et al., 2019)。一方面, 森林砍伐的行為移除了植物、減少了地表傳送到大氣的潛熱通量; 另一方面, 更高的可感熱通量使得近地面的溫度更高, 近地面的水氣通量輻合增強, 帶來額外的水氣通量 (Chen et al., 2019)。在上述兩個效應的共同競爭之下, 最終會造成降水量的增加。在降水的機制方面, 森林砍伐造成的額外水氣通量輻合是陸地區域重要的水氣來源 (Chen et al., 2019)。儘管一樣是在熱帶地區進行森林砍伐, 但不同的地理區域所產生的降水量變化效果卻不一定相同 (Chen et al., 2019)。在亞馬遜地區或非洲熱帶地區, 森林砍伐會減少蒸發散量, 造成更少的降水量。但在海洋大陸地區, 雖然森林砍伐同樣會減少蒸發散量, 但由於小

島被海洋所圍繞, 砍伐後的水氣輻合反而增加, 進而造成更多的平均降水。氣候模式的模擬顯示, 海洋大陸的陸地區域降水量在森林砍伐後普遍為增加, 其趨勢與亞馬遜地區、非洲熱帶地區相反。由此可見, 水氣輻合似乎扮演的更重要的角色, 來自於周圍近海的水氣貢獻對於分析海洋大陸森林砍伐的降水量變化是相當關鍵的。

海洋大陸地區主要由島嶼構成, 因此風場輻合可以將周圍海上的水氣帶向陸地, 補充陸地區域的水氣量。透過分析陸地區域各高度層的水氣通量輻合狀況, 則可以得知森林砍伐效應是否有引發額外的局部性環流。Chen et al. (2019) 分別以全球氣候模式及區域氣候模式, 模擬了在季節週期性的海溫條件下, 森林砍伐對海洋大陸的氣候影響。在此研究中, 森林砍伐後的陸地區域降水量增加了 16.5 Wm^{-2} , 且陸地區域有顯著的低層水氣通量輻合。不過, 該研究僅考慮大氣與陸地的耦合模型, 海洋的影響只考慮的季節的變化, 因此並沒有年際的變異度。

除了地表變遷外, 年際的氣候變異也會影響降水狀況。在海洋大陸地區, 聖嬰—南方震盪現象 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 會影響此區域的大氣

環境，造成不同的年均降水量 (Hendon, 2003; Jia, Ge and Wang, 2016; Lyon and Barnston, 2005)。在 El Niño 時，海洋大陸區域的高層大氣會有異常的沉降氣流，使得此區域的降水量較少。然而，若同時考慮森林砍伐與 ENSO 的效應，有時會出現較特殊的結果。例如在 El Niño 時，森林砍伐反而造成最大日降水量的增加 (Tölle et al., 2017)。因此，El Niño 與 La Niña 各自造成的大氣環境與森林砍伐的交互作用是值得進一步探討的，尤其須從海洋大陸區域的降雨機制來分析。

Lee and Lo (2021) 使用 CESM 大氣與陸地耦合模式，給定平均氣候與 El Niño 相位時的海溫環境，並通過地表輻射收支來解釋 El Niño 下森林砍伐對海洋大陸地區降水的影響。在 El Niño 的條件下，沉降的環境會抑制雲量、增加地表接收到的太陽輻射，地表溫度增加幅度更大，使得森林砍伐造成的當地水文氣候反應更強，且以上的特徵在九月至十一月 (SON) 尤為明顯。利用氣候模式得到的實驗結果發現，SON 的降水量增加幅度在 El Niño 時相較 Neutral 時更大。Tölle et al. (2017) 亦提到森林砍伐會擴大 ENSO 的影響，

造成海洋大陸的日最大降水強度增加，但該研究討論的季節是北半球的冬季。關於過去各研究文獻針對 ENSO 效應與森林砍伐對降水量的相關研究結論，簡要整理於表 1。

在海洋大陸地區，ENSO 造成的降水量變化是有季節性的。Hendon (2003) 提到 Niño 3.4 的海溫與海洋大陸地區降水量在 JJA 與 SON 期間有較強的負相關性。換言之，El Niño 所造成的沉降在 JJA、SON 時較強，因而抑制降水量。因此，若森林砍伐的效應亦受到大範圍環流的影響，森林砍伐造成的降水量變化可能也會具有季節性特徵。本研究將以氣候模式模擬海洋大陸地區森林砍伐後的氣候環境，篩選出 ENSO 個案，比較在不同 ENSO 相位的影響下，森林砍伐對於平均降水量增加幅度的影響。並根據降水量的季節循環，判斷不同 ENSO 相位、不同季節之內，對於森林砍伐造成的降水量增加幅度是否會有所差異。另一方面，從溼靜能垂直剖面的觀點，試圖解釋水氣垂直分布、垂直風速變化、大氣不穩定度與降水量增加幅度之間的相互關係。

表 1. 各研究文獻對於 ENSO 環境下海洋大陸森林砍伐對降水量影響的實驗比較。

| 參考文獻 | 本研究 | Lee et al. (2021) | Chen et al. (2019) | Tölle et al. (2017) |
|------------------------|--|---|---|--|
| 氣候模式 | 全球模式 CESM - CAM5, CLM4 | 全球模式 CESM - CAM5, CLM4 | 全球模式 CESM - CAM5, CLM4 | 區域模式 COSMO4.8 - CLM17 (Forcing: ERA-Interim) |
| 海溫資料 | HadiSST 與 NOAA OI 合併的 HadOIBI | HadiSST 與 NOAA OI 合併的 HadOIBI 歷史海溫資料中數 個 El Niño 與 La Niña 事件合併。 | 1982 - 2001 ERA- Interim 平均海溫 月資料 | 1984-2004 ERA- Interim |
| 水平解析度 (緯度 × 經 度) | 0.9° × 1.25° | 0.9° × 1.25° | 0.9° × 1.25° | 0.125° × 0.125° |
| ENSO 挑選 或模擬方式 | Neutral : 該年 ONI 五個月滑動 平均均介於 -0.5 與 0.5。 El Niño : 該年 ONI 五個月滑動 平均大於 1.5。 La Niña : 該年 ONI 五個月滑動 平均小於 -1.5。 | Neutral : 1982 - 2001 氣候平均海 溫月資料，所有資 料平均 El Niño : 將挑選出 的 El Niño 事件減 去 La Niña 事件 平均作為 El Niño 的模擬。以 2 年 為一個週期，重複 模擬 60 年。 | 無 | El Niño : 1991 - 1992、1994 - 1995、1997 - 1998、2002 - 2003 La Niña : 1995 - 1996、1998 - 1999、1999 - 2000、2000 - 2001 |
| 降水量變化 特徵 | NDJ : Neutral : 21.78 Wm ⁻² El Niño : 22.12 Wm ⁻² La Niña : 10.88 Wm ⁻² | SON : Neutral: +15.36 Wm ⁻² El Niño: +20.57 Wm ⁻² | 氣候長期平均 : +16.5 Wm ⁻² | NDJFM : 平均降水量減少， 極端降水強度（日 最大降水量）增加 森林砍伐可以擴大 ENSO 事件的自然 模態 (natural mode) |

二、資料與方法

(一) 全球氣候模式

1. 氣候模式設定

本研究使用 Community Earth System Model (CESM) 進行氣候的模擬，並分析其中 Community Atmosphere Model version 5 (CAM5, Neale et al., 2012) 模式的輸出資料。其中 CAM5 耦合了 Community Land Model version 4 (CLM4, Oleson et al., 2010; Lawrence et al., 2011)，透過改變模式的地表植被設定，模擬陸地與大氣間的交互作用。空間解析度分別為經度 1.25 度，緯度 0.9 度，高度共 30 層。為了模擬 ENSO 環境，我們使用 HadiSST (Rayner, 2003) 與 NOAA OI 合併的 HadOIBI (Reynolds, 2007)，並取 1970 年 7 月至 2005 年 6 月的資料，模擬海溫條件下的氣候特徵。並依據該海溫來計算 ONI 指數，並挑選 El Niño、La Niña 與 Neutral 年分的個案。

另外，為了驗證 CESM 降水量資料的可信度，我們也使用 Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) 的降水量觀測資料來與 CESM 的 CTR 組資料進行比對，比較兩者的降水量特徵。

GPCC 資料的解析度為經度 0.5 度、緯度 0.5 度，且僅覆蓋陸地區域。

2. 森林砍伐的模擬

本研究中的氣候模式模擬將會有兩種不同的地表設定，分為對照組 (Control run，以下簡稱 CTR) 及實驗組 (Deforestation run，以下簡稱 DEF)。CTR 組的地表特徵與初始狀況相同；而在 DEF 組中，闊葉落葉 (Broadleaf deciduous tropical trees) 及闊葉常綠 (Broadleaf evergreen tropical trees) 植物會被替換成草地植物，用於代表森林砍伐後的地表狀況。DEF 組減去 CTR 組稱為 ANO 組，代表森林砍伐所造成的淨效應。

在兩種模式設定中，皆會使用相同的海表溫度條件進行模擬。因此兩種設定中所挑選出的 ENSO 個案會在相同的年分，海溫造成的效應也相同。如此一來，只要篩選出每一種 ENSO 相位的資料進行分析，則可以區分出來自於地表變遷所造成的效應。在附錄的資料散布圖 (附圖一) 中也可以得知，CESM 與 GPCC 在海洋大陸陸地區域的降水均與 ONI 有明顯的負相關。儘管 CESM 資料的均方根誤差小於 GPCC，兩者的資料仍存在差別，但

CESM 對於 ENSO 年際變化的掌握是足夠充分的。因此我們將從 CESM 中挑選年分，來代表不同 ENSO 條件下的環境並分析氣候條件。

3. 系集模擬

為了增加樣本數，CESM 的 CTR、DEF 兩種模式設定分別會進行 8 次模擬。每一次的大氣模式都會加入微小的溫度初始擾動場，以系集模擬的方式進行實驗。如此即可得到較多的資料樣本數。而不同模式間結果的變異度則來自於對初始場敏感的效應。

(二) 資料篩選

1. 空間篩選

海洋大陸地區的地理位置如圖 1 所示。而本實驗所稱海洋大陸地區，定義為

東經 90 度至東經 140 度之間、南緯 10 度至北緯 10 度之間。根據圖 2 所示的 ENSO 風場特徵，可以發現在 La Niña 時的上升—下沉氣流交界大約位於東經 140 度，因此本研究使用東經 140 度作為空間範圍的東側邊界。其中圖 2 使用每年十一月至次年一月的資料繪製，是為了配合後續降水量分析的季節所選取。

若要篩選陸地區域的網格點，則以上述範圍內的網格陸地比例大於 0.5 作為篩選門檻。另外，為了分析陸地與近海區域間的區域性環流，我們也篩選出近海區域的網格點。篩選門檻為 (1) 該網格本身為海洋，即陸地比例為零。(2) 該網格的上、下、左、右、左上、左下、右上、右下的 8 格內包含陸地網格。符合上述兩個篩選門檻，就挑選為近海區域。陸地區域與近

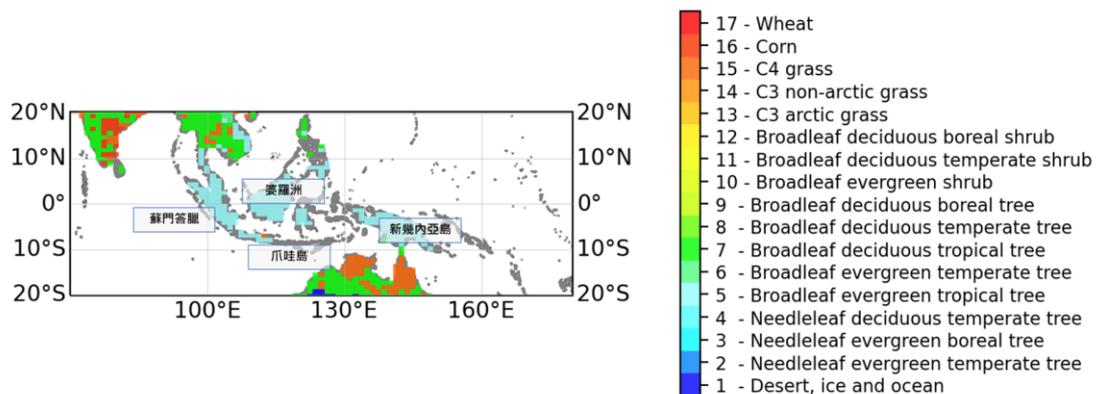


圖 1. 海洋大陸及其周圍區域地理分布圖，中文為此區域的主要組成島嶼名稱，其中陸地網格均以 CLM 陸地模式中的植物功能性類型(Plant Functional Type, PFT) 繪製顏色。

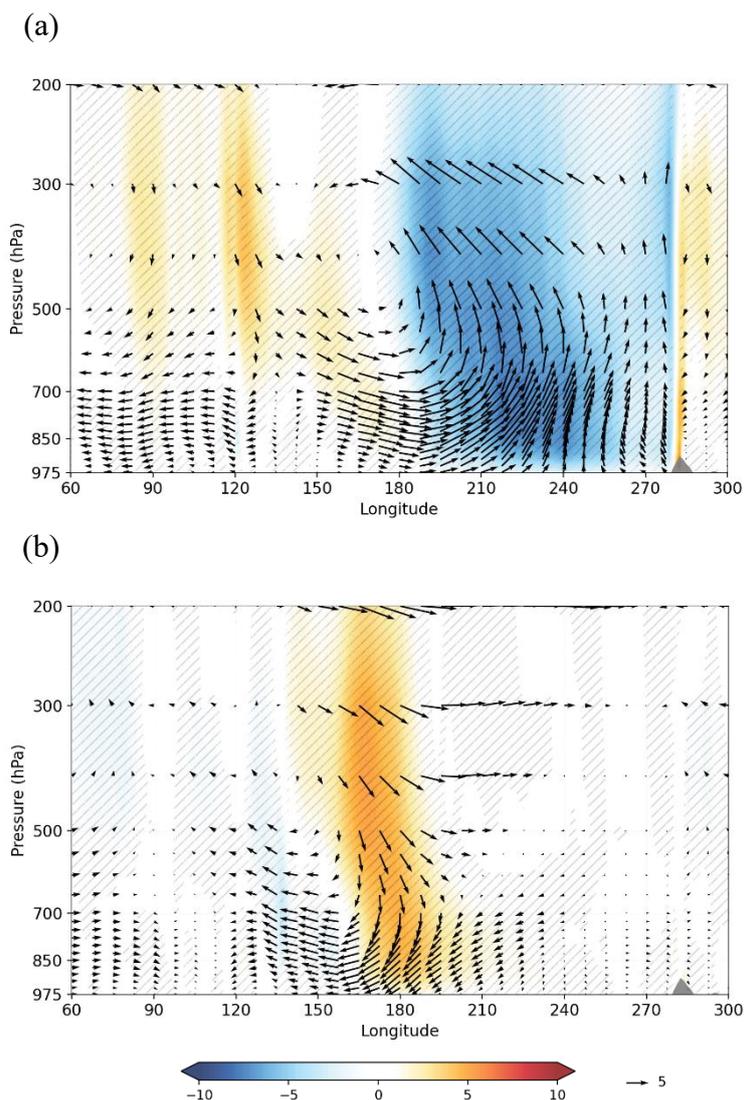


圖 2. 赤道太平洋區域在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，緯向風、垂直風的經度－高度剖面圖，並取緯度範圍 5°S 至 5°N 的平均。箭號為緯向 - 垂直風場，塗色等值線為垂直風速。(a) El Niño 扣除 Neutral 的風場、(b) La Niña 扣除 Neutral 的風場。底色為垂直風速的量值，紅色為正，代表下沉氣流。其中黑色斜線部分代表具有統計顯著性差異 ($\alpha=0.05$)。

海區域的網格點如圖 3 所示。在後續若無特別標註，本研究中所稱空間平均值均指陸地區域的平均。

2.時間範圍

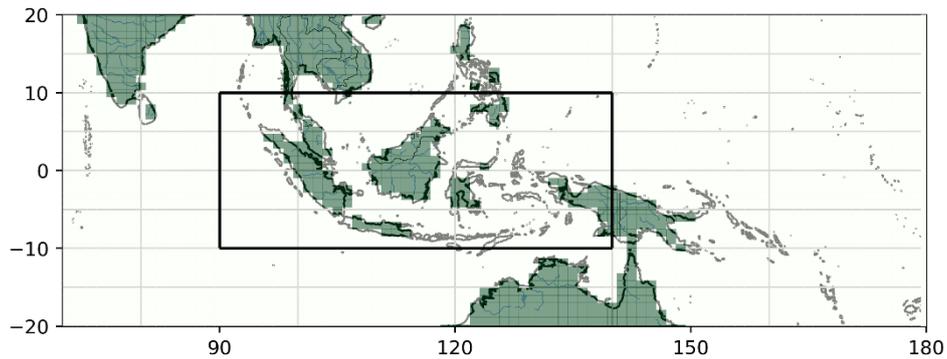
本實驗中將使用 1970 年 7 月至 2005 年 6 月的資料。為了配合 ENSO 個案的

分析，由於 El Niño、La Niña 事件大致起始於北半球夏天，因此在進行資料分析時，皆將某年 7 月至次年 6 月定義為該 ENSO 事件所挑選出的時間範圍。

3. ENSO 個案篩選

ENSO 是發生在赤道太平洋地區的氣

(a)



(b)

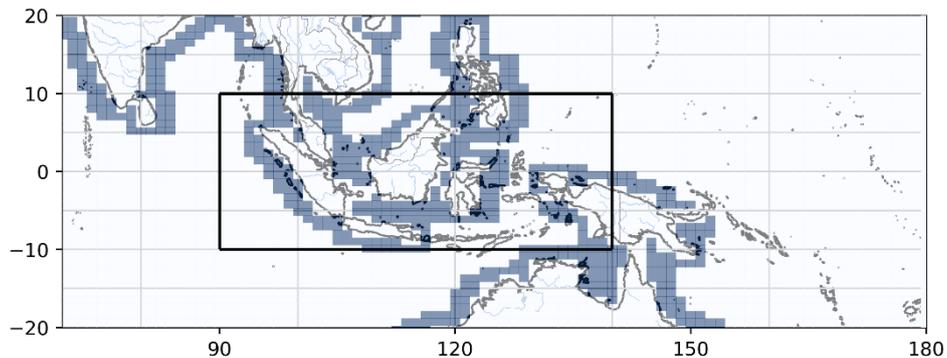


圖 3. 本實驗所使用的 (a) 陸地區域及 (b) 近海區域網格範圍。黑色框線為海洋大陸區域的邊界。

候震盪，且包含熱帶大氣與海洋間的交互作用關係。El Niño 與 La Niña 分別代表赤道區域沃克環流的減弱與增強，由於海洋大陸位於沃克環流的西側上升區，因此大氣環境會受到 ENSO 年際震盪的影響。現行主要的 ENSO 監測指標為美國國家海洋暨大氣總署 (NOAA) 所使用的 ONI 指數 (Oceanic Niño Index)。其定義為

Niño 3.4 區域內，ERSST.v5 海表溫度異常的三個月移動平均。本研究篩選 ENSO 個案時，會使用 ONI 數值大於 1.5 (小於 -1.5) 作為門檻，且該月分往前連續五個月連續達到門檻時，則將該月所處的年分定義為 El Niño、La Niña 個案。而根據上述的計算方式，全年皆未達到正負 0.5 的門檻時，則將該年分定義為 Neutral 個案 (圖 4)。

根據此方法定義的 El Niño、La Niña 可以挑選出強度較強的 ENSO 個案。在本實驗所使用的資料時間範圍內，共可以挑選出 5 個 El Niño (1972-1973, 1982-1983, 1987-1988, 1991-1992, 1997-1998) 個案與 5 個 La Niña (1973-1974, 1975-1976, 1988-1989, 1998-1999, 1999-2000) 個案。而 Neutral 個案則有 11 個 (1978-1979, 1980-1981, 1981-1982, 1985-1986, 1989-1990, 1990-1991, 1992-1993, 1993-

1994, 1996-1997, 2001-2002, 2003-2004)。
由於 ENSO 的篩選門檻與 Neutral 個案的篩選門檻並未涵蓋所有的 ONI 值範圍，因此總個案數並非資料範圍的 35 年。

然而，各個 ENSO 事件之間 ONI 發展狀況的歧異性較大。例如，在 1987-1988 的 El Niño 事件中，ONI 從十一月開始即下降至 +1.5 以下；而在 1991-1992 的 El Niño 事件中，ONI 從十二月開始才上升至 +1.5 以上。而 1973-1974、1975-1976 兩

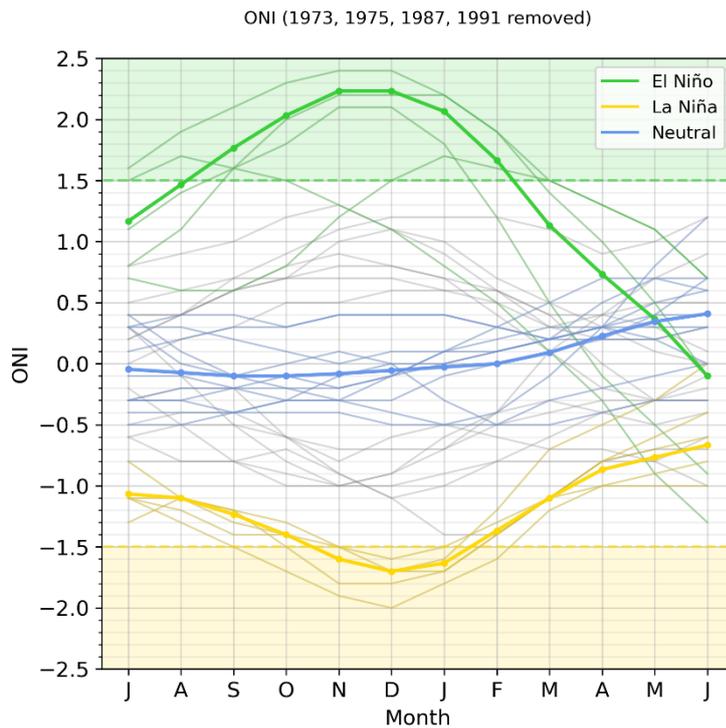


圖 4. 以本實驗資料海溫所繪製之 Oceanic Niño Index (ONI) 季節循環。細線表示各年分的 ONI，綠色、黃色、藍色、灰色分別代表 El Niño、La Niña、Neutral 與其餘年分。粗線代表 El Niño、La Niña、Neutral 的平均。其中 El Niño 的平均為移除 1987-1988、1991-1992 兩個 El Niño 事件後的結果，La Niña 的平均為移除 1973-1974、1975-1976 兩個 La Niña 事件後的結果。橫軸為月份，起始自七月、結束於次年六月。縱軸為 ONI 指數，大於 +1.5 與小於 -1.5 的部分分別以綠色範圍與黃色範圍標記，代表本次實驗中 El Niño 事件與 La Niña 事件的篩選標準。其中，El Niño 標記了五條線所對應的年分，例如 97 則代表 1997-1998 的事件。

個 La Niña 事件中，低層大氣的水氣量與溫度都明顯較其他三個事件低。相較於其他事件，上述的年分可能會有不同的氣候狀況，因此我們將捨去 1973-1974、1975-1976、1987-1988、1991-1992 的個案，以其餘年分代表 El Niño 與 La Niña 的三個個案。圖 4 顯示了 El Niño、La Niña、Neutral 各自的 ONI 季節循環，其中的 El Niño 平均值（綠色粗線）已移除 1987-1988、1991-1992 的個案，La Niña 平均值（黃色粗線）已移除 1973-1974、1975-1976 的個案。可以發現在移除上述年分後，El Niño 時的 ONI 平均值大致在十二月左右達到最大值，與 La Niña 時 ONI 達到最小值時間大致相同。

（三）降水量特徵

本研究以 CESM 中 CAM 所輸出的 PRECC（對流性降水）與 PRECL（層狀性降水）總和代表降水量，並分析 CTR、DEF、ANO 組的降水量差異，以及其在不同 ENSO 相位時的特徵。其中，降水的單位為 Wm^{-2} ，是將單位面積內降水的總質量乘以潛熱（ L_v ）以表示降水在相變後所提供的能量，將降水表示成能量通量的形式。可以方便與其他地表能量收支項（如

潛熱通量、可感熱通量）等相互比較，較能清楚展示各項之間的相對量值大小。

（四）大氣能量收支平衡

1. 地表能量收支

在本研究的氣候模式中，地表的能量收支平衡可分為長波輻射通量、短波輻射通量、可感熱通量、潛熱通量等（圖 5）。長期而言，能量收支應趨近於平衡：

$$(R_{SW}^{\downarrow} - R_{SW}^{\uparrow}) + (R_{LW}^{\downarrow} - R_{LW}^{\uparrow}) - (SH + LH + G) = 0 \quad \dots\dots\text{式 1}$$

三個括號內的項分別代表淨短波輻射、淨長波輻射與非輻射項。 R_{SW}^{\downarrow} 與 R_{SW}^{\uparrow} 分別為地表向下及向上短波輻射，兩者的比例與地表對太陽輻射的反照率有關。 R_{LW}^{\downarrow} 與 R_{LW}^{\uparrow} 分別為地表向下與向上長波輻射。 R_{LW}^{\downarrow} 與大氣的發射的長波輻射有關，受水氣量、雲量等因素影響。 R_{LW}^{\uparrow} 大致與地表溫度的四次方成正比，此項可用於分析輻射平衡後的地表溫度變化。 SH 熱通量。 G 為地表向下熱通量，長期平均而言， G 的變化相對較少，因此在本研究當中忽略。

（五）溼靜能

從大氣溼靜能（Moist static energy）剖面可以分析各層大氣間的相對能量大小。若低層的溼靜能增加，代表低層大氣擁

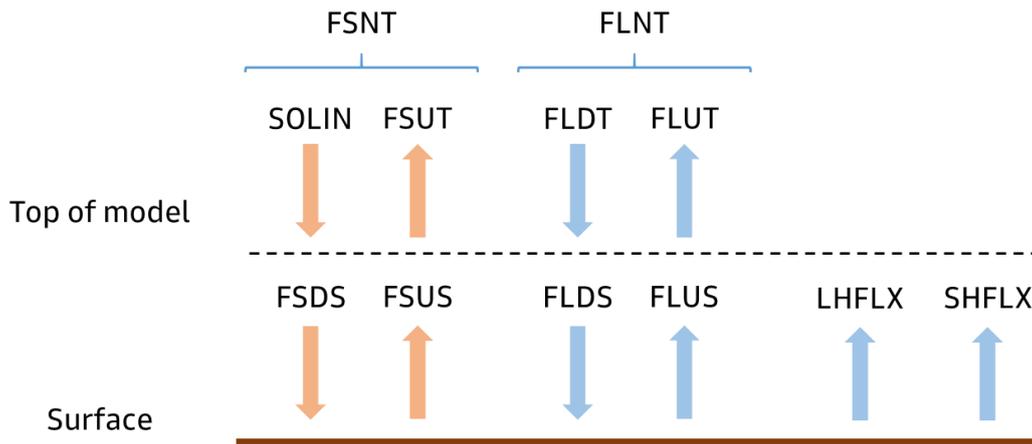


圖 5. CAM5 模式中的大氣能量收支示意圖。紅色箭頭為短波輻射（太陽輻射）通量，藍色箭頭為長波輻射通量。SOLIN、FSUT 分別為大氣層頂向下、向上短波輻射；FSDS、FSUS 分別為地表向下、向上短波輻射；FLDT、FLUT 分別為大氣層頂向下、向上長波輻射；FLDS、FLUS 分別為地表向下、向上長波輻射。圖中最上方的 FSNT、FLNT 分別為大氣層頂淨短波輻射、淨長波輻射。LHFLX、SHFLX 分別為地表潛熱通量及地表可感熱通量。在本研究中忽略地表向下熱通量（Ground heat flux）。

有更高的能量，該條件有利於對流發生。

溼靜能（MSE）可寫成下列形式：

$$MSE = C_p T + gz + L_v q_v \quad \dots\dots \text{式 2}$$

其中 T 為溫度 (K)、 z 為重力位高度 (m)、 q_v 為水氣比溼 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 C_p 為定壓比熱容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)、 g 為重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)、 L_v 為水的凝結潛熱 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)，溼靜能的單位為 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

（六）陸地與近海區域間的局部性環流

陸地區域的低層水氣通量輻合是此區域重要的水氣來源，由於水氣主要來自於周圍的海域（以下稱為近海地區），因此我們會同時分析陸地區域與近海區域的垂直風速、雲量等，觀察局部性環流是否改變。

水氣通量為一向量，定義為 $\langle qu, qv \rangle = q\vec{V}$ ，則水平水氣通量輻合可以用散度來定義。根據向量的性質，水平水氣通量輻合（Horizontal moisture flux convergence, HMFC）可表示為：

$$HMFC = -\nabla \cdot (q\vec{V}) \quad \dots\dots \text{式 3}$$

圖 6 為局部性環流的示意圖。其中，本研究中以陸地區域的水氣通量的散度來代表近地面的水氣輻合，即綠色箭頭部分。由於本研究中的陸地區域大多為獨立的海島，可以視為封閉的區域，根據高斯散度定理，其範圍內的水氣通量散度值等於穿過區域的淨通量，即可類比為近海往陸地區域的輻合或輻散。儘管如此，東經 140 度的邊界切過了新幾內亞島中部，因此上

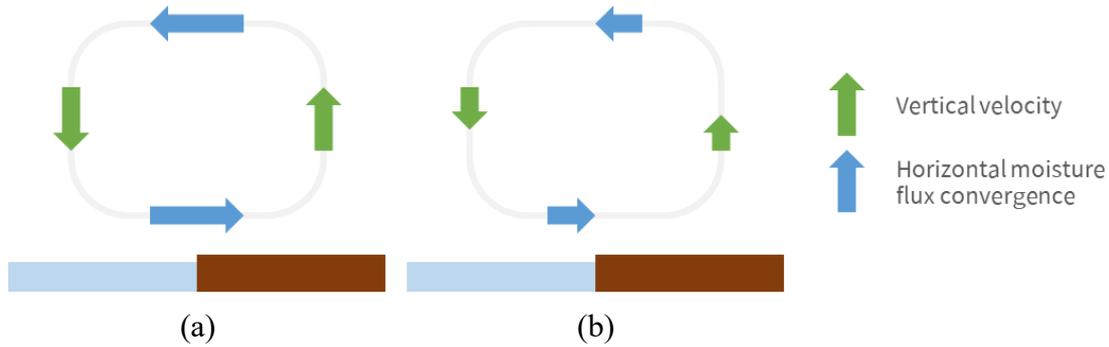


圖 6. 陸地與近海區域間的局部性環流示意圖，其中每張子圖的左側為近海區域，右側為陸地區域。藍色箭頭代表水平方向的風場（本研究中以水平水氣通量輻合代表），綠色箭頭為垂直風速，四個部分共同構成一個局部性環流。而 (a) 與 (b) 分別是兩種局部性環流的情況，箭頭愈長代表相對強度愈強。

述的估計仍有誤差，而本實驗先忽略此問題。

（七）垂直水氣通量

陸地區域的垂直水氣通量（Vertical moisture flux, VMF）代表垂直方向上的水氣傳輸，可以表示成垂直風速與比溼的乘積 $q\omega$ 。在森林砍伐後，垂直風速與比溼皆會有變化，因此可以將 ANO 組的垂直水氣通量拆分成三個部分：

$$(q\omega)' = q'\bar{\omega} + \bar{q}\omega' + q'\omega' \quad \dots\dots\text{式 4}$$

其中 \bar{X} 代表 X 變數 CTR 組的量值， X' 代表 X 變數 ANO 組的量值。後三項分別代表水氣的效應（稱為熱力項）、垂直風速的效應（稱為動力項）、以及非線性項。其中由於資料頻率是月資料，因此垂直水氣通量（包括前述的水平水氣通量

輻合）等包含非線性運算的物理量皆可能有偏誤。

（八）資料分類及統計檢定方法

1. 資料的分類方法

本研究的模式結果包括 CTR 組、DEF 組，而依照篩選出的 ENSO 個案可分為 $CTR_{Neutral}$ 、 CTR_{ElNino} 、 CTR_{LaNina} 與 $DEF_{Neutral}$ 、 DEF_{ElNino} 、 DEF_{LaNina} 。對於同一組系集的模擬結果而言，CTR 組與 DEF 組的年分是可以一一對應的。因此，可將 DEF 組與 CTR 組沿著時間維度相減，即可得到 ANO 組資料。同理，可根據不同的氣候狀態分為 $ANO_{Neutral}$ 、 ANO_{ElNino} 、 ANO_{LaNina} 。另外，本研究也會分析以上資料兩兩之間的差異，例如 $CTR_{ElNino} - CTR_{Neutral}$ 代表兩組資料相減。

除了資料本身的經度、緯度、高度外，

以上資料皆包括時間及系集兩個維度。在計算平均時，不同的資料會有不同的處理方式。第一種是前段提到的各組資料，如 $CTR_{Neutral}$ 、 $ANO_{Neutral}$ 等，因為資料中包含時間及系集兩個維度，因此直接取以上兩個維度的平均。第二種是前段提到兩組相減的資料，由於這前後兩資料的年分不同，樣本數也可能不同，無法對應相減。因此將使用兩樣本數不同獨立母體的統計檢定，進行 p -value 與信賴區間的計算。

2. 顯著性統計檢定

本研究將使用 t -test 雙尾檢定來評估某變化量是否顯著異於零。須要注意的是，資料的維度包括不同時間及不同系集。因此在分析資料時，樣本的標準差將來自於年際氣候變異度及樣本間變異度。

三、結果

(一) 降水量變化與季節性特徵

1. 降水量季節循環

圖 7 (a) 展示了海洋大陸陸地區域降水量 CTR 組的季節循環。可以發現在北半球夏季時，降水量普遍較少，為海洋大陸地區的典型乾季。在此階段，不同 ENSO 相位間的降水量差異較大。而在北

半球秋、冬季（約十月至次年三月）時降水量較多，且不同 ENSO 相位間的降水量差異亦較小。另外在次年的北半球春天時，ENSO 造成的降水量效應甚至與 ENSO 發展初期相反，El Niño 時的降水量在四月時較 La Niña、Neutral 時更多。圖 7 (c) 為 GPCP 資料的降水量 CTR 組季節循環。在乾季末期（七月至九月）左右，不同 ENSO 對於降水量的影響很大；而在北半球冬季至隔年春天，年際變異度則較小。這個趨勢與圖 7 (a) 所示的模式降水量資料相似。

圖 7 (b) 為降水量 ANO 組的季節循環。相較於 CTR 組， ANO 組數值變化較沒有明顯的季節差異。不過在北半球的秋季至冬季，La Niña 增加的量值相較 El Niño、Neutral 時較少。在十月至三月 (ONDJFM) 之間 La Niña 的量值皆小於另外兩種情況；而在十一月至二月 (NDJ) 時的差異尤為明顯。此季節正好為 ENSO 事件典型的成熟期，是圖 4 中 ONI 數值發展至極大或極小的時間。在後續的分析當中，我們會討論在 NDJ 季節時的森林砍伐效應及降水量特徵等，並探討 La Niña 降水量增加幅度較 Neutral 時小的原因。

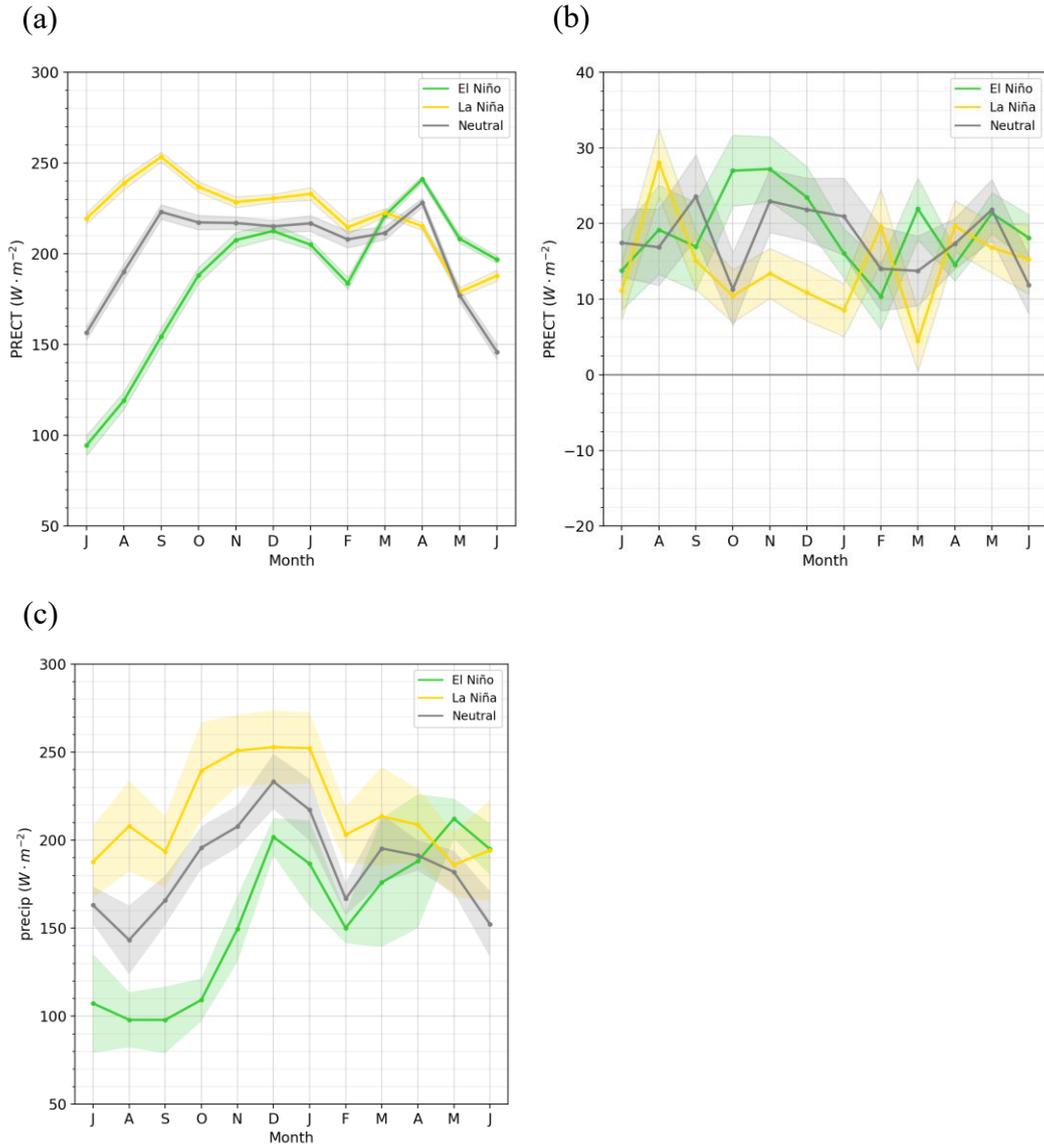


圖 7. 海洋大陸陸地區域降水量季節循環 (El Niño 已移除 1987-1988 與 1991-1992、La Niña 已移除 1973-1974、1975-1976)。(a) 為 CTR 組，(b) 為 ANO 組。(c) 是以 GPCC 資料所繪製的 CTR 組。橫軸為月份，起始自七月、結束於次年六月。縱軸為降水量 (W·m⁻²)。每條線上下之塗色範圍為樣本 95% 信賴區間，包含年際變異度及系集變異度，而 GPCC 資料僅包含年際變異度。

2. 森林砍伐造成的降水量變化

表 2 為各組實驗之下，全年平均以及在十一年至次年一月間 (NDJ) 海洋大陸陸地區域的降水量量值。在 CTR 組與 DEF 組的全年平均降水量中，ENSO 對於

降水量的反應相當一致，El Niño (La Niña) 會造成降水量減少 (增加)。表示雖然森林砍伐造成了整體降水量的增加，但 ENSO 對於降水條件的影響仍是相似的。另一方面，在十一年至次年一月為此地區的溼季期間，降水量較全年平均多。若比較 CTR

組與 DEF 組的 El Niño – Neutral 與 La Niña – Neutral，可知溼季內 ENSO 造成的降水量變化幅度較小。

若探討 ANO 組的資料，可以發現在 Neutral 下的全年平均降水量為 17.70 Wm^{-2} ，大於 La Niña，小於 El Niño。但從 $ANO_{\text{ElNino}} - ANO_{\text{Neutral}}$ 、 $ANO_{\text{LaNina}} - ANO_{\text{Neutral}}$ 的統計顯著性也可得知，ENSO 並未造成 ANO 組的量值有顯著差異。雖然兩者量值的正負號不同，但統計上的可信賴度並不高。

在十一月至次年一月間，在 Neutral、El Niño 時的降水量增加幅度大於全年平均值。而在 La Niña 時的降水量增加幅度則小於全年平均值，且兩者差異顯著，量值約為 ANO_{Neutral} 的二分之一。

(二) 地表能量收支

1. CTR 組

我們先以地表能量收支的變化來分析影響降水量增加的變因。表 3 展示了十一月至次年一月海洋大陸陸地區域的能量收支與地表溫度。在 CTR 組中，地表接收

表 2. 海洋大陸陸地區域在全年、十一月至次年一月 (NDJ) 之間，在各組實驗中的降水量 (Wm^{-2})。其中資料已移除了 1973-1974、1975-1976 兩個 La Niña 個案以及 1987-1988、1991-1992 兩個 El Niño 個案。星號代表 $p\text{-value} < 0.05$ 。

| 資料 | 降水量 全年平均 | 降水量 NDJ |
|--|-------------|------------|
| CTR_{Neutral} | 199.32 | 214.96 |
| CTR_{ElNino} | 184.88 | 207.10 |
| CTR_{LaNina} | 220.30 | 229.24 |
| DEF_{Neutral} | 217.02 | 236.74 |
| DEF_{ElNino} | 203.93 | 229.22 |
| DEF_{LaNina} | 234.66 | 240.12 |
| ANO_{Neutral} | 17.70* | 21.78* |
| ANO_{ElNino} | 19.05* | 22.12* |
| ANO_{LaNina} | 14.36* | 10.88* |
| $CTR_{\text{ElNino}} - CTR_{\text{Neutral}}$ | -14.44* | -7.86 |
| $CTR_{\text{LaNina}} - CTR_{\text{Neutral}}$ | 18.61* | 14.28* |
| $DEF_{\text{ElNino}} - DEF_{\text{Neutral}}$ | -13.09* | -7.52 |
| $DEF_{\text{LaNina}} - DEF_{\text{Neutral}}$ | 17.63* | 3.38 |
| $ANO_{\text{ElNino}} - ANO_{\text{Neutral}}$ | 1.35 | -0.34 |
| $ANO_{\text{LaNina}} - ANO_{\text{Neutral}}$ | -3.35 | -10.90* |

到的向下長波輻射與向上的長波輻射在 El Niño 皆增加。由於森林與草地的輻射發射率差異不大 (Qin et al., 2004; Labed and Stoll, 1991), 因此長波輻射增加代表地表或大氣的溫度增加。大氣層頂的向上輻射在 El Niño 時有較大幅度的增加。這可能跟 ENSO 對雲頂高度的變化有關。El Niño 時由於下沉作用的關係, 雲頂高度降低 (Su and Wang, 2015), 因此使雲頂溫度相對 Neutral 時更高、向上輻射的長波輻射更強。但在 La Niña 時, 地表向下長波輻射與向上長波輻射亦增加, 而大氣層頂的向上長波輻射變化則較小。在太陽輻射方面, El Niño 時的地表向下短波輻射增加, La Niña 則減少。大氣層頂的向上長波輻射在 El Niño 時顯著減少, La Niña 時則有顯著增加。表示在 La Niña 時, 有更多短波輻射未被地表吸收, 而直接被反射至大氣層以外。

非輻射項方面, 地表潛熱通量在 ENSO 的影響下變化不顯著。地表可感熱通量在 El Niño 時相較 Neutral 時更多, 在 La Niña 時則更少。地表溫度在 El Niño 與 La Niña 時均增加, 且均有統計顯著性。

2.ANO 組

表 4 為十一月至次年一月 ANO 組的能量收支與地表溫度。在 ANO_{Neutral} 組中, 地表向下長波輻射與向上長波輻射增加, 與 CTR 組在 El Niño 的情況類似。但大氣層頂的向上長波輻射減少, 可能代表雲頂溫度降低、雲頂高度上升。向下短波輻射略為減少, 但變化不顯著。而地表向上短波輻射與大氣層等向上短波輻射皆增加。這可能是由於地表植被改變, 平均反照率增加所致, 此現象與過去的研究結論類似 (Chen et al., 2019)。非輻射項方面, 由於移除地表的植物, 潛熱通量大幅減少; 而可感熱通量增加。地表溫度則增加 1.33 度, 這與 Lee and Lo (2021) 的結果相符合, 且幅度較 CTR 組在 El Niño 相對 Neutral 時的地表增溫更大。

相較於 Neutral, 在 La Niña 時的短波輻射的變化較為顯著。從 ANO_{LaNiña} - ANO_{Neutral} 可知, 地表向下短波輻射與地表向上短波輻射皆為正, 但大氣層頂向上短波輻射顯著為負。代表相較於 Neutral 時, 在 La Niña 森林砍伐造成額外入射的太陽輻射能量更多, 且有更多的輻射能量被留在大氣與地表。該結果可以對應到 La Niña 時較小的 ANO 降水量增加量。由於降水量較少時會讓雲量較少、太陽輻射

表 3. 海洋大陸陸地區域在十一月至次年一月 (NDJ) 之間, CTR 組的能量收支與地表溫度, 大氣層頂向下長波輻射及向下短波輻射(太陽輻射)未列出。其中能量收支變數的單位為 Wm^{-2} , 地表溫度的單位為 K。星號代表具有統計顯著性差異 ($\alpha = 0.05$)。

| 變數 | | CTR _{Neutral} | CTR _{EINino} - CTR _{Neutral} | CTR _{LaNina} - CTR _{Neutral} |
|------|-------------------|------------------------|--|--|
| 長波輻射 | 地表/向下輻射 FLDS | 419.43 | 1.30* | 1.26* |
| | 地表/向上輻射 FLUS | 446.60 | 1.49* | 0.68* |
| | 大氣層頂/向上輻射 FLUT | 207.67 | 10.30* | -1.56* |
| 短波輻射 | 地表/向下輻射 FSDS | 160.56 | 2.64* | -2.96* |
| | 地表/向上輻射 FSUS | 19.17 | 0.22 | -0.37* |
| | 大氣層頂/向上輻射 FSUT | 175.54 | -2.46* | 2.37* |
| 非輻射項 | 地表潛熱通量 LHFLX | 101.20 | -0.81 | -0.89 |
| | 地表可感熱通量 SHFLX | 12.31 | 1.58* | -0.40* |
| 地表溫度 | | 297.83 | 0.25* | 0.11* |

表 4. 與表 3. 相同, 但資料為 ANO 組。

| 變數 | | ANO _{Neutral} | ANO _{EINino} - ANO _{Neutral} | ANO _{LaNina} - ANO _{Neutral} |
|------|-------------------|------------------------|--|--|
| 長波輻射 | 地表/向下輻射 FLDS | 3.14* | 0.10 | -0.42 |
| | 地表/向上輻射 FLUS | 8.01* | 0.35* | 0.16 |
| | 大氣層頂/向上輻射 FLUT | -2.80* | -0.77 | 1.66 |
| 短波輻射 | 地表/向下輻射 FSDS | -0.48 | 0.21 | 2.81* |
| | 地表/向上輻射 FSUS | 2.79* | 0.06 | 0.32* |
| | 大氣層頂/向上輻射 FSUT | 3.44* | -0.07 | -2.36* |
| 非輻射項 | 地表潛熱通量 LHFLX | -13.06* | 0.32 | 1.41* |
| | 地表可感熱通量 SHFLX | 6.16* | -0.50 | 0.36 |
| 地表溫度 | | 1.33* | 0.051 | 0.025 |

的入射量更高，因此 ANO 的降水量與 ANO 的地表向下短波輻射應為負相關關係。相較之下，El Niño 時的各項變化較不顯著。但地表溫度增加幅度較大，地表向上長波輻射亦增加，而地表可感熱通量降低。若比較 El Niño、La Niña 兩種環境下的森林砍伐效應，可以發現各變數的變化基本不顯著，僅有短波輻射在 La Niña 時有更多能量被地球系統吸收。

3. 地表總能量收支

若計算地表總能量收支（剩餘項除以淨能量接收量），可以發現 CTR 組與 DEF 組（附表未列出）的剩餘項分別為 0.71 Wm^{-2} 與 -0.53 Wm^{-2} ，分別占淨能量接收量的 0.12% 與 0.09%。這可能來自於本研究中忽略的地表向下熱通量的變化，或是其他來自於數值方法計算的誤差。

（三）溼靜能

我們以溼靜能代表大氣長期平均的能量。若大氣垂直方向上的整體溼靜能增加，代表此區域有更多的能量可利於對流與降水發展。我們將以各組實驗的溼靜能垂直剖面來分析，討論各種條件下的溼靜能相對變化。

1. CTR 組

圖 8 為海洋大陸陸地區域溼靜能的垂直剖面。在 Neutral 時，大約在 700 hPa 左右有極小值（圖 8 (a)）。在 El Niño 的條件下，500 hPa 至 700 hPa 附近的水氣 $L_v q_v$ 顯著減少，使得溼靜能量值減少；而 800 hPa 以下的區域 $L_v q_v$ 項增加，溼靜能的量值亦增加。若對比中、低層的溼靜能，溼靜能的梯度增加，大氣的不穩定度增加（圖 8 (b)）。La Niña 時則相反，對比中、低層的溼靜能，大氣的不穩定度減少。但儘管如此，La Niña 在各層的水氣皆較 Neutral 時更多，溼靜能大於 Neutral 時的環境（圖 8 (c)）。

2. ANO 組

在森林砍伐後，近地面的水氣 $L_v q_v$ 顯著減少、氣溫 $C_p T$ 增加，兩者抵銷後使得溼靜能減少。在 900 hPa 以上， $L_v q_v$ 項增加，加上中層以上的 $C_p T$ 增加，使得 900 hPa 以上的溼靜能增加（圖 8 (d)）。若比較近地面與中層大氣的溼靜能，大氣的不穩定度減少，但是整體而言有較多的垂直積分溼靜能。

El Niño 時的 $L_v q_v$ 項的樣本變異度較大，整體的變化不顯著（圖 8 (e)）。而在 La Niña 時，近地面的溼靜能相對 Neutral

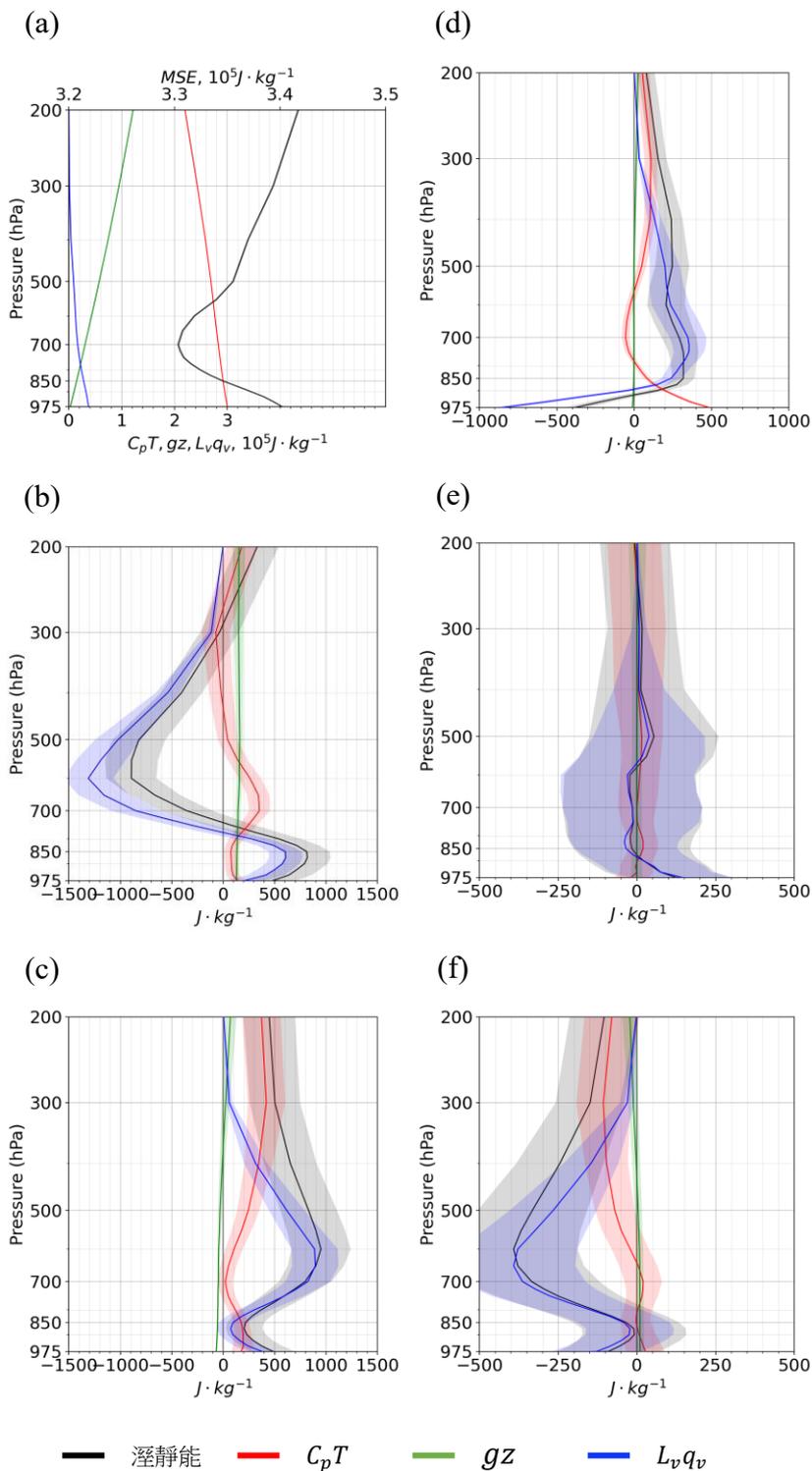


圖 8. 海洋大陸在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，溼靜能的垂直剖面圖。由上至下三列分別為 Neutral、El Niño - Neutral、La Niña - Neutral，(a) ~ (c) 為 CTR 組，(d) ~ (f) 為 ANO 組。黑、紅、綠、藍線分別代表溼靜能、 $C_p T$ 項、 gz 項與 $L_v q_v$ 項剖面。各項單位皆為 $J \cdot kg^{-1}$ 。縱軸為氣壓，單位為 hPa。各顏色的塗色範圍為 95% 信賴區間。

略微減少，在 850 hPa 附近則與 Neutral 接近。而 $L_v q_v$ 項在 850 hPa 以上有較顯著的減少，使得中層與高層大氣的溼靜能較低(圖 8(f))。若比較近地面與中層大氣的溼靜能，大氣的不穩定度更高。

(四) 陸地與近海區域間之局部性環流

為了驗證森林砍伐的效應是否會影響水平風場或垂直風場，進而影響水氣的平流與收支，後續將會分析水氣通量的輻合與陸地、近海區域的垂直風速，以確認是否有陸地區域、近海區域間的局部性環流現象。

1. 水氣通量輻合

在 CTR 組中，可以發現在 1000 hPa 至 850 hPa 之間，在陸地區域有明顯的水氣通量輻合(圖 9(a))，代表水平方向的風場將更多的水氣帶入陸地區域。在 850 hPa 至 700 hPa 之間，有較微弱的水氣通量輻散；而更上層的水氣通量則無明顯的輻合或輻散。整體而言，陸地區域相對於周圍近海區域，存在一個下層(約 850 hPa 以下)輻合、上層(約 850 hPa 至 700 hPa)輻散的水氣通量收支。在 El Niño 時，850 hPa 以下的水氣通量輻合增強，850 hPa 以上的輻散增強(圖 9(b))。而在 La Niña

時則相反，兩層的輻合、輻散強度減弱(圖 9(c))。

在森林砍伐後，會產生一個類似於 $CTR_{ElNiño} - CTR_{Neutral}$ 的效果(圖 9(d))，下層的水氣通量輻合增強、上層輻散增強，而此水氣通量變化的現象分別在約 850 hPa 以下、850 hPa 至 700 hPa 兩層。在 ENSO 的影響下，El Niño 對水氣通量輻合的影響不明顯(圖 9(e))；而在 La Niña 時，各層皆有更強的水氣通量輻散(圖 9(f))。

2. 垂直風速

在 CTR 組中，陸地區域與近海區域的垂直風速在各高度中皆為上升氣流(圖 10(a) 與 (d))。在 El Niño 時，陸地與近海區域的中、高層大氣均有額外的沉降氣流；但在低層大氣中，陸地區域的趨勢則相反，具有額外的上升氣流(圖 10(b) 與 (e))。我們推測在 El Niño 時，中、高層大氣的垂直風速可能主要受 ENSO 引起的沃克環流強度主導，而低層大氣垂直風速可能主要受到地表可感熱通量加熱情況、地表能量收支所影響。在 La Niña 時，陸地與近海區域的反應相似。中、高層大氣有額外的上升氣流，低層大氣則相反，均

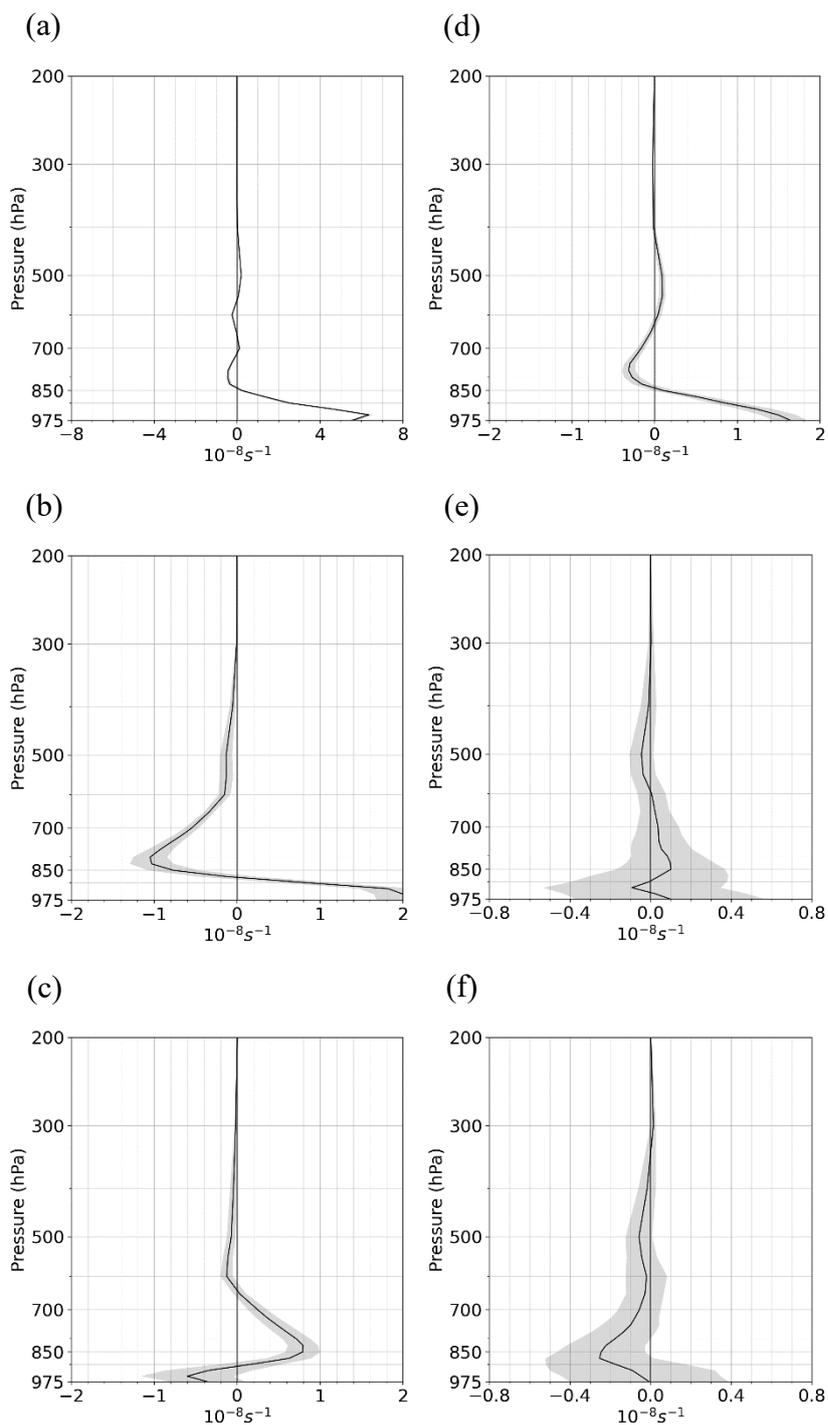


圖 9. 海洋大陸在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，水平水氣通量輻合 (HMFC) 的垂直剖面圖。由上至下三列分別為 Neutral、El Niño - Neutral、La Niña - Neutral，(a)~(c) 為 CTR 組，(d)~(f) 為 ANO 組。水平水氣通量輻合單位為 s^{-1} 。縱軸為氣壓，單位為 hPa。塗色範圍為 95% 信賴區間。

有額外的下沉氣流（圖 10(c) 與 (f)）。低層大氣垂直風速的變化幅度小於中、高層大氣，但各高度層的垂直變化均具有統計顯著性。

在 ANO 組中，森林砍伐大約會對陸地區域 850 hPa 以上的大氣產生 $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ 左右的額外上升氣流（圖 11(a)）。近海區域 700 hPa 以上的大氣亦產生額外上升氣流，但量值較弱；而近海區域 700 hPa 以下則為額外的下沉氣流（圖 11(d)）。在 ENSO 的影響下，El Niño 時陸地與近海區域的垂直風速與 Neutral 時無顯著差異（圖 11(b)(e)）。La Niña 時，陸地區域相較 Neutral 有顯著的額外下沉氣流（圖 11(c)），在 300 hPa 至 500 hPa 左右的上升風速僅有 Neutral 時的二分之一。近海區域的低層大氣較不顯著，而中、高層大氣有額外的下沉氣流（圖 11(f)）。

3. 局部性環流強度

由水氣通量輻合的垂直剖面可知（圖 9(a)），在 $\text{CTR}_{\text{Neutral}}$ 組中的陸地區域，低層大氣存在下層輻合、上層輻散的現象，而此處的兩層分別位於 850 hPa 以下、850 hPa 至 700 hPa 附近。在 El Niño 時，上述的輻合與輻散的強度更強（圖 9(b)）。在

過去文獻中，亦有提到在西太平洋靠近海洋大陸東北側的區域會在 El Niño 時產生額外的 850 hPa 水氣通量輻散 (Jia, Ge and Wang, 2016; Feng, Chen and Wang, 2018)。在空間解析度更高的再分析資料中，El Niño 減 La Niña 的 850 hPa 水氣通量在海洋大陸陸地區域的空間分布並非完全均一，但額外水氣通量輻散區域可以對應到 El Niño 時較低降水量的區域 (Rauniyar and Walsh, 2013)。在低層大氣，陸地區域的上升氣流增強、近海區域的下沉氣流增強（圖 10(b)、(e)），整體構成一個額外的局部性環流。在 La Niña 時，陸地區域的輻合與輻散的強度減弱，變化與 El Niño 時相反（圖 9(c)）；在低層大氣，陸地區域與近海區域的下沉氣流皆增強（圖 10(c)、(f)）。對陸地區域而言，亦是構成一個局部性環流，但方向與 El Niño 時相反。綜上所述，若以陸地區域低層大氣垂直風速、850 hPa 以下水氣通量輻合、850 hPa 至 700 hPa 水氣通量輻散三個指標來判斷，可以視為一個海陸間的局部性環流。且在 El Niño 與 La Niña 時，強度分別會增強、減弱。

在 ANO 組中，森林砍伐會在低層大氣建立一個下層輻合、上層輻散的局部性

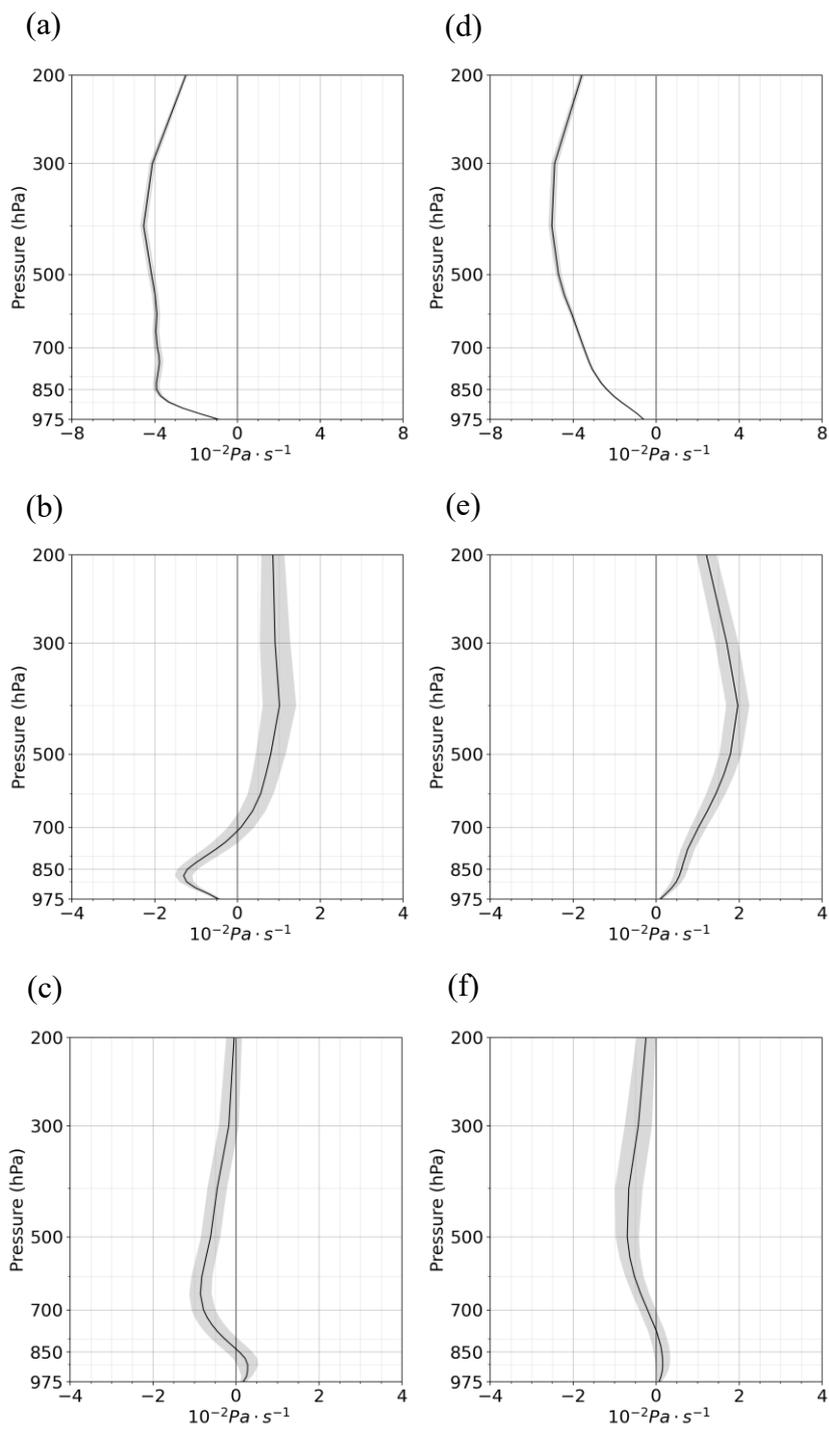


圖 10. 海洋大陸在十一月至次年一月 (NDJ) 之間, CTR 組垂直風速的垂直剖面圖。由上至下三列分別為 Neutral、El Niño - Neutral、La Niña - Neutral, (a)~(c) 為陸地區域平均, (d)~(f) 為近海區域平均。垂直風速單位為 $10^2 Pa s^{-1}$ 。縱軸為氣壓, 單位為 hPa。塗色範圍為 95% 信賴區間。

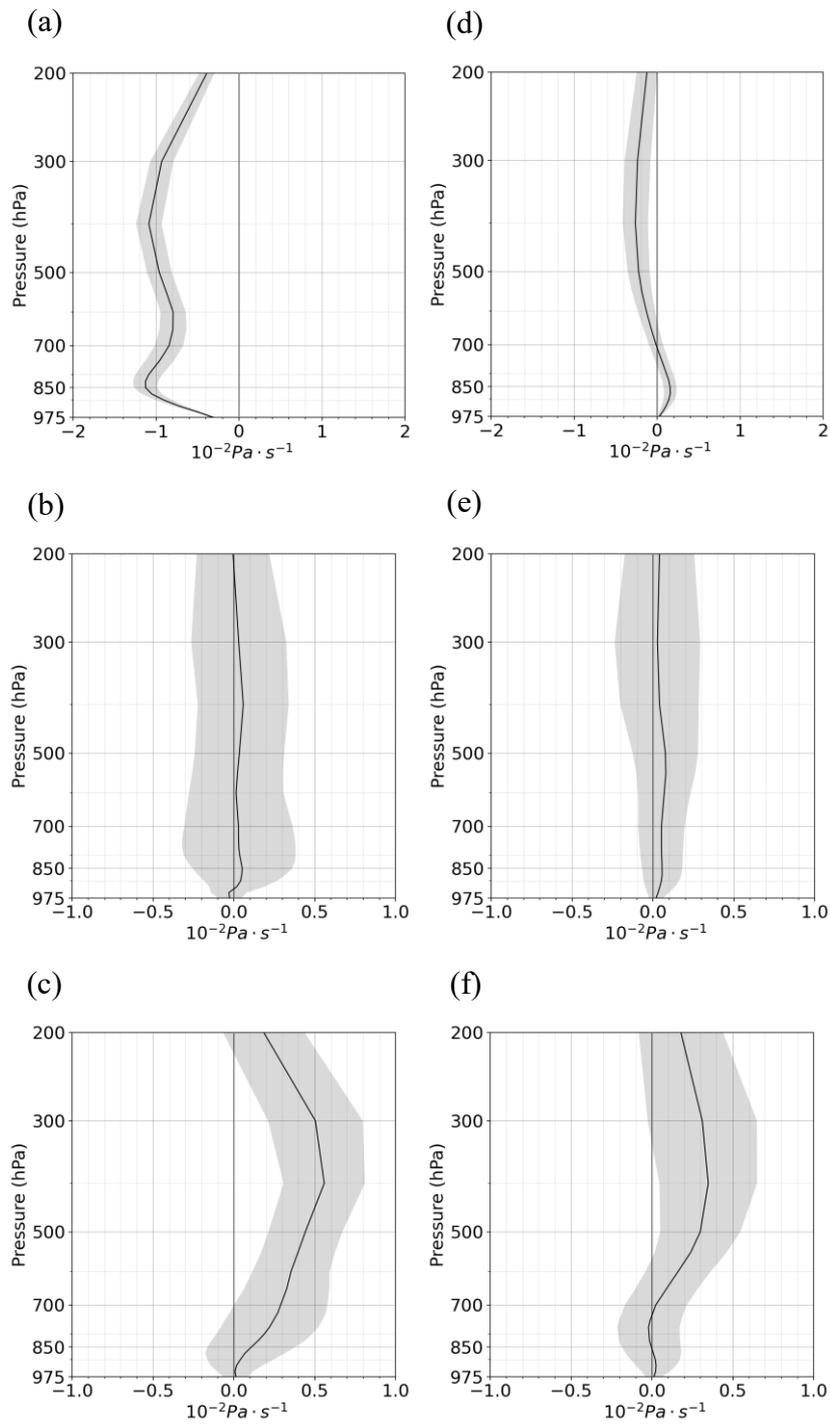


圖 11. 與圖 10. 相同，但資料組為 ANO 組。

環流，環流的型態與 CTR 組的 El Niño 時的變化類似（圖 9 (d)），但強度較 $CTR_{ElNiño} - CTR_{Neutral}$ 弱。陸地區域的上升氣流增強，近海區域的上升氣流減弱（圖

11 (a)、(d)）。在 El Niño 時，ANO 中組的水氣通量輻合沒有顯著變化（圖 9 (e)），陸地與近海區域的上升氣流變化亦不顯著（圖 11 (b)、(e)）。而在 La Niña 時，水氣

通量輻合減弱(圖 9(f))，陸地區域的上升氣流相較 Neutral 減弱，而近海區域低層大氣的垂直風速與 Neutral 差異不顯著。整體而言，ANO 組中的局部性環流可對應森林砍伐的淨效應，此局部性環流的強度在 La Niña 時較 Neutral 時弱，而在 El Niño 時與 Neutral 的差異則不明顯。

(五) 垂直水氣通量

垂直方向上的水氣通量可以視為垂直方向上的水氣傳輸，造成溼靜能的傳輸，影響各層的溼靜能收支。圖 12 為陸地地區與垂直水氣通量的垂直剖面。在 CTR 組中，由於水氣恆為正，因此垂直風速與垂直水氣通量的傳輸方向皆相同，Neutral 時各層的水氣傳輸方向皆為向上，極值約在 850 hPa 左右(圖 12(a))，量值約為 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$ 。在 El Niño 時，低層大氣相較於 Neutral 有較強的向上水氣傳輸(圖 12(b))，El Niño 時額外的垂直水氣通量量值可達到 $2 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$ ，增幅約為 Neutral 時的 40%。La Niña 時，垂直水氣通量的剖面大致與 El Niño 時相反，而量值較小(圖 12(c))。

在 ANO 組中，在 Neutral 時各層的向上水氣傳輸皆增強(圖 12(d))，額外水

氣傳輸的峰值約在 850 hPa，量值約為 $1.5 \times 10^{-4} \text{ Pa s}^{-1}$ ，垂直剖面的特徵與 $\text{CTR}_{\text{Neutral}}$ 相同。在 El Niño 時，垂直水氣通量與 Neutral 時類似(圖 12(e))。而 La Niña 時，相較於 Neutral 則有額外的向下水氣傳輸(圖 12(f))。表示在 La Niña 的環境下，森林砍伐造成的向上水氣傳輸強度較弱，減弱幅度約為 10% 至 20%。垂直水氣傳輸可以拆解成從熱力項、動力項、非線性項的效應，可以發現森林砍伐對垂直水氣通量的改變主要來自於動力項(垂直風速)的效應主導。另外，在 $\text{ANO}_{\text{Neutral}}$ 中非線性項的量值為負，表示 ANO 組的垂直風速與 ANO 組的水氣的資料本身存在負相關。

四、討論

為分析影響降水量增加量的因素，我們額外進行了雲輻射強迫、行星邊界層高度、雲量與輻射加熱率等分析，其結果詳列於補充資料(二)至(四)中。在 ANO 組的地表能量收支中，大氣層頂向上長波輻射在不同 ENSO 條件下與 Neutral 時有差異，此可能與雲高的變化情況有關，儘管這些差異的統計顯著性較低。Chen et al. (2019) 中提到，海洋大陸森林砍伐會使

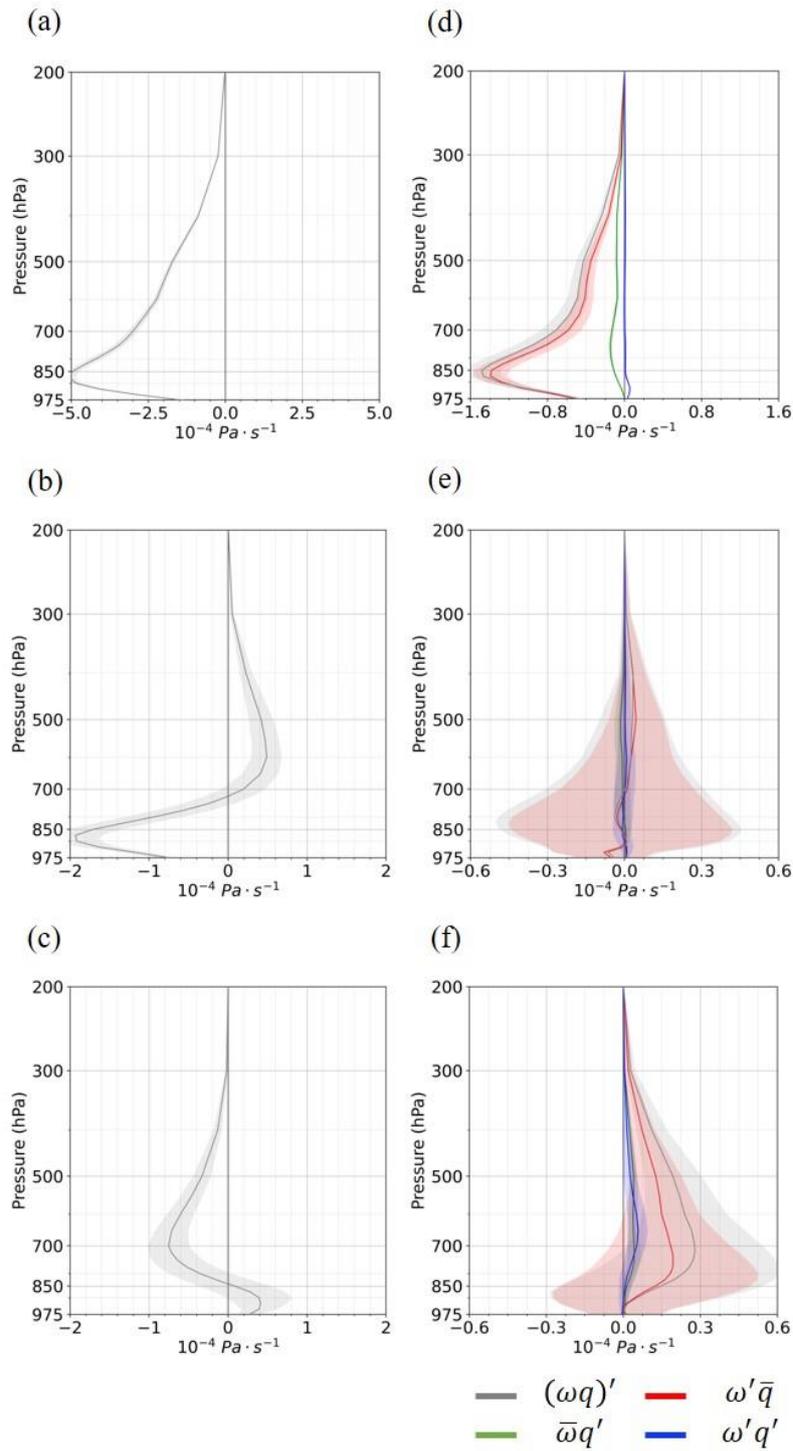


圖 12. 海洋大陸在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，垂直水氣通量 (VMC) 的垂直剖面圖。由上至下三列分別為 Neutral、El Niño - Neutral、La Niña - Neutral，(a)~(c) 為 CTR 組，(d)~(f) 為 ANO 組。其中右欄圖中的灰線為 ANO 組的量值，而藍線、紅線、綠線分別代表 ANO 組的熱力項、動力項、非線性項。水平水氣通量輻合單位為 s^{-1} 。縱軸為氣壓，單位為 hPa。塗色範圍為 95% 信賴區間。

得氣候長期平均的低雲減少、中雲與高雲增加。由於中、高雲擁有較低的反照率與輻射溫度，因此中、高雲的增加有助於增加雲輻射強迫，將地表的輻射能量留在大氣中。若在 La Niña 時，中、高雲的增加幅度較小，則可能造成大氣層頂向上長波輻射的減少幅度較小。在短波輻射方面，La Niña 時的地表向下短波輻射反而在森林砍伐後增加。這可能是由於 La Niña 狀態下的中、高雲雲量本來就比較多，森林砍伐所帶來的額外增加幅度有限。而森林砍伐使得低層大氣水氣減少，能讓低雲雲量減少 (Chen et al., 2019)，兩種效應同時能讓太陽輻射入射能量增加。無論在何種 ENSO 條件下，森林砍伐後均造成地表溫度相較砍伐前有顯著的增加。El Niño 與 La Niña 的增溫幅度皆大於 Neutral，但其差異皆不具統計顯著性。地表的非輻射項方面，ANO_{Neutral} 的潛熱通量相較森林砍伐前有顯著的減少，而 La Niña 時的減少幅度較小。然而，在 La Niña 的溼靜能垂直剖面中，低層大氣並沒有更多的水氣，與 El Niño 時的趨勢不同。表示在 ANO 組中，地表潛熱通量並不是影響低層大氣水氣的唯一因素。

ANO 組的雲長波輻射強迫在 La Niña 時較弱，符合雲量剖面的變化趨勢。但雲短波輻射強迫卻大幅增加，導致雲總輻射強迫在 La Niña 時仍強於 Neutral，不過不具統計顯著性。因此，若僅以雲輻射強迫的觀點，無法解釋森林砍伐後的降水量的增加幅度。另一方面，行星邊界層高度在森林砍伐後的增加幅度在不同 ENSO 條件下亦無明顯差異。La Niña 時，森林砍伐造成的行星邊界層增加幅度更大，似乎無法說明降水量增加幅度較小的觀點。

本研究中，局部性環流與降水量的相關性最高。在局部性環流的分析當中，可以看到 ANO 組的局部性環流強度與降水量增加幅度的趨勢相似，Neutral 時的局部性環流強度較 La Niña 時更強，而 El Niño 與 Neutral 的差異不顯著。但對於 La Niña 的陸地區域而言，垂直風速有顯著的額外下沉氣流，且有更多的水氣通量輻散，此條件有助於抑制降水，可以用於解釋前述的降水量增加幅度。

陸地與近海之間的局部性環流、垂直水氣傳輸的示意圖如圖 13 所示。在 ANO 組中，La Niña 時近地面的水平水氣通量較 Neutral 時弱 (圖 9)，向上水氣傳輸的

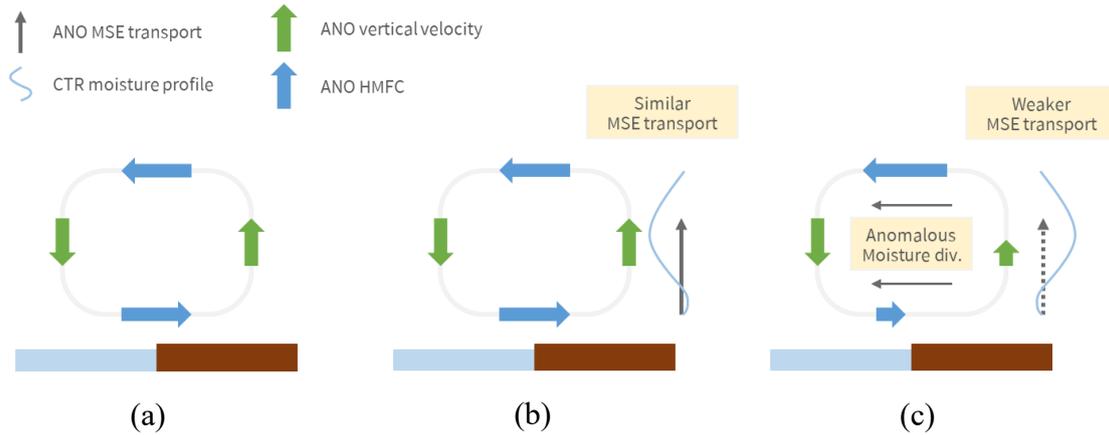


圖 13. 海洋大陸陸地與近海區域的局部性環流、比溼垂直剖面與垂直水氣傳送示意圖。(a) $ANO_{Neutral}$ ，(b) $ANO_{ElNiño}$ ，(c) $ANO_{LaNiña}$ 。每一張子圖的左側與右側分別表示近海與陸地區域，垂直方向上表示高度。綠色箭頭代表垂直風速，藍色箭頭代表陸地區域計算出來的水平水氣通量輻合、輻散，箭頭愈長代表強度愈強。每張圖右側的黑色箭頭表示垂直向上的溼靜能傳輸，淺藍色曲線為該 ENSO 相位下 CTR 組的比溼垂直剖面。(c) 的黑色虛線箭頭表示向上的溼靜能傳輸更弱。

增幅亦較 *Neutral* 時更小 (圖 12)，這可以解釋 $ANO_{LaNiña}$ 溼靜能剖面在中層增幅較小的原因。我們推測由於 $CTR_{LaNiña}$ 的水氣垂直剖面在近地面附近較小、中層大氣較大 (圖 8)，水氣的垂直梯度使得 $ANO_{LaNiña}$ 的向上水氣傳輸較 $ANO_{Neutral}$ 時更小，讓 $ANO_{LaNiña}$ 在中層的水氣增加幅度較小，使得對流不穩定的條件比 *Neutral* 時更弱，影響森林砍伐後的降水量增幅。另一方面， $CTR_{LaNiña}$ 時大氣穩定度較高的溼靜能剖面也使向上風速在森林砍伐後的增加幅度較小，進一步讓森林砍伐造成的向上水氣傳輸更弱。相較之下，*El Niño* 在垂直水氣傳輸、水平水氣通量輻合的 ANO 組垂直剖面都與 *Neutral* 時無

顯著差異。可能是由於 *El Niño* 與 *La Niña* 環境對溼靜能、垂直風速等垂直剖面的影響機制不同，造成兩個 ENSO 條件對於氣候狀態的反應不對稱。在後續的研究中，我們可以針對溼靜能或垂直風速等垂直剖面資料進行統計分析，或對垂直剖面的特徵進行分組，找出影響降水量增加幅度的原因。

對於 ANO 組降水量增加幅度在 *La Niña* 時顯著小於 *El Niño* 與 *Neutral* 的現象，確切的機制尚不明確。目前我們認為 ENSO 的年際震盪改變了海洋大陸區域的大氣環境，包括不同強度的沃克環流、不同的大氣穩定度等。ENSO 造成的 CTR 降水量變化是由於對於大氣環境的調整

(造成額外的沉降或上升環流),森林砍伐的效應則會使原本的大氣變得更不穩定,可能使得原本無法發展的對流得以發展成降水,或是讓原本降水事件變得較強。我們推測由於 La Niña 的環境利於對流降水,大部分的降水在 CTR 條件下即可發生,因此森林砍伐引起的額外降水條件無法大幅增加總降水量。然而上述的驗證仍需要更多的實驗來驗證,例如以更細緻時空尺度的模擬來模擬大氣穩定度與對流性降水發展有關的熱力與動力過程。

除了 ENSO 外,赤道地區的印度洋偶極 (Indian Ocean Dipole, IOD) 也是影響海洋大陸年際降水量的重要變因。IOD 也與海溫距平有關,並會影響赤道地區的大氣環境 (Kurniadi et al., 2021)。IOD 為正相位時,海洋大陸區域會有額外的沉降環境,抑制降水活動。由於 ENSO 與 IOD 的震盪並非完全相關,因此可以透過統計方法來分別擷取 ENSO 相位與 IOD 相位對赤道氣候的影響。我們預期可以得到 El Niño 與正 IOD 對降水皆為抑制效應,而 ENSO 與不同的 IOD 相位同時發生時,森林砍伐的淨效應可能會有所不同。

在本研究中,ANO 組降水量增加幅度在 El Niño 時略小於 Neutral,且不具

統計顯著性,與 Lee and Lo (2021) 對於 SON 季節降水量的分析結果不同。Lee and Lo (2021) 擷取了歷史資料中較強的數個 El Niño 事件的海溫並平均成一組時間序列作為 El Niño 條件的代表,且重複使用該條件數年。由於給定 El Niño 環境的模擬時間較久,較容易形成顯著的氣候反應。另外,該研究僅使用熱帶太平洋地區的資料, ENSO 條件的模擬較為單純,避免了其他區域海溫的遙相關效應。相反地,本研究中的海溫使用全球的歷史資料,甚至可能包含歷史上不同時間尺度的氣候震盪,使得篩選出的 ENSO 個案中包含較多變異性。這可能是本研究中, El Niño 的模擬結果不顯著的原因。而在整體的實驗設計上,本研究僅使用 CESM 一種模式作為模擬,因此無法排除模式偏誤所造成的誤差。在未來,若需要對機制進行更詳細的分析,則必須加入更多不同的全球氣候模式,並比較模式間對於物理過程的模擬是否具有的一致性,才能得到更有說服力的結論。

五、結論

此研究從 ENSO 所建立的大氣環境與能量收支出發,探討在不同環境之下,

ENSO 與森林砍伐兩種效應共同影響下的降水量特徵。根據 ANO 組降水量的季節循環，發現在十一月至次年一月之間，La Niña 的降水量明顯小於 Neutral 與 El Niño 時。對於十一月至次年一月之中，降水量在 Neutral、El Niño、La Niña 時的 ANO 組量值分別為 21.78 Wm^{-2} 、 22.12 Wm^{-2} 、 10.88 Wm^{-2} 。對於 El Niño – Neutral、La Niña – Neutral 而言，兩組的 p-value 分別為 0.94、0.01。因此，在北半球冬季而言，La Niña 時森林砍伐所造成的降水量增加幅度顯著小於 Neutral。

在地表能量收支部分，ANO 組的大氣層頂向上長波輻射在 La Niña 時略為大於 Neutral，代表在森林砍伐之下可能使得雲頂溫度降低，而在 El Niño 時的變化幅度較小。若更低的雲頂溫度可以對應到更高的雲頂高度與更多的深對流活動，則更高的大氣層頂向上長波輻射則可以解釋更小的降水量增加幅度。其他陸地區域的能量收支變數差異大多不顯著。

雲輻射強迫方面，在 ANO 組中的雲長波輻射強迫在 Neutral 時為正，在 La Niña 時小於 Neutral。而雲短波輻射強迫在 Neutral 時為正，在 La Niña 時較 Neutral 時更大。對長波與短波而言，在

ANO_{Neutral} 時皆為加熱效應，但在 La Niña 條件下分別有冷卻與加熱的效果，且短波的額外加熱效應大於長波的額外冷卻效應。因此，以森林砍伐的效果而言，雲輻射強迫的加熱效應在 La Niña 時較 Neutral 時更大。在行星邊界層方面，El Niño 與 La Niña 在 ANO 組中皆大於 Neutral，且 La Niña 時的增加幅度更大。雲總輻射強迫與行星邊界層高度在不同 ENSO 條件下的量值由大至小皆為 La Niña > El Niño > Neutral，但無統計顯著性。

在 ANO 組中，El Niño 對雲量增加幅度的影響不顯著，而在 La Niña 時則使各高度層的雲量增幅都小於 Neutral，此現象可以對應到降水量增幅。在輻射加熱率方面，850 hPa 附近有較明顯的長波輻射冷卻，此效應傾向於增加大氣的穩定度。在溼靜能的方面，ANO_{Neutral} 的近地面溼靜能減少、中層大氣增加，大氣不穩定度減少。在 La Niña 時，中層大氣的溼靜能增加幅度較 Neutral 時更少，因此若比較近地面與中層大氣，穩定度較 Neutral 時更小。結合輻射加熱率與溼靜能兩者的觀點而言，La Niña 時在 850 hPa 附近的水氣增加幅度較小，溼靜能的梯度有更高的大氣不穩定度。但雲量的梯度亦造成更多

的長波輻射冷卻，對大氣不穩定度的貢獻與水氣增加幅度相反。

對於陸地區域，在下層有水氣通量輻合、上層有水氣通量輻散，加上陸地區域的向上垂直風速，共同構成一個陸地與近海之間的低層大氣局部性環流。這個環流在 CTR 組中，在 El Niño 時的強度大於 Neutral，而在 La Niña 時較弱。ANO 組中，森林砍伐的效應會使此局部性環流增強。若加入 ENSO 的效應，El Niño 時環流強度與 Neutral 時差異不明顯，而在 La Niña 時的增強幅度則較小，各層皆有額外的水氣通量輻散。另外，從垂直水氣傳輸的觀點， $CTR_{LaNiña} - CTR_{Neutral}$ 的近地面水氣較少、中層水氣較多，而 $ANO_{LaNiña}$ 向上風速增加幅度較少，以上兩種效應皆會使森林砍伐造成的向上水氣傳輸強度減弱。由於低層至中層的水氣的溼靜能增加幅度較小，在熱力上為更不利於降水與對流的環境。相對而言，El Niño 環境下的森林砍伐對於溼靜能剖面、垂直風速剖面與降水量增加幅度的影響皆與 Neutral 時無顯著的差異。

綜合以上各種因素的影響，可以發現並非所有效應的變化趨勢都與降水量相同。在 La Niña 時的降水量增加幅度較

少，此與大氣層頂向上長波輻射、雲長波輻射強迫、局部性環流強度等效應的變化特徵同向，尤其以局部性環流的機制與降水量的關聯最強，在 La Niña 時能使陸地區域的環境更不利於降水。對大多數的地表能量收支而言，La Niña 與 Neutral 的差異不具統計顯著性。雲總輻射強迫在 $ANO_{Neutral}$ 中為正，而在 La Niña 時相較 Neutral 具有額外的增溫效應。除了雲總輻射強迫外，行星邊界層高度也有相似的趨勢。這些變數在 La Niña 與 Neutral 的差異較 El Niño 與 Neutral 間更大，但變化幅度皆無統計顯著性。從大氣不穩定度的觀點分析，在 La Niña 時相較於 Neutral 的雲量的梯度可以增加輻射冷卻率、有助於減少大氣不穩定度，溼靜能中水氣量的梯度則可以增加大氣不穩定度，兩者對降水量的效應亦相反。在本研究中，降水量受地表加熱（地表能量收支、雲輻射強迫等分析）、大氣輻射加熱（輻射加熱率等分析）、低層水氣收支（局部性環流分析）等效果的影響，且與降水量的相關性各有不同。能量收支的大部分變數與降水量的相關性無法以簡單的線性關係描述，也有可能是氣候環境的反應不夠明顯，造成統計顯著性不足。

由於 ENSO 事件的強度對氣候環境的變化影響很大，一次採用所有個案、所有季節的資料進行分析，可能會遺漏其中較短時間尺度的變化。本次研究中，僅挑選了十一月至次年一月進行分析，但在 ENSO 事件的發展期、成熟期、減弱期在海洋大陸地區皆會有不同的熱力、動力條件。若能針對不同月份或季節繼續細分，討論 ENSO 環境與森林砍伐的交互影響，可能有更多時間序列上的特徵值得分析。除了時間尺度外，海洋大陸的不同區域也有許多不同的氣候特徵。新幾內亞島的地形變化較大，容易在島內不同位置形成不同的降水特徵；蘇門答臘島鄰近印度洋，受到更多印度洋的風場影響。本研究雖然已盡量挑選受沃克環流影響較為單純的區域，但仍然無法避免地形與地理區域的變異度。若未來得以進行更理想化的模式實驗，或是以更多的變數控制空間變異度，將地形的效應、盛行風、海陸差異等因素一併納入考慮來進行統計分析，則可以更仔細探討此區域受到 ENSO 與地表變遷過程的綜合效應與降水變化情形。

致謝

感謝科技部計畫：“MOST 106-2111-M-002-010-MY4”與“MOST 110-2628-M-002 -004 -MY4”的資助與國家高速網路與計算中心的計算資源。

參考文獻

- Chen, C.-C., Lo, M.-H., Im, E.-S., Yu, J.-Y., Liang, Y.-C., Chen, W.-T., et al. (2019). Thermodynamic and dynamic responses to deforestation in the maritime continent: A modeling study. *Journal of Climate*, 32(12), 3505–3527.
- Feng, J., Chen, W., & Wang, X. (2018). Asymmetric responses of the Philippine Sea anomalous anticyclone/cyclone to two types of El Niño–Southern Oscillation during the boreal winter. *Atmospheric Science Letters*, 19(12).
- Freedman, J., Fitzjarrald, D., Moore, K.E., & Sakai, R. (2001). Boundary Layer Clouds and Vegetation–Atmosphere

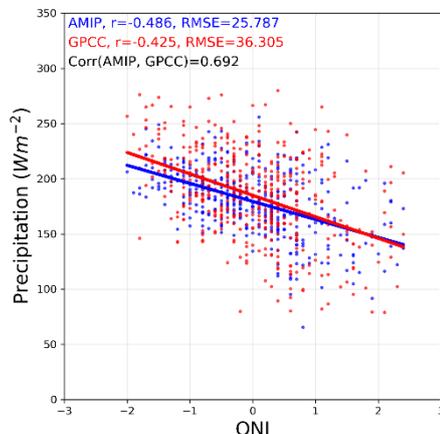
- Feedbacks. *Journal of Climate*, 14, 180–197.
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S., Goetz, S., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A.S., Chini, L.P., Justice, C.O., & Townshend, J.R. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850–853.
- Hendon, H. H. (2003). Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air-Sea Interaction. *Journal of Climate*. 16, 1775–1790.
- Jia, X., Ge, J., & Wang, S. (2019). Diverse impacts of ENSO on wintertime rainfall over the Maritime Continent. *International Journal of Climatology*, 36, 3384–3397.
- Kurniadi, A., Weller, E., Min, S., & Seong, M. (2021). Independent ENSO and IOD impacts on rainfall extremes over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 41(6), 3640–3656.
- Labed J, Stoll MP (1991). Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band: spectral signature and effective surface temperature. *Remote Sens Environ* 38(1):1–17
- Lawrence, D., Vandecar, K. (2015). Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Clim Change* 5, 27–36
- Lee, T.-H., Lo, M.-H., (2021). The role of El Niño in modulating the effects of deforestation in the Maritime Continent. *Environ. Res. Lett.* 16 054056.
- Nair, U., Ray, D., Lawton, R., Welch, R., Pielke, R., & Calvo-Alvarado, J. (2011). The impact of deforestation on orographic cloud formation in a complex tropical environment. *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*, 538–548 Edition: I, Chapter: 55.
- OpenStreetMap contributors and A. Allan. (Cartographer). OpenCycleMap. Retrieved from

- <https://www.thunderforest.com/maps/opencyclemap/>
- Qin ZH, Li WJ, Xu B, Chen ZX, Liu J (2004). The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6. *Remote Sens Land Resour* 3:28–32.
- Pielke R. A. Sr., J. Adegoke, A. Beltraán-Przekurat, C. A. Hiemstra, J. Lin, U. S. Nair, D. Niyogi and T. E. Nobis (2006). An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. Volume 59, 2007 - Issue 3, 587-601.
- Rauniyar, S.P., & Walsh, K.J. (2013). Influence of ENSO on the Diurnal Cycle of Rainfall over the Maritime Continent and Australia. *Journal of Climate*, 26, 1304-1321.
- Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C. and Kaplan, A. (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D14), 4407-4037.
- Reynolds, Richard W., Thomas M. Smith, Chunying Liu, Dudley B. Chelton, Kenneth S. Casey, Michael G. Schlax. (2007). Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 20, 5473-5496.
- Rudolf, B., A. Becker, U. Schneider, A. Meyer-Christoffer, M. Ziese. (2010). GPCP Status Report December 2010. GPCP, December 2010, 7pp.
- Su, W., Wang, H. (2015). The ENSO effects on tropical clouds and top-of-atmosphere cloud radiative effects in CMIP5 models. *Journal of Geophysical Research*, 120, 4443-4465.
- Tölle, M. H., Engler, S. and Panitz, H. J. (2017). Impact of abrupt land cover changes by tropical deforestation on Southeast Asian climate and agriculture, *Journal of Climate*, 30, 2587–2600.

- Turner, D. D. ; Shupe, M. D. ; Zwink, A. B. (2018). Characteristic Atmospheric Radiative Heating Rate Profiles in Arctic Clouds as Observed at Barrow, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(4), 953–968.
- Van der Molen, M. K. (2002). Meteorological impacts of land use change in maritime tropics (PhD's Thesis), Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands.

附錄

(一) 海洋大陸陸地區域降水與 ENSO 的相關性



附圖 1. CESM 與 GPCC 降水資料與 ONI 的散布圖與回歸直線，左上角為兩組資料的線性回歸 R^2 與均方根誤差，以及兩組資料的相關係數 (Correlation coefficient)。

(二) 大氣能量收支與雲輻射強迫

附表 1. 海洋大陸陸地區域在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，陸地區域 CTR 組的雲輻射強迫，LWCRF、SWCRF 與 NCRF 分別代表雲長波輻射強迫、雲短波輻射強迫與雲總輻射強迫。各變數的單位皆為 Wm^{-2} 。星號代表具有統計顯著性差異 ($\alpha = 0.05$)。

| | CTR 組 | | | ANO 組 | | |
|-------|---------|------------------|------------------|---------|------------------|------------------|
| | Neutral | ElNiño - Neutral | LaNiña - Neutral | Neutral | ElNiño - Neutral | LaNiña - Neutral |
| LWCRF | 61.34 | -7.47* | 0.60 | 3.35* | 0.74 | -1.10 |
| SWCRF | -117.34 | 4.23* | -2.93* | 0.98 | 0.05 | 2.46* |
| NCRF | -56.16 | -3.25* | -2.33* | 4.33* | 0.78 | 1.35 |

在本文圖 5 中，太陽短波輻射入射 (SOLIN) 與大氣層頂向下長波輻射 (FLDT) 的改變量基本上可忽略。除此之外，其餘的輻射量值皆會受大氣環境或地表環境所影響。大氣層頂向上短波輻射 (FSUT) 受大氣整體的反照率影響，當雲量、雲高改變時，即會影響此項的量值。大氣層頂向上長波輻射 (FLUT) 受溫室氣體含量、雲頂高度等影響。普遍而言，當對流的雲頂高度更高、溫度更低時，雲頂向外輻射出的長波輻射 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 更低。另一方面，當大氣溫度改變時，也會影響地表接收到的向下長波輻射 (FLDS)。

在本節中，我們會使用雲輻射強迫來代表大氣中雲對輻射的效應。雲輻射強迫 (Cloud radiative forcing, CRF) 是相對於無雲情況，大氣中的雲對大氣層頂的淨輻射效

應。若輻射強迫為正，代表雲的存在使得更多輻射能量得以進入大氣層而被地表吸收，反之則代表更多輻射能量被阻絕於大氣層外。整體雲輻射強迫效應（Net cloud radiative forcing, NCRF）可以拆分成長波（Longwave cloud radiative forcing, LWCRF）與短波（Shortwave cloud radiative forcing, SWCRF）兩個部分；長波輻射強迫主要受到大氣中的雲與溫室氣體影響，大多數情況為加熱效應；短波輻射強迫主要受雲的反照率所影響，大多數情況為冷卻效應。

地球系統中的短波輻射主要來自於入射的太陽輻射。由於低雲對太陽光的阻擋程度較明顯，低雲雲頂的可見光反照率也較高，因此低雲的增加會更有效的將輻射能量反射回地球系統以外，具有較強的輻射強迫冷卻效應。相較之下，中雲、高雲的反照率較低，因此輻射強迫冷卻較弱。而長波主要來自於地表的發射，若大氣中缺乏溫室氣體，則長波輻射會無法加熱大氣。因此，諸如水氣等溫室氣體可以增加長波輻射強迫的加熱效應。如果雲頂的高度較高、溫度較低，則輻射出的長波輻射較弱，長波輻射強迫加熱效應更強。

另一方面，高雲與低雲各自兩種輻射強迫的效應亦不相同。高雲的反照率較低、雲頂溫度較低、向上發射的長波輻射較弱，因此經常為加熱效應；低雲的反照率較高、雲頂溫度較高、向上發射的長波輻射較強，因此經常為冷卻效應。若要解釋森林砍伐後對輻射強迫的總效果，則須從不同高度的雲量變化來分析。

1. CTR 組

我們從大氣整體的能量收支來分析降水量變化。由於雲量對輻射能量有較大的影響，因此我們將從雲輻射強迫的角度來討論。附表 1 中列出了十一月至一月之間，CTR 組的雲輻射強迫。CTR 中的 LWCRF 在 Neutral 時的平均值為 61.34 Wm^{-2} ，而在 El Niño 時效應較 Neutral 小 7.47 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)，La Niña 時效應較 Neutral 大 0.60 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.30$)。另外，SWCRF 在 Neutral 時的平均值為 -117.34 Wm^{-2} ，El Niño 時量值較 Neutral 大 4.23 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)，La Niña 時量值較 Neutral 小 2.93 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)。但若以輻射強迫效應的強度而言，SWCRF 在 Neutral 時為冷卻效應，El Niño 時的冷卻效應較弱，而 La Niña 時的冷卻效應較強。由此可見，雲輻射的效應在 El Niño 時較弱，可能與 El Niño 時的雲量較少有關。

對於整體的雲輻射強迫效應 NCRF 而言，在 Neutral 下為 -56.16 Wm^{-2} ，表示雲對於輻射能量的淨貢獻為冷卻。在 El Niño 時冷卻效應更強，較 Neutral 時小 3.25 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)。在 La Niña 時，NCRF 較 Neutral 時小 2.33 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.01$)，幅度小於 El Niño 時的變化幅度。

2. ANO 組

在森林砍伐後，LWCRF 在陸地區域增加 3.35 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)。在 ENSO 的環境下，El Niño 時的 LWCRF 增加量與 Neutral 並無明顯差異， $\text{ANO}_{\text{ElNiño}}$ 較 $\text{ANO}_{\text{Neutral}}$ 大 0.74 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.42$)，而 $\text{ANO}_{\text{LaNiña}}$ 較 $\text{ANO}_{\text{Neutral}}$ 小 1.10 Wm^{-2} ($p\text{-value} = 0.00$)。

value = 0.13)。SWCRF 在陸地區域增加 0.97 Wm^{-2} (p-value = 0.10)。在 El Niño 時，增加量與 Neutral 無明顯差異，ANO_{ElNiño} 較 ANO_{Neutral} 大 0.05 Wm^{-2} (p-value = 0.97)，而在 La Niña 時有較顯著的增加，ANO_{LaNiña} 較 ANO_{Neutral} 大 2.46 Wm^{-2} (p-value = 0.01)。

對於整體的雲輻射強迫效應 NCRF 而言，Neutral 時的平均值為 4.33 Wm^{-2} (p-value = 0.00)。在 El Niño 與 La Niña 時的變化皆不顯著，ANO_{ElNiño} 較 ANO_{Neutral} 大 0.78 Wm^{-2} (p-value = 0.38)，ANO_{LaNiña} 較 ANO_{Neutral} 大 1.35 Wm^{-2} (p-value = 0.09)。根據以上數據可知，森林砍伐會使得 NCRF 的數值增加。由於 CTR 組的 NCRF 為負、屬於冷卻效應，因此森林砍伐會造成冷卻效應減弱，更多太陽短波輻射能量得以穿過大氣、進入地表。再透過地表的長波輻射，將能量傳遞給大氣。而在 La Niña 時，冷卻效應減弱的幅度更大，更多能量會被地球系統所吸收，但變化不顯著。

(三) 行星邊界層高度

附表 2. 海洋大陸陸地區域在十一月至次年一月(NDJ)之間的行星邊界層高度，兩列分別為 CTR 組與 ANO 組。單位為 m。星號代表具有統計顯著性差異 ($\alpha = 0.05$)。

| | Neutral | ElNiño - Neutral | LaNiña - Neutral |
|-----|---------|------------------|------------------|
| CTR | 276.17 | 3.73 | -8.80* |
| ANO | 56.96* | 0.30 | 4.74* |

本研究將分析 CAM5 所輸出的行星邊界層 (Planetary boundary height) 高度，用以代表近地面大氣的受熱混合情況。在地表受到的加熱較強時，會增加地表往大氣的熱通量，使近地面大氣向上混合至較高的高度。為了了解地表能量收支、雲輻射強迫對於大氣的影響，由於熱帶區域有較多的對流性降水，我們以行星邊界層高度來討論大氣的邊界層加熱效應是否顯著。附表 2 為十一月至次年一月之間，陸地區域與近海區域的行星邊界層高度。CTR_{Neutral} 時陸地區域的行星邊界層高度為 276.17 m。在 El Niño 條件下，行星邊界層的高度較 Neutral 時高 3.73 m (p-value = 0.18)。而在 La Niña 時，較 Neutral 低 8.80 m (p-value = 0.00)。

在 ANO 組中，ANO_{Neutral} 時的陸地區域平均值為 56.96 m (p-value = 0.00)。在 ENSO 的環境下，El Niño 時的增加幅度較 CTR 大，ANO_{ElNiño} 較 ANO_{Neutral} 大 0.30 m (p-value = 0.92)；而 La Niña 的增加幅度較 El Niño 更大，ANO_{LaNiña} 較 ANO_{Neutral} 大 4.74 m (p-value = 0.04)。

(四) 雲量與輻射加熱率

輻射加熱率 (Radiative heating rate, RHR) 是大氣中輻射通量在高度上的輻合、輻散對大氣加熱的效果，以下列方式定義：

$$\text{RHR} = -\frac{1}{C_p \rho} \frac{dF_{net}}{dz} = \frac{g}{C_p} \frac{dF_{net}}{dp}$$

其中 F_{net} 代表某層的淨輻射通量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、 C_p 為定壓比熱容 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)、 ρ 為空氣密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)、 g 為重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

雲量垂直剖面的變化會影響輻射加熱率，進而造成各層大氣的加熱與冷卻效果。我們希望能找到輻射加熱率在各組實驗中的差異，探討其對於大氣穩定度的影響。

1. CTR 組

附圖 2 列出了 CTR 組的雲量與輻射加熱率的垂直剖面圖。對於 CTR 組，雲量大約介於 10% 至 50% 之間，長波輻射加熱率為負、短波輻射加熱率為正，整體輻射加熱率為負（附圖 2 (a)）。而不同 ENSO 對雲量的影響主要集中於中、高層，在 El Niño 時，中層以上的雲量大約會減少 5% 至 10%（附圖 2 (b)）。在 La Niña 時，中層以上的雲量則會略為增加（附圖 2 (c)）。而上述兩種不同的反應亦會影響輻射加熱率的垂直分布。由於在 El Niño 時，850 hPa 以上的雲量逐漸減少，可將此高度視為雲量的相對極大處。因此長波輻射加熱率將會在 850 hPa 附近造成冷卻效應，而短波輻射加熱率則會造成加熱效應。長波輻射加熱率的量值較大，因此整體的輻射加熱率為負，使得 850 hPa 附近為輻射的淨冷卻效應，加熱率極小值約為 -0.4 K day^{-1} 。

另一方面，La Niña 的中高層雲量增加，因此 850 hPa 附近為雲量相對極小處，長波輻射加熱率與短波輻射加熱率分別會有加熱、冷卻效應。而長波輻射加熱率的量值仍較大，因此 850 hPa 處整體的輻射加熱率為正，為淨加熱效應。不過加熱率的絕對值小於 El Niño 時冷卻效應的絕對值，加熱率極大值約為 0.2 K day^{-1} 。

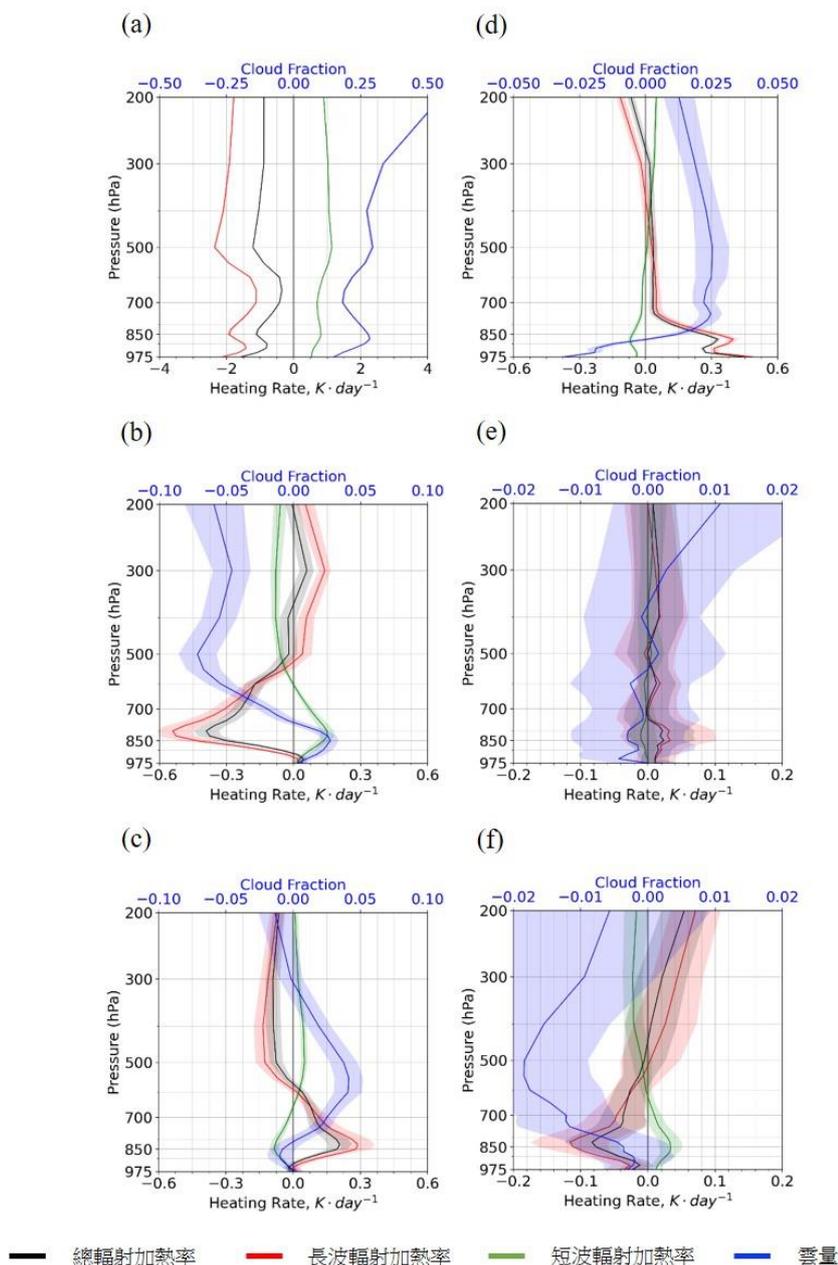
2. ANO 組

在森林砍伐後，會造成近地面的雲量大幅減少，在 850 hPa 以下的低層大氣約減少 5% 以內，而 850 hPa 以上的雲量則增加（附圖 2 (a)）。由於下層雲量減少、上層雲量增加，因此低層大氣會有更強的長波輻射加熱率；而上層的雲量遮蔽更多的太陽輻射，因此低層大氣的短波輻射加熱率減少。兩者抵銷後，整體的輻射加熱率效果為正。加熱率量值約為 0.2 至 0.4 K day^{-1} ，有助於加熱低層大氣、增加大氣不穩定度。若以加熱率的量值而言，ANO_{Neutral} 的對低層大氣的輻射加熱率效果大於 CTR_{LaNiña}。

在 ENSO 的影響下，El Niño 與 La Niña 對 ANO 組的反應也不相同（附圖 2 (e) ~ (f)）。El Niño 並未對 ANO 組的雲量剖面造成顯著的影響，雲量、輻射加熱率的剖面在統計上與 Neutral 亦無顯著差異（附圖 2 (e)）。而 La Niña 使得各層的雲量皆略為減少，在中層大氣的減少幅度可超過 1%（附圖 2 (f)）。且由於中、上層的減少幅度較大，

因此 850 hPa 附近有長波輻射加熱率的冷卻效應，量值約為 0.08 K day^{-1} ，為 $\text{CTR}_{\text{ElNiño}}$ 時冷卻效應的三分之一左右。

綜上所述，在 CTR 組、La Niña 環境下的雲量較 Neutral 時高。在森林砍伐後，La Niña 時雲量增加量整體偏少，使得中、低層大氣有額外的輻射冷卻效應。



附圖 2. 海洋大陸在十一月至次年一月 (NDJ) 之間，雲量與輻射加熱率的垂直剖面圖。由上至下三列分別為 Neutral、El Niño - Neutral、La Niña - Neutral，(a)~(c) 為 CTR 組，(d)~(f) 為 ANO 組。黑、紅、綠、藍線分別代表總輻射加熱率、長波輻射加熱率、短波輻射加熱率與雲量的剖面。雲量無因次，輻射加熱率單位為 K day^{-1} 。縱軸為氣壓，單位為 hPa。各顏色的塗色範圍為 95% 信賴區間。

The Roles of Different ENSO Phases in the Deforestation Induced Precipitation Increases over the Maritime Continent: An Analysis of NCAR CESM

Chun-Lien Chiang, Ting-Hui Lee, Min-Hui Lo

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taiwan

(manuscript received 31 January 2022 ; in final form 21 April 2022)

Abstract

ENSO has an interannual impact on the precipitation of the Maritime Continent. On the other hand, deforestation, as a kind of land-use change, brings to increases in the climatological precipitation. This study analyzed the deforestation-induced precipitation changes over the terrestrial Maritime Continent regions by CESM simulation with prescribed SST, which coupled with atmosphere model and land model. From a perspective of surface energy budget, cloud radiative forcing, moist static energy, and circulation field, we tried to determine the cause of different deforestation effects under different ENSO conditions. Between November to January of the following year, enhanced precipitation from deforestation in La Niña is significantly less than that in Neutral, while an increase in precipitation in El Niño is slightly less than that in Neutral. We also compared the deforestation effect under Neutral, El Niño, and La Niña events. The local circulation shows a positive correlation with precipitation changes. However, other variables such as surface temperature, surface sensible heat flux, surface latent heat flux, cloud radiative forcing, planetary boundary layer height, etc., have no significant correlation with the increases in precipitation. The local circulation between the land and offshore area can bring more moisture into the land regions through the convergence of moisture flux near the surface; however, the intensity of this local circulation is significantly weakened at La Niña. This may be a critical factor leading to an increase in precipitation. Upward moisture transport increases less after deforestation due to moisture gradient (drier in

lower-atmosphere and wetter in mid-atmosphere) under La Niña conditions and a smaller increase in upward vertical wind velocity. The effect would lead to less moisture in the mid-atmosphere and smaller vertical integrated moist static energy. Under La Niña conditions, the climate response after deforestation has a disadvantage of precipitation compared to deforestation under Neutral conditions. On the contrary, moist static energy vertical profile, vertical wind velocity vertical profile, and increases in precipitation in El Niño have no significant difference from the Neutral condition.

Keywords: Maritime Continent 、 ENSO 、 El Niño 、 Deforestation 、 Land-use change. doi:

10.53106/025400022022040050002