

聖嬰與印度洋偶極子的耦合效應對海洋大陸

乾季陸地降水的影響

尚鶴鳴 羅敏輝* 李庭慧

國立臺灣大學大氣科學系

(中華民國 109 年 10 月 6 日收稿；中華民國 110 年 3 月 11 日定稿)

摘要

被太平洋與印度洋環繞的海洋大陸，是氣象研究中的主角之一。因為海洋大陸特殊的地理位置，陸地降水有著鮮明的年際變化。本研究中，從與海洋大陸乾季降水息息相關的火災出發，發現當聖嬰(El Niño)與正相位印度洋偶極子(positive Indian Ocean Dipole; PIOD)耦合時，位於海洋大陸的沃克環流從近地面到高層相較於氣候值都有更顯著的沉降距平，使得海洋大陸七月至十月的陸地降水顯著減少，導致更嚴重、更持久的乾旱，進而引發後續的森林大火。同時，我們也探討 El Niño 與 PIOD 在年代際時間尺度的變化，並找到兩個可能的影響因子：北大西洋年代際振盪與全球暖化。從觀測中發現當北大西洋年代際振盪為正(負)相位時，有 fewer(more) El Niño 與 PIOD 耦合在一起；另一方面，從數值模式中發現全球暖化也有助於 El Niño 與 PIOD 的耦合。這也意味著在海洋大陸，未來的乾旱與火災事件可能會更頻繁。本研究利用觀測、再分析資料與氣候模式的結果探討 El Niño 與 PIOD 對海洋大陸陸地降水的影響，下一步則需要利用氣候模式進行一系列的實驗，以驗證觀測資料所觀察到的現象以及探討其背後的物理機制。

關鍵字：海洋大陸、聖嬰、印度洋偶極子、年代際變化、北大西洋年代際振盪

*通訊作者地址：羅敏輝，10617 台北市大安區羅斯福路四段 1 號，Email: minhuilo@ntu.edu.tw，TEL：02-33663918

一、前言

近年來世界各地野火頻發，造成人員傷亡及巨大經濟損害。2018 年，野火在美國奪走至少 85 人的生命並產生 30 億美金的巨額財損(Levis et al., 2019)。那場從 2019 年 9 月開始，延續五個多月的澳洲森林大火，造成至少 32 人罹難及大量動物無家可歸(Editorial, 2020)。靠近赤道的海洋大陸，每年都會藉助火耕的方式開荒，以種植更有經濟效益的棕櫚樹(vander et al., 2010)。海洋大陸的森林火災，主要發生在當地乾季(Hendon, 2003)，即從北半球夏季開始一直持續到 10 月中旬，並在 9、10 月最為嚴重(Field et al., 2009)。相較於正常年間的森林火災，當氣候變異(例如，聖嬰現象)發生後導致降水減少及土壤乾旱時(Hendon, 2003)，海洋大陸的森林火災往往會極為嚴峻(例如, Taufik et al., 2017)。

太平洋上的聖嬰-南方振盪現象(ENSO)及印度洋偶極子(IOD, Indian Ocean Dipole)是影響海洋大陸 9、10 月降水的兩個主要氣候變異因子(Nur'utami and Hidayat, 2016)。ENSO 通常從春至夏季開始發展，並在冬季成熟。相較於 ENSO 成熟期，在成熟期之前的秋季，ENSO 對整個海洋大陸的陸地降水，在空間上的影響更加一致。以正相位 ENSO (El Niño)年為例：a.當大尺度背景風場較

弱時，局地日夜循環較強，有利於陸地對流的發展，即婆羅洲南部降水在 El Niño 年的 12 月份增加(例如, Qian et al., 2013)；b.由於地形與背景風場的交互作用，在 El Niño 成熟期菲律賓海低層的反氣旋距平被加強，使得蘇門答臘東側迎風面的東風增強，並在經過蘇門答臘時受到地形舉升導致當地降水增加(例如, Chang et al., 2004; Jiang and Li, 2018)。IOD 是印度洋上的海氣耦合系統(Webster et al., 1999)，並且有些 IOD 是由 ENSO 所強迫出來，有些 IOD 是由於自己的動力所形成。前者，被 ENSO 強迫出的 IOD，往往在西印度洋有更顯著的海表溫距平(Yang et al., 2015)。在比較理想的 IOD 正相位(positive IOD)中，印度洋有西暖東冷的海表溫距平，東西側的海溫梯度開始出現在 6 月，並在 10 月達到最大(Saji et al., 1999)。

相較於氣候場，海洋大陸在 PIOD 時位於印度洋沃克環流下沉區，與 El Niño 年相似，海洋大陸陸地降水減少(例如, Nur'utami and Hidayat, 2016)。儘管 PIOD 的強度(印度洋東西側海表溫梯度)並沒有 El Niño 的強度(太平洋 Niño3.4 區域海溫距平)強，但 PIOD 不僅會使海洋大陸局地的海表溫偏冷以致減少局地對流，也會減少來自於印度洋西側的水氣傳送(Saji et al., 1999)，對海洋大陸的降水產生顯著的影響(例如, Field et al., 2009)；

Hamada et al., 2012)。

過去對海洋大陸森林大火的研究，主要從上述提到的 El Niño 與 PIOD 兩個氣候變異因子出發：1. 討論 El Niño 與 PIOD 在海洋大陸造成的沃克環流沉降距平，進而減少降水(例如, Field et al., 2009; Pan et al., 2018)，並看到當 El Niño 與 PIOD 同時發生時，會更有效率削弱沃克環流，使得降水減少更多(Pan et al., 2018)；2. 不同的 El Niño 型態對海洋大陸降水的影響。相較於中太平洋型聖嬰(Central Pacific El Niño; CP El Niño)，東太平洋型聖嬰(Eastern Pacific El Niño; EP El Niño)在東太平洋有更多的暖海溫距平，由此在海洋大陸高層會導致更多的輻合，導致在海洋大陸地區的沉降距平更強，減少更多的降水而引發較多的森林大火(Chen et al., 2016; Pan et al., 2018)。也有研究考慮局地的海表溫對海洋大陸陸地降水的影響，並發現相較於其它月份，班達海(Banda Sea)海表溫在森林大火高發期的 9、10 月對海洋大陸陸地降水有較為顯著的影響(Kim et al., 2019)。Chen et al. (2016)在觀測中看到海洋大陸的陸地降水與火災面積有很好的線性關係，即當氣候變異如 El Niño 事件發生時，月降水總量較少，往往會導致比較嚴重、面積較大的火災。因此，在這份研究中，我們想借由與森林大火關係密切且有較長時間觀測的陸地降水，去瞭解森林大

火的年代際變化。同時探討影響海洋大陸陸地降水的兩個氣候變異因子(即 PIOD 與 El Niño)在過去百年歷史資料裡的耦合關係，並提出背後可能的原因。

二、資料與方法

在這份研究中，海洋大陸的選取範圍為 10°S-10°N 和 90°-150°E。

(一) 資料來源

1. 海表溫

海表溫資料使用月平均、空間解析度為 1°x1°的 HadISST 1.1 (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set; Rayner et al., 2003)，其時間段為 1870 至 2018 年，此研究選取 1900 至 2018 年的海表溫資料。

2. 降水

降水資料使用月平均、空間解析度為 0.5°x0.5°的 GPCP v2018 (Global Precipitation Climatology Centre; Schneider et al., 2014)、基於觀測所構建的陸地降水資料，使用 1900 至 2016 年的降水資料。

3. 風場

風場使用大氣再分析資料，選取時間段為 1900 至 2010 年、月平均、解析度 1°x1°、垂直 37 層的 ERA-20CM (Hersbach et al., 2015)進行分析。

4. 模式

另外，爲了理解在觀測及再分析資料中看到結果背後的可能原因，本研究同時使用第五階段耦合氣候模式對比計劃(CMIP5, Couple Model Intercomparison Project 5; Taylor et al., 2012)中模式的工業革命前期 (Pre-Industrial Control (piControl))、歷史氣候模擬(historical)及高輻射強迫力 (Representative Concentration Pathways RCP85, 在 2100 年時，每平方公尺增加的輻射強迫力為 8.5W)實驗組進行分析。其中 piControl 選取每個模式達平衡後的 100 年，historical 及 rcp85 則分別選取模式的 1900-2004 及 2006-2100 年。因爲需要同時具有上述三個實驗組，以及風場、海表溫等變數，本研究選取 CMIP5 中的 18 個模式(表 1)。

(二) 方法

在合成分析中會使用的風場、海表溫、降水資料，先用最小平方法去除所選時間段的長期線性趨勢，再濾除季節循環的訊號。使用觀測及模式的海表溫資料，定義過去 100 年間及各個模式中的 El Niño 與 PIOD 事件。參照 Saji et al. (1999)計算 IOD 指數(亦即 Dipole Mode Index, DMI)，即考慮東印度洋(90°-110°E, 10°S-0°N)與西印度洋(50°-70°E, 10°S-10°N)間的海表溫梯度。當北半球夏(JJA)或秋(SON)季的 DMI 超過該季一個標準差，

定義為 IOD 事件；參照 Kug et al. (2005)計算 ENSO 指數，當 11、12 及次年 1 月 (NDJ)的三個月月平均 Niño 3.4 超過一個標準差，定義為 ENSO 事件。由以上方法所定義出來的 ENSO 事件與 IOD 事件呈現在表 2 中。

在計算北大西洋年代際振盪(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)指數時，爲更好區分外強迫輻射力及氣候變異，先去除長期的季節循環(1900-2018)，再去除用線性回歸所構建受全球暖化影響的外強迫部分(Ting et al., 2009)，並將北大西洋海表溫(0°-60°N 和 7.5°-75°W)做區域平均及 121 個月份的滑動平均後所得到氣候變異的部分，即 AMO 指數。

在後續分析中主要分爲三大類，即某一年 El Niño(PIOD)單獨發生時，定為 Only El Niño(Only PIOD)，當某一年既是 El Niño 年也是 PIOD 年時，則定義為 El Niño 與 PIOD 耦合事件(combined event)(表 2)。

三、結果

(一) El Niño 與 PIOD 耦合效應(Combined effects)

圖 1 為海洋大陸陸地降水之氣候場與不同分類下的降水季節變化，在氣候場中，海洋大陸的陸地降水從 8 月到 12 月逐漸增多，從 12 月至隔年 8 月再逐漸

表 1 本研究所使用的 CMIP5 模式資料

Centre Acronym(s)	Model	Resolution
CCCma	CanESM2	64×128×22
CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	128×256×17
CSIRO-BOM	ACCESS1.0	144×192×17
INM	INMCM4.0	120×180×17
IPSL	IPSL-CM5A-LR	96×96×17
	IPSL-CM5A-MR	143×144×17
MIROC	MIROC5	64×128×35
MOHC	HadGEM2-AO	144×192×17
MPI-M	MPI-ESM-LR	96×192×25
MRI	MRI-CGCM3	160×320×23
NASA-GISS	GISS-E2-H	90×144×17
	GISS-E2-R	90×144×17
NCAR-NSF-DOE-NCAR	CCSM4	192×288×17
	CESM-BGC	192×288×17
NCC,NMI	NorESM1-M	96×144×17
NIMR,KMA	HadGEM2-AO	144×192×17
NOAA-GFDL	GFDL-CM3	90×144×23
	GFDL-ESM2G	90×144×17

表 2 本研究所定義的 ENSO 與 IOD 事件

El Niño	1902, 1905, 1911, 1913, 1918, 1923, 1925, 1930, 1940, 1941, 1957, 1963, 1965, 1968, 1972, 1976, 1977, 1982, 1986, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2006, 2009, 2015
PIOD	1902, 1914, 1918, 1923, 1925, 1926, 1935, 1941, 1943, 1944, 1951, 1961, 1963, 1967, 1972, 1976, 1982, 1983, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2006, 2011, 2012, 2015, 2017, 2018
Only El Niño	1905, 1911, 1913, 1930, 1940, 1957, 1965, 1968, 1977, 1986, 2009
Only PIOD	1914, 1926, 1935, 1943, 1944, 1951, 1961, 1967, 2012, 2018
El Niño + PIOD	1902, 1918, 1923, 1925, 1941, 1963, 1972, 1976, 1982, 1987, 1991, 1994, 1997, 2002, 2006, 2015

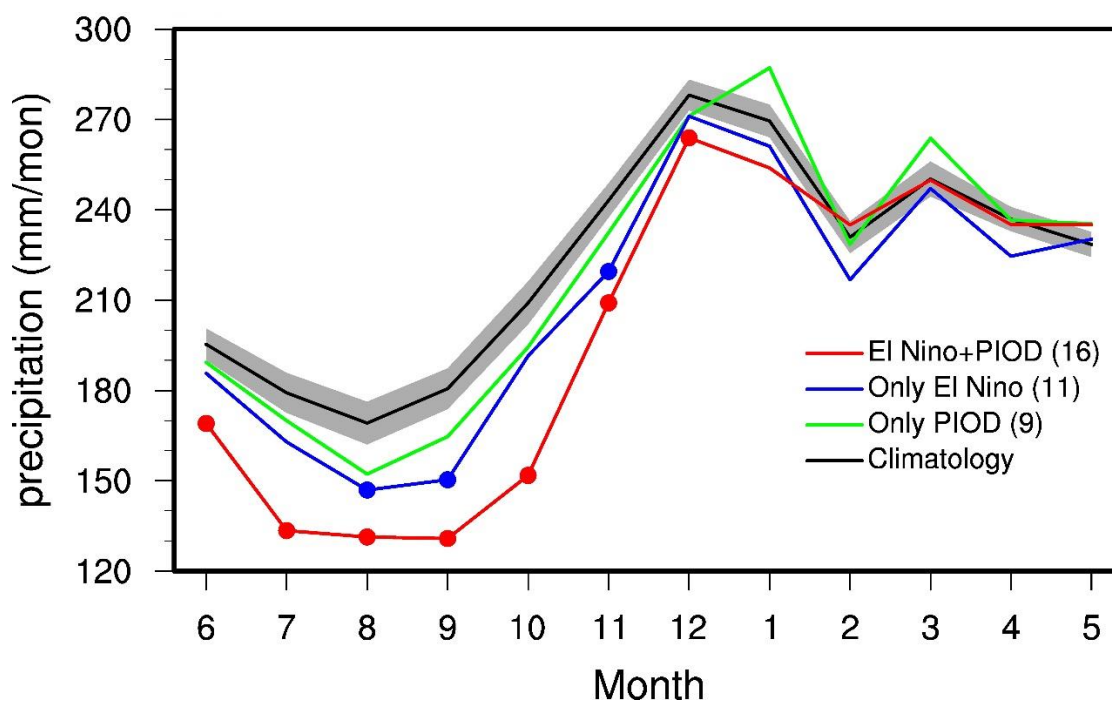


圖 1 1900-2016 年海洋大陸月平均陸地降水圖。黑、綠、藍、紅色實線分別為氣候平均、Only PIOD、Only El Niño、耦合事件的降水。黑色實線的陰影區代表 95% 的信賴區間；使用雙尾 Student-t 檢驗，在 Only PIOD、Only El Niño、耦合事件中的點，代表它們的降水與氣候場有顯著差異 ($P < 0.05$) 的月份。

減少，8 月和 12 月分別是海洋大陸陸地降水最少和最多的兩個月份，即最乾月和最濕月。而當 Only El Niño 或 Only PIOD 事件發生後，海洋大陸的降水平均值皆比氣候值少，其中 Only El Niño 在 9 月和 11 月都有顯著的減少，而在 Only PIOD 時，海洋大陸的陸地平均降水減少幅度並未通過 95% 信心水準檢定 ($P\text{-value} > 0.05$)。當 El Niño 與 PIOD 耦合事件發生時，從 6 月至 12 月，陸地降水都有顯著減少，其減少程度比 Only El Niño 或 Only PIOD 多。在氣候場中，降水在到達最乾的 8 月後，從 9 月開始逐漸增多，但在耦合事件中，降水持續減少到 9 月，10 月開始降水才逐漸增加。有趣的是，El Niño 與 PIOD 耦合事件中降水減少最多的月份並不是最乾的 7、8、9 三個月，而是 10 月，且 10 月降水在耦合事件發生時甚至低於氣候場中最乾的 8 月。Turetsky et al. (2015) 指出，因為地表的覆蓋物需要一定的時間變乾，森林火災的時間通常會發生在乾季的 1-3 個月之後。而當持續的乾旱導致地下水水位下降以及整體的土壤濕度變低時，也往往會引發較為嚴重的森林火災(例如, Taufik et al., 2017)。當耦合事件發生後，從 7 月至 10 月的持續乾旱，導致地下水水位下降以至地面狀態變得足夠乾，使森林火災變得更為嚴重，並在 9、10 月達到巔峰 (Field et al., 2009; Chen et al., 2016)，而直

至 11 月降水逐漸增加，森林火災才會緩解。基於 9、10 月 (September and October, SO) 是森林火災最嚴重的月份 (Field et al., 2009)、El Niño 與 PIOD 耦合事件在海洋大陸陸地降水的效應最明顯，在之後的分析中，以 SO 月份為主。

為瞭解耦合事件中 SO 降水顯著減少的原因，將南北緯 10° 風場做經向平均後，畫出包含印度洋及太平洋兩個沃克環流距平的垂直剖面(圖 2)。相較於氣候場，Only El Niño 或 Only PIOD 事件都僅有少數區域有顯著差異，在海洋大陸區域有較不明顯的沉降距平。而在耦合事件中，位於印度洋及西太平洋的沃克環流距平都更加清晰：在 150hPa，海洋大陸西(東)側有更强的西(東)風距平；在近地表，海洋大陸在其西(東)側有更强的東(西)風距平。且在海洋大陸區域，從近地表到 150hPa，當跟 Only El Niño 或 Only PIOD 事件相比時，都有更强、更顯著的沉降距平(圖 2c)。即是由於 El Niño 與 PIOD 耦合後，在海洋大陸從近地表到高層都有更加顯著、強盛的沉降距平，導致海洋大陸 SO 的陸地降水顯著減少，這部分與過去研究相符合(例如, Nur'utami and Hidayat, 2016)。當 El Niño 與 PIOD 耦合後，會顯著減少海洋大陸 SO 的降水，而本研究將著重 El Niño 與 PIOD 的耦合事件在年際時間尺度中的分佈會是如何。

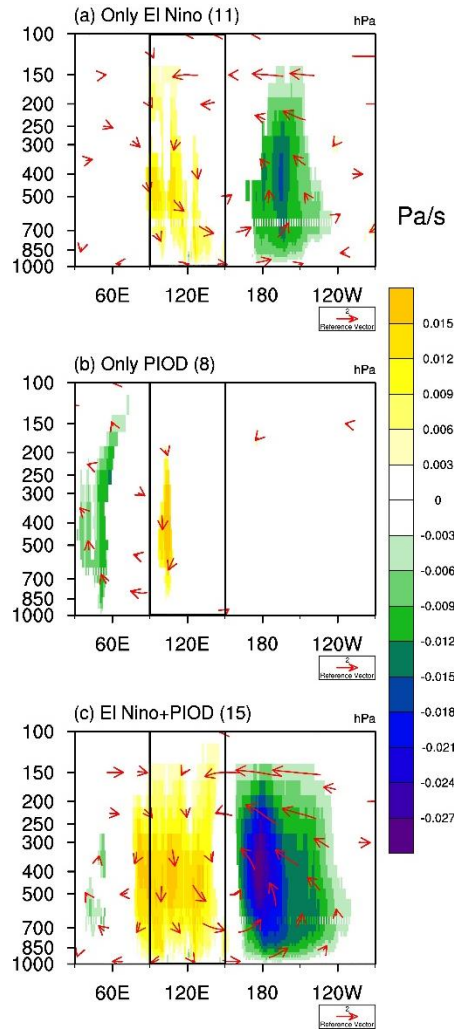


圖 2 Only PIOD(圖 a)、Only El Niño(圖 b)與耦合事件(圖 c)的風場(向量)、垂直速度場(色階)垂直剖面圖，僅呈現 95%信心水準的結果。使用雙尾 Student-t 檢驗，風場只要有一個分量通過統計檢定即畫出。Y 軸為垂直高度(hPa)；色階為上升速度距平(Pa/s)；風標為 u-w 風場距平(m/s)。在合成 u-w 風場時， $w=-w*100$ 。圖中黑框為海洋大陸區域，剖面為包含海洋的南北緯 10°經向平均。

(二) El Niño 與 PIOD 耦合事件 (Combined events)

為瞭解 El Niño 與 PIOD 耦合事件在過去百年的分佈及是否是由某一單獨事件導致降水平均與氣候出現巨大偏差，畫出 1900-2016 年的 SO 平均的陸地降水

距平(圖 3)。縱然降水資料有去除長期的線性趨勢，我們看到在 1970 年後的耦合事件中陸地降水減少更多，而在 1970 年前，耦合事件的降水減少與某些 Only PIOD 或 Only El Niño 帶來的降水減少程度相當。我們也注意到在某些時間段耦合事件出現較多，某些時間段出現較少，

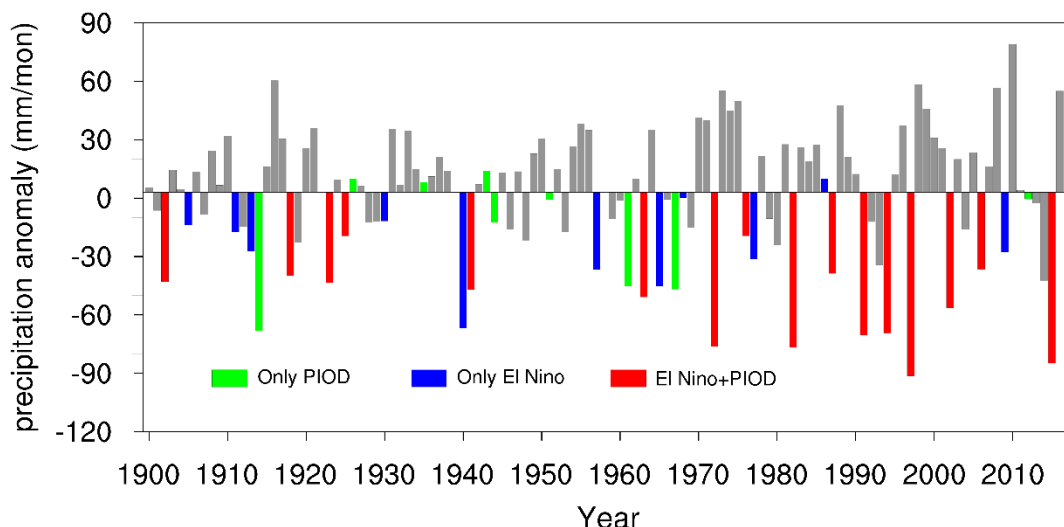


圖 3 1900-2016 年每年 SO 與氣候值的降水差異。綠、藍、紅色條分別為 Only PIOD、Only El Niño、耦合事件的降水距平，其它年份包含 La Nina 年以灰色條標記。

例如，在 1900-1929 年間，耦合事件出現四次，我們計算這段時期耦合事件的個數(Combined Number)除以發生的 El Niño 與 PIOD 個數和減去耦合事件個數(也就是看聯集的部分)，並定義其為耦合比，即 1900-1929 年間的耦合比為 0.44，而從 1970 年開始，耦合事件似乎更頻繁的發生，耦合比為 0.67(圖 3)。

如同前述，El Niño 與 PIOD 的耦合事件，並非是一個平穩過程(Non-stationary)。為瞭解耦合比是否有長周期性的變化，我們做了 31 年的耦合比滑動平均，即計算 1900-1930 年的耦合比並放到 1915 年，再計算 1901-1931 年的耦合比並放到 1916 年，持續滑動直到 1988-2018 年的耦合比並放置於 2003 年(圖 4 藍線)。Luo et al. (2012)發現，熱帶印度洋

與熱帶太平洋之間的緯向風梯度及海表溫梯度存在著年代際的訊號，且 AMO 對區域氣候存在著一定的影響(例如, Ting et al., 2009; García-García and Ummenhofer, 2015)。1930 與 1970 年左右剛好是 AMO 相位轉換的時間點。當考慮 AMO 曲線時(圖 4 橘線)，可看到在 1970 年以前，當 AMO 為正(負)相位，耦合比較低(高)；在 1970 年以後，AMO 逐漸變為負相位且耦合比增加，但是其增加程度已遠遠超過 1900-1930 年的耦合比(圖 4)。

Dong et al. (2006)指出，在正相位 AMO 時，整個赤道太平洋的溫躍層會被加深，由此不利於 ENSO 的產生，即減少 ENSO 個數並減弱 ENSO 強度；Yu et al. (2017) 也指出正相位 AMO 會加強太

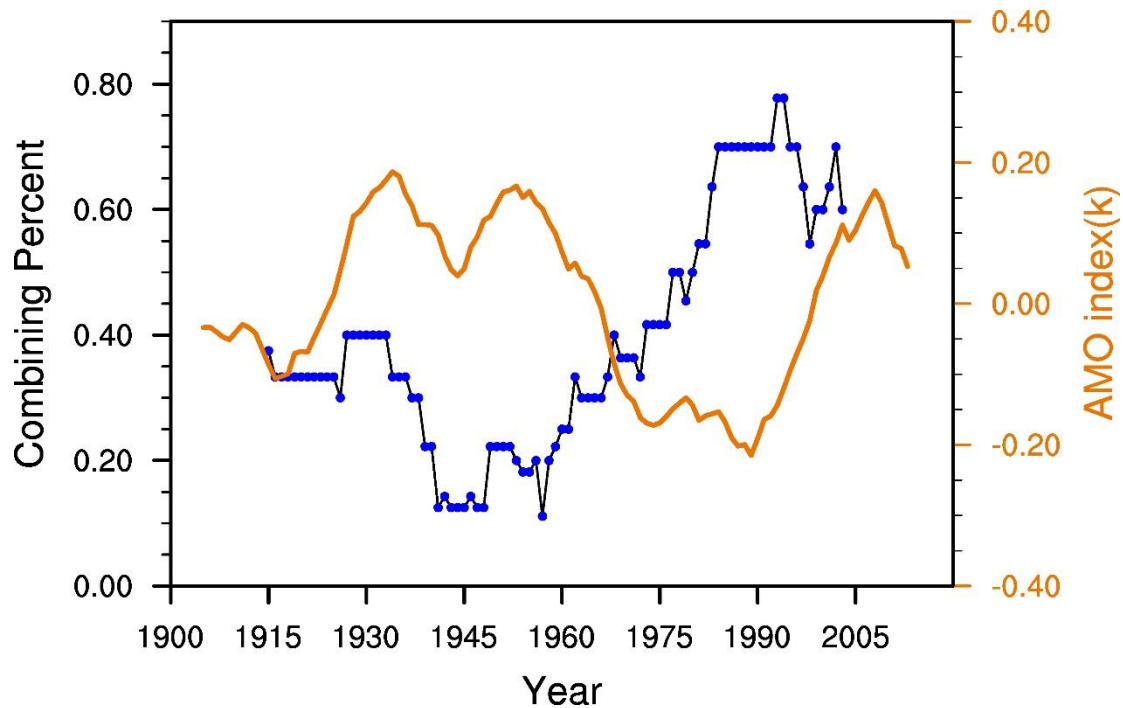


圖 4 耦合比(藍線)及 AMO 指數(棕線)的年代際震盪。藍色點線為每 31 年滑動計算的耦合比。耦合比為每 31 年間耦合事件的個數(Combined Number)除以發生的 El Niño 與 PIOD 個數和，即 $\text{Combined Number} / (\text{El Niño Number} + \text{PIOD Number} - \text{Combined Number})$ 。

平洋的副熱帶高壓，導致更多的 CP El Niño；相較於 CP El Niño，EP El Niño 更易與 PIOD 耦合。所以，基於正相位 AMO 會減少 ENSO 個數及導致更多不易與 PIOD 耦合的 CP El Niño，正(負)相位 AMO 似乎會導致更低(高)的耦合比。然而在 1970 年以後，為什麼 El Niño 與 PIOD 的耦合比會持續增加呢？首先，從 El Niño 與 PIOD 的角度出發，分別瞭解它們在 1970 年前後的變化。Wang et al. (2019)指出，由於赤道太平洋西側相較於東側更明顯的暖化，其東西向的海溫梯度增加，有利於西風爆發機制的形成，即自 1970 年左右，強海盆型(Strong basin-

wide) El Niño 大量增加。在印度洋上，也由於赤道印度洋西側的暖化速率大於東側，印度洋東西溫度梯度增加且信風增強，IOD 更傾向於正相位，即自 1970 年後，有越來越多的 PIOD 事件(例如, Chie et al., 2008; Cai et al., 2009; Roxy et al., 2014)。由此可見，在 1970 年後，似乎由於赤道印度洋、赤道太平洋的暖化不對稱，使得 El Niño 與 PIOD 產生某種改變。

為了探究全球暖化是否會影響 El Niño 與 PIOD 的耦合比，我們使用 CMIP5 的 piControl 及 rcp85 實驗組，試圖瞭解暖化對 El Niño 與 PIOD 耦合比的影響。有鑒於 CMIP5 對模擬海洋大陸的陸地降

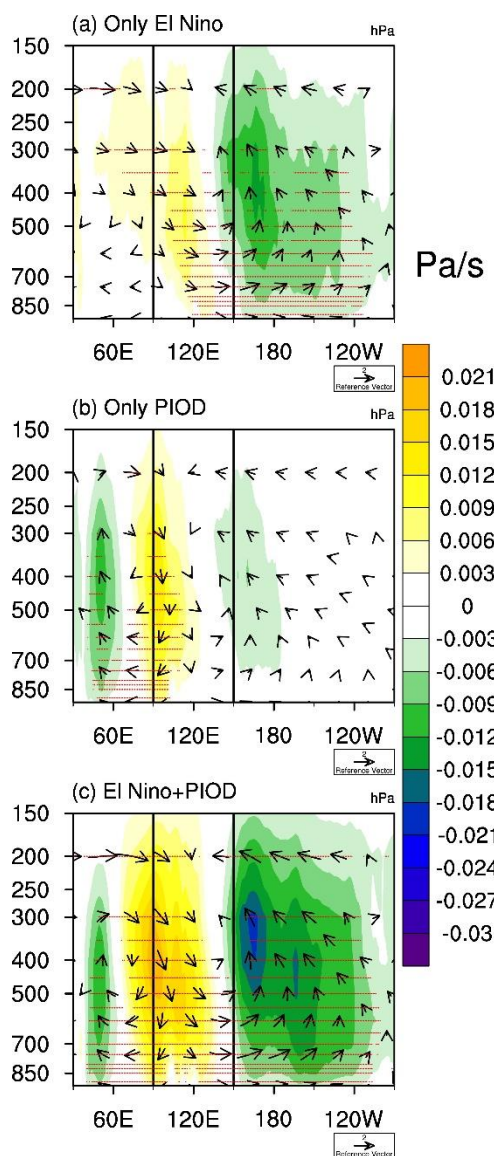


圖 5 同圖 2，但為 18 個 CMIP5 historical 多模式系集平均。圖 a、b、c 分別為模式 Only PIOD、Only El Niño、耦合事件的系集平均。先計算每個模式在各事件的合成分析，最後系集平均所有模式的結果。同時，使用 student-t 檢定檢驗每個模式在各事件中是否與其氣候值有顯著性差異，當 18 個模式中至少有 12 個模式出現顯著性差異後，該處以紅點表示之。

水有一定缺陷，例如一些氣候模式在模擬海洋大陸 SO 的降水時，無法模擬出類似於觀測的數值及空間分佈(例如，Raghavan et al., 2018)。因此，我們使用垂直風場而非降水的合成分析，去瞭解模式是否能模擬出 El Niño 與 PIOD 在下沉

氣流的耦合效應。18 個模式 historical 實驗的系集平均中，可以看到，相較於 Only El Niño 或 Only PIOD，當 El Niño 與 PIOD 耦合時，在海洋大陸區域從近地表到 150hPa 都有更强的沉降距平，即 CMIP5 模式可以模擬出 El Niño 與 PIOD 的耦合

效應(圖 5)，亦即其下沉氣流會較 Only PIOD 或是 Only El Niño 事件的要強；且相較於 Only PIOD 或者 Only El Niño，有更多的模式在耦合事件中與氣候值出現顯著的差異($p < 0.05$)。同時，圖 6 分別計

算每個模式在 piControl 與 rcp85 實驗中的耦合比。發現在 18 個模式中，有 12 個模式在暖化后，耦合比都有增加，指出在全球暖化下，El Niño 與 PIOD 的耦合事件出現的頻率會提高。

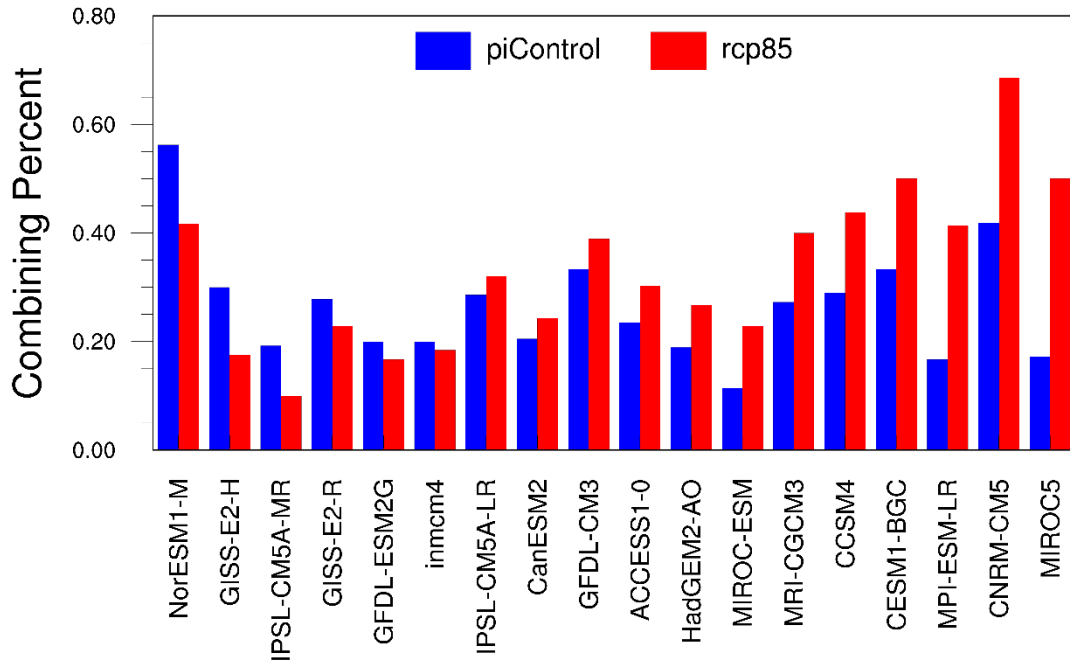


圖 6 CMIP5 模式的工業前期(藍色)與高輻射強迫力(紅色)實驗組的耦合比圖。藍色條為所選 18 個 CMIP5 模式在工業革命前期(piControl)實驗組中 100 年間的耦合比(這段時期的耦合事件的個數除以發生的 El Niño 與 PIOD 個數和)；紅色條則為各個模式，使用相同計算方法計算在高輻射強迫力(rcp85)實驗組中，所選擇 2006-2100 年 95 年間的耦合比。

四、討論

相較於在北半球冬季成熟的 El Niño，PIOD 成熟於更早的北半球秋季。除了之前提到的 AMO 與全球暖化對耦合事件的可能影響，1976 年的氣候變遷型轉變(Climatic change regime shift)或許也是可能因素(Annamalai et al., 2004)。因

為對 ENSO 與 IOD 事件的不同定義，Annamalai et al. (2004)發現所有的 El Niño 與 PIOD 耦合事件發生在 1976 年氣候變遷型轉變以後，而在 1950-1976 年則僅有 Only El Niño。他們在兩階段的 El Niño 事件合成分析中，看到北半球秋季的印度洋海表溫距平在 1976 年以前呈現海盆暖化(Basin-wide warming)，而 1976

年之後則是一個東西偶極的海表溫結構。利用大氣模式及理想化模式，發現印度洋在 1976 年前的海盆暖化可以通過 Gill 模型(Gill type response)的凱爾文波(Kelvin wave)加強赤道西至中太平洋的東風距平，進而不利於 El Niño 的成長；但 1976 年後，在印度洋東西偶極的結構下，凱爾文波被削弱，此時赤道西至中太平洋不再是顯著的東風距平而是微弱的西風距平，此情況並有利於 El Niño 的成長。因此在兩階段中 El Niño 與 PIOD 耦合事件個數會有懸殊的差異。

透過 Gill 模型，影響赤道西至中太平洋的風向進而影響 El Niño 的生成，似乎對 1976 年以後的耦合比上升提供了一個解釋。然而在不同分類下，1976 年以前也有一定數量的耦合事件。縱使在赤道印度洋東西不對稱的暖化，有助於 PIOD 事件的形成(例如, Cai et al., 2009)並促進隨後 El Niño 的生成(Annamalai et al., 2004)，我們也看到，在 1990 年後耦合比不再增加甚至有一點點下降(圖 4)，這或許是因為在氣候場中，由於赤道印度洋與東太平洋的暖化不對稱不斷增大後，赤道西太平洋的東風被加強，並在太平洋上呈現一個類似於 La Niña(La Niña like)的狀態(Luo et al., 2012)，不利於 El Niño 與 PIOD 耦合事件的形成。

根據 Dong et al. (2006)及 Yu et al. (2017)的研究，或許可以猜測 AMO 與耦

合比有一定的關係。雖然我們在圖 4 中看到耦合比是很綫性的改變，並且似乎出現一定的年代際變化，但因為比值會同時被分子分母所影響，亦即一旦某一年為耦合事件時，會對整個時間段的耦合比產生較大的影響，例如在 1931 年-1970 年間只有三個耦合事件，所以導致那一整段時期有較低的耦合比。同時，究竟是當 AMO 相位轉變耦合比就會顯著的改變，並在一段時間維持相對的高位或低位(即 0 和 1)，又或者 AMO 的強度與耦合比強度有一定的關係(即較綫性遞增或遞減)。至於在太平洋的其它低頻振盪與耦合比是否有一定的關係呢？我們有將一些低頻振盪的指數與耦合比疊起來，發現它們在相位轉換的時間點上很難一一對應，或許有一定的關係，但其效應可能沒有 AMO 來得大。另外，我們也使用了 CMIP5 piControl 的實驗組，試圖瞭解模式中 AMO 相位與耦合比的關係(圖 7)。但由於 CMIP5 中的 AMO，無論強度或相位轉換時間點都與觀測有巨大的差距，因此並沒有如在觀測中看到的 AMO 對 ENSO 與 IOD 耦合比的調節(圖 8)。

本研究也使用了另一組基於觀測所構建的長時期陸地降水資料 CRU v3 (Climatic Research Unit; Jones et al, 2008)及風場的再分析資料 NCEP-20C v3 (20th Century Reanalysis data version 3)，與目

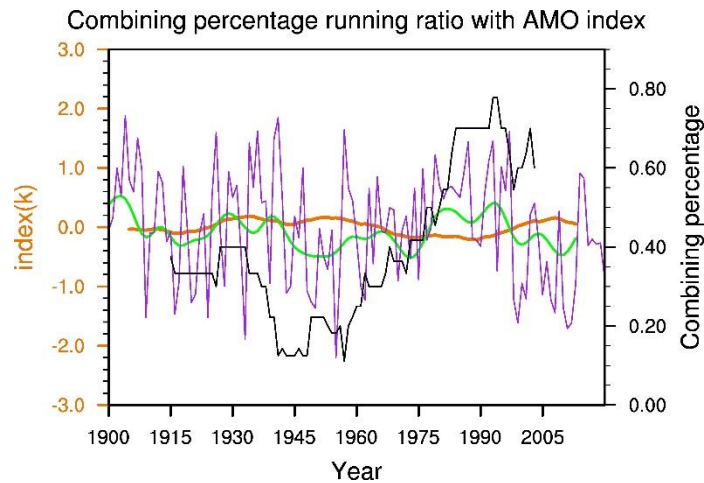


圖 7 圖中黑線為 31 年滑動平均的耦合比，棕色線為 AMO 在 SO 的 index，綠色和紫色線來則分別是 IPO 和 PDO index 在 SO 的平均（來自於 NOAA）。

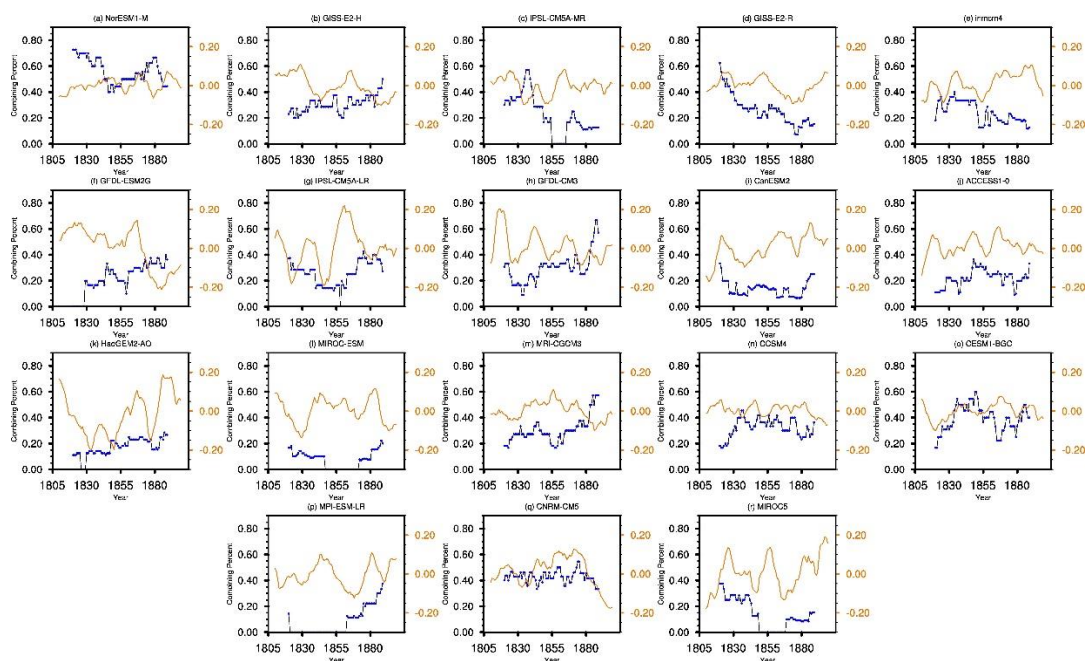


圖 8 CMIP5 模式的工業前期 AMO(黃色)與 31 年滑動耦合比(藍色)圖。計算方法與圖 4 一致，但是對每個模式。

前結果極為相似，因此未展示。雖然一些資料在早期的可信度並沒有那麼高，但兩組資料結果高度的相似性，或許會稍

稍增添結果的可信度。另外，在 CMIP5 實驗組三個情景的模擬(piControl, historical, rcp85)中，多模式的平均結果都可以看到

MC 區域在耦合事件有更強的沉降，即可以預期如觀測中所見，MC 降水在耦合事件相較於 Only PIOD 或 Only El Niño 事件減少更多。雖然太平洋的沃克環流在暖化下似乎有略微加強，而在印度洋的沃克環流並沒有明顯改變，同時在 MC 的下沉也沒有明顯差異，總之，三個情境的結果並無明顯差異，因此只展現在 historical 實驗組的結果。

五、結論

本研究探討 El Niño 與 PIOD 耦合事件對海洋大陸陸地降水的影響：當耦合事件發生時，由於在海洋大陸從近地面到 150hPa 都有更顯著的沉降(圖 2)，導致 7 月至 10 月的陸地降水會顯著減少(圖 1)，因此極有可能引發後續嚴重的森林大火。同時，也看到在 1970 年以前，當 AMO 呈現正(負)相位時，有更少(更多)的 El Niño 與 PIOD 事件耦合(圖 4)。通過 CMIP5 模式的分析，發現暖化似乎有助於更多的 El Niño 與 PIOD 事件耦合(圖 6)。受限於 CMIP5 模式對 AMO 的強度與週期模擬都有一定誤差(Han et al., 2016)，我們只在極少數模式中看到類似於觀測的 AMO 對 El Niño 與 PIOD 耦合事件耦合比的調節，之後則需要用 PACEMAKER(例如，Kosaka and Xie, 2016)的模式實驗來進一步的探討 AMO

影響 El Niño 與 PIOD 耦合事件的機制，以及在全球暖化下的效應。

致謝

本研究感謝科技部的資助，計畫編號：“MOST 106-2111-M-002-010-MY4”。

參考文獻

- Annamalai, H., Xie, S. P., McCreary, J. P., & Murtugudde, R. (2005). Impact of Indian Ocean Sea Surface Temperature on Developing El Niño. *Journal of Climate*, 18(2), 302-319. doi:10.1175/jcli-3268.1
- Cai, W., Cowan, T., & Sullivan, A. (2009). Recent unprecedented skewness towards positive Indian Ocean Dipole occurrences and its impact on Australian rainfall. *Geophysical Research Letters*, 36(11). doi:10.1029/2009GL037604
- Chang, C.-P., Wang, Z., Ju, J., & Li, T. (2004). On the Relationship between Western Maritime Continent Monsoon Rainfall and ENSO during Northern Winter. *Journal of Climate*, 17(3), 665-672. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0665:Otrbwm>2.0.Co;2

- Chen, C.-C., Lin, H.-W., Yu, J.-Y., & Lo, M.-H. (2016). The 2015 Borneo fires: What have we learned from the 1997 and 2006 El Niños? *Environmental Research Letters*, 11(10). doi:10.1088/1748-9326/11/10/104003
- Chen, C.-C., Lo, M.-H., Im, E.-S., Yu, J.-Y., Liang, Y.-C., Chen, W.-T., . . . Chien, R.-Y. (2019). Thermodynamic and Dynamic Responses to Deforestation in the Maritime Continent: A Modeling Study. *Journal of Climate*, 32(12), 3505-3527. doi:10.1175/jcli-d-18-0310.1
- Dong, B., Sutton, R. T., & Scaife, A. A. (2006). Multidecadal modulation of El Niño–Southern Oscillation (ENSO) variance by Atlantic Ocean sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 33(8). doi:10.1029/2006gl025766
- Editorial. (2020). Firing up ambition. *Nature Climate Change*, 10(1), 1-1. doi:10.1038/s41558-019-0680-9
- Field, R. D., van der Werf, G. R., & Shen, S. S. P. (2009). Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. *Nature Geoscience*, 2(3), 185-188. doi:10.1038/ngeo443
- García-García, D., & Ummenhofer, C. C. (2015). Multidecadal variability of the continental precipitation annual amplitude driven by AMO and ENSO. *Geophysical Research Letters*, 42(2), 526-535. doi:10.1002/2014gl062451
- Hamada, J.-I., Mori, S., Kubota, H., Yamanaka, M. D., Haryoko, U., Lestari, S., . . . Syamsudin, F. (2012). Interannual Rainfall Variability over Northwestern Jawa and its Relation to the Indian Ocean Dipole and El Niño–Southern Oscillation Events. *SOLA*, 8, 69-72. doi:10.2151/sola.2012-018
- Han, Z., Luo, F., Li, S., Gao, Y., Furevik, T., & Svendsen, L. (2016). Simulation by CMIP5 models of the atlantic multidecadal oscillation and its climate impacts. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(12), 1329-1342. doi:10.1007/s00376-016-5270-4
- Hendon, H. H. (2003). Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air–Sea Interaction. *Journal of Climate*, 16(11), 1775-1790. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<1775:IRVIOE>2.0.CO;2
- Ihara, C., Kushnir, Y., & Cane, M. A. (2008). Warming Trend of the Indian Ocean SST and Indian Ocean Dipole from 1880 to 2004. *Journal*

- of Climate, 21(10), 2035-2046.
doi:10.1175/2007JCLI1945.1
- Jiang, L., & Li, T. (2018). Why rainfall response to El Niño over Maritime Continent is weaker and non-uniform in boreal winter than in boreal summer. *Climate Dynamics*, 51(4), 1465-1483.
doi:10.1007/s00382-017-3965-6
- Kim, J. S., Jeong, S. J., Kug, J. S., & Williams, M. (2019). Role of Local Air-Sea Interaction in Fire Activity Over Equatorial Asia. *Geophysical Research Letters*, 46(24), 14789-14797. doi:10.1029/2019gl085943
- Kosaka, Y., & Xie, S.-P. (2016). The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming. *Nature Geoscience*, 9(9), 669-673. doi:10.1038/ngeo2770
- Kug, J.-S., An, S.-I., Jin, F.-F., & Kang, I.-S. (2005). Preconditions for El Niño and La Niña onsets and their relation to the Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 32(5). doi:10.1029/2004gl021674
- Levi, M. R., Krueger, E. S., Snitker, G. J., Ochsner, T., Villarreal, M. L., Elias, E. H., & Peck, D. E. (2019). Rating fire danger from the ground up.
- Luo, J.-J., Sasaki, W., & Masumoto, Y. (2012). Indian Ocean warming modulates Pacific climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(46), 18701-18706.
doi:10.1073/pnas.1210239109
- Nur'utami, M. N., & Hidayat, R. (2016). Influences of IOD and ENSO to Indonesian Rainfall Variability: Role of Atmosphere-ocean Interaction in the Indo-pacific Sector. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 196-203.
doi:10.1016/j.proenv.2016.03.070
- Pan, X., Chin, M., Ichoku, C. M., & Field, R. D. (2018). Connecting Indonesian Fires and Drought With the Type of El Niño and Phase of the Indian Ocean Dipole During 1979-2016. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
doi:10.1029/2018jd028402
- Qian, J.-H., Robertson, A. W., & Moron, V. (2013). Diurnal Cycle in Different Weather Regimes and Rainfall Variability over Borneo Associated with ENSO. *Journal of Climate*, 26(5), 1772-1790. doi:10.1175/jcli-d-12-00178.1
- Raghavan, S. V., Liu, J., Nguyen, N. S., Vu, M. T., & Liong, S.-Y. (2018). Assessment of CMIP5 historical simulations of rainfall over Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(3), 989-

1002. doi:10.1007/s00704-017-2111-z
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., . . . 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: Atmospheres*, 108(D14). doi:10.1029/2002JD002670
- Roxy, M. K., Ritika, K., Terray, P., & Masson, S. (2014). The Curious Case of Indian Ocean Warming. *Journal of Climate*, 27(22), 8501-8509. doi:10.1175/JCLI-D-14-00471.1
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360-363. doi:10.1038/43854
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., & Rudolf, B. (2014). GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1), 15-40. doi:10.1007/s00704-013-0860-x
- Taufik, M., Torfs, P. J. J. F., Uijlenhoet, R., Jones, P. D., Murdiyarso, D., & Van Lanen, H. A. J. (2017). Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics. *Nature Climate Change*, 7(6), 428-431. doi:10.1038/nclimate3280
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. doi:10.1175/bams-d-11-00094.1
- Ting, M., Kushnir, Y., Seager, R., & Li, C. (2009). Forced and Internal Twentieth-Century SST Trends in the North Atlantic. *Journal of Climate*, 22(6), 1469-1481. doi:10.1175/2008jcli2561.1
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G. R., & Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1), 11-14. doi:10.1038/ngeo2325
- Van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Mu, M., Kasibhatla, P. S., . . . van Leeuwen, T. T. (2010). Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and*

- Physics, 10(23), 11707-11735.
doi:10.5194/acp-10-11707-2010
- Vecchi, G. A. et al. Seasonality and Predictability of the Indian Ocean Dipole Mode: ENSO Forcing and Internal Variability. *Journal of Climate* 28, 8021-8036, doi:10.1175/jcli-d-15-0078.1 (2015).
- Wang, B., Luo, X., Yang, Y.-M., Sun, W., Cane, M. A., Cai, W., . . . Liu, J. (2019). Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(45), 22512-22517.
doi:10.1073/pnas.1911130116
- Webster, P. J., Moore, A. M., Loschnigg, J. P., & Leben, R. R. (1999). Coupled ocean–atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98. *Nature*, 401(6751), 356-360. doi:10.1038/43848
- Yu, J. Y., Wang, X., Yang, S., Paek, H., & Chen, M. (2017). The Changing El Niño–Southern Oscillation and Associated Climate Extremes. In *Climate Extremes* (pp. 1-38).

Combining effects of El Niño and IOD on Maritime Continent's Dry Season Land Precipitation

He-Ming Xiao, Min-Hui Lo, Ting-Hui Lee

Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

(manuscript received 6 October 2020; in final form 11 March 2021)

Abstract

The Maritime Continent (MC) is surrounded by the Indian Ocean and Pacific, one of the main characters in the atmospheric science study. There are apparent interannual variabilities in MC's land precipitation because of its unique geographic location. This study focuses on MC's dry season land precipitation, related to the MC's forest fires. The significant decrease in MC's land precipitation is associated with the reduced upward motion from the surface to 150hPa in MC's land regions under El Niño and positive Indian Ocean Dipole (PIOD). The decrease in land precipitation can further contribute to more severe MC's fires. We also found that the event numbers of combined El Niño and PIOD year are ununiformed in historical and may be associated with the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) and warmer atmospheric temperature. More combined El Niño and PIOD events under global warming, implying that there will be more server drought and fire events over the MC regions in the future. This study utilized observations, reanalysis datasets, and climate model simulations to explore El Niño and PIOD on the MC's land precipitation. A series of climate model experiments can be further utilized to investigate the physical mechanisms behind.

Keywords: Maritime Continent, El Niño, Positive Indian Ocean Dipole, Interdecadal

Chang, Atlantic Multidecadal Oscillation. doi: 10.3966/025400022021074901002