

2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180009

參展科別 地球與環境科學

作品名稱 全球平均海平面的年際變化
(1993-2017), Mean Sea Level Variations on
Inter-annual to Decadal Timescales,
1993-2017

得獎獎項 大會獎：一等獎
出國正選代表

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師 趙丰、陳忠城

作者姓名 廖廷涓

關鍵詞 海平面、年際震盪、相關性

作者簡介



我是廖廷涓，目前就讀國立臺灣師範大學附屬高級中學 1456 科學班。

希望能藉此機會，跟喜歡科學的人做交流。(或是把大家都騙來地球科學 XD)

如果對我的研究有興趣，或是在我的報告書中發現任何錯誤想要通知我、想要更正確的版本或是最新進度的報告書，請 e-mail 至 jey05jey05@gmail.com。

摘要

本研究探討年際氣候震盪對全球平均海平面的影響，故將衛星測高儀數據剔除長期趨勢與季節波動後，與數個氣候指數進行互相關及同調性頻譜分析，其結果為：(i) 海平面與 ENSO，尤其是 Central-Pacific Types 在一年半以上的時間尺度，有高度相關，相關的原因可能與混合層溫度變化、陸地降雨海陸分布的變化有關。(ii) 海平面與 PDO、AMO 的相關性分別集中在 4 年以上與 2 年到 10 年，海水的熱含量變化可能是主因。AMO 相關性最高是在其比海平面早發生 8 個月的時間。(iii) 雖然研究資料不包含北極海，但結果指出海平面與 AO 有弱相關，意味著北極海的年際溫鹽變化，對於全球海平面有遙相關的影響。(iv) 海平面與 AAO 似乎有弱相關，但是無法確定。最後本研究將上述五個指數以最小平方擬合海平面年際變化，得到各指數的相對強度貢獻比例，有助於了解在未來全球暖化下的海平面變化。

Abstract

We investigate the impact of the inter-annual climate oscillations on the global mean sea level (MSL) derived from satellite radar altimeter observations since 1992. After numerically removing the long-term trends and seasonal variations of MSL, we perform the cross-correlation and coherent spectrum analyses with several climate oscillations represented by their respective meteorological indices, including El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO), Atlantic multidecadal oscillation (AMO), Arctic Oscillation (AO), Antarctic Oscillation (AAO). We find: (i) There is high correlation on time scales more than 1.5 years between MSL and ENSO, especially w.r.t. the Central Pacific type of El Niño. The reasons might be related to changes in dynamics of the mixed layer and in land-sea distribution of land rainfall. (ii) Moderate correlations of MSL with PDO and AMO, respectively on time scales of over 4 years and 2-10 years. The heat content might be the main cause. AMO's highest correlation is 8 months earlier in phase than MSL. (iii) Although the data of research doesn't contain Arctic sea, the results indicate that MSL is weakly correlated with AO, implying that the interannual temperature and salinity changes in the Arctic Sea have a teleconnection with MSL. (iv) Practically no correlation between MSL and AAO. Finally, we least-squares fit MSL by the above five indexes to get the relative contribution of each oscillation in causing the interannual MSL variations toward better understanding of the MSL under current climate changes.

壹、 前言

一、研究動機

在 2011 年時，全球平均海平面下降且並非季節性的因素。當時有報導說是海平面開始下降，但這其實是 ENSO 的影響。我想要進一步了解，各個年際震盪指數對於海平面的影響究竟有多大，以及海平面與這些年際震盪間的關係。

大多數的研究主要是在探討海平面會上升的原因、趨勢等。而我想要探討的是，海平面除了每年因季節的周期性變化以及 3mm 的線性上升以外，其他會影響到全球平均海平面的現象。目前比較少人關注到這部分，於是我開始了這次的研究——利用數學與物理分析方法，探討海平面與其他海洋或氣候變化的關係。

二、研究目的

- (一) 找出逐年海平面的淨變化（扣除平均、長期趨勢、季節性變化的平均海平面高度變化）
- (二) 比較海平面淨變化與不同尺度氣候變因間的關係 (El Niño-Southern Oscillation, Atlantic Multidecadal Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Antarctic oscillation, Arctic Oscillation)
- (三) 探討海平面與不同種聖嬰現象間的關係 (Central Pacific ENSO, Eastern Pacific ENSO)
- (四) 探討聖嬰現象與海平面的關係，是質量或密度變化造成
- (五) 使用跟海平面高相關的氣候變因，擬合出海平面的變化

貳、 研究方法或過程

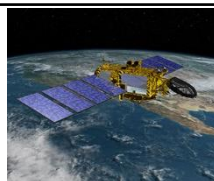
一、實驗數據

(一) 海平面

1. 測量海面

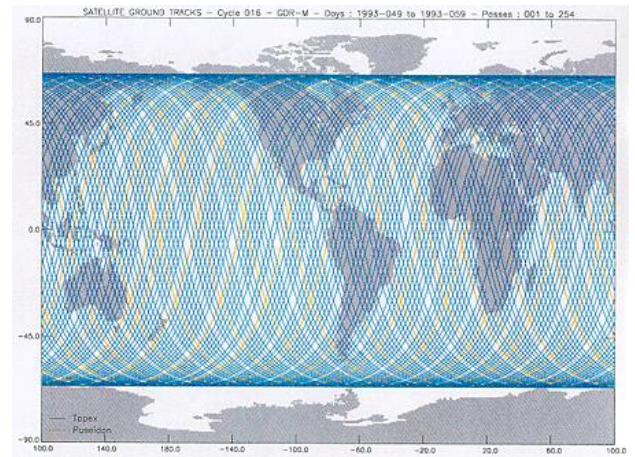
高度（海水體積變化）

圖一：Jason 衛星
軌道高度：1328—1380km
繞行週期：112min
測量範圍：南北緯 66°間
(<https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/jason3/>)



本實驗使用的數據是由

TOPEX/Poseidon, Jason 1—3 四顆衛星利用雷達測高儀所測量到海平面高度，如上圖一。衛星測量到的海平面，指的是相對於地心（利用衛星與地球間重力算出來的地球重心）的高度。也就是利用軌道高度減去雷達（經校正後）測到的衛星與海面間的距離。將此結果扣除平均海平面，以及一些已知的時變效應，例如潮汐。為了使每個點所占的面積一樣，各地的點透過加權平均，高緯度的加權低，低緯度加權高，得到全球平均海平面。此衛星的軌道每 10 天重覆到相同的地理位置，因此從科羅拉多大學網站得到的全球平均海平面也就是 10 天一筆的數據，如圖二。



圖二：衛星軌道圖

藍線表示衛星會經過的地片投影路徑。每十天會重複一次。

本研究討論的是全球平均海平面 (eustatic sea level) 的變化，而非物理海平面 (physical sea level)。全球平均海平面的變化，可以當作是整體海水體積的變化，也就是只受海水質量及密度改變影響；物理海平面還會受當地海表面、陸地移動...等因素影響。

(二) 氣候現象

1. ENSO

聖嬰—南方震盪現象 (El Niño-Southern Oscillation)，是指橫跨赤道附近太平洋的震盪。赤道的東風減弱，造成太平洋東岸的湧升流減弱，表層海水溫度上升。此時太平洋東西的氣壓也會改變，稱為南方震盪。平均 4—5 年發生一次。以「海平面氣壓」、「表面風的緯向 (U) 和經向 (V) 分量」、「海水表面溫度」、「海面空氣溫度」、「天空總雲量」等六項參數構成每個月有一個的 MEI (Multivariate ENSO Index) 值來表示聖嬰現象的強弱，如圖三 (a)。

近年來，將聖嬰現象又分為：東太平洋聖嬰 (EP) 以及中太平洋聖嬰 (CP)。兩者的差別是驅動力以及暖水團主要的位置。東太平洋聖嬰是在 20 世紀以前較多、傳統的聖嬰，較重複性的。而中太平洋聖嬰與副熱帶、加州東岸較有關係，受大氣的影響也比東太平洋聖嬰大。如圖三 (f,g)。

2. AMO

大西洋多年震盪 AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation)，是指在北大西洋盆地的海水表面溫度 SST (Sea surface temperature) 發生的異常。另外，AMO 指數則是由北大西洋盆地 (0°N-65°N, 80°W-0°E) 海水表面溫度的經緯度平面上發生的異常 (扣除季節性變化)，如圖三 (b)。

3. PDO

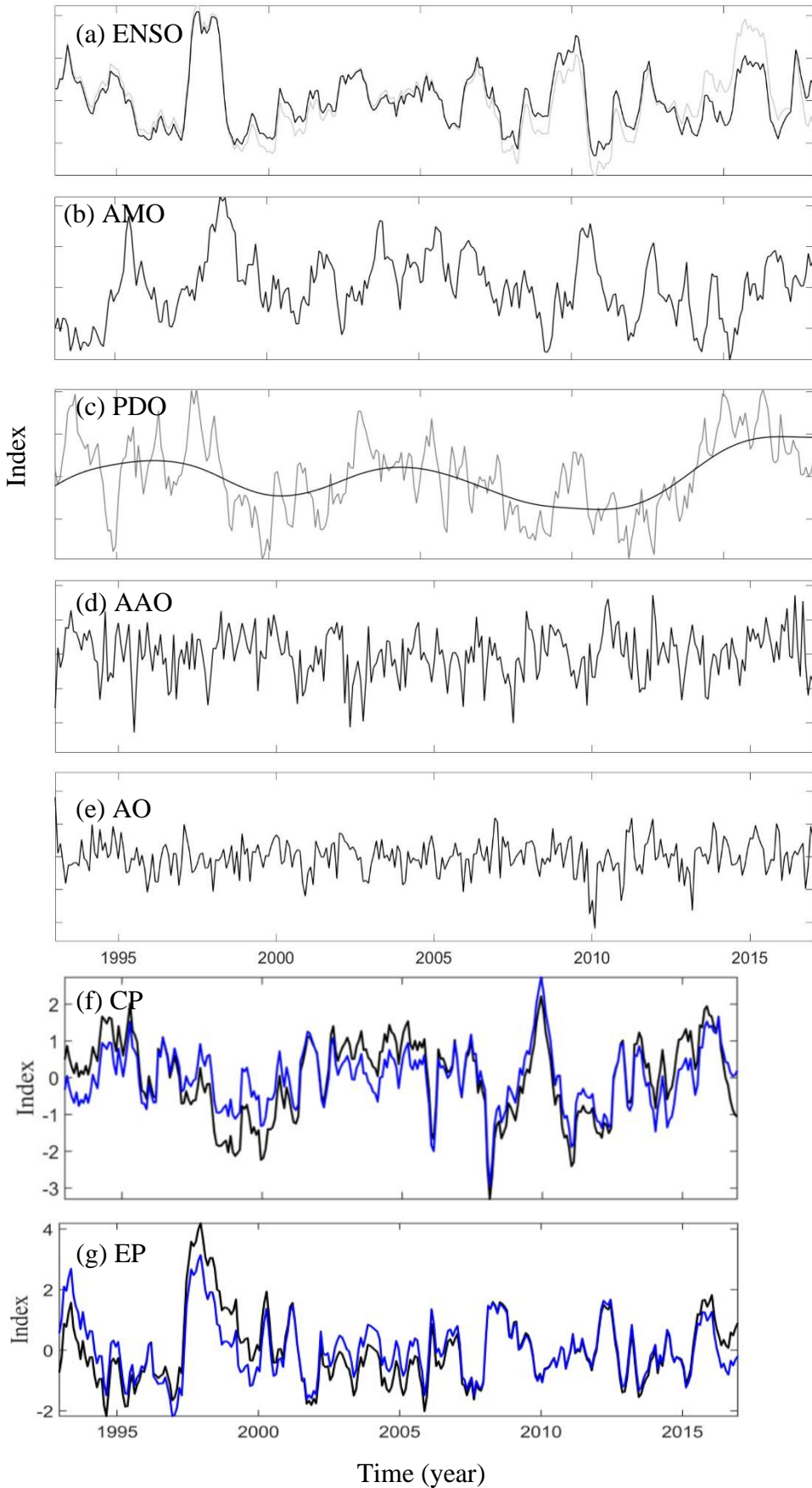
太平洋十年振盪 PDO (Pacific Decadal Oscillation)，是指發生在太平洋 20°N 的海水表面溫度的異常。海水表面溫度扣除氣候年度變化以及全球平均異常後，再將海水表面溫度做經驗正交函數分解 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分析，然後將最主要的一項作為 PDO 指數，其中將熱帶太平洋的中部及東部海水溫度上升的 PDO 指數定義為正值，如圖三 (c)。

4. AAO

南極震盪 AAO (Antarctic oscillation)，又稱 SAM (Southern Annular Mode)，是指南極附近的西風帶或低壓帶向南北移動所產生的震盪行為。將「每個月 20°S 以南的 700hPa 平均高度」扣除季節性訊號，做經驗正交函數分解後取最主要的該項數值定為 AAO 指數，如圖三 (d)。

5. AO

北極震盪 AO (Arctic Oscillation) 是指北極極區氣壓與北半球中緯度成反向的關係。將「每個月 20°N 以北的 1000hPa 平均高度」扣除季節性訊號，做經驗正交函數分解後取最主要的該項數值定為 AO 指數。當 AO 指數為正值時，表示極區氣壓較低，中高緯度的氣壓較高。此時西風噴流較強，極區冷空氣不會向南移動，影響中高緯地區的天氣，如圖三 (e)。



圖三：氣候現象指數

圖 a：ENSO（灰色實線為實際 ENSO 值，黑色線為八年以下濾波後的 ENSO）

圖 b：北大西洋震盪

圖 c：太平洋震盪（灰色實線為實際 PDO 值，黑色線為八年以下濾波後的 PDO）

圖 d：南極震盪

圖 e：北極震盪

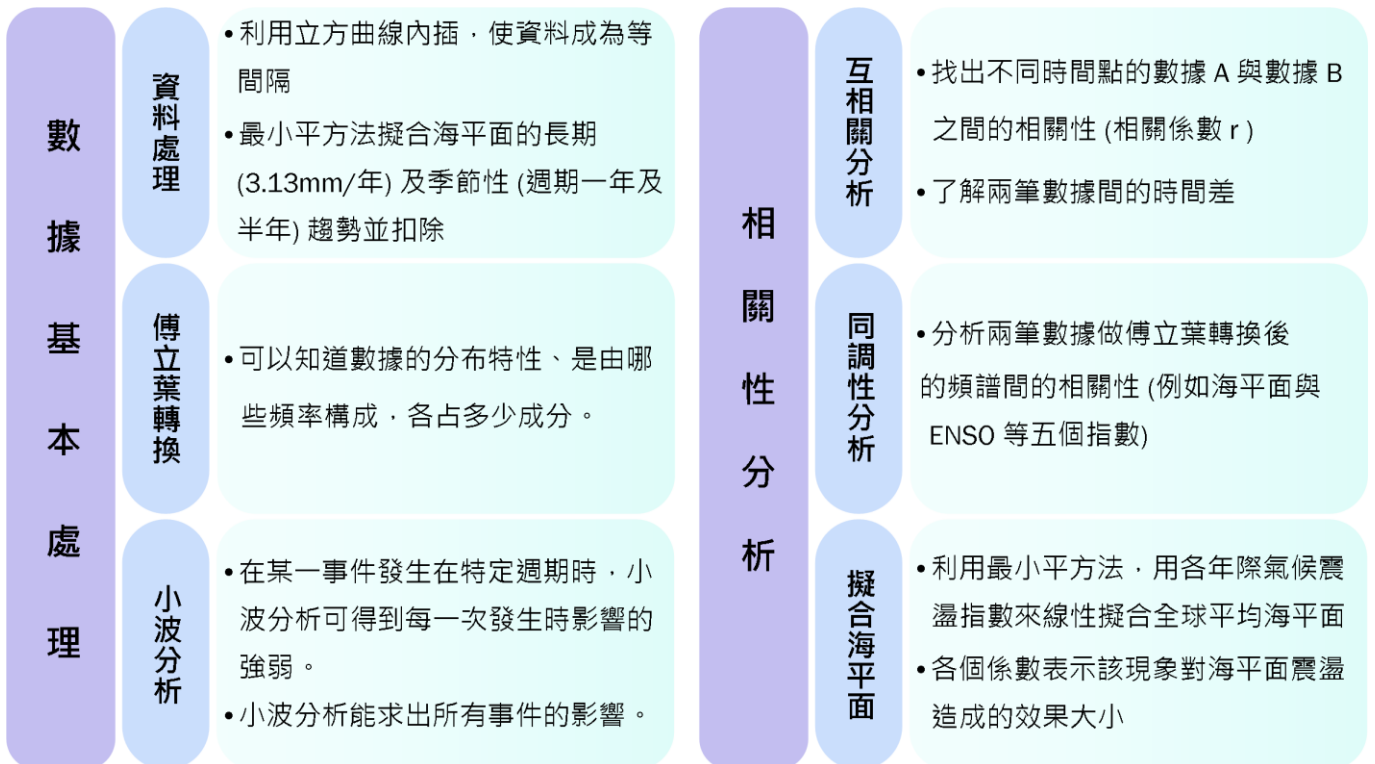
圖 f：中太平洋聖嬰（黑色線為實際 CP 值，藍色線為八年以下濾波後的 CP）

圖 g：東太平洋聖嬰（黑色線為實際 EP 值，藍色線為八年以下濾波後的 EP）

X 軸：年

Y 軸：指數大小，僅相對大小有意義。

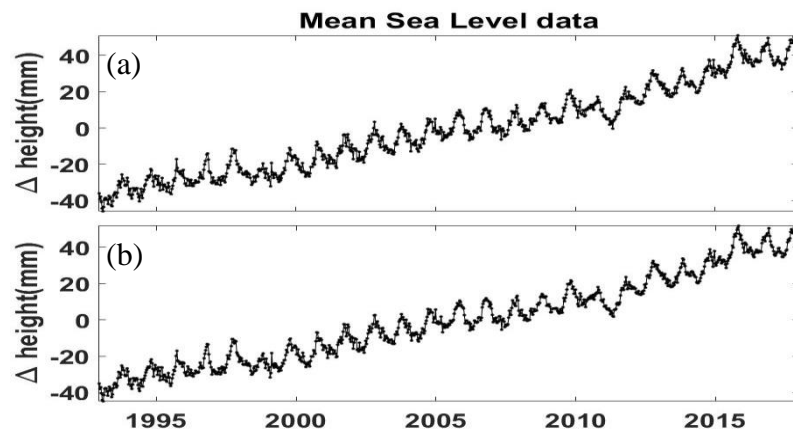
二、研究方法與過程



圖四：研究過程流程圖

(一) 將資料做內插

快速傅立葉轉換 (FFT) 需要資料等間隔，因此資料需要內插。衛星需要修正軌道的關係，造成實際數據並非真的每十天一筆。有些是 11 天，有些則為 9 天。因此利用立方曲線 (cubic spline) 內插將資料內插成等間隔，如圖五。

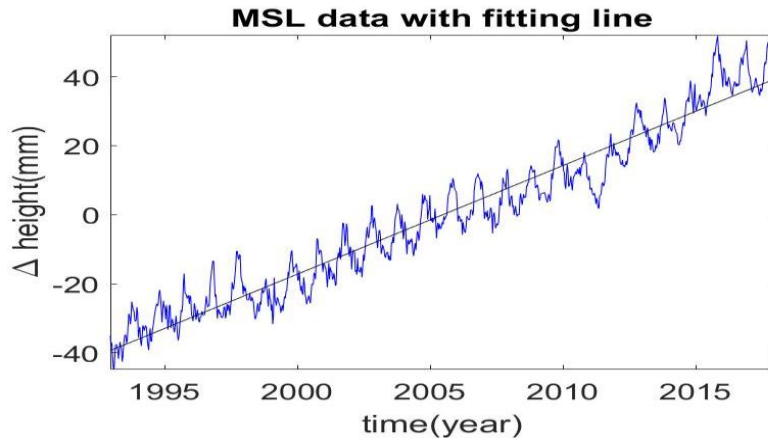


圖五：海平面高度變化對時間做圖

a：原始的海平面資料；b：經過立方曲線內插處理後資料間隔為每 10.1456 天一筆

(二) 將資料去趨勢 (de-linear)

在做資料分析時，若有長期趨勢將會影響數據分析的結果，因此需要將長期趨勢扣除。本實驗使用最小平方法 (least-square method) 擬合一條最接近海平面上升趨勢的斜直線，並且將其扣除。這個原因是因全球暖化下海水熱含量上升造成的。本實驗主要想探討的並非此長期趨勢，因此在此先將其扣除，如圖六。



圖六：海平面高度變化對時間做圖

藍線：海平面高度隨時間變化線（經立方曲線內插處理）

黑線：利用最小平方法擬合出來的斜線。斜率為 3.15。

(三) 傅立葉轉換

傅立葉轉換可以知道資料的特性，能看出該筆資料是藍噪音（頻譜上高頻的強度相較於其他頻率高）、紅噪音（頻譜上低頻的強度相較於其他頻率高）或白噪音（頻譜上每個頻率的強度都差不多）；資料是由哪些頻率構成的，各占多少成分。

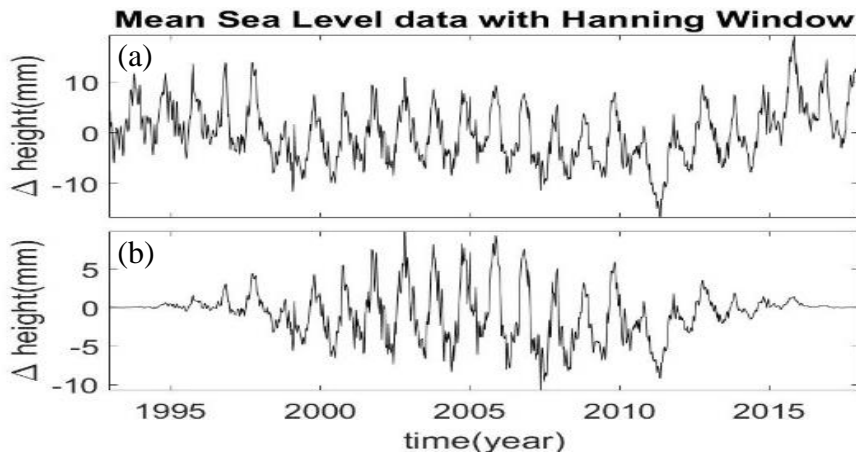
為了避免轉換後訊號強度外洩 (spectral leakage) 到其他不該有訊號的地方，故將已經扣除趨勢以及平均值的海平面加上漢寧窗 (Hanning window)，如圖七。原始數據並非很完整的「週期」（受限於資料長度），如果將這樣的資料直接做傅立葉轉換，得到的轉換結果會與該筆數據實際的頻率及強度有差距。

$$w(x) = 0.5 \times \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{x}{L-1}\right)\right)$$

w(x)：漢寧窗；x：變數；L：資料總長度 (總共 h 有幾個)

為了提高快速傅立葉轉換的解析度，將資料補零（做 zero padding）至 2^{15} 個數據點。這是在原始資料後補 0，使資料長度 L 變長。離散傅立葉轉換的最小解析度 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{L}$ ，因此只要增長 L ，就能提高頻譜的解析。當 $L \rightarrow \infty$ 時，即為連續傅立葉轉換。傅立葉轉換是將時間域的東西轉換到頻率域上，如圖八。離散傅立葉轉換公式為：

$$\sum_{n=0}^{L-1} f(n)e^{-i2\pi\frac{kn}{L}}, \text{ where } k \in \{0,1,2, \dots, L-1\}$$

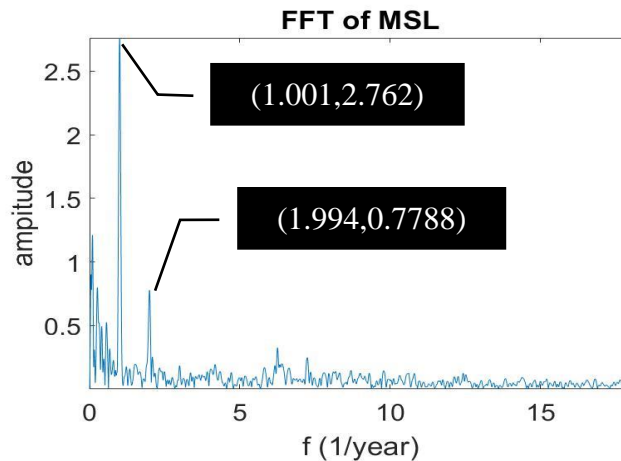


圖七：海平面高度變化與漢寧窗

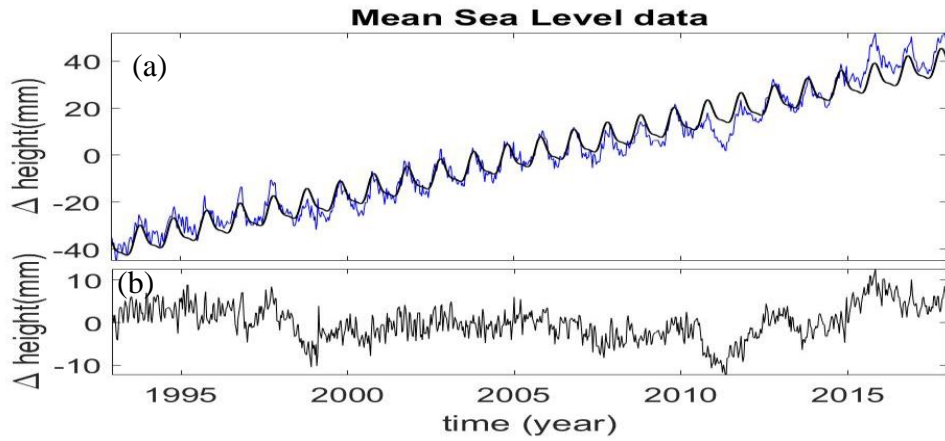
a：海平面高度隨時間變化線（經立方曲線內插、去除線性趨勢）

(四) 將海平面的資料扣除季節性訊號

由傅立葉轉換可以看出，季節性（一年及半年的訊號）對於海平面變化的影響很強。用最小平方法擬合頻率為一年及半年的 \sin 函數，以扣除季節性訊號，如圖九。



圖八：海平面高度傅立葉轉換

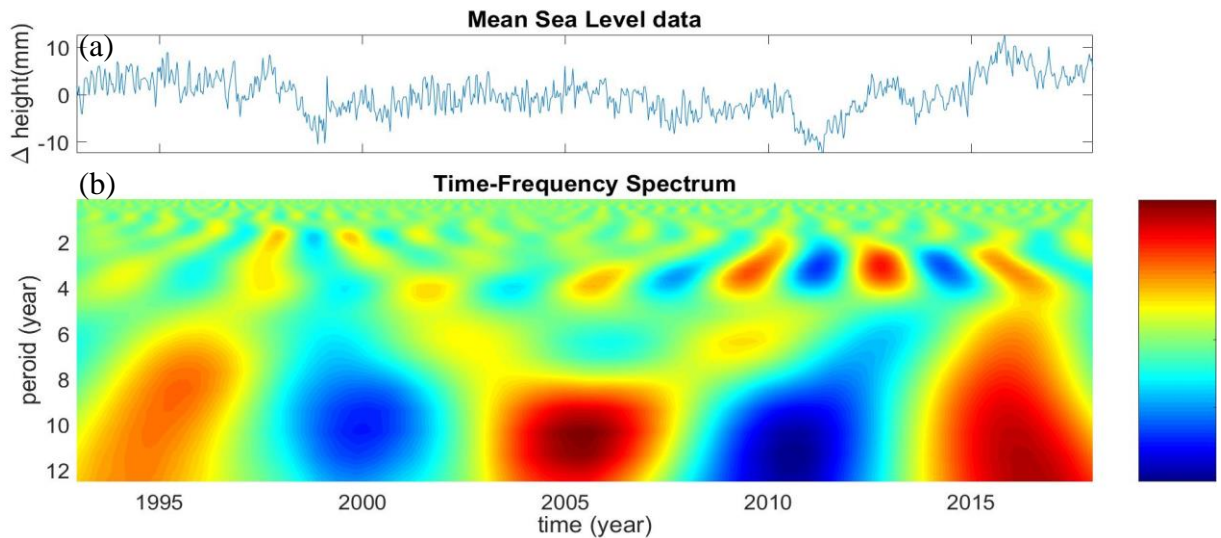


圖九：海平面高度與季節性變化

a 藍線：海平面高度隨時間變化線；黑線：分別用週期為 1, 0.5 的 sin 函數以及斜直線透過最小平方法擬合出來的線；b 黑線：a 圖中藍線扣除黑

(五) 小波 (wavelet) 分析

如果只有某段時間才有特定頻率。從傅立葉分析無法看出這件事，只能知道這筆資料中有該頻率，卻不知道是從頭到尾都有，還是特定時間內很強。做小波分析，能看出在某個時間下，每個頻率有多強，如圖十。



圖十：海平面高度與 wavelet 分析時頻譜

a：海平面高度隨時間變化線 (經立方曲線內插、去季節性及趨勢處理)

b：藍色：數值為負，顏色越深，其值越大；紅色：數值為正，顏色越深，其值越大

傅立葉分析是將數據與特定頻率做內積，得到數據在該頻率下的震幅。而小波分析則是將那個頻率加一個高斯函數 (Gaussian function) 當作窗戶。例如在週期為一年的頻率下，加了一個相應長度的窗戶，再與資料做內積。得到的結果是該筆資料在有加窗戶的那段時間的分析。

$$X(a, b) = \frac{1}{\sqrt{b}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt$$

$$\varphi(t) = \cos(\omega t) e^{-t^2}$$

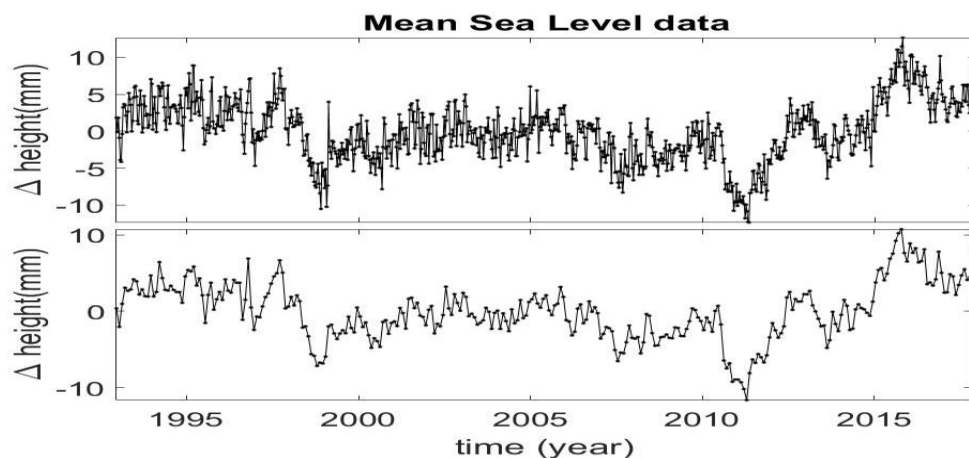
$f(t)$ ：海平面高度的序列函數； a ：window 位置； b ：window 寬度

$$t_1 \leq a \leq t_{end} ; 0 \leq b \leq L$$

改變 a 可以得到資料在相同頻率、不同時間的數值。改變 b 則能得到不同頻率 (不同窗戶寬度)、相同時間的數值。以小波的時頻譜來說，改變 a 能畫出在 x 軸上不同位置的數值， b 則是 y 軸。資料與小波內積出來的值為 z 軸 (或是圖片顏色表示)。但是此分析方法的數值不能代表該頻率在該時間的震幅大小，只能看之間的相對大小關係而已。

(六) 降低採樣頻率

海平面資料為每十天一筆，但是 ENSO 等其他資料皆為每月一筆。為了能使兩者做後續分析，須將兩者的採樣間隔調為相同，如圖十一。但是如果將原本資料每三筆取一筆做為新的海平面資料的話。分析時會有原本高頻的 (週期為 $20 (= 10 \times 2)$ 天到 $60 (= 30 \times 2)$ 天) 資料以低頻的訊號方式出現 (會有混疊的現象)。



圖十一：海平面高度與降低採樣頻率

a：原本的海平面高度隨時間變化線；b：降低採樣頻率後的海平面高度隨時間變化線

(七) 將海平面資料與 ENSO 進行互相關分析 (Cross-Correlation)

Correlation 指的是兩筆資料(A,B)間的相關性，並以相關係數 r 表示如下：

$$-1 \leq r = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \leq 1$$

A, B：兩筆要找相關性的數據； \bar{A}, \bar{B} ：這兩筆數據的平均值；n：資料總長度 (L)

Cross-Correlation 是為了找到過去的數據 A 與現在的數據 B（或是過去的 B 與現在的 A）之間的相關性。因為兩筆數據間的反應可能回有時間差的影響，而做 cross correlation 可以同時了解兩者影響間的時間差，以及修正後真正的相關性的大小。畫出來的圖當 x 軸為 1 時，y 軸即輸入數據 A_{1-n-1} 與 B_{2-n} 之間的相關係數。

$$r_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_{i+\tau} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}}$$

τ 為兩者之間差的時間(cross - corr 圖的 x 軸)

但是只有相關係數 r，並不能看出兩者間的相關性，還要看自由度（degree of freedom, DOF）以決定相關係數是否有顯著性。舉例來說，具有主要線性趨勢（或是兩個都很平滑且時間尺度相同）（非常低的自由度）的兩個時間序列可以具有非常高的 r（正相關或負相關都行），但是這無法當作有物理意義相關的證據。反過來說，如果有兩個高自由度的數據，就算 r 值沒有很高，還是能證明是有高度相關的，因此兩筆數據是否相關，自由度也很重要。但是數據的自由度不能只看數據有幾筆，還要考慮數據本身的自相關性，才能決定數據的自由度。

$$P_c(r, \nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\Gamma(\nu/2)} \int_{|r|}^1 (1-x^2)^{(\nu-2)/2} dx, \quad \Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx, \quad \text{where } \text{Re}(z) > 0$$

ν ：數據的自由度，若兩筆數據不同，取高的； $2P_c$ ：顯著性水平 (significance level)

信心水準為 $1 - 2P_c$

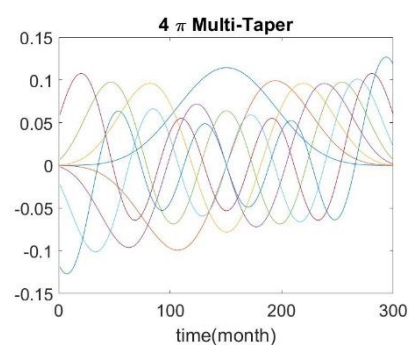
(八) 將海平面資料與 ENSO 進行同調性分析 (Cross-Coherence)

互相關分析只能算出兩筆資料間的相關性，但無法知道是哪個頻率的相關性較高。為了要更進一步了解兩筆資料間的關係，本研究使用同調性分析找出兩筆資料間在頻譜上的相關。

$$\gamma(\omega)_{A,B} = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i(\omega))(B_i(\omega))^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |A_i(\omega)|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |B_i(\omega)|^2}}$$

$$A(\omega) = FT[A(t)] ; B(\omega) = FT[B(t)]$$

為了要進行分析，需要使數據有不只一筆（原始數據的 $N = 1$ ），於是對原始數據乘上 8 個互相正交的 4π Multi-Taper，如圖十二。得到 8 筆數據後，再分別做 FFT，就能做同調性分析。



圖十二：Multi-Taper

和互相關分析一樣，同調性分析的值也跟自由度有關。

α ：信心水準； N ：使用的 Multi – Taper 數目

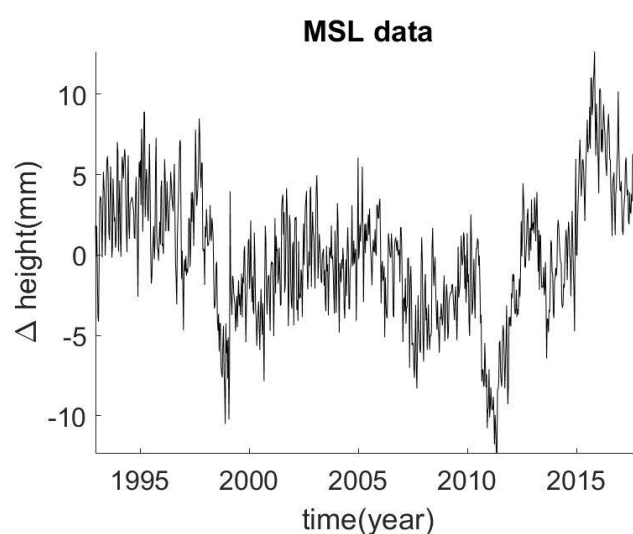
參、 研究結果與討論

一、海平面的淨變化

由圖十三可以看出，就算拿掉了上升趨勢、季節性變化，全球平均海平面還是有 ± 5 毫米左右的不規則變化。

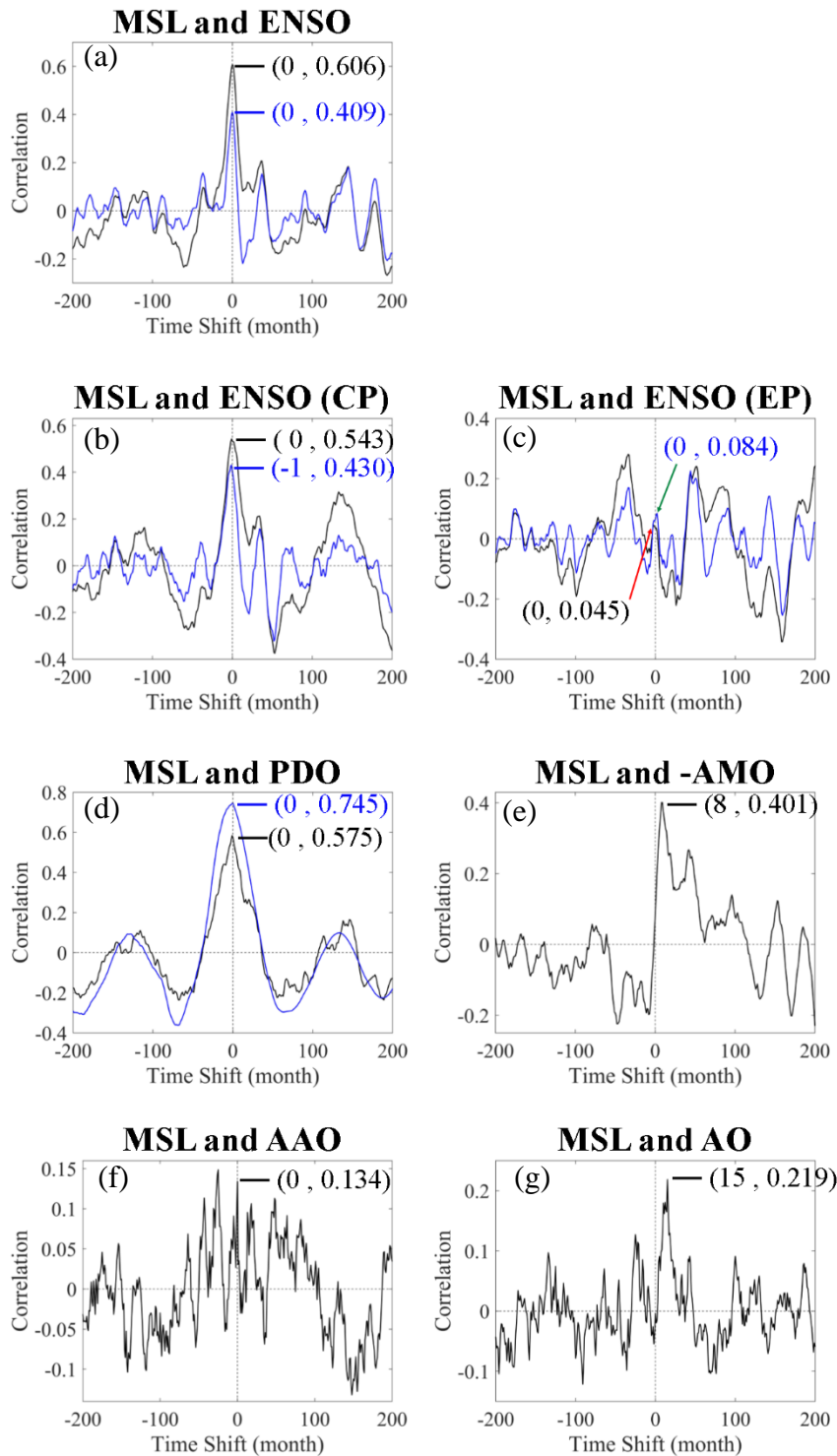
本研究使用最小平方方法擬合斜直線的方式扣除長期趨勢。但這是人為主觀的扣除，並非完全客觀的方法。本實驗有嘗試過使用奇異譜分析 SSA (Singular Spectrum Analysis) 的 mode 1 來扣除長期趨勢。奇異譜分析是將得到的時間序列切週期的整數倍，構造出軌跡矩陣，透過分析軌跡矩陣，將資料分解成很多個相互正交的序列。但是對於週期的整數倍是幾倍，這部份則是因數據而異，沒有統一的用法。

海平面的構造軌跡矩陣如果是切 1 年的長度，會造成扣除過多的資訊（如長周期訊號），與聖嬰等現象相關的部分也將被扣除；如果將資料切更長週期（2 年,3 年...），會造成擬和線在資料首尾兩段明顯與海平面趨勢不符。衛星海平面資料是從 1992 年才開始的，至今資料筆數不夠多，就會造成擬和時邊際不符。未來如果有更多的數據，此方法將會較適用。



圖十三：海平面的淨變化

二、海平面淨變化與各年際震盪現象的互相關分析



圖十四：互相關分析

只有中太平洋聖嬰 (CP) 與海平面有關。

互相關分析結果，x 軸為正值表示年際震盪現象較快。如圖十四 (e) 中，-AMO 的最高值 (8,0.40) 表示在 -AMO 比海平面快八個月的時候，相關係數最高。X 為 0 的位置的相關係數，即為一般相關性分析時得到的 r 值。

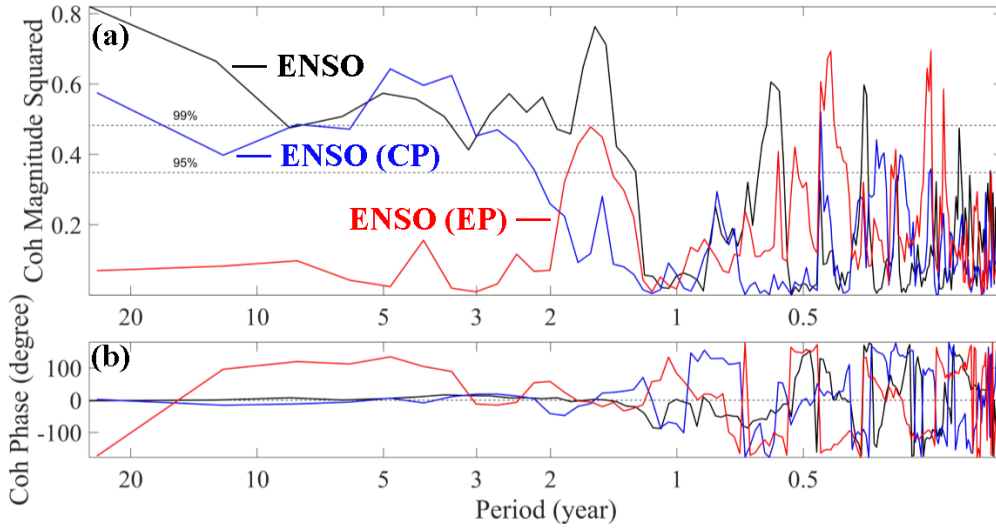
由圖十四可以得知，平均海平面與 ENSO, PDO, AMO 有高度相關，AMO 提早了 8 個月，而且是負相關。

ENSO 佔年際海平面變異的 36%，PDO 佔 35%，AMO 佔 16%，AAO 佔 1.5%，AO 佔 5%。

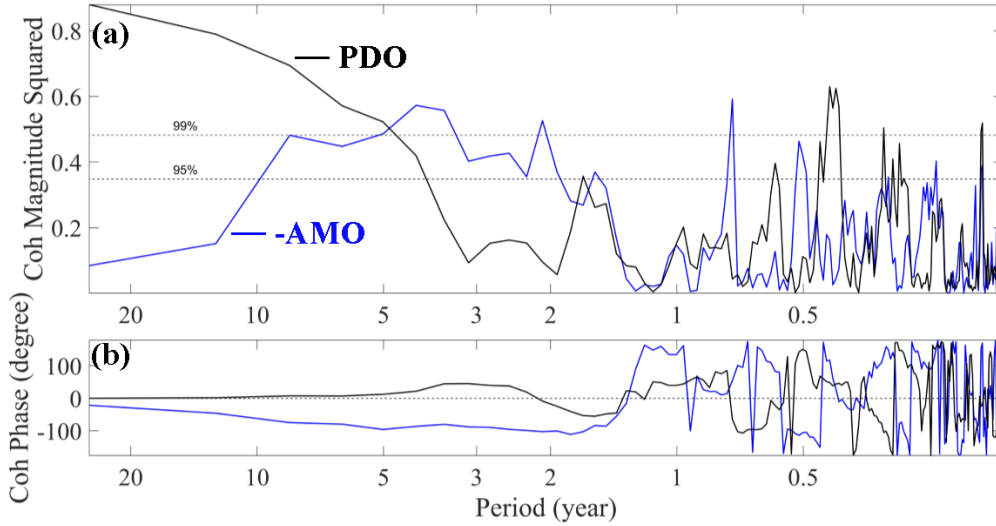
AAO, AO 可能有相關，但是不明顯，因此我們做同調性分析以更詳細的分析其相關性。

聖嬰現象雖然整體看起來與海平面有高度相關，但把兩種聖嬰拆開來與海平面做比較，會發現其實

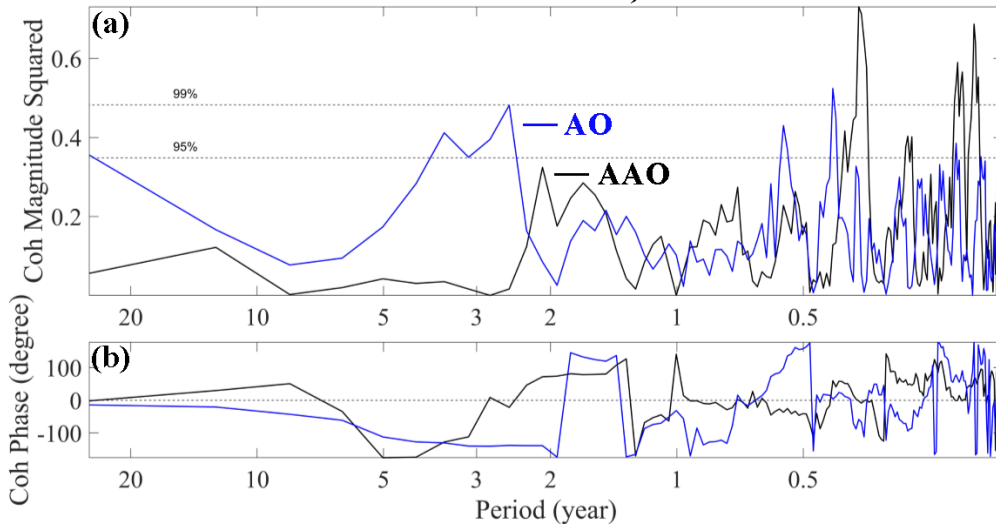
MSL and ENSO



MSL and PDO, -AMO



MSL and AAO, AO



圖十五：海平面境變化與各年現象同調性分析圖

三、海平面淨變化與各年際震盪現象的同調性分析

同調性分析的結果為複數，將此複數平方，作為圖 a 的 y 軸，可以看出兩筆資料在該頻率的相關性。圖中 95% (99%) 表示超過該線，即有 95% (99%) 的信心兩筆數據在該週期相關；圖 b 則是畫出此複數的相位差，可以用來表示兩筆資料間的延遲時間。在圖十八及十九中，相位差為負表示該年際震盪現象較海平面快。

$$\text{(該頻率對應到的) 週期} \times \frac{\text{相位差}}{360^\circ} = \text{延遲 (lag) 的時間}$$

由圖十五可看出，ENSO 和海平面的相關性集中在半年到 10 年的時間尺度；PDO 是 4 年以上；-AMO 則為 2 年到 10 年。且相位差計算出來的時間延遲與互相關分析的結果相同。

聖嬰現象與海平面相關的原因，已經有研究指出，是因為降雨區在陸地或海洋造成的。聖嬰現象較強時，雨降在海上的比例較高，造成整體海水質量增加，進而使衛星量測的平均海平面高度上升；反之，如果降在陸上的比例較高，海水質量下降，平均海平面則下降。也有可能是因為聖嬰現象造成太平洋東岸湧升流減弱，海水溫度上升、密度下降、體積增加，海平面上升。PDO 與 AMO 和海平面相關，推測是海水熱含量變化造成的。

AAO 雖然在互相關分析的圖上（如圖十四），0 的位置有較高的點。但是 r 值不高，不足以由此證明兩者相關。而且 AAO 從同調性分析的圖也可以告訴我們（如圖十五），在長周期的部分，應該是與海平面無太大的相關性。

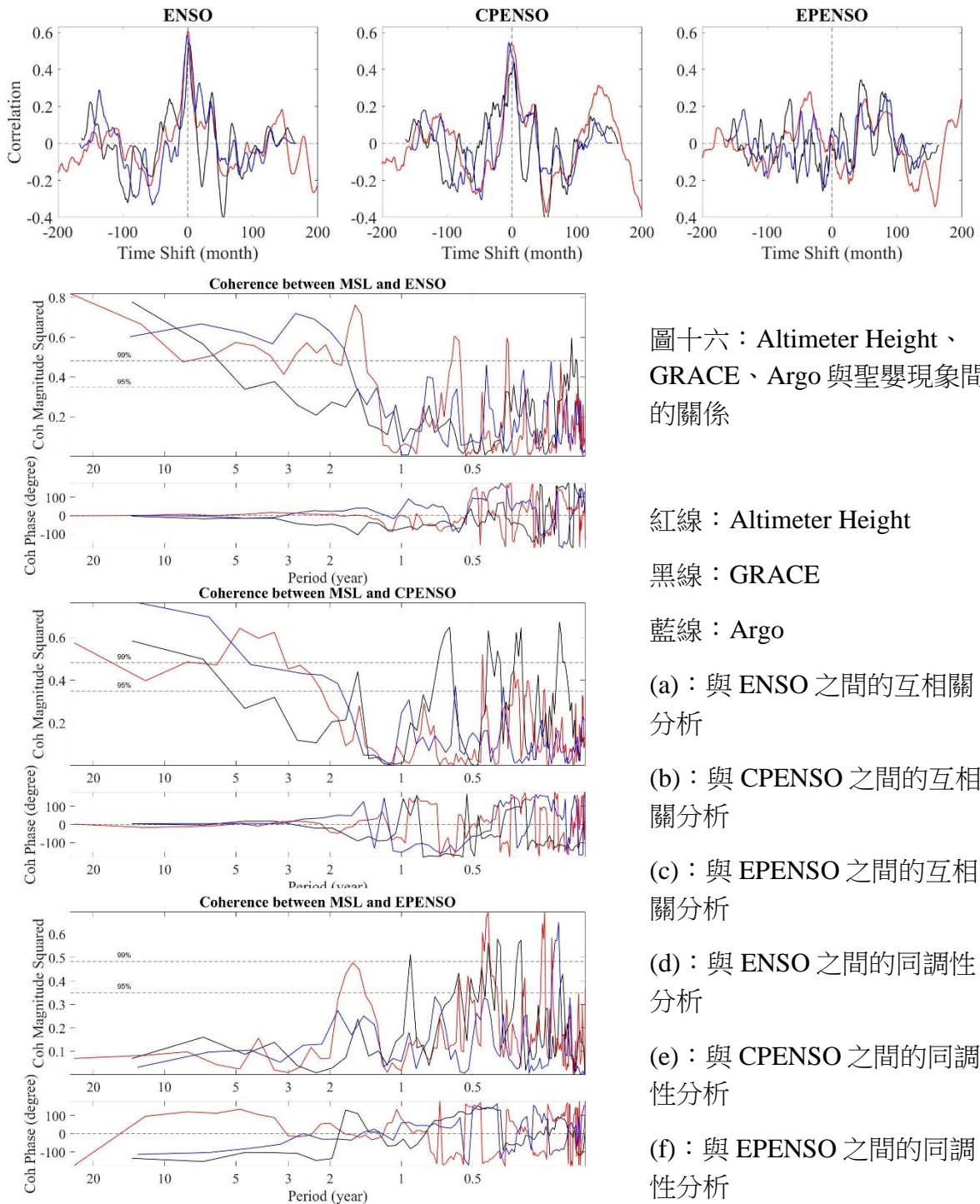
從互相關的圖上可以看出 AO 與海平面相關（如圖十四），而且 AO 比海平面快了 15 個月。在同調性分析的圖，AO 在一年左右與海平面些微相關（如圖十五），相位差的斜率代表 15 個月的相位提前，此也與互相關分析的結果相符。

AAO 與 AO 雖然是差不多的測量方法，造成兩者波動的原因可能也差不多，但一個相關，另一個無關可能也與本實驗數據來源的測量方法有關。南極為陸地，北極是海洋。本實驗數據的全球平均海平面並非真正的全球平均，只有南北緯 66° 之間，無法測量到北極海的變化。因此全球平均海平面與北極震盪有關，可能是因為北極震盪造成當地的海平面高度變化，而目前衛星的觀測資料無法將此變化考慮進去，造成看起來兩者相關的現象。

同調性分析與互相關分析各有優缺點。同調性分析可以看出兩者在該頻率相關，但是無法知道該頻率的相關造成整體數據相關的多少，因為同調性分析時是有經過一般化的。如果不經過一般化，只能看出兩者在該頻率都很強，無法得知兩者實際的相關性。

而互相關分析則相反，雖然可以看出整體的相關性，但無法將各頻率分開，看是怎麼相關。只能從互相關分析來看，如果峰值的範圍較寬，那影響較大的是長周期，反之則是短周期。因此前面提到的，經過旋轉的 ENSO 數據幾乎沒有低頻的頻率，造成相關係數下降，但是可以看出非常明顯的峰值。

四、GRACE（重力衛星）與 Argo（剖面觀測浮標）測得的質量與密度變化造成海洋總體積變化與聖嬰現象間的關係（如圖十六）



圖十六：Altimeter Height、GRACE、Argo 與聖嬰現象間的關係

紅線：Altimeter Height

黑線：GRACE

藍線：Argo

(a)：與 ENSO 之間的互相關分析

(b)：與 CPENSO 之間的互相關分析

(c)：與 EPENSO 之間的互相關分析

(d)：與 ENSO 之間的同調性分析

(e)：與 CPENSO 之間的同調性分析

(f)：與 EPENSO 之間的同調性分析

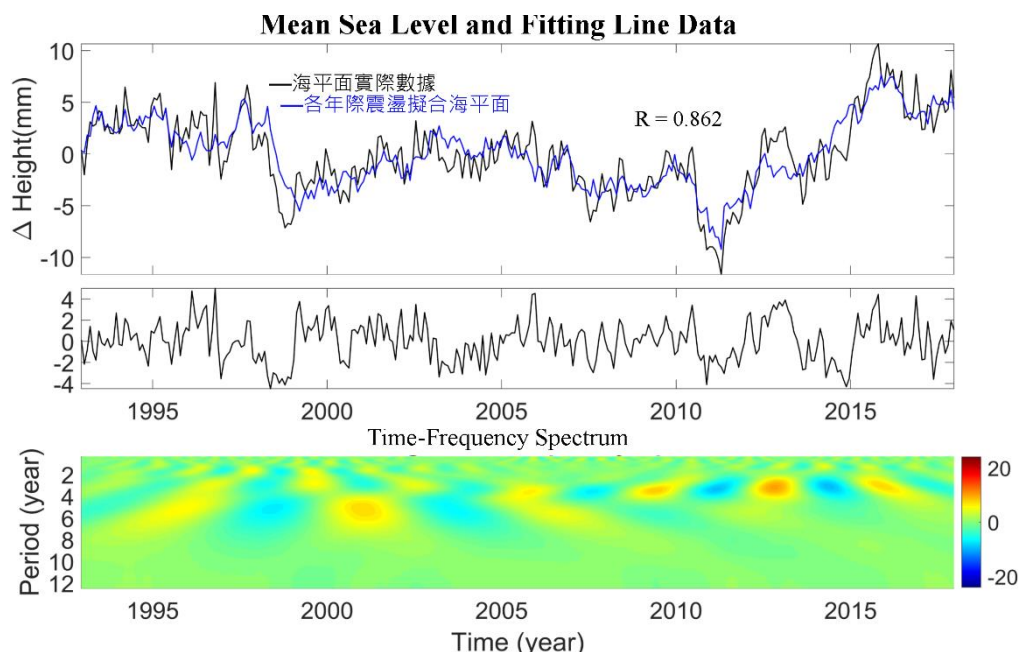
五、利用年際震盪指數擬合海平面

ENSO 與 PDO 之間互相相關（相關係數 0.6），尤其在長週期的相關性也非常高。因此在擬合海平面時，使用 AMO, AO、8 年高通濾波的 ENSO（只有週期在八年以下的 ENSO 數據會被拿來擬合）、八年低通濾波 PDO（只有週期在八年以上的 PDO 數據會被拿來擬合）來進行線性的擬合。ENSO 與 PDO 分別與海平面做相關性時沒有問題，但是在擬合時會對結果造成影響（擬合時要用互相正交的函數）。因此本研究在擬合時，ENSO 只使用 8 年以下的數據，PDO 則是使用 8 年以上。本研究也有嘗試過將濾波的時間切在不同的時間長度（7 年、8 年...10 年），選用 8 年是因為這是擬合出來相關係數最高的。由此結果可以知道，ENSO 與 PDO 對於海平面的影響，在 8 年以下，ENSO 佔了很重要的影響，但在 8 年以上 PDO 較大。

由於中太平洋及東太平洋聖嬰在指數定義的區域有部分重疊，且兩者有中度負相關。因此本實驗使用 ENSO (MEI) 來做擬合。

本實驗分析前已經移除季節性及長期趨勢，因此在擬合及扣年際震盪的影響後，剩下的應該是地下水、水庫蓄水等造成的變化以及噪音 (noise)。

擬合線與實際海平面變化相關係數為 0.86，表示這些年紀震盪可以解釋 74% 的海平面年紀變化的變異量。由圖十八可知，擬合海平面與實際海平面在一年半以上的時間尺度，都有高於 99% 的信心相關。



圖十七：海平面與擬合線以及其小波分析圖

肆、 結論與應用

一、海平面的淨變化

全球平均海平面每年上升趨勢約為 3.1 毫米，是全球暖化海水溫度上升改變海水密度以及陸冰融化增加海水體積造成的。每年間會有一年及半年的季節性變化，變化幅度約為 20 毫米。海平面變化的原因有很多，本研究專注在年際變化上。

二、海平面與各年際震盪指數間的關係：

- (一) 在 8 年以內的時間尺度下，對海平面最大的影響來自 ENSO。
- (二) 聖嬰現象可有兩種不同的型態 (Kao, H., & Yu, J, 2009)，在 21 世紀以前，大部分的聖嬰現象為東太平洋聖嬰 (EP)，21 世紀之後中太平洋聖嬰 (CP) 出現的頻率較高。本研究指出 CP 對海平面的影響較 EP 來得顯著。
- (三) CP 對海平面影響的主因，與混合層溫度變化（影響密度、海水體積變化）以及降雨的海陸分布的變化（影響質量）兩者。(Meysignac, B, 2012) (Yu, J.-Y., 2018)
- (四) EP 雖然與海水總體積變化相關性較低，但其中與密度變化可能有若相關。
- (五) 在 8 年以上，更長的時間尺度下，PDO 是造成海平面變化的主因。PDO 為正值時海平面上升，應該是混和層溫度變化造成。
- (六) AMO 與海平面有明顯負相關；AMO 領先 8 個月，可能與 AMO 在太平洋的遙相關有關。
- (七) 雖然研究資料不包含北極海，但結果指出海平面與 AO 有弱相關，意味著北極海的年際溫鹽變化，對於全球海平面有遙相關的影響。(Armitage, T. W., 2018)
- (八) AAO 對於海平面的影響不大，可能因為南極以陸地為主。

三、擬合海平面

本研究將與海平面相關的 5 個指數 (ENSO、PDO、AMO、AO、AAO) 以最小平方擬合海平面年際變化（去除長期趨勢、季節性變化）。其中 ENSO 與 PDO 分別使用 8 年的高通及低通濾波（ENSO 只採用 8 年週期以下的數據，PDO 只用 8 年以上的），得到擬合的海平面與實際海平面十分相近，之間的相關係數為 0.86。聖嬰現象佔擬合海平面的比例最多。如圖十七、十八。

透過本研究能更了解與全球平均海平面相關的現象，未來如果有其他研究要研究海平面上升趨勢及其對人類影響，能運用本研究結果，先將各年際震盪造成的影響扣除，以利分析與討論。

如果有更長時間的資料（例如海洋的再分析資料），應該能找出 AMO 的八個月延遲的詳細原因。也可以嘗試氣候模式研究的未來暖化模擬結果，擬合未來的年際震盪與海平面間的關係，去探討與現在的結果是否相符，並討論此結果。或著是透過 GRACE 所測得的空間分布分析，進一步探討影響的程度及過程。

伍、 參考文獻

- Armitage, T. W., Bacon, S., & Kwok, R. (2018). Arctic Sea Level and Surface Circulation Response to the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 45(13), 6576-6584. doi:10.1029/2018gl078386
- Bloomfield, P. (1976). *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*. New York, NY: John-Wiley.
- Boeing, C., Willis, J. K., Landerer, F. W., Nerem, R. S., & Fasullo, J. (2012). The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters*, 39(19). doi:10.1029/2012gl05305
- Chao, B. F. (1988). Correlation of interannual length-of-day variation with El Niño / Southern Oscillation, 1972-1986. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B7), 7709-7715.
- Benoit Meyssignac, Anny Cazenave.(2012). *Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability*.
- Cazenave, A., D. Chambers, P. Cipollini, L. Fu, J. W. Hurrell, M. A. Merrifield, R. S. Nerem, H. P. Plag, C. K. Shum, and J. K. Willis. "The Challenge for Measuring Sea Level Rise and Regional and Global Trends." In *OCEANOBS2009*. Venice: ESA, 2010.
- Douglas, B. C., Kearney, M. S., & Leatherman, S. P. (2001). *Sea level rise: History and consequences*. San Diego: Academic Press.
- Greicius, T. (2016, March 15). Jason-3 Begins Mapping Oceans, Sees Ongoing El Niño. Retrieved January 15, 2018, from <https://www.nasa.gov/feature/jpl/jason-3-begins-mapping-oceans-sees-ongoing-el-ni-o>
- Kao, H., & Yu, J. (2009). Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. *Journal of Climate*, 22(3), 615-632. doi:10.1175/2008jcli2309.1
- Meyssignac, B., & Cazenave, A. (2012). *Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability*. *Journal of Geodynamics*, 58, 96-109. doi:10.1016/j.jog.2012.03.005 .
- Nicholls, R. J., and A. Cazenave. "Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones." *Science* 328, no. 5985 (2010): 1517-1520.
- Piecuch, C. G. and Quinn, K. J.: El Niño, La Niña, and the global sea level budget, *Ocean Sci.*, 12, 1165–1177, <https://doi.org/10.5194/os-12-1165-2016>, 2016.
- Rasmusson, E.G., and T.H. Carpenter, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354-384.
- Wu, C.-R.*, Y.-F. Lin, and B. Qiu (2019): Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Pacific North Equatorial Current bifurcation. *Scientific Reports*, 9, 2162, doi:10.1038/s41598-019-38479-w. [SCI; IF:4.122]
- Yu, J.-Y., & Fang, S.-W. (2018). The distinct contributions of the seasonal footprinting and charged-discharged mechanisms to ENSO complexity. *Geophysical Research Letters*, 45. <https://doi.org/10.1029/2018GL077664>

【評語】 180009

作品局具創意，利用小波分析與 EOF，FFT 等數學分析工具探討全球暖化引起之變化趨勢之外，聖嬰現象，太平洋十年際週期震盪等對海平面高度上升均有顯著之影響。作者利用最小平方法擬合出之海平面高度變化和實際變化高達 0.86 以上之相關性，相當好的研究成果。