

# 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

**第一名**

051906

**全球平均海平面的年際變化 (1993-2017)**

學校名稱：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者： 高二 廖廷涓	指導老師： 陳忠城
---------------	--------------

關鍵詞：海平面、年際震盪、相關性

## 得獎感言

首先，先感謝科教館辦理此次活動，讓我可以看到很多很厲害的作品，與對科學有興趣有熱忱的同學交流、共同成長。

在這一路上非常感謝很多人的幫助，沒有他們我無法完成這次的研究。尤其是願意指導一開始什麼都不懂的我 趙丰老師； 忠城老師督促我，協助我完成這份報告與比賽；也感謝臺大施勝安學長、鍾綺樺學姊很有耐心的教我、與我討論。最後，我還要謝謝給我幫助與支持的家人及朋友。

科學研究跟讀書不同，過程中充滿了各式各樣的驚喜。

就我的研究來說，一開始只是想透過剛學會的分析方法，看看海平面資料。沒想過這可以拿來當作科展題目、甚至拿到任何獎項。但每次結果跑出來，都覺得地球給我很大的驚喜：竟然有這麼有趣的現象。為了解釋實驗結果，查詢了很多資料、閱讀如天書般難懂的 paper、嘗試不同的方法，進而得到更有趣的結果，再繼續查資料、與老師討論…我的科展就在重複著這樣的過程中完成了。而這樣尋找答案的過程，是科學研究中我最享受的部分。

有人說做科展是辛苦的，尤其是在想不出解釋、文章看不懂的時候，真的令人很想翻桌。

但我從沒懷疑過，為什麼自己要做這些。因為一時的挫折，並不會改變我對科學的熱情，求知的渴望以及過程中的「好玩」。只要想想自己做這件事到初衷，就能撐過去，繼續努力下去。

希望未來的學弟妹也能喜歡科學，我們生活的世界充滿了各種未知與好玩，等待大家一起來探索。

## 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 在半年到十年的尺度下，有高度相關，相關的原因可能與降雨區的變化有關。(ii) 與 PDO、AMO 的相關性集中在二年到十年，AMO 相關性最高是在其比海平面早發生 8 個月的時間。海水的熱含量變化可能是主因。(iii) 與 AO 有弱相關，相關性最高是在 AO 比海平面早發生 15 個月的時間，推估可能是衛星測量資料空間範圍沒涵蓋北極海造成。(vi) 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方法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。

## 壹、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。

## 貳、研究目的

- 一、找出逐年海平面的淨變化（扣除平均、長期趨勢、季節性變化後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、使用跟海平面高相關的氣候變因，擬合出海平面的變化

## 參、研究設備及器材

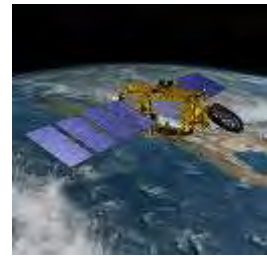
- 一、分析、繪圖用具
  - (一) Matlab 程式
  - (二) Excel 程式

## 二、數據

### (一) 海平面

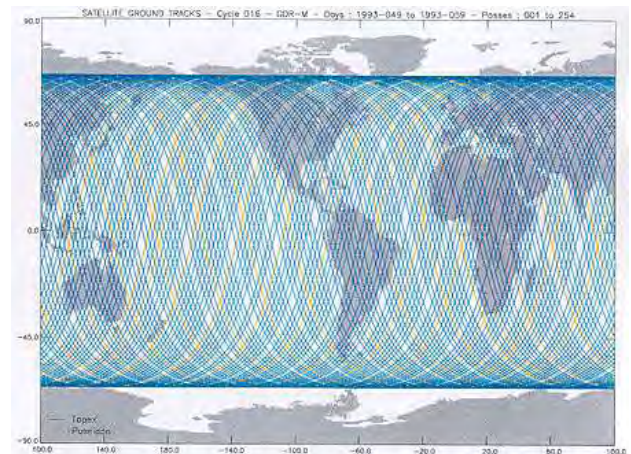
本實驗使用的數據是由 TOPEX/Poseidon, Jason 1—3 四顆衛星利用雷達測高儀所測量到海平面高度，如右圖一。衛星測量到的海平面，指的是相對於地心（利用衛星與地球間重力算出來的地球重心）的高度。也就是利用軌道高度減去雷達（經校正後）測到的衛星與海面間的距離。將此結果扣除平均海平面，以及一些已知的時變效應，例如潮汐。為了使每個點所占的面積一樣，各地的點透過加權平均，高緯度的加權低，低緯度加權高，得到全球平均海平面。此衛星的軌道每 10 天重覆到相同的地理位置，因此從科羅拉多大學網站得到的全球平均海平面也就是 10 天一筆的數據，如圖二。

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。



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/>)



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。

## (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)。

### 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

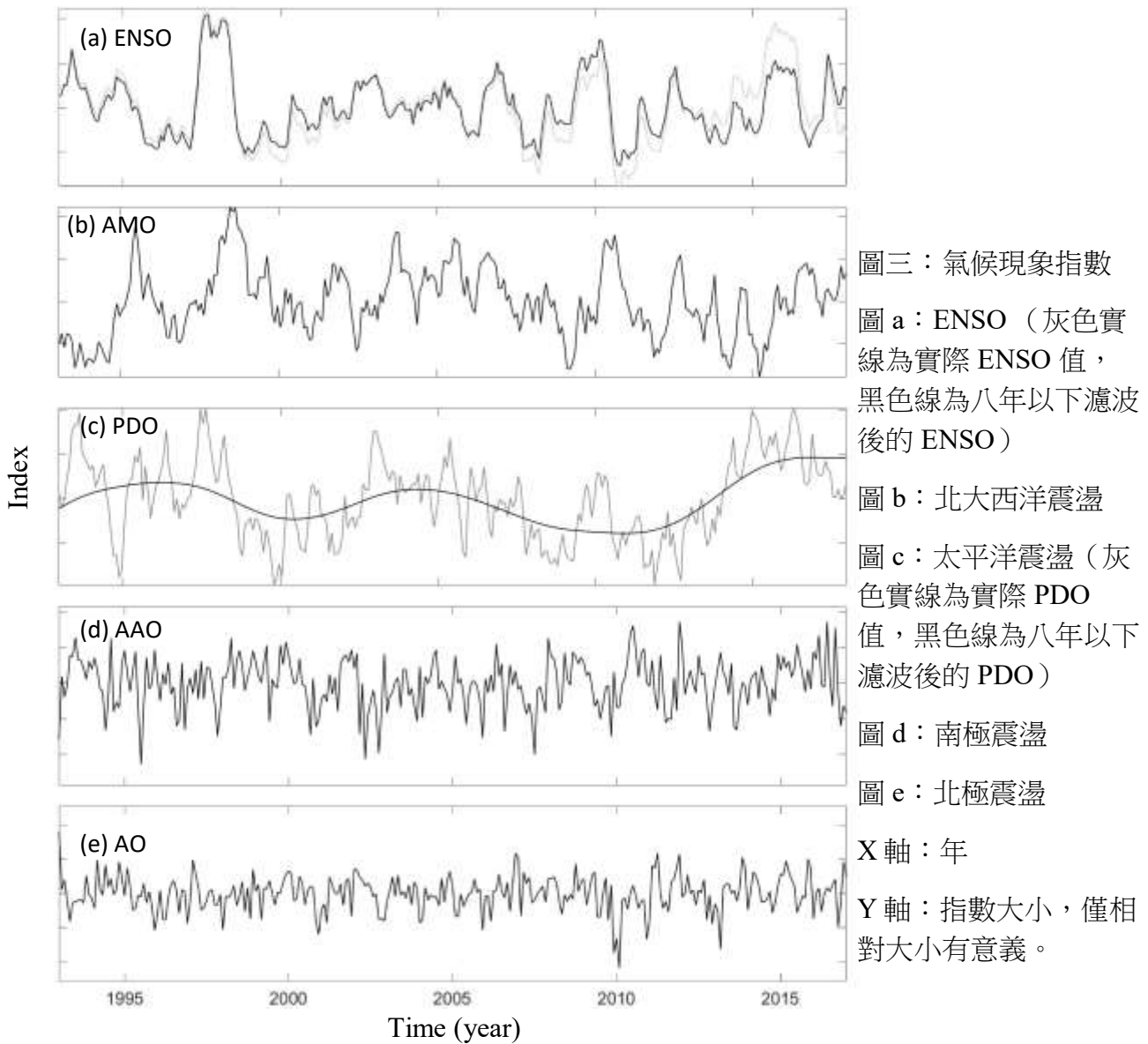
太平洋十年振盪 PDO (Pacific Decadal Oscillation)，是指發生在太平洋 20°N 的海水表面溫度的異常。海水表面溫度扣除氣候年度變化以及全球平均異常後，再將海水表面溫度做經驗正交函數分解 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分析，然後將最主要的一項作為 PDO 指數，其中將熱帶太平洋的中部及東部海水溫度上升的 PDO 指數定義為正值，如圖三 (c)。

### 4. AAO

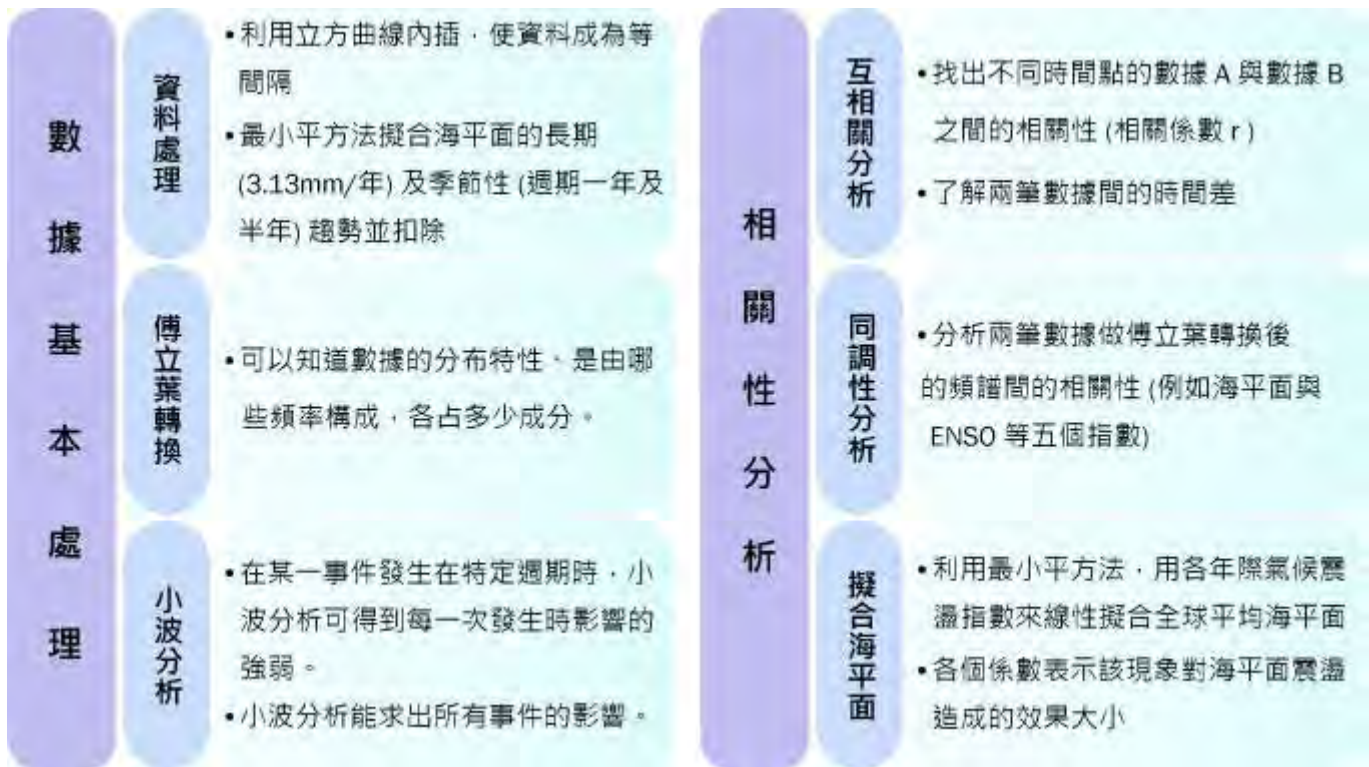
南極震盪 AAO (Antarctic oscillation)，又稱 SAM (Southern Annular Mode)，是指南極附近的西風帶或低壓帶向南北移動所產生的震盪行為。將「每個月 20°S 以南的 700hPa 平均高度」扣除季節性訊號，做經驗正交函數分解後取最主要的該項數值定為 AAO 指數，如圖三 (d)。

## 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)。



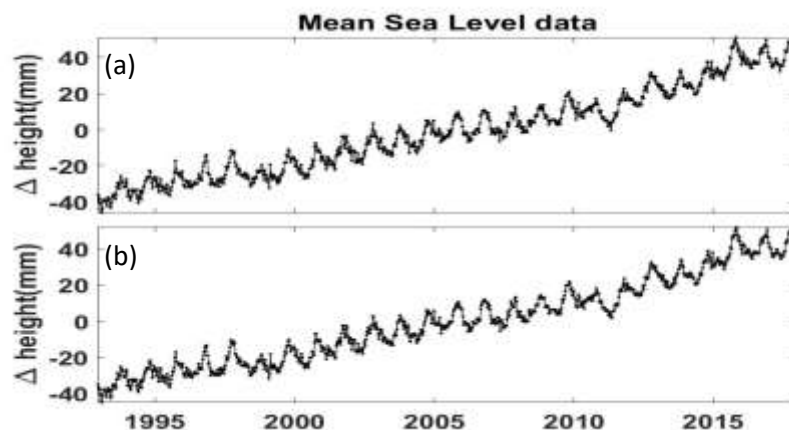
## 肆、研究過程或方法



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。



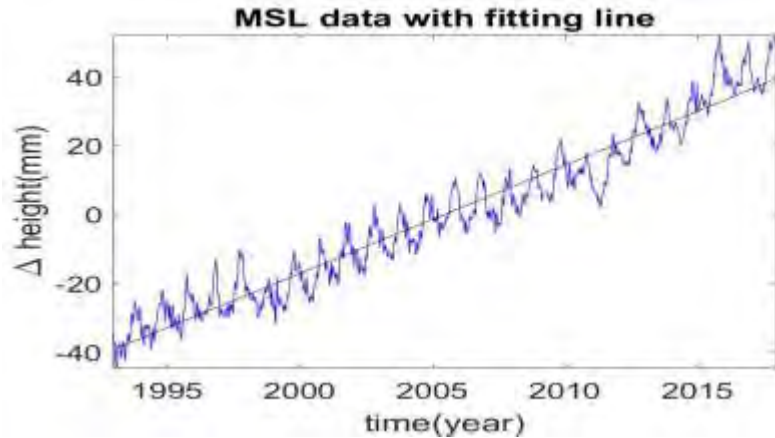
圖五：海平面高度變化對時間做圖

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

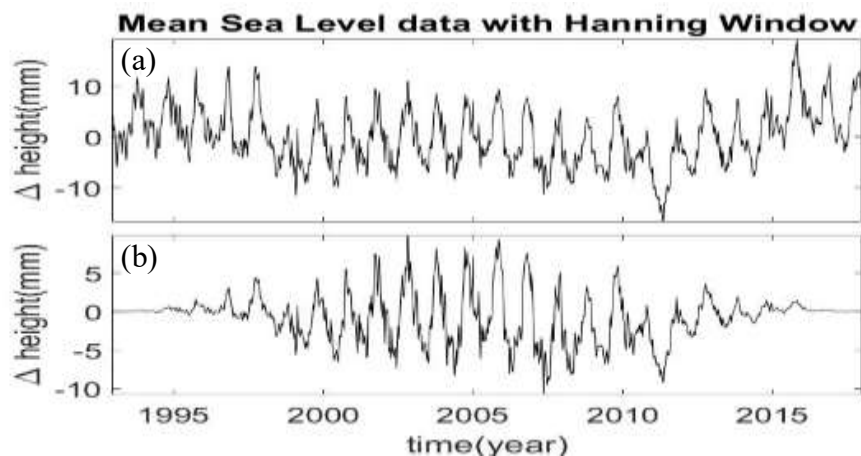
傅立葉轉換可以知道資料的特性，能看出該筆資料是藍噪音（頻譜上高頻的強度相較於其他頻率高）、紅噪音（頻譜上低頻的強度相較於其他頻率高）或白噪音（頻譜上每個頻率的強度都差不多）；資料是由哪些頻率構成的，各占多少成分。

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。

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

$w(x)$ ：漢寧窗； $x$ ：變數； $L$ ：資料總長度 (總共  $h$  有幾個)





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）

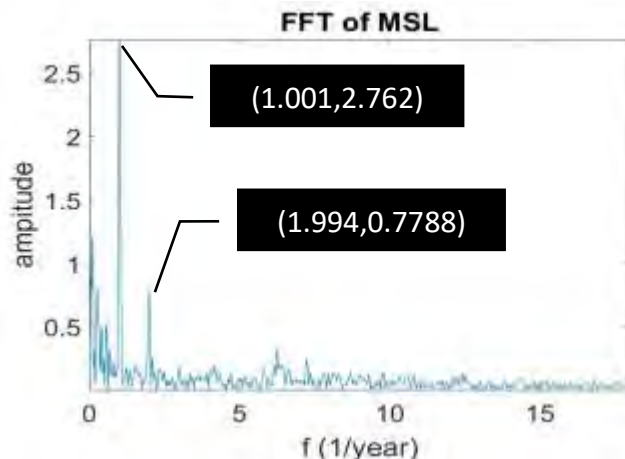
b：加上漢寧窗的海平面資料

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：

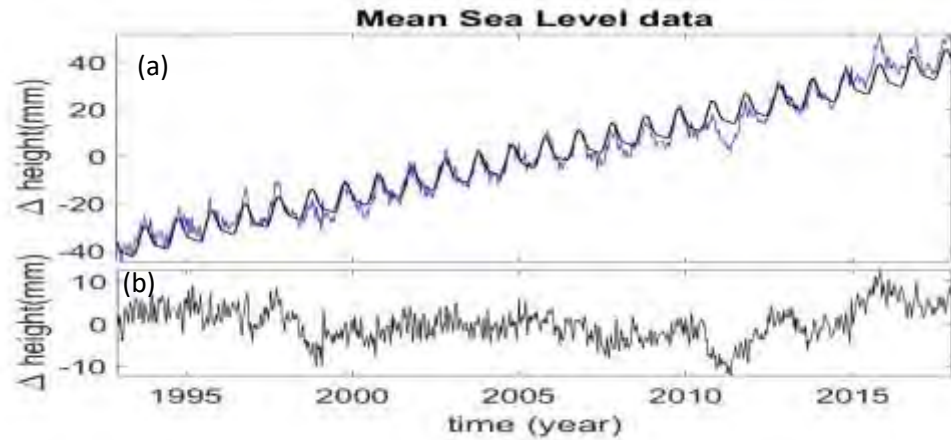
$$\sum_{n=0}^{L-1} f(n)e^{-i2\pi\frac{kn}{L}}, \text{ where } k \in \{0,1,2, \dots, L-1\}$$

#### 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

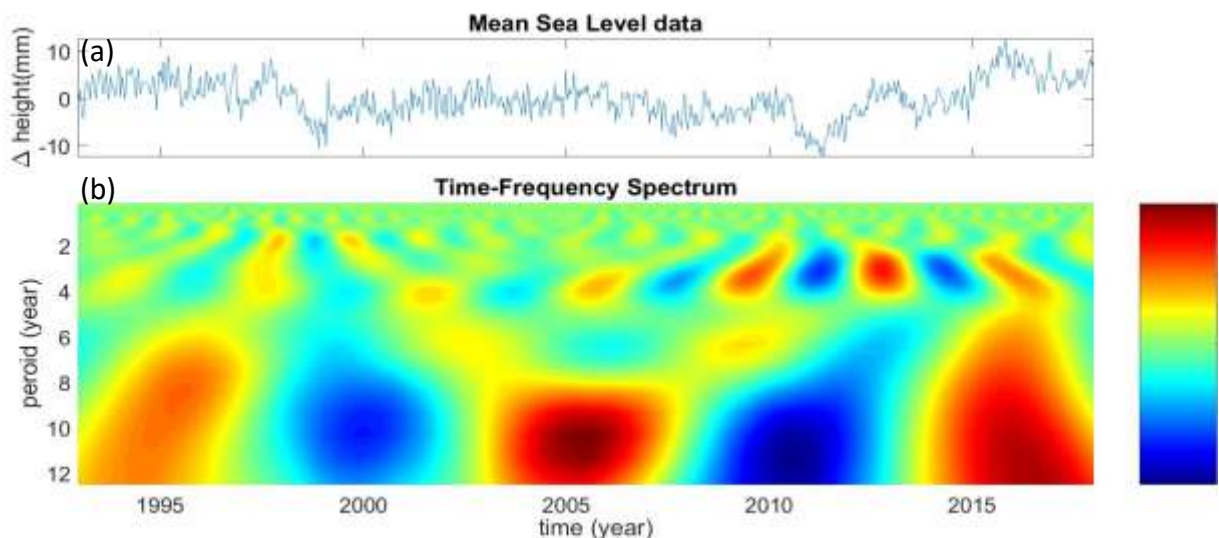


圖九：海平面高度與季節性變化

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方法擬合出來的線；b 黑線：a 圖中藍線扣除黑線

## 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。

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

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

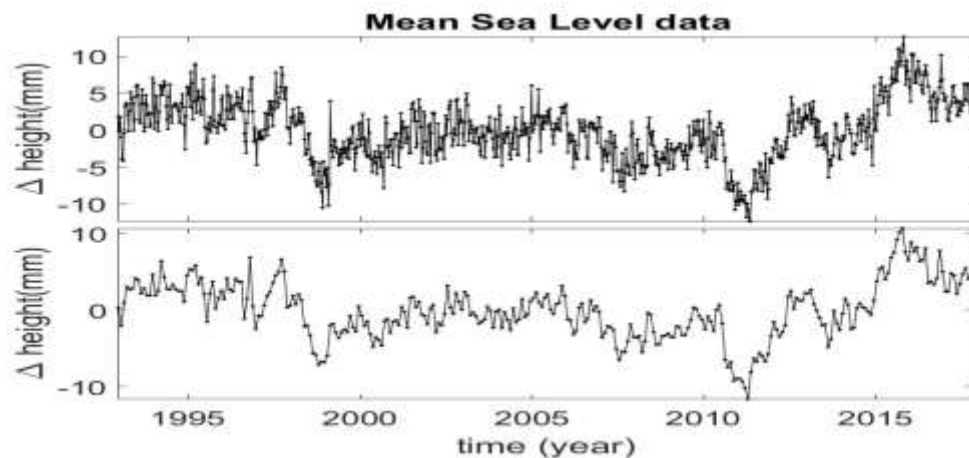
$f(t)$ ：海平面高度的序列函數； $a$ ：window 位置； $b$ ：window 寬度

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

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



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

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 (= 10×2) 天到 60 (= 30×2) 天）資料以低頻的訊號方式出現（會有混疊的現象）。

## 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  $A_{1 \sim n-1}$  與  $B_{2 \sim n}$  之間的相關係數。

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

$\tau$  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，還需要看自由度（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。

$$P_c(r, \nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma[(\nu+1)/2]}{\Gamma(\nu/2)} \int_{|r|}^1 (1-x^2)^{(\nu-2)/2} dx$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{z-1} e^{-x} dx \quad , \text{where } \text{Re}(z) > 0$$

$\nu$ ：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。

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

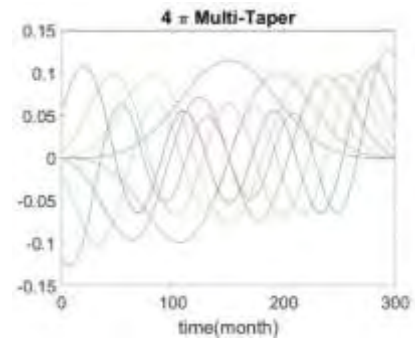
$$A(\omega) = FT[A(t)] ; B(\omega) = FT[B(t)]$$

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  $4\pi$ 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。

和互相關分析一樣，同調性分析的值也跟自由度有關。

$$\Gamma^2(\alpha) = 1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{N-1}}$$

$\alpha$ ：信心水準； $N$ ：使用的 Multi-Taper 數目



圖十二：Multi-Taper

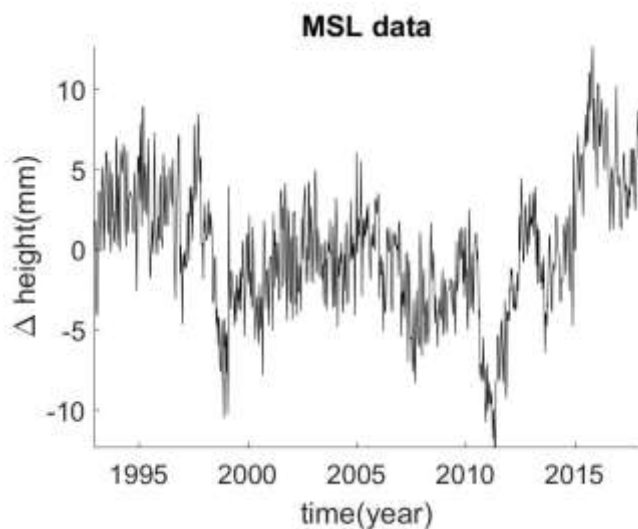
## 伍、研究結果與討論

### 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  $\pm 5$  毫米左右的不規則變化。

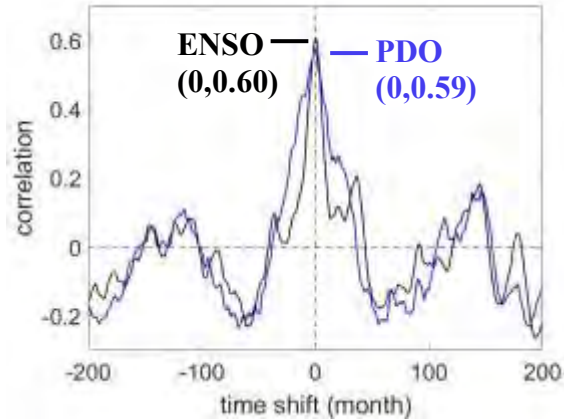
本研究使用最小平方方法擬合斜直線的方式扣除長期趨勢。但這是人為主觀的扣除，並非完全客觀的方法。本實驗有嘗試過使用奇異譜分析 SSA (Singular Spectrum Analysis) 的 mode 1 來扣除長期趨勢。奇異譜分析是將得到的時間序列切週期的整數倍，構造出軌跡矩陣，透過分析軌跡矩陣，將資料分解成很多個相互正交的序列。但是對於週期的整數倍是幾倍，這部份則是因數據而異，沒有統一的用法。

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。

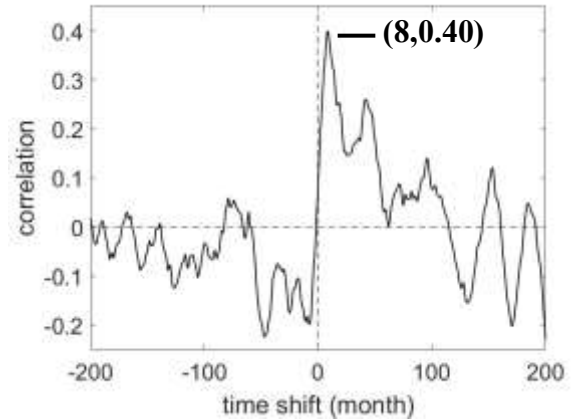


圖十三：海平面的淨變化

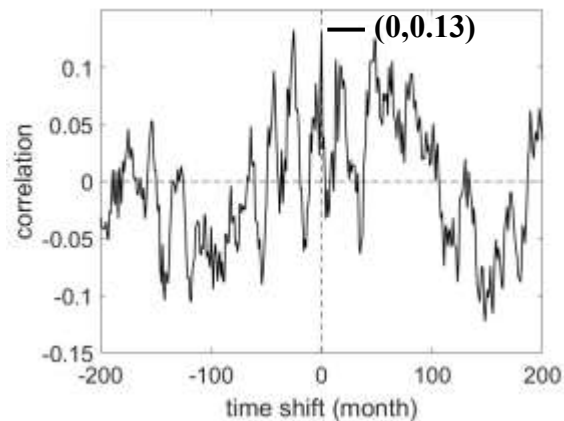
## 二、海平面淨變化與各年際震盪現象的互相關分析



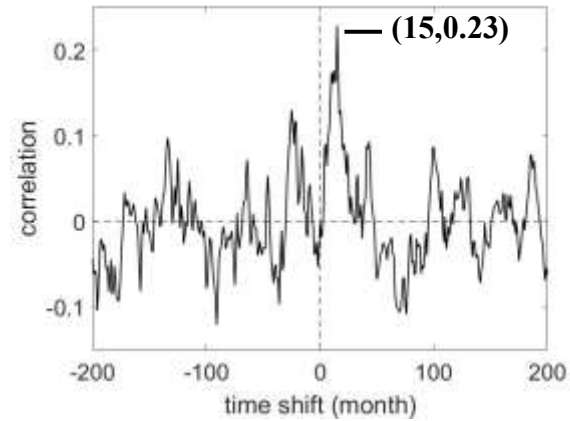
圖十四：海平面高度與 ENSO, PDO 的互相關分析



圖十五：海平面高度與 -AMO 的互相關分析



圖十六：海平面高度與 AAO 的互相關分析



圖十七：海平面高度與 AO 的互相關分析

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，-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。

由圖十四到十七可以得知，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。

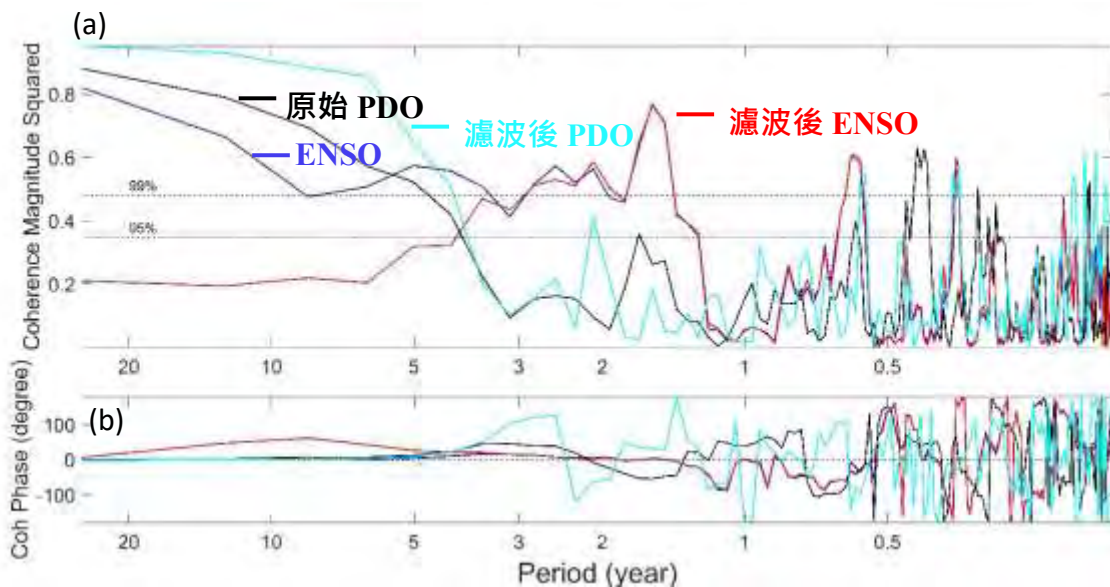
### 三、海平面淨變化與各年際震盪現象的同調性分析

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。

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

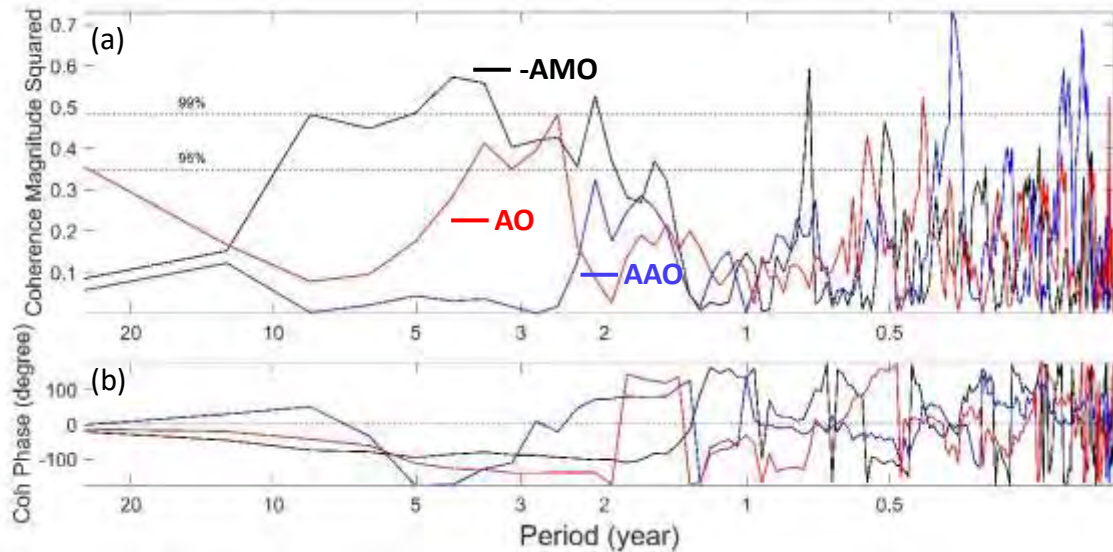
由圖十八可看出，ENSO 和海平面的相關性集中在半年到 10 年的時間尺度；PDO 是 4 年以上；-AMO 則為 2 年到 10 年。且相位差計算出來的時間延遲與互相關分析的結果相同。

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



圖十八：海平面高度與 ENSO, PDO 的同調性分析

圖 a：海平面高度與 ENSO, PDO 的同調性分析強度；圖 b：海平面高度與 ENSO, PDO 的同調性分析相位差



圖十九：海平面高度與 -AMO, AAO, AO 的同調性分析

圖 a：海平面高度與 -AMO, AAO, AO 的同調性分析強度；圖 b：海平面高度與 ENSO, PDO, -AMO 的同調性分析相位差

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（如圖十九），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（如圖十九），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（如圖十七），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（如圖十九），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。

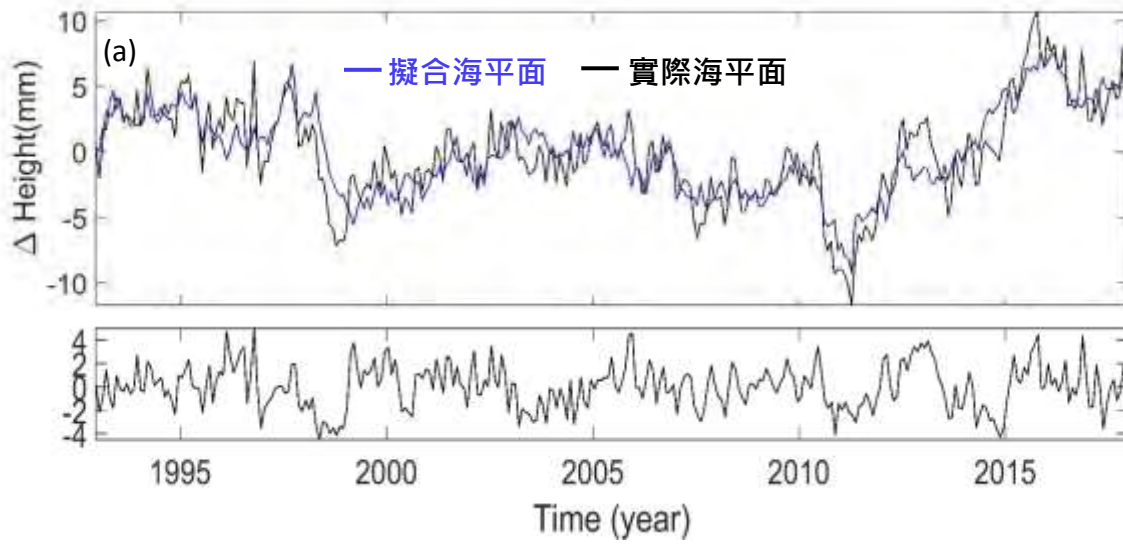
AAO 與 AO 雖然是差不多的測量方法，造成兩者波動的原因可能也差不多，但一個相關，另一個無關可能也與本實驗數據來源的測量方法有關。南極為陸地，北極是海洋。本實驗數據的全球平均海平面並非真正的全球平均，只有南北緯  $66^\circ$  之間，無法測量到北極海的變化。因此全球平均海平面與北極震盪有關，可能是因為北極震盪造成當地的海平面高度變化，而目前衛星的觀測資料無法將此變化考慮進去，造成看起來兩者相關的現象。

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，只能看出兩者在這頻率都很強，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。

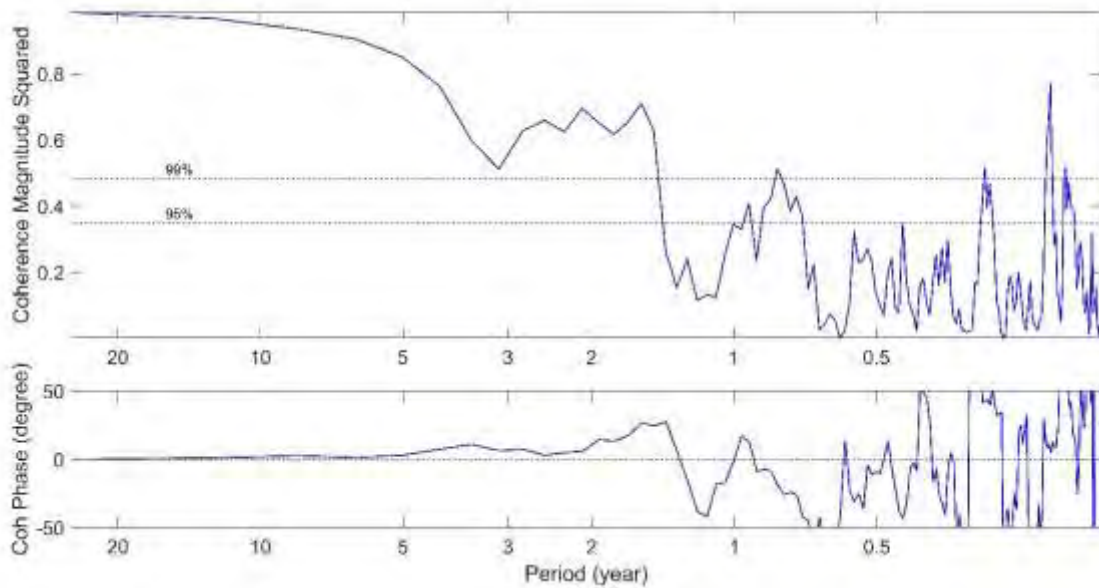
#### 四、利用年際震盪指數擬合海平面

由上述結果可知，與海平面相關的年際氣候震盪現象為：ENSO, PDO, AMO, AO。但是 ENSO 與 PDO 之間又互相相關（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）、八年底通濾波 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。

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% 的海平面年變化的變異量。由圖二十一可知，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。



圖二十：海平面高度與年際氣候震盪擬合海平面  
 a：實際海平面高度與年際氣候震盪擬合海平面；b：圖 a 中兩者的差。



圖二十一：海平面高度與年際氣候震盪擬合海平面的同調性分析

## 陸、結論

### 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) 海平面與 ENSO 有很強的高度相關，集中在半年到 10 年的時間尺度，沒有時間延遲。其原因源自降雨在海陸分布隨聖嬰現象的差異。
- (二) 海平面與 PDO、AMO 的相關性分別集中在 4 年到 10 年，以及 2 年到 10 年。PDO 沒有時間延遲，AMO 提前 8 個月（負相關），可能原因為海水熱含量變化造成。
- (三) 海平面與 AO 在一年左右有弱相關，AO 提前 15 個月。估計是源自於衛星測量資料空間範圍在南北緯 66 度之間，沒有涵蓋北極海（因此屬人為因素）。
- (四) 海平面與 AAO 似乎有弱相關，但是無法確定。
- (五) 未來可以嘗試與 GRACE 衛星的重力資料作分析探討，造成海平面的變化的原因（密度變化或質量變化）分開。也能分區域討論各地區的海平面變化與氣候影響。

### 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) 以最小平方法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。如圖二十、圖二十一。

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。

未來本研究會希望透過 GRACE 與 Argo 的資料，將海平面變化分為質量分布改變以及溫度造成的密度變化，分析各個年際震盪指數究竟是怎麼影響海平面變化的。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。

## 柒、參考資料

Bloomfield, P. (1976). *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*. New York, NY: John-Wiley.

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*.

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>

Nicholls, R. J., and A. Cazenave. "Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones." *Science* 328, no. 5985 (2010): 1517-1520.

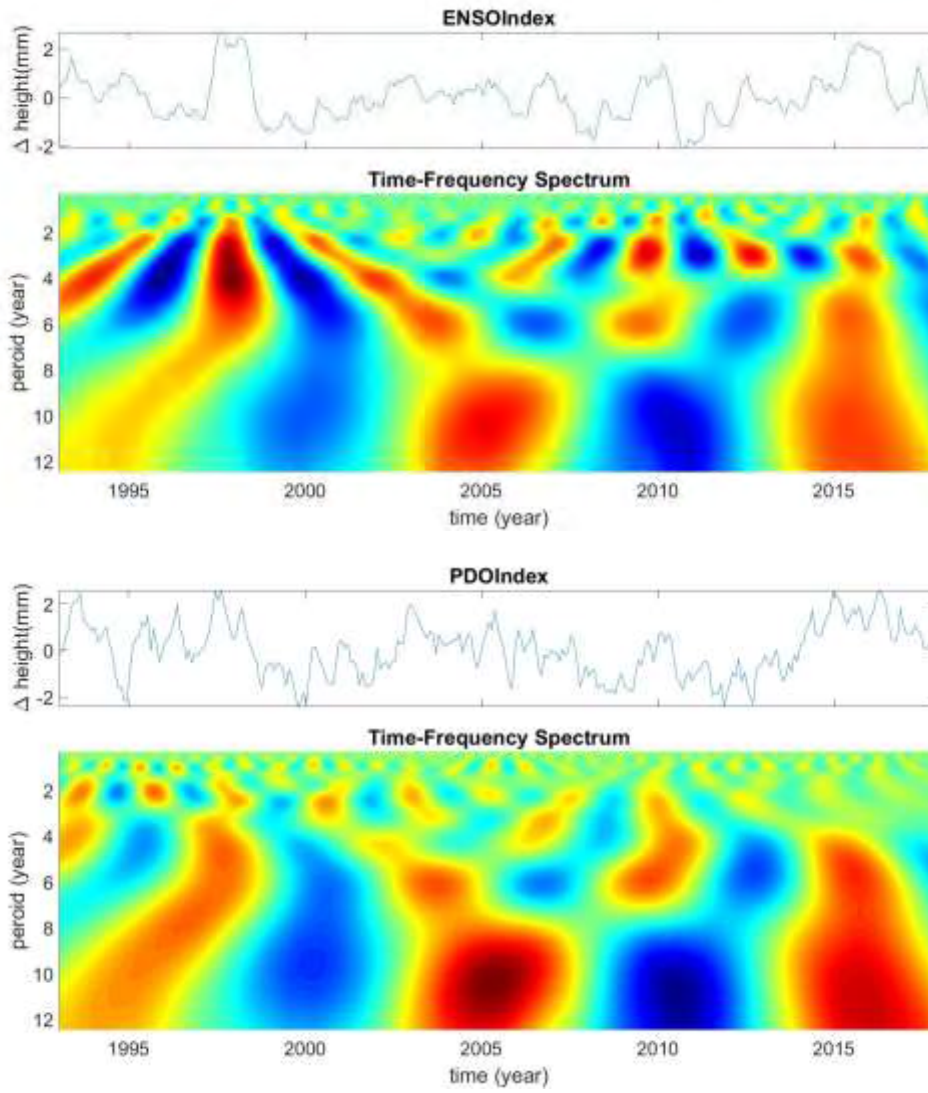
Cazenave, A., D. Chambers, P. Cipollini, L. Fu, J. W. Hurrell, M. A. Merrifield, R. S. Nerem, H. P. Plag, C. K. Shum, and J. K. Willis. "The Challenge for Measuring Sea Level Rise and Regional and Global Trends." In *OCEANOBS2009*. Venice: ESA, 2010.

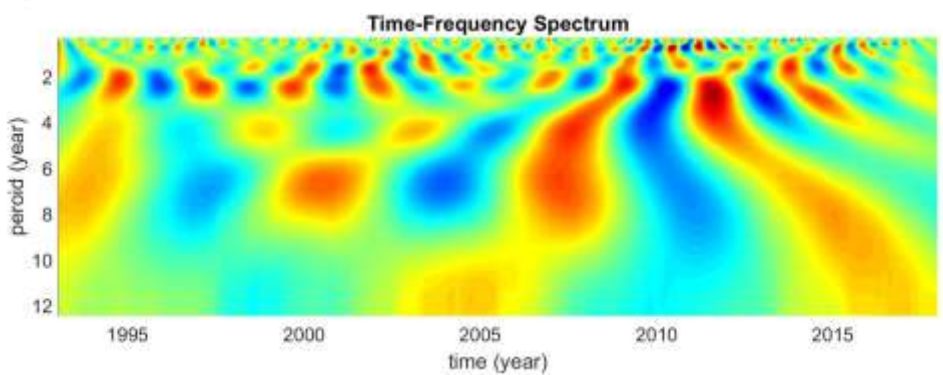
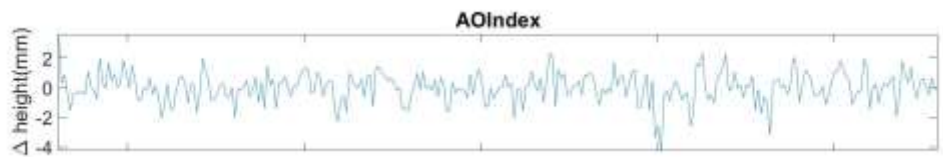
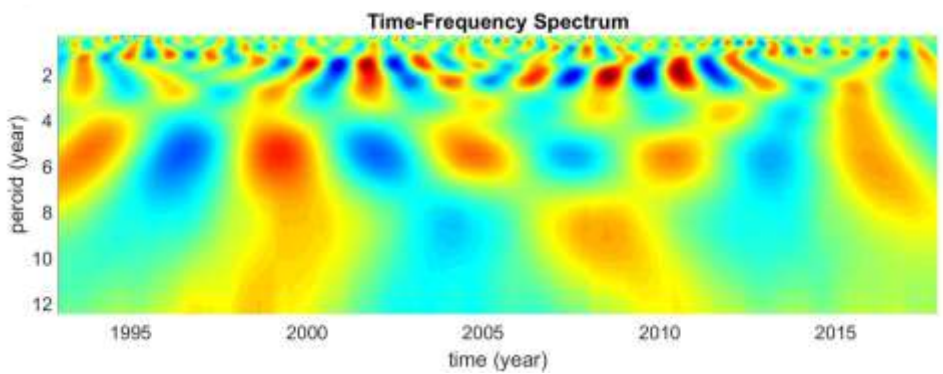
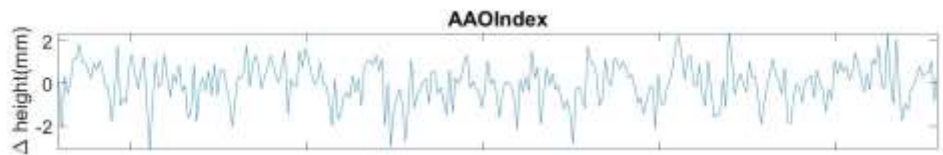
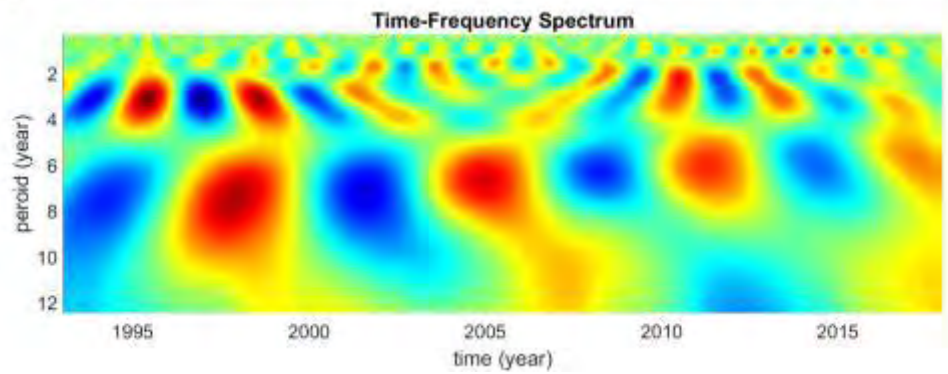
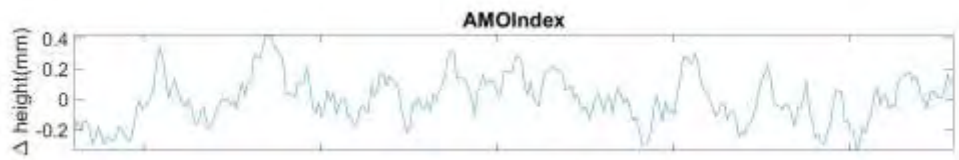
Rasmusson, E.G., and T.H. Carpenter, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354-384.



# 附錄

各年際震盪指數的小波分析





各年際震盪指數間的相關係數

	ENSO	PDO	AMO	AAO	AO
ENSO		*0.604	0.026	-0.052	-0.084
PDO	*0.604		-0.041	0.006	-0.149
AMO	0.026	-0.041		0.071	-0.152
AAO	-0.052	0.006	0.071		0.101
AO	-0.084	-0.149	-0.152	0.101	

上表中 \* 表示高於 99% 信心相關。

## 【評語】 051906

該作品針對全球海平面年際變化提出構想，使用先進數學工具進行分析，題目有趣，具回答「大故事」主題格局。作品由學生親力親為，值得嘉許。回答問題思慮清楚，頗有大將之風。以高中生而言，資料收集縝密，分析方法明確，並作出確切結論，利用國際共通資料做實驗，也得到想要的答案，資料收集能力與分析方法值得稱許。



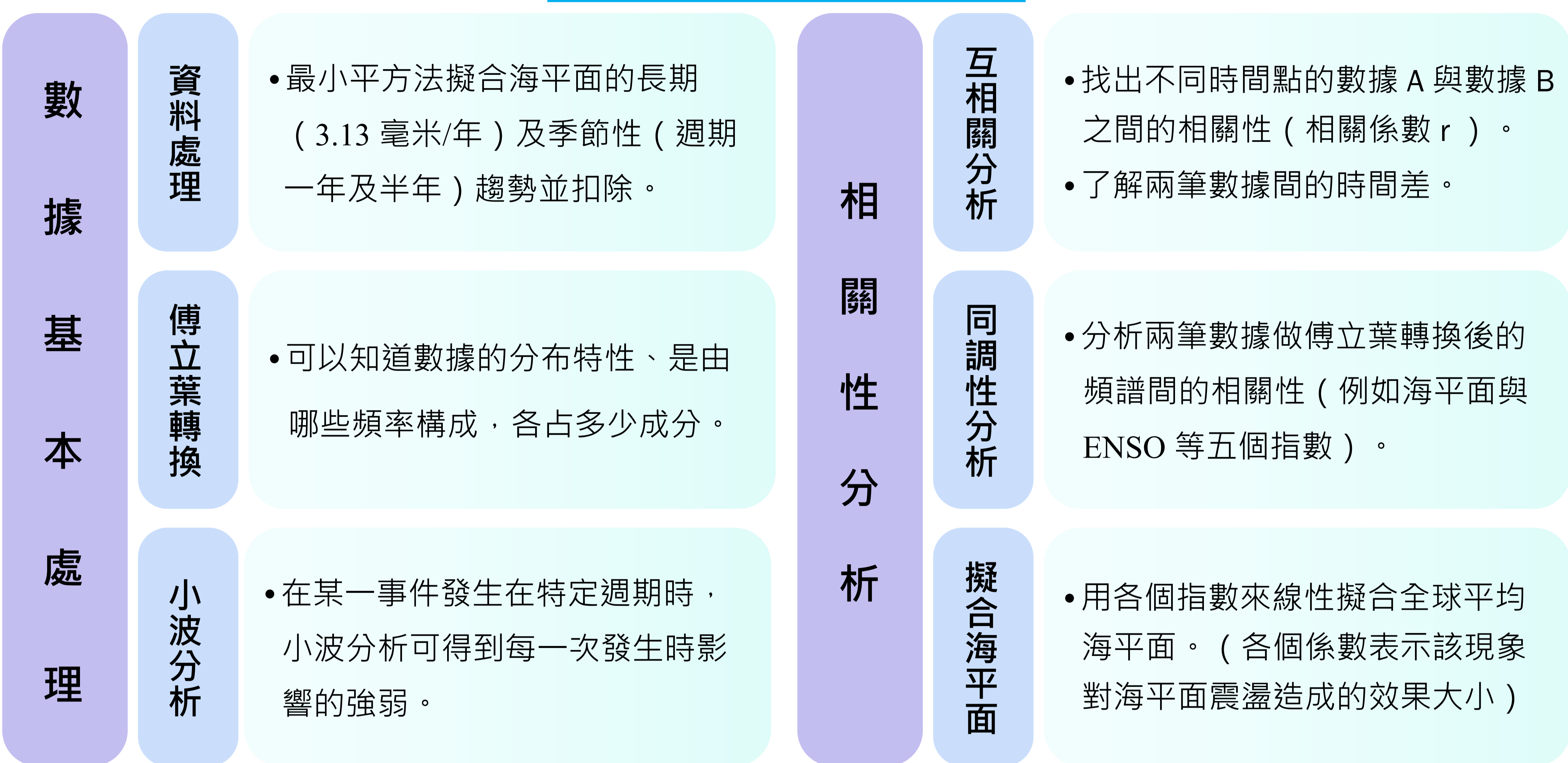
# 摘要

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，AMO 相關性最高是在其比海平面早發生 8 個月的時間。海水的熱含量變化可能是主因。(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。

## 研究動機與目的

在 2011 年時，有報導說是海平面開始下降，但這其實是 ENSO 的影響 (Boening, 2012)。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。具體來說，我想找出逐年海平面的淨變化（扣除平均、趨勢、季節性變化後的海平面），並且比較海平面淨變化與不同時間尺度氣候變因（尤其是年際變化）間的關係，其中包括海氣交互作用下較強的年際震盪 ENSO, AMO, PDO, AAO, AO。

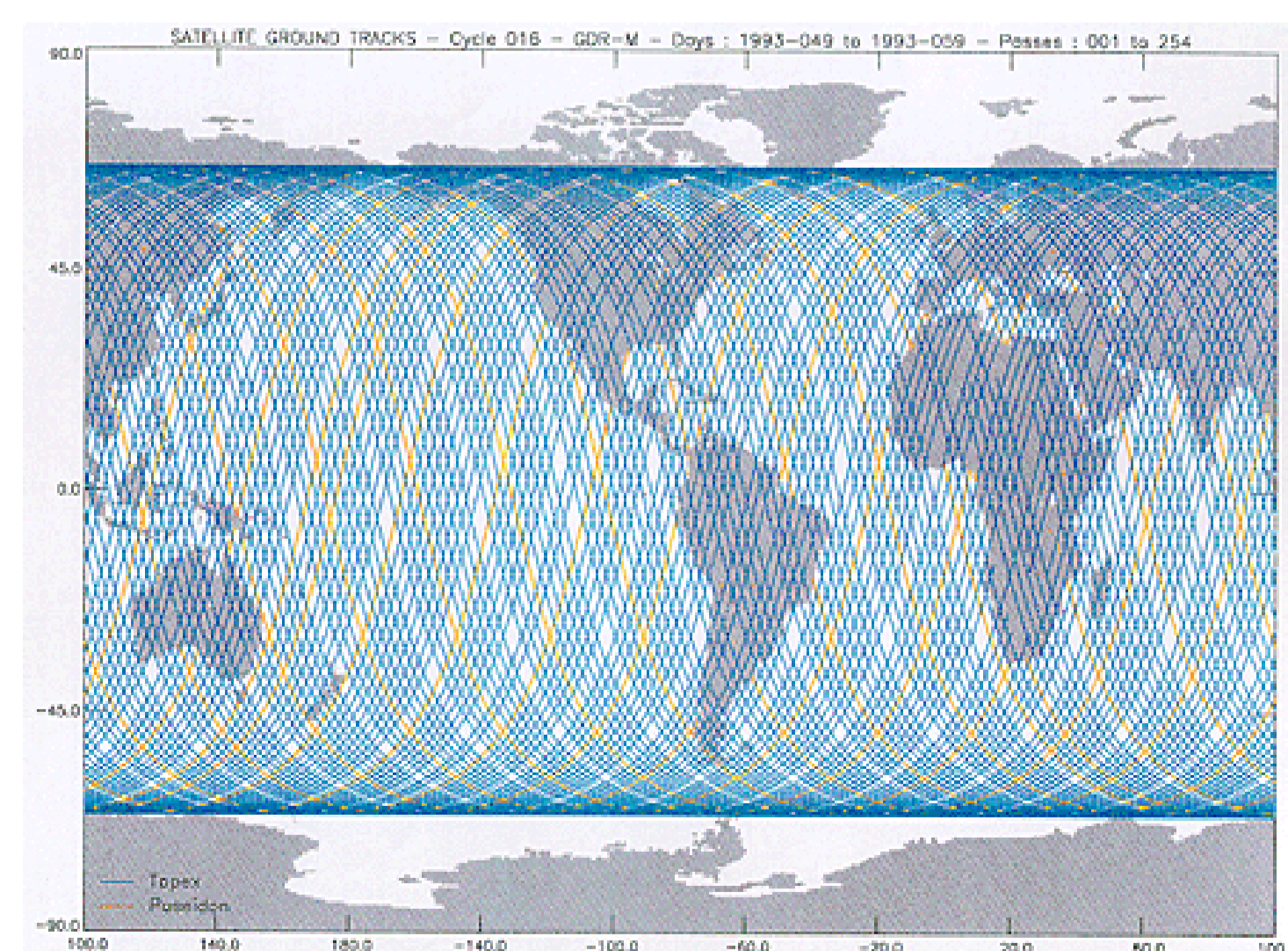
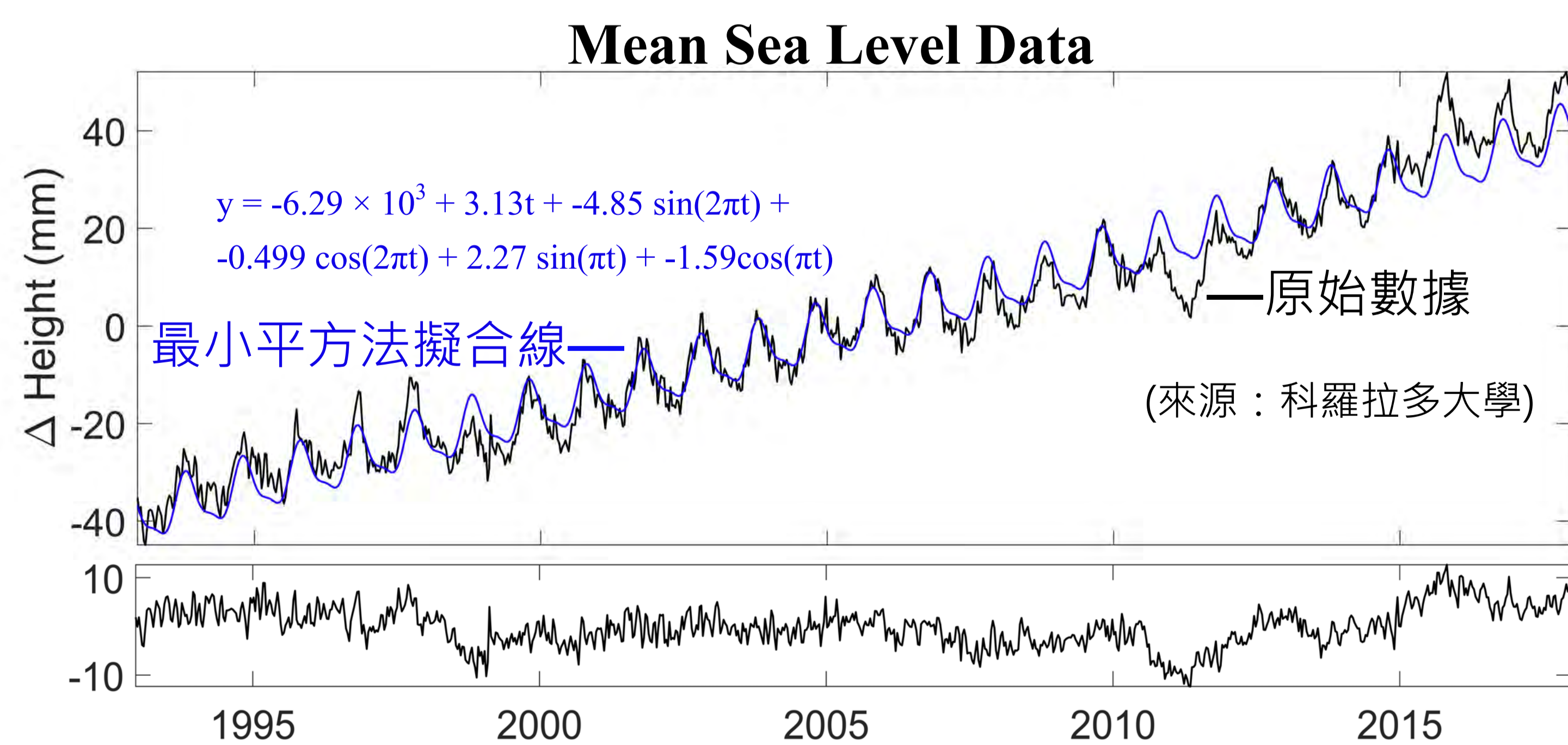
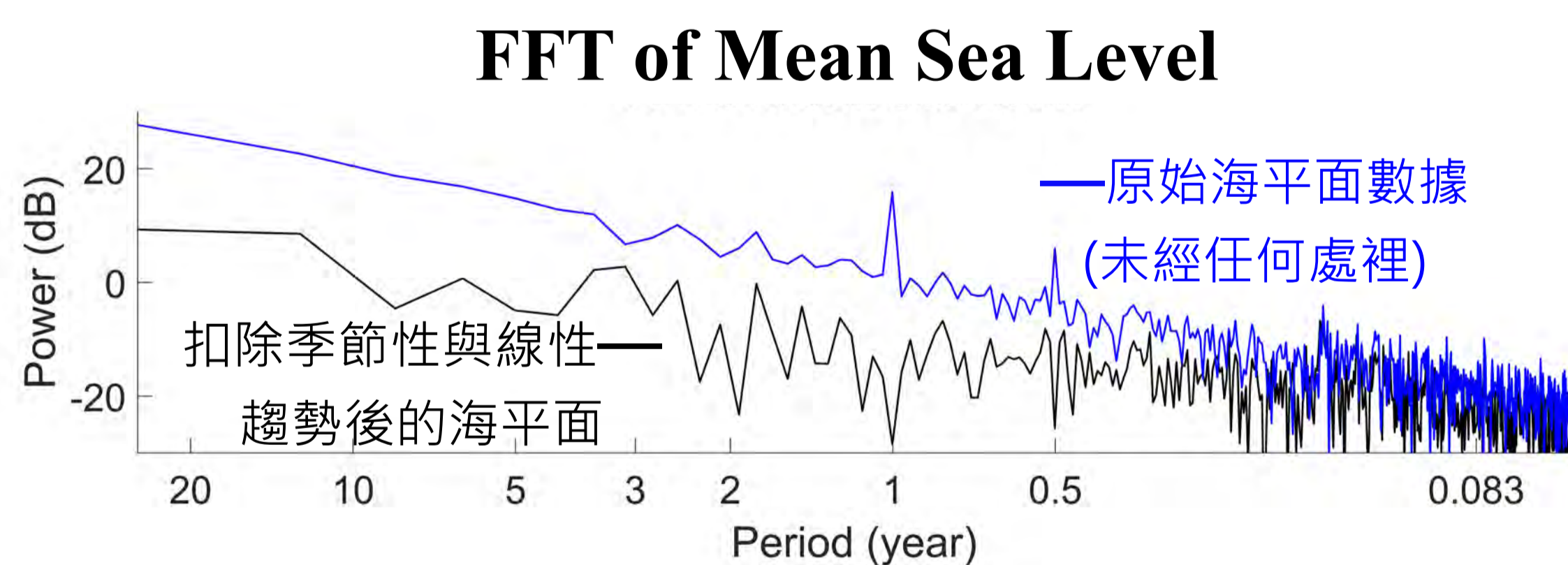
## 方法與過程



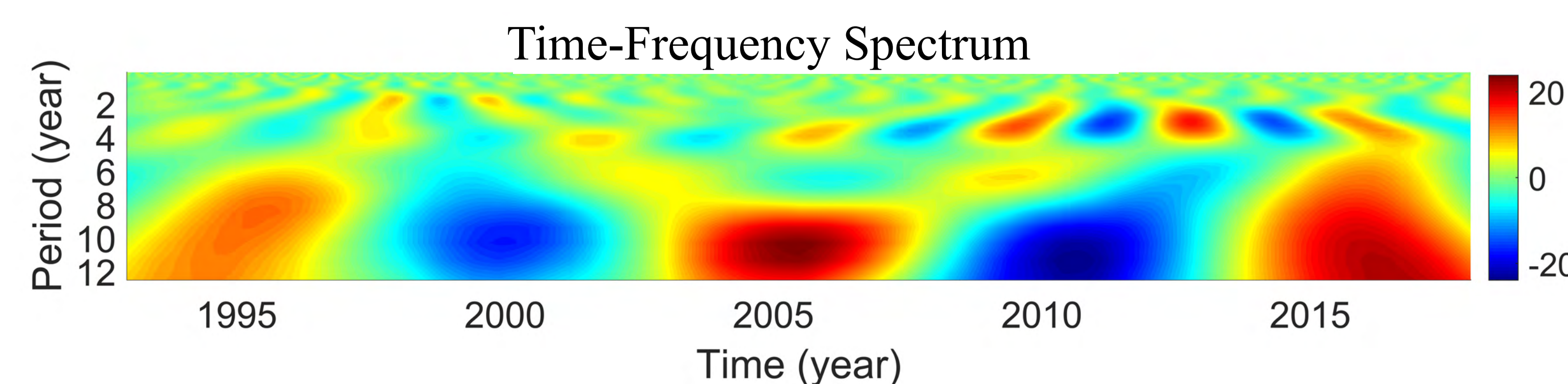
## 研究數據

### 海平面高度數據

- 海洋雷達測高衛星系列：TOPEX/Jason (TOPEX/Poseidon, Jason 1—3)
- 數據時間範圍：1993 年至 2017 年
- 數據時空解析度：十天重複軌道的軌跡如右下圖
- 軌道傾角：66°
- 軌道高度：1328—1380km
- 繞行週期：112 分鐘



TOPEX/Jason 系列衛星軌道圖  
實線表示每十天衛星經過的地面軌跡



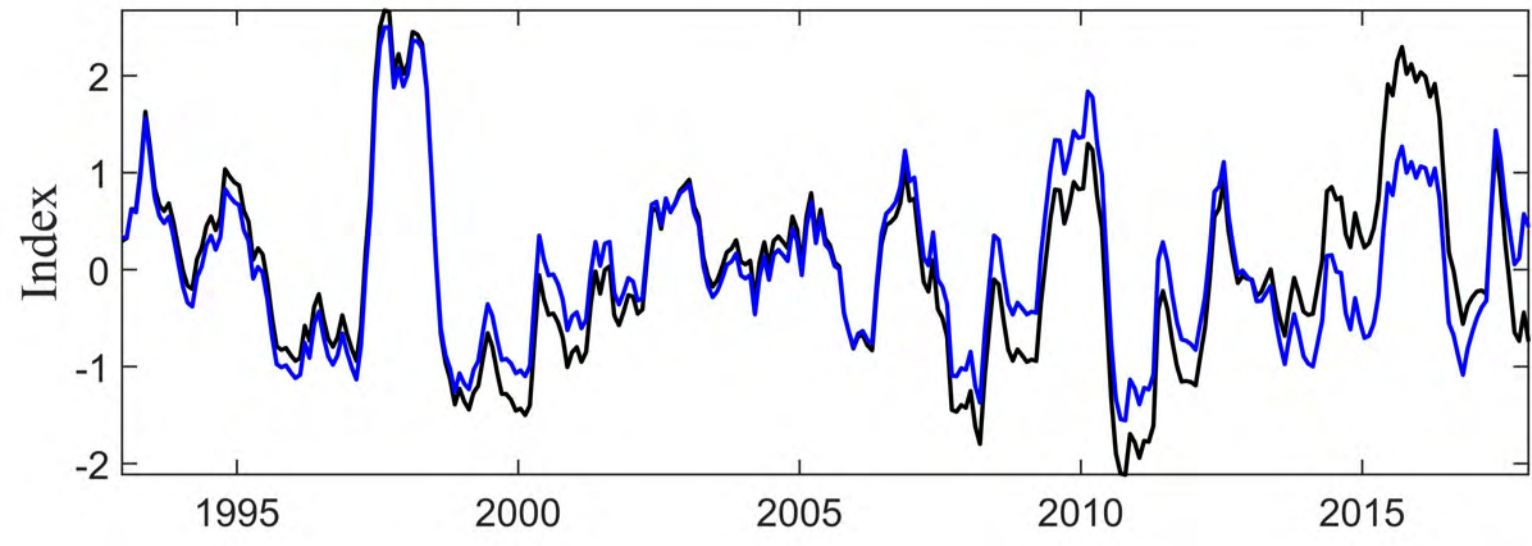
- 本實驗主要想探討的並非全球暖化、季節性變化對海平面變化造成的影響，故在此先將其扣除。
- 由傅立葉分析圖可以看出，主要影響海平面的是長周期變化。



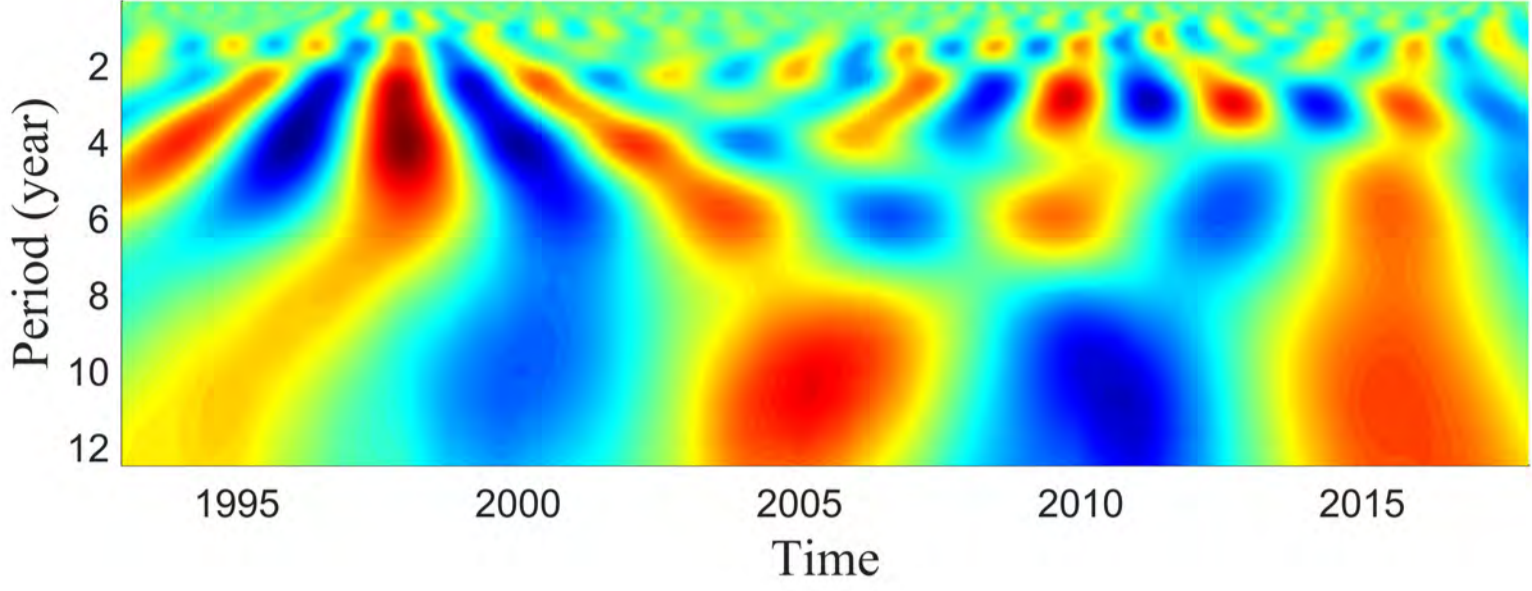
# 年際氣候震盪指數

藍線以週期 8 年為分界，ENSO 為高通、PDO 為低通濾波；資料來源：美國海洋大氣數 NOAA

## ENSO 聖嬰-南方震盪

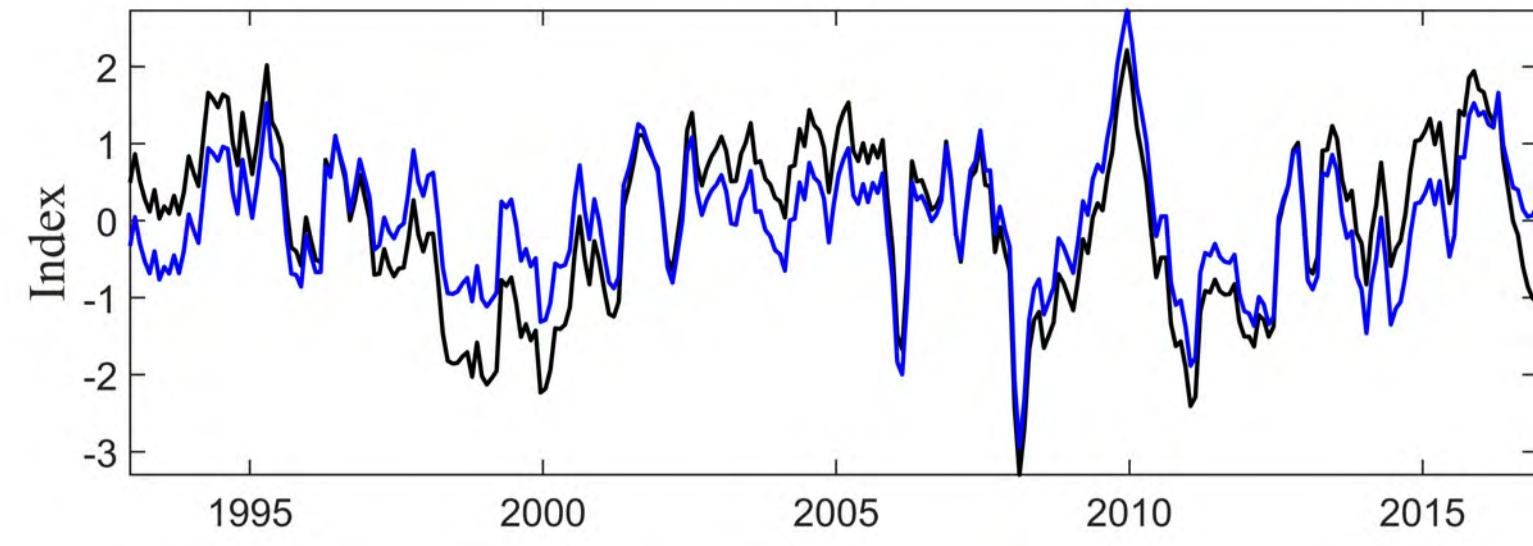


### Time-Frequency Spectrum

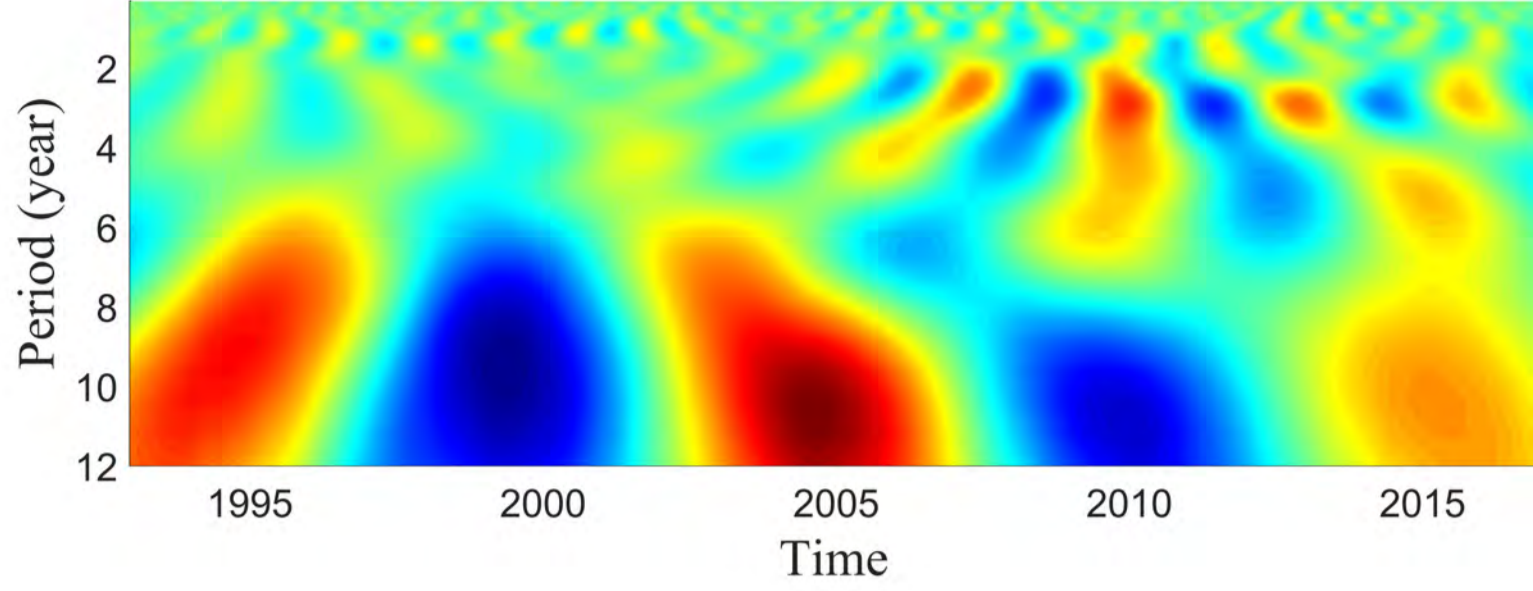


聖嬰現象的強度 (兩種聖嬰的綜合)  
用 MEI (Multivariate ENSO Index) 指數表示

## Central-Pacific ENSO

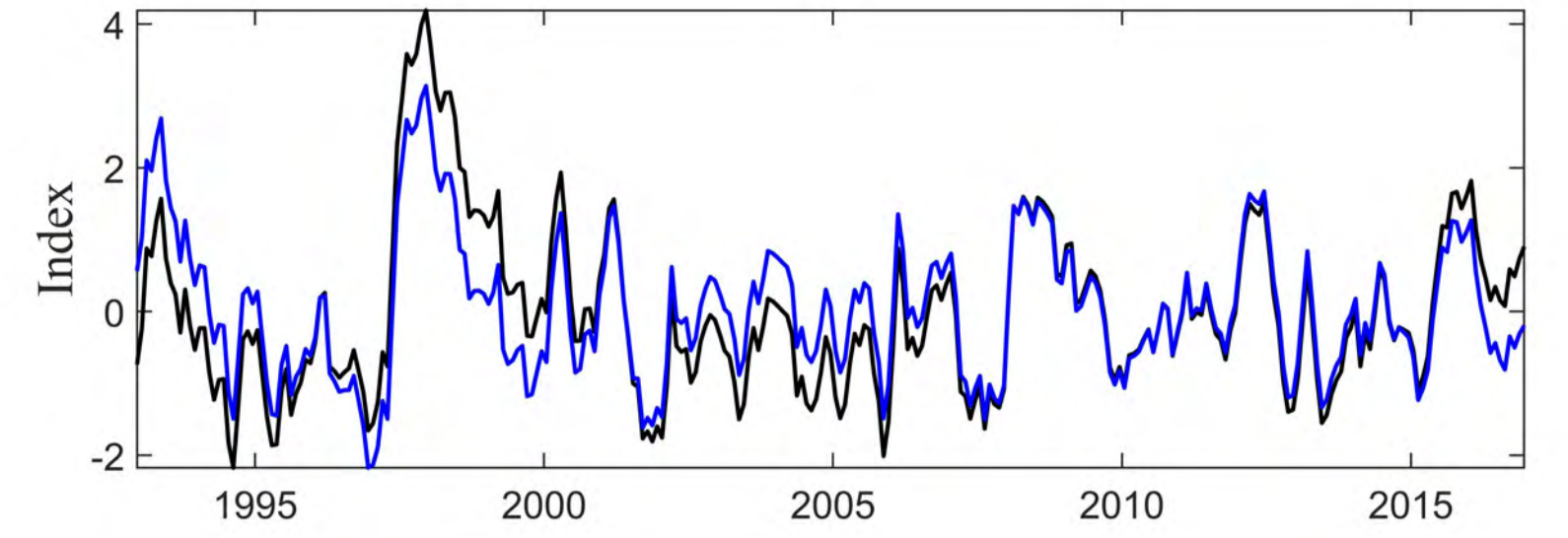


### Time-Frequency Spectrum

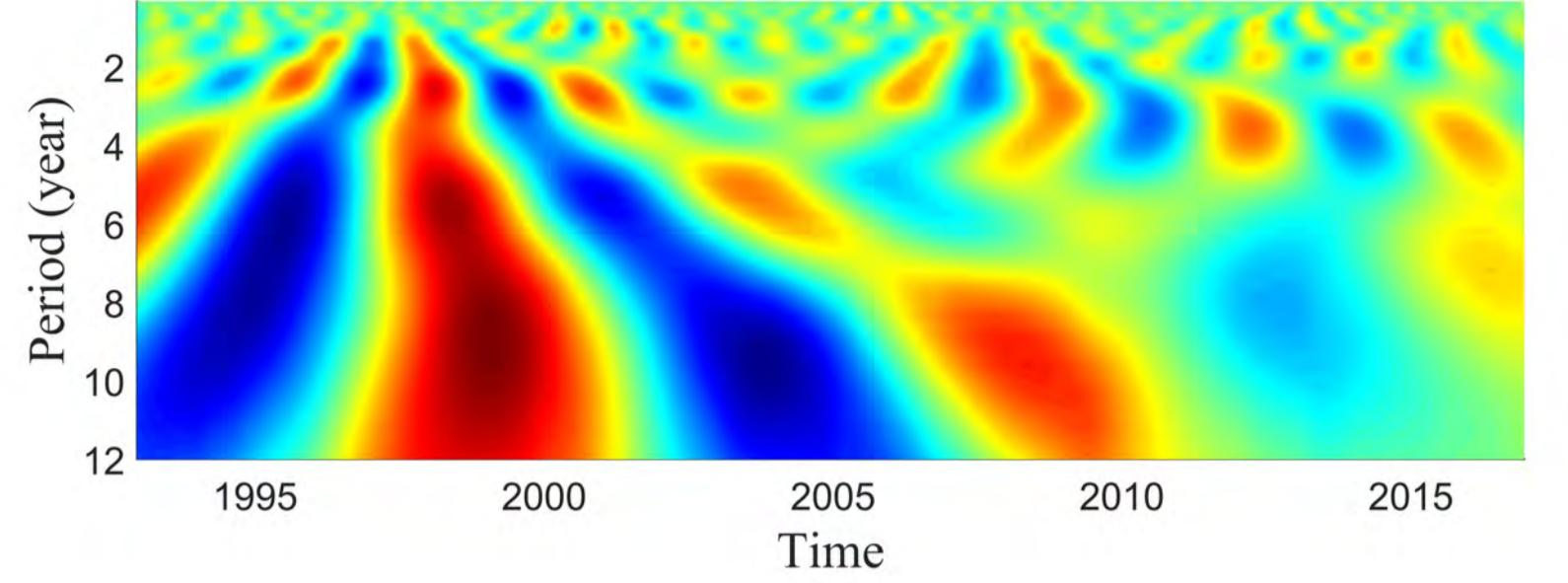


中太平洋聖嬰的強度  
回歸經驗正交函數分析太平洋海表面溫度

## Eastern-Pacific ENSO

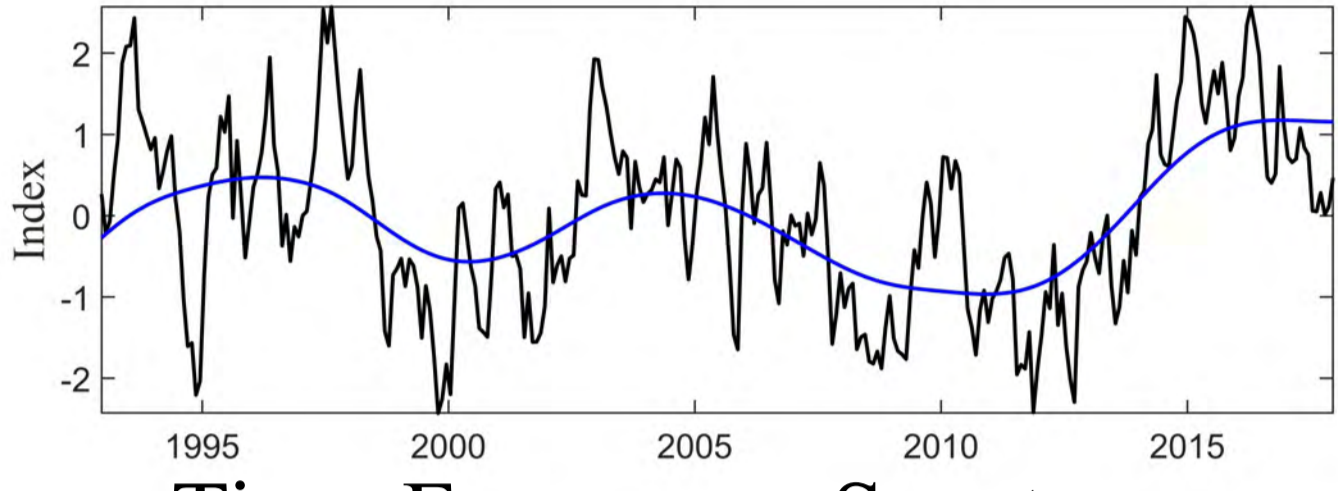


### Time-Frequency Spectrum

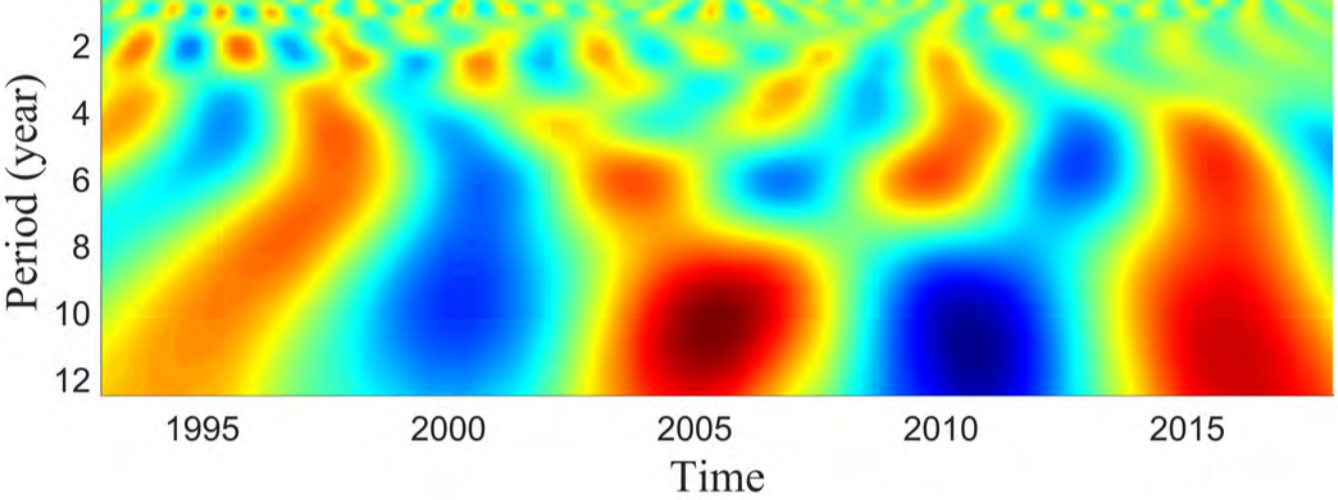


東太平洋聖嬰的強度  
回歸經驗正交函數分析太平洋海表面溫度

## PDO 太平洋十年震盪

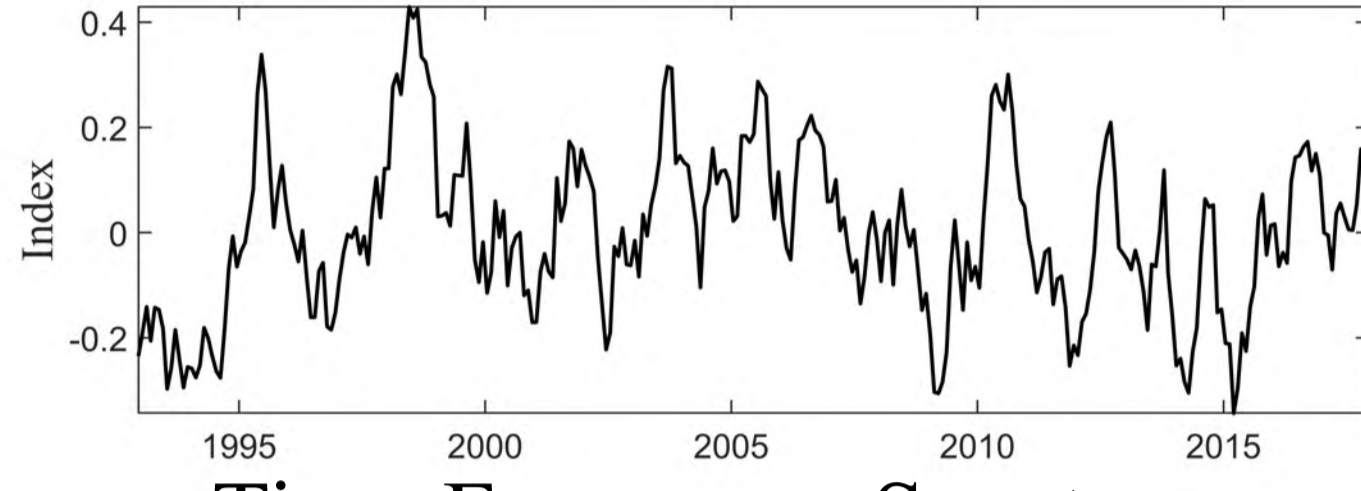


### Time-Frequency Spectrum

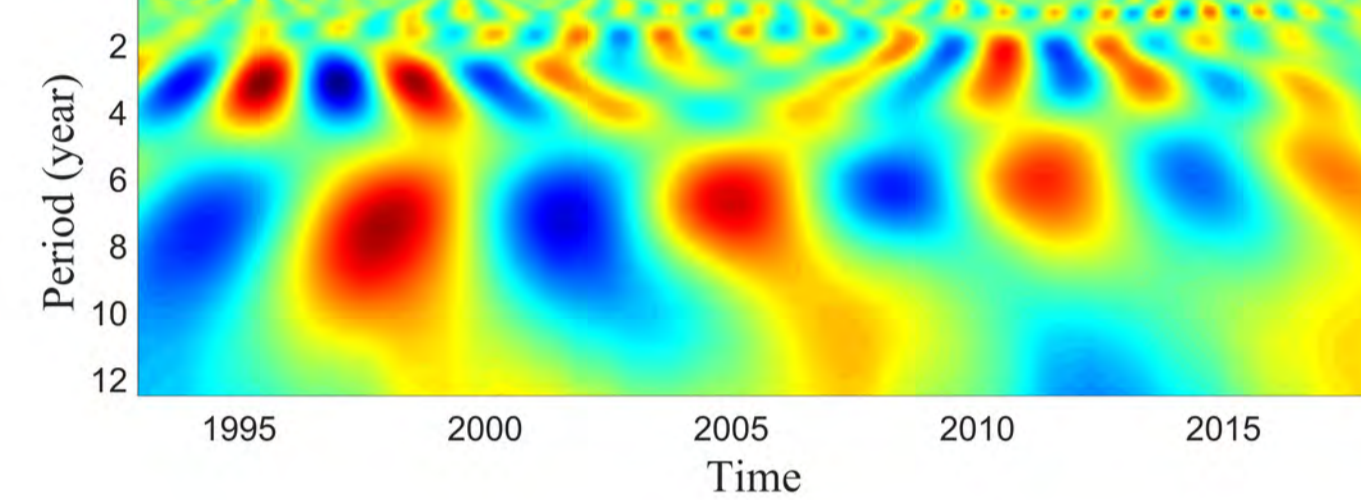


太平洋 20°N 的  
海水表面溫度 (SST) 的空間平均異常

## AMO 大西洋多年震盪

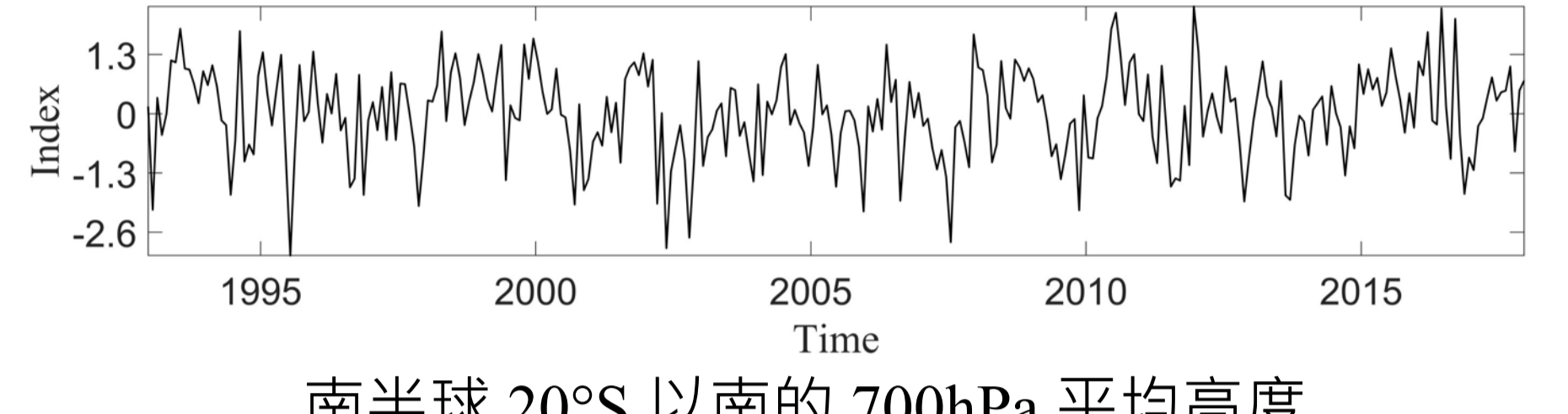


### Time-Frequency Spectrum



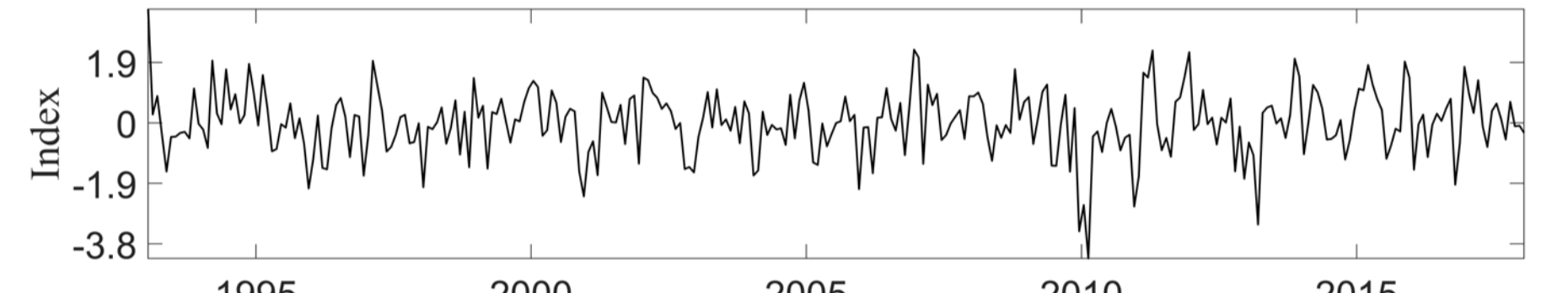
北大西洋盆地 (0°N-65°N, 80°W-0°E) 的  
海水表面溫度 (SST) 的空間平均異常

## AAO 南極震盪



南半球 20°S 以南的 700hPa 平均高度

## AO 北極震盪

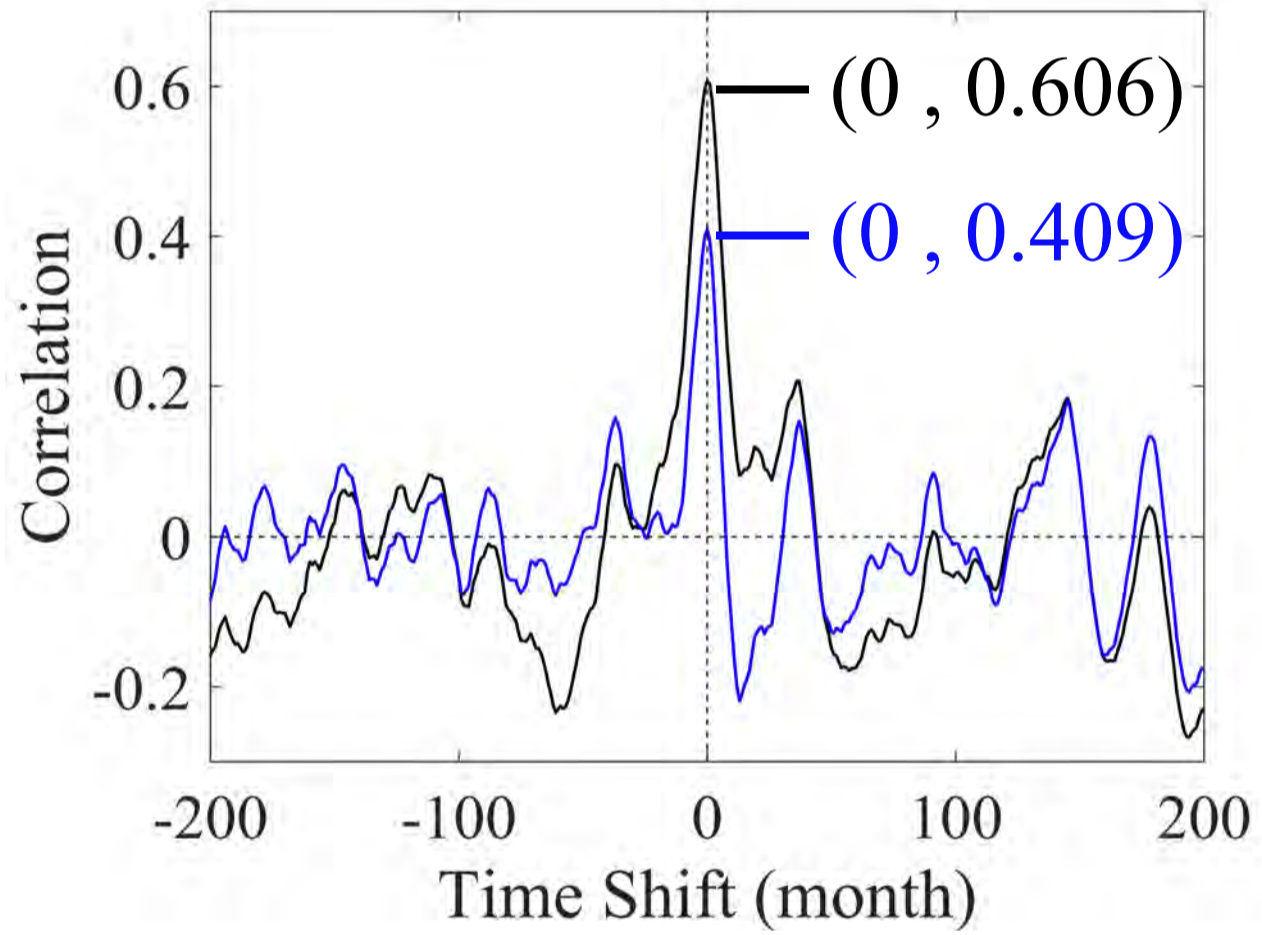


北半球 20°N 以北的 1000hPa 平均高度

# 結果 — 海平面 (MSL) 與各年際震盪的相關性

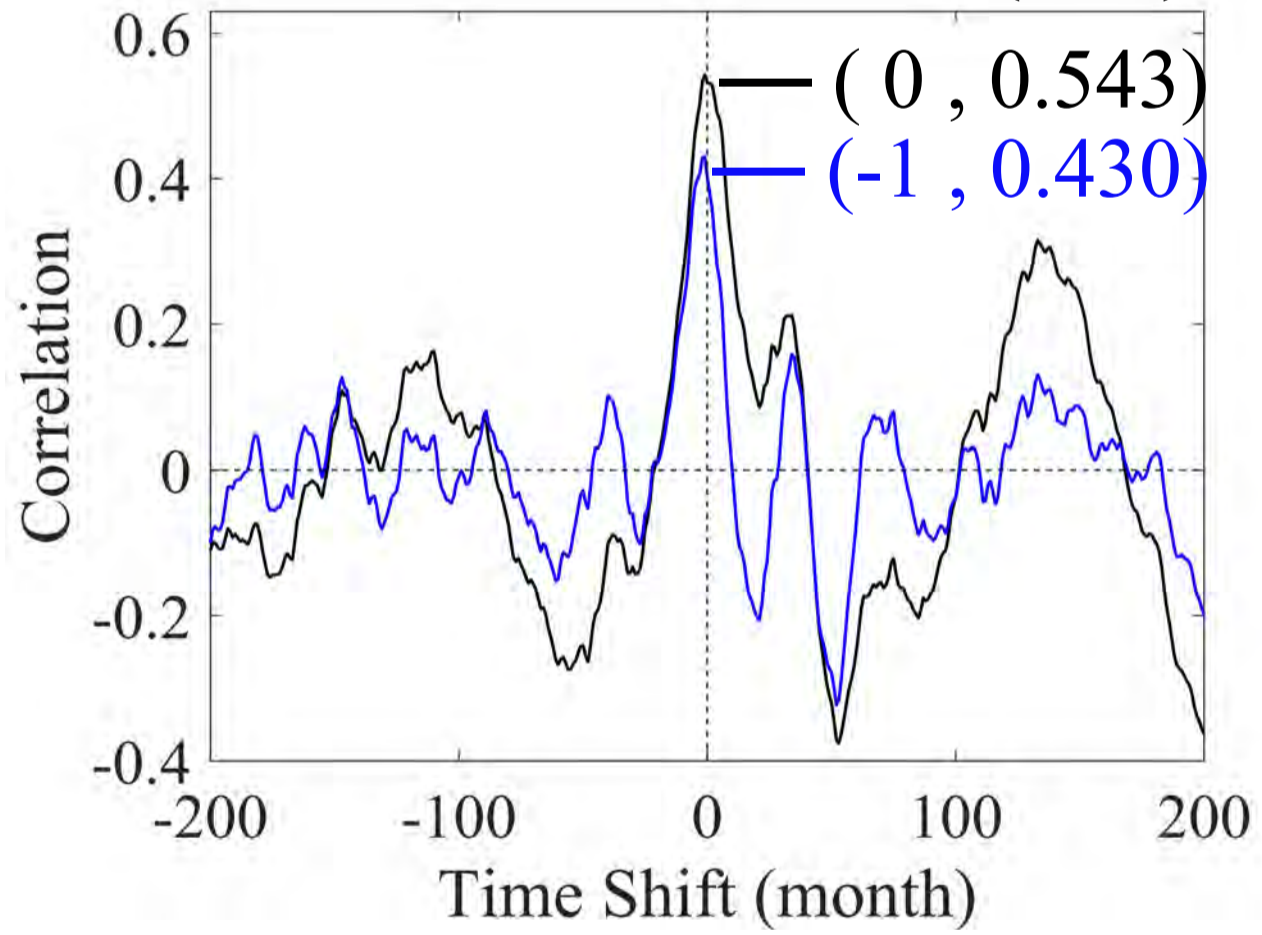
## 互相關函數 (時間域)

### MSL and ENSO

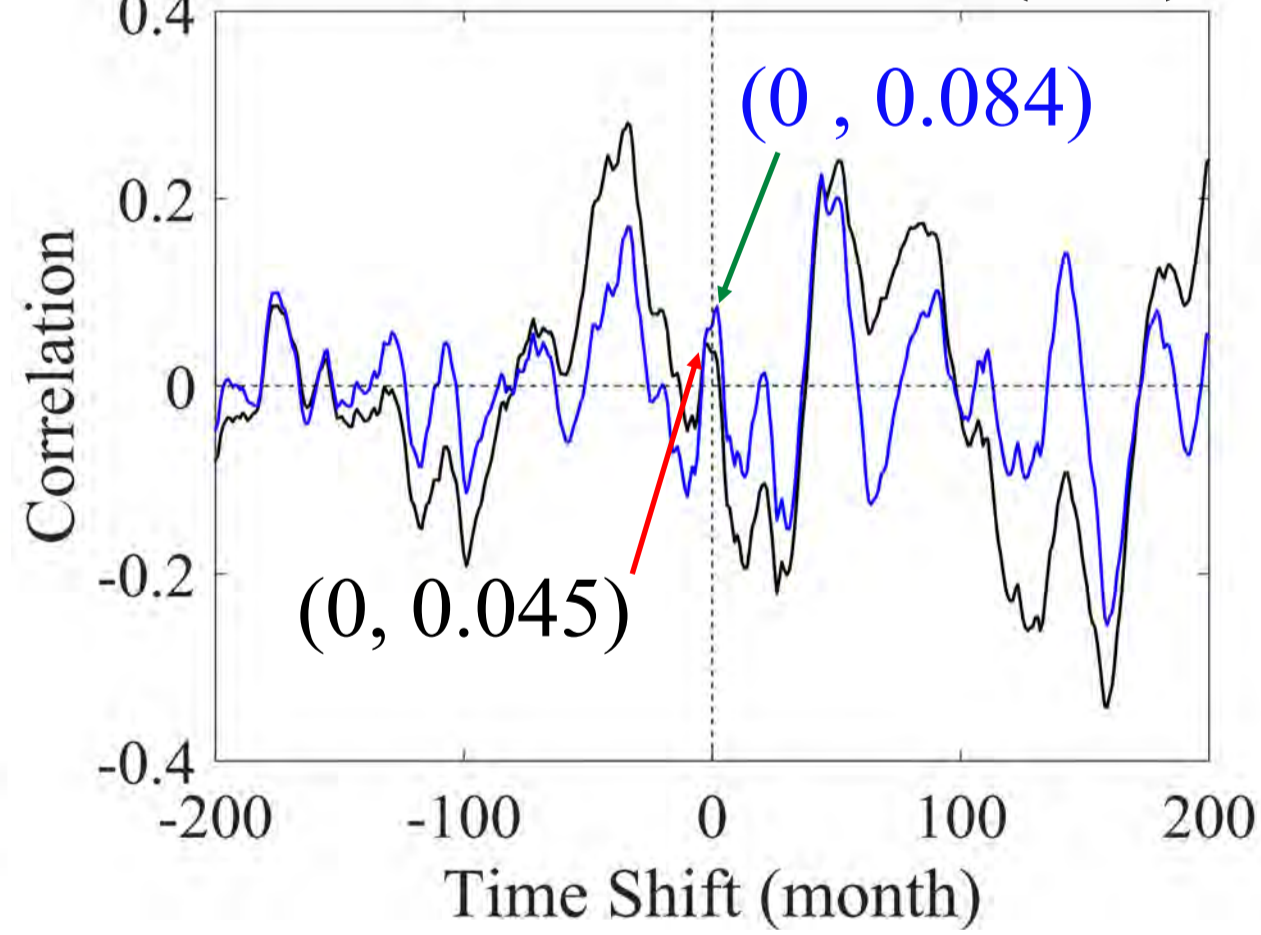


兩筆資料間是否相關、有多少信心相關，單只用相關係數無法表示，還要考慮資料自由度 (Degree of Freedom)、資料的自相關 (autocorrelation)。

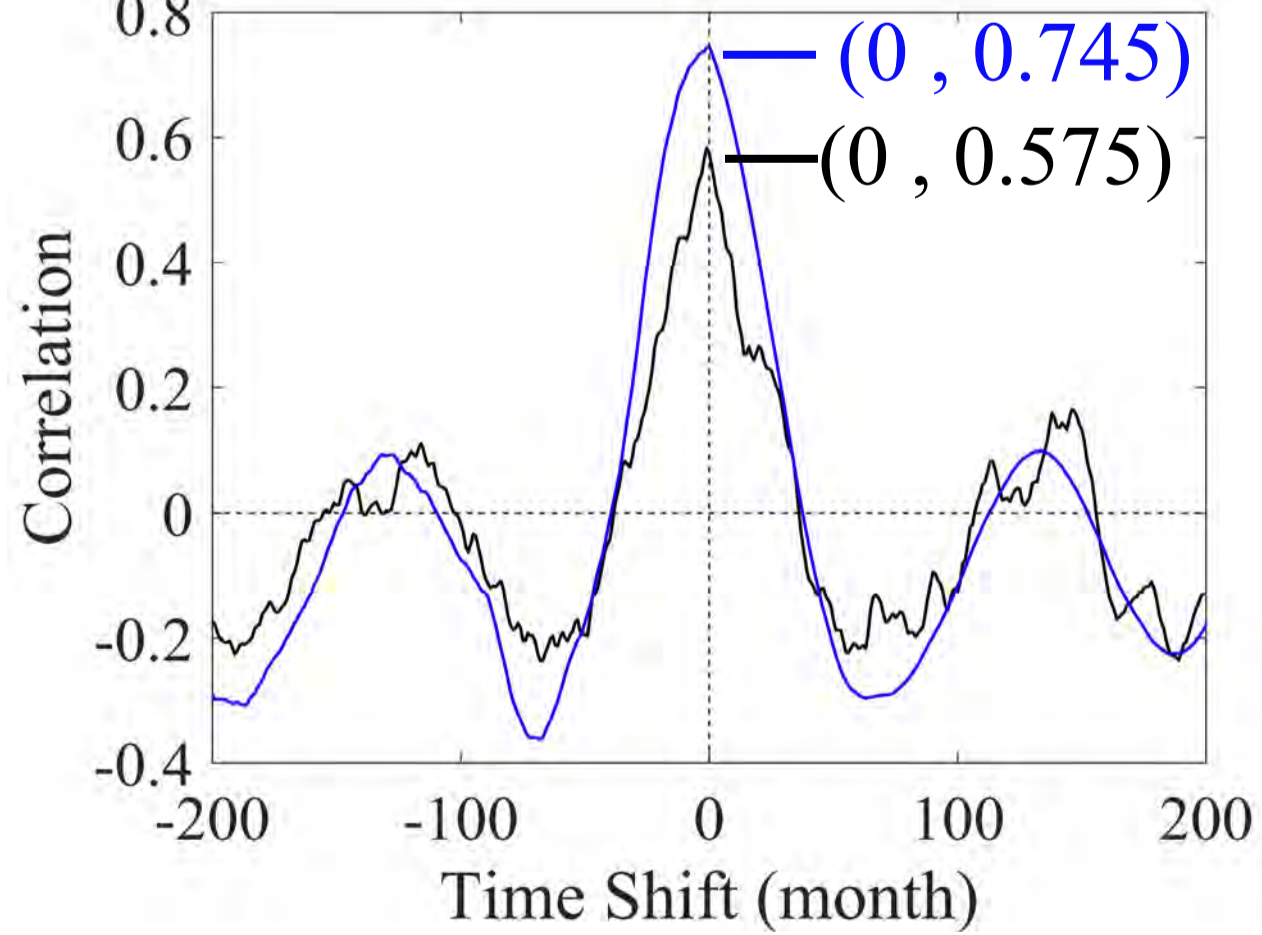
### MSL and ENSO (CP)



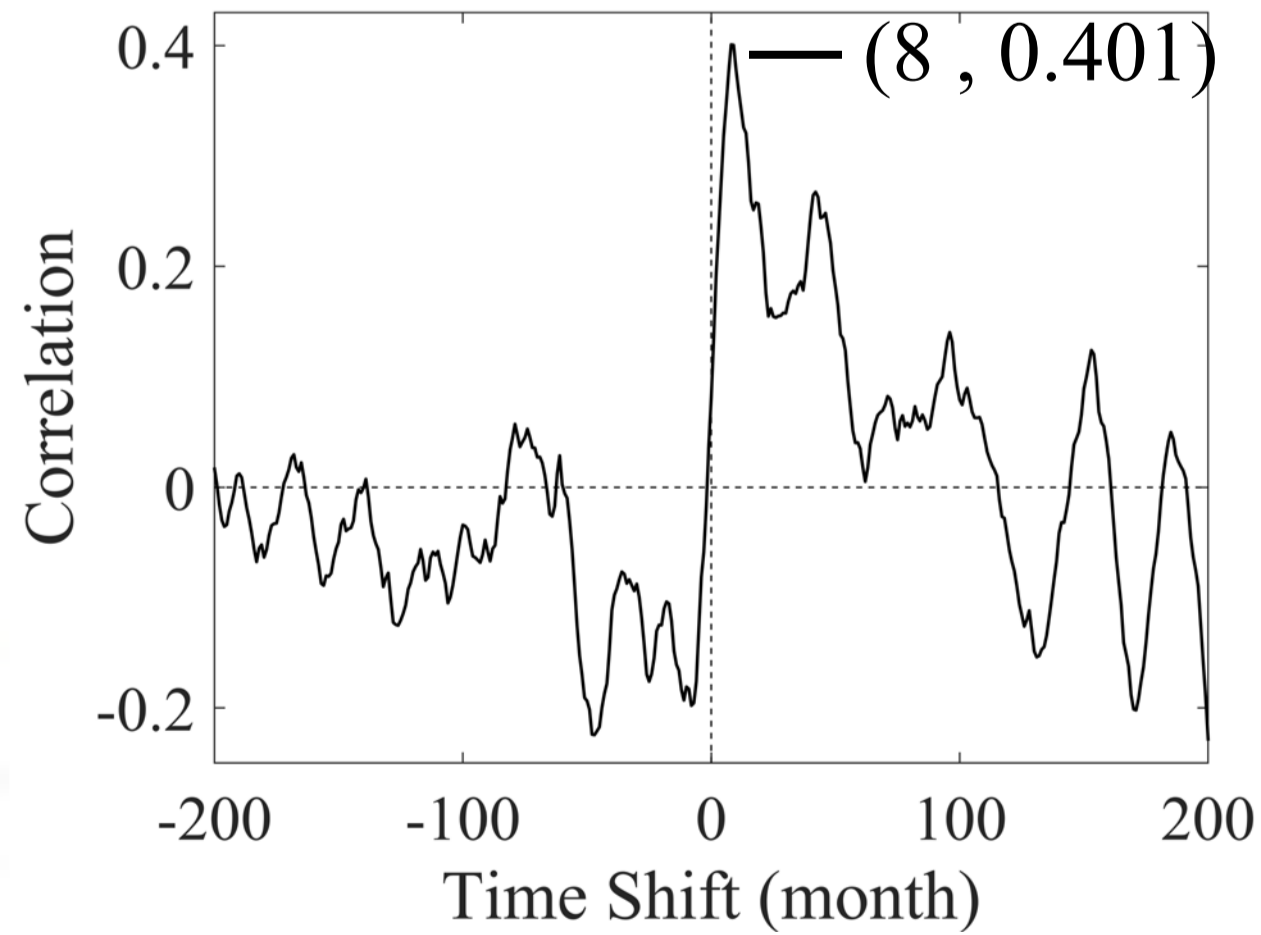
### MSL and ENSO (EP)



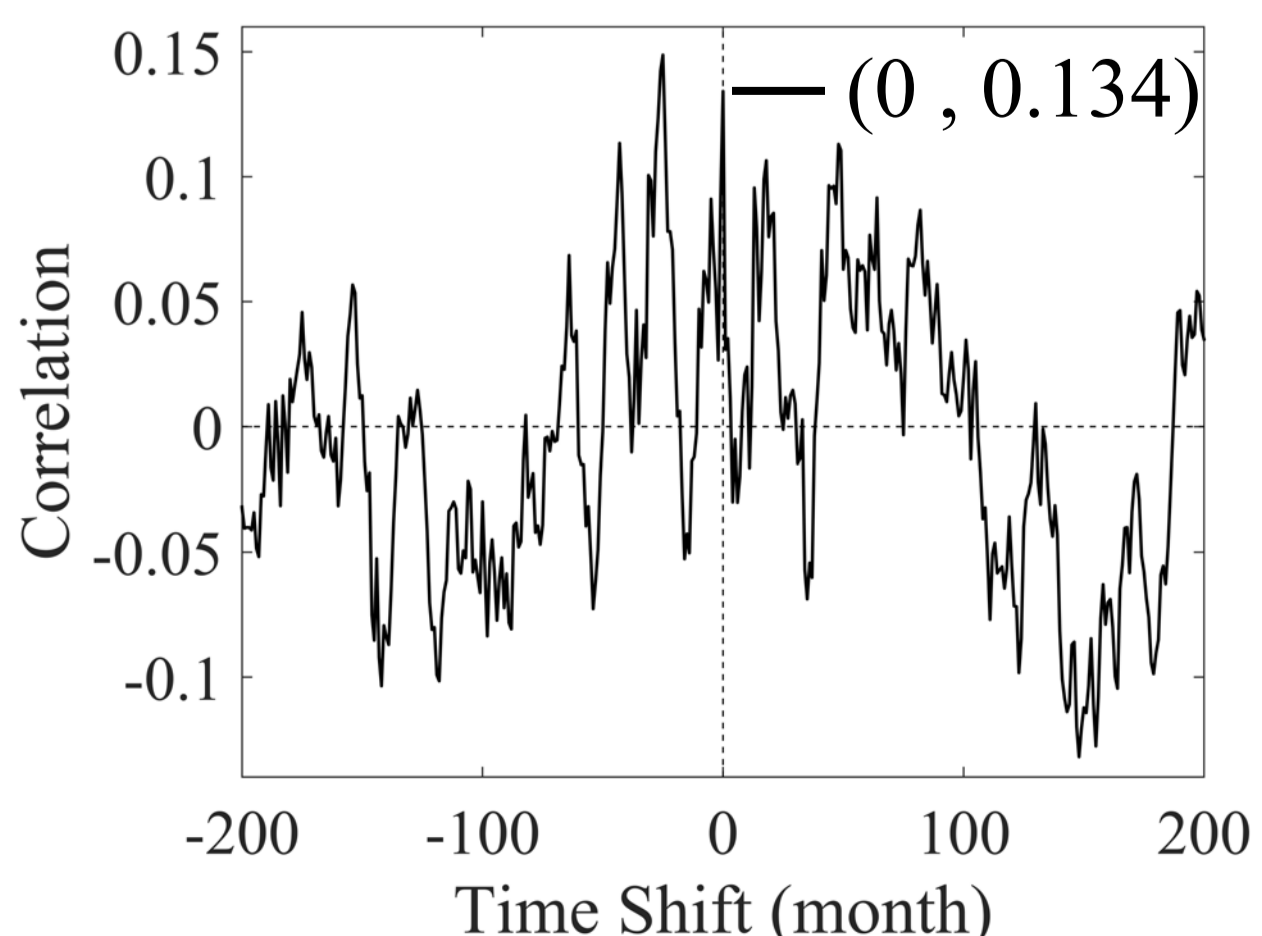
### MSL and PDO



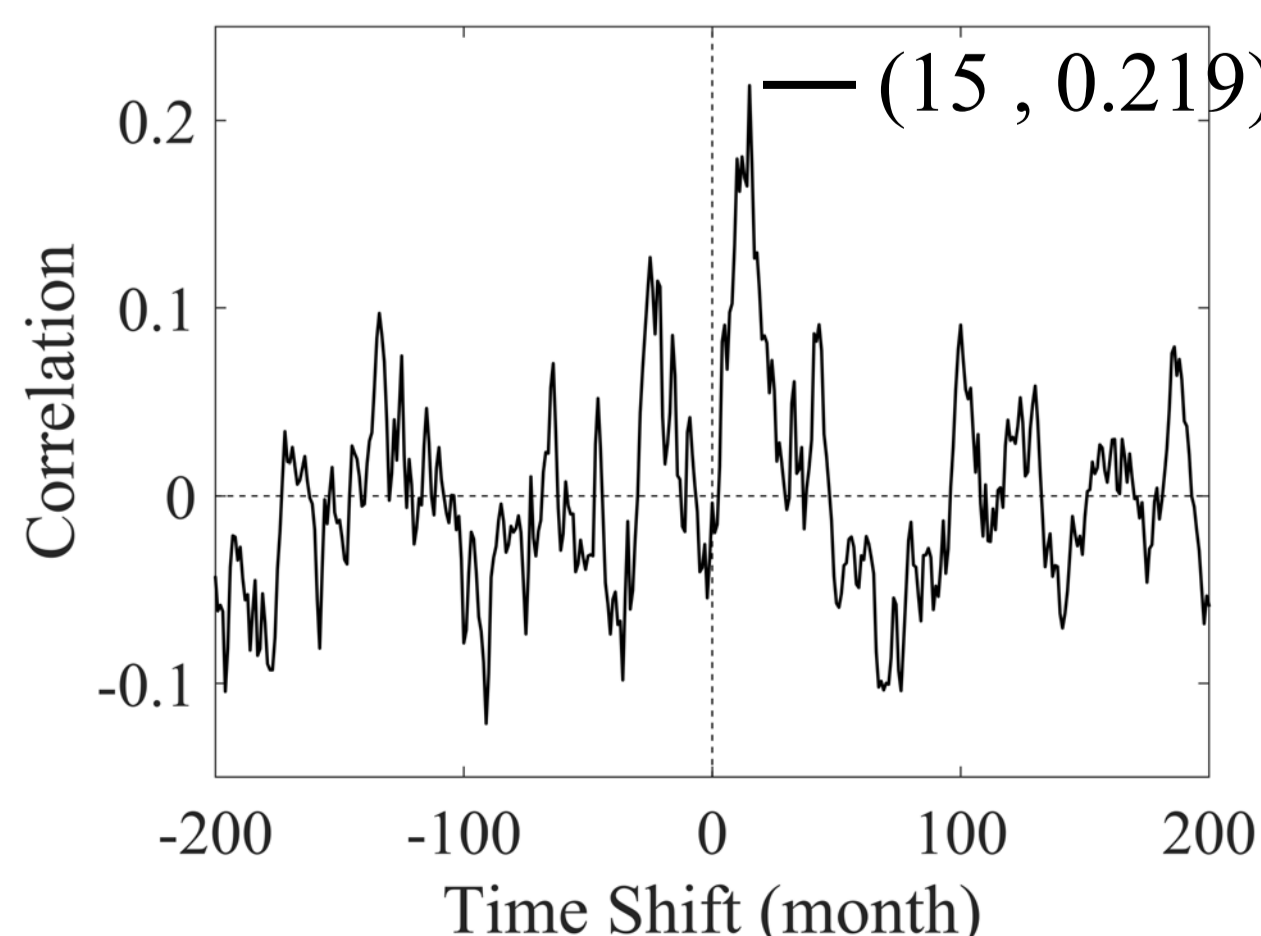
### MSL and -AMO



### MSL and AAO



### MSL and AO

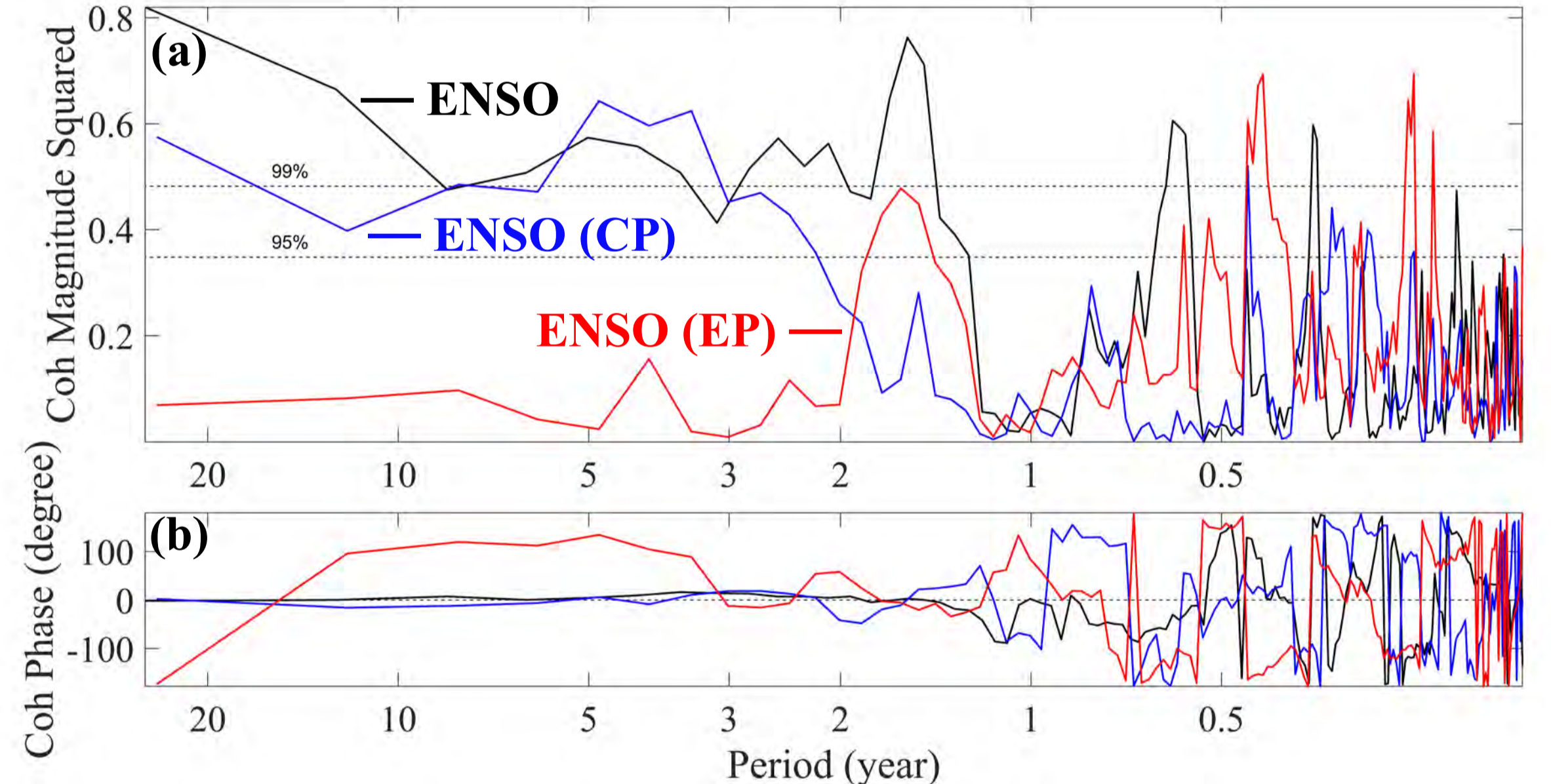


X 軸表示全球平均海平面 (MSL) 與年際震盪出現的時間關係  
例如 AMO 的變化領先 MSL 八個月

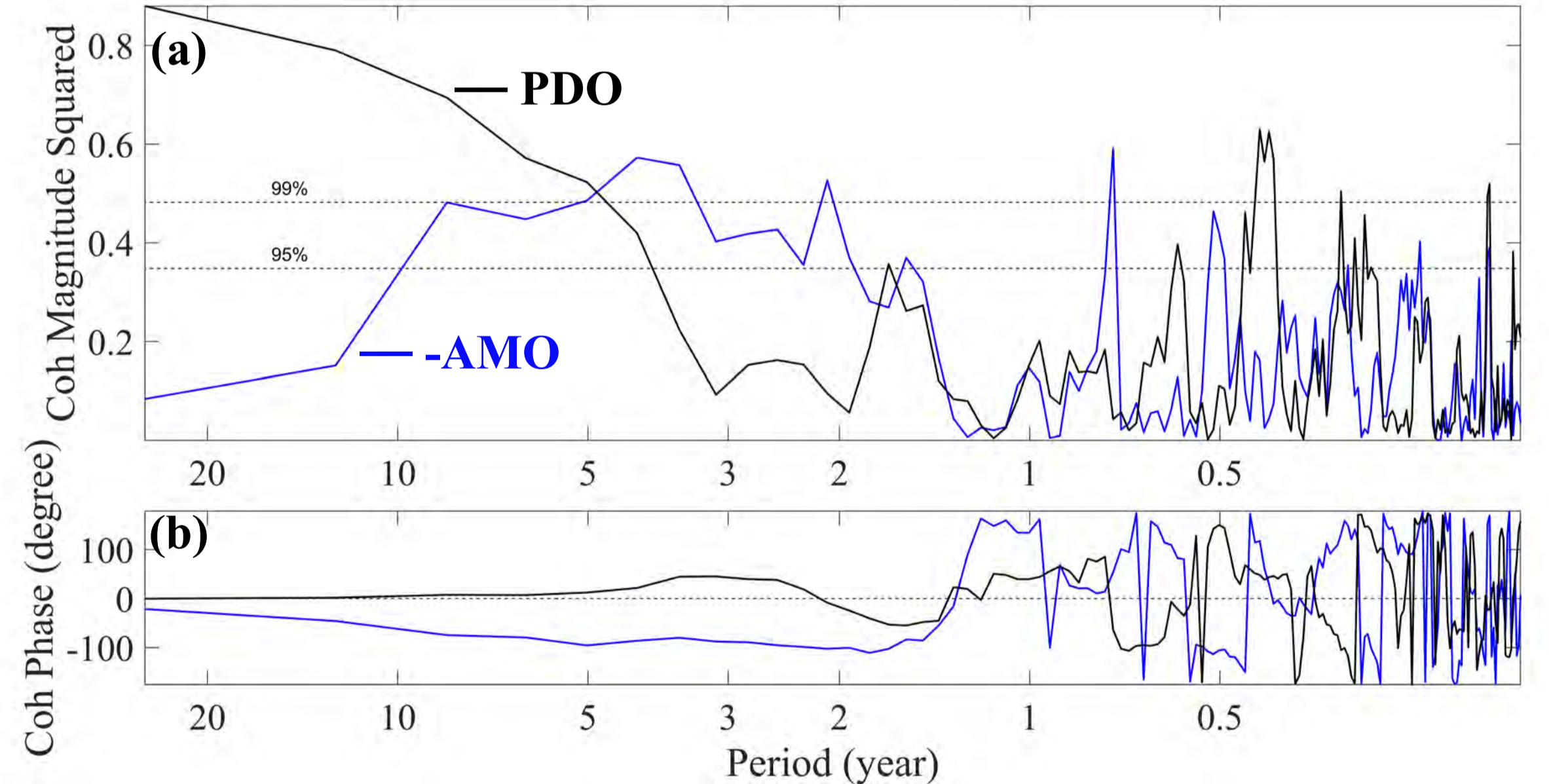
(藍線為週期 8 年濾波)

## 同調性頻譜 (頻率域)

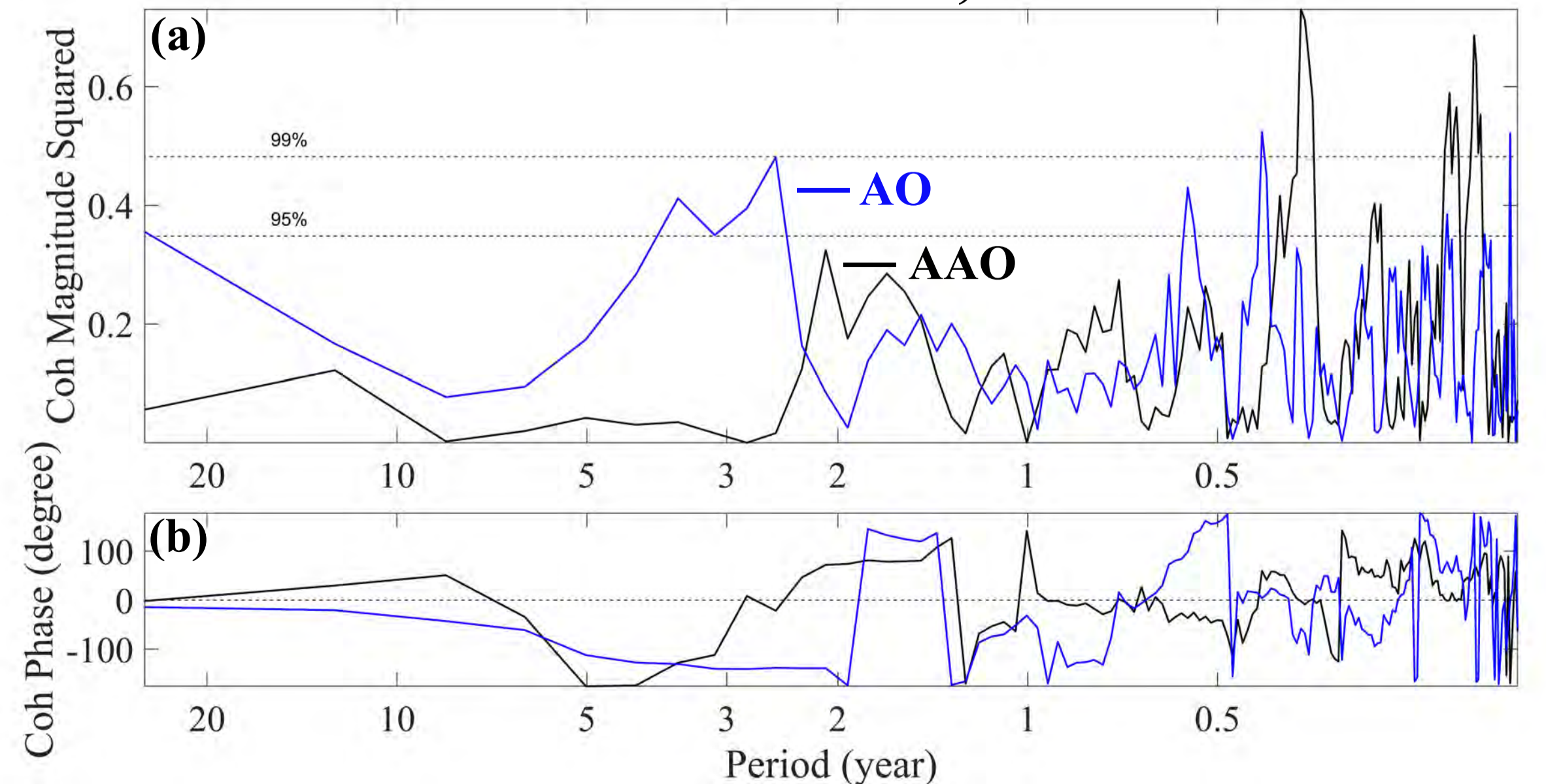
### MSL and ENSO



### MSL and PDO, -AMO



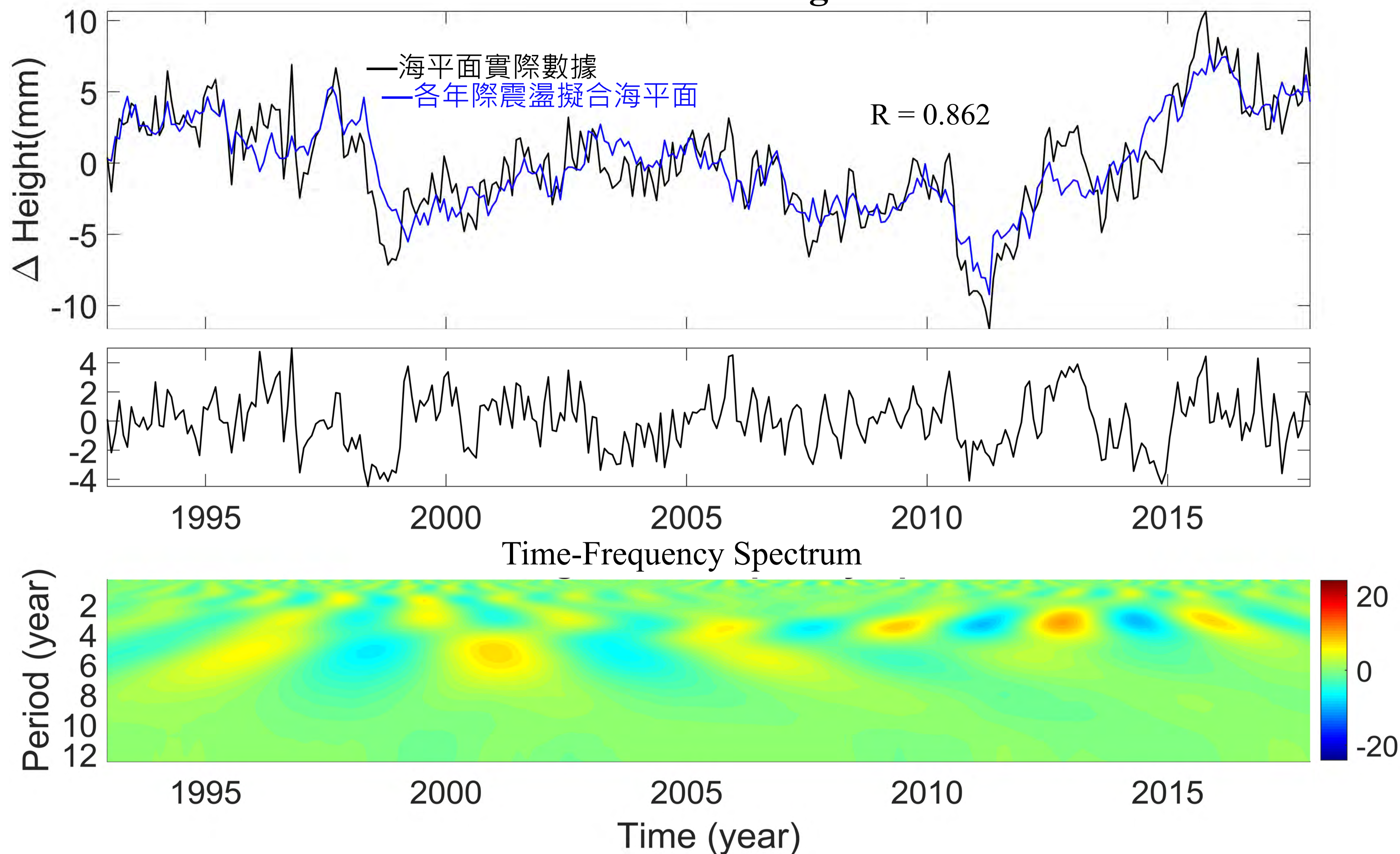
### MSL and AAO, AO



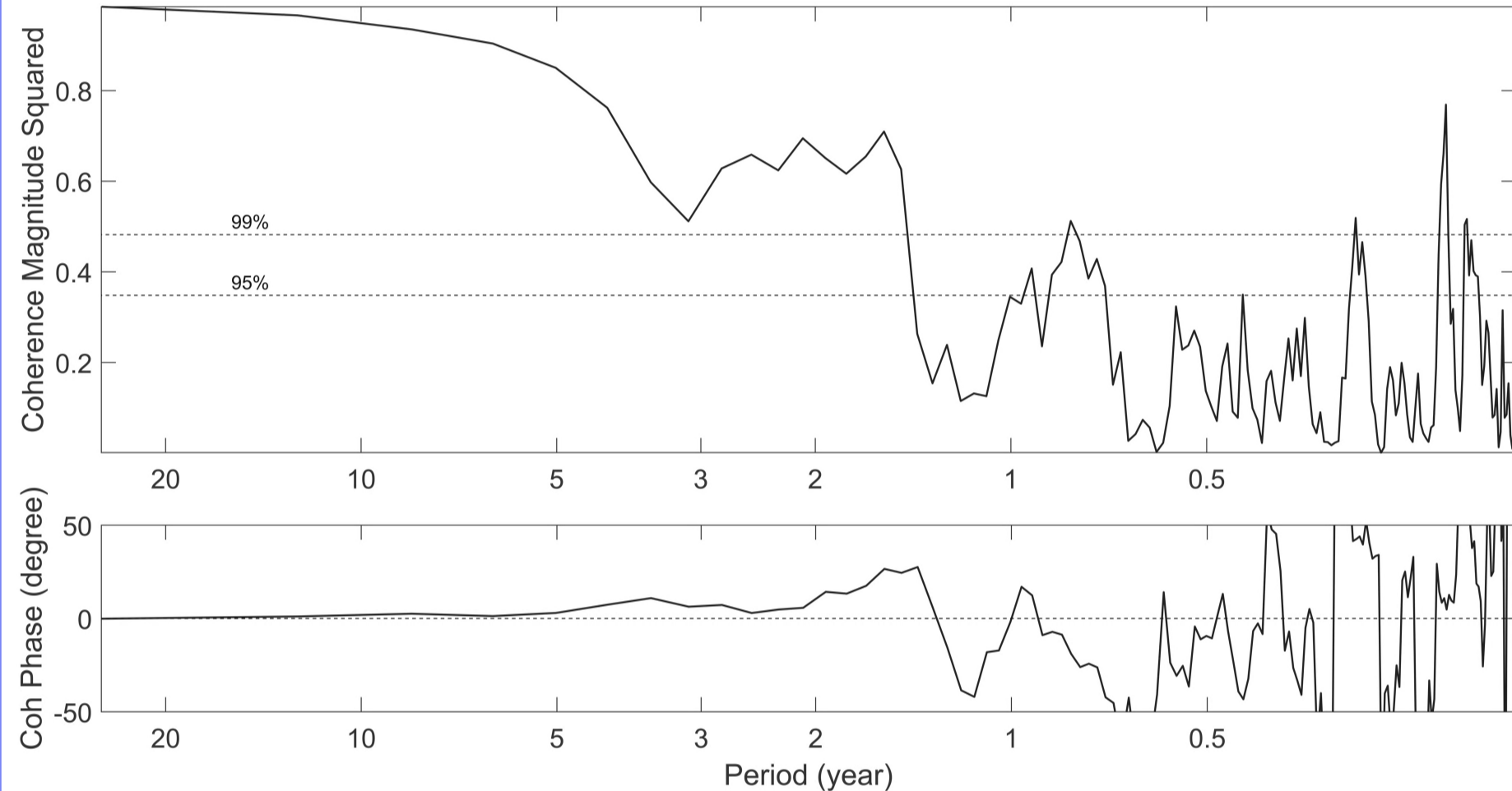
- 圖 a 95% (99%) 線表示有該信心兩筆數據相關。
- 圖 b 表示在該周期相關性的延遲。(負值表示年際氣候震盪領先海平面)
- $\text{Period} \times \text{Phase} / (360^\circ) = \text{延遲的時間}$



## Mean Sea Level and Fitting Line Data



## Coherence of Mean Sea Level and Fitting



各指數	線性擬合的係數 (normalized by std)
ENSO	0.862
PDO	2.55
-AMO	1.15
AAO	0.358
AO	0.447

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)。

## 結論

- 全球平均海平面每年上升趨勢約為 3.13 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；同時也有季節性變化。而本研究專注在年際變化上。
- 在 8 年以內的時間尺度下，對海平面最大的影響來自 ENSO。
- 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。
- CP 對海平面影響的主因，推測與混合層溫度變化 (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) 有關。(Meysignac, B, 2012) (Yu, J.-Y., 2018)
- 在 8 年以上的更長的時間尺度下，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。
- 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。
- 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)
- AAO 對於海平面的影響不大，可能因為南極以陸地為主。
- 本研究利用年際震盪擬合海平面與實際海平面十分相近 (寬頻的相關係數 0.86)，使我們能深入探討海平面變化的其他較次要的因素。
- 未來可以嘗試用 GRACE (重力衛星) 系列與 Argo (全球溫鹽浮標) 的資料，將密度與質量變化分開討論，了解海平面變化 (包括延遲現象) 的原因。

## 參考資料

- 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
- Boening, 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
- Douglas, B. C., Kearney, M. S., & Leatherman, S. P. (2001). *Sea level rise: History and consequences*. San Diego: Academic Press.
- 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
- Meysignac, 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
- 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