

Constructed Analog 統計方法應用於海溫預報之研究

陳孟詩
氣象預報中心
中央氣象局

摘要

本研究根據 van den Dool (1994) 及 van den Dool and Barnston (1995) 發展 Constructed Analog (CA) 海溫預報模式，希望除了聖嬰事件外，也能對反聖嬰事件做出預警，甚至可以結合其他動力模式發展多模式系集預報。

配合作業需求，本研究所使用的資料為 1950-1981 年的重建海溫資料 (RSST) 及 1982 年迄今的最佳內插海溫資料 (OISST)。為配合電腦資源，研究所使用的海溫以季為單位，資料長度近 50 年，分析區域為 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ， $45^{\circ}\text{S}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ，解析度為 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 。所謂 CA 指的是組合過去觀測海溫的距平場，使其盡可能地接近所要預報目標的海溫距平場。資料先經過 EOF 分析，進行 EOF 分析前亦先將資料標準化。模式發展架構建立後，進行交叉驗證、預報校驗及設計預報實驗，並由相關係數及均方根誤差來評估模式的表現。

交叉驗證的結果顯示，半年前對冬半年的海溫指標預報，其相關都可達 0.6 以上，但對於春、夏交接之際的海溫指標預報，大概只有一、兩個月前的預報可信度較高，其中 Niño3.4 是四個海溫指標中最具有被預報能力的，最差的則是 Niño3。校驗 Niño3.4 1952-2001 年之事後預報，結果顯示 CA 模式有能力模擬出海溫的年際變化及季節變化。以各海溫指標而言，CA 模式對 Niño3.4 的掌握能力還算不錯，對 Niño3 的掌握能力相對而言是較差的。就季節而言，比較一個月前的 Niño3.4 各季節的事後預報，冬半年的表現較夏半年佳。就不同領先預報而言，1~5 個月前對 Niño3.4 DJF 事後預報的相關係數可達 0.6 以上。以 1996-2006 年為預報實驗時間，發現 CA 模式對 Niño4 的預報要比對 Niño3.4 好一點，對 Niño1+2 的預報結果並不好。比較各模式於 1996-2006 年間對 Niño3.4 的預報，結果顯示 ENSO-CLIPER 仍然是表現最好的方法，但 CA 的表現比 CCA 和持續法都要好，對於提高海溫預報準確度應有所助益。

一、前言

聖嬰/反聖嬰 (El Niño/La Niña) 是指赤道中到東太平洋海溫每 2~7 年異常增暖/變冷的現象。聖嬰發生時，伴隨著赤道東風減弱，深對流區並由西太平洋東移至中及東太平洋，由於祕魯沿岸湧升流減弱，漁獲減少，同時透過海氣交互作用及大氣遙相關型態，使得遙地氣候改變，例如美國加州降水增加，而印尼降水減少，影響人類生活至鉅。因此若能準確預報聖嬰的發展，必能減少經濟活動損失。

上一世紀末發生了有紀錄以來最強烈的聖嬰事件，也為氣象學家提供了一次檢視聖嬰預報模式表現的機會。Barnston et al. (1999) 針對 1997-98 聖嬰事件之模式預報做評比，參與評比的模式包括 8 個動力模式及 7 個統計模式，所使用的方法為均方根誤差及相關係數。研究結果發現，就此事件而言，大部分的模式在 1996 年 12 月即預報赤道太平洋海溫有增暖的趨勢，但直到 1997 年 3 月才預報聖嬰事件的發生，1997 年 6 月才意識到此次為超強的聖嬰事件，一旦聖嬰開始發展之後，大部分的模式均能預報在 1997 年底達到巔峰，之後於 1998 年晚春初夏時減弱，甚至逆轉為反聖嬰。換句話說，雖然大

部分的模式在聖嬰開始前 1 至 2 季能預報某種程度的海溫增暖，但沒有一個模式能預報到此事件的強度。綜合來看，動力與統計模式並無孰優孰劣。表現較好的動力模式有 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 及 COLA (Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies) 所發展的包含海洋及大氣的完整方程，而表現較好的統計模式如 ENSO-CLIPER (El Niño Southern Oscillation CLImatology and PERsistence)、CA (Constructed Analog) 及 CCA (Canonical Correlation Analysis)，則是使用線性迴歸方法。對動力模式而言，其預報能力之限制在於同化初始資料不足，對統計模式而言則是線性之假設及對實際觀測之反應遲緩。

Landsea and Knaff (2000) 認為預報模式之技術不能以氣候法 (climatology) 或持續法 (persistence) 為基準，而應採用結合氣候法、持續法及海溫變化趨勢的 ENSO-CLIPER。他們發現此 12 個預報模式中，有些模式預報 1997-98 聖嬰事件之開始及減弱的表現的確比 ENSO-CLIPER 好，但沒有一個模式能在 6 至 8 個月前成功地預報聖嬰開始或減弱的訊號，包括 ENSO-CLIPER 在內，也沒有一個模式能在 6 至 11 個月前能夠預報到聖嬰成熟期強度之一半。就此事件而言，短期預報 (0 至 5 個月前) 表現較好的模式為 ENSO-CLIPER，中長期預報 (6 至 23

個月前)表現較好的模式則是 CA、CCA 及 COLA 海氣耦合模式。

由上述學者的研究可知, CCA 和 CA 是較好的聖嬰統計預報模式。能夠正確預報聖嬰現象的發展, 不僅可以提升超越兩星期之預報能力, 同時也可藉由聖嬰資訊應用於台灣地區長期氣候預報之研究。由於 CCA 已應用於現行聖嬰預報作業, 且由兩模式分別對 Niño3.4 海溫預報的校驗(圖略)可發現 CCA 模式雖能良好地掌握聖嬰事件, 但對於反聖嬰事件卻是 CA 模式表現比較好, 因此本研究即根據 van den Dool (1994)及 van den Dool and Barnston (1995)發展 CA 模式, 希望除了聖嬰事件外, 也能對反聖嬰事件做出預警, 甚至可以結合其他動力模式發展多模式系集預報(multi-model ensemble)。本文第二節敘述發展模式所需之資料及方法, 第三節檢視模式預報之表現, 包括模式架構、交叉驗證(cross-validation)、預報校驗(verification)及預報實驗, 第四節為結論。

二、資料及研究方法

配合作業需求, 本研究所使用的資料為 1950-1981 年的重建海溫資料(Reynolds Reconstructed SST, RSST, Smith et al., 1996)及 1982 年迄今的最佳內插海溫資料(NOAA Optimum Interpolation SST V2, OISST, Reynolds et al., 2002)。研究並使用 1854 年迄今的延伸重建海溫資料(Extended Reconstructed SST, ERSST, Smith and Reynolds, 2003)做平行測試, 以經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析探究資料不一致是否會造成影響。經由分析單季(如 JFM)、連續季(如 JFM、FMA、MAM、...、DJF)及四季(如 JFM、AMJ、JAS、OND)的結果顯示, 前四個模(mode)可解釋的變異度皆近 50%, 以連續季為例(圖略), 第一個模除了表示 ENSO 現象外, 另外也可明顯看出年代際(decadal)變化。第二個模的海溫振盪週期約為 5 年, 90 年代後期似乎有跳到另一個氣候狀態(climate regime)的趨勢, 太平洋海溫型態與第一個模類似, 但最強中心位於中太平洋而非東太平洋, 且在印度洋強度較弱。由前二個模來看, 似乎均隱含著太平洋年代際振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)的現象, 換句話說, EOF 分析可能無法將 PDO 現象獨立分離出來。大致上而言, 此兩種資料的差異性不大, 表示我們應可使用 RSST 及 OISST 組合而成的海溫資料庫。

為配合電腦資源, 研究所使用的海溫以季為單位, 資料長度近 50 年, 分析區域為 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$, $45^{\circ}\text{S}\sim 45^{\circ}\text{N}$, 解析度為 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 。Van den Dool (1994)指出, 必須盡可能地減小資料自由度, 才有可能以 CA 的方法來做預報, 因此資料先經過 EOF 分析, 以 Kaiser's rule (Wilks, 1995)保留較重要的前幾個

模。進行 EOF 分析前亦先將資料標準化(standardization), 以去除因地理位置而造成之差異。

所謂 CA 指的是組合過去觀測海溫的距平場, 使其盡可能地接近所要預報目標的海溫距平場, 例如, 以 1973 年 JFM 及 1978 年 JFM 的海溫線性組合成 1975 年 JFM 的海溫。以方程式表示即為要最小化 Q

$$Q(jbase) = \sum_{nmo=1}^M (S_{constr}(nmo) - S_{jbase}(nmo))^2$$

其中

$$S_{constr}(nmo, jbase) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq jbase}}^N \alpha_j S_j(nmo)$$

S 表示季海溫標準距平, α 為權重函數, j 表示年份指標, N 為年份總數, $jbase$ 表示目標年, nmo 表示 EOF 的模指標, M 為保留的模總數。找出權重函數後, 再利用下式預報海溫(即 $t > 0$ 的情況):

$$S_{constr}(nmo, jbase, t) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq jbase}}^N \alpha_j(t=0) S_j(nmo, t)$$

模式的表現則由相關係數及均方根誤差(Wilks, 1995)來評估。

三、模式發展及結果

(一) 模式架構

此處進一步說明預報流程。以觀測值至 2004 年 6 月為例, 欲預報未來一年的季海溫, 首先將 1954 年 JAS 至 2004 年 AMJ 海溫經由 EOF 找出前幾個模(結果顯示以 Kaiser's rule 所保留的模可解釋之變異程度達 90% 以上), 之後以這幾個模重建(reconstructed)的海溫找出權重函數, 例如, 以 1954~2002 年 JAS 重建海溫線性組合成 2003 年 JAS 重建海溫、以 1954~2002 年 OND 重建海溫線性組合成 2003 年 OND 重建海溫、...、以此類推, 如此可找出每年的權重函數, 再以此權重函數將 1955~2003 年 JAS 海溫線性組合成 2004 年 JAS 海溫(即為預報)、...、1956~2004 年 AMJ 海溫線性組合成 2005 年 AMJ 海溫。

(二) 交叉驗證

研究選取 1951-2000 年做為交叉驗證的時間。圖 1 為 Niño3.4 事後預報(hindcast)與觀測值的相關, 結果顯示相關較高的季節為 NDJ、DJF、JFM, 較低

的季節則為 MJJ、JJA、JAS，Niño3 的結果與 Niño3.4 類似，但 Niño1+2 及 Niño4 的結果則顯示較低的季節落在 JAS、ASO、SON（圖略）。最可被長期預報的季節為 OND、NDJ、DJF、JFM、FMA，較差的是 AMJ、MJJ、JJA，換句話說，半年前對冬半年的海溫指標預報，其相關都可達 0.6 以上，但對於春、夏交接之際的海溫指標預報，大概只有一、兩個月前的預報可信度較高，其中 Niño3.4 是四個海溫指標中最具有被預報能力的，最差的則是 Niño3。

(三) 模式校驗

一個月前 (lead1) 對 Niño3.4 1952-2001 年事後預報的校驗 (圖略)，相關係數為 0.88，均方根誤差為 0.38°C，顯示 CA 模式有能力模擬出海溫的年際變化及季節變化。進一步將各海溫指標一個月事前事後預報的相關係數及均方根誤差整理如圖 2，由圖中可看出相關係數由高至低依序為 Niño3.4、Niño4、Niño1+2、Niño3，而均方根誤差由小至大依序為 Niño1+2、Niño4、Niño3.4、Niño3，換句話說，CA 模式對 Niño3.4 的掌握能力還算不錯，對 Niño3 的掌握能力相對而言是較差的。比較一個月事前對 Niño3.4 各季節的事後預報 (圖 3)，則可發現冬半年的表現較夏半年佳，最好的是 DJF，但即使是最差的 JJA，相關係數也超過 0.7。比較對 Niño3.4 DJF 不同領先預報的結果則發現 (圖 4)，1~5 個月前的預報相關係數可達 0.6 以上。

(四) 預報實驗

研究以 1996-2006 年為預報實驗的時間，但由於資料長度不足，海溫資料庫之年份選擇由近 50 年修改為近 40 年，發現一個月前的預報能準確預報 1997/98 聖嬰事件的開始時間 (圖略)，但強度稍弱，對於 1998~2000 年的反聖嬰事件也能良好的掌握，但其中預報 1998/99 反聖嬰事件的強度似乎稍強，對於 2002/03 年的聖嬰事件掌握的能力較差，不但開始時間稍有落後，預報的強度也稍嫌不夠。預報各海溫指標不同領先預報之相關係數及均方根誤差則整理於圖 5，由圖中可看出相關係數由高至低依序為 Niño3.4、Niño4、Niño3、Niño1+2，而均方根誤差由小至大依序為 Niño4、Niño3.4、Niño1+2、Niño3，大致上而言，對 Niño4 的預報要比對 Niño3.4 好一點，對 Niño1+2 的預報結果並不好。若與其他方法如 CCA、ENSO-CLIPER 及持續法比較 Niño3.4 的預報 (陳和慮，2002)，1996-2006 年間各模式的表現如圖 6 所示，結果顯示 ENSO-CLIPER 仍然是表現最好的方法，但值得注意的是 CA 的表現比 CCA 和持續法都要好，不但相關係數提高，也大幅降低均方根誤差，換句話說，CA 模式表現比現行海溫預報作業所使用的 CCA 模式好，對於提高海溫預報準確度應有所助益。

四、結論

本研究使用 1950-1981 年的重建海溫資料及 1982 年迄今的最佳內插海溫資料，根據 van den Dool (1994) 及 van den Dool and Barnston (1995) 發展 Constructed Analog 海溫預報模式，希望除了聖嬰事件外，也能對反聖嬰事件做出預警，進而結合其他動力模式發展多模式系集預報。為配合電腦資源，研究所使用的海溫以季為單位，資料長度近 50 年，分析區域為 0°~360°，45°S~45°N，解析度為 4°×4°。資料先經過 EOF 分析，保留較重要的前幾個模。進行 EOF 分析前亦先將資料標準化，以去除因地理位置而造成之差異。之後再組合過去觀測海溫的距平場，使其盡可能地接近所要預報目標的海溫距平場。

評估模式的表現以交叉驗證、模式校驗及預報實驗來進行。交叉驗證的結果顯示，半年前對冬半年的海溫指標預報，其相關都可達 0.6 以上，但對於春、夏交接之際的海溫指標預報，大概只有一、兩個月前的預報可信度較高，其中 Niño3.4 是四個海溫指標中最具有被預報能力的，最差的則是 Niño3。校驗 Niño3.4 1952-2001 年之事後預報，結果顯示 CA 模式有能力模擬出海溫的年際變化及季節變化。以各海溫指標而言，CA 模式對 Niño3.4 的掌握能力還算不錯，對 Niño3 的掌握能力相對而言是較差的。就季節而言，比較一個月事前對 Niño3.4 各季節的事後預報，冬半年的表現較夏半年佳。就不同領先預報而言，1~5 個月前對 Niño3.4 DJF 事後預報的相關係數可達 0.6 以上。以 1996-2003 年為預報實驗時間，發現 CA 模式對 Niño4 的預報要比對 Niño3.4 好一點，對 Niño1+2 的預報結果並不好。比較各模式於 1996-2000 年間對 Niño3.4 的預報，結果顯示 ENSO-CLIPER 仍然是表現最好的方法，但 CA 的表現比 CCA 和持續法都要好，對於提高海溫預報準確度應有所助益。

本研究已完成開發 Constructed Analog 海溫預報模式，也針對模式的表現做了初步評估，敏感度測試則是未來可以進一步努力的方向，期許經由敏感度測試的結果及討論，決定是否對模式進行細部修正，以提供更準確的海溫預報。

五、誌謝

本研究感謝郭勉之博士提供寶貴建議。

六、參考文獻

陳孟詩與盧孟明，2002：聖嬰／反聖嬰 (El Niño／La Niña) 統計預報之發展。氣象學報，44-4，25-39。

- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, 15, 1609-1625.
- Smith, T. M., R. W. Reynolds, R. E. Livezey, and D. C. Stokes, 1996: Reconstruction of historical sea surface temperature using empirical orthogonal function. *J. Climate*, 9, 1403-1420.
- , and —, 2003: Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854-1997). *J. Climate*, 16, 1495-1510.
- van den Dool, H. M., 1994: Searching for analogues, how long must we wait? *Tellus*, 46A, 314-324.
- , and A. G. Barnston, 1995: Forecasts of global sea surface temperature out to a year using the constructed analogue method. *Proc. of the 19th Annual Climate Diagnostics Workshop*. College Park, MD, NOAA/NMC/CAC and Dept. of Meteor./CIICS, Univ. of Maryland, 416-419.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467pp.

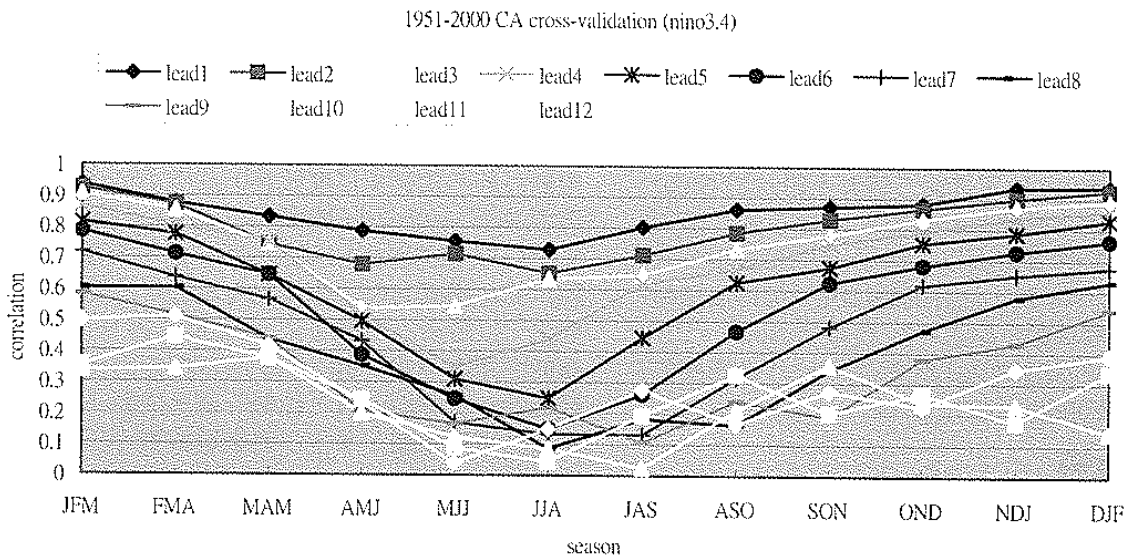


圖 1、1951-2000 年交叉驗證期間各季節 Niño3.4 之不同領先預報與觀測值的相關係數。

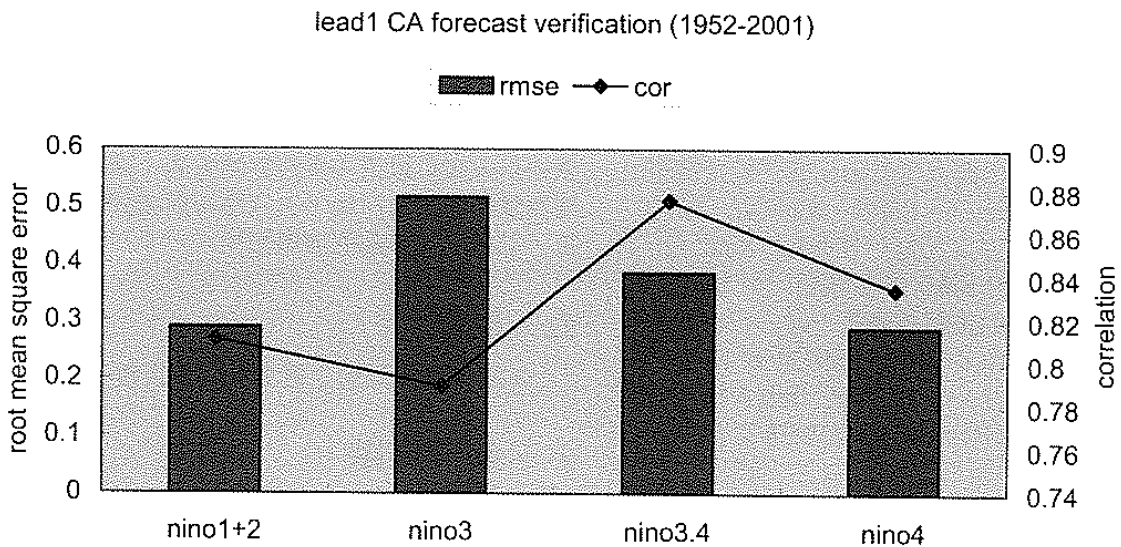


圖 2、CA 對各海溫指標一個月之預報校驗。校驗期間為 1952~2001 年，長條為均方根誤差，折線為相關係數。

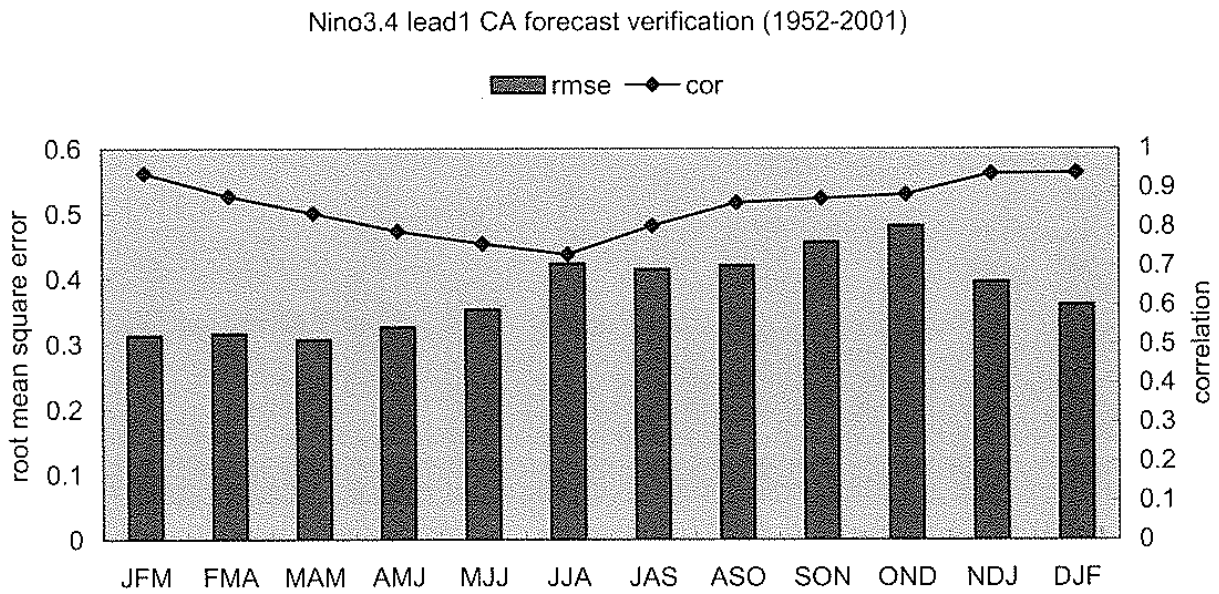


圖 3、CA 對 Niño3.4 各季節一個月之前之預報校驗。校驗期間為 1952-2001 年，長條為均方根誤差，折線為相關係數。

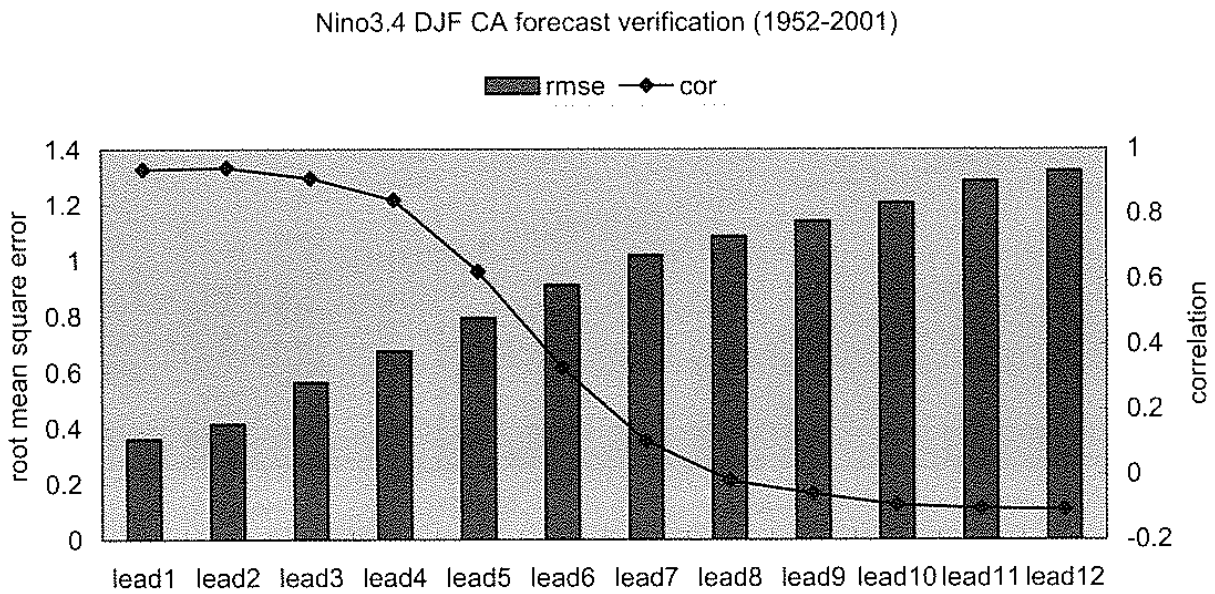


圖 4、CA 對 Niño3.4 DJF 不同領先預報之校驗。校驗期間為 1952~2001 年，長條為均方根誤差，折線為相關係數。

1996-2006 CA forecast verification

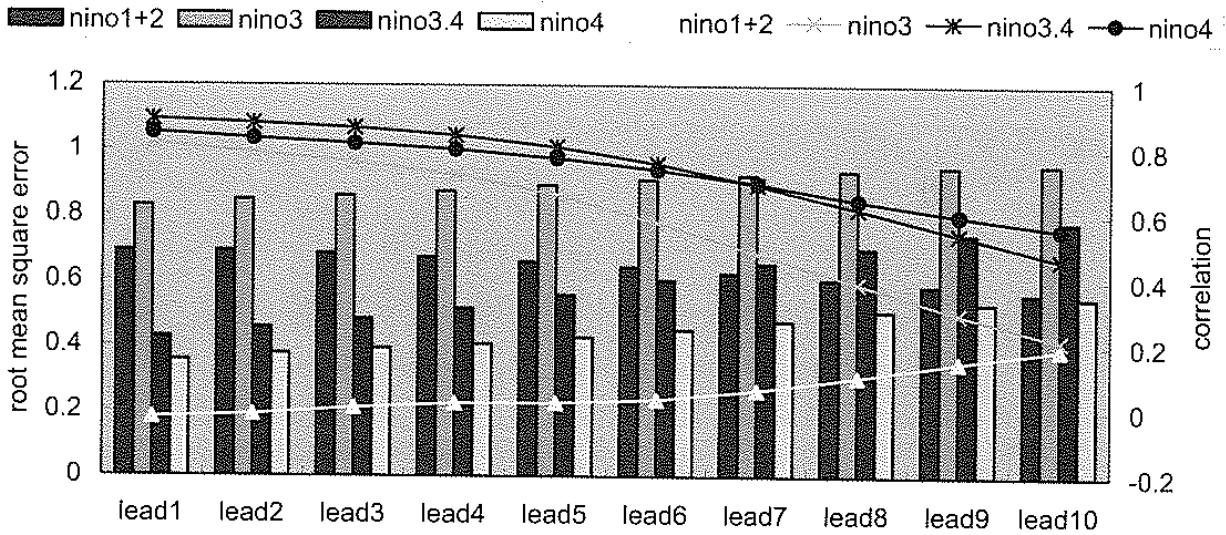


圖 5、1996~2006 年預報實驗期間 CA 對各海溫指標不同領先預報之校驗。長條為均方根誤差，折線為相關係數。

1996-2006 Nino3.4 forecast verification

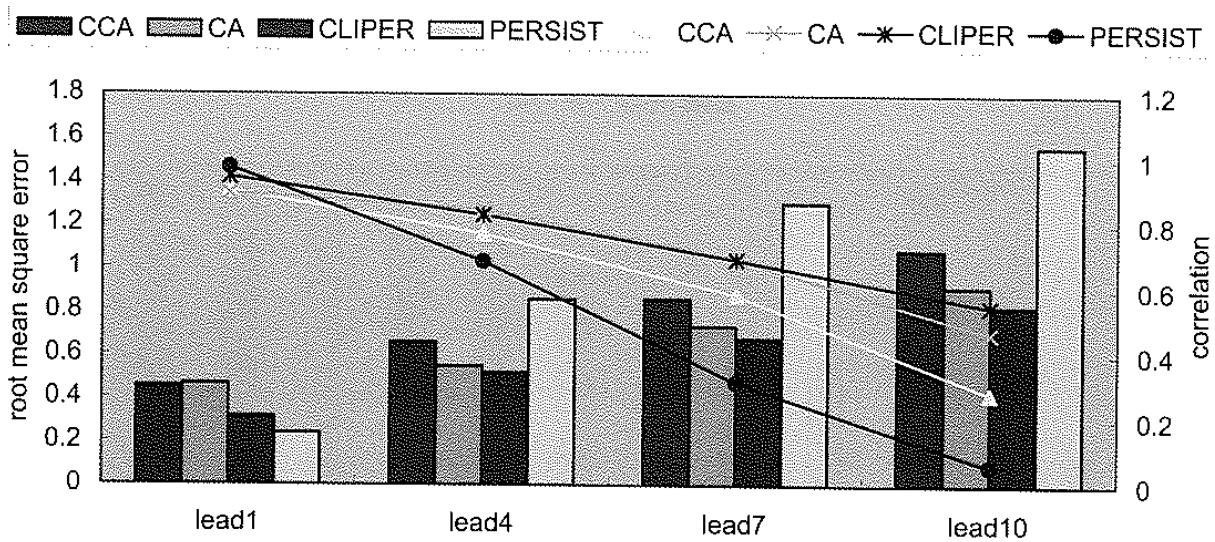


圖 6、1996~2006 年 CA、CCA、持續法 (PERSIST) 及 ENSO-CLIPER 對 Niño3.4 一、四、七、十個月前之預報校驗。長條為均方根誤差，折線為相關係數。