

# 從印度季風到南方振盪： 統計方法如何走進氣象科學

王嘉琪

文化大學大氣與地質科學系教授

## 前言

現在的天氣預報，常會使用「降雨機率」、「颱風路徑不確定範圍」、「系集預報」等詞彙；談到氣候變遷時，也會討論長期平均、趨勢、極端事件機率、自然變異與統計顯著性等。對現代人來說，用統計方法理解天氣與氣候似乎理所當然。但是在氣象科學的發展史中，統計方法並不是一開始就站在舞台中央。它之所以變得重要，是因為科學家碰到了一個非常實際又極為困難的問題：我們能不能預報印度季風？

這個問題之所以重要，是因為印度季風不只是氣候現象，還攸關印度的農業經濟。19 世紀末至 20 世紀初的英屬印度，夏季季風的雨量直接影響農業生產、糧食供應與社會穩定。雨量若明顯不足，可能導致旱災與饑荒；若能在雨季來臨前預先推估季風會偏強或偏弱，政府便有機會提前準備糧食、灌溉與救災措施。

## 早期預報的嘗試與限制

1877 年，由於夏季季風雨量不足，造成嚴重乾旱與饑荒，印度氣象局 (India Meteorological Department) 迫切需要發展季風長期預報的能力。第一任預報員布蘭福德爵士 (Sir Henry Francis Blanford) 剛上任就開始嘗試利用喜馬拉雅山的積雪作為預報因子，並自 1886 年開始發布例行的季風預報 (India Meteorological Department, n.d.)。

這個想法在直覺上並不難理解，若冬季或春季喜馬拉雅山與氣候平均相比，有較多積雪，陸地升溫可能較慢，海陸溫差較小，進而減弱夏季季風，反之亦然。但是實際預報結果並不理想，因為季風受到多重因子影響，除了喜馬拉雅山的積雪，還包括印度局部地區的氣象條件、印度洋與太平洋的大氣狀態，甚至更遠地區的氣壓與降雨，都可能與季風變化有關。

## 沃克的氣象任務

沃克爵士 (Sir Gilbert Thomas Walker, 1868–1958; 見圖 1) 是英國數學家與氣象學家，他受過嚴格的數學訓練，研究興趣相當廣泛，曾涉獵電磁學、空氣動力學、鳥類飛行、迴旋鏢運動與時間序列分析等領域。1904 年沃克成為印度氣象局第三任局長，當時印度需要的，不只是一位熟悉天氣圖的氣象人員，而是一位能夠面對大量資料、尋找規律、建立客觀預報方法的人。沃克在 1904 至 1924 年任職期間，開始使用較客觀的技術進行長期季風預報，並將相關與迴歸方法引入這項工作 (Katz, 2002)。

圖 1

沃克肖像



圖片來源：MacTutor History of Mathematics/Royal Society obituary portrait。

沃克在研究印度季風長期預報時，將相關與迴歸等統計方法引入氣象分析，並辨識出後來稱為「南方振盪」(southern oscillation) 的大尺度氣壓變化。這是氣象科學史上一個很重要的轉折。沃克面對的問題，並不是「明天下午會不會下雨」這種短期天氣預報，而是「幾個月後的印度夏季季風降雨會偏多還是偏少」。這類問題很難只靠幾張天氣圖回答，因為季風是大尺度、季節尺度的現象，涉及海洋、陸地、熱帶大氣環流與遠方地區的變化。沃克的想法是：既然印度季風可能不是孤立的局部現象，那麼也許可以從世界各地的觀測資料中，找出與印度雨量相關的線索。

## 把世界放進統計表

為了尋找影響印度季風雨量的因素，沃克開始進行一項在當時相當龐大的資料分析工作。他和同事整理世界各地的氣壓、溫度、降雨等資料，計算不同地區、不同季節、不同時間落差之間的相關係數 (NOAA Physical Sciences Laboratory, n.d.)。現在這些工作是氣候資料分析的基本功：尋找變數之間的相關性、檢查是否有時間差、建立迴歸式和評估預報能力。但是在當時，這是一種新的氣象研究方式，有別於早期氣象學從局部地區的觀測與天氣圖出發的分析方法。

沃克試圖把全球各地的資料放在一起，問一個更大尺度的問題：世界不同地區的大氣變化之間，是否存在可以重複出現的關係？也就是說要「從大量資料中尋找結構」。

例如，若印度雨量偏少時，澳洲附近氣壓常常偏高，而南美洲附近氣壓偏低，那麼這些遙遠地區的變化可能並非完全獨立。沃克正是沿著這樣的思路，逐步找出一種跨越印度洋與太平洋的大尺度氣壓變化型態，也就是後來被稱為「南方振盪」的現象 (Walker, 1923, 1924)。

「相關」與「迴歸」是最早進入氣象科學的統計分析方法，但是什麼是「相關」與「迴歸」？所謂相關，是用來描述兩個變數是否傾向一起變化。例如，一個地區春季氣壓偏高時，另一個地區夏季降雨是否常常偏少？若這種關係在許多年的資料中反覆出現，就可以說兩者具有某種統計相關。迴歸則進一步嘗試建立一個預測式。例如，若印度夏季雨量與前幾個月某些地區的氣壓、溫度或降雨有關，研究者便可以把這些變數放入一個統計式中，嘗試預測即將到來的季風雨量。沃克的工作正是這種思維的早期代表。他不是只看單一地點或單一年份，而是把多地、多年、多季節的資料放在一起，尋找可重複出現的統計關係。但是相關不等於因果。兩個變數一起變化，並不代表其中一個變數的變化直接造成另一個變數改變。它們可能共同受到第三個因素影響，也可能只是某一段時期剛好呈現關聯。因此，統計方法可以提供線索，卻仍需要物理機制來解釋這些線索為什麼存在。

## 從統計線索到物理機制

南方振盪這個發現的意義非常深遠。沃克原本的任務是改善印度季風預報，但他在尋找季風預報因子的過程中，意外發現了全球熱帶大氣的一種整體變化。換句話說，他不是先有完整理論，然後用資料驗證；而是在龐大資料中先看到了統計關係，再讓這些關係引導科學家思考背後可能存在的物理機制。這裡也可以看出統計方法在氣象科學中的雙重角色。第一，它可以作為預報工具：如果某些遠方的氣壓或溫度變化與印度季風有穩定關係，就有可能用來提前判斷季風強弱。第二，它可以作為發現工具：即使預報能力有限，統計關係仍可能透露出大氣系統中原本不容易被看見的連結。沃克的南方振盪正是第二種角色的經典例子。

這種「遠距離關聯」後來成為氣候科學中的重要概念，也就是所謂的「遙相關 (teleconnection)」。遙相關指的是相距很遠的地區，其氣候異常可能呈現統計上的連動關係。這類關係不一定代表兩地直接互相影響，而可能是透過大尺度大氣環流、海氣交互作用或波動結構相互連結。沃克的工作不只是在技術上建立統計相關性，也在氣象科學上創造了一種「相互連結的氣候世界」的概念，各地的氣壓、雨量與溫度變化，不再只是區域現象，而可能是全球尺度振盪的一部分。

不過，沃克的工作也有明顯限制。他找到了許多相關性，但並不是所有的關係都能

穩定用於預報。沃克的工作大量依賴領先-落後相關性 (lead-lag correlation) 分析。這些統計關係雖然描述了南方振盪的重要結構，但對其完整物理解釋並不充分 (NOAA Physical Sciences Laboratory, n.d.)。沃克曾系統性檢查印度季風雨量與全球環流參數的關係，並在 1906 年以 28 個預報因子建立迴歸式，但後續研究顯示其中部分因子的統計關係會隨時間減弱或失去顯著性 (Indian Institute of Tropical Meteorology, n.d.)。

這一點對現代讀者特別重要。沃克的故事告訴我們「並不是只要資料夠多，就可以用統計方法解決所有問題」。相反地，它提醒我們：統計方法非常有用，但統計關係本身並不等於物理解釋。相關可以幫助科學家看見線索，迴歸可以協助建立預報工具，時間落差分析可以指出潛在的預兆；但若要判斷一個關係是否可靠、是否能在不同年代維持、是否能用於未來預測，就必須回到物理機制與資料品質。

沃克的時代主要是從氣壓資料看見大氣振盪，到了 20 世紀中葉以後，科學家進一步把這種大氣變化與赤道太平洋海溫異常連結起來。畢雅可尼 (Bjerknes, 1969) 提出海溫、信風、熱帶對流與東西向大氣環流之間的耦合關係，逐漸形成今日所熟知的聖嬰—南方振盪現象 (El Niño-southern oscillation, ENSO)，使得沃克早期以統計方式辨識出的南方振盪獲得更完整的物理意義 (Adamson, 2020)。

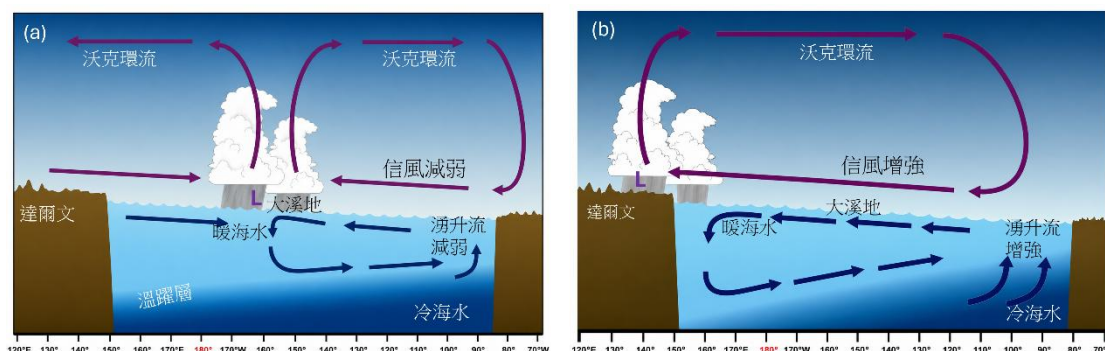
「南方振盪」與「ENSO」常被放在一起介紹，但兩者並不完全相同。如圖 2 紫色箭頭所示，南方振盪主要指熱帶印度洋—太平洋地區的大尺度氣壓翹翹板，是沃克從氣壓與降雨等資料中辨識出的統計型態，後來發展成用大溪地與達爾文之間的海平面氣壓差來描述南方振盪的指數，也就是「南方振盪指數」(southern oscillation index, SOI)。氣壓蹺蹺板反映的便是東西向大尺度環流的變化，後來此環流被命名為沃克環流。

ENSO 則是更完整的海氣耦合現象。它包含赤道太平洋海溫異常，也包含沃克環流、信風、對流與降雨分布的改變。聖嬰現象通常對應赤道中東太平洋海溫偏暖，而反聖嬰則對應該區海溫偏冷。當海溫異常與大氣南方振盪相互作用時，就形成我們今天所說的 ENSO。

換句話說，沃克主要看見的是大氣的振盪；後來的研究則補上了對應的海洋變化與海氣交互作用機制。這也正是氣候科學發展中常見的路徑：統計方法先在資料中辨識出型態，物理理論再進一步解釋這些型態如何形成與維持。

圖 2

ENSO 現象示意圖。(a) 聖嬰；(b) 反聖嬰



註：

1. 南方振盪為海表面溫度改變時，沃克環流隨著海水溫度分布一起變化的大氣反應。聖嬰現象則是信風改變時，表層洋流及湧升流減弱，暖海水往中太平洋回流的海洋反應。大氣（沃克環流）與表層海洋會互相影響，透過此正回饋過程形成聖嬰-南方振盪現象。
2. 圖片來源：參考 NOAA 網頁重繪

## 沃克留給現代氣候科學的問題

沃克的故事同時具有歷史性、科學性與現代意義。從歷史上看，它發生在殖民政府急需季風預報的脈絡之中；從科學上看，它展示了統計方法如何進入氣象研究；從現代意義上看，它也提醒我們，今日的氣候科學仍然面對類似問題：如何從大量資料中辨識訊號？如何區分穩定關係與偶然巧合？如何把統計結果轉化為可理解的物理機制？

如果把時間拉回沃克的時代，當時沒有衛星，沒有全球再分析資料，也沒有超級電腦。科學家手上的資料來自世界各地測站，時間長度有限，品質也不完全一致。在這樣的條件下，要從全球資料中辨識出南方振盪，並不是一件容易的事。沃克所做的，是把零散觀測轉化為可比較的統計量，再將這些統計量放到地理空間中理解。這種做法與今日氣候科學常用的相關圖、迴歸圖、主成分分析、經驗正交函數分析，甚至機器學習中的型態辨識，都有概念上的連續性。

當然，現代方法比沃克的時代複雜許多。今日科學家可以使用全球衛星觀測、海洋浮標、再分析資料、氣候模式與大量系集模擬（ensemble simulation），分析海溫、風場、降雨、雲量、土壤濕度、積雪、海冰與輻射收支之間的關係。AI 模型也可以在高維度資料中學習非線性關係，用於天氣預報、降雨估計、颱風路徑輔助預測、模式偏差修正或氣候型態分類。可是，在這些複雜技術背後，仍然延續著沃克時代已經提出的基本問題：資料中是否存在可重複出現的結構？這些結構是否具有預報價值？它們是否能被物理機制解釋？

沃克的故事是氣象科學方法轉變的一個象徵。統計方法在氣象與氣候科學中的價值，並不是讓我們用統計模型取代理解，而是讓我們更清楚地提出問題。當我們看到兩個變數有相關時，下一步是追問：這個關係是否穩定？是否受年代際變異影響？是否在不同資料集中都存在？是否有合理的物理機制？是否能在模式中重現？這些問題至今仍是氣候研究的核心。

因此，從印度季風到南方振盪，沃克的研究歷程可以被看成統計方法走進氣象科學的一個經典入口。它始於一個迫切的社會需求：能否預測攸關民生的季風雨量？它發展成一套客觀分析方法：使用相關、迴歸與時間落差分析尋找預報因子。它最終又超越了原本的預報目標，找出了熱帶大氣中跨越印度洋與太平洋的大尺度振盪。這段歷史說明，統計方法不只是預報工具，也是科學發現的工具。

今日，當我們討論降雨機率、系集預報、氣候變遷趨勢、極端事件發生機率，甚至 AI 天氣模型時，其實都站在同一條科學脈絡上。面對複雜且充滿不確定性的大氣系統，我們不只尋找單一答案，而是嘗試理解可能性、變異範圍、統計訊號與物理機制之間的關係。沃克當年為了印度季風所做的努力，正是這條脈絡中極具代表性的起點之一。

## 參考文獻

- Adamson, G. (2020) . *Imperial oscillations: Gilbert Walker and the construction of the southern oscillation*. In M. Mahony & S. Randalls (Eds.) , *Weather, climate, and the geographical imagination: Placing atmospheric knowledges* (pp. 43–66) . University of Pittsburgh Press.  
[https://kclpure.kcl.ac.uk/ws/portalfiles/portal/131112580/PURE\\_version.pdf](https://kclpure.kcl.ac.uk/ws/portalfiles/portal/131112580/PURE_version.pdf)
- Bjerknes, J. (1969) . Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97, 163–172.
- India Meteorological Department. (n.d.) . *Climate prediction and monitoring group: History of long range forecasting*.  
<https://imdpune.gov.in/cmpg/lrf/History.html>
- Indian Institute of Tropical Meteorology. (n.d.) . *Seasonal prediction*.  
[https://www.tropmet.res.in/monsoon/files/seasonal\\_prediction.php](https://www.tropmet.res.in/monsoon/files/seasonal_prediction.php)
- Katz, R. W. (2002) . Sir Gilbert Walker and a connection between El Niño and statistics. *Statistical Science*, 17 (1) , 97–112.
- NOAA Physical Sciences Laboratory. (n.d.) . *History of the southern oscillation index*. <https://psl.noaa.gov/enso/misc/hxsoi.html>
- Walker, G. T. (1923) . Correlation in seasonal variations of weather, VIII: A preliminary study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, 24, 75–131.
- Walker, G. T. (1924) . Correlation in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather. *Memoirs of the India Meteorological Department*, 24, 275–333.

