

## 目 錄

總召集人的話 李隆盛 III

### 本期專題：地球科學與災害防制



大西洋聖嬰與反聖嬰現象 涂建翊 1

地震發生後的長週期震動 蕭乃祺 11

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 21

### 教學現場

淺層地底構造探勘：用「光的折射」原理透視地下世界 陳達毅 29

礦石之美者：自然世界的原始呼喚 吳育雅 39

### 特約專欄

幼兒園圖鑑繪本科學閱讀的教學轉化與實踐 劉淑雯、蕭淑芬 49

森棚教官的數學題：無齒之輪 游森棚 65

### 科普活動報導

在科教館遇見未來：親子職感挑戰與「可能自我」的建構 蘇萬生、陳冠玟、林昕諺、賴予亭 67

## 關於本刊

出版單位：國立臺灣科學教育館

發行人：劉火欽

總召集人：李隆盛

編輯委員：

- ◆ 物理科 吳仲卿 余進忠 戴明鳳 朱慶琪
- ◆ 化學科 王伯昌 林如章 周金城 黃琴扉
- ◆ 生物科 王美芬 蕭世輝 張育傑 辛懷梓 郭淑妙
- ◆ 地球科學 許民陽 王郁軒 謝隆欽 盧孟明
- ◆ 科技科 張玉山 汪殿杰 林育沖 徐新逸
- ◆ 數學科 李源順 游森棚 嚴志弘 高欣欣
- ◆ 跨領域學科 李名揚 劉淑雯 吳 嫻 李芝瑜 王淑音

特約專欄：游森棚 黃琴扉 陳正改 劉淑雯

策劃：李耕雲

主編：吳中益

編輯：佟冠誼 林博雅

網頁設計編輯：施曉恬

投稿規範請來信詢問：[article@mail.ntsec.gov.tw](mailto:article@mail.ntsec.gov.tw)

## 總召集人的話

科學先進國家中小學地球科學與防災教育的發展方向之一是重視「氣候韌性」與「跨學科實踐」。例如，聚焦於颶風（颱風）與地震引發的複合式災害，並探討氣候變遷對極端天氣頻率的影響，強調社區防禦與抗災城市設計；結合大數據與地理資訊系統進行災害模擬，並透過新世代科學標準等跨學科 STEM 模式，培養學生在地化風險評估與危機決策的公民素養。

本期《科學研習》以地球科學為專題，主題側重災害防制。全刊共登載八篇文章，分為下列四個單元：

### 專題主題：地球科學與災害防制（3 篇）

先是〈大西洋聖嬰與反聖嬰現象〉一文介紹發生於大西洋海域赤道區的海溫異常現象—大西洋聖嬰與反聖嬰。透過與太平洋聖嬰現象對比，說明其規模較小、強度較弱且主要於夏季成熟的特性。文中亦解析其對西非季風、降雨及大西洋颶風生成的影響，並指出 2019--2024 年間的極端發展趨勢。接著，〈地震發生後的長週期震動〉深入淺出地解析地震發生後長週期震動對高層建築的影響，強調當長週期震動週期與建物自然週期一致時產生的共振風險。文中透過 1985 年墨西哥及 2011 年東日本大震災等實例，指出遠距離大地震仍能對都市高樓造成劇烈晃動。最後介紹臺灣長週期震度應用情形，並指出我國參考日本經驗推動長週期震動研發的需求。〈從印度季風到南方振盪：統計方法如何走進氣象科學〉介紹統計方法進入氣象科學的歷史轉折，內容聚焦於沃克（Gilbert Walker）爵士對印度季風預報的研究。沃克在 20 世紀初利用相關與迴歸分析，從全球觀測資料中識別出「南方振盪」跨洋氣壓規律。文中說明了統計方法如何從預報工具演變為科學發現的線索，並最終與物理機制結合。

以上三篇文章，解析大西洋聖嬰、地震共振與統計預報演進，呈現地球科學對環境變異、災害風險及預測技術的重要探索面向。

### 教學現場：地底探勘與地質科學（2 篇）

〈淺層地底構造探勘：用「光的折射」原理透視地下世界〉分享利用地震折射法探測淺層地底構造的原理與實務。作者以光學折射為類比，闡述司乃耳定律應用於震波探勘的方法，並解釋如何透過「走時曲線圖」分析直達波與折射波，進而推算地層波速與厚度。文中記錄了臺北市立大學學生的校園實作過程，展示與說明利用重錘和地震儀，即可在不開挖地表下探勘淺層地底構造。〈礦石之美者：自然世界的原始呼喚〉藉由科

博館特展，介紹礦物學歷史發展與現代應用。從早期的解理與硬度發現，談到石英及稀土在半導體工業的關鍵角色；最後說明海森（Robert Hazen）的礦物演化論，指出氧氣與生命如何催生出地表的繽紛礦物。

以上兩篇文章，聚焦於地底探勘與地質科學的教學實踐，透過光的折射原理透視地下世界，並從礦物演化探索自然之美。

### 特約專欄：思考與實踐的引導（2 篇）

〈幼兒園圖鑑繪本科學閱讀的教學轉化與實踐〉探討幼兒園過度偏重故事繪本、忽略資訊類「圖鑑繪本」的教學困境。分享作者透過跨園教師專業學習社群，共同研發出適應幼兒認知發展的「三層次提問架構」，藉由恐龍與狗狗等生活主題的遊戲化實踐，將靜態圖鑑轉化為引發幼兒主動觀察、推理與探究的科學工具。森棚教官的數學題〈無齒之輪〉透過「砍去部分齒輪的重疊齒」為情境，引導讀者思考離散數學與組合幾何中的旋轉、對稱與覆蓋問題。文中提出四個遞進式問題，從具體的 7 齒、14 齒變形，最終延伸至一般化的  $n$  齒齒輪，並加入翻面的空間變換，探討完整投影的可能性。

以上兩篇文章分別透過不同載體深化思考，一藉三層次提問拉近幼兒與圖鑑的距離，另一則利用齒輪模型拆解離散數學的空間對稱，二者都強調思考與實踐的引導。

### 科普活動報導：親子職感挑戰（1 篇）

〈在科教館遇見未來：親子職感挑戰與「可能自我」的建構〉報導職掘協會與科教館合作舉辦的親子職感挑戰賽。活動設計八大跨領域職人關卡，融合航太、金融等專業與情感教育。透過體驗式學習與家庭雙重驅動，幫助兒童探索職涯，同時深化親情連結並實踐家庭賦能。

綜上，本期八篇文章從巨觀的氣象變異、微觀的礦物構造，一路延伸至教學轉化、數學思考與親子科普活動。期盼這些豐富的內容，能為讀者開啟跨學科探究的視角，並在心中增強加深和加廣科學探索與環境韌性的動機。

總召編輯委員—李隆盛



# 大西洋聖嬰與反聖嬰現象

涂建翊

彰化師大地理學系教授

聖嬰現象 (El Niño) 是目前大家所熟知，發生在太平洋海域，中太平洋至東太平洋赤道區海水表面溫度異常偏高的現象；相反地，當該區域海水表面溫度偏低時，則稱為反聖嬰現象 (La Niña)。兩者之間，以不規律的週期交替出現。

大西洋海域赤道區也有著類似的變化特徵，學者稱它為大西洋聖嬰 (Atlantic Niño)、大西洋反聖嬰 (Atlantic Niña) 或者是大西洋緯向 (東西向) 模態 (Atlantic zonal mode, AZM)。它與傳統聖嬰現象有何不同？主要影響又是什麼？接下來將透過以下內容讓大家認識它。

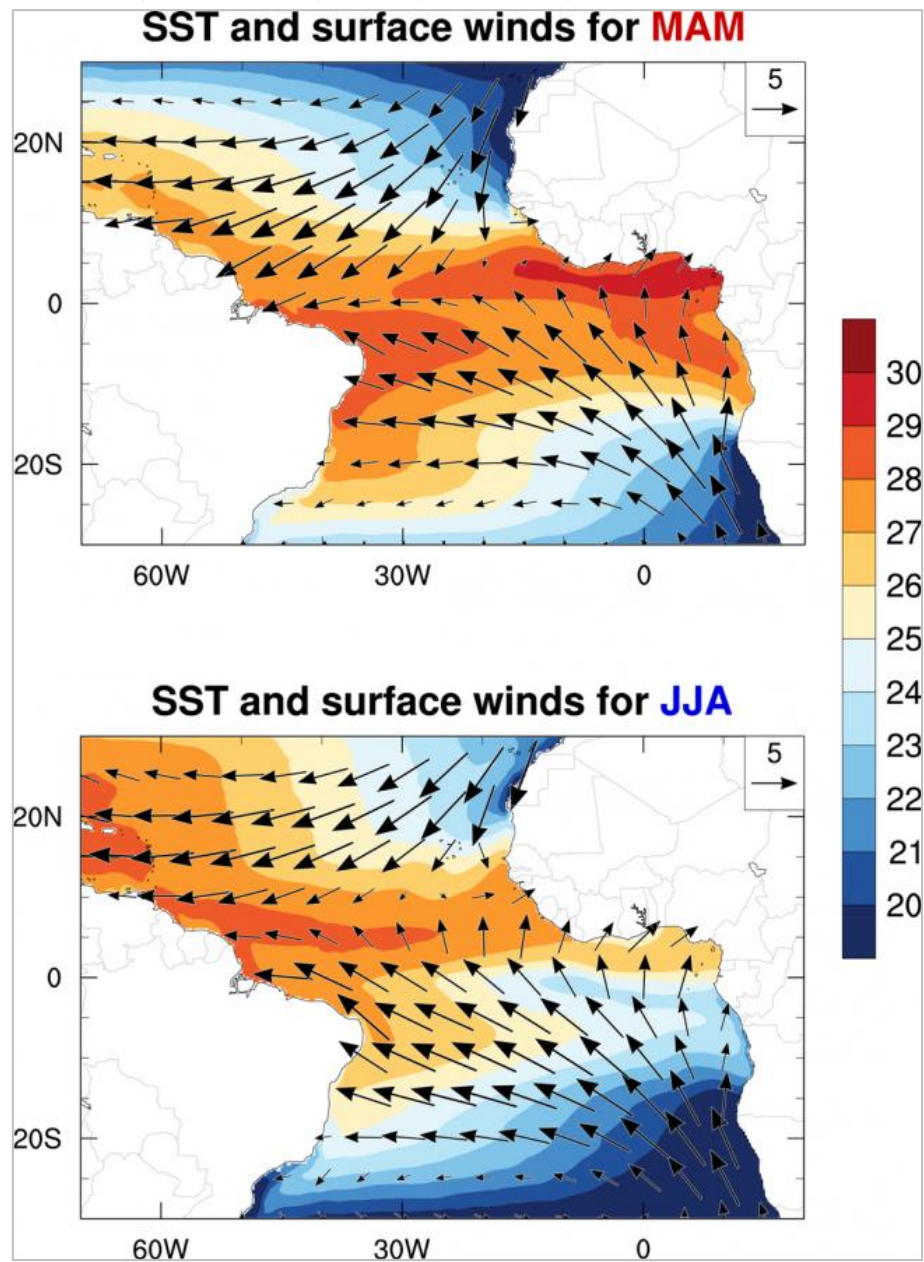
## 熱帶大西洋海域的季節循環特徵

過去我們在討論季節變化時，幾乎都會連結到中、高緯度地區，而熱帶地區其實也同樣有季節變化，只是幅度相對小一些。以熱帶大西洋為例，春季時 (3-5 月/March-April-May/MAM 的平均)，太陽直射區的位置會最靠近赤道，此時赤道地區的太陽輻射加熱作用最為強烈，並伴隨空氣輻合以及信風減弱等特徵，連帶使得赤道海水表面溫度於此季節特別溫暖。其中，幾內亞灣附近海域的海水溫度高達 29°C，整個海盆從南緯 10°到北緯 5°之間，也都在 27°C 以上 (圖 1 上)。

到了夏季 (6-8 月/June-July-August/JJA 的平均)，隨著太陽直射區位置北移，高海溫區位置和空氣輻合帶也同時往北移動，這也讓赤道附近的東南信風增強，赤道東大西洋海表面溫度開始下降，並從赤道南側的非洲沿岸一路向西延伸到西經 20°附近，形成一條相對低溫 (低於 25°C) 的區域，稱為「大西洋冷舌」(Atlantic cold tongue)。由於大西洋西側仍維持溫暖的狀態，最終形成明顯的東西向溫度差 (即東西向海表面溫度梯度大) (圖 1 下)，也增強了海洋與非洲大陸之間的熱力對比，進而影響西非季風的發展。

圖 1

北半球春季 ( 3-5 月 · MAM ) 與夏季 ( 6-8 月 · JJA ) 熱帶大西洋氣候平均狀態



註：

背景顏色為海水表面溫度 ( sea surface temperature, SST ; 單位 : °C ) ; 箭頭代表近地面 10 公尺風場 ( 單位 : 公尺/秒 ) ; 右上角的數字 5 以及下方的小箭頭代表風標單位長度相對應的風速大小 , 即圖中箭頭的長度若與該基準箭頭一致 , 則代表該處的平均風速為 5 公尺/秒。

本圖來源 : [https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/?page\\_id=1566](https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/?page_id=1566)

為什麼會出現這樣的溫度分布特徵？其實與熱帶大西洋近地面風場由東往西吹送有關，結果會造成暖水團（water masses）往西岸移動，並在南美洲沿岸堆積，連帶讓大西洋赤道區東側的海水，由較冷的次表層往表層方向流動，形成湧升流，導致東側海水表面溫度偏低。

## 何謂「大西洋聖嬰／大西洋反聖嬰」？

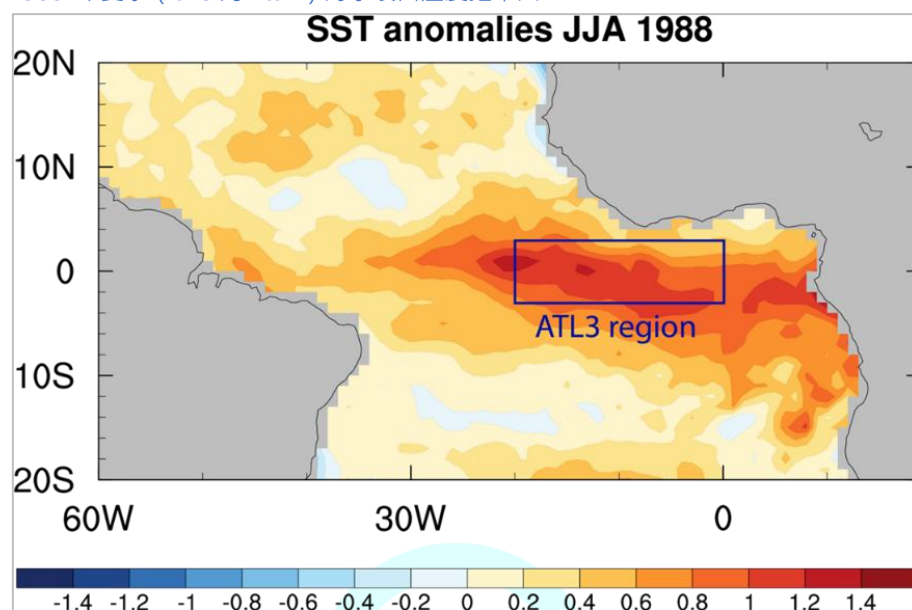
由上一段的季節循環特徵說明可以清楚知道：夏季時，熱帶大西洋海域海水表面溫度所呈現出來最重要的特徵，就是東側與西側有明顯的差異，其中西側海水表面溫度明顯高於東側，熱帶東風扮演關鍵角色。那麼大西洋聖嬰/大西洋反聖嬰現象指的又是什麼呢？

所謂「大西洋聖嬰現象」，指的是每隔數年發生在赤道東大西洋，海水表面溫度異常升高的現象，屬於暖事件，是一種低頻的熱帶氣候變化型態。該名詞於 1980 年代被提出，特徵與眾所周知的熱帶太平洋聖嬰現象（El Niño）非常相似，不過所涵蓋的範圍較小、振幅也比太平洋聖嬰弱，海水表面溫度變化更是集中在赤道附近，所以有人戲稱他是「聖嬰小兄弟」（El Niño's little brother 或 El Hermanito）。不過也有學者認為，使用大西洋緯向模態，也就是大西洋赤道地區，海水表面溫度呈現東西方向差異變化的氣候模態，來形容這樣的現象會更貼切；與太平洋反聖嬰現象相似的冷事件，則稱為「大西洋反聖嬰」。

某些年份（圖 2），熱帶大西洋近地面的東風會減弱，使得赤道海洋環流和大西洋東側的湧升流變弱，冷卻作用也隨之減弱。這結果會造成赤道東大西洋的海水表面溫度升高，當升溫幅度大於氣候平均值  $0.5^{\circ}\text{C}$  甚至  $1^{\circ}\text{C}$  時，就會被視為是一場暖事件或稱為「大西洋聖嬰事件」。同樣地，在其他年份，若是東風增強，那麼會讓赤道海洋環流與湧升流變得更強，冷卻效應也更加明顯，當赤道東大西洋的海水表面溫度低於氣候平均值時（即海溫距平 $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ 以上），就可以被定義為冷事件或稱為「大西洋反聖嬰事件」。

圖 2

1988 年夏季 ( 6-8 月 · JJA ) 海水表面溫度距平圖



註：

1988 年為相對強烈的大西洋聖嬰事件。藍色方框所標示的 ATL3 ( Atlantic 3 ) 區域為常用於監測大西洋聖嬰事件的指標海域，位置位於大西洋冷舌區 ( 20°W-0°、3°S-3°N )，透過計算該區域範圍內的海水表面溫度距平值，可以描述赤道大西洋的海溫變化狀態，該數值也稱為 ATL3 指數。

本圖來源：<https://www.clivar.org/content/atlantic-ni%C3%B1os-aren%E2%80%99t-what-they-used-be>

為了掌握大西洋赤道區海水溫度的長期變化，學者透過資料分析，嘗試將海溫變化敏感區 ( 3°S-3°N，20°W-0° ) 視為指標海域，藉由計算該區域範圍內的海水表面溫度平均值，定義為「大西洋聖嬰指標」，並稱為 Atlantic 3 (ATL3) 指數 (Zebiak, 1993)。只取南北緯 3 度之間，是因為大西洋海盆較太平洋小，在這個緯度範圍內，有最穩定且顯著的變化，同時不容易被其他低頻振盪訊號所干擾。

## 大西洋聖嬰與太平洋聖嬰有何差別？

太平洋聖嬰與大西洋聖嬰都具有季節到年際時間尺度的變化特徵，差異性呢？大致上我們可以從以下幾個面向進行討論。

### 一、海水表面溫度異常所涵蓋的範圍

由於大西洋海盆赤道區的寬度大約只有太平洋赤道區的三分之一。所以從東西向寬度來看，大西洋暖海溫區域範圍，大約也僅是太平洋對應區域範圍的三分之一，規模明顯偏小。

## 二、海水表面溫度異常幅度

當太平洋聖嬰現象達到成熟時，指標海域的海水表面溫度可比氣候平均值高出 3°C 以上。相較之下，大西洋聖嬰現象達到成熟時，增溫幅度通常僅約 1°C。這也說明了，太平洋海域所發生的聖嬰現象強度明顯高於大西洋。

## 三、大氣—海洋交互作用的強度差別

大西洋的大氣—海洋交互作用強度，一般被認為較弱，也就是在相同的海溫異常條件下，在大西洋所引起的風場反應，通常要比在太平洋來得弱，這也是大西洋聖嬰強度為何較弱的可能原因之一。

## 四、事件演變與強度達到最強時間

太平洋聖嬰事件通常會在北半球春末夏初時開始發展，秋冬季達到成熟，並於翌年春季開始減弱，維持一至兩年的時間。大西洋聖嬰事件則明顯不同，它的發展通常是在北半球春季（3–5 月，MAM）展開，夏季（6–8 月，JJA）時強度達到最強，秋季就會逐漸減弱（圖 3a），持續時間僅數個月。不僅僅是持續時間沒有太平洋聖嬰事件來得長，對應季節的時序演變也完全不同。

## 五、變化週期

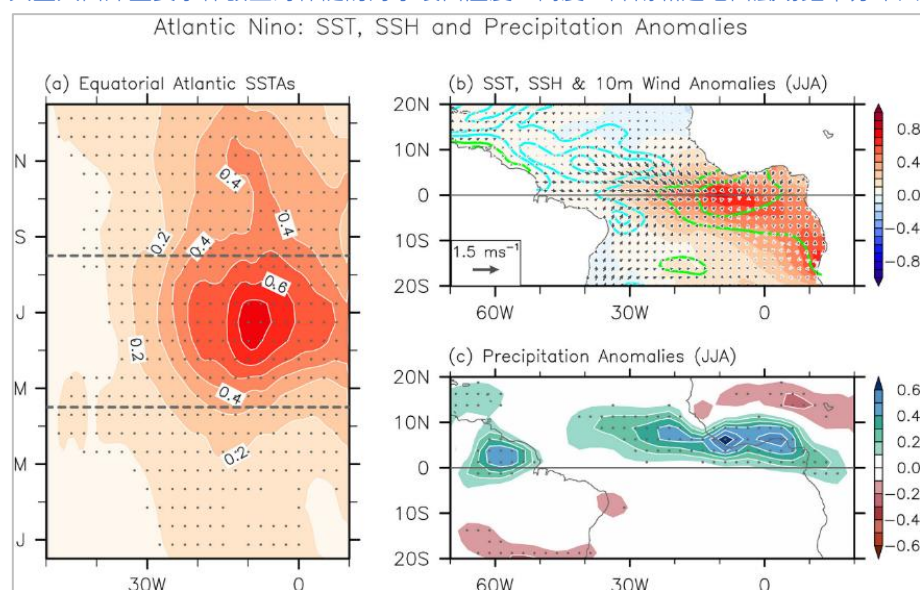
太平洋聖嬰事件是一個伴隨 2–7 年時間尺度的準週期性低頻振盪現象，但是大西洋聖嬰事件的變化週期，目前仍不是太明確。

## 大西洋聖嬰事件會帶來什麼影響？

大西洋聖嬰事件通常發生在太平洋聖嬰事件發展相對不活躍的夏季，持續時間較短、強度也比不上太平洋聖嬰，對於氣候的影響相對溫和，範圍也以區域尺度為主，不過有研究指出，它可以藉由大氣環流的遙相關，來影響更遙遠的地方。舉例來說，當發生大西洋聖嬰事件時，鄰近的西非夏季季風運行規律可能被打亂，同時大西洋間熱帶輻合區（Atlantic intertropical convergence zone，ITCZ）的對流和降雨強度會增強，並往南偏移，這結果會導致南美洲東北部和幾內亞灣沿岸的西非國家洪水發生頻率提高（圖 3c）（Vallès - Casanova et al., 2020），北方的薩赫爾（Sahel）地區降雨則減少。另外，夏季大西洋增溫的結果，有可能同步增強太平洋赤道區的東西向沃克環流（Pacific Walker circulation），間接導致接下來的冬季於太平洋發展出反聖嬰現象。

圖 3

典型大西洋聖嬰事件發生時伴隨的海水表面溫度、高度、降雨和近地面風場距平分布圖



註：

1. (a) 為典型大西洋聖嬰事件發生時，赤道大西洋海水表面溫度距平 (SSTA) 之時間-經度圖，緯度範圍選取 3°S-3°N，時間從 1 月開始至 12 月。經由統計檢定信心水準達 99% 以上之海溫距平值以灰點標示。
2. (b) 為北半球夏季 (6-8 月，JJA) 熱帶大西洋海水表面溫度距平值 (色階)、海面高度距平值 (SSH，等值線) 以及 10 公尺高度風場距平值 (風標)。海面高度距平值中的綠色等值線代表正值，水藍色代表負值。
3. (c) 為北半球夏季降水距平值。經由統計檢定信心水準達 95% 以上的降水距平以灰點標示。
4. 海表面溫度、海表面高度、10 公尺風場和降水的單位分別為 °C、公分、公尺/秒、毫米/日。圖 (b) 中的海面高度距平等值線間距為 0.5 公分。

本圖來源：Vallès-Casanova et al., 2020, Fig1.

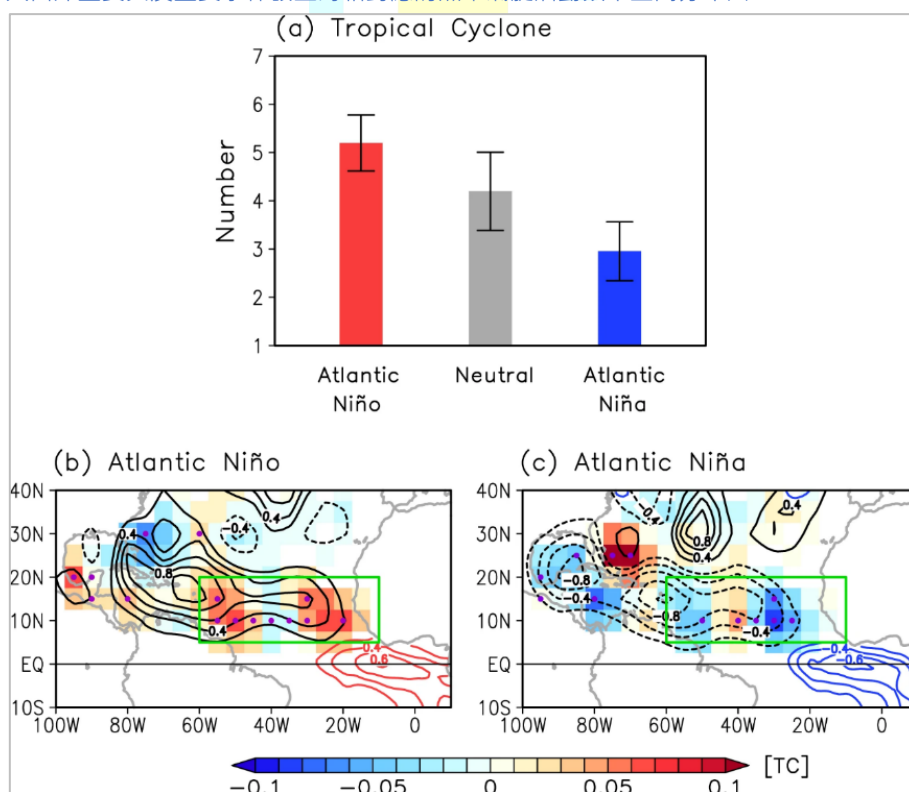
由於大西洋聖嬰事件在發展過程中，強度達到成熟的時間點正好落在夏季，此與大西洋颶風季的時間重疊，因此有學者開始思索，大西洋颶風的形成與發展，是否會受到大西洋聖嬰事件的影響。以暖事件為例，當熱帶東大西洋區域的海水溫度上升時，會讓大西洋 ITCZ 增強、低層空氣的相對渦度 (旋轉度) 提升、非洲東風波 (African easterly waves) 變得更活躍。上述環境特徵的改變，提供了有利空氣上升的條件，有機會讓海面上的強對流進一步發展成熱帶擾動、熱帶風暴甚至是颶風的可能性，結果將嚴重威脅加勒比海島國以及美國東南岸受熱帶氣旋衝擊的風險。

從影響過程來看，東大西洋升溫，會增強海洋的水氣蒸發效率，提供更多熱帶風暴發展所需要的能量，結果當然是讓對流系統的發展更為順利，也增加了熱帶氣旋形成的可能性。當然，也有學者認為，太平洋的聖嬰 (反聖嬰) 事件對於大西洋颶風的影響，可能會比大西洋本身的聖嬰/反聖嬰事件影響來得大。

奠基於前人研究所建立的大西洋聖嬰與大西洋 ITCZ 強度、西非夏季季風降雨三者之間的關聯。學者進一步探討對大西洋熱帶氣旋可能帶來的影響 (Kim et al., 2023)。在大西洋聖嬰現象發生期間的夏秋季 (6-11 月)，北大西洋 (60°W-10°W、5°N-20°N) 生成的熱帶氣旋數量明顯較多，平均每年可達 5.1 個，而在大西洋反聖嬰年則相對偏少，平均每年僅 2.9 個 (圖 4a)。這結果也說明了，赤道東大西洋的海表面溫度異常，會影響大西洋熱帶氣旋的生成頻率。

檢視熱帶氣旋的生成和路徑於空間上的分布差異發現 (圖 4b、c)，在大西洋聖嬰年期間，熱帶氣旋生成於加勒比海以及北大西洋的頻率是增加的，尤其是北大西洋東側 (西經 40°以東)，而大西洋西北側 (北緯 20°-30°) 則呈現減少趨勢。路徑部分，往西北西方向移動的機率明顯增加，這也意味著登陸加勒比海島國以及美國佛羅里達的可能性將會提高。相反地，在大西洋反聖嬰年期間，熱帶氣旋於墨西哥灣、加勒比海及北大西洋的生成數量將會減少，大西洋西北側 (北緯 20°-30°) 則略有增加，結果也導致墨西哥灣、加勒比海以及北大西洋受到熱帶氣旋影響的機率將會下降。

圖 4  
大西洋聖嬰與反聖嬰事件發生時相對應的熱帶氣旋活動頻率空間分布圖



註：

- (a) 為北大西洋 (60°W–10°W、5°N–20°N；圖 b 和 c 中的綠色方框) 於大西洋聖嬰年 (紅色柱)、中性年 (灰色柱) 與大西洋反聖嬰年 (藍色柱) 期間，6–11 月熱帶氣旋生成數量統計圖。誤差線代表統計檢定達到 95% 信心水準的值。
- (b) 與 (c) 分別為大西洋聖嬰年與大西洋反聖嬰年期間，熱帶氣旋特性與海溫合成分布圖。背景顏色為熱帶氣旋生成個數 (單位：個/年)、黑色等值線代表熱帶氣旋通過頻率密度 (間距為 0.2 個 TC/年)、紅色與藍色等值線代表海表面溫度 (等值線間距為 0.2K)、紫色點表示熱帶氣旋生成距平值在統計檢定達到 95% 信心水準的區域。另外，熱帶氣旋生成與路徑密度已進行空間平滑處理。

本圖來源：[Kim et al., 2023, Fig1.](#)

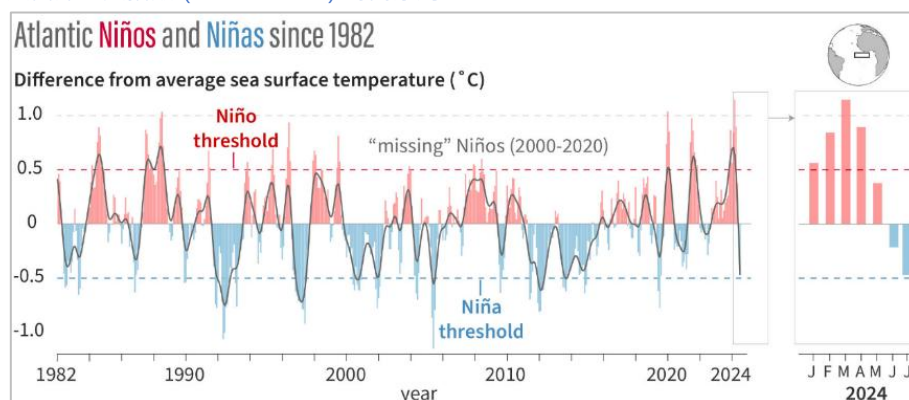
## 近期大西洋聖嬰事件有什麼變化？

雖然在 1970 年代以前，大家對於大西洋聖嬰現象仍處於無知的狀態，但近期有學者依據新的海水表面溫度重建資料，重新分析 ATL3 指數後發現，相對強的大西洋聖嬰事件主要發生在 1950–1960 年代，尤其以 1963 年的暖事件最具代表性，該個案增溫幅度達到 1.5°C，且持續將近一年的時間，規模幾乎可堪比於太平洋聖嬰事件。雖然之後的強度沒有先前那麼極端，不過 1980 與 1990 年代仍維持一定的活躍度。

然而，自 2000 年開始，大部分的時間幾乎看不到大西洋聖嬰事件再次出現 (圖 5)，直到 2019 年末才又開始活躍起來。該次事件不僅強度異常，發生的季節也與過去有所不同。一般而言，大西洋聖嬰事件會在北半球春季 (3–5 月) 開始發展，夏季 (6–8 月) 達到成熟，隨後的秋季 (9–11 月) 則逐漸減弱。但 2019 年的暖事件卻是在秋季後期才開始發展起來 (圖 6)。雖然文獻中曾記錄過晚秋事件，但這類事件的強度通常會比夏季弱很多。

圖 5

大西洋聖嬰指數 (ATL3 index) 時間序列



註：

- 左圖為 1982 年 1 月至 2024 年 7 月，月平均 ATL3 指數隨時間變化圖 (已移除長期暖化趨勢訊號)。圖中顯示 2024 年的大西洋聖嬰事件是自 1982 年以來最強的一次。紅色柱狀代表 ATL3 指數為正 (偏暖)，藍色柱狀代表 ATL3 指數為負 (偏冷)，紅色

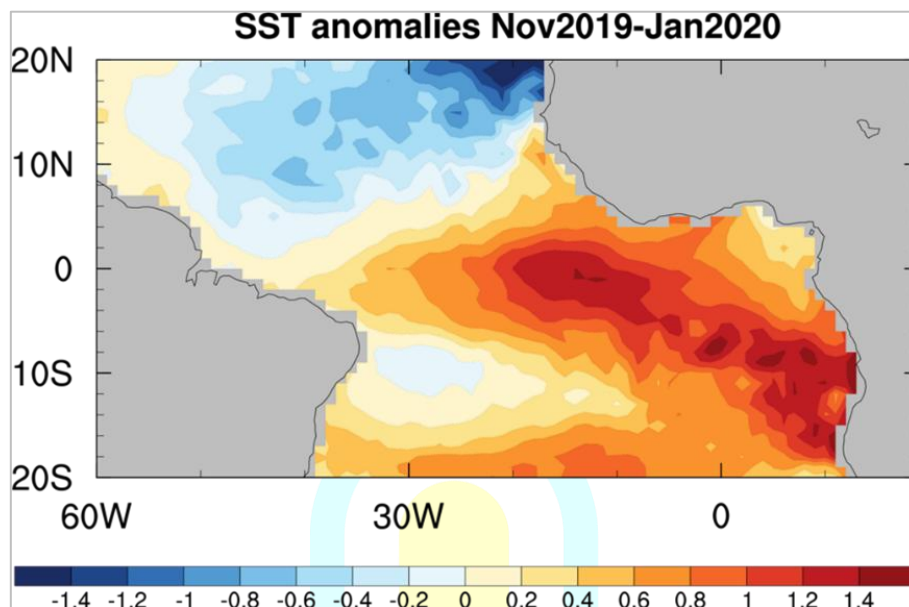
水平虛線為暖事件的臨界值( $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$ )，藍色水平虛線則為冷事件的臨界值( $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$ )。

2. 右圖為 2024 年 1-7 月，ATL3 指數隨時間變化圖。

本圖來源：<https://www.climate.gov/media/16295>

圖 6

2019 年 11 月至 2020 年 1 月平均之海水表面溫度距平圖



註：

此為自 1980 年以來強度最強的大西洋聖嬰事件，該季節本應是大西洋聖嬰事件消散時期，但該個案反而在冬季時強度達到最強，堪比太平洋聖嬰事件。

本圖來源：<https://www.clivar.org/content/atlantic-ni%C3%B1os-aren%E2%80%99t-what-they-used-be>

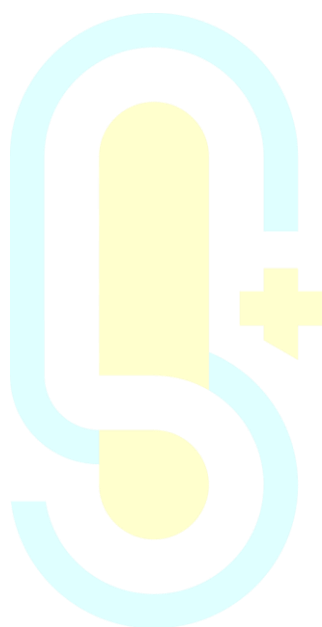
就在 2019 年事件發生後不到一年半，2021 年夏季又出現了破紀錄的暖事件，如此強度的雙峰事件在過去的觀測紀錄中未曾出現過。2024 年初，赤道東大西洋於 2-4 月間又出現了極端高的海表面溫度，當時所量測到的溫度值超過攝氏 30 度，可說是自 1982 年有衛星觀測資料以來最強的暖事件。同樣引人注意的是，該區域海溫於春季的極端增暖後（正值），快速地於夏季轉為偏冷（負值），這也是過去所有的觀測紀錄中，未曾出現過的，自然也吸引到一些學者的關注。

## 結語

過去當大家提到聖嬰與反聖嬰現象時，聯想到的基本上都是發生在太平洋海盆，赤道中至東太平洋海水表面溫度異常升溫的事件。然而從近期一些研究也可以發現到，有越來越多的文章，開始聚焦討論發生在大西洋的聖嬰事件。名氣雖然不如太平洋聖嬰/反聖嬰，影響層面現階段仍認為以區域氣候為主，不過在未來暖化情境下會如何發展以及對區域氣候甚至全球帶來何種影響，還是值得我們持續關注。

## 參考文獻

- Kim, D., Lee, S.-K., Lopez, H., Foltz, G. R., Wen, C., West, R., & Dunion, J. (2023) . Increase in Cape Verde hurricanes during Atlantic Niño. *Nature Communications*, 14, 3704. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39467-5>
- Vallès-Casanova, I., Lee, S.-K., Foltz, G. R., & Pelegrí, J. L. (2020) . On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087108. <https://doi.org/10.1029/2020GL087108>
- Zebiak, S. E. (1993) . Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region. *Journal of Climate*, 6, 1567–1586. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1567:AIITEA>2.0.CO;2)



## 地震發生後的長週期震動

蕭乃祺

中央氣象署地震測報中心副主任

### 何謂長週期震動？

長週期震動 (long-period ground motion, LPGM) 係指地震發生後，地震波向外傳遞時，週期較長的波相 (phase) 所造成的震動，週期約在 2-10 秒 (Furumura & Oishi, 2023)。造成長週期震動的波相速度比 S 波速度慢，通常每秒小於 3 公里，波長可達數公里至十數公里。跟高頻震波 (1 Hz 以上) 比較起來，長週期地震波具有衰減慢、傳播距離遠的特性，當傳遞至 100 多公里以外鬆軟的地表岩層，例如沖積平原或沉積盆地，常常會來回振盪，形成表面波，震幅被放大、震動時間被拉長。

長週期震動的週期，往往與高層建築物 (如 20 層樓以上的大樓) 的自然振動週期 (natural period) 相近，因為共振 (resonance) 的關係，導致高樓產生長時間且大幅度、慢節奏的搖晃。建築物的自然振動週期隨高度而變化，建築物越高，週期越長。根據經驗法則，樓層數  $N$  層的建築物，其自然振動週期約等於  $N/10$  秒。低層建築物由於自然振動週期較短 (小於 1 秒)，受到一般高頻的地震波影響較大；長週期地震波則因為震動週期較長，對於高樓層建築物的影響顯著，越高樓層搖晃振幅越大 (圖 1)。

圖 1  
不同週期地震波對於建築物的影響示意圖



長週期震動開始受到世人矚目，源於 1985 年的墨西哥大地震 (Koketsu & Miyake, 2008)。該地震的地震矩規模 (MW) 高達 8.0，發生在墨西哥西南太平洋外海的板塊交界上，由於長週期震動，造成距離震央 400 公里的墨西哥市，發生重大災情，包括 2 萬人傷亡、8,000 棟房屋損壞。墨西哥市位於古湖泊沉積物的盆地上，地震波傳遞至當地後，週期 2 秒、長延時的長週期震動，因共振造成大量 6-15 層的建築物損壞 (Beck & Hall, 1986)。

另外，長週期震動同樣會造成儲油設施損壞。2003 年日本北海道十勝 (Tokachi) 外海發生規模 8.3 地震，距離震央約 250 公里的苫小牧 (Tomakomai)，雖然觀測震度僅為日本震度 5 弱，但由於長週期震動，導致一家煉油廠的儲油槽內的液體劇烈晃動，造成上方的浮頂 (floating roof) 下沉，進而引發大火 (Koketsu et al., 2005)。1999 年 921 地震發生時，我國中油公司的儲油槽，也因為長週期震動導致槽內液體劇烈晃動，造成儲油槽損壞，雖然幸運沒有引發火災，但是仍發生漏油造成環境汙染 (Yoshida et al., 2000)。

近年來，由於高層建築物越建越多，長週期震動的影響更受到世人重視。高層建築物長時間、大幅度的搖晃，內部的家具和設施可能會傾倒或移位，電梯也可能發生故障，而且樓層越高，搖晃程度往往越強，造成的損失也越大。日本 311 大地震時，震央距離超過 700 公里的大阪，高層建築物因長週期震動發生明顯搖晃。根據觀測紀錄，有大樓頂層的最大振幅達到 2.7 公尺，搖晃持續了將近 10 分鐘，同時東京有多棟 60 公尺以上高樓電梯停擺，造成人員受困 (日本經濟新聞, 2011)。另外，2025 年 3 月 28 日緬甸中部發生規模 7.7 的地震，除了緬甸發生嚴重災害外，遠在 1,500 公里外的泰國曼谷受盆地效應影響，長週期震動造成當地高樓發生災損 (國家災害防救科技中心, 2025)。

## 發生長週期震動的原因

長週期震動主要為表面波所造成。地震的震源深度越淺，越容易在地面表層生成表面波；另外越大規模的地震，由於震源破裂長度較長，其相對擁有較強能量的長週期地震波。地震波傳遞時，長週期成分的震波比短週期震波不容易衰減，可以傳遞到較遠的距離，而傳遞路徑與地表場址的沉積構造或材料，亦可能生成表面波。

日本學者 Koketsu 和 Miyake (2008) 的研究指出，長週期震動依據引發機制與發生位置，可以分為遠震源型 (far source) 與近斷層型 (near-fault) 二種類型。我們一般認知表面波造成的長週期震動，屬於遠震源型 (圖 2)，其大部分由隱沒帶海溝發生的大規模淺源地震、加上震波傳遞經過鬆軟的沉積構造所引發。例如海陸板塊邊界的增積岩體 (accretionary prism)，可以有效傳遞長週期成分的地震波，甚至形成表面波。

而當地震波傳到地表為沖積平原或沉積盆地時，容易陷在其中形成表面波，因其震動頻率與場址主頻相近，震幅會被放大、震動時間會被拉長。

圖 2  
遠震源型長週期震動生成示意圖

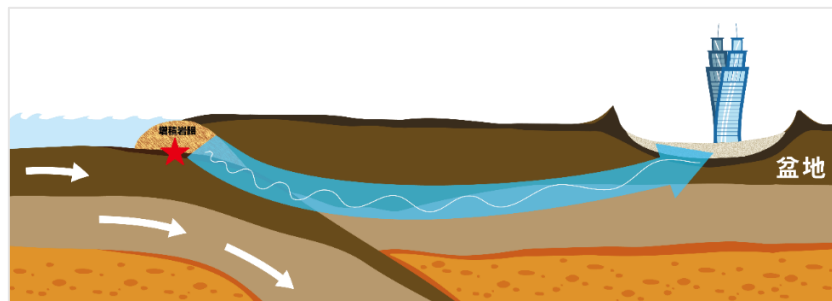
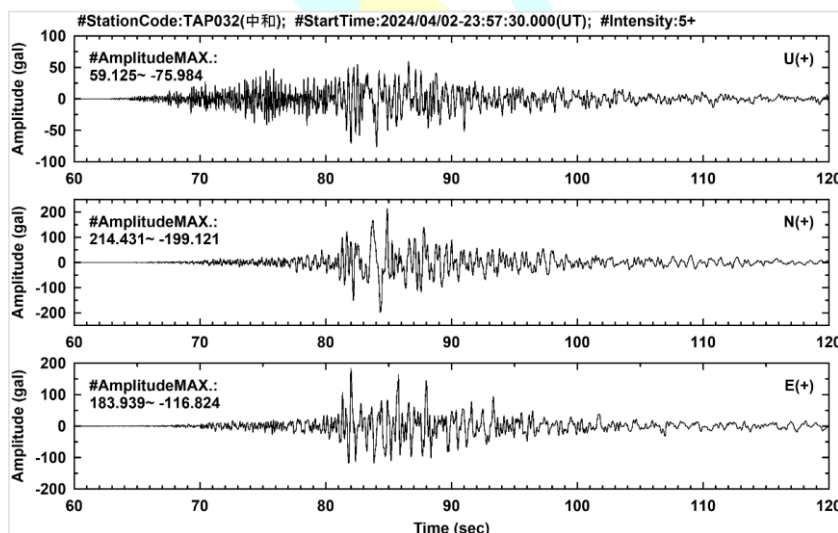


圖 3 為 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震發生時，新北市中和區積穗國小的地震站所記錄到的地震波形，該地震站位於臺北盆地內，距離震央約為 125 公里。圖中地震波開始記錄的時間為臺灣時間 7 時 57 分 30 秒，發震時間則是早上 7 時 58 分 9 秒，在地震後 42 秒左右（橫軸時間比例尺 81 秒），開始出現長週期震波，週期初估約為 1-2 秒，有感搖晃時間超過 40 秒。雖然中和距離震央超過 100 多公里，但由於最大震度達到 5 強，且搖晃時間很長，在當地造成建物災害。

圖 3  
2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，新北市中和區積穗國小強震站所記錄到地震波圖（由上至下分別為垂直向、南北向、東西向震波圖）



另外一種長週期震動類型為近斷層型（圖 4）。當內陸地殼內發生中大型地震，沿著斷層破裂方向，有可能因為破裂方向效應 (directivity effect)，在近斷層處引發長週期、大震幅的脈衝訊號，造成災害。另外當震波傳遞到遠處的沖積平原或沉積盆地，亦可能因為場址效應，產生遠震源型長週期震動。

圖 4  
近斷層型長週期震動生成示意圖

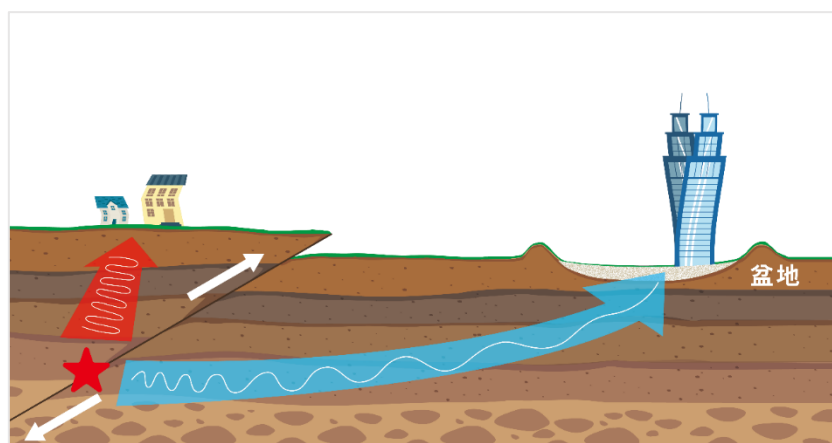
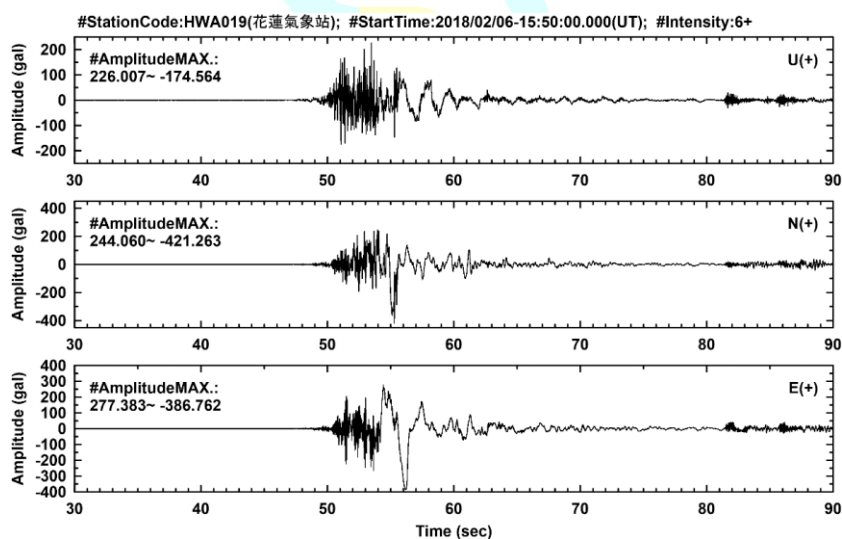


圖 5 為 2018 年 2 月 6 日 23 時 50 分 41 秒、規模 6.2 花蓮地震，花蓮氣象站強震站所記錄到地震波形，開始記錄時間為臺灣時間 23 時 50 分整。圖中波形紀錄顯示，地震後 13 秒左右（橫軸時間比例尺 54 秒），出現明顯的長週期脈衝波，週期約為 3 秒。該地震觸發米崙斷層錯動，位於斷層破裂方向上的花蓮氣象站，距離斷層最近距離僅數公里，由於破裂方向效應，記錄到明顯的長週期脈衝波，而此脈衝波亦是該地震造成花蓮市建築物損壞嚴重的最主要原因。

圖 5  
2018 年 2 月 6 日 規模 6.2 花蓮地震，花蓮氣象站強震站所記錄到地震波圖  
(由上至下分別為垂直向、南北向、東西向震波圖)



比較兩者不同類型的長週期震動，遠震源型主要是表面波的貢獻，生成的原因受到震源、路徑、場址等效應的影響，與近斷層型長週期震動相較起來，其震動的時間較長。近斷層長週期震動則主要受到震源破裂行為的影響，雖然震動時間較短，但由於其主要出現於震央距離 50 公里以內 (Somerville et al., 1997)，震幅更為劇烈，破壞程度更為顯著。

## 日本長週期震度分級




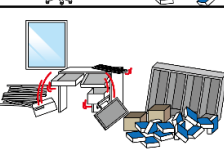
2011 年日本 311 大地震發生時，東京、名古屋、大阪等都會區的高層建築物，出現明顯的長週期震動 (Takewaki et al., 2011)，甚至引發災害。原本以地表觀測所計算的地震震度，傳統計算方法所使用的濾波器，會濾掉地震波長週期的成分，因此即便高樓搖晃劇烈，地表所計算的震度級數可能會偏小，造成發布資訊與高樓民眾體感的落差，無法忠實呈現高樓層民眾感受，以及室內家具、設施受損的情況。

因此地震發生後隔年，日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 開始推動長週期震動的相關研究，並於 2013 年建立長週期震度分級 (日文名稱「長周期地震動階級」)，透過官方網站發布相關資訊 (Aizawa et al., 2014)，進行效益評估。最終在 2019 年 3 月 19 日，開始正式實施長週期震度分級制度，用意不在取代傳統震度，而是做為補充資訊，專門針對高層建築物的搖晃程度進行分級。

日本長週期震度分為 4 級，主要描述地震期間，高層建築物中民眾行動的困難程度、以及家具和固定裝置的移動或翻倒等破壞程度，級數越大代表搖晃與影響程度越嚴重，各級數影響程度的描述請參考表 1。針對的對象通常指 14、15 層以上的高層建築物，其自然震動週期約為 1.5 秒至 8 秒。

表 1

日本長週期震度分級表

日本長週期震度分級		人體的感受及行動	室內狀況
<b>1級</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>室內幾乎所有人都能感受到搖晃，有些人會感到驚訝。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>窗簾、百葉窗等懸掛物大幅搖晃。</li> </ul>
<b>2級</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>感受到室內劇烈搖晃，想要抓緊固定物。</li> <li>感覺行動受到阻礙 (例如不攙扶東西就難以行走)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>裝有輪子的家具/設備 (如辦公椅) 輕微滑動。</li> <li>未固定的家具可能位移，不穩固的家具可能會翻倒。</li> <li>隔間牆等處可能出現裂痕。</li> </ul>
<b>3級</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>難以站穩。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>裝有輪子的家具/設備大幅滑動。</li> <li>未固定的家具可能位移，不穩固的家具可能會翻倒。</li> <li>隔間牆等處可能出現裂痕。</li> </ul>
<b>4級</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>無法站立，不爬行就無法移動。</li> <li>身體完全任由搖晃擺布。(無法隨意行動)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>裝有輪子的家具/設備大幅滑動，且部分會翻倒。</li> <li>大多數未固定的家具會位移，甚至翻倒。</li> <li>隔間牆等處的裂痕會變多。</li> </ul>

註：表格摘錄、翻譯自日本氣象廳發行資料手冊《地震と津波》

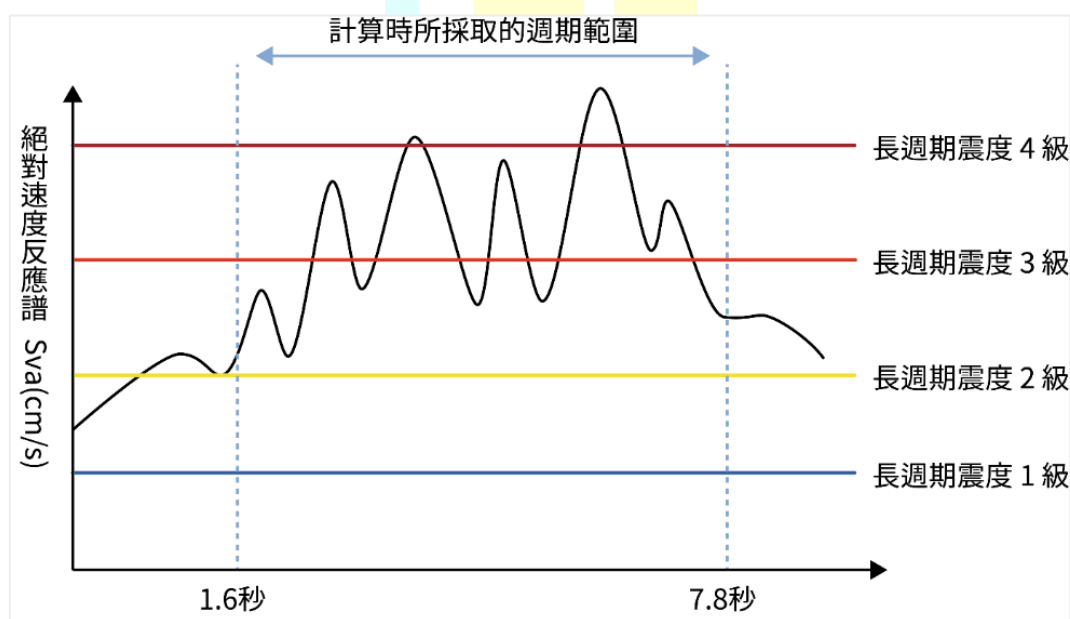
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/jishintsunami/>

不同於傳統計算震度使用最大地動加速度 (peak ground acceleration, PGA)，或是最大地動速度 (peak ground velocity, PGV) (蕭乃祺，2021)，日本計算長週期震度所依據的參數是不同週期的絕對速度反應譜 (absolute velocity response spectrum, Sva)。絕對速度反應譜用以描述單自由度結構在地震波作用下，其最大絕對速度反應與結構不同振動週期的關係，由於高層建築內的民眾的不適感、或是家具移動與設備破壞，主要與建築物的變動量及速度能量有關，因此使用 Sva 來界定長週期震度的分級。

計算長週期震度流程，首先使用地表的強震儀紀錄，模擬在地震波作用下，不同週期單自由度結構物的譜速度波形，計算過程需要的阻尼比 (damping ratio)，採用鋼筋混凝土結構常使用的 5%。然後分別將不同週期 3 向量 (垂直、南北、東西) 的譜速度波形進行向量合成，並找出整個波形紀錄的最大值，即是個別週期的絕對速度反應譜值。長週期震度計算採用的週期範圍從 1.6–7.8 秒，每增加 0.2 秒週期計算 1 次絕對速度反應譜值，最後以週期範圍內最大的 Sva 值 (圖 6)，對應到 Sva 數值範圍與長週期震度的關係表 (表 2)，即可得到當地的長週期震度。

圖 6

採用週期 1.6–7.8 秒範圍內的最大絕對速度反應譜值，對照本文表 2 得到日本長週期震度的示意圖



註：圖片修改、翻譯自日本氣象廳官方網站資料

[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm\\_explain/about\\_level.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/jishin/ltpgm_explain/about_level.html)

表 2

計算日本長週期震度對照最大絕對速度反應譜值的範圍表

	日本長週期震度分級	絕對速度反應譜 S <sub>va</sub> 之值 (目標週期 1.5 s < T < 8.0 s, 阻尼比 5%)
■	長週期震度1級	5 cm/s ≤ S <sub>va</sub> < 15 cm/s
■	長週期震度2級	15 cm/s ≤ S <sub>va</sub> < 50 cm/s
■	長週期震度3級	50 cm/s ≤ S <sub>va</sub> < 100 cm/s
■	長週期震度4級	100 cm/s ≤ S <sub>va</sub>

註：表格修改、翻譯自日本氣象廳官方網站資料

[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/jishin/ltpgm\\_explain/about\\_level.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/jishin/ltpgm_explain/about_level.html)

週期 1.6–7.8 秒範圍的反應譜值，一般認為可以呈現 15 層樓以上、一直到 70、80 層超高層建築物的地震反應，完整覆蓋日本現有絕大多數高層建築的自然振動週期範圍。因計算時間需要，日本氣象廳如有觀測到長週期震度 1 級的地震，約在地震後 10 分鐘，於官方網站上對外公布長週期震度的資訊。

## 臺灣長週期震度應用初探

本文嘗試使用上述計算日本長週期震度的流程，以 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震為例，初步測試日本長週期震度應用在臺灣的成果。圖 7 為模擬後、全臺長週期震度分布情形，最大可以達到 4 級，而且幾乎 2/3 陸地都觀測到 1 級以上的長週期震度，顯示地震當時產生很強的長週期地震波。4 級震度集中在花蓮市區、宜花交界和平地區與宜蘭縣部分濱海地區；3 級地區則除了近震央的花蓮、宜蘭外，震央距離超過 100 公里的台北盆地、桃園、彰化的平原地區，亦可觀測到 3 級震度。

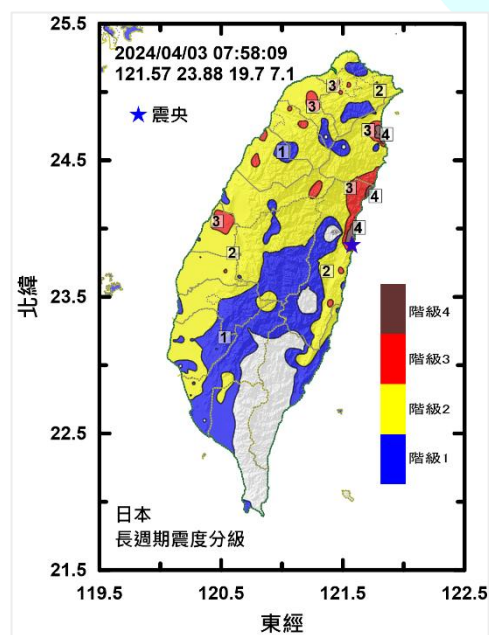


圖 7 使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，全臺長週期震度分布情形圖。

另外，如果將範圍侷限在地震發生的花蓮地區，同時比對被判定紅單建物（主結構受損，有傾倒危險）與黃單建物（結構無立即危險，但非主結構有損）的地點（圖 8），我們可以發現高長週期震度（4 級、3 級）的分布區域，與受損建物發生的位置有很高的關聯性，顯示長週期震度應用於評估建物災情的實用性。北部地區屬於受到遠震源型長週期震動影響的範圍，同樣進行

震度分布與建物受災地的比對 (圖 9)，我們亦可發現受損的建物，比較集中在該地區最大震度 3 級的範圍、或是周邊鄰近的地方。

圖 8

使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，花蓮地區長週期震度的分布圖，圖中同時標示受損紅、黃單建物的位置

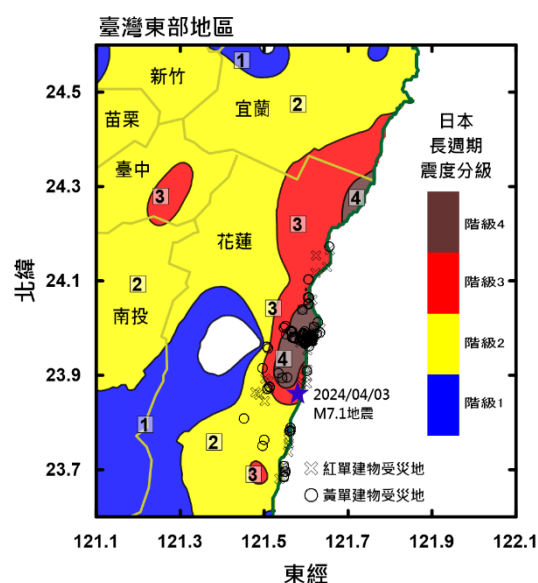
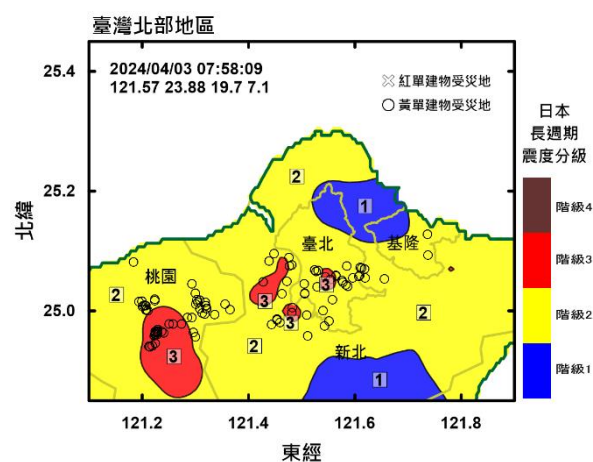


圖 9

使用日本計算長週期震度方法，模擬 2024 年 4 月 3 日規模 7.1 花蓮地震，北部地區長週期震度的分布圖，圖中同時標示受損紅、黃單建物的位置



我國人口集中的都會區，主要都位在沖積平原或沉積盆地內，其林立的高樓同樣會面臨長週期震動的問題，包括傳統震度資訊與民眾體感存在落差，以及無法呈現高層建築物內部家具、電梯等設施實際影響的程度。我國目前並沒有制定長週期震度的分級制度與計算方法，日本的經驗，值得我們參考推動長週期震動的相關研究，評估規劃我國長週期震度分級的可行性與效益。

## 參考文獻

- 日本經濟新聞 (2011)。東日本大震災の長周期地震動 大阪のビルも被害。  
[https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1402K\\_U1A111C1000000/](https://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1402K_U1A111C1000000/) (日文)
- 國家災害防救科技中心 (2025)。2025 3 月 28 日緬甸地震事件報導。  
<https://den.ncdr.nat.gov.tw/1330/1334/1336/24616/25173/>
- 蕭乃祺 (2020)。臺灣的新地震震度分級制度，科學研習月刊，第 59 卷，第 2 期。  
<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6841&p=1&lid=16214>
- Aizawa, K., Ogami, Y., Uratani, J., Sakihara, H., & Nakamura, M. (2014). *Japan Meteorological Agency information on long-period ground motion*. Japan Geoscience Union Meeting 2014 (Abstracts), April 28– May 2, 2014, Pacifico Yokohama, Kanagawa, Japan.
- Beck, J. L., & Hall, J. F. (1986). Factors contributing to the catastrophe in Mexico City during the earthquake of September 19, 1985. *Geophysical Research Letters*, 13 (6), 593–596. <https://doi.org/10.1029/GL013i006p00593>
- Furumura, T., & Oishi, Y. (2023). An early forecast of long-period ground motions of large earthquakes based on deep learning. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101774. <https://doi.org/10.1029/2022GL101774>
- Koketsu, K., Hatayama, K., Furumura, T., Ikegami, Y., & Akiyama, S. (2005). Damaging long-period ground motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan, earthquake. *Seismol. Res. Lett.* 76 (1), 67–73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.76.1.67>
- Koketsu, K., & H. Miyake, H. (2008). A seismological overview of long-period ground motion. *J. Seismol.* 12, 133–143. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9080-0>
- Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., & Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*, 68 (1), 199–222. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.199>
- Takewaki, I., Murakami, S., Fujita, K., Yoshitomi, S., & Tsuji, M. (2011). The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (11), 1511–1528. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.06.001>
- Yochida, S., Zama, S., Yamada, M., Ishida, K., & Tahara, T. (2000). Report on damage and failure of oil storage tanks due to the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Journal of Japan High Pressure Institute*, 38 (6), 23–34. <https://doi.org/10.11181/hpi1972.38.363> (in Japanese)



# 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)。

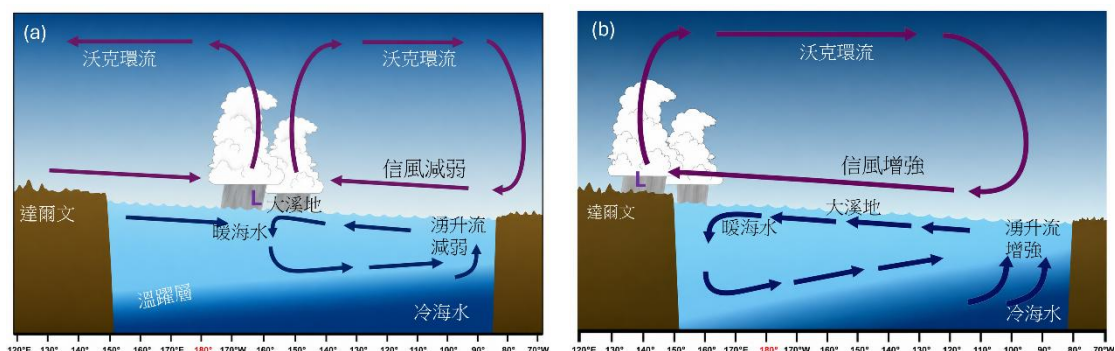
「南方振盪」與「ENSO」常被放在一起介紹，但兩者並不完全相同。如圖 2 紫色箭頭所示，南方振盪主要指熱帶印度洋—太平洋地區的大尺度氣壓翹翹板，是沃克從氣壓與降雨等資料中辨識出的統計型態，後來發展成用大溪地與達爾文之間的海平面氣壓差來描述南方振盪的指數，也就是「南方振盪指數」(southern oscillation index, SOI)。氣壓蹺蹺板反映的便是東西向大尺度環流的變化，後來此環流被命名為沃克環流。

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.



# 淺層地底構造探勘： 用「光的折射」原理透視地下世界

陳達毅

臺北市立大學地球環境暨生物資源學系兼任助理教授

提到我們腳下土地的構造，多數人腦中浮現的往往是交疊的岩石與泥土。然而，在未開挖地表前，我們很難得知地底究竟埋藏著堅硬岩盤、巨大孔洞、珍貴礦脈，或是沉睡千年的古文明遺跡。若想在破壞地表的前提下精準「透視」地底，地震波探測便是一項兼具經濟效益與非破壞性的科學利器。這種探測方法的核心，源自我們熟悉的物理現象：就像筷子斜插入水杯時，會因光線在不同介質間傳遞時的速度差異而產生「折射」，看起來在水面處彎折了一樣。同樣地，地震波在穿透地層時，行為也與光線相似，會在不同性質的岩層交界面產生複雜的折射與反射。在實務操作上，科學家透過人工方式製造震源（如重錘敲擊或引爆炸藥）將地震波送入地底，再利用地面上的地震儀陣列捕捉來自地下的訊號，藉此分析地震波在不同地層間的傳遞速度。透過這項技術，我們得以在不破壞地表的情況下，精確掌握地下數公尺深處的地層資訊。

地殼內部通常呈現明顯的層狀結構，各層由密度與硬度差異顯著的岩石或土壤所組成。當我們在地面以重錘敲擊鐵板時，所釋放的能量便轉化為地震波，向地底深處傳播。在同一岩層中，地震波會以穩定的速度沿直線前進。一旦遇到岩層性質明顯改變的交界面時，就像光線從空氣斜射入水面一樣，震波會發生折射而改變傳播路徑，繼續向更深處前進。同時，在介面處也會產生波的「分流」：部分能量穿透界面繼續向下傳遞，其餘則自交界面返回地表。探勘人員預先在地表沿著一條直線布設地震儀陣列，捕捉這些從地底返回的微弱震波，並精確記錄各觀測點的接收時刻。隨後，結合每個地震儀與震源（重錘敲擊鐵板的位置）之間的距離，與震波自產生（敲擊鐵板）到地震儀接收的「旅行時間」，繪製成後續將詳細介紹的「走時曲線圖」。透過分析這張關係圖，我們便能反推地底各層的震波速度與岩層厚度，如同為地殼進行了一次精密的「超音波檢查」。

## 斯乃耳定律與「臨界折射波」：地底探勘的物理鑰匙

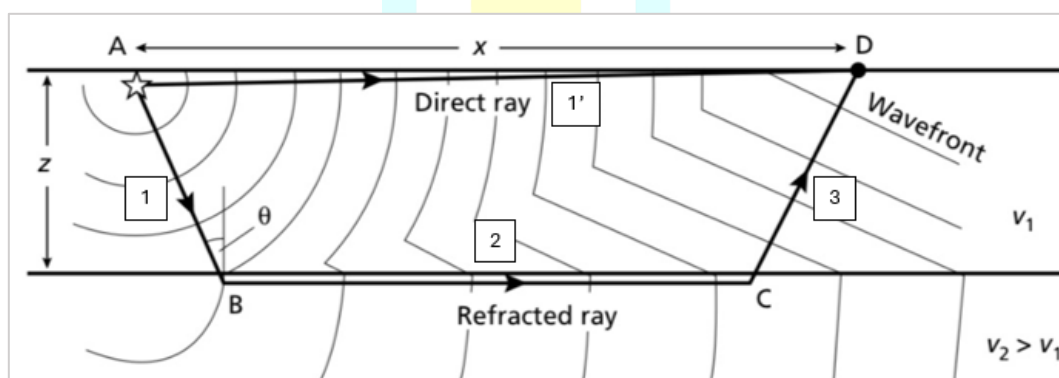
既然地震波的折射行為與光波如此相似，自然也遵守經典的斯乃爾定律（Snell's law）(Halliday et al., 1997, p. 856)。假設地下有上、下兩層地層，上層波速  $V_1$ ，下層波速  $V_2$ ，且由於深層岩石長期承受較大的壓力，因此質地更堅硬，通常滿足  $V_2 > V_1$  的條件。當震波入射到上、下層的交界面時，因下層速度較快，折射角會大於入射角（一如光線從水中射入空氣）。斯乃爾定律用數學語言表達就是：入射角的正弦值與折射角

的正弦值之比，恰好等於兩層介質波速之比：

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{V_1}{V_2}$$

如圖 1 所示，隨著入射角逐漸增大，折射角也隨之增加。當折射角恰好達到 90 度時，此時的入射角即稱為「臨界角」。在這種特殊情況下，折射波不再穿透進入下層，而是貼著兩層介面高速滑行，形成所謂的「臨界折射波」。根據惠更斯原理 (Huygens' principle) (Halliday et al., 1997, p. 902)，在介面上高速滑行的波前，每一點都會化為次級波源，不斷向地表輻射能量。這些能量以相同於入射波臨界角的角度重新折射回地面，最終被地震儀陣列捕捉。這條由「下傳、沿介面傳遞、再折返上傳」所構成的「三段式」路徑，正是折射震測法運作的物理基礎。只要能精確記錄這些折射波抵達地面的時間，我們就握有了透視地底構造的鑰匙。

圖 1  
地震波折射探測示意圖



註：

本圖展示了震波在地層中的傳播情形。圖中震源 (星號) 位於 A 點，地震儀位於 D 點。震波傳播主要分為兩種路徑：一是僅在上層介質 (波速  $V_1$ ) 中直線傳播的「直達波」(路徑 A-D)；二是當下層波速大於上層 ( $V_2 > V_1$ ) 時產生的「臨界折射波」。臨界折射波的行進可分為三段：第 1 段 (路徑 A-B) 以臨界角  $\theta_c$  向下入射至交界面，第 2 段 (路徑 B-C) 沿著交界面以較快的速度  $V_2$  高速滑行，最後第 3 段 (路徑 C-D) 再向上折射回地表。這條利用深層高速介質傳遞的路徑，正是折射震測法用來推算地層波速與深度的物理基礎。

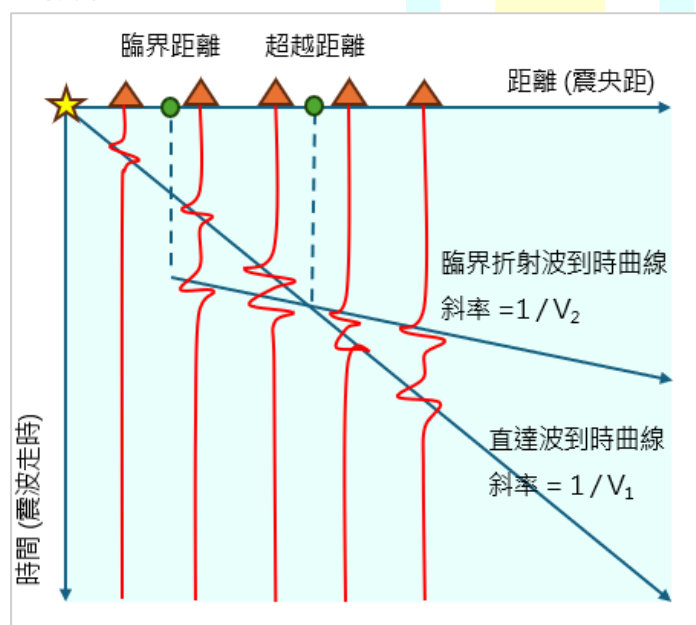
資料來源：臺北市立大學震測實驗報告

## 什麼是「走時曲線圖」？：地底探勘最核心的分析工具

在折射震測實務中，我們於地面沿著一條直線等間距布設地震儀陣列，並在測線一端以重鎚擊地激發震波。隨後，各觀測點將依序記錄震波抵達的時刻。離震源愈近，接收訊號愈早；反之則愈遲。然而，這項探測技術真正的價值，並不在於單純的接收先後，而是隱藏在「距離」與「時間」之間精確的數學連動關係中。

如圖 2 所示，「走時曲線圖」(travel-time curve) 就是把每個地震儀收集到的地震波形資料，依其與震源的距離在坐標軸上的展開。橫軸 (X 軸) 代表地震儀與震源 (重鎚敲擊鐵板的位置) 間的水平距離，縱軸 (Y 軸) 則標記震波從激發瞬間 (敲擊鐵板) 到抵達地震儀所耗費的時間 (稱為「走時」)。將不同地震儀所接收到的震波訊號連線後，便構成了走時曲線。如果地下只有一層均質的介質，走時曲線會是一條從原點出發的直線。距離愈遠、時間愈久，斜率就是波速的倒數 ( $1/V_1$ )。然而，真正讓這張圖展現威力的關鍵，在於當地底存在第二層波速更快的介質時，圖面上會轉折並延伸出第二條直線。

圖 2  
走時曲線圖



註：

本圖展示了折射地震法的基本原理，其中橫軸代表震央距離，縱軸則為震波到達的時間。由原點出發且斜率較陡的直線為在表層傳播的「直達波」(斜率為  $1/V_1$ )，而斜率較平緩、於臨界距離後才出現的則是經深層高速界面傳遞的「臨界折射波」(斜率為  $1/V_2$ )。兩條線的交點稱為「超越距離」，在此距離之後，由於下層波速較快，折射波會後來居上，比直達波更早抵達測站。圖中三角形代表由近及遠佈設的地震儀，其下方波線則為地震儀實際記錄到的震波訊號，清晰呈現了直達波與折射波隨距離變化的到時差異。

資料來源：作者繪製

圖 2 中，第一條直線代表「直達波」的走時。直達波只在地表淺層（第一層介質）中直線傳播，其走時等於傳播距離除以第一層波速 ( $V_1$ )。在走時曲線圖上，直達波表現為一條通過原點、斜率為  $1/V_1$  的直線。這意味著距離每增加一公尺，走時便固定增加  $1/V_1$  秒。該直線自震源起始點（距離與走時皆為零）向右無限延伸，說明無論觀測距離多遠，地震儀理論上都能接收到這股沿地表傳遞的直接能量。

第二條直線代表「臨界折射波」的走時。折射波遵循「三段式」路徑：首先以臨界角下傳至交界面，接著沿界面以  $V_2$  高速滑行、最後再以臨界角折射回地表。由於中間路段行經的是「高速公路」( $V_2 > V_1$ )，該直線的斜率為  $1/V_2$ ，顯得比直達波更為平緩。不同於直達波，折射波的走時線並不通過原點，而且在 X 軸上存在一個最小觀測距離，稱為「臨界距離」。在臨界距離之內的地震儀，於幾何上無法接收到折射波，這是因為入射角尚未達到臨界角的門檻，波無法沿界面滑行。

走時曲線圖上最引人入勝的現象，莫過於兩條直線的交會點，此距離稱為「超越距離」(crossover distance)。在此距離之前，直達波因路徑較短而率先抵達地震儀。然而，一旦超過這個關鍵距離，折射波雖然「繞了遠路」，卻憑藉在深層高速介質中飛馳的優勢後來居上，反而比直達波更早到達地表！

這就像兩個人從同一起點出發的競賽：一個選擇直行的近路（直達波），但全程行經限速較低的一般道路（速度  $V_1$ ），另一個則先經過一段一般道路（速度  $V_1$ ），再切換到速度較快的高速公路（速度  $V_2$ ）、最後再折返一般道路（速度  $V_1$ ）抵達終點。在短程比賽中，走一般道路者勝出；但隨著目的地愈來愈遠，有走高速公路的人最終會追回先前的時間落後，並一舉超越。

走時曲線圖之所以被稱為折射震測「最核心的分析工具」，是因為一旦圖表成形，地下構造的三個關鍵參數就能全部算出：第一層波速  $V_1$ （直達波斜率的倒數）、第二層波速  $V_2$ （臨界折射波斜率的倒數），以及第一層地層的厚度  $h$ （利用超越距離搭配  $V_1$ 、 $V_2$  代入公式即可）。換句話說，一張走時曲線圖，便是地底構造被攤開在紙上的密碼本。

## 透視地下構造：折射地震法與走時曲線的幾何秘密

為了推導直達波與臨界折射波的走時公式(Lillie, 1999, p. 62)，我們首先假設一個最基礎的「雙層水平地層模型」：表層厚度為  $h$ ，震波傳播速度為  $V_1$ ；下層為無限深的高速地層，震波傳播速度為  $V_2$ 。且滿足發生臨界折射的必要條件： $V_2 > V_1$ 。

## 一、直達波 (direct wave) 走時公式

直達波是從震源發出後，直接沿著地表（即第一層介質）傳播至地震儀的震波。由於其傳播路徑為直線，且完全在速度為  $V_1$  的表層中行進，因此當震波到達距離震源為  $x$  的測站時，其走時  $T_1$  的公式非常單純：

$$T_1 = \frac{x}{V_1}$$

在走時曲線圖上，這是一條通過原點的直線，斜率為  $1/V_1$ 。

## 二、臨界折射波 (head wave) 走時推導

臨界折射波的傳播路徑分為三段：向下穿透表層、沿著界面底層高速滑行、向上折射回地表。臨界角  $\theta_c$ ：根據斯乃耳定律，當折射角為 90 度時，入射的角度即稱為臨界角，公式為：

$$\sin(\theta_c) = \frac{V_1}{V_2}$$

向下與向上路徑：震波在表層向下及向上的路徑長度皆為（在這些路徑上皆以  $V_1$  的速度傳播）

$$\frac{h}{\cos(\theta_c)}$$

界面滑行路徑：震波在界面上以  $V_2$  的速度傳播，其滑行的水平距離為總距離  $x$  扣除兩端在表層水平投影的距離，即：

$$x - 2h \tan(\theta_c)$$

將這三段走時相加，可得到臨界折射波的總走時  $T_2$ ：（圖 1 中的第 1 段走時+第 2 段走時+第 3 段走時）

$$T_2 = \frac{h}{V_1 \cos(\theta_c)} + \frac{x - 2h \tan(\theta_c)}{V_2} + \frac{h}{V_1 \cos(\theta_c)}$$

經由整理可得：

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

三、由於在超越距離 (Xc) 時直達波與臨界折射波的走時相同，經公式推導可計算地層厚度 (h)

$$T_1 = T_2$$

可得：

$$\frac{x}{V_1} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1V_2}$$

經由整理可得：

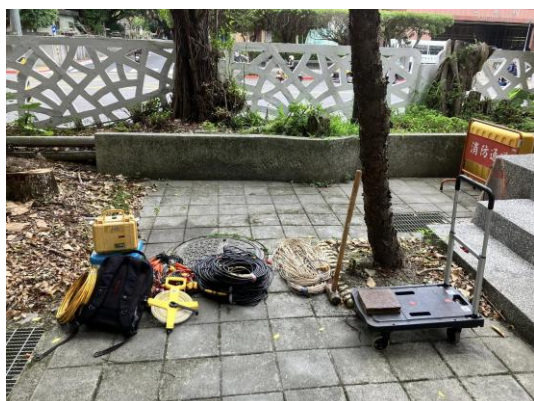
$$h = \frac{x_c\sqrt{V_2 - V_1}}{2\sqrt{V_2 + V_1}}$$

地質學家在完成野外實驗後，可以藉由走時曲線圖的交點得知超越距離 (Xc)，以及 V1 與 V2 的速度 (從兩條直線的斜率得知)，再透過這個最終公式，就能精準計算出地下表層地層的厚度 (h)。

## 從教室走向實驗場：臺北市立大學的實地探勘

2025 年 9 月 24 日，於臺北市立大學圖書館後方進行了一場完整的野外折射震測實驗 (圖 3 為實驗所使用之相關儀器與設備)。首先進行場地評估與測線規劃，在地勢平坦區域以皮尺布設全長 48 公尺的測線，每隔 2 公尺精確設置一個觀測點，共計 24 處觀測點，詳見圖 4。同時，於測線兩端及中央位置預先規劃「震源點」(即重鎚敲擊鐵板的位置)，以確保折射波能從多個方向完整覆蓋地下結構。接著進行地震儀佈設，此步驟為確保資料品質的關鍵。學生們須將 24 支地震儀垂直且穩固地植入土壤中，若遇石塊阻礙則適度調整位置，以確保地震儀與地面之間具備良好的「耦合」效果。正式施測時 (如圖 5 所示)，負責製造人工震源的學生需敏銳觀察周遭環境，避開鄰近馬路車流雜訊，在相對安靜的時機精準敲擊鐵板，以獲得清晰的震動訊號。為提升訊號品質，各震源點皆進行多次重複敲擊，並透過電腦進行訊號的「疊加」(stacking) 處理，能有效抑制隨機雜訊並強化來自地下的反射與折射訊號。隨後，再依序移動震源位置完成所有測點之資料採集，待確認各測站波形品質清晰、走時資料完整後，即進行儀器回收與清點，完成野外震測作業。

圖 3  
野外折射震測器材總覽



註：  
器材含黃色資料擷取主機、皮尺、橘色主電纜線、白色震源觸發線、鐵鎚與鐵板（右側手推車），以及各類連接電纜。  
攝於臺北市立大學實驗現場。

圖 4  
學生沿約 48 公尺測線



註：  
每隔 2 公尺以皮尺定位後插入一支地震儀，並沿地面鋪設主電纜，逐步完成 24 通道的量測陣列布設。  
攝於臺北市立大學圖書館後方。

圖 5  
學生舉起大鐵鎚由肩膀高度向下敲擊鐵板，產生人工地震波



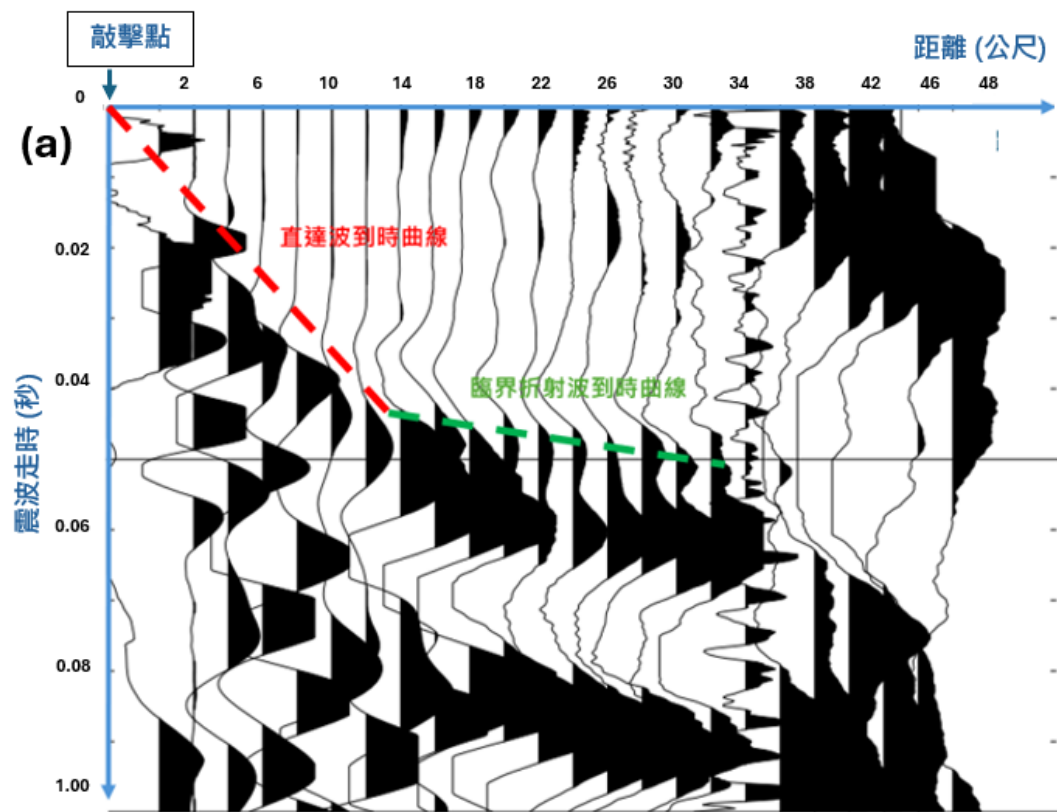
註：  
被敲擊的鐵板旁邊有一個觸發感測器，當敲擊時資料擷取主機會同步記錄觸發時間，並立即接收 24 個通道的波形。  
攝於臺北市立大學實驗現場。

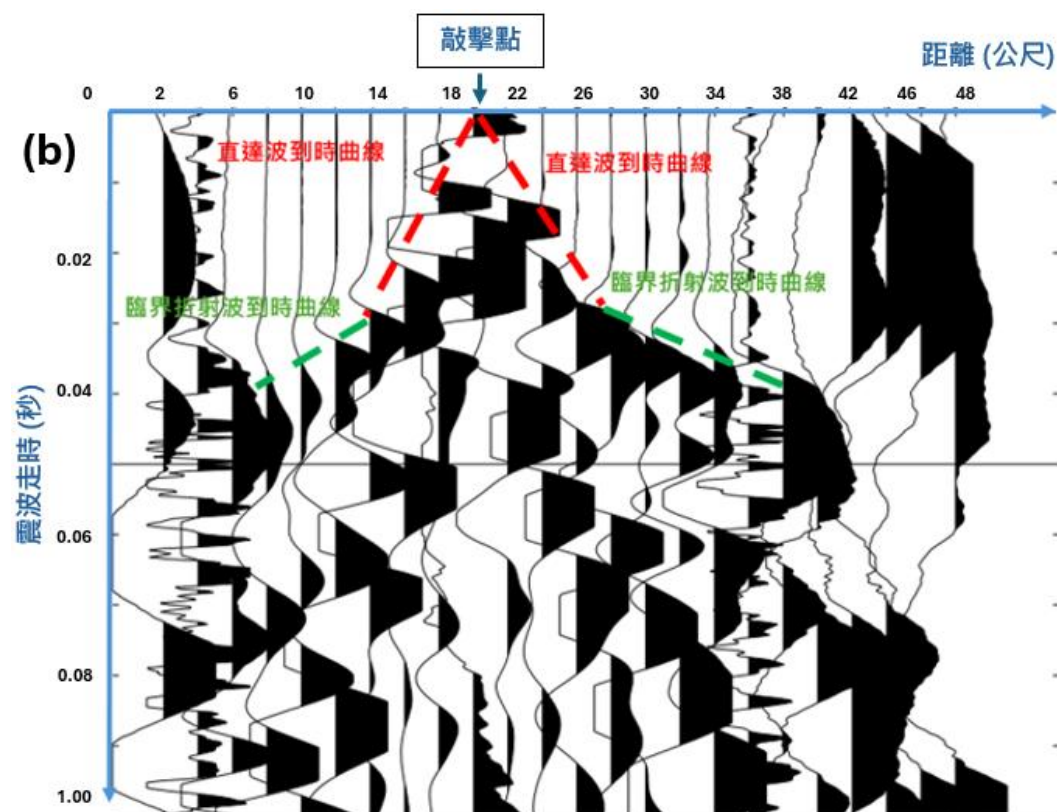
## 校園地下三公尺的秘密

將野外收集到的波形資料帶回後，首先需逐一判讀每條紀錄上的初動時間，並以距離為橫軸、走時為縱軸，繪製出關鍵的「走時曲線圖」。以圖 6 (a)與(b)為例，透過直線擬合，由斜率的倒數即可精確換算出波速：圖中的紅色擬合線代表直達波 ( $V_1$  約為 500 m/s)、綠色線則代表臨界折射波 ( $V_2$  約為 1000 m/s)。綜合多組數據後，實驗呈現出

清晰的地層圖像：第一層（表土）波速  $V_1$  約落在 300–480 m/s 之間，具備鬆散表土或人工回填土的特徵，與圖書館後方林地的地貌觀測完全吻合。第二層波速  $V_2$  則由 600 m/s 延伸至超過 1700 m/s，揭示了地下岩性顯著的非均質性：較低速區段可能為壓密黏土或風化軟岩；而 1500 m/s 以上較高速區段則強烈暗示震波觸及了飽和含水層（水中聲速約 1500 m/s）或質地較完整的岩盤介面。再經公式推算，立即可以得知地層厚度約 2.5 至 4.5 公尺。換言之，在不挖開一鏟土的前提下，學生們僅憑一把鐵鎚及一排地震儀所獲得的走時曲線圖，便成功「看見」了腳底下約三公尺處一個物理性質劇變的地層交界面。

圖 6  
折射地震法震波紀錄剖面圖





註：

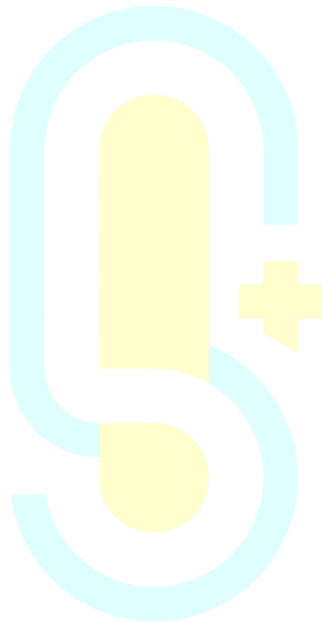
1. 本圖展示了兩種不同的布線施測方式：圖 (a) 為震源 (標示 0 的敲擊點) 位於測線端點的單邊施測，圖 (b) 則是震源位於測線中段的中央施測。圖中橫軸代表震央距離，呈現 24 條接收波線的空間排列；縱軸為震波走時。在複雜的波紋訊號中，紅色虛線描繪出在表層傳播、斜率較陡的「直達波到時曲線」，而綠色虛線則標示出經深部界面傳遞、斜率較平緩且在遠距離處領先到達的「臨界折射波到時曲線」。
2. 資料來源：臺北市立大學實驗報告。

折射震測實驗跳脫了課堂筆記與純粹計算的框架，讓學生們親身參與「從地面讀取地底資訊」的完整過程。在揮汗實作的現場，學生們也分享了實驗過程中的心得：「震測實驗比我想像中有趣好多！尤其是親自拿起鐵鎚後的那份悸動，更加深了我對地震學的興趣。結果發現鐵鎚真的超級重，但幸好還是有成功敲下去。」、「最印象深刻的是電腦立刻跑出波形的那一刻，波形一層一層疊加，慢慢可以看見完整的折點，非常神奇，透過這張圖我們就可以判斷地下的結構！」

這就是地震波折射探勘的魅力所在，整個方法的精髓來自於一張走時曲線圖裡：兩條斜率不同的直線交織，便能解析出地層波速與厚度的全部資訊。臺北市立大學的這場實驗，讓課本上的斯乃爾定律從紙面躍入泥土，透過理論與雙手的結合，產出了真實可參考的地質剖面。而這一切科學旅程最迷人的起點，就是那句你我都學過的「光從一種介質進入另一種介質時，會改變行進的方向。」

## 參考文獻

- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1997). *Fundamentals of physics* (5th ed.). Wiley.
- Lillie, R. J. (1999). *Whole earth geophysics: An introductory textbook for geologists and geophysicists*. Prentice Hall.



# 礦石之美者：自然世界的原始呼喚

吳育雅

臺大兼任助理教授級專業技術人員

## 前言

你曾在海邊撿過貝殼或在河岸注視到令你怦然心動的石頭嗎？生物學家愛德華·威爾森 (Edward Wilson) 指出，人類有一種天生與自然界連結的本能。石頭的紋理、貝殼的幾何結構，對大腦來說是極佳的感官刺激。無論我們是在路邊撿起一顆閃亮的石頭時，或是凝視在博物館透亮櫥窗展示的美麗晶體，都會啟動大腦中遠古的「發現」獎勵，活化我們的感官與想像。

## 臺中科博館的大地瑰寶常設展

2025 年 9 月在臺中科學博物館的大地瑰寶常設展開幕，幾個月來已吸引了無數的觀眾。這是一場超越 40 年的蒐藏，將近 1,800 件的標本，規劃布展花了 20 餘年，從礦物演化的角度，依序呈現太陽系誕生到生命大爆發之後，礦物花樣百出的華麗舞台。在展場中形形色色的礦石標本，令人歎為觀止 (圖 1)！吸引參觀民眾的，不僅是色彩奪目，或是具有獨特外形的晶體，隨著展場中的解說引導，深化對礦物晶體的認識，在櫥窗邊的瀏覽在不經意間便能促發一次次的怦然心動！

圖 1

大地瑰寶展場琳瑯滿目美不勝收的礦物蒐藏



我的目光被一抹藍色吸引而停下——那不是溫和的藍，而是一種鮮明、近乎刺眼的色彩。一塊含有稀土元素的礦物閃耀著變幻的色彩，一簇簇水矽鈳鈣石 (cavansite) 點綴在淺色的片沸石 (stilbite) 之上 (圖 2)，強烈的對比彷彿經過精心安排。藍色來自晶體結構中的鈳 (V4+) 元素，它的內層電子與光線互動，留下這種鮮明的色澤。由放射狀晶體組成的水矽鈳鈣石藍色小球，讓你非得在玻璃展示櫃前停下腳步、微微靠近凝視，隨著腳步的移動，光線改變，晶體也隨之閃耀。

圖 2

艷藍的水矽鈳鈣石點綴在淺色的片沸石上



這塊標本源自印度，在霸王龍稱霸的末期，德干高原上大規模溢流的玄武岩冷卻，熔岩流留下了大大小小的孔洞，之後岩漿末期富含礦物的熱液溫度下降，多種金屬陽離子與大量水流過此地，慢條斯理在安靜的孔洞中緩慢結晶，無數細小的薄片細緻規律堆疊出了片沸石。在已經長好的片沸石晶體表面，點綴著呈放射狀小球的藍色水矽鈳鈣石。

這意味著水矽鈳鈣石是「後到者」，是在熱液活動的最後階段，片沸石鋪好了舞台，流過此地的水溶液變得非常純淨且鈳元素剛好達到飽和，水矽鈳鈣石出現了，也說明了當時晶洞內的氧化還原電位被精準地鎖定在一個極窄的區間內，因為 V4+ 是一種不穩定的狀態，如果環境氧氣太多，鈳會變成五價；如果氧氣太少，則可能變成三價。這樣歷經數百萬年成長出來的結晶，有如該地區環境變遷的時間膠囊，如今正優雅地被封存在科博館展示櫥窗之內。

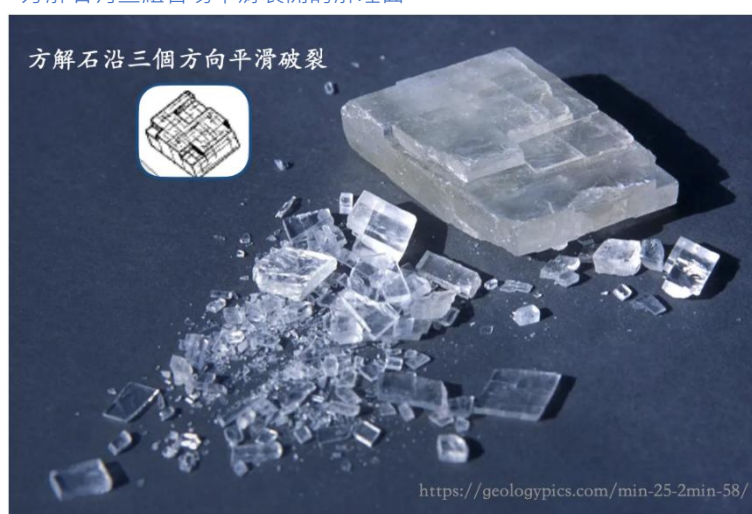
蒐藏自然珍奇在兩、三百年前歐洲的上流社會文化中，曾是一種高尚的流行。很多富商、銀行家熱衷於收集自然界中各種形色礦石，當時的啟蒙運動讓知識成為一種新的社會地位象徵。拉瓦節於 18 世紀末確立了現代化學命名的原則，19 世紀初礦物的分類便依據化學組成的陰離子 (或酸根) 區分為碳酸鹽、矽酸鹽類等。然而化學分類不足以解釋為何某些礦物總是能具有特殊結晶外形，也無法說明相同的化學成分，為何能有全

然不同的物理性質？正如遠古人類用來書寫的石墨既黑又軟滑，同是碳所構成的鑽石，卻是燦爛奪目且堅硬無比，石墨和鑽石組成相同，礦物外觀與物理特性卻有天壤之別？在沒有精密儀器看穿原子世界的時代，人類對礦物的認識是如何進展的呢？

## 發現礦物內在的獨特性

有一則傳聞是有關結晶學之父—法國神父阿維 (René-Just Haüy) 的意外，他在參觀朋友的收藏室時，不小心摔碎了一塊美麗的方解石。他驚訝地發現，碎掉的小石塊儘管變小了，但碎裂出的幾何形狀竟然和原本的大晶體一模一樣(圖 3)(Whitlock, 1918)。

圖 3  
方解石有三組容易平滑裂開的解理面



圖片來源：：  
<https://geologypics.com/min-25-2min-58/>

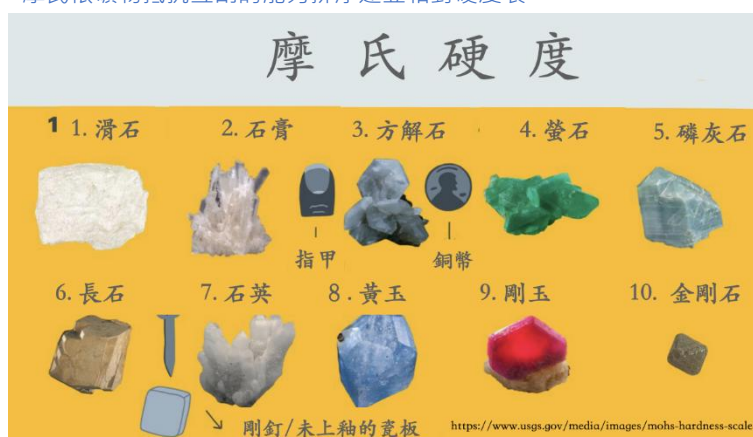
打碎方解石的神父並沒有讓自己停留在驚嘆或懊惱中，他開始了一系列的觀察，最終發現無論外觀多麼奇異，只要順著自然接合面（也就是解理面）切開，最後都會切成一個縮小的最基礎幾何形，「晶體是用一堆同樣大小的微小立方體來堆疊」是他用來解釋結晶很著名的類比。他在還沒有 X 射線、看不到原子的年代，就靠著邏輯推理預見了晶格 (lattice) 與 晶胞 (unit cell) 的存在。

礦物的硬度是一項重要的物理性質，這項發現的關鍵是從奧地利的一位銀行家雅各·范德努爾 (Jacob Friedrich van der Nüll) 的收藏開始，這些石頭來自世界各地，命名混亂。如果沒有專業人士鑑定，這些收藏只是一堆漂亮的石頭，因此他聘請了一位學術顧問弗里德里希·摩氏 (Friedrich Mohs) 來判斷礦物真偽、區分種類，甚至為蒐藏中新發現的礦物命名。

摩氏在德國大學有數理背景，又在弗萊貝格礦業學院師從「地質學之父」亞伯拉罕·

魏納 (Abraham Werner)，也曾擔任過採礦工程師。他不僅遵從雇主對蒐藏的整體要求，他個人堅信礦物也應該有一套像動植物一樣的「檢索表」，特別是他想到化學組成並不能說明這些礦物的行為，針對不同礦物抗拒外界力量的強度，他找來了當時已知的各種礦物，開始有系統進行成千上萬次的互刮測試，最終開發了一套連小學生都能操作的硬度計。他建立的原則是：如果 A 可以在 B 上留下刮痕，那麼 A 就比 B 硬。他挑選了 10 種在自然界中相對常見、性質穩定的礦物，將它們排列成從 1 到 10 的序列 (圖 4) (Oldroyd, 2002)。

圖 4  
摩氏依礦物抵抗互刮的能力排序建立相對硬度表



圖片來源：  
<https://www.usgs.gov/media/images/mohs-hardness-scale>

摩氏問：「為什麼這個礦物會被刮傷，那個不會？」這個故事告訴我們：偉大的科學發現往往不在於你看了多少新東西，而在於你是否能對習以為常的現象進行深度觀察。

## 工業革命與礦物的應用

19 世紀人類對礦物晶體有非常深刻的認識之後，礦物成了工業革命的推手。當時的海戰與測繪極度依賴望遠鏡，石英的化學成分是二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ )，不過天然砂子常含有微量鐵元素，如果鐵含量太高，玻璃會呈現深綠色或褐色，就像早期的啤酒瓶。為了消除雜質顏色，移除這些會吸收特定光波的金屬離子，石英砂變純才能讓玻璃變透明。

高品質的石英砂是製作高精密透鏡的關鍵，純石英砂的熔點高達  $1,713^\circ\text{C}$ ，百年前這是極難達成的高溫。為了降低熔點，工匠會加入蘇打  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  等助熔劑，打斷部分矽氧鍵結，讓熔點降到  $1,000^\circ\text{C}$  左右。如果冷卻速度夠快，溫度降到玻璃轉化溫度時黏滯力變得極大，原子動彈不得，就成為玻璃。雖然玻璃看起來是固體，但其內部原子排列依然保有液體的隨機性。這就是為什麼玻璃沒有固定的熔點，而是隨著加熱逐漸軟化，玻璃破碎時也沒有特定的解理面，而是呈現貝殼狀斷口。

進入 20 世紀，礦物應用的重心轉向了半導體。在量子力學出現前，人們很難解釋為什麼金屬礦物可以導電，而有的礦物如石英、雲母等是不導電的絕緣體。量子力學告訴我們，固體中的電子不是隨意運動的，它們只能待在特定的「能階」裡。礦物的導電性主要取決於其內部的化學鍵結方式，可類比為礦物內部的電子交通狀況：有的像高速公路（導體），有的則像佈滿路障的荒野高地（絕緣體）。絕緣體的電子能階差異太大，電子跳不過去。金屬的電子則像在空曠的「開放空間」，隨時都在跑來跑去，因而導電性極強。

半導體材料的性質是平時不導電，但只要給點能量（熱或光），電子就能跳過去。矽（silicon）在地殼中含量極多，要製成半導體，必須達到「九個九」（99.9999999%）的純度。在這樣的純度下，主動加入特定的原子（如磷或硼），亦即通常每一億個矽原子中，只加入一個雜質原子。將矽提煉到「極致的純」，才能確保隨後加入的那一點點「量子摻雜」，能精確地按照方程式計算出的結果來導電（Cahn, 2005）。在自然界，礦物原本多少含有其他雜質（元素），因此半導體被稱為人類「煉金術」的頂峰—創造出了自然界從未存在過的極致純淨。

## 稀土元素與傳奇的瑞典小鎮 Ytterby

到了二十一世紀，稀土元素成為國際博弈的關鍵，因為電動車、風力發電機和精準飛彈，都非要稀土不可。

釷（Yttrium, Y）、鉕（Terbium, Tb）、鉺（Erbium, Er）和鐿（Ytterbium, Yb）屬於稀土元素，這四個名字全都來自 Ytterby 這個字，一個瑞典小鎮的名字，這是個人口不到三千人的小鎮，名字卻永遠刻在週期表上。

故事始於 1787 年，一位名為阿倫尼烏斯（Carl Axel Arrhenius）的業餘礦物學家，在 Ytterby 的一座採石場發現了一種黑色、沉甸甸的奇怪石頭\*1。這種石頭後來被命名為「矽鉍釷礦」（gadolinite）。石頭長得一點都不起眼，看起來就像一塊焦黑的煤渣（圖 5）。在當時的分離技術不發達，最初在 1794 年只發現了「釷土」（Y）。科學家加多林（Johan Gadolin）第一次從礦石中分離出「釷土」時，他以為那是一種純物質（Kaczmarek, 1981）。直到 50 年之後，後輩科學家才發現「那裡面其實還有其他元素混在一起」：鉺（Er）和鉕（Tb），1878 年又分離出鐿（Yb）。因為這四個元素的離子半徑非常接近，它們很容易互相取代，一起擠進矽鉍釷礦的晶格位置裡。正因為它們性質太像了，人類花了近百年的時間才把它們徹底分清楚。

圖 5  
深邃漆黑墨綠色的矽鉍鈮礦



圖片來源：

<https://www.etsy.com/uk/listing/4431450451/>

稀土元素共有 17 種，除了釷 (Sc) 與 鈾 (Y)，在週期表上被稱為「鑷系」元素。它們的不可替代性源於它們獨特的電子層結構，稀土元素的電子填入的是內層 4f 軌域，最外層電子排列幾乎一樣，這使得它們擁有許多未成對電子。4f 電子是原子家族裡的孤僻怪咖，像是一群隱居在地下室的頂級科技宅，或是躲在深山裡的世外鬼才。表面上看來毫無動靜，可一旦被外界的能量喚醒，就能展現出點亮雷射、拉動巨磁的絕世武功。稀土被稱為「工業維他命」—只需加一點，就能讓產品變得輕、薄、短、小且高效能。如果沒有稀土電子一致的自旋方向，產生了極強的磁矩，馬達要達到同樣的功率，體積可能會大上好幾倍。

雖然它們被稱為「稀」土，但其實在地球並不稀少，真正的問題在於開採與提煉極其困難。在自然界中，這 17 種元素總是混居在同一塊礦石裡，就像 17 個長得一模一樣的孿生兄弟。因而要將它們一個個分開，必須經過數百次甚至數千次的溶劑萃取。鈾讓電視機顯示出鮮豔的紅色；鈹讓你的手機螢幕具備觸控感應與發光功能；鉭變成了海底電纜的雷射放大器，讓你現在能跨海連上網路。當時只是為了採集做瓷盤的長石，在這座採石場挖石頭，但因為有人多看了一眼那塊「黑色石」，人類才拿到了進入現代電子文明的鑰匙。

## 礦物演化論的新觀點

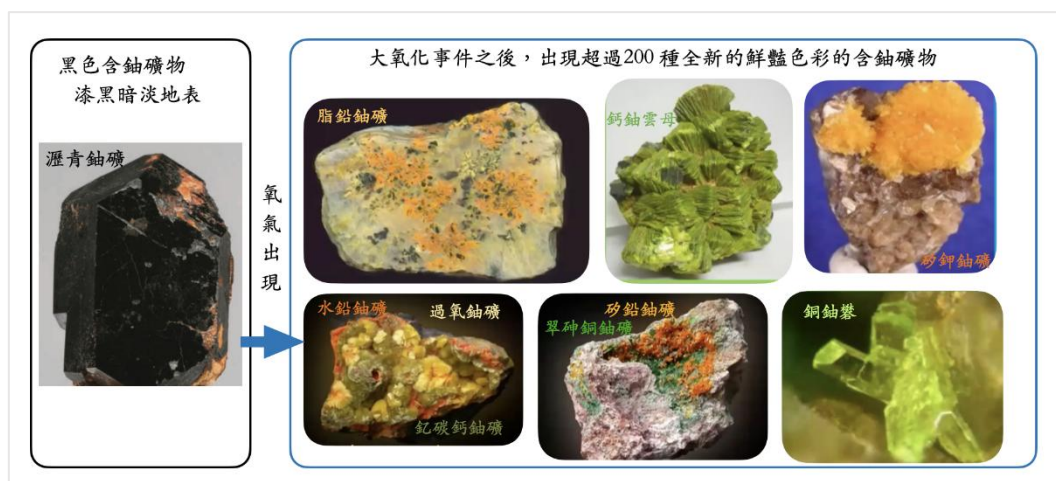
二十世紀的礦物學是根據化學組成分類，描述晶體結構的靜態科學。在這個知識架構中，礦物學與生物學、地質學相對脫節。然而礦物是地質幽冥歷史最忠實的紀錄者，每種自然礦物都標記了一個特定的時間點與成因。近年來羅伯特·海森 (Robert Hazen) 提出礦物演化的觀點，引入了生物學中的「多樣性」與「演化時間線」。他發現地球上目

前 6,000 多種礦物，並非一開始就存在，而是隨著行星演化分階段出現的。在這樣的系統思維下研究礦物，他指出 6,000 多種礦物中，有超過三分之二是直接或間接由生命活動（如大氧化事件）創造的。

海森是卡內基科學研究所 (Carnegie Institution for Science) 的高級研究員，受過哈佛大學與研究所地質學專業訓練，並在英國劍橋大學攻讀博士，專攻礦物物理學 (mineral physics)。2006 年他在一場聖誕派對上的閒聊，被一個問題問倒了。長期以來，黏土礦物一直被認為對早期微生物的有機分子很重要，那晚理論生物學家 哈羅德·莫羅維茨 (Harold Morowitz) 突然問他一個看似基礎卻從沒人問過的問題：「冥古宙 (40 億年前) 的地球上黏土礦物嗎？」(Mann, A., 2017)，海森當時愣住了。他意識到傳統礦物學只關心礦物的晶體結構，卻從未有人系統性地思考過礦物在時間長河中是如何出現與改變的。這次對話讓海森徹夜難眠，他開始意識到，如果生物會演化，那麼作為生命舞台的礦物，必然也有一套與行星共同進展的歷史。

舉例來說，瀝青鈾礦 (uraninite,  $UO_2$ ) 是最重要的鈾礦物，在地球的大氧化事件 (GOE, 25 億年) 之前，地球上的鈾主要以 ( $U^{4+}$ ) 的形式存在 (Hazen et al., 2009)，它非常「宅」，不喜歡水，極難溶解。它就一直待在原地，即使岩石風化了，也只是變成碎屑隨波逐流。當氧氣出現，鈾被氧化成 ( $U^{6+}$ )，它會與兩個氧原子結合形成鈾醯離子 ( $UO_2$ )  $^{2+}$ 。鈾醯離子非常「外向」，極易溶於水，當光合作用生物開始排放氧氣，地表水和地下水變成了氧化性流體。這些水流過含有瀝青鈾礦的岩石時，把固體的  $U^{4+}$  氧化成可溶的 ( $UO_2$ )  $^{2+}$  帶走，這意味著原本被鎖死的鈾，突然獲得了地表通行證，可以隨水流動。( $UO_2$ )  $^{2+}$  非常活潑，它能與磷酸根、砷酸根、釩酸根、碳酸根或硫酸根結合，因為這種強大的結合能力，一下子創造出了超過 200 種全新的礦物種類。這些礦物通常具有極其鮮豔的螢光黃、亮綠色或橙色，與早期地球暗淡的黑色、灰色礦物形成鮮明對比。可以說氧氣大量出現後，礦物的大爆發讓暗沈的地表塗抹上妝，變成了豔麗多彩的世界 (圖 6) ！

圖 6  
地球氧氣大量出現後，含鈾礦物的大爆發



圖片來源：

<https://www.youtube.com/watch?v=Lzv-NwF1DNE>

海森整合行星科學以及大氣與環境科學，將礦物學從單純的研究「它是什麼」轉向研究「它在行星演化中扮演什麼角色」。透過 21 世紀強大的計算機模擬與數據庫，拼湊出跨越 45 億年的礦物演化全景圖 (Hazen et al., 2022)。海森擁有長達 40 年的專業小號手生涯，這種對交響樂宏觀敘事的掌握，可能影響了他看待科學的方式—不把礦物視為孤立的標本，而是將其視為與生物、地質、大氣共同演奏的一場地球交響曲。

## 後記

礦物有耐人尋味的美，可以從晶體結構感受到極致的秩序感，晶體那橫平豎直、幾何對稱的線條，展現了一種永恆且不容懷疑的確定性。我們讚嘆礦物的色彩時，不妨感謝那群在微觀世界裡不斷跳躍的電子，他們藉能量轉換帶出華麗色彩！礦物也是地球的「記憶載體」，它在某個特定的地質年代結晶，便將那一刻的溫度、壓力、化學條件甚至是古氣候的線索，像拍照一樣永遠封存在晶格之中。地球物質不會真正消失，一切只是在不斷地轉換型態，並留下與地球環境變遷交會的可見形態。這些深刻的體會隨著櫥窗玻璃的反光閃爍，內心不免浮現一種靜謐而滿足的喜悅。當大地瑰寶閉館時間已到，終於必須轉身離去時，我忍不住告訴自己還會再來，期待開啟另一場與礦物無聲而理解的交會。

## 參考文獻

- Cahn, R. W. (2005). Silicon: A child of revolution. *The Electrochemical Society Interface*, 14(1), 15–16.
- Hazen, R. M., Ewing, R. C., & Sverjensky, D. A. (2009). Evolution of uranium and thorium minerals. *American Mineralogist*, 94(10), 1293–1311.  
<https://doi.org/10.2138/am.2009.3208>
- Hazen, R. M., Morrison, S. M., & Downs, R. T. (2022). On the paragenetic modes of minerals: A mineral evolution perspective. *American Mineralogist*, 107(7), 1262–1287. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8099>
- Kaczmarek, J. (1981). Discovery and commercial separations. In K. A. Gschneidner Jr. (Ed.), *Industrial applications of rare earth elements* (pp. 135–165). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1981-0164.ch008>
- Mann, A. (2017, October 31). *What mineral evolution tells us about life on Earth — and beyond*. Medium. <https://medium.com/@adammann930/what-mineral-evolution-tells-us-about-life-on-earth-and-beyond-7d9be193ea30>
- Oldroyd, D. (2002). Friedrich Mohs and the historical background of his hardness scale. *Earth Sciences History*, 21(2), 140–155.  
<https://doi.org/10.17704/eshi.21.2.v2427r761l885542>
- Whitlock, H. P. (1918). René-Just Haüy and his influence. *The American Mineralogist*, 3(6), 92–98. [https://msaweb.org/AmMin/AM3/AM3\\_92.pdf](https://msaweb.org/AmMin/AM3/AM3_92.pdf)



# 幼兒園圖鑑繪本科學閱讀的教學轉化與實踐

劉淑雯<sup>1</sup>、蕭淑芬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南加州師範學院課程總監、<sup>2</sup>臺北市立中正幼兒園園長

## 緒論：書架上最快被翻過的那本書

圖鑑，是幼兒園書架上最容易被忽略的那一類書。從許多幼教師都曾親歷的共讀挑戰，試圖梳理圖鑑繪本在幼兒園生活中的真實樣貌，並以此作為整篇文章探討的起點。

### ∞ 圖鑑繪本的挑戰時刻

午後，孩子們圍坐在老師身旁，聽著關於昆蟲女孩的故事繪本，眼神專注、身體前傾，偶爾輕聲說：「蟲蟲好可憐！」「後來呢？」這樣的氛圍讓老師感到踏實—這是他熟悉的、有把握的閱讀節奏。故事結束，有孩子抬起頭問：「老師，那個蝴蝶是毛毛蟲變成的嗎？」、「是哪一種蝴蝶呢？」老師靈機一動，從書架上取出一本昆蟲圖鑑：「我們來找找看！」

圖鑑被翻開了。一頁、兩頁、三頁.....不到兩分鐘，孩子們開始快速地掃過頁面，像是在翻一本沒有目的地的地圖。提問消失了，眼神飄移了，原本凝聚的能量悄悄散去。老師也靜了下來，不確定自己下一句話該說什麼。「這是樺斑蝶的小寶寶」、「那是無尾鳳蝶」，然後呢？

這樣的「卡住」時刻，是許多幼教師曾經歷的情境。它不是某位老師的個人困境，而是多數的幼兒園中一個安靜卻真實存在的教學難題：圖鑑明明近在咫尺，卻始終成為書架上被翻過最快、停留最短的那一本書。

## 問題意識：幼兒園為什麼需要圖鑑繪本？

圖鑑繪本在幼兒園中的缺席並非偶然。以下從閱讀生態的失衡、教師面對的困境，以及圖鑑與圖鑑繪本的概念釐清三個面向，剖析問題的根源。

### 一、閱讀生態的偏食

近年來，臺灣幼兒閱讀推廣工作持續發展，故事繪本的應用越來越多元豐富，但資訊類文本在幼兒園閱讀場域中的出現率，卻遠遠少於故事類文本。不僅是資源分配的問題，而是成人對「閱讀」概念的思考：在許多幼兒園領域中，「閱讀」幾乎涵蓋了「聆聽故事」。這樣的等號，使圖鑑長期處於邊緣。

然而，幼兒階段的科學學習，不只是聽一個關於自然的故事，而是要能夠觀察—仔細看、尋找細節；比較—發現異同、整理規律；提問—從「這是什麼」走向「為什麼」「還有呢」。這正是圖鑑繪本最擅長引發的學習，這種「看→想→就是問」的思考過程，也正可以補足故事繪本較難獨自完成的部分。當幼兒園的閱讀生態只有故事時，孩子便少了一個進入科學思考的入口。

幼兒園教保活動課程大綱（教育部，2017）將「探索與理解」列為認知領域目標，強調幼兒應透過觀察、比較與提問建構對世界的理解—這正是圖鑑繪本最擅長引發的學習歷程，也為圖鑑帶讀提供了課程依據。

## 二、教師面臨的三個困境

圖鑑繪本使用率低，根源在於下列三個相互扣連的教學困境：

1. 成人不知道如何帶讀：相較於故事繪本有情節可循，圖鑑的結構是並列式知識呈現，教師缺乏「從哪裡切入」的教學語言，往往開口便是逐頁念說明文字，反而讓共讀失去溫度。
2. 提問層次難以深化：帶讀圖鑑時，教師最常問的是「這是什麼？」。這是必要的起點，卻也常常是終點。從辨識走向觀察、比較、推論，需要教師有意識地設計問題階梯。
3. 幼兒的閱讀行為停留在掃視：幼兒面對圖鑑時，最普遍的反應是快速翻頁，像在看電視頻道，找不到停留的理由。圖像豐富，卻缺乏一個讓孩子「讀進去」的入口。

三個困境的根源，並不在於「圖鑑不適合幼兒」，而在於教師缺乏陪孩子進入圖鑑世界的語言與策略—這正是本文試圖回應的問題。

## 三、圖鑑與圖鑑繪本：定義與異同之處

圖鑑 (field guide) 與圖鑑繪本 (illustrated guidebook) 雖皆以視覺影像為知識載體，但在敘事邏輯與功能定位上有顯著差異。圖鑑的核心價值在於其「檢索功能」與「科學工具性」，強調物種或物件的去脈絡化呈現，透過精準的特徵標註與標準化數據，提供讀者客觀的辨識基準，解決「鑑定與比對」的實務需求。

相對而言，圖鑑繪本則更具備「敘事美學」與「情境啟蒙」的特徵。它不僅止於知識點的羅列，而是透過創作者的藝術詮釋與情境建構，將零散的資訊整合為具流動性的

視覺故事。其目的不在於追求極致的科學數據，而在於藉由藝術感官的介入，將工具性的「知識點」串聯為具生命力的「知識面」，激發讀者的探索動機。若圖鑑是追求精確辨識的「專業目錄」，圖鑑繪本便是強調感性連結的「美感導覽」，兩者在科普出版中相互補足。

## 他山之石：圖鑑讓孩子學會「理解世界」

回顧國際學術研究與日本實踐經驗，從研究文獻、日本案例與兩類繪本的功能比較三個角度，說明圖鑑在幼兒發展中的獨特價值。

### 一、資訊類文本的教育價值

資訊類文本 (informational text) 在幼兒閱讀發展研究中，長期處於被輕忽的地位。Yopp 與 Yopp (2006) 針對逾千位幼兒園至三年級教師的調查發現，無論學校或家庭共讀，孩子接觸故事類文本的機會遠多於資訊類—這種失衡從學校延伸到家庭，成為結構性的閱讀偏食。Dreher (2003) 進一步指出，資訊類文本在班級圖書館中本就稀少，在低收入學校尤甚，學科詞彙的匱乏往往正是孩子在中年級開始落後的關鍵原因之一。

然而，資訊類文本對幼兒認知發展有其不可替代的貢獻。Dreher (2003) 指出，資訊類閱讀能有效累積學科詞彙，為幼兒建立進入科學思考的語言基礎；而這種效益，在故事類文本中難以單獨實現。Wright 與 Gotwals (2017) 的幼兒園實驗則進一步驗證了這一點—他們為幼兒園設計了一套整合科學探究與語言素養的課程，歷時僅四週，實驗班的孩子在「提出主張」、「以證據支持論點」與「學科詞彙應用」三個面向，均顯著優於對照班。即使平時在教室裡表現較為掙扎的孩子，也在科學討論中積極投入—幼兒不缺能力，缺的是讓他們開口聊科學的入口。

從縱向角度來看，Jang 等人 (2024) 以美國幼兒園至五年級 18,174 名孩子的長期追蹤資料為基礎發現，科學學習的落差早在二年級便已清楚浮現，且隨年級升高持續擴大。而在所有可能縮小這些落差的因子中，語言與閱讀素養的程度最具關鍵性—對女孩、黑人與西班牙裔孩子、以及低收入家庭的孩子而言，語言與識字能力的提升，是縮小科學成就差距最有力的保護因素。這說明幼兒園的語言鷹架不是超前學習，而是防止科學落差日後擴大的基礎工程。

綜合上述研究，圖鑑在幼兒科學學習中的功能可歸納如下：

1. 提問能力：從「這是什麼」走向「為什麼」怎麼發生的」
2. 學科詞彙：建立科學概念所需的語言鷹架
3. 觀察力與分類思考：從注意力細節，走向發現規律
4. 說明文閱讀策略：為學齡後的跨科學習奠定基礎

問題從來不是「圖鑑不適合幼兒」，而是缺乏將圖鑑帶入教學的語言與策略。「從辨識到追問」的思維歷程，也見於對科學繪本作家創作策略的研究。劉淑雯與林吟霽(2023)以梅麗莎·史都華的作品為例，說明優質科學繪本如何以問題為起點，引導讀者逐步建立科學探究的思考習慣——不急著給答案，而是持續拋出引人深思的問題，與本文三層次提問架構的精神相互呼應。

## 二、日本經驗的啟發：把圖鑑當成生活中的科學入口

福音館書店自 1969 年起持續出版的月刊《かがくのとも》(科學之友)，至今年如昆蟲、植物、水、影子等日常自然現象，以寫實的插圖與簡潔的文字呈現給幼兒。該刊物的定位從一開始就很明確：補充教材，而且是日常閱讀；不是刊物上課用的，而是生活裡參考的。

日本幼教現場的圖鑑使用，有幾個標誌性的共同特徵，圖鑑是教室中隨手可及的生活工具；孩子在戶外觀察後，會自然地回到圖鑑中比對；教師也習慣給孩子自主翻讀的空間，而不是逐頁帶讀。圖鑑在這樣的文化中，成為孩子與真實世界之間的橋樑--先觀察，比對，再提問。問題從來不在圖鑑，而在我們如何陪孩子讀。

親野智可等(2014)也從實踐角度指出，圖鑑之所以能增強孩子的學習力，關鍵不在圖鑑本身的內容豐富與否，而在大人是否具備陪伴孩子「讀進去」的意識與方法。問題從來不在圖鑑，而在我們如何陪孩子讀圖鑑。

## 三、故事繪本與圖鑑繪本：感受世界與理解世界，缺一不可

本文並非要以圖鑑繪本取代故事繪本，而是建立一個「互補共生」的閱讀生態。兩者在閱讀環境中可以並存：故事繪本引發孩子對世界的情感好奇，圖鑑繪本則幫助孩子形成對世界的認知理解(見表 1)。

表 1

故事繪本與圖鑑繪本的功能比較

向度	故事繪本 (FICTION)	圖鑑繪本 (NON-FICTION)
文本結構	情節、角色、衝突與解決	並列知識、分類、比較、說明
認知功能	情感導入、敘事理解、同理	觀察分析、分類思維、因果推理
語言學習	文學語言、情境詞彙	學科詞彙、說明語句
提問類型	「然後呢？」「為什麼他這樣做？」	「這是什麼？為什麼長這樣？」
科學學習	引發對自然的情感連結與驚奇	培養科學思考的觀察與分析工具

科學教育的目標，不僅讓孩子喜歡自然，還包括讓孩子觀察和解釋自然。一個只有故事繪本的閱讀環境，給了孩子感受世界的能力，卻少了解釋世界的工具。圖鑑繪本，正是彌補了這一空白的關鍵資源。

## 我們的行動：以社群協作拓展教師的帶讀語言

本文作者曾以教師專業學習社群為基石，透過跨園協作，共同發展圖鑑繪本帶讀語言與教學模組。

社群協作奠基於作者多年的科學繪本研究，從科普閱讀推廣（劉淑雯，2019）、日本月刊科學繪本的引介（劉淑雯、黃明宏，2019），到科學繪本選用與課堂應用（劉淑雯、黃明宏，2021；劉淑雯、黃譯平，2022），提供了該研究的理論視野與實踐基礎。

### 一、理論基礎：教師專業學習社群作為行動框架

本次社群協作奠基於教師專業學習社群（professional learning community, PLC）的理論。DuFour (2004) 指出，PLC 的精神在於讓教師從孤立的個別實踐者，轉變為透過協作持續改進教學的集體行動者；專業成長不再依賴外部研習，而是內嵌於日常的共同討論與實踐。Wenger (1998) 的「實踐社群」(communities of practice) 概念進一步說明，知識在教師「共同實踐、共同反思」的互動過程中不斷生成。

教育部 (2009) 《建立教師專業學習社群手冊》倡議教師透過共同備課、觀課與議課，形成持續學習的社群文化。本文的協作設計，正是在此政策脈絡下的實踐。

圖鑑帶讀的困境，並非源於教師個人能力不足，而是整體社群中缺乏共享的教學語言與策略。當教師共同閱讀圖鑑、討論提問設計、試演帶讀與相互修正，「不知道怎麼帶」的困境便從個人無力感，轉化為社群可共同面對的課題。

## 二、社群歷程：從共讀協作到教學設計的三個遞進階段

作者邀請八位臺北市幼教師組成跨園圖鑑繪本教學研究社群。社群歷程分為下列三個遞進階段：

### 第一階段、共同閱讀與賞析：

社群成員先以「讀者身分」重新認識圖鑑繪本，這類文本與故事繪本有什麼不同？它的版型設計、索引功能、圖文關係各有什麼特色？練習從幼兒的視角圖鑑的吸引力，以及可以激發觀察、比較與提問的教學切入點。這個階段的目標，是讓教師建立共同的「讀圖鑑語言」，在此之前，許多老師從來沒有認真「讀過」圖鑑繪本（見圖 1、2）。

### 第二階段、協作設計與研討：

社群中的教師以自己班級的孩子為對象，選取一本圖鑑繪本，設計完整的「遊戲化共讀活動方案」，包含帶讀流程、三層次思考設計與延伸遊戲活動。初稿設計完成後，在社群中進行討論，思考帶讀提問與活動實作的可能性，並具體回饋與修改建議。

### 第三階段、整合與實踐反思：

將各教師的設計成果進行跨校比較與統整，歸納出可移轉的教學原則，並討論不同發展階段（小、中、大班）的帶讀策略差異，逐漸形成社群內部共享的教學知識。

圖 1  
線上共備會議，相見歡



圖 2  
社群共讀圖鑑繪本



### 三、核心架構：三層次提問模組

社群協作最主要的產出，是可通用於不同圖鑑主題的「三層次提問架構」。此架構依幼兒認知發展，將圖鑑共讀的提問分為表 2 所列三個層次。

表 2

圖鑑繪本遊戲化共讀三層次提問架構

層次	提問方向	核心認知能力
第一層	看到什麼？發現什麼？	觀察與描述：注意細節、用語言表達所見
第二層	因為.....所以.....想到什麼？	證據與推理、比較與連結：根據觀察進行邏輯推論
第三層	為什麼？還有呢？ 如果.....可能.....	提問與探究：自發提問、創造性假設、跨情境延伸思考

第一層以「觀察與描述」為核心，鼓勵幼兒仔細看、說出所見；第二層進入「證據與推理」，引導幼兒根據圖鑑中的資訊進行邏輯推論；第三層則是「提問與探究」，讓幼兒從接收知識的讀者，轉化為主動提問的探索者。三個層次並非嚴格順序，教師可視教學節奏靈活切換與運用。

### 教學實踐案例：讓圖鑑繪本在孩子眼中活起來

以下擇取兩個教學設計案例，具體呈現三層次提問架構如何在真實生活和教學情境中落地，說明遊戲化延伸活動如何將圖鑑繪本知識轉化為孩子主動投入的學習歷程。

#### 一、《恐龍出現了！》：從肢體模仿到古生物推理

在《恐龍出現了！》的教學設計中，教師著眼於恐龍主題的一個常見認知誤解：無齒翼龍常被誤認為恐龍，但牠實際上是翼龍類，與恐龍屬於不同的分類系統。教師以這個「誤解」作為教學切入點，讓孩子在澄清認知的過程中自然接觸到科學思考中「分類」的核心概念。

三層次提問的設計中，第一層圍繞觀察與描述：「你喜歡哪隻恐龍？形容一下牠的外觀、顏色、高度」，以及比較自己與恐龍有哪些相像或不相像的地方。第二層進入證據與推理，例如引導孩子思考：恐龍和蜥蜴同屬爬行類，但後腳連接方式不同，這個差異為什麼重要？這類問題已超出一般幼兒的先備知識範圍，目的並非要求答對，而是引發「想去找答案」的動機—圖鑑從此成為「問題的起點」，而不只是「答案之書」。第三層則開放孩子探究恐龍滅絕的可能原因，或想像恐龍是否有機會再復活。

遊戲化延伸部分，教師設計了三個活動。「恐龍比身高」讓孩子用捲尺找出圖鑑中與自己身高最接近的恐龍，將數字帶入身體的真實尺度；「我的牙齒和恐龍的牙齒像嗎？」引導孩子觀察不同恐龍的牙齒形狀—暴龍的尖齒與梁龍的扁齒—再照鏡子觀察自己的牙齒，推論牙齒形狀的功能，讓觀察→比較→推論的思考流程在一個簡單的動作中自然發生；「恐龍肢體模仿賽」讓孩子用身體表演特定恐龍的動作或外型特徵，在遊戲中深化對恐龍外型的記憶與理解。這三個活動有一個共同前提：孩子必須先「細看圖鑑」才能進行。圖鑑不再是快速掃過的背景，而成為遊戲得以展開的必要工具（見圖 3、4、5）。

圖 3  
看看我的牙齒



圖 4  
模仿恐龍肢體



圖 5  
和恐龍比身高



## 二、《狗狗出沒中！》：從情感連結到科學觀察

在《狗狗出沒中！》的設計中，教師選擇情感作為帶讀入口。這本圖鑑的特別之處，在於它不只介紹犬種，更用大量篇幅描繪狗狗的情緒與肢體語言—搖尾巴、露肚子、屁股翹高—這些行為訊號的視覺化呈現，對幼兒極具吸引力，也為觀察與推理的教學提供了豐富素材。

教師特別點出孩子與狗狗之間的一個相似之處：兩者都習慣把自己的感受放在別人身上，「我喜歡抱抱，所以狗狗也喜歡抱抱」—而狗狗同樣會把心愛的肉乾或玩具送給人來表達愛意。這個觀察構成了教學切入點：孩子本來就想理解狗狗，圖鑑提供的是理解的工具，情感引路、科學接手。

三層次提問中，第一層引導孩子描述所見：「你看過書裡的哪一種狗狗呢？牠的尾巴或耳朵長什麼樣子？」「從圖片中，你發現開心的狗狗和生氣的狗狗，身體動作有什麼不一樣？」第二層引導孩子比較與連結：「你覺得狗狗和貓咪有什麼不一樣？可以從外表、動作或個性來想一想。」第三層引導孩子從情感衝動走向責任推論：「如果你要養一隻狗狗，需要做哪些準備呢？還有誰可以一起幫忙照顧？」

遊戲化延伸方面，教師設計了兩個活動。「狗狗安定訊號演練」取材自圖鑑中介绍的「安定訊號」概念—遇到陌生狗狗時，避開視線並安靜走過，傳達「我沒有敵意」的肢體訊息。一人扮演陌生狗狗，其他人練習「不看牠、安靜走過」。這個活動同時涵蓋科學觀察、安全教育與社會情緒學習。「撿便便大賽」使用塑膠袋模擬撿便便，規則是兩隻手都不能直接摸到大便才算成功，讓「養寵物的責任」從抽象概念變成具體的身體操作，幫助孩子理解：愛一個生命，需要願意做不輕鬆的事（見圖 6、7、8）。

圖 6  
模仿狗狗各式各樣動作



圖 7  
體驗聽覺的靈敏度



圖 8  
如何撿狗大便



### 從教學現場的角度看《狗狗出沒中！》

教師在教室帶讀時，觀察到一個有意思的現象：孩子不是在「翻」書，而是在「找」書。幾個孩子開始在圖鑑裡找和自己家或朋友家的狗狗相似的品種，小聲討論「這就是虎斑貓？不對，我家的比較像這個！」書成了比對工具，不再是被動閱讀的對象。

帶讀中另一個孩子拿著書走到老師旁邊，指著一張圖問：「老師，牠在生氣嗎？」教師當時沒有直接給答案，而是翻到相關的頁面，說：「我們來找找看，書上怎麼說的？」孩子盯著那頁看了一會兒，說：「喔，牠是在放鬆！不是生氣！」這個「找答案」的動作只花了三十秒，但三十秒裡完成了觀察→提問→從圖鑑尋找資訊→得出結論的完整思考路徑。

教學現場最難複製的，是教師能夠暫停住自己「馬上給答案」的直覺。這需要練習，也需要對圖鑑有足夠的熟悉—知道答案藏在某一頁，才能自信地說「我們去找找看」。社群協作歷程中，教師多次試演帶讀，也是在練習這個「按住」的能力。當教師不再急著給答案，孩子就有機會走到圖鑑裡去找。這是最難教、也最值得練習的一件事。

### 三、圖鑑繪本的帶讀歷程與教學轉化

這兩個教學現場片段，聚焦三件事：教師如何帶得起來、提問如何有層次展開，以及幼兒的閱讀行為如何被看見與回應。

#### 1. 「便利商店也有這個！」——《米飯開動了！》帶讀現場

下午自由活動時間前，老師把《米飯開動了！》放在語文區，沒有宣告，只是將書打開放著。五分鐘後，三個孩子圍過來了。A 指著飯糰說：「這個我和媽媽去便利商店有看過！」老師輕聲問：「飯糰裡面包什麼？你記得嗎？」A 回答，B 翻到下一頁，指著一個細長的食物：「這個長長的是什麼？」老師沒有直接回答，而是說：「你覺得呢？你有沒有在哪裡看過像這樣的東西？」B 想了一下：「迴轉壽司店！」

這次帶讀是意外發生的，沒有預定問題、沒有排好座位，但老師的每句話都是第一層提問—讓孩子說出所見、連結生活記憶。約莫十分鐘後，孩子主動翻到介紹米種類的那一頁，A 問：「為什麼這個米是紅色的？」那是第三層問題，是孩子自己走到那裡的。老師在事後的社群分享中說：「以前我不會這樣帶，因為我覺得我得先準備好答案。現在我知道，問題比答案重要。能讓孩子問出問題，那次帶讀就沒有白費。」

這次帶讀讓老師看見的，不只是孩子對米食的興趣，更是孩子翻書的方式—他們不是隨機掃視，而是在書裡找自己認識的東西，找到了，就停下來。那個「停」，是提問得以發生的起點。

#### 2. 「老師，這個麵包我吃過！」——《麵包出爐了！》的帶讀轉折

老師在帶讀《麵包出爐了！》之前，對這本書的定位有些猶豫：「麵包有什麼好觀察的？孩子不就是愛吃嗎？」他擔心帶讀會停在「認識麵包種類」的層次，翻完一輪就沒了。

帶讀的走向，卻讓他意外。書翻到介紹吐司的那一頁，C 說：「這個我每天早餐都吃！」另一個孩子 D 搖搖頭：「我吃的是圓圓的那種。」兩人開始比較起來，老師順著問：「你們的麵包，外面是硬的還是軟的？顏色一樣嗎？」第一層的觀察與描述，在孩子自己的早餐記憶裡自然展開。

翻到法國長棍的頁面，孩子說：「這個好長喔，怎麼烤的？」老師沒有急著回答，而是指著圖鑑中的烘焙步驟說：「你看這裡，烤之前要先怎麼做？」孩子仔細看了一下：「要先切線！不然它不會裂開！」接著又問：「為什麼要讓它裂開？」那是第三層問題—從觀察到推論、再到自己提問的完整路徑，在一頁圖鑑裡走完了。

結束後，老師在社群分享中說：「我以為孩子對麵包的興趣只是『想吃』。後來我才發現，他們其實很想知道麵包是怎麼來的。那個『為什麼要切線』的問題，是我沒想到會出現的。而孩子對於各種麵包的歷史由來很感興趣，本書透過小故事的方式讓孩子在吃麵包時又多了一些故事能和家長分享，我想這也是這本圖鑑繪本為什麼這麼收到孩子歡迎的原因之一吧！」

《麵包出爐了！》讓我們看見，「日常熟悉的主題」反而是帶讀的優勢，不是限制。孩子帶著既有的生活經驗進入圖鑑，熟悉感讓他們敢開口；圖鑑提供的細節，又讓熟悉的事物變得陌生而值得再問一次。這是日常生活類圖鑑繪本獨有的帶讀節奏。

這些學習故事呈現的共同軌跡是：帶讀可以從輕巧開始，問題的層次可以跟著孩子的目光移動，而幼兒的閱讀行為——他們停在哪裡、問什麼、去哪裡找答案——本身就是最豐富的教學資訊。主題不同、場景不同，但每一次帶讀裡都有孩子自己發現或思考到的那個問題。

## 討論與省思：圖鑑帶讀的更多可能

最後，我們在實踐基礎上，反思圖鑑繪本教學的定位與可能，並聚焦未來值得繼續深化的方向。

### 一、回應困境 1：從沒有腳本，到有語言的帶讀

教師最初面對圖鑑時，最常說的一句話是「不知道從哪裡開始」。故事繪本有情節，教師可以跟著情節走；圖鑑的結構是並列式的，沒有一條線帶著人前進，這對習慣故事帶讀的教師而言是一種陌生。

社群協作歷程中，這個困境的轉化，不是來自一次研習或一套講義，而是發生在教師「先當讀者」的過程裡。當教師以讀者身分重新閱讀圖鑑，開始注意版型設計、索引功能、圖與文之間的對話關係，他們才慢慢找到切入點，找到「第一句話可以說什麼」。

教師設計「撿便便大賽」時說：「我就想，孩子如果真的想養狗，那責任感要從哪裡建立？便便就是最具體的那一步。」這樣的教學判斷，不是來自預設教案，而是來自一位教師對自己班上孩子的深刻理解。社群提供的，是讓這份判斷被看見、被討論的空間，讓個別教師的細膩觀察成為共同資源。

### 二、回應困境 2：三層次提問如何在現場真實發生

三層次提問架構的設計初衷，是提供教師一份「問題的地圖」，而非逐題照念的腳

本。社群試演與現場回饋呈現出幾個共同現象。

第一，第一層問題幾乎所有教師都問得出來，但停在第一層是最常見的狀況。「這是什麼？」問完了，教師往往不確定下一步要往哪裡走。第二層問題的設計—引導孩子用「因為……所以……」或「我發現……」說話—需要教師刻意建構，才能走出「辨識」的邊界，進入「推論」。

第二，第三層問題有時是孩子先問出來的，教師的任務反而是「聽出來」並接住。老師在《米飯開動了！》帶讀時，孩子問「為什麼這個米是紅色的？」那是第三層問題，是孩子走到那裡的，不是教師推著去的。這說明三層次提問框架是可以「從孩子的問題逆向使用」的一看見孩子在哪一層，再決定往哪個方向引導。

三層次提問框架是可以內化的思考工具，不需要照單全收，重要的是教師依孩子的反應靈活調整。

### 三、回應困境 3：孩子停留在圖鑑裡的要素

幼兒面對圖鑑快速翻頁的現象，在社群討論中屢被提及。實踐案例讓我們看見幾個讓孩子「停下來」的要素。

第一是找到自己認識的東西。孩子在圖鑑中找到自己家的貓、吃過的食物、熟悉的狗狗，他們就停了。這說明圖鑑帶讀的起點，往往不需要從最有趣的頁面開始，而是從孩子「已知」的地方切入，讓陌生的知識有一個熟悉的入口。

第二是圖鑑成為遊戲的必要工具。教師們設計的三個延伸活動，都邀請孩子先細看圖鑑才能進行。當圖鑑不再只是「看的書」，而是「做事情的工具」，孩子翻頁的方式就不同了—他們在找東西，不是在掃視。

第三是有人「不急著給答案」。帶讀的過程中也都呈現了同一件事：當教師把問題還給圖鑑，說「我們去書裡找找看」，孩子就有機會慢下來，真正進入文本。這個簡單的動作，改變了孩子與圖鑑的關係。

### 四、科學與感受可以並重

社群討論中，有教師擔心：「帶圖鑑，孩子的閱讀感受會不會變得太理性、太冷？」科學學習的起點，常常是情感上的驚奇。《狗狗出沒中！》教的不只是犬種辨識，更是「如何站在狗狗的角度理解世界」；《恐龍出現了！》的「恐龍肢體模仿賽」，讓孩子用自己的身體感受恐龍的外型，這本身就是一種充滿情感的認識方式。圖鑑閱讀不排除感受，它給孩子的是更多觀察的語言和思考的工具。

一個孩子對著圖鑑中的章魚說「牠好奇怪喔！」，接著問「為什麼牠有八隻腳？」，兩句話之間，就是情感與科學思考的自然銜接。感受在前，提問在後，兩者並不互相妨礙。

## 五、「圖鑑繪本」的定位：既非故事，亦非教科書

圖鑑繪本有別於圖鑑純粹檢索功能，它以情境敘事與藝術詮釋為核心，帶領讀者在視覺故事中建構知識。然而在教學現場，許多教師仍習慣以「使用圖鑑」的方式帶讀圖鑑繪本，試圖逐頁核對資訊、強調正確辨識—這正是「卡住」的根源之一。圖鑑繪本不是故事繪本的知識升級版，也不等同於幼兒版教科書，它有一套屬於自己的閱讀邏輯。

圖鑑繪本的核心特質是「非線性結構」：讀者可以從任何一頁開始，不需要依序翻完。這個特質對教學來說是一種挑戰，因為沒有情節可以帶著孩子走；但換個角度，孩子也因此有機會依照自己的興趣決定去哪一頁。我們的帶讀設計，正是試圖將這個「非線性」轉化為教學模組：三層次提問架構提供教師多個彈性切入點，帶讀不必依序進行，而是因應孩子的反應調整節奏。

## 六、教師社群：最關鍵的知識生產場域

社群協作歷程中，最令人印象深刻的是教師從「不知道怎麼帶」到「設計出充滿創意的活動」的轉變。這種轉變不是來自外部專家的灌輸，而是發生在教師彼此的對話、試演與回饋之間。

教師設計「撿便便大賽」時說：「我就想，孩子如果真的想養狗，那責任感要從哪裡建立？便便就是最具體的那一步。」這樣的教學智慧，來自教師對自己班上孩子的深刻理解，而非來自任何預設教案。社群提供了一個讓這份教學判斷被看見、被討論的機會，使個別教師的洞察有機會成為大家共同的資源。

社群提供的是共識與架構，不能取代教師面對班上孩子時的即時判斷。

## 七、省思：我們的下一步

這次的實踐，回頭看這幾個案例，有些事情確實做到了：教師從困惑中找到帶讀語言，三層次提問在現場發生了，孩子的閱讀行為有所轉變。但也有仍需要省思調整之處，如：帶讀品質目前並無發展出可以自我檢核的觀察工具。每次帶讀後的反思，是以非正式的、依賴教師個人判斷的。

未來可透過社群協作，發展合宜的帶讀觀察指標。而三層次提問在大班的效果明顯，但在小班是否同樣適用、需要怎樣調整，也是我們有待系統地面對與思考的問題。

我們相信圖鑑繪本帶讀的樂趣，可以傳播讓更多人看見；更希望這套帶讀語言和三層次提問架構，有機會被更多教師看見、試用，也能讓更多家長理解：圖鑑不是孩子讀不了的書，而是一扇等待被推開的門。當孩子拿著圖鑑問「為什麼」，那個問題本身，就是科學思考的起點。

帶讀語言的形成還在進行中，社群還沒有散，持續發酵中。我們期待這份發酵，能慢慢擴散到更多的教室、更多的書架旁—讓圖鑑不再只是被翻過最快的那一本書。

## 結語：讓圖鑑在每間教室裡活起來

「問題從來不在圖鑑繪本，而在我們如何陪孩子讀圖鑑繪本。」

從教學現場的真實困境出發，探討圖鑑繪本在幼兒科學領域中的教育潛能。實踐研究顯示，圖鑑繪本不是儲存知識的靜態工具，而是能引發幼兒深度學習的動態媒介，其核心在於提供一種與故事截然不同的思考方式：觀察、比較、提問與解釋。

以下歸納讓圖鑑繪本在教室裡「活起來」的三個策略：

### 一、從「檢索」到「實務連結」：留下探索的足跡

圖鑑繪本是連結幼兒實物體驗與抽象知識的橋樑。教學中應強調「凡查過必留下足跡」，引導幼兒透過標記、比對與紀錄，將圖鑑繪本上的發現與日常生活中的查證行為產生連結。當「知道的事」轉化為「感興趣的事」，閱讀便能引向更深的探索。

### 二、策略性的選書與鷹架：建構適齡適性的探究階梯

教師挑選與收集圖鑑繪本的專業，直接影響幼兒的參與度。在「博物型」與「主題型」圖鑑之間，應依據教學目標靈活選用，並避免使用超出認知程度過多的資源以防挫折。教師應扮演鷹架的角色，將圖鑑內容應用於環境佈置或生活解難中，讓閱讀與日常生活的脈絡無縫對接。

### 三、繪本遊戲化閱讀：創造主動學習的路徑

為激發幼兒的閱讀動機，提出「遊戲化閱讀」的策略。具體做法包括將圖鑑拆成散頁以降低翻閱門檻，或引導幼兒利用其最感興趣的內容製作「個人化圖鑑」與「知識紙牌遊戲」。從「讀」到「做」，強化知識應用，也讓閱讀成為探究遊戲。

社群協作的歷程中，教師從困惑走向創造，「觀察→推理→探究」三層次架構在恐龍、狗狗、任務車、米飯等不同主題中，生長出各自的教學樣貌。圖鑑繪本進入教室並非要取代故事，而是要讓閱讀的面貌更趨完整。

希望在幼兒園的日常裡，除了感性的故事，也有讓孩子仔細看、認真問的圖鑑。當「看圖鑑」與「讀故事」並進，科學的種子便能在情感的土壤裡悄悄發芽。那個午後，翻開圖鑑卻卡住的老師，只需要一套可以上手的策略、一個好問題、一次不同的嘗試—圖鑑繪本就能在孩子眼中活起來。

## 附錄：與 AI 協作的說明

### 一、AI 協作概述

本文的修改過程採用了人機協作 (human-AI collaboration) 的模式，以 Claude (Anthropic) 作為輔助工具，協助進行文章架構優化與文字潤飾。以下說明協作的具體內容、分工原則與品質管控方式。

### 二、AI 協作的具體工作項目

一是架構調整，包括各節標題加入副標以及結論段落增加呼應開的收尾語句；二是文字潤飾，包括句子節奏的疏理、各節語氣的統一，以及標點與格式的處理一致性。

### 三、人機分工原則與品質管控

本文的核心內容—包括研究設計、文獻論述、教學案例與分析詮釋—均由人類作者撰寫與負責。AI 的角色定位為「文字編輯助理」，而非「共同作者」。所有 AI 建議的修改，均經由人類作者逐一審閱確認後方才採用；凡涉及學術判斷、研究詮釋與個人觀點的段落，均不依賴 AI 生成。為確保 AI 協作不影響學術誠信，本文採取以下措施：

- 所有引用文獻均由人類作者自行核實，AI 不參與引用內容的產製。
- AI 修改前後版本均保留備查。
- 本附錄之撰寫，即為對 AI 使用的透明揭露。

四、本文採用 AI 輔助寫作工具，符合學術寫作透明原則，並依投稿期刊規範進行揭露。

## 參考文獻

- 教育部 (2009)。建立教師專業學習社群手冊。
- 教育部 (2017)。幼兒園教保活動課程大綱 (修訂版)。
- 劉淑雯 (2019)。趣讀科普，昇華閱讀，活化 STEM 腦。科學研習，58 (1)。
- 劉淑雯、黃明宏 (2019)。日本月刊科學繪本初探：走讀福音館『かがくのとも』50週年紀念展。科學研習，58 (6)。
- 劉淑雯、黃明宏 (2021)。科學繪本的選用與教學應用。科學研習，60 (1)。
- 劉淑雯、黃譯平 (2022)。閱讀有趣的科學繪本培養探索世界的好奇心。科學研習，61 (1)。
- 劉淑雯、林吟霓 (2023)。不斷追問的問號：以問題為創作之始的作家—梅麗莎·史都華 (Melissa Stewart)。科學研習，62 (1)，87-98。
- 親野智可等 (2014)。善用圖鑑—讓孩子學力增強吧！。貓頭鷹出版社。
- Dreher, MJ (2003)。利用資訊類書籍的潛力激勵閱讀困難的學生。閱讀與寫作季刊，19 (1)，25-38。https://doi.org/10.1080/10573560390143012
- Jang, W., Kwon, K.-A., & Horm, D. (2024)。語言和讀寫能力在幼兒園至五年級科學學習中的作用：緩解性別、種族/民族和社會經濟差異。教育科學，14，994。https://doi.org/10.3390/educsci14090994
- Wright, T. S., & Gotwals, A. W. (2017)。在綜合科學與學科素養課程背景下支持幼兒園兒童的科學討論。小學教育雜誌，117 (3)，513-537。
- Yopp, R. H., & Yopp, H. K. (2006)。資訊文本在學校和家庭的朗讀應用。讀寫研究雜誌，38 (1)，37-51。https://doi.org/10.1207/s15548430jlr3801\_2

## 森棚教官的數學題：海底撈

游森棚

臺灣師大數學系教授

- ❖ 有兩個完全相同的 7 齒齒輪，上下重疊在一起。任意砍去 3 對重合的齒。請問是否必能將上方的齒輪旋轉到某位置，使得兩齒輪的投影仍為一個完整的齒輪？
- ❖ 有兩個完全相同的 14 齒齒輪，上下重疊在一起。任意砍去 4 對重合的齒。請問是否必能將上方的齒輪旋轉到某位置，使得兩齒輪的投影仍為一個完整的齒輪？
- ❖ 有兩個完全相同的  $n$  齒齒輪，上下重疊在一起。砍去 5 對重合的齒。如果不管怎麼砍，必能將上方的齒輪旋轉到某位置，使得兩齒輪的投影仍為一個完整的齒輪，請問  $n$  是多少？
- ❖ 如果齒輪不只可以旋轉還可以翻面，請問答案如何？



# 在科教館遇見未來： 親子職感挑戰與「可能自我」的建構

文／蘇萬生<sup>1</sup>、陳冠玟<sup>2</sup>、林昕諺<sup>3</sup>、賴予亭<sup>4</sup>

圖／賴予亭<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣科學教育館實驗組編輯，社團法人臺灣直覺職掘職涯探索協會

<sup>2</sup> 營運長、<sup>3</sup> 秘書長、<sup>4</sup> 理事長

## 前言：後疫情時代的職涯探索新視野

繼 2025 年夏季成功的科普營隊（其報導見本刊第 65 卷第 1 期）後，社團法人臺灣直覺職掘職涯探索協會（以下簡稱職掘協會）於 2026 年 3 月 22 日，在國立臺灣科學教育館（以下簡稱科教館）的全力支持下，策劃了一場深具教育意義的「親子挑戰賽」（圖 1）。本次活動不僅是一場職業技能的競賽，更是一場基於 Kolb（1984）體驗式學習循環的大型教育實驗。

圖 1

親子挑戰賽現場 75 組親子、60 位協力夥伴大合照



當前教育研究指出，孩子對未來的想像往往受限於其所能接觸到的環境刺激。在快速變動的 AI 時代，職涯探索不應僅止於單向的職業介紹，而應是透過感官體驗與家庭支持系統的雙重驅動，幫助孩子在「具體經驗」中形成深層的認知連結。本次挑戰賽正是以「體驗」為核心，邀請家長與孩子化身為夥伴，共同在科教館的科學殿堂中打造一幅全新的未來地圖。

## 職人關卡設計：多維度感官經驗的轉化

本次挑戰賽設計了八大跨領域關卡，將抽象的職業技能拆解為可感知的任務。根據職業抱負發展理論（Gottfredson, 1981），兒童在 9-12 歲期間會經歷「社會價值導向」的轉變，此時期的環境刺激對其職涯邊界的勾勒至關重要。

## 1. 生態與科學的理性建構（視覺與詮釋）

在「生態嚮導」關卡中，親子需共同觀察鳥類外型、顏色與行為特徵（圖 2），繪製「鳥類觀察紀錄卡」。這不僅是生物知識的吸收，更是心理學中「詮釋性理解」的練習。而在「科學策展人」關卡（圖 3），家長與孩子需針對聲音、磁力、風能設計「小型科學展區」。這要求參與者具備將科學原理轉化為視覺傳述的能力，體現了 STEM 教育中「溝通與表達」的核心素養。

## 2. 工程結構與力學觸覺（體感與邏輯）

「土木工程師」關卡要求親子利用紙材、吸管、積木等材料建造承重橋梁（圖 4）。研究顯示，動手做(maker)的過程能強化「觸覺結構感」(tactile structural awareness)，讓孩子在物理反饋中即時調整邏輯模型，這種「試錯中學習」的精神是工程師性格培養的基石。

圖 2

在生態嚮導的關卡中，孩子與家長一起在花園中尋找鳥的身影



圖 3

在策展人的關卡中，規劃科教館 B1 的科學展覽



圖 4

在土木工程師的關卡中，利用吸管積木蓋房子



### 3. 跨領域專業與素養的碰撞（航太、金融與敘事）

- ❖ 航太探索：由臺灣太空教育的第一把交椅—SIGHT Space 探空隨筆，帶領孩子認識臺灣太空產業，並打造太空任務。
- ❖ 財務素養：邀請彰化銀行信福方程式團隊，引導家庭探索金錢價值觀，將抽象財商轉化為生活決策能力。
- ❖ 圖像敘事：由圖文作家馬克透過畫筆引導家庭敘事，強化情感表達與視覺創意。
- ❖ 興趣啟蒙：透過小小職業探險家的桌遊體驗，在趣味競爭中擴展孩子對多元職業的認知（圖 5）。

圖 5

家長與孩子一起透過桌遊，認識多元的職業



### 愛與連結的實踐：社團法人小樹傳愛協會與擁抱新運動

在職業技能與科學邏輯之外，本次挑戰賽更注入了深厚的情感教育能量。社團法人小樹傳愛協會（以下簡稱小樹傳愛協會）也特別受邀參與現場，於關卡中實踐其核心理念—「擁抱新運動」（圖 6、圖 7）。該協會長期致力於推動親情連結，認為強大的心理安全感是孩子勇敢探索外部世界的基石。

圖 6

孩子與家長在寫完「愛的語言」後，貼到抱抱氣球的身上



圖 7

孩子與家長一起參與「擁抱心運動」



在活動現場，小樹傳愛協會透過互動引導，鼓勵家長與孩子在完成挑戰的緊湊過程中，停下腳步進行真誠的擁抱與眼神交流。根據 Bowlby (1988) 的依附理論，安全穩定的依附關係能為孩子提供探索環境的「安全基地」(secure base)。當孩子感受到父母無條件的支持與肢體接觸帶來的安定感時，其大腦分泌的催產素 (oxytocin) 能有效緩解參與競賽的壓力。

此外，小樹傳愛協會與科教館的合作關係也會延伸至八月份，屆時雙方將於科教館共同舉辦盛大的「善愛嘉年華」。這項延續性的合作，象徵著職業探索與生命教育的深度結合：孩子不僅在三月的挑戰賽中學會「做事」的職人精神，更會在八月的善愛嘉年華中體會「為愛行動」的生命價值。這種從個人成就轉向社會共好的教育路徑，正是現代全人教育的核心願景。

## 個案深論：從情緒障礙到自我效能的躍升

在本次活動的眾多隊伍中，獲得冠軍的家庭提供了一個極具學術研究價值的「長期參與成效」案例。該組家庭的孩子自 2025 年 3 月起，已連續參與職掘協會五次以上的系列活動。

根據家長的回饋，孩子在初期參與時展現了顯著的避學行為與情緒焦慮，包括在現場情緒不穩、拒絕進入關卡等。然而，隨著參與次數的增加，孩子在協會設計的「高安全感、低威脅」環境中，逐步累積了小規模的成功經驗。Bandura (1997) 的自我效能理論指出，個體的信心主要源於「掌控經驗」(mastery experiences)。

本次挑戰賽中，最關鍵的變項在於家庭支持系統的完整化—這是爸爸與媽媽首次共同參與。家庭系統理論 (Bowen, 1978) 強調，當家庭成員共同參與一項任務時，能產生強大的「共同效能感」(collective efficacy)。在父母的共同見證下，孩子展現了前所未有的勇氣，開始主動練習舉手發言 (圖 8)，並在各關卡的協作中表現出色，最終摘下冠軍獎牌 (圖 9)。孩子在賽後詢問「下一次是什麼時候」的自發性需求，正是內在動機被成功喚醒的徵兆。

圖 8

在開幕式的遊戲中，孩子積極舉手發言



圖 9

由職掘協會創辦人賴予亭，頒發這次競賽的冠軍獎項



## 家庭賦能：職涯探索的社會心理學分析

本次挑戰賽不僅是孩子的競技場，更是家長的賦能 (empowerment) 過程。在職掘協會的設計中，家長被定位為「支架」(scaffolding)。根據 Vygotsky (1978) 的近側發展區間 (ZPD) 理論，適當的成人引導能幫助孩子跨越獨立解決問題的邊界。

許多家長在回饋表單中提到，過去總認為孩子「不行」或「太小」，但在挑戰賽中看到孩子在花園觀察鳥類與植物時的專注，或是在金融觀念關卡中的邏輯判斷，才重新認識了孩子的潛能。這種認知的轉變，對於建立長期的家庭支持性溝通至關重要。

## 結語：讓「可能自我」在科教館持續發光

「視野拓展效應」(exposure effect) 是教育中共同的關鍵字。當孩子在科教館這樣一個充滿求知氣息的場域中，與 SIGHT Space、信福方程式等專業職人交會，加上小樹傳愛協會的情感支持，他們眼中的光芒不僅是對當下活動的熱情，更是對未來生活的期盼。

職掘協會相信，每一個孩子都是天生的探險家。3 月 22 日的這場盛會，透過跨領域合作與家庭深度參與，成功地在孩子心中種下了夢想的種子。當這群孩子在多年後回首，這場在科教館裡與父母並肩作戰、感受擁抱溫度的午後，將成為他們勇往直前、探索世界的動力源泉 (圖 10)。

圖 10

親子一起在挑戰賽中，度過愉快的午後時光



## 參考文獻

- Bandura, A. (1997) . *Self-efficacy: The exercise of control*. W.H. Freeman.
- Bowen, M. (1978) . *Family therapy in clinical practice*. Jason Aronson.
- Bowlby, J. (1988) . *A secure base: Parent-child attachment and healthy human development*. Basic Books.
- Gottfredson, L. S. (1981) . Circumscription and compromise: A developmental theory of occupational aspirations. *Journal of Counseling Psychology*, 28 (6) , 545-579.
- Kolb, D. A. (1984) . *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall.
- Vygotsky, L. S. (1978) . *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

