

古環境變遷研究發展與新利器

Recent Advances of Paleoclimate Study and New Technique

雷佳、高樹基

K. Selvaraj, S. J. Kao

人類在尚未完全瞭解氣候動力機制之前已經顯著改變氣候，頻度更高的洪旱災難事件讓將全球氣候變遷研究的重要性浮上檯面。本文主要簡介最近古氣候研究的迫切需求與發展重點，同時也探討新高解析度掃描儀在此研究方向上可能產生的貢獻與在自然材料上的應用。

Human have changed the climate before fully understanding the mechanism of climate dynamics. More frequent flood/drought disasters urge the importance of a full swing climate change research all over the world. This paper mainly introduces the recent advances in paleoclimate study, its urgent needs and the potential contribution from the application of novel techniques on various kinds of natural archives.

一、近期古氣候變化重建與預測未來

人類的工業革命在數十年間讓大氣中二氧化碳暴增約三分之一，前所未有快速而巨幅的干擾，正測試著大地之母的承載能力。最近的研究顯示，人類引起的大氣層增溫很可能驅動了劇烈天氣：強降雨被增強、微降雨被削弱⁽¹⁾。這樣兩極反向的改變，無疑地會引發水資源利用調節的窘境，並給予生態系統更嚴峻的挑戰。而受海表溫度的增加，西太平洋的颱風強度正逐漸增強⁽²⁾，在臺灣以及高山地勢的區域或國家勢必引發更多大規模洪水與山崩災害。

2009年哥本哈根氣候高峰會，多國領袖與國際組織代表面對全球暖化的問題，制訂二氧化碳減排政策，商討人類該如何應變。然而在全球暖化的

課題下，除二氧化碳持續增加的問題外，各國國內該如何因應氣候變化，乃涉及區域性尺度的氣候反應。

不幸的是，有歷史紀錄以來的天氣資料實在太短，不足以提供充分信息以架構區域性尺度氣候系統模式與提供驗證，東南亞這方面的資料尤其不足。在這樣的科學基礎背景下，如何能提出氣候變遷下正確有效的管理方向與應變政策？運用不足的知識當然更無法推演台灣本土水資源與生態系統的相關響應。

「知古鑑今」這句話，應用在古氣候學與古海洋學上最足以顯現其真義。吾人賴以存活的大地、大氣與海洋巧妙地將自己的歷史記錄在大自然裡，我們若可以揭開地球以往百年至千年尺度冷暖氣候狀態下的各種變化，疊加上近代短期儀器記錄或模

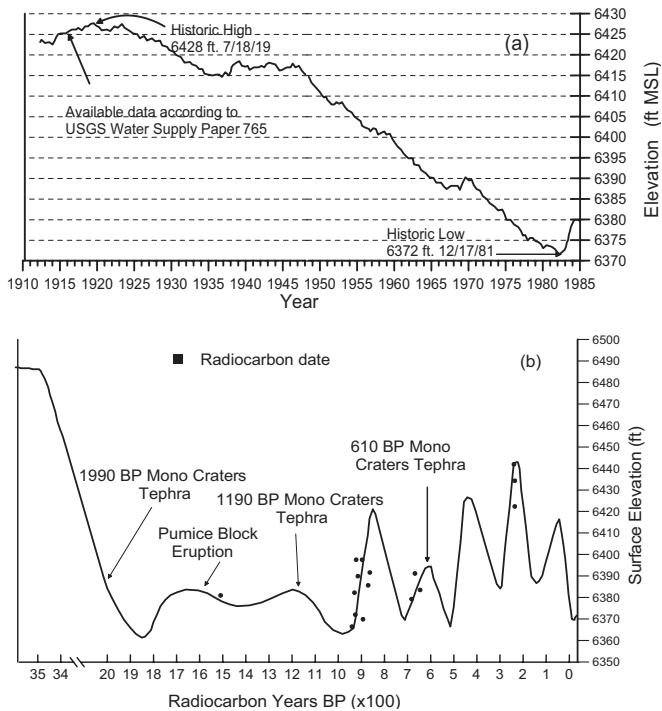


圖 1. (a) Mono Lake 有儀器記錄以來 (1913–1985 年) 之水面絕對高程 (海水面以上, ft)。(b) 反演湖泊水位歷史變化曲線, 時間橫軸為 3500 年前至 1950 年 (0 BP)。

式推演, 將可能預測到未來的氣候變遷與環境反應, 而將災害降到最低。

兩項最重要的信息必須要被確認而可以從古環境研究反演出來的: 第一是過去氣候的變化幅度, 第二是天氣變化的速度。因為影響氣候的作用力, 其時間尺度可以從百年與短到一年, 我們必須具備自各種自然孕育的資料庫 (如海洋與湖泊沉積物岩芯、珊瑚礁、樹輪) 以及可以擷取高解析度資訊的利器, 方能推斷出影響氣候各作用力之間的關係。當時間解析度細微達年內尺度的高解析資訊 (在材料上為微米級解析度), 我們將不止可以分析氣候, 同時可以討論天氣, 這對於瞭解季風與溫度的變化、調校模式以及如何因應環境變遷必大有助益。

二、變化幅度與速率研究的重要性

舉一個美國加州在 1999 年被揭露的有名例

子—Mono 湖。過去在 1919 年有儀器紀錄以來, 湖水水位曾經達到最高, 海平面以上 6427 尺 (湖水水位的變動基本是由降雨與蒸發控制, 顯然 1919 年降雨達到峰值), 而自 1945 年起水位持續下降直到 1980 年代趨近歷史最低 (6371 尺), 下降幅度與速度相當大 (圖 1(a))⁽³⁾。然而, 經過古氣候研究的水位資料反演, 卻發現 1750 年代湖水水位高度比歷史記錄最高的還要高出 30 尺 (圖 1(b)), 過去 900 年內有五次大幅度水位升降循環, 兩千年內曾經歷過四次枯水期, 3500 年前湖水水位更是比歷史紀錄最高值多出 100 尺, 超乎預期, 同時歷次上升下降速度與現代相比不遑多讓。

這樣的 research 揭示出環境自然變異的幅度與速度比人類想像的要大得多。這個案例同時指出在因應人為衝擊的氣候變遷環境下, 長期的水資源管理應朝向更大幅度變化的考量。另外, 氣候變化「速率」是決定生態系統存續的重要因子之一。最近針對湖泊、海洋沉積物研究顯示, 在短短數十年內, 氣候狀態可以迅速由暖變冷, 反之亦然 (例如 Brauer 等人, 2008 年; Bakke 等人, 2009 年)。然而要解開變化速率之謎, 必須要有超高解析度儀器以及適當材料, 如湖泊紋泥沉積物。

以德國的 Meerfelder Maar 為例 (Brauer 等人, 2008 年), 高解析度的影像與 X 光螢光元素分析 (圖 2(a)、(b)、(c)), 明白地指出紋泥的顯著顏色變化以及鐵含量的巨幅變異僅在數年之間 (紋泥計數)。此研究不只彰顯氣候的快速變化, 並說明高解析度儀器在古氣候重建研究中扮演的重要角色, 可以將天氣強烈變化的真實記錄萃取出來, 如鐵與鈦含量可以表徵沙塵等風源顆粒落塵量。

從 Brauer 等人於 2008 年的研究尺度, 可以清楚地解析出氣候 (數十年平均) 降至天氣 (年內至年間) 尺度的變異速度 (參見圖 3)。

現今全世界僅 16 個研究機構擁有 core scanner (用於湖泊/海洋沉積物) 或 multiscanner (用於樹輪、珊瑚礁), 然而以論文發表而言, 其衝擊卻大得驚人 (儀器信息在第四節)。回顧近五年來 Nature、Science、PNAS 以及 Nature Geoscience, 顯然為數不少發表的論文與此二儀器取得之高解析資訊息息相關。進一步觀察, 多數這些論文的焦點

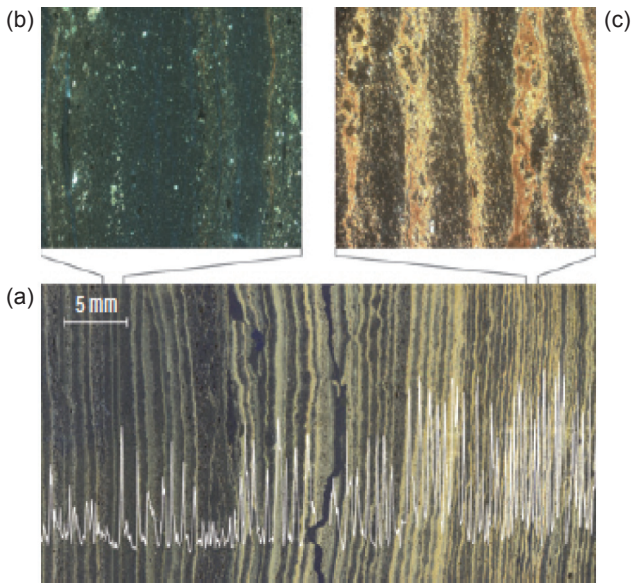


圖 2. (a) 紋泥影像分析套疊鐵含量 (白色曲線)，(b) 與 (c) 局部放大兩個不同時段到年際尺度，影像顯現其顏色與紋泥層次厚度的不同。

在於世界各地之百年尺度氣候事件與人類社會的關連性。研究季風變化、氣候變遷，最終還是在關懷人類，及其財產損失、文化崩解等課題，尤其是針對低緯度人口密集地區。科學家相信氣候科學與古氣候學的進步，得歸功於亞洲、非洲、印太、中東地區百年尺度氣候事件研究的新發現。

另外，2007 年 Yancheva 等人在中國大陸廣州的湖泊研究，以高解析湖泊沉積物地化資訊發掘百年尺度之季風變化，與以石筍資料重建的全新世季風與氣候變遷互相應證，顯示中國朝代的興衰與季風相關 (如圖 4 所示)，雖然朝代盛衰驅動力不一定只是氣候，但旱澇天災肯定會加速朝代的滅亡。

三、台灣地理位置與東南亞資料缺乏

科學界咸認同台灣因地理位置特殊，在間熱帶輻合區 (intertropical convergence zone, ITCZ) 與世界最溫暖海洋印太暖池 (Indo-Pacific warm pool, IPWP) 影響之下，陸地、海洋、大氣之交相互作用十分劇烈，對環境變遷研究有其獨特的重要性。研究認為，以百年尺度而言，ITCZ 與 IPWP 是東亞季風變化與農業生產力的主要控制因素，至少

從全新世以來是如此。此外，在陽光主控力較弱的時期，準十年尺度的模式如聖嬰年南方震盪 (El-Nino Southern Oscillation, ENSO) 與太平洋十年震盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 引發的海洋—大氣交互作用，使得氣候變化的預測在缺乏足夠長時間的資料下更形複雜而困難。

自上次冰期以來，地球氣候發生無數變化，其中許多開始與人類社會變革產生關連性，研究這段時期內 ITCZ 百年尺度的移動，以及 ITCZ 與 ENSO 較短時間尺度的交互作用，以台灣的地理位

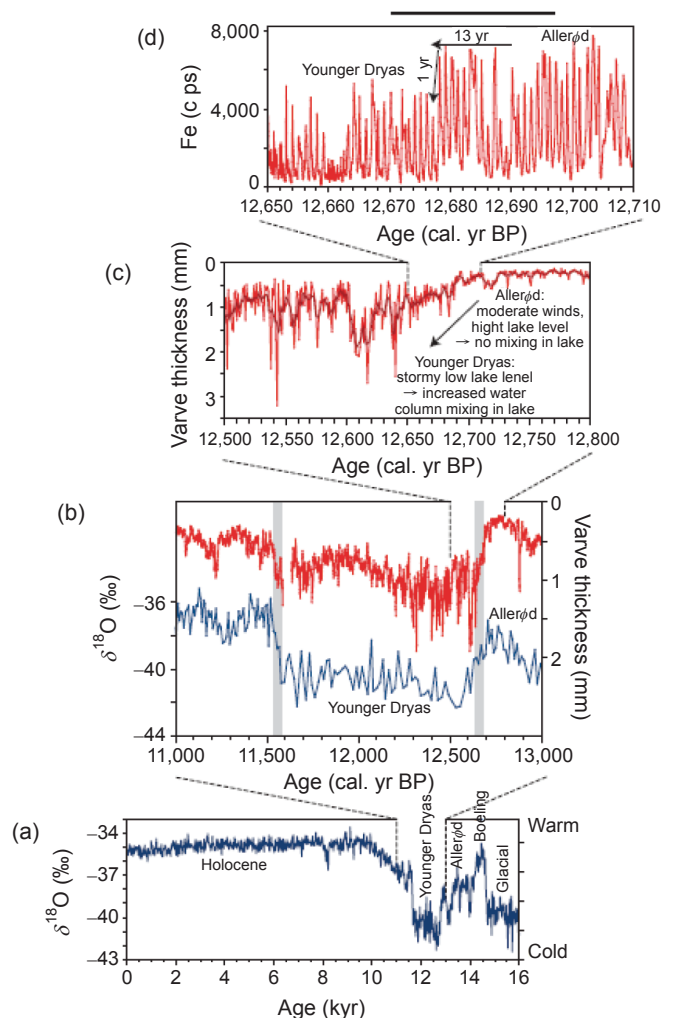


圖 3. (a) 格陵蘭冰芯氧同位素變化 (表徵海水面高度)，(b) 提取出 11000—13000 年間冰芯紀錄以及紋泥厚度，(c) 提取出 12500—12800 之間紋泥沉積厚度，(d) 再更細分 12650—12710 所測得高解析鐵含量變化⁽⁸⁾。

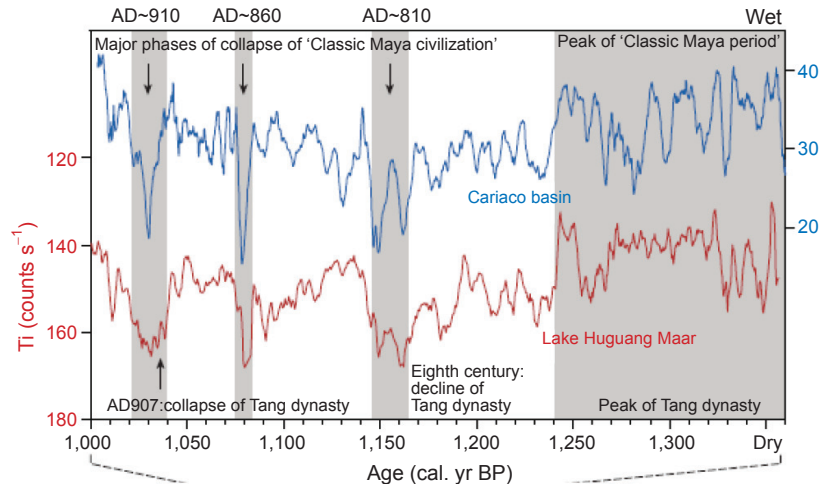


圖 4. 距今 1000–1400 年間鈦含量在廣州湖光岩沉積物與加勒比海沉積物的記錄比對。其相對變化並對應到唐朝的興盛與衰敗以及瑪雅文化的興衰。

置而言自是最為理想的。然而過去 20 年來對於台灣海洋、湖泊岩芯的研究 (Wei, 2008)，因為儀器的限制從來沒有真正足夠達到分析氣候變化速率的高解析度資料產出，驗證幾個主要百年尺度氣候事件 (小冰河期，LIA，1300–1850 AD、中世紀暖期，MWP，800–1300 AD、聞名的 8.2 ka 冷卻事件，以及新仙女木時期，12.9–11.5 ka B.P.) 的效應。

2006 年，雷佳 (本文第一作者) 曾以撤退湖 (位於台灣東北部，Selvaraj 等人，2007 年) 資料為基礎，撰寫「8.2 ka 冷卻事件之亞熱帶證據」一文，並向 *Geology* 投稿，然該文遭退稿，原因是數據解析度不足 (圖 5)。

關於台灣高山湖泊與水庫之百年尺度氣候事件的高解析度資料，目前所獲得的較高解析度 (160 公分岩芯之 1 公分間距切片) 翠峰湖沉積物磁性數據已顯示出小冰河期的存在 (圖 6)。然而同一支岩芯之 2–4 公分間距切片所得之地化數據，則無明顯的小冰河期存在之證據 (本文無顯示圖表)，其可能原因在於太大的切片間距模糊了此事件的地化訊號。類似狀況也發生在 4.2 ka 事件 (又以北大西洋全新世事件 3 聞名)，撤退湖加上翠峰湖數據顯示這些快速變化氣候事件的存在，但囿於數據的解析度，無法進行高解析度分析，故無法推斷亞熱帶台灣東北部 4.2 ka 事件的合理起因與其持續時間長度。

上述資訊之缺口現今可以藉由高解析度岩芯掃描儀 (ITRAX) 加以彌補。在不久的未來，若能獲

取高解析度資訊，將為台灣建立充分的資料庫，以驗證百年尺度氣候事件。此儀器尚能使我們的氣候研究工作進一步跨足到樹輪以及珊瑚礁岩芯。台灣高山不乏老樹，這些樹的樹輪芯可用來建立約 500 年以來 (可涵蓋小冰河期) 年度間氣候及季風變化。到目前為止，我們未曾將所使用儀器取得之資訊與樹輪記錄相比對，這方面已落後於中國大陸和日本等國家，我們的古氣候研究計畫理應涵蓋樹輪之研究。

精確的數據能為氣候模式學者建立良好的基準線。台灣雖然一年平均受 4 個颱風侵襲，帶來超過 2000 毫米的雨量，然而因欠缺田野資料和模式驗證，台灣至今尚缺上述氣候事件之季風與氣溫變化的推算模擬，在全球過往氣候變遷計畫 (past global changes, PAGES) 相關組織 (如 Global Monsoon 與 Asia2k) 的重要議題研討與創制方面的貢獻明顯不足。

四、新儀器—Cox 分析系統

Cox 分析系統 (Cox Analytical Systems) 係一家瑞典公司，由幾位瑞典查爾摩斯科技大學 (Chalmers University of Technology) 的 X 光物理學家創立於 1992 年，辦公室與工廠設於瑞典西海岸哥特堡地區。公司草創之初以 X 光螢光分析 (X-ray fluorescence) 以及射線成像技術為重點項目。十餘年來該公司已成功地發展並銷售出數套功

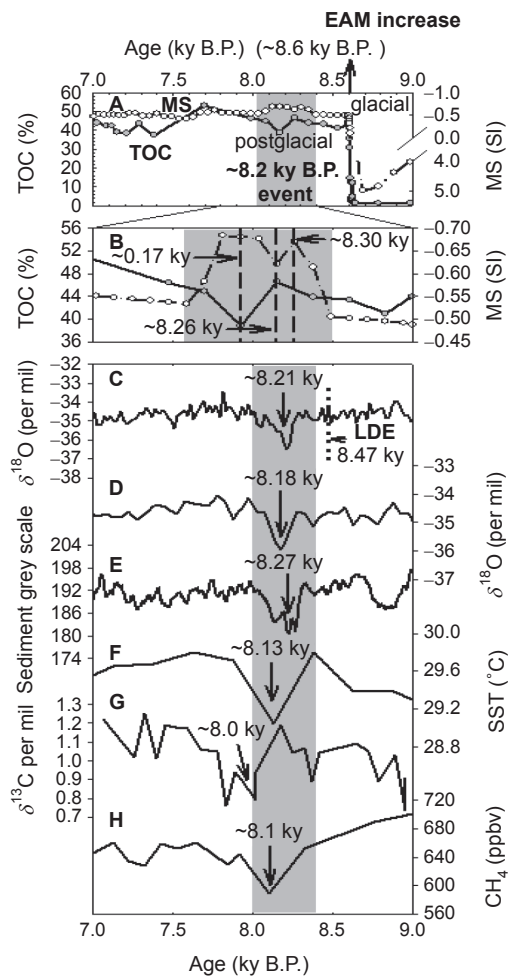


圖 5. 在台灣取得之 8.2 ka 事件氣候數據結合以冰芯與海洋資訊。注意，除了圖 B，所有數據僅顯示 7–9 ka B.P. 區間。圖 (A) 撤退湖沉積物岩芯總有機碳含量 (TOC) 與磁化率 (MS)；低總有機碳含量顯示台灣地區東亞季風帶來之雨量微弱。圖 (B) 7.8 至 8.6 ka B.P. 間之放大圖，顯示 MS 記錄的雙尖端結構。圖中亦顯示亞熱帶台灣東亞季風突然增強 (約 8.6 ka B.P.) 與 glacial lakes drainage event (LDE, 8.47 ka B.P.; 圖 (C) 之垂直虛線)。貫穿各圖的灰色區域表示 8.2 ka 冷卻事件。

能各異的分析儀器。自 2002 年起 Itrax 岩芯掃描儀 (針對岩芯大標本) 和 Itrax 多功掃描儀 (針對樹輪、石筍、珊瑚等小標本) 成為他們的主力產品。藉由 Itrax 系列產品，舉凡樹輪芯、岩石或沉積物岩芯，在 XRF 及射線照相的領域裡，Cox 公司大有

執分析技術發展牛耳之勢。全球現今有 16 部 Itrax 岩芯掃描儀 (國立台灣大學地質系魏國彥教授在 2009 年也購入 1 部) 與 8 部 Itrax 多功掃描儀。

Itrax 系列分析儀讓我們清楚地得知各種元素在沉積物岩芯、樹輪芯、岩石岩芯與鐘乳石切片等樣品中的不同分布情形。分子量大於鎂的大多數元素都是它的偵測對象，包括重要元素鋁、矽、鉀、鈣、鈦以及主要重金屬錳、鐵、銅、鋅、鋇、銀、鉛等。針對多數金屬而言，它的偵測極限很廣，上至大體積樣品，下可達僅數 ppm 之含量。它的分析內容尚包含樣本光學影像和射線成像，基質的各種變化一覽無遺。結合這些特長，足以作為樣本詮釋和訂定更深入研究計畫之良好基礎。

此儀器的可調整解析度使得它能運用於多種樣本類型。只要輕點滑鼠，就可以從公分級的概觀性掃描，切換到次毫米級的超高解析度深入分析。高解析度射線影像和 XRF 正是 Itrax 系列儀器的強項。

此外，它的分析方式屬於非破壞性與非接觸性，樣本在分析過程中完全不受影響。拜先進科技所賜，該系列掃描儀靈敏度、速度和可重現性都極高。現代化的軟體設計主要用於沉積物岩芯樣品分析。以水平方式做全長掃描 (最長至 1.7 公尺)，逐點分析後，所有資訊會被整合起來成為一道全樣本的元素成分變化剖面圖，每個點的分析時間約一秒。X 光傳輸之影像資訊會被加以記錄，最後以射線成像方式展示樣本的化學與密度特性。光學影像則以高解析度呈現樣本的表面樣貌。

藉由掃描剖半的沉積物岩芯取得的資訊，重建古氣候模式，是 Itrax 岩芯掃描儀的主要應用領域之一。XRF 分析元素組成能提供廣泛的參數，諸如季節變化、有氧/缺氧狀態、有殼類/孔蟲之數量、粒徑大小相關效應、火山灰、淺水碳酸鈣源、沉積物分級、氧化還原相關岩化與生物源矽化物等，可以運用於海洋以及湖沼環境。除此之外，它的應用尚可包括來源研究、層片計算、湖泊過去之導電度重建、估算以往之生產力、風化程度、颶風發生頻率、溶濾及侵蝕強度。

在湖泊研究中，甚至溫度估算等季節變化都可以被追蹤。國際間有多個計畫目前正在進行中，利

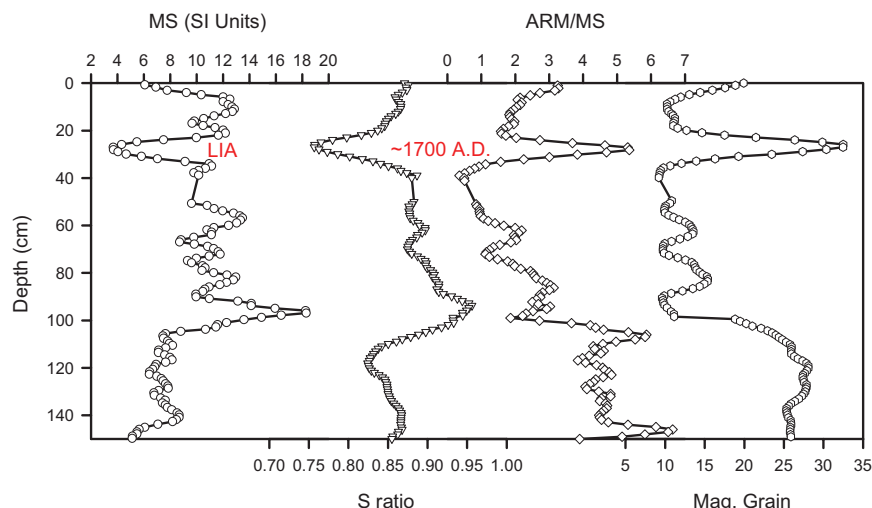


圖 6. 翠峰湖沉積物岩芯磁性數據 (MS 為磁感率) 清楚地證實台灣東北部發生過小冰河時期 (LIA) (中央研究院地球科學研究所李德貴未發表數據)。

用它的高解析度，分析大型岩芯素材，以追蹤數千年前的季節變化或年間變化。此類計畫包含東非馬拉威湖計畫和伊索匹亞塔納湖等。

圖 7 是二根沉積物岩芯的照片。上者是對剖後的湖泊沉積物岩芯，此圖是射線影像疊加鋇／鈣比的剖面圖 (資料來源：Prof. Pierre Francus, INRA, Quebec, Canada)。下者為對剖後的海洋沉積物岩芯，於射線影像上再疊加鋁及矽元素的剖面圖 (資料來源：Dr. Guy Rothwell, NOC, Southampton, UK)。以上資料皆由 Itrax 岩芯掃描儀取得，掃描解析度為 200 微米。

針對小標本，Itrax 多功掃描儀則應用於木輪芯、木片和鐘乳石等樣本，分析樣本長度可達 28 公分，採直立式分析法。此儀器工作時以極精細的 X 光掃描樣本，在最佳狀態下同時進行多項分析。密度資訊以數位方式記錄，所有工作皆於電腦中進行，無需使用底片。每個樣本掃描僅需數分鐘，掃描進行中，資訊同時顯示在電腦螢幕上。此儀器運用高密度軟性 X 光，所以不但掃描速度快，而且資訊極為精準。橫向解析度之高，足以提供年輪寬度和最高密度等數字。所有分析過程，從參數設定到結果分析工作皆在電腦中進行。

關於材料方面，樹輪的最大優點在於它擁有清晰的時序記錄，在某些需要時間資訊的研究上，它能提供完美的應用。木紋中的年輪最大密度與夏季氣溫有最佳相關性，優於傳統之年輪寬度計算，也優於同位素分析。由研究顯示，透過觀察到樹

木生長於最佳生長線 (timber line) 外，而重建出當時的良好氣候⁽⁴⁾，許多熱帶樹種年輪不清晰，此時以 XRF 應用在木紋上，則可確定年輪寬度。舉例來說，鈣是很好的指標，它可以清楚地界定年輪邊界，區別出真假年輪。XRF 在木材中能偵測到的元素，在木質中有其特定位置，所以雖然經過長久的時間，它的吸收時間可以清楚得知。XRF 於木質中能偵測的元素包括鎂、鋁、矽、磷、硫、氯、鉀、鈣、鈦、鈇、鐵、鎳、銅、鋅、砷、銻和錫。某些狀況下尚且可偵測鉛。在環境監測與環境法律爭議上，XRF 分析的敏銳度和可重複性會是非常有力的工具。此儀器的非破壞性長處在此更毋需贅言。

圖 8 是一松木條置於 Itrax 多功掃描儀支架上，背景黑色，木質則以彩色呈現。射線影像以反

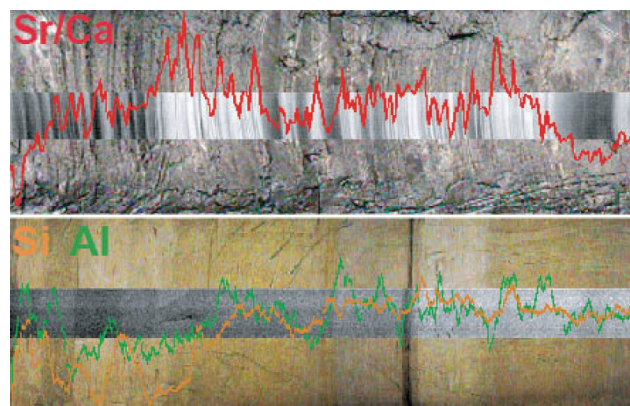


圖 7. 沉積物岩芯的照片。

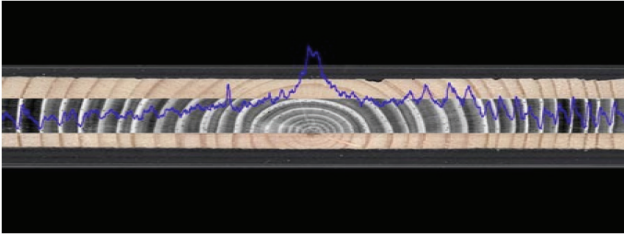


圖 8. 一松木條置於 Itrax 多功掃描儀支架上。

灰階疊加上，藍色折線是鈣元素剖面圖。資料藉由多功掃描儀取得，掃描解析度 50 微米。

參考文獻

1. S. C. Liu, C. Fu, C.-J. Shiu, J.-P. Chen, and F. Wu, *Geophysical Research Letters*, **36**, L17702, doi:10.1029/2009GL040218 (2009).
2. J. B. Elsner, J. P. Kossin, and T. H. Jagger, *Nature*, **455**, 92 (2008).
3. C. I. Millar and E. D. Woolfenden, *Ecological Application*, **9** (4), 1207 (1999).
4. S. Helama, M. Vartiainen, T. Kolstrom, H. Peltola, and J. Merilainen, *Vegetation History and Archaeobotany*, **17**, 675 (2008).
5. K. Selvaraj, C. T. A. Chen, and J. Y. Lou, *Geophysical Research Letters*, **34**, L01703, doi:10.1029/2006GL028155 (2007).
6. K. Y. Wei, *Western Pacific EarthSciences*, **2** (2), 149 (2008).
7. G. Yancheva and co-authors, *Nature*, **445**, doi:10.1038/nature0543 (2007).
8. A. Brauer, G. H. Haug, P. Dulski, D. M. Sigman, and J. F. W. Negendank, *Nature Geoscience*, **1**, doi:10.1038/ngeo263 (2008).



雷佳先生為印度馬德拉斯大學地質科學博士，現任中央研究院環境變遷研究中心博士後研究員。

Selvaraj received his Ph.D. in geology from the University of Madras, India.

He is currently a post-doctoral researcher at Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica.



高樹基先生為國立台灣大學海洋博士，現任中央研究院環境變遷研究中心研究員。

S. J. Kao received his Ph.D. in oceanography from National Taiwan University.

He is currently a research fellow at Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica.