

科學月刊

APR 2026

676

SCIENCE MONTHLY

性

從生理機制、疾病風險到醫療標準，
揭開性別差異背後的真相。

別

議題評析・性別檢測，規範的是公平還是制度價值？

經典專欄・痠痛，到底是痠還是痛？

焦點新聞・不想戴呼吸器？睡眠呼吸中止症新療法

NT\$280

ISSN:0250-331X



9 770250 331001 04

重新校準地球的時間

鈾鈷定年法突破科學極限



胡訓銘

臺灣大學地質科學系博士後研究員，現任中國科學院副研究員，主要從事鈾鈷定年學、古氣候學等研究。



沈川州

臺灣大學地質科學系國家講座暨臺大講座教授，主要利用陸地與海洋的碳酸鈣標本重建現代與古氣候環境變遷，鈾鈷定年學、考古與人類演化、以及古地磁研究。



人類對地球歷史的理解，極度仰賴「時間」這把鑰匙。冰期 (glacial period) 何時開始？氣候轉折發生在多久之前？早期人類如何演化與遷徙？這些問題的背後都仰賴一個共同基礎：是否能把事件「準確地」標記在時間軸上。

Take Home Message

- 雖然鈾鈷定年法理論上可追溯至數十萬年前，但在中更新世轉型期的年代區間，因放射性比值變化極小，導致微小的測量誤差會被放大為巨大的定年誤差。問題在於天然鈾-234 與鈾-238 比值難以高精度量測，是科學界長久以來難以突破的瓶頸。
- 透過同位素鏡像模擬校正法，以鈷-232 的離子拖尾行為精準模擬並扣除鈾-238 對鈾-234 的背景干擾，並導入 $10^{13} \Omega$ 高阻抗放大器，提升微弱離子訊號的訊雜比。這些改進使測量精準度提升至正負萬分之一，成功將可定年範圍推進至 60 ~ 80 萬年前。
- 研究團隊進一步重新測定鈾-234 的半衰期，將不確定度從 ± 70 年縮小至 ± 25 年，並發現新舊值存在約 50 年差異。此微小的修正能在數十萬年尺度上大幅降低年代誤差，為古氣候重建與人類演化研究帶來關鍵性突破。

眾所皆知的放射性碳定年法 (C-14 dating) 雖然在考古學上應用廣泛，但受限於碳-14 約只有 5730 年的半衰期，因此有效測量範圍通常只能覆蓋距今約 5 萬年內的樣本。一旦超過這個時間範圍，殘留的碳-14 濃度會接近甚至低於背景值，難以提供可信的年代資訊。

而另一種常見的鈾釷定年法 (U-Th dating) 則是利用鈾-238 的衰變，理論上可測定至 60 萬年甚至更久遠的年代。60~80 萬年前在氣候學上被稱為「中更新世轉型期」(Mid-Pleistocene Transition, MPT)，這個區間也是早期人類遷徙的關鍵時間點。儘管有鈾釷定年法可以作為「時鐘指針」的放射性訊號讓科學界窺探這個區間的歷史，但是傳統鈾釷定年法在這個時間範圍內，因放射性比值變化極小，年代判斷格外困難，且任何微小的測量偏差都可能在定年運算中被放大成巨大的年齡誤差。因此，自鈾釷定年法發展半世

紀以來，如何精確測定這段時間的絕對年代，一直都是科學界亟待突破的瓶頸。

什麼是鈾釷定年法？

天然鈾元素的同位素皆為不穩定的放射性核種，其中占 99.72% 的主要核種是鈾-238。鈾-238 會經由 α 衰變產生鈾-234，進而再衰變為釷-230，並持續經歷一連串衰變過程，最終轉變為穩定的核種鉛-206。

鈾元素與釷元素具有截然不同的地球化學行為。在氧化環境的天然水體中，鈾通常以易溶的六價鈾酰離子 (uranyl ion, UO_2^{2+}) 形式存在；而釷元素的四價釷則展現極強的顆粒吸附性且難溶於水。也因為上述特性，鈾釷定年法常被運用在許多可於水中形成的礦物，其中碳酸鹽類礦物，例如珊瑚與洞穴鐘乳石 (圖一) 便是最典型的代表。

圖一



洞穴鐘乳石是科學家常用於研究古環境與古氣候的重要材料，也非常適合利用鈾釷定年法進行精確的年代測定。圖中顯示的是鐘乳石表面特殊的石花結構，這類結構通常形成於地下水以極薄水膜緩慢流動，並在快速釋放二氧化碳的環境中，使碳酸鈣在高度過飽和狀態下迅速結晶，進而長成如冰晶或霜花般的形態。(作者提供)

礦物在水體中形成時，幾乎只有鈾元素會進入礦物晶格。此時，礦物會形成一個封閉的系統，鈾-238 與鈾-234 開始衰變為釷-230，隨著時間累積，釷-230 便愈多。現今科學家可以透過質譜儀 (mass spectrometry, MS) 測量釷-230 與鈾-238，以及鈾-234 與鈾-238 的兩組比值，計算出礦物的形成年齡，而這正是鈾釷定年法的基本原理。

過去這套方法相當適合用於測定現代至 40 ~ 60 萬年前的岩石標本。筆者的團隊曾在 2013 年改進了鈾釷分析技術，並發表新的鈾-234 與釷-230 半衰期，分別為 2.4562×10^5 年與 7.558×10^4 年。當時分析鈾-234/ 鈾-238 比值的最佳測量誤差約為正負萬分之三，最佳的定年範圍約為現代至 40 ~ 60 萬年前。

然而，當樣本年齡超過 40 ~ 60 萬年後，鈾系統逐漸接近放射性平衡，鈾-234/ 鈾-238 比值的時間變化趨於平緩。此時，雖然同位素比值仍在改變，但它對年齡的敏感度明顯下降，使極小的測量誤差可能轉化為數萬年的年齡不確定度。因此，當鈾-234/ 鈾-238 比值的測量精度能提升時，年齡不確定度便能顯著縮小，原本被誤差淹沒的時間訊號重新變得可解析，使鈾系定年法能夠向更老的年代延伸。

鈾-234/ 鈾-238 比值測量極限

現今科學家通常使用感應耦合電漿質譜儀進行鈾釷同位素的分析，這種儀器可有效將原本不易游離的鈾原子充分游離化，以便進行高精度測量。

然而，這也同時會引發另一個棘手的物理現象：當標本被引導至數千度的高溫電漿中，鈾原子被游離為鈾離子時，會有少量鈾-238 離子在儀器內發生散射或碰撞，進而偏離原有的離子束，而分散程度有時可延伸至數個原子質量單位之外。

這些效應源自高溫電漿所產生約 5 ~ 10 電子伏特 (eV) 的初始離子動能，及正電離子間的排斥作用，最終導致鈾-238 離子束在高質量區與低質量區皆產生雜訊拖尾現象(註)。而不幸的是，因為鈾-234 的天然豐富度極低，僅為鈾-238 的萬分之五，這種拖尾現象便會對鈾-234 造成背景干擾，使測量出現偏差。

註

拖尾現象是指在質譜圖中，當某一個質量數上有特別強的訊號峰值時，部分離子會因為離子之間的排斥作用等原因，使訊號不會只集中在峰頂，而是向兩側延伸。圖上訊號的兩側會形成緩緩滑落的斜坡。圖二就是拖尾效应在質譜儀中的放大的樣子。

由於天然鈾元素都有少許的鈾-234，因此無法直接量測鈾-238 離子束在質量數 234 位置上的干擾。過去的方法是先假設此一拖尾現象依循指數函數，然後測量質量數 235.5、234.5 與 233.5 位置的訊號，間接評估鈾-238 離子束在質量數 234 上的拖尾背景後，再計算出鈾-234/ 鈾-238 的比值(圖二)。此假設正是為何過去對鈾-234/ 鈾-238 比值的測量最佳精確度 (accuracy) 僅能達到正負萬分之三，難以再進一步突破的主要原因。

精確鈾 -234/ 鈾 -238 同位素測定

為了突破上述物理極限，我們最新的研究分別針對了分析的策略與硬體設備進行革新。

首先是針對背景干擾所提出的「同位素鏡像模擬校正法」。我們發現鈾 -232 同位素在質譜儀離子源與飛行路徑中的離子光學行為，與鈾 -238 高度相似。透過測量高純度鈾 -232 離子束在低質量區的拖尾模式，可精準模擬它對質量數相差 4，也就是質量數 228 位置所造成的拖尾背景程度。依此，就可以精確扣除相對於鈾 -238 相差四個質量數之鈾 -234 離子束所受的拖尾背景干擾。

除了精準扣除干擾，如何將微弱的鈾 -234 訊號更準確測量更是關鍵。為此，團隊在偵測器端引進

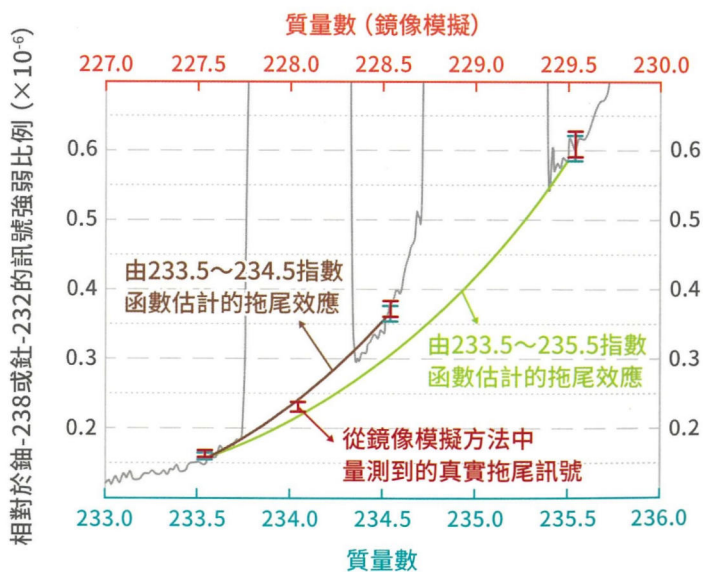
了 10^{13} 歐姆 (Ω) 高阻抗放大器。在質譜儀中，放大器的功能是將離子撞擊偵測器所產生的微小電流轉換為可讀取的電壓訊號。根據歐姆定律，電壓等於電流乘以電阻。傳統儀器多使用 10^{11} Ω 的放大器，但對於訊號極弱的離子束所產生的電壓通常會被電路本身的熱雜訊淹沒。而改用 10^{13} Ω 放大器，代表將電阻值提高了 100 倍，能在相同離子電流下，使電壓訊號被顯著放大；而雜訊的增加幅度則微小得多，因此整體的訊號與雜訊比例可獲得顯著的提升。最終，這些技術革新成功將鈾 -234/ 鈾 -238 比值的測量精準度改善至正負萬分之零點八，60 ~ 80 萬年區間的岩石標本成為了可定年的範圍。



(資料來源：作者提供)

圖二 | 鏡像模擬法示意圖

灰色線為質譜儀中量測鈾與鈾標準品時時實際產生的訊號以及拖尾。青色誤差棒為質譜儀中量測 233.5、234.5 與 235.5 的訊號大小。紅色誤差棒為量測 227.5、228.0、228.5、229.5 的訊號大小。由於 227.5、228.5、229.5 與 233.5、234.5、235.5 皆能相對應，代表 228.0 上的訊號可以用於估計 234.0 的拖尾背景，此方法即為鏡像模擬法。咖啡色與黃綠色線則為傳統方法中「間接估計」的拖尾背景，不同的估計方法也會造成不同的結果。



重新校準半衰期

極致精確的測量技術雖然解決了訊號清晰度的問題，但隨之而來的核心問題是測量到的數值換算後是否能代表準確的年代呢？對此，研究團隊更回頭檢視定年公式中最基礎的物理常數——半衰期。

半衰期如同時間量尺上的刻度間距。在過去的鈾鈷定年計算公式中，鈾-234的半衰期數值大約存在著正負70年的不確定度。但更關鍵的問題在於，過去測定鈾-234半衰期的方法，是基於經驗法則外推拖尾影響的方式估算而得。也就是說，舊有的刻度是建立在對背景雜訊的猜測上。既然如今已能利用鏡像法精準扣除拖尾，則必須摒棄舊有的估算，以新技術對這個核心常數重新進行嚴格檢驗。

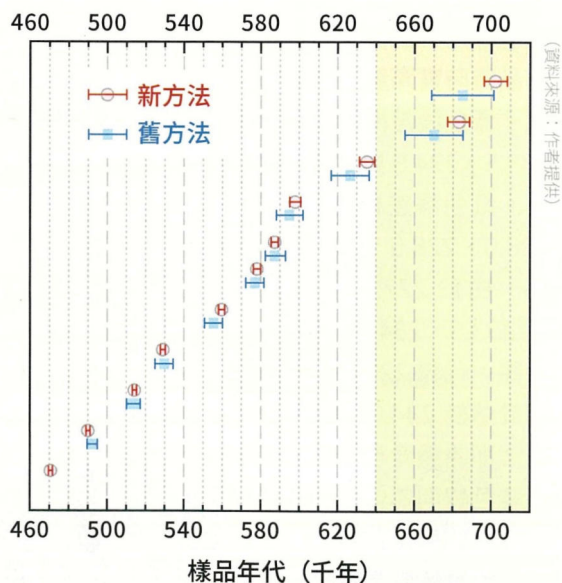
研究團隊分析數百萬年的碳酸鈣標本，計算出鈾-234半衰期應該是 2.4567×10^5 年，比原先2013年發表的值多了50年，誤差更精煉到只有正負25年。此差異雖然看似微不足道，但在計算60萬年以上的標本時，將算出的絕對年代出現數千至上萬年的偏差。而儀器測量的正負萬分之0.8的精準度，也讓60~80萬年的地質標本定年誤差，從萬年以上縮小到數千年（圖三）。

對未來的影響

自1950年以來，缺乏對於60~80萬年前這個時間段的放射性分析方法，限制了許多地球科學與人類學的研究。筆者團隊提出的這項鈾-234半衰期重新校準與相關革新技術，不僅是物理常數的更新，更是校正古代時間軸的關鍵一步，也為科

圖三

研究團隊應用新技術與2013年發表的舊技術的定年結果比較。紅色點與水平誤差範圍是以去(2025)年新方法測得，藍色點與水平誤差範圍是以2013年舊方法數據。在距今約60萬年以內，傳統方法與新方法給出的年代結果相近，顯示舊方法在此時間範圍內仍具可靠性。但對於更古老的樣品，傳統方法的不確定度明顯放大，導致年代無法有效判定。圖中黃色標示區段顯示，舊方法(藍色)因誤差過大，無法區分樣品的先後年代；而新方法(紅色)則能清楚辨識較老與較新的年代，顯著提升鐘乳石可追溯的年代上限。



學家開展更多研究提供新的可能性。例如終於能將陸地洞穴中的石筍紀錄，精準地與海洋沉積物或極地冰芯所反映的氣候訊號，在近百萬年尺度內、特別是十萬年冰期與間冰期循環的初始階段進行對比，進而更正確地解析地球氣候演變的真實模式。

我們也預期人類演化與遷徙研究將迎來重要突破畢竟 60～80 萬年前正是直立人 (*Homo erectus*)、尼安德塔人 (*Homo neanderthalensis*) 與丹尼索瓦人 (*Homo denisova*) 活動時空相互交織，並在歐亞大陸擴散的關鍵時期。過去科學家很難驗證早期人類的遷徙與演化是否受到特定氣候事件的

驅動。現在終於能將破碎的古人類化石紀錄，更精準地嵌入高解析度的氣候背景中，讓科學家有機會回答更具體的問題，例如某次乾旱、某次極端寒冷或某段氣候劇變，是否與遷徙浪潮同步？又或是新技術的出現，使族群得以跨越原本難以生存的環境邊界？

科學的進步往往不在於發現了什麼全新的大陸，在於讓人們換上一雙更銳利、更深情的眼睛，重新審視那些古老而熟悉的風景。而這些更多、更有趣的問題，則有待未來更多的科學家一一解答。

