

# 考古學上的科學定年法

劉俊昱

如同美國〈CSI 犯罪現場〉電視影集裡的科學鑑識是破案的關鍵技術，科學絕對定年法的發明是考古家破解史前謎團的關鍵利器。

相對於文字紀錄主要的研究者是歷史學家，考古學家是研究文字書寫前人類活動史的主要人員。對於兩學科來說，有一個重要且相同的因素，就是「時間」。相對於歷史學者研究書寫文本中的年代，考古家的文本是一鏟一掘出土的考古物質遺留，而從物質遺留中擷取年代有兩大方法，即相對定年與絕對定年。

## 相對與絕對

層位學是地質學發展出來一套研究地層堆積的方法，而水平堆積原則則是層位學一個重要的原理。在沒有其他外力的影響下，地層的堆積是由下而上、水平平行。也就是說，堆積在越下方的地層是越古老的，越上方靠近地面則是越年輕的。考古學家借用這個原理，推測出位置在上方的考古遺物是「較為」年輕的。



年輪是一種區域性的定年方法，透過計數沉積物與植物成長的輪紋，來判定這輪紋的年代。(圖片來源：種子發)

「絕對」定年法是基於科學原理推導出目標年代的一門技術，這些技術大多從地質學發展而來，廣為考古學家應用。



哈佛大學博物館中的校園發掘地層展示櫃標示著層位，並且在各層位中以抽屜展示不同年代的出土遺物。

除了從地層堆積決定相對的定年以外，考古家也發明了排列法（排隊法）。排列法也有其基本假設，也就是器物的風格、形狀與紋飾的變化通常是一個漸變的過程，但排列法可以提供的訊息基本上仍然是「相對的」。

科學性的「絕對」定年法是基於科學原理推導出目標年代的一門技術，這些技術大多從地質學發展而來，廣為考古學家應用。追求準確與精密是科學實驗的精神，考古學所應用的定年科技也不例外。然而，每一種定年技術所能提供的準確度與精密度並不一致，主要有兩種原因，一是技術本身的限制，二是定年樣本的品質。因此，單一技術的「絕對」定年並不是那麼絕對，而是要佐以各式各樣不同的技術，校正、交集到考古家需要的定年。

## 科學定年方法

以原理來說，應用在考古學上的科學定年方法大致可分為 3 種：年輪、放射性、電子捕獲。

年輪是一種區域性的定年方法，透過計數沉積物與植物成長的輪紋，來判定這個輪紋的年代。以沉積物來說，大多使用在冰川邊緣湖底的沉積泥，若那一年天氣較暖，則沉積泥層較厚，反之則較薄。樹輪定年也是相同的概念，氣候分明區域的樹輪較容易判讀，因為氣候影響植物生長，四季分明的地區樹輪也較分明。紋泥定年的主曲線在北歐地區重建得較完整，可以定到 13,000 年前。而樹輪定年在歐洲與北美西南部地區的主曲線也已建立堅實的資料庫，甚至得以利用樹輪定年來校準放射性定年。

**放射性定年是利用放射性元素有固定半衰期的原理，透過計算目標物中特定放射性元素的濃度來定年。**

電子捕獲定年也跟放射性有關，但測定的不是目標物放出的輻射，而是被輻射照射以後其內部晶體電子的行為。

放射性定年則是利用放射性元素有固定半衰期的原理，透過計算目標物中特定放射性元素的濃度來定年。若以可測定的年代早晚來看，核飛跡法可以測定 15 萬年以上、鉀氫法可以測定 10 萬年以上、鈾系法的範圍則在 1 ~ 50 萬年之間，而台灣考古界最常使用的碳 14 ( $^{14}\text{C}$ ) 定年法則是 6 萬年以內到近代。

電子捕獲定年也跟放射性有關，但與前述放射性定年法不同的是，測定的不是目標物放出的輻射，而是目標物被輻射照射以後其內部晶體電子的行為。這種原理的定年方法有熱釋光、光釋光，以及電子自旋共振法，前二者的定年範圍約為 10 萬年到近代，後者則是 100 萬年 ~ 5 千年左右。

這麼多的定年方法，考古學家要怎麼決定想使用的科學定年法呢？這就跟想知道的目標年代、材質、誤差容許範圍及預算有關了。

## 碳 14 定年法

在台灣，最廣為考古學家所採用的定年方法是碳 14 定年法，但也有嘗試使用釋光定年（或稱螢光定年）。

碳 14 法的定年材質必須是有機物，如木炭、動植物遺留等，螢光定年則是加熱或光照過的礦物，通常可以在數量最龐大的考古遺留、陶片中找到。以現行的技術來說，若利用加速器質譜法來測定碳 14 法的年代，理論上的誤差值可以在  $\pm 25$  年左右，比螢光定年法精準一些。然而，螢光

定年所需的標本相較於碳 14 法來說，則容易取得多了。

$^{14}\text{C}$  法大概是當代考古學家採用最多的定年法，國外甚至已有專門的商業實驗室。美國化學家 Willard Libby 在 1949 年發布了全世界第 1 組碳 14 數據，爾後碳 14 定年在考古界可以說刮起了一陣旋風。這套科學定年法跨越了區域的範疇，跟紋泥或樹輪不同，使考古學家得以建立全球通用的年表。碳 14 定年的結果通常用 BP（距今）表示，為了避免混淆，已經把這個「今」定為碳 14 定年開始運用的 1950 年，因此 2,000 BP  $\pm$  25 代表的是大約公元後 50  $\pm$  25 年。

$^{14}\text{C}$  是普通碳原子  $^{12}\text{C}$  的同位素，是氮原子跟高空大氣中的高能中子反應而來，跟普通的碳原子相比， $^{14}\text{C}$  多了兩個中子，因此不是那麼穩定，會以  $5,730 \pm 40$  年為半衰期衰變。也就是說，每經過 5,730 年，一個封閉系統內  $^{14}\text{C}$  的濃度就會減少一半，而經過了 11,460 年後， $^{14}\text{C}$  的濃度會只剩下原本的 1/4。

這個方法有兩個基本的假設。第一、地球大氣內  $^{14}\text{C}$  的濃度是固定的，第二、封閉系統。舉例來說，高空中生成的  $^{14}\text{C}$  平均分布到大氣後，透過光合作用進入植物內部，爾後又被草食性動物攝入體內，最後，草食動物有可能老死或被肉食性動物捕食。植物死亡或被當做柴薪燃燒，沒有辦法繼續光合作用後便形成了一個封閉系統，草食動物老死或被捕食也視為封閉系統的形成，甚至肉食動物的死亡也是。

這些封閉系統一旦形成， $^{14}\text{C}$  的濃度在其體內就會以 5,730 年為半衰期減半。

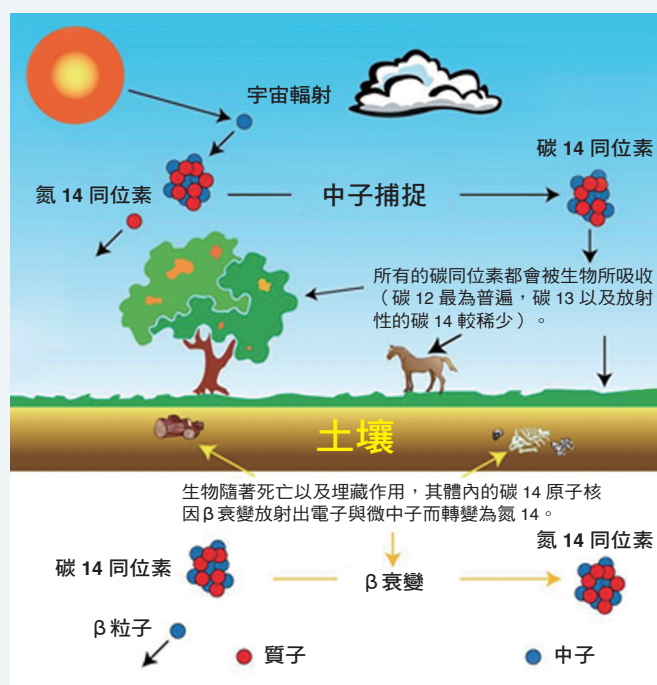
第一個假設並不完全成立，例如公元 1000 年前的  $^{14}\text{C}$  濃度比現在高，而在近現代，又有核子武器頻繁試爆以後的影響。因此，現在使用的  $^{14}\text{C}$  定年都是經過校正的，經由交叉比對前述所提及的樹輪、泥紋定年，並結合其他如鈾系定年的資料，可以得到一個校正曲線，對比出校正後的年代。

傳統的  $^{14}\text{C}$  定年法約需要 2 克的純碳，以考古遺留來說，大概要找到 5 ~ 10 克以上的乾燥木炭，且採取的過程儘量不能碰觸到任何有機物。近年來，由於應用計數較為精準的加速器質譜法，只要 30 微克 ~ 3 毫克即可，對考古學家來說可是一大福音。然而，在考古發掘中要採集到有機質仍是一件相當靠運氣的事，更何況是採取得到足夠的碳（定年樣本）了。再者，被定年的目標樣本跟考古事件並不一定一致，例如火塘裡生火用的木頭也有可能是年紀很大的老木，這樣的話，定出來的年分跟考古學家想知道的時間就有差距了。

## 螢光定年法

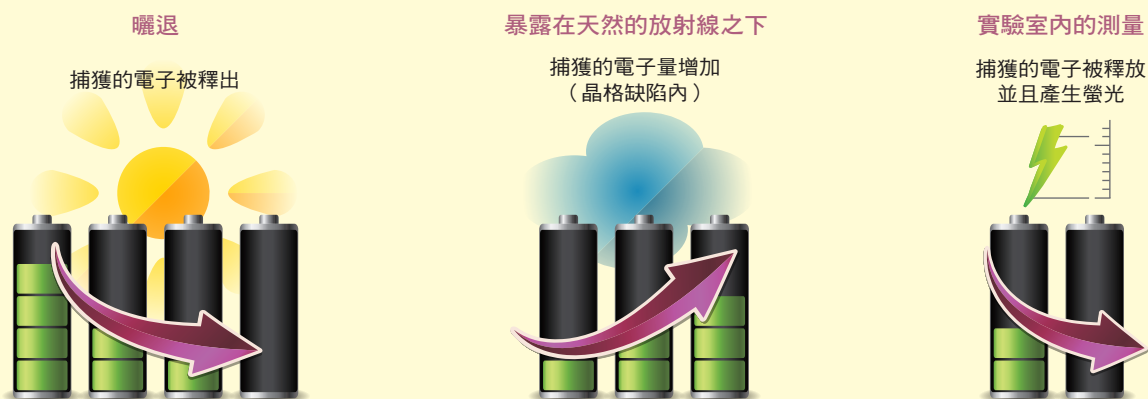
螢光定年法可以說是一個幾乎不用考慮定年樣本量的大小，以及目標樣本與考古事件是否不一致的方法。為何稱為「螢光」定年法呢？因為這個定年法主要是量測目標樣本受刺激後所發出的光量而來。依據刺激來源的不同，有熱釋光與光釋光定年法。相較於碳 14 定年法有特殊的紀年規則，螢光定年法則直接使用 BCE/CE（公元前 / 公元）來表示，而且不需要校正。

螢光定年法的原理是，晶體礦物經過放射線照射後，部分的電子會脫離本來的位置而掉入晶格缺陷中，其電子數量會與時間成正比穩定累積。



碳 14 的生成與循環（圖片來源：<http://rses.anu.edu.au/services/anu-radiocarbon-laboratory/radiocarbon-dating-background>）

這個方法的基本原理是，晶體礦物（常用的是石英與長石）經過放射線照射後，部分的電子會脫離本來的位置而掉入晶格缺陷中，假若輻照的強度是固定的，落入晶格缺陷的電子數量會與時間成正比穩定累積。因此，若可以計算目標樣本的輻照總量（總計量），除以 1 年的輻照量，就可以得到這個樣本的年齡。地層中的天然輻射來源跟量是穩定的，來源有鈾、釷與鉀的放射性同位素，因此測量當代這 3 種放射性同位素的濃度，



螢光定年可以用充電電池來理解。假設電池中的電量代表的是晶格缺陷中的電子量，左圖太陽或高溫照射後，儲存在晶格缺陷內的電子會釋放出來，中圖則是樣本離開光線或高溫後，晶格缺陷中的電子逐漸增加，右圖則是樣本進入實驗室後，以人工的方式清空電子量（加熱或照光）。（圖片來源：Luminescence Dating, English Heritage 2008）

可以推定年劑量。根據以上的原理，可以得到下列公式：

$$\text{年齡} = \text{總計量} / \text{年劑量}$$

那麼，螢光從哪裡來呢？落入晶格缺陷的電子經過熱能或光線的刺激後，會跳出當初落入的缺陷，而這期間差異的電子能量會以光的型式釋放出來，也就是螢光的來源。

這個定年技術為什麼適用於考古樣本呢？考古出土遺物中數量最多的是黏土與摻合料所做成的陶器破片。陶器在製作的過程中會經過火燒成型，也就是清空晶格陷阱中的電子，而陶器破損被棄置掩埋後，因為接受周遭放射性同位素的天然輻射，礦物中的晶格缺陷又重新開始累積電子，所以熱釋光定年法可以至少確知陶器破損後被掩埋的時間。雖然螢光定年有不用校正以及與考古事件一致的優點，但仍有長石樣本異常衰退、石英樣本部分衰退、精密度不如碳 14 定年法等問題。

不過，每一種定年法都有其優缺點。例如，碳 14 定年法需要校正，且樣本目標的年代跟考古事件的年代不一定相符，而鉀氬法無法測定台灣大部分史前時代的年代。因此，交叉比對可用的定年結果，以及控制採樣過程避免樣本汙染，是讓絕對定年法更為精準的不二法門。就好像〈CSI 犯罪現場〉電視影集裡精準的科學鑑識是破案的關鍵技術一樣，精準的絕對定年法可以讓考古學家更容易破解史前謎團，發掘出更多的故事給大家欣賞！

劉俊昱  
美國華盛頓大學人類學系