

地球的年齡

文·圖／林秋玫、董國安

摘要

地球的年齡得由隕石來告訴我們！隕石是早期太陽系物質的見證，也是微行星的組成材料，微行星因重力吸積作用逐漸壯大成行星，而未能構成天體的隕石則成爲殘餘物質飄盪在太空中。美國地球化學家帕特森(Patterson)假設這些太陽系物質皆同時形成、演化自具有相同的初始鉛同位素組成的封閉系統，因此只要測量隕石的年齡，那麼它們的年齡就約爲地球的年齡，他在 1956 年《隕石與地球的年齡》一文中利用 ^{207}Pb - ^{206}Pb 等時線推算發表地球的年齡有 45.5 ± 0.7 億年。近年來由隕石測定出最古老的年齡也都是 45 點多億年，與帕特森當年的測定結果相近，所以科學家公認地球年齡爲 46 億年。

關鍵詞：地球年齡、隕石、放射性定年、均變說

關於地球年齡的猜想

古希臘時代亞里斯多德尚不清楚地球在宇宙中的空間定位，時間沒有開端、是一個永無止境的輪迴。東漢時代張衡則有「宇之表無極，宙之端無窮」的思辯，無論東西方古文明都有「時間的無窮」看法，因此根本無從回答起地球有多老的這類問題。1650年愛爾蘭大主教烏雪爾(James Ussher)根據舊約聖經的族譜推算出上帝在公元前4004年的10月23日創造了萬物，這番說詞現今看來荒誕，卻在當時深具權威。百年後待化石與地層的科學蒐證愈來愈多之後，人們才逐漸從地球只有6000歲的宗教框架中跳脫出來。

英國地質學家查爾斯·萊爾(Charles Lyell)1830年出版了他的重要著作《地質學原理》首版，承襲自18世紀蘇格蘭自然哲學家詹姆斯·赫登(James Hutton，史稱現代地質學之父)的思想，主張地球的特徵永不止息的在進行著侵蝕與重新塑造，這種變化的速度大致保持恆定，這樣的想法動搖了當時將地球的歷史視為「靜態、固定不變的」，由間歇性的災變事件引發「變化」的傳統思維。後來許多自然學家受到萊爾的影響，漸漸發展成「均變說」(Uniformitarianism)，相信支配現在與過去時間當中的地質作用是均勻、一致的(uniformity)，當時赫登以“uniformity in time”(意即「時間一致性」)討論之，此一學說認為地貌是已知的自然規律在漫長的地質時間中經歷無數的小變化所形成，地球的年齡必定極為長久(圖1)。

英國物理學家威廉·湯姆森(William Thomson)，後來受封為克耳文爵士(Lord Kelvin，制定絕對溫標，對熱力學第二定律有卓越貢獻)，他將法國數學家傅立葉(Joseph Fourier)的熱學分析理論應用於解決地球年齡的問題，假設地球形成自一個完全熔融的物體、地球本身是剛性、均質的且藉著「傳導與輻射」逐步冷卻成現今狀態。它不會自行產生熱，也沒有所謂「尚未被發現」的能量來源(圖2)，透過測量地表熱量流失的速率、地表附近的地熱梯度及岩石的熱擴散係數等熱力學方法即可估算地球年齡，並由岩石的熔融實驗估算出地球的初始溫度為7000°F(或3900°C)，年齡則介於2400萬年~4億年(之後又曾下修至2000萬年)。地球在這位當代物理巨擘的眼中始終是個年輕小伙子，他為19世紀中後期地球年齡的觀點帶來重要影響，就連一開始受到《地質學原理》所啟發的達爾文也信服於他的數學計算，儘管與演化論所稱的地球約有數億年的歷史大相逕庭，達爾文卻在他的《物種起源》後幾版中悄悄的下修，甚至刪除了原先針對威爾德沉積岩層(Weald Formation，倫敦東南部的一個地質構造區)的年齡估計(圖1)。

19世紀末、20世紀初時，關於原子結構的秘密被一層層的剝開，1896年從貝克(Henri Becquerel)手中誕生了意外的新發現—鈾鹽晶體能自行放出一種神祕的射線使一同被放進抽屜中的底片感光，幾年後居里夫婦著手研究這種奇怪的鈾射線，又很快的發現了其他比鈾放射性更強的新元素：釷(Po)和鐳(Ra)，更將此現象以「放射性」(radioactivity)稱之，並確定元素的衰變過程中會伴隨著熱能釋放。在相同的

質量下，元素衰變的熱能釋放量遠不及其化學反應的放熱量，雖然放射性元素在岩石當中的含量很低，但一旦考慮整個地球內部存在的放射性元素持續衰變，加總起來將產生不容小覷的龐大熱源！以現今的溫度推算，地球的年齡可能大幅增加？另外，在發現放射性前的 1895 年，約翰·佩里(John Perry)闡述地球內部的熱對流作用以挑戰克耳文的論點。地球本身的複雜性正是克耳文大師所不了解，地球的年齡顯然不是單純的物理模型可輕易詮釋。

放射性定年法

「放射性」除了供給大量熱源外，還是一個能夠量化岩石的訊息，甚至是測量地球與太陽系年齡的有效方法。自然界中有些元素本身即具不穩定的原子核（如 ^{238}U ）或存在不穩定的同位素（如 ^{40}K 為鉀元素的不穩定同位素），會經過一次或多次自發衰變而成其他較穩定的原子核。而每種元素特定的「半衰期」使母元素像沙漏上層流失的沙一般的減少、子元素則像沙漏底部日漸積累的沙構成了肉眼不可見的計時器。選用適當半衰期長度的衰變系統可用於探究不同尺度的時間問題，例如 ^{14}C 定年法（半衰期：5730 年）可用於人類考古或近代地質； ^{238}U - ^{206}Pb 定年法（半衰期： 4.47×10^9 年）適於探討地球歷史，藉由質譜儀精確分析母/子元素含量比值（即沙漏上、下層的沙量比）與已知的衰變常數就能推算岩石距離它生成時已經歷多少歲月！（圖 3）目前所知地球上最古老的岩石有 40 億歲之久，卻僅是地球年齡的下限值。

放射性定年法固然精美，但仍受限於母/子元素必須完全保存在「封閉」的礦物中而沒有散失或額外加入，且岩石生成後不受熔融、換質或風化作用影響而導致放射性元素重新分布。然而，我們知道這並不可能，因地球自誕生以來所謂的「最古老的痕跡」早已被不停歇的地質循環抹滅殆盡，故地球本身無法告訴我們它的年齡。

地球的年齡得由隕石來告訴我們！隕石是早期太陽系物質的見證，也是微行星的組成材料，微行星因重力吸積作用逐漸壯大成行星，我們的地球就是在這樣的過程中誕生的（圖 4），而未能構成天體的隕石則成為殘餘物質飄盪在太空中。美國地球化學家帕特森(Patterson)假設這些太陽系物質皆同時形成、演化自具有相同的初始鉛同位素組成的封閉系統，只要測量隕石的年齡，那麼它們的年齡就約為地球的年齡。他前後收集了 3 個石質隕石：包含 2 個普通球粒隕石(ordinary chondrites)、1 個玄武岩質非球粒隕石(basaltic achondrite)與 2 個鐵質隕石樣本（其中之一是來自美國亞利桑那州迪亞布洛峽谷(Canyon Diablo)的鐵質隕石）（圖 5），針對隕石樣本中封存了鈾-鉛同位素的鉛石晶體進行質譜分析，他在 1956 年《隕石與地球的年齡》一文中利用 ^{207}Pb - ^{206}Pb 等時線斜率計算，公布了地球的年齡有 45.5 ± 0.7 億年之久。之後，科學家由隕石測定出最古老的年齡也都是 45 點多億年，與帕特森當年的測定結果相近，所以現在公認地球年齡為 46 億年。



圖 1. 萊爾在 1833 年《地質學原理》第三版中繪製英國東南部威爾德盆地(圖中粗灰色線所圍區域)之地質圖，其地層岩性以白堊(Chalk)、黏土為主，後來達爾文在《物種起源》中根據此地區的地層侵蝕狀況做出年齡估計。

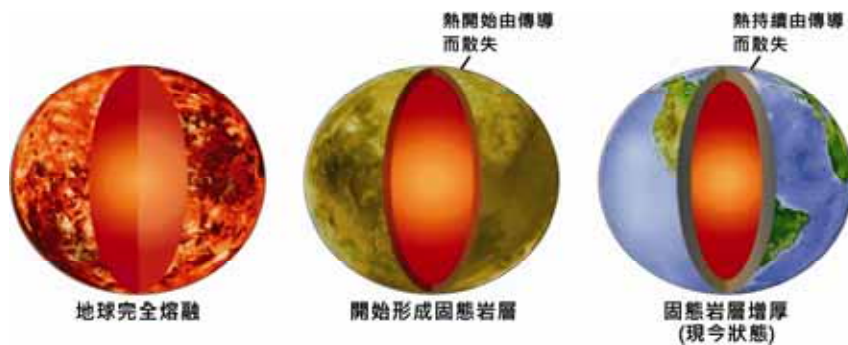


圖 2. 地球冷卻模型。應用熱傳導與輻射定律，計算地球從熔融體冷卻至現今狀態所需的年數。

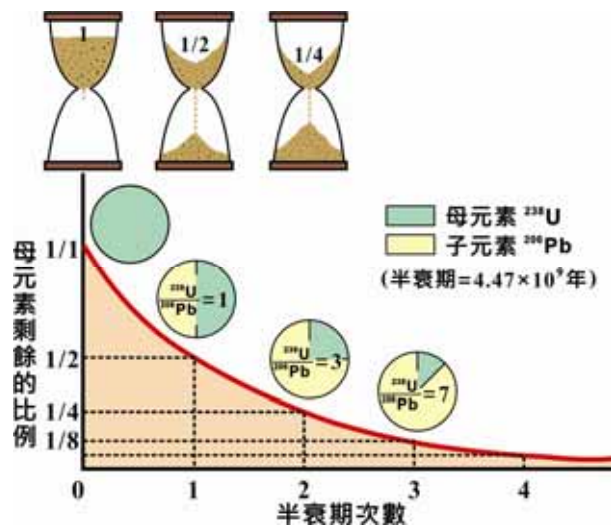


圖 3. 放射性定年法的概念，以 ^{238}U - ^{206}Pb 衰變系統為例。

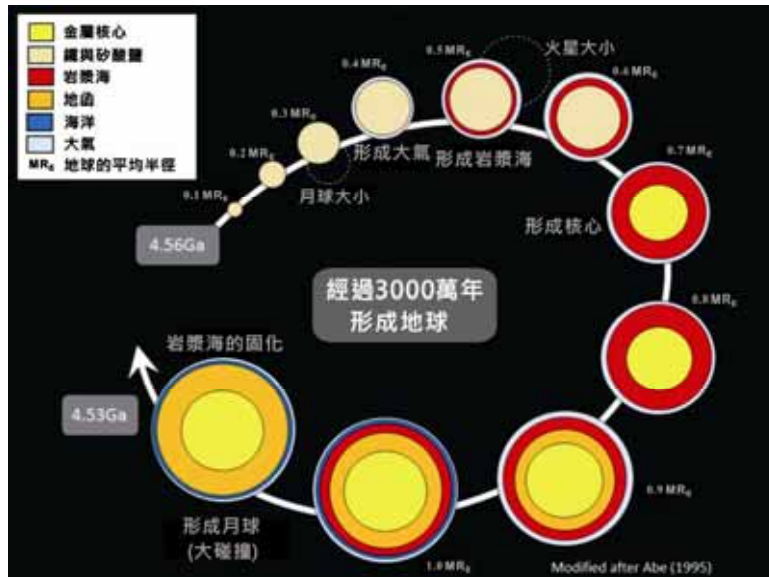


圖 4. 地球形成過程示意圖，顯示地球自微行星(~4.56 Ga)以來體積的壯大及內部層圈的連續分化。(修改自 Shigenori Maruyama et al., 2017)

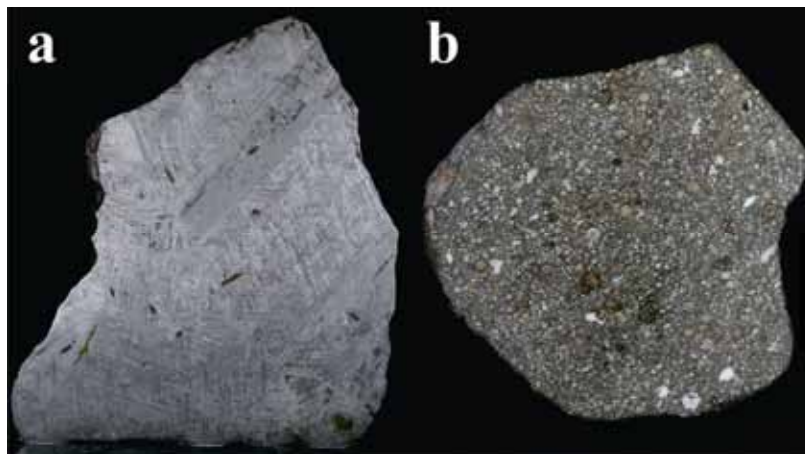


圖 5. 隕石樣本。(a)鐵質隕石。其中鐵紋石與鎳紋石依特定方向交互生長構成維德曼斯塔騰交角紋理(Widmanstätten patterns)的特徵；(b)碳質球粒隕石。主要由橄欖石、低鈣輝石、斜長石、鐵-鎳金屬及其硫化物組合成數 mm 至數 cm 大小的球粒(chondrules)與鉛灰色基質所組成，基質中散布著白色不規則狀的富鈣鋁包裹體(Ca-Al-rich Inclusions, CAIs)，被認為是太陽系最古老的物質。