

概說絕對定年法

鄭偉力 國立臺灣大學海洋研究所

地質紀年學 (geochronology) 是研究地球歷史上的年代問題。可包括相對年齡之測定法 (relative dating system)，例如利用古生物學、地層學、地質構造學等方法，及絕對定年法 (absolute age determination) 如利用放射性定年 (radiometric dating) 本文將介紹絕對定年法。

我們都知道樹木的年齡可由其年輪來決定，數魚鱗片上之年輪可得知魚的年齡，對於岩石或礦物標本我們如何測定它們的年齡呢？原則上我們需要一個計時器從岩石形成時便開始計時，那麼這個計時器一定要不停地“走”很久很久，通常短則數萬年，長則數億年之久，問題在於我們是否可找到這類計時器？科學家利用半生期很長的放射性同位素之蛻變（或反應速率很慢的化學反應）來當做計時器，只要測定親代與子代之相對含量（或生成物與反應物之相對含量），若蛻變常數為已知，那麼年齡便不難求得，這種方法稱為絕對定年法。

早在 1904 年 E. Rutherford 曾指出放射性元素對於地質學家之可能功用，在那時候 B. B. Boltwood 正在研究各種礦物中之鉛與鈾元素之比值，他下結論鉛是鈾經放射性崩解的產物，並在 1905 年提倡這種比值可用來決定岩石與礦物的絕對年齡因它是隨年齡而變的，雖然我們現在知道應該測定的是同位素而不是元素，但是 Boltwood 的基本觀念是正確的。在理想的情況下，所需要的是測定親代（例如鈾 -238）與子代（鉛 -206 是鈾 -238 蛻變的產物）的量，加上蛻變常數（幾乎所有的放射性轉變之蛻變速率是不隨時間而改變的常數，並且不受溫度、壓力、化學與物理環境的影響），那麼年齡便可決定了。

各種同位素計時器之選用必須配合各種放射性同位素蛻變之半生期，也就是說待測標本之年齡需與所選用之放射性同位素之半生期“相當”，例如標本之年齡在百萬年左右，則需利用半生期大約在百萬年的同位素最為適當：若用半生期為十億年級的同位素，則它的子代含量太低了，不易測定且誤差大，有“殺雞用牛刀”之感；相反的，若用半生期為千年級的同位素，則親代早都已蛻變無餘了，根本定不出標本之真實年齡，有“殺牛用雞刀”之誤。

另外一般人乍看之下感覺到同位素定年方法的誤差太大了，譬如實驗誤差為 1%，則年齡為千年、百萬年與十億年的標本之測定誤差分別為十年、萬年與千萬年，令人覺得太不準確了；事實不然，大家所熟知的亞佛加德羅常數 6.023×10^{23} 的誤差是 1×10^{20} ，真是大得離譜，怎能稱得上“常數”呢？實際上它已“準確”得夠資格被稱為常數了。

以放射性同位素來定年可有以下兩大類。

一、聚集式計時法

放射性親代蛻變產生非放射性子代（即穩定子代），利用該子代聚集之量與親代剩餘之量來推算年代之方法，它是基於兩個基本假設：第一是，系統必需是封閉的，即是除了放射性蛻變外，沒有其他任何過程使親代或子代添加或遺失；第二是，當系統形成時（即時間為零）沒有子代的存在。這兩個假設對於聚集式計時法限制相當大，事實上，嚴密的封閉系統在自然界可能不存在，但是，很奇怪的是許多礦物或岩石能滿足這種要求，而適用於核子定年；我們不能假設由放射性蛻變所產生之核種原先不存在，實際上，它們通常是存在的，因此我們必須設法找出它們最初的含量，那麼源自系統裡放射性親代所產生的子代的量便可得到，在許多長半生期放射性核種中（表一），只有鉀-40，鉀-87，鈾-235與鈾-238具有較廣用途。

表一 長半生期放射性核種

親 代	子 代	半生期（年）	蛻變類型
鉀-40	{ 氫-40 鈣-40	1.3×10^9 （總）	電子捕獲 β
釷-50	{ 鈦-50 鉻-50	$\sim 6 \times 10^{15}$ （總）	電子捕獲 β
鉀-87	鋇-87	4.7×10^{10}	β
鈾-115	錫-115	5×10^{14}	β
碲-123	銻-123	1.2×10^{13}	電子捕獲
鐳-138	{ 鋇-138 鉍-138	1.1×10^{11} （總）	電子捕獲 β
釷-142	鋇-138	5×10^{15}	α
鉀-144	釷-140	2.4×10^{15}	α
釷-147	釷-143	1.06×10^{11}	α
釷-148	釷-144	1.2×10^{13}	α
釷-149	釷-145	$\sim 4 \times 10^{14}$	α
釷-152	釷-148	1.1×10^{14}	α
釷-156	釷-152	2×10^{14}	α
釷-174	釷-170	4.3×10^{15}	α
釷-176	釷-176	2.2×10^{10}	β
釷-187	釷-187	4×10^{10}	β
釷-190	釷-186	7×10^{11}	α
釷-204	汞-200	1.4×10^{17}	α
釷-232	鉛-208	1.41×10^{10}	$6\alpha + 4\beta$
鈾-235	鉛-207	7.13×10^8	$7\alpha + 4\beta$
鈾-238	鉛-206	4.51×10^9	$8\alpha + 6\beta$

尚有一類方法與上述方法極為相似，基本上唯一不同的是：一為測定蛻變的產物，另一為測定蛻變的效應。譬如核分裂遺痕定年法（Fission-track dating）是屬於後者，原理是鈾-238除了 α 蛻變之外，同時也藉自發分裂而崩解成許多同位素碎片，這種崩解的現象比一般正常的放射性蛻變少了

許多，但它的蛻變常數為已知，如果鈾-238與它的分裂產物的含量可被測定，則含鈾-238礦物的形成時間便可決定了。由於分裂產物富含能量成為拋射體在礦物內形成管狀損壞遺痕，這種遺痕長度大約為10微米，並可藉浸蝕液（如強酸或強鹼）將痕跡放大約一百倍，使在顯微鏡下清晰地顯現出來，那麼一個標本中所有分裂產物的量可由核分裂遺痕數目概略決定，至於估計鈾-238的量，可將標本置于核反應器內，以中子撞擊後數出新遺痕的數目來推算，如是便可定出標本之年齡。核分裂遺痕之年齡測定法可適用於許多種礦物與玻璃物質如黑曜岩等，這種方法可用來測定很老（數百萬年者）到很年輕（數千年者）的標本，倘若岩石標本因深埋或變質而受過熱作用，使得核分裂遺痕因退火作用而遭毀滅，那麼用該法來定年就不適宜了。另外，與核分裂遺痕定年法同屬結構上之破壞是 α 質點（源自鈾-238與釷-232），因動量守恒反彈而造成破壞，其效應非一般方法所能偵測得到的，但是這種破壞使晶體或非晶體內之化學鍵斷裂造成有未成對之電子，恰可用電子自旋共振儀來測量，其定年範圍約為 $10^2 \sim 10^6$ 年。

二、蛻變計時法

當一種放射性核種是由某種核反應所產生，並且這種反應依一定速率連續不斷地產生，在某一系統中達到穩定平衡（secular equilibrium），新產生放射性核種逐漸累積而達到一定值，一核種處於穩定平衡時，它在環境中所產生之速率等於它所蛻變之速率，那麼它所剩下來的量保持一定，經由某種作用，該系統中之一部份自穩定平衡中移出，並且以某種形式被保存起來，之後，沒有其他物質加入，平衡時之量便逐漸蛻變，剩餘量為時間之函數，顯然地，這種計時法受到限制，因為剩餘量會愈變愈少，於是測定誤差愈變愈大，放射性物質之污染漸趨嚴重，一般說來，這種計時法不超過十個半生期，因為到那時候它的放射性強度約為原來穩定平衡值之0.1%而已。適于這類計時法的放射性核種如表二所示，當中最明顯的例子是碳-14定年法，藉着宇宙射線不斷地撞擊地球的大氣而產生許多核子碎片，當中包含中子，這些中子很快地就被大氣中氮所吸收，氮-14吸收中子，放出質子而變為碳-14，因為宇宙射線通量率維持一定，那麼中子產生率也一定，碳-14之產量保持不變，新產生放射性碳與氧結合形成二氧化碳，進入地球的碳貯庫，相互混合達成平衡，這些貯庫包括所有在海洋、大氣與生物圈內的二氧化碳、碳酸鹽與有機碳等。假設一片木塊所含的碳與交換貯庫達成平衡，現在將它自貯庫移去，於是碳-14計時器便開始計時，碳-14年齡測定成功的條件之一是在交換貯庫的

表二 由中子感應而生的放射性核種

核 種	半生期（年）
氫-3	12.3
鈹-10	2.7×10^6
碳-14	5,730
鈉-22	2.6
鋁-26	0.74×10^6
矽-32	700
氯-36	0.31×10^6
氫-39	260

混合時間必需比要測定的時間來得短。其他如氫-3計時法，氫-3來源小部份是藉由在高空中宇宙射線之交互作用產生，絕大部份是藉熱核爆炸而來，氫-3的半生期只有12.3年，於是它最大用途在於追蹤大氣與表面水的運動，同時地下水的年齡也可利用氫-3的含量來估計。