

同位素定年法及變質岩石學 對了解板塊運動的功用

一九〇〇年代，放射性同位素的發現，
開啟了利用同位素定年學研究工作的大門，其基本原理是什麼？

羅清華

台灣人用「地動」來講地震，不但適切、達意，更生動地描述了地球表面板塊運動的活躍性。的確，自從地球形成以來，我們生活的岩石圈板塊，即無時無刻不在漂移，只是速度相當緩慢，如果不是發生地震，一般人可能無法察覺它的活躍性罷了！

而在有限的地球表面空間內板塊的運動，必然造成不同板塊間的碰撞、隱沒或錯移，結果就形成了我們所熟知的山脈、裂谷與海溝等多采多姿的地形地

貌，也帶來了深具毀滅性的火山爆發與地震等大家耳熟能詳的地質現象。

或許您會問：台灣的地震是不是會停止？何時開始的？或更深入地問起相關問題，如台灣島是如何形成的？台灣島是在上升還是下陷？回答這些問題，首先必須先了解板塊運動的速度、影響的空間範圍與作用的時間等。而這些問題的答案，事實上都可以在岩層中找到蛛絲馬跡。



地球科學家即透過對岩層中的化石、岩石或礦物紀錄的解讀，推斷出岩層生成後的時空演化。例如，在板塊碰撞或隱沒作用過程中，常將下伏板塊內的岩層深埋至地底深部。由於地球內部溫度與壓力結構關係，越往地底深部溫度越高，壓力也越大。因此，岩石即會因深埋而產生變質作用，岩石內的組成礦物因而轉變成另一群穩定於高溫、高壓的礦物相，形成所謂的變質岩。隨著板塊碰撞，隱沒作用的構造運動，

部分高溫、高壓的變質岩會被帶至地表。

一九五 至一九八 年間，岩石學家利用高溫、高壓實驗與熱力學理論，推導出各種狀況下應有的穩定礦物群。因而，藉由高溫、高壓礦物相或礦物群的出現，我們可以理解板塊隱沒或碰撞過程中，岩層曾被深埋產生變質作用的深度。截至目前為止，從地球表面露出的變質岩被深埋的紀錄，顯示在板塊碰撞過程中，可以被埋至一百公里以上的深度。

然而，利用礦物相平衡反應關係所得的資料，只能提供我們發生深埋變質作用時片斷的空間分布，仍無法了解速率與途徑。如要運用此類靜態資料探討板塊運動狀態，就實用性而言，仍十分有限。

一九八 年代以後，為解決此類問題，近代岩石學研究乃結合精密的微分析技術與反應速率等相關理論，配合定年學方法，發展出所謂變質溫度 - 壓力 - 時間途徑的研究方法，進一步探討板塊運動過程中，岩層遷移的時空演化途徑。就研究形態來說，是從了解靜態紀錄為主的傳統變質岩石學研究，發展為探討板塊運動動態途徑的研究。

同位素定年分析的發展

要探討板塊運動過程的速度等問題，「時間」這個參數是絕對需要的。例如，在探討地震發生的頻率、板塊飄移的速度、全球氣候變遷的速率、地殼變形、山脈抬升與盆地陷等有興趣的地球科學問題時，就非得考慮「時間」的參數不可。在地球科學界，研究「時間」這個參數的學問，稱之為定年學。

估計「時間」這個參數的方法有許多種，舉凡一切不可逆反應的結果，都可以當作定年的依據。例如，生物演化的「不可逆」過程，使得我們可以利用生物化石的紀錄，決定地層沈積的先後次序，進而建立起相對的地質年代。然而，此種利用化石所建立的時間序列（或稱地質年代），只能提供相對年代，對研究速率或絕對年代而言，仍嫌不夠。

一九 年代，放射性同位素的發現，開啟了利用同位素定年學研究工作的大門。其基本原理在於利用不穩定同位素會發生衰變作用，由於這些衰變反應

都發生在原子核內，且其反應的活化能都比一般化學反應來得高。因此，同位素的衰變反應不易受到環境因素的影響。也就是說，衰變作用的反應速率可被視為定值。故只要精確地量測礦物岩石內衰變前後的同位素含量，配合衰變速率值（衰變常數），即可藉以推估岩石礦物生成的年代。

隨著科技的進步與分析儀器的精進，陸續發現了許多放射性同位素，而各同位素含量與衰變常數等也陸續提出，因此建立起各種同位素定年的方法。

一九七〇年代以前，常用的同位素定年方法，例如鈾 - 鉛法、鉀 - 氬法、鈷 - 鎳法與碳十四法等，基本上都已發展得相當完備。近年來，更出現鈹 - 鋰法、氯三十六法等可供分析沈積物與地下水年代的方法。

由於越來越多資料的出現，人們發現依據定年分

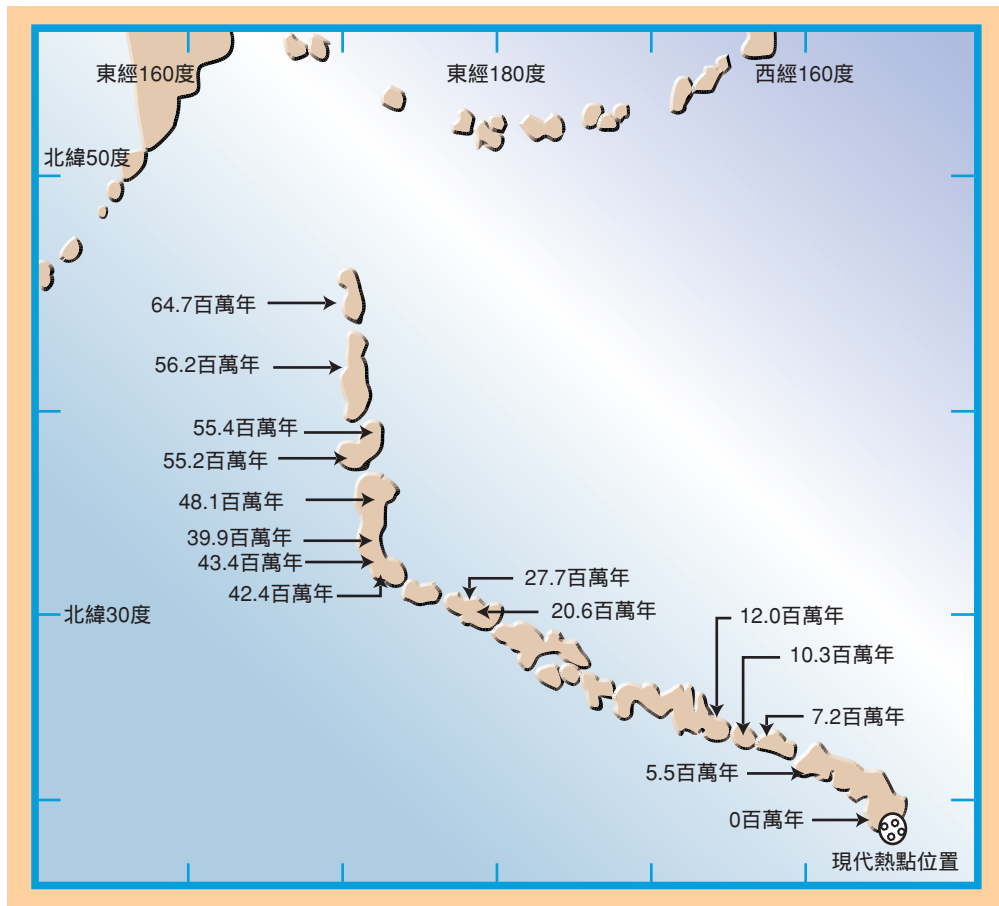
析所量測出來的數據，具有許多規律性，不但可以作為年代參數資料，也提供了許多「時間」參數以外的訊息。

例如，利用同位素分析一塊岩石標本內各種礦物的年代，常發現其年代值隨礦物的不同及同位素的不同而不同。主要原因是元素在礦物岩石形成以後會產生擴散作用，不同的元素在不同礦物岩石內的擴散情形並不相同，有些很容易產生擴散流失，導致能記錄的年代就比較年輕；而不容易產生擴散作用的同位素系統，就會因此呈現相對年老的紀錄。

擴散作用的產生也會隨著溫度的增高而加速，更是擴散系統大小與溫度變化率的函數。換言之，同位素能封存於礦物岩石內，必須有它的所謂封存溫度。一般來說，不容易產生擴散的同位素系統，其封存溫度應該比容易產生擴散的同位素系統來得高。因此，

如果能配合擴散理論的計算，定年分析不但能提供年代，更可提供封存溫度的資料。也就是說，如果能結合擴散理論與同位素定年分析，就可以得到礦物或岩石在形成後的冷卻曲線，或冷卻歷史。

就一般情況而言，岩石與礦物形成後，如果一直被深埋於地底深部的某處，由於地球內部溫度結構關係，應該一直維持在某一個溫度範圍內。因此，岩石礦物發生冷卻的情形，只有地殼變動抬升地



夏威夷——皇帝火山島鏈的時空分布圖

緣於太平洋板塊在過去的六千七百萬年間，向西北方向持續漂移，更於四千二百萬年時發生漂移角度的改變。我們之所以能理解這種漂移現象，主要是由夏威夷 - 皇帝火山島鏈的定年資料顯示出來的。

表的狀況下才會發生。換言之，如果地溫梯度為已知的狀況下，上述定年分析所得的冷卻曲線資料，應可進一步換算為岩層抬升的速度。當然，如果單選擇一種同位素系統進行區域性系統定年分析，也可以了解板塊變形與移動的情形。近來，台灣的定年學家利用碳十四定年系統分析斷層的活動歷史與頻率，所依據的即是定年分析資料。

變質岩石學的效用

類似於同位素的擴散現象，組成礦物的其他元素在高溫下也會產生擴散現象。雖然鍵結於結晶中的一般離子，其擴散現象可能不明顯，但某些礦物卻能完整記錄一般元素的擴散情形。假如能結合相關的擴散模式計算，礦物內元素的分布也可以顯示礦物生成後的溫度歷史。另一方面，一些擴散情形不明顯的礦物，也可以利用礦物環帶成分，推導出各環帶生長過程中的平衡溫度 - 壓力情形。

例如，石榴子石即常呈現生長環帶，其化學成分常呈環帶分布。假設這些離子均屬不易產生擴散的情形，則環帶的成分變化應該可反映各生長環帶的平衡狀態。而石榴子石的生長，可以在不同溫壓條件下進行。因此，石榴子石的生長環帶，應代表著板塊在隱沒、碰撞過程中環境溫壓的連續反應。利用熱力學定律，石榴子石由內向外的環帶分布，可推導出其平衡溫度 - 壓力。換句話說，石榴子石的生長環帶常可提供岩層的溫度 - 壓力過程。

一般而言，地球內部環境壓力的來源，主要是來自上覆地殼物質的重壓。因此，藉由重力計算，上述所得的壓力值，應該是代表著岩層的埋藏深度。過去二十年間，岩石學家已成功地利用石榴子石的生長環帶，推估出世界主要山脈內岩層過去的深埋與抬升的溫度 - 深度途徑。

板塊運動的體驗

誠如上述，定年分析可提供岩層生成後的溫度 - 時間演化歷史，而變質岩石學分析則提供了岩層過去所歷經的溫度 - 深度途徑。這兩類資料的結合，即可



了解岩層在過去的歷史中所經歷的時空途徑，也就是板塊運動的演化過程。

以阿爾卑斯山地區變質帶的抬升冷卻歷史為例，阿爾卑斯山上的岩石曾經在二千萬年前是位處於地底約二十七公里深處，隨著造山運動，以每年大於二釐米的速度抬升到地表。這些資訊都是從礦物的定年與化學成分資料，配合相關熱力學與動力學原理解析所得。換句話說，造山運動的過程，可以由微細的礦物顆粒解析出來。

由於板塊運動的速度十分緩慢，緩慢到絕大部分生活在地球上的人類，可能一輩子都無法感受到它的活動性。但如果能藉由上述變質岩石學與定年學方法，有系統地分析各岩層的過去時空演化途徑，則整個板塊運動與相互作用碰撞、隱沒或錯移的方式與演化，就可以一目了然地完全呈現出來，具體顯現「見微知著」的研究工作本質。當了解了這一點，即使是生活在沒有明顯地震活動的地區，也可以明白「地動」的意義，體會大地的活躍性。

羅清華

台灣大學地質科學系