

隱藏在礦物中的小秘密

文 • 圖 / 何恭算、鍾坤煒

摘要

礦物是組成固態地球的基本物質，同時也是人類生活不可或缺的重要礦產資源。本文著重在地質學家如何從平凡無奇的礦物晶體中，尋找重要證據，來探索、解決一些地質科學的問題。當然，經由礦物研究可資探討的議題相當廣泛，本文僅列舉一些重要研究面向，略加說明。

時間、溫度、壓力是研究地球演化歷史最重要的三個基本要素。時間可由化石先後出現來訂出相對年代，或是透過同位素的定年方法測出該礦物或岩石形成的絕對年代；而由共生礦物相所推導出來的地質溫壓計，乃是普遍被應用在估算火成岩和變質岩形成溫度和壓力的方法。例如：我們測出火成岩的噴發年齡，對於岩漿活動與該區地質的發展歷史，將可更清楚的了解。若選擇適合的礦物進行區域變質岩之溫度—壓力—時間路徑探討，藉由變質岩的受熱歷史，將可推論整體造山運動的演化歷程。在過去二十餘年來，超高壓變質岩石及礦物相陸續被發現以後，證實大陸地殼物質可隱沒至上部地函超過 100 公里的深度，然後經由大陸板塊間的碰撞又被抬升折返地表。這些超高壓變質帶的成因史，柯石英與微鑽石等超高壓礦物的出現，以及周遭變質岩內礦物群的紀錄，居功厥偉。

近年來全球氣候暖化的議題一再受到討論，人們關心近期的氣象變化，也對長時間氣候變動投入更多的關注。了解過去氣候的循環規律，將有助於推測未來氣候的變化，因此，古氣候的研究也就顯得格外重要。由霰石所構成的洞穴碳酸鈣在研究古氣候方面，也能提供重要信息。

關鍵詞：礦物、定年、溫壓條件、構造作用、古氣候

前言

礦物是組成固態地球的基本物質，同時也是人類生活不可或缺的重要礦產資源。過去在本館館訊中，筆者先後報導「漫談礦物用途」(第 217 期)及「漫談礦產資源」(第 222 期)，本文則著重地質學家如何從平凡無奇的礦物晶體中，尋找重要證據，來探索、解決一些地質科學的問題。

礦物現身：揭開前世之謎

眾所周知，每種礦物均有其穩定的溫壓形成條件，我們可以從單一礦物或共生礦物群的出現與否，來判斷岩體形成的地質環境。由於此一議題牽涉範圍太廣，本文僅列舉幾個例子來加以說明。

在礦物領域中，不乏有同質異形體(註)出現，透過同質異形中某種礦物的存在，可以幫助我們推測該岩體形成時可能的溫壓範圍。例如：在 Al_2SiO_5 同質多形體的礦物中(圖 1)，紅柱石(Andalusite)主要產於低壓變質帶中較低溫的環境；矽線石(Sillimanite)產於中壓或低壓變質帶的較高溫環境；藍晶石(Kyanite)則產於高壓或中壓變質帶中溫至高溫的環境(圖 2)。在變質岩區，這些礦物是含鋁量較高之泥質片岩中的重要礦物，所以依據 Al_2SiO_5 的同質多形體中出現的礦物種類，將可判定該變質岩大致是在何種溫度和壓力範圍下形成的。

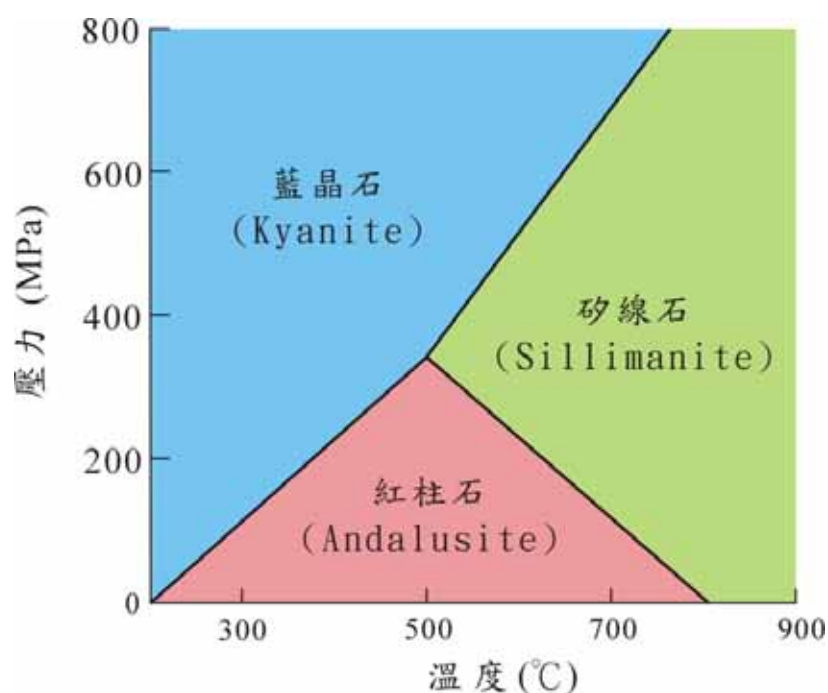


圖 1. Al_2SiO_5 同質多形體的穩定溫壓範圍



圖 2. 藍晶石。產地：巴西 Minas Gerais。標本大小：32 x 21 cm。
(張介宇攝)

再者，石英家族的成員中有許多同質異形體，在常溫常壓下存在的 α 型石英，高溫狀態下形成的 β 型石英、鱗石英 (Tridymite) 及方石英 (Cristobalite) 和高壓狀態下形成的斯石英 (Stishovite) 及柯石英 (Coesite) 均是，彼等均有一定的穩定溫壓範圍 (圖 3)。因此在常壓下，當溫度升高至 573°C 時， α 型石英會轉變為 β 型石英 (圖 4)，反之亦然。

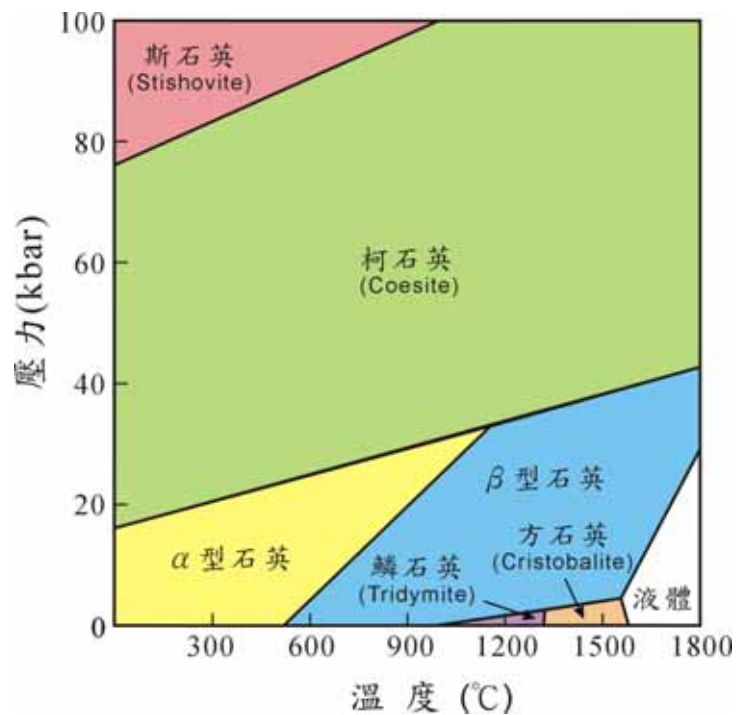


圖 3. 石英家族的穩定溫壓範圍



圖 4. β 型石英。產地：俄羅斯 Primorsky Kray。標本大小：39 x 35cm。

圖 3 顯示柯石英是在高壓環境下形成的，因此，在隕石坑附近發現柯石英的蹤跡，是表示該處地表曾經受到隕石超高速撞擊的一項佐證。而我們耳熟能詳的另一種高溫高壓下形成的礦物——鑽石，它主要產在古老穩地地塊（或稱克拉通 Craton）之金伯利岩（或稱角礫雲母橄欖岩 kimberlite）內（圖 5），代表這類岩漿係源自地球內部相當深的地方。在 1984 年以前，柯石英與鑽石這兩種礦物僅出現在隕石坑附近或金伯利岩、橄欖岩及其捕獲地函包體內，之後才陸續在西阿爾卑斯山的 Dora Maira 地塊、挪威的西部片麻岩區、俄羅斯烏拉山——蒙古褶皺帶的 Kokchetav 地區及中國東部的秦嶺——大別造山帶等處之大陸碰撞縫合帶的高壓變質岩中被發現（Chopin, 1984; Smith, 1984; Sobolev and Shatsky, 1990; Wang and Liou, 1991）。在這些超高壓變質帶內出現柯石英和微鑽石（micro-diamond）兩種超高壓礦物相，證實原本大陸地殼的物質隨著板塊碰撞被俯衝至上部地函超過 100 公里的深度，經歷了超高壓變質作用（ultrahigh-pressure metamorphism, UHPM）使得岩石內的組成礦物轉變成穩定於高溫、高壓的礦物相後，再藉板塊作用從上部地函深處重新折返地表。

上述重大發現已燃起國際地質學者對超高壓變質帶的高度興趣，至於此類岩石是如何俯衝至如此深度？又是何種機制使其折返地表並被保存下來？相關議題的研究，至今仍持續不墜。由於超高壓變質帶記錄著造山帶根部作用的地球動力學軌跡，因此，中國選擇江蘇省東海縣境內進行「大別—蘇魯超高壓變質帶科學鑽探工程」。此項重大的地質鑽探工程從 2001 年年中開鑽，鑽進地球內部深達 5000 公尺。

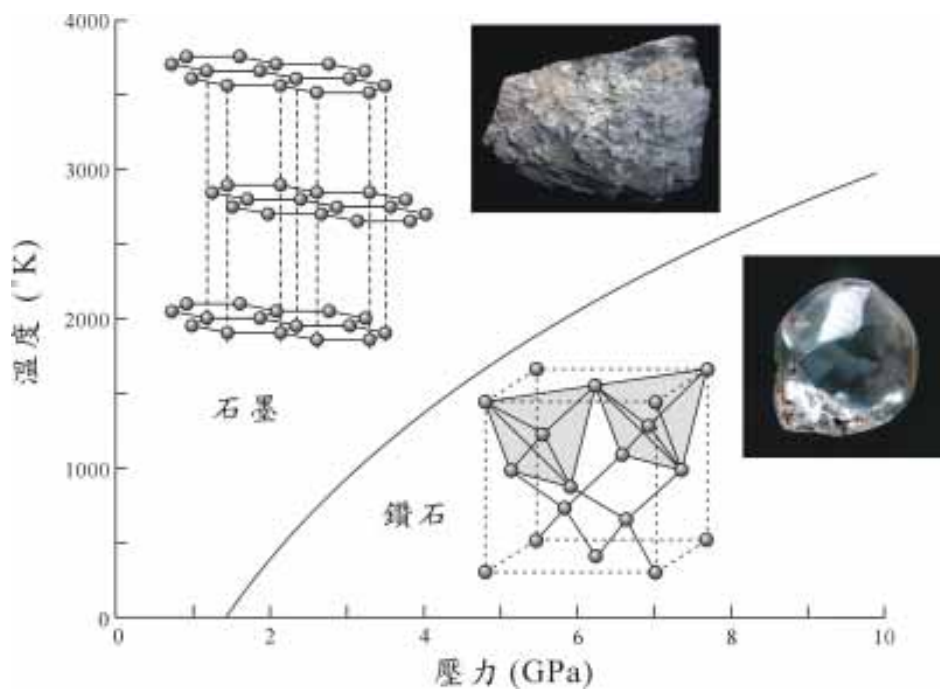


圖 5. 鑽石與石墨的晶體結構及穩定溫壓範圍

確立礦物形成年代

「礦物結晶需要多久？」經常有民眾指著標本提出這類的問題。由於每種或每件礦物的形成條件不盡相同，而且大多數礦物缺乏定年資料，實在無法做出精準的回答。

對地質科學而言，「時間」乃是探討過去演化歷史的重要關鍵，它不僅僅告訴我們某種地質事件是在何時發生？也能提供發生速率或演化速率的重要資訊。就地質時間而言，有所謂的相對年代與絕對年代，前者如以化石先後出現的時間，來訂出地層沈積的順序；後者則以一些同位素的定年方法，來測出該礦物晶體的 formation 年代，常用的有碳十四、鉀-氬、氩-氩、鈷-鋇、釷-釷、鈾-鉛、鈾-鈾等。每種定年的方法都有它適用的時間範圍，有的可以量測很長的時間，例如：鈷-鋇定年法可量測地球的年代，鉀-氬定年法可分析的年代範圍從地球年齡 46 億年至 10 萬年左右；有的方法只能量測短短幾萬年時間，如碳十四定年法可量測近萬年來洞穴碳酸鈣的形成年代。因此，要選擇何種定年的方法，首先要知道該地質事件發生的概略時間，是距今數萬、數百萬、還是數億年？然後再挑選適合的礦物（或岩石）種類來進行。

一般而言，酸性火成岩含有鈾的礦物，例如獨居石（Monazite），適於鈾-鈾-鉛法來定年；酸性和中性火成岩常有富含鉀和鈷的角閃石、雲母（圖 6）等礦物，因此，可利用鉀-氬、氩-氩或鈷-鋇的測年法，達到定年目的。在變質岩內若是在變質過程中形成的礦物，則透過這些礦物測出來的年代，即代表發生變質作用的時間。至於碎屑性沈積岩是原岩經風化、搬運、堆積、岩化等作用而

來，若是測定組成礦物的年齡，代表該礦物形成的時間，除非該種礦物是在沈積過程中形成的，否則測出的年齡並非沈積岩的沈積年代。總之，無論採用何種定年方法，都需要瞭解測得的年齡所代表的地質意義才行。



圖 6. 白雲母。產地：巴西 Minas Gerais。晶體大小：6.5 x 4.5 cm。

推斷礦物形成的溫壓條件

對同種礦物而言，在不同的溫度、壓力或地質環境所形成的晶體，除了可能造成晶體形狀不同外，在化學成分上也常會有所變化。一般而言，礦物是具有「一定」的化學成分，這是構成礦物的必要條件之一。但在自然界裡，礦物的化學成分固定不變者相當罕見，絕大多數礦物的化學成分都是在一定範圍內發生變化。一般造成礦物成分變化的原因相當複雜，若岩石內不同礦物相之成分能靈敏反應溫度或壓力的變化（可根據高溫高壓實驗和熱力學理論來確定），則可將這些共生礦物相作為地質溫壓計（Geothermobarometer）之用。

當地質學家選取該類岩石適用的地質溫壓計之後，便可實際量測共生礦物的化學成分，來計算形成時達至平衡的溫度與壓力大小。例如：我們從福建明溪新生代火山岩所捕獲的石榴子石橄欖岩包體（garnet peridotite xenoliths）中，分析共生直輝石與斜輝石的成分，再利用輝石地質溫壓計，推導出平衡溫度為 1100 ~ 1200°C，平衡壓力在 23~25 仟巴（kbar，1 bar 約等於 1 大氣壓）之間，以正常溫壓環境下，相當於離地表大約 75~83 公里。由於該區地殼厚度約 34 公里，所以這些包體係源自於上部地函（upper mantle）。

一般相信地函主要是由橄欖岩所構成，除了上述經由源自地下深處之岩漿攜帶至地表之橄欖岩包體而得到具體物證之外，全球一些地區因板塊相互擠壓而將最上部地函物質擠露出地表的地體（terrane）中，也是以橄欖岩為主，此外，透過高溫高壓實驗岩石學和震測等地球物理方法，亦得到進一步驗證。

探討地塊經歷之構造作用

前述利用共生礦物相平衡反應關係所獲得的資料，只能提供我們片段的溫壓訊息，假若能夠配合定年資料，則可解決所謂的速率或途徑的問題。譬如在不同變質作用時期的共生礦物所得到的溫壓演變途徑（P-T path），便可作為探討該區大地構造變化的重要依據。

利用變質岩內石榴子石的生長環帶（zoning）進行變質溫度—壓力—時間途徑的研究，可說是一個成功的例子。在變質作用過程中，隨著石榴子石的生長，其化學成分會與周圍共生礦物發生離子交換而改變，因而造成成分環帶的現象。地質學家便利用環帶從邊緣至核心與其他平衡礦物相的成分變化，推導出溫壓的變化曲線，進而計算出該區發生變質作用的溫壓變化途徑。在過去二十餘年以來，地質學家已成功的利用石榴子石之生長環帶，推估世界主要山脈內岩層過去深埋與抬升的溫度—深度途徑（羅清華，2002）。

解析古氣候重要訊息

全球氣候變遷一直是人們關注的焦點，自工業革命以來，由人類活動所產生的污染，已經造成氣候很大的變化，因此，酸雨、溫室效應、臭氧層破洞、全球暖化、兩極冰山溶解、海平面上升…，均是一則則震撼人心的報導。有道是：鑑古知今，對於地球過去的古氣候狀況，長期以來經由研究學者不斷的鑽研，分別從樹木年輪、冰岩心、黃土、湖泊及海洋沈積物、孢粉化石、珊瑚、鐵錳氧化物及洞穴碳酸鈣等材料中得到許多重要訊息，而這些材料乃是紀錄地球上過去數百、數千、甚至更長時間尺度古環境的代用指標（proxies）。



圖 7. 產於新竹關西石灰岩區的鐘乳石，橫斷面具有清晰的同心層狀構造。（洪誌楨攝）

我們以霏石（Aragonite）或方解石為主所構成之鐘乳石為例，它具有像樹木年輪的同心層狀構造（圖 7），其一圈圈由亮層與暗層交替組成的微層構造，便記錄著成長的歷程。由於這些碳酸鈣沈積時，其化學成分會隨著環境的變化而改變，因此，透過鐘乳石、石筍等洞穴碳酸鈣各微層之鎂／鈣、鎂／鋁、鋁／鈣

等微量元素比值及碳、氧等穩定同位素組成的研究，便可獲得當時之溫度、降水及植生等古氣候及古環境等相關訊息。

結語

地質學家在探討地球的演變過程中，從礦物晶體中尋找所遺留下來的蛛絲馬跡，經長期的努力，已獲得諸多重要訊息。但面對複雜的地球演化歷史，至今我們所知的仍然極為有限。外表看似冰冷的無機礦物晶體，不論是外形或內部的結構與成分，相信仍隱藏著大量而珍貴的信息。欲解讀這些密碼，有賴礦物學家或地質學家不斷的實驗、分析及野外地質現象的驗證，以求真的科學精神，善用每一顆大地結晶，以便揭開更多我們所未知的真相。

註：同質異形（Polymorphism）是指化學成分相同的物質，在不同的溫度、壓力和介質條件下，形成不同結晶構造的晶體（即不同的礦物種類）。例如：鑽石和石墨均由碳所組成，前者屬等軸晶系，後者為六方晶系，即是典型的同質異形礦物。

參考文獻

- 羅清華，2002。同位素定年法及變質岩石學對了解板塊運動的功用，科學發展，(358)：24~27。
- Chopin, C. ,1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps: a first record and some consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 107-118.
- Smith, D. C. ,1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature* 310, 641-644.
- Sobolev, N. V. and Shatsky, V. S. ,1990. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks. *Nature* 343, 742-746.
- Wang, X. and Liou, J. G. ,1991. Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China: Evidence from country rocks, gneiss, and metapelite. *Geology* 19, 933-936.