

知識天地

銠鐵同位素系統應用在地函岩石之定年

王國龍副研究員（地球科學研究所）

前言

地殼的形成是地球相對於其他太陽系行星極為特殊的地質現象，而伴隨其形成所遺留下的熔融殘餘即為所謂的岩石圈地函（lithospheric mantle），其為不發生熱對流的最上部地函。地殼和岩石圈地函兩者所組成的岩石圈，代表著地球最外緣的剛性部份，即所謂的板塊。岩石圈的形成與演化關係著地球整體熱能的散失與內部溫度的降低所引發的地球內部成份的變化，故研究岩石圈演化是瞭解地殼形成和長期地函演化過程基礎且重要的工作。而此工作最重要的部分在於時間的制約，對於代表地殼岩石，廣泛分布的花崗岩與片麻岩等基盤岩而言，針對這些岩石中銠石的銠鉛同位素年代測定已成為地學界一致公認最重要且最精確的定年工具，一直是同位素定年學應用在地學研究的顯學。然而對於代表地函岩石，僅能以偶發出露的岩漿捕獲岩（包體）或相對範圍極為侷限的造山帶所抬升的局部地函地塊的橄欖岩而言，如同銠鉛同位素年代測定法般堅實可信的定年工具則仍亟待開發。

前人研究

過去一般用於地函橄欖岩的同位素定年法如鉀（Rb）－銦（Sr）、釷（Sm）－釷（Nd）等同位素系統其母同位素對皆屬親岩石性元素（lithophile element: Goldschmidt classification; V. Goldschmidt, 1937），即在以矽酸鹽岩石為主要成分的地函發生部分熔融時，此類元素不論母、子同位素皆傾向進入岩漿而隨之上升至淺處或噴出地表，而在熔融殘餘的地函中則含量偏低。此種元素特性造成原生的同位素組成容易被後期的岩漿作用改變，特別是在岩漿上升至地表所經路徑的岩石圈地函，此種後期岩漿交代變質作用（metasomatism）改變其原生地球化學特性的事件層出不窮，因而其原生的同位素年代將無法得知。其次，這些同位素系統在岩漿（地殼）與殘餘地函間母、子元素的分異不大，如釷－釷同位素系統地殼和地函的同位素比值僅有約0.5%的差異，加上殘餘地函中此類元素含量甚低，對測定高精度的同位素比值是一大挑戰。

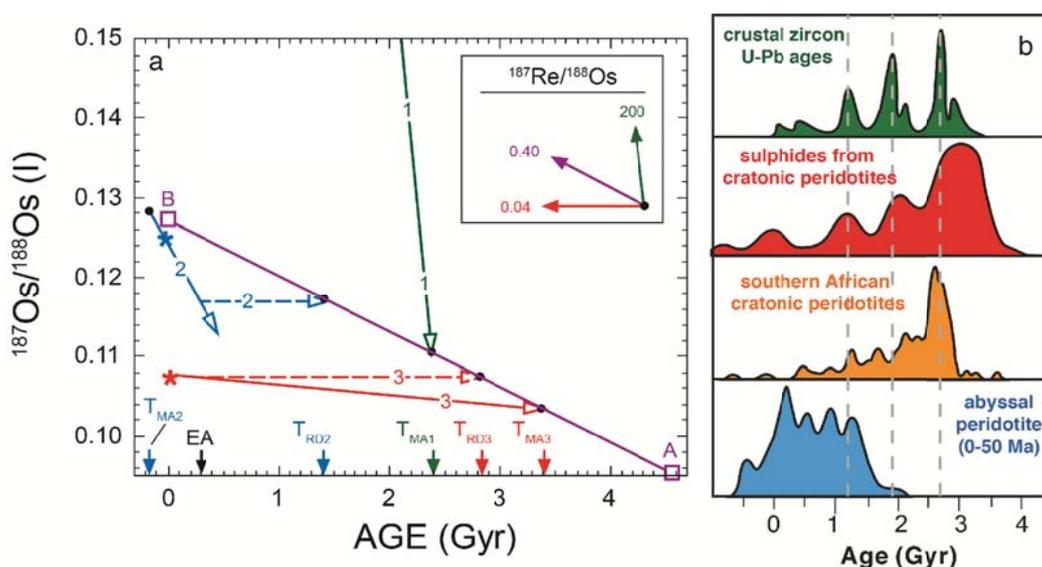
銠（Re）－鐵（Os）同位素定年系統

拜在熱離子源質譜儀（thermal ionization mass spectrometry）所發展的負離子分析質譜術與感應耦合電漿質譜術（inductively-coupled plasma mass spectrometry: ICPMS）的發展所賜，1960年代即被提出的銠－鐵同位素系統得以克服早期的分析技術困境，現今得以成為極具潛力的地函岩石定年工具。因為該同位素系統具有不同於前述親岩石性同位素系統的特性：首先，銠和鐵均屬親鐵（siderophile）和親硫性（chalcophile）元素，傾向於在鐵和硫化物礦物相中富集，因此，它們高度富集在以鐵、鎳為主要成分的地核中，在地函和地殼中則含量極低。其次，在地函發生部分熔融時，鐵傾向於留在殘餘的地函中，因而此同位素系統極適合應用在地函年代與成分的研究上；銠則傾向於進入岩漿，導致兩者母、子元素的分異極大，可達近兩個數量級，故在地函與地殼的鐵同位素比值約有10倍的差異，即便地函岩石中鐵含量仍偏低（約在ppb等級），然而在分析上的精度要求並不若前述親岩石性同位素系統，因而大大降低分析的困難度。最後，由於其親鐵和親硫的特性，後期岩漿交代變質作用對銠－鐵同位素系統幾無影響，地函岩石中的原生鐵同位素比值不易被改變，故可保留可靠的岩石圈形成年代訊息。

由銠（ ^{187}Re ）放射性衰變至鐵（ ^{187}Os ）的半衰期為420億年，故適合應用在自地球形成以來的事件定年，特別是較早的時期。如前所述，由於鐵在地函岩石中的含量甚低，故全岩粉末分析儘量挑選地函岩石中具高鐵含量的礦物如輝鉬礦（molybdenite）、鐵－鎳合金相礦物（osmiridium alloy）、硫鈳礦（laurite; RuS_2 ）、含鐵鎳的硫化物（Fe-Ni sulfides）和橄欖岩等進行測定。近期的研究結果（Alard et al., 2000）已證實，在地函橄欖岩中，鐵等的鉑族元素幾

乎全集中 (80-90%) 在少量 (<0.1%) 的含鐵鎳硫化物，而許多橄欖岩皆含有此種生成過程複雜的硫化物。隨著雷射分析技術的精進，利用雷射技術得以測定橄欖岩中單一硫化物顆粒的銻-鐵同位素組成 (Pearson et al., 2002)，除瞭解這些硫化物複雜的生成歷史並精確推算其所經歷的熔融虧損事件之年代，更得以保留這些硫化物在橄欖岩中的空間分佈與岩象結構 (petrography) 的關係，有助於提供鐵同位素隨硫化物在微構造中遷徙的認識，這是在全岩粉末分析所無法獲知的重要訊息。

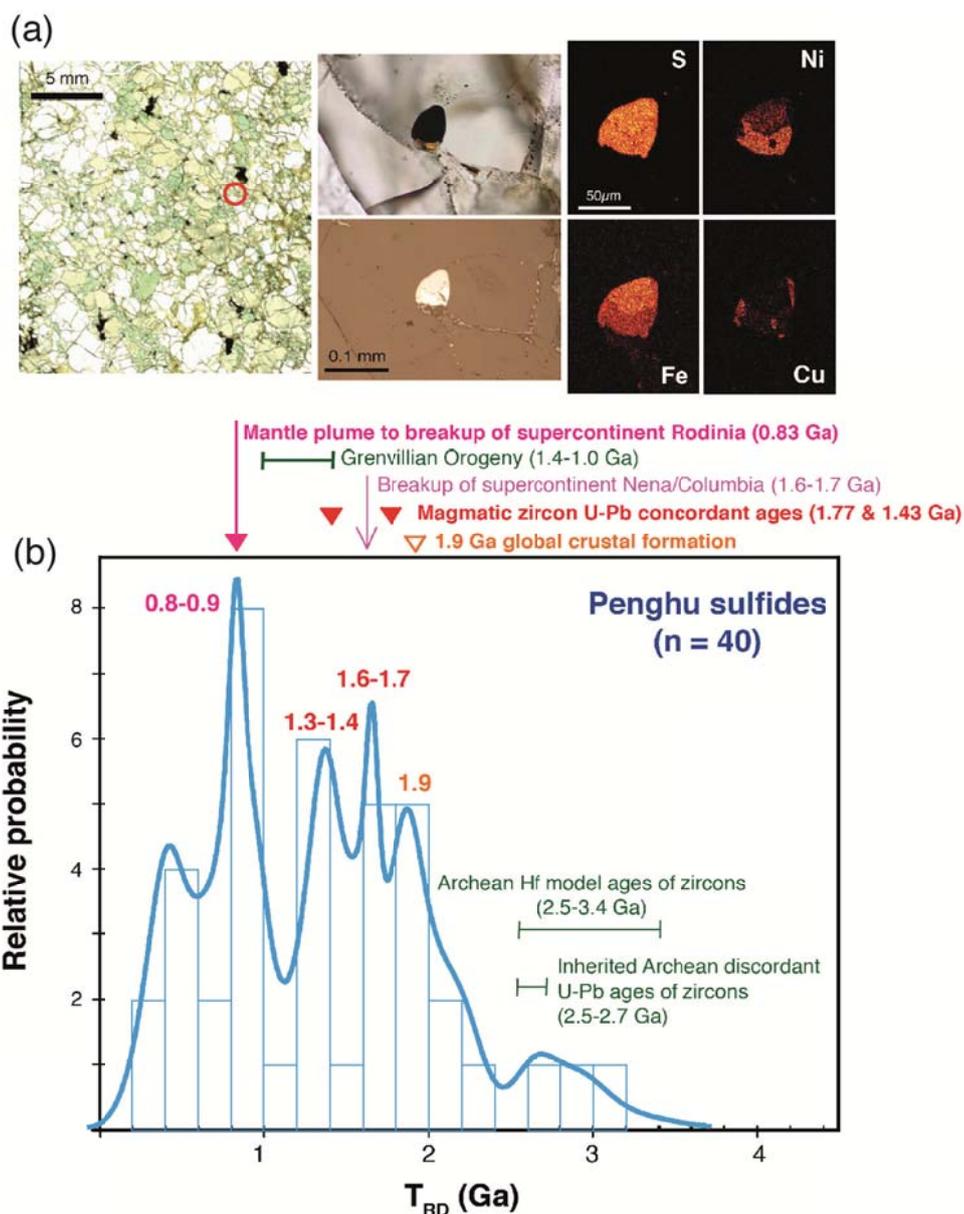
同位素定年法依衰變方程式原理，以量測的母 (^{187}Re)、子 (^{187}Os) 同位素比值分佈作等時線求其斜率而得到絕對年代。然而由於原生岩石圈地函岩石中普遍富鐵而缺銻，即便在分離出的礦物中也鮮少具有高銻鐵比的礦物，故有時不易獲得精準的等時線年代，因此須由推算相對的模式年代 (modal age; 圖一) 作為輔佐。作為熔融殘餘的地函岩石其鐵同位素組成可計算出兩種模式年代 (Shirey and Walker, 1998)：一為以硫化物本身所量測到的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 所計算的銻模式年代 (T_{MA})，代表其藉由部分熔融自地函分離的時間；另一則為適用於具高銻/鐵比值的硫化物，假設 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 為零所計算的銻虧損模式年代 (T_{RD})，代表最近一次部分熔融事件 (幾乎移去所有銻) 的時間。將全球來自古陸 (craton) 的地函橄欖岩全岩或其硫化物的鐵同位素模式年代的峰值分佈與全球地殼中鋯石的鈾-鉛年代峰值分佈做比較 (圖一b)，可發現兩者在 27、19、12 億年等峰值年代有極好的對應，一般相信這三個時間點是地球歷史中主要地殼形成的時間，而在岩石圈地函中亦保留了相對應的事件記錄，說明新生地殼 (juvenile crust: 由地函直接熔出所形成的地殼) 的事件得以在岩石圈地函亦留下記錄。而岩石圈地函所記錄的年代除顯示其形成的時間外，亦反映其自生成後所經歷的熱構造事件歷史。



圖一(a)模式年代示意圖 (擷自Shirey and Walker, 1998)：縱軸為 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值，橫軸為年代。A-B斜線為自地球形成以來地函的鐵同位素比值演化線，以45.58億年的III A族鐵隕石初始鐵同位素值0.09531 (A)和現今隕石平均值0.127 (B)連結為代表，此演化線的斜率正近似現今隕石的平均 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值0.4 (如插圖紫線斜率所示)。此處以三種典型的狀況解釋模式年代的計算：(1)綠線：岩漿中具有高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和高 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值，以其量測的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 當斜率直接投射回地函演化線所得到的年代24億年即為該岩漿的銻模式年代 (T_{MA1})。(2)藍線：由3億年 (EA) 噴發的岩漿所捕獲的殘餘地函橄欖岩具有低 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值，但因寄主岩混染或後期交代變質作用加入銻而具有高 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值，假設其中所有的銻皆由後期作用加入而將其扣除，故由量測的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 以 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比為斜率回推至3億年時的值再由水平線回推至地函演化線所得到的年代14億年即為該橄欖岩的銻虧損模式年代 (T_{RD2})。在此狀況下，橄欖岩的銻模式年代 (T_{MA2}) 為無意義的未來年代。(3)紅線：同樣由3億年 (EA) 噴發的岩漿所捕獲的未受後期作用的殘餘橄欖岩具有低 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和低 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值，其所得到的銻虧損模式年代 (T_{RD3}) 28.5億年會比銻模式年代 (T_{MA3}) 34億年更為年輕。(b)全球地函橄欖岩鐵同位素模式年代與全球地殼中鋯石的鈾-鉛年代峰值分佈比較圖 (修改自Pearson et al., 2007)。

台灣地函橄欖岩之應用研究

在台灣西部澎湖群島上中新世玄武岩亦捕獲大量的地函橄欖岩，由本島北寮奎壁村和外島東吉嶼所採集到的橄欖岩中單顆硫化物的雷射銻同位素比值所計算的模式年代約在5到30億年，峰值年代集中在19、16、14和8億年（圖二b），顯示澎湖群島下方的岩石圈地函可能早在太古代（Archean）晚期即已形成，而在上述峰值年代期間經歷數次熱構造事件的影響。此岩石圈年代記錄暗示澎湖群島所在地殼應亦於太古代晚期即形成，而和南中國板塊（South China Block）最早的地殼形成時間相當，且和南中國板塊地殼演化的峰值年代相對應（圖二；Wang et al., 2003; 2009），印證（1）澎湖群島位處南中國板塊大陸邊緣的地體構造環境；（2）古老的岩石圈地函在經歷新生代以來於此大陸邊緣形成的大陸張裂仍舊存在而未被上湧的軟流圈取代；（3）台灣本島下方所處地殼應為南中國板塊地殼的延伸，約在太古代晚期即已形成。



圖二 (a) 偏光顯微鏡下的地函橄欖岩硫化物。最右側相片則為利用電子探針所作的背散射 (back-scatter image) 元素分布圖；(b) 澎湖群島橄欖岩中硫化物的銻虧損模式年代分布圖與地殼事件之對照。

未來展望

雖然鐵同位素模式年代應用在地函的年代測定上已獲致可觀的成果，然而在假設如隕石般的地函演化線其原始地函值究竟該用較富化的頑輝球粒隕石（enstatite chondrite）或虧損的球粒隕石（chondrite）、硫化物隨交代變質作用的播遷所造成鐵同位素的分佈形態及其影響、還有越來越多的證據顯示軟流圈地函中存在古老物質而未被均質化所造成古老的岩石圈地函訊息究竟是否可能是來自軟流圈的混染等的爭議，則仍有待更多的研究來釐清，以完備此一具高度發展潛力的地函岩石定年工具。

參考文獻

- Alard, O., Griffin, W.L., Lorand, J.P., Jackson, S.E., O'Reilly, S.Y., 2000. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulfides. *Nature* 407, 891-894.
- Goldschmidt, Victor (17 March 1937). "The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society". *Journal of the Chemical Society*: 655-673. doi:10.1039/JR9370000655.
- Pearson, D.G., Parman, S.W., Nowell, G.M., 2007. A link between large mantle melting events and continent growth seen in osmium isotopes. *Nature* 449, 202-205.
- Pearson, N.J., Alard, O., Griffin, W.L., Jackson, S.E., O'Reilly, S.Y., 2002a. In situ measurement of Re-Os isotopes in mantle sulfides by laser ablation multicollector-inductively coupled plasma mass spectrometry: analytical methods and preliminary results. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 1037.
- Shirey, S.B., Walker, R.J., 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 26, 423-500.
- Wang, K.-L., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Chung, S.-L., Pearson, N.J., 2003. Proterozoic mantle lithosphere beneath the extended margin of the South China block: in situ Re-Os evidence. *Geology* 31, 709-712.
- Wang, K.-L., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Pearson, N.J., Zhang, M., 2009. Sulfides in mantle peridotites from Penghu Islands, Taiwan: melt percolation, PGE fractionation, and the lithospheric evolution of the South China block. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 4531-4557.