

## 板塊作用與岩石多樣性

文・圖／林秋玫、董國安

### 摘要

大地者，萬物之逆旅。僅不到整體地球 1% 重量的「地殼」組成，如同封存了 40 多億年來地球歷史的巨大檔案室，當中的岩石單元記載了火成結晶作用、變質作用及成礦作用等在不同時空遞變下的階段性特徵。但光是以上述的「地質作用」就認定地球是太陽系類地行星中擁有得天獨厚的「板塊作用」的星球顯然說服力不足。板塊活動促成流淌而出的滾滾熔岩、拔地而起的綿延山脈…將地球形塑成一顆活生生的星球，不僅形成大陸，也調節大氣組成與地表溫度、牽動氣候與洋流變遷、支持生命的蓬勃脈動，上演著地球獨有的故事。

關鍵詞：板塊作用、岩石多樣性、大陸地殼、海洋地殼、岩石圈

## 前言

大地者，萬物之逆旅。僅不到整體地球 1% 重量的「地殼」組成，如同封存了 40 多億年來地球歷史的巨大檔案室，當中的岩石單元記載了火成結晶作用、變質作用及成礦作用等在不同時空遞變下的階段性特徵，但光是以上述的「地質作用」就認定地球是太陽系類地行星中擁有得天獨厚的「板塊作用」的星球顯然說服力不足。板塊活動促成流淌而出的滾滾熔岩、拔地而起的綿延山脈……將地球形塑成一顆活生生的星球，不僅形成大陸，也調節大氣組成與地表溫度、牽動氣候與洋流變遷、支持生命的蓬勃脈動，上演著地球獨有的故事。

## 古往今來論地殼

地殼分為大陸地殼與海洋地殼，僅約 5 % 的現存大陸地殼老於 25 億年；大部分(約 70 %)年齡小於 10 億年；海洋地殼則更年輕，幾乎不老於 1.8 億年。地殼的瓦解與再造讓許多古老印記不復存在，科學家從僅存的古老岩石與碎屑銻石的定年學與同位素等線索尋求蛛絲馬跡，發掘古今地殼大小事。

地球誕生後的最初幾千萬年，經歷了地核/地函系統的增生與分化。正處於火熱岩漿海的熔融地表，最初可能先固化成基性岩質的靜止蓋層(stagnant-lid)，在混沌中初開天地。冥古宙晚期-太古宙中期(約 40-30 億年前)，由「前」板塊構造體系(pre-plate tectonic)造就原始地殼。當時仍「過熱」的地函所進行的熔融與結晶分異作用，產生不同於現代的岩石圈結構。而來自淺部持續性的岩漿入侵或來自深部的地函熱柱作用形成厚度大(~20 公里厚)的海洋地殼，由於浮力效應太大無法「真正的」隱沒，透過「低角度隱沒」所造成的岩石圈變形，加厚了基性地殼，引發重熔作用(remelting)，或經過岩石圈底部的拆沉作用(delamination)將地殼物質循環回地函。在這些複雜機制的交互作用下，逐步緩慢的改變岩石圈與地函的溫度、密度、化學成分等性質，進而形成 TTGs 質岩漿並構成一系列以長英質片麻岩(TTG)為主體的太古元大陸地殼。待岩石圈與地函之間的物理、化學性質累積至一定程度的差異時，約在太古宙晚期(30-25 億年前)時，推動了岩石圈與地函流變強度的重大轉變，決定了岩石圈是否開始出現隱沒、碰撞或相互分離的「現代板塊作用」。小陸塊之間的水平運動、隱沒、碰撞，造成大陸地殼的大規模增長與克拉通(Craton)化，為之後超大陸的地體格局揭開序幕。元古宙初期至晚期(約 25-7.5 億年前)，岩石圈的演化逐漸穩定下來，接著古老大陸或年輕地塊群(terrane)的匯聚-碰撞縫合、增生-超大陸-裂成次大陸或地塊，表現在造山作用、克拉通增生與裂谷伸展，乃至於裂解的種種過程……主導了全球板塊佈局的變化。

直至目前，大陸地殼佔據 40% 的地表面積及 70% 的地殼總體積，厚度介於

25-70 公里（平均約 35-40 公里厚），主要岩石有沉積岩、花岡岩、片岩、片麻岩、粒變岩等，平均組成較接近安山岩質，其密度（平均約 2.7 克/立方公分）低於較薄的（平均 7 公里厚）以基性岩（玄武岩、輝長岩）質為主的海洋地殼（密度平均約 3.0 克/立方公分）（圖 1）。地殼與部分的上部地函共同組成剛性的岩石圈，而裂解後的岩石圈即為「板塊」，浮在軟流圈之上而移動。

## 板塊作用與多樣岩石

海洋地殼之上發育洋脊(oceanic ridges)、洋盆(oceanic basins)、洋島(oceanic islands)及島弧(island-arcs)。位居張裂型板塊邊界的洋脊，是一系列狹長而隆起的海底火山系統，來自「淺部」地函物質湧升，因張裂、減壓作用造成部分熔融，形成玄武岩質岩漿，其冷卻後的中洋脊型玄武岩(MORB)是構成上部海洋地殼的主要岩石，以橄欖質拉斑玄武岩為代表，這樣的新生海洋地殼不斷向外推擠、拉張，進而成為寬廣洋盆的一部分。洋島，分布在海洋地殼上的一些孤立火山島或呈線型排列的火山島鏈，由板塊內部(intra-plate)的火山活動造成，與板塊邊界作用無關，如著名的夏威夷-帝王海山鏈，一般認為來自「深部」的地函熱柱為其岩漿源，於較高壓下部分熔融形成玄武岩質岩漿（洋島型玄武岩，OIB）。另外，火山也可產自聚合型板塊邊界之隱沒造山帶，當海洋板塊隱沒至另一海洋板塊之下時，將在其邊界形成海溝，並隨著板塊隱沒的深入與成熟，沿著隱沒板塊上的海洋地殼依序產生綠色片岩相-角閃岩相-榴輝岩相的變質作用。變質過程中因含水礦物的脫水而釋放水分進入地函，造成換質的地函一楔橄欖岩部分熔融，形成玄武岩質岩漿（島弧型玄武岩，IAB），岩漿的結晶分異作用則漸發展出玄武-安山-英安-流紋岩系的島弧岩石。若海洋板塊隱沒至大陸板塊之下時，則在大陸板塊上發育出大陸火山弧，其岩漿產生機制類似於島弧，不同的是湧升的岩漿因需經過較厚的大陸板塊而經歷更多的結晶分異作用或受到大陸地殼原有物質的混染(contamination)，形成的深成岩（閃長岩、花岡閃長岩、花岡岩等）、噴出岩（安山-英安-流紋岩系等）在種類及化學成分上也更複雜多樣。這類岩漿由於黏度高而傾向於爆炸式噴發，亦常形成火山碎屑岩的堆積，例如火山礫岩和凝灰岩。當兩大陸板塊互相接近時，即同時宣告一個古海洋（古洋盆）的閉合。若板塊持續的強烈擠壓、碰撞會造成地殼岩石和沉積岩層的大規模扭曲變形、增厚或斷裂，而形成局部或廣泛地區的褶皺、逆衝斷層等多樣構造；並引起岩漿、熱液活動和不同程度的變質作用，為造山運動史另啟新局！這也是阿帕拉契山脈、烏拉山脈等古造山帶與活躍於新生代的亞洲造山運動—喜馬拉雅山脈的前世今生（圖 2）。

板塊作用的進行，左右著地球岩石的消耗與重生。岩石受地表長期的風化與侵蝕作用而崩解成岩屑或釋放離子，通過風吹、河流、地下水、冰川、海流等營力的搬運，在漫漫時光中，逐漸成為覆蓋地表的沉積物，而後固結成沉積岩或化作大地的養分。

## 參考文獻

- 李江海，1998。前寒武紀的超大陸旋回及其板塊構造演化意義。地學前緣(中國地質大學, 北京)，05：141-151。
- 吳育雅，2014。地殼秘密檔案。科學研習月刊，第 53 卷，第 9 期。國立台灣科學教育館。
- 翟明國，2010。地球的陸殼是怎樣形成的？—神秘而有趣的前寒武紀地質學。自然雜誌(Chinese Journal of Nature)，32(3)：125-133。
- Stern, R. J., 2007. 板塊構造啟動的時間和機制：理論和經驗探索。科學通報，52(5)：489-501。
- Artemieva, I.M. & Meissner, R., 2016. Crustal thickness controlled by plate tectonics: A review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples. *Tectonophysics*, 530-531, 18-49.
- Blatt, H., Tracy, R.J., Owens, B.E., 2006. *Petrology: Igneous, Sedimentary, and Metamorphic* (third edition). W.F. Freeman and Company, New York.
- Condie, K.C., 1997. *Plate Tectonics and Crustal Evolution* (fourth edition). Elsevier Science.
- Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., Pietranik, A.B., Cawood, P.A., Kemp, A.I.S. & Storey, C.D., 2010. The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society (London)*, 167, 229-248.
- Hawkesworth, C.J. & Cawood, P.A., 2016. Tectonics and crustal evolution. *GSA Today*, 26, 4-11.
- Korenaga, J., 2018. Estimating the formation age distribution of continental crust by unmixing zircon ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 482, 388-395.
- Lurent, O., Martin, H., Moyen, J.F., Doucelance, R., 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonic between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos* 205, 208-235.

## 其他

臺大地質科學數位典藏博物館-地質學習教室

[http://nadm.gl.ntu.edu.tw/nadm/cht/class.php?serial\\_type\\_1=8&serial\\_type\\_2=4&serial\\_type\\_3=19#](http://nadm.gl.ntu.edu.tw/nadm/cht/class.php?serial_type_1=8&serial_type_2=4&serial_type_3=19#)

地球板塊何時開始運動？－ 科學人電子報

<https://www.lungteng.com.tw/Web/scientific-epaper-content.aspx?KEY=278&ARTICLE=03>

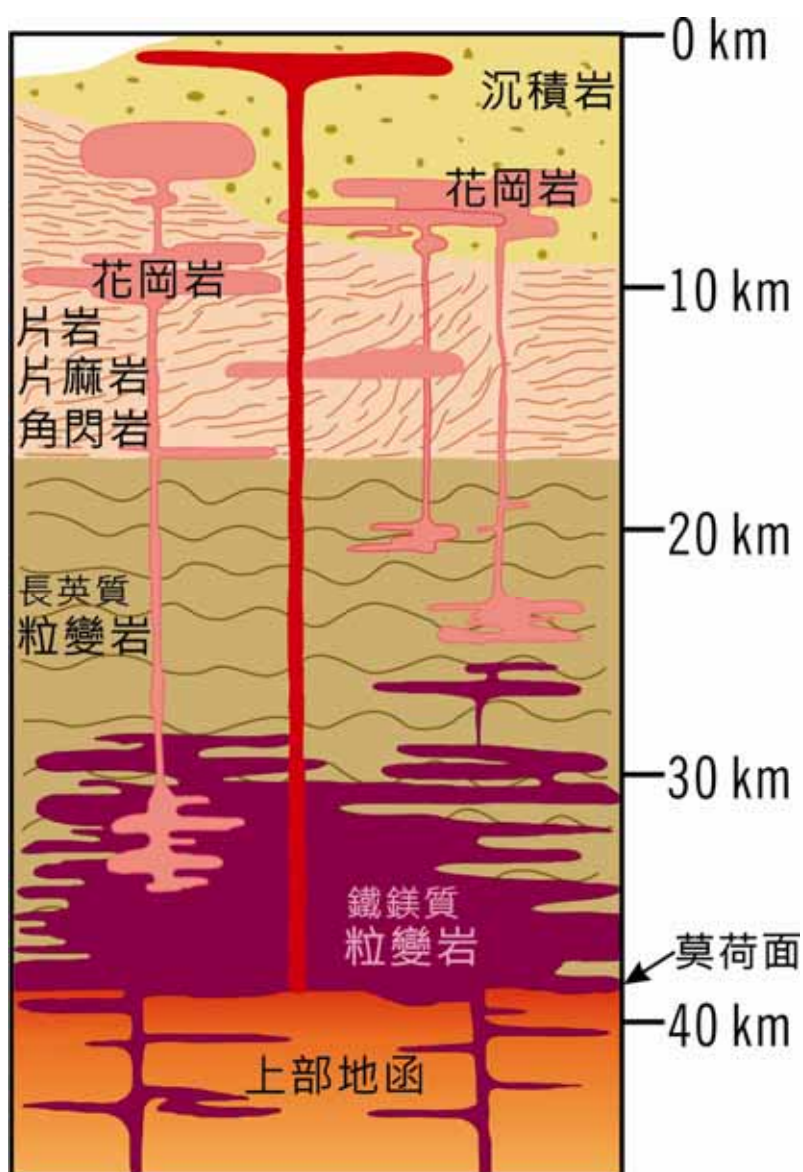


圖 1. 「現代」大陸地殼剖面示意圖

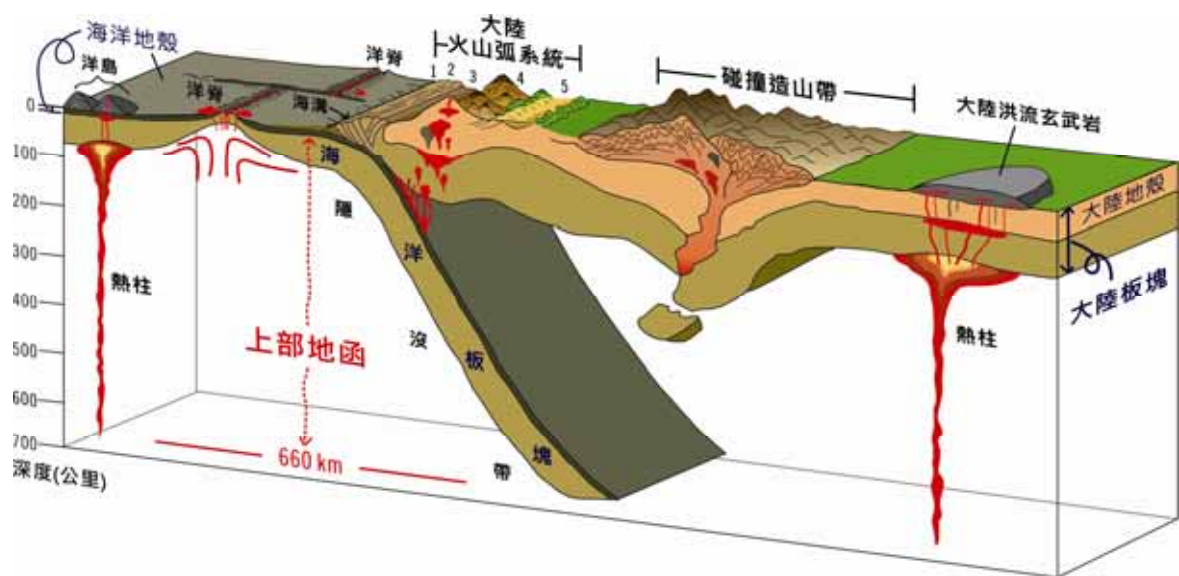


圖 2. 「現代」板塊作用示意圖。聚合型板塊邊界表現在島弧、大陸火山弧(圖示中編號 1-5 依序為海溝、增積岩體、弧前盆地、火山弧及前陸盆地)與碰撞造山帶等構造環境。張裂型板塊邊界表現在洋脊、大陸裂谷等構造環境，至於洋島與大陸洪流玄武岩則一般認為與來自深部的地函熱柱作用有關。(水平及垂直軸方向未按比例繪製)。



