

## 超羽流：地幔的深層結構

### 一 地殼板塊結構

地球裏面到底是怎麼一個狀況？這經過地質學家近半個世紀的努力，我們總算是有了一個粗略認識。地球和雞蛋的構造有點相像（雖然形狀並不一樣），外面包着的，是極薄的固體硬殼，即厚約數十公里的地殼；裏面相當於蛋白部分的是黏度頗高的熾熱熔岩，即地幔（mantle）；相當於蛋黃的中央部分是溫度和密度都更高的鐵核心（core）。

二者不同之處，是那薄薄一層地殼並非完整相連，而是由「浮」在地幔上，不斷緩慢移動的「板塊」構成。例如大西洋和太平洋底部都由薄板塊構成，它們從中央分裂，其兩側板塊不斷外向移動，形成裂溝，其中不斷有熾熱熔岩從地幔湧上來，造成大洋底下延綿數千公里的所謂「洋中央山脊」（mid-ocean ridge），以及其兩側平鋪於海底的新岩層。外移的薄板塊碰到厚得多的大陸板塊，則形成洋緣深溝，並沿之下沉而「潛沒」（subduct）到地幔中去。大陸板塊本身也在移動：例如印度板塊擠向歐亞大陸板塊，從而形成喜馬拉雅山脈和青藏高原（彩頁圖 a）。

此外，我們還發現，地幔也並非靜止：它在某些固定位置產生不斷上升的熔岩湧流，即所謂羽流（plume），而這會穿透海洋底下的板塊，造成海底或突出洋面的火山。由於板塊不斷移動，這些在固定「熱點」的羽流所造成的山峯便顯現為連串峯巒，甚至千百公里長的山脈，夏威夷群島就是其中最著名的例子。

地殼板塊為甚麼會不斷移動？基本理由是地球高溫核心的熱能無法以傳導（conduction）方式通過地幔散發到地面，因此令處於半熔狀態的地幔內部出現對流，後者轉而令浮在地幔上的地殼板塊移動。所以，地殼的板塊結構（plate

tectonics）和運動，基本上是由地球內部散熱過程驅動的。

### 二 為地球內部分層造影

在80年代以前，地質學家的注意力主要集中在於地殼板塊；近二十年，研究重點則轉向地球內部，即地幔和地核之中。研究的方法主要是把世界各地不同監測站所錄得的大量震波紀錄，加以詳細分析。由於不同性質的震波在不同密度、溫度和成分的介質之中有不同速度，而震波又會從震源依循許多不同途徑，即經過地表以及地球內各部分，到達遠方的監測站，所以綜合研究這些震波紀錄，便可以反過來推求地球內部的深層結構。這和醫學上所謂CT（computerised tomography）造影法，即以X—光從各個不同角度穿透人體，然後根據不同人體組織的吸收率反求內臟影像，是十分相似的，因此又稱震波分層造影法（seismic tomography）。地球內部結構變化非常緩慢，所以每次地震所「照耀」的都是同一結構。只要累積了足夠資料，並且用夠快、夠先進的計算機仔細分析，那麼其內部結構細節自然就會慢慢呈現。

### 三 地幔結構的造影圖

在今年五月間舉行的美國物理地質學年會（AGU）上，初次出現了利用上述技術直接以電腦測繪出來的精細地幔對流結構圖（彩圖 b），它初步解決了地幔到底是整體，抑或如以前那樣可以分為「上幔」（厚600-700公里）和「下幔」兩層的爭論。它顯示，在大陸邊緣「潛沒」的海底板塊（它溫度較低而密度較高，因此震波波速也

Reprinted with permission from *Science* 285, 187. Copyright 1999 American Association for the Advancement of Science.

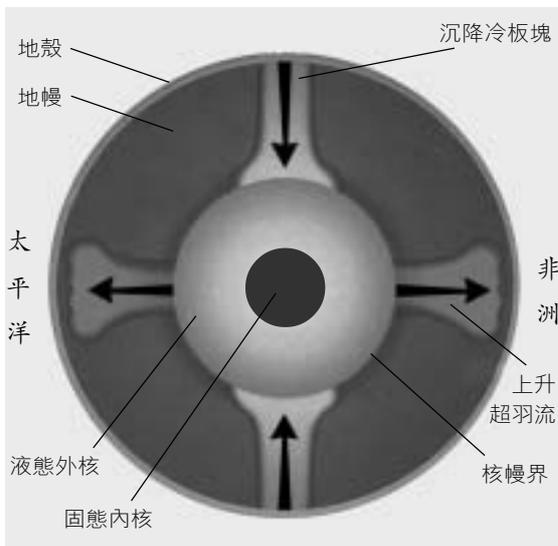


圖1 地球以及地幔內部構造示意圖

較高)是從地殼向下伸延,穿過整個地幔,到達地球核心—地幔界面(即「核幔界」),然後才沿界面向四周擴散。在加勒比海下面,以及太平洋西面諸如鄂克斯海、馬利安納群島、中爪哇等地,都發現了這樣的穿越上、下幔,筆直下沉的冷板塊。因此地幔是一整體的觀念,已逐漸為多數地質學家接受<sup>①</sup>。

更令人驚奇的是,地幔裏還有廣袤數百公里,從「核幔界」一直上升到地殼的所謂「超羽流」(Superplume):它基本上是一股溫度高於(因而密度和震波速度則低於)四周的巨大上升熔岩流。這其中最清晰可辨的,就是所謂「非洲超羽流」:它的「根」位置相當於南非好望角下面的核幔界面;它並非筆直上升,而是向東北方向傾斜(這大致是由地球的自轉造成),到達地殼時位置大約已在紅海南端埃塞俄比亞附近。除此之外,在冰島下面和太平洋西南部也另有兩股超羽流,雖然它的結構造影沒有那麼清晰<sup>②</sup>。

## 四 非洲超羽流

其實,長期以來,地質學家都為東非和南非高原海拔達到一公里左右,而其附近海底

也比正常深度隆起(即所謂 residual bathymetry)了500米左右感到困惑。現在,這一現象可以很自然地用非洲大陸底下的超羽流所產生的強大上湧力加以解釋了。去年華盛頓卡內基學院(Carnegie Institute of Washington)的兩位地質學家就已經應用由前述震波分層造影法所得的地幔密度變化資料,算出了由於非洲超羽流的上湧而造成地殼隆起(彩圖c及d)。他們認為,有不少迹象顯示,這一超羽流在大約4,500萬年以前初次在埃塞俄比亞附近衝擊非洲板塊底層,然後順着板塊下面的深坑分別向東西兩個方向流散,流距達到5,000公里——也就是說,從非洲西岸的喀麥隆以至東岸的馬達加斯加島的地層構造和火山活動,都可以用這超羽流統一解釋<sup>③</sup>。

因此,一個相當簡單的地幔結構(mantle tectonics)圖像已逐漸形成:地幔基本上可以分為若干對流格(convection cell):格的邊界是由冷的、從地殼直抵核幔界的下降板塊形成,其中央則是熱的、上升的巨大超羽流。地球核心的高熱藉着這巨大對流而散發到地面,地殼板塊的移動以及其升降也是與這內部動態結構密不可分。

兩年前我們報導了藉着震波分析而測得的地球內核與外核之間的相對轉動<sup>④</sup>;最近產生地球磁場以及上述相對轉動的機制也通過模擬計算初步闡明<sup>⑤</sup>,現在地幔整體結構又已經測繪出來。那麼,今後隨着計算機、計算技術以及地震測量的不斷進步,震波造影法變得更精密、準確、全面是可預期的,屆時地球內部就再不會有多少秘密了。

① Richard A. Kerr, *Science* 275, 613 (31 January 1997).

② Richard A. Kerr, *Science* 284, 1095 (14 May 1999) & 285, 187 (9 July 1999).

③ C. Lithgow-Bertelloni & P. G. Silver, *Nature* 395, 269 (17 September 1998).

④ 《二十一世紀》39, 123 (1997年2月)。

⑤ G. A. Glatzmaier & P. H. Roberts, *Science* 274, 1887 (13 December 1996).