



This Dynamic Earth
The Story of Plate Tectonics

板塊構造學說紀事

W. Jacquelyne Kious and Robert I. Tilling◎著
陳建志、馬家齊◎譯



南亞大地震和海嘯為什麼會發生？

是**海底火山爆發**造成了夏威夷群島
還是**板塊推擠**形成的？



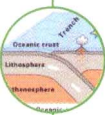
恐龍滅絕的真相不是因為天寒而是…？

板塊構造學說的確立是怎麼演進的？

「板塊理論」在地球科學裡所扮演的角色，就像W. Jacquelyne Kious和Robert I. Tilling所比喻的，一如物理學之原子結構論、生物學之進化論般地基礎。

中央大學太空及遙測研究中心助理教授 張中白推薦



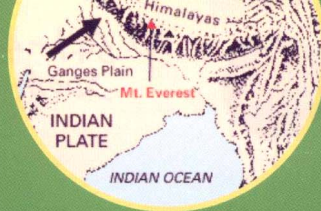
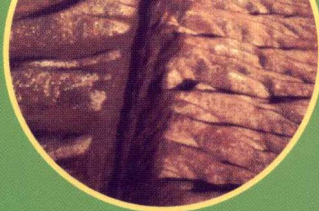
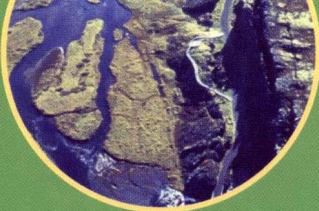


This Dynamic Earth **The Story of Plate Tectonics** **板塊構造學說紀事**

作者 ◎ W. Jacquelyne Kiouss 、 Robert I. Tilling

譯者 ◎ 陳建志 國立中央大學地球科學系副教授
馬家齊 台灣省桃園農田水利會研究員

五南圖書出版公司 印行



This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics

This book was originally published in paper form in February 1996 (design and coordination by Martha Kiger; illustrations and production by Jane Russell). It is for sale for \$7 from:

U.S. Government Printing Office
Superintendent of Documents, Mail Stop SSOP
Washington, DC 20402-9328

or it can be ordered directly from the U.S. Geological Survey:
Call toll-free 1-888-ASK-USGS

Or write to
USGS Information Services
Box 25286, Building 810
Denver Federal Center
Denver, CO 80225
303-202-4700; Fax 303-202-4693

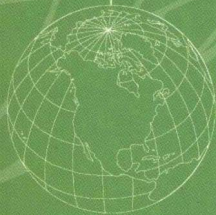
ISBN 0-16-048220-8

Version 1.10

The online edition contains all text from the original book in its entirety.
Some figures have been modified to enhance legibility at screen resolutions.
Many of the images in this book are available in high resolution from the USGS Media for Science page.

USGS Home Page

URL: <http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>
Contact: jmwatson@usgs.gov



國家圖書館出版品預行編目資料

板塊構造學說紀事 / W. Jacquelyne Kiouss, Robert I. Tilling 作 ; 陳建志, 馬家齊譯. -- 初版. -- 臺北市 : 五南, 2005[民 94]

面 ; 公分

參考書目 : 面

譯自 : This dynamic earth: the story of plate tectonics
ISBN 957-11-3926-2(平裝)

1. 結構地質學

353

94003853

5U01 This Dynamic Earth: the story of Plate Tectonics

板塊構造學說紀事

作 者 W. Jacquelyne Kiouss、Robert I. Tilling

編 輯 蔣和平

出版者 五南圖書出版股份有限公司

發行人 楊榮川

地 址 : 台北市大安區 106
和平東路二段 339 號 4 樓

電 話 : (02)27055066 (代表號)

傳 真 : (02)27066100

劃 撥 : 0106895-3

網 址 : <http://www.wunan.com.tw>

電子郵件 : wunan@wunan.com.tw

顧 問 財團法人資訊工業策進會科技法律中心

版 刷 2005 年 3 月 初版一刷

定 價 350 元

版權所有・請予尊重

譯者序



LESSON 1

導讀 Preface

P.1



LESSON 2

歷史透視 Historical perspective

P.3



LESSON 3

理論的發展 Developing the theory

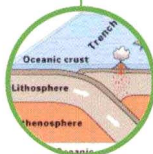
P.19



LESSON 4

板塊運動 Understanding plate motions

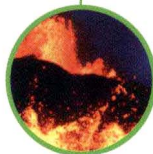
P.43



LESSON 5

熱點、熱柱“Hotspots”: Mantle thermal plumes

P.65



LESSON 6

未解之謎 Some unanswered questions

P.75



LESSON 7

板塊與人類 Plate tectonics and people

P.85

參考文獻 P.107

LESSON

1

導讀 Preface

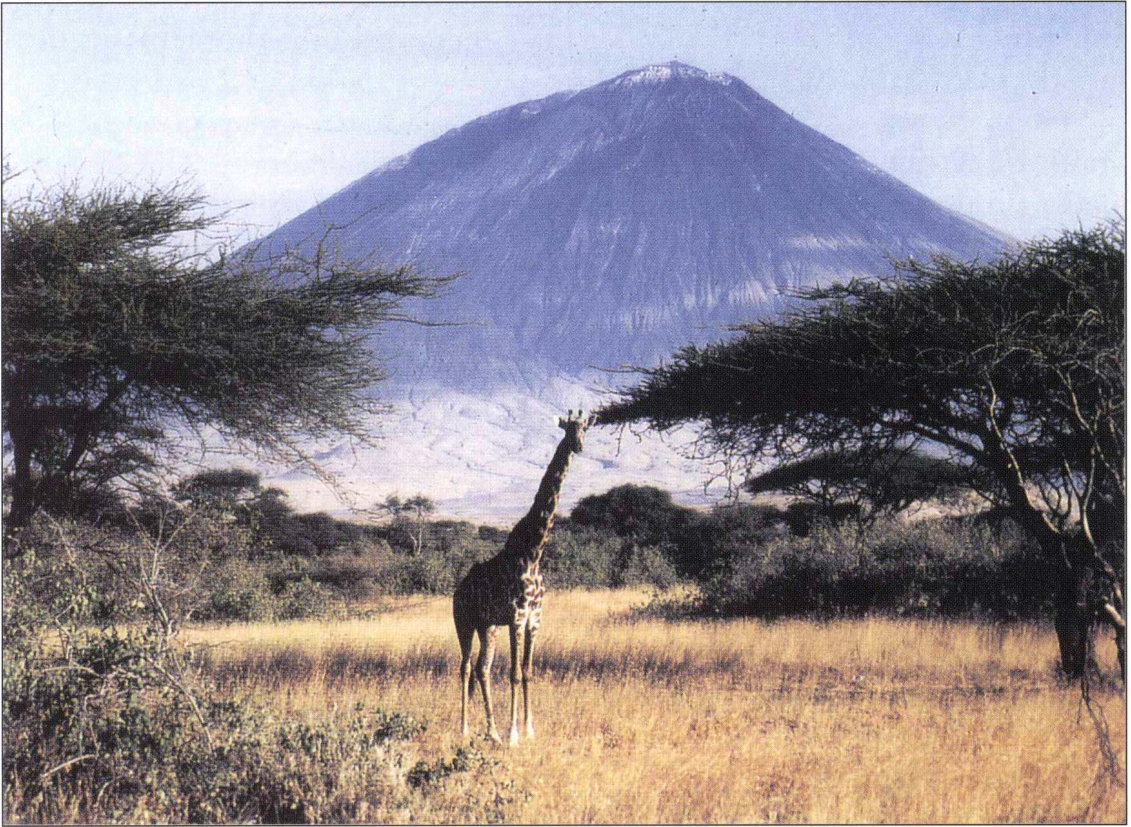
六十年代早期，由於「板塊構造理論」的出現，掀起了地球科學界的一場革命。自此以後，地球科學家不斷地檢驗、修補該理論。時至今日，科學家對板塊運動如何影響人類所居住的這顆行星，總算有了深刻的瞭解與認識。

板塊運動幾乎直接、間接地影響著所有的地質活動，不管是過去的、現在的，甚至是未來的。漂移的板塊，使地表的地形、地貌，持續地發生改變。人類看待眼前景物的觀點，廣受新理論的影響。

板塊運動的力量與結果，一方面造福著人類的生活，卻也同時威脅著人類的生存。一個地震或者火山爆發所釋出的能量，比目前人類能夠產生的任何力量都要強大，而我

們卻連預測這些突發災害的能力都沒有。不過，不能控制板塊運動的過程，並不影響雄心勃勃的科學家窺其究竟的野心。事實上，科學家也確實掌握了板塊運動許多方面的特性。而隨著認識越深，人們就越能禮讚大地的富麗宏偉，也就越懂得敬畏地球在偶然間向人類展示的壯闊威力。

本書深入浅出地介紹板塊構造理論的概念。有關板塊學說在發展過程中，一些重要的人物與科學發現，也將本書中加以敘述。不過，仍然要提醒讀者的是，雖然板塊構造理論的主要觀念，在今日已廣泛地被學界所接受，但還是有一些問題正困惑、挑戰著地球科學家。可以說我們正經歷地球科學界的一場革命，這場革命方興未艾。



藍開 (Oldoinyo Lengai) 火山是位於東非大地塹內的一座活火山。東非大地塹的形成，是因為板塊邊緣的張裂作用所致。(Photograph by Jorg Keller, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Germany.)

This Dynamic Earth

The Story of Plate Tectonics

板塊構造學說紀事

歷史透視

Historical perspective

「板塊構造學」，一門研究板塊在地球表面如何分布、移動，並如何影響地表各種地質景觀、地質活動的學問。事實上，在板塊構造學說出現前，就有人相信，現在散落四處的各大洲，應是由較早之前的一塊面積龐大的「超大陸」分裂的結果。而大陸漂移學說，也因此被視為板塊構造理論的前身…

本章就要為讀者細述板塊構造學的形成歷史與學者們如何一步步地構築出今日的板塊構造學說。

》大陸漂移學說

》深入地心

》何謂構造板塊

》「大陸漂移說」之父——阿弗烈·路塞·魏格納

》板塊構造理論

》極地恐龍？



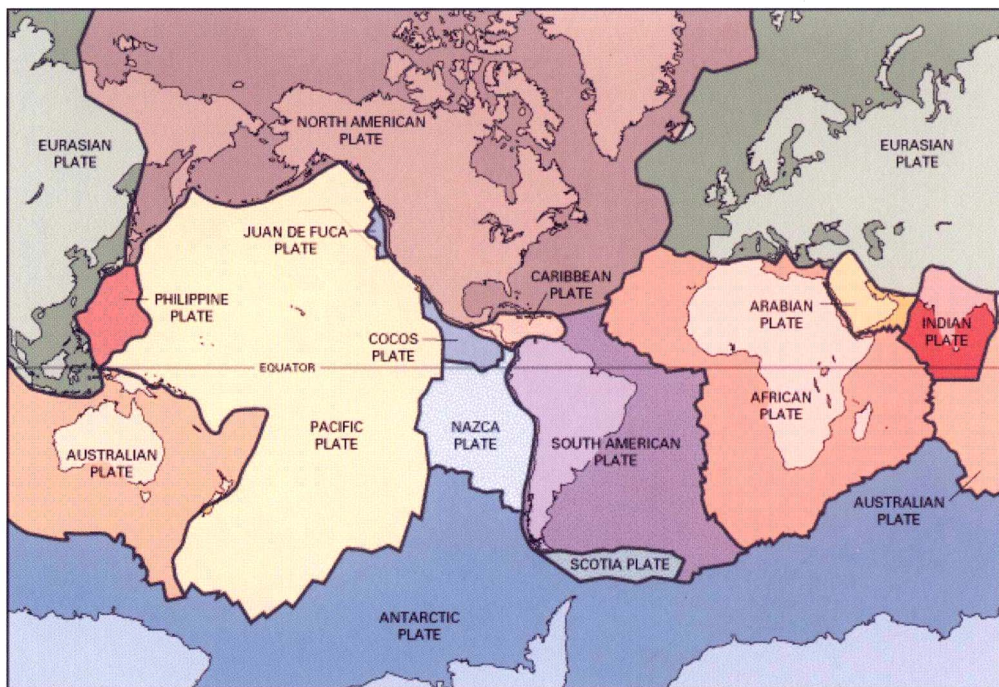
LESSON 2 歷史透視

Historical perspective

大陸漂移學說

「板塊構造學」，是一門研究板塊在地

球表面如何分布、移動，並如何影響地表各種地質景觀、地質活動的學問。在地質學的術語中，「板塊」一詞指的是一塊巨厚、堅



地球表面可以視為由數塊剛硬的平板拼湊而成，地質學家稱這些平板為「構造板塊（簡稱板塊）」。板塊在地球表層彼此不斷地推擠、運動。

硬的固體岩石平板；而「構造學」則源自希臘文，有「建造」、「建構」的意思。板塊構造的理論，主張地球的最外一層，是由十餘個大小不一的板塊拼湊而成。這些板塊漂浮在一個溫度較高、流動性較佳的物質上。各板塊受其下物質流動所牽引，乃彼此有相對速度而互相擠壓。

Plus! 深入地心

早在古希臘時代，人們就已經得知地球的尺寸大小了。現在知道的地球直徑，大約是 12570 公里。但另一方面，對地球內部的認識，卻直到十九、二十世紀之交，科學家才得以利用地震學的方法，定出地球的三個主要分層，即地殼、地函與地核。地球的這種層圈構造，可比擬成一顆煮熟的雞蛋。

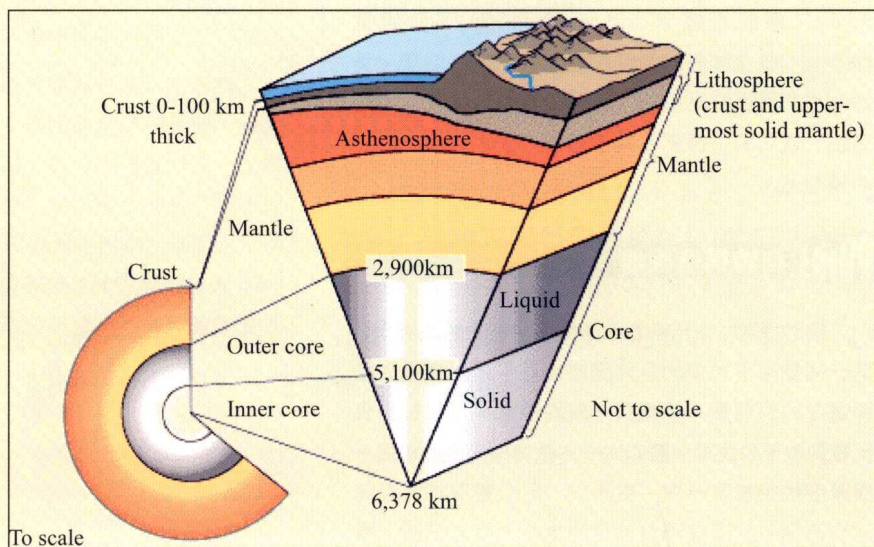
「地殼」是地球最外的一層，比起其他兩層的厚度顯得特別地薄，而且具有剛性。在海洋底下地殼厚度變化較小，平均約 5 公里厚，最厚的部分也不超過 10 公里。而陸地之下的地殼厚度，就比較不規則，平均厚度約 30 公里，在某些崇山峻嶺地區，像歐洲阿爾卑斯山區或美國內華達山

區（Sierra Nevada）底下，地殼厚度更可達到 100 公里厚。就如蛋殼一般薄而易碎，科學家發現地殼其實也極為破碎。

地球內部構造剖面。為求清楚繪出幾個主要的地球層圈構造，右側的剖面並未依真實比例描繪。但從左下角依真實比例測繪的圖中可知，若把地殼想像成地球表面一層薄薄的皮膚，確實一點也不為過。

地殼之下是一層半固態灼熱而稠密的岩層。其厚度達二千九百公里，地球科學家稱之為「地函」。相較於地殼而言，地函內含有比較多的鐵質、鎂質和鈣質。因為地球內的溫度、壓力隨著深度而增加，所以地函內的物質也更為滾熱、更為緻密。換言之，若把地函比擬成一個煮熟的蛋白，也頗為貼切。

再深入地球中心，我們就碰到「地核」了。由於地核的成份是鐵鎳合金，而不再是「石質」成份，



因此密度上幾近地函的兩倍。實際上，地核本身還可再細分成兩部份，即外核與內核。兩者厚度各分別為二千二百公里與一千二百五十公里。在狀態上，內核為固態物質，外核則為液態流體。當地球旋轉時，液態外核隨之流動。一般相信，這種流動正是地磁場形成的重要因素。

毋庸置疑地，地球內部結構密切影響著板塊構造運動。地函上部的物質溫度比較低，因此比其下的物質剛硬，從很多方面來看，其物理性質反而較類似上覆的地殼，兩者共同形成所謂的「岩石圈（lithosphere，源自希臘字 lithos，其意為堅硬的石頭）」。岩石圈在海洋地區或火山活躍的大陸地區，譬如美國西部，有減薄的趨勢。大部分地區的岩石圈厚度，平均在八十公里左右。整個岩石圈又分裂成數塊涵蓋各大陸與大洋的板塊，在地球外圍互相推擠、移動。科學家相信岩石圈下方，是地函中一段流動性較高的圈層，名為「軟流圈（asthenosphere，源於希臘字 asthenes，軟弱、脆弱的意思）」。軟流圈內的物質在漫長的地質時間裡，受到地球內部高溫高壓的作用，變得相當柔軟而極易流動，岩石圈彷彿就在其上漂浮，受其牽引而緩緩地移動著。

Plus! 何謂構造板塊

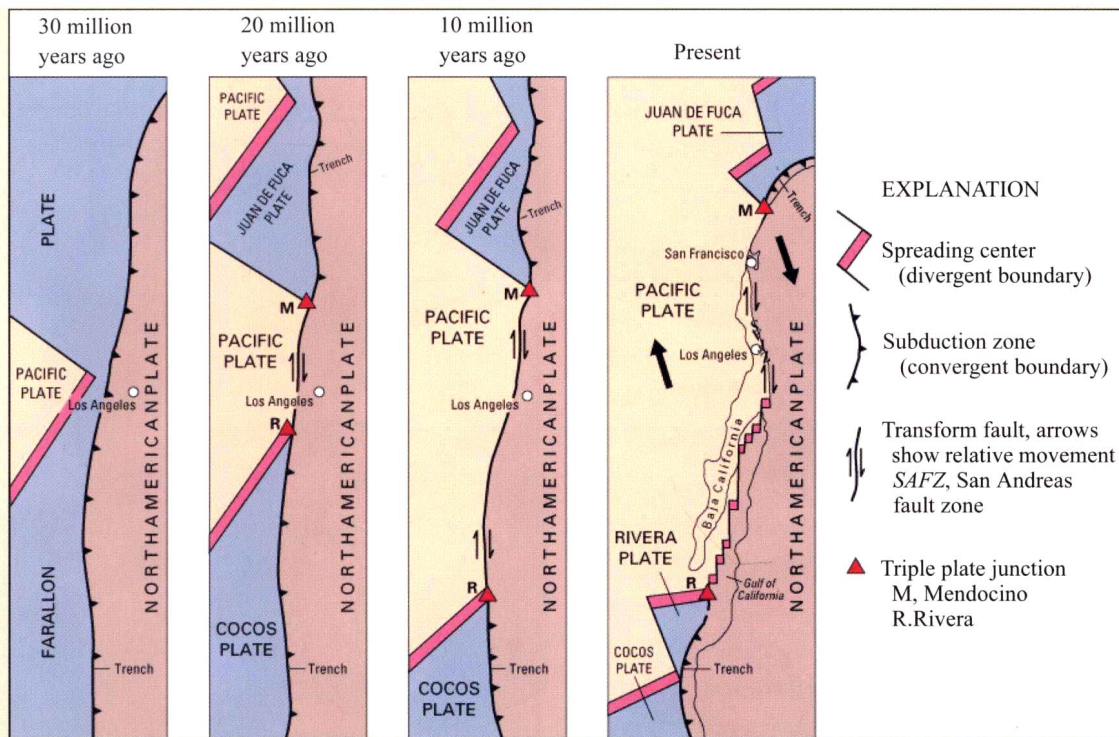
構造板塊（或稱為岩石圈板塊，常簡稱為板塊）是一個外型不規則的巨大固體岩石平板，包括大陸和海洋的岩石圈。板塊尺寸差異很大，可從幾百公里寬到數千公里寬，譬如太平洋板塊與南極洲板塊。而厚度也相當不一致，從小於 15 公里厚的年輕海洋岩石圈，到厚達兩百公里的古老大陸岩石圈，譬

如北美大陸板塊與南美大陸板塊。

如此厚重、巨大的固體岩石，如何能漂浮呢？關鍵就在於岩石的成分組成。大陸地殼是由花崗岩質的岩石組成的，通常含有石英、長石等較輕的礦物成分；反之，海洋地殼由比較稠密而重玄武岩質的岩石組成。兩種地殼在重量與密度上的不平衡，因而影響了板塊的厚度。海洋下的地殼通常僅約 5 公里厚，但因大陸岩石比較輕，其下的岩石因而比較厚，可達 100 公里。就如海水中的冰山，浮在水面上的其實僅是冰山一角一樣，大陸底下也有較深的「大陸根」，支持其較高的高度。

大部分板塊邊界，因為隱匿在深洋底下，人們常無緣親見。不過海洋板塊的邊界，則可從外太空 GEOSAT 衛星的觀測，精確地描繪出。這些邊界附近，因為板塊彼此推擠，通常會發生許多地震或火山活動。在地球四十六億年的歷史中，板塊可能很早就演化形成了，而且在地球表面，就像遊樂場中的旋轉杯一般，重複匯聚與分離，持續地漂移著。

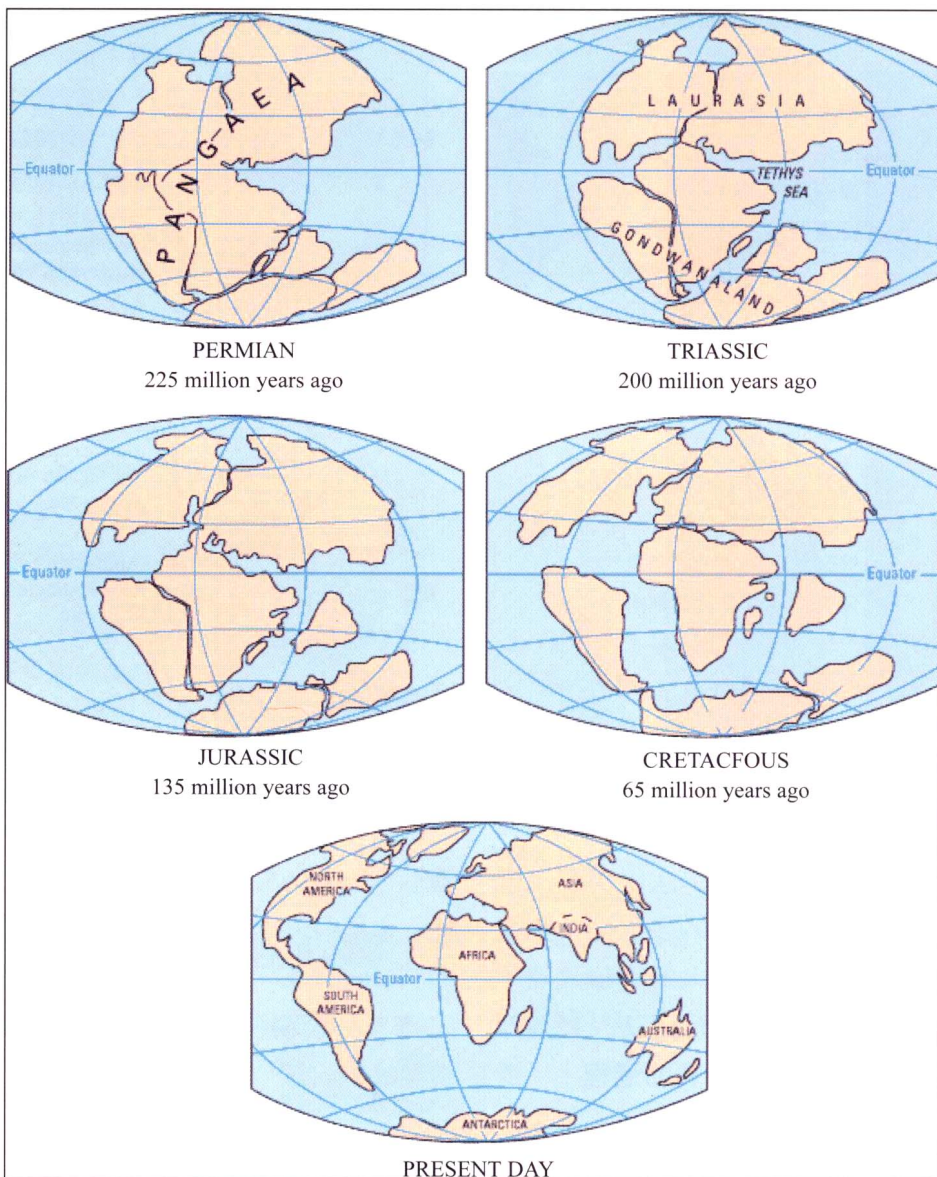
地表上很多特性都會隨著時間演化，板塊亦復如此。部分甚至全部的海洋板塊，可能隱沒、沉入另外一個比較輕的板塊（這絕大多數是大陸板塊）底下，乃至完全消失掉。目前俄勒岡和華盛頓海岸外，就正發生這樣的板塊隱沒作用。弗羅倫（Farallon）板塊所殘留的加璣帝角板塊，正持續地向東沉入北美板塊底下，直到把自己完全耗盡為止。



弗羅倫板塊隱沒演化的過程。三千萬年前，弗羅倫板塊仍佔有相當大的面積。隨其逐漸東移，隱沒到北美板塊與加勒比海（Caribbean）板塊底下時，原板塊遂分裂成現在的加璣帝角、科寇斯（Cocos）與禮弗拉（Rivera）三個小板塊。圖中粗黑實心箭頭，代表目前太平洋板塊與北美板塊間的相對運動。

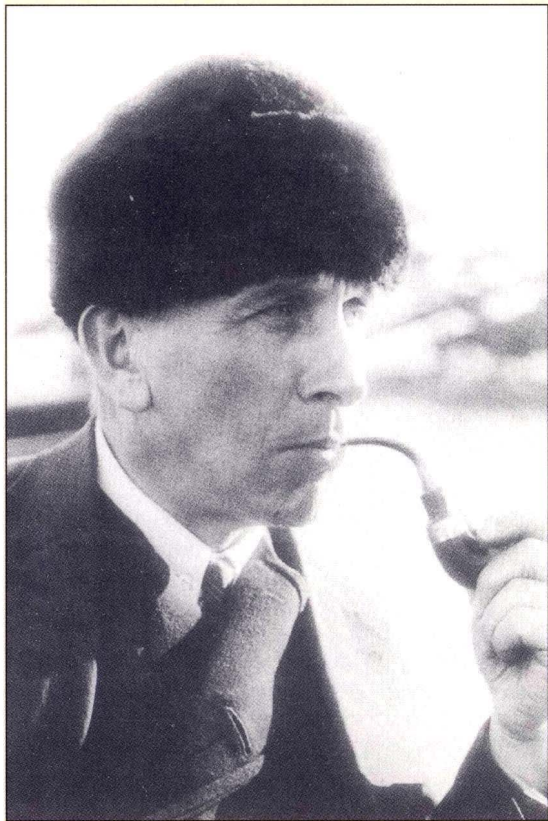
事實上，在板塊構造學說出現前，就有人相信，現在散落四處的各大洲，應是由較早之前的一塊面積龐大的「超大陸」分裂的結果。下圖說明了這塊名為「泛蓋亞（Pangaea）」的超大陸分裂的過程。「泛

蓋亞」一詞，在希臘文中意指「所有的陸地」，是由德國氣象學家魏格納（Alfred Lot-har Wegener），在其大陸漂移學說中率先提出的。大陸漂移學說，也因此被視為板塊構造理論的前身。



根據大陸漂移理論，超大陸「泛蓋亞」開始破裂分離，大約是在二億年前至二億二千五百萬年前。分裂、漂移的結果，各陸塊最後形成今日所見的樣貌。

Plus! 阿弗烈·路塞·魏格納



魏格納 (1880-1930)，「大陸漂移說」之父。(Photograph courtesy of the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany.)

魏格納對科學界的最大貢獻，或許是他那種能編織一個表面上看似無關卻能吸引他人目光之學說的能力。無庸置疑地，他是個一流的地球物理學家，對地球的活動有著深刻的瞭解。

魏格納的科學觀是在 1914 年第一次世界大戰的軍醫院中，受到良好磨練的。他當時是德軍士兵，因為作戰受傷而躺在醫院裏。在白色的病床上，他有充裕的時間去思考吸引他好多年的有趣事物。

如同他的許多前輩，魏格納被南美洲和非洲的海岸線是如此契合的現象所吸引，但他獨特的地方在於，為了支持自己的學說，魏格納找出許多地理學和古生物學的證據，來證明這兩塊陸地曾經結合在一起。在他長期養病期間，魏格納完整地將他的構想發展成「大陸漂移說」，並在 1915 年以「大陸與海洋的起源」為書名出版。

魏格納在 1905 年獲得天文學博士學位，但不久他的興趣就轉向氣象學，在他有生之年，他參加了數次格陵蘭的氣象探險計畫。生性頑固的魏格納，花了許多時間在為他的大陸漂移說作辯護。這個學說一提出就受到嚴厲的攻擊，而且在他有生之年，都未獲得肯定與接受。大多數地理學權威，惡意批評身為氣象學家的魏格納，只是個門外漢，可不是研究地理學或地質學的科班生。但魏格納並不理會他們，一本初衷地進行研究，企圖使他的學說更趨完備。

在他去世前兩年，魏格納完成了他其中的一個人生目標：成為大學教授。事實上，他在德國本土不斷地覓職，都未能成功，而是最後被澳洲格瑞茲（Graz）大學聘為教授的。不過，魏格納在求職上的失敗和延誤，可能反而使他在科學研究上，找到了更寬廣的路子。就如同魏格納的老朋友兼老同事強尼·喬治（Johannes Georgi）所形容的：「常聽說他又沒被提名了，因為他的背景總是特別引人注意，那些傢伙總認為他在這個領域中沒有地位。」

可惜的是，魏格納在他實現教授夢不久，就死於格陵蘭的氣象探險旅程中了。喬治曾要求魏格納協調一次建立冬候氣象站的探險，以研究高空的高速氣流（暴風雨的軌跡）。魏格納勉強地答應，但由於惡劣的天氣而延誤許久。1930年九月，魏格納和其他十四人開始著手工作，共準備了十五組雪橇和四千磅的補給品。嚴寒的氣候使大部分人都放棄了，只剩下一個格陵蘭人願意留下來，但魏格納已經下定決心要完成這個氣象站，因為他知道喬治和其他研究人員非常期待這個氣象站。在嚴寒的氣候中旅行，氣溫低於零下54°C，魏格納終於在五個星期後，到達了氣象站的預定地。隔天為了要儘快回家，他堅持在早晨折返基地營，只是他始終未能走到。翌年夏天，他的遺體在天寒地凍的冰土中被發現了。

魏格納在他五十歲去世那年，依然是個精力旺盛而開朗的研究者。在他英年早逝的前一年（1929年），他的經典著作出了第四版，在這一版中他加入了一篇影響深遠的報告，指出淺海在地質年代上應是較為年輕的。1930年，魏格納緊抓著20年代末期，由德國研究船「流星號（Meteor）」所獲得的大西洋深海探測資料進行分析，這些資料顯示，沿著大西洋中洋脊的許多小山脊，存在著中央山谷。他認為大西洋中洋脊中較淺的部分，其地質年代較年輕的特徵可能起因於熱膨脹，而地塹般的中央山谷則源於海底地殼的延伸，海底中央的年輕地殼擴張則造成板塊構造的擠壓。魏格納的這個推論，引起板塊構造學權威美國華盛頓特區海軍實驗室彼得·佛特（Peter R. Vogt）博士的重視，他暗示「魏格納可能已經掀起板塊構造學的革命，若他能活得更久，他就會是實際的推動者。」無論如何，在往後

的三十年裏，魏格納的理論確實形成了板塊構造理論的架構與催化劑。



1930年十一月一日在格陵蘭的最後一次氣象探險，魏格納（左）和擔任嚮導的愛斯基摩人的合照，這是他生前最後一張照片。（Photograph courtesy of the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany.）

板塊構造理論

板塊構造理論，是一個相當新穎的科學概念。大約三十年前，才由地球科學家提出。但是從它被提出之後，就徹底改變了人

們對地球的看法與理解，拓展了人類的視野。板塊構造理論，幾乎統攝地球科學中各個領域的研究，從古生物學（研究化石的學問）到地震學（研究地震及其各類現象的學問）。板塊構造理論也解釋了數個世紀以來，科學家極力思索的問題——地球上的地震和火山活動，為何總發生在某些地區？阿爾卑斯（Alps）山和喜馬拉雅（Himalayas）山這類巨大的山系，是如何形成的？又為何形成呢？

地球為何如此不安？是什麼力量讓大地地撼山搖？是什麼力量產生火山爆發時的崩雲亂石？又是什麼力量可以將山脈抬升到如此聳人的高度？長久以來，科學家、哲學家、乃至於神學家，都在追尋答案。十八世紀初，大多數的歐洲人都還相信，聖經裡記載的那場大洪水，雖然有方舟拯救了地球上的生物，不過地表地貌卻逃不過洪水肆虐的厄運。地形在像洪水這種突臨的災難前後，變得截然不同。這樣的觀念，形成地質研究中所謂的「災變論」，地質學成了一連串災難的記錄，而地球上所有的變化，都是突如其來的。

1785 年，蘇格蘭地質學家詹姆士·赫登（James Hutton）獨排眾議，在這種思想氛圍裡，留下了一個省人的想法。赫登認為，

現在發生在地球上的一切地質作用與過程，必然在久遠的地質長河裡也發生著。地球的面貌，是這些作用長久累積的結果。

「均變」和「災變」，是同等地影響著地表面貌。赫登，或者是後人改述他的話，說道：「現在是過去之鑰（The present is the key to the past）」。這就是所謂的「均變原理」，這句話後來更成了「均變論」的第一教條。不過，就像許多天才的想法一樣，均變論要取代災變論的地位，成為地球科學思潮中的主流，還得等半個世紀，直到十九世紀中葉之後。

20 世紀以前，就有人懷疑過，各個大陸的位置也許曾經被移動過。最早可追溯到 1596 年，荷蘭製圖師亞伯拉罕·歐提留斯（Abraham Ortelius），已經在他的「地理彙編（Thesaurus Geographicus）」中，提出這種觀點。歐提留斯在書中敘述道：「美洲大陸也許是被地震或洪水，從歐洲和非洲大陸上撕開的，撕痕甚至還保留得相當完整。我們從世界地圖上，仔細地審視這三塊陸地的海岸線，就不難察覺出來。」

被遺忘許久後，十九世紀時，歐提留斯的論調再次出現。然而真正被整裝、擴建成一個嚴肅的科學理論，則有賴於 1912 年三十二歲的魏格納在發表的兩篇文章上所做的