

What Force Drives the Crustal Movement?

Shunliang Chi^{1,2}

¹Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan Hubei

²Hebi Earthquake Administration of Henan Province, Hebi Henan

Email: chisl@263.net

Received: Oct. 28th, 2019; accepted: Nov. 11th, 2019; published: Nov. 18th, 2019

Abstract

It is the core issue of earth science to give kinetic interpretation of formation folds, formation of large mountains and the origin of land and sea. From the theory of cold shrinking, the drift of the mainland to the establishment of the theory of the plate, what kind of power drive is always a difficult point of theory. From the law of the movement phenomenon of the trough, the tectonic movement originated from the opposite direction and coordinated large-scale horizontal migration of the crust material in the deep crust. The gravitational pull of the sun and the moon produces alternating tidal stress, causing the shell and the ring to shear each other. Due to the "shear motion instability", the tidal stress transforms the driving force F_c that drives the shells on both sides of the Moho surface and the horizontal migration of the bismuth material, causing the Moho surface to fluctuate to form the largest internal wave system on the earth. The gravitational potential energy contained therein is sufficient for the global tectonic movement, and the energy comes from the rotational energy consumption of the earth. The finite element numerical simulation realized the settlement of the ground trough with a width of 10,000 meters and the uplift of the two sides, which uncovered the mystery of the trough activity. "Internal wave theory" gives a genetic explanation for the four global tectonic phenomena of the global mid-ocean ridge system, continental crust double-layer structure, continental overflow basalt and oceanic volcano. The origin of the continent is the core issue of global tectonic theory. The "Civil Wave" reveals the crustal thickening mechanism of "the thin crustal bottom material automatically migrates to the bottom of the thick crust", which grows the island into a continent on which humans depend. According to the "continental roots" and other phenomena, "internal wave theory" supports the mainland fixed theory. The development direction of the global tectonic movement is: the small islands in the ocean merge into land, the continental crust expands, the oceanic crust shrinks, and eventually becomes a planet dominated by the continental crust and the tectonic movement stops like the moon. "Internal wave theory" is not an improvement of "sectors". From the theoretical establishment starting point, starting area, dependent dominant energy, material movement form, and geological history length, both are different. This is an academic system of two different ideas.

Keywords

Earth Rotation, Mantle Differentiation, Geosyncline Activity, Solid Tidal, Wave Motion

究竟是什么力量推动了地壳运动？

池顺良^{1,2}

¹中国科学院测量与地球物理研究所，湖北 武汉

²河南省鹤壁市地震局，河南 鹤壁

Email: chisl@263.net

收稿日期：2019年10月28日；录用日期：2019年11月11日；发布日期：2019年11月18日

摘要

对地层褶皱、大山脉形成及海陆起源给出动力学解释，是地球科学的核心问题。从冷缩说、大陆漂移说到板块理论创立，何种力量驱动始终是理论的难点。从地槽活动现象规律，找到构造运动源于地壳深部壳幔物质的相向、协同大尺度水平迁移。日月引力产生交变固体潮汐应力，引起壳、幔圈层相互剪切。因“剪切运动不稳定性”，潮汐应力转化出驱动莫霍面两侧壳、幔物质水平相向迁移的驱动力 F_c ，使莫霍面波动形成地球上最大的内波系统。其中蕴藏的重力势能，足够全球大地构造运动所需，能量来自地球转动动能消耗。有限元数值模拟，实现了幅度万米的地槽沉降及两侧地带隆升，揭开了地槽活动之谜。

“内波说”对全球洋中脊体系、陆壳双层结构、大陆溢流玄武岩和洋底火山四种全球性大地构造现象给出成因解释。大陆起源是全球构造理论核心问题。“内波说”揭示的“薄地壳底部物质自动向厚地壳底部迁移”的地壳增厚机制，将海岛生长成人类赖以生存的大陆。根据“大陆根”等现象，“内波说”支持大陆固定说。全球构造运动的发展方向是：洋中小岛合并成陆地，陆壳不断扩大，洋壳不断缩小，最终像月球那样成为陆壳为主、构造运动停止的星球。“内波说”不是“板块说”的改进。从理论建立出发点、出发地域、依赖的主导能源、物质运动形态、地质史长度方面，两者均不相同。这是两种不同思路的学术体系。

关键词

地球自转，地幔分异，地槽活动，固体潮汐，波动运动

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

牛顿力学(天体、弹塑性体、流体力学)建立后，用动力学解释地层褶皱、大山脉形成及海陆起源，成为地质学核心问题。从鲍蒙发表冷缩说、魏格纳提出大陆漂移到板块理论创立，地质学一直在探索、寻找，究竟是什么力量推动全球大地构造运动，却找不到可以推动大陆漂移的力，大陆漂移说面临困境。

霍姆斯提出“地幔对流”假说，“地幔对流”提供强大推力的可能性使漂移说摆脱困境，板块构造理论诞生。

经 60 年发展，板块理论已成为地学主流理论。板块构造内容被编入学校教科书，“大陆漂移”、“板块碰撞”已广泛流传。然而，这个由大洋地质出发建立的理论，“对大陆板块及其板内构造演化的解释

则显得苍白无力……尤其是板块运动的驱动力问题，迄今没有一个令人满意的解释” [1]。

马宗晋院士对板块理论的评价是：“板块运动机制至今没有确定，板块运动驱动力不能确定，始终是板块构造理论的严重缺陷。动力学机制，是任何一种学说或理论赖以立足的根基，所以是一个不能回避的问题。任何一种合理的地壳动力学或地球动力学假说，至少要满足以下一些条件：① 能对全球的构造运动特征及其空间分布规律和构造演化过程作出解释；② 所依赖的动力因子既有足够的能量，其作用方式又能合理说明构造变形场的特征；③ 应符合物理学的基本原理和地球内部物质的物理 - 化学性质。从这些判别条件看，迄今还没有一种地球动力学假说是完善的” [2]。

滕吉文院士指出：“板块构造理论以地幔对流来解释其运动的力源，……但也应当看到，它毕竟仍是一个‘猜想’，这便表明，当今的一切地学模型都是建立在对地幔对流假设模型的基础之上，即十分缺乏观测数据的检验” [3]。

矿物学家们对生成深度达 150~200 km 的大颗粒天然金刚石中环带结构的研究发现，在金刚石生长的 3000 Ma 间，环境压力没有变化，金刚石在地幔固定深度生长[4] [5] [6] [7]。金刚石不可能不跟随对流地幔运动，地幔没有对流，也就没有推力可以提供。

那么，到底是什么力量推动了全球大地构造运动？

动力来自能量转化。靠热能驱动的板块说是一种“热机理论”。地球生成以来，已释放热能 $6 \times 10^{30} \sim 20 \times 10^{30}$ J，自转动能 15×10^{30} J。现在，每年释放热能 9.4×10^{20} J，自转动能 1.3×10^{20} J。全球地震活动每年释放能量 5×10^{18} J，此值为构造运动所需能量下限。自转能和热能的年耗散分别比它大 1~2 个量级。其他能量，如地磁场总能量为 10^{22} J 量级，数量上远远不够[8]。

2. 地球转动能如何转化为大地构造运动驱动力

地球自转作用，在以往地球动力探索中就受到重视，但多数意见认为地球自转产生的离心力、离极力和潮汐应力在构造运动中作用十分微弱[9]。然而，纬度高于 73° 地球自转轴通过的两极地区缺少地震，强震活动多发于南北纬 40 度地带的地震学百年观测事实表明：地球自转动能极可能是构造运动的驱动能源。

2.1. 地球自转的何种效应与构造运动有关

地球自转产生的效应有：离心力、极移力、科里奥利力、潮汐应力等。只有地球转动能被消耗，才能将转动能中的一部分通过某种机制转变成地壳运动所需能量。地球转动能耗散主要通过潮汐作用发生。潮汐耗散对地球自转的减速作用已得到观测证实[10]，“转动机理论”必定与潮汐过程有关。

2.2. 从百年地质勘察揭示的地槽活动现象规律中寻找构造运动动力机制

建立物质系统运动的动力学理论，必须以对这个系统的运动学观测为基础。建立在实证资料基础上经典的“地槽 - 地台”说揭示的构造运动的运动学现象规律，是我们寻找地壳运动动力学理论的运动学基础。

经典地质学发现令人惊讶的事实是：所有构成大山脉的地层都是在海底沉积形成。沉积地层厚度可达 1.5~2 万米！然后，在某个时候，这些沉积地层又会回返隆起，形成山脉；地层褶皱，断裂、火山、岩浆活动活跃。中央山地出现宽数十公里，长数百公里深不见底的花岗岩岩基。

图 1 是喜马拉雅山脉珠峰的照片，峰顶为水平产状奥陶纪结晶灰岩。由奥陶纪至志留纪、泥盆纪、石炭纪……直到第三系，沉积地层总厚度 1.2 万米。珠峰顶海相石灰岩地层曾位于古地中海下 1.2 万米深处。这 1.2 万米厚沉积地层形成经历 5 亿年时间，隆升至现在高度只用了五千万年。



Figure 1. A photograph of Mount Everest in the Himalayas. The peak is a horizontally occurring early Ordovician crystalline limestone

图 1. 喜马拉雅山脉珠峰的照片，峰顶为水平产状奥陶纪早期结晶灰岩

地槽活动中沉降与隆起带交互分布的平面格局，用拉伸和压缩机制均解释不了。关键在于，如何使沉降作用在适当时候转变成回返隆起，以及这种作用能提供平面上呈现条带状平行交替分布的沉降-隆起带交叉分布格局。

李四光先生在探讨地槽沉降起因时指出：“我们不得不问，那个槽子底下的物质哪里去了？如果我们否认槽子底下的物质向侧面迁移，以致在它的侧面形成隆起地带，我们就无法答复上面提出的问题”[11]。李老上述论断指出，地槽沉降及回返隆起的垂直运动，是地壳底部物质大幅度水平迁移的结果。这是摆脱了直观经验想象束缚的原创性思想。

梁元博、白文吉、李德威等，之后也提出过类似设想：盆地或沉降区下地壳物质向山脉或隆起区下地壳方向水平迁移，从盆地下地壳抽出的物质填充到山根部位，迫使山脉隆升，而盆地沉降，两者同步进行，形成盆山运动[12][13][14]。

如果我们寻找到驱动地壳底部物质水平迁移的动力，及转化为动力的能量来源，就有望提出地槽活动的动力学假说。构造运动难以用实验验证，数值模拟是用计算机做构造运动实验。若在假说的动力机制下能够重演地槽活动过程，所提动力学机制就初步得到验证。

2.3. 壳幔圈层间剪切相互作用驱动壳幔物质相向水平迁移，莫霍面形成内波

地球是有活力的星球，地球有活力是因为地球内部有各种“能流”在周身流动。地球热能流约 0.06 W/m^2 ，地球内部最大的能流不是热能流而是作用于地球的潮汐机械功引起的潮汐机械能流。

受日月天体引力，地球在与天体连线方向被拉伸成椭球。随着地球自转，形变峰转移，地球内部产生潮汐应力，应力值在 10^4 pa 量级，应变幅度 10^{-7} ，质点位移幅度达 0.7 米 [15]。地球内部潮汐机械能流密度矢量 S_i 由下式计算：

$$S_i = -\sigma_{ij} \cdot v_j \quad (1)$$

式中 σ_{ij} 为潮汐应力张量， v_j 为潮汐位移速度矢量。由此计算，地球内部的潮汐能流密度超过 0.1 W/m^2 [16]。

李瑞浩研究员指出：“地球在引潮力作用下周期性受迫运动产生巨大的潮汐应变能，因地球的粘弹性将在地壳和地幔中消耗掉。其消耗方式有两种：一是摩擦过程中转化为热能；二是在地壳和地幔间弹性特征(拉梅系数 λ , μ ；密度 ρ)不连续的地方以构造应变能的形式贮藏起来”[17]。

壳、幔界面是弹性特征不连续的地方。壳幔圈层间传递潮汐应力的相互作用，驱动壳幔物质相向水平迁移，形起莫霍面内波生长。

风成波是空气与水面发生相对剪切运动交界面上波动生长的例子；沙漠中，风将低处的沙粒推到高处，形成沙丘，当风从两侧反复吹来时，沙丘在原地增长。水波与沙丘形成，都由于上部介质(空气)与下部介质在交界面上发生相对剪切运动所致，平面上波峰、波谷相间平行延伸的图像也十分相似。这些波的形成，都属于流体力学中的“剪切运动不稳定”现象。两层介质界面总有微小起伏。介质间发生相对剪切运动时，微小起伏发展成界面内波。两种粘滞流体交界面上内波的形成与发展，至今没有严格数学解。地球物理学家杰弗里斯在“迎风面”压力增强、“背风面”压力减弱假定下，得到风成波形成的近似解[18][19][20][21]。

在电子元件工厂中，有一种物料振动输送机。送料斗向前振动时料斗上抬，向后振动时料斗下沉，物料就会连续前行。物料的前进运动产生于向前与向后运动的不对称性。

交变潮汐剪应力如何驱动莫霍面两侧物质定向迁移，引起莫霍面内波生长？

我们取出莫霍面附近一矩形平面小区域，由于区域取得足够小，可认为区域中各点的潮汐应力 $\sigma_{xx}(t)$ 、 $\sigma_{yy}(t)$ 、 $\tau_{xy}(t)$ 都相同(x 为水平向，y 为垂直向)，并略去作用在区域内微弱的引潮力。

潮汐应力包括日波、半日波及长周期波各种谐波，幅度最大的是半日波。壳、幔圈层间，通过莫霍面发生一日两次方向交变的剪切作用。为简单起见，只考虑半日波 M_2 波。作用在小区域上的潮汐应力 $\sigma_{xx}(t)$ 、 $\sigma_{yy}(t)$ 、 $\tau_{xy}(t)$ 可表为：

$$\sigma_{xx}(t) = \sigma_x \sin(\omega t - \varphi_1); \sigma_{yy}(t) = \sigma_y \sin(\omega t - \varphi_2); \tau_{xy}(t) = \tau \sin \omega t \quad (2)$$

式中， σ_x 、 σ_y 、 τ 分别为正应力与剪应力的幅值， $\omega = 2\pi/T$ 为波的圆频率， M_2 波的 $\omega = 28.984^\circ/h$ 。

主要分析剪应力的作用。对小区域 A，当界面平坦时，同时刻区域中各处剪应力相同。正半周期时，图 2 中三个典型剖面上剪应力沿 Y 轴的分布如图 2(a)所示，负半周期反向剪应力分布如图 2(b)。潮汐剪应力的周期平均值 τ_0 为零。

$$\tau_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tau \sin(\omega t) dt = 0 \quad (3)$$

若莫霍面上有一微小正弦形凸起。参考杰弗里斯“迎风面”应力增强、“背风面”应力减弱的假定，界面扰动区产生附加剪应力 $\tau'_{xy}(t)$ ，并设其大小和原有应力值及扰动界面斜率 $d\zeta/dx$ 成比例，远离界面附加应力消失。附加应力表达为

$$\tau'_{xy}(x, y, t) = E \cdot \tau \cdot e^{-(y-\zeta)/d} \cdot d\zeta/dx \quad (4)$$

式中， E 为影响系数， d 为影响深度， $d\zeta/dx$ 为界面斜率。设界面扰动波形为

$$\zeta = -a \cdot \cos kx \quad (5)$$

$k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为扰动波波长， a 为扰动波幅。

因迎风与背风效应的不对称，区域中剪应力周期平均值 τ_0 不再为零。

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 1/2\pi \int_0^{2\pi} (\tau_{xy} + \tau'_{xy}) dt = 1/2\pi \int_0^{2\pi} a \cdot k \cdot E \cdot \tau \cdot e^{-(y-\zeta)/d} \cdot \sin kx \cdot |\sin \omega t| dt \\ &= 2/\pi \cdot \omega \cdot a \cdot k \cdot E \cdot \tau \cdot e^{-(y-\zeta)/d} \sin kx = C e^{-(y-\zeta)/d} \sin kx \end{aligned} \quad (6)$$

平均剪应力 τ_0 集中于壳幔交界面(莫霍面)两侧，远离消逝。对于弹性介质， τ_0 将引起莫霍面两侧物质发生微弱的弹性位移；对于粘滞流体介质， τ_0 将驱动莫霍面两侧物质发生缓慢的相向水平迁移。

图 2 是壳 - 幔交界面经受交变潮汐剪应力作用的情况。在三个剖面位置上显示垂直莫霍面方向潮汐剪应力的变化。

潮汐应力的交变周期远小于壳幔物质弛豫时间，不为零的平均剪应力 τ_0 将驱动莫霍面两侧壳幔物质相向水平迁移。这正是李四光推测的地槽活动区地壳底部发生的物质水平迁移运动。

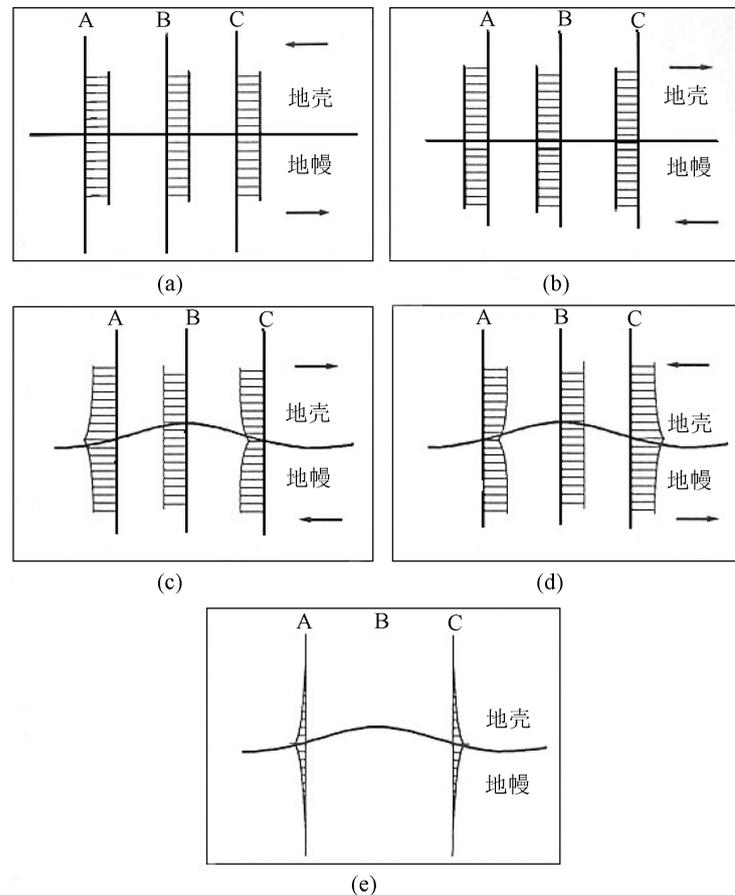


Figure 2. Schematic diagram of the average tidal shear stress generated at the Moho perturbation interface. (a) Uniform distribution of shear stress at a flat interface; (b) When the motion is reversed, the shear stress is evenly distributed, but in the opposite direction. The average value of a period is zero, and the flat Moho surface does not deform; (c) The shear stress distribution on the undulating interface is no longer uniform; (d) Shear stress distribution when the motion is reversed; (e) The mean value of shear stress at the perturbation interface is no longer zero, causing horizontal migration of materials on both sides of the Moho surface

图 2. 莫霍面微扰界面上产生平均潮汐剪应力 τ_0 的示意图。(a) 界面无起伏时剪应力均匀分布；(b) 剪切运动反向时也均匀分布，方向相反。周期平均值为零，平坦的莫霍面不发生变形。(c) 微扰起伏的界面上剪应力分布不再均匀；(d) 剪切运动反向时的剪应力分布；(e) 扰动界面上剪应力平均值 τ_0 不再为零，引起莫霍面两侧物质相向水平迁移

莫霍面两侧壳、幔物质迁移，是一种“互相让位”的相向迁移。只有一方物质单向迁移，运动会遇到巨大的“占位”阻力而停滞。

为方便有限元数值模拟，引入推动莫霍面两侧壳、幔物质相向迁移的等效体积力 $F_c \approx \partial\tau_0/\partial y$ (限于

小波幅情况), 称为“潮波驱动力”。这是根据弹塑性力学运动方程中, 剪应力对 y (垂直) 方向的偏导数相当于 x (水平) 方向的体积力[22] (图 3)。

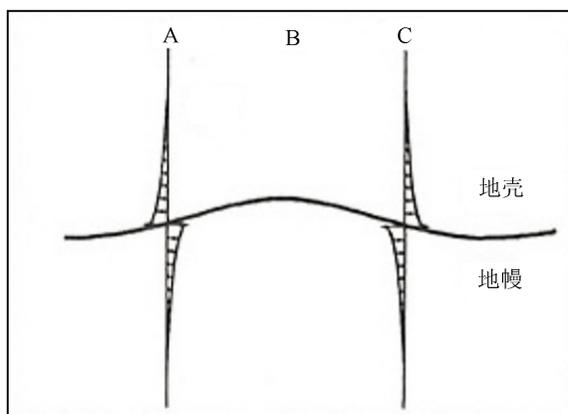


Figure 3. Due to the fluctuation of crust and mantle interface, the tidal shear stress derives the “tidal wave driving force” $F_c \approx \partial \tau_0 / \partial y$

图 3. 因壳幔界面起伏, 潮汐剪应力派生出“潮波驱动力” $F_c \approx \partial \tau_0 / \partial y$

在“潮波驱动力” F_c 驱动下, 界面两侧物质相向迁移, 界面微小波动进一步扩大, 发展成莫霍面内波。重力均衡作用下, 莫霍面隆起处沉降、莫霍面下陷处隆升(图 4)。

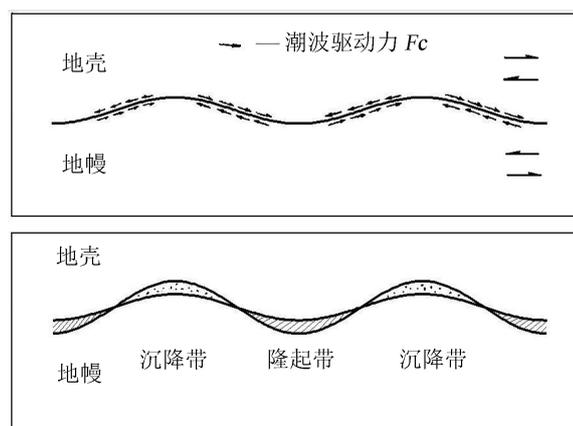


Figure 4. The interlayer tidal shear stress in the upper crust and mantle of the Moho surface perturbation interface derives the “tidal wave driving force” F_c , which drives the material to migrate toward each other on both sides of the interface and further enlarges the interfacial fluctuation. The oblique line and the scatter point are the lower crust and upper mantle materials migrated by translocation respectively

图 4. 莫霍面微扰界面上壳、幔圈层间“潮波驱动力” F_c 驱动界面两侧物质相向迁移, 界面波动进一步扩大。斜线和散点处分别为易位迁移来的下地壳和上地幔物质

这种从不停歇的潮汐应力, 在地壳深处逆重力方向不断易位迁移壳、幔物质, 形成了巨大的莫霍面内波。全球莫霍面起伏中贮藏的重力位能达到 8.5×10^{25} J, 足够全球地震活动释放数百万年[23]。

3. 以 F_c 力为主导动力的内波说对多种大地构造运动现象的解释

从地槽沉降活动中,找到驱动地槽活动的“潮波驱动力” F_c ,提出了大地构造运动的“内波假说”。若在主导动力 F_c 驱动下,能够重演地槽沉降活动过程,内波说动力机制就初步得到验证。如果能对更多大地构造现象,如“陆壳双层结构”、“大洋中脊”、“大陆溢流玄武岩”等形成作出解释,“内波假说”就有进一步发展的前景。

3.1. 二维有限元模拟沉降期地槽活动

对于地质时间尺度的运动,我们将壳、幔物质简化为不可压缩牛顿粘滞流体。图 5(a)是计算起始模型。上层是密度 2.7,粘滞系数 10^{20} Pa·s 的地壳,下层为密度 3.3,粘滞系数 10^{21} Pa·s 的上地幔。重力作用在整个体系上,潮波驱动力只作用在莫霍面两侧薄层中,大小与莫霍面斜率成比例。在这个模型中,莫霍面两侧物质的粘滞系数超过 10^{20} Pa·s,微弱的潮波驱动力(强度不到物质自重 1%)不能引起明显变形而产生地壳运动。莫霍面因经受交变潮汐剪应力长期作用,一旦放射性热等积累温度升高到临界值,两侧薄层的壳、幔物质,等效粘度可降低到 10^{15-16} Pa·s [24] [25]。初始时刻,平坦的莫霍面上要设置一些微小隆起(或凹陷),否则运动不会启动。用“有限元法”书后的程序计算结果是[26]:在“潮波驱动力” F_c 作用下,莫霍面形成隆起-凹陷-隆起的近正弦波形起伏,两隆起间波长约 80 km。重力均衡下地面形成镜象对称起伏,出现洼地与高地。波动起伏增大到一定幅度,莫霍斜面上逆重力推动的物质将被重力分力平衡而停止运动。莫霍面及地面起伏被凝固。

引进剥蚀搬运作用,隆起带物质搬运到沉降带沉积,平衡打破,莫霍面两侧物质继续相向迁移。沉降、隆升继续,沉积地层达两千米都不会停止—实际情况是,沉积 1~2 千米后,沉降、隆升逐渐停止。原因是冷地层沉到深部,沉降带底部物质粘滞系数增大,物质迁移停顿。图 5 给出了开始时刻和 0.6 Ma、1.2 Ma 时的地壳结构。图中显示了两条沉降带和三条隆起带,沉积地层厚度超过千米,地面高差达 3000 m。

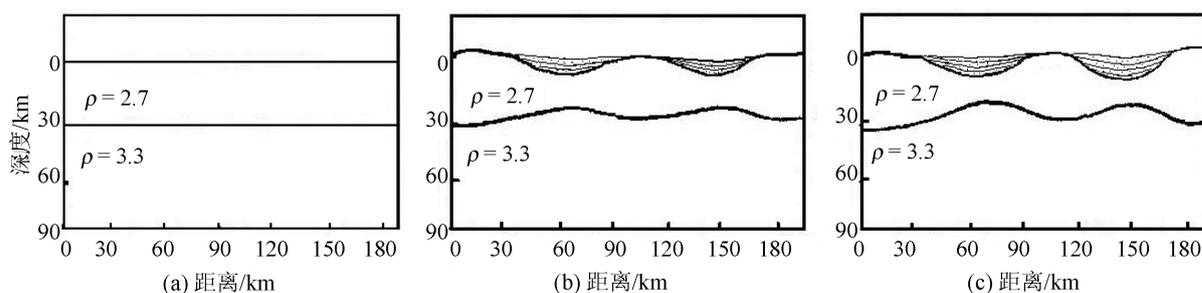


Figure 5. Crustal evolution under combined action of gravity, tidal wave driving force and denudation transport (a) Flat initial surface and Moho surface; (b) Crustal structure at 0.6 Ma; (c) Crustal structure at 1.2 Ma

图 5. 重力、“潮波驱动力”和剥蚀搬运联合作用下的地壳演变(a) 平坦的初始地面和莫霍面; (b) 60 万年时的地壳结构; (c) 120 万年时的地壳结构

有限元数值模拟显示,在“潮波驱动力” F_c 持续不断推动下,能够实现地壳沉降及两侧地带隆升的地槽活动。“通过有限元数值计算,证明在引潮力的长期作用下可得到类似的地槽运动结果,这初步支持了内波理论的假设” [27]。

地槽回返隆升运动也是在 F_c 这一主导动力推动下发生。

如果将一次地槽活动看作一次构造活动旋回,地史上已发生过十多次旋回。加里东、海西和阿尔卑斯是最新几次。槽台说总结的构造活动现象规律指导探矿等地质实践,整整一个世纪内在地质学界占据主导地位。

在板块说流行的现代，板块说也不能涵盖槽台说所有内容，尤其是大陆构造研究，许多相关概念至今仍具有强大生命力。这一理论仍在地质填图、找矿等实践活动中广泛应用。

但地槽演化的动力机制不明，地质学的这一重要理论仍处于“现象论”阶段。1947年，美国地球物理学联合会会长亚当斯提出六个急需解决的重大问题：山脉的成因、地槽的成因，位列第一、第二。足见其在地球科学中的地位。

3.2. 回返隆升期地槽活动及陆壳双层结构形成

地槽回返隆升期的有限元模拟涉及应力、热传导、温度、物态变化等多场耦合，笔者没有能力实行。以下是定性分析。

沉积了万米地层的沉降带地壳底部温度降低，已经没有低粘滞的下地壳物质可移出供加厚隆起带，隆起带底部却积储了大量塑性好的地壳物质。内波生长过程的特点是，薄地壳底部的玄武岩物质自动向厚地壳底部集中。隆起带底部虽运来了大量低粘滞的玄武岩物质，但不会向厚度比它薄的沉降区底部集中。

剥蚀搬运作用下，经过数千万年后地表及莫霍面又处于水平状态。已经趋于平坦的地壳底部，莫霍面出现一些新的扰动起伏，终于隆起带底部流动性好的地壳物质向沉降带底部集中，向斜(沉降带)开始快速隆起回返。经数千万年放射性热积聚，温度大幅上升但尚未达到熔融状态的沉积地层，由于大幅度隆起，上覆地层剥蚀，地层围压降低，发生大范围等温减压原地重融。形成中央隆起轴部大范围酸性花岗岩岩基[28]。

伴随着隆起、褶皱，地层广泛开裂，地槽回返后期发生中、酸性岩浆侵入和喷发为特征的火山活动。地壳热量大量散失，地槽渐趋稳定，成为不甚活动的“地台”。经历多次旋回，大陆地壳上部被反复“耕犁”，玄武岩被“磨”成碎末，雨水淋溶带走易溶的铁镁物质，沉积岩就地重熔变成硅铝质花岗岩。“耕犁”只达到中地壳深度，上地壳花岗岩化，下地壳仍是基性岩，陆壳形成双层结构。环太平洋周边地带，在最近一期卷入地槽活动，因“耕犁”及“淋溶”的不充分，形成“安山岩地带”。

根据放射性元素含量，使稳定地台区莫霍面深度部位大致 400℃~600℃上升到地槽活动带莫霍面深度通常具有的 800℃高温，大概需要 1.5 亿~3 亿年时间。地壳底部热能的积聚成为地槽活动发生地点与时间的控制因素。也是地槽活动具有旋回性又非全球同步发生的原因。

月球和太阳对地球的引潮力只有地表重力的 10^{-7} 。潮汐动力机制如何能推动构造运动，抬起数千千米高的山脉、将数十公里厚岩层剪断，形成巨大的推覆构造！一系列放大机制起了作用：作用在整个地球上的引潮力被集中于壳-幔界面，实现了第一步放大；作用在莫霍斜坡面上的“潮波驱动力”只有重力的 10^{-3} ，但在双层介质中移动物质只要克服壳、幔物质的密度差，再利用斜面效应，像蚂蚁那样搬山不止，改变了地壳的厚度。利用均衡力再次实现放大。于是，数十公里厚的地层可以强制剪断[29]；强烈活动地槽带的深断裂能向下延伸到数百千米深度，引起中深源地震；地幔中生长的大颗粒金刚石得以通过深断裂上升到地表；抬升起来的地层向下重力滑动形成巨大的推覆构造，滑动距离可达数百千米。一系列令人印象深刻的大地构造运动活剧就这样一幕幕展开。

在内波说中，没有了“外动力”，构造运动会停滞，外动力与内动力一样，是构造活动不可或缺的因素。

3.3. 大洋中脊体系

大洋底有一条遍及全球、横穿大洋盆地、线状延伸的洋中脊海底山脉。各大洋洋脊相互连通，形成全球大洋中脊系统，总长 8 万公里。怎样的动力过程能形成如此宏伟、宛如地球脊梁的洋中脊体系？板块说提出的解释是海底扩张。任纪舜等指出，大洋底多处发现古老地层与海底扩张说矛盾[30]。

内波说如何解释全球大洋中脊系统形成?

地壳玄武岩物质, 受潮汐力驱动有从薄地壳底部向厚地壳底部迁移集中的趋势。大洋中脊体系形成的数值实验要在三维地球模型上进行, 目前尚未实施。但由简单的二维模型, 也可看出洋壳底部玄武岩如何从洋陆交界处向大洋中心积聚的过程。

图 6 是洋中脊体系生成演化的二维模型。与地槽演化模型的区别是: 1) 平面区域的尺度从数百千米扩大到数千千米; 2) 两侧边界条件不是固壁, 是比洋壳厚度大的陆壳; 3) 有海水保护, 洋底不考虑剥蚀搬运外动力作用。

图 6(a) 是洋脊形成模型的初始状态。图 6(b) 中, 与陆壳接触部位, 洋壳底部玄武岩物质被吸引到厚的陆壳底部。图中 ac 段地壳底部物质被迁移至陆壳下方。bc 段洋壳左侧薄右侧厚, 底部物质向大洋中心方向迁移, bc 段尺度不断扩大(图 6(c))。同样的情形在另一侧洋陆交界处发生, 两侧洋壳加厚处在大洋中线处会合, 形成大洋中脊(图 6(d))。

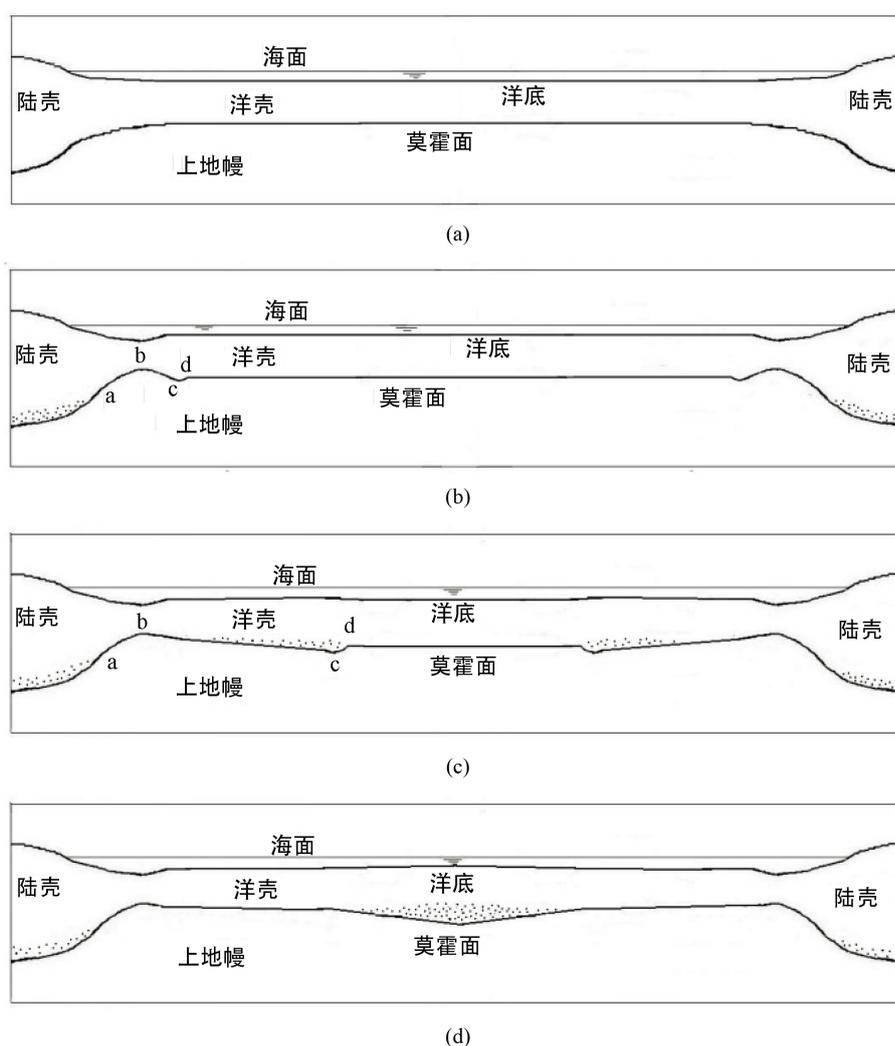


Figure 6. Basalt material at the bottom of oceanic crust is attracted to the bottom of continental crust, and basalt material concentrates in the center of ocean, forming a sketch map of mid-ocean ridge. The scattering dot is the transported basalt material

图 6. 洋陆交界处洋壳底部玄武岩物质被吸引到陆壳底部、玄武岩物质向大洋中央集中, 形成洋中脊示意图。散点为运移过来的玄武岩物质

在数值模拟实验做出结果前，仍可指出一些支持这个模型的地质事实。根据这一模型，洋中脊玄武岩(MORB)是经过长途运移集中起来的。MORB 化学成分是大量洋底玄武岩成分的平均。同一洋中脊各处的 MORB 成分应该差异不大。而各岛采集的“洋岛玄武岩”(OIB)的成分则会有差别，实际情况正是如此[31]。

大西洋、太平洋、印度洋三大洋各自的 MORB 都很均一，但各大洋之间有系统的差别，尤其是相距遥远的印度洋与北冰洋之间成分差异更大。这支持了欧阳自远院士的下述观点：地球由星子吸积形成，星子成分并不均一，造成原始地球各地成分的不均一性[32]。

3.4. 大陆溢流玄武岩

大陆上一些地方玄武岩溢流分布面积很大。印度德干高原溢流玄武岩分布面积达 50 万 km²；巴西帕拉南高原玄武岩出露达 100 万 km²。大陆溢流玄武岩以宁静的熔岩溢出方式活动。巨厚熔岩高原由反复溢出的熔岩流组成，熔岩高原的厚度往往达到数千米，如此大量从地幔中分异出来的玄武岩岩浆，是如何集中到这些地块下，并一次次溢出地表。

大陆溢流玄武岩与大洋中脊有联系(图 7) [33]。东太平洋隆起通过信天翁高原与墨西哥南部大陆接触的地方、印度西海岸同印度洋中脊接触的地方都出现玄武岩溢流。冰岛位于大西洋中脊北端，岛上大片溢流玄武岩就来自洋中脊。

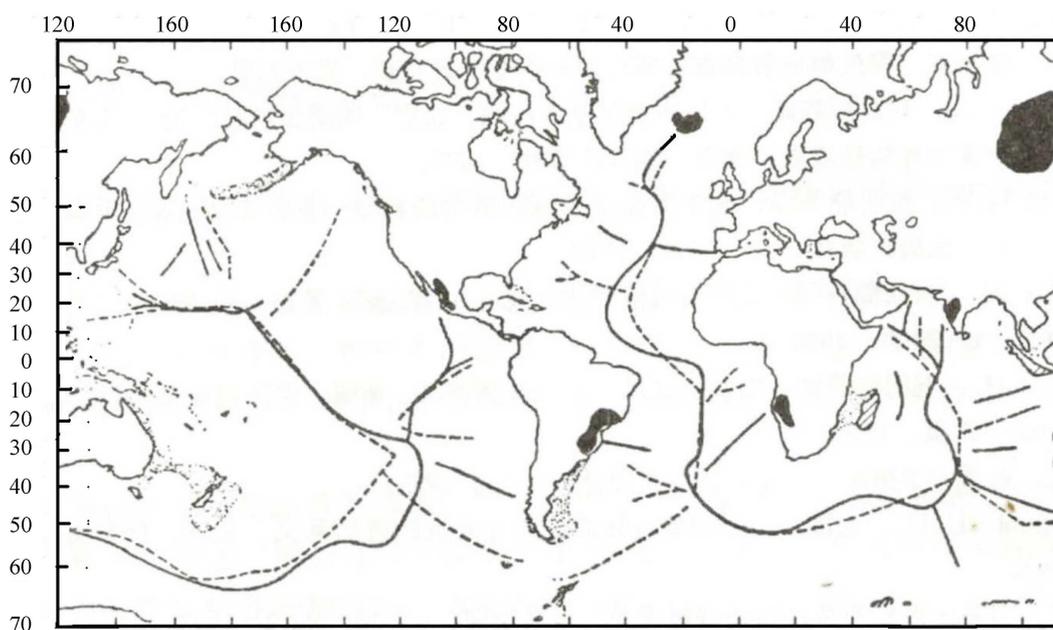


Figure 7. Distribution of mid-ocean ridge (solid black line) and continental overflow basalt (black area). Many continental overflow basalts are located in the contact area between the mid-ocean ridge and the continents (Menard, 1960)

图 7. 洋中脊(实黑线)与大陆溢流玄武岩(黑色区域)的分布。多处大陆溢流玄武岩位于洋中脊与大陆接触的地方(Menard, 1960)

Meyerhoff 提供的资料说明，洋中脊上有大量平行中脊的断裂、破裂和裂隙，显示出地层下平行于洋脊走向的层状岩浆流形成平直而连续的裂隙和断裂系统。它们的方向表明，洋脊下面岩浆的流动与洋脊平行，不像板块构造要求的那样与洋脊垂直[34]。洋脊与大陆接触处，洋脊通道中岩浆从大陆构造运动形成的裂隙涌出地面，远处岩浆再流过来，填充空缺后又一次从裂隙中涌出，形成层叠的大陆玄武岩溢流。

当洋脊内的玄武岩浆流走后，洋脊顶部地层塌陷，形成中央裂谷。各地大陆溢流玄武岩的成分与临近的洋中脊玄武岩主元素成分相类似，支持了这一观点[31]。

3.5. 深海盆地上散布的万座洋底火山

大洋中往往奇峰突起，出现孤独或成群的洋底火山，有的露出海面成为岛屿，更多的深藏海面之下。大洋中高于 1500 米的火山就有一万多座。热容易扩散不会自动集中，通常认为炙热的岩浆只能从温度更高的深部——由“地幔热缕”送来。火山和岩浆活动给目击者以极深刻的印象，但是全球火山和岩浆活动散发的热只有 $(3.8\sim 26.5) \times 10^{17}$ J/a，只占地球内部散发到空间的热流量 $(9.4 \times 10^{20}$ J/a) 的极小部分。研究火山的实质问题，在于弄清为什么很少量的热会在地壳的局部集中[35]。

三维地震层析成像发现，热点的热区域位于 100~200 公里的深度，下方是温度相对较低的区域[36]。这一事实表明，集中于热点的热，很可能来源于地球浅部，而非“热缕”带来的。

固体潮和海潮活动作用在整个大洋壳上。反复的加载、卸载，潮汐能在洋壳地层中耗散产热，在断裂、软弱夹层地点产热率剧增。岩石温度达到部分熔融， Q 值急剧下降，产热率上升，导致雪崩式的熔岩形成过程。岩浆囊形成后，熔岩体积增大大约 16%，上覆地层胀裂，熔岩在减压条件下喷溢，一座新的海底火山开始喷发。

海潮负载对洋底地壳加热，类似微波炉加热，是从上向下加热，热区域自然位于地球浅部，更深处温度反而相对较低；且作用在整个大洋底部，形成遍布洋底的火山。

内波说对这四种全球构造运动现象给出了它们在统一的能源——地球转动能耗散提供的动力驱动下发生、演化的机制性解释。

海陆起源、尤其是大陆的起源是全球构造理论的核心问题。在“大陆漂移说”、“板块说”中，海洋与大陆一开始就存在。它们没有回答海陆起源问题。

对于海陆起源这一地学的基本问题，内波说如何作出回答。

4. 海陆的起源

关于原始地球海陆分布状态有不同的假说。地史学告诉我们，早期地球上大陆面积很少，大片海洋覆盖着地球。太古宙、元古宙、显生宙的陆地面积，占全球面积的比例分别为 0.3%~2.4%，2.4%~15%，15%~29%；陆地地壳厚度从 10 km 逐步增加到 40 km，地壳岩石成分渐趋酸性[37] [38]。

根据地史学资料，海陆演化的初始状态是：早期地球地壳较薄，厚度相对均匀，海水覆盖了全球大洋，洋中难有出露洋面的岛屿。

大陆与大洋之间的区别只是壳的厚度不同[37]。海陆的起源问题，主要是解释原始大洋地壳中，部分洋壳如何会逐渐增厚，露出洋面成为岛屿，再扩大成为陆地。

4.1. 部分洋壳吸纳周围物质增厚形成陆岛再扩大成大陆

内波机制的特点是，薄地壳底部的玄武岩物质自动向厚地壳底部集中。这一特点决定了厚度相对均匀的原始洋壳必定会分化成薄的洋壳与厚的陆壳，形成海陆的对立。

原始大洋地壳三维全球模型，在 F_c 力的作用下，数值模拟能够得到大洋中出现岛屿、岛屿逐渐扩大，之后全球大洋中分布若干大陆块的图像吗？

我们期待三维数值模拟的结果，但在模拟计算前，根据内波运动的特点，设想一下海陆演化过程。

设想全被海水覆盖的原始地球已分离出厚度大致均匀的洋壳，其上随机分布着数百个地壳稍厚(或稍薄)的小区域。厚度稍大的洋壳吸引周围洋壳物质增大，再相互合并成数十个体形更大也更厚的块体。它

们互相“吞并”，个头越来越大、个数却在减少，随着厚度增加，它们开始露出洋面成为陆块。这些陆块的数量已经不多，它们之间最可能的位置分布应该是相互远离的。

现今地球表面，大陆与大洋是正相对踵分布的。四个古老的大陆位于四面体四个角上，四个大洋则占据四个面所在位置。地球上几乎找不到一处陆地，它的对踵点仍然是陆地。以为是“大陆漂移”运动此时正巧出现海陆对踵分布，应属小概率事件。

原始大洋地壳三维全球模型的演化模拟，会不会出现大陆块与海洋对踵分布的形态？让我们等待模拟计算验证。

4.2. 大陆地幔根 - 大陆从地幔中吸纳玄武岩物质的通道

厚陆壳的形成，除了从周围薄地壳底部吸引玄武岩，还从下部地幔中补充玄武岩物质。地震层析发现各大陆古地盾下方的“地幔根”现象，将地幔中分异玄武岩物质补充到大陆底部通道的影像清晰地显示在我们眼前。

全球地震层析成像揭示出的大陆根现象说明：陆壳与地幔是连成一体的，形成大陆的玄武岩物质来自下部地幔岩中轻物质成分的分异上浮。

图 8 是全球三维地震层析成像图。左图是 125 千米深度，地震波高波速异常区(深蓝色)都出现在各古老陆核下方分布的地幔根图象，右图是 350 千米深度，在陆核区下方仍有大于 2% 的高速体分布。在广阔的大洋下，没有地幔根[39]。

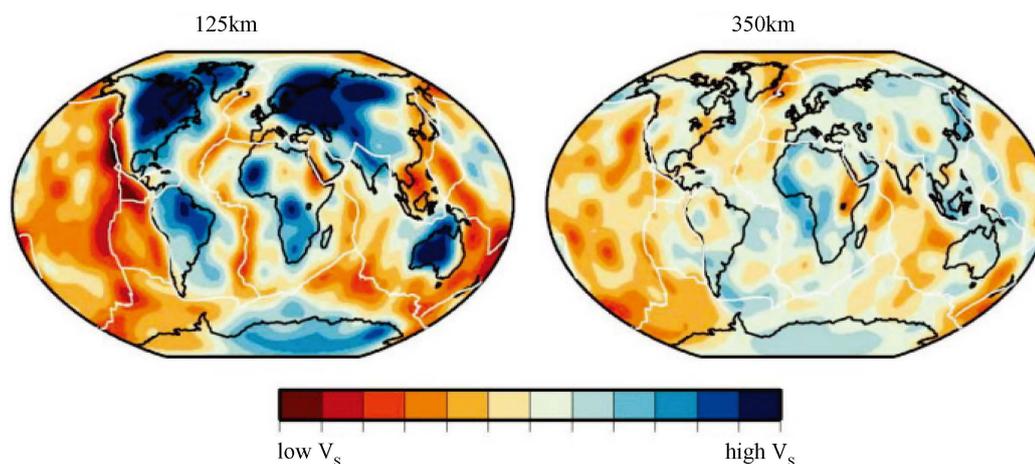


Figure 8. Seismic tomography reveals mantle roots beneath ancient cratons around the world

图 8. 地震层析成像揭示的位于全球各古老克拉通下方的地幔根现象

地震层析中这些高波速陆根，在全球重力异常数据反演下被认证为是陆核下方上地幔物质的密度增高异常(最大正密度异常 0.016) [40]。

根据岩石学研究，从地幔岩中可分异出约 7%~12% 玄武岩浆，未分异上地幔岩的密度为 3.25 g/cm^3 ，分异后密度为 3.29 g/cm^3 [41]。

0.016 g/cm^3 正密度异常相当于这里的地幔岩中已分异出 5% 玄武岩浆。从 300 千米厚上地幔正密度异常区中分异出的玄武岩浆可形成约 10~15 千米厚玄武岩地壳。

杜乐天对直接来自上地幔的地幔岩捕虏体中浆胞的研究，从微观上揭示了玄武岩岩浆发生、发育、析出的过程。是地幔中的挥发性成分和超临界流体渗入地幔岩中促使玄武岩浆形成[42]。大气剥蚀搬运造成负荷重分布等外动力地质作用，对陆壳下部地幔的扰动，促使更多的玄武岩浆形成上浮。

陆根的存在，使得陆壳与上地幔连接为一体。无人能够解释，若大陆漂移，如何能保持它的陆根不被削去。这应该是 Lowman 在发现大陆根现象后不久，就提出“大陆固定不动的板块构造假说”的原因 [43]。

大陆漂移的概念，将大陆与下方地幔的物质联系切断，地壳与地幔作为整体的正常思路被错误观念阻断，因而无法理解大陆根的意义。

4.3. 大陆的维持与生长

剥蚀作用每年将约 10 km^3 陆上物质搬运到海中。出露海面的陆块体积约 $1.3 \times 10^8 \text{ km}^3$ ，若没有某种反向的物质搬运与集聚过程，只要几千万年，大陆就会被剥蚀夷平 [44]。

Dietz 提出海底扩张说同时，意识到：“一个满意的地壳演化理论必须要能解释，为什么大陆经长期削平风化作用仍能保持那么高” [45]。但是，Dietz 没有找到能够抵御剥蚀作用的机制。

内波说中，厚地壳从周围薄地壳底部吸引玄武岩物质形成大陆。这种与剥蚀作用方向相反的物质输运，既是陆壳形成的机制，也是抗御剥蚀的机制，因而大陆不会被夷平，陆屑被搬运到大陆周缘沉积，引起一轮又一轮地槽活动，大陆不断围绕陆核增生。

陆壳通过从周围薄地壳底部吸引、同时接纳来自地幔大陆根分异上浮的玄武岩，生长增厚。大陆有这些吸收机制，虽然陆壳只占全球面积 30%，但陆壳的体积却占全部地壳体积的 70% [46]。

呈现在我们面前这幅大陆逐渐生长，地壳不断增厚的图像就是全球大地构造演化剧的主线。舞台上的两位主角是：地幔分异和因地球自转能释放引起的构造运动；太阳辐射能和地球热能则作为辅助能源出现。

4.4. 地球上海陆演化的前景

按照 Anderson 的计算，地球能够形成约 200 千米厚的地壳 [47]。地球没有形成那样巨厚的地壳说明地球的分异过程远没有完成。

月球实际是一颗类地行星，有月壳和月幔，也有“洋”和“陆”，而且与地球的陆壳和洋壳有类似构造 [48]。月海集中在向着地球的半球，另外半球是月陆。月球上的海陆分布，一阶球谐已成为主项，地球上主项尚由次低阶的二阶球谐(四面体分布)担任。

经数十亿年演化，地壳平均厚度尚不到 20 千米，但直径不到地球 1/3 的月球，月亮厚度竟达到 60 千米。地球上大陆面积不到 30%，月陆则超过 70%。地球上强震频繁，构造运动活跃；月球上只有少量微震，构造运动已经基本停顿。是什么原因让两者之间产生这样的差异？

内波说认为构造运动因地球受到日月引潮力引起。月球受到地球的潮汐作用更激烈，月亮运动更强烈，分异与构造演化速度更快，30 亿年前就被潮汐作用锁定，相对于地球停止转动，走完演化全程。

地球的自转速度仍然不低，地壳运动演化离走完全程还远，其演化方向也是地壳不断加厚，大陆不断扩张，海洋继续缩小，地球自转速度越来越慢，构造活动逐渐趋于停顿。

5. 内波说与板块说的差别及优势

与板块说描述巨大板块间碰撞挤压，数千千米地层缩短、增厚抬升成高原或山脉，海洋或大陆板块下插并消逝在地幔中，受到往往超过数百兆帕强应力驱动的图景不同；内波说描述的全球大地构造运动，主导驱动力是强度极微弱但数十亿年来时刻不停作用在全球壳幔交界面上的“潮波驱动力”，引起莫霍面与地面发生波动起伏；在大气剥蚀搬运负荷重分布的外动力地质作用下在地层中产生数百兆帕强应力而驱动地壳运动。

板块说是当前地学的主流学说，“地幔对流”假说是板块说建立的动力基石。霍姆斯当年提出“地幔对流”假说时，就申明“这种为适应特别需要而虚构的推测，在得到独立的证据支持之前是没有科学价值的”。

最初设想的对流发生在软流层中，之后设想了上地幔对流、上下地幔分别对流，以及越来越复杂的各类对流形式。图9是设想的对流形式中的一种。作为动力源的“地幔对流”，无论是它的形式或存在的证据都充满不确定性[3]，让“板块构造动力学”与地幔对流一样充满不确定性。

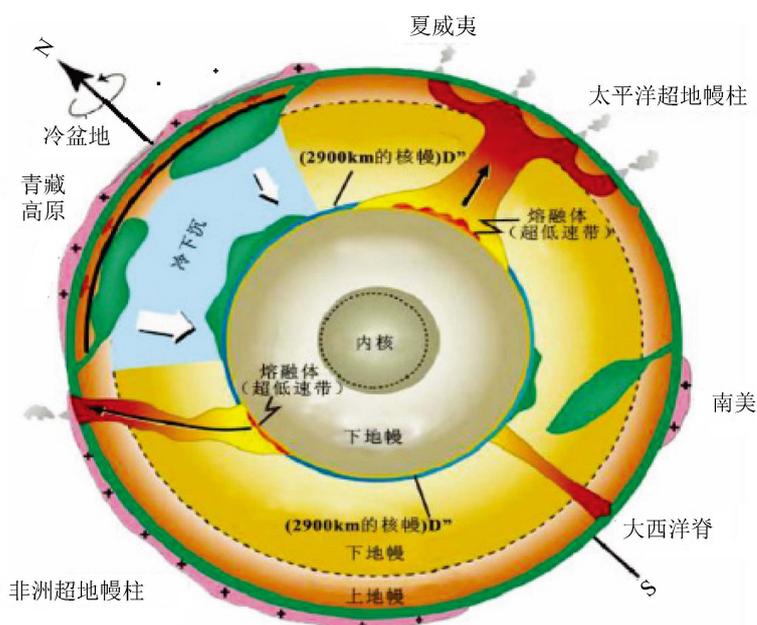


Figure 9. Another envisaged form of mantle convection, the superplume
图9. 又一种设想的地幔对流形式——超级地幔柱

在缺乏全球构造动力学新假说的情况下，板块说得不到通常科学发展中批评性验证和比较。地球科学亟须可与板块说竞争的全球构造动力学新假说。新假说依赖的固体潮汐应力已被观测证实确实存在、并可用数学形式表达其大小、方向及作用持续时间。

板块说建立在“地幔对流”、“海底扩张”、“大陆漂移”三个科学猜想基础上。内波说从百年地勘搞清地槽运动的现象规律出发，寻找到动力。

动力来源是否清楚而且可靠是评价一个地球动力学理论的重要依据。

“地幔对流”假说是板块说建立的基石。最初设想的对流发生在软流层中，之后设想了上地幔对流、上下地幔分别对流，以及越来越复杂的各类对流形式。作为动力源的“地幔对流”，无论是它的形式或存在的证据都难以确定[3]。

内波说的主导力源 F_c 由潮汐应力转化而来，潮汐应力的存在已由观测充分证实。莫霍面内波生长过程属于流体力学中剪切运动不稳定问题，在力学上有充分根据。内波说的重要优势是：动力因子清楚而且简明，满足马宗晋先生对“任何一种合理的地壳动力学或地球动力学假说，至少要满足的三个条件”的要求[2]。因为动力机制清晰，在计算技术飞速发展的今天，不难通过数值模拟检验新假说的合理性。

6. 大洋中脊体系——验证全球构造理论的钥匙

“内波说”将波动运动概念引入了大地构造学。在内波说中，壳、幔物质的协同运动发育出波长不

同的构造系：造成地槽活动的内波，优势波长在数百千米，属短波构造；长波构造形成所需的演化时间更长，且需要不受剥蚀搬运外动力作用干扰。洋中脊体系这一长波构造就在由海水隔离大气营力的大洋环境中发育形成。

在板块构造理论体系中，洋壳年龄不超过 2.2 亿年，洋中脊地层更年轻。根据大洋钻探获得的洋壳、洋中脊地层年代，就能判别这两种全球构造假说，何种符合实际。近年来，大洋勘察在多处洋底和洋脊处发现同位素年龄为 1670 Ma、748 Ma、790 Ma 的古老岩层，令海底扩张说陷入困境[30]。

从洋中脊中央裂谷的形态，也能判定海底扩张只是考虑不周的猜想。图 10 是突起在洋底的洋中脊结构图。洋中脊中间是宽度数十千米的中央裂谷，裂谷两侧是裂谷山[49]。

对于海底扩张的动力，现在倾向于“桌布下滑”模式，板块俯冲拉力将中央裂谷拉出裂缝，岩浆上涌填充裂缝实现海底扩张。这样的过程将使两侧裂谷山之间的中央裂谷不断加宽。以大西洋为例，洋脊扩张已 2 亿年，中央裂谷宽度仍仅数十千米，说明设想的“桌布下滑”将中央裂谷拉裂、岩浆上涌填充的过程根本就没有发生过。除非岩浆填充裂谷中裂隙同时，两侧裂谷山能发生向中心靠拢的运动！

洋中脊处出现中央裂谷的原因，用洋脊通道中的玄武岩浆流走后，上部洋壳塌陷解释更合理(按前文所述，流走的岩浆的去向之一是形成大陆溢流玄武岩)。

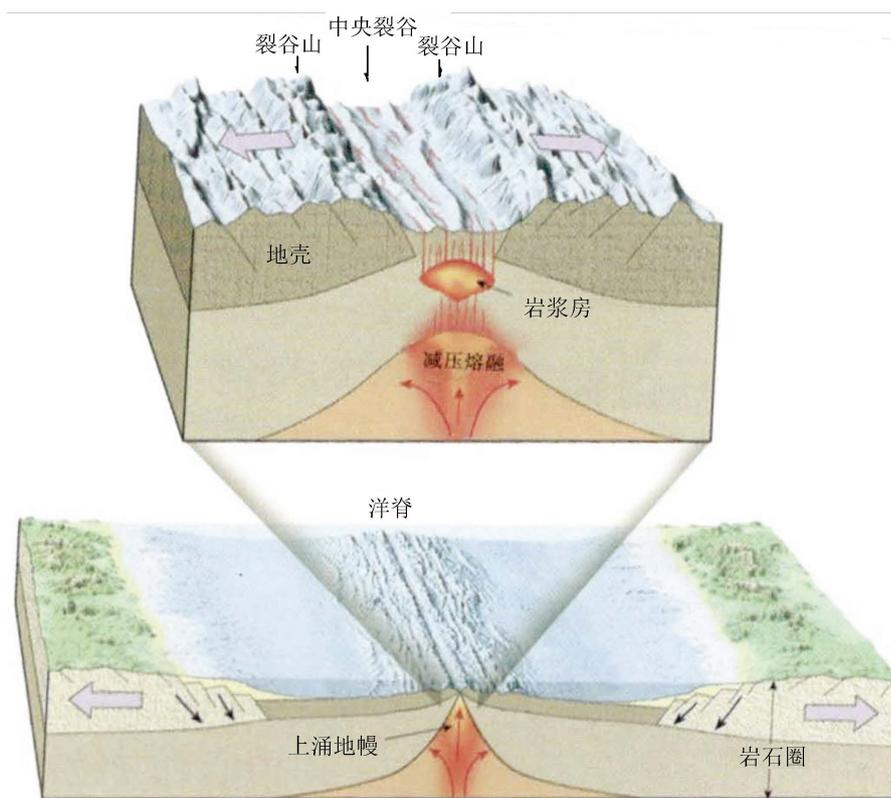


Figure 10. The structure of the mid-ocean ridge

图 10. 洋中脊结构图

大洋勘察难度大、花费高，建立在大洋勘察资料基础上的板块说，必然受到勘察深度仍然肤浅的影响。正如汪品先院士所述：“进行过大洋钻探的海洋很多，但是大多只钻探沉积层，很少能探索基底”[50]。洋底不存在大气剥蚀作用，无论是沉积物覆盖还是熔岩溢出，总是新地层覆盖在上，只有打到基底的深钻孔才能揭示出洋底的真实年龄。根据没有钻到基底的地层资料进行的分析，很容易出错。新世纪

中“有更多深海钻孔将钻进洋底地壳第三层……若发现古老的或大陆性的岩层，这对于板块学说将是一个严峻的考验”[51]。

如果进一步的大洋钻探证实洋壳及中脊的年龄同古地质同样古老，将宣布板块理论走到尽头。

7. 结语

“挤压成山，拉张成盆”是地质界的共识。将水平地层挤压成山脉，需要强大的水平力在地层中产生数十至数百兆帕应力。从冷缩说到大陆漂移说，地质学一直在探索、寻找这种水平推力而无果。直到霍姆斯提出“地幔对流”说，“地幔对流”提供强大推力的可能性使漂移说摆脱困境，板块构造理论诞生。遗憾的是60年后，板块运动驱动力仍不能确定[1][2]。

对地球自转在地壳运动中的作用不少学者进行过研究，较普遍的结论是：地球自转速度变化引起地层中构造应力值仅几个Pa，极移引起的可到0.003MPa，离能使岩石变形所需的应力值差距太大[52]。这些对地球自转在构造运动中作用的分析并不到位。

李四光从上世纪二十年代开始考虑地球自转与大地构造运动的关系，经40年思考提出“地质力学”，开创了全球构造“转动机”理论探索的先河。李老在探讨地槽沉降起因时又指出[11]，大山脉隆升的垂直运动，是地壳底部物质大幅度水平迁移的结果。在李老思路启发下，笔者提出地壳与地幔圈层间相互作用，产生“潮波驱动力” F_c ，驱动地壳和地幔物质相向水平迁移。在 F_c 力作用下通过数值模拟实现了地槽沉降活动，初步证实了李老思路的正确。新中国成立后培养的科学工作者，在分析百年大陆地质勘察揭示出的构造运动现象规律基础上，以地球转动为主导动力，提出全球构造动力学理论——“内波说”。

板块说是当前地学主流学说，得到大多数地球科学家支持和认同。但是，这个在对大洋底相对粗浅观测基础上建立的理论是否能够最终确立不被淘汰，仍然存在不确定性。“板块说是靠研究海洋地质起家的，研究对象的局限性限制了它真正成为全球构造理论的可能性。从产生到现在，它一直在为其登陆而奋斗，由于遇到难以克服的困难，这种愿望迄今未能实现”[53]。若登陆仍不成功，寻求统一的全球构造理论的愿望也就破灭。正如滕吉文院士指出的：很大的问题是，作为动力源的“地幔对流”，无论是它的形式或存在的证据都充满不确定性。

内波说动力来自日月引力对转动地球内部产生的交变潮汐应力，根据理论计算和实测，伴随潮汐应力的能量流比热能流还大。潮汐交变应力的存在早已被观测证实。它的动力源不存在不确定性，且可以给出力的作用点、方向及持续时间。目前，这个假说已经对地槽沉降机制这个地质学多年来没有能够解答的问题，做了有限元数值模拟，得到与地质活动符合的结果[27]。若对全球洋中脊体系形成的三维数值模拟得到正面结果，这个假说就能上升为全球构造的动力学实用假说。

地壳运动中“潮波驱动力” F_c 作为内动力、大气营力作为外动力，重力始终参与其中。地球上只有重力作用能够产生强应力，但重力是垂向力，又是保守力，总是趋向均衡状态。内动力 F_c 虽然微弱但千万年从不停歇，引起莫霍面及地面波动起伏，通过外动力引起的“负荷重分布”等机制，重力作用可在地层中产生数百兆帕应力，引起地壳运动。壳幔圈层相互作用属全球性动力机制，能解释陆地上大山脉形成，也应可解释洋底山脉形成，甚至有可能解释“海陆的起源”。

当前地学的主流学说“板块说”，运动所需能量来自地球内部热能散失，属“热机”类理论。本文提出莫霍面在壳幔圈层相互作用下内波自激生长的“内波说”，运动消耗的能量来自地球转动能耗散，属于“转动机”理论。板块说并非地壳运动动力学理论的唯一候选者。从理论建立出发点、出发地域、依赖的主导能源、物质运动形态、地质史长度方面，内波说与板块说均不相同。这是两种不同思路的学术体系。

在潮汐应力、剥蚀搬运外动力、壳幔系统热积聚等因素作用下，模拟行星地球从地质演化阶段开始

的全球构造演化过程进行数值模拟, 当前的计算机已有能力检验本文所提出的构造运动驱动力是否能够引起构造运动的发生及演化。

以李四光为首的中国科学家开启了“转动机”理论的探索之路。欧美的“热机”与中国的“转动机”将在地球科学中同台接受验证和比较。对地球科学基本问题感兴趣的力学、物理、天文、地质等研究单位, 组织起研究队伍, 进行三维地球模型数值实验, 取得新的进展, 我们将在地球科学领域中取得自己应有的话语权。继承李老敢于探索、勇于创新、严谨论证的科学精神, 中国人能够在地球科学基础性重大理论问题上作出自己的贡献。

致谢

此项工作曾以“全球构造的内波机制研究”列入中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学开放研究实验室项目。中国地震局地震科学联合基金会及河南省科委、鹤壁市科委也对该项研究给予资助。中国科学院武汉分院院长许厚泽院士、张赤军研究员、开放实验室主任高布锡研究员、王勇研究员、郝晓光研究员等对此项研究给予热情的支持与帮助, 作者对他们表示衷心的感谢!

作者感谢刘东生、任纪舜、滕吉文院士对此项工作的鼓励, 及在请教问题时给予热情的解答。还要感谢中国地质矿产信息研究院报道室、中国地震局地球物理研究所图书资料室、中国地震局地震研究所资料室在查阅资料方面给予的方便和帮助。对各位同仁给予的支持和帮助, 作者在此表示衷心的感谢!

基金项目

本文受中国科学院测量与地球物理研究所开放实验室“全球构造的内波理论研究”项目资助。

参考文献

- [1] 柴东浩, 陈廷愚. 新地球观——从大陆漂移到板块构造[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2000: 163-167.
- [2] 马宗晋, 杜品仁. 地球的非对称性[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2007: 158, 332-334.
- [3] 滕吉文, 白武明, 张中杰, 等. 中国大陆动力学研究导向和思考[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 1913-1936.
- [4] Richardson, S.H., Gurney, J.J., Erlank, A.J. and Harris, J.W. (1984) Origin of Diamonds in Old Enriched Mantle. *Nature*, **310**, 198-202. <https://doi.org/10.1038/310198a0>
- [5] Mitchell, R.H. (1991) Kimberlites and Lamproites Primary Sources of Diamond. *Geoscience Canada*, **18**, 1-16.
- [6] 路凤香, 郑建平, 陈美华. 有关金刚石形成条件的讨论[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 125-132.
- [7] 肖化云, 刘丛强, 黄智龙. 金刚石包裹体中的古地幔信息[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 244-250
- [8] 池顺良. 大地构造运动主导能量来自地球自转动能[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(8): 1288-1295.
- [9] A.E. 夏德格. 地球动力学原理[M]. 王仁, 黄杰藩, 译. 北京: 地震出版社, 1986: 229-257.
- [10] K. 兰伯克. 地球自转的变化[M]. 李志安, 李永生, 胡辉, 译. 北京: 地震出版社, 1988: 329-350.
- [11] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973: 10.
- [12] 梁元博. 海底构造[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 79-119.
- [13] 白文吉, 杨经绥. 山系的形成与板块构造碰撞无关[J]. 地质论评, 1993, 39(2): 110-117.
- [14] 李德威. 大陆构造样式及大陆动力学模式初探[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 88-93.
- [15] 丁中一, 王仁. 引潮力的全球位移场及应力场[J]. 地球物理学报, 1986, 29(6): 578-596.
- [16] 池顺良, 骆鸣津. 固体地球中的潮汐机械能流[J]. 地震学报, 1992, 14(2): 243-246.
- [17] 李瑞浩. 重力学引论[M]. 北京: 地震出版社, 1988: 265-270.
- [18] 钱宁. 异重流[M]. 北京: 水利出版社, 1958: 71.
- [19] R.A. 拜格诺. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 钱宁, 林秉南, 译. 北京: 科学出版社, 1959: 2.
- [20] 易家训. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982: 23-24.

- [21] L. 普朗特. 流体力学概论[M]. 郭永怀, 陆士嘉, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 533-535.
- [22] C.H. 尼基伏罗夫. 弹性与塑性理论[M]. 徐芝纶, 译. 北京: 高等教育出版社, 1965: 19-56.
- [23] 马杏垣, 主编. 重力作用与构造运动[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 19.
- [24] Jin, Z.-M., Green, H.W. and Yi, Z. (1994) Melt Topology in Partially Molten Mantle Peridotite during Ductile Deformation. *Nature*, **372**, 164-167. <https://doi.org/10.1038/372164a0>
- [25] 金振民. 上地幔动态部分熔融研究的重要发现[J]. 地球科学, 1995(4): 438.
- [26] O.C. 监凯维奇. 有限元法[M]. 尹泽勇, 江伯南, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 717-800.
- [27] 高布锡, 潘显章. 板块运动与地壳形变的内波理论研讨会在武汉召开——地壳运动理论的新探讨[J]. 地球科学进展, 1994, 9(3): 93-94.
- [28] 陈国能. 原地重熔与元素地球化学场[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [29] 池顺良. 地壳中的负荷应力[J]. 地震地质, 1984, 6(2): 6-8.
- [30] 任纪舜, 徐芹芹, 赵磊, 等. 寻找消失的大陆[J]. 地质论评, 2015, 61(5): 969-989.
- [31] 郑永飞, 主编. 化学地球动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 128-132.
- [32] 欧阳自远, 王世杰. 堆积的地球及其初始不均一性[J]. 地球科学进展, 1994, 9(3): 1-5.
- [33] Menard, H.W. (1960) *Marine Geology of the Pacific*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [34] Meyerhoff, A.A. 全球构造的新概念——颤动构造简介[M]. 中国地质矿产信息研究院, 1992: 35.
- [35] Yoder, H.Q.S. 玄武岩浆成因[M]. 翟淳, 马绍周, 译. 北京: 地质出版社, 1982: 69-82.
- [36] 王军芝, 编. 现今地球动力学问题讨论会论文集[M]. 北京: 地震出版社, 1994: 19-25.
- [37] 列扎诺夫. 大洋的起源[M]. 孙德佩, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 128-134.
- [38] 荣书之, 齐有科. 地质学概论[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 237.
- [39] Woodhouse, J.H. and Dziewonski, A.M. (1984) Mapping the Uppermantle, Three Dimensional Model of Earth Structure by Inversion of Seismic Wave Forms. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 5953-5986. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05953>
- [40] 方剑, 许厚泽. 全球地幔密度异常及其构造意义[J]. 测绘学报, 2000, 29(s1): 16-21.
- [41] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根柱构造[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 48-49.
- [42] 杜乐天. 地幔流体与玄武岩及碱性岩浆成因[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 145-154.
- [43] Lowman Jr., P.D. (1985) Plate Tectonics with Fixed Continents: A Testable Hypothesis I. *Journal of Petroleum Geology*, **8**, 373-378. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1985.tb00279.x>
- [44] Hamblin, W. K. 殷维翰等译地球动力系统[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 90-108.
- [45] Dietz, R.S. (1961) Continent and Ocean Evolution by Spreading of the Sea Floor. *Nature*, **190**, 854-857. <https://doi.org/10.1038/190854a0>
- [46] 汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 38+492-504.
- [47] Anderson, D.L. 地球的理论[M]. 关华平, 译. 北京: 地震出版社, 1993: 39.
- [48] King, E.A. 宇宙地质学概论[M]. 王道德, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1983: 111.
- [49] 马宗晋, 杜品仁. 地球的非对称性[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2007: 332-334+158.
- [50] 汪品先. 大洋钻探五十年: 回顾与前瞻[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3868-3876.
- [51] 金性春. 漂移的大陆[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 262.
- [52] 万天丰. 论全球岩石圈板块构造的动力学机制[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 320-334.
- [53] 罗永国. 试谈发展有中国特色的地质科学理论的几个问题[J]. 地质科技参考资料, 地质矿产部情报研究所, 1992(3): 1-5.