

大陆板块运动的经验规律

谈镐生 关德相

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文通过观测到的板块运动速度和一个参数(有效洋脊长度和大陆板块面积的比值)间的关联,得到了一个线性关系经验规律,这规律预言存在三个不等式,即:(1)海洋板块底部的粘性 \ll 大陆板块底部的粘性;(2)转换断层阻力 \ll 洋脊推力;(3)海沟-岛弧区或造山带的阻力 \ll 洋脊推力。前一预言已得到证实,但后两个仍有待将来观测的检验。一个简化的力学分析显示,沿洋脊的边界推力和在大陆板块底部的粘性表面阻力形成大陆板块上的主要作用力。

近年来,由于提出了板块构造理论,大陆漂移和海底扩张的运动学取得了很大的成功。但是,关于板块构造的驱动机理,知道得却相当少^[1,2]。也就是说,板块构造理论的动力学问题尚没有解决。因此,许多地球物理学家和流体力学家一直致力于这一研究,并提出了各种不同的驱动力模式^[3-6]。

一些人认为,岩石圈下面软流圈中由温度梯度引起的对流运动,给予板块以粘性剪切力,拖拽板块运动。文献[3]指出,软流圈中这种对流环的水平尺度比板块的水平尺度小很多,因此每个板块下存在着若干个对流环。由于相邻对流环的流动方向相反,对板块的作用力大部互相抵消,不能产生足够的净剪切力作用于板块的下表面,把板块拖动。文献[1]指出,软流圈中的大尺度地幔流动产生阻力,不受小尺度对流环的影响。

另有一些人则强调下沉板块的作用^[7]。他们认为,岩石圈板块下沉部分的温度低于环境温度,因而受到向下的力作用。这个力被称为负浮力,它驱使板块运动。但是,这种驱动力模式难以解释下面三点事实,即:(1)并非所有板块都有下沉部分,例如欧亚板块和非洲板块就没有下沉部分;(2)地球物理观测和震源机制研究表明,许多下沉板块内部受到的是压应力,而不是张应力^[8];(3)负浮力是垂直向下的。如果海洋板块不受到来自后面的强大推力,它怎么会向大陆板块下面斜冲呢?

还有人提出了在洋脊处的重力滑移产生驱动力^[9]。他们认为,洋脊处的地形比洋底高,具有附加的势能,于是洋脊趋向于扩张以得到较低的势能。但是,洋脊的高度是由上升的高温地幔物质不断加入来维持的,所以这种洋脊推力归根到底还是来源于热对流^[1]。

上述各种驱动力模式,各家看法很不一致,得不到一个板块运动的统一规律。文献[1]和[9]曾利用统计图表方法,试图找出板块运动速度分别与板块的总面积、大陆面积、洋脊长度、海沟长度和转换断层长度的关系。但是都没有得到令人满意的规律性结果。

本文1980年6月18日收到,

本文根据文献 [1] 和 [9] 所给出的数据,通过分析大陆板块的受力状况,找到了控制大陆板块运动的主要参数 l_R/s_c (洋脊有效长度和大陆面积之比),发现了大陆板块速度与 l_R/s_c 呈线性关系的运动规律,并且证实了大陆板块运动的驱动力来自大洋中脊。

至于这一驱动力的起因,我们认为,是由于大洋中脊下面涌熔岩通道内的较高压力所引起,而不是由于在大洋中脊处的重力下滑所引起的。关于这一点,我们将在别处进行详细讨论。

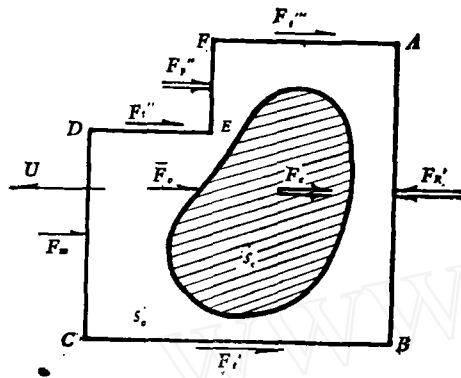


图1 大陆板块受力示意图

大陆板块的受力情况简化模式可用图 1 示意。图中 $ABCDEF$ 为一个大陆板块,其中阴影区代表大陆,面积为 s_c ; 其余区域代表海洋,面积为 s_o 。边界 AB , EF 为大洋中脊,其上分别作用有推力 F_R' 和 F_R'' 。 BC , DE 和 FA 为转换断层,分别作用有阻力 F_i' , F_i'' 和 F_i''' 。 CD 为造山带或海沟-岛弧区,作用有阻力 F_m 。根据文献 [1], 以上所有作用力都与它们的边界长度成正比,即:

$$F_R = F_R' - F_R'' = k_R l_R, \quad (1)$$

$$F_i = F_i' + F_i'' + F_i''' = k_i l_i, \quad (2)$$

$$F_m = k_m l_m. \quad (3)$$

k_R , k_i 和 k_m 为比例常数; l_R , l_i 和 l_m 为各自的边界长度; l_R 为 AB 长度与 EF 长度之差 (称为大洋中脊的有效长度), l_i 为长度 BC , DE 和 FA 之和, l_m 为长度 CD 。

此外,大陆板块的下表面受到软流圈中地幔物质的耦合作用。按照文献 [1], 它是阻碍板块运动的力。由于大陆和海洋下面地幔物质的有效粘性系数不同,它应该分成两部分来计算,即大陆下面的地幔阻力 F_c 和海洋下面的地幔阻力 F_o :

$$F_c = k_\mu \mu_c s_c U, \quad (4)$$

$$F_o = k_\mu \mu_o s_o U, \quad (5)$$

其中 k_μ 为比例系数, U 为板块的运动速度, μ_c 和 μ_o 分别为大陆和海洋下面地幔的粘性系数。

因为板块的运动速度基本上不变,所以有

$$F_R = F_i + F_m + F_o + F_c. \quad (6)$$

将 (1)–(5) 式代入 (6) 式,得出关系式

$$U = m \frac{l_R}{s_c \left(1 + \frac{\mu_o s_o}{\mu_c s_c} \right)} \left(1 - \frac{k_i l_i}{k_R l_R} - \frac{k_m l_m}{k_R l_R} \right), \quad (7)$$

其中 $m = k_R / (k_\mu \mu_c)$ 。

表 1 给出了 (7) 式中各有关量的大小。表中 U 的数据取自文献 [8]: 印度板块和阿拉伯板块的 U 值取自文献 [8] 的图 10, 其余板块的 U 值根据文献 [8] 中表 4 的数据, 取算术平均值。表中除 U 以外的数据, 取自文献 [1] 中表 1 或者根据其中的数据算出。

需要指出,目前板块的划分方法很不一致。Morgan^[10] 提出 20 个板块的方案, Lepichon^[11] 提出 6 个板块的方案, Minster 等人^[9] 提出 10 个板块的方案, Forsyth 和 Uyed^[12] 提出 12 个板块的方案。尹赞勋指出^[12], 小板块影响很小, 只有局部的重要性; 大板块才能控制全球构造的基本格局。

表 1 大陆板块的运动学参数

序号	板 块	U 厘米/年	s_c $\times 10^4$ 公里 ²	l_R $\times 10^4$ 公里	l_R/s_c $\times 10^{-4}$ 公里 ⁻¹	s_o/s_c	l_i/l_R	l_m/l_R
1	北 美	2.6	36	86	2.39	0.67	1.42	1.40
2	南 美	2.3	20	71	3.55	1.05	1.51	1.56
3	南 极	0.6	15	17	1.13	2.93	7.76	1.00
4	印 度	6.6	15	108	7.20	3.00	1.16	1.58
5	非 洲	1.9	31	58	1.87	1.55	2.05	1.19
6	欧 亚	1.1	51	35	0.69	0.35	1.60	7.86
7	阿 拉 伯	4.0	4.4	27	6.14	0.11	1.33	1.19

注： U 的数据取自文献[8]，其余数据取自文献[1]。

本文采用大板块划分方案。但是文献[1]指出，在大西洋裂开的历史中，南美洲和北美洲多半是独立运动的。因此，我们采用 Minster 等人的十大板块方案。按照这种方案，南美板块和北美板块分开处理，于是，大陆板块有七个，如表 1 所列。海洋板块有三个，为太平洋板块、那斯加板块和可可板块。

图 2 表示大陆板块的运动速度 U 对应于参数 l_R/s_c 值的七个观测数据。图中每一个点代表一个大陆板块，其序号与表 1 相同。从图 2 可以看出，七个点全部落在一条通过原点的直线附近。我们希望这现象不只是一个偶然的巧合，而是确实反映了大陆板块的运动规律。图中的直线是根据七个点，利用最小二乘法画出的。

由 (7) 式可以看出， U 本来是一个含 l_R/s_c 、 $\mu_o s_o / (\mu_c s_c)$ 、 $k_i l_i / (k_R l_R)$ 和 $k_m l_m / (k_R l_R)$ 变量的多元函数。但是，对于七个大陆板块，虽然 s_o/s_c 、 l_i/l_R 和 l_m/l_R 变化很大(见表 1)，而 U 与 l_R/s_c 间的关系却可用图 2 中的直线表示。

这说明 $\mu_o s_o / (\mu_c s_c)$ 、 $k_i l_i / (k_R l_R)$ 和 $k_m l_m / (k_R l_R)$ 对 U 的影响很小。为此，要求下面三个关系成立，即：

$$\frac{\mu_o s_o}{\mu_c s_c} \ll 1, \tag{8}$$

$$\frac{k_i l_i}{k_R l_R} \ll 1, \tag{9}$$

$$\frac{k_m l_m}{k_R l_R} \ll 1. \tag{10}$$

由表 1， s_o/s_c 的最大值为 3.00。为了使 (8) 式成立，必须有 $(\mu_o/\mu_c) \ll 1$ ，也就是说，大陆板块下地幔的有效粘性系数至少应该比海洋板块下的高一个数量级。这一结论与根据低速层的表面波研究所得到的结果是一致的^[13,14]，许多作者都接受了这一看法^[6,9,15]。

注意到 (1)–(3) 式，(9) 式表示转换断层的阻力远小于大洋中脊的推力，式 (10) 表示海

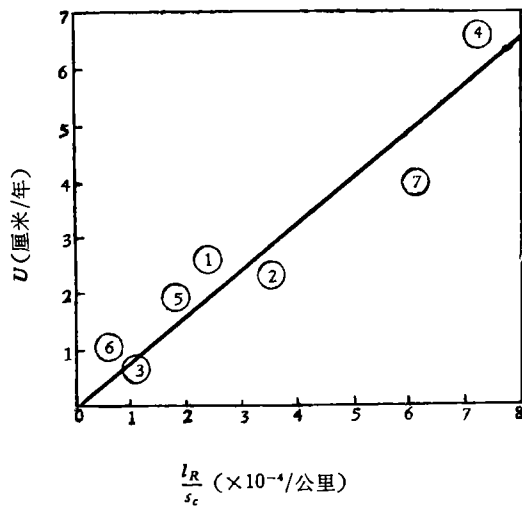


图 2 板块速度 U 和参数 l_R/s_c 的关系

沟-岛弧区或造山带的阻力远小于大洋中脊的推力。这两点预言有待验证。

利用公式(8)–(10), (7)式可以近似写为:

$$U \approx m \frac{l_R}{s_c} \quad (11)$$

根据图 2, 我们得到 $m = 0.0832$ 公里²/年。

在板块构造理论中, l_R/s_c 是一个重要参数, l_R/s_c 小, 要求 l_R 小(推力小), 或者 s_c 大(阻力大)。因此, 一个板块的 l_R/s_c 越小, 板块便越稳固; l_R/s_c 越大, 板块便具有越大的冲撞力。从表 1 或图 2 看出, 在七个大陆板块中, l_R/s_c 值最小的是欧亚板块, l_R/s_c 值最大的是印度板块。当这两个极端板块相撞时, 便产生了世界上最强烈的造山活动: 隆起了高耸的喜马拉雅山和青藏高原。式(11)还可写成

$$F_c \approx F_R \quad (12)$$

这表明大陆板块的主要驱动力是沿大洋中脊的推力, 主要阻力是大陆下面地幔的粘性力。其力与这两个相比, 居次要地位。

致谢: 本文曾得到尹赞勋教授的许多帮助, 作者表示衷心谢意。

参 考 文 献

- [1] Donald Forsyth and Seiya Uyeda, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 43(1975), 163—200.
- [2] 傅承义, 大陆漂移、海底扩张和板块构造, 科学出版社, 1973.
- [3] Richter, F. M., *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 11(1973), 223—287.
- [4] Mckenzie, D. P., Robert, J. M., Weiss, N. O., *Journal of Fluid Mechanics*, 62(1974), 465—538.
- [5] Turcotte, D. L., Oxburgh, E. R., *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 4(1972), 33—38.
- [6] 李荫亭、关德相, 中国科学, 1979, 3:281—292.
- [7] Mckenzie, D. P., *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 18(1969), 1—32.
- [8] Hales, A. L., *Earth Planet Sci. Lett.*, 6(1969), 31—34.
- [9] Minster, J. B., Jordan, T. H., Molnar, P. and Haines, E., *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 36(1974), 541—576.
- [10] Morgan, W. J., *J. G. R.*, 73(1968), 1959—1982.
- [11] Lepichon, X., *J. G. R.*, 73(1968), 3661—3697.
- [12] 尹赞勋, 地质科学, 1978, 1:99—112.
- [13] Knopoff, L., *Tectonophysics*, 13(1972), 497—519.
- [14] Alexander, S. S., *EOS, Trans. Am. geophys. Un.*, 55(1974), 358—359.
- [15] Artyushkov, E. V., *J. G. R.*, 78(1973), 7675—7708.