

# 板块运动的统一经验性规律和驱动机理

谈 镐 生 关 德 相

(中国科学院力学研究所,北京)

## 摘 要

本文根据观测数据,找到了既适用于大陆板块也适用于海洋板块的统一经验性运动规律: 板块的运动速度  $U$  正比于几何参数  $T_d$  (有效洋脊长度与海沟长度之和除以大陆面积与下沉条带两侧表面积之和)。根据这一经验规律,简化的力学分析表明,板块运动的驱动力来源于洋脊的推力和下沉条带的拉力,阻力主要为作用于板块大陆部分底面和下沉条带两侧面的粘性力。

岩石圈板块的运动规律对于研究板块的驱动机理具有十分重要的意义<sup>[1-4]</sup>。

本文通过对简化力学模型的分析,我们将证明主要的几何参数,在长度方面,应该包括有效洋脊长度和海沟长度;在面积方面,包括大陆面积和下沉条带面积。一个成功的参数选择,必然体现为现象和参数之间的良好关联。

## 一、板块的受力分析

板块受力情况的简化模式可用图 1 示意。图中  $ABCDEF$  为一岩石圈板块,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  $AB$  为大洋中脊,其上作用有洋脊推力  $F_R$ 。 $BC$ 、 $DE$  和  $FA$  为板块边界断层,分别作用有摩擦阻力  $F'_i$ 、 $F''_i$  和  $F'''_i$ 。 $CD$  为除海沟以外的碰撞边界,作用有碰撞阻力  $F'_m$ 。根据文献 [1],以上所有的力都与它们的边界长度成正比,即

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

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

$$F'_m = k_m l'_m. \quad (3)$$

$k_R$ 、 $k_i$  和  $k_m$  为比例常数,  $l_R$ 、 $l_i$  和  $l'_m$  为各自的边界长度。洋脊有效长度  $l_R$  定义为能够施加净推力的长度。 $l_i$  为  $BC$ 、 $DE$  和  $FA$  长度之和,  $l'_m$  为  $CD$  的长度。

岩石圈板块下表面,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

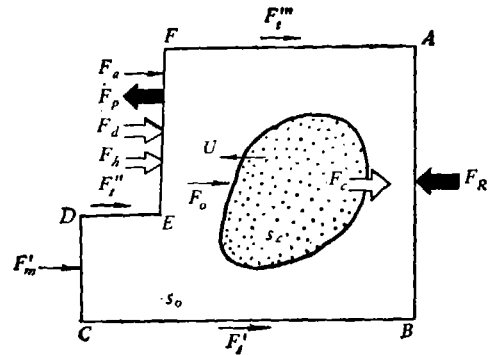


图 1 岩石圈板块受力示意图

本文 1981 年 5 月 11 日收到,1981 年 9 月 2 日收到修改稿。

动的力。由于大陆和海洋下面地幔物质的粘性系数不同,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  $F_o$ , 即

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

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

其中  $k_\mu$  为比例系数(假设大陆和海洋下面相同),  $U$  为板块的运动速度,  $\mu_c$  和  $\mu_o$  分别为大陆和海洋下面地幔的粘性系数。

图 1 中边界  $EF$  为海沟,其长度为  $l_p$ , 在海沟下面具有一下沉条带。关于下沉条带的受力情况见图 2。其中  $F_a$  为海沟的碰撞阻力,  $F_h$  为下沉条带的前缘阻力,  $F_d$  为作用在下沉条带两侧的粘性阻力,  $F_p$  为负浮力沿条带的切向分量。

关于单位宽度内下沉条带的负浮力  $k_p$ , 象文献 [1] 一样,假设它与板块速度无关,并且对于所有下沉条带都是相同的,于是,有

$$F_p = k_p l_p. \quad (6)$$

虽然  $F_h$  和  $F_d$  都沿着同一方向,并且按照文献 [1],  $F_h$  比  $F_d$  大三到五倍,但是由于两者性质不同,所以把它们分开来考虑。  $F_d$  作为粘性阻力,依赖于板块的运动速度。另一方面,  $F_h$  作为下沉条带的前缘阻力,可假设与速度无关。它将  $F_p$  的大部分抵消,可始终把它与  $F_p$  结合在一起考虑。于是,有

$$F_d = k_\mu \mu_d S_d U, \quad (7)$$

$$F_h = k_h l_p, \quad (8)$$

其中  $\mu_d$  为软流层中的粘性系数,  $S_d$  为下沉条带两侧表面积之和,  $k_h$  为比例系数。根据文献 [5], 大陆下面软流圈内的粘性系数在一定深度之内随深度的变化不明显。所以,假设  $\mu_d = \mu_c$ , 于是,(7)式可改写为:

$$F_d = k_\mu \mu_c S_d U. \quad (9)$$

至于  $F_a$ , 可象文献 [1] 一样,仍写为:

$$F_a = k_m l_p. \quad (10)$$

将(10)与(3)式相加,有

$$F_m = k_m l_m, \quad (11)$$

其中  $F_m$  为  $F_a$  与  $F'_m$  之和,  $l_m$  为  $l_p$  与  $l'_m$  之和,即  $l_m$  为包括海沟长度在内的碰撞边界长度。

考虑到板块以恒速运动,作用在板块上的外力必须处于平衡状态。Elsasser<sup>[6]</sup> 指出,岩石圈可以充当一个应力传导物 (Stress guide)。它把下沉条带的负浮力象通过“柔绳”一样传递到板块的水平部分。于是有

$$F_R + F_p = F_t + F_m + F_o + F_c + F_d + F_h. \quad (12)$$

将式(1)至(11)式代入(12)式,得到关系式

$$U = m \frac{l_R + \frac{k_n}{k_R} l_p}{(S_c + S_d) \left(1 + \frac{\mu_o}{\mu_c} \frac{S_o}{S_c + S_d}\right)} \left(1 - \frac{k_t l_t}{k_R l_R + k_n l_p} - \frac{k_m l_m}{k_R l_R + k_n l_p}\right), \quad (13)$$

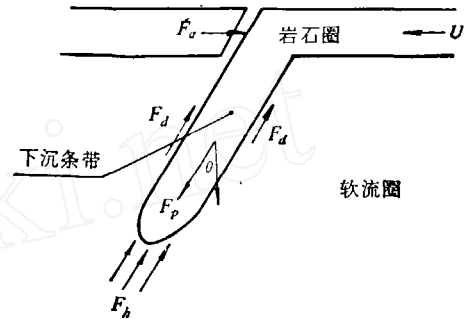


图 2 下沉条带受力示意图

其中

$$m = \frac{k_R}{k_{\mu} \mu_c}, \quad (14)$$

$$k_n = k_p - k_h, \quad (15)$$

$$S_d = 2l_p l_b. \quad (16)$$

关于  $S_d$  的估算, 可进行如下: 文献 [7] 指出, 下沉条带俯冲进软流圈中的长度  $l_b$  与板块速度  $U$  之间存在经验关系式,

$$l_b = AU, \quad (17)$$

其中  $A$  为常数, 大约为  $10^7$  年, 因此有

$$S_d = 2AUl_p. \quad (18)$$

## 二、板块运动的统一经验性规律

表 1 中给出了公式 (13) 中各有量的大小. 表中  $S_d$  的数据根据 (18) 式算出,  $U$  的数据取自文献 [2], 其余数据取自文献 [1] 中表 1 或根据其中的数据算出.

表 1 岩石圈板块的运动学参数

序 号	板 块	$U$ 厘米/年	$S_c$ 10 <sup>6</sup> 公里 <sup>2</sup>	$S_d$ 10 <sup>6</sup> 公里 <sup>2</sup>	$S_c + S_d$ 10 <sup>6</sup> 公里 <sup>2</sup>	$l_R$ 10 <sup>2</sup> 公里	$l_p$ 10 <sup>2</sup> 公里	$S_o$ $S_c + S_d$	$l_t$ $l_R + l_p$	$l_m$ $l_R + l_p$	$\frac{l_R + l_p}{S_c + S_d}$
											10 <sup>-4</sup> 公里 <sup>-1</sup>
1	北 美	2.6	36	0.52	36.5	86	10	0.76	1.27	1.25	2.63
2	南 美	2.2	20	0.13	20.1	71	3	1.04	1.45	1.50	3.68
3	南 极	1.4	15	—	15.0	17	—	2.93	7.76	1.00	1.13
4	印 度	6.6	15	11.0	26.0	108	83	1.75	0.65	0.90	7.35
5	非 洲	2.2	31	0.40	31.4	58	9	1.53	1.78	1.03	2.13
6	欧 亚	1.2	51	—	51.0	35	—	0.46	1.60	7.86	0.69
7	阿 拉 伯	4.0	4.4	—	4.4	27	—	0.11	1.33	1.19	6.14
8	太 平 洋	8.6	—	19.4	19.4	119	113	5.57	0.78	0.72	11.9
9	那 斯 加	9.5	—	9.8	9.8	54	52	1.53	0.45	0.59	10.8
10	可 可	9.0	—	4.5	4.5	29	25	0.64	0.30	0.59	12.0

需要指出, 目前板块的划分方法很不一致<sup>[8]</sup>. 我们采用 Minster 等人<sup>[2]</sup> 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 (No. 1—7), 海洋板块有三个 (No. 8—10), 如表 1 所列.

图 3 表示岩石圈板块的速度  $U$  对应于参数  $T_d = (l_R + l_p)/(S_c + S_d)$  的十个观测数据. 图中每一个点代表一个岩石圈板块, 其序号与表 1 相同. 从图 3 可以看出, 十个点全部落在一条通过原点的直线附近. 我们认为这现象不只是一个偶然的巧合, 而确实反映了板块的运动规律. 图中的直线是根据十个点, 利用最小二乘法画出的.

由 (13) 式可以看出,  $U$  本来是一个含  $(l_R + \frac{k_n}{k_R} l_p)$ ,  $(S_c + S_d)$ ,  $\mu_o S_o / \mu_c (S_c + S_d)$ ,  $k_t l_t / (k_R l_R + k_n l_p)$ ,  $k_m l_m / (k_R l_R + k_n l_p)$  变量的多元函数. 对于十个岩石圈板块, 速度  $U$  与  $(l_R + l_p) / (S_c + S_d)$  间的关系满足图 3 中的线性关联. 这说明首先存在等式

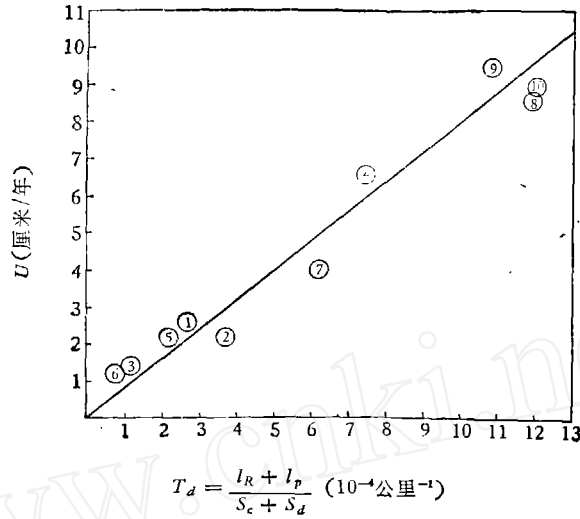


图 3 板块速度  $U$  和参数  $T_d$  的关系

$$\frac{k_n}{k_R} = 1. \tag{19}$$

其它比例  $\mu_o S_o / \mu_c (S_c + S_d)$ ,  $k_i l_i / (k_R l_R + k_n l_p)$  和  $k_m l_m / (k_R l_R + k_n l_p)$  对  $U$  的影响很小,也就是要求存在下面三个关系式:

$$\frac{\mu_o}{\mu_c} \frac{S_o}{S_c + S_d} \ll 1, \tag{20}$$

$$\frac{k_i l_i}{k_R l_R + k_n l_p} \ll 1, \tag{21}$$

$$\frac{k_m l_m}{k_R l_R + k_n l_p} \ll 1. \tag{22}$$

将(19)式分别代入(13),(21)和(22)式中,得出

$$U = m \frac{l_R + l_p}{(S_c + S_d) \left(1 + \frac{\mu_o}{\mu_c} \frac{S_o}{S_c + S_d}\right)} \left(1 - \frac{k_i}{k_R} \frac{l_i}{l_R + l_p} - \frac{k_m}{k_R} \frac{l_m}{l_R + l_p}\right), \tag{23}$$

$$\frac{k_i}{k_R} \frac{l_i}{l_R + l_p} \ll 1, \tag{24}$$

$$\frac{k_m}{k_R} \frac{l_m}{l_R + l_p} \ll 1. \tag{25}$$

由表 1,  $S_o / (S_c + S_d)$  的最大值为 5.57, 为了使式(20)成立, 必须有

$$\frac{\mu_o}{\mu_c} \ll 1. \tag{26}$$

也就是说, 大陆下面地幔的粘性系数至少应该比海洋下面的高一个数量级. 这一结论与根据低速层的表面波研究得到的结果是一致的<sup>[9,10]</sup>, 许多作者都接受了这一看法<sup>[2,10,12]</sup>.

由表 1 看出, 所有岩石圈板块, 都满足不等式

$$l_p < l_R. \tag{27}$$

(24)和(25)式可以改写为:

$$\frac{k_i l_i}{k_R l_R} \ll 1, \quad (28)$$

$$\frac{k_m l_m}{k_R l_R} \ll 1. \quad (29)$$

(28)式表示边界断层阻力远小于洋脊推力, (29)式表示碰撞阻力远小于洋脊推力。这两点预言有待以后验证。

将(20),(24),(25)式代入(23)式,最后得到岩石圈板块的统一运动规律

$$U = m \frac{l_R + l_p}{S_c + S_d}. \quad (30)$$

其中

$$m = \frac{k_R}{k_\mu \mu_c} = 0.08 \text{ 公里}^2/\text{年}. \quad (31)$$

(30)式又可写成

$$F_d + F_c = F_R + (F_p - F_h) = F_R + F_n. \quad (32)$$

这表明,岩石圈板块运动的驱动力有两个:一个是洋脊推力  $F_R$ , 另一个是下沉条带的净拉力  $F_n$ 。岩石圈板块运动的主要阻力也有两个:一个是作用于板块大陆底面的地幔粘性力  $F_c$ , 另一个是作用于下沉条带两侧的地幔粘性力  $F_d$ 。

将(15)与(19)式合并,有

$$k_R = k_p - k_h. \quad (33)$$

这说明,对于单位长度而言,尽管下沉条带的负浮力和前缘阻力本身的数值可能都很大,但两者的差值,即净拉力,则与洋脊推力大小相当。

对于无下沉条带的大陆板块,(32)式可简化为:

$$F_c = F_R, \quad (34)$$

此时板块的驱动力只有洋脊推力,主要阻力只有大陆底面的地幔粘性力,这就是文献[3]的结果。

利用上述结果,可对板块内部的应力状态做一些分析。图4表示一个海洋板块,它主要受如下几个力的作用:洋脊推力  $F_R$ , 前缘阻力  $F_h$ , 负浮力  $F_p$  ( $F_p - F_h = F_n$ , 为净拉力)和地幔的粘性阻力  $F_d$ , 其余的力与它们相比是次要的,可以忽略。

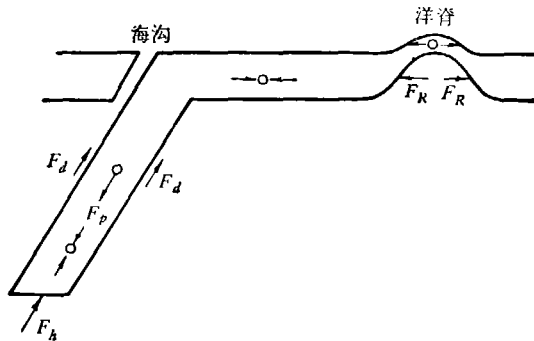


图4 海洋板块内部应力示意图

正如图 4 所示,海洋板块前面作用有净拉力  $F_n$ ,后面作用有推力  $F_R$ 。这是一种比较稳定的受力状态,所以,尽管板块的厚度与长度之比有时很小,即板块很薄,它也不会失稳,产生大规模褶皱。

在大洋中脊的顶峰处,由于受到洋脊的推力作用,板块内部承受拉应力,而且这一应力只局限于板块上部很薄的一层之内。大洋中脊处的震源机制研究表明<sup>[13,14]</sup>,此处的地震都是浅源的,其应力状态是拉伸。所以,这一预言和观测结果一致。

不难看出,在板块水平部分,应该承受压应力,这与观测数据也一致<sup>[15,16]</sup>。

文献[17]指出,负浮力  $F_p$  的中心在 200—300 公里的深度。因此,在这一深度以下的板块,由于主要受到  $F_p$  与  $F_n$  的压缩,其内部应该承受压应力,这也与观测数据一致<sup>[18]</sup>。

在负浮力中心以上的深度,板块内部的受力情况比较复杂,需要结合下沉条带的具体速度来进行分析。一般说来,本文所说的板块速度,是指整个板块的平均速度。但是,正如文献[19]所指出,因为板块是被限制在一个球面上运动,所以它的瞬时速度可以用围绕一个通过地心的轴线的转动来描述。于是,如果板块面积较大,则它的各部分差别也比较大。例如,对于太平洋板块,日本和汤加海沟距转轴(转轴与地表的交点)较远,这里下沉条带的速度大于平均速度;相反, Kermadec 海沟距转轴较近,其速度小于平均速度。如果下沉条带的速度大于板块的平均速度,则前缘阻力较大,使得负浮力中心以上深度内的应力为压应力;相反,为拉应力。此预言是与文献[1]的结果相一致的。

### 三、结 论

岩石圈板块的运动速度服从公式(30)所表达的统一经验性规律: 板块的速度  $U$  正比于参数  $T_d = (l_R + l_p)/(S_c + S_d)$ , 其比例系数为 0.08 公里<sup>2</sup>/年。

岩石圈板块运动的主要驱动力有两个,即下沉条带的净拉力和洋脊推力。主要阻力也有两个,即下沉条带两侧面的地幔粘性力和大陆底部的地幔粘性力。作用在板块上的其它力,与上述四个力相比,都是次要的。板块作等速运动,表明这四个力之间存在平衡。

对于不具有下沉条带的三个大陆板块 (No. 3, 6, 7), 主要驱动力只有洋脊推力,主要阻力只有大陆下面的地幔粘性力。对于三个海洋板块 (No. 8, 9, 10), 主要驱动力除洋脊推力外,还有冷沉条带的净拉力;主要阻力只有条带两侧的粘性力。海洋板块的运动速度较大表明大陆底部的地幔粘性力是非常有效的阻力。

关系式(19)要求单位长度的洋脊推力  $k_R$  和单位长度的下沉条带净拉力  $k_n$  相等。这一等式具有深远函义,它保证了图 3 中的十个点全部落在一条直线的近旁,为我们的岩石圈板块运动的统一经验性规律提供了力学依据。

致谢: 本文曾得到尹赞勋教授许多帮助,作者表示衷心谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Forsyth, D. & Uyeda, S., *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 43(1975), 163—200.
- [2] Minster, J. B., Jordan, T. H., Molnar, P. & Haines, E., *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 36 (1974), 541—576.
- [3] 谈镐生、关德相, 中国科学, 1981, 3: 337—340.
- [4] Tureotte, D. L. & Oxburgh, E. R., *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 4(1972), 33—38.

- [ 5 ] Cathles, L. M., *The Viscosity of the Earth's Mantle*, Princeton University Press, New York, 1975.
- [ 6 ] Elsasser, W. M., *The Application of Modern Physics to the Earth and Planetary Interiors* (Ed. Runcorn, S. K.), Wiley-Interscience, New York, 1969, 223—246.
- [ 7 ] Isacks, B., Oliver, J. E. & Sykes, L. R., *J. Geophys. Res.*, **73**(1968), 5855—5899.
- [ 8 ] 傅承义, 大陆漂移、海底扩张和板块构造, 科学出版社, 1973年.
- [ 9 ] Knopoff, L., *Tectonophysics*, **13**(1972), 497—519.
- [ 10 ] Alexander, S. S., *Eos, Trans. Am. Geophys. Un.*, **55**(1974), 358—359.
- [ 11 ] 李荫亭、关德相, 中国科学, 1979, **3**: 281—292.
- [ 12 ] Artyushkov, E. V., *J. Geophys. Res.*, **78**(1973), 7675—7708.
- [ 13 ] Sykes, L. R., *J. Geophys. Res.*, **72**(1967), 2131—2151.
- [ 14 ] Sleep, N. H. & Biehler, S., *J. Geophys. Res.*, **75** (1970), 2748—2752.
- [ 15 ] Mendiguren, J. A., *J. Geophys. Res.*, **76**(1971), 3861—3879.
- [ 16 ] Forsyth, D., *Nature*, **243**(1973), 78—79.
- [ 17 ] Turcotte, D. L. & Schubert, G., *J. Geophys. Res.*, **76**(1971), 7980—7987.
- [ 18 ] Sykes, L. R. & Sbar, M. L., *Nature*, **245**(1973), 298—302.
- [ 19 ] Le Pichon, X., Francheteau, J. & Bonnin, J., *Plate Tectonics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1973, 28—33.