



地壳板块运动的广义相对论理论

板块构造学说问世以来,迅速地为广大地学工作者所接受^[1,2],被 J. T. 威尔逊宣称为一
次“地球科学中的革命”。它是当前最广泛采用的一种大地构造理论。

但是,随着板块构造学说的理论研究不断深入,人们也发现和遇到一些新问题。人们认
识到板块学说在许多方面的问题尚未解决或仍在发展中。其中最重要的问题之一是,虽然深
海钻探和海洋地磁测量证明了大陆漂移和海底扩张的事实,但其动力机制迄今为止还没有
得到证实。板块构造学说中对板块移动机制的研究提出了一些假说,例如认为是地幔对流带
动了板块的移动。也就是说,板块是受对流的地幔物质所拖 被动地移动的。这种假说在说
明什么力量使地幔发生对流以及地幔物质如何对流方面遇到了困难,还是一个待研究的问
题。另外,一些作者甚至认为地幔对流是根本不存在的^[3]。因此,地壳板块移动的驱动力问题
仍是一个没有解决的问题。而这个问题对板块学说是至关重要的,正如竹内均指出^[4]：“如果
在地幔中不发生对流,这个学说就成为建筑在沙滩上的楼阁”。

所以,在板块学说取得巨大成就后,随着地球科学的深入发展也出现了一些新问题,甚
至出现了一定程度的“混乱”和“危机”。出现这种情况的原因固然很多,但我们认为最根本
的原因在于,迄今为止的地壳板块的运动理论还是建立在经典的时—空观的基础上的。因此这
种理论在发展的过程中必然会遇到不可逾越的困难。爱因斯坦创立的广义相对论说明了时
间和空间与物质运动有不可分割的联系。该理论无论在微观上还是在宇宙学问题上都取得
了很大的成就,越来越多的事实证明它是认识世界的科学的时—空观。而转动和引力场是广
义相对论中的两个十分重要的基本问题^[5]。因此,对于转动的地球上的物质(板块)在引力场
中的运动,用广义相对论的理论来进行研究,无论从哲学、自然科学和逻辑上来说都是十分
必要的了。

本文根据广义相对论的理论提出一种地壳板块移动的机制,作为解决地壳板块移动机
制及相关问题的一种尝试。

天文学观测表明,行星绕太阳公转的轨道并不是严格的周期轨道,而是存在所谓“进动”
现象。经典的牛顿力学不能解释这种现象,而用广义相对论的理论则能很好地解释。行星在
以太阳为中心的引力场中的进动表明,质点在运行一周(2π)后并不回到原来的位置。由此使
我们想到,如果把地壳板块看作是在地心引力场中运动的质点,那么当地球自转一周后,板
块也不会回到原来的位置。也就是说,板块相对于原来的位置移动了。因此,从广义相对论的
理论出发,板块的移动是自然而然的事情。

这里有几个问题需要阐明:

- (1)地壳板块在地球引力场中的运动是否符合广义相对论讨论行星轨道进动时的条件?
- (2)这种移动的数量级是否足以在地质年代的尺度上表现出来?

(3)由广义相对论出发阐明的板块运动能否解释地壳及地球十分复杂的物质运动形式,及解释迄今为止所观测到的现象?

我们首先简要回顾广义相对论对行星轨道进动的讨论^[6,7]。它是以爱因斯坦场方程的球对称解为基础的。所谓场方程就是决定物质和空间的运动性质的引力场方程:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

此为一张量方程。 $R_{\mu\nu}$ 叫做黎曼-克里斯托菲张量,或简称曲率张量, $g_{\mu\nu}$ 为度规张量, G 为引力常数, $T_{\mu\nu}$ 为应力-能量张量, C 为光速。按照K.施瓦茨希德(Schwarzschild)的解法,在球座标系中,其轨道方程为:

$$W = \frac{1}{a(1-\varepsilon^2)} \left[1 + \varepsilon \sin\varphi - \frac{3GM\varepsilon}{c^2 a(1-\varepsilon^2)} \varphi \cos\varphi + \frac{GM\varepsilon^2}{c^2 a(1-\varepsilon^2)} \cos^2\varphi + \frac{GM}{c^2 a(1-\varepsilon^2)} (3 + \varepsilon^2) \right] \quad (2)$$

$(W = \frac{1}{r})$

其中 a 为椭圆轨道的半长轴, ε 为偏心率, γ, φ 为球坐标, M 为产生引力的质量。上式中的项:

$$-\frac{3GM\varepsilon}{c^2 a^2(1-\varepsilon^2)^2} \varphi \cos\varphi \quad (3)$$

将引起轨道的前移(advance,亦称进动)。通过下述变换:

$$\frac{\varepsilon}{a(1-\varepsilon^2)} \left[\sin\varphi - \frac{3GM\varepsilon \varphi \cos\varphi}{c^2 a(1-\varepsilon^2)} \right] = \frac{\varepsilon}{a(1-\varepsilon^2)} \left[1 + \frac{9G^2 M^2 \varphi^2}{c^4 a^2 (1-\varepsilon^2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin \left[\varphi + t g^{-1} \left(-\frac{3GM\varepsilon \varphi}{C^2 a(1-\varepsilon^2)} \right) \right] \quad (4)$$

可知,行星每公转一周,进动的角位移为:

$$\Delta_1 = \frac{6\pi GM}{c^2 a(1-\varepsilon^2)} \quad (5)$$

天文学中对水星近日点进动的观测很好地符合于上述广义相对论推算的理论值。

对于第一个问题,我们知道,地球在太阳系中除绕太阳公转外,同时绕地轴自转,周期约为24小时。地球的赤道半径为6378 km,表面是地壳,厚几公里至几十公里。地壳以下直到2900 km为地幔(上地幔和下地幔)。从2900 km到地心称为地核(外核和内核)。岩石圈包括地壳和莫霍面以下的上地幔的刚性部分。岩石圈在海洋区厚仅数十公里,在大陆区厚数十公里至一百多公里。岩石圈受到板块移动的影响发生破裂和变形。岩石圈下则为带塑性和流动性的软流圈。所谓大陆漂移,就是岩石圈在软流圈上的漂移。

因此,若取地球质心为原点建立球坐标系,刚性板块的运动可由其质心在地球引力场中的运动来描述。由此,地球的物质分布及板块的运动是满足Schwarzschild求解引力场方程的条件的。对于自转的地球来说,其表面的板块近似作圆周运动,根据广义相对论,某一板块在运动一周后并没有回到原来的位置。

对于第二个问题,由前所述,质点运行一周产生的进动为(5)式所示。将地球的下列常数代入: $G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$, $M=5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$, $a=6.37 \times 10^6 \text{ m}$ 及光速 $C=3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。把地球近似看成球形,则自转一周进动的数量级为:

$$\Delta_1 \sim 10^{-9} \text{ 弧度}$$

它对应地球表面的距离约为 10^{-6} m 的数量级。这是一个极微小的量。但 Δ 是随转动的圈数 n 而累加的,即:

$$\Delta = n\Delta_1 \quad (6)$$

以宇宙或地质年代的尺度,则进动的累计值可以达到相当的数量级。

关于如何用广义相对论的理论来解释板块运动所表现出的十分复杂的形式,我们认为,首先根据广义相对论推出的前述(3)式,引起轨道进动的项与 φ 有关。这就是说,对于地球自转,其表面板块的进动效应会随纬度的升高而急剧降低;其次,各个板块的质量、形状等有很大的差异;第三,在地球漫长的演化进程中,其形状、自转速率等都是变化的;最后,地球的运动还受太阳及其它行星和月球的影响。上述这些原因都可以造成各个板块运动的差异,不同历史年代的运动也会不相同。加上各个板块之间的相互作用,因此在时间-空间上形成十分复杂的运动形态。

我们从广义相对论的理论来说明板块的运动并不排斥前人对板块运动的观测和一些假说,例如地幔对流假说。只是根据广义相对论地幔对流已经不是板块运动的必要条件。而且,从广义相对论出发,地幔、地壳均处在地球的引力场中运动。因此,我们还可以深入讨论诸如地球内部的状态、地磁场的变化等一系列问题。根据我们的初步研究,板块学说赖以建立的许多观测资料都可以应用广义相对论的理论予以解释。我们相信,在广义相对论理论的基础上,通过地球科学中各个领域的深入研究工作,可望建立一整套地球动力学的广义相对论理论。

(国家地震局兰州地震研究所 荣代潞)

参考文献

- 1 P J 威利. 动力地球学. 北京:地质出版社,1978
- 2 李春昱,等. 板块构造的基本问题. 北京:地震出版社,1986
- 3 杨槐. 地质科学理论发展的哲学思考. 大自然探索,1994,13(3)
- 4 竹内均,等. 地壳运动假说. 北京:地质出版社,1978
- 5 A 爱因斯坦. 相对论的意义. 北京:科学出版社,1979
- 6 J 韦伯. 广义相对论与引力波. 北京:科学出版社,1979
- 7 F R 坦盖里尼. 广义相对论导论. 上海:上海科学出版社,1963

THE THEORY OF GENERAL RELATIVITY FOR THE MOVEMENT OF CRUST AND PLATES

Rong Dailu

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)