

板块运动的纬向重力模式

郝晓光^{1,2}

(1. 中国科学院 测量与地球物理研究所,湖北武汉 430077; 2. 同济大学 测量与国土信息工程系,上海 200092)

摘要:按照“纬向正常密度假说”的观点提出了“纬向密度异常”和“纬向重力”的概念,进而提出了板块运动的“纬向重力模式”。按照这一模式,纬向重力总是把地球物质从“纬向密度异常高”的地区推向“纬向密度异常低”的地区。一方面,纬向重力驱动岩石圈沿水平方向运动。另一方面,因纬向重力驱动软流圈物质沿水平方向运动而使得岩石圈沿垂直方向发生运动,纬向密度异常高地区的岩石圈会因软流圈物质的流失而下沉,纬向密度异常低地区的岩石圈会因为软流圈物质的补充而上升。

关键词: 纬向正常密度假说; 纬向密度异常; 纬向重力

中图分类号: P 312

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 374X(2001)06 - 0653 - 04

Latitudinal Gravity Mode of Plate Movement

HAO Xiaoguang^{1,2}

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Academia Sinica, Wuhan 430077, China;

2. Department of Surveying and Land Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents the concept of “latitudinal density anomaly” and “latitudinal gravity” on the basis of viewpoint of “latitudinal normal density hypothesis”, and then puts forward a “latitudinal gravity mode of plate movement”. According to this mode, latitudinal gravity always pushes the earth’s matter toward the region of “latitudinal density anomaly low” from “latitudinal density anomaly high”. On one hand, latitudinal gravity drives lithosphere movement along the horizontal direction. On the other hand, because latitudinal gravity drives asthenosphere matter movement along the horizontal direction, it enables the lithosphere to move along the vertical direction; lithosphere in the region of latitudinal density anomaly high will subside due to loss of asthenosphere matter, but lithosphere in the region of latitudinal density anomaly low will rise because of adding the asthenosphere matter.

Key words: latitudinal normal density hypothesis; latitudinal density anomaly; latitudinal gravity

1901年,奥地利的休斯(E. Suess)出版了名著《地球的面貌》,书中首次出现了大陆漂移的概念。休斯认为,非洲、南极洲和印度曾经是一个超级大陆,并称它为“冈瓦纳大陆”(Gondwanaland)。但是,正如李四光先生所指出的那样,休斯甚至在他的晚年也似乎没有能够找出大陆漂移的动力^[1]。迄今为止,大陆漂移及板块运动的动力问题已困扰了地学界达100年之久,是地球科学的心腹之患与世纪之谜。

1 从大陆漂移假说到板块构造学说的发展

1910年,美国的泰勒(F. B. Taylor)指出,由于欧洲与亚洲一起向南蠕动,因而在第三纪掀起了横跨欧亚的山脉带。泰勒认为,在白垩纪时期月球被地球捕获,而且最初离地球要比现在近得多,潮汐力使地球的

收稿日期:2000 - 06 - 27

基金项目:中国科学院院长基金资助项目;同济大学博士后基金资助项目;中国科学院知识创新资助项目(KZCX2 - 106)

作者简介:郝晓光(1958 -),男,上海人,高级工程师,博士生。

转速陡然增大,地球的高速旋转使大陆从极区滑向赤道.这个动力理论遇到的问题,如果造山作用同白垩纪地球捕获月球关联的话,那么早于第三纪的造山运动就得不到解释.而且强大到足以移动大陆的潮汐力,必然会在很短的时间内使地球的旋转减慢到几乎停止.

1915年,德国的魏格纳(A. Wegener)出版了名著《大陆和海洋的形成》,提出了轰动地学界的大陆漂移假说.魏格纳认为,距今约2亿年前,冈瓦纳大陆与亚洲以及北美洲曾经是一个联合古陆(pangaea),后来由于“离极力”(pole fleeing force)的作用而分裂开来.离极力的概念首先是匈牙利的R. von Eotvos于1912年提出来的.对于椭圆形的地球来说,在子午面内看到的重力线是弯曲的,两极位于弯曲的凹侧.由于漂浮物质的重心高于被排开的下层物质的重心,重力线的弯曲使得重力和浮力不能相抵消,因而有一个指向赤道的合力.P. S. Epstein(1921), W. D. Lambert(1921), H. Ertel(1935),以及大陆漂移假说反对派的代表人物英国的H. Jeffreys的研究表明,尽管离极力是存在的,但它的量级很小,难以克服大陆漂移的摩擦阻力.A. Prey(1936)甚至对离极力的真实性提出了质疑.而魏格纳却认为,离极力的量级虽不大,但持续数百万年就会使大陆漂移.把离极力解释成大陆漂移的动力理论,使得大陆漂移假说在魏格纳1930年去世后不久便遭受到严重挫折.

大陆漂移假说在海洋中得到了复兴.1889年,英国的P. Aldrich在太平洋中发现了海沟.1923年,荷兰的F. A. Vening Meinesz开始在海上进行重力测量,并发现在海沟处具有较大的重力负异常.这意味着有某种力在保持着地球表面的不规则形状,以阻止其变平的自然倾向.Vening Meinesz认为这种力与地幔的热对流有一定的关系.在此基础上,英国爱丁堡大学的霍姆斯(A. Holmes)于1928年提出了地幔对流假说.霍姆斯认为,当地幔对流体上升到大陆中央并向两侧散开时,大陆就会裂开形成海洋.当地幔对流体经长距离迁移逐渐冷却加重后,就会下沉回到地幔深处,并将海底向下牵引形成海沟.可惜地幔对流假说在当时没有引起人们的注意.甚至连霍姆斯本人也认为,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.

1885年,英国的M. F. Maury在北大西洋中发现了洋中脊.1956年,美国哥伦比亚大学的M. Ewing和B. C. Heezen发现了贯穿全世界大洋的洋中脊体系.1954年,英国剑桥大学的布拉德(E. C. Bullard)开始在海上进行海底热流测量.20世纪60年代的海底热流测量结果表明,洋中脊处的热流值高出海沟处的热流值达20倍之多.这意味着地幔对流有可能在洋中脊处上升而在海沟处下降,使得地幔对流假说在提出30年后得到了证实.1961年,R. S. Dietz第一次引入了“海底扩张”这一名词.1962年,美国普林斯顿大学的赫斯(H. H. Hess)以地幔对流假说为桥梁把大陆漂移假说发展成海底扩张假说.赫斯认为,洋中脊是地幔对流物质的出口,海底由此诞生并向两侧扩张传送,到达海沟后又重新沉入地幔中,全过程需要2~3亿年.在赫斯发表海底扩张假说之前,美国加利福尼亚大学的V. Vacquier于1959年发现在北美西部的太平洋底呈现一种规则条带状的地磁异常图形.1963年,布拉德的学生瓦因(F. J. Vine)和马修斯(D. H. Matthews)针对V. Vacquier的发现提出了一个让人简直不敢相信的科学见解,由于地磁方向在地质历史上发生周期性倒转,正负相间的海底地磁异常图形正是地球磁场周期性转向时海底离开洋中脊而扩张的结果,从而令人信服地证实了海底扩张假说.

1914年,美国的J. Barrell提出了岩石圈和软流圈的概念.1926年,德国的古登堡(B. Gutenberg)发现地震波在通过地下100~200 km深度时速度不但没有增加反而减慢了,到达250 km深度时波速才又上升.因此他认为,在地下大约60~250 km的深度之间存在着一个塑性的软流圈.古登堡的发现在当时被认为是局部现象而没有引起重视.与地幔对流假说的命运相同,30年后的1960年5月22日,智利发生了8.9级大地震,对这次地震记录所进行的分析和计算为软流圈的存在提供了决定性的证据.

软流圈的发现使得大陆漂移、地幔对流和海底扩张的思想显得更加合理了.1968年前后,D. P. Mc Kenzie, R. L. Parker, W. J. Morgan和X. Le Pichon等人将岩石圈划分为六个板块,并且建立起了板块之间的运动模式.于是,被誉为地球科学革命的板块构造学说终于在海底扩张假说的基础上诞生了.板块构造学说认为,地质构造形成的原因是刚性板块的相互作用,板块在垂直方向上包括整个岩石圈的厚度约100 km,在水平方向上沿软流圈或连同软流圈一起迁移,板块运动的动力就是发生在软流圈中的地幔对流.

虽然地幔对流假说在大陆漂移假说发展成海底扩张假说,以及最后形成板块构造学说的过程中,起到了重要的桥梁作用,但地幔对流假说至今还没有解决板块运动的动力问题.如果说是地幔对流驱动了板块

运动,那么又是什么力量使地幔发生对流呢?

20世纪70年代初,W.J. Morgan和J. T. Wilson先后提出地幔中存在有一系列热点(hot spot)和地幔柱(mantle plume)的推测.他们认为,在下地幔有物质衰变生热形成热点,热力使物质熔化膨胀,构成一股热流向地表上升形成地幔柱,上升的热流到达岩石圈底部并向外围扩散,然后逐渐冷却、变重、下沉,形成对流.连成一线的热点则形成一条海底扩张带.但是这个理论遇到的问题,现在知道的热点不一定都在海底扩张带上,而在很长的一段扩张带上也不一定有热点^[2].

目前,板块构造学说仍处于定性讨论阶段,还有一些根本问题没有解决,如板块构造的形成机制和演变规律以及板块运动的动力问题等.在这些尚未解决的根本问题中,动力问题是最根本的问题.只要动力问题能得到解决,板块构造的形成机制和演变规律等问题也就有可能迎刃而解.在过去的一个世纪里,地幔对流假说起了大陆漂移假说与板块构造学说之间的桥梁作用.在新世纪的开端,板块运动的动力问题——这个地球科学的世纪之谜,正在以挑战者的姿态呼唤着新理论的诞生.

2 纬向正常密度假说的提出及其基本观点

地球重力学与大陆漂移假说在理论上有着密切的联系.1749年,法国的布格(P. Bouguer)根据对重力测量和垂线偏差的研究,发现安第斯山脉下面存在质量亏损,山体的密度似乎只有地球平均密度的1/6.这种现象在当时并未引起特别注意.100年后,英国的G. Everest于1854年在靠近喜马拉雅山的印度北部进行三角测量时,取得了由山体影响而导致垂线偏差的大量资料.英国的J. H. Pratt在整理这些垂线偏差的测量记录时发现,实测偏差大大小于理论计算偏差.这意味着山体及其下部存在着某种补偿作用,在一定程度上抵消了其高出地表那部分的影响.为了解释这种现象,J. H. Pratt和G. B. Airy于1855年创立了地球重力学中的著名理论——地壳均衡假说(isostatics).不过“均衡(isostasy)”这个词是C. E. Dutton后来于1889年给出的.地壳均衡假说认为,山脉是“漂浮”在地下深处一种密度较大的流体物质之上的.正是由于这一点,地壳均衡假说否定了“陆桥沉没”的观点,成为魏格纳建立大陆漂移假说的基础理论之一.

研究地球的形状和密度,是地球重力学的两项基本任务.现代地球重力学的经典理论是由英国的G. G. Stokes和前苏联的M. S. Molodensky分别于1849年和1945年创立的,但它们都是以回避密度分布为数学前提来研究地球形状的理论.最早用于研究地球密度的地球重力学理论是法国的克莱劳(A. C. Clairaut)于1743年发表的平衡形状理论.A. M. Legendre(1793年)和P. S. Laplace(1825年)根据这个理论得到了地球内部的密度定律.此后,G. H. Darwin(1884年),E. Wiechert(1897年),E. C. Bullard(1954年),F. Birch(1964年)及K. E. Bullen(1975年),也分别得到了类似的密度定律^[3].但是,以上密度定律得到的都是地球的径向密度分布 $\rho = \rho(r)$,而没有得到纬向密度分布 $\rho = \rho(B)$.研究地球的纬向密度分布对认识板块运动的动力问题有重要意义.为了建立密度与纬度的数学关系,郝晓光等于1998年提出了一个叫做“纬向密度”的概念,设地球为一旋转椭球,椭球的向径是地表到地心的直线段,再设任一向径上所有点的密度的平均值为 ρ ,因为不同向径对应不同纬度,所以不同纬度的 ρ 的数值不同,故称为椭球的“纬向密度”.实际上,纬向密度就是任一纬度由地表到地心的“垂直平均密度”^[4].

按照纬向密度概念和1980大地参考系统,郝晓光等于2000年解算出地球的纬向正常密度函数为
$$\rho(B) = \sqrt{5.526625^2 \cos^2 B + 5.509460^2 \sin^2 B} \text{ (g cm}^{-3}\text{)},$$
从数学上证明了地球赤道的纬向正常密度大于极点的纬向正常密度,进而提出了“纬向正常密度假说”^[5].

纬向正常密度假说定量地表达了以下观点.地球的纬向正常密度是按纬向正常密度函数 $\rho = \rho(B)$ 规则分布的,由极点向赤道逐渐压缩,纬度越高,纬向密度越小,这是地球的固有特性,是由地球重力学中的1980大地参考系统决定的.如果地球的纬向密度是按 $\rho = \rho(B)$ 正常分布的,那么地球物质的分布状态在纬度方向就是稳定的.而如果地球的纬向密度是异常分布的,那么地球的物质分布状态在纬度方向就是不稳定的.这时,与 $\rho = \rho(B)$ 不符的“纬向密度异常”就会引起水平方向的“纬向重力”.纬向重力总是把地球物质从“纬向密度异常高”($\rho > 0$)的地区推向“纬向密度异常低”($\rho < 0$)的地区.在纬向重力的驱动下,地球物质沿纬度方向发生迁移和调整,最终达到纬向密度的正常分布状态 $\rho = \rho(B)$.

应该特别说明,纬向重力与离极力是不同的.离极力是由于重力线的弯曲引起的,离极力总是把岩石

圈推向赤道,离极力是永远存在的.而纬向重力是由 $\Delta\delta$ 引起的, $\Delta\delta > 0$ 意味着物质“多余”, $\Delta\delta < 0$ 意味着物质“不足”.全球物质对“多余物质”的引力加上“多余物质”所受离心力的合力,就是“多余物质”所受到的纬向重力.纬向重力总是把物质从 $\Delta\delta > 0$ 地区推向 $\Delta\delta < 0$ 的地区而使得 $\Delta\delta = 0$.如果地球的纬向密度处于正常分布状态 $\Delta\delta = (B)$,那么 $\Delta\delta$ 也就处处为零,纬向重力也就不复存在了.

3 板块运动的纬向重力模式与大陆构造运动

有些地质学家认为,山脉褶皱是由于地壳的水平运动挤压所产生的,构造运动的动力是水平力.但另一些地质学家认为,山脉隆起是由于地壳的垂直运动所产生的,构造运动的动力是垂直力.在海洋里,构造运动的主要特征是海底扩张,因此可认为海洋构造运动的主要动力是水平力.在大陆上,构造运动的主要特征是山脉的隆起和盆地的沉陷,因此可认为大陆构造运动的主要动力是垂直力.迄今为止,还没有一种动力理论能够同时解释海洋和大陆不同类型的构造运动^[6].

以青藏高原为例,目前的观点是印度板块和欧亚板块碰撞导致青藏高原的隆起,板块碰撞的边界在雅鲁藏布江断裂带一线.板块碰撞的原因是印度板块向北俯冲.但是从全球板块的分布状况来看,印度洋的洋中脊似乎难以提供驱动印度板块向北运动的动力.况且,简单地用俯冲和碰撞的观点也无法解释远离碰撞边界的天山和阿尔泰山系的隆起和塔里木盆地的巨大沉降.另外,火星上的 Tharsis 高原比青藏高原的高度高一倍、面积大七倍,但是没有任何迹象表明火星上存在着像地球上那样大规模的板块运动^[7].

按照纬向正常密度假说的基本观点可以建立板块运动的“纬向重力模式”.这种模式能够把大陆岩石圈的水平运动和垂直运动联系在一起.一方面,纬向重力驱动岩石圈沿水平方向由 $\Delta\delta > 0$ 的地区向 $\Delta\delta < 0$ 的地区运动.另一方面,因纬向重力驱动软流圈物质沿水平方向运动而使得岩石圈沿垂直方向发生运动; $\Delta\delta > 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的流失而下沉造成盆地沉陷(见图1), $\Delta\delta < 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的补充而上升造成山脉隆升(见图2).在印度洋、印度次大陆和中亚等地均存在着大型的低密度中心,这些低密度中心与 $\Delta\delta$ 的关系及其动力学含义值得深入研究.应用纬向重力模式和地幔对流假说互为补充地来解释青藏高原的大陆构造运动,以便最终了解大陆岩石圈物质的增生与消减过程.

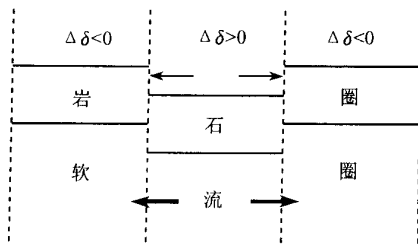


图1 板块运动的纬向重力模式——盆地沉陷

Fig.1 Latitudinal gravity mode of plate movement: basin subsidence

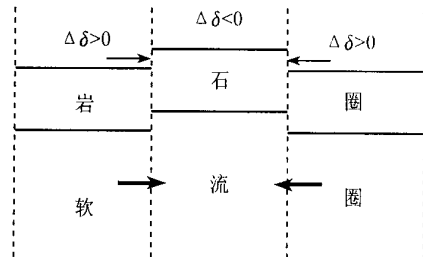


图2 板块运动的纬向重力模式——山脉隆升

Fig.2 Latitudinal gravity mode of plate movement: mountain uplift

参考文献:

- [1] 李四光. 地质力学方法[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] 李春昱. 板块构造学说的起源、发展和展望[A]. 李春昱,郭令智,朱夏,等. 板块构造基本问题[C]. 北京:地震出版社,1986. 6-8.
- [3] 傅承义,陈运泰,祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京:科学出版社,1985. 427-430.
- [4] 郝晓光,许厚泽. 水准椭球的纬向密度分布[J]. 测绘学报,1998,27(4):345-351.
- [5] 郝晓光,许厚泽,刘大杰. 地球的密度扁率与纬向正常密度假说[J]. 中国科学D辑,2000,30(4):436-441.
- [6] 曾融生. 固体地球物理学导论[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [7] 利布特里L. 大地构造物理学和地球动力学[M]. 孙坦译. 北京:地质出版社,1986.