

纬向正常密度假说与内波假说的比较

郝晓光, 方剑, 刘根友

(中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077)

摘要 本文简要介绍了大陆漂移及板块运动动力问题研究的历史背景, 以及我国地学工作者最新提出的“内波假说”和“纬向正常密度假说”在这一问题上的基本观点. 针对地壳运动及板块运动的动力机制问题, 对“内波假说”和“纬向正常密度假说”的基本观点进行了初步的比较.

关键词 板块运动, 内波假说, 纬向正常密度假说

中图分类号 P541, P312

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2005)04-0991-06

Comparison between latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis

HAO Xiao-guang, FANG Jian, LIU Gen-you

(Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract This paper gives a background review of geodynamical researches on plate motion, introduces the internal wave hypothesis and latitudinal normal density hypothesis presented by Chinese scholars recently. Aiming at dynamic mechanism of plate motion, we have done preliminary comparison and analysis between these two hypotheses.

Key words plate motion, internal wave hypothesis, latitudinal normal density hypothesis

0 引言

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, 就像李四光先生指出的那样, 休斯似乎没有能够, 甚至在他的晚年, 找出大陆漂移的动力^[1]. 迄今为止, 正如有关文献所述: “板块运动的驱动机制仍是一个悬而未决的问题, 需要众多地球科学家的持久努力”^[2]. 所以, 大陆漂移及板块运动的动力问题已困扰了地学界达一百年之久, 堪称地球科学的世纪之谜.

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所捕获, 而且最初离地球要比现在近得多, 潮汐力使地球的转速陡然增大, 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, 距今约两亿年前, 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

收稿日期 2005-03-10; 修回日期 2005-05-15.

基金项目 中科院野外台站研究基金(051114)资助.

作者简介 郝晓光, 男, 1958年生, 上海市人, 1982年毕业于同济大学测量系, 现任中国科学院测量与地球物理研究所研究员, 理学博士, 主要从事地球重力学研究, 已发表论文 40 余篇. (E-mail: hxg@asch.whigg.ac.cn)

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。

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。1960 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二十倍之多。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三十年后得到了证实。

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,全过程需要二至三亿年。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地倒转,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 公里到 200 公里深度时速度不但没有增加反而减慢了,到达 250 公里深度时波速才又上升。因此他认为,在地下大约 60 公里到 250 公里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,三十年后的 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. McKenzie, 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 公里,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?

1970 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^[3]。

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,动力问题是根本中的根本.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会迎刃而解.在过去的一个世纪里,地幔对流假说完成了大陆漂移假说与板块构造学说之间桥梁作用.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,正以挑战者的姿态呼唤着新理论的诞生.

2 内波假说的提出及其基本观点

2002年1月,我国地震出版社出版了池顺良和骆鸣津的专著:《海陆的起源》^[4],对传统的板块构造学说提出了全面的质疑,并系统阐述了关于地壳运动的“内波假说”.

“内波假说”关于地壳运动动力机制的基本观点如下:

地壳运动所需的能量是通过潮汐转化的地球自转能:由于日、月引力作用,引起地球自转速率减慢,自转能得以释放,成为地壳运动的能源^[4].

潮汐应力引起莫霍面上内波的生长,从而产生驱动物质水平迁移的“潮波驱动力”:由于存在交变潮汐应力,在莫霍面的斜坡带上出现了使莫霍面两侧物质相向迁移的水平向驱动力,称之为“潮波驱动力”^[4].

两种不同介质分界面上发生的波动称为“内波”,内波通常发生在分层介质系统中:在地壳和地幔交界处,存在一种下地壳物质与上地幔物质的水平相向迁移运动,壳幔分层介质体系界面内波的生长,导致物质迁移运动^[4].

“潮波驱动力”驱动莫霍面两侧的物质水平相向运动,推动大地构造的演化:下地壳物质与上地幔物质的水平相向迁移运动,在地槽区形成沉降与隆起带的交替分布;在海陆交界处发生更大时空尺度的物质迁移,使统一的地壳分化为厚薄不同的陆壳和洋壳^[4].

地壳在水平方向保持稳定,没有板块的漂移和碰撞,地壳的垂直运动则是由壳下物质的水平运动引起的:内波假说从地壳中发生的垂直运动现象出发,最后不仅得到了地壳垂直运动的解释,还获得了关于地壳底部发生大规模水平运动的解释.这种地壳与上地幔物质大规模水平运动的概念与大陆漂移、板块运动的概念完全不同.这是一种发生在地壳

深处的大规模物质水平迁移,迁移运动的时间尺度可跨越数十亿年,空间尺度可跨越上万公里^[4].

3 一种关于驱动机制的地质学观点

李四光先生在探讨地槽沉降运动的起因时指出:“我们不得不问,那个槽子底下的物质哪里去了?如果我们否定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”^[5].

克鲁泡特金在探讨岛弧和海沟区的重力异常时指出:“这种变化可能与壳下基底中物质水平方向上的流出与流入有关,或者至少可能与基底的致密情况有关.长期的垂直运动是由于深部物质的水平运动而产生”^[6].

梁元博在讨论岛弧和深海沟共轭体系的成因时指出:“海沟区地壳下面有部分物质被抽出,加添到岛弧区地壳下面,这种过程使得岛弧隆起和海沟相应下降”^[7].

白文吉在研究盆地和山脉的成因时指出:“盆地区上地幔相对隆升、山脉区上地幔相对沉降,盆地区被抬升和加热的下地壳物质向山脉下地壳方向蠕动.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”^[8].

可见,地质学家们已经意识到发生在深部的这种物质侧向迁移运动存在的必要性,以上论断表明了以下观点:地壳物质的垂直运动是由于地幔物质的水平运动造成的;山脉和盆地(或岛弧和海沟)是共轭诞生的,山脉(或岛弧)的隆起,是由于盆地(或海沟)的沉降引起的;山脉(或岛弧)隆起的成因是由于该地区地幔物质的流进造成的,而盆地(或海沟)沉降的成因是由于该地区地幔物质的流出造成的.以上观点将盆地与山脉(或海沟与岛弧)的演化过程描述成一种此消彼长的互动关系,这就是地质学界所说的“盆山耦合关系”.

虽然“盆山耦合关系”还没有阐明板块运动的驱动机制,然而,“尽管地质学家们没有进一步指出这种物质运动的驱动力,但是,指出地质实践要求存在这类形式的物质运动本身,就为进一步的探索指出了方向”^[4].

不难看出“内波假说”与“盆山耦合关系”的共同点:地壳的垂直运动是由于壳下物质的水平运动引起的.

4 纬向正常密度假说的提出及其基本观点

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着一个质量亏损,山体的密度似乎只有地球平均密度的六分之一,这种现象在当时并未引起特别注意.一百年后,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.英国的普拉特(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,普拉特和艾黎(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.不过“均衡”(isostasy)这个词是C. E. Dutton后来于1889年创造的.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.所以,地球重力学与大陆漂移假说及板块构造学说在理论上有着密切的联系,正是地球重力学的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;而正是Vening Meinesz的海洋重力测量,才导致了霍姆斯的地幔对流假说.

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司托克斯(G. G. Stokes)和前苏联的莫洛金斯基(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.勒让德(A. M. Legendre, 1793)和拉普拉斯(P. S. Laplace, 1825)根据这个理论得到了地球内部的密度定律.此后,达尔文(G. H. Darwin, 1884)、维歇特(E. Wiechert, 1897)、布拉德(E. C. Bullard, 1954)、布伦(K. E. Bullen, 1975)等世界著名的地球科学家,也分别得到了类似的密度定律^[9].但是,以上密度定律得到都是地球的径向密度分布,而没有得到纬向密度分布.

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,板块运动最有可能的动力是地幔物质流动,这一点已为大多数地球科学家所共识,但地幔物质流动的成因至今尚未查明.针对这一问题,本文作者等按照地球重力学的理论和方法进行

了持续的研究:1996年提出水准椭球的密度分布与纬度密切相关的设想^[10],1998年提出“纬向密度”概念、初步求解出“地球纬向正常密度函数”^[11],2000年提出“密度扁率”概念、提出“地球纬向正常密度假说”^[12],2001年给出山脉隆升和盆地沉陷的“纬向密度异常”模型、提出“板块运动纬向重力模式”^[13],2002年对“地球纬向正常密度函数”中的系数进行了修正^[14]、并初步提出了建立板块动力模型的地球重力学方法^[15],2004年求解出“地幔纬向正常密度函数”^[16]、并初步探讨了板块运动驱动机制的地球重力学条件^[17,18].与此同时,逐步建立起地球重力学的“参数椭球”理论作为上述研究的数学方法^[19-24].

“纬向正常密度假说”的基本观点认为:地幔的纬向正常密度是按“地幔纬向正常密度函数”(B)规则分布的;如果地幔的纬向密度是正常分布的,其物质分布状态在水平方向就是稳定的;而如果地幔的纬向密度是异常分布的,其物质分布状态在水平方向就是不稳定的,与(B)不符的“地幔纬向密度异常”就会引起的水平方向的重力.“水平重力”总是把地幔物质从“地幔纬向密度异常高”($\rho > 0$)的地区推向“地幔纬向密度异常低”($\rho < 0$)的地区.在“水平重力”的驱动下,地幔物质沿水平方向发生迁移和调整,最终达到地幔纬向密度的正常分布状态 $\rho = 0$.

“板块运动纬向重力模式”的基本观点认为:岩石圈板块的水平运动与垂直运动是一种辩证关系.一方面,“水平重力”驱动岩石圈沿水平方向由 $\rho > 0$ 的地区向 $\rho < 0$ 的地区运动,造成大陆漂移和板块运动.另一方面,因“水平重力”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; $\rho > 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的流出而下沉造成盆地沉陷(图1), $\rho < 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的流入而上升造成山脉隆升(图2).

需要说明的是,由于地球是旋转椭球,所以没有必要考虑“经向正常密度函数”.实际上,地幔纬向正常密度函数可表示为: $\rho(L, B) = \rho(B)$ ^[18].

不难看出“纬向正常密度假说”与“盆山耦合关系”的共同点,李四光等地质学家的观点在图一和图二中得到了完美的体现.所不同的是,“盆山耦合关系”只是指出了盆山共轭的现象,而纬向正常密度假说则试图阐明盆山共轭现象的成因和板块运动的驱动机制.克鲁泡特金的猜测是:盆山共轭现象“可能

与壳下基底中物质水平方向上的流入和流出有关,或者至少可能与基底的致密情况有关”;而纬向正常密度假说则明确表达地幔物质流动与地幔物质密度的内在联系: $\rho_e > 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的流出而下沉造成盆地沉降, $\rho_e < 0$ 地区的岩石圈会因为软流圈物质的流入而上升造成山脉隆升。

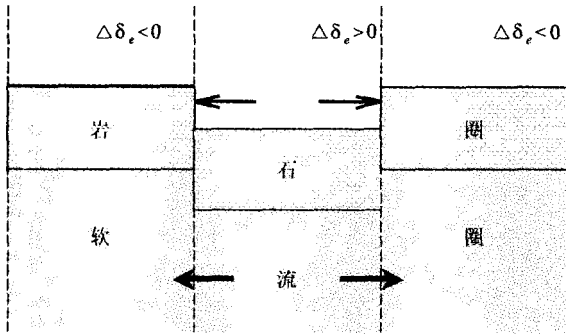


图 1 盆地沉降

Fig. 1 Basin subside

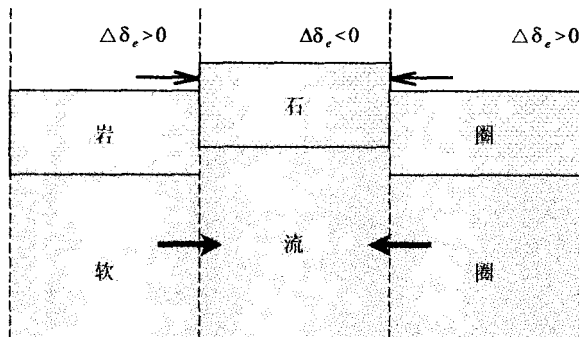


图 2 山脉隆升

Fig. 2 Mountain rise

5 纬向正常密度假说与内波假说的比较

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^[25]。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,火星上的塔尔锡斯(Tharsis)高原比地球上的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如地球上那样大规模的板块运动^[26]。

从地壳的水平运动与垂直运动及其动力机制上来看,“纬向正常密度假说”与“内波假说”有一些共同点,但也有一些不同点:

“纬向正常密度假说”与“内波假说”都认为,地壳的垂直运动是由于壳下物质的水平运动引起的,这与李四光等地质学家提出的“盆山耦合关系”是相同的。

“内波假说”提出了与“纬向正常密度假说”相近似的观点:“重力是推动地壳运动的杠杆,重力既是垂直力、也能够转化成强大的水平力,很难找到可用于推动地壳构造运动的非重力派生的水平力,所有构造运动的方式都能在地球重力场的作用下发生^[4]。”

“内波假说”认为,驱动地壳运动的“潮波驱动力”是太阳与月亮的引力引起的、是“外力”。但“纬向正常密度假说”却认为,驱动岩石圈与软流圈运动的“水平重力”是地球的自引力引起的、是“内力”。

“内波假说”认为,驱动地壳运动的“潮波驱动力”在水平方向存在与莫霍面的两侧、而且方向是“相向的”。但“纬向正常密度假说”却认为,驱动岩石圈与软流圈的运动的“水平重力”在水平方向存在于整体岩石圈与软流圈之中,“水平重力”的方向在同一地区是相同的、不是“相向的”。

“纬向正常密度假说”认为,岩石圈板块的水平运动与垂直运动是一种辩证关系;一方面,岩石圈沿水平方向运动、形成大陆漂移和板块运动,另一方面,岩石圈下的软流圈物质沿水平方向运动而使得岩石圈沿垂直方向运动、形成山脉隆升和盆地沉陷。但“内波假说”却认为,不存在地壳的水平运动和板块的漂移与碰撞,地壳与上地幔物质大规模水平运动的概念与大陆漂移、板块运动的概念完全不同,这是一种发生在地壳深处的大规模物质水平迁移,时间尺度可跨越数十亿年,空间尺度可跨越上万公里。

6 结 语

从 20 世纪初提出大陆漂移的动力问题,到现在

已经过了一百年.在地球重力学中,从1749年布格发现安第斯山脉下面的质量亏损到1855年普拉特提出地壳均衡假说用了一百年,从1849年的斯托克斯理论发展到1945年的莫洛金斯基理论也用了一百年.科学研究的历史上充满着大胆的假说,它们中的大多数被遗忘了,但其中的一部分却随着时间的推移变成了真理.“内波假说”和“纬向正常密度假说”也不可能例外,要想深入到板块运动的动力问题中去,就必须连续不断地进行顽强的努力和艰苦的探索.或许我们有理由无比兴奋地猜想:深刻揭示板块运动及地壳运动驱动机制的历史性机遇,莫非真的已经悄然来到了中国地球科学工作者的面前?

参 考 文 献 (References):

- [1] 李四光.地质力学方法[M].北京:科学出版社,1979,1~28.
- [2] 孙付平,赵铭.现代板块运动的测量和研究——地球物理方法[J].地球物理学进展,1998,13(1):1~16.
- [3] 李春昱.板块构造学说的起源、发展和展望.李春昱、郭令智、朱夏,等.板块构造基本问题[M].北京:地震出版社,1986,6~8.
- [4] 池顺良,骆鸣津.海陆的起源[M].北京:地震出版社,2002.
- [5] 李四光.地质力学概论[M].北京:科学出版社,1973,10~11.
- [6] . . . 克鲁泡特金, . . . 留斯吉赫, . . . 鲍瓦罗-什维柯夫斯基.大陆与大洋的重力异常及其对大地构造的意义[M].刘光鼎,译.北京:科学出版社,1963,51~60.
- [7] 梁元博.海底构造[M].北京:科学出版社,1983,79~119.
- [8] 白文吉,胡旭峰,杨经绥,周美付.山系的形成与板块构造碰撞无关[J].地质论评,1993,39(2):111~116.
- [9] 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.
- [10] 郝晓光.对重力测量纬度改正概念的修正[J].地壳形变与地震,1996,16(3):8~13.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 郝晓光.板块运动的纬向重力模式[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(6):653~656.
- [14] 郝晓光,刘根友.地球纬向正常密度函数系数的修正[J].大地测量与地球动力学,2002,22(2):53~56.
- [15] 郝晓光.地球重力学方法建立板块动力模型.大地测量与天文地球动力学进展——贺韩天芑先生八十寿辰[C].武汉:湖北科学技术出版社,2002,69~73.
- [16] 郝晓光,刘根友.地幔纬向正常密度函数[J].测绘学报,2004,33(2):105~109.
- [17] 郝晓光,刘根友.板块运动地球重力学机制研究[J].地学前沿,2004,11(1):84.
- [18] 郝晓光,刘根友.板块运动地球重力学机制探讨.大地测量与地球动力学进展——贺许厚泽院士七十寿辰[C].武汉:湖北科学技术出版社,2004,487~493.
- [19] 郝晓光.参数椭球表面的重力[J].地球科学,1997,22(2):223~226.
- [20] 郝晓光,许厚泽,刘大杰.地球的重力聚点及参数椭球的地球重力学性质[J].测绘学报,2000,29(2):109~113.
- [21] 郝晓光,许厚泽,刘大杰.参数椭球数学性质的初步研究[J].测绘学报,2001,30(3):203~207.
- [22] 郝晓光,刘大杰.参数椭球的准等位条件[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(1):86~89.
- [23] 郝晓光,刘根友.参数椭球的密度分布研究[J].测绘科学,2004,29(2):31~33.
- [24] 郝晓光,刘根友.似水准椭球[J].大地测量与地球动力学,2005,(3):45~49.
- [25] 曾融生.固体地球物理学导论[M].北京:科学出版社,1984,415~416.
- [26] L. 利布特里.大地构造物理学和地球动力学[M].孙坦,译.北京:地质出版社,1986,143~144.