

[学术争鸣]

# 再论纬向正常密度假说与内波假说的比较

郝晓光, 方剑, 柳林涛, 刘根友

(中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077)

**摘要** 本文对“纬向正常密度假说”和“内波假说”再次进行了讨论,进一步比较了二者的联系和区别.根据岩石圈板块概念和地幔对流假说的基本观点、以及“纬向正常密度假说”和“板块运动重力机制”的基本观点,提出了“软流圈板块”概念.

**关键词** 纬向正常密度假说,内波假说,岩石圈板块,软流圈板块

**中图分类号** P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2007)01-0312-05

## Discussion on latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis

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

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

**Abstract** This paper gives a further comparison and analysis between the latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis. Based on the concept of lithosphere plate and latitudinal normal density hypothesis, concept of asthenosphere plate is put forward.

**Keywords** latitudinal normal density hypothesis, internal wave hypothesis, lithosphere plate, asthenosphere plate

### 0 引言

《地球物理学进展》2005 年第 4 期刊出“纬向正常密度假说与内波假说的比较”<sup>[1]</sup>,讨论了关于地壳运动机制的“内波假说”和“纬向正常密度假说”的区别与联系.《地球物理学进展》2006 年第 4 期刊出“就‘纬向正常密度假说与内波假说的比较’一文与郝晓光、方剑、刘根友三位博士交换意见”<sup>[2]</sup>,从“动力学理论的运动学基础”、“全球构造运动的能源分析”和“中国地学的创新”三方面进一步阐述了“内波假说”的基本观点.

尊崇“学术争鸣推动学术研究”的理念,本文进一步讨论“纬向正常密度假说”与“内波假说”的联系和区别,并根据“地幔对流假说”和“纬向正常密度假说”的基本观点提出“软流圈板块”概念,请池顺良先生和地学界同行指教.

### 1 纬向正常密度假说与板块运动重力机制

“纬向正常密度假说”的基本观点认为:地幔的正常密度是按“地幔纬向正常密度函数” $\delta_c(B)$ 规则分布的;如果地幔密度是正常分布的,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  $\delta_c(B)$ 不符的“地幔密度异常” $\Delta\delta_c$ 就会引起的水平方向的重力.“水平重力”总是把地幔物质从“地幔密度异常高”( $\Delta\delta_c > 0$ )的地区推向“地幔密度异常低”( $\Delta\delta_c < 0$ )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,最终达到地幔密度的正常分布状态  $\Delta\delta_c = 0$ .“板块运动重力机制”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  $\Delta\delta_c > 0$  的地区向  $\Delta\delta_c < 0$  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”

收稿日期 2006-12-26; 修回日期 2007-01-10.

基金项目 国家自然科学基金(40574033)和中国科学院百人计划联合资助.

作者简介 郝晓光,男,1958年生,上海市人,1982年毕业于同济大学,中科院测量与地球物理研究所研究员,理学博士、博士后.主要从事大地测量学和地球物理学的理论研究.(E-mail:hxg@asch.whigg.ac.cn)

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; $\Delta\delta_e > 0$  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陷(见文献[1]图 1), $\Delta\delta_e < 0$  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(见文献[1]图 2)。

求解“纬向正常密度函数”时没有考虑“经向正常密度函数”,因为对于旋转椭球来说,“正常密度函数”只与纬度相关,可表示为

$$\delta_e(L, B) = \delta_e(B).$$

地幔要保持其正常重力位  $U_e(B)$ , 就会使地幔中  $\Delta\delta_e > 0$  的地区物质流向  $\Delta\delta_e < 0$  的地区,这与地球表面(海面)要保持其正常重力位  $U_0$  的道理是一样的. 电位差(电压)导致电流、水位差导致水流,地幔物质流动的原因是“重力位差”,即地幔的重力位异常  $\Delta U_e$ .

## 2 软流圈板块概念

建立板块运动模型的地质与地球物理学方法最早是由 LePichon 于 1968 年提出来的,所建立的板块运动模型为 LP68<sup>[3]</sup>. 此后,随着观测资料的积累和研究工作的深入,Chase 于 1972 年和 1978 年建立了板块运动模型 CH72 和 P071<sup>[4]</sup>,Minster 和 Jordon 于 1974 年和 1978 年建立了板块运动模型 RM1 和 RM2<sup>[5]</sup>,DeMets 和 Gordon 于 1990 年和 1994 年建立了板块运动模型 NUVEL-1 和 NUVEL-1A<sup>[6]</sup>. 最新的研究工作是根据 ITRF96 和 ITRF97 的结果研究板块运动模型,Sillard 用 ITRF96 速度场建立了 8 个主要板块的运动模型<sup>[7]</sup>,我国的张强、熊永清和朱文耀也得出了相应的研究成果<sup>[8~9]</sup>.

目前,“板块运动模型”的测量与研究已经取得丰硕成果,而“板块动力模型”的测量与研究却还没有取得实质性的进展,“板块构造还只是一种运动学理论,只要驱动力问题不解决,那么它仍然只是一种在继续思维着的假设”<sup>[10]</sup>。“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”<sup>[11]</sup>. 大陆漂移的概念最早是休斯(E. Suess)于 1901 年在其名著《地球的面貌》中首次提出的,但是,正如李四光先生所指出的那样:“休斯似乎没有能够,甚至在他的晚年,找出大陆漂移的动力”<sup>[12]</sup>.

针对大陆漂移及板块运动的动力问题,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底部并向两侧散开时,大陆就会裂开形成海

洋;而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. 1970 年代初, Morgan 和 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<sup>[13~14]</sup>. 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是,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<sup>[15]</sup>.

虽然对地幔对流的模式还存在着不少争论,但是,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. 由于地幔物质流动的成因至今尚未查明,所以板块构造学说研究仍处于“运动模型”阶段,而没有进入“动力模型”阶段.

针对地幔物质流动的成因问题,作者等按照地球重力学的理论和方法进行了持续的研究: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<sup>[16]</sup>,2000 年提出“密度扁率”概念和“纬向正常密度假说”<sup>[17]</sup>,2001 年给出山脉隆升和盆地沉陷的密度异常模型、提出“板块运动重力机制”<sup>[18]</sup>,2002 年对地球纬向正常密度函数的系数进行了修正<sup>[19]</sup>,2004 年求解出地幔纬向正常密度函数  $\delta_e(B)$ <sup>[20]</sup>,并提出板块运动的动力学条件<sup>[21]</sup>.

目前,板块的概念指的是岩石圈板块、是一种“运动板块”. 根据地幔对流假说的基本观点,岩石圈板块运动的动力存在于软流圈中. 根据“纬向正常密度假说”和“板块运动重力机制”的基本观点,一方面,密度异常高地区的岩石圈板块会向密度异常低的地区进行俯冲,另一方面,软流圈中的动力则是由于地幔密度异常及其重力位异常造成的,而近年来我国学者的研究也表明了地幔密度异常驱动地幔物质流动的观点<sup>[22~24]</sup>.

如果地幔密度异常真是驱动地幔物质流动的成因,那么就有可能在“纬向正常密度假说”的理论框架下建立全球的地幔密度异常驱动模式.

如果驱动地幔物质流动的动力是地幔密度异常的话,那么软流圈中就有可能存在着动力特性不同的区域,区域的边界可以按照地幔密度异常的正、负值域来进行划分. 不妨把这种按照动力特性划分的软流圈区域称为“软流圈板块”,“软流圈板块”的特性应该有两种,地幔密度正异常代表物质多余、区域

内的物质要向区域外移动、可称为“张力板块”，地幔密度负异常代表物质亏损、区域外的物质要向区域内移动、可称为“引力板块”。也就是说，“软流圈板块”可按照力学性质分为两类： $\Delta\delta_e > 0$ 的地区（ $\Delta U_e > 0$ 的地区）的物质总是要被推向  $\Delta\delta_e < 0$ 的地区（ $\Delta U_e < 0$ 的地区），最终达到  $\Delta\delta_e = 0$ （ $\Delta U_e = 0$ ）。所以， $\Delta U_e > 0$ 的“软流圈板块”可称为“张力板块”， $\Delta U_e < 0$ 的“软流圈板块”可称为“引力板块”。

### 3 几点讨论

虽然“软流圈板块”的建立及其与“岩石圈板块”的作用关系等重要的问题有待进行深入研究，但是，“软流圈板块”概念与“纬向正常密度假说”和“板块运动重力机制”一起，似乎使得扑朔迷离的板块运动动力问题变得鲜明和简明起来。当然，概念和假说只是解决问题的线索、而不是问题解决本身。围绕这一线索并针对“纬向正常密度假说”与“内波假说”的联系和区别，可进行以下几点讨论：

第一，“内波假说”指出：大陆地壳物质经受强烈的风化、剥蚀作用，不断被搬运到海洋中沉积；一个满意的地壳演化理论必须能解释，为什么大陆经长期的削平风化作用仍能保持那么高<sup>[25]</sup>。与“内波假说”一致，“纬向正常密度假说”认为，地球密度在水平方向总要维持一种“正常分布”，一旦陆地的物质被搬运到海洋中引起“密度异常”，那么海洋中的这些“异常物质”就会以地幔物质流动的形式回到陆地下面引起山脉隆升来补偿剥蚀。

第二，李四光等地质学家曾经指出：舍地球自转的实际而追求地幔对流的设想寻找地壳运动的推动力是不明智的，不能再将寻找大地构造运动动力来源的希望全放在地幔对流上，必须加强地球自转在大地构造运动中作用的研究<sup>[26~27]</sup>。“内波假说”也认为“地球自转动能是驱动全球构造运动的主导能源”<sup>[2]</sup>。但是，不应该把“地球自转”和“地幔物质流动”割裂开、并对立起来。按照“纬向正常密度假说”的观点，地幔物质流动的能源是地幔重力位异常，而“重力位”则是由“引力位”和“离心力位”两部分构成的，并没有忽视“地球自转”在大地构造运动中的作用。

第三，“大陆内部以蛇绿岩带为标志的地缝合线不一定在造山带内，即造山带常常出现在板内而不是板块边界上”<sup>[28]</sup>。“碰撞造山说在世界各国早已流行，人们可以随心所欲地使用碰撞造山作用描述某个造山带或造山作用，殊不知碰撞造山说法，根本是

没有地质事实根据的臆说”<sup>[29]</sup>。按照“纬向正常密度假说”的观点，造山运动不仅是岩石圈板块碰撞的结果，也是软流圈物质水平流动的结果，这样就对板内的造山运动给出了解释。

第四，李四光等地质学家指出：“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”<sup>[30]</sup>。“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”<sup>[31]</sup>。“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，形成盆地山运动”<sup>[32]</sup>。由文献<sup>[1]</sup>图1和图2不难看出，“纬向正常密度假说”和“板块运动重力机制”的观点完全符合盆地与山脉以及海沟与岛弧此消彼长的运动机制。

第五，一些地质学家认为，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。但另一些地质学家却认为，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这两种不同类型的构造运动<sup>[33]</sup>。然而，“纬向正常密度假说”、“板块运动重力机制”以及“软流圈板块”的基本观点阐明了地壳水平运动与垂直运动的辩证关系：一方面，岩石圈沿水平方向由密度异常高的地区向密度异常低的地区运动、造成大陆漂移和板块运动；另一方面，软流圈物质沿水平方向由密度异常高的地区向密度异常低的地区运动，进而使得岩石圈沿垂直方向发生运动、造成山脉隆升和盆地沉陷。

第六，凡是看到过全球地震分布图的人一定会对“环太平洋地震带”留下深刻印象。据统计，环太平洋地震带上发生的地震占全球发生地震总数的百分之七十五以上。那么为什么大西洋、印度洋和北冰洋不存在像太平洋那样的地震带？到底是太平洋的结构与众不同、还是太平洋的起源与众不同呢？看来这又是一个地球科学的未解之谜。按照“纬向正常密度假说”的观点可以进行猜测：太平洋地区一定发生过某种震撼人心的地学事件，这一事件使得太平洋

中的地球物质突然缺失,造成该地区的巨大密度异常;这时,地球物质应从四面八方涌向太平洋,受太平洋大陆坡阻碍而形成环太平洋地震带。

第七,文献<sup>[2]</sup>针对“纬向正常密度假说”指出:地幔中存在密度异常,产生水平分力是可能的,问题是这个水平分力究竟有多大?关于这个问题,作者在文献<sup>[21]</sup>中已进行了讨论。驱动板块运动的动力是地球本身由于密度分布的异常而产生的“地球自身重力”造成的,所以板块运动的动力学条件有两个,一是地球的质量足够大(质量越大、自身重力越大),二是地球密度分布足够异常(密度异常越大、所产生的“水平重力”越大);二者缺一不可<sup>[21]</sup>。1930年,年仅19岁的印度少年钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)在赶往剑桥大学去读研究生的轮船上写出了一篇在科学史上占有重要地位的论文(钱德拉塞卡于1983年获得诺贝尔奖,部分原因就在于这篇论文),几经周折后发表在美国的《天体物理学杂志》上。在这篇论文中他计算出,“一个大约为太阳质量一倍半的冷恒星不能支持自身以抵抗自己的引力”<sup>[34]</sup>。这个约一倍半的太阳质量,现在被称为“钱德拉塞卡质量极限”。如果一颗冷恒星的质量比“钱德拉塞卡质量极限”小,那么它最后会停止收缩并变为一颗半径为几千公里、密度为每立方厘米上百吨的“白矮星”。如果一颗冷恒星的质量比“钱德拉塞卡质量极限”大,那么它将无法支撑“自引力”的作用而最终坍缩成一点、变为“黑洞”。曾与惠勒(J. Wheeler)合写名著《引力》的美国加利福尼亚理工学院费曼物理学教授索恩(Kip S. Thorne)的观点应该能打消文献<sup>[2]</sup>作者的顾虑,索恩教授写道:“即使我们认为在所有力中最强的核力也顶不住引力的挤压”<sup>[35]</sup>。实际上,只要质量足够大,行星自身的重力是一种不可阻挡的力量,且不说“小小的”板块运动阻力,它甚至能够克服“所有力中最强的核力”而打破原子核,把一颗冷恒星“挤压”成一颗半径只有十几公里、密度为每立方厘米上亿吨的“中子星”。

第八,“内波假说”对“纬向正常密度假说”的质疑是:“如果不存在地幔密度异常自动产生的机制,在物质蠕动,重力势平衡之后运动也就停止了。构造运动是如何能够多次地进行的?这是纬向正常密度假说必须给以解答的问题”<sup>[2]</sup>。关于这个问题,“纬向正常密度假说”与“内波假说”的观点是不同的。“纬向正常密度假说”是“有限论”,认为地幔中重力势平衡之后运动也就停止了,除非有什么条件造成新的地幔密度异常。

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。“纬向正常密度假说”和“内波假说”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!

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 郝晓光,方剑,刘根友. 纬向正常密度假说与内波假说的比较[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 991~996.
- [2] 池顺良. 就“纬向正常密度假说与内波假说的比较”一文与郝晓光、方剑、刘根友三位博士交换意见[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1364~1369.
- [3] Le Pichon X. Sea-floor spreading and continent drift[J]. J. Geophys. Res., 1968, 73: 3661~3697.
- [4] Chase C G. Plate kinematics: The Americas, East Africa, and the rest of the world[J]. Earth planet. Sci. Lett., 1978, 37: 355~368.
- [5] Minster J B, Jordan T H. Present-day plate motions[J]. J. Geophys. Res., 1978, 83: 5331~5354.
- [6] DeMets C, et al. Current plate motions[J]. Geophys. J. Int., 1990, 101: 425~478.
- [7] Sillard P, Altamim Z, Boucher C. The ITRF96 realization and dits associated velocity field[J]. G. R. L., 1998, 25(17): 3223~3226.
- [8] Z. Qiang, Z. Wenyao, X. Yongqin. Global plate motion models incorporating the velocity field of ITRF96[J]. G. R. Lett., 1999, 26(18): 2813~2816.
- [9] 熊永清,朱文耀,张强. ITRF96 参考架中的全球板块运动[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 102~108.
- [10] 陈道汉,刘麟仲. 现代行星物理学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1988, 146.
- [11] 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.
- [12] 李四光. 地质力学方法[M]. 北京:科学出版社, 1979, 1~28.
- [13] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 230: 42.
- [14] Wilson J T. Mantle plumes and plant motions[J]. Tectonophys., 1973, 19: 149~164.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] 郝晓光,刘根友. 板块运动地球重力学机制研究[J]. 地学前缘,2004,11(1):84.
- [22] 方剑,许厚泽. 全球地幔密度异常及其构造意义[J]. 测绘学报,2000,29:16~20.
- [23] 傅容珊,董树谦,黄建华,常筱华. 地震层析成像之密度异常驱动地幔对流模型[J]. 大地测量与地球动力学,2003,23(1):5~11.
- [24] 傅容珊,冷伟,常筱华. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展[J]. 地球物理学进展,2005,20(1):170~179.
- [25] 池顺良,骆鸣津. 海陆的起源[M]. 北京:地震出版社,2002,35~38.
- [26] 李四光. 地壳构造与地壳运动[J]. 中国科学,1973(4):400~429.
- [27] 张伯声. 张伯声地质文集[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1984,181~189.
- [28] 李德威. 大陆动力学的哲学探索[J]. 大自然探索,1997(2):107~110.
- [29] 赵宗溥. 大陆碰撞构造剖析[J]. 地质科学,1994,29(2):120~129.
- [30] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社,1973,10~11.
- [31] 梁元博. 海底构造[M]. 北京:科学出版社,1983,79~119.
- [32] 白文吉. 山系的形成与板块构造碰撞无关[J]. 地质论评,1993,39(2):111~116.
- [33] 曾融生. 固体地球物理学导论[M]. 北京:科学出版社,1984,415~416.
- [34] 史蒂芬·霍金. 时间简史,许明贤、吴忠超译[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2002,108~109.
- [35] 基普·S·索恩. 黑洞与时间弯曲,李泳译[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2001,119~120.

## 《地球物理学进展》2007 年征订启事

各期刊订户:

2007 年《地球物理学进展》由季刊改为双月刊,每年 6 期,每期定价不变,仍为 35 元,全年定价变为:210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62007709,010-62007696

联系人 刘少华,汪海英,肖台琴

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, wanghy@mail.igcas.ac.cn

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378,022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn