

郝晓光,胡小刚,方剑等. 2014. 从克拉通破坏到板块动力模型的研究. 地球物理学报, 57(7):2344-2351, doi:10. 6038/cjg20140728.  
Hao X G, Hu X G, Fang J, et al. 2014. From the Craton destruction to the study of plate dynamical model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7):2344-2351, doi:10. 6038/cjg20140728.

## 从克拉通破坏到板块动力模型的研究

郝晓光,胡小刚\*,方剑,刘根友,段鹏硕,冯伟,崔荣花

中国科学院测量与地球物理研究所,大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉 430077

**摘要** 华北克拉通破坏动力机制研究导致了全球动力系统及“板块动力模型”研究. 板块运动最有可能的动力是地幔物质流动,但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. 如果地幔密度异常是驱动地幔物质流动的成因,那么就有可能基于重力学方法以“板块动力模型”的形式建立地幔密度异常驱动模式;软流圈中可能存在着动力特性不同的区块,地幔密度正异常代表物质盈余、区块内的物质要向区块外移动,地幔密度负异常代表物质亏损、区块外的物质要向区块内移动. 本项目采用重力和地震资料相结合研究地球的整体分层,根据重力大地水准面联合地震波速度结构反演求解地幔密度异常,再根据地球正常密度假设和板块运动重力学机制的观点并与现有“板块运动模型”相结合,分析地幔密度异常动力区块,初步建立“基于重力学机制的板块动力模型”;为最终建立多学科机制的“全球板块动力模型”,迈出重要一步.

**关键词** 重力学机制;地幔正常密度;地幔密度异常;动力区块;板块动力模型

doi:10. 6038/cjg20140728

中图分类号 P541

收稿日期 2013-05-06,2014-01-18 收修定稿

### From the Craton destruction to the study of plate dynamical model

HAO Xiao-Guang, HU Xiao-Gang\*, FANG Jian, LIU Gen-You, DUAN Peng-Shuo, FENG Wei, CUI Rong-Hua

*State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China*

**Abstract** The research of North China Craton destruction dynamical mechanism has caused lots of studies about global power system and plate dynamical model. The most likely reason for urging the plate motion is the mantle mass flow. However, the things that can urge the mantle mass flow are still unclear enough, so the plate tectonic theory is still in the motion model stage, and not in the dynamic model stage. If the mantle density anomaly is the contributing factor of Earth's mantle mass flow, then it is possible to establish the Earth's mantle density anomaly drive mode based on the gravity method in the form of plate dynamical model; There may be many blocks with different dynamical properties in the rheosphere, and in which the mantle density positive anomaly represents mass surplus, which signifies the mass would move from inside of the block to outside, then mantle density negative anomaly represents mass loss signifies the material of the block outside could move into the block. This paper studies the Earth's overall stratification combined gravity data with Seismic data and the inversion result of the mantle density anomaly can be gained by combining gravity geoid with seismic wave velocity structure. The study also analysis of the mantle density anomaly power blocks based on the normal density theory, plate motion gravity mechanism and the plate motion model. In a word, it is possible to

**基金项目** 国家自然科学基金(41374029 和 41021003)资助.

**作者简介** 郝晓光,1958 年出生,博士、研究员,长期从事地球物理学理论研究. E-mail: hxg@whigg. ac. cn

\* **通讯作者** 胡小刚,1963 年出生,博士、研究员,主要从事地球物理信号处理研究. E-mail: hxg432@whigg. ac. cn

build up the preliminary plate dynamical model based on the gravity mechanism and make an important step for establishing global dynamical model of multi-discipline mechanism, eventually.

**Keywords** Gravity mechanism; Mantle normal density; Mantle density anomaly; Power block; Plate dynamic model

## 1 引言

2007年,国家自然科学基金委员会发布《华北克拉通破坏重大研究计划申请指南》,华北克拉通破坏研究进入了一个新的阶段(吴福元等,2008).高山院士在最近发表的文章中写道:“通过几代人的努力,华北克拉通破坏的研究已取得大量高水平成果,但有关破坏作用的时间、空间、机制和驱动力等四个问题仍未解决”(高山等,2009).实际上,在时间、空间、机制和动力这四个尚未解决的基础问题中,最关键的是动力问题,最难的也是动力问题.朱日祥院士在最近发表的文章中强调地球物理学在华北克拉通破坏机制研究中的重要性时指出:“岩石学和地球化学研究所依据的深部样品分布存在局限和不均匀性,大大制约了从整体上对华北克拉通破坏方式和机制的认识.要寻找其动力学作用,就需要对整个华北克拉通岩石圈及其周围的地幔流动状态作整体和全面的认识,侧重从地球物理的角度来认识华北克拉通破坏的动力学机制”(朱日祥和郑天愉,2009).

实际上,要想对“整个华北克拉通岩石圈及其周围的地幔流动状态作整体和全面的认识”和“认识华北克拉通破坏的动力学机制”,没有基础理论的原始创新是不可能的.实际上,面对“华北克拉通破坏动力机制”这个关键问题,已经到了非进行基础理论(特别是地球物理学)的原始创新不可的地步.

“将华北克拉通破坏的研究置于全球大陆演化的背景下,将是继续深入研究的关键问题”(朱日祥等,2012).“被破坏的克拉通向人们提出了新的研究命题:是地球动力系统的局部平衡失稳还是全局性破坏(如大陆裂解)的前兆”? (朱日祥和郑天愉,2009)可见,克拉通破坏动力机制的研究,最终指向了全球动力系统状态的研究.

“板块动力模型”是表达全球动力系统状态的基本形式.然而众所周知的是:研究建立“板块运动模型”的工作已取得丰硕成果,但研究建立“板块动力模型”的工作却还没有取得实质性进展.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.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.

研究建立“基于重力学机制的板块动力模型”,就是对解决板块运动动力问题所进行的尝试和探索,如果动力问题得以解决,板块构造的形成机制和演变规律等问题(包括克拉通破坏的机制问题)也就会迎刃而解.

## 2 建立板块运动模型的基本方法

建立“板块运动模型”的方法有两种,一种是“地质与地球物理方法”,另一种是“空间大地测量方法”.“地质与地球物理方法”的观测内容有两项,一是板块相对运动的速度,计有瓦因—马修斯法、地形法、布龙法和贝尼奥夫带长度法等;二是板块相对运动的方向,其主要观测量为地震滑动矢量和转换断层方位角.“空间大地测量方法”的观测内容也是两项,一是位于不同板块上的测站间的基线变化,二是测站地心坐标的变化;前者可以用来求解板块相对运动参数,后者可以用来求解板块绝对运动参数;“空间大地测量方法”的观测手段为 VLBI、SLR 和 GPS 等(徐菊生等,2001).

用“地质与地球物理方法”建立板块运动模型,最早是由 LePichon 于 1968 年提出来的(Le Pichon, 1968),所建立的板块运动模型为 LP68.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(Chase, 1978),Minster 和 Jordon 于 1974 年和 1978 年建立了板块运动模型 RM1 和 RM2(Minster and Jordan, 1978),DeMets 和 Gordon 于 1990 年和 1994 年建立了板块运动模型 NUVEL-1 和 NUVEL-1A(DeMets et al., 1990).

1980 年代初,Drewes 导出了由测站坐标变化和弧长变化求解板块运动参数的数学公式,并于 1986 年利用当时有限的实测资料估算了北美与澳

大利亚板块的相对运动参数,又分别用 VLBI 和 SLR 资料求解出北美、欧亚、太平洋和澳大利亚板块的绝对运动参数(Drewes, 1989). 随着测站的增加和观测时间的积累,这项研究得到了发展. Argus 和 Gordon 利用 1984—1987 年的 VLBI 观测数据,解算了北美与太平洋板块的相对运动参数(Argus and Gordon, 1990). 我国专家利用 1979—1991 年 50 个 VLBI 站的 175 条基线变化,解算出欧亚、北美和太平洋板块的相对运动参数(孙付平和赵铭, 1998). 随着 GPS 观测技术的发展,Argus 和 Heflin 利用 4 年的 GPS 观测结果建立了全球 6 大主要板块的运动模型(Argus and Heflin, 1995), Larson 利用 5 年 GPS 观测资料建立了 8 个主要板块的运动模型(Larson et al., 1997), Sato 利用 34 个 GPS 站的 558 条基线变化建立了 5 个主要板块的运动模型(Kachishige Sato, 1998), Drewes 联合利用 GPS、VLBI 和 SLR 资料建立了 12 个板块的运动模型. 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(Sillard et al., 1998), 我国专家也得出了相似的结果(Zhang et al., 1999).

研究建立“板块运动模型”的工作已取得丰硕成果,但研究建立“板块动力模型”的工作却还没有取得实质性进展. 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“板块运动模型”阶段,而没有进入“板块动力模型”阶段. 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. 研究建立“全球板块动力模型”,就是解决板块运动动力问题的尝试和探索,如果动力问题得以解决,板块构造的形成机制和演变规律等问题也就会迎刃而解.

### 3 地球正常密度理论的基本观点

“正常密度”概念是相对于地球重力学研究地球密度问题而言的,或者说,是为了地球重力学研究地球密度问题而建立的. 在地球重力学中,有三个概念是大家都知道的,即:“重力异常”、“正常重力”,以及“密度异常”. 从逻辑上说,“重力异常”概念是由“正常重力”概念定义的,但“密度异常”这个概念却一直

没有相应的“正常密度”概念来支撑;另外,“重力异常”概念与“密度异常”概念是相对应的,但与“正常重力”概念相对应的“正常密度”概念却一直没有确定;这就使得“地球的正常密度”在地球重力学中一直是一个“缺失”的概念. 为此,作者于 2000 年提出“正常密度”概念(郝晓光等, 2000)、2002 年求解出“地球正常密度函数” $\delta(B)$ (郝晓光和刘根友, 2002)、2004 年求解出“地幔正常密度函数” $\delta_e(B)$ (郝晓光和刘根友, 2004); 2009 年出版《地球正常密度假说——重力学的参数椭球与纬向密度理论》,提出了“参数椭球”、“纬向密度”、“准等位”、“似水准椭球”、“地球正常密度假说”和“板块运动重力学机制”等概念和观点,系统建立了“正常密度理论”(郝晓光等, 2009).

实际上,“正常密度理论”是一种地球物理学的数学理论(郝晓光, 1997; 郝晓光等, 2000, 2001),其主要内容是求解等位旋转椭球的密度分布函数. 然而,这种数学理论的地球物理学含义是非常明确的(郝晓光等, 2004, 2005, 2007, 2010, 2011),体现地球物理学含义的是“地球正常密度假说”和“板块运动重力学机制”.

“地球正常密度假说”的观点是:“地球正常密度”对整体地球来说是普遍适用的,地幔的正常密度是按“地幔正常密度函数” $\delta_e(B)$  规则分布的;如果地幔的密度是正常分布的,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 $\delta_e(B)$  不符的“地幔密度异常” $\Delta\delta_e$ . 总是把地幔物质从“地幔密度异常高”( $\Delta\delta_e > 0$ ) 的地区推向“地幔密度异常低”( $\Delta\delta_e < 0$ ) 的地区. 在 $\Delta\delta_e$  的驱动下,地幔物质沿水平方向发生迁移和调整,最终达到全球物质平衡,也就是地幔密度的正常分布状态 $\Delta\delta_e = 0$ . (郝晓光等, 2009)

“板块运动重力学机制”的观点是: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,“地幔密度异常”驱动岩石圈沿水平方向由 $\Delta\delta_e > 0$  的地区向 $\Delta\delta_e < 0$  的地区运动、造成大陆漂移和板块运动. 另一方面,因“地幔密度异常”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, $\Delta\delta_e < 0$  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(郝晓光等, 2009).

## 4 软流圈动力区块概念

地球重力学与大陆漂移和板块构造学说在理论上有着密切的联系. 1749 年, 法国的布格(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 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 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, Pratt 和 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 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. 地壳均衡假说否定了“陆桥沉没”的观点, 成为大陆漂移假说的基础理论之一.

1915 年, 德国的魏格纳(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 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. Epstein、Lambert、Ertel、以及大陆漂移假说反对派的代表人物英国的 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. Prey 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 Aldrich 在太平洋中发现了海沟. 1923 年, 荷兰的 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(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 Maury 在北大西洋中发现了洋中脊. 1956 年, 美国哥伦比亚大学的 Ewing 和 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(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, 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(Hess)以地幔对流假说为桥梁, 在一篇著名的论文(《海底的历史》)中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 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(Vine)和马修斯(Matthews)针对 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, 令人信服地证实了海底扩张假说.

1914 年, 美国的 Barrell 提出了岩石圈和软流圈的概念. 1926 年, 德国的古登堡(Gutenberg)发现地震波在通过地下 100 km 到 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 km 到 250 km 的深度之间存在着一个塑性的软流圈. 古登堡的发现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,McKenzie、Parker、Morgan 和 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?

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。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。

目前,板块指的是岩石圈板块,这是一种“运动学板块”。按照板块运动的动力来自地幔物质流动的观点,岩石圈板块运动的动力存在于软流圈中;而根据“正常密度理论”,软流圈中的动力是由地幔密度异常造成的。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(方剑和许厚泽,1997,2000;傅容珊等,2003,2005)。

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“正常密度理论”的框架下建立全球的地幔密度异常驱动模式。这时,软流圈中就有可能存在着动力特性不同的区块,区块可按照地幔密度异常的正、负值域来进行划分,这种按照动力特性划分的“软流圈动力区块”应该有两种,地幔密度正异常代表物质盈余、区块内的物质要向区块外移动,地幔密度负异常代表物质亏损、区块外的物质要

向区块内移动。也就是说,“软流圈动力区块”可按照流体力学性质分为两类: $\Delta\delta_c > 0$  的区块的物质总是要被推向  $\Delta\delta_c < 0$  的区块,最终达到  $\Delta\delta_c = 0$ 。所以, $\Delta\delta_c > 0$  的“软流圈动力区块”会向外扩散物质、故可称为“张力区块”, $\Delta\delta_c < 0$  的“软流圈动力区块”会向内汇聚物质、故可称为“引力区块”。

## 5 重力和地震观测资料研究建立板块动力模型

研究建立“全球板块动力模型”,可采用地球物理学的地震方法和重力方法。地震方法可研究地球介质的速度分层,能得到不同深度或不同层次的信息;天然地震能量大,可以激发体波、面波、自由震荡等多种成分,用来研究地球的整体分层。利用地震方法可以探测岩石圈的底界面(软流圈顶部)、上下地幔分界面、核幔边界以及地球内部各圈层的速度结构,而地震层析成像技术则能够给出地幔三维速度异常图像,显示出流动层内的地震波速度的不均匀特征。重力方法可研究地球各圈层的密度结构,依据重力大地水准面、再联合地震波速度结构,就可反演得到地幔密度异常。

首先,对水准椭球面上的正常重力公式进行整理推算得到空间任意点的正常重力表达式,将自由空气重力异常重新归算得到大地水准面上的纯重力异常,并由此进行布格改正、地形改正、均衡改正得到布格重力异常和均衡重力异常。长波长大地水准面异常主要是由于下地幔密度不均匀所引起的,结合地震层析成像结果分析可以确定下地幔物质不均匀对应的大地水准面球谐函数的阶次,从而确定下地幔产生的重力异常。并对均衡重力异常进行频率特征分析,研究地壳均衡补偿和地壳失衡的频率范围、特征和机制以及与克拉通破坏的联系。

然后,建立适合于重力及地震联合反演的模型,确定包括数据误差在内的目标函数及收敛准则。根据地震走时数据进行地震反演,得到界面深度及速度值。因为假定密度与速度具有共同的分界面,利用地震反演得到的速度模型转换成密度模型,以此为初值来进行重力反演。重力反演可以根据线性反演方法进行,从而得到各层的密度。将密度模型再转换成速度模型,并判断密度模型与速度模型是否符合要求,如果不符合要求,则根据新的速度模型进行地震反演,如此地震反演与重力反演交替进行,直至反演的密度、速度结果满足一定的条件或收敛准则,从

而得到三维密度反演结果. 在进行重力线性反演时, 由于方程的病态性, 这里采用选权拟合的方法进行反演. 根据密度本身的特点合理构造约束矩阵, 利用广义交叉检核法、L 曲线法或广义不符原理确定权系数, 这里的权系数为观测值的方差与解估计的方差之比. 用约束矩阵及权系数阵代替正则化中的稳定泛函及正则化参数.

图 1 是反演计算得到的 300 km 深度(深度区

间为 150~450 km)地幔平均密度异常(方剑和许厚泽, 2000), 按照“正常密度理论”地幔密度异常驱动地幔物质流动的观点, 可用来划分软流圈动力区块. 图 2 是依据 LP68 绘制的全球岩石圈板块分布图(板块运动模型)(金性春, 1984). 图 3 是依据和图 1 和“正常密度理论”绘制的全球软流圈动力区块分布图——板块动力模型(锥形).

由图 3 可见, 全球软流圈动力区块可分为 6 个,

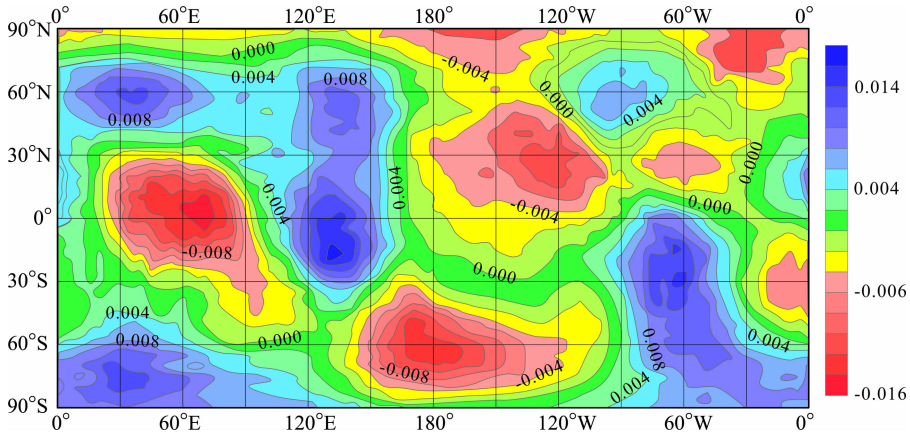


图 1 300 km 深度全球地幔密度异常分布图(密度异常单位:  $g \cdot cm^{-3}$ )

Fig. 1 300 km depth global mantle density anomaly

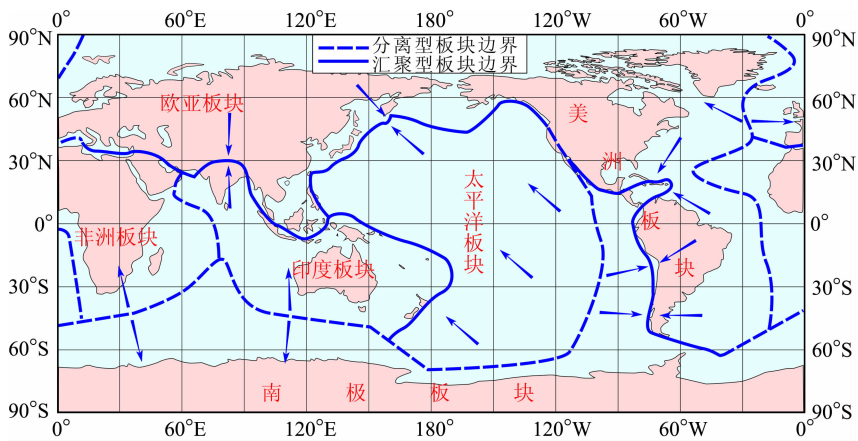


图 2 依据 LP68 绘制的全球岩石圈板块分布图(板块运动模型)

Fig. 2 Based LP68 global lithospheric plate model

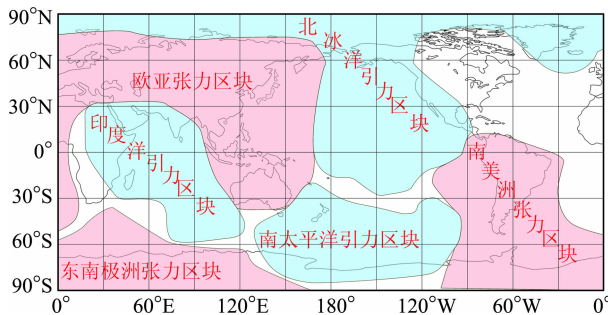


图 3 基于重力学机制的板块动力模型

Fig. 3 Plate dynamic model based on the gravity mechanism

3 个为“张力区块”(密度异常值为正,动力学性质为物质扩散):“欧亚张力区块”、“东南极洲张力区块”和“南美洲张力区块”,3 个为“引力区块”(密度异常值为负,动力学性质为物质汇聚):“北冰洋引力区块”、“印度洋引力区块”和“南太平洋引力区块”。

由图 2 可见,最初的板块运动模型也是由 6 个板块构成的:欧亚板块、非洲板块、印度板块、太平洋板块、南极洲板块和美洲板块,进一步的工作应该研究这 6 个“软流圈动力区块”和 6 个“岩石圈运动板块”的相互作用关系。

## 6 讨论

从克拉通破坏动力机制研究到板块动力模型研究、从地球化学研究到地球物理学研究、从地区性局部研究到全球性整体研究,一条新的研究线索仿佛出现在我们面前。面对尚未解决的克拉通破坏作用的“时间、空间、机制和驱动力等四个问题”(高山等, 2009),这条新的线索是否会有所突破呢?

1901 年,奥地利的休斯(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。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”(李四光, 1979)。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,是地球科学的世纪之谜;而应用“正常密度”理论和地球物理学方法研究建立板块动力模型,仅仅是揭开这一世纪之谜的开始。要想深入到板块运动的动力问题研究中去,就必须连续不断地进行顽强的努力和艰苦的探索。

**致谢** 本研究多年来得到许厚泽院士的指导,朱日祥院士在克拉通破坏机制方面对本研究予以了关注,在此表示衷心感谢!

## References

- Argus D F, Gordon R G. 1990. Pacific-North America plate motion from very long baseline interferometry compared with motion inferred from magnetic anomalies, transform faults, and Earthquake slip vectors. *J. Geophys. Res.*, 95(B4): 17315-17324.
- Argus D F, Heflin M B. 1995. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the global positioning system. *Geophys. Res. Lett.*, 22(15): 1973-1976.
- Chase C G. 1978. Plate kinematics; The Americas, East Africa, and the rest of the world, Earth planet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 37(3): 355-368.
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. 1990. Current plate motions. *Geophys. J. Intl.*, 101(2): 425-478.
- Drewes H. 1989. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematics and crustal deformation models. *Inter. Assoc. Geodesy Symposia*, 119: 377-382.
- Fang J, Hsu H Z. 1997. Three-dimensional lithospheric density structure beneath qinghai-tibet and its adjacent area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 40(5): 660-666.
- Fang J, Xu H Z. 2000. Global mantle density anomalies and its tectonical implication. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 29(Sup.): 16-20.
- Fu R S, Dong S Q, Huang J H, et al. 2003. A mantle convection model driven by density anomalies in mantle. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 23(1): 5-11.
- Fu R S, Leng W, Chang X H. 2005. Advancements in the study of mantle convection and the material movements in the deep Earth interior. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 20(1): 170-179.
- Gao S, Zhang J F, Xu W L, et al. 2009. Delamination and destruction of the North China Craton. *Chin. Sci. Bull.*, 54(19): 3367-3378, doi:10.1007/s11434-009-0395-9.
- Hao X G. 1997. The gravity of parameter ellipsoid. *Earth Science* (in Chinese), 22(2): 223-226.
- Hao X G, Xu H Z, Liu D J. 2000a. Earth's density flattening and hypothesis of latitudinal normal density. *Science in China (Series D)*, 44(8): 673-679.
- Hao X G, Xu H Z, Liu D J. 2000b. Gravity assembly points of the Earth and gravitative features of the parameter ellipsoid. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 29(2): 109-113.
- Hao X G, Xu H Z, Liu D J. 2000. A preliminary study of mathematical properties of the parameter ellipsoid. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 30(3): 203-207.
- Hao X G, Liu G Y. 2002. Modification of coefficient of the Earth latitudinal normal density function. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 22(2): 53-56.
- Hao X G, Liu G Y. 2004a. Latitudinal normal density function of mantle. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 33(2): 105-109.
- Hao X G, Liu G Y. 2004b. Discussion on earth gravity mechanism for plate motion. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 11(1): 84.
- Hao X G, Fang J, Liu G Y. 2005. Comparison between latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 20(4): 991-996.
- Hao X G, Fang J, Liu L T, et al. 2007. Discussion on latitudinal normal density hypothesis and internal wave hypothesis. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 22(1): 312-316.
- Hao X G, Hu X G, Liu G Y, et al. 2009a. The distribution of the Earth's normal density. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 38(5): 377-382.
- Hao X G, Fang J, Liu G Y, et al. 2009b. Hypothesis of Earth's Normal Density: the Gravity Theory of Parameter Spheroid and Latitudinal Density (in Chinese). Beijing: Surveying and



- Mapping Press, 44-51.
- Hao X G, Fang J, Liu G Y, et al. 2010. Satellite gravity measurement and study of global material balance. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 30(5): 38-41.
- Hao X G, Fang J, Liu G Y, et al. 2011. North China craton destruction, delamination or thermal erosion? *Progress in Geophys.* (in Chinese), 26(3): 1137-1140.
- Jin X C. 1984. *The Base Plate Tectonics* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 41-43.
- Kachishige Sato. 1998. Tectonic plate motion and station motion derived from rates of change of Global Positioning System baseline lengths. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 44(3): 143-167.
- Larson K M, Freymueller J T, Philipson S. 1997. Global plate velocities from the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 102(B5): 9961-9981.
- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, 73(12): 3661-3697.
- Li S G. 1979. *The Geological Mechanics Method* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1-28.
- Minster J B, Jordan T H. 1978. Present-Day Plate Motions. *J. Geophys. Res.*, 83(B11): 5331-5354.
- Sillard P, Altamir Z, Boucher C. 1998. The ITRF96 realization and its associated velocity field. *Geophys. Res. Lett.*, 25(17): 3223-3226.
- Sun F P, Zhao M. 1998. Measurement and research of current plate motions—Geophysical Methods. *Progress in Geophys* (in Chinese), 13(1): 1-16.
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S, et al. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24(6): 1145-1174.
- Xu J S, Lai X A, Zhang G A, et al. 2001. New progress in measurement of plate movement by space geodesy and comparison with geological results. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 21(3): 55-65.
- Zhang Q, Zhu W Y, Xiong Y Q. 1999. Global plate motion models incorporating the velocity field of ITRF96. *Geophys. Res. Lett.*, 26(18): 2813-2816.
- Zhu R X, Zheng T Y. 2009. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics. *Chinese Sci Bull*, 54(19): 3354-3366 (in Chinese), doi: 10.1007/s11434-009-0451-5.
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. 2012. Destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci.*, 55(10): 1565-1587, doi: 10.1007/s11430-012-4516-y.
- 物理学报, 40(5): 660-666.
- 方剑, 许厚泽. 2000. 全球地幔密度异常及其构造意义, 测绘学报, 29(增刊): 16-20.
- 傅容珊, 董树谦, 黄建华等. 2003. 地震层析成像之密度异常驱动地幔对流模型. 大地测量与地球动力学, 23(1): 5-11.
- 傅容珊, 冷伟, 常筱华. 2005. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展. 地球物理学进展, 20(1): 170-179.
- 高山, 章军锋, 许文良等. 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏. 科学通报, 54(14): 1962-1973.
- 郝晓光. 1997. 参数椭球表面的重力. 地球科学, 22(2): 223-226.
- 郝晓光, 许厚泽, 刘大杰. 2000a. 地球的密度扁率与纬向正常密度假说. 中国科学 D 辑, 30(4): 436-441.
- 郝晓光, 许厚泽, 刘大杰. 2000b. 地球的重力聚点及参数椭球的地球重力学性质. 测绘学报, 29(2): 109-113.
- 郝晓光, 许厚泽, 刘大杰. 2001. 参数椭球数学性质的初步研究. 测绘学报, 30(3): 203-207.
- 郝晓光, 刘根友. 2002. 地球纬向正常密度函数系数的修正. 大地测量与地球动力学, 22(2): 53-56.
- 郝晓光, 刘根友. 2004a. 地幔纬向正常密度函数. 测绘学报, 33(2): 105-109.
- 郝晓光, 刘根友. 2004b. 板块运动地球重力学机制研究. 地学前缘, 11(1): 84.
- 郝晓光, 方剑, 刘根友. 2005. 纬向正常密度假说与内波假说的比较. 地球物理学进展, 20(4): 991-996.
- 郝晓光, 方剑, 柳林涛等. 2007. 再论纬向正常密度假说与内波假说的比较. 地球物理学进展, 22(1): 312-316.
- 郝晓光, 胡小刚, 刘根友等. 2009a. 地球的正常密度. 测绘学报, 38(5): 377-382.
- 郝晓光, 方剑, 刘根友等. 2009b. 地球正常密度假说——重力学的参数椭球与纬向密度理论. 北京: 测绘出版社, 44-51.
- 郝晓光, 方剑, 刘根友等. 2010. 卫星重力测量与全球物质平衡问题研究. 大地测量与地球动力学, 30(5): 38-41.
- 郝晓光, 方剑, 刘根友等. 2011. 岩石圈拆沉还是软流圈上涌?——正常密度理论与华北克拉通破坏重力学机制研究. 地球物理学进展, 26(3): 1137-1140.
- 金性春. 1984. 板块构造学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 41-43.
- 李四光. 1979. 地质力学方法. 北京: 科学出版社, 1-28.
- 孙付平, 赵铭. 1998. 现代板块运动的测量和研究——地球物理方法. 地球物理学进展, 13(1): 1-16.
- 吴福元, 徐义刚, 高山等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145-117.
- 徐菊生, 赖锡安, 张国安等. 2001. 空间大地测量测定板块运动的新进展及其与地质学成果的比较. 地壳形变与地震, 21(3): 55-65.
- 朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 54(14): 1950-1961.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光等. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学(地球科学), 42(8): 1135-1159.

## 附中文参考文献

方剑, 许厚泽. 1997. 青藏高原及其邻区岩石层三维密度结构. 地球