

# 地质作用的驱动力和大地构造学

李小明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长沙大地构造研究所, 湖南 长沙 410013; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**地质作用的驱动力是产生地壳运动的根本原因, 对地质作用驱动力, 尤其是驱动力作用方式观点上的分歧是出现众多大地构造学派的主要原因, 也是当今大地构造学研究的热点和前缘。板块构造理论是当今大地构造学的主流, 地幔柱构造则是对它的重要补充。地球动力学与地球系统科学的研究将有助于大地构造学的进一步发展。

**关键词:**地质作用驱动力; 大地构造学; 板块构造; 地幔柱; 地球动力学

**中图分类号:**P541 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5589(2002)03-0209-09

大地构造学是地质学的一个重要组成部分, 它的主要研究对象是地球的岩石圈, 特别是地壳组成、地壳构造、地壳运动和地壳发展, 并进一步阐明它们的规律和成因。19 世纪以来, 随着科学技术的发展和进步, 地质学家提出了不少大地构造学说(假说), 曾经产生较大影响的是槽台学说, 而现在盛行的、为大多数地质学家接受的是板块构造学说<sup>[1~3]</sup>。

槽台学说是 19 世纪中叶在欧美建立起来的大地构造学说。地槽的概念主要是用地质学方法来研究大陆造山带的发生、发展历史。槽台学说的学术思想差不多在整整的一个世纪内在国际地质学界占据着统治地位, 对地质学的各个方面都有重要影响。20 世纪 60 年代以来, 板块构造学说的兴起, 使人们改变了许多地槽的传统观念, 并用全球构造的观点来解释地槽, 从而在新的基础上给地槽以新的内容。我国地质学家 20 世纪 50~60 年代在大地构造学的研究上, 出现了“百花齐放、百家争鸣”的局面, 如出现了地质力学<sup>[4]</sup>、多旋回构造<sup>[5]</sup>、地洼学说<sup>[6]</sup>等众多大地构造学派。

地质作用的驱动力是产生地壳运动的根本原因, 包括驱动力的来源和机制。任何一种大地构造学说都必须回答地质作用的动力来源和机制等基本问题。魏格纳曾把大陆漂移归因于与地球自转有关的潮汐摩擦力和离极力, 而正因为他在驱动力问题上处理欠妥, 致使漂移说在 20 世纪 30~40 年代一蹶不振。60 年代运用地幔对流模式使大陆漂移说得到重新认识和肯定, 其原因是很好地解释了驱动力的问题。本文拟从地质作用的驱动力的来源和机制方面阐述大地构造学的研究历史、现状和发展方向。

## 1 地质作用的驱动力

地质作用分内力地质作用和外力地质作用两种。内力地质作用是由地球转动能、重力和放射性元素蜕变的热能而产生的地质动力所引起的地质作用。它们主要是在地壳中或地幔中进行的, 故称为内力地质作用。其表现方式有地壳运动、岩浆作用、变质作用和地震

收稿日期: 2002-05-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助(KZCX2-101)

作者简介: 李小明(1967-), 男, 湖南省人, 博士生, 主要从事同位素构造地质研究。

等;外力地质作用是由地球范围以外的能源所产生的地质作用。它的能源主要来自太阳辐射能以及太阳和月球的引力、地球的重力能等。其作用方式有风化、剥蚀、搬运、沉积和成岩作用等。

对地质作用的动力学机制的认识,一直存在分歧。地质作用主要动力来源究竟是什么?它又是如何作用的?这是各大地构造学派存在分歧的地方,也是产生众多大地构造学派的主要原因所在。这里简述槽台学说、板块构造、地质力学、断块构造、地洼构造、颤动构造等大地构造学说中所论述的地质作用的动力学机制,主要包括驱动力和(或)驱动力的作用方式。

### 1.1 槽台学说对地质作用内动力的认识<sup>[7]</sup>

地槽拗陷的形成机理,最主要的控制因素是地球的重力和热力作用。目前一般认为,在热力作用下,受热膨胀使地幔物质上涌,形成异常地幔垫(幔隆或幔枕),地壳相应发生均衡调整导致厚度减薄,引起地表拉张、裂开下陷,形成地槽或裂谷。反之,冷却会造成收缩,形成幔凹或山根,这时地壳相应均衡调整,厚度增大,引起侧向水平挤压褶皱成为造山带。不过,这些机理并非显而易见,大多要靠推测,槽台学说属固定论,现在已经被弃用。

### 1.2 板块运动的动力学机制

板块运动的动力学机制,目前一般都归因于地幔对流<sup>[1~3,7]</sup>。地幔对流是由温度差或密度差引起的。热的地幔物质上升,冷的物质下沉,连接起来成为一个对流环。对流模式最重要的有以下几种:

**软流圈—岩石圈(硅铝层除外)的浅地幔对流模型** 兴起于 20 世纪 60 年代末、70 年代初。对流环的下半部为软流圈,上半部为岩石圈。这一模式不但解释了大陆漂移,而且合理地解释了以洋脊为轴两侧对称的种种图案。但是,该模式存在的问题是对流体的垂直幅度与水平幅度相比显得太小了。

**分层地幔对流模型** 对流体分别发生于上地幔与下地幔内,分层边界是 660 km 深度处,并得到地球化学研究的支持<sup>[8]</sup>。

**全地幔对流模型** 得到地震学观测(从早期走时残差研究,到以后的层析成像研究,以及转换波研究)的支持<sup>[8]</sup>。

**地幔不充分混合模型** 无论是简单的全地幔对流模型或分层地幔对流模型,都不能完全解释全部观测事实。因此目前发展了一些地幔对流涉及全部地幔、但不能使化学成分充分混合的模型,如团块模型(blob)<sup>[9]</sup>、拉瓦灯(lava lamp)模型<sup>[10]</sup>等。其中最有代表性的是拉瓦灯模型。这类模型的特点是要综合考虑各种观测事实的约束,一方面允许俯冲板片穿透 660 km 界面,满足地震学观测事实和地球动力学计算结果;但另一方面仍然保持两个源区(亏损的地幔和未亏损的地幔),满足大洋中脊玄武岩化学成分和地热产生散失率的要求。这类模型比简单的全地幔对流或分层地幔对流更有说服力,但目前尚缺乏有力的直接观测支持<sup>[8]</sup>。

到目前为止,地幔对流还不能很好地解释许多板块—地幔系统的基本问题,一个是板块运动的机制,另一个是不同地方喷出的岩浆的组分有变化,这与地幔中存在全地幔物质对流的现象有矛盾<sup>[11]</sup>。实际上是板块运动驱动力问题还没有得到很好的解决<sup>[3]</sup>。

### 1.3 地质力学<sup>[2,4,7]</sup>关于地壳运动的动力来源

地壳运动的方式和方向是以水平运动为主,而垂直运动是次要的。水平运动又有经向

水平运动和纬向水平运动,导致物质水平运动是因为在重力控制下的地球自转惯性离心力。地球自转惯性离心力又来源于地球自转速度的变化。

从物理学上知道,一个封闭系统的角动量是守恒的,即: $\omega \cdot I = C$ 。 $\omega$ 为旋转体的角速度, $I$ 为旋转体的转动惯量, $C$ 为常数。转动惯量是物体内部所有各质点的质量与对旋转轴的转动半径平方乘积之总和: $I = \sum mr^2$ ,转动惯量的变化与地球内部的物质分配有关,当地球质量向地球中心集中时, $I$ 就变小, $\omega$ 相应变大,这时便产生从两极向赤道方向的离心惯性力的水平分力(经向惯性离心力),以及产生与加速度方向相反的沿纬向方向自东向西的纬向惯性离心力。前者有使地球变扁的趋势,使地壳表层物质从高纬度向赤道方面推移,使海水向赤道方向海侵,即发生南北向的挤压和扭动;后者使大陆发生大规模的东西向的挤压、张裂、并兼有扭动。相反,当地球内部物质向外扩散时, $I$ 变大, $\omega$ 必然变小,这时所产生的经向惯性离心力与纬向惯性离心力方向恰好相反。这就是地球内部物质运动引起转动惯量的变化,转动惯量的变化又影响地球自转角速度的变化,从而导致地壳运动的产生。地质力学理论是活动论的代表之一,但由于地球内部的复杂性及忽略了热力作用的影响,使其具有局限性。

#### 1.4 断块构造学说<sup>[7,12]</sup>认为驱动力的来源是复杂的

地球内存在吸引和排斥的对立因素。地球内部物质在重力作用下发生收缩作用以及重力分异作用,在热作用下发生体积膨胀或某种方式的热对流。在角动量基本守恒的前提下,地球内部物质向地心运动将使地球转动惯量变小,因而使自转角速度加快;反之,若地球内部物质向外运动,则将使转动惯量变大,而导致自转角速度变慢。在这种质量再分配过程中(同时再加上外部天体的影响),地球自转轴也可能发生一定程度的偏转。地球自转速度与自转轴的摆动又将导致离心力、科里奥利力、旋转速度不均一效应的变化与极移应力的产生,以及地球内部各圈层间相对扁率的变动和滑动。岩石圈各断块间的相互错动、碰撞与拉开,就是在这些过程的相互交替与联合作用下发生的。该学说与板块构造有相似之处,但不够简洁、清晰、完整。

#### 1.5 地洼学说<sup>[6,7]</sup>称地壳运动的机制为散聚交替说

地球内部物质既互相排斥,又互相吸引。排斥就是上地幔软流层下部物质由于温度增高,密度减小,从深处向浅处运移,形成上升流,致使热能(包括放射能)外散,结果使得该处内部因失热而逐渐收缩,相应部位的地壳,则因受热反而膨胀,同时热流增高,从而引起该处强烈的地壳运动,并以水平运动占优势。吸引就是上地幔软流层上部物质(特别是重的),自浅处向深处凝聚,进行重力分异,致使能量内聚,结果将使地球该处内部因积热而逐渐膨胀,但相应部位的地壳则因热能消散反而相对收缩或膨胀不明显,同时热流减低,从而导致该处地壳运动转弱,并且水平运动退居劣势,致使垂直运动(起因有多种)显示优势。在地壳演化过程中,一个地区某一时期,如果前者取得支配地位,将出现强烈的构造变动,岩浆活动,变质作用及地震等,形成(强烈)活动区(如地槽区、地洼区)。反之,则转化为(相对)“稳定”区(如地台区)。如此类推。地壳发展就是这样由于地球内部物质扩散与凝聚之间的矛盾斗争所推动,随着矛盾主要方面互相转化易位而递进前进的。地洼学说建立了第三构造单元,采用了历史—动力综合分析方法,在国内外有一定影响。但主要应用于大陆岩石圈,对大洋岩石圈研究不多,强调热动力作用。

### 1.6 颤动构造(surge tectonics)理论<sup>[3,13]</sup>对地质作用驱动力的认识

冷却说,即冷却挤压,强调了地幔热的因素。即:收缩圈冷却引起岩石圈挤压作用,挤压力大到一定程度导致颤动通道破裂,出现区域构造作用,终止了一个大地构造旋回又开始了另一个新的旋回,亦即颤动通道交替出现充填与排空,产生大地构造旋回;另外,上部岩层的侧向运动是对地球旋转的一种响应,地球上所有现代活动带均与这些颤动通道有关。该学说受板块构造理论的制约,很有新意,但有待进一步认识和研究。

另外,多旋回构造<sup>[2,5]</sup>是对槽台学说的重要发展,且与板块说互相补充,密切结合,驱动力类同板块说;波浪状镶嵌构造说<sup>[7,14]</sup>认为地壳的运动必须服从地球整体的运动,地球整体的运动主要是自转与脉动,这两种运动形式是统一的;重力构造强调了重力在地质作用中的重要性<sup>[7,15]</sup>;波动说<sup>[16]</sup>把地球演化的驱动力划分为宏观与微观两个不同范畴的作用力,前者是重力和转动惯性产生的质量惯性力,后者是基本粒子间的作用力——核力和电磁力。这些力的相互作用构成了各种地质作用的基本动力。

其它大地构造学说(假说)对地质作用驱动力也有论述,例如:深层分异说认为主要由放射性物质的裂变产生的热能使地球内部灼热,但鉴于地球本身物质的导热性能差,促使热能不断积聚,在重力作用影响下发生分异作用,结果使地球内部相对较轻的物质不断上升至外圈,同时这些物质亦把深部积聚的热能带了上来,将地球的上层加热。正是在这一前提下,发现软流圈有周期性的加热和鼓起这一膨胀机理,苏联学者别洛乌索夫主张是深部物质的分异作用上升到软流圈所致;膨胀说是从地球内部热体制变化和引力作用引起地质作用的;深大断裂(线形构造)理论认为地质作用是热和重力共同作用产生的结果<sup>[16]</sup>。

大地构造学的本质是地质内动力作用过程,无疑,动力作用与热作用是引起地质作用的两种主要方式,并且热作用受限于动力作用。各大地构造学说对地质作用驱动力认识的差异主要是驱动力作用方式(动力学机制)的不同。从而出现不同学派对同一地质现象存在不同的地质解释。

## 2 板块构造学说的优势和面临的困境

除板块构造外,以上所述各种大地构造学说(假说)尽管各有其丰富的内涵和深刻的意义,但这些学说大多数还只是从某一角度出发,而未能从全局上囊括全球构造演化多方面的基本问题,有“盲人摸象”的味道。未能像板块理论那样对“地球是怎样活动的”问题作出简洁明快的解答。例如:地质力学把地壳运动驱动力归因于地球转速的变化,它就不能允许偏离东西向和南北向的长距离的大陆漂移运动。对某些地质现象不能解释(如印度的北漂不是以赤道为终点)<sup>[2]</sup>。壳体大地构造学<sup>[6]</sup>是地洼学说的发展,研究全球构造,采用了板块构造的大部分观点(尽管用词上有较大差别),实际上是接受或默认了板块学说。多旋回构造、断块说、颤动构造中的精华部分(或曰合理部分)实际上也是板块学说的局部或单方面的表现。

事实上,板块学说是由国际上地球科学各分支学科的无数学者广泛运用现代化科学技术联合研究的结果。至少有以下优点<sup>[1~3]</sup>:(1)以岩石圈大规模运移取代了海陆位置固定不变的旧地球观;(2)解释了最广泛的地质现象,使地球科学各个领域取得了前所未有的统一;(3)一改以往各种学说仅仅解释地质现象的局限,对某些地质现象提出了定量的可以检验的预言;(4)在理论表述上具有最大的简洁性和严密的逻辑性。

但板块构造学说并不完善,现阶段面临的困境主要反映在两个方面<sup>[17,18]</sup>:其一,众多大陆地质学及其构造演化的客观事实和认识,如板(陆)内造山的动力学机制问题,难于与板块构造的基本推论相容,即板块构造理论未能阐明发生在大陆地区的大多数动力学作用。其二,进入20世纪90年代以来,三维地震层析、超高压矿物相变、地幔对流的实验和理论模拟以及全球范围地幔地球化学最新进展已揭示了岩石圈深部,特别是地幔组成和热结构的不均一性,向传统板块构造理论所提出的挑战已涉及其理论的基础,即板块构造的驱动力、地幔源区物质、消减板块去向及其与全球构造的关系。

基于上述两方面实践和理论上的巨大挑战,在继续执行持续时间最长、涉及规模最大的地质国际合作计划——国际岩石圈计划的同时,美国“大陆动力学研究国家计划”的提出和启动,实际上是国际固体地球科学研究战略方向的转折。对大陆岩石圈运动的动力学机制是重点研究方向之一。

### 3 地球动力学和大陆动力学

基于大地构造学研究中碰到的难题(主要是动力学机制),研究者20多年前就提出了要进行地球动力学和大陆动力学的研究。地球动力学主要研究地球岩石圈的构造特征、演化历史及其动力学过程<sup>[17~19]</sup>。地球是一个由圈层组成的完整的动力学系统。全球动力学旨在研究地球的整体运动,地球内部各圈层的相互作用及其与表层间的相互作用和表层构造变形的力学过程。

大陆是由众多地质作用过程形成和改造的各种成分构造的一个大拼合体。它经历了长达几十亿年的、多种不同性质的动力学过程的叠加和改造,记录了地球动力学最完整的演化过程和演化历史。大陆和大洋的演变都受全球动力学过程的控制,为同一地球动力学过程,但大陆和大洋岩石圈有着很大的不同。大陆下面的软流圈不具全球意义,大陆岩石圈缺乏刚性,其动力作用过程与大洋也有很大差别。大陆岩石圈生长和消亡的演变过程比大洋岩石圈复杂得多,至今仍未建立可供解释的力学模式。大陆动力学研究的核心问题是大陆岩石圈物质增长、消减和保存的演化过程。大陆动力学过程是全球动力学过程的一个组成部分,因此要把大陆作为一个独立的动力学子系统来研究,寻找出主要驱动力、局部过程和构造变形间的相互联系,建立大陆动力学模型<sup>[17]</sup>。

运用地球动力学和大陆动力学,国外一些学者修正与发展了地球膨胀说。近年来我国学者对大陆动力学和地球发展模式也作了一些探讨。例如:邓晋福等<sup>[20]</sup>提出“大陆根—柱构造”,把它看作是大陆动力学的“钥匙”;马宗晋等<sup>[21]</sup>提出了板条构造学说,初步论述了地球变动的综合动力论设想;欧阳自远等<sup>[22]</sup>从全球地球化学分区的角度,提出了地球形成的吸积过程中不同成分的星子群导致的地球初始不均一性;蒋志<sup>[23]</sup>用“地幔脉动论”来解释地质现象。此外,钱维宏<sup>[24]</sup>提出了古极地大陆及其漂移和“回漂”的设想;李鸿业<sup>[25]</sup>提出了“两极挤压说”;杨学祥等<sup>[26]</sup>的“科里奥利力驱动构造运动”和一些学者提出的灾变说等。最近,杨志华等<sup>[27,28]</sup>提出的在地球自转速度变化制约下的多层扭动涡旋甩出说—核幔壳“风暴”所引发的热核反应是地球发展与演化的唯一的、统一的“动力”来源,也是壳幔形成的根本原因。

任何一个重要的地球动力学过程既是物理的运动又伴随着化学的变化,因此,地球化学、地球物理与地质学一样均是认识地球动力学和大陆动力学的重要支柱,也是研究地球动

力学和大陆动力学的主要方法。例如:化学地球动力学<sup>[29~31]</sup>作为地球化学和地球动力学相结合的一个学科,近 20 年来得到了飞速发展。

地壳运动的驱动力与地球深部(地幔和地核)存在紧密的联系,因而,人们正在对地球深部进行动力学研究,运用地球化学、地球物理与地质学相结合的方法研究地幔直到地核的组成、结构、构造和运动特征,取得了一些可喜的成果。例如:认识到了地幔的化学不均一性<sup>[29~31]</sup>;宋晓东等<sup>[32]</sup>首次发现并测量到地球内核的运动,并且发现内核跟地球朝同一方向旋转,但每天旋转一圈的速度要比地壳和地幔快。

总之,地球动力学、大陆动力学到地球深部动力学研究,其重点是解决地质作用的动力学机制,并建立动力学模型。从而解决好大地构造学的根本问题,即驱动力问题。这样可以完善大地构造学的框架,甚至建立新的大地构造理论。

#### 4 地幔柱构造是板块构造学说的重要补充

地幔柱概念的提出与板块学说的形成和发展是密不可分的,同时也是地幔对流观点发展的必然产物。30 多年来,这一概念得到了极大的发展,在固体地球科学、岩石圈深部过程和壳—幔—核相互作用中占着极为重要的地位,同时,对板块学说的发展和完善起了重要的补充作用。

##### 4.1 地幔对流与地幔柱

Morgan<sup>[33]</sup>正式提出了地幔柱假说,即起源于核幔边界在地幔中上升的热物质流,在地表表现为热点,而地幔柱之间是没有相对运动的。理论及模拟研究表明,地幔柱向地表输送的热量仅为地球总热损失量的很小部分,地幔物质粘性系数对温度的依赖关系是地幔柱存在的必要条件;柱对称结构是地幔上升的唯一方式。基于地幔柱内物质上升是浮力驱动。静态(或称定常)地幔柱模式的研究构成了 20 世纪 70~80 年代深部研究的一个热点。地幔地球化学研究也以夏威夷群岛、冰岛等热点作为洋岛玄武岩(OIB)的一种典型组分,并将其视为与地幔柱密切相关的深地幔的代表,并提出了著名的深俯冲地幔柱模式<sup>[34]</sup>。

##### 4.2 从静态地幔柱到超级地幔柱和大型火成岩省

静态地幔柱学说虽然取得了一定的成功,但在实验模拟上未能解决热效应问题,因而限制了其在地球动力学研究中的应用。Griffiths 等<sup>[35]</sup>在实验模拟上取得重大突破,基本解决了模拟地幔柱两大本质特征——热驱动和大粘度对比的问题,从而成功地解释了大片溢流玄武岩与火山岛链之间在时空组成上的内在联系。直径为 800~1 200 km 的地幔柱头部抵达岩石圈底部时,可横向伸展到 2 000~2 500 km 范围,并促使形成大范围的溢流玄武岩或海洋台地,称之为大火成岩省。而地幔柱尾部熔体可产生火山岛链。Hill<sup>[36]</sup>发展了上述实验及数学模拟结果,总结性地提出了一系列地幔柱与大陆构造的可能结果,包括引起大陆裂解(原有大陆岩石圈已过热或薄弱部位),譬如:一些研究者提出的峨眉地裂运动<sup>[37]</sup>实际上可能是峨眉山地幔柱作用的结果;还控制新的洋中脊位置及形成时间(但并非板块驱动力)等。地幔柱的上升同样会影响俯冲作用,海底台地的密度改变导致其有可能发生仰冲。而在大陆地壳区,则可以与一系列的岩浆活动有关,并将影响全球和宏大尺度的深地幔柱称之为超级地幔柱。

##### 4.3 地幔柱构造

以 Maruyama<sup>[38]</sup>为代表提出了一种新的全球构造观,或简称为地幔柱构造(plume tec-

tonics)。俯冲带可局部下沉到核幔边界层,并得出全球在南太平洋及非洲存在两个超级上升地幔柱,而在亚洲则存在一个超级下沉地幔柱,大西洋中脊则是次一级的上升地幔柱,而在南美,俯冲过程仍在继续之中。这一格局主宰了今日全球构造。将上述地幔柱构造模式可推广到太阳系行星(及卫星)的整个演化历史。主张全地幔对流,板块构造控制幔柱构造,而幔柱构造影响板块构造。

#### 4.4 地幔柱与非威尔逊旋回:MOMO 模式

地幔对流作为板块运动的驱动机制,其尺度和性质是一个争议已久的问题,是上、下地幔双层对流,还是全地幔对流?地幔柱构造是支持全地幔对流的,为了解释全地幔对流、深地幔俯冲,研究者提出了幕式幔源物质流活动及其地球化学特征与主要地壳造山事件之间联系的 MOMO 模式(Major Overturn/Major Orogeny)<sup>[39]</sup>。

由于受到学科发展的局限,目前对一些基本事实尚无法确切厘定,如深地幔地震层析高分辨率、地球化学反演与地球物理的结合、动态地幔柱的活动性确定,都尚需进行大量的工作。

从地幔对流观点发展至地幔柱—超级地幔柱—巨旋回—两种地幔柱构造的学说可见,地幔柱思想贯穿在整个深部过程研究发展之中,并扮演着核心的角色。因而,笔者认为:地幔柱可能是地质作用的一种主要作用方式,是对板块构造学说的重要补充。

### 5 地质作用驱动力与大地构造学研究的发展方向

综上所述,大地构造学尚没有一个学说圆满地解释地球岩石圈的运动、发展和变化规律。板块构造学说是当今大地构造学的主流,地幔柱构造从驱动力作用方式上对其进行了重要的补充。

地质作用的驱动力主要是自身的重力与热力,其它星球的引力作用对地质作用的驱动是次要的,大多数大地构造学派对这一点是认同的。地质作用驱动力的作用方式是大地构造学研究的难点,也是出现众多大地构造学说(假说)的主要原因。

总之,地球是一个物质成分、结构、构造、演化历史均很复杂的略扁的球体。过去人们对其是定性的认识,对岩石圈的形成、发展和变化也只是定性地了解,随着科学技术的进步,数字地球、地球系统科学的提出、研究和发展<sup>[40~43]</sup>,从过去的定性描述转变到半定量、定量的综合分析和研究。在第31届国际地质大会上,构造地质研究领域已呈现了多学科交叉、协同发展的趋势<sup>[44]</sup>。

笔者相信:随着科学技术的进步,采用各种先进的技术和方法,如进行大陆科学钻探(超深钻)、地学大断面等方面的研究;综合运用地质学、地球化学、地球物理及其它学科对地球进行系统的研究,获得地壳运动、演化和发展的一般规律,将会建立新的、令人信服的、能经受实践检验的动力学模型和大地构造学说。

#### 参考文献:

- [1] 李春昱. 板块构造是当今世界上最盛行的大地构造说[A]. 见:中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展[C]. 北京:科学出版社,1980. 34-41.
- [2] 金性春,严则. 板块构造理论与中国主要大地构造学派[J]. 地质论评,1988,34(1):71-79.
- [3] 王鸿祯. 全球构造研究的简要回顾[J]. 地学前缘,1995,2(1):37-42.

- [4] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1973. 1 - 136.
- [5] 黄汲清. 试论地槽褶皱带的多旋回发展[J]. 中国科学, 1979, (4): 384 - 397.
- [6] 陈国达. 地洼学说—活化构造及成矿理论体系概论[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996. 1 - 455.
- [7] 杨森楠, 杨巍然. 中国区域大地构造学[M]. 北京: 地质出版社, 1985. 1 - 429.
- [8] 石耀霖. 地幔对流研究的一些新进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 496 - 500.
- [9] LAY T, WILLIAMS Q, GAMERO E J. The core—mantle boundary layer and deep earth dynamics [J]. Nature, 1998, 392: 461 - 468.
- [10] KERR R A. A lava lamp model for deep Earth[J]. Science, 1999, 283: 1 826 - 1 827.
- [11] TACKLEY P J. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory[J]. Science, 2000, 288: 2 002 - 2 007.
- [12] 张文佑. 断块构造导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984. 1 - 385.
- [13] MEYERHOFF A A, TANER I, MORRIS A E L, et al. Surge tectonics, a new hypothesis of earth dynamics[A]. In: Chttergee S, Hotton III N, eds. New concepts in global tectonics[C]. Lubbock: Texas Tech Univ Press, 1992. 309 - 409.
- [14] 张伯声, 王战. 镶嵌构造波浪运动说[A]. 见: 中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展[C]. 北京: 科学出版社, 1980. 26 - 33.
- [15] 马杏垣. 重力构造概述[A]. 见: 中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展[C]. 北京: 科学出版社, 1980. 61 - 68.
- [16] 郭令智, 施央申, 马瑞士. 近代大地构造理论研究进展的评述[A]. 见: 中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展[C]. 北京: 科学出版社, 1980. 69 - 81.
- [17] 陈毓川, 赵逊, 张之一, 等. 世纪之交的地球科学——重大地学领域进展[M]. 北京: 地质出版社, 2000. 1 - 210.
- [18] 周新华. 壳—幔深部过程化学地球动力学与大陆岩石圈研究[A]. 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 15 - 29.
- [19] 王仁, 何国琦, 王永法. 地球动力学简介——现状与展望[A]. 见: 中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展[C]. 北京: 科学出版社, 1980. 61 - 68.
- [20] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1 - 110.
- [21] 马宗晋. 南美俯冲带显示的板条构造. 地震地质[J], 1983, 6(3): 319 - 325.
- [22] 欧阳自远, 王世杰, 张福勤. 堆积的地球及其初始的不均一性[J]. 地球科学进展, 1994, 9(3): 1 - 5.
- [23] 蒋志. 地球在银道面上运动与理论地质年表[J]. 中国科学, 1981, (9): 1 104 - 1 116.
- [24] 钱维宏. 行星地球动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 1 - 213.
- [25] 李鸿业. 两极挤压学[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 1 - 461.
- [26] 杨学祥. 地球差异旋转动力学[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1998. 1 - 199.
- [27] 杨志华, 苏生瑞, 李勇, 等. 中国大地构造几个重大问题的探讨[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 395 - 406.
- [28] 杨志华, 李勇, 苏生瑞, 等. 新全球动力学理论与壳幔的形成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 238 - 242.
- [29] ALLEGRE C J. Chemical geodynamics[J]. Tectonophysics, 1982, 81: 109 - 132.
- [30] ZINDLER A, HART S R. Chemical geodynamics[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1986, 14: 493 - 571.
- [31] 郑永飞, 李曙光, 陈江峰. 化学地球动力学[J]. 地球科学进展, 1998, 13(2): 121 - 128.
- [32] 宋晓东. 地球内核与地球深部动力学[J]. 地学前缘, 1998, 5(增刊): 1 - 7.
- [33] MORGAN W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 280: 42 - 43.



- [34] HOFMANN A W, WHITE W M. Mantle plumes from ancient oceanic crust[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, **57**: 421 - 436.
- [35] GRIFFITHS R W, CAMPBELL I H. Stirring and structure in mantle starting plumes[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, **99**: 66 - 78.
- [36] HILL R I, CAMPBELL I H, DAVIES G F, et al. Mantle plumes and continental tectonics[J]. *Science*, 1992, **256**: 186 - 193.
- [37] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. *地质论评*, 1988, **34**(1): 11 - 24.
- [38] MARUYAMA S. Plume tectonics[J]. *J Geol Soc Japan*, 1994, **100**(1): 24 - 49.
- [39] STEIN M, HOFMANN A W. Mantle plumes and episodic crustal growth[J]. *Nature*, 1994, **372**: 63 - 68.
- [40] 陈述彭, 曾杉. 地球系统科学与地球信息科学[J]. *地理研究*, 1996, **15**(2): 1 - 11.
- [41] 陈之荣. 现代地球系统科学——可持续发展战略的科学基础[J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(2): 198 - 203.
- [42] 陈幼松. 数字地球改变人类计划[N]. *中国计算机报*, 1998-11-19.
- [43] 王心源, 郭华东. 地球系统科学与数字地球[J]. *地理科学*, 1999, **19**(4): 344 - 348.
- [44] 吴淦国, 张达, 陈柏林, 等. 构造地质学现状和进展——第31届国际地质大会构造领域学术成果综述[J]. *地质论评*, 2001, **47**(4): 446 - 447, 432.

## Driving Force of Geological Process and Geotectonics

LI Xiao-ming<sup>1,2</sup>

(1. *Changsha Institute of Geotectonics, Academia Sinica, Changsha 410013, China*; 2. *Graduate School, CAS, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** Driving force of geological process is the fundamental reason of the lithosphere movement. Discrepancies between views on driving force of geological process, especially for operation mode of driving force is the main reason why many tectonic schools come forth, also, now it is hotspots and frontiers of geotectonics study. The theory of plate tectonics is the mainstream of tectonic in the present, and mantle plume tectonics is the important supplement for it. The study on the geodynamics and earth system science contributes to the further development of geotectonics.

**Key words:** driving force of geological process; geotectonics; plate tectonics; mantle plume; geodynamics