

文章编号: 0253-9985(2005)01-0023-06

我国大陆古板块运动演化的特征

洪汉净, 马宗晋, 程国梁, 郑秀珍

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 应用地理信息系统, 研究了显生宙以来中国及其邻区板块运动演变过程的特征。着重分析了多陆块拼合过程和中、新生代以来两种类型板块运动交替过程。中国大陆古板块不是由单一古地核发展而成的简单板块, 是多个古地核或多陆块拼合而成的组合板块。中国大陆古板块演化是在全球板块运动的总体框架下进行的, 受全球板块运动的控制。中、新生代以来, 板块运动可以分为以开合(漂移)为主和以升降(裂解/焊接)为主的两种类型。两种类型的运动交替发生, 与地幔对流一起构成了总的板块演化历史。

关键词: 古板块; 组合板块; 开合; 升降; 演化

中图分类号: TE111.1 **文献标识码:** A

Characteristics of fossil continental plate evolution and movement in China

Hong Hanjing, Ma Zhongjin, Cheng Guoliang, Zheng Xiuzhen

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing)

Abstract: The characteristics of plate evolution and movement in China and adjacent areas since Phanerozoic have been studied by using GIS, with a focus on analyzing the matching process of multiple landmasses and the alternating process of the two types of plate movement since Mesozoic-Cenozoic. The fossil continental plate in China was not a simple plate that had been developed from a single ancient Earth core, but a combination plate that resulted from the matching of several ancient Earth cores or multiple landmasses. The evolution of the fossil continental plate in China had been carried out under the general framework of global plate movement, thus it had been controlled by the global plate movement. Plate movement since Mesozoic-Cenozoic can be divided into two types: one was dominated by opening and closing (drifting), and another was dominated by elevation and subsidence (splitting/bonding). These two types of plate movement occurred alternatively and constituted, in combination with mantle convection, the whole evolution history of the plate.

Key words: fossil plate; combined plate; opening and closing; elevation and subsidence; evolution

板块理论认为, 岩石圈板块为相对刚性的、变形相对统一的块体, 而板块边界变形相对激烈, 地球表面的变形主要由板块边界变形来完成。板块学说勾画了一个由宽阔、相对稳定的板块和狭窄、变形激烈的板块边界组成的地球表面运动的空间图像。

近年来, 板块构造演化时间过程的探讨成了板块构造研究的一个课题。利用海底扩张、古地磁、古生物及板块几何形态等数据进行古板块恢复, 可以运用欧拉定理求出各板块、各时期的古欧

拉极及其角速度, 运用计算机程序恢复岩石圈板块在地质历史中不同时期的古地理位置^[1~4]。然而对古板块演化过程仍然停留在描述阶段, 未能识别出有规律性的特征。一方面对板块的划分和恢复不够详细, 各时期的板块图像不够详尽; 另一方面阶段的划分不够细, 难以看出演化过程。

我们已经运用欧拉几何学原理, 利用古地磁数据, 在计算机地理信息系统上恢复了 600 Ma 以来古板块的运动过程^[5]。本文对这个结果进行进

基金项目: 国家课题(49672155)与中国石油天然气集团公司“九五”重点科研项目(970212-1-7)

第一作者简介: 洪汉净, 男, 36岁, 研究员(博士), 地球动力学

收稿日期: 2004-12-26

一步的分析,以期得出板块演化的特征。

1 多陆块的逐渐组合

由单一古地核发展而成的板块为简单板块,而由多个古地核或古板块拼合而成的板块为组合板块。北美板块、南美板块、澳大利亚板块、南极洲板块等为简单板块,而欧亚板块为组合板块。我国大陆是由华北、华南、塔里木、柴达木、羌塘、冈底斯等古板块拼合而成的^[6]。

人们早就注意到中国大陆基底与北美、西伯利亚等大陆不同,不是由一个单一的地台所组成,而是由若干地台拼合而成的。古地磁视极移曲线^[5]表明,至少在中生代以前,华北、扬子、塔里木、柴达木4个板块各自有独立的视极移曲线与运动轨迹。

早寒武纪时,中朝、扬子地块位于南纬。根据现有古地磁数据认为寒武纪华北位于南半球亚热带地区,与这一时期华北广泛发育的滨海相红色碎屑沉积以及浅海相碳酸岩的沉积岩相分析一致^[7]。

当时冈瓦纳大陆位于赤道附近的北半球,古华南的古纬度与其来源于冈瓦纳是相符的。早寒武纪扬子区的动物群是低纬度半干旱气候的产物^[8]。而当时华北陆块北缘的生物古地理区属西伯利亚型和北方型^[9]。考虑到当时西伯利亚、哈萨克与俄罗斯都在南半球中高纬度区^[10],华北位于扬子南面是合理的。

自震旦纪开始,几乎所有大型稳定地块和主要的中间地块都已形成。这一时期大陆块大部分位于南半球赤道附近^[11]。西伯利亚、俄罗斯位于南半球高纬度^[1]。澳大利亚、南极洲在北半球,塔里木、华北、华南在它们之间。这一时期整个大陆块之间的相对位置与后来的相对位置大致相同,只不过整体颠倒了。兴凯与加里东时期基本上是离散的多陆块,其中有许多是从古冈瓦纳大陆或其他古大陆分裂而形成的。

早海西时期,古特提斯洋扩张,陆块群在整体旋转中逐渐聚集成自身古板块,扬子地台与华夏拼合,华北地台与松辽-锡林霍特的拼合。但古板块间尚围有陆间海,与目前的形态尚有很大的差别。晚海西时期(晚石炭纪-二叠纪, 320~250 Ma)冈瓦纳大陆与西伯利亚和哈萨克产生焊接而形成潘基亚超级大陆。实际上大陆并不是完整的一块,其主体东侧有一条分离的大陆带,北支华北-蒙古成北西向分布,南支华南-印支成北东向分

布,两支在北半球中纬度汇合。

晚二叠纪时(255 Ma),在南半球赤道附近开始形成中特提斯洋,印支期中特提斯洋扩张,地幔运动由沉寂开始活跃,在全球大洋扩张中,古特提斯洋逐渐关闭(250~185 Ma),西北、华北、华南、羌塘、印支、滇缅泰马等6大古板块拼合成中国古大陆。

2 中、新生代的板块演化

中、新生代全球板块演化过程总体上是潘基亚古陆的解体和板块格局重新分配的过程。中国大陆古板块演化是在全球板块运动的总体框架下进行的,受全球板块运动的控制。

2.1 印支(250~200 Ma)

这是板块快速漂移,中特提斯洋打开和古特提斯闭合的时期(图1)。

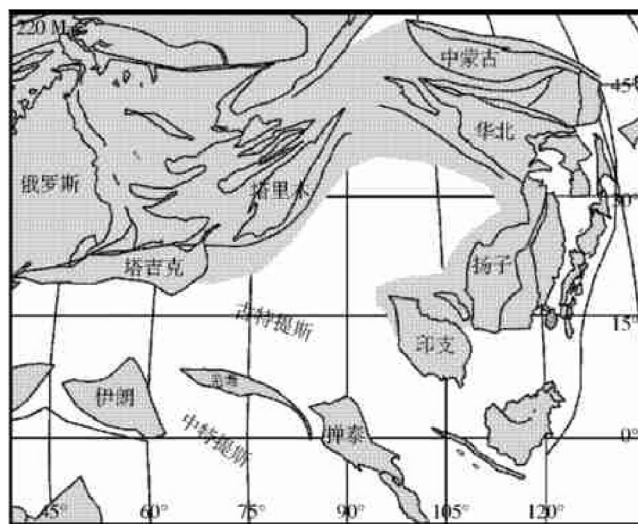


图1 晚三叠世时期(220 Ma)古板块位置复原图

Fig. 1 Palinspastic map showing the location of the fossil plates in Late Triassic (220 Ma)

晚二叠纪时,在南半球赤道附近开始形成中特提斯洋,随着中特提斯洋的扩张,将印支、华南向北推,促使古特提斯闭合,南、北大陆碰撞、拼合,秦岭、松潘洋封闭。中国构造由早、中三叠世北陆南海的古地理格局,晚三叠世转化为东西分异的新格局。印支运动前后华北与扬子的磁偏角发生巨大变化,表明印支运动期间块体受到巨大的水平作用力。

华北北部阴山-燕山一带普遍遭受褶皱与逆冲,表现为近南北向的水平缩短^[12]。秦岭印支褶皱系也是近东西走向,在华北地台内部,晚三叠世以来发育大型内陆拗陷盆地,鄂尔多斯盆地,沉积

中心也呈近东西向展布, 都显示了近南北向的挤压。华北-华南碰撞可能使柴达木地块向西挤出, 其北部的祁连断裂右旋错动, 其南部的东昆仑断裂左旋错动。

三叠纪初, 中特提斯洋向北俯冲, 形成强大的区域挤压, 天山山系急剧隆升, 向盆地大规模冲断, 形成总体上北厚南薄的楔形前陆盆地^[13]。晚三叠纪(220~208 Ma), 羌塘-印支块体与欧亚南缘碰撞, 200 Ma 左右滇缅泰马与印支碰撞, 同时, 金沙江洋关闭。

2.2 早燕山(200~165 Ma)

这是中大西洋巨型岩浆岩省形成的时代, 潘基亚古陆裂解的时期(图2)。

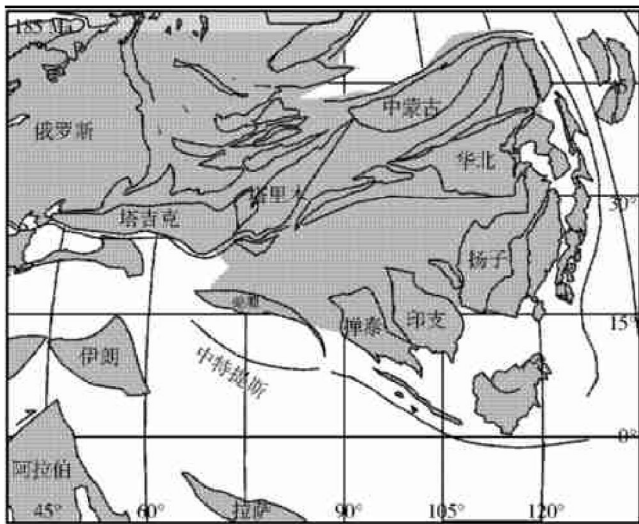


图2 早、中侏罗世时期(185 Ma)古板块位置复原图

Fig. 2 Palinspastic map showing the location of the fossil continental plates in Early-Middle Jurassic (185 Ma)

这一时期, 中亚洲大陆基本形成, 华北大部分与东北高地一样广泛抬升, 而接受剥蚀, 地块内部发育有一些 NE-NNE 向的舒缓褶皱。鄂尔多斯大型拗陷向西收缩。早、中侏罗纪(170~140 Ma)是中国东部环太平洋岩浆活动的第一个高潮期, 主要是巨大花岗岩的深成侵入, 可能是地壳受热重熔的结果。

三叠纪末-早侏罗世班公-怒江海扩张, 羌塘向北扩张, 可可西里增生楔发生本区最强烈的变形, 缺失下侏罗统^[14]。180 Ma 时, 羌塘与塔里木碰撞, 塔里木西部隆起, 形成巴楚-和田古陆。拜城、满加尔凹陷呈右行雁列。

2.3 中燕山(165~120 Ma)

此时期太平洋快速扩张, 库拉板块快速向北

漂移, 而蒙古-鄂霍茨克大洋闭合(图3)。

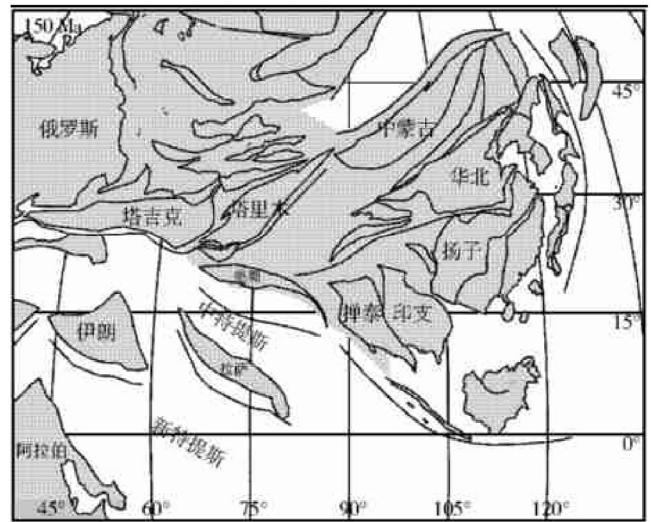


图3 晚侏罗世时期(150 Ma)古板块位置复原图

Fig. 3 Palinspastic map showing the locations of the fossil continental plates in Late Jurassic (150 Ma)

侏罗纪-白垩纪期间, 太平洋板块向北漂移(纬度可达40°左右), 160~80 Ma 期间是太平洋板块快速向北运动的时期。华北块体在晚侏罗纪-早白垩世有明显地向北漂移^[15]。东亚NNE向构造经受巨大的剪切挤压变形, 郯庐断裂大幅度左旋走滑也是在这一时期发生的。徐嘉伟认为: 郯庐断裂两侧地壳左旋错动700 km左右, 错开的时间主要在晚侏罗至早白垩世之间。古地磁资料认为郯庐两侧错动达6°左右^[16], 也是发生在晚侏罗世之后。而早白垩世以后断层两盘的古纬度相近, 表明自早白垩世后无明显的大幅度平移。

这一时期是中生代环太平洋岩浆活动的第二个高峰期。地壳上部脆性破裂, 为火山喷发提供了良好的通道, 使火山活动与岩浆侵入活动都很活跃^[17]。这一时期华北构造变形的走向已明显地以NE-NNE向为主, 在华北高地上局部有一些小型山间断陷盆地, 华北离散的盆地内发育酸性、中性、中基性火山岩, 总的趋势是西边强东边弱。这一时期东北及东南沿海也发育分布极广的火山盆地。

2.4 晚燕山(120~80 Ma)

这主要属于中生代静磁期(118~84 Ma), 是翁通爪哇、凯尔盖朗巨型岩浆岩省活动的时期(图4)。

这一时期华北再次褶皱隆起, 兴安岭-太行山-雪峰山一线的山系升起, 而在其东侧形成一系列的沉积盆地, 早白垩世晚期仅在山前地带有

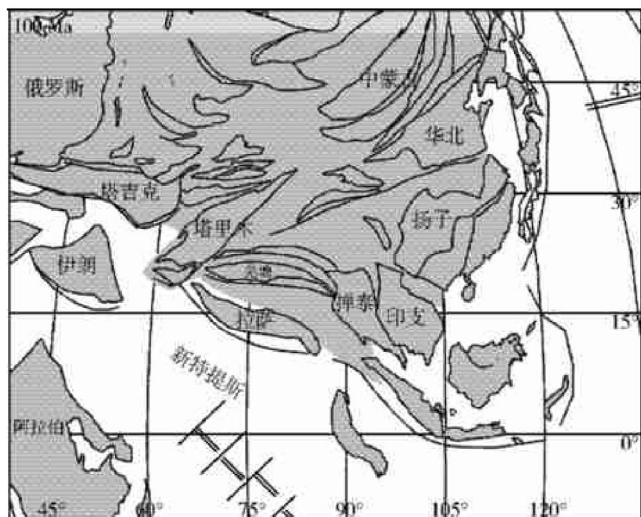


图4 白垩纪时期(100 Ma)古板块位置复原图

Fig. 4 Palinspastic map showing the locations of the fossil continental plates in Cretaceous (100 Ma)

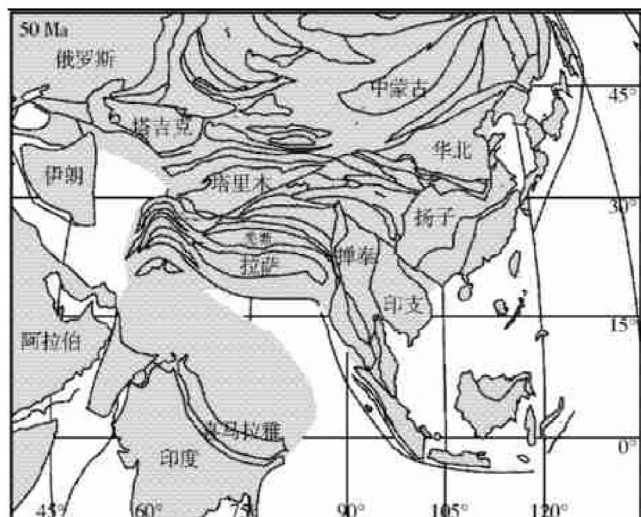


图5 早第三纪时期(50 Ma)古板块位置复原图

Fig. 5 Palinspastic map showing the locations of the fossil continental plates in Early Tertiary (50 Ma)

一些类磨拉石堆积,尚未形成一个完整的大盆地。而晚白垩世沉积范围扩大,在黄骅、济阳等地的上白垩统为河湖红色砂泥岩,在郯庐断裂带内为山麓-河流类磨拉石型沉积。早白垩世晚期已停止沉积的鄂尔多斯盆地开始隆起、西仰东倾,接受剥蚀;晚白垩世川滇盆地沉积范围也急剧缩小。

这一时期郯庐断裂带从早期的左旋走滑转为裂谷性质,以山东沂沭段最为典型。郯庐断裂带的火山岩与黄骅类似,都属于钾质系列为主的碱性火山岩系列^[18],它与新生代玄武岩不同,说明在深部岩浆岩区处于缓慢挤压状态,而郯庐断裂带是在华北NNW向总体挤压格局下的NEE向局部引张造成的。

华南武陵山以东至东南沿海广大地区,中小盆地星罗棋布,其共同特点为主要沿着北东和北北东向断裂继承性发育。

2.5 早喜山(80~40 Ma)

此时期印度洋快速扩张,印度板块快速北上,雅鲁藏布江洋关闭(图5)。

85 Ma左右全球板块运动的格局发生了的巨大变化。60 Ma北大西洋裂开,造成北美与欧洲分开。晚白垩世至始新世中期,从75 Ma至45 Ma,印度洋板块以15~20 cm/a的速度急剧地向北运动,而澳大利亚板块运动仍很缓慢,这样在印度洋板块与澳大利亚板块之间形成一条转换带。90°海岭南段(18°~10°S)东缘始新世早期之前显示为近南北向的右旋走滑运动。

80 Ma 科希斯坦碰撞,发生强烈变形,印度次大陆的西端在52 Ma时首先与欧亚大陆碰撞,在向北运动的同时逆时针旋转,42 Ma左右东端拼合。印度边界碰撞变形,作用局限在板块边界附近,形成冈底斯花岗岩^[5,19]。

塔里木已形成统一盆地,海水自西向东侵漫。华北等盆地初始引张^[20]。鄂尔多斯南缘西北缘裂陷引张。印支半岛向东南挤出。

2.6 晚喜山(40~0 Ma)

此时期青藏高原隆升,东亚大陆边缘盆地沉降(图6)。

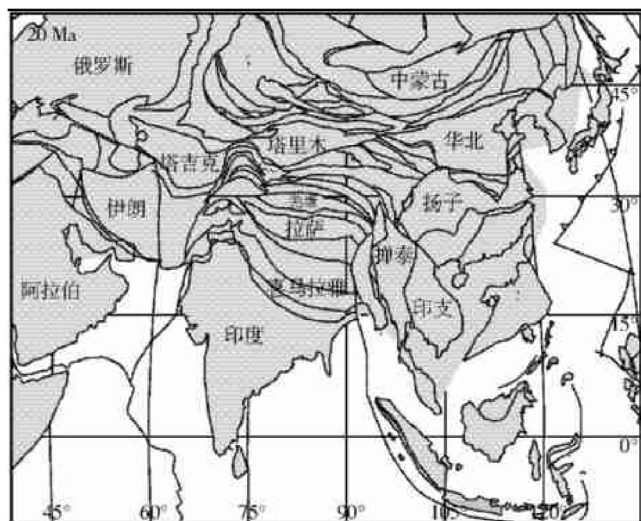


图6 晚第三纪时期(20 Ma)古板块位置复原图

Fig. 6 Palinspastic map showing the locations of the fossil continental plates in Late Tertiary (20 Ma)

中晚始新世(43~36 Ma)太平洋板块转向。从始新世中期开始,印度洋板块和澳大利亚板块一起向北运动,此时期印度板块与欧亚板块完全拼合,印度洋板块的运动速度比上一阶段要低得多。

在印度板块与欧亚板块的碰撞过程中,西藏高原开始呈现起伏缓慢抬升。渐新世期间柴达木两侧EW向断层右旋剪切挤压。印支块体向东南挤出的同时,从泰国裂谷系、滇西、银川到华北平原盆地产生一NNE向引张构造。

早中新世(25~15 Ma)印度板块的影响已经扩展到了青藏边缘。高原边缘形成NW向挤压隆升带,华北、南海北部大陆架等盆地进入坳陷阶段,而亚洲东边缘进入引张高潮,边缘海逐次拉开。中晚中新世(15~5 Ma)亚洲东边缘转为挤压。中轴构造带南段活动强烈,实皆断层大幅度右旋走滑,红河断裂由左旋转变为右旋活动,鲜水河断裂左旋,川滇块体开始挤出,柴达木两侧断层挤压。上新世以来(5~0 Ma)中轴构造带活动向北延伸,青藏高原快速抬升,山西裂陷形成,红河断裂继续右旋,鲜水河断裂左旋,柴达木两侧断层左旋,冲绳海槽张开。

3 讨论

中、新生代板块的演化有升降(板块裂解)和开合(快速漂移)相交替的现象:印支时期以中特提斯洋的张开和古特提斯洋的闭合为主要特征;早燕山时期中大西洋巨型岩浆岩省活动,潘基亚古陆裂解,华北大部分与东北高地广泛抬升;中燕山时期,太平洋张开,库拉板块快速北上,蒙古-鄂霍茨克洋关闭,亚洲东缘出现左旋剪切;晚燕山时期,翁通爪哇、凯尔盖朗巨型地幔柱活动,南半球大洋裂解,兴安-太行隆起,松辽盆地裂陷;早喜山时期,印度洋快速打开,雅鲁藏布江洋闭合,90°海岭出现右旋剪切;晚喜山时期青藏隆起,东亚盆地沉降^[21]。

3.1 板块运动类型

全球板块运动可以分为以开合(漂移)为主和以升降(裂解/焊接)为主的两种类型^[22]。两种类型的运动交替发生,与地幔对流,构成了总的板块演化历史。

当板块运动与地幔对流之间强耦合时,板块漂移速度较慢,主要是隆起与沉降运动,地幔对流顶层的运动控制了板块的变形。当上层岩石圈板

块脱离下伏地幔的桎梏,板块快速运动,往往产生大洋的快速张开,同时也就有板块的快速闭合,而且不均匀的水平运动往往产生横向剪切构造。

3.1.1 升降(裂解/焊接)

板块漂移速度较慢,往往有巨型岩浆岩省活动,代表大型地幔热柱的活动。主要是隆起与沉降运动,而没有实质性水平运动。块体之间发生垂直差异运动,可以产生逆冲或正断运动。板块运动与地幔对流之间的关系为力学强耦合时,地幔对流顶层的运动控制了板块的变形。

在板块运动中,裂谷两侧块体大规模水平分离之前,有一个裂解的时期,一个完整的板块不可能瞬时解耦,通常裂解演化经过抬升、裂陷、岩石圈减薄、分离和漂移等过程。这是板块分裂、解耦的过程。

由于大陆地毯作用,大陆下不断产生热积累,但这不是裂解的充要条件。最重要的是地幔对流的上升流,更准确地说是向两侧反向的离散运动,则大陆不管上升或下沉都可以裂解。仅仅把板块推到一起是不可能形成统一的新板块的,两个板块靠近之后需要有一个焊接的过程,包括相应的变质活动。

3.1.2 开、合、扭

当上下层之间解耦后,上层岩石圈板块脱离下伏地幔的桎梏,板块就会快速运动,往往产生大洋的快速张开。大洋中脊裂解后,或两侧块体互相脱离后向两侧快速运移,如特提斯或太平洋的快速打开。

另一方面,由于地球表面面积大体不变,快速扩张需要在板块另一侧快速闭合相补偿,这样可能有大规模的俯冲,否则快速运动的板块如何消耗。因此板块的快速张开与闭合往往是同时发生的。

板块张开或闭合都是水平运动,而不均匀的水平运动往往产生横向剪切构造。

3.2 交替运动的机理

裂解/结合与漂移/剪切交替,垂直运动和水平运动交替,升降与开合交替。

板块裂解前,两侧板块耦合在一起,虽然下伏地幔存在离散的拖曳力,未分离板块的水平运动受到限制,而以升降运动为主。当板块裂解后,两侧板块分离,将形成快速的水平运动。

岩石圈板块下地幔对流水水平分量不可能同一

方向,或者说板块下伏对流不会都与上覆板块运动的方向完全相同,运动差异产生剪切生热,热能积累逐渐使岩石圈底层介质屈服失效,产生解耦。由于剪切屈服而产生的板块与下伏不协调对流的解耦,板块运动所受的阻力减少,板块运动的速度也就提高。

40 Ma 反映了对流能量积累到一定时间,对流使地表热流逐步升高,当由于热流提高而软流圈温度到达最大时,岩石圈与其下部地幔解耦,岩石圈快速运移。岩石圈快速运移过程中,大洋快速打开,消耗热能,板块逐渐冷却,又会促使上下层耦合,板块运动速度减慢。

大陆聚合后,地幔效应使温度升高,由于热积累而产生岩浆活动。上升流到达岩石圈底层后,温度升高,部分熔融,导致岩浆活动。以形成上升运动为主,由于均衡要求同时需要沉降变形,造成以升降为主。而板块裂解,热能消耗后,水平运动又占上风。

参 考 文 献

- Ziegler A M, Peter M, Rees P M, et al. Mesozoic assembly of Asia: constraints from fossil floras, tectonics, and paleomagnetism[A]. In: Yin A, Harrison T M. The Tectonic Evolution of Asia[C]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1996. 371-401
- Irving E. Fragmentation and assembly of the continents, mid-Carboniferous to present[J]. Geophysical Surveys, 1983, 5: 299-333
- Scotese C R. Paleogeographic Atlas, Texas, PALEOMAP progress report 90-0497[M]. Texas: Department of Geology, University of Texas at Arlington, 1997. 1-45
- Schettino A, Scotese C R. A synthetic APWP for Africa (Jurassic-Present) and global plate tectonic reconstructions[J]. Eos Trans, AGU, 2000, 81(19): 180
- 马宗晋, 杜品仁, 洪汉净. 地球构造与动力学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003. 350-417
- 洪汉净, 于泳, 陶玮, 等. 组合板块与中国大陆构造变形[A]. 见: 张中杰, 高锐, 吕庆田, 等. 中国大陆地球深部结构与动力学研究[C]. 北京: 科学出版社, 2004. 204-213
- 杨振宇, 马醒华, 黄宝春, 等. 华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(增刊): 38-43
Yang Zhenyu, Ma Xinghua, Huang Baochun, et al. Phanerozoic apparent polar-wandering curve and block motion in North China Block[J]. Science in China(series D), 1998, 28(Sup): 38-43
- 蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 7-60
- 陈炳蔚, 姚培毅, 郭宪璞, 等. 青藏高原北部地体构造与演化——格尔木额济纳旗地学断面走廊域地质构造与演化研究[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1-120
- Senger A M C, Natal' in B A. Palcotectonics of Asia: fragments of a synthesis[A]. In: Yin A, Harrison T M. The tectonic evolution of Asia[C]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1996. 486-616
- 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3): 1-12
Wang Hongzhen. Speculations on Earth's Rhythms and continental dynamics[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3): 1-12
- 聂宗笙, 刘仲温. 华北地块破裂过程及构造活动规律[J]. 中国区域地质, 1984, 63-76
Nie Zongxin, Liu Zhongwen. Fracture process and tectonic active in North China block[J]. Regional Geology in China, 1984, (9): 63-76
- 何登发, 李德生. 塔里木盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1-173
- 边千韬, 郑祥身, 叶建青, 等. 构造[A]. 见: 张以弗, 郑祥身. 青海可可西里地区地质演化[C]. 北京: 科学出版社, 1996. 80-148
- 方大钧, 郭亚滨, 谈晓冬, 等. 华北板块中生代古地磁研究[A]. 见: 中国地质学会构造地质专业委员会编. 第三届全国构造地质会议论文选集[C]. 北京: 科学出版社, 1990. 182-192
- 魏斯禹, 滕吉文, 王谦身, 等. 中国东部大陆边缘地带的岩石圈结构与动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 1-188
- 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培. 中国及邻区构造古地理和生物古地理[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990. 1-126
- 徐贵忠. 渤海裂谷中生代火山岩特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 1986, 2(1): 81-90
Xu Guizhong. Features of Mesozoic volcanic rocks and their geology meaning in Bohai rift[J]. Acta Petrologica Sinica, 1986, 2(1): 81-90
- 贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 121-125
Jia Chengzao, He Dengfa, Lu Jiemin. Episodes and geodynamic setting of Himalaya movement in China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 121-125
- 刘池洋, 赵红格, 杨兴科, 等. 前陆盆地及其确定和研究[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 307-313
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Yang Xingke, et al. Foreland basin and its definition research[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 307-313
- 张厚福. 石油地质学新进展[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 351-354
Zhang Houfu. Development of petroleum geology[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(3): 351-354
- 杨克明, 熊永旭, 李晋光, 等. 中国西北地区板块构造与盆地类型[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(1): 47-56
Yang Keming, Xiong Yongxu, Li Jinguang, et al. Plate tectonics and basin types in Northwest China[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(1): 47-56