青藏高原的形成与隆升

潘裕生

(中国科学院地质研究所,北京,100029)

摘 要 青藏高原的形成与隆升问题是个十分复杂、倍受地球科学家关注的问题。它被认为是冈瓦纳大陆与欧亚大陆长期相互作用的结果。青藏高原是由6个地体相继增生到亚洲大陆上的一个组合,这些地体之间的边界被5条缝合带所限定。造山作用自北向南相继变年轻。青藏高原是特提斯的主要范畴,它可以分成3个区域,分别代表了3个阶段主洋盆位置。特提斯北区位于昆仑山和祁连山,它的遗迹是第五缝合带,在大陆基底上于震旦纪形成裂谷,奥陶纪闭合。特提斯中区位于可可西里—巴颜喀喇,古生代晚期以来在弧后盆地基础上继续破裂、扩张,典型的洋壳形成于石炭—二叠纪,这个时期的洋称古特提斯,它的遗迹为第三和第四缝合带。特提斯南区位于青藏高原南部,雅鲁藏布江缝合带代表了它的主洋盆遗迹,班公—怒江缝合带代表了它的弧后盆地。青藏高原的隆升以多阶段、非均匀、不等速为特征,大体上可分成4个阶段,即45~38,25~17,13~8和3~0 Ma。虽然到目前为止已经提出了多种模式来解释高原的形成与隆升,但是这一问题迄今仍然没有解决。文中笔者根据多年来地质、地球物理和地球化学研究成果和近年来新的实验研究结果,提出了叠加压扁热动力模式来解释青藏高原的形成与隆升机制。

关键词 青藏高原 形成 隆升 机制 模式 叠加压扁

CLC P542

青藏高原以其特高的海拔高程而被人们称为世界屋脊,科学家们把它与南极、北极相提并论,誉为地球的第三极——高极。青藏高原的形成是地球历史上最伟大的事件之一,虽然它的隆升仅仅是最近几百万年以来的事件,但究其根源却有着漫长的地质历史。通常被认为是冈瓦纳大陆与欧亚大陆长期相互作用的结果,是现今正在进行着的大陆对大陆碰撞的典型例子,被誉为是打开地球动力学大门的金钥匙,从而成为国际地球科学的一个热点。在国内外学者的共同努力下,青藏高原的研究已经取得了重要的进展,对全球构造作出了应有的贡献,提出了许多带有普遍意义的重大理论问题,如造山模式、特提斯演化、地壳运动及变形机制等。本文主要从已有的地质、地球物理和地球化学资料入手,研究高原的地质演化、物质组成、运动方式、变化特征、高原隆升过程及其机制等,探讨高原形成的动力学过程。

收稿日期:1998-10-15 修改稿收到日期:1999-01-08

作者简介:潘裕生,男1937年生,研究员,主要从事构造地质、新构造及地震地质研究工作。自1974年以来一直参加青藏高原综合科学考察和国家攀登计划青藏项目的研究,主要从事构造地质、大地构造、特提斯演化、高原的形成演化与动力学机制等研究,对青藏高原的地质问题有较深入的研究。

本研究受国家攀登项目与中国科学院青藏高原研究项目(编号:KZ951-204-01-05)资助。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 高原现今的地质特征

青藏高原是地球上一块独特的自然地域单元,现今仍保存着许多独特的地质特征。青藏高原面积约2 500 000 km^2,平均海拔在4 500 m以上,大面积特高地势与这个地区的地壳

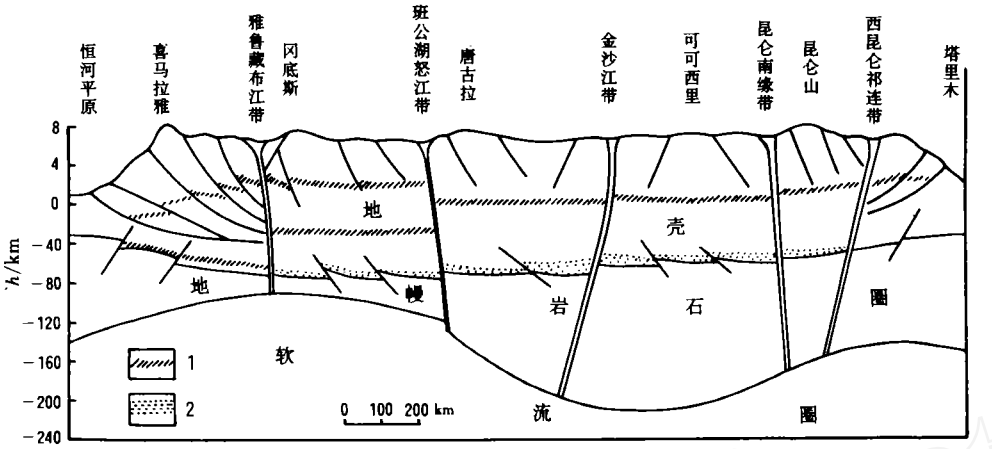


图1 青藏高原南北向岩石圈结构示意剖面

Fig.1 Schematic profile of the lithosphere structure of the Qinghai－Tibet Plateau

1-地壳低速层;2-壳-幔过渡层

结构密切相关。根据各种地球物理探测资料[1~10],一致得出了青藏高原平均地壳厚度达70 km的结论,大体上相当于正常大陆地壳的两倍。但是,岩石圈地幔却相对偏薄,平均厚度在90～140 km,而且在安多一改则一线南北有个显著的差别,安多以南在90～120 km,以北根据大地电磁测深资料[11]认为可达120～210 km,西部剖面改则以北可达230 km。青藏高原地壳中普遍存在1～2个低速高导层[1,2,5,7~12],由此揭示了高原地壳结构十分复杂,具多圈层结构特征,反映出由软硬交替的岩石层组成(图1)。在本次吉隆—三个湖综合地球物理剖面上,在冈底斯地体的中地壳中存在透镜层状的低速高密物质,虽然这些物质的性质、状态、来源等尚未确定,但是显然为非原地的物质。喜马拉雅的浅色花岗岩通常被认为是地壳的局部重熔岩浆就地侵位的产物,深反射再次证实了地壳中存在多个低速带和岩浆体[13,14]。这类岩浆的温度不需特别高,甚至在500～700℃时即开始局部重熔,沿断层面的滑动、冲断滑脱、局部减压是这些岩浆局部重熔的主因。具有高地热显示、地表水热显示600多处[15],其中普遍存在高温沸泉、间歇泉、喷气孔、水热爆炸等现象。尤其是在雅鲁藏布江带两侧,高地热显示十分普遍而且强烈。高原北部地区虽然地表水热显示较少,温度亦较低,但是强烈的近代火山活动十分醒目,是全球大陆内部火山活动的典型区域之一。不仅地表热显示强烈,深部热异常也非常显著,从目前高原仅有的几个热流值测量数据看,高原南部的热异常亦极为显著。在羊卓雍湖所测的平均热流值为146 mW/m^2[16~18],普莫雍湖为91 mW/m^2,罗布莎为60 mW/m^2,拉萨北郊为66 mW/m^2,马区为106 mW/m^2,羊八井为108 mW/m^2,羊应乡为364 mW/m^2,拉多岗为338 mW/m^2,那曲为319 mW/m^2,伦坡拉盆

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地为 140 mW/m^2,沱沱河为 47 mW/m^2,东昆仑北麓为 42 mW/m^2,锡铁山为 40 mW/m^2。除了羊应乡、拉多岗和那曲为传导-对流型热流外,其余都为传导型热流。青藏高原的地质结构是由被 5 条缝合带分隔的 6 个地体组合而成的(图 2)[19~24],5 条缝合带自南而北分别为雅鲁藏布江缝合带、班公湖—怒江缝合带、金沙江缝合带、昆仑南缘缝合带和西昆仑—阿尔金—北祁连缝合带;6 个地体的名称自南而北是喜马拉雅地体、拉萨地体、羌塘地体、可可西里—巴颜喀喇地体、昆仑地体、塔里木地体。印度次大陆受印度洋板块运动的影响,自侏罗纪以来以 12 cm/a 的速度向北漂移,至始新世与亚洲主大陆碰撞,导致了喜马拉雅造山运

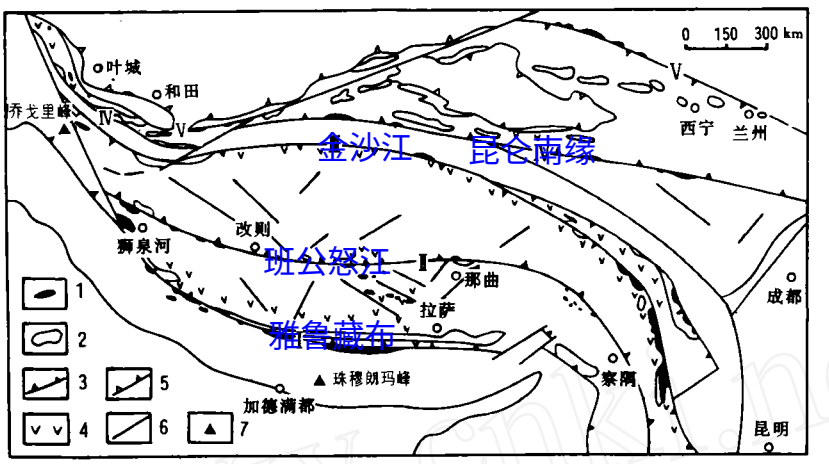


图 2 青藏高原构造简图

Fig.2 A brief structural map of Qinghai－Tibet Plateau

1-蛇绿岩;2-岛弧深成岩;3-缝合带及其编号;4-岛弧火山岩;5-盆地边界;6-断裂;7-山峰

动。大陆碰撞之后,印度次大陆并没有因此而停止其向北的运动,仍以 5 cm/a 的速度向北移动,时至今日,这一状态并无多大改变。青藏高原实际上长期处在南北向巨大挤压应力作用下,目前无论是各种地球物理场资料还是地质上的各种证据都符合这一统一应力场,青藏高原现存的强烈挤压冲断,大规模的走滑与剪切、正断与拉伸等等都是在这一统一应力场中的不同表现形式。

2 高原岩石圈的形成与演化

青藏高原岩石圈结构在纵横方向上都是不均匀的。现今地球上最显著、最本质的差别是大陆与海洋,这或许是由于它们的地壳性质不同所决定的,因此,我们今天在划分地壳最大一级构造单元时依据的首要准则就是地壳的性质(是陆壳还是洋壳)。现在的缝合带虽然很狭窄,但有洋壳残迹蛇绿岩存在,代表着某个时期的海洋,为此,它仍然应该是一级构造单元。根据这一原则我们将青藏高原划分为 5 条缝合带和 6 个地体(图 2)。

青藏高原被认为是印度板块与欧亚板块相互作用的结果,同时,它又是东特提斯的主体范畴,高原的形成过程与特提斯的兴衰密切相关。自从特提斯一词提出之后,研究者之众、文章之多目不暇接,对特提斯的研究也越来越深入。随着新地层时代的不断发现、更正与补

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

充,在原认为属侏罗纪的这套地层中,发现了愈来愈多的地层,不仅包括了三叠纪、晚古生代乃至早古生代地层,而且延续到第三纪仍有深水大洋沉积,由此特提斯出现了更丰富多彩的名词,同时亦造成了引用上的混乱,但是如果一成不变地把特提斯的含义仍限制在原含义上的侏罗纪,恐怕没有一个人能够接受,亦不符合客观现实。因此,时至今日归纳起来可把特提斯分为新特提斯、古特提斯和原特提斯,特提斯仍然是指发育于欧亚大陆南缘与冈瓦纳大陆之间的一个大洋,只是笼统的特提斯一词几乎只具空间含义,而没有明确的时间含义,或者是泛指这个区域内古生代以来的大洋。只有新、古、原特提斯才既具空间含义,又具明确的时间含义,分别代表了中—新生代、古生代晚期和古生代早期的特提斯。顺便说一下,国内学者还有"中特提斯"的提法,意指中生代特提斯,笔者认为最好不用这一名词,因为在青藏高原并不存在独立的中生代大洋。有人认为三叠纪巴颜喀喇群为大洋沉积,然而在这套地层中完全缺乏火山物质,表明已不存在活动的洋脊,海洋已于二叠纪死亡,而且,在这套地层中普遍存在大量黄铁矿假晶,后期有机质亦十分丰富,表明它并非广海,而是比较闭塞的盆地。因此,它并非属于真正的深水大洋盆地,而是古特提斯的残留海。雅鲁藏布江带虽然从三叠纪开始发育,中生代是该大洋的主体,但它延续到第三纪,已被国内外学者习惯地称作新特提斯。只有班公湖—怒江带所代表的洋发育在中生代侏罗纪,但是它是弧后盆地性质的洋盆,是一些小洋盆地的组合,发育时间短,发育不成熟,这个时期的真正大洋在雅鲁藏布江带,因此称它为中特提斯也并不确切,不如直接称它为新特提斯的弧后盆地更为明确。

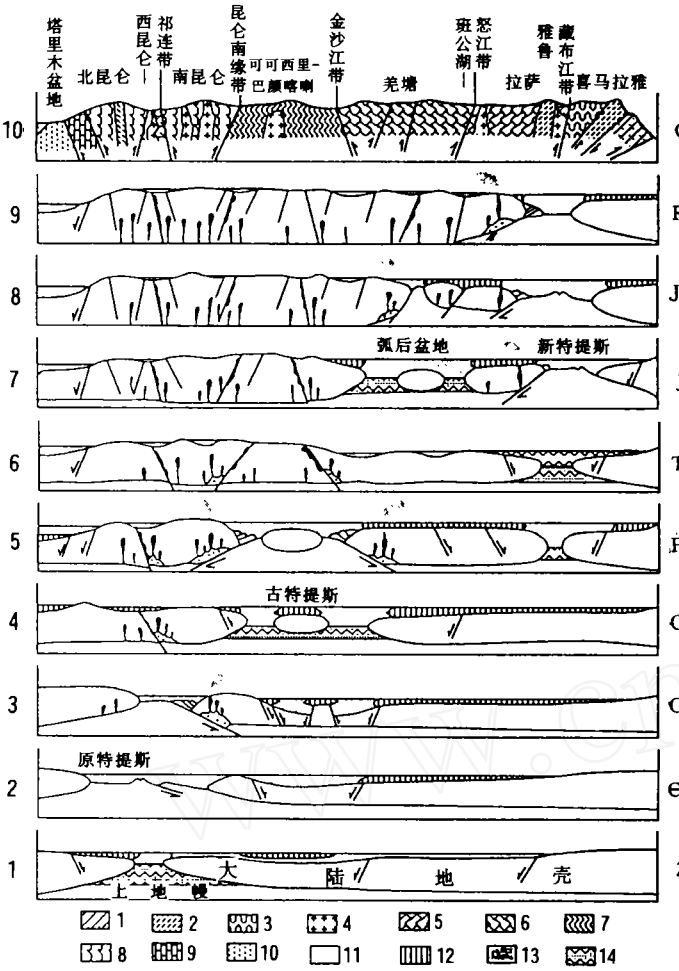


图3　青藏高原构造形成与演化示意图

Fig.3　Sketch map of the formation and evolution of Qinghai－Tibet Plateau

1-低喜马拉雅沉积物;2-基底变质岩;3-特提斯喜马拉雅沉积;4-花岗岩;5-拉萨地体沉积物;6-羌塘地体沉积物;7-巴颜喀喇群;8-昆仑山沉积变质岩;9-北昆仑晚古生代沉积;10-昆仑山前中生代沉积;11-新生代盆地堆积;12-大洋台地沉积;13-大洋浅水沉积;14-大洋壳及深水沉积

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在青藏高原范围内,特提斯在空间上可以分成3个区域,即北区、中区及南区,这3个区

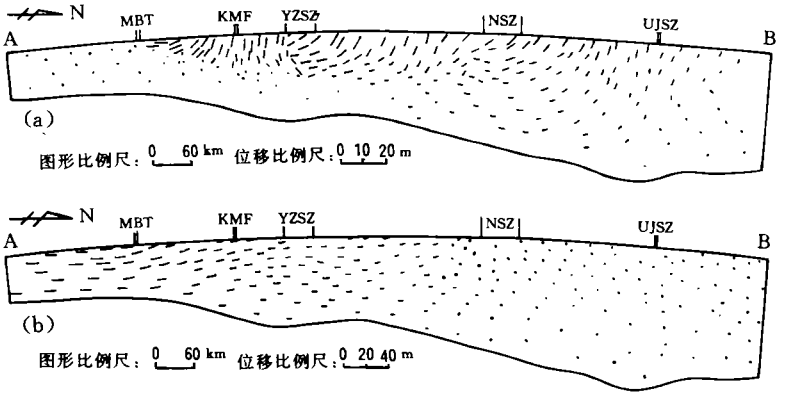


图4 青藏高原地壳上地慢内位移矢量图[38]

Fig.4 Vectograph of displacement in the crust and upper mantle of Qinghai－Tibet Plateau

(a)-重力作用下;(b)-边界力和位移作用下(无重力作用);箭头指位移矢量方向,箭头长短指位移量

域恰好对应于特提斯3个不同阶段的主洋盆位置。原特提斯主要发育于北区,对应于第五缝合带。大约于震旦纪裂开,奥陶纪向南消减而逐渐消亡。古特提斯主要发育于中区,可对应于第三、四缝合带。古生代早期为原特提斯的弧后盆地,石炭纪、二叠纪进一步裂开成洋,二叠纪向两侧消减,海洋逐步死亡,三叠纪时期仅仅是古特提斯的残留洋。新特提斯发育于南区,主洋盆对应于雅鲁藏布江缝合带。二叠纪末、三叠纪初裂开,侏罗纪成洋后即一边扩张、一边向北消减,班公湖—怒江缝合带是与它对应的弧后盆地。新特提斯直至始新世海洋消亡,喜马拉雅拼合到亚洲南缘,统一的青藏高原才告形成,后经抬升才成今日所见的高原。由此可见,特提斯洋盆有随时间的推移而向南迁移的现象,这与高原各地体和缝合带北老南新相一致,反映了冈瓦纳大陆不断裂离、亚洲相继依次向南增生的板块运动过程。整个高原的地质演化可用图3来表示。

由于青藏高原是由多地体拼合而成的,各地体的构造形态有明显的差异。喜马拉雅地体主要为近东西方向的构造线,无论是褶皱轴向还是冲断层方向都与山脉走向一致。由于这一方向构造特别强烈,其它方向的构造几乎都被掩盖了,在南北方向上构成了十分紧闭的褶皱与冲断叠覆,往往有远距离的推覆。除此之外南北向的张性或张扭性构造也随处可见,但规模都不大,与东西方向构造相比显然弱得多,而且稍晚,切割了东西向构造,如莫斯塘地堑、卧马地堑、康马东的地堑等。褶皱与冲断构造大多不对称,多数面朝北倾,包括褶皱轴面,冲断面的倾角较小。因此,变形机制类似简单剪切,南侧向北向下俯冲、北侧向南向上仰冲,在长期的剪切作用下造成南北方向的强大挤压,共轭剪切面夹角较小(锐角指向南北)。因此,它是印度地盾长期北移下插的直接结果。

高原北部的昆仑地体,主构造线方向虽然亦近东西向,但是褶皱轴面或冲断面都有两个方向,即既有朝南倾的,也有朝北倾的,倾角通常都很陡,但也有少量极平缓的,显然是几期构造叠加的结果。它在南北方向上亦挤压得很紧密,但是仍然可以清晰地分辨出北西与北东两个方向的共轭剪切断裂,它们受到了后期的改造,目前呈北西西和北东东方向展布,北东向者为左旋,如阿尔金断裂等,北西向者为右旋,如喀喇昆仑断裂等,其规律性十分明显。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

显然,它们现在的状态是受后来南北方向挤压叠加压扁的结果,致使剪切夹角的钝角指向南北方向。这与剖面上面朝南倾和面朝北倾的两组共轭冲断面倾角都过于陡,都在 70°以上,同样也是受南北向压扁的结果一致。

拉萨地体与羌塘地体的变形介于喜马拉雅与昆仑之间,虽然主构造线方向也都为近东西向,但是北东向与北西向的两组共轭剪切断裂更为显著,从而造成这两个地体上突出的特点是菱形地块的广泛分布。但两者也有区别,拉萨地体上大多数构造面仍有南倒北倾现象,而羌塘地体上构造面比较对称,以复向斜、复背斜形式出现,冲断面亦较对称,从而更接近对挤形式,南北向的剪切夹角要比拉萨地体的大。

从整个青藏高原大规模走滑断层的运动方向看,北部的走滑断层大多为左旋运动,如昆仑山口断裂,东一西大滩断裂、昆中断裂等,而南部的走滑断层大多为右旋运动,如北冈底斯断裂、波密断裂、阿尼桥断裂、雅鲁藏布江断裂等,表明高原中部的物质确有向东运动滑出的现象,龙门山断裂逆冲到成都平原上,与高原中部物质东移现象是完全一致的。再则,高原南部的喜马拉雅山现正在向恒河平原上仰冲,而北部的昆仑山第四纪以来向塔里木盆地的仰冲十分明显。因此,第四纪以来高原向周围盆地的扩散现象亦是十分显著的,与其相关高原内部亦出现了一些东西向正断层及地堑。由此可见,高原现今的应力状态仍然是处在南北向挤压之中,而非拉张状态。高原上目前广泛分布的正断层仅仅是近地表很浅部位的产物,而且出现的时间都很晚,它们都切割了第四纪早、中期的沉积物,是在这些沉积物堆积之后形成的,它们并不代表整个高原处于拉张状态,而是高原抬升到一定高度后,表面向周围扩散引起的张裂,类似于横梁弯曲顶端的张裂。

从上述事实可以看出,无论是 5 条缝合带还是 6 个地体,它们都是北部的形成早,地体的拼合作用也是北面的早,经历的运动次数多,变形强而复杂,逐次向南迁移变新;南部的形成晚,经历的运动次数少,变形虽然也很强,但是形式比较单调,显然,青藏高原的变形是在南北向挤压作用下以多期递进叠加压扁变形为特征。

3　高原隆升机制的讨论

青藏高原究竟何时开始隆升,何时形成现在的格局,各个阶段的状态如何,至今仍是个争论的问题。从地质作用的过程看,自印度次大陆与亚洲主大陆开始碰撞起,青藏高原现今各块体即联成了一个整体,大陆碰撞这个历史性转折事件即是青藏高原隆升的起点。这个划分是人为的,实际上从新特提斯向北消减起,冈底斯即以科迪勒拉型造山型式而逐步从海底升起。根据同位素年代学等综合分析,大陆碰撞以来,高原的抬升可分 4 个阶段。我们认为青藏高原的隆升是多阶段、非均匀、不等速过程,是多种机制联合作用的产物,存在快速抬升阶段(45～38 Ma,25～17 Ma,13～8 Ma,3 Ma 至现代)和长期的夷平过程[25,26],青藏高原现今的面貌是 3～4 Ma 以来快速抬升的结果。

青藏高原的形成及其隆升问题是一个非常复杂的问题,虽然已有许多论述,但至今没有一个为人们所公认而令人满意的解释[27～34,19～24,35,36]。下面就目前的工作程度和我们所掌握的资料,提出我们对高原形成与隆升的初步看法。

最近我们作了一些实验研究,无论是冰、岩芯加压试验还是岩石三轴流变试验,取圆柱形试样,两端加压,结果圆柱体变短,在圆柱体中部向外鼓出,而两加压端变化不大。构造物

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理模拟实验表明,模型在挤压初始阶段,变形区主要集中在楔状压模前缘,随着压模的进一步推进,模型的变形区逐渐向外扩大,变形加强。最后当实验楔状压模推进 5 cm 时,模型向右侧边压出或沿走滑断层的滑移量为 3 cm,压模前缘的抬升量为 2 cm,即压缩量一般近似于或等于伸张量与抬升量之和[37]。

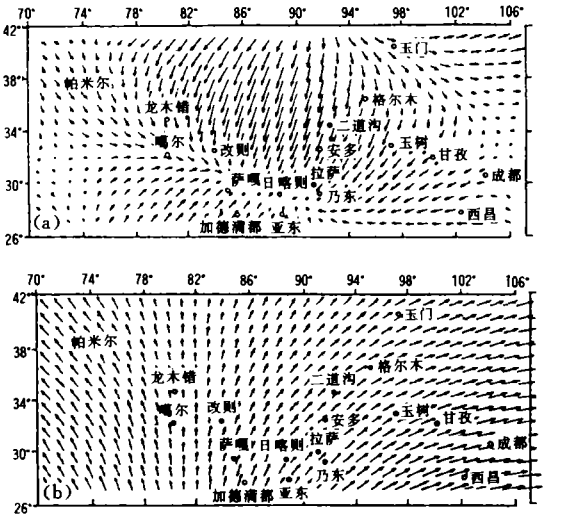


图 5 青藏高原地幔流动场图[39]

Fig.5 The map of the mantle flowing field of Qinghai－Tibet Plateau

(a)-高阶地幔流动场;

(b)-低阶地幔流动场(等距离投影)

大陆碰撞后由于印度次大陆持续北移,青藏高原经历了多次陆内递进叠加压扁变形[24],即在南北向强大的挤压作用下,高原岩石圈在南北方向上压扁缩短,垂向上拉伸增厚,东西方向走滑流展。由于高原各地体北部的形成早,经历的运动次数多,压扁程度愈强烈,共轭剪切角的钝角指向南北,构造样式愈复杂;南部的地体形成晚,经历的运动次数少,构造样式较单一,压扁程度弱,共轭剪切角的锐角指向南北。但在总体上各地体的变形方式又有某些相似之处,反映它们的变形环境有某些类同,如变形应力场均近南北向。大陆碰撞之后,在青藏高原范围内海洋已完全消亡,较轻的大陆岩石圈已不能向下俯冲到软流圈中去,只能靠大陆岩石圈本身的变形来吸收与调整应力。而大陆变形也有其自身的规律,在变形的各个阶段,塑性、脆性和刚性强度都是不同的,总体上塑性不断减弱,刚性不断增强。早期以岩石的褶皱或褶皱冲断为主,如北喜马拉雅于始新世时期的褶皱与褶皱冲断;中期以冲掩叠覆和大规模走滑为主,如前面已经讨论过的中新世时期青藏高原普遍的大规模冲断推覆与走滑;后期由于刚性增强,变形能力减弱,变形域缩小,在周围刚性块体的夹持下表现出以整体抬升为主。

前面已经提到,青藏高原岩石圈是以多圈层结构为其特征。由于各圈层的物质组成不同、物理化学性质的差异,以及所处环境的不同,即使在同等的应力作用下其变形方式也不一样,总体上向深部由于温压条件的增大,塑性增强,受分异作用和热作用的影响更大,所有这些规律都可以由模拟实验得到验证。事实上青藏高原上部地壳的加厚主要是由岩石的褶皱冲叠造成的,上地壳厚 15～20 km,岩石的褶皱及冲掩叠覆完全可以达到这一厚度。中下地壳由于岩石的塑性加强,主要以垂向拉伸增厚为主。有人估计,青藏高原的地壳在南北方向上压缩了 50%,因此在垂向上就拉伸了一倍[32]。这显然有点机械,且过于简单化了,完全用平面应变替代了三维应变,把缩短掉的物质看作全部添加到了垂直方向,没有考虑能量转化的其它形式,因此不符合青藏高原的实际情况。因为高原在南北方向缩短的同时除在垂直方向的拉伸外,还有东西方向的滑移流展,这两者之和才相当于压缩量,这一点已完全为模拟实验所证实。还有人提出,青藏高原地壳加厚了一倍,岩石圈地幔亦应当等同地加厚一倍[32]。但目前青藏高原特别是雅鲁藏布江缝合带两侧,岩石圈地幔极薄,不仅没有加厚现象,反而比正常岩石圈地幔还薄,从而提出此现象是由于岩石圈底部的平流拆离,掉入软

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流圈中所致。我们觉得这种提法问题较多,首先,地壳加厚一倍,岩石圈地幔是否一定也必然等同地加厚一倍?我们认为不一定,两者并不同步。J.Dewey 曾提到印度地盾的岩石圈厚度达 250 km,而印度地盾的地壳并没有加厚,这就是在不同圈层变形不同步的极好例证。这一现象用我们前面提到的冰芯试验和岩石三轴流变试验结果就很容易解释,因为印度地盾处于印度洋板块的印度洋中脊与雅鲁藏布江缝合带之间,相当于我们试样圆柱体的中部,当印度洋中脊扩张向北推挤时受阻于雅鲁藏布江缝合带,因此恰好在印度地盾的位置上向外鼓而加厚;而在印度洋中脊与雅鲁藏布江缝合带相当于两个加压端,并不发生明显的变形。那末印度地壳为什么不发生等量的加厚呢?前面已经提到,印度大陆是浮载在印度洋板块岩石圈之上的一个陆块,主要的应力作用发生在岩石圈中,印度陆块仅仅被这个应力带动象北位移,而向北位移的能量又被喜马拉雅及其以北的青藏高原的地壳变形所吸收,因此在印度没有强大的挤压应力使地壳加厚。再则,沿着壳-幔面还可以滑动,这已为现代地球物理所证实。INDEPTH 计划还证实了地壳中存在多层局部熔融层[13],这些熔融层与不同层圈间的滑动面大体相一致。

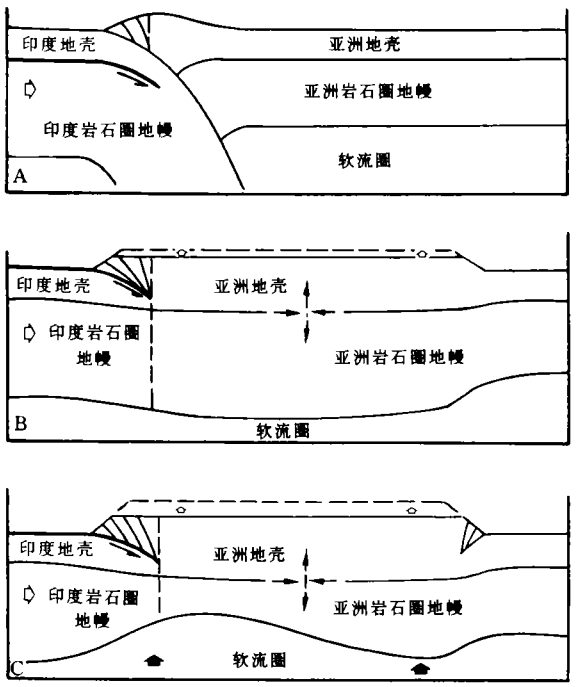


图 6　青藏高原形成与隆升机制模型

Fig.6　The mechanism model of the formation and uplifting of Qinghai－Tibet Plateau

印度地盾的持续北移,加上周围块体的围限,使青藏高原的物质运动十分复杂和特殊。图 4 表示高原地壳和上地幔物质位移矢量图。在有重力作用下显得十分复杂,尤其是在浅部;在无重力作用下位移矢量总体都是向北,但是越向北位移量越小,表明应力来自南面,高原本身吸收了大量的能量,因此向北逐渐衰减。图 5 表示青藏高原地幔物质运动方向,高阶场(浅部)地幔流动有汇聚于日喀则一带(雅鲁藏布江缝合带)的趋势,而低阶场(深部)地幔流动的总趋势向北,应力轨迹和位移矢量图基本一致,表明印度地盾对青藏高原的挤压作用。当地壳和岩石圈经历了大规模的变形与加厚后,青藏高原的刚性大大加强了,地壳和岩石圈都不可能无休止地继续大规模缩短与加厚,然而印度仍然在北移,南北向的挤压应力仍然存在,同时又受到了周围刚性块体的围限与楔入,各块体在深部互相接近,使青藏高原本身的变形域越来越小,已不能通过高原本身的变形来吸收南来的应力,一部分剩余应力继续向北和向高原外围更大范围传递,致使这些地区重新活跃起来,如天山等的抬升都是最近地质时期地壳运动的结果,表明都是受这次大陆碰撞远程效应影响的结果。而在高原内部能量的转换形式也必然要改变,大规模的挤压、滑动一方面转化为向上面自由空间发展的上升力,另一部分能量转化为热。生热的另一个途径还在于岩石圈本身,我们知道,放射性元素主要分布在岩石圈中,特别是在地壳中最为富集,青藏高原地壳的缩短与增厚,等于把分散

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

学报,1985,28(增刊 I):108～122
17 沈显杰．藏南高温热流及其构造演化意义．见:西藏地球物理文集．北京:地质出版社,1990.93～108
18 沈显杰,张文仁,杨淑贞,等．青藏热流和地体构造热演化．北京:地质出版社,1992.1～90
19 常承法,郑锡澜．中国西藏南部珠穆朗玛地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨．中国科学(D辑),1973(2):190～201
20 常承法,潘裕生,郑锡澜,等．青藏高原地质构造．北京:科学出版社,1982.1～91
21 Chang Chengfa, Robert M Shackleton, et al. The geological evolution of Tibet. In: *Report of the* 1985 *Royal Society—academia Sinica Geotraverse of the Qinghai－Xizang Plateau*. London: London the Royal Society, 1988.1～413
22 潘裕生．西昆仑山构造特征与演化．地质科学,1990(3):224～232
23 肖序常,李廷栋,李光岑,等．喜马拉雅岩石圈构造演化总论．北京:地质出版社,1988.1～236
24 Pan Yusheng, et al. *Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains*. Beijing: Seismological Press, 1996.1～288
25 丁林,钟大赉,潘裕生,等．东喜马拉雅构造自上新世以来快速抬升的裂变径迹证据．科学通报,1995,40(16):1497～1500
26 Zhong Dalai, Ding Lin. Rising process of the Qinghai－Xizang(Tibet) Plateau and its mechanism. *Science in China* (Series D), 1995, 39(4):369～379
27 Argand E. La tectonique de I'Asie. *Proc 13th Int Geol Congr Brussels*, 1924, 7:171～372
28 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264: 319
29 England P C, Mckenzie D P. A thin viscous sheet model for continental deformation. *Geophys J R Astron Soc*, 1982, 70:295～321
30 England P C, Housemen G A. The mechanics of the Tibetan Plateau. *Phil Trans Roy Soc Ser A*, 1988, 326:301～320
31 England P C, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 1990, 344:140～142
32 Dewey J F, Stephen Cande, Walter C. Pitman Ⅲ. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone. *Eclogae geol Helv*, 1989, 82(3):717～734
33 Mckenzie D. Spinning continents. *Nature*, 1990, 344: 109～110
34 Zhao Wu ling, Dave A Yuen. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust: A temperature-dependent viscous model. *Tectonics*, 1987, 6(4):505～514
35 Hsu J K. The concept of tectonic facies. *Bull Tech Univ Istanbul*, 1991, 44: 25～42
36 Sengor A M C. The Palaeo-Tethys suture: a line of demarcation between two fundamentally different architectural styles in the structure of Asia. *The Island Arc*, 1992, 1: 78～91
37 钟嘉猷．青藏高原构造特征与邻区受力状态．地震地质,1998,10(3):67～79
38 邓宗策,崔军文,冯晓枫,等．青藏高原构造动力及变形机制的弹性有限元分析．见:中国地质科学院院报．北京:地质出版社,1990.65～75
39 黄培华,傅容珊．中国岩石层底面地幔对流状态的探讨．地球物理学报,1983,26(1):39～47

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

FORMATION AND UPLIFTING OF THE QINGHAI－TIBET PLATEAU

Pan Yusheng

(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029*)*

Abstract The questions about the formation and uplifting of the Qinghai－Tibet Plateau are very complex, and they are very attractive to geologists in the world. The Plateau resulted from the interaction of the Gondwanaland and the Eurasia continent in a long time. The Qinghai－Tibet Plateau was assembled to Asia through successive accretion by six terranes. The boundaries between these terranes are defined by five suture zones. From north to south the orogenic events took place successively. The Qinghai－Tibet Plateau is the main domain of Tethys. It can be divided into three regions to represent the main locations in the three different stages. The northern Tethys Region is now occupied by the Kunlun and the Qilian Mountains, its remnant is the Fifth suture zone. The rift initiated after the basement had been formed in Sinian and was closed in Ordovician. The central Tethys Region lies in Hoh Xil-Bayan Har. Since Late Palaeozoic, the back-arc bathyal basin continued to break and spread. The typical oceanic crust was eventually formed in Carboniferous and Permian. The Ocean during that period is named the Paleo-Tethys, of which the remnant is the Third and the Fourth suture zones. The southern Tethys Region lies in the southern part of the Qinghai－Tibet Plateau. The Yarlung Zangbo suture zone may represent the trace of its main oceanic basin, and the Banggong-Nujiang suture zone the trace of the back-arc basin. The uplifting of the Qinghai－Tibet Plateau is characterised by multiple stage, inhomogeneity and nonuniform velocity. It can apparently be divided into four stages, i.e. 45～38, 25～17, 13～8 and 3～0 Ma, respectively. Although several models have already been proposed, the questions concerning the formation and uplifting of the Qinghai－Tibet Plateau have not been resolved. Based on new experimental results and data of geology, geophysics and geochemistry, a new model, i.e. superimposed flattening and thermal dynamic model, is put forward for the formation and uplifting mechanism of the Qinghai－Tibet Plateau in this paper.

Key words Qinghai－Tibet Plateau, formation, uplifting, mechanism , model, superimposed flattening

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net