

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

青藏高原西、中、东的分段性及其意义

张 进 马宗晋

北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871

内容提要 经过近几十年的研究,人们已经普遍认为青藏高原是由几条近东西向的块体先后拼贴而成,大型的东西向构造是高原内部最明显的构造特征。然而根据最近所获得的有关青藏高原以及附近地区的重力场、地震层析成像、地震活动性、水平位移速度场以及地质等资料,发现整个青藏高原内部存在着明显的两条重要的南北向或近南北向构造和一些小型的南北向构造,它们将青藏高原划分为西、中、东三个有各自构造特点的部分;西侧的南北向构造沿 $84^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{E}$ 延伸,东侧的近南北向构造位于 $92^{\circ}\sim 94^{\circ}\text{E}$ 之间。这两个构造带在上述的多种地球物理资料中均有良好的显示,是重要的重力异常变异带、重要的热结构边界带、重要的地震活动带,也是明显的地貌陡变带,等等。高原西部地形崎岖,剥蚀最深,布格重力异常最高,目前向北北西方向运动;中部地区地表平坦,发育众多的南北向地堑裂谷,东西向伸展活动最明显,海拔最高,集中分布了7座超过8000 m的高峰,目前向北东东方向运动;而东部地区地形也比较崎岖,发育许多目前仍在强烈活动的走滑断层,在这些断层之间,地块相对转动,目前向北东甚至南东方向运动。造成青藏高原东西分段的原因现在还不清楚,笔者等倾向认为造成这种现象可能是由于与欧亚板块发生碰撞的印度板块在横向上也是西、中、东分段的,印度板块被两条NE向断裂分割成三块,岩性各不相同,属不同年代的构造单元,这些单元之间的分界线与青藏高原近南北向构造有一定的对应关系,推论它们向高原的推挤方式中段和西、东两段有所不同。

关键词 重力场 CT剖面 GPS速度场 南北向构造 青藏高原 分段性 地震活动性

青藏高原的系统研究可以追溯到20世纪二、三十年代,早期的研究主要集中在喜马拉雅山脉的附近地区;到了60年代,随着 Gansser(1964)的《喜马拉雅地质》一书的出版,标志着青藏高原(主要为喜马拉雅地区)的地质研究进入了一个新的历史时期;之后的近40年中,随着板块构造理论的建立和运用,现在已经认识到青藏高原是由几个东西向的条状地体在中、新生代先后拼合而成的(常承法等,1973, 1982; Dewey et al., 1973; Allegre et al., 1984; Chang et al., 1988; 肖序常等, 1988; Sengor et al., 1996; Yin et al., 1996; 潘裕生, 1999; Yin et al., 2000)。现在有关青藏高原的研究是国际上一个长期的热点,在高原内部以及周边地区开展过多种方法的研究和观测。但由于恶劣的自然环境,对青藏高原的地球物理研究多数集中沿南北向的青藏公路以及藏南附近进行,先后完成了各种手段的探测,得到了一大批宝贵的资料,逐渐认识到青藏高原深部结构的复杂性和不均一性,建立了多种结构模型(王谦身, 1985; 滕

吉文等, 1985; 熊绍柏等, 1985; 祝恒宾等, 1985; 吴功建等, 1989; 王武等, 1990; 孟令顺等, 1990; 卢德源等, 1990; 高恩源等, 1990; 曾融生等, 1991, 1992; Zhao et al., 1993; 孔祥儒等, 1996; Douglas et al., 1998; Hauck et al., 1998; 潘裕生, 1999; 张中杰等, 2001)。近年来也有学者探明和注意到了高原西部近南北向构造的存在(曾融生等, 1991)。孔祥儒等(1996)认为高原可以分出西、中、东三个部分,并明确提出青藏高原西部的深部构造与中东部有明显的区别。但由于全面的区测还没有完成,而又受固有模式的影响,当前的构造、动力学研究的热点仍然以青藏高原南北剖面上的结构、动力学模式和隆升问题为主,并未充分注意是否有横向(南北向)构造的存在,或者忽视其重要的动力学意义,未加以深入的研究。笔者等近年来受全区重力场、深部CT结构特征的启发,比较系统地收集和综合分析了这方面的问题和资料,认为高原内部存在着重要的南北向构造,整个青藏高原可以被划分为西、中、东三段,并由此

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 4983402)的成果。

收稿日期:2002-08-21;改回日期:2003-12-15;责任编辑:郝梓国、任希飞。

作者简介:张进,男,1973年生。在站博士后,构造地质方向。通讯地址:100029,北京德外祁家豁子中国地震局地质研究所;Email:zhangjinem@sina.com。

引申到分段的演化模式以及印度板块的作用方式的讨论。下文将具体说明这两条重要南北向(近南北向)构造的特点以及由它们所分隔的高原三段之间的相互关系和各自特点。

1 青藏高原的地形地势特征

从青藏高原的地势分布可以看出,高原中部整体明显较其东侧和西侧高,喜马拉雅山脉内超过8000 m以上的高峰11座,有7座分布在中部地区(图版1),4座分布在西部的帕米尔构造结地区。而喜马拉雅山脉北坡的南北向冰川也主要分布在中部地区(陈俊勇等,1994)。高原内部的湖泊群也主要分布在中部。相对而言,中部的地形起伏小,而高原东部和西部地形崎岖,起伏明显,发育许多大型强烈切割的河流。西部的宽度仅为400~500 km,只是中部地区的1/3。此外高原中部与东部在可可西里地段,山脉的高程突然降低约600~700 m左右。

2 地球物理资料所显示的深部南北向和北东向构造

近几十年来,在中外科学家的不断努力下,已经

获得了大量不同尺度、不同方面的青藏高原浅部和深部的地球物理资料,许多资料已经初步显示了高原深部南北向(近南北向)构造的存在,但由于在青藏高原形成模式的长期影响下,这些南北向(近南北向)构造没有得到应有的重视。实际上这些南北向(近南北向)构造才是青藏高原最近构造活动的深部基础之一;它们改造和叠加在早期的高原内近东西向单一的构造格局之上,它们控制着高原内部重要的南北向正断层以及水热活动(韩同林,1987;肖序常等,1988);因此它们与高原的隆升和地表变形以及高原北部晚期的岩浆活动有着紧密的联系。

2.1 重力测量结果

根据近年由中国石油总公司补测编制的青藏高原布格重力异常图(图1)(赵政璋等,2001)所显示,在约84°~85°E之间存在着明显的南北向重力高异常带,该带截断了青藏高原中部大型的的东西向重力高异常带,该带以西的东西向重力异常最高可达530~540 mGal,这也是高原内部重力异常值最高的地区;该东西向的重力异常带并被南北向重力异常带明显错开,显示出一定的走滑运动性质;该东西向重力高向东异常值逐渐减小。有关此南北向构造在地

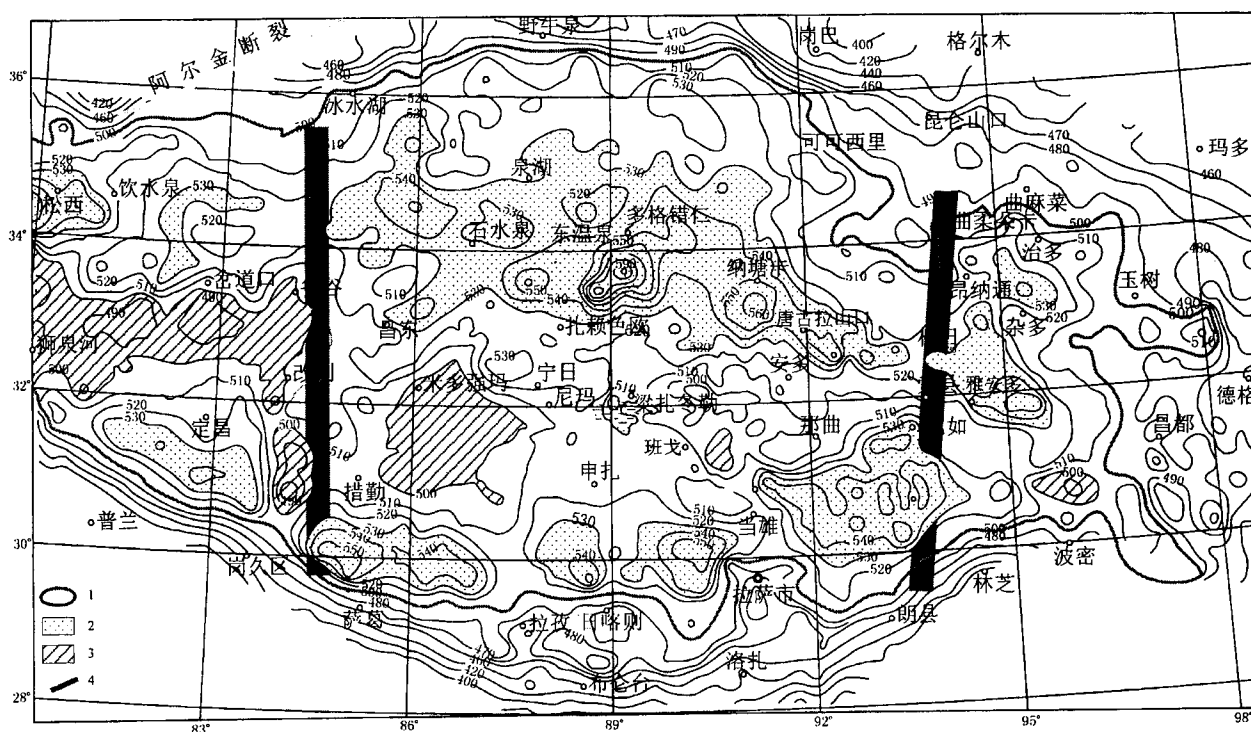


图1 青藏高原布格重力异常图(据赵政璋等,2001)

Fig. 1 Bouguer gravity anomaly of Qinghai-Tibetan Plateau (Modified from Zhao Zhengzhang et al., 2001)

1—500 mGal 等值线;2—布格重力异常<-530 mGal;3—布格重力异常>500 mGal;4—推断的构造

1—500 mGal contour;2—Bouguer gravity anomaly<-530 mGal;3—Bouguer gravity anomaly>500 mGal;4—the inferred structures

表的反映还鲜有报道(韩同林, 1987; 肖序常等, 1988), 一方面是缺少详细的地表地质调查, 另一方面是以往的区域地质研究过于重视高原内部大型的近东西向构造, 而忽视了或没有认真考虑是否存在南北向的构造。但随着各方面工作的深入, 尤其是地球物理方面的资料可以弥补上述研究的缺陷。另一条大型的重力异常带为北北东向($92^{\circ}\sim 94^{\circ}\text{E}$ 之间), 该异常带虽然没有上述西侧异常带明显, 但其两侧的重力变化是比较清楚的, 它同样截断了高原中部大型的近南北向重力高异常带。该近南北向构造带的东部, 东西向重力高异常变小、断续、以至消失。地震反射剖面的研究表明, 该近南北向重力高异常带所对应的是高原内莫霍面“下凹”的地区(张中杰等, 2001), 而且该近南北向构造在地表有很明显的反映, 即青藏高原内部规模最大的近南北向第四纪的裂谷: 亚东—谷露裂谷带。该裂谷带宽约 $50\sim 60\text{ km}$, 走向为 $\text{N}20^{\circ}\text{E}$, 自南向北包括一系列的第四纪盆地。裂谷带可能向北越过班公湖—怒江缝合带, 延伸至雁石坪、沱沱河附近, 而向南已经穿过喜马拉雅山脉进入尼泊尔并可能继续延伸到印度境内, 全长超过 1000 km (曾融生等, 1991; Douglas et al., 1998)。西部南北向重力异常带向北到 34°N 为止, 但有可能向北与阿尔金构造带相连, 东部的重力异常带可一直延伸到昆仑山。另外在全国水平重力异常梯度图上这两条近南北向的异常也表现的比较明显。

2.2 CT 结果

近年来通过面波资料已经获得了整个青藏高原地区不同深度的 CT 切片(曾融生等, 1992), 可以从这些切片中看出青藏高原具有非常复杂的深部结构, 不均一性十分明显, 初步揭示了高原深部西、中、东分区的特点。最近周华伟根据高分辨率全球地震波 P1200 模型完成的青藏高原及邻区的 CT 结果也显示出类似的特点(周华伟等, 2002, 图1), 南北向分区界线尤其突出。在 $0\sim 35\text{ km}$ 范围内, 可以看出西藏高原东部和西部的地壳物质明显要比中部地区的热, 三者之间的分界线呈南北向, 这意味着高原的上地壳就存在着东、中、西分块的结构。在 $35\sim 75\text{ km}$ 的范围内三者之间的边界依然存在, 但三者之间的热结构发生相反的变化, 高原西部和东部的中、下地壳物质明显要比中部的冷, 这也说明高原中、下地壳同样存在着东西三分的格局。在 $75\sim 120\text{ km}$ 范围内, 三个部分的物质都变冷, 但中部仍然比两侧热, 三者之间的界线仍然明显。从周华伟等(2002)的图1

中可以看出这种深部结构东西分段的现象可以一直延续到 $360\sim 410\text{ km}$ 的上地幔范围内, 而且不同的部分自身也存在着上下冷热交替变换的现象。因此可以肯定造成西藏高原东西三分的根本原因是深部物质活动造成的。高原的西、中、东三部分共同特征就是在不同的深度冷热相间, 不论在什么深度三者之间都存在明显的南北向(近南北向)界线。但究竟是什么原因导致了上述的现象, 现在还没有得到应有的重视和研究, 本文推测形成上述高原分段性的原因是横向上存在不均一性的印度板块向欧亚板块碰撞的结果。

此外根据东西向地震反射法的研究(张中杰等, 2001)也表明, 在色林错—雅安多剖面中, 高原内中部地区与东部地区的地壳也存在明显东西方向上的区别; 两者之间过渡带上地壳的 Poisson 比要低于两侧, 而高原中部下地壳的 Poisson 比要大于东部地区, 而下地壳的刚度中部小而西部大。东部与中部的过渡地区的莫霍面呈现“下凹”的特征, 该处的岩石圈较两侧厚, 达 80 余千米。而莫霍面“下凹”的现象多在大型的走滑断裂的深部出现(Stern et al., 1998)。这与从 GPS 以及震源机制所获得的结果是一致的, 即西藏高原的中部与东部地区之间存在一定的走滑运动。

2.3 GPS 测量结果

最近根据中国大陆相对于欧亚板块的水平运动速度的 GPS 资料(马宗晋等, 2001; 王琪等, 2002)得到了中国大陆及周边地区现今地壳运动速度场图(图2)。该图可以反映现今中国大陆的构造变形和有关动力学机制的特征。从图2中可以看出西藏高原西部南北向构造带在地表显示有一定的左行走滑特征; 该构造带西部的高原地区目前向北北西或正北方向运动, 而中部高原地区的 GPS 速度矢量却指向北北东方向, 两者之间存在一定的走滑兼拉张的活动。该地区的震源机制也证实了这种运动状态。东部高原的 GPS 速度矢量更加复杂, 方向多变(北东东—东—东南), 反映了强烈的陆内变形, 走滑运动异常明显, 伴随着块体的旋转运动, 这与变形较弱的中部地区形成鲜明的对比, 所以总的来看高原的中段和东段之间是一个明显的现今引张区, 两者之间的过渡地区发育有高原内部规模最大的近南北向的裂谷(亚东—谷露裂谷), 同时这两者之间也存在着相互运动, 前人的资料(Yin et al., 2000; Douglas et al., 1998)也指出了中段的亚东—谷露裂谷边缘正断层存在着明显的走滑分量, 震源机制解

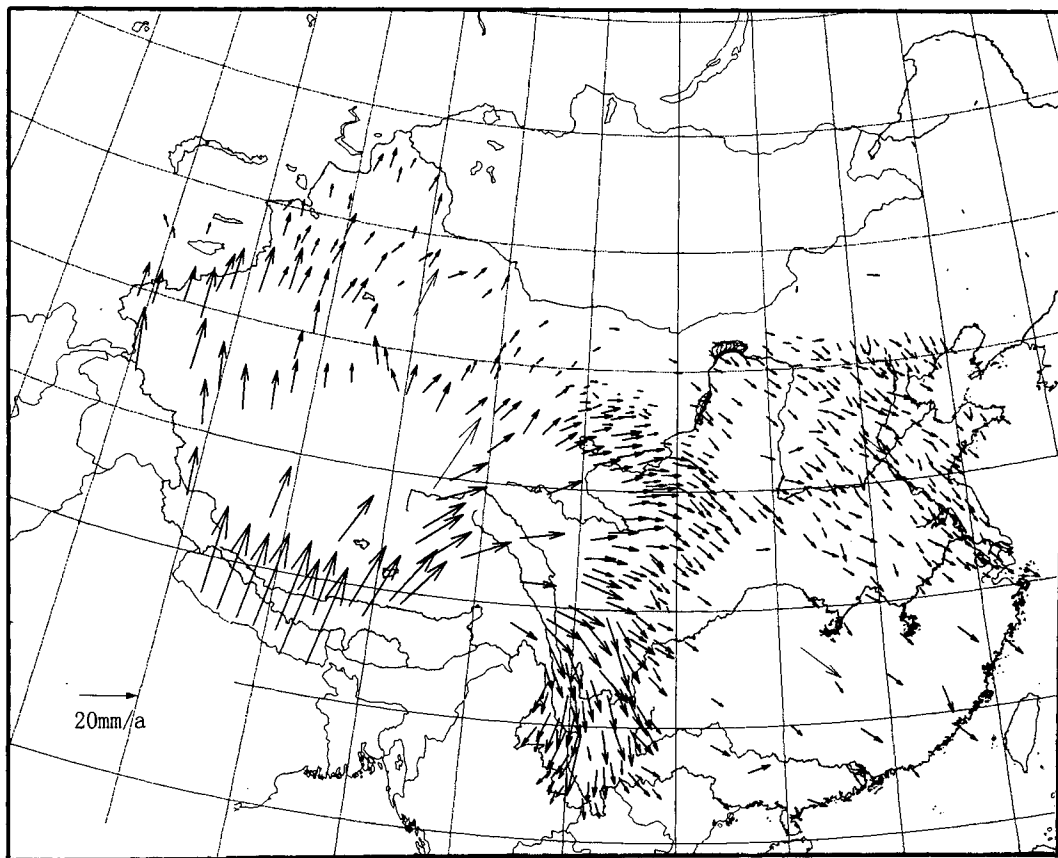


图 2 中国大陆及周边地区现今地壳运动速度场图

Fig. 2 The horizontal velocity of China continent and adjacent areas relative to Eurasian Plate

也显示出该过渡带存在走滑运动。综上所述,从现今的中国大陆 GPS 水平运动场中可以看出,青藏高原内部东西方向上存在明显的运动不协调性,应该有构造带来协调三者之间的运动。

2.4 地震及震源机制

通过对近几十年的高原地震资料的整理和分析,也证实了在西藏西部地区存在一条高原内部重要的南北向地震带,即拉竹笼—阿木中地震带(曾融生等,1991)。在该地震带已经发现明显地震迁移的规律性,自南向北迁移。该带的震源机制解也同样表明是以走滑兼拉张为主(图版 I),这与从 GPS 以及布格重力场所得到的结果相一致,相信该地震带在地表或近地表可能有明显的变形构造。这条地震带对应的就是由重力资料所反映出来的高原西部南北向深部构造带(图版 I)。

高原东部近南北向重力异常带所对应的亚东—谷露裂谷带也是高原内部重要的地震活动带(曾融生等,1991),而且震源深度比较大,可以达到40~70

km,这些都充分说明该地震带明显受控于深部的这个近南北向的构造带。此外该带的地热资源也十分的丰富,表明该地带深部的异常活动状态(韩同林,1987;肖序常等,1988)(图版 I)。

此外,由大陆碰撞而产生的喜马拉雅造山带在横向上也显示出一定的地震活动性分段的特征。最近几年来,随着资料和研究的积累,喜马拉雅地震活动性分段的特点日见明显(Guptasarma, 1996; Wesnousk et al., 1999),即喜马拉雅山脉的西段及东段地震活动性很高,大地震很多,而中部在几个世纪以来几乎没有强烈的破坏性地震的发生。上述现象也与笔者等所收集到的资料吻合(图版 I)。当然该造山带西部和东部的地震可能与两个构造结点有一定的关系,但控制该造山带地震的主要因素还是与俯冲的印度板块关系密切。中部地区缺少大地震,而两侧地震频发,是与下插的印度板块在横向上的不均一以及俯冲角度和速率有关(Guptasarma, 1996)。

综上所述可以看出,许多地球物理资料都显示了青藏高原内部存在两条大型的(近)南北向构造带,这里按照曾融生先生的提法(曾融生等,1992)将西部南北向构造带称为拉竹笼—阿木中构造带,而东部的称为亚东—谷露构造带。

3 地质特征

高原内部西、中、东三段在地质方面也具有各自鲜明的特点。

高原西部地区靠近帕米尔构造结,变形非常剧烈,地域狭窄,由众多的次级小地块构成,发育有重要的大型走滑兼逆冲断层(如喀拉昆仑断裂),与中部地区呈转换拉张的运动关系;目前为止对该地区的地质研究还比较少,且研究多集中在西南部国境外的巴基斯坦等地区(Searle, 1991, 1996)。该地区的构造活动与印度西北的“犄角”向北推挤有密切关系,该地区地表破碎,地形崎岖,南北向宽度小,致使该区是整个高原范围内剥蚀深度最大,高级变质岩及花岗岩岩基出露广泛。

高原中部以平坦的地貌而区别于两侧,它是构成高原的主体部分,各时代的多种类型的火成岩分布广泛。此外中部地区的北部是整个高原内中、新生代钙碱性岩浆活动最为强烈的地区(Yin et al., 2000),形成的火山岩主体为一套陆内造山带钾玄岩—安粗岩—粗面岩—流纹岩组合,属于偏碱性岩浆活动。地球化学分析表明这些火山岩是新生代青藏高原岩石圈缩短、加厚以及快速拆沉岩石圈等过程的综合结果(邓万明等, 1998)。高原的东部和西部此类火山岩分布相对中部较少,活动时间上可能也有所差异(Chung et al., 1998),可见西藏高原的这两条南北向(近南北向)构造与东西向岩浆带的分布有一定的关系。需要说明的是控制岩浆的是岩石圈及软流圈的深部因素,而上述南北向构造是不同岩石圈及地幔不同单元之间的边界。上述的岩浆岩分布也从一方面说明高原东部和西部岩石圈的厚度和结构与中部有比较明显的差别,这也从另一方面验证了CT的结果,即中部岩石圈的热结构与两侧的热结构有明显的差别。在构造表现方面喜马拉雅高山带向南仰冲于印度板块之上,根据陈俊勇等(1994, 1996)的研究,珠穆朗玛峰正相对于印度板块作向南西西的运动(70年代中期以来平均

速率为113 mm/a)。这与其两侧的高原部分相反,它们的边界断层上走滑分量占了很大的比重。近几十年来的调查中发现高原中部地区发育了9条大型南北向地堑或裂谷(Tapponnier et al., 1977; Molnar et al., 1978; 韩同林, 1987; 肖序常等, 1988; Burchfiel et al., 1991; Yin et al., 2000)以及一系列的小型正断层(图3),这些裂谷和正断层都是新生代发育而成的,而高原范围内的斑岩铜矿也呈南北向串珠状分布,中部北侧的裂谷研究较少。这些研究表明高原中部地区至少是上地壳范围内表现出东西向的拉张状态,而高原的东部与西部没有发育类似重要的裂谷,中部与东部的分界线正好沿高原内最大的近南北向裂谷带(亚东—谷露)延伸;关于这些裂谷和正断层形成的机制争论也比较多,多数学者认为是造山带开始垮塌的表现,但也有的学者认为是高原下大规模地幔运动导致的弧后拉张体制(Yin et al., 2000),还有一部分学者认为是与印度板块发生碰撞的效应(Ratschbacher et al., 1994)。上述这些论点都是针对高原中部的特点而提出的,但都没有考虑到整个高原的分段特征。

高原的东部地区是整个青藏高原向东运动的前缘地区,因此新构造活动非常显著,在该部分的东侧就是中国著名的南北向中轴构造带(马宗晋等,

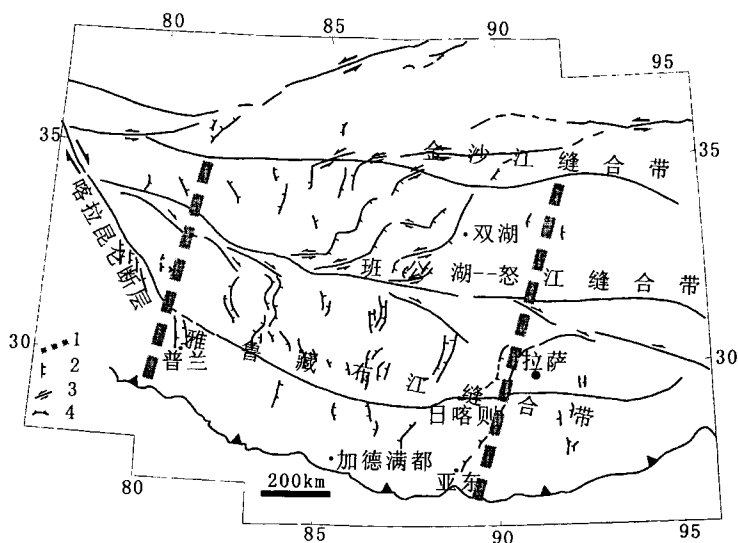


图 3 青藏高原内部的南北向裂谷和正断层
(韩同林, 1987; Yin et al., 2000)

Fig. 3 The distribution of the north—south trending rifts and normal faults in the Qinghai—Tibetan Plateau
(Han Tonglin, 1987; Yin et al., 2000)

1—推测构造;2—正断层;3—走滑断层;4—逆冲断层

1—Inferred structure; 2—normal fault; 3—strike-slip fault; 4—thrust fault

1981; 马宗晋, 1990)。多年的研究很早就已经认识到该地区(95°E 以东)与高原的其他地区存在着明显的区别(Yin et al., 2000)。东部地区与高原的中部和西部地区在地表变形上有着重大区别, 概括起来有4个明显的特点, ① 发育大型的走滑和倾滑断层, 如龙门山逆冲带、鲜水河—小江断裂带、嘉丽—高黎贡断裂、哀牢山—红河断裂带, 这些大型的断裂伴随着中南半岛地块向南东的逃逸运动(钟大赉, 1998); ② 明显的块体转动, 近几年来野外地质(Ratschbacher et al., 1996; Wang E et al., 1997, 1998)、古地磁分析(Huang et al., 1992, 1993)、GPS测量(King, 1997)的研究均表明高原东部地区围绕东喜马拉雅构造结做顺时针转动, 新生代最大旋转可达60°(Huang et al., 1992, 1993)。Royden (1996)和 Royden 等(1997)认为这种旋转是由于下地壳软弱, 上地壳运动与下地壳和地幔解耦的结果; ③ 强烈的地震活动性和内部变形。由于高原东部四川盆地等稳定地块的阻挡, 高原向南东的挤压受到限制, 于是产生了著名的“南北构造地震带(中轴带)”的南段; ④ 无明显的伸展构造发育(图3)。Dewey 等(1989)认为该地区是印度向北推挤所造成变形的吸收地区, 可以看出形成上述特点的原因是与印度东部的“犄角”向北东推挤、东部四川盆地等稳定地块

的阻挡以及中南半岛向南东运动的直接结果。

综上所述, 青藏高原内部东西方向上的不同部分的结构和变形有着各自的特点, 三者之间的运动是不协调的, 这必须要有构造(如断裂)来调节上述的差异运动与变形, 而本文所提出的拉竹笼—阿木中构造带和亚东—谷露构造带可能就是起控制和调节作用的。青藏高原的这两条近南北向构造形成的机制现在还不十分明确, 但可以肯定的是这两条南北向构造是高原新构造活动中很重要的分割性构造边界, 它们正在改造早期高原近东西向构造, 或者从印度板块向亚洲大陆碰撞一开始不久, 即逐步显现出分段性的发展, 这可能与印度板块的结构有某种必然的联系。

4 形成南北向(近南北向)构造的原因

由于目前印度板块仍然在持续向北挤压, 笔者倾向于这些南北向构造的形成与印度板块有关。过去人们一直认为印度板块是一个非常稳定的克拉通, 然而最近几年内该板块内部相继发生了几次所谓的板内强地震, 如古吉拉特地震($M_s=7.9$)、拉图地震($M_s=6.8$)及一系列的中、小地震, 都说明印度板块并非是一个非常完整的克拉通。根据地貌特征和一些地球物理及地球化学的研究(Pandey, 1999)

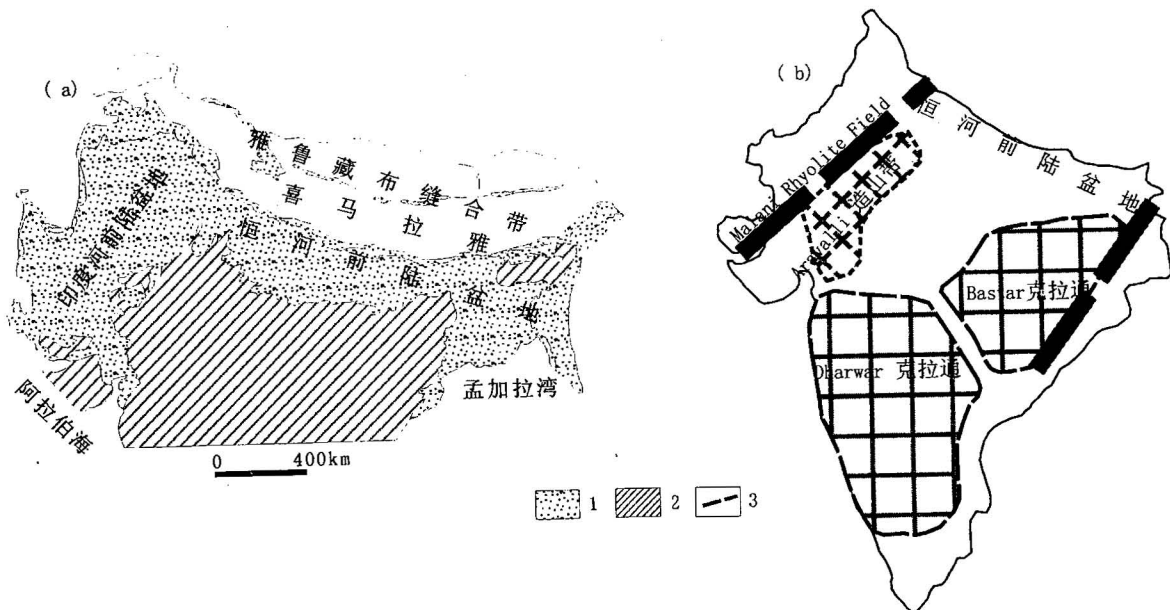


图4 印度板块的横向不均一性和北部的前陆盆地(据 Patrick Le Fort, 1996修改)

Fig. 4 The transverse inhomogeneity of the Indian Plate and the foreland basins in the northern part (modified from Patrick Le Fort, 1996)

1—前陆盆地; 2—地盾; 3—推测构造

1—Foreland basin; 2—shield; 3—inferred structures

表明整个印度地区由几个不同的克拉通构成,这些克拉通及它们之间的过渡带在年龄、岩石圈厚度、热流及物质组成等方面都存在着明显的差别(图4),而这些差别也突出的表现在东西方向上的差别。可以推测这种非均一性的板块与欧亚板块相作用,一定在造山带上产生横向构造,差异性的俯冲进而导致热结构及活动性上的差异,CT的结果可能就是这种差异性俯冲的表象。这些差异会以不同的现象表现出来,这种关系有如南美洲西海岸科迪勒拉造山带的分段性(马宗晋,1984)。很早以前印度的学者就已经注意到了喜马拉雅造山带横向上的分段性与印度板块深部结构分段性之间的对应关系(Valdiya, 1976), Gupatasarma (1996)最近也认为造成喜马拉雅山脉横向上分段的原因也是由于印度板块深部发育的与造山带垂直的构造隆起带及印度板块在不同的地区以不同的角度、速度向欧亚大陆推挤等联合作用的结果。根据对喜马拉雅山前的前陆盆地的研究也表明(Burbank et al., 1996),喜马拉雅造山带的前陆盆地实际上由两个不同的盆地组成,即恒河前陆盆地和西侧的印度河前陆盆地(图4a)。这两个盆地在构造走向上有鲜明的区别,恒河前陆盆地走向近东西向,印度河盆地却走向近南北,而且这两个盆地之下的地壳强度也相差很大,恒河下为 0.7×10^{25} N. m,相应的盆地挠曲宽度大于200 km;而印度河盆地之下地壳的强度为 0.4×10^{24} N. m,仅仅相当于恒河地区的1/10~1/15。这样的差别也导致了印度河盆地的地壳挠曲波长只是恒河盆地的1/2。这两个的盆地以北西向的 Aravalli 造山带为界(图4b),该造山带与喜马拉雅造山带相交于高原西侧拉竹笼—阿木中构造带向南延伸的地区;而东侧沿 Bastar 克拉通南东边缘向北延伸也与喜马拉雅造山带相交于东侧高原内亚东—谷露构造带向南延伸的地区(图4b)。可见高原内的这两条(近)南北向构造与印度板块上不同级次构造单元之间的边界或界线相连。由此可以看出印度板块横向上的不均一性有其重要的动力学意义,然而现在还没有注意到它对整个青藏高原的形成以及隆升重要的控制作用。最近的研究也表明印度板块岩石圈地幔至少已经向北到达班公湖—怒江缝合带以北的地区(周华伟等, 2002; Tilmann et al., 2003),周华伟等(2002)研究的结果认为向北已经到达 36°N ,影响深度已达400 km,这也与南北向构造分布的主要地区一致。

5 结论与意义

从上述的各种资料中可以看出,青藏高原内部

是存在着两条重要的大型南北向或近南北向构造带。这两个纵贯高原南北的构造带将整个高原明显分割成西、中、东三部分。三个地区的地表变形、地球物理场、地震活动、地质特征以及岩浆活动均存在明显的差异。由于这两条大型构造带与高原区域构造线垂直或成大角度相交,笔者等称其为大型“横向构造”。高原在新生代的强烈隆升与这些南北向构造的关系可能更大,因为目前这些南北向构造正在改造过去的东西向构造,是它们控制了现在高原一系列的新构造运动。至于为什么青藏高原会产生这样的南北向构造,这可能与印度板块的结构有一定的联系。印度板块可能也存在着横向上西、中、东的分段,西藏高原的东西分段性可能就是具有上述结构的印度板块与欧亚板块碰撞的反映,是分为不同刚度的印度板块的分段持续向欧亚大陆差异推挤、俯冲的结果。

笔者认为,印度板块的中部向北俯冲的角度可能较大,西部较小,且有可能其前端有一部分转为仰冲,而其东部俯冲角度也较小,其端部向下转为大倾角的俯冲。另一个很值得讨论的问题是尽管本文强调了西藏高原西、中、东的分段性,但就高原地貌来说,整体性隆升以及鲜明的区域性东西向构造还是最基本的,而南北向构造是在这些背景中发育的,因此存在比横向分段性活动更高一级的动力学机制。

致谢 在本文的工作中,得到了中国地震局地球物理研究所曾融生院士、中国科学院地质与地球物理研究所孔祥儒研究员、国家测绘局陈俊勇院士、中国地质大学(北京)邓晋福教授和中国地震局地质研究所邓起东院士的热情指导和帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- 常承法, 郑锡澜. 1973. 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讨论. 中国科学(D辑), 2: 190~201.
- 常承法, 潘裕生, 郑锡澜. 1982. 青藏高原地质构造. 北京: 科学出版社, 1~92.
- 陈俊勇, 刘允诺, 张骥. 1994. 珠穆朗玛地区的地壳运动、地壳厚度、张性冰川的探讨. 测绘学报, 23 (3): 178~182.
- 陈俊勇, 张骥, 薛璋. 1996. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动及有关问题的探讨. 地球物理学报, 39 (1): 58~67.
- 邓万明, 孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征. 地学前缘, 5 (4): 307~317.
- 高恩源, 徐忠信, 王香经. 1990. 喜马拉雅山北麓—雅鲁藏布江地区人工爆炸地震测深地壳结构, 西藏地球物理文集. 北京: 地质出版社, 1~15.
- Harsh K Gupta. 1998. 印度——印度板块和欧亚板块连续碰撞的地方, 亚洲太平洋地区国家地震危害管理. 北京: 地震出版社, 89~102.

- 韩同林. 1987. 喜马拉雅岩石圈构造演化—西藏活动构造. 中华人民共和国地质矿产部地质专报—构造地质 地质力学, No. 4. 北京:地质出版社, 95~108.
- 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 1996. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究. 中国科学(D辑), 24(4): 308~315.
- 卢德源, 黄立言, 陈纪平. 1990. 青藏高原北部沱沱河—格尔木地区地壳和上地幔的结构模型和速度分布特征, 西藏地球物理文集. 北京:地质出版社, 51~62.
- 赖绍聪. 1998. 青藏高原北部新生代火山岩的成因机制. 岩石学报, 15(1): 98~104.
- 马宗晋, 郑大林. 1981. 中蒙大陆中轴构造带及其地震活动. 地震研究, 14(4): 421~436.
- 马宗晋. 1984. 南美俯冲带显示的板条构造, 地震研究, 6(3): 319~325.
- 马宗晋. 1990. 中国大陆地震分区及其动力学讨论, 国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会——第三届全国构造地质会议论文选集(Ⅱ). 北京:科学出版社, 86~95.
- 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华. 2001. 中国大陆区现今地壳运动的GPS研究. 科学通报, 146(13): 1118~1112.
- 孟令顺, 高锐, 周富祥. 1990. 利用重力异常研究亚东—格尔木地壳构造. 中国地质科学院院报, 21: 149~161.
- 潘裕生. 1999. 青藏高原的形成与隆生. 地学前缘, 6(3): 153~163.
- 滕吉文, 尹周勋, 熊绍柏. 1985. 西藏高原北部地区色林错—蓬错—那曲—索县地带地壳结构与速度分布. 地球物理学报, 28(增刊Ⅱ): 28~42.
- 王谦身. 1985. 亚洲大陆地壳厚度分布轮廓及地壳构造特征的研究. 构造地质论丛, 4: 112~119.
- 王琪, 张培震, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造变形GPS观测数据与速度场. 地学前缘, 9(2): 415~429.
- 王武, 卢德源, 黄立言. 1990. 西藏高原南北走向的地壳结构模型和速度分布特征, 见: 西藏地球物理文集. 北京:地质出版社, 38~50.
- 吴功建, 肖序常, 李廷栋. 1989. 青藏高原亚东—格尔木地学断面. 地质学报, 63(4): 285~296.
- 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 常承法, 袁学诚. 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化—总论. 中华人民共和国地质矿产部地质专报——构造地质 地质力学, No. 7, 北京:地质出版社, 160~171.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋. 1985. 西藏高原地区的地壳厚度和莫霍面的起伏. 地球物理学报, 28(增刊Ⅱ): 16~26.
- 曾融生, 孙为国. 1991. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论. 地震学报, 14(增刊): 543~564.
- 曾融生, 朱介寿, 周兵. 1992. 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型. 地震学报, 14(增刊): 523~533.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京:科学出版社, 1~231.
- 祝恒宾, 周文虎, 武立高. 1985. 青藏高原重力场特征及其大地构造上的含义. 地球物理学报, 28(增刊Ⅱ): 60~69.
- 张中杰, 李英康, 王光杰. 2001. 藏北地壳东西向结构与“下凹”莫霍面——来自宽角反射剖面的启示. 中国科学(D辑), 31(11), 881~888.
- 周华伟, Murphy Michael, 林清良. 2002. 西藏及其周围地区地壳、地幔地震层析成像—印度板块大规模俯冲于西藏高原之下的证据. 地学前缘, 9(4): 285~292.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞. 2001. 青藏高原大地构造特征及盆地演化. 北京:科学出版社, 61~62.
- Himalaya—Tibet orogenic belt. Nature, 307: 17~22.
- Yin An, Harrison M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan Orogen. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 211~280.
- Burbank Douglas W., Richard A. Beck, Thomas Mulder, et al. 1996. The Himalayan foreland basin, The Tectonic evolution of Asia. An Yin, Mark Harrison, 149~188.
- Burchfiel B C, Chen Z, Royden L H, et al. 1991. Extensional development of Gabo valley, southern Tibet. Tectonophysics, 194: 187~193.
- Chang Chengfa, Zheng Xilan. 1973. Geological structure of Qomolangma region in southern Tibet and discussions on the origin of EW-trending mountains in Tibetan Plateau. Science in China (Series D), 2: 190~210 (in Chinese).
- Chang Chengfa, Pan Yusheng, Zheng Xilan. 1982. The tectonics of the Qinghai—Tibet Plateau. Beijing: Science Press, 1~92 (in Chinese).
- Chang Chengfa, Robert M Shackleton. 1988. The geological evolution of Tibet. Report of the 1985 Royal Society-academia Sinica Geotraverse of the Qinghai—Xizang Plateau, London: London the of Royal Society, 1~413.
- Chen Junrong, Liu Yunnuo, Zhang Ji, et al. 1994. The determination for the height of Qomolangma Feng and the crustal movement in its adjacent area. Acta Geodaetica et cartographica Sinica, 23(3): 178~182 (in Chinese).
- Chen Junyong, Zhang Ji, Xue Zhang, et al. 1996. On the crustal movement in Qumolomgma Feng and its adjacent area. Acta Geophysica Sinica, 39(1): 58~67 (in Chinese).
- Chung Sun-Lin, Lo Ching-Hua, Lee Tung-Yi, et al. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. Nature, 394: 769~773.
- Deng Wanming, Sun Hongjuan. 1998. Isotopic geochemistry and source of intraplate volcanic rocks in north Tibet, China. Earth Science Frontiers, 5(4): 307~317 (in Chinese).
- Douglas Alsdorf, Larry Brown, Douglas Nelson, et al. 1998. Crustal deformation of Lhasa terrane, Tibet plateau from Project INDEPTH deep seismic reflection profiles. Tectonics, 17(4): 501~519.
- Dewey J F, Burke K. 1973. Tibetan, Variscan and Precambrian basement reactivation: products of continental collision. J. Geol., 81: 683~692.
- Dewey J F, Cande S, Pitman W C. 1989. Tectonic evolution of the India—Eurasia collision zone. Ecol. Geol. Helv., 82: 717~734.
- Gansser A. 1964. Geology of Himalayas. New York: Wiley-Interscience, 1~289.
- Gao Enyuan, Xu Zhongxin, Wang Xiangjing. 1990. The crustal structures from the north foot of Himalaya to Yaluzangbu River shown by the deep seismic sounding, The corpus of the Tibetan geophysics. Beijing: Geological Publishing House, 1~15 (in Chinese).
- Guptasarma D. 1996. Is the seismic risk similar everywhere along the Himalayan Collision Belt?. Himalayan Geology, 17: 1~9.
- Harsh K Gupta. 1998. India—the place where the Indian plate continues colliding with the Asian plate, The disaster management of the earthquake in the countries in the Asia—Pacific region. Beijing: Seismic Publishing House, 89~102 (in Chinese).
- Han Tonglin. 1987. The active tectonic in Xizang (Tibet). People's Republic of China Ministry of Geological and Mineral Resources Geological Memoirs, No. 4. Beijing: Geological Publishing House, 95~108.
- Hauck M L, Nelson K D, Brown L D, et al. 1998. Crustal structure of

References

Allegre C J and 34 OTHERS. 1984. Structure and evolution of the

- the Himalayan Orogen at $\sim 90^\circ$ east longitude from Project INDEPTH deep reflection profiles. *Tectonics*, 17 (4): 481~500.
- Huang K, Opdyke N D L, et al. 1992. Paleomagnetism of Cretaceous rocks from eastern Qiangtang terrane. *J. Geophys. Res.*, 97: 1789~1799.
- Huang K, Opdyke N D. 1993. Paleomagnetic results from Cretaceous and Jurassic rocks of south and southwest Yunnan: evidence for large clockwise rotations in the Indo-China and Shan—Thai—Malay terranes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117: 507~524.
- King R W, Shen F, Burchfiel B C, et al. 1997. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China. *Geology*, 25: 1279~1282.
- Kong Xiangru, Wang Qianshen, Xiong Shaobai. 1996. The comprehensive geophysical study on the lithospheric structures of western Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 24 (4): 308~315 (in Chinese).
- Lai Shaocong. 1998. The course of the Cenozoic volcanic rocks, northern Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Petrol Sinica*, 15 (1): 98~104 (in Chinese).
- Lu Deyuan, Huang Liyan, Chen Jiping. 1990. The structure model and the characteristics of the velocity distribution of crust and upper mantle in the Tuotuohe—Geermu region, northern Qinghai—Tibet Plateau, The corpus of the Tibetan geophysics. Beijing: Geological Publishing House, 1990. 51~62 (in Chinese).
- Ma Zongjin, Chen Xinlian, Ye Shuhua, et al. 2001. Contemporary crustal movement of continental China obtained by Global Positioning System (GPS) measurements. *Science Bulletin*, 46 (13): 1118~1120 (in Chinese).
- Ma Zongjin, Zheng Dalin. 1981. The Central Axis Tectonic Zone in China—Mongolia continent and its seismic activity. *Earthquake Research*, 14 (4): 421~436 (in Chinese).
- Ma Zongjin. 1990. The seismic division of Chinese continent and the its dynamics. The international symposium of the tectonic evolution and dynamics of the continental lithosphere—the corpus of the the third national structural geology meeting (II), Beijing: Science Press, 86~95 (in Chinese).
- Ma Zongjin. 1984. The slab tectonics shown by South American subduction zone. *Earthquake Research*, 6 (3): 319~325 (in Chinese).
- Meng Lingshun, Gao Rui, Zhou Fuxiang. 1990. Investigation the crustal structures of Yadong—Golmud transect using the gravity anomaly. *Bulletin of the Chinese Academy of Science*, 21: 149~161 (in Chinese).
- Molnar P J, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet. *J. Geophys. Res.*, 85: 5361~5375.
- Pan Yusheng. 1999. Formation and uplifting of the Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6 (3): 153~163 (in Chinese).
- Patrick Le Fort. 1996. Evolution of the Himalaya, The Tectonic evolution of Asia. An Yin, Mark Harrison, 95~109.
- Pandey O P. 1999. Lithospheric Mantle Deformation beneath the Indian Cratons. *the Journal of Geology*, 107: 683~692.
- Ratschbacher L, Frisch W, Chen C, et al. 1996. Cenozoic deformation, rotation, and stress patterns in eastern Tibet and western Sichuan, China, The Tectonic Evolution of China. An Yin, Mark Harrison, New York: Cambridge Univ. Press, 227~249.
- Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, et al. 1994. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India—Asia collision. *J. Geophys. Res.*, 99: 19917~19945.
- Royden L H. 1996. Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: implications for strain partitioning in the crust. *J. Geophys. Res.*, 101: 17699~17705.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788~790.
- Sengor A M C, Borisa. Nataln. 1996. Paleotectonics of Asia: fragment of a synthesis, The tectonic evolution of Asia. An Yin, Mark Harrison, Cambridge University Press, 486~640.
- Stern T A, McBride J H. 1998. Seismic exploration of continental strike-slip zones. *Tectonophysics*, 286: 63~78.
- Searle M P. 1991. *Geology and Tectonics of the Karakoram Mountains*. New York: Wiley, 1~358.
- Searle M P. 1996. Cooling history, erosion, exhumation, and kinematics of the Himalaya—Karakoram—Tibet orogenic belt, The Tectonic Evolution of China. An Yin, Mark Harrison, New York: Cambridge Univ. Press, 110~137.
- Tapponnier P, Molnar P J. 1977. Active faulting and tectonics of China. *J. Geophys. Res.*, 82: 2905~2930.
- Teng Jiwen, Yin Zhouxun, Xiong Shaobai. 1985. Crustal structure and velocity distribution beneath the Serlin Co—Peng Co—Suo County region in the Northern Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 28 (supp.): 28~42 (in Chinese).
- Tilmann Frederik, Ni James, INDPH III Seismic Team. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian Lithosphere beneath Central Tibet. *Science*, 300: 1424~1427.
- Valdiya K S. 1976. Himalayan transverse faults and folds and their parallelism with subsurface structures of the northern Indian plains. *Tectonophysics*, 32: 353~386.
- Wang Wu, Lu Deyuan, Huang Liyan. 1990. The north—south trending crustal structural mode and distribution of the velocity of Tibet Plateau, The corpus of the Tibetan geophysics. Beijing: Geological Publishing House, 38~50 (in Chinese).
- Wang Qianshen. 1985. The study on the thickness outline and the structures of continental crust of Asia. The corpus of the structural geology, 4: 112~119 (in Chinese).
- Wang E, Burchfiel B C. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalaya syntaxis. *Int. Geol. Rev.*, 39: 191~219.
- Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, et al. 1998. Late Cenozoic Xiang shuihe—Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 327: 1~108.
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Ma Zongjin. 2002. GPS database and velocity field of contemporary tectonic deformation in continental China. *Earth Science Frontiers*, 9 (2): 415~429 (in Chinese).
- Wesnousk Y G, Kumar, S, Mohindra, R, et al. 1999. Uplift and convergence along the Himalayan Frontal Thrust of India. *Tectonics*, 18(6): 967~976.
- Wu Gongjian, Xiao Xuchang, Li Tingdong. 1989. The Yadong—Golmud transect in Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 63 (4): 285~296 (in Chinese).
- Xiao Xuchang, Li Tingdong, Li Guangcen, Chang Chengfa, Yuan Xuecheng. 1988. Tectonic evolution of the lithosphere of the Himalayas—General Principle. People's Republic of China Ministry of Geological and Mineral Resources Geological Memoirs, No. 7. Beijing: Geological Publishing House, 160~171.
- Xiong Shaobai, Teng Jiwen, Yin Zhou. 1985. The thickness of the crust and undulation of the Tibet Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 28 (supp.): 16~26 (in Chinese).
- Yin A, Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of

- China and its neighboring regions, *The Tectonics of Asia*. An Yin, Mark Harrison, New York: Cambridge Univ. Press, 442~485.
- Zhang Zhongjie, Li Yingkang, Wang Guangjie, et al. 2001. The east—west trending crustal structures and sunken Moho surface—revelation from the broad angle reflection profile. *Science in China (Series D)*, 31(11): 881~888 (in Chinese).
- Zhao W, Nelson K D, and The Project Indepth Team. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366: 557~559.
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, et al. 2001. The tectonic characteristics of Qinghai—Tibet plateau and basin evolution. Beijing: Science Press, 61~62 (in Chinese).
- Zhu Hengbin, Zhou Wenhui, Wu Ligao. 1985. The characteristics of the gravity field of the Qinghai—Tibet Plateau and its tectonic sense. *Acta Geophysica Sinica*, 28 (supp.): 60~69 (in Chinese).
- Zeng Rongsheng, Zhu Jieshou, Zhou Bing. 1992. 3-D velocity structure and continental dynamics in Qinghai—Xizang Plateau and its east rejon. *Acta Seismological Sinica*, 14 (supp.): 523~533 (in Chinese).
- Zeng Rongsheng, Sun Weiguo. 1991. Seismicity and focal mechanism and discussion of material flow toward the east in Qinghai—Xizang Plateau and its neighbor regions. *Acta Seismological Sinica*, 14 (supp.): 543~564 (in Chinese).
- Zhong Dalai. 1998. The paleo-Tethys Orogen of western Yunnan. Beijing: Science Press, 277~249 (in Chinese).

East—West Segmentation of the Tibetan Plateau and Its Implication

ZHANG Jin, MA Zongjin

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871

Abstract

After more than 30 years' research, people have already know that the Tibetan Plateau is formed by several east—west-trending blocks (Lhasa Block, Qiangtang Block, etc.) colliding with each other during the last tens of million years. However, with many interdisciplinary projects carried out in the Tibetan Plateau and surrounding areas, we find that there are at least two large nearly north—south trending tectonic zones developed in the interior of the Tibetan Plateau, which cut the Plateau into three parts from west to east. These three parts are different in topography, movement direction of crust, Bouguer gravity anomaly, structures in the depth, thickness of the crust and lithosphere, and many other geological characteristics. The Bouguer gravity anomaly is the highest in the western part, and the present crust movement there is directing to the northern northwest, which is different from the other two parts. The central part is a special area and there are many characteristics that can distinguish it from other two parts. There are seven larger north—south-trending rifts and many small east—west extensional faults and glaciers developed in the central part. Most summits over 8000 m above sea level along the Himalayas are located in the central part. Moreover, the movement direction of this part is northern northeast, and most Cenozoic volcanoes also distribute in the central part. In the eastern part, there are several large strike-slip faults cutting into several smaller blocks, which rotate clockwise, so, the movement direction of the crust is also clockwise, from northeast to east. The western boundary ($84^{\circ}\text{E}\sim 85^{\circ}\text{E}$) between the west part and the central part is tracing one seismic zone (Lazhulong—Amuzhong) that was recently found. The movements across this zone calculated by focal mechanics show transtension between these two parts. The eastern boundary ($92^{\circ}\text{E}\sim 94^{\circ}\text{E}$) is tracing another large seismic zone (Yadong—Amdo) in the interior of the plateau, which is more than 1000 kilometers long. This seismic zone goes through the Himalayas to India. A largest rift zone (Yadong—Amdo) in the Tibetan Plateau also extends along this boundary. From many CT profiles going through the plateau at the different depth, we can also find that the boundaries between the units can go down for about four hundred kilometers to the upper mantle. These may result from the inhomogenous Indian Plate, which is colliding with the Eurasian Plate. It is the segmented Indian Plate that leads to the different deformations and crust movements between the three parts.

Key words: gravity field; CT profiles; velocity field of GPS; Tibetan Plateau; segmentation; east—west-trending tectonic zone; seismic activity

