

青藏高原东部构造块体的运动学及形变特征分析

李建彪, 甘卫军, 冉勇康, 陈立春

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要:通过分析青藏高原东部的活动断裂资料和 GPS 速度场数据, 试图阐述活动地块的几何学、运动学和形变特征。初步认为: (1) 第四纪特别是晚更新世以来的活动地块边界带与早期的构造单元边界密切相关, 但也具有明显的新生性; (2) 根据两种资料推导出的各个活动地块的运动学特征基本上是吻合的, 其中鲜水河-玉树-玛尼断裂带是一条重要的分界线, 其南、北部活动地块的运动方式差异明显; (3) 除了活动地块的边界带强烈活动外, 各个地块内部也显示出很强的变形; (4) 晚更新世以来, 青藏高原地壳的运动学和形变特征表现为在印度板块挤压力作用下, 活动地块在向 NE 方向的运动过程中遇到稳定地块阻挡, 调节方式是地壳增厚以及南、北部地块分别向 SE-SSE 和 NWW-W 方向的构造软弱部位水平侧向迁移。

关键词: 活动断层; 活动地块; GPS 速度场; 青藏高原

中图分类号: P228.4; P546

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2006)02-0097-07

Analysis on Kinematics and Deformation Characteristic of Tectonic Blocks in Eastern Tibet Plateau

LI Jian-biao, GAN Wei-jun, RAN Yong-kang, CHEN Li-chun

(Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the analyses of active faults and Global Position System (GPS) data of the eastern Tibet plateau, the paper attempts to discuss the geometry, kinematics and deformation of the active blocks in eastern Tibet plateau. The preliminary conclusions are: (1) The boundaries of the 'active' blocks which have activated in Quaternary, especially in Late Pleistocene are associated with the primary boundaries of the tectonic units (those are five suture zones and a deep, lithospheric fault zone between the terranes), a few were newly formed since late Quaternary Period; (2) The kinematics characteristic of all active blocks induced from the active faults data are as same as one from GPS data, as the boundary, Xianshuihe - Yushu - Mani fault belt is very important for the movement way of the active blocks at the southern the fault belt is different from the ones at the northern side; (3) Not only does the intensive deformation exist within the boundary zone between two active blocks, but also the deformation has taken place in the active blocks interior since Quaternary Period; (4) Since Late Pleistocene, the kinematics and deformation characteristic of the Tibet plateau crust should be that: when the active blocks moved to NE under the Indian plate compression, the steady blocks (i. e. Xiyu block region, Huabei block region, Nanhua block region) at the front held up the movement of the blocks, meanwhile the adjustment way of the active blocks was thickening crust and the blocks horizontal transfer to the tectonic weaker places, that is, the active blocks at the south of Xianshuihe - Yushu - Mani fault belt rotated clockwise to SE-SSE as an entirety around the Eastern Himalayan Syntaxis, while the blocks in the northern side of

收稿日期: 2005-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(40274034)

作者简介: 李建彪(1963-), 男(汉族), 湖南湘潭人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事构造地质学和第四纪地质学工作。

the fault belt displaced sinisterly to NWW - W.

Key words: Active fault; Active block; GPS data, Tibet plateau

0 前言

青藏高原在地貌上以其平均海拔高度达 4 500 m 而被称为世界的第三极。地质学家普遍认为,青藏高原是印度板块与欧亚板块自新生代早期碰撞以来逐渐形成的,其中印度板块楔入到欧亚板块之下对青藏高原隆升起着主要作用^[1-6]。

对于青藏高原晚新生代以来的构造变形机制,目前在认识上主要存在两种模式。一种模式是把印度板块向青藏高原下部的挤入简化为平面刚塑性问题,将其变形方式近似地看成主要断层之间刚性块体的相互作用,即认为新构造变形主要集中在几条走滑断裂上,而由其所围限的块体的侧向迁移是调节构造变形的形式,因此走滑断裂作用占主导地位^[2-4,7-8]。另一种模式则认为,板块会聚所引起的构造变形主要是通过广泛分布于大陆内部的逆断层作用和地壳增厚来调节的,而走滑断层作用是有限的,其构造变形应看成为一种连续介质的内部应变和旋转,上地壳的非连续变形仅反映了局部区域的脆性地壳特征,深部塑性岩石圈则为连续变形^[9-14]。

上述认识上的分歧主要表现为:在印度板块的俯冲碰撞作用下,青藏高原内部各个构造块体的运动学机理及其内部的形变特征是什么?本文拟通过分析青藏高原东部第四纪特别是晚第四纪以来的活动断裂资料和 GPS 速度场资料,阐述活动断裂带所围限块体——活动地块的几何学和运动学特征。其中, GPS 速度场资料直接提供了活动地块边界和内部的现今运动和形变信息。

1 早期构造单元

青藏高原东部由 6 个地体以及分隔开它们的 5 条缝合带和一条深大断裂组成^[6,15-17](图 1),自北而南分别为:祁连-阿尔金加里东期缝合带,祁连山地体,青海南山及北淮阳断裂带,东昆仑-柴达木地体,东昆仑-阿尼玛卿华力西期缝合带,松潘-甘孜-可可西里地体,金沙江印支期缝合带,羌塘地体,班公湖-怒江燕山期缝合带,拉萨地体,雅鲁藏布江喜马拉雅期缝合带和喜马拉雅地体。青藏高原 5 条狭长的缝合带是各时期洋盆消减和地体碰撞的结果。

缝合带的时代由北向南依次变新显示了亚洲大

陆逐渐向南增生。印度次大陆与亚洲大陆碰撞使雅鲁藏布江一带的特提斯残余海最终封闭^[6],并开始了缓慢的分阶段的构造运动、岩浆活动及地面隆升过程。

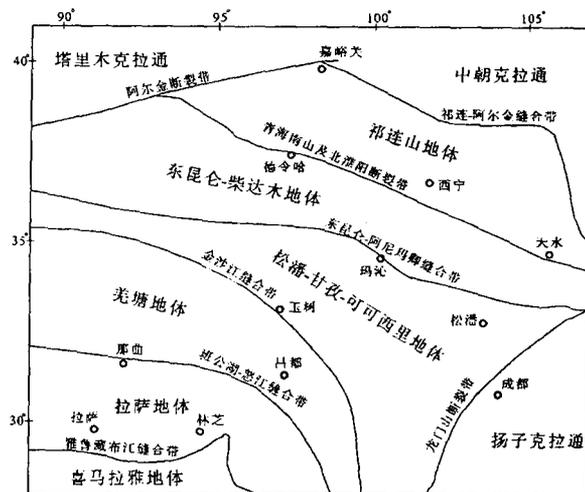


图 1 研究区主要构造单元图

(资料来源:文献[6,15,16])

Fig.1 Tectonic units in the research area.

2 活动断裂与活动地块

图 2 是根据邓起东等^[18]编制的中国活动构造图修改而成的研究区活动断裂分布图。虽然其中的许多断裂还未得到详细的研究,如通过卫星照片解译出的断裂还未得到野外工作的论证,但本图基本上包括了该区域的所有活动断裂。从图上可知,与周围稳定的克拉通区相比,青藏高原东部构造区的断层密度明显较高,说明该区域地壳相对克拉通来说强度低,塑性高,也较破碎;断层走向在北部除了阿尔金-海原断裂带的西段为 NEE 向外,其余基本上为 SEE;南部区域则以 SSE 为主。其中喜马拉雅活动构造带、班公错-嘉黎断裂带和金沙江-红河断裂带的运动学特征为右旋走滑兼逆冲;其它断裂带为左旋走滑兼逆冲。

总体上研究区内的活动断层大部分都可以归入以下 8 条活动断裂带:

(1) 喜马拉雅活动构造带(HM)。由向南凸出的主中央冲断带(MCT)-主边界冲断带(MBT)-山前冲断带(RFT)所组成,全新世滑动速率 15~18 mm/a^[19-20],具有右旋走滑分量。

(2) 班公错-嘉黎断裂带(BG-JL)。右旋滑

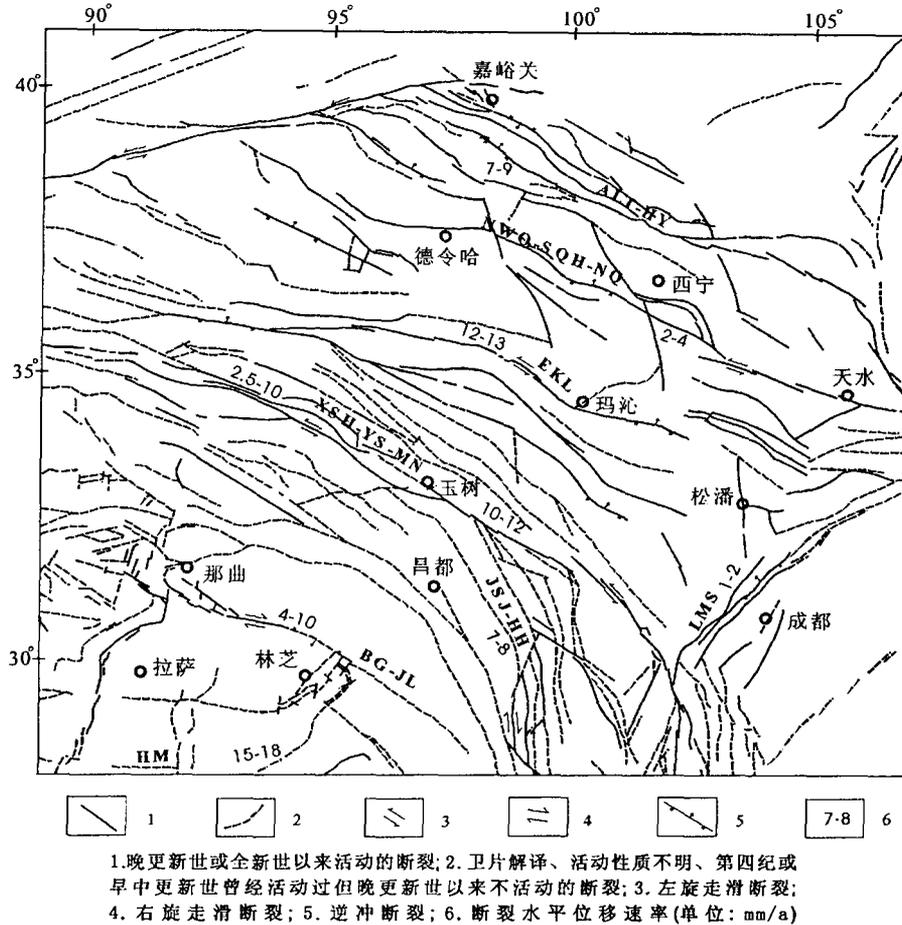


图2 研究区活动断裂分布图(资料来源:文献[15])(实线表示晚更新世或全新世以来活动的断裂,虚线表示卫片解译、活动性质不明、第四纪或早中更新世曾经活动过但晚更新世以来不活动的断裂)

Fig. 2 Distribution of active faults in the research area.

动速率约为4~10 mm/a左右^[21-22]。

(3) 鲜水河-玉树-玛尼断裂带(XSH-YS-MN)。东部玉树-鲜水河段左旋滑动速率为10~12 mm/a^[23];西部左旋滑动速率大概在2.5~10 mm/a^[24]。

(4) 东昆仑断裂带(EKL)。左旋走滑兼向南逆冲,晚第四纪滑动速率12~13 mm/a^[25];2001年11月昆仑山口8.1级强烈地震在该带中部发生,形成长达350 km的地表破裂带^[26]。

(5) 西秦岭北缘-青海湖南缘-柴达木盆地北缘断裂带(NWQ-SQH-NQ)。左旋走滑兼向南(部分断层段向北)逆冲,造成南祁连山系推覆于柴达木-共和盆地之上,滑动速率较小,一般为2~4 mm/a^[27]。

(6) 阿尔金-海原断裂带(ALT-HY)。左旋走滑兼逆冲挤压,左旋滑动速率约为7~9 mm/a^[28-32]。

(7) 金沙江-红河断裂带(JSJ-HH)。右旋走

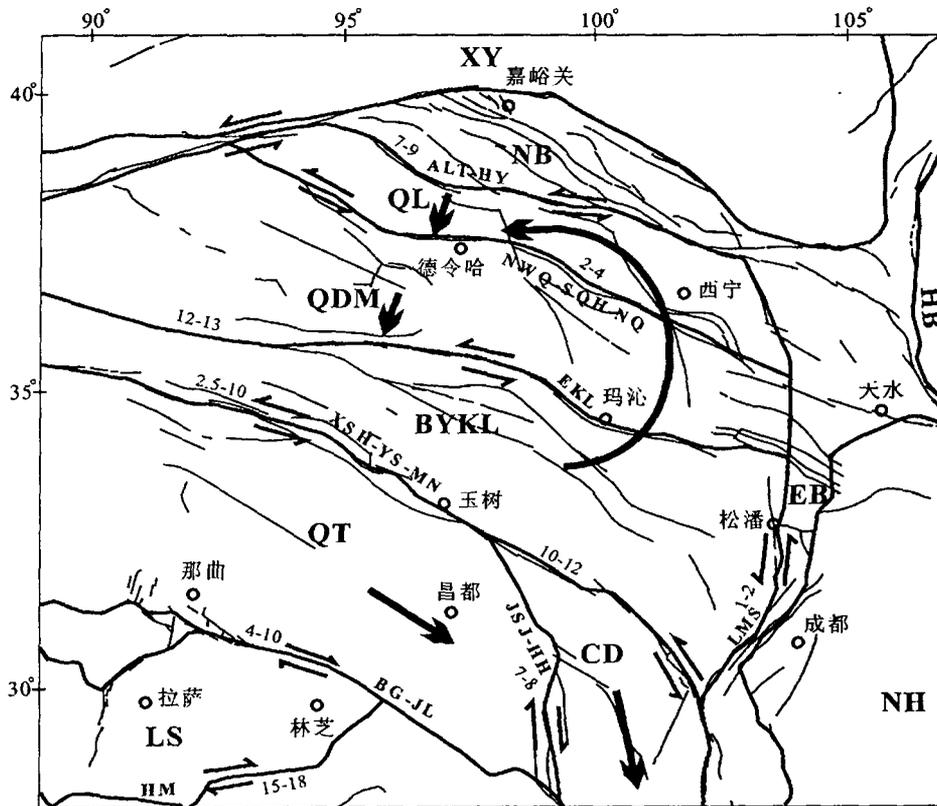
滑,晚第四纪滑动速率可达7~8 mm/a^[33-34]。

(8) 龙门山断裂带(LMS)。活动性不强,但其中的岷江断裂具有左旋走滑特征,速率1~2 mm/a^[35]。

根据邓起东等^[18]和张培震等^[36]关于活动断块或活动地块的划分,研究区自南而北分别为:a. 拉萨地块(LS), b. 羌塘地块(QT), c. 川滇地块(CD), d. 巴颜喀拉地块(BYKL), e. 柴达木地块(QDM), f. 祁连地块(QL)。另外还可划分出北缘边界构造带(NB),东缘边界构造带(EB)(图3)。

通过分析这些活动断裂运动性质及组合方式,可以得出活动地块具有如下特征:

(1) 羌塘地块和川滇地块的东北边界为左旋剪切的鲜水河-玉树-玛尼断裂带,西南边界分别为右行剪切的班公错-嘉黎断裂带和金沙江-红河断裂带,地块两侧断裂带剪切方向相反,共同指示羌塘地块和川滇地块具有向SE-SSE方向运动的趋势,表现为围绕东喜马拉雅构造结的水平旋转。拉萨地



大箭头表示地块运动方向，小箭头表示剪切方向，细线为晚更新世以来活动的断层
 LS: 拉萨地块; QT: 羌塘地块; BYKL: 巴颜喀拉地块; QDM: 柴达木地块; QL: 祁连地块; Cd川滇地块;
 NB: 北缘边界构造带; EB: 东缘边界构造带; XY: 西域地块区; Hb华北地块区; NH南华地块区;
 HM: 喜马拉雅活动构造带; BG-JL: 班公错-嘉黎断裂带; XSH-YS-MN: 鲜水河-玉树-玛尼断裂带;
 EKL: 东昆仑断裂带; NWQ-SQH-NQ: 西秦岭北缘-青海湖南缘-柴达木盆地北缘断裂带;
 ALT-HY: 阿尔金-海原断裂带; JSJ-HH: 金沙江-红河断裂带; LMS: 龙门山断裂带。

图 3 研究区活动地块及其运动学特征

Fig. 3 Active blocks and their kinematic characteristic in the research area.

块与这两个地块运动性质类似。

(2) 鲜水河-玉树-玛尼断裂带、东昆仑断裂带、西秦岭北缘-青海湖南缘-柴达木盆地北缘断裂带具有左行剪切及向 S 逆冲的性质,阿尔金-海原断裂带左行剪切运动,这种断裂带组合指示了巴颜喀拉地块、柴达木地块和祁连地块共同向 NW-W 方向旋转运动及向 S 挤压。

3 GPS 数据分析

在我们的研究区内大约有 310 个 GPS 站点的速度矢量,勾画出了较密集的地壳运动速度场。这些数据主要来源于“中国地壳运动观测网络”1998-2004 年的观测结果^[37-38],另外也补充了部分其它项目的站点资料^[20]。图 4 是甘卫军等^[39]在“青藏高原整体固定”参考框架下确定的 GPS 速度场。所用的基本方法是:首先提取所有位于青藏高原内部的 GPS 站点,对其在稳定欧亚参考框架下的速度矢量场进行球面刚性块体旋转运动的最佳拟合,确

定出描述青藏高原整体旋转的最佳欧拉矢量,然后计算青藏高原及其周边各 GPS 站点在该欧拉矢量下的“刚性”运动速度矢量,并从原速度矢量值中扣除。由于去除了青藏高原 GPS 速度场中的整体刚性运动成分,所以使高原内部(各个活动地块内部及地块之间)的构造变形和差异运动得以最大限度的凸现。表 1 是对图 4 青藏高原东部 GPS 速度场所反映的差异运动结果的统计。

分析图 4 和表 1,可以看出青藏高原东部的内部形变具有以下特征:

(1) 以鲜水河-玉树-玛尼断裂带为界,南部的拉萨地块、羌塘地块和川滇地块较之北部的巴颜喀拉地块、柴达木地块和祁连地块,其平均东向速度分量的差异达 12 mm/a,北向速度分量的差异约达 6 mm/a。南部地块表现为绕喜马拉雅东构造结的顺时针挤出式“流滑”,北部地块则表现为左旋旋转兼向 S 挤压的特征。

(2) 区域内主要的活动断裂带,包括班公错-

表1 青藏高原东部GPS站点数据统计

地块名称	站点数	北向分量 $V_n/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	东向分量 $V_e/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	速度矢量 $V/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	V 平均值/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
拉萨地块	7	-2.85 ~ 9.5	10.28 ~ 23.91	14.0 ~ 24.08	16.98
羌塘地块	15	-15.71 ~ 2.5	6.42 ~ 15.47	9.62 ~ 18.27	14.18
川滇地块	18	-18.24 ~ -10	2.36 ~ 12.83	10.77 ~ 19.56	16.46
巴颜喀拉地块	28	-11.31 ~ -1.45	-0.18 ~ 14.74	2.25 ~ 17.65	6.65
柴达木地块	25	-6.5 ~ 2.84	-7.3 ~ 0.88	0.25 ~ 9.64	3.79
祁连地块	30	-2.8 ~ 3.71	-8.98 ~ -0.19	1.01 ~ 9.41	3.52
北缘边界以北	90	4.38 ~ -9.8	-15.74 ~ -4.91	5.42 ~ 16.46	11.44
东缘边界附近	43	-4.75 ~ -2.53	-3.01 ~ 5.56	0.25 ~ 5.81	2.38

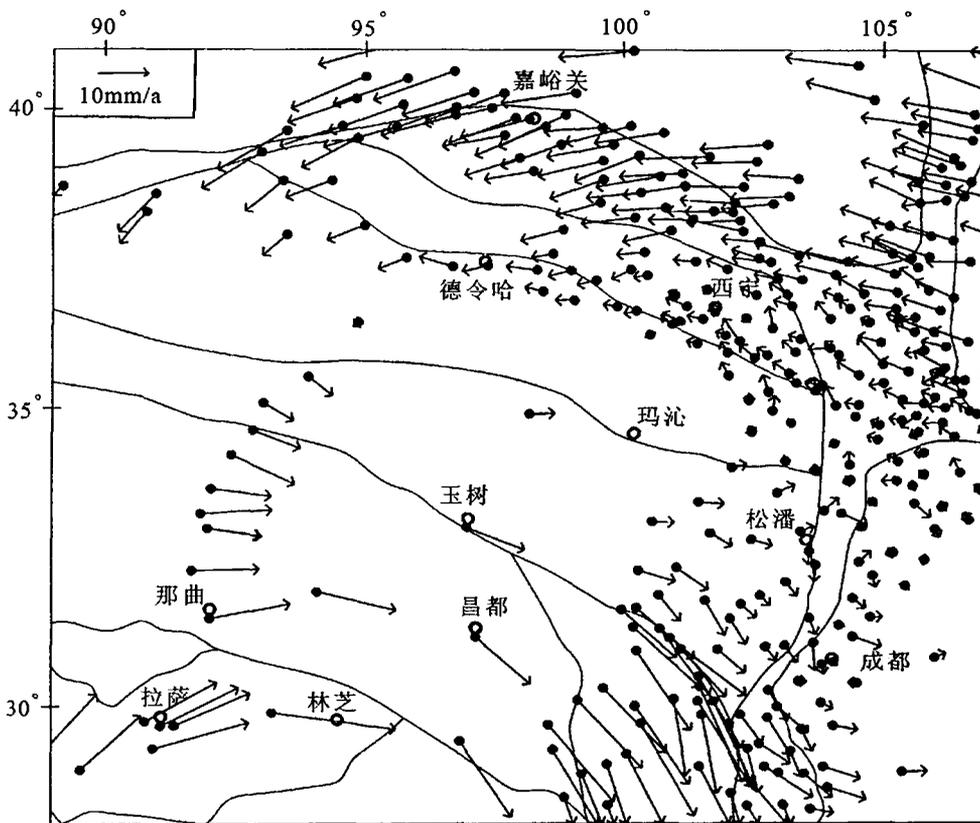


图4 在青藏高原整体固定框架下的青藏高原东部的水平形变速度场

Fig. 4 Horizontal movement rate field in eastern Tibet plateau under the wholly fixed frame of Tibet plateau.

嘉黎断裂带、鲜水河-玉树-玛尼断裂带、东昆仑断裂带和阿尔金-海原断裂带,两侧的速度场显示了明显的差异,反映出这4条断裂带现今强烈的水平活动性;而西秦岭北缘-青海湖南缘-柴达木盆地北缘断裂带两侧变化不太明显可能反映了活动性较弱。

(3) 东缘边界构造带附近(31°-35°, 102.30°-106°),包括龙门山、四川盆地及其以北区域,速度矢量以及南北分量值较小,特别是巴颜喀拉地块东部的水平形变存在着南北分岔的现象(分别表现为顺时针和反时针的剪切),可能是扬子地块阻挡了巴颜喀拉地块向东运动。北缘边界构造带及其以北地区速度矢量以及南北分量值明显大于柴达木地块和

祁连地块。

(4) 速度矢量以及南北分量值在各个地块内部变化范围较大,说明青藏高原地块内部也存在着较强烈的变形,明显不同于中国大陆的一些典型地块,如西域地块区、华北地块区和南华地块区。

4 讨论与认识

青藏高原东部构造块体的运动学特征在新生代前后是截然不同的。五条缝合带的存在就说明在新生代之前的地质历史时期,各个构造块体(地体)之间是相对独立的,存在于古特提斯洋中。随着印度板块和欧亚大陆不断靠近,各个“地体”依次拼合到欧亚大陆上,直至喜马拉雅期印度板块和欧亚大陆

最终碰撞在一起;新生代之后由于各个块体在印度板块的继续作用之下,处于相互挤压的状态,开始了另一种复杂形式的构造运动。

对比图1和图3可以看出,第四纪特别是晚更新世以来的活动地块边界带与早期的构造单元边界密切相关,但也具有明显的新生性。雅鲁藏布缝合带是喜马拉雅期间的碰撞带,由于它已不再活动或活动性较弱,不再是活动地块的边界;班公错-嘉黎断裂带不与班公湖-怒江缝合带重合,新生程度较高;鲜水河-玉树-玛尼断裂带西段和金沙江-红河断裂带基本上继承了金沙江缝合带,而鲜水河-玉树-玛尼断裂带东段是新生的;东昆仑断裂带基本上沿着东昆仑-阿尼玛卿缝合带的迹线,但其东端已转化为东缘边界构造带的一部分;西秦岭北缘-青海湖南缘-柴达木盆地北缘断裂带除了东端已转化为东缘边界构造带的一部分外,总体上与青海南山及北淮阳断裂带重合;阿尔金-海原断裂带是新生的,位于祁连-阿尔金缝合带的南边。

根据地块边界活动断裂带的运动方式和GPS速度场推导出的各个活动地块的运动学特征基本上是吻合的。鲜水河-玉树-玛尼断裂带是一条相当重要的分界线,其南、北两侧活动地块的运动方式不同。南部地块包括拉萨地块、羌塘地块和川滇地块的运动方式是以SE-SSE方向绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转;北部地块包括巴颜喀拉地块、柴达木地块和祁连地块具有以NWW-W方向左行旋转运动及向S挤压的性质。

之所以活动地块具有这样的运动学特征,其原因可能是:青藏高原由于印度板块连续不断地向NE方向挤压使得整个青藏高原具有朝NE方向运动的趋势,但由于稳定的西域地块区、华北地块区和南华地块区的阻挡,迫使高原地壳增厚、南部地块朝SE方向挤出、北部地块向NWW方向左行旋转及向S挤压。实际上,东缘边界构造带附近地震活动强烈(著名的中国南北地震带),但GPS数据显示的水平形变速度值小就说明南华地块区阻挡着青藏高原活动地块朝东运动,挤压所造成的应力集中以发生强烈地震的方式释放;北缘边界构造带北侧的西域地块区和华北地块区起着类似的阻挡作用。

青藏高原东部构造区除了活动地块的边界带表现为强烈活动的特性外,各个地块内部也显示出很强的活动性,表现在活动断裂线密度高且呈现出“弥散状”的分布特征。GPS测量也证实速度矢量在地块内部变化较大,水平形变表现为一连续形变。

与稳定的西域地块区、华北地块区和南华地块区相比,青藏高原东部地壳强度低,说明青藏高原的各个地体于新生代早期最终碰撞以来,强烈的变形可能从原来“地体”的边界带向“地体”内部“渗透”,整个青藏高原可能是一个“弥散状”的活动构造区。

总之,青藏高原东部构造块体的几何学、运动学和形变特征说明,青藏高原东部地壳的变形机制在第四纪以来,已经不是传统意义上的刚性块体之间的相互作用,而是地块边界和内部变形同时存在。在印度板块NE向挤压力作用下,活动地块在向NE方向的运动过程中遇到稳定地块阻挡,调节方式主要以地壳增厚,同时南、北部地块分别向SE-SSE和NWW-W方向的构造软弱部位水平侧向迁移。

[参考文献]

- [1] Dewey J F, Burke K, Tibetan. Variscan and Precambrian basement reactivation: Products of continental collision [J]. *J. Geol.*, 1973, **81**: 683 - 692.
- [2] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 1975, **189**: 419 - 426.
- [3] Tapponnier P, Molnar P. Slip - line field theory and large - scale continental tectonics [J]. *Nature*, 1976, **264**: 319 - 324.
- [4] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insight from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, **10**: 611 - 616.
- [5] England P, G A Houseman. Finite strain calculations of continental deformation 2: Comparison with the India - Asia collision [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 3 664 - 3 667.
- [6] An Yin, T Mark Harrison. Geologic Evolution of the Himalayan - Tibetan Orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, **28**: 211 - 280.
- [7] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike - slip faults, rifts, and basins during the India - Asia collision: an experimental approach [J]. *J. G. R.*, 1988, **93** (B12): 15 085 - 15 117.
- [8] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**: 895 - 898.
- [9] England P C, Housemen G A. The mechanics of Tibetan Plateau [J]. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1988, **326**: 301 - 320.
- [10] England P C, Molnar P. Right - lateral shear and rotation as the explanation for strike - slip in eastern Tibet [J]. *Nature*, 1990, **344**: 140 - 142.
- [11] England P C, Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. *Geophys. J. Int.*, 1997, **130**: 551 - 582.
- [12] Molnar P. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics [J]. *Nature*, 1988, **335** (6 186): 131 - 137.
- [13] Holt W E, Wallace T C, Haines A J. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions [J]. *J. Geo-*

- phys. Res., 1991, **96**: 14595 - 14632.
- [14] Holt W E, Li M, Haines A J. Earthquake strain rates and instantaneous relative motions within central and eastern Asia[J]. Geophys. J. Int., 1995, **122**: 569 - 593.
- [15] 滕吉文, 张中杰, 杨顶辉, 等. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究[J]. 地球物理学报, 1996, **39**(5): 629 - 641.
- [16] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造—中国及邻区大地构造图简要说明(1: 5000000)[M]. 北京:地质出版社, 1999.
- [17] 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 等. 青藏高原的地幔结构:地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. 地学前缘, 2004, **11**(4): 329 - 343.
- [18] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), 2002, **32**(12): 1 020 - 1 030.
- [19] Lave J, J P Avouac. Active folding of fluvial terraces across the Siwalik Hills, Himalayas of central Nepal [J]. J. Geophys. Res., 2000, **105**: 5 735 - 5 770.
- [20] Wang Q, Zhang P - Z, Freymueller T J, et al. Present - day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements [J]. Science, 2001, **294**: 574 - 577.
- [21] Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. J. Geophys. Res., 1986, **91**: 13 803 - 13 872.
- [22] 任金卫, 沈军, 曹忠权, 等. 西藏东南部嘉黎断裂新知[J]. 地震地质, 2000, **22**(4): 344 - 350.
- [23] 闻学泽. 鲜水河断裂带未来三十年地震复发的条件概率[J]. 中国地震, 1990, **6**: 8 - 16.
- [24] 吴章明, 汪一鹏, 任金卫, 等. 青藏高原中部的活动断裂[A]. 见: 活动断裂研究(3)[C]. 北京:地震出版社, 1994. 56 - 73.
- [25] Van Der Woerd, J F Ryerson, P Tapponnier, et al. Holocene left slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China) [J]. Geology, 1998, **26**(8): 695 - 698.
- [26] 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震($M_s 8.1$)地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, 2002, **24**(1): 1 - 13.
- [27] Van Der Woerd, X Xu, H Li, et al. Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghe Nan Shan (western Gansu, China)[J]. J. Geophys. Res., 2001, **106**: 30 475 - 30 504.
- [28] 国家地震局地质研究所, 宁夏自治区地震局. 海原活动断裂带[M]. 北京:地震出版社, 1990.
- [29] 国家地震局阿尔金活动断裂课题组. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京:地震出版社, 1993.
- [30] Bendick R, Bilham R, Freymueller J T, et al. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system[J]. Nature, 2000, **404**: 69 - 72.
- [31] Shen Z - K, Zhao Ch, Yin A, et al. Contemporary crustal deformation in eastern Asia constrained by Global Positioning System measurements[J]. J. Geophys. Res., 2000, **105**: 5 721 - 5 734.
- [32] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D辑), 2001, **31**(7): 529 - 536.
- [33] Wang E, Buechfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right - lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis[J]. Int. Geol. Rev., 1997, **39**: 191 - 219.
- [34] Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xiangshuihe - Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [J]. Geol. Soc. Am., Special Paper, 1998, **327**: 1 - 108.
- [35] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 1994, **16**(4): 389 - 403.
- [36] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, 2003, **33**(增刊): 12 - 20.
- [37] 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 现今中国大陆地壳运动与活动地块模型研究[J]. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊): 21 - 32.
- [38] 牛之俊, 王敏, 孙汉荣, 等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果[J]. 科学通报, 2005, (8): 113 - 114.
- [39] 甘卫军, 沈正康, 张培震, 等. 青藏高原地壳水平差异运动的GPS观测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, **24**(1): 29 - 35.