

杨攀新, 陈正位, 张俊等. 西藏中南部格仁错断裂张剪性质及其区域动力学意义. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3285-3295, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.011.

Yang P X, Chen Z W, Zhang J, et al. The tension-shear of Gyaring Co Fault and the implication for dynamic model in South-central Tibet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(10): 3285-3295, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.011.

西藏中南部格仁错断裂张剪性质 及其区域动力学意义

杨攀新^{1,2}, 陈正位^{1,2}, 张俊³, 任金卫^{2*}

1 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3 中国医学科学院药用植物研究所, 北京 100193

摘 要 喀拉昆仑—嘉黎断裂带(KJFZ)是青藏高原中南部一条规模宏大断裂带, 因其是青藏高原向东运移的南边界, 其构造展布和活动性质与高原隆升、侧向挤出和东西向伸展等科学问题关系密切, 也是研究高原变形机制和地球动力学重要场所. 本文选取该断裂带中部 NW 向格仁错断裂(GRCF), 对断裂沿线进行较详细地质地貌调查, 对冲沟位错和断层陡坎等地貌单元进行测量, 并进行探槽开挖, 结合天然剖面揭示了断裂产状, 详细研究断裂活动性质, 发现断裂除前人认为的右旋走滑性质外, 还具有明显的张性正断性质, 断裂向北陡倾, 且北盘相对南盘下降, 全新世以来右旋走滑速率和正断速率分别为 2.98 mm/a 和 0.2~0.5 mm/a 之间. 前人在共轭的北东向断裂研究中, 也发现除左旋走滑性质外, 同样具有正断分量, 表明现今高原中南部上地壳除传统认为处东西向张性应力场环境外, 南北向也具有明显张性特征. 而受印度板块向北东向挤压作用, 高原岩石圈总体应处于挤压应力状态. 因此, 推测现今该区域上下地壳处于应力解耦状态, 并尝试建立区域张剪性地壳动力学模型; 在南北向挤压应力场的作用下, 中下地壳缩短凸起隆升, 导致上地壳在各方向都表现为不同程度的张性特征.

关键词 格仁错断裂, 喀喇昆仑—嘉黎断裂带, 青藏高原, 动力学模型

doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.10.011

中图分类号 P541, P315

收稿日期 2011-11-11, 2012-06-28 收修定稿

The tension-shear of Gyaring Co Fault and the implication for dynamic model in South-central Tibet

YANG Pan-Xin^{1,2}, CHEN Zheng-Wei^{1,2}, ZHANG Jun³, REN Jin-Wei^{2*}

1 Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China

2 Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China

3 Institute of Medicinal Plant Development, Beijing 100193, China

Abstract Karakorum-Jiali fault zone (KJFZ) is a large-scale fault zone in central-southern Qinghai-Tibet Plateau. Because it is the southern margin of the plateau and the Qinghai-Tibet Plateau moves to the east along this fault zone, its formation, structure and activities are crucial to uplift, lateral extrusion and east-west extension of Tibetan Plateau. Gyaring Co fault (GRCF) is one of faults in middle of KJFZ. By geomorphologic research, measure the dislocation of gorge and scarps along the fault and trench study in the field, the fault is north dip, and its south wall

基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(0210240201, 02091412), 973 计划(2008CB425701)共同资助.

作者简介 杨攀新, 男, 1971 年生, 安徽怀宁人, 硕士, 副研究员, 从事地震地质与活动构造研究. E-mail: pxy@seis.ac.cn

* **通讯作者** 任金卫, 男, 博士, 研究员. E-mail: ren@seis.ac.cn

raised up relatively to the north wall. Not only the right-lateral strike-slip is found as the former's studies, but also tensional dip-slip has been found. The rate of the strike-slip and dip-slip is 2.98 mm/a and 0.2~0.5 mm/a respectively during Holocene. At the same time, the former also find the tension besides left-lateral strike-slip in NE conjugated faults north of Bangonghu-Nujiang suture zone(BNS). This extension-shear in the conjugated faults system show upper crust of the south-central plateau is not only the tension in east-west direction with Qiangtang terrance east movement, but also has a significant tension in north-south direction presently. Though the lithosphere is in press state because the Indian plate ram into Eurasia continent in NNE direction, it can be speculated that the stress of upper crust is decoupled from mid-lower crust. As a conclusion, a regional dynamic model of extension-shear is built: the mid-lower crust uplifts under the press stress field in direct of south-north, so the upper crust is in tensional stress in all direction.

Keywords Gyaring Co Fault, Karakorum-Jiali Fault Zone, Tibetan Plateau, Geodynamic model

1 引言

喀拉昆仑—嘉黎断裂(Karakorum-Jiali Fault zone)是青藏高原中南部一条规模宏大断裂带,总长度超过 2000 km,断裂带最西端为喀喇昆仑断裂(Karakorum Fault),最东端为嘉黎断裂(Jiali Fault),两者之间沿班公湖—怒江缝合带附近发育一系列雁列断裂系(图 1),由于其为青藏高原向东挤出块体的南部边界,因此断裂带的形成时代、活动性质及活动速率在研究青藏变形机制方面具有很重要的作用,尤其在高原隆升、侧向挤出和东西向伸展等科学问题有重要研究意义。

对青藏高原影像的解译,形成了青藏高原新构造图像^[1-3],并根据局部野外调查成果,国内外学者对喀拉昆仑—嘉黎断裂带研究形成了两种截然不同的模式。一种是简单剪切模式,认为断裂带为羌塘块体连续统一南边界断裂,羌塘块体在该断裂带北侧整体向东运移,通过区域资料推测其右旋走滑速率在 10~20 mm/a 之间,并认为由于断裂的右旋运动,尾端形成张性断裂系,即高原南部的广泛发育的南北向裂谷系,因此裂谷的不再向北延伸(图 2a)^[3-4]。另一种为挤压共轭构造的纯剪切模式,近年来一些学者调查研究结果显示,除北西向右旋走滑断裂外,羌塘块体内还广泛发育北东向的左旋走滑断裂,与北西向断裂一起形成了多组共轭构造体系,共同组成喀拉昆仑—嘉黎断裂带,整个变形带宽度达 200~300 km,受印度板块南北向挤压作用,共轭断裂之间的楔形块体向东运移^[5-7](图 2b),从而对简单剪切模式提出质疑。

近年来的以 INDEPTH、Hi-Climb、和国土资源部“十五”青藏专项研究计划和青藏高原所“羚羊计划”为代表开展了大陆的地球物理探测工作,为研究青藏高原的隆升块体划分和变形机制,尤其在深部动力机制方面,取得了一批颇具影响力的成果^[8-15]。其中大量工作对青藏高原中南部的怒江—班公湖缝合带形成和动力学意义也提出了大量的见解,比较一致的结果认为在缝合带处地壳结构发生明显的变化^[16-20],但是由于高原腹部工作环境恶劣,很难进行系统的地质地貌调查,大量的成果缺少直接证据支持,所以至今没有统一的认识。

格仁错断裂(GRCF)为该断裂带中部展布最长、线性最明断裂,也是地震活动性最强一条断裂,1934 年在该断裂上发生 $M_s 7.0$ 地震^[3],另外,在断裂的北侧我们新发现了一组地震地表破裂带,极有可能是 1908 年 7 级地震,地震目录将震中位置定在该断裂北侧的色林错附近,此工作将另文详叙。因此,该断裂是高原中南部历史记载以来仅有的两次 7 级地震的发震断裂。因此,该断裂的构造展布及活动性是研究高原中南部变形机制和区域动力学模型的最佳场所。本文通过对断裂沿线野外地质地貌调查,发现除前人研究认为的右旋走滑性质外^[3,5,7,21],张性正断性质在整个断裂沿线表现也十分显著。并结合地球物理资料在区域和深部构造动力学研究成果,综合分析断裂张剪性质的形成机制,并在此基础上探讨高原中南部区域构造动力学模式。

2 格仁错断裂张剪性质

格仁错断裂位于喀喇昆仑—嘉黎断裂带的中

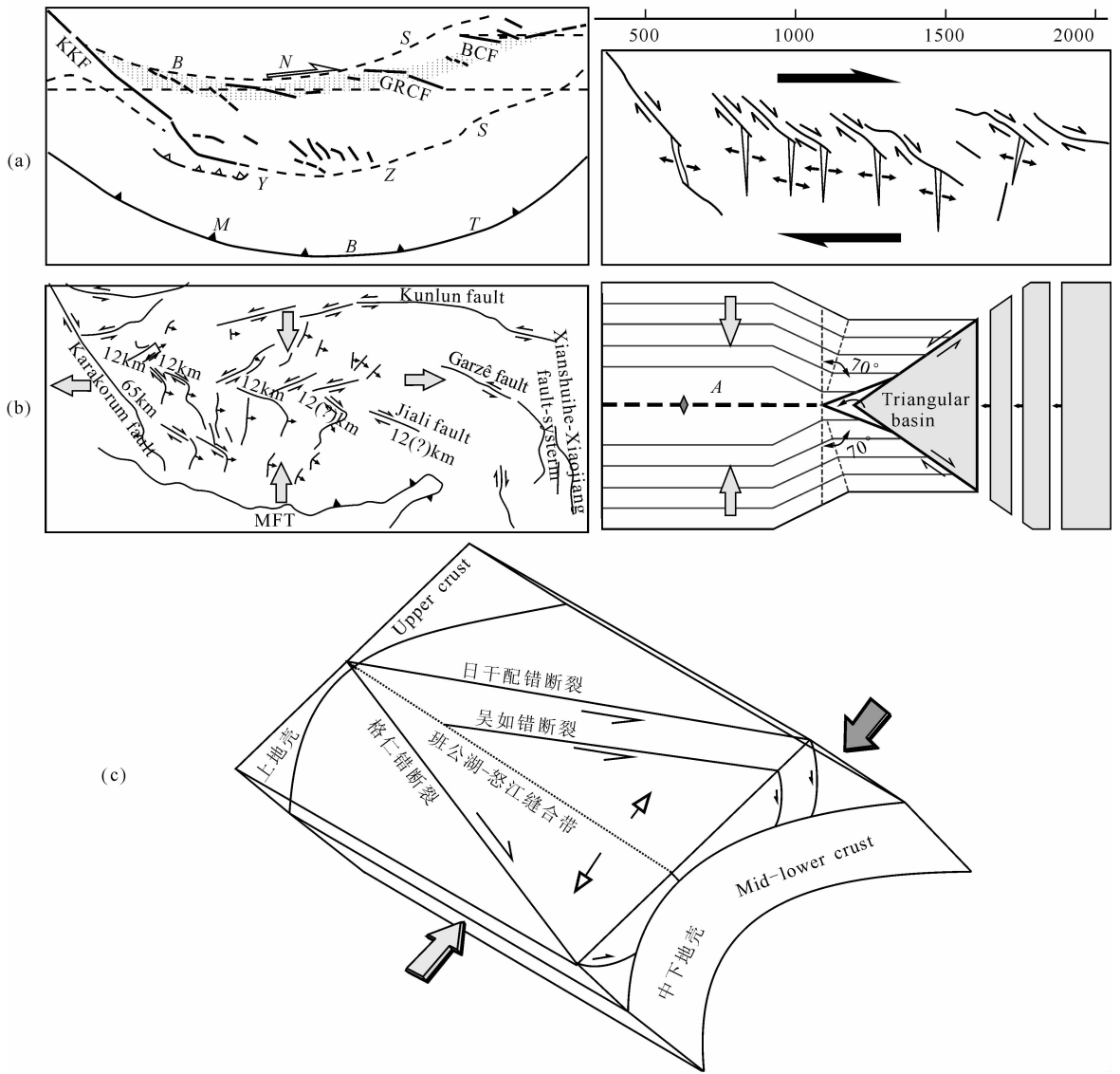


图2 青藏高原中南部动力学模式图

(a) 简单剪切模式^[3-4]; (b) 纯剪切模式^[5-7]; (c) 剪切伸展模型(本文).

Fig. 2 The geodynamic model of Tibet plateau

(a) Simple shear model^[3-7]; (b) Pure shear model^[3]; (c) Shear-extension model (this paper).

部,断裂在冻果错北侧与班公湖—怒江缝合带交汇,向南经戈芒错、张奶错、控错、孜桂错,于格仁错南侧穿过申扎一定结地堇系(亦称裂谷)向南东方向经过错嘎错、那拉错至瓦昂错东南,全长大于200 km。由于吴如错断裂、下过断裂和申扎一定结裂谷截切,在地貌和活动性特征不同,可将断裂初步划分为四个断裂段(图3):张奶错以北段,断裂进入高原腹部,形迹不清晰,只在张奶错北发现断裂陡坎地貌;张奶错—格仁错段,断裂线性清晰,在高分辨率遥感影像上穿过冲洪积物和湖相阶地,并错断冲沟和洪积扇体;格仁错段,分为南北两支,北支沿格仁错北展布,活动性较弱,未发现明显的新活动证据,南支在格仁

错东南和甲岗雪山北侧展布,冲积扇体上有最新地表破裂带分布,为1934年地震地表破裂带^[1,22];申扎以南段,断裂沿错嘎错、那拉错、瓦昂错及河流槽地两侧延伸,由多条断裂组成,断裂张性特征明显,且表现为向南陡倾特点。由于在以前文章中对格仁错段和申扎以南段均有较详细的介绍^[22-23],本文只对北西两段进行重点描述。

2.1 张奶错以北段

该段是指被吴如错断裂截切以西段,初步踏勘过程中未发现明显的右旋活动,在冻果错一带,只能从宽阔平坦的河湖谷地判断断裂的存在,断裂切割中生代白垩纪地层形成典型的“单斜山”地貌,发育

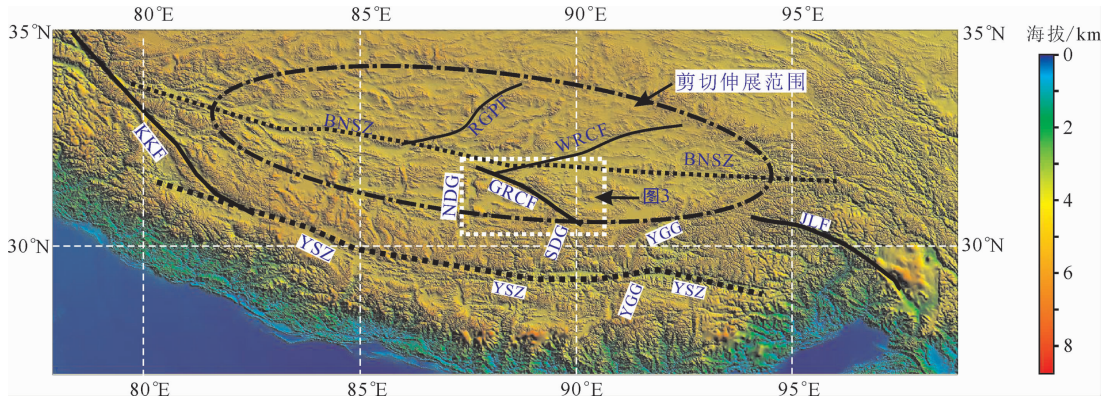


图 1 青藏高原中南部 DEM 地形及研究区位置图

BNS 班公湖—怒江缝合带;YSZ 雅鲁藏布江缝合带;SDG 申扎—定结地堑系;NDG 尼玛—定日地堑系;GRCF 格仁错断裂;KKF 喀喇昆仑断裂;JLF 嘉黎断裂;RGPF 日干配错断裂;WRCE 吴如错断裂

Fig. 1 The DEM image in center-south Qinghai-Tibet plateau and study zone

BNS Bangonghu-Nuijiang suture zone; YSZ Yarlung Zangbo River suture zone; SDG Xainza-Dingyê Graben; NDG Nyima-Tingri Graben; GRCF Gayring Co Fault; KKF Karakorum Fault; JLF Jiali Fault; RGPF Rigain Pünco Fault; WRCE Urru Co Fault

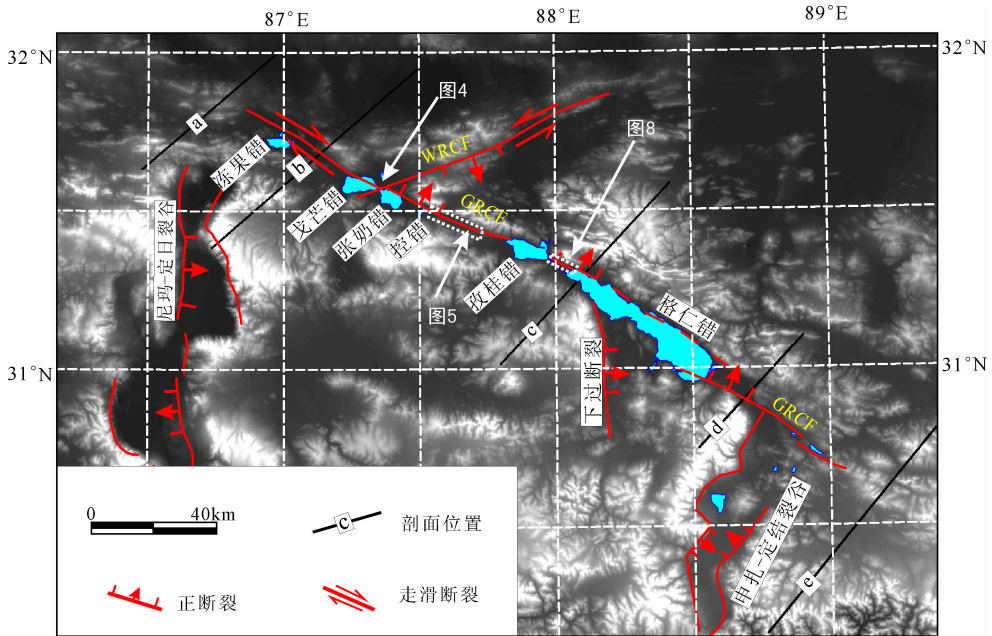


图 3 格仁错断裂展布及 DEM 图(缩写字母与图 1 相同)

Fig. 3 The distribution of Gayring Co fault in DEM image (The symbols as in Fig. 1)

巨大陡立的断层三角面,表明断裂可能向北陡倾,且具有显著的正断性质,南盘相对北盘抬升量相当大,但断裂经过冲沟时均未见有右旋错动,表明在该段断裂的右旋走滑性质不明显,或基本没有走滑运动,推测由于断裂地处高原面内部,由于内流作用,强烈的剥蚀作用形成的沉积物基本原地或附近堆积,覆盖层厚度较大^[24],因此断裂形迹不甚清晰。

张奶错北侧发育一高台地,在台地顶部发现有贝壳,表明其为湖相沉积后经抬升露出湖面,经激光测距仪测量,台地据盆地底部总高度为 32 m,在台地北缘中部发现断裂形成最新陡坎地貌(图 4a),陡

坎高度 4~5 m,未发现明显的冲沟右旋位错,表明断裂在该处只为正断性质.台地北侧发育一新生的小型湖盆,考察时积水很少,只在靠近陡坎一侧水深较大,而远离陡坎北侧积水变浅直至露出湖底,因此推断由于断裂正断作用湖底由南西向北东西发生掀斜(图 4b)。

此外,格仁错断裂被共轭的左旋吴如错断裂截切,呈左阶展布,表明后者形成时代可能较前者晚,在高分辨率遥感影像上,可清楚看见张奶错北湖相阶地被吴如错断裂左旋位错,且具有明显的南东盘下降,北西盘上升的正断特征。

2.2 控错—孜桂错之间

控错—孜桂错之间是断裂带线性最清晰,在高分辨率影像上连续平直的展布于河湖谷地中,穿过第四纪沉积物形成明显的地貌陡坎、反向陡坎、断层槽谷等典型地貌(图 5),该段总长度达到 30 km,控错东侧谷地中,断裂穿过不同时期的冲积扇体,扇体物源来自南侧山体,形成不同级别高度的陡坎,图 5a 段为最老的冲积扇,断裂形成的陡坎最大高度达

70 m,最小也在 50 m 以上;图 5b 段为最新的洪积扇,其形成年代为全新世,扇体中形成的陡坎高度一般不超过 5 m,而在北侧山体前缘发育冲积扇中,形成了明显的反向陡坎,在高分辨率遥感影像中对扇体复原,可知扇体发生了约 400 m 的位移,在位移最西端(图 5c 段),反向陡坎最大高度达 21 m,向东逐渐减小,在 c 段东侧的路附近发生转换,陡坎变为正向陡坎.洪积扇体东侧,断裂表现为较宽的槽谷,



图 4 张奶错北断裂地貌图(箭头指示最新断裂陡坎)

Fig. 4 The geomorphology of the fault northern of Zhangnai Co

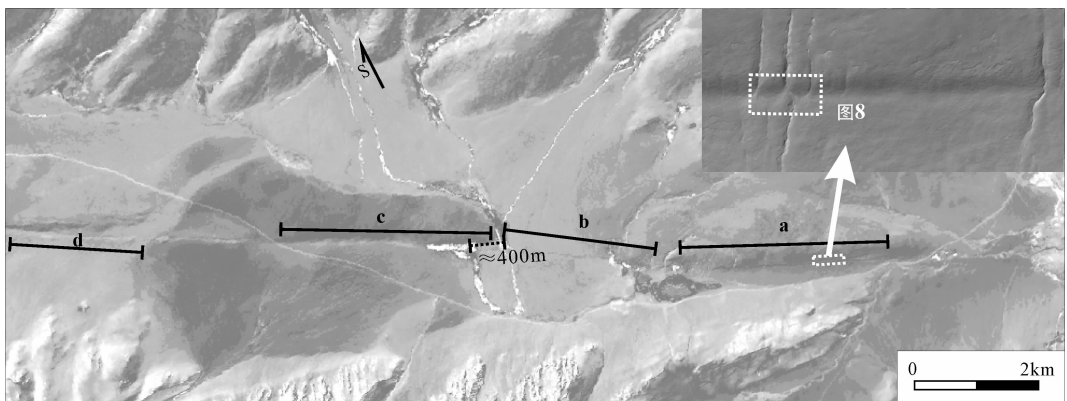


图 5 孜桂错—控错之间断裂 worldview 卫星影像

Fig. 5 The worldview image between Zigui Co and Kong Co

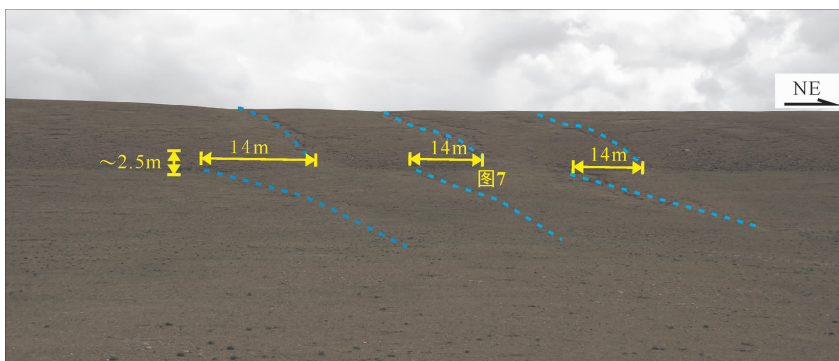


图 6 控错附近格仁错断裂冲沟位错和陡坎地貌

Fig. 6 Dislocation of gorge and scarp along the Gyaring Co Fault near Kong Co

最大宽度约 30 m 左右,槽谷南侧壁总体高于北侧(图 5d 段)。另外,图 5d 段东侧至孜桂错,发育长约 7 km 的地表破裂带,其穿过山前洪积扇中形成了反向陡坎明显,沿线冲沟均发生了右旋位错,专家认为其可能为 1908 年 7 级地震地表破裂带(与闻学泽研究员会议交流)。因此,在该段断裂虽然主要表现为右旋走滑性质,但也表现显著的正断性质。

图 5a 段的陡坎中部,断裂还形成最新的陡坎和冲沟位错地貌,陡坎高度 2.5 m,其对应的三条冲沟均发生了 14 m 的右旋位错(图 6)。为揭示断裂活动性质和产状,在陡坎前缘开挖一条垂直断裂的探槽,探槽长 3 m,最深处 2.1 m,图 7 为探槽西侧壁素描剖面,剖面沉积层可分为 5 层,其中断裂南西侧均为坡积物和原地冲积扇物质,因为其组成和物性与在附近大型冲沟切穿冲积扇体的相同,而断裂北东侧,上部为坡积物,以下两层含少量砾石或不含砾石的砂层,且层理发育良好,在冲积扇体内未发现类似物质,因此判定其为断裂位错冲沟后,在下降盘沟口处形成小型断塞塘,这两个砂层推测为后期的断塞塘沉积物,而最下部的砂层未见底,以坡积层下界为标准计算,垂直断裂的位错量应大于 1.5 m,与地表 2.5 m 陡坎高度一致。

2.3 孜桂错—格仁错之间

断裂穿过孜桂错后,继续向东延伸,在加吓藏布河谷的沉积物和北侧山坡有明显发现多组断裂展布,图 8 为 0.5 m 分辨率的 worldview 遥感图,从图中可以看出断裂在沉积物和基岩山坡呈不同的特征,东侧山坡基岩区,断裂切穿山体,形成向北陡倾的反向陡坎,陡坎高度最高处近 100 m,断裂显著南升北降垂直位错是确定无疑的。西段沉积物中断裂有 4 组破裂/断裂带展布,其中有一条为主要破裂/断裂带,另外有两组次级破裂/断裂带和转换破裂/断裂带,主要断裂带形成了明显的反向陡坎,原本冲积扇体自山坡向河流缓倾,在断裂带南侧却形成比北侧更高的反向地形,也说明了断裂确实存在明显正断性质,而次级破裂/断裂带可能就是由于这一正断作用,在断裂一侧形成的负花状构造显示(图 8)。

在破裂/断裂带的最西端,断裂穿过孜桂错一级湖相阶地,使阶地发生右旋位错,经实地激光测距仪测量,其位错量也恰好为 14 m,另外,断裂两侧阶地顶面还发生明显竖向位错,经测量南侧比北侧高 1.1 m(图 9),进一步证明断裂南升北降的正断性质明显。前人对纳木错对阶地进行了系统的研究,测得一级阶地¹⁴C 年龄在 4700BP 左右^[25],由于孜桂错

与纳木错同处于青藏高原中南部,其大地构造和气候条件一致,推测湖相阶地主要与气候相关,同一拔湖高度的阶地形成年代应大体相当。因此,计算平行断裂走向的右旋走滑速率和垂直断裂走向位错分别为 2.98 mm/a 和 0.234 mm/a 左右,走滑速率与前人在嘉黎断裂研究成果相当^[26],而远远小于 10~20 mm/a 速率^[1]。

山前冲积扇冲沟拐弯处,沉积物内发现几条近平行的断裂,断裂错动所有沉积层,包括地表的坡积物,主要断裂发育于最北端(图 10a),产状向北陡倾,上盘为含砾石粘土层,在下盘中未发现该沉积层,其应为冲积扇形成后由于断裂活动在下降盘沉积物质,冲沟揭露该层未见底,陡坎高度为 1.5 m,因此估计该沉积层位错在 2 m 左右,在沉积物中有小型动物骨骼(图 10b),经 Bate 实验室加速质谱仪(AMS)测定¹⁴C 年龄为 3750±30aBP,以此计算,断裂垂向下降速率为 0.53 mm/a,略大于阶地计算结果。

2.4 小结

通过对断裂北部两段地貌和剖面分析,表明断裂除表现为明显的右旋走滑性质外,其正断性质也十分显著,前人在申扎附近的格仁错南端,发现 1934 年地表破裂带,经测量其右旋位错 4~5 m 左右,垂直位错 1~1.5 m^[1],同样表现为南盘上升而北盘下降的特点,另外,前人在附近的在夺弄考察时发现,断层新活动切断了洪积扇,形成一条走向 300°,坎高 2.2 m 的新断裂陡坎,在被错断的洪积扇顶采得¹⁴C 样品,测年结果为 3165±110a,而在昂木洞也同样发现断裂新陡坎,其右旋位错和正断位错分别为 6.7 m 和 2.1 m^[21]。作者前期对断裂中南段调查证明,这一正断性质也相当明显,但在申扎以南错嘎错和那拉措附近,断裂产状发生转换,变为向南陡倾,可能是受南北向申扎一定结地堑(亦称裂谷)影响^[21]。为检验张性正断性质在更长时间内是否存在,为此在 30 m 分辨率的 ASTER DEM 图中(图 3),垂直断裂方向横切 5 个地形剖面(图 11),除 c 剖面外,其他剖面均表现断裂南盘地形面高于北盘,这证明在更长时间内就存在这一特征,在那拉错北侧新近纪的红色砂岩发生挤压变形,因此,初步认为在新近纪以来某个时期上地壳发生应力转变,虽然目前还没有这一转变年龄限制,但是前人研究认为藏南南北向裂谷的起始年龄在 8~14 Ma 左右^[10],而且这两组构造在空间展布和动力学上有密切的联系。因此,推测这两种事件可能同时发生,但这一推

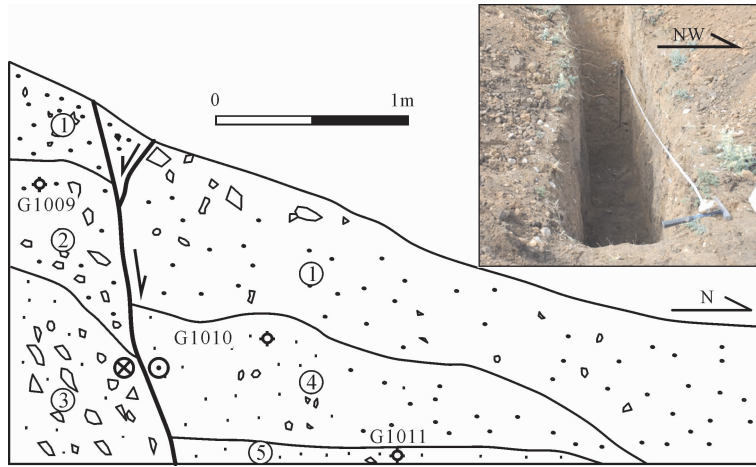


图 7 探槽照片及剖面素描图

①黄色砾石粘土坡积物,②黄色砾石沙土层,③棕色钙化砾石沙土层,④黄色含砾砂层,⑤棕色砂层.

Fig. 7 The photo and sketch of trench

① Yellow gravel and clay deluvium, ② Yellow gravel and sand, ③ Brown calcified gravelsand, ④ Yellow sand with sacant gravel, ⑤ Brown sand.

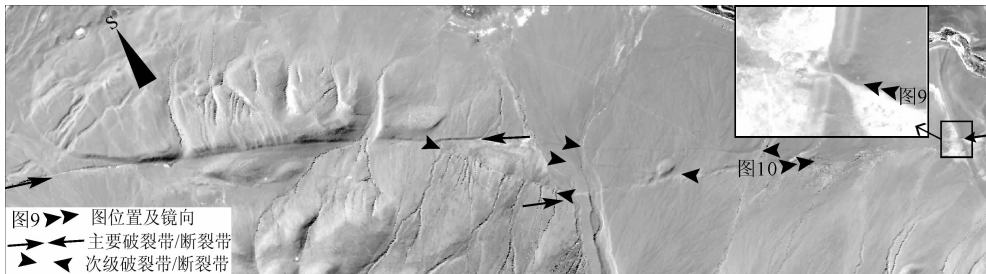


图 8 孜桂错—格仁错之间断裂 worldview 遥感图

Fig. 8 The worldview image between Zigui Co and Gyaring Co

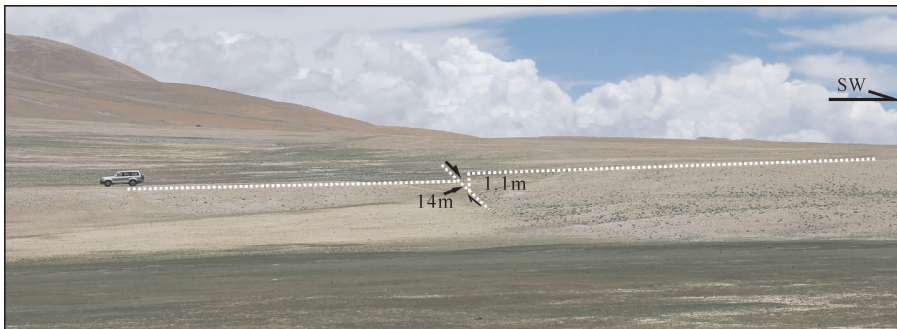


图 9 孜桂错湖相阶地位错图

Fig. 9 The dislocation map of the fault in Zigui Co terrace



图 10 冲沟拐弯处侧壁上的正断裂

Fig. 10 The right faults in the bend of gorge

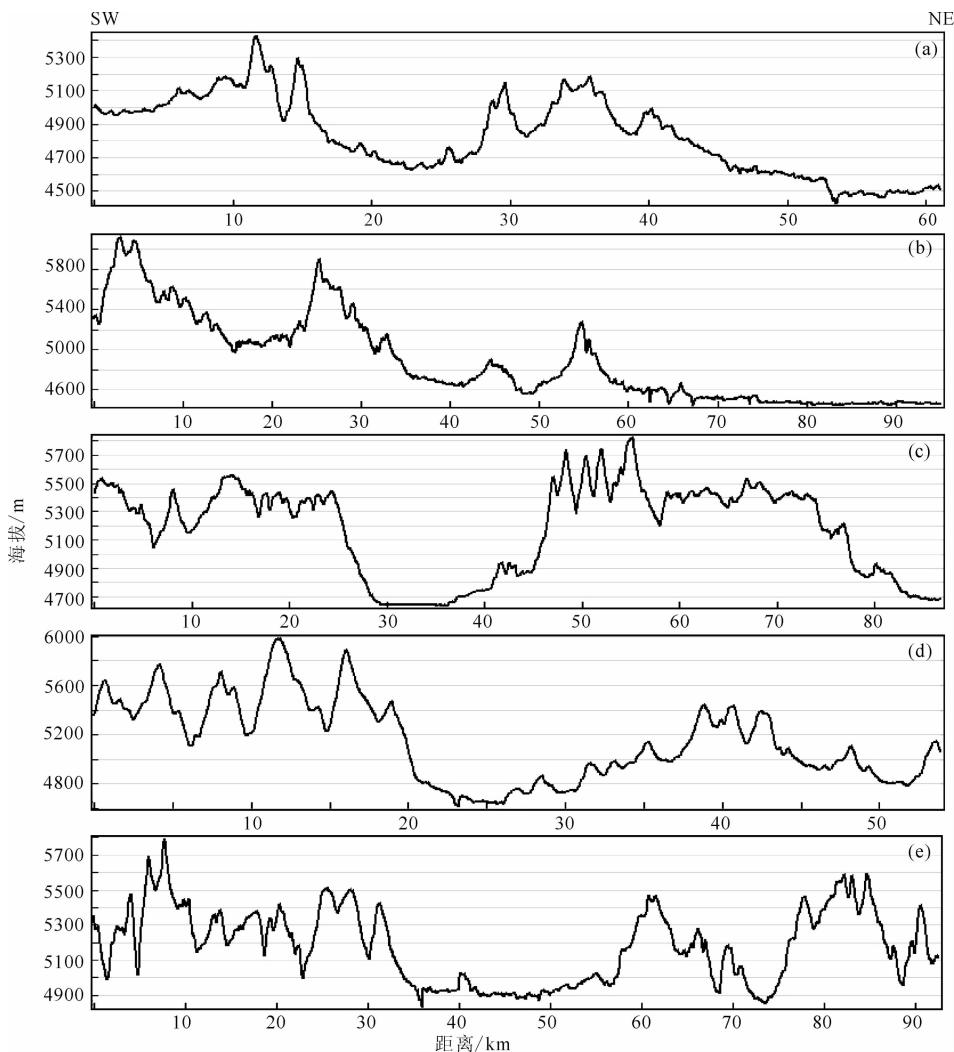


图 11 垂直断裂高程剖面图(箭头表示断裂位置)

Fig. 11 The sketch of topography perpendicular the Fault strike

测还需要地质地貌和地球物理探测的进一步证明.

3 讨论与结论

前人研究提出的纯剪切和简单剪切模型满足大地构造的某些特点,但是均不能解释格仁错断裂为何存在张剪性质.如简单剪切模型(图 2a)要求该断裂为单一的右旋走滑性质,不能解释整个断裂存在的张扭性质,更不能解释 BNS 以北发育共轭的左旋走滑断裂的存在;纯剪切模型(图 2b)虽然符合区域构造存在的共轭断裂系统,但是其要求该断裂系统应处于南北挤压的应力场环境,因此共轭的断裂应表现为压扭性质,这与本文发现的张扭性质正好相反.除本文中格仁错断裂呈现明显的正断性质外,缝合带以北的日甘配错断裂也有明显的正断性质^[5],表明这一张性特征在 BNS 两侧均有显示.因此,笔

者尝试利用剪切伸展模型(图 2c)来解释这一构造特点:在印度板块向北挤入欧亚大陆之下,青藏高原发生挤压隆升,在高原的怒江—班公湖缝合带附近(图 1),中下地壳发生强烈的隆升,导致上地壳应力与中下地壳发生解耦,从而无论在东西方向和南北方向均呈现张应力状态,又由于高原从古近纪的东高西低格局,经历了新近纪全区的不均衡隆升和拗陷,最终铸就了西高东低的地貌格局,因此在重力作用下上地壳向东运动,从而形成不对称的共轭体系^[14].

研究区近年来开展的地球物理研究成果,表明研究区上地壳结构和运动是与深部地球动力密切相关的.证实在拉萨块体和羌塘块体中下地壳存在广泛发育的地壳流,由于南北向挤压作用,在 BNS 附近塑性层发生明显的隆起^[16,27-28],从而导致上地壳主压应力为静岩压力,而在水平方向上处于张应力

状态。INDEPTH-III 确定在 BNS 两侧附近出现了一个低速楔体(5.5~5.8 km/s),上宽(达 100 km)下窄,南侧是向北倾斜,倾角较大,北侧向南倾斜,倾角较缓,下延深度可大于 20 km。这一楔体包括有伦坡拉盆地和南羌塘盆地^[8],也即本研究区域的东侧,低速楔体的产状形态与本文提出的模式中基本一致,至少表明张性剪切区域南北向是有限定的,而且可能滑脱面深度就是该模型的上地壳与中下地壳应力解耦面,但是藏南地震震源深度多集中于 10 km 左右,作者认为还需收集各方面的资料进行综合分析,才能更可靠的确定解耦面的深度。Yin 也认为水平作用使呈塑性流动的下地壳上涌而产生底辟作用上地壳发生伸展^[29]。另外,分析区域地貌特点发现,沿 BNS 两侧的 200 km 左右范围均呈现负地形(图 1),高原内部的主要湖泊沿这一带也最发育,如色林错、纳木错等,前人研究还认为沿该带 116—72 kaB。P 曾发育更大范围联通现今这些湖泊的古羌塘湖泊^[25],这一地貌特点可能就是该区域在伸展作用下形成大范围的凹陷的表现。但是这一范围被限定在藏中南念青唐古拉以西区域(图 1),自色林错至雅安多的 500 km 长的地震宽角反射剖面探测结果表明,在崩错附近,地壳厚度发生明显的变化,东侧为 75~80 km,而西侧为 60~65 km^[30],表明张性特征受深部构造约束明显,但是究竟是什么样的机理和模式来制约还需要进一步分析。

总之,本文以构造地貌研究方法,证明在青藏高原中南部,BNS 南侧格仁错断裂除有明显的走滑特点外,还具有显著的正断性质,推测高原岩石圈在挤压过程中,中下地壳发生缩短隆起,从而导致了上地壳在水平方向上均处于张性状态。深地震反射剖显示南羌塘盆地的下地壳岩层整体向北倾斜^[31-33],表明中下地壳在研究区确实发生了挠曲形变。根据 GPS 换算现今地应变结果也认为高原内部大部分地区面膨胀为正值(拉张状态)^[34],其它研究也认为在怒江一班公湖缝合带附近与周边处于不同应力场的环境^[35-36]。在此基础上,尝试提出了剪切伸展模型。当然,还需要对高原中南部的共轭断裂系统进行进一步系统的研究予以证实,如张性正断性质的分布范围和幅度,张性正断发生的起始时间,其动力学机制还需要地壳结构更高精度地球物理资料来证实。

致谢 闻学泽研究员对本文提出详细的修改建议,讨论中田勤俭研究员给予重要启示,评审专家提出了很多宝贵的修改意见和鼓励,在此一并致谢。

参考文献(References)

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of asia-effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.
- [2] Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of tibet. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83(11): 5361-5375.
- [3] Armijo R, Tapponnier P, Han T L. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94:2787-2838.
- [4] Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet; field observations and tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91:13803-13872.
- [5] Taylor M, Yin A Ryerson, Kapp F J, et al. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2003,22(4): 1044, doi:10.1029/2002TC001361.
- [6] Taylor M, Peltzer G. Current slip rates on conjugate strike-slip faults in central Tibet using synthetic aperture radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 2006,111:B12402, doi: 10.1029/ 2005JB 004014.
- [7] Yin A. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(9): 21745-21759.
- [8] 赵天津,吴珍汉.加强地表层与深层调查的结合,深化对中国大地构造特征的认识——纪念黄汲清先生 100 周年诞辰.地质论评,2004,50(3):256-266.
Zhao W J, Wu Z H. Strengthening Combination of the Survey on Surface and in Depths, Deepening Understanding of Tectonic Characteristic of China-in commemoration of the 100th Anniversary of Prof. Huang Jiqing's birth. *Geological Review* (in Chinese), 2004, 50(3):256-266.
- [9] Kind R, Yuan X, Saul J, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet; evidence for Eurasian plate subduction. *Science*, 2002, 298: 1219-1221.
- [10] Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago. *Nature*, 2001, 412(6847): 628-632.
- [11] Zhao J M, Yuan X H, Liu H B, et al. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *PNAS*, 2010, 107(25):11229-11233.
- [12] 卢占武,高锐,李秋生等.中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958—2004).地球物理学报,2006,49(3):753-770.
Lu Z W, Gao R, Li Q S, et al. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958—2004). *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 753-770.
- [13] 谭捍东,魏文博, Martyn Unsworth 等.西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究.地球物理学报,2004,47(4):685-691.

- Tan H D, Wei W B, Martyn Unsworth, et al. Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4):685-691.
- [14] Zhang K X, Wang G C, Cao K, et al. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai Tibet plateau. *Science in China (Ser. D)*, 2008, 51(11): 1658-1672.
- [15] Wei W B, Unsworth M, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 2001, 292:716-718.
- [16] Solon K D, Jones A G, et al. Structure of the crust in the vicinity of the Banggong-Nujiang suture in central Tibet from INDEPTH magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.*, 2005, doi:10.1029/2003 JB002405.
- [17] Shi D, Zhao W, Brown L, et al. Detection of southward intracontinental subduction of Tibetan lithosphere along the Bangong-Nujiang suture by P-to-S converted waves. *Geology*, 2004, 32: 209-212.
- [18] Xu Q, Zhao J M, Cui Z X, et al. Moho offset beneath the central Bangong-Nujiang suture of Tibetan Plateau. *Chinese Sci. Bull.*, doi: 10.1007/s11434-009-0387-9.
- [19] 金胜, 魏文博, 叶高峰等. 班公—怒江构造带的电性结构特征——大地电磁探测结果. *地球物理学报*, 2009, 52(10): 2666-2675.
- Jin S, Wei W B, Ye G F, et al. The electrical structure of Banggong-Nujiang suture: results from magnetotelluric sounding detection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10):2666-2675.
- [20] 魏文博, 金胜, 叶高峰等. 藏北高原地壳及上地幔导电性结构—超宽频带大地电磁测深研究结果. *地球物理学报*, 2006, 49(4):1215-1225.
- Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. Conductivity structure of crust and upper mantle beneath the northern Tibetan Plateau: Results of superwide band magnetotelluric sounding. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4):1215-1225.
- [21] 吴章明, 曹忠权, 申屠炳明等. 西藏格林错断层带的基本特征. *地震地质*, 1992, 14(1):41-47.
- Wu Z M, Cao Z Q, Shen T B M, et al. Seismogenic Tectonics in the central Tibet. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1992, 14(1):41-47.
- [22] 杨攀新, 陈正位, 任金卫等. 西藏中部格仁错断裂带错嘎错—那拉错段细结构及活动性. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 1003-1008.
- Yang P X, Chen Z W, Ren J W, et al. structure and activity between Cuoga Co and Nala Co of Gyaring Co fault zone in center Tibet plateau. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2010, 30(5):1003-1008.
- [23] 杨攀新, 陈正位, 任金卫等. 西藏中部格仁错断裂带活动特征及分段研究. *地震学报*, 2011, 33(3):362-372.
- Yang P X, Chen Z W, Ren J W, et al. Activity and Segments of Gyaring Co Fault Zone in Center Tibet Plateau. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2011, 33(3):362-372.
- [24] Liu Z P, Tapponnier Y, Gaudemer, et al. Quantifying landscape differences across the Tibetan plateau: Implications for topographic relief evolution. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, F04018, doi:10.1029/2007JF000897.
- [25] Zhu D G, Meng X G, Zhao X T, et al. Evolution of an Ancient Large Lake in the Southeast of the Northern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(4): 982-992.
- [26] 任金卫, 沈军, 曹忠权等. 西藏东南部嘉黎断裂新知. *地震地质*, 2000, 22(4): 344-350.
- Ren J W, Shen J, Cao Z Q, et al. Quaternary faulting of Jiali fault southeast Tibetan plateau. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2000, 22(4):344-350.
- [27] 叶高峰, 金胜, 魏文博等. 西藏高原中南部地壳与上地幔电性结构. *地球科学*, 2007, 32(4):491-499.
- Ye G F, Jin S, Wei W B, et al. Research of conductive structure of crust and upper mantle beneath the South-Central Tibetan Plateau. *Earth Science* (in Chinese), 2007, 32(4):491-499.
- [28] 钱辉, 姜枚, Chen Wangping 等. 青藏高原吉隆—鲁谷(Hi-Climb)层析成像与印藏碰撞的消减作用. *地球物理学报*, 2007, 50(5):1427-1436.
- Qian H, Jiang M, Chen W P, et al. Tomography of Gyirong-Lugu profile (Hi-Climb) and the subduction of Indian-Tibet collision. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1427-1436.
- [29] Yin A, P A Kapp, et al. Significant late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 1999, 27(9): 787-790.
- [30] Zhang Z, Klempere S L. West-east variation in crustal thickness in northern Lhasa block, central Tibet, from deep seismic sounding data. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, B09403, doi:10.1029/2004 JB003139.
- [31] Lu Z W, Gao R, Li Q S, et al. Test of Deep Seismic Reflection profiling across central uplift of Qiangtang terrane in tibetan plateau. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2): 438-447.
- [32] 卢占武, 高锐, 李永铁等. 青藏高原羌塘盆地基底结构与南北向变化——基于一条 270 km 反射地震剖面的认识. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3319-3327.
- Lu Z W, Gao R, Li Y T, et al. Structure of basement and its N-S direction transformation in Qiangtang basin in Tibet: Discovered by a 270 km seismic reflection profile. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2011, 27(11):3319-3327.
- [33] 卢占武, 高锐, 薛爱民等. 羌塘盆地石油地震反射新剖面及基底构造浅析. *中国地质*, 2006, 33(2):286-290.
- Lu Z W, Gao R, Xue A M, et al. New seismic reflection profiles and basement structure in the Qiangtang basin, northern Tibet. *Geology in China* (in Chinese), 2006, 33(2):286-290.
- [34] 朱守彪, 蔡永恩, 石耀霖. 青藏高原及邻区现今地应变率场

- 的计算及其结果的地球动力学意义. *地球物理学报*, 2005, 48(5):1053-1061.
- Zhu S B, Cai Y E, Shi Y L. Computation of the present-day strain rate field of the Qinghai-Tibetan plateau and its geodynamic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(5):1053-1061.
- [35] 张智, 田小波. 青藏高原中部地壳和上地幔各向异性分析. *地球物理学报*, 2011, 54(11):2761-2768.
- Zhang Z, Tian X B. Anisotropy of the crust and upper mantle beneath the central Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(11):2761-2768.
- [36] 王刚, 伊海生, 刘顺等. 青藏高原腹地中新世从造山阶段向造高原阶段的转变及其动力学机制. *地球物理学报*, 2010, 53(6):1384-1398.
- Wang G, Yin H S, Liu S, et al. The deformation transfer from orogen stage to plateau stage in the central part of Tibetan Plateau during Miocene time and its tectonic mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6):1384-1398.

(本文编辑 刘少华)