

新生地震构造带——马边地震构造带最新构造变形样式的初步研究

韩竹军¹⁾, 何玉林^{2,3)}, 安艳芬¹⁾, 李传友¹⁾

1) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029; 2) 成都理工大学沉积地质研究院, 成都, 610059;
3) 四川省地震局工程地震研究院, 成都, 610041

内容提要:以雷波地区为例,通过野外地质地貌调查,结合探槽技术以及年代测试结果,获得了有关马边地震构造带最新构造变形样式及其性质的初步认识。研究表明:马边地震构造带内的雷波地区存在一条北东东向雷波断裂带,它断错的最新地层时代在40ka左右,属晚更新世活动断裂;在活动性质上,为一条以右旋走滑运动为主的断裂。北北西向玛瑙断裂在第四纪风化壳中存在两次突然位错事件,在剖面上的错距分别为0.5m和>0.7m;最新错动面产状陡立,存在水平左旋位错的构造地貌证据。马边地震构造带上北东东向断裂与北北西断裂不是一种从属关系,而是在现代构造应力场条件下两组呈共轭关系的剪切断裂,它们代表了马边地震构造带最新构造变形样式,具新生性。马边地震构造带的破坏性地震以中强地震为主,具有频度高、成带性差等特点,这符合共轭构造变形样式可能引起的地震活动特征。马边地震构造带位于青藏高原东缘南部,初步分析表明:一种受重力作用控制的中下地壳塑性流展模型,可以对该地区包括大凉山断裂带、安宁河断裂带以及鲜水河断裂带在内的断裂构造的活动习性做出较合理的解释。伴随着高原内部中下地壳物质持续向外流展,高原边界向外扩张形成新的边界,并表现为一条新生地震构造带。

关键词: 马边地震构造带;共轭关系;新生地震构造带;中下地壳塑性流展

在青藏高原东缘南部,从四川省峨边、马边至云南省盐津、大关一带(图1),自公元1216年以来先后发生过8次6级以上的强震,其中包括1216年马湖7级地震和1974年大关北7.1级地震。4.7级以上的破坏性地震更是频繁发生,1917年以来不到100年时间内有54次,2006年7月22日和8月29日在盐津还发生了2次5.1级地震。前人把该带称为马边地震带(国家地震局,1981)。1971年8月16日马边5.8级地震和1974年5月11日大关北7.1级地震,使该地震带受到重视(刘正荣等,1977;李坪,1979)。20世纪90年代,随着金沙江溪落渡等梯级电站的开发建设,该地震带的发震构造背景和断裂活动再次受到关注(曹忠权等,1993;韩德润,1993;张世民等,2005)。

然而,由于马边地震构造带位于地质历史上相对稳定的扬子地台内,与其他强震带相比,有着其自身的复杂性和特殊性,主要表现在:①不存在一条贯通的大型活动断裂带。张世民等(2005)认为的沿

着马边地震构造带存在一条NW向荣经-马边-盐津断裂构造带,也是由9条走向不一、规模较小的断裂组成的。②活动断裂调查主要围绕着基岩断裂展开的,卷入这些断裂活动、尤其是褶皱变形的最新地层也是中生代地层(韩德润,1993;张世民等,2005),未见断错第四纪地层的确凿证据。③认识分歧较大。如对于1974年大关北7.1级地震的发震构造,两支震后现场考察队分别得到了北西向和北东向的不同结论(刘正荣等,1977)。

上述马边地震构造带的特殊性可能也代表了一种不同于板内其它强震带的最新构造样式。虽然从地质研究的方法出发,对于这样一个不发育大型活动断裂带,同时又是流水侵蚀作用强烈、第四系很不发育的地区开展活动断裂和发震构造研究具有很强的挑战性,但此项工作对于充分认识板内地震构造的复杂性具有重要意义。

最新构造变形样式为研究现今地球动力学提供了最直接的证据。在青藏高原东缘南部存在一组南

注:本文为国家重点基础发展规划项目“活动地块边界带的动力过程与强震预测”(编号2004CB418401)资助的项目。

收稿日期:2007-11-09;改回日期:2008-09-12;责任编辑:郝梓国。

作者简介:韩竹军,男,1964年生。博士,研究员,主要从事活动构造及地震安全性评价等方面的研究。通讯地址:100029,北京市德外中国地震局地质研究所;电话:010-62009037;Email: zjhan0904@163.com。

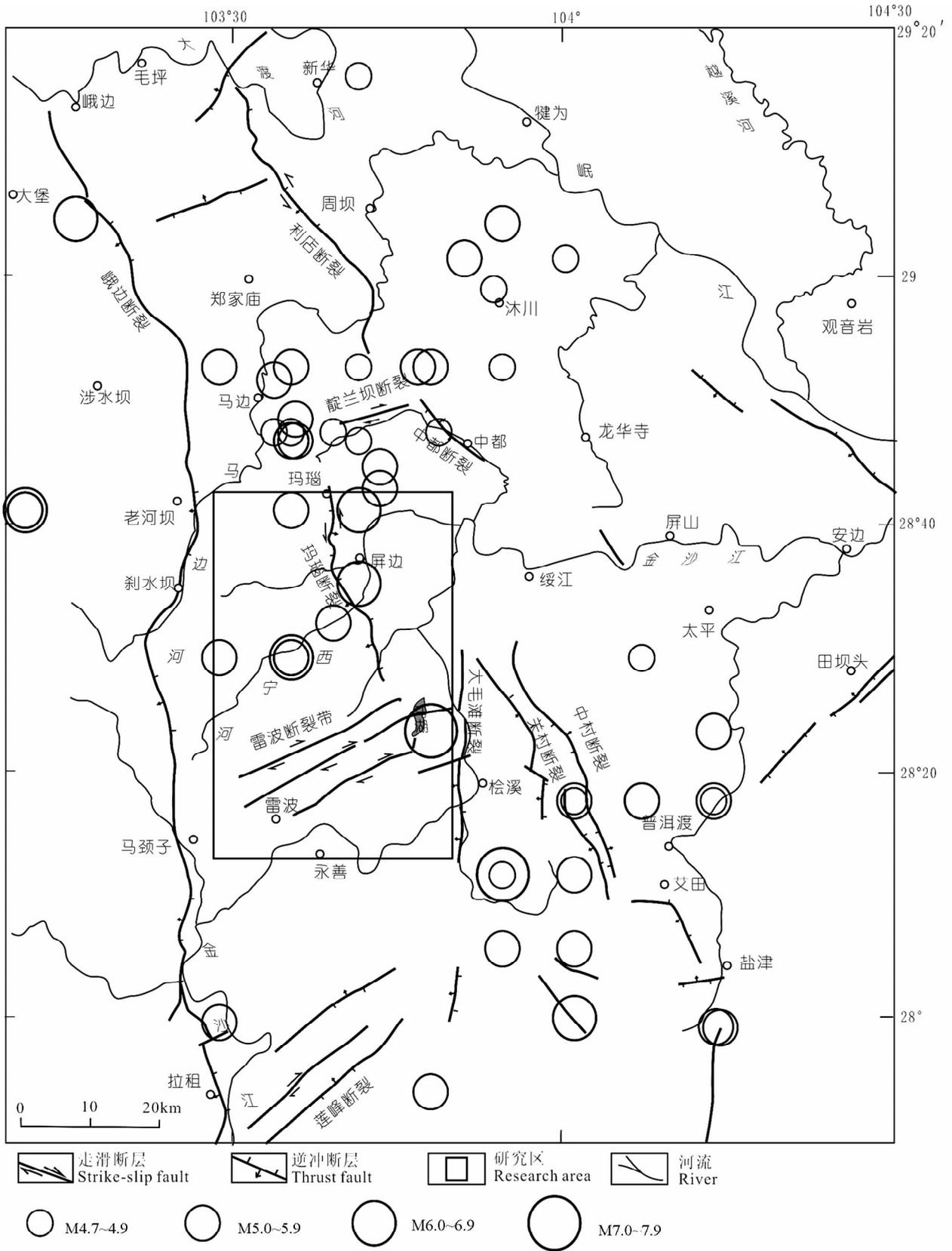


图 1 马边地震构造带破坏性地震(M>4.7)与主要断裂分布图

Fig. 1 Main faults and destructive earthquakes (M>4.7) in Mabian seismo-tectonic zone

北向-北北西向的大型活动断裂带,如安宁河断裂带、大凉山断裂带,它们在近地表都存在与鲜水河断

裂带相联系的地质地貌证据。马边地震构造带位于这一组构造带的最外侧,它们都是青藏高原东缘南部构造格局中的重要组成部分。对青藏高原东缘动力学过程的认识,有赖于对各个重要构造带的深入解剖。在此基础上,通过建立或验证统一的大陆动力学变形模式,可以为地震动力预测提供物理依据。

为此,在对马边地震构造带航片(共1222张)和ETM卫星影像(分辨率15m)资料的解译分析基础上,选择了马边地震构造带中间地段的雷波地区开展详细的调查研究,该区内主要发育北东东向雷波断裂带和北北西玛瑙断裂,并发生了1216年马湖7级地震(图2)。研究工作从晚第四纪时期断裂活动的地质地貌证据入手,选择典型地段实施探槽开挖,进行新年代学样品的采集和测试,获得了马边地区北东东向雷波断裂带和北北西玛瑙断裂晚第四纪活动的地质证据。结合现代构造应力场和GPS观察资料分析,初步建立了马边地震构造带最新构造样式,即由北东东向活动断裂和北北西向活动断裂组成了一幅共轭图像,它们代表了马边地震构造带最新构造变形样式,具有新生性。从新生地震构造带解释了马边地震构造带的地震活动特征。并且,进一步说明青藏高原东缘南部边界不是固定的,而是向外扩展的,其动力学背景很可能来自于中下地壳的物质流展。

1 北北东向雷波断裂带

1.1 构造地貌

雷波断裂带由3条近于平行的北东东向次级断裂组成,由北向南分别为北支断裂(F_1-1)、中支断裂(F_1-2)和南支断裂(F_1-3),它们构成一个总长约35km、宽约10km的北东东向断裂构造带(图2)。断裂沿线构造地貌表现清楚,以北支断裂(F_1-1)为例,水系和山脊同步右旋走滑(图3),最大错距300m左右。而且断层构造带两侧均为二叠纪玄武岩,排除了由于岩性分界而形成的地貌表现。同时,从地质构造位置上分析,线性地貌分布在“城墙岩-山楂岗”NE向背斜的SE翼,整个山势走向也是NE向,因此初步认为断裂带的构造地貌可能是内动力和外动力作用的综合因素造成,但以构造作用占主导。

考虑交通等因素,调查的重点放在雷波断裂带中支断裂(F_1-2)上(图4)。从航空影像上(图4a),可以看出断裂沿线构造地貌清楚,发育线状构造、尤其是垭口地貌。区内地形起伏剧烈,侵蚀作用很强,

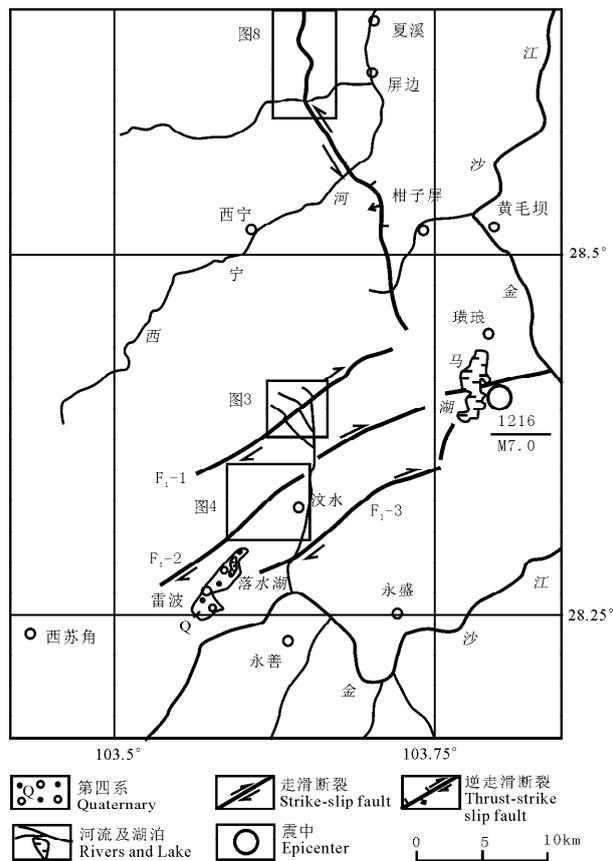


图2 雷波-马湖一带晚第四纪活动断裂分布图

Fig. 2 Active faults in late Quaternary at the vicinity of Leibo-Mabu

第四系分布局限,只在垭口相对平缓的地段残留有晚第四纪坡-洪积物(图4b)。

1.2 安家营盘露头剖面与剥离剖面

在沿断裂走向上的垭口露头地质剖面观察中,在汶水镇西北约1km的安家营盘垭口东北侧发现了直接断错第四纪地层的构造现象(图5)。断层构造带两侧均为二叠纪玄武岩。主断面倾向北西,倾角 69° 。沿主断面发育杂色断层泥条带,并可见清晰的水平擦痕。断层北西盘由单一的玄武岩组成,但断层东南盘下部为黄褐色、灰黑色玄武岩(层③),上部为含角砾砂粘土层(层①和层②),两者之间存在一个在颜色和岩性上突然变化的界面,说明上部地层并非下部玄武岩的风化壳,在成因上属于第四纪坡-洪积堆积物,与北西盘玄武岩之间呈断层接触关系。在第四纪地层下部采集光释光年代样品(TL-04),经中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试,距今 (135.7 ± 16.9) ka,属中更新世晚期的堆积。近地表第四纪松散层的时代应属晚更新世至全新世。

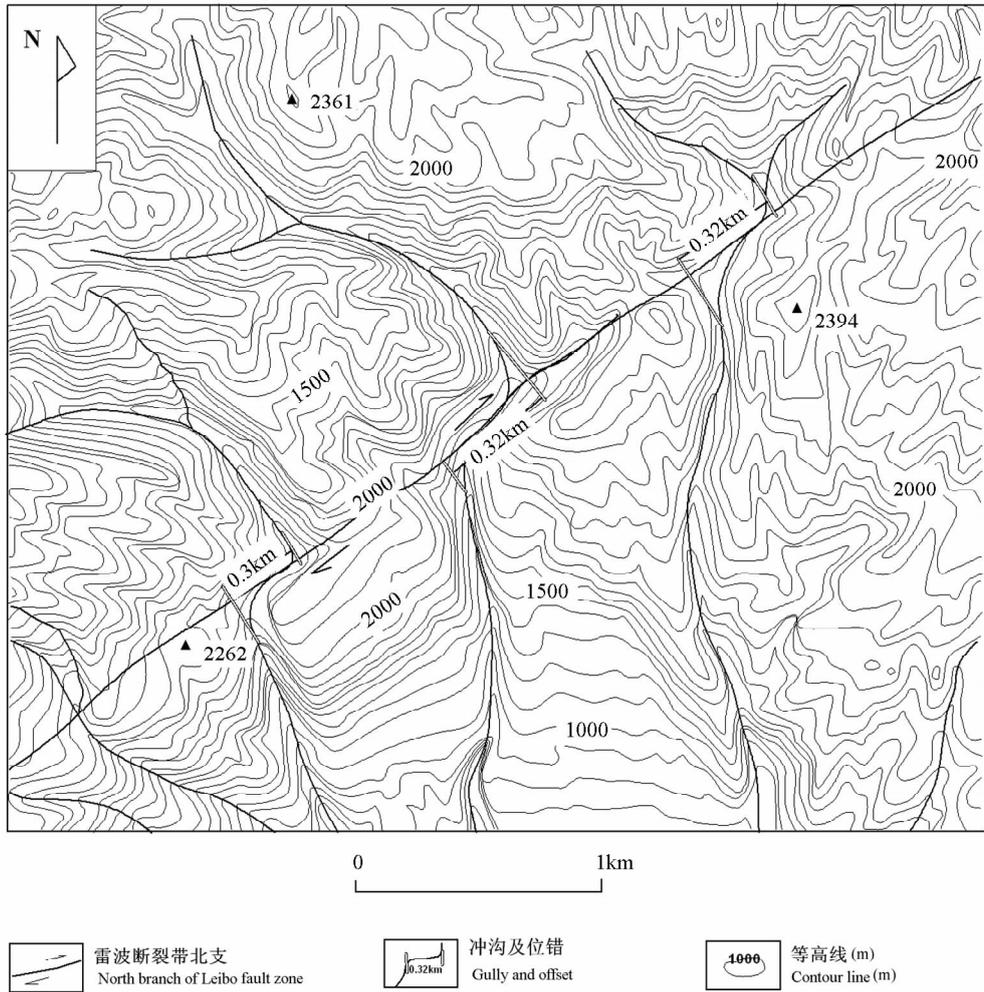


图 3 雷波断裂带北支断裂(F₁-1)水系同步右旋位错图

Fig. 3 Consistently dextral offset of gullies along the north branch (F₁-1) of Leibo fault zone

在安家营盘垭口另一侧,经过剥离,同样揭示了较好的断裂断错晚第四纪地层的构造现象(图 6,平面位置见图 4)。在该剖面上,可见两套第四纪松散地层被断层错断,其中上部地层②为灰黄色角砾石层,粘土质物质充填其中;下部地层③为棕红色含角砾粘土层,采集光释光年代样品(TL-01),测试结果为距今 (90.2 ± 9.8) ka,时代为晚更新世早期。这两套地层均属于坡-洪积堆积物,显示了一定成层性分布特征,与下伏的二叠纪玄武岩之间存在明显的分界面。沿断面平行分布着 3~5cm 厚的灰黄色含角砾粘土条带,很可能是地层②被卷入到断裂构造带中;地层③的棕红色含角砾粘土层则沿着断裂构造带呈楔状分布,在主断面的东南盘被向下拖曳。断面整体上显示出向东南方向突出的弧形,结合地层层位分析,可以看出断裂逆走滑力学性质。断面以倾向北西为主,与垭口东北侧揭示的主断面倾向以

及力学性质一致。

1.3 大路口探槽

在安家营盘向西南 500m,沿断裂垭口开挖了大路口探槽(图 7,平面位置见图 4),在探槽底部的玄武岩中可见两条浅绿色断层泥条带,产状稳定。在玄武岩之上的第四纪松散堆积层为含角砾砂粘土,根据颜色和角砾大小,可以粗略地分为 4 层(图 5)。在探槽剖面上可以清晰地看出,在地层⑤与地层④、二叠纪玄武岩之间存在构造混杂带,有错动迹象。在地层⑤中采集了两个光释光年代样品(TL-10)和(TL-11),经中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试,年代分别为 (38.9 ± 4.6) ka 和 (41.3 ± 4.2) ka(表 1),时代相当,采集两个年代样品的目的在于相互验证。上覆两套地层的 4 个光释光年代样品中,地层③的测试结果差别较大,地层②的两个样品 TL-14 和 TL-15 测试结果相近,分别为

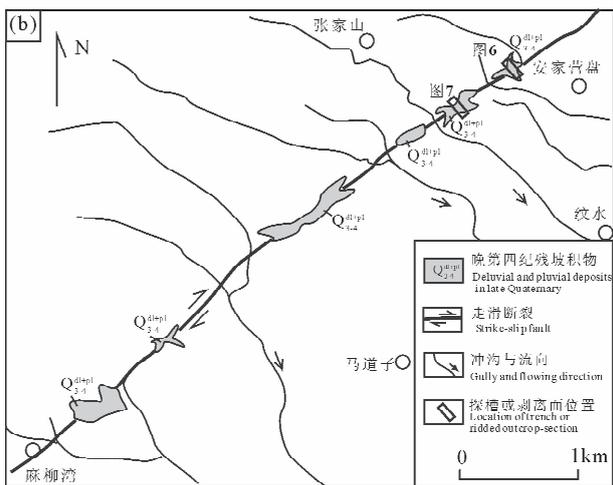
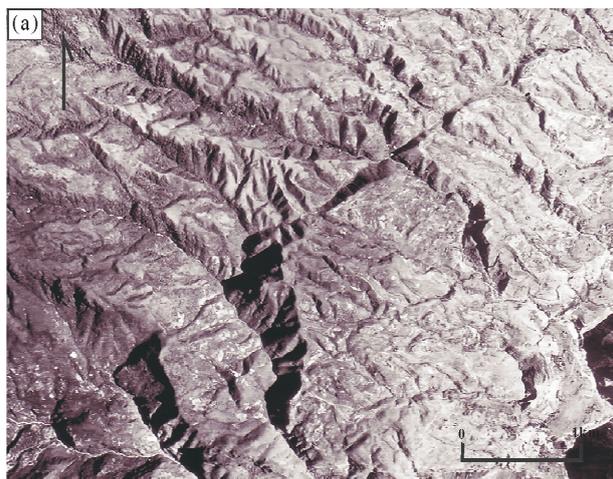


图4 雷波断裂带中支断裂(F₁₋₂)地质地貌综合图

Fig. 4 Composite map of geological and geomorphological features along the central branch (F₁₋₂) of Leibo fault zone

(a)—航空照片;(b)—断裂沿线第四系分布图 (含图6和图7的平面位置)

(a)—Aerial photograph; (b)—Distribution of interpreted fault and Quaternary (including the location of Fig. 6 and 7)

(1.1±0.1)ka 与(2.5±0.2)ka, 由于 TL-13 样品的测试结果甚至小于其上覆地层, 因此, 可以认为该样品的测试结果不可信。如果 TL-12 年代样品的测试结果可以代表地层③的堆积时代, 那么, 该断裂在距今(6.4±0.5)ka 以来没有发生过明显断错地表的构造活动。

2 北北西向玛瑙断裂

2.1 构造地貌

玛瑙断裂沿线构造地貌表现清楚, 发育一系列马鞍形垭口地貌, 负地形线状呈带分布, 在马边县柳木溪两侧比较典型(图8)。断裂在局部一些地段呈

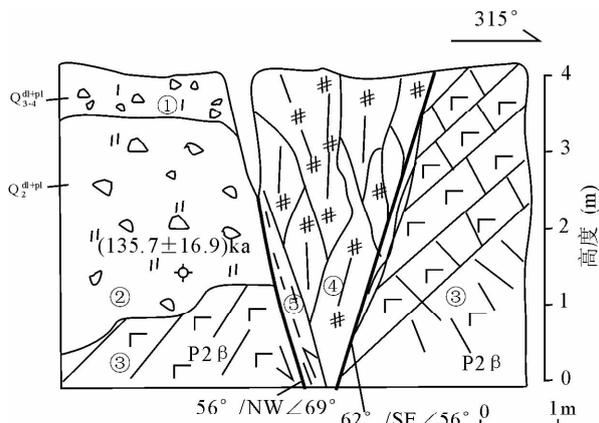


图5 汶水镇安家营盘西北垭口东北侧断裂剖面图
Fig. 5 Fault section at northeastern side of depression in the north-west of Anjiayanpan village, Wenshui Town

①—土黄色, 含角砾砂质粘土; ②—黄色, 含角砾砂粘土; ③—黄褐色、灰黑色玄武岩, 破碎严重; ④—断层破碎带; ⑤—灰绿色、浅紫色断层泥
①—Grey-yellow, Sandy clay with angular gravel; ②—Yellow, Sandy clay with angular gravel and pebble; ③—Yellow-brown and slight-black basalt, heavily fractured; ④—Fault zone; ⑤—Grey green and slight purple, fault clay

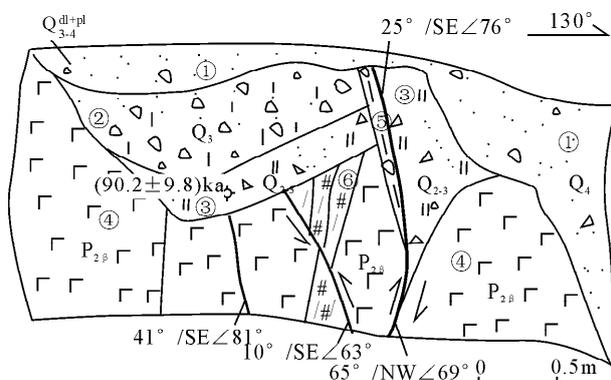


图6 汶水镇安家营盘西北垭口西南侧断裂剖面图
Fig. 6 Fault section at southwestern side of depression in the north-west of Anjiayanpan village, Wenshui Town

①—灰色、土灰色含砾石砂土层; ②—灰色砾石, 坡-洪积物; ③—棕红色含角砾粘土层, 坡-洪积物; ④—玄武岩; ⑤—灰黄色含角砾粘土层, 平行断面分布; ⑥—断裂碎裂带
①—Grey and dull grey sandy clay with clasts. Abundant plant materials; ②—Grey gravel, pluvial and deluvial deposits; ③—Brown-reddish clay with angular gravel, pluvial and deluvial deposits; ④—Basalt; ⑤—Grey-yellow clay with angular gravel, parallel to fault plane; ⑥—Fault zone

近南北走向, 整体上为北北西向(图1、2)。虽然断裂两侧地貌上以高山深谷为主, 人烟稀少, 但在断裂沿线形成村落、农田相对密集地带。这种独特的人

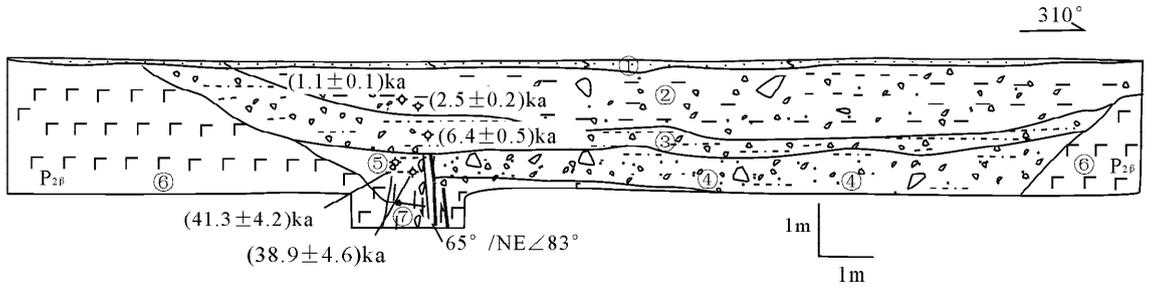


图 7 汶水镇大路口探槽西南壁剖面图

Fig. 7 Log of southwestern trench wall at Dalukou, Wenshui Town

- ①—土壤层;②—灰褐色含角砾砂粘土;③—灰色、灰黑色含碎石粘土;④—灰黄色含角砾粘土;⑤—灰白色含角砾粘土;⑥—玄武岩
- ①—Soil layer, severely disturbed by cultivation; ②—Grey-brown, sandy clay with angular gravel; ③—Grey to slight black, clay with fragments; ④—Grey yellow, clay with angular gravel; ⑤—Grey white clay with angular gravel; ⑥—Basalt

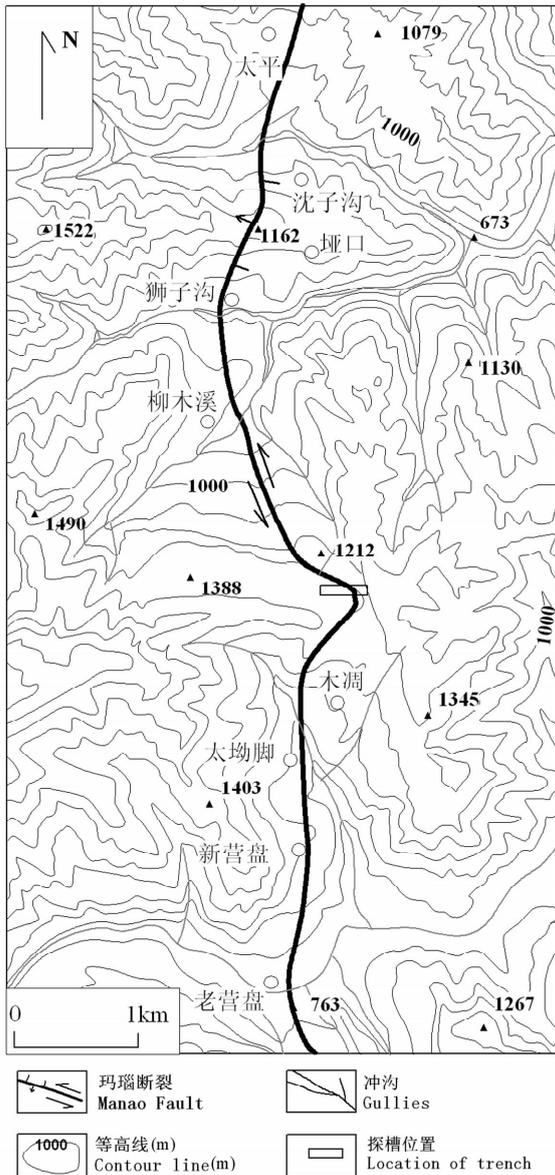


图 8 马边县柳木溪两侧玛瑙断裂构造地貌分布特征图
Fig. 8 Tectono-geomorphological features along Manao fault around LiumuXi, Mabian County

文景观与垭口地段的地形相对平缓有关,同时也说明断裂沿线岩体疏松,易于形成土壤层,以及断裂带贯通性好,便于地下水渗出。断裂造成冲沟与山脊表现出一定的左旋位错现象,如沈子沟、柳木溪及其附近的山脊等。但由于外动力作用强烈,导致同步水平位错不很明显。断裂两侧的层状地貌面存在 300~500m 左右的高差,从构造地貌学分析,可以初步看出玛瑙断裂为一条具有左旋走滑分量的断裂构造。

2.2 木凋探槽

在屏山县屏边乡木凋村与马边县柳木溪村之间的分水岭垭口地段,布设了一条 1.5m 宽、1.5m 深、长 15m 的探槽(图 9)。

该探槽南北壁均揭示清楚的断裂构造,图 9 所示的为探槽北壁剖面。在该剖面东侧可见较新鲜的侏罗纪砂岩⑩,呈灰黑色。侏罗纪基岩上出露了较完整的风化壳,在颜色及风化程度上呈现渐变的特点,但整体上可以分为两套,下部为暗紫、紫黑色风化层⑧,分布在细砂岩顶部;上部为紫红色风化层⑦。两套风化层在岩性上均为砂质粘土。在剖面的东半部可以清晰地看出两个断层(F₁和F₂),两个断层面上均分布着一层薄的灰黄色粘土层,应属断层泥条带。

断层 F₁ 呈现出略向东凸出的弧形,产状为 336°/SW∠40°~61°,该断层面上盘分布着两套地层,下部为前述的暗紫、紫黑色风化层⑧,上部为紫红色风化层⑦,属于侏罗系风化壳的正常序列;断层下盘则为单一的紫红色风化层⑦。在探槽剖面上的断层 F₁ 下半段,属于风化壳下部的暗紫、紫黑色粉砂粘土层⑧,已经沿断层 F₁ 逆冲到属于风化壳上部的紫红色粉砂质粘土⑦之上。以层⑦和层⑧之间的界线为标志,可以看出:沿断层 F₁ 的断距为 0.5m。

表1 大路口探槽光释光测量数据一览表*

Table 1 Dating results of OSL samples in Dalukou trench

送样号	实验号	探槽中 地层序号	测量技术	等效剂量 (Gy)	α 计数率 (cpks)	K(%)	实测含水量	剂量率 (Gy/ka)	年龄(ka)
TL-10	LEDL 06-531	⑤	细颗粒石英 OSL(SMAR)	82.9±7.3	9.72±0.26	0.93	44%	2.13	38.9±4.6
TL-11	LEDL 06-532	⑤	细颗粒石英 OSL(SMAR)	80.6±5.1	7.97±0.24	1.06	45%	1.95	41.3±4.2
TL-12	LEDL 06-533	③	细颗粒石英 OSL(SMAR)	11.6±0.1	7.46±0.23	0.98	37%	1.82	6.4±0.5
TL-13	LEDL 06-534	③	细颗粒石英 OSL(SMAR)	2.7±0.1	7.4±0.24	1.09	27%	2.23	1.2±0.1
TL-14	LEDL 06-535	②	细颗粒石英 OSL(SMAR)	2.3±0.1	7.76±0.18	0.91	28%	2.16	1.1±0.1
TL-15	LEDL 06-536	②	细颗粒石英 OSL(SMAR)	4.7±0.1	5.57±0.16	0.76	20%	1.9	2.5±0.2

* 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试。

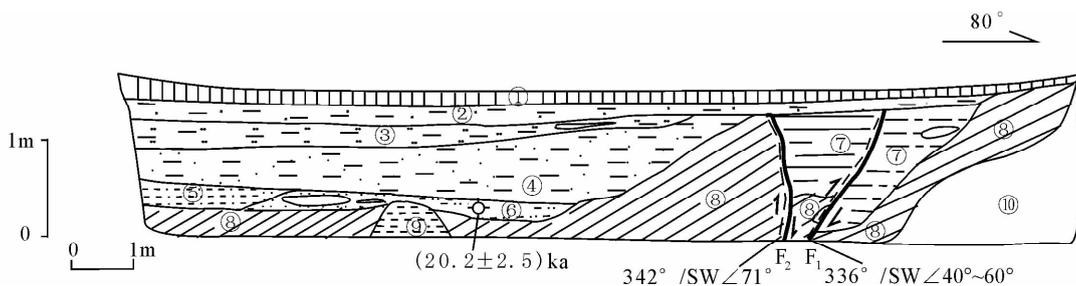


图9 屏边乡木洞探槽北壁剖面图

Fig. 9 Log of northern trench wall at Mudiao, Pingbian Town

①—灰黑色砂土层,偶含小砾石,表层植被;②—棕黄色、棕红色砂质粘土;③—浅黄色、锈黄色粘土;④—棕黄、棕灰色砂质粘土;⑤—棕红色粘土层,顶部薄层桔黄色;⑥—灰白色粘土层,含透镜体结构;⑦—紫红色风化层,岩性上表现为砂质粘土;⑧—细砂岩顶部的暗紫、紫黑色风化层,岩性上表现为砂质粘土;⑨—砖红色含砾粉砂质粘土;⑩—基岩

①—Grey-black sandy clay, rare clasts. Severely disturbed by cultivation; ②—Brown-yellow and reddish sandy clay; ③—Slightly yellow and ferruginous clay; ④—Brown yellow and brown grey sandy clay; ⑤—Brown-reddish clay. A thin, Saffron deposits at the top; ⑥—Grey white clay with lens texture; ⑦—Purple reddish weathering crust, sandy clay in lithology; ⑧—Dark purple to purple black weathering crust at the top of fine-sandstone, sandy clay in lithology; ⑨—Brick red, fine-sandy clay with gravel; ⑩—Basement rock

断层 F_2 呈向东凸出的弧形。在探槽剖面上,断层 F_2 的下部倾向南西,产状为 $342^\circ/\text{SW}\angle 71^\circ$,但上部倾向已变为东北方向。沿着断层 F_2 ,属于风化壳下部的暗紫、紫黑色粉砂粘土层⑧与风化壳上部的紫红色粉砂质粘土⑦之间呈断层接触关系。考虑断层 F_2 两侧层⑧顶面的高程差,可以推断沿断层 F_2 的断距大于 0.7m。但这种断距也可能为一种视断距,从该断面近于直立的产状说明该断裂可能存在较明显的水平位错。

在探槽的中西部可以分辨出 6 套第四纪松散堆积层,其中顶部为灰黑色砂土层,偶含小砾石,表层植被①;向下分别为棕红色砂质粘土②、浅黄色及锈黄色粘土③、棕灰色砂质粘土④、棕红色粘土层⑤以

及含透镜体砂层的灰白色粘土层⑥,在这些松散堆积层均未见断层存在的迹象。在层⑥中采集光释光年代样品(TL-07),经中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试,距今年代为 $(20.2 \pm 2.5)\text{ka}$ 。

上述的探槽剖面观察结果表明:虽然玛瑙断裂在距今 $(20.2 \pm 2.5)\text{ka}$ 以来的地层中没有任何构造扰动的迹象,但它的构造活动已经直接断错了基岩风化壳。由于目前的测年手段还很难获得有关风化壳的绝对年代数据,可以从风化壳形成过程和物理性质等方面对它的形成时代做简单的推论。前已述及,在岩性特征,两套风化壳均属于松软的砂质粘土,近地表分布。沿着马边地震构造带外动力流水

侵蚀作用强烈,一般地段很难形成一定序列的风化壳,只有在一些垭口等相对平缓、低洼的地段才有可能出现。上述风化壳应该出现在垭口地貌形成之后。根据马边地震构造带新生代抬升过程的年代学研究,在 20~3Ma 的相当长时间内,该区处于一个相对稳定的阶段,即较广泛的剥蚀夷平阶段。只是在距今 2.5~3Ma 发生过快速抬升,玛瑙断裂两侧 300~500m 左右的高差应该为 2.5~3Ma 以来断裂活动引起的,相应地,沿断裂出现的一系列垭口地貌也是第四纪(2.5~3Ma)以来内外动力共同作用的产物。垭口出现后,由于其相对较为特殊的地形条件,使得这些地段可以形成的风化壳,并得到保存,它至少 2 次被突然断错则反映了玛瑙断裂在第四纪中晚期的构造活动习性。

3 马边地震构造带最新构造变形样式及其新生性讨论

通过上述野外地质现象和构造地貌分析工作,并结合室内年代测试结果,可以看出沿着马边地震构造带,在雷波地区存在两组在第四纪时期有明显活动的断裂构造,一组为北东东向,一组为北北西向,它们在空间上呈现出近于正交的关系。

在马边地震构造带还存在其它走向的断裂构造,如北西走向的中都断裂、中村断裂和关村断裂;近南北走向的峨边断裂等,沿着这些断裂在航、卫片影像上没有发现明显的构造地貌特征,也未见确凿的断错第四纪地层的地质现象。

3.1 北东东向断裂

沿着北东东向雷波断裂带,在地质露头、剥离及探槽剖面上,均可见断错第四纪松散堆积层的现象,经中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室测试,断错的最新地层时代为 (38.9 ± 4.6) ka 和 (41.3 ± 4.2) ka,属晚更新世活动断裂。在活动性质上,根据断裂沿线冲沟和山脊同步右旋位错,不存在明显的陡崖,以垭口或马鞍形为主的构造地貌现象,并结合断面上发育水平擦痕的特点,可以看出雷波断裂带是一条以右旋走滑运动为主的断裂。

在断裂形成时代方面,沿着断裂走向的追索可以看出:断裂两侧的基岩岩性完全一致,对前新生地地层的分布没有任何控制作用,这说明该断裂不存在长期构造演化历史。沿断裂也不发育古近纪和新近纪地层,断裂断错的第四纪地层直接覆盖在前新生代地层之上。由此可见,雷波断裂带很可能只是在第四纪时期才开始出现,即为一条第四纪新生断

裂带。由于断层通过之处大多侵蚀作用强烈,少有第四纪松散堆积,断裂的活动性参数的获取目前来看还是一个很有挑战性的难题。

3.2 北东东向断裂与北北西向断裂的相互关系

沿着马边地震构造带,北西和北北西向断裂一直是最新构造变形样式研究中关注的重点(徐锡伟等,2005)。对于北东东向构造,张世民等(2005)把雷波一带存在的 3 条线性构造,统称为雷波断裂束,并认为北东东向断裂束是一种“横向撕裂断裂”,属于北西向荣经-马边-盐津构造带差异性逆冲活动引起的一种次生断裂,北东东向断裂上右旋走滑及其大小受到其两侧块体缩短量的控制。

张世民等(2005)认为荣经-马边-盐津构造带断裂活动以逆冲为主,断裂两侧的地层存在较强的褶皱变形,活动强度具有南强北弱的特点。根据这种认识,对于位于北西向逆冲构造带西侧的北东东向雷波断裂而言,其南盘的缩短量应该大于北盘,该断裂带应该表现为左旋走滑,但实际情况是沿着雷波断裂带存在清楚的右旋走滑证据,因此,不能把雷波断裂带看作为北西向荣经-马边-盐津构造带差异性逆冲活动引起的一种次生断裂。

如果把北西向荣经-马边-盐津逆冲构造带作为马边地震构造带最新构造变形样式,则要求一种以南西-北东向为主的挤压构造应力场,这也很难与该地区现今构造应力场和块体运动方向的已有研究结果相吻合。马边地震构造带现代构造应力场的水平主压应力轴优势方向为北西西-南东东(成尔林,1981;谢富仁等,1993;崔效锋等,2006),块体运动也为北西西向(Zhang et al.,2004)。对于 1974 年大关北 7.4 级地震序列,无论是主震还是较大余震,均为直立断层面走向滑动类型。主压应力 P 轴北西西向,主张应力 T 轴北北东向,二应力轴基本呈水平(刁桂岑等,1995),说明马边地震构造带以走滑构造应力环境为主。荣经-马边-盐津逆冲构造带中的一些主要断裂如利店断裂、中都断裂、中村断裂和关村断裂等走向为 $310^{\circ} \sim 320^{\circ}$,与水平主压应力轴的交角小于 45° ,在现代构造应力场中应该具有一定的拉张性。因此,沿着这些断裂表现出的逆冲断裂活动和褶皱变形很可能不是现代构造运动的产物,事实上,参与上述断裂活动及褶皱变形中的最年轻地层为侏罗系-白垩系(J-K)。玛瑙断裂与荣经-马边-盐津逆冲构造带中一些主要断裂的重要差别有两条:一是走向北北西;二是斜切了北西向褶皱,具有一定的新生性(曹忠权等,1993)。

综上所述,马边地震构造带上北东东向断裂与北北西断裂应该不是一种从属关系,而是在现代构造应力场条件下两组呈正交关系的断裂。在运动性质上,北北西向玛瑙断裂和北东东向雷波断裂带(如在安家营盘剖面上,见图5)均表现出一定的逆冲分量,可能与主压应力P轴和主张应力T轴不完全在水平面上有关,但两组断裂在力学性质上均以剪切作用为主,它们可以看作为共轭断裂,代表了马边地震构造带最新构造变形样式的基本要素,而且具新生性。

3.3 地震活动与发震构造

前已述及,1917年以来不到100年时间内马边地震构造带发生了 $M > 4.7$ 级地震54次,其中有一次 $M \geq 7$ 级地震,即1974年5月11日大关北7.1级地震,其余均为 $7 > M \geq 4.7$ 的中强地震。这些地震震中在空间分布上条带性不典型(图1),分布在一个宽100、长150km的范围内,面状分布现象明显。这些现象实际上也反映了马边地震构造带共轭状活动断裂变形样式可能引起的地震活动特征。

张文佑(1984)曾经对断裂的孕育和发展进行过详细的论述。在断裂孕育阶段(塑性形变阶段),受应力作用的岩石试样出现呈共轭交叉网状分布的吕德氏纹;在断裂发展阶段(脆性形变阶段)的早期,随着应力继续增大,在吕德氏纹的基础上形成一对共轭的交叉剪切面;在脆性形变阶段的后期,应力的再增大导致贯通的锯齿状断裂的形成。从岩石模拟试验中可以看出,在断裂脆性形变的早期,岩石变形呈面状分布在一对共轭状断裂系统中,两组断裂构造的相互制约,使得它们规模均较小,不具贯通性,在某一局部地段难以集中很高的能量,因而以中强地震活动为主。丁国瑜等(1979)已经指出:在两组共轭断裂相互交汇的地段易于发生破坏性地震。众多的共轭交汇点使得地震频度较高,并且成带性差。

对于1216年马湖7级地震,依据中国地震目录,震中位置为(103.80°, 28.40°)。尽管历史文献资料确定的历史地震,无论在震级大小以及震中位置,都存在一定的误差,但仔细分析1216年马湖7级地震的震中位置与北东东向雷波断裂带、北北西玛瑙断裂在空间上的相互关系(图2),可以看出:此次地震大致发生在这两条共轭断裂相互交汇的地段。因此,可以认为在晚第四纪表现出明显构造活动的雷波断裂带和玛瑙断裂,以北东东向雷波断裂带活动为主,初步推测该组断裂为发震构造,北北西向玛瑙断裂规模大,活动性强,作为孕震构造。在两

组共轭断裂相交的部位引起应力集中,从而引发地震的发生。总之,它们的共轭组合关系构成了1216年马湖7级地震发生的构造条件。

3.4 马边地震构造带形成的动力学背景分析

马边地震构造带位于青藏高原东缘南部,该带最新构造变形样式的新生性,也说明了青藏高原东缘南部边界很可能不是固定的,而是向外扩展的。由于在近地表并没有大型断裂带把马边地震构造带与青藏高原内部或东缘南部边界带上的其它大型断裂带相联系,那么,是一种什么样的动力学机制制约着青藏高原东缘南部最外侧马边地震构造带的构造活动呢?由于在青藏高原东缘南部还存在安宁河断裂带、大凉山断裂带以及鲜水河断裂带,一个合理的动力学模型也需要对这些构造带现今活动特征做出解释。

地壳加厚导致重力异常,在重力的均衡调整过程,将引起地壳物质的重新分布或流展,在地壳中造成了横向作用力(周玖等,1980;Goodacre et al., 1980;Barrows et al., 1981)。对大陆中下地壳高导软弱层的认识,进一步证实了这种物质流展的可能性。为此,Clark等(2000)假设在青藏高原东缘中下地壳存在一个15km厚的粘性流动层(图10a),以速度“u”(与粘滞系数、横向压力差以及深度相关的一个变量)向高原外流展。通过给定不同的粘滞系数,成功地模拟了青藏高原东缘两种不同类型的边缘地貌形态。一种是地形有显著落差的边缘(粘滞系数为 10^{21} Pa·s),如高原东缘中部的龙门山与四川盆地之间,这种边缘刚性较强,从高原内部向边缘的中下地壳塑性流展受到阻挡;一种是不存在明显地形落差的边缘(粘滞系数 10^{18} Pa·s),如高原东缘南部从理塘、安宁河、大凉山至马边、宜宾一线以及高原东南缘从中甸、大理至普洱一线,这种边缘强度较弱,高原内部中下地壳流展距离可达1000~2000km(图10b)。根据这种动力学模型,可以推断在青藏高原东缘中部和南部之间,中下地壳向外流展的速度和距离存在很大的差异性,导致大型走滑断裂带的发育,由此不难理解鲜水河断裂带上强烈的左旋走滑运动。越过鲜水河断裂带后,面向川南、滇东南和滇西南相对软弱的边缘地带,中下地壳的物质流展通道变得开阔,差异性活动减弱,断裂活动强度也有所下降。伴随着青藏高原的隆升,高原内部中下地壳不断向外流展,沿着地壳强度相对较低的高原边界依次向外扩展,即高原边界不是固定的,可以是新生的;同时,由于差异性活动较弱,不易发

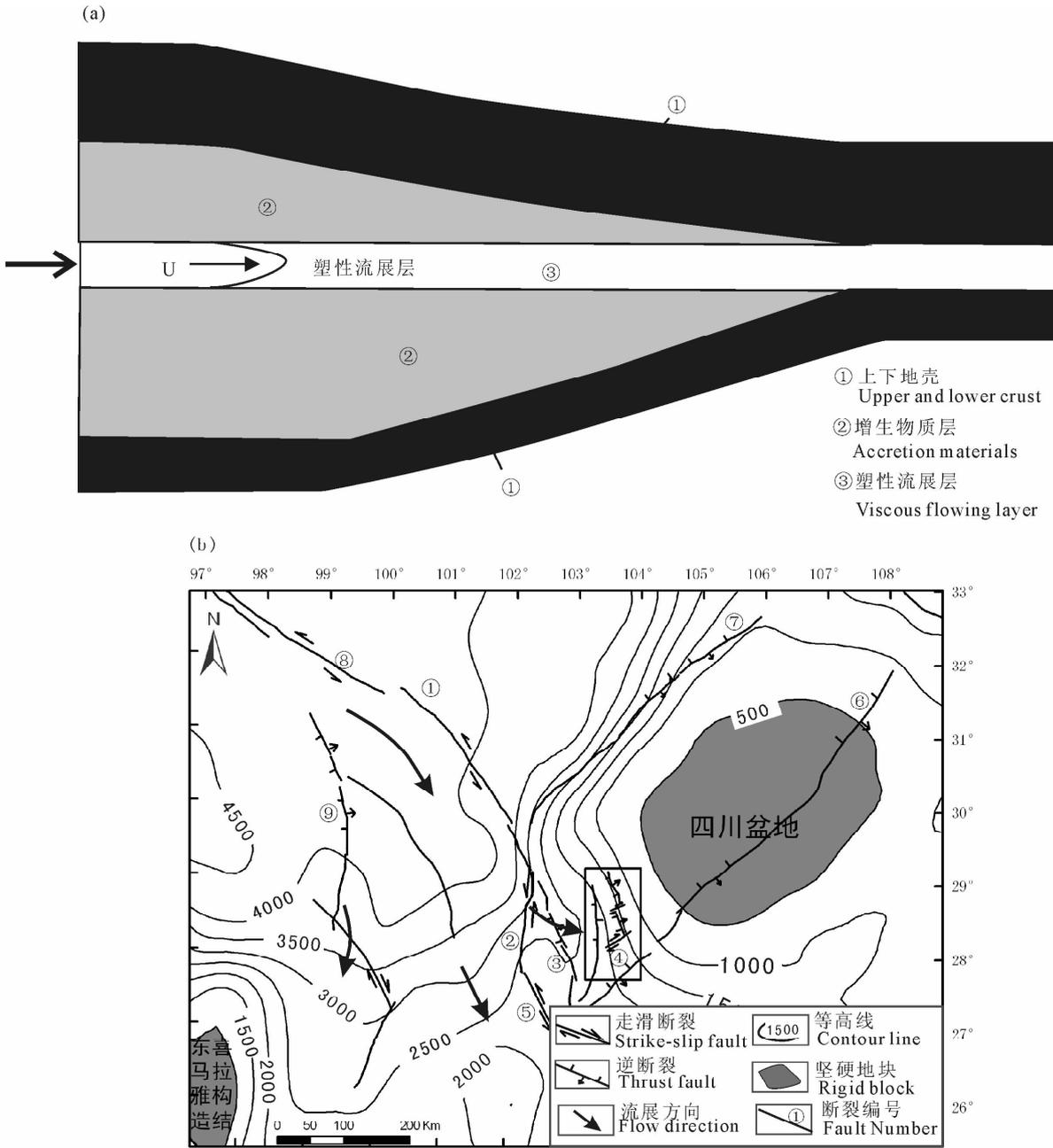


图 10 青藏高原东南缘地壳动力学模型图(据 Clark 等,2000)

Fig. 10 Crust dynamic model at eastern margin of Tibetan Plateau (modified from Clark et al. , 2000)

(a)强度较低的高原边缘现今地壳模型。塑性流展层(白色表示)位于中下地壳,在流展过程中,厚度不变,多余物质增生到该层的上部 and 下部(灰色表示),从而使地壳增厚;(b)一经过平滑处理的青藏高原东南缘等高线与主要构造带关系图。高原内部中下地壳物质通过相对软弱的地段向外流展。等高线信息通过运用 arcgis 软件对 CGIAR-CSI(the CGIAR consortium for spatial information)中 90m 分辨率地形数据进行处理获得。断裂名称:①—鲜水河断裂带;②—安宁河断裂带;③—大凉山断裂带;④—马边地震构造带;⑤—则木河断裂带;⑥—华莹山断裂带;⑦—龙门山断裂带;⑧—甘孜-玉树断裂带;⑨—金沙江断裂带

(a)—Modern crust dynamic model at plateau margin with low viscosity. Viscous flowing layer (in white color) is located at the middle to lower crust. Its thickness is kept the same during flowing and additional materials are accreted to the upper and lower crust to make the crust thicker; (b)—Smoothened contour lines and their relationship with main fault zones. The materials at the middle to lower crust in the plateau interiors are flowing out through weak forland. Fault or tectonic zone name: ①—Xianshuihe fault zone; ②—Anninghe fault zone; ③—Daliangshan fault zone; ④—Mabian seismotectonic zone; ⑤—Zemuhe fault zone; ⑥—Huayingshan fault zone; ⑦—Longmenshan fault zone; ⑧—Ganzi-Yushu fault zone; ⑨—Jinshajiang fault zone

育大型断裂带,而以面状、整体性变形为主,在构造活动中难以积累发生大震所需要的能量,地震活动以中强地震为主,具有弥散状分布的特点,如马边地震构造带、普洱-思茅地震带等。

综上所述,马边地震构造带最新构造变形样式及其地震活动特征,支持一种重力作用控制的中下地壳塑性流展模型。发生在中下地壳的塑性流展为马边地震构造带最新构造活动提供了动力来源,因此,在近地表可以不需要大型断裂带把该地震带与青藏高原边缘或内部相连。由于地壳物质调整主要发生在中下地壳,地壳增厚以及地表抬升不是通过近地表的地壳缩短来完成的(Royden等,1997),在马边地震构造带最新构造样式可以不出现反映地壳缩短的大型逆冲断裂或活动褶皱。

4 结论

通过对马边地震构造带上雷波地区地震地质调查和分析,可以获得如下初步结论:

(1)雷波地区存在一条北东东向雷波断裂带,它断错的最新地层时代在40ka左右,属晚更新世活动断裂,距今(6.4±0.5)ka以来没有发生过明显断错地表的构造活动;在活动性质上,为一条以右旋走滑运动为主的断裂;在断裂形成时代方面,很可能只是在第四纪时期才开始出现,即为一条第四纪新生断裂带。

(2)北北西向玛瑙断裂在第四纪风化壳中存在2次突然位错事件,从剖面上可以看出:2次错距分别为0.5m和>0.7m;最新错动面产状陡立,存在水平左旋位错的构造地貌证据;在距今(20.2±2.5)ka以来的地层中没有构造扰动的迹象。

(3)马边地震构造带上北东东向断裂与北北西断裂不是一种从属关系,而是在现代构造应力场条件下两组呈共轭关系的剪切断裂,它们代表了马边地震构造带最新构造变形样式,具有新生性。作为一条新生地震构造带,马边地震构造带的破坏性地震以中强地震为主,具有频度高、成带性差等特点。1216年马湖7级地震发生在两组呈共轭关系的活动断裂相互交汇的地段。

(4)马边地震构造带位于青藏高原东缘南部,初步分析表明:一种受重力作用控制的中下地壳塑性流展模型,可以对该地区包括大凉山断裂带、安宁河断裂带以及鲜水河断裂带在内的活动习性做出较合理的解释。伴随着高原内部中下地壳物质持续向外

流展,在地壳强度较低的地段,高原边界依次向外扩张,形成新的边界,并表现为一条新生地震构造带。

致谢: 特别感谢项目首席科学家张培震研究员在本文写作中提供的建设性意见,同时感谢他和课题负责人徐锡伟研究员在项目执行中给予的指导和帮助,感谢冉勇康研究员给予的支持!

参 考 文 献

- 曹忠权,汪一鹏,殷秀华等. 1993. 马边地震构造带发震构造背景的初步研究. 中国地震, 9(4): 373~383.
- 成尔林. 1981. 四川及其邻区现代构造应力场和现代构造运动特征. 地震学报, 3(3): 231~241.
- 崔效锋,谢富仁,张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义. 地震学报, 28(5): 451~461.
- 刁桂岑,王绍晋,龙晓帆等. 1995. 永善-大关7.1级地震序列表源区应力场分析. 华北地震科学, 13(1): 28~33.
- 丁国瑜,李永善. 1979. 我国地震活动与地壳现代破裂网络. 地质学报, 53(1): 22~34.
- 国家地震局. 1981. 中国地震烈度区划工作报告. 北京:地震出版社, 378~383.
- 韩德润. 1993. 马边-永善地震带构造形式及地震特征. 地震地质, 15(3): 253~260.
- 李珩. 1979. 四川马边地震——一个震群型发震构造的实例. 川滇强震区地震地质调查汇编, 北京:地震出版社: 132~143.
- 刘正荣,雷素华,胡素华. 1977. 1974年5月11日云南永善-大关地震. 地球物理学报, 20(2): 110~114.
- 谢富仁,祝忠忠,梁海庆,等. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征. 地震学报, 15(4): 407~417.
- 徐锡伟,张培震,闻学泽,等. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 27(3): 446~461.
- 张世民,聂高众,刘旭东,等. 2005. 荣经-马边-盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征. 地震地质, 27(2): 221~233.
- 张文佑. 1984. 断块构造导论. 北京:石油工业出版社, 97~95.
- 周玖,黄修武. 1980. 在重力作用下的我国西南地区地壳物质流. 地震地质, 2(4): 1~10.
- Barrows L, Langer C J. 1981. Gravitational potential as a source of earthquake energy. Tectonophysics, 76: 237~253.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. Geology, 28(8): 703~706.
- Goodacre A K, Haegawa, H S. 1980. Gravitationally induced stresses at structural boundaries. Can. J. Earth Sci., 17: 1286~1291.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. Science, 276(5313): 788~790.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. Geology, 32(9): 809~812.

A New Seismotectonic Belt: Features of the Latest Structural Deformation Style in the Mabian Seismotectonic Zone

HAN Zhujun¹⁾, HE Yulin^{2,3)}, AN Yanfen¹⁾, LI Chuanyou¹⁾

1) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029*; 2) *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059*; 3) *Institute of Engineering Seismology, Sichuan Earthquake Administration, Chengdu, 610041*

Abstract

By using the Leibo area as an example, a basic understanding of the latest deformation style in the Mabian seismic tectonic belt has been obtained, based on the geologic and geomorphologic survey, and combined with trench technology and dating. The research results demonstrate the existence of an NEE-trending Leibo fault zone in the Leibo area. A faulted stratum age is about 40 ka. The fault is a dextral slip and active in late-pleistocene. The NNW-trending Manao fault exposes the Quaternary weathering crust, from which two displacement events can be recognized. Their displacement offsets are 0.5m and > 0.7 m in sections respectively. A steep plane of the offset provides the evidence of horizontal sinistral slip. The NEE- and NNW- trending faults in the Mabian seismic zone belong to one pair of conjugate shear faults in the modern tectonic stress-field, representing the latest deformation style of the Mabian seismotectonic zone. The disastrous earthquakes in the Mabian seismotectonic zone are characterized by moderate magnitudes, high frequency and weak zoning, and these are in agreement with features of earthquakes caused by conjugate tectonic frame. The Mabian seismotectonic zone is situated at the southern section of the eastern margin of the Tibetan Plateau. The research further shows that a ductile flow model in the middle-lower crust, controlled by gravity, can give a reasonable explanation about the active habits of faults, including the Dalianshan fault zone, Anninghe fault zone and Xianshuihe fault zone. With a continuous flow of the middle-lower crustal material inside the Tibetan Plateau, the Plateau boundary spread gradually outwards and a new boundary formed. Thus the boundary represents a newly-formed seismotectonic belt.

Key words: Mabian seismotectonic zone; conjugate relationship; new seismotectonic belt; ductile flow in middle-lower crust

