

王 萍,付碧宏,张 斌等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系. 地球物理学报, 2009, 52(1): 131~139

Wang P, Fu B H, Zhang B, et al. Relationships between surface ruptures and lithologic characteristics of the Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(1): 131~139

## 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系

王 萍<sup>1</sup>, 付碧宏<sup>2</sup>, 张 斌<sup>1</sup>, 孔 屏<sup>2</sup>, 王 刚<sup>3</sup>

1 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

3 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

**摘 要** 2008 年汶川 8.0 级地震沿龙门山断裂带内的映秀—北川断裂和灌县—安县断裂分别形成约 230 km 和 70 km 的地表破裂带. 震后地质考察研究表明, 伴随地震断层出露地表的滑动面大多沿炭质泥岩和煤层发育. 与 1:5 万区域地质图进行对照, 显示映秀—北川地震破裂带的西南段(虹口—清平段)和灌县—安县地震地表破裂带的展布与龙门山地区上三叠统须家河组煤系地层的出露范围相一致. 龙门山地区的上三叠统须家河组地层中的薄煤层、炭质泥岩层以及志留系、寒武系的炭质页岩层是易于产生滑动的柔性岩层, 易形成滑脱面或成岩片夹于断层带中. 汶川地震产生的复杂地表破裂带是龙门山逆冲推覆构造带沿地表构造层中夹有煤层等柔性岩层的断层产生 B 型滑动的结果.

**关键词** 汶川 8.0 级地震, 地表破裂带, 断层滑动面, 上三叠统须家河组, 软弱地层

**文章编号** 0001-5733(2009)01-0131-09

**中图分类号** P315

**收稿日期** 2008-10-29, 2008-11-12 收修定稿

### Relationships between surface ruptures and lithologic characteristics of the Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0 earthquake

WANG Ping<sup>1</sup>, FU Bi-Hong<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, KONG Ping<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract** Two co-seismic surface rupture zones, 230 km and 70 km long, are produced by the 2008 Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0 earthquake along the pre-existing Yingxiu-Beichuan fault and the Guanxian-Anxian fault, respectively, in the Longmen Shan fault zone. The post-earthquake geological study shows that the exposed fault planes accompanying with co-seismic scarps usually occurred along the coal seams and carbonaceous shales. In this paper we present the observed results of fault scarps and the slip surface in some typical locations along the co-seismic rupture zones. Comparing with the 1:50000 regional geological map, it shows that the distribution of the major section (the southwest part) of the Yingxiu-Beichuan co-seismic rupture zone and the Guanxian-Anxian co-seismic rupture zone are corresponding with the exposed area of the Upper Triassic Xujiahe coal-bearing strata in the Longmen Shan region. The Upper Triassic Xujiahe coal seam and the Middle-Lower Triassic and Silurian, Cambrian shales in the Longmen Shan region are the flexible rock layers, which are easy to slide and form detachment surface or detritus within the fault zone. The co-seismic rupture zone produced by the May 12 Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0

**基金项目** 中国地震局地震动力学国家重点实验室自主课题(LED2008A02)和国家自然科学基金项目(40472090)资助.

**作者简介** 王 萍, 女, 副研究员, 主要从事地震地质和新构造年代学研究. E-mail: wangping907@yahoo.com.cn

great earthquake resulted from a B-type sliding along the flexible rock layers in the shallow crust level.

**Keywords** The Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake, Surface rupture zone, Slip surface, Upper Triassic Xujiahe Formation, Flexible rock layers

## 1 引言

2008年5月12日发生的汶川8.0级地震发生在青藏高原东缘与四川盆地交接部位的龙门山断裂带上。龙门山断裂带是由前山断裂(灌县—安县断裂)、中央断裂(映秀—北川断裂)和后山断裂(汶川—茂县断裂)为主滑动面的叠瓦状逆冲推覆构造带。地震资料反演表明,汶川8.0级地震在龙门山断裂带的地壳中产生了长约300 km的地表破裂带(<http://www.csi.ac.cn/sichuan>)。大量震后卫星和高分辨率航空遥感图像的解译分析表明这次大地震形成了具有一定规模和空间上连续分布的地震地表破裂带,在图像上主要表现为有规律地横切山脊、水系、冲沟、阶地、河漫滩、道路等各种地貌单元的线性特征。根据上述解译标志及影像特征,我们充分利用震后中国科学院遥感飞机所获取的高分辨率航空遥感图像以及中国台湾福卫2号卫星遥感图像进行详细解译分析,初步查明了汶川 $M_s$ 8.0级大地震所产生地表破裂带的空间分布特征,其几何学特征十分复杂,大致沿先存的第四纪活动断裂展布(图1)。

野外地质调查表明沿映秀—北川断裂、灌县—安县断裂分别形成230多公里、70余公里的地表破裂带<sup>[1~3]</sup>(图1)。沿地表破裂带产生断层陡坎、裂缝、鼓包等地面变形以及堰塞湖、滑坡和崩塌等地质灾害。映秀—北川断裂伴随着垂直位错还有显著的水平位错,最大垂直错距和右旋水平错距分别达到6.0 m和5.8 m,其西南段(虹口—清平段)以逆冲活动为主,北东段(北川—南坝段)为逆走滑活动<sup>[1~4]</sup>;灌县—安县断裂以逆冲活动为主,最大垂直错距达2.3 m<sup>[5]</sup>。汶川地震破裂带的宽度较窄,一般为21~45 m,具有变形局部化特点<sup>[3]</sup>。大部分余震都分布在映秀—北川断裂的上盘,地表破裂也主要沿映秀—北川断裂发生,显示这次地震是龙门山断裂带内映秀—北川断裂活动的结果<sup>[1,6]</sup>。

汶川地震地表破裂带具有结构复杂(多条地震断层)、长度长(总长度超过300 km)、宽度窄(一般宽度小于50 m)的显著特征。如此复杂的地震地表破裂带的产生哪些因素起了控制作用?野外地质调查发现多个出露地表的地震断层是顺煤层或含炭质

地层发生滑动的,与1:5万区域地质图进行对照,显示映秀—北川地表破裂带的西南段和彭县—灌县地表破裂带的展布与龙门山地区上三叠统须家河组含煤地层的延伸范围相一致。那么,煤层或含炭质地层与地表破裂带有何相关性?本文对观察到的数个典型断层滑动面的岩性特征进行了介绍,对上述问题进行了初步分析。

## 2 映秀—北川断裂的断层滑动面

映秀—北川地表破裂带从映秀镇西南开始向北东方向延伸,经虹口、擂鼓、北川,终止在平武县的石坎子附近。

### 2.1 都江堰市虹口乡八角庙村的断层滑动面

该断层滑动面出露点(图1中的观察点No.1)位于映秀—北川断裂地表破裂带的西南段。

映秀—北川断裂在八角庙附近由3条断层组成,分别产出于上元古界花岗岩( $Pt_3$ )和震旦系火山岩( $Pt_{2-3}$ )之间( $F_{2-1}$ )、震旦系火山岩与上三叠统须家河组( $T_{3x}$ )之间( $F_{2-2}$ )以及上三叠统须家河组与石炭—二叠系(D-P)粉砂岩、灰岩之间( $F_{2-3}$ )<sup>[1]</sup>(图2)。 $F_{2-3}$ 为倾向南西的滑覆面, $F_{2-1}$ 与 $F_{2-2}$ 为倾向北西的推覆面。

从断层对水系的控制作用来看, $F_{2-2}$ 活动明显。自北西流向南东的河流被断层 $F_{2-2}$ 错断,形成跌水,河道顺 $F_{2-2}$ 方向肘状弯曲后折向南西方向。断层两盘发育多级阶地,同级阶地高度在河道两侧明显不同,反映断层西北盘抬升,东南盘相对下降。滑动面出露于河漫滩中,地表形成高4.3 m的断坎(图2)。滑动面产状为 $N40^\circ E/NW \angle 76^\circ$ ,其上擦痕十分发育,显示地震断层以逆冲为主,兼有少量右旋错动。

在区域上 $F_{2-2}$ 大致沿震旦系与三叠系的岩层界面发育,但地表出露的断层滑动面及其两盘岩层均为上三叠统须家河组一段( $T_{3x}^1$ )的炭质泥岩。 $T_{3x}^1$ 的岩性主要为砾岩、砂泥岩夹泥灰岩,含炭质泥岩仅以薄层状夹于上述岩层之中。地表破裂带不

1) 四川省地质矿产局. 1:5万都江堰幅区域地质调查报告,1996

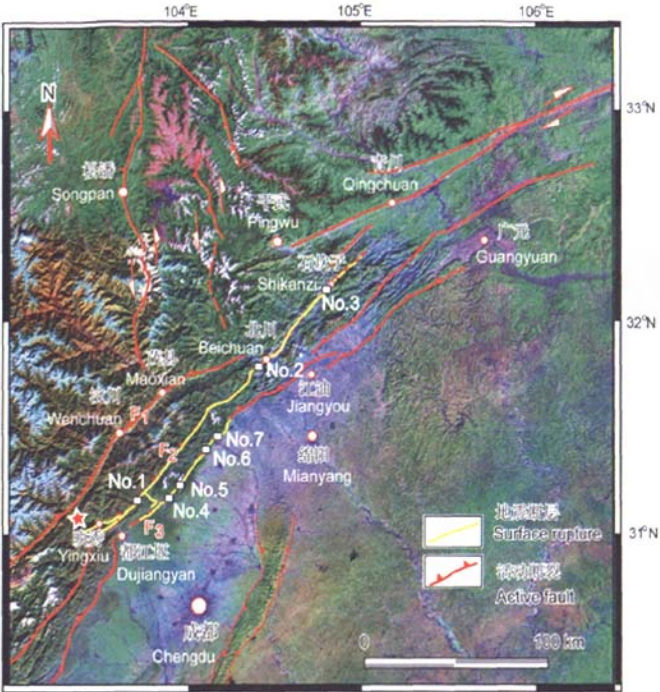


图 1 汶川 8.0 级地震地表破裂带及地表滑动面观察点位置示意图

F<sub>1</sub>, 汶川—茂县断裂; F<sub>2</sub>, 映秀—北川断裂; F<sub>3</sub>, 灌县—安县断裂

Fig. 1 Sketch map of observation location in surface rupture zone and sliding surface of Wenchuan M<sub>s</sub> 8.0 earthquake

F<sub>1</sub>: Wenchuan-Maoxian Fault; F<sub>2</sub>: Xiyao-Beichuan Fault; F<sub>3</sub>: Guanyuan-An County Fault

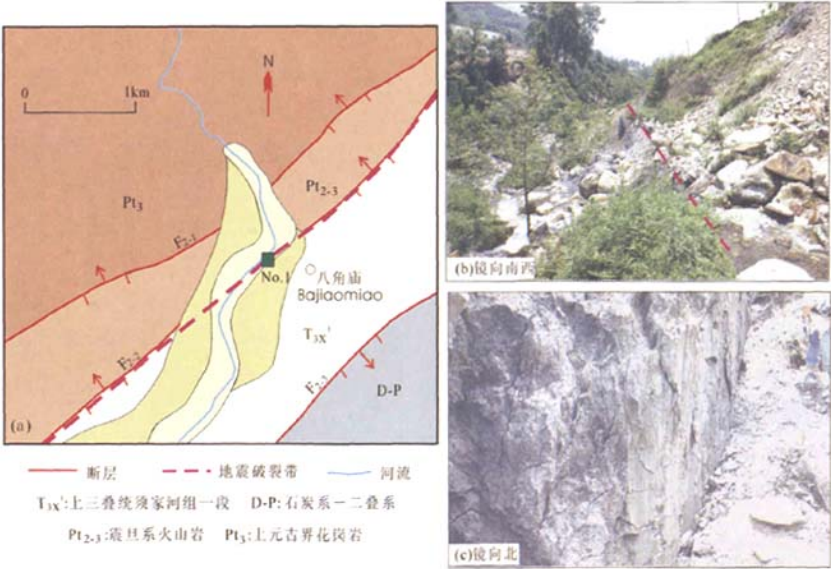


图 2 八角庙的地表破裂带(a)、断层陡坎(b)和滑动面(c)

Fig. 2 Surface rupture zone(a), fault scarp(b) and sliding surface (c) in Bajiaomiao

(b) View to the SW; (c) View to the N.

T<sub>3X</sub><sup>1</sup>: Member1, Xujiache formation of T<sub>3</sub>; D-P: Carboniferous-Permian system;

Pt<sub>2-3</sub>: Volcanite of Sinian system; Pt<sub>3</sub>: Granite of P<sub>3</sub>

沿震旦系与三叠系的岩层界面发育,而是沿三叠系中软弱的含炭质泥岩层产生滑动,并形成 4.3 m 高的断坎,表明炭质泥岩层有利于逆冲运动的发生,变形沿滑动面集中释放,在地表形成大的位移量。

## 2.2 北川县擂鼓镇赵家沟滑动面

观察点(图 1 中 No. 2)位于映秀—北川断裂地表破裂带东北段的擂鼓镇赵家沟。

图 3a 中红色箭头位置为地震陡坎,断层将  $T_1$  阶地垂直错断 5 m,将  $T_1$  阶地面上的小路左旋错动 5.8 m。从跌水发育的高度来看,地表陡坎可能是两次地震错动的结果。断层带宽 0.4 m,断面产状  $N60^\circ E/NW \angle 62^\circ$ ,主要由炭质泥岩构成,上覆地层为灰岩,下伏地层为砂岩(图 3b)。断层带顶面为汶川 8.0 级地震的主滑动面,发育厚约 1 cm 的新鲜断层泥,并可见斜向上冲擦痕;断层带底面夹定向排列的扁平状砾石;断层带中的岩层破碎,可见揉皱和眼球状构造。

## 2.3 平武县石坎子乡地表滑动面

观察点(图 1 中 No. 3)位于映秀—北川地表破裂带的北东端部。破裂带呈直线延伸,在河漫滩和阶地上形成断坎。图 4a 中破裂带穿越河漫滩,将建于  $T_1$  阶地上的公路路面垂直断错 1.5 m,并产生 2 m 的右旋位错。图 4b 为  $T_1$  阶地前缘出露的断层带,黑灰色寒武系炭质页岩逆冲于河流砾石层之上,汶川地震的滑动面位于断层带的底部。沿断层带炭质页岩变形十分强烈,岩层破碎,揉皱发育。

# 3 灌县—安县断裂的地表滑动面

灌县—安县地表破裂带起自向峨,经通济、白鹿、九龙、汉旺,终止于安县以南。沿破裂带多点出露断层滑动面。

## 3.1 彭州市白鹿镇—什邡市八角镇的滑动面

观察点 No. 4 和 No. 5 均位于灌县—安县地表破裂带中段。破裂带发育于上三叠统须家河组煤系地层中,其延伸方向与煤系地层走向大致平行(图 5a)。该地区发育上三叠统须家河组一段( $T_{3x}^1$ )、二段( $T_{3x}^2$ )和三、四段( $T_{3x}^{3-4}$ ),岩性为砂岩、粉砂岩、泥岩,夹煤层,厚几十公分的煤层或更薄的煤线主要分布在  $T_{3x}^2$  中<sup>2)</sup>。破裂带大致沿该套地层中的贯通性良好的先存断层发育,断面多呈舒缓波状,宽数米的挤压破裂带及糜棱岩化构造岩发育。在地表形成 1~3 m 高的断坎。该断层的上盘(西北盘),几条顺薄煤层发育的断层也产生了同震滑动(图 5b),在地

表形成高度为 0.2~0.4 m 的陡坎或鼓包。在破裂带东南侧的须家河组和侏罗系地层中断层相对不发育,主要以倾向南东的单斜岩层产出。

在白鹿镇(No. 4)附近破裂带穿过河道,在河漫滩上形成 2 m 左右的地震陡坎, $T_1$  阶地上的陡坎高 4~5 m。据调查,该次地震前  $T_1$  阶地上残留高 1~2 m 左右的陡坎,因此  $T_1$  阶地上高 4~5 m 的陡坎应是两次地震事件地表错动的结果。沿破裂带方向垭口地貌十分明显(图 5b)。

在八角镇方家沟(No. 5)地震陡坎高 2.2 m,沟底出露煤层,顺煤层的同震滑动,使断层带物质逆冲于河流砾石层之上(图 5c)。

## 3.2 安县九龙—汉旺的滑动面

No. 6 观察点位于九龙乡西, No. 7 观察点位于破裂带的北东端点,地震破裂带展布于山脉与盆地的交界线附近(图 6a)。灌县—安县断裂在该段走向  $N45^\circ E$ ,由一组 NE 向逆冲断层组成。主断层带宽数米至十余米,断层上盘为须家河三段( $T_{3x}^3$ ),下盘为侏罗系红色碎屑岩。 $T_{3x}^3$  由灰、褐灰色中厚-块状细-中粒岩屑长石砂岩、薄-中层状含钙质粉砂岩、粉砂质泥岩、黑色含炭质页岩及煤层、煤线组成,厚度可达千米。地震破裂带大致沿主断层展布,出露的滑动面为炭质泥岩或煤层。在区域上彭县—灌县断裂主断层发育于三叠系和侏罗系的岩层接触面上,但地震破裂时的地表滑动是沿着软弱的炭质泥岩或煤层发生的。

在九龙镇清泉村(No. 6),河漫滩被错断形成 2.2 m 的陡坎(图 6b),断层上盘出露宽数米的炭质泥岩。在汉旺镇东北方向的玉皇观乡白溪沟口村(No. 7),破裂带穿越河道形成 1 m 多的陡坎,炭质泥岩逆冲到河流砾石层之上(图 6c)。

# 4 沿软弱地层产生地表滑动的构造机制

## 4.1 软弱地层和 B 型滑动

Stearns<sup>[7]</sup>将岩体相对滑动的类型分为 A 型滑动和 B 型滑动。A 型滑动是指岩体的岩性类似,其间含有分散的不连续面,沿此不连续面发生的滑动,如沿灰岩与白云岩界面的滑动。B 型滑动没有这样的不连续面,而是通过某种夹入物质(例如夹有一层

2) 四川省地质矿产局. 1:5 万海骊子幅区域地质调查报告, 1996





图 3 擂鼓镇赵家沟地震陡坎(a)和断层带(b)

Fig. 3 Seismic scarps (a) and fault zone (b) in Zhaojiagou, Leigu town  
(a) View to the NW; (b) View to the NE.



图 4 石坎子乡断层陡坎(a)和断层带(b)

Fig. 4 Fault scarp (a) and fault zone (b) in Shikanzi town  
(a) View to the SW, the red arrow showing the fault scarp; (b) View to the NE.

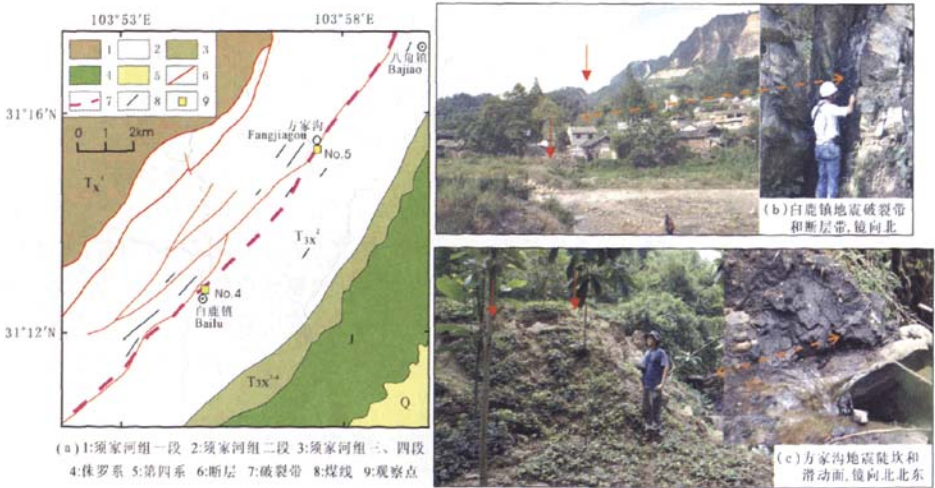


图 5 白鹿一八角镇的地表破裂带(a)、断层带(b)和滑动面(c)

Fig. 5 Surface rupture zone (a), fault zone (b) and slip surface (c) in Bailu town-Bajiao town  
(b) Earthquake rupture zone and fault zone at Bailu town, view to N; (c) Fault scarp and slip surface at Fangjiagou, view to NNE.  
1, Member 1, Xujiache formation; 2, Xujiache formation; 3, Member 3 and 4, Xujiache formation; 4, Jurassic system;  
5, Quaternary system; 6, Fault; 7, Surface rupture zone; 8, Coal layer; 9, Viewpoints

软的页岩)的变形来实现滑动的. 在 A 型滑动中, 滑动面的摩擦强度决定了断裂是否容易滑动, 在 B 型滑动中断裂的易发性主要依赖于较软弱物质的屈服强度.

岩石的强度性质, 即岩石对压、拉、弯、剪等外力的抵抗能力, 常用抗压强度等来表示. 根据 Lama 等<sup>[8]</sup>总结的实验室岩石力学属性数据, 在表 1 中列出了汶川地震区几种典型岩石类型的抗拉、抗压强度, 煤的抗压强度显著小于砂岩、灰岩等类型岩石, 页岩的抗压强度变幅很大, 炭质页岩或含空隙水的页岩强度很低. 炭质泥岩与煤层在强度上相近, 同为软弱岩层.

表 1 实验室岩石强度性质表

Table 1 Laboratory mechanical properties of rocks

岩性	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
煤	1.8	普遍 < 50, 一般变化在 10~30, 最低 2.5	—
砂岩	2.4	一般变化在 50~200, 最高可达 350	< 15
灰岩	2.6	一般 100 左右, 大致变化在 20~200	10 左右
页岩	2.7	一般 100 左右, 可变化在 1~503	2 左右
砾岩	2.7	一般在 60~200	7

夹持于映秀—北川断裂和彭县—灌县断裂之间的前山推覆体主要由上三叠统须家河组组成. 须家河组(T<sub>3x</sub>)为一套海陆交互相和陆相含煤地层, 以砂岩和泥质岩石为主, 夹黑色的炭质泥岩和煤层, 共分五段<sup>[9]</sup>. 其沉积中心紧靠龙门山造山带一侧, 地层厚度超过 4000 m, 自龙门山中段向北、东、南部厚度减薄, 底界埋深可超过 5000 m<sup>[10]</sup>. 在地震剖面上, 炭质泥岩和煤层一般表现为软弱层或滑脱层<sup>[11]</sup>. 图 6 表示出汶川地震破裂带和须家河组地层的分布及其相互关系: 须家河组地层分布于映秀至汉旺一带, 长轴范围与紧邻的彭灌杂岩体大致相当; 映秀—北川地震破裂带的西南段的展布范围与须家河组的分布一致, 映秀—北川地震破裂带的北东段主要沿线性延伸的寒武系炭质页岩延伸; 彭县—灌县地震破裂带的展布范围仅限于须家河组煤系地层, 在安县附近, 须家河组煤系地层已被剥蚀, 地震破裂带也终止发育. 地震破裂带的滑动面多出露煤层、炭质泥岩等低屈服应力的岩层, 有理由推测汶川地震破裂带是沿着映秀—北川断裂和彭县—灌县断裂带中夹有煤层、炭质泥岩等软弱岩层的先存断层, 发生 B 型滑动的结果. 国内外活动断裂和强震研究中也乏地

震破裂沿炭质页岩等软弱地层发生滑动的事例, 如中国台湾 1999 年集集地震就是沿第三纪页岩层发生的逆冲型滑脱<sup>[12]</sup>.

地震破裂沿夹有煤层、炭质泥岩等软岩层的断层带到达地表, 由于汶川地震区煤层的分布有限、厚度不大, 如含煤层较为丰富的白鹿地区的上三叠统须家河组岩层中仅含有煤层 3~5 层, 厚度多小于 1 m<sup>[13]</sup>, 因此断层带的宽度一般较窄, 地震破裂变形集中于断层带附近, 地表位移表现明显.

#### 4.2 地表破裂的构造机制

龙门山冲断带由后山断裂(汶川—茂县断裂)、中央断裂(映秀—北川断裂)和前山断裂(灌县—安县断裂)为主滑动面构成 3 个叠瓦状逆冲推覆构造带, 分别称为后山推覆构造带、中央推覆构造带和前山推覆构造带<sup>[14, 15]</sup>. 中央推覆体在龙门山中段主要为彭灌杂岩体, 由元古界绿片岩相变质岩、晋宁—澄江期岩浆岩和下震旦统火山岩地层组成, 被北川—映秀断裂和汶川—茂县断裂夹持于前山须家河组地层和后山志留泥盆纪地层之间<sup>[16]</sup>. 前山推覆体是受逆冲断层破坏、推移的无根断片, 主体为上三叠统须家河组煤系地层, 下伏岩层主要由侏罗系至下第三系红层构成. 推覆构造的冲断带在剖面上多呈犁式, 其倾角在地表可以较陡, 达 50°~60°, 向下往往变得很缓, 仅为 5°~10°, 甚至可以和某些岩层或薄弱构造面近平行展布<sup>[15, 17~19]</sup> (图 7). 地震反射剖面及钻井等地球物理资料分析表明这些滑脱面可沿基底与盖层之间的不整合面发生, 但大多数情况下是沿盖层中某一软弱岩层(如三叠系膏盐层、煤层等)发生<sup>[17, 20, 21]</sup>.

地震的发生主要是地下岩层的一定部位由于地应力不断积累和加强, 直到超过岩石的抗压强度或者断层的摩擦强度而迅速破裂的结果. 汶川地震是伴随着青藏高原的隆升和向外扩展沿龙门山逆冲断裂带突然发生破坏所致. 推测其构造机制为: 随着龙门山冲断带推覆作用的前展式发展, 龙门山前陆盆地西部的上三叠统须家河组地层被卷入龙门山冲断带, 须家河组地层强烈褶皱变形, 煤层等软弱地层易产生滑动, 成为 1~5 km 的地表构造层中的滑脱面和断层带, 硬度大的彭灌杂岩体逆冲和推覆于由映秀—北川断裂和彭县—灌县断裂所夹持的上三叠统须家河组煤系地层所构成的前山构造带之上. 前山构造带中那些夹有煤层的断层具有产生地震滑动的潜在可能性. 当青藏高原的隆升和向外扩展产生的地应力在龙门山逆冲断裂带积累并超过岩石的抗压



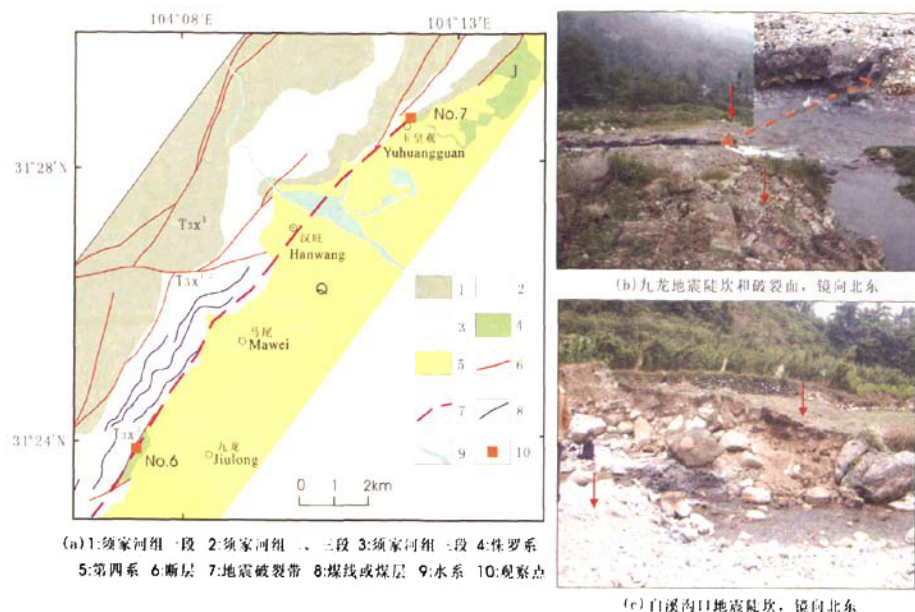


图 6 彭县—灌县地表破裂带北东段观察点位置(a)和断层陡坎(b,c)

Fig. 6 The observation location in the northeast part of Pengxian-Guanxian surface rupture zone (a), the fault scarps (b, c)

(b) Fault scarp and surface of Jiulong Earthquake, view to NE; (c) Fault scarp at Baixigou, view to NE.

1: Member 1, Xujiache formation; 2: Member 2 and 3, Xujiache formation; 3: Member 3, Xujiache formation; 4: Jurassic system, 5: Quaternary system; 6: Fault; 7: Earthquake surface ruptures; 8: Coal layers; 9: River system; 10: Viewpoints

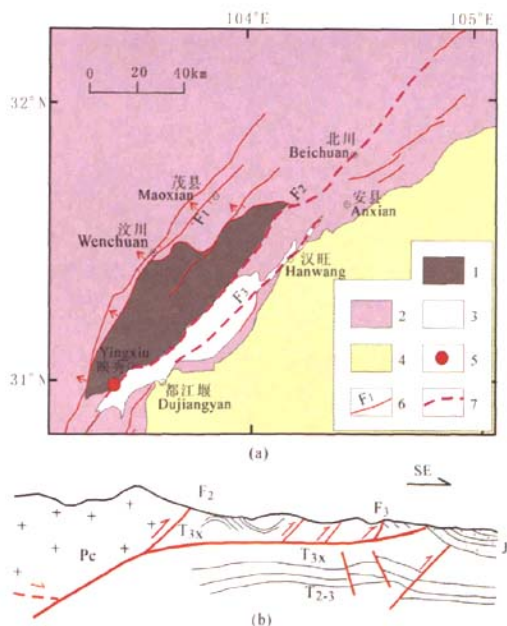


图 7 汶川地震破裂带的展布与须家河地层的分布(a)

和龙门山前山构造带横剖面示意图(b)

1. 彭灌杂岩; 2. 基岩; 3. 上三叠统须家河组; 4. 侏罗系 第四系;  
5. 汶川地震震中; 6. 断层; 7. 地震破裂带; Pc. 前寒武变质杂岩  
Fig. 7 Spreading of fracture zone in Wenchuan earthquake and distribution of Xujiache formations (a) and cross section sketch map of Longman Shan front range structure (b)  
1. Pengguan complex rock; 2. Bedrock; 3. Xujiache formation of J<sub>3</sub>; 4. Jurassic Quaternary system; 5. Epicenter of Wenchuan earthquake; 6. Fault; 7. Earthquake surface rupture; Pc. Precambrian complex

强度或者断层的摩擦强度时,以汶川震中为初始破裂点,地震破裂切穿整个上地壳岩石圈,并迅速地沿近地表构造层中夹有软弱地层的映秀—北川断裂产生地表破裂。当破裂向北东方向继续传播进入呈线性展布的北川—南坝段时,沿寒武系炭质泥岩中先存的断层带产生破裂,伴随有显著的右旋走滑运动。在始破裂发生的同时,由于在推覆体的前锋应变最大,逆冲断层运动在前山推覆体前方的煤系地层中扩展,产生以逆冲活动为主的灌县—安县地震破裂带。

## 5 结 语

汶川地震是世界上第一次明确记录到多条平行断裂参与同震破裂的逆冲型地震,复杂的地表破裂带是龙门山逆冲推覆构造带沿地表构造层中夹有煤层等柔性岩层的断层产生 B 型滑动的结果。

在进行未来强震地表破裂带分布和潜在危害性的预测时,可能要考虑的一个重要因素或线索,那就是强震危险区岩石中的哪些界面具有成为地震地表破裂滑动面的潜在可能性? 是否可以通过活动断裂带区域地层岩性的研究来预测破裂的类型和范围? 汶川 8.0 级地震为我们提供了对上述问题进行思考

的一个典型事例。龙门山推覆构造带的三条断裂在震时表现出不同的破坏特征,地表破裂主要沿中央断裂和前山断裂中夹有软弱岩层的断层带出露。因此,煤层等软弱岩层是灾后重建合理避让带应当考虑的一个因素。我们的研究表明,地震断层的位移量分布是有变化的,在地表出露由软弱地层构成的滑动面时,位移量往往很大。由于上三叠统须家河组煤系地层的岩相变化大,结构不均一,煤系地层区等软弱地层并非连续分布,很可能是沿破裂带的位移量分布出现变化的原因之一。

软弱地层对地震破裂带的起始、终止和弯曲等几何学特征的限定作用及具体样式,将另文予以讨论。

**致谢** 在论文的写作过程中,与周永胜研究员、朱艾斓博士进行了有益的讨论,陈立春博士提供了白溪沟口村的断层陡坎照片,特此致谢!

## 参考文献 (References)

- [1] 张培震,徐锡伟,闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, **51**(4): 1066~1073  
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implication for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4): 1066~1073
- [2] 何宏林,孙昭民,王世元等. 汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带. 地震地质, 2008, **30**(2): 359~362  
He H L, Sun Z M, Wang S Y, et al. Rupture of the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(2): 359~362
- [3] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, **30**(3): 597~629  
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 597~629
- [4] 何仲太,马保起,田勤俭等. 汶川 8.0 地震地表破裂平通镇段的变形特征. 第四纪研究, 2008, **28**(5): 789~795  
He Z T, Ma B Q, Tian Q J, et al. Rupture of the Wenchuan Earthquake ( $M8.0$ ) at the Pingtong town. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2008, **28**(5): 789~795
- [5] 马保起,张世民,田勤俭等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带. 第四纪研究, 2008, **28**(4): 513~517  
Ma B Q, Zhang S M, Tian Q J, et al. The surface rupture of Wenchuan earthquake ( $M8.0$ ). *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2008, **28**(4): 513~517
- [6] 王卫民,赵连锋,李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 388~397  
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 388~397
- [7] Stearns D W. Faulting and forced folding in the rocky mountains foreland. In: Matthews V I. Laramide Folding Associated with Basement Block Faulting in the Western United States. Colorado: Geological Society of America Memoir, 1978. 1~37
- [8] Lama R D, Vuturi V S. Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Ohio: Trans Tech Publications, 1978
- [9] 林良彪,陈洪德,姜平等. 川西前陆盆地须家河组沉积相及岩相古地理演化. 成都理工大学学报, 2006, **33**(4): 376~383  
Lin L B, Chen H D, Jiang P, et al. Sedimentary facies and lithopaleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in West Sichuan foreland basin. *Journal of Chengdu University of Technology* (in Chinese), 2006, **33**(4): 376~383
- [10] 刘金华,张世奇,孙耀庭等. 川西前陆盆地上三叠统须家河组地层的划分对比及沉积演化. 地层学杂志, 2007, **31**(2): 190~196  
Liu J H, Zhang S Q, Sun Y T, et al. Correlation and evolution of the upper Triassic Xujiahe formation in the west Sichuan foreland Basin. *Journal of Stratigraphy* (in Chinese), 2007, **31**(2): 190~196
- [11] 陶正喜. 川西坳陷 X 区块须家河组三维地震构造解释. 天然气工业, 2007, **27**(6): 54~56  
Tao Z X. The 3D seismic volume interpreters of Xujiahe formation in the X-region of Western Sichuan depression. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2007, **27**(6): 54~56
- [12] Ma K F, Tanaka H, Song S R, et al. Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project. *Nature*, 2006, **444**(23): 473~476
- [13] 苟宗海. 四川彭州市白鹿乡地区上三叠统须家河组特征. 岩相古地理, 1998, **18**(3): 34~40  
Gou Z H. The upper Triassic Xujiahe formation in the Bailu district, Pengzhou, Sichuan. *Sedimentary Facies and Palaeogeography* (in Chinese), 1998, **18**(3): 34~40
- [14] 李勇,周荣军, Densmore A L 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京:地质出版社, 2006  
Li Y, Zhou R J, Densmore A L, et al. Geodynamic Processes of Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Geological Responses (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [15] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志. 北京:地质出版社, 1991  
Sichuan Geological Mineral Product Development Bureau. Regional Geology of Sichuan Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991
- [16] 林茂炳,马永旺. 论龙门山彭灌杂岩体的构造属性. 成都理工学院学报, 1995, **22**(1): 42~46  
Lin M B, Ma Y W. A discussion on the tectonic characteristics of Peng-Guan complex in Longmen mountains. *Journal of Chengdu Institute of Technology* (in Chinese), 1995, **22**(1): 42~46



- [17] 刘树根,田小彬,李智武等. 龙门山中段构造特征与汶川地震. 成都理工大学学报,2008,35(3):388~397
- Liu S G, Tian X B, Li Z W, et al. Structural features of the central Longmen Mountains and the Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Journal of Chengdu Institute of Technology* (in Chinese), 2008,35(3):388~397
- [18] 王绪本,余 年,朱迎堂等. 龙门山逆冲构造带大地电磁测深初步成果. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008,35(4): 398~403
- Wang X B, Yu N, Zhu Y T, et al. Preliminary result of magnetotelluric sounding in the Longmen thrust belt of West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2008,35(4):398~403
- [19] Leigh H R, Burchfiel B C, Robert D H. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*,2008,321:1053~1058
- [20] Meng Q R, Wang E C, Hu J M, et al. Late Cenozoic denudation by large-magnitude landslides in the eastern edge of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 252~267
- [21] 汤良杰,杨克明,金文正等. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形. 中国科学(D辑),2008,38(增刊 I): 30~40
- Tang L J, Yang K M, Jin W Z, et al. Multi-level decollement zones and detachment deformation of Longmenshan thrust belt, Sichuan basin, southwest China. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese),2008,38(Suppl. I): 30~40

(本文编辑 何 燕)