

汶川地震主滑移带(PSZ):映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂

李海兵^{1,2} 许志琴^{1,2} 王 焕^{1,2} 司家亮^{1,2} 李天福^{1,2}
宋圣荣³ 裴军令⁴ 郭力维³ 孙知明⁴ 黄 尧⁵
Marie-Luce Chevalier^{1,2} 刘栋梁^{1,2}

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 台湾大学地球科学系, 台北; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 5. 江苏省地质六队, 江苏 连云港 222023)

摘要:2008年5月12日在青藏高原东缘龙门山地区发生了毁灭性的汶川地震(M_s 8.0),并沿映秀—北川断裂和灌县—安县断裂分别产生约270 km和80 km长、并具不同运动性质的地表破裂带。大地震后的断裂带科学钻探是研究地震机制的有效方法,为更好地了解汶川地震过程中的断裂机制、岩石的物理、化学变化和特征,2008年11月4日(汶川地震后的178 d)快速实施了汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD),该项目在这两条断裂带的上盘布置深浅不一的五口群钻(500~3000 m深)。笔者以汶川科钻一号孔(WFSD-1)岩心为主要研究对象,通过对岩心的岩石学研究 and 构造分析,识别出映秀—北川断裂带中的不同断裂岩分布和组合,以及确定了汶川地震主滑移带位置,为进一步研究汶川地震断裂机制提供了基础。

通过详细的岩心分析,在WFSD-1岩心中~575~759 m深之间存在由碎裂岩、断层泥和断层角砾岩组成的一条约100 m宽(~184 m岩心厚)的断裂带,从上部到底部主要为碎裂岩带、断层泥与断层角砾岩混合带、角砾岩带及其断层泥带,该断裂带分布在新元古代彭灌杂岩与三叠纪须家河组之间,主要在须家河组中,为映秀—北川断裂带。由综合测井数据、粘土矿物变化和显微构造分析,确定在岩心589 m深处有约1 cm厚的黑色新鲜断层泥,为汶川地震断裂主滑移带(PSZ),这是靠近岩心中映秀—北川断裂带上部位置。在虹口地表露头彭灌杂岩与三叠纪须家河组之间,同样存在相似结构约190 m宽的映秀—北川断裂带,汶川地震地表破裂带靠近断裂带底部,因此,汶川地震PSZ在映秀—北川断裂带内并斜切了断裂带,暗示着汶川地震PSZ可能是一条新的高角度($62^\circ\sim 65^\circ$)逆冲断裂,它不完全沿袭古地震滑移带,并可能与地震震级大小有关。100~190 m宽的映秀—北川断裂带是经过从10~15 Ma前至现在在长期地震活动和演化的结果,同时也记录了龙门山快速崛起的过程。

关键词:汶川地震断裂带科学钻探(WFSD);汶川地震主滑动带(PSZ);岩心;映秀—北川断裂带;龙门山

中图分类号: P542+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0121-19

在地震断裂带上实施科学钻探,特别是在大地震发生后,利用科学钻探,通过对温度、地震波速度和发震断层渗透率变化等物理参数的精确测量,有可能获取有关地震愈合和破裂周期、地震摩擦热、岩脉填充、渗透性、流体作用、应力状态等重要基础数据,大地震后的快速钻探是研究地震机制和捕捉余

震直接信息的有效方法之一^[1-3]。1995年阪神大地震之后,日本开始实施了大地震后的Nojima断层科学探测项目^[4];1999年台湾集集地震后,2004年开始实施台湾车笼埔断层深钻项目(TCDP)^[5,6],这些项目的实施加深了对地震断裂机制的认识。

2008年5月12日发生在青藏高原东缘与四川

收稿日期:2012-12-23;改回日期:2013-01-08

基金项目:国家科技专项“汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)”资助。

作者简介:李海兵,男,1966年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事构造地质学及活动构造研究;E-mail:lihaibing06@yahoo.com.cn。

盆地过渡区域的龙门山地区的汶川地震(Mw7.9),主要沿龙门山断裂带中映秀—北川断裂和灌县—安县断裂分别形成长约270 km和80 km同震地表破裂带^[7-11]。为了更好地理解汶川地震机制、地震过程中的物理和化学特性、继续对余震进行有效监控以及提高地震监测能力,由科技部、国土资源部和中国地震局共同快速组织实施了汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD)。该项目针对两条主破裂带的不同部位布置五口群钻(WFSD-1, 2, 3, 3P, 4),地震发生后仅仅178 d(2008年11月4日),第一口钻井(WFSD-1)开始实施,2009年7月12日竣工,总深度1 201.15 m。笔者以WFSD-1岩心为研究对象,通过地层、岩性、岩石、结构构造特征,以及测井数据分析探讨和认识汶川地震主断裂带特征,从而旨在帮助理解在龙门山断裂带中能发生这样灾难性事件的地震机制。

1 构造背景

1.1 龙门山断裂带

龙门山断裂带由NE走向的3条主要逆冲断裂组成(图1),由西向东分别为:汶川—茂县断裂(后龙门山断裂)、映秀—北川断裂(龙门山中央断裂)和灌县—安县断裂(龙门山前山断裂)^[12]。该断裂带具有长期活动性,其活动断裂沿袭了晚三叠世以来的断裂^[2,12,13,14]。

由于龙门山断裂带在历史上没有发生过大于7级地震的记录,也就是说在汶川地震发生前,该地区已经历了一个相对长时间的安全期,断裂带已经聚集了一定的能量,有可能存在大震发生的可能。在断裂带中、南段曾经发生过3次6.0~6.5级强震^[15],在其北部岷山地区,发生过2次强烈地震:1933年叠溪7.5级地震和1976年松潘7.2级地震^[15]。从现有的地貌特征以及古老的地表破裂特征来看,龙门山断裂带上曾经发生过大于7级地震,因为,通常震级 $M \geq 7$ 的地震才产生地表破裂带^[16]。

1.2 汶川地震同震地表破裂带

汶川地震(Mw7.9)造成NE走向的映秀—北川断裂和安县—灌县断裂同时破裂,形成映秀—北川破裂带和汉旺破裂带,其地表破裂带长度分别为270 km和80 km左右^[7-10,18](图1),破裂性质主要为逆冲伴随右旋走滑和纯逆冲性质^[7,8,10,18],另外,在小鱼洞镇地区发育长约6 km呈NW走向、由SW向

NE逆冲并兼有左旋滑动的地表破裂带(小鱼洞破裂带),它连接于NE走向的两条近平行的破裂带,地表破裂带基本沿袭早先存在的断裂发育。

从滑移特征来看,映秀—北川破裂带基本存在垂直位移比较大的两个峰值,即从绵竹清平乡为界分为南北两个大的滑移区段,南段最大垂直位移量为6~6.7 m^[7,17-20],位于深溪沟和虹口八角庙地区。北段最大垂直位移量为10~12 m^[7,10,17,21],位于北川县曲山镇沙坝村;南、北段破裂带基本对应于由地震波数据反演结果^[22,23,24]得出的两次破裂事件:南段为右旋走滑—逆冲事件;北段为右旋走滑为主的事件;沿汉旺破裂带最大垂直位移约4 m^[7,10,17,21],位于绵竹市九龙镇沙坝村五组,为纯逆冲事件。

2 汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)及一号孔(WFSD-1)钻井概况

2.1 汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)概况

汶川地震断裂带科学钻探计划布置的五口群钻(图2),主要针对同震地表破裂带不同段的最大位移区,如一号孔(WFSD-1)和二号孔(WFSD-2)位于映秀—北川破裂带南段具垂直位移量~6 m的虹口乡八角庙村地区;三号孔的先导孔(WFSD-3P)和三号孔(WFSD-3)位于沿安县—灌县断裂带发育的汉旺破裂带的最大垂直位移(~4m)区。四号孔(WFSD-4)原计划布置在具有~10 m垂直位移量的北川县城西侧地区,然而很难选择到适合钻井井场的位置(考虑井场的大小和安全),因此,初步选择在北川县城北部的陈家坝地区,可是那里大的滑坡体的存在,很难保证其井场的安全性,最终WFSD-4选择在平武县南坝镇北侧老街上村地区,该地区右旋水平位移量2~3m,垂直位移量1~2 m^[7,8,18,19,20,25 18]。

目前,WFSD-1、2、3P、3四口钻井已完成(图2),WFSD-1钻井完钻深度为1 201.15 m,WFSD-2完钻深度为2 283.56 m,WFSD-3P完钻深度为551.51 m,WFSD-3完钻深度为1 501.80 m,其中,WFSD-1孔是WFSD-2孔的先导孔,WFSD-3P孔是WFSD-3孔的先导孔。WFSD-4孔的计划深度为3 400 m,截止到2012年12月23日钻井深度为1 813.28 m。

2.2 WFSD-1 钻井特征

汶川地震断裂带科学钻探第一号孔(WFSD-1)位于四川都江堰市虹口乡八角庙村、映秀—北川断裂带上盘的彭灌杂岩内(图1-b)、汶川地震地表破

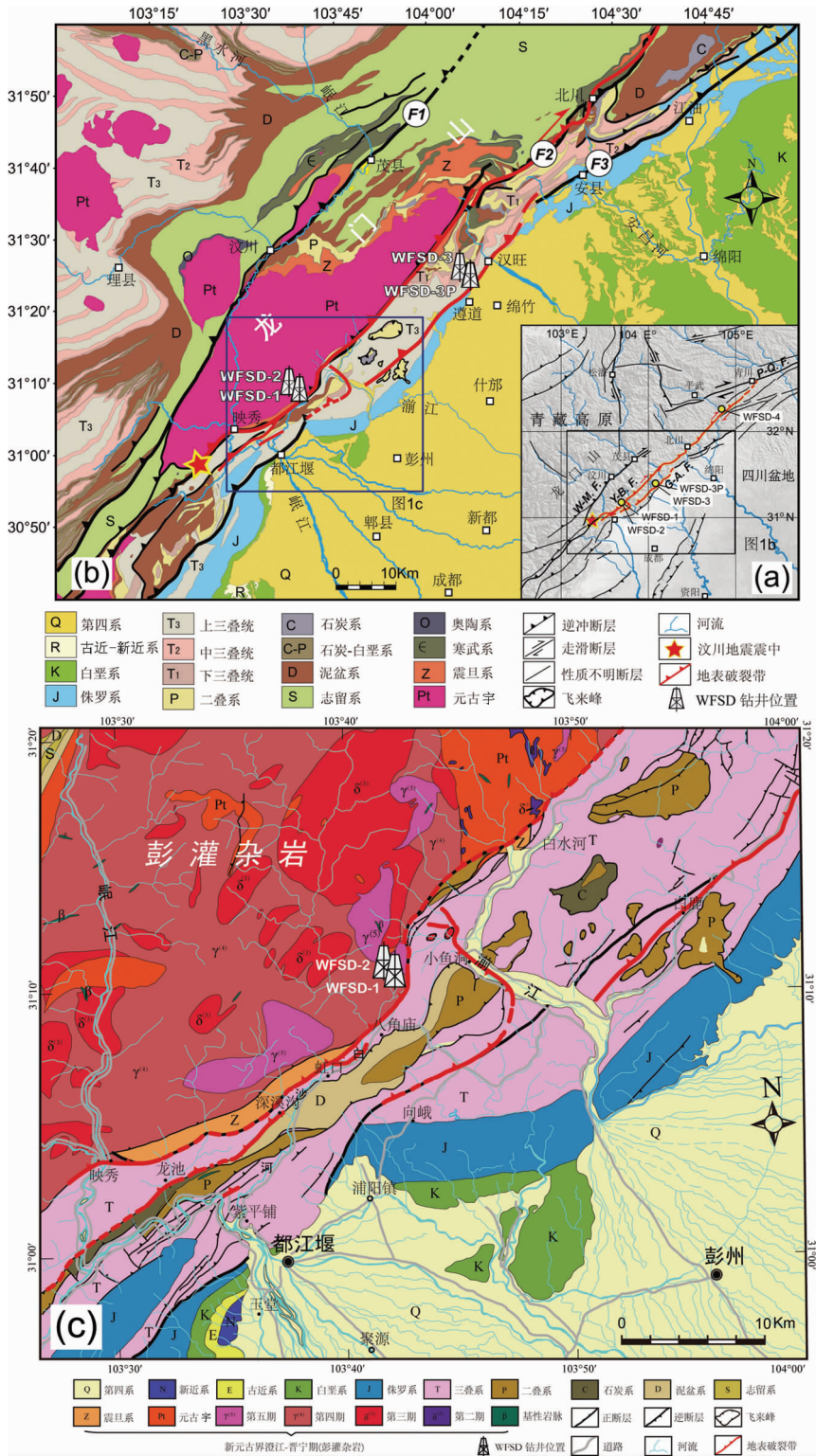


图 1 龙门山及邻区构造地质简图(a,b)、彭灌杂岩局部地质图(c)(据四川省地矿局,1975,灌县幅 1:200000 地质图)及 WFSFD 钻井位置

F1—汶川-茂县断裂(W - MF); F2—映秀-北川断裂(Y - B F); F3—灌县-安县断裂(G - A F),平武-青川断裂(P - Q F)
Fig.1 Geological structures of Longmenshan and its adjacent area (a,b), local detailed geological map (c) (after Sichuan Bureau of Geology, 1:200000 Geological Map of Guangxian Sheet) and WFSFD drilling sites location
F1—Wenchuan - Maoxian fault (W - MF); F2—Yingxiu - Beichuan fault (Y - B F); F3—Guanxian - Anxian fault (G - A F), Pingwu - Qingchuan fault (P - Q F)

汶川地震断裂带科学钻探 (WFSD)

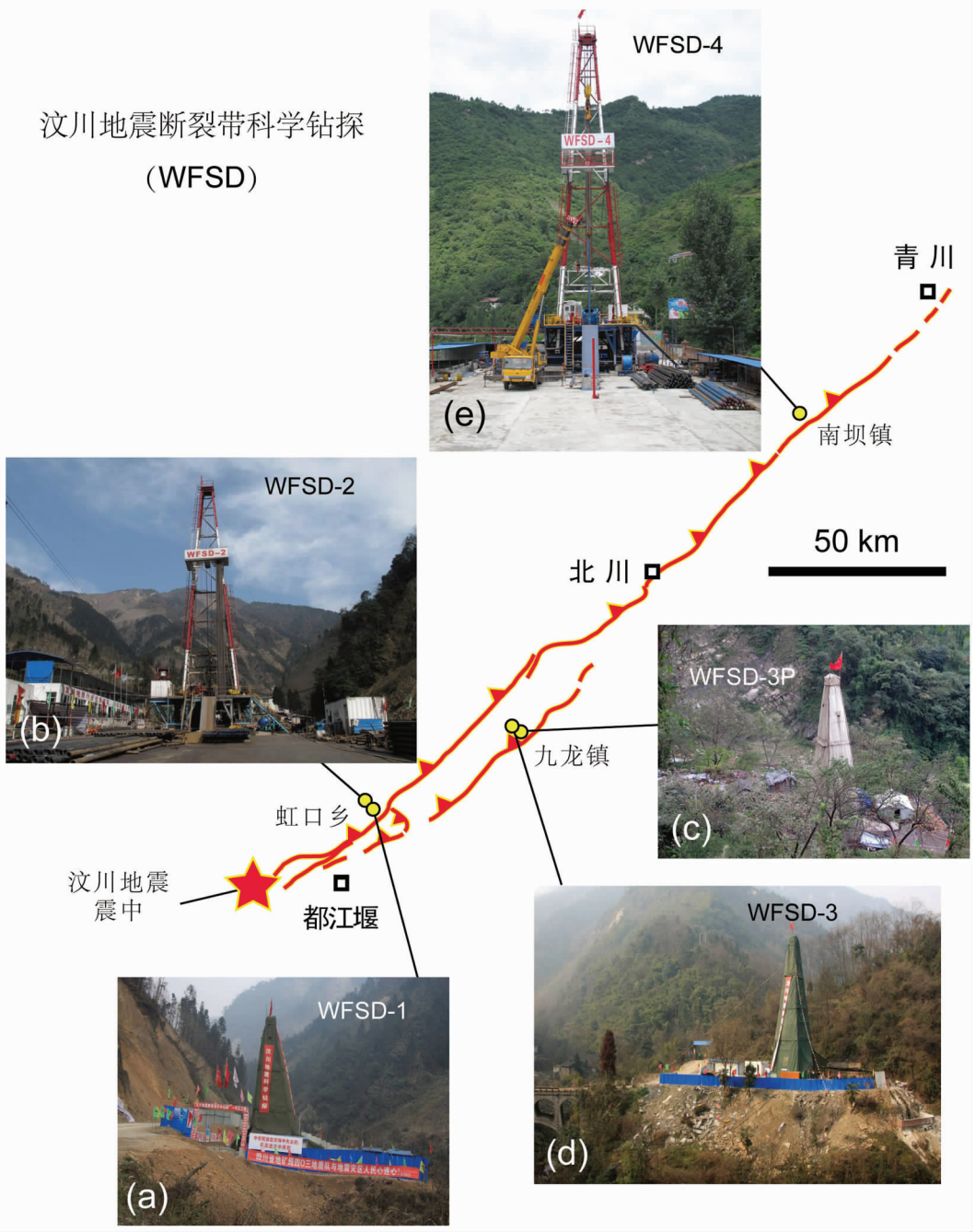


图2 汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)钻井现场

红线为汶川地震地表破裂带;a—一号孔(WFSD-1),二号孔的先导孔;b—二号孔(WFSD-2);c—三号孔先导孔(WFSD-3P);d—三号孔(WFSD-3);e—四号孔(WFSD-4)

Fig.2 Drilling sites of the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling (WFSD)

Red line indicating the surface rupture zone of the Wenchuan earthquake. a—Hole-1(WFSD-1). The pilot hole of WFSD-2; b—Hole-2(WFSD-2); c—Pilot hole of WFSD-3(WFSD-3P); d—Hole-3(WFSD-3); e—Hole-4(WFSD-4)

裂带西侧 385 m 处(图 3),为了能够尽早穿过汶川地震主滑移带,了解断裂带的特征,以及在余震仍在发生期间进行井中地震监测和地震过程中产生的摩擦热的残余热监测,设计 WFSD-1 为斜孔,以 80°倾

角(10°顶角)向 NE134°方向钻井,垂直于走向为 NE40°方向的地表破裂带。

WFSD-1 于 2008 年 11 月 4 日开孔钻探,距汶川地震发生后 178 天,由于岩层破碎严重,钻进中存

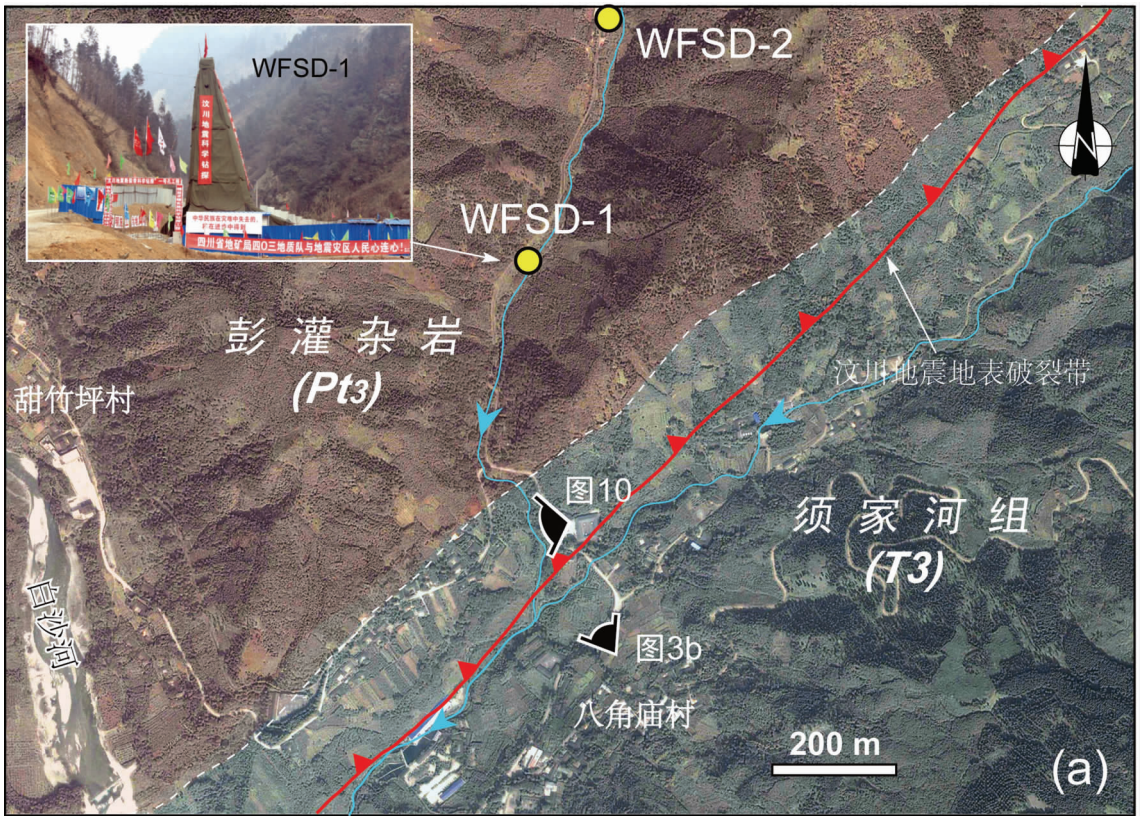


图 3 WFSD-1,2 区域卫星影像图(a)(来自 Google Earth)及地表破裂带(b)
同震地表破裂带分布在上三叠统须家河组沉积岩(淡蓝色)中,淡粉红色代表彭灌杂岩部分

Fig.3 Satellite image (Google Earth) of WFSD-1 and 2

The co-seismic surface rupture zone striking N46°E (red line) lying within the Upper Triassic sediments (Xujiahe Formation, light blue); the light pink area representing the Neoproterozoic Pengguan complex

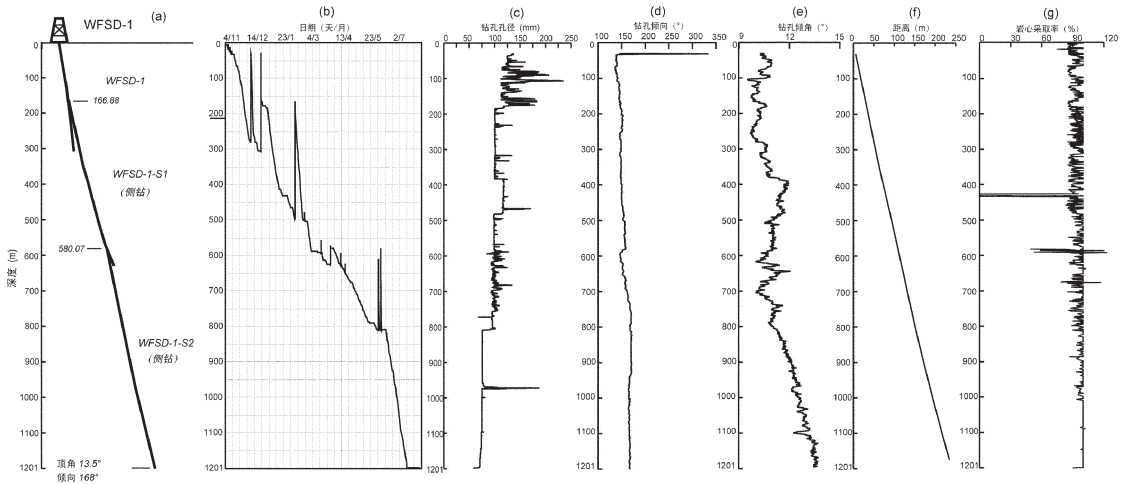


图4 WFS D-1 钻井过程特征

a—钻孔轨迹,第一个侧钻从166.88 m的深度开始,第二个侧钻从580 m深度开始;b—钻井进程,钻井事故发生在深度约300 m、500 m、600 m和800 m;c—钻孔直径;d—钻孔倾向;e—钻孔倾角;f—钻孔垂直于表面破裂的轨迹;g—岩心采取率

Fig.4 Drilling process of WFS D-1 borehole

a—Hole sketch, the second hole from 166.88 m in depth and the third hole from 580 m in depth; b—Problems occurred at the depths of ~300, 500, 600 and 800 m at the beginning of logging and casing and sidetrack-drilling at the depths of ~166.88 and 580 m; c—Borehole diameters; d—Borehole inclination; e—Borehole dip angle; f—Drilling trace perpendicular to the surface rupture; g—Core recovery percentage, the cores were lost at about 430 m—depth

在取心困难、孔壁坍塌、掉块、涌水等问题,在孔深167 m处和580 m处发生严重钻探事故,因此,进行了二次侧钻(图4-a)。至2009年7月12日,WFS D-1终孔,其孔深1201.15 m,取心钻进总进尺1368.29 m,平均岩心采取率95.4%(图4-e),平均机械钻速1.07 m/h,平均回次长度1.31 m,终孔顶角 13.5° (图4-c),终孔方位角 168° (图4-b),与设计有所偏差(图4-d,e)。

3 WFS D-1 岩心特征

3.1 岩石与地层特征

WFS D-1 钻孔从地表到1201.15 m孔深为全孔取心,其中166 m孔深以上岩心直径为76 mm,166~498 m孔深岩心直径为67 mm,498~1201.15 m孔深岩心直径为46 mm。虽然岩心很破碎,由于岩心采取率较高,岩心几乎是连续的。

岩心中有火山岩、花岗岩、砂岩(含煤砂岩)、粉砂岩、砾岩以及一系列断层岩等等(图5)。其中在585 m孔深以上部分为花岗岩和火山岩,属于龙门山主要地质体新元古代彭灌杂岩体,在585~598 m孔深部分主要为彭灌杂岩与须家河组边界带(断裂带),在这个边界带中既有彭灌杂岩的物质又有沉积

岩部分,后者成分较多;598 m孔深以下部分为砂岩、粉砂岩和砾岩等三叠系须家河组成分。

3.1.1 彭灌杂岩

位于龙门山中段的彭灌杂岩平面上呈透镜状分布于汶川—茂县断裂和映秀—北川断裂之间(图1),是龙门山构造带的重要组成部分。岩体除北侧局部与震旦系呈沉积不整合接触外,其他方向与周围古生界—三叠系均呈断裂接触(图1,3)。彭灌杂岩主要由黑云花岗岩、斜长花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和闪长岩等酸性侵入岩体组成,伴随有少量基性—超基性侵入岩、火山岩、火山碎屑岩和绿片岩相变质岩等^[26-28]。其花岗岩、闪长岩和辉长岩的锆石U-Pb年龄为859~699 Ma^[27],SHRIMP年龄为850~750 Ma^[29,30],表明彭灌杂岩为新元古代岩浆活动的产物。彭灌杂岩西侧邻近的雪隆包埃达克杂岩(图2)的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $(748\pm 7)\text{Ma}$ ^[31]。

WFS D-1 岩心中(图5),地表之下3~181.5 m孔深的岩心基本为灰绿色的火山碎屑岩(图5),大部分为火山凝灰岩;从181.5~291 m孔深为闪长玢岩和闪长岩,夹有三段火山岩;291~575.6 m孔深主要为火山岩和火山碎屑岩及少许闪长岩;575.6~585.75 m孔深主要为碎裂岩,其原岩为花岗质和火

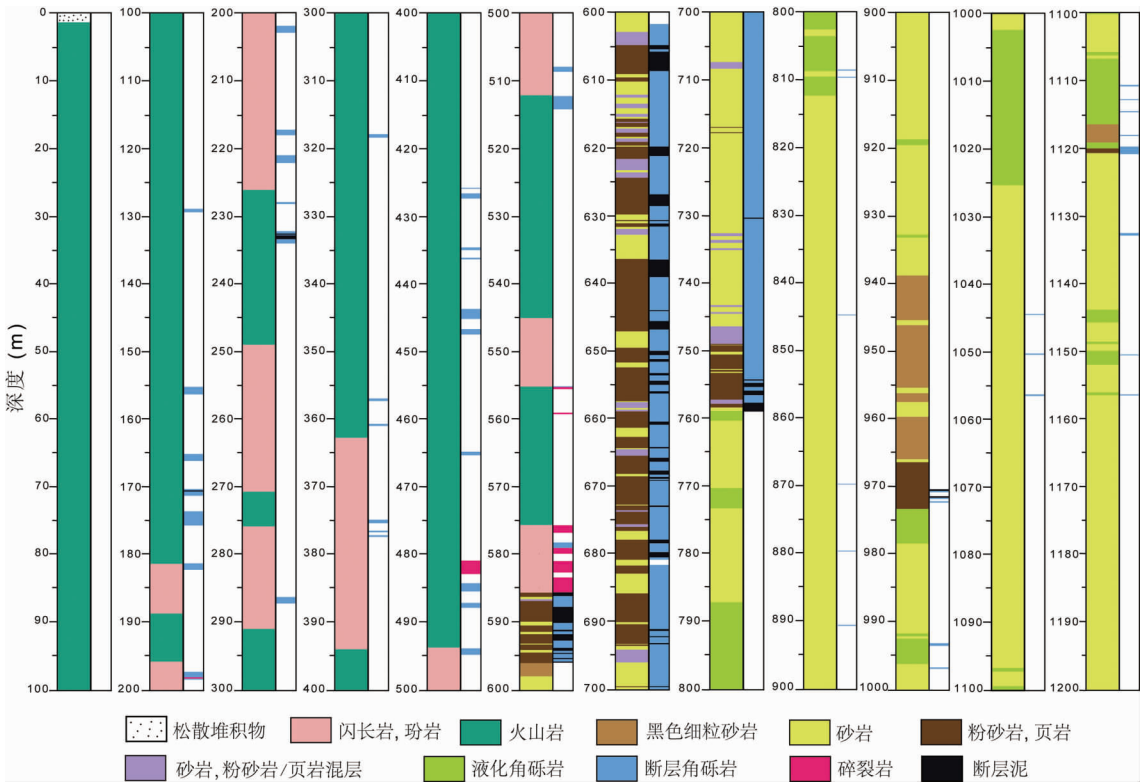


图 5 WFSD-1 岩心岩性(左侧)—断层岩(右侧)柱状图(深度为钻孔深度)

Fig.5 Lithologic chart (original rock, left) and distribution of fault rocks (right) along WFSD-1 cores, with depths being the borehole depths

山质岩石。上述都属于彭灌杂岩单元。

3.1.2 须家河组

不变质的上三叠统分布于映秀—北川断裂之东(图 1)。上三叠统包括马鞍塘组、小塘子组与须家河组^[26]。

须家河组岩石组合可划分为 6 个岩性段, WFSD-1 钻井区域及邻区须家河组一段和六段缺失。须家河组第二段主要为灰色、浅灰色石英砂岩、岩屑砂岩夹粉砂岩、深灰色泥岩、砂质泥岩和煤线;第三段为灰色、深灰色泥岩、砂质泥岩与浅灰色、灰色岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、富岩屑砂岩和粉砂岩互层,中、下部夹炭质页岩、煤层(线);第四段为灰色细—中粒岩屑砂岩、砂砾岩、砾岩、粉砂岩与灰色、深灰色泥岩、砂质泥岩互层,夹煤线;第五段主要为灰色、深灰色泥岩、砂质泥岩与灰色细粒岩屑砂岩、富岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、粉砂岩互层,含植物化石和煤线。

WFSD-1 岩心中(图 5),585.75~759 m 孔深的岩心主要为灰色砂岩、粉砂岩、深灰色泥岩、炭质页岩和煤线组成;759 m 以下孔深的岩心主要为灰色

砂岩、深灰色粉砂岩、液化角砾岩(软沉积物变形岩石)组成。笔者对照区域上须家河组的岩性段,发现 585.75~759 m 孔深段岩性为须家河组第三段岩性段,759 m 以下孔深段岩性为须家河组第二段岩性段,它们属于正常层序。

3.2 断裂岩

在 WFSD-1 岩心中断裂岩的分类,笔者主要采用 Sibson(1977)^[23]的组织分类(textural classification),依据岩石的结构、细粒泥质及角砾碎块的含量来划分。与地震有关的断裂岩主要为断层泥、碎裂岩、断层角砾岩和假玄武玻璃。通过对 WFSD-1 岩心的详细观察和分析,前三种典型的断裂岩都存在于彭灌杂岩的火成岩和须家河组沉积岩中(图 6)。

断层泥发育在不同岩性的岩石中,呈灰色、深灰色和黑色,大多以深灰色和黑色为主(图 6)。从手标本上看,断层泥内部基本无定向组构。有的断层泥刚从钻孔中取出时,看上去软而且富含水分,一天过后由于水分蒸发而开始干裂,干裂纹具有定向性,估计干裂纹平行于断裂滑移面(图 6-d)。在整个

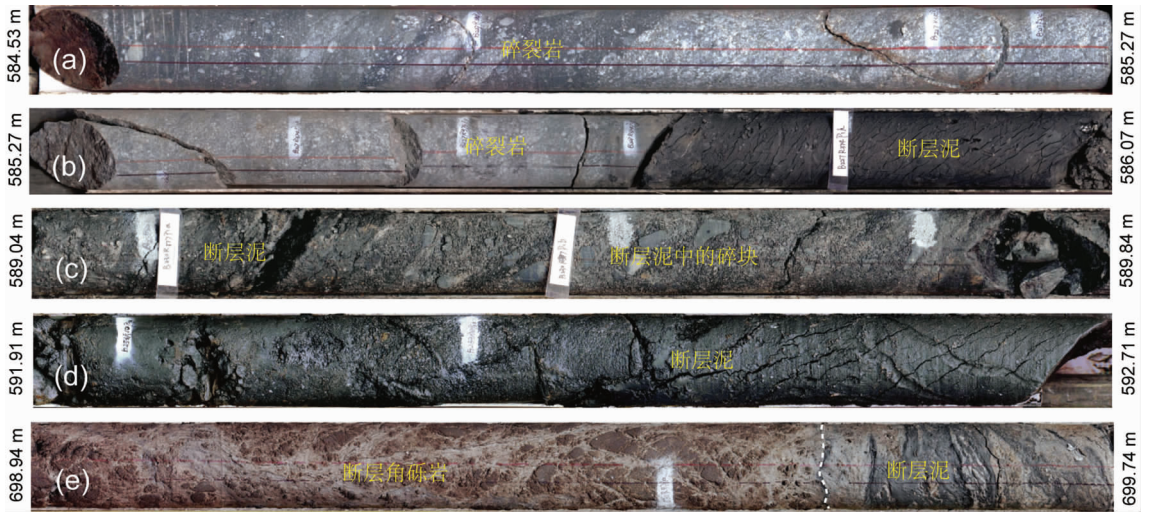


图6 WFSD-1岩心中的断裂岩特征

a—不同颜色的碎裂岩显示出定向性; b, c, d—黑色的断层泥中裂纹显示出面理发育; e—具砂岩碎块的断层角砾岩

Fig.6 Photos showing fault-related rocks in WFSD-1 cores

a- Directional properties shown by different colors in cataclasis; b, c, d-Directional cracks observed along the foliation in the black gouge; e- Sandstone fragments in fault breccia

WFSD-1岩心中,断层泥的厚度从几毫米到几米不等,在岩心587.8~590.1 m、605.7~608.7 m和636.5~639.1 m深处,分别存在超过2 m、3 m和2.5 m厚(不是真厚度)的断层泥,这是WFSD-1岩心中最厚的断层泥(图5)。

碎裂岩往往呈深灰色、灰色或浅灰色(图6-a, b,图8),主要存在于彭灌杂岩的下部、与三叠系须家河组的边界附近。在586~759 m深的断层泥-断层角砾岩带中也存在碎裂岩的角砾。

断层角砾岩在岩心中容易识别,其角砾碎块在细粒基质中>30%,基本分布在三叠系沉积岩中(图6-e)。

在WFSD-1岩心中,假玄武玻璃没有发现,但是,在地表露头花岗岩质初碎裂岩中看到(图7),这些假玄武玻璃都是古地震的产物。

4 变形构造

在WFSD-1岩心中,岩心破碎是最显著的构造特征,另外,还有方解石脉、断层角砾岩、碎裂岩和断层泥都显示出不同方向的构造,有的断裂面上可见到不同特征的擦痕(图8),显示出运动学性质不同。另外,断层泥中滑移面上的“镜面构造”较为发育(图8)。通常在断裂带中方解石脉较多,并且沿断裂面发育,有的在沿脉体方向裂开的断面上,还可以看见

“阶步构造”(图8)。

从图9来看,破裂分布在WFSD-1整个岩心中,破裂密度上下也基本一致,但是,破裂面的倾向有所不同,600 m孔深以上部分倾向为N170°~N270°的破裂面占多数,倾角为40°~70°的破裂较多,次之为N270°~N360°倾向的破裂;596~780 m孔深段没有测井数据,但是根据破裂密度分布特征(图9-b)来看,与680~830 m孔深段破裂特征可能基本一致,图9-b显示,780 m孔深以下部分破裂面倾向以N40°~N100°的相对集中,它明显不同于上部破裂面倾向,倾角也有所不同(图9-c,d)。

600 m孔深以上部分的断裂带倾向为N220°~N360°(图9-e),倾角在20°~80°范围内(图9-f),多数为60°~75°;780 m孔深以下部分,约972 m和约1133 m孔深处断裂带倾向为N30°~N120°(图9-f),倾角为40°~80°(图9-f)。虽然596~780 m孔深段没有测井数据,但是根据连续岩心特征来看,一些断裂带的产状与590 m深处断裂近一致。

从岩心中断裂岩的分布来看,断裂带很多、大小规模不一,每一条断裂带由不同断裂岩组成,断层泥是断裂带的核心。断层泥的宽度基本从0.72~3.79 m不等,有个别的只有几个毫米。每条断裂带是由很多更次级断裂组成,而每一次级断裂带的断层泥有的很薄,它们累积起来相对较大。上述提到的断裂带的

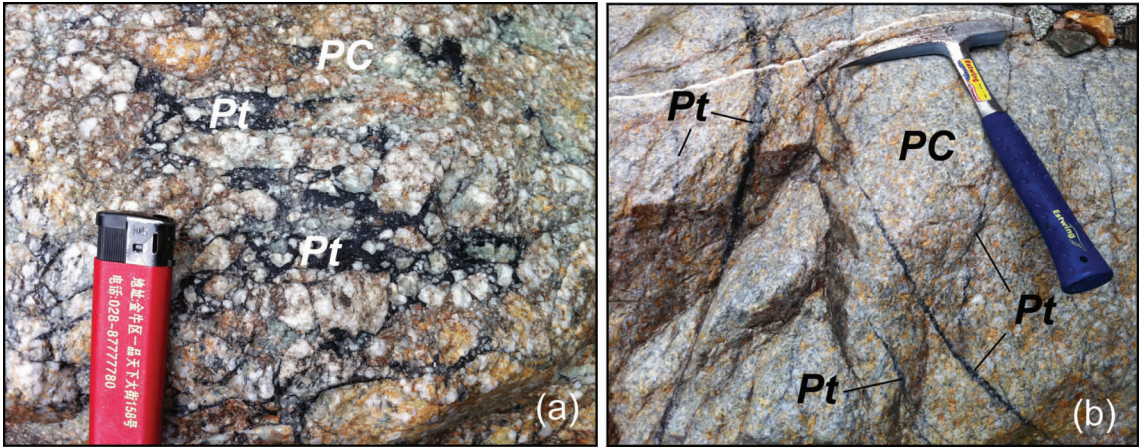


图 7 映秀—北川断裂带中粗碎裂岩中的网络状假玄武玻璃(a)及假玄武玻璃脉(b)(虹口八角庙露头)
Pt—假玄武玻璃;PC—初碎裂岩

Fig.7 Photograph of network pseudotachylyte (a) and pseudotachylyte veins (b) in protocataclasite at Hongkou outcrops in the Yingxiu—Beichuan fault zone
Pt— Pseudotachylyte; PC— Protocataclasite



图 8 WFSD-1 岩心中断层岩变形构造特征

a—232.50 ~233.33 m 深的断裂岩;b—断裂面上陡倾的擦痕,指示为纯逆冲作用;c—斜向逆冲擦痕;
d、e、f—“镜面构造”;g—断裂面上的台阶

Fig.8 Deformation structure characteristics of fault-related rocks in WFSD-1 cores
a— Fault-related rocks at 232.50–233.33 m-depth;b—Steep striation in the fault plane which lies at the bottom of (a), indicating pure thrust component;c—Oblique thrust striation;d, e, f—“Mirror structure”;
g—Striation and steps in the fault planer

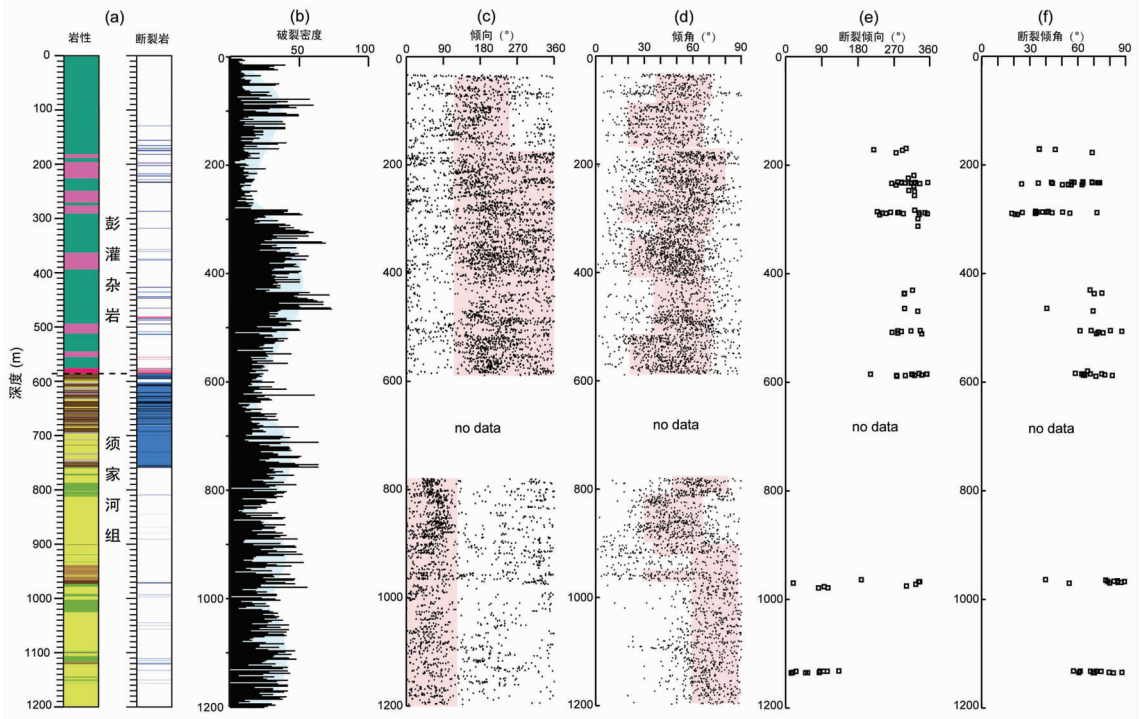


图9 WFS-1岩心中变形构造分布特征

a—岩性-断裂岩柱状图,图例与图5一致;b—破裂密度图;c—构造倾向趋势;d—构造倾角;e—断层方位角;f—断层倾角

Fig.9 Distribution of deformation structure in WFS-1 cores

a—Lithologic and fault rocks chart;b—Crack density chart;c—Structure tendency;d— Structure dip angle;e—Fault zones azimuth; f—Dip angle of fault zones

宽度或者断层泥的宽度都不是真厚度,实际上是在岩心中的厚度,其真厚度为它们的岩心长度乘以倾角(θ)的 $\text{Sin}\theta$ 。

5 讨论

5.1 映秀—北川断裂带结构及宽度

一般认为断裂带的结构有两种类型^[34]:(1)具有一个高应变带核心的破裂带结构^[34],(2)具有多个高应变带核心组合的破裂带结构^[35],断裂核心通常由断层泥、碎裂岩或超碎裂岩(或它们的组合)构成,破裂带由一个较宽的破裂区域和一些次级断裂构成。很显然,分布在彭灌杂岩与须家河组沉积岩之间的映秀—北川断裂带结构是由多个高应变带核心组合的破裂带,从WFS-1岩心中和野外露头都表现的很清楚。

5.1.1 WFS-1岩心

大型断裂带是由很多小规模次级断裂带组成。那么,有哪些次级断裂带组成为映秀—北川断裂带呢?从WFS-1岩心剖面图(图5)中连续的断裂岩分布特征来看,575.7~759 m为连续分布的断裂

岩带,其中,575.7~585.75 m主要为碎裂岩,585.75~759 m是由断层泥和断层角砾岩组成。因此,笔者确认上述两部分代表一个大规模的断裂带。另外,585.75 m深度层为新元古代彭灌杂岩和晚三叠统须家河组沉积岩地层的边界(图5);测井数据显示(图9),其面理的平均倾向为 $\text{N}305^\circ$,平均倾角为 $65^\circ\sim 71^\circ$,因此,这条大规模的断裂带即为映秀—北川断裂带,其岩心厚度至少为183 m左右,由于WFS-1是个斜孔,倾斜的钻孔约为 12° ,所以,其真实厚度约为100 m。

从WFS-1岩心来看(图5),单一次级断裂带由断层泥、碎裂岩和/或断层角砾岩以及具有破裂特征的围岩等组成典型的破碎带(damage zone),单一的断裂核心为断层泥,从整个岩心剖面或单一断裂带来看,都具有很多断裂核心(断层泥),很明显映秀—北川断裂带结构具有多核结构(multiple cores model)特征,与地表显示的断裂带一致^[36]。岩心中可看出断裂带具有强或弱的面理化,断层泥的宽度从几毫米到几米不等,与地表研究结果一致^[37]。

5.1.2 野外露头

从虹口断裂带的露头(图 10)来看,映秀—北川断裂带总体走向 N40°~70°E,NW 倾,宽约 190 m,其中,断裂带北侧碎裂岩(初碎裂岩)带宽约 100 m,南侧断层角砾岩和断层泥带宽约 90 m,其中断层泥主要分布在北侧靠近碎裂岩带的部分(黑色断层泥

带厚约 4~6 m,含有断层角砾岩)(图 10-d),在南侧靠近断裂带的底部也出现有黑色断层泥带(图 10-b),汶川地震的滑动面分布在断层泥带底部或靠近底部(图 10-b),显示一种不对称的断裂带结构特征,即滑动面的上盘为破碎带或断层泥和断裂角砾岩带,这一现象与 Nojima 断裂带表现出破碎带只分

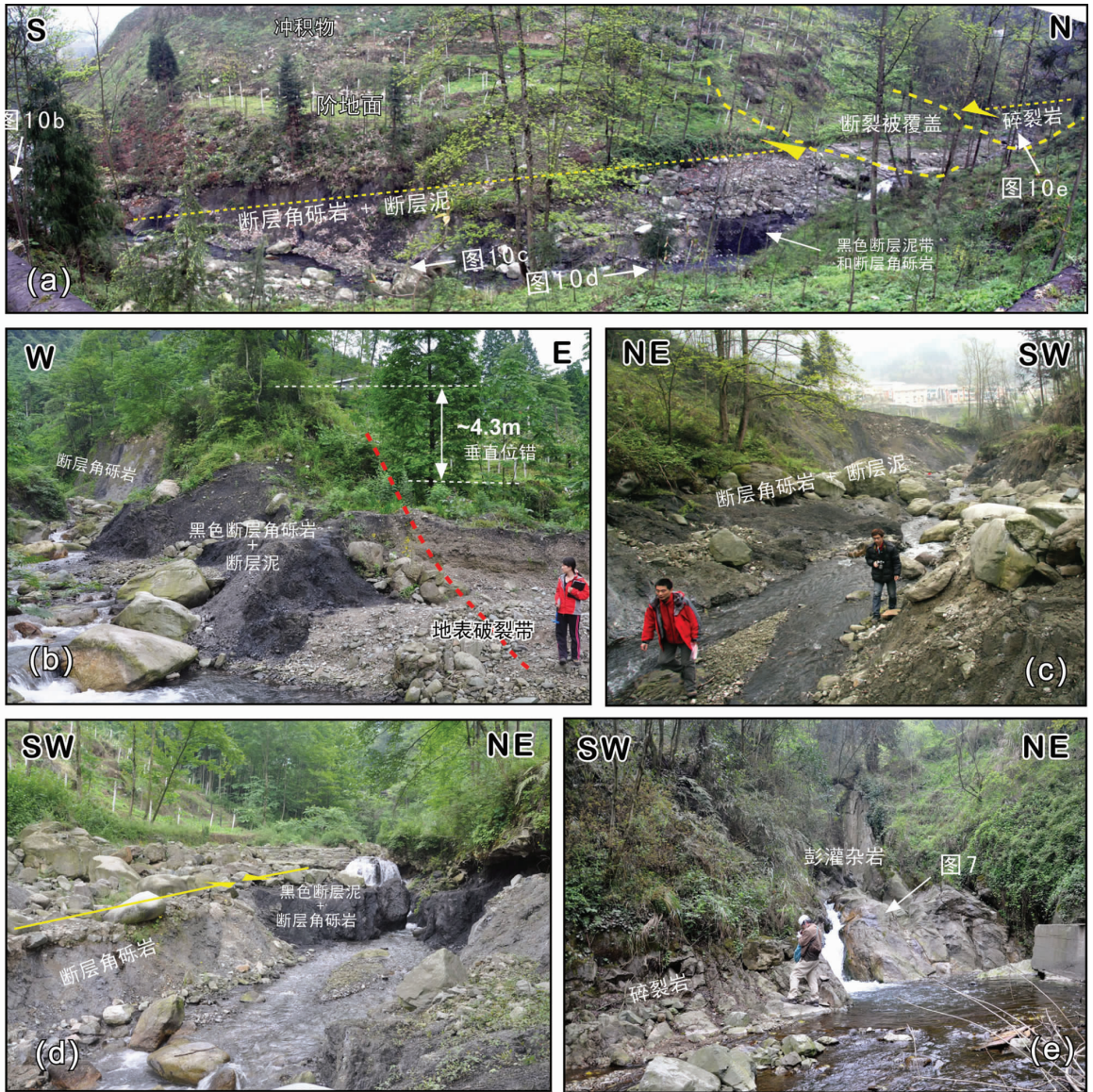


图 10 映秀—北川断裂带露头照片(虹口乡八角庙村,拍摄于 2012 年 3 月,位置见图 3)

A—断裂带的全景照片; b—映秀—北川断裂带底部的黑色断裂带(黑色断层泥和/或黑色断层角砾岩),红色虚线代表汶川地震同震地表破裂带; c—映秀—北川断裂带中部的灰色断层角砾岩和断层泥区域; d—映秀—北川断裂带顶部的黑色断裂带(黑色断层泥和/或黑色断层角砾岩); e—彭灌杂岩中的碎裂岩带

Fig.10 Photos of outcrops of Yingxiu - Beichuan fault zone at Bajiaomiao village taken in March 2012, Location shown in Fig. 3 (a- Panoramic photo of the fault zone. Black fault zones (black fault gouges and/or black fault breccias) distributed at the bottom;b- Top (a, d) of Xujiage Formation. Gray fault breccia and fault gouge zone;c- Distribution between them;e-Pengguan massif (the cataclasite zone) in the northern outcrop. The red dashed line represents the co-seismic surface rupture zone of the Wenchuan earthquake (b)

布在断裂面上盘的不对称特征一致^[38]。

如果这种断裂带的不对称结构,从地表到地下深部一直贯穿整个断裂带,那么,汶川地震的同震滑动面也应该分布在 WFSD-1 岩心中映秀—北川断裂带的底部,也就是在 759 m 深处左右的黑色断层泥中。

从 WFSD-1 岩心中断裂岩的分布来看(图 5),映秀—北川断裂带中的断层泥主要分布在断裂带的上部和底部,这种断层泥分布特征与露头断裂带的特征似乎有一点相似,如果 WFSD-1 岩心中的断裂带可以对比地表露头断裂带的话,汶川地震主滑移带(PSZ)可能就分布在岩心~759 m 深处。

然而,笔者检查了整个岩心中断层泥的颜色和新鲜程度,尤其是岩心中的映秀—北川断裂带中的断层泥,在~759 m 深处断裂岩中没有发现新鲜的断层泥,而在~590 m 深处断裂带中发现有新鲜的断层泥。另外,其他的测井数据,包括温度测量,都没有发现该断裂带(~759 m 深处断裂带)存在异常。

5.2 汶川地震断裂主滑移带(PSZ)

汶川地震主滑移带的确定是研究汶川地震断裂机制、岩石物理变化和化学变化,以及完钻后井中实施地震、温度、流体和应力场长期监测的前提。因此,认识和确定汶川地震主滑移带的位置至关重要。

5.2.1 地质及断裂结构分析

从前人研究来看,地震断裂主滑移带的位置应该位于断裂带的核心断层泥的位置^[5,6,39-41]。WFSD-1 岩心中断裂带发育较多,而且每条断裂带又有很多层断层泥,究竟哪一条断裂带是汶川地震断裂带?哪一层断层泥是汶川地震主滑移带呢?从区域来看,约 270 km 长的地表破裂带基本沿袭映秀—北川断裂带分布,而断裂带南段映秀断裂是新元古代彭灌杂岩和晚三叠世须家河组地层的边界,在虹口乡八角庙村地表露头显示断裂带宽约 190 m,汶川地震地表破裂带分布在断裂带底部,从 WFSD-1 断裂岩岩心分布(图 5)来看,575.7~759 m 深的断裂带是彭灌杂岩和晚三叠世须家河组的边界断裂带,因此,它是汶川地震断裂带。

在岩心约 100 m 厚的断裂带中,要确定汶川地震的主滑移带(PSD)的位置不是一件容易的事,这需要多方面的综合研究,如从断层泥的新鲜程度、测井数据异常特征、粘土矿物变化和显微构造分析等综合研究。从岩心断裂带中的断层泥的新鲜程度来

看,也只有在约 590 m 深处的断层泥最为新鲜。

5.2.2 测井分析

从常规测井曲线(图 11)上可看出:自 585 m 深开始,井径不规则,586~590 m 扩径,591~594 m 缩径(图 4-b);585~600 m 孔深段出现约 0.15°C 的温度异常峰值(图 11-b),自然伽马明显从 60API 升高到约 90API(图 11-c),声波时差从 60 μ s/ft 增加到大于 100 μ s/ft(图 11d),自然电位有微弱负异常(图 11-e),视电阻率明显从约 2 000 Ω m 降低到几十 Ω m(图 11-f);590 m 孔深处的岩心出现高磁化率峰值(图 11-g)。

从井孔的测温曲线(图 11-b)上看,15 m 范围内的温度正异常峰值的出现有三种可能:(1)岩石破裂摩擦产生高温,随着时间的变化仍残留在岩石中的摩擦热,如 TCDP 钻孔中保留的集集地震产生的摩擦热的残余^[42];(2)该处有流体作用的影响而造成的热异常;(3)具有某种放射性成分的岩石,而产生的热异常。如果过一段时间后再去测量钻孔温度,通常第一种情况下产生的温度正异常峰值会变小,而后两种情况下通常不会有变化。一年后笔者又去测量 WFSD-1 钻孔温度,在同样深度位置(585~600 m 孔深段)仍然出现温度异常,只是由原来的 0.15°C 的异常变小为 0.018°C^[43],因此,该处的温度(正)异常可能是由于汶川地震的摩擦热的残留,也就是汶川地震的残余热,那么,该处的断裂带极有可能就是汶川地震断裂带,而且汶川地震主滑移带可能在 590 m 左右孔深位置。

另外,井径的不规则变化可能反映的是岩石的破碎程度不同,以及断层泥遇水后易膨胀而造成缩井等特征;自然伽马、声波时差、自然电位、视电阻率等这些变化反映了从火山岩到断层岩(断层泥)的岩性变化。

在约 590 m 深处断裂带中,至少有 12 层断层泥,只有一处深黑色的断层泥(589.17~589.25 m 孔深段)看上去最为新鲜(图 11-g),同时,该段的磁化率也比较高(图 11-h),这种断层泥出现高磁化率可能是由于摩擦产生的高温作用造成含磁矿物成分增加所致^[42,45-47]。台湾集集地震(Mw7.6)形成的断层泥只有 3 mm~2 cm 厚^[5,40,41],因此,大约 8 cm 宽的黑色新鲜断层泥可能并不都是汶川地震的产物。

5.2.3 显微构造分析

笔者选取了包括新鲜断层泥在内的从 589.04~

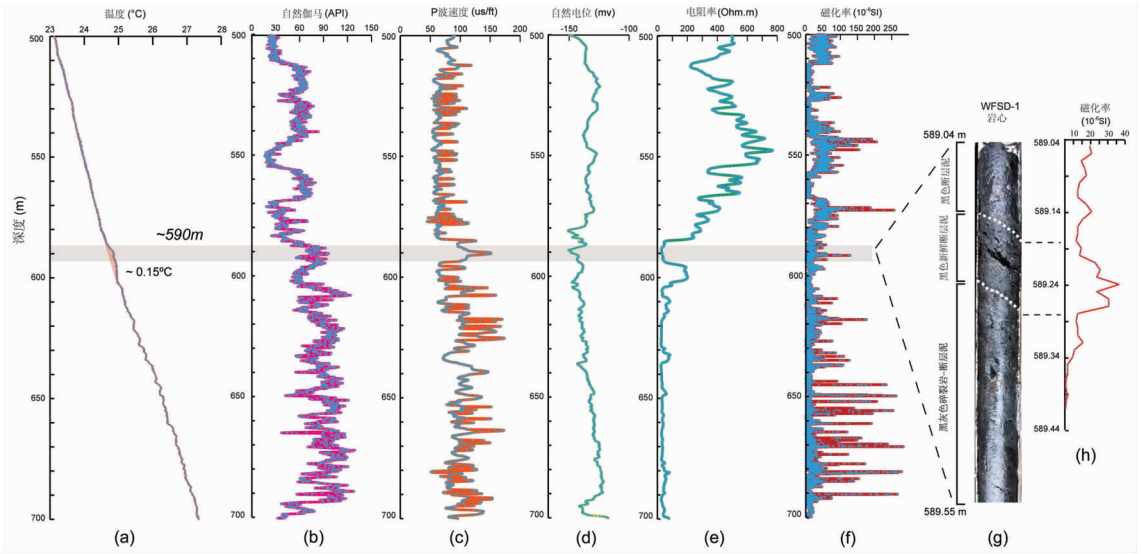


图 11 在 500~700 m 孔深的主要断裂带的测井和岩心数据

所有异常出现在 590 m 的深度;(a)—钻孔测温曲线,可见~0.15°C 异常峰值,可能是由于汶川地震过程中摩擦热的剩余热;(g)—汶川地震主滑移带(PSZ)位于最新鲜的黑色断层泥中

Fig.11 Logging and core data of the main fault zone at 500 - 700 m-depth

All anomalies appear at 590 m-depth. (a)-Borehole logging temperature curve, with ~0.15 °C anomaly peak, probably reflecting the residual heat which was produced by friction during the Wenchuan earthquake; (g)-The Wenchuan earthquake Principal Slip Zone (PSZ) seems to be located where the freshest black gouge is

589.34 m 孔深段岩心切制连续的岩石薄片(图 12),观测其显微构造特征。在岩心中能见到很多碎块,在新鲜断层泥(图 12 中黄色线之间)内部可见一些白色方解石小碎块和小脉体(图 12-b),而中间红色虚线部分部分的断层泥呈深黑色,并且基本不含方解石碎块和脉。从详细的显微构造照片(图 12-d)中可见到断层泥中面理构造发育,而且有 S-C 构造和不对称的旋转构造,指示着明显的剪切方向。在整个薄片只有红色虚线之间(589.21~589.22 m 孔深)颗粒相对较细、均匀(图 12-d),另外,通过连续的粘土矿物分析发现也只有该段部分具有较高的蒙脱石成分^[48],高的蒙脱石成分可作为确定 PSZ 的主要证据之一^[40,41]。因此,图 12-d 中红色虚线之间约 1 cm 厚的细颗粒部分可能为汶川地震主滑动带(PSZ),从显微照片中还可见到滑动面。

虹口地区地表断裂带研究显示汶川地震地表同震滑动带宽为 2~3 mm^[49]或 10~20 mm^[50]。由于地表同震滑动带中的断层泥含有伊利石和绿泥石矿物,但不含蒙脱石^[50],因此,表明地表同震滑动带的断层泥不是汶川地震形成的,而是古老地震形成的断层泥。

5.3 汶川地震主滑动带:一条映秀—北川断裂带内的斜切断裂

从新元古代彭灌杂岩与三叠纪沉积岩边界、测井数据、断层泥的新鲜程度和显微构造特征来看,在 WFSD-1 岩心中,汶川地震主滑移带(PSZ)的位置基本可以确定在 589.2 m 孔深左右的位置(具体为 589.21~589.22 m 孔深段),基本处在映秀—北川断裂带的上部,并且,在该孔深处形成约 1 cm 厚新鲜的断层泥。在虹口地表露头中,汶川地震地表破裂带(主滑移带)分布在约 190 m 宽的断裂带的底部,因此,从地表到地下深部,汶川地震 PSZ 斜切整个映秀北川断裂带(图 13 中粗红实线 FB)。表明汶川地震主断裂是一条映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂(滑动带)。

在 WFSD-1 岩心中,所有的 PSZ 证据都指示在大约 589 m 深处,在断裂带底部~749 m 深处并没有显示出足够的证据表明存在汶川地震 PSZ。为什么在 WFSD-1 岩心中汶川地震 PSZ 没有沿断裂带底部分布(图 13 中粗红虚线 FA),而分布在断裂带的上部呢? 这种特征可能由于彭灌杂岩与须家河组沉

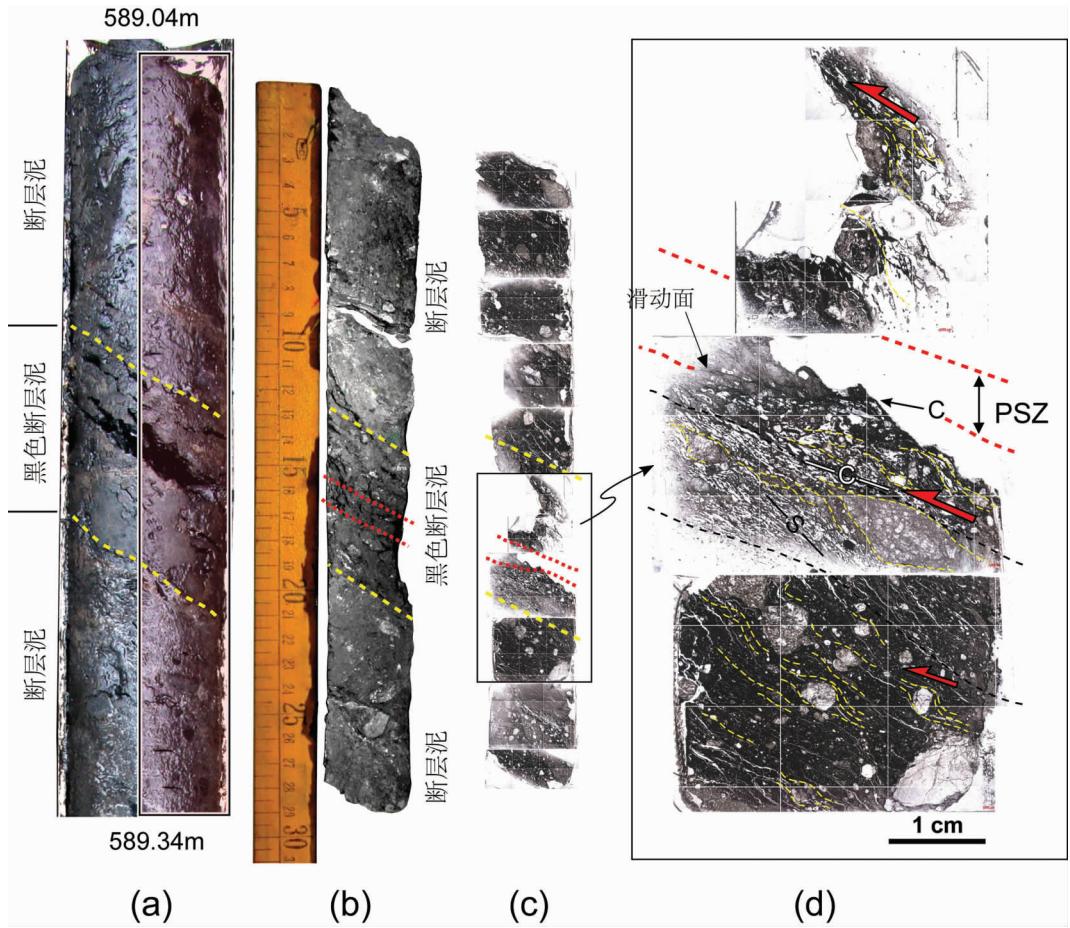


图 12 WFSD-1 岩心中 590 m 深处断裂带的新鲜断层泥显微构造

a—孔深 589.04~589.34 m 段断层泥岩心,中间段断层泥(黄色虚线之间)呈深黑色,并且中间已裂开,可能由于失水后,靠近滑移面易裂开所致,岩心右侧浅粉色框区域为切制薄片区域(图 b); b—整个岩心的 1/4 部分,岩心中间的张裂口已对接闭合,断层泥中白色碎块和条带为方解石;红色虚线之间颜色更黑,基本没有方解石条带和碎块; c—对应左侧 b 图的断层泥的连续薄片照片; d—断层泥的显微照片; 面理化断层泥中具 S-C 构造,红色虚线之间颗粒较细、均匀,为汶川地震主滑动带(PSZ),可见到滑动面

Fig.12 Microstructure of fresh gouge at 590 m—depth of WFSD-1 cores

a— The central part of the gouge is broken due to water loss and is located close to the slip plane. The pink area to the right is the location of thin sections; b— The broken part shows the bands of calcite (white fragments). The section between red dotted lines is darker and generally has no calcite; c— The continuous thin sections (plainlight) correspond to (b); d—Gouge microphotograph (plainlight). S-C fabrics occur in the foliated gouge. The PSZ of the Wenchuan earthquake is outlined by red dotted lines where fine and uniform grains as well as the slip plane can be observed

积岩之间的岩石能干性存在着较大的差别,因此在深部它们之间的边界是个极其软弱的滑动带,同时可能与地震震级大小还有关,具体怎样的联系还需要进一步研究。

另外,我们能够计算汶川地震 PSZ 的倾角。如果从地表破裂面的位置到 589 m 深的井中画一条直线,便获得一条滑动面倾角 65°。考虑到表面破裂面倾角为 75°~82°^[7],并从 589 m 深再向下具有一定的延伸,然后再逐渐变缓,那么可估计倾角约为 62°。因此,汶川地震的主滑移带(PSZ)具有倾向 N310~317°,倾角 62~65°(图 13 中粗的红实线 FB)。

表明汶川地震 PSZ 是一条新的高角度 (62°~65°)逆冲断裂,不完全沿袭古地震滑移带。

5.4 映秀—北川断裂带与地震活动性的关系

断层泥是断裂活动的重要产物,与地震活动有着密切关系^[5,51,52]。断层泥厚度与地震活动次数之间有着密切的联系^[5,36]。虽然断层泥厚度与地震强度、围岩岩性、流体性质等诸多因素有关,但是目前研究说明一次强震所产生的断层泥厚度为几毫米至几厘米^[5,6,40,52]。台湾集集地震(Mw7.6)形成的断层泥只有 3 mm~2 cm 厚^[5,40,41],十几厘米至几米厚的断层泥可能是多次强地震活动累积的结果。汶川地震事件产生

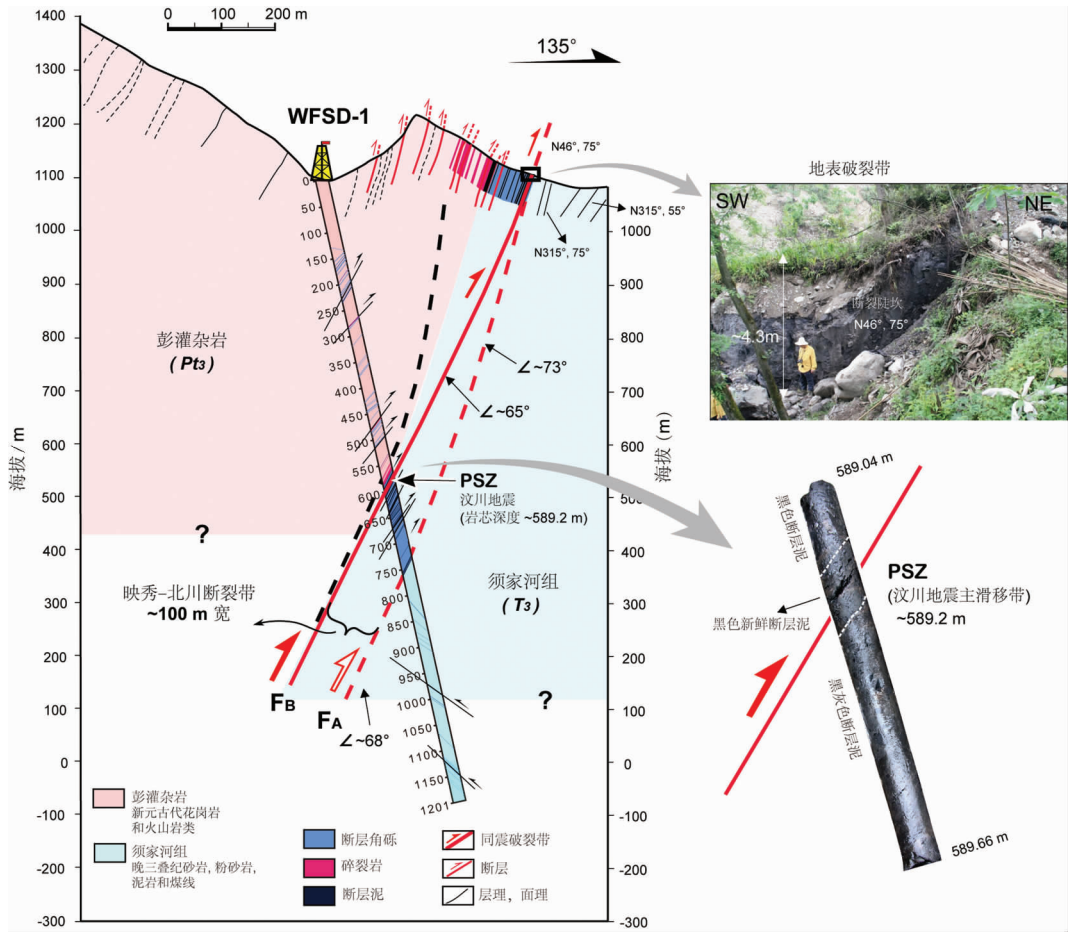


图 13 通过 WFS-1 钻井现场和汶川地震同震地表破裂带的地质剖面略图

野外露头中映秀—北川断裂带(包括碎裂岩、断层角砾岩和断层泥)大约宽 190 m。在断裂带底部露头中的地表破裂带走向 N46°E 和倾角 75°。FA—推断的同震断层位置,通过地表同震断层连接 WFS-1 岩心中映秀—北川断裂带底部断层泥的位置;FB—本研究中推断的同震断层(参见文本描述)。在 WFS-1 岩心中映秀—北川断裂带大约 100 m 宽,其特征类似于露头中所见的 190 m 宽的断裂带。映秀—北川断裂带在约 760 m 深的倾角大约 68°

Fig.13 Geological cross-section across WFS-1 drilling site of the 1200-m deep hole and co-seismic surface rupture zone of the Wenchuan earthquake

The width of the Yingxiu - Beichuan fault zone (consisting of cataclasite, fault breccia and fault gouge) is about 190 m at the outcrop. The surface rupture zone strikes N46°E and dips 75°NW at the bottom of the fault zone at the outcrop. FA: Co-seismic fault inferred from the dip angle observed at the surface and is connected with the bottom of the fault zone in WFS-1 cores. FB: Co-seismic fault inferred in this study (see text for details). The Yingxiu - Beichuan fault zone is about 100 m wide in the WFS-1 cores, similar to the 190 m-width of the fault zone at the outcrop. The dip angle of the Yingxiu - Beichuan fault zone is about 68° at the depth of ~760 m

约 1 cm 厚的断层泥,因此,在 WFS-1 约 590 m 深的岩心中出现约 8 cm 宽黑色新鲜断层泥可能是很多次(简单推算可能至少 8 次)类似汶川地震事件的产物。

从 WFS-1 岩心和地表露头中都显示出映秀—北川断裂带是由碎裂岩带、断层角砾岩和断层泥带组成的 100~190 m 宽的巨型断裂带,该断裂带中发育了几十条厚度不等的断层泥,断层泥的累计厚度较大,另外,在岩心中还可见多处细薄的断层泥条带,这些大多是地质历史中强烈地震活动的记录,

同时表明由很多高应变带核心组合的上百米宽的映秀—北川断裂带是由于长期的强烈地震活动所致。这种多高应变带核心特征可能表明映秀—北川断裂带的宽度与地震活动次数及其演化历史有着成因上的直接联系,同时,多次地震活动叠加的直接表现形式为龙门山的抬升。

5.5 映秀—北川断裂带与龙门山隆升作用

无论从 WFS-1 岩心和地表露头中都可看出,映秀—北川断裂带中的碎裂岩带部分主要都分布在

彭灌杂岩中,虽然,目前映秀—北川断裂带的断裂岩特征(碎裂岩、断层泥和断层角砾岩)显示为地壳浅部的脆性变形产物,但是代表相对较深些的碎裂岩部分已经出露到地表,它应该是目前可以看见的映秀—北川断裂带中最老的断裂岩,是龙门山早期快速崛起的直接产物。

目前,多数学者认为龙门山的快速抬升至少在10~15 Ma 前开始^[53-57],因此,分布在彭灌杂岩中的映秀—北川断裂带的碎裂岩带部分可能是10~15 Ma 前断裂活动(地震)所形成,也就是说,WFSD-1 岩心和地表露头中上百米厚的映秀—北川断裂带是从10~15 Ma 前至今长期活动和演化的结果。

6 结 论

汶川地震断裂带科学钻探项目(WFSD)提供了一个独特的机会去研究汶川地震断裂机制。通过对WFSD-1 钻孔1 201 m 深岩心的详细分析和研究,并结合钻孔测井数据分析,以及地表地质的研究,得出以下结论:

(1)WFSD-1 岩心中,在大约585 m 孔深以上发育由火山岩和花岗岩等组成的岩石为彭灌杂岩;在大约585 m 孔深以下由含煤系的砂岩、粉砂岩和砾岩等组成的岩石为晚三叠世须家河组地层。

(2)岩心中发育3种典型的断裂岩:断层泥、碎裂岩和断层角砾岩。在岩心中发育较多不同规模的断层泥,其厚度由2 mm~4 m 不等。位于彭灌杂岩和须家河组沉积岩之间大约590 m 孔深处的断裂带中的断层泥最厚(4 m),暗示着该断裂带具有长期地震活动性特征。

(3)根据岩心中断裂岩的分布特征,确定了龙门山中央断裂带(映秀—北川断裂带)由575.7~759 m 孔深段的断裂岩组成,其断裂带宽度大约100 m。在地表露头断裂带宽度约为190 m。

(4)结合测井数据、断层泥的新鲜程度和岩心高磁化率值的结果,确定约590 m 深处断裂带为汶川地震断裂,其中,在589.21~589.22 m 孔深处约1 cm 厚的黑色新鲜断层泥为汶川地震主滑移带(PSZ),因此,汶川地震主断裂在WFSD-1 岩心中分布在断裂带的上部,并没有像地表一样分布在断裂带的底部,表明它是一条在映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂(滑动带),并且不完全沿袭古地震滑移带。汶川地震断裂滑移面倾角为62°~65°,反映出高角度逆冲断

裂性质。

(5)从映秀—北川断裂带中断层泥分布特征来看,断裂带具有多高应变带核心特征,它是10~15 Ma 前至今经历了长期地震活动及其演化的结果,其长期地震活动的表现形式是龙门山的崛起。

致谢:感谢汶川科钻中心胡时友、张伟、贾军、樊腊生和牛一雄的帮助和支持,还要感谢四川省地矿局403地质队在钻井方面的艰辛工作以及和405地质队李辉华、张勇和汪宇航在岩心编录方面的努力工作,使得汶川科钻一号孔地学研究顺利进行。同时,还要感谢T. Shimamoto、姚路和王羽帮助我们在岩心断裂岩方面的再确认。

参考文献 (References):

- [1] Zoback M D, Hickman S, Ellsworth W. The Role of Fault Zone Drilling[J]. *Geophysics*, 2007, 4:649-674.
- [2] Xu Z Q, Ji S C, Li H B, et al. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake[J]. *Episodes*, 2008, 31 (3):291-301.
- [3] Brodsky E, Ma K F, Mori J, et al. Rapid response fault drilling: past, present and future. Report of the ICDP/SCEC International Workshop of Rapid Response Fault Drilling. Tokyo, Japan, 2009, Nov. 17-19.
- [4] Oshiman N, Shimamoto T, Takemura K. et al. Thematic issue: Nojima fault zone probe[J]. *Island Arc*, 2001, 10:195-505.
- [5] 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 [J]. *Nature*, 2006, 444 (7118):473-476.
- [6] Song S R, Kuo L W, Yeh E C, et al. Characteristics of the lithology, fault-related rocks and fault zone structures in the TCDP Hole-A[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 2007, 18: 243-269.
- [7] 李海兵, 付小方, Van D W, 等. 汶川地震(Ms 8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J]. *地质学报*, 2008, 82(12):1623-1643. Li Haibing, Fu Xiaofang, Van der Word, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geological Sinica*, 2008, 82(12):1623-1643 (in Chinese with English abstract).
- [8] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 MS 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. *地震地质*, 2008, 30 (3):597-629. Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jiangqing, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30 (3):597-629 (in Chinese with English abstract).
- [9] 付碧宏, 王萍, 孔屏, 等. 四川汶川 5_12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(10):2237-2243. Fu Bihong, Wang Ping, Kong Ping, et al. Preliminary study of coseismic fault gouge occurred in the slip zone of Wenchuan Ms

- 8.0 earthquake and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (10):2237–2243 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘静, 张智慧, 文力, 等. 汶川8级大地震同震破裂的特殊性及构造意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(12):1707–1722.
- Liu Jing, Zhang Zhihui, Wen Li, et al. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake co-seismic rupture and its tectonic implications: an out of sequence thrusting event with slip partitioned on multiple faults [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12):1707–1722 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 映秀—北川断裂的地表破裂与变形特征[J]. *地质学报*, 2008, 82 (12):1688–1706.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Surface rupture and deformation of the Yingxiu—Beichuan fault by the Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12):1688–1706 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑—逆冲作用的地貌标志[J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (1):40–52.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Geomorphic evidence for the late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen Mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (1):40–51(in Chinese with English abstract).
- [13] Burchfiel B C, Chen Z L, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China[J]. *International Geology Review*, 1995, 37 (8):661–735.
- [14] Densmore A L, Ellis M A, Li Y, et al. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2007, 26 (TC4005):doi:10.1029/2006TC001987.
- [15] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地质出版社, 1993:1–190.
- Tang Rongchang, Han Weibin. *Active Faults and Earthquake in Sichuan Province*[M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:1–190(in Chinese).
- [16] 冯先岳. 新疆古地震[M]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社, 1997:228–229.
- Feng Xianyue. *The Paleoearthquakes in Xinjiang Region, China* [M]. Urumqi:Xinjiang Science and Sanitary Press, 1997:228–229 (in Chinese).
- [17] 李海兵, 司家亮, 付小方, 等. 2008年汶川地震同震滑移特征、最大滑移量及构造意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(3):387–402.
- Li Haibing, Si Jialiang, Fu Xiaofang, et al. Co-seismic rupture and maximum displacement of the 2008 Wenchuan earthquake and its tectonic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29 (3):987–402(in Chinese with English abstract).
- [18] Fu B H, Shi P L, Guo H D, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40 (4):805–824.
- [19] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, 2009, 37 (6):515–518.
- [20] Liu Zeng J, Wen L, Sun J, et al. Surficial Slip and Rupture Geometry on the Beichuan Fault near Hongkou during the Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, China [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100 (5B):2615–2650.
- [21] 付碧宏, 时丕龙, 王萍, 等. 2008年汶川地震断层北川段的几何学与运动学特征及地震地质灾害效应 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(2):485–495.
- Fu Bihong, Shi Piping, Wang Ping, et al. Geometry and kinematics of the Wenchuan earthquake surface ruptures around the Qushan Town of Beichuan County, Sichuan: Implications for mitigation of seismic and geologic disasters [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2):485–495(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告[R]. 2008. <http://www.csi.ac.cn>.
- Chen Yuntai, Xu Lisheng, Zhang Yong, et al. Report on the great Wenchuan earthquake source of May 12, 2008 [R]. <http://www.csi.ac.cn>.
- [23] 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程 [J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(10):1186–1194.
- Zhang Yong, Feng Wanpeng, Xu Lisheng, et al. Spatio temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake[J]. *Science in China (series D)*, 2009, 52, (2):145–154 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川8.0级地震震源过程 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51 (5):1403–1410.
- Wang Weimin, Zhao Lianfeng, Li Juan, et al. 2008. Rupture process of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51 (5):1403–1410(in Chinese with English abstract).
- [25] Li C Y, Wei Z Y, Ye J Q, et al. Amounts and styles of coseismic deformation along the northern segment of surface rupture, of the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake, China [J]. *Tectonophysics*, 2010, 491:35–58.
- [26] 四川省地矿局. 灌县幅地质图(1:200000) [M]. 1975.
- Sichuan Bureau of Geology. *Geologic map of Guangxian (scale 1:200000)* [M]. 1975 (in Chinese).
- [27] 马永旺, 王国芝, 胡新伟. “彭灌杂岩”推覆体的构造变形特征[J]. *四川地质学报*, 1996, 16 (2):110–114.
- Ma Yongwang, Wang Guozhi, Hu Xinwei. Tectonic deformation of Pengguan complex as a nappe[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1996, 16 (2):110–114 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. *中国地质*, 2002, 29 (1):30–36.
- Li Yong, Hou Zhongjian, Si Guangying, et al. Cenozoic tectonic sequence and tectonic events at the eastern margin of the Qinghai–Tibet plateau [J]. *Geology in China*, 2002, 29 (1):30–36 (in Chinese with English abstract).
- [29] 许志琴, 李化启, 侯立玮, 等. 青藏高原东缘龙门山—锦屏山造山带的崛起: 大型拆离断层和挤出机制[J]. *地质通报*, 2007, 26(10):

- 1262–1276.
- Xu Zhiqin, Li Huaqi, Hou Liwei, et al. Uplift of the Longmen–Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai–Tibet Plateau: Large–scale detachment faulting and extrusion mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (10):1262–1276 (in Chinese with English abstract).
- [30] Yan Q R, Hanson A D, Wang Z Q, et al. Neoproterozoic Subduction and Rifting on the Northern Margin of the Yangtze Plate, China: Implications for Rodinia Reconstruction [J]. *International Geology Review*, 2004, 46 (9):817–832.
- [31] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction–related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248 (1–2):286–300.
- [32] Sibson R H. Fault rocks and fault mechanisms [J]. *Journal of the Geological Society*, 1977, 133 (3):191–213.
- [33] Faulkner D R, Jackson C A L, Lunn R J, et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32:1557–1575.
- [34] Chester F M, Logan J M. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1986, 124:79–106.
- [35] Faulkner D R, Rutter E H. The effect of temperature, the nature of the pore fluid, and subyield differential stress on the permeability of phyllosilicate–rich fault gouge [J]. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 2003, 108 (B5).
- [36] 王焕, 李海兵, 裴军令, 等. 汶川地震断裂带结构、岩性特征及其与地震活动的关系[J]. *第四纪研究*, 2010, 30 (4) :768–778.
- Wang Huan, Li Haibing, Pei Junling, et al. Structural and lithologic characteristics of the Wenchuan earthquake fault zone and its relationship with the seismic activity[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (4):768–778(in Chinese with English abstract).
- [37] Togo T, Shimamoto T, Ma S L, et al. Internal structure of Longmenshan fault zone at Hongkou outcrop, Sichuan, China, that caused the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Science*, 2011, 24:249–265, doi:10.1007/s11589–011–0789–z.
- [38] Lin A M, Maruyama T, Kobayashi K. Tectonic implications of damage zone–related fault–fracture networks revealed in drill core through the Nojima fault, Japan[J]. *Tectonophysics*, 2007, 443:16–173.
- [39] Sibson R H. Thickness of the seismic slip zone [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93 (3):1169–1178.
- [40] Kuo L W, Song S R, Yeh E C, et al. Clay mineral anomalies in the fault zone of Chelungpu Fault, Taiwan, and its implication[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (L18306):doi:10.1029/2009GL039269.
- [41] Kuo L W, Song S R, Huang L, et al. Temperature estimates of coseismic heating in clay–rich fault gouges, the Chelungpu fault zones, Taiwan[J]. *Tectonophysics*, 2011, 502 (3–4):315–327.
- [42] Kano Y, Mori J, Fujio R, et al. Heat signature on the Chelungpu fault associated with the 1999 Chi–Chi, Taiwan earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (L14306):doi:10.1029/2006GL026733.
- [43] Li H B, Xu Z Q, Si J L, et al. Characteristics of the fault–related rocks, fault zone structures and the principal slip zone of the Wenchuan earthquake in WFSD drilling cores American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, San Francisco, 2010, T53E–02, Dec. 13–17.
- [44] Hirono T, Ikehara M, Otsuki K, et al. Evidence of frictional melting from disk–shaped black material, discovered within the Taiwan Chelungpu fault system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (L19311):doi:10.1029/2006GL027329.
- [45] Hirono T, Fujimoto K, Yokoyama T, et al. Clay mineral reactions caused by frictional heating during an earthquake: An example from the Taiwan Chelungpu fault [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (L16303):doi:10.1029/2008GL034476.
- [46] Tanikawa W, Mishima T, Hirono T, et al. High magnetic susceptibility produced by thermal decomposition of core samples from the Chelungpu fault in Taiwan[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272 (1–2):372–381.
- [47] 裴军令, 李海兵, 孙志明, 等. 汶川地震断裂带断层滑移作用—来自高磁化率断层岩的信息[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4):750–758.
- Pei Junling, Li Haibing, Sun Zhiming, et al. Fault slip in the Wenchuan earthquake fault zone—information from fault rocks with higher magnetic susceptibility [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (4):759–767 (in Chinese with English abstract).
- [48] Si J L, Li H B, Song S R, et al. Clay mineral anomalies in WFSD drilling core and surface fault rocks and their significences. American Geophysical Union, Fall Annual Meeting. San Francisco, T51B–2044, Dec. 13–17, 2010.
- [49] Lin A M. Seismic slip recorded by fluidized ultracataclastic veins formed in a coseismic shear zone during the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake [J]. *Geology*, 2011, 39:547–550, doi:10.1130/G32065.1.
- [50] Togo T, Shimamoto T, Ma S L, et al. Internal structure of Longmenshan fault zone at Hongkou outcrop, Sichuan, China, that caused the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Science*, 2011, 24:249–265.
- [51] 林传勇, 史兰斌, 刘行松, 等. 断层泥在基岩区断层新活动研究中的意义[J]. *中国地震*, 1995, 11(1):26–32.
- Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Liu Xingsong, et al. Significance of fault gouge in the study of recent activity of fault in bedrock area [J]. *Earthquake research in China*, 1995, 11 (1):26–32 (in Chinese with English abstract).
- [52] Sibson R H. Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting [J]. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 1975, 43:775–794.
- [53] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 2005, 33, 525–529.

- [54] Godard V, Pik R, Lavé J, et al. Late Cenozoic evolution of the central Longmen Shan, eastern Tibet: Insight from (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Tectonics*, 2009, 28, TC5009.
- [55] Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology [J]. *Tectonics*, 2002, 21, TC1246.
- [56] Ouimet W, Whipple K, Royden L, et al. Regional incision of the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Lithosphere*, 2010, 2, 50–63.
- [57] Wang E Q, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic [J]. *Nature Geoscience*, 2012, doi:10.1038/NNGEO1538.

The Principle Slip Zone of the 2008 Wenchuan earthquake: a thrust fault oblique cutting the Yingxiu–Beichuan fault zone

LI Hai-bing^{1,2}, XU Zhi-qin^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, SI Jia-liang^{1,2}, LI Tian-fu^{1,2},
SHONG Sheng-rong³, PEI Jun-ling⁴, GUO Li-wei³, SUN Zhi-ming⁴, HUANG Yao⁵,
CHEVALIER Marie-Luce^{1,2}, LIU Dong-liang^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Continental Tectonic and Dynamics, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei, China;
4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 5. No. 6 Geological Party of Jiangsu Geology & Mineral Resources Bureau, Lianyungang 222300, Jiangsu, China)

Abstract: The May 2008 Ms 8.0 disastrous Wenchuan earthquake occurred in the eastern margin of Tibetan Plateau, producing 270 and 80 km-long different kinematics features coseismic surface ruptures along the Yingxiu–Beichuan and Anxian–Guanxian faults, respectively. Drilling in active fault zones, especially after large earthquakes, is an effective way to study earthquake mechanisms, in order to better understand the fault mechanisms during the earthquake process as well as physical and chemical characteristics of rocks. The Wenchuan earthquake Fault Scientific Drilling project was carried out on November 6, 2008 (178 days after the Wenchuan earthquake). Five boreholes were ultimately drilled along the Yingxiu–Beichuan and Anxian–Guanxian faults, ranging from 600 m to 3000 m in depth. This paper focuses on the cores of the first hole (WFSD-1). Petrological and structural analysis of the cores allowed the identification of the distribution and combination of fault-related rocks in the Yingxiu–Beichuan fault, and the Principle Slip Zone (PSZ) location of the Wenchuan earthquake was determined, which provided a basis for further research on earthquake mechanism.

The detail analysis of the cores reveals the existence of a fault zone, which is about 100 m wide from 575 m to 759 m in depth and consists of gouge, cataclasite, and fault breccia. From the top to the bottom there exist mainly cataclasite zone, fault gouge and fault breccias mixed zone, breccias zone and fault gouge zone. This fault zone lies between the Neoproterozoic Pengguan complex and Triassic Xujiahe sedimentary rocks, which is the Yingxiu–Beichuan fault zone, mainly distributed in Xujiahe Formation. The Principle Slip Zone (PSZ) of the Wenchuan earthquake was found at ~589 m with ~1 mm fresh fault gouge, which lies in the upper part of Yingxiu–Beichuan fault zone, as evidenced by logging data, and clay mineral analysis, in combination with the microstructure of the gouges. There exist similar structures between Pengguan complex and Triassic Xujiahe Formation in Hongkou outcrop with the thickness of about 190 m, lying at the bottom of the Yingxiu–Beichuan fault zone. Hence, The Wenchuan earthquake fault slip cut the Yingxiu–Beichuan fault zone obliquely, indicating that Wenchuan earthquake fault might be a new high-angle thrust fault with a dip angle of 62°–65°, which did not totally follow the slip zone of ancient earthquake and might be related to the earthquake magnitude. It is the result of the long term earthquake activity and evolution from about 10–15 million years ago to the present, which formed the 100~190 m-wide Yingxiu–Beichuan fault zone.

Key words: Wenchuan earthquake fault scientific drilling (WFSD); Principle Slip Zone (PSZ) of the Wenchuan earthquake; drill cores; Yingxiu–Beichuan fault; Longmen Shan

About the first author: LI Hai-bing, male, born in 1966, senior researcher, mainly engages in the study of structural geology and active tectonics; E-mail: lihaibing06@yahoo.com.cn.