

川滇地区类似汶川 8.0 级地震的发震构造对比研究^{*}

谢英情, 张建国, 李 西, 张彦琪, 施伟华, 刘 娜

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 在分析汶川地震发震构造和玉龙—龙门深断裂系的组成及活动特征基础上, 利用构造类比的方法, 筛选和对比研究了川滇地区与发生汶川 $M_s 8.0$ 地震的龙门山断裂类似的地震构造。结果表明, NE向的小金河断裂具有 $M_s \geq 7.0$ 地震的发震能力, 可能是潜在的大震危险区。

关键词: 川滇地区; 汶川 8.0 级地震; 发震构造; 构造类比; 大震危险区

中图分类号: P315.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)增刊-0505-10

0 引言

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒, 四川省汶川县 ($31^\circ N$ $103.4^\circ E$) 发生 $M_s 8.0$ 地震。根据四川地震台网的月报目录^①, 截至 6 月 30 日, 已记录到 $M_s 8.0$ 地震 1 次、 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震 5 次、 M_s 及 $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震 49 次。

这次发生在龙门山断裂带的特大地震, 出乎绝大多数地震工作者的预料, 震前不仅无短临地震预报, 甚至连长期预测意见都鲜见。历史记载龙门山断裂带没有 $M_s \geq 7.0$ 大地震的发生, 以往研究一般认为该断裂带是中、晚更新世活动断裂(唐荣昌等, 1993), 在中国地震动参数区划图说明书(2001)上给出该断裂带的地震动峰值加速度为 $0.1g$ (基本地震烈度为 VI 度), 属于中强地震危险区。

这场突如其来的特大地震, 震感几乎波及整个中国和东南亚地区, 是新中国建国以来损失最为惨重的地震灾害, 给四川、甘肃、陕西、重庆、云南、青海等省、市震区的人民生命和财产造成了重大的损失: 死亡 69 197 人, 失踪 18 222 人, 受伤 374 176 人(中国新闻网, 截至 7 月 21 日)。巨大的灾情, 强烈地震撼着人们的心灵, 也促使地震工作者认真思考: 川滇地区是否还有类似的断裂带和大震危险区?

地质学中经常应用类比的方法根据已知对象推论或预测未知研究对象, 地震构造类比的原则和方法, 就是相似类比原理在地震学中的运用。胡聿贤等(1999)提出的地震构造类比原则指某地区历史上虽然没有强地震或中等强度地震记载, 但与已经发生强震地区的构造条件具有类似的特点, 就可以划为具有同类震级的潜在震源区; 或者是指虽无强震记载, 但已发现有古地震遗迹的地段, 可划为相当于最大古地震震级的潜在震源区。《工程场地地震安全性评价技术规范》(1999)采用的构造类比定义为: 一种地震活动性分析方法, 该方法认为具有同样构造标志的地区, 有发生同样强度地震的可能。

在地震区划、地震危险区划分和潜在震源区划分等研究工作中, 通常采用地震构造类比的原则和方法。笔者根据地震构造类比的原则和方法, 对比研究了川滇地区与汶川 $M_s 8.0$ 地震类似的发震构造, 期望引起人们对该类发震构造及其潜在大震危险区的重视与警惕, 同时为进一步的相关研究起到抛砖引玉的作用。

1 汶川特大地震的发震构造分析

1.1 构造分析

汶川 8.0 级地震与龙门山断裂关系密切: 汶川 8.0 级地震微观震中^① 位于龙门山断裂带的龙门山

^{*} 收稿日期: 2008-07-21.

基金项目: 云南省科技厅重点项目“城市地震安全关键技术应用与示范研究”(2007CA02)资助。

① 四川省地震局, 2008. 四川地震台网月报目录.

主中央断裂（北川—映秀深断裂）中西段上，具体为该断裂与金汤弧形（褶皱）断裂带及茂汶断裂交汇的构造部位（图 1）（云南省地矿局，1990；四川省地矿局，1991；唐荣昌等，1993；毛玉平等，2003）；地震现场调查得到的宏观震中也处于该断裂上的映秀—北川一带。

1.2 烈度等震线分析

震后的震害现场调查圈出由 VI ~XI度共 6 个等级的近似椭圆形等震线^①，方向性非常明显，大致呈 45°方向分布。等震线展布方向与龙门山断裂一致，其中 IX ~XI度极震区与断裂带几乎完全重合（图 2）^②。

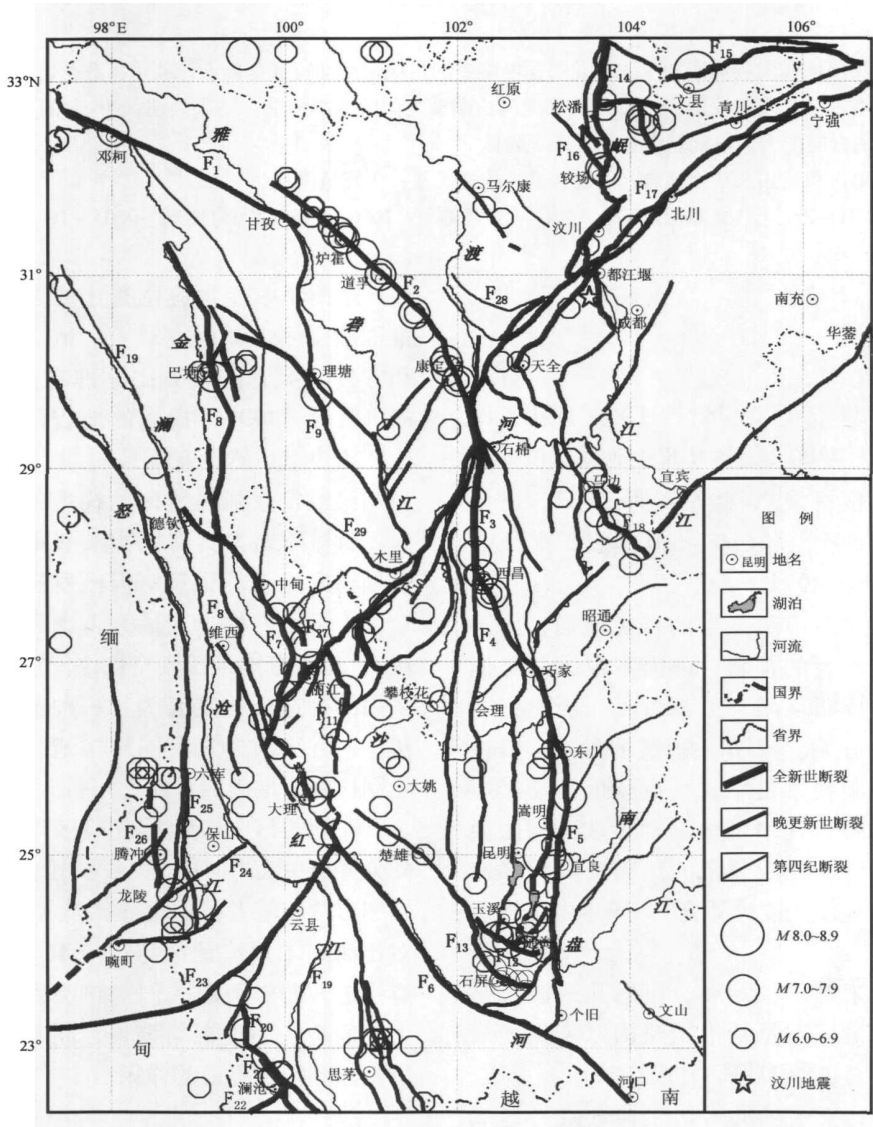


图 1 区域地震构造简图

F₁: 甘孜—玉树断裂；F₂: 鲜水河断裂；F₃: 安宁河断裂；F₄: 则木河断裂；F₅: 小江断裂；F₆: 红河断裂；F₇: 中甸—剑川断裂；F₈: 金沙江断裂；F₉: 理塘断裂；F₁₀: 小金河断裂；F₁₁: 程海断裂；F₁₂: 曲江断裂；F₁₃: 楚雄—建水断裂；F₁₄: 岷江断裂；F₁₅: 文县断裂；F₁₆: 松平沟断裂；F₁₇: 龙门山断裂；F₁₈: 马边—大关断裂；F₁₉: 澜沧江断裂；F₂₀: 木里断裂；F₂₁: 澜沧—勐遮断裂；F₂₂: 孟连断裂；F₂₃: 南汀河断裂；F₂₄: 龙陵—瑞丽断裂；F₂₅: 怒江断裂；F₂₆: 腾冲火山断裂；F₂₇: 玉龙雪山—东麓断裂；F₂₈: 金汤弧形断裂；F₂₉: 木里弧形断裂

① 四川汶川 8.0 级地震国家地震现场应急工作队. 2008 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震灾害损失评估报告.
② 中国地质调查局. 2001. 1:50 万中国地质图.
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

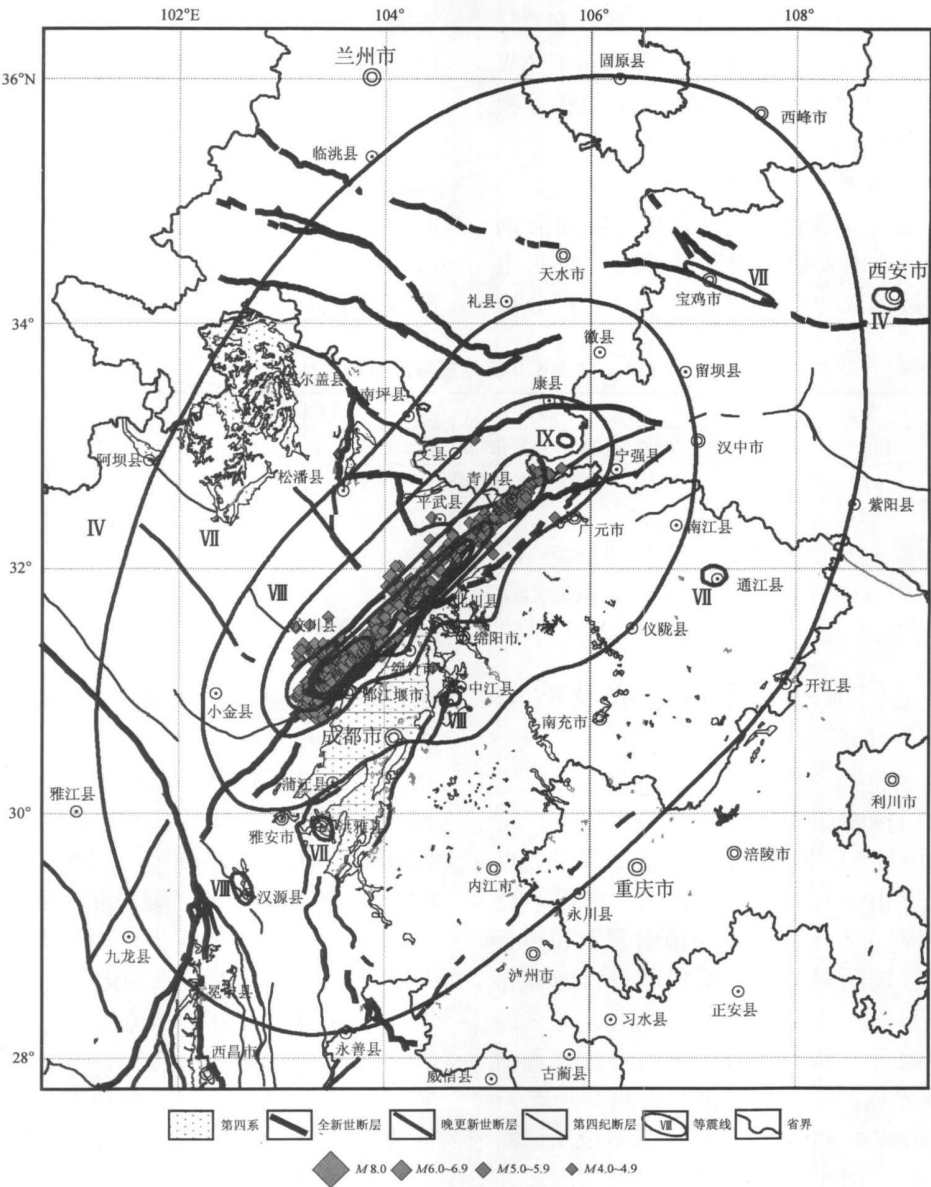


图 2 汶川地震序列、等震线及震区构造简图

1.3 地震序列分析

根据四川地震台网月报目录（截止到 2008 年 6 月 30 日）进行 GIS 分析可知：汶川地震序列共记录到 4 级以上地震 517 个，其中 4~4.9 级地震 462 个（占 89.4%），5~5.9 级地震 49 个，6~6.9 级地震 5 个，8 级地震 1 个；该序列呈 NE 向分布，空间位置上与龙门山断裂带重合较好，主体分布在龙门山主中央断裂（北川—映秀深断裂）的 NW 一侧，显示地震序列的破裂活动与龙门山断裂关系密切（图 2）；地震序列破裂的长度约 320 km，与 IX 度区长一致；地震序列破裂的深度范围为 1~60 km，优势深度为 11~30 km（占 67%）。

1.4 地表形变带分析

根据中国地震局地质研究所的应急科学考察成果分析：地表形变带总体走向 40°~50°（邓志辉等，2008），主要由地表破裂及滑坡组成；地表破裂带出现在龙门山断裂带的两条分支断裂上，沿龙门山主中央断裂延伸的西支破裂带长 200 km，沿龙门山主边界断裂延伸的东支破裂带长 80 km；地表破裂方式以挤压逆冲兼有右旋走滑位移为主，最大垂直和水平同震位移出现在龙门山主中央断裂上的都江堰市虹口乡深溪村附近，分别为 5 m 和 4.8 m；都江堰市虹口乡八角村发现的地震断层（垂直位错 4.3 m）破裂面产状为 302°。

∠76°，破裂面见向 SW侧伏的擦痕，侧伏角 75°（下部）~80°（上部），反映主震致使断层 NW盘相对 SE盘经历了 2个逆冲兼有右旋的位错过程（何宏林等，2008）。

1.5 震源机制解分析

根据中国地震局陈运泰等人^①和美国地质调查局（USGS）、哈佛大学相关网站给出的汶川主震矩张量解和最佳双力偶解的数据（表 1）分析

表明：节面 A显示 SW（NE）走向 229°~238°（49°~58°），倾向 NW，倾角 33°~59°，在 NW~SE向（283°~302°）主压应力（P轴与节面 A的锐交角 54°~64°较大）作用下，可产生逆冲兼有右旋走滑分量的破裂活动。该节面反映的破裂面产状及破裂活动特征与龙门山断裂的产状及其活动性质类似，可代表龙门山断裂的深部发震构造破裂事件。

表 1 汶川 8.0级地震震源机制解结果

M_w	节面 A			节面 B			P轴		T轴		N轴	
	走向 / (°)	倾角 / (°)	滑动角 / (°)	走向 / (°)	倾角 / (°)	滑动角 / (°)	方位 / (°)	仰角 / (°)	方位 / (°)	仰角 / (°)	方位 / (°)	仰角 / (°)
7.9 ^①	238	59	128	2	47	45	302	6	202	57	36	31
7.9 ^②	229	33	141	352	70	63	103	20	2	25	227	57
8.3 ^③	229	43	123	7	55	63	116	7	222	67	23	22

注：① USGS CMT资料，② 哈佛大学 CMT资料，③ 陈运泰小组 CMT资料。

2 玉龙—龙门深断裂系的组成及活动特征

玉龙—龙门深断裂系（任纪舜等，1985）指龙门山到玉龙山呈 NE方向延展的一组断裂带，也称龙门山—锦屏山—玉龙雪山中新世代推覆构造带（潘桂棠，1983），主要由龙门山断裂带和小金河断裂带组成。该断裂系在地质、地貌和地球物理异常上均有显示：从古生代到三叠纪，是东部台区（扬子准地台）和西部槽区（松潘甘孜地槽褶皱系）的分界线；新生代以来，青藏高原东南缘隆升形成的海拔 4 000 m以上高山基本位于该断裂系的北西一侧（图 4），是青藏高原的东南边界（四川省地矿局，1991）；构造位置与巨型 NE向重、磁异常带重合。

2.1 地表特征

（1）龙门山断裂带

由 3条近于平行的 NE向断裂组成（图 1）（四川省地矿局，1991）。

① 龙门山主边界断裂（江油—灌县断裂）：北起广元，经江油、灌县，南达天全西南，长 400 km。断裂总体走向 45°，倾向 NW，倾角 60°~70°，断面多呈舒缓波状，可见指示右旋错动的斜冲和水平擦痕，时见数米宽挤压破碎带及糜棱

岩化构造岩。断裂沿线垭口、槽谷和断层崖等地貌发育。断裂两侧地貌景观差异明显，NW侧山峦叠嶂，SE侧为开阔盆地。

② 龙门山主中央断裂（北川—映秀断裂）：北起广元，经北川、映秀，南达泸定，长 500 km。断裂的次级断层平面多分叉、复合，总体走向 45°，倾向 NW，倾角 60°，断面呈波状，可见叠置的推覆岩片夹于其间。断裂带发育片理、糜棱岩塑性柔皱流变带及石香肠和压扁变形的化石及砾石。

③ 龙门山后山断裂（茂汶断裂）：北起茂汶，南经汶川、陇东至泸定，长 230 km。断裂总体走向 30°~50°，倾向 NW，倾角 50°~70°，断裂沿线可见水系及山脊同步扭动显示的右旋位错特征。

（2）小金河断裂带

小金河断裂带（四川省地矿局，1991；唐荣昌等，1993）由多条斜列及平行次级断裂组成，也称小金河—三江口断裂（云南省地矿局，1990）、小金河—丽江断裂或丽江—剑川断裂（国家地震局地质研究所等，1990）、丽江—小金河断裂（向宏发等，2002；徐锡伟等，2003）、丽江—木里断裂等（毛玉平等，2003）。该断裂带西南起自剑川盆地，向 NE经丽江、宁蒗入川，沿小金河、锦屏山达石棉西油房与安宁河断裂相交汇（图 1），全长约 350 km，总体走向 40°，SW段倾向 SE，NE段倾向 NW，倾角 60°~80°（徐锡伟等，2003）。该断裂斜切“川滇菱

① 陈运泰，许力生，张勇，等，2008. 2008年 5月 12日汶川特大地震震源特性分析报告. 1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

形地块” (向宏发等, 2002), 上古生界浅变质岩沿断裂向 SE 逆冲叠覆在三叠系之上。断裂带两侧构造挤压带中小柔皱及劈理发育, 地层有牵引、倒转现象 (四川省地矿局, 1991)。沿断裂带有基性、超基性岩浆的侵入和喷发活动及温热带分布 (云南省地矿局, 1990)。

2.2 深部特征^①

(1) 与地幔陡坡带重合

玉龙—龙门深断裂系与平武—康定—木里地幔陡坡带重合, 该带属于环绕青藏高原的弧形地幔陡坡带, 长约 950 km, 宽 130~160 km, 呈 NE 向带状分布。带内莫霍面向 NW 陡倾, 平均每千米

变化 0.7 km。
(2) 与重磁异常带重合
川滇地区存在一条显著的巨型 NE 向龙门山—石棉—丽江重力梯度带 (四川、云南两省地矿局的物探队分别称龙门山—大雪山或木里—丽江重力梯度带^②)。该重力梯度带长约 950 km, 宽 150~200 km, NE、SW 两端分别转化为近 SN 向和近 EW 向梯度带, 中部沿安宁河断裂显示左旋扭曲。梯度带 NE 段梯度大于 SW 段, 平均每千米变化率分别为 $1.88 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、 $0.5 \times 10^{-5} \sim 0.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。龙门山—石棉—丽江重力梯度带与玉龙—龙门深断裂系重合 (图 3 布格重力异

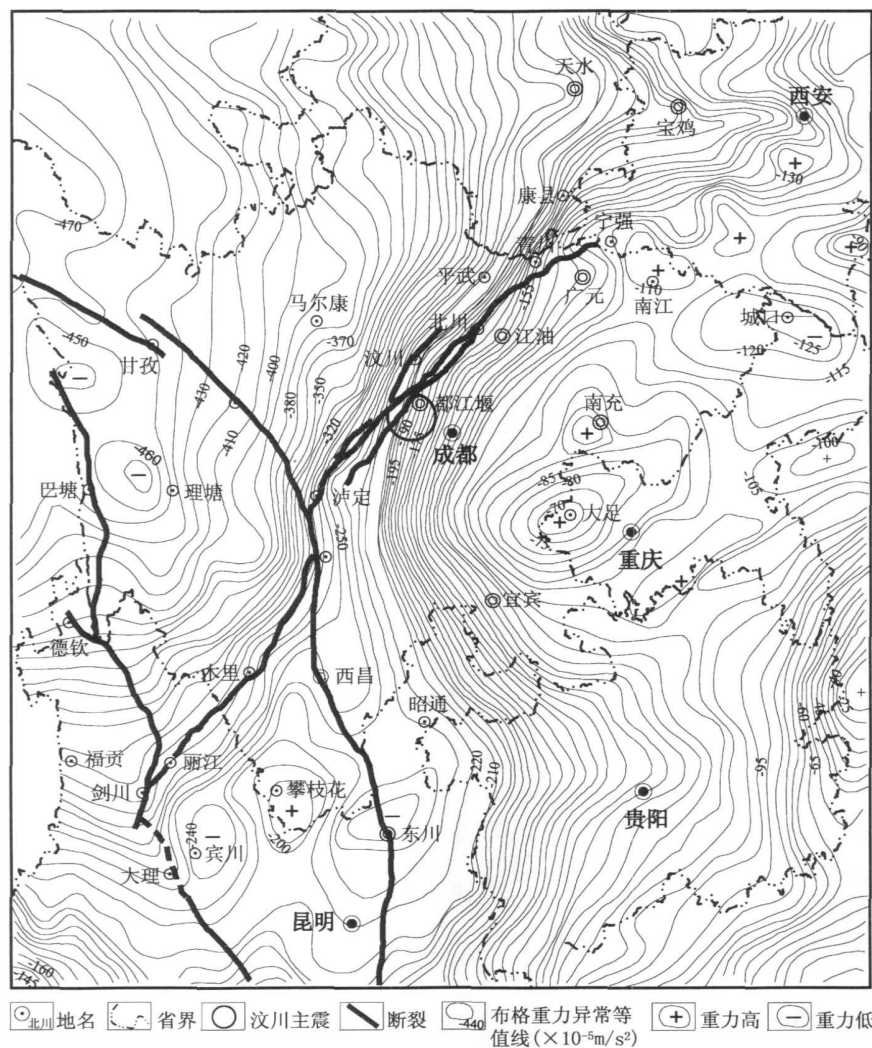


图 3 玉龙—龙门断裂系 布格重力异常图

① 四川省地质矿产局物探队. 1991. 四川省重力航磁异常综合研究报告.
② 云南省地质矿产局物探队. 1988. 云南省区域物化探资料综合研究报告.

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

常资料来源于 2006 年中国地震局升级的 2.6.11 版 MapSIS 软件的地图数据库), 可能反映龙门山断裂带和小金河断裂带是深部切穿莫霍面的超壳断裂带。

玉龙—龙门深断裂系与 NE 向航磁异常带重叠对应关系也很明显。其中龙门山断裂带与 NE 向高强度正磁异常带重合 ($20 \sim 160$ nT), 小金河断裂带主要与 NE 向木里—丽江负磁异常带重合 (异常带宽约 $20 \sim 40$ km, 强度不大, 仅 $-10 \sim -20$ nT)。

(3) 人工地震剖面显示

1986 年和 1987 年, 地科院 562 综合大队单独及成都地院和地矿部二部联合分别测制了横穿龙门山断裂带的黑水—松桃 ($1\ 300$ km) 及阿坝—简阳 (700 km) 爆炸地震测深剖面。两条剖面均显示龙门山断裂深部可切穿壳—幔混合层, 断面多向 NW 倾斜, 个别向 SE 倾斜。四川地区地壳大致可以壳内低速层为界, 分为上、下地壳层。龙门山断裂及其以北的阿坝地区上地壳厚 $37 \sim 40$ km, 下地壳厚 $23 \sim 28$ km, 地壳分层数较多, 可达 $10 \sim 11$ 层, 上地壳内发育多个低速层 ($5.80 \sim 5.85$ km/s)。

2.3 动力学特征

主要地壳动力源来自印度板块与欧亚大陆碰撞及其向北 $50 \sim 60$ mm/a 的推挤 (丁国瑜等, 1991), 引起青藏高原的地壳物质东向逃逸或侧向挤出 (Tapponnier 等, 1976)。其中, 川滇块体主压应力场呈 SE—SSE 向, 块体以 8 mm/a (丁国瑜等, 1991) 的速率向 SE 方向运动, 致使小金河断裂产生左旋走滑兼有逆冲分量的运动; 马尔康 (川青或甘青) 块体主压应力场呈近 EW 或 SEE 向, 块体以 5 mm/a (丁国瑜等, 1991) 速率向东运动, 致使龙门山断裂产生逆冲兼有右旋走滑分量的运动。GPS 观测结果显示, 青藏高原内部地壳物质流动表现为绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转 (连续变形), 造成高原东边界的地壳缩短和增厚, 垂直于龙门山断裂的缩短速率为 (4 ± 2) mm/a, 运动矢量在川西一带为 NEE 方向, 到云南中部转为 SSE 方向 (张培震等, 2004)。

1991~2003 年的 GPS 监测成果表明: 龙门山断裂附近的甘青块体向 SEE (107°) 方向运动, 速率为 (10.7 ± 3.2) mm/a; 龙门山断裂两盘呈

右旋挤压运动的速率为 (1.2 ± 2.2) mm/a, 远小于鲜水河断裂左旋走滑的运动速率 (9.3 ± 3.2) mm/a (唐文清等, 2005)。断裂地质位错模型的 GPS 数据 (1999~2001) 反演解显示, 小金河 (剑川) 断裂的左旋走滑分量为 11.1 mm/a, 逆冲倾滑分量为 1.9 mm/a (申重阳等, 2002)。

2.4 断裂的活动性

对龙门山断裂和小金河断裂活动性的认识在汶川特大地震发生以前存在较大差异, 主流认识它们是晚更新世活动断裂, 具有中强地震活动能力; 21 世纪以来, 有少数专家、学者认为这两条断裂属全新世活动断裂, 具有 $M \geq 7.0$ 地震的震能力。

两条断裂在航、卫片上的线形影像清晰, 对青藏高原东南边界的地形、地貌具有明显的控制作用: 小金河断裂是川西高原强烈抬升区的东南边界, 北西盘为贡嘎山强隆区; 龙门山断裂是川西北强烈抬升区的东南边界, 北西盘为龙门山强隆带 (图 4)^① (云南省地矿局, 1990; 四川省地矿局, 1991; 唐荣昌等, 1993; 毛玉平等, 2003)。

(1) 龙门山断裂

四川省地震局唐荣昌等 (1993) 根据断错地貌, 断错地层, 断层带物质的热释光 (TL)、电子自旋共振 (ESR)、铀系法及石英碎砾电镜形貌分析 (SEM) 测年等成果, 认为龙门山的三条断裂在中晚更新世有过活动, 并且中南段活动时代更新一些; 李勇等 (2006) 利用地表断距的精确测量和测年数据, 定量计算了青藏高原东缘龙门山主干断裂的逆冲速率 (一般小于 1.1 mm/a) 和走滑速率 (一般小于 1.46 mm/a), 结果表明龙门山断裂晚新生代构造变形微弱, 并且右旋走滑分量明显大于逆冲分量; 周荣军等 (2006) 根据古地震资料推测龙门山断裂带的 3 条主干断裂皆具备发生 7 级左右地震的能力, 判定单条断裂上的强震复发间隔至少应在 $2\ 000 \sim 3\ 000$ a 左右; Alexander 等 (2007) 认为, 北川断层 (龙门山主中央断裂) 和彭灌断层 (龙门山主边界断裂) 为晚更新世—全新世活动断层, 表现为逆冲—右旋运动性质, 且走滑位移量要大于垂直位移量, 断层的长度足以产生强地面震动的地震, 成为区域地震危险性的潜在震源。

① 中国地震局, 2006 MapSIS 软件。
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

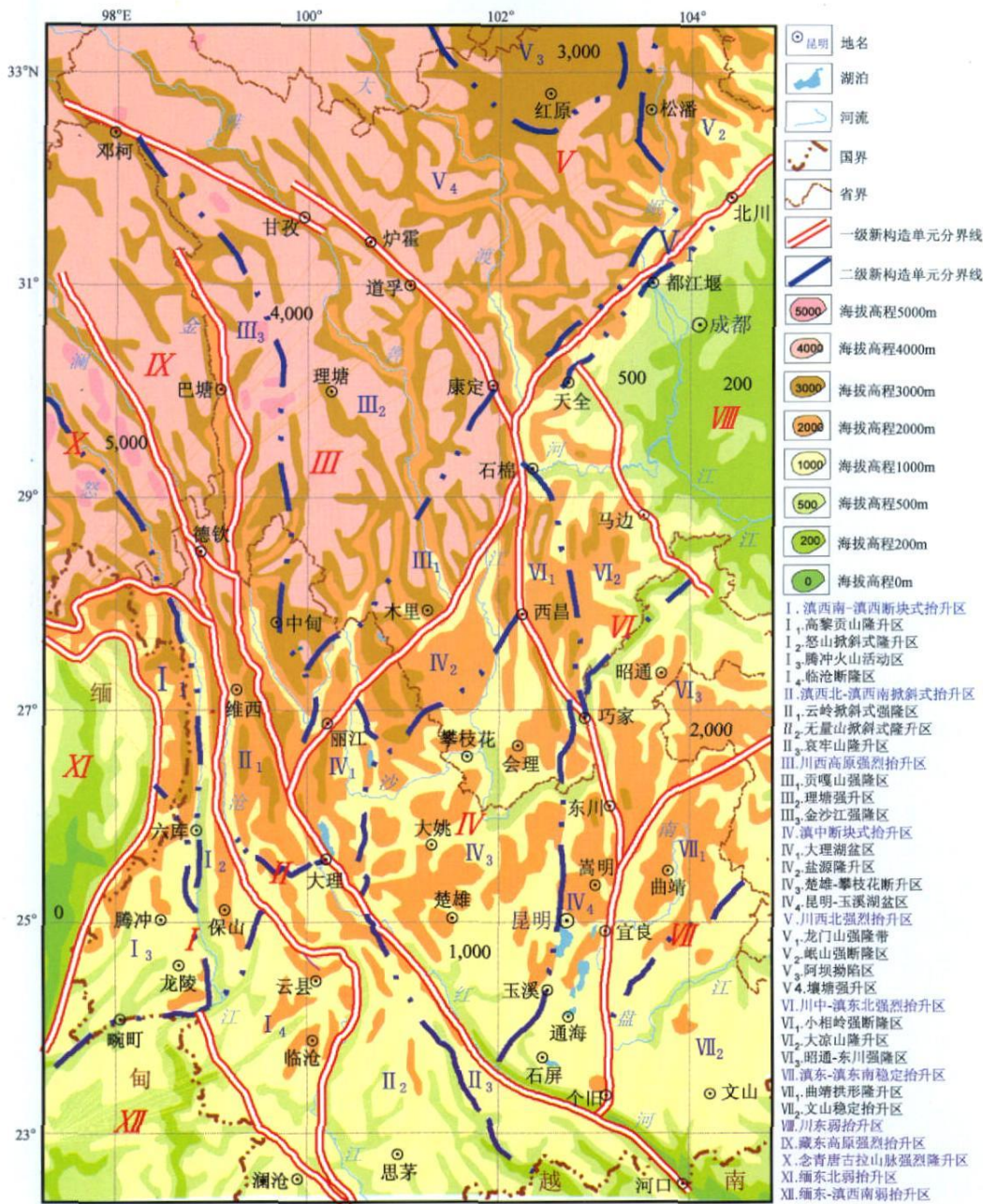


图 4 川滇地区新构造分布简图

唐荣昌等（1993）给出的跨断层短水准形变测量结果显示：龙门山主边界断裂在 1977~1987 年时段，NW 盘以 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm/a}$ 的速率上升和局部下降（双河场地）；1985 年以来龙门山主中央断裂，北段 NW 盘以 0.1 mm/a 的速率上升、显压性，南段 NW 盘以 0.2 mm/a 的速率下降、显张性；1976 年松潘—平武 7.2 级地震后两年的观测资料显示，龙门山后山断裂北段 NW 盘以 0.8 mm/a 的速率上升，耿达以南 NW 盘以 0.1 mm/a 的速率下降。

（2）小金河断裂

国家地震局地质研究所等（1990）根据丽江—剑川断裂的断错地貌、断错地层、 C^{14} 测年等成果，认为该断裂为具有一定垂直分量的左旋走滑断裂，第四纪晚期以来，其走滑与垂直错动速率都不算很大；向宏发等（2002）根据吉子、南溪、丽江等盆地的水平位错和丽江东北罗城—干塘子段、宁蒗长坪新村—母猪达段夷平面的垂直落差，分别得到全新世以来的平均水平位错速率 $2.0 \sim 5.0 \text{ mm/a}$ （中值 3.5 mm/a ）和中更新世以来的垂

直位错速率 $1.2 \sim 1.7 \text{ mm/a}$ 徐锡伟等 (2003) 根据野外断错地貌位错量的精确测量, 断错地层的 C^{14} 测年等成果, 认为该断裂中南段属全新世活动断裂, 晚第四纪以左旋走滑为主 (速率为 $(3.8 \pm 0.7) \text{ mm/a}$), 兼有垂直 (逆) 运动分量 (NW 盘相对 SE 盘抬升速率为 $(0.65 \pm 0.14) \text{ mm/a}$)。

1980~1999 年时段的跨断层形变测量结果显示, 小金河断裂水平左旋运动速率为 0.72 mm/a , 垂向逆冲运动速率为 0.11 mm/a (吕弋培等, 2002)。

2.5 地震活动性

(1) 龙门山断裂

大震前龙门山断裂带仅有发生过中强地震的历史记载。其中, 龙门山主边界断裂从 1787 年灌县 $4\frac{3}{4}$ 级地震以来曾发生过 4 次中强地震, 最大一次是 1970 年大邑西 6.2 级地震; 沿龙门山主中央根据 1168 年以来的历史地震记载, 断裂曾发生过 12 次 4 级以上地震, 呈条带状主要分布在宝兴—北川段, 最大一次是 1958 年北川 6.2 级地震; 龙门山后山断裂从 1597 年有历史地震记载以来, 曾发生过 4 级以上地震 3 次, 最大一次是 1657 年汶川 $6\frac{1}{4}$ 级地震 (唐荣昌等, 1993)。

(2) 小金河断裂

沿断裂带西南段, 自 1515 年以来曾发生过 28 次 $M \geq 5.0$ 中强地震 (部分发生在次级断裂上), 其中 $M_{6.0} \sim 6.9$ 地震 5 次 (国家地震局地质研究所等, 1990), 最大一次是 1751 年剑川 $6\frac{3}{4}$ 级地震。

(3) 两条断裂与 $M \geq 7.0$ 地震的关系

龙门山断裂带北段附近的松平沟断裂、虎牙断裂或岷江断裂、文县断裂和断裂带西南端附近的鲜水河断裂曾发生过 8 次 $7.0 \sim 8.0$ 级大震 (唐荣昌等, 1993); 小金河断裂两端的安宁河断裂 (唐荣昌等, 1993) 和程海断裂、玉龙雪山东麓断裂 (毛玉平等, 2003) 也曾发生过 3 次 $M \geq 7.0$ 大震。

3 类似龙门山断裂的地震构造筛选和构造标志对比

3.1 川滇地区类似龙门山断裂的地震构造筛选

从图 1 分析可知, 川滇地区的 $M \geq 7.0$ 地震绝大多数发生在马尔康 (川青或甘青) 块体、川滇 (康滇) 菱形块体及保山—普洱 (滇西南) 块体上

(徐锡伟等, 2003)。阚荣举等 (1983) 对震源机制解研究表明, 三个块体存在一片 SSE—SE 向压应力场区域。张培震等 (2004) 运用 GPS 观测得到川西的地壳物质流动速度矢量为 SEE 方向运动, 在云南中部一带转为向 SSE 方向运动, 在云南西部转为向 SW 方向运动。在此背景下, 发生近似龙门山断裂逆走滑破裂活动并引发大地震的类似断裂, 应该是规模较大的横向 (NE 走向) 全新世活动断裂。据此对川滇地区的筛选仅有小金河断裂和南定河断裂符合条件, 但是南定河断裂由于横切保山—普洱 (滇西南) 块体, 在 SW 方向的地壳物质流动影响下, 表现为以水平位错速率为 2.7 mm/a (毛玉平等, 2003) 的左旋纯走滑活动断裂, 难以产生与龙门山断裂类似的破裂活动, 应该予以剔除。

从断裂的形态规模、性质、变形强度、活动环境、演化历史等构造条件及特征综合类比, 在川滇地区与引发汶川地震的龙门山断裂带最相似的地震构造是处于同一断裂系的小金河断裂带。二者具有众多相似特征: 均为 NE 走向, 同处青藏高原和地质构造单元的边界线, 是走滑兼有逆冲的全新世活动断裂, 现代应力场主压应力轴与断层走向的锐交角大于 45° , 喜山期渐新世末以来的大规模逆掩推覆及晚第四纪以来的走滑兼有逆冲 (或逆冲兼有走滑) 的构造变形。

此外, 以往对小金河断裂带的主流认识也与龙门山断裂相似——属晚更新世活动断裂 (毛玉平等, 2003), 地震动峰值加速度为 $0.15g$ (基本地震烈度为 VII 度) (中国地震参数区划图, 2001), 也曾经划分为中强地震危险区。因此, 对比研究该类断裂具有重要的现实意义。

3.2 小金河断裂与龙门山断裂的地震构造标志对比

对川滇地区的地震构造类比已经有较多的研究 (国家地震局地质研究所等, 1990, 唐荣昌等, 1993, 毛玉平等, 2003)。我们综合前人研究, 采用活动构造块体边界、第四纪断陷盆地发育程度、断裂的活动性、深部构造特征、特殊构造部位、活动断裂速率、古地震等主要标志, 进行小金河断裂与龙门山断裂的地震构造类比分析。

(1) 活动构造块体的主边界断裂标志

在川滇地区划分的 4 个一级活动块体及 5 个次级块体中, 龙门山断裂是马尔康块体的东南边界,

小金河断裂是川滇菱形块体内川西北和滇中 2 个次级块体的分界线 (徐锡伟等, 2003)。

(2) 第四纪断陷盆地标志

龙门山断裂带和小金河断裂带的第四纪断陷盆地均不发育, 后者仅在西南端有零星盆地发育。

(3) 断裂的活动性标志

地震地质研究成果显示, 龙门山断裂和小金河断裂晚第四纪以来的活动特征均以走滑为主兼有逆冲运动, 并且都是全新世活动断裂。

(4) 深部构造标志

龙门山断裂和小金河断裂深部位于同一 NE 向巨型地幔陡坡带、布格重力梯度带及航磁异常带。均有可能为切割壳幔混合带的深大断裂。

此外, 从图 3 分析可知, 两条断裂的 SE 一侧都有一较大的重力高异常 (大足—南充异常、攀枝花异常), 分别对应四川和滇中 (楚雄) 比较刚性和相对稳定的中生代盆地, 这些较刚性的地块对青藏高原物质向 SE 流动变形的阻挡, 可能是龙门山—锦屏山—玉龙雪山中新世代推覆构造带发育、龙门山断裂及小金河断裂变形活动应力积累发生地震的重要原因之一。

(5) 特殊构造部位标志

汶川 $M_s 8.0$ 地震发生在龙门山断裂带的北川—映秀断裂上, 微观震中位于金汤弧形 (褶皱) 断裂带 (四川省地矿局, 1991) 及茂汶断裂与该断裂中西部的交汇点上。小金河断裂也有类似的特殊构造部位: 该断裂中东部的北西盘有木里弧形 (褶皱) 断裂带 (许志琴等, 1992) 与其交汇的类似构造点。

(6) 活动断裂的高速率标志

此标志主要适应于走滑断裂。小金河断裂与龙门山断裂全新世以来活动较弱, 水平和垂直运动速率都不高, 低于 4 mm/a 。

(7) 古地震标志

周荣军等 (2006) 对龙门山断裂带的古地震研究发现, 3 条次级断裂上均具有史前强震活动的历史 (大致判定皆具备发生 7 级左右地震的能力)。最晚一次强震发生在 $(3\ 830 \pm 200) \text{ a (BP)}$ 后不远的时期, 结合成都地区两千余年的历史地震记载资料判定, 单条断裂上的强震复发间隔至少在 $2\ 000 \sim 3\ 000 \text{ a}$ 左右。对于小金河断裂带的古地震研究, 未见公开发表的成果资料, 有待今后进一步研究。

上述构造标志的对比分析表明, 小金河断裂与龙门山断裂具有较好的相似性, 应该具有类似的发震能力。

3.3 小金河断裂与龙门山断裂的差异性分析

小金河断裂横贯川滇菱形块体中部, 周围块体边界的活动断裂以走滑运动为主, 水平滑动速率为 $3.3 \sim 20 \text{ mm/a}$, 大于龙门山断裂周围块体边界活动断裂的水平滑动速率 $1.0 \sim 9.6 \text{ mm/a}$ (徐锡伟等, 2003)。这种差异, 预示小金河断裂周围菱形块体边界断裂的破裂活动频繁引发的强震, 可能会使该断裂不太容易积累足够的应力产生大震。

龙门山断裂南东侧的四川盆地规模大于小金河断裂南东侧的滇中 (楚雄) 盆地, 二者在北西侧地壳物质 SE—SSE 向流动时产生的阻力也是前者大于后者, 可能反映龙门山断裂的发震能力大于小金河断裂。

4 结论

(1) 汶川 $M_s 8.0$ 地震的发生与 NE 向龙门山断裂带的破裂活动有关, 主震的发震构造为龙门山主中央断裂 (北川—映秀断裂)。极震区的地震断层破裂变形特征和震源机制解等信息反映的该断裂具有逆冲为主兼有右旋走滑的性质与震前地震地质研究成果显示的右旋走滑为主兼有逆冲性质的特征具有一定差异。

(2) 汶川地震的发震构造是晚新生代构造变形微弱的全新世活动断裂, 这和以往 $M_s \geq 7.0$ 大震往往发生在活动断裂的高速率 (4 mm/a 以上) 段的主流认识有较大差异。由于这类断裂不易引起重视, 对比研究类似活动断裂及其地震危险性就具有了重要的现实意义。川滇地区与龙门山断裂带类比最相似的是小金河断裂带。二者空间上位于相同的断裂系或巨型构造带, 时间上具有大体一致的演化活动历程。晚第四纪以来, 近似的构造环境使两条断裂的多种发震构造标志具有较好的相似性。

(3) 运用构造类比方法推测: 小金河断裂具有 $M_s \geq 7.0$ 地震的发震能力, 可能是潜在的大震危险区带, 但该断裂的发震能力可能小于龙门山断裂。

本文得到刘丽芳、李永莉、卢永坤等人的帮助, 在此表示诚挚的谢意!

参考文献:

- 邓志辉, 杨主恩, 陈桂华, 等. 2008. 汶川 8.0 级强震北川、映秀地表破裂现象 [J]. 地震地质, 30 (2): 355—338.
- 丁国瑜, 蔡文伯, 谢广林, 等. 1999. 中国岩石圈动力学概论 [M]. 北京: 地震出版社.
- 国家地震局地质研究所, 云南省地震局. 1990. 滇西北地区活动断裂 [M]. 北京: 地震出版社.
- 何宏林, 孙昭民, 王世元, 等. 2008. 汶川 $M_{8.0}$ 地震地表破裂带 [J]. 地震地质, 30 (2): 359—362.
- 胡隶贤, 张裕明, 时振梁, 等. 1999. 地震安全性评价技术教程 [M]. 北京: 地震出版社.
- 阚荣举, 王绍晋, 黄琨, 等. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断裂相对运动 [J]. 地震地质, 5 (2): 79—90.
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 2006. 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]. 第四纪地质, 26 (1): 40—51.
- 吕弋培, 廖华, 苏琴, 等. 2002. 川滇菱形块体边界的现今地壳形变 [J]. 中国地震, 18 (1): 28—37.
- 毛玉平, 韩新民, 谷一山, 等. 2003. 云南地区强震 ($M \geq 6$ 级) 研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 潘桂棠, 徐耀荣, 王培生. 1983. 青藏高原东部边缘新生代构造 [Q / 地质矿产部青藏高原地质文集编委会编. 青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社: 129—141.
- 任纪舜, 江春发. 1985. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 申重阳, 吴云, 王琪, 等. 2002. 云南地区主要断层运动模型的 GPS 数据反演 [J]. 大地测量与地球动力学, 22 (3): 46—51.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 唐荣昌, 韩渭滨, 黄祖智, 等. 1993. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社.
- 唐文清, 陈智梁, 刘宇平, 等. 2005. 青藏高原东缘鲜水河断裂与龙门山断裂交会区现今的构造活动 [J]. 地质通报, 24 (12): 1169—1172.
- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民. 2002. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义 [J]. 地震地质, 24 (2): 188—198.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (增刊): 151—162.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 张培震, 沈正康, 王敏, 等. 2004. 青藏高原及周边现今变形的运动学 [J]. 地震地质, 26 (3): 367—377.
- 周荣军, 李勇, Densmore A L, 等. 2006. 青藏高原东缘活动构造 [J]. 矿物岩石, 26 (2): 40—51.
- Alexander L D, Michael A E, Li Y, et al. 2007. Active tectonics of the Beichuan and Pengguan faults at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 26: 1—17.
- Tappanier P, Molnar P. 1976. Slip line field theory and large scale continental tectonics [J]. Nature, 264: 319—364.
- GB/T 17741—1999 工程场地地震安全性评价技术规范 [S].
- GB/T 18306—2001 中国地震参数区划图 [S].

Analog Study: Seismogenic Structure of the Wenchuan $M_{8.0}$ Earthquake and Similar Structures in Sichuan-Yunnan Region

XIE Ying-qing ZHANG Jian-guo, LIX, i ZHANG Yan-qi SHI Wei-hua LIU Na
(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

We analyze the seismogenic structure of the Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake and the composition and active characteristics of the Yulong-Longmen deep fault system. Based on the analysis we study the seismic structures in the Sichuan-Yunnan region similar to the Longmenshan fault using structure analog method. The result indicates that the NE-direction Xijiaohe fault is potential risk zone of large earthquake on which $M_{\geq 7.0}$ earthquake possibly occurs.

Key words: Sichuan-Yunnan region; Wenchuan $M_{8.0}$ earthquake; seismogenic structure; analog of structure; risk zone of large earthquake