论文

2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析

谢祖军^{1,2}, 郑勇^{1*}, 姚华建³, 房立华⁴, 张勇⁵, 刘成利¹, 王毛毛⁶, 单斌¹, 张会平⁷,
任俊杰⁸, 季灵运⁹, 宋美琴¹⁰

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

2. 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;

3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院地震与地球内部物理实验室, 合肥 230026;

4. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

6. 河海大学海洋学院, 南京 210098;

7. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

8. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085;

9. 中国地震局第二监测中心, 西安 710054;

10. 山西省地震局, 太原 030021

* 通讯作者, E-mail: zhengyong@cug.edu.cn

收稿日期: 2017-08-21; 接受日期: 2017-11-06; 网络版发表日期: 2017-12-26

中国地震局星火计划项目(编号: XH15007)、国家自然科学基金项目(批准号: 41604058、41574057、41621091)和川滇国家地震监测预报实验场项目(编号: 2016CESE0204)资助

摘要 国际标准时间2017年8月8日13点19分四川省九寨沟附近发生了 $M_s7.0$ 级地震, 造成了较大的人员伤亡和财产损失. 为了快速确定该地震的震源参数及发震构造, 评估地震危险性, 文章初步分析了该地震的构造运动背景、震源区速度结构、震源参数和破裂过程、库仑应力场, 以及同震断层的三维形态等特征. 研究表明: (1) 九寨沟地震发生在东昆仑断裂构造转换带的子断层、位于虎牙断裂西北延长线的未标识断层上; (2) 主震破裂位置和余震分布区域位于地震波速度变化剧烈的区域. 地壳中下部剪切波在震源区西南侧呈低速特征, 在东北侧转换为较正常的速度值; (3) 余震呈西北-东南分布, 区域较窄, 大部分余震分布在5~20km深度; (4) 主震以左旋走滑为主, 震源机制解走向、倾角和滑动角分别为 152° , 74° 和 8° . 起破点深达20km, 矩心深度则较浅, 为6km左右, 破裂集中在3~13km. 矩震级为 $M_w6.5$ 左右; (5) 地震破裂增强了断层两端和邻近的塔藏断裂东段的库仑应力. 基于定位结果和地质考察资料的发震断层几何模型显示, 断层的倾角从西北向东南有一定的变化, 范围为 $66^\circ\sim89^\circ$, 平均值在 84° 左右, 断层呈接近直立的高角度走滑特征.

关键词 九寨沟地震, 速度结构, 震源参数, 发震构造, 地震危险性

中文引用格式: 谢祖军, 郑勇, 姚华建, 房立华, 张勇, 刘成利, 王毛毛, 单斌, 张会平, 任俊杰, 季灵运, 宋美琴. 2018. 2017年九寨沟 $M_s7.0$ 地震震源性质及发震构造初步分析. 中国科学: 地球科学, 48: 79~92, doi: 10.1360/N072017-00279

英文引用格式: Xie Z J, Zheng Y, Yao H J, Fang L H, Zhang Y, Liu C L, Wang M M, Shan B, Zhang H P, Ren J J, Ji L Y, Song M Q. 2018. Preliminary analysis on the source properties and seismogenic structure of the 2017 $M_s7.0$ Jiuzhaigou Earthquake. Science China Earth Sciences, 61, doi: 10.1007/s11430-017-9161-y

1 引言

据中国地震台网测定, 国际标准时间2017年8月8日13点19分, 在四川省西部的九寨沟附近发生了M_s7.0级地震, 震中位置为103.843°E、33.217°N. 地震时正值九寨沟景区旅游旺季, 截至8月13日, 九寨沟地震造成25人死亡, 500多人受伤, 并对周边区域造成了较大破坏. 由于该区域位于东昆仑断裂带和龙门山断裂带的交汇区域, 地质构造非常复杂. 因此, 快速确定九寨沟地震的震源性质和发震构造, 对此次地震的动力学过程、后续余震发展态势以及该地区构造活动等研究具有重要的科学意义和实用价值.

从地质构造上看, 九寨沟地震位于东昆仑断裂带

东端, 发震区附近存在多条已知活动断裂带(图1), 包括岷江断裂、塔藏断裂, 以及震源附近的虎牙断裂等(Xu等, 2009; Ren等, 2013a). 该区域地震活动频繁, 历史上发生过多中强地震. 此次地震的发生, 对该区域的地震危险性的影响, 从科学研究和防震减灾的角度, 都是非常值得关注的.

另外, 东昆仑断裂在青藏高原东部的延伸情况一直是一个悬而未决的问题(徐锡伟等, 2003), 此次地震提供了一个可能解决该争议问题的机会. 从发震位置来看, 此次地震位于虎牙断裂和岷江断裂附近. 区域构造分析表明, 岷江断裂和虎牙断裂构成了岷山隆起东西边界, 形成了东昆仑断裂东段的挤压转换构造(Chen

图1 巴颜喀拉块体东缘活动构造特征与历史强震(网络版彩图)

历史地震资料来自于国家地震局震害防御司(1995)和中国地震局震害防御司(1999), 活动断层资料修改自Xu等(2009)和Ren等(2013a), 强震震源机制来自于哈佛大学gCMT解

等, 1994; 徐锡伟等, 2003; 张岳桥等, 2008). 岷江断裂南接龙门山逆冲断裂带中段, 北部终止于东昆仑断裂, 呈南北向延伸, 长达120km, 是一条西倾的逆冲断裂带(邓起东等, 1994), 1933年造成超过6800人伤亡的 $M_s7.5$ 级叠溪地震就发震于岷江断裂上. 虎牙断裂位于岷山隆起的东部边界, 同样近南北向延伸, 是一条西倾的逆冲断裂(邓起东等, 1994). 1976年松潘-平武两次 $M_s7.2$ 级地震发生于虎牙断裂, 震源机制解显示虎牙断裂是一条具左旋走滑性质的逆冲断裂(Jones等, 1984), 与地质考察具有较好的一致性(徐锡伟等, 2005). 与岷江断裂和虎牙断裂活跃的地震记录不同, 据1970年以来的现代地震记录显示, 与它们相交的东昆仑断裂, 从交点处向西100km范围内, 只有两例微震发生. 研究表明, 构成东昆仑断裂东端的塔藏断裂, 晚第四纪以左旋走滑运动为主, 左旋走滑速率为1.4~3.2mm/a(Ren等, 2013b). 由于此次九寨沟地震发生于岷江断裂、虎牙断裂西北延长线和塔藏断裂的交汇区(图1), 其震源性质和余震分布能够帮助揭示东昆仑断裂带从走滑到虎牙断裂的逆冲构造的过渡性质. 因此, 研究该地震将对了解和认识东昆仑断裂带东向延伸, 以及构造性质如何从左旋走滑向挤压逆冲过渡提供了良好的契机.

此外, 东昆仑断裂带东部玛沁-玛曲段存在一条很长的地震空区(Wen等, 2007), 且2001年昆仑山口西地震对该段的库仑应力场产生了一定程度的抬升, 具备发生强震的可能性(Xiong等, 2010; Shan等, 2015). 九寨沟地震发震区域靠近东昆仑断裂带东端的塔藏断裂, 如果九寨沟地震发生在塔藏断裂上, 或者余震有向东昆仑断裂带迁移的趋势, 那么玛沁-玛曲段的地震危险性将大大增加, 值得密切关注.

为了较为全面的认识这些问题, 本文综合了此次地震的震源参数、发震构造以及地震危险性等的快速响应研究, 初步分析了该地震的构造运动背景、震源区速度结构、地震序列位置、主震震源参数、破裂模型、断层模型, 以及库仑应力场等方面的内容, 从而对九寨沟地震的震源性质、发震断层和周边地震危险性, 以及东昆仑断裂带孕震环境等问题给出初步的认识.

2 区域构造运动背景

九寨沟地震发生在巴颜喀拉块体的东部边缘区

域. 新生代以来青藏高原东部向东运动, 与相对稳定的四川盆地持续汇聚, 造就了巴颜喀拉块体东缘复杂的构造格局和陡立的地貌特征(Burchfiel等, 1995). 该地区晚第四纪构造活动强烈, 块体南北边界分别为北西向鲜水河断裂带和北西西向东昆仑断裂带, 为青藏高原内部最重要的走滑断裂带(Molnar和Tapponnier, 1975), 二者左旋走滑速率为~10mm/a(Van der Woerd等, 2002; Zhang等, 2007); 东边界为北东向龙门山断裂带和近南北向岷江断裂和虎牙断裂, 主要以逆断作用为主(Yeats, 2012). 东昆仑断裂带被认为是青藏高原向东运动过程中吸收和转移构造形变的一条重要断裂带. 断错地貌和GPS形变测量表明, 东昆仑断裂中、西段($92^\circ\text{E}\sim 100^\circ\text{E}$)具有左旋滑动速率较为均一的特征, 约为10~12mm/a(Van der Woerd等, 2000, 2002; Li等, 2005; Harkins等, 2010). 沿走向从西向东($100^\circ\text{E}\sim 102^\circ\text{E}$), 左旋滑动速率从6~7mm/a(Kirby等, 2007; Harkins等, 2010)下降至玛曲附近的3~5mm/a(Kirby等, 2007; 李陈侠等, 2011), 至塔藏断裂西段减小为1.4~3.2mm/a(Ren等, 2013b). 东昆仑断裂带上向东减少的滑动速率可能转换到南侧的阿万仓断裂和北侧的白龙江断裂、光盖山-迭山断裂和西秦岭断裂带等走滑断裂上(图1)(李陈侠等, 2016; 郑文俊等, 2013). 塔藏断裂左旋走滑向东也逐渐减小, 大部分应变转换至其南侧近南北向的龙日坝断裂带北段、岷江断裂和虎牙断裂上的地壳缩短(Ren等, 2013b). 在巴颜喀拉块体东边界, 龙日坝断裂带与龙门山断裂带走向接近平行(图1), 以右旋走滑为主; 其中段晚第四纪滑动速率为~5.4mm/a, 其与龙门山断裂带共同分担了青藏高原在东缘的形变(Ren等, 2013a). 龙门山断裂带由多条近平行的分支断裂组成, 主要表现为逆冲兼右旋走滑性质(图1), 单条断裂晚第四纪活动速率均小于1mm/a, 整个断裂带地壳缩短速率为~3mm/a(Zhang等, 2010). 而岷江断裂和虎牙断裂则主要表现为向东的逆断作用, 共同控制了岷山第四纪快速隆起(邓起东等, 1994), 晚第四纪活动速率小于1mm/a(李勇等, 2006).

在此构造环境下, 巴颜喀拉块体东部地区成为地震活动非常强的地区之一. 块体北边界虽无历史强震的记录, 但古地震研究揭示出东昆仑断裂带玛沁-玛曲段在全新世以来至少发生过9次地表破裂型事件, 其中最新一次事件发生在距今1000~1500年(Lin和Guo, 2008), 塔藏断裂在公元1488年也曾发生过一次 $M7.0$ 的

强震(Zhang, 2017). 近400年来, 巴颜喀拉块体东边界发生过12次6.5级以上的地震(国家地震局震害防御司, 1995; 中国地震局震害防御司, 1999), 包括1879年文县M₈级地震、1933年叠溪M_{7.5}级地震、1976年两次平武7.2级地震、2008年汶川M_{8.0}级地震(Xu等, 2009)和2013年M_{7.0}芦山地震(徐锡伟等, 2013; Wang等, 2014). 沿块体南边界鲜水河断裂带上, 发生过1973年M_{7.6}炉霍地震、1955年康定7.5级地震等(闻学泽等, 2011). 从震源机制解来看, 南边界主要发生左旋走滑型地震, 而东边界主要发生逆断型地震, 与该地区的构造活动特征一致(图1).

3 震源区速度结构特征

近些年来, 在青藏高原东缘开展了大量的地震波速度结构(如Yao等, 2010; Yao, 2012; Zheng等, 2010b;

郑勇等, 2013; Yang等, 2012; Liu等, 2014; Shen等, 2016)以及大地电磁测深(如Bai等, 2010; Zhao等, 2012)等方面的研究工作, 得到较高分辨率的结果(如, Shen等(2016)的结果分辨率达 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$). 结果显示, 青藏高原东缘的地壳中下部可能存在较大范围的低速高导异常体(图2), 表明该地区地壳中下部整体强度较弱, 易于发生塑性形变, 有利于青藏高原的地壳深部物质向东南方向运移, 但低速高导体的空间分布有可能受大型断裂带分布的控制(Yao等, 2010; Bai等, 2010; Zhao等, 2012; Liu等, 2014).

地震学成像(Shen等, 2016)及大地电磁测深成像(Zhao等, 2012)结果显示, 岷江断裂以西地壳的中部存在明显的低速高导层, 但岷江断裂以东地区地壳中下部的速度较为正常(图2). 电导率除在岷江断裂与龙门山断裂局部地区10~20km深度存在强高导层外, 在地

图2 九寨沟地震震源及邻区三维横波速度结构分布图(改自Shen等, 2016)(网络版彩图)

其中横剖面显示的是地壳10km、20km、30km和Moho面深度的S波速度结构, 最右面的两条纵剖面显示的是沿AA'剖面和沿BB'剖面的地壳S波速度结构, 垂直剖面位置如Moho面深度图中红色线所示. 浅绿色震源球表示九寨沟M_{7.0}级地震的震中位置和震源机制, 右边纵剖面图中的灰点显示余震的分布, 余震到相应剖面轴线的水平分布范围如虚线边框所示. 水平剖面图中黑色线条为区域断层分布

壳中下部并未显示出明显异常(Zhao等, 2012). 地壳中部低速异常东部边界的位置(岷江断裂附近)与山体陡峭程度及隆升速率快速变化的位置非常吻合(Kirby等, 2003). 这些结果表明岷江断裂及其邻近的断裂带可能影响地壳中下部低速高导层的空间分布. 岷江断裂东部较为刚性的块体可能阻挡了其西侧地壳中下部塑性较强的物质东向运移, 这与岷江断裂是逆冲型的断裂也是吻合的.

除了可能影响地壳中下部低速高导层的空间分布, 岷江断裂及其邻近的断裂带也相应控制了该地区地壳应力应变的积累以及地震的孕育和发生. 此次九寨沟地震位于岷江断裂带以东区域, 北靠塔藏断裂带, 正好处于走滑和逆冲的转换地带. 其孕震背景必然受该区域地壳中下部物质流动的影响. 从地震位置和余震的分布来看(图2), 该发震断层位于速度跳变比较剧烈的区域, 速度结构剧烈变化的深度深至30km左右, 和余震的分布深度有较好的一致性. 这有可能在一定程度上表明地壳中部低速物质运移及其强度结构导致了九寨沟地震的发生.

4 震源参数和破裂模型

4.1 地震序列位置分布

据中国地震台网测定, 截至2017年8月10日10时, 共记录到九寨沟地震余震1741个, 其中M4.0~4.9余震2个,

M3.0~3.9余震22个, 最大余震震级M4.8. 三个以上台站记录到的可定位的余震909个, 震级分布范围M1.1~4.8. 本文采用双差定位方法(Waldhauser和Ellsworth, 2000), 根据CRUST1.0速度模型(Laske等, 2013)对主震和余震序列进行了重定位, 图3给出了重定位后的主震和余震分布. 主震震中200km范围内有25个台站, 台站方位分布较好, 可对震源位置进行有效约束(图4a). 从平面图上看, 余震呈NNW方向分布. 主震位于余震区中间, 主震起破点深度在20km左右. 余震展布长度约33km, 西北段略宽, 东南段较窄. 在邻近主震的西北侧, 早期余震存在一个3~5km范围的空区(图3). 震源深度剖面显示, 余震主要集中在5~20km深度范围内, 且多数余震位于主震起破深度上方, 表明此次地震破裂可能由深向浅破裂. 余震揭示的发震断层倾向较陡, 接近直立.

4.2 震源机制解

准确确定震源机制解和矩心深度对于认识地震的发震机理, 以及确定震源破裂模型非常关键(Liu等, 2015). 由于此次地震发生在较为复杂的构造区域, 多条性质差异很大的断层相互交错, 因此确定地震的发震断层存在一定困难. 研究表明, 准确的震源机制解能够有效帮助判定地震的发震断层, 因此我们采用CAP方法(Zhao和Helmberger, 1994; Zhu和Helmberger, 1996; Zhu和Rivera, 2002; Tan等, 2006)对该地震的震

图3 重定位后的余震震中和震源深度分布图(网络版彩图)

品红色椭圆表示早期余震分布稀疏的区域. 震源球表示九寨沟地震主震震中及震源机制. 深度剖面中, 每个地震到剖面轴线的距离小于5km, 黄色五角星表示主震起始深度

图4 台站分布、速度模型和震源深度反演结果(网络版彩图)

(a) 震中附近台站分布(震源球表示九寨沟地震震中及震源机制, 三角形表示台站, 蓝色三角形表示震源机制解反演所使用的台站, 细灰色线条表示断层); (b) 震源机制反演所采用的速度模型; (c) 震源机制及反演误差随深度分布图

源机制解和矩心深度进行反演. 该方法已被大量研究证明是行之有效的震源机制解反演方法(e.g., Tan等, 2006; 郑勇等, 2009; Zheng等, 2010a, 2012; 谢祖军等, 2013; Xie等, 2015).

值得注意的是由于九寨沟地震震级为 $M_s7.0$, 属于强震, 具有较大的破裂尺度和较长的破裂时间. CAP方法所基于的点源假设严格来说已不能完全满足, 根据我们对芦山地震和鲁甸地震的研究(谢祖军等, 2013; Xie等, 2015), 参考破裂过程得到的结果, 调整震源时间函数, 发现震源上升持续时间在8s时拟合度较高. 此外, 为了满足震源机制解的点源假设, 采用了较低的频段滤波(0.01~0.1Hz 4阶Butterworth带通滤波器滤波)和较长反演时间窗长(Pnl部分窗长40s的和面波部分窗长75s)进行反演, 以准确获取该地震的震源机制解.

在速度模型选取上, 考虑到CAP方法对速度模型依赖较小的优势, 我们根据Shen等(2016)、Liu等(2014)

以及Li等(2014)等的研究成果选取震中附近的结构构建一个一维的速度模型, 如图4b所示. 在数据选取方面, 由于国家地震台网在发震区域已经布设了分布较好的观测台阵(Zheng X F等, 2010), 我们根据信噪比高、P波初动明显和波形不限幅等原则, 以及台站方位分布良好的要求, 挑选出质量较高的近震数据用于反演. 采用的台站分布如图4a蓝色三角形所示.

基于图4b一维平均速度模型和图4a中近震波形数据, 经过全局搜索, 在矩心深度6km附近, 拟合误差最小(图4c), 对应的波形拟合相关性系数非常高, 反演结果理论地震图能很好吻合观测地震图(图5a). 震源机制在不同深度上高度一致, 最佳震源机制解节面I走向 152° , 倾角 74° , 滑动角 8° ; 节面II走向 60° , 倾角 82° , 滑动角 164° , 矩震级为 $M_w6.47$. 同时, 根据余震的空间分布, 我们认为节面I为发震断层面.

作为对比, 我们收集了美国地质调查局(USGS)、

图5 震源机制解反演结果(网络版彩图)

(a) CAP方法反演震源机制解理论地震图(红线)和观测地震图(黑线)对比图。波形左侧是台站名、方位角(°)与震中距(km), 下面的数字依次是理论地震图相对观测地震图的相关系数(用百分比表示)以及相对移动时间, 正值表示理论波形比观测波形快。(b) 不同机构给出的震源机制解结果。USGS表示美国地质调查局, 数据结果来自(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1#moment-tensor>), IG-CEA表示中国地震局地球物理研究所, IEF-CEA表示中国地震局地震预测研究所, 数据结果来自(<http://www.csi.ac.cn/manage/eq-Down/05LargeEQ/201708082119M7.0/zonghe.html>, 2017年8月15日)

中国地震局地球物理研究所(IG-CEA)和中国地震局地震预测研究所(IEF-CEA)三家单位给出的震源机制解结果, 并与本文得到的结果进行比较(图5b)。其中, IG-CEA是利用P波初动得到的震源机制解, 其他结果都是矩张量解。USGS是采用远震数据得到的结果, 包括本文在内的其他结果都是基于近场数据得到的。总体上, 不同单位得到的结果均反映了此次地震以走滑为主, 都具有较高的倾角。基于近场数据的结果比较一致, 与USGS的结果相差较大, 考虑到远震的分辨率相对来说比较低, 因此USGS结果的可靠性相对较低。

为了进一步确认震源机制解结果的可靠性, 我们对可能影响反演结果的因素进行了测试和分析。首先, 测试了速度模型的影响。我们采用了CRUST1.0的模型进行了对比反演, 此模型明显区别是地壳内没有低

速层。结果显示, 除了震级达到 $M_w 6.51$ 以外, 深度仍然是6km, 震源机制解基本没有变化。但理论波形和观测波形的时移比较大, 表明速度模型主要对不同震相的到时影响比较大, 对震源机制解的影响比较小。其次, 我们对震源时间函数的影响进行了测试, 测试了从5s到12s不同上升持续时间的影响。结果显示, 震源时间越长, 对应的震级越大, 但矩心深度和震源机制解变化非常小; 波形拟合程度有一定的变化, 波形拟合度随震源持续时间增长而降低, 这主要是因为时间越短越符合CAP方法的假设。因此, 综合考虑, 我们选取了8s作为震源时间函数。第三, 采用Bootstrap方法对不同台站进行了测试, 发现在台站方位角覆盖较均匀的情况下, 反演结果的稳定性和拟合度相当高。从图5给出的波形拟合来看, 绝大多数的拟合相关性系数都

在0.9以上. 综合几方面的测试结果, 我们认为本文的震源机制解和矩心深度反演结果具有较高的可靠性和准确性.

4.3 震源破裂模型

震源破裂模型是确定地震破坏区域、破坏大小的关键性判断依据, 也是计算地震库仑应力场, 分析地震应力降以及地震烈度的基础. 地震发生后, 我们基于远震地震波形(图6a), 采用小波变换模拟退火有限断层反演方法(Ji等, 2002; Liu等, 2015)对九寨沟地震的震源破裂模型进行了反演.

参考震源机制解和余震定位的结果, 选取节面 I 为破裂面(走向和倾角分别为 $152^{\circ}/74^{\circ}$), 将断层面分成面积为 $2.0\text{km} \times 2.0\text{km}$ 的子断层, 每个子断层的滑动范围为 $0 \sim 2.5\text{m}$. 将断层滑动角的范围取 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 反演步长为 2° , 破裂速度的搜索范围为 $1.0 \sim 3.5\text{km/s}$, 步长为

0.1km/s , 每个子断层的上升时间为 $0.5 \sim 5\text{s}$, 步长为 0.5s . 由于定位得到的震源深度起破点为 20km 左右, 而CAP反演的矩心深度仅为 6km , 两者相差较大. 考虑到主震发生时震源附近的近台很少, 因此主震的起破点深度误差可能较大; 为了进一步了解此次地震的起破点深度的可靠性, 我们对震源深度进行了敏感性测试, 测试深度 $3 \sim 25\text{km}$. 从最终的波形拟合误差来看, 当震源深度为 9km 时, 波形的拟合误差最小, 如图6b所示, 因此我们设置起破点深度为 9km .

从反演结果来看(图6), 此次地震的矩震级大小为 $M_w 6.5$, 与CAP方法震源机制解反演结果一致. 震源破裂模型显示震源破裂以左旋走滑为主, 破裂深度集中在 $3 \sim 13\text{km}$, 矩心深度在 $6 \sim 8\text{km}$, 与CAP方法反演的结果比较接近(图6d), 但在断层面的不同区域有一定的变化. 此次地震的能量释放存在着两个阶段, 前一阶段为主要释放阶段, 破裂区域较大, 距离主震起始位置

图6 有限断层方法反演的九寨沟地震破裂模型(网络版彩图)

(a) 台站分布; (b) 远震波形拟合误差随起破点深度的分布; (c) 地震矩释放率函数; (d) 破裂模型, 图中颜色表示位移大小, 白色箭头表示破裂滑移方向, 黑色等值线表示破裂时间, 白色小圆圈表示余震位置. 模型断层采用走向 152° 、倾角 74° 、起破点深度 9km ; (e) 滑动分布在水平面上的投影

比较近;然后又释放掉一个小一点的能量区域,距离起破点较远.

此外,在主震起破点的西北侧存在着一个3~5km的余震分布较为稀疏的空段,该空段的余震在3~20km深度范围内地震都很稀少,从而将余震分成北部和南部两个部分,北部的分布宽度较大,南部较窄(图3),该分布状态可能体现了破裂过程和发震断层的复杂性.虽然从震源破裂模型来看,此区间的主震破裂没有明显的间断.但由于破裂模型是采用远震数据反演的,其空间分辨率和可靠性存在一定的不足,因此需要利用进一步的研究结果,特别是近震数据和InSAR的结果进行证实.

5 库仑应力场变化和地震危险性

基于获得的震源机制解和破裂模型,利用弹性位错理论和岩石圈分层结构模型(单斌等, 2013, 2017),我们计算了九寨沟地震同震库仑应力变化,并分析了主震对余震分布的影响(图7a)以及此次地震对周边断层应力积累的影响(图7b).结果显示,本次地震余震序列受主震库仑应力影响明显,余震主要发生在库仑应力增强区,在库仑应力减弱区除了西北段有少数余震发生外,其他地方几乎没有余震发生.本次地震库仑应力影响的范围比较小(图7b),主要是增强了塔藏断裂南段以及本次地震南边虎牙断裂带上的应力积累,这些地区今后的地震危险性需要特别关注.另外,此次地震的断层两端应力有明显的增强(图7b),因此,

余震有可能向两侧扩展.由于断层西北端靠近岷江断裂,因此需要特别关注,尤其是晚期的余震震源机制解,看其是否从主震的走滑向岷江断裂带的逆冲地震发生了转变.如果存在该现象,则需要重点关注西北端的余震危险性.

6 断层几何模型

基于余震序列定位结果、震源机制解以及地表断层踪迹等数据,我们在Paradigm GoCAD三维可视化建模软件平台上,建立了2017年 $M_s 7.0$ 九寨沟地震的发震断层的三维模型.模型结果(图8)显示,本次地震的发震断层总体沿北西向延伸,倾角范围在 $66^\circ \sim 89^\circ$,平均值在 84° 左右,呈高角度走滑特征.断层面的倾向分析结果(图8b)显示,断层面的倾向主要呈两组:(1)北东倾向($30^\circ \sim 90^\circ$),分布范围如图中浅蓝色区域所示;(2)南西倾向($220^\circ \sim 270^\circ$),分布范围如图中浅红色区域所示.在2~8km深度范围内,CAP方法得到的震源机制解所确定的南西倾向节面与精定位余震数据确定的断层面匹配良好.向下延伸至8~20km深度范围内,断层面逐渐过渡为北东倾向,但在其北西段再次过渡为南西倾向,表现出极其复杂的三维断层形态.以上信息揭示出此次九寨沟地震的发震断层是一条北西走向延伸的左旋走滑断层,位于虎牙断裂向西北的延伸部分.初步认为2017年九寨沟地震发震于东昆仑断层向东延伸由左旋走滑向逆冲挤压转换的过渡部位,填补了这一巨大断裂体系末端的活动断裂图像.但是否发

图7 九寨沟地震同震库仑应力对余震(a)及周边断层(b)的影响(网络版彩图)

图8 2017年九寨沟地震的发震断层三维模型(网络版彩图)

(a) 发震断层的平面俯视图, 插图为余震随深度的分布; (b) 发震断层的三维透视图, 插图为余震数量随方位角的分布. 彩色点为余震的位置

生在虎牙断裂, 取决于虎牙断裂在北端活动性质是否有别于南段, 即由逆冲性质转换为走滑性质. 这个问题可以通过对大量历史地震重新定位和余震震源性质的研究加以判断. 因此后续的研究工作将应关注东昆仑断层末端断裂体系的三维空间模型及其与区域其他断裂之间的相互关系.

7 讨论与分析

7.1 九寨沟地震与青藏高原东部构造机制的关系

九寨沟地震的动力学机理是什么? 该区域的发震背景是否与地壳中等深度($\sim 20\text{km}$)低黏滞系数物质的东向运移有关? 一些研究(如Burchfiel等, 2008; Royden等, 2008)认为2008年的汶川地震的发生与青藏高原地壳中下部低黏滞系数物质东向流动有关: 低黏滞系数物质遇到较为刚性的四川盆地块体之后, 物质运移向地壳浅部偏转, 从而造成物质堆积和地表的抬升, 形成逆冲地震; 也有研究认为汶川地震的发生仅是刚性的地壳上部逆冲缩短所导致的(Hubbard等, 2010), 或者是两种机制共同作用的结果(Zhang, 2013). 从图2震源区速度结构来看, 九寨沟地震的发生与地壳中下部低强度(或低黏滞系数)物质东向运移在岷江断裂附近受阻有密切关系, 壳内物质运动模式的快速变化直接

导致了物质运移边界区域地壳应力应变的累积, 从而导致了九寨沟地震的发生.

虽然青藏高原物质向东南方向运移和变形的模式仍然存在较大争议, 如刚性块体挤出模型(Tapponnier等, 1982)和下地壳通道流模型(Royden等, 1997, 2008), 但目前越来越多的研究表明, 青藏高原东南部地壳物质的运移和变形模式可能是受上述两种机制共同作用的结果(Yao等, 2010; Yao, 2012; Zhang, 2013; Liu等, 2014). 相对而言, 对东北缘区域的认识目前还比较薄弱, 在是否存在中下地壳流动, 以及走滑运动在青藏高原东北缘物质逃逸中起何种作用等问题上还存在着很大的争议(如Zheng等, 2010b; Huang等, 2008; Jiang等, 2014). 九寨沟地震的发生, 为认识该区域动力学构造和发震机理提供了一个良好的契机. 从发震断层所处的位置来看, 此次地震正好位于青藏高原地壳中部低速异常向东北部正常速度过渡的梯度带上, 而且余震和主震主要发震深度位于地壳中部低速异常区边界. 因此, 该地震发震断层和南部的虎牙断裂可能是青藏高原东北缘地壳中下部速度异常的分界带, 断层两侧存在着明显的物质差异. 青藏高原地壳物质一部分可能沿地壳中下部向东和东南流动, 在该断裂带的阻挡作用下, 发生东北向偏转, 导致了该断层的左旋走滑作用, 从而造成了九寨沟地震的发生. 而在南部的虎

牙断裂带和龙门山断裂带附近, 由于走向已经接近南北向, 因此除了一部分物质存在侧向流动外, 大部分物质在断层附近堆积, 从而形成逆冲构造, 导致了龙门山断裂带中部和南部的逆冲型地震, 包括汶川地震和芦山地震. 而在北部的塔藏断裂, 则由于呈近东西向和南东走向, 没有对物质运动形成阻挡作用, 物质沿塔藏断裂以左旋走滑的方式运动, 在该断裂带及其东北区域形成的左旋走滑地震, 例如2008年的汶川地震后青川6.5级地震(郑勇等, 2009). 因此, 九寨沟地震正好位于青藏高原物质沿走滑向逆冲的过渡地带, 深入研究该区域的断层构造与速度结构的关系, 将对定量认识青藏高原东北缘物质流动的机理提供关键性的约束.

7.2 震源深度的复杂性

此次地震一个非常显著的现象是矩心深度与起破点的深度差异很大. 定位显示起破点在20km左右, 而矩心深度集中在6~8km. 虽然地震破裂的矩心深度通常与起破点不一致, 但是考虑到此次地震矩震级只有 M_w 6.5左右, 参考此前的统计研究(Wells和Coppersmith, 1994), 同等强度的地震, 破裂尺度在断层面上一般只有12km左右. 而此次地震从矩心深度到起破点的破裂尺度在断层面上已达到整个破裂尺度的统计值, 整个破裂尺度明显偏大. 造成这种差异的原因, 首先可能与近场台站分布较少有关. 主震发生时, 距离发震位置50km以内就只有一个台, 震中距约40km. 研究表明, 只有震中距小于约1~2倍震源深度时, 基于走时方法确定的震源深度才有较高的精度(罗艳等, 2013). 因此, 本文中对主震起破点的绝对定位可能存在一定的误差. 不过, 地震序列的相对位置误差则小得多, 特别在震后24小时内布设了一定数量的近场流动台, 因此, 余震序列的分布格局不会有较大的偏差. 另一个原因可能与反演起破点和矩心深度所采用的地壳速度模型不同有关. 本文在进行震源破裂模型反演和震源机制解反演时, 采用的是图4b所示的一维综合速度模型, 而地震定位采用的速度模型是CRUST1.0模型, 两者之间存在一定的差异. 因此, 我们采用图4b显示的综合一维速度模型对主震的起破点深度进行了测试, 发现深度在 (22 ± 2) km左右, 和采用CRUST1.0模型的定位结果非常接近. 因此速度模型的差异不是导致矩心深度和起破点深度差异的主要原因. 第三个可能

的原因是地震起始破裂区域破裂不完全. 在地震发生时, 起破点附近的大部分应变没有在同震破裂中释放掉, 而是以余震的方式来释放, 从而导致余震的深度从起破点开始一直延伸到浅部; 而同震破裂则在浅部破裂比较完全, 从而导致矩心深度比起始破裂深度小很多这一现象.

7.3 东昆仑断裂带的地震危险性

从余震的分布和库仑应力场的变化区域来看, 地震破裂增强了发震断层两端的应力场. 由于断层西北部已经接近东昆仑断裂带区域的岷江、塔藏以及东昆仑断裂带, 因此余震有向东昆仑断裂带迁移的可能. 如果该断裂带发生地震的话, 考虑到东昆仑断裂带西部的玛曲-玛沁段存在较大的地震空区, 其地震危险性将值得关注.

8 初步结论

通过对九寨沟地震的快速分析, 我们得到了九寨沟地震以下的主要认识和初步结论:

(1) 该地震是一个走滑为主的地震, 矩震级为 M_w 6.5级左右, 综合震源机制解和余震分布, 我们推测断层面的节面解为 $152^\circ/74^\circ/8^\circ$, 矩心深度在6~8km.

(2) 地震破裂没有到达地表, 破裂主要集中在3~13km, 能量主要释放于前10s.

(3) 发震断层介于东昆仑断裂带的转换区域, 是位于虎牙断裂西北延长线上的一段未标识断层. 从震源参数来看, 发震断层为左旋走滑断层, 和塔藏断裂较为一致, 但位置不一致; 位置和虎牙断裂的西北端延长线较为一致, 但与虎牙断裂的断层性质有较大差异.

(4) 九寨沟地震震源区介于地壳中部低速带向正常速度过渡的区域, 是青藏高原东部物质流动的边界区域. 青藏高原物质在震源区南部以垂向堆积为主, 形成虎牙断裂逆冲构造; 而在虎牙断裂向北延长线上, 积累的能量主要以走滑位错的方式来释放, 导致了九寨沟地震的发生.

(5) 九寨沟地震同震破裂增强了九寨沟地震两端和西北部塔藏断裂上的库仑应力, 目前余震基本都发生在库仑应力增强区. 从库仑应力场分布来看, 两端的余震活动呈现增强的趋势.

不过, 目前对余震序列的认识还不够全面, 同时

地质考察才刚刚开始, 本文的研究主要基于地震学观测, 结果及认识还比较初步。从目前的研究来看, 对于该发震断层的认识还有一定局限性。原因在于, 从地震性质来看, 与塔藏断裂一致; 从定位来看, 属于虎牙断裂西北延长线上一段未标识的断裂; 该断裂是否与虎牙断裂相连成一条断裂, 取决于虎牙断裂西北部是否过渡到以走滑为主的活动性质, 这可以通过大量的余震震源性质辅予以判定。果真如此的话, 虎牙断裂从北向南逐渐从走滑过渡到逆冲断裂, 体现了东昆仑断裂带东端向龙门山断裂带的动力学转换机制, 值得下一步深入研究。

致谢 对主编、编委和审稿人的工作表示衷心的感谢, 他们的意见和建议对提升本文的质量具有重要的作用。感谢中国地震局监测预报处对本工作的大力支持。感谢中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心 (doi:10.11998/SeisDmc/SN)、四川地震台网为本研究提供地震波形数据。感谢 IRIS 为本研究提供的远震波形数据。本文图件均用 GMT 软件绘制。

参考文献

- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 16: 389–403
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录 (公元前23世纪–公元1911年). 北京: 地震出版社
- 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 陈桂华, 杨虎, 安艳芬, 高翔. 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用. 中国科学: 地球科学, 41: 1295–1310
- 李陈侠, 袁道阳, 杨虎, 徐锡伟. 2016. 东昆仑断裂带东段分支断裂–阿万仓断裂晚第四纪构造活动特征. 地震地质, 38: 44–64
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, Ellis M A. 2006. 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
- 罗艳, 曾祥方, 倪四道. 2013. 震源深度测定方法研究进展. 地球物理学进展, 28: 2309–2321
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 金笔凯, 刘成利, 谢祖军, 许厚泽. 2013. 2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系. 中国科学: 地球科学, 43: 1002–1009
- 单斌, 郑勇, 刘成利, 谢祖军, 孔军. 2017. 2017年M_{7.0}级九寨沟地震同震库仑应力变化及其与2008年汶川地震的关系. 中国科学: 地球科学, 47: 1329–1338
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 龙锋. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性及其与2008年汶川地震. 地球物理学报, 54: 706–716
- 谢祖军, 金笔凯, 郑勇, 葛黎, 熊熊, 熊诚, 许厚泽. 2013. 近远震

- 波形反演2013年芦山地震震源参数. 中国科学: 地球科学, 43: 1010–1019
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 陈文彬, 闻学泽. 2003. 中国大陆中轴构造带地壳最新构造变动样式及其动力学内涵. 地学前缘, 10(增刊): 160–167
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 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: 446–461
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 陈桂华, 李传友, 郑文俊, 张世民, 任治坤, 许冲, 谭锡斌, 魏占玉, 王明明, 任俊杰, 何仲, 梁明剑. 2013. 四川芦山7.0级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, 58: 1887–1893
- 张岳桥, 杨农, 施炜, 董树文. 2008. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用. 地质学报, 82: 1668–1678
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 闵伟, 任治坤, 刘兴旺, 王爱国, 许冲, 葛伟鹏, 李峰. 2013. 甘肃东南地区构造活动与2013年岷县–漳县M_{6.6}级地震孕震机制. 地球物理学报, 56: 4058–4071
- 郑勇, 葛黎, 谢祖军, 杨英杰, 熊熊, 许厚泽. 2013. 芦山与汶川地震震区地壳结构及深部孕震环境. 中国科学: 地球科学, 43: 1027–1037
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 2009. 汶川地震强余震 ($M \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 413–426
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录 (公元1912年–1990年, $M \geq 4.7$). 北京: 中国科学技术出版社
- Bai D, Unsworth M J, Meju M A, Ma X, Teng J, Kong X, Sun Y, Sun J, Wang L, Jiang C, Zhao C, Xiao P, Liu M. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nat Geosci*, 3: 358–362
- Burchfiel B C, Chen Z L, Liu Y, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. *Int Geol Rev*, 37: 661–735
- Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, Hager B H, Chen Z, King R W, Li C, Lü J, Yao H, Kirby E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *Gsa Today*, 18: 4
- Chen S F, Wilson C J L, Deng Q D, Zhao X L, Luo Z L. 1994. Active faulting and block movement associated with large earthquakes in the Min Shan and Longmen Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 99: 24025–24038
- Harkins N, Kirby E, Shi X, Wang E, Burbank D, Chun F. 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia. *Lithosphere*, 2: 247–266
- Huang Z, Xu M, Wang L, Mi N, Yu D, Li H. 2008. Shear wave splitting in the southern margin of the Ordos Block, north China. *Geophys Res Lett*, 35: L19301

- Hubbard J, Shaw J H, Klinger Y. 2010. Structural Setting of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan, China, Earthquake. *Bull Seismological Soc Am*, 100: 2713–2735
- Ji C, Wald D J, Helmberger D V. 2002. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull Seismological Soc Am*, 92: 1192–1207
- Jiang C, Yang Y, Zheng Y. 2014. Penetration of mid-crustal low velocity zone across the Kunlun Fault in the NE Tibetan Plateau revealed by ambient noise tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 406: 81–92
- Jones L M, Han W, Hauksson E, Jin A, Zhang Y, Luo Z. 1984. Focal mechanisms and aftershock locations of the Songpan earthquakes of August 1976 in Sichuan, China. *J Geophys Res*, 89: 7697–7707
- Kirby E, Harkins N, Wang E, Shi X, Chun F, Burbank D. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault. *Tectonics*, 26: TC2010
- Kirby E, Whipple K X, Tang W, Chen Z. 2003. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles. *J Geophys Res*, 108: 2217
- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophys Res Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658
- Li H B, Van der Woerd J, Tapponnier P, Klinger Y, Qi X X, Yang J S, Zhu Y T. 2005. Slip rate on the Kunlun fault at Hongshui Gou, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, $M_w \sim 7.9$ Kokoxili earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 237: 285–299
- Li Y, Gao M, Wu Q. 2014. Crustal thickness map of the Chinese mainland from teleseismic receiver functions. *Tectonophysics*, 611: 51–60
- Lin A, Guo J. 2008. Nonuniform slip rate and millennial recurrence interval of large earthquakes along the eastern segment of the Kunlun fault, northern Tibet. *Bull Seismological Soc Am*, 98: 2866–2878
- Liu C, Zheng Y, Xiong X, Wang R J. 2015. Rupture process of the 23 October 2011 $M_w 7.1$ Van earthquake in eastern Turkey by joint inversion of teleseismic, GPS and strong-motion data. *Pure Appl Geophys*, 172: 1383–1396
- Liu Q Y, van der Hilst R D, Li Y, Yao H J, Chen J H, Guo B, Qi S H, Wang J, Huang H, Li S C. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nat Geosci*, 7: 361–365
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189: 419–426
- Ren J, Xu X, Yeats R S, Zhang S M. 2013a. Latest Quaternary paleoseismology and slip rates of the Longriba fault zone, eastern Tibet: Implications for fault behavior and strain partitioning. *Tectonics*, 32: 216–238
- Ren J, Xu X, Yeats R S, Zhang S. 2013b. Millennial slip rates of the Tazang fault, the eastern termination of Kunlun fault: Implications for strain partitioning in eastern Tibet. *Tectonophysics*, 608: 1180–1200
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z L, Shen F, Liu Y P. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788–790
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321: 1054–1058
- Shan B, Xiong X, Wang R, Zheng Y, Yadav R B S. 2015. Stress evolution and seismic hazard on the Maqin-Maqu segment of East Kunlun Fault zone from co-, post- and interseismic stress changes. *Geophys J Int*, 200: 244–253
- Shen W, Ritzwoller M H, Kang D, Kim Y H, Lin F C, Ning J, Wang W, Zheng Y, Zhou L. 2016. A seismic reference model for the crust and uppermost mantle beneath China from surface wave dispersion. *Geophys J Int*, 206: 954–979
- Tan Y, Zhu L P, Helmberger D V, Saikia C K. 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations. *J Geophys Res*, 111: B01306, doi: 10.29/2005JB003775
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611–616
- Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, Meriaux A S, Gaudemer Y, Meyer B, Finkel R C, Caffee M W, Zhao G G, Xu Z Q. 2000. Uniform slip-rate along the Kunlun Fault: Implications for seismic behaviour and large-scale tectonics. *Geophys Res Lett*, 27: 2353–2356
- Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, Meriaux A S, Meyer B, Gaudemer Y, Finkel R C, Caffee M W, Zhao G G, Xu Z Q. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophys J Int*, 148: 356–388
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull Seismological Soc Am*, 90: 1353–1368
- Wang M, Jia D, Shaw J H, Hubbard J, Plesch A, Li Y, Liu B. 2014. The 2013 Lushan earthquake: Implications for seismic hazards posed by the Range Front blind thrust in the Sichuan Basin, China. *Geology*, 42: 915–918
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull Seismol Soc Amer*, 84: 974–1002
- Wen X, Yi G, Xu X. 2007. Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the $M_s 8.1$, 2001, Kokoxili earthquake, China. *J Asian Earth Sci*, 30: 63–72
- Xie Z, Zheng Y, Liu C, Xiong X, Li Y, Zheng X. 2015. Source Parameters of the 2014 $M_s 6.5$ Ludian Earthquake Sequence and Their

- Implications on the Seismogenic Structure. *Seismological Res Lett*, 86: 1614–1621
- Xiong X, Shan B, Zheng Y, Wang R. 2010. Stress transfer and its implication for earthquake hazard on the Kunlun Fault, Tibet. *Tectonophysics*, 482: 216–225
- Xu X, Wen X, Yu G, Chen G, Klinger Y, Hubbard J, Shaw J. 2009. Co-seismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 37: 515–518
- Yang Y, Ritzwoller M H, Zheng Y, Shen W, Levshin A L, Xie Z. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. *J Geophys Res*, 117: B04303
- Yao H. 2012. Lithospheric structure and deformation in SE Tibet revealed by ambient noise and earthquake surface wave tomography: Recent advances and perspectives. *Earthq Sci*, 25: 371–383
- Yao H, van der Hilst R D, Montagner J P. 2010. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography. *J Geophys Res*, 115: B12307
- Yeats R S. 2012. Active Faults of the World. Cambridge: Cambridge University Press
- Zhang J L. 2017. On fault evidence for a large earthquake in the late fifteenth century, Eastern Kunlun fault, China. *J Seismol*, 20: 1–9
- Zhang P Z. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7–22
- Zhang P Z, Molnar P, Xu X. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26: TC5010
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, Chen J H. 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38: 353–382
- Zhao G, Unsworth M J, Zhan Y, Wang L, Chen X, Jones A G, Tang J, Xiao Q, Wang J, Cai J, Li T, Wang Y, Zhang J. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan $M_w7.9$ earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40: 1139–1142
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Amer*, 84: 91–104
- Zheng X F, Yao Z X, Liang J H, Zheng J. 2010. The role played and opportunities provided by IGP DMC of China national seismic network in Wenchuan earthquake disaster relief and researches. *Bull Seismological Soc Am*, 100: 2866–2872
- Zheng Y, Li J, Xie Z, Ritzwoller M H. 2012. 5Hz GPS seismology of the El Mayor-Cucapah earthquake: Estimating the earthquake focal mechanism. *Geophys J Int*, 190: 1723–1732
- Zheng Y, Ni S, Xie Z, Lv J, Ma H, Sommerville P. 2010a. Strong aftershocks in the northern segment of the Wenchuan earthquake rupture zone and their seismotectonic implications. *Earth Planet Space*, 62: 881–886
- Zheng Y, Yang Y, Ritzwoller M H, Zheng X, Xiong X, Li Z. 2010b. Crustal structure of the northeastern Tibetan plateau, the Ordos block and the Sichuan basin from ambient noise tomography. *Earthq Sci*, 23: 465–476
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull Seismol Soc Am*, 86: 1634–1641
- Zhu L, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media. *Geophys J Int*, 148: 619–627