

吴萍萍、王阳、朱洁等, 2016, 1970 年以来鲜水河断裂带地震活动特征与 2014 年康定 $M_s 6.3$ 地震, 中国地震, 32(4), 776~786。

1970 年以来鲜水河断裂带地震活动特征 与 2014 年康定 $M_s 6.3$ 地震

吴萍萍^{1,2)} 王阳¹⁾ 朱洁¹⁾ 李大虎³⁾ 黄骥超¹⁾ 孙岩⁴⁾

1) 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京市海淀区学院路 29 号 100083

2) 防灾科技学院, 北京东燕郊 101601

3) 四川省地震局, 成都 610041

4) 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 西安 710119

摘要 本文基于 1970 年以来的地震目录及四川地区 4.0 级以上地震的震源机制解资料, 分析鲜水河断裂带分段(炉霍段、道孚段、康定段、石棉段)的地震活动特征及研究区现代构造应力场, 结合深部速度结构, 探讨鲜水河断裂带上地震活动频度与龙门山断裂带地震活动的关系及康定地段 6.3 级地震的孕震环境。结果发现: (1) 鲜水河断裂带北段和南段地震活动性存在差异, 炉霍段和道孚段的地震活动频度 1981 年前要高于 2000 年后, 康定段和石棉段的地震活动频度 2000 年以后高于 1981 年前; (2) 分析地壳 P 波速度结构发现康定震区西侧川滇块体表现出低速异常, 东侧表现出高速异常; (3) 对构造应力场的分析结果表明龙门山断裂带主要以 NW-SE 向挤压为主, 鲜水河断裂带构造应力场以 NWW-SEE 向为主。综合鲜水河断裂带应力场特征、深部速度结构、断层间的相互作用等信息推断, 康定 $M 6.3$ 地震的发生与该地区应力积累及深部孕震环境相关, 同时由于龙门山断裂带地震活动性影响, 导致鲜水河断裂带康定段的能量释放。

关键词: 地震活动性 鲜水河 康定 地应力 孕震环境

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0776-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

鲜水河活动断裂带位于青藏高原东南缘的四川西部地区, 是一条近 NW 走向的弧形左旋走滑断裂带, 海拔 4500m。印度板块向欧亚大陆俯冲, 青藏高原物质向东运动, 受到四川盆地的阻挡作用, 地幔物质的运移使鲜水河断裂带由浅至深受到不同程度的影响, 在地表表现出左旋剪切运动的特征(胥颐等, 2010), GPS 观测数据(图 1)表明鲜水河断裂带自北向南的地表运动速率逐渐降低(Chen et al, 2000; Shen et al, 2005)。

自 1970 年以来, 鲜水河断裂带上发生两次 6.5 级以上地震(1973 年 2 月 6 日炉霍 7.6 级地震、1981 年 1 月 23 日道孚 6.9 级地震), 而龙门山断裂带发生 6.5 级以上地震主要有 2008

[收稿日期] 2016-04-12; [修定日期] 2016-08-15

[项目类别] 中国地震局 2016 年度测震台网青年骨干培养专项(20160520)资助

[作者简介] 吴萍萍, 1988 年生, 在读博士, 地球探测与信息技术专业。E-mail: 569536759@qq.com

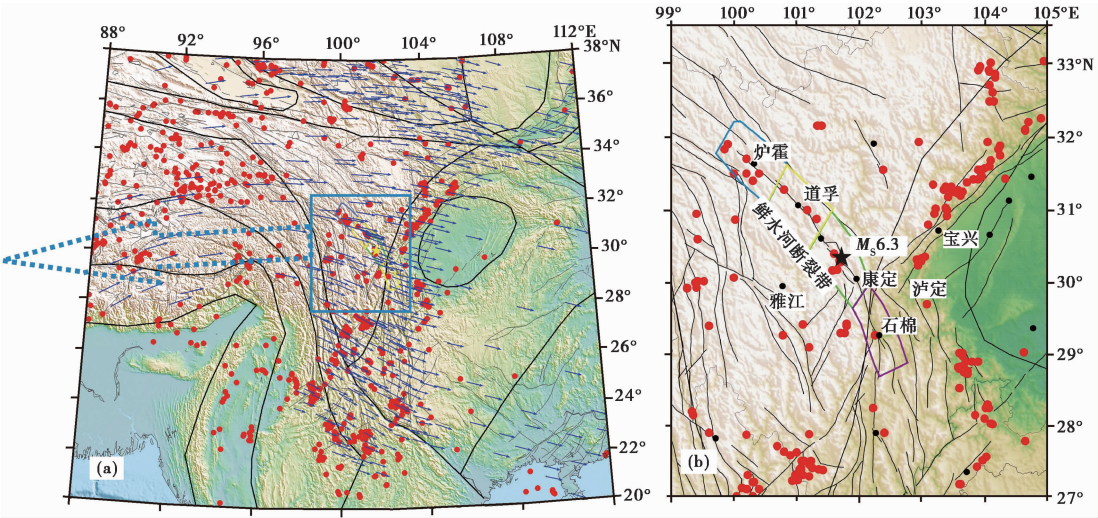


图 1 鲜水河构造背景图

(a) 中心的正方形研究区;(b) 研究区内鲜水河断裂带上不同颜色的框分别为
炉霍段、道孚段、康定段、石棉段的区域;红色圆圈表示 5 级以上地震震中(1970 年至今)

年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震和 2013 年 4 月 23 日芦山 7.0 级地震。在 1981~2008 年鲜水河断裂带及其周边断层没有发生大地震,出现了地震在时间段上的“空段”(易桂喜等,2011;闻学泽等,2009;Wen et al,2008)。图 2 统计了 1970 年至今鲜水河断裂带上 5 级以上地震的 $M-t$ 图,图中明显表明 5 级地震在这段时间内也出现近 20 年的“空段”。杜方等(2010)分析 1973 年炉霍地震后地壳形变特征,发现炉霍段每年的蠕滑速率在逐渐减小,由早先的开放性耦合向封闭性方向发展。

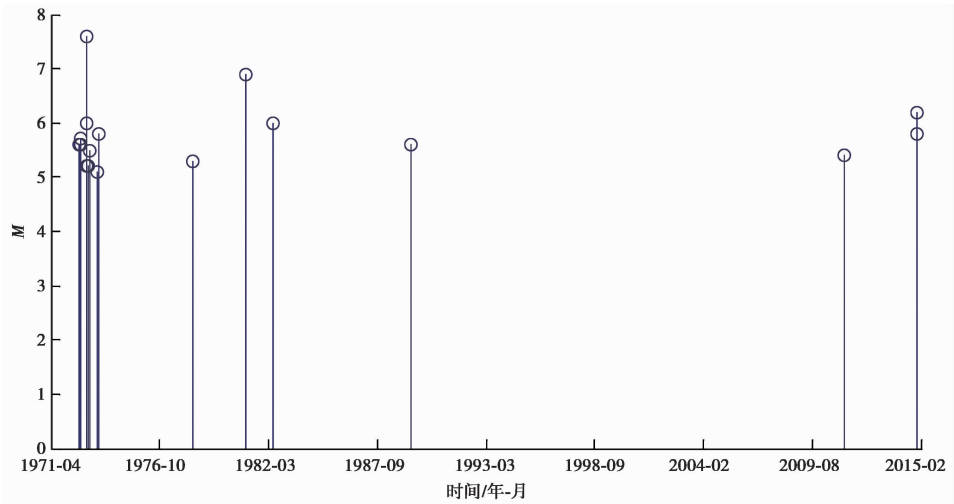


图 2 鲜水河断裂带上 5 级以上地震 $M-t$ 图

自 1973 年的炉霍地震发生后,前人对于鲜水河断裂带地震活动特征及其孕震环境的研究从未间断。蜀水(1974)研究了炉霍 7.9 级地震后的地震活动特征,包括 b 值、应力-应变释放特征、震源机制;闻学泽等(1989,1990)根据鲜水河断裂带的几何特征进行分段并探讨不同几何特征的断裂带对孕震的影响;钱洪等(1990,1988)以炉霍地震为例探究鲜水河断裂的特征地震现象;张秋文等(2003)探讨炉霍 7.9 级地震和道孚 6.9 级地震同震库仑应力对余震及该断裂带上下一次强震的影响;吴萍萍等(2013)探究鲜水河断裂上库仑应力的变化,发现康定段存在地震危险。

2014 年 11 月 22 日康定 6.3 级地震发生在鲜水河断裂带的南段。该地区历史上在 1955 年 4 月 14 日曾发生过 7.5 级地震。自从汶川地震后,对鲜水河断裂带的地震危险性已有了很多研究,尤其是道孚-康定段;易桂喜等(2008)计算川滇东边界的 b 值空间分布特征,获知石棉段的小震活动性强,而未来几年发生大震的可能性小,地震的危险区主要集中在道孚-乾宁段;单斌等(2008,2013)探究汶川地震和芦山地震同震库仑应力对周边断层的影响,发现鲜水河断裂带的康定-道孚段的库仑应力增加,地震危险性增加;秦向辉等(2013)分析水压致裂应力资料发现康定地区的地应力较高,存在地震危险;李德威等(2013)通过地壳的热流状态发现鲜水河断裂内“热河”异常,存在 7 级以上地震的可能性。

1966 年邢台地震后,地震监测技术迅速发展,中国地震台网中心记录了较为完整的地震数据。鲜水河断裂带具有明显的分段特征(闻学泽等,1989,2000;张周术等,1991),东南段的构造特征要比西北段的复杂,这种复杂的构造特征造成了历史上中强震活动的分段差异。本文结合前人对鲜水河断裂带分段特征的研究,将该断裂带分成 4 段即炉霍段、道符段、康定段、石棉段,分别统计自 1970 年以来各段地震活动频度随时间的变化特征并计算 b 值。本文结合研究区内 $M \geq 4.0$ 的震源机制计算得到鲜水河断裂带及周边断裂构造应力场,综合研究区深部速度结构及其它地质地球物理资料,以期获得鲜水河断裂带地震活动分段特性的原因,探究康定地震的深部孕震环境和发震机制。

1 地震活动性分析

1.1 资料

本文选取距鲜水河断裂带两侧 30km 范围内为研究区(图 1),选出区内 $M \geq 1.5$ 的地震。地震目录来源于中国地震台网中心 1970~2013 年《中国地震月报目录》^①和四川省地震局 2014 年 1 月~2014 年 11 月的震相报告^②。本研究区范围内共有近 7000 多个地震符合上述条件,图 3 为 1970 年至今鲜水河断裂带上 $M \geq 1.5$ 的地震频度图。从图中我们可以发现鲜水河断裂带活动性随时间变化表现为时间段两头活动性强、中间地震活动性弱的特征。

1.2 b 值计算方法

b 值是通过实际地震资料进行统计得到的,因此与地震目录的完整性、可靠性、统计样本量的大小有关(黄玮琼等,1989;任雪梅等,2011;高原等,1995)。本文先分析了研究区内的整条鲜水河断裂带的 b 值,图 3 给出了研究区 $M \geq 1.5$ 地震的震级-频度的关系,为了确定

① 中国地震台网中心,1970~2013,《中国地震月报目录》

② 四川省地震局,2014 年 1 月~2014 年 11 月地震目录

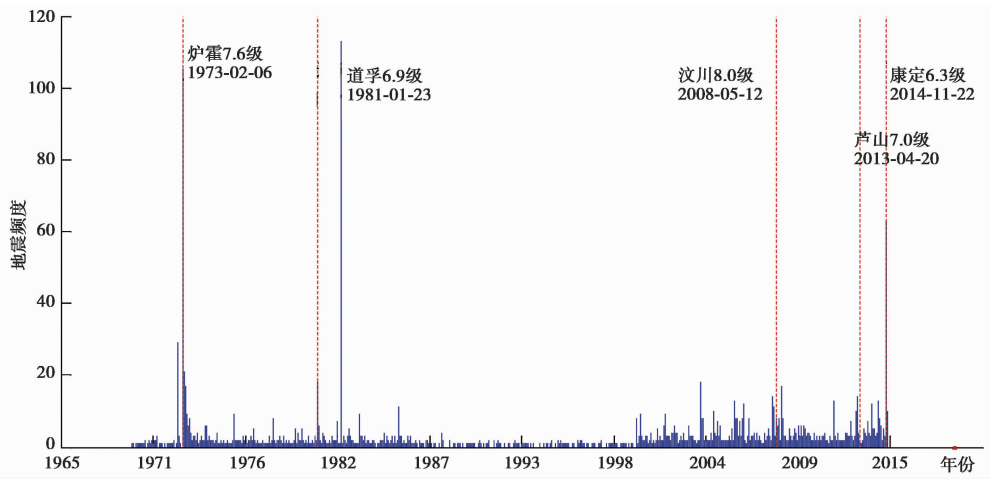


图 3 1970 年以来鲜水河断裂带 $M \geq 1.5$ 的地震频度图

最小二乘拟合地震周期,本文对最小震级分别为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0、2.1、2.2、2.3、2.4、2.5 的地震进行搜索,对最大震级分别为 4.5、4.6、4.7、4.8、4.9、5.0、5.1、5.2、5.3、5.4、5.5、5.6、5.7 的地震进行搜索 (吴萍萍等,2015)。用式(1)计算,当计算得到的误差最小时,所对应的最小和最大的震级的值为本文需要拟合地震震级的下限和上限。通过计算,本文拟合结果为下限震级为 1.5,上限震级为 4.6,误差(δy)为 0.36, b 值为 0.97, a 值为 4.77(b 值反映区域内不同震级地震的相对分布, a 值表示区域内的地震活动水平, b 值和 a 值是地震危险性和地震预测分析的基础参数),图 4 为拟合结果。

$$\delta y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{real}} - y_{\text{cal}})^2}{n}} \tag{1}$$

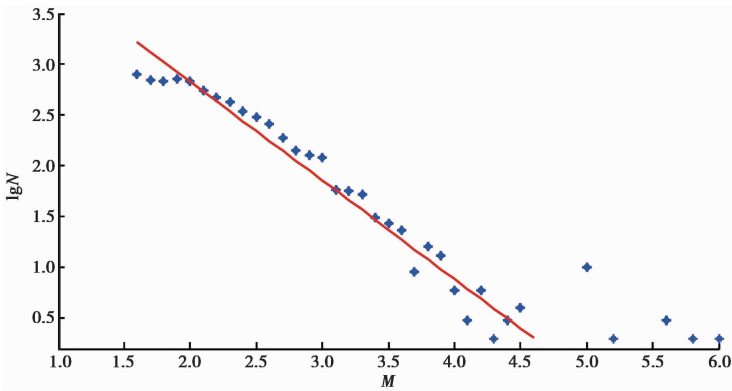


图 4 鲜水河断裂带地震震级 M 与地震频度 N 的关系

1.3 鲜水河断裂带分段地震活动特征

为了研究鲜水河断裂带的地震活动特征,本文将鲜水河断裂带分为炉霍、道孚、康定、石棉 4 段(图 1)。分别统计 1970 年至今各段内 $M \geq 1.5$ 的地震频度和 b 值。从表 1 和图 5 中

表 1 鲜水河断裂带各段的 b 值和 a 值

	鲜水河断裂带	炉霍段	道符段	康定段	石棉段
b 值	0.97	0.85	0.85	0.67	0.96
a 值	4.77	3.92	3.83	2.97	4.36

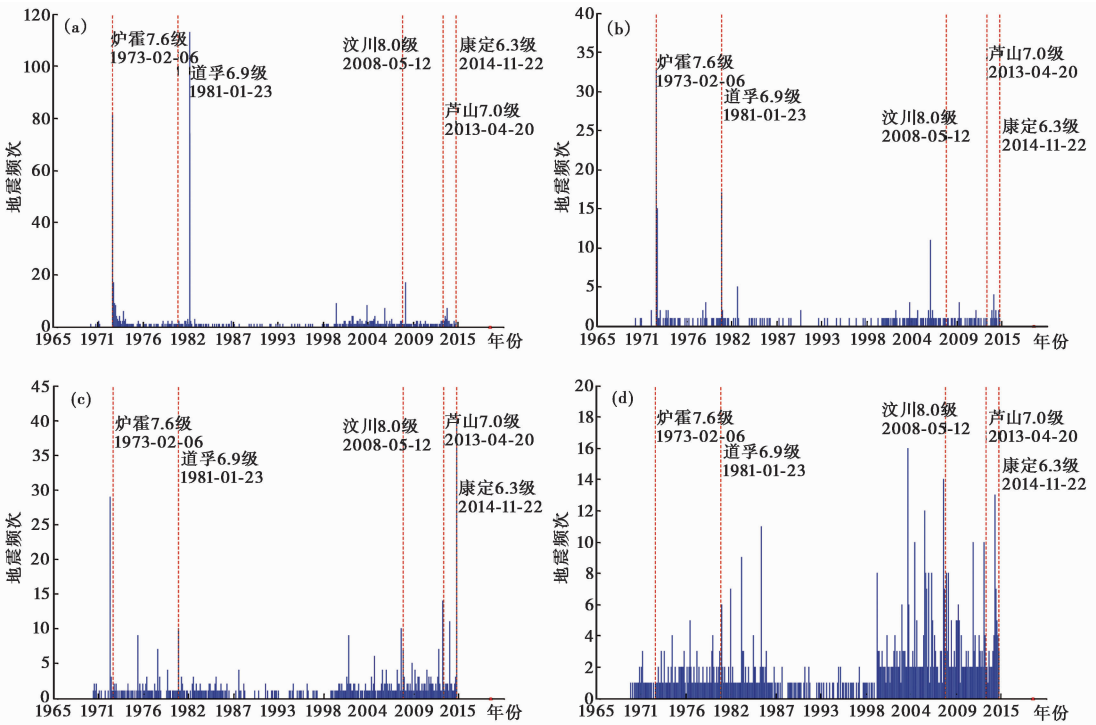


图 5 鲜水河断裂带各段 $M \geq 1.5$ 地震频度图
(a) 炉霍段; (b) 道孚段; (c) 康定段; (d) 石棉段

可以发现:炉霍段 b 值为 0.85, a 值为 3.92, 1981 年以前地震活动频度高于 2000 年以后(图 5(a));道符段计算得到的 b 值为 0.85, 1981 年以前的地震活动频度与 2000 年以后相当(图 5(b));康定段计算得到的 b 值最低为 0.65, 1981 年以前的地震活动频度低于 2000 年以后(图 5(c));石棉段 b 值最大为 0.96, 2000 年以后的地震活动频度明显高于 1981 年以前(图 5(d))。

2 现代构造应力场分析

现代构造应力场是驱动区域断裂构造活动和地震活动的基本原因。不同的现代构造应力场造成断层的变形特征不同,造成的地震强度也不同(谢富仁等,2004)。

根据单个地震震源机制解反推地震发生地区的现代构造应力场,是目前常用的有效方法(万永革等,2009,2011,2010)。本文根据川滇地区近百年来 $M_s \geq 4.0$ 的震源机制解,用 Wan et al(2010)方法计算得出鲜水河断裂带周边的地应力。为了保证计算得到的地应力精度,我们计算同一构造的震源机制解作为某个地区地应力结果,共得到 5 个区的地应力(表 2)。

表 2 应力场反演的最优解 (置信区间 90%)

区号	S_1		S_2		S_3	
	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)
(A)	288.68	4.98	190.00	60.00	21.51	29.50
(B)	291.67	35.06	159.00	44.00	41.37	25.65
(C)	261.16	4.16	35.00	84.00	170.84	4.31
(D)	110.29	46.48	236.00	29.00	344.11	29.28
(E)	134.41	3.19	42.00	37.00	228.63	52.82

注： S_1 、 S_2 、 S_3 释义同图 6。

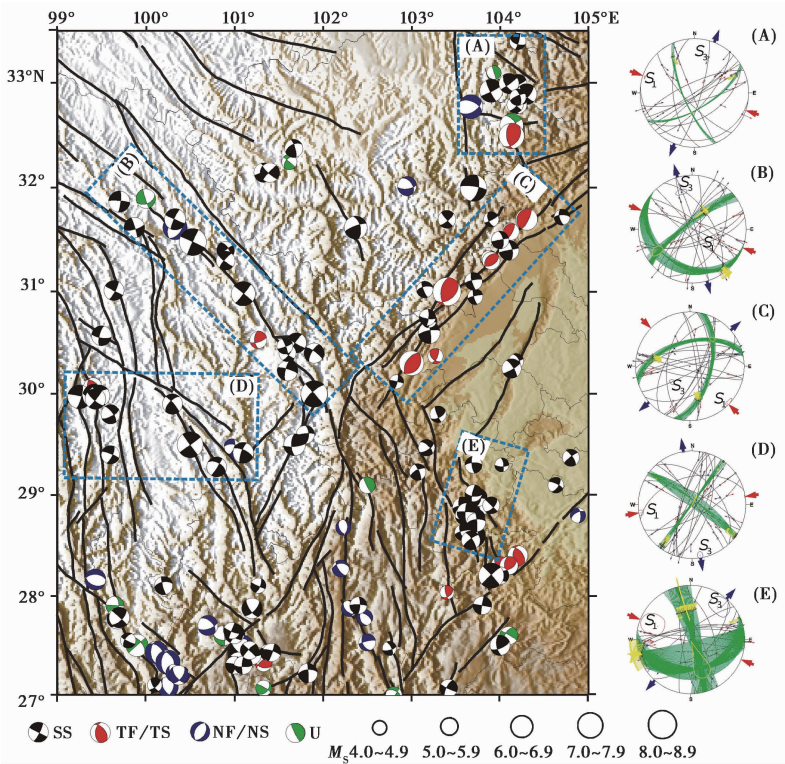


图 6 研究区内的震源机制及构造应力场
(A)、(B)、(C)、(D)、(E) 分别表示据不同构造带算出来的主压应力, 红色箭头表示主压应力方向
 S_1 为最大主压应力轴; S_2 为中间应力轴; S_3 为最大主张应力

从图 6 中可见区域内的主压应力主要以 NW-SE、NWW-SEE 为主。在这样的主应力场条件下, 鲜水河断裂带(走向为 NW-SE 向)易于产生左旋走滑运动, 而对于龙门山断裂带(走向为 NE-SW 向)易产生逆冲断层。这与张红艳等(2013)的结果相似。

3 鲜水河断裂带南段地壳速度结构

深部介质是孕震环境的载体, 结合研究区的深部速度结构特征(李大虎等, 2015), 发现鲜水河南段两侧壳内物质存在明显的横向差异。康定 $M_s6.3$ 地震震区位于高速和低速区的

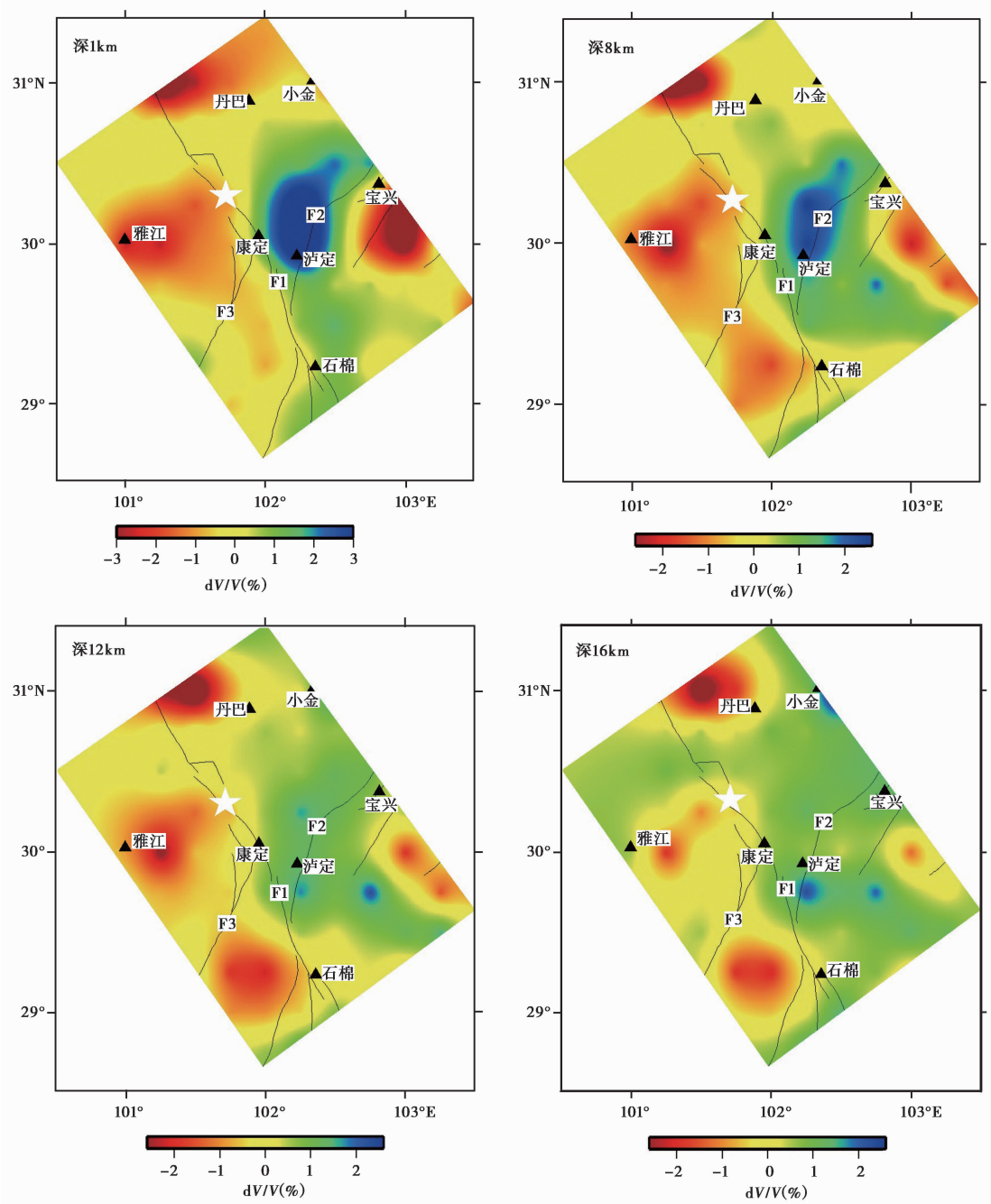


图 7 鲜水河断裂带南段 P 波速度异常分布 (李大虎等, 2015)

F1: 鲜水河断裂带; F2: 龙门山断裂带; F3: 玉农希断裂带; 图中黑线为区内主要断裂, 白色星号代表康定 M_s 6.3 主震

分界带上 (图 7)。通过地质资料 (陶晓风等, 1995; 许志琴等, 1992; 曾宜君等, 2001) 可知, 康定东侧至宝兴一带因出露前震旦纪结晶片岩、中基性变质火山岩及岩浆岩而表现出高速异常特征。康定震区西侧川滇块体呈现低速异常。吴建平等 (2009) 从 P 波三维成像中发现龙

门山断裂带与鲜水河断裂带交叉地带从地表到深部 30km 处均呈高速异常,鲜水河断裂带炉霍-道孚-康定段均表现出低速异常,在康定段和石棉段之间存在一个高速和低速的分界带,而 2014 年 11 月 22 日康定地震发生在高速和低速交界带附近。

4 康定地震成因初探

鲜水河活动断裂带位于青藏高原东南缘,印度板块向欧亚板块俯冲挤压,致使青藏高原的物质向东逃逸,受到稳定的四川盆地阻挡,鲜水河断裂带结构由浅到深受到不同程度的影响。龙门山断裂带为松潘-甘孜板块与四川盆地的交界断裂带,与鲜水河断裂带交接于康定-石棉段。图 6 给出了本文得到的构造应力场结果,从图中的震源机制球可以明显看出,鲜水河断裂带应力场(B 区所示)最大主压应力轴大部分指向 NWW-SEE 向,与构造带走向近乎平行;C 区为龙门山断裂带应力场,最大主压应力轴表现为 NW-SE 向,近垂直于龙门山构造带,由于受到青藏高原隆起、深部物质向东流动的影响,在龙门山断裂带主要形成“挤压”型地震;而在鲜水河与龙门山两条断裂带交界处地震震源机制特征十分复杂,最大主压应力轴指向杂乱无章,说明此区域应力积累来源较为复杂,可能是鲜水河断裂带和龙门山断裂带综合作用的结果。

前人对鲜水河断裂带南段和北段的差异特征已有了相当多的研究。王敏等(2008)和刘冠中等(2013)通过对鲜水河断裂带断层活动进行地表形变监测,发现鲜水河断裂带以北的炉霍段、道孚段的走滑量较大,表现为张性的左行滑移,而以南的康定段、石棉段走滑量小,运动形态复杂,这可能与地表的形变和深部物质流动相关(张培震,2008);胥颐等(2010)通过 Pn 波的各向异性揭示青藏高原深部物质向东流,由于受到四川盆地的阻挡,深部物质沿康定-石棉段方向挤出;陈应涛等(2013)通过对鲜水河断裂带岩石的磁组构造特征和热磁特征研究发现,南段在构造活动期间抬升幅度较北段抬升幅度大,且整条断裂带由北向南逐渐转化为挤压构造。从本文研究结果发现,鲜水河断裂带北段和南段地震活动性存在一定的差异(图 5):鲜水河断裂带北段 1981 前的地震活动性高于 2000 年以后,原因可能是鲜水河断裂带北段滑移量大,能量得到释放;而鲜水河断裂带南段的地震活动性 2000 年以后高于 1981 年前,原因可能是南段滑移量小,应力在南段累积,形成“地震核”效应,地震危险性增加。

地震的孕育过程除了与能量的累积和释放有关,还与深部构造环境相关。Liu et al (2014)通过青藏高原东部 0~100km 的三维速度成像,发现青藏高原下深部物质沿鲜水河断裂带流动,并在鲜水河断裂带和龙门山断裂带交界处分流,在流动过程中同时拖曳着中上地壳物质运动。康定震区速度结构(图 7)(李大虎等,2015;吴建平等,2009)揭示了康定震区上地壳(20km 以内)横向物质存在差异,震区东西两侧深部介质分布不均匀(马宏生等,2008)。综上所述,研究区内地应力场的分布特征及深部速度结构的差异,可能为 2014 年 11 月 22 日 $M_s 6.3$ 康定地震提供了深部孕震环境。

断层的应力释放与周边断层之间的相互作用有一定关系。根据应力触发理论可知,因地震释放的能量可以传递,转移到其它地方,增加了其它断层的负荷,促进地震的发生(King, et al, 1994)。程佳等(2009)通过研究汶川地震同震形变场,探讨汶川地震对川滇地区主要活动断裂地震活动趋势的影响,发现鲜水河断裂北西段和东南段地震活动性受到不

同程度的影响,西北段的地震危险性降低,而东南段的地震危险性增强。邵志刚等(2010)发现汶川 8.0 级地震引起鲜水河断裂带的道孚-康定段库仑应力明显增加,道孚-康定段存在一定的地震危险性。单斌等(2013)通过计算汶川地震和芦山地震的同震和震后粘弹松弛应力变化,发现鲜水河断裂带康定-道孚段的库仑应力增量进一步提升,其中汶川地震导致康定-道孚段上最大库仑应力增量为 0.01MPa,地震危险性增加。从这些断裂带之间的相互作用我们可以发现,龙门山断裂带和鲜水河断裂带并不是完全独立的,二者间相互影响。结合鲜水河断裂带南北段的应力累积差异和深部速度结构特征,研究区可能是在持续应力的作用下,由于康定 6.3 级震区深部物质横向分布不均匀,致使能量在该地区累积。汶川地震和芦山地震之后,龙门山断裂带释放的能量通过传递,对鲜水河断裂带的道孚-康定段产生很大影响,这种影响可能是导致康定地震的一个重要因素。

5 结论

(1) 本文利用鲜水河断裂带南段(康定段、石棉段)的地震资料得到的 b 值分别为 0.65 和 0.96,2000 年后的地震活动频度高于 1981 年前;相反,鲜水河断裂带北段(炉霍段、道孚段)1981 年前的地震活动频度要高于 2000 年后,本文得到的北段 b 值都为 0.85。

(2) 本文利用川滇地区近百年来 $M_s \geq 4.0$ 的震源机制解资料计算了区内不同构造带的应力场,发现鲜水河断裂带应力场的最大主压应力轴为 NW-SE 向,与断裂构造带的 NW-SE 向近乎平行,龙门山断裂带应力场的最大主压应力轴为 NW-SE 向,几近垂直于龙门山断裂构造带的 NE-SW 向。而鲜水河与龙门山两条断裂带交界地带的震源机制特征十分复杂,可能是鲜水河断裂带和龙门山断裂带综合作用的结果。

(3) 从地壳 P 波速度结构中发现康定震区西侧川滇块体速度特征为低速异常,东侧为高速异常,深部物质分布的不均匀性可能为康定 $M_s 6.3$ 震区提供了深部孕震环境。

(4) 结合鲜水河断裂带构造应力场特征、深部速度结构等信息可知,康定 $M_s 6.3$ 地震的发生可能是由于鲜水河断裂带在持续的应力作用下,震区深部物质横向分布不均匀,能量在该地区累积,同时受到龙门山断裂带频繁地震活动的影响,导致了康定段能量的释放。

致谢: 中国台网中心提供地震目录,防灾科技学院万永革研究员在论文完成中提供了宝贵的建议。

参考文献

- 陈应涛、张国伟、鲁如魁等,2013,青藏高原东缘鲜水河断裂带磁组构特征及构造意义,岩石学报,29(3),977~989。
- 程佳、刘杰、甘卫军等,2009,汶川地震同震形变场对川滇地区主要活动断裂地震发生趋势的影响,地震学报,31(5),477~490。
- 陈兵、江在森、赵振才,2000,中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究,中国地震,16(1),77~85。
- 杜方、闻学泽、张培震,2010,鲜水河断裂带炉霍段的震后滑动与形变,地球物理学报,53(10),2355~2366。
- 任雪梅、高孟潭、冯静,2011,地震目录的完整性对 b 值计算的影响,震灾防御技术,6(3),257~268。
- 高原、刘昭君,1995,随机性细胞自动机的地震模拟的动力学含义,中国地震,11(1),8~14。
- 李德威、陈桂凡、陈继乐等,2013,地震预测:从芦山地震到大陆地震,地学前缘,20(3),1~10。
- 李大虎、丁志峰、吴萍萍等,2015,鲜水河断裂带南东段的深部孕震环境与 2014 年康定 $M_s 6.3$ 地震,地球物理学报,58(6),1941~1953。
- 李志伟、胥颐、黄润秋等,2011,龙门山地区的 P 波速度结构与汶川地震的深部构造特征,中国科学(D 辑),41(3),283~

- 290。
- 刘冠中、马瑾、张鸿旭等, 2013, 二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征, 地球物理学报, **56**(3), 878~891。
- 马宏生、张国民、闻学泽等, 2008, 川滇地区三维 P 波速度结构反演与构造分析, 地球科学~中国地质大学学报, **33**(5), 591~602。
- 秦四清、薛雷、徐锡伟等, 2010, 川滇地区未来强震预测与汶川 $M_w 7.9$ 地震孕震过程分析, 地球物理学报, **53**(11), 2639~2650。
- 钱洪、罗灼礼、闻学泽, 1990, 鲜水河断裂带上特征地震的初探, 地震学报, **12**(1), 22~29。
- 钱洪、C.R. 艾伦、罗灼礼, 1988, 全新世以来鲜水河断裂的活动特征, 中国地震, **4**(2), 9~18。
- 秦向辉、陈群策、谭成轩等, 2013, 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析, 岩石力学与工程学报, **32**(1), 2870~2976。
- 黄玮琼、时振梁、曹学锋, 1989, b 值统计中的影响因素及危险性分析中 b 值的选取, 地震学报, **11**(4), 351~361。
- 单斌、熊熊、郑勇等, 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(D 辑), **43**, 1002~1009。
- 单斌、熊熊、郑勇等, 2009, 2008 年 5 月 12 日 $M_w 7.9$ 汶川地震导致的周边断层应力变化, 中国科学(D 辑), **39**(5), 537~545。
- 蜀水, 1974, 炉霍 7.9 级地震特征和该区的地震活动性, 地球物理学报, **17**(2), 77~83。
- 邵志刚、周龙泉、蒋长胜等, 2010, 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响, 地球物理学报, **53**(8), 1784~1795。
- 陶晓风, 1995, 龙门山双石推覆构造的形成机制探讨, 成都理工学院学报, **22**(2), 27~30。
- 万永革、沈正康、盛书中等, 2009, 2008 年汶川大地震对周围断层的影响, 地震学报, **31**(2), 128~139。
- 万永革、吴逸民、盛书中等, 2011, P 波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果, 地球物理学报, **54**(11), 2809~2818。
- 闻学泽、C.R. Allen、罗灼礼等, 1989, 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义, 地震学报, **11**(4), 362~372。
- 闻学泽, 1990, 鲜水河断裂带未来三十年内地震复发的条件概率, 中国地震, **6**(4), 8~16。
- 闻学泽, 2000, 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征, 地震地质, 2000, **22**(3), 239~249。
- 闻学泽、张培震、杜方等, 2009, 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景, 地球物理学报, **52**(2), 444~454。
- 王敏、沈正康、甘卫军等, 2008, GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化, 中国科学(D 辑), **38**(5), 575~581。
- 吴萍萍、李振、李大虎等, 2014, 基于 ANSYS 接触单元模型的鲜水河断裂带库仑应力演化数值模拟, 地球物理学进展, **29**(5), 2084~2091。
- 吴萍萍、李振、叶庆东等, 2015, 郛庐断裂带南段及邻区地震 b 值的空间分布特征, 中国地震, **31**(2), 372~381。
- 吴建平、黄媛、张天中等, 2009, 汶川 $M_s 8.0$ 地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究, 地球物理学报, **52**(2), 320~328。
- 胥颐、李志伟、黄润秋等, 2010, 四川西部龙门山地区的 Pn 波速度和各向异性, 中国科学(D 辑), **40**(4), 452~457。
- 谢福仁、崔效锋、赵建涛等, 2004, 中国大陆及邻区现代构造应力场分区, 地球物理学报, **47**(4), 654~662。
- 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, 北京: 地质出版社, 1~188。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2013, 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究, 地球物理学报, **56**(4), 1112~1120。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等, 2011, 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布, 地球物理学报, **54**(6), 1490~1500。
- 曾宜君、杨学俊、李云泉, 2001, 丹巴地区岩石地层层序-兼论造山带地层学研究的有关问题, 四川地质学报, **21**(1), 6~11。
- 张周术、黄忠贤、王建军, 1991, 鲜水河断裂带强震活动的模拟, 中国地震, **7**(3), 72~79。
- 张培震, 2008, 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配及深部动力过程, 中国科学(D 辑), **38**(9), 1041~1056。
- 张秋文、张培震、王乘等, 2003, 鲜水河断裂带断层间相互作用的触震与缓震效应, 地震学报, **25**(2), 143~153。
- 张红艳、谢富仁、崔效锋, 2013, 四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征, 地球科学与环境学报, **35**(2), 99~106。
- Chen Z, Burchfiel B C, Lin Y et al, 2000, Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for

India/Eurasia intercontinental deformation, *J Geophys Res*, **105**, 16215~16227.

King G C P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull Seismol Soc Amer*, **84**, 935~953.

Liu Q H, Hilst R D, Li Y, Yao H J et al, 2014, Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults, *Nature Geoscience*, **30**(3), 1~5.

Shen Z K, Lu J, Wang M, Burchfiel B C, 2005, Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau, *J Geophys Res*, **110**, B11409.

Wan Y G, 2010, Contemporary tectonic stress field in China, *Earthq Sci*, **23**, 377~386.

Wen X Z, Ma S L, Xu X W, 2008, Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China, *Phys Earth Planet Int*, **168**, 16~36.

The characteristics of seismic activity on Xianshuihe fault since 1970 and the preliminary study on seismogenesis of the Kangding $M_s6.3$ earthquake

Wu Pingping¹⁾ Wang Yang¹⁾ Zhu Jie¹⁾ Li Dahu²⁾ Huang Jichao²⁾ Sun Yan⁴⁾

1) China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

2) Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China

3) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

4) Northwest Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710119, Shaanxi, China

Abstract Seismicity feature of different scaled rectangles (Luhuo, Dawu, Kangding, Shimian) of Xianshuihe Fault and the principal compress axes of the recent stress field are analyzed by investigating seismic activity data since 1970 and the data of focal mechanism of Sichuan region. Moreover, we preliminarily discuss the relationship between the earthquake frequency on Xianshuihe Fault and the seismic activity on Longmenshan Fault. We analyze seismogenic conditions of the Kangding $M_s6.3$ earthquake. The results show that: (1) seismic activity along Xianshuihe fault exhibits different features at northern and southern segments; the seismic activity frequency before 1981 is higher than the activity after 2000 on Luhuo and Dawu zone (northern segment). On the other hand, seismic activity frequency after 2000 beneath Kangding and Shimian zone (southern segment) is higher than the activity before 1981. (2) From the picture of P wave velocity structure, we can find that western side of the Kangding earthquake zone (Sichuan-Yunnan tectonic block) appears to have low velocity abnormal, which is different from the eastern part. (3) The principal compressional stresses of the Longmenshan fault and Xianshuihe Fault are mainly NW-SE and NWW-SEE under the recent structural stress field. Combined with the information of ground surface deformation, the deep structure, and the fault interaction, we infer that the seismogenesis of Kangding $M_s6.3$ is attributed to two factors—the accumulation of stress and induced earthquake of high-frequency seismic activity of Longmenshan Fault.

Key words: Seismic activity; Xianshuihe; Kangding; Stress field; Seismogenic environment