www.cagsbulletin.com www.地球学报.com

2014 年 5 月云南盈江 M_s5.6、M_s6.1 地震发震构造分析

黄小龙^{1,2)},吴中海^{1)*},赵小艳³⁾,吴坤罡^{1,4)},黄小巾⁵⁾,杜锦锦⁴⁾

1)中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
2)北京大学,北京 100871;
3)云南省地震局,云南昆明 650091;
4)中国地质大学(北京),北京 100083;
5)首都师范大学,北京 100048

摘 要:2014年5月云南省盈江县先后发生 M_s5.6、M_s6.1 地震,为确定它们的发震构造及其所反映的区域 活动构造格局,笔者围绕该区开展了地震烈度调查、活动构造遥感解译、地质构造及构造地貌野外调查、 震源机制解及余震分布资料分析等工作。调查与分析表明,两次地震的宏观震中均位于盈江县勐弄乡麻栗 坡村附近,但发震断层明显不同。前者为 NE 走向左旋走滑的昔马一盘龙山断裂,后者为近 SN 向右旋走滑 的苏典断裂。历史地震资料显示,盈江地区的地震活动多以 5~6 级的中-强震为主,并具有明显的群发性和 沿 SN 向断层迁移的特征。在实皆断裂及滇西内弧带的共同作用下,腾冲地块内以大盈江断裂为界,北部主 要发育近 SN 向右旋走滑断裂,南部则以 NE 向左旋走滑断裂为主,其中近 SN 向断层晚第四纪活动性更强。 关键词:盈江地震;发震断层;地震烈度;苏典断裂;腾冲地块

中图分类号: P315.32; P315.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.06.08

Seismogenic Structure of 2014 M_8 5.6 and M_8 6.1 Earthquakes in Yingjiang, Yunnan Province

HUANG Xiao-long^{1, 2)}, WU Zhong-hai^{1)*}, ZHAO Xiao-yan³⁾, WU Kun-gang^{1, 4)}, HUANG Xiao-jin⁵⁾, DU Jin-jin⁴⁾

Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;
Peking University, Beijing 100871;
Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650091;
China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
Capital Normal University, Beijing 100048

Abstract: Two earthquakes of $M_s5.6$ and $M_s6.1$ occurred successively on May, 2014, in Yingjiang, Yunnan province. In order to determine their seismogenic structures and the regional active tectonic settings, the authors carried out field investigation of seismic intensity, remote sensing image interpretation, analysis of focal mechanism solutions and aftershock distribution. The results show that the macro-epicenters of two earthquakes were both located near the area of Malipo Village, Mengnong Township, Yingjiang County, but their seismogenic faults are different from each other. The former was associated with the NE-trending left-lateral strike-slip Xima-Panlongshan fault, whereas the latter occurred along the SN-trending right-lateral strike-slip Sudian fault. Historical seismicities were dominated by the earthquakes with magnitude 5~6 in the Yingjiang region, which clustered along the SN-trending fault. Under the combination effect of Sagaing fault and inner arc belt in western Yunnan, the north of Tengchong block bounded by Dayingjiang fault is mainly dominated by nearly SN-trending right-lateral strike slip faults, whereas the south is dominated by NE-trending left-lateral strike slip faults. The activity of nearly NS-tranding faults was relatively stronger in Late Quaternary.

Key words: Yingjiang earthquake; seismogenic fault; seismic intensity; Sudian fault; Tengchong block

收稿日期: 2014-12-29; 改回日期: 2015-05-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介:黄小龙,男,1989年生。博士研究生。主要从事活动构造与地震地质研究。E-mail: tinyloong@163.com。

*通讯作者:吴中海,男,1974年生。博士,研究员。主要从事活动构造与地震研究。E-mail: wzhh4488@sina.com。

本文由中国地质调查局项目(编号: 1212011120163; 12120114002101)、国家自然科学基金项目(编号: 41171009)和中央级公益性科研院所 基本科研业务费项目(编号: DZLXJK201410)联合资助。

据中国地震台网中心(CENC)测定,2014年5月 24 日及 5 月 30 日, 云南省德宏傣族景颇族自治州 盈江县先后发生 Ms5.6 和 Ms6.1 地震。地震共造成 盈江县及其周边地区 16个乡镇共 85个村庄的房屋 受损、4 万余户群众受灾。哈佛大学(HRV)和美国 国家地震台网中心(NEIC)也给出了观测结果(表 1), 显示两次地震的震中位置十分接近,都位于盈江县 城 NNW 方向的卡场镇附近。历史地震资料显示, 盈江地区 5~6 级左右的中强震活动频繁, 自 1929 年以来共发生5级及以上地震27次,2008年以来该 地区地震活动更为频繁。高频率的地震活动,给当 地人民的生产生活带来严重的影响和巨大的损失, 因此急需该地区的地震及断层活动资料,为下一步 的防震减灾工作提供地质依据。然而盈江地处我国 滇西南与缅甸交界地带,历史上无强震发生,前人 对该区调查研究较少。2008年以后,该区连续发生 多次 5 级以上的地震活动,引起许多学者的关注并 进行了一系列的研究工作。如: 大盈江断裂晚第四 纪以来活动性的研究(安晓文等, 2009; 常祖峰等, 2011); 2008 年以来地震参数与发震断层关系的研 究、震源机制解及区域应力场研究等(徐彦等, 2012; 赵小艳等, 2012; 邓菲和刘杰, 2014)。在目前的研究 工作中,对区内主要断层及其活动性的研究还较少, 对区内活动构造格局的认识还不统一, 对主要控震 构造的方向还有争论。震后,笔者开展了地震烈度 和发震断层的地表调查工作,进而对此次地震的发 震构造及区内主要活动构造的格局开展初步的讨 论。

盈江地区地处横断山脉的西南端,区域构造上 位于三江褶皱带西部的腾冲地块内。出露的最老的 地层为元古界高黎贡山群变质岩,局部地区出露有 奧陶系、志留系、泥盆系和石炭系。在大盈江两岸 及苏典断裂沿线发育第四纪盆地,充填了第四纪冲 洪积堆积。地质历史上岩浆活动强烈,形成了门类 齐全的火成岩基岩带(云南省地质矿产局,1990)。受 喜山运动的影响,区内新构造活动强烈,始新世初 期受特提斯俯冲和印度与欧亚大陆碰撞的影响,区 内构造活动以具有左旋走滑的逆冲断裂为主;渐新 世一中新世,区内构造活动主要受右旋走滑的那邦 断裂和高黎贡山断裂的控制(季建清等,2000;毛玉 平等,2003);中新世末期一上新世早期,由于大陆 的进一步汇聚使腾冲地块发生顺时针的旋转,加之 受实皆断裂右旋走滑活动的影响,形成了区内以近 SN 向和 NE 向断层为主的活动构造格局。遥感资料 解译表明腾冲地块内主要存在上述两组方向上的断 裂并以大盈江断裂为界,南部主要发育以龙川江断 裂、大盈江断裂等为代表的左旋走滑断裂,北



图 1 盈江及其邻区地质简图(A)和 地质剖面图(B)

Fig. 1 The geology diagram of Yingjiang and its adjacent area (A) and the geological profile (B)

	表 1	不同地震台网所记录的地震参数
ble 1	Seismic pa	rameters recorded by different seismic network

Table 1 Seismic parameters recorded by unrefent seismic networks							
日期	时间	纬度/°	经度/°	深度/km	震级	数据来源	
2014-05-24	04:49:21.2	25.0 N	97.8 E	12.4	<i>M</i> _s 5.6	CENC	
2014-05-24	04:49:21.0	24.97 N	97.84 E	8.0	$M_{\rm W}5.8$	NEIC	
2014-05-24	04:49:26.0	24.97 N	97.91 E	18.8	$M_{\rm W}5.6$	HRV	
2014-05-30	09:20:12.9	25.0 N	97.8 E	12.0	$M_{\rm S}6.1$	CENC	
2014-05-30	09:20:15.0	24.99 N	97.85 E	10.0	$M_{\rm W}5.9$	NEIC	
2014-05-30	09:20:19.0	24.95 N	97.92 E	13.9	$M_{\rm W}5.9$	HRV	



图 2 盈江 M₈5.6、M₈6.1 地震烈度图 Fig. 2 Seismic intensities of the Yingjiang M₈5.6 and M₈6.1 earthquakes

Ms5.6 地震等震线图为参考中国地震局盈江县6.1级地震现场工作队应急科考组应急考察报告绘制

 $M_{\rm s}5.6$ seismic isoseismal map compiled after Emergency Report by Emergency Scientific Investigation Group of Yingjiang $M_{\rm s}6.1$ In-situ Working Party, China Bureau of Seismology

侧主要发育以固东一腾冲断裂、猴桥一中和断裂、 槟榔江断裂、苏典断裂等近 SN 向右旋走滑断裂(图 5a)。区内火山活动强烈,仅在腾冲一带就分布有六 十余座第四纪火山,在苏典等断裂附近亦分布有多 处受断层控制的新近纪玄武岩地层(图 1)。

1 地震烈度调查

此次调查共获得 50 个有效的地震烈度调查点, 综合所有调查点绘制等震线图(图 2)。结果显示, *M*s6.1 地震的宏观震中位于盈江县勐弄乡麻栗坡村, 坐标 N24°54'42.10"、E97°53'59.40",宏观震中建筑 物破坏严重(图版 I-i, j)烈度可达WI度。此外在VI度 区存在麻竹岭杆村和盘龙山村两个VII度异常点,分 析认为两个村子均临沟而建,它们的烈度异常均受 地形放大效应影响(刘洪兵和朱晞, 1999),并与前后 两次地震破坏效果的叠加有关。

2 发震构造分析

2.1 遥感解译与地表调查

为确定盈江地区两次地震的发震断层,笔者以 宏观震中麻栗坡村为中心,开展了初步的活动断裂 和构造地貌的调查。遥感解译及野外调查表明,附 近存在两条晚第四纪以来存在明显活动的断层。

苏典断裂:遥感图像及地形图件的综合解译表 明,苏典断裂南起盈江盆地的北西侧,经勐典、黄 草坝、苏典等地向北一直延伸至缅甸境内。断裂总 长约80km,其中中国境内长55km左右,总体走向 近 SN, 主体向西倾斜, 在苏典乡北侧变为向东倾 斜。断裂晚第四纪以来的活动十分明显, 断层的最 北端受尾端拉张作用的影响于盈江盆地的西北侧发 育一三角形的断陷(图 3a); 在勐典至苏典段, 断裂 呈左阶斜列,形成了串珠状的拉分盆地,南部为与 昔马--盘龙山断裂共同控制的勐典盆地, 中部为断 层走滑拉分形成的宽约 1.5 km 菱形的黄草坝盆地 (图 3c), 北部为苏典拉分盆地(图 3c)及右旋错断可 达 1.5~2.1 km 的勐嘎河(图 3d); 在苏典北部断层经 腊马河向缅甸延伸, 控制了狭长的第四纪盆地 Sadung 的发育, 右旋错动盆地中一条主要河流, 偏 移量可达 0.6~1 km(图 3e)。

野外调查发现,在苏典断裂南段滚塘寨附近于 山前位置处存在一系列近 SN向的反向坡(图版 I-a)、 与之平行的断层三角面及三角面下因冲沟偏移形成 的断头沟(图版 I-b)。该点北侧断裂为一系列平直的、 线性的、近 SN 向的断层三角面(图版 I-c)由该处向 北延伸,控制了盈江盆地与勐典盆地之间的线性谷 地。在菱形拉分的黄草坝盆地的东侧有一断层面出 露(图版 I-d),该断面表面光滑,上有擦痕发育(图版 I-e),实测断面产状为 285° ∠80°,擦痕产状 22° ∠5°,18° ∠7°,20° ∠10°,25° ∠11°,擦痕 产状表明苏典断裂晚第四纪期间以右旋走滑为主。

沿苏典断裂采集新近纪的玄武岩样品进行测年,两组样品的年龄分别为4.83 Ma、4.42 Ma(表 2),表明至少从上新世的早期苏典断裂就已经开始活动了。因沿断裂发育的玄武岩并未表现出沿冲沟流动的分布特征,表明现有冲沟多是在最年轻的新近纪 玄武岩层形成之后发育的,可得出苏典断裂自 4.42 Ma 至今的平均活动速率值约为 0.34~ 0.48 mm/a。

昔马一盘龙山断裂: 该断裂南起昔马盆地的北 东侧, 经河边寨向北东延伸, 止于苏典断裂的西 侧。断层长约 30 km, 总体走向约 45°, 向东倾斜 倾角近于直立。遥感图像显示从昔马盆地的北东侧 至勐弄乡西南, 断层为一平直、线性特征明显的断 层槽谷; 至勐弄附近, 受新近纪玄武岩地层覆盖, 断层线性特征不如南侧明显; 在勐典盆地的西侧断 层的线性特征明显, 并控制了勐典盆地的西侧边 界。

野外调查发现, 在松园村西南有一条走向 50° 左右的断层槽谷。槽谷西侧出露产状 112° ∠84°

表 2 盈江晚新生代火山岩样品及其测年结果 Table 2 Samples and dating results of late Cenozoic volcanic rocks in Yingjiang

	1		8			80 8	
样品编号	位置	纬度	经度	海拔/m	年龄/Ma	样品类型	测年方法
S505-1	盈江县大寨北	25°00.893'	97°56.752′	2146	4.83 ± 0.14	致密块状玄武岩	Ar-Ar
S505-3	勐弄西公路边	24°54.353'	97°54.081′	1777	4.42 ± 0.11	致密块状玄武岩	K-Ar



图 3 盈江及其邻区活动断层遥感解译图(a)、地形剖面及震源深度关系图(b)、拉分盆地图(c)和错断水系图(d, e) Fig. 3 Remote sensing interpretation of active faults in Yingjiang and its adjacent areas (a), diagram showing the relationship between topographic profile and the centrum depth (b), Pull-apart basin diagram (c) and offset stream (d, e)

断面(图版 I-f),其上滑槽发育,指示断层以左旋走 滑活动为主(图版 I-g)。沿断层向北,在盘龙山村的 西南同样存在一走向约 45°的断层槽谷。此外,在 盘龙山村的北东侧山前,有一与断层走向一致的长 条形山体(图版 I-h),山体后部为一个走向与之一致 延伸约 1.5 km 的断层挡水。调查表明昔马一盘龙山 断裂晚第四纪以来具有明显左旋走滑。

2.2 发震断层分析

在 *M*_s6.1 地震的等震线图中, VI度区与VI度区 的长轴走向都在 350° 左右, 等震线整体表现为长 宽比略大于 2 的椭圆形, 疏密变化不明显(图 2)。指 示发震断层走向近 SN, 以走滑活动为主, 倾角较 陡。余震分布(图 4d)显示此次地震的余震主要分布 在苏典断裂的西侧, 优势方向为近 SN 向, 指示发 震断层走向近 SN。 对于这次地震, 滇西北实验预报场(以下简称 实验场)、哈佛大学(HRV)及美国地质调查局(UCGS) 分别给出了各自的震源机制解(表 3, 图 3)。结果显 示都存在走向约 80°及走向 350°左右的两组节 面。其中节面 I 指示一条走向近 EW、倾角近于直 立的左旋走滑断层, 节面 II 指示走向近 SN、倾角在 65°至 85°之间的右旋走滑断层。节面 II 与烈度及 余震分布所指示的发震断层接近, 与宏观震中附近 近 SN 向的苏典断裂的性质基本一致。

此次地震的震源平均深度约 12 km;震源机制 解指示断层平均倾角约 75°。据此计算震中距发震 断层的地表距离为 3.2 km,与宏观震中距苏典断裂 4 km 左右的距离非常接近。此外,宏观震中距昔马 一盘龙山断裂仅 1 km 左右,野外调查中昔马一盘 龙山断裂倾角约 85°,计算发现昔马—盘龙山断裂



图 4 盈江 M_s5.6、M_s6.1 地震余震精定位图 Fig. 4 Aftershock distribution of Yingjiang M_s5.6, M_s6.1 earthquakes

a, b-M_s5.6 地震 5月 24—28 日移动前、后余震分布图; c-M_s5.6 地震 24 日余震分布图(移动后); d, e-M_s6.1 地震 5月 30 日—6月 8日 移动前、后余震分布图; f-M_s6.1 地震 30 日余震分布图(移动后)

a, b- $M_{s}5.6$ aftershock distribution and adjusted figure from May 24 to 28; c- $M_{s}5.6$ aftershock distribution figure on 24th (after movement); d, e- $M_{s}6.1$ aftershock distribution figure and adjusted figure from May 30 to June 8; f- $M_{s}6.1$ aftershock distribution figure on 30th (after movement)

Table 3 The Yingjiang earthquake' focal mechanism								
地震	Plane I]	数据			
事件	Strike	Dip	Slip	Strike	Dip	Slip	来源	
	82°	85°	5°	351°	85°	175°	HRV	
$M_{\rm S}6.1$	261°	90°	-25°	351°	65°	180°	实验场	
	80°	85°	-14°	172°	76°	-175°	UCGS	
M 5 6	335°	82°	-175°	244°	85°	-8°	HRV	
M _S 5.0	155°	85°	175°	245°	85°	5°	实验场	

表 3

盈江地震的震源机制解

会在向下延伸约 11.5 km 后与此次地震的震源及震中的连线相交,该深度与震源深度近乎一致。据此 推测此次地震可能发生在苏典断裂与昔马一盘龙山 断裂在地下约 12 km 的交汇位置上(图 3b)。

综合地震烈度分布、余震分布、震源机制解、 震源深度关系及遥感解译和实地调查结果,可以确 定此次盈江 *M*_s6.1 地震的发震断层为近 SN 向右旋 走滑的苏典断裂。 中国地震局盈江县 6.1 级地震现场工作队应急 科考组(2014)给出的地震烈度调查结果显示, *M*_s5.6 地震的宏观震中位于卡场镇附近, 烈度可达 \mp 度区长轴方向为 NNE向(图 2)。据笔者 *M*_s6.1 地震 后的调查工作,卡场附近的烈度只有 \mp N 、故笔者认 为 *M*_s5.6 地震的宏观震中应该位于同为 \mp 更区的勐 弄北侧 \mp 更区的中心,即麻栗坡村附近。则该次地 震极震区长轴走向 NE,指示发震断层位于勐弄乡 附近走向 NE。余震主要沿 NE 向分布(图 4a),进一 步证明地震受 NE 向断层控制。震源机制解(表 3) 指示,发震断层走向约 65°,倾角约 85°,以左旋 走滑为主。综上可确定 *M*_s5.6 级地震的发震断层为 走向 NE,倾角近于直立,左旋走滑的昔马一盘龙 山断裂。

图 4a, d 显示 *M*_s5.6 及 *M*_s6.1 地震的仪器震中相 对于宏观震中均存在十余 km 的偏差。根据双差地



图 5 腾冲地块活动构造简图(a)、动力学模式图(b)和运动学模式图(c) Fig. 5 Simplified map of the active tectonics in Tengchong block (a), dynamics model (b), kinematics model (c)

震精定位方法的基本原理,作为一种相对定位方法, 结果中地震事件的相对位置是准确的,但绝对位置 会存在一定系统误差(Waldhauser et al., 2000)。上述 定位结果中不同事件中这两个近乎一致的偏差可能 就是定位中的系统误差。在确保宏观震中准确的前 提下,笔者尝试对地震序列中的所有事件进行由主 震的仪器震中向宏观震中的移动,得到结果如图 4b, e。经移动 M_s5.6 及 M_s6.1 地震余震的分布与发震断 层表现出了更好的契合关系,进一步地证实了笔者 对两次地震发震断层的判断。此外,地震当日的余 震分布(图 4c, f)显示, 30 日的余震与总的余震分布 的优势方向基本一致; 24 日余震分布的优势方向为 NE向,而总的余震分布中除了 NE 向还存在一个近 SN 向的优势方向。余震分布显示可能是 24 日的地 震诱发了苏典断裂活动,导致 30 日地震的发生。

3 讨论

地震资料显示,盈江地区历史上5~6级中-强震 活动频繁,且从未发生过 6.5 级以上地震,但历史 地震资料时间较短,而强震复发周期一般比较长, 因此不排除区内具有发生 6.5 级及以上强震的潜 能。沿固东一腾冲断裂历史上就曾发生过 6.5 级地 震,因此作为走向和规模均与之相似的苏典断裂存 在发生 6.5 级左右地震的潜力。历史地震资料亦显 示,盈江地区的地震活动存在群发性及沿 SN 向断 层迁移的特征(图 3)。笔者认为,区内群发型地震活 动与由多组 NE 向和 SN 向断裂组成的复杂断裂系 统有关,一条断层的活动可能触发其他断层的活动, 故而造成地震群发;而沿断裂的地震迁移则可能与 断层的分段破裂有关。

关于腾冲地块内的活动构造格局, Wang 等 (1997)认为是在与实皆断裂和高黎贡山断裂有关的 右旋剪切及顺时针旋转作用下形成, 但高黎贡山断 裂自中一晚第三纪右旋走滑已经很弱, 难以控制该 区的活动构造格局。笔者认为由于腾冲地块位于由 弧形的玉树一鲜水河一小江断裂与右旋走滑的实皆 断裂所围限的川滇旋扭构造系统与缅甸的交界地区 (吴中海等, 2012), 故其右旋剪切及顺时针旋转与实 皆断裂及滇西内弧带的活动有关。受印度板块俯冲 碰撞及青藏高原物质挤出作用的影响(崔作舟等, 1990; 苏伟等, 2002), 川滇地块围绕东喜马拉雅构 造节存在着顺时针的旋转(Wang et al., 1998; Burchfiel, 2004), GPS 观测也证实了该结论(Chen et al., 2000; 张培震等, 2002)。吴中海等(2014, 2015), 在前人研究的基础上,将川滇旋扭块体进一步的划 分出了由玉树断裂、鲜水河—小江断裂组成的川滇 外弧带;以及由德钦一中甸断裂带、滇西北裂陷带、 南汀河断裂带、畹町断裂带所构成的滇西内弧带。 腾冲地块恰好位于滇西内弧带与实皆断裂及其分支 断裂所围成的区域内, 在实皆断裂的影响下区内先 存的 SN 向断层向西偏转并与大盈江断裂北侧 SN 向断层共同构成如图 5c 所示的断块系统。在右旋剪 切及顺时针旋转作用下, 断块系统内以大盈江断裂 为界南侧因顺时针旋转致使 NE 向断块间发生左旋 走滑,北部主要受实皆断裂右旋走滑活动影响导致 SN 向断块之间发生右旋走滑。主要地震的震源机 制解指示区内现今主压应力方向为 NE-NNE 向(图 5a)与前人研究结果基本一致(崔效锋和谢富仁, 1999; 谢富仁等, 2001; 徐彦等, 2012), 在该应力作 用下块体内将产生 NE 向的左旋走滑断裂及近 SN 向的右旋走滑断裂(图 5b), 与运动学模式中的结果 一致反映了现今构造对先存构造的继承。进一步的 遥感解译及野外调查发现,在大盈江断裂北部近 SN 向断裂所控制的断块内部. 还发育有一系列 NE 向左旋走滑的次级断裂(5a)。笔者认为其是在苏典 断裂、固东一腾冲断裂、实皆断裂及其分支断裂等 的右旋走滑作用下,夹持与其中的块体受到顺时针 的旋扭作用,进而产生了一系列 NE 向左旋走滑的 次级断层以调节区内的旋扭变形所致(图 5c)。

前人研究认为盈江地区主要断裂中大盈江断 裂的活动性较强(安晓文等, 2009; 常祖峰等, 2011), 但沿断裂的地震活动性显示, 自公元 760 年以来盈 江地区的地震活动主要分布在苏典断裂的两侧, 明 显是受苏典断裂控制(图 3a)。虽然 2011 年盈江 *M*_s5.9 地震被认为是大盈江断裂活动引起(赵小艳等, 2013), 但孙尧等认为苏典断裂才是这次地震的发 震断层(Sun et al., 2014)。地震活动性显示近 SN 向 的苏典断裂晚更新世以来的活动性更强。从整个腾 冲地块来看, 5 级以上的历史地震也多分布在大盈 江断裂的北侧, 以固东—腾冲断裂两侧最多(图 5a), 反映了晚第四纪期间腾冲地块内近 SN 向的断层的 活动性更为强烈。进一步反映了右旋走滑的实皆断 裂对腾冲地块的断裂活动的控制作用显著。

综上,此次盈江两次 5 级以上地震是在实皆断 裂的右旋剪切变形及滇西内弧带顺时针旋扭作用下, 由近 SN 向断裂所加持的 NE 向次级断块首先发生 顺时针旋转引发次级断裂的左旋走滑活动,进而触 动近 SN 向主断层发生右旋走滑活动所致。该情况 的发生,提醒我们关注由次级断层活动触发主断层 活动而引起的强烈地震。

4 主要结论

(1)*M*_s5.6 及 *M*_s6.1 地震的宏观震中十分接近, 均位于盈江县勐弄乡麻栗坡村附近。其中 *M*_s6.1 地 震的宏观震中坐标为 N24°54'42.10"、E97°53'59.40", 烈度可达WI度。

(2)*M*_s5.6 地震的发震断层为 NE 走向、左旋走 滑的昔马一盘龙山断裂; *M*_s6.1 地震的发震断层为 近 SN 向右旋走滑的苏典断裂。两次地震的震源可 能均位于苏典断裂与昔马一盘龙山断裂在地下约 12 km 交汇处。此次双震活动应为区域块体在近 SN 向右旋剪切变形作用下, SN 向断裂所夹持的 NE 向 次级断块首先发生顺时针旋转引发次级断裂活动, 进而触动近 SN 向主断层活动所致。

(3)区内地震活动频发,且多以 5~6 级的中强震 为主,但不排除具有发生 6.5 级及以上地震的潜能; 尤其是沿苏典断裂,根据其晚更新世显著的活动性 和规模来看,存在发生 6.5 级及以上地震的潜力。 此外,因受断裂系统内断层相互作用及断层分段活 动的影响,区内地震活动常具有明显的群发性及沿 SN 向断层迁移的特征。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 1212011120163 and 12120114002101), National Natural Science Foundation of China (No. 41171009) and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. DZLXJK201410).

参考文献:

- 安晓文,常祖峰,石静芳. 2009. 大盈江断裂西南段晚第四纪活动研究[J]. 地震研究, 32(2): 193-197.
- 常祖峰, 陈刚, 余建强. 2011. 大盈江断裂晚更新世以来活动的 地质证据[J]. 地震地质, 33(4): 877-888.
- 崔效锋,谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行 应力分区的初步研究[J]. 地震学报,21(5):513-522.
- 崔作舟,尹周勋,高恩元,卢德源,傅维洲. 1990. 青藏高原地 壳结构构造及其与地震的关系[J]. 地球学报,11(z1): 215-226.
- 邓菲, 刘杰. 2014. 2008 年盈江地震序列的震源参数和震源机制 相关系数研究[J]. 地震, 34(2): 22-34.
- 季建清,钟大赉,张连生.2000. 滇西南新生代走滑断裂运动 学、年代、及对青藏高原东南部块体运动的意义[J]. 地质 科学,35(3):336-349.
- 刘洪兵,朱晞. 1999. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 15(03): 20-25.

毛玉平, 韩新民, 谷一山, 何蔚, 罗荣联. 2003. 云南地区强震

(M≥6)研究[M]. 昆明: 云南科技出版社: 1-15.

- 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 黄忠贤. 2002. 青藏高原及其邻区地壳 上地幔 S 波速度结构[J]. 地球学报, 23(3): 193-200.
- 吴中海,赵根模,龙长兴,周春景,范桃园.2014. 青藏高原东 南缘现今大震活动特征及其趋势:活动构造体系角度的初 步分析结果[J]. 地质学报,88(8):1401-1416.
- 吴中海,赵希涛,范桃园,叶培盛,全亚博,杨振宇.2012. 泛亚 铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征[J]. 地质通报,31(2/3):191-217.
- 吴中海,龙长兴,范桃园,周春景,冯卉,杨振宇,全亚博.2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与 机制[J]. 地质通报,34(1):1-31.
- 谢富仁,苏刚,崔效锋,舒塞兵,赵建涛. 2001. 滇西南地区现 代构造应力场分析[J]. 地震学报, 23(1): 17-23.
- 徐彦,高洋,李丹宁,何家斌. 2012. 盈江中强地震序列震源机 制及区域地壳流变特征和断层性质研究[J]. 地球物理学进 展,27(6): 2358-2368.
- 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: 613-630.
- 张培震,王琪,马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, 9(2): 442-450.
- 赵小艳,韩立波,龙锋.2012.2011 年盈江 Ms≥4.0 地震序列震源 机制解与发震构造研究[J]. 地震研究,35(4):477-484.
- 赵小艳,韩立波,苏有锦,刘自凤. 2013. 2011 年云南盈江 Ms5.8 地震序列重定位[J]. 中国地震, 29(4): 438-447.
- 中国地震局盈江县 6.1 级地震现场工作队应急科考组. 2014. 2014年盈江县 Ms6.1 级地震应急科学考察报告[Z]. 中国地 震局盈江县 6.1 级地震现场工作队应急科考组.

References:

- AN Xiao-wen, CHANG Zu-feng, SHI Jing-fang. 2009. Investigation of Late Quaternary Activity along the South-western Segment of the Da Yingjiang Fault[J]. Journal of Seismological Research, 32(2): 193-197(in Chinese with English abstract).
- BURCHFIEL B C. 2004. New Technology: New Geological Challenges[J]. GSA Today, 14(2): 4-10, doi: 10.1130/1052-5173.
- Bureau of Geology and Mineral Resources in Yunnan Province. 1990. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 613-630(in Chinese).
- CHANG Zu- feng, CHEN Gang, YU Jian- qiang. 2011. Geological Evidence of Activity along the Da Yingjiang Fault Since Late Pleistocene[J]. Seismology and Geology, 33(4): 877-888(in Chinese with English abstract).
- CHEN Z, BURCHFIEL B C, LIU Y, KING R W, ROYDEN L H, TANG W, WANG E, ZHAO J, ZHANG X. 2000. Global Positioning System Measurements from Eastern Tibet and Their Implications for India/Eurasia Intercontinental Deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 105: 16215-16227.
- China Earthquake Administration Yingjiang Ms6.1 Earthquake Field Work Team Emergency Research Group. 2014. 2014 Yingjiang Ms6.1 earthquake emergency scientific research

report[Z]. China Earthquake Administration Yingjiang M_s 6.1 Earthquake Field Work Team Emergency Research Group(in Chinese).

- CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren. 1999. A preliminary Study of the Stress in Southwest China and Its Neighboring Area With the Focal Mechanism[J]. Acta Seismologica Sinica, 21(5): 513-522(in Chinese).
- CUI Zuo-zhou, YIN Zhou-xun, GAO En-yuan, LU De-yuan, FU Wei-zhou. 1990. The Structure and Tectonics of the Crust and Their Relation with Earthquakes in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 11(z1): 215-226(in Chinese with English abstract).
- DENG Fei, LIU Jie. 2014. Source Parameters and Correlation Coefficients of Focal Mechanisms for the 2008 Yingjiang Earthquake Sequence[J]. Earthquake, 34(2): 22-34(in Chinese with English abstract).
- JI Jian-qing, ZHONH Da-lai, ZHANG Lian-sheng. 2000. Kinematics and Dating of Cenozoic Strike-slip Faults in the Tengchong Area, West Yunnan: Implications for the Block Movement in the Southeastern Tibet Plateau[J]. Scientia Geological Science, 35(3): 336-349(in Chinese with English abstract).
- LIU Hong-bing, ZHU Xi. 1999. Advance on Topographic Amplification Effects of Seismic Response[J]. Word Information on Earthquake Engineering, 15(03): 20-25(in Chinese with English abstract).
- MAO Yu-ping, HAN Xin-min, GU Yi-shan, HE Wei, LUO Rong-lian. 2003. Strong earthquakes' Research in Yunnan (M ≥5)[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press: 1-15(in Chinese).
- SU Wei, PENG Yan-ju, ZHENG Yue-jun, HUANG Zhong-xian. 2002. Crust and Upper Matle Shear Velocitu Structure beneath the Tibetan Plateau and Adjacent Areas[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(3): 193-2006(in Chinese with English abstract).
- SUN Yao, AN Mei-jian, FENG Mei, LOHNG Chang-xing, YANG Zhen-yu. 2014. Seismogenic Tectonics and Dynamics of the 2011 Ms5.9 Yingjiang Earthquake in Yunnan, China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(2): 468-482.
- WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L. 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of American, 90(6): 1353-1368.
- WANG E, BURCHFIEL B C, ROYDEN L H, CHEN Liang-zhong, CHEN Ji-shen, LI Wen-xin, CHEN Zhi-liang. 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali Fault Systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China[J]. Geological Society of America Special Paper, 327: 1-108.
- WANG E, BURCHFIEL B C. 1997. Interpretation of Cenozoic Tectonics in the Right-Lateral Acoommodation Zone Between the Ailao Shan Shear Zone and the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. International Geology Review, 39: 191-219.
- WU Zhong-hai, LONG Chang-xing, FAN Tao-yuan, ZHOU

Chun-jing, FENG Hui, YANG Zhen-yu, TONG Ya-bo. 2015. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. Geological Bulletin of China, 34(1): 1-31(in Chinese with English abstract).

- WU Zhong-hai, ZHAO Gen-mo, LONG Chang-xing, ZHOU Chun-jing, FAN Tao-yuan. 2014. The Seismic Hazard Assessment around South-East Area of Qinghai-Xizang Plateau: A Preliminary Results from Active Tectonics System Analysis[J]. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1401-1416(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, ZHAO Xi-tao, FAN Tao-yuan, YE Pei-sheng, TONG Ya-bo, YANG Zhen-yu. 2012. Active fault and seismologic characteristics along the Dali-Ruili railway in west Yunnan province[J]. Geological Bulletin of China, 31(2/3): 191-217(in Chinese with English abstract).
- XIE Fu-ren, SU Gang, CUI Xiao-feng, SHU Sai-bing, ZHAO Jian-tao. 2001. Modern Tectonic Stress Field in Southwestern Yunnan, China[J]. Acta Seismologica Sinica, 23(1): 17-23(in Chinese with English abstract).
- XU Yan, GAO Yang, LI Dan-ning, HE Jia-bin. 2012. Focal mechanisms of mid-size Yingjiang earthquake sequences and the study of rheology in the crust and the fault plane properties[J].Progress in Geophysica, 27(6): 2358-2368(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. 2002. GPS Velocity Field and Active Crustal Deformation in and Around The Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 9(2): 442 – 450(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xiao-yan, HAN Li-bo, LONG Feng. 2012. Focal Mechanism Solutions and Seismogenic Structures of Yingjiang Ms ≥4.0 Earthquake Sequences in 2011[J]. Journal of Seismological Research, 35(4): 477-484(in Chinese with English abstract).

ZHAO Xiao-yan, HAN Li-bo, SU You-jin, LIU Zi-fu. 2013. Relocation of Ms5.8 Event of the 2011 Yingjiang Earthquake Sequence[J]. Earthquake Research in China, 29(4): 438-447(in Chinese with English abstract).

图版说明

图版 I Plate I

- a-苏典断裂南段的反向坡(镜像南东);
- b-苏典断裂南段反向坡下部的断头沟(镜像东);
- c-苏典断裂南段近南北向的断层三角面(镜像北东);
- d-苏典断裂黄草坝段出露的断面(镜像东);
- e-擦痕;
- f-昔马一盘龙山断裂南段出露的断面(镜像南西);
- g-断面上出露的滑槽;
- h-昔马一盘龙山断裂北段的断层挡水及条形的山体(镜像北西 西);
- i, j-Ms6.1 地震宏观震中受损的房屋
- a-reverse slope in the south of Sudian fault (face SE);
- b-beheaded ditch under reverse slope in the south of Sudian fault (face E);
- c-nearly SN-trending fault facet in the south of Sudian fault (face NE);
- d-fault plane of Sudian fault exposure in Huang Caoba (face E); e-striation;
- f-Xima-Panlongshan fault's fault plane exposure in the south (face SW);
- g-striated rock-surface on fault plane;
- h-fault dam water and linear mountain in the north of Xima-Panlongshan fault (face NWW);
- i, j-damaged houses in the macroscopic epicenter of $M_{\rm S}6.1$ earthquake

图版 I Plate I

