

杨晓平, 陈立春, 马文涛, 陈慧, 周擎, 李岩峰, 谢英情, 施伟华, 常祖峰. 2008. 2007年6月3日宁洱6.4级地震地表变形的构造分析和解释. 地震学报, 30(2): 165-175.

Yang Xiaoping, Chen Lichun, Ma Wentao, Chen Hui, Zhou Zhi, Li Yanfeng, Xie Yingqing, Shi Weihua, Chang Zufeng. 2008. Structural analysis and interpretation of the surface deformation associated with the Ning'er, Yunnan Province, China M_s6.4 earthquake of June 3, 2007. *Acta Seismologica Sinica*, 30(2): 165-175.

2007年6月3日宁洱6.4级地震地表 变形的构造分析和解释^{*}

杨晓平^{1,*} 陈立春¹ 马文涛¹ 陈慧³ 周擎³
李岩峰² 谢英情³ 施伟华³ 常祖峰³

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国北京 100049 中国地震应急搜救中心

3) 中国昆明 650041 云南省地震局

摘要 以2007年6月3日云南省宁洱6.4级地震地表裂缝、喷砂冒水、地震滑坡、地震崩塌等资料为基础, 结合震区的地质构造、震源机制解、余震分布等资料, 研究了本次地震的发震断层及其强震频繁发生动力学机制。地震地表裂缝资料表明, 北西向的宁洱断裂班海段具有右旋走滑的特征, 北北东向的断层具有左旋走滑的性质。地震地质灾害集中分布在330°方向上的长13.5 km、宽4 km的范围内, 等震线的长轴方向亦为330°, 震度区长轴长度为17 km。震源机制解资料显示, 宁洱6.4级地震的北西向节面为右旋错动, 北东向节面为左旋错动。大于等于2.0级的余震分布优势方向为330°, 深度为3—12 km, 优势深度为3—10 km, 余震分布与地震地质灾害集中分布带一致。以上资料说明, 宁洱断裂班海段为这次地震的发震断层。最后以活动地块理论为基础, 讨论了宁洱地震的动力来源为印度板块的向北推挤使青藏高原向东滑移, 在滇西南地区转化为向南南东方向的挤出, 使宁洱附近网络状的北西向断裂发生右旋活动, 北东向断裂发生左旋活动。这种构造格局可能是该区频繁发生6.0—6.9级地震的原因。

关键词 宁洱地震 地表变形 发震断层 动力学

文章编号: 0253-3782(2008)02-0165-11 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Structural analysis and interpretation of the surface deformation associated with the Ning'er, Yunnan Province, China M_s6.4 earthquake of June 3, 2007

Yang Xiaoping^{1,*} Chen Lichun¹ Ma Wentao¹ Chen Hui³ Zhou Zhi³
Li Yanfeng² Xie Yingqing³ Shi Weihua³ Chang Zufeng³

* 基金项目 国家自然科学基金(40572126)和中国地震局地震应急资金联合资助。

收稿日期 2007-11-01 收到初稿, 2008-02-25 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: yangxiaopingdzs@sina.com

- 1) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
- 2) China Center for Earthquake Disaster Emergency and SAR, Beijing 100049, China
- 3) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China

Abstract: The seismogenic fault and the dynamic mechanism of the Ning'er, Yunnan Province $M_s 6.4$ earthquake of June 3, 2007 are studied on the basis of the observation data of the surface fissures, sand blow and water eruption, landslide and collapse associated with the earthquake, incorporating with the data of geologic structures, focal mechanism solutions and aftershock distribution for the earthquake area. The observation of the surface fissures reveals that the Banhai segment of the NW-trending Ning'er fault is dominated by right-lateral strike-slip, while the NNE-trending fault is dominated by left-lateral strike-slip. The seismo-geologic hazards are concentrated mainly within a 330° -extending zone of 13.5 km in length and 4 km in width. The major axis of the isoseismal is also oriented in 330° direction, and the major axis of the seismic intensity VIII area is 13.5 km long. The focal mechanism solutions indicate that the NW-trending nodal plane of the Ning'er $M_s 6.4$ earthquake is dominated by right-lateral slip, while the NE-trending nodal plane is dominated by left-lateral slip. The preferred distribution orientation of the aftershocks of $M_s \geq 2$ is 330° , and the focal depths are within the range of 3—12 km, predominantly within 3—10 km. The distribution of the aftershocks is consistent with the distribution zone of the seismo-geologic hazards. All the above-mentioned data indicate that the Banhai segment of the Ning'er fault is the seismogenic fault of this earthquake. Moreover, the driving force of the Ning'er earthquake is discussed in the light of the active block theory. It is believed that the northward pushing of the Indian plate has caused the eastward slipping of the Qinghai-Tibetan Plateau, which has been transformed into the southeastern-southernward squeezing of the southwest Yunnan region. As a result, the NW-trending faults in the vicinity of the Ning'er area are dominated by right-lateral strike-slip, while the NE-trending faults are dominated by left-lateral strike-slip. This tectonic framework might be the main cause of the frequent occurrence of $M_s 6.0$ — 6.9 earthquakes in the area.

Key words: Ning'er earthquake; surface deformation; seismogenic fault; dynamics

引言

2007年6月3日云南省宁洱县发生6.4级地震，宏观震中位于宁洱县城南约3 km，极震区包含宁洱县城区（地震烈度Ⅷ度）及其周边山区，给当地的经济、社会造成巨大的破坏。历史上宁洱—思茅地区曾发生8次6.0—6.4级地震，是一个中强地震多发区。据统计，全世界范围内大于等于6.4级的地震往往能在地表形成明显的地震破裂带，也有少量小于等于6.5级地震形成地表破裂（邓起东等，1992）。一般情况下，用地质的方法判断发震构造最直接的证据是发现地震地表断层，以便确定地震断层的同震活动参数。6月3日宁洱发生6.4级地震后，我们于当日陆续到达地震现场，次日便投入到地震灾害评估和科学考

察中, 获得了一批有关地震地表裂缝、喷砂冒水、带状分布的地震滑坡等宝贵的资料。本文是在现场调查得到的第一手资料基础上, 结合震源机制和余震分布等资料, 探讨宁洱地震的发震断层, 地震过程中发震断层的地表表现, 以及地震的动力学来源。

1 宁洱地震区的地质构造

大致始于距今50 Ma的印度板块与欧亚板块的汇聚, 导致了特提斯洋闭合及青藏高原快速隆起抬升, 对青藏高原东缘地区的地质地貌演化具有深刻的影响。一方面由于喜马拉雅东构造结向北运动过程中产生强大的向北、向东方向的推挤力, 形成了向东方向的挤压推覆作用, 云南兰坪、泰国清迈等推覆体向东推覆距离达80—100 km(许志琴等, 1992);

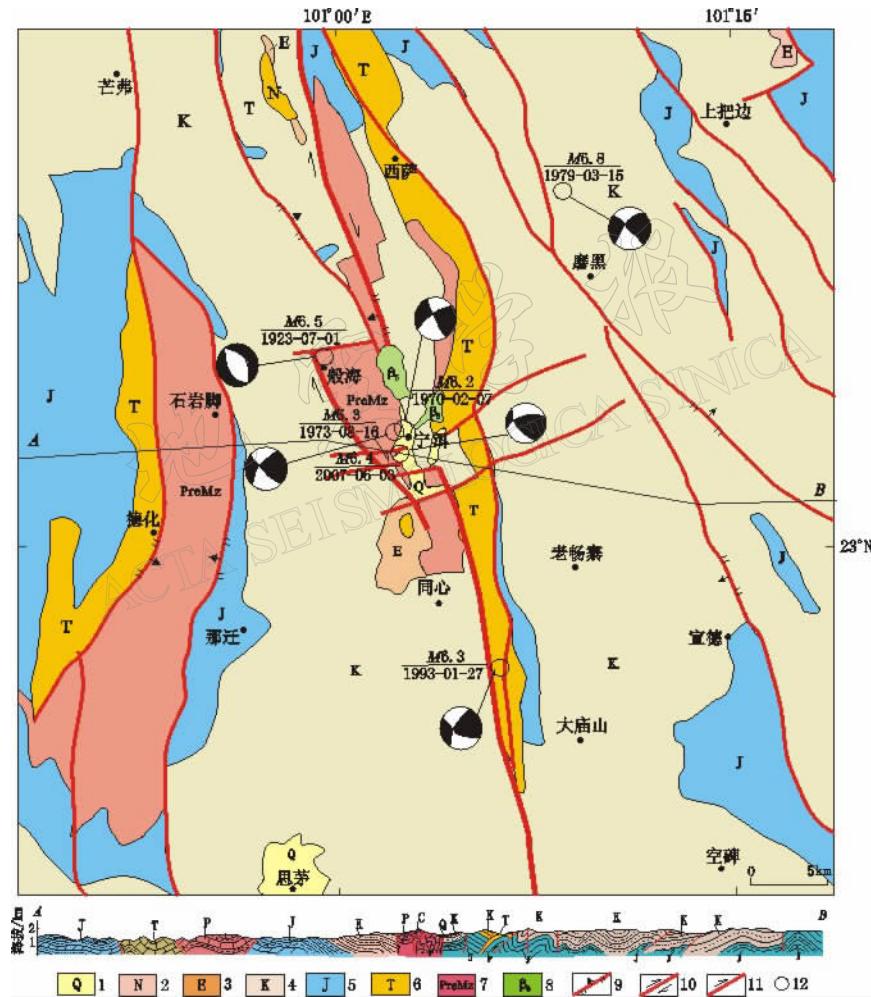


图1 宁洱地区地震构造简图

1. 第四系; 2. 新近系; 3. 古近系; 4. 白垩系; 5. 侏罗系; 6. 三叠系; 7. 前中生界; 8. 喜山期玄武岩;
9. 平面图上的逆断裂; 10. 走滑断裂; 11. 剖面图上的逆断裂; 12. 6.0—6.9级地震

Fig. 1 Tectonic structure of Ning'er region

1. Quaternary; 2. Neogene; 3. Paleogene; 4. Cretaceous; 5. Jurassic; 6. Triassic; 7. Pre-Mesozoic;
8. basalt of Himalayan; 9. Reverse fault in the plane; 10. Strike-slip fault;
11. Reverse fault in the profile; 12. M6.0—6.9

另一方面,由于高原的迅速隆起,在重力势作用下地壳深部物质的塑性流动产生了水平推挤(周玖,黄修武,1980)。在这两种力的共同作用下,滇西地区形成了北北西向的中新生代褶皱带和逆冲断层。同时在滇西、川西地区形成了大型的走滑断裂系(钟大赉等,1998)(图1)。

宁洱地区位于青藏高原的东南缘,出露最老的地层为石炭纪上统的马坪组灰岩和二叠纪龙潭组砂岩。中生代沉积了大量的砂岩、泥岩和砾岩,新生代只有少量的砂砾岩和煤系地层沉积,第四纪地层仅限于宁洱、思茅等小型盆地中(云南省地质矿产局,1990)。另外,宁洱盆地北侧和盆地底部有喜山期玄武岩喷出^{①、②}。宁洱地区主要发育北北西向的逆断裂和由中生代地层组成的褶皱。同时,北西向的断裂伴随有右旋走滑活动,北东东向的断裂伴随左旋活动(虢顺民等,1999;邓起东等2007)。宁洱附近的主要断层倾向南西西或北东东,走向北北西、北西,石炭纪、二叠纪地层向东、向西逆冲于白垩纪泥岩、砂岩上(图1)。

2 宁洱地震的地表裂缝、喷砂冒水、滑坡和崩塌

宁洱地震发生后,震中区产生大量有规律分布的地震地表裂缝、喷砂冒水、地震滑坡和地震崩塌等。

2.1 地表裂缝和喷砂冒水

2007年6月3日宁洱6.4级地震发生后,在地震烈度Ⅷ度区产生了一系列与边坡效应无关的地震地表裂缝。一组地表裂缝走向为320°—330°,另一组地表裂缝走向为70°—80°(图2)。以下分别叙述这两组地表裂缝的地表分布和显示出的错动方向。



图2 宁洱6.4级地震地表裂缝、滑坡、崩塌和喷砂冒水分布图

Fig. 2 Sites of ground fissures, landslides, collapses, sandboils and waterspouts induced by the Ning'er earthquake

2.1.1 北北西向地表裂缝和喷砂冒水

在野外发现3个地点(砍柴河、龙洞和梨原头)发育北北西向的地震地表裂缝带(图2)。

① 云南省地质局. 1976. 普洱幅区域地质图(1:20万)及调查报告.

② 云南省地质局. 1983. 思茅幅区域地质图(1:20万)及调查报告.

2.1.1.1 砍柴河地震地表裂缝和喷砂冒水

砍柴河北西向地裂缝长度约70 m, 总体走向 305° , 由长短不一、间距为1.0—1.5 m的5条地裂缝组成宽5—8 m的裂缝带。其发育在一条走向 330° 的冲沟底部, 且被开垦成平坦的农田。单条地裂缝长10—20 m、宽5—12 cm, 可见深度0.5 m。图3a是其中的一个裂缝段。从其平面分布可以看出, 该地裂缝具有追踪分布的特征。其中, 走向近南北的裂缝段张开较宽, 一般为8—12 cm; 走向约 320° 方向的裂缝段较紧闭, 宽度小于5 cm。地裂缝两侧没有垂直位错, 但依据地裂缝的不同走向段的张开、紧闭形态和两侧的标志点可以判断, 该地裂缝在形成过程中发生了4—5 cm的右旋位移。

在砍柴河地震地表裂缝带的北西方向约30 m的水塘附近, 地震时出现了6个喷砂冒水点(图4a)。据居住在水塘附近的村民讲, 地震时喷出水柱的高度约2 m。

2.1.1.2 龙洞地震地表裂缝和喷砂冒水

在龙洞村北西平坦的农田中, 发育一组长约150 m的北西向地裂缝带, 宽约15 m, 单条长度20—30 m, 总体走向 320° 。该地裂缝平面分布也呈现出追踪的特征(图3b)。其走向近南北的裂缝段宽度3 cm左右; 走向 315° — 320° 方向的裂缝段宽度为1.5—2.0 cm。显示出右旋错动的特征。

与地裂缝伴生的是喷砂冒水, 初步统计喷砂冒水点有30个左右(图4c), 总体上呈北西向分布, 散布在长180 m、宽30 m的范围内。

2.1.1.3 梨原头侏罗纪砂岩中的地裂缝

梨原头村附近出露的地层为侏罗纪细砂岩。在一条基岩出露的山梁上, 地震时形成走向 330° 的地裂缝, 长150 m, 由4条长短不一的地裂缝组成, 地裂缝之间相互平行。地裂缝发育的地方, 原本地表为大片的侏罗纪砂岩, 后来由于修筑公路在部分基岩上覆盖了厚10—30 cm的砂土。砂岩中的地裂缝总体走向 330° , 部分地裂缝段走向近南北(图3d), 其中一个砂岩块被错断成两部分, 右旋错距3 cm。

在有砂土覆盖位置, 砂土中也发育地表裂缝, 总体走向 330° 。在走向近南北的裂缝段张开宽度3—8 cm, 显示出局部拉张的特点。在走向 330° 的裂缝段, 张开宽度一般为1—2 cm。走向 300° 的裂缝段宽度小于1 cm, 或紧闭(图3c)。

2.1.2 北东东向地表裂缝和喷砂冒水

宁洱6.4级地震极震区范围内的新平村和昆鹅村, 分别发现了一组走向 70° — 80° 、长100—150 m的地震地表裂缝带(图2)。这两条地裂缝带均发育在平坦的农田中, 周围不存在斜坡地形。

2.1.2.1 新平村地裂缝带和喷砂冒水

新平村地裂缝带总体走向 70° — 71° , 宽15 m左右, 长120 m, 由12条相互平行、长短不一的地裂缝组成。图5a是新平地裂缝带中典型的一段, 走向 70° 的地裂缝段宽度为2.0—2.5 cm, 走向 55° — 60° 的裂缝段宽度为4.0—5.0 cm。从裂缝的几何形态和裂缝两侧标志点可以看出, 新平地裂缝带具有左旋走滑的运动特征, 错动量为2—3 cm。

在新平地裂缝带内还发现约30个喷砂冒水点, 图4b是其中的一个喷砂冒水孔, 其遗留下的粉细砂锥直径为50—60 cm。据当地看到喷砂过程的村民讲, 地震时该玉米地中有大片的喷水, 水柱的高度比玉米高。玉米的高度为1.70—1.80 m, 估计地震时水柱的高度约2 m。



图 3 北西向地震地裂缝(红箭头表示地裂缝的位置, 兰箭头表示局部拉张)

(a) 砍柴河地裂缝; (b) 曼连龙洞地裂缝; (c) 梨原头地裂缝; (d) 梨原头侏罗纪砂岩中的地裂缝

Fig. 3 NW-SE strike ground fissures induced by Ning'er earthquake, red arrow shows fissures, blue arrow denotes local extensional crack

(a) Kanchaihe ground fracture; (b) Manlian-longdong ground fracture; (c) Liyuantou ground fracture; (d) Liyuantou fracture in Jurassic sandstone

2.1.2.2 昆鹅地裂缝带

该地裂缝带发育在昆鹅村北的一片菜地和玉米地中, 其东侧为一块菜地, 菜地西侧台阶高约 1.5 m, 台阶上为玉米地。地裂缝带总体走向 70° — 80° , 东西长 150 m, 宽约 10 m。单条地裂缝不是一条连续的地裂缝, 而是由几条长短不一、右阶斜列的地裂缝组成。图 5d

给出的是其中的一条地裂缝,由右阶斜列的两条地裂缝组成,其中西侧的一条地裂缝切过水井,使井口边缘出现2.5 cm的左旋位错(图5c).其东侧的一条地裂缝发育在田间小路上,地表形迹清楚。该段地裂缝近南北走向段宽2.5—3.0 cm,走向70°—80°的段落较紧闭,宽度只有1.0 cm,或小于1.0 cm(图5b).从几何结构和裂缝的宽窄分布,以及裂缝两侧标志点可以确定,地震时该地裂缝带产生了左旋位错。



图4 宁洱地震喷砂冒水

(a) 砍柴河喷砂冒水孔; (b) 新平喷砂冒水孔; (c) 龙洞喷砂冒水孔

Fig. 4 Holes with Sandboils and waterspouts after Ning'er earthquake

(a) Kanchahe hole; (b) Xinping hole; (c) Longdong, two holes



图5 北东东向地震地裂缝。(a) 新平地裂缝; (b), (c), (d) 昆鹅地裂缝

Fig. 5 Ground fissures of ENE-strike induced by Ning'er earthquake

(a) Xinping ground fracture; (b, c, d) Kun'e ground fracture

2.2 地震滑坡和崩塌分布

宁洱6.4级地震发生在云南省西南的山区,震区内的地形特征为高山峡谷,出露的地层主要为中生代砂岩和古生代石灰岩。震后的地震地质灾害调查发现,地震滑坡、崩塌,

以及道路的裂缝分布在南北长 13.5 km、东西宽 4 km 的范围内，总体走向 330°(图 2)。

3 宁洱地震震源机制、小震分布和等震线

3.1 宁洱 6.4 级地震的震源机制解

宁洱地震发生后，美国地质调查局、中国数字地震台网等先后依据各自掌握的资料，分别给出了这次地震的震源机制解。中国国家地震科学数据中心资料表明，2007 年 6 月 3 日宁洱地震震级为 M_s 6.4。

1970—1993 年，宁洱附近发生了 4 次 6.2—6.8 级地震，这 4 次地震的震源深度为 10—24 km。除 1973 年 6.3 级地震为正断层性质外，其余 3 次地震时北西向节面发生右旋错动，北东向节面发生左旋错动，主压应力方向为近南北向(龙海英等，2007)(表 1)。

表 1 宁洱附近 6 级以上强震震源机制解

Table 1 Focal mechanism solutions of $M > 6$ earthquakes in and near Ning'er region

地震日期 年-月-日	震 中 位 置			M_s	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴		N 轴		断层 性质
	$\varphi_N/^\circ$	$\lambda_E/^\circ$	地点		走向 $^\circ$	倾向 $^\circ$	滑动角 $^\circ$	走向 $^\circ$	倾向 $^\circ$	滑动角 $^\circ$	方位 $^\circ$	倾角 $^\circ$	方位 $^\circ$	倾角 $^\circ$	方位 $^\circ$	倾角 $^\circ$	
1970-02-07	22.9	100.8	普洱	6.2	129	78	160	223	70	13	177	5	85	23	279	66	走滑
1973-08-16	23.1	100.9	普洱	6.3	150	45	-90	330	45	-90	0	90	240	0	330	0	正断
1979-03-15	23.1	101.1	普洱	6.8	132	89	164	222	73	1	178	11	85	12	309	74	走滑
1993-01-27	22.93	101.1	普洱	6.3	329	88	-159	238	69	-2	196	16	102	13	335	69	走滑
2007-06-03	23.04	101.02	宁洱	6.4	138	57	140	252	58	40	15	0	105	50	285	40	走滑

注：2007 年 4 月 18 日，普洱县改为宁洱县，思茅市改为普洱市。2007 年 6 月 3 日宁洱地震的震源机制数据为 USGS 资料，其余为龙海英等(2007)资料。走向、倾角、滑动角和方位的单位均为度。

3.2 小震的空间分布

2007 年 6 月 3 日宁洱 6.4 级地震发生后，云南省地震局在宁洱地区设立了 6 个临时地震台组成一个观测网(图 6a)，从 6 月 3 日 20 时 5 分 45.3 秒开始至 6 月 10 日 9 时 29 分 40.2 秒，共记录到大于等于 2.0 级地震 155 次。采用美国地质调查局 Hypo81 定位程序，对现场流动测震台网在 6 月 3 日 20 时至 6 月 10 日记录到的 155 次大于等于 2.0 级地震进行定位。余震 90% 的事件定位残差小于 0.1，其中震中定位相对误差小于 1.0 km，深度定位相对误差小于 1.5 km^①。把这些地震投影到平面图上可以看出，这次地震的余震分布在一个狭窄的北西向条带中(图 6a)，走向 330°。把主震、小震投影到三维空间和北东东向的剖面上(图 6b, c)，可以看出小震密集带倾向北东(说明：由于图 6c 横向比例尺远小于纵向比例尺，表面上看小震分布近于垂直，若将横向比例尺放大，就可以看到小震密集带倾向北东)，深度为 3—12 km，约 40% 的余震深度小于 3—10 km，约 20% 的地震深度为 3—8 km。

3.3 等震线分布

此次地震的宏观震中位于宁洱县般海村—前进村一带，极震区烈度Ⅷ度，总面积 167 km²(图 6d)，个别自然村有Ⅸ度的破坏现象。其等震线呈椭圆形，长轴走向 330°，长约 17 km(苗崇刚等，2007)。Ⅶ度线和Ⅵ度线也呈椭圆形，长轴方向同样为北北西向。通常情况下，极震区等震线长轴方向代表发震断层的走向，长轴的长度大致与发震断层的长度一致。由此可以确定，2007 年宁洱 6.4 级地震发震断层的走向为北北西，长度约 17 km。

① 陈慧，叶建庆，刘学军，付虹. 2007. 2007 年云南宁洱 6.4 级地震监测与研究.

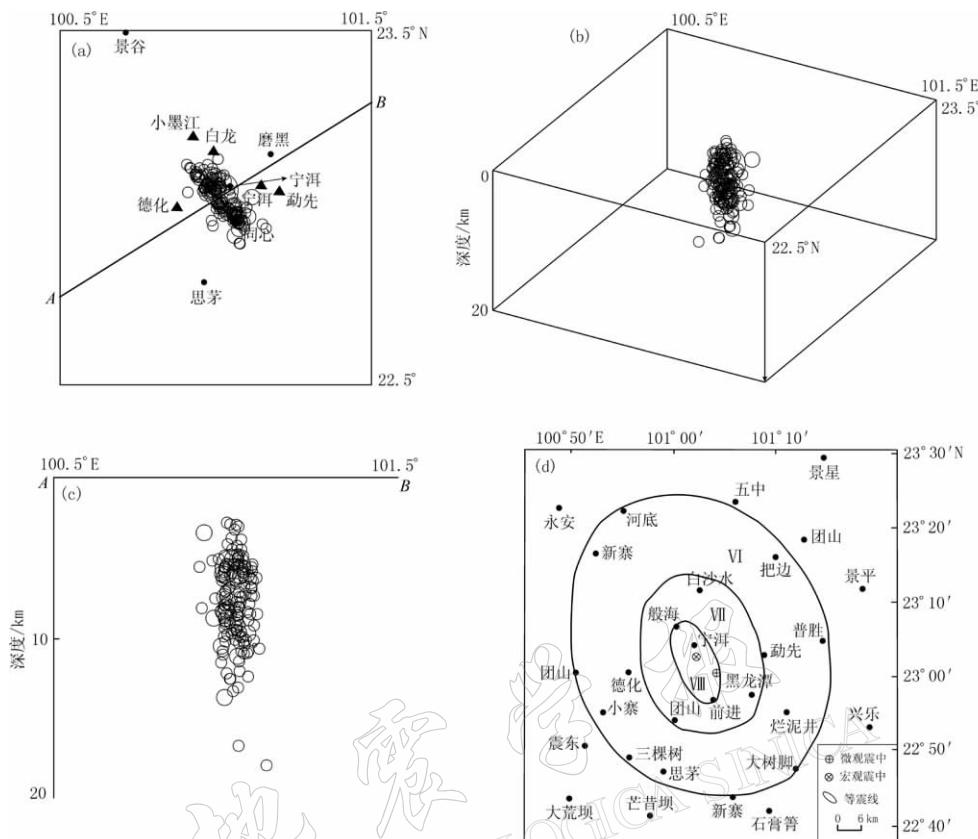


图 6 宁洱 6.4 级地震余震分布和等震线图

(a) 主震和强余震分布图(三角为流动地震台站);(b) 空间分布图;(c) 北东东向剖面上的分布图;
(d) 等震线图(据苗崇刚等(2007)修改). 图 6a-c 根据云南省地震现场流动台网资料绘制

Fig. 6 Aftershocks and isoseismals of the $M_{\text{6.4}}$ mainshock

(a) Locations of the mainshock and aftershocks ($M \geq 2.0$); (b) 3D view of aftershocks; (c) ENE-WSW cross-section projection; (d) Isoseismals of the $M_{\text{6.4}}$ mainshock

4 发震断层的认识及其动力学讨论

对比宁洱地区地震构造图(图 1)可以知道, 宁洱西侧约 3 km 的位置发育一条 330° 方向的断裂。2007 年宁洱 6.4 级地震的地裂缝、喷砂冒水、滑坡崩塌等地质灾害集中分布在走向 330° 方向, 南北长 13.5 km、东西宽 4 km 的范围内, 与宁洱断裂般海段的空间位置大致相同。走向 330° 方向的地裂缝显示出右旋错动, 走向 70° — 80° 方向的地裂缝显示出左旋错动的运动学特征。震源机制解表明, 这次地震的北西向节面为右旋逆冲滑动, 北东向的节面为左旋走滑活动。余震分布也揭示出地震断层面走向北西(330°), 向北东方向陡倾, 震源深度为 3—12 km。因此, 可以认为 2007 年宁洱 6.4 级地震的地震断层为北西向的走滑断层, 即宁洱断裂般海断层段, 震时北东向的断层也发生了错动, 震源深度小于 10 km。青藏高原的地震学研究表明(郑斯华, 高原, 2001), 高原及周边地区大多数地震的震源深度不超过 20 km, 只有少数地震的深度超过 20 km。该地区的地壳厚度平均为 45—70 km。

因此可以认为,青藏高原地区的地震主要发生在地壳的浅部或上部地壳,中下地壳是无震的。

印度板块的向北推挤,成为青藏高原及其周边地区各块体运动和变形的动力来源。印度板块以 50 mm/a 的速度向北运动(Minster, Jordan, 1978),使青藏高原地壳缩短、隆起,同时使红河断裂带及其以西的北西向断层右旋走滑活动,北东向的断层左旋活动。丁国瑜和卢演伟(1989)认为,在印度板块的北向运动作用下,青藏高原内部形成一系列北西向的左旋走滑活动断裂,其中鲜水河断裂和昆仑山断裂将青藏高原分成南北两部分,形成以青藏高原为中心的向北、向东南的扇形辐射地块运动格局(张培震等, 2002, 2005; Shen et al., 2005)。红河断裂带的西部,由于印度板块向北东东向推挤,在板缘产生了缅甸逆冲带和以东的实皆右旋走滑断裂、龙陵—澜沧江右旋走滑断裂和红河右旋走滑断裂(虢顺民等, 2001)(图 7)。宁洱断裂位于龙陵—澜沧江断裂与红河断裂之间的思茅微地块中,总体

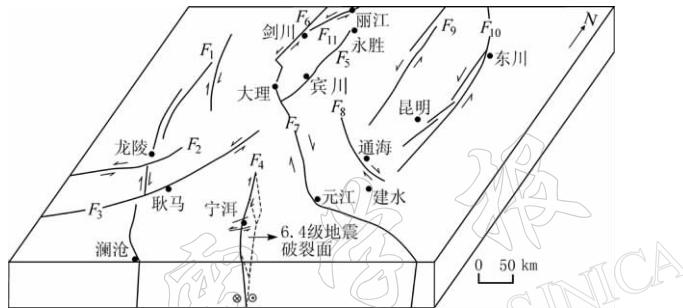


图 7 宁洱 6.4 级地震发震构造模式

F_1 . 龙陵—澜沧江断裂; F_2 . 瑞丽断裂; F_3 . 南汀河断裂; F_4 . 宁洱断裂; F_5 . 程海断裂; F_6 . 剑川
断裂; F_7 . 红河断裂; F_8 . 曲江断裂; F_9 . 安宁河断裂; F_{10} . 鲜水河一小江断裂带

Fig. 7 A seismogenic model for the Ning'er M_s 6.4 earthquake

F_1 . Longling-Lancangjiang fault; F_2 . Ruili fault; F_3 . Nandinghe fault; F_4 . Ning'er fault; F_5 . Chenghai fault;
 F_6 . Jianchuan fault; F_7 . Honghe fault; F_8 . Qujing fault; F_9 . Anninghe fault; F_{10} . Xianshuihe fault

走向北北西,也是一条右旋走滑断裂(钟大赉等, 1998; 邓起东等, 2002)。正是由于印度板块的向北推挤,导致了青藏高原东向挤出,在滇西南地区转化成向南南东方向的推挤(徐锡伟等, 2003; Shen et al., 2005),造成了北北西向宁洱断裂的右旋错动和北东东向断裂的左旋错动,在两组断裂的交汇部位发生了 2007 年宁洱 6.4 级地震。宁洱地区的北北西和北东东向的两组断裂均为晚更新世—全新世活动断裂,构成了网络状活动断裂体系(邓起东等, 2002, 2007)。由于活动断裂的相互截错,使每个断层段的长度一般小于 20 km。依据地震震级与活动断层段长度之间的统计关系(邓起东等, 1992),计算得到了宁洱地区发生地震的震级小于 7.0 级。该计算结果与本区已经发生的地震震级一致。也就是说,宁洱地区破碎的地壳结构是本区多次发生 6.2—6.8 级地震的原因,也是本区没有发生更大地震的构造条件。

中国地震局、云南省地震局宁洱地震现场指挥部和宁洱县人民政府在震后第一时间提供了灾害评估和科学考察的后勤保障,笔者向参与震后灾害评估和科学考察的全体人员表示崇高的敬意。本文在写作过程中得到了马瑾院士的热情指导,并与徐锡伟、冉勇康、何

宏林等进行了多次讨论; 审稿专家提出了宝贵建议。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 丁国瑜, 卢演伟. 1989. 板内块体的现代运动[M]//中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社: 21.
- 邓起东, 于贵华, 叶文华. 1992. 地震地表破裂参数与震级关系的研究[G]//《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究理论与应用, 2期. 北京: 地震出版社: 247-264.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), **32**(12): 1 020-1 030.
- 邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2007. 中国活动构造图(1: 400万)[M]. 北京: 地震出版社.
- 虢顺民, 汪洋, 计凤桔. 1999. 云南思茅—普洱地区中强震群发生的构造机制[J]. 地震研究, **22**(2): 105-114.
- 虢顺民, 计凤桔, 向宏发, 董兴权, 严富华, 张双林, 李新元, 张晚霞. 2001. 红河活动断裂带[M]. 北京: 海洋出版社: 86-101.
- 龙海英, 聂晓红, 高国英. 2007. 新疆天山地区与川滇地区中强地震震源机制解对比分析[J]. 地震研究, **30**(3): 229-234.
- 苗崇刚, 胡永龙, 周光全, 侯建盛. 2007. 云南宁洱6.4级地震应急行动及灾害特征[J]. 国际地震动态, (6): 5-11.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社: 1-190.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 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**(3): 281-288.
- 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: 1-178.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. 地学前缘, **9**(2): 430-441.
- 张培震, 甘卫军, 沈正康, 王敏. 2005. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形耦合模型[J]. 地质学报, **79**(6): 748-956.
- 郑斯华, 高原. 2001. 青藏高原的地震学研究综述[G]//马宗晋, 汪一鹏, 张燕平主编. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京: 地震出版社: 223-239.
- 钟大赉, 吴根耀, 丁林. 1998. 藏东新生代陆内变形特征[G]//潘裕生, 孔祥儒主编. 青藏高原岩石圈演化和动力学. 广州: 广东科技出版社: 333-364.
- 周玖, 黄修武. 1980. 在重力作用下我国西南地区地壳物质流[J]. 地震地质, **2**(4): 1-10.
- Minster J B, Jordan T H. 1978. Present day plate motions[J]. *J Geophys Res*, **83**: 5 331-5 354.
- Shen Zhengkang, Lu Jiangning, Wang Min, Burgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, **110**(B11409), doi:10.1029/2004JB003421.