

滇西南龙陵—澜沧断裂带现今地壳垂直运动研究*

郝明, 王庆良, 崔笃信, 秦姗兰

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过分析云南西南部 1988、1991 和 2012 年 3 期精密水准观测数据, 获取了区域现今地壳垂直运动速度场。结果表明: 龙陵—澜沧断裂带上的永德—永康段相对于周围区域的运动处于快速隆起状态, 结合地震分布和构造地质等方面资料, 认为该地区为一个中强震长期危险区域。

关键词: 龙陵—澜沧断裂; 速度场; 同震形变; 震后形变; 危险区

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0281-05

0 引言

云南西南部龙陵—澜沧断裂带是一条第四纪新生的断裂带, 该断裂带上地震活动频次高、强度大、周期短, 并以双震或震群型地震为主(虢顺民等, 1999, 2002)。穿过该断裂的 GPS 速度剖面结果表明(Shen *et al*, 2005; 王敏, 2009), 龙陵—澜沧断裂具有较强的右旋走滑速率, 速率为 6mm/a , 与向宏发等(1999)得出的平均地质滑动速率 6.8mm/a 一致, 同时兼具水平拉张活动(虢顺民等, 1999, 2002)。

攻守文(1995), 张四新等(1998)利用精密水准数据对陕甘宁青和川西地区的地壳垂直形变与地震危险性之间的关系进行了探讨。本文利用截止到 2012 年最新观测的精密水准数据, 研究龙陵—澜沧断裂区域现今地壳垂直运动速度场, 结合地震分布和构造地质等方面资料, 为中长期危险性区域的划分提供基础资料。

1 区域地质构造

滇西南地区具有复杂的地质构造背景, 该区域内以南北向构造为主体, 区内除南北向的花岗岩体、变质岩体及活动的澜沧江大断裂带外, 还分布有北东、北西 2 组断裂(图 1)。区内主要活动断裂有北西向的汗母坝断裂、木嘎断裂、龙陵—澜沧断裂(狭义), 北东向的大盈江断裂、龙陵—瑞丽断裂、南汀河断裂、孟连—澜沧断裂, 以

及南北向的澜沧江断裂共 8 条, 这些断裂发育历史悠久, 新构造活动强烈, 它们对区域构造与地震活动起着控制作用且都曾发生过 6 级以上地震沿断裂带发育有断崖、断裂谷地、断陷盆地、古滑坡、崩塌及断错水系等地貌。(图 1)。

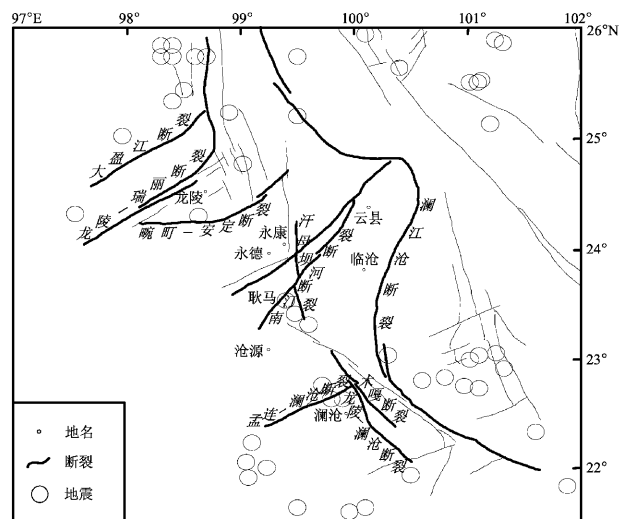


图 1 1900~2012 年滇西南地区活动断裂与 $M_s \geq 6.0$ 以上地震震中分布图

Fig. 1 Distribution of the active faults and epicenters of $M_s \geq 6.0$ earthquakes in southwestern Yunnan region from 1900 to 2012

2 水准数据及处理

用于获取滇西南地区垂直运动速度场的水准

* 收稿日期: 2012-10-23.

基金项目: 地震行业科研重点专项(201208009、201208006)资助.

数据观测时间分别为 1988、1993 和 2012 年，水准路线如图 2 所示。由于曾发生 1976 年龙陵 7.3、7.4 级地震以及 1988 年发生了澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震，所以云思线的观测数据会受到龙陵地震震后形变和澜沧—耿马地震同震及震后形变的影响。因此，首先需剔除受到这两次地震影响的水准点（图 2）。

由于我们没有收集到 1976 年龙陵地震的同震断层产状结构，只收集到 1988 年发生在木嘎和汗母坝断裂上的澜沧—耿马地震的同震垂直形变数据，所以只能通过澜沧—耿马地震的震后形变范围来推测龙陵地震的震后影响区域。

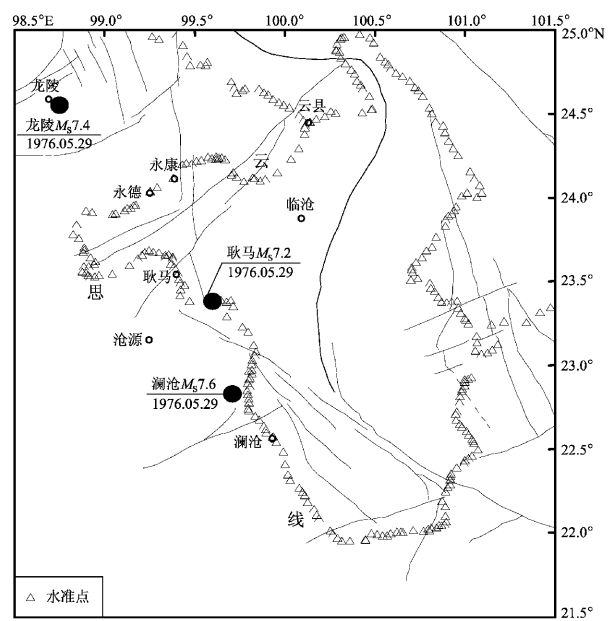


图 2 滇西南地区水准路线图
Fig. 2 Leveling route in southwestern Yunnan region

2.1 澜沧—耿马地震同震形变影响

目前还没有具体的 1988 年澜沧—耿马地震的同震破裂几何模型，故需通过水准观测的垂向同震形变约束来反演此次地震的同震破裂几何模型及滑动分布。由于笔者只收集到该区域震前 1981 年和震后 1993 年的一等水准观测数据，所以这两期的观测高差之差包含了同震形变和震后形变的影响。Hao 等 (2012) 通过 1990 年共和地震震后垂直形变数据，揭示出震后形变影响的区域要大于同震形变的影响区域，地震之后的头几年以断层面的震后滑移为主。因此，可以将 1981 和 1993 年之间的形变（同震和短期震后形变）作为同震形变（图 3），来反演同震破裂模型，而对剔除受同震以及震后滑移

影响的水准点几乎没有影响。澜沧—耿马地震以右旋走滑（姜葵，1993）为主，而我们只有同震垂直形变数据，所以需要结合地震波反演的结果（王绍晋，王利民，1991；张之立，王华强，1992；王凯等，1991）。在反演同震滑动分布时，采用 Okada (1992) 的单一矩形断层面的半无限空间弹性位错模型，以相邻水准点之间的高差之差作为约束（Hao *et al*, 2012），可以减少水准测量中系统误差沿水准路线累积。图 4 和表 1 为反演得到的断层几何模型和滑动分布，图 5 为相邻水准点之间高差形变的模型结果，拟合后的残差平方和 χ^2 为 714.2 mm²，标准化的 χ^2 为 11.3 mm²。

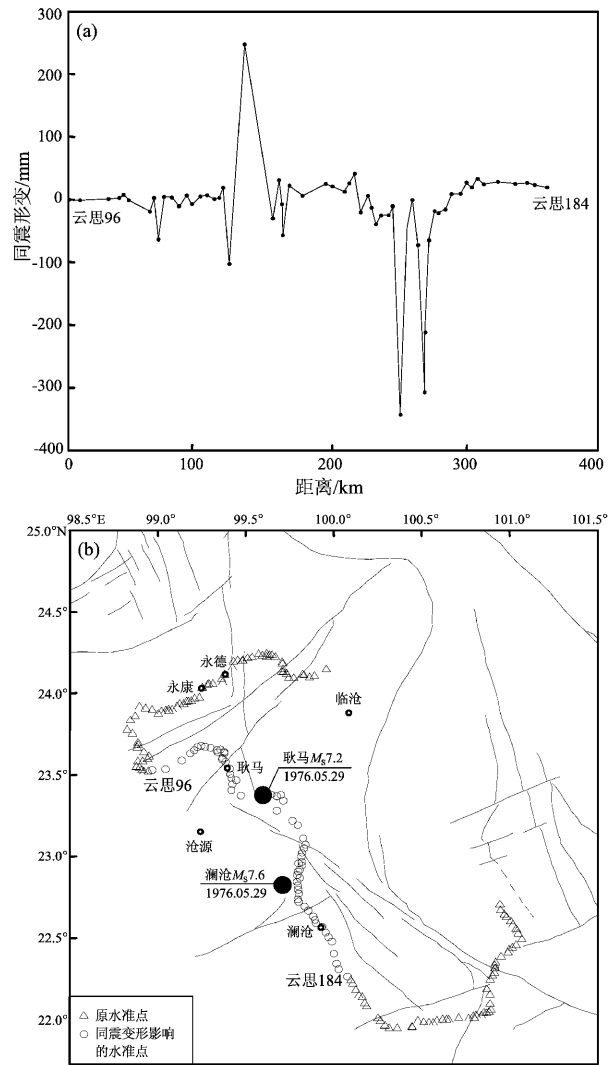


图 3 1988 年澜沧—耿马地震的同震垂直形变 (a) 和同震影响的水准点 (b)
Fig. 3 Co-seismic vertical deformation (a) and the co-seismic benchmarks (b) effected by Lancang-Gengma M_s 7.6、7.2 earthquakes in 1988

表 1 澜沧—耿马地震同震断层模型
Tab. 1 Co-seismic fault model of Lancang-Gengma $M_s7.6$ 、 7.2 earthquakes

断层名称	起始位置 / (°)		走向 / (°)	倾角 / (°)	长度 / km	宽度 / km	滑动量 / m	
	λ_E	φ_N					走滑 *	倾滑 *
木嘎断裂	99.796	22.887	327	88	73	14.0	-1.251	0.363
汗母坝断裂	99.639	23.383	343	63	47	12.5	-2.276	-2.781

* 左旋走滑和逆冲倾滑为正。

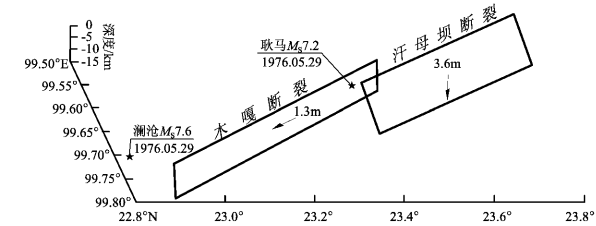


图 4 同震断层滑动分布

Fig. 4 Slip distribution of co-seismic fault

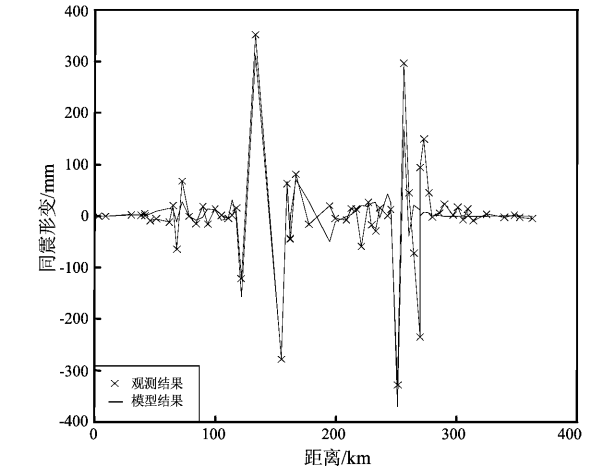


图 5 相邻水准点之间高差变化的
观测结果与模型结果

Fig. 5 Deformation bservation and model
results of of height difference
between two adjacent

2.2 澜沧—耿马和龙陵地震震后形变影响

根据同震断层破裂模型，利用 Wang 等 (2006) 的 PSGRN/PSCMP 程序来模拟粘弹性松弛模型对震后形变的影响。基于地壳模型 Crust2.0^①计算该地区的上、下地壳厚度、密度以及各层的 P 波和 S 波传播速度 (表 2)。将上地壳取为弹性层，下地壳的粘滞系数为 1 019，上地幔的粘滞系数为 1 021。图 6 为采用粘弹性

松弛模型模拟的震后 1993 年 11 月至 2012 年 3 月垂直形变 (相对于云思 58)。

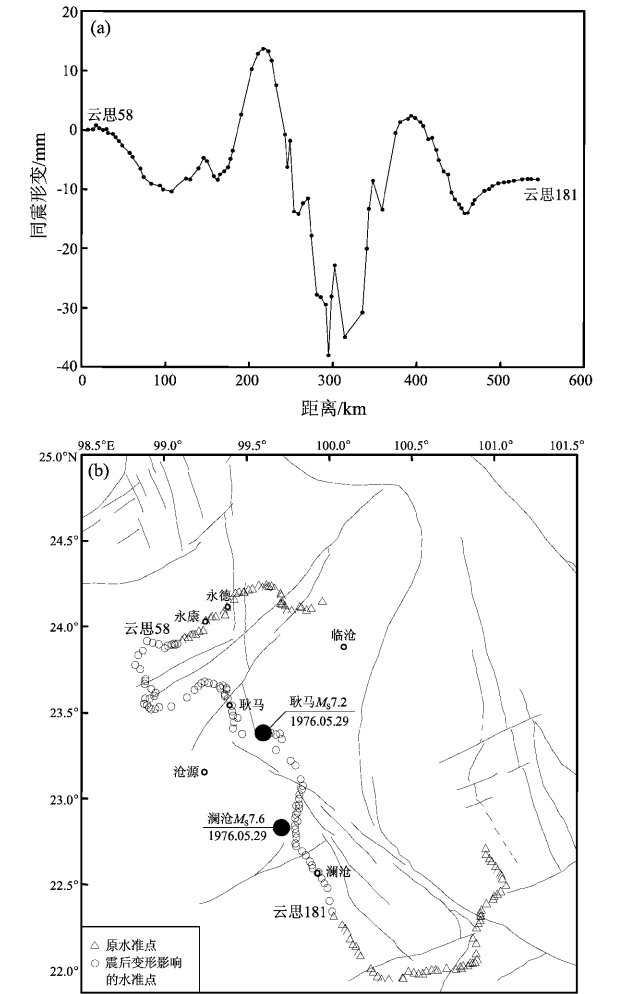


图 6 澜沧—耿马地震震后 1993 年 11 月至
2012 年 3 月的垂直形变 (a) 和地震
震后影响的水准点 (b)

Fig. 6 Vertical deformation after Lancang-Gengma
 $M_s7.6$ 、 7.2 earthquakes between Nov. , 1993
and Mar. , 2012 (a) and benchmarks
effected by the earthquakes (b)

① <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.

震后形变模型表明, 澜沧—耿马地震震后松弛影响着距震中 80 km 的范围, 龙陵地震震中距云思线最近约 75 km, 可以推断云思线的水准观测数据不会受到 1976 年龙陵地震震后松弛的影响。

利用剔除受 1988 年澜沧—耿马地震同震及震后效应影响的水准数据, 基于 GPS 先验约束的线性动态平差模型 (郝明, 2012), 可以得到滇西南地区现今地壳垂直运动速度场 (图 7)。

表 2 澜沧—耿马地区的壳幔结构模型

Tab. 2 Structure model of crust and mantle in Lancang-Gengma region

层数	分层厚度 /km	P 波速度 /km · s ⁻¹	S 波速度 /km · s ⁻¹	地壳密度 /kg · m ⁻³	粘滞系数 /Pa · s
1	0 ~ 19.0	6.10	3.50	2 750	∞ (弹性体)
2	19.0 ~ 38.5	6.60	3.80	2 900	1 019
3	38.5 ~ ∞	7.20	4.00	3 100	1 021

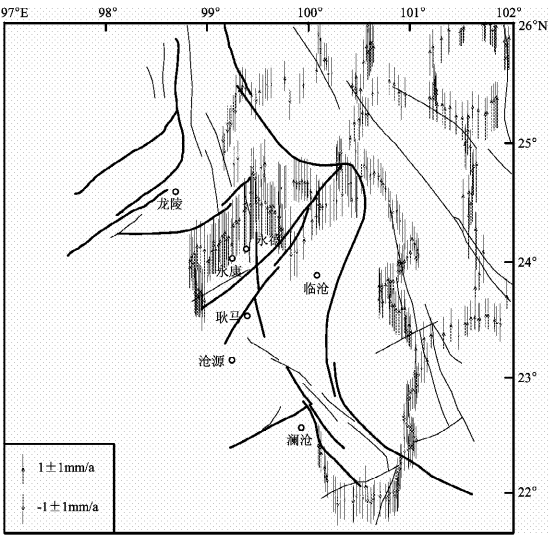


图 7 滇西南地区垂直运动速度场

Fig. 7 Vertical velocity field in southwestern Yunnan region

3 讨论

由滇西南地区长期垂直运动速度场 (图 7) 可看出, 在龙陵—澜沧断裂带永德至永康一带有一垂直形变隆起区, 平均隆升速率为 3 mm/a, 明显高于周围区域的长期垂向运动。因此该区域处于整体的快速隆升阶段。

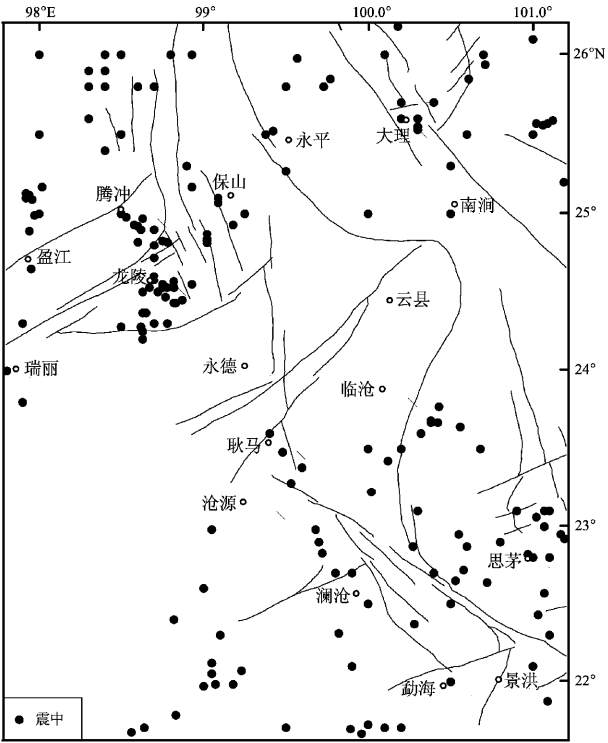


图 8 1900 ~ 2012 年滇西南地区 5 级以上地震震中分布图

Fig. 8 Epicenters distribution of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in southwestern Yunnan region from 1900 to 2012

从地震分布图上看 (图 8), 1941 年在耿马西北和澜沧东南发生过两次 7 级地震, 1976 年在龙陵发生过 7.3 和 7.4 级地震, 1988 年在澜沧、耿马发生过 7.2、7.6 级双震, 以及一系列中小地震也均发生在从腾冲经耿马、澜沧至景洪这一北北西向狭长带状范围内, 但历史上在龙陵—耿马段均无强震记载, 中、小地震也很少发生。

虽然在腾冲—龙陵—耿马—澜沧—勐海的北西向地表上还没形成一条统一的控震构造, 但仍可见一组长约几十到百余公里、呈斜列展布的活动断裂断续相连, 并作为 6 级以上地震的主要控震—发震构造, 将带内绝大多数强震震中串联起来, 结合强震活动的时空特点, 推测澜沧江西部分存在一个北西向地震破裂带 (姜葵, 1993; 向宏发等, 2000)。虢顺民等 (2002) 根据断裂带上的地震破裂单元、断层闭锁单元和障碍体单元之间的转换关系和地震构造标志, 将龙陵—澜沧断裂带上的永康—永德地区划分为大震区。

4 结论

利用云南西南部1988、1991和2012年3期精密水准观测数据,获取了该区域长期地壳垂直运动速度场。由于观测数据受到1988年龙陵和耿马地震同震及震后形变影响,需剔除受影响的水准点。速度场结果表明龙陵—澜沧断裂带上的永德—永康段相对于周围区域的运动处于快速隆起状态,结合地质构造和地震分布,永德—永康应该列为一个强震中长期危险区。

参考文献:

- 攻守文. 1995. 陕甘宁青地区块体交接带上大地垂直形变演化特征与块体运动[J]. 地球物理学报, 38(3): 329–338.
- 虢顺民, 向宏发, 徐锡伟, 等. 1999. 滇西南龙陵—澜沧断裂带: 大陆地壳上一条新生的破裂带[J]. 科学通报, 44(19): 2118–2121.
- 虢顺民, 徐锡伟, 向宏发, 等. 2002. 龙陵—澜沧新生断裂带地震破裂分段与地震预测研究[J]. 地震地质, 24(2): 133–144.
- 郝明. 2012. 基于精密水准数据的青藏高原东缘地区现今地壳垂直运动与典型地震同震及震后垂直形变研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 姜葵. 1993. 1988年云南澜沧—耿马地震[M]. 昆明: 云南大学出版社.
- 王凯, 高莉萍, 姚振兴, 等. 1991. 澜沧—耿马地震的震源机制研究[J]. 地震学报, 34(5): 569–580.

- 王敏. 2009. 基于GPS同震位移场约束反演2008年5.12汶川大地震破裂空间分布[J]. 地球物理学报, 52(10): 2519–2526.
- 王绍晋, 于利民. 1991. 利用P、S振幅比资料测定澜沧—耿马震区中小地震震源机制[J]. 地震研究, 14(3): 197–202.
- 向宏发, 虢顺民, 徐锡伟, 等. 2000. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J]. 地震地质, 22(3): 253–264.
- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 等. 1999. 滇西地区两组交叉型活动断裂及其地震地质意义. 活动断裂研究[M]. 北京: 地震出版社, 81–87.
- 张四新, 刘文义, 攻守文. 1998. 四川西部现今地壳形变与地震[J]. 地壳形变与地震, 18(4): 48–54.
- 张之立, 王华强. 1992. 澜沧、耿马地震序列的非均匀断裂模式及弹塑性断裂计算方法[J]. 地震学报, 14(4): 463–471.
- Hao M, Shen Z K, Wang Q L, *et al.* 2012. Postseismic deformation mechanisms of the 1990 M_w 6.4 Gonghe, China earthquake constrained using leveling measurements [J]. *Tectonophysics*, 532–535: 205–214.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America* 82(2), 1 018–1 040.
- Shen Z-K, Lü J, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(11): B11409.
- Wang R, Lorenzo-Martin F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co-and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic–gravitational dislocation theory [J]. *Computers & Geosciences* 32(4): 527–541.

Present Crustal Vertical Movement of Longling-Lancang Fault in Southeast of Yunan Province

HAO Ming, WANG Qing-liang, CUI Du-xin, QIN Shan-lan

(The Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China)

Abstract

Analyzing the precise leveling observation data in 1988, 1991 and 2012, we obtained the present crustal vertical movement in the southeast of Yunnan Province. The result shows that the vertical movement velocity field of Yongde-Yongkang segment in the middle of Longling-Lancang Fault uplifts quickly compared to its surrounding area. Combing the distribution of earthquakes and the geological structure etc., this region is regarded as a middle and long term strong earthquake risk area.

Key words: Longling-Lancang Fault; velocity field; coseismic deformation; postseismic deformation; risk region