

杜义, 张效亮, 黄学猛, 杜宇本, 谢富仁, 2012. 龙陵-瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔. 震灾防御技术, 7(3): 215—226.

龙陵-瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔¹

杜 义¹⁾ 张效亮²⁾ 黄学猛¹⁾ 杜宇本³⁾ 谢富仁¹⁾¹⁾

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2) 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

3) 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031

摘要 野外地质地貌调查表明, 龙陵-瑞丽断裂(南支)北段是以左旋走滑为主兼具一定正断分量的区域性活动断裂。断裂晚更新世以来的平均水平滑动速率为2.2mm/a, 平均垂直滑动速率为0.6mm/a; 全新世以来的平均水平滑动速率为1.8—3.0mm/a, 平均垂直滑动速率为0.5mm/a。断裂在晚更新世以来的滑动速率在不同的时间尺度上变化不大, 反映出该断裂晚更新世以来的活动强度比较稳定。利用 Poisson 模型、Lognormal 模型、BPT 模型三种概率模型计算获得未来50a强震发震概率分别是: 6.32%、0.08%、0.05%; 三种模型分别取权重0.28、0.36、0.36, 获得龙陵-瑞丽断裂北段未来50a特征地震发震概率为1.82%。

关键词: 龙陵-瑞丽断裂 滑动速率 特征地震 复发间隔

引言

1900年以来, 滇西南地区共发生34次6级以上地震, 其中有8次为7级以上地震, 引起了许多学者对滇西南地区的地震活动性、地壳动力学与新构造运动等特征的积极关注(阚荣举等, 1977; 1983; 陈立德等, 1979; 谢富仁等, 2001; 周瑞奇等, 1998; 魏顺民等, 1999a; 1999b; 2000; 2002; 向宏发等, 1999; 2000; 苏有锦等, 2001; 王晋南等, 2006)。龙陵-瑞丽断裂是滇西南地区北东向构造体系中重要的断裂之一, 属于密支那一西盟地块内密支那地块与龙陵—镇康地块的分界断裂(向宏发等, 2000), 是一条具有深部构造背景且全新世仍在活动的区域性活动断裂。

1976年的龙陵7.3级和7.4级地震即发生于龙陵-瑞丽断裂带的北段, 是一次典型的双震型地震事件。由于该断裂途经高山峡谷地带, 植被茂密, 第四系分布有限, 对该断裂的研究较为薄弱, 特别是对于其第四纪晚期以来的活动性研究较为欠缺。虽然目前的古地震与历史地震等资料不够完善, 但对于该断裂发震能力以及强震复发间隔的评估仍是十分

1 基金项目 铁道部科技研究开发计划(2008G027-B)和国土资源部深部探测技术与实验研究专项(Sinoprobe-06-04)资助

[收稿日期] 2012-07-05

[作者简介] 杜义, 男, 生于1977年。助研。主要研究方向: 活动构造与地球动力学。E-mail: y-du@163.com

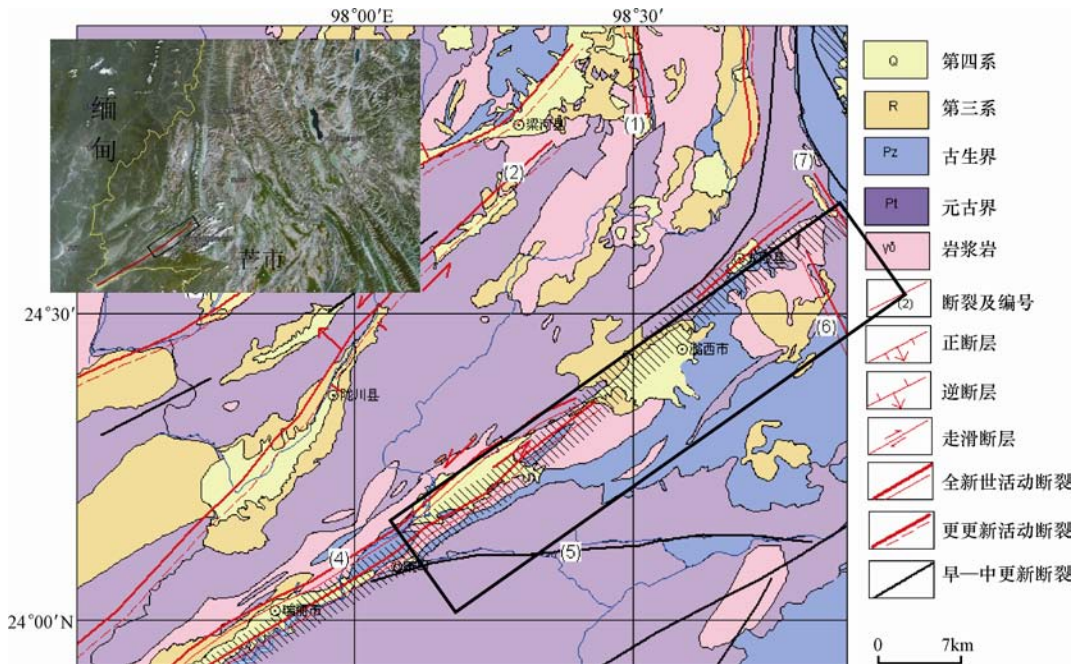
通讯作者 谢富仁, 男, E-mail: xxief@263.net

必要的。

本文选取龙陵-瑞丽断裂北段，利用遥感影像对断裂沿线的水系、山脊位错等现象进行了解译、判读，并在随后的野外考察工作中详细调查和测量了沿线的地貌位错特征。在龙陵、芒市和遮放盆地边界，找到了该断裂全新世活动的地质证据，并且对典型位错地貌进行了实地测量，得到了该断裂晚更新世晚期与全新世以来的滑动速率。并据此利用断层滑动法，评估了龙陵-瑞丽断裂带的大震复发间隔，对得到的结果进行了简要的分析。

1 断裂晚第四纪活动特征

龙陵-瑞丽断裂的西南起于瑞丽西南的缅甸境内，向北东经遮放、芒市盆地和龙陵盆地，穿过黄草坝，最后隐伏于镇安盆地附近，总体走向为北东 50° 左右，断裂倾向不一，在我国境内全长约 170km (图 1)。该断裂由多条近平行的断裂组成，在几何结构上常表现为由一组北东向断裂组成的左阶斜列构造，在断裂的重叠阶区多形成断陷盆地。断裂带两侧岩层的变质程度迥然不同，断裂带上温泉发育，岩石破碎，糜棱岩化剧烈，断层带内构造岩发育。多期活动特征明显，显示早期以挤压为主，晚期则以水平左旋运动为主，是一条古生代以来长期活动的继承性活动断裂。



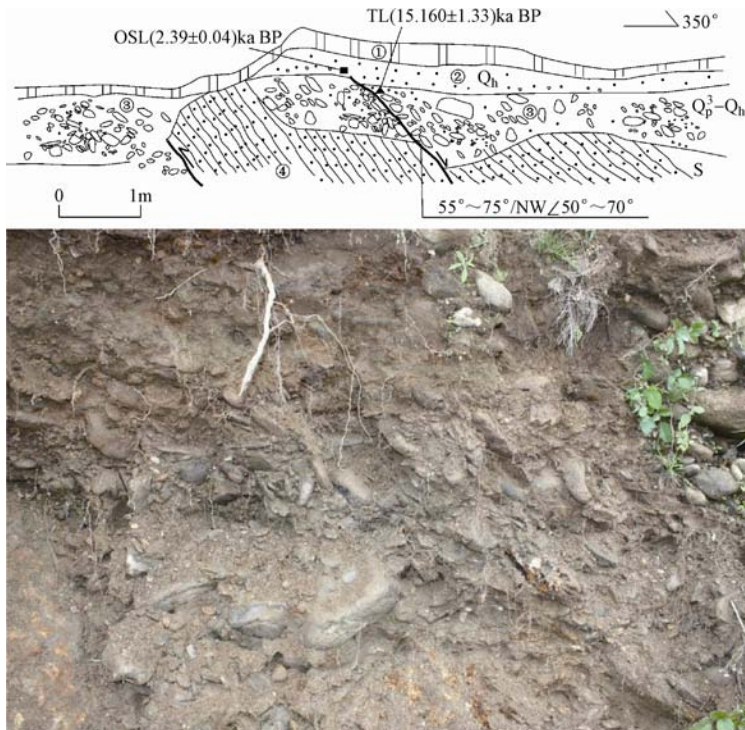
(1) 拖角-腾冲断裂; (2) 陇川断裂; (3) 大盈江断裂; (4) 龙陵-瑞丽断裂; (5) 畹町断裂; (6) 勐冒断裂; (7) 镇安断裂

图 1 龙陵-瑞丽断裂的位置与几何结构图

Fig. 1 Distribution map of Longling-Ruilong fault

作者对龙陵-瑞丽断裂北段的镇安—遮放沿线进行了地质地貌考察，发现该断裂沿线的水系、冲沟呈明显的同步左旋位错，并且在大坪子和杞木林经探槽开挖揭露出全新世地层被断错，表明该断裂是一条以左旋走滑为主，兼具张性正断的全新世活动断裂。

龙川江的Ⅱ级支流蒙牛河依山而流自北而南汇向龙陵盆地, 断层沿河谷发育, 西北靠山一侧阶地保留清晰, 在盆地北东端的大坪子拐弯处, 在西北侧 T_1 阶地上发育了高 2m 的反向断层陡坎(图 2)。后经探槽开挖发现 T_1 阶地下面的砾石层③被断错, 其上覆的粉细砂层在断点上方呈明显的坡折状, 断层走向为北东 $55^\circ\text{--}75^\circ$, 倾向北西, 倾角 $50^\circ\text{--}70^\circ$, 形成宽约 15cm 的断层带, 并且断层带内砾石呈明显的定向排列。断层上盘的砾石层呈明显的挠曲状, 根据砾石层断错情况和砾石定向排列的方向与断面的锐夹角分析, 可以判断该断层为正断层。在被该断层断错了的砾石层③中采集热释光样, 测得年代为距今 (15.160 ± 1.33) ka; 在该砾石层上覆的粉细砂层②中取光释光样, 测得年代为距今 (2.39 ± 0.04) ka。根据被断错地层及其上覆地层的年代限定, 以此判断断裂活动时代下限为距今 (15.160 ± 1.33) ka; 断层活动时代上限为距今 (2.39 ± 0.04) ka。



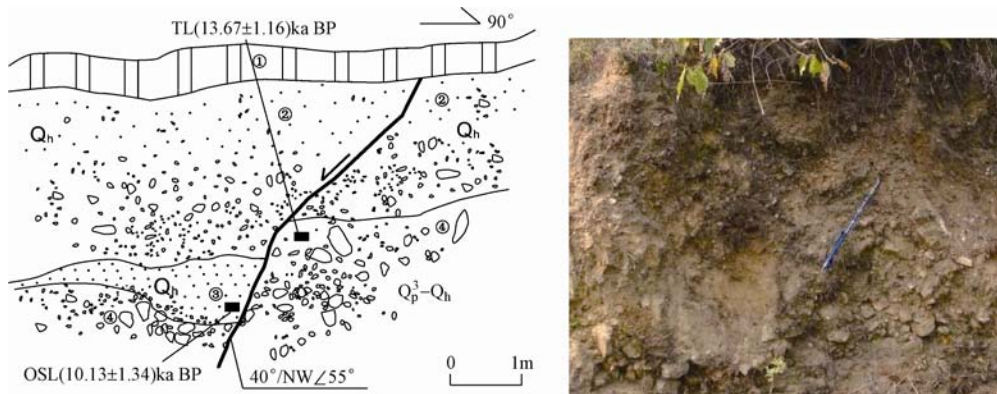
①耕植土, 厚 15cm; ②粉砂层, 厚 30cm, 在该层底部 OSL 样 (5-4-3); ③砾石层, 在顶部取热释光样 (12-29-3); ④志留纪粉砂岩、白云质灰岩组成的基岩; 黑方块表示取样点

图 2 龙陵-瑞丽断裂大坪子剖面

Fig. 2 Cross section of Longling-Ruilu fault at Dapingzi village

在龙陵盆地北东端的朱家寨, 一条北西向冲沟切开盆地南东边缘的两期叠瓦状洪积扇, 往盆地内部汇入龙川江的Ⅱ级支流。由于断裂的左旋走滑活动, 该冲沟与老洪积扇中轴被同步左旋位错 70m, 在老扇体的前缘形成高约 18m 的陡坎, 同时在老洪积扇的前缘形成新的洪积扇, 在新扇体上面住有人家并种植着庄稼。根据老洪积扇的位错与新洪积扇地层沉积的时间先后关系, 可以判断该断裂有一期断错事件的活动时代在老洪积扇形成之后, 并且在新洪积扇最早沉积之前。在新洪积扇的底部砾石层中取热释光样, 测得年代为距今 (32.88 ± 2.79) ka。

ka, 以此年代表示该冲沟与老洪积扇位错后的最早沉积的地层年代, 可作为累积位移的起始时间上限, 即 70m 的累积位移起始时间上限为距今 (32.88±2.79) ka。



①现代耕植土, 厚 15cm; ②中、细砾石层, 上盘厚 2m, 下盘厚 1.5m, 在该层下部夹杂有巨砾石; ③崩积楔, 由粉砂与细砾石组成, 靠近断面处层厚 50cm, 远离断面尖灭, 含有底砾层, 在下部取光释光样 (4-14-1); ④大砾石层, 中等磨圆, 上盘的可见厚度为 1.2m, 下盘的可见厚度为 1.8m, 在该层顶部取样 (4-14-2); 黑方块表取样点

图 3 龙陵-瑞丽断裂杞木林断层剖面图

Fig. 3 Cross section of Longling-Ruilu fault at Qimulin village

在龙陵盆地南东边界中部的杞木林洪积扇上, 位于冲洪积扇中部的冲沟左旋位错 18m, 在冲沟北壁进行探槽开挖, 揭露出晚更新世冲洪积砾石层④被垂直断错 1.5m (图 3) 并形成崩积楔③。在层③下部取光释光样, 经光释光测年分析年代为距今 (10.13±1.34) ka; 在被断错地层④顶部取热释光样, 测得年代为距今 (13.67±1.16) ka。根据地层的断错及先后沉积关系, 表明在层④形成之后与层③形成之前, 该点发生过一次位错事件, 并且崩积楔③的形成可能更接近该位错事件发生的时代, 也就是说, 该点位错事件发生的年代更接近于距今 (10.13±1.34) ka。对于 1.5m 的垂直位错量, 需要说明的是由于该断裂是以走滑活动为主的断裂, 其垂直位错量受地表的坡度影响较大, 1.5m 的位错量可能不能代表该断裂的真实垂直位错量。

在芒市盆地西北边界中部的曼岗与曼常之间, 发育有芒市河的北西向的 I 级支流, 该支流的 T_1 阶地被左旋位错 10.9m, 该位错阶地相对于河道属于错离河道 (张培震等, 2008)。在距 T_1 阶地面下 1m 处取光释光样, 测得年代为距今 (7.00±0.59) ka; 在大坪子距 T_1 阶地面 0.5m 处粉砂中取光释光样, 测得年代为距今 (2.39±0.04) ka; 二者差别较大, 可能与取样的部位和测年的方法差异有关。对比前人的研究, 王晋南等 (2006) 测定, 位于红光村龙川江 I 级支流 T_1 阶地面之下 0.8m 和 1m 处堆积物的热释光年代分别为距今 (4.16±0.35) ka 和 (6.68±0.57) ka。对比之下, 选择距今 4ka 作为 T_1 阶地的形成年代较为合理。综上分析表明, 10.9m 的累积位错的起始时间约为距今 4ka。

在黄草坝以北的高家坪子—镇安盆地一带, 龙陵-瑞丽断裂顺河谷发育, 主要表现为河谷两岸的断层三角面, 河流的 T_1 、 T_2 阶地未被明显的错动。该地带北西向断裂活动较强, 屡见北西向断层剖面, 初步判断北东向断裂靠近镇安盆地活动性减弱。在北东向断层剖面中取断层泥样 (4-10-1), 经热释光测年分析为距今 (51.10±4.34) ka。

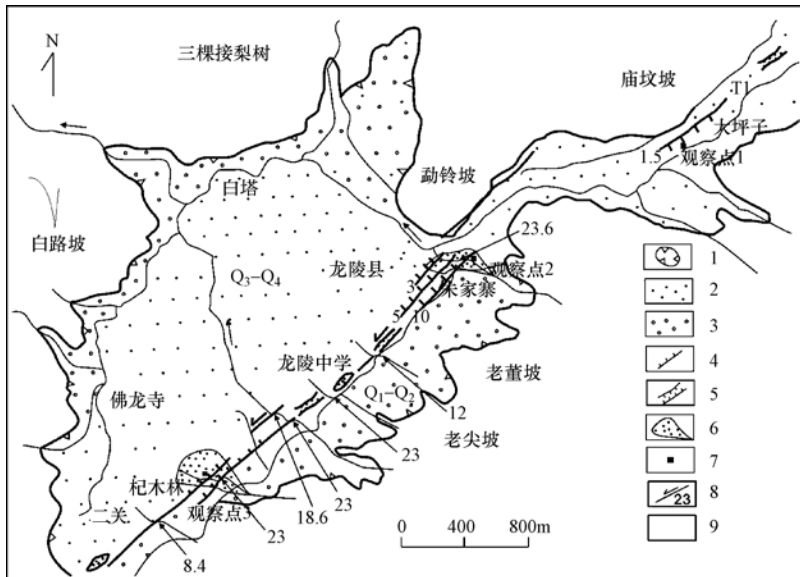
根据以上分析可以确定, 龙陵-瑞丽断裂南支(北段)断错了形成于晚更新世晚期的洪积扇和全新世 T_1 阶地, 是一条全新世活动断裂。

2 断裂断错地貌特征与滑动速率

2.1 断错地貌特征

在遥感影像上, 龙陵-瑞丽断裂线性影像极为清晰, 断裂沿线的冲沟、山脊呈同步位错。下面对断裂沿线龙陵、芒市和遮放三个盆地边缘典型地貌点的位错特征进行分析。

在龙陵盆地的南东边界, 断裂总体走向为北东 50° — 60° , 倾向北西, 表现为连续的冲沟、洪积扇同步位错(图 4, 表 1)。并且在龙陵盆地边缘以多条平行的断裂展布, 如在朱家寨由 3 条近平行的断层组成。



1 第四纪盆地边界; 2 晚更新世至全新世冲洪积物; 3 早、中更新世堆积物; 4 断层陡坎; 5 断层谷地;
6 晚更新世洪积扇; 7 断层水平位错方式及错距 (m); 8 基岩地区

图 4 龙陵盆地南东边界综合地貌图

Fig. 4 Landforms around southeastern border of Longling Basin

在龙陵盆地南东边界的杞木林, 冲沟发生 II 级错动并且在冲沟的沟壁上见砾石层被断错。

在黄草坝南周家寨, 北西向冲沟被左旋错动 20.8m, 同时在拐弯处的西南沿线, 见高约 5m 的断层陡坎, 冲沟往南的山脊呈左旋扭错(图 5)。

在芒市盆地的西北边界, 断裂沿第三系与第四系分界线展布, 断裂带总体走向为北东 50° , 倾向南东, 断裂沿线的冲沟水系连续同步位错。在芒市盆地西南端的户育—三台山一带表现为走滑断裂典型的地貌组合, 较为典型的是连续的冲沟、山脊同步左旋位错, 并且在山脊上形成连续的断层三角面、眉坡脊地貌和断层陡坎, 其中发育长约 1km 左右的冲沟位错量在 10m 左右(图 6, 表 1)。

在遮放盆地西北边界的南见村一带, 表现为走滑断裂特有的地貌组合, 较为典型的为连

续的冲沟位错、山脊位错、眉坡脊地貌、断尾沟、断层陡坎（图 6，表 1）。在南见村北口，发育 2 条长约 50m 的断尾沟，较长的冲沟皆被左旋扭错，并且附近的北西向山脊上形成北东 50° 方向的地形陡变带。在南见村村南口调查发现，北西向山脊左旋位错 10m，并且山脊沿北东 50° 方向形成刀切状的高约 2m 的垂直断坎，紧邻山脊两侧、且冲沟长度为 1km 左右的北西向冲沟分别被左旋位错 10m、10.3m 左右。往南 300m 处发现北西向冲沟左旋位错 10.9m。

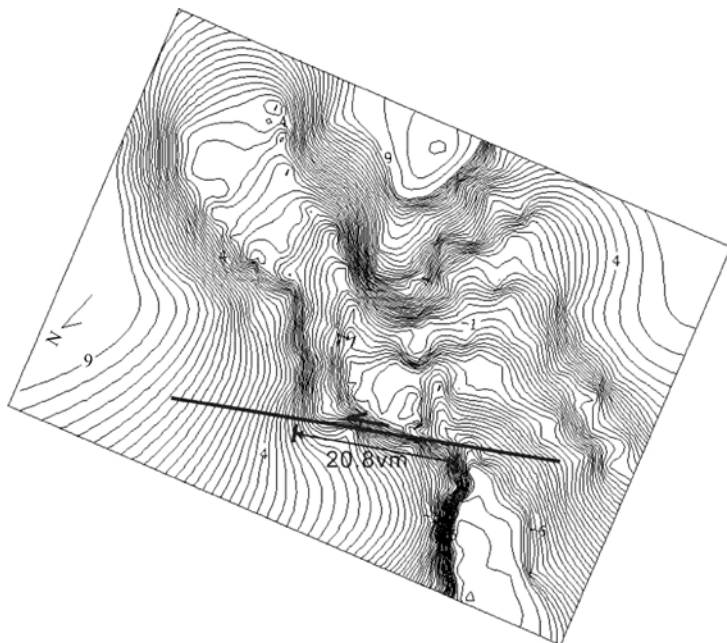
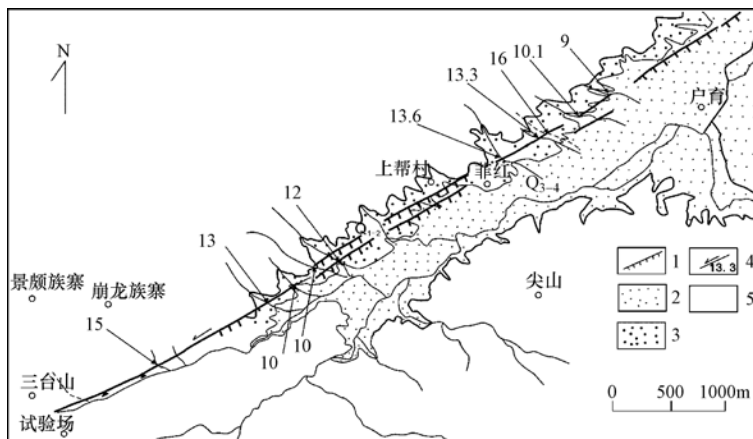


图 5 周家寨冲沟位错实测图

Fig. 5 Gully off-set measured at Zhoujiazhai village



1 断层陡坎；2 第四系；3 第三系；4 断层水平位错方式及错距（m）；5 基岩地区

图 6 芒市盆地西南端菲红一带冲沟位错图

Fig. 6 Landforms of gully off-set at Feihong, northwest of Mangshi Basin

综合以上的分析，可以统计得出断裂沿线冲沟、山脊和阶地的连续位错的量级主要分布在 10m 和 20m 两个级别。位错量在 10m 左右的冲沟断点至沟头的长度在 1km 左右；位错量为 20m 级别的冲沟断点至沟头的长度在 2km 左右。由此可以看出，冲沟位错量的级别与冲沟发育长度的级别相对应，并且在断裂沿线的不同地点位错量与冲沟对应级别相同，表明断裂活动强度在空间上表现得比较均匀。根据前面杞木林冲沟的断错年代分析，20m 级别的位错起始年代限定为距今 (10.13 ± 1.34) ka；通过曼常河流 T_1 阶地位错的分析，10m 级别位错起始时间为距今 4ka。

表 1 龙陵-瑞丽断裂北段断错地貌数据表

Table 1 Displacements from landform data along northern Longling-Ruilu fault

编号	位移地点	位移标志	位错量 (m)		位错年代距今 (ka)	平均水平滑动速率 (mm/a)	平均垂直滑动速率 (mm/a)
			水平	垂直			
1	朱家寨	洪积扇	70	18	32.88 ± 2.79	2.2	0.6
2	杞木林	冲沟	18		10.13 ± 1.34		
3	周家寨	冲沟	20.8				
4	龙陵中学北侧	冲沟	23				
5	黄草坝	冲沟	18				
6	龙陵中学南侧	冲沟	19				
7	黄草坝北大坪子	打界河 T_1 阶地		2	T_1 阶地		
8	团山	冲沟	8.4	3			
9	团山	冲沟	10.3	3			
10	龙陵中学北 500m	冲沟	12.2				
11	二关	冲沟	8.4			2.7	0.5
12	曼常	芒市河 I 级支流 T_1 阶地	10.9		T_1 阶地		
13	曼赛	芒市河 I 级支流 T_1 阶地	10				
14	菲红	冲沟	10.1				
15	菲红	冲沟	13.3				
16	菲红	冲沟	13.6				
17	三台山	冲沟	13				
18	营前村	山脊	12.5				
19	曼里	山脊、冲沟	13.3			2.7	0.5
20	南见村北	冲沟	9.8				

2.2 断裂滑动速率

用于计算断裂滑动速率的公式为：

$$S=D/T$$

式中， S 表示断裂带某一时期的平均滑动速率，既包括断裂粘滑速率也包括断裂的蠕滑速率；

D 表示该时期的累积位移量; T 表示累积位移起始的时间。

根据朱家寨洪积扇的位错特征分析得知, 该断裂距今 (32.88 ± 2.79) ka 以来的水平累积位错量为 70m; 垂直位错量为 18m。以此计算得到该断裂晚更新世以来的平均水平滑动速率为 2.2mm/a; 平均垂直滑动速率为 0.6mm/a。

根据柘木林冲沟位错特征及沟壁上剖面的分析, 并结合整个断裂沿线冲沟的位错特征, 获得该断裂距今 (10.13 ± 1.34) ka 以来的水平位错量为 (20 ± 2) m, 计算得到该断裂全新世早期以来的平均水平位错速率为 1.8—2.2mm/a。

根据上文对大坪子、曼常等龙川江 II 级支流 T_1 阶地的位错分析, 获得该断裂距今 4ka 以来的水平位错量为 8—12m; 垂直位移量为 2.0m。计算得到该断裂全新世中期以来的平均水平滑动速率为 2.0—3.0mm/a; 平均垂直滑动速率为 0.5mm/a (表 2)。

向宏发等 (1999) 通过那里—橄榄坡一带水系断错特征与断阶平台处坡洪积物年龄为 10 万年估计, 得到该断裂晚更新世以来平均滑动速率为 2.6mm/a; 王阎昭等 (2008) 通过 GPS 资料约束反演, 得到该断裂的平均走滑速率为 3.1mm/a。上述结果与本文的结果相近。

表 2 龙陵-瑞丽断裂带北段位错量与滑动速率表

Table 2 Displacement and slip rate in northern Longling-Ruilu fault zone

位错起始时代 (ka)	水平位错量 (m)	垂直位错量 (m)	水平位错速率 (mm/a)	垂直位错速率 (mm/a)
全新世中期	10±2	2	2.0—3.0	0.5
全新世早期	20±2		1.8—2.2	
晚更新世	70	18	2.2	0.6

3 特征地震复发间隔

地震复发间隔是地震危险性分析的重要参数, 其精度的高低决定了结果的可靠性 (闻学泽, 1990)。为了确保地震复发间隔的计算精度, 本文利用断层滑动法对龙陵-瑞丽断裂的大震复发间隔进行了计算。同时根据资料的可靠度和完整程度, 将上述结果分别赋予适当的权重, 获得了较为可靠的地震平均复发间隔。

3.1 计算模型

当前, 可用于地震危险性分析的概率模型主要有: 威布尔分布 (Weibull distribution)、伽马分布 (Gamma distribution)、经验模型 (Empirical model)、时间可预报模型 (Time-Predictable model)、BPT 模型 (Brownian Passage Time model) 和 BPT-Step 模型。本文在参考 Working Group on California Earthquake Probabilities (2003, 2008) 方案的基础上, 选取泊松模型 (Poisson model)、对数正态模型 (Lognormal model) 和 BPT 模型 (Brownian Passage Time model) 计算研究区未来一定时段发震概率。

特征地震模型同时使用了上述泊松分布 (Poisson distribution)、对数正态分布 (Lognormal distribution) 和 BPT 模型 (Brownian Passage Time model) 三种概率模型。考虑到三种模型中参数的不确定性, 为了提高概率结果的准确性, 对上述三种模型取加权平均, 给出特征地震模型平均结果。WGEC (2002) 在对 San Andreas 概率地震危险性分析中, 采用了对各模型结果进行专家打分的方法, 各模型权系数分别是: Poisson 模型为 0.28; BPT 模型为 0.72。由

于 Lognormal 模型和 BPT 模型为与离逝时间有关的实时概率模型, 而 Poisson 模型与离逝时间无关, 故本文对上述三种模型分别赋予 0.36、0.36、0.28 的权重。特征地震模型综合结果的计算公式为:

$$P_{\text{char}}=0.28P_{\text{exp}}+0.36P_{\text{LN}}+0.36P_{\text{BPT}}$$

式中, P_{exp} 为 Poisson 模型计算得到的条件概率; P_{LN} 为 Lognormal 模型计算得到的条件概率; P_{BPT} 为 BPT 模型计算得到的条件概率。

3.2 地震复发间隔计算

3.2.1 龙陵 $M7.3$ 、 $M7.4$ 级地震的发震构造问题

龙陵-瑞丽断裂北段, 全长约 90km, 已有的研究表明, 断裂断错了 I 级阶地, 其时代为距今 (2.39 ± 0.04) ka 左右, 全新世以来其水平滑动速率为 1.8—3.0mm/a。

由于该地区工作条件较为艰苦, 工作基础较为薄弱, 对这一地区的断裂活动性分析以及区域地震活动性与危险性等方面的研究仍存在很多欠缺之处。通过对前人研究结果的整理与野外的现场调查工作可以发现, 关于 1976 年龙陵地震的发震构造问题, 至今确实仍然没有一个明确的结论。但仍可从中得到以下几点认识:

(1) 1976 年龙陵 $M7.3$ 级地震的等震线图显示, 其优势方向应为两组, 即北东方向和北西方向, 且极震区位于北东向构造(龙陵-瑞丽断裂)和北西向构造(龙陵-澜沧断裂)交汇的镇安镇地区。这表明该次地震事件有可能是在该地区两组构造共同控制下发生的。

(2) 在野外考察过程中, 沿龙陵-瑞丽断裂带, 在镇安、龙陵、橄榄坡等地仍可见到一些由于强震导致的滑坡、塌方等灾害现象。表明在该地区近期曾发生过较大震级的地震, 而据地震记录及相关历史文献, 该地区最近一次大震即为 1976 年的龙陵 $M7.3$ 级地震。

(3) 前人在该地区开展了大量的研究工作, 但截止目前仍没有发现某条单一的活动断裂可以作为此次地震事件的发震构造, 魏顺民等(1999)、陈立德等(1979)认为, 龙陵地震的发生是由于北东向断裂与北西向断裂的共同作用所导致的, 这也是目前一般认为比较合理的解释。

综上所述, 1976 年发生的龙陵 $M7.3$ 和 $M7.4$ 级地震, 其发震机理较为复杂, 依据目前的研究成果, 认为其是由北东向的龙陵-瑞丽断裂和北西向的龙陵-澜沧断裂共同作用所导致的。其中, $M7.4$ 级地震的震中与破坏分布均偏南, 认为其受龙陵-瑞丽断裂的影响较弱; 而 $M7.3$ 级地震无论是震中位置还是灾害分布, 都与龙陵-瑞丽断裂展布的位置密切重合, 且其极震区就位于北东向的龙陵-瑞丽断裂和北西向的龙陵-澜沧断裂交汇的镇安镇(图 7)。因此, 认为该次地震事件与龙陵-瑞丽断裂的活动密切相关。

3.2.2 地震复发间隔计算结果

大地震具有原地重演的特点已是公认的事实, 特征地震是大地震原地重复的重要表现形式。基于上述考虑, 作者认为龙陵-瑞丽断裂是 1976 年龙陵地震的发震断裂之一。因此, 特征震级取 $M7.3$ 级地震, 根据同震位错—断层长度统计关系式(Wells 等, 1994), 得到平均同震位错为 1.66m, 除以滑动速率从而得到平均复发间隔为 766 年。

离逝时间取 $2012-1976=36a$, 计算获得 Poisson 模型、Lognormal 模型、BPT 模型三种概率模型未来 50a 发震概率分别是: 6.32%、0.08%、0.05%; 三种模型分别取权重 0.28、0.36、

0.36, 获得龙陵-瑞丽断裂未来 50a 发震概率为 1.82% (见表 3), 这就是特征地震模型的计算结果。

由计算结果可以看出, 龙陵-瑞丽断裂未来 50a 再次发生 $M7.3$ 级特征地震的可能性非常低 (概率值为 1.82%), 究其原因 1976 年龙陵 $M7.3$ 级地震距今只有不到 40 年的时间, 离逝时间远小于平均复发间隔, 该次大地震释放的能量可能还没有完全恢复, 但是随着能量的积累, 不能排除未来发生中等强度的破坏性地震。

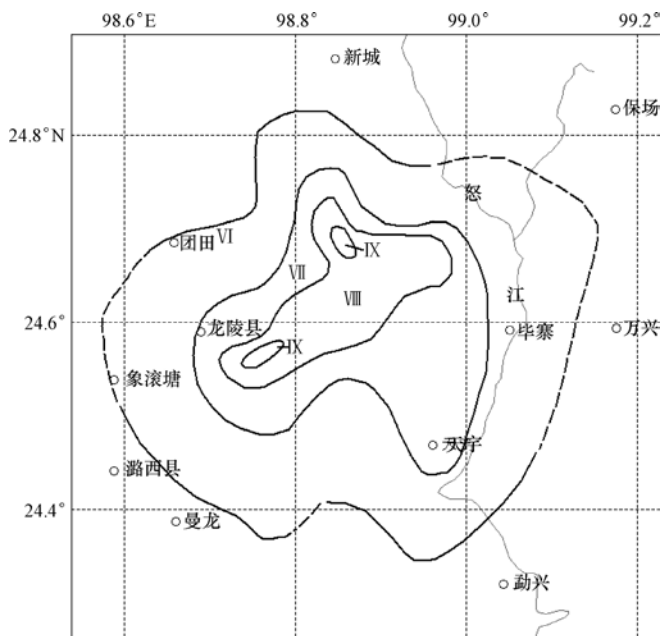


图 7 1976 年云南龙陵 7.3 级地震等震线图

Fig. 7 Isoseismal intensity map the Longling $M7.3$ in 1976

表 3 龙陵-瑞丽断裂带北段特征地震复发概率

Table 3 The characteristic earthquake recurrence probability of northern Longling-Ruili fault

断裂段	复发间隔 (a)	离逝时间 (a)	特征地震模型条件概率			
			泊松模型	对数正态模型	BPT 模型	加权平均
龙陵-瑞丽断裂	766	36	6.32%	0.08%	0.05%	1.82%

通过对比实时概率模型 (BPT 模型和 Lognormal 模型) 与非实时概率模型 (Poisson 模型) 的结果可知, 当特征地震离逝时间与地震复发间隔之比较小时, BPT 模型和 Lognormal 模型获得的结果小于 Poisson 模型的结果; 当特征地震离逝时间与地震复发间隔之比较大时, BPT 模型和 Lognormal 模型获得的结果小于 Poisson 模型的结果。这是因为 Poisson 模型认为地震发生是随机的与离逝时间无关, 而 BPT 模型和对数正态模型考虑了离逝时间和应变能的积累过程, 在刚发生地震后较短的时间内再次发生地震的可能性最低, 随着时间的增长和能量不断的积累, 再次发生地震的可能性不断增强。但是这两种模型对地震危险性评价的是适宜性还需要仔细研究, 而且两者权重的确定依据也有待于深入分析。

4 结论与讨论

(1) 龙陵-瑞丽断裂(南支)北段有多期地质活动,对断裂两侧的沉积建造、岩浆活动的控制作用十分明显,尤其是明显控制了断裂沿线遮放、芒市、龙陵等新生代盆地的形成与发育,断裂断错了形成于晚更新世晚期以来的洪积扇和全新世 T_1 阶地。

(2) 依据断错地貌特征,获得了龙陵-瑞丽断裂(南支)北段晚更新世晚期以来的平均水平滑动速率为 2.2mm/a , 平均垂直滑动速率为 0.6mm/a ; 全新世以来的平均水平滑动速率为 $1.8\text{—}3.0\text{mm/a}$, 平均垂直滑动速率为 0.5mm/a 。总体看,龙陵-瑞丽断裂北段是一条以左旋走滑运动为主的全新世活动断裂,且晚更新世以来活动强度变化不大,较为稳定。

(3) 区内北东向断裂活动强度小于北北西向断裂。区内的北东向断裂多为继承性活动断裂,相对于区内北北西向活动断裂的晚第四纪滑动速率偏小,且多被北北西向断裂截断。北北西向龙陵-澜沧断裂带晚更新世以来的平均地质滑动速率可达 6.8mm/a (向宏发等, 1999), 是一条具有深部构造背景的大型新生地震破裂带(虢顺民等, 1999a; 1999b)。因此,未来的研究工作应重点围绕断裂转折部位以及北东向龙陵-瑞丽断裂与北西向龙陵-澜沧断裂展开。

(4) 限于资料和研究程度的限制,本文仅给出了研究区断裂发震概率的初步结果。龙陵-瑞丽断裂未来 50 年再次发生 $M7.3$ 级特征地震的可能性非常低(概率值为 1.82%),其原因可能是由于 1976 年龙陵 $M7.3$ 级地震距今只有不到 40 年的时间,离逝时间远小于平均复发间隔,该次大地震释放的能量可能还没有完全恢复。但是随着能量的积累,不能排除未来发生 5 级左右的中等强度的破坏性地震。

参考文献

- 陈立德, 赵维城. 1979. 1976 年龙陵地震. 北京: 地震出版社.
- 虢顺民, 向宏发, 周瑞奇等, 1999a. 滇西南龙陵-澜沧断裂带: 大陆地壳上一条新生的破裂带. 科学通报, **44** (19): 2118—2121.
- 虢顺民, 向宏发, 徐锡伟等, 1999b. 滇西南大盈江断裂带第四纪活动初步研究. 活动断层研究, (7): 58—65.
- 虢顺民, 向宏发, 徐锡伟等, 2000. 滇西南龙陵-澜沧第四纪新生代断裂带特征和形成机制研究. 地震地质, **22** (3): 277—284.
- 虢顺民, 徐锡伟, 向宏发等, 2002. 龙陵-澜沧新生破裂带地震破裂分段与地震预测研究. 地震地质, **24** (2): 133—144.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐等, 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. 地球物理学报, **24** (2): 96—110.
- 阚荣举, 王绍晋, 黄琨等, 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动. 地震地质, **5** (2): 79—90.
- 苏有锦, 秦嘉政, 2001. 川滇地区强震活动与区域新构造运动的关系. 中国地震, **17** (1): 24—34.
- 王晋南, 王洋龙, 安晓文等, 2006. 1976 年龙陵地震区断裂活动性研究. 地震研究, **29** (4): 366—372.
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康等, 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学 (D 辑): 地球科学, **38** (5): 582—597.
- 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.

- 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, (7): 81—87.
- 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. 地震地质, **22** (3): 253—264.
- 谢富仁, 苏刚, 崔晓锋等, 2001. 滇西南地区现代构造应力场分析. 地震学报, **23** (1): 17—23.
- 张培震, 李传友, 毛凤英, 2008. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率. 地震地质, **30** (1): 44—57.
- 周瑞奇, 虢顺民, 向宏发等, 1998. 龙陵-澜沧断裂带双震型强震活动破裂模型讨论. 地震地质, **20** (3): 70—76.
- Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Amer., **84** (4): 974—1002.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 2003. Earthquake probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002 to 2031. USGS Open-File Rept, Appendices 2003, 3—214.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 2008. The Uniform California Earthquake Rupture Forecast. Version 2(UCERF 2): U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1437 and California Geological Survey Special Report 203.

Strong Earthquake Occurrence Interval along the Northern Segment of Longling-Ruili Fault and Its Late Quaternary Activity

Du Yi¹⁾, Zhang Xiaoliang²⁾, Huang Xuemeng¹⁾, Du Yuben³⁾ and Xie Furen¹⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

3) China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract The field investigation and interpretation of remote images indicate that the last activity along the northern segment of Longling-Ruili fault occurred in the Holocene with a strike-slip rate of 2.2-2.5 mm/a and vertical slip rate of 0.6mm/a since late Pleistocene epoch, and strike-slip rate of 1.8-3.0 mm/a and vertical slip rate of 0.5mm/a during the Holocene epoch.

The occurrence probability of strong earthquakes in 50 years is calculated as 6.32% by Poisson model, 0.08% by Lognormal model and 0.05% by BPT model respectively. Finally, the probability of occurrence of characteristic earthquakes for north section of Longling-Ruili fault is estimated as 1.82% with the weight of 0.28, 0.36 and 0.36 for Poisson model, Lognormal model and BPT model.

Key words: Longling-Ruili fault; Slip rate; Characterized earthquake; Recurrence interval