

研究报告

祁连山活动地块东北部活动构造的定量 研究与大地震危险性分析^{*}

刘百箴, 李清河, 刘小凤, 何文贵, 吕太乙, 袁道阳, 王永成

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

主题词: 祁连山; 重点监测区; 地震构造; 地震危险性评估

中图分类号: P315.2; P315.5 文献标识码: D 文章编号: 1000-0844(2000)02-0187-04

祁连山中东段的范围东起宁夏固原, 西至青海祁连县以西的托莱山一带. 该区曾发生过 1920 年海原 8.6 级地震, 1927 年古浪 8.0 级地震, 近期还发生过一系列中强地震, 如 1986 年门源 6.4 级、1990 年景泰一天祝 6.2 级、1995 年永登 5.8 级等地震. 该地区是我国构造活动和地震活动最强烈的地区之一. 存在连绵不断的一系列的全新世活动断裂, 其中自西向东最重要的有海原活动断裂、古浪活动断裂、老虎山活动断裂、毛毛山-金强河活动断裂、冷龙岭活动断裂、托莱山活动断裂、庄浪河活动断裂、马衔山活动断裂等. 前 4 条断裂的定量研究已在“八五”期间基本完成. 在“九五”项目(95-04-10)的支持下, 又完成了后 3 条断裂的野外定量研究和祁连山中东段重点监视防御区孕震活动构造的定量研究及地震危险性评估. 通过 1996~1999 年的工作, 基本完成了任务, 达到了项目合同的要求. 现将新取得的主要进展分述如下:

1 冷龙岭活动断裂, NWW 走向左旋走滑为主, 长 127 km, 从冷龙岭山脊或山腰通过, 通常海拔在 4 000 m 以上, 属于高寒冰碛地区. 在该断层上, 开挖了两个探槽, 测定 7 个热释光和 6 个放射碳年代样品. 初步确定其晚更新世以来的平均滑动速率为 4.07 mm/a, 全新世以来的滑动速率为 4.62 mm/a. 两个探槽揭露出 3 次古地震事件: ① 表现为崩积楔和断塞塘, 其年龄上限为 5 926 a B.P.; ② 表现为崩积楔和断塞塘, 其年代略早于 3 885 a B.P.; ③ 在两个探槽中均有表现, 其年代为 245~1994 a B.P. 的事件③ 伴随着一条长约 20 km 的较新鲜的破裂带. 1998 年对该破裂带进行了再研究, 重上冷龙岭, 补测了 20 余条最年轻破裂坎的地形剖面, 经扩散方程计算, 年代集中在距今 440~488 a, 与史料记载的 458 a(公元 1540 年)和¹⁴C 测定的 1994~245 a 十分吻合. 该破裂带又正好位于史料记载的有感区的地理中心, 从而确定该破裂带就是各地震目录中遗漏的 1540 年 5 月 14 日(明嘉靖十九年四月庚午)地震的破裂带, 其震级按有感范围及位移量估计当大于等于 7.2 级, 从而填补了该段历史大地震的空白. 并获取准确的大地震离逝时间, 并为地震目录补充了一个新的强震, 当然这需要历史地震专业委员会的最后认可.

收稿日期: 2000-01-04

基金项目: 中国地震局“九五”攻关课题(95-04-10-03); 国家重点基础研究发展规划项目(95-13-01-04)

* 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2000022

作者简介: 刘百箴(1941-), 男, 河南省信阳人, 研究员, 现主要从事地震地质和工程地震研究.

2 托莱山左旋走滑断裂带是青海东北部最清晰的一条全新世活动断裂带. 它的东端与冷龙岭断裂相交, 走向 NNW, 全长大于 280 km. 自东向西大致可分为 13 个断层段, 多以左阶排列, 阶区为拉分盆地, 右阶区则为隆起山峰; 西段转为逆冲断层, 阶区的力学特征也不明显. 断错微地貌非常明显. 大河流的最大错距可达 7 600 m, 最新的小错距仅十几米. 大量的位移数据表明, 其位移数据具有明显的分组特征, 这种分组特征反映了水系形成在不同的气候—构造旋回期. 该断裂 700 ka 以来的平均滑动速率为 5.7~10.0 mm/a, 26~30 ka 以来的为 4.0~5.4 mm/a, 全新世 4 ka 以来的为 12 mm/a. 开挖探槽揭露出 3 次古地震事件: ① 发生于距今 $13\,240 \pm 940 \sim 13\,960 \pm 1\,020$ a 间; ② 发生在 $6\,080 \pm 450$ a 前; ③ 发生在距今 $3\,570 \pm 270 \sim 4\,390 \pm 340$ a 之间. 此外, 在东草河—小八宝河一带, 发现了约 26 km 长的古地震破裂带, 从破裂带的新鲜程度来看, 可能要老于冷龙岭的破裂带(公元 1540 年), 但是要新于黑马圈河的破裂带($1\,750 \pm 50$ a 前). 粗略估计, 其年龄可能为距今 500~1 000 a, 震级约为 7.0~7.5 级.

3 开展了祁连山中段的活断层调查. 野外调查和判读最近的法国 SPOT 卫片表明, 从昌马断裂东端大泉口以东至冷龙岭断裂西端硫磺沟口一带的祁连山中段不存在明显的左旋走滑运动, 运动形式以逆冲作用为主. 横穿宽 40~60 km 的祁连山中段的民乐童子坝河和梨园河并切过了该段中相互平行的祁连山北缘断裂、荒草疙瘩断裂、祁连山主峰北侧断裂、峨堡—青羊沟断裂、大岔牧场断裂等 5 条断裂. 这两条河流的阶地位相图显示出: ① 除大岔牧场断裂外, 其它断裂无明显的全新世活动, 但有不少在晚更新世还活动的断裂; ② 我们所关心的祁连山北缘断裂, 在这一段可以肯定没有全新世活动. 其东段(民乐段)活动时代较新, 的确影响了第 II 级阶地, 有可能到 II 级阶地以后仍有活动. 但中段(肃南段)却在晚更新世以来没有活动过, IV 级以下阶地未受影响.

4 编写了三维地壳速度反演程序, 利用天然地震对祁连山东中段地壳深部结构进行了反演, 得出了几个有意义的重要结论:

(1) 古浪 1927 年 8.0 级地震区深部结构特点: ① 上地壳震源区两侧均有低速体存在, 但震源区上部呈高速; ② 中地壳顶部高速区隆起; ③ 下地壳存在一高速体, 速度约为 6.9 km/s; ④ 下地壳高速体之下为一低速体, 速度为 6.4 km/s; ⑤ 莫霍面上隆.

(2) 1990 年天祝—景泰 6.2 级地震区深部结构类似于古浪地震, 但上地壳低速区未中断, 高速区夹在其中.

(3) 1954 年山丹 7 $\frac{1}{2}$ 级地震区深部结构特点: 1954 年 2 月 11 日该地震发生在山丹与阿拉善右旗之间, 微观震中在 $39.00^{\circ}\text{N}, 101.2^{\circ}\text{E}$. 就其深部结构而言, 中地壳顶部高速上隆, 下地壳有一高速体, 其下是低速层, 莫霍面上隆. 这些特点类似于古浪地震和天祝—景泰地震.

(4) 1986 年门源 6.4 级地震区深部结构特点: 上地壳速度较高, 中地壳高速隆起, 下地壳有一高速体, 其下是一低速层, 莫霍面上隆且邻近地区的埋深有明显变化.

(5) 重大构造单元的深部结构差异: 本区在大地构造上属塔里木—阿拉善地块(华北)、走廊过渡带和北祁连褶皱带(秦祁褶皱系). 塔里木—阿拉善地块上地壳低速层厚, 中地壳速度等值线近平行, 下地壳有一低速层, 莫霍面较走廊过渡带略深. 走廊过渡带最主要特点是莫霍面上隆. 祁连带上地壳有一高速体, 下地壳有一低速体, 莫霍面向下凹.

5 祁连山东中段具有明显的应变分配现象, 表现为在同一挤压构造应力场作用下地壳深部的应变在地表解耦成倾滑和走滑两种应变. 老虎山、毛毛山、冷龙岭断裂是区域内主走滑断裂, 古浪断层是推覆体后缘的走滑断层, 而皇城—双塔断裂是推覆体前缘且与戈壁平原相接的挤压逆冲断层. 在此基础上对工作区活动构造框架进行了分析研究, 并用 1972 年以来的大量

微震资料,研究了活动构造在地下 0~40 km 深度的产状和几何形态,完成了“祁连山中东段三维构造物理模型及其在地震预报中的应用”研究,试图在活动构造与地震预报间架起一座桥梁.

6 用气候—构造旋回的年代学方法建立了西北地区阶地地貌年代标尺,得出不同运动性质地区的回归方程:

(1) 青藏高原东北边缘走滑断裂区($n = 61$)

$$\lg t = 1.37 \times \lg h - 0.19 \quad (r = 0.9379) \quad (1)$$

(2) 青藏高原东北缘推覆体构造区($n = 13$)

$$\lg t = 0.59 \times \lg h + 0.54 \quad (r = 0.9522) \quad (2)$$

式中, t 为阶地形成年代(ka), h 为阶地拔河高度(m), n 为样本数, r 为相关系数. 用此方程对以往取得的断错地貌的年龄进行了重新标定,并将这些数据应用于地震危险性分析.

7 对大地震危险性评估的理论和进行了探讨研究,分析了 NB 模型使用范围的不足之处,并用经过我们改进的蒙特卡罗方法重建概率的分布模型,用这一方法可以得到所有参数的不确定性的条件概率分布,若 N 足够大,则这一分布将逼近真实分布.并研究了在条件概率的基础上进行地震危险性分析(PSHA)的方法和地面运动峰值加速度(PGA)区划图.对比了基于泊松模型的 PSHA 的和基于特征地震的 PSHA 的结果,最后按照复发时间间隔的经验概率分布模型^[1, 2]计算出祁连山中东段各活动断裂段今后 10 a、20 a、50 a、100 a 和 500 a 的地震危险性条件概率(表 1 和表 2).

表 1 祁连山中东段各破裂单元破裂概率

断裂名称	分段	变异系数 σ	同震位错/m	特征震级 M	各预测时段的破裂概率/%		
					50 a	100 a	500 a
海原断裂	月亮山东麓段	0.34	2.45	7.1	0.00	0.00	26.61
	西南华山北麓段	0.69	3.16	7.1	0.00	0.00	88.18
	黄家洼—北漳山段	0.31	2.82	7.2	0.00	0.00	0.32
	哈斯山—米家山段	0.48	2.95	7.2	0.00	0.00	0.00
香山-天景山断裂	东段	0.25	1.58	6.7	0.00	0.00	0.00
	中段	0.24	1.32	6.5	0.00	0.00	1.62
	西段	0.24	2.68	6.7	0.00	0.00	0.00
老虎山断裂	老虎山断裂	0.24	2.69	7.2	0.00	0.00	83.10
	毛毛山断裂	0.21	2.19	7.0	57.58	81.99	99.99
	金强河断裂	0.21	1.48	6.6	57.06	81.35	99.99
皇城-双塔断裂	皇城段		2.82	7.2			
	上寺段		1.58	6.7			
	冬青顶段	0.39	1.78	6.8	0.00	0.00	0.00
哈溪-大靖断裂	天桥沟段	0.15	1.78	6.8	0.00	0.00	0.00
	黄羊川段	0.15	1.78	6.8	0.00	0.00	0.00
	大靖段		2.45	7.1	0.00	0.00	0.00
冷龙岭断裂	东段	0.29	2.45	7.1	0.00	0.36	33.66
	中段		3.09	7.3		0.45	36.68
	西段						
马衔山断裂			2.19	7.0	18.25	37.60	95.70
托莱山断裂			3.84	7.5	30.87	55.25	98.60

表 2 毛毛山-金强河断裂未来各时段破裂概率

断裂名称	特征 震级 M	离逝时间 /a	各预测时段的破裂概率/%		
			10 a	20 a	50 a
毛毛山断裂	7.0	940	15.76	29.03	57.58
金强河断裂	6.6	1 200 ~ 1 300	18.29	33.62	66.28
		600 ~ 700	15.33	28.41	57.06
联合破裂	7.5		31.17	52.89	85.70
			28.67	49.19	81.79
马衔山断裂	7.0	875	3.76	7.48	18.25
托莱山断裂	7.5	500	6.58	12.98	30.87
		1 000	12.42	23.32	48.60

[参考文献]

- [1] 闻学泽. 小江断裂带破裂分段与地震潜势的概率估计[J]. 中国地震, 1993, 15(4): 289~300.
- [2] 闻学泽. 准时间可预报复发行为与断裂带分段发震概率估计[J]. 地震学报, 1993, 15(3): 322~330.

**SEISMIC RISK EVALUATION AND QUANTITATIVE STUDY OF ACTIVE
SEISMOTECTONICS IN FOCAL MONITORING AREA ON MID-EAST
SEGMENT OF QILIAN MOUNTAINS**

LIU Bai-chi, LI Qing-he, LIU Xiao-feng, HE Wen-gui,

LU Tai-yi, YUAN Dao-yang, WANG Yong-cheng

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Key words: Qilian Mountains; Focal monitoring area; Seismotectonics; Seismic risk evaluation