

地震活动水平在潜在震源区判定中的应用 ——以甘肃酒西盆地为例

梁明剑¹, 袁道阳^{2,3}, 王爱国^{2,3}

(1. 四川省地震局工程地震研究院, 四川 成都 610041; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:酒西盆地为河西走廊西段的一个压陷性盆地, 其内发育了多条晚第四纪活动逆断裂、褶皱带, 是未来具有发生破坏性地震的潜在震源区。通过对酒西盆地和邻近地区9个潜在震源区的长期地震活动水平的对比研究, 发现不同震级档的潜在震源区基本处于各自的一个地震活动水平档上。据此将玉门潜在震源区地震活动水平与其它潜在震源区对比, 并结合区内活动构造及历史地震等活动特征, 判定其震级上限为 $M_s7.0$ 。指出地震活动水平对比方法可作为潜在震源区划分中的一个辅助手段。

关键词:地震活动水平; 酒西盆地; 逆断裂—褶皱带; 潜在震源区; 震级上限

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)02-0136-06

The Application of Seismic Activities Level on Determination of Potential Seismic Source Zone in Jiuxi Basin, Gansu Province

LIANG Ming-jian¹, YUAN Dao-yang^{2,3}, WANG Ai-guo^{2,3}

(1. Department of Development, Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000, China;)

Abstract: Jiuxi basin, a compressional basin in western segment of Hexi Corridor, had developed several late Quaternary reverse faults and fold zones, and is a potential seismic source of strong earthquake in future. In this paper, taking Yumen potential seismic source zone as an example, the long-term seismic activity levels of 9 potential seismic sources near Jiuxi basin are compared. It is found that seismic activities of seismic sources in same magnitude grades are nearly in the same level respectively. Basing on the result, it is feasible that determination of the upper-bound magnitude of Yumen potential source is $M_s7.0$. So, comparing seismic activities level in long term is a auxiliary measure for determination of potential seismic source zone.

Key words: Seismic activity level; Jiuxi basin; Reverse fault-fold zone; Potential seismic source zone; Upper-limit magnitude

0 引言

潜在震源区是有可能发生破坏性地震的震源或震中位置的集合体。潜在震源区的划分在本质上是确定发震构造的潜在地震分布范围与强度, 其中范

围依据历史地震的展布、发震构造及其分段的规模、深浅构造关系以及活动构造的组合关系来勾画; 震级上限则建立在对具体发震构造的最大潜在发震能

收稿日期: 2008-05-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目子专题 2006BAC13B01-0102; 甘肃省科技攻关基金项目(2GS054-A44-015)

作者简介: 梁明剑(1979-), 男(汉族), 广西北海人, 硕士, 主要从事地震地质研究工作。

力的估计等来判定^[1-4]。对中国西部的强构造活动区而言,潜在震源区的方向和范围相对易于确定,而对其震级上限以往通常采用构造类比和地震重复性两种方法来确定^[3-4],但是对于构造复杂的逆断裂—活动褶皱带在划分潜在震源区时却存在一定的难度,因为其上地震的地表破裂与其震中往往存在分离的现象^[5],使得通常所用的一些统计关系并不完全适用。那么是否还有其它定量或半定量的辅助方法来评价其震级上限呢?研究表明,地震活动水平代表某一区域范围或构造带在某一时段内地震能量的释放程度或水平,是定量评价地震构造活动的方法之一^[6]。本文基于构造类比原则的研究思路和方法,以祁连山—河西走廊西段的酒西盆地为例,研究潜在震源区之间地震活动水平对比方法在潜在震源区划分中的应用。

1 酒西盆地的地震构造特征

1.1 酒西盆地地震构造背景

酒西盆地处在 NEE 向的阿尔金大型左旋走滑断裂与 NW 向的祁连山北缘断裂之间的构造转换部位。盆地南靠祁连山,北至赤金堡—宽滩山—黑山,西起红柳峡山—五华山,东抵嘉峪关—文殊山一带。盆地基底为下古生界变质岩,最大埋深为 4 000~7 000 m;盖层沉积最大厚度 6 000~7 000 m,其中新第三系厚约 2 500 m,第四系厚约 1 700 m。盆地南缘为祁连山北缘断裂及老君庙推覆体北侧的玉门断裂,盆地中部为白杨河断裂,北缘为宽滩山南麓断裂等。上述断裂的构造活动贯穿于整个盆地的发展演化过程之中。在盆地边缘还见有晚第三纪及第四纪早中期的短轴褶曲。前人曾对酒西盆地南缘的祁连山北缘断裂进行过初步研究^[7-12],认为该断裂带西段的早峡—大黄沟断裂第三纪中新世至第四纪中更新世活动强烈,而晚更新世以来则处于相对稳定的状态。相反,在盆地内部发育的断裂晚第四纪活动明显,如位于盆地南缘山前的玉门断裂就是一条构造活动强烈的晚第四纪逆断裂—活动褶皱带,位于盆地北部的新民堡断裂和阴洼山断裂以及东部的嘉峪关断裂等晚第四纪构造活动显著^[13-14]。上述断裂具备发生中强以上地震的构造条件,其最新构造活动导致了本区多次历史及现今地震的发生,这些活动构造带是本区未来潜在地震的震源区。

1.2 玉门 5.9 级地震的发震构造特点

2002 年 12 月 14 日在酒西盆地南缘发生了一

次 $M_s 5.9$ 地震,极震区位于玉门市早峡煤矿和妖魔山一带,震中烈度Ⅶ度,极震区呈长椭圆形,长轴走向 $N65^\circ W$ (图 1)^[15]。前人对该次地震发震构造的认识存在一定的分歧:有人认为其发震构造为祁连山北缘断裂带西段的早峡—大黄沟断裂^[15-16];或者为玉门断裂^[14];也有人认为是上述两条断裂共同孕育了该次地震^[16]。玉门 $M_s 5.9$ 地震区主要涉及了祁连山北缘断裂带早峡—大黄沟断裂和玉门断裂,其中早峡—大黄沟断裂全长约 160 km,断裂活动方式以挤压逆冲或逆掩推覆为主,垂直运动的标志较为清楚,晚更新世以来未发现水平扭错现象,仅有间歇性的缓慢抬升运动^[12],未见晚第四纪活动的证据,其新活动性较弱。而玉门断裂以大红泉为界,东段靠近北大河和骨头泉一带山前洪积扇上断层陡坎连续分布,局部发育新鲜的自由面,属于全新世晚期活动断裂。探槽揭露该段断裂最新一次构造活动的垂直断距为 0.8 m,全新世以来的垂直滑动速率为 0.26 mm/a ^[13]。该断裂西段在玉门市、青草湾一带多呈隐伏状或表现为隐伏逆断裂—褶皱带。

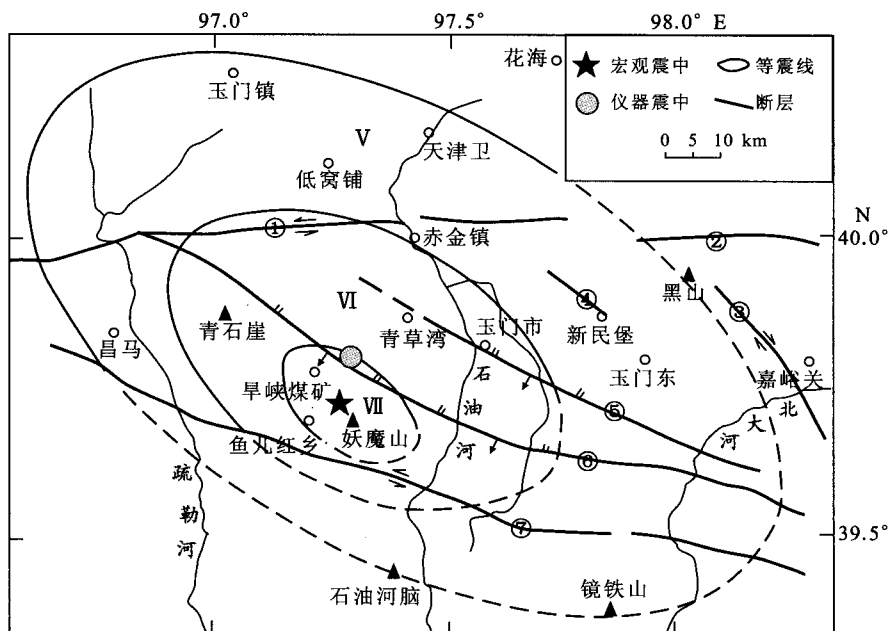
玉门 $M_s 5.9$ 地震的“对称交叉型”前震分布图像,反映了区域上阿尔金构造带和祁连山构造带交汇部位的孕震背景^[18]。而且小震精确定位的研究结果表明(图 2)^[19],在地震区下部存在一个明显的界面,主震震中即位于该界面附近,而其后的绝大多数小震均位于该界面之上,界面以下基本没有地震发生,推测该界面为北祁连山前逆冲推覆构造带的滑脱面。从图 2 可见,玉门 $M_s 5.9$ 地震及其后的小震活动不仅分布在早峡—大黄沟断裂上,向前延伸也分布在玉门断裂上。这表明本次地震不应简单地看作为单一断裂破裂的结果,而应是早峡—大黄沟断裂和玉门断裂所构成的逆断裂—褶皱带新活动的结果。该构造带为全新世活动的盲逆断裂—褶皱带,其最新构造活动表现为逐渐向盆地内部挤压扩展的逆冲作用。由此可见,酒西盆地的孕震和发震构造有别于单一的走滑活动断裂带,其潜在震源区范围和震级上限的确定有其特殊性。

2 酒西盆地周缘潜在震源区综合判定

2002 年玉门 $M_s 5.9$ 地震发震构造的 2 条断裂中,早峡—大黄沟断裂可能为祁连山北缘逆冲推覆构造带的主断裂,以垂直运动为主,而其前锋断裂则为玉门断裂,晚第四纪期间其新活动明显。因此依据地震构造类比的原则,其潜在震源区范围应沿北祁连山北缘与酒西盆地的交接带划分,将其作为一

个统一的活动构造系或发震构造带来考虑。该潜源区北侧以玉门断裂为边界,呈近东西向展布,包括了北祁连山北缘断裂带的早峡一大黄沟断裂、玉门断裂两条断层,其宽度约 21 km(图 3 中 3 号潜源)。同样,基于中国地震烈度区划图(1990)和中国地震动参数区划图(2001)的潜在震源区划分方案^[20-21],并充分吸收近年来不同研究者对酒西盆地及其周缘活动断裂的最新研究成果,划分了酒西盆地的潜在震源区(图 3)。其中昌马潜在震源区(1 号)为昌马全新世活动断裂带,其上曾发生过 1932 年昌马 7.6 级地震,震级上限定为 8.0 级;金佛寺潜在震源区(8 号)沿佛洞庙—红崖子断裂划分,其上曾发生过

1609 年 7 $\frac{1}{4}$ 级地震,震级上限确定为 7.5 级;2 号赤金堡潜在震源区主要依据阿尔金断裂东段而划分,震级上限为 7.0 级;4 号宽滩山潜在震源区依据宽滩山断裂和黑山山前断裂而划分,震级上限为 7.0 级;6 号金塔南山潜在震源区沿梧桐墩北至金塔县南的金塔南山断裂而划分,震级上限为 7.0 级;7 号嘉峪关潜在震源区主要依据嘉峪关断裂而划分,震级上限为 7.0 级。花海子潜在震源区(5 号)以花海隐伏断裂为主的一组帚状构造而划分,震级上限为 6.5 级;镜铁山潜在震源区(9 号)包括昌马—俄博左旋走滑断裂带的小东沟—洪水坝河三岔河段及肃南—祁连段等多条次级断层,断层连续性差,活动性



①阿尔金断裂; ②金塔南山北缘断裂; ③嘉峪关断裂; ④新民堡断裂;
⑤玉门断裂; ⑥早峡一大黄沟断裂; ⑦昌马断裂

图 1 2002 年玉门 5.9 级地震等震线图(据何文贵等^[15])

Fig. 1 Isoseismal line of Yumen M5.9 earthquake in 2002(From reference [15])

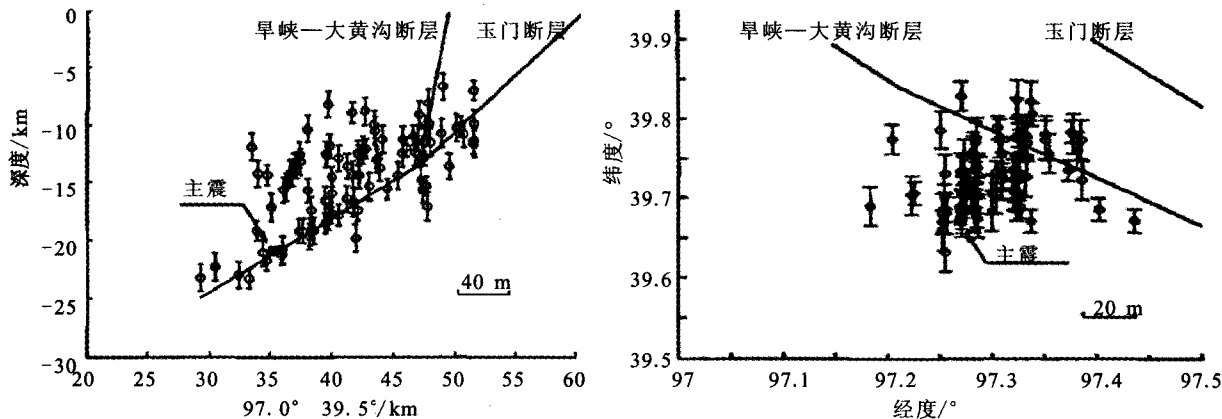


图 2 2002 年玉门 5.9 级地震序列震中分布图(据 Rong Dailu 等^[19])

Fig. 2 The epicenters of seismic sequences of Yumen M5.9 earthquake in 2002(From reference[19]).

不强,震级上限为 6.5 级。

3 玉门潜在震源区(3号)震级上限的判定

3.1 研究区历史地震可靠性与现代地震台网监测能力分析

研究区所在的河西走廊西端由于历史文化、地域等多方面原因,早期历史地震记载可能缺失较多。本区最早的地震记载为公元 180 年东晋时期(AD317—AD420)在玉门有地震记载;唐朝(AD618—AD907)在高台有地震记载;明清朝(AD1368—AD1911)在嘉峪关、金塔、临泽等地均有历史地震记载。特别是明朝时地方志开始兴起,破坏性地震的记载趋于完整。因此从明朝起的近 500 年里,研究

区 $M_s \geq 5.0$ 破坏性地震一般不会漏记。

另据甘肃省地震局(2005)编著的甘肃省地震监测志,自 1970 年以来至 1992 年期间河西西部地区台网监测能力相对较差,大致可达到 $M_L \geq 3.0$ 地震不漏记;而自嘉峪关无线遥测台网 1992 年 10 月建成以来,本区地震台网控制能力为 $M_L \geq 2.0$,稍偏远地区不会漏记 3.0 级以上地震。

由于中强地震与小震在释放能量上存在数量级差距,我们仍可以在同等地震监测能力条件下,综合完整记录的历史破坏性地震和现今小震记录(1970 年以来),来分析研究区内各个潜在震源区的地震能量释放率水平,为玉门潜在震源区(3号)的潜在地震最大震级的判定提供类比依据。

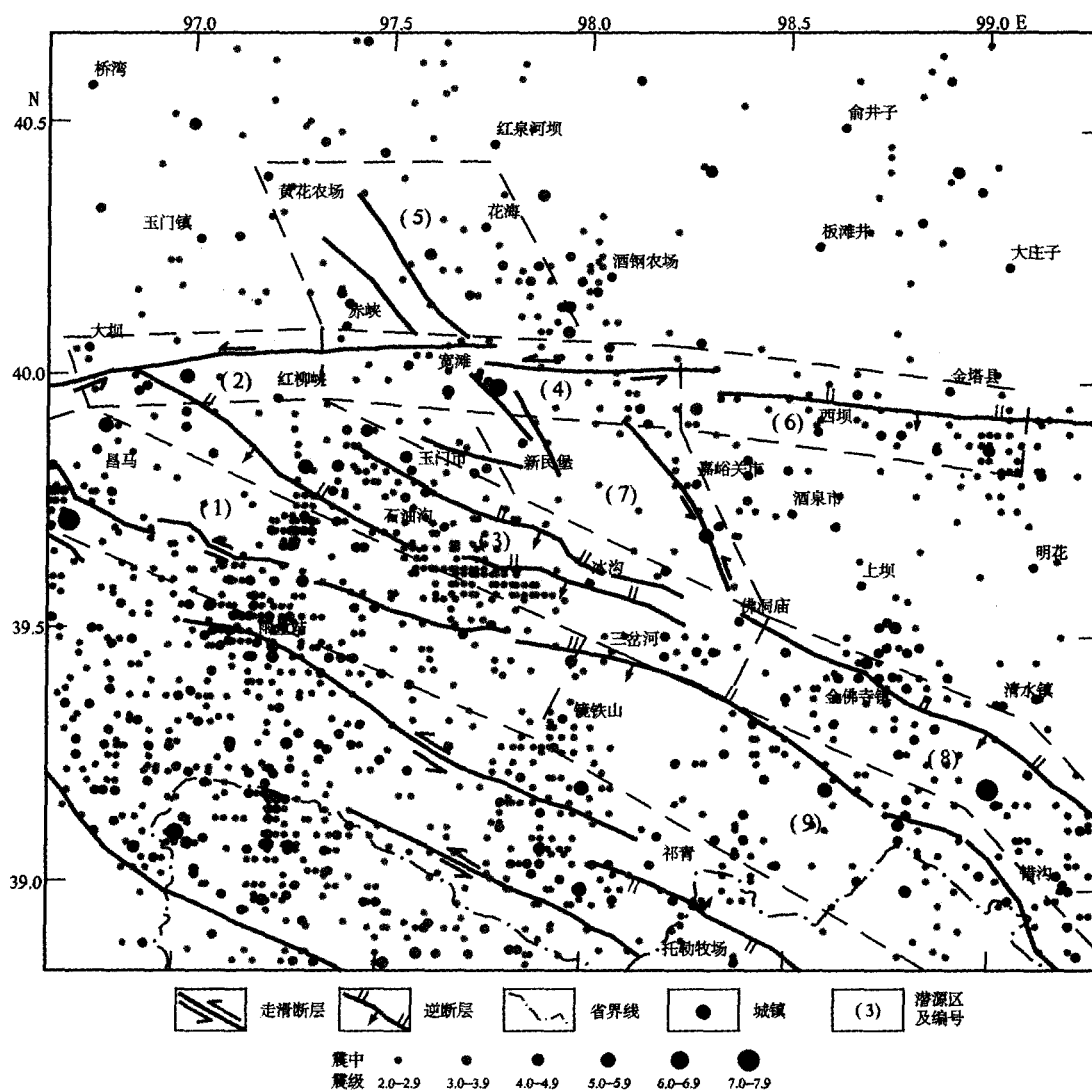


图 3 研究区潜在震源区示意图

Fig. 3 Sketch of potential seismic sources of Yumen basin.

3.2 单个潜在震源区地震能量释放水平对比

我们分别统计各单元在有完整破坏性地震记载以来的地震总能量释放水平,并按各统计单元的面积和统计时段的长度归一化。先将各统计单元在有完整记载的时间段(t_0-t_1)中 n 次 $M_s \geq 4.7$ 破坏性地震释放的能量 E 累加得到^[6]

$$\sum E_d = \sum_{i=1}^n E_i \quad (M_s \geq 4.7)$$

其中, t_0 为 2006 年, t_1 为 $M_s \geq 4.7$ 破坏性地震有完整记载的起始年限。然后再计算自有台网以来、在长度为(t_0-t_2)时段内释放的 k 次 $M_s < 4.7$ 级地震的能量总和 $\sum E_j$,并归算到总的时段(t_0-t_1)中,得到 $M_s < 4.7$ 地震释放总能量的估值^[6]:

$$\sum E_s = \frac{\sum_{j=1}^k E_j}{(t_0-t_2)} \times (t_0-t_1)$$

式中 t_2 为使用的 $M_s < 4.7$ 地震台网目录的起始年代,取 $t_2=1992$;

由公式 $\lg E = 1.5M_s + 4.8$ (单位为 J)^[22] 计算各统计单元在总时段长度(t_0-t_1)内地震释放的总能量估值^[6]

$$\sum E = \sum E_d + \sum E_s$$

最后,统计单元在单位时间和单位面积内释放的能量为^[6]

$$e = \frac{\sum E}{S \times (t_0-t_1)}$$

式中 S 为统计单元的面积,单位为 km^2 。

通过对研究区内 9 个潜在震源区归一化的地震能量释放率统计和类比发现(表 1,图 4),昌马(1 号)和金佛寺(8 号)潜在震源区属于地震能量释放率较高的一个水平档;赤金堡(2 号)、玉门(3 号)、宽滩山(4 号)和嘉峪关(7 号)潜在震源区属于同一水平档;花海子(5 号)、金塔南山(6 号)和镜铁山(9 号)潜在震源区为同一水平档。需要说明的是,其中的金塔南山潜在震源区主要是依据金塔南山北缘断裂而划分的。根据沿金塔南山北缘断裂的野外调查,它断错了现代冲沟的河床及最新一期的洪积扇,形成高约 30 cm 的陡坎。根据古地震的测年结果,最晚一次古地震约为 $0.495 \pm 0.39 \text{ ka}$ ^① 但距离其仅 30 余公里的酒泉市却没有史料记载,可能测试年龄偏新。不过可以说明该潜在震源区全新世晚期有一次地震,在现有地震记录及 500 年以前更早历史地震记录可能缺失的情况下,对其地震能量释放率的估算可能偏低。

3.3 玉门潜在震源区(3 号)震级上限判定

玉门潜在震源区(图 3 中 3 号)北侧以玉门断裂为界,南侧包括北祁连山北缘断裂带的旱峡一大黄沟断裂,总体呈近东西向展布。其中,玉门断裂东段发育高约 2 m 的断层陡坎,并有新鲜的自由面,断裂垂直断距 0.8 m,全新世以来垂直位错速率约为 0.26 mm/a ^[13]。本区现代小震活动比较密集成带,西段发生过 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震。考虑断裂规模和历史地震情况,根据构造类比原则,将其确定为 7 级潜在震源区。

表 1 各潜源区的地震能量释放率统计及其历史最大地震震级(500 年)

编号	潜在震源区	统计起始年代	面积 $S/10^3 \times \text{km}^2$	总释放能量 $\sum E/\text{J}$	单位时间、面积释放率 对数 $\lg e$	历史最大地震震级 / M_s
1	昌马	1506	3.53	1.59×10^{16}	9.95	7.6
2	赤金堡	1506	0.81	1.13×10^{13}	7.44	5½
3	玉门	1506	2.82	1.86×10^{14}	8.12	5.9
4	宽滩山	1506	1.28	3.55×10^{14}	8.74	6½
5	花海子	1970	2.78	2.39×10^{10}	5.37	3.7
6	金塔南山	1970	1.36	3.53×10^{10}	5.85	3.5
7	嘉峪关	1506	1.25	1.07×10^{13}	7.24	5.4
8	金佛寺	1506	2.81	3.98×10^{15}	9.44	7¼
9	镜铁山	1970	3.70	8.75×10^{10}	5.80	3.9

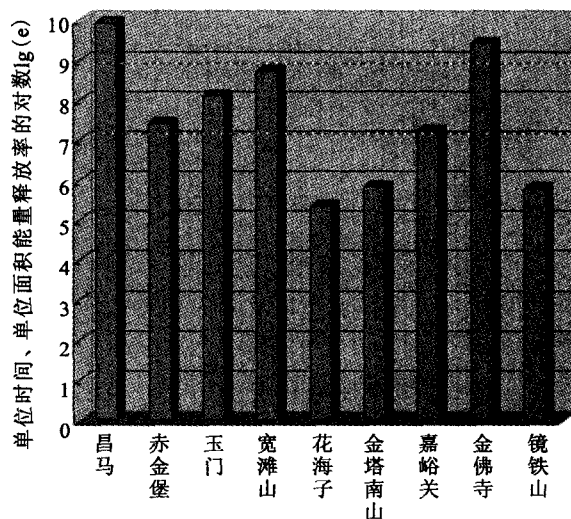


图 4 研究区各潜在震源区的地震能量释放水平直方图(500 年)

Fig. 4 Histogram of Seismic energy release of potential seismic sources in the study area(500 a).

根据中国地震动参数区划图(2001)潜在震源区划分结果,将赤金堡(2 号)、宽滩山(4 号)和嘉峪关

① 中国地震局地质研究所等,西部原油成品油管道工程场地地震安全性评价,2001.

(7号)潜在震源区的震级上限均定为 $M_s7.0$ 。假如这些潜在震源区震级上限确定是基本合理的话,根据前述分析,玉门潜在震源区(3号)的地震活动水平与上述3个潜在震源区近500年来的地震能量释放水平属于同一档次内。因此基于地震活动水平的类比分析,判定玉门潜在震源区的震级上限应为 $M_s7.0$ 。

4 结论与讨论

(1)酒西盆地为河西走廊西端的一个压陷性盆地,其内发育了多条晚第四纪活动的逆断裂—褶皱带,其新构造活动明显,是未来具有发生破坏性地震的潜在震源区。其中2002年发生的玉门 $M_s5.9$ 地震其发震构造即为酒西盆地南缘的早峡—大黄酒断裂与玉门断裂共同作用的结果。上述2条断裂组成一组晚第四纪活动的盲逆冲断裂—褶皱带,因此其潜在震源区范围应包括整个逆断裂—褶皱带。

(2)基于中国地震动参数区划图(2001)的潜在震源区划分方案,通过把酒西盆地及邻近地区9个潜在震源区的长期地震活动水平统一归算于500年来进行对比研究,发现不同震级档的潜在震源区基本处于各自的一个地震活动水平档上。其中玉门潜在震源区(3号)和赤金堡、宽滩山和嘉峪关等3个 $M_s7.0$ 潜在震源区的地震活动水平属于同一水平档次。结合研究区的地震构造背景、新构造活动及发震构造条件等因素,判定玉门潜在震源区的潜在地震最大震级为 $M_s7.0$ 。

(3)在现代小震监测能力较差且同类构造样本较少的情况下,可考虑采用研究区完整的历史破坏性地震记载,在相似条件下对研究区多个潜在震源区长期地震活动性水平进行归一化对比分析,然后根据地震活动水平进行类比分析来综合判定潜在震源区的震级上限。该方法可作为此类逆断裂—褶皱带潜在震源区震级上限判定的一个辅助手段。

[参考文献]

- [1] 张裕明. 几个术语的含义及地震构造区最大潜在地震评价[J]. 地震地质, 1993, 15(4): 375-380.
- [2] 鄢家全, 贾家娟. 我国东北和华北地区中强地震潜在震源区的划分原则和方法[J]. 中国地震, 1996, 12(2): 173-194.
- [3] 周本刚, 张裕明, 董瑞树, 等. 划分潜在震源区的地震地质规则研究[J]. 中国地震, 1997, 13(3): 241-252.
- [4] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [5] 杨晓平, 邓起东, 张培震, 等. 北天山地区活动逆断裂—褶皱带构造与潜在震源区估计[J]. 地震地质, 1998, 20(3): 193-200.
- [6] 朱金芳, 徐锡伟, 黄宗林, 等. 福州市活断层探测与地震危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 343-375.
- [7] 陈志泰, 张锋. 中法活断层合作研究取得进展[A]//中国地震年鉴[G]. 北京: 地震出版社, 1987: 321-324.
- [8] 魏顺民, 向宏发, 陈志泰, 等. 中法双方科研人员在中国甘肃省河西地区进行活断层合作考察[J]. 国际地震动态, 1987, (5): 17-19.
- [9] 魏顺民, 向宏发, 黄昭, 等. 河西走廊南缘断裂第四纪活动断裂的考察[A]//中国地震年鉴[G]. 北京: 地震出版社, 1987: 263-268.
- [10] 向宏发, 魏顺民, 才树华, 等. 祁连山北缘断裂带第四纪运动特征的初步研究[J]. 华北地震科学, 1988, 6(3): 1-9.
- [11] 向宏发, 魏顺民. 河西走廊玉门—嘉峪关地区活动断裂的初步研究[A]//现代地壳运动研究[G]. 北京: 地震出版社, 1990: 139-145.
- [12] 国家地震局地质研究所. 祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [13] 闵伟, 张培震, 何文贵, 等. 酒西盆地断层活动特征及古地震研究[J]. 地震地质, 2002, 24(1): 35-44.
- [14] 陈柏林, 刘建生, 张永双, 等. 玉门断裂全新世活动特征及其与玉门地震的关系[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 138-142.
- [15] 何文贵, 赵广堃, 马尔曼, 等. 2002年甘肃玉门5.9级地震的地质背景研究[J]. 地震研究, 2004, 27(4): 363-368.
- [16] 陈永明, 赵广堃, 马尔曼, 等. 2002年玉门5.9级地震的震害特征及发震断裂[J]. 中国地震, 2003, 19(4): 431-436.
- [17] 刘小凤, 肖丽珠. 2002年12月14日玉门5.9级地震活动及序列特征[J]. 华南地震, 2003, 23(2): 31-39.
- [18] 董治平, 程建武, 康庆强, 等. 祁连山构造带中强地震前震前震活动探讨[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 49-55.
- [19] Rong Dailu, Li Yarong. Study on the generating fault and mechanism of the $M5.9$ Yumen earthquake on Dec. 14, 2002, according to the accurate locating of the seismic sequences using the double-difference earthquake location algorithm[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 223-227.
- [20] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1990)说明书[S]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准管理委员会. 中国地震动参数区划图(GB18306—2001)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [22] Gutenberg B, Richter G F. Magnitude and energy of earthquakes[J]. Ann., Geofis., 1956, 9: 1-15.