

## 太原盆地地震潜势分析\*

张井飞 谢富仁 荆振杰 杜 义 黄学猛

(中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

**摘 要** 将太原盆地划分为4个区段,利用近年来在各区段取得的古地震数据,通过实时概率模型,对每个区段分别进行强震潜势的定量评估。得出太原-文水区与太谷区未来50年内发生7级以上强震的概率分别为7.1%和15%,100年内为13.9%与27.8%,而介休-平遥区与汾阳区发生7级以上强震的可能性极小。

**关键词** 太原盆地;活动断裂;地震潜势;地震构造;实时概率模型

**中图分类号**:P315.5

**文献标识码**:A

## ANALYSIS OF SEISMIC POTENTIAL IN TAIYUAN BASIN

Zhang Jingfei, Xie Furen, Jing Zhenjie, Du Yi and Huang Xuemeng

(*Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085*)

**Abstract** The Taiyuan basin is divided into four sections: the Taiyuan-Wenshui area and the Fenyang area, the Taigu area and the Jiexiu-Pingyao area. The paleoearthquake data obtained in recent years in Taiyuan basin is analysed, with real-time probability model, the quantitative assessment of earthquake potential is carried out for above each section. The probability of earthquake occurrence in the Taiyuan-Wenshui area, the Taigu area in the next 50 years are 7.1%, 15%, in the next 100 years are 13.9%, 27.8%, while the Fenyang and the Taigu areas have very low possibility of earthquake larger than magnitude 7.

**Key words**: Taiyuan basin; active fault; seismic potential; seismotectonics; real-time probability model

### 1 引言

山西断陷盆地是鄂尔多斯断块与太行山断块的分界构造带。GPS观测结果表明<sup>[1]</sup>,鄂尔多斯断块与太行山断块间的差异运动明显,为右旋剪切拉张状态。太原盆地位于山西断陷带中部,为地震多发盆地。前人对山西断陷带的地震危险性进行过一些研究,徐锡伟等<sup>[2]</sup>根据历史地震资料和太原盆地张性倾滑分量较大的特点,认为太原盆地最大震级在6~6.5级左右。易桂喜等<sup>[3]</sup>将太原盆地划分为

南(介休-汾阳段)北(太原-徐沟段)两段,认为介休-汾阳段处于较高水平的应变积累和较低水平的地震矩释放阶段,太原-徐沟段的应变积累水平中等偏低,并估算出此段的强震复发间隔为:M6.5~7.0地震的平均复发间隔为510~1430年。刘静<sup>[4]</sup>曾给出交城断裂中段未来20年、50年、100年发生强震的条件概率分别为<0.09%、<0.22%、<0.43%。但当时关于交城断裂的活断层资料还相当少<sup>[5]</sup>,评估结果的不确定性很大。近年来,在交城断裂及太谷断裂开展了大量的地质调查<sup>[6-8]</sup>,积累了丰富的

\* 收稿日期:2011-02-09

基金项目:中国地震局地震行业科研专项(200908001)

作者简介:张井飞,男,1986年生,硕士,主要从事活动构造及地震危险性研究. E-mail: zjf. csu@163. com

古地震资料,为太原盆地地震潜势的评估提供了新的数据。

2 太原盆地区段的划分

太原盆地内断层发育,主要有北东向、北北东向和北西向 3 组,其中北东向断层规模最大,基本控制着太原盆地的地貌格局。太原盆地总体走向北东,平面展布呈一矩形,长约 150 km,最宽处约 40 km。自西北向东南,分别为吕梁山、太原盆地和太岳山脉。盆地基底起伏不平,主要分为 4 个基底构造地貌单元(图 1)。西谷-南庄凹陷位于盆地中部西侧,基底由东南向西北倾斜,该区东南侧基底埋深仅 400 m,而西北侧深达 3 000 ~ 3 800 m。侯城-平遥陷隆位于西谷-南庄凹陷东南,基底受不同方向断层的切割,埋深从 200 ~ 800 m 不等,西侧断裂处下陷深至 600 ~ 800 m,陷隆宽度为 5 ~ 15 km。孝义断阶位于太原盆地的西南端,边界受北西向断裂和北东向断裂控制,基底埋深 600 ~ 1800 m 不等。太原断陷位于太原盆地的西北端,南北长 40 km,东西宽 10 ~ 15 km,断陷西侧有一条近南北向断层,由于它的活动使其东侧靠近断层处陷落深达 1000 m,向东逐渐变浅,呈一向西倾斜的断陷。

称性,交城断裂较太谷断裂活动性要强。

交城断裂在黄村镇西被突出的山嘴基岩分隔为南北两段,盆地西南角为交城断裂的南段控制,西北角为交城断裂的北段控制,交城断裂向北伸入太原凹陷,被石岭关隆起阻挡。盆地的西南角为太谷断裂的南段控制,太谷断裂在此处继续向南延伸与绵山西侧断裂相接,盆地东北角为太谷断裂北段控制,太谷断裂在此处也被基岩阻挡而终止。两条断裂在构造的延伸性上,具有中心对称的特点。

2.1 交城断裂分段

交城断裂北段交城-清徐一线上新世活动速率为 0.45 mm/a,早更新世活动速率为 0.33 mm/a,中更新世以来活动速率为 0.38 mm/a<sup>[9]</sup>。该段活动强度有减缓趋势,但同南、中两段相比,仍保持较大的活动速率。断裂的南段,即汾阳地区,活动强度次之。上新世、早更新世及中更新世以来活动速率分别为 0.23 mm/a、0.20 mm/a、0.43 mm/a,活动强度稍有增加。断裂的中段,上新世、早更新世及中更新世以来的活动速率分别为 0.37 mm/a、0.34 mm/a、0.29 mm/a,活动强度呈减缓趋势<sup>[9]</sup>。

谢新生等<sup>[10]</sup>通过断层沿线多个大探槽古地震事件的对比,认为交城断裂南段全新世不活动,北段及中段全新世存在多期活动,并具有同步性,它们在全新世共同发生过 3 次 7 级以上强震。从强震破裂的角度,交城断裂北段和中段不存在分段问题,因此,北段和中段可看作同一个破裂段,从文水向南的段落全新世不活动,单独为一段。本研究采用以文水为界的南北两段的破裂分段方式。

2.2 太谷断裂分段

太谷断裂太谷县后山盘道地区上新世、早更新世和中更新世以来的活动速率分别为 >0.11 mm/a、0.11 mm/a、0.31 mm/a,有增强趋势。断裂南段的洪山-东泉一线,活动强度稍小,上新世、早更新世和中更新世以来的平均速率分别为 >0.01 mm/a、0.13 mm/a、0.25 mm/a,呈增强趋势。北段范村一带活动强度小,上新世、早更新世和中更新世以来的平均速率分别为 >0.03 mm/a、0.14 mm/a、0.24 mm/a<sup>[9]</sup>。

根据笔者在太谷断裂的野外调查及探槽开挖,在介休市上曹麻村南的探槽中,距地表 2 m 左右的一层红黏土的断距达 9 m 以上,在断面附近发现大量沙土液化现象。而在上曹麻以北 30 km 的北贾村附近发现的断层剖面,红黏土的断距只有 0.5 m。由此认为,在太谷断裂南段的石屯-常乐段,受临汾盆地霍山山前断裂活动的影响最大,活动性较强,向北逐渐减弱。在峪口以北,太谷断裂活动已不受霍



图 1 太原盆地新生界等厚线及基底构造单元  
Fig. 1 Isopach of cainozoic and basal tectonic units in Taiyuan basin

太原断陷盆地北以石岭关横向隆起与忻定断陷盆地相连,南以灵石隆起与临汾盆地相接。西部的交城断裂和东部的太谷断裂是控制盆地边界的主要断裂<sup>[6,7]</sup>。盆地内的深断陷带沿交城断裂带分布,东部的太谷断裂断陷幅度相对较小,盆地具有西深东浅的特点。盆地的新构造运动表现出明显的不对

山山前断裂的影响,它的活动具有独立性。由此,以峪口为界,将太谷断裂分为南北两段(图2)。

2.3 太原盆地地震震中分布特征

从图2我们可以看出,作为一个活动盆地,地震集中分布在盆地内部,山区也有个别相对较密集的地段,如太原东边的山地、平遥以东的山地。这与两条边界断裂都倾向盆地内部有关。以盆地中轴线为界分为两个条带,它们具有相对独立的震中密集区。地震震中呈现盆地西北角太原凹陷附近与东南角介休附近相对密集,而东北角晋中附近与西南角汾阳附近相对稀疏的特征,这与盆地构造上的中心对称相一致。

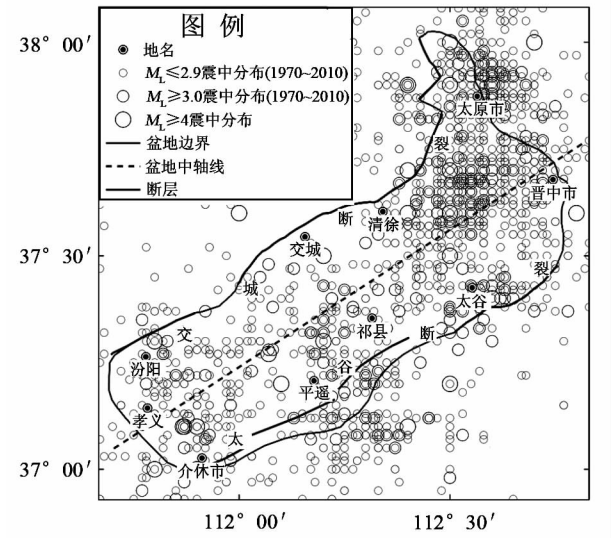


图2 太原盆地地震震中分布  
Fig.2 Distribution of epicenters in Taiyuan basin

2.4 区段划分

根据太原盆地两条主控断裂的分段活动性、地震活动及构造地貌特征,将太原盆地划分为太原-文水、汾阳、介休-平遥和太谷4个评估区段(图3)。太原-文水区和汾阳区的主要发震构造分别是交城断裂北段和交城断裂南段,它们的界限在文水附近,即交城断裂南北两段的分界点。介休-平遥区和太谷区的主要地震构造为太谷断裂南段和太谷断裂北段,它们的界限在峪口,即太谷断裂南北两段的分界点。

太原-文水区和汾阳区与介休-平遥区和太谷区的分界基本就是盆地纵轴线。太谷断裂和交城断裂基本都与盆地纵轴线平行,它们各自控制着盆地两个边界的地震活动,而图2地震震中分布也显示出了这个特征。盆地纵轴线西北一侧较东南一侧断陷速度快,沉降幅度大,存在差异,以盆地纵轴线作为分区界线较为合理。

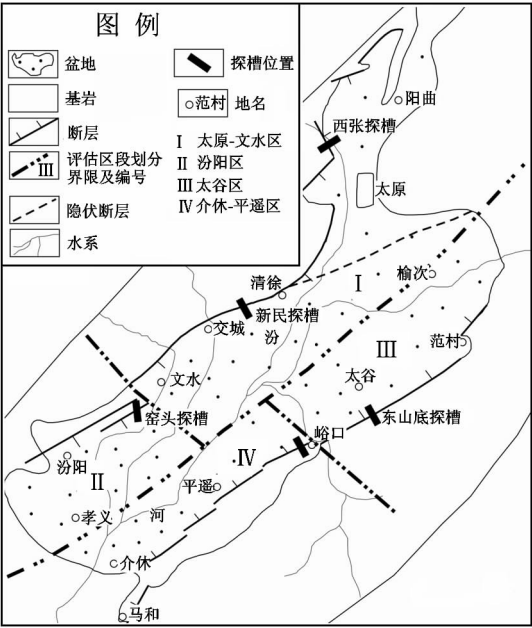


图3 太原盆地评估区段划分  
Fig.3 Partition of estimated sections in Taiyuan basin

3 地震潜势评估

3.1 评估方法

地震复发的条件概率公式为:

$$P_e(t_e \leq t \leq t_e + \Delta t) = \frac{\int_{t_e}^{t_e + \Delta t} f(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt} = \frac{F(t_e + \Delta t) - F(t_e)}{1 - F(t_e)}$$

(1)

其中 $t_e$ 为离逝时间, $\Delta t$ 为预测的时间段, $f(t)$ 为概率密度函数, $F(t)$ 为概率分布函数。利用此方法进行地震潜势的评估,需要具备的数据有目标区最后一次特征地震的离逝时间以及特征地震平均复发间隔。

古地震序列的平均复发间隔,按

$$T = \exp[\ln T_{av} - (\mu_D + 0.5\sigma_D^2)]$$

(2)

计算<sup>[11]</sup>。其中, $T_{av}$ 是复发间隔的算术平均值, $\mu_D$ 是分布的均值, $\sigma_D$ 是不同轮回特征地震复发间隔 $T$ 的对数 $\ln T$ 的“内在不确定性”的数值估计。

3.2 地震平均复发间隔

表1为交城断裂北段古地震资料,两个探槽揭示的3次同步事件分别为E1:2 748 ± 100 a,E2:5 910 ± 510 a,E3:8 350 ± 90 a~8 360 ± 710 a。事件E3取平均年龄为8 355 ± 357 a。

利用式(2)计算得到的交城断裂全新世古地震复发间隔中位数估计结果见表2。

表 1 交城断裂全新世古地震事件一览

Tab. 1 Holocene paleoearthquake events in the Jiaocheng fault

区段	具体位置	事件时间 (BP)
太原文水区	清徐新民探槽	2 748 ± 100 a
	清徐新民探槽	5 910 ± 510 a ~ 4 037 ± 120 a
	清徐新民探槽	8 360 ± 710 a ~ 5 910 ± 510 a
	太原西张探槽	3 740 ± 60 a ~ 3 060 ± 260 a
	太原西张探槽	8 350 ± 90 a ~ 3 740 ± 60 a
	太原西张探槽	10 660 ± 850 a ~ 8 350 ± 90 a
汾阳区	全新世不活动	

表 2 交城断裂北段古地震事件的复发间隔中位数

Tab. 2 Recurrence interval median of paleoearthquakes on the north section of Jiaocheng fault

位置	地震事件	距今年龄 (a)	复发间隔 (a)	变异系数	复发间隔中位数 (a)
		$\bar{t} \pm S_t$	$T_i \pm S_{T_i}$	$S_{T_i}/T_i$	$\bar{T} \pm S_T$
太原	E1	2 748 ± 100	3 162 ± 520	0.165	2 767 ± 581
文水	E2	5 910 ± 510			
区	E3	8 355 ± 357	2 445 ± 622	0.254	( $\sigma_T = 0.210$ )

文献[7]获得的太谷断裂南、北段的古地震资料如表 3 所示。南段(介休-平遥区)3 次事件分别取 E1:707 a,E2:3 500 a,E3:6 400 a。北段(太谷区)3 次事件的分别为 E4:3 000 a,E5:4 700 a,E6:7 800 a。

表 3 太谷断裂古地震数据

Tab. 3 Paleearthquake data in the Taigu fault

区段	具体位置	事件时间 (BP)
介休平遥区	南段历史地震	707 a(1303 年洪洞 8 级地震)
	祁县下闫灿探槽	3 350 ± 150 a 之后
	祁县下闫灿探槽	3 977 ± 150 a ~ 8 110 ± 690 a
太谷区	太谷县东山底探槽	3 880 ± 150 a 之后
	太谷县东山底探槽	4 450 ± 170 a 之前
	太谷县东山底探槽	7 750 ± 660 a 之后

利用式(2)计算得到的太谷断裂古地震复发间隔的中位数如表 4。

3.3 各区段发震条件概率

根据文献[12],计算地震复发的条件概率公式分别为:

$$F_N(t) = \Phi\left[\frac{t_e/\bar{T} - 1.0}{0.20}\right] \tag{3}$$

$$F_{LN}(t) = \Phi\left[\frac{\ln(t_e/\bar{T}) + 0.02}{0.205}\right] \tag{4}$$

对各区段按照公式(1),分别用正态分布、对数正态分布计算未来 100 年、200 年大地震复发的条件概率,结果列于表 5。

表 4 太谷断裂古地震事件的复发间隔中位数

Tab. 4 Recurrence interval median of paleoearthquakes in the Taigu fault

位置	地震事件	距今年龄 (a)	复发间隔 (a)	变异系数	复发间隔中位数 (a)
		$\bar{t} \pm S_t$	$T_i \pm S_{T_i}$	$S_{T_i}/T_i$	$\bar{T} \pm S_T$
介休平遥区	E1	707a	2 793 a	0	2 847 ± 433 a
	E2	3 500 a			
	E3	6 400 a	2 900 a	0	( $\sigma_T = 0.152$ )
	E4	3 000 a	1 700 a	0	2 400 a ± 365 a
太谷区	E5	4 700 a			
	E6	7 800 a	3 100 a	0	( $\sigma_T = 0.152$ )

表 5 各段强震发生 7 级以上强震的条件概率

Tab. 5 The conditional probabilities of occurrence of earthquakes of over 7 in each section

评估区段	正态分布		对数正态分布	
	50 年	100 年	50 年	100 年
太原-文水区	7.1%	13.8%	7.1%	14%
汾阳区	-	-	-	-
太谷区	16.9%	31.3%	13.1%	24.3%
介休-平遥区	0.01%	0.01%	0	0

由表 5 可以看出,太原-文水区和太谷区未来 50 年的发震概率平均为 7.1%、15%,未来 100 年平均为 13.9%、27.8%,危险性较高,原因在于,虽然在太原-文水区和太谷区发现了古地震事件,但在漫长的有人类记载的时期并没有发生大地震,而这段时期与这两个地区的大震复发周期较为接近。介休-平遥区由于经历了 1303 年洪洞 8 级地震,离逝时间较短,与本区的大震复发周期差距较大,应力水平还未恢复,因此,近期发生强震的可能性极小。汾阳区没有全新世活动的证据,没有给出定量评估结果。

4 结论与讨论

1)利用活动断层探测等资料,估计太原盆地太原-文水区未来 50、100 年内发生 7 级以上地震的概率为 7.1%、13.9%,太谷区未来 50、100 年的发震生 7 级以上地震概率较高,分别为 15% 和 27.8%,汾阳区和介休-平遥区未来 50、100 年内的发震概率很低。

2)太原-文水区内的交城断裂北段地震平均复发间隔为 2 767 年,最新古地震事件距今 2 748 年,尽管小震频繁,但历史上没有 7 级以上大震记载,因此,未来 100 年发生大震的危险性仍然较高。太谷区较高的发震概率原因与太原-文水区相同。介休-平遥区平均复发间隔为 2847 年,最新事件是 707 年前的洪洞大地震,应力释放较充分,离逝时间短,

现今应力积累水平较低,因此,未来 100 年发生 7 级以上地震的概率很低。

3)综合前面所述,以及前人对洪洞地震等大震的研究结果,认为太原地区未来的强震发震模式可能为以下几种:太谷区(太谷断裂北段)和太原-文水区(交城断裂北段)单独发震,震级在 7.0 级左右;太谷区(太谷断裂北段)或太原-文水区(交城断裂北段)发生大震,并突破盆地之间的障碍体,诱使相邻的几条断裂随之产生破裂、发震,震级可能达到 8.0 级左右。

参 考 文 献

1 杨国华,等. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制[J]. 地球物理学报,2001,44(5):645-653. (Yang Guohua, et al. Current horizontal deformation and kinematic mechanism of major tectonic units and boundary zones in north China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001,44(5):645-653)

2 徐锡伟,等. 山西地堑系强震的活动规律和危险区段的研究[J]. 地震地质,1992,14(4):305-316. (Xu Xiwei, et al. Study on strong earthquake activity and risk areas in the Shanxi graben system[J]. Seismology and Geology, 1992,14(4):305-316)

3 易桂喜,闻学泽,徐锡伟. 山西断陷带太原-临汾部分的强震平均复发间隔与未来危险段落研究[J]. 地震学报,2004,26(4):387-395. (Yi Guixi, Wen Xueze and Xu Xiwei. Average recurrence intervals of strong earthquakes and potential risky segments along the Taiyuan-Linfen portion of the Shanxi graben system[J]. Acta Seismological Sinica, 2004,26(4):387-395)

4 刘静,汪良谋. 运用活断层资料评价汾渭地震带中长期强震危险性[J]. 地震学报,1996,18(4):427-436. (Liu Jing and Wang Liangmou. Using active fault data to evaluate long-term earthquake risk in Fenwei earthquake zone[J]. Acta Seismological Sinica, 1996,18(4):427-436)

5 江娃利,聂宗笙,张康富. 山西交城断裂错断全新世洪积扇[J]. 地震地质,1992,14(3):534. (Jiang Wali, Nie

Zongsheng and Zhang Kangfu. The dislocated Holocene alluvial-diluvial fans related to the activity of the Jiaocheng fault in Shanxi province[J]. Seismology and Geology, 1992, 14(3):534)

6 江娃利,等. 山西断陷系交城断裂全新世古地震活动初步研究[J]. 地震研究,2004,27(2):184-190. (Jiang Wali, et al. Preliminary study on activity of Holocene paleoearthquakes along the Jiaocheng fault in the Shanxi downfaulted system[J]. Journal of Seismological Research, 2004,27(2):184-190)

7 谢新生,等. 山西太谷断裂带全新世活动及其与 1303 年洪洞 8 级地震的关系[J]. 地震学报,2004,26(3):281-293. (Xie Xinsheng, et al. Holocene activities of the Taigu fault zone, Shanxi province, in relation to the 1303 Holocene  $M=8$  earthquake[J]. Acta Seismological Sinica, 2004, 26(3):281-293)

8 谢新生,等. 山西交城断裂带西张探槽全新世古地震研究[J]. 地震地质,2007,29(4):744-755. (Xie Xinsheng, et al. Study on Holocene paleoearthquake in Xizhang trench on the Jiaocheng fault zone, Shanxi province[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(4):744-755)

9 王乃樑,等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京:科学出版社,1996. (Wang Nailiang, et al. Cenozoic deposits and tectonic geomorphology of Shanxi graben[M]. Beijing:Science Press, 1996)

10 谢新生,等. 山西交城断裂带多个大探槽全新世古地震活动对比研究[J]. 地震地质,2008,30(2):412-430. (Xie Xinsheng, et al. Comparative study on Holocene paleoseismic activities among multi-trenches along the Jiaocheng fault zone, Shanxi[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(2):412-430)

11 闻学泽. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京:地震出版社,1995. (Wen Xueze. Quantitative estimates of seismic potential on active faults[M]. Beijing: Seismological Press, 1995)

12 Nishenko and Buland. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4):1382-1399.