

文章编号: 0253-3782(2004)04-0387-09

山西断陷带太原—临汾部分的强地震平均复发间隔与未来危险段落研究^{*}

易桂喜^{1,2)} 闻学泽²⁾ 徐锡伟³⁾

1) 中国成都 610059 成都理工大学

2) 中国成都 610041 四川省地震局

3) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

摘要 1303 年山西洪洞 M_8 大地震距今已 700 年。为了分析长期地震危险性, 本文将山西断陷带太原—临汾部分划分为 5 个震源段, 根据历史地震和 GPS 观测资料, 估算出各段的平均地震矩率与强地震平均复发间隔, 进而根据最近 30 多年的台网地震资料计算获得的 b 值图象, 分析不同段落现今应力积累的相对水平。主要结果表明: 临汾盆地段的平均地震矩率为 $2.21 \times 10^{16} \sim 3.03 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{a}$, $M_{7.5}$ 地震的平均复发间隔估值为 1 560~2 140 a。灵石—洪洞段 M_8 地震的平均复发间隔估值在 4 300~5 100 a 之间, 相当于平均矩率为 $2.58 \times 10^{16} \sim 3.10 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{a}$ 。 b 值图象显示灵石—洪洞段与临汾盆地段现今处于低或较低的应力水平, 可能反映自 1303 年 M_8 和 1695 年 $M_{7.5}$ 大地震破裂后, 这两段的断面强度至今仍未恢复。侯马段和介休—汾阳段具有相对较高的应力水平, 并结合平均复发间隔估值, 判定这两个段落可能是未来强震的潜在危险段。

关键词 历史地震 震源段 地震矩率 平均复发间隔 潜在危险段

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A

引言

山西省是我国历史地震记载早、资料丰富的地区之一。公元 4 世纪起山西临汾、大同两地及其附近已能记载重要的地震事件, 13 世纪起太原—临汾地区的强震事件记载逐渐完整, 同时也能记载到较多的有感和轻破坏地震事件(山西省地方志编纂委员会, 1991; 齐书勤, 1993)。这样的历史地震资料是不可多得的。我们曾经利用这些资料研究山西断陷带的强地震复发行为与过程(易桂喜, 闻学泽, 2000; 闻学泽, 2000)。本文以历史地震资料为基础, 结合活动构造分析, 研究山西断陷带太原—临汾部分不同段落强地震的平均复发间隔。同时, 利用现代台网地震资料绘制研究区的 b 值图象, 以揭示不同段落现今的相对应力水平与断层活动习性, 并进一步判定未来强震的可能危险地段。

1 活动构造与历史强震震源分段

山西断陷带太原—临汾部分自北而南由太原盆地、灵石隆起、临汾盆地和峨眉台地等主要活动构造单元组成(图 1)。其中, 太原和临汾两个互呈左阶雁列的第四纪断陷盆地以

* 国家发展改革委员会“十五”科学工程“城市活断层试验探测”项目资助。

2003-10-28 收到初稿, 2004-01-07 收到修改稿, 2004-03-12 决定采用。

活动正断层为断陷边界。两盆地之间是北北东向以右旋走滑为主伴有正断分量(西盘相对下降)的霍山山前断裂。除最南面的峨眉台地外,其余构造单元或段落最近1 000年均发生过强震或大地震。

我们将山西断陷带太原—临汾部分划分为5个震源段:太原—徐沟段、介休—汾阳段、灵石—洪洞段、临汾盆地段和侯马段(图1),作为估算强震平均复发间隔的基本构造单元。

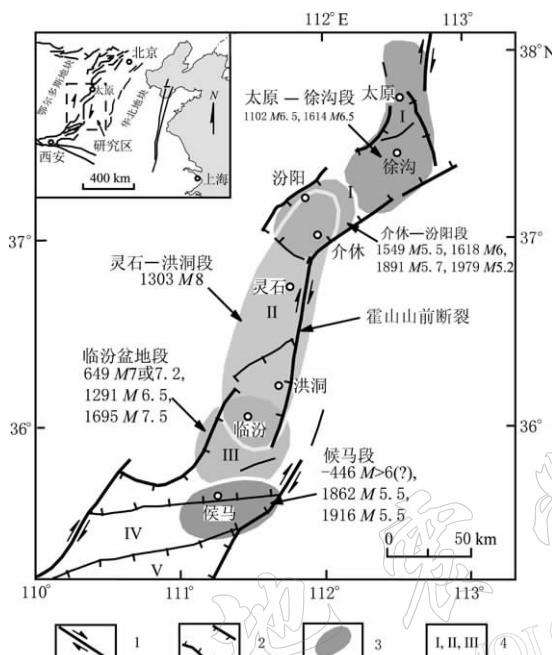


图 1 山西断陷带太原—临汾部分活动构造及历史震源区分布图

- 左上角索引图示意研究区与华北主要活动地块的关系。
断裂底图据邓起东等(1993)改编。
1. 走滑活动断裂;
2. 正倾滑活动断裂; 3. 历史强震区轮廓或大地震震源区;
4. 主要活动构造单元编号: I 为太原断陷盆地;
II 为灵石隆起; III 为临汾断陷盆地; IV 为峨眉台地; V 为运城断陷盆地

划分震源段的主要依据是历史强震和大地震震源区的空间分布,同时考虑活动构造上的分段标志。历史震源区由地震时的重破坏区(国家地震局震害防御司,1995;国家地震局地球物理研究所,复旦大学历史地理研究所,1990a, b, c;山西省地方志编纂委员会,1991)圈定;根据经验, $M8.0$ ±、 $M7.5$ ±和 $M6.7$ ±地震的震源尺度(或破裂延伸)可分别由烈度 \geqslant IX度、 \geqslant VIII度和 \geqslant VII度区的长度近似估计(闻学泽,2001)。活动构造上的分段标志主要指相对独立的断陷单元或断裂段,如临汾盆地、霍山山前断裂等。另外,相邻历史地震的震源之间可能有部分重叠,其边界划分还考虑了现今地震活动的空间分布。

如图1所示,太原—徐沟段是太原盆地的北段,属中、强震集中发生段,1102年以来已发生过2次 $M6.5$ 强震及多次中等和中强地震。介休—汾阳段属太原盆地南段,除了曾作为1303年洪洞大地震破裂的北段(闻学泽,2000)外,本身还发生过多次 $M=5.2\sim 6$ 地震。灵石—洪洞段沿右旋的霍山山前断裂展

布,是1303年大地震的主破裂段(徐锡伟,邓起东,1993)。临汾盆地段自649年以来至少发生过3次 $M=6.5\sim 7.5$ 地震,说明该盆地是一个相对独立的破裂单元。另外,1303年大地震破裂的南端也有可能进入临汾盆地北部(闻学泽,2000)。侯马段是临汾盆地与运城盆地之间的峨眉台地的东段,受控于两条北东东向次级活动断裂,是山西断陷带内部一处相对上升的活动构造单元,但最近数百年中仅发生过数次 $M=4.7\sim 5.5$ 地震。

2 地震平均复发间隔估计

2.1 方法

一个震源段或断裂段上给定震级 M 地震的平均复发间隔 T ,由相应的地震矩 M_0 与该段的地震矩平均年速率 V_{M_0} 之比估计

$$T = \frac{M_0}{V_{M_0}} \quad (1)$$

地震矩 M_0 由适用于中国大陆地区的经验公式^①

$$\lg M_0 = 0.89M + 13 \quad (2)$$

估计, 单位为 $N \cdot m$ 。式(1)的平均地震矩率 V_{M_0} 可由同一段落主要大小的历史地震资料估计。在过去 τ 年的历史时期中重复发生过 n (≥ 2) 次地震的断裂段, 其 V_{M_0} 估值之一为

$$V_{M_0} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=2}^n M_{0,i} \quad (3)$$

若主要地震的复发过程表现出时间可预报行为(Shimazaki, Nakata, 1980), 即地震矩越大, 至下一次地震的时间间隔越长时, V_{M_0} 的估值为

$$V_{M_0} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{n-1} M_{0,i} \quad (4)$$

公式(3)和(4)中的 $M_{0,i}$ 为第 i 次地震的矩。历史地震资料的完整性与震级的可靠性, 对于平均地震矩率的估算结果会有显著影响。本研究采用的地震事件及其震级以最新版的中国地震目录(国家地震局震害防御司, 1995; 中国地震局震害防御司, 1999)为准。对于少数事件的震级, 将依据有关研究成果考虑多种可能性, 并给出相应的说明。

对于缺少重复多次历史地震的记载, 但可获知可靠的近代断层平均滑动速率 V 的断裂段, 其地震平均复发间隔 T 的估计(闻学泽, 1995)为

$$T = \frac{\bar{D}}{V} \quad (5)$$

式中, \bar{D} 是震级为 M 的地震沿地表断层的同震平均位错。

2.2 结果与分析

由上述方法估计出 5 个震源段的平均地震矩率和不同震级地震的平均复发间隔, 结果列于表 1。其中 4 个段的地震矩随时间的积累过程如图 2 所示。现结合表 1 和图 2 对结果分析如下:

1) 候马段。本段及其附近最早记载的是公元前 446 年的一次强烈地震, 但有关记述过于简略而难以获得地震强度及主要破坏区的确切信息(山西省地方志编纂委员会, 1991)。在具有较完整记载的最近数百年中未发生过 $M \geq 6$ 的强震, 但 1291 年发生在邻段(临汾盆地段)的 $M 6.5$ 地震, 在本段的曲沃造成“坏民屋, 多压死者”的破坏(山西省地方志编纂委员会, 1991), 应是一次对本段有显著影响的地震。若以 1291 年作为本段有完整破坏性地震记载的起始时间, 则由式(3)估得平均地震矩率下限为 $0.28 \times 10^{16} N \cdot m/a$; 若以 1622 年以来的地震计算, 可由式(3)估得平均矩率上限为 $0.49 \times 10^{16} N \cdot m/a$ (图 2a)。据平均矩率上、下限可估计出 $M 6$ 、 $M 6.5$ 和 $M 7$ 地震的平均复发间隔为 $450 \sim 780 a$ 、 $1240 \sim 2200 a$ 和 $3500 \sim 6000 a$ 。该结果与本段自 1291 年以来未发生过 $M \geq 6$ 地震的事实(表 1)基本一致。

由图 1 看到: 本段仅包含山西活动断陷带宽度的一部分, 从而其长期的平均地震矩率理应低于那些包含整个断陷带宽度的段落。

2) 临汾盆地段。本段破坏性地震始记于公元 276 年前后, 唐朝以来可能不会漏记强震事件(山西省地方志编纂委员会, 1991), 并已至少记载到 3 次强震和大地震(表 1)。其中,

^① 国家地震局震源机制研究小组, 1973. 中国地震震源机制的研究, 第二辑, 1~77.

649 年地震的震级在最新版地震目录中定为 $6\frac{3}{4}$ 级(国家地震局震害防御司, 1995), 但丁国瑜(1998)从这次地震的死亡人数(5 000 余人)等方面进行论证, 并与山西断陷带北段 512 年代县地震($7\frac{1}{2}$ 级, 死亡 5 300 余人)进行对比, 认为震级应为 $7\frac{1}{2}$ 级. 我们认为 649 年地震应大于 $6\frac{3}{4}$ 级, 但考虑到临汾盆地的人口密度要比代县附近的大, 在同样造成 5 000 余人死亡的情况下, 649 年地震应比 512 年地震略小, 为 7.0 或 7.2 级的可能性更大. 另外, 本段 1695 年地震的震级有不同的方案($M7\frac{1}{2}$, $7\frac{3}{4}$ 和 8)(国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所, 1990c; 国家地震局震害防御司, 1995; 山西省地方志编纂委员会, 1991), 本研究取 $7\frac{1}{2}$. 由图 2b 看到, 这对本段平均地震矩率的计算结果不会有影响.

表 1 山西断陷带 5 个段落的平均地震矩率与复发间隔估值

震源段	主要历史地震		地震矩率 V_{M_0} $/10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$	断层平均 滑动速率 mm/a	地震平均复发间隔 T/a			
	年-月	M			$M=6.5$	$M=7$	$M=7.5$	$M=8.0$
侯马	-446-00	>6 (?)	0.28~0.49	1240~2200	3500~6000			
	(1291-08	6.5)						
	1622-06	4.7						
	1862-12	5.5						
	1916-08	5.5						
	1989-12	4.9						
临汾 盆地	649-09	7 或 7.2	2.21~3.03	200~280	560~770	1560~2140		
	1291-08	6.5						
	(1303-09	8.0)						
	1695-05	7.5						
灵石— 洪洞	1303-09	8.0	(2.58~3.10)	1.5	640	1 800	4300~5100	
	(1303-09	8.0)						
	汾阳	5.5						
介休— 汾阳	1549-04	5.5		(M=5.2, $T=45$)				
	1618-05	6.0						
	1891-04	5.7						
	1979-06	5.2						
太原— 徐沟	1102-01	6.5	1.19 ($M \geq 6.5$)	510	1 430			
	1342-05	5.5						
	1366-08	5.7						
	1367-00	5.5						
	1614-10	6.5						
	1679-10	5.5						
	1883-06	5.5						

注: 表中第二栏括号内的地震是主破裂位于邻段, 但对本段有一定影响的地震事件.

本段包含山西断陷带的整个宽度, 由公元 649 年以来的强震以及公式(4), 估得平均地震矩率在 $2.21 \times 10^{16} \sim 3.03 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 之间(图 2b), 进而可估计出这里 $M6.5$ 、 $M7$ 、 $M7.5$ 地震的平均复发间隔分别为 200~280 a, 560~770 a 和 1 560~2 140 a(表 1). 其中, 7 级地震的复发间隔估值与这里历史地震的实际间隔一致, 但 6.5 级地震的复发间隔估值比实际间隔(1291~1695 a)偏短 124~204 a. 这可能是由于邻段 1303 年大地震破裂对本段的影响所致(闻学泽, 2000).

我们注意到山西断陷带北部在公元 512 年发生代县 $M7.5$ 地震后, 至今尚未复发强震, 说明那里 $M7.5$ 地震的原地复发间隔应大于 1491 年(2003-512). 因此, 以上估计的

本段 $M_{7.5}$ 地震的平均复发间隔为 1 560~2 140 a 的结果应是可靠的。若认为临汾 1695 年地震的震级为 $7\frac{3}{4}$ (国家地震局震害防御司, 1995), 则平均复发间隔估值应为 2 350~3 230 a。因此, 临汾盆地段自最晚的 1695 年大地震以来才经历了 300 余年, 距下一次大地震的发生还很遥远。

3) 灵石—洪洞段。此段的霍山山前断裂自 1303 年 M_8 大地震以来一直处于很低的地震活动水平, 仅记载到一次 $M_{4.7}$ 地震, 现今小震活动水平也不高。因此, 不可能由历史地震资料估计出可靠的平均地震矩率。

山西断陷带是鄂尔多斯与华北两个活动地块(张培震等, 2003)之间发生右旋剪切作用造成的(见图 1 索引图)。根据现代 GPS 测量, 两地块之间的右旋水平滑动速率为 1~1.9 mm/a(李延兴等, 2003; 杨国华等, 2003)。灵石—洪洞段是山西断陷带内以单一走滑断裂(霍山山前断裂)组成的段落(图 1), 因此可根据 GPS 测量结果, 将该断裂的平均右旋滑动速率估计为 1.5 mm/a。野外考察已观测到 1303 年大地震时沿霍山山前断裂中部的同震右旋位错量优势分布在 4~6 m 之间, 少数为 7~8.6 m, 最大可达到 10.4 m(徐锡伟, 邓起东, 1993), 由此可估计出平均同震位错约 6.5 m, 进而由式(5)估算出霍山山前断裂上像 1303 年那样的大地震的平均复发间隔约为 4 300 a。若根据全球适用的走滑地震平均位错量 \bar{D} (单位为 m)与矩震级 M_w 的经验关系: $\lg(\bar{D}) = 0.90 M_w - 6.32$ (Wells, Coppersmith, 1994), 可估得 $M_w = 7, 7.5$ 和 8.0 地震的值分别为 0.96, 2.7, 7.6 m, 再由式(5)估得相应的平均复发间隔分别为 640, 1 800, 5 100 a。统计表明在 5.7~8.0 震级范围内, 矩震级 M_w 与面波震级 M 没有系统偏差(Wells, Coppersmith, 1994), 从而估得本段 M_8 地震的平均复发间隔在 4 300~5 100 a 之间, 相当于平均矩率为 $2.58 \times 10^{16} \sim 3.10 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m/a}$, 与临汾盆地段的平均矩率基本一致(表 1)。

4) 介休—汾阳段。因属于 1303 年大地震破裂北段的一部分(图 1), 介休—汾阳段在 1303 年大地震时应伴有显著的, 但不知具体量的矩释放(图 2c)。本段包含了活动断陷带的整个宽度(图 1), 根据活动构造的连续性推测其长期的平均矩率应与邻段的接近或相当。然而, 本段 1549 年以来中强地震活动的平均矩率仅 $0.97 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m/a}$, 不仅明显低于前述两段, 同时也低于太原—徐沟段(详见后文)。因此, 本段 1549 年以来的矩率低于其应有的长期平均值。这可能与 1303 年大地震后这里处于较低水平的应变(或矩)释放有关(闻学泽, 2000)。

从图 2c 看出: 介休—汾阳段自 1549 年以来以偏低的矩率, 以及符合时间可预报模式的中强地震复发趋势, 在不远的未来可能不会改变。据此可估得以最晚地震(1979 年 $M 5.2$)

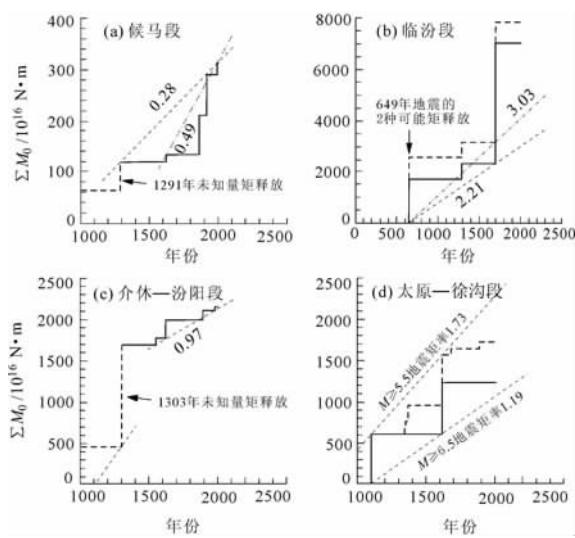


图 2 研究区 4 个段落的历史地震矩随时间的
积累图象及平均地震矩率估计

图内的小数是斜向虚线的斜率, 即地震矩的平均速率,
单位为 $10^{16} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 。计算的详细说明见正文

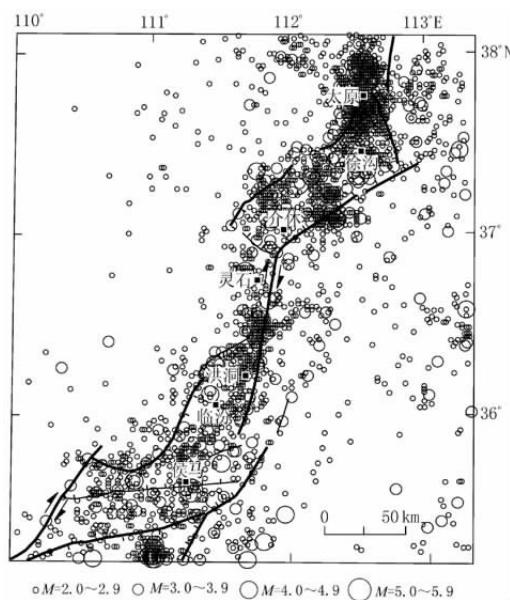


图 3 研究区台网记录的 $M \geq 2.0$ 地震震中分布图(1970-01~2003-03)

断层图例说明见图 1; b 值的计算范围是沿断带的震中密集区

的矩释放为条件的平均复发间隔估值为 45 a, 说明未来 20 a 左右可能面临另一次中强地震的发生.

5) 太原—徐沟段. 1102 年以来本段 $M \geq 5.5$ 地震记载较完整. 考虑到这里自 1614 年以来无强震发生, 应属平静期, 故采用 1102~1614 年间的地震资料, 由式(3)和(4)估得平均地震矩率为 1.73×10^{16} $N \cdot m/a$ ($M \geq 5.5$ 地震) 和 1.19×10^{16} $N \cdot m/a$ (仅考虑 $M \geq 6$ 强震), 略小于临汾盆地段和灵石—洪洞段(表 1, 图 2d). 本段 $4.7 \leq M < 5.5$ 的中等地震及小震频次(图 3)比其它段落的高, 而计算中未包含 $M < 5.5$ 的地震, 可能是平均矩率估值低于其它两段的主要原因.

估算本段的强震平均复发间隔时, 采用强震的平均矩率值(1.19×10^{16} $N \cdot m/a$) (图 2d). 结果表明: $M 6.5$ 和 $M 7$ 地震的平均复发间隔分别为 510 a 和 1 430 a(表 1).

3 由 b 值推断各段的应力积累状态

3.1 资料与方法

强震往往发生在活动断裂带上的相对高应力积累区. 已有研究表明, 应力的高低与震级-频度关系中的 b 值成反比(Scholz, 1968; Urbancic *et al*, 1992). 因此, 可根据 b 值的空间分布, 来揭示和推断活动断裂带不同段落的相对应力水平(Wiemer, Wyss, 1997; Wyss *et al*, 2000).

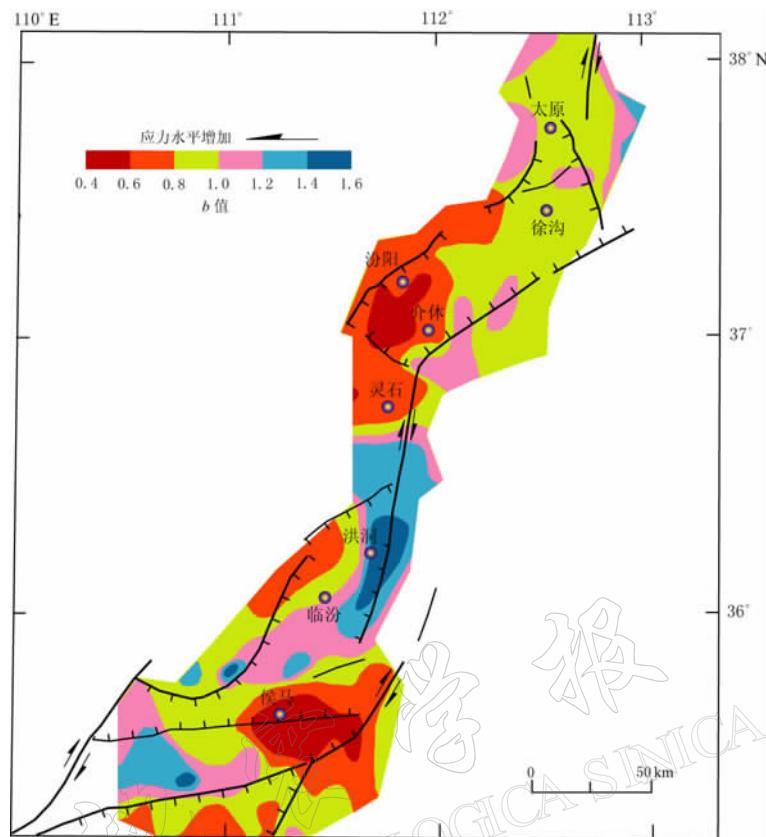
研究区自 1970~2003 年 3 月由台网记录的 $M \geq 2.0$ 地震震中分布如图 3 所示. 利用这 33.25 年的地震资料, 计算沿山西断陷带太原—临汾部分的 b 值分布. 为此, 首先将计算区域进行 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格化, 挑选出以每个网格节点为圆心, 半径为 $r(20 \text{ km})$ 的统计单元内的地震资料; 然后, 对每一个统计单元分别确定出完整性震级下限 M_{\min} , 再利用最小二乘法计算出震级 M -累积频次 N 关系

$$\lg N = a - bM \quad (6)$$

中的 b 值, 并作为该统计单元中心点(即网格节点)的计算值. 式中, a 和 b 为回归常数. 最后由计算出的各节点的 b 值绘制研究区的 b 值等值线图(图 4).

3.2 结果分析

图 4 显示沿山西断陷带不同段落的 b 值具有明显差异. 现将 b 值分布图象与历史强震破裂的时空分布(图 1、图 2; 表 1)、现今地震活动(图 3)进行综合, 分析出该断陷带不同段落的现今应力状况与活动习性如下:

图 4 山西断陷带太原—临汾部分的 b 值分布图

断层图例说明见图 1. 使用台网地震资料时段: 1970-01~2003-03

1) 候马段. 该段具有研究区最低的 b 值(0.47), 显示以通过候马的北东东向断裂的东段为中心存在高应力积累区(图 4). 考虑到本段已至少有 700 余年未发生 $M \geq 6$ 的强震(表 1), 应判定为未来强震的危险地段. 由异常低 b 值区的尺度, 粗略估计未来地震的震级为 $M 6.5$ 左右.

2) 临汾盆地段. 具有较高的 b 值(1.10~1.39)(图 4), 表明该段自 1695 年大地震破裂后, 虽已经过了 300 多年, 但仍处于较低应力积累的状态. 上一节的研究已表明, 本段 $M 7.5$ 地震的平均复发间隔在 1 560~2 140 a 之间. 因此, 在可预见的未来本段再次发生大地震的可能性很小.

3) 灵石—洪洞段. 本段大部分具有 1.2~1.5 的高 b 值, 且高 b 值区与 1303 年 $M 8$ 大地震主破裂段的展布(徐锡伟, 邓起东, 1993)完全一致(图 1、图 4). 显示该段自 1303 年大地震破裂后, 尽管已经过了 700 年的应力调整, 目前仍处于低应力积累状态, 断面可能仍未耦合. 这与前面计算出的该段 $M 8$ 地震的平均复发间隔为 4 300~5 100 a 的结果是一致的.

4) 介休—汾阳段. 核心部分是研究区内的次低 b 值(0.5~0.6)区, 显示目前处于相对较高的应力积累. 由这里的中强地震复发趋势(图 2c)预测在未来 20 a 左右将复发另一次中强地震, 从而应属未来发生中强地震的危险段.

5) 太原—徐沟段. 本段大部分 b 值在 0.81~1.03 之间, 属中等略偏低. 该段现今小震

弱震活动较其它段更频繁(图 3), 且 $M=4.7\sim5.5$ 的中等地震较多, 表明本段应力积累水平并不高.

4 结论

1) 山西断陷带临汾盆地段的平均地震矩率估值为 $2.21\times10^{16}\sim3.03\times10^{16}$ N·m/a, 像 1695 年 $M7.5$ 那样的地震的平均复发间隔估值为 1 560~2 140 a. 在以霍山山前断裂为主体的灵石—洪洞段上, 像 1303 年 $M8$ 那样的地震的平均复发间隔估值在 4 300~5 100 a 之间, 相当于平均矩率为 $2.58\times10^{16}\sim3.10\times10^{16}$ N·m/a. 这两个段落的高和较高 b 值, 反映了现今处于低或较低的应力积累水平, 同时反映出自 1303 年和 1695 年大地震破裂后, 相应断面的强度仍未恢复.

2) 候马段 $M6$ 地震的平均复发间隔估值为 450~780 a, 且已有 700 余年未发生过 $M\geq6$ 地震. 该段的异常低 b 值反映具有较高水平的应力积累, 意味着是未来可能发生 $M6.5$ 左右地震的危险段.

3) 介休—汾阳段正处于较低水平的地震矩释放阶段, 但低 b 值或偏高的应力积累水平, 表明本段应属于未来可能复发中强地震的危险段. 以这里 1979 年 $M5.2$ 地震的矩释放为条件的平均复发间隔估值为 45 a.

4) 太原—徐沟段 $M6.5$ 和 $M7$ 地震的平均复发间隔估值分别为 510 a 和 1 430 a, 中等的 b 值表明这里目前尚未有较高水平的应力积累.

感谢中国地震学会历史地震专业委员会和地震地质专业委员会对本研究工作的支持.

参 考 文 献

- 丁国瑜. 1998. 关于公元 649 年临汾地震的讨论[J]. 中国地震, 14(3): 38~42
- 邓起东, 苏宗正, 王挺梅, 等. 1993. 临汾盆地地震构造基本特征和潜在震源区的划分[A]. 见: 马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾[M]. 北京: 地震出版社, 67~95
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所. 1990a. 中国历史地震图集(远古至元时期)[M]. 北京: 中国地图出版社, 174
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所. 1990b. 中国历史地震图集(明时期)[M]. 北京: 中国地图出版社, 194
- 国家地震局地球物理研究所, 复旦大学历史地理研究所. 1990c. 中国历史地震图集(清时期)[M]. 北京: 中国地图出版社, 244
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社, 514
- 李延兴, 杨国华, 李智, 等. 2003. 中国大陆活动地块的运动与应变状态[J]. 中国科学, D 辑, 33(增刊): 65~81
- 齐书勤. 1993. 关于山西地震历史资料的研究与认识[A]. 见: 马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾[M]. 北京: 地震出版社, 302~306
- 山西省地方志编纂委员会. 1991. 山西通志第五卷·地震志[M]. 北京: 中华书局, 346
- 闻学泽. 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估[M]. 北京: 地震出版社, 150
- 闻学泽. 2000. 山西 1303 年大地震破裂对相邻断裂段地震复发行为的影响[J]. 中国地震, 16(1): 22~27
- 闻学泽. 2001. 活动断裂的可变破裂尺度地震行为与级联破裂模式的应用[J]. 地震学报, 23(4): 380~390
- 徐锡伟, 邓起东. 1993. 1303 年洪洞地震的地震构造[A]. 见: 马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾[M]. 北京: 地震出版社, 149~158
- 杨国华, 韩月萍, 王敏. 2003. 近十年华北地壳水平运动的若干特征[J]. 中国地震, 19(4): 324~333
- 易桂喜, 闻学泽. 2000. 活动断裂带的整体地震复发行为及其与分段地震复发行为的关系[J]. 地震学报, 22(5): 527~537
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, D 辑, 33(增刊): 12~20
- 中国地震局震害防御司编. 1999. 中国近代地震目录[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 637

- Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation to microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **58**: 399~415
- Shimazaki K, Nakata T. 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **7**: 279~282
- Urbancic T I, Trifunovic C I, Long J M, et al. 1992. Space-time correlation of *b* values with stress release[J]. *Pure Appl Geophys*, **139**: 449~462
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 974~1 002
- Wiemer S, Wyss M. 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times[J]. *J Geophys Res*, **102**(B7): 15 115~15 128
- Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto-Elsinore fault zones[J]. *J Geophys Res*, **105**(B4): 7 829~7 844

AVERAGE RECURRENCE INTERVALS OF STRONG EARTHQUAKES AND POTENTIAL RISKY SEGMENTS ALONG THE TAIYUAN-LINFEN PORTION OF THE SHANXI GRABEN SYSTEM

Yi Guixi^{1, 2)} Wen Xueze²⁾ Xu Xiwei³⁾

1) Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: Since the great 1303 Hongtong, Shanxi, earthquake of magnitude 8, 700 years have elapsed. To analyze the long-term seismic potential, this paper divides the Taiyuan-Linfen portion of the Shanxi graben system into 5 seismogenic segments. Based on data of historical earthquakes and GPS observation, the authors estimate mean seismic-moment rates and average recurrence intervals of strong earthquakes for the individual segments, and further analyze relative levels of current stress cumulation on the segments based on mapping *b*-values along the graben system by using the network seismic data for the recent over 30 years. The main result shows that the Linfen basin segment has an estimated mean seismic-moment rate of $2.21 \times 10^{16} \sim 3.03 \times 10^{16}$ N · m/a, and its average recurrence interval for $M=7.5$ earthquake is estimated to be between 1 560 and 2 140 years. For the Lingshi-Hongtong segment, the estimated average recurrence interval for $M=8$ earthquakes is between 4 300 and 5 100 years, equivalent to having a mean moment-rate of $2.58 \times 10^{16} \sim 3.10 \times 10^{16}$ N · m/a. The contour map of *b*-values shows that the two segments of Lingshi-Hongtong and Linfen basin have been being at low or relatively low stress levels, reflecting that since the 1303 $M=8$ and the 1695 $M=7.5$ earthquake ruptures, the fault-plane's strengths of the both segments have not been resumed yet. And the other two segments, the Houma and the Jiexiu-Fenyang, have relatively high stress levels, and have been already identified as potential risky segments for the coming earthquakes from the analysis combining with the estimated average recurrence intervals of earthquakes on the both segments.

Key words: historical earthquakes; seismogenic segment; moment rate; average recurrence interval; potential risky segment