

doi:10.3799/dqkx.2017.526

# 太原盆地应力场演化与强震关系的数值模拟研究

李平恩<sup>1</sup>, 廖力<sup>1</sup>, 刘盼<sup>2</sup>

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 陕西省地震局, 陕西西安 710068

**摘要:**近年来, 太原盆地内尽管没有强震发生, 小震却异常活跃, 而研究太原盆地构造应力场的分布和演化规律的工作比较少。采用有限元数值方法, 综合考虑区域地质构造差异、主要活动断裂带、地形起伏和岩石圈分层结构, 引入深部速度结构, 建立包含太原盆地在内的山西地区三维粘弹性模型。以 GPS 观测值和最大主压应力方向测量值为约束条件, 重建研究区现今构造背景应力场。在此基础上, 依次模拟了自公元 512 年以来太原盆地 6 级以上和山西地震带 7 级以上历史强震序列。计算结果显示, 太原盆地内的 3 次 6 级以上历史地震均落在应力场增加值大于 0.01 MPa 的区域, 盆地近年来小震空间分布与现今应力增加值大于 0.01 MPa 的区域有较好的对应关系。研究表明: 山西地震带内历史强震序列和长期构造加载对太原盆地内 3 次历史强震均有促进作用, 太原盆地的地震活动性明显受区域当前应力水平的控制。

**关键词:**太原盆地; 应力场演化; 强震间相互关系; 地震活动性; 数值模拟。

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2017)09-1623-14

收稿日期: 2016-12-28

## Numerical Simulation of Relationship between Stress Field Evolution and Historical Strong Earthquakes in Taiyuan Basin

Li Ping'en<sup>1</sup>, Liao Li<sup>1</sup>, Liu Pan<sup>2</sup>

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

**Abstract:** In recent years, although no strong earthquakes occurred in Taiyuan basin, small earthquakes were very active. However, the research on the distribution and evolution of tectonic stress field in Taiyuan basin is very little. The 3-D viscoelastic finite element model of Shanxi area including Taiyuan basin is built by applying the finite element numerical method in this paper. In addition, the difference of regional geological structure, the main active fault zone, irregular topography and layered lithosphere structure synthetically, as well as the seismic velocity structure of the crust and mantle, are considered when building the model. Moreover, the present tectonic background stress field in the research area is reconstructed by the constraint of the observed values of GPS and direction of the maximum principal compressive stress. On these bases, the historical strong earthquake sequences with  $M \geq 6$  in Taiyuan basin and with  $M \geq 7$  in Shanxi seismic zone since AD 512 are simulated, respectively. The calculated results illustrate that the three historical strong earthquakes in Taiyuan basin are all located in the area where stress field increased more than 0.01 MPa, and the spatial distribution of small earthquakes in recent years has a good correlation with the present stress field change greater than 0.01 MPa. The results show that the historical strong earthquake sequence in Shanxi seismic zone and long-term tectonic stress loading both promoted the three historical strong earthquakes in Taiyuan basin. The present seismic activity of Taiyuan basin is obviously controlled by the current stress level in the area.

**Key words:** Taiyuan basin; stress filed evolution; interaction between strong earthquakes; seismic activity; numerical simulation.

**基金项目:**中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项(No.DQJB14C06); 地震行业科研专项(No.201408014); 国家自然科学基金项目(No.41674105)。

**作者简介:**李平恩(1977—), 男, 副研究员, 主要从事地球动力学数值模拟方面的研究。ORCID: 0000-0002-3104-8037. E-mail: pingen2000@163.com

**引用格式:**李平恩, 廖力, 刘盼, 2017. 太原盆地应力场演化与强震关系的数值模拟研究. 地球科学, 42(9): 1623—1636.

0 引言

太原盆地位于山西地震带的中部,为地震多发盆地。太原盆地及邻区主要活动断裂带和历史强震分布如图1所示。从有记载的公元231年至今,共记录到太原盆地内发生3次 $6\frac{1}{2}$ 级地震,无7级以上强震。与之对应,太原盆地所处的山西地震带共记录到7级以上强震6次,其中7.0~7.9级地震4次,主

要分布在盆地东北方向 NNE 向的忻定盆地;8 级以上地震 2 次,全部发生在盆地西南方向 NNE 向的临汾盆地内(吴乾蕃等,1991;黄福明等,1992;刘光勋和阎凤忠,1995;张世民,2000;王秀文等,2001)。这些强震序列必然会导致太原盆地内应力场发生变化。另外,自 1695 年临汾 8.0 级地震后至今的 321 a 内,山西地震带再没有发生过 7 级以上强震。最近的 6 级以上强震是 1989 年的大同阳高 6.1 级地震(吕培苓等,1997),距今已有 27 a。总体而言,目前整个

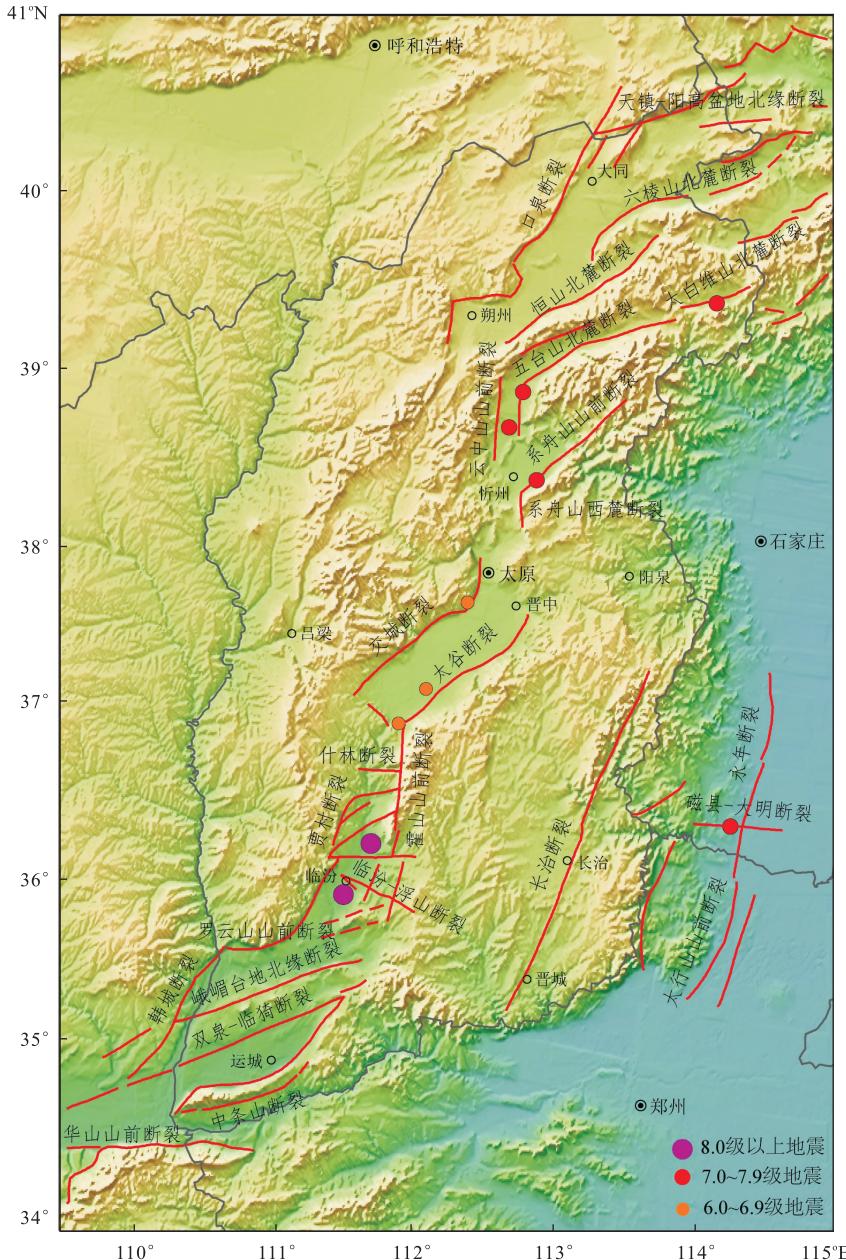


图 1 太原盆地及邻区主要断裂带及历史强震分布

Fig.1 Distribution of main faults and historic strong earthquakes in Taiyuan basin and its adjacent area

主要断裂带数据源自“基于 GIS 的地震分析预报系统”软件提供的中国断层数据；历史强震数据源自“基于 GIS 的地震分析预报系统”软件提供的地震数据

山西地震带都处于大震缺失的状态,山西地震带内的断陷盆地边界主要由 NNE、NE 及 NEE 向正断层或走滑断层组成,断层面的倾角均较大,边界断裂全新世活动明显(黄福明等,1992; 刘光勋和阎凤忠,1995; 张世民,2000)。

如图 1 所示,太原盆地的构造活动主要受西北部的交城断裂和东南部的太谷断裂控制。盆地内 3 次  $6^{1/2}$  级历史地震中,1 次发生在交城断裂北段,2 次发生在太谷断裂南段(刘光勋和阎凤忠,1995)。地震探槽表明,在交城断裂曾经发生过多次 7 级以上古地震事件(江娃利等,2004; 谢新生等,2007)。由于盆地内的主要城市都靠近交城或太谷断裂,因此地震学家很关注这两条断裂上是否还会发生大地震。近些年来,太原盆地内尽管没有强震发生,小震却异常活跃,它们与盆地内的应力水平有何关系,需要深入进行研究。

构造应力场作用之下的现代地壳运动控制着地震的孕育、发展过程和发震力学机制。因此,要了解地震的孕育、发生过程,最根本的途径是研究构造应力场的分布和演化规律(李玉江等,2009)。区域构造应力场的变化受长期构造加载和强震两方面因素的影响(King *et al.*, 1994; Stein, 1999; Freed, 2005; Luo and Liu, 2010)。在研究构造应力场的众多方法中,数值模拟方法由于具有高度的灵活性和适应性、成本低且周期短的特点,已成为定量研究的重要手段,并取得了丰富的研究成果(王仁等,1982; 邵志刚,2007; 陈连旺等,2008; 王辉等,2008; Luo and Liu, 2010; Zhu and Zhang, 2010, 2013; 李玉江等,2013; Liu *et al.*, 2014; 杨兴悦等,2016),但这些工作大多集中在地震或构造活动活跃的地区,如华北、川滇或青藏高原地区等。在太原盆地,类似的工作较少(黄福明等,1992; 徐志斌等,1998; 沈正康等,2004),这可能与该地区最近十几年强震较少有关。近些年来,地震学家在深部结构反演、GPS 观测等方面取得重要进展。数值模拟方法可以充分利用这些研究成果,通过建立合理的模型来分析大家所关心的问题。

因此,本文拟采用数值模拟方法,考虑主要活动断裂带、地表起伏和岩石圈分层结构,引入最新深部反演结果,建立包含太原盆地在内的山西地区三维粘弹性有限元模型。以 GPS 观测值和最大主压应力方向测量值为约束条件,重建研究区现今构造应力场。在此基础上,通过依次模拟太原盆地 6 级以上和山西地震带 7 级以上历史强震序列,研究了太原盆

地应力场的演化过程,分析了历史强震序列对盆地内 3 次  $6^{1/2}$  地震的影响,最后探讨了盆地现今应力状态与地震活动性之间的关系。

## 1 三维粘弹性有限元模型

### 1.1 模型的建立

由于太原盆地位于山西地震带的中部,其地震活动和应力场受整个山西地震带的应力水平和强震活动影响,因此,研究太原盆地的应力场演化必须结合整个山西地震带进行分析。本文选取  $109.45^{\circ} \sim 115.05^{\circ}\text{E}, 34.0^{\circ} \sim 41.0^{\circ}\text{N}$  的矩形范围区域建立三维模型,如图 2 所示,包含了山西地震带和太原盆地主要的活动断裂带,图中不同颜色代表对活动地块和断裂带的划分。三维模型沿纵向( $z$  轴)从地表到地下 100 km 共分为 4 层,即上地壳、下地壳、岩石圈上地幔和软流圈上地幔,包含活动地块和主要断裂带两种地质单元。断层宽度取为 5 km,深度为地表至地下 20 km。考虑到山西地震带内的断层大部分均是高角度正断层或正走滑断层(黄福明等,1992; 张世民等,2000),为简化起见,所有断层均设为直立。由于研究区域不大,采用 Gauss-Kruger 投影算法将经纬度坐标投影为直角坐标进行计算,以东向为  $x$  轴正向,北向为  $y$  轴正向,垂直向上为  $z$  轴正向。模型地表起伏采用ETOPO1地形高程数据得到

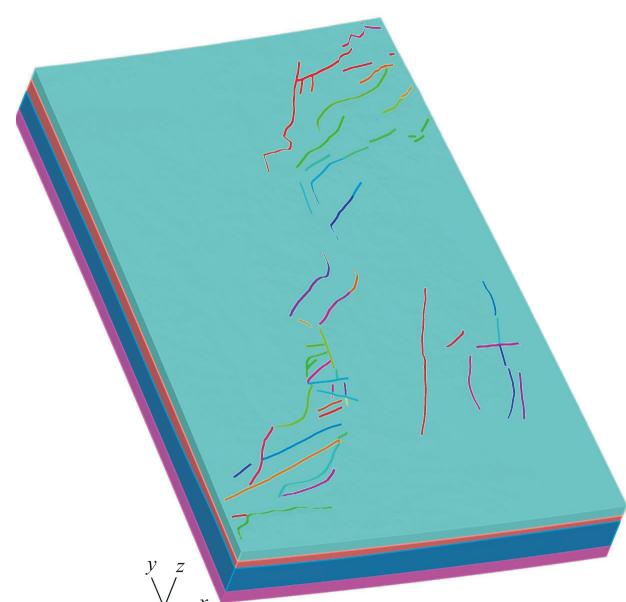


图 2 包含太原盆地在内的山西地区三维有限元模型

Fig.2 3-dimensional FEM model of Shanxi area including Taiyuan basin

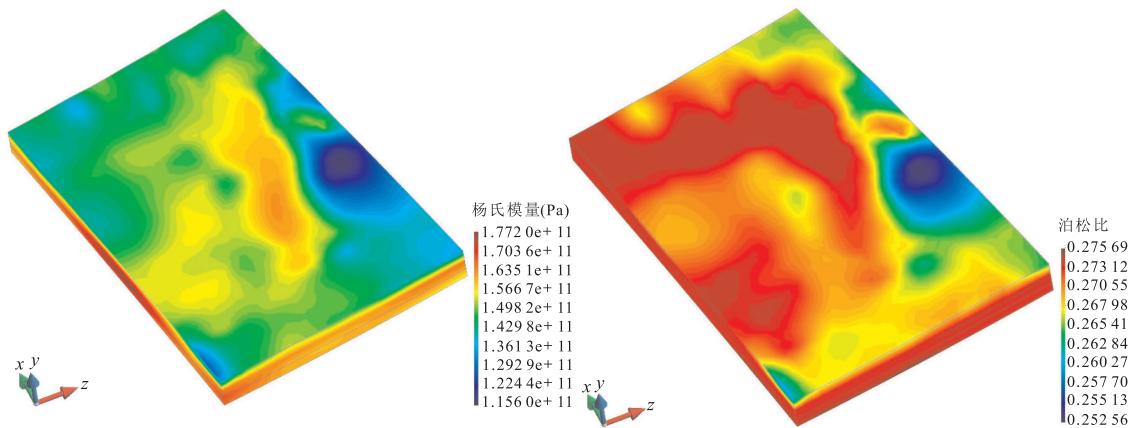


图 3 三维模型从 Moho 面(上表面)到 100 km 深度(下表面)的材料参数

Fig.3 Material parameter of 3D model from Moho (upper surface) to 100 km (lower surface) depth

(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>), 分辨率为 1 弧度分。根据 Moho 面深度值 (Li et al., 2014) 得到地壳与地幔的分界面, 采用 4 节点 4 面体单元对三维模型进行剖分, 节点总数为 70 841 个, 单元总数为 329 597 个。采用通用有限元程序 ADINA 进行计算。

## 1.2 本构关系和材料参数

为了模拟岩石圈介质在漫长的地质演化历史中表现出的流变效应, 以及地震发生时的瞬时弹性效应, 本文采用 Maxwell 粘弹性本构模型, 其长期表现为流变性质, 瞬时表现为弹性性质, 本构关系为:

$$\begin{cases} K(t) = K; \\ G(t) = \mu e^{-\frac{\eta}{t}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K(t)$  和  $G(t)$  分别为 Maxwell 模型的体积模量和剪切模量;  $\eta$  为粘滞系数;  $K$  为弹性体积模量;  $\mu$  为弹性剪切模量。后两个参数可由线弹性介质的杨氏模量  $E$  和泊松比  $\nu$  换算得到。根据研究区深部反演获得的三维 P 波、S 波速度模型和密度模型 (Li et al., 2013), 可以计算得到杨氏模量  $E$  和泊松比  $\nu$ 。换算关系为 (杨兴悦, 2012):

$$\begin{cases} E = \rho \frac{v_s^2(3v_p^2 - 4v_s^2)}{(v_p^2 - v_s^2)}; \\ \nu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}, \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v_p$ 、 $v_s$  分别为三维速度模型的 P 波和 S 波速度值;  $\rho$  为密度模型的密度值。由式(2)可计算得到三维模型每个节点位置的杨氏模量  $E$  和泊松比  $\nu$ 。图 3 给出的是从 Moho 面到 100 km 深度范围模型节点的杨氏模量和泊松比分布。在此基础上, 根据每

表 1 三维模型的粘滞系数

Table 1 Coefficient of viscosity of 3-dimensinal model

分层深度(km)	$\eta(10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s})$
上地壳地表~20	$1.0 \times 10^3$
下地壳~20~Moho 面	$1.0 \times 10^2$
岩石圈上地幔 Moho 面~80	$1.0 \times 10$
软流圈上地幔~80~100	1.0

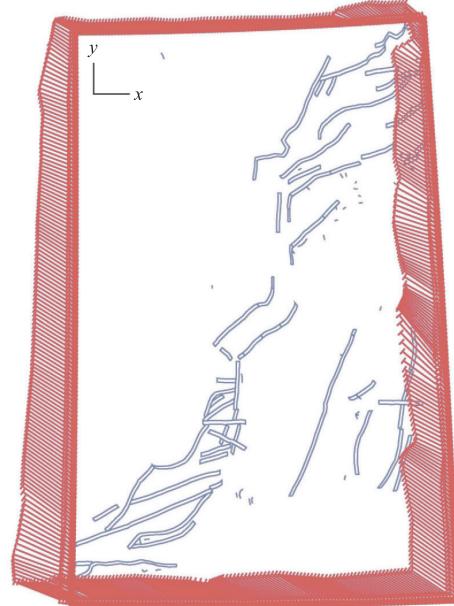


图 4 模型的加载条件

Fig.4 Loading condition of model

个单元的质心坐标可进一步得到各单元的弹性参数。由于断层介质一般比周围活动地块介质软, 因此将计算得到的杨氏模量乘以弱化系数, 实现断层的弱化 (王辉等, 2006; 胡幸平等, 2012)。本文取弱化系数为 1/3, 以体现断层与块体之间材料性质的差异。

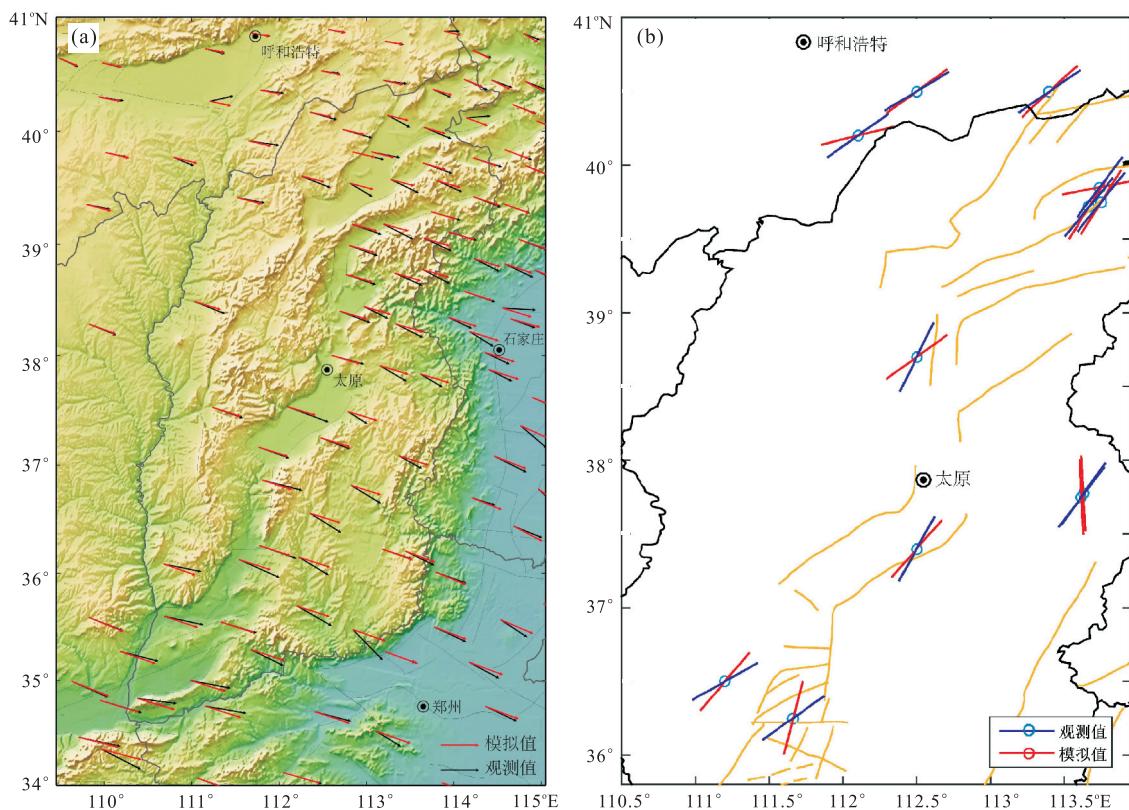


图5 模拟值与观测值的比较

Fig.5 Comparison of simulated values and the observed values

a.地壳水平运动速率模拟值与观测值的比较;b.最大主压应力方向模拟值与观测值的比较

粘滞系数的选取参考石耀霖和曹建玲(2008)和孙玉军等(2013)的结果,计算参数见表1所示。最后由公式(1)得到三维模型每个单元的粘弹性参数,即体积模量和剪切模量。以上方法充分利用了深部反演的研究结果,使模型的材料分辨率与反演得到的三维速度结构模型的分辨率完全一致,体现了对研究区深部构造的最新认识。由于研究区域内地表高程变化不大,地形差异导致的附加重力作用影响不明显,因此本文没有考虑重力的影响。

### 1.3 模型加载和边界条件

为了进行计算,需要对模型施加加载条件和边界条件。根据地表GPS观测值(张培震,2008)在模型4个侧边界插值得到位移加载条件,如图4所示。由于GPS值在深部与地表的差异尚无定论,因此假设加载条件从地表到地下100 km深度保持一致。考虑到GPS观测值代表的是地壳水平位移的年变化,因此总位移加载量等于侧边界上的水平位移年变化值乘以按年计算的总加载时间。模型底边界条件为沿垂直( $z$ 轴)方向固定,沿 $xy$ 水平方向自由,上表面为自由边界。

### 1.4 模型检验

在以上材料参数、加载条件和边界条件下,对模型加载10万a,最后得到稳定的应力状态。为验证模型的可靠性,将模拟结果分别与GPS观测值(张培震,2008)和最大主压应力方向测量值进行比较,如图5所示。由图5a可知,对于地壳水平运动速率,在太原盆地以及山西地震带大部分地区,模拟值与观测值在方向和大小上都非常接近,仅在个别测点存在一些差异,模拟结果基本反映了山西地区地壳水平运动总体沿SEE方向的趋势。最大主压应力方向的测量值来自世界应力分布图2008(Heidbach et al.,2010)。由图5b可知,模拟值与观测值基本吻合,特别是在太原盆地和山西北部符合最好,南部临汾盆地附近符合程度稍差。模拟结果基本体现了山西地震带最大主压应力方向沿NE、NNE方向的特征。总体而言,模拟结果基本反映了研究区域的现今构造变形和应力状态,将此状态下的应力场作为研究区现今构造背景应力场,在此基础上,模拟历史强震序列的发生。

## 2 应力变化速率

应力场的变化用等效应力  $\sigma_e$ 、最大剪应力  $\tau_{max}$  来表示,其定义分别为:

$$\begin{cases} \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^+ (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}; \\ \tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  分别为 3 个主应力分量.等效应力和最大剪应力能够反映介质趋于屈服的程度.等效应力或最大剪应力值增大,有利于介质失稳而加速孕震进程;反之,等效应力或最大剪应力值减小,不利于介质失稳和减缓孕震进程(陈连旺等,2001;尹祥础,2011;杨兴悦等,2013).本文将同时采用等效应力和最大剪应力进行分析.根据前面研究区现今构造背景应力场的结果,可以得到由于长期构造加载导致的太原盆地等效应力和最大剪应力的年变化速率(图 6).由图 6a 可知,太原盆地等效应力年变化呈北高南低的趋势,年增加值最大的地区为盆地东北部地区,约为  $60 \text{ Pa} \cdot \text{a}^{-1}$ ,盆地西南部地区年增加值相对较小,约为  $40 \text{ Pa} \cdot \text{a}^{-1}$ .如图 6b 可知,最大剪应力年变化情况与等效应力情况相似,仍然是东北高西南低.太原盆地历史上虽无 7 级以上强震记录,但中强地震和弱震活动却一直是华北地区内频率最高的地区之一(光春云和孙国学,1993;田勇,1997).太原盆地内公元 1000—1985 年间  $M \geq 4.0$  地震以及 1966—1985 年间共 14 起群震的空间分布结果表明(光春云和孙国学,1993;田勇,1997;侯廷爱等,1997),太原盆地东北部地区的地震明显更多更集

中,表明其历史地震活动性强,这与该地区应力年增加值相对较高是吻合的.

## 3 历史强震序列模拟

地震是在一定背景应力场条件下发生的,与漫长的地质演化历史相比,地震的发生是一个瞬态过程.如果忽略地震发生过程中发震断层的动态破裂过程,而仅仅研究地震前后的静应力状态变化,可以采用准静态方法模拟地震的发生.本文采用 ADINA 的重启动算法引入研究区现今构造背景应力场,采用降低发震断层材料参数的方法,使发震断层变得更软从而发生错动,以此来模拟实际地震的发生.考虑到一般情况下材料的泊松比  $\nu$  是一个不变量,根据泊松比  $\nu$  与体积模量  $K$  和剪切模量  $G$  的关系  $\nu = 0.5K/(K+G)$ (王敏中等,2011),在模拟地震时,按相同比例同时降低发震断层单元的体积模量  $K$  和剪切模量  $G$ ,以保持泊松比  $\nu$  不变.在模拟中以地震发生时断层的水平滑动位移作为约束条件,采用试错的方法,通过不断调整发震断层单元的材料参数,最后使得模拟得到的同震水平错动值与实际观测值一致.

考虑到太原盆地的应力变化受区域内强震的影响,由于盆地内历史上没有 7 级以上强震记录,因此选取 6~6.9 级地震进行模拟,共有 3 次.另外,盆地内的应力场还可能受山西地震带内的强震影响,因此选取自有地震记载以来的山西地区的所有 7 级以上强震进行模拟,共有 7 次.总共需要模拟的强震共 10 次,如图 1 所示,模拟中用到的历史强震目录及

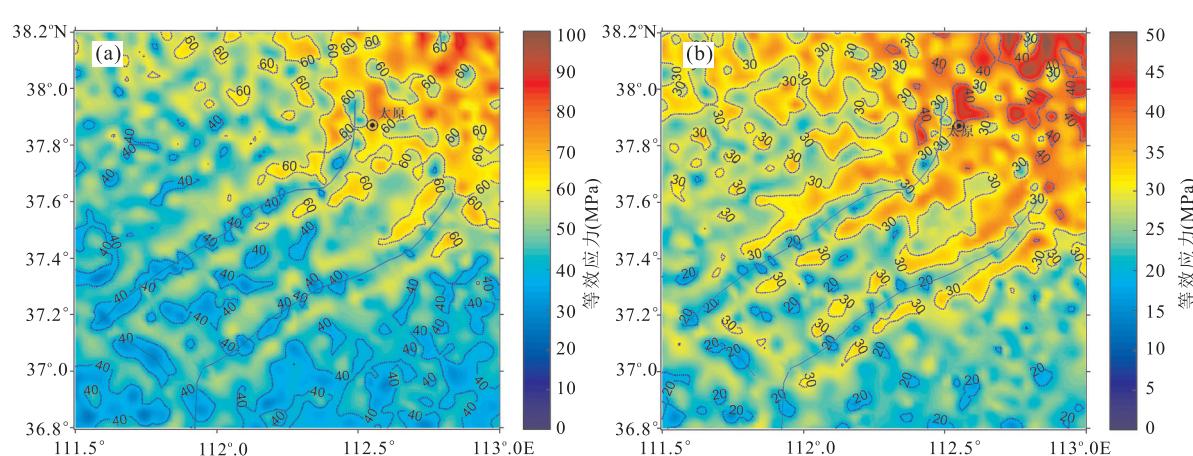


图 6 太原盆地等效应力年变化(a)和最大剪应力年变化(b)

Fig.6 Annual variation of effective stress (a) and max shear stress (b) in Taiyuan basin

表2 模拟中用到512年以来太原盆地6级以上和山西地震带7级以上地震目录及震源参数

Table 2 Earthquake catalogue and source parameter of earthquakes with  $M \geq 6$  in Taiyuan basin and earthquakes with  $M \geq 7$  in Shanxi seismic zone in simulation

序号	时间		震中位置		M	发震断层	破裂长度(km)	水平错动(cm)	参考文献
	年—月—日	地点	经度(°E)	纬度(°N)					
1	512-05-23	原平、代县间	112.8	38.9	7 <sup>1/2</sup>	五台山北麓、西麓	80.7	185.5	(1)
2	1038-01-15	定襄、忻定间	112.9	38.4	7 <sup>1/4</sup>	系舟山山前	57.0	93.6	(1)
3	1102-01-22	太原	112.4	37.7	6 <sup>1/2</sup>	交城	34.3	12.5	(2)
4	1303-09-25	洪洞	111.7	36.3	8.0	霍山山前	85.0	402.5	(1,3~5)
5	1614-10-23	平遥	112.1	37.2	6 <sup>1/2</sup>	太谷	34.3	10.9	(2)
6	1618-05-20	介休	111.9	37.0	6 <sup>1/2</sup>	太谷	41.8	12.5	(2,6)
7	1626-06-28	灵丘	114.2	39.4	7.0	太白维山前	86.6	19.7	(1~2)
8	1683-11-22	原平	112.7	38.7	7.0	五台山西麓	70.0	34.4	(2)
9	1695-05-18	临汾	111.5	36.0	8.0	临汾—浮山	62.2	447.5	(2,5,7~8)
10	1830-06-12	河北磁县	114.3	36.4	7 <sup>1/2</sup>	磁县一大明	57.0	173.9	(1~2,9)

注:(1)刘光勋等(1993);(2)沈正康等(2004);(3)江娃利等(2004);(4)徐锡伟等(1993);(5)刁桂苓等(2007);(6)殷娜和韩军青(2010);(7)王挺梅等(1993);(8)武烈(1995);(9)许华明等(2010).

震源参数见表2所示.表2中参数的选取尽可能充分利用了对历史地震的研究结果(刘光勋等,1993;徐锡伟和邓起东,1993;王挺梅等,1993;武烈等,1995;江娃利等,2004;刁桂苓等,2007;许华明等,2010).对于缺乏历史地震研究结果的,震源参数则采用地震烈度与断层破裂长度、震级和地震矩的统计关系得到(沈正康等,2004;李铁明等,2007).为方便模拟地震,根据表2中给出的参数,笔者在模型中预先设置了这些历史强震的发震断层,如图2所示,不同的颜色代表不同的断层单元.

## 4 数值模拟结果及分析

### 4.1 应力演化与强震关系

应力场的演化包括长期构造加载导致的应力变化,以及强震发生导致的同震应力变化.其中前者与地震无关,仅与长期构造加载和岩石圈介质的粘弹性参数有关.在此基础上叠加历次强震导致的同震应力变化,就可得到由同震和长期构造加载引起的总应力变化.根据数值模拟结果,考虑到太原盆地地震源深度的典型分布范围,深度值取地下20 km位置,以研究区现今构造背景应力场为参考状态,依次给出了盆地内3次6<sup>1/2</sup>级强震前以及1830年磁县7<sup>1/2</sup>地震后等效应力和最大剪应力的演化情况,并计算了在后继地震震源处的应力值,由此分析应力演化与历史强震之间的关系.需要说明的是,本文计算得到的应力场演化值,不是区域的绝对应力场变化值,而是以现今构造背景应力场为参考状态,由历史强震和长期构造加载导致的应力场变化值,它们

是相对参考状态的应力场扰动.一般地震的发生除了与区域的绝对应力场水平有关外,还与区域应力场在一段时间内的相对变化有关,因此,通过分析应力场的相对变化来研究应力变化与强震之间的关系是具有意义的.

图7a~7c依次给出了太原盆地历次强震前等效应力的变化,同时在图中还给出了在后继地震震源处的应力值.由图7a可知,1038年定襄7<sup>1/4</sup>地震后,在后继1102年太原6<sup>1/2</sup>地震震源处的应力值为0.055 MPa,表明1102年太原地震发生在等效应力增加的区域,其前序强震序列的同震效应和长期构造加载的综合影响对这次地震有促进作用.由图7b~7c可知,太原盆地内的另外2次强震,即1614年平遥6<sup>1/2</sup>地震和1618年介休6<sup>1/2</sup>地震均发生在其前序强震和长期构造加载产生的等效应力增加的区域,增加值分别为0.205 MPa和0.244 MPa.由图7b进一步可知,1102年太原6<sup>1/2</sup>地震释放了交城断裂北段的部分能量,使该部分区域处于应力负值影区;而1303年洪洞8.0级地震导致太谷断裂南段的应力值增加,使该段地震危险性增加,并且促进了1614年平遥6<sup>1/2</sup>地震的发生.由图7c可知,1614年平遥6<sup>1/2</sup>地震后,太谷断裂南段的部分能量得到释放,使该部分区域处于应力影区,但后继1618年介休6<sup>1/2</sup>地震震源区仍处于应力增加的区域,其地震危险性并未降低,从而导致4a后该次地震的发生.由图8d可知,1618年介休6<sup>1/2</sup>地震后,太谷断裂带南段的能量进一步得到释放,其应力影区范围进一步扩大.总体而言,山西地震带内历史强震序列和长期构造加载作用对太原盆地内3次历史强震均有促进作用.

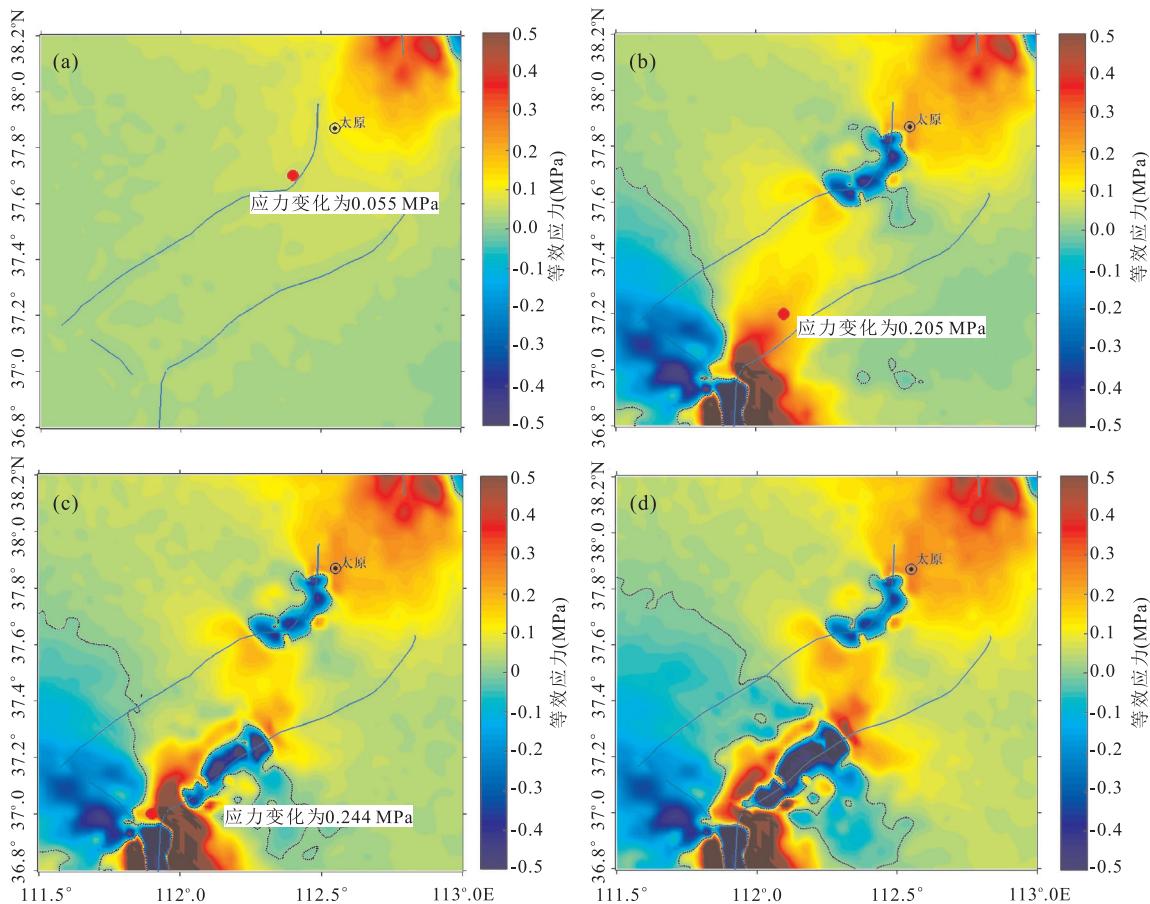


图 7 太原盆地 512 年以来等效应力演化

Fig.7 Evolution of effective stress in Taiyuan basin since AD 512

a.1038 年定襄  $7\frac{1}{4}$  地震后,1102 年太原  $6\frac{1}{2}$  地震前;b.1303 年洪洞 8.0 地震后,1614 年平遥  $6\frac{1}{2}$  地震前;c.1614 年平遥  $6\frac{1}{2}$  地震后,1618 年介休  $6\frac{1}{2}$  地震前;d.1830 年磁县  $7\frac{1}{2}$  地震后,1989 年阳高 6.1 地震前.红色实心圆圈表示后继地震位置,虚线表示 0 等值线

图 8 给出了太原盆地最大剪应力的变化情况.由图 8a~8c 可以看出,太原盆地内的 3 次历史强震均发生在最大剪应力增加的区域,增加值分别 0.028 MPa、0.102 MPa 和 0.104 MPa,这表明前序地震和长期构造加载对这 3 次地震均有促进作用.由图 8a~8d 进一步可知,这 3 次地震分别释放了交城断裂北段和太谷断裂南段的部分能量,使这些区域处于应力影区.总体而言,采用最大剪应力的分析结果与采用等效应力的分析结果相同.

#### 4.2 强震之间的相互关系

根据模拟结果,可以给出太原盆地 3 次历史强震震源处的应力随时间的变化曲线,以分析长期构造加载和前序强震序列对这 3 次地震的影响.图 9 分别给出了 1102 年太原  $6\frac{1}{2}$  地震、1614 年平遥  $6\frac{1}{2}$  地震和 1618 年介休  $6\frac{1}{2}$  地震前震源处的等效应力变化曲线.由图 9a 可知,前序 512 年代县地震和 1038 年定襄地震的同震效应导致 1102 年太原地

震震源处的应力增加值分别为 0.0113 MPa 和 0.0182 MPa;从 512 年到 1038 年的 526 a 间,长期构造加载导致太原地震震源处的应力增加值为 0.0259 MPa,年增加速率为  $49.2 \text{ Pa} \cdot \text{a}^{-1}$ .这表明前序地震的同震效应和长期构造加载作用导致的 1102 年太原地震震源处的应力增加值相当,它们都对太原地震有促进作用,长期构造加载的影响不能忽略.由图 9b 知,在 1614 年平遥  $6\frac{1}{2}$  地震的前序地震中,1303 年洪洞 8.0 级地震由于距离相对较近且震级最大,影响也最大,同震效应导致平遥地震震源处的应力增加值达 0.146 MPa,大大促进了平遥地震的发生,另外 3 次前序地震由于距离平遥地震距离相对较远或者震级相对较小,引起的同震应力变化虽然也为正,但均未超过 0.01 MPa,说明这 3 次地震对 1614 年平遥地震的促进作用有限.从 512 年至 1303 年的 791 a 间,长期构造加载导致 1614 年平遥地震震源处的等效应力增加值达 0.0412 MPa,

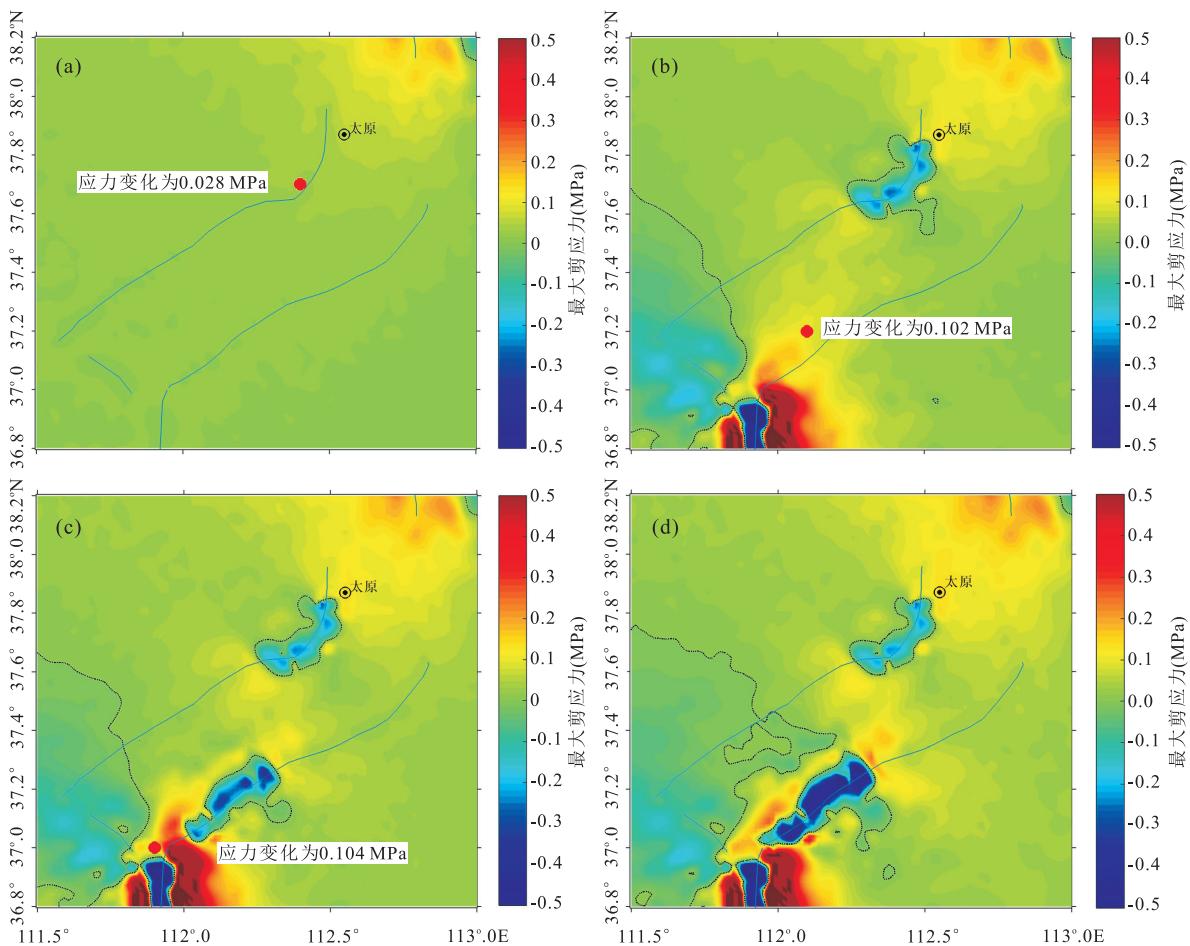


图8 太原盆地 512 年以来最大剪应力演化

Fig.8 Evolution of max shear stress in Taiyuanbasin since AD 512

a.1038年定襄 $7\frac{1}{4}$ 地震后,1102年太原 $6\frac{1}{2}$ 地震前;b.1303年洪洞8.0地震后,1614年平遥 $6\frac{1}{2}$ 地震前;c.1614年平遥 $6\frac{1}{2}$ 地震后,1618年介休 $6\frac{1}{2}$ 地震前;d.1830年磁县 $7\frac{1}{2}$ 地震后,1989年阳高6.1地震前.红色实心圆圈表示后继地震位置,虚线表示0等值线

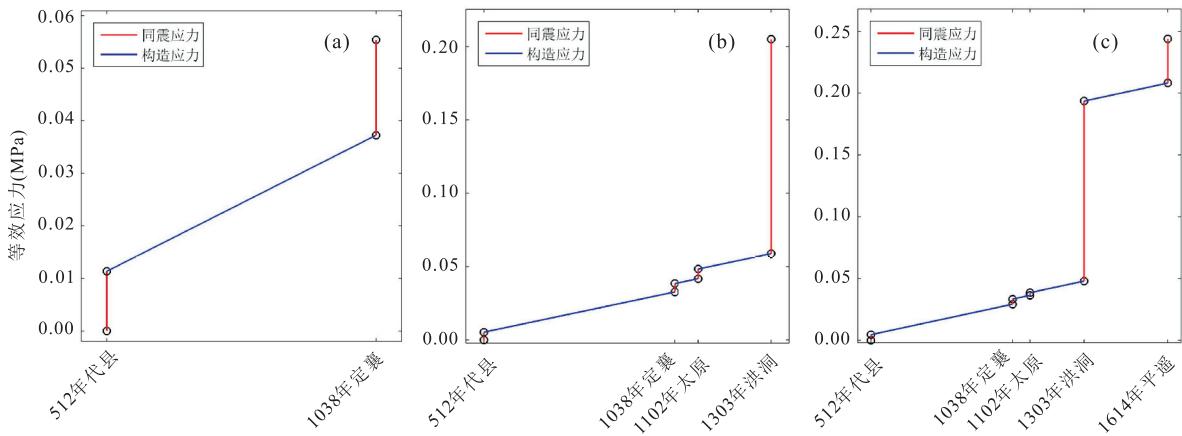


图9 自 512 年以来历史地震震源处的等效应力变化曲线

Fig.9 Effective stress evolution at the epicenter of historical strong earthquake in Taiyuan basin since AD 512

a.1102年太原地震前震源处;b.1614年平遥地震前震源处;c.1618年介休地震前震源处

年增加速率为  $52.1 \text{ Pa} \cdot \text{a}^{-1}$ ,对平遥地震的促进作用明显.同理,由图9c可知,对于1618年介休 $6\frac{1}{2}$

地震,其前序地震中1303年洪洞8.0级和1614年平遥 $6\frac{1}{2}$ 地震对其促进作用明显,其余3次地震影

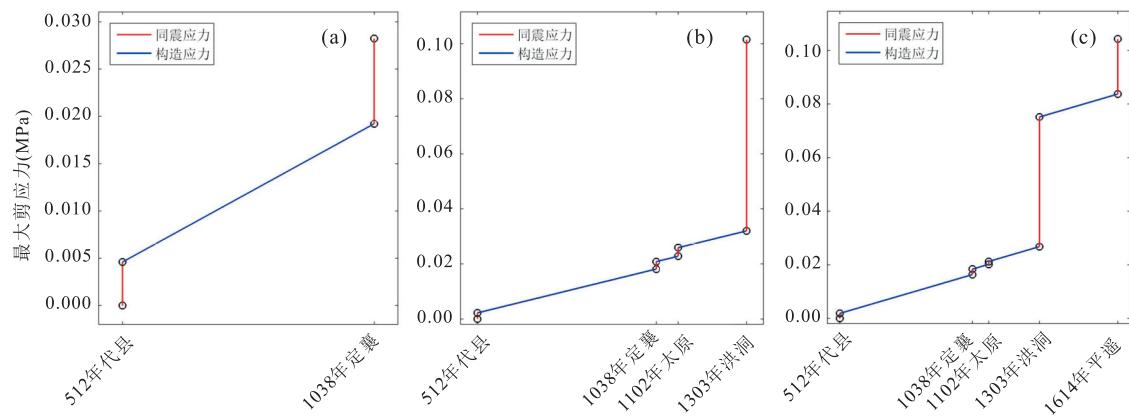


图 10 自 512 年以来历史地震震源处的最大剪应力变化曲线

Fig.10 Max shear stress evolution at the epicenter of historical strong earthquake in Taiyuan basin since AD 512  
a.1102 年太原地震前震源处;b.1614 年平遥地震前震源处;c.1618 年介休地震前震源处

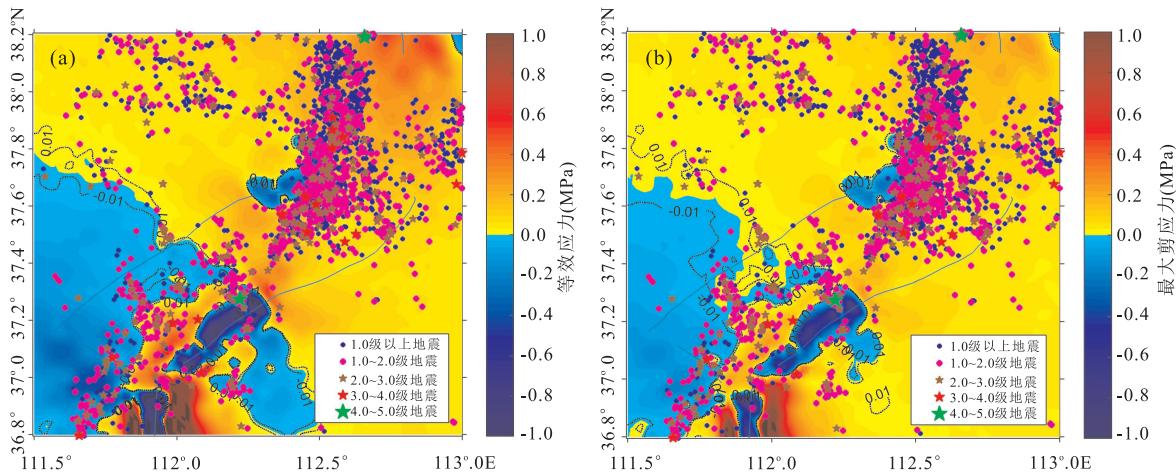


图 11 2008 年后太原盆地等效应力场与小震分布(a)和最大剪应力场与小震分布(b)

Fig.11 Effective stress variation and distribution (a) and max shear stress variation and distribution (b) of small earthquake in Taiyuan basin after 2008

响较弱。1618 年介休地震和 1614 年平遥地震均发生在太原盆地太谷断裂带南段，由此可进一步推断，1614 年的平遥  $6^{1/2}$  级地震并没有完全释放掉太谷断裂带南段的全部能量，反而导致太谷断裂带南段等效应力增加，从而促进了 4 a 后 1618 年介休  $6^{1/2}$  级地震的发生。

图 10 给出了太原盆地 3 次历史强震震源处剪应力的变化曲线，其变化趋势与如图 9 所示的等效应力情况相同，表明采用等效应力或最大剪应力进行分析得到的结论是相同的。总体而言，对于太原盆地内的 3 次历史强震，其前序地震的同震效应和长期构造加载都对它们有促进作用。

#### 4.3 现今应力状态与地震活动性的关系

为研究现今应力状态与地震活动性的关系，本

文收集了 2008 年 10 月至 2016 年 3 月间的山西地区的小震数据，共计 4 919 个（房立华个人通讯，2016）。图 11 分别给出了太原盆地 2008 年后的等效应力场和最大剪应力场与小震的空间分布，4 919 个小震中有 3 033 个位于图中区域内。计算表明：在 3 033 个小震中，有 2 582 个，即 85.13% 的小震位于等效应力大于 0.01 MPa 的区域，如图 11a 所示；有 2 648 个，即 87.31% 的小震落在最大剪应力大于 0.01 MPa 的区域，如图 11b 所示。这说明小震分布与应力值大于 0.01 MPa 的区域有很好的对应关系，小震活动受应力水平的控制明显。总体而言，盆地北部小震数量更多更密集，表明北部地区的地震活动性更强，该区域是应力值为正且正值较高的地区。盆地边界的交城断裂带北段的最北端和最南段，以及太谷

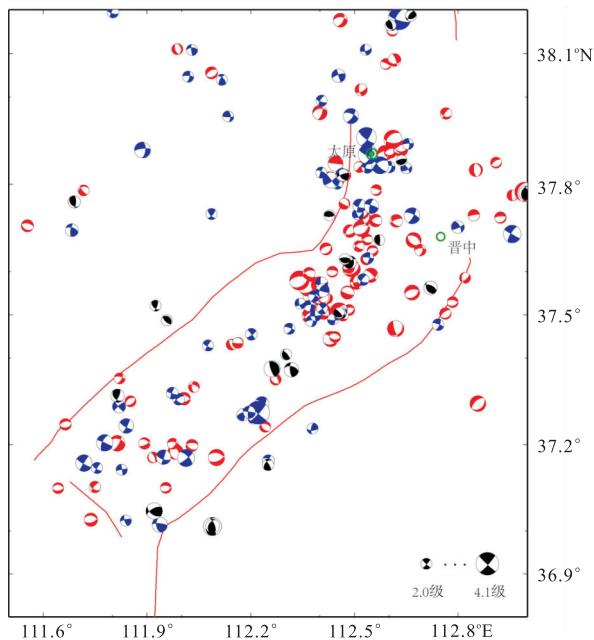


图 12 2009 年 1 月—2015 年 10 月太原盆地  $M_L \geq 2.0$  级以上中小震震源机制解空间分布

Fig.12 Distribution of focal mechanism for moderate and small earthquake with  $M_L \geq 2.0$  in Taiyuan basin from January 2009 to October 2015

红色为正断型地震,蓝色为走滑型地震,黑色为逆冲型地震,皮球大小表示震级

断裂北段均处于应力值为正的区域,地震危险性可能较高。相比之下,交城断裂和太谷断裂南段处于应力负值影区,小震相对较少和稀疏,地震活动性较弱。由于太原盆地近期地震活动性以小震为主,因此,以上结果也说明目前太原盆地的地震活动性主要受区域当前应力水平的控制。

对于小于 5.0 级的地震,由于它们发生的频率高,通过对它们震源特征进行研究,可以进一步了解区域应力场与地震活动之间的关系。为此本文收集了基于 P 波初动和振幅比的 HASH 方法反演得到的,从 2009 年 1 月至 2015 年 10 月间太原盆地 2.0 级以上中小地震的震源机制解(郭祥云个人通讯,2017),如图 12 所示。可以看出,太原盆地震源机制解类型总体上以正断和走滑型为主,表明区域震源机制解以剪切拉张为主。郭祥云等(2017)在获得的大量中小地震的震源机制解的基础上,反演了山西地震带的最大水平主压应力方向,优势方向为 NE 和 NNE 方向。以上结果表明,太原盆地的小震震源机制解与如图 5b 所示模拟得到的区域最大主压应力方向是吻合的,进一步说明了当前太原盆地的小震活动主要受区域应力场的控制。

## 5 结论

山西地震带历史强震序列和长期构造加载对太原盆地内的 3 次 6 级以上历史强震具有明显促进作用,长期构造加载的影响不可忽略不计。太原盆地现今应力水平呈北高南低的趋势,盆地内的地震活动性明显受区域当前应力水平的控制。

本文同时采用等效应力和最大剪应力进行分析,得到的结论是相同的,表明这两种指标都能单独用于分析应力变化与地震之间的关系。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供的小震数据,郭祥云副研究员提供的震源机制解。同时感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵修改意见。

## References

- Chen, L. W., Lu, Y. Z., Guo, R. M., et al., 2001. Evolution of 3D Tectonic Stress Field and Fault Movement in North China. *Acta Seismologica Sinica*, 23(4): 349–361 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. W., Zhang, P. Z., Lu, Y. Z., et al., 2008. Numerical Simulation of Loading/Unloading Effect on Coulomb Failure Stress among Strong Earthquakes in Sichuan-Yunnan Area. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1411–1421 (in Chinese with English abstract).
- Diao, G. L., Hu, X. L., Zhang, X., et al., 2007. Analysis on the Interaction between the Focal Fault of Hongtong and Linfen Earthquake and Its Earthquake Tendency. *North China Earthquake Sciences*, 25(2): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Freed, A. M., 2005. Earthquake Triggering by Static, Dynamic, and Postseismic Stress Transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1): 335–367. doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122505
- Guang, C. Y., Sun, G. X., 1993. Characteristics of Earthquake Activities of Taiyuan Basin in History and Estimation of the Seismic Situation in Future. *Earthquake Research in Shanxi*, (1): 3–8 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. Y., Jiang, C. S., Wang, X. S., et al., 2017. Characteristics of Small to Moderate Focal Mechanism Solution Stress Field of the Circum-Ordos Block. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in press) (in Chinese).
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., et al., 2010. Global Crustal Stress Pattern Based on the World Stress Map Database Release 2008. *Tectonophysics*, 482(1–4): 3–15. doi:10.1016/j.tecto.2009.07.023

- Hou, T.A., Cheng, X.Y., Meng, Y.Y., et al., 1997. Ground Shock Effect of Mine Explosion of Heishan Iron Mine, Iron and Steel Company of Chengde. *Earthquake Research in Shanxi*, (3): 14–19 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. P., Cui, X. F., Ning, J. Y., et al., 2012. Preliminary Study on Tectonic Deformation Models in the Longmenshan Region Based on Focal Mechanism Solutions of the Wenchuan Earthquake Sequence. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (8): 2561–2574 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F.M., Li, Q.F., Huang, P.Y., 1992. Preliminary Study on the Active Trend of the Shanxi Seismic Belt. *Earthquake Research in China*, 8(4): 34–42 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.L., Deng, Q.D., Xu, X.W., et al., 2004. Surface Rupture Zone of the 1303 Hongtong  $M = 8$  Earthquake, Shanxi Province. *Acta Seismologica Sinica*, 26 (4): 355–362 (in Chinese with English abstract).
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 935–953.
- Li, T.M., Shen, Z.K., Xu, J., et al., 2007. Analysis on the Parameters of Seismogenic Fault of the Earthquake More than 6.5 in North China. *Progress in Geophysics*, 22 (1): 95–103 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.H., Gao, M.T., Wu, Q.J., 2014. Crustal Thickness Map of the Chinese Mainland from Teleseismic Receiver Functions. *Tectonophysics*, 611: 51–60. doi: 10.1016/j.tecto.2013.11.019
- Li, Y.H., Wu, Q.J., Pan, J.T., et al., 2013. An Upper-Mantle S-Wave Velocity Model for East Asia from Rayleigh Wave Tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 377–378: 367–377. doi: 10.1016/j.epsl.2013.06.033
- Li, Y.J., Chen, L.W., Lu, Y.Z., et al., 2013. Numerical Simulation on Influences of Wenchuan Earthquake on the Stability of Faults in the Neighborhood. *Earth Science*, 38(2): 398–410 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.J., Chen, L.W., Ye, J.Y., 2009. Application and Development of Numerical Simulation in Stress Field Evolution and Seismology. *Progress in Geophysics*, 24 (2): 418–431 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G.X., Yan, F.Z., 1995. Understanding the Datong-Yanggao Earthquake Based on Shanxi Seismic Zone. *Earthquake Research in Shanxi*, (1): 3–6 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G.X., Meng, X.L., Yan, F.Z., 1993. Tectonic Conditions of Strong Earthquake and Potential Seismic Source Region Division in Shanxi and Its Adjacent Areas. In: Ma, Z.J., ed., *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Seismological Press, Beijing, 12–22 (in Chinese).
- Liu, M., Luo, G., Wang, H., 2014. The 2013 Lushan Earthquake in China Tests Hazard Assessments. *Seismological Research Letters*, 85 (1): 40–43. doi: 10.1785/0220130117
- Lü, P. L., Wu, K. T., Li, M. F., 1997. Research on Datong Yanggao Seismic Swarm of 1989–1995 and Post Earthquake Prediction. *Earthquake Research in Shanxi*, (1–2): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- Luo, G., Liu, M., 2010. Stress Evolution and Fault Interactions before and after the 2008 Great Wenchuan Earthquake. *Tectonophysics*, 491 (1–4): 127–140. doi: 10.1016/j.tecto.2009.12.019
- Shao, Z.G., 2007. FEM Numerical Simulation of Deformation of Strong Earthquake and Geodynamic Environment (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese).
- Shen, Z.K., Wan, Y.G., Gan, W.J., et al., 2004. Crustal Stress Evolution of the Last 700 Years in North China and Earthquake Occurrence. *Earthquake Research in China*, 20(3): 211–228 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y.L., Cao, J.L., 2008. Effective Viscosity of China Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 82–95 (in Chinese with English abstract).
- Stein, R.S., 1999. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence. *Nature*, 402(6762): 605–609. doi: 10.1038/45144
- Sun, Y.J., Dong, S.W., Fan, T.Y., et al., 2013. 3D Rheological Structure of the Continental Lithosphere beneath China and Adjacent Regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(9): 2936–2946 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., 1997. Determining the Seismicity Trend in North China Seismic Region by the Seismicity in Taiyuan Basin. *Earthquake Research in Shanxi*, (1–2): 69–75 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Liu, J., Shen, X. H., et al., 2008. Dynamic Simulation of Interactions between Major Earthquakes on the Xianshuihe Fault Zone. *Science China Earth Science*, 51 (10): 1388–1400 (in Chinese).
- Wang, H., Zhang, G. M., Shi, Y. L., et al., 2006. Numerical Simulation of Movement and Deformation of Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(2): 15–23 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. Z., Wang, W., Wu, J. K., 2011. *Elastic Mechanics*. Peking University Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, R., Huang, J. F., Sun, X. Y., et al., 1982. Simulation of Tectonic Stress Field in North China. *Science China*

- Chemistry*, (4):337—344 (in Chinese).
- Wang, X. W., Zhao, X. P., Zhao, L. H., et al., 2001. Crustal Deformation and Strain Field and Analysis of Moderately Strong Earthquake Risk along Shanxi Seismic Belt. *Earthquake*, 21(1):14—24 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. M., Zheng, B. H., Li, X. Y., et al., 1993. Research on Seismotectonic of 1695 Linfen  $7\frac{1}{2}$  Earthquake. In: Ma, Z. J., ed., *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Seismological Press, Beijing, 172—189 (in Chinese).
- Wu, L., 1995. Discussion and Thinking for Some Problems on 1695 Linfen Macroquake. *Earthquake Research in Shanxi*, (3—4):20—23 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Q. F., Lian, Y. F., Zu, J. H., et al., 1991. Research on Geothermal in Shanxi Fault Depression Zone. *Chinese Science Bulletin*, 36(7):532—534 (in Chinese).
- Xie, X. S., Zhao, J. Q., Jiang, W. L., et al., 2007. Study on Holocene Paleoearthquake in Xizhang Trench on the Jiaocheng Fault Zone, Shanxi Province. *Seismology and Geology*, 29(4):744—755 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. M., Zhou, B., Geng, S. J., et al., 2010. Segmentation Characteristics and Activity of Cixian-Daming Fault. *North China Earthquake Sciences*, 28(1):1—7 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Deng, Q. D., 1993. Seismotectonic of 1303 Hongtong Earthquake. In: Ma, Z. J., ed., *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Seismological Press, Beijing, 149—158 (in Chinese).
- Xu, Z. B., Wang, J. Y., Yun, W., et al., 1998. Numerical Simulation of Current Tectonic Stress Field in South Central Shanxi. *Journal of China University of Mining & Technology*, 27(1):13—18 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Chen, L. W., Yang, L. M., et al., 2013. Numerical Simulation on Strong Earthquake Dynamic Process of Bayan Har Block. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3):304—314 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Zeng, W. H., Wang, Y., et al., 2016. Numerical Simulation on Magnitude 7 or Over Earthquakes in Southeast Gansu Province and Its Neighboring Areas. *Earth Science*, 41(7):1238—1248 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., 2012. Numerical Simulation on Strong Earthquake Dynamic Process of Bayan Har Block in Qinghai-Tibetan Plateau (Dissertation). Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou (in Chinese).
- Yin, N., Han, J. Q., 2010. Probe into the Space-Time Occurrence Laws of the Earthquakes ( $M \geq 6$ ) since 1 000 AD in Shanxi Seismic Belt. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 20(18):161—163 (in Chinese with English abstract).
- Yin, X. C., 2011. *Solid Mechanics*. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, P. Z., 2008. The tectonic Deformation, Strain Distribution and Deep Dynamic Processes in Eastern Margin of Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China (Ser. D)*, 38(9):1041—1056 (in Chinese).
- Zhang, S. M., 2000. Basin Evolutionary Differences and Seismotectonics of Fenwei Graben System. *Journal of Geomechanics*, 6(2):30—37 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, S. B., Zhang, P. Z., 2013. FEM Simulation of Interseismic and Coseismic Deformation Associated with the 2008 Wenchuan Earthquake. *Tectonophysics*, 584: 64—80. doi:10.1016/j.tecto.2012.06.024
- Zhu, S. B., Zhang, P. Z., 2010. Numeric Modeling of the Strain Accumulation and Release of the 2008 Wenchuan, Sichuan, China, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B):2825—2839. doi:10.1785/0120090351
- ## 附中文参考文献
- 陈连旺,陆远忠,郭若眉,等,2001.华北地区断层运动与三维构造应力场的演化.地震学报,23(4):349—361.
- 陈连旺,张培震,陆远忠,等,2008.川滇地区强震序列库仑破裂应力加卸载效应的数值模拟.地球物理学报,51(5):1411—1421.
- 刁桂苓,胡新亮,张晓,等,2007.洪洞临汾大震震源断层的相互作用和地震趋势分析.华北地震科学,25(2):1—4.
- 光春云,孙国学,1993.太原盆地历史地震活动特征及未来地震形势估计.山西地震,(1):3—8.
- 郭祥云,蒋长胜,王晓山,等,2017.鄂尔多斯块体周缘中小地震震源机制及应力场特征.大地测量与地球动力学(待刊).
- 侯廷爱,程新原,孟雁英,等,1997.太原盆地地震群的几个特征.山西地震,(3):14—19.
- 胡幸平,崔效锋,宁杰远,等,2012.基于汶川地震序列震源机制解对龙门山地区构造变形模式的初步探讨.地球物理学报,55(8):2561—2574.
- 黄福明,李群芳,黄佩玉,1992.山西地震带活动趋势的初步研究.中国地震,8(4):34—42.
- 江娃利,邓起东,徐锡伟,等,2004.1303年山西洪洞8级地震地表破裂带.地震学报,26(4):355—362.
- 李铁明,沈正康,徐杰,等,2007.华北地区  $M_s \geq 6.5$  级地震震源断层参数的研究.地球物理学进展,22(1):95—103.
- 李玉江,陈连旺,陆远忠,等,2013.汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟.地球科学,38(2):398—410.
- 李玉江,陈连旺,叶际阳,2009.数值模拟方法在应力场演化

- 及地震科学中的研究进展.地球物理学进展,24(2):418—431.
- 刘光勋,孟宪梁,阎凤忠,1993.山西及其邻区强震构造条件和潜在震源区划分.见:马宗晋,主编,山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社,12—22.
- 刘光勋,阎凤忠,1995.从山西地震带看大同—阳高地震.山西地震,(1):3—6.
- 吕培苓,吴开统,李闽峰,1997.1989 年—1995 年大同—阳高震群及其震后预报研究.山西地震,(1—2):17—23.
- 邵志刚,2007.强地震形变过程的有限元数值模拟及其动力学环境的研究(博士学位论文).合肥:中国科学技术大学.
- 沈正康,万永革,甘卫军,等,2004.华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震的关系研究.中国地震,20(3):211—228.
- 石耀霖,曹建玲,2008.中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论.地学前缘,15(3):82—95.
- 孙玉军,董树文,范桃园,等,2013.中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构.地球物理学报,56(9):2936—2946.
- 田勇,1997.利用太原盆地地震活动判断华北地震区地震活动趋势.山西地震,(1—2):69—75.
- 王辉,刘杰,申旭辉,等,2008.鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究.中国科学(D辑),38(7):808—818.
- 王辉,张国民,石耀霖,等,2006.青藏活动地块区运动与变形特征的数值模拟.大地测量与地球动力学,26(2):15—23.
- 王敏中,王炜,武际可,2011.弹性力学教程.北京:北京大学出版社.
- 王仁,黄杰藩,孙荀英,等,1982.华北地震构造应力场的模拟.中国科学(B辑),(4):337—344.
- 王挺梅,郑炳华,李新元,等,1993.1695 年临汾 71/2 级地震的地震构造研究.见:马宗晋,主编,山西临汾地震研究与系统减灾,北京:地震出版社,172—189.
- 王秀文,赵新平,赵丽华,等,2001.山西地震带形变应变场及中强地震危险性分析.地震,21(1):14—24.
- 吴乾蕃,廉雨方,祖金华,等,1991.山西断陷带地热研究.科学通报,36(7):532—534.
- 武烈,1995.关于 1695 年临汾大震若干问题的商榷和思考.山西地震,(3):20—23.
- 谢新生,赵晋泉,江娃利,等,2007.山西交城断裂带西张探槽全新世古地震研究.地震地质,29(4):744—755.
- 徐锡伟,邓起东,1993.1303 年洪洞地震的地震构造.见:马宗晋,主编,山西临汾地震研究与系统减灾.北京:地震出版社,149—158.
- 徐志斌,王继尧,云武,等,1998.晋中南现代构造应力场的数值模拟研究.中国矿业大学学报,27(1):13—18.
- 许华明,周斌,耿师江,等,2010.磁县大名断层分段特征及活动性.华北地震科学,28(1):1—7.
- 杨兴悦,陈连旺,杨立明,等,2013.巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟.地震学报,35(3):304—314.
- 杨兴悦,2012.青藏高原巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟(硕士学位论文).兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 杨兴悦,曾文浩,王燕,等,2016.甘东南及邻区 7 级以上强震数值模拟.地球科学,41(7):1238—1248.
- 殷娜,韩军青,2010.山西地震带公元 1000 年以来  $M \geq 6$  地震时空发生规律探讨.科技情报开发与经济,20(18):161—163.
- 尹祥瑞,2011.固体力学.北京:地震出版社.
- 张培震,2008.青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程.中国科学(D辑),38(9):1041—1056.
- 张世民,2000.汾渭地堑系盆地发育进程的差异及其控震作用.地质力学学报,6(2):30—37.