

李惠玲,李冬梅,李颖,等. 2023. 山西活动断陷带主要断层垂直形变分段特征. 中国地震, 39(4):821~831.

山西活动断陷带主要断层垂直形变分段特征

李惠玲^{1,2)} 李冬梅^{1,2)} 李颖^{1,2)} 陈永前^{1,2)}
陈慧^{1,2)} 高云峰^{1,2)} 魏凯艳^{1,2)}

1) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025

2) 山西省地震局, 太原 030021

摘要 断层运动方式与滑动速率是断层活动性研究和地震危险性判定的重要参数。本文基于山西断陷带多年积累的跨断层水准观测资料, 在处理与重构的基础上采用断层活动性分析方法, 基于构造分区给出各构造区主要断层现今运动特征。结果表明, 山西断陷带主要断层在观测期内以继承性正断运动为主, 各盆地断层运动特征具有显著差异, 表现为南、北两段的垂直活动量明显大于中段, 其中, 忻定盆地累积变化量值最小。从断层垂直活动速率来看, 五台山断裂、系舟山山前断裂、唐河断裂和霍山山前断裂跨断层测段活动速率明显低于全区水平; 受长期构造应力加载及区域中强地震影响, 各时段断层运动也存在差异变化, 下达枝、亭旨头、太原、广胜寺等部分跨断层测段表现出明显的断层逆继承运动、断层相对闭锁等特征。

关键词: 山西断陷带 跨断层观测 垂直形变 时空分段特征

[文章编号] 1001-4683(2023)04-0821-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

山西断陷带以剪切拉张变形为特征, 受 NNE 向右旋走滑正断裂控制, 正断层分量占主导地位(安美建等, 1998; 张培震等, 2013)。正断性质断裂带是在重力和拉伸构造力作用下产生的变形组合(马晓静, 2013), 山西断陷带作为发育有众多大型正断拉张活动断层的裂谷, 其内部构造复杂, 控盆主边界断裂活动显著(Liu et al, 2021, 2023; 张娜等, 2021; 石婧, 2023)。由于垂直差异运动强烈使构造变形非连续性较强, 利于应力积累和强震孕育, 存在发生强震的构造背景和活动机制(邓起东等, 2003; 王同庆等, 2017; 张培震等, 2003)。山西历史上曾发生过多次 7 级、8 级强震, 如 1303 年山西洪洞 8 级地震, 其发震构造霍山山前断裂为控盆断裂, 是一近直立断层, 地表破裂具有明显的正断层活动性质(徐锡伟等, 1990), 此次 8 级地震距今已有 700 多年历史, 按华北地区强震平均 300 年周期来考虑, 该区应至少发生一次 6 级左右地震(王健等, 2004)。近年来, 山西裂谷带为地震重点监视防御区之一, 山西裂谷带北段也是中国大陆 7 级以上地震潜在的危險地段(M7 专项工作组, 2012), 其未来

[收稿日期] 2023-09-11 [修定日期] 2023-11-06

[项目类别] 太原大陆裂谷国家野外科学观测研究站研究课题(NORSTY2022-04)、山西省地震局重点科研项目(SBK-2326)、国家自然科学基金(41974111)共同资助

[作者简介] 李惠玲, 女, 1980 年生, 高级工程师, 主要从事地形变地震监测预报和研究工作。E-mail: king_ling@126.com
李冬梅, 通讯作者, 女, 1965 年生, 高级工程师, 主要从事地震监测预报预警工作。E-mail: ldm19@126.com

震情形势严峻而复杂。因此,加强对该区域断层现今运动状态的监视与研究,对分析其构造运动规律和地震危险性具有参考价值。

地震孕育发生过程中会伴随较显著的断层形变异常(车兆宏等,1999;李杰等,2011;王双绪,2011;刘瑞春等,2021a),而跨断层水准测量因其测线跨越一些重要断层,是定量研究断层近场活动的有效手段,获得的断层形变成果物理意义明确,在地球动力学、活动构造和获取地震异常前兆信息中得到广泛应用(曹建玲等,2016、2020;李惠玲等,2021;马伶俐等,2015、2020)。本文从断层活动方式及活动强度的角度对山西断陷带观测以来跨断层水准获得的垂直形变时间序列进行重构,尝试提取信号中的异常信息,结合山西及邻区历史中强地震可能对山西断陷带断层活动产生的影响,探索研究区内主要断层的活动特征。

1 跨断层形变数据选取

自20世纪70年代开始,山西地区就已开展跨断层形变观测,至今已有40年以上历史,目前有11处跨断层流动水准监测场地,4处跨断层定点短水准观测场地(图1)。流动水准监测场地20世纪70年代起测6处,20世纪80年代起测4处,21世纪初起测1处,观测最早始于1973年8月,最晚为2014年2月,监测场地全部跨出露断裂,其中跨全新世活动断裂10处,占总场地数的90.91%,跨早第四纪活动断裂1处,较好地满足了监测规范对监测场地跨断层年代的要求。定点水准监测场地20世纪70年代起测1处,20世纪80年代起测3

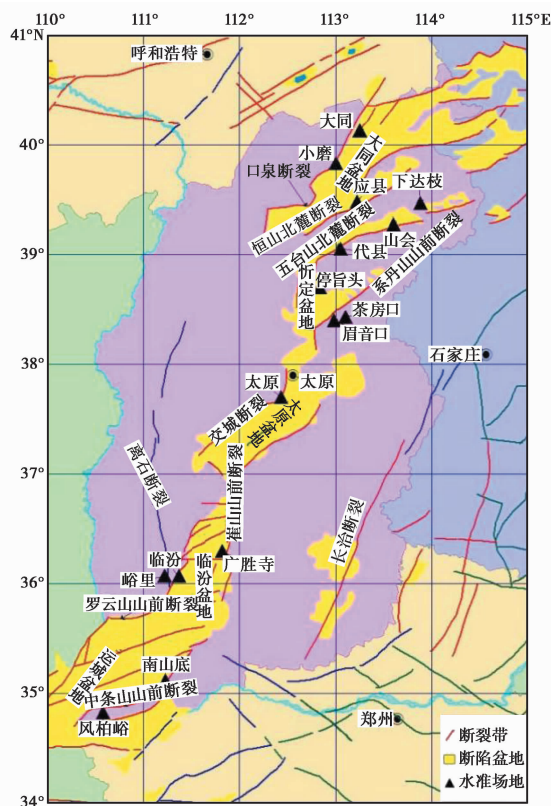


图1 山西跨断层形变监测场地分布

处,观测最早始于 1979 年 1 月,最晚为 1986 年 1 月,观测周期 2018 年 10 月前为 1 日,2018 年 10 月后为 5 日。

考虑到资料的完整性以及长期积累和研究的主要目标,在测段选取时将观测时间尚短、对历史地震不具统计意义的部分跨断层测段进行了剔除,最终选取观测时间较早且资料完整的 10 处跨断层流动水准及 4 处跨断层定点水准场地观测资料,并系统梳理了跨断层形变场地监测断层概况(表 1)。所选场地均为基岩端点,所用资料时间跨度最长达 49 年。

表 1 山西跨断层形变监测场地概况及观测反映的断层活动性质

场地名称	观测手段	监测断层名称	断层产状	资料来源	资料时段(年-月)	断层活动性质
大同	水准 (定点)	口泉断裂 (口泉—上皇庄段)	N35°E~55°/ SE∠50°~70°	徐伟等,2011	1986-01—2022-12	正断兼 右旋走滑
小磨	水准 (流动)	口泉断裂 (鹅毛口—口泉段)	N35°E~55°/ SE∠50°~70°	徐伟等,2011	1984-01—2022-12	正断兼 右旋走滑
应县 大石口	水准 (流动)	恒山北麓断裂 (窰子沟—牛槽峪段)	N50°E~60°/ NW∠65°~78°	地震安全性 评价报告 ^①	1992-02—2022-12	正断兼 右旋走滑
下达枝	水准 (流动)	唐河断裂	NW 30°/ SW∠64°~71°	李腊月等,2014	1983-06—2022-12	正断层
代县	水准 (定点)	五台山北麓断裂	N60°E~70°/ NW∠45°~82°	刘光勋等,1991	1985-01—2022-12	正走滑
亭旨头	水准 (流动)	五台山西麓断裂	N23°E/ NWW∠85°~90°	李腊月等,2014	1979.12—2022.12	正断层
茶房口	水准 (流动)	系舟山山前 断裂(南西段)	N45°E~50°/ NW∠65°~70°	窦素芹等,1995	1979-12—2022-12	正断层
眉音口	水准 (流动)	系舟山山前 断裂(南西段)	N45°E~50°/ NW∠65°~70°	窦素芹等,1995	1979-12—2022-12	正断层
太原	水准 (定点)	交城断裂中段	N58°E~74°/ SE∠40°~80°	谢新生等,2008; 李腊月等,2014	1979-01—2022-12	正断兼 右旋走滑
广胜寺	水准 (流动)	霍山山前断裂 (苏堡—广胜寺段)	N0°E~30°/ NW∠60°~80°	徐锡伟等,1990; 毕丽思等,2011	1973-08—2022-12	正断兼 右旋走滑
临汾	水准 (定点)	罗云山断裂(龙祠断裂、 马头山断裂北部)	NN30°E~45°/ SE∠70°~80°	李宏伟等,2018	1985-01—2022-12	正断兼 右旋走滑
峪里	水准 (流动)	罗云山断裂 (龙祠段)	N30°E~45°/ SE∠70°~90°	孙昌斌等,2011	1980-01—2022-12	正断兼 右旋走滑
风伯峪	水准 (流动)	中条山北麓断裂 中段(解州段)	NE65°E~90°/ NW∠60°~80°	程绍平等,2002; 郭春杉等,2019	1984-02—2022-12	正走滑
南山底	水准 (流动)	中条山北麓断裂 东段(夏县段)	N25°E~30°/ NW∠60°~80°	程绍平等,2002; 郭春杉等,2019	1994-01—2022-12	正走滑

2 断层垂直形变活动性参量计算方法

断层垂直升降累积量是基于累积变化的研究思路,选用起始年的观测数据作为参考基

^① 中国地震局地壳应力研究所. 1998. 山西平朔安家岭露天煤炭有限公司工业广场地震安全性评价报告.

准,利用每年某月份的测值减去基准年对应月份的测值,计算每年在基准年基础上的水准累积变化量,这样既可以消除季节变化等因素引起的年周变影响,又可以了解断层背景活动方式,得到的断层垂直升降累积量能更客观地描述断层在观测期内的活动状态。可根据公式(1)得到相对于参考年的累计年变化量,即

$$\Delta H = \frac{1}{2}(\Delta H_1 + \Delta H_2) \quad (1)$$

其中,计算得到的断层垂直累积升降量 $\Delta H > 0$,表示正断层活动; $\Delta H < 0$,表示逆断层活动。

断层垂直形变活动速率是衡量断层活动强度的一个重要指标,其在一定程度上反映了断层活动随时间变化的动态特征。为消除观测粗差、地表季节性变化引起的年周期变化对断层继承性构造活动的影响,利用每月测值减去上年同期测值,得到每年12个月相对滑动量,再除以一年时间尺度,由此得到断层活动年速率,即

$$\Delta S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i) \quad (2)$$

其中, a_i 表示某月测值, b_i 表示上年同期测值。

3 计算结果

对选取的14处跨断层形变水准场地观测数据进行预处理,剔除数据中因干扰引起的明显突变等,由于取用的资料时间间隔有所不同,对所选用的不等间隔观测资料进行连续性检验,剔除重复数据,并对观测数据采用线性插值进行逐月内插计算,获得等间隔单月观测数据。

3.1 断层垂直活动性质

通过计算各测段在基准年基础上的年累积变化量,求出新的观测值时间序列,得到断层在观测期内的活动状态(表1),并从北到南按构造分区,分别给出各盆地内水准测段垂直活动累积量时序曲线(图2)。因太原盆地仅有一处监测场地,故与临汾盆地合并绘制。

从图2可以看出,山西断陷带各断层在观测期内以张性正断活动为主要特征。从盆地内各测段垂直活动累积量可以看出,南、北两段的活动量明显大于中段。其中,忻定盆地表现出小区域活动特征,其累积变化量值较小;而南山底测段解算出的活动量值较大,表现为快速拉张,可能与测区常年受地热温泉开采影响有关。

3.2 断层垂直活动强度

由于收集到的资料观测时长大部分在30年以上,为能较好地消除季节变化及各种系统性、周期性误差影响,利用线性回归方法计算各测段断层的垂直形变速率,其中速率为正值表示张性,速率为负值表示压性。跨断层测段由北向南监测的断层活动结果见表2。

山西地区跨断层形变观测资料计算给出的各断层垂直形变速率结果表明,山西断陷带断层活动以继承性正断运动为主,以忻定盆地为界,南、北两段的断层垂直形变速率与中段差异较大,表现出显著构造活动差异特征,这与万年尺度的野外地质调查结果一致性较好(表2)。五台山断裂、系舟山断裂、唐河断裂和霍山断裂的垂直形变速率明显低于全区平均垂直形变速率,区域特点显著。通过定量分析得到的断层运动特征与车兆宏(1993)、郭良迁等(2003)、贾晓东等(2012)的研究结果基本一致。而南山底场地跨断层垂直形变速率量值

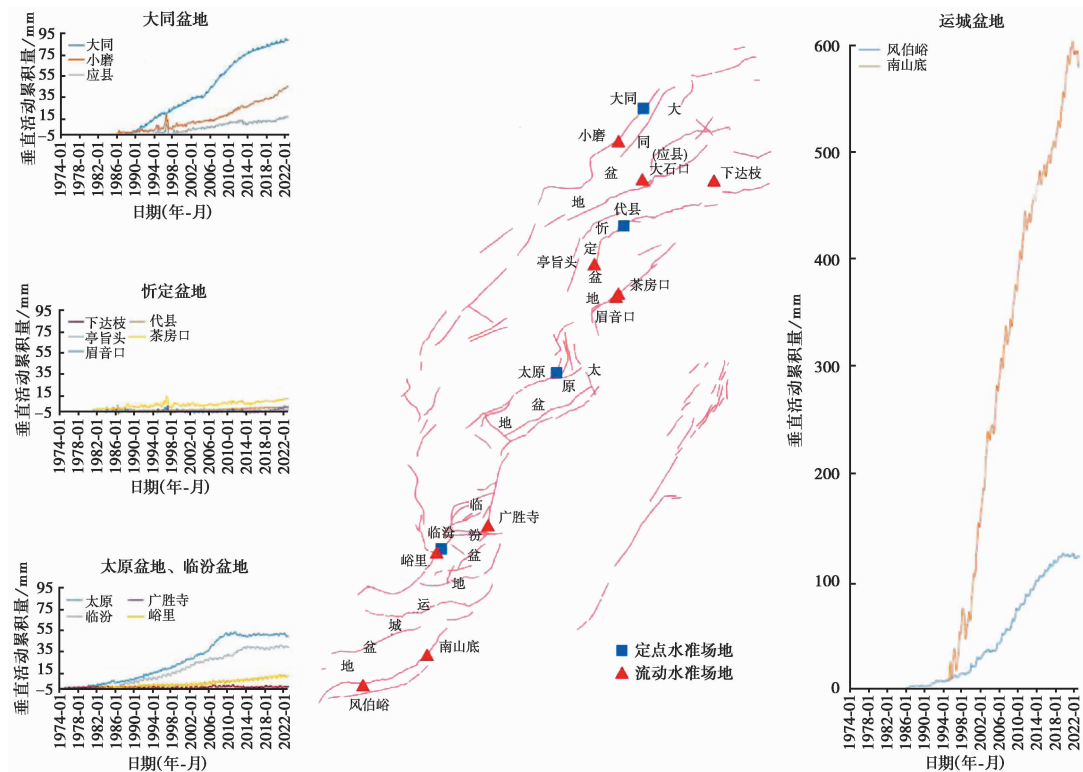


图 2 山西断陷带断层垂直活动累积量曲线

表 2 断层垂直形变速率统计结果

场地名称	监测断层	跨断层资料结果		地质调查结果(郭良迁等,2003)	
		速率 $\text{/(mm} \cdot \text{a}^{-1}\text{)}$	断层 活动性质	速率 $\text{/(mm} \cdot \text{a}^{-1}\text{)}$	断层 活动性质
大同	口泉断裂(口泉—上皇庄段)	2.50	正断张性	3.60	右旋正走滑
小磨	口泉断裂(鹅毛口—口泉段)	1.30	正断张性	3.60	右旋正走滑
大石口	恒山北麓断裂(窰子沟—牛槽峪段)	0.60	正断张性	1.00	正走滑
下达枝	唐河断裂	0	正断压性	0.34	正断层
代县	五台山北麓断裂	0.10	正断张性	1.12	正断层
亭旨头	五台山西麓断裂	0	正断张性	1.12	正断层
茶房口	系舟山山前断裂(南西段)	0.30	正断张性	1.48	正断层
眉音口	系舟山山前断裂(南西段)	0.20	正断张性	1.48	正断层
太原	交城断裂中段	1.20	正断张性	1.38	正断层
广胜寺	霍山山前断裂南段次级段(苏堡—广胜寺段)	0.10	正断张性	0.69	右旋正走滑
临汾	罗云山断裂(龙祠断裂、马头山断裂北部)	1.00	正断张性	0.15	右旋正走滑
峪里	罗云山断裂(龙祠段)	0.30	正断张性	0.15	右旋正走滑
风伯峪	中条山北麓断裂中段(解州段)	3.30	正断张性	2.70	正走滑
南山底	中条山北麓断裂东段(夏县段)	18.10	正断张性	0.60	正走滑

较大,根据进一步调查研究,其主要受到测区周边地热温泉大量开采的影响。

根据上述分析可知,研究区断层在观测期内整体呈张性活动,这与山西地区所处的背景应力场有关。已有大量研究和观测事实表明山西所在的华北地区主要受张性构造应力场作用,主张应力方向为 NNW-SSE,主压应力方向为 NEE-SWW(武敏捷等,2011)。显然,本文所分析的 NE、NNE 及 NEE 向断层呈张性活动与此是吻合的。

4 分析与讨论

4.1 断层垂直升降累积量变化与区域地震关系

根据前人研究给出的以累积活动量时序曲线系统偏离正常线性趋势,即断层偏离背景活动趋势作为异常判断依据(李腊月等,2023;张希等,2020),结合山西及邻区典型地震,探讨断层现今活动与区域中强地震的关系。

图 2 中多数测段曲线反映出一致的整体趋势运动,在本区及邻区中强地震前,部分测段表现出较显著的趋势转折或速率变化异常。其中,1989 年大同 6.1 级地震前后,大同、下达枝、茶房口、亭旨头、眉音口测段出现加速拉张或张压交替的大幅变化,多处跨断层水准观测曲线均具有 1987—1988 年开始加速后转折的特点。这种准同步、范围较广的加速、转折变化,反映了区域应力场发生改变。

1998 年张北 6.2 级地震前观测到的异常较多,区域异常同步特征明显,如:大同盆地小磨、应县测段、忻定盆地下达枝、亭旨头、茶房口与眉音口测段在震前 2~3 年同步出现显著的趋势转折异常变化,反映出断层在趋势运动背景下的速率加速及转折运动。

2006 年文安 5.1 级地震前,大同和太原测段、茶房口和亭旨头测段水准垂直累积活动量在一定程度上表现出相似的异常形态,均为在震前的 2004—2006 年出现累积活动量值增大的异常变化。

此外,除忻定盆地外,山西断陷带内其余 4 个盆地内部分测段受 2008 年汶川 8.0 级地震影响,垂直活动累积量改变,表现为张性活动变缓,或部分测段表现出闭锁、挤压状态。刘峡等(2013)对汶川 8.0 级地震前后山西断陷带的地壳运动模拟研究结果显示,1999—2007 年、2007—2009 年两个时段的 GPS 模拟结果差异较大,前一时段断层活动以拉张变形为主,后一时段部分断层受挤压作用为主,显示山西断陷带的动力学环境发生了改变,所受构造挤压增强。总体上,2008 年以后山西断陷带内的断层形变以正断减速为主要特征。通过定量分析得到的山西断陷带跨断层水准各测段垂直活动累积量时序曲线解算结果与刘峡等(2013)的研究结果基本一致。

4.2 断层垂直形变速率时空分段特征

结合前人的研究成果,同时考虑山西及邻区几次中强地震(1989 年大同 6.1 级、1998 年张北 6.2 级、2006 年文安 5.1 级地震)以及 2008 年汶川 8.0 级、2011 年日本 9.0 级地震对山西断陷带断层活动可能造成的影响,将各测段观测结果分为 1989 年前、1990—1999 年、2000—2008 年、2008—2011 年和 2011—2022 年 5 个时间段,计算了断层垂直形变速率(表 3)。

断层垂直形变速率时空分段结果(图 3)显示,忻定盆地可能为地壳运动强度转化过渡带,断层活动速率与南北段存在较大差异;另外,唐河断裂下达枝测段、五台山山前西麓断裂亭旨头测段、交城断裂中段太原测段、霍山山前断裂南段(苏堡—广胜寺段)广胜寺测段的

表 3 山西断陷带断层垂直形变速率统计结果

场地名称	1989 年前		1990—1999 年		2000—2008 年		2008—2011 年		2011—2022 年	
	速率 $/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	活动 性质	速率 $/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	活动 性质	速率 $/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	活动 性质	速率 $/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	活动 性质	速率 $/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	活动 性质
大同 (大同盆地)	0.469	继承性	2.558	继承性	3.117	继承性	4.518	继承性	2.072	继承性
小磨 (大同盆地)	0.483	继承性	0.670	继承性	0.838	继承性	2.029	继承性	2.011	继承性
应县大石口 (大同盆地)			0.390	继承性	0.776	继承性	0.902	继承性	0.434	继承性
下达枝 (忻定盆地)	-0.140	逆继承性	0.017	继承性	0.001	继承性	0.026	继承性	-0.003	逆继承性
代县 (忻定盆地)	0.085	继承性	0.028	继承性	0.104	继承性	0.165	继承性	0.130	继承性
亭旨头 (忻定盆地)	0.023	继承性	-0.021	逆继承性	-0.025	逆继承性	-0.186	逆继承性	0.073	继承性
茶房口 (忻定盆地)	0.532	继承性	0.136	继承性	0.134	继承性	0.531	继承性	0.259	继承性
眉音口 (忻定盆地)	0.224	继承性	0.030	继承性	0.056	继承性	0.307	继承性	0.277	继承性
太原 (太原盆地)	0.803	继承性	1.421	继承性	2.754	继承性	1.851	继承性	-0.099	逆继承性
广胜寺 (临汾盆地)	0.110	继承性	-0.048	逆继承性	0.144	继承性	0.037	继承性	-0.053	逆继承性
临汾 (临汾盆地)	1.332	继承性	1.054	继承性	1.353	继承性	1.230	继承性	0.670	继承性
峪里 (临汾盆地)	0.177	继承性	0.169	继承性	0.365	继承性	0.338	继承性	0.391	继承性
风伯峪 (运城盆地)	0.533	继承性	1.391	继承性	4.844	继承性	7.641	继承性	3.740	继承性
南山底 (运城盆地)			13.104	继承性	30.156	继承性	26.275	继承性	15.847	继承性

断层垂直形变速率表现出正负交替的活动状态,反映断层在观测期内存在非继承性的张压交替变化。

(1)第一时段(1989 年之前),除下达枝测段外,其余断层反映出具有一致性较好的继承性正断拉张运动,断层整体活动速率较小;南段速率稍大于北段,可能与该时段邻区河北及山东地区一系列中强地震(1981 年隆尧 $M_s5.8$ 、1983 年菏泽 $M_s5.9$ 、1985 年任县 $M_s5.3$ 地震)较活跃有关;而在 1989 年大同—阳高 $M_s6.1$ 地震前,大同盆地断层活动迹象不明显,各测段垂直形变速率未表现出显著的加速运动,可能表明断层存在一定静止或运动速率减小的状态。

(2)第二时段(1990—1999 年),山西断陷带中北段及其邻近地区出现空间集中的中强地震活跃,而该时段山西断陷带大同盆地和太原盆地内的跨断层监测测段表现出显著的断层垂直形变加速运动,1991 年忻州 $M_s5.1$ 、阳高 $M_s5.8$ 、张北 $M_s6.2$ 地震可能与此有关;亭旨头、广胜寺测段出现断层逆继承性转折变化,忻定盆地和临汾盆地的断层垂直形变速率明显减小,反映该时期存在区域构造应力场增强现象。

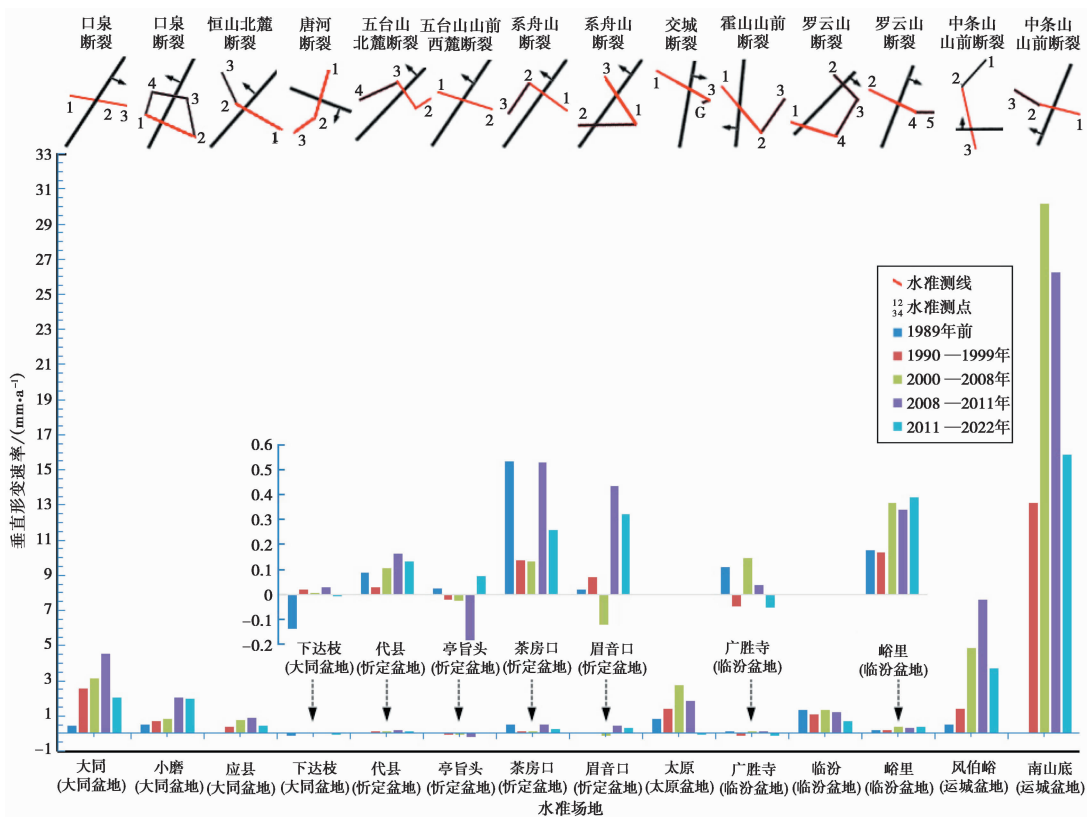


图3 山西断陷带断层垂直形变速率统计

(3) 第三时段(2000—2008年),山西断陷带及邻区整体中强地震活动相对平静,该时段内发生了几次中等地震;亭旨头测段跨断层监测结果仍反映断层逆继承性运动;从断层活动定量结果来看,除忻定盆地的下达枝和茶房口两个测段跨断层垂直形变速率稍有减缓外,研究区其他各测段断层垂直形变速率均显示加强,表明山西断陷带整体拉张增强的正断性质。其中,下达枝和茶房口测段的继承性速率减缓,亭旨头测段的持续逆继承运动以及太原和临汾盆地内断层垂直形变速率显著增强,可能与2002年太原 $M_s4.7$ 、2003年洪洞 $M_s4.9$ 以及2006年文安 $M_s5.1$ 地震等几次中等地震孕育有关。

(4) 第四时段(2008—2011年),区域应力场呈现出与第三时段完全相反的状态,这一时期应力场呈现明显的分区特征。以忻定盆地南端为界,其以北的断层显示正断活动加速,垂直形变速率以增强为主,可能与2010年大同 $M_s4.5$ 和2010年阳曲 $M_s4.6$ 地震有关;局部区域亭旨头测段仍呈断层逆继承运动,且压性速率显著高于上一时段;忻定盆地以南的太原盆地、临汾盆地和运城盆地内的断层垂直形变速率呈正断活动减速特征,表现为由正断活动逐渐转为断层上、下盘相对运动减弱,显示区域构造挤压增强,这可能与2008年汶川 $M_s8.0$ 地震后中国大陆东、西部相对运动增强、鄂尔多斯块体与华北平原块体相对挤压和扭错显著增强,导致山西断陷带的动力学环境发生改变,区域形变场与应力场由构造拉张转为挤压及局部应变能积累有关(刘峡等,2013;刘瑞春等,2021b)。另外,2010年河津 $M_s4.8$

地震也发生在该时段内,而运城盆地南山底测段在长期受地热温泉开发影响下,其断层垂直形变速率呈现由上一期的正断拉张加速到拉张减缓趋势,也进一步揭示区域应力场的积累。

(5)第五时段(2011—2022年),全区断层以正断拉张为主,但张性活动整体较上一时段显著减弱,研究认为其可能是受到2011年日本9.0级强震影响造成应力扰动,进而发生震后应力松弛,并对中国大陆板块产生卸载作用(王丽凤等,2013)。此外,在该时段内,大同盆地、忻定盆地、太原盆地及临汾盆地的部分测段断层呈相对闭锁状态,断层活动低于历史水平(表3)。其中,下达枝、太原、广胜寺测段出现断层逆继承性变化可能是2016年一系列中小地震(2016年原平 M_s 4.2、清徐 M_s 4.2、盐湖 M_s 4.5地震等)活跃的触发因素。因此,断层活动变化差异较大的地区有利于局部应变能积累及区域中强地震的孕育、发生。

综上所述,山西断陷带跨断层水准观测结果反映出的断层加速、逆继承运动、断层相对闭锁等显著变化与中强地震活动之间存在一定关系。利用跨断层垂直形变速率分时段分析山西断陷带各断层活动特征,能在一定程度上反映出区域的应力变化情况。因此,从较长时间尺度来看,需进一步跟踪区域应力场的发展变化。

5 结论

采用断层垂直活动累积量及活动速率方法将山西断陷带自观测以来的跨断层水准时间序列进行重构,获得的断层活动方式及滑动速率能在一定程度上直接反映区域的应力变化情况,结合区域构造分区、分时段垂直形变速率结果和区域中强地震活动可能对山西断陷带断层活动产生的影响进行分析,得出以下结论:

(1)利用跨断层水准时间序列重构的垂直活动累积量分析盆地内各测段断层的活动特征,显示出山西断陷带断层以继承性正断活动为主,各盆地断层运动分区特征明显。

(2)构造分区的断层垂直形变速率结果显示,忻定盆地可能为地壳运动强度转化过渡带,其断层垂直活动速率较小,与南北两侧存在较大差异;时间分段特征显示,受区域中强地震及汶川8.0级等地震影响,各时段断层运动存在差异变化。此外在空间上,下达枝测段、亭旨头测段、太原测段及广胜寺测段在观测期内的断层垂直形变速率存在非继承性张压交替的显著变化;在时间上,逆继承性变化主要集中在第二时段,与区域及周边中强地震频发存在一定关系;而在第五时段,断层活动减速及逆继承性变化更趋于集中,这一现象值得引起关注。利用跨断层资料分析山西断陷带各盆地断层活动特征,可进一步加强对区域构造应力变化与中强地震关系的认识。

(3)区域背景应力水平是区域地震危险性的决定因素。断层活动累积量结果表明,受大规模区域构造应力场影响,区域地壳形变场变化显著,2008年以后山西断陷带内断层运动整体以拉张伸展减缓、挤压缩短增强为主要特征。特别是山西中南部,包括太原、临汾及运城盆地具有较高的局部应变能积累,应进一步关注该区域的地震危险性。

致谢:感谢曹建玲博士及李腊月高级工程师在整个研究过程中给予的悉心指导,感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

安美建,李方全. 1998. 山西地堑系现今构造应力场. 地震学报, 20(5): 461~465.

- 毕丽思,何宏林,徐岳仁,等. 2011. 基于高分辨率 DEM 的裂点序列提取和古地震序列的识别——以霍山山前断裂为实验区. 地震地质, **33**(4):963~977.
- 曹建玲,贾晓东,李腊月,等. 2016. 华北地区跨断层前兆异常特征综述. 地震, **36**(4):61~75.
- 曹建玲,张晶,闻学泽,等. 2020. 由 km 尺度的跨断层基线测量断层近场运动与变形——川滇块体东边界 2 个场地的初步实验. 地震地质, **42**(3):612~627.
- 车兆宏. 1993. 首都圈断层活动性研究. 华北地震科学, **11**(2):23~34.
- 车兆宏,谢觉民,张晶,等. 1999. 张北 6.2 级地震地形变形前兆演化特征. 地震, **19**(4):315~322.
- 程绍平,杨桂枝. 2002. 山西中条山断裂带的晚第四纪分段模型. 地震地质, **24**(3):289~302.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2003. 中国活动构造与地震活动. 地学前缘, **10**(增刊 1):66~73.
- 窦素芹,于慎涛,等. 1995. 系舟山山前活动断裂带的几何结构及其活动性. 见:《活动断裂研究》编委会,国家地震局地质研究所. 活动断裂研究 理论与应用 4. 北京:地震出版社.
- 郭春杉,李文巧,田勤俭,等. 2019. 中条山北麓断裂解州段晚更新世滑动速率研究. 地震, **39**(4):13~26.
- 郭良迁,薄万举,杨国华. 2003. 华北地区断裂带的现代形变特征. 大地测量与地球动力学, **23**(2):29~36.
- 贾晓东,武艳强,闫伟,等. 2012. 山西断裂带跨断层形变观测资料动态特征分析. 大地测量与地球动力学, **32**(3):31~35, 40.
- 李宏伟,刘瑞春,陈永前. 2018. 山西南部区域应变场演化与地震关系的数值模拟. 山西地震, (4):7~10.
- 李惠玲,曹建玲,魏文薪. 2021. 新疆精河 2017 年 6.6 级地震对 2018 年 5.4 级地震的应力影响分析. 大地测量与地球动力学, **41**(12):1253~1257,1320.
- 李杰,殷海涛,吴晨,等. 2011. 沂沭断裂带跨断层形变异常及其解释. 大地测量与地球动力学, **31**(4):18~21.
- 李腊月,许明元,何庆龙,等. 2014. 山西断裂带断层现今活动特征及与中强震关系浅析. 地震, **34**(4):143~151.
- 李腊月,尹海权,马伶俐,等. 2023. 丽江与芦山两次 $M_s7.0$ 地震震例回溯研究及亚失稳特征探讨. 地震研究, **46**(4):461~472.
- 刘光勋,于慎涛,张世民,等. 1991. 山西五台山北麓活动断裂带. 见:《活动断裂研究》编委会. 活动断裂研究(1). 北京:地震出版社.
- 刘瑞春,张锦,郭文峰,等. 2021a. 鄂尔多斯块体东南缘现今的变形特征与构造模式探讨. 地震地质, **43**(3):540~558.
- 刘瑞春,张锦,郭文峰,等. 2021b. 利用 GPS 观测研究山西断陷带现今构造应力场变化与地震活动. 地震工程学报, **43**(2):251~258.
- 刘峡,马瑾,占伟,等. 2013. 汶川地震前后山西断陷带的地壳运动. 大地测量与地球动力学, **33**(3):5~10.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究. 北京:地震出版社.
- 马伶俐,洪敏,彭丽媛,等. 2020. 基于跨断层形变资料的地震预测效能回溯性分析——以鲜水河断裂带为例. 防灾科技学院学报, **22**(1):23~31.
- 马伶俐,苏琴,李菲菲,等. 2015. 康定 6.3 级地震前鲜水河南段跨断层形变异常分析. 震灾防御技术, **10**(增刊 I):724~731.
- 马晓静. 2013. 正断层发生地震的动力学过程数值模拟研究. 国际地震动态, (9):37~39.
- 石婧, 2023. 吕梁隆起中段冲断构造解析. 地质科学, **58**(1):248~258.
- 孙昌斌,谢新生,许建红. 2011. 罗云山山前断裂带阶地调查研究及其构造意义. 中国地震, **27**(2):126~135.
- 王健,吴宣,张晓东,等. 2004. 1303 年山西洪洞 8 级地震高烈度区内地震活动特征及其物理意义. 地震学报, **26**(4):347~354,456.
- 王丽凤,刘杰,赵金贵,等. 2013. 2011 年日本 9.0 级地震的同震位错以及震后应力松弛过程对中国大陆的影响. 地震, **33**(4):238~247.
- 王双绪. 2011. 基于大地形变监测的大震预测问题思考. 国际地震动态, (2):8~13.
- 王同庆,王树发,杨博,等. 2017. 基于重力和 GPS 的山西地区形变特征分析. 地震研究, **40**(1):101~110.
- 武敏捷,林向东,徐平. 2011. 华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析. 大地测量与地球动力学, **31**(5):39~43.
- 谢新生,江娃利,孙昌斌,等. 2008. 山西交城断裂带多个大探槽全新世古地震活动对比研究. 地震地质, **30**(2):412~430.
- 徐伟,刘旭东,张世民. 2011. 口泉断裂中段晚第四纪最新活动研究. 中国地震, **27**(4):386~395.

- 徐锡伟,邓起东. 1990. 山西霍山山前断裂晚第四纪活动特征和 1303 年洪洞 8 级地震. 地震地质, (1):21~30,97~98.
- 张娜,黄金刚,魏越超,等. 2021. 山西断陷带南部三维 P 波速度结构及地震分布特征. 地质科学,56(4):1267~1278.
- 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. 中国科学(D 辑),33(增刊 1):12~20.
- 张培震,邓起东,张竹琪,等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学:地球科学,43(10):1607~1620.
- 张希,贾鹏,刘峡,等. 2020. 岷县漳县强震前的跨断层短临异常及亚失稳状态特征. 地震地质,42(5):1205~1207.
- Liu R C, Yang C S, Wang Q L, et al. 2021. Possible mechanism of the formation of the Jichechang ground fissure in Datong, China, based on in-situ observations. Environ Earth Sci,80(14):463.
- Liu R C, Zhang J, Guo W F, et al. 2023. Adaptive vertical-deformation field estimation and current tectonic deformation significance analysis in Shanxi rift valley. Front Earth Sci,11:1083562.

Segmentation Characteristics of Vertical Deformation of Main Faults in Shanxi Fault Depression Zone

Li Huiling^{1,2)}, Li Dongmei^{1,2)}, Li Ying^{1,2)}, Chen Yongqian^{1,2)}, Chen Hui^{1,2)}, Gao Yunfeng^{1,2)}, Wei Kaiyan^{1,2)}

1) Shanxi Taiyuan National Continental Rift Valley Dynamics Observation and Research Station, Taiyuan 030025, China

2) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China

Abstract The mode of fault movement and slip rate are important parameters for studying fault activity and determining earthquake risk. Based on processing and reconstruction of cross fault leveling observation data accumulated over the years in the Shanxi fault depression zone, we analyzed the current movement characteristics of the main faults in each structural area based on structural zoning. The results suggest that the main faults in the Shanxi fault depression zone were mainly characterized by inherited normal fault movement during the observation period, and there were significant differences in fault movement characteristics among different basins. The vertical activity of the north and south sections was significantly greater than that of the middle section, in which the Xinding Basin is of the smallest cumulative change value. From the perspective of vertical activity rate of faults, the activity rate of Mount Wutai Fault, Shizhoushan piedmont fault, Tanghe fault and Huoshan piedmont fault across faults is significantly lower than that of the whole region. Due to long-term tectonic stress loading and the influence of moderate to strong earthquakes in the region, there are also differences in fault movements at different time periods. Some cross fault survey sections, such as Xiaxiazhi, Tingzhitou, Taiyuan, and Guangshengsi, exhibit significant features such as reverse fault inheritance movement and relative fault locking.

Keywords: Shanxi fault depression belt; Cross-fault observation; Vertical deformation; Spatiotemporal segmentation characteristics