

万永魁, 刘峡, 万永革, 李媛, 王雷. 2018. 基于定点形变资料获取断裂浅层倾向和倾角的方法研究——以唐山台为例. 地震学报, 40(4): 471–480. doi: 10.11939/jass.20170160.

Wan Y K, Liu X, Wan Y G, Li Y, Wang L. 2018. Method for obtaining shallow fault inclination and dip angle based on the fixed-points deformation data: A case study of Tangshan seismic station. *Acta Seismologica Sinica*, 40(4): 471–480. doi: 10.11939/jass.20170160.

基于定点形变资料获取断裂浅层 倾向和倾角的方法研究 ——以唐山台为例^{*}

万永魁¹⁾ 刘 峡^{1),†} 万永革²⁾ 李 媛¹⁾ 王 雷³⁾

1) 中国天津 300180 中国地震局第一监测中心

2) 中国河北三河 065201 防灾科技学院

3) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 本文利用唐山地震台 1978—2016 年跨断层定点形变资料探究唐山地震台所跨断层的浅层倾向和倾角。首先, 对形变资料进行数字滤波处理, 消除原始观测数据中的非构造信息; 其次, 对数据精度进行评价, 得出 1997—2016 年滤波后的形变数据年累计残差普遍较小、精度较高; 最后, 采用精度较高的形变数据计算 SE 和 NW 两倾向不同倾角下基线与水准和的累计残差分布, 进而获取断层的浅层倾向和倾角。结果显示, 依据跨断层定点形变资料获得唐山地震台所跨断层的浅层倾向为 SE, 倾角为 89°, 该结果与前人探槽剖面中断层产状相一致, 反映出本文提出的基于长期跨断层定点形变资料通过数字滤波、数据精度评价来获取断裂浅层倾向和倾角的方法具有可行性, 但本文所得反演结果与唐山地震台目前采用的断层倾向 NW、倾角 72°存在一定偏差。

关键词 跨断层形变 数字滤波 精度评价 浅层倾向和倾角

doi: 10.11939/jass.20170160 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Method for obtaining shallow fault inclination and dip angle based on the fixed-points deformation data: A case study of Tangshan seismic station

Wan Yongkui¹⁾ Liu Xia^{1),†} Wan Yongge²⁾ Li Yuan¹⁾ Wang Lei³⁾

1) First Crust Deformation Monitoring and Application Center, China Earthquake
Administration, Tianjin 300180, China

2) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China

3) Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China

Abstract: Based on the data of the Tangshan seismic station during 1978–2016, shallow inclination and dip angle of the fault which crosses Tangshan seismic station were investigated.

* 基金项目 国家自然科学基金(41472180)和中国地震局第一监测中心科技创新
主任基金(FMC2017012)共同资助。

收稿日期 2017-08-05 收到初稿, 2017-10-20 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: aster551@mail.ustc.edu.cn



Firstly, eliminate non-geologic structure information by digital filtering; secondly, evaluate data precision and obtain that annual accumulated residual error of the filtered data from 1997 to 2016 is generally small and accurate; finally, accumulated residual distribution of baselines and leveling lines are calculated with different dip angles by using these processed data, and the shallow fault inclination and dip angle are obtained. The results show that, according to the cross-fault deformation data of fixed-points, the inclination of shallow fault is SE and dip angle is 89° , which is consistent with the fault attitude in the previous exploration profiles, suggesting that the method proposed in this paper is feasible. However, our inversion result is partly different from the fault inclination NW and dip angle 72° adopted at present by Tangshan seismic station.

Key words: cross-fault deformation; digital filtering; precision evaluation; shallow trend and dip angle

引言

1976 年唐山 $M_S 7.8$ 地震的震源深度为 11 km, 震中烈度达 XI 度, 造成约 24 万人死亡(刘启元等, 2007)。该地震震中位于燕山南缘与华北平原交会之处, 断层多被第四系沉积层覆盖, 关于唐山地震发震断层的倾向和倾角问题的争议持续存在。邱群(1976)根据 P 波初动信号求得唐山地震的发震断层为走向 N41°E、倾向 SE、倾角为 76° 的右旋正断层。张之立等(1980)采用 P 波初动方法得到唐山地震发震断层的倾角近似直立。陈运泰等(1979)利用三角测量和水准资料反演出此次地震发生在长 84 km、宽 34 km、走向 N49°E、倾向 SE、倾角为 76° 的断层上。Butler 等(1979)采用面波资料推算该地震发生在长 140 km、宽 15 km 的垂直断层上。此后, 桂焜长和耿世昌(1987)通过分析唐山地区的地质构造, 认为发震断层为位于开平向斜西北翼、倾向 NW、倾角约 60° 的开滦煤矿 V 号断层, 即唐山断裂。曾融生等(1988)根据地震折射和反射剖面分析认为唐山地震的发震断层有两条, 分别为近直立的开平地壳断裂和倾向 SE、成铲式结构的陡河断裂。郝书俭等(1998)、郝书俭和尤惠川(2001)利用高分辨率浅层地震探测剖面资料揭示出该地震的发震断层唐山断裂倾向 NW, 但南北段差异显著, 北段表现为逆断层, 南段则表现为高倾角正断层。万永革等(2008)利用小震分布和区域应力场确立唐山断裂北段的倾角为 $89.1^\circ \pm 1.3^\circ$, 近似直立; 南段倾向 NW、倾角为 $73.7^\circ \pm 2.8^\circ$ 。郭慧等(2011)利用钻孔和探槽揭示唐山断裂地表破裂带分为南北两支, 北支以右旋走滑为主, 地表垂直位移为西升东降, 南支地表垂直位移为东升西降, 兼具右旋走滑, 这种断层活动方式虽无法用单一的正断层或逆断层活动予以解释, 但与断裂带右旋走滑活动产生的垂直位移场吻合。武艳强等(2016)依据唐山 $M_S 7.8$ 地震同震位移得到震前唐山断裂的闭锁深度为 18—23 km, 发震断层倾角介于 74° — 90° 之间。万永革等(2017)用形变资料反演了唐山地震序列的断层破裂分布, 结果显示唐山断裂北段断层倾角近似直立。综上, 认为唐山地震发震断层为唐山断裂的占多数, 但是除了断层走向与地表主破裂带方向一致可以确定以外, 断层的具体倾向和倾角尚存争议。

同其它完整岩层相比, 断层具有应力强度低、易于变形的特点, 是地震前兆信息的敏感通道(周硕愚, 1994; 江在森等, 2001)。我国自 20 世纪六七十年代起在多条活动断裂开展跨断层形变监测, 观测数据在地震预测研究中取得了较好的实际应用效果(张晶等, 2011; 苏琴等, 2014), 同时获取了大量科研成果, 主要涵盖断层滑动速率计算和地震异常信息识别两

方面内容,但其前提需已经确定断层的产状。然而对于唐山大地震主破裂带北段的唐山地震台而言,日常采用断层倾向NW、断层倾角为72°进行数据处理,其依据并不充分,与多位研究人员反演得到的倾角结果(介于74°—90°之间)存在差异。唐山大地震发生后,震源区的余震活动一直在持续,特别是2016年8—9月期间,唐山开平—古冶一带出现了震群活动,相继发生 M_S 3.0—3.9地震3次, M_S 4.0地震1次,最近一次地震发生于2018年6月13日,震级为 M_S 2.0,震中位于唐山市古冶区,表明近期唐山地区的地震活动性又明显增强。因此,详细研究唐山 M_S 7.8地震发震断层的具体倾向和倾角,可为该区跨断层形变数据分析、地震预测研究及强震危险性评价提供可靠、准确的基础资料。

假定断层运动符合“刚体断块模型”,断层相对运动仅发生在断层面上,那么给定断层倾向为SE与NW两方向,在不同倾角情况下,反演得到跨断层基线与水准和的理论变化量与其实际变化量之间的累计残差,其中残差值最小的数据组合对应浅部断层实际倾向和倾角。基于以上考虑,本文拟以唐山地震台1978—2016年跨断层定点形变资料为基础,求取所跨断层的浅层倾向和倾角,为确定唐山地震发震断层北段的产状提供佐证。

1 场地概况和观测数据

唐山地震台位于唐山市路南区复兴路原第十中学院内,是唐山地区唯一的大地形变台站。该台站观测场所跨断层为唐山断裂,即唐山 M_S 7.8地震的地表主破裂带,破裂带的错动导致台站内道路、涵管、围墙和房基均发生明显位错,其中右旋走滑分量为1.2 m,地表垂直位移表现为西升东降,位错量为0.5 m。破裂带走向为NNE,跨地表破裂带观测场布设有4条基线(J_1J_2 , J_2J_3 , J_3J_4 , J_4J_1)和4条水准测线(S_1S_2 , S_2S_3 , S_3S_4 , S_4S_1),长度24—48 m不等,以不同角度与断层交会,分布如图1所示。

唐山地震台自1978年7月至今已积累了40年的跨断层定点形变观测资料,其观测数据在探讨唐山大地震之后发震断层的运动方向、提取唐山老震区余震前地壳形变前兆信息、研究该地区地壳应力演变和地震活动趋势中发挥着重要作用。前人已利用地震台跨断层形变数据开展了多方面的研究,例如:谢觉民等(1997)研究了唐山地震后发震断层和周围地区地壳形变;薄万举等(2001)开展了斜率差前兆信息提取方法研究;周海涛等(2009, 2013)讨论了唐山断裂的近期活动性,计算了断层运动速率并探讨了断裂带应变的计算方法;黄建平等(2010)开展了从跨断层短基线观测计算地应变的方法研究。上述研究成果在推动跨断层形变学科发展,判定唐山地区地震活动趋势中发挥着极为重要的作用。

2 数据处理

原始跨断层基线数据易受到人为与自然环境等因素的影响,长时间观测也会由于不同型号水准仪器的更替而影响跨断层水准观测精度。为消除非构造信息及观测误差对计算结果

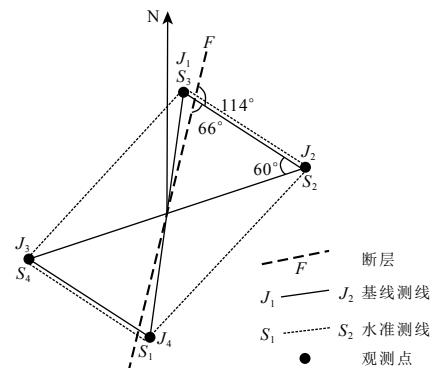


图1 唐山地震台跨断层基线和水准测线布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the layout of baselines and leveling lines at Tangshan seismic station

的影响，需对原始观测数据进行处理：首先，对数据进行数字滤波，消除原始观测数据中非构造信息；其次，进行数据精度评价，剔除跨断层基线和水准的理论变化量与实际变化量年累计残差较大的数据来提高计算精度；最后，利用年累计残差相对较小的数据求取断层的浅层倾向和倾角，并与前人研究成果进行对比分析，进而确定唐山地震台所跨断层浅层倾向和倾角。

2.1 数字滤波

唐山地震台 1978—2016 年跨断层基线和水准测线观测结果如图 2 所示，可见观测数据中包含明显的周期性年变、波动和折返，而理想状态下断层运动应相对稳定。为消除上述非构造信息对计算结果的影响，本文利用数字滤波器对原始观测数据进行滤波处理(万永革，2012)，滤去频率高于 1 a^{-1} 的成分(即去除周期小于 1 a 的成分)，滤波后跨断层基线和水准测线结果如图 2 中红色曲线所示。

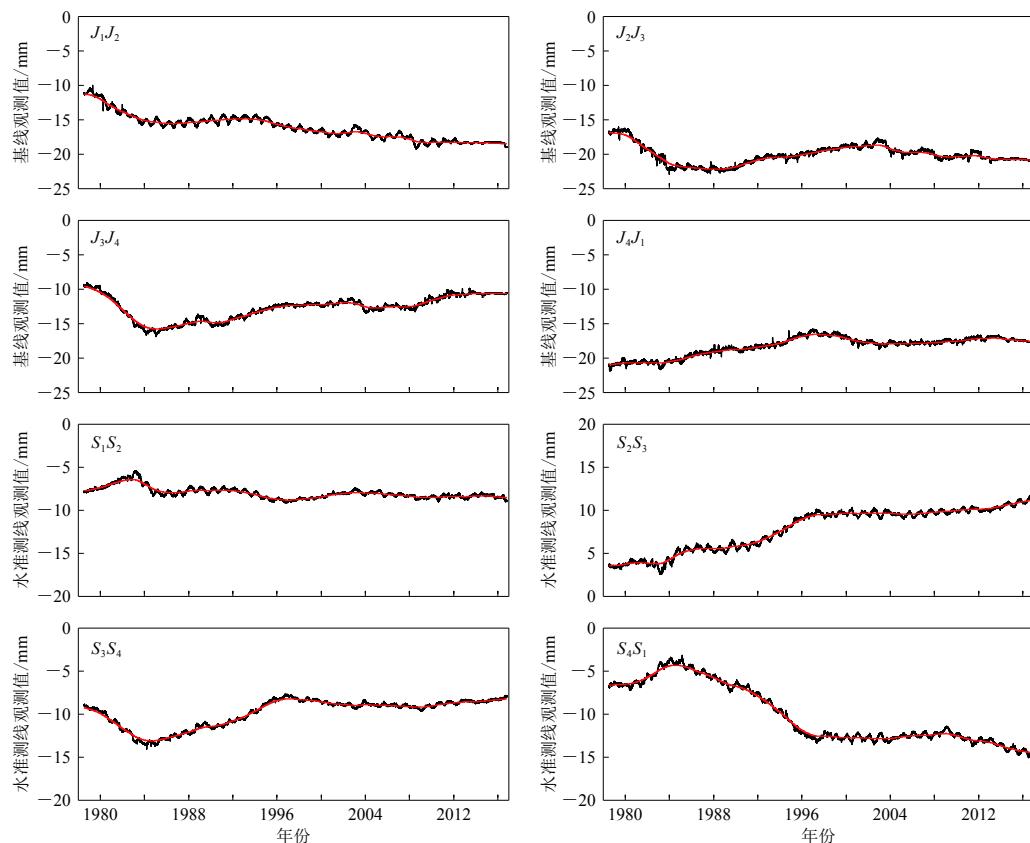


图 2 唐山地震台 1978—2016 年跨断层基线、水准测线原始观测数据(黑线)和数字滤波后结果(红线)

Fig. 2 The original observation data of baseline and leveling line (black lines) across the Tangshan fault during 1978–2016 and its digital filtering results (red lines) of Tangshan seismic station

2.2 数据精度评价

关于断层滑动速率的计算中，已有研究均假设断层两盘为不变形的刚性块体，这样断层的相对运动则发生在断层面上，计算断层走滑及张压分量利用两条或两条以上跨断层基线数据，计算垂直分量则只采用跨断层水准数据(张超，1981；焦青，范国胜，2007；黄建平

等, 2010; 陈建国等, 2011; 周海涛, 薄万举, 2013; 周海涛等, 2013). 上述方法应用在基线与水准观测结果所反映的断层力学性质相一致时是没有问题的, 但跨断层基线与水准结果所揭示的断层力学性质有时并非一致, 例如跨断层基线表现为张性, 而跨断层水准却表现为压性, 此时如仍采用该方法分别进行断层的走滑、张压和垂直分量计算, 并合成断层两盘相对运动的总量, 那么两盘的相对运动可能并不发生在断层面上, 即与“刚体断块模型”的假设相矛盾.

为避免出现上述矛盾, 本文将以往计算中的走滑、张压和垂直分量转化为右旋走滑及倾滑分量, 并且在计算过程中综合考虑跨断层基线及水准结果, 即假定断层运动符合“刚体断块模型”, 则有

$$\Delta x \cos(\pi - \theta) + \Delta s \cos \beta \sin \theta = \Delta L \quad (1)$$

$$\Delta s \sin \beta = \Delta H \quad (2)$$

式中, Δx 和 Δs 分别为所求断层的每天右旋走滑分量和倾滑分量, ΔL 为滤波后基线变化量(拉张为正), ΔH 为滤波后的垂向变化量(上盘相对下盘下降为正), θ 为断层顺时针旋转至与基线平行时所需旋转的角度(基线 J_1J_2 , J_2J_3 , J_3J_4 , J_4J_1 的 θ 分别为 114° , 54° , 114° , 174°), β 为断层倾角. 根据式(1)由 4 条跨断层基线数据可以确立 4 组方程, 根据式(2)由 S_1S_4 和 S_2S_3 跨断层水准数据可以确立另外 2 组方程, 将上述 6 组方程联立, 在给定断层倾角 β 的前提下, 采用最小二乘法便可求解断层每天右旋走滑分量和倾滑分量.

为提高计算精度, 减小观测误差对计算结果的影响, 本文以年为统计时长, 利用

$$C_n = \frac{\sum_{i,j} |L_{i,j} - \Delta L_{i,j}|}{4} + \frac{\sum_{k,j} |H_{k,j} - \Delta H_{k,j}|}{2}, \quad i=1, 2, 3, 4; k=1, 2; j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

分别计算断层倾向为 SE 和 NW 两种情况下不同倾角($\beta=1^\circ$ — 90° , 间距为 0.1°)基线与水准和的理论变化量与滤波后实际变化量之间的年累计残差. 式中 C_n 为年累计残差, n 为每年观测次数, i 为 4 条跨断层基线的编号, k 为 2 条跨断层水准测线的编号, $L_{i,j}$ 和 $H_{k,j}$ 是根据断层右旋走滑和倾滑分量计算的 4 条跨断层基线及 2 条跨断层水准理论变化量, $\Delta L_{i,j}$ 和 $\Delta H_{k,j}$ 为滤波

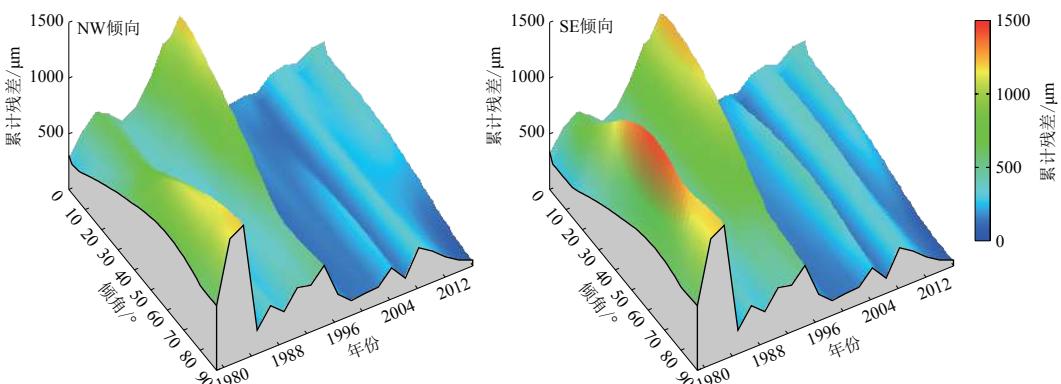


图 3 唐山地震台所跨断层不同倾角下基线与水准和的理论变化量与滤波后实际变化量之间的年累计残差

Fig. 3 Annual residual of baseline and leveling between theory variation and actual variation under different dip angles across the Tangshan fault

后实际变化量。结果如图3所示,无论断层倾向为SE还是NW,1997年之前基线与水准和的年累计残差均明显较大,介于400—1 400 μm之间,而1997年之后的年累计残差显著减小,介于50—400 μm之间,这可能与唐山主震、余震、震后余滑及断层自身的愈合过程有关。唐山主震释放了地壳内长期积累的大部分应变能,但能量释放并不完全,剩余应变能主要以余震和震后余滑的方式释放,影响断层整体运动,造成断层运动不协调,故导致跨断层基线与水准和的年累计残差较大;随着时间推移,余震频次逐渐降低,震后余滑也逐渐减弱,这有利于断层的整体运动趋于稳定。此外,距主震时间越长,发震断层自身逐渐愈合,这也有助于断层的整体运动趋于协调,减小跨断层基线与水准和的年累计残差。实际发震情况如图4所示:主震后1978—1993年间唐山断裂及唐山菱形地块周缘的余震活动较为频繁,而1993—2016年余震活动明显减弱(图4b黑色虚线右侧),特别是 $M_S \geq 4.0$ 地震频次明显降低,这与本文计算的1997年后的年累计残差显著减小,虽有4年差异,但这一差异可能与震后断层余滑及断层自身愈合调整时间有关。因此,1997—2016年滤波后的数据更为精确,本文利

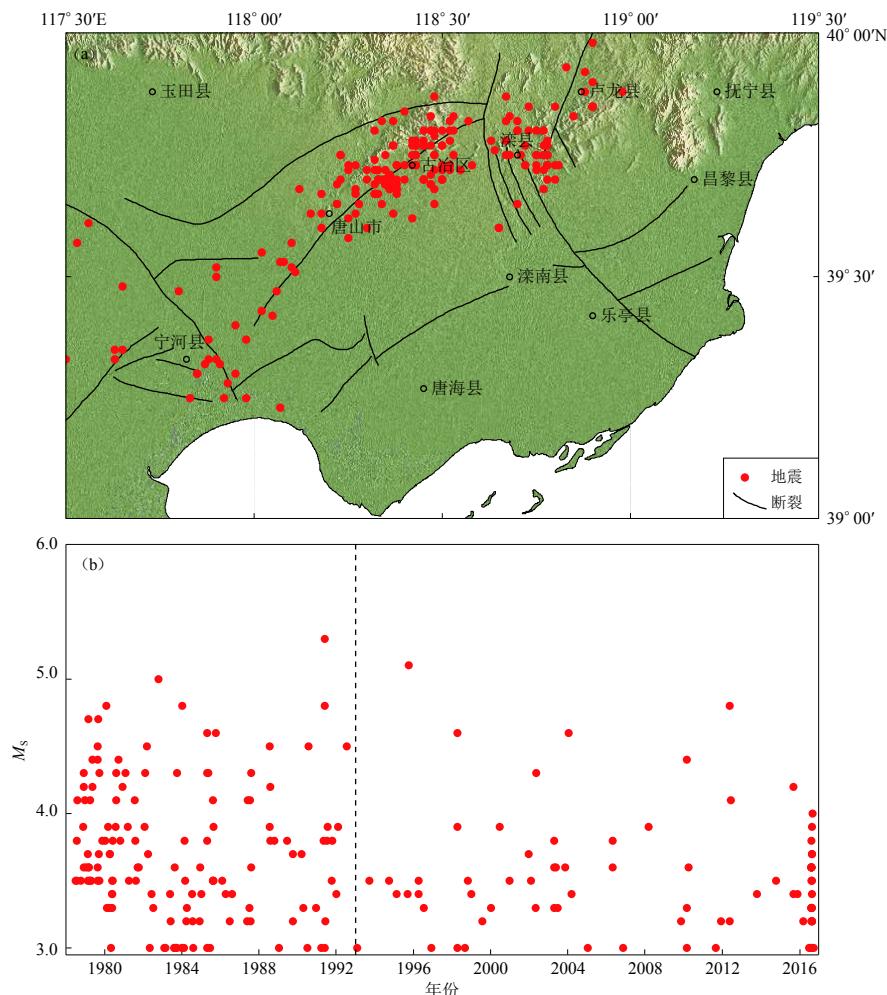


图4 1978—2016年唐山断裂及唐山菱形地块周缘的地震分布(a)和 $M-t$ 图(b)

Fig. 4 Earthquake distribution (a) and $M-t$ (b) of the Tangshan fault and the Tangshan diamond block from 1978 to 2016

用该数据求取断层的浅层倾向和倾角。

2.3 获取断层浅层倾向和倾角

利用式(3)对1997—2016年滤波后数据进行重新计算,分析上述两倾向不同倾角下基线与水准和的理论变化量与滤波后实际变化量之间的累计残差分布,此时式(3)中的n取1997—2016年总观测次数,结果如图5所示,断层倾向由NW向逐渐转变至SE向,倾角由NW向 0° 增加至 90° ,而后又逐渐减小至SE向 0° 。结果显示当断层倾向SE、倾角为 89° 时累计残差最小,故依据跨断层定点形变观测资料获取的唐山地震台所跨断层浅层倾向为SE,倾角为 89° 。

王挺梅和李建平(1984)为探究唐山大地震的重复间隔,曾在唐山市原十中北院跨地表主破裂带开挖一探槽(图6),由于当时地表主破裂带是发震断层还是仅为地裂缝存在很大争议,故将探槽中的裂缝F作为地裂缝处理。尤惠川等(2002)通过野外调查和浅层高分辨率地震探测证实地表主破裂带即为发震断层,因而探槽中的裂缝F应作为断层对待。此外,地表破裂带存在约1.2 m的右旋走滑分量,这与地裂缝仅有拉张分量存在显著差异;淡黄棕色黄

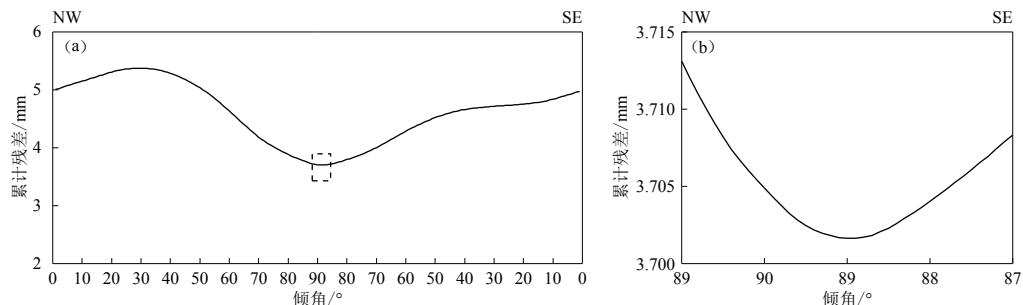


图5 1997—2016年唐山地震台所跨断层不同倾角下基线与水准和的理论变化量与滤波后实际变化量累计残差曲线
(a)为累计残差结果,(b)为(a)中黑色虚线框部分

Fig. 5 Distribution of baseline and leveling cumulative residual amount between theory variation and actual variation under different angles across the Tangshan fault from 1997 to 2016
(a) gives the results of cumulative residual, and (b) shows the part of the dotted rectangle in (a)

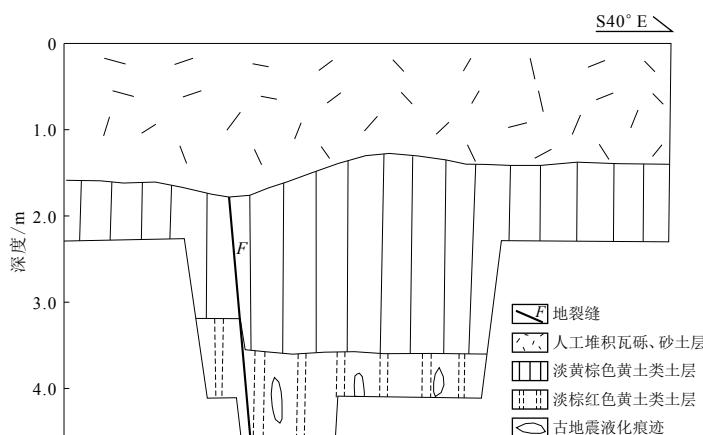


图6 原唐山市十中北院探槽剖面
Fig. 6 Trenching profile at northern courtyard of Tangshan Tenth Middle School

土类土层底界存在明显位错；裂缝 F 较为陡直，呈明显的线性特征，与三河—平谷 M_{8.0} 地震的发震断层夏垫断裂具有相同的形态特征(万永魁等, 2014; 张超等, 2014)；淡棕红色黄土类土层中存在多个古地震液化喷砂管，揭示了 1976 年唐山 M₈7.8 地震是在原活动断裂上复发的一次最新的强震活动。上述现象再次说明前人探槽中所描述的裂缝 F 即为唐山 1976 年 M₈7.8 地震的发震断层，该断层倾向 SE，倾角近似直立，该结果与本文利用长期跨断层定点形变观测资料获得的断裂浅层倾向和倾角相一致。

3 讨论与结论

观测数据及断层产状的精确程度是影响跨断层形变数据分析的重要因素。在现有观测精度下，准确提取断层产状要素并将其用于跨断层形变数据分析，是获取断层滑动速率、提高跨断层形变数据分析质量的有效途径。本文利用唐山地震台跨断层定点形变观测资料探究所跨断层浅层倾向和倾角的研究方法，所获得的结果与前人探槽剖面中断层产状相一致，取得了较好的效果，主要结论如下：

1) 针对隐伏区断层具体倾向和倾角难以确定的问题，本文提出利用长期跨断层定点形变资料通过数字滤波、数据精度评价获取断裂浅层倾向和倾角的基本方法，该方法可适用于隐伏区跨断层定点形变台站，具有可行性。

2) 基于长期跨断层定点形变资料反演得到的唐山地震台所跨断层的浅层倾向为 SE，倾角为 89°，近似直立，该结果与唐山地震台目前采用的断层倾向 NW、倾角 72° 存在差异。此外，考虑到断层倾向和倾角可能沿断层走向发生转变，关于唐山地震发震断层北段的具体产状还需结合其它方法深入研究。

参 考 文 献

- 薄万举, 谢觉民, 罗三明. 2001. 前兆信息提取的一种新方法：斜率差信息法[J]. 地震学报, 23(2): 159–166.
- Bo W J, Xie J M, Luo S M. 2001. A new method for precursory information extraction: Lope-difference information method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 23(2): 159–166 (in Chinese).
- 陈建国, 吕文青, 陈龙, 马栋, 张晶. 2011. 对利用跨断层基线和水准测量资料推算断层活动参数公式的改进[J]. 华北地震科学, 29(4): 34–37.
- Chen J C, Lü W Q, Chen L, Ma D, Zhang J. 2011. Improvement of the formula for calculating faulting parameters using data of base line measurement across faults and leveling[J]. *North China Earthquake Sciences*, 29(4): 34–37 (in Chinese).
- 陈运泰, 林邦慧, 王新华, 黄立人, 刘妙. 1979. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式[J]. 地球物理学报, 22(3): 201–217.
- Chen Y T, Lin B H, Wang X H, Huang L R, Liu M. 1979. A dislocation model of the Tangshan earthquake of 1976 from the inversion of geodetic data[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 22(3): 201–217 (in Chinese).
- 桂焜长, 耿世昌. 1987. 值得再三思考的唐山地震构造[J]. 中国地震, 3(增刊 1): 81–86.
- Gui K C, Geng S C. 1987. Worth considering the seismo-structure of the Tangshan earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 3(S1): 81–86 (in Chinese).
- 郭慧, 江娃利, 谢新生. 2011. 钻孔与探槽揭示 1976 年河北唐山 M₈7.8 地震发震构造晚第四纪强震活动[J]. 中国科学: 地球科学, 41(7): 1009–1028.
- Guo H, Jiang W L, Xie X S. 2011. Late-Quaternary strong earthquakes on the seismogenic fault of the 1976 M₈7.8 Tangshan earthquake, Hebei, as revealed by drilling and trenching[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(11): 1696–1715.
- 郝书俭, 李建华, 于之水, 储宝贵. 1998. 唐山地震发震构造的浅层地震探测[J]. 中国地震, 14(4): 78–84.
- Hao S J, Li J H, Yu Z S, Chu B G. 1998. Shallow seismic exploration of the seismogenic structures of Tangshan earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 14(4): 78–84 (in Chinese).

- 郝书俭, 尤惠川. 2001. 唐山活动断层的浅层地震精细探测[J]. 地震地质, 23(1): 93–97.
- Hao S J, You H C. 2001. A detailed detection of the Tangshan active fault using shallow seismic survey[J]. *Seismology and Geology*, 23(1): 93–97 (in Chinese).
- 黄建平, 石耀霖, 李文静. 2010. 从跨断层短基线观测计算地应变的方法探讨: 以唐山台地形变数据为例[J]. 地球物理学报, 53(5): 1118–1126.
- Huang J P, Shi Y L, Li W J. 2010. Method of strain calculation based on the cross-fault short-baseline observation: Taking the Tangshan deformation data as an example[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(5): 1118–1126 (in Chinese).
- 江在森, 丁平, 王双绪, 刘文义. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测[M]. 北京: 地震出版社: 1–5.
- Jiang Z S, Ding P, Wang S X, Liu W Y. 2001. *Geodetic Deformation Monitoring and Earthquake Prediction in West China*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–5 (in Chinese).
- 焦青, 范国胜. 2007. 河北文安地震前后首都圈跨断层位移的变化特征[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 17–21.
- Jiao Q, Fan G S. 2007. On characteristics of fault-crossing displacement variation in capital area before and after Wenan earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(6): 17–21 (in Chinese).
- 刘启元, 王峻, 陈九辉, 李顺成, 郭飚. 2007. 1976年唐山大地震的孕震环境: 密集地震台阵观测得到的结果[J]. 地学前缘, 14(6): 205–213.
- Liu Q Y, Wang J, Chen J H, Li S C, Guo B. 2007. Seismogenic tectonic environment of 1976 great Tangshan earthquake: Results given by dense seismic array observations[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 205–213 (in Chinese).
- 邱群. 1976. 1976年7月28日河北省唐山7.8级地震的发震背景及其活动性[J]. 地球物理学报, 19(4): 259–269.
- Qiu Q. 1976. The background and seismic activity of the $M=7.8$ Tangshan earthquake, Hebei Province of July 28, 1976[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 19(4): 259–269 (in Chinese).
- 苏琴, 杨永林, 郑兵, 王双洪, 李菲菲, 刘冠中. 2014. 4·20芦山7.0级地震预测思路及过程回顾[J]. 地震地质, 36(4): 1077–1093.
- Su Q, Yang Y L, Zheng B, Wang S H, Li F F, Liu G Z. 2014. A review of the thinking and process about prediction of Lushan $M_7.0$ earthquake on April 20, 2013[J]. *Seismology and Geology*, 36(4): 1077–1093 (in Chinese).
- 万永革, 沈正康, 刁桂苓, 王福昌, 胡新亮, 盛书中. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3): 793–804.
- Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, Wang F C, Hu X L, Sheng S Z. 2008. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(3): 793–804 (in Chinese).
- 万永革. 2012. 数字信号处理的MATLAB实现[M]. 北京: 科学出版社: 217–256.
- Wan Y G. 2012. *MATLAB Implementation of Digital Signal Processing*[M]. Beijing: Science Press: 217–256 (in Chinese).
- 万永魁, 沈军, 于晓辉, 戴训也, 王雷, 邵博, 李祥. 2014. 北京平原区夏垫活动断裂滑动速率及古地震复发间隔[J]. 防灾科技学院学报, 16(3): 38–45.
- Wan Y K, Shen J, Yu X H, Dai X Y, Wang L, Shao B, Li X. 2014. The slipping rates and ancient earthquake recurrence interval at Xiadian fault, Beijing plain[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 16(3): 38–45 (in Chinese).
- 万永革, 万永魁, 靳志同, 盛书中, 刘兆才, 杨帆, 冯甜. 2017. 用形变资料反演1976唐山地震序列的破裂分布[J]. 地球物理学报, 60(9): 3387–3395.
- Wan Y G, Wan Y K, Jin Z T, Sheng S Z, Liu Z C, Yang F, Feng T. 2017. Rupture distribution of the 1976 Tangshan earthquake sequence inverted from geodetic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(9): 3378–3395.
- 王挺梅, 李建平. 1984. 唐山大地震的重复间隔[J]. 地震地质, 6(3): 77–83.
- Wang T M, Li J P. 1984. The recurrence intervals of the strong earthquakes in Tangshan[J]. *Seismology and Geology*, 6(3): 77–83 (in Chinese).
- 武艳强, 黄立人, 陈长云, 朱爽, 金涛, 刘辛中. 2016. 1976年唐山 $M_7.8$ 地震同震及现今形变特征[J]. 地震学报, 38(4): 609–617.
- Wu Y Q, Huang L R, Chen C Y, Zhu S, Jin T, Liu X Z. 2016. Coseismic and contemporary deformation features of the $M_7.8$ Tangshan earthquake in 1976[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38(4): 609–617 (in Chinese).

- 谢觉民, 王若柏, 薄万举, 华彩虹. 1997. 唐山地震后发震断层和周围地区的地壳形变[J]. 地震学报, **19**(5): 487–492.
Xie J M, Wang R B, Bo W J, Hua C H. 1997. Crustal deformation of Tangshan fault and its surrounding areas after the $M_{\text{S}} 7.8$ Tangshan earthquake in 1976[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **19**(5): 487–492 (in Chinese).
- 尤惠川, 徐锡伟, 吴建平, 何正勤. 2002. 唐山地震深浅构造关系研究[J]. 地震地质, **24**(4): 571–582.
You H C, Xu X W, Wu J P, He Z Q. 2002. Study on the relationship between shallow and deep structures in the 1976 Tangshan earthquake area[J]. *Seismology and Geology*, **24**(4): 571–582 (in Chinese).
- 曾融生, 陆涵行, 丁志峰. 1988. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因[J]. 地球物理学报, **31**(4): 383–398.
Zeng R S, Lu H X, Ding Z F. 1988. Seismic refraction and reflection profiling across Tangshan epicentral region and their implication to seismic processes[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **31**(4): 383–398 (in Chinese).
- 张超. 1981. 跨断层位移测量与局部断层活动[J]. 地震, (5): 24–25.
Zhang C. 1981. Displacement measurement and local fault activity across the fault[J]. *Earthquake*, (5): 24–25 (in Chinese).
- 张超, 沈军, 赵江涛, 周晨阳, 李青. 2014. 北京平原夏垫断裂沉积旋回研究[J]. 防灾科技大学学报, **16**(2): 49–57.
Zhang C, Shen J, Zhao J T, Zhou C Y, Li Q. 2014. Research on sedimentary cycles of Xiadian fault near Beijing[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, **16**(2): 49–57 (in Chinese).
- 张晶, 黎凯武, 武艳强, 李春光. 2011. 断层活动协调比在地震预测中的应用[J]. 地震, **31**(3): 19–26.
Zhang J, Li K W, Wu Y Q, Li C G. 2011. Application of fault motion coordinate ratio in earthquake prediction[J]. *Earthquake*, **31**(3): 19–26 (in Chinese).
- 张之立, 李钦祖, 谷继成, 斯雅敏, 杨懋源, 刘万琴. 1980. 唐山地震的破裂过程及其力学分析[J]. 地震学报, **2**(2): 111–129.
Zhang Z L, Li Q Z, Gu J C, Jin Y M, Yang M Y, Liu W Q. 1980. The fracture processes of the Tangshan earthquake and its mechanical analysis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **2**(2): 111–129 (in Chinese).
- 周海涛, 郭良迁, 张立成. 2009. 唐山断裂现代活动性研究[J]. 华北地震科学, **27**(3): 17–22.
Zhou H T, Guo L Q, Zhang L C. 2009. Study on modern activity of Tangshan fault[J]. *North China Earthquake Science*, **27**(3): 17–22 (in Chinese).
- 周海涛, 薄万举. 2013. 利用跨断层形变资料求解断层运动及断裂带应变方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, **33**(6): 31–35.
Zhou H T, Bo W J. 2013. Research on method to solve fault movement and fault zone strain using cross-fault deformation data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **33**(6): 31–35 (in Chinese).
- 周海涛, 周伟, 杜雪松, 余敏, 夏峰. 2013. 利用跨断层形变资料研究近期唐山断裂活动性[J]. 地震研究, **36**(7): 286–291.
Zhou H T, Zhou W, Du X S, Yu M, Xia F. 2013. Researches on activities of the Tangshan fault with cross fault deformation data[J]. *Journal of Seismological Research*, **36**(7): 286–291 (in Chinese).
- 周硕愚. 1994. 断层形变测量与地震预报[J]. 地壳形变与地震, **14**(4): 90–97.
Zhou S Y. 1994. Fault deformation measurement and earthquake prediction[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **14**(4): 90–97 (in Chinese).
- Butler R, Stewart G S, Kanamori H. 1979. The July 27, 1976 Tangshan, China earthquake: A complex sequence of intraplate events[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **69**(1): 207–220.