

引用格式: 高云鹏, 刘静, 韩龙飞, 等, 2023. 古地震事件震级或强度大小限定的讨论 [J]. 地质力学学报, 29 (5): 704–719. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023034

Citation: GAO Y P, LIU J, HAN L F, et al., 2023. Discussion on the magnitude or intensity limitation of paleoearthquake events [J]. Journal of Geomechanics, 29 (5): 704–719. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023034

古地震事件震级或强度大小限定的讨论

高云鹏¹, 刘 静¹, 韩龙飞¹, 邵延秀¹, 姚文倩¹, 徐 晶², 胡贵明¹, 王子君¹,
屈孜屹¹, 徐恩民¹

GAO Yunpeng¹, LIU Jing¹, HAN Longfei¹, SHAO Yanxiu¹, YAO Wenqian¹, XU Jing², HU Guiming¹,
WANG Zijun¹, QU Ziyi¹, XU Enmin¹

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054

1. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shannxi, China

Discussion on the magnitude or intensity limitation of paleoearthquake events

Abstract: The magnitude is an important parameter that characterizes the size of earthquakes. However, in paleoearthquake studies, it is difficult to precisely determine the rupture parameters closely related to seismic moment, making it challenging to directly calculate the magnitude of events. Researchers often assume that event sequences consist of characteristic earthquakes with similar magnitudes or use empirical relationships based on known magnitudes of historical earthquakes to estimate magnitudes. However, previous studies have shown that the assumption of characteristic earthquakes is overly simplistic, and magnitude estimation based on empirical relationships is limited by various errors. Therefore, there is a pressing need to explore new methods to improve the reliability of magnitude assessments for ancient earthquake events. In recent years, the successful application of three-dimensional combination trenches has demonstrated that these trenches contain rich deformation information about events, confirming the feasibility of assessing event sizes within trenches. Using the example of the Copper Mine trench on the Altyn Tagh fault, this article utilizes the deformation intensity revealed within the trench, including vertical displacement, deformation zone width, and total tensile strain, to estimate the scale of the event sequence. Data analysis results indicate that the deformation intensity parameters have a certain positive correlation with the relative magnitude, and there is also some correlation among these parameters. Therefore, the information on deformation intensity within the trench can be used to assess the relative magnitude of events, and fully exploring the deformation information within trenches can provide valuable insights and references for the reasonable evaluation of the magnitude of paleoearthquake events. This underscores the importance of considering such information in paleoearthquake research.

Keywords: magnitude limitation; paleoearthquake events; empirical relationships; deformation intensity; copper mine trench

摘 要: 震级是表征地震能量大小的重要参数, 但在古地震研究中, 由于难以精确给定与地震矩紧密相关的破裂参数, 故而无法直接计算事件的震级大小。研究者通常假定事件序列为震级相似的特征地震, 或基于震级已知的历史地震地表破裂参数获取经验关系来进行震级估算。但已有研究表明特征地震的假

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3000605-04)

This research is financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC3000605-04).

第一作者: 高云鹏 (1999—), 男, 在读硕士, 从事活动构造和古地震的研究。E-mail: 1755357034@qq.com

通讯作者: 刘静 (1969—), 女, 博士, 教授, 从事强震与断层活动性、构造地貌等方面研究。E-mail: liu_zeng@tju.edu.cn

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-08-25; 责任编辑: 王婧

设过于简化，而利用经验关系估算震级的方法也受限于各种误差，因此亟需探索新方法以提升古地震事件震级或规模大小评估的合理性。近年来，三维组合探槽的成功应用表明探槽内蕴含着丰富的事件变形信息，进而证实了在探槽内评估事件规模大小的可行性。基于此，文章以阿尔金断裂铜矿探槽为例，利用探槽揭示的事件变形强度，包括垂向位移量、变形带宽度和裂缝总拉张量，来评估事件序列的规模。数据分析结果表明，事件变形强度参数与震级相对大小具有一定的正相关性，且各参数之间也呈现部分相关性。因此，探槽中事件变形强度信息可以判断事件震级的相对大小，充分挖掘探槽内的事件变形信息可为合理评估古地震事件的震级提供借鉴和参考，在古地震研究中应加以重视。

关键词：震级限定；古地震事件；经验关系；变形强度；铜矿探槽

中图分类号：P65 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616 (2023) 05-0704-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023034

0 引言

活动断裂的强震破裂数据对区域地震危险性的评估至关重要，尤其是地震复发周期和震级大小等关键参数 (Bonilla et al. , 1984; Schwartz and Coppersmith, 1984; 闻学泽, 1993; Wells and Coppersmith, 1994; Yeats et al. , 1997; Xu et al. , 2006; 闻学泽等, 2008; Scharer et al. , 2014; Scholz, 2019)，其主要来源于历史地震记录和古地震序列的研究。但由于历史地震记录往往短于地震复发周期，研究者们开展古地震研究工作，通常参考现今地震造成的地表破裂特征，以“将今论古”的原理从断裂带的沉积记录和沿线的断错地貌中揭示过去千年到万年尺度内大地震的发生频率及同震位移的重复行为，以此弥补仪器或历史地震记录短的局限性，获得活动断裂上多次强震复发的时空特征模型 (Wallace, 1981; Agnew et al. , 1988; McGill and Sieh, 1991; 冉勇康和邓起东, 1999; Gürpınar, 2005; McCalpin, 2009; Zielke et al. , 2010; Klinger et al. , 2011; 刘静等, 2021)。

古地震研究的主要目标是限定地震事件发生的位置、时间和震级 (Sieh, 1978, 1984; Fumal et al. , 1993; 冉勇康和邓起东, 1999; 刘静等, 2021)。古地震事件的发生时间可以通过紧邻事件层的上下地层年龄来限定，但其误差范围受制于地层的沉积和定年方法，误差可达数十至数百年 (Sieh, 1978, 1984)。相比之下，有学者在印度尼西亚苏门答腊俯冲带研究中，利用珊瑚礁的生长纹和 U 系测年来反演古地震复发行为，将古地震事件的发震时间精确到数年的尺度范围内

(Zachariasen et al. , 1999; Sieh et al. , 2008)，是一种误差较小的方法。近些年来，随着第四纪测年技术的快速发展，地貌面或探槽内古地震发震年代的准确性和可靠性得到了显著提高，并与历史地震吻合度较好 (Sieh et al. , 1989; Chen et al. , 2013; Liu-Zeng et al. , 2015; Gold et al. , 2019; Burgette et al. , 2020)。

在古地震研究中，限定事件的年龄相对容易达到，但地震事件的震级大小很难精确限定，这主要是由于与地震矩紧密相关的地震破裂面积和位移等物理参数本就很难由古地震研究给出 (McCalpin, 2009; 刘静等, 2021, 2023)。尽管目前研究人员可以利用高精度地形数据来测量地貌面上大小不等的位移，建立累计位移概率密度函数 (Cumulative Offset Probability Density, COPD)，但 COPD 更多地聚焦于古地震事件期次的解译而非震级的厘定 (McGill and Sieh, 1991; Zielke et al. , 2010; Klinger et al. , 2011)。此外，由于大地震沿断裂走向上造成的位移量往往变化显著，直接将 COPD 的峰值解译为某次古地震事件可能存在过度解译的假象 (Reitman et al. , 2019; Lin et al. , 2020)。同时，需要注意的是，COPD 识别的地震事件通常被假定为震级相似的特征地震，而古地震探槽给出平均复发间隔也是基于这种假设。近年来的研究表明，一些特定条件下的中小型地震 ($M_w \leq 6.5$) 也能造成可被识别的地表破裂 (Wells and Coppersmith, 1994; Bakun and Wentworth, 1997; Streig et al. , 2014; Liu-Zeng et al. , 2015; 唐茂云等, 2015)，如若研究人员简单地将探槽内不同事件认定为震级相似的特征地震，则会导致地震危险性评估的可信度发生重大偏差，同时也会对地震活动时空分布样式的研究造成重要影响

(Wells and Coppersmith, 1994; Scharer et al., 2014; Ren et al., 2016)。因此, 在古地震事件震级大小的确定方面, 仍需要探索各种新方法。

文章通过总结有关古地震事件震级大小限定问题的研究, 分析和讨论了其在应用过程中应注意的问题; 进而提出探槽中古地震事件造成的地层变形量大小可能与事件的震级正相关, 因此地层变形量除了可作为事件发生的证据外, 还应该充分挖掘其蕴含的事件大小信息。以阿尔金断裂铜矿探槽为例, 利用其揭露的长序列古地震事件 (Yuan et al., 2018), 量化了各事件所造成的地层变形强度大小, 并分析了其与震级之间的关系。

1 地震事件震级大小限定方法

震级作为表征地震规模的重要参数, 其大小由发震破裂的尺度以及所释放的能量决定。现代地震的震级大小往往基于地震仪器记录的震波数据计算得到, 不同研究方法得到的震级标度也不尽相同, 常用的有体波震级 (m_b)、面波震级 (M_s) 和矩震级 (M_w)。其中, 由于矩震级 (M_w) 不存在震级饱和现象, 且与地震破裂物理性质具有相关性, 因此被普遍认为是衡量地震大小的最佳方法 (Kanamori, 1977; Bormann, 2002; 陈运泰和刘瑞丰, 2004)。矩震级 M_w 是由地震矩 M_0 根据公式 1 计算得到, 而地震矩 M_0 除了可用地震仪器记录波形测定外, 也可用震源破裂尺度的公式 2 得到:

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (1)$$

$$M_0 = \mu D_{av} A \quad (2)$$

其中 μ 为剪切模量, D_{av} 为平均位错量, A 为破裂面积 (Hanks and Kanamori, 1979)。

对于古地震事件而言, 由于难以精确给出计算所必须的破裂面积、平均位错量等参数信息, 因此很难直接计算其震级大小。尽管如此, 研究人员仍尝试从不同方面来限定古地震事件的震级, 以提高区域中长期地震形势分析的精度和大陆变形运动学信息理解的准度 (Daëron et al., 2007; Liu-Zeng et al., 2015)。

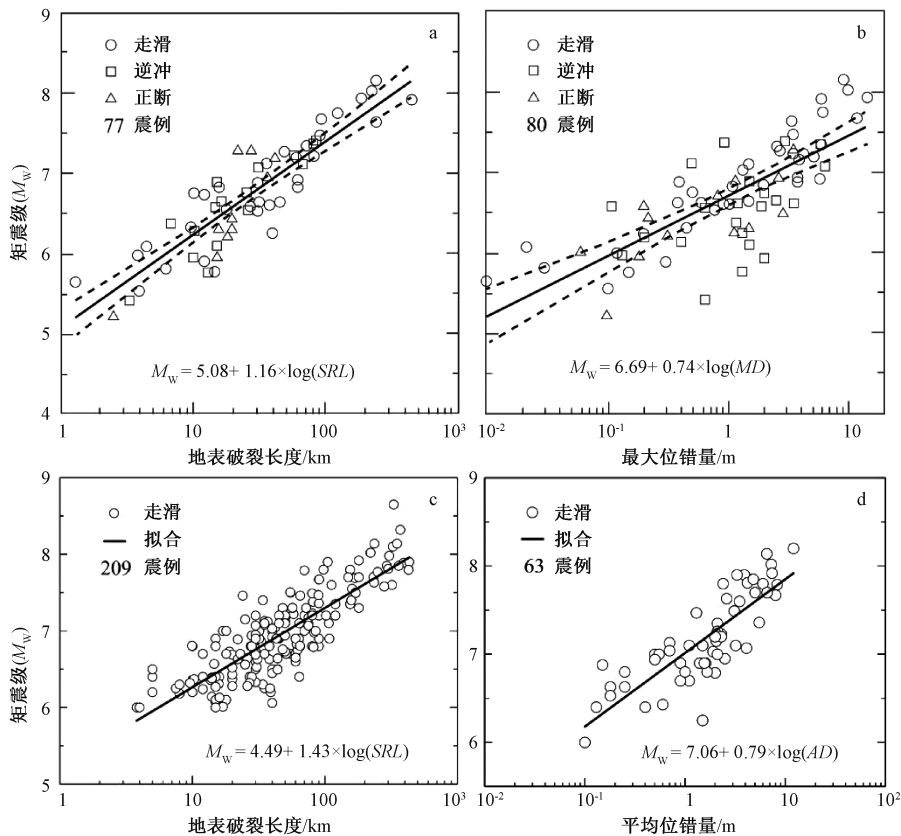
1.1 地表破裂参数估算震级方法

在古地震研究中, 研究人员注意到在断层活动过程中, 地表破裂长度 (Surface Rupture Length, L) 和位错量 (Displacement, D) 可较清晰地保留

地貌面上的主要变形遗迹, 因此常用其估算事件的震级大小。最初的估算方法是通过分析已知震级的历史地震及其相关破裂参数, 建立详细的震例库 (Slemmons, 1982; Bonilla et al., 1984; Heaton et al., 1986; Khromovskikh, 1989; Wells and Coppersmith, 1994; Stirling et al., 2002), 并拟合出不同地震类型下地表破裂长度、位错量等破裂参数与矩震级之间的经验关系 (图 1), 随后代入某次古地震事件的破裂信息以估算其震级。后续研究中有学者指出, 单独使用地表破裂长度和位错量进行古地震震级的估算缺乏相应的物理意义, 因此建立了震级与 $\log(LD)$ 或 $\log(LD^2)$ 的经验统计关系, 并获得了更强的相关系数 (Slemmons, 1982; Bonilla et al., 1984; Hanks and Bakun, 2002)。然而, 将 L 和 D 结合在一起的一个事实是, 调查得到的地表破裂长度 (往往小于真实破裂长度) 会造成对震级的低估, 而位错量却被系统地高估。因此, 在一定程度上将两者结合在一起在可以更接近真实的震级大小 (Mason, 1996)。虽然更具有物理意义的地震矩 M_0 应该被用于估算震级大小, 但对于古地震事件而言却难以实现。

地表破裂长度和位错量是评估古地震震级的重要参数, 将其代入到如 Wells and Coppersmith (1994) 建立的回归方程中可估算某次古地震事件的震级。然而在实际测量过程中, 往往由于难以准确识别地表破裂带两端的微小位错量 (经历后期风化侵蚀等地表作用被快速改造), 或无法区分地表破裂带所承载的不同期次的事件信息, 会导致地表破裂长度或位错量在一定程度上被低估或高估。类似的误差或不确定性在现代地震研究中也同样存在。以 2021 年玛多 $M_w 7.4$ 级地震为例, 姚文倩等 (2022) 认为此次地震造成了长达 158 km 的地表破裂, 地震后应急调查的快速报道 (如, 潘家伟等, 2021), 可能忽略了破裂东端点的局部破裂迹线, 导致低估了地震的破裂长度。另外还需注意的是, 在古地震研究中, 断层上地表破裂带的复杂结构 (阶区、弯曲等) 和震后的侵蚀退化作用会导致完整的地震地表破裂带被分割为不同段落, 从而可能被误解为多期破裂事件 (Rubin, 1996; Elliott et al., 2015)。

在此背景下, 研究人员试图通过多点位探槽和定年的方法来限定单次古地震事件的破裂延伸



a—矩震级 (M_w) 与地表破裂长度 (SRL) 的经验关系 (据 Wells and Coppersmith, 1994 修改); b—矩震级 (M_w) 与最大位错量 (MD) 的经验关系 (据 Wells and Coppersmith, 1994 修改); c—走滑历史地震的矩震级 (M_w) 与地表破裂长度 (SRL) 的经验关系; d—走滑历史地震的矩震级 (M_w) 与平均位错量 (AD) 的经验关系

图 1 矩震级 (M_w) 与地表破裂长度、最大位错量和平均位错量之间的经验关系

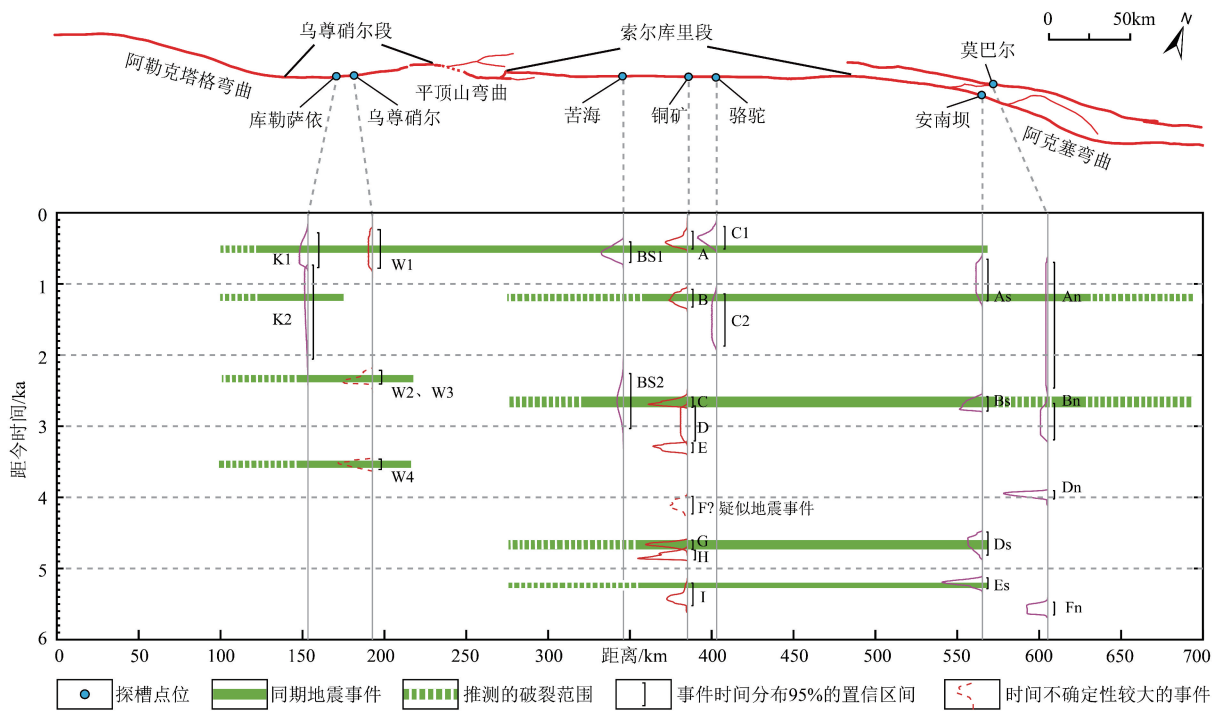
Fig.1 The empirical relationship between moment magnitude (M_w) and surface rupture length (SRL), maximum displacement (MD), and average displacement (AD)

(a) The empirical relationship between moment magnitude (M_w) and surface rupture length (adapted from Wells and Coppersmith, 1994); (b) The empirical relationship between moment magnitude (M_w) and maximum displacement (adapted from Wells and Coppersmith, 1994); (c) The empirical relationship between moment magnitude (M_w) and surface rupture length of strike-slip earthquakes with known historical seismicity; (d) The empirical relationship between moment magnitude (M_w) and average displacement of strike-slip earthquakes with known historical seismicity

范围。早在 20 世纪末，Grant and Sieh (1994) 便基于此方法对圣安德烈斯断裂卡里佐段上古地震的破裂区间进行限定，以讨论该段上古地震的破裂范围。随后，Washburn et al. (2003) 在阿尔金断裂上也同样利用该方法来讨论索尔库里段的古地震时空复发特征。近些年来，随着探槽和定年技术的快速进步，Shao et al. (2018) 在阿尔金断裂阿克塞弯曲段基于多点位探槽和高精度年龄样品，建立并对比了不同点位的古地震时间序列，进而构建了最新两次事件可能的破裂模型。此外，袁兆德等 (2020) 也基于该方法构建了阿尔金断裂中段的古地震时空复发特征 (图 2)，同时约束

了每次事件的地表破裂长度，并代入回归方程中 (图 1a、1b) 估算出各期事件可能的震级大小。尽管这些尝试可以帮助研究者们确定断裂带上某次古地震事件的多段破裂特征和破裂长度区间，但由于探槽空间分布不均、事件数量记录不等且测年误差较大，相邻探槽中是否为同一次事件只是推论，而非观测事实。因此，基于此类方法得到的事件破裂长度存在较大的不确定性。

相较于地表破裂长度，研究者们更常用位错量来估算古地震的震级大小，通常选择平均位错量 (Average Displacement, AD) 或最大位错量 (Maximum Displacement, MD)。然而，由于沿地



字母代表各探槽内不同期次的地震事件

图 2 阿尔金断裂中段古地震事件序列对比图 (据袁兆德等, 2020 修改)

Fig. 2 Comparison of event sequences in the middle part of the Altyn Tagh fault (modified from Yuan et al. , 2020)

The letter numbers represent different periods of paleoearthquake events in different trenches.

表破裂带走向上单次事件位错量变化的复杂性 (Schwartz and Coppersmith, 1984; McCalpin and Slemmons, 1998; McGill and Rubin, 1999; McCalpin, 2009; Zielke et al. , 2010; Ren et al. , 2016; Reitman et al. , 2019; Lin et al. , 2020), 在应用过程中如何获取相应的位错量值是一个难题。对平均位错量而言, 研究人员通常首先将野外实测的位错量值进行归一化处理, 然后利用“几何平均”或“等间隔平均”的方法统计各区段的位错量, 从而得到整条破裂带的平均位错量 (McCalpin and Slemmons, 1998)。这种沿着整条破裂带积分得到的平均位错量虽然比简单均值更具有物理意义, 但仍受限于震后改造作用或研究人员认知偏差 (例如, 在野外工作中更倾向于测量位错量发育明显的段落, 而忽略位错量较小的部位) 带来的较大误差。而对最大位错量来讲, 似乎可以更简单地测量, 但值得注意的是, 地震破裂造成的最大位错量未必由断错地貌所记录, 因此由断错地貌测量的最大位错量 $\leq$ 实际最大位错量 (潘家伟等, 2021)。尽管目前的研究可以通过震前震后差分影像获得的地震位移场来精确测量最大位错量 (Oskin et al. , 2012; Duffy et al. ,

2013; Milliner et al. , 2015; Scott et al. , 2020), 但在古地震研究中无法应用。

除上述利用直接证据 (地表破裂长度、位错量) 来估算震级外, 地震波强震动的破坏效应, 如沙土液化、滑坡面积、烈度分布等间接证据也被尝试应用于评估古地震或历史地震的震级大小 (Adams, 1981; Keefer, 1984; Schuster et al. , 1992; Munson et al. , 1997; Green et al. , 2005; Wen et al. , 2008; Xu et al. , 2022)。例如, Wen et al. (2008) 结合地震史料和野外调研, 确定了川滇地块近几百年来发生的 36 次大地震的时空破裂模式, 并建立了烈度分布和破裂长度之间的经验关系。Xu et al. (2022) 则基于发生大量滑坡的区域长度与地表破裂长度相等的假设, 利用遥感影像对天水地区的滑坡数量和面积进行详细填图, 并结合历史资料考证和现代地震滑坡效应区分了不同因素及事件造成的滑坡影响, 最终估算公元 734 年天水地震的矩震级 $M_w = 7.4$ 。总结来讲, 这类方法主要是通过确定大范围的灾害分布状况来揭示强地面震动效应分布和距离衰减情况, 并借助于历史地震震级和烈度分布之间的经验公式计算得到震级大小。虽然间接证据在评估古地震震

级方面的应用程度较弱,但是对于某些发震断层没有破裂到地表的情况下,它是一个可替代的判别依据。

综上所述,尽管古地震学家尝试通过多方面分析来限定事件震级大小,但基于地表破裂参数估算震级引入的不确定性仍无法避免,主要包括由于自然的、不可预测变化产生的偶然误差以及研究者对概念或系统了解不足导致的认识误差。在古地震研究中,由于地震离逝时间和震后侵蚀改造作用的影响,研究者们一方面很难准确测量古地震造成的实际破裂参数,另一方面对事件期次、震级的解译往往存在多解性,因此会引入难以避免的偶然误差和认识误差。另外,用于估算古地震震级的经验公式,由于历史地震样本的有限性以及地表破裂带调查的时效性和全面性,也在一定程度上影响震级估算大小。基于此,文章搜集了自19世纪以来全球范围内6级以上走滑地震的全部资料,更新丰富了震例库(Slemmons, 1982; Bonilla et al., 1984; Heaton et al., 1986; Khromovskikh, 1989; Wells and Coppersmith, 1994; Stirling et al., 2002),精进了震级与地震破裂参数之间的经验关系(图1c、1d)。

1.2 探槽揭示古地震事件位移或震级的研究

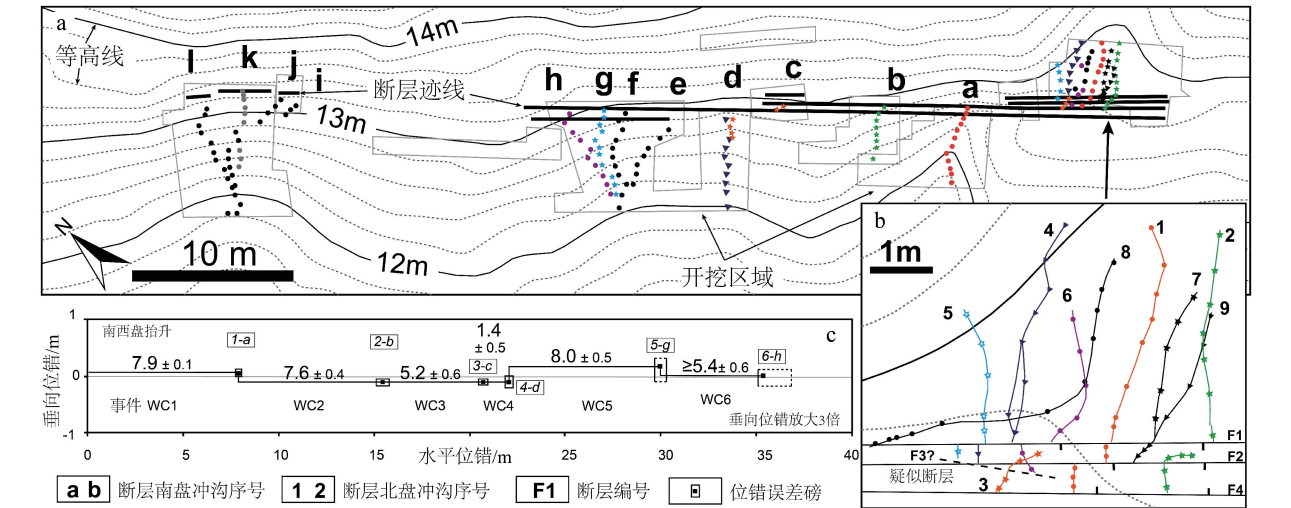
古地震学作为活动构造研究的常规手段,在很大程度上丰富了强震的研究样本量,但由于震级厘定需要多参数协调的复杂性,多数情况下研究者们很难定量给出每次事件的震级大小。在此背景下,Liu-Zeng et al. (2015)在基于可靠的事件解译和精准的样品定年基础上,通过考证历史地震资料,限定了海原断裂干盐池探槽中3次可靠古地震事件的发震年龄和其对应的震级大小,并指出探槽揭示的古地震事件未必是特征地震,中小型地震也有可能破裂地表造成地层变形。类似的结论也曾由Wells and Coppersmith (1993)和Weldon II and Biasi (2013)统计研究提出。因此,在有历史地震震害效应记录的地区,要结合探槽里事件的变形规模或附近的史料记录等其他证据,对各个事件的震级大小进行评估,以期获得更加可靠的发震模式。尽管借助历史资料考证来限定事件震级大小为古地震震级的厘定提供了新的突破口,但由于理想探槽点位的稀缺性和附近探槽历史资料记录的偶然性,再次开展类似于Liu-Zeng et al. (2015)的研究仍具有挑战性。

近几十年来,随着探槽技术的不断成熟(Haddad et al., 2012),研究人员可以更准确地选择优质探槽位置,以揭示古地震事件的同震位错量(Liu et al., 2004; Kondo et al., 2010; Wechsler et al., 2018)。例如,Liu et al. (2004)在圣安德烈斯断裂上开挖的三维组合探槽中,利用断层两侧冲沟的切割关系、冲沟形态、地层性质等特征重建了河道形态,成功揭示了5~6次古地震事件的同震位错在5.2~8.0 m(图3),并据此推断相应事件的破裂长度应该>200 km且 $M_w > 7.8$ 。Kondo et al. (2010)在北安那托利亚断层上开挖的三维组合探槽也精确定位了埋藏冲沟的空间展布位置,并获得了4次事件的平均同震位错量为 5.0 ± 0.8 m。虽然依据单点位的位错量值得到的震级区间并不可靠,但这类尝试一方面丰富了地震复发模型的讨论,提高了有关震级大小和复发间隔厘定的警觉性;另一方面挖掘了探槽内有关事件大小的信息,验证了在探槽内评估事件震级大小的可行性。

三维组合探槽技术已成功揭示了各事件的同震位错量,但需要确保探槽点位新冲沟的形成时间间隔要小于古地震复发间隔,否则所记录的地位错量可能是累积位错(Ludwig et al., 2010; Klinger et al., 2011; Zielke et al., 2015; 刘静等, 2021),因此,理想的三维组合探槽点位显得尤为稀缺。然而,近年来研究人员于不同断裂体系上开挖了大量的用来揭示长序列古地震事件的探槽(Grant and Sieh, 1994; Weldon II et al., 2002; Daëron et al., 2007; Liu-Zeng et al., 2007; Berryman et al., 2012; Rockwell et al., 2015; Shao et al., 2018; Yuan et al., 2018),但简单假定这些事件为特征地震序列可能对区域地震危险性的评估造成重大偏差。因此,充分挖掘探槽内变形地层所蕴含的事件大小信息来评估震级大小,进而给定合理的复发间隔是未来进行古地震研究的重要任务。

2 古地震事件变形强度与震级关系的方法探索

探槽技术不仅可以揭示古地震事件序列,还可以记录不同事件造成的地层变形。一般而言,大震和强震可以形成更丰富的变形证据,而中小型地震只能形成强度较弱的地层变形。基于此,



a—探槽开挖布设及所揭露出的断层两侧的对冲沟，颜色指示对应关系，灰黑色点线表示断层对盘没有对冲沟；b—断层东北盘揭露的多期冲沟；c—冲沟揭示的水平 and 垂向位错量，矩形框内的字母-数字序号对应断层两侧相应冲沟

图 3 加利福利亚州华莱士溪附近探槽揭露的同震位移量 (据 Liu et al. , 2004 修改)

Fig. 3 The coseismic displacement revealed by the trench of the Wallace Creek area in California (modified from Liu et al. , 2004) (a) Map views of buried channels at site (Colors indicate correlations across fault, and Gray and black dot lines are channels with no known correlatives across fault.); (b) Multiple incised channels exposed on the northeastern side of the fault block; (c) Horizontal and vertical offsets revealed by the incised channels (Letter-number pairs in boxes are correlated channels.)

文章针对古地震事件震级限定问题进行新的探索，即尝试对已开挖解译的理想探槽——阿尔金断裂铜矿探槽再解译，以此获取描述地震事件变形强度的 3 个相关参数：垂向位移量、变形带宽度范围及裂缝总拉张量，进而讨论其与震级之间的关系。

变形强度参数值的获取是基于古地震事件发生时地表层（事件层）的位置。垂向位移量和变形带宽度范围均由主破裂带两侧地层未发生变形的位位置来限定，具体表现为最后一支断裂出现且地层开始趋于平缓的位置。垂向位移量的大小是指主破裂带两侧未发生变形地层之间的高差，其测量原理本质上是通过“加减”运算实现的（图 4）。例如，假设地震事件 A 发生造成事件层 100 垂向位移 10 cm，随后事件 B 造成事件层 200 垂向位移 5 cm，则 100 层位的垂向位移量为 10+5 cm。据此，便可反推得到各事件造成的垂向位移量。需要注意，该方法要求保证各事件均造成同一变形宽度范围内地层的沉降，因此在探槽剖面内需要谨慎选择更老期次事件垂向位移量的测量位置。

裂缝总拉张量是指地震事件造成的多个裂缝形成的拉张量总和。但通常由于震后侵蚀改造作用，裂缝顶部会出现拓宽现象，因此统计时以裂缝两侧断裂由陡峭趋于平缓的拐点之间的距离作为单个裂缝的拉张量。另外，地表泥裂也有可能

形成小的无根裂缝（Pampeyan et al. , 1988; Holzer and Galloway, 2005），需要在统计过程中加以区分。

3 古地震事件变形强度的量化

3.1 铜矿探槽古地震事件序列

铜矿探槽（含 T1、T2）开挖于阿尔金断裂上具有发生强震并造成全段破裂能力的索尔库里段，探槽点位附近地势低洼，地形平坦，以 0.8 ~ 1.8 mm/a 的速率沉积了粉砂-黏土为主的高分辨率地层。基于此，Yuan et al.（2018）使用 Scharer et al.（2007）提出的量化评估方法，依据拉张裂缝、角度不整合及生长地层等证据识别出 8~9 次古地震事件，从新到老依次记为事件 A—I（图 5）。通过对古地震事件序列完整性的分析，Yuan et al.（2018）发现探槽中仅在 AD575~565BC 之间存在一个 1000 a 的沉积间断，但由于其东侧的骆驼探槽中该时间段沉积连续且未记录地层变形证据（Washburn et al. , 2003），因此判断该沉积间断应该没有造成地震事件的遗漏。此外，虽然地震的变形叠加效应难以识别，但铜矿探槽中各事件丰富的识别标志降低了其造成的不确定性。综上，铜矿探槽揭露了较完整的 8~9 次古地震事件，其中事件 F 为疑似古地震事件。

有关事件震级评估方面，袁兆德（2018）基于可靠的同震位移量和破裂长度，粗略估算了各事件的震级（表 1），为文中有关变形强度和震级关系的研究提供了参考。

表 1 铜矿探槽各事件的震级估算大小

Table 1 Estimation of magnitude for each event in the copper mine trench

古地震事件	A	B	C	D	E	F	G	H	I
同震位错/m	~5	~5	~7	~6.5	—	—	—	—	—
破裂长度/km	>350	>350	~300	~200	~200	~200	~300	~200	~300
矩震级 (M_w)	7.8~8.1	7.8~8.1	7.8~7.9	7.7	7.7	7.7	7.9	7.7	7.9

注：引自袁兆德，2018

3.2 各事件的变形强度

该研究对铜矿探槽内 9 次事件变形强度的相关参数进行再解译，获得了表 2—表 4 的测量结果。其中，事件 A、B、G 变形强度相关参数的识别更为明确全面，而其余 6 次事件变形强度的相关参数在不同探槽壁中识别并不完全。

表 2 不同探槽壁各事件垂向位移量值

Table 2 Vertical displacement values for each events on different trench wall

古地震事件	1 号探槽		2 号探槽	
	T1NE	T1SW	T2NE	T2SW
A	28.6	11.1	6.3	18.7
B	26.4	25.8	10.3	19.4
C	42.6	59.6	18.2	22
D	—	—	—	—
E	0.4	—	—	—
F	—	—	—	—
G	—	56.7	39.4	21.9
H	4.5	3.6	7.2	7.9
I	—	—	—	—

注：“空白”指无法测量其垂向位移量值

表 3 不同探槽壁各事件变形带宽度范围

Table 3 Width of the deformation zone for each event on different trench walls

古地震事件	1 号探槽		2 号探槽	
	T1NE	T1SW	T2NE	T2SW
A	13.0	13.0	11.7	11.2
B	24.1	24.8	15.0	11.2
C	7.0	5.7	—	—
D	2.6	1.6	—	—
E	1.3	1.4	1.9	2.4
F	—	2.5	2.7	2.3
G	16.3	18.0	11.5	11.9
H	2.7	0.5	—	2.9
I	0.9	1.5	—	—

注：“空白”指无法测量其变形带宽度范围

以最新古地震事件 A 造成的变形强度参数为例，该事件造成了 T1 内 13.0 m 宽的地层变形，且在北东壁（NE）和南西壁（SW）分别形成了 28.6 cm 和 11.1 cm 的垂向位错。相比之下，事件

表 4 不同探槽壁各事件裂缝总拉张量

Table 4 Total fracture tension tensor for each event on different trench walls

古地震事件	1 号探槽		2 号探槽	
	T1NE	T1SW	T2NE	T2SW
A	2.20±0.12	2.12±0.10	0.42±0.31	0.97±0.11
B	2.59±0.12	2.12±0.11	1.02±0.80	2.03±0.76
C	0.49±0.08	0.95±0.07	—	—
D	—	—	—	—
E	0.13±0.06	—	0.18±0.02	—
F	—	0.19±0.01	—	—
G	0.90±0.07	0.25±0.08	0.03±0.03	1.15±0.10
H	—	—	—	—
I	—	1.56±0.10	—	—

注：“空白”指无法测量其裂缝总拉张量

A 在 T2 中形成的变形带宽度和垂向位移均较小，分别表现为 T2NE 壁的 11.7 m/6.3 cm 以及 T2SW 壁的 11.2 m/18.7 cm。另外，事件 A 在 T1 内形成了至少 3 个拉张裂缝，总拉张量为 T1NE 的 2.20±0.12 m（图 6a）和 T1SW 的 2.12±0.10 m。在 T2 内，事件 A 形成了至少 1 个拉张裂缝，总拉张量为 T2NE 的 0.42±0.31 m 和 T2SW 的 0.97±0.11 m。事件 B、G 的测量结果详见表 2—表 4。

事件 C 和 D 由于发震时间久远且后期强改造等因素的影响，导致在探槽中的保存相当不连续，因此无法获得单独造成的垂向位移大小。在变形带宽度方面，我们也只在 T1 中限定了这两次事件的范围。有关事件 E 的变形证据虽然在 T1、T2 中均有保留，但没有观察到明显的垂向位错和裂缝拉张效应，因此变形带宽度（表 3）则成为了判断其变形强度的重要指标。此外，事件 F 也未观察到明显的位错和拉张效应，仅在 T1SW 形成了一个 0.19 m 的无根裂缝（图 6b）。

事件 G 的变形证据数量多，且在 4 个探槽壁上均保留了较为完整的事件层位。但遗憾的是，由于 T1NE 没有保留事件 F 的垂向位移大小，无法在该壁上获得事件 G 的垂向位移效应。然而，探槽壁上清晰地保存了该事件造成的拉张裂缝和相

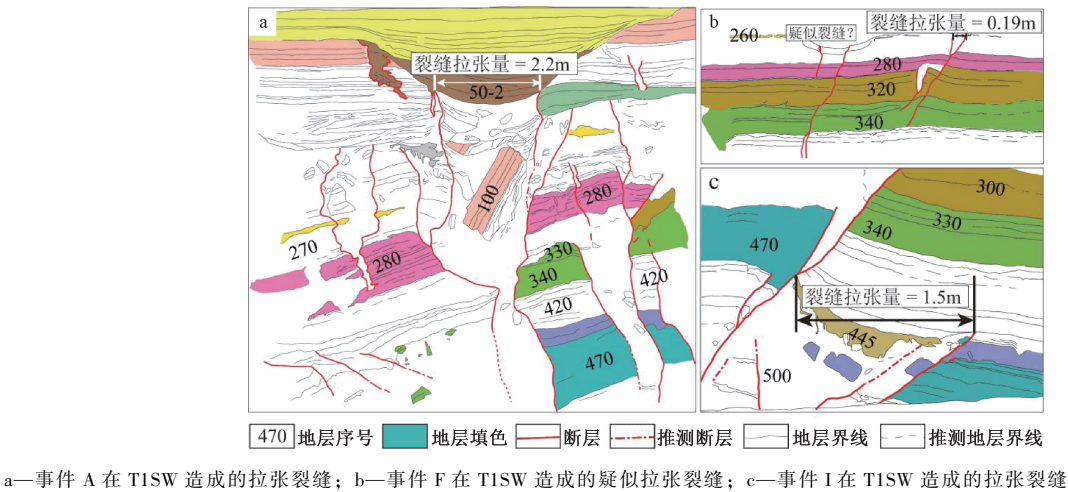


图 6 铜矿探槽内的拉张裂缝 (据 Yuan et al. , 2018 修改)

Fig. 6 Tensional fractures of the Copper Mine Trench (modified from Yuan et al. , 2018)

(a) Tensional fractures caused by Event A in T1SW; (b) Tensional fractures caused by Event B in T1SW; (c) Tensional fractures caused by Event I in T1SW

对完整的变形带宽度 (表 3—表 4)。

有关事件 H 的垂向位移量和变形带宽度在 T1 和 T2 中均较好的保存, 但该事件没有形成任何有关拉张裂缝的痕迹, 而最老事件 I 则造成了 T1SW 至少 1.5 m 宽的拉张裂缝 (图 6c)。

3.3 测量结果的统计分析

基于表 2—表 4 的变形强度参数统计结果, 文中对不同探槽内不同事件的相关参数进行了统计和分析 (图 7—图 9)。

根据图 7 所示, 我们发现事件 G 在 4 个探槽壁上引起的垂向位移量普遍较大, 最高值可达 T1SW

的 56.7 cm。与之相比, 事件 H 的垂向位移量在 4 个探槽壁上均不足 10 cm。尽管在 T2NE, 事件 H 的垂向位移量要略大于事件 A, 但其他探槽壁上, 事件 A 的垂向位移量要远大于事件 H。有关事件 A 和 B 之间的垂向位移量比对, 情况相对复杂。除了 T1NE 表现为事件 A 的垂向位移量略大于事件 B 外, 其余 3 个探槽壁则相反, 且 4 个探槽壁上事件 A、B 的平均值也表现为前者略小于后者。因此, 基于不同探槽壁上垂向位移量的大小来评估事件 A、B、G、H 造成的变形强度, 得出以下结论: 事件 G>事件 B>事件 A>事件 H。

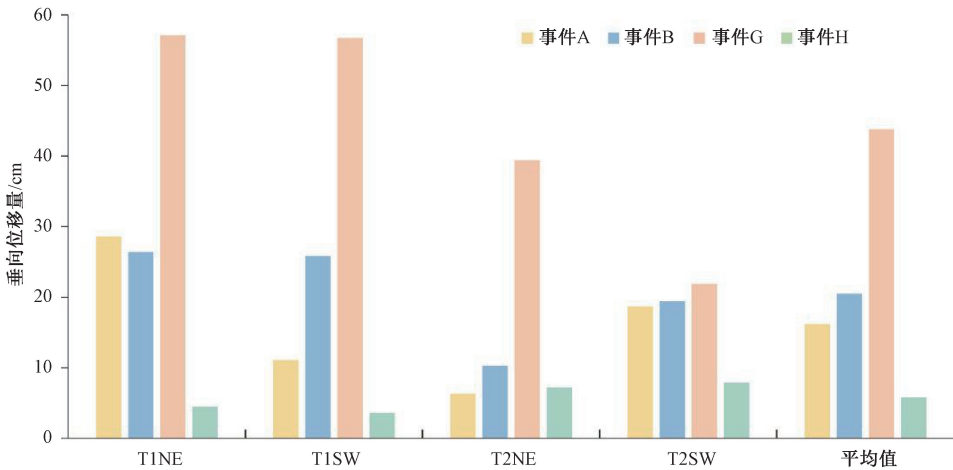


图 7 不同探槽壁上事件 A、B、G、H 的垂向位移量大小对比图

Fig. 7 Vertical displacement comparison diagram of events A, B, G, and H on different trench walls

根据图 8 所示的探槽内各事件变形带宽度范围分析结果, 可以得出以下结论: 事件 B 的变形带

宽度范围明显大于其他事件, 仅在 T2SW 壁上略小于事件 G; 事件 G 的变形带宽度在 4 个探槽壁上均

大于事件 A，其余事件的变形带宽度要明显小于事件 A、B、G。若按其在 4 个探槽壁上的变形带宽度范围均值进行比较，则结果为事件 C>事件 F>事件 D>事件 H>事件 E>事件 I，其中事件 E、F、D、

H 造成的变形带宽度范围近乎相等，均在 2 m 左右。因此，仅依据变形带宽度范围来表征各事件变形强度的结果为：事件 B>事件 G>事件 A>事件 C>事件 F>事件 D>事件 H>事件 E>事件 I。

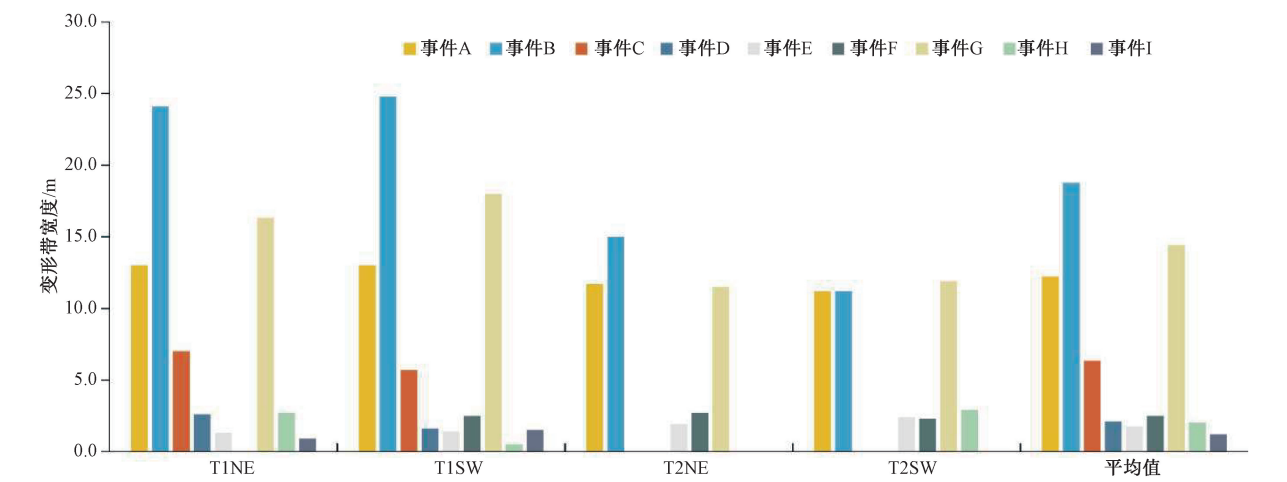


图 8 不同探槽壁上各事件变形带宽度范围对比图

Fig. 8 Comparison diagram of the width range of deformation zones for each event on different trench walls

裂缝总拉张量的结果表明（图 9），事件 B 的裂缝总拉张量最大，其次为事件 A 或 G，再之后为事件 C，其中事件 E 和事件 F 形成的总拉张量最小

且近乎相等。需要注意的是，事件 I 在 T1SW 壁上形成了 1 个不小于 1.5 m 的拉张裂缝（图 6c），因此可以推断事件 I 的变形强度应该不低于事件 G。

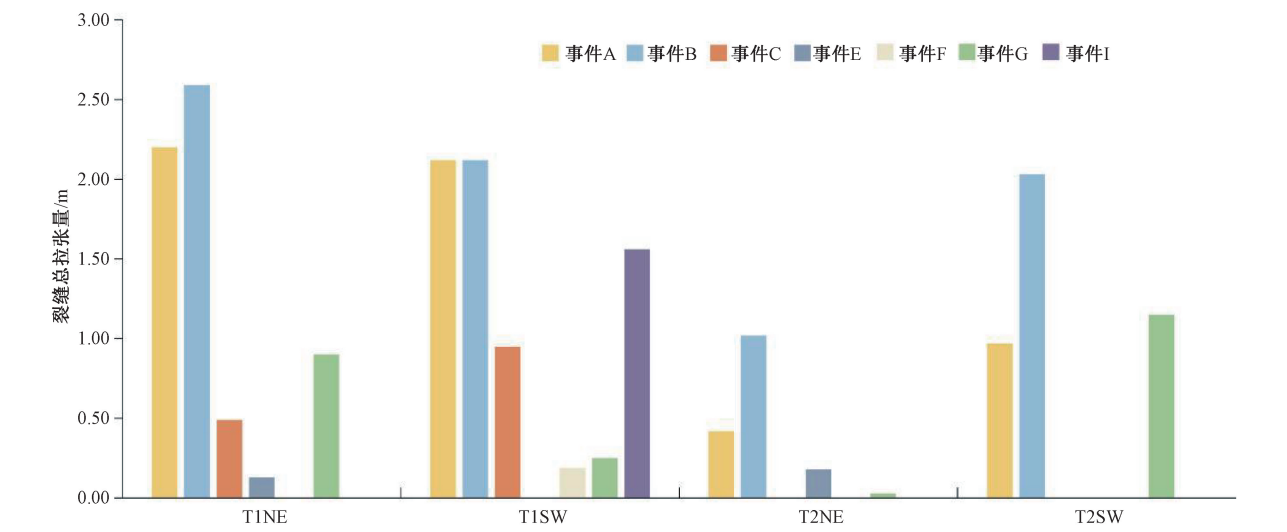


图 9 不同探槽壁上各事件裂缝总拉张量对比图

Fig. 9 Comparison diagram of total tensional displacement of cracks for each event on different trench walls

此外，研究还基于事件 A、B、G 较完整的变形强度参数进行参数之间的相关性分析（图 10），以评估地震事件造成的垂向位移量、变形带宽度和裂缝总拉张量之间的相关性强弱。分析结果显示，垂向位移量与变形带宽度及裂缝总拉张量之间的皮尔逊相关系数分别为 0.273 和 -0.325，呈弱相关性；而变形带宽度和裂缝总拉张量之间的

皮尔逊相关系数为 0.413，相关性相对较强（贾俊平，2012）。但值得注意的是，三个参数之间相关性分析的显著性均大于 0.1，这表明其所得的相关系数准确度不高。

综上，可定性推断事件 B、G 震级应大于事件 A，其次为事件 C，之后为事件 E、F、D、H，这与基于古地震事件同震位错和破裂长度两个参数

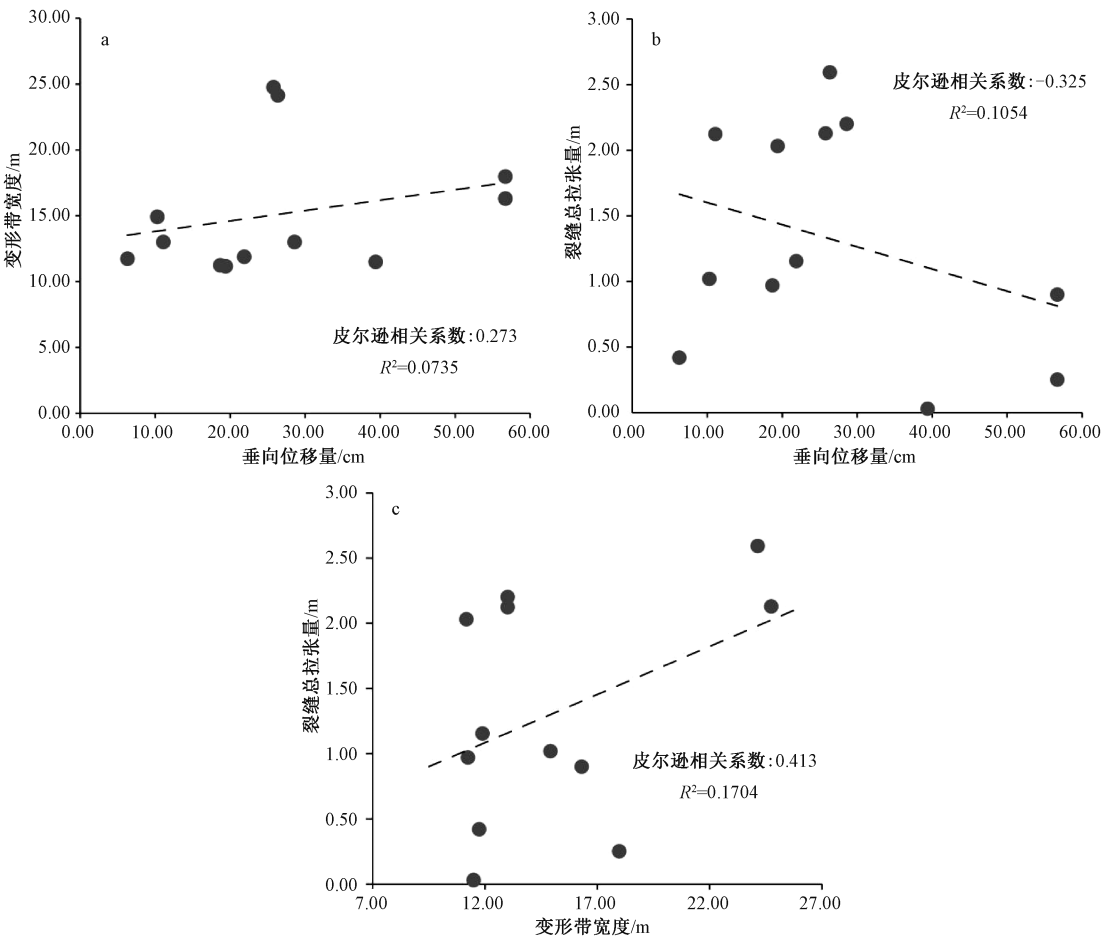


图 10 基于事件 A、B、G 的变形强度参数间的相关性分析图

Fig. 10 Correlation analysis diagram of deformation intensity parameters based on Events A, B, and G

情况下讨论得到的各古地震事件震级的相对大小近乎一致, 并且古地震探槽内的各变形强度参数之间呈现出一定的相关性。该研究分析说明, 当探槽开挖后, 基于事件造成的变形强度参数可以判断所揭露的事件规模相对大小, 研究人员应充分挖掘事件造成的地层变形强度差异信息。但需要注意, 如若展开类似研究工作, 需要统一地层变形强度参数测量标准并注意变形强度的叠加问题, 进而通过不断增加样本量来分析地层变形强度参数和震级之间的经验关系。

4 结语

古地震事件震级大小的限定一直是古地震研究的难点问题, 研究人员通常假定事件序列为震级相似的特征地震, 从而给定相应的复发间隔。但已有研究表明特征地震的假设过于简化, 因此, 合理评估古地震事件序列中不同期次事件的震级

大小对区域地震危险性分析至关重要。通过历史或现代地震样本造成的破裂参数信息可以估算古地震事件的震级大小, 但往往受限于古地震事件破裂尺度的不确定和各种误差。通过三维组合探槽能获取各期次事件的同震位移量, 但理想的研究点位稀缺。文章以阿尔金断裂铜矿探槽为例, 挖掘揭示了长序列古地震事件的探槽内所蕴含的事件大小信息。利用垂向位移量、变形带宽度和裂缝总拉张量等变形强度参数信息评估各事件相对大小。结果表明, 利用变形强度参数评估的事件相对大小与基于地表破裂长度和同震位移限定的震级结果近乎一致, 同时发现各参数之间有一定的相关性。该研究的尝试表明, 在发育有高精度地层的探槽研究工作中, 利用探槽揭露的事件变形识别古地震期次时, 依据其变形强度的差异对事件大小乃至震级范围给出估计是可行的。因此, 在后续探槽研究工作中, 研究人员在关注古地震序列的事件年代和复发周期的同时, 还应充

分挖掘各事件造成的地层变形强度差异信息。

References

- ADAMS J, 1981. Earthquake-dammed lakes in New Zealand [J]. *Geology*, 9 (5): 215-219.
- AGNEW D C, ALLEN C R, CLUFF L S, et al., 1988. Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault [R]. Menlo Park: U. S. Geological Survey.
- BAKUN W H, WENTWORTH C M, 1997. Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87 (6): 1502-1521.
- BERRYMAN K R, COCHRAN U A, CLARK K J, et al., 2012. Major earthquakes occur regularly on an isolated plate boundary fault [J]. *Science*, 336 (6089): 1690-1693.
- BONILLA M G, MARK R K, LIENKAEMPER J J, 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74 (6): 2379-2411.
- BORMANN P, 2002. New manual of seismological observatory practice (NMSOP-2) [R]. Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ.
- BURGETTE R J, HANSON A M, SCHARER K M, et al., 2020. Late Quaternary slip rate of the Central Sierra Madre fault, southern California: implications for slip partitioning and earthquake hazard [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115907.
- CHEN L C, RAN Y K, WANG H, et al., 2013. Paleoseismology and kinematic characteristics of the Xiaoyudong rupture, a short but significant strange segment characterized by the May 12, 2008, Mw 7.9 earthquake in Sichuan, China [J]. *Tectonophysics*, 584: 91-101.
- CHEN Y T, LIU R F, 2004. Earthquake magnitude [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 25 (6): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- DAËRON M, KLINGER Y, TAPPONNIER P, et al., 2007. 12, 000-year-long record of 10 to 13 paleoearthquakes on the Yammouneh fault, Levant fault system, Lebanon [J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 97 (3): 749-771.
- DUFFY B, QUIGLEY M, BARRELL D J A, et al., 2013. Fault kinematics and surface deformation across a releasing bend during the 2010 MW 7.1 Darfield, New Zealand, earthquake revealed by differential LiDAR and cadastral surveying [J]. *GSA Bulletin*, 125 (3-4): 420-431.
- ELLIOTT A J, OSKIN M E, LIU-ZENG J, et al., 2015. Rupture termination at restraining bends: the last great earthquake on the Altyn Tagh Fault [J]. *Geophysical Research Letters*, 42 (7): 2164-2170.
- FUMAL T E, SCHWARTZ D P, PEZZOPANE S K, et al., 1993. A 100-year average recurrence interval for the san Andreas fault at Wrightwood, California [J]. *Science*, 259 (5092): 199-203.
- GOLD R D, DUROSS C B, DELANO J E, et al., 2019. Four major Holocene earthquakes on the Reelfoot fault recorded by Sackungen in the New Madrid seismic zone, USA [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (3): 3105-3126.
- GRANT L B, SIEH K, 1994. Paleoseismic evidence of clustered earthquakes on the San Andreas Fault in the Carrizo Plain, California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99 (B4): 6819-6841.
- GREEN R A, OBERMEIER S F, OLSON S M, 2005. Engineering geologic and geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction effects: field examples [J]. *Engineering Geology*, 76 (3-4): 263-293.
- GÜRPINAR A, 2005. The importance of paleoseismology in seismic hazard studies for critical facilities [J]. *Tectonophysics*, 408 (1-4): 23-28.
- HADDAD D E, AKÇIZ S O, ARROWSMITH J R, et al., 2012. Applications of airborne and terrestrial laser scanning to paleoseismology [J]. *Geosphere*, 8 (4): 771-786.
- HANKS T C, KANAMORI H, 1979. A moment magnitude scale [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84 (B5): 2348-2350.
- HANKS T C, BAKUN W H, 2002. A bilinear source-scaling model for M-log a observations of continental earthquakes [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (5): 1841-1846.
- HEATON T H, TAJIMA F, MORI A W, 1986. Estimating ground motions using recorded accelerograms [J]. *Surveys in Geophysics*, 8 (1): 25-83.
- HOLZER T L, GALLOWAY D L, 2005. Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States [M] // EHLEN J, HANEBERG W C, LARSON R A. Humans as geologic agents. Boulder: Geological Society of America, 87-99.
- JIA J P, 2012. Statistics [M]. 5th ed. Beijing: China Renmin University Press. (in Chinese)
- KANAMORI H, 1977. The energy release in great earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 82 (20): 2981-2987.
- KEEFER D K, 1984. Landslides caused by earthquakes [J]. *GSA Bulletin*, 95 (4): 406-421.
- KHROMOVSKIKH V S, 1989. Determination of magnitudes of ancient earthquakes from dimensions of observed seismodislocations [J]. *Tectonophysics*, 166 (1-3): 269-280.
- KLINGER Y, ETCHEBES M, TAPPONNIER P, et al., 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun Fault in China [J]. *Nature Geoscience*, 4 (6): 389-392.
- KONDO H, ÖZAKSOY V, YILDIRIM C, 2010. Slip history of the 1944 Bolu-Gerede earthquake rupture along the North Anatolian fault

- system: implications for recurrence behavior of multisegment earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115 (B4): B04316.
- LIN Z, LIU-ZENG J, WELDON R J, et al., 2020. Modeling repeated coseismic slip to identify and characterize individual earthquakes from geomorphic offsets on strike-slip faults [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 545: 116313.
- LIU J, KLINGER Y, SIEH K, et al., 2004. Six similar sequential ruptures of the San Andreas fault, Carrizo Plain, California [J]. *Geology*, 32 (8): 649-652.
- LIU J, YUAN Z D, XU Y R, et al., 2021. Paleoseismic investigation of the recurrence behavior of large earthquakes on active faults [J]. *Earth Science Frontiers*, 28 (2): 211-231. (in Chinese with English abstract)
- LIU J, XU J, OU Q, et al., 2023. Discussion on the overestimated magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 45 (4): 579-596. (in Chinese with English abstract)
- LIU-ZENG J, KLINGER Y, XU X, et al., 2007. Millennial recurrence of large earthquakes on the Haiyuan fault near Songshan, Gansu Province, China [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (1B): 14-34.
- LIU-ZENG J, SHAO Y X, KLINGER Y, et al., 2015. Variability in magnitude of paleoearthquakes revealed by trenching and historical records, along the Haiyuan Fault, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (12): 8304-8333.
- LUDWIG L G, AKÇİZ S O, NORIEGA G R, et al., 2010. Climate-modulated channel incision and rupture history of the San Andreas fault in the Carrizo Plain [J]. *Science*, 327 (5969): 1117-1119.
- MASON D B, 1996. Earthquake magnitude potential of the Intermountain Seismic Belt, USA, from surface-parameter scaling of late Quaternary faults [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (5): 1487-1506.
- MCCALPIN J P, SLEMMONS D B, 1998. Statistics of paleoseismic data [R]. Estes Park: U. S. Geological Survey.
- MCCALPIN J P, 2009. Paleoseismology [M]. 2nd ed. Burlington: Academic Press: 615.
- MCGILL S F, SIEH K, 1991. Surficial offsets on the Central and Eastern Garlock Fault associated with prehistoric earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96 (B13): 21597-21621.
- MCGILL S F, RUBIN C M, 1999. Surficial slip distribution on the central Emerson fault during the June 28, 1992, Landers earthquake, California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B3): 4811-4833.
- MILLINER C W D, DOLAN J F, HOLLINGSWORTH J, et al., 2015. Quantifying near-field and off-fault deformation patterns of the 1992 M_w 7.3 Landers earthquake [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16 (5): 1577-1598.
- MUNSON P J, OBERMEIER S F, MUNSON C A, et al., 1997. Liquefaction evidence for Holocene and latest Pleistocene seismicity in the southern halves of Indiana and Illinois: a preliminary overview [J]. *Seismological Research Letters*, 68 (4): 521-536.
- OSKIN M E, ARROWSMITH J R, CORONA A H, et al., 2012. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LIDAR [J]. *Science*, 335 (6069): 702-705.
- PAMPEYAN E H, HOLZER T L, CLARK M M, 1988. Modern ground failure in the Garlock fault zone, Fremont Valley, California [J]. *GSA Bulletin*, 100 (5): 677-691.
- PAN J W, BAI M K, LI C, et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_s 7.4 earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (6): 1655-1670. (in Chinese with English abstract)
- RAN Y K, DENG Q D, 1999. History, status and trend about the research of paleoseismology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 44 (10): 880-889.
- REITMAN N G, MUELLER K J, TUCKER G E, et al., 2019. Offset channels may not accurately record strike-slip fault displacement: evidence from landscape evolution models [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (12): 13427-13451.
- REN Z K, ZHANG Z Q, CHEN T, et al., 2016. Clustering of offsets on the Haiyuan fault and their relationship to paleoearthquakes [J]. *GSA Bulletin*, 128 (1-2): 3-18.
- ROCKWELL T K, DAWSON T E, YOUNG BEN-HORIN J, et al., 2015. A 21-event, 4, 000-year history of surface ruptures in the Anza seismic gap, San Jacinto Fault, and implications for long-term earthquake production on a major plate boundary fault [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 172 (5): 1143-1165.
- RUBIN C M, 1996. Systematic underestimation of earthquake magnitudes from large intracontinental reverse faults: historical ruptures break across segment boundaries [J]. *Geology*, 24 (11): 989-992.
- SCHARER K, WELDON II R, STREIG A, et al., 2014. Paleoeearthquakes at Frazier Mountain, California delimit extent and frequency of past San Andreas Fault ruptures along 1857 trace [J]. *Geophysical Research Letters*, 41 (13): 4527-4534.
- SCHARER K M, WELDON R J, FUMAL T E, et al., 2007. Paleoeearthquakes on the southern san Andreas fault, Wrightwood, California, 3000 to 1500 B. C.: a new method for evaluating paleoseismic evidence and earthquake horizons [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (4): 1054-1093.
- SCHOLZ C H, 2019. The mechanics of earthquakes and faulting [M]. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- SCHUSTER R L, LOGAN R L, PRINGLE P T, 1992. Prehistoric rock avalanches in the Olympic Mountains, Washington [J]. *Science*, 258 (5088): 1620-1621.
- SCHWARTZ D P, COPPERSMITH K J, 1984. Fault behavior and

- characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B7): 5681-5698.
- SCOTT C P, DELONG S B, ARROWSMITH J R, 2020. Distribution of aseismic deformation along the Central San Andreas and Calaveras faults from differencing repeat airborne lidar [J]. *Geophysical Research Letters*, 47 (22): e2020GL090628.
- SHAO Y X, LIU-ZENG J, OSKIN M E, et al., 2018. Paleoseismic investigation of the Aksay restraining double bend, Altyn Tagh fault, and its implication for barrier-breaching ruptures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123 (5): 4307-4330.
- SIEH K, STUIVER M, BRILLINGER D, 1989. A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas Fault in southern California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B1): 603-623.
- SIEH K, NATAWIDJAJA D H, MELTZNER A J, et al., 2008. Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra [J]. *Science*, 322 (5908): 1674-1678.
- SIEH K E, 1978. Slip along the San Andreas fault associated with the great 1857 earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68 (5): 1421-1448.
- SIEH K E, 1984. Lateral offsets and revised dates of large prehistoric earthquakes at Palmett Creek, southern California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B9): 7641-7670.
- SLEMMONS D B, 1982. Determination of design earthquake magnitude for microzonation [C]. s. n. //Proceedings of the 3rd international earthquake microzonation conference. *Earthquake Society*: 119-130.
- STIRLING M, RHOADES D, BERRYMAN K, 2002. Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (2): 812-830.
- STREIG A R, DAWSON T E, WELDON II R J, 2014. Paleoseismic evidence of the 1890 and 1838 earthquakes on the Santa Cruz mountains section of the San Andreas fault, near Corralitos, California: paleoseismic evidence of the 1890 and 1838 earthquakes on the SAS of the San Andreas Fault, near Corralitos [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104 (1): 285-300.
- TANG M Y, LIU J, SHAO Y X, et al., 2015. Analysis about the minimum magnitude earthquake associated with surface ruptures [J]. *Seismology and Geology*, 37 (4): 1193-1214. (in Chinese with English abstract)
- WALLACE R E, 1981. Active faults, paleoseismology, and earthquake hazards in the western United States [M] //SIMPSON D W, RICHARDS P G. *Earthquake prediction: an international review*. Washington: American Geophysical Union: 209-216.
- WASHBURN Z, DUPONT-NIVET G, WANG X F, et al., 2003. Paleoseismology of the Xorxol segment of the central Altyn Tagh fault, Xinjiang, China [J]. *Annals of Geophysics*, 46 (5): 1015-1034.
- WECHSLER N, ROCKWELL T K, KLINGER Y, 2018. Variable slip-rate and slip-per-event on a plate boundary fault: the Dead Sea fault in northern Israel [J]. *Tectonophysics*, 722: 210-226.
- WELDON II R J, FUMAL T E, POWERS T J, et al., 2002. Structure and earthquake offsets on the San Andreas fault at the Wrightwood, California, paleoseismic site [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (7): 2704-2725.
- WELDON II R J, BIASI G P, 2013. Appendix I: Probability of detection of ground rupture at paleoseismic sites [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report 2013-1165-I, and California Geological Survey Special Report. 228-I.
- WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1993. Likelihood of surface rupture as a function of magnitude [J]. *Seismological Research Letters*, 64 (1): 54.
- WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [J]. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84 (4): 974-1002.
- WEN X Z, 1993. Fracture segmentation and earthquake potential probability estimation of Xiaojiang fault zone [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 15 (5): 322-330. (in Chinese)
- WEN X Z, FAN J, YI G X, et al., 2008. A seismic gap on the Anninghe fault in western Sichuan, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51 (10): 1375-1387.
- WEN X Z, MA S L, XU X W, et al., 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168 (1-2): 16-36.
- XU X W, YU G H, KLINGER Y, et al., 2006. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake ($M_w 7.8$), northern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111 (B5): B05316.
- XU Y R, LIU-ZENG J, ALLEN M B, et al., 2022. Understanding historical earthquakes by mapping coseismic landslides in the Loess Plateau, northwest China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47 (9): 2266-2282.
- YAO W Q, WANG Z J, LIU J, et al., 2022. Discussion on coseismic surface rupture length of the 2021 $M_w 7.4$ Madoi Earthquake, Qinghai, China [J]. *Seismology and Geology*, 44 (2): 541-559. (in Chinese with English abstract)
- YEATS R S, SIEH K, ALLEN C R, 1997. *The geology of earthquakes* [M]. New York: Oxford University Press: 568.
- YUAN Z D, 2018. Long paleoseismic record on the Wuzunxiaoer-Xorkoli section of the central Altyn Tagh fault [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator. (in Chinese with English

abstract)

YUAN Z D, LIU-ZENG J, WANG W, et al. , 2018. A 6000-year-long paleoseismologic record of earthquakes along the Xorkoli section of the Altyn Tagh fault, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 497: 193-203.

YUAN Z D, LIU-ZENG J, ZHOU Y, et al. , 2020. Paleoseismologic record of earthquakes along the Wuzunxiaer section of the Altyn Tagh fault and its implication for cascade rupture behavior [J]. *Science China Earth Sciences*, 63 (1): 93-107.

ZACHARIASEN J, SIEH K, TAYLOR F W, et al. , 1999. Submergence and uplift associated with the giant 1833 Sumatran subduction earthquake: Evidence from coral microatolls [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B1): 895-919.

ZIELKE O, ARROWSMITH J R, LUDWIG L G, et al. , 2010. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas fault [J]. *Science*, 327 (5969): 1119-1122.

ZIELKE O, KLINGER Y, ARROWSMITH J R, 2015. Fault slip and earthquake recurrence along strike-slip faults—Contributions of high-resolution geomorphic data [J]. *Tectonophysics*, 638: 43-62.

附中文参考文献

陈运泰，刘瑞丰，2004. 地震的震级 [J]. *地震地磁观测与研究*, 25 (6): 1-12.

贾俊平，2012. *统计学* [M]. 5 版. 北京：中国人民大学出版社.

刘静，袁兆德，徐岳仁，等，2021. 古地震学：活动断裂强震复发规律的研究 [J]. *地学前缘*, 28 (2): 211-231.

刘静，徐晶，偶奇，等，2023. 关于 1920 年海原大地震震级高估的讨论 [J]. *地震学报*, 45 (4): 579-596.

潘家伟，白明坤，李超，等，2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震地表破裂带及发震构造 [J]. *地质学报*, 95 (6): 1655-1670.

冉勇康，邓起东，1999. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势 [J]. *科学通报*, 44 (1): 12-20.

唐茂云，刘静，邵延秀，等，2015. 中小震级事件产生地表破裂的震例分析 [J]. *地震地质*, 37 (4): 1193-1214.

闻学泽，1993. 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计 [J]. *地震学报*, 15 (3): 322-330.

闻学泽，范军，易桂喜，等，2008. 川西安宁河断裂上的地震空区 [J]. *中国科学 D 辑：地球科学*, 38 (7): 797-807.

姚文倩，王子君，刘静，等，2022. 2021 年青海玛多 $M_w7.4$ 地震同震地表破裂长度的讨论 [J]. *地震地质*, 44 (2): 541-559.

袁兆德，2018. 阿尔金断裂中段乌尊硝尔-索尔库里段长序列古地震记录 [D]. 北京：中国地震局地质研究所.

袁兆德，刘静，周游，等，2020. 阿尔金断裂中段乌尊硝尔段古地震记录与级联破裂行为 [J]. *中国科学：地球科学*, 50 (1): 50-65.