



关于1920年海原大地震震级高估的讨论

刘静 徐晶 偶奇 韩龙飞 王子君 邵志刚 张培震 姚文倩 王鹏

Discussion on the overestimated magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake

Liu Jing, Xu Jing, Ou Qi, Han Longfei, Wang Zijun, Shao Zhigang, Zhang Peizhen, Yao Wenqian, Wang Peng

引用本文:

刘静, 徐晶, 偶奇, 韩龙飞, 王子君, 邵志刚, 张培震, 姚文倩, 王鹏. 2023. 关于1920年海原大地震震级高估的讨论. *地震学报*[J], 45(4): 579–596. DOI: 10.11939/jass.20220051

Liu J, Xu J, Ou Q, Han L F, Wang Z J, Shao Z G, Zhang P Z, Yao W Q, Wang P. 2023. Discussion on the overestimated magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*[J], 45(4): 579–596. DOI: 10.11939/jass.20220051

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汶川地震的面波震级测定及其多普勒效应

Determination of the surface-wave magnitude of the Wenchuan earthquake and its seismic Doppler effect
地震学报. 2018, 40(3): 364–373 <https://doi.org/10.11939/jass.20170212>

赣南地区历史地震补充研究

Supplementary investigation of historical earthquakes in southern Jiangxi
地震学报. 2020, 42(4): 491–503 <https://doi.org/10.11939/jass.20200042>

新国家标准震级标度与传统震级标度对比研究

Comparison of the new national standard magnitude scales with the traditional magnitude scales
地震学报. 2018, 40(2): 121–131 <https://doi.org/10.11939/jass.20170075>

2014—2019年浅源中强地震辐射能量的快速测定

Rapid evaluation of radiated seismic energy for great shallow earthquakes from 2014 to 2019
地震学报. 2021, 43(2): 194–203 <https://doi.org/10.11939/jass.20200077>

中强地震能量震级测定

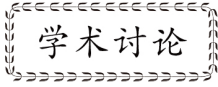
Energy magnitude determination of moderate–strong earthquakes
地震学报. 2019, 41(3): 289–301 <https://doi.org/10.11939/jass.20180139>

方位角对地方震震级测定的影响

Influences of azimuth on the local earthquake magnitude measurement
地震学报. 2017, 39(6): 880–890 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.06.006>

刘静, 徐晶, 偶奇, 韩龙飞, 王子君, 邵志刚, 张培震, 姚文倩, 王鹏. 2023. 关于 1920 年海原大地震震级高估的讨论. 地震学报, 45(4): 579–596. doi: 10.11939/jass.20220051.

Liu J, Xu J, Ou Q, Han L F, Wang Z J, Shao Z G, Zhang P Z, Yao W Q, Wang P. 2023. Discussion on the magnitude overestimation of the 1920 Haiyuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 45(4): 579–596. doi: 10.11939/jass.20220051.



关于 1920 年海原大地震震级高估的讨论^{*}

刘 静^{1),†} 徐 晶²⁾ 偶 奇³⁾ 韩龙飞¹⁾ 王子君¹⁾
邵志刚⁴⁾ 张培震⁵⁾ 姚文倩¹⁾ 王 鹏⁶⁾

- 1) 中国天津 300072 天津大学地球系统科学学院
- 2) 中国西安 710054 中国地震局第二监测中心
- 3) 英国牛津 OX1 3AN 牛津大学地球科学系
- 4) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所
- 5) 中国广东珠海 519080 中山大学地球科学与工程学院
- 6) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

摘要 1920 年海原大地震作为史料记载以来中国大陆震级最高、伤亡最多的极具破坏性的地震之一, 开启了我国用现代地震学方法研究大地震的新篇章, 在我国地震研究史上具有里程碑的意义. 最新研究结果表明, 1920 年海原大地震的矩震级为 $M_w(7.9 \pm 0.2)$, 与文献和大众广泛接受的 $M_{8\frac{1}{2}}$ 的数值相差较大. 本文通过对震级标度及其演化历史的总结和梳理, 阐述了仪器记录早期阶段基于地震波波幅和频率的震级标定存在系统偏差的问题, 这与仪器限制、台站稀疏、标定不统一等因素有关, 也使得 1920 年海原大地震和同时期世界上其它一些重要大地震的震级不同程度被高估. 在各种震级标度中, 矩震级 M_w 与地震破裂面积和位移等物理参数关联, 是地震震级的最佳标定方法. 震级作为表述地震大小和能量的重要参数, 被广泛地用于评估断层未来的地震潜能; 震级的偏差对地震活动时空分布样式的研究会产生重要影响, 并造成基于历史地震资料的地震危险性评价和灾害评估等产品的可信度降低. 因此, 本文倡导对历史地震震级进行检验和修订, 并建议 1920 年海原大地震的震级采用矩震级 $M_w(7.9 \pm 0.2)$ 表示, 修正后的 1920 年海原大地震的震级与 2008 年汶川地震($M_w 7.9$, $M_S 8.0$)和 2001 年昆仑山大地震($M_w 7.8$, $M_S 8.1$)相当.

关键词 1920 年海原大地震 历史地震 震级标定 面波震级 矩震级 同震位移分布
doi: 10.11939/jass.20220051 中图分类号: P315.3⁺2 文献标识码: A

Discussion on the overestimated magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake

^{*} 基金项目 国家重点研发计划项目(2021YFC3000605-04)和国家自然科学基金(42202232, U1839203, 42030305, 42104061)共同资助.

收稿日期 2022-04-09 收到初稿, 2022-11-14 决定采用修改稿.

作者简介 刘静, 博士, 教授, 主要从事强震与断层活动性、构造地貌等方面的研究,
e-mail: liu_zeng@tju.edu.cn



Liu Jing^{1,†} Xu Jing²⁾ Ou Qi³⁾ Han Longfei¹⁾ Wang Zijun¹⁾
Shao Zhigang⁴⁾ Zhang Peizhen⁵⁾ Yao Wenqian¹⁾ Wang Peng⁶⁾

1) School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

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

3) Department of Earth Sciences, University of Oxford, Oxford OX1 3AN, UK

4) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

5) School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangdong Zhuhai 519080, China

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

Abstract: The great 1920 Haiyuan earthquake, resulting in tremendous casualties, ranks as one of the largest and most devastating earthquakes in China. This significant event marks the start of investigating earthquakes through modern scientific approaches in China. Recent studies show that the moment magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake is $M_W(7.9 \pm 0.2)$, prominently smaller than the widely known and often cited magnitude $M_{8\frac{1}{2}}$. This paper reviews the re-calibration and conversion of different types of magnitude in the early developing phase of seismometers and analogue seismographs. Similar to the 1920 Haiyuan earthquake, the magnitude of many large shallow earthquakes that occurred in this period are systematically over-estimated due to factors such as developing technology, sparse instrumentation and data, and diverse calibration functions. The moment magnitude, linked to physical parameters of earthquake rupture, is the best magnitude scale. For magnitude is the most commonly used parameter in describing an earthquake's size and energy and is an essential factor in seismic hazard assessment, bias and errors in magnitude conversion have significant consequences in understanding the spatio-temporal pattern of historical seismicity and the reliability of various products of seismic potential and hazard evaluation. We thus advocate citing revised moment magnitude $M_W(7.9 \pm 0.2)$ for the 1920 Haiyuan earthquake in future studies and re-evaluating the magnitude of historical earthquakes in general. With a revised magnitude, the 1920 Haiyuan earthquake is similar in size to the 2008 Wenchuan earthquake ($M_W 7.9$, $M_S 8.0$) and the 2001 Kunlun earthquake ($M_W 7.8$, $M_S 8.1$).

Key words: 1920 Haiyuan earthquake; historical earthquake; magnitude scale; Gutenberg-Richter surface-wave magnitude; moment magnitude; coseismic slip distribution

引言

1920年12月16日20时06分,宁夏海原(海原当时隶属甘肃省)发生了震惊世界的大地震(Close, McCormick, 1922),强烈的震动持续了十几分钟,几乎全球都有震感,被称为“寰球大震”。彼时正值滚筒式地震记录仪开始在全球布设,因此,世界范围内至少有76个地震台记录到了此次地震(International Seismological Centre, 2014)。这是我国有史以来最具破坏性的地震之一,约有23万人丧生,后期复核死亡人数高达27万之多(刘百箴等, 2003)。

海原地震之前,我国没有自己的现代地震仪和地震台,也没有相关的地震研究机构和专职研究人员,而海原大地震的发生引发了众多开创性的工作(邓起东, 2011)。二十世纪上半叶是我国大陆地震观测历史的早期阶段,1904年到1929年我国大陆的地震观测仅通过外国地震学家建设的少数台站获得,自1930年我国自主建成的第一个地震台鹞峰站运行伊始,我国地震监测的序幕就此拉开(Wang, 2020)。海原大地震发生之后,我国地质科学家一路辗转、历尽艰辛实地考察了海原周边地区的地震灾害,并相继发表调查报告(王烈, 1921; 翁文

灏, 1922; 谢家荣, 1922)。其中, 翁文灏(1922)对1920年海原地震的研究开创了我国以现代方法和实地调查结合进行大地震研究的先河, 提交了中国历史上第一份地震科学考察报告, 并制作了我国第一张震区烈度等震线图, 还首次划分了中国大陆东部的地震危险带。在我国活动构造领域中, 一些里程碑式的研究成果出自对海原地震和海原断裂带的研究。例如, 1920年海原大地震综合专著(国家地震局兰州地震研究所, 宁夏回族自治区地震队, 1980)和二十世纪八十年代活动断裂的1:50 000大比例构造填图首先在海原断裂带上完成(国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震队, 1989, 1990)。

海原地震的震级 $M_{8\frac{1}{2}}$ (Gutenberg, Richter, 1941, 1954; 有时误标为里氏震级), 被认为是二十世纪发生在我国的最大地震震级, 也是世界上历史地震最大的震级之一。尽管震级在概念上很简单, 但在现实中却很复杂。多数震级的标度并不能直接标定地震释放的能量, 而震级相差1.0就大概相当于能量相差30倍。震级的标定往往是一个方程, 根据地震仪记录的地震波振幅、仪器的放大幅度以及仪器到震中的距离, 有时还需要根据所测地震波的频率和地震的深度进行震级校正(Bormann, 2012)。对于没有仪器记录或器测时代早期阶段的历史地震, 由于缺乏地震学资料、仪器频响和有效增益等信息, 震级测量具有很大的不确定性(Abe, Kanamori, 1980; Abe, Noguchi, 1983), 因此也造成了震级在不同目录之间以及不同标定方法之间的差异(Abe, 1981)。Kanamori(1977)提出矩震级 M_w 的概念, 并由地震矩来计算 M_w , 由此与地震破裂的面积和位移等物理参数相关联。与其它震级标度不一样, 矩震级具有物理意义且不存在饱和的问题, 是震级的最佳标定, 因此越来越被认可。

最新研究结果显示, 1920年海原大地震的矩震级应该为 $M_w(7.9 \pm 0.2)$ (Liu-Zeng *et al.*, 2015; Ou *et al.*, 2020), 与文献和大众广泛接受的(里氏)震级 $M_{8\frac{1}{2}}$ 差别很大。虽然面波震级不一定要与矩震级一致, 但 $M_{8\frac{1}{2}}$ 一直以来被广泛传播, 且其前缀经常被忽略, 笼统称为海原 $8\frac{1}{2}$ 级大地震, 造成了混淆和错觉。这与仪器记录早期历史强震的震级标定存在系统偏差问题有关, 同时期世界上其它一些大地震的震级也存在不同程度的高估(Abe, Noguchi, 1983)。震级作为表示地震大小和能量的重要参数, 被广泛地用于评估断层未来的地震潜势(Wells, Coppersmith, 1994)。对于无仪器记录且缺乏地表破裂研究的早期历史地震, 通常根据地震的震级(烈度和震级经验公式估算得到)与破裂参数之间的经验关系推算地震的破裂尺度、最大位移和平均位移, 由此估算断裂复发周期、灾害分布范围等参数, 进而评价断裂的地震危险性(*e.g.*, Nishenko, Buland, 1987; Working Group of California Earthquake Probabilities, 1988, 1990, 1995, 1999; Shao *et al.*, 2016; Xiong *et al.*, 2017), 并为基础设施和关键设施的结构设计提供依据(*e.g.*, Chen, Petersen, 2011)。因此, 震级误差会造成基于历史地震资料的地震危险性评价和灾害评估等产品的可信度发生偏差, 也将对地震活动时空分布样式的研究产生重要影响。鉴于此, 本文拟对海原大地震的震级进行估算和重新厘定, 并对地震仪发展早期震级标度及其演化历史进行讨论, 以澄清1920年海原大地震震级过高估计的原因。

1 地震构造背景

自新生代以来, 印度板块与欧亚板块的持续碰撞与会聚作用导致了青藏高原的持续隆升与扩展。这不仅对青藏高原周边的环境演化和地貌格局产生了重要影响, 也在高原周缘及内部形成了一系列弧形展布且延伸上千千米的大型走滑断裂带, 如阿尔金断裂带、海原断裂带、昆仑断裂带等, 也因此吸收和调节了印度大陆向北推移所产生的应变。同时, 这些大型

走滑断裂带及其伴生构造也是我国陆内多数大震、强震事件的发震构造。

海原走滑断裂带作为一条主要构造边界，总长约 1 000 km，对于青藏高原和阿拉善地块之间的相对运动具有重要的调节作用(Molnar, Tapponnier, 1975; Deng et al, 1986; 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局, 1990)。如图 1 所示，广义上该断裂带西起祁连山内部的哈拉湖附近(约 98°E)，以走向约 290°E 向东延伸经冷龙岭、天祝、米家山—哈思山，走向转为 320°E 至海原，最终以近南北走向延伸至六盘山(106°E 以东)。前人依据海原断裂带的几何学、地震复发特征等将其自西向东划分为哈拉湖段、冷龙岭段、金强河段、毛毛山段、老虎山段、海原段(狭义)和六盘山段(Gaudemer et al, 1995; 袁道阳等, 1998; 刘静等, 2007)，其中冷龙岭段向东延伸与金强河相交处分叉出一条向东北方向明显凸起的弧形分支断裂即古浪—中卫断裂，该断裂总体以近东西走向展布，延伸约 350 km 后向东转为近南北走向，并在固原附近与海原断裂带再次交会。

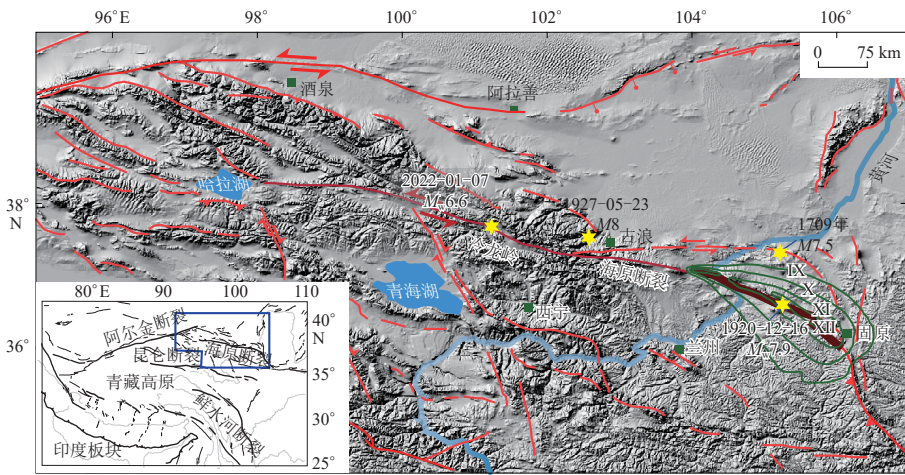


图 1 青藏高原东北缘活动断裂和 1920 年海原大地震等震线(绿色)分布图

Fig. 1 Map showing active faults in northeast Tibetan Plateau and the isoseismal contour lines of the 1920 Haiyuan earthquake shown in green

沿海原断裂带发育有大量的左旋错断地貌，相对干燥的气候使得这些错断地貌标志得以较完整地保存下来，如错断的河流、阶地、山脊、冲洪积扇等自然地貌以及田埂等人工地物，均记录了大小不等的各级位移量。利用错断的地貌标志，前人开展了大量的晚第四纪断裂滑动速率的研究，得到速率的量值范围为 2.3—16 mm/a (Zhang et al, 1988a; Gaudemer et al, 1995; 袁道阳等, 1997; Lasserre et al, 1999, 2002; 何文贵等, 2000; Li et al, 2009; Jiang et al, 2017; 刘金瑞等, 2018; Matrau et al, 2019; Yao et al, 2019; Shao et al, 2021)。河流阶地是最常应用于第四纪断层滑动速率研究中的地貌体，其年龄限定一直以来都存在着争议。争议主要集中在选取上级阶地还是下级阶地的废弃年龄作为位移累积的起始时间。Yao 等(2019)和 Shao 等(2021)强调在滑动速率估算中同时限定上下级阶地是更加客观的做法，而不应把滑动速率的上限估计值(下级阶地模型重建结果)或下限估计值(上级阶地模型重建结果)作为滑动速率值本身。据此原则，海原断裂带毛毛山—金强河区段的晚第四纪滑动速率为 5—8 mm/a。要获得更准确的滑动速率值，则需要通过确定滑动速率的上限最小值和下限

最大值,找到上下限差异的最小值逼近(王子君等,2023)。此外,Zhang等(1988a)和Burchfiel等(1991)依据古生代基岩体位错量,估算得到海原区段更长地质时间尺度的滑动速率分别为 (8 ± 2) mm/a和5—10 mm/a。短时间尺度上,前人利用大地测量方法得到海原断裂带的应变累积速率为4—8.6 mm/a(Gan *et al.*, 2007; Cavalié *et al.*, 2008; Daout *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2017),该结果反映了海原断裂带上数年至数十年(短期)内弹性应变累积的快慢。

历史记录显示沿着海原断裂带曾发生过多次数M8左右的地震事件,如1920年发生在狭义海原区段上的海原大地震、1927年在海原断裂带西段冷龙岭段的M8.0古浪大地震等(国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队,1980; Deng *et al.*, 1986; Zhang *et al.*, 1987; 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局,1990; Gaudemer *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2020),这些中强到大震的频繁发生反映出海原断裂带较强的孕震能力及较高的地震危险性。过去三十多年在海原断裂带的海原段和毛毛山段开展了一些古地震的探槽研究,其结果揭示了大地震具有1000年左右的原地复发周期,大地震可以造成单条断裂破裂或多条断裂的级联破裂,且在时间尺度上显示出丛集性(Zhang *et al.*, 1988b, 2003; 冉永康等,1997; 袁道阳等,1998; Liu-Zeng *et al.*, 2007, 2015)。同时,古地震探槽的研究揭示出中强震也有破裂到地表的记录,表明不能用特征地震的简单重复来描述海原断裂带活动的时空特征(Liu-Zeng *et al.*, 2007, 2015; 邵延秀等,2016)。

2 1920年海原大地震的地表破裂和震害

1920年海原大地震的宏观震中位于宁夏回族自治区海原县的干盐池附近,仪器震中为 $(36.7^{\circ}\text{N}, 104.9^{\circ}\text{E})$,宏观震中烈度为Ⅺ度(国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队,1980; 顾功叙等,1983; 谢毓寿,蔡美彪,1986; 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局,1990; Ou *et al.*, 2020)(图1)。前人对海原大地震开展了多次详细的野外考察,尤其是对其宏观震害的考察,并结合历史资料的分析,逐渐确定了海原大地震极震区的位置、走向和范围,绘制了1920年海原地震等烈度线分布图。极震区东起固原,经西吉、海原、靖远等县,向西止于景泰县;Ⅷ度以上烈度区的分布形态相似,长轴方向均为NW向、东南端宽度大,向西北端逐渐变得狭窄,在平面上形成一个水滴形;烈度在Ⅸ度以上的地区长达200余km,并且以海原活动断裂带为界,地震烈度向NE方向衰减较快,向SW方向衰减较慢(国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队,1980)。从地震烈度图上可以看出,破裂的东部相对比较复杂,可能是由于东部以沿西倾断面上的逆冲为主(六盘山东缘断裂),且延伸较远。1920年海原大地震极震区及其邻近的高烈度地区的滑坡和崩塌的规模之大、分布范围之广在地震史上均属罕见,特别是西吉、会宁、静宁一带,成串的因滑坡堵塞河流而造成的堰塞湖至今尚在(Close, McCormick, 1922; 国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队,1980; Xu *et al.*, 2021)。地震晃动造成了大量的长距离巨型滑坡,以致于Close和McCormick(1922)用“在山走动的地方”为题报道了该地震所造成的震害。

1920年海原大地震沿海原断裂带产生了长约237 km的地表破裂带(图2; Deng *et al.*, 1984),该破裂带东端始于宁夏固原硝口附近,经宁夏海原、甘肃靖远等县,西端止于甘肃景泰县以南的兴泉堡。地表破裂突破了沿线多个挤压和拉张型阶区等复杂几何结构,据此将该断裂带分成11个段落,各段长10—50 km不等(图2a)(Deng *et al.*, 1986; 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局,1990; Klinger, 2010)。海原地震地表破裂带的展布及变形特征

与海原活动断裂带的分布及内部结构具有十分密切的关系，各破裂段在平面展布上与所在次级剪切断层基本吻合。以南华山东端为界，海原断裂带西段断层的总体走向稳定，约为 280° — 290° ，东段总体走向偏转为 320° — 330° （国家地震局地质研究所，宁夏回族自治区地震局，1990）。沿地表破裂带发生的一系列地裂缝、鼓包、地震陡坎等构造地貌以左旋位错为主，被阶区分隔的每条断层段间的走滑位移量大，向两侧逐渐减小，至阶区为最小，整体上沿断裂走向形成一个较明显的“钟形”位移分布特征（国家地震局地质研究所，宁夏回族自治区地震局，1990）。

二十世纪八十年代的野外调查研究发现，1920年海原地震的最大水平左旋位移量约为11 m，平均位移为5 m（图2b）（Deng *et al.*, 1986；国家地震局地质研究所，宁夏回族自治区地震局，1990）。近年来，激光雷达(light detection and ranging, 缩写为LiDAR)高精度三维地形扫描清晰地展示了数字化海原断裂带的各级位错地貌（刘静等，2013）。研究人员利用高精度高分辨率的地形数据以及遥感影像等提取了大量位移测量值，并基于位移量概率密度函数(cumulative offset probability density, 缩写为COPD)将各组位移解译为对应不同次数地震事件的累积效应，并认为最小的位移量组平均值(3—5 m)为1920年海原大地震的同震位移，而早期研究得到的10 m代表的可能是多次古地震事件的累积位移（Ren *et al.*, 2016；Ou *et al.*, 2020）。

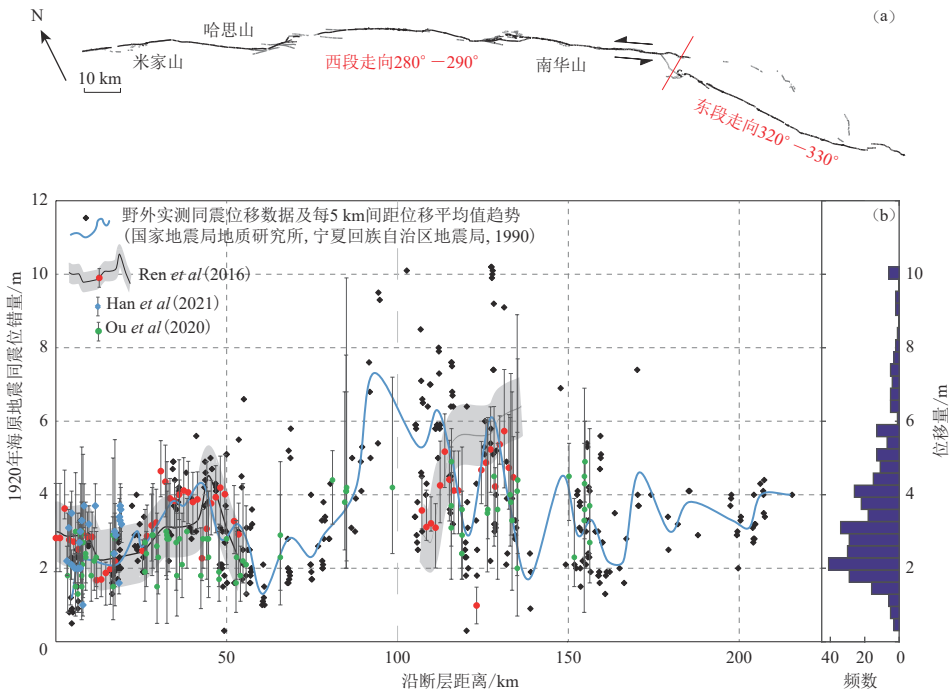


图2 1920年海原大地震地表破裂几何形态平面展布(修改自国家地震局地质研究所，宁夏回族自治区地震局，1990)(a)和同震左旋位移沿断裂分布的不同研究结果对比(b)，图(b)右侧为位移量直方图

Fig. 2 Surface rupture geometry of the 1920 Haiyuan earthquake (revised from Institute of Geology of State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, 1990)(a) and

comparison of coseismic left-lateral offsets along fault strike in different studies (b).

The right panel of Fig. (b) is the histogram of all measured offsets

但是这种解译下得到的最大位移、最小位移及平均位移三者相似, 变异系数 (coefficient of variation, 缩写为 COV) 值非常小 (<0.2). 这些显然与现代地震发生后实地调查显示的最大位移与平均位移之比一般约为 2、同震位移沿走向变化幅度大 ($COV > 0.3$) 的实际情况不符 (Lin *et al.*, 2020). Lin 等 (2020) 指出, 位移量概率密度函数的一个峰值可以由不同次事件造成的相似位移值 (单次或多次累积位移) 混合构成, 单次地震的最大位移落在两次地震累积位移区间的情况比较常见. 之前野外调查与现今基于高精度地形数据的同震位移解译之间的差异也凸显了, 利用地貌标志重建几十年到上百年前发生的历史地震同震位移时区分单次或多次事件位移的不确定性 (刘静等, 2021). 干盐池唐家坡错断 (7.5 ± 1) m 的石垒田埂 (图 3) 也说明了 1920 年海原地震中存在远大于平均值的同震位移量. 在该点位附近沿海原断裂约 400 m 范围内, Zhang 等 (1987) 量测多个左旋同震位移, 从 4.8 m 到 7.5 m 不等. 测量值的差异其一可能代表位移沿走向的变化, 其二测量值未能涵盖多条破裂分支时小于真实值. 不论争议结果如何, Liu-Zeng 等 (2015) 指出, 基于地表破裂参数, 若破裂长度为 240 km, 即使同震地表位移的平均值为 5 m, 最大值为 10 m (暂且认为上限值), 其对应的震级也仅为 $M_W (7.8 \pm 0.2)$, 与文献中常见的 1920 海原地震 $M_S 8\frac{1}{2}$ 或 $M 8.7$ 相差较大, 并不协调.

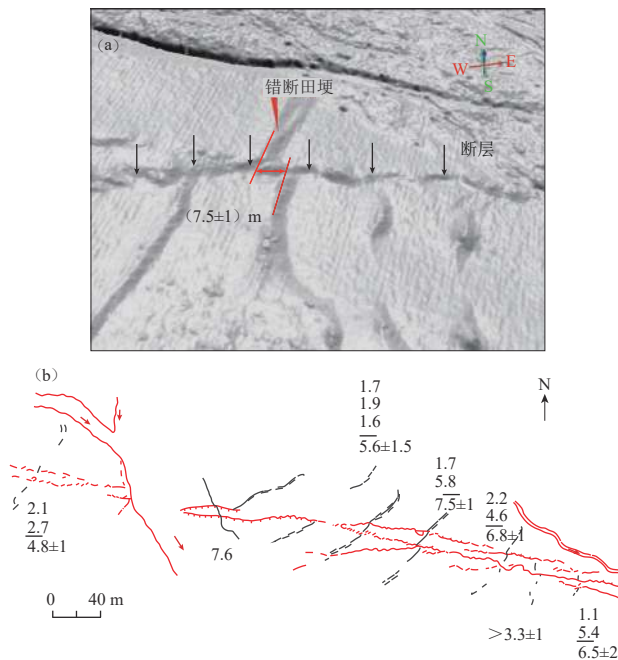


图 3 (a) 高精度 LiDAR 三维地形再现干盐池唐家坡村 1920 年地表破裂形成的陡坎和石垒田埂 (7.5 ± 1) m 的左旋错断; (b) 在该点位附近沿断裂约 400 m 范围内 Zhang 等 (1987) 量测多个左旋同震位移, 从 4.8 m 到 7.5 m 不等

Fig. 3 (a) High-resolution 3D LiDAR topography shows the stone wall being left-lateral offset (7.5 ± 1) m near the village of Tangjiapo, Ganyanchi; (b) Near the site, Zhang *et al.* (1987) measured multiple sinistral coseismic offsets from 4.8 m to 7.5 m over about 400 m distance along the fault

3 1920 年海原大地震震级的估算和重新厘定

1920 年海原大地震震级的标定历史其实也是一部意义深远的世界震级发展编年史. 虽然十九世纪末就开始有仪器记录地震波, 但直到 1935 年震级的概念才出现. 1920 年海原大地震是震级概念提出时全球少数几个有较完整地震波记录的大地震, 而在之后的半个多世纪里, 随着震级计算方法的不断创新、更迭和完善, 其震级也被反复地估计和校正, 因此也就造成了目前多个版本的震级估计值. 而且在提及一次地震的震级时, 研究人员较少引用其出处, 这就愈发造成了近几十年文献中关于 1920 年海原大地震震级的混乱引用. Ou 等 (2020) 梳理了 1920 年海原大地震震级的各种估算、校正和讨论及其文献, 详列于表 1, 可见文献中报道的震级数值从 7.8 到 8.6 不等, 震级标度包括 M , m , M_W , M_S 和 m_B , 有些早期研究中的数据未同时发表, 因此无法直接验证; 而不同研究方法得到的不同震级标度结果也不宜直接比较.

表 1 1920 年海原地震震级的不同估算值及文献来源 (修改自 Ou *et al.*, 2020)

Table 1 Estimates of the magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake (modified from Ou *et al.*, 2020)

震级	计算或估算方法	文献来源
$M8.5$	频率约为 20 s 的面波振幅	Gutenberg 和 Richter (1941)
$m7.9$	体波震级公式 $m_B = \lg(A_H/T)_{\max} + Q(\Delta)$	Gutenberg 和 Richter (1956)
$M_W8.3$	基于瑞雷面波频谱密度与 45° 断层倾角假设	Chen 和 Molnar (1977)
$M_W7.8$	由 Chen 和 Molnar (1977) 给出的地震矩计算而得	Kanamori (1977)
$M_S8.6$	根据 Gutenberg 的笔记重新修订	Abe (1981)
$m_B7.9$	根据 Gutenberg 的笔记重新修订	Abe (1981)
$M8.5$	基于地震烈度 $M = 0.58I_0 + 1.5$	顾功叙等 (1983)
M_W8	基于 90° 断层倾角假设对 Chen 和 Molnar (1977) 结果进行修正	Deng 等 (1984)
$M8.6$	根据 Gutenberg (1945b) 的方法编译	谢毓寿和蔡美彪 (1986)
$M_S8.4$	从 $M_S8.6$ 修正	Pacheco 和 Sykes (1992)
$M_W8.3$	引用 Chen 和 Molnar (1977)	International Seismological Centre (2013)
$M_S8.7$	基于三个地震记录计算得到	International Seismological Centre (2014)
$M_W7.8$	基于地表破裂长度约 240 km 和同震位移最大值和平均值	Liu-Zeng 等 (2015)
$M_W8.2$	基于震源物理动态模拟的理论计算	Xu 等 (2019)
$M_W(7.9 \pm 0.2)$	将早期地震波形记录扫描并数字化, 计算体波震级和面波震级并换算, 辅以体波波形进行正演拟合	Ou 等 (2020)

据国际地震中心 (International Seismological Centre, 缩写为 ISC) 公告, 全球至少有 78 个地震台站记录了 1920 年海原地震的地震波, 但一些记录由于破坏、火灾等已不复存在 (Okal, 2015). Ou 等 (2020) 搜集了 12 个国家的 27 个台站利用 13 种独特仪器记录到的 60 张含有海原地震波形的地震波扫描件, 并将其数字化 (图 4). 由于海原地震的面波振幅大, 而全球很多地震仪的记录限幅或指针脱落和卡顿, 加之 1920 年兼有垂向或双水平向记录的地震仪较少, 最终只有三个地震台的数据可以用于面波震级的估算, 其余地震台的数据则只能针对其体波记录进行体波震级和矩震级的估算. 基于振幅和波长测量值 (Bormann, 2012) 计算得到体波震级 $m_B(7.9 \pm 0.3)$ 和窄频面波震级 $M_{S(20)}(8.1 \pm 0.2)$. 若将体波震级和面波震级通过经验公式换算成矩震级, 则分别是 $M_W(8.1 \pm 0.4)$ 和 $M_W(8.0 \pm 0.2)$. 此外, 对仪器测得的 11 条体波波形进行正演拟合, 模拟有限源双向破裂过程, 获得矩震级 $M_W(7.9 \pm 0.2)$. 由此, 考虑误差范围, 三组矩震级估计结果的一致性较好, 可相互印证.

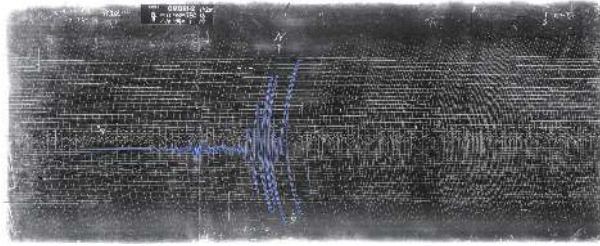


图 4 1920 年海原大地震的烟熏纸质记录扫描并数字化示例

Fig. 4 Example of original seismogram on smoked paper of the 1920 Haiyuan earthquake that was scanned and digitized

1920 年海原地震的震级在文献中常用 $M8.7$ 或 $M_S8\frac{1}{2}$, 但其出处比较隐晦或被忽略. 其中 $M_S8\frac{1}{2}$ 来自于 Gutenberg 和 Richter (1941), 而 $M8.7$ 震级的引用则来源不详. Ou 等(2020)指出, 早期研究中体波震级与矩震级的换算关系(Kanamori, 1977)以及体波震级与面波震级的换算关系(Richter, 1958)是相对稳定的. Richter (1958)首次介绍体波震级的计算公式, 并与面波震级进行比较, 给出了 m 与 M 的转换关系 $m=2.5+0.63M$. Abe (1981)重新评估校正全球早期浅源强震震级, 给出了 1920 年海原大地震的震级为 $m_B=7.9$, $M_S=8.6$ (表 1). 按此换算公式, 海原地震 $M_S8.6$ 对应于 $m7.91$, m 即为后来的 m_B . 这与 Ou 等(2020)通过全球更多数据得到的 $m_B(7.9\pm0.3)$ 结果一致. 国际地震中心(International Seismological Centre, 2014)曾从 RIV, LPZ 和 FBR 这三个地震台目录中的振幅和波长信息, 分别得到 $M_S7.85$ (RIV), $M_S8.68$ (LPZ)和 $M_S8.81$ (FBR), 取其中位数和标准差得 (8.7 ± 0.2) . 但不确定是否为近几十年有些文献中引用 $M8.7$ 的来源, 或许只是一个巧合. 2020 年 ISC (Di Giacomo, 2020)又基于 9 个地震台目录中报告的振幅和波长信息获得宽频面波震级 $M_{S(BB)}(8.06\pm0.11)$, 通过经验公式换算为矩震级 $M_W7.98$, 与 Ou 等(2020)的结果一致.

Chen 和 Molnar (1977)利用瑞雷波的频谱密度, 假设断层倾角为 45° , 计算得到海原地震的矩震级为 $M_W8.3$, 这是 ISC 地震目录中采用 $M_W8.3$ 的来源和所列参考文献. 但是 Deng 等(1984)基于 Chen 和 Molnar (1977)的频谱密度, 按断层倾角为 90° 计算得到海原地震矩震级的修正值为 $M_W8.0$, 而该修正值可能由于列在文章附录里而被研究者们忽略. Ou 等(2020)在重新计算中采用了近垂直的断裂倾角. 值得指出的是, 在 1920 年海原地震破裂东端, 断裂深部倾向 NW, 倾角可能小于 60° (段虎荣等, 2018), 可能伴有一定的逆冲分量. 向东变宽的“水滴状”地震烈度等震线分布暗示烈度在断裂两侧衰减的速度小于以断面垂直和走滑为主的破裂中、西段, 而破裂往东扩展的方向性效应也不足以解释上述现象(Xu *et al*, 2019), 因此, 东部的破裂可能比较复杂. 但现有的地震学数据还不足以评价破裂东端的复杂几何形态对震源机制解和震级估计的影响.

4 讨论与结论

4.1 仪器记录早期(1920—1950 年)强震震级的标定问题

表 1 中所采用的震级标度和所得震级值看似五花八门, 但其中有些震级标度之间是有联系的. 我们拟对其关系进行总结和归纳, 以便读者能够更好地理解不同震级值的由来, 以及不同震级符号的意义. 因为这种演变反映了时代变迁的影响, 所以对 1920 年海原地震震级

的总结也有助于理解地震器测记录的早期其它大地震的震级。表 1 中震级标度可分为三大类, 根据概念提出的先后, 依次为面波震级、体波震级和矩震级。面波震级适用于浅源地震, 而体波震级和矩震级无论地震深浅均可。面波震级和体波震级通过测量特定相位的波峰和波长以及地震台站的震中距, 代入相应的经验公式计算得到, 而矩震级则需要对长波段进行分析才能得出。从代表震级标定类别的符号来看, 通常可以认为: M , M_S , M_s , MS , $M_{S_{20}}$, $M_{S_{BB}}$, $M_{S(20)}$ 和 $M_{S(BB)}$ 代表面波震级; m , mB , m_B , $m_{B_{BB}}$, mb 和 m_b 代表体波震级; M_w 和 M_W 代表矩震级。依据 2011 年国际地震学与地球内部物理学联合会(The International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, 缩写为 IASPEI) 公约, 地震学界采用了固定的符号标准和规范, 但在之前的文献中, 还没有约定和共识, 加上印刷字体的限制, 同一种震级标度符号存在上述不同的版本。

近几十年来地震仪一直在不断地改进更新, 如从只能记录水平向到可以记录垂向地震动, 从缺乏减震设计到减震装置稳定有效, 从窄频记录到宽频记录, 从记录的动态范围受纸张和记录指针或光源的粗细限制到数字化仪器带来的跨数量级的动态范围。震级标度是以地震波最大振幅值的对数来表示的, 这意味着震级上一个单位的差值对应着在相同距离上记录的地震波振幅的 10 倍差值。因此, 在相同距离上, $M_{6.0}$ 地震是 $M_{5.0}$ 地震波振幅的 10 倍, 以此类推。随着地震仪设计和制造技术上的进步, 同类震级的计算方法也随着数据质量的提高而日趋完善。因此, 有些报告中的震级, 虽采用同一类震级标定, 不同年代的计算方法和所测量波的相位也可能存在不同。计算方法的不同有时候体现在符号中, 如 $M_{S_{20}}$ 和 $M_{S(20)}$ 代表面波震级针对波长介于 18—22 s 之间的波峰测量(Gutenberg, 1945a), 属于常见的窄频面波震级, 而 $M_{S_{BB}}$ 和 $M_{S(BB)}$, 其下标 BB 代表宽频(broadband), 测量波长在 3—60 s 之间的面波波形的最大波峰, 因此属于宽频面波震级。同样地, mB , m_B 和 $m_{B_{BB}}$ 是宽频体波震级, 而 mb 和 m_b 则是二十世纪六七十年代以来全球标准化地震台网(World-Wide Standardized Seismograph Network, 缩写为 WWSSN) 普及后提出(Kárník *et al*, 1962), 逐渐成为现代常用标准窄频体波震级并沿用至今。由于 mb 和 m_b 只测量最先到达地震台站几秒内波长小于 3 s 的 P 波波峰, 这种窄频体波震级不适用于破裂时间长、震级大于 6.5 的地震; 而宽频体波震级可测量波长达 20 s 的波峰值, 适用于震级大于 5.5 的地震。1960 年前发表的体波震级皆可认为是通过 Gutenberg (1945a) 开创的宽频体波震级方法得来的, 不同于现代常用的窄频体波震级。

此外, 各类震级计算公式在实际应用中会根据仪器和数据特点进行版本调整, 如 1930 年前安装的地震仪多以 Wiechert, Bosch 和 Omori 设计的记录地震动位移的地震仪为主, 而 1930 年之后常用的 Gallitzin 设计的地震仪记录的则是地震动速度, 震级计算公式也相应改变, 虽然公式背后的地球物理原理是相同的。体波震级和面波震级只需要测量垂向或水平向地震动的波峰即可; 当有垂向记录时, 测量垂向更简单, 这也是现代标准的测量方法。但是在 1920 年及之前, 很少有地震台站记录垂向运动, 而且只记录一个水平方向(如只记录南北向或东西向)的地震台站也不少, 因此在假设另一个水平方向的运动幅度时就会存在较大误差。关于震级计算方法及其历史沿革, 具体参考 Bormann (2012) 和刘瑞丰等(2015) 等。此外, 1960 年以前, 震级估算的局限和误差更多源于震级计算时所用的地震波数据有限, 数据分享的不便导致震级计算所能采用数据的数量较少, 而样本量稀缺直接导致误差较大、不同数据得出的结果不统一等问题。同时, 计算得到的震级又容易由于单个地震仪的减震效果、稳定

性、实际参数与标定参数不符等问题而引入系统性偏差。对于现代地震学,这些都已不复存在。宽频带地震记录的W震相可以用来估算特大地震,像1920年海原地震这样的大地震,在地震波到达全球远震台站时,近实时估算的震级已经比较精确。

除了1920年海原大地震,仪器记录早期发生的一些标志性强震的震级也被高估。以1906年旧金山大地震为例,传统引用的震级8.3(8 $\frac{1}{4}$)来自Richter(1958)。而Wald等(1993)重新研究了全球96个关于1906年地震的波形记录,从中挑选出12个质量好的记录进行数字化和分析后得到震级 M_W 7.7,这与Thatcher和Lisowski(1987)给出的震级估算值 M_W 7.7一致。此外,Thatcher等(1997)重新评估了1906年旧金山地震前后基准点三角网变形(大地测量数据),并反演同震位移的断层面解后计算得到的矩震级为 M_W 7.9,接近于Abe和Noguchi(1983)所得的修正值 M_S 7.8。

那么地震仪器早期,地震震级高估的问题是否普遍存在?受仪器限制、台站稀疏、标定不统一等因素的影响,仪器记录早期的历史强震震级标定存在很多问题(Abe, Kanamori, 1980; Abe, 1981; Abe, Noguchi, 1983)。例如,1901年6月至1929年,配备了Omori地震仪的日本大阪气象台,定期报道地震波极大值的振幅和周期,基于这些数据所得的地震震级称为 M_S (OSA)。Omori仪器没有阻尼装置,轨迹振幅除以静态放大倍数即为实际的地面位移。因此,当输入信号的周期非常接近谐振周期时, M_S (OSA)容易被高估。这种情况经常发生在冲击非常大的情况下,因为该情况下系统的周期很长。尽管进行了仔细的校准试验,但是由无阻尼米尔恩(Milne)数据获得的震级很可能还是被大大高估(Utsu, 1979)。早期研究中,利用无阻尼米尔恩地震仪记录的面波最大振幅来确定1912年以前发生的浅源大地震的面波震级 M_S 。这些仪器的有效增益是用从古登堡和里克特关于全球地震活动的未发表数据表中计算出的面波震级 M_S (GR)来校准的。尽管在仪器记录早期研究人员进行了仔细的校准试验,但基于无阻尼米尔恩数据获得的震级依然可能被大大高估(Utsu, 1979; Abe, Kanamori, 1980; Abe, Noguchi, 1983)。Abe(1981)提到Gutenberg和Richter(1954)所列地震事件的面波震级一般偏高0.2。Abe和Noguchi(1983)对1897—1912年期间发生的浅源大地震的震级进行重新评估,并再次指出 M_S 普遍高估的情况,其中1904—1906年之间发生的地震震级高估约0.5,1907年地震高估0.4,1908—1909年高估0.3。二十世纪早期,不仅 M_S 震级, m_b 震级也存在系统性高估的现象(Abe, 1984)。

综上所述,器测早期地震震级估算存在以下问题:①发展初期地震仪不完善,如缺乏减震设计;②仪器校准和标定不足;③地区差异未予以考虑;④仪器频带不够宽,尤其是低频段。最后一个因素对1920年海原地震震级估算的影响最大。20s周期的振幅不能很好地涵盖超过100km长破裂所释放的地震波信息。此外,震波辐射样式、射线路径速度结构等因素均未予以考虑。

4.2 历史地震震级被高估的问题

仪器测量早期阶段有些大震级地震的高估,还可能引发对仅存震害文字记录的历史地震震级的高估。历史地震缺少地震仪器记录,很难用震级公式进行估算,大部分地震的震级是通过史料记载或现场考察的方式,将调查到的地震现象分门别类地进行统计、比较,然后归纳为判定地震强弱的各种判据,继而得到地震烈度的分布,再根据烈度与震级之间的经验公式换算成震级。仪器记录早期发生的强震常用于建立震级与烈度的关系式,以估计更久远的历史地震的震级。例如,顾功叙等(1983)对于1900—1962年发生的地震,用Gutenberg和

Richter (1954) 给出的部分地震震级为标准震级进行折算, 与中国地震烈度进行拟合, 得到烈度与震级之间的经验公式 $M=0.58I_0+1.5$, 并通过该公式将 1900 年以前的历史地震烈度转化为震级. 如果作为拟合数据的地震震级被过高估计, 那么对于从震级-烈度公式换算所得的其它更早期的历史地震的震级也就很可能出现系统性偏高.

近年来, 一些重要历史地震的震级过高估计的现象渐渐浮现. 例如: ① 1556 年华县地震. 根据历史记录的地震烈度分布估算华县地震的震级为 $8-8\frac{1}{4}$ (国家地震局震害防御司, 1995); 顾功叙等(1983)将其震级列为 8, 而 Feng 等(2020)综合野外观测、基于高精度地形数据的错断地貌填图、年代学数据、钻孔岩芯等资料对该次地震展开了精细研究, 认为 1556 年华县地震的地表破裂约长 90 km, 最大位移约为 10 m, 基于这些破裂尺度的矩震级估算为 $M_W7.3-8.0$, 均小于基于烈度-震级换算公式得到的震级. ② 1739 年平罗地震. 其震级也是基于震害的历史记录得到烈度分布, 经由烈度-震级经验公式推算为 $M8$ (顾功叙等, 1983; 国家地震局震害防御司, 1995). Middleton 等(2016)指出该次地震在贺兰山东麓断裂上产生的破裂长约 87 km, 最大垂向位移为 5.1 m, 平均为 3.0 m, 基于破裂参数的最佳震级估计为 $M_W7.1-7.6$, 小于之前广泛引用的震级 $M8$. ③ 1303 年洪洞大地震的震级为 8 (顾功叙等, 1983; 国家地震局震害防御司, 1995), 而 Xu 等(2018)基于地貌填图和探槽剖面的研究认为该次地震的地表破裂长约 98 km, 最大同震垂向位移为 5 m, 基于破裂尺度的矩震级估算为 $M_W7.1-7.6$, 均小于文献中常见的引用值 $M-8$. ④ 即便是发生在 1955 年的折多塘地震, 文献中引用的震级为 $M_S7.5$, 而 Xu 等(2022)基于高精度 LiDAR 地形数据的地震地表破裂填图发现, 地表破裂长约 30 km, 左旋最大位移约为 (2 ± 0.5) m, 与破裂尺度和位移量对应的矩震级估算为 $M_W(7.0\pm 0.2)$, 小于文献引用的 $M_S7.5$. 随着后续更多类似的研究, 这样的震例可能会越来越多. 我们注意到甚至二十世纪七十年代发生的地震也存在震级高估的现象, 例如, 1970 年通海 $M_S7.7$ 地震, 同震破裂长度仅 50—90 km (张四昌, 刘百箴, 1978; Zhou *et al.*, 1983), 地震学反演得到的地震矩约为 8.7×10^{19} N·m, 大致对应矩震级 $M_W7.2$ (Zhou *et al.*, 1983). 中国地震目录中, 1983—2004 年地震的 M_S 震级值比 NEIC 报道的 M_S 震级值平均偏高 0.2 (刘瑞丰等, 2006; Bormann *et al.*, 2007), 而大地震 M_S 震级数值与国际地震中心的 M_W 震级值 (International Seismological Centre, 2013) 相比有不同程度的偏大, 如 1900—1965 年期间 $M_S>7$ 地震的 M_S 比 M_W 偏高约 0.2, 1966—1975 年期间则偏高 0.5 (Cheng *et al.*, 2017).

对于地震的震级, 实际应用中常根据震中距和其它因素采用不同的标度, 导致震级标定方式不统一、 M 定义不明确、不同的震级标度混用等现象. 然而, 在评估震级递归曲线用于地震危险性评价时, 地震震级标定方式不统一可能会造成混合数据集不统一甚至错误的结果. 因此, 需要对数据集中所有地震的震级使用相同的震级标度重新计算 (Bent, 2011). 近年来, 由于矩震级 M_W 与地震破裂的物理性质的相关性, 且不会低估特大地震 ($M_W8.0$ 及以上) 的规模, 因此被普遍认为是地震大小的最佳衡量方法. 矩震级 M_W 可通过与地震矩 M_0 相关的公式 $M_W=2/3\lg M_0-10.7$ 计算得到 (Hanks, Kanamori, 1979). 地震矩 M_0 可根据公式 $M_0=\mu D_{av}A$ (其中 μ 为剪切模量, D_{av} 为平均位错量, A 为破裂面积) 得到, 也可以使用地震仪器记录波形测定得到. 对于测震仪早期发展阶段发生的地震, 如果不能基于原始数据逐一重新估算, 可以通过 $m=2.5+0.63M$ (Gutenberg, Richter, 1956) 或 $M_W=1.33m_B-2.36$ (Bormann, Saul, 2008) 转换公式, 较快捷地将 Gutenberg 和 Richter (1941) 的 M 转换为 M_W . 对于中国报道的不同来源的 M 震级, 则宜采取各自不同的转换公式, 如 Cheng 等(2017)和

Zhang 等(1999)的论述.

因此,历史地震的震级这一重要参数有必要重新厘定.建议有地震波记录的历史地震(如1920—1970年间),在能回溯的条件下对其地震记录波形进行数字化和震级修订,用矩震级来标定,或基于破裂参数计算矩震级 M_w .对1970年以前发生且有地表破裂的历史地震,进行地表破裂的详细填图,以重新评估破裂长度和同震位移等破裂参数,从而实现震级检验和修订.二十世纪发生的大地震,距今百年之内,有些地震的地表破裂仍然保存较好,如1947年达日地震、1950年崩错地震等,均可以开展详细的地表破裂填图工作.

综上所述,1920年海原大地震是二十世纪我国伤亡人口最多的毁灭性地震,也是我国地震研究史上具有里程碑意义的大地震.近年来最新研究结果表明,海原大地震的矩震级应该为 $M_w(7.9 \pm 0.2)$ (Liu-Zeng *et al*, 2015; Ou *et al*, 2020),与文献和大众广泛接受的震级 $8\frac{1}{2}$ 数值相差较大.虽然面波震级不一定要与矩震级一致,但是在传播过程中,海原大地震震级前级常被忽略,而被笼统地简称为海原 $8\frac{1}{2}$ 大地震,造成错觉和混淆.震级作为表述地震大小和能量的重要参数,不明就里的震级偏差会影响基于历史地震资料的地震危险性评价和灾害评估等产品的可信度和历史地震活动时空样式的研究,故特撰此文讨论以澄清1920年海原地震震级过高估计的原因.测震仪器发展早期,强震的震级标定存在系统偏差问题,震级高估问题也不鲜见.矩震级 M_w 因其与地震破裂的物理参数相关联且不存在饱和的问题,是最佳的震级标定方式,因此,建议1920年海原大地震的震级采用矩震级 $M_w 7.9$.修正后的1920年海原大地震的震级与2008年汶川地震($M_w 7.9$, $M_s 8.0$)和2001年昆仑山大地震($M_w 7.8$, $M_s 8.1$)相当.

两名审稿人为本文提供了建设性的修改意见,对本文质量提升给予了很大的帮助,在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 邓起东. 2011. 在科学研究的实践中学习和进步: 纪念海原大地震90周年, 为地震预测和防震减灾事业而努力[J]. *地震地质*, **33**(1): 1–14.
- Deng Q D. 2011. Learning and progress through scientific practices: Commemorating the 90th anniversary of the tragic Haiyuan earthquake, striving to advance our abilities of earthquake prediction and seismic hazard reduction[J]. *Seismology and Geology*, **33**(1): 1–14 (in Chinese).
- 段虎荣, 周仕勇, 李闰. 2018. 基于地震活动性资料估计海原断裂倾角[J]. *地球物理学报*, **61**(9): 3713–3721.
- Duan H R, Zhou S Y, Li R. 2018. Estimation of dip angle of Haiyuan faults based on seismic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(9): 3713–3721.
- 顾功叙, 林庭煌, 时振梁, 武宦英, 李群, 卢寿德, 杨玉林, 陈海通, 汪素云. 1983. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社: 1–872.
- Gu G X, Lin T H, Shi Z L, Wu H Y, Li Q, Lu S D, Yang Y L, Chen H T, Wang S Y. 1983. *Catalogue of Chinese Earthquakes, 1831 BC–1969 AD* [M]. Beijing: Science Press: 1–872 (in Chinese).
- 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 1989. 海原活动断裂带地质图(1:50000)[M]. 北京: 地震出版社: 1–6.
- Institute of Geology of State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. 1989. *Geological Map of Haiyuan Fault Zone (1:50000)* [M]. Beijing: Seismological Press: 1–6 (in Chinese).
- 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 1990. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社: 1–286.
- Institute of Geology of State Seismological Bureau, Seismological Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region. 1990. *Haiyuan Active Fault Zone* [M]. Beijing: Seismological Press: 1–286 (in Chinese).

- 国家地震局兰州地震研究所, 宁夏回族自治区地震队. 1980. 一九二〇年海原大地震[M]. 北京: 地震出版社: 1-134.
- Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Earthquake Team of Ningxia Hui Autonomous Region. 1980. *The Haiyuan Earthquake on 1920*[M]. Beijing: Seismological Press: 1-134 (in Chinese).
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录: 公元前23世纪—公元1911年[M]. 北京: 地震出版社: 1-850.
- Department of Earthquake Disaster Prevention, State Seismological Bureau. 1995. *Catalogue of Chinese Historical Strong Earthquakes*[M]. Beijing: Seismological Press: 1-850 (in Chinese).
- 何文贵, 刘百箴, 袁道阳, 杨明. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报, 22(1): 90-97.
- He W G, Liu B C, Yuan D Y, Yang M. 2000. Research on slip rates of the Lenglongling active fault zone[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 22(1): 90-97 (in Chinese).
- 刘百箴, 张俊玲, 吴建华, 郭华. 2003. 1920年12月16日海原8.5级大地震的伤亡人口再评估[J]. 中国地震, 19(4): 386-399.
- Liu B C, Zhang J L, Wu J H, Guo H. 2003. Re-evaluating on casualty in the Haiyuan $M_{S}8.5$ earthquake on December 16, 1920[J]. *Earthquake Research in China*, 19(4): 386-399 (in Chinese).
- 刘金瑞, 任治坤, 张会平, 李传友, 张竹琪, 郑文俊, 李雪梅, 刘彩彩. 2018. 海原断裂带老虎山段晚第四纪滑动速率精确厘定与讨论[J]. 地球物理学报, 61(4): 1281-1297.
- Liu J R, Ren Z K, Zhang H P, Li C Y, Zhang Z Q, Zheng W J, Li X M, Liu C C. 2018. Late Quaternary slip rate of the Laohushan fault within the Haiyuan fault zone and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(4): 1281-1297 (in Chinese).
- 刘静, 徐锡伟, 李岩峰, 冉勇康. 2007. 以海原断裂甘肃老虎山段为例浅析走滑断裂古地震记录的完整性: 兼论古地震研究中的若干问题[J]. 地质通报, 26(6): 650-660.
- Liu J, Xu X W, Li Y F, Ran Y K. 2007. On the completeness of paleoseismic records of strike-slip faults: An example from the Laohushan segment of the Haiyuan fault in Gansu, China, with a discussion of several problems in the paleoearthquake study[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 650-660 (in Chinese).
- 刘静, 陈涛, 张培震, 张会平, 郑文俊, 任治坤, 梁诗明, 盛传贞, 甘卫军. 2013. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构[J]. 科学通报, 58(1): 41-45.
- Liu J, Chen T, Zhang P Z, Zhang H P, Zheng W J, Ren Z K, Liang S M, Sheng C Z, Gan W J. 2013. Illuminating the active Haiyuan fault, China by Airborne Light Detection and Ranging[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(1): 41-45 (in Chinese).
- 刘静, 袁兆德, 徐岳仁, 邵延秀, 王鹏, 徐晶, 林舟, 韩龙飞. 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.
- Liu J, Yuan Z D, Xu Y R, Shao Y X, Wang P, Xu J, Lin Z, Han L F. 2021. Paleoseismic investigation of the recurrence behavior of large earthquakes on active faults[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(2): 211-231 (in Chinese).
- 刘瑞丰, 陈运泰, Bormann P, 任泉, 侯建民, 邹立晔, 杨辉. 2006. 中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比(II): 面波震级[J]. 地震学报, 19(1): 1-7.
- Liu R, Chen Y, Bormann P, Ren X, Hou J M, Zou L Y, Yang H. 2006. Comparison between earthquake magnitudes determined by China seismograph network and US seismograph network (II): Surface wave magnitude[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 19(1): 1-7.
- 刘瑞丰, 陈运泰, 任泉, 徐志国, 王晓欣, 邹立晔, 张立文. 2015. 震级的测定[M]. 北京: 地震出版社: 1-154.
- Liu R F, Chen Y T, Ren X, Xu Z G, Wang X X, Zou L Y, Zhang L W. 2015. *Determination of Magnitude*[M]. Beijing: Seismological Press: 1-154 (in Chinese).
- 冉勇康, 段瑞涛, 邓起东, 焦德成, 闵伟. 1997. 海原断裂高湾子地点三维探槽的开挖与古地震研究[J]. 地震地质, 19(2): 97-107.
- Ran Y K, Duan R T, Deng Q D, Jiao D C, Min W. 1997. 3D trench excavation and paleoseismology at Gaowanzi of the Haiyuan fault[J]. *Seismology and Geology*, 19(2): 97-107 (in Chinese).
- 邵延秀, 刘静, Klinger Y, 谢克家, 袁道阳, 雷中生. 2016. 海原断裂干盐池探槽揭示非特征性古地震序列[J]. 地质通报, 35(5): 711-726.
- Shao Y X, Liu J, Klinger Y, Xie K J, Yuan D Y, Lei Z S. 2016. Research on various magnitudes of paleoearthquakes: A case

- study of non-characteristic earthquakes from the Salt Lake site of Haiyuan fault[J]. *Geological Bulletin of China*, **35**(5): 711–726 (in Chinese).
- 王烈. 1921. 调查甘肃地震之报告[N]. 晨报. 6月23日.
- Wang L. 1921. Report on investigation of the Gansu earthquake[N]. *Morning Post*. June 23 (in Chinese).
- 王子君, 姚文倩, 刘静, 邵延秀, 王文鑫, 沈续文, 高云鹏, 徐晶. 2023. 利用构造地貌方法限定走滑断裂第四纪滑动速率的不确定性及其意义: 以海原断裂带为例[J]. *地球科学* (待刊).
- Wang Z J, Yao W Q, Liu J, Shao Y X, Wang W X, Shen X W, Gao Y P, Xu J. 2023. Application of tectonic geomorphology method for constraining the slip rate uncertainty and implication of strike-slip faults: An example from the Haiyuan fault zone[J]. *Journal of Earth Science* (in press) (in Chinese).
- 翁文灏. 1922. 民国九年十二月十六日甘肃的地震[J]. *科学*, **7**: 105–114.
- Weng W H. 1922. The 1920–12–16 earthquake in Gansu Province[J]. *Science*, **7**: 105–144 (in Chinese).
- 谢家荣. 1922. 民国九年十二月十六日甘肃及其它各省地震之情形[J]. *地学杂志*, **8-9**: 1–22.
- Xie J R. 1922. Circumstances of the earthquake in Gansu and other provinces on December 16, 1922[J]. *Journal of Geosciences*, **8-9**: 1–22 (in Chinese).
- 谢毓寿, 蔡美彪. 1986. 中国地震历史资料汇编, 第四卷(下)[M]. 北京: 科学出版社: 1–258.
- Xie Y S, Cai M B. 1986. *Compilation of Historical Seismic Data in China, Volume 4 (II)*[M]. Beijing: Science Press: 1–258 (in Chinese).
- 袁道阳, 刘百箴, 吕太乙, 何文贵, 刘小凤. 1997. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. *地震地质*, **19**(1): 1–8.
- Yuan D Y, Liu B C, Lü T Y, He W G, Liu X F. 1997. Slip rates of the Maomaoshan fault zone in Gansu Province obtained by using ages of loess paleosol sequence[J]. *Seismology and Geology*, **19**(1): 1–8 (in Chinese).
- 袁道阳, 刘百箴, 吕太乙, 何文贵, 刘小凤, 甘卫军. 1998. 北祁连山东段活动断裂带的分段性研究[J]. *西北地震学报*, **20**(4): 27–34.
- Yuan D Y, Liu B C, Lü T Y, He W G, Liu X F, Gan W J. 1998. Study on the segmentation in east segment of the northern Qilianshan fault zone[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **20**(4): 27–34 (in Chinese).
- 张四昌, 刘百箴. 1978. 1970年通海地震的地震地质特征[J]. *地质科学*, (4): 323–335.
- Zhang S C, Liu B C. 1978. Seismic geological characteristics of Tonghai earthquake in 1970[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 323–335 (in Chinese).
- Abe K. 1981. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **27**(1): 72–92.
- Abe K. 1984. Complements to “Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980” [J]. *Phys Earth Planet Inter*, **34**(1/2): 17–23.
- Abe K, Kanamori H. 1980. Magnitudes of great shallow earthquakes from 1953 to 1977[J]. *Tectonophysics*, **62**(3/4): 191–203.
- Abe K, Noguchi S. 1983. Revision of magnitudes of large shallow earthquakes, 1897–1912[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **33**(1): 1–11.
- Bent A L. 2011. Moment magnitude (M_w) conversion relations for use in hazard assessment in eastern Canada[J]. *Seismol Res Lett*, **82**(6): 984–990.
- Bormann P, Liu R, Ren X, Gutdeutsch R, Kaiser D, Castellaro S. 2007. Chinese national network magnitudes, their relation to NEIC magnitudes, and recommendations for new IASPEI magnitude standards[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(1B): 114–127.
- Bormann P, Saul J. 2008. The new IASPEI standard broadband magnitude m_B [J]. *Seismol Res Lett*, **79**(5): 698–705.
- Bormann P. 2012. Magnitude calibration formulas and tables, comments on their use and complementary data[G]//*New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 1–19. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_3.1.
- Burchfiel B C, Zhang P Z, Wang Y P, Zhang W Q, Song F M, Deng Q D, Molnar P, Royden L. 1991. Geology of the Haiyuan fault zone, Ningxia-Hui Autonomous Region, China, and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, **10**(6): 1091–1110.
- Cavalié O, Lasserre C, Doin M P, Peltzer G, Sun J, Xu X, Shen Z K. 2008. Measurement of interseismic strain across the Hai-

- yuan fault (Gansu, China), by InSAR[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **275**(3/4): 246–257.
- Chen R, Petersen M D. 2011. Probabilistic fault displacement hazards for the southern San Andreas fault using scenarios and empirical slips[J]. *Earthq Spectra*, **27**(2): 293–313.
- Chen W P, Molnar P. 1977. Seismic moments of major earthquakes and the average rate of slip in Central Asia[J]. *J Geophys Res*, **82**(20): 2945–2969.
- Cheng J, Rong Y F, Magistrale H, Chen G H, Xu X W. 2017. An M_w -based historical earthquake catalog for Mainland China[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **107**(5): 2490–2500.
- Close U, McCormick E. 1922. Where the mountains walked[J]. *Natl Geograph Magaz*, **12**(5): 445–464.
- Daout S, Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, Barbot S, Tapponnier P, Peltzer G, Socquet A, Sun J. 2016. Along-strike variations of the partitioning of convergence across the Haiyuan fault system detected by InSAR[J]. *Geophys J Int*, **205**(1): 536–547.
- Deng Q D, Sung F M, Zhu S L, Li M L, Wang T L, Zhang W Q, Burchfiel B C, Molnar P, Zhang P Z. 1984. Active faulting and tectonics of the Ningxia-Hui Autonomous Region, China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **89**(B6): 4427–4445.
- Deng Q D, Chen S F, Song F M, Zhu S L, Wang Y P, Zhang W Q, Jiao D C, Burchfiel B C, Molnar P, Royden L, Zhang P Z. 1986. Variations in the geometry and amount of slip on the Haiyuan (Nanxihaushan) fault zone, China and the surface rupture of the 1920 Haiyuan earthquake[C]//*Earthquake Source Mechanics*. Washington: American Geophysical Union, **37**: 169–182.
- Di Giacomo D. 2020. ISC-GEM solution for the Haiyuan earthquake of 16 December 1920[DB/OL]. ISC Seismological Dataset Repository. [2022-01-19]. <https://doi.org/10.31905/8IZMESGK>.
- Feng X, Ma J, Zhou Y, England P, Parsons B, Rizza M A, Walker R T. 2020. Geomorphology and paleoseismology of the Weinan fault, Shaanxi, Central China, and the source of the 1556 Huaxian earthquake[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(12): e2019JB017848.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, Niu Z J, Wang M, Wan Y G, Zhou D M, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **112**(B8): B08416.
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, Peltzer G, Guo S M, Chen Z T, Dai H G, Cifuentes I. 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘Tianzhu gap’, on the western Haiyuan fault, Gansu (China)[J]. *Geophys J Int*, **120**(3): 599–645.
- Guo P, Han Z J, Gao F, Zhu C H, Gai H L. 2020. A new tectonic model for the 1927 $M_8.0$ Gulang earthquake on the NE Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, **39**(9): e2020TC006064.
- Gutenberg B. 1945a. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **35**(1): 3–12.
- Gutenberg B. 1945b. Amplitudes of P, PP, and S and magnitude of shallow earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **35**(2): 57–69.
- Gutenberg B, Richter C F. 1941. *Seismicity of the Earth (Special Papers, Number 34)*[M]. New York: Geological Society of America.
- Gutenberg B, Richter C F. 1954. *Seismicity of the Earth and Related Phenomena*[M]. Princeton: Princeton University Press.
- Gutenberg B, Richter C F. 1956. Earthquake magnitude[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **46**(2): 105–145.
- Han L F, Liu-Zeng J, Yao W Q, Shao Y X, Yuan Z D, Wang Y. 2021. Coseismic slip gradient at the western terminus of the 1920 Haiyuan $M_w7.9$ earthquake[J]. *J Struct Geol*, **152**: 104442.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale[J]. *J Geophys Res*, **84**: 2348–2350.
- International Seismological Centre. 2013. ISC-GEM earthquake catalogue[DB/OL]. [2022-01-19]. <http://doi.org/10.31905/D808B825>.
- International Seismological Centre. 2014. On-line bulletin[DB/OL]. [2022-01-19]. <https://doi.org/10.31905/D808B830>.
- Jiang W L, Han Z J, Guo P, Zhang J F, Jiao Q S, Kang S, Tian Y F. 2017. Slip rate and recurrence intervals of the east Lenglongling fault constrained by morphotectonics: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Lithosphere*, **9**(3): 417–430.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **82**(20): 2981–2987.

- Kárník V, Kondorskaya N V, Riznitchenko Ju V, Savarensky E F, Soloviev S L, Shebalin N V, Vanek J, Zátoupek A. 1962. Standardization of magnitude scales[J]. *Stud Geophys Geod*, **6**: 41–48.
- Klinger Y. 2010. Relation between continental strike-slip earthquake segmentation and thickness of the crust[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **115**(B7): B07306.
- Lasserre C, Morel P H, Gaudemer Y, Tapponnier P, Ryerson F J, King G C P, Métivier F, Kasser M, Kashgarian M, Liu B C, Lu T Y, Yuan D Y. 1999. Postglacial left slip rate and past occurrence of $M \geq 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **104**(B8): 17633–17651.
- Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, Mériaux A S, van der Woerd J, Yuan D Y, Ryerson F J, Finkel R C, Caffee M W. 2002. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **107**(B11): 2276.
- Li C Y, Zhang P Z, Yin J H, Min W. 2009. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, **28**(5): TC5010.
- Lin Z, Liu-Zeng J, Weldon R J, Tian J, Ding C, Du Y. 2020. Modeling repeated coseismic slip to identify and characterize individual earthquakes from geomorphic offsets on strike-slip faults[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **545**: 116313.
- Liu-Zeng J, Klinger Y, Xu X, Lasserre C, Chen G H, Chen W B, Tapponnier P, Zhang B. 2007. Millennial recurrence of large earthquakes on the Haiyuan fault near Songshan, Gansu Province, China[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(1B): 14–34.
- Liu-Zeng J, Shao Y X, Klinger Y, Xie K J, Yuan D Y, Lei Z S. 2015. Variability in magnitude of paleoearthquakes revealed by trenching and historical records, along the Haiyuan fault, China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **120**(12): 8304–8333.
- Matrau R, Klinger Y, van der Woerd J, Liu-Zeng J, Li Z, Xu X, Zheng R. 2019. Late Pleistocene-Holocene slip rate along the Hasi Shan restraining bend of the Haiyuan fault; Implication for faulting dynamics of a complex fault system[J]. *Tectonics*, **38**(12): 4127–4154.
- Middleton T A, Walker R T, Parsons B, Lei Q Y, Zhou Y, Ren Z K. 2016. A major, intraplate, normal-faulting earthquake: The 1739 Yinchuan event in northern China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **121**(1): 293–320.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision[J]. *Science*, **189**(4201): 419–426.
- Nishenko S P, Buland R. 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(4): 1382–1399.
- Okal E A. 2015. Historical seismograms: Preserving an endangered species[J]. *Geo Res J*, **6**: 53–64.
- Ou Q, Kulikova G, Yu J, Elliott A, Parsons B, Walker R. 2020. Magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake reestimated using seismological and geomorphological methods[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **125**(8): e2019JB019244.
- Pacheco J F, Sykes L R. 1992. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(3): 1306–1349.
- Ren Z K, Zhang Z Q, Chen T, Yan S L, Yin J H, Zhang P Z, Zheng W J, Zhang H P, Li C Y. 2016. Clustering of offsets on the Haiyuan fault and their relationship to paleoearthquakes[J]. *Geol Soc Am Bull*, **128**(1/2): 3–18.
- Richter C F. 1958. *Elementary Seismology*[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company: 768.
- Shao Y X, Liu-Zeng J, van der Woerd J, Klinger Y, Oskin M E, Zhang J Y, Wang P, Wang P T, Wang W, Yao W Q. 2021. Late Pleistocene slip rate of the central Haiyuan fault constrained from optically stimulated luminescence, ^{14}C , and cosmogenic isotope dating and high-resolution topography[J]. *Geol Soc Am Bull*, **133**(7/8): 1347–1369.
- Shao Z G, Xu J, Ma H S, Zhang L P. 2016. Coulomb stress evolution over the past 200 years and seismic hazard along the Xianshuihe fault zone of Sichuan, China[J]. *Tectonophysics*, **670**: 48–65.
- Thatcher W, Lisowski M. 1987. Long-term seismic potential of the San Andreas fault southeast of San Francisco, California[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **92**(B6): 4771–4784.
- Thatcher W, Marshall G, Lisowski M. 1997. Resolution of fault slip along the 470-km-long rupture of the great 1906 San Francisco earthquake and its implications[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **102**(B3): 5353–5367.
- Utsu T. 1979. Seismicity of Japan from 1885 through 1925: A new catalog of earthquakes of $M \geq 6$ Felt in Japan and smaller earthquakes which caused damage in Japan[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **54**(2): 253–308.

- Wald D J, Kanamori H, Helmburger D V, Heaton T H. 1993. Source study of the 1906 San Francisco earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **83**(4): 981–1019.
- Wang J. 2020. Conservation and utilization of historical seismograms from early stage (AD 1904–1948), Mainland China[J]. *Seismol Res Lett*, **91**(3): 1394–1402.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(4): 974–1002.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 1988. *Probabilities of Large Earthquakes Occurring in California on the San Andreas Fault*[R]. San Francisco: US Geological Survey: 88–398.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 1990. *Probabilities of Large Earthquakes in the San Francisco Bay Region, California*[R]. San Francisco: US Geological Survey: 811–814.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 1995. Seismic hazards in southern California: Probable earthquakes, 1994 to 2024[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(2): 379–439.
- Working Group on California Earthquake Probabilities. 1999. *Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2000 to 2030: A Summary of Findings*[R]. Reston: US Geological Survey: 1–60.
- Xiong X, Shan B, Zhou Y M, Wei S J, Li Y D, Wang R J, Zheng Y. 2017. Coulomb stress transfer and accumulation on the Sagaing fault, Myanmar, over the past 110 years and its implications for seismic hazard[J]. *Geophys Res Lett*, **44**(10): 4781–4789.
- Xu J, Liu-Zeng J, Yuan Z D, Yao W Q, Zhang J Y, Ji L Y, Shao Z G, Han L F, Wang Z J. 2022. Airborne LiDAR-based mapping of surface ruptures and coseismic slip of the 1955 Zheduotang earthquake on the Xianshuihe fault, east Tibet[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **112**(6): 3102–3120.
- Xu X R, Zhang Z G, Hu F, Chen X F. 2019. Dynamic rupture simulations of the 1920 $M_s 8.5$ Haiyuan earthquake in China[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(5): 2009–2020.
- Xu Y R, He H L, Deng Q D, Allen M B, Sun H Y, Bi L S. 2018. The CE 1303 Hongdong earthquake and the Huoshan piedmont fault, Shanxi graben: Implications for magnitude limits of normal fault earthquakes[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(4): 3098–3121.
- Xu Y R, Liu-Zeng J, Allen M B, Zhang W H, Du P. 2021. Landslides of the 1920 Haiyuan earthquake, northern China[J]. *Landslides*, **18**(3): 935–953.
- Yao W Q, Liu-Zeng J, Oskin M E, Wang W, Li Z F, Prush V, Zhang J Y, Shao Y X, Yuan Z D, Klinger Y. 2019. Reevaluation of the Late Pleistocene slip rate of the Haiyuan fault near Songshan, Gansu Province, China[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(5): 5217–5240.
- Zhang P Z, Molnar P, Burchfiel B C, Royden L, Wang Y P, Deng Q D, Song F M, Zhang W Q, Jiao D C. 1988a. Bounds on the Holocene slip rate of the Haiyuan fault, north-central China[J]. *Quat Res*, **30**(2): 151–164.
- Zhang P Z, Molnar P, Zhang W Q, Deng Q D, Wang Y P, Burchfiel B C, Song F M, Royden L, Jiao D C. 1988b. Bounds on the average recurrence interval of major earthquakes along the Haiyuan fault in north-central China[J]. *Seismol Res Lett*, **59**(3): 81–89.
- Zhang P Z, Yang Z X, Gupta H K, Bhatia S C, Shedlock K M. 1999. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) in continental Asia[J]. *Annali Geofis*, **42**(6): 1167–1190.
- Zhang P Z, Min W, Deng Q D, Mao F Y. 2003. Paleoearthquake rupture behavior and recurrence of great earthquakes along the Haiyuan fault, northwestern China[J]. *Science in China: Series*, **48**(3): 364–375.
- Zhang W Q, Jiao D C, Zhang P Z, Molnar P, Burchfiel B C, Deng Q D, Wang Y P, Song F M. 1987. Displacement along the Haiyuan fault associated with the great 1920 Haiyuan, China, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(1): 117–131.
- Zheng G, Wang H, Wright T J, Lou Y D, Zhang R, Zhang W X, Shi C, Huang J F, Wei N. 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **122**(11): 9290–9312.
- Zhou H L, Allen C R, Kanamori H. 1983. Rupture complexity of the 1970 Tonghai and 1973 Luhuo earthquakes, China, from P-wave inversion, and relationship to surface faulting[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **73**(6A): 1585–1597.