

藏南裂谷系正断层带孕震潜力和地震危险性讨论

胡贵明^{1,2}, 徐岳仁^{1,2}, 刘晗¹, 袁瑞敏¹, 陆玲玉¹

1. 地震预测与风险评估应急管理部重点实验室（中国地震局地震预测研究所），北京，100036
2. 中国地震局地震预测重点实验室，中国地震局地震预测研究所，北京，100036

摘要:

青藏高原南部自西向东分布有多组近南北向的藏南裂谷系，作为块体内部重要的构造伸展区，发育了一系列的正断层和正断层型强震。自晚第四纪以来，该区域构造活动强烈，地震频繁且诱发的灾害大，例如 2025 年 1 月 7 日定日 $M_w7.1$ 地震便呈现出“小震大灾”的特征。为了评估裂谷系内正断层的孕震能力以及了解这些正断层的致灾程度，本文依据断层的几何特征划分了 92 条正断层断裂带，并统计了每条断层的迹线长度。基于地震导致断层沿地表迹线全段破裂的假设，结合全球正断层地震破裂尺度与矩震级的关系经验公式，估算了藏南裂谷系内各正断层潜在的最大震级。研究表明，这些正断层的孕震上限介于 $M_w6.5$ 至 $M_w7.5$ 之间。这些正断层普遍具有较强的孕震能力，但也呈现出东强西弱的特征。裂谷系内的正断层带被南北两侧大型断裂带所围限且南侧主边界断裂带和块体内部存在多个历史地震空区，考虑到 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 强震加快了临界断层库伦应力加载过程和边界主断裂带上的强震可能存在联动或触发效应的背景下，该地区雅鲁藏布江以南的正断层，尤其是定日-聂拉木一带、雄曲断裂未来具有较高的强震危险性。

关键词：藏南裂谷系；正断层；最大震级；地震空区；联动和触发效应

中图分类号：P315 收稿日期：2025-02-25

基金项目：国家自然科学基金青年项目 C 类：阿尔金断裂带拉配泉段长序列古地震事件的光释光测年研究（编号：42202212）；国家自然科学基金项目：黄土高原历史疑难强震震源参数修订的密集地震滑坡解译方法（编号：42072248）；中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项重点项目：1976 年唐山大地震震例解剖及环渤海强震构造背景研究（编号：CEAIEF20240302）；

作者简介：胡贵明(1988-)，男，助理研究员，主要从事活动构造、古地震和释光年代学等方面的研究。Email: huchm@ief.ac.cn; <https://orcid.org/0009-0002-9506-7090>

通讯作者：徐岳仁(1981-)，男，研究员，研究领域为活动构造、古地震与强震次生灾害制图研究。Email: xuyr@ief.ac.cn; <https://orcid.org/0000-0001-7342-2210>

Estimation of the maximum magnitude of normal faults and seismic risk in the southern rift system of the Tibet Plateau

Abstract:

In the southern Tibet Plateau, there are several approximately north-south trending rift systems distributed from west to east. As important tectonic extensional zones within the blocks, these rift systems have developed a series of normal faults and experienced multiple strong earthquakes throughout history. Since the Late Quaternary, this region has exhibited intense tectonic activity with frequent earthquakes causing significant disasters. For instance, the January 7, 2025 $M_w7.1$ (CENC: $M_s6.9$) Tingri earthquake demonstrated the characteristic of "small earthquake with major disaster consequences". To assess the seismogenic potential of normal faults within the rift systems and understand their disaster-inducing capacity, this study divided 92 normal fault zones based on geometric characteristics and statistically analyzed fault trace lengths. Under the assumption of full-length surface rupture along fault traces during earthquakes, combined with empirical relationships between normal fault rupture dimensions and moment magnitude, we estimated the maximum potential magnitudes of normal faults in the rifts. Results indicate that these normal faults have upper seismogenic limits ranging from $M_w6.5$ to $M_w7.5$, with numerous historical seismic gaps. While generally demonstrating strong seismogenic capacity, they exhibit an eastward-increasing strength pattern. Bounded by major fault zones to the north and south, and considering multiple historical seismic gaps along the southern magethrust (particularly in the context of accelerated Coulomb stress loading following the 2015 Nepal $M_w7.8$ earthquake and potential interaction/triggering effects between major boundary faults), the normal faults south of Yarlung Tsangpo River, especially those in the Tingri-Nyalam area and Xiongqu segment, show high potential for future strong earthquakes.

0 引言

盆岭构造是地壳伸展构造系统的一种典型表现，其是在拉张伸展构造动力学环境下形成的构造-地貌单元，内部主要的控盆断层类型为正断层，是地震孕育的重要场所，历史时期在该类型地貌单元内曾发生过多起著名的正断层大震事件（dePolo et al., 1991; Hou et al., 1998; Xu et al., 2018）。这种构造地貌单元在全球范围内发育较为常见，包括美国西部盆岭省，欧洲南部爱琴海、

亚平宁山脉等（如 Eaton, 1982; Anderson and Jackson, 1987; Jackson, 1994）。这些地区绝大部分发育正断层体系，且地震活动频繁，例如美国西部科迪勒拉山系的盆岭区，全长约 3000 km，历史上就曾发生过 1915 年 $M_w6.9$ 和 1872 年 $M_w7.8$ 级大震，孕震能力高（Doser and Smith, 1989; Hough and Hutton, 2008）。我国的鄂尔多斯块体东南缘和北缘也是张性盆岭构造区（徐锡伟和邓起东, 1988），历史时期也曾发生 1303 年洪洞 $M8$ 和 1556 年华县 $M8$ 级地震（Hou et al., 1998; Xu et al., 2018）。因此，盆岭构造单元是研究正断层发震能力和孕震背景等构造环境的理想场所。

藏南裂谷系是青藏高原中南部的构造伸展变形区，发育有一系列近南北向正断层带及其围限的盆地、山谷，是典型的盆岭构造体系，构造活动强烈，强震多发，如 1411 年羊八井 $M8$ 地震、1952 当雄 $M7.5$ 地震和 2025 年定日 $M_w7.1$ 地震（USGS; 国家地震局地质研究所, 1992; 石峰等, 2025; 邵延秀等, 2025）。该裂谷系南缘紧邻青藏高原弧形构造带，其南缘主前锋逆冲断裂带是现代强震的多发区域。研究表明，藏南弧形构造带的孕震环境和发震过程对自身及周边地区的断层活动与演化具有深远影响（吴中海, 2024）。目前，该弧形构造带存在多个历史地震空区，一些历史地震离逝时间较长，如 1505 年加尔瓦尔地震已离逝 520 年，达到了历史地震重现期阈值，预示着未来存在极高的地震风险。自 1990 年以来，该区域已发生 6 次 $M_w \geq 6.5$ 的地震，其中包括 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震。分析认为，自 2015 年以来，青藏高原处于能量缓慢释放阶段，且已持续近十年（吴中海, 2024）。因此，下一轮快速释放的时间和未来地震危险性备受关注。若该弧形构造带历史地震空区发生强震，将对藏南裂谷内的正断层产生何种影响？这些断层一旦被触发，可能诱发的震级上限是多大？这些问题的答案对于藏南裂谷系内未来地震灾害的防治和风险评估至关重要。

2025 年 1 月 7 日，西藏自治区日喀则市定日县发生 $M_w7.1$ 地震（CENC: $M_s6.9$; 图 1）。本次地震的发震断层为藏南裂谷系中的申扎-定结裂谷系南段的登么错断裂，并在该断裂中北段产生约 25-35 km 的同震地表破裂带（石峰等, 2025; 邵延秀等, 2025）。研究表明，青藏高原弧形构造带与邻近断层带上的大震之间存在显著的时空关联，如 2015 年 4 月 12 日尼泊尔 $M_w7.8$ 地震所导致的应变是否纵向迁移影响了该区域，改变了申扎-定结裂谷系南段孕震环境（Chen et al., 2024）。

因此，本文将结合前人研究成果和卫星遥感影像解译等手段，通过藏南裂谷系内断层迹线的几何特征与全球地震矩震级经验公式，估算藏南裂谷系内正断层系统孕震上限，加深对该构造地貌单元内正断层的发震潜力和危险性的理解，以及以 2025 年 1 月 7 日定日 $M_w7.1$ 地震为例，讨论喜马拉雅弧形构造带强震环境对藏南裂谷系正断层型强震的潜在影响。

1 研究区地质背景

新生代以来，印度板块与欧亚板块的碰撞引发了青藏高原的隆升、地壳的缩短与增厚，以及广泛的高原变形，这些过程成为控制中国西部构造变形的动力学机制。在青藏高原中南部（78°E-94°E），藏南裂谷系作为一个重要的近东西向构造伸展变形区，被北缘和东缘的走滑断层系统以及南侧的喜马拉雅弧形构造系统所围限。该裂谷系东西延伸约 1100 km，构造活动强烈，地震频发，其第四纪伸展速率为约 10 mm/yr (Armijo et al., 1986)，与当前 GPS 数据揭示的约 13-15 mm/yr 的速率大致相当 (Zheng et al., 2017; Chen et al., 2004; Wang et al., 2019)。这表明该地区的伸展活动强度较大，反映了印度板块与欧亚板块碰撞的持续影响。因此，研究藏南裂谷系内造山伸展活动的发展和演化历史，对于深入理解大陆碰撞过程中高原的演化具有重要意义。

在上述构造背景下，藏南裂谷系内发育了一系列主要的近南北向地堑型裂谷系。这些裂谷中的大部分地堑型盆地受到正断层的控制，其走向主要为北北东 (NNE)、北北西 (NNW) 或近南北向 (N-S)。这些正断层多为高角度断层，倾角通常在 40-60° 之间 (Elliott et al., 2010)。统计显示，这些断层的活动性显著或较为显著，尽管存在空间差异和明显的分段性，但绝大多数全新世断层活动强烈，晚更新世断层活动强度中等，藏南裂谷系内的活断层的强震风险较高 (黄婷等, 2024)。尽管关于藏南裂谷系及其内部正断层的成因多样，包括地壳增厚导致的重力垮塌、块体挤出和侧向逃逸等观点 (Molnar 和 Tapponnier, 1978; Molnar et al., 1993; Tapponnier et al., 1982; Royden et al., 1997)，但这些观点均强调了印度板块与欧亚板块快速汇聚进一步导致藏南裂谷系断层活动增强，促进了地震的频繁发生。

由于印度板块与欧亚板块的低角度俯冲，喜马拉雅弧上的强震，作为印度-欧亚板块边界的地震活动，其发震断层或余震已经影响到中国内陆地区，这些强震震源深度多在 10~30 km，属于浅源地震，直接影响表现为对近场相邻构造区的触发作用 (邓起东等, 2010; 吴中海等, 2014; Liu-Zeng et al., 2020; 张培震等, 2022)。藏南裂谷系南侧被喜马拉雅弧形逆冲型断裂带所围限，据不完全统计 (吴中海, 2024; 图 1)，1990 年以来，该弧形主前缘逆冲断裂带上共发生了 6 次 $M_w > 6.5$ 的地震，包括 2015 年 4 月 12 日和 5 月 12 日尼泊尔 $M_w 7.8$ 和 $M_w 7.3$ 地震。就藏南裂谷系而言，自 1264 年以来共发生了 53 次 $M > 6$ 的地震，其中包括 1411 年羊八井 $M 8$ 地震和 1952 年当雄 $M 7.5$ 地震 (西藏自治区科学技术委员会, 1982)。自 1900 年以来，该地区共发生了 19

次 $M_w > 6.5$ 的地震，最近的一次为 2025 年 1 月 7 日的定日 $M_w 7.1$ 地震。

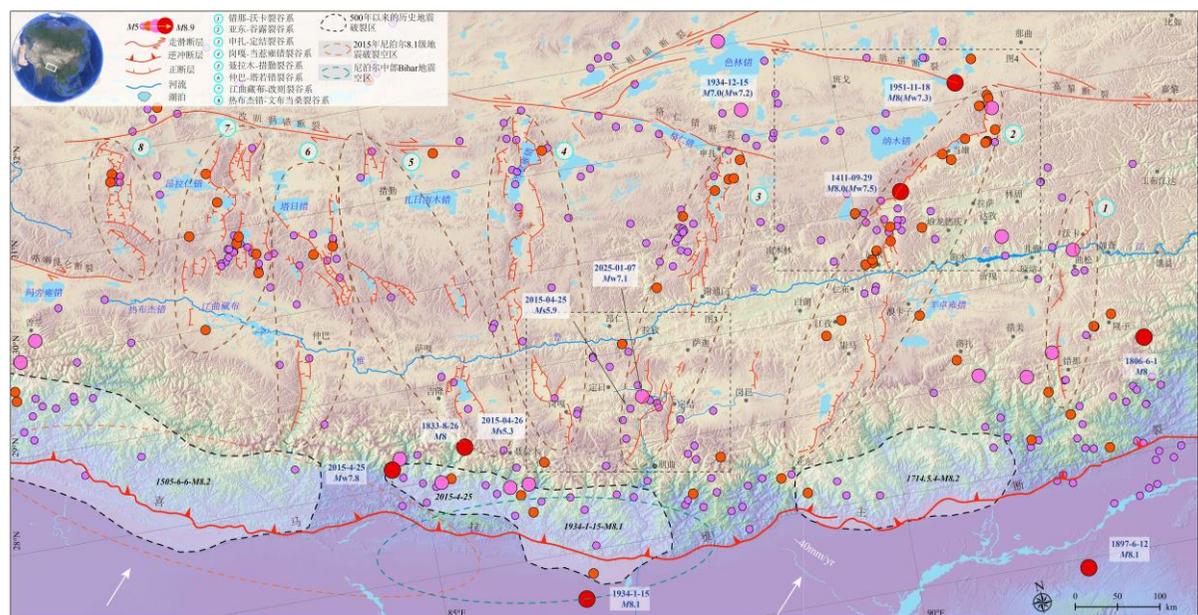


图 1. 青藏高原藏南裂谷系及周边主要活动断层和主要强震分布图。喜马拉雅弧形构造带上的白色区域为历史地震空区 (Bilham, 2019)。地震数据分别来自《西藏地震史料汇编》、中国地震台网中心 (<https://news.ceic.ac.cn>) 和美国 USGS 地震数据中心 (<https://earthquake.usgs.gov>)。橙色椭圆为 2015 年尼泊尔 Mw7.8 地震之后加德满都附近地震空区仍存在的破裂空段分布范围, 具备发生震级~M8 的可能。绿色的椭圆为尼泊尔中部-比尔哈尔地震空区 (改自 Srivastava et al., 2015)。

Figure 1. Map of active faults and seismic distribution within and around the Southern Tibetan Rift Zones. The white areas along the Himalayan arc tectonic zone represent historical seismic gaps (Bilham, 2019). Seismic data are sourced from the "Compilation of Tibetan Historical Earthquake Records", China Earthquake Networks Center (<https://news.ceic.ac.cn>), and the USGS Earthquake Hazards Program (<https://earthquake.usgs.gov>). The orange ellipse indicates the remaining unruptured segment near Kathmandu after the 2015 Nepal Mw7.8 earthquake, which has the potential to generate an earthquake of ~M8 magnitude. The green ellipse denotes the Central Nepal-Bihar

seismic gap (modified from Srivastava et al., 2015).

2. 研究方法

断层的孕震能力是地震危险性评估的关键因素，因此估算断层能够产生的最大地震震级至关重要。过往研究提出了多种估算地震震级的方法（Kanamori et al., 1977; Wells 和 Coppersmith, 1994; Di Giacomo, 2020），例如通过断层破裂长度与地震经验公式来预估地震震级（Wells and Coppersmith, 1994）。震级的标度可分为面波震级、体波震级和矩震级。通常认为 M 和 M_s 代表面波地震，体波震级包括 m 和 m_b 等。 M_w 代表矩震级，因其与地震破裂的物质性质相关且震级不会饱和，本文用其标定正断层孕震上限。当前研究认为，以往用 M 标定的震级可能导致历史地震震级被高估，且中国陆内多数强震面波震级高于矩震级，面波震级系统性偏大，这是受中国陆内的板内强震的特征影响（徐月怡和张勇, 2023; 刘静等, 2023）。因此，重新评估现今地震目录中历史地震的震级是必要的。本文将结合 1411 年羊八井 $M8$ 地震和 1952 年当雄 $M_s7.5$ 地震，在后文中对此问题进行详细讨论。

针对藏南裂谷系中正断层的最大地震震级，本文采用了断层破裂长度与全球地震矩震级经验公式进行估算，并假设最大地震会导致断层沿迹线全段破裂。尽管大多数大地震并不会导致断层全段破裂，而是呈现分段破裂的特征，但在地震灾害风险管理、预防以及重要基础设施建设等工作中，基于断层几何特征并考虑断层全段破裂来计算断层震级上限仍具有重要的科学和现实意义。文中统计的断层起止点和断层长度数据部分参考了前人的研究成果，并结合卫星影像资料、地质地貌位置、古地震调查和构造不连续性的概念进行断层划分和断层长度统计（吴中海等; 2008; 徐心悦, 2019; 黄婷等, 2024; dePolo et al., 1991; Wu et al., 2011; Ha et al., 2019a）。最终，依据 Wells 和 Coppersmith（1994）基于全球历史地震统计拟合的地表破裂尺度与全球正断层地震矩震级经验关系公式，计算可能的震级上限：

$$M_w = 4.86 + 1.32 \times \log(\text{SRL}), \text{ 本文选用断层迹线长度}$$

研究认为，主边界断裂与块体内的断裂具备联动或触发效应，主边界断裂的强震会加速块体内部的应力加载过程，促进块体内部地震的发生（吴中海等; 2015; 刘静等, 2015; 徐晶等, 2016; 张培震等, 2022）。藏南裂谷系北侧被几条大型 NW 走向的走滑断层围限，如改则洞错断裂、格仁错断裂和嘉黎断裂等，这些走滑断裂带上的强震与裂谷系北侧的正断层地震之间是否存在联动关系需要格外注意。南侧紧邻青藏高原弧形超大型逆冲构造带，构造活动强烈，现代大震和历史大地震频繁（表 1）。靠近弧形超大型逆冲构造带现代大地震（如 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震）和历史地震空区（尤其是超过重现期阈值，如 1505 年 $M8.2$ 地震）的地区要格外关注未来

强震危险性。本文将借助 2025 年定日 $M_w7.1$ 地震和 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震来讨论藏南地区主边界断裂与块体内次级正断裂地震触发的可能性。对于文中地震空区和强震危险区的划定，我们参考了以下原则：

地震空区通常是指地震活跃带中长期未发生显著地震的段落。由于这些区域长期缺乏能量释放，可能已积累了大量应变，因此被认为是未来潜在大地震的高风险区。本文所指的地震空区判断依据一是根据前人在研究区古地震研究结果来确定的。这些地区的地震显著超出该断层段平均复发周期却未发生大地震。二是周边断层已有 $M \geq 7$ 地震的发震历史，而地震空区已长期没有 $M \geq 7$ 地震记录，即被历史地震破裂区所包围。

地震高危险区的划定参考了地震空区的概念。这些高危险区紧邻弧形主边界断裂的历史地震空区。一些历史地震已超过历史地震复发周期阈值，且危险区长期没有 $M \geq 7$ 地震记录，但断裂具备 $M \geq 7$ 发震能力；区域上紧邻 2015 年 $M_w7.8$ 地震破裂区。基于 2015 年尼泊尔地震后的库伦应力变化和 2025 年定日地震的余震序列分析，2025 年定日 $M_w7.1$ 地震并没有完全释放这些累积的应力，相邻区域依旧是高危险区；对于像 1714 年 $M8.2$ 地震空区这样历史地震空区且紧邻弧形主边界断裂的区域，根据古地震、历史地震和断裂滑动亏损速率等研究，未来具有发生强震的风险。

表 1 藏南裂谷系及周边主要历史强震列表，包括了 2015 年廓尔喀地震和 2025 年 1 月 7 日定日地震。

Table 1. Major historical earthquakes within and around the Southern Tibetan Rift Zones, including the 2015 Gorkha earthquake and the Dingri earthquake on January 7, 2025.

地震	时间	参考震中	地表破裂长度(km)	震级
羊八井地震	1411.09.28	29.7 °N; 90.2 °E	~136	M8.1-8.6
当雄北地震	1952.08.18	30.63 °N; 91.52 °E	57.7	M7.5
加尔瓦尔地震	1505.06.06	30 °N; 82 °E;	~500-600	M8.2
不丹地震	1714.05.04	27.5 °N; 89.6 °E	>240	M8-8.2
尼泊尔地震	1833.08.26	28.83 °N; 78.5 °E	<130	M7.7-7.8
阿萨姆地震	1897.06.12	25.13 °N; 90.07 °E	~95	M8.1-8.3
康格拉地震	1905.04.04	32.636 °N; 76.788 °E	~100	M7.8-7.9
比尔哈尔地震	1934.01.15	27.55 °N; 87.09 °E	>150	M8.4
阿萨姆地震	1950.08.15	28.363 °N; 96.445 °E	250	M8.7
藏南	1951.11.18	30.98 °N; 91.49 °E	200	M8
廓尔喀地震	2015.04.25	28.147 °N; 89.708 °E	~120-140	M8.1
定日地震	2025.01.07	87.45 °E, 28.50 °N	~36.5	Mw7.1(CENC:Ms6.9)

3. 结果分析

3.1 藏南裂谷系正断层孕震上限与危险性分析

基于断层几何特征、构造背景以及前人研究（吴中海等, 2008; 徐心悦, 2019; 黄婷等, 2024; Wu et al., 2011; Ha et al., 2019a, 2019b），本文在藏南裂谷系共划分了 92 条正断层断裂带。这些断层的长度范围~20-130 km 不等。其中，最长的为亚东-谷露裂谷系北侧由 1411 年 $M8.0$ 产生的地表破裂带。通过应用 Wells 和 Coppersmith（1994）提出的正断层破裂长度与震级的经验公式，假设断层全线破裂，整个藏南裂谷系内各正断层的孕震上限介于 $Mw6.5$ 至 $Mw7.5$ 之间。其中，49 条断层具有孕育 $Mw \geq 7.0$ 级地震的能力，这表明藏南裂谷系内正断层的孕震能力普遍较强。

在申扎-定结裂谷系以东的裂谷中， $Mw \geq 7.0$ 级地震的占比为 66%（表 2）。错那-沃卡裂谷系内的三条正断层的震级上限均具有 $Mw > 7.0$ 的能力。根据史料记载（西藏自治区科学技术委员会, 1982），错那-拿日雍措断裂（编号 1）和沃卡断裂（编号 3）可能分别在 1806 年和 1915 年发生过 $M \geq 7.0$ 级地震，这进一步证明了该裂谷带内具备 $Mw > 7.0$ 的发震能力。该裂谷内的邛多江断裂（编号 2）控制的盆地自公元 1800 年以来没 $Mw > 7.0$ 的地震记录，被认为是明显的地震空区（图 2; 吴中海等, 2007）。但应力积累的时间越长，诱发的震级就越大，因此依旧具有较高的危险性。

亚东-谷露裂谷是藏南裂谷系中东侧孕震能力很强的区域。除冲巴雍错断裂带（编号 6）和羊易断裂带（编号 10）具有发生 $Mw6.8$ 级地震的能力外，其余 6 条断裂带均具有发生 $Mw > 7.0$ 级地震的能力（表 2）。其中，北侧的念青唐古拉山东麓断层在历史时期孕育了两次 $M \geq 7.5$ 级地震。其南侧的帕里-羊易区域在历史时期没有 $Mw \geq 7.0$ 级地震的记录，是历史地震的空区（图 2）。亚东-谷露裂谷南侧的正断层具备与北侧一致的大震孕育潜力（Ha et al., 2019a）。尤其是多庆错地堑一带（编号 5）的正断层目前具有极高的地震风险（Wu et al., 2019; Zou et al., 2021）。此外，该裂谷北侧紧邻崩错走滑断裂和嘉黎走滑断裂，这一区域断层之间可能也存在相互触发效应，如 1951 年的崩错 $Mw7.3$ 地震和 1952 年 $Mw7.2$ 的当雄地震之间的关系。南侧紧邻喜马拉雅弧形断裂带的 1714 年历史地震空区（图 2），因此也是一个非常危险和需要重点关注的区域。

申扎-定结裂谷系正断层的孕震能力介于 $Mw6.6$ 至 $Mw7.3$ 之间，其中最大的为郭加东断裂北段（编号 16; 表 2）。该裂谷南侧没有历史强震的记录，但紧邻尼泊尔中部-比哈尔历史地震空区。该地区于 1934 年 12 月在申扎北发生了 $M7.0$ （可能的最大震级为 $Mw7.2$ ，大于实际地震）

地震，并造成~60 km 的地表破裂 (Armijo et al., 1986; 杨攀新等, 2010)，南侧的登么错断裂于 2025 年 1 月 7 日发生了 $M_w7.1$ 级地震，因此该地区是强震危险区 (图 2)，要持续关注地震诱发的应力变化以及未来再次发生强震的可能性。

经统计 (表 2)，申扎-定结裂谷系以西的正断层孕震能力 $M_w>7.0$ 的占比为 45%，这表明该区域的正断层孕震能力同样较高但明显弱于东侧。岗嘎-当惹雍错裂谷系和聂拉木-措勤裂谷系内的正断层孕震震级介于 $M_w6.6$ 至 $M_w7.4$ 之间。这两个裂谷系在历史时期 $M_w\geq 6.0$ 以上的地震极少 (西藏自治区科学技术委员会, 1982; 图 1)，但断层的危险性不容忽视 (高扬等, 2024)。例如，前人对佩枯措盆地开展的古地震研究认为，该盆地内的断层地震重现期约为 6-7 ka，且最近一次地震的离逝时间已超过 6 ka，未来具备发生 $M_w6.8$ 以上地震的可能性 (Gao et al., 2024)。这两个裂谷系紧邻的喜马拉雅弧形构造带上发生过 6 次 $M>7.0$ 级地震，且靠近尼泊尔中部-比尔哈尔历史地震空区 (见图 1 和 2)。目前虽未发生破坏性强震，但应力积累时间长短与地震震级大小呈正相关，因此，帮色曲-苦塘嘎一带、佩枯措-穆林错一带需特别注意未来强震的风险 (图 2)。

仲巴-塔若错裂谷和江曲藏布-改则裂谷系的正断层震级上限介于 $M_w6.6$ - $M_w7.5$ 之间，孕震能力最大的断层为布多断裂 (编号 61 和 62) 和雄曲断裂 (编号 69 和 70; 图 2)。从地震目录上看，这两个裂谷系震级 $M>5$ 的断层发震密度集中在裂谷系中部，与这些位置断层数量较多相一致 (图 2)。江曲藏布-改则裂谷系北侧的霍尔巴-仓木错裂谷被识别为地震空区 (图 2; 胡渊等, 2024)，该段正断层系列具备发生 $M_w6.9$ - 7.3 的潜力。仲巴裂谷西侧断裂的活动性可能强于东侧 (刘璐等, 2022)，南侧的雄曲断裂历史时期没有发生强震的记录，但西段具备发生 $M_w7.5$ 地震的潜力。雄曲断裂的东段 1945 年曾发生 $M5.5$ 级地震，江曲藏布断裂 (编号 71) 东侧 1913 年发生过 $M6.3$ 级地震，但也属于明显的历史大地震空区。目前，这两个裂谷系均没有 $M>7$ 以上的历史地震记录。仲巴和江曲藏布盆地南侧紧邻喜马拉雅弧形构造带上的 1505 年 $M8.2$ 震级大地震空区，该历史地震空区已积累超过 500 年的应力，目前已超过或处于历史地震重现期的阈值，需格外关注对毗邻断层的影响。

热布杰错-文布当桑裂谷系位于藏南裂谷系的最西端，南北被两个走滑断层系统所围限 (图 1)。该裂谷中的正断层孕震震级上限介于 $M_w6.7$ 至 $M_w7.3$ 之间，其中孕震潜力最大为茶里错西断裂 (编号 89; 图 2)。该裂谷系南侧正断层紧邻喀喇昆仑走滑断裂带，处于走滑断层和正断层的构造转换区，具有孕育 $M_w7.3$ 地震的潜力，需关注喀喇昆仑断裂带的强震对该断裂带强震触发的潜在影响。北侧的断裂震级上限介于 $M_w6.8$ - $M_w7.4$ 之间，历史时期有两次 $M>6$ 地震的发

生，目前尚无 $M>7$ 地震的记录。北侧区域也处于走滑断层与正断层的构造转换区。根据我国阿尔金断裂带与祁连山逆冲断裂带构造转换区的研究经验，这些构造转换区会出现应力的重新分配，该区域的应力变化情况和地震危险性需要持续关注。

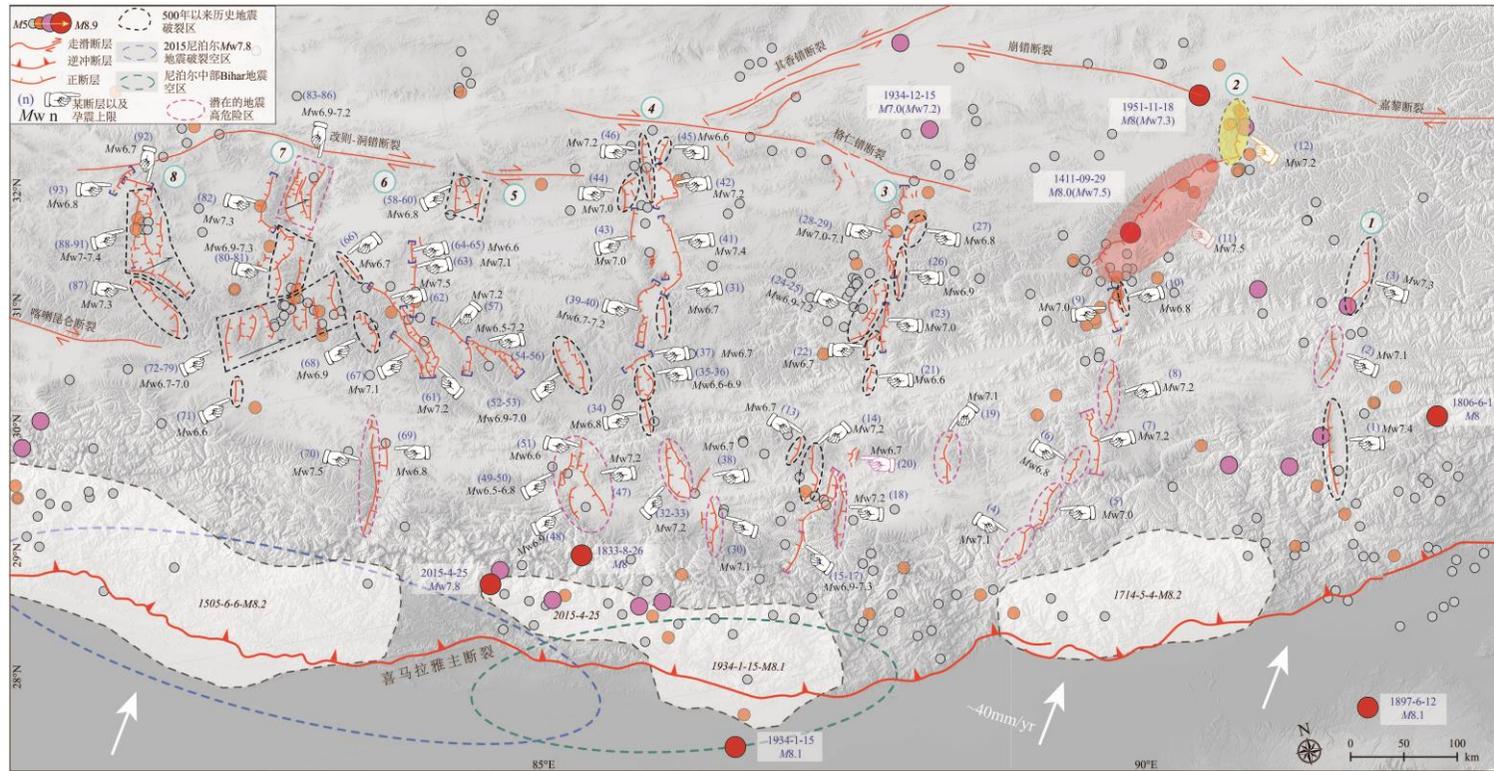


图 2. 依据断层破裂长度与地震经验公式计算获得的藏南裂谷系正断层最大矩震级分布图。粉色和黄色区域为 1411 年羊八井和 1952 年当雄地震的极震区（参考《西藏中部活动断层》，1992; 左嘉梦等, 2020）

Figure 2. Distribution of maximum moment magnitudes for normal faults in the Southern Tibetan Rift Zones calculated based on fault rupture lengths and empirical seismic relationships. The pink and yellow areas represent the meizoseismal zones of the 1411 Yangbajain earthquake and the 1952 Damxung earthquake, respectively (referencing *Active Faults in Central Xizang Plateau*, 1992; Zuo et al., 2020).

表 2. 藏南裂谷系各断层几何参数及最大发震能力表

Table 2. Summary of Fault Parameters in the Southern Tibetan Rift Zones

裂谷名称	序号	破裂长度(km)	Mw	断裂带	走向	运动性质	裂谷名称	序号	破裂长度(km)	Mw	断裂带	走向	运动性质	
错那-沃卡裂谷	1	86	7.4	错那-拿日雍措断裂	近南北	正断层	聂拉木-措勤裂谷系	47	56	7.2	佩枯措东断裂	北北西	正断层	
	2	50	7.1	邛多江断裂	北北东	正断层		48	36	6.9	佩枯措西断裂	近南北	正断层	
	3	71	7.3	沃卡断裂	北北东	正断层		49	31	6.8	穆林错东断裂	北北东	正断层	
亚当-谷露裂谷	4	46	7.1	帕里断裂	北北东	正断层		50	18	6.5	穆林错西断裂	北北东	正断层	
	5	45	7.0	多庆错断裂	北北东	正断层		51	21	6.6	松那断裂	北北东	正断层	
	6	30	6.8	冲巴雍措断裂	北北东	正断层		52	48	7.0	打加错东断裂	北北西	正断层	
	7	62	7.2	涅如断裂	近南北	正断层		53	38	6.9	打加错西断裂	北北西	正断层	
	8	58	7.2	热龙断裂	北北东	正断层		54	55	7.2	瑟香错东断裂	北北西	正断层	
	9	40	7.0	安岗断裂	近南北	正断层		55	26	6.7	瑟香错西断裂南段	北北西	正断层	
	10	30	6.8	羊易断裂	近南北	正断层		56	18	6.5	瑟香错西断裂北段	北北西	正断层	
	11	136	7.5	1411 地表破裂	北东	左旋走滑兼具正断		57	60	7.2	杰萨错断裂	北北西	正断层	
	12	57.7	7.2	1952 年地表破裂	近南北	正断层		58	28	6.8	达瓦错断裂西段	近南北	正断层	
	13	25	6.7	弄曲断裂	北北东	正断层		59	28	6.8	达瓦错断裂中段	近南北	正断层	
	14	60	7.2	登么错断裂	近南北	正断层		60	29	6.8	达瓦错断裂东段	近南北	正断层	
申扎-定结裂谷	15	41	7.0	郭加东断裂南段	北北东	正断层		仲巴-塔若错裂谷	61	61	7.2	布多断裂东段	北西	正断层
	16	75	7.3	郭加东断裂北段	近南北	正断层			62	103	7.5	布多断裂西段	北西	正断层
	17	33	6.9	郭加西断裂	近南北	正断层			63	49	7.1	布多断裂北段	北西	正断层
	18	60	7.2	定结断裂	北北东	正断层			64	20	6.6	麦穷错断裂西段	近南北	正断层
	19	50	7.1	尼色断裂	北北东	正断层			65	20	6.6	麦穷错断裂北段	近南北	正断层
	20	25	6.7	麻布加断裂	北北东	正断层			66	26	6.7	塔若错西段	北西	正断层
	21	21	6.6	通门乡断裂	近南北	正断层			67	49	7.1	薄莫断裂	北北西	正断层
	22	28	6.8	错查断裂	近南北	正断层			68	36	6.9	森里错断裂	北北西	正断层
	23	45	7.0	查布-南木切断裂	近南北	正断层			69	30	6.8	雄曲断裂东段	近南北	正断层
	24	57	7.2	青都东断裂	近南北	正断层			70	98	7.5	雄曲断裂西段	近南北	正断层

岗嘎-当惹雍错裂谷	25	32	6.9	青都西断裂	北北东	正断层	江曲藏布-改则裂谷	71	20	6.6	江曲藏布断裂	近南北	正断层
	26	33	6.9	查藏错东断裂	北北东	正断层		72	40	7.0	错惹则断裂	近南北	正断层
	27	29	6.8	越恰错东断裂	北北东	正断层		73	23	6.7	泻浪藏布西断裂	近南北	正断层
	28	40	7.1	查藏错西断裂	北北东	正断层		74	24	6.7	泻浪藏布东断裂	近南北	正断层
	29	56	7.0	越恰错西断裂	北北东	正断层		75	34	6.9	噶昌断裂	近南北	正断层
	30	50	7.1	帮色曲断裂	近南北	正断层		76	27	6.7	帕龙错西缘断裂南段	近南北	正断层
	31	26	6.7	克玛乡断裂	北北东	正断层		77	24	6.7	雅曲藏布断裂东段	近南北	正断层
	32	56	7.2	苦塘嘎东断裂	近南北	正断层		78	35	6.9	措日布者断裂	近南北	正断层
	33	61	7.2	苦塘嘎西断裂	近南北	正断层		79	40	7.0	供阿藏布断裂	近南北	正断层
	34	32	6.9	曲珍错断裂	近南北	正断层		80	71	7.3	仁多正断裂	近南北	正断层
	35	34	6.9	阿木错东断裂	近南北	正断层		81	35	6.9	帕龙错西缘断裂北段	近南北	正断层
	36	20	6.6	阿木错西断裂	近南北	正断层		82	68	7.3	隆格尔雪山断层西支断裂	近南北	正断层
	37	26	6.7	阿木错北断裂	北东	正断层		83	55	7.2	隆格尔雪山正断层东段	近南北	正断层
	38	37	6.9	许如错东断裂	近南北	正断层		84	34	6.9	克勤村西山麓断裂	近南北	正断层
	39	23	6.7	查孜乡西断裂	近南北	正断层		85	51	7.1	扎龙藏布断裂	近南北	正断层
	40	57	7.2	许如错西断裂	近南北	正断层		86	35	6.9	康玛村山前断裂	近南北	正断层
	41	81	7.4	当惹雍错东支南断裂	近南北	正断层		87	70	7.3	阿果错断裂	北西	正断层
	42	58	7.2	当惹雍错东支北断裂	近南北	正断层		88	51	7.1	茶里错北断裂	近南北	正断层
	43	45	7.0	当惹雍错西支南断裂	北北东	正断层		89	79	7.3	茶里错西断裂	近南北	正断层
	44	41	7.0	当惹雍错西支北断裂	北北东	正断层		90	80	7.4	茶里错东断裂	近南北	正断层
	45	21	6.6	当穹错东断裂	北东	正断层		91	39	7.0	热西断裂	近南北	正断层
	46	55	7.2	当穹错西断裂	北北东	正断层		92	23	6.7	茶里错北断裂	北西	正断层
								93	28	6.8	洞古错断裂	北北东	正断层

3.2 藏南裂谷系主边界断裂与块体内部次级断裂的强震关联性

如前文所述，藏南裂谷系内的正断层普遍具备较强的孕震能力，是未来地震防范工作需重点关注的区域。其内的地震事件与主边界的强震存在怎样的时空关联？本文以 2025 年 1 月 7 日定日 $M_w7.1$ 地震为典型案例，分析其与紧邻南侧 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震的关系，旨在为未来强震预防及政策制定提供参考依据。

2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震发生后，研究人员计算了该次强震同震和震后的库伦应力变化，一致认为此次强震加快了北侧正断层应力加载的过程，会促进藏南近南北向正断层地震的发生，并建议未来数年重点关注定日-定结一带未来强震的可能性（刘静等, 2015; 万永革等, 2015; 熊维等, 2015; 徐晶等, 2016; Liu et al., 2017）。从同震库伦应力结果来看，岗嘎-当惹雍错裂谷系至亚东-谷露裂谷系南端震后库伦应力变化极大，个别断层应力增加量超过 0.01 MPa，静态库伦破裂应力结果揭示了震后藏南裂谷系北侧的走滑断裂库伦应力增加明显，格林错断裂接近触发阈值（熊维等, 2015; 徐晶等, 2016）。从震后 10 年、20 年和 30 年的应力变化模拟结果来看，岗嘎-当惹雍错裂谷系整段、亚东-谷露裂谷系和岗嘎-当惹雍错裂谷系的南端应力持续增加（徐晶等, 2016），震后 40 年该地区的应力变化峰值可以达到 0.13Mpa（熊维等, 2015）。所以，2025 年 1 月 7 日定日 $M_w7.1$ 地震很可能是由于 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震导致累积库伦应力加载过大触发的。此次地震的发震断层为登么错断裂，长约 40 km，为定日-定结一带较小的次级断裂，其东南侧还分布着更大的郭加断裂和定结断裂。后者的孕震潜力在 $M_w \geq 7$ 以上，且处在历史地震空区，累积应力持续加载。从 2025 年定日 $M_w7.1$ 余震序列上来看，此次地震在郭加断裂和定结断裂都存在余震分布，触发了这两个断裂的部分段落活动，而并没有减弱这两个断层的危险性（图 3）。因此，藏南断裂带内存在主边界断裂强震诱发块体内部断裂活动、块体内部的次级断裂活动会影响与之相邻的次级断裂活动的风险。未来要持续重点关注郭加断裂和定结断裂强震的可能性（图 2）。

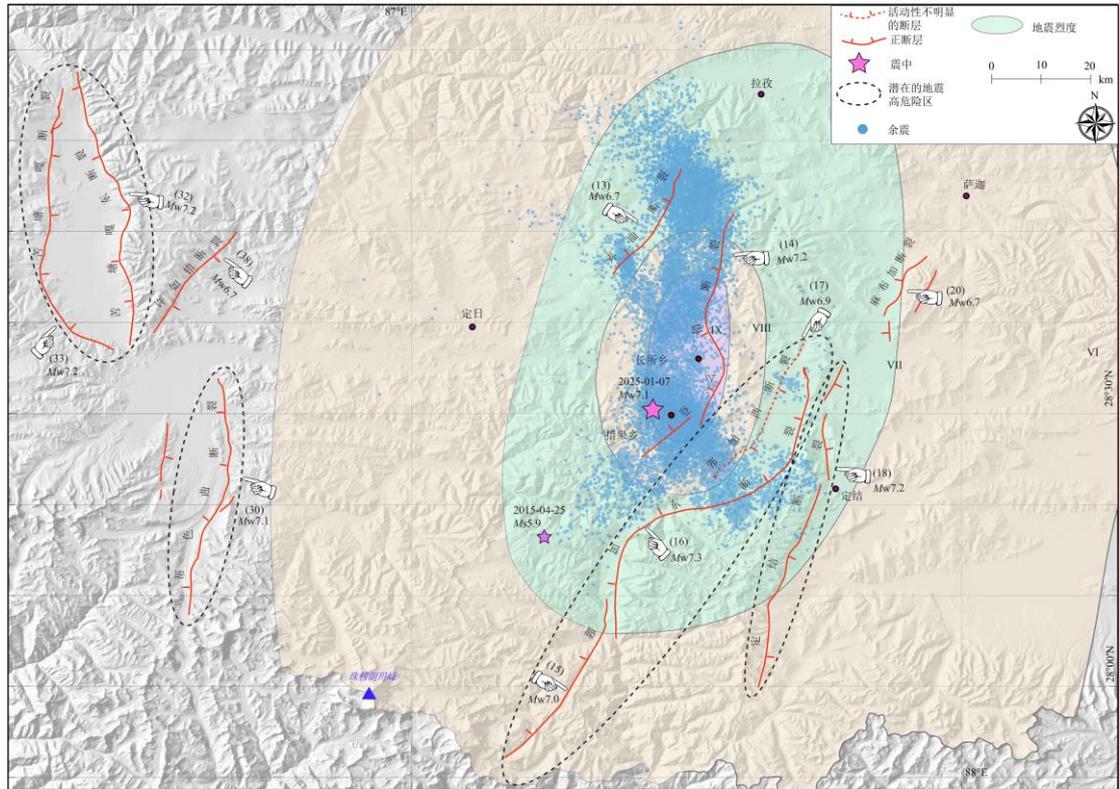


图 3. 2025 年 1 月 7 日定日地震的主震及余震序列分布图（蓝色标注）。

Figure 3. Distribution map of aftershock sequences following the main shock on January 7, 2025 (marked in blue).

4. 讨论

4.1 正断层破裂尺度和震级估算的可靠性

本文根据此次定日地震的破裂特点，基于假设藏南裂谷系内各控盆正断层发生强震并导致各条断裂发生全段破裂的极端情况，对每条正断层潜在的最大震级进行了估算。估算结果的可靠性在一定程度上依赖于正断层的起止长度以及断层破裂的可能性。已有统计结果表明，地震发生后，破裂更倾向于在单条断裂段上独立发生，这使得断层的每个分段具有各自独立的破裂历史。然而，某些地震由于特定的断层几何结构、应力状态、摩擦性质以及震级大小等因素的影响，能够突破复杂几何结构上的“障碍体”（如阶区、断层分支、弯折、空区、双弯结构等），进而发生级联破裂（参见 Padilla et al., 2024）。此外，对于破裂尺度超过 30 km 或 $M > 7$ 级的地震，小尺度的“障碍体”也很难阻挡破裂带的传播（Zhang et al., 1991）。

在一些大型走滑断裂带上，例如 2023 年 2 月 6 日土耳其东安托利亚断裂发生的 $M_w7.8$ 和 $M_w7.5$ 双强震事件中， $M_w7.8$ 地震引发了东安托利亚断裂西南端多个断裂段的级联破裂（梁朋等, 2025; Ren et al., 2024）。海原断裂带在 1920 年 $M_w7.9$ 地震时，3 个段落同时发生破裂（李彦宝等, 2016）。2001 年昆仑山口西 $M8.1$ 导致 400 多公里的地震地表破裂主要由 5 条次级破裂段组成（陈杰等, 2003）。此外，关于小江断裂和鲜水河走滑断裂上级联破裂引发大地震的概率问题也有相关讨论（Cheng et al., 2023）。尽管在正断层和逆冲断层上研究级联破裂的案例相对较少，但根据前人研究经验，这两种类型的断层带同样可能引发级联破裂，从而形成大震并导致严重的地震灾害（Elliot et al., 2022; Glasgow et al., 2023; Cheng et al., 2023）。

基于一些逆冲断裂和走滑断裂的震例，我国学者创新性地提出 $M \geq 7$ 的大地震和特大地震是由多个次级断层发生级联破裂的产物（徐锡伟等, 2023）。藏南裂谷系内的正断层带几何特征较为简单，具有较好的连续性和线性特征，段落之间的阶区非常窄，未出现非常明显的大型“障碍物”。但藏南裂谷系的正断层地震多为浅源地震，出现单个断裂带各分段落出现级联破裂，其破裂宽度和破裂面积都无法与走滑断层相比，这也就决定了正断层型地震是存在震级上限的。历史上，藏南裂谷系曾多次发生 $M \geq 7$ 以上的地震（西藏自治区科学技术委员会, 1982; 图 1），典型案例如 1411 年羊八井 $M8$ 地震和 1952 年 $M_s7.5$ 地震，引发了约 58-130 km 长的地表破裂（国家地震局地质研究所, 1992）。在错那-沃卡裂谷系和亚东-谷露裂谷系北侧都有发生 $M_w \geq 7$ 的历史地震事件（图 1），与我们基于全段破裂的假设估算的矩震级上限大致符合。在地质地貌和古地震研究方面，通过古地震探槽获取同震位移的方法得到的古地震震级与我们采用全段破裂的方法得到的正断层孕震上限值基本一致（Zuo et al., 2021; Gao et al., 2024），说明地震导致盆地内发生级联破裂产生强震的现象在藏南裂谷系是存在的。另外，对于 2025 年 1 月 7 日定日地震，根据地震波反演，地表会出现 40 余公里的破裂带，推算震级 $M_w7.1$ ，余震序列也揭示了地下 40 余公里的破裂带，与我们和前人估算的该断裂可孕育 $M_w > 7$ 地震的能力相一致（田婷婷等, 2023）。因此，本文对藏南裂谷系内正断层带孕震上限的评估方法是合理的。

4.2 历史地震目录重新厘定的必要性

长时间尺度的地震数据是地震风险评估以及未来地震中长期预测可靠性的关键基础。然而，器测地震的时间跨度仅有几十年，鉴于此，拓展地震的时间尺度成为一项必要工作。历史地震能够将地震的时间跨度延伸至几百年，在震害预测模型中占据着极为重要的地位。历史地震震

级，作为衡量地震大小与能量释放的关键参数，常被用于评估历史地震的危害程度以及未来地震的发生潜势。然而，由于早期地震仪器设备不够完善、校准标定不足、地区差异以及仪器频带问题等诸多原因，早期历史强震震级标定可能存在普遍高估的问题，这其中包含一些影响力巨大的强震，例如 1920 年海原 $M_w7.9$ 大地震、1556 年华县 $M_w(7.3-8.0)$ 大地震和 1303 年洪洞 $M_w(7.1-7.6)$ 大地震 (Feng et al., 2020; Ou et al., 2020; Xu et al., 2018)。这些系统性的震级偏差会对基于历史资料的强震风险评估可靠性产生影响，进而导致震防资源的过度浪费。因此，重新厘定历史地震的震级是十分必要的。

对于藏南裂谷系的正断层，在历史时期也曾发生过多强震事件 (图 1)。但由于该地区较为偏远、文字资料记录不完整等原因，可考证的震例数量有限。在上世纪 90 年代，国家地震局地质研究所出版的《西藏中部活动断层》一书中，记录了 1411 年羊八井地震和 1952 年当雄地震的野外考证资料。这两次地震的极震区均出现在吉达果-雄姆错地堑内的，并且经野外调查发现，地震分别造成念青唐古拉山东麓断层当雄-羊八井盆地和多弄-烟它段大约 136 km 和 57.5 km 的局部地表破裂 (图 4;《西藏中部活动断层》，1992)。对于 1952 年 8 月 18 日当雄地震，仪器记录给出的震级为面波震级 $M_s7.5$ ，本文根据正断层经验公式 (1) 和断层破裂尺度计算得到矩震级为 $M_w7.2$ ，比面波震级低 0.3。基于最大垂向位移 (5.5 m; 国家地震局地质研究所, 1992) 与全球矩震级经验公式 ($M_w=6.61+0.71\times\log(MD)$, 最大同震位移) 得到此次地震的矩震级为 $M_w7.1$ ，与基于破裂尺度的结果基本一致。1411 年羊八井地震给出的震级为 $M8$ 。本文结合走滑断层经验公式 ($M_w=5.16+1.12\times\log(SRL)$, 本文也采用地表迹线长度), Well 和 Coppersmith (1994) 得到矩震级 $M_w7.5$ ，低于历史震级 0.5。基于最大位移 (8.5m; 国家地震局地质研究所, 1992) 与全球矩震级经验公式 ($M_w=6.81+0.78\times\log(MD)$, 最大同震位移) 得到此次地震的矩震级为 $M_w7.5$ ，与基于破裂尺度的结果一致。此外，根据烈度 XI 值 (西藏自治区科学技术委员会, 1982) 和烈度与震级之间的经验公式 $M=0.58I_0(\text{烈度值})+1.5$ ，可得 $M7.9$ ，再根据 m (体波震级) $=2.5+0.63M$ ，可得到 $m=7.5$ ，使其等价于 m_B (体波震级)，借助公式 $M_w=1.33*m_B-2.36$ ，得到矩震级 $M_w=7.6$ (推理公式可见 Ou et al., 2020)，与基于破裂长度得到的结果也基本一致。在念青唐古拉山东麓断层全段破裂的前提下 (~190 km)，地震的矩震级介于 $M_w7.7$ ，也小于历史地震震级 $M8$ 。

从这两个历史地震震级标定结果来看，本文基于地表破裂长度填图和最大同震位移获得的震级小于历史地震目录和 USGS 的结果，USGS 的结果与历史地震目录更为匹配。以 2025 年定日地震为例，根据野外地表破裂填图，目前所得到的最大的地震地表破裂长度为 36.5 km (邵延

秀等, 2025), 带入经验公式 (1), 获得震级为 $M_w6.9$ 。USGS 根据地震波反演此次地震造成地表形成 40 余 km 的同震地表破裂, 震级为 $M_w7.1$, 两者相差 0.2, 误差为 3%。野外获得的地表破裂尺度与 USGS 反演的地表破裂尺度存在差异, 这是导致计算结果存在差异的直接原因。但本文认为, 基于详实的野外地表破裂填图估算的震级可能更符合真实的地震震级。

关于体波震级、面波震级和矩震级在震级标定的区分和优劣势, 刘静等, 2023 和 Ou et al., 2020 有很好的概述和说明, 且根据前人对历史地震的重新标定, 认为以往给出的历史地震震级普遍存在高估的想象, 采用矩震级重新标定后的地震级更为可靠性。因此, 对于 1952 年强震, 选用基于地表破裂填图的矩震级 $M_w7.2$ 可能更合理些。对于 1411 年历史地震, 没有地震波形资料和其他地震台资料计算震中距, 无法进行体波和面波震级反演。依据地震烈度-震级的关系公式推算的结果可能会使震级系统性偏高 (刘静等, 2023)。因此, 基于地表破裂尺度填图计算矩震级 $M_w=7.5$ 更为合理 (图 4)。

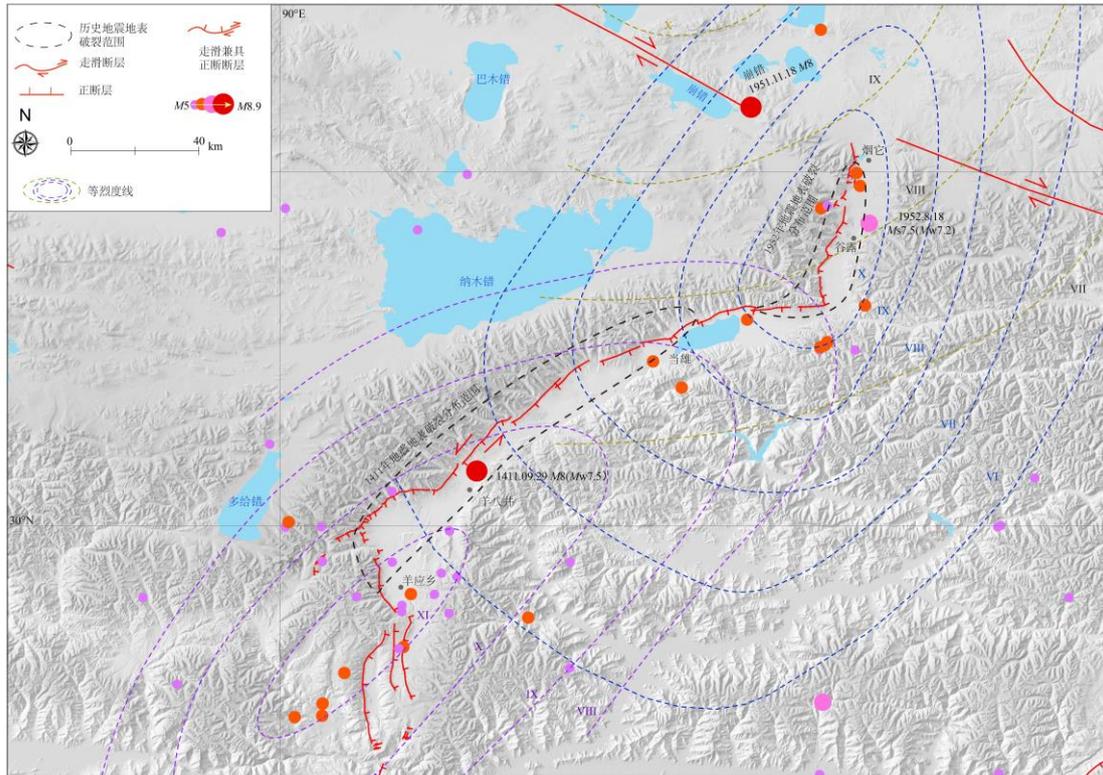


图 4.1411 年羊八井地震和 1952 年当雄地震地表破裂范围。烈度线参考《西藏地震史料汇编》, 1982

Figure 4. Surface rupture extents of the 1411 Yangbajain earthquake and 1952 Damxung earthquake, with intensity contours referencing *Compilation of Xizang Historical Earthquake Records* (1982).

4.3 裂谷系正断层的强震危险性以及与喜马拉雅主边界断裂潜在的强震触发效应

藏南裂谷系是青藏高原内部重要的构造伸展区，域内的正断层受控于面膨胀应变和地壳拉伸作用，正断型地震多发（张培震等, 2022）。如前文所述，对藏南裂谷系 8 条近南北向大型裂谷带的正断层孕震潜力进行统计分析得知，有超过一半（52%）的断层具备孕育 $M_w \geq 7$ 地震的潜力（图 2，表 2，图 5a）。尽管在空间上呈现东强西弱的差异，但总体来说，这些正断层的孕震能力普遍较强（Li et al., 2025; 图 5b）。经前人研究和结合历史地震资料，藏南裂谷系存在多个 $M > 7$ 历史地震空区（图 2），可能说明这些正断层正处于应力积累的过程中，其释放的周期和应力积累的时间可能更长，这与古地震调查结果揭示的大地震重现期在 5-7 ka 左右相一致（黄婷婷等, 2023; Ha et al., 2019b）。

此外，藏南裂谷系北侧被大型走滑断裂带所围限，这些走滑断裂的活动可能也会与藏南裂谷系北侧的正断层存在相互联动的关系，如 1951 年崩错 $M_w 7.3$ 地震与震后一年在谷露盆地发生的当雄 $M_w 7.2$ 地震之间的关联性。藏南裂谷系南侧紧邻超大型喜马拉雅弧形主前锋逆冲断裂带，为典型的低角度逆冲断裂带，历史强震频发，绝大多数强震会伴随地表破裂且破裂尺度基本达到甚至超过百公里级别，强震造成断面的解锁加快了临近断裂应力加载的过程（图 1; 表 1）。另据 GNSS 十年尺度的数据分析认为，青藏高原的连续变形受控于统一的应变场，如果活动构造体系主边界断裂与块体内部的次级断裂的强震事件存在联动效应或相互触发关系，青藏高原东南缘的主逆冲断裂带上的强震加快了北侧藏南裂谷系应力加载过程，就可能会促进正断层裂谷系强震的发生（刘静等, 2015; 徐晶等, 2016; 张培震等, 2022）。典型的案例为 1934 年 1 月尼泊尔东部 $M 8.1$ 地震后，于 1934 年 12 月在申扎北发生了 $M 7.0$ （可能的最大地震为 $M_w 7.2$ ，大于实际地震）。2015 年 4 月尼泊尔 $M_w 7.8$ 强震后应力在北向增加，特别是改变了亚东-谷露裂谷系南侧的应力环境和断层的活动速率，导致震后定日-定结县正断层型地震数量的明显增加（Chen et al., 2023; 万永革等, 2015; 黄婷婷等, 2023）。从震后库伦应力触发过程来看，2015 年尼泊尔 $M_w 7.8$ 地震造成聂拉木-定日一带应力发生显著增强，并触发了 2015 年定日 $M_s 5.9$ 和聂拉木 $M_s 5.3$ 级地震（Liu et al., 2017; 万永革等, 2015）。藏南裂谷系南侧包括亚东-谷露地堑南段、岗嘎-当惹雍错断裂和申扎-定结断裂的南段同震库伦应力升高，其中岗嘎-当惹雍错南端同震库伦应力变化峰值更是超过了 0.01 MPa 应力触发阈值（熊伟等, 2015）。

目前，喜马拉雅弧形构造带存在多个历史地震空区，个别已超过大震 500 年的复发周期，如 1505 年历史地震空区（图 1）。研究也认为喜马拉雅弧形构造带上缺乏多次 8 级左右甚至大于 $M_w 8.5$ 的强震来释放已积累的能量（Ader et al., 2012; Bollinger et al., 2015）。基于强震联动效应或相互触发的观点，要格外关注藏南裂谷系南侧紧邻弧形构造带的一些断层，尤其是雅鲁藏布

江河谷南侧的正断层的未来强震危险性。

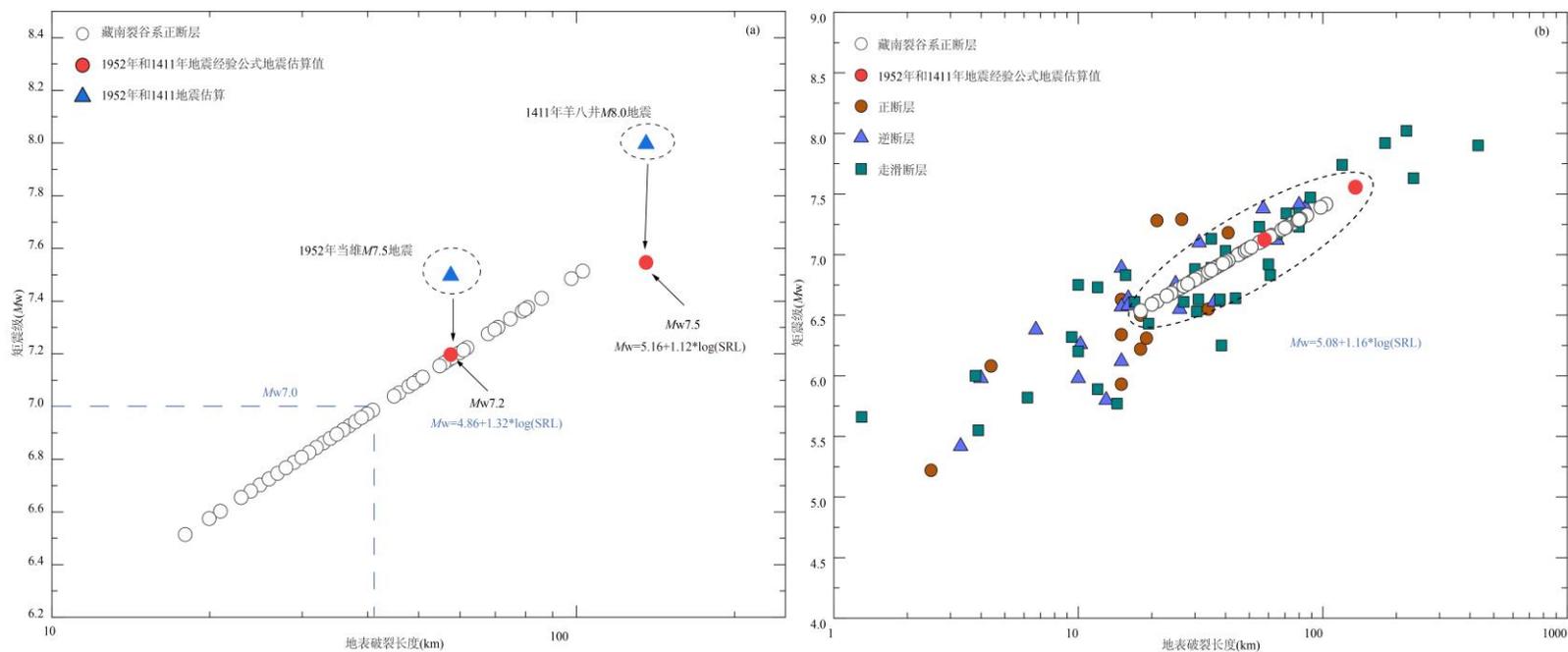


图5 (a) 藏南裂谷系正断层全段破裂与矩震级的关系以及重新标定前后的历史地震数据。(b) 基于 Wells 和 Coppersmith, 1994 经验数据和藏南裂谷系正断层震级的投图。

Figure 5. (a) Relationship between full-segment rupture of normal faults in the South Qinghai-Xizang Plateau Rift System and moment magnitude, with historical earthquake data before and after recalibration. (b) Magnitude scaling plot based on empirical data from Wells and Coppersmith (1994) and normal fault magnitudes in the South Qinghai-Xizang Plateau Rift System.

5. 结论

藏南裂谷系内发育的众多正断层以及地堑、半地堑盆地，是典型的伸展变形区域，同时也构成了盆-岭构造-地貌单元。自晚第四纪以来，该区域构造活动强烈且地震频发，地震震害程度较高，其中 2025 年 1 月 7 日发生的 $M_w7.1$ 地震便是“小震大灾”的典型例子。因此，深入探究藏南裂谷系正断层的发震能力，对于藏南裂谷系未来的震防工作具有重要意义。

在前人研究成果以及正断层几何和构造特征的基础上，本文整理出 92 条裂谷系内的正断层。为了评估每条断层的孕震上限，假设地震导致断层沿迹线全段破裂，结合断层破裂长度与全球正断层震级的经验公式，对这些正断层各自的最大震级进行了估算。研究表明，这些正断层的孕震上限处于 $M_w6.5-7.5$ 之间，整体展现出普遍较强的孕震能力，且最大震级上限出现在亚东-谷露裂谷系北侧以及紧邻 1505 年历史地震空区的雄曲断裂。藏南裂谷系的正断层型地震震源较浅，断层破裂面积有限，因此存在断层发震上限。此外，藏南裂谷系内部和喜马拉雅弧形构造带存在多个历史地震空区，研究表明藏南裂谷系主边界断裂与块体内部次级断裂存在强震的关联性 or 触发联动效应。参考 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震对 2025 年 1 月 7 日定日 $M_w7.1$ 地震的触发可能性以及定日 $M_w7.1$ 地震后的余震序列结果，本文建议需关注雅鲁藏布江河谷南侧的正断层体系，特别是定日-定结一带的郭加断层和定结断裂的未来强震危险性。

参考文献:

- Ader T, Avouac J, Liu-Zeng J, et al., 2012. Convergence rate across the Nepal Himalaya and interseismic coupling on the Main Himalayan Thrust: Implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research*, 117, B04403
- Armijo, R., Tapponnier, P, Mercier J L. et al., 1986. Quaternary Extension in Southern Tibet - Field Observations and Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 91(B14), 13803-13872.
- Anderson H and Jackson J.1987. Active tectonics of the Adriatic region. *Geophysical Journal International*, 91(3), 937-983.
- Bollinger L, Tapponnier P, Sapkota S. 2015. Balance and deficit of seismic slip in central Nepal: Implication for a repeat of the 1344 earthquake in Nepal. *Journal of Nepal Geology Society*, 48, 25.
- Bilham, R., 2019. Himalayan earthquakes: a review of historical seismicity and early 21st century slip potential, *Himalayan Tectonics: A Modern Synthesis*, P. J. Treloar, M. P. Searle.
- Chen, H., Qu, C., Zhao, D., et al., 2024. Large-Scale Extensional Strain in Southern Tibet from Sentinel-1 InSAR and GNSS data. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL110512.
- Chen, Q., Freymueller, J. T., Wang, Q., et al., 2004. A deforming block model for the present-day tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B01403).
- Cheng, J., Xu, C., Ma, J., et al. 2023. From active fault segmentation to risks of earthquake hazards and property and life losses: A case study from the Xianshuihe–Xiaojiang Fault Zone. *Science*

- China: Earth Sciences*, 66(6), 1345-1364.
- dePolo, C.M., Clark, D.G., Slemmons, et al., 1991. Historical Basin and Range Province surface faulting and fault segmentation. *Journal of Structural Geology*, 13, 123–136.
- Di Giacomo D. 2020. ISC-GEM solution for the Haiyuan earthquake of 16 December 1920[DB/OL]. ISC Seismological Dataset Repository.
- Doser, D.I. Smith, R.B. 1989. An assessment of source parameters of earthquakes in the Cordillera of the western United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79, 1383-1409.
- Eaton G P. 1982. The Basin and Range Province: Origin and tectonic significance. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 10(1), 409-440.
- Elliott J R, Walters R J, England P C. et al., 2010. Extension on the Tibetan plateau: Recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2), 503–535.
- Elliott JL, Grapenthin R, Parameswaran RM, et al., 2022. Cascading rupture of a megathrust. *Science Advances*, 8(18), eabm4131.
- Feng X, Ma J, Zhou Y, et al., 2020. Geomorphology and paleoseismology of the Weinan fault, Shaanxi, Central China, and the source of the 1556 Huaxian earthquake[J]. *Journal Geophys Res: Solid Earth*, 125(12), e2019JB017848
- Gao, Y., Li, M., Wu, Z., et al., 2024. Late Quaternary normal faulting along the western boundary fault of Peiku Co graben in southern Nyalam-Coqen rift: Implications for extensional deformation in southern Tibet and seismic hazard. *Journal of Structural Geology*, 181, 105087.
- Hough, Susan E. and Kate Hutton. 2008. Revisiting the 1872 Owens Valley, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98, 931-949.
- Ha,G., Wu,Z., Gai,H., et al., 2019a. New Discovery of Surface Rupture of Large PaleoEarthquake along Northern Pagri-Duoqing Co Graben, Southern Yadong-Gulu Rift. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(4), 1135-1136.
- Ha,G., Wu,Z., Liu, F., 2019b. Late Quaternary vertical slip rates along the Southern Yadong–Gulu Rift, Southern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 755, 75-90.
- Hou, J., Han, M., Chai, B. 1998. Geomorphological observations of active faults in the epicentral region of the Huaxian large earthquake in 1556 in Shaanxi Province, China. *Journal of Structural Geology*, 20(5), 549-557.
- Jackson, J. 1994. Active tectonics of the Aegean region. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 22(1), 239-271.
- 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(12), 8304-8333.
- Liu-Zeng, J., Zhang, Z., Rollins, C., et al., 2020. Postseismic deformation following the 2015 Mw7.8 Gorkha (Nepal) earthquake: New GPS data, kinematic and dynamic models, and the roles of afterslip and viscoelastic relaxation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2020JB019852.
- Li, Y., Shan, X., Qu, C., et al., 2025. Slip deficit rate and seismic potential on crustal faults in Tibet. *Geophysical Research Letters*, 52(1), e2024GL112122.
- Margaret E. Glasgow, Brandon Schmandt, Susan L. Bilek. 2023. Cascading multi-segment rupture in an injection-induced earthquake sequence with a Mw 5.3 mainshock. *Earth and Planetary Science Letters*, 620, 118335.

- Molnar, P., England, P., Martinod, J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Rev Geophys* 31, 357-396.
- Molnar, P., Tapponnier, P. 1978. Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83, 5361-5375.
- Ou Q, Kulikova G, Yu J, et al., 2020. Magnitude of the 1920 Haiyuan earthquake reestimated using seismological and geomorphological methods. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), e2019JB019244.
- Padilla, R., Oskin, A.M., Brodsky, M.E., et al., 2024. The Influence of fault geometrical complexity on surface rupture length. *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109957.
- Ren, C.M., Wang, Z.X., Taymaz, T., et al., 2024. Super-shear triggering and cascading fault ruptures of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquake doublet. *Science*, 383(6680), 305-311.
- Royden, L.H., Burchfiel, B.C., King, R.W., et al., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. *Science*, 276, 788.
- Srivastava, H.N., Verma, M., Bansal, et al., 2013. Discriminatory characteristics of seismic gaps in Himalaya. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(3), 224-242.
- Susan E. Hough, Kate Hutton. 2008. Revisiting the 1872 Owens Valley, California, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (2): 931-949.
- Wang H, Wright T J, Liu-Zeng Jing, et al., 2019. Strain rate distribution in south-central Tibet from two-decades of InSAR and GPS. *Geophysical Research Letters*, 46, 5170-5179.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Wu, Z., Ye, P., Barosh, P. J., et al., 2011. The October 6, 2008 Mw 6.3 magnitude Damxung earthquake, Yadong-Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, 943-957.
- Wu, Z., Ha, G., Wang, H., et al., 2019. Abnormal disappearance of Duoqing Co lake between November 2015 and April 2016, due to far-field aseismic creeping of the southern Yadong-Gulu rift of Tibet, triggered by the 2015 Ms 8.1 Nepal earthquake. *International Geology Review*, 2313-2327.
- Xu, Y., He, H., Deng, Q., et al., 2018. The CE 1303 Hongdong earthquake and the Huoshan Piedmont Fault, Shanxi Graben: Implications for magnitude limits of normal fault earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 3098-3121.
- Zhang, P., Slemmons, D.B., Mao, F., 1991. Geometric pattern, rupture termination, and fault segmentation of the Dixie Valley–Pleasant Valley active normal fault system, Nevada, USA. *Journal of Structure Geology*, 13, 165-176.
- Zhao, Y. H., Ding, W. W., Yin, S. R., et al., 2020. Asym-metric Post - Spreading Magmatism in the South China Sea: Based on the Quantification of the Volume and Its Spatiotemporal Distribution of the Seamounts. *International Geology Review*, 62(7/8), 955-969.
- Zheng G, Wang H, Wright T J, et al., 2017. Crustal Deformation in the India-Eurasia Collision Zone From 25 Years 538 of GPS Measurements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 9290-9312.
- Zou, J., Wu, Z., Ha, G., et al., 2021. Spatial variation of nearly NS-trending normal faulting in the southern Yadong-Gulu rift, Tibet: New constraints from the Chongba Yumtso fault, Duoqing Co graben. *Journal of Structure Geology*, 144, 104256.

中文参考文献:

- 邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 2010. 青藏高原昆仑-汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动. 地学前缘, 17(5), 163-178.
- 邓起东, 徐锡伟. 1988. 晋北张性区盆岭构造及其形成的力学机制. 中国地震, 4(2), 19-27.
- 陈杰, 陈玉坤, 丁国瑜 等. 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带. 第四纪研究. 23(6), 629-639.
- 高扬, 吴中海, 左嘉梦, 等. 2024. 藏南聂拉木-措勤裂谷南段第四纪正断层作用的时空特征. 地球科学, 49(7), 2552-2569.
- 胡渊, 韩帅, 吴中海, 等. 2024. 藏南霍尔巴-仓木错裂谷的主要活动断层与最新地震地表破裂特征. 地震科学进展, 54(10), 649-660.
- 黄婷, 吴中海, 韩帅, 等. 2024. 西藏日喀则地区的活断层基本特征及地震灾害潜在风险评估. 地震科学进展, 54(10), 696-711.
- 刘璐, 邵延秀, 王伟, 等. 2022. 藏南仲巴裂谷带地貌和断裂活动特征研究. 地球科学, 47(8), 3029-3044.
- 梁朋, 徐岳仁, 周晓成, 等. 2024. 2023 年 2 月 6 日土耳其 M_w 7.8 和 M_w 7.5 双强震地表破裂与东安纳托利亚断裂带强震危险性. 中国科学: 地球科学, 55(2), 626-641.
- 李彦宝, 冉勇康, 王虎, 等. 2016. 干盐池拉分盆地内新生断层大地震记录与海原断裂带级联破裂地震事件. 地震地质, 38(4), 830-843.
- 刘静, 纪晨, 张金玉, 等. 2015. 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.8 级地震的孕震构造背景和特征. 科学通报, 60, 2640-2655
- 刘静, 徐晶, 偶奇, 等. 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.
- 刘心悦. 2019. 藏南申扎 - 定结断裂系卡达正断裂晚第四纪活动性及其环境效应. 硕士论文.
- 邵延秀, 王爱生, 刘静, 等. 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日地震地表破裂特征和野外同震位移测量初步结果. 地球科学. 040.
- 石峰, 梁明剑, 罗全星, 等. 2025. 2025 年 1 月 7 日西藏定日 6.8 级地震发震构造与同震地表破裂特征. 地震地质, 47(1), 1-15.
- 吴章明, 申屠炯明, 曹忠权, 等. 1990. 1411 年西藏当雄南 8 级地震地表破裂. 地震地质, 12(2), 98-108.
- 吴章明, 曹忠权, 申屠炯明, 等. 1992. 1411 年西藏当雄南 8 级地震发震构造. 中国地震, 8(2), 46-52.
- 吴中海, 赵根模, 龙长兴, 等. 2014. 青藏高原东南缘现今大震活动特征及其趋势: 活动构造体系角度的初步分析结果. 地质学报, 88(8), 1401-1416.
- 吴中海, 赵根模, 刘杰. 2015. 2015 年尼泊尔 M_s 8.1 地震构造成因及对青藏高原及邻区未来强震趋势的影响. 地质学报, 90(6), 1062-1082.
- 吴中海. 2024. 青藏高原 1990 年以来的 $M_w \geq 6.5$ 强震事件及活动构造体系控震效应. 地震科学进展, 54(1), 10-24.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 2008. 西藏错那 - 拿日雍错地堑的第四纪正断层作用及其形成机制探讨. 第四纪研究, 28(2), 232-242.
- 万永革, 盛书中, 李详 等. 2015. 2015 年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响. 地球物理学报, 58(11), 4277-4286.
- 徐晶, 李海燕, 邵志刚, 等. 2016. 基于库仑应力变化分析 2015 年尼泊尔 M_s 8.1 地震对中国大陆的影响. 地震, 36(1), 69-77.
- 徐锡伟, 李峰, 程佳, 等. 2023. 活动断层研究进展及其科学前沿问题讨论. 煤田地质与勘探, 51(12), 1-16.
- 田婷婷, 吴中海. 2023. 西藏申扎 - 定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震

- 地质意义. 地质论评, 69, 53-55.
- 西藏自治区科学技术委员会编. 1982. 《西藏地震史料汇编》. 拉萨: 西藏人民出版社.
- 杨攀新, 陈正位, 张俊, 等. 2010. 西藏中部格仁错断裂带错嘎错-那拉错段细结构及活动性. 第四纪研究, 30(5), 1012-1019.
- 张培震, 闵伟, 邓起东, 等. 2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律. 中国科学 (D 辑), 33(8), 705-713.
- 左嘉梦, 吴中海, 盖海龙, 等. 2020. 藏南多庆错地堑冲巴雍错段最新史前大地震遗迹及其年龄证据. 第四纪研究, 40(5), 1323-1333.
- 国家地震局地质研究所. 1992. 西藏中部活动断层. 地震出版社.