引用格式：吴中海，郑文俊，任俊杰，等，2024. 活动构造与强震：专辑序言［J］. 地质力学学报，30（2）：181-188. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.20243002

Citation：WU Z H，ZHENG W J，REN J J，et al.，2024. Active tectonics and strong earthquakes：A preface for the special issue［J］. Journal of Geomechanics，30（2）：181-188. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.20243002

活动构造与强震：专辑序言

吴中海[1]，郑文俊[2]，任俊杰[3]，任治坤[4]
WU Zhonghai[1]，ZHENG Wenjun[2]，REN Junjie[3]，REN Zhikun[4]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 中山大学地球科学与工程学院，广东 珠海 519082；
3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083；
4. 中国地震局地质研究所，北京 100029

1. *Institute of Geomechanics*，*Chinese Academy of Geological Sciences*，*Beijing* 100081，*China*；
2. *School of Earth Sciences and Engineering*，*Sun Yat-sen University*，*Zhuhai* 519082，*Guangdong*，*China*；
3. *School of Earth Science and Resources*，*China University of Geosciences*，*Beijing* 100083，*China*；
4. *Institute of geology*，*China Earthquake Administration*，*Beijing* 100029，*China*

Active tectonics and strong earthquakes：A preface for the special issue

Abstract：Active tectonics is not only the manifestation of the latest crustal activity but also the leading cause of strong earthquakes. With its complex active tectonic system，China has become an area with particularly severe seismic activity and related hazards worldwide. Therefore，a deep understanding of active tectonic characteristics and the occurrence patterns of strong earthquakes in China can help scientifically prevent or mitigate the risk of seismic disasters in urban planning and major engineering construction projects. In order to timely exchange the latest achievements in the field of active tectonics and strong earthquakes，this special issue on Active Tectonics and Strong Earthquakes selected 12 representative papers，mainly covering six different fields，including the earthquake-controlling process of active tectonics，paleoearthquakes，surveying and detection of active faults，seismic geological hazards，application of remote sensing technology and reservoir-induced earthquakes. Based on the new achievements of this issue and the research trends in related fields at home and abroad，it is suggested that future research on active tectonics and strong earthquakes should focus on four aspects：（1）comprehensive understanding of regional seismic hazards from the perspective of active tectonic evolution and active fault systems；（2）quantitative and refined field investigations of active tectonics；（3）application of high-precision remote sensing and various dating techniques continuously expanding the scope and timing of paleoearthquake research；（4）human-induced earthquakes.

Key words：active fault detection；paleoearthquake；induced earthquake；coseismic rupture and hazard；active tectonic system

摘　要：活动构造既是地壳最新活动的表现，也是导致强震的主要根源。中国大陆因发育了复杂的活动构造系统，成为世界上强震活动及相关灾害特别严重的地区。因此，深入认识中国大陆的活动构造特征与强震发生规律，有助于在城镇规划和重大工程建设中科学防范或规避强震灾害风险。为了及时交流活

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20242319，DD20230014）；国家自然科学基金联合基金项目（U2002211，U2139201）；西藏自治区第 1 次全国自然灾害综合风险普查项目（2022 年地震灾害部分）（XZLX-BMC-2022-053）

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey（Grants No. DD20242319 and DD20230014），the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China（Grant No. U2002211，U2139201），and the First National Natural Disaster Comprehensive Risk Survey Project of Xizang Autonomous Region（Grant No. XZLX-BMC-2022-053）.

动构造与强震研究领域的最新成果，此期专辑优选了代表性论文12篇，主要涵盖了活动构造控震、古地震、活动断裂调查与探测、地震地质灾害、遥感技术应用和水库诱发地震共6个不同领域的研究进展。综合此期专辑的新成果和国内外相关领域的研究动态，建议活动构造与强震研究应关注4个方面的动态进展，包括：从活动构造演化及活动断裂体系角度更全面地认识区域强震的危险性；活动构造已步入定量化与精细化调查研究阶段；高精度遥感和多种定年技术的应用正在不断扩展古地震研究的范围和时限；人类活动诱发地震问题。

关键词：活断层探测；古地震；诱发地震；同震破裂与灾害；活动构造体系

中图分类号：P315 **文献标识码**：A **文章编号**：1006-6616（2024）02-0181-08

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.20243002

1 活动构造与强震

活动构造最早被美国构造地质学家Wallace（1986）所定义，特指“第四纪晚期（主要是距今约50万年或15万年以来的期间）仍在活动，并且在人类关注的未来仍将活动的构造”。活动构造已逐步发展成为一门新的学科（Keller and Pinter, 1996），其重点是探知构造活动的“现在和未来”，即了解地壳最新运动状态及未来的活动趋势，因而，活动构造研究也是揭示现今地球动力学特征的主要途径，如Tapponnier等曾基于对青藏高原及邻区活动构造的研究提出了著名的“大陆逃逸”模式（Tapponnier and Molnar, 1977；Tapponnier et al., 1982）。活动构造的发展源于对活动断裂与地震关系的研究，主要服务于地震预测与灾害预防、地壳稳定性和地震安全性评价，因而从活动构造角度探知强震的发生位置、孕育机制及未来危险性等一直是地震地质学的核心工作之一（李四光，1977；邓起东和闻学泽，2008）。

从活动构造角度研究强震活动特征及规律，涉及构造地质、地貌与第四纪地质、地质年代学、构造地貌、古地震、历史与考古地震、大地测量和地球物理等多个领域，研究内容主要包括：通过构造地貌证据确定断裂的存在（图1a、1b），查明其空间分布及其几何学与运动学特征，并确定其滑动速率；研究活动断裂的分段活动特征、断层间相互作用及相关的强震时空迁移特征；通过判别活动断裂的多期错动过程或相关记录识别古地震（图1c），并确定其大地震复发间隔与复发规律以及最近一次大地震（主要指$M \geqslant 7.0$地震）的离逝时间等；调查同震地表破裂带特征与同震位移，理解活动断裂分段如何控制地表破裂发育；综合判别活动断裂的最新活动时代（图1d）、发震能力及强震发生概率等。掌握这些资料及相关的关键参数，既是科学评判活动断裂带上未来强震危险性的重要依据，也是评价活动构造带上城镇和重要基础设施地质安全以及科学采取防范措施的前提。

中国大陆因由多个微陆块经多期造山作用拼合而成，晚新生代期间，在全球最活跃的印度板块与西太平洋板块共同作用下，中国大陆的许多古老造山带纷纷复活，发育了非常复杂的活动断裂体系，成为全球面积最大的板内弥散变形区，也是世界上强震活动及相关灾害特别严重的地区（张培震等，2013；吴中海和周春景，2018；郑文俊等，2019）。因此，深入认识中国大陆活动构造体系与强震机理，既有助于更好地理解板内地壳变形特征及其孕震规律，更有助于在城镇规划和重大工程建设中科学防范或规避相关的灾害风险。近年来，伴随全国地震灾害风险普查、城市活断层探测、地震科学试验场建设、工程场地的地震安全性评价以及重大工程与城镇区的活断层鉴定与地壳稳定性评价等工作的深入开展，高精度遥感、构造地貌、古地震和第四纪年代学等方法的广泛应用，显著提升了活动构造与强震方面的理论方法进步。为了及时交流该领域的最新研究成果，支撑服务区域防震减灾及重要工程和基础设施的地质安全评价等工作，《地质力学学报》编辑部特组织了该期《活动构造与强震》成果专辑，征集了活动构造与强震相关领域论文共26篇，优选了其中的代表性论文12篇纳入此专辑。

2 研究进展

此期专辑收录的12篇新成果主要代表了活动

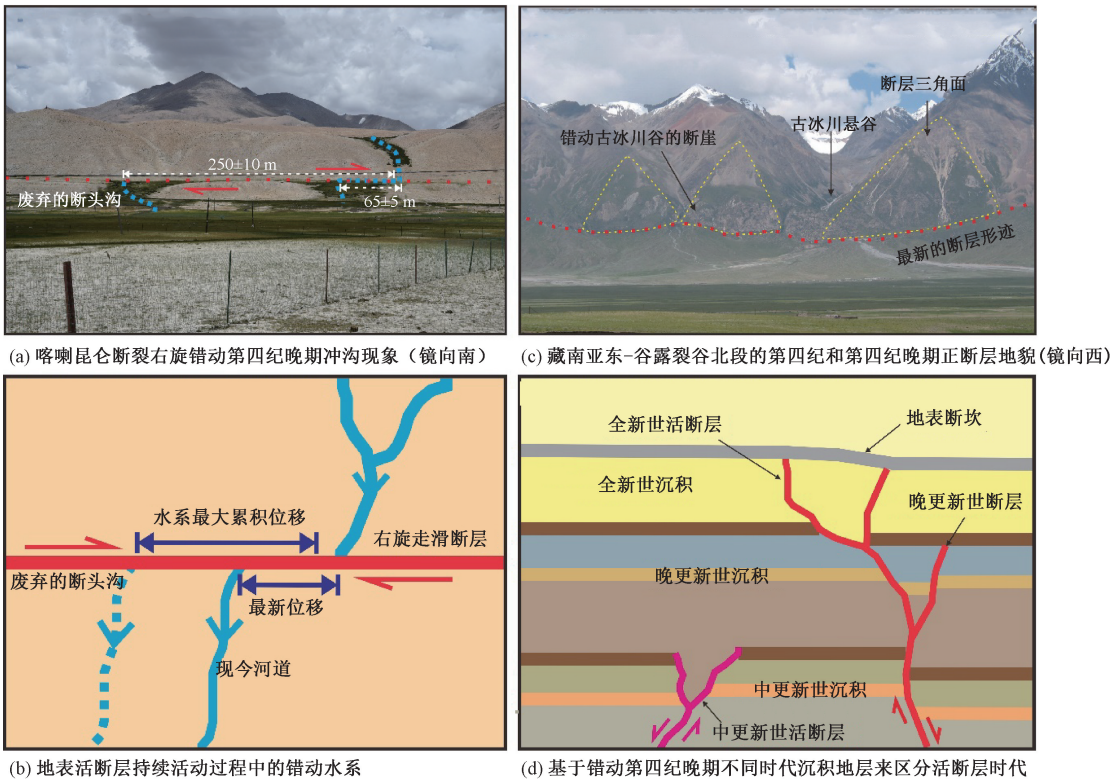

图 1　活断层的典型地貌标志与地质剖面上的断错标志及时代分类示意图（吴中海，2022）

Fig. 1　Schematic diagram of the geomorphologic marks of surface active faults (a-c) and the characteristics of the age classification of active fault based on the marks of offset Quaternary deposits (Wu, 2022)

构造控震、古地震、活动断裂调查与探测、地震地质灾害、遥感技术应用和水库诱发地震共 6 个不同领域的研究进展。这里将相关研究进展及其意义概述如下。

2.1　活动构造及其控震特征

充分理解活动构造控震方式和机制是分析区域强震危险性的关键。吴中海（2024）以青藏高原 1990 年以来强震活动为例，结合土耳其安纳托利亚板块及周缘的最新强震序列，阐述了陆陆碰撞-挤出活动构造体系的控震作用及特征，为从活动构造体系角度分析区域强震危险性提供了新的思路。

鄂尔多斯地块周缘活动构造带是中国陆内强震活动相对频发且地震地质灾害尤为突出的区域，中国历史上死亡人数最多的公元 1556 年华县 8.0 级大地震即发生在其南界。郑文俊等（2024）从活动地块控震角度，在系统总结鄂尔多斯活动地块周缘边界断裂带第四纪晚期活动与古地震等定量研究成果基础上，全面分析了鄂尔多斯活动地块边界带的第四纪晚期活动性质、主要断裂滑动速率、强震孕育机制及强震风险。该成果在进一步深化活动地块控震理论的同时，也为全面了解该区的强震构造条件及判别未来强震危险性等提供了重要参考。

2.2　古地震

古地震研究可以弥补历史与仪器地震记录（主要为百年时间尺度）的不足，有助于从更长时间尺度来认识活动断裂带的大地震复发特征与规律，从而为区域地震危险性评价提供关键依据（McCalpin，2009；刘静等，2021）。

柴达木盆地北缘的逆冲-褶皱活动变形带是反映青藏高原北部地壳缩短的典型构造带，姚生海等（2024）综合 5 个古地震探槽的研究结果，揭露了柴达木盆地北缘断裂锡铁山-阿木尼克山段上包括 1962 年 6.8 级地震在内的 5 次古地震事件，定量约束了古地震的复发间隔和该段断裂上最新强震活动的离逝时间，并推断出该断裂未来发生强震的概率，这为区域强震危险性评价提供了关键的科学依据。

川西高原的北西-北北西向理塘断裂带作为调节青藏高原东南部物质顺时针旋转及向东南挤出的主要左旋走滑断裂带之一，也是川西高原的重

要控震构造，因而认识其强震发生规律对于区域防震减灾具有重要意义。王世元等（2024）针对该断裂带的措普湖段开展了滑动速率和古地震研究，定量约束了4次古地震事件的年龄和断层左旋走滑速率，为进一步深入分析理塘断裂带不同段落的第四纪晚期走滑断裂活动特征与古地震复发特征，以及未来强震危险性等提供了新资料。

2.3 活动断裂调查与探测

由于活动断裂是强震的主要危险源，因而调查和探测活动断裂的空间分布、几何学与运动学特征，并揭示其深、浅部结构及定量约束其滑动速率，既是评价活动断裂发震潜力的基础，也是城镇规划和重要基础设施建设中采取科学避让或防范措施的前提（Wu and Hu, 2024）。

华北平原区是中国东部典型的隐伏活动断裂发育区，穿过城镇区的隐伏活动断裂因隐蔽性强，是威胁性最显著的地震危险源之一，因此隐伏区活动断裂探测一直是华北平原地震地质工作的重点之一。刘广英等（2024）综合浅层地震勘探、钻孔勘探和第四纪测年等方法，对华北平原中南部隐伏的聊城-兰考断裂活动性进行了精细研究，定量约束了该断裂的垂直滑动速率和晚更新世以来的4次古地震事件，并探讨了1937年菏泽7.0级地震的发震构造。这一成果一方面为隐伏活动断裂探测研究提供了方法借鉴，另一方面也为更深入认识华北平原中南部的断裂活动特征和强震构造提供了重要资料。

正确认识青藏高原腹地羌塘断块的挤出方式是理解青藏高原活动造山带陆内变形机制的关键。韩帅等（2024）基于新的遥感解译和地表调查资料，研究了羌塘断块南界班公湖-怒江缝合带上布木错共轭走滑断裂系的第四纪晚期构造变形和最新地震地表破裂变形特征，发现羌塘断块向东挤出的南部边界可能并非受控于单一的集中剪切变形带，而是由多个共轭走滑断裂系共同控制，进而提出高原内部变形更符合中—下地壳流驱动下的连续变形模式（Zhang et al., 2004），而不支持刚性块体挤出模式下的集中变形样式（Armijo et al., 1989）。这一新成果加深了对高原内部活动构造变形方式的认识。

认识基岩地质结构与活动断裂上大尺度的几何复杂体的关系，基岩地质结构是否控制断层分段、同震位移亏损和地表破裂传播拓展，是深入理解断层分段与同震破裂扩展方式的关键。杨勇忠等（2024）以祁连山北缘佛洞庙-红崖子断层为例，开展了基岩地质差异对活动断裂地表几何形态的控制作用研究，揭示出活动断裂上断错地貌参数显著变化区与基岩地质结构存在明显的对应关系，并提出在地震危险性分析中需关注基础地质背景的影响。该成果为认识断层分段机制和同震破裂发育特征等进一步开拓了思路。

2.4 地震地质灾害

活动褶皱是挤压造山带的典型活动构造类型，其地震地质灾害具有不同于一般活动断裂所造成地表破裂的独特性，深入认识活动褶皱变形带的同震地表破坏特征对于相关区域的重大工程与基础设施规划建设的地质安全评价至关重要。杨晓平等（2024）以天山地区典型活动褶皱的地表变形特征为例，分析探讨了活动褶皱相关同震构造变形的地表破坏作用及其成灾特点，并指出了活动背斜两翼弯曲变形和倾伏端的地面掀斜变形对工程与建筑安全的威胁问题。这一研究成果有助于全面认识活动褶皱地表变形方式与地表破坏特征，并可为工程建设如何有效防范类似灾害提供了重要参考。

2023年12月18日甘肃临夏州积石山 M_S6.2地震是一次典型的西宁-兰州断块内部强震事件（吴中海等，2024），导致151人死亡失踪，及时总结分析同震地质灾害发育规律及开展易发性评价，对支撑震后恢复重建至关重要。刘帅等（2024）综合震后的应急排查资料与野外地表调查结果，结合机器学习-随机森林模型，划分了同震地质灾害类型，圈定了极高和高易发性区等，该成果在支撑震后规划重建的同时，也可为类似山地丘陵区的地质灾害易发性评价提供参考。

2.5 遥感技术应用

利用遥感技术快速获取地震的同震变形场有助于及时了解地震破裂过程及成因，并可为认识发震断裂的孕震特征提供依据。康文君和徐锡伟（2024）利用哨兵2号光学影像数据，通过光学影像相关性匹配技术获取了2023年2月6日土耳其双强震的同震地表变形场，并分析讨论了其同震变形特征与原因。这既提供了快速获取同震形变场的方法借鉴，也为深入认识此次土耳其双震型地震的同震变形场特征提供了重要资料。

基于无人机（UAV）低空遥感的UAV SfM

（Structure from Motion，运动恢复结构）三维重建技术在活动构造调查研究中的应用，显著提高了定量获取高精度断层微地貌与构造地貌参数的效率和质量，也相对推动了活动构造定量研究的水平。江晨轶等（2024）以青藏高原西北部的龙木错断裂为例，开展了 UAV SfM 技术在活动构造应用中的数据采集、处理及精度评估研究，对比了是否搭载 RTK 模块 2 种场景下，UAV SfM 技术的精度差异，并给出了不同场景的应用建议。该成果为在活动构造调查研究中更合理地应用 UAV SfM 技术提供了很好的方法借鉴。

2.6　水库诱发地震

强震的发生包括了天然地震和诱发地震 2 类，诱发地震的因素包括油气与矿产开采、水库蓄水、基于水压致裂的干热岩开发和工地下注入废液等，并可能造成严重的地震灾害，因而诱发地震问题一直是地震地质领域的研究焦点。其中水库诱发地震是人类最早关注到的诱发地震类型，那么在正在运行的水库蓄水区，通常认为的天然强震事件中是否也会存在人类活动因素影响，影响程度如何，显然是一个十分具有挑战性的研究课题。朱家正等（2024）针对这一科学问题，利用三维孔隙弹性有限元数值模型开展了四川大岗山水库蓄水对 2022 年泸定 M_S6.8 级地震及余震的影响研究，结果发现水库蓄水对 M_S6.8 级地震的发生起到了促进作用。该成果为全面认识强震的孕震机制和人类工程活动对区域强震活动的影响提供了新视角。

3　研究展望

综合此期专辑展示出的新成果，结合国内外相关领域的研究动态，笔者认为活动构造与强震研究领域在以下方面的发展趋势值得关注。

（1）从活动构造演化及其断裂体系角度来认识强震危险性

活动构造是新构造期间构造应力场动态演化的结果，尤其是活动断裂的发育，必然存在新生期、成熟期和消亡期不同演化阶段，并导致强震活动特征及危险性出现明显差异。因而从更长时间尺度认识断裂活动性，能够更好地理解和把握区域内不同断裂的强震危险性及其差异性。而从活动断裂体系角度，同一断裂体系中不同断裂间的相互作用经常会导致强震相互触发，从而导致强震丛集现象。如 2022 年门源地震和 2023 年积石山地震先后发生在西宁-兰州断块的边界及内部，前者出现在日月山断裂与海原断裂交汇区，而后者发生在日月山断裂与西秦岭北缘断裂带交汇附近的拉脊山断裂带上，因而从活动断裂体系角度，需进一步关注该断块及其边界断裂的未来强震危险性，尤其是第四纪晚期活动性显著的日月山断裂带（韩帅等，2022；吴中海等，2024）。

（2）活动构造调查研究已经步入定量化与精细化研究阶段

近年来，高分辨率遥感和高精度定年技术的应用正在不断提升活动构造调查研究的精细化和定量化水平，并更新着地质学家对断裂活动方式与行为特征的认识（Friedrich et al.，2003）。前者主要是雷达干涉图像（InSAR）与全球定位系统（GPS）或 GNSS 以及小型无人机等在活动断裂与同震变形研究中的应用，显著提高了获取断层地表变形量与同震位移等参数的精度（Elliott et al.，2016）。后者的技术发展使得精确限定活断层第四纪期间从百万年到千年不同时间尺度的滑动速率及其时空变化特征，以及精细刻画古地震事件年龄和恢复古地震复发过程成为可能。因此，高精度地貌观测技术与第四纪年代学方法紧密结合，使得活动构造的调查研究已经步入定量化与精细化研究阶段，并开始向更高精度的四维尺度发展（Ren et al.，2018）。

（3）新技术方法的应用正在不断扩展古地震研究的范围和时限

近年来，高精度地貌观测技术与多种第四纪年代学方法的应用，为更精细刻画古地震复发过程提供了技术支撑（刘静等，2021），并相应扩展着古地震研究的范围和时限，并提升了古地震理论发展。这方面的发展主要包括应用高精度地形数据获取同震位移和恢复古地震事件（Zielke et al.，2015）；综合机载 LiDAR、古地震探槽和 AMS-^{14}C 等技术更精确恢复大地震的同震位移与发震时间及复发模式（Ludwig et al.，2010；Zielke et al.，2010）；将宇宙成因核素^{36}Cl 和^{10}Be 浓度变化及测年应用于正断层基岩断面的古地震研究（Mozafari et al.，2019）；从同震流体活动角度，将高精度 U 系测年应用于同震碳酸盐脉体定年，获得 10 万年时间尺度的更长古地震记录及复发过程

(Williams et al., 2017)。

(4) 人类活动诱发地震问题正在得到更多关注

近年来，随着大型水电工程、页岩气等非常规油气的大规模开采、增强型地热系统的使用和CO_2等气体地下封存等人类工程不断增加，与之相关的诱发地震案例正显著增多 (Davies et al., 2013)。虽然诱发地震绝大多数是人类难以感觉到或不对地表产生破坏的微小地震 (即多为2.0级以下的无感地震) 或无害地震，但由于诱发地震普遍具有震源深度浅 (通常小于5 km) 的特点，因而如果在人口相对稠密区发生$M \geqslant 5.0$诱发地震，甚至会导致大于天然地震的灾害效应 (Atkinson et al., 2020)。据全球诱发地震数据库 (HiQuake; http://inducedearthquakes.org/) 的统计结果，目前已知的人类活动诱发地震主要集中在北美、西欧和中国，其中美国所占比例最多，接近50%，中国次之，占比大于14%。因此，诱发地震的孕震机理及如何科学预防或防范正得到越来越多的关注，并正成为防灾减灾领域面临的重要课题之一。

笔者相信随着国家不断加大在基础研究及应用方面的投入，在活动构造与强震领域专家学者的持续努力下，伴随着理论研究的不断深入和技术方法的进步，这一领域将会有更多、更好的成果涌现，从而更好地支撑服务中国的防灾减灾事业。

致谢：本专辑的出版得到了中国地质科学院地质力学研究所、中国地震学会地震地质专业委员会及国内有关同行单位的关心和支持，受到了活动构造和地震地质等相关领域专家学者的积极响应，国家自然科学基金委、中国地震局、中国地质调查局、国家科技基础资源调查和重点研发专项、第一次全国自然灾害综合风险普查、中央级公益性科研院所基本科研业务费、省级财政与创新人才基金等为主要研究成果提供了资助，多位同行专家对论文进行了认真评审，并提出了宝贵意见与建议，《地质力学学报》编辑部和责任主编等付出了大量的辛勤劳动，在此一并衷心感谢。

References

ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T L, 1989. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94 (B3): 2787-2838.

ATKINSON G M, EATON D W, IGONIN N, 2020. Developments in understanding seismicity triggered by hydraulic fracturing [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 1 (5): 264-277.

DAVIES R, FOULGER G, BINDLEY A, et al., 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons [J]. Marine and Petroleum Geology, 45: 171-185.

DENG Q D, WEN X Z, 2008. A review on the research of active tectonics: history, progress and suggestions [J]. Seismology and Geology, 30 (1): 1-30. (in Chinese with English abstract)

ELLIOTT J R, WALTERS R J, WRIGHT T J, 2016. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes [J]. Nature Communications, 7: 13844. doi: 10.1038/ncomms13844.

FRIEDRICH A M, WERNICKE B P, NIEMI N A, et al., 2003. Comparison of geodetic and geologic data from the Wasatch region, Utah, and implications for the spectral character of Earth deformation at periods of 10 to 10 million years [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108 (B4): 2199. doi: 10.1029/2001JB000682.

HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan M_S6.9 Earthquake, Qinghai, China: implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk [J]. Journal of Geomechanics, 28 (2): 155-168, doi: 10. 12090/j. issn. 1006-6616. 2022013. (in Chinese with English abstract)

HAN S, WU Z H, WANG S F, et al., 2024. Late Quaternary surface deformation and tectonic implications of the Bue Co strike-slip fault system in central-western Qiangtang block [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 298-313. (in Chinese with English abstract)

JIANG C Y, PAN J W, ZHANG L J, et al., 2024. Application of UAV SfM technology in active tectonic research: A case study of the Longmu Co Fault, Northwestern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 332-347.

KANG W J, XU X W, 2024. Study on coseismic surface deformation of the 2023 Turkey M_W7.8 and M_W7.5 double strong earthquakes using optical image correlation method [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 289-297. (in Chinese with English abstract)

KELLER E A, PINTER N, 1996. Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall.

LEE J S, 1977. Seismic geological [M]. Beijing: Science Press: 52. (in Chinese)

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 G Y, LIANG K, LI Z P, et al., 2024. Detection of the Late Quaternary activity of the Liaocheng-Lankao Fault in the south-central part of the North China Plain: Discussion on the seismogenic mechanism of the 1937 Heze M7.0 earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 242-259. (in Chinese with English abstract)

LIU S, HE B, WANG T, et al., 2024. Development characteristics and

susceptibility assessment of coseismic geological hazards of Jishishan M_S6.2 earthquake, Gansu Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 314-331. (in Chinese with English abstract)

LUDWIG L G, AKÇIZ 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.

MCCALPIN J P, 2009. Paleoseismology [M]. 2nd ed. Burlington: Academic Press: 629.

MOZAFARI N, TIKHOMIROV D, SUMER Ö, et al., 2019. Dating of active normal fault scarps in the Büyük Menderes Graben (western Anatolia) and its implications for seismic history [J]. Quaternary Science Reviews, 220: 111-123. doi: 10.1016/j.quascirev.2019.07.002.

REN Z K, ZIELKE O, YU J X, 2018. Active tectonics in 4D high-resolution [J]. Journal of Structural Geology, 117: 264-271. doi: 10.1016/j.jsg.2018.09.015.

TAPPONNIER P, MOLNAR P, 1977. Active faulting and tectonics in China [J]. Journal of Geophysical Research, 82 (20): 2905-2930.

TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with Plasticine [J]. Geology, 10 (12): 611-616.

WALLACE R E, 1986. Active tectonics: impact on society [M]. Washington, DC: National Academies Press: 176.

WANG S Y, WANG J, LI F P, et al., 2024. Late quaternary slip rate and paleoseismic sequence of the Cuopuhu section of the Litang-Yidun fault, western Sichuan, China [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 275-288. (in Chinese with English abstract)

WILLIAMS R T, GOODWIN L B, SHARP W D, et al., 2017. Reading a 400, 000-year record of earthquake frequency for an intraplate fault [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114 (19): 4893-4898, doi: 10.1073/pnas.1617945114.

WU Z H, ZHOU C J, 2018. Distribution map of active faults in China and its Adjacent Sea Area (1∶5, 000, 000) [M] //HAO A B, LI R M. Atlas sets of geological environment of China. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

WU Z H, 2022. Active faults and engineering applications Ⅰ: definition and classification [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 44 (6): 922-947. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, 2024. The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around Qinghai-Tibet Plateau: A case study of strong earthquakes since 1990 [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 189-205. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, HE Z T, ZHONG N, et al., 2024. The strong earthquakes and seismogenic structures in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas: a preface for the special topic [J]. Progress in Earthquake Sciences, 54 (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, HU M M, 2024. Definitions, classification schemes for active faults, and their application [J]. Geosciences, 14 (3): 68. doi: 10.3390/geosciences14030068.

YANG X P, CHEN J, LI A, et al., 2024. Structural deformation characteristics of active anticline and their implications for seismogeological disaster effect under compression setting in the Late Cenozoic [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 225-241. (in Chinese with English abstract)

YANG Y Z, LI Z F, REN J J, et al., 2024. Control of bedrock geology on active structural deformation revealed by changes in geomorphic parameters: A case Study of the Fodongmiao-Hongyazi Frontal Thrust, NE Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 348-362. (in Chinese with English abstract)

YAO S H, GAI H L, YIN X, et al., 2024. Late Quateranry paleoseismicity of the Xitieshan-Amunikeshan section of the northern margin fault of the Qaidam Basin [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 260-274. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al., 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. Geology, 32 (9): 809-812.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG Z Q, et al., 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China [J]. Scientia Sinica Terrae, 43 (10): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, SUN X, LEI Q Y, et al., 2024. Late Quaternary tectonic activity and strong earthquake generation mechanism around the boundary zone of the Ordos active-tectonic block, central China [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 206-224. (in Chinese with English abstract)

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.

ZHU J Z, SUN Y J, XIE Z Y, et al., 2024. The impact of the Dagangshan Reservoir impoundment in Sichuan Province on the 2022 Luding M_S6.8 earthquake and its after shocks [J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 363-376.

附中文参考文献

邓起东，闻学泽，2008. 活动构造研究：历史、进展与建议 [J]. 地震地质，30 (1): 1-30.

韩帅，吴中海，高扬，等，2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 M_S6.9 地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示 [J]. 地质力学学报，28 (2): 155-168.

韩帅，吴中海，王世锋，等，2024. 羌塘地块中西部布木错走滑断裂系的第四纪晚期地表变形特征与构造意义 [J]. 地质力学学报，30 (2): 298-313.

康文君，徐锡伟，2024. 基于光学影像相关性匹配技术的 2023 年土耳其 M_W7.8 与 M_W7.5 双强震地表同震变形研究 [J]. 地质力学

学报，30（2）：289-297.

李四光，1977. 地震地质［M］. 北京：科学出版社：52.

江晨轶，潘家伟，张丽军，等，2024. UAV SfM 技术在活动构造研究中的应用：以青藏高原西北部龙木错断裂为例［J］. 地质力学学报，30（2）：332-347.

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.

刘广英，梁宽，李志鹏，等，2024. 华北平原中南部聊城-兰考断裂的第四纪晚期活动性探测：兼论 1937 年菏泽 7.0 级地震发震机制［J］. 地质力学学报，30（2）：242-259.

刘帅，何斌，王涛，等，2024. 积石山县 M_S6.2 地震同震地质灾害发育特征与易发性评价［J］. 地质力学学报，30（2）：314-331.

王世元，王竞，李福鹏，等，2024. 川西理塘-义敦断裂措普湖段第四纪晚期滑动速率与古地震序列［J］. 地质力学学报，30（2）：275-288.

吴中海，周春景，2018. 中国及毗邻海区活动断裂分布图（1∶500 万）［M］//郝爱兵，李瑞敏. 中国地质环境图系. 北京：地质出版社.

吴中海，2022. 活断层与工程应用Ⅰ：定义与分类［J］. 地球科学与环境学报，44（6）：922-947.

吴中海，2024. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用：以 1990 年以来强震活动为例［J］. 地质力学学报，30（2）：189-205.

吴中海，何仲太，钟宁，等，2024. 青藏高原东缘及邻区强震构造：专辑序言［J］. 地震科学进展，54（1）：1-9.

杨勇忠，李占飞，任俊杰，等，2024. 基岩地质差异对活动断层地表几何形态的控制作用：以祁连山北缘佛洞庙-红崖子断层为例［J］. 地质力学学报，30（2）：348-362.

杨晓平，陈杰，李安，等，2024. 新生代晚期挤压作用下活动背斜区的构造变形特征及其地震地质灾害效应［J］. 地质力学学报，30（2）：225-241.

姚生海，盖海龙，殷翔，等，2024. 柴达木盆地北缘断裂锡铁山-阿木尼克山段第四纪晚期古地震活动性［J］. 地质力学学报，30（2）：260-274.

张培震，邓起东，张竹琪，等，2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程［J］. 中国科学：地球科学，43（10）：1607-1620.

郑文俊，张培震，袁道阳，等，2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制［J］. 地质力学学报，25（5）：699-721.

郑文俊，孙鑫，雷启云，等，2024. 鄂尔多斯活动地块边界带第四纪晚期构造活动特征及强震孕育机制［J］. 地质力学学报，30（2）：206-224.

朱家正，孙玉军，谢志远，等，2024. 四川大岗山水库蓄水对 2022 年泸定 M_S6.8 地震及余震的影响［J］. 地质力学学报，30（2）：363-376.