



## 青藏高原东缘及邻区强震构造：专辑序言

吴中海, 何仲太, 钟宁, 俞晶星, 张波

## The strong earthquakes and seismogenic structures in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas: A preface for the special topic

Wu Zhonghai, He Zhongtai, Zhong Ning, Yu Jingxing, and Zhang Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-008>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### [第八届青藏高原东部构造与地球物理研讨会 \(WTGTP2020\) 反映的新进展](#)

Advancement in geophysics and continental dynamics of the Tibetan Plateau: Review of the WTGTP2020

地震科学进展. 2021(12): 529–546

#### [吴忠—灵武地区地震活动性与强震危险性分析](#)

The earthquake activity and strong earthquake risk analysis of Wuzhong–Lingwu region

地震科学进展. 2020(10): 1–12

#### [青藏高原辐射低值与青藏高原东缘的强震关系讨论](#)

Correlation discuss between the low value of radiation in Qinghai–Tibet Plateau and large earthquakes in it's eastern edge

地震科学进展. 2019(8): 35–36

#### [地震干涉法及其在青藏高原东缘的应用研究](#)

Method of seismic interferometry and its application in the eastern margin of the Tibetan Plateau

地震科学进展. 2019(1): 47–48

#### [鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展](#)

Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block

地震科学进展. 2020(4): 1–21

#### [基于希尔伯特–黄变换的九寨沟M7.0地震加速度记录时频分析](#)

Time–frequency analysis of Jiuzhaigou M7.0 seismic acceleration record based on Hilbert–Huang transform

地震科学进展. 2019(7): 9–16



关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴中海, 何仲太, 钟宁, 等. 青藏高原东缘及邻区强震构造: 专辑序言 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 1-9. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-008

Wu Z H, He Z T, Zhong N, et al. 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, 2024, 54(1): 1-9. doi:10.19987/j.dzcxjz.2024-008

## 青藏高原东缘及邻区强震构造: 专辑序言

吴中海<sup>1)\*</sup> 何仲太<sup>2)</sup> 钟宁<sup>1)</sup> 俞晶星<sup>2)</sup> 张波<sup>3)</sup>

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

3) 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000

**摘要** 青藏高原东缘由多个次级构造单元组成了独特的“多层次挤出-旋转活动构造体系”, 是调节高原物质向东挤出的构造转换带, 发育了高密度的活动断裂, 强震频度高且强度大, 而且地质地貌复杂, 成为我国地震灾害问题最为突出的地区之一。近年来, 伴随全国地震灾害风险普查、城市活断层探测、地震科学实验场建设、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, 显著提升了青藏高原东缘及邻区强震构造的调查研究程度。为了及时交流这方面的最新研究成果, 支撑区域防震减灾及重要工程和基础设施建设的地质安全评价等工作, 《地震科学进展》编辑部组织了“青藏高原东缘及邻区强震构造”成果专辑, 征集了活断层与地震、甘肃积石山地震以及相关领域的研究综述等代表性学术论文 20 余篇, 本期《青藏高原东缘及邻区强震构造专辑 I》优选了 10 篇论文, 后续还将推出《青藏高原东缘及邻区强震构造专辑 II》。希望这些成果可提升对区域强震活动特征与孕震构造机制的理解, 并为区域强震危险性分析和有效防范强震灾害风险提供科学依据。

**关键词** 青藏高原东缘; 强震构造; 积石山 6.2 级地震; 活动断裂; 河套—银川裂谷

中图分类号: P315.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)01-0001-09

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2024-008

## The strong earthquakes and seismogenic structures in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas: A preface for the special topic

Wu Zhonghai<sup>1)</sup>, He Zhongtai<sup>2)</sup>, Zhong Ning<sup>1)</sup>, Yu Jingxing<sup>2)</sup>, Zhang Bo<sup>3)</sup>

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

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

3) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Gansu Lanzhou 730000, China

**Abstract** The eastern margin of the Tibetan Plateau is composed of multiple secondary tectonic units which constitute typical “multi-level extrusion-rotation active tectonic system”. It is the tectonic transformation belt that

收稿日期: 2024-01-05; 采用日期: 2024-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2002211), 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)和国家科技基础资源调查专项课题(2021FY100104)共同资助。

\* 通信作者: 吴中海(1974-), 男, 研究员, 主要从事新构造与活动构造方面的研究。E-mail: wuzhonghai8848@foxmail.com。



regulates the eastward extrusion of plateau blocks, and contains high-density active faults. This area is characterized by frequent and high intensity strong earthquakes and complex geological and geomorphological features. Therefore, this region is one of the areas in China where the problem of earthquake disaster is particularly significant. In recent years, with the research deepening of the national earthquake disaster risk survey, active fault detection of urban, seismic experimental site construction, seismic safety evaluation of engineering sites, identification of active faults and evaluation of crustal stability in major projects sites and urban areas, and the wide application of high-precision remote sensing, tectonic geomorphology, paleoseismic and Quaternary chronology methods. The investigation of seismogenic structures around the eastern margin of the Tibetan Plateau and its adjacent areas has been significantly improved. In order to timely exchange the latest study results in this field support regional earthquake prevention and disaster reduction and geological safety evaluation of important projects sites and infrastructure construction, the journal editorial department of *Progress in Earthquake Science* organized the special topic "The strong earthquakes and seismogenic structures in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas". More than 20 representative academic papers such as active faults and earthquakes, Jishishan earthquake in Gansu Province, and research reviews in related fields have been collected. In this issue, 10 papers are selected in the special topic I "The strong earthquakes and seismogenic structures in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas". It is hoped that these newly study results may improve the understanding of characteristics of strong earthquake activity and seismogenic structural mechanism in the region, and provide scientific basis for regional strong earthquake risk analysis and effective prevention of strong earthquake disaster risk.

**Keywords** eastern margin of Tibetan Plateau; seismogenic structures; Jishishan  $M_{6.2}$  earthquake; active fault; Hetao-Yinchuan rift

## 0 引言

新生代期间, 印度与欧亚板块的持续陆陆碰撞过程形成了全球平均海拔最高、规模巨大且变形最为强烈的陆内造山带——青藏高原造山带<sup>[1-2]</sup>, 并发育了高密度的活动断裂系统, 使之成为喜马拉雅—地中海地震带上陆内强震活动强度及频度最高的区域之一。青藏高原东缘及邻区作为青藏高原物质向东挤出的构造转换带, 活动断裂体系尤为复杂, 强震活动频繁, 构成了东亚大陆南北地震带的南段, 而且该区地形起伏大, 人口相对密集, 因而是我国遭受地震灾害影响特别严重的区域<sup>[3]</sup>。

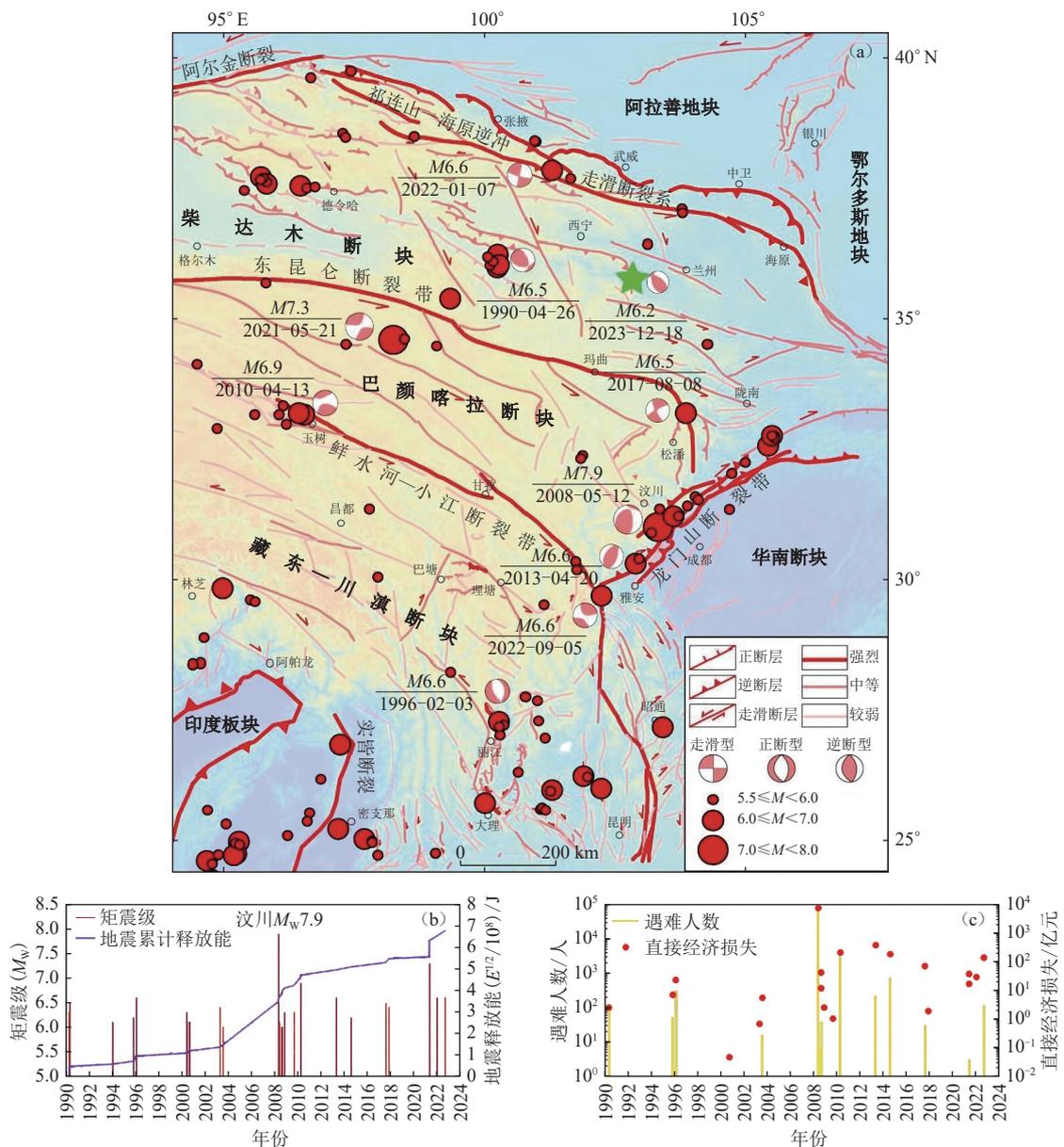
统计结果显示, 青藏高原东部及邻区(24.127°N~39.977°N, 94.043°E~109.072°E), 1990年以来共发生震源深度小于35 km的 $M_{\text{W}} \geq 5.5$ 中强震110次、 $M_{\text{W}} \geq 6.0$ 强震29次和 $M_{\text{W}} \geq 6.5$ 强震9次(图1a), 其中绝大部分发生在我国境内, 所占比例分别为85%、83%和100%, 最大地震为2008年的四川汶川地震, 其中 $M_{\text{W}} \geq 6.0$ 强震累计造成的直接经济损失约9733亿元, 遇难人数约91800人。而且2008年汶川大地震之后, 青藏高原东部及邻区的强震活动相比之前出现了较明显的频度增加趋势(图1b), 造成的经济损失和遇难人数也呈现出明显增多现象(图1c)。尤

其是出现在人口相对密集区的强震活动, 即使相对较低的震级( $M_{\text{W}} < 7.0$ ), 也会造成严重的人员伤亡, 如汶川地震后发生的玉树地震、芦山地震和鲁甸地震等, 而近期发生的甘肃积石山6.2级地震, 更是导致了151人遇难。而全面了解“强震在哪, 危险性如何?”是有效防范和减轻强震灾害风险的重要前提。因此, 深入研究青藏高原东缘及邻区的强震构造及其特征, 不仅对于掌握该区的强震活动规律和预判未来强震位置及危险性具有重要科学意义, 更有助于为城镇规划和重大工程建设防范或减轻相关强震灾害风险提供关键科学依据。

## 1 青藏高原东缘及邻区的强震构造特征

活动断裂研究和GPS观测成果表明<sup>[4-9]</sup>, 青藏高原的现今地壳变形样式属于典型的陆陆碰撞-挤出活动构造体系(或称为“块体楔入-挤出构造体系”)<sup>[10]</sup>, 而青藏高原内部物质的向东挤出主要被高原东部多条大型左旋走滑断裂系与邻侧断块构成的“挤出-旋转构造体系”所调节, 并将青藏高原的向东挤出运动向东传递, 从而进一步影响到华北和华南断块的现今地壳变形样式和运动状态<sup>[8]</sup>。

青藏高原东部的“挤出-旋转构造体系”从北到南包含了祁连-海原逆冲-走滑断裂系与南侧柴达



(a) 中强地震活动与主要活动断裂；(b)  $M_w \geq 6.0$  强震的  $M-t$  图和地震累积释能曲线；  
(c)  $M_w \geq 6.0$  强震造成的直接经济损失和遇难人数统计图

(a) Moderate to strong earthquakes activity and major active faults; (b)  $M-t$  map and cumulative release energy curve of strong earthquakes with  $M_w \geq 6.0$ ; (c) Statistical chart of direct economic losses and fatalities caused by earthquakes with  $M_w \geq 6.0$

图 1 青藏高原东部及邻区强震活动图

Fig. 1 Strong earthquakes activity map in eastern margin of Tibetan Plateau and adjacent areas

木断块、东昆仑断裂带—龙门山断裂带与西南侧的巴颜喀拉断块、鲜水河—小江断裂系与西南侧的藏东—川滇断块，3 个次级挤出—旋转构造体系(图 1a)。该构造体系西南侧被喜马拉雅前缘逆冲断裂带和近南北向的实皆右旋走滑断裂带所围限，东北与鄂尔多斯地块及邻侧的河套—银川裂谷相接，东侧则被华南断块所阻。由于边界条件的差异，导致青藏高原

东部北、中、南不同部位次级构造体系及其中断块的变形方式存在明显差异(图 1a)。北部的柴达木断块北部和东北侧分别受到阿拉善地块和鄂尔多斯地块的阻挡，在沿祁连—海原逆冲—走滑断裂系向东挤出的同时，内部主要表现为压扭变形，存在明显的北东向缩短变形，发育了许多北西向逆冲断裂，并伴有北西向右旋走滑断裂和北东向左旋走滑断裂等次级活

动断裂。中部的巴颜喀拉断块在沿东昆仑断裂带向东滑移过程中,由于东侧被华南断块阻挡,沿北东向的龙门山断裂带及邻侧产生了明显的逆冲和挤压褶皱变形,而断块内部以走滑剪切变形为主。而东南部的藏东—川滇断块南部属于相对松弛的边界,其在鲜水河—小江断裂系控制下主要向东南挤出,并围绕东喜马拉雅构造结发生顺时针旋转运动,内部表现出张扭变形特征,主要发育更为复杂的正断层和弧形走滑断裂系统<sup>[9]</sup>,包括藏东地区的北西向左旋走滑断层、北东向右旋走滑断层及近东西向正断层,至川滇地区,转变为北西向右旋走滑断裂、北北东向左旋走滑断层和近南北向正断层。

青藏高原东部的“挤出-旋转构造体系”作为区域主要控震构造,明显控制了区域上1990年以来的强震活动(图1a)。中强震活动都发生在该构造体系的主要边界断裂带及断块内部次级断裂带上,而其中绝大部分 $M_w \geq 6.5$ 强震发生在边界断裂带上,断块内部以发生 $M < 6.5$ 的中强地震为主,仅出现少量 $M_w \geq 6.5$ 强震,包括出现在柴达木断块中的1990年青海共和 $M_w 6.5$ 地震和川滇断块中的1996年云南丽江 $M_w 6.6$ 地震,最新一次强震是近期发生在柴达木断块东北部西宁—兰州次级断块内部拉脊山北缘断裂带上的甘肃积石山6.2级地震。因此,青藏高原东部的“挤出-旋转构造体系”中以左旋走滑为主的边界断裂带由于规模大且活动性强,是区域上 $M_w \geq 6.5$ 强震活动的主要场所,因而应该是防大震的重要对象,而断块内部虽然次级断裂规模相对小且活动性弱,但断裂数量多,地震活动会相对频繁,而且断块内部还常常是城镇相对密集的区域,因而其中-强地震危险性及其灾害风险也不容忽视。

## 2 研究进展

近年来,伴随全国地震灾害风险普查、城市活断层探测、地震科学实验场建设、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,显著提升了青藏高原东缘及邻区强震构造的调查研究程度。为了及时交流这方面的最新研究成果,支撑服务区域防震减灾及重要工程和基础设施建设的地质安全评价等工作,《地震科学进展》编辑部特邀中国地质科学院地质力学研究所的吴中海研究员和钟宁副研究员,中国地震局地质研究所的何仲太研究员和

俞晶星副研究员,甘肃省地震局的张波副研究员,共5位中青年编委作为召集人,组织了“青藏高原东缘及邻区强震构造”成果专辑,征集了活断层与地震、甘肃积石山地震以及相关领域研究综述等代表性学术论文20余篇,本期《青藏高原东缘及邻区强震构造专辑I》优选了首批的10篇论文,这里将相关研究进展简述如下。

### 2.1 活断层与地震

地震主要是岩石圈变形过程中断层活动的表现,因而活断层构成了区域主要控震构造以及强震活动的主要场所。因此,查明区域活断层的位置、最新活动性及古地震复发特性,了解区域活动构造体系及其控震特征,是认识区域强震活动规律,分析评价区域未来强震危险性的关键。此次专辑征集了相关领域论文6篇,主要研究成果如下。

#### 2.1.1 从活动构造体系角度揭示近年来青藏高原的强震活动规律

从活动构造体系角度深入认识区域未来强震活动趋势,对于防震减灾具有重要科学意义。吴中海研究员对青藏高原及邻区1900年以来的 $M \geq 6.0$ 强震活动及其发震构造进行深入分析后发现<sup>[10]</sup>,青藏高原自1950年西藏墨脱—察隅8.6级地震以来整体处于相对缓慢的地震能释放期,但1990年以来强震释放能开始出现逐步增高趋势,而青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系中的“多层次挤出-旋转活动构造体系”是此轮强震活动的主要控震构造,其中巴颜喀拉挤出构造单元的强震活动最为显著。据此推断,青藏高原“多层次挤出-旋转活动构造体系”的强震活动趋势未来一段时期内仍会持续,因而需重视构成挤出块体边界的3条大型左旋走滑断裂带,阿尔金—祁连—海原断裂系、东昆仑断裂带和鲜水河—小江断裂带上出现更大强震震害风险的可能性。这一研究成果为更好地从区域上认识强震的时空迁移特征及判断未来最可能出现的构造部位提供了新的视角和参考<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.2 提出2017年青海泽库 $M_s 4.9$ 地震控震构造及区域活动断裂构造格局新认识

了解中强震的地震构造成因是认识区域活动断裂格局的重要途径之一。张波副研究员等通过活动断裂遥感解译和野外考察,在2017年青海泽库 $M_s 4.9$ 地震的震中附近新发现可能属于夏河断裂西端构造的近EW向和NW向断裂,并利用双差定位方法对泽库 $M_s 4.9$ 地震序列进行重定位解释,揭示夏河断

裂的三维几何形态和运动性质与地震序列的空间分布及震源机制等具有良好对应关系。进而提出夏河断裂的西延段落可能是泽库  $M_s4.9$  地震发震断裂, 夏河断裂可能属于西秦岭北缘断裂西端帚状散开的分支断层的新认识。该成果一方面为认识青海泽库  $M_s4.9$  地震的控震构造提供了新证据, 另一方面也对深入理解西秦岭断裂西延及其与日月山断裂几何学与运动学关系具有重要参考价值<sup>[11]</sup>。

### 2.1.3 探槽揭露河套地堑北缘大青山山前断裂土右旗西段的全新世古地震序列

大青山山前断裂是河套地堑东段土默特右旗一呼和浩特地堑北缘的主边界正断层, 晚第四纪活动性显著, 但古地震数据不足一直是制约认识其大地震复发规律和未来强震危险性的关键因素。姚赆胜助理研究员等通过大型古地震探槽开挖揭露了该断裂土右旗西段的全新世古地震序列, 综合新的光释光测年数据和前人资料, 并运用逐次限定法确定土右旗西段断裂距今约 11500 年发生了 5 次古地震事件, 平均复发间隔约 2260 年, 最新一次古地震事件可能是公元 849 年地震, 并进一步估算大青山山前断裂不同段落的潜在发震能力在  $M_w6.8\sim7.2$  左右。该成果不仅为认识大青山山前正断层的古地震复发规律提供了新资料, 同时也为评价区域强震危险性提供了关键科学依据<sup>[12]</sup>。

### 2.1.4 银川地堑东南缘断裂晚第四纪活动性研究新认识

银川地堑地处青藏高原东北缘与鄂尔多斯和阿拉善地块衔接部位, 认识该区断裂晚第四纪活动对于理解断块间相互作用具有重要意义。武治群工程师等通过地表调查、探槽开挖和第四纪定年等工作, 对银川地堑东南缘发育的面子山—清水营断裂及其晚第四纪活动性进行研究后认为<sup>[13]</sup>, 该断裂北段的面子山断层为兼有左旋走滑运动的高角度正断层, 而南段的清水营断层为逆断层, 并推断存在晚更新世活动。同时提出, 该断裂的形成与青藏高原东北缘的持续推挤扩展有关。该成果为认识银川地堑活动断裂格局提供了新资料和新观点。

### 2.1.5 2022 年青海门源 $M_s6.9$ 地震及其工程破坏效应研究新成果

2022 年青海门源  $M_s6.9$  地震造成了兰新铁路专线的桥隧工程严重破坏, 深入了解此次地震的同震地表破裂特征及工程破坏效应具有重要意义。殷翔

工程师等基于地震现场调查资料, 结合无人机低空摄影和余震数据等, 对发震断层硫磺沟段的地表破裂特征及铁路桥隧震害效应进行了分析, 提供了关于兰新高铁硫磺沟大桥和大梁隧道等工程破坏的新资料与新认识, 并对该地区的桥梁抗震设防措施提出了意见建议<sup>[14]</sup>。该成果对于更好地认识走滑型强震的工程破坏效应具有参考价值。

### 2.1.6 鄂尔多斯活动地块及边界带 1:50 万地震构造图编制新成果

地震构造图是了解区域地震构造环境及特征和开展地震危险性评价的基础性图件。雷启云正高级工程师等所在团队在国家重点研发计划“鄂尔多斯活动地块边界带动力学模型与强震危险性研究”项目的支持下, 系统收集整理地理、地质、活动构造、地震、地球物理等方面的最新资料, 结合高分辨卫星影像解译, 首次编制完成鄂尔多斯活动地块及边界带 1:50 万地震构造图<sup>[15]</sup>。该成果全面反映了由银川盆地—贺兰山、弧形构造束、渭河盆地、山西地堑系、河套盆地等活动构造单元组成的鄂尔多斯地块边界带的主要活动断裂及其特征, 给出了更为全面详细的区域活动断裂几何学与运动学图像, 建立了该区的地震构造数据库, 并提出区域地震构造环境与特征的新认识。相信这一成果不仅是区域地震构造研究方面的重要参考资料, 也必将会成为区域防震减灾方面的重要基础性图件。

## 2.2 甘肃积石山 6.2 级地震

2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分甘肃积石山发生  $M6.2$  地震, 发生在由海原断裂带、日月山断裂带和西秦岭北缘断裂带围限的西宁—兰州断块内部, 震中附近的主要控震构造是北西—北北西向的拉脊山逆冲断裂带。该地震是该区历史上发生的最大地震, 迄今共造成了 151 人遇难, 因而得到社会广泛关注。为了及时了解此次地震的发震构造和地表破坏特征等信息, 本专辑快速征集了 2 篇相关论文, 主要成果如下。

### 2.2.1 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源参数和破裂特征

甘肃积石山 6.2 级地震后, 中国地震局地球物理研究所积极组织相关领域研究人员快速分析了此次地震的震源参数、震源机制、破裂过程、余震序列和地震辐射能量等, 获得了余震序列重定位、基于震源模型的震动图模拟和同震形变场反演等的初步结果。郭祥云高级工程师等对此次评估结果的总结表

明<sup>[16]</sup>,此次地震震源深度较浅,能量集中在前约8 s内释放,并集中在浅层,因而震感强烈且灾害较为严重,极震区最大烈度可达Ⅷ度以上,地震的发震构造是拉脊山断裂带,以逆冲断层作用为主,地震引起较显著的同震变形,震源破裂长度近30 km,最大水平向位移达到7.8 cm、垂直向位移达到15.8 cm,但同震变形可能未延伸至地表。上述快速评估结果为及时了解此次强震的震源机制与破裂过程、地震能量释放特征和发震构造等提供了重要参考,也相应反映了我国当前对强震事件的快速反应能力。

### 2.2.2 甘肃积石山县6.2级地震的控震构造及特征分析

甘肃积石山6.2级地震后,中国地质科学院地质力学研究所立即组织相关专家,分析了震区及周边地区相关资料,形成关于发震断裂、构造应力场和未来地震趋势等方面的初步认识。在此基础上,陆诗铭博士研究生所在的活动构造研究团队进一步综合地震构造、地质、余震序列重定位、地震烈度等资料对积石山地震的控震构造及其特征进行了深入研究<sup>[17]</sup>。结果发现,此次强震是发生在青藏高原东北缘西宁—兰州断块内部的一次北北西向逆冲断层作用事件,距震中最近的拉脊山逆冲断裂带构成了此次地震的控震构造,而具体发震断层是整体倾向西南的拉脊山北缘逆冲断裂带南段东支断层。综合认为,此次积石山地震是印度与欧亚板块陆陆碰撞作用下,西宁—兰州断块沿海原断裂向东侧向滑移过程中,因受到鄂尔多斯地块阻挡,在东北向挤压构造应力场作用下引发日月山断层与西秦岭北缘断层构成的共扼走滑断裂系交汇部位逆断层活动的结果。此次强震指示青藏高原东缘挤出构造体系仍是近年来我国内陆强震活动的主要控震构造。该成果提出了关于此次发震断层及区域活动断裂格局的新认识,并可为深入理解断块内部强震机理和研判区域未来强震活动趋势提供参考。

## 2.3 强震构造相关方面的成果综述

除了上述活断层与地震以及积石山地震方面的代表性研究成果外,本专辑还包括了2篇综述类论文,具体如下。

### 2.3.1 滇藏铁路沿线重要活动断裂带及其晚第四纪活动性的总结分析

拟建滇藏铁路将穿越青藏高原东南缘强震区,沿线活动断裂发育且地质灾害频发,工程建设和运营将面临比较严峻的地质安全风险。张献兵博士研

究生所在的中国地质科学院地质力学研究所重大工程地质安全评价团队在系统收集分析前人研究成果的基础上,重点对拟建滇藏铁路的香格里拉一波密段的已知10条活动断裂带主要活动断裂带的几何展布、活动性质、滑动速率和古地震等进行了比较全面的总结分析<sup>[18]</sup>,并对部分断裂的晚第四纪活动性提出新认识,成果为全面了解滇藏铁路工程沿线区域的活动断裂研究现状及存在问题等具有参考价值。

### 2.3.2 湖泊沉积物灾害事件记录与识别方法方面研究进展与存在问题的总结分析

第四纪湖泊沉积层除了储存有指示气候变化的信息外,也同时记录了包括地震事件在内的多种自然灾害事件信息。李营营硕士研究生所在团队在回顾和总结湖泊沉积中自然灾害事件记录的已有研究基础上,进一步梳理分析了湖泊沉积中自然灾害事件识别方法,介绍了现阶段湖泊事件沉积识别的主要分析手段,并分析探讨了已有研究的优势与不足,该成果可为进一步深入了解如何利用湖泊沉积物识别灾害事件提供参考<sup>[19]</sup>。

## 3 展望

青藏高原东缘及邻区作为高原物质向东挤出的构造转换带和近几十年来我国内陆强震活动的主要控震构造,既是认识青藏高原最新构造变形样式的关键区域,也是我国的重点震害防御区,而且该区未来一段时期内的强震危险性和灾害风险依然严峻<sup>[10]</sup>。因此,持续关注和加强该区的强震构造相关研究无疑具有重要的科学意义和应用价值。

此专辑显然不能完全囊括青藏高原东缘及邻区强震构造领域,而是这一领域研究进展的缩影。综合这些新成果,反思最近甘肃积石山6.2级地震造成严重人员伤亡给予的教训可知,虽然近年来围绕该区的强震活动及其控震构造等取得了许多具有代表性的研究进展,但同时反映出当前我国地震地质研究领域存在的问题和亟需加强的一些薄弱环节。笔者认为在今后的强震构造研究中应至少有以下4个方面需要进一步加强。

(1)注意从更长时间尺度和地质演化角度认识断裂的活动性和强震危险性:青藏高原是处于不断演化过程中的活动造山带,其中的构造应力场和断裂构造等也必然处于动态演化中。在此过程中,断裂发育至少存在新生期、成熟期和消亡期3个演化阶段,处于不同演化阶段的断裂,其强震活动特征及危险

性等必然存在明显差异。新生断裂处于断裂扩展和活性增长过程中, 中强地震活动频率会不断增长; 成熟期的断层活性最强, 发震潜力和发震频率增加, 强震危险性最高; 而消亡期的断裂活性明显减弱, 发震能力和频率都会相应变低, 强震危险性也相应减弱。因而从更长时间尺度和地质演化角度来认识断裂的活性, 能够更好地理解或把握区域内不同断裂的强震危险性及其差异性。

(2) 加强对活断层体系和断裂间相互作用的研究: 从活动构造体系角度, 同一构造应力场作用下形成的不同断裂之间必然存在密切的几何学与运动学关系, 应属于同一构造体系。尤其对于板内构造环境而言, 同一构造体系中不同断裂间的相互作用常会导致强震相互触发, 从而出现强震丛集现象。如2022年的门源地震和此次积石山地震都属于西宁—兰州断块边界及内部地震, 前者处于日月山断裂与海原断裂交汇附近, 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(图1a)。因此, 从活断层体系角度, 需进一步关注该断块及其边界断裂的未来强震危险性, 尤其是晚第四纪活性显著的青海日月山断裂带<sup>[20]</sup>。

(3) 加强对断块内部非全新世断层或弱活动断层的调查研究和强震危险性评价: 因为断块边界断裂带的规模大, 全新世活动明显且强震活性强, 因而已有的强震构造研究往往更多集中在断块边界断裂带上。但2021年的云南漾濞6.4级地震和此次甘肃积石山地震两个典型强震皆发生在断块内部, 并且是前第四纪断层复活和非全新世断层发震<sup>[17, 21]</sup>。由于在断块内部往往城镇更为集中, 而非全新世断层, 甚至定义为早-中更新世或前第四纪断层, 在合适的应力场环境下, 同样可能具有发生强震的潜力。因此, 断块内部非全新世断层或弱活动断层的强震危险性不容忽视, 应加强研究。

(4) 进一步提升对断裂活性与发震潜力关系的认知: 准确判定断裂活性及其发震能力是进行强震危险性评价, 开展地震动区划和确定抗震设防水平的重要前提。而近年来的多个强震实例表明, 我们目前对断裂活性与发震潜力关系的认知程度仍然不足。这主要表现在一些强震出现在之前认为的非全新世断层和前第四纪断层上, 或高烈度地震出现在已有地震动区划图的低烈度区。同时也反映出断裂活动时代和发震能力并非必然关系, 判定断裂发震能力不能过度依赖断裂活动时代, 而区域构造应力场下的断裂潜在活动能力、断裂规模及其可承载的应力积累程度, 可能与其发震能力更为密切。

我们相信随着理论研究的深入和技术方法的进步, 通过相关领域专家学者的持续努力, 在青藏高原东缘及邻区强震构造领域会有更多更好的成果涌现, 也会不断弥补已有研究的不足和提升认识, 从而更好地支撑服务我国的防震减灾事业。

## 致谢

本专辑论文征集过程中, 得到《地震科学进展》主编李小军教授和编委会专家, 以及召集人所在单位和专业学会: 中国地质科学院地质力学研究所、中国地震局地质研究所、甘肃省地震局和中国地震学会地震地质专业委员会等的关心和支持, 受到了行内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、省级财政资金与人才基金等为主要研究成果提供了资助。多位同行专家对专辑论文进行了认真评审, 并为提升论文水平提出了宝贵意见与建议, 编辑部为此专辑的编撰出版付出了大量的辛勤劳动, 在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1988, 327(1594): 379-413
- [2] 尹安. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长[J]. *地球学报*, 2001, 22(3): 193-230  
Yin A. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen in the context of phanerozoic continental growth of Asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(3): 193-230
- [3] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 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*, 2013, 43(10): 1607-1620  
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental

- China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43(10): 1607-1620
- [4] Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B11): 5361-5375
- [5] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19(1): 113-157
- [6] Molnar P, Lyon-Caent H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins[J]. *Geophysical Journal International*, 1989, 99(1): 123-153
- [7] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812
- [8] 吴中海, 周春景. 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(图件编号: 00-01-05). 北京: 地质出版社, 2018
- Wu Z H, Zhou C J. Distribution map of active faults in China and its adjacent sea area (1:5000000)[M]/Hao A B, Li R M. Atlas sets of geological environment of China (map number: 00-01-05). Beijing: Geology Press, 2018
- [9] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 1-31
- Wu Z H, Long C X, Fan T Y, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 1-31
- [10] 吴中海. 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[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 10-24
- Wu Z H. The  $M_w \geq 6.5$  strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 10-24
- [11] 张波, 李启雷, 王爱国, 等. 西秦岭夏河断裂的西延活动特征——兼论2017年青海泽库 $M_s 4.9$ 地震成因[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 25-33
- Zhang B, Li Q L, Wang A G, et al. The western extension of Xiahe fault in West Qinling: Discussion on seismogenic structure of Qinghai Zeku  $M_s 4.9$  earthquake in 2017[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 25-33
- [12] 姚赞胜, 王爱国, 邵延秀, 等. 大青山山前断裂土右旗西段莲花山探槽揭露的古地震事件及年龄[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 34-44
- Yao Y S, Wang A G, Shao Y X, et al. Paleoseismic events and ages revealed by the Lianhuashan trench in the western section of the Tuyouqi of the Daqingshan piedmont fault[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 34-44
- [13] 武治群, 雷启云, 杜鹏, 等. 银川盆地东南缘面子山—清水营断裂活动性[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 45-56
- Wu Z Q, Lei Q Y, Du P, et al. Activity of the Mianzishan-Qingshuiying fault in the southeast margin of the Yinchuan basin[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 45-56
- [14] 殷翔, 绽蓓蕾, 姚生海, 等. 2022年1月8日青海门源 $M_s 6.9$ 地震序列、地表破裂特征及其工程效应[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 57-64
- Yin X, Zhan B L, Yao S H, et al. The earthquake sequence, surface rupture characteristics and engineering effects of the  $M_s 6.9$  Qinghai Menyuan earthquake on January 8, 2022[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 57-64
- [15] 雷启云, 郑文俊, 王银, 等. 鄂尔多斯活动地块及边界带1:50万地震构造图编制[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 65-74
- Lei Q Y, Zheng W J, Wang Y, et al. The compilation of 1:500000 seismotectonic map of the Ordos active block and boundary zone[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 65-74
- [16] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源参数和破裂特征[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 75-85
- Guo X Y, Han L B, Zhang X, et al. Source parameters and rupture characteristics of the  $M 6.2$  Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85
- [17] 陆诗铭, 吴中海, 李智超. 2023年12月18日甘肃省积石山6.2级地震的控震构造及特征[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 86-93
- Lu S M, Wu Z H, Li Z C. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023  $M 6.2$  Jishishan earthquake, Gansu Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 86-93
- [18] 张献兵, 于皓, 余潇, 等. 滇藏铁路沿线重要活动断裂带晚第四纪活动性初步研究[J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 94-109
- Zhang X B, Yu H, Yu X, et al. Preliminary study on the Late Quaternary activity of important active fault zones along the Yunnan-

- Tibet railway[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 94-109
- [19] 李莹莹, 李林林, 何仲太. 湖泊沉积的灾害事件记录与识别方法: 研究进展与存在问题 [J]. *地震科学进展*, 2024, 54(1): 110-123
- Li Y Y, Li L L, He Z T. Lacustrine sedimentary response to natural hazards[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 110-123
- [20] 韩帅, 吴中海, 高扬, 等. 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*, 2022, 28(2): 155-168
- Han S, Wu Z H, Gao Y, et al. 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*, 2022, 28(2): 155-168
- [21] 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021 年 5 月 21 日漾濞  $M_S6.4$  地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果 [J]. *地质力学学报*, 2021, 27(4): 662-678
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, et al. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi  $M_S6.4$  earthquake: Analysis results from the relocation of the earthquake sequence[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(4): 662-678