引用格式：郑文俊，孙鑫，袁道阳，等，2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境[J]. 地质力学学报，31（5）：1006−1029. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025124

Citation: ZHENG W J，SUN X，YUAN D Y，et al.，2025. Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：1006−1029. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025124

青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境

郑文俊[1,2]，孙　鑫[1,2]，袁道阳[3]，潘家伟[4]，王　虎[5]，吴传勇[6]，张竹琪[7,8]，郝　明[9]，何骁慧[1,2]，刘炳旭[1,2,10]，刘　浩[1,2]，张冬丽[1,2]，付碧宏[11]，李海兵[4]，陈立春[12]，李传友[7,8]

ZHENG Wenjun[1,2]，SUN Xin[1,2]，YUAN Daoyang[3]，PAN Jiawei[4]，WANG Hu[5]，WU Chuanyong[6]，ZHANG Zhuqi[7,8]，HAO Ming[9]，HE Xiaohui[1,2]，LIU Bingxu[1,2,10]，LIU Hao[1,2]，ZHANG Dongli[1,2]，FU Bihong[11]，LI Haibing[4]，CHEN Lichun[12]，LI Chuanyou[7,8]

1. 中山大学地球科学与工程学院，广东 珠海 519082；
2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室，广东 珠海 519082；
3. 兰州大学地质科学与矿产资源学院，甘肃 兰州 730000；
4. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037；
5. 西南交通大学地球科学与工程学院，四川 成都 610031；
6. 防灾科技学院，河北 三河 065201；
7. 中国地震局地质研究所，北京 100029；
8. 地震动力学与强震预测全国重点实验室，北京 100029；
9. 中国地震局第二监测中心，陕西 西安 710054；
10. 广东省地震局，广东 广州 510070；
11. 中国科学院空天信息创新研究院，北京 100094；
12. 桂林理工大学地球科学学院，广西 桂林 541006

1. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Sun Yat-sen University*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards*, *Zhuhai* 519082, *Guangdong*, *China*;
3. *School of Earth Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*;
4. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*;
5. *Faculty of Geosciences and Engineering*, *Southwest Jiaotong Unviersity*, *Chengdu* 610031, *Sichuan*, *China*;
6. *Institute of Disaster Prevention*, *Sanhe* 065201, *Hebei*, *China*;
7. *Institute of Geology*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100029, *China*;
8. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Strong Earthquake Prediction*, *Beijing* 100029, *China*;
9. *The Second Monitoring and Application Center*, *China Earthquake Administration*, *Xi'an* 710054, *Shaanxi*, *China*;
10. *Guangdong Earthquake Agency*, *Guangzhou* 510070, *Guangdong*, *China*;
11. *Aerospace Information Research Institute*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100094, *China*;
12. *College of Earth Sciences*, *Guilin University of Technology*, *Guilin* 541006, *Guangxi*, *China*

基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0901）；国家自然科学基金项目（42174062）

This research is financially supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP) (Grant No. 2019QZKK0901), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174062).

第一作者：郑文俊（1972—），男，教授，主要从事新构造、活动构造、构造地貌与地震危险性方面研究。

Email：zhengwenjun@mail.sysu.edu.cn

收稿日期：2025−09−02；**修回日期**：2025−09−18；**录用日期**：2025−09−28；**网络出版日期**：2025−11−03；**责任编辑**：范二平

Active faults, seismic activity, and seismotectonic environments in the Tibetan Plateau and its adjacent regions

Abstract: ［**Objective**］The early Cenozoic collision between the Indian and Eurasian plates triggered multi-stage uplift of the Tibetan Plateau, resulting in its remarkable landscapes and abundant mineral resources, while profoundly influencing climate, environment, and hazard evolution across Asia and beyond. The Tibetan Plateau and its surroundings have undergone intense tectonic activity and recurrent natural disasters, particularly earthquakes, which have significantly shaped its tectonic and geomorphic evolution. Seismic records indicate that more than half of the major earthquakes on the Chinese mainland and the surrounding regions occur within the plateau and its margins, controlled by the diverse types, scales, and distributions of active faults. ［**Methods**］This study synthesizes decades of research on active faults and earthquake hazards across the Tibetan Plateau. It builds on the results of the Active Faults and Earthquake Hazards theme of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), which provided detailed documentation of major active fault zones. This study integrated current deformation fields, seismicity, and stress regimes to examine the seismotectonic settings associated with strong earthquakes across different regions of the plateau. Based on this analysis, the future seismic hazard potential of the plateau was further evaluated. ［**Conclusion**］The image of active faults on the Tibetan Plateau indicates that different regions comprise fault systems with diverse scales, kinematics, and activity patterns. The tectonic settings associated with strong earthquakes have evolved through prolonged, multi-stage deformation, progressively establishing the present seismotectonic framework governing the nucleation and occurrence of large earthquakes. Current patterns of crustal deformation reveal northeastward deceleration with limited eastward extrusion of crustal blocks. Stress regimes, in contrast, are characterized by shear–extension in the interior and compression along the margins. Seismic hazard trends inferred from active tectonics and crustal deformation suggest a distinct segmented zonal pattern of strong earthquake activity, with plateau margins and fault-dense interiors representing the primary loci of future large earthquakes. Additionally, tectonic and geomorphic boundary zones demonstrate an increased likelihood for strong seismic events.

Keywords: active tectonics; seismic activity; seismotectonic environment; seismic hazard; Tibetan Plateau

摘　要：新生代初期印度板块和欧亚板块的碰撞导致了青藏高原多阶段的快速隆升，不仅造就了美丽的高原地貌景观，形成了丰富的矿产资源，同时也影响着亚洲大陆乃至全球的气候、环境及灾害演变。青藏高原及周边地区构造活动强烈、地震灾害频发，遍布于高原不同位置的地震，更是伴随着高原构造地貌格局的形成、演化和发展的全过程。已有强震记录表明，发生在青藏高原及周缘的强震占据了中国大陆及邻区强震的一半以上，而控制这些强震孕育和发生的是遍布高原不同位置、不同性质、不同规模的活动断裂（带）。通过总结多年来青藏高原活动断裂与地震研究成果，基于第二次青藏高原综合科学考察研究任务（九）之“活动断裂与地震灾害”专题获得的主要活动断裂带的空间分布、活动习性、地震灾害特征等最新资料，结合现今变形场特征、地震活动、应力场特征等，对高原不同区域的强震构造环境与变形特征进行总结，进而评估了青藏高原未来强震的危险趋势。结果显示，青藏高原不同区域强震构造环境的形成和演化均经历了长时间、多阶段的构造变形和演化过程，逐渐形成了现今复杂的活动构造图像及强震构造环境，并控制着不同区域强震的孕育和发生。青藏高原形变场特征显示，高原整体表现出向北东方向水平速率逐渐降低运动的同时，向东表现为块体的有限挤出，而应力场特征以高原内部的剪切拉张和周缘的挤压为主要特征。进一步分析活动构造和地壳形变特征给出的强震发生率揭示了青藏高原强震长期危险性趋势，高原强震活动表现为典型的分区、分块特点，高原周缘和内部的活动断裂密集区是未来强震发生的主要区域，而且高原周缘的构造地貌边界带未来强震活动有增强的趋势。

关键词：活动断裂；地震活动；地震构造环境；地震危险性；青藏高原

中图分类号：P546; P511.2; P315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)05−1006−24

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025124

0　引言

被称为“世界屋脊”“第三极”的青藏高原，是世界上海拔最高、面积最大、年代最新且仍在持续隆升和扩展的高原，其南起喜马拉雅山脉南缘，北至天山、昆仑山、阿尔金山和祁连山的北缘，高原西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉，东及东北部与

秦岭山脉西段和黄土高原相接(Yao et al., 2015; Chen et al., 2021a; 姚檀栋等, 2022)。青藏高原高山大川密布,地势险峻多变,地形复杂,其平均海拔远远超过同纬度周边地区,这充分表明了高原经历了长期而复杂的地质构造过程,逐步形成了现今复杂的构造地貌格局。青藏高原的隆升不仅塑造了美丽的自然景观,形成了丰富的矿产和自然资源,同时也影响了亚洲大陆乃至全球的气候、环境及灾害演变(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier et al., 2001; Zhang et al., 2001; Molnar, 2005; Yao et al., 2015; Chen et al., 2021a; 姚檀栋等, 2024)。伴随着青藏高原的隆升和构造活动而发育的数量众多、类型复杂的地质灾害广泛分布在高原内部及其边缘地带,对人类生活、生产及生态环境产生了巨大影响(张培震等, 2013, 2022; 郑文俊等, 2016, 2019; 崔鹏等, 2018; 彭建兵等, 2020)。

作为众灾之首的强震活动更是遍布于高原不同位置,并贯穿于青藏高原构造地貌格局演化和发展的全过程(Tapponnier et al., 2001; 邓起东等, 2002, 2014; 张培震等, 2003, 2013, 2022; 吴中海, 2019, 2024; 郑文俊等, 2019, 2020, 2022)。已有记录表明(邓起东等, 2003, 2009; 张培震等, 2003, 2013, 2022; 徐锡伟等, 2017; 郑文俊等, 2019, 2020, 2022),青藏高原及周缘发生的强震约占中国大陆及邻区强震总数的一半以上,这些强震的发生主要受控于活动断裂(带)。因此遍布青藏高原不同性质、不同规模的活动断裂是研究该区地震构造环境及减轻地震灾害的重要对象和核心内容。

第二次青藏高原综合科学考察任务(九)“地质环境与灾害”旨在查清青藏高原地质灾害本底,认清灾害发生规律,揭示成灾机制,为未来灾害风险预测和保障区域地质安全提供科学依据。然而,青藏高原自新生代初期开始,经历了多阶段和多期次的构造事件,形成了由古老造山带和现代活动构造共同组成的复杂构造体系(Yuan et al., 2013; Zheng et al., 2013; 郑文俊等, 2016, 2019, 2021; Wang et al., 2022),而且不同区域的岩石圈性质存在明显差异,结构十分复杂(柯小平等, 2009; Zhang et al., 2014; 滕吉文等, 2019; Cheng et al., 2021)。因此,此次科考任务(九)之“活动断裂与地质灾害”专题将准确了解和掌握青藏高原范围内活动断裂的空间分布、运动特征和活动习性等作为查清地震灾害本底的核心内容。文章基于以往调查研究成果,结合第二次青藏高原综合科学考察任务(九)之“活动断裂与地震灾害”专题的调查成果和研究进展,对青藏高原活动断裂的分布特征进行了总结;并结合高原地震活动和现今地壳变形特征,总结了青藏高原不同区域地震构造环境的形成过程和机制,建立了青藏高原区域应变场,并进一步评估了高原未来的强震活动趋势。

1 青藏高原的地质-地貌基本特征

青藏高原横贯欧亚大陆南部,位于特提斯构造域东段,是由板块裂解、拼合与碰撞形成的大型造山系统。其记录了古生代至新生代期间,一系列来自冈瓦纳(Gondwana)大陆北部裂解的块体向北漂移并拼合到欧亚大陆的过程,尤其是新生代印度板块与欧亚板块的碰撞,不仅导致喜马拉雅造山带强烈变形,而且形成了东西延伸约2000km、平均高度约5000 m的造山带(丁林等, 2017; 吴福元等, 2020; Meng et al., 2023; Ibarra et al., 2023; Hou et al., 2024)。同时,该造山系统也使亚洲大陆内部的古特提斯洋、中特提斯洋构造带复活,导致亚洲大陆内部数千千米宽的广阔地区发生强烈的构造变形(Molnar and Tapponnier, 1975; England and Houseman, 1986; Tapponnier et al., 2001)与快速抬升(Dewey et al., 1988; Harrison et al., 1992; DeCelles et al., 2001)。

青藏高原整体上由高原主体部分以及北部的天山组成。青藏高原主体部分在大地构造上大致以龙木错-金沙江缝合带为界分为南北2个构造区(王成善等, 2004; Reid et al., 2005; Roger et al., 2010; 许志琴等, 2013)。其中,高原主体的北部属于欧亚古陆南缘构造带,由祁连-柴达木、昆仑、巴颜喀拉3个主要构造带组成,该区是在早—中元古代结晶基底上发育了早古生代坳地槽,加里东运动时期地槽回返而形成褶皱基底,到了晚古生代时期逐渐转化为稳定的盖层。而南部包括羌塘、冈底斯和喜马拉雅3个主要构造带,该区在中—晚元古代结晶基底上整合递变,早古生代开始发育地台盖层,海相沉积一直延续到始新世(黄汲清和陈炳蔚, 1987; 肖序常等, 1988)。新生代初期,印度板块和欧亚板块发生碰撞,导致青藏高原逐渐形成。在这个阶段,特提斯洋开始向北俯冲插入欧亚板块之下,引起昆仑山脉和可可西里的隆起。新生代中后期,陆陆碰撞的远程效应逐渐传递到高原北部,导致北部柴达木-

祁连山地区的多阶段变形，逐步形成了目前的构造地貌格局（Yuan et al., 2013; Zheng et al., 2013; 郑文俊等, 2016, 2019; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2022）。而高原北部的天山是既古老而又年轻的山系，其形成演化主要经历了 3 个大的发展阶段，即古生代的褶皱隆起阶段、中生代古近纪剥蚀夷平阶段、新近纪—第四纪初的断块隆升阶段。断块隆起阶段也标志着青藏高原向北扩展的远程效应开始显著影响天山地区，最终形成了现今天山山脉强烈活动的构造系统和宏伟壮观的地貌特征（Yin et al., 1998; 肖文交等, 2019; Wu et al., 2021）。

由于受不同规模和类型构造的长期作用影响，青藏高原整体地势呈现出由西北向东南倾斜的趋势，并表现出西高东低、南高北低的特点（刘静等, 2009）。地貌特征上，相对于高原边缘区的起伏不平，高原内部反而是起伏度较低的区域。高原边缘区有多个巨大的高山山脉，根据走向可分为东西向和南北向，前者占据了青藏高原的大部分地区，后者主要分布在高原的东南部及横断山区，这 2 组山脉组成了高原边缘地貌的整体框架。山脉之间则为数量众多的宽谷、盆地和湖泊，而区域性的活动断裂则多与山脉近平行发育，并控制着山间断陷盆地或谷地的形态（Wang et al., 2017b; Zhang et al., 2017; 张会平等, 2022）。北部的天山平均海拔约为 4000 m，山脉内发育有众多轮廓大多呈菱形或条带状的山间盆地和谷地，并且长轴方向多与山脉两侧构造带走向一致，指示其主要由活动断裂控制，并构成了强震活动的主要区域（Wu et al., 2018, 2020; Lu et al., 2020, 2022）。

地震记录显示，发生在青藏高原及边缘地带的强震约 2000 次，其中 8 级及以上大震 15 次，7～7.9 级地震近百次（邵志刚等, 2020; 袁道阳等, 2020; 郑文俊等, 2020; 李海兵等, 2021）。频繁发生的强震给高原及周边地区造成重大的人员伤亡和财产损失。活动断裂不仅是强震的主要危险源，也是引起地表变形并伴生多种类型次生地质灾害的主要地质构造因素，而且活动断裂发育的区域，往往也是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发区域。尤为典型的是 2008 年汶川 M 8.0 地震和 2015 年尼泊尔 M 8.1 地震，断裂活动引起的强震及其伴生的多种类型链生地质灾害呈现高频发生的现象（崔鹏等, 2008; Ohsumi et al., 2016）。

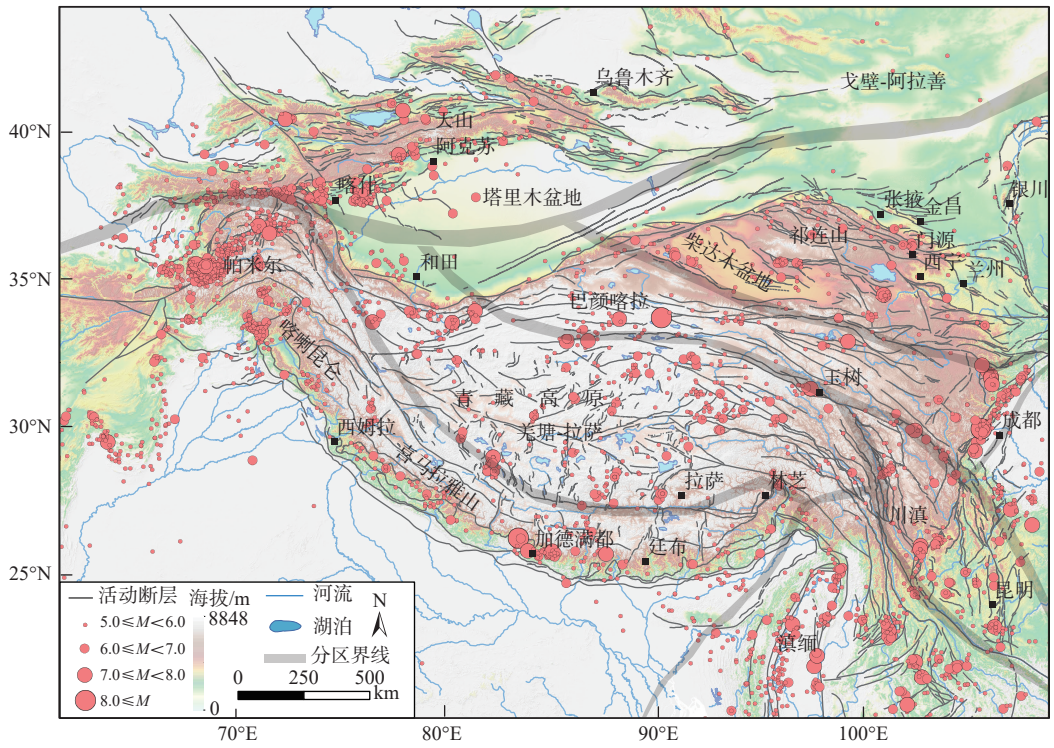
2　青藏高原的活动断裂与地震构造特征

青藏高原及周边地区自新生代以来构造活动强烈、地震等自然灾害频发（张培震等, 2013, 2022）。现今的青藏高原由多个活动地块（区）组合而成，活动地块边界发育了众多规模、性质和活动性等都不尽相同的活动断裂（带）（郑文俊等, 2020, 2022），而组成青藏高原的活动地块差异运动和变形是青藏高原大地震孕育的地质构造基础，大地震主要沿活动地块边界断裂带发生（图 1）。因此，本文参考活动地块的划分方案（张培震等, 2003; 郑文俊等, 2022），兼顾相互间的构造变形关系、地貌属性等，将青藏高原划为 7 个分区：祁连山−柴达木、巴颜喀拉、川滇、羌塘−拉萨、帕米尔−喀喇昆仑−喜马拉雅山、滇缅、天山，分区总结其主要断裂的活动性及区域地震构造环境特征。

2.1　祁连山−柴达木地块区

该区北以阿尔金−祁连山−六盘山断裂带为界，南以东昆仑断裂带为界，是青藏高原向北部欧亚大陆内部持续挤压扩展的前缘部位（图 2），遍布全区的第四纪晚期逆冲断裂、走滑断裂和活动褶皱等表明该区正在经历强烈的地壳缩短和剪切变形作用（Yuan et al., 2013; Zheng et al., 2013），不但导致主边界断裂发生左旋走滑，还在地块内部形成性质各异的活动断裂带，并控制了区内的盆山构造地貌和强震活动（郑文俊等, 2016）。

按照构造部位和活动性质的差异，该区主要活动断裂可分为北东东—近东西向左旋走滑断裂、北北西向右旋走滑断裂和北西向逆冲断裂 3 组（图 2）。其中北东东—近东西向左旋走滑断裂主要包括阿尔金断裂、祁连−海原断裂、东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂共 4 条边界左旋走滑断裂。4 条断裂的滑动速率往往在中段高且稳定，向端部逐渐降低至 1～2 mm/yr（Zheng et al., 2013; Liu et al., 2022），并转换到逆冲断裂、褶皱带或呈帚状分叉的次级走滑断裂（Zheng et al., 2013）。北北西向右旋走滑断裂主要包括鄂拉山断裂和日月山断裂，其右旋走滑速率一般为 1～3 mm/yr（Yuan et al., 2011; Liu et al., 2025），夹持在近东西向主边界断裂之间，可能形成了地块内部左旋剪切压扁或书斜式变形作用（Chen et al., 2021b）。北西向逆冲断裂主要发育于近东西向边界走滑断裂之间和端部，如祁连山西段的党河



图中活动断裂基于邓起东等(2002)和吴中海(2019)等基础上修改完善，并增加了第二次青藏高原综合科学考察研究项目的最新成果；地震数据在中国地震台网中心(http://data.earthquake.cn)基础上，部分进行了重新定位

图 1 青藏高原及邻区活动断裂与强震分布图

Fig. 1 Map of active faults and strong earthquakes in the Tibetan Plateau and its adjacent regions

The active faults in the figure have been modified and improved based on Deng et al., 2002 and Wu, 2019, and the latest results of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program have been added. Seismic data comes from the China Earthquake Networks Center (http://data.earthquake.cn); some earthquakes have been repositioned.

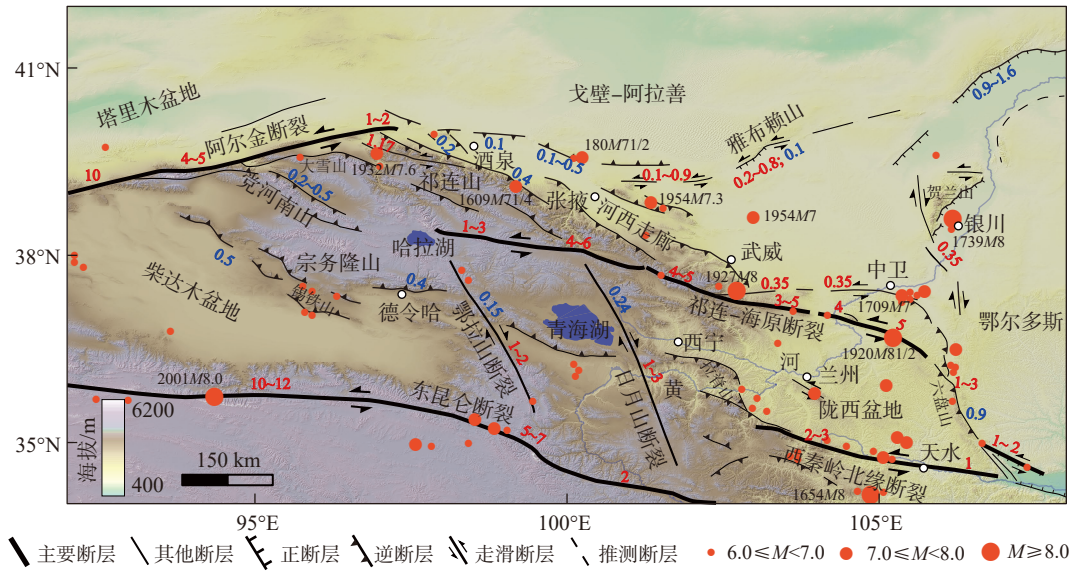
南山断裂、野马河−大雪山断裂和祁连山北缘断裂带等，单条逆冲断裂的逆冲或缩短速率相对较小，一般为 0.5～1.0 mm/yr(郑文俊等，2016)。上述不同走向和性质的活动断裂(带)构成了区域上历史及现代强震的主要发震构造带，如沿祁连−海原断裂发生过 1920 年海原 8½级、1927 年古浪 8 级和 2022 年门源 M_S 6.9 地震等(袁道阳等，2023)，沿祁连山北缘的佛洞庙−红崖子断裂曾发生 1609 年红崖堡 7¼级地震(Li et al., 2021)。

在上述 3 组活动断裂的控制和影响下，祁连山−柴达木活动地块内还发育了一些较为特殊的活动构造带或构造转换区(袁道阳等，2004)。比较典型的包括：南祁连−柴达木挤压逆冲构造区，该区发育了多条以挤压逆冲为特征的活动构造带，如大柴旦断裂、锡铁山断裂、宗务隆山南缘断裂及怀头他拉活动褶皱−逆断裂带等(姚生海等，2020)；拉脊山−六盘山弧形挤出构造区，该区为一组向北东方向突出的弧形构造带，如拉脊山、庄浪河和六盘山弧形断裂带(袁道阳等，2004)；甘东南的“V”字型构造转换区，该区主要发育了北西西向逆左旋走滑断裂和北东东向的逆右旋走滑断裂，其复杂的构造几何形态主要受控于西秦岭北缘断裂和东昆仑断裂东段的相互作用(Zheng et al., 2016)。

2.2 巴颜喀拉地块区

巴颜喀拉活动地块四周均由规模较大的活动断裂所围限(图 3)，主要包括了北边界东昆仑断裂、南边界甘孜−玉树−鲜水河断裂带、西边界阿尔金断裂中西段、东边界龙门山断裂带，其中东边界断裂以逆冲变形为主，其余边界断裂以走滑运动为主。

北边界的东昆仑断裂东西向延伸约 2000 km，其中段左旋走滑速率为 10～12 mm/yr，向东逐渐降低(Kirby et al., 2007)。沿该断裂自 20 世纪以来已发生 7 次 $M\geqslant7.0$ 地震事件，最大地震为 2001 年昆仑山口西 M_S 8.1 地震(Pan et al., 2022)。地块西边界阿尔金断裂由多条次级断裂组合而成，其左旋滑动速率西段大于东段，走滑速率转换部位位于阿克塞

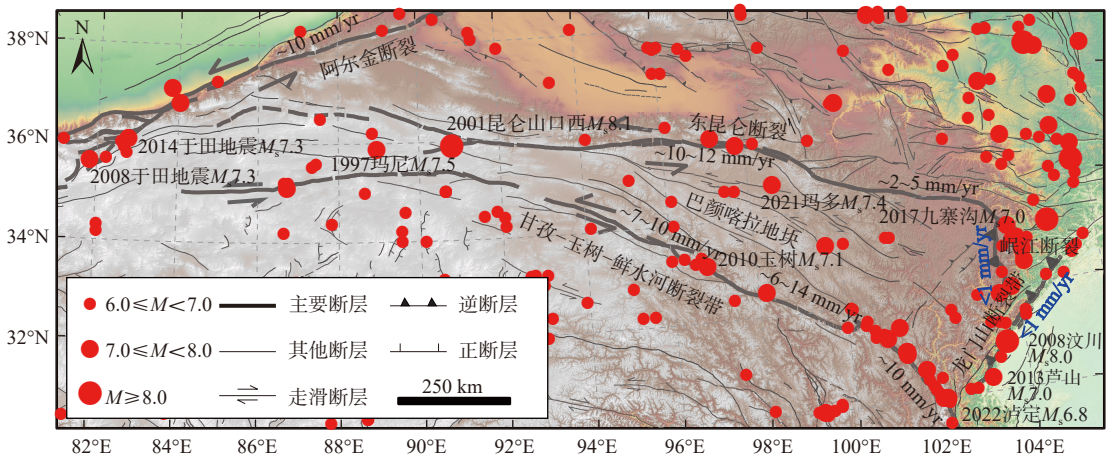


图中红色数字代表断层走滑速率（单位 mm/yr），蓝色数字代表断层逆冲（垂直）速率（单位 mm/yr）；图中断层滑动速率及断层分布来源于 Zheng et al.（2013）和郑文俊等（2016, 2019）对已有成果的总结，并增加了部分第二次青藏高原综合科学考察研究项目的最新成果

图 2　祁连山—柴达木区域主要活动断裂及运动特征

Fig. 2　Main active faults and movement characteristics in the Qilianshan–Qaidam basin

The red numbers represent the strike-slip rate (unit: mm/yr) of the fault, and the blue numbers represent the thrust (vertical) rate (unit: mm/yr) of the fault. The slip rates and fault distributions shown are derived from a summary of previous results by Zheng et al.,2013, 2016, 2019, and include some of the latest results from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program.



图中黑色数字代表断层走滑速率，蓝色数字代表断层逆冲（垂直）速率；图中断层滑动速率及断层分布来源于已有研究成果（周荣军等，2000; Kirby et al., 2007; 王虎等，2011; Li et al., 2016; 李峰等，2018; Liu et al., 2020），并增加了部分第二次青藏高原综合科学考察研究项目最新成果

图 3　巴颜喀拉地块周缘主要断裂及运动特征

Fig. 3　Main faults and movement characteristics around the Bayan Har Block

The black numbers represent the strike-slip rate of the fault, and the blue numbers represent the thrust (vertical) rate of the fault. The slip rates of the main faults are sourced fromZhou et al., 2000; Kirby et al., 2007; Wang et al, 2011; Li et al., 2016; Li et al., 2018; Liu et al., 2020, and include some of the latest results from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program.

段，由西段约 10 mm/yr 的滑动速率降低到肃北县城附近的 4～5 mm/yr，并向北东进一步降低（Liu et al., 2020）。地块南边界西段具有弥散性和不确定性，东段为甘孜–玉树–鲜水河断裂带，整体呈北西西—北西向展布，由多个次级断裂段组成，近 300 年来发生过 M≥7.0 以上地震 8 次，最近发生的地震为 2010 年玉树 M_S7.1 地震和 2022 年泸定 M_S 6.8 级地震。甘孜–玉树–鲜水河断裂带西段的左旋滑动速率相对较高，

可达到约14 mm/yr, 而南东段左旋滑动速率逐渐降低至10 mm/yr(Bai et al., 2021)。地块东边界龙门山断裂带属于具有右旋走滑分量的逆冲断裂带, 由汶川−茂汶、映秀−北川、江油−灌县断裂和山前隐伏断层组成, 这4条断裂向下呈铲形汇合于约18～20 km深的滑脱面上。汶川−茂县断裂最新活动时间为晚更新世中晚期(王旭光等, 2017), 其余3条为全新世活动断层。映秀−北川断裂和江油−灌县断裂右旋滑动速率均小于1 mm/yr, 是2008年汶川*M*8地震的发震构造; 山前隐伏断层在全新世以来的倾滑和水平速率分别为1.1±0.2 mm/yr和1 mm/yr(Li et al., 2016)。另外龙门山断裂带南段发生了2013年芦山*M*s7.0地震, 其中大川−双石断裂为全新世活动断裂, 其垂向位移速率约为0.6 mm/yr(Wang et al., 2015)。龙门山断裂带北侧还发育近南北向的岷江断裂和虎牙断裂, 这2条断裂皆为左旋逆冲断裂, 前者左旋走滑与垂向抬升速率相当, 为0.7～0.9 mm/yr(李峰等, 2018), 后者的垂向和水平位移速率约分别为0.5 mm/yr和1.4 mm/yr(周荣军等, 2000)。

整体上由于印度板块与欧亚板块的持续挤压碰撞效应叠加了四川盆地刚性地块的阻挡效应, 从而控制着巴颜喀拉地块物质向东的有限挤出。因此巴颜喀拉地块南北边界断层主要表现为剪切变形, 即走滑运动, 而东边界龙门山断裂带主要表现为挤压性变形, 即以逆冲运动为主。

2.3 川滇地块区

川滇活动地块主要由以下几个边界断裂(带)围限(图4), 北边界鲜水河断裂带、东边界安宁河−则木河−大凉山−小江断裂带、西边界金沙江−红河断裂带, 上述边界断裂带第四纪晚期以来变形强烈并主要表现为走滑运动。

地块东边界的安宁河断裂呈近南北向展布, 左旋和垂直滑动速率分别为4～6.2 mm/yr和0.9～1.4 mm/yr(冉勇康等, 2008)。则木河断裂呈北北西向展布, 左旋走滑速率为2.4～3.6 mm/yr(王虎等, 2011)。安宁河断裂与则木河断裂交汇处的西昌一带记录了1536年7½级地震和1850年7½级地震。大凉山断裂带走向北北西向, 左旋走滑速率为3～5 mm/yr(魏占玉等, 2012)。上述断裂向南与近南北向小江断裂带交汇, 左旋滑动速率达到14～22 mm/yr, 该断裂历史上曾发生过多次强烈地震, 包括1833年嵩明8级地震、1733年东川7¾级地震等(谭鑫等, 2023)。

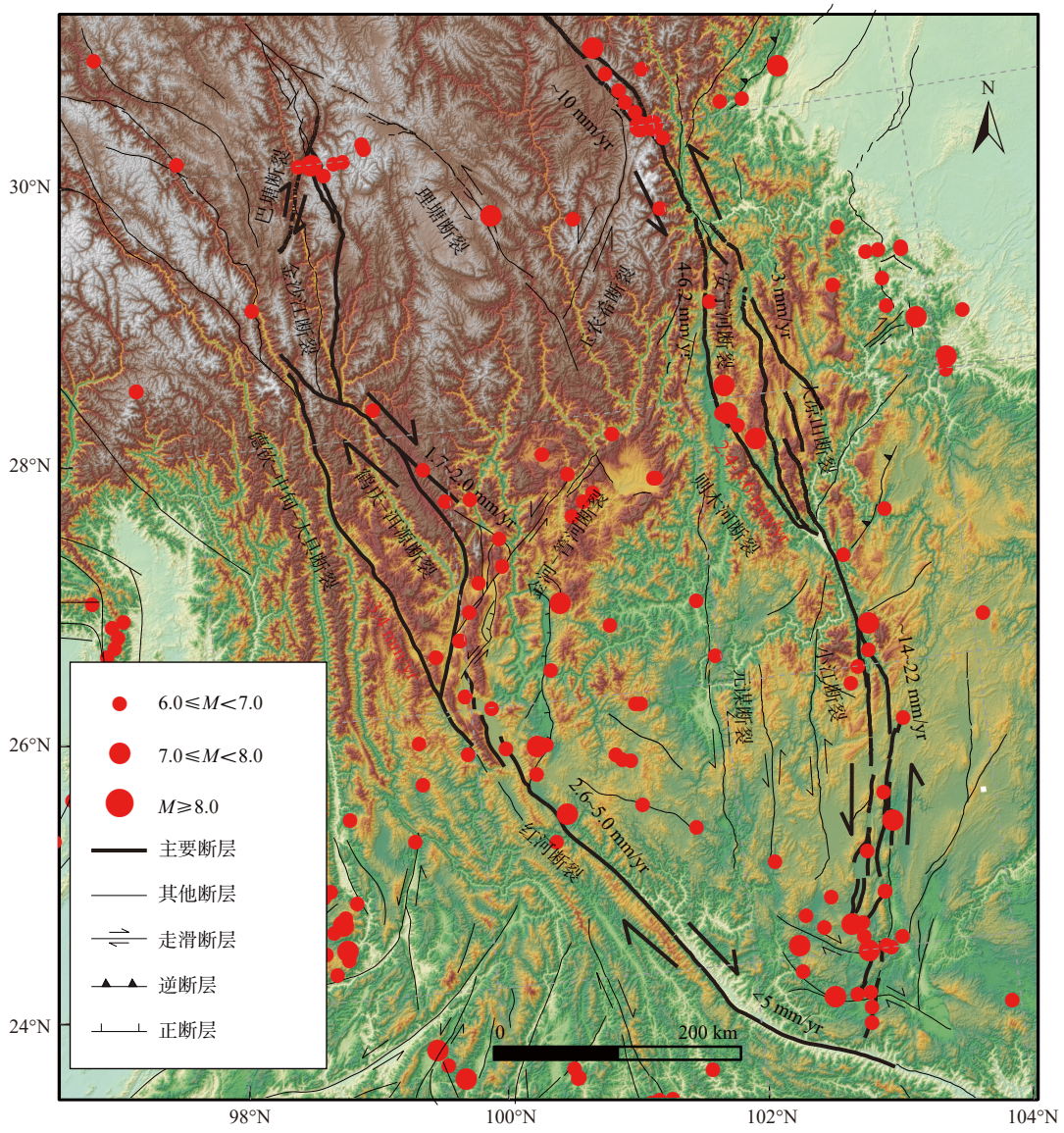
地块西边界金沙江断裂带总体走向近南北向, 巴塘以北段的主要活动时代在新近纪至第四纪早期, 少数次级断裂的最新活动可能延至晚更新世。巴塘以南段则发现全新世活动证据, 历史上曾发生过多次6～7级地震。其中的巴塘断裂呈北北东向, 历史上发生6级以上强震7次, 最大为1870年巴塘7¼级地震。西边界在丽江一带的变形特征相对复杂, 其中德钦−中甸−大具断裂带走向北西向, 晚更新世以来右旋滑动速率为1.7～2.0 mm/yr, 垂直滑动速率为0.6～0.7 mm/yr(程理等, 2020)。龙蟠−乔后断裂总体呈北北东—南南西走向, 推断该断裂左旋走滑速率约为3.4 mm/yr(何付明和常祖峰, 2022)。鹤庆−洱源断裂呈北西走向, 左旋滑动和正断速率分别约为0.28 mm/yr和1.80 mm/yr(魏永明等, 2017)。程海断裂带北段为北西走向, 南段为近南北向, 两段左旋滑动速率分别约为0.2～1.4 mm/yr和0.09～0.69 mm/yr, 该断裂在1515年发生了永胜7¾级地震外, 历史上曾发生3次6～7级地震(黄小巾等, 2018)。红河断裂大致沿红河展布, 向南东向延伸至境外, 可分为北段(洱源−弥渡断裂)、中段(苴力−大斗门断裂)和南段(春元−河口断裂), 北段为全新世中、晚期活动断裂, 晚更新世以来平均右旋走滑速率约为2.6～5.0 mm/yr, 平均垂直位移速率约为5.2～7.4 mm/yr, 历史上该段发生过1925年大理7级和1652年弥渡南7级地震, 该断裂南段为全新世活动断裂, 第四纪晚期以来滑动速率不超过5 mm/yr(李西等, 2016; Shi et al., 2018)。

综合认为由于印度板块与欧亚板块的持续挤压碰撞效应以及东部四川盆地的阻挡, 青藏高原东边界向东南方向发生挤出, 导致川滇活动地块主要边界断层的变形方式以剪切运动为主, 即北边界−东边界以左旋走滑为主, 而西边界以右旋走滑为主, 在上述构造格局控制下该地块主要发生走滑型为主的强震。

2.4 羌塘−拉萨地块区

青藏高原中部主要由拉萨地块、羌塘地块以及中间的班公湖−怒江缝合带组成(图5)。中新世晚期以来, 该区域发育了一系列北东向或北西向走滑断裂和近南北向正断层, 并伴随裂谷和地堑发育(Taylor et al., 2003)。

该区走滑断裂系统主要包括北东向的左旋走滑断裂和北西向的右旋走滑断裂。在北东—南西向左旋走滑断裂中, 日干配错断裂全长约360 km,



图中黑色数字代表断层走滑速率；图中断层滑动速率及断层分布来源于已有文献（冉勇康等，2008；王虎等，2011；魏占玉等，2012；李西等，2016；Shi et al., 2018；程理等，2020），并增加了部分第二次青藏高原综合科学考察研究项目的最新成果

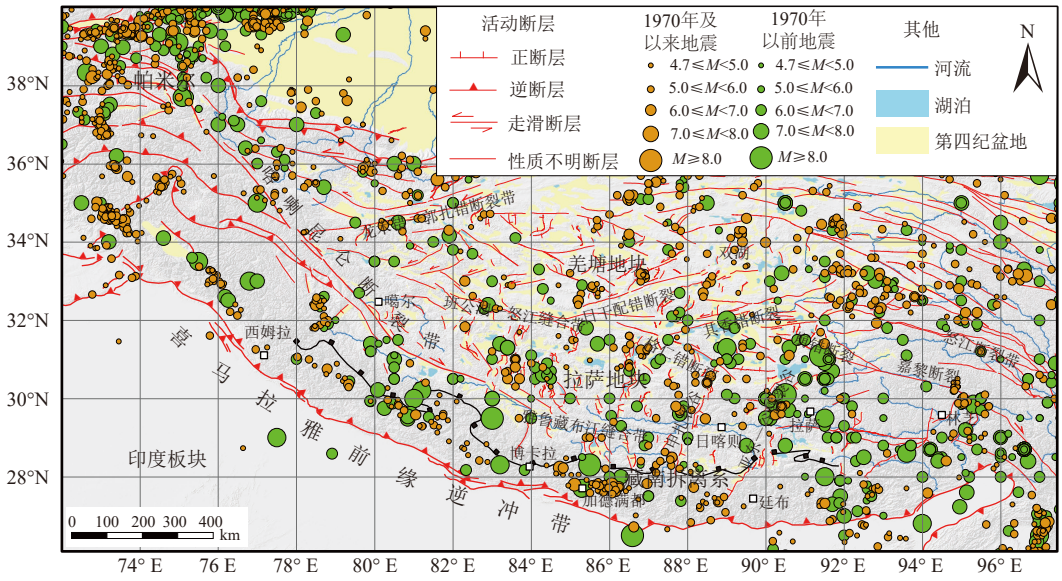
图 4　川滇活动地块主要断裂及运动特征

Fig. 4　Main faults and movement characteristics around the Sichuan–Yunnan Block

The black numbers represent the strike-slip rates of the faults. The slip rates of the main faults are sourced from Ran et al., 2008; Wang et al., 2011; Wei et al., 2012; Li et al., 2016; Shi et al., 2018; Cheng et al., 2020, and include some of the latest results from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program.

总体走向为NEE60°～70°，第四纪晚期以来的走滑速率为 0.2～0.3 mm/yr（刘富财等，2022；Tang et al., 2024）；其香错断裂长度大于 300km，走向大致为 NEE70°～75°，第四纪晚期走滑速率为 2～3 mm/yr（Li et al., 2024a）。在北西—南东走向右行走滑断裂中，格仁错断裂延伸总长度约 250 km，第四纪晚期南西段走滑速率为 2～3 mm/yr（Shi et al., 2014），南东段走滑速率为 0.5～1.0 mm/yr（Wang et al., 2021）；崩错断裂长约 230 km，走向约 SE120°，第四纪晚期崩错断裂走滑速率为 4.8±0.5 mm/yr（Li et al., 2022a, 2022b），1951 年崩错 7¾级地震使崩错断裂北拉–谷露段发生破裂，形成长约 80 km 的同震地表破裂带。

近南北向正断层及伴生的裂谷或地堑构造几乎遍布地块内部。例如，藏北羌塘地块中的双湖地



图中断层资料据已有文献（Taylor et al., 2003; 吴中海等, 2009; Shi et al., 2014; Chevalier et al., 2020）修改，并增加了部分第二次青藏高原综合科学考察研究项目的最新成果；图中地震数据来源于中国地震台网中心（http://data.earthquake.cn）

图5 羌塘、拉萨及帕米尔–藏南主要活动断裂与强震分布

Fig. 5 Main active faults and strong earthquakes in the Qiangtang block, Lhasa block, and the Pamir-southern Tibetan Plateau

Data of active faults are modified fromTaylor et al., 2003;Wu et al., 2009;Shi et al., 2014;Chevalier et al., 2020), and include some of the latest results from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program. The seismic data in the figure are from the China Earthquake Networks Center (http://data.earthquake.cn).

堑西边界正断层，走向为NE20°～50°（东倾），倾角为50°～80°，第四纪晚期垂直滑移速率<0.1 mm/yr（Blisniuk and Sharp, 2003）；诺尔玛错地堑西边界正断层陡坎的走向为NE20°～50°，第四纪晚期垂直滑移速率为0.1 mm/yr（Liu et al., 2024）；懂错地堑东边界断层的走向为NE20°～40°，第四纪晚期垂直滑移速率约为0.7 mm/yr（Li et al., 2019a）。藏南拉萨地块中隆格尔裂谷西边界活动断裂的平均走向为NE20°～30°，2004年M_W 6.2地震和2005年M_W 6.3地震使该裂谷内向西倾的断层发生了破裂，2008年M_W 6.7地震使该地堑向东倾的断层发生了破裂（吴中海等, 2009）；当惹雍错裂谷长约250km，裂谷边界正断层总体走向为NE7°～50°，局部走向为SE150°，断层倾角为50°～60°，大地测量学方法获得的伸展速率为4～5 mm/yr（Wang et al., 2019）；申扎裂谷西边界活动断裂的走向为60°～120°，大地测量学方法获得的伸展速率为1～2 mm/yr（Wang et al., 2019）；亚东–谷露裂谷北段主要由谷露地堑和当雄地堑组成，地堑内活动断裂的总体走向为NE30°，第四纪晚期北段正断层的垂直滑移速率为0.5～0.8 mm/yr，伸展速率为1～1.6 mm/yr（Chevalier et al., 2020），有记录以来，该区内发生了10余次6级以上的地震。

羌塘–拉萨地块区内地震以走滑型和正断型为主，其中拉萨地块以正断型地震为主，这些地震沿着南北向裂谷分布，反映了一系列近南北向的裂谷来调节和吸收拉萨地块东西向的伸展变形；羌塘地块以弥散分布的正断型地震和走滑型地震为主，反映了羌塘地块东西向伸展作用主要由一系列南北向地堑和走滑断裂调节吸收。在羌塘地块和拉萨地块之间，地震类型主要以走滑型为主，反映了两个地块之间的构造边界主要以走滑变形为主。地震类型以及对应的构造样式表明，西藏北部孕震背景主要与该区域东西向伸展变形过程有关。

2.5 帕米尔–喀喇昆仑–喜马拉雅山地块区

该区自喜马拉雅西构造结的帕米尔高原开始，向东依次包括了喀喇昆仑、喜马拉雅山，东至东构造结地区，北界为雅鲁藏布江缝合带，南界至喜马拉雅山南坡（图5）。该区域内的主要活动构造带可以分为3个部分：①西构造结的帕米尔构造区，②沿喜马拉雅山弧形延伸的喜马拉雅主逆冲构造带，③从羌塘–拉萨地块延伸进入该区的藏南裂谷带，其走向大致垂直于喜马拉雅山走向，主要由一系列近南北向的地堑系组成，表现为东西向伸展特征。

帕米尔–喀喇昆仑区内自北而南依次包括塔里

木−塔吉克、兴都库什−帕米尔−西昆仑、喀喇昆仑−科希斯坦以及印度等断块及其边界活动断裂带。活动构造变形以西构造结前缘和喜马拉雅南缘的地壳缩短、帕米尔内部的东西向拉张、塔里木块体的顺时针旋转、西帕米尔−塔吉克盆地的逆时针旋转为基本特征。帕米尔构造区内部发育了全球最活跃、最深的陆内中源地震带（70～350 km; Sippl et al., 2013; Schurr et al., 2014），是中国大陆受板块挤压作用最强烈的地区。帕米尔东北缘由一系列近南北向和北东向的逆冲构造组成（Zubovich et al., 2010; Thompson et al., 2015），其中第四纪及现今变形主要集中在全新世活动的帕米尔前缘推覆系，在其东段发生的 1985 年乌恰 M_W 6.9 地震形成了长约 22 km 的地表破裂带（Li et al., 2019b）。帕米尔内部在第四纪几乎没有显著的南北向缩短作用，其现今变形主要以近东西向的拉张为主（Robinson et al., 2007），拉张速率高达 5～10 mm/yr（Wang and Shen, 2020）。喀喇昆仑断裂是西昆仑与帕米尔−喀喇昆仑块体的分界断裂，右旋走滑速率为 3～10 mm/yr（Lacassin et al., 2004; Chevalier et al., 2005, 2012, 2016），沿断裂的构造地貌特征极为清晰、壮观，但缺乏历史强震记录，仪器记录小震也极为稀疏。

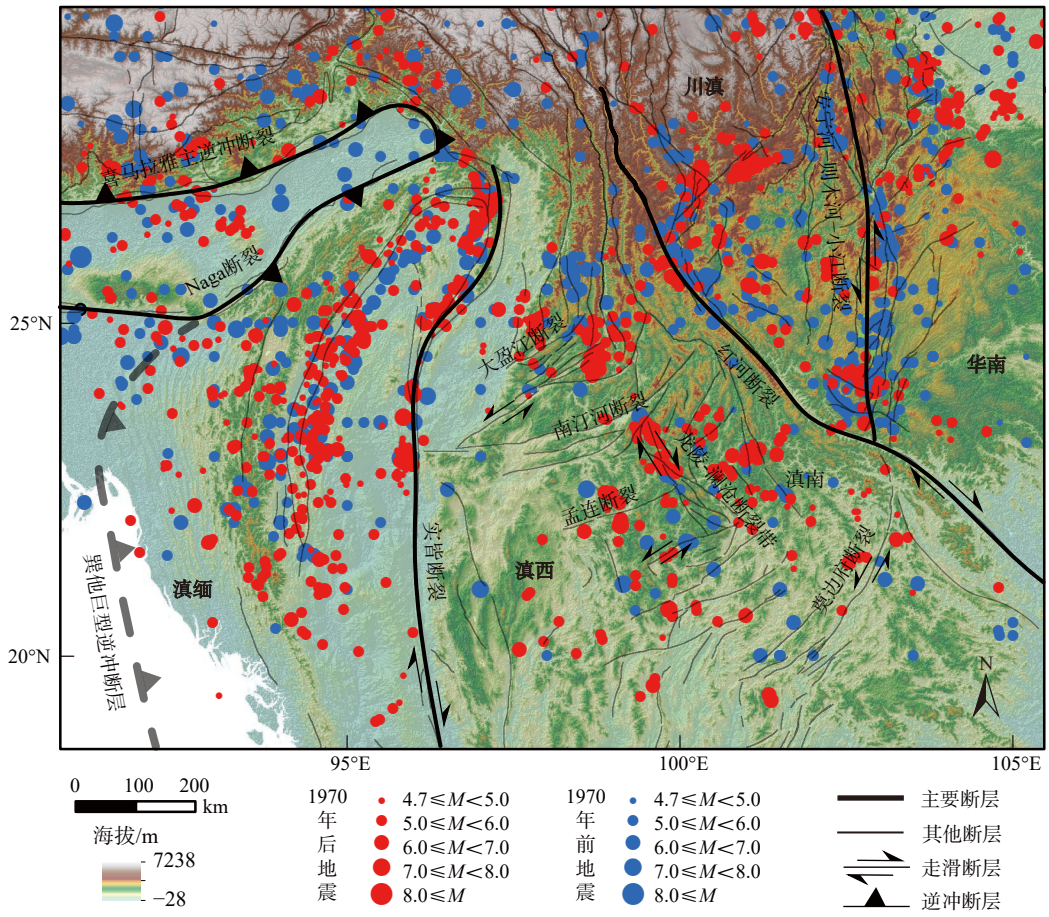
喜马拉雅构造带主要为平行于喜马拉雅山脉走向弧形展布的逆冲断裂带，包括主中央逆冲断裂带（MCT）、主边界逆冲断裂带（MBT）和主前缘逆冲断裂带（MFT），三者在深部连接到统一的滑脱层主喜马拉雅逆冲推覆带（MHT）之上（Yin and Harrison, 2000; Yin, 2006）。除此之外，沿造山带方向还发育 1 条巨型伸展断裂系统——藏南拆离系（STDS），以及大致垂直于喜马拉雅山走向的近南北向藏南裂谷带（Armijo et al., 1986）。MFT 是喜马拉雅构造带地区最主要的全新世断裂，其上盘抬升速率达 10 mm/yr，水平缩短速率约 21±1.5 mm/yr（Lavé and Avouac, 2000），控制了包括 1950 年察隅 M 8.7 地震、2015 年尼泊尔 M 8.1 地震等在内的 8 次 8 级以上历史强震的发生。总体上，喜马拉雅构造带地区以南北向挤压和东西向伸展为主要变形特征，其中近南北向的地堑系以发生正断型地震为主，而喜马拉雅山南部边界逆冲断裂带以发生逆断层型地震为特征，并常见 8 级及以上巨大地震。

2.6　滇缅地块区

滇缅活动地块位于青藏高原东南缘，是印度板块持续向北推挤与川滇地块东南向挤出共同作用的关键区域。全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, 简称 GNSS）观测揭示，该区地壳表现出大规模的顺时针旋转运动（Wang and Shen, 2020），其内部的 2 组不同走向的断裂呈近共轭分布，形成复杂的剪切网络，共同调节区域变形。滇缅活动地块区西边界由 Naga 断裂及其南延的巽他巨型逆冲断层（Sunda Megathrust）限定，东北边界为红河断裂，两者之间的区域构成青藏高原物质向东南迁移的重要构造通道（Tapponnier et al., 2001; Chevalier et al., 2022）。地块内部还存在二级地块边界，如实皆断裂作为滇缅地块与滇西地块的分界，龙陵−澜沧断裂带是滇西地块和滇南地块的分界（张培震等，2003; 郑文俊等，2022; 图 6），地块间的相互作用和变形控制着该区域强震的孕育和发生。

东北边界的红河断裂全长约为 900 km，主要表现为右旋走滑，现今滑动速率为 0.9～2.3 mm/yr，局部段落存在逆冲分量（Chevalier et al., 2022）。相较之下，Naga 断裂及其南延的巽他巨型逆冲断层以逆冲活动为主，构成印度板块向东俯冲的主要界面。深部地震层析结果显示，印度岩石圈板块俯冲于缅甸地块之下（Lei et al., 2019）。实皆断裂长达 1200 km，是缅甸（滇缅）地块与印支（滇西）地块的边界，也是区域内最强活动断裂之一，全新世及现今的右旋走滑速率可达约 18 mm/yr（Li et al., 2020a），断裂沿线历史上多次发生 7 级以上强震，其北段在 2025 年发生了缅甸 M_W7.8 地震。在实皆断裂与红河断裂之间，还发育有 2 组近共轭的走滑断裂系。北东向断裂系包括龙陵−瑞丽断裂、畹町断裂、南汀河断裂和孟连断裂等，以左旋走滑兼拉张为主，滑动速率约 1～5 mm/yr, 1995 年孟连 M_S 7.1 地震与该类断裂的活动有关（何文贵等, 2015; Shi et al., 2018）。而北西向断裂系包括无量山断裂、龙陵−澜沧断裂带等，以右旋走滑为主，滑动速率约 2～5 mm/yr, 1988 年澜沧−耿马双震即发生于龙陵−澜沧断裂带南段（Li et al., 2020b），2014 年景谷 M_S6.6 地震则可能与无量山断裂带的最新活动有关。

综合断裂几何特征、活动速率、GNSS 观测及地球物理场特征可见，滇缅活动地块是青藏高原东南缘强震频发的构造区，其强震构造环境主要受 3 方面控制：①印度板块的北向推挤，提供持续动力；②实皆断裂、红河断裂及巽他巨型逆冲断层等边界断裂构成的俯冲−剪切系统；③次级地块边界带内部北东向和北西向走滑断裂在高应变背景下



图中断层根据 Shi et al.(2018)和郑文俊等(2019)修改，并增加了部分第二次青藏高原综合科学考察研究项目的最新成果；图中地震数据来源于中国地震台网中心(http://data.earthquake.cn)

图 6 滇缅地块区主要活动断裂与强震分布

Fig. 6 Main active faults and strong earthquakes in the Yunnan–Myanmar block

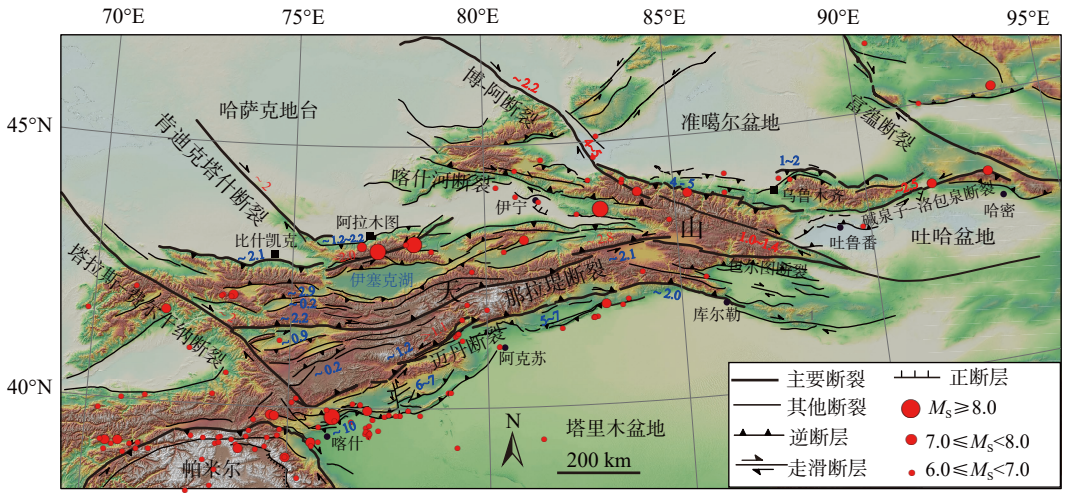
Data of active faults are modified from Shi et al., 2018; Zheng et al., 2019, and include some of the latest results from the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program. The seismic data in the figure are from the China Earthquake Networks Center (http://data.earthquake.cn).

的活动，并可孕育7级及以上强震，代表性事件包括1941年耿马 M 7.0地震、1976年龙陵 M 7.3地震，以及1988年澜沧 M 7.6地震与耿马 M 7.2双震。

2.7 天山地块区

天山晚新生代变形以南北向地壳缩短为主，因此最显著的活动构造是山前及山体内部广泛发育的一系列近东西向的逆冲断裂-褶皱带。此外，还发育2组断裂：山体内部北东东向的左旋逆冲断裂和北天山北西向的右旋走滑断裂带(图7)。这3组断裂带共同控制了天山现今地壳变形和强震孕育(Wu et al., 2023)。

天山南北两侧广泛发育与山体走向一致的前陆冲断带，表现为典型的薄皮式逆冲推覆构造，其在深部为断坪-断坡构造，地表变形则以地层褶皱和断层逆冲为特征，并具有最新活动不断向盆地内部扩展的特征。北天山地区典型的前陆冲断带包括乌鲁木齐冲断带和吐鲁番冲断带等，前者由3～4排逆断裂背斜组成，地壳缩短速率为3～4 mm/yr(Wu et al., 2023)，1906年曾发生玛纳斯7.7级地震，是一次典型的盲逆断层-褶皱型地震(Avouac et al., 1993)。南天山地区最为典型的前陆冲断带包括库车冲断带和柯坪冲断带，其中前者南北向的地壳缩短速率在5～7mm/yr(Wu et al., 2023)，发生的最大地震是1949年库车7¼级地震。后者以皮羌断裂为界，可分为东、西2个部分，西侧发育4排逆断裂-褶皱带，东段发育5～6排逆断裂-褶皱带，该构造带



图中红色数字代表断层走滑速率（单位 mm/yr），蓝色数字代表断层逆冲（垂直）速率（单位 mm/yr）

图 7　天山地块区主要活动断裂及运动特征（据 Wu et al.，2021，2023 修改）

Fig. 7　Main active faults and movement characteristics in the Tianshan (modified from Wu et al., 2021, 2023)

The red numbers represent the strike-slip rates (unit: mm/yr) of the faults, and the blue numbers represent the thrust (vertical) rates (unit: mm/yr) of the faults.

的地壳缩短速率约为 10 mm/yr（Zubovich et al., 2010; Wu et al., 2023），历史上曾发生过 1902 年阿图什 8¼级地震、2024 年乌什 M_S7.1 地震。

天山山体内部也发生了明显的缩短变形，并形成众多被边界活动逆断层−褶皱带所控制的规模不等的山间盆地。其中多数断裂全新世期间仍有活动，第四纪晚期以来单条断裂的滑动速率主要介于 0.1～3.0 mm/yr（Thompson et al., 2015）。天山内部的活动断裂历史上也曾发生过一系列大震，如 1992 年吉尔吉斯天山内部的 M 7.2 强震，1716 年可能发生在昭苏盆地内部特克斯河断裂带的 7½级地震，该断裂带 2003 年还发生了昭苏 M_S 6.1 级地震。天山内部除了挤压变形外，还发育 1 组北东东走向的左旋逆冲断裂和北西—北西西向的大型右旋剪切断裂带，前者多是晚新生代复活的先存深大断裂，如迈丹断裂、那拉提断裂、克敏断裂、包尔图断裂和碱泉子−洛包泉断裂等，其左旋走滑速率多在 1～2 mm/yr（Wu et al., 2019, 2023）。这些断裂历史上曾多次发生大震，如 1889 年发生在克敏断裂上的契里克（Chilik）8¼级地震。后者多位于天山西北部并斜切天山，部分可向北延伸至哈萨克地台内部，包括了博−阿断裂、喀什河断裂、肯迪克塔什（Kindytas）断裂、塔拉斯−费尔干纳断裂等，这些断裂第四纪晚期活动强烈，速率一般约为 2 mm/yr（Campbell et al., 2013），而且控制着强震的活动，如 1812 年发生在喀什河断裂上的尼勒克 8 级地震等。

印度板块与欧亚板块陆陆碰撞下导致的塔里木地块陆内斜向俯冲作用是天山地区强烈南北向挤压和东西向左旋剪切应变的主要动力机制。因此，天山地区近东西走向的断裂带多以逆冲运动为主，通过地壳缩短和叠置的方式调节南北向压缩应变，并孕育着强震的发生。而北东东向的左旋逆冲断裂调节了塔里木斜向俯冲造成的东西向左旋应变，并控制着山体内部左旋走滑型强震的孕育和发生。北天山地区北西向右旋走滑断裂是在左旋剪切应力环境下产生的 1 组书斜构造，以断裂右旋走滑运动和块体逆时针旋转的方式调节着北天山地区的左旋剪切应变（Wu et al., 2021, 2023）。

3　青藏高原现今变形、强震活动与地震危险性

印度板块向欧亚板块的持续楔入造成了青藏高原地壳垂向增厚和岩石圈变形强烈，同时高原还持续向外扩展并与周围地块相互作用，从而导致区域上强震频发（张培震等，2013, 2022; 郑文俊等，2020）。此次科学考察“活动断裂与地震灾害”专题在对青藏高原活动断裂的活动习性及区域强震机制调查研究的同时，还通过收集多源形变观测数据，开展了青藏高原及邻区的现今变形场特征分析，利用震源机制建立了区域构造应力场，在此基础上对青藏高原未来的强震危险性趋势进行了综

合评估。

3.1 青藏高原的现今变形场特征

通过收集青藏高原及邻区的多源GNSS原始观测资料，使用高精度GNSS定位定轨软件GMAIT/GLOBK进行了数据处理，其中物理模型和误差主要参照Hao et al.（2021）的模型，获取了各GNSS站点相对稳定欧亚板块的水平速率。此外，研究还整合了近年公开发表的青藏高原及邻区GNSS速度场数据（Wang and Shen, 2020; Li et al., 2022a, 2023），采用二维赫尔默特变换方法将其转换至此研究使用的参考框架，最终构建了相对欧亚板块的青藏高原及邻区GNSS水平运动速度场图像（图8a）。同时，采用区域变形的中位数估计方法（Kreemer et al., 2018），由GNSS速度场计算得到了最大剪应变率场（图8b）和面应变率场（图8c）。

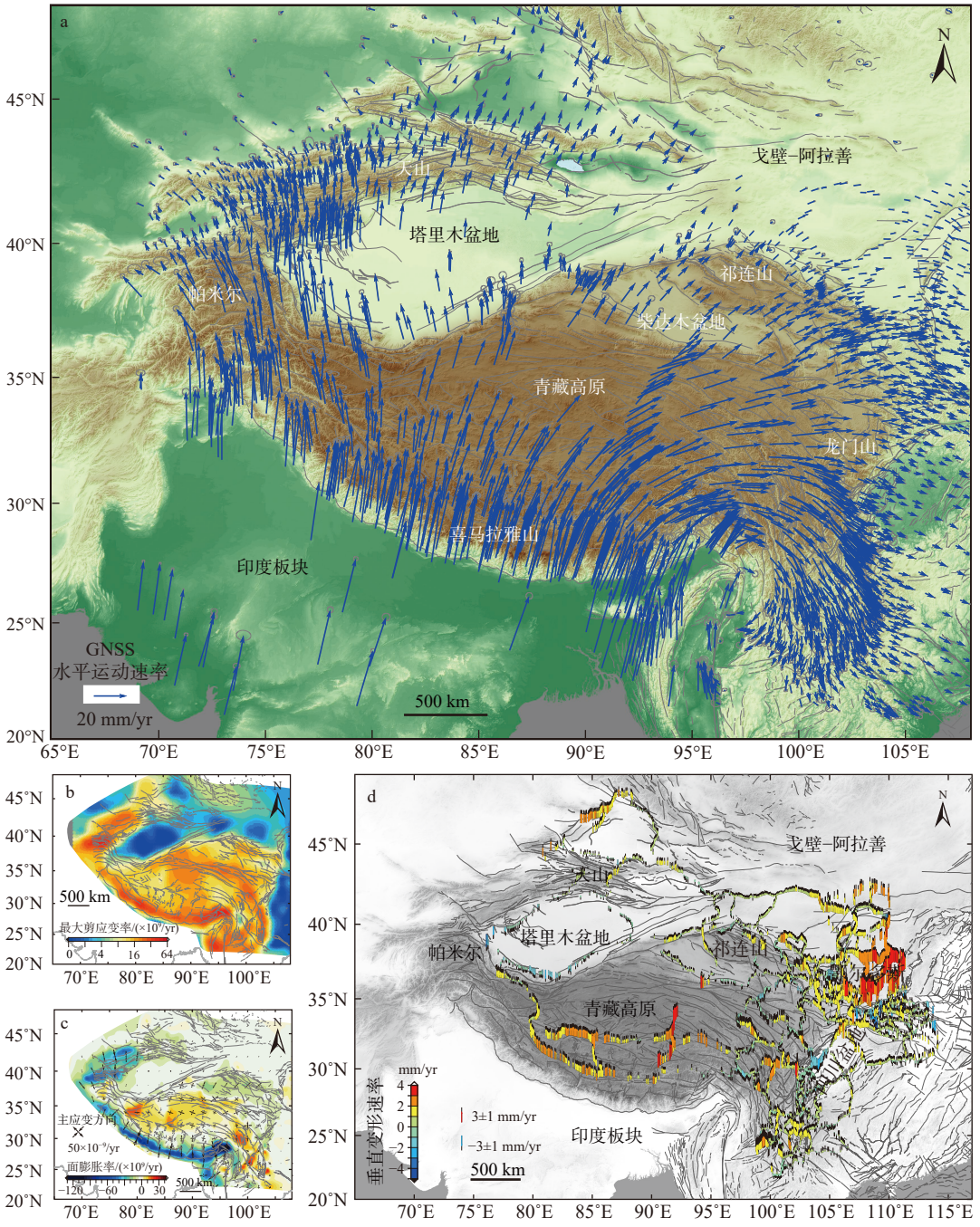
GNSS水平运动速度场结果（图8a）显示，印度板块现今正相对欧亚板块以约40 mm/yr的速率向北东向推挤，青藏高原整体表现为北—北东向运动，但运动速率向北逐渐减弱，指示青藏高原内部的构造变形调整吸收了大部分变形。高原周边以收缩应变为主，表现为地壳缩短增厚，而内部则以扩张和剪切应变为主（张培震等，2022），喜马拉雅东、西构造结则分别表现出顺时针和逆时针旋转特征。最大剪应变率场结果（图8b）显示，高值区主要分布在喜马拉雅山和天山造山带的逆冲断裂发育区，以及海原断裂、东昆仑断裂和玉树−鲜水河−小江断裂带等区域大型走滑断裂（带）发育区，这些构造带也是历史强震的频发带。面应变率场结果（图8c）显示，面收缩应变率高值区主要分布在高原周边山系及其伴生的前陆盆地，是区域上主要的逆冲型强震发生区；面膨胀应变率高值区主要分布在高原内部的高海拔区域，即高原内部的近南北向正断层和北东/北西走向共轭走滑断裂系发育区，以发生产生正断层型和走滑型地震为特征。

通过收集整理青藏高原及邻近区域1970—2023年国家一、二等精密水准网和区域地震水准网观测资料，剔除地面沉降显著异常和强震影响的高差测段后，以高精度连续GNSS站点的垂直速率为松弛约束，对水准高差数据进行最小二乘平差（Li et al., 2024b），估算得到了青藏高原及邻区的现今地壳垂直运动速度场（图8d）。结果表明，高原南部主要表现为速率为1～3 mm/yr的上升运动，最快上升速率达到4 mm/yr；高原东北缘和鄂尔多斯地块西部表现出差异性上升运动，尤其是鄂尔多斯地块内部整体上升运动速率平均约为2 mm/yr，高于高原东北缘；高原北缘祁连山地区的上升运动并不显著，其中祁连山北缘的上升速率仅约1 mm/yr，在阿尔金−祁连山转换区甚至表现为约1 mm/yr的下降运动；高原东南缘的川滇地块内部表现出1～2 mm/yr的上升，其中地块北部平均上升速率比南部高约1 mm/yr；天山构造带的上升速率约1 mm/yr；四川盆地、塔里木盆地、柴达木盆地以及鄂尔多斯地块周缘断陷带均表现为继承性沉降运动，平均沉降速率约为1 mm/yr。

3.2 青藏高原强震活动及应力场特征

青藏高原是中国强震最频发的地区，历史和现代地震记录表明该区共发生过18次8级以上、50余次7～7.9级和300余次6～6.9级地震，主要分布在羌塘、巴颜喀拉、祁连、川滇及天山地区（图9a）。自1900年以来，强震活动呈3个高峰：20世纪20—30年代以海原M 8.5和古浪M 8.0为代表的东北缘活动期；20世纪50—70年代以察隅M 8.6和当雄M 8为代表的羌塘东段强震活动期；21世纪以来以昆仑山口M 8.1和汶川M 8.0为代表的巴颜喀拉活动期（邓起东等，2014）。分区分析结果显示，羌塘区域早期多发7级地震，1950年前后进入8级地震活跃期，1952年以来虽有6级地震但缺乏7级以上地震；在1976年前巴颜喀拉地块区的强震沿鲜水河和东昆仑断裂分布，1976—1996年相对平静，而1996年以来再度活跃，汶川、玉树、芦山、玛多等强震均在此期间发生，并成为近30年来中国大陆强震最集中的区域；祁连区域在20世纪上半叶强震频繁，此后以6级地震为主，近年仍有门源、德令哈等强震发生；川滇区域为中国强震最活跃区域之一，7级以上地震多沿大理断裂系、小江断裂带和曲江断裂带等分布，历史上龙陵、松潘、丽江、姚安等地也多有强震发生。总体上看，青藏高原及邻区中—小地震在区域上广泛分布（图9b），而强震活动具有阶段性爆发和空间迁移的特征。

利用相关的数据库（http://data.earthquake.cn）与文献资料（Dziewonski and Anderson, 1981; 罗钧，2013; 崔子健等，2019; 郭祥云等，2022），并结合宽频带波形资料通过CAP（Cut and Paste）方法（Zhao and Helmberger, 1994; Zhu and Helmberger, 1996）反演，共获得1976—2023年间$M\geqslant3$地震机制解4794个（图9c）。结果显示：其中正断型地震占14.5%，逆断型地震占



图中的黑色细线为断裂

a—GNSS 水平速度场（相对欧亚板块）；b—最大剪应变率场；c—面应变率场（正值为面膨胀、负值为面压缩）；d—水准垂直速度场（相对 ITRF2014）

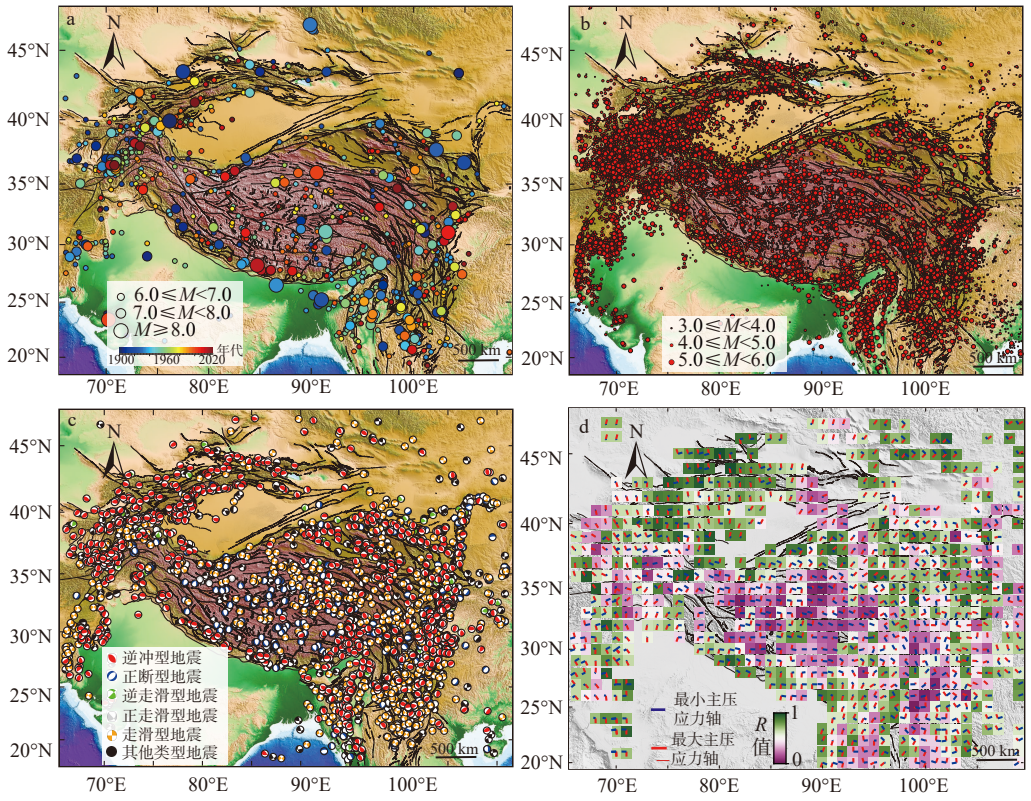
图 8　青藏高原及邻区现今变形场

Fig. 8　Current deformation field of the Tibetan Plateau and adjacent regions

(a) GNSS horizontal velocity field (relative to the Eurasian Plate); (b) Maximum shear strain rate field; (c) Surface strain rate field, with positive values indicating surface expansion and negative values indicating surface compression; (d) Leveling vertical velocity field (relative to ITRF2014).

The gray lines indicate the faults.

28.8%，走滑型地震占 39.2%，其余为复合类型地震。总体上，川滇地块以走滑型地震为主（超 50%），滇西、滇南亦相似；天山以逆冲型地震为主，北天山有走滑型地震相对发育；高原西部以逆断型地震为



图中灰黑色线为断层

a—1900年以来M≥6.0地震分布；b—1970年以来M 3.0—M 6.0地震分布；c—震源机制解分布；d—应力场分布特征（R为应力比值）

图9 青藏高原地区地震活动、震源机制与应力场特征

Fig. 9 Seismic activity, focal mechanisms, and stress field characteristics in the Tibetan Plateau and the adjacent region

(a) Distribution of earthquakes with $M \geq 6.0$ since 1900; (b) Distribution of M 3.0 to M 6.0 earthquakes since 1970; (c) Distribution of focal mechanism solutions; (d) Stress field characteristics (R is the stress ratio)

The black lines indicate the faults.

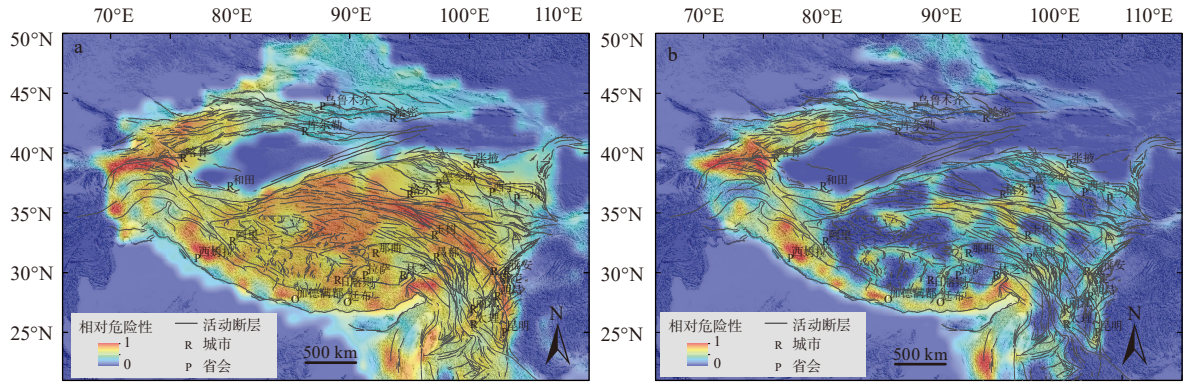
主，反映强挤压特征；而高原内部多以走滑型与正断型地震为主，显示以伸展变形为主要特征；喜马拉雅造山带以逆冲型地震为主，而北坡多为正断型地震；东西构造结以逆冲和走滑型地震为主；羌塘内部以正断型地震为主，反映以伸展变形为主；巴颜喀拉地块整体以走滑型地震为主，祁连山地区为走滑与逆冲型地震混合，柴达木盆地及周缘以逆冲型地震为主。整体上可以看出震源机制解结果与前述的区域活动构造变形格局高度一致。

利用机制解资料，使用Martínez-Garzón et al.（2014）基于Hardebeck and Michael（2006）提出的区域应力张量阻尼反演法SATSI（Spatial And Temporal Stress Inversion）开发的MSATSI软件反演获得1°×1°网格构造应力场图像和应力比值（R）的空间分布（图9d）。结果显示，R在高原内部均值约0.38，受水平拉张和剪切应力主导；周缘R值约为0.84，受水平挤压控制。整体上，高原西部水平主压应力呈北北东—东东西向并随空间逆时针旋转；东部及东构造结水平主压应力呈近东西向至北东—南西向，规律性顺时针旋转与GNSS应变场一致。分区来看，拉萨-羌塘内部应力以拉张为主，与该区正断与地堑广布相一致；巴颜喀拉地块的应力轴方向顺时针旋转特征显著，南北边界以左旋走滑性质为主，东边界龙门山为逆冲为特征；祁连地块的水平主压应力呈北东向，显示以水平挤压作用为主；川滇地块整体以走滑应力场为主，但主应力方向常随区域变形特征的变化而转变。总体上，青藏高原呈“内部拉张-周缘挤压”的应力场格局，区域上主应力方向具有明显的旋转特征。

3.3 青藏高原及邻区未来强震危险趋势

文章采用改进的区域地震矩平衡方法结合基于地理信息系统的空间分析对青藏高原地震危险性进行评估，该方法基于标量地震矩速率平衡原理、古登堡-里克特震级频次关系和震级能量经验

关系等构建地震发生率模型(Wells and Coppersmith, 1994; Ward, 1998)，模型的输入条件和参数主要包括地震带分布与最大震级、地壳应变率、上地壳厚度以及地震活动性(*b* 值)等。模型采用的地震相关参数主要来自于此次科考专题结果和第五代地震区划图(高孟潭，2015)，上地壳厚度来自地震结构模型 crust 1.0(Laske et al., 2013)，*b* 值来源于已有研究成果(陈培善等，2003)。基于模型进行计算，并通过插值获得青藏高原及周缘 0.1°×0.1°网格的年均特定震级以上强震发生率，进而对结果作归一化处理，最终得到区域内的地震相对危险性图像(图 10)，并据此来反映区域地震发生的危险性趋势。



图中灰色细线为断层

a—6.5 级及以上地震相对危险性；b—7.5 级及以上地震相对危险性

图 10　青藏高原及周缘强震相对危险性

Fig. 10　Relative risk of large earthquakes in the Qinghai–Tibetan Plateau and its surrounding areas

(a) Relative risk of earthquakes with a magnitude of 6.5 or greater; (b) Relative risk of earthquakes with a magnitude of 7.5 or greater

The black lines indicate the faults.

青藏高原及邻区 $M \geqslant 6.5$ 地震的相对危险性图像显示(图 10a)，在青藏高原南缘的帕米尔–喀喇昆仑–喜马拉雅区域，活动的逆冲断裂和走滑断裂沿线 6.5 级以上强震活动整体活跃，表现出较为集中的相对危险性；在高原中东部 6.5 级以上强震相对危险区主要是围绕巴颜喀拉地块、川滇地块边界分布，在高原东北部祁连山中东段也表现出 6.5 级以上强震的相对危险性，在天山地区 6.5 级以上强震活动的相对危险区主要集中在喀什西北—北部的西天山区域。

青藏高原及邻区 $M \geqslant 7.5$ 地震的相对危险性图像显示(图 10a)，沿青藏高原南缘的帕米尔–喀喇昆仑–喜马拉雅区域的边界逆冲断裂是 7.5 级以上强震活动的相对危险区，特别是喜马拉雅前缘逆冲断裂带和东西构造结附近；与西构造结帕米尔逆冲带相邻的西天山区域也表现出 7.5 级以上强震活动的相对危险性。在青藏高原内部及北部，沿几个主要活动地块或次级地块边界带，表现出 7.5 级以上强震活动在边界带有明显的相对危险性，反映出高原内部大震活动主要受活动地块之间相互作用所控制。

4　结束语

经历了长期多阶段造山过程，新生代初期在印度板块和欧亚板块碰撞作用下快速隆升的青藏高原，显著影响了中国大陆乃至全球的构造、地貌、资源和环境等的塑造和演化，并伴生有地震等多类型灾害。作为众灾之首的地震，更是遍布于高原全区，并伴随了青藏高原地貌构造格局的演化和发展的全过程，而地震活动主要危险源是第四纪晚期期间正在活动的断裂，即活动断裂。因此，详细查明青藏高原及邻区的主要活动断裂活动习性和现今活动状态，不仅是开展区域未来强震危险性评价的关键，也有助于科学评估及预测与活动断裂及地震相关的灾害风险。

(1) 青藏高原现今的活动构造系统，是在长期的多阶段构造演化过程中逐渐形成的，包含了众多规模、性质和活动性不尽相同的活动断裂(带)，以及由活动断裂带分割的多个活动地块(区)。青藏

高原不同区域的断裂活动特征差异明显，不同地块差异运动和变形是青藏高原大地震孕育的地质构造基础，这也造就了不同的强震构造环境，但总体上，大地震主要沿活动地块边界断裂带发生。

（2）青藏高原及周边的水平运动速度场揭示，印度板块现今正以～40 mm/yr的速率向北东向持续推挤，高原整体表现为北东向运动，运动速率向北东逐渐减弱，高原周边以地壳缩短应变为主，内部则以扩张和剪切应变为主。高原及邻区的现今地壳垂直运动速度场揭示，除周缘和内部盆地表现为继承性沉降运动外，高原内部整体以差异性上升运动为主要特征。

（3）青藏高原的强震活动主要表现为沿地块边界带呈群发和丛集发生的特征，不同类型地震的震源机制解分布与区域活动构造格局及变形特征高度一致，表现出分区差异性。区域构造应力场特征显示，高原内部主要受水平拉张和剪切应力主导，周缘主要受水平挤压控制，同样与区域活动构造格局一致。

（4）青藏高原及周缘的地震相对危险性评估结果显示，区域主要地块的边界构造带控制了区域上主要的强震活跃区，其中青藏高原南缘和中东部及西天山喀什以西区域的强震活跃度相对最高，未来危险性也相对高，大型构造带对不同震级档强震的极度活跃区的分布均起到了一定控制作用。

近年来青藏高原及周缘多次发生的破坏性强震进一步提醒人们，活动断裂与地震灾害研究还存在诸多难题需要解决和攻克，虽然“活动地块”假说对强震发生的位置进行了科学的预判，并在近年发生的强震中得到了较好的验证，但是对活动地块边界带断裂之间的相互作用和大地震孕育的物理机制等的认识还远远不足，关于活动地块与强震活动关系的基本物理假设仍然缺乏，对组成边界带大震震源区断层的三维应力状态、深浅结构与构造精细几何关系、大震震源断层动力学机制、以及应力应变状态与强震发生的物理关系等的认知程度还明显不够。因此，仍需要全方位加强和推进活动断裂和地震的研究工作，更多地获取和积累活动构造基础资料与数据，并需要从不同视角或学科角度去剖析强震机制，不断提升对活动断裂的作用与强震机制的认识，才能更为科学、全面地服务于国家的防震减灾工作。

致谢：感谢第二次青藏高原综合科学考察研究任务（九）之“活动断裂与地震灾害”专题全体项目组成员多年来的辛苦付出，感谢科考任务（九）地质灾害与环境各团队给予的支持和帮助。论文是基于科考成果及前人对研究青藏高原活动断裂与地震活动研究的一个总结，在此对致力于青藏高原研究特别是高原活动断裂与地震灾害研究的前辈和同仁们表达最崇高的敬意和深切的谢意。同时由于篇幅所限，无法全面总结所有的工作和成果，在此表示歉意。感谢张会平研究员、吴中海研究员在论文评阅过程中提出的建设性意见和建议。由第二次青藏高原综合科学考察研究任务（九）之“活动断裂与地震灾害”专题编制完成的《青藏高原活动断裂与强震分布图（1∶100万）》将由地震出版社近期出版，欢迎大家批评指正。

References

ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al., 1986. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B14): 13803-13872.

AVOUAC J P, TAPPONNIER P, BAI M, et al., 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B4): 6755-6804.

BAI M K, CHEVALIER M L, LELOUP P H, et al., 2021. Spatial slip rate distribution along the SE Xianshuihe Fault, eastern Tibet, and earthquake hazard assessment[J]. Tectonics, 40(11): e2021TC006985.

BLISNIUK P M, SHARP W D, 2003. Rates of late Quaternary normal faulting in central Tibet from U-series dating of pedogenic carbonate in displaced fluvial gravel deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 215(1-2): 169-186.

CAMPBELL G E, WALKER R T, ABDRAKHMATOV K, et al., 2013. The Dzhungarian fault: Late Quaternary tectonics and slip rate of a major right - lateral strike - slip fault in the northern Tien Shan region[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(10): 5681-5698.

CHEN F H, DING L, PIAO S L, et al., 2021a. The Tibetan Plateau as the engine for Asian environmental change: the Tibetan Plateau Earth system research into a new era[J]. Science Bulletin, 66(13): 1263-1266.

CHEN G, AI M, ZHENG W J, et al., 2021b. Nonrigid Bookshelf Kinematics of Northeastern Tibet: constrains from Fault Slip Rates around the Qinghai Lake and Chaka-Gonghe Basins[J]. Lithosphere, 2021(S2): 4115729.

CHEN P S, BAI T X, LI B K, 2003. *b*-value and earthquake occurrence period[J]. Chinese Journal of Geophysics, 46(4): 510-519. (in Chinese with English abstract)

CHENG L, LI G T, WU H, et al., 2020. A preliminary study of paleo-earthquake in the Majiacun-Daju section of Zhongdian-Daju fault, Yunnan Province[J]. Earthquake Research in China, 36(2): 211-220. (in Chinese with English abstract)

CHENG S H, XIAO X, WU J P, et al., 2021. Crustal thickness and *Vp/Vs*

variation beneath continental China revealed by receiver function analysis[J]. Geophysical Journal International, 228(3): 1731-1749.

CHEVALIER M L, RYERSON F J, TAPPONNIER P, et al., 2005. Slip-rate measurements on the Karakorum Fault may imply secular variations in fault motion[J]. Science, 307(5708): 411-414.

CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, et al. , 2012. Spatially constant slip rate along the southern segment of the Karakorum fault since 200ka[J]. Tectonophysics, 530-531: 152-179.

CHEVALIER M L, VAN DER WOERD J, TAPPONNIER P, et al., 2016. Late Quaternary slip-rate along the central Bangong-Chaxikang segment of the Karakorum fault, western Tibet[J]. GSA Bulletin, 128(1-2): 284-314.

CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, et al., 2020. Late Quaternary extension rates across the northern half of the Yadong - Gulu Rift: implication for East - West extension in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(7): e2019JB019106.

CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, TRINH P T, et al., 2022. Large-scale intersion of Plio-Quaternary slip along the boundary faults between the South China, Sunda, and Shan blocks[J]. Acta Geologica Sinica, 96(8): 2833-2852.

CUI P, WEI F Q, CHEN X Q, et al., 2008. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 23(4): 317-323. (in Chinese with English abstract)

CUI P, HU K H, CHEN H Y, et al., 2018. Risks along the Silk Road Economic Belt owing to natural hazards and construction of major projects[J]. Chinese Science Bulletin, 63(11): 989-997. (in Chinese with English abstract)

CUI Z J, CHEN Z L, WANG Q C, et al., 2019. Inversion for regional tectonic stress field in the North-South Seismic Belt of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 41(2): 219-229. (in Chinese with English abstract)

DECELLES P G, ROBINSON D M, QUADE J, et al., 2001. Stratigraphy, structure, and tectonic evolution of the Himalayan fold - thrust belt in western Nepal[J]. Tectonics, 20(4): 487-509.

DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. Earth Science Frontiers, 10(S1): 66-73. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(4): 356-372.

DENG Q D, GAO X, YANG H, 2009. Fault-block tectonics, active fault-block tectonics and earthquake activity[J]. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1083-1093. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, CHENG S P, MA J, et al., 2014. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(7): 2025-2042. (in Chinese with English abstract)

DEWEY J F, SHACKLETON R M, CHENGFA C, et al., 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 327(1594): 379-413.

DING L, LI Z Y, SONG P P, 2017. Core fragments of Tibetan Plateau from Gondwanaland united in northern hemisphere[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(9): 945-950. (in Chinese with English abstract)

DZIEWONSKI A M, ANDERSON D L, 1981. Preliminary reference Earth model[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25(4): 297-356.

ENGLAND P, HOUSEMAN G, 1986. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India - Asia Collision Zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B3): 3664-3676.

GAO M T, 2015. Textbook on Seismic ground motion parameters zonation map of China[M]. Beijing: China Standard Press: 1-264. (in Chinese)

GUO X Y, JIANG C S, HAN L B, et al. , 2022. Focal mechanism data set in Chinese mainland and its adjacent area (2009-2021)[EB/OL]. https://data.earthquake.cn,2022. DOI: 10.12080/nedc.11.ds.2022.0004 or CSTR:12166.11.ds.2022.0004. (in Chinese with English abstract)

HAO M, WANG Q L, ZHANG P Z, et al., 2021. "Frame Wobbling" causing crustal deformation around the ordos block[J]. Geophysical Research Letters, 48(1): e2020GL091008.

HARDEBECK J L, MICHAEL A J, 2006. Damped regional - scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B11): 2005JB004144.

HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, et al., 1992. Raising tibet[J]. Science, 255(5052): 1663-1670.

HE F M, CHANG Z F, 2022. Late Quaternary activity characteristics of the Taoyuan section of Longpan-Qiaohou fault zone in northwest Yunnan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3): 579-591. (in Chinese with English abstract)

HE W G, LIU X W, YUAN D Y, et al., 2015. Preliminary study on the Late Quaternary activity characteristics of the Menglian Fault in Southwest Yunnan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 37(4): 986-995. (in Chinese with English abstract)

HOU Z Q, LIU L J, ZHANG H J, et al., 2024. Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau controlled by tearing of the Indian slab[J]. Nature Geoscience, 17(3): 255-263.

HUANG J Q, CHEN B W, 1987. The evolution of the Tethys in China and adjacent regions[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

HUANG X J, WU Z H, HUANG X L, et al., 2018. Tectonic geomorphology constrains on quaternary activity and segmentation along Chenghai-Binchuan Fault zone in Northwest Yunnan, China[J]. Earth Science, 43(12): 4651-4670. (in Chinese with English abstract)

IBARRA D E, DAI J G, GAO Y, et al., 2023. High-elevation Tibetan Plateau before India–Eurasia collision recorded by triple oxygen isotopes[J]. Nature Geoscience, 16(9): 810-815.

KE X P, WANG Y, XU H Z, 2009. The forward simulation of gravity for 3D crustal structures in the Tibetan plateau[J]. Progress in Geophysics, 24(4): 1225-1234. (in Chinese with English abstract)

KIRBY E, HARKINS N, WANG E Q, et al., 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault[J]. Tectonics, 26(2): 2006TC002033.

KREEMER C, HAMMOND W C, BLEWITT G, 2018. A robust estimation of the 3 - D intraplate deformation of the North American Plate from GPS[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(5): 4388-4412.

LACASSIN R, VALLI F, ARNAUD N, et al., 2004. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakorum fault, Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 219(3-4): 255-269.

LASKE G, MASTERS G, MA Z T, et al. , 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree global model of Earth's crust[C]//Proceedings of EGU General Assembly 2013. Vienna: EGU: 2658.

LAVÉ J, AVOUAC J P, 2000. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B3): 5735-5770.

LEI J S, ZHAO D P, XU X W, et al., 2019. Is there a big mantle wedge under eastern Tibet?[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 292: 100-113.

LI F, LIU H G, JIA Q C, et al., 2018. Holocene active characteristics of the northern segment of the Minjiang fault in the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 40(1): 97-106. (in Chinese with English abstract)

LI H B, PAN J W, SUN Z M, et al., 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194-213. (in Chinese with English abstract)

LI J, YAO Y, LI R, et al., 2022a. Present - day strike - slip faulting and thrusting of the Kepingtage fold - and - thrust belt in southern Tianshan: constraints from GPS observations[J]. Geophysical Research Letters, 49(11): e2022GL099105.

LI K, KIRBY E, XU X W, et al., 2019a. Rates of Holocene normal faulting along the Dong Co fault in central Tibet, based on ^{14}C dating of displaced fluvial terraces[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 183: 103962.

LI K, TAPPONNIER P, XU X W, et al., 2022b. Holocene slip rate along the Beng Co Fault and dextral strike - slip extrusion of central eastern Tibet[J]. Tectonics, 41(8): e2022TC007230.

LI K, CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, et al., 2024a. Previously unrecognized, 1000 km-long Qixiang Co fault governs eastward escape of central Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 644: 118928.

LI T, CHEN Z X, CHEN J, et al., 2019b. Along - strike and downdip segmentation of the Pamir frontal thrust and its association with the 1985 M_W 6.9 Wuqia earthquake[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(9): 9890-9919.

LI X, RAN Y K, CHEN L C, et al., 2016. The Holocene seismic evidence on southern segment of the Red River Fault zone[J]. Seismology and Geology, 38(3): 596-604. (in Chinese with English abstract)

LI Y J, SHAO Z G, SHI F Q, et al., 2020a. Stress evolution on active faults in the southwestern Yunnan region, southeastern Tibetan Plateau, and implications for seismic hazard[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 200: 104470.

LI Y H, SONG S W, HAO M, et al., 2023. Present-day crustal deformation across the Daliang Shan, southeastern Tibetan Plateau constrained by a dense GPS network[J]. Geophysical Journal International, 232(3): 1619-1638.

LI Z F, XU X W, TAPPONNIER P, et al., 2021. Post-20 ka earthquake scarps along NE-Tibet's Qilian Shan frontal thrust: multi-millennial return, ～characteristic co-seismic slip, and geological rupture control[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(12): e2021JB021889.

LI Z G, LIU-ZENG J, JIA D, et al., 2016. Quaternary activity of the range front thrust system in the Longmen Shan piedmont, China, revealed by seismic imaging and growth strata[J]. Tectonics, 35(12): 2807-2827.

LI Z J, HAO M, HAMMOND W C, et al., 2024b. Geodetic constraints on three-component motion of the Ordos block (China) and their implications for lithospheric dynamics[J]. GSA Bulletin, 136(11-12): 5217-5230.

LI Z J, WANG Y, GAN W J, et al. , 2020b. Diffuse deformation in the SE Tibetan Plateau: New insights from geodetic observations[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(10). https://doi.org/10.1029/2020JB019383

LIU F C, PAN J W, LI H B, et al., 2022. Characteristics of quaternary activities along the Riganpei co fault and seismogenic structure of the July 23, 2020 M_W6.4 Nima Earthquake, Central Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(2): 173-188. (in Chinese with English abstract)

LIU F C, PAN J W, LI H B, et al., 2024. Tenfold lower Late Quaternary throw rates in central Tibet compared to southern Tibet reflect different extensional deformation mechanisms[J]. Journal of Structural Geology, 182: 105116.

LIU J, ZENG L S, DING L, et al., 2009. Tectonic geomorphology, active tectonics and lower crustal channel flow hypothesis of the southeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1227-1255. (in Chinese with English abstract)

LIU J R, REN Z K, ZHENG W J, et al., 2020. Late Quaternary slip rate of the Aksay segment and its rapidly decreasing gradient along the Altyn Tagh fault[J]. Geosphere, 16(6): 1538-1557.

LIU J R, REN Z K, ZHANG H P, et al., 2022. Slip rates along the Laohushan Fault and spatial variation in slip rate along the Haiyuan Fault zone[J]. Tectonics, 41(2): e2021TC006992.

LIU J R, REN Z K, MIN W, et al., 2025. A quintessential strike - slip contractional duplex: deciphering the geometric kinematics of the Elashan Fault, NE margin of Tibetan Plateau, China[J]. Tectonics, 44(2): e2024TC008783.

LU H H, WU D Y, ZHANG H P, et al., 2020. Spatial patterns of Late Quaternary river incision along the northern Tian Shan foreland[J]. Geomorphology, 357: 107100.

LU H H, JIANG Y T, LI B J, et al., 2022. Origin of Late Quaternary gravel and drainage basin expansion in the northern Chinese Tian Shan: insights from sediment provenance analyses[J]. Journal of Geophysical Research:

Earth Surface, 127(5): e2021JF006472.

LUO J, 2013. Characteristics of focal mechanisms and stress field of the Sichuan-Yunnan rhombic block and its adjacent regions[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)

MARTÍNEZ-GARZÓN P, KWIATEK G, ICKRATH M, et al., 2014. MSATSI: a MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool[J]. Seismological Research Letters, 85(4): 896-904.

MENG J, GILDER S A, TAN X D, et al., 2023. Strengthening the argument for a large Greater India[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 120(33): e2305928120.

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.

MOLNAR P, 2005. Mio-Pliocene growth of the Tibetan Plateau and evolution of East Asian climate[J]. Palaeontologia Electronica, 8(1): 1-23. 2A: 23p, 625KB

OHSUMI T, MUKAI Y, FUJITANI H, 2016. Investigation of damage in and around kathmandu valley related to the 2015 Gorkha, Nepal earthquake and beyond[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 34(4): 1223-1245.

PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2022. Co-seismic rupture of the 2021, M_W7.4 Maduo earthquake (northern Tibet): short-cutting of the Kunlun fault big bend[J]. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117703.

PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)

RAN Y K, CHENG J W, GONG H L, et al., 2008. Late Quaternary geomorphic deformation and displacement rates of the Anninghe fault around Zimakua[J]. Seismology and Geology, 30(1): 86-98. (in Chinese with English abstract)

REID A J, WILSON C J L, LIU S, 2005. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 27(1): 119-137.

ROBINSON A C, YIN A, MANNING C E, et al., 2007. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. GSA Bulletin, 119(7-8): 882-896.

ROGER F, JOLIVET M, MALAVIEILLE J, 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: a synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 39(4): 254-269.

SCHURR B, RATSCHBACHER L, SIPPL C, et al., 2014. Seismotectonics of the Pamir[J]. Tectonics, 33(8): 1501-1518.

SHAO Z G, FENG W, WANG P, et al., 2020. A study review on characteristics of seismic activity of active-tectonic block boundaries in mainland China[J]. Seismology and Geology, 42(2): 271-282. (in Chinese with English abstract)

SHI X H, KIRBY E, LU H J, et al., 2014. Holocene slip rate along the Gyaring Co Fault, central Tibet[J]. Geophysical Research Letters, 41(16): 5829-5837.

SHI X H, SIEH K, WELDON R, et al., 2018. Slip rate and rare large prehistoric earthquakes of the Red River Fault, Southwestern China[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(7): 2014-2031.

SIPPL C, SCHURR B, YUAN X, et al., 2013. Geometry of the Pamir - Hindu Kush intermediate - depth earthquake zone from local seismic data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(4): 1438-1457.

TAN X, LIANG K, MA B Q, 2023. A review of research progress on the Late Quaternary activities of the Xiaojiang Fault Zone[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 18(4): 757-772. (in Chinese with English abstract)

TANG Q, ZHENG W J, BI H Y, et al., 2024. Fault slip behavior and segmentation revealed by geomorphic offset clusters: an example from the middle Riganpei co fault, central Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 260: 105976.

TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294(5547): 1671-1677.

TAYLOR M, YIN A, RYERSON F J, et al., 2003. Conjugate strike - slip faulting along the Bangong - Nujiang suture zone accommodates coeval east - west extension and north - south shortening in the interior of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 22(4): 2002TC001361.

TENG J W, YANG D H, TIAN X B, et al., 2019. Geophysical investigation progresses of the Qinghai-Tibetan Plateau in the past 70 years[J]. Scientia Sinica Terrae, 49(10): 1546-1564. (in Chinese with English abstract)

THOMPSON J A, BURBANK D W, LI T, et al., 2015. Late Miocene northward propagation of the northeast Pamir thrust system, northwest China[J]. Tectonics, 34(3): 510-534.

WANG C S, ZHU L D, LIU Z F, 2004. Tectonic and sedimentary evolution of basins in the north of Qinghai-Tibet plateau and northward growing process of Qinghai-Tibet plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 19(3): 373-381. (in Chinese with English abstract)

WANG D, CHANG H, YIN G M, et al., 2021. Spatial changes in Late Quaternary slip rates along the Gyaring Co Fault: implications for strain partitioning and deformation modes in central Tibet[J]. Tectonics, 40(5): e2020TC006110.

WANG H, RAN Y K, LI Y B, 2011. Growth of a small pull-apart sasin and slip rate of strike-slip fault: with the example of Zemuhe fault on the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 33(4): 818-827. (in Chinese with English abstract)

WANG H, CHEN L C, RAN Y K, et al., 2015. Paleoseismic investigation of the seismic gap between the seismogenic structures of the 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes along the Longmen Shan fault zone at the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Lithosphere, 7(1): 14-20.

WANG H, WRIGHT T J, LIU-ZENG J, et al., 2019. Strain rate distribution in South - Central Tibet from two decades of InSAR and GPS[J]. Geophysical Research Letters, 46(10): 5170-5179.

WANG M, SHEN Z K, 2020. Present - day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WANG W T, ZHANG P Z, GARZIONE C N, et al., 2022. Pulsed rise and growth of the Tibetan Plateau to its northern margin since ca. 30 Ma[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119(8): e2120364119.

WANG X G, LI C Y, LV L X, et al., 2017. Analysis of the Late Quaternary activity along the Wenchuan-Maoxian fault—Middle of the back-range fault at the Longmenshan fault zone[J]. Seismology and Geology, 39(3): 572-586. (in Chinese with English abstract)

WANG X Y, VANDENBERGHE J, LU H Y, et al., 2017b. Climatic and tectonic controls on the fluvial morphology of the Northeastern Tibetan Plateau (China)[J]. Journal of Geographical Sciences, 27(11): 1325-1340.

WARD S N, 1998. On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: the United States[J]. Geophysical Journal International, 134(1): 172-186.

WEI Y M, WEI X H, LI D W, et al., 2017. Remote sensing imagery features and activity analyses of Heqing-Eryuan Fault Zone in the northwestern area of Yunnan Province[J]. Quaternary Sciences, 37(2): 234-249. (in Chinese with English abstract)

WEI Z Y, HE H L, SHI F, et al., 2012. Slip rate on the south segment of Daliangshan fault zone[J]. Seismology and Geology, 34(2): 282-293. (in Chinese with English abstract)

WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

WU C Y, ZHENG W J, ZHANG Z Q, et al., 2018. Terrace sequence along the Yushanguxi River in the southern piedmont of Tian Shan and its relationship to climate and tectonics in northwestern China[J]. Geomorphology, 313: 48-57.

WU C Y, ZHENG W J, ZHANG P Z, et al., 2019. Oblique thrust of the Maidan Fault and Late Quaternary tectonic deformation in the southwestern Tian Shan, northwestern China[J]. Tectonics, 38(8): 2625-2645.

WU C Y, ZHENG W J, ZHANG Z Q, et al., 2020. Large-earthquake rupturing and slipping behavior along the range-front Maidan fault in the southern Tian Shan, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 190: 104193.

WU C Y, WANG W T, ZHENG W J, et al., 2021. Opposite sense of strike - slip faulting and crustal rotation accommodating left - lateral shear between the Tianshan Mountains and Kazakh platform[J]. Geophysical Research Letters, 48(24): e2021GL096442.

WU C Y, ZHANG P Z, ZHANG Z Q, et al., 2023. Slip partitioning and crustal deformation patterns in the Tianshan orogenic belt derived from GPS measurements and their tectonic implications[J]. Earth-Science Reviews, 238: 104362.

WU F Y, WAN B, ZHAO L, et al., 2020. Tethyan geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1627-1674. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, YE P S, WU Z H, 2009. The seismic intensity, seismogenic tectonics and mechanism of the M_S6.6 Damxung earthquake happened on October 6, 2008 in southern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 28(6): 713-725. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, 2019. The active fault map of China and its adjacent sea areas[J]. Journal of Geomechanics, 25(1): 151. (in Chinese)

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

XIAO W J, SONG D F, WINDLEY B F, et al., 2020. Accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: advances and perspectives[J]. Science China Earth Sciences, 63(3): 329-361.

XIAO X C, LI T D, LI G C, et al. , 1988. Tectonic evolution of Himalayan lithosphere[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

XU X W, WU X Y, YU G H, et al., 2017. Seismo-geological signatures for identifying M≥7.0 earthquake risk areas and their premilimary application in China's mainland[J]. Seismology and Geology, 39(2): 219-275. (in Chinese with English abstract)

XU Z Q, YANG J S, LI W C, et al., 2013. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(6): 1847-1860. (in Chinese with English abstract)

YAO S H, GAI H L, YIN X, et al., 2020. Tectonic Geomorphology and Quaternary slip rate of the Xitieshan section of the northern margin fault of Qaidam Basin[J]. Seismology and Geology, 42(6): 1385-1400. (in Chinese with English abstract)

YAO T D, WU F Y, DING L, et al., 2015. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches[J]. National Science Review, 2(4): 468-488.

YAO T D, WANG W C, AN B S, et al., 2022. The scientific expedition and research activities on the Tibetan Plateau in 1949-2017[J]. Acta Geographica Sinica, 77(7): 1586-1602. (in Chinese with English abstract)

YAO T D, WANG W C, YANG W, et al., 2024. Imbalance of the Asian Water Tower characterized by glacier and snow melt[J]. Climate Change Research, 20(6): 689-698. (in Chinese with English abstract)

YIN A, NIE S, CRAIG P, et al., 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan[J]. Tectonics, 17(1): 1-27.

YIN A, HARRISON T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211-280.

YIN A, 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation[J]. Earth-Science Reviews, 76(1-2): 1-131.

YUAN D Y, ZHANG P Z, LIU B C, et al., 2004. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, CHAMPAGNAC J D, GE W P, et al., 2011. Late Quaternary right-lateral slip rates of faults adjacent to the lake Qinghai, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. GSA Bulletin, 123(9-10): 2016-2030.

YUAN D Y, GE W P, CHEN Z W, et al., 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large - scale continental geodynamics: a review of recent studies[J]. Tectonics, 32(5): 1358-1370.

YUAN D Y, FENG J G, ZHENG W J, et al., 2020. Migration of large earthquakes in Tibetan block area and disscussion on major active region in the future[J]. Seismology and Geology, 42(2): 297-315. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, XIE H, SU R H, et al., 2023. Characteristics of co-seismic surface rupture zone of Menyuan M_S6.9 earthquake in Qinghai province on January 8, 2022 and seismogenic mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(1): 229-244. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B X, ZHENG W J, LI T, et al., 2022. Late Cenozoic fold deformation in the northern margin of Qaidam Basin and southward propagation of Qilian Shan[J]. Tectonophysics, 822: 229153.

ZHANG H P, KIRBY E, PITLICK J, et al., 2017. Characterizing the transient geomorphic response to base - level fall in the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(2): 546-572.

ZHANG H P, LIU C C, XIONG J G, et al., 2022. Late Cenozoic tectonic deformation and geomorphological evolution in the Gonghe-Chaka Basin on the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 42(3): 662-672. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, MOLNAR P, DOWNS W R, 2001. Increased sedimentation rates and grain sizes 2±4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. Nature, 410(6831): 891-897.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(S2): 13-24.

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)

ZHANG P Z, WANG W T, GAN W J, et al., 2022. Present-day deformation and geodynamic processes of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 96(10): 3297-3313. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X M, TENG J W, SUN R M, et al., 2014. Structural model of the lithosphere–asthenosphere system beneath the Qinghai–Tibet Plateau and its adjacent areas[J]. Tectonophysics, 634: 208-226.

ZHAO L S, HELMBERGER D V, 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(1): 91-104.

ZHENG W J, ZHANG P Z, HE W G, et al., 2013. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults[J]. Tectonophysics, 584: 267-280.

ZHENG W J, LIU X W, YU J X, et al., 2016. Geometry and late Pleistocene slip rates of the Liangdang-Jiangluo fault in the western Qinling mountains, NW China[J]. Tectonophysics, 687: 1-13.

ZHENG W J, YUAN D Y, ZHANG P Z, et al., 2016. Tectonic geometry and kinematic dissipation of the active faults in the northeastern Tibetan plateau and their implications for understanding northeastward growth of the plateau[J]. Quaternary Sciences, 36(4): 775-788. (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, WANG Q L, YUAN D Y, et al., 2020. The concept, review and new insights of the active-tectonic block hypothesis[J]. Seismology and Geology, 42(2): 245-270. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG B X, YUAN D Y, et al., 2021. Tectonic Activity in the Southern Alashan Block and the Latest Boundary of Outward Expansion on the North eastern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 43(2): 224-236. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG Z Q, HAO M, et al., 2022. Physical basis for prediction of continental strong earthquakes: development and prospect of active tectonic block theory[J]. Chinese Science Bulletin, 67(13): 1352-1361. (in Chinese with English abstract)

ZHOU R J, PU X H, HE Y L, et al., 2000. Recent activity of Minjiang Fault zone, uplift of Minshan block and their relationship with seismicity of Sichuan[J]. Seismology and Geology, 22(3): 285-294. (in Chinese with English abstract)

ZHU L P, HELMBERGER D V, 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5): 1634-1641.

ZUBOVICH A V, WANG X Q, SCHERBA Y G, et al., 2010. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions[J]. Tectonics, 29(6): TC6014.

附中文参考文献

陈培善，白彤霞，李保昆，2003. *b* 值和地震复发周期[J]. 地球物理学报，46(4)：510-519.

程理，李光涛，吴昊，等，2020. 云南中甸-大具断裂马家村-大具段古地震初步研究[J]. 中国地震，36(2)：211-220.

崔鹏，韦方强，陈晓清，等，2008. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊，23(4)：317-323.

崔鹏，胡凯衡，陈华勇，等，2018. 丝绸之路经济带自然灾害与重大工程风险[J]. 科学通报，63(11)：989-997.

崔子健, 陈章立, 王勤彩, 等, 2019. 南北地震带区域构造应力场反演[J]. 地震学报, 41(2): 219-229.

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), 32(12): 1020-1030.

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 10(S1): 66-73.

邓起东, 高翔, 杨虎, 2009. 断块构造、活动断块构造与地震活动[J]. 地质科学, 44(4): 1083-1093.

邓起东, 程绍平, 马冀, 等, 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 57(7): 2025-2042.

丁林, 李震宇, 宋培平, 2017. 青藏高原的核心来自南半球冈瓦纳大陆[J]. 中国科学院院刊, 32(9): 945-950.

高孟潭, 2015.《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 1-264.

郭祥云, 蒋长胜, 韩立波, 等, 2022. 中国大陆及邻区震源机制数据集（2009-2021年）[EB/OL]. https: //data.earthquake.cn, 2022. DOI: 10.12080/nedc.11.ds.2022.0004 or CSTR: 12166.11.ds.2022.0004. .

何付明, 常祖峰, 2022. 滇西北龙蟠—乔后断裂带桃源段晚第四纪活动特征研究[J]. 地震工程学报, 44(3): 579-591.

何文贵, 刘兴旺, 袁道阳, 等, 2015. 滇西南地区孟连断裂晚第四纪新活动特征初步研究[J]. 地震工程学报, 37(4): 986-995.

黄汲清, 陈炳蔚, 1987. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社.

黄小巾, 吴中海, 黄小龙, 等, 2018. 滇西北程海-宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定[J]. 地球科学, 43(12): 4651-4670.

柯小平, 王勇, 许厚泽, 2009. 青藏高原三维地壳结构的重力正演模拟[J]. 地球物理学进展, 24(4): 1225-1234.

李峰, 刘华国, 贾启超, 等, 2018. 青藏高原东缘岷江断裂北段全新世活动特征[J]. 地震地质, 40(1): 97-106.

李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等, 2021. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例[J]. 地质学报, 95(1): 194-213.

李西, 冉勇康, 陈立春, 等, 2016. 红河断裂带南段全新世地震活动证据[J]. 地震地质, 38(3): 596-604.

刘富财, 潘家伟, 李海兵, 等, 2022. 青藏高原中部日干配错断裂第四纪活动特征及2020年7月23日西藏尼玛 M_W6.4地震发震构造分析[J]. 地球学报, 43(2): 173-188.

刘静, 曾令森, 丁林, 等, 2009. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和下地壳流动假说[J]. 地质科学, 44(4): 1227-1255.

罗钧, 2013. 川滇块体及周边现今震源机制和应力场特征研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.

彭建兵, 崔鹏, 庄建琦, 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 39(12): 2377-2389.

冉勇康, 程建武, 宫会玲, 等, 2008. 安宁河断裂紫马跨一带晚第四纪地貌变形与断层位移速率[J]. 地震地质, 30(1): 86-98.

邵志刚, 冯蔚, 王芃, 等, 2020. 中国大陆活动地块边界带的地震活动特征研究综述[J]. 地震地质, 42(2): 271-282.

谭鑫, 梁宽, 马保起, 2023. 小江断裂带晚第四纪活动研究综述[J]. 震灾防御技术, 18(4): 757-772.

滕吉文, 杨顶辉, 田小波, 等, 2019. 青藏高原深部地球物理探测70年[J]. 中国科学: 地球科学, 49(10): 1546-1564.

王成善, 朱利东, 刘志飞, 2004. 青藏高原北部盆地构造沉积演化与高原向北生长过程[J]. 地球科学进展, 19(3): 373-381.

王虎, 冉勇康, 李彦宝, 2011. 小型拉分盆地的生长与走滑断层的位移速率: 以青藏高原东南缘则木河断裂带为例[J]. 地震地质, 33(4): 818-827.

王旭光, 李传友, 吕丽星, 等, 2017. 龙门山后山断裂中段汶川-茂县断裂的晚第四纪活动性分析[J]. 地震地质, 39(3): 572-586.

魏永明, 魏显虎, 李德文, 等, 2017. 滇西北地区鹤庆-洱源断裂带遥感影像特征及活动性分析[J]. 第四纪研究, 37(2): 234-249.

魏占玉, 何宏林, 石峰, 等, 2012. 大凉山断裂带南段滑动速率估计[J]. 地震地质, 34(2): 282-293.

吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6): 1627-1674.

吴中海, 叶培盛, 吴珍汉, 2009. 2008年10月6日西藏当雄 M_S6.6级强震的地震烈度控震构造和发震机理[J]. 地质通报, 28(6): 713-725.

吴中海, 2019. 中国毗邻海区活动断裂分布图(中英文)正式出版[J]. 地质力学学报, 25(1): 151.

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.

肖文交, 宋东方, WINDLEY B F, 等, 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 49(10): 1512-1545.

肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等, 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论[M]. 北京: 地质出版社.

徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等, 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 39(2): 219-275.

许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 29(6): 1847-1860.

姚生海, 盖海龙, 殷翔, 等, 2020. 柴达木盆地北缘断裂(锡铁山段)的构造地貌特征与晚第四纪活动速率[J]. 地震地质, 42(6): 1385-1400.

姚檀栋, 王伟财, 安宝晟, 等, 2022. 1949-2017年青藏高原科学考察研究历程[J]. 地理学报, 77(7): 1586-1602.

姚檀栋, 王伟财, 杨威, 等, 2024. 亚洲水塔失衡与冰雪变化[J]. 气候变化研究进展, 20(6): 689-698.

袁道阳, 张培震, 刘百篪, 等, 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 78(2): 270-278.

袁道阳, 冯建刚, 郑文俊, 等, 2020. 青藏地块区大地震迁移规律与未来主体活动区探讨[J]. 地震地质, 42(2): 297-315.

袁道阳, 谢虹, 苏瑞欢, 等, 2023. 2022年1月8日青海门源 M_S6.9地震地表破裂带特征与发震机制[J]. 地球物理学报, 66(1): 229-244.

张会平, 刘彩彩, 熊建国, 等, 2022. 青藏高原东北缘共和-茶卡盆地晚新生代构造变形与地貌演化[J]. 第四纪研究, 42(3): 662-672.

张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地

块[J]. 中国科学(D辑：地球科学)，33(S1)：12-20.

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.

张培震，王伟涛，甘卫军，等，2022. 青藏高原的现今构造变形与地球动力过程[J]. 地质学报，96(10)：3297-3313.

郑文俊，袁道阳，张培震，等，2016. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展[J]. 第四纪研究，36(4)：775-788.

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，王庆良，袁道阳，等，2020. 活动地块假说理论框架的提出、发展及未来需关注的科学问题[J]. 地震地质，42(2)：245-270.

郑文俊，张博譞，袁道阳，等，2021. 阿拉善地块南缘构造活动特征与青藏高原东北缘向外扩展的最新边界[J]. 地球科学与环境学报，43(2)：224-236. 郑文俊，张竹琪，郝明，等，2022. 强震孕育发生的大陆活动地块理论未来发展与强震预测探索[J]. 科学通报，67(13)：1352-1361.

周荣军，蒲晓虹，何玉林，等，2000. 四川岷江断裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关系[J]. 地震地质，22(3)：285-294.

第一作者简介：

郑文俊，中山大学地球科学与工程学院教授，博士生导师。长期从事活动构造、构造地貌与地震危险性方面的研究。已发表论文200多篇，其中近五年发表论文80余篇，出版专著1部。主持国家重点研发计划、第二次青藏高原综合科学考察研究（专题）、国家自然科学基金重大项目（课题）等项目多项。2017年获得国家自然科学二等奖。

