引用格式: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. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2023186

Citation: 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. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2023186

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

吴中海1,2,3

WU Zhonghai^{1,2,3}

- 1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
- 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,北京 100081;
- 3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心,北京 100081
- 1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
- 3. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China

The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around the Qinghai–Tibet Plateau: A case study of strong earthquakes since 1990

Abstract: [Objective] The Qinghai - Tibet Plateau is one of the most seismically active regions along the Mediterranean - Himalayan seismic belt. Understanding the earthquake-controlling effect of the active tectonic system in this region is crucial for analyzing regional strong earthquake hazards. [Methods] We analyzed earthquake activity with $M_{\rm w} \ge 6.0$ since 1990 and their tectonic mechanism around the Tibetan Plateau, focusing on the continental collision-extrusion tectonic system. [Results] The results show that the system plays a significant role in governing regional strong earthquake activity. Specifically, $M_w \ge 6.5$ earthquakes primarily occur along the main boundary fault zone of this tectonic system, exhibiting a relatively regular spatio-temporal migration process. Moreover, the multi-layered extrusion-rotation active tectonic system in the eastern Tibetan Plateau constitutes the primary earthquake-controlling structure of the strong earthquake process since 1990, followed by the thrust faults of the Himalayan foreland. Therefore, the extrusion tectonic system of the Qinghai-Tibet Plateau should be the focus for the trend analysis of the strong earthquake activity in the future, especially the most active secondary extrusion tectonic units such as the Bayan Har block. Comparative analysis of strong earthquake activities in and around the Anatolian plate reveals similar continental collision-extrusion tectonic systems and earthquakecontrolling effects in this area, indicating that this tectonic system is a typical earthquake-controlling structure in the intracontinental orogenic belt. [Conclusion] Further comprehensive analysis suggests that the active tectonic system can significantly control regional strong earthquake activity. Firstly, most of the strong earthquake events occur in the main boundary fault zone of the fault block in the tectonic system. Secondly, the strong earthquake events along different structural zones in the tectonic system often have linkage effects or mutual triggering relationships, and the complex or particular structural sites are often where double earthquakes or earthquake swarm

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20242319,DD20230014);国家自然科学基金云南联合基金项目(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)

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

第一作者:吴中海 (1974—),男,博士,研究员,主要从事新构造与活动构造研究。Email: wuzhonghai8848@ foxmail.com 收稿日期: 2023-12-01;修回日期: 2024-01-15;录用日期: 2024-03-14;网络出版日期: 2024-04-09;责任编辑:范二平

activities easily occur. Thirdly, when a certain structural unit or tectonic zone in the tectonic system is in an active stage, strong earthquake clustering phenomena occur. [Significance] A thorough understanding of the coordinated deformation relationships between major active faults in the tectonic system, the segmented rupture behavior of strong earthquake activity in active fault zones, and the characteristics of "long period, quasi-periodicity and clustering" of strong earthquake recurrence in situ on active faults will assist in more accurately assessing the future seismic hazard of active fault zones when analyzing the future trend of strong earthquake activity based on the active tectonic system.

Keywords: Qinghai - Tibet Plateau; continental collision orogeny; active tectonic system; strong earthquake activity; active fault

摘 要:青藏高原是地中海-喜马拉雅地震带上强震活动最频繁的区域之一,深入认识该区的活动构造体 系控震效应对于区域强震危险性分析具有重要科学意义。从陆陆碰撞-挤出活动构造体系角度,对青藏高 原自1990年以来的 Mw≥6.0 强震活动及控震构造机制进行分析发现,青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系 对区域强震活动起到显著控制作用,区域强震事件尤其是 Mw≥6.5 地震主要出现在构造体系的主要边界 断裂带上,并显示出相对有规律的时空迁移过程,而且青藏高原东部的多层次挤出-旋转活动构造体系构 成了1990年以来强震过程的主要控震构造,其次是喜马拉雅主前缘逆冲断裂带。因此,青藏高原挤出构 造体系应是未来强震活动趋势分析最值得关注的区域,尤其是当前最为活跃的巴颜喀拉次级挤出构造单 元。对比分析土耳其安纳托利亚板块及周边的强震活动发现,该区具有类似的陆陆碰撞-挤出构造体系及 控震效应,表明该构造体系是陆内造山中的一种典型的控震构造。进一步综合分析认为,活动构造体系 控震效应的主要表现:一是构造体系中主要断块的边界断裂带通常是强震活动的主要场所;二是构造体 系中不同构造带的强震活动常具有联动效应或相互触发关系,其中的复杂或特殊构造部位则是易出现双 震或震群活动的场所:三是当构造体系中某个构造单元或构造带处于活跃阶段时,便会出现强震丛集现 象。另外,充分认识构造体系中主要活动断层间的协调变形关系,活动断层带上的强震活动的分段破裂 行为,以及活动断层上强震原地复发通常存在"周期长、准周期性和丛集性"的特点等,有助于在根据 活动构造体系分析区域未来强震活动趋势时更为准确地判定活动断层带的未来强震危险性。

关键词:青藏高原;陆陆碰撞造山;活动构造体系;强震活动;活动断裂 中图分类号:P315;P553 文献标识码:A 文章编号:1006-6616 (2024) 02-0189-17 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023186

0 引言

中国大陆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构造 体系和相对高密度的活动断层,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;Wu and Hu,2019,2024)。而正 确理解活动构造如何控制强震的时空分布与迁移 及其成因机制是科学判断区域未来强震活动趋势 的关键,虽然研究者普遍关注到绝大部分强震总 是沿着活动构造带发生或重复出现(Reid,1911; 李四光,1973a),但强震的时空不均匀分布和局 部丛集活动,以及强震沿不同活动构造区带交替 出现等现象,表明活动构造与强震活动之间的关 系复杂。相关学者针对活动构造如何控制或影响 强震时空分布及成因曾提出了不同观点。最具代 表性的观点包括:①活动地块假说(邓起东等, 2003;张培震等,2003;郑文俊等,2019),强调 强震活动主要受控于活动地块间的差异运动和变 形,活动地块边界带往往是规模较大的活动断层 (带),是强震主要发生带;而地块内部因构造变 形弱,强震少。②板块边界动力主导观点,从板 块边界动力学角度,认为区域强震活动相对规律 的时空迁移过程主要受控于板块间相互作用及其 应力-应变向板内的传导过程(赵根模等, 2019, 2020)。③活动构造体系控震观点,认为活动构造 体系及其中不同构造单元间的相互作用是控制区 域强震活动时空不均匀分布及出现规律性迁移的主 要原因(吴中海等,2014,2016;吴中海,2024)。 上述观点无疑为深入理解活动构造与强震关系提 供了重要参考,但由于两者成因关系复杂,尤其 是活动构造体系的控震规律以及控震强震活动时 空迁移过程的具体机制等关键科学问题,仍需结 合更丰富的强震实例开展更深入的研究。

印度板块与欧亚板块新生代期间的持续陆陆 碰撞过程造就了全球平均海拔最高、变形最为强 烈且规模巨大的陆内活动造山系统——喜马拉雅-青藏高原造山带 (Dewey et al., 1988; Molnar and Lyon-Caent, 1989)。该活动造山带发育了高密度 的复杂活动断裂体系,是喜马拉雅-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,也 是中国地震灾害最为严重的区域之一(张培震等, 2013;吴中海和周春景,2018)。活动构造研究和 GPS 观测结果表明,印度板块与欧亚板块的陆陆 碰撞作用主要是通过高原周缘的近南北向缩短和 高原内部物质的向东挤出 2 种基本变形方式来调节 的,具有典型的陆陆碰撞-挤出活动构造体系特征 (Molnar and Tapponnier, 1978; Tapponnier et al., 1986; Zhang et al., 2004; 吴中海和周春景, 2018)。 因此, 深入理解青藏高原的强震活动特征, 对于 理解活动构造体系控震特征和预判区域未来强震 危险性都具有重要科学意义。

笔者以 1990 年以来青藏高原发生的 $M_w \ge 6.0$ 强震事件为例,重点探讨青藏高原陆陆碰撞-挤出 活动构造体系作用下的区域强震活动特点,初步 总结了活动构造体系控震特征,并兼论了土耳其 安纳托利亚板块及邻区发育的类似活动构造体系 及近年来的强震时空迁移特征;以期相关成果有 助于更好地了解陆内造山背景下"碰撞-挤出活动 构造体系"的控震效应及特征,并为科学判断区 域强震活动趋势提供参考。

1 青藏高原 1990 年以来的强震活动 主要特征

文章梳理了 1990 年 1 月 1 日—2023 年 8 月 30 日期间青藏高原发生的 $M_w \ge 6.0$ 强震事件,并重 点厘定了其中 $M_w \ge 6.5$ 强震事件的发震时间、地 点、矩震级 (M_w) 、发震构造和同震破裂等主要 参数 (表 1)。地震数据源自美国地质调查局 (USGS) 相关网站 (https://earthquake.usgs.gov/ earthquakes/map/), 搜集范围:北纬 26.037°~40.044°, 东经 76.025°~106.084°。结果显示(图1), 自 1990 年以来的近 33 年间,区内共发生 M_w≥6.0 强震 61 次、M_w≥6.5 强震 22 次,年平均发 生率分别约为 1.9 次/年和 0.7 次/年,其中最大震 级地震为 2008 年汶川 M_w7.9 大地震。

从空间分布来看(图 1a), 青藏高原发生的 $M_{w} \geq 6.0$ 强震活动具有较明显的弥散式分布特点, 除了少量 地震出现在西南天山地区外,其中约 50%的强震活动分布在青藏高原边缘地带,另有约 40%的强震出现在高原内部,这与该地区的高密度 活动断裂特征相吻合。从震源机制解来看(图 1b),不同断层类型的强震活动皆有,其中逆断层 型地震最多,达26个,占比约为43%,主要分布 在构成青藏高原周缘主边界的喜马拉雅山、龙门 山和西昆仑山一带的逆冲-褶皱变形带上;其次分 布在青藏高原东北部的柴达木盆地周缘和西南天 山南麓地带等挤压变形区内。走滑断层型强震共 21个,占比约为34%,在青藏高原周缘和内部皆 有分布,但主要出现在阿尔金、海原、东昆仑和 鲜水河-小江等大型左旋走滑断裂带上, 仅少量出 现在挤压与伸展变形区或断块内部。正断层型强 震14个,占比约为23%,除2个出现在塔里木盆 地西北部 (成因不明)、1个出现在青藏高原东南 缘之外,其他主要出现在青藏高原中南部的近东 西向伸展变形区内。

强震活动的震级-时间 (M-T) 图和地震累积 释放能曲线显示 (图 1c),此轮强震活动过程中包 含了 3 个相对明显的地震能快速释放期 (对应地 震累积释放能曲线中的陡峭段落),按时间顺序分 别为 1997 年西藏玛尼 M_w 7.5 地震至 2001 年青海 太阳湖 (昆仑山口西) M_w 7.8 地震期间、2008 年 M_w 7.9 汶川大地震前后和 2015 年尼泊尔 M_w 7.8、 M_w 7.3 地震前后。快速释放期之间是持续约 7 年 的地震能缓慢释放期,目前青藏高原活动造山带正 处于地震能缓慢释放阶段,但已经持续超过 8 年, 这是否预示着即将出现下一轮快速释放期值得关注。

2 青藏高原的陆陆碰撞-挤出活动构 造体系及其特征

综合以往的活动构造研究和 GPS 观测结果 (Molnar and Tapponnier, 1978; Tapponnier et al.,



地震释放能(E)采用公式 logE = 5.24+1.44M_w进行计算(美国地质调查局, https://www.usgs.gov/) a—强震分布图(DEM数据来源 https://www.gscloud.cn/search;国内的活动断层数据引自吴中海和周春景,2018;国外活动断层数据为遥 感解译);b—强震的震源机制解(数据搜索自 https://www.globalcmt.or);c—强震的震级-时间(*M-T*)分布与地震累计释放能曲线

图 1 1990年以来青藏高原发生的 M_w≥6.0 强震的活动特征

Fig. 1 Characteristics of strong earthquakes with $M_{\rm W} \ge 6.0$ around the Qinghai-Tibet Plateau since 1990

(a) Distribution map of strong earthquakes (DEM Data from https: //www.gscloud.cn/search); domestic active fault data from Wu and Zhou, 2018, and foreign active fault data from remote sensing interpretation); (b) Seismic source mechanism solutions of strong earthquakes (data retrieved from https: //www.globalcmt.org); (c) Magnitude-time (M-T) distribution of strong earthquakes and cumulative seismic energy release curve (Dark purple line)

The seismic energy release (E) is calculated using the formula $\log E = 5.24 + 1.44M_w$ (U.S. Geological Survey, https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/earthquake-magnitude-energy-release-and-shaking-intensity).

時号 (年-月-日) (*) 北纬/ 东 22/ (年-月-日) (*) (*) (*) (年-月-日) (*) (*) (*) 2 2022-09-05 29.68 102.24 四川 2 2022-01-07 37.83 101.29 青満 5 2015-04-26 33.19 103.86 四川 5 2015-04-25 28.23 84.73 配裕 8 2015-04-25 28.23 84.73 配裕 8 2015-04-25 28.23 84.73 配裕 8 2015-04-25 28.23 84.73 配裕 10 2013-04-25 28.23 84.73 配裕 11 2011-09-18 27.73 86.07 限務 11 2011-09-18 27.73 86.16 印周 11 2011-09-18 27.73 88.16 印周 11 2011-09-18 27.73 88.19 10.0 103.32 10 19 201-11-14 35.95 90.54 青桜 17 1999-03-28 30.51 79.40 印周 18 1997-11-08 35.07 87.33 10 19 1996-11-19 35.35 78.13 33 10	早年十年	后息级	震源	发震构造		_	司震震破裂		
(-) $(-)$ <t< th=""><th>地辰及生地</th><th>44 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1</th><th>深度/</th><th>第三ク会</th><th>東京</th><th></th><th>最大位</th><th>移/m</th><th>参考文献</th></t<>	地辰及生地	44 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 1	深度/	第三ク会	東京		最大位	移/m	参考文献
1 2022-09-05 29.68 102.24 四川 2 2022-01-07 37.83 101.29 曹浩 4 2017-08-08 33.19 103.86 四川 5 2015-04-25 33.19 103.86 四川 6 2015-04-25 28.23 84.73 尼省 7 2015-04-25 28.23 84.73 尼省 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼省 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼省 10 2015-04-12 35.91 82.59 蜀雪 11 2015-04-13 35.17 86.07 局消 11 2015-04-13 35.17 86.16 南消 11 2014-02-11 35.31 102.89 南消 11 2011-09-18 27.73 88.16 南消 12 2010-04-13 33.17 96.55 青常 13 2008-08-25 30.31 102.32 四 13 2008-09 <th></th> <th>/ M zrr \</th> <th>km</th> <th>哟 云 有 秋</th> <th>财区比则</th> <th>以及/ KIII</th> <th>水平</th> <th>垂直</th> <th></th>		/ M zrr \	km	哟 云 有 秋	财区 比则	以及/ KIII	水平	垂直	
2 2022-01-07 37.83 101.29 清満 3 2021-05-21 34.60 98.25 清満 4 2017-08-08 33.19 103.86 四川 5 2015-05-12 27.81 86.07 尼祥 6 2015-04-25 27.77 86.02 尼祥 7 2015-04-25 28.23 84.73 尼祥 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼祥 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼祥 10 2013-04-26 30.31 102.89 阿川 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿川 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿川 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿川 12 2010-04-13 33.17 96.55 靖常 13 2008-05-12 31.00 102.89 阿川 15 2008-05-12 31.00 103.32 阿川 15 2008-05-12	aJ川泸定	6.6	12	鉾水河断裂带磨西段	左旋走滑	22	2. 23	1	吴伟伟等,2023;韩炳权等,2023
3 2021-05-21 34.60 98.25 青尚 4 2017-08-08 33.19 103.86 四川 5 2015-05-12 27.77 86.07 尼裕 6 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 7 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼将 10 2013-04-26 30.31 102.89 阿川 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿尚 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿尚 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿月 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿月 12 2010-04-13 33.17 96.55 青常 13 2008-05-12 31.00 103.32 []] 15 2008-05-20 35.49 81.47 %] 16 2008-05-20	青海门源	6.6	13	每原断裂带冷龙岭托莱山段	左旋走滑	23	3.2	0.5~1.0	韩帅等, 2022
4 2017-08-08 33.19 103.86 四川 5 2015-04-12 27.81 86.07 尼省 6 2015-04-25 28.22 84.82 尼省 7 2015-04-25 28.23 84.82 尼省 8 2015-04-25 28.23 84.82 尼省 9 2014-02-12 35.91 82.59 新電 10 2013-04-20 30.31 102.89 四川 11 2011-09-18 27.73 88.16 日周 11 2011-09-13 33.17 96.55 青常 12 2010-04-13 33.17 96.55 青常 13 2008-08-25 30.90 83.52 団 15 2008-03-20 35.49 81.47 新雪 16 1999-03-28 30.51 79.46 日 17 1999-03-28 30.51 79.40 日 18 1997-11-08 35.07 87.33 3 3 19	青 海玛多	7.3	10	东昆仑断裂带分支昆仑山口-江错断裂东南段	左旋走滑	151 ~ 154	2.8~4.8	2.0	盖海龙等, 2021; 潘家伟等, 2021; Pan et al., 2022; Ran et al., 2022; Fan et al., 2022; Fan et al., 2022
5 2015-05-12 27.81 86.07 尼裕 6 2015-04-25 28.22 84.82 尼裕 7 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼裕 10 2013-04-26 35.91 82.59 新電 11 2011-09-18 35.31 102.89 阿川 11 2011-09-18 27.73 88.16 阿市 12 2010-04-13 33.17 96.55 青裕 13 2008-08-25 30.90 83.50 西南 13 2008-08-26 33.17 96.55 青裕 15 2008-03-20 35.49 81.47 新雪 15 2008-03-20 35.49 81.47 新雪 16 1999-03-28 30.51 79.40 107 17 1999-03-28 30.51 79.40 107 18 1997-11-1	明川九寨沟	6.5		东昆仑断裂带东段的塔藏断裂	左旋走滑	25~40	0.74~1.1	I	单新建等,2017;季灵运等,2017;郑绪君等,2017;郑绪君等,2017;陈威等,2018;申文豪等,2019;
6 2015-04-26 27.77 86.02 尼浴 7 2015-04-25 28.23 84.73 尼浴 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼浴 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼浴 10 2015-04-25 28.23 84.73 尼浴 11 2014-02-12 35.91 82.59 菊雪 11 2011-09-18 27.73 88.16 南雪 12 2010-04-13 33.17 96.55 青浴 13 2008-08-25 30.90 83.52 西雪 13 2008-08-25 31.00 103.32 四川 15 2008-03-20 35.49 81.47 菊雪 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 印 18 1997-11-08 35.07 87.33 ਗ 19 1996-11-19 35.35 78.13 3	己泊尔珠峰登山者营地	7.3	15	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带尼泊尔段	低角度逆冲	40	3.5(作	顷滑)	吴中海等, 2015
7 2015-04-25 28.22 84.82 尼沿 8 2015-04-25 28.23 84.73 尼泊 9 2015-04-25 28.23 84.73 尼泊 10 2013-04-26 35.91 82.59 獅雪 11 2013-04-12 35.91 82.59 獅雪 11 2011-09-18 27.73 88.16 同月 12 2010-04-13 33.17 96.55 青満 13 2008-08-25 30.90 83.52 西川 13 2008-08-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 31.00 103.32 四川 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 印 18 1997-11-08 35.07 87.33 西 19 1996-11-19 35.35 78.13 3	己泊尔(余震)	6.7	22.91	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带尼泊尔段	低角度逆冲	Ι			USGS
8 2015-04-25 28. 23 84. 73 尼浴 9 2014-02-12 35. 91 82. 59 新響 10 2013-04-20 30. 31 102. 89 阿川 11 2011-09-18 27. 73 88. 16 阿傅 11 2011-09-18 27. 73 88. 16 阿傅 11 2010-04-13 33. 17 96. 55 淸漸 12 2010-04-13 33. 17 96. 55 淸浙 13 2008-08-12 31. 00 103. 32 四川 15 2008-05-12 31. 00 103. 32 四川 15 2008-05-12 31. 00 103. 32 四川 15 2008-05-12 35. 49 81. 47 新ធ 16 2001-11-14 35. 95 90. 54 靑४ 17 1999-03-28 30. 51 79. 40 51 18 1997-11-08 35. 07 87. 33 51 19 1996-11-19 35. 35 78. 13 31	己泊尔(余震)	6.6	10	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带尼泊尔段	低角度逆冲	I			USGS
9 2014-02-12 35.91 82.59 新疆 10 2013-04-20 30.31 102.89 四川 11 2011-09-18 27.73 88.16 曰馬 12 2010-04-13 33.17 96.55 漕營 13 2008-08-25 30.90 83.52 西 _萬 14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 35.49 81.47 新雪 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 70 18 1997-11-08 35.07 87.33 78.13 3 19 1996-11-19 35.35 78.13 3 3 3	己泊尔博克拉	7.8	8. 22	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带尼泊尔段	低角度逆冲	140	5.3(作	顷 滑)	吴中海等, 2015
10 2013-04-20 30.31 102.89 四川 11 2011-09-18 27.73 88.16 印唐 12 2010-04-13 33.17 96.55 青浴 13 2008-08-25 30.90 83.52 西藤 14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-20 35.49 81.47 新電 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 105 18 1997-11-08 35.07 87.33 西唐 18 1997-11-19 35.35 78.13 新雪	所疆于田	6.9	0	呵尔金断裂西南分支:南硝尔库勒断裂、硝尔库勒断裂及阿什库勒断裂	左旋走滑	37.1	0.9	Ι	袁兆德等, 2021
11 2011-09-18 27.73 88.16 印角 12 2010-04-13 33.17 96.55 清浴 13 2008-08-25 30.90 83.52 西海 14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-12 31.00 103.32 四川 16 2008-03-20 35.49 81.47 渤雪 17 1999-03-28 30.51 79.40 印 18 1997-11-08 35.07 87.33 西 18 1997-11-108 35.07 87.33 雪 雪 19 1996-11-19 35.35 78.13 蜀 雪 雪	可川芦山	6.6	14	龙门山构造带南段的盲逆断层	逆断层	$20 \sim 28$	1.5~1.6	(倾滑)	王卫民等, 2013; 刘成利等, 2013
12 2010-04-13 33.17 96.55 曹猶 13 2008-08-25 30.90 83.52 西壽 14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-05-20 35.49 81.47 貓爾 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 79.4 18 1997-11-08 35.07 87.33 西唐 19 1996-11-19 35.35 78.13 麵雪	D度锡金邦	6.9	20	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带锡金段	走滑断层	Ι	I	I	USCS
13 2008-08-25 30.90 83.52 西藏 14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-03-20 35.49 81.47 新電 16 2001-11-14 35.95 90.54 青举 17 1999-03-28 30.51 79.40 印目 18 1997-11-08 35.07 87.33 西毒 19 1996-11-19 35.35 78.13 新電	肯海王树	6.9	17	玉树-甘孜断裂带隆宝湖-结古镇段	左旋走滑	46	2.4	0.6	周春景等,2014
14 2008-05-12 31.00 103.32 四川 15 2008-03-20 35.49 81.47 漸電 16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 印馬 18 1997-11-08 35.07 87.33 西嘯 19 1996-01-19 35.35 78.13 漸雪	互藏 仲巴县	6.7	12	仲巴-改则裂谷中段的帕龙错地堑	左旋正断层	50	1.15~1.34	1 (傾滑)	邱江涛等,2019
15 2008-03-20 35.49 81.47 新疆 16 2001-11-14 35.95 90.54 清浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 印馬 18 1997-11-08 35.07 87.33 西龜 19 1996-11-19 35.35 78.13 浙ब	可川汶川	7.9	19	龙门山构造带的映秀-北川断裂和彭县-灌县断裂	右旋逆断层	240	4.9	6.5	Xu et al., 2009
16 2001-11-14 35.95 90.54 青浴 17 1999-03-28 30.51 79.40 印唐 18 1997-11-08 35.07 87.33 西嘉 19 1996-11-19 35.35 78.13 新雪	所疆于田	6.6	14	阿尔金断裂西南分支局部拉分处的雪山西麓断裂	左旋正断层	31	1.8	2.0	徐锡伟等,2011;
17 1999-03-28 30.51 79.40 印度 18 1997-11-08 35.07 87.33 西藤 19 1996-11-19 35.35 78.13 新報	青海太阳湖	7.8	10	东昆仑断裂系库塞湖-昆仑山口段	左旋走滑	426	8.0		Xu et al., 2006
18 1997-11-08 35.07 87.33 西嶺 19 1996-11-19 35.35 78.13 新電	D度北安恰尔	6.6	15	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带印度乌塔兰恰尔邦段	低角度逆冲	I	I		USGS
19 1996-11-19 35.35 78.13 新事	互藏玛尼	7.5	33	东昆仑断裂系西段分支玛尔盖茶卡断裂	左旋走滑	$170\sim185$	5.5~7.5		Wang et al., 2007; Ren and Zhang, 2019
	所疆和田喀喇昆仑山口	6.9	33	呵尔金断裂系西段分支断裂	左旋走滑	61	I		Wang and Wright, 2012
20 1996-02-03 27.29 100.28 云南	云南丽江大具乡	6.6	11.1	给巴-王龙雪山东麓断裂	正断层	33	I	0.78	秦嘉政等,1997
21 1991-10-19 30.78 78.77 印度	D度代赫里	6.8	10.3	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带印度乌塔兰恰尔邦段	低角度逆冲	I	I	I	USGS
22 1990-04-26 35.99 100.25 青海	青海共和	6.5	8.1	青海共和盆地北西西向隐伏逆断层	左旋逆断层	40	0. 05	0.79 (領滑)	赵明等,1992

1990年以来青藏高原 22 次 M_w≥6.5 强震序列及其主要参数

表 1

第2期

1986; Molnar and Lyon-Caen, 1989; Zhang et al., 2004; 吴中海等, 2016),以及笔者近年来的活动断 裂编图成果(吴中海和周春景, 2018)可知,在活 动构造变形期,青藏高原主要通过高原周缘的近南 北向缩短和内部物质的向东挤出来调节印度板块与 欧亚板块间的陆陆碰撞变形作用,其现今地壳变形 可归纳为典型的陆陆碰撞。挤出活动构造体系(块 体楔入-挤出构造体系;图2)。该活动构造体系由 南向北主要包括喜马拉雅前缘逆冲缩短变形带、青 藏高原中南部的近东西向伸展变形区、青藏高原东 部的断块挤出构造系统和天山-祁连山逆冲缩短变形 带4个主要变形区带(图2)。断层滑动速率研究和GPS观测结果显示,印度板块与欧亚板块间的约1/2缩短量(18~22 mm/yr)被喜马拉雅主前缘逆冲断裂带所吸收(Ader et al., 2012),剩余的缩短量大部分被喜马拉雅造山带至天山-祁连山之间的断块通过近东西向伸展、近南北向缩短和向东挤出等多种变形方式所吸收(Molnar and Lyon-Caent, 1989; Zhang et al., 2004),仅少量变形可被进一步向北传递至准噶尔盆地至河西走廊以北、欧亚板块边缘的戈壁阿尔泰至贝加尔湖之间地带,并主要被共轭走滑断层作用所吸收(图2)。



Ⅰ-柴达木断块; Ⅱ-巴颜喀拉断块; Ⅲ-藏东-川滇-禅泰断块

图 2 青藏高原及邻区的活动构造变形样式与现今地壳运动状态 (Molnar and Lyon-Caen, 1989; Zhang et al., 2004; 吴中海和周春景, 2018)

Fig. 2 Active tectonic deformation patterns and present crustal movement around the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent regions (Molnar and Lyon-Caen, 1989; Zhang et al., 2004; Wu and Zhou, 2018)

I-Qaidam Block; II-Bayan Har Block; III-eastern Tibetan-Sichuan-Yunnan-Chantai Block

青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系的主要 特点是,其南、北两侧主要通过边界构造带的逆 冲-褶皱缩短变形来调节陆陆碰撞作用,但其内部 则主要是通过伸展和挤出变形来调节陆陆碰撞作 用。在青藏高原的内部,可大致以东昆仑左旋走 滑断裂带为界划分为南、北2个不同的变形区。北 侧的祁连山-柴达木断块属于压扭变形区,主要通 过一系列规模不等的北西—北西西向逆冲断层和 穿插其间的北北西向右旋与北西西向左旋走滑断 层主导下的近南北向挤压缩短与向东挤出运动来 调节地壳缩短变形。南侧的青藏高原中—南部属 于伸展变形区,该区以北西向的喀喇昆仑右旋走 滑断裂带和北东向龙木错-郭扎错左旋走滑断裂带 构成的共轭走滑断层系为西界,主要通过由近南 北向裂谷、规模不等的正断层以及由北东向和北 西向共轭走滑断层系所构成的近东西向伸展变形 系统来调节近南北向地壳缩短 (Molnar and Lyon-Caent, 1989; Taylor, et al., 2003; 吴中海和周春 景,2018),其现今的近东西向伸展变形速率约达 22±3 mm/yr,大致吸收了 10~14 mm/yr 的近南北 向缩短量 (Zhang et al., 2004)。青藏高原中部的

近东西向伸展变形向东被转化为向东挤出,并主 要被巴颜喀拉断块和藏东-川滇-禅泰断块的旋转-挤出作用所吸收(图2)。

青藏高原向东挤出过程主要通过3条大型弧形 走滑断层系的左旋走滑运动来完成(Tapponnier and Molnar, 1977; Molnar and Tapponnier, 1978), 从北向南分别是北东—北西西向的阿尔金-祁连-海原断裂系、近东西—北西西向的东昆仑断裂系 和北西西—南北向的鲜水河-小江断裂系(图2)。 这3条断裂系的第四纪晚期左旋走滑速率虽然都存 在分段差异,但最大都可达 10~14 mm/yr (Molnar and Lyon-Caent, 1989; Tapponnier et al., 2001; Zhang et al., 2004; 张军龙等, 2014)。通过大型 走滑断层带的左旋运动可将青藏高原的近南北向 缩短变形转换为断块向东挤出作用,并进一步将 印度板块与欧亚板块间的陆陆碰撞作用向中国大 陆的西南部和中东部施加影响。以上述3条走滑断 层系为主边界,可将青藏高原向东挤出变形划分 为3个构造单元 (图2),由北向南分别为:阿尔 金-祁连-海原逆冲走滑边界与其南侧的柴达木压 扭变形断块区 (以发育逆断层和走滑断层为主); 东昆仑断裂带、龙门山断裂带及其西南侧的巴颜 喀拉剪切变形断块区 (以发育走滑断层为主);鲜 水河-小江断裂系及其西南的藏东-川滇-禅泰弧形 旋扭变形断块区 (以发育弧形走滑断层和正断层 为主) (吴中海等, 2015)。这3个断块区在向东 挤出的同时,还伴随着顺时针旋转运动。断块旋 转一方面吸收了一部分青藏高原向东的挤出量,同 时可起到调节印度板块与华南板块间(属于碰撞造 山带的翼部) 右旋剪切变形的作用 (Molnar and Lyon-Caent, 1989; England and Molnar, 1990)。这 种包含了多个在几何学与运动学上存在密切联系的 挤出构造单元、并伴有断块旋转的活动构造系统也 可称之为"多层次挤出-旋转活动构造体系"。

综上,青藏高原的陆陆碰撞-挤出活动构造体 系中除了相对完整和稳定的柴达木盆地与塔里木 盆地外,实际上主要包含了3类变形方式明显不同 的次一级活动构造系统(图2)。一是构成青藏高 原活动造山带南、北主边界构造带,以逆冲-褶皱 变形为主、吸收板块间挤压缩短变形的喜马拉雅 前主缘逆冲断裂带和天山-祁连山(包含河西走廊 带)逆冲-褶皱变形带;二是青藏高原中南部伸展 变形区,主要以近南北向正断层作用和共轭走滑 断层作用等近东西向伸展变形方式来调节板块间 的近南北向缩短变形;三是"多层次挤出-旋转活 动构造体系",主要通过一系列大型走滑断层带左 旋运动控制下的邻侧断块向东侧向挤出和伴随的 顺时针旋转来吸收板块间的挤压缩短及造山带翼 部的剪切变形。

3 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造 体系与强震的关系

青藏高原在 1990 年以来的近 33 年间共发生 $M_w \ge 6.5$ 强震 22次(图1,表1),其中 $M_w \ge 7.0$ 地震 6次,显示其经历了一轮较明显的强震丛集活 动过程。其中大部分强震,尤其是 $M_w \ge 7.0$ 地震 都发生在青藏高原活动构造体系中的主边界构造 带上,主要是构成南界的喜马拉雅主逆冲构造带 和挤出断块的边界构造带上,仅少量出现在断块 内部(图3)。文章主要基于此轮 22次 $M_w \ge 6.5$ 强震的地震释放能分配及时空分布特征,探讨强 震活动与陆陆碰撞-挤出构造体系的关系。

3.1 构造体系中不同构造单元的强震分布

通过分析此轮强震活动与青藏陆陆碰撞-挤出 活动构造体系的关系发现(图3),构造体系的不 同活动单元在最近一轮强震活动过程中皆发生了 不同程度的强震活动,但活跃程度显然不同。此 轮 22 个 $M_w \ge 6.5$ 强震活动中,发生在喜马拉雅前 缘逆冲断裂带上的数量最多,达到7次,包括了 1991 年印度代赫里 $M_w 6.8$ 地震、1999 年印度北安 恰尔 $M_w 6.6$ 地震、2011 年印度锡金邦 $M_w 6.9$ 地 震、2015 年尼泊尔博克拉 $M_w 7.8$ 地震及其2 次强 余震($M_w 6.7$ 地震与 $M_w 6.6$ 地震)、珠峰登山者 营地 $M_w 7.3$ 地震。其中,除了 2011 年印度锡金邦



1—青藏高原中南部的近东西向伸展变形构造体系;2—由鲜水河-小江断裂带及藏东-川滇断块区构成的挤出构造体系;3—由东昆仑断裂带、龙门山断裂带及巴颜喀拉断块构成的挤出构造体系;4—由阿尔金-祁连-海原逆冲走滑边界及柴达木断块构成的挤出构造体系;5—走 滑断裂;6—逆冲断裂;7—正断层;8—GPS观测的主要断块现今运动状态及速率(数据引自Zhang et al.,2004);9—震源机制解(其中粗 线条代表发震断层节面);10—6.5≤M_w<7.0地震;11—7.0≤M_w<8.0地震</p>

图 3 青藏高原主要活动断裂与构造体系以及 1990 年以来发生的 $M_{W} \ge 6.5$ 强震活动 (震源机制解和地震数据引 自美国地质调查局 (USGS) 相关网站 (https: //earthquake. usgs. gov/);国内部分活动断层数据引自吴中海和周春景, 2018;国外活动 断层数据为遥感解译;断层滑动速率引自 Van Der Woerd et al., 2002; Vigny et al., 2003; Cowgill, 2007; Ader et al., 2012; Cowgill, 2007; Ader et al., 2012; Chevalier et al., 2012, 2017; Liu et al., 2020; Li et al., 2021; 胡萌萌等, 2023)

Fig. 3 Main active faults and tectonic systems around the Qinghai-Tibet Plateau and strong earthquake events with $M_w \ge 6.5$ since 1990 (seismic source mechanisms and earthquake data from relevant websites of the United States Geological Survey (USGS); some domestic active fault data from Wu and Zhou, 2018; foreign active fault data from remote sensing interpretation; fault slip rates from Van Der Woerd et al., 2002; Vigny et al., 2003; Cowgill, 2007; Ader et al., 2012; Chevalier et al., 2012, 2017; Liu et al., 2020; Li et al., 2021; Hu et al., 2023)

1-Nearly EW-trending extensional deformation tectonic system in the central and southern Qinghai-Tibet Plateau; 2-Extrusion tectonic system composed of the Xianshuihe-Xiaojiang Fault Zone and the eastern Tibetan-Sichuan-Yunnan Block; 3-Extrusion tectonic system composed of the Dongkunlun Fault Zone, Longmenshan Fault Zone, and Bayan Har Block; 4-Extrusion tectonic system composed of the Altyn Tagh-Qilian-Haiyuan thrust and strike-slip boundary and Qaidam Block; 5-Strike-slip faults; 6-Thrust faults; 7-Normal faults; 8-Current movement and velocity of main blocks observed by GPS (data from Zhang et al., 2004); 9-Seismic source mechanisms (thick lines represent fault planes); 10-Earthquakes with $6.5 \le M_w < 7.0$; 11-Earthquakes with $7.0 \le M_w < 8.0$

地震的震源机制显示为走滑型,推测与逆冲断层 带中的捩断层有关外,其余强震皆为低角度逆冲 型。其次在由东昆仑断裂带、龙门山断裂带及其 南侧的巴颜喀拉断块区构成的挤出构造体系中, 共发生了6次 M_w≥6.5强震,且多数发生在该挤 出构造体系的边界断裂带上,地震强度普遍较高, 包括东昆仑断裂带上的 1997 年西藏玛尼 M_w 7.5 地 震、2001 年青海太阳湖 M_w 7.8 地震、2017 年四川 九寨沟 M_w 6.5 地震和 2021 年青海玛多 M_w 7.3 地 震,龙门山断裂带上的 2008 年四川汶川 M_w 7.9 地 震和 2013 年四川芦山 M_w 6.6 地震。在由阿尔金-祁连-海原逆冲走滑边界与其南侧柴达木断块区构 成的挤出构造体系中发生强震5次,其中柴达木断 块区内的青海共和盆地 1990 年 M_w6.5 地震表现为 逆断层性质为主的震源机制解;此外还包括阿尔 金断裂带西南端分支断裂上的 1996 年新疆和田喀 喇昆仑山口 M_w6.9 地震、2008 年与 2014 年新疆于 田 M_w6.6 与 M_w6.9 地震, 2022 年海原断裂带冷龙 岭-拖莱山段的青海门源 Mw6.6 地震。其中 2008 年新疆于田地震因发生在阿尔金断裂带与其西南 分支郭扎错断裂的左阶雁列拉分区,表现为正断 层型震源机制解,其余3次皆为左旋走滑型地震。 在由鲜水河-小江断裂带及其西南的藏东-川滇断 块区构成的挤出构造体系中发生的强震数量最少, 仅为3次,包括鲜水河-小江断裂带上玉树段2010 年青海玉树 M_w6.9 地震和磨西段 2022 年四川泸定 $M_{w}6.6$ 地震,为左旋走滑型震源机制解;而发生 在断块内部滇西北丽江-大理断陷带北段的 1996 年云南丽江 M_w6.6 地震为正断层型震源机制解。

如果从上述青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造 体系中3类不同的次一级活动构造系统角度分析, 此轮22个 M_w≥6.5强震活动中,发生在青藏高原 "多层次挤出-旋转活动构造体系"中的强震数量 最多,达到14个;其次发生在喜马拉雅前缘逆冲 断裂带上的强震达到7次,而发生在青藏高原中南 部伸展区的强震仅有1次。因此,青藏高原 "多 层次挤出-旋转活动构造体系"无疑是此轮强震活 动的主要控震构造。

3.2 构造体系中的地震释放能分配

为进一步了解此轮强震活动在陆陆碰撞-挤出 构造体系不同构造单元中的活跃程度,可根据公 式 log $E = 5.24 + 1.44 M_w$ (图 1),将 22次 $M_w \ge 6.5$ 地震的矩震级 (M_w) 换算为地震释放能 (E), 然 后对比不同类型发震断层和构造单元(体系)的 地震释放能及其分配情况。结果显示(图4),从 发震断层类型角度(图4a),逆断层上发生的强震 释放能最多,约占47%,主要发生在喜马拉雅前 缘逆冲断裂带和东缘的龙门山断裂带。其次为走 滑断层,发生在其上的强震释放能约占44%,主 要是调节青藏高原向东挤出的主边界走滑断层带。 仅有约9%的地震释放能被块体内部的正断层作用 所释放,主要出现在藏南裂谷带和滇西北丽江-大 理裂陷带。按照青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系 的不同构造单元统计(图4b),阿尔金-祁连-海 原断裂系、东昆仑断裂和鲜水河-小江断裂带3个 挤出走滑边界带上的地震释放能最多,约占43%; 其次为印度-欧亚板块间的主边界逆冲带(即喜马 拉雅前缘逆冲断裂带), 地震释放能约占 31%; 挤 出前缘的边界逆冲带与龙门山断裂带上的地震释 放能分别约占18%, 而块体内部变形释放的地震 能最少,约占9%。上述地震释放能分配特点表 明,印度-欧亚板块间的喜马拉雅逆冲边界带和调 节青藏高原向东挤出的主边界走滑断层带是控制 此轮强震活动中的主要活动构造单元。青藏高原 向东挤出构造体系包括阿尔金-祁连-海原、东昆 仑和鲜水河-小江3个走滑挤出边界带以及龙门山 断裂带的地震释放能占比为 61%: 加之邻侧断块 内部的强震释放能,占比共接近70%,表明青藏 高原"多层次挤出-旋转活动构造体系"是此轮强 震活动的主控构造。进一步对比青藏高原3个向东 挤出变形构造体系中的地震释放能可知(图 4c). 东昆仑断裂带及其南侧巴颜喀拉断块区释放的地 震能最多,所占比例约为47%,显然其是此轮强 震活动中最为活跃的构造单元。其次阿尔金-祁 连-海原逆冲走滑边界与其南侧的柴达木断块区的 地震释放能占比约为15%;而鲜水河-小江断裂带 及其西南的藏东-川滇断块区上的地震释放能最 少, 仅约为7%。

3.3 构造体系中强震活动的其他特征

除上述青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系与此 轮强震活动的空间相关性,另外还有2个值得注意 的突出现象:

(1)此轮强震活动过程存在沿挤出断块边界构造带发生规律性迁移的现象,主要表现为沿阿尔金-祁连-海原断裂系、东昆仑断裂和鲜水河-小江断裂带 3 个大型走滑挤出边界带强震活动整体上由西向东迁移。例如,沿东昆仑断裂带由西向东依次出现 1997 年玛尼 M_w 7.5 地震、2001 年太阳湖 M_w 7.8 地震和 2021 年玛多 M_w 7.3 地震;沿阿尔金断裂带的西段由西向东依次出现 1996 年喀喇昆仑山口 M_w 6.9 地震、2008 年和 2014 年于田 M_w 6.6 地震和 M_w 6.9 地震;沿鲜水河-小江断裂带由北西向南东依次出现 2010 年玉树 M_w 6.9 地震和 2022 年泸定 M_w 6.6 地震。这是否预示着未来的强震活动会继续向东迁移,显然值得关注。

(2) 基于对汶川大地震及之前一年内区域 中一强地震活动的分析发现(Wu et al., 2011), 高原腹地的伸展型中一强地震常起着"预警器"



图 4 青藏高原最近一轮强震活动过程中不同类型 断裂带和构造单元的地震能释放量统计图

Fig. 4 Statistical map of seismic energy release from different types of active fault zones and tectonic units during the recent strong earthquakes with $M_{\rm W} \ge 6.5$ around the Qinghai – Tibet Plateau since 1990

作用,即在高原东部挤出构造体系出现 $M_w \ge 7.0$ 大地震前,往往会在高原内部先出现与之具有动力学联系的中一强地震活动。例如,2008年汶川大地震发生前两个月内发生了于田正断层型地震; 玉树 $M_w 6.9$ 地震发生前3周在那曲安多东北部发生伸展型(包括正断层型和走滑断层型) $M_w 5.5$ 、 $M_w 5.7$ 地震。因此,在区域强震趋势分析中需实时关注高原内部的中—小地震活动。

4 讨论

青藏高原此轮强震活动与陆陆碰撞-挤出构造 体系的关系表明,青藏高原"多层次挤出-旋转活 动构造变形系统"构成了此轮强震活动的主要控震 构造,其中东昆仑断裂带及其南侧巴颜喀拉断块区 是此轮强震活动中最为活跃的构造单元。同时显示, 在青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系中不同的次一级 构造体系或构造单元间还存在强震联动效应,即当 该构造体系中的某个构造边界带出现显著活动时, 会牵动相关的其他构造带或同一构造带的不同段落 发生连锁变形反应,从而导致区域强震丛集活动现 象。因此,可以预见,青藏高原"多层次挤出-旋 转活动构造变形系统"的未来强震活动趋势仍会持 续,尤其是阿尔金-祁连-海原断裂系、东昆仑断裂 带和鲜水河-小江断裂带3条主要走滑挤出边界带上 未来的强震危险性更值得进一步重视。

在了解青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系 及其控震作用的基础上,通过进一步认识全球类 似构造体系的控震现象,将有助于更好地归纳陆 陆碰撞-挤出构造体系的控震特征。

4.1 陆陆碰撞-挤出构造体系控震的典型实例----

土耳其及邻区公元 1999—2023 年间发生的 M_w>7.0 大震序列

陆陆碰撞-挤出构造体系及其控震现象并非青 藏高原活动造山带所独有,处于欧亚板块与阿拉 伯-非洲板块之间的土耳其及其邻区同样存在类似 的构造体系控震作用。

活动构造研究和 GPS 观测结果表明 (Reilinger et al., 1997; Armijo et al., 1999), 土耳其安纳托 利亚板块及邻区被加持于欧亚板块与非洲-阿拉伯 板块之间,在欧亚与阿拉伯板块间强烈的近南北 向挤压以及非洲板块向北俯冲的联合作用下,形 成了3类变形方式显著不同的构造单元。①由北安 纳托利亚右旋走滑断裂带(NAF)与东安纳托利 亚左旋走滑断裂带(EAF)所组成的共轭走滑断 层系统,及其加持的向西挤出且伴有逆时针旋转 的安纳托利亚板块;②阿拉伯-非洲板块与欧亚板 块间的挤压变形带,包括希腊俯冲带和托罗斯山 挤压逆冲变形带;③希腊俯冲带北侧的希腊弧形 伸展变形区,主要属于俯冲带的弧后扩张变形区 (图 5a)。因此,该区的活动构造变形样式可归纳 为以压扭性变形为主的陆陆碰撞-挤出活动构造体 系 (图 5a、5b), 但不同于青藏高原的整体向东挤 出和挤出断块的顺时针旋转, 土耳其安纳托利亚 板块是整体向西挤出,并伴随块体的逆时针旋转。 另外, 安纳托利亚板块的向西挤出大部分被希腊 俯冲带北部的伸展变形所吸收调节、而青藏高原 东部调节块体向东挤出的变形方式更为复杂,一 部分被六盘山-龙门山一线的横向挤压缩短变形和 藏东-川滇断块的弧形旋扭变形所吸收(吴中海等,



NAF—北安纳托利亚断裂带; EAF—东安纳托利亚断裂带; DSF—死海断裂; NAT—北爱琴海海槽 a—安纳托利亚及周边板块现今运动状态 (Armijo et al., 1999); b—土耳其安纳托利亚及邻区的陆陆碰撞-挤出构造体系及其最近一轮大地 震迁移过程

图 5 土耳其及邻区公元 1999—2023 年间的 $M_w > 7.0$ 大震序列与陆陆碰撞-挤出构造体系关系图 (地震与震源机制解数据源自美国地质调查局 (USCS) 相关网站 https: //earthquake.usgs.gov/)

Fig. 5 Relationship between the sequence of $M_w > 7.0$ earthquakes and the continental collision-extrusion tectonic system in Turkey and neighboring areas from 1999 to 2023 (earthquake and seismic source mechanism data sourced from relevant websites of the United States Geological Survey (USGS) at https: //earthquake.usgs.gov/)

(a) Current motion status of Anatolia and surrounding plates (from Armijo et al., 1999); (b) Continental collision-extrusion tectonic system and the latest seismic migration process in Anatolia, Turkey, and neighboring areas

2015),另外,相当一部分变形进一步向东传递到 了中国大陆的中—东部地区,进而持续施加影响。

安纳托利亚陆陆碰撞-挤出构造体系在约23 年间(1999—2023年),沿共轭走滑断层系和挤压 逆冲变形带等不同构造部位,依次发生了1999年 伊兹米特 M_w7.6和 M_w7.2双震型大地震、2011年 土耳其与伊朗交界凡省 M_w7.1大地震、2017年伊 朗西部克尔曼沙赫省与伊拉克北部苏莱曼尼亚省 交界区 M_w7.3大地震以及2023年土耳其哈塔伊 M_w7.8和 M_w7.5双震型大地震(图5b)。上述4 次大地震序列的时间间隔介于6~12年,既显示出 活动体系控震作用下的强震丛集活动特点,也表 现出了非常典型的不同构造带之间的大地震活动 的相互触发或联动效应。其中1999年和2023年的 2次双震事件分别发生北安纳托利亚右旋走滑断裂 带的斜列断层段落上和东安纳托利亚断裂带与其 分支断裂的交汇部位。

4.2 陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震效应

综合青藏高原和土耳其安纳托利亚地区 2 个典 型陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震现象,可知同一 活动构造体系不同构造单元之间的强震活动往往存 在显著的时空关联性,这里将其称之为"活动构造 体系控震效应"。如果不考虑块体旋转,则可将刚性 块体间的陆陆碰撞-挤出构造体系简化为"块体楔 入-横向挤出模型",并划分为挤出块体内部分别以 压扭变形和张扭变形为主的2类端元模式(图6)。 在压扭变形模式下,构造体系主要包含了边界逆冲 断裂与平行造山带(或垂直挤压方向)的逆冲-褶 皱变形带、斜向兼逆冲成分的共轭走滑系及其间的 挤出断块以及挤出断块前缘的逆冲-褶皱隆起带等构 造单元 (图 6a)。而张扭变形模式主要包含平行挤 压方向的正断层带与地堑、斜向兼正断成分的共轭 走滑系及其间的挤出断块以及挤出断块内部或边缘 的伸展正断层系统等构造单元(图 6b)。



图 6 刚性块体碰撞-挤出活动构造体系及控震特征模式图 Fig. 6 Diagram showing the collision-extrusion active tectonic system of rigid block and its earthquake-controlling pattern

陆陆碰撞-挤出活动构造体系的控震效应主要 表现为,当其中某个边界断裂带上(如主边界逆 冲断裂带)出现强震活动后,随后会在其他相关 构造带上,如造山带内部逆断层或正断层、共轭 挤出断裂系和前缘挤压或伸展断裂带等,依次出 现强震活动,从而表现出在一个时间段内围绕该 构造体系出现强震丛集现象(图 6)。综合青藏高 原和土耳其及其邻区的陆陆碰撞-挤出活动构造体 系特点及相关控震现象,可将类似构造体系的具 体控震效应及受控因素归纳为 3 个方面。

(1) 在活动构造体系不同序次和级别的构造 带与构造单元中,主要断层的规模与活动性等会 存在明显差异,通常是高级别或序次的断层带活 动性普遍强于低级别断层。例如块体边界断层带 的活动性会明显高于块体内部断层因此,块体边 界断层带一般是区域强震活动的主要场所,而块 体内部断层是强震活动的次要场所,这一点类似 于活动地块控震理论(张培震等,2003)。青藏高 原此轮强震活动过程也符合这一特点,表现为绝 大多数 $M_w \ge 6.5$ 强震都出现在边界构造带上。

(2)活动构造体系中主要边界断裂带或构造 带之间以及与块体内部的次级断裂间具有密切的 几何学、运动学与动力学联系,因而其中不同构 造带的强震活动间常具有联动效应或相互触发关 系(吴中海等,2014),而且在共轭断层带、断层 带斜列段落、主断层分叉或与分支断层交汇等特 殊构造部位,通常是最易出现双震或震群活动的 场所(图6)。这在土耳其及邻区1999—2023年间 的大地震活动序列(图5)、中国 2008年汶川 *M*_w7.9大地震及其前后的区域强震活动序列(Wu et al., 2011) 以及青藏高原东南缘的历史强震过 程中都有明显表现(邓起东等, 2010; 吴中海等, 2014)。

(3)由于活动构造体系中不同构造单元间具 有密不可分的几何学与运动学关系的变形,相互 间的构造变形需符合应变平衡或协调性原则(李 四光,1973b)。因而当构造体系中某个构造单元 或构造带处于相对活跃阶段时,在一轮强震活动 过程会在构造体系的不同构造带上或同一构造带 的不同段落或其中的次级断层带上,依次出现强 震序列,从而经常会控制区域强震的时空迁移过 程,并表现出强震丛集现象(图 6)。例如,近年 来围绕巴颜喀拉地块周缘出现的强震丛集活动 (邓起东等,2014),实际上是青藏高原东缘挤出 构造体系中不同次级构造体系之间的强震触发和 联动现象。

4.3 活动构造体系控震效应与强震活动趋势分析

理解活动构造体系控震效应有助于预测未来 强震的活动趋势及最可能出现的位置。具体的判 别依据,除了上述陆陆碰撞-挤出构造体系控震效 应之外,还有3个方面需要考虑或重视。

(1)根据构造体系中主要活动断层间的协调 变形关系,可对未来大地震可能出现的位置做出 科学判断。例如,当共轭走滑断层体系中一条断 裂出现大地震活动,与之共轭的另一条走滑断层 常常会成为下一次大地震的发震断层,如土耳其 安纳托利亚板块南、北边界断层带上强震活动所 具有的时空关联性(图5,图6)。据此,在青海 门源地震之后,需要重视与其发震断层(海原断 裂带的拖莱山-冷龙岭段)几何学上呈共轭关系的 北西向日月山右旋走滑断层带未来的强震危险性问题(韩帅等,2022)。

(2)活动构造体系同一断层带或构造带中的 不同分支断层交汇部位,断层带中不同段落的斜 列部位、共轭断层带的交叉部位等,常常会是双 震和震群活动场所,或出现群集性强震活动,如 2023年土耳其双震活动出现在近南北向死海断裂 带与北东向东安纳托利亚断裂带的交汇部位。因 此,在区域强震危险性分析中,需要注意复杂断 层带或特殊构造部位出现双震或震群活动的危险 性问题。

(3) 因大型活动断层带上的强震活动常具有 分段破裂行为或"填空性",即一个时间段内的强 震活动会表现出沿同一断层带不同段落上出现连 锁反应或丛集活动的现象,此时一条断层带上距 上一次大地震事件离逝时间最长的段落 (这样的 段落也常被称之为"地震空区"段)将是未来强 震最可能出现的部位(吴中海和赵根模, 2013; 吴中海等, 2014)。例如, 自公元 1700 年以来的近 323年间,沿鲜水河断裂不同段落依次发生了共11 次 $M_w \ge 6.5$ 地震,其中2次强震间平均间隔约为 32年,最短间隔约为19年,地震破裂基本完全覆 盖了该断裂的不同段落,指示其上积累的应变能 已经在最新一轮强震过程中得到较充分地释放, 从而也降低了整个断裂大部分段落未来一段时期 的强震危险性,但相邻的甘孜-玉树断裂带或安宁 河-则木河-小江断裂带上的"地震空区"段可能 会成为未来强震活动的主要场所。

另外需要注意的是,沿单条活动断层或断层 带上的单个段落,其上的强震原地复发通常存在 "周期长、准周期性和丛集性"的特点(吴中海和 赵根模,2013),而板内活动断层上M_w≥6.5强震 的原地重复发生间隔通常在数百年至数千年尺度 (吴中海,2022)。据此,近期内发生过强震活动、 已经将之前积累的应变能充分释放的断层或其段 落,在未来一段时期内(通常指十年到百年尺度) 再次发生强震的概率会大大降低。同时,如果认 识到活动断层带特定段落上大地震原地复发存在 准周期性或丛集性活动特征,此时根据该断层带 段落的大地震平均复发间隔或丛集期内的复发特 征,利用地震复发间隔和离逝时间等参数,可对 断层带未来的强震危险性做出更为可靠的判别 (吴中海和赵根模,2013;吴中海,2022)。

5 结论

(1) 青藏高原活动造山带自 1990 年以来经历 了 3 次平均间隔约为 7 年的地震能快速释放期,发 生了 $M_w \ge 6.0$ 强震 61 次和 $M_w \ge 6.5$ 强震 22 次, 推测当前可能正处于向下一个快速释放期过渡的 相对缓慢释放阶段。

(2) 青藏高原活动造山带具有典型的陆陆碰撞-挤出构造体系特征,包含3类不同构造变形系统:由喜马拉雅主前缘逆冲断裂带和天山-祁连山逆冲褶皱变形带构成的主边界逆冲-褶皱变形带;包含藏南裂谷带和藏北共轭走滑断裂系与近南北向正断层的青藏高原核部伸展变形区;东部的走滑挤出构造系统属于"多层次挤出-旋转活动构造体系",包括3个伴有顺时针旋转的次一级挤出构造单元,由北向南依次为阿尔金-祁连-海原逆冲走滑边界与其南侧的柴达木压扭变形断块区,东昆仑断裂带、龙门山断裂带及其西南的巴颜喀拉剪切变形断块区,鲜水河-小江断裂系及其西南的藏东-川滇-禅泰弧形旋扭变形断块区。

(3) 青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系对区域 上 1990 年以来发生的 $M_w \ge 6.5$ 强震起到明显的控 震作用,具体表现在:强震主要集中在构造体系 主要边界断层带上,并显示出相对有规律的时空 迁移过程;陆陆碰撞-挤出构造体系中的多层次挤 出-旋转活动构造体系构成了此轮强震过程的主要 控震构造。因此,青藏高原挤出构造体系应是未 来强震危险性分析最值得关注的区域,尤其是当 前最为活跃的巴颜喀拉次级挤出构造单元,其次 是构成印度板块与欧亚板块碰撞主边界的喜马拉 雅主前缘逆冲断裂带。土耳其安纳托利亚板块及 其周边具有类似的构造体系控震效应,表明陆陆 碰撞-挤出构造体系是陆内造山背景下的一种典型 控震构造。

(4)活动构造体系控震效应主要表现在当体系中某个构造单元或构造带处于活跃阶段时,便会出现强震丛集现象,其中主要断块的边界断层带通常是强震活动的主要场所,而不同构造带的强震活动常具有联动效应或相互触发关系,而复杂或特殊构造部位则易出现双震或震群活动的场所。在根据活动构造体系分析区域未来强震活动趋势中,应注意了解构造体系中主要活动断层间

的协调变形关系,活动断层带上强震活动的分段 破裂行为,以及板内活动断层上强震原地复发通 常存在的"周期长、准周期性和丛集性"等特点。 致谢:中国地质科学院地质力学研究所博士生陆 诗铭帮助绘制了部分图件,中国地质大学(北京) 硕士研究生曾京协助整理了参考文献,审稿专家 对本文提出了宝贵的修改意见和建议,在此表示 衷心感谢。

References

- ADER T, AVOUAC J P, JING L Z, et al., 2012. Convergence rate across the Nepal Himalaya and interseismic coupling on the Main Himalayan Thrust: implications for seismic hazard [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117 (B4): B04403, doi: 10.1029/2011JB009071.
- ARMIJO R, MEYER B, HUBERT A, et al., 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: timing and kinematics [J]. Geology, 27 (3): 267-270, doi: 10.1130/0091-7613 (1999) 027 < 0267: WPOTNA > 2.3. CO; 2.
- CHEN W, QIAO X J, LIU G, et al., 2018. Study on the coseismic slip model and Coulomb stress of the 2017 Jiuzhaigou M_S7.0 earthquake constrained by GNSS and InSAR measurements [J]. Chinese Journal of Geophysics, 61 (5): 2122-2132, doi: 10.6038/ cjg2018L0613. (in Chinese with English abstract)
- 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 200 ka [J]. Tectonophysics, 530-531: 152-179, doi: 10.1016/j. tecto. 2011.12.014.
- CHEVALIER M L, PAN J W, LI H B, et al., 2017. First tectonicgeomorphology study along the Longmu-Gozha Co fault system, western Tibet [J]. Gondwana Research, 41: 411-424, doi: 10.1016/j. gr. 2015.03.008.
- COWGILL E, 2007. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 254 (3-4): 239-255, doi: 10.1016/j. epsl. 2006.09.015.
- DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Active tectonics and earthquake activities in China [J]. Earth Science Frontiers, 10 (special issue): 66-73. (in Chinese with English abstract)
- DENG Q D, GAO X, CHEN G H, et al., 2010. Recent tectonic activity of Bayankala fault-block and the Kunlun-Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 17 (5): 163-178. (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, doi: 10.6038/cjg20140701. (in Chinese with English abstract)

- DEWEY J F, SHACKLETON R M, CHANG C F, et al., 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 327 (1594): 379-413.
- ENGLAND P, MOLNAR P, 1990. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet [J]. Nature, 344 (6262): 140-142.
- FAN X R, ZHANG G H, ZHAO D Z, et al., 2022. Fault geometry and kinematics of the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake from aftershocks and InSAR observations [J]. Frontiers in Earth Science, 10: 993984, doi: 10.3389/feart. 2022.993984.
- GAI H L, YAO S H, YANG L P, et al., 2021. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the "5.22" M_S 7.4 Earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 899-912, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.073. (in Chinese with English abstract)
- HAN B Q, LIU Z J, CHEN B, et al., 2023. Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding Mw 6.6 earthquake revealed by InSAR observations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 48 (1): 36-46, doi: 10.13203/J.whugis20220636. (in Chinese with English abstract)
- HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan M_s 6.9 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)
- HU M M, WU Z H, LI J C, et al., 2023. The late Quaternary strikeslip rate of the Qiaojia segment of the Xiaojiang fault zone [J]. Acta Geologica Sinica, 97 (1): 16-29, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2022188. (in Chinese with English abstract)
- JI L Y, LIU C J, XU J, et al., 2017. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou M_S7.0 earthquake in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60 (10): 4069-4082, doi: 10.6038/cjg20171032. (in Chinese with English abstract)
- LEE J S, 1973a. Seismological geology [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LEE J S, 1973b. An introduction to geomechanics [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LI H, CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, et al., 2021. Block tectonics across western Tibet and multi-millennial recurrence of great earthquakes on the Karakax fault [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126 (12): e2021JB022033, doi: 10.1029/ 2021JB022033.
- LIU C L, ZHENG Y, GE C, et al., 2013. Rupture process of the M_s7.0 Lushan earthquake, 2013 [J]. Science China Earth Sciences, 56 (7): 1187-1192, doi: 10.1007/s11430-013-4639-9.
- 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, doi: 10.1130/GES02250.1.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1978. Active tectonics of Tibet [J].

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 83 (B11): 5361-5375.

- MOLNAR P, LYON-CAENT H, 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins [J]. Geophysical Journal International, 99 (1): 123-153.
- PAN J W, BAI M K, LI C, et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M₈7.4 earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 95 (6): 1655-1670, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021166. (in Chinese with English abstract)
- 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): shortcutting of the Kunlun fault big bend [J]. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117703, doi: 10.1016/j.epsl.2022.117703.
- QIN J Z, LIU Z Y, ZHANG J W, 1997. Study on the rupture process of the M7.0 Lijiang earthquake by using seismic scaling [J]. Journal of Seismological Research, 20 (1): 47-57. (in Chinese with English abstract)
- QIU J T, LIU L, LIU C J, et al., 2019. The deformation of the 2008 Zhongba earthquakes and the tectonic movement revealed [J]. Seismology and Geology, 41 (2): 481-498, doi: 10.3969/ j. issn. 0253-4967. 2019. 02. 014. (in Chinese with English abstract)
- REID H F, 1911. The elastic-rebound theory of earthquakes [J]. Bulletin of the Department of Geology, University of California Publications, 6 (19): 413-444.
- REILINGER R E, MCCLUSKY S C, ORAL M B, et al., 1997. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102 (B5): 9983-9999.
- REN J J, XU X W, ZHANG G W, et al., 2022. Coseismic surface ruptures, slip distribution, and 3D seismogenic fault for the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake, central Tibetan Plateau, and its tectonic implications [J]. Tectonophysics, 827: 229275, doi: 10.1016/j. tecto. 2022.229275.
- REN Z K, ZHANG Z Q, 2019. Structural analysis of the 1997 M_w 7.5 Manyi earthquake and the kinematics of the Manyi fault, central Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 179: 149-164, doi: 10.1016/j. jseaes. 2019.05.003.
- SHAN X J, QU C Y, GONG W Y, et al., 2017. Coseismic deformation field of the Jiuzhaigou M_s7.0 earthquake from Sentinel-1A InSAR data and fault slip inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60 (12): 4527-4536, doi: 10.6038/cjg20171201. (in Chinese with English abstract)
- SHEN W H, LI Y S, JIAO Q S, et al., 2019. Joint inversion of strong motion and InSAR/GPS data for fault slip distribution of the Jiuzhaigou 7.0 earthquake and its application in seismology [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62 (1): 115-129, doi: 10.6038/ cjg2019L0541. (in Chinese with English abstract)
- TAPPONNIER P, MOLNAR P, 1977. Active faulting and tectonics in China [J]. Journal of Geophysical Research, 82 (20): 2905-2930.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R, 1986. On the mechanics

of the collision between India and Asia [J]. Geological Society, London, Special Publications, 19 (1): 113-157.

- TAPPONNIER P, RYERSON F J, VAN DER WOERD J, et al., 2001. Long-term slip rates and characteristic slip: keys to active fault behaviour and earthquake hazard [J]. Comptes Rendus de l' Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 333 (9): 483-494.
- TAYLOR M, YIN A, RYERSON F J, et al., 2003. Conjugate strikeslip 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): 1044, doi: 10.1029/ 2002TC001361.
- VAN DER WOERD J, TAPPONNIER P, RYERSON F J, et al., 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from ²⁶Al, ¹⁰Be, and ¹⁴C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology [J]. Geophysical Journal International, 148 (3): 356-388, doi: 10.1046/j. 1365-246x. 2002.01556. x.
- VIGNY C, SOCQUET A, RANGIN C, et al., 2003. Present-day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108 (B11): 2533, doi: 10.1029/2002JB001999.
- WANG H, XU C J, GE L L, 2007. Coseismic deformation and slip distribution of the 1997 M_W7.5 Manyi, Tibet, earthquake from InSAR measurements [J]. Journal of Geodynamics, 44 (3-5): 200-212, doi: 10.1016/j. jog. 2007.03.003.
- WANG H, WRIGHT T J, 2012. Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet [J]. Geophysical Research Letters, 39 (7): L07303.
- WANG W M, HAO J L, YAO Z X, 2013. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan Earthquake, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 56 (4): 1412-1417, doi: 10.6038/cjg20130436. (in Chinese with English abstract)
- WU W W, MENG G J, LIU T, et al., 2023. Coseismic displacement field and slip distribution of the 2022 Luding M6.8 earthquake derived from GNSS observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66 (6): 2306-2321, doi: 10.6038/cjg2023Q0826. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, YE P S, BAROSH P J, et al., 2011. The October 6, 2008
 Mw 6.3 magnitude Damxung earthquake, Yadong-Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 40 (4): 943-957, doi: 10.1016/j.jseaes. 2010.05.003.
- WU Z H, ZHAO G M, 2013. The earthquake prediction status and related problems: a review [J]. Geological Bulletin of China, 32 (10): 1493-1512. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, ZHAO G M, LONG C X, et al., 2014. The seismic hazard assessment around South-East area of Qinghai-Xizang Plateau: a preliminary results from active tectonics system analysis [J]. Acta Geologica Sinica, 88 (8): 1401-1416. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, LONG C X, FAN T Y, et al. , 2015. 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, 34 (1): 1-31. (in Chinese with English abstract)

- WU Z H, ZHAO G M, LIU J, 2016. Tectonic genesis of the 2015 Ms8.1 Nepal great earthquake and its influence on future strong earthquake tendency of Tibetan Plateau and its adjacent region [J]. Acta Geologica Sinica, 90 (6): 1062-1085. (in Chinese with English abstract)
- 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, HU M M, 2019. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology: terminology, applications and advances [J]. Journal of Geodynamics, 127: 1-15.
- WU Z H, 2022. Active faults and engineering applications I: definition and classification [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 44 (6): 922-947, doi: 10.19814/j.jese.2022.09049. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, 2024. The M_W ≥ 6.5 strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system [J]. Progress in Earthquake Sciences, 54 (1): 10-24, doi: 10.19987/j.dzkxjz.2023-170. (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.
- XU X W, YU G H, KLINGER Y, et al., 2006. Reevaluation of surface rupture parameters and faulting segmentation of the 2001 Kunlunshan earthquake (M_w7.8), northern Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111 (B5): B05316, doi: 10.1029/2004JB003488.
- XU X W, WEN X Z, YU G H, et al., 2009. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. Geology, 37 (6): 515-518, doi: 10.1130/G25462A.
- XU X W, TAN X B, WU G D, et al., 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian M_S7.3 earthquake and its tectonic nature [J]. Seismology and Geology, 33 (2): 462-471. (in Chinese with English abstract)
- YUAN Z D, LIU-ZENG J, LI X, et al., 2021. Detailed mapping of the surface rupture of the 12 February 2014 Yutian M_S7.3 earthquake, Altyn Tagh fault, Xinjiang, China [J]. Science China Earth Sciences, 64 (1): 127-147, doi: 10.1007/s11430-020-9673-6.
- ZHANG J L, REN J W, CHEN C Y, et al., 2014. The Late Pleistocene activity of the eastern part of east Kunlun fault zone and its tectonic significance [J]. Science China Earth Sciences, 57 (3): 439-453, doi: 10.1007/s11430-013-4759-2.
- 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 (2): 13-24.

- 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, doi: 10.1130/G20554.1.
- 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)
- ZHAO G M, WU Z H, LIU J, et al., 2019. The time space distribution characteristics and migration law of large earthquakes in the Indiam-Eurasian plate collision deformation area [J]. Journal of Geomechanics, 25 (3): 324-340, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.03.030. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G M, WU Z H, LIU J, 2020. The types, characteristics and mechanism of seismic migration [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 13-32, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.002. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO M, CHEN Y T, GONG S W, et al., 1992. Inversion of focal mechanism of the Gonghe earthquake in April 26, 1990 using leveling data [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 12 (4): 1-11. (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, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.05.062. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG X J, ZHANG Y, WANG R J, 2017. Estimating the rupture process of the 8 August 2017 Jiuzhaigou earthquake by inverting strong-motion data with IDS method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60 (11): 4421-4430, doi: 10.6038/cjg20171128. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU C J, WU Z H, NIMA C R, et al., 2014. Structural analysis of the co-seismic surface ruptures associated with the Yushu Ms7.1 earthquake, Qinghai Province [J]. Geological Bulletin of China, 33 (4): 551-566, doi: 10.3969/j. issn. 1671-2552. 2014. 04. 011. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈威,乔学军,刘刚,等,2018. 基于 GNSS 与 InSAR 约束的九寨 沟 M_s7.0 地震滑动模型及其库仑应力研究 [J]. 地球物理学报, 61 (5): 2122-2132, doi: 10.6038/cjg2018L0613.
- 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(特刊):66-73.
- 邓起东,高翔,陈桂华,等,2010. 青藏高原昆仑—汶川地震系列 与巴颜喀喇断块的最新活动 [J]. 地学前缘,17 (5):163-178.
- 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, doi: 10.6038/cjg20140701.
- 盖海龙,姚生海,杨丽萍,等,2021. 青海玛多"5·22" M_s7.4 级地震的同震地表破裂特征、成因及意义 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 899-912, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.06.073.
- 韩炳权,刘振江,陈博,等,2023.2022 年泸定 Mw 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 48 (1): 36-46, doi: 10.13203/J.whugis20220636.

- 韩帅,吴中海,高扬,等,2022.2022年1月8日青海门源 M₈6.9
 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,
 doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022013.
- 胡萌萌,吴中海,李家存,等,2023. 小江断裂带巧家段晚第四纪 走滑速率研究 [J]. 地质学报,97 (1):16-29, doi:10.19762/ j. cnki. dizhixuebao. 2022188.
- 季灵运,刘传金,徐晶,等,2017. 九寨沟 M_s7.0 地震的 InSAR 观 测及发震构造分析 [J]. 地球物理学报,60 (10):4069-4082, doi:10.6038/cjg20171032.
- 李四光, 1973a. 地震地质 [M]. 北京:科学出版社.
- 李四光, 1973b. 地质力学概论 [M]. 北京:科学出版社.
- 刘成利,郑勇,葛粲,等,2013.2013 年芦山 7.0 级地震的动态破裂过程 [J]. 中国科学:地球科学,43 (6):1020-1026.
- 潘家伟,白明坤,李超,等,2021.2021年5月22日青海玛多 M₈7.4 地震地表破裂带及发震构造 [J].地质学报,95(6): 1655-1670, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021166.
- 秦嘉政,刘祖荫,张俊伟,1997. 用地震标定律研究丽江 7.0 级地 震的破裂过程 [J]. 地震研究,20 (1):47-57.
- 邱江涛,刘雷,刘传金,等,2019.2008年仲巴地震形变及其揭示 的构造运动 [J]. 地震地质,41 (2):481-498, doi: 10.3969/ j.issn.0253-4967.2019.02.014.
- 单新建,屈春燕,龚文瑜,等,2017.2017年8月8日四川九寨沟 7.0级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演 [J].地球物 理学报,60 (12):4527-4536,doi:10.6038/cjg20171201.
- 申文豪,李永生,焦其松,等,2019. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地震学应用 [J]. 地球物理学报,62 (1):115-129, doi: 10.6038/cjg2019L0541.
- 王卫民,郝金来,姚振兴,2013.2013年4月20日四川芦山地震 震源破裂过程反演初步结果 [J].地球物理学报,56(4): 1412-1417, doi: 10.6038/cjg20130436.
- 吴伟伟, 孟国杰, 刘泰, 等, 2023. 2022 年泸定 6.8 级地震 GNSS 同震形变场及其约束反演的破裂滑动分布 [J]. 地球物理学报, 66 (6): 2306-2321, doi: 10.6038/cjg2023Q0826.
- 吴中海,赵根模,2013. 地震预报现状及相关问题综述 [J]. 地质 通报,32 (10): 1493-1512.
- 吴中海,赵根模,龙长兴,等,2014.青藏高原东南缘现今大震活动特征及其趋势:活动构造体系角度的初步分析结果 [J].地质学报,88(8):1401-1416.
- 吴中海,龙长兴,范桃园,等,2015. 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,34 (1): 1-31.
- 吴中海,赵根模,刘杰, 2016. 2015 年尼泊尔 Ms8.1 地震构造成因

及对青藏高原及邻区未来强震趋势的影响 [J]. 地质学报, 90 (6): 1062-1085.

- 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 (图件编号: 00-01-05).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, doi: 10.19814/j.jese.2022.09049.
- 吴中海, 2024. 青藏高原 1990 年以来的 M_w ≥ 6.5 强震事件及活动 构造体系控震效应 [J]. 地震科学进展, 54 (1): 10-24, doi: 10.19987/j. dzkxjz. 2023-170.
- 徐锡伟,谭锡斌,吴国栋,等,2011.2008 年于田 M_s7.3 地震地 表破裂带特征及其构造属性讨论 [J].地震地质,33 (2): 462-471.
- 袁兆德,刘静,李雪,等,2021.2014 年新疆于田 M_s7.3 地震地 表破裂带精细填图及其破裂特征 [J].中国科学:地球科学,51 (2):276-298,doi:10.1360/SSTe-2020-0100.
- 张军龙,任金卫,陈长云,等,2014.东昆仑断裂带东部晚更新世 以来活动特征及其大地构造意义 [J].中国科学:地球科学,44 (4):654-667.
- 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),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.
- 赵根模,吴中海,刘杰,等,2019.印度-欧亚板块碰撞变形区的 大地震时空分布特征与迁移规律 [J].地质力学学报,25 (3): 324-340, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.03.030.
- 赵根模,吴中海,刘杰,2020. 地震迁移的类型、特征及机制讨论 [J]. 地质力学学报,26(1):13-32,doi:10.12090/j.issn. 1006-6616.2020.26.01.002.
- 赵明,陈运泰,巩守文,等,1992. 用水准测量资料反演1990年 青海共和地震的震源机制 [J]. 地壳形变与地震,12(4): 1-11.
- 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, doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.05.062.
- 郑绪君,张勇,汪荣江,2017.采用 IDS 方法反演强震数据确定 2017年8月8日九寨沟地震的破裂过程 [J].地球物理学报,60 (11):4421-4430, doi:10.6038/cjg20171128.
- 周春景,吴中海,尼玛次仁,等,2014. 青海玉树 Ms7.1 级地震同 震地表 破 裂 构 造 [J]. 地 质 通 报,33 (4):551-566,doi: 10.3969/j.issn.1671-2552.2014.04.011.