

青藏高原1990年以来的 $M_w \geq 6.5$ 强震事件及活动构造体系控震效应

吴中海

The $M_w \geq 6.5$ Strong earthquake events since 1990 around the Qinghai-Tibet Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system

Wu Zhonghai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-170>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴中海. 青藏高原 1990 年以来的 $M_w \geq 6.5$ 强震事件及活动构造体系控震效应 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 10-24. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-170

Wu Z H. The $M_w \geq 6.5$ strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 10-24. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-170

学术论文

青藏高原 1990 年以来的 $M_w \geq 6.5$ 强震事件及活动构造体系控震效应

吴中海^{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

摘要 深入认识青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系作用下的强震活动特点及未来强震活动趋势, 对于区域防震减灾具有重要科学意义。统计分析青藏高原及邻区 1900 年以来的 $M \geq 6.0$ 强震活动发现, 青藏高原自 1950 年西藏墨脱-察隅 8.6 级大地震以来正处于新一轮相对缓慢的地震能释放期, 但 1990 年以来的强震发生率和地震释放能显示出逐步增高趋势, 并可能预示下一轮地震能快速释放期的临近。活动构造体系控震分析表明, 青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系中的“多层次挤出-旋转活动构造体系”构成了 1990 年以来新一轮 $M_w \geq 6.5$ 强震活动的主要控震构造, 尤其是其中的巴颜喀拉挤出构造单元的强震活动最为显著, 指示其目前正处于构造活跃状态, 而且这一状态可能仍将持续。综合研究认为, 在区域强震活动趋势分析中, 充分认识活动构造体系控震效应, 将有助于更好地分析判断区域未来强震时空迁移过程及最可能出现的构造部位。考虑到当前强震活动过程中, 青藏高原“多层次挤出-旋转活动构造体系”的未来强震活动趋势仍会持续, 需要重点关注挤出块体边界上 3 条大型左旋走滑断裂带, 阿尔金-祁连-海原断裂系、东昆仑断裂带和鲜水河-小江断裂带的未来强震危险性, 其次是断块内部断裂。

关键词 青藏高原; 陆陆碰撞-挤出构造体系; 强震事件; 巴颜喀拉断块; 构造体系控震效应

中图分类号: P315.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)01-0010-15

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-170

The $M_w \geq 6.5$ strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system

Wu Zhonghai^{1,2,3)}

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

收稿日期: 2023-11-25; 采用日期: 2023-12-18。

基金项目: 中国地质调查项目(DD20221644), 国家自然科学基金云南联合基金项目(U2002211)和西藏自治区第 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)共同资助。

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



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

Abstract It is of great scientific significance for regional seismic prevention and disaster mitigation to understand the characteristics and future trends of strong earthquakes related with the active continental collision-extrusion tectonic system in the Tibetan Plateau. The characteristics of $M_w \geq 6.5$ strong earthquakes since 1990 and the earthquake-controlling phenomena of the continental collision-extrusion tectonic system in the Tibetan Plateau are comprehensively analyzed. The results indicate that the Tibetan Plateau has been in the period of slow release of seismic energy recently, but may be approaching the next period of rapid release. The “multi-level extrusion-rotation active tectonic system” in the continental collision-extrusion tectonic system of the Tibetan Plateau plays a major role in controlling this strong earthquakes process. In particular, the Bayan Hara extrusion tectonic unit shows the most significant strong seismic activity process in this tectonic system. The results of comprehensive study suggest that the earthquake-controlling effect of active tectonic system should be fully recognized in the analysis of activity trend and hazard of regional strong earthquake, which is helpful to scientifically judge the space-time migration process and the most likely location of strong earthquakes in the future. In the process of the current strong earthquake activity, the strong earthquake activity trend of the “multi-level extrusion-rotation active tectonic deformation system” in the Tibetan Plateau will continue in future. In particular, more attention should be paid to the future strong earthquake hazard of three large left-lateral strike-slip fault zones which constitute the boundary of extrusion blocks in the “multi-level extrusion-rotation active tectonic deformation system”, including Altyn-Qilian-Haiyuan fault system, East Kunlun fault zone and Xianshuihe-Xiaojiang fault zone.

Keywords Tibetan Plateau; continental collision-extrusion tectonic system; strong earthquake events; Bayan Hara fault-block; control-earthquake effect of tectonic system

0 引言

青藏高原是全球平均海拔最高、变形最为强烈且规模巨大的陆内活动造山带,也是喜马拉雅—地中海地震带上陆内强震活动强度与频度最高的区域之一。统计青藏高原及周边(21.943°N~40.647°N, 75.674°E~110.127°E)自1900年1月1日—2023年8月30日的 $M \geq 6.0$ 强震事件,结果显示,在最近的约123年间,共发生 $M \geq 6.0$ 强震383次,年均发生率约为3.1次/年。其中包括 $M \geq 6.5$ 强震132次和 $M \geq 7.0$ 强震57次,年均发生率分别约为1.1次/年和0.5次/年。由于青藏高原主体位于我国境内,而且地形地貌复杂,因而也是我国地震灾害特别严重的区域之一。因此,深入了解青藏高原强震活动的活动构造体系控震特征及规律,对于更好地认识或判断区域强震活动趋势具有重要的科学意义。

1900年以来强震活动的 $M-t$ 图和地震累积释放能曲线表明(图1),以1950年西藏墨脱—察隅8.6级大地震为界,青藏高原及邻区的强震活动经历了两个明显不同的阶段,之前的强震发生率(约3.2次/年)和地震累积释放能相对高,而之后经历了较长时期的低发生率(约2.8次/年)和地震能释放过程。但在后一阶段,以1988年云南澜沧7.7级大地震为界,其

后的强震发生率(约3.0次/年)和地震能释放过程相比之前(约2.3次/年)又存在明显增强趋势(图1)。特别是自1990年1月1日—2023年8月30日的近33年间,青藏高原(26.037°N~40.044°N, 76.025°E~106.084°E)共发生 $M_w \geq 6.5$ 强震22次,年均发生率约0.7次/年,最大地震是2008年汶川 $M_w 7.9$ 地震。据不完全统计,此轮强震活动至少造成逾101983人死亡失踪,直接经济损失超过1万亿元人民币,其中我国境内的死亡失踪人数和直接经济损失分别占到近90%和93%,表明青藏高原强震活动对我国境内的影响特别显著。因此,深入认识和分析青藏高原最新一轮的强震活动特点及未来强震活动趋势,对于区域防震减灾具有重要意义。

青藏高原是印度与欧亚板块新生代期间持续陆陆碰撞造山过程的产物^[1-2],第四纪期间发育了高密度的复杂活动断裂体系^[3-4],并具有典型的陆陆碰撞—挤出活动构造体系特征^[4-6]。因此,从活动构造体系角度分析青藏高原最新一轮强震活动的控震构造特征,将有助于科学预判区域未来强震危险性。因此,这里重点针对青藏高原1990年以来最新一轮 $M_w \geq 6.5$ 强震过程分析其与陆陆碰撞—挤出活动构造体系的关系,了解陆内造山背景下“碰撞—挤出活动构造

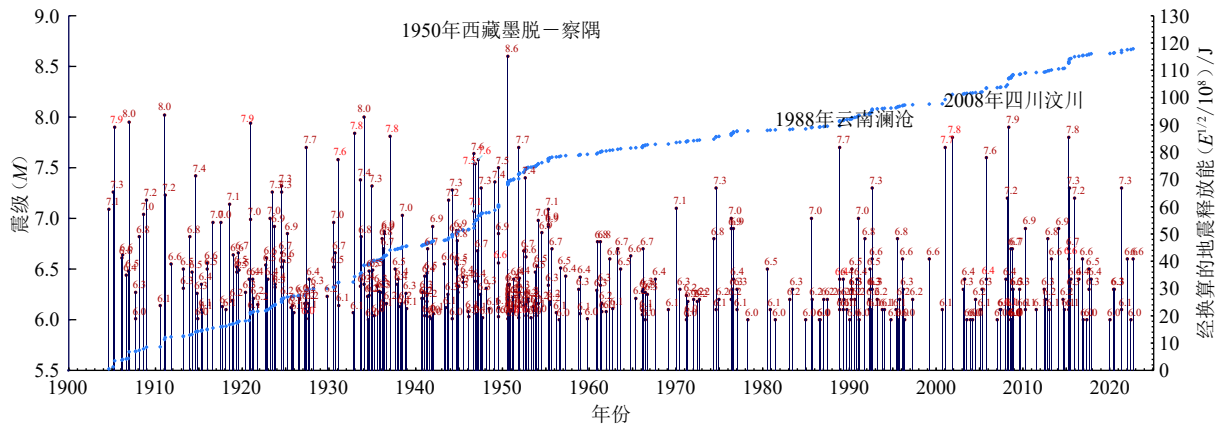


图1 1900年以来青藏高原及邻区 $M \geq 6.0$ 强震 $M-t$ (震级-时间) 图和地震累积释放能曲线(蓝色线)

Fig. 1 The $M-t$ (Magnitude-time) maps and cumulative energy release curves of strong earthquakes ($M \geq 6.0$) around the Tibetan Plateau and adjacent areas since 1900

体系”的控震效应及特征,从而为科学判断区域强震活动趋势提供参考。

1 1990年以来的青藏高原 $M_w \geq 6.5$ 强震活动基本特征

1.1 数据来源

本文对青藏高原1990年以来 $M_w \geq 6.5$ 强震活动及其特征进行分析,主要涉及到地震、震源机制解、地震释放能和活断层等数据资料(图2,图3)。强震数据搜集自美国地质调查局(USGS)相关网站(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>),震源机制解采用了Global CMT Catalog(<https://www.globalcmt.org>)数据(前者用于图2b,后者用于图4)。地震释放能(E)的计算采用了美国地质调查局的公式 $\log E = 5.24 + 1.44M_w$,先将矩震级(M_w)换算为地震释放能(E ,单位:J),接着将结果转换为 $E^{1/2}/10^8$ (单位:J),然后再统计地震能释放特征(图3)。活断层资料的国内部分引自中国及毗邻海区活动断裂分布图^[4],境外部分为遥感解译。制图所用的数值高程影像(DEM)源自网站 <https://www.gscloud.cn/search>。

1.2 强震活动的基本特征

青藏高原1990年以来共发生 $M_w \geq 6.5$ 强震22次,空间上主要分布在青藏高原边缘,其次是高原内部(图2a)。震源机制解(图2b)显示,此轮强震活动的发震断层包含了走滑型、逆断层型和正断层型3类。不同类型强震的空间分布和发生数量显示(图2b,图3a),走滑断层型地震数量最多,达10次,占比约45%,主要出现在高原边缘地带,包括西昆仑、祁连山、龙门山周边及喜马拉雅山一带,高原内部主要出现在巴颜喀拉地块周缘。逆断层型地震数

量次之,为9次,占比约41%,主要分布在高原南缘的喜马拉雅和东缘的龙门山地带,仅1次出现在柴达木盆地东部的共和盆地。正断层型地震数量最少,为3次,占比约14%,出现在西昆仑南侧、藏南和青藏高原东南缘的云南西北部。

强震 $M-t$ 图和地震累积释放能曲线(图3c)显示,此轮强震活动过程中包含了3个较为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),从早到晚分别为:①1996—2001年,发生了1997年西藏玛尼 $M_w 7.5$ 和2001年青海太阳湖(昆仑山口西) $M_w 7.8$ 两次大地震;②2008年前后,发生了新疆于田 $M_w 7.2$ 和汶川 $M_w 7.9$ 两次大地震;③2015年前后,发生了2015年尼泊尔 $M_w 7.8$ 、 $M_w 7.3$ 大地震。快速释放期之间是持续约7年的地震能缓慢释放期。但自2015年的尼泊尔大地震至今,青藏高原一直处于地震能缓慢释放阶段,并已持续超过8年,这是否预示着即将出现下一轮快速释放,值得进一步关注。

2 强震活动的发震构造及特征

基于1990年以来22次强震事件的震中位置与震源机制解,进一步综合这些强震事件的地表调查、地震波反演和同震形变观测等调查研究结果,对强震活动的发震断层及其性质和同震破裂相关参数进行系统梳理,从而获得了此轮强震活动的发震构造信息(表1)。据此可将它们的相关特征归纳如下。

2.1 逆断层型强震的发震构造及特征

此轮强震包含9个逆断层事件(表1,图4),除1990年青海共和 $M_w 6.5$ 地震的发震构造为共和盆地南部的隐伏北西西向左旋逆冲断裂,属柴达木断块内部强震事件外,其他8次强震都发生在青藏高原

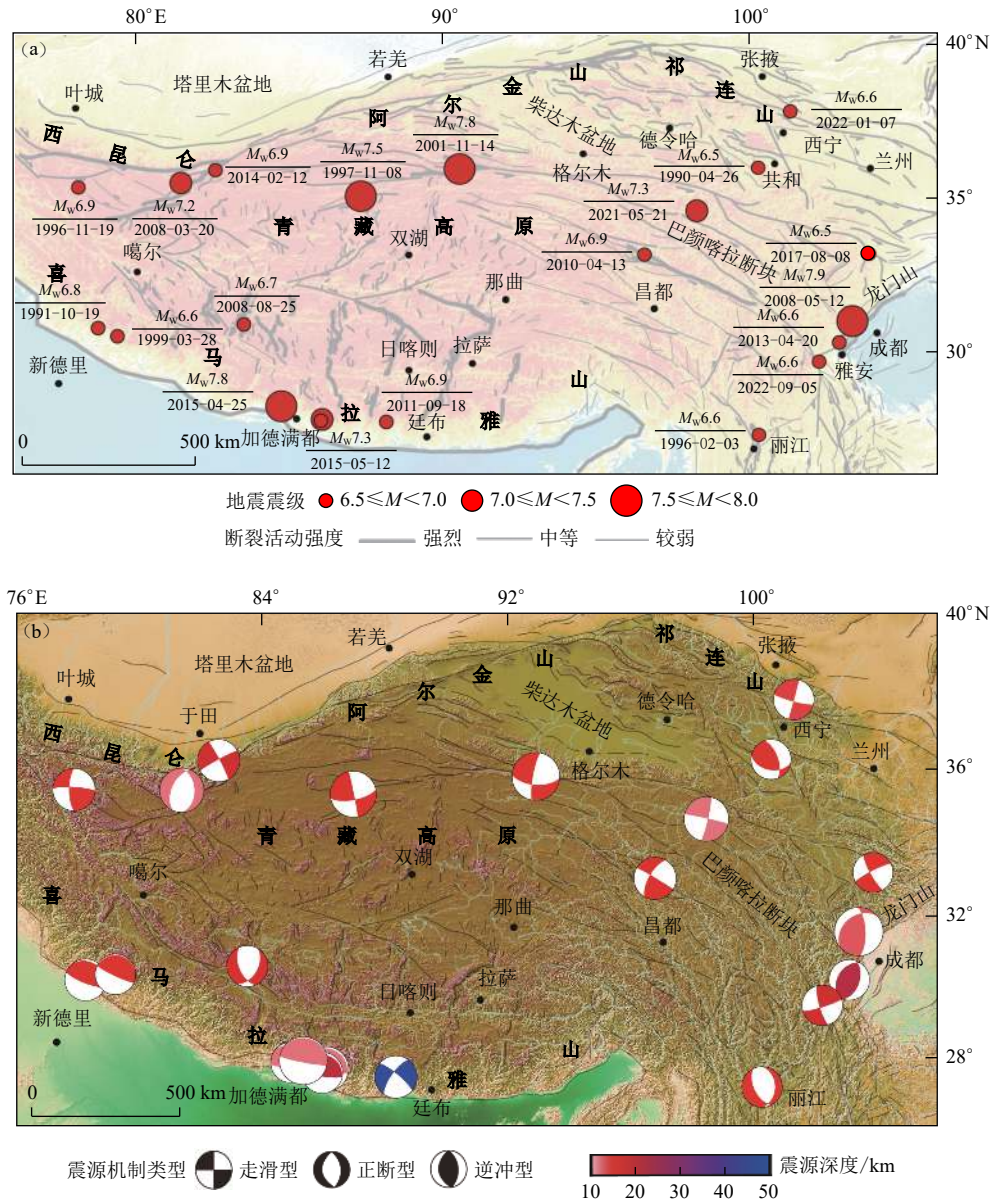


图 2 青藏高原 1990 年以来 $M_w \geq 6.5$ 强震活动空间分布与主要活动断裂 (a) 及震源机制解 (b)

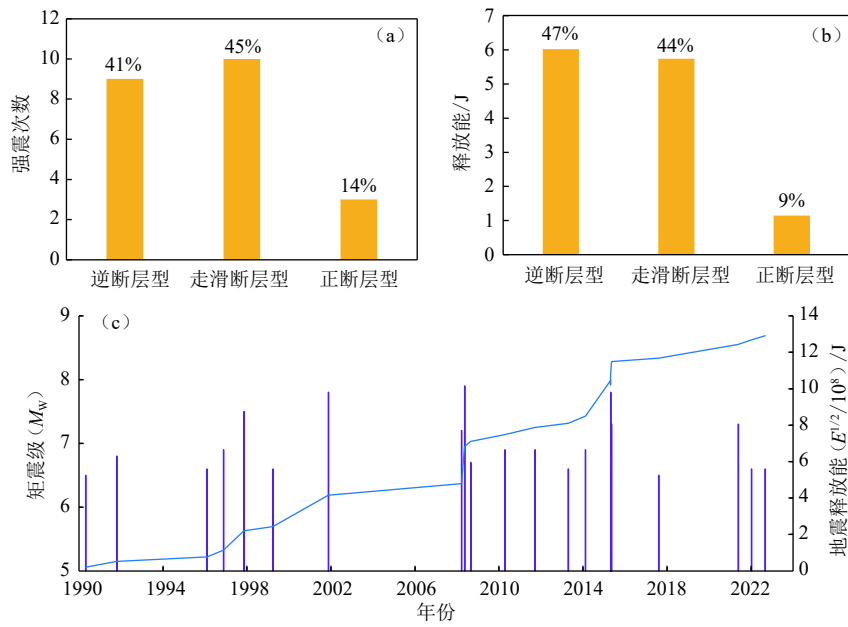
Fig. 2 The spatial distribution of $M_w \geq 6.5$ strong earthquakes since 1990 around Tibetan Plateau and active faults (a) and their source mechanism solution (b)

周缘的边界逆冲构造带上。其中 6 次出现在青藏高原南缘的喜马拉雅主前缘逆冲断裂带的不同段落上, 包括 2015 年的尼泊尔博克拉 $M_w 7.8$ 及其两次 $M_w 6.6$ 、 $M_w 6.7$ 强余震, 尼泊尔珠峰登山者营地 $M_w 7.3$ 地震, 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。该断裂带是调节印度—欧亚板块陆陆碰撞的主边界断裂带, 跨断裂带的全新世缩短速率达 $18 \sim 22 \text{ mm/a}$ ^[7], 吸收了两大板块间近一半的缩短量。另 2 次强震发生在青藏高原东缘的北东向龙门山断裂带上, 包括 2013 年四川芦山 $M_w 6.6$ 地震和 2008 年四川汶川 $M_w 7.9$ 地震, 发震构造分别

是龙门山断裂带南段的盲逆断层和中段的映秀—北川右旋逆断层和彭县—灌县逆冲断裂。该断裂带是调节巴颜喀拉断块向东挤出的主边界构造, GPS 观测其现今水平缩短速率约 $(4 \pm 2) \text{ mm/a}$ ^[8]。

2.2 走滑断层型强震的发震构造及特征

本轮强震的 10 次走滑断层型地震中, 除了 2011 年印度锡金邦 $M_w 6.9$ 地震出现在喜马拉雅山地区, 推测可能与喜马拉雅主前缘逆冲断裂带上的次级走滑断层作用(如逆冲—褶皱构造带上常见的擦断层作用)相关外, 其余 9 次强震都发生在青藏高原的 3 条大型左旋走滑断裂带及其分支断层上(表 1, 图 4)。

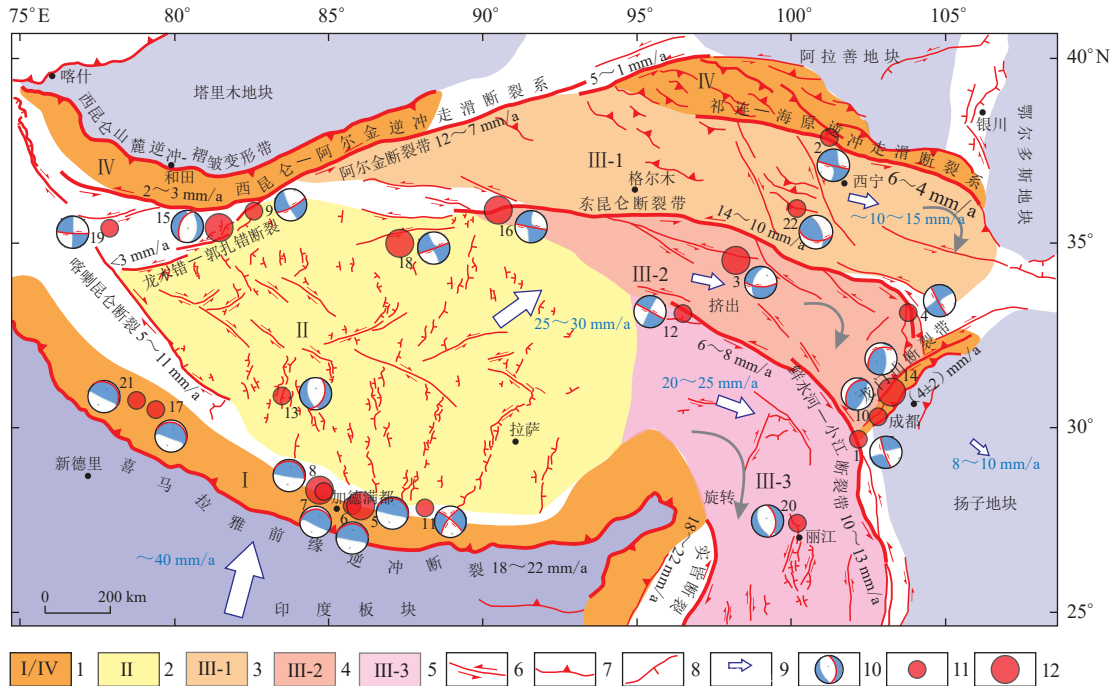


(a) 强震发震断层类型与数量统计图; (b) 不同类型强震的地震释放能统计结果; (c) $M_w \geq 6.5$ 强震的震级-时间($M-t$)分布(深紫色线)与地震累计释放能曲线(蓝色线)

(a) Statistical diagram of seismic fault types and number of strong earthquakes; (b) Statistical results of seismic energy released along different types active faults; (c) The magnitude-time ($M-t$) distribution (dark purple line) and cumulative energy release curve (blue line) of $M_w \geq 6.5$ strong earthquakes since 1990 around Tibetan Plateau

图3 地震能释放特征

Fig. 3 Characteristics of seismic energy release



1: 青藏高原周缘的逆冲-褶皱变形带; 2: 青藏高原中南部近东西向伸展变形区; 3: 柴达木挤出断块区; 4: 巴颜喀拉挤出断块区; 5: 藏东-川滇弧形挤出-旋转断块区; 6: 走滑断裂; 7: 逆冲断裂; 8: 正断层; 9: GPS 观测的主要断块现今运动状态及速率(数据引自 [8]); 10: 震源机制解(红线指示发震断层节面); 11: $6.5 \leq M_w < 7.0$; 12: $7.0 \leq M_w < 8.0$; 断层滑动速率引自文献 [7, 9-16]

图4 青藏高原主要活动断裂与构造单元及1990年以来的 $M_w \geq 6.5$ 强震事件

Fig. 4 The main active faults and tectonic units of the Tibetan Plateau and $M_w \geq 6.5$ strong earthquake events since 1990

表 1 青藏高原 1990 年以来的 22 次 $M_w \geq 6.5$ 强震序列及其主要参数一览表
Table 1 Sequence and main parameters of 22 $M_w \geq 6.5$ strong earthquake events since 1990 around Tibetan Plateau

编号	发震时期 (年-月-日)	震中位置		地点	震源 深度 /km	矩震级 (M_w)	发震断层或构造	断层性质	同震破裂		参考文献	
		北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$						长度 /km	最大位移/m 水平 垂直		
1	2022-09-05	29.68	102.24	四川泸定	6.6	12	鲜水河断裂带磨西段	左旋走滑	22	2.23	—	[17-18]
2	2022-01-07	37.83	101.29	青海门源	6.6	13	海原断裂带冷龙岭—托莱山段	左旋走滑	23	3.2	0.5~1.0	[19]
3	2021-05-21	34.60	98.254	青海玛多	7.3	10	东昆仑断裂带分支——昆仑山口—江错断裂东段	左旋走滑	151~154	2.8~4.8	2.0	[20-24]
4	2017-08-08	33.19	103.86	四川九寨沟	6.5	9	东昆仑断裂带东段的塔藏断裂	左旋走滑	25~40	0.74~1.1	—	[25-29]
5	2015-05-12	27.81	86.07	尼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(倾滑)	—	[30]
6	2015-04-26	27.77	86.02	尼泊尔(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	—	—	—	USGS
7	2015-04-25	28.22	84.82	尼泊尔(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	—	—	—	USGS
8	2015-04-25	28.23	84.73	尼泊尔博克拉	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(倾滑)	—	[30]
9	2014-02-12	35.91	82.59	新疆于田	6.9	10	阿尔金山西南分支; 南阿尔库勒断裂、硝尔库勒断裂及阿什库勒断裂	左旋走滑	37.1	0.9	—	[31]
10	2013-04-20	30.31	102.89	四川芦山	6.6	14	龙门山构造带南段的盲逆断层	逆断层	20~28	1.5~1.6(倾滑)	—	[32-33]
11	2011-09-18	27.73	88.16	印度锡金邦	6.9	50	喜马拉雅主前缘逆冲断裂带锡金段	走滑断层	—	—	—	USGS
12	2010-04-13	33.17	96.55	青海玉树	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	[34]
13	2008-08-25	30.90	83.52	西藏仲巴县	6.7	12	仲巴—改则裂谷中段的帕龙错地堑主边界正断层	左旋正断层	50	1.15~1.34(倾滑)	—	[35]
14	2008-05-12	31.00	103.32	四川汶川	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	[36]
15	2008-03-20	35.49	81.47	新疆于田	6.6	14	阿尔金山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	[37]
16	2001-11-14	35.95	90.54	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	—	[38]
17	1999-03-28	30.51	79.40	印度北安恰尔	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	—	—	—	USGS
18	1997-11-08	35.07	87.33	西藏玛尼	7.5	33	东昆仑断裂系西南段分支——玛尔盖茶卡断裂	左旋走滑	170~185	5.5~7.5	—	[39-40]
19	1996-11-19	35.35	78.13	新疆和田喀喇昆仑山口	6.9	33	推测为阿尔金山断裂系西段分支断裂	左旋走滑	61	—	—	[41]
20	1996-02-03	27.29	100.28	云南丽江大具乡	6.6	11.1	哈巴—玉龙雪山东麓断裂	正断层	33	—	0.78	[42-43]
21	1991-10-19	30.78	78.77	印度代赫里	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	—	—	—	USGS
22	1990-04-26	35.99	100.25	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/倾滑	[44]

注: 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/>); ②数据是1990年1月1日—2023年8月30日(26.037°N~40.044°N, 76.025°E~106.084°E)范围内的 $M_w \geq 6.5$ 强震; ③地震破裂: 具有同震地表破裂数据, 使用地表调查数据, 否则采用地震反演或InSAR等形变观测的震源区破裂参数。

其中构成青藏高原北缘边界的阿尔金—海原左旋走滑断裂带上发生3次强震,由西向东依次为:1996年的新疆和田喀喇昆仑山口 M_w 6.9地震,虽然实地调查资料相对缺乏,但震源机制解和 InSAR 观测结果指示(图4),其发震断层为近东西向的左旋走滑断层^[41],从断裂位置推断其可能是阿尔金断裂带西南端的分支断裂;2014年的新疆于田 M_w 6.9地震,发震断层为阿尔金断裂西南端的多条分支断裂:南硝尔库勒断裂、硝尔库勒断裂及阿什库勒断裂^[31];2022年青海门源 M_w 6.6地震,发震断层为海原断裂带的冷龙岭—托莱山段。青藏高原中部的东昆仑断裂带上发生4次强震(表1,图4),由西向东依次为:1997年西藏玛尼 M_w 7.5地震,发震断层是东昆仑断裂带的西南分支断层——玛尔盖茶卡断裂;2001年青海太阳湖 M_w 7.8地震(也称为昆仑山口西大地震),发震断层是东昆仑断裂带的主干断裂之一,库赛湖—昆仑山口断裂;2017年四川九寨沟 M_w 6.5地震,发震断层为东昆仑断裂东端的塔藏断裂;2021年青海玛多 M_w 7.3地震,发震断层为东昆仑断裂带南侧分支断裂昆仑山口—江措断裂带的东段。青藏高原东南部的鲜水河—小江断裂带上发生2次强震,由西向东依次是:2010年青海玉树 M_w 6.9地震,发震断层是鲜水河—小江断裂带西北段的甘孜—玉树断裂上的玉树断裂带隆宝湖—结古镇段;2022年四川泸定 M_w 6.6地震,发震断层是鲜水河断裂带的磨西段。

综合来看,在上述青藏高原的3条大型左旋走滑断裂带中,每条断裂带上的强震活动大都具有沿断裂带从西向东迁移的特点,其中东昆仑断裂带上发生的强震数量最多且强度也最大,是此轮强震活动的主要控震构造之一。

2.3 正断层型强震的发震构造及特征

此轮强震中包含3次正断层型地震,发震断层皆为近南北向正断层,但属于3类不同的伸展变形区(表1,图4)。1个发生在阿尔金断裂带西南段与其分支断裂龙木错—郭扎错左旋走滑断裂带左阶雁列的拉分阶区,发震断层是近南北向的雪山西麓正断层。1个出现在藏南裂谷带上,发震构造是近南北向仲巴—改则裂谷中段的帕龙错地堑主边界正断层。另1个发生在青藏高原东南缘近南北向滇西北裂陷带中的大具—丽江断陷盆地北段,发震断层是哈巴—玉龙雪山正断层南段^[43],应属于藏东—川滇断块内部的强震事件。

3 青藏高原强震活动的主要控震构造及特征

3.1 青藏高原的陆陆碰撞—挤出构造体系特征

综合前人活动构造研究和 GPS 观测结果^[2,5-6,8,30],以及笔者近年来的活动断裂编图成果^[4],可将青藏高原的现今地壳变形归纳为由4个次一级活动构造单元(或变形区带)组成的陆陆碰撞—挤出活动构造体系(或称为“块体楔入—挤出构造体系”)。这里由南向北将各构造单元的特征分述如下(图4)。

(1)喜马拉雅边界构造带(I),以近南北向挤压作用下的逆冲—褶皱缩短变形为特征,主要控震构造是喜马拉雅主前缘逆冲断裂带,这也是印度与欧亚板块间陆陆碰撞的主边界构造,因而全新世活动性强烈,跨断裂带的平均水平缩短速率高达约18~22 mm/a^[7],吸收了印度与欧亚板块间近南北向缩短量(约40 mm/a)的近一半。

(2)青藏高原中南部伸展变形区(II),以东西向伸展变形为特征,主要控震构造是藏南的近南北向裂谷带、西藏中部的共轭走滑断裂系和藏北高原许多规模不等的近南北向正断层^[2,4],现今的近东西向伸展变形速率可达约(22±3) mm/a,吸收了约10~14 mm/a的近南北向缩短量^[8]。

(3)青藏高原的向东挤出构造系统(III),主要以断块挤出和旋转运动来调节青藏高原缩短变形,主要控震构造是阿尔金—海原走滑断裂带、东昆仑断裂带和鲜水河—小江断裂带,共3条大型左旋走滑断裂带,其次是挤出断块的内部断裂与前缘的挤压逆冲变形带(如龙门山断裂带)。3条大型走滑断裂带的晚第四纪左旋走滑速率最大都高达约10~14 mm/a^[2,8,45],构成了调节青藏高原向东挤出的主要边界断裂。以这3条走滑断裂带为主边界,可将青藏高原向东挤出变形进一步划分为3个次一级的挤出构造单元(图4),由北向南分别为:柴达木挤出构造单元(III-1),由阿尔金—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组成;巴颜喀拉挤出构造单元(III-2),由东昆仑断裂带、龙门山断裂带及其西南侧的巴颜喀拉剪切变形断块区组成,其中龙门山逆冲—褶皱变形带构成了该挤出构造单元的东缘挤压变形带,起着吸收部分挤出量的作用,跨变形带的平均缩短速率约(4±2) mm/a^[8];藏东—川滇挤出构造单元(III-3),由鲜水河—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组成^[46]。这3个次一级构造单元中的主要断块在向东挤出的同时,还伴随着顺时针旋转运动,这种旋转—

方面吸收了一部分青藏高原的向东挤出量,同时可起到调节印度板块与华南板块间右旋剪切变形的作用^[2,47]。这种包含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可称之为“多层次挤出-旋转活动构造体系”。

(4) 青藏高原北缘-东北缘的西昆仑-祁连山边界构造带(IV),以挤压缩短变形为特征,主要控震构造是西昆仑山麓逆冲-褶皱变形带、祁连山北缘以及河西走廊北部的边界逆冲断裂带及伴生的活动褶皱构造带等,跨祁连山-河西走廊逆冲-褶皱变形带的现今地壳缩短速率可达约 $4 \sim 8 \text{ mm/a}$ ^[8],大约吸收了印度与欧亚板块间近北向缩短量的 $10\% \sim 20\%$,因而活动性明显弱于南部的喜马拉雅边界构造带。

3.2 多层次挤出-旋转活动构造体系是青藏高原近年来强震活动的主要控震构造

根据前述的此轮强震活动的主要发震断裂可知,22次强震事件主要发生在青藏高原南缘的喜马拉雅主前缘逆冲断裂带和3条大型左旋走滑断裂带上,共17次,其次是龙门山断裂带上的2次和高原或断块内部的3次。这里根据青藏高原陆陆碰撞-挤

出构造体系特征,进一步分析此轮强震活动过程中不同活动构造单元地震释放能分配情况,从而更深入了解近年来强震活动的主要控震构造。

地震释放能的分析结果(图5)表明,青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系中4个次级构造单元中的强震数量级地震释放能总量差异明显(图5a)。其中青藏高原向东挤出构造系统(III)在此轮强震过程中共发生14次 $M_w \geq 6.5$ 地震,释放的地震能最多,占到总量的约67%;喜马拉雅边界构造带(I)次之,共发生了7次 $M_w \geq 6.5$ 地震,地震释放能约占31%;伸展变形区(II)在此轮强震过程中只发生1次 $M_w \geq 6.5$ 地震,即西藏仲巴 $M_w 6.7$ 地震,地震释放能仅占2%;而青藏高原北缘-东北缘的西昆仑-祁连山边界构造带(IV)无 $M_w \geq 6.5$ 地震发生,地震释放能为零。据此可以看出,青藏高原的向东挤出构造系统,即“多层次挤出-旋转活动构造体系”是当前最新一轮强震过程的主控构造。因此,该构造体系中的主要边界断裂带,包括阿尔金-祁连-海原断裂系、东昆仑断裂系和鲜水河-小江断裂系等,无疑是未来强震活动的主要场所,其次是挤出断块内部的次级断裂。

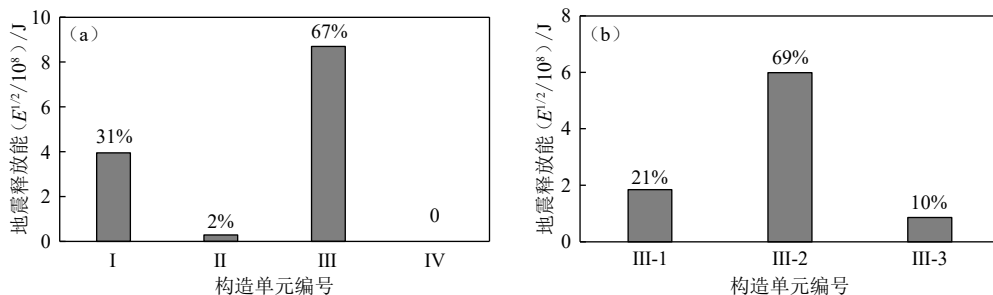


图5 (a) 青藏高原各构造单元的地震释放能; (b) 各挤出构造单元的地震释放能

Fig. 5 (a) The seismic energy release of various tectonic units around Tibetan Plateau; (b) The seismic energy release of various extrusion tectonic units

进一步对比分析青藏高原“多层次挤出-旋转活动构造体系”中3个次级构造单元的地震释放能发现(图5b),柴达木挤出构造单元(III-1)的地震释放能占到该构造系统总量的约21%;而巴颜喀拉挤出构造单元(III-2)的地震释放能占总量的比例最高,达到了约69%;藏东-川滇挤出构造单元(III-3)的地震释放能占比最低,仅约10%。表明巴颜喀拉挤出构造目前正处于构造活跃状态,是目前强震最活跃的构造单元。因此,需重点关注该挤出构造单元中东昆仑断裂带和巴颜喀拉断块内部次级断裂的未来强震危险性。

4 讨论

深入了解青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系的控震特征,有助于更好地分析判断未来强震的活动趋势及最可能出现的构造部位。这里基于前述的青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震过程,从青藏高原陆陆碰撞-活动构造体系控震机制角度,来分析探讨区域强震活动趋势和构造体系控震效应问题。

4.1 青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系控震机制

青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系由南向北主要包含了4个不同的控震构造区带(图4,图6),分别

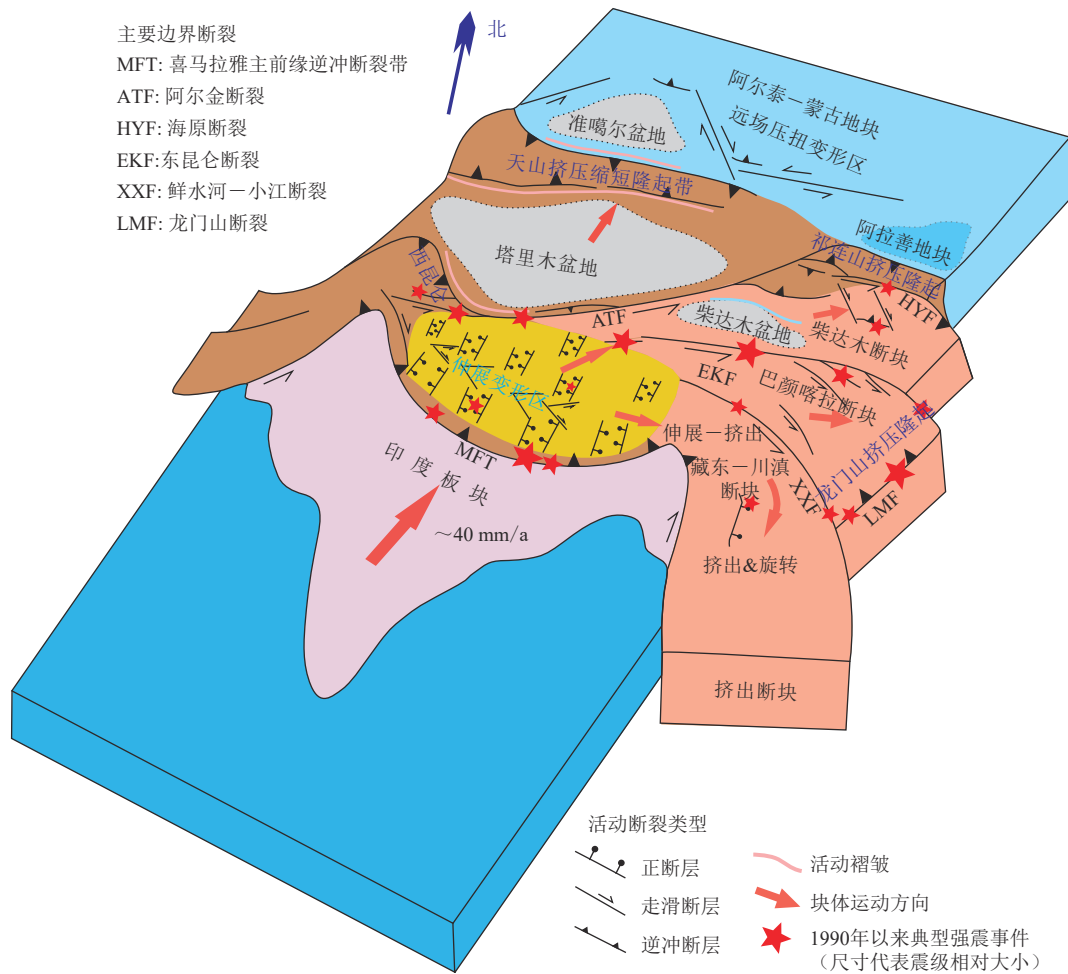


图6 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系及对近年来强震的控制作用(修改自文献^[48])

Fig. 6 The continent-continent collision-extrusion active tectonic system of the Tibetan Plateau and its controlling effect on recent strong earthquakes (modified from reference^[48])

是以喜马拉雅主前缘逆冲断裂带(MFT)为主要发震断裂的喜马拉雅边界构造带,以近南北向正断层和共轭走滑断裂系为主要发震断层的青藏高原中南部伸展变形区,以阿尔金—海原走滑断裂带、东昆仑断裂带和鲜水河—小江断裂带等大型左旋走滑断裂以及邻侧断块内部次级断裂为主要发震断层的青藏高原向东挤出构造系统,以西昆仑山前逆冲-褶皱变形带和祁连山山前逆冲-褶皱变形带为主要发震构造的青藏高原北缘-东北缘的西昆仑—祁连山边界构造带。从更大的区域来看(图6),其中青藏高原东北缘的祁连山挤压逆冲构造带与天山挤压逆冲构造带一起,构成了印度板块与欧亚板块南部阿尔泰—蒙古地块之间北西西向青藏高原活动造山带的北部前缘边界构造带,而其北部的准噶尔盆地周缘和戈壁—阿尔泰地区,以走滑断层和少量逆断层构成的压扭变形区,可以看做是青藏高原活动造山带变形进

一步向北扩展的结果(即远场变形效应)。

地震作为断裂构造的脆性变形结果,多属于上地壳的应力—应变释放过程。因而青藏高原的强震活动实际上是调节吸收印度板块与阿尔泰—蒙古地块之间近南北向缩短变形的结果。由前所述,1990年以来的强震活动主要集中在青藏高原陆陆碰撞-挤出构造体系中的喜马拉雅边界构造带和向东挤出构造系统两个不同活动构造单元(图6),而其它两个构造单元的强震活动明显很少,这表明在数十年的短时间尺度上,不同构造单元的应变分配是不均匀的,与其所承担的应变变量也是不匹配的。如印度板块与西伯利亚地块间约40 mm/a缩短量有近一半被喜马拉雅构造带所吸收,但在最近的强震活动中,其地震能释放量只占到约30%,青藏高原中南部近东西向伸展变形区至少吸收了约四分之一的缩短量,但地震能释放量仅占到约10%,明显存在欠缺。因此,

在一个地震活动阶段, 承担主要地震能释放量的构造单元只是构造体系中的某一个或几个构造带, 而非所有构造单元, 这指示构造体系中不同构造单元的强震集中活动具有交替性。即在一轮强震过程中, 构造体系中非常活跃的地震活动区带, 在下一轮强震过程中的强震活动会显著减弱, 而上一轮强震活动中偏于平静的构造单元反而会出现显著的强震活动。因此, 短期来看, 1990 年以来的强震过程中, 喜马拉雅构造带和巴颜喀拉挤出构造单元是强震活动最为活跃的两个构造单元(图 6), 而且这一趋势可能还会持续一段时期; 但从长期来看, 当前并不活跃的青藏高原中南部伸展变形区、西昆仑—祁连山挤压逆冲构造带以及“多层次挤出—旋转活动构造体系”中的柴达木与藏东—川滇挤出构造单元, 将会在下一轮强震活动中成为主要强震活动区带。尤其是其中的柴达木与藏东—川滇两个挤出构造单元, 当前已经显示出逐步活跃状态, 这也意味着海原断裂带和鲜水河—小江断裂带两条主边界走滑断裂未来的强震危险性可能会进一步增强。

4.2 青藏高原强震活动趋势

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, 青藏高原的“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, 而且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, 会牵动相关的其它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, 尤其是其中的阿尔金—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的未来强震危险性更值得进一步重视。

同时, 区域强震活动趋势还具有以下特点, 值得判断区域强震活动趋势时参考。

(1) 强震活动沿挤出断块边界走滑断裂带的规律性迁移现象, 主要表现为沿阿尔金—祁连—海原、东昆仑和鲜水河—小江 3 个大型走滑挤出边界带, 强震活动整体上由西向东迁移。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 年于田 $M_w 6.6$ 地震和 2014

年于田 $M_w 6.9$ 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—强地震活动的分析发现^[49], 青藏高原内部伸展变形区的中—强地震常对青藏高原东部的大震发生起着“预警器”作用, 即在高原东部挤出构造体系出现 7.0 级或以上大地震前, 往往会在高原内部先出现与之具有动力学联系的中—强地震活动。如在 2008 年汶川大地震发生前不到两个月, 首先发生了于田正断层型地震。在玉树 $M_w 6.9$ 地震前 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^[49]。在 2021 年青海玛多 $M_w 7.3$ 地震之前, 在高原内部的依布茶卡地堑中发生了正断层型的西藏尼玛 $M_w 6.3$ 地震^[50]。因此, 在区域强震趋势分析中, 需实时关注高原内部的中—强地震活动。

(3) 值得注意的是, 由东昆仑断裂带、巴颜喀拉断块和龙门山断裂带构成的巴颜喀拉挤出构造单元构成了此轮强震活动中最为活跃的构造单元, 自 1997 年西藏玛尼 $M_w 7.5$ 地震以来, 共发生了包括 2001 年昆仑山口 $M_w 7.8$ 大地震和 2008 年汶川 $M_w 7.9$ 大地震在内的 6 次 $M_w \geq 6.5$ 强震, 指示其正处于构造活跃状态。但此轮强震活动虽然覆盖了龙门山断裂带的大部分段落, 但东昆仑断裂带上仍有一些已知地震空区未被覆盖^[51], 如主断层上的东—西大滩段与玛沁—玛曲段, 阿万仓断裂等分支断裂, 而且巴颜喀拉断块内部还发育了多条次级走滑断层^[4]。因此, 有理由相信, 巴颜喀拉挤出构造单元的强震活动仍将持续, 尤其是构成主边界的东昆仑断裂带的未来强震危险性仍然较高, 需要重点关注。

4.3 活动构造体系控震效应及特征

活动构造体系的基本特点是包含了不同的次级构造单元和不同级别的活动构造带和断块, 而且各构造单元间和不同级别构造带的变形具有密不可分的几何学与运动学关系^[46]。因而它们的强震活动也必然存在密切的时空关联性, 这种关联性可称之为“活动构造体系控震效应”。根据青藏高原的强震活动特征及陆陆碰撞—挤出构造体系控震现象等, 可将“活动构造体系控震效应”初步归纳为以下 3 个方面。

(1) 在活动构造体系中, 块体边界断裂带的活动性明显高于块体内部断裂。因此, 块体边界断裂带一般是区域强震活动的主要场所, 而块体内部断裂是

强震活动的次要场所,这一点类似于活动地块控震理论^[52]。如在青藏高原此轮强震活动过程中,各挤出构造单元中的绝大多数 $M_w \geq 6.5$ 强震都出现在边界走滑断裂带上,仅少数出现在断块内部。因此,在区域强震活动趋势分析中,应首先关注主要边界断裂带的强震危险性,其次是断块内部。

(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^[53],如在我国2008年汶川8级大地震前后,在区域上普遍出现的强震活动响应^[49],以及青藏高原东南缘历史强震过程中所表现出的强震时空关联性等^[53-54]。因此,在区域强震活动趋势判断中,需密切关注构造体系中存在密切的几何学与运动学联系的活动断裂带之间,可能出现的强震触发过程或连锁反应。

(3)活动构造体系中不同构造单元间的构造变形需符合应变平衡或协调性原则。因而在新一轮强震活动过程中,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,会在同一构造带(或单元)的不同段落或其中的次级断裂带上,或者构造体系的不同构造带上依次出现强震序列,从而表现出相对规律的区域强震时空迁移过程以及强震丛集活动等现象^[30, 53]。例如,在此轮强震活动中,围绕巴颜喀拉地块周缘出现的强震丛集活动^[54-55],实际上属于一种典型的同一挤出构造系统中,不同次级构造单元之间的强震触发和联动现象。

5 主要结论与认识

综合以上研究,可以获得以下主要结论和认识。

(1)统计分析青藏高原及邻区1900年以来的 $M \geq 6.0$ 强震活动发现,青藏高原自1950年西藏墨脱—察隅8.6级大地震以来,正处于新一轮相对缓慢的地震能释放期,但1990年以来的强震发生率和地震释能能显示出逐步增高趋势,并可能预示新一轮地震能快速释放期的临近。而青藏高原陆陆碰撞—挤出构造体系中的“多层次挤出—旋转活动构造体系”构

成了最新一轮强震活动过程的主要控震构造,并控制着区域上绝大多数走滑型强震事件的发生,尤其是,其中的巴颜喀拉挤出构造单元当前处于最为活跃的状态。其次是青藏高原南缘的喜马拉雅主前缘逆冲断裂带,控制了区域上主要的逆冲型强震事件。而青藏高原中南部的伸展变形区在此轮强震过程中并不活跃。

(2)青藏高原“多层次挤出—旋转活动构造变形系统”作为此轮强震活动的主控构造,其未来强震趋势必然仍会持续,尤其是其中的阿尔金—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的未来强震危险性更值得进一步重视。同时,需关注强震活动沿挤出断块边界断裂带的规律性迁移现象,尤其是强震活动是否会继续沿阿尔金—祁连—海原、东昆仑和鲜水河—小江3条大型走滑断裂带进一步由西向东迁移。另外,应关注青藏高原内部伸展变形区的中—强地震事件,因为它们可能对青藏高原东部的大震发生起着“预警器”作用。

(3)了解活动构造体系控震效应有助于更好地分析判断未来强震的活动趋势及最可能出现的区域位置。这种效应主要表现在3个方面:一是活动构造体系中,块体边界断裂带一般是区域强震活动的主要场所,而块体内部是次要场所;二是活动构造体系中,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,因而易于在一轮强震过程中出现强震连锁反应或丛集活动现象;三是在一轮强震活动过程中,通常会在同一构造体系的不同构造带上依次出现强震序列,从而导致相对有规律的强震时空迁移过程。

致谢

中国地质科学院地质力学研究所陆诗铭博士帮助绘制了部分图件,并协助整理了文稿,审稿专家对本文提出了宝贵的修改完善意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Dewey J F, Shackleton R M, Chang C F, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1988, 327(1594): 379-413
- [2] Molnar P, Lyon-Caent H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins[J]. *Geophysical Journal International*, 1989, 99(1): 123-153
- [3] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1607-1620
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43(10): 1607-1620
- [4] 吴中海, 周春景. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(附说明书)(1:5000000) [M]. 北京: 地质出版社, 2018
Wu Z H, Zhou C J. Distribution map of active faults in China and its adjacent sea area (attached explanation)(1:5000000)[M]. Beijing: Geology Press, 2018
- [5] Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B11): 5361-5375
- [6] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19(1): 113-157
- [7] Ader T, Avouac J P, Jing L Z, et al. 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*, 2012, 117(B4): B04403
- [8] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812
- [9] Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 356-388
- [10] Liu J R, Ren Z K, Zheng W J, et al. Late Quaternary slip rate of the Aksay segment and its rapidly decreasing gradient along the Altyn Tagh fault[J]. *Geosphere*, 2020, 16(6): 1538-1557
- [11] Cowgill E. 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*, 2007, 254(3/4): 239-255
- [12] 胡萌萌, 吴中海, 李家存, 等. 小江断裂带巧家段晚第四纪走滑速率研究 [J]. *地质学报*, 2023, 97(1): 16-29
Hu M M, Wu Z H, Li J C, et al. The Late Quaternary strike-slip rate of the Qiaojia segment of the Xiaojiang fault zone[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(1): 16-29
- [13] Vigny C, Socquet A, Rangin C, et al. Present-day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B11): 2533
- [14] Chevalier M L, Tapponnier P, Van der Woerd J, et al. Spatially constant slip rate along the southern segment of the Karakorum fault since 200 ka[J]. *Tectonophysics*, 2012, 530-531: 152-179
- [15] Chevalier M L, Pan J W, Li H B, et al. First tectonic-geomorphology study along the Longmu-Gozha Co fault system, western Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 411-424
- [16] Li H, Chevalier M L, Tapponnier P, et al. Block tectonics across western Tibet and multi-millennial recurrence of great earthquakes on the Karakax fault[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(12): e2021JB022033
- [17] 吴伟伟, 孟国杰, 刘泰, 等. 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*, 2023, 66(6): 2306-2321
Wu W W, Meng G J, Liu T, et al. Coseismic displacement field and slip distribution of the 2022 Luding $M_6.8$ earthquake derived from GNSS observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(6): 2306-2321
- [18] 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等. 2022 年泸定 $M_w 6.6$ 地震 InSAR 同震形变与滑动分布 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(1): 36-46
Han B Q, Liu Z J, Chen B, et al. Coseismic deformation and slip distribution of the 2022 Luding $M_w 6.6$ earthquake revealed by InSAR observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 36-46
- [19] 韩帅, 吴中海, 高扬, 等. 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_s 6.9$ 地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(2): 155-168
Han S, Wu Z H, Gao Y, et al. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan $M_s 6.9$ earthquake, Qinghai, China: Implications

- for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(2): 155-168
- [20] 盖海龙, 姚生海, 杨丽萍, 等. 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*, 2021, 27(6): 899-912
- Gai H L, Yao S H, Yang L P, et al. Characteristics and causes of coseismic surface rupture triggered by the “5·22” $M_S7.4$ earthquake in Maduo, Qinghai, and their significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(6): 899-912
- [21] 潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 2021年5月22日青海玛多 $M_S7.4$ 地震地表破裂带及发震构造[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1655-1670
- Pan J W, Bai M K, Li C, et al. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) $M_S7.4$ earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1655-1670
- [22] Pan J W, Li H B, Chevalier M L, et al. 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*, 2022, 594: 117703
- [23] Ren J J, Xu X W, Zhang G W, et al. Coseismic surface ruptures, slip distribution, and 3D seismogenic fault for the 2021 $M_W7.3$ Maduo earthquake, central Tibetan Plateau, and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2022, 827: 229275
- [24] Fan X R, Zhang G H, Zhao D Z, et al. Fault geometry and kinematics of the 2021 $M_W7.3$ Maduo earthquake from aftershocks and InSAR observations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 993984
- [25] 单新建, 屈春燕, 龚文瑜, 等. 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*, 2017, 60(12): 4527-4536
- Shan X J, Qu C Y, Gong W Y, et al. Coseismic deformation field of the Jiuzhaigou $M_S7.0$ earthquake from Sentinel-1A InSAR data and fault slip inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4527-4536
- [26] 季灵运, 刘传金, 徐晶, 等. 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*, 2017, 60(10): 4069-4082
- Ji L Y, Liu C J, Xu J, et al. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou $M_S7.0$ earthquake in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(10): 4069-4082
- [27] 郑绪君, 张勇, 汪荣江. 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*, 2017, 60(11): 4421-4430
- Zheng X J, Zhang Y, Wang R J. Estimating the rupture process of the 8 August 2017 Jiuzhaigou earthquake by inverting strong-motion data with IDS method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(11): 4421-4430
- [28] 陈威, 乔学军, 刘刚, 等. 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*, 2018, 61(5): 2122-2132
- Chen W, Qiao X J, Liu G, et al. 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*, 2018, 61(5): 2122-2132
- [29] 申文豪, 李永生, 焦其松, 等. 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*, 2019, 62(1): 115-129
- Shen W H, Li Y S, Jiao Q S, et al. 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*, 2019, 62(1): 115-129
- [30] 吴中海, 赵根模, 刘杰. 2015 年尼泊尔 $M_S8.1$ 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*, 2016, 90(6): 1062-1085
- Wu Z H, Zhao G M, Liu J. Tectonic genesis of the 2015 $M_S8.1$ Nepal great earthquake and its influence on future strong earthquake tendency of Tibetan Plateau and its adjacent region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(6): 1062-1085
- [31] 袁兆德, 刘静, 李雪, 等. 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*, 2021, 51(2): 276-298
- Yuan Z D, Liu J, Li X, et al. 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*, 2021, 64(1): 127-147
- [32] 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 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*, 2013, 56(4): 1412-1417
- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1412-1417
- [33] 刘成利, 郑勇, 葛黎, 等. 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*, 2013, 43(6): 1020-1026

- Liu C L, Zheng Y, Ge C, et al. Rupture process of the $M_S7.0$ Lushan earthquake, 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(7): 1187-1192
- [34] 周春景, 吴中海, 尼玛次仁, 等. 青海玉树 $M_S7.1$ 级地震同震地表破裂构造 [J]. *地质通报*, 2014, 33(4): 551-566
Zhou C J, Wu Z H, Nima C R, et al. Structural analysis of the co-seismic surface ruptures associated with the Yushu $M_S7.1$ earthquake, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(4): 551-566
- [35] 邱江涛, 刘雷, 刘传金, 等. 2008 年仲巴地震形变及其揭示的构造运动 [J]. *地震地质*, 2019, 41(2): 481-498
Qiu J T, Liu L, Liu C J, et al. The deformation of the 2008 Zhongba earthquakes and the tectonic movement revealed[J]. *Seismology and Geology*, 2019, 41(2): 481-498
- [36] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 $M_W7.9$ Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, 2009, 37(6): 515-518
- [37] 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 等. 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*, 2011, 33(2): 462-471
Xu X W, Tan X B, Wu G D, et al. Surface rupture features of the 2008 Yutian $M_S7.3$ earthquake and its tectonic nature[J]. *Seismology and Geology*, 2011, 33(2): 462-471
- [38] Xu X W, Yu G H, Klinger Y, et al. 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*, 2006, 111(B5): B05316
- [39] Wang H, Xu C J, Ge L L. Coseismic deformation and slip distribution of the 1997 $M_W7.5$ Manyi, Tibet, earthquake from InSAR measurements[J]. *Journal of Geodynamics*, 2007, 44(3/5): 200-212
- [40] Ren Z K, Zhang Z Q. Structural analysis of the 1997 $M_W7.5$ Manyi earthquake and the kinematics of the Manyi fault, central Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179: 149-164
- [41] Wang H, Wright T J. Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): L07303
- [42] 秦嘉政, 刘祖荫, 张俊伟. 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*, 1997, 20(1): 47-57
Qin J Z, Liu Z Y, Zhang J W. Study on the rupture process of the $M7.0$ Lijiang earthquake by using seismic scaling[J]. *Journal of Seismological Research*, 1997, 20(1): 47-57
- [43] Wu Z H, Zhang Y S, Hu D G, et al. Late Quaternary normal faulting and its kinematic mechanism of eastern piedmont fault of the Haba-Yulong Snow Mountains in northwestern Yunnan, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(10): 1470-1484
- [44] 赵明, 陈运泰, 巩守文, 等. 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*, 1992, 12(4): 1-11
Zhao M, Chen Y T, Gong S W, et al. Inversion of focal mechanism of the Gonghe earthquake in April 26, 1990 using leveling data[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1992, 12(4): 1-11
- [45] Tapponnier P, Ryerson F J, Van der Woerd J, et al. Long-term slip rates and characteristic slip: Keys to active fault behaviour and earthquake hazard[J]. *Earth and Planetary Science*, 2001, 333(9): 483-494
- [46] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制 [J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 1-31
Wu Z H, Long C X, Fan T Y, et al. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 1-31
- [47] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet[J]. *Nature*, 1990, 344(6262): 140-142
- [48] Avouac J P. Mountain building: From earthquakes to geologic deformation[J]. *Treatise on Geophysics*, 2015, 6: 381-432
- [49] Wu Z H, Ye P S, Barosh P J, et al. The October 6, 2008 $M_W6.3$ magnitude Damxung earthquake, Yadong-Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 943-957
- [50] 李旭茂, 梁姗姗, 邹立晔, 等. 2020 年西藏尼玛 $M_S6.6$ 和 $M_S4.8$ 地震震源机制测定 [J]. *地震科学进展*, 2021, 51(5): 234-240
Li X M, Liang S S, Zou L Y, et al. Focal mechanism determination of Nima $M_S6.6$ and $M_S4.8$ earthquakes in Tibet in 2020[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2021, 51(5): 234-240
- [51] 张军龙, 任金卫, 陈长云, 等. 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*, 2014, 44(4): 654-667

- Zhang J L, Ren J W, Chen C Y, et al. The Late Pleistocene activity of the eastern part of east Kunlun fault zone and its tectonic significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(3): 439-453
- [52] 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(增刊1): 12-20
Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(2): 13-24
- [53] 吴中海, 赵根模, 龙长兴, 等. 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*, 2014, 88(8): 1401-1416
Wu Z H, Zhao G M, Long C X, et al. The seismic hazard assessment around south-east area of Qinghai-Xizang Plateau: A preliminary results from active tectonics system analysis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(8): 1401-1416
- [54] 邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 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*, 2010, 17(5): 163-178
Deng Q D, Gao X, Chen G H, et al. Recent tectonic activity of Bayankala fault-block and the Kunlun-Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(5): 163-178
- [55] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 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*, 2014, 57(7): 2025-2042
Deng Q D, Cheng S P, Ma J, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025-2042