

郭瑛霞, 张丽峰, 余娜, 等. 2023年10月22日以来青藏高原 $M_s \geq 4.0$ 地震条带异常分析[J]. 华南地震, 2024, 44(S1): 85–89. [GUO Yingxia, ZHANG Lifeng, YU Na, et al. Anomalous Characteristics of $M_s \geq 4.0$ Seismic Belt in Qinghai–Tibet Plateau Since October 22, 2023[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(S1): 85–89]

2023年10月22日以来青藏高原 $M_s \geq 4.0$ 地震条带异常分析

郭瑛霞^{1,2}, 张丽峰², 余娜^{1,2}, 胡维云², 孙玺皓^{1,2}

(1. 青海格尔木青藏高原内部地球动力学野外科学观测研究站, 西宁 810001; 2. 青海省地震局, 西宁 810001)

Anomalous Characteristics of $M_s \geq 4.0$ Seismic Belt in Qinghai–Tibet Plateau Since October 22, 2023

GUO Yingxia^{1,2}, ZHANG Lifeng², YU Na^{1,2}, HU Weiyun², SUN Xihao^{1,2}

(1. Geodynamics Field Observation and Research Station of the Qinghai–Tibet Plateau, Xining 810001, China;

2. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China)

关键词: 青藏高原; 地震条带; 异常特征

Keywords: Qinghai–Tibet plateau; Seismic belt; Anomalous characteristics

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)S1-0085-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.S1.31

0 研究背景

地震活动条带图是地震预测中最常用的方法之一。1969年刘蒲雄在“通过弱震活动的分析开展地震预报的一些认识”一文中首次提出地震条带的概念,指出“大震前,小震活动出现条带分布,而条带外围广大地区呈现平静的异常图形”^[1]。

上世纪80年代中国地震学家开始对地震条带进行了认真清理与系统研究。陆远忠等^[2]对1967—1976年发生在中国的11次 $M \geq 7.0$ 大震和 $M 6.0 \sim 6.9$ 地震前的区域地震活动图像进行了研究,认为 $M \geq 7.0$ 大震前小震活动“条带”的出现具有一定的普遍性,可将震前条带所展现出的一些共同特征作为

孕震条带的判别标准;之后一些学者^[3]分别分析了四川、云南等地区不同地震条带的震例,认为小震条带可作为强震前的一种震兆,并提出了候选地震活动条带的一些标准;刘蒲雄和陈章立^[4]通过对中国大陆1967—1989年32个 $M \geq 5.5$ 地震震例的条带图像系统分析,确定了条带的划分方法和异常条带的判别,并对条带与大震发生的关系进行了统计分析。这些地震学家还从地壳的实际变形过程讨论了条带的形成机理。这些研究成果在中国近30年的地震预报研究与实践中发挥了重要的作用。

90年代后,随着强震的不断发生,有关条带的研究不断增多。在青海地区,马玉虎等人^[5]在总结2000年9月12日兴海6.6级地震时,发现1997年

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 青海省地震科学基金项目(2023A02); 2024年度震情跟踪定向工作任务(2024010118); 青海格尔木青藏高原内部地球动力学野外科学观测研究站专项; 青海省科技计划项目(应用基础研究计划)(2023-ZJ-770)联合资助。

作者简介: 郭瑛霞(1990–),女,硕士,工程师,主要从事地震活动性和数字地震学方面的研究工作。

E-mail: 932319938@qq.com

2月至1999年12月沿鄂拉山断裂带 $M_L 4.0$ 以上地震形成一明显的NNW向地震条带,2000年以来 $M_L \geq 4.0$ 地震又呈现NE向条带分布,两条带的交汇部位位于鄂拉山断裂与库玛断裂的交汇部位,即兴海及附近地区,兴海6.6级地震就发生在2个条带的交汇区;陈玉华等人^[6]在昆仑山口西8.1级地震研究过程中,也发现8.1级地震前中国大陆5级以上强震显示出规模较大的地震条带,2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震发生在1991—1996年形成的谢通门至包头NE向条带与1997—2001年形成的NW向条带的交汇部位。

本文尝试对2023年10月22日以来青藏高原 $M_s \geq 4.0$ 地震形成的条带异常进行分析,探讨条带及周边发生6级以上地震危险性,为未来青藏高原条带预测中强地震提供参考意义。

1 研究方法

地震活动条带图像是地震预测中最常用的方法之一。地震条带的判据已有一些共识:组成条带地震数 $N \geq 6$;条带长度 $L > 200$ km($M_L < 3$)或 $L > 400$ km($M_L \geq 3$),条带长宽比 $L/D \geq 4$,最大空段不超过全长的1/3。条带划定规则:①在 L^2 区域内(条带居中)范围内,带上地震数 $N_{\text{条}}$ 与带外地震数 $N_{\text{外}}$ 满足 $N_{\text{条}}/(N_{\text{条}}+N_{\text{外}}) \geq 0.75$,若出现近于垂直的两支条带时,我们把长的一支称为主条带,另一支为次条带,其长度分别为 L_1 、 L_2 ,则除主条带满足划定规则外, L^2 修正为 $(3/2)L_1 \times L_2$;②随着条带的形成,条带所处区域的应变能释放、频度、 b 值等出现不同程度的异常变化;③条带上或其延长线上可能出现震群;④弱震密集带的 $N_{\text{条}}/(N+1)$ 出现明显高值(高于2倍均方差, N 为条带两侧向外扩展1/2宽度内的逐月地震频度);⑤条带一般与大断裂带相一致,但不与某一断层相符合。震群发生在条带或其延伸线上,带上有震群,条带信度较高。

2 研究内容及结果

2.1 研究内容

2023年10月22日尼泊尔 $M_s 5.0$ 级地震后,青海省内及邻区短时间内发生了一系列的 $M_s 4.0$ 及以上地震,4级地震活动明显增强。10月22日当天又发生甘肃肃北4.7级地震,10月23日发生唐古拉4.7级地震和西藏申扎4.4级地震后,通过跟踪 $M_s 4.0$ 及以上地震的空间分布特征发现,在青藏高原境内自2023年10月22日至23日,短时间内形成

了一条近NE的4级以上地震带状分布,密切关注后10月24日在带状分布的北端发生肃北5.5级地震,成为年度会商重点关注的显著异常之一,2023年11月4日、12月1日在带内又先后发生了尼泊尔5.9级地震、肃北5.0级地震,形成从尼泊尔到甘肃肃北4级以上地震的北东向展布格局,进入2024年后,在此带状分布的空段内发生了1月25日都兰4.3级地震、2月3日都兰4.1级地震,至此贯穿青藏高原的近北东向条带形成(图1),随后条带内又发生了3月7日杂多5.7级震群、3月14日天峻4.2级地震,3月18日杂多4.3级地震、3月26日治多4.5级地震(表1)。青藏高原 $M_s \geq 4.0$ 地震条带满足条带定义:条带内共发生14次 $M_s \geq 4.0$ 地震(≥ 6 次),条带长度 L 约1890 km(> 400 km)、宽约340 km,长宽比为5.6(> 4),条带内最大空段为630 km(\leq 全长1/3),在 L^2 区域范围内,条带内外频次比 $N_{\text{条}}/(N_{\text{条}}+N_{\text{外}}) = 77.7\% (\geq 0.75)$ 。该条带在持续发展后,据历史震例回溯可知,4级条带形成后多对应条带及周边6级以上地震,故密切关注条带及周边发生6级以上地震的危险。

2.2 条带内历史地震分析

青藏高原地区构造运动强烈,地质构造复杂,地震活动强度大,频度高。1900年以来条带内共发生44组 $M \geq 6.0$ 地震(图2),包括4组 $M \geq 7.0$ 地震,即1908年西藏奇林湖 $M 7.0$ 地震、1932年甘肃昌马 $M 7.6$ 地震、1934年西藏申扎 $M 7.0$ 、1963年青海阿兰湖附近 $M 7.0$ 。从条带内历史地震分布,发现强震主要位于条带内的主要断裂区域,7级地震主要发生于条带两侧边缘的断裂处。因此,初步分析认为条带内及两侧的主要断裂区域具有发生强震的构造背景。

2.3 震例对应情况及预报效能评估

对青藏高原地区短时间内快速形成的 $M_s \geq 4.0$ 地震条带进行统计(表2),1990年以来共出现过7次 $M_s \geq 4.0$ 地震条带,其中有6次条带形成后1年内在条带及邻区发生6级以上地震,对应率为85.71%,7次 $M_s \geq 4.0$ 地震条带共预测12 454 d,占研究总时间的2.93%;应报对地震45次,其中报对6次地震,报准率13.33%;预测评分 R 值为: $(R = 0.1333 - 0.0293 = 0.104) > (R_0 = 0.08)$,通过预报效能检验。表明此次短时间内快速形成的 $M_s \geq 4.0$ 地震条带,对条带内及邻区未来1年内6级以上地震具有较好的预测意义。

表1 青藏高原 $M_s\geq 4.0$ 地震条带内地震目录

表1 The earthquake catalogs of $M_s\geq 4.0$ seismic belt in Qinghai-Tibet plateau

时间	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	震级/ M_s	深度/km	地点
2023-10-22	27.81	84.74	5.0	10	尼泊尔
2023-10-22	39.38	97.33	4.7	10	甘肃酒泉市肃北县
2023-10-23	33.57	91.30	4.7	10	青海海西州唐古拉地区
2023-10-23	31.51	88.26	4.4	8	西藏那曲市申扎县
2023-10-24	39.43	97.28	5.5	10	甘肃酒泉市肃北县
2023-11-04	28.80	82.10	5.9	10	尼泊尔
2023-12-01	39.30	97.27	5.0	9	甘肃酒泉市肃北县
2024-01-25	36.95	97.12	4.3	15	青海海西州都兰县
2024-02-03	36.94	97.12	4.1	10	青海海西州都兰县
2024-03-05	33.52	93.01	5.3	10	青海玉树州杂多县
2024-03-07	33.58	93.01	5.5	10	青海玉树州杂多县
2024-03-14	38.53	97.40	4.2	9	青海海西州天峻县
2024-03-18	33.51	92.99	4.3	10	青海玉树州杂多县
2024-03-26	36.05	91.55	4.5	8	青海玉树州治多县

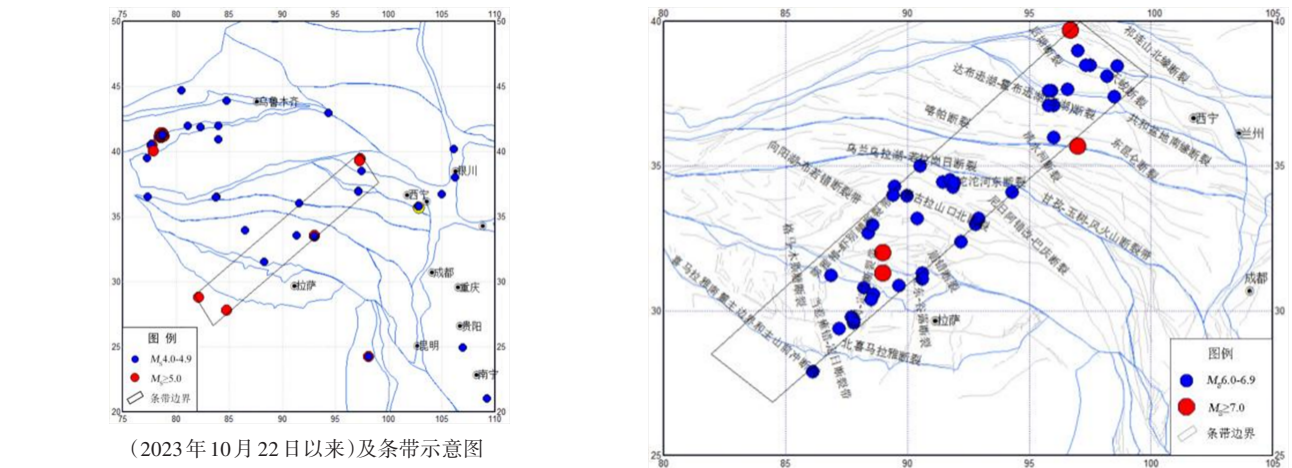


Fig.1 Spatial distribution map of $M_s\geq 4.0$ earthquakes and seismic belt in Qinghai-Tibet plateau(From October 22,2023)

图2 条带内及附近主要构造和历史地震分布图

Fig.2 Spatial distribution map of fault and historical earthquake within seismic belt and its adjacent area

表2 1980年以来青藏高原地区 $M_s\geq 4.0$ 地震条带对应震例统计

Table 2 Statistics of earthquake cases corresponding to $M_s\geq 4.0$ seismic belt in Qinghai-Tibet Plateau since 1980

序号	条带形成时段		条带时长/天	地震个数	条带起止震级/ M	对应地震			对应地震与条带位置关系	对应地震距条带形成时间/d
						时间	地点	震级		
1	1989-09-30	1990-09-30	365	10	3.0 ~ 4.9	1990-10-20	甘肃天祝—景泰	6.2	条带南端	20
2	1992-07-30	1992-08-22	23	11	4.0 ~ 4.6	1993-03-20	西藏昂仁	6.6	条带南端	211
3	1996-09-23	1996-11-16	54	14	4.0 ~ 5.0	1996-11-19	喀拉昆仑	7.1	条带西端	4
4	1998-11-19	1999-08-04	258	11	5.0 ~ 6.2	2001-11-14	昆仑山口西	8.1	主震发生在靠近2个条带的交汇部位	833
	2000-01-05	2000-11-26	326	21	5.0 ~ 6.5					353

(转下表)

(接表2)

序号	条带形成时段		条带时长/天	地震个数	条带起止震级/ M	对应地震			对应地震与条带位置关系	对应地震距条带形成时间/d
						时间	地点	震级		
5	2002-05-22	2002-06-17	26	13	4.0~4.9	2003-04-17	青海德令哈	6.6	条带北端附近	304
6	2009-09-17	2009-10-12	24	11	4.0~4.9	2010-04-14	青海玉树	7.1	条带东南约300 km	185
7	2015-04-25	2016-01-14	264	5	5.2~5.9	2016-01-21	青海门源	6.4	条带北端	7

2.4 典型震例对比分析

通过统计1990年以来6.0级以上地震震前1个月至12个月的4级地震活动情况，其中有6次地震震前半年出现4级以上地震近似带状分布，分别是1993年西藏昂仁6.6级地震前、1996年喀拉昆仑7.1级地震前、2001年昆仑山西口8.1级地震前、2003年青海德令哈6.6级地震前、2010年青海玉树7.1级地震前和2016年门源6.4级地震前。1992-07-30—1992-08-22快速形成近NE向 $M_s\geq 4.0$ 地震条带，1993年西藏昂仁6.6级地震发生在条带南端(图3a)，条带形成距对应地震211 d；1996-09-23—1996-11-16快速形成NW向 $M_s\geq 4.0$ 地震条带，1996年喀拉昆仑7.1级地震发生在条带西端(图3b)，条带形成距对应地震仅4天；1998-11-19—

1999-08-04形成NW向 $M_s\geq 5.0$ 向地震条带，2000-01-05—2000-11-26形成NS向 $M_s\geq 5.0$ 向地震条带，2001年昆仑山西口8.1级地震发生在两个条带的交汇部位(图3c)，条带形成距对应地震353 d；2002-05-22—2002-06-17快速形成近NE向 $M_s\geq 4.0$ 向地震条带，2003年德令哈6.6级地震发生在条带北端(图3d)，条带形成距对应地震304 d；2009-09-17—2009-10-12快速形成近NE向 $M_s\geq 4.0$ 向地震条带，2010年玉树7.1级地震发生在条带附近(图3e)；条带形成距对应地震185 d；2015-04-25—2016-01-14形成近NE向 $M_s\geq 4.0$ 向地震条带，2016年青海门源6.4级地震发生在条带北端(图3f)，条带形成距对应地震仅7 d，据此分析认为，此次条带异常的预测地震发生在条带两端的可能性较大。

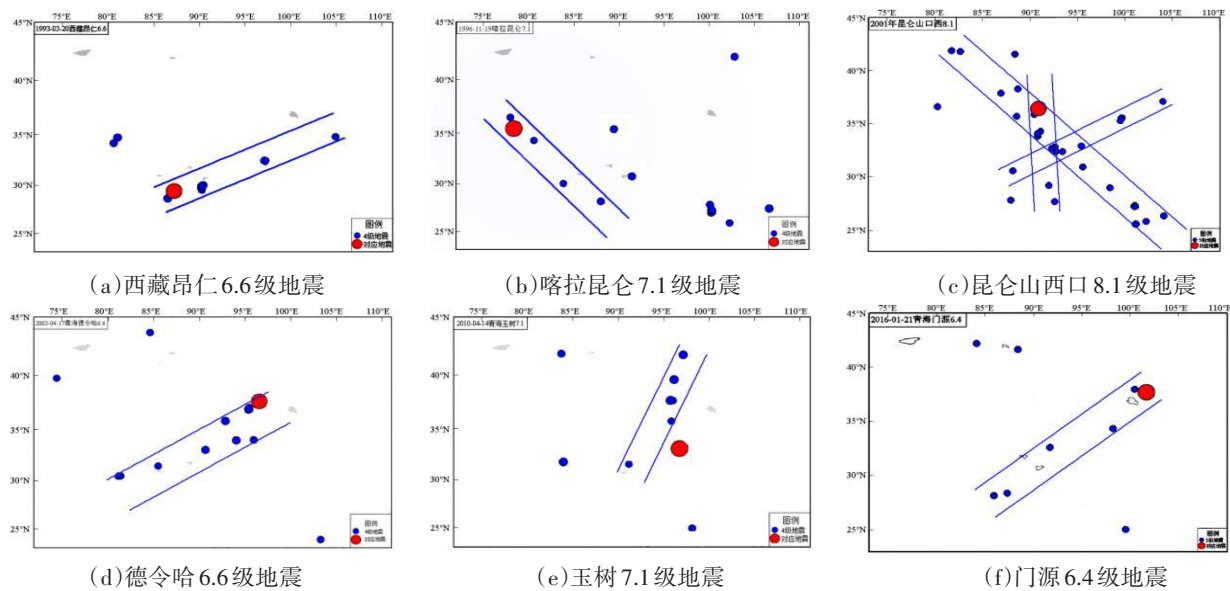


图3 大地震前条带示意图

Fig.3 Spatial distribution map of seismic belt before the major earthquake

3 结论

研究区域构造运动强烈，地质构造复杂，地震活动强度大，频度高，大部分活动断裂均具备发生6级以上地震的能力。通过1990年以来条带回溯，研究区出现7次 $M_s \geq 4.0$ 的地震条带，其中有6次条带形成后1年内在条带及邻区发生6级以上地震，对应率为6/7，可信度较高，预测未来1年内条带及周边地区存在发生6级以上地震的可能。

典型震例类比结果发现，本次条带快速形成，条带十分明显，且从尼泊尔地区延伸至甘肃肃北，统计1990年以来6.0级以上地震前1个月至12个月的4级地震活动情况，其中有6次地震震前一年出现4级以上地震近似带状分布，分析对应地震与条带位置关系认为，此次条带异常的预测地震发生在条带两端的可能性较大。

综合分析认为，青藏高原近NE向地震条带及周边地区，未来1年内存在发生6级以上地震的危险，目标地震发生在条带两端的可能性较大。2024年4月4日茫崖5.5级地震发生后，跳出带状区域，条带虽解体，但预测意义仍然持续，继续关注。

参考文献

- [1] 国家地震局科技监测司. 地震学分析预报方法程序指南[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [2] 陆远忠,陈章立,王碧泉. 地震预报的地震学方法[M]. 北京:地震出版社,1985.
- [3] 周传荣,孙志昆. 地震的条带分布[M]//许绍燮. 地震预报方法实用化研究文集(地震学专辑). 北京:学术书刊出版社,1989.
- [4] 刘蒲雄,陈章立. 地震条带及其在地震预报中的作用[J]. 中国地震,1989,5(1): 23-32.
- [5] 马玉虎,王培玲,李永强. 2000年9月12日青海省兴海6.6级地震[M]//陈棋福. 中国震例(2000~2002). 北京:地震出版社,2008.
- [6] 陈玉华,张肇诚. 昆仑山口西8.1级地震前地震活动性异常特征[J]. 西北地震学报,2009,31(4):374-379.