

青藏高原北部地区地震基本活动状态定量评价

刘小凤, 梅秀苹, 冯建刚, 程建武, 张 辉

(甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:基于区域构造背景、应力场状态及动力学环境等,将青藏高原北部地区划分为4个相对独立的统计单元,即祁连山地震带、甘东南地区、柴达木—共和地块及库玛地震带。通过地震频度和 b 值拟合确定了各个地区不同下限震级的地震目录完整性起始时间;确定了各构造单元中强以上地震活跃与平静交替活动的特征;定量计算了在平均状态中强以上地震活动特征参数及平静阶段与活跃阶段地震活动特征参数;分别获得了各个区域在平均、活跃与平静状态下的小震活动状态参数。

关键词: 青藏高原北部地区;地震活动状态;定量分析;状态参数

中图分类号: P315.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2011)02-0130-07

Quantitative Estimating Basic State of Seismicity in Northern Region of Qinghai—Xizang Plateau

LIU Xiao-feng, MEI Xiu-ping, FENG Jian-gang, CHENG Jian-wu, ZHANG Hui

(Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The northern region of Qinghai—Xizang plateau is divided into four separated seismicity areas according to the regional geological structures, stress field and dynamic environment, they are Qilian mountain seismic belt, southeastern Gansu province, Caidam—Gonghe block and Kuma seismic belt. The starting times for the minimum earthquake magnitude with complete recording catalogue in every areas are confirmed on the base of b -value and seismic frequency. The alternative characteristics of active and calm periods for moderate-strong earthquakes in each area are concluded. Finally, the quantitatively characteristic parameters of earthquakes activity which have magnitudes bigger than moderate-strong event in average, active and calm periods are calculated separately, and also the state parameters of small event activity in three periods are obtained for the four areas.

Key words: Northern region of Qinghai—Xizang plateau; State of seismicity; Quantitative estimation; State parameter

0 引言

区域地震活动状态判定在地震趋势预测中具有重要意义。而以往研究大多基于定性的经验总结,地震活动性异常的确认与描述基本处于定性的状态;其次是不同区域小震定位精度存在较大差异;第三是不同地区历史地震目录完整性差异较大。这些

导致我们对区域地震活动状态判定具有一定的局限性。

本文根据区域构造背景、应力场状态及动力学环境等,将青藏高原北部地区划分出4个与构造及地震活动相关的统计单元,在对各构造单元地震监控能力分时段评估的基础上,从不同震级范围的地

震频次、应变释放、强度变化、 $G-R$ 关系 b 值、地震时间间隔等基本参数入手,定量判定青藏高原北部地区不同构造区带平均状态下地震活动的强弱,在更精细的层次上对不同构造单元地震活跃和平静状态进行定量、半定量评估。

1 基于区域动力学环境的统计单元划分

青藏高原北部地区地质构造复杂,地震活动频率高、强度大。根据区域活动构造定量数据、GPS 和跨断层形变观测、震源机制解等研究结果^[1-4],将青藏高原北部地区划分为祁连山地震带、甘东南地区、柴达木—共和地区和库玛地震带 4 个相对独立的统计单元(图 1)。

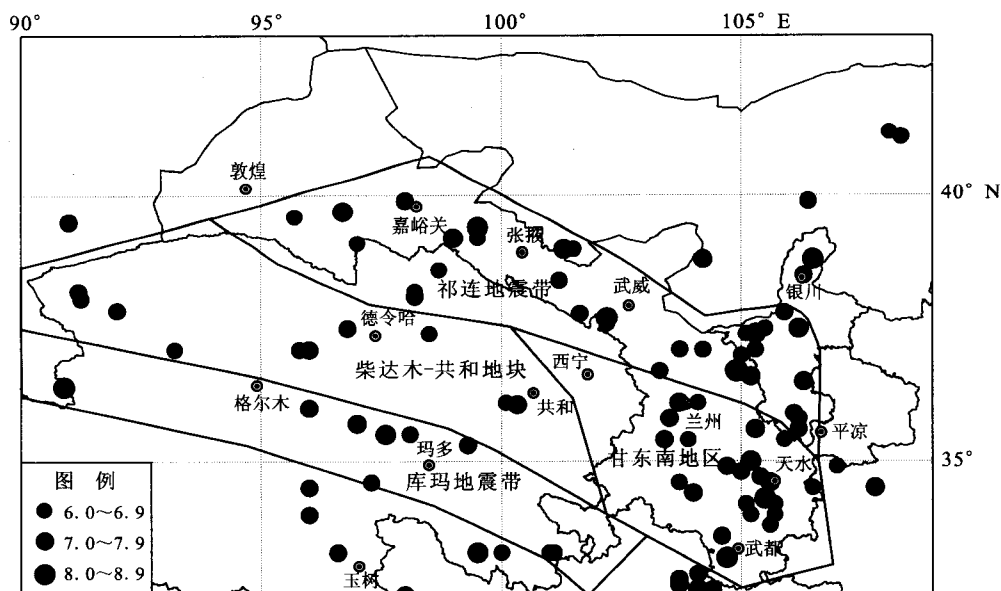


图 1 青藏高原北部地区构造单元划分图

Fig. 1 Tectonic zoning of northern region of Qinghai-Xizang plateau.

祁连山地震带四周被深大走滑活动断裂包围,在 NNE 向区域应力场作用下地块内部发生挤压逆冲,形成一系列推覆体构造,区内发生过 1920 年海原 8.5 级地震、1927 年古浪 8 级地震。震源机制解显示该地区中强以上地震断层错动类型以左旋走滑为主兼有一定的逆冲分量,区域主压应力方向自西向东由 NNE、NE 向到 NEE 和近 EW 向。

甘东南地区是青藏高原东北缘一系列 NW—NWW 向构造和青藏块体东部近 SN 向构造的过渡地区,地壳活动十分活跃,区内构造复杂,地震活动强烈,曾发生 1654 年天水 8 级地震、1879 年武都 8 级地震。震源机制解显示,该地区中强以上地震断层错动类型以左旋走滑为主兼有一定的逆冲分量,区域主压应力 P 轴优势方向主要为 NW 和近 SN 向,整体构造应力场在较长时间内基本上保持稳定状态。自晚更新世以来一直处于 NE—NEE 向区域构造应力场作用下,导致块体内部向东南方向的挤出。

柴达木—共和地块内部构造和介质性质比较简单,周边受区域深大活动断裂围限,内部发育 NNW 和 NW 向次级断裂。在 NE 向区域应力场作用下 NW—NWW 向边界断裂发生左旋走滑活动,NNW 向次级断裂发生右旋走滑活动,导致共和—兰州地区发生顺时针旋转和整个块体向南东方向的挤出。块体内发生的最大地震为 1990 年共和 7.0 级。震源机制解显示柴达木—共和地块中强以上地震断层错动类型以左旋走滑为主兼有一定的逆冲分量,区域主压应力方向主要为 NE 向,晚更新世以来该地区的运动状态为向右的旋转运动。

库玛活动断裂带是青藏块体内部长度超过千里的一条重要的左旋走滑活动断裂带,1900 年以来库玛地震带及附近地区共发生 7 级以上地震 11 次,最大地震为 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震。震源机制解显示库玛地震带中强以上地震断层错动类型以左旋走滑为主,区域主压应力方向主要为 NE—NEE 向。

2 各构造区带地震监控能力评估

2.1 历史地震目录完整性分析

地震目录的完整性是指某一震级以上的地震都能被观测或记录到,如果这一震级以上地震出现遗漏,即称为不完整地震目录^[5]。已有的研究表明,分析历史地震目录完整性最常见的方法是利用古登堡—里克特的震级—频度关系^[6],计算出最小完整性震级,在时间和震级尺度基本不变的条件下,利用震级—频度关系对地震目录进行不完整性定量估计,确定目录的遗失率等。本文采用古登堡—里克特的震级—频度关系($G-R$ 关系)对青藏高原北部地区历史地震目录的完整性进行了定量分析,通过地震频度和 b 值拟合,大致确定了不同下限震级

的完整性目录起始时间。

2.1.1 频度曲线

利用各个构造单元地震目录,删除5级以上强余震,分别以 $M_{5.0}$ 和 $M_{6.0}$ 做为震级下限,20年滑动步长做频度曲线,得到地震频度随时间的变化特征。根据西北地区各构造单元不同震级下限频度曲线,祁连山地震带及甘东南地区从1570年开始历史地震记载较多,1920年之后地震目录相对完整;柴达木—共和地块和库玛地震带从1900年以后才有地震记载,柴达木—共和地块1935年之后地震目录相对完整。表明频度曲线存在一个相对明显的变化过程,显示出地震目录由不完整趋向完整,处在一个稳定的变化范围(图2)。

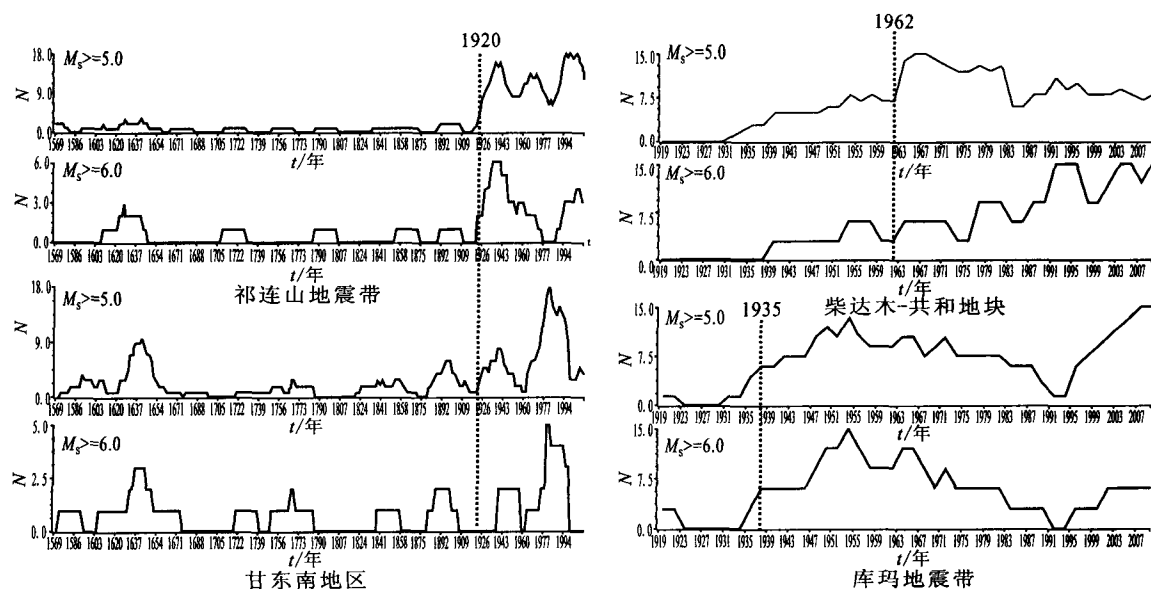


图2 青藏高原北部各构造单元不同震级下限频度图

Fig. 2 Different completeness magnitude of tectonic units in the northern region of Qinghai-Xizang plateau.

2.1.2 b 值拟合

b 值拟合主要反映出了低震级端地震目录的完整性及起始时间。利用各个统计单元5级以上地震目录,删除5级以上强余震,以5.0级地震做为震级下限,得到 b 值拟合图。从中可以看出,1900年以来青藏高原北部地区5级以上地震记录基本完整,四个区域 b 值差异不大,库玛地震带 b 值略低,这反映了该区域的应力水平相对较高,库玛地震带处于青藏块体内部,构造活动较强烈(图3)。

根据震级—频度关系^[6-7]对青藏高原北部地区历史地震目录完整性进行了分析,通过地震频度、 b 值拟合的估计,初步确定了不同下限震级的完整目录起始时间:祁连山地震带6级以上地震自1569年

以后是相对完整的,5级以上地震目录自1920年以后是完整的;甘东南地区6级以上地震自1575年以后是相对完整的,5级以上地震目录自1920年以后是完整的;柴达木—共和地块6级以上地震自1935年以后是相对完整的,5级以上地震目录自1950年以后是完整的;库玛地震带6级以上地震自1935年以后是相对完整的,5级以上地震目录自1950年以后是完整的。

2.2 仪器记录地震目录完整性分析

仪器记录地震目录是地震活动分析研究中的关键资料,随着地震监测台网的不断改造升级,地震监测能力有了很大的提高,完整地震目录的震级下限也在不断提高。对4个构造单元基于古登堡—里克

特的震级—频度关系对每个区域不同时间段小震目录进行完整性分析。采用 1970 年以来全国小震目录,利用 K-K 法进行余震删除,再删除震群,最后

用最小二乘法拟合不同区域、不同时期的 b 值,根据 b 值的拟合情况分析完整目录的震级下限。

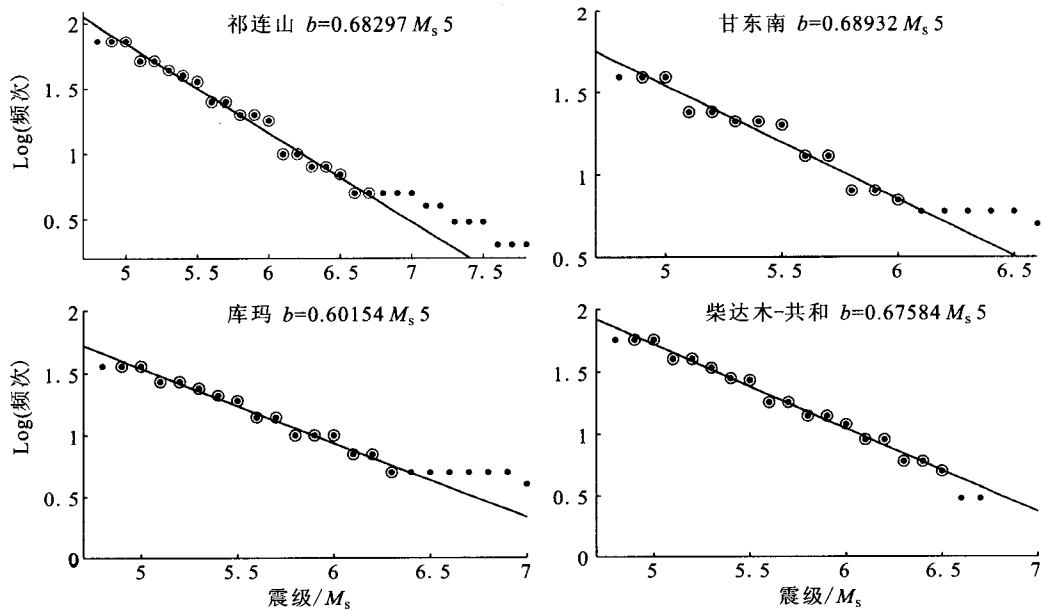


图 3 青藏高原北部 1900 年以来 5 级以上地震 b 值拟合图
Fig. 3 Fitting of b value of $M \geq 5.0$ earthquakes from 1900 in the northern region of Qinghai—Xizang plateau.

青藏高原北部地区不同构造单元分时段 b 值拟合结果显示,完整地震目录的震级下限随着台网的改造升级而不断降低,4 个统计单元中完整目录震级下限有一定的差异,祁连山地震带和甘东南地区震级下限要低于柴达木—共和和库玛地震带,各区域完整地震目录的震级下限分别为:祁连山地震带 $M_L 2.6$ 、甘东南地区 $M_L 2.3$ 、库玛地震带 $M_L 3.1$ 、柴达木—共和地块 $M_L 3.2$ ^[8]。

3 中强以上地震活跃期及平静期特征

1900 年以来 5 级以上地震的研究结果显示,青藏高原北部地区大体可以划分为 6 个集中丛集活跃时段,每个时段持续时间不等,地震频度和强度也差异较大^[9]。

3.1 分区地震活动基本状态

(1)祁连山地震带
1900 年以来祁连山地震带 5 级以上地震表现出 4 个集中丛集活动的阶段(图 4(a)),第一阶段为 1920—1934 年,连续发生了 1920 年海原 8.5 级、1927 年古浪 8.0 级和 1932 年昌马 7.6 级地震,间隔时间分别为 7 年和 5 年,并依次由东向西迁移;第二阶段为 1951—1962 年,最大地震为 1954 年山丹

7.3 级,发生在祁连山地震带北部的龙首山断裂带上;第三阶段为 1980—1993 年,以中强地震活动为主,包含了 3 次 6 级地震,最大地震为 1986 年门源 6.4 级;第四阶段始于 2000 年,发生了 5 次地震,具有自东向西再折返向东迁移的特征,到目前为止最大地震为 2003 年民乐 6.1 级。每个活跃阶段持续

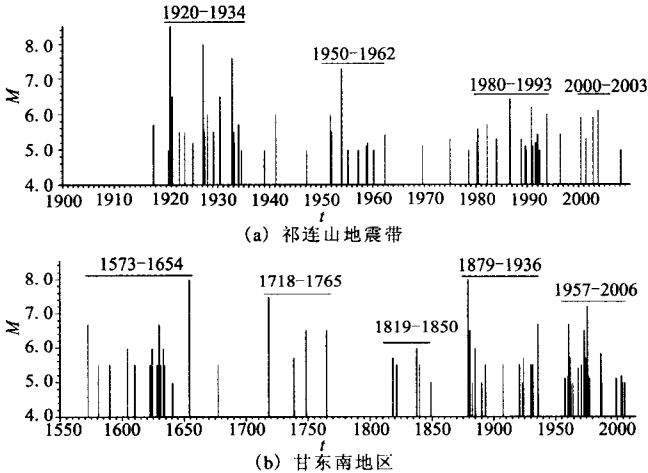


图 4 祁连山地震带和甘东南地区 5 级以上地震 $M-t$ 图

Fig. 4 $M-t$ diagrams of $M \geq 5.0$ earthquakes in Qilian mountain seismic belt and southeastern Gansu province.

10 年左右,一般至少发生 5.5 级以上地震 5 次,6.0 级以上地震 3 次,每个活跃阶段之间为 15 年左右的平静期。

(2) 甘东南地区

甘东南—甘青川交界地区 5 级以上地震具有平静和活跃交替活动特征,大体可划分为 6 个活跃阶段(图 4(b))。第一阶段为 1573—1654 年,发生 4 次 6 级地震和 1 次 8 级地震,最大地震为 1654 年天水 8.0 级;第二阶段为 1718—1765 年,发生 2 次 6 级地震和 1 次 7 级地震,最大地震为 1718 年通渭 7.5 级;第三阶段为 1819—1850 年,发生 1 次 6 级地震,最大地震为 1837 年岷县 6.0 级;第四阶段为 1879—1936 年,发生 4 次 6 级地震和 1 次 8 级地震,最大地震为 1879 年武都 8.0 级;第五阶段为 1957—2006 年,发生 3 次 6 级地震和 2 次 7 级地震,最大地震为 1976 年松潘 7.2 级。每个活跃阶段持续时间一般为 31—81 年,平均约 50 年,每个活跃阶段至少发生 4 次 5.5 级以上地震或 1 次 6 级以上地震。活跃阶段之间为 21—64 年的平静时间,平静时段内一般无 5 级以上地震发生。

(3) 柴达木—共和地块

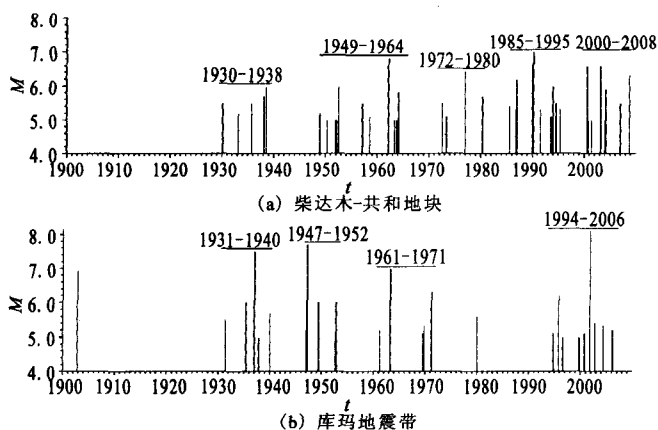


图 5 1900 年以来柴达木—共和地块和库玛地震带 5 级以上地震 $M-t$ 图

Fig. 5 $M-t$ diagrams of $M \geq 5.0$ earthquakes from 1900 of Qaidam—Gonghe mass and Kuma seismic belt.

1900 年以来柴达木—共和地块 5 级以上地震大体可以划分出 5 个阶段,每个阶段持续时间不等(图 5(a))。第一阶段为 1930—1938 年,持续时间 8 年,最大地震为 1938 年天峻 6.0 级;第二阶段为 1949—1964 年,持续时间 15 年,最大地震为 1962 年霍布逊湖 6.8 级;第三阶段为 1972—1980 年,持续时间 8 年,最大地震为 1977 年茫崖 6.4 级;第四阶段为 1985—1995 年,持续时间 10 年,最大地震为

1990 年共和 7.0 级;第五阶段为 2000—2008 年,持续时间 8 年,最大地震为 2000 年兴海 6.6 级、2003 年德令哈 6.6 级地震。由此可见,该地区地震活动强度不大,但频次较高,最大地震为 1990 年共和 7.0 级。活跃期一般持续 10 年左右,至少发生 2 次 6 级地震。平静期持续时间不等,分别为 11 年、12 年、15 年和 5 年,平静期无 5 级以上地震发生。

(4) 库玛地震带

1900 年以前库玛地震带历史地震资料遗漏,未记录到 5 级以上地震,1900 年以后特别是 1950 年以前地震记录也不完整。根据现有的地震资料,大体可以划分出 4 个活跃阶段,第一阶段为 1931—1940 年,持续时间为 9 年,最大地震为 1937 年托索湖 7.5 级;第二阶段为 1947—1952 年,持续时间为 5 年,最大地震为 1947 年达日 7.7 级;第三阶段为 1961—1971 年,持续时间为 10 年,最大地震为 1963 年阿兰湖 7.0 级;第四阶段为 1995—2006 年,持续时间为 12 年,最大地震为 2001 年昆仑山口西 8.1 级(图 5(b))。在第四活跃阶段中若不考虑 8.1 级地震的余震活动,则持续时间为 7 年。活跃期一般持续 10 年左右,发生 5 级以上地震 5—9 次,至少发生 1 次 7 级以上地震。平静期持续时间不等,分别为 7 年、9 年和 23 年。

3.2 地震活动状态参数统计分析

根据有记载以来 5 级以上地震目录,结合前述地震目录完整性分析结果,确定了各个构造单元统计地震的起始时间。采用 Mapseis2.9.3 软件中的计算方法,分别获得了 4 个分区地震活跃与平静期的地震活动状态参数,其中 m 值计算采用蒋海昆提供的 DA 模式。DA 模式的含义是,大震前临界区范围内地震活动呈加速态势,同一时期在孕震区较小范围内则出现地震活动的减弱。震前孕震区范围地震活动的减弱被归因于由于震前滑移所导致的应力松弛过程^[10-11]。

不同构造单元 5 级以上地震活跃与平静期地震活动状态参数统计结果显示,祁连山地震带和甘东南地区地震活跃期持续时间明显大于平静期,柴达木—共和地块和库玛地震带地震活跃期与平静期持续时间差异不大。活跃期一般发生 5 级地震 5~27 次,6 级地震 1~6 次,7 级以上地震 1~2 次,5 级以上地震年频次为 0.5~1.8,6 级以上地震年频次为 0.03~0.7,折合震级为 6.1~8.5,平均震级为 5.5~7.7, b 值为 0.4~0.8, m 值为 1.2~1.5。平静期发生 5 级以上地震 1~3 次或不发生 5 级以上地震,

均无 6 级以上地震发生(表 1)。

4 平静期与活跃期小震活动基本状态

根据 1970 年以来 $M_L2.0$ 以上地震目录,采用 Mapseis2.9.3 软件中的计算方法,分别获得了 4 个区的地震活动状态参数。需要说明的是,分别使用不删除余震和用 K-法删除余震两套地震目录分别计算各单元地震地震活跃、平静时段小震活动参数特征,其结果显示删除余震后活跃期与平静期各参数的差异性减小,而不删除余震的差异性较大,因此以下定量指标判据均为未删除余震计算的结果。

不同构造单元小震活跃与平静时段地震活动状态参数统计结果显示(表 2),祁连山地震带和柴达木一共和地块活跃时段平均持续时间较长,而甘东南与库玛地震带平静时段平均持续时间较长。活跃时段 $M_L\geq 3.0$ 、 $M_L\geq 4.0$ 和 $M_L\geq 5.0$ 地震平均年频次和月频次明显大于平静时段,活跃时段平均年应变释放折合震级一般大于 5 级,平均月应变释放折合震级一般大于 4 级, b 值小于 0.8, m 值也较低。平静时段平均年应变释放折合震级小于 5 级,平均月应变释放折合震级小于 4 级, b 值大于 0.8, m 值一般较高。

表 1 不同构造单元 5 级以上地震活跃与平静期地震活动状态参数统计表

分区	祁连山地震带		甘东南地区		柴达木共和地块		库玛地震带	
状态	活跃	平静	活跃	平静	活跃	平静	活跃	平静
持续时间/年	12~16	7~17	32~58	21~64	9~16	5~11	6~13	7~23
5 级以上地震/次	14~27	1~3	5~24	1	5~17	1	4~15	1
5.0~5.9 级/次	5~17	1~3	2~20	1	4~15	1	2~13	1
6.0~6.9 级/次	1~6	1	1~5	0	1~3	0	1~2	0
$M\geq 7.0$ /次	1~2	0	1~2	0	1	0	1	0
$M\geq 5.0$ 年频次	0.7~1.8	—	0.1~0.5	—	0.6~1.5	—	0.5~1.2	—
$M\geq 6.0$ 年频次	0.1~0.7	—	0.03~0.08	—	0.1~0.4	—	0.2~0.5	—
折合震级	6.3~8.5	—	6.1~8.0	—	6.1~7.1	—	7.0~8.1	—
平均震级	5.5~7.7	—	5.7~7.3	—	5.7~6.4	—	6.6~7.4	—
m 值	1.2~1.5	—	0.2~1.5	—	1.4~1.6	—	1.3~1.5	—
b 值	0.4~0.8	—	0.5~0.6	—	0.5~0.9	—	0.8	—

表 2 1970—2008 年不同构造单元小震活跃与平静时段地震活动状态参数统计表

分区	祁连山地震带		甘东南地区		柴达木共和地块		库玛地震带	
状态	活跃	平静	活跃	平静	活跃	平静	活跃	平静
持续时间/年	9~16	8~9	1~4	12~16	9~11	6	13	24
$M_L\geq 3.0$ 年频次	53~54	47~49	15~116	21~27	23~46	12~27	14.9	7.5~8.0
$M_L\geq 4.0$ 年频次	7~9	3~6	3~17	1~2	6.1~6.7	2.0~3.8	5.3	1.3~2.1
$M_L\geq 5.0$ 年频次	0.6~1.9	0.3	0.8~2.8	0.1~0.3	1.1~3.2	0.33	2.3	0.2~0.3
$M_L\geq 3.0$ 月频次	4.7~4.8	4.3~4.7	5~11	1.8~2.7	2.1~3.8	1.2~2.6	1.4	0.6~0.7
$M_L\geq 4.0$ 月频次	0.6~0.9	0.4~0.6	0.7~1.7	0.2	0.6	0.2~0.4	0.5	0.1~0.2
$M_L\geq 5.0$ 月频次	0.1	0.03	0.2~0.3	0.01~0.03	0.1~0.3	0.03	0.2	0.01~0.03
年折合震级/ M	5.5~5.6	4.9~5.1	5.3~6.2	1.6~4.7	5.4~5.8	4.7~4.8	5.6	4.5~4.6
月折合震级/ M	4.4~4.5	3.8~3.9	3.8~4.2	2.9~3.0	3.1~3.2	2.5~3.1	2.3	1.6
$M_L\geq 3.0$ 年应变释放均值 $\times 10^6$	6.1~6.4	2.4~3.0	2.1~3.8	1.2~1.5	6.1~12.0	0.9~1.7	27.7	0.6~0.8
m 值	0.8~1.6	1.2~1.5	0.8~1.3	1.1	1.1~1.8	0.8~1.7	1.62	1.3~1.8
b 值	0.7~0.8	1.1	0.6~0.7	0.9~1.0	0.6~0.7	0.7~0.9	0.6	0.9

注: m 值为 DA 模式计算的结果,其中祁连山地震带和甘东南地区为 M_L2 级以上地震,柴达木一共和地块和库玛地震带为 M_L3 级以上地震。

5 结论

(1) 根据区域构造地质背景、形变观测及震源机制解揭示出的应力场状态及区域动力学环境等,结合微震精定位后呈现出的时空强和震源深度分布特征,将青藏高原北部地区划分为四个独立的统计构造单元,即祁连山构造带、甘东南地区、柴达木一

共和地块和库玛构造带。

(2) 通过地震频度和 b 值拟合,确定了各个地区不同下限震级的完整性目录起始时间,其中祁连山地震带 6 级以上地震自 1569 年以后是相对完整的,5 级以上地震目录自 1920 年以后是完整的;甘东南地区 6 级以上地震自 1575 年以后是相对完整

的,5级以上地震目录自1920年以后是完整的;柴达木一共和地块6级以上地震自1935年以后是相对完整的,5级以上地震目录自1950年以后是完整的;库玛地震带6级以上地震自1935年以后是相对完整的,5级以上地震目录自1950年以后是完整的。仪器记录地震精度分析结果显示,1970年以来区域完整地震目录的震级下限分别为,祁连山地震带 $M_L 2.6$,甘东南地区 $M_L 2.3$,库玛地震带 $M_L 3.1$,柴达木一共和地块 $M_L 3.2$ 。

(3) 各构造单元中强以上地震存在活跃与平静交替活动的特征。祁连山地震带5级以上地震表现出4个集中丛集活动的阶段,每个活动阶段持续10年左右,每个活跃阶段内一般至少发生5.5级以上地震5次,6.0级以上地震3次,每个活跃阶段之间为15年左右的平静期;甘东南地区可划分为6个活跃阶段,每个活跃阶段持续时间一般为31—81年,平均约50年,每个活跃阶段至少发生4次5.5级以上地震或1次6级以上地震;活跃阶段之间为21~64年的平静时间,平静时段内一般无5级以上地震发生;柴达木一共和地块可以划分出5个阶段,每个阶段持续时间不等,活跃期一般持续10年左右,至少发生2次6级地震。平静期持续时间不等,分别为11年、12年、15年和5年,平静期无5级以上地震发生;库玛地震带可以划分出4个活跃阶段,活跃期一般持续10年左右,发生5级以上地震5~9次,至少发生1次7级以上地震。平静期持续时间不等,分别为7年、9年和23年。

(4) 定量计算了祁连山地震带、甘东南地区、柴达木一共和地块及库玛地震带中强以上地震活动特征参数及平静期地震活动特征参数。不同构造单元5级以上地震活跃与平静期地震活动状态参数统计结果显示,地震活跃期一般发生5级地震5~27次,6级地震1~6次,7级以上地震1~2次;5级以上地震年频次为0.5~1.8,6级以上地震年频次为0.03~0.7;折合震级为6.1~8.5,平均震级为5.5~7.7; b 值为0.4~0.8, m 值为1.2~1.5。平静期

发生5级以上地震1~3次或不发生5级以上地震,均无6级以上地震发生。获得了各个区域地震活跃与平静状态下的小震活动状态参数,祁连山地震带和柴达木一共和地块活跃时段平均持续时间较长,而甘东南与库玛地震带平静时段平均持续时间较长;活跃时段 $M_L \geq 3.0$ 、 $M_L \geq 4.0$ 和 $M_L \geq 5.0$ 地震平均年频次和月频次明显大于平静时段;活跃时段平均年应变释放折合震级一般大于5级,平均月应变释放折合震级一般大于4级; b 值小于0.8, m 值也较低。平静时段平均年应变释放折合震级小于5级,平均月应变释放折合震级小于4级, b 值大于0.8, m 值一般较高。

[参考文献]

- [1] 袁道阳,张培震,刘百箴,等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报,2004,78(2):270-278.
- [2] 刘百箴,曹娟娟,袁道阳,等. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料[J]. 地震地质,2008,30(1):161-175.
- [3] 张希,张晓亮,王双绪,等. 青藏块体东北缘近期地壳水平运动与应变积累[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(4):12-16.
- [4] 刘小凤,刘百箴,杨立明. 祁连山中东段三维构造物理模型及其在地震预报中的应用[J]. 西北地震学报,2000,22(2):.
- [5] 王海涛,李莹甄,屠弘伟. 新疆历史地震目录完整性分析[J]. 内陆地震,2006,20(1):10-17.
- [6] Gutenberg B, Richter C F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1956, 46: 105-143.
- [7] Richter C F. Elementary seismology[M]. San Francisco: Freeman, 1958.
- [8] 冯建刚,姚家骏,代伟. 青藏高原北部地区小震目录完整性分析[J]. 高原地震,2010,22(2):10-14.
- [9] 杨立明,肖丽珠,张小美,等. 青藏高原北部地震活动形势及其与中国大陆地区地震活动的关系研究[J]. 地震,2001,23(3):243-249.
- [10] 蒋海昆,吴琼,董祥,等. 不同温压条件下声发射应变能释放特征——加速模型参数物理含义的初步讨论[J]. 地球物理学报,2009,52(8):2064-2073.
- [11] 蒋海昆,董祥,苗青壮,等. 中国大陆7级强震前中小地震应变释放特征[J]. 地震,2009,29(3):1-10.