

# 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西地震 ——一次面波震级未饱和的地震\*

刘瑞丰 陈运泰 任 泉 侯建民 邹立晔

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 概述了 2001 年 11 月 14 日发生在新疆、青海交界的昆仑山口西地震震级的测定过程, 分析比较了我国国家数字地震台网和美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)测定的面波震级  $M_s$ , 以及国内外不同机构测定的该地震的矩震级  $M_w$ . 结果表明, 不同的机构在测定面波震级时, 由于所使用的资料不尽相同, 所使用的计算震级的公式也有所不同, 导致测定结果有一定的差别. 我国对该地震的速报结果是  $M_s=8.1$ , 在正式编辑出版的《中国数字地震台网观测报告》中给出的测定结果是  $M_s=8.2$ ; 美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)测定的结果是  $M_s=8.0$ . 地震发生后不久, 哈佛大学(Harvard)、NEIC、东京大学地震研究所(ERI)、中国地震局分析预报中心(APCEA)、中国地震局地球物理研究所(IGCEA)利用全球地震台网、中国国家数字地震台网或中国数字地震台网(CDSN)的资料得出的矩震级  $M_w$  分别是 7.8(Harvard), 7.7(NEIC), 7.7(ERI), 7.6(APCEA), 7.5(IGCEA), 测定的结果基本一致, 平均为  $M_w=7.7$ . 鉴于矩震级是一个描述地震绝对大小的力学量, 与传统的震级标度相比具有明显的优点, 国际地震学界推荐矩震级作为优先使用的震级. 本文分析表明, 昆仑山口西地震的震级(矩震级)为  $M_w=7.7$ , 其面波震级  $M_s=8.0$ , 是一次面波震级未饱和的地震.

**关键词** 震级 矩震级 面波震级 震源机制 地震台网

**中图分类号**: P315.3<sup>+</sup>2 **文献标识码**: A

## 引言

据我国国家数字地震台网速报(中国地震局监测预报司, 2002), 2001 年 11 月 14 日在新疆、青海、西藏交界的昆仑山口西发生了面波震级  $M_s 8.1$  地震. 这是我国大陆自 1950 年 8 月 15 日西藏察隅  $M_s 8.6$  ( $M_w 8.6$ ) (Kanamori, 1983) 和 1951 年 11 月 18 日西藏当雄  $M_s 8.0$ ,  $M_w 7.5$  (Kanamori, 1983)、7.7 (Engdahl, Villasenor, 2002) 地震之后 50 a 来最大的一次地震, 也是唯一的一次  $M_s 8$  级以上地震. 这次地震的破裂带总体走向为  $N70^\circ \sim 90^\circ W$ , 东起青藏公路以东 70 km 附近, 西止于布喀达板峰东缘附近, 地震地表破裂带主体长度大于 350 km (徐锡伟等, 2002). 这次地震震源破裂过程非常复杂, 整个地震事件系由 3 次较大的子事件构成; 在震源破裂过程中发生了触发与复杂的聚合过程 (许力生, 陈运泰, 2004).

\* 科技部国际科技合作重点项目《地质过程与灾害发生机理与预测》子项目“中国数字地震实时分析系统与海底地震观测”(2001CB711005)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1023.  
2004-04-16 收到初稿, 2005-06-21 收到修改稿并决定采用.

这次地震是中国国家数字地震台网自 2001 年 1 月正式运行以来记录到的我国境内震级最大的地震. 由于国家数字地震台站全部采用 24 位数据采集器, 即使是离震中最近的花土沟地震台(震中距约 100 km)和格尔木地震台(震中距约 392 km)都完整地记录下了这次地震, 没有发生限幅现象. 由于青海省的省级地震台网全部集中在西宁附近, 对该地震余震活动的监测能力非常弱, 所以这次地震的速报和余震的监测主要由国家数字地震台网和流动地震台网承担. 本文利用我国国家数字地震台网的记录, 计算了该地震的面波震级, 并将所测得的震级与其它机构测定的震级进行了比较.

1 面波震级

1.1 面波震级的测定

1966 年 1 月以后, 中国的地震报告采用了郭履灿和庞明虎(1981)提出的以北京白家疃地震台为基准的面波震级公式:

$$\begin{cases} M_s = \lg\left(\frac{A}{T}\right)_{\max} + \delta_{\text{PEK}}(\Delta) + C(\Delta) + D & 1^\circ < \Delta < 130^\circ \\ \delta_{\text{PEK}}(\Delta) = 1.66\lg(\Delta) + 3.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $(A/T)_{\max}$  是  $(A/T)$  的最大值;  $A$  是周期  $T \geq 3$  s 的面波地动位移矢量之和的振幅, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $T$  是面波的周期, 单位为 s.  $C(\Delta)$  是台站台基校正值;  $D$  是震源校正值, 对于白家疃地震台,  $C(\Delta)$  与  $D$  均取为 0.

Ванек 等(1962)研究了 14 位不同研究者的震级量规函数, 对它们加权平均, 提出了一个测定  $M_s$  的公式:

$$M_s = \lg\left(\frac{A}{T}\right)_{\max} + 1.66\lg\Delta + 3.3 \quad 20^\circ < \Delta < 160^\circ \quad h \leq 50 \text{ km} \quad (2)$$

式(2)称作莫斯科-布拉格公式或布拉格公式. 该公式在 1967 年苏黎世举行的国际地震学和地球内部物理学协会(IASPEI)大会上被推荐给世界各国使用. 自 1975 年以来美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)一直使用这个公式.

这次昆仑山口西大地震发生在人烟稀少的青海、新疆和西藏交界地带的青藏高原腹地无人区. 该地区基本上无历史地震资料记载. 由于自然条件的限制, 相对于我国其它地区而言, 在上述三省交界地区的地震台站相当稀疏, 距离主震震中最近的台站是青海省的花土沟地震台和格尔木地震台, 它们距主震震中分别约为 100 km 和 392 km.

地震发生以后, 中国地震局分析预报中心(APCEA)采用面波震级计算公式(1), 利用中国国家数字地震台网(图 1)25 个台站的资料, 在 20 分钟内快速测定了震源参数, 计算得到的面波震级是  $M_s = 8.1$ .

在此之后, 中国地震局地球物理研究所(IGCEA)利用国家数字地震台网 62 个台站的震相数据进行了地震定位, 并利用其中 48 个台站(包括上述 25 个速报及 23 个一般台站)的资料, 也采用公式(1)计算, 得出该地震的面波震级为  $M_s = 8.2$ . 美国国家地震信息中心(NEIC)利用全球地震台网(GSN)491 个台站的震相到时进行了地震定位, 并利用其中的 108 个台站的资料用公式(2)计算了面波震级, 得出  $M_s = 8.0$ . 其计算震级所用的台站分布见图 2. 不同的机构测定得到的地震参数见表 1.

从表 1 可以看出, IGCEA 的地震观测报告与 NEIC 的定位结果基本一致, 发震时刻相

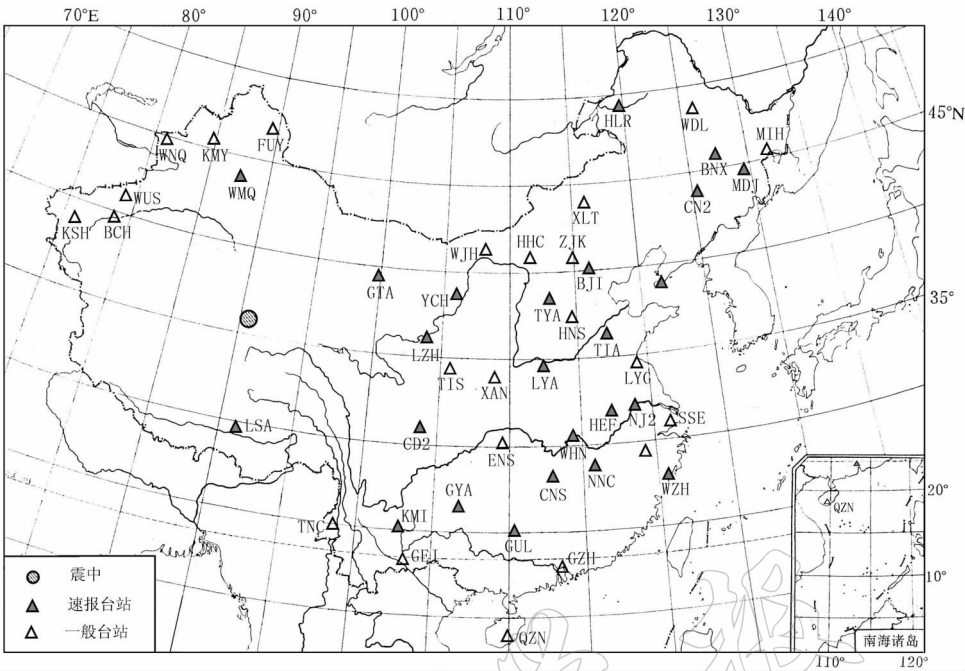


图 1 我国测定昆仑山口西地震震级所使用的中国地震台站分布图  
在昆仑山口西地震的速报中，中国地震局分析预报中心用了 25 个速报台站(实心三角形)的记录资料测定了面波震级，在《中国数字地震台网观测报告》中除了使用上述 25 个速报台站外，还使用了 23 个一般台站(空心三角)的数据计算震级，台湾资料暂缺

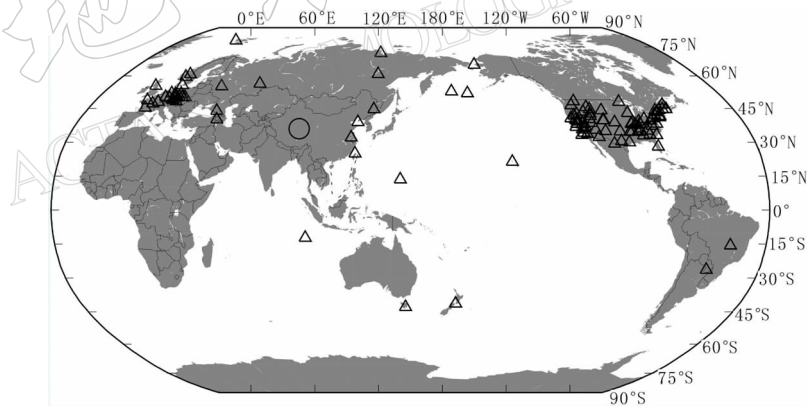


图 2 美国国家地震信息中心测定昆仑山口西地震震级所使用的全球地震台网 108 个台站(空心三角形)分布图，空心圆表示昆仑山口西地震震中

表 1 不同机构测得的 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西地震的震源参数

序号	发震时刻 (UTC) 时:分:秒	震 中 位 置		震源深度 /km	定位用的 台站数	$M_s$	计算震级的 台站数	测定机构
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$					
1	09:26:13	36.20	90.90		25	8.1	25	APCEA
2	09:26:09	35.92	90.53	11	62	8.2	34	IGCEA
3	09:26:10	35.95	90.54	10	491	8.0	108	NEIC

差 1 s,震中精度与纬度均相差约 1 km,震源深度相差 1 km;APCEA 的速报与 IGCEA 地震观测报告及 NEIC 的定位结果差别较大,发震时刻相差 3 s,震中经度与纬度相差 30~40 km.地震速报产生误差的主要原因是由于地震速报要求的时间性非常强,在速报时使用的只是国家数字地震台网中的 25 个地震台的数据,台站数量偏少.

表 2 和表 3 分别列出了中国地震局地球物理研究所 2001 年编辑的《中国数字地震台网观测报告》和 NEIC 测定的这次地震的面波震级结果.可以看出,《中国数字地震台网观测报告》测定的震级平均是 8.2.每个台站单独测定的昆仑山口西地震震级彼此都有一定的差别,测得的震级最大的台站是福建泉州地震台(QZH),结果是  $M_s8.8$ ;震级最小的台站是内蒙乌加河地震台(WJH),结果是  $M_s7.3$ .所测震级相差 1.5.从台站的观测环境看,乌加河地震台是目前全国台基最好的地震台之一,而泉州地震台的台基较差.NEIC 利用全球地震台网不同距离、不同方位的 108 个台站测定的面波震级( $M_s=8.0$ )与《中国数字地震台网观测报告》测定的结果( $M_s=8.2$ ),以及 APCEA 测定的结果( $M_s=8.1$ )一致.其单台测得的震级最小的台站是 GNI,结果是  $M_s=7.2$ ;测得的震级最大的台站是 EMMW,结果是  $M_s=8.6$ .测得的最大震级与最小震级相差 1.4.

表 2 中国国家数字地震台网测定的 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西地震的面波震级

序号	台站代码	震中距/(°)	方位角/(°)	$M_s$	序号	台站代码	震中距/(°)	方位角/(°)	$M_s$
1	WMQ	8.2	345	8.5	23	BJI	20.6	71	8.5
2	BCU1	10.1	296	8.3	24	WHN	20.6	98	8.7
3	WUS	10.3	304	7.7	25	XLT	21.1	60	8.7
4	KMY1	10.6	338	8.5	26	TIA	21.5	81	8.0
5	FUY	11.1	356	7.8	27	HEF	22.5	93	8.1
6	WNQ	11.6	324	8.4	28	NNC	22.5	101	8.4
7	KSH	12.1	292	8.3	29	LYG	23.4	85	7.5
8	CD2	12.1	111	8.5	30	GZH	23.5	117	8.7
9	YCH	12.6	73	8.0	31	NJ2	23.8	91	8.2
10	TIS	12.7	92	7.4	32	QZN	23.9	130	8.2
11	TCG	12.9	145	8.2	33	DL2	24.8	74	8.3
12	WJH	14.8	63	7.3	34	XAJ	25	97	7.8
13	KMI	15	132	8.4	35	HLR	25.1	49	8.3
14	XAN	15.2	92	7.8	36	SSE	26	92	7.8
15	GEJ	16.6	135	7.7	37	QZH	26.5	107	8.8
16	GYA	16.7	120	8.3	38	WEZ	26.7	99	8.5
17	ENS	16.9	104	8.0	39	CN2	27.8	63	8.4
18	HHC	17.2	67	8.5	40	WDL	29	53	7.5
19	LYN	18	88	8.0	41	BNX	29.3	59	7.9
20	HNS	19.4	78	8.5	42	MDJ	30.8	62	8.2
21	ZJK	19.7	68	8.6	43	MIH	32.4	60	8.2
22	CNS	20.5	106	8.2	平均				8.2

1.2 单台测定的震级之间的偏差的主要原因

在测定震级时,无论是中国数字地震台网还是全球地震台网,不同台站测定的面波震级都会有一定的差别.这次昆仑山口西地震的震级测定也不例外.导致单台震级测定有差别的主要原因有以下两点:

- 1) 台基.在我国使用的面波震级计算公式(1)中, $C(\Delta)$ 为台站校正值,它是震中距的

表 3 美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)测定的  
2001 年 11 月 14 日昆仑山口西地震的面波震级

序号	台站代码	震中距/(°)	方位角/(°)	M <sub>s</sub>	序号	台站代码	震中距/(°)	方位角/(°)	M <sub>s</sub>
1	NJ2	23.76	91.2	7.9	56	BEKR	99.37	23.6	8.1
2	DL2	24.8	73.8	8.2	57	ACCN	99.82	21.2	8.2
3	TATO	28.72	103.7	7.7	58	PAHR	99.83	23	8.3
4	ARU	29.73	323.6	7.3	59	WCN	100.07	23.4	8.1
5	MDJ	30.78	61.5	7.8	60	HWUT	100.21	16.7	8.1
6	YAK	35.7	30.7	8.2	61	CMB	101.02	24.4	8.2
7	GNI	36.03	290.6	7.2	62	DUG	101.24	18	8.3
8	KIV	37.11	297.4	7.6	63	BINY	101.26	349.8	7.8
9	TIXI	40.89	17.5	7.8	64	L SCT	101.33	347.7	8.0
10	OBN	41.19	315.1	7.7	65	JFWS	101.51	0.6	8.1
11	COCO	48.24	171.7	7.6	66	SAO	101.79	25.8	8.1
12	OJC	51.7	309.4	7.9	67	TPH	101.99	22.1	8.0
13	RAC	52.73	309.5	7.7	68	PAL	102.1	348	7.8
14	KBS	52.81	346.2	7.7	69	MVU	102.99	18.1	8.2
15	GUMO	53.38	100.2	7.6	70	SSPA	103.05	351	7.9
16	DPC	53.83	310.2	7.8	71	ISCO	103.17	12.7	8.2
17	VKA	54.39	307.7	7.7	72	GLD	103.29	12.4	8.1
18	NAO01	54.48	323.7	7.6	73	TPNV	103.33	21.8	8.1
19	COP	54.8	317.3	7.3	74	DAC	103.53	23.1	8.1
20	PRU	55.03	310.2	7.8	75	ISA	103.81	24	7.6
21	BRG	55.16	311.3	7.3	76	ACSO	103.96	354.9	7.9
22	KONO	55.37	322.4	7.7	77	MCWV	104.25	352.4	8.1
23	CLL	55.61	312	7.8	78	CBKS	105.01	8.3	8.1
24	KHC	55.88	309.4	7.9	79	BLO	105.2	357.6	8.5
25	GEC2	55.89	309	7.5	80	PAS	105.29	24.4	8.1
26	CLZ	57.02	313.2	8.0	81	CBN	105.38	350.1	8.0
27	GRA1	57.17	57.17	7.8	82	SNCC	105.64	25.8	8.1
28	GRF	57.17	310.6	7.8	83	SLM	105.79	0.6	8.0
29	TNS	58.69	311.9	7.6	84	WUAZ	106.03	18.5	8.3
30	SMY	58.72	45	8.3	85	WCI	106.14	357.4	8.0
31	HAU	60.78	310	7.8	86	PFO	106.34	23.3	8.1
32	TNA	62.36	27.4	7.9	87	CCM	106.35	1.5	8.1
33	LOR	62.62	310	7.7	88	SIUC	106.71	359.8	8.1
34	ESK	63.31	320.3	7.7	89	BLA	106.73	352.5	8.0
35	FLN	64.62	312.9	7.9	90	ANMO	107.71	14.6	8.0
36	RJF	64.92	308.8	7.5	91	WVT	108.27	358.6	8.1
37	PMR	71.5	25.8	8.2	92	SNZO	108.79	127.7	7.8
38	NEW	92.6	18.1	8.0	93	WMOK	109.14	8.1	8.3
39	HAWA	93.68	20.3	8.1	94	MYNC	109.17	355.4	8.0
40	HON	93.75	60.4	7.5	95	TUC	109.22	19	7.9
41	TAU	94.01	142	8.0	96	PLAL	109.42	358.8	8.4
42	PQI	95.53	345.3	8.4	97	UALR	109.59	2.5	8.5
43	BOZ	96.35	15.4	8.3	98	MIAR	109.77	3.6	8.3
44	EYMN	96.46	1.4	8.1	99	OXF	109.91	0	8.2
45	EMMW	97.28	344.4	8.6	100	NHSC	110.76	351.7	8.1
46	MOD	97.54	22.7	8.2	101	GOGA	110.78	354.6	8.2
47	WVOR	97.56	21.4	8.2	102	LRAL	111.34	357.8	8.1
48	LKWY	97.64	14.9	8.3	103	JCT	113.21	9.7	8.2
49	HLID	97.67	18	8.3	104	LTX	113.7	13.5	8.3
50	WVL	97.88	345.8	8.4	105	HKT	114.18	6.1	8.4
51	WDC	98	24.8	7.9	106	DWPF	115.84	352.1	8.2
52	LBNH	98.62	347.3	7.9	107	BDFB	137.95	287.8	7.7
53	AHID	99.21	16	8.2	108	CPUP	150.99	280.2	7.8
54	RSSD	99.22	10.6	7.9	平均			8.0	
55	NCB	99.26	348.9	7.8					

函数，其值因台站和仪器的不同而不同。在实际工作中，由于如何求得准确的  $C(\Delta)$  值并不明确，按照不同的方法求得的  $C(\Delta)$  值又不同，所以为了避免混乱，在我国的地震报告中，均取  $C(\Delta)=0$ 。昆仑山口西地震震级测定的实践再一次表明，台基校正值不能简单地予以忽略。

2) 震源。由于地震波的辐射具有方向性，所以处于不同方位的地震台站测得的震级有差别是很自然的。这次昆仑山口西地震的断层长达 350 km 左右，地震波辐射图型有着明显的方向性。我国国家数字地震台网和 NEIC 单台测定的震级的方位分布分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出，在中国国家数字地震台网中，台站的方位分布很不均匀，在方位角  $130^{\circ}\sim 296^{\circ}$  之间，以及在  $356^{\circ}\sim 53^{\circ}$  之间没有台站。震级偏大的台站方位角在  $296^{\circ}\sim 345^{\circ}$  之间、 $60^{\circ}\sim 71^{\circ}$  之间和  $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$  之间，而方位角在  $71^{\circ}\sim 100^{\circ}$  之间台站测定的震级偏小。NEIC 虽然使用的台站资料比较多，但台站分布的方位覆盖也很不均匀，台站主要集中在第一象限和第四象限，第二象限的台站较少，而第三象限则没有台站。震级偏大的台站的方位角在  $344^{\circ}\sim 45^{\circ}$  之间，而在其它方位的台站测定的震级则偏小。从图 3 和图 4 都可以看出，由不同方位角的台站测得的震级存在明显的方向性。

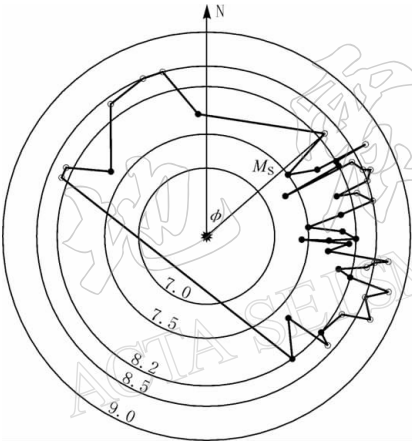


图 3 中国国家数字地震台网单台测定的  
昆仑山口西地震震级方位分布图  
 $\phi$  表示台站相对于震中的方位角

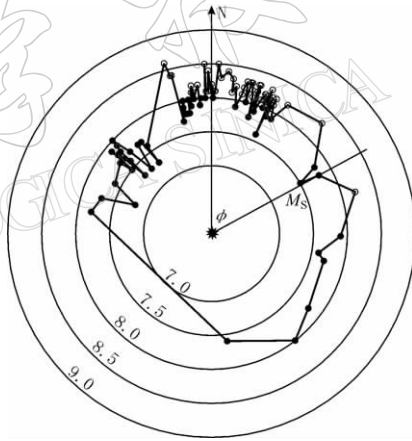


图 4 美国 NEIC 单台测定的昆仑山口西  
地震震级方位分布图  
 $\phi$  表示台站相对于震中的方位角  
● 小于等于平均震级；○ 大于平均震级

为了减小台基和震源对震级测定的影响，各地震台网普遍采用的有效方法是对不同方位、不同震中距的大量台站测定的结果求算术平均值。

根据以上分析，笔者认为，由 IGCEA、APCEA 以及 NEIC 测定的昆仑山口西地震的面波震级相当一致， $M_s=8.0\sim 8.2$ ；考虑到 NEIC 的震级测定使用了全球 108 个地震台站的记录，具有虽仍不够均匀、但相对而言比其它两个机构方位覆盖略好些的台站分布，笔者认为这次地震的面波震级宜采用 NEIC 测定的结果，即  $M_s=8.0$ 。

1.3 传统的震级标度存在的主要问题

自从 Gutenberg(1945)提出面波震级  $M_s$  以来， $M_s$  得到了十分广泛的应用。但是经过几十年的实践，发现传统的震级标度存在以下主要问题：

1) 系统偏差. 在 Gutenberg 震级公式的基础上, 各国根据本国的地震仪记录, 发展了各自的震级计算公式. 由于各国测定震级的量规函数的差异和地震仪频带的不同, 使得同一地震各国测定的震级存在一定的差别.

2) 单色性. 震级的物理意义不清楚, 并且任何震级都只涉及一个单一的周期, 也就是说它是“单色的”. 单用一个数字来描写地震的复杂现象确实过于简单化. 为了恰当地反映地震的大小, 对于一次地震, 可以采用不同波型、不同周期的波, 得到一系列震级值(Duda, 1989). 然而用多震级值来描述一次地震是不方便的, 有违引进震级来简便衡量地震大小的本意, 并且也很难将它们与其它震源参数相联系.

3) 震级饱和. 20 世纪 70 年代中期, Chinnery 和 North(1975)在研究全球地震的年频度与  $M_s$  关系曲线时, 发现缺少  $M_s > 8.6$  的地震, 但用地震矩  $M_0$  求地震的年频度关系时, 却有  $M_s > 8.6$  和 9 级以上的地震, 于是便提出了  $M_s$  震级饱和问题. 震级饱和现象是震级标度与频率有关的反映(Geller, 1976; Aki, Richards, 1980; Lay, Wallace, 1995; Udias, 1999; 刘瑞丰, 2003; 陈运泰, 刘瑞丰, 2004).

2 矩震级

昆仑山口西地震引起了地震学界的普遍关注, 地震发生后不久国际上著名的地震观测机构与研究机构, 如哈佛大学(Harvard)、美国地质调查局(USGS)、东京大学地震研究所(ERI, Tokyo Univ, 简称 ERI)、IGCEA、APCEA 很快测定了这次地震的震源机制解, 并由地震矩计算了矩震级, 测定的结果见表 4. 从表 4 中可以看出, 不同机构测定的震源机制结果之间存在着明显的差异, 这一情况在一定程度上反映了这次地震震源破裂过程的复杂性(中国地震局监测预报司, 2002). 许力生和陈运泰(2004)利用全球数字地震台网记录的资料反演了这次地震的震源时空破裂过程, 结果表明这次地震由 3 次子事件构成, 而震源破裂过程主要是这 3 次子事件的触发复杂的聚合的断层运动过程, 其矩震级为 7.6. 不同的机构测定的矩震级也有一定的差别, 它们测定的矩震级分别为 7.8(Harvard), 7.7(USGS), 7.7(ERI), 7.6(IGCEA)和 7.5(APCEA), 基本上一致; IGCEA 和 APCEA 测定的矩震级略小些. 造成上述差别的主要原因是 IGCEA 和 APCEA 使用的台站数量较少, 并且都是震中距较小的台站的数据; IGCEA 只使用了 CDSN 中 10 个台站的数据, APCEA 使用的是国家数字地震台网中部分台站的数据, 而 Harvard、USGS 使用的是全球地震台

表 4 各机构测定的 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西地震的震源机制解结果

节面 I			节面 II			$M_0$ / $10^{20}$ N · m	$M_w$	矩心位置			资料来源
走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)			$\varphi_N$ /(°)	$\lambda_E$ /(°)	深度 /km	
96	54	-7	190	84	-144	5.8	7.8	35.54	92.25	15	Harvard
32	4	-76	198	86	-91	3.5	7.7	36.00	90.50	5	USGS
89	88	-2	179	88	-178	3.9	7.7	36.10	90.50	20	ERI
113	68	49	0	46	149	3.2	7.6	36.20	90.90		IGCEA
144	83	-81	273	11	-140	2.2	7.5	36.60	90.80		APCEA
290	85	-10	21	80	-175	3.2	7.6	35.97	90.59	11	许力生和 陈运泰(2004)

注: IGCEA 为中国地震局地球物理研究所, APCEA 为中国地震局分析预报中心.

网(GSN)的资料, 台站分布较好. 尽管不同的机构测得的这次地震的矩震级  $M_w$  互有差别, 但差别并不大,  $M_w = 7.5 \sim 7.8$ , 平均  $M_w \approx 7.7$ . 更重要的是, 测定结果一致表明, 总体上这次地震的矩震级  $M_w$  比面波震级  $M_s$  小, 是一次面波震级  $M_s$  未饱和的地震 (Hanks, Kanamori, 1979; Lay, Wallace, 1995).

矩震级实质上就是用地震矩来描述地震的大小. 地震矩  $M_0$  是震源的等效双力偶中的每一对力偶的矩, 是继地震能量后的第二个关于震源定量的特征量, 一个描述地震绝对大小的力学量. 其定义为

$$M_0 = \mu DA \quad (3)$$

式中,  $\mu$  是介质的剪切模量;  $D$  是地震破裂的平均位错量;  $A$  是破裂面的面积. 地震矩是表征震源区不可恢复的非弹性形变的一个物理量.

由式(3)可见, 地震矩是对断层滑动引起的地震强度的直接测量, 它是由地震波振幅的“零频”成分的大小决定的, 反映了震源处破裂的大小. 断层面的面积越大, 拐角频率越低, 激发的长周期地震波的能量也越大.

矩震级标度的定义 (Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori, 1979) 为

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.06 \quad (4)$$

式中,  $M_0$  为地震矩, 单位是  $\text{N} \cdot \text{m}$ . 从式(4)可以看出, 如果能够得到地震矩  $M_0$ , 就可以计算出该地震的矩震级  $M_w$ . 现在利用宽频带数字地震观测资料测定地震矩和矩震级的数字地震记录台网中心越来越多. 利用数字地震记录不但可以测定强震和远震的矩震级, 也可以测定小震和区域地方震的矩震级 (刘瑞丰, 2003). 矩震级标度反映了震源区不可恢复的非弹性形变规模的大小, 是目前量度地震大小最好的物理量. 它是一个绝对的力学标度, 不存在饱和问题. 对于大震、小震、微震甚至极微震, 以及浅震、深震均可测量其矩震级; 矩震级与传统的震级标度相衔接, 对于面波震级适用的震级范围,  $M_w \approx M_s$ ; 它是一个均匀的震级标度, 适于震级尺度范围很宽的统计; 计算公式统一, 即公式(4), 不存在区域差异的问题.

由于矩震级具有以上优点, 目前已得到世界上大多数地震台网和地震观测机构的认同, 并且已得到普遍使用. 2002 年 USGS 对地震震级的发布做出了新的规定, 该规定的要点如下 (USGS, 2002):

1) 对于同一次地震, 如果能测定出几种不同的震级, 并且有矩震级时, 公布的震级应当是矩震级.

2) 在 USGS 地震目录中所列的所有地震, 矩震级是优先使用的震级. 所有其它的震级应当保存在数据库中, 但在常规的目录检索中只列出优先使用的震级.

3) 历史地震的优先使用震级是矩震级的最佳估计值. 然而这样的估计不是简单地将其它一些历史震级标度转换矩震级标度, 而应当是利用一些辅助信息 (如地表面破裂、地震现场宏观调查数据等等) 得到的估计值.

### 3 讨论和结论

昆仑山口西地震是我国国家数字地震台网正式运行以来记录到的最强烈的地震. 在我国的地震监测史上第一次完整地记录到了  $M_s 8$  级大地震, 所有台站均没有限幅, 为研究昆



仑山口西地震提供了宝贵的基础资料。

由于地震速报要求的时间性非常强,在这次地震的速报中使用了国家数字地震台网 25 个台站的资料进行了地震定位和震级计算,测定的面波震级  $M_s=8.1$ ;在正式编辑出版的《中国数字地震台网观测报告》中,利用国家数字地震台网 62 个台站的震相数据进行了地震定位,并利用其中 43 个台站的资料计算了面波震级,得出  $M_s=8.2$ ;NEIC 利用全球地震台网(GSN)491 个台站的震相到时进行了地震定位,并利用其中的 108 个台站的资料计算了面波震级,其结果是  $M_s=8.0$ 。中国使用的面波震级计算公式,原本是作为与国际使用的面波震级计算公式引进的,理当得出一致的测定结果。但是,由于中国与美国使用的面波震级计算公式仍存在一定的系统偏差,并且使用的资料也不尽相同,致使测定的震级有一定的差别。不过,就昆仑山口西地震而言,中国地震台网与美国地震台网测定面波震级测定结果的差异不大,仍在通常的测定误差范围之内,可以认为两者的测定结果基本上是一致的。

从 NEIC 和 IGCEA 测定的结果看,即使采用相同的面波震级计算公式,每个地震台单独测定的面波震级都有一定的差别。在 NEIC 测定的结果中,单台测定的最大震级与最小震级相差 1.4;在 IGCEA 测定的结果中,单台测定的最大震级与最小震级相差 1.5。单台测定的面波震级的一致性存在问题。这个问题包括两方面内容:一方面是,在面波震级计算公式(1)中,台基校正  $C(\Delta)$ ,对于所有地震台均取为 0。实际上,对于白家疃地震台  $C(\Delta)=0$ ,但对于其它地震台台基校正则不能简单地予以忽略;另一方面,由于震源辐射图型的方向性以及震源破裂扩展的方向性,震级的测定结果随台站方位的不同而有显著的差别。这次昆仑山口西大地震的断层长达 350 km,地震波辐射图型存在着明显的方向性。鉴于 NEIC 测定该地震的面波震级  $M_s=8.0$ ,系由多达 108 个台的资料测得的,方位覆盖相对而言较好,最具代表性,因此昆仑山口西地震的面波震级宜采用该结果,即  $M_s=8.0$ 。

地震发生后不久,国际上著名的地震监测机构与研究机构很快测定了这次地震的震源机制解,并由地震矩计算了矩震级。哈佛大学、美国地质调查局国家地震信息中心、东京大学地震研究所利用全球地震台网资料计算的矩震级  $M_w$  分别是 7.8(Harvard), 7.7(NEIC), 7.7(ERI)。中国地震局地球物理研究所利用中美合作的 CDSN 资料测定的矩震级  $M_w=7.6$ (IGCEA);中国地震局分析预报中心利用新建的中国国家数字地震台网的资料测定的矩震级  $M_w=7.5$ (APCEA)。所有这些机构测定的矩震级结果基本一致,即  $M_w=7.5\sim 7.8$ ,平均为  $M_w=7.7$ 。本文的分析表明,昆仑山口西地震的矩震级  $M_w=7.7$ ,比面波震级  $M_s=8.0$  还要小,是一次面波震级未饱和的地震。

## 参 考 文 献

- 陈运泰,刘瑞丰. 2004. 地震的震级[J]. 地震地磁观测与研究, 25(6): 1~12  
郭履灿,庞明虎. 1981. 面波震级和它的台基校正[J]. 地震学报, 3(3): 312~320  
刘瑞丰. 2003. 震级[A]. 见:陈运泰主编. 地震参数,数字地震学在地震预测中的应用[C]. 北京:地震出版社, 7~15  
许力生,陈运泰. 2004. 从全球长周期波形资料反演 2001 年 11 月 14 日昆仑山口地震时空破裂过程[J]. 中国科学, D 辑, 34(3): 256~264  
徐锡彬,陈文彬,于贵华,等. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震( $M_8.1$ )地表破裂的基本特征[J]. 地震地质, 24(1): 1~13  
中国地震局监测预报司. 2002. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震[M]. 北京:地震出版社, 1~129  
Aki K, Richards P G. 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. 1 & 2[M]. San Francisco: W H Freeman, 1~932

- Chinnery M A, North R G. 1975. The frequency of very large earthquake[J]. *Science*, **190**: 1 197~1 198
- Duda S J. 1989. Earthquakes: Magnitude, energy, and intensity[A]. In: James D ed. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*[C]. New York: Van Nostrand-Reinhold, 272~288
- Engdahl E R, Villasenor A. 2002. Global seismicity: 1900—1999[A]. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C *et al* eds. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*[C]. Amsterdam: Academic Press, 665~690
- Geller R J. 1976. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **66**: 1 501~1 523
- Gutenberg B. 1945. Amplitude of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **35**: 57~69
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale[J]. *J Geophys Res*, **84**(B5): 2 348~2 350
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **82**: 2 981~2 987
- Kanamori H. 1983. Global seismicity[A]. In: Kanamori H, Boschi E eds. *Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation*[C]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 596~607
- Lay T, Wallace T C. 1995. *Modern Global Seismology*[M]. San Diego: Academic Press, 1~521
- Udias A. 1999. *Principles of Seismology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1~474
- USGS. 2002. New USGS earthquake magnitude policy[J]. *MCEER Information Service News*, 1~3
- Ванек И, Затопек А, Карник В, и труд. 1962. Стандартизация шкалы магнитуд[J]. *Изв АН СССР Сер Геофиз*, (2): 153~158

## THE NOVEMBER 14, 2001 EARTHQUAKE WEST OF KUNLUN MOUNTAIN PASS: AN EARTHQUAKE WITH UNSATURATED SURFACE WAVE MAGNITUDE

Liu Ruifeng Chen Yuntai Ren Xiao Hou Jianmin Zou Liye

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This paper presents an overview of the magnitude determination of the November 14, 2001 earthquake west of Kunlun Mountain Pass (KMP) at the juncture of Xinjiang and Qinghai, northwestern China. Comparisons are made among surface wave magnitudes determined by China National Digital Seismograph Network (CNDSN), National Earthquake Information Center (NEIC) of US Geological Survey (USGS) and moment magnitudes determined by different institutions in China and abroad. The results show that different institutions yield different surface wave magnitudes, as different data and calculation formulae are used in magnitude determination. The magnitude of the earthquake in “China’s Rapid Earthquake Information Release” was given as  $M_s = 8.1$ ; Measurement given in the formally edited and published “Observation Report of China Digital Seismograph Network” is  $M_s = 8.2$ ; And magnitude determined by NEIC is  $M_s = 8.0$ . Soon after the occurrence of the KMP earthquake, Harvard University (Harvard), NEIC, Earthquake Research Institute of University of Tokyo (ERI), Center for Analysis and Prediction, China Earthquake Administration (APCEA) and Institute of Geophysics, China Earthquake Administration (IGCEA) gave the moment magnitude  $M_w$  as 7.8 (Harvard), 7.7 (NEIC), 7.7 (ERI), 7.6 (APCEA) and 7.5 (IGCEA), respectively, based on data from Global Seismograph Network (GSN), CNDSN and China Digital Seismograph Network (CDSN). These measurements, with an average value of  $M_w = 7.7$ , are close to each other. As moment magnitude is a physical quantity measuring the absolute size of an earthquake and has obvious advantages over conventional magnitude scales, it is the preferred magnitude of the international seismological community. It is concluded that the KMP earthquake is an earthquake with unsaturated surface wave magnitude with moment magnitude  $M_w = 7.7$  and surface wave magnitude  $M_s = 8.0$ .

**Key words:** magnitude; moment magnitude; surface wave magnitude; focal mechanism; seismograph network