第 37 卷　第 2 期(541~550)　　中 国 地 震　　Vol. 37　No. 2
2021 年 6 月　　EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA　　Jun. 2021

邓文泽,杨志高,席楠,等,2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 *M*7.4 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震,**37**(2):541~550.

2021 年 5 月 22 日青海玛多 *M*7.4 地震的快速测定与数据产品产出

邓文泽　杨志高　席楠　刘敬光　戴丹青
梁建宏　杜广宝　孙丽　黄志斌

中国地震台网中心,北京　100045

摘要　2021 年 5 月 22 日 02 时 04 分 11.3 秒(北京时间)青海果洛州玛多县发生 *M*7.4 地震。中国地震台网中心在震后立即启动余震监测和统计工作,于震后 9min 发布正式速报结果。同时,中国地震台网中心联合多家单位,共产出 9 类 14 种数据产品。产品结果显示,本次地震发生在巴颜喀拉块体,位于甘德南缘断裂带和玛多甘德地震带之间,推测极震区的烈度达到Ⅸ度;震源机制解显示该地震为一次走滑型事件,余震在震中两侧均有分布,总体呈 NW-SE 走向;震源破裂过程的结果表明本次地震持续时间约为 45s,主要能量在震后 30s 释放,地震的破裂方式为双侧破裂,最大滑移量达 4.5m,地壳浅层滑动位移量较大,推测可能存在地表破裂。

关键词:　青海玛多地震　地震速报　余震　震源机制　震源破裂　数据产品

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0541-10　　[中图分类号] P315　　[文献标识码] A

0　引言

根据中国地震台网中心测定,2021 年 5 月 22 日 02 时 04 分 11.3 秒(北京时间)青海果洛藏族自治州玛多县(34.59°N,98.34°E)发生 *M*7.4 地震,震源深度 17km[①]。本次地震震中位于黄河乡,距玛多县城 38km,距西宁 380km,震中海拔高度 4258m,青海、甘肃、四川等地震感明显,局部地区震感强烈。截至 5 月 24 日,地震共计造成 18 人受伤、青海省果洛藏族自治州及玉树藏族自治州 6 县 26 个乡镇 32431 人受灾[②]。

1　地震参数速报

中国地震台网中心自 2013 年开展自动速报工作以来,能够在震后 3min 产出自动速报

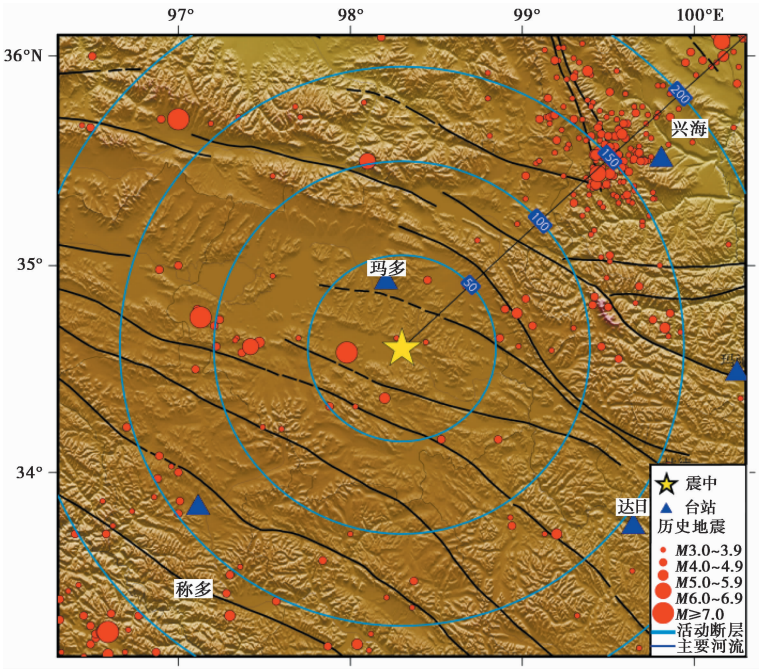
[收稿日期] 2021-05-27　[修定日期] 2021-06-01
[项目类别] 中国地震局监测预报司经常性项目"大震应急产品产出系统运维"(12150411007)资助
[作者简介] 邓文泽,男,1989 年生,工程师,主要从事地震监测及震源破裂过程研究工作。E-mail:dengwenze@seis.ac.cn
黄志斌,通讯作者,男,1968 年生,研究员,主要从事地震速报、地震数据分析、处理与管理工作。
E-mail:tw@seis.ac.cn

①http://www.cenc.ac.cncencdzxx/369255/index.html
②http://www.chinanews.com/sh/2021/05-24/9484432.shtml

结果，在震后 10min 产出正式速报结果，实现了地震速报“既快又准”。在本次地震中，自动速报系统于北京时间 02 时 07 分发布了“在青海果洛藏族自治州玛多县附近（34.63°N，98.52°E）发生 7.1 级左右地震”的信息。正式速报信息于 22 日 02 时 13 分发布，正式速报结果与自动速报结果的震中偏差约为 17km，正式速报震级为 *M*7.4，用时 9min。地震参数的快速测定是抗震救灾的“发令枪”，地震发生后中国地震台网中心立即组织开展各项应急工作。本次地震的正式速报参数及国际同行机构的测定结果（最后访问时间为 2021 年 5 月 27 日 12 时），如表 1 所示；本次地震的主震震中位置、震中台站分布及周边区域历史地震分布情况，如图 1 所示。

表 1　青海玛多 *M*7.4 地震全球各地震学机构测定结果

发震时刻（北京时间）（年-月-日 T 时：分：秒）	北纬 /（°）	东经 /（°）	震源深度 /km	震级	测定机构
2021-05-22 T02：04：11.3	34.59	98.34	17	*M*7.4	中国地震台网中心（CENC）①
2021-05-22 T02：04：15.8	34.57	98.26	10	M_W7.4	德国波茨坦地学研究中心（GFZ）③
2021-05-22 T02：04：13.0	34.61	98.25	10	M_W7.3	美国地质调查局（USGS）④
2021-05-22 T02：04：14.0	34.58	98.36	10	M_W7.4	欧洲地中海地震中心（EMSC）⑤



震中距 /km	台站数
0 ≤ Δ ≤ 50	1
0 ≤ Δ ≤ 100	1
0 ≤ Δ ≤ 200	6
0 ≤ Δ ≤ 300	23
0 ≤ Δ ≤ 400	42
0 ≤ Δ ≤ 500	61

最近台站	震中距
玛多台	36km

图 1　青海玛多 *M*7.4 地震震中位置、台站分布及周边区域历史地震分布（1960 年以来）

③http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/event.php?id=gfz2021jxef

④https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000e54r/technical

⑤https://www.emsc-csem.org/Earthquake/earthquake.php?id=987151

2　余震监测

2021 年 5 月 22 日青海玛多 *M*7.4 地震发生后，余震频发。截至 2021 年 5 月 27 日 12 时，玛多地震序列共记录到 M_L1.0 以上余震 2643 次，其中 M_L1.0～1.9 地震 1680 次，M_L2.0～2.9地震 744 次，M_L3.0～3.9 地震 188 次，M_L4.0～4.9 地震 25 次，M_L5.0～5.9 地震 6 次，最大余震为 5 月 22 日 10 时 29 分 M_L5.6 地震。青海玛多 *M*7.4 地震 $M_L \geqslant 5.0$ 的事件目录见表 2，震后快报编目 $M_L \geqslant 3.0$ 的余震分布见图 2，由图可见余震在震中两侧均有分布，呈 NW-SE 向条带状展布。

表 2　　青海玛多 *M*7.4 地震主震及 $M_L \geqslant 5.0$ 余震（截至 2021 年 5 月 27 日 12 时）

序号	发震时刻（北京时间）（年-月-日 T 时：分：秒）	北纬/（°）	东经/（°）	震源深度/km	震级	参考地名
主震	2021-05-22 T02：04：11	34.59	98.34	17	*M*7.4	青海果洛州玛多县
1	2021-05-22 T05：59：36	34.61	98.46	10	M_L5.1	青海果洛州玛多县
2	2021-05-22 T10：29：35	34.8	97.45	10	M_L5.6	青海果洛州玛多县
3	2021-05-22 T10：38：45	34.51	98.9	10	M_L5.3	青海果洛州玛沁县
4	2021-05-22 T11：21：18	34.68	98.02	10	M_L5.2	青海果洛州玛多县
5	2021-05-22 T15：06：23	34.44	98.92	10	M_L5.2	青海果洛州玛沁县
6	2021-05-22 T17：39：35	97.57	34.77	10	M_L5.0	青海果洛州玛多县

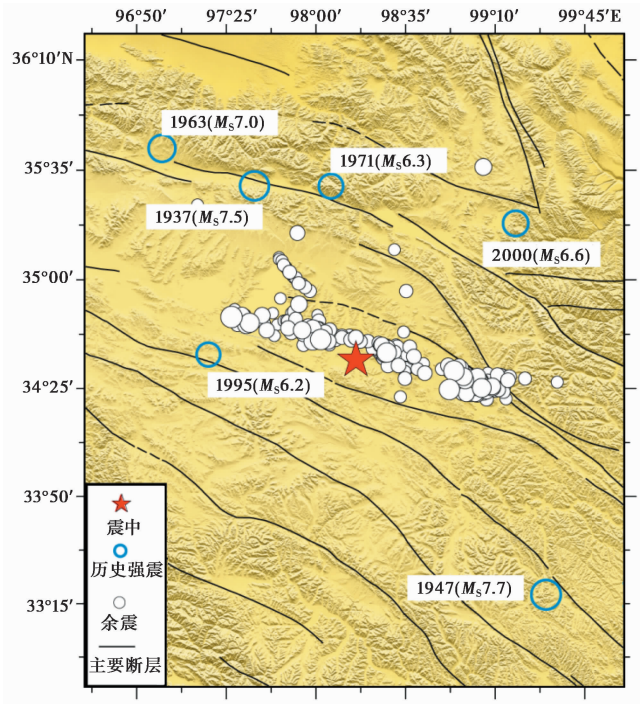


图 2　青海玛多 *M*7.4 地震 $M_L \geqslant 3.0$ 余震分布

3 应急产品产出

地震监测台网应急产品产出服务最早可追溯至 2008 年(邹立晔等,2018、2019),截至 2021 年 5 月中国地震台网中心已完成国内外大震应急产品产出 500 余次。近年来,随着应急产品产出工作的要求不断提高,中国地震台网中心预警速报部逐步实现了产品产出自动化和图集汇集自动化工作。青海玛多 *M*7.4 地震发生后,中国地震台网中心联合地震行业多家单位产出了一系列丰富的数据产品,由中国地震台网中心进行产品汇集,编制了《2021 年 5 月 22 日青海玛多 *M*7.4 地震应急数据产品综合图集》。该图集在震后 20min 自动生成,并于震后 25min 发布第一版,随后不断更新,于 2021 年 5 月 22 日 12 时更新至第六版。该图集包含地震基本参数、历史地震分布、台网分布、地震构造、余震精定位、震源机制解、仪器地震烈度、推测烈度、库仑破裂应力、构造应力场、震源破裂过程等 9 类 14 种产品,各类数据产品对本次地震的孕震机理研究和震后应急救援起到了关键性作用。

3.1 台网台站与历史地震分布

青海玛多 *M*7.4 地震的基本信息、历史地震分布和余震分布情况分别见图 1 和图 2。本次地震震中周边的测震台站较为稀疏,距离震中最近的台站为玛多县玛多台(QH/MAD),约为 36km,震中 500km 范围内台站数为 61 个。青海玛多 *M*7.4 地震为一次发生在巴颜喀拉块体边界的走滑型地震事件,有历史记录以来震中附近发生过 6 次 *M*6.0 以上地震(顾功叙,1983)。该区域地震主要发生在东昆仑断裂和达日断裂,1947 年达日 7.7 级地震是至今该区域最大的一次地震。

3.2 震源机制解

中国地震台网中心主要采用 2 种震源机制解反演方法:W-phase 方法(Kanamori et al,2008)和近场全波形反演方法(Herrmann,2013),前者主要针对国内外强震($M \geqslant 7.0$),后者主要服务于国内中等强度的地震($M \geqslant 4.0$)。本次地震的震源机制解采用 W-phase 方法,结果为:矩震级 M_W7.4,矩心深度 25km,断层节面Ⅰ的走向、倾角和滑动角分别为 102°/81°/-11°,断层节面Ⅱ走向、倾角和滑动角分别为 194°/79°/-171°。初步推断本次地震为陡倾角走滑型事件(图 3)。

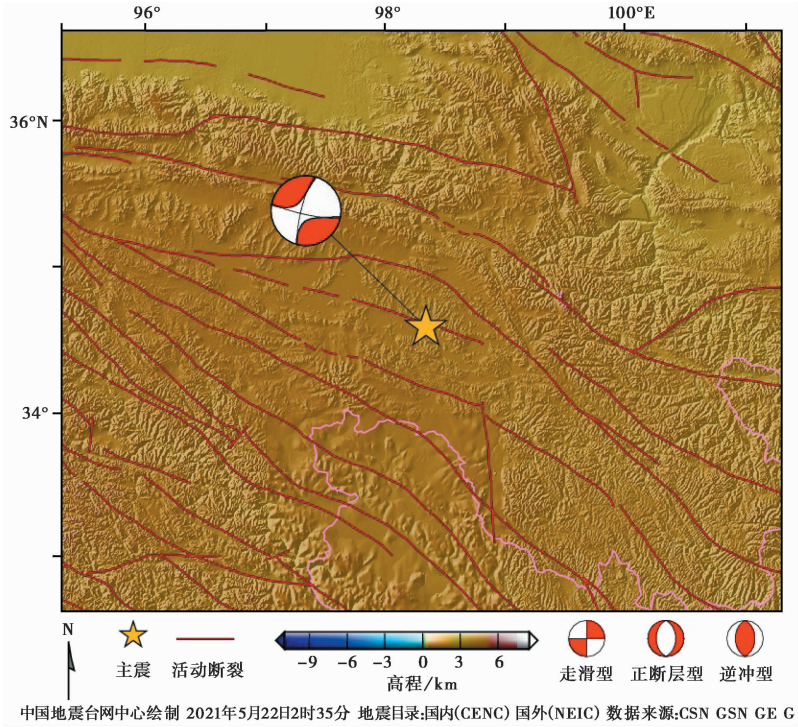
图 4 给出了该区域内 5 级以上地震的震源机制解(数据来源于全球矩心矩张量数据中心(GCMT)⑥),由图可见该区域地震以走滑型为主。表 3 列出了一些机构对青海玛多 *M*7.4 地震的反演结果,综合图 4 和表 3 的结果可知,各机构对本次地震的震源机制解反演结果基本一致,并与该构造区域内的历史矩张量解保持一致;本次地震为一次走滑型的事件,真实破裂面为 NW-SE 向(102°/81°/-11°)。

3.3 震源破裂过程

中国地震台网中心采用有限断层反演方法(Ji et al,2002a、2002b)对本次地震的震源破裂过程进行反演。地震发生后,我们从 IRIS 数据中心⑦下载了全球台站波形数据,根据中国地震台网中心震源机制解反演的结果构建有限断层模型,选择信噪比高、分布均匀的 23 个

⑥ https://www.globalcmt.org/

⑦ http://ds.iris.edu/wilber3/find_event



发震时刻（北京时间）（年-月-日 T 时:分:秒）	东经/(°)	北纬/(°)	节面 Ⅰ/(°)			节面 Ⅱ/(°)			矩震级 M_W	质心深度/km
			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角		
2021-05-22 T02:04:11.3	98.34	34.59	102	81	-11	194	79	-171	7.4	25

地震类型（初判）：走滑型为主

图 3　青海玛多 *M*7.4 地震震源机制解

远场 P 波（30°<震中距<90°）和 18 个 SH 波的波形资料进行反演（图 5（a）），获得了本次地震断层滑动分布的初步结果。结果表明本次地震破裂持续时间为 45s（图 5（b）），主要能量在震后 30s 释放，地震破裂方式为双侧破裂，最大滑动 4.5m，且可能存在地表破裂（图 5（c）、5（d））。

3.4　地震动强度分布

中国地震台网中心自主研发了一套烈度速报系统，该系统通过实时接收并处理分析台站波形记录，结合震源参数和台站实测地震动参数，快速判断地震破裂断层方向和破裂分布，同时利用实测地震仪器烈度修正烈度衰减关系，快速评估地震烈度分布。该烈度速报系统在自动速报完成后 5min 内实时产出仪器地震烈度图（图 6），并在震后 15min 内产出推测地震烈度图（图 7），可以看出本次地震推测烈度最高达到Ⅸ度，Ⅵ度以上区域面积约为 19611km^2。

3.5　区域构造背景与应力场分布

区域构造图（图 8）显示本次地震震中位于巴颜喀拉板块，震中附近主要的发震断层为

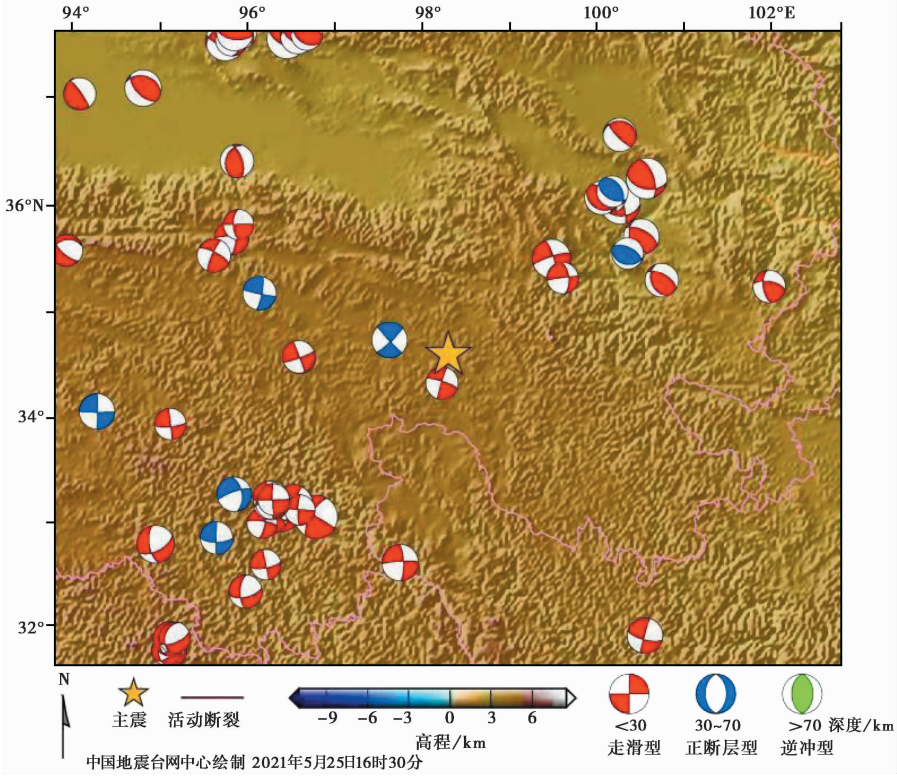


图 4 历史震源机制解分布图(数据源自 GCMT)

表 3 青海玛多 *M*7.4 地震震源机制解各机构产出结果

节面Ⅰ/(°)			节面Ⅱ/(°)			机制解示意图	深度/km	M_W	测定机构
走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角				
102	81	-11	194	79	-171		25.0	7.4	中国地震台网中心
101	81	-7	192	83	-171				中国地震局地球物理研究所
92	67	-40	200	53	-151		23.5	7.3	美国地质调查局
102	84	-3	192	86	-174		15.0	7.4	德国波茨坦地学研究中心
13	81	-173	282	83	-9		12.0	7.4	全球矩心矩张量数据中心

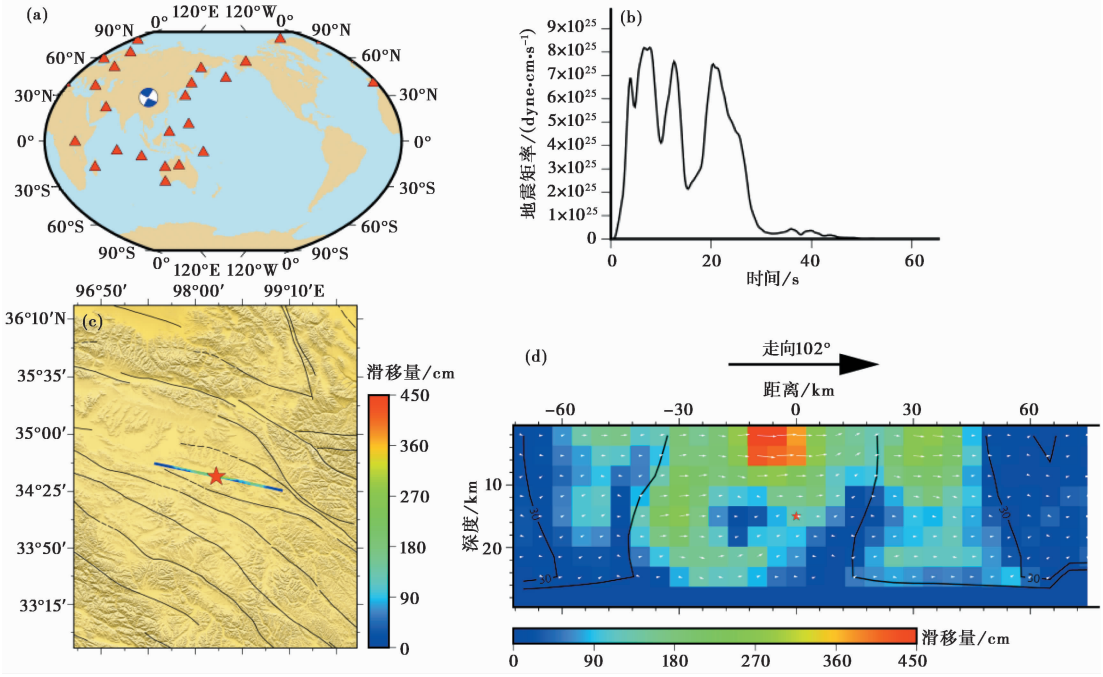
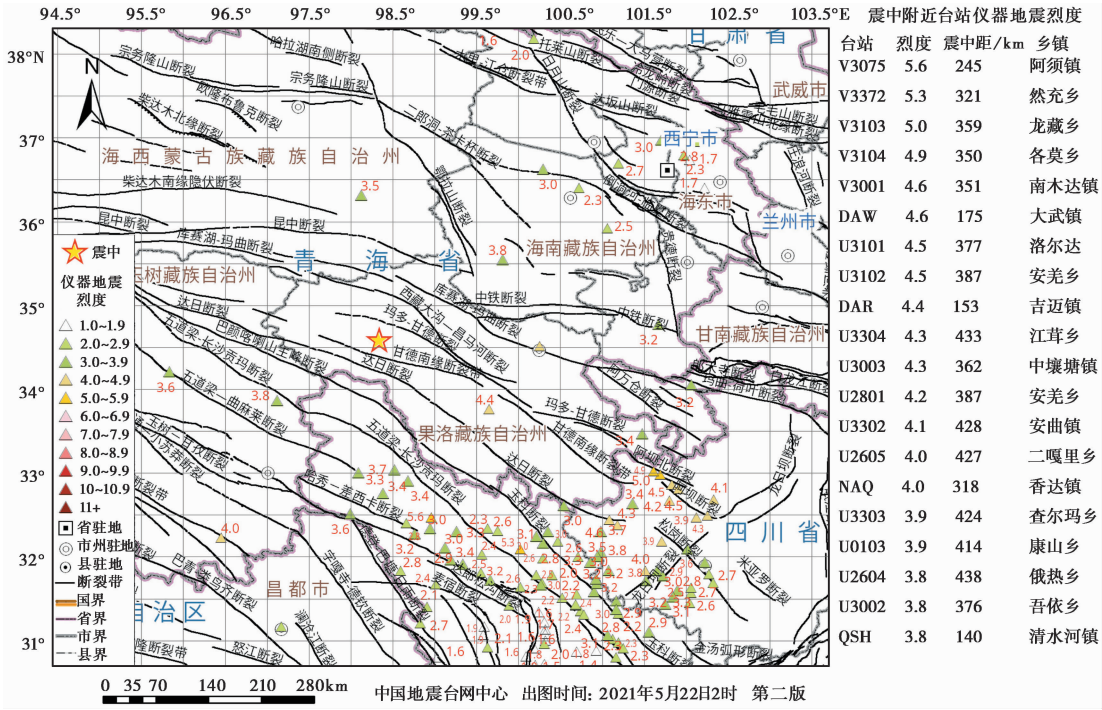


图 5　震源破裂过程反演

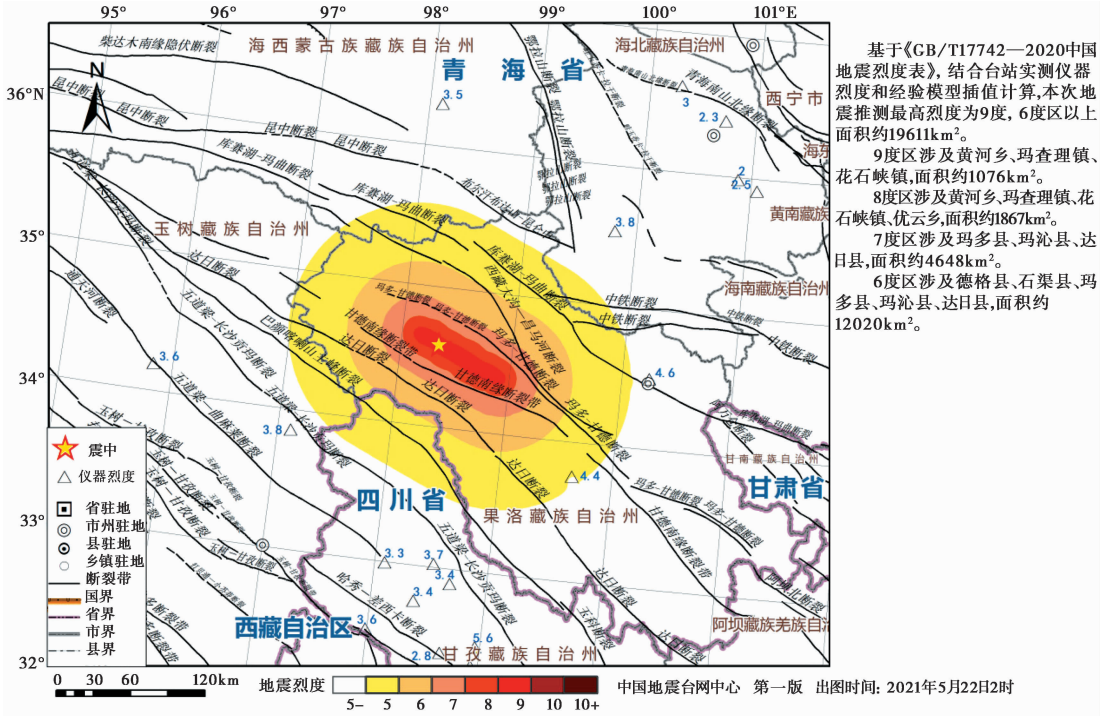
(a)震中-台站位置分布；(b)震源时间函数；(c)地震断层滑移分布投影；(d)地震断层面滑动分布



震中附近台站仪器地震烈度

台站	烈度	震中距/km	乡镇
V3075	5.6	245	阿须镇
V3372	5.3	321	然充乡
V3103	5.0	359	龙藏乡
V3104	4.9	350	各莫乡
V3001	4.6	351	南木达镇
DAW	4.6	175	大武镇
U3101	4.5	377	洛尔达
U3102	4.5	387	安羌乡
DAR	4.4	153	吉迈镇
U3304	4.3	433	江茸乡
U3003	4.3	362	中壤塘镇
U2801	4.2	387	安羌乡
U3302	4.1	428	安曲镇
U2605	4.0	427	二嘎里乡
NAQ	4.0	318	香达镇
U3303	3.9	424	查尔玛乡
U0103	3.9	414	康山乡
U2604	3.8	438	俄热乡
U3002	3.8	376	吾依乡
QSH	3.8	140	清水河镇

图 6　青海玛多 *M*7.4 地震仪器地震烈度图



基于《GB/T17742—2020中国地震烈度表》,结合台站实测仪器烈度和经验模型插值计算,本次地震推测最高烈度为9度,6度区以上面积约19611km²。

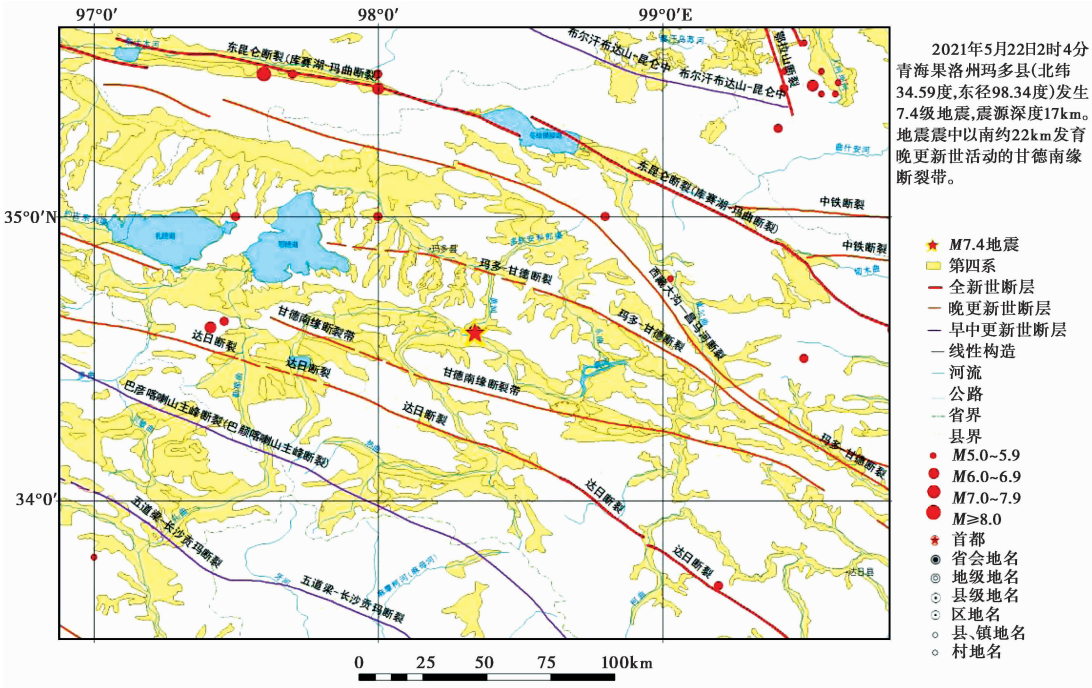
9度区涉及黄河乡、玛查理镇、花石峡镇,面积约1076km²。

8度区涉及黄河乡、玛查理镇、花石峡镇、优云乡,面积约1867km²。

7度区涉及玛多县、玛沁县、达日县,面积约4648km²。

6度区涉及德格县、石渠县、玛多县、玛沁县、达日县,面积约12020km²。

图 7 青海玛多 *M*7.4 地震推测地震烈度分布图



2021年5月22日2时4分青海果洛州玛多县(北纬34.59度,东径98.34度)发生7.4级地震,震源深度17km。地震震中以南约22km发育晚更新世活动的甘德南缘断裂带。

图 8 区域地震构造图(中国地震局地质研究所吴熙彦提供)

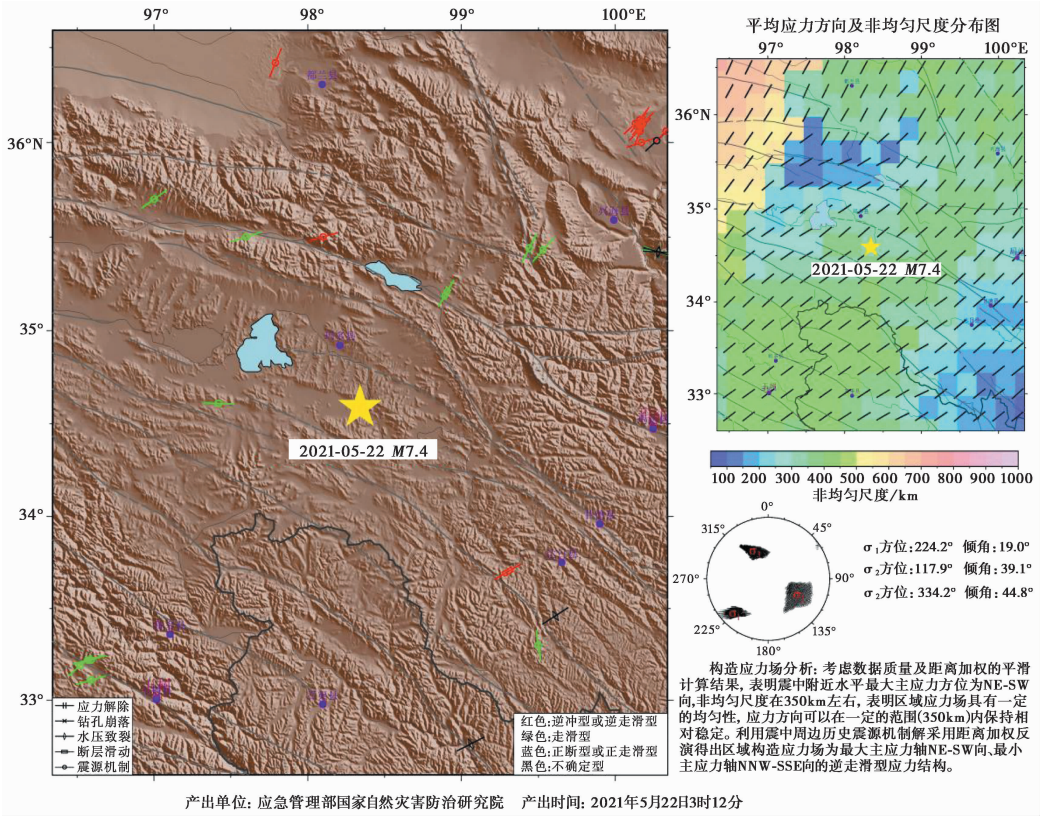


图 9　周边构造应力场(应急管理部国家自然灾害防治研究院胡辛平提供)

玛多-甘德断层,断层走向为 NW-SE 向,这与余震展布(图 2)的方向表现一致。震中周边区域的构造应力场(图 9)结果显示,该区域水平最大主应力方向为 NE-SW 向,非均匀尺度在 350km 左右,表明区域应力场具有较强的非均匀性,应力方向可以在一定的范围内保持相对稳定,该地区构造应力场最大主应力轴为 NE-SW 向,最小主应力轴为 NNW-SSE 向,属于逆走滑型应力结构。

4　结论

2021 年 5 月 22 日青海玛多发生 *M*7.4 地震,中国地震台网中心快速、准确地完成了主震和余震的参数测定,并联合中国地震局多家单位完成震后应急产品产出和汇集工作,在科学方法的基础上实现了各类地震数据的深加工,为震后应急救灾提供了指导意见。

各类数据产品结果显示,本次地震极震区烈度达到Ⅸ度,Ⅵ度以上区域面积约为 19611km^2。余震呈 NW-SE 向条带状展布,结合区域地震构造图、应力场和震源机制解的结果可初步推测,此次地震为一次陡走滑型事件,真实破裂面为 NW-SE 向(102°/81°/-11°)。震源破裂过程的结果表明,此次地震破裂持续时间约 45s,主要能量在震后 30s 释放,最大滑动位移为 4.5m,在近地表,推测可能存在地表破裂。

致谢: 中国地震台网中心预警速报部应急产品产出服务工作组提供了丰富的数据产品,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

顾功叙,1983. 中国地震目录(公元前 1831—公元 1969 年). 北京: 科学出版社, 1~910.

邹立晔,黄志斌,刘杰,等,2018. 地震应急数据产品产出工作体系构建. 见: 中国地球科学联合学术年会"智慧地球物理"专题. 北京: 中国地球物理学会,1534~1535.

邹立晔,黄志斌,周静,等. 2019. 2019 年 6 月 17 日四川长宁 *M*6.0 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震,**35**(3): 573~583.

Herrmann R B,2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. Seismol Res Lett,**84**(6): 1081~1088.

Ji C,Wald D J,Helmberger D V,2002a. Source description of the 1999 Hector Mine,California,earthquake,part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. Bull Seismol Soc Am,**92**(4):1192~1207.

Ji C,Wald D J,Helmberger D V,2002b. Source description of the 1999 Hector Mine,California,earthquake,part Ⅱ: Complexity of slip history. Bull Seismol Soc Am,**92**(4):1208~1226.

Kanamori H,Rivera L,2008. Source inversion of W phase: Speeding up seismic tsunami warning. Geophys J Int,**175**(1):222~238.

Fast Determination and Data Production Related to the *M*7.4 Earthquake on May 22,2021 in Maduo,Qinghai Province

Deng Wenze Yang Zhigao Xi Nan Liu Jingguang Dai Danqing Liang Jianhong Du Guangbao Sun Li Huang Zhibin

China Earthquake Networks Center,Beijing 100045,China

Abstract A magnitude 7.4 earthquake hit Maduo,Qinghai Province,China at 02:04am(local time,CST)on May 22,2021. China Earthquake Networks Center reported the formal quick report in 9 minutes,and started to monitor the aftershocks immediately. Meanwhile,China Earthquake Networks Center organized some related institutions,and quickly produced 14 scientific data products of 9 categories. These products imply that this earthquake occurred in Bayan Har block, located between the Gande-Maduo faults and Gande south rim fault in terms of regional tectonics. The estimated intensity of the epicenter area reached IX degree with the focal mechanism of a strike-slip event. The aftershocks concentrate in a narrow NW-SE band with main shock located in its center. The rupture process is a bilateral mode and lasts 45s. The majority energy releases in the first 30s and the maximum slip reaches 4.5 meters in the shallow crust which may cause surface fracture.

Keywords: Qinghai Maduo earthquake; Seismic quick report; Aftershocks; Focal mechanism; Rupture process; Data products