第 37 卷 第 3 期(574~585)	中 国 地 震	Vol. 37 No. 3
2021 年 9 月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Sep. 2021

钟骏,王博,周志华,等,2021. 2021 年青海玛多 M 、7.4 地震前地下流体异常特征分析. 中国地震,37(3):574~585.

2021 年青海玛多 M_s 7.4 地震前 地下流体异常特征分析

钟骏 王博 周志华 晏锐

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 地震地下流体在地震预测研究与震情跟踪方面发挥着重要作用,本文对 2021 年 5 月 22 日青海玛多 M_s7.4 地震前震中附近地下流体观测资料及异常特征进行系统分析,并结合震前 预测过程进行了回顾性总结。结果表明,玛多 M_s7.4 地震震中距 500km 范围内存在 5 项异常, 其中 4 项为短期异常,主要出现在震前 2~3 个月。异常在空间上分布不均匀,主要位于玛多 M_s7.4 地震震中的东北部和西南部,整体呈现出由外围向震中收缩的迁移特征,且玛多 M_s7.4 地 震和 2010 年青海玉树 M_s7.1 地震在异常特征和应力加载作用方面具有较好的相似性。研究结 果为地震监测能力较低地区积累了震例资料,对于提升强震地下流体前兆异常认识及未来震情 趋势判定水平具有一定的参考意义。

关键词: 玛多 M_s7.4 地震 地下流体 异常特征

[文章编号] 1001-4683(2021)03-0574-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

MYK

据中国地震台网测定,北京时间 2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分青海果洛藏族自治州玛多县 (34.59°N,98.34°E)发生 *M*_s7.4 地震,震源深度 17km,震中最高烈度 X 度。此次地震造成数 人受伤,大量房屋倒塌,部分道路、桥梁等基础设施被破坏或受损(李智敏等,2021)。地震地 下流体是地震前兆观测的重要手段,此次震前是否观测到表征地震即将发生的地下流体异 常信号备受关注。

地下流体是地震孕育与发生的主要影响因素,在地震预测研究和震情跟踪工作中发挥着 重要作用(王铁城等,1994;Roeloffs,1998;车用太等,2006;孙小龙等,2020)。据不完全统计, 中国历史地震资料中与地下流体有关的地震前兆异常占全部异常的50%以上(汪成民,1990)。 Montgomery等(2003)通过研究不同空间尺度地下水对地震的响应特征发现,地下水变化的响 应范围可达数千千米。李军等(2005)对理塘毛垭温泉三十余年的水温观测资料研究发现,该

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFE0109700、2018YFC150330505)、中国地震局地震科技星火计划项目(XH19055)、 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2021010311)、中国地震台网中心青年科技基金(QNJJ202015)共同资助

[[]收稿日期] 2021-07-20 [修定日期] 2021-08-20

[[]作者简介]钟骏,男,1988年生,硕士,助理研究员,主要从事地震地下流体研究。E-mail;zjadvance@126.com 王博,通讯作者,1984年生,高级工程师,主要从事岩石物理实验和地下流体动力学研究。 E-mail;wangbo313@163.com

温泉水温异常与川滇地区的 6 级以上地震存在较好的对应关系。Ghosh 等(2009) 指出,土壤气 浓度异常变化与地震震级呈正相关,即土壤气异常幅度随着地震震级的上升而增大。刘耀炜 等(2015) 总结鲁甸 M_s6.5 地震震前地下流体典型异常特征,认为区域应力加载作用可能与断 层裂隙的开启和闭合有关,从而引起水位、水温、深部气体以及水化学离子组分发生显著变化。 此外,众多学者基于《中国震例》研究发现地下流体前兆异常在时空上具有阶段性和不均匀性, 演化过程主要表现为"向震中收缩""构造控制""相对集中"等 3 种典型特征,特别是进入短临 阶段后,异常向震源区收缩的趋势更为明显; 而震前异常在数量上主要表现为"持续增长"型 和"先增后减"型 2 类,且以"先增后减"型居多,趋势性异常转折结束、新突变异常增多往往是 地震孕育进入短临阶段的标志(张肇诚,1988; 晏锐等,2004; 付虹等,2008; 陈棋福,2008; 蒋海 昆,2018、2019; 蒋海昆等,2009; 孙小龙等,2016)。

575

本文通过系统梳理玛多 M_s7.4 地震前地下流体前兆异常,研究这些异常的震前动态演 化特征并进行强震异常特征对比,进而积累震例资料,为提升地下流体前兆异常认识水平及 未来震情趋势判定提供借鉴和参考。

1 观测资料概述

青藏高原北部地下流体观测点分布不均,主要集中在青藏高原东北缘,其他地区监测能力较弱。玛多 M_s7.4 地震震中 200km 范围内仅有 2 个地下流体观测点,500km 范围内存在 21 个地下流体观测点,共 38 个测项(图 1),其中水温 18 项,水位 8 项,气氡 7 项,水氡 5 项,



图 1 玛多 M_s7.4 地震震中距 500km 范围内前兆异常空间分布 震源机制来自全球质心矩张量数据库(GCMT); 蓝色圆圈为 M_s3.0 余震; 时间截至 2021 年 8 月 19 日

3 期

СМҮК

裛

以水温观测为主。按照测项预报效能分类,可分为 A 类 1 项, B 类和 C 类各 12 项, D 类 4 项, 未评估 9 项, 以 B 类和 C 类为主。

玛多 M_s7.4 地震前共出现 5 项地下流体异常,分别为玉树水温、共和水温(2 套探头)、 共和气氡、佐署水位、门源水位,基本特征见表 1。

-		
Ŧ.	1	
1 X		

576

玛多 M_s7.4 地震震中距 500km 范围内地下流体异常基本信息

省份 台	站	测项	观测仪器	观测精度	预报 效能	北纬 /(°)	东经 /(°)	震中距 /km	异常 起始时间 (年-月-日)	异常 特征	异常幅度	异常 类别
青海玉	树	水温	SZW-II	0.01°C	С	33.03	97.00	213	2021-03-15	下降一上升	0.0027℃	短期
青海 共	和	水温	SZW-I/SZW-II	0.03℃/0.01℃	С	36.17	100.36	254	2021-02-28	上升一下降	0.047℃/0.07℃	短期
青海 共	和	气氡	BG2015R	0.01Bq/L	Ν	36.17	100.36	254	2021-02-28	上升	29Bq/L	短期
青海 佐	署	水位	SWY-II	0.02m	С	36.32	101.73	362	2021-02-25	下降	0.268m	短期
青海 门	源	水位	SWY-II	0.02m	Ν	37.45	101.40	421	2019-10-01	上升	6.85m	趋势

1.1 玉树水温

玉树台位于巴颜喀拉山南麓的甘孜-玉树断裂附近,水温观测井深 105m,观测仪器为 SZW-II 型数字水温仪。含水层岩性为中生代侏罗纪花岗岩(杨晓霞等,2016)。自 2007 年 8 月开始观测以来,整体呈多年稳定的趋势上升变化,历史资料分析显示,玉树水温异常一般出现在震前 1~3 个月,异常持续时间在 12~41 天,基本上遵循"下降一上升"的"V"字形变化过程,重复性较好(王博等,2016)。该异常曾在 2008 年 3 月 21 日新疆于田 *M*_s7.3、2008 年 5 月 12 日四川汶川 *M*_s8.0、2010 年 4 月 14 日青海玉树 *M*_s7.1、2015 年 4 月 25 日尼泊尔 *M*_s8.1、2016 年 1 月 21 日青海门源 *M*_s6.4 和 2016 年 10 月 17 日青海杂多 *M*_s6.2 等地震前出现。

2021年3月15日玉树水温在正常背景下出现快速下降,幅度约0.0027℃,16日开始转 折上升,过程中发生了3月19日西藏比如*M*_s6.1地震,3月21日受异常核实影响再次出现 下降,幅度约0.0023℃,3月22日再次转折上升,至4月23日恢复至正常背景,29天后发生 玛多*M*_s7.4地震,异常过程整体表现出不规则的"V"字形变化特征(图2(a))。

1.2 共和气氡、水温

共和台地处昆仑-秦岭纬向构造带与河西系构造复合部位的沉降带,位于共和盆地北缘断裂与共和盆地南缘断裂之间,观测井深 174.35m,气氡和水温(2套探头)观测分别使用BG2015R型数字气氡仪、SZW-I和 SZW-Ⅱ型数字水温仪。含水层岩性为砂质黏土、砾石(邱鹏成等,2010)。自 2011年开始对共和气氡进行观测,观测数据较稳定,呈现冬高夏低的年变特征,2019年5月因仪器老化对其进行更换,更换后观测时间较短,无正常年变特征;分别于 2011年和 2015年开始对共和水温 2 套仪器进行观测,观测数据同步性较好,无年变特征。共和气氡和水温(2套探头)观测数据于 2021年 2月 28日出现同步上升变化,幅度分别为 17.4Bq/L、0.047℃和 0.07℃。气氡浓度于 3月 1—10日持续呈小幅波动上升变化,累计上升幅度为 29Bq/L,之后开始缓慢下降,73天后发生玛多 Ms7.4 地震,震后气氡浓度维持下降状态(图 2(b));水温于 3月 1—2 日同步下降恢复至变化前的趋势水平,幅度分别为

37 卷

577



图 2 玛多 M_s7.4 地震地下流体异常时序图

0.072℃和 0.21℃,81 天后发生玛多 M_s7.4 地震(图 2(c)~(d))。

1.3 佐署水位

佐署台位于拉脊山构造带的北缘、日月山断裂和拉脊山断裂交汇区域,观测井深 107m, 观测仪器为 SWY-Ⅱ型数字水位仪。含水层岩性为砂砾岩(张昱等,2008)。自 1986 年 5 月 开始对佐署水位进行观测,期间受数字化改造、台站改造、仪器故障以及修路施工等影响,水 位观测极不稳定,数据质量较差,于 2019 年 10 月施工结束后才开始正常观测。自 2019 年 10 月观测以来水位呈波动趋势下降变化,直至 2021 年 2 月 25 日出现突降变化,幅度为 0.268m,26 日开始呈缓慢上升趋势,85 天后发生玛多 *M*_s7.4 地震,并出现幅度为 0.097m 的 同震阶升变化(图 2(e))。

1.4 门源水位

门源水位地处北祁连新元古代-早古生代缝合带,达坂山断裂北约15m,观测井深105.4m,观测仪器为SWY-II型数字水位仪。含水层岩性为砂岩、间夹泥岩(邱鹏成等,2010; 汪发耀等,2020)。自2017年11月开始对门源水位进行观测,观测资料连续稳定,无正常年 变特征。2019年9月24日—12月4日门源水位出现大幅上升,幅度约6.85m,12月5日开 始转折快速下降,至2020年5月1日恢复至以往平稳变化趋势,累计下降4.14m,异常结束

CMYK

3 期

386 天后发生 2021 年 5 月 22 日玛多 M_s7.4 地震(图 2(f))。

2 异常特征分析

2.1 数量特征



图 3 不同震中距范围内的地下流体异常测项数、背景测项数及异常测项比

2.2 时间特征

从时间演化上看(图4),震前地下流体异常主要为3个月内的短期异常,有4项异常在 2021年2月之后出现,占异常总数的80%。异常起始和结束时间的阶段性特征明显,仅门源 水位1项趋势异常出现在震前19个月,持续213天后,在震前12个月结束;其余4项短期 异常均出现在震前3个月内并在震前结束,异常持续时间较短(2~40天)。整个演化过程呈 现出异常数量由少增多、在震前3个月内显著加速的特点。

2.3 时空特征

从时空演化上看,震中距 500km 范围内的 38 项地下流体观测主要集中在震中东北方向,震中距 200km 内仅有的 2 个地下流体观测点,未出现异常,5 项异常均位于震中 200km 以外,主要集中在 200~300km 范围内(3 项,占异常总数的 60%),表现出流体观测和异常测 项存在空间分布上的不均匀性。异常最早出现在距震中较远的位置(门源水位,震中距 421km),随着时间的推移,在震前 3 个月至震前 2 个月,震中 400km 内的异常开始集中出现并向震中位置迁移,其中距震中最近的异常为玉树水温,震中距为 213km (图 5)。

СМҮК





图 5 玛多 M_s7.4 地震前地下流体异常时空演化特征

2.4 形态特征

前人通过震例研究发现,部分流体异常形态存在明显的重现性(王博等,2016;Sunetal, 2018;苏维刚等,2021)。玉树水温异常在周边 *M*_s6.0 以上地震以及巴颜喀拉块体边界附近 发生的多次 *M*_s7.0 以上地震前重复出现,异常形态主要表现为幅度不同的"下降一上升"的 "V"字形变化(图6),该测项在玛多 *M*_s7.4 地震前出现同样的异常形态,对于地震的时、空、 强判定有一定的指示意义(表2)。而共和气氡、共和水温、佐署水位和门源水位异常属于观 测以来首次出现的前兆异常变化,相关异常特征及震例信息有待积累和进一步验证。

3 讨论

截至 2021 年 8 月, 玛多 M_s7.4 地震是继汶川 M_s8.0 地震之后发生在中国大陆的最大地 震, 震中位于青藏高原北部巴颜喀拉块体内部的昆仑山口-江错断裂(王未来等, 2021)。该 断裂整体走向N230°W~270°, 倾向 NE, 倾角 80°, 运动方式以左旋走滑为主, 兼有少量正断 分量(华俊等, 2021)。历史上, 巴颜喀拉块体周边活动断裂发育, 构造运动剧烈, 强震频繁发 生, 尤其是巴颜喀拉块体东边界附近曾多次发生 M_s7.0 以上地震, 如 1973 年四川炉霍 M_s7.6、1976 年四川松潘 M_s7.2、1990 年青海共和 M_s7.0、2008 年四川汶川 M_s8.0、2010 年青 海玉树 M_s7.1、2013 年四川芦山 M_s7.0 和 2017 年四川九寨沟 M_s7.0 地震等(朱亚戈等,

СМҮК

580

表 2



图 6 玉树水温 2007-2021 年观测曲线

玉树水温异常变化与对应地震的关系

异常起止时间 (年-月-日)	亦化幅度	3	对应的地震	日告告法	目带结束距		
	交化幅反 /(℃)	发震日期 (年-月-日)	地点	震级 M _s	井震距 /km	时间/天	发震时间/天
2007-10-04-2007-10-13	-0.0198	2008-03-21	于田	7.3	1464	10	160
2008-03-21-2008-03-27	-0.0288	2008-05-12	汶川	8.0	689	7	46
2009-11-24-2009-11-29	-0.0180					6	
2010-01-23-2010-02-02	-0.0294	2010-04-14	玉树	7.1	22	11	71
2015-03-13-2015-03-17	+0.0224	2015-04-25	尼泊尔	8.1	1256	5	39
2015-10-07-2015-11-17	-0.0160	2016-01-21	门源	6.4	620	41	65
2016-06-15-2016-07-28	-0.0166	2016-10-17	杂多	6.2	190	43	81
2021-03-15-2021-04-23	-0.0027	2021-05-22	玛多	7.4	213	40	29

2021)。根据震例总结统计(张肇诚,1988; 蒋海昆,2018、2019; 晏锐等,2018; 中国地震台 网中心,2019),这些地震震前 500km 内均存在一定的地下流体异常变化(表 3)。

其中,1973年炉霍 M_s7.6 地震前流体异常仅有 1 项,为姑咱水氡,震中距为 220km;1976 年松潘 M_s7.2 地震前流体异常共 4 项,分别为江油水位、理塘水温、松潘水氡和姑咱水氡,震 中距范围 50~460km;1990 年共和 M_s7.0 地震前流体异常共 13 项,分别为佐署水位、湟源流 量、湟源水氡、西宁水氡、长宁水氡、乐都水氡、民和水氡、张掖水氡、山丹水氡、五泉山水氡、 格尔木水氡、松潘拱北水氡和山丹气汞,震中距范围 110~495km;2008 年汶川 M_s8.0 地震前 地下流体异常共 24 项,分别为水富水位、蒲江水位、德阳水位、小金水位、泸州水位、邛崃水 位、二道桥水位、北川水位、巴塘水温、理塘水温、乡城水温、龙头沟水温、道孚水温、二道桥水 温、大足水温、武都殿沟水氡、武山 1 号泉水氡、武山 22 号井水氡、清水温泉水氡、天水花牛 水氡、昭觉 CO₂、普格 CO₂、布拖 CO₂、龙头沟气体总量,震中距范围 71~492km;2010 年玉树 M_s7.1 地震前流体异常共 2 项,为玉树水温和德令哈水温,震中距分别为 22~480km;2013 年 芦山 M_s7.0 地震前流体异常共 10 项,分别为邛崃水位、泸州水位、理塘水温、二道桥水温、龙 头沟水温、泸定水温、理县水氡、普格 CO₂、布拖 CO₂和盐源 CO₂,震中距范围 27~350km;

37 卷

<i>帚 国</i>	异常数量/个							震中距最小值	震中距最大值
辰例	水位及流量	水温	氡	气体	合计	短期	趋势	/km	∕km
1973年炉霍 M _s 7.6	0	0	1	0	1	1	0	220	220
1976 年松潘 M _s 7.2	1	1	2	0	4	1	3	50	460
1990年共和 M _s 7.0	2	0	10	1	13	3	10	110	495
2008年汶川 M _s 8.0	8	7	5	4	24	7	17	71	492
2010年玉树 M _s 7.1	0	2	0	0	2	2	0	22	480
2013 年芦山 M _s 7.0	2	4	1	3	10	1	9	27	350
2017年九寨沟 M _s 7.0	4	5	5	0	14	0	14	108	493
2021年玛多 M _s 7.4	2	2	1	0	5	4	1	213	421

巴颜喀拉块体东边界 M。7.0以上地震震中距 500km 范围内地下流体异常情况

注:气体包括 CO2、汞、气体总量等; 短期异常为震前 3 个月内出现。

2017年九寨沟 M_s7.0 地震前流体异常共 14 项,分别为干盐池水位、大足水位、北碚水位、清水李沟流量、二道桥水温、干盐池水温、泸定水温、巴塘水温、理塘水温、武都殿沟水氡、武山 1 号泉水氡、武山 22 号井水氡、勉县水氡和洋县水氡,震中距范围 108~493km。

数量特征上(图7),震前异常数量小于5个的地震有3次,分别为炉霍地震、松潘地震和玉树地震,其中,松潘地震与玛多地震异常数量相近,观测手段相同,相似性较好;时间特征上(表3,图8),除玛多地震外,震前短期异常占比超过80%的仅有炉霍地震和玉树地震(均为100%),但这两次地震前流体异常数较少,时间特征统计意义较弱。其余地震短期异常占比均小于30%,震前3个月内短期异常加速特征不显著。时空特征上(图8),共和地震和汶川地震前6个月,异常存在由外围向震中收缩的迁移特征。进入震前6个月内,迁移特征消失,异常在距震中不同范围内均有出现,与玛多地震由外围向震中收缩的迁移特征差异较大。其余地震异常时空演化特征不明显。形态特征上,如前面所述,玉树水温在汶川地震和玉树地震均出现"V"字形变化,与玛多地震前形态十分相似(图6)。因此,从整体异常特征上看,玛多地震 M_s7.2、玉树 M_s7.1 地震相似性较高。



图 7 M_s7.0 以上地震震中距 500km 范围内地下流体异常数量对比

3 期

表 3





582



图 8 M_s7.0 以上地震 500km 范围内地下流体异常时空对比

研究认为,流体前兆响应和地震孕育过程中的区域应力加载作用密切关系(车用太等, 1999)。一般情况下,7级左右地震在地下流体方面的异常持续时间一般在1年左右,甚至 更短(蒋海昆等,2009)。松潘地震地下流体异常的持续时间基本在1年左右,与前人经验一 致。玛多地震前1年尺度的前兆异常仅有门源水位1项,玉树地震前无1年尺度的异常信 息出现,可能反映了此时段处于应力加载初期缓慢的弹性积累阶段,异常现象并不突出。随 着应力的不断积累,进入长期应力加载后的岩石膨胀阶段,短期前兆异常开始集中显现直至 地震发生(张学民等,2018)。而玛多地震和玉树地震震中附近台站稀少,可能是临震破裂阶 段震源区附近未观测到异常现象的主要原因。整体上看,玛多地震和玉树地震震中空间位 置较为接近、构造环境类似,震前3个月内地下流体短期异常在时空分布上也具有较好的相 似性,可能具有类似的应力加载过程。而松潘地震相对较远且震前无短期异常出现,说明其 孕育过程可能存在一定的差别,需要进一步深入研究。

玛多 M_s7.4 地震前,中国地震台网中心预报部地下流体研究室依据玉树水温异常的高 重现性、高映震率以及相对固定的震例发生地点等优势给出了明确预报意见,证明了地下流 体异常在短期地震预测预报中发挥着不可替代的作用。虽然此次玉树水温异常幅度较以往 小一个数量级,导致预报震级偏低,但共和气氡、共和水温以及佐署水位等3项短期异常的 集中出现以及玛多地震的发生,很可能说明震前出现的这些地下流体短期异常与地震孕育 过程存在某些有待探索的物理联系。结合历史震例对比结果,认为即使地下流体异常个数 较少或异常测项比较低,巴颜喀拉块体发生 M_s7.0以上地震的可能性仍然较高,特别是出现 类似玉树水温这种关键性短期异常,以及出现群体异常集中分布或由外围向震中收缩等,这 些特征对于未来地震趋势研判均具有重要的参考意义。

在过去的半个多世纪里,我国地震地下流体观测网从无到有、由点及面,观测台站数量 逐年增多,已发展成为世界上规模最大、地震监测能力最好的现代化地震地下流体观测网 (车用太等,2017)。然而,研究表明,绝大多数地震前的地下流体异常数量占比较低,基本不 超过20%(张立,2013;孙小龙等,2016;杨晓霞等,2016;钟骏等,2018;王俊等,2020),根据 震前捕捉到的流体异常提出预测意见的地震次数更是不到10%(王广才等,2003)。这一事 实固然与地震的孕震环境不同以及观测井孔所在构造条件不同有关,但更突出反映了现有 地下流体观测网空间分布明显存在不均匀的弊端。同时,本次地震震中 500km 范围内测项 的预报效能主要为 B 类和 C 类,其次为 D 类,而 A 类仅有 1 项,未评估甚至高达 9 项,说明 该区域内地下流体观测资料的预报能力整体偏弱,导致监测预报水平十分有限,远不能满足 防震减灾的需求。因此,有必要进一步优化与升级,尤其是在台网布局上,亟需增强地震弱 监视区的监测水平,并从基础资料、观测质量、影响因素和震例信息等方面对每个测项的预 报效能进行常态化动态评估,从而不断提升我国地下流体台网的监测预报水平以及地震分 析预报能力。

4 结论

СМҮК

3期

通过对玛多 M_s7.4 地震前地下流体观测资料及异常特征分析,结合比巴颜喀拉块体多次 M_s7.0 以上地震前的地下流体异常特征,得出以下结论:

(1) 玛多 M_s7.4 地震前地下流体异常的时间阶段性特点明显,整个演化过程呈现出由外向震中收缩的迁移特征,短期阶段异常数量呈现加速增多的特征。

(2)玉树水温异常具有明显的重现性。异常形态多表现为"下降一上升"的"V"字形变化,对于地震的时、空、强判定有一定的指示意义。

(3) 玛多 *M*_s7.4 地震震前地下流体异常和松潘 *M*_s7.2 地震、玉树 *M*_s7.1 地震具有一定的 相似性;在区域应力加载作用方面, 玛多 *M*_s7.4 地震与玉树 *M*_s7.1 地震可能具有类似的应 力加载过程。

参考文献

车用太,何案华,冯恩国,等,2017. 从二个地下流体典型震例论台网优化与升级. 地震,37(1):134~147.

车用太,鱼金子,2006. 地震地下流体学. 北京:气象出版社.

车用太,鱼金子,刘五洲,1999. 华北北部地区 3 次强震前地下流体异常场及其形成与演化机理.中国地震,15(2):139~150.

陈棋福,2008. 中国震例(2000-2002). 北京:地震出版社.

付虹,李永莉,赵小艳,等,2008. 云南 M≥5 地震震前异常的统计特征. 地震研究,31(4):335~339.

华俊,赵德政,单新建,等,2021.2021年青海玛多 Mw7.3 地震 InSAR 的同震形变场、断层滑动分布及其对周边区域的应力

扰动. 地震地质,43(3):677~691.

蒋海昆,2018. 中国震例(2007-2010). 北京:地震出版社.

蒋海昆,2019. 中国震例(2013). 北京:地震出版社.

蒋海昆,苗青壮,吴琼,等,2009. 基于震例的前兆统计特征分析. 地震学报,31(3):245~259.

李军,黄圣睦,闻学泽,2005.理塘毛垭温泉水温异常研究.四川地震,(3):10~16.

李智敏,李文巧,李涛,等,2021.2021年5月22日青海玛多 M_s7.4 地震的发震构造和地表破裂初步调查. 地震地质,43 (3):722~737.

刘耀炜,任宏微,张磊,等,2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析. 地震地质,37(1):307~318.

邱鹏成,王永刚,杨广华,2010. 汶川 M_s8.0 地震前青海地区数字化水温(地温)异常变化分析. 防灾科技学院学报,**12**(1): 73~78.

苏维刚,刘磊,袁伏全,等,(2021-07-16)[2021-08-16]. 2021 年玛多 *M*_s7.4 地震前玉树地震台井水温异常特征. 地震学报: 1-5, http://kns.cnki.netkcmsdetail/11.2021.P.20210715.1654.002.html.

孙小龙,刘耀炜,付虹,等,2020. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾. 地震研究,43(2):216~231.

孙小龙,王俊,向阳,等,2016. 基于《中国震例》的地下流体异常特征统计分析. 地震,36(4):120~130.

王博,马玉川,马玉虎,2016. 玉树台井水温变化及其与青藏块体周缘大地震间的关系. 中国地震,**32**(3):563~570. 汪成民,1990. 中国地震地下水动态观测网. 北京:地震出版社.

汪发耀,杨积礼,杨开来,等,2020. 门源地震台静水位和形变异常核实实例与思考. 高原地震,32(3):50~55.

王广才,车用太,刘成龙,等,2003. 我国地震地下流体观测的现状和趋势. 水文地质工程地质,(6):89~96.

王俊,黄显良,刘朝君,等,2020. 2014 年安徽霍山 Ms4.3 地震前地下流体典型异常特征分析.中国地震,36(1):67~79.

王铁城,鄂秀满,陈建民,等,1994. 中国地震地下流体监测系统的现状与展望. 中国地震,10(3):277~286.

王未来,房立华,吴建平,等,2021.2021 年青海玛多 M_s7.4 地震序列精定位研究.中国科学:地球科学,51(7):1193~1202.

晏锐,黄辅琼,顾瑾平,2004.中国大陆7级强震前地下流体前兆时空特征.地震,24(1):126~131.

晏锐,田雷,王广才,等,2018.2008年汶川8.0级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析.地球物理学报,61(5):1907~1921.

杨晓霞,王小玲,李玉丽,等,2016.2016年青海门源 M_s6.4 地震前地下流体异常特征分析. 地震研究,**39**(增刊 I):89~94. 张立,2013.2011年缅甸 7.2 级地震前云南地下流体异常特征分析. 地震,**33**(1):119~126.

张学民,申旭辉,刘静,等,2018. 多地球物理场观测的玉树地震孕育过程分析. 遥感学报,22(增刊 I):56~63.

张昱,李春森,赵小茂,等,2008. 甘肃及邻区数字化水位观测资料的应用与地震监测效能评估. 地震,28(3):103~109.

张肇诚,1988.中国震例(1966—1975).北京:地震出版社.

中国地震台网中心,2019.2017年九寨沟7.0级地震总结.北京:地震出版社.

钟骏,王博,周志华,2018. 精河 $M_{\rm S}6.6$ 地震前地下流体异常特征分析. 中国地震,34(4):754~764.

朱亚戈, 刁法启, 付誉超, 等, (2021-06-25) [2021-08-11]. 基于 GPS 资料约束的 2021 年玛多地震发震断层的滑动速率. 中国科学: 地球科学: 1-8, http://kns.cnki.netkcmsdetail/11.5842.P.20210624.1702.003.html.

Ghosh D, Deb A, Sengupta R, 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. J ApplGeophys, 69(2):67~81.

Montgomery D R, Manga M, 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. Science, 300 (5628): 2047 ~ 2049.

Roeloffs E A, 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. J Geophys Res: Solid Earth, 103 (B1): 869~889.

Sun X L, Xiang Y, Shi Z M, et al, 2018. Preseismic changes of water temperature in the Yushuwell, Western China. Pure ApplGeophys, 175(7):2445~2458.

584

MYK

CMYK

Analysis on Anomaly Characteristics of Underground Fluid before 2021 Maduo M_s 7.4 Earthquake in Qinghai Province

Zhong Jun Wang Bo Zhou Zhihua Yan Rui

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Underground fluid observation plays an important role in earthquake prediction research and earthquake tracking. In this paper, the observation data and characteristics of anomalies from underground fluid around the epicenter of Maduo M_s 7.4 earthquake on May 22, 2021 were systematically analyzed, and the prediction process before the earthquake was reviewed. the results show that there exist 5 anomalies within 500km of Maduo epicenter, and 4 of them are short-term anomalies, mainly occurring $2 \sim 3$ months before the earthquake. the anomalies are evenly distributed in space, but mainly located in the northeast and southwest of Maduo epicenter, displaying an overall migration characteristic from the periphery to the epicenter. There exists a good similarity between Maduo M_s 7.4 earthquake and Qinghai Yushu M_s 7.1 earthquake in 2010 in terms of anomaly characteristics and stress loading. the results of this paper added more earthquake cases for areas with low seismic monitoring ability, and have certain reference for improving the understanding of precursory anomalies of underground fluid of strong earthquakes and for determining future earthquake situation trend.

Keywords: Maduo M_s7.4 earthquake; Underground fluid; Anomaly characteristics