

冯丽丽,李霞,赵玉红,等,2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震短临异常跟踪分析. 中国地震,38(1):12~20.

2022 年 1 月 8 日青海门源 6.9 级地震 短临异常跟踪分析

冯丽丽^{1,2)} 李霞^{1,2)} 赵玉红^{1,2)} 张朋涛^{1,2)}

1) 中国地震局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

摘要 2022 年 1 月 8 日青海门源县发生 6.9 级地震,此次地震前青海地区出现了大量地球物理观测异常。2021 年 10 月下旬青海地区出现地磁垂直强度极化高值异常,10 月 27 日异常台站最多,并在门源-祁连至兴海地区形成一个面积约为 $6.6 \times 10^4 \text{km}^2$ 的高值异常区;此外,2021 年 7—11 月青海地区 8 项地下流体观测数据出现准同步异常变化。结合青海及周边地区历史震例的分析结果,认为 2021 年 11 月 23 日至 2022 年 1 月 23 日,青海西北部地磁垂直强度极化高值区内可能发生 5.6~6.4 级地震。门源 6.9 级地震发生在地磁垂直强度极化异常出现后的 73 天,震中位于预测区的边缘,地震的发生时间和地点与预测意见一致,但震级超出预测意见上限值 0.5 级。此次地震前基于地球物理观测地震预测指标体系开展的短临异常跟踪分析过程,对大陆西部地震预报工作具有一定的参考意义。

关键词: 门源 6.9 级地震 短临异常 地磁垂直强度极化 地下流体异常 地震预测

[文章编号] 1001-4683(2022)01-0012-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定,2022 年 1 月 8 日 1 时 45 分青海海北州门源县 (37.77°N , 101.26°E) 发生 6.9 级地震,震源深度 10km。距离震中最近的断层为托勒山北缘断裂,空间距离约 3.0km,该断层运动性质以左旋走滑为主(许英才等,2022)。此次地震前,青海地区的地球物理观测异常较为突出。形变、电磁和流体异常依次出现,空间分布广、持续时间长且异常项数在震前迅速增多。其中,利用地磁垂直强度极化法提取到的电磁辐射异常对地点和震级的判定、地下流体异常对发震时间的判定发挥了重要作用。

极化法(Polarization)由 Hayakawa 等(1996)提出,因其能够反映地震地磁扰动异常的产生、传播和分布特征,被广泛应用于国内外地震电磁扰动异常提取(Hayakawa et al,2000; Molchanov et al,2003;Prattes et al,2008;冯志生等,2010;李琪等,2015;廖晓峰等,2019;艾萨·伊斯马伊力等,2020;樊文杰等,2021)。但以往研究主要以单台资料分析为主,对震前

[收稿日期] 2022-02-09 [修定日期] 2022-02-21

[项目类别] 青藏高原岩石圈磁场与强震关系研究(2021-ZJ-969Q)、基于流磁矢量数据的青藏地区岩石圈磁场变化特征研究共同资助

[作者简介] 冯丽丽,女,1986 年生,高级工程师,主要从事地震电磁关系研究。E-mail:ynuffl@sina.com

电磁辐射异常的空间特征研究较少。2019 年,基于 2015—2018 年中国地磁台网磁通门磁力仪产出的秒采样观测数据,在对分析结果进行了适当的处理后,总结了地磁垂直强度极化高值异常与后续地震的时空关系,建立了完整的地震预报指标体系(中国地震局监测预报司, 2020),使得该方法得到了较大发展。贺曼秋等(2019)在 2017 年九寨沟 7.0 级和精河 6.6 级地震前,在 2 个震中附近同时提取到了地磁垂直强度极化异常;李霞等(2021)在 2017 年西藏米林 6.9 级地震前 10 天提取到了青藏高原出现的大范围地磁垂直强度极化高值异常;管贻亮等(2021)对 2015 年尼泊尔地震前的地磁垂直强度极化异常进行了分析并从构造动力演化角度对地磁极化异常的孕育和发展进行了解释;冯丽丽等(2021)总结了 2015—2020 年中国大陆西部地磁垂直强度极化异常和地震的关系,认为地磁垂直强度极化异常出现后半年内,空间分布图中 0.2 阈值线附近发生 6 级以上强震的可能性较大,且高值异常区面积与震级存在正相关关系。

地震前也常观测到地下流体的异常变化。在 2021 年青海玛多 7.4 级(钟骏等,2021)、2017 年新疆精河 6.6 级(钟骏等,2018)、2010 年青海玉树 7.1 级地震(李滔等,2012)等中国大陆西部强震前,均在震中周边多个台站观测到了地下流体化学组分的浓度变化、温度变化或水位变化等。

1 地磁垂直强度极化法

Hayakawa 等(1996)提出的地磁垂直强度极化法能够突出源于震源区的异常信号,抑制来源于外源场的信号。具体数学表述如下

$$Y_{ZH} = \left| \frac{Z(\omega)}{H(\omega)} \right|, H(\omega) = \sqrt{H_x^2(\omega) + H_y^2(\omega)} \quad (1)$$

式中, $Z(\omega)$ 为地磁垂直分量的谱幅度值, $H(\omega)$ 为地磁水平分量的谱幅度值; $H_x(\omega)$ 为地磁南北分量谱幅度值, $H_y(\omega)$ 为地磁东西分量谱幅度值。地磁分量单位为 nT, ω 为圆频率。

1.1 数据处理

数据处理步骤如下:①将磁通门三分量 Z 、 H_x 和 H_y 每天的秒资料按每段 15min 分为 96 段,计算各段垂直矢量和水平矢量的傅里叶谱幅度;②将每天 5~100s(0.01~0.2Hz)内各频点的极化值的均值作为当日极化值,以半年为周期对逐日极化值曲线进行傅里叶拟合(数据一般不短于半年),获得其年变化曲线,并计算两者残差的均方差;③将每天 5~100s(0.01~0.2Hz)内各频点的极化值曲线减去傅里叶拟合得到的年变化曲线,消除其中的年变化成分;④仅保留各频点极化值曲线中高于 2 倍残差均方差的部分,剔除低值部分;⑤对筛选出高值后的每天 5~100s(0.01~0.2Hz)内各频点的极化值的均值作为当日极化值,再次进行傅里叶拟合后,发现仍然存在年变化,因此再次对年变化进行了扣除,最终处理得到了地磁垂直强度极化高值序列 Y_{ZH} 。

以往震例表明,震前的极化异常在不同台站出现时间可能略有差异,在研究异常空间特征时,可能因为前后出现时间的差异导致异常的空间范围与实际不相符的情况,因此对逐日值进行了 5 日滑动平均处理,得到 Y_{ZH1} 。

1.2 归一化

因观测环境及仪器的差异,各台 Y_{ZH1} 波动范围不尽相同。在提取 Y_{ZH1} 高值进行空间特

征研究时,可能出现因台站差异导致的失真现象。为了消除台站影响,需要对各台 Y_{ZM1} 进行归一化。为了使结果更直观,对归一化后的结果进行了置零处理。具体算法为

$$Y_{ZH2} = \frac{Y_{ZM1}}{2 \sqrt{\sum_{j=1}^n ((Y_{ZM1})_j - \overline{(Y_{ZM1})_j})^2}} - 1 \quad (2)$$

我们称 Y_{ZH2} 为归一置零极化值,当其高于 0 时,等同于 Y_{ZM1} 高于 2 倍方差。在空间上对现有台站的归一置零极化值进行克里金法数学插值,即可得到大陆西部地区每日的地磁垂直强度极化空间分布。

2 异常分析

2.1 地磁垂直强度极化异常

2021 年 10 月 27 日前后,全国范围内 77 个参与计算台站中共有 17 个台站出现高值异常。从青海地区的 Y_{ZM1} 时序曲线来看(图 1),从 2021 年 10 月 20 日起青海地区多个台站的 Y_{ZM1} 出现持续升高,至 10 月 27 日前后达到极大值,后持续回落。这是 2021 年 6 月(玛多 7.4 级地震)以来青海地区最显著、幅度最大的一次地磁垂直强度极化高值异常。

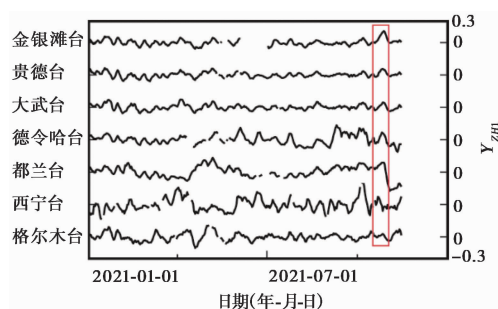


图 1 2021 年 1 月以来青海地区各台地磁垂直强度极化时序曲线

经过后续处理和分析,发现在异常幅度最大、异常台站最多的时间,即 2021 年 10 月 27 日,在青海西北部形成 1 个面积大于 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的高值异常区(图 2),异常面积为 $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大

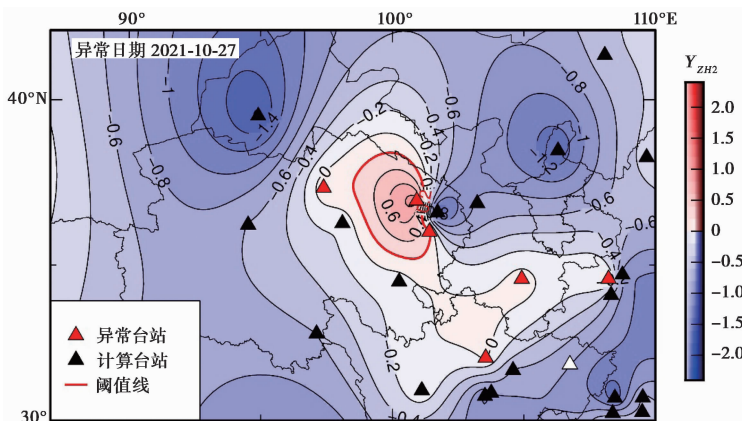


图 2 2021 年 10 月 27 日地磁垂直强度极化 Y_{ZH2} 异常空间分布

于阈值 0.2 的范围内有 3 个异常台站, 分别为德令哈台、贵德台和金银滩台, 详细信息见表 1。其中归一置零极化值最高的为金银滩台, 达到 0.9。

表 1 2021 年 10 月 27 日青海地区垂直强度极化信息

台站名	仪器名[编号]	东经/(°)	北纬/(°)	原始极化值	归一置零极化值
金银滩	GM4XL[4]	100.9	37.0	0.12188	0.906106
贵德	GM4XL[2]	101.4	36.0	0.07175	0.275634
德令哈	GM4XL[b]	97.4	37.4	0.07653	0.154951
大武	GM4XL[b]	100.3	34.5	0.05613	-0.11636
都兰	GM4XL[7]	98.1	36.3	0.11029	-0.16473
格尔木	M15[1]	94.5	36.3	0.03620	-0.58968
巴塘	FGM01[1]	97.1	32.8	0.45000	-0.59918
西宁	FGM01[1]	101.7	36.6	-0.0382	-1.43678

2.2 地下流体准同步短期异常

2021 年 7 月至 11 月, 青海地区陆续出现多项流体短临异常。其中佐署台动水位的下降异常及浅层水温的上升异常出现时间最早, 2 个测项出现异常的时间一致, 均为 7 月初。而平安静水位破年变异常随后在 7 月底至 8 月初出现。门源静水位突降异常、乐都逸出气氮突升异常以及西宁逸出气氮浓度突降异常均出现在 2021 年 9 月。上述异常大多仅持续较短的时间, 而西宁逸出气氮浓度突降异常一直持续到 11 月初, 几乎与此同时, 共和的 2 套中层水温也同时出现了突降异常, 并于 12 月初再次出现同步变化。德令哈水温在 12 月上、中旬出现突升—转平—突降的“倒 U”形变化, 整个变化过程持续约半个月。至此, 青海地区地下流体异常数量达到 8 项(共和 2 套水温观测仪器相同且装置于同一井孔中, 因此计为 1 项), 空间分布见图 3, 时序曲线见图 4。

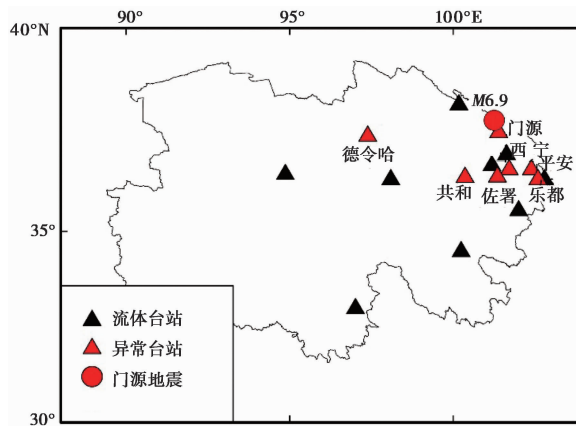


图 3 门源地震前青海地区地下流体异常台站分布

从震中距及异常出现时间来看, 最远的德令哈台和相对稍远的共和台出现异常的时间最晚。而最近的门源台于震前 4 个月出现异常, 在此次准同步变化过程中处于中段。西宁台、佐署台、平安台、乐都台及共和台震中距相差不大, 但异常出现的时间最大相差了 5 个

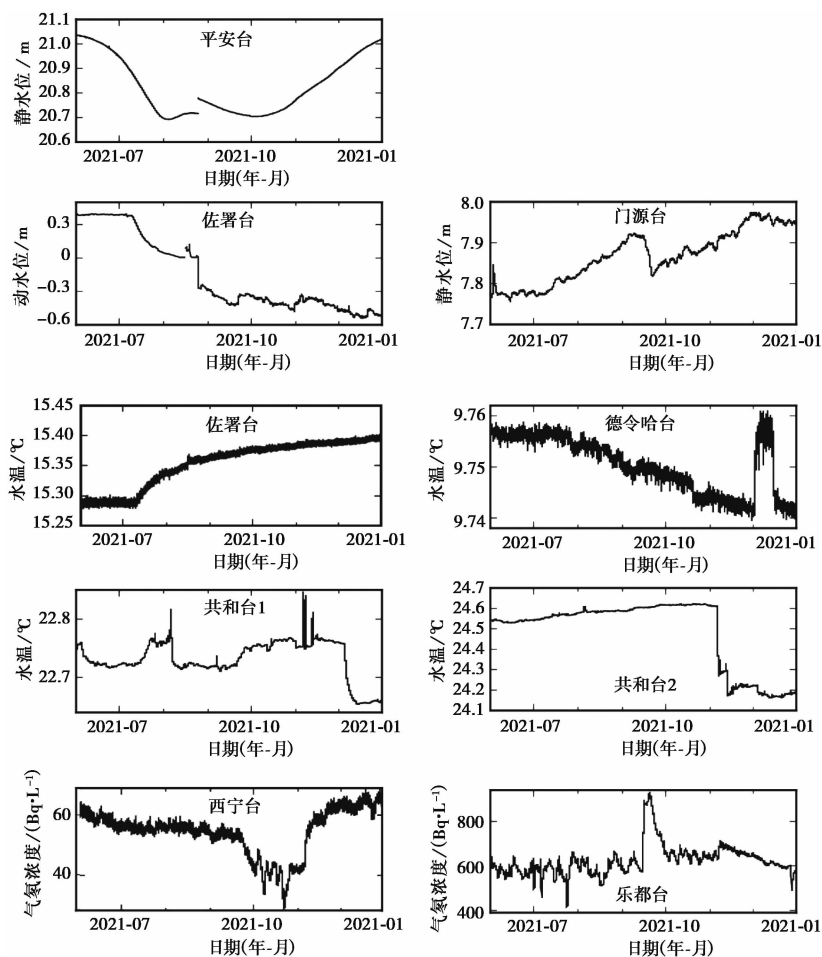


图4 2021年6月以来青海多个台站地下流体准同步异常

月,无明显的时空演化特征。

从异常类别来看,共3个台出现水位变化,3个台的4套仪器观测显示水温变化,2个台出现逸出气氡浓度变化。其中平安台、佐署台和门源台出现了水位变化,平安台打破了原本的年变化上升趋势,水位转平下降;门源台出现了水位上升变化(平安台与门源台为静水位观测,数值下降表明水位上升);而佐署台则呈现了持续性的下降变化。水温变化在德令哈台和佐署台主要表现为升高变化,而共和台2套仪器的观测结果均显示阶降变化。而从逸出气氡浓度来看,乐都台出现稍早,主要为上升变化,在乐都台开始下降阶段西宁台出现了上升变化。

青海地区地下流体测项在2021年5月22日玛多7.4级地震前1~3个月,曾提出多项准同步异常变化,包括玉树水温(苏维刚等,2021)、佐署动水位、共和逸出气氡及共和中层水温等(刘磊等,2021)。2016年门源6.4级地震前1~3个月,也曾出现过3项准同步变化,包括玉树水温“V”型变化、乐都气氡快速升高异常(刘磊等,2020)、平安静水位破年变变化等(杨晓霞等,2016),部分异常台站和测项与此次异常特征相似。且对应地震的时间均在3个

月内。

3 “时、空、强”综合分析

3.1 时间判定

表 2 列出了青海地区地磁垂直强度极化异常信息。自 2015 年以来,青海地区共出现 8 次地磁垂直强度极化异常,其中 6 次在异常出现后 8 个月内异常区内及附近发生了 5.6 级以上地震,对应率为 75%,具有较高的信度。而其中 4 次地震发生在异常出现后的 60 天内,表明该异常具有一定的短期指示意义。从异常出现时间推测优势发震时间在 2021 年 12 月 27 日前。但考虑到目前震例较少,且部分震例对应时间较长,因此在发震时间判定中同时考虑了地下流体准同步变化的时间。2021 年 7 月以来,青海地区陆续出现多项流体异常。2021 年 11 月再次出现多项准同步变化,这种现象对于后续 3 个月内青海地区的强震有较好的指示意义。综合上述分析,判断发震时间为 2021 年 12 月至 2022 年 1 月。

表 2 青海及周边地区极化异常信息

异常时间 (年-月-日)	异常台站	对应地震	发震时间	震中位置
2015-11-18	格尔木、都兰、西宁、金银滩			
2015-11-23	都兰、西宁、金银滩	门源 6.4 级	60 天	异常区内
2016-09-15	玉树巴塘	杂多 6.2 级	31 天	阈值线
2016-12-02	都兰、西宁、金银滩			
2019-09-24	贵德、金银滩、大武	夏河 5.7 级	34 天	阈值线外侧
2019-11-12	大武	石渠 5.6 级	141 天	阈值线
2020-10-15	都兰、德令哈、贵德、金银滩、大武	玛多 7.4 级	219 天	阈值线外侧
2021-05-07	都兰、贵德、金银滩	玛多 7.4 级	15 天	阈值线外侧

3.2 地点判定

图 5 给出了青海及周边地区垂直强度极化异常空间分布与后续地震的震中位置,震中全部位于异常区内或阈值线(归一置零极化值为 0.2 的等值线)附近。因此,预测发震地点在异常区内或阈值线附近。

3.3 震级判定

由表 2 可知,青海地区震例震级在 5.6~7.4 级之间。根据以往对中国大陆西部的震例研究(冯丽丽等,2021),后续地震震级与高值异常区面积有近似正相关关系,并存在拟合关系。此次异常区面积与夏河 5.7 级地震前异常区面积相当。综合分析认为,目标地震可能在 6 级左右,因此最终给出预测震级为 5.6~6.4 级。

3.4 综合预测结果

基于青海及周边地区地磁垂直强度极化异常,并综合 2021 年 7—11 月以来青海地区地下流体准同步异常变化,基于以往震例分析认为 2021 年 11 月 23 日至 2022 年 1 月 23 日,青海西北部地磁垂直强度极化高值区内可能发生 5.6~6.4 级左右地震,并填报地震短临预测卡片。此次门源 6.9 级地震发生于异常后的 73 天,震中位于预测区边界,发震时间和震中

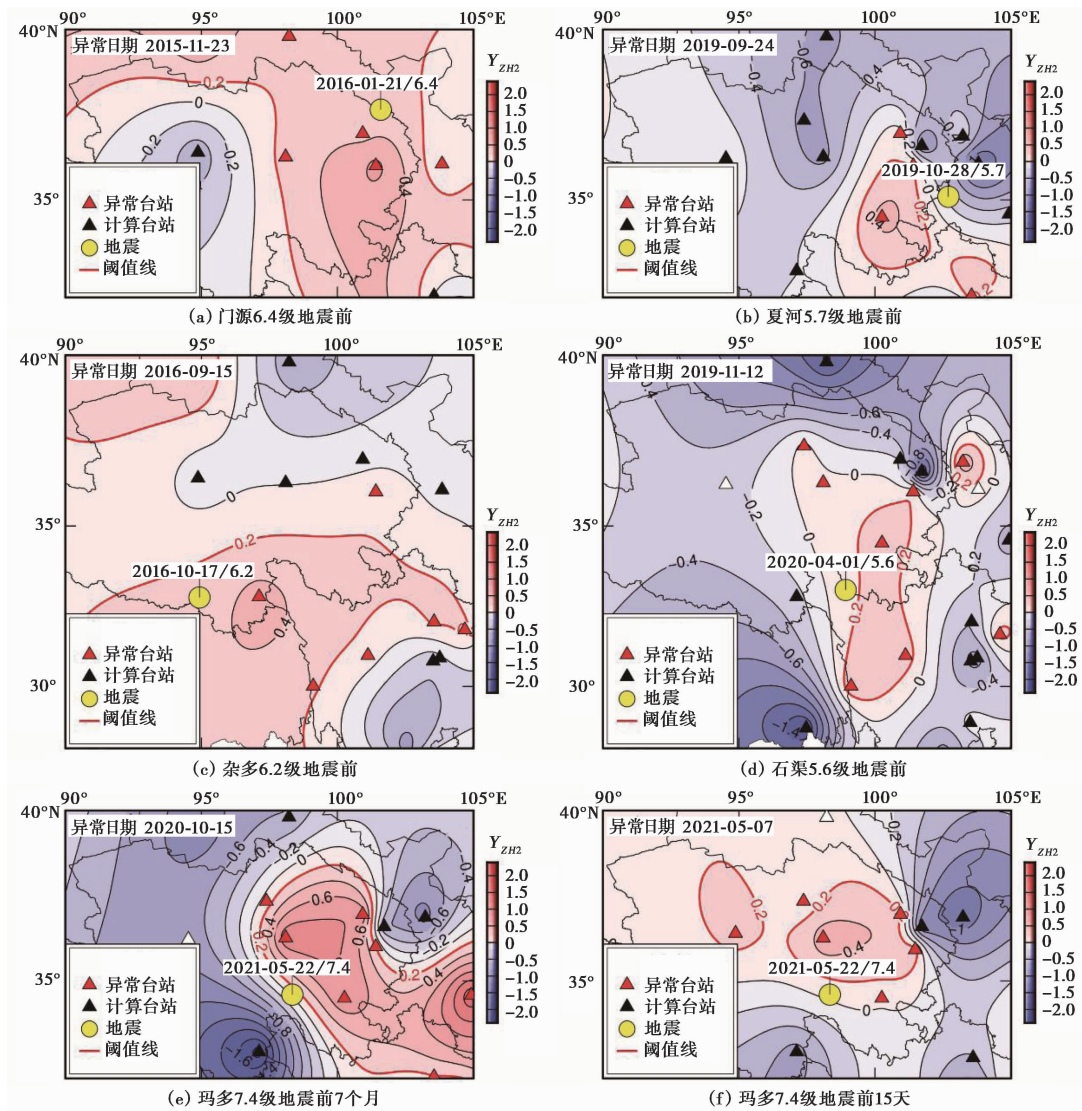


图5 青海地区地磁垂直强度极化 Y_{ZH2} 异常空间分布

位置均符合预期,但震级比预期高 0.5 级。

4 结论与讨论

(1) 此次门源 6.9 级地震前 73 天在青海西北部出现了地磁垂直强度极化异常,高值区面积为 $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,空间上位于此次地震震中西南。震前,通过对该异常在青海地区的预测指标进一步分析认为异常出现后 60 天至稍长时间,高值区附近可能发生 6 级左右地震。

(2) 此次门源 6.9 级地震前 1~6 个月,青海地区出现了多项地下流体异常,在时间上表现为准同步变化。根据异常指标,认为发震时间可能在 2021 年 12 月至 2022 年 1 月。

(3) 此次门源 6.9 级地震的发生表明震前的分析和判断基本正确。地磁垂直强度极化

异常空间阈值线是地震地点预测的良好指标。该异常在青海地区可作为短临异常,指示未来 2~3 个月内的中强以上地震,地下流体的准同步异常具有较强的时间指示意义。

优质的时间、空间预测指标是本次地震短临跟踪分析成功的关键。但同时应指出,此次预测的震级仍存在 0.5 级的偏差,主要原因是目前在青海地区尚未梳理出高质量的震级预测指标,需要在下一步工作中继续加强此方面工作。

参考文献

- 艾萨·伊斯马伊力,冯志生,陈界宏,等. 2020. 2020 年于田 $M_s6.4$ 地震前地磁极化异常特征分析. 内陆地震, **34**(3):295~302.
- 樊文杰,冯丽丽,李霞,等. 2021. 中强地震前地磁极化异常特征及其与后续地震的关系. 地震, **41**(2):170~179.
- 冯丽丽,冯志生,樊文杰,等. 2021. 中国大陆西部强震前超低频磁场时空变化特征. 地震学报, **43**(3):359~375.
- 冯志生,李琪,卢军,等. 2010. 基于磁通门秒值数据的地震 ULF 磁场可靠信息提取研究. 华南地震, **30**(2):1~7.
- 管贻亮,董晓娜,尹玉振,等. 2021. 2015 年尼泊尔 $M_w7.8$ 地震前磁扰动极化异常特征分析. 地震地质, **43**(5):1311~1325.
- 贺曼秋,冯丽丽,樊文杰,等. 2019. 九寨沟 7.0、精河 6.6 级地震前地磁垂直强度极化值特征. 国际地震动态, (8):71~72.
- 李琪,杨星,蔡绍平. 2015. 极化方法应用于地磁台阵的震例分析. 震灾防御技术, **10**(2):412~417.
- 李滔,马建新,樊春燕,等. 2012. 玉树地震前的地下流体观测井温度数据超差异常及其与地震关系研究. 中国地震, **28**(3):328~334.
- 李霞,冯丽丽,赵玉红,等. 2021. 2017 年西藏米林 $M_s6.9$ 地震前地磁垂直强度极化异常特征. 地震学报, **43**(5):584~594.
- 廖晓峰,冯丽丽,祁玉萍,等. 2019. 地磁极化方法在阿拉善 5.0 级地震中的应用研究. 地震, **39**(4):127~135.
- 刘磊,李霞,赵玉红,等. 2020. 青海乐都断层气氛的年异常特征分析. 浙江大学学报(理学版), **47**(3):355~361.
- 刘磊,张朋涛,苏维刚,等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M7.4$ 地震前共和水温异常分析研究. 地震工程学报, **43**(4):860~867.
- 苏维刚,刘磊,袁伏全,等. 2021. 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, **43**(3):392~396.
- 许英才,郭祥云,冯丽丽,等. 2022. 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_s6.9$ 地震序列重定位和震源机制研究. 地震学报, **44**(2):1~16.
- 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.
- 中国地震局监测预报司. 2020. 地震电磁分析预测技术方法工作手册. 北京:地震出版社.
- 钟骏,王博,周志华. 2018. 精河 $M_s6.6$ 地震前地下流体异常特征分析. 中国地震, **34**(4):754~764.
- 钟骏,王博,周志华,等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震前地下流体异常特征分析. 中国地震, **37**(3):574~585.
- Hayakawa M, Itoh T, Hattori K, et al. 2000. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996. *Geophys Res Lett*, **27**(10):1531~1534.
- Hayakawa M, Kawate R, Molchanov O A, et al. 1996. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam Earthquake of 8 August 1993. *Geophys Res Lett*, **23**(3):241~244.
- Molchanov O, Schekotov A, Fedorov E, et al. 2003. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **3**(3~4):203~209.
- Prattes G, Schwingenschuh K, Eichelberger H U, et al. 2008. Multi-point ground-based ULF magnetic field observations in Europe during seismic active periods in 2004 and 2005. *Nat Hazard Earth Syst Sci*, **8**(3):501~507.

A Short-term Prediction Practice on the Menyuan $M6.9$ Earthquake on January 8, 2022

Feng Lili^{1,2)} Li Xia^{1,2)} Zhao Yuhong^{1,2)} Zhang Pengtao^{1,2)}

1) Golmud Geodynamics Field Observation and Research Station of Qinghai-Tibet Plateau,
China Earthquake Administration, Xining 810001, China

2) Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, China

Abstract An $M6.9$ earthquake occurred in Menyuan county, Qinghai Province on January 8, 2022. Some geophysical precursory anomalies have been recorded in Qinghai region before this event. For example, obvious anomalies of geomagnetic vertical intensity polarization happened in Qinghai area at the end of October 2021. The number of anomalous stations reached the climax on October 27, and the anomaly area of $6.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ covered Menyuan-Qilian to Xinghai area in northwest Qinghai. In addition, from July to November in 2021, eight subsurface fluid observations in Qinghai region showed quasi-synchronous abnormal changes. With the reference of previous earthquake cases in Qinghai and its surrounding areas, we made a conclusion that an $M5.6$ to $M6.4$ earthquake might occur in geomagnetic anomalous area in northwest Qinghai from November 23, 2021 to January 23, 2022. Thus, a short impending earthquake prediction card had been provided. The Menyuan $M6.9$ earthquake occurred 73 days after the occurrence of the anomaly, and its epicenter is located at the boundary of the prediction area of geomagnetic vertical intensity polarization anomaly. In light of this practice, the predicted time and the epicentral location of the earthquake are basically good enough but the magnitude is 0.5 magnitude higher than expected. However, this short-term anomaly tracking and prediction practice will be of importance in Qinghai area and even in the western China.

Keywords: Menyuan $M6.9$ earthquake; Short impending anomaly; Geomagnetic vertical strength polarization; Subsurface fluid anomaly; Earthquake prediction