第36卷 第3期(375~382)	中 国 地 震	Vol. 36 No. 3
2020 年 9 月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Sep. 2020

解滔,王同利,肖武军,等,2020. 2020 年 7 月 12 日唐山 M<sub>s</sub>5.1 地震前通州台井下地电阻率变化. 中国地震,36(3):375~382.

# 2020 年 7 月 12 日唐山 M<sub>s</sub> 5.1 地震前 通州台井下地电阻率变化

解滔<sup>1)</sup> 王同利<sup>2)</sup> 肖武军<sup>1)</sup> 胡毅涛<sup>2)</sup> 李然<sup>2)</sup> 卢军<sup>1)</sup>

1)中国地震台网中心,北京 100045
 2)北京市地震局,北京 100080

摘要 通州地震台井下地电阻率观测于 2019 年 11 月完成建设,完成相关测试后于 2020 年 投入实际观测。在 2020 年 7 月 12 日河北唐山 M<sub>s</sub>5.1 地震前,地电阻率呈现出一定的变化,约从 4 月上旬开始 NE 和 NW 测道同步出现下降变化,6 月中旬开始 NW 测道出现转折回升。EW 测道同期存在一定的上升变化,但变化幅度约为 NE 测道幅度的 1/4。此次地震的震源机制解为走 滑型,最大主压应力方位为 101°,与 NE、NW 和 EW 测道的夹角分别为 70°、50°和 10°。震前 NE 测道下降幅度最大,NW 测道次之,EW 测道变化幅度最小,符合实验结果和地震前地电阻率各向异性变化特征。

关键词: 唐山 M<sub>s</sub>5.1 地震 地电阻率 通州地震台 各向异性变化 [文章编号] 1001-4683(2020)03-0375-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

#### 0 引言

2020 年 7 月 12 日 06 时 38 分河北省唐山市古冶区发生 M<sub>s</sub>5.1 地震,震中位置为 118.44°E、39.78°N。地电阻率是实施中短期地震预测的有效观测手段,其观测物理量是测 区地下探测范围内介质电阻率的综合反映,其变化主要反映构造应力作用下因测区介质变 形而诱发微裂隙活动所引起的电阻率变化(Mjachkin et al,1975;Crampin et al,1984)。实验 室和野外原地实验结果、各向异性电阻率模型以及震前的实际观测资料均表明,在应力作用 下地电阻率会呈现出与主压应力方位有关的异常变化(Brace et al,1968;张金铸等,1983;赵 玉林等,1983;钱复业等,1998;Jouniaux et al,2006;杜学彬等,2007;解滔等,2020)。

为有效提升 2022 年冬奥会举办期间及今后华北北部地区的震情监视能力,中国地震局于 2018 年开始实施了冬奥会晋冀蒙交界地区监测能力提升工程,在该区域内 9 个地电阻率 台站原有测区内增加小极距井下观测,其中通州台于 2019 年 11 月完成建设,并于 2020 年 投入实际观测。井下地电阻率观测数据的背景变化形态和幅度显著区别于地表观测,地震 前异常的分析方法和判别依据目前还处于探索阶段。例如:天水台井下观测在 2013 年芦山

[项目类别] 冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目、地震科技星火计划青年项目(XH19054Y)共同资助

[作者简介] 解滔,男,1986年生,副研究员,主要从事地震电磁学方面的研究。E-mail:xtaolake@163.com

CMYK

<sup>[</sup>收稿日期] 2020-07-15; [修定日期] 2020-08-04

36卷

*M*<sub>s</sub>7.0 地震和岷县-漳县 *M*<sub>s</sub>6.6 地震前均出现高频扰动现象(刘君等,2013;高曙德,2016), 与 50 多年以来基于地表观测的经验认识存在一定的差异。通州台距离此次唐山地震的震 中约 133km,本文将对地震前通州台井下地电阻率观测资料进行初步分析,以期为该区域的 井下观测资料分析提供参考。

#### 1 通州地电阻率井下观测

通州地震台位于北京市通州区西集镇赵庄村西北约1km处,海拔高度15m,距离潮白河约1km,地下潜水位深度约8m。台站处于华北平原北端,大厂凹陷西南边缘,距NNE走向的夏垫断裂2km(图1)。地电阻率测区覆盖层多为第四纪洪积物,厚度沿东北向增大,主要为细砂岩和砂岩与黏土互层。基岩埋深约为377m,岩性为第三纪杂色砾岩(图2)。



图 1 通州台区域地质构造分布

深度/m	柱状图	岩性描述	备注
41.33		灰色砂岩	
94.72	<u>00002000</u>	灰白色黏砂及深灰色黏砂中夹灰 白色细砂,底部为深灰色砾石	
249.20		深灰白色黏砂,土黄色黏砂、灰色 黏土,黏砂与黄色细砂、灰白色粉 砂、浅黄色、黄色黏砂互层	基岩埋深
377.09	******	土黄色黏砂,灰色黏砂、灰色黏土、 黏砂与黄色细砂,灰色釉砂、黄色 中砂互层。底部以中细砂为主	377.09m
		杂色砾岩层	

图 2 通州台钻孔岩性剖面

376

MYK

通州台井下地电阻率观测于2019年10月开始建设,11月全部完成。2020年1月完成 观测系统测试后正式投入观测。水平方向布设EW、N30°E和N30°W3个测道,另布设垂直 方向观测。水平测道和垂直测道供电极距 *AB* = 80m,测量极距*MN* = 20m。水平测道装置埋 深100m,采用等边三角形布局,两两测道共用公用供电电极(图3)。垂直测道中心点深度 100m,最底端供电极埋深140m,最顶端供电电极埋深60m,垂直测道与水平测道最近的电极 之间的距离为50m。所有井孔在电极下放之后,采用黏土进行回填。测量仪器采用 ZD8M 地电阻率仪,每小时进行一次观测。



图 3 通州台井下地电阻率观测布极方式

井下地电阻率观测水平测道的装置系数计算公式为(聂永安等,2010)

$$K = \frac{4\pi}{C_{\rm A} - C_{\rm B}} \tag{1}$$

其中

$$C_{\rm A} = \frac{1}{AM} + \frac{1}{\sqrt{AM^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{\sqrt{AN^2 + 4H_0^2}}$$

$$C_{\rm B} = \frac{1}{BM} + \frac{1}{\sqrt{BM^2 + 4H_0^2}} - \frac{1}{BN} - \frac{1}{\sqrt{BN^2 + 4H_0^2}}$$
(2)

式中,AM、BM、AN、BN分别为电极 A 与 M、B 与 M、A 与 N、B 与 N之间的距离;  $H_0$ 为装置埋深。 垂直测道的装置系数计算公式具有与式(1)相同的形式,其中

$$C_{A} = \frac{1}{AM} + \frac{1}{2H_{A} + AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{2H_{A} + AN}$$

$$C_{B} = \frac{1}{BM} + \frac{1}{2H_{B} - BM} - \frac{1}{BN} - \frac{1}{2H_{B} - BN}$$
(3)

МҮК

377

中	玉	抽	震
		10.0	100

36卷

式中, $H_A$ 为供电电极 A 的埋深, $H_B$ 为供电电极 B 的埋深。

依据式(1)计算得到通州台井下观测水平测道装置系数 K = 468m,垂直测道装置系数  $K = 464m_{\odot}$ 

#### 2 观测数据变化分析

通州台井下地电阻率 2020 年 2 月 15 日~7 月 11 日的观测数据见图 4。NE 测道自 4 月 上旬开始持续性下降,截至震前最大下降幅度为 0.033Ω · m(图 4(a))。NW 测道自 4 月上 旬开始同步出现持续性下降,6 月中旬开始转折回升,最大下降幅度为 0.019Ω · m(图 4 (b))。EW 测道自 2 月开始持续上升,但变化幅度较小,截至震前上升幅度为 0.008Ω · m (图 4(c))。垂直测道 1 月至 5 月初持续性上升,之后维持平稳状态(图 4(d))。



图 4 通州台井下地电阻率观测数据 为便于比较水平方向 3 个测道的变化幅度, 图(a)~(c) 纵坐标采用相同的幅度范围

此次唐山5.1级地震发生在唐山断裂和滦县-乐亭断裂的交汇区域,位于1976年唐山大 地震的余震区内,二者相距约15km。此次地震的震源机制解为走滑型,最大主压应力方向 约为101°(图1)。通州台NE、NW和EW测道与最大主压应力方向之间的夹角分别为70°、 50°和10°。震前NE测道下降幅度最大,NW测道次之,EW测道变化幅度最小,呈现出明显 的各向异性变化。实验室内及野外原地实验结果和多次中强以上地震震前的实际观测数据 表明,应力作用下地电阻率将出现各向异性变化:垂直于最大主应力方向的测道变化幅度最 大,平行方向的测道变化幅度最小或无明显变化,斜交方向的测道变化幅度介于二者之间 (陈大元等,1983;赵玉林等,1983;杜学彬等,2007;陈峰等,2013)。唐山*M*<sub>s</sub>5.1 地震前通州 台井下地电阻率各向异性变化特征与理论模型、实验结果和多次实际震例相吻合,说明其变 化可能与此次地震之间存在力学机制上的联系。此外,NW测道变化形态为下降一转折回 升,地震发生在转折回升阶段,与多次地震前地电阻率的变化特征也相吻合(钱复业等, 1982;赵玉林等,2001;汪志亮等,2002;Du,2011)。

钱复业等(1982)依据 40 多次中强以上地震震前的地电阻率异常变化, 拟合得到异常持续时间和震级之间的经验关系

378

СМҮК

$$T_{\rm s} = 0.5 + 2.5 \lg(T)$$
 (4)

379

式中,T为异常持续时间(天),此次地震前,通州台井下地电阻率变化时间约为90天,依据式(4)计算的震级为M<sub>s</sub>5.4,与实际震级相近。

M

垂直测道4个电极位于同一个井孔内,电极下放之后采用黏土分批次进行回填。在自 身重力的作用下,回填土势必会经历由松散到逐渐压实的过程,原有孔隙中的低阻水被挤 出,井孔内介质的电阻率增加。垂直测道观测数据1月至5月初的持续上升很可能与这一 过程有关。

#### 3 讨论

1976年唐山 M<sub>s</sub>7.8 地震的发震断裂为 NNE 走向的唐山断裂,主震主压应力方位近 EW 向(李钦祖等,1983;杨雅琼等,2016)。原通州西集台位于目前井下观测测区以西约 2km 处,距离 1976年唐山 M<sub>s</sub>7.8 地震震中约 120km,震前 NS 测道出现约 2.5%的下降异常,持续时间约 3 年,EW 测道无明显异常变化(图 5(a)、5(b)),地震发生在 NS 测道转折回升阶段。NS 测道与主压应力方向近于垂直,而 EW 测道与主压应力方向近于平行,2 个方向的异常变化同样符合地震前的各向异性变化规律(赵玉林等,1978)。因此,对于同一震源区 2 次主压应力方位大致相同的地震,通州台地电阻率出现与主压应力方位有关的各向异性变化的重现性。此外,与井下观测同场地还布设了 NS 和 EW 测道的地表观测,供电极距 AB = 1800m,测量极距 MN = 400m。2018年,经过测区的北京大七环连通,对观测造成显著影响,观测数据背景变化范围显著增加(图 5(c)、5(d)),因此,难以分析此次 M<sub>s</sub>5.1 地震前的异常变化。



图 5 通州西集台历史观测数据和通州台地表观测数据 (a)西集台 NS 测道;(b)西集台 EW 测道;(c)通州台地表观测 NS 测道;(d)通州台地表观测 EW 测道

尽管此次唐山 M<sub>s</sub>5.1 地震前通州台井下地电阻率观测数据变化与地震前地电阻率的异常特征相吻合,但仍然存在一些不确定性。地震前新建成的井下观测系统刚刚投入观测,观测数据积累时间较短,还无法获取无震时的正常背景变化范围。此次出现显著变化的 NE 和 NW 测道,其变化幅度较小,分别为 0.033 Ω·m 和 0.019 Ω·m。而在 50 多年的地表大极距观测中,多数地震前地电阻率异常变化幅度超过 1%。异常幅度较小的原因一方面可能是此次地震震级较小,且震中距较远;另一方面,由于通州台采用了近似全空间的井下观测方式, 有效降低了地表浅层介质电阻率因季节性降水和温度发生大幅度变化对观测的影响(解滔

3 期

**MYK** 

36卷

等,2019),地电阻率观测数据变化形态更为平稳。由于采用了小极距的观测方式,深度探测范围较地表大极距方式变浅。通州台井下观测的主体探测范围位于沉积层,为空隙型含水介质,而之前地表大极距观测的探测深度可达到裂隙型的基岩。实验和理论分析表明,岩土介质骨架基质电阻率、孔(裂)隙结构和含水饱和度存在不同,对于相同幅度的孔隙度(裂隙率)变化,介质电阻率相对变化幅度存在数量级上的差异(Yamazaki;1966;赵玉林等,1983; 解滔等,2020)。

发生在我国地电台网附近的多次中强地震,震前震中附近台站的地表大极距观测也记录到幅度低于 1% 的异常变化,如 2019 年 11 月~2020 年 5 月南天山西段发生 8 次 5.0 级及以上地震(震级最大地震为 2020 年 1 月 19 日伽师 *M*<sub>s</sub>6.4 地震),震前柯坪台 NS 测道异常变化幅度为 0.88%(图 6(a));2014 年内蒙古阿左旗 *M*<sub>s</sub>5.8 地震前,石嘴山台 NW 测道的异常变化幅度为 0.15%(图 6(b))。这 9 次地震的相关信息见表 1。鉴于不同台站地下介质电阻率对应力作用下微裂隙变化的响应能力存在较大差异,杜学彬等(2001、2017)提出采用多年背景变化幅度(速率)的均方差作为参照,可对背景动态变化幅度小的观测数据在地震前出现的异常变化进行有效地识别。



图 6 柯坪台和石嘴山台地电阻率异常变化

(a) 柯坪台 NS 测道月均值;(b) 柯坪台 NS 测道去年变后数据;(c) 柯坪台 NS 测道相对变化幅度;
 (d) 石嘴山台 NW 测道月均值;(e) 石嘴山台 NW 测道去年变后数据;(f) 石嘴山台 NW 测道相对变化幅度 图中红色虚线为 2.5 倍均方差

### 4 结论

2020 年 7 月 12 日唐山 M<sub>s</sub>5.1 地震前,通州台井下地电阻率 NE、NW 测道出现了较为显著的变化,EW 测道变化不明显,3 个测道的变化符合中强地震前地电阻率各向异性变化特征。结合 1976 年唐山地震前的异常变化,通州台地电阻率在同一震源区 2 次主压应力方位

380

СМҮК

表 1 柯坪台和石嘴山台异常期间 200km 范围内 5.0 级及以上地震							
序号	台站	震中位置	时间 (年-月-日)	$M_{\rm S}$	东经 /(°)	北纬 /(°)	震中距 /km
1		新疆阿图什	2018-11-04	5.1	77.60	40.24	124
2		新疆乌什	2019-10-27	5.0	78.80	41.21	79
3	柯坪台	新疆伽师	2020-01-18	5.4	77.10	39.83	180
4		新疆伽师	2020-01-19	6.4	77.20	39.83	172
5		新疆阿图什	2020-01-19	5.2	77.40	39.89	154
6		吉尔吉斯斯坦	2020-02-15	5.0	79.30	41.85	150
7		新疆伽师	2020-02-21	5.1	77.40	39.87	155
8		新疆柯坪	2020-05-09	5.2	70.70	40.77	39
9	石嘴山台	内蒙古阿拉善左旗	2015-04-15	5.8	106.30	39.80	65

大致相同的地震发生前,出现与主压应力方位有关的各向异性变化的重现性。但通州台井下观测时间较短,且地震前的变化幅度较小,是否为此次 *M*<sub>s</sub>5.1 地震前的异常变化仍具有一定的不确定性。

**致谢**: "冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目"专家组、实施组和通州地震台工作人员为井下地电阻率 观测付出了辛勤的工作,审稿专家提出了中肯的修改建议,在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献

陈大元,陈峰,王丽华,1983. 单轴压力下岩石电阻率的研究:电阻率的各向异性. 地球物理学报,26(增刊 I):783~792. 陈峰,马麦宁,安金珍,2013. 承压介质电阻率变化的方向性与主应力的关系. 地震学报,35(1):84~93. 杜学彬,李宁,叶青,等,2007. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. 地球物理学报,50(6):1802~1810. 杜学彬,阮爱国,范世宏,等,2001.强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性.地震学报,23(3):289~297. 杜学彬,孙君嵩,陈军营,2017. 地震预测中的地电阻率数据处理方法. 地震学报,39(4):531~548. 高曙德,2016. 深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨. 地球物理学进展,31(5):2078~2088. 李钦祖,刁桂苓,戴英华,1983. 唐山地震序列的应力释放调整过程. 地球物理学报,26(3):224~236. 刘君,杜学彬,范莹莹,等,2013. 甘肃岷县漳县 Ms6.6 地震前的地电阻率变化. 地震工程学报,35(4):819~826. 聂永安,巴振宁,聂瑶,2010. 深埋电极的地电阻率观测研究. 地震学报,32(1):33~40. 钱复业,赵玉林,于谋明,等,1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学:B 辑,12(9):831~839. 钱复业,卢振业,丁鉴海,1998. 电磁学分析预报方法. 北京:地震出版社. 汪志亮,郑大林,余素荣,2002. 地震地电阻率前兆异常现象. 北京:地震出版社. 解滔, 卢军, 2020. 含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化. 地球物理学报, 63(4): 1675~1694. 解滔,于晨,卢军,2019.开展小极距井下地电阻率观测的可行性分析.中国地震,35(1):14~24. 杨雅琼, 王晓山, 万永革, 等, 2016. 由震源机制解推断唐山地震序列发震断层的分段特征. 地震学报, 38(4):632~643. 张金铸,陆阳泉,1983.不同三轴应力条件下岩石电阻率变化的实验研究.地震学报,5(4):440~445. 赵玉林, 卢军, 张洪魁, 等. 2001. 电测量在中国地震预报中的应用. 地震地质, 23(2):277~285. 赵玉林,钱复业,1978. 唐山7.8级强震前震中周围形变电阻率的下降异常. 地球物理学报,21(3);181~190. 赵玉林,钱复业,杨体成,等,1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报,5(2):217~225. Brace W F, Orange A S, 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. J Geophys Res, **73**(4):1433~1445.

3期

**MYK** 

381

Crampin S, Evans R, Atkins B K, 1984. Earthquake prediction: a new physical basis. Geophys J Int, 76(1):147~156.

Du X B,2011. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. Sci China Earth Sci, 54(1):145~156.

- Jouniaux L, Zamora M, Reuschlé T, 2006. Electrical conductivity evolution of non-saturated carbonate rocks during deformation up to failure. Geophys J Int, 167(2):1017~1026.
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al, 1975. Two models for earthquake forerunners. Pure Appl Geophys, 113(1):169~181.

Yamazaki Y, 1966. Electrical conductivity of strained rocks. The second paper: further experiments on sedimentary rocks. Bull Earthq Res Inst, 44(4):1553~1570.

## Apparent Resistivity Variations before Tangshan $M_s 5.1$ Earthquake on July 12,2020 Recorded at Tongzhou Station

Xie Tao<sup>1)</sup> Wang Tongli<sup>2)</sup> Xiao Wujun<sup>1)</sup> Hu Yitao<sup>2)</sup> Li Ran<sup>2)</sup> Lu Jun<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, CEA, Beijing 100045, China

2) Beijing Earthquake Agency, CEA, Beijing 100080, China

**Abstract** The apparent resistivity well-observation of Tongzhou station was completed in November 2019, and has been put into practice observation in 2020 after relevant tests have been completed. Before the  $M_s 5.1$  earthquake in Tangshan, Hebei Province on July 12, 2020 the apparent resistivity showed a certain degree of variations as early as in April, in which the NE and NW observations have been decreasing simultaneously, and the NW observation turned upward since mid-June. The EW observation has a certain rise in the same period, with the variation range is about 1/4 of the NE observation. The focal mechanism solution of this earthquake is strike-slip type. The direction of the maximum principal compressive stress (P axis) is 101°. The angle between the P axis and NE, NW and EW observation is 70°, 50° and 10°, respectively. The NE observation dropped the most before the earthquake, followed by the NW observation, whereas the EW observation changed the least, which conforms to the experimental results and the practical observation of that the apparent resistivity anisotropic changes before earthquakes.

Keywords: Tangshan  $M_s 5.1$  earthquake; Apparent resistivity; Tongzhou station; Anisotropic changes

382

СМҮК