

陶志刚,刘春国. 2022. 地下流体井水温数据质量评价指标探讨[J]. 地震研究, 45(2): 340–344, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0025.

Tao Z G, Liu C G. 2022. Discussion on the evaluation indexes of the quality of the temperature data of well water[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 340–344, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0025.

地下流体井水温数据质量评价指标探讨*

陶志刚, 刘春国*

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 针对我国井水温监测现状以及现行的数据质量评价指标存在的主要问题, 提出了干扰时强、动态特征、水温传感器置深合理性和信息反映能力4个新的井水温数据质量评价指标。新的评价指标是对现行评价指标的有效补充, 为制定新的井水温数据质量评价方案提供参考。

关键词: 地下流体; 井水温; 数据质量; 评价指标

中图分类号: P315.723 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)02-0340-05

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0025

0 引言

作为地震前兆异常的高灵敏性测项, 井孔水温观测在地震预报工作中发挥着重要作用, 特别是在短临预报工作中起决定性作用(车用太等, 2005), 因此, 井水温观测数据的真实性非常关键, 其数据质量评价体系也尤为重要。体现数据质量优秀的基本标准是: 观测数据能真实反映地下动态变化; 动态变化背景清晰; 具有记录到地震、构造活动或其它地球物理事件的能力。这也要求数据质量评价指标应能够满足观测数据的真实性、可靠性、连续性或完整性、动态稳定与噪声水平、观测精度等方面的评价需求(刘春国等, 2017)。

随着地下流体台网观测资料评价标准体系逐渐完善, 评价方式逐渐由人工向自动化转变, 在提高观测资料质量方面起到重要作用, 但也存在评价指标体系不够完善, 部分测项自动化程度不高, 不能适应地震行业高速、集约化发展需求的问题。

车用太等(2006)调查了我国345个地震地下流体观测台站, 发现这些台站存在着不同程度的环境干扰。据邱鹏成等(2010)的统计, 2008年四川汶川8.0级地震震中周围800 km范围内的216个水温观测井中, 记录到同震变化的井点有132个, 占61%。2010年青海玉树7.1级地震发生时, 记录到同震变化的井水温观测点有10个。2013年四川芦山7.1级地震发生时, 记录到同震变化的水温观测井点有10个(张彬等, 2013)。全国能够记录到水温潮汐变化信息的井点有32个(鱼金子等, 2012)。由此可见, 大部分观测井都会受到不同程度的环境干扰, 每口井水温观测数据记录地球物理信息的能力也各不相同。此外, 传感器置深合理性也是水温观测很重要的影响因素。张慧等(2013)从井下153 m、336 m、510 m 3处不同传感器置深对海口ZK26井水温的微动态变化进行对比研究, 证明同一口井不同传感器置深对固体潮效应、同震响应、震后效应的记录能力差别较大。陶志刚和刘春国(2021)通过对非自流井水温固体潮的分析, 认为水温记录固体潮效应与水温传感器的投放位置有很大关系。而目

* 收稿日期: 2022-02-23.

基金项目: 中国地震局专项(地下流体水温同震响应分析与数据质量评价应用)资助.

第一作者简介: 陶志刚(1986-), 工程师, 主要从事地震地下流体监测工作. E-mail: 464788781@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 刘春国(1968-), 研究员, 主要从事地震地下流体研究工作. E-mail: liuchguo@126.com.

前的井水温数据质量评价指标还是基于数据完整性、动态稳定性、数据内在质量和日常检查4部分,评价指标未能充分体现出数据受干扰程度、记录的有用信息、传感器置深合理性等方面的作用。针对井水温监测现状以及目前现行评价指标存在的问题,应该重新建立井水温数据质量评价指标体系,更加科学合理地评估井水温观测数据质量。地下流体地温观测网包括井水温、泉水温和地温观测,本文所讨论的主要是井水温观测数据的评价指标,旨在为制定新的井水温数据质量评价方案提供参考。

1 井水温监测现状

地下流体井水温观测指的是监测井孔中某一深度处的井水温度随时间的变化,目前纳入国家地下流体台网管理的井水温测点约有445个,分布在全国30个省、市和自治区。观测仪器主要为SZW-1、SZW-1A、SZW-2、ZKGD3000NT、TDT-56等测温仪,已全部实现数字化观测,采样率为1次/min,观测精度优于0.05℃,分辨力为0.0001℃,短期漂移稳定性小于0.001℃/月,仪器指标和性能明显提升。与流体其它测项的观测数据相比,水温数据变化幅度相对较小,动态变化比较稳定。水温的正常动态变化类型分为上升型、下降型、平稳型和起伏型4大类。多年监测结果表明,从井水温观测的时间序列曲线中可以识别出地震前兆异常、同震响应、震后效应、构造运动、固体潮效应等地球物理信息。

2 现行评价指标

目前,地下流体观测数据质量评价方案参照的是2015年修订的《地下流体学科观测资料质量评比办法》^①。井水温观测数据的评价指标主要有数据完整率、动态稳定性、数据内在质量和日常工作检查4部分。

(1) 数据完整率。数据完整率是在整点值的基础上进行计算,是有效数据个数与仪器应产出数据个数的比值。观测数据是地震监测事业的基础,数据完整率是质量评价中最为重要的指标,

完整率越高,说明仪器产出的有效数据越多,因此分值权重占比最高。

(2) 动态稳定性。采用观测数据消除趋势后的标准差 σ 作为衡量标准。基本思路是用一阶差分或移动平均方法对数据进行去趋势化处理,用标准差数值作为评价数据背景噪声的水平。标准差越大,说明数据的离散程度越大、背景噪声越大。

(3) 数据内在质量。采用消除趋势后的超差个数来衡量内在质量。根据超过3倍标准差 σ 的次数评定,超差个数越多,说明数据突跳、阶变越多,数据质量越差。

(4) 日常工作检查。查看观测数据是否进行正确的预处理操作,数据发生明显变化后是否有对应的观测日志记录,数据跟踪分析记录是否准确。日常工作检查主要是对台站观测运维方面的评价。

在现行的地下流体观测质量评比办法中,井孔水温数据质量主要采用观测曲线动态稳定性和超过3倍标准差的个数2个指标进行评价,这2个指标只反映了水温观测数据变化序列的背景噪声水平和离散程度,不够全面。例如少数观测井受环境干扰比较显著,水温传感器因放置在一个水或热交换缓慢的井孔部位,或水温传感器被井底淤泥掩埋,全年动态数据稳定,这种情况的井水温观测数据在质量评价中往往得到很高的分数;而个别井水温观测动态背景变化较大,且具有很强的映震能力的测点,在评比中得分却相对较低。目前,现有评价指标不完备,评价结果不能完全反应出井水温数据质量的真实状态,数据质量评价还依靠于评价人员自身的信息储备来辅助判断。

3 新评价指标

地震地下流体台网数据质量监控从年、月、周3个时间尺度进行(陶志刚等,2021),主要目的是减少“盲”数据的比例,提高观测数据的应用,更好地服务于地震监测预报。观测人员根据评价结果寻找影响观测数据质量的根源和问题所在,排除影响因素,提升观测数据的质量。

^① 国家地下流体台网中心. 2015. 地下流体学科观测资料质量评比办法.

地下流体监测要求观测仪器能够产出连续、稳定、可靠的观测数据。因此,在对数据进行质量评价前,应首先查看仪器配置是否合理,水温传感器是否放置在监测效能最好的位置上,其次是要看观测数据中反映出的地球物理信息,这两个指标决定了产出数据的可靠性;数据的完整率是另一个非常重要的指标,它决定了数据的连续

性;而数据的受干扰程度以及动态背景特征这两个指标决定了数据的稳定性。依据上述思路,结合监测预报人员的需求,本文在现行的《地下流体学科观测资料质量评比办法》的基础上提出新的井水温评价指标,包括干扰时强、观测曲线动态特征、信息反映能力、传感器置深合理性 4 个指标,见表 1。

表 1 井水温数据质量新评价指标提出依据

Tab. 1 Basis for new evaluation indexes of the quality of the temperature data of well water

衡量标准	数据质量评价方面	评价指标
连续性	仪器是否能够连续产出观测数据	数据完整率
稳定性	数据受干扰的程度	干扰时强、干扰原因说明
	正常动态变化背景是否清晰	观测曲线动态特征 (均方差和超差个数)
可靠性	具有记录到地震、构造活动或其它地球物理事件的能力	信息反映能力 (固体潮、前兆异常、同震响应)
	真实反映井下地温场的变化	传感器置深合理性 (井孔地温梯度、背景噪声)

(1) 干扰时强。地下流体监测过程中,干扰因素是无法避免的。如果地震前兆异常与干扰因素同时作用在数据上,是很难区分开的,因此干扰因素评价非常重要。本文讨论的干扰因素是指所有影响观测数据质量的因素,包括人为干扰、观测系统干扰、自然环境干扰、场地环境干扰 4 大类。干扰因素对数据的影响不仅与数据变化幅度有关,同时与干扰的时间长短有关。例如,长期抽水干扰,虽然每次干扰幅度相对较小,但是每天都出现,长此以往,会严重影响数据使用。仪器校测干扰可能会引起数据发生大幅度变化,但是对数据作用的时间很短,预处理后不会影响观测数据的正常使用。此外,数据发生异常变化是否有对应的变化原因说明,也会影响数据的使用。因此,评价干扰因素时需要考虑数据变化幅度、作用时间和干扰数据说明 3 个方面的因素。

本文根据数据的干扰幅度和干扰时间两个因素,提出了干扰时强评价指标,用于全面衡量干扰因素对数据的影响程度。干扰时强是一个无量纲指标,是数据干扰程度与干扰时长的乘积,它将数据的受干扰程度进行了精确量化计算。干扰度的概念是由车用太等(2005)提出的,是各类干扰引起的地下流体各测项动态的相对异常程度。干扰度的计算参数如图 1 所示。

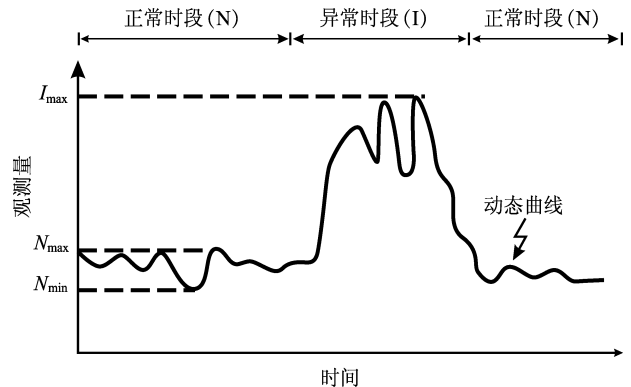


图 1 干扰度计算参数示意图 (据车用太等, 2005)

Fig. 1 Sketch of parameters for interference level calculation (according to Che *et al*, 2005)

干扰度为:

$$ID_{\max} = \frac{I_{\max} - N_{\max}}{N_{\max} - N_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

干扰时长 T 为数据异常变化的起止时间, 单位 h, 精确到小数点后一位。

干扰时强为:

$$ID_T = ID_{\max} \times T \quad (2)$$

干扰时强阈值划分: 计算每个水温测点的干扰时强数值, 并进行累计求和。根据干扰时强的数值可以将观测数据划分为严重干扰、中等干扰和轻微

干扰 3 种类型，分别对应为观测数据不可用、基本可用和可用 3 类，见表 2。

表 2 干扰程度划分表

Tab. 2 Division of interference degrees

干扰类型	观测数据可用性	干扰时强阈值
轻微	可用	$0 < ID_T < n$
中等	基本可用	$n < ID_T < m$
严重	不可用	$m < ID_T$

按照干扰时强计算方法，对流体台网近 5 年总结的井水温观测数据可用性（数据观测可用、基本可用和不可用）进行计算，分别求出干扰时强所对应的 3 类阈值范围，即 n 、 m 数值，然后进行划分。

干扰原因说明是指数据异常变化的“使用说明”，每一段干扰数据都应该有对应的干扰原因说明。评定标准为每一段干扰数据是否有对应的观测日志和跟踪分析事件记录（二者有其一即可），记录的信息包括：数据变化幅度、变化过程、干扰因素、干扰过程、强度、周期等。另外，对于已知原因造成的压制动态曲线变化的干扰数据应进行预处理删除。

（2）观测曲线动态特征。地震监测的目的是观测地震前兆异常，地震前兆异常指地震孕育与发生阶段表现出的、与无地震活动时段正常动态有显著差异的变化。常见的水温前兆异常有两类：一类是震前 1~2 a 出现的中期异常，表现为变化速率与变化方向的转折；另一类是震前几个月到几天的短临时间尺度上出现的阶变、脉冲等异常形态（车用太等，2007）。因此，井水温观测数据正常动态的基本特征应具有清晰的变化规律或稳定的变化速率，这样才有可能识别出具有上述特征的地震前兆异常。反之，在正常时段的无规律、趋势变化速率不稳定的动态中或具有阶变、脉冲、起伏型的动态中，是无法识别出地震中短期前兆异常的。因此，根据监测预报目的，将动态特征作为评价指标之一，动态特征可通过消除趋势后计算均方差和超差个数两个方面进行评定。

（3）信息反映能力。从观测数据中提取与地震孕育和发生相关的信息，是地震监测预报的主要任务。井水温记录的有科学研究意义的地球物

理信息主要包括地震前兆异常、同震效应、震后效应和固体潮效应。信息反映能力指标能在一定程度上反映出水温测点对应力-应变的灵敏性。固体潮效应属于中、低频段地球物理信号，同震效应是高频地球物理信号。能监测到低频和高频的地球物理信息，说明观测井水温观测的频带较宽，监测效能好。地震前兆异常、同震响应和震后效应可以根据震后总结进行判定，能够记录到固体潮效应的水温测点相对较少，可通过调和分析方法计算固体潮 M_2 波观测精度进行判定。

（4）传感器置深合理性。井水温观测是井孔中某一深度处的水温动态变化，不同观测位置的监测效能是不一样的。评价传感器置深合理性宜参考《地震地下流体观测方法井水和泉水温度观测》（DB/T 49—2012）中的水温探头位置安装技术要求，从井孔地温梯度和数据变化背景噪声两个方面进行评价。地温梯度较大，可以明显记录到由深部物质上涌、深层热水上升或不同层冷水混合等因素引起的井水温变化；背景噪声较小，可以清晰地识别出数据的异常变化特征，避免地震前兆异常、同震响应、固体潮效应等有用的地球物理信息被背景噪声淹没。因此，评价传感器置深合理性，主要依据台站是否参考了观测井温度梯度测量结果和不同深度段的观测数据背景噪声水平这两个因素。

4 新评价指标的意义

新评价指标是对现行评价指标的有效补充，主要体现在数据可靠性和稳定性两个方面。水温传感器置深合理性指标是在布设新仪器或更新改造仪器的时候进行评定。信息反映能力可以根据过去 5 年仪器的地球物理信息记录能力进行评定，这两个指标属于长期指标。而观测曲线动态特征和干扰时强是动态指标，以月尺度评价即可。井水温数据质量评价可以结合数据完整性、动态特征、干扰时强、传感器置深合理性和信息反映能力等指标，根据不同权重进行赋值，从而全面评价观测数据的连续性、稳定性和可靠性。

地下流体数据质量评价应从数据质量和观测运维两个维度进行。对于数据使用人员来说，比

较看重数据的内在质量评价结果,即数据的可靠性和稳定性,可用数据的动态特征和干扰时强等指标来评价;而监测人员看重的是观测运维方面的评价结果。台站一线监测人员是否按照国家地下流体台网的要求进行数据跟踪分析、数据预处理、观测日志填写、仪器定期检查、标定等,要用数据连续率、数据变化说明、传感器置深合理性、干扰时强等指标来评价。因此,新的评价指标是从监测和预报需求的角度提出的,也是加强监测预报紧密结合的体现。

5 结论

井水温观测每天产出大量的观测数据,完善的数据质量评价方案不仅能提高数据的质量,还可以提高数据的使用程度,从而提升水温测项在监测预报中的地位。本文根据当前井水温评价存在的主要问题以及数据质量的制约因素,提出了干扰时强、动态特征、传感器置深合理性和信息反映能力4个新的评价指标,新评价指标是对现有评价方案的补充,新、旧评价指标的有效结合可以形成一套更加完备的井水温评价方案,为科学、合理评价观测数据提供参考。

本文只是给出了新评价指标的初步评价方法,评估模型还不成熟,尚不能应用于实际的评价工

作中,今后还需要通过大量的评价试验与实践研究来不断改进与完善。

参考文献:

- 车用太,刘成龙,鱼金子. 2005. 地下流体观测环境的评估指标——干扰度[J]. 地震, 25(3): 63–68.
- 车用太,鱼金子,刘成龙,等. 2006. 地下流体动态的观测环境干扰影响距离研究[J]. 国际地震动态, (4): 10–16.
- 车用太,鱼金子,刘成龙,等. 2007. 京津冀地区地下流体数字化观测数据完整率及其地震前兆监测有效性的调查与分析[J]. 国际地震动态, (4): 20–24.
- 刘春国,李正媛,吕品姬,等. 2017. 数字化地震前兆台网观测数据质量评价方法[J]. 中国地震, 33(1): 112–121.
- 邱鹏成,王永刚,杨广华,等. 2010. 汶川8.0级地震前后表层水温的异常变化研究[J]. 西北地震学报, 32(4): 367–375.
- 陶志刚,樊春燕,樊俊屹,等. 2021. 地震地下流体台网日常质量监控现状分析[J]. 地震地磁观测与研究, 42(1): 105–112.
- 陶志刚,刘春国. 2021. 非自流井水温传感器置深对固体潮体应变响应的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 42(3): 208–213.
- 鱼金子,车用太,何案华. 2012. 井水温度动态的复杂性及其机制问题讨论[J]. 国际地震动态, (3): 273–274.
- 张彬,刘耀炜,杨选辉. 2013. 中国大陆井水温对汶川8.0级、玉树7.1级、芦山7.0级和岷县6.6级地震响应特征的对比研究[J]. 地震工程学报, 35(3): 536–541.
- 张慧,顾申义,李志雄,等. 2013. 单井多层位水温微动态初步研究[J]. 地震, 33(1): 102–108.
- DB/T 49—2012,地震地下流体观测方法:井水和泉水温度观测[S].

Discussion on the Evaluation Indexes of the Quality of the Temperature Data of Well Water

TAO Zhigang, LIU Chunguo

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

In this paper we firstly analyze the current situation of the well water temperature monitoring in China and the existing problems of the quality of the temperature data of well water, then we propose four new evaluation indexes: duration and amplitude of interference, dynamic characteristics of the well water temperature, placing depth of the water temperature sensor, ability of the well water temperature to reflect precursory information. The new evaluation indexes are an supplement to the current evaluation indexes and will help formulate an evaluation criterion for the quality of the temperature data of well water.

Keywords: underground fluid; temperature of well water; data quality; evaluation indexes