

车用太, 鱼金子, 刘成龙, 徐桂明, 郑益铭. 2011. 判别地下水异常的干扰性与前兆性的原则及其应用实例. 地震学报, 33(6): 800-808.

Che Yongtai, Yu Jinzi, Liu Chenglong, Xu Guiming, Zheng Yiming. 2011. Principles on distinguishing interference from seismic precursor of underground water variation and its application. *Acta Seismologica Sinica*, 33(6): 800-808.

判别地下水异常的干扰性与前兆性的原则及其应用实例*

车用太¹⁾ 鱼金子¹⁾ 刘成龙¹⁾ 徐桂明²⁾ 郑益铭³⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国南京 210014 江苏省地震局

3) 中国四川邛崃 611530 四川省邛崃市防震减灾局

摘要 提出了地下水干扰异常识别与排除的4个“相关性”原则,即成因上的相关性、空间上的相关性、时间上的相关性与强度上的相关性;提出了地下水前兆异常确认的4个判据,即首先是非干扰性异常,其次是有震例与理论模式的支持,再次是已有前兆映震理论或模式的支持,最后是有其它测项与学科异常的配套.还介绍了利用上述原则与判据排除江苏省宿迁市大面积地下水干扰异常,与确认四川省邛崃川22井2007年12月—2008年4月断流为汶川地震的前兆性异常的实践检验实例.

关键词 地下水 干扰异常 地震前兆异常

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.010 中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A

Principles on distinguishing interference from seismic precursor of underground water variation and its application

Che Yongtai¹⁾ Yu Jinzi¹⁾ Liu Chenglong¹⁾ Xu Guiming²⁾ Zheng Yiming³⁾

1) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2) *Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China*

3) *Administration of Protecting Against and Mitigating Earthquake Disasters of Qionglai City Sichuan Province, Qionglai 611530, China*

Abstract: In this paper four principles to follow in distinguishing interference from observations of underground water variation are presented. The principles are the correlation of contributing factors, the correlation of spatial variations, the correlation of temporal variations and the correlation of signal intensities. Besides, three criteria for identifying precursory anomalies of underground water variation are also proposed. Firstly the anomalies must have been distinguished from interferences; then there must be observations and theoretical model supporting the correlation between observed anomalies and earthquakes;

* 基金项目 中国地震局老专家科研基金(201148)和国家自然科学基金(40930637)项目资助.

收稿日期 2011-04-24 收到初稿, 2011-09-21 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: che@ies.ac.cn

finally there must be corresponding observed anomalies from other scientific observations. Two inspection cases in using above-mentioned principles and criteria are presented. The first case is the distinguishing and removing of the interference anomalies of underground water appeared in Suqian city, Jiangsu province. The second is the conformation of a precursory anomaly that the underground water flow in the Chuan 22 well, in Qionglai city of Sichuan, had shut down during December 2007 to April 2008 before the Wenchuan earthquake.

Key words: underground water; interference anomaly; earthquake precursory anomaly

引言

回顾我国 40 多年地震监测预测的历史, 虽然经历过许多预测失败的实践, 但毕竟还不同程度地成功预测过 20 多次破坏性地震(岳明生, 2005), 还在不少的地震前曾有所觉察(万迪堃等, 1993; 车用太, 鱼金子, 2006). 这些成功与觉察都在防震减灾事业中发挥了积极的作用. 然而, 近几年地震预测人员越来越感到地震预测的困难, 甚至怀疑现有的地震前兆监测台网能不能承担预测任务. 现有的地震前兆台网, 的确存在环境干扰恶化与观测技术不完善等新的问题, 其地震前兆监测能力没有发生根本性的变化, 问题在于干扰多了, 识别与提取地震前兆信息变得更加困难了. 因此, 当前我国地震监测预报实践面临的突出问题之一, 是如何更加有效地识别与排除干扰异常和提取与确认前兆异常信息的问题. 本文从我国地震预测成功的实例与预测失败的教训出发, 结合笔者的实践经验, 提出如何识别与排除地下水干扰异常的原则, 如何在震前(或震后)对地下水异常的前兆性质进行确认的判据.

1 地下水异常

地下水的基本特性是上地壳中广泛存在, 具有流动性, 对上地壳中发生的各种地壳动力作用的响应具有灵敏性, 其动态对地震活动与构造活动的响应十分灵敏, 同时又受多种自然环境变化的影响也较大. 因此, 提高利用地下水动态预测地震的效能, 必须不断强化地下水异常调查与落实的工作力度, 力争事前能够识别与排除各种干扰异常, 并对其前兆异常性质作出肯定的确认. 这项工作一贯受到重视, 今天更具现实和迫切意义.

地下水动态在震前异常的理论事实, 已被国内外学者广泛报道(Киссин, 1982; 胁田宏, 1984; 汪成民等, 1988; Roeloffs, 1998; 车用太, 鱼金子, 2006, Wang, Manga, 2010). 地下水动态在地震预测中的作用与有效性也被一些学者所介绍(万迪堃等, 1993; 车用太, 鱼金子, 2006; 刘耀炜等, 2010). 地下水动态受多种因素的干扰问题, 同样被地下水动态监测与预测人员所关注, 并开展不断地研究, 力图建立有效的识别与排除干扰的理论方法(贾化周等, 1985; 中国地震局监测预报司, 2000; 车用太等, 2004). 几十年的监测结果表明, 及时识别与排除干扰异常, 震前确认地下水异常的前兆性, 对于正确把握震情与成功识别前兆异常和预测至关重要. 同时也表明, 对地下水动态的干扰因素较多, 但最为常见与最为严重的是大气降雨的渗入补给与地下水开采的干扰(谷元珠等, 2001; 车用太等, 2004).

大气降雨的渗入影响, 对观测层埋深仅几百米(汪成民, 1989)的观测井而言, 是不可

避免的. 据不完全统计(车用太等, 2004), 全国地震地下水观测网中, 约有 45% 以上的观测井不同程度地受大气降水渗入补给的影响, 其中部分井受到的影响十分严重, 已成干扰. 由于大气降水自身的不规律性, 即降水的范围、降水的速率、降水的强度等随时间与空间的变化不定, 同时也由于影响大气降水渗入补给含水层的环境条件不同, 如包气带厚度不等、包气带含水状态不同等, 因此不同时间段的降水, 即使是同一时间段的降水对同一口井地下水动态的干扰特征可能就不一样. 这样的情况, 使大气降水干扰的识别与排除变得十分困难.

地下水作为重要的生产与生活资源, 随着各地经济与社会飞速发展, 开采的地区越来越多, 井的数量越来越多, 井的深度越来越大, 开采的强度越来越大, 地下水开采对地震地下水动态的干扰也变得越来越普遍与越来越严重. 据不完全统计(汪成民, 1989), 我国地震地下水动态观测网中受开采干扰的井数达 20% 以上, 而且近几年有不断增多的趋势, 不断干扰着地震前兆异常信息的判别, 已成为利用地下水异常预测地震的“大敌”.

面对着众多的干扰异常, 如何对出现的干扰异常进行识别与排除, 如何从复杂的干扰背景下提取出地震前兆异常, 无疑是当前提高地下水动态监测与地震预测效能的十分突出的问题.

2 识别地下水干扰异常的原则

地下水动态干扰异常识别原则是把握 4 个“相关性”, 即成因上的相关性, 空间上的相关性, 时间上的相关性与强度上的相关性.

成因上的相关性, 指出现的异常动态与其可能的影响因素之间存在成因上的关联. 例如, 同层开采井的干扰一定表现为观测井水位的下降, 停止开采后井水位一定会回升. 又如, 大气降水的渗入补给, 一定表现为观测井水位的上升, 停止渗入补给后井水位一定会下降等, 异常动态与干扰(影响)因素之间一定存在成因上的相关性.

空间上的相关性, 指干扰源与观测井之间的空间关系, 一般是在一定范围内出现的干扰源才对观测井产生干扰. 以地下水开采干扰为例, 在第四系松散砂砾石孔隙含水层地区, 粉砂孔隙水层中最大干扰距离为 1 km, 细砂层中为 1.5 km, 中砂层中为 2.5 km, 粗砂层中为 3 km, 砾石层中为 6 km; 在基岩裂隙含水层或碳酸盐岩岩溶含水层, 水文地质条件简单(构造为单斜或岩层平缓, 岩性单一, 裂隙或岩溶不发育)地区, 最大干扰距离为 1 km, 水文地质条件中等复杂(构造上为褶皱断裂区, 岩性不单一, 裂隙或岩溶较发育)地区为 5 km, 水文地质条件复杂(大型断裂破碎带或地下暗河发育)地区为 10 km(中国国家标准化管理委员会, 2004). 若是干扰源超过上述规定距离时, 一般对观测井不会产生干扰.

时间上的相关性, 指干扰出现的时段与干扰源作用的时段的关系, 一般是二者时间段一致或干扰出现时段略有滞后. 关于干扰源作用时段与干扰出现时间之间滞后的时间长度, 在不同水文地质条件下不同. 以大气降雨干扰为例, 在山前降雨渗入补给区二者间的滞后时间很小, 往往是同步, 随着观测井距降雨渗入补给区距离的增大, 滞后时间越来越长; 含水层的渗透性或导水性越强时间滞后时间越短等; 滞后时间短时仅几小时至十几小时, 滞后时间长时可达几天甚至几个月.

强度上的相关性, 指干扰源的作用强度与干扰的幅(强)度间的关系, 一般干扰作用越强, 干扰幅度越大, 特别是干扰的幅度随干扰作用强度随时间的变化而变化. 以地下水开

采干扰为例, 开采量大时水位下降幅度大, 开采量变小时产生的水位下降幅度也小, 往往二者间表现出较好的定量关系。

地下水动态的异常变化, 符合上述 4 个方面的相关性, 可判定为干扰异常, 不能再视为地震前兆异常。即使是时间段上与后来发生的地震有非常好的对应关系也不宜视为地震前兆异常。

3 确认地下水前兆异常的判据

地震发生之前, 地下水前兆异常的确认, 是非常困难的。即使是在地震发生之后也往往很难给出科学的确认结果。然而, 地震监测预测实践中, 这又是一个必须要面对的问题。根据笔者的经验, 可以从以下 4 个方面进行判定。

第一, 视为地震前兆的异常, 必须是经过干扰的识别与排除, 确认不是干扰的异常。在我国地震预测界, 长期以来对此较为重视。然而近些年来, 特别是引入计算机预测地震的各种方法之后, 部分分析预测人员常把各种数学处理方法识别出的异常简单地视为是地震前兆异常。这种作法, 影响着地震预测效能的提高。不管是定性的分析方法, 还是多么好的定量分析方法, 识别出的异常中, 一定会有部分, 甚至相当多的异常是非地震因素造成的, 因此对识别出的任何异常必须要经过干扰异常的识别与排除, 确实实地认定不是非地震因素干扰的异常, 才可视为地震前兆异常。这是确认地震前兆异常的必要条件。

第二, 视为地震前兆的地下水异常, 要有国内外震例的普遍支持, 特别是经过地震预测实践检验过的典型震例的支持。我国已积累了数以百计的震例(万迪堃等, 1993; 车用太, 鱼金子, 2006), 其中有近千个的地下水异常, 但多数是震后总结出来的。由于地震发生之后, 对地震前兆异常的识别变得相对容易, 特别是从异常与地震的对应关系上确认的, 其信度显得不够, 因此只能参考。然而, 其中有些地下水异常是震前被确认为地震前兆异常的, 而且跟踪其发展过程并用于震情判定上, 这种异常作为地震前兆异常的信度较高, 因此可作为较为可信的前兆异常。

第三, 视为地震前兆的地下水异常, 最好有其它测项或其它学科的异常相匹配, 甚至有中小地震活动性异常配套。这一点虽不是确认地下水前兆异常的必要条件, 但是重要的充分条件。我国现有的震例中, 这方面的研究尚较薄弱。以观测区或观测层岩体变形与破坏为前兆异常生成机理的绝大多数前兆异常, 理应各测项之间表现出密切的相关性、同步性与协调性, 但事实往往并非完全如此。其中的原因是非常复杂的, 或许我们目前所确认的前兆异常并非客观的、真实的、可靠的, 也许是各测项与各学科前兆观测的精度与频带等不同造成的。然而不管怎样, 当多测项与多学科异常同步出现与协调发展时, 这种异常视为前兆异常的可靠性增大。

第四, 视为前兆异常的地下水异常, 最好有一定的前兆理论或模式的支持。目前较为流行的理论或模式可分为两大类: 源兆理论与场兆理论。主要的源兆理论是扩容扩散(DD)模式与裂隙串通(IPE)模式(Mjachkin *et al.*, 1975; Scholz, 1990)。主要的场兆理论是多点应力集中模式、红肿理论、预位移理论、带动模式与块动模式及构造活动模式等(马宗晋, 1980; 付承义, 1976; 郭增建, 秦保燕, 1979)。源兆理论偏重于描述地震孕育与发生过程中震中及其邻近地区地下水异常发生与发展过程的特征。场兆理论主要是描述同地震孕育与发生过程中震中及外围广大范围内协调出现的异常井的空间展布与时空演化特征。如果

某一口井地下水异常的演化过程符合某种源兆理论,或多口地下水异常井的空间展布及其演化特征符合某种场兆理论时,这类异常的科学性增强,可确认为前兆异常。

上述 4 种判据中,在目前的科学水平下,确认地下水前兆异常的第一条是必要条件,其余 3 条是充分条件。在预测实践中,满足上述 4 个判据中的第一及其它 1 条以上的判据,即可判定为地震前兆异常,并可用于地震三要素的预测。

4 地下水异常性质的判定实例

4.1 干扰异常的识别实例

2009 年 4 月上旬在江苏省宿迁市宿城区仓集镇李官庄村与河西村出现大面积地下水异常,主要表现是 4 月 1 日起 400 多口民用井抽不出水。这不仅给当地村民饮用水变得十分困难,且该异常是在郟庐带南北两段相继发生中强地震的背景下出现在其中南段上的显著异常,引起有关部门的高度重视。

笔者对于这组异常进行了现场调查,其结果如下:

1) 异常井空间分布。在大地构造上,异常井群虽总体上出现在 NE 向郟庐带中南段,但异常井群分布区并不在该断裂带上,分布区的主轴走向也不是 NE 向,而是 NW 向,异常井群分布主要与废黄河古道南岸的透镜状分布的局部粉砂含水层发育区一致(图 1)。

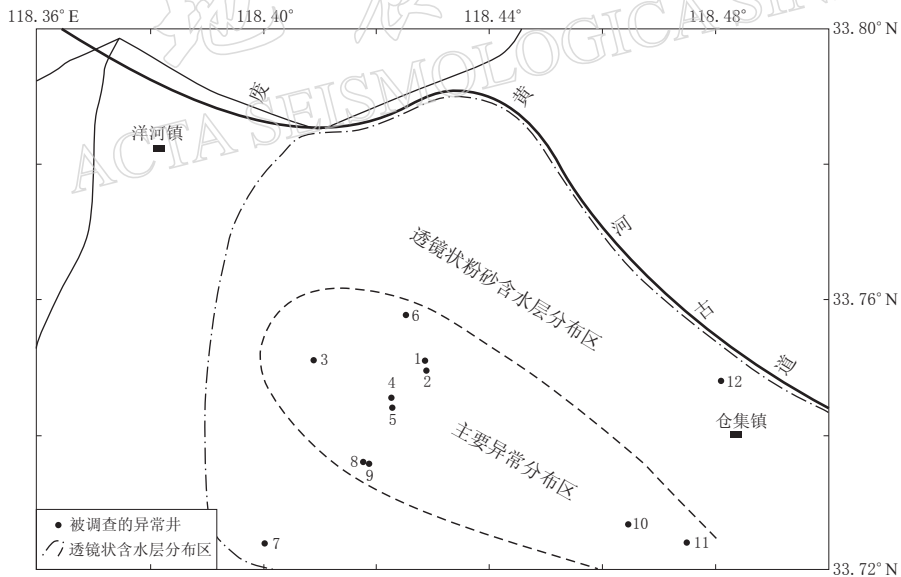


图 1 江苏省宿迁市大面积地下水异常分布特征

Fig. 1 Distribution of underground water anomalies in Suqian city, Jiangsu province

2) 异常井的深度多为 30 m 左右,其抽水层全为透镜状粉砂质含水层,抽水井多建于 2002—2003 年,抽水主要用于村民饮用,每井每日抽水量约为几吨,已开采利用 6—7 年,地下水静储量消耗很大;异常井初建时水位埋深为 6 m 左右,但现今异常井的水位实测结果,埋深在 8.5—10.02 m。

3) 对异常的时空分布特征调查结果表明,处在地势高处的抽水井早在几年前就已抽不出水,但因已全改为自来水供应,故本期异常中并没有显现;本期异常中个别地处低洼

处的抽水井仍可抽出水. 显然, 本期异常只出现在处于地形低洼但不是最低洼的抽水井中.

4) 当地 2008 年 11 月—2009 年 3 月降水量明显偏少, 前 20 年同期降雨量的均值为 172 mm, 而今只有 107 mm. 大气降水的渗入补给量少了 40%.

5) 本次调查结果, 抽取埋深 10 m 左右的浅层含水层地下水的井与抽取埋深 100 m 以下深层含水层地下水的井均无明显异常, 异常只出现在抽取埋深几十米的中层含水层地下水的井中.

由上述调查结果可见, 这组异常是大气降雨渗入补给量严重不足与长期开采导致透镜状含水层中地下水静储量的消耗, 使井水位不断下降, 降至离心泵扬程(一般 8—9 m)之下引起的干扰异常. 其成因上的相关性、空间上的相关性与时间上的相关性都很清楚.

通过上述调查与分析, 排除了该异常是地震前兆异常的可能性.

4.2 前兆异常的确证实例

四川省邛崃川 22 井位于成都凹地的西南端, 井深 176 m, 观测层为白垩系上统夹关组 (K_{2j}) 砂岩孔隙裂隙承压水层. 1977 年 12 月成井, 为自流井, 成井后不久开始观测动水位. 2004 年 10 月进行数字化观测, 但仪器工作一直不正常, 2007 年 5 月才开始基本正常. 数字化改造之后, 无论自流还是断流情况下, 观测产出值为井口至水位的距离, 即井水位埋深值. 自观测以来, 井水一直自流, 但 2007 年 12 月 17 日开始时断时流, 12 月 29 日彻底断流, 直到 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震发生时复流, 至今仍在自流(图 2).

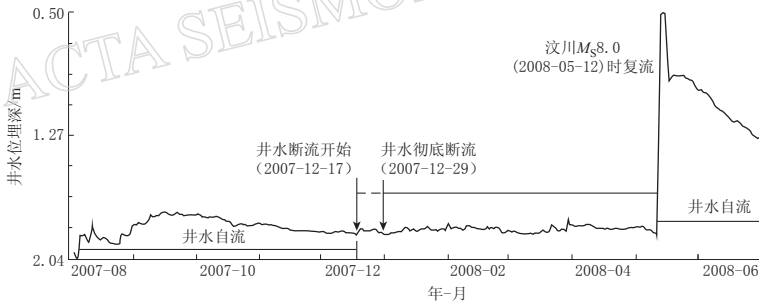


图 2 邛崃川 22 井 2007 年 8 月—2008 年 6 月井水位日值动态曲线

Fig. 2 Variation of daily observation of water level in Chuan 22 well, Qionglai, from August 2007 to June 2008

自 2007 年 12 月 17 日到 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震发生前表现出的井水断流异常, 地震前被认为是降雨渗入补给减少与邻井开采引起的干扰异常, 地震后也未被有关部门与专家视为地震前兆异常(晏锐, 2009). 为了查明该异常的性质, 笔者于 2010 年 8 月进行了现场调查与研究, 其结果如下:

1) 自 1959 年有降雨观测记录以来, 当地年均降雨量为 1010.5 mm. 2000—2008 年间年均降雨量为 939.3 mm, 各年降雨量值如表 1 所列. 由表 1 可见, 9 年中有 5 年雨量低于 9 年均值. 降雨量最低年份是 2006 年, 2002—2004 年连续 3 年降雨量低于多年均值, 2007 年降雨量也偏低. 似乎把井水断流异常归因于降雨渗入补给量引起的干扰异常有一定依据. 然而深入分析结果表明, 井水断流异常出现在 2007 年 12 月, 异常出现的时间与最干旱年份和连续多年连续干旱年份都不相符, 异常出现时间与干扰源作用时间不相关, 因此

表 1 邛崃地区 2000—2008 年降雨量值
Table1 Precipitation in Qionglai region from 2000 to 2008

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	9 年 均值
降雨量 /mm	941.1	957.3	876.8	907.8	850.2	1136.9	742.0	835.4	1206.2	939.3

不能把井水断流归因于降雨渗入补给不足.

2) 邛崃 10 井(与川 22 井相距 11 km, 井深 149 m, 自流井)和 75 号泉(与川 22 井相距 4 km, 下降泉. 图 3)均为邛崃地区地震地下水动态观测井(泉). 然而, 邛崃 10 井的井水同期并未断流, 水位反而有所上升; 75 号泉的流量同期也并没有明显变化. 说明大气降雨对当地地下水的影响并没有引起井水断流, 甚至极易受大气降雨影响的下降泉的流量都没有产生明显影响.

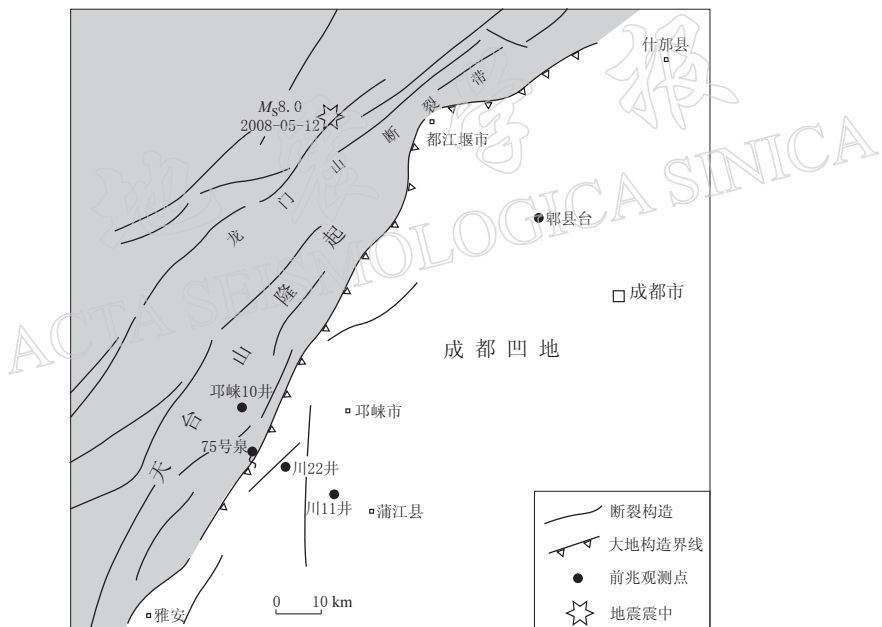


图 3 川 22 井、邛崃 10 井、75 号泉、川 11 井与郫县地震台分布图

Fig. 3 Position of the Chuan 22 well, Qionglai 10 well, No. 75 spring, Chuan 11 well and Pixian seismic station

3) 关于邻井抽水干扰, 更是不存在. 与川 22 井距离约 800 m 处的一口抽水井, 是汶川地震后施工的, 而且至今也没有正式抽水, 因此不可能是引起川 22 井 2007 年井水断流的干扰源.

综上所述, 邛崃川 22 井水断流异常, 虽然在成因上可能与降雨补给相关, 空间上与降雨干扰源的作用区也相关, 但时间上不相关, 强度上也不相关. 特别是汶川 $M_s 8.0$ 地震发生的同时井水变自流, 因此判定是非干扰异常, 认为可视为地震前兆异常.

支持视川 22 井断流为前兆异常的还有如下二条依据: 一是蒲江川 11 井水位下降与郫县台地电阻率的配套异常; 二是 3 个异常在力学含义上表现出一定的一致性. 川 11 井, 位于川 22 井东南约 14 km 处, 同在成都凹地的西南端中(图 3). 该井水位自 2006 年底开始

下降, 2007 年降到自观测以来的最低点, 且在低值上起伏, 直到汶川地震发生时突升(图 4a); 郫县地电阻率也于 2006 年开始偏离多年的平稳基线, 转为持续下降, 直到汶川 $M_S 8.0$ 地震发生后开始回升(图 4b). 无论是川 22 井断流, 还是川 11 井水位下降与郫县台地电阻率下降, 都表现出成都凹地西南端在汶川地震孕育的后期同受拉张的应力作用, 说明同一个构造单元上的 3 个异常相互配套, 而且在力学成因上表现为一致性. 此外, 并不在成都凹地中的邛崃 10 井与 75 号泉同期并没有表现出异常, 也是佐证.

可见, 邛崃川 22 井水断流并非干扰异常, 同时有同测项与其它学科的异常配套, 在力学成因上也有一定的合理性. 因此, 把该异常确认为汶川 $M_S 8.0$ 地震的中短期前兆异常.

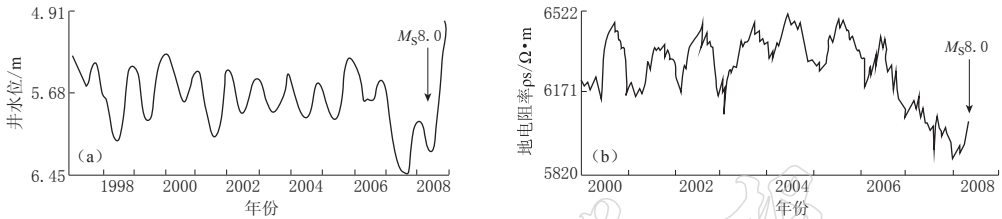


图 4 汶川地震前川 11 井水位(a)与郫县地电阻率(b)下降异常(晏锐, 2009)

Fig. 4 Decrease anomalies of water level in Chuan 11 well (a) and Pixian geoelectrical resistivity (b) before the Wenchuan earthquake

5 讨论与结论

地震预测问题是当今世界的科学难题, 在可见的未来突破这一难题的可能性较小, 但又是国家与人民乃至全人类急需解决的实际问题, 这对地震预测的科学探索者而言是十分棘手与为难的任务. 面对这种局面, 如何更有效地识别与排除干扰异常和提取与确认前兆异常信息具有重要意义. 本文提出了识别干扰异常的 4 项相关性原则, 即出现的异常与干扰源之间存在成因上的相关性, 异常出现的地点与干扰源作用空间上的相关性, 异常出现的时间与干扰的作用时间上的相关性, 以及异常的幅度与干扰源的作用强度的相关性, 为干扰异常排除工作提出了明确的科学思路.

本文同时还提出了确认前兆异常的 4 条判据, 即异常判定为非干扰性异常, 有震例支持, 有其它前兆异常配套, 有合理的前兆映震理论与模式解释. 这些原则与判据, 未必是完全科学的, 但实践证明还是可操作的与有效的, 具有较好的推广应用的前景.

在本项研究中, 特别是在实例检验的现场调查与研究中得到江苏省地震局张智、侯康明、刘建达等与四川省地震局李介成、杨贤和以及邛崃市防震减灾局余平、杜世学等有关同志们的大力支持, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- 车用太, 鱼金子, 等. 2004. 地下流体典型异常的调查与研究[M]. 北京: 气象出版社: 3-40, 74-168.
 车用太, 鱼金子. 2006. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社: 323-339, 361-419.
 付承义. 1976. 地球十讲[M]. 北京: 科学出版社: 133-136.
 郭增建, 秦保燕. 1979. 震源物理[M]. 北京: 地震出版社: 70-92.
 贾化周, 杨玉荣, 等. 1985. 地震地下水动态及其影响因素分析[M]. 北京: 地震出版社: 6-53.

- 刘耀炜, 陆明勇, 付虹, 黄辅琼, 李胜乐. 2010. 地下流体动态信息提取与强震预测技术研究[M]. 北京: 地震出版社: 1-82.
- 马宗晋. 1980. 华北地壳的多(应力集中)点场与地震[J]. 地震地质, 2(1): 39-47.
- 万迪堃, 汪成民, 等. 1993. 地下水动态异常与地震短临预报[M]. 北京: 地震出版社: 1-9, 47-146.
- 汪成民, 车用太, 万迪堃, 等. 1988. 地下水微动态研究[M]. 北京: 地震出版社: 234-240.
- 汪成民(主编). 1989. 中国地震地下水动态观测网[M]. 北京: 地震出版社: 36-37.
- 胁田宏. 1984. 日本地震预报的地下水观测[C]//国家地震局科技监测司编. 大陆地震活动和地震预报国际讨论会论文集. 北京: 地震出版社: 291-298.
- 晏锐. 2009. 地震前兆观测资料分析[C]//中国地震局监测预报司编著. 汶川 8.0 级地震科学研究报告. 北京: 地震出版社: 170-193.
- 岳明生. 2005. 地震预测研究发展战略几点思考[J]. 国际地震动态, (5): 7-21.
- 中国地震局监测预报司编. 2000. 地震前兆异常落实工作指南[M]. 北京: 地震出版社: 72-85.
- 中国国家标准化管理委员会. 2004. 地震台站观测环境技术要求: 地下流体观测台站(GB/T19531.4-2004)[S]. 北京: 中国标准出版社: 55-62.
- Scholz H (著). 1990. 马胜利等(译). 1996. 地震与断层力学[M]. 北京: 地震出版社: 380-385.
- Киссин И Г (著). 1982. 单修政(译). 1986. 地下水与地震[M]. 北京: 地震出版社: 1-157.
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, Dieterich J H. 1975. Two models for earthquake forerunners[J]. *Pure and Applied Geophys*, 113(1/2): 169-181.
- Roeloffs E A. 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield California due to local and distant earthquakes [J]. *J Geophys Res*, 103(B1): 869-889.
- Wang C Y, Manga M. 2010. *Earthquakes and Water*[M]. Springer: 141-160.