

车用太, 鱼金子, 刘成龙, 张卫华, 梅建昌, 李万明. 2010. 水库诱发地震地下水监测网建设的若干问题探讨. 地震学报, 32(2): 203-213.

Che Yongtai, Yu Jinzi, Liu Chenglong, Zhang Weihua, Mei Jianchang, Li Wanming. 2010. A discussion on some problems in groundwater network construction for monitoring reservoir-induced earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 32(2): 203-213.

水库诱发地震地下水监测网 建设的若干问题探讨*

车用太^{1),*} 鱼金子¹⁾ 刘成龙¹⁾ 张卫华²⁾
梅建昌²⁾ 李万明³⁾

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

2) 中国武汉 430071 湖北省地震局

3) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

摘要 根据国内外已发生的水库诱发地震的基本特点, 结合三峡工程诱发地震地下水监测网与金沙江下游水电工程地下水监测网建设的经验及我国地震地下水动态观测网建设与运行中得到的科学认识, 探讨了水库诱发地震的地下水监测井网建设中的布网区及其范围、观测井间距确定、观测井位置选择、观测含水层选择与观测井深度和结构设计等若干技术问题.

关键词 水库诱发地震 地下水监测网

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.02.008

中图分类号: P315.72⁺3

文献标识码: A

A discussion on some problems in groundwater network construction for monitoring reservoir-induced earthquakes

Che Yongtai^{1),*} Yu Jinzi¹⁾ Liu Chenglong¹⁾ Zhang Weihua²⁾
Mei Jianchang²⁾ Li Wanming³⁾

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

2) *Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China*

3) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

Abstract: Based on the characteristics of reservoir-induced earthquakes occurred all over the world, combined with construction experiments of groundwater monitoring network of Three Gorgers project and Jinshajiang lower reaches project for reservoir-induced earthquakes, and the scientific knowledge obtained during and after construction of China Earthquake-Groundwater Monitoring Network, the problems that how to select area and sites of groundwater monitoring network, how to decide the relative distance of wells, how to select observation aquifer and how to design the depth and structure of observation well, are dis-

* 基金项目 地震科学联合基金会老专家专项 2008 年度资助项目.

收稿日期 2009-01-20 收到初稿, 2009-04-13 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: che@ies.ac.cn

cussed in this paper.

Key words: reservoir-induced earthquake; groundwater monitoring network

引言

水库诱发地震指人类在江河上修筑的水库中蓄水引发的地震。这种地震是在特定的地质-水文地质条件下,水库水体荷载与孔隙水压力扩散共同作用下引发的。

近百年来,国内外已有 100 多个水库诱发地震的实例,在我国有十多例(Gupta, 1992; 丁原章等, 1989; 胡毓良, 1994)。其中, $M_s \geq 6.0$ 的有 4 例,即我国的新丰江(1962 年 3 月 19 日, $M_s 6.1$)、赞比亚-津巴布韦边界的 Kariba(1963 年 9 月 23 日, $M_s 6.1$)、希腊的 Kremasta(1965 年 2 月 5 日, $M_s 6.2$)与印度的 Koyna(1967 年 12 月 10 日, $M_s 6.3$); $M_s 5.0$ — 5.9 的有 12 例; $M_s 4.0$ — 4.9 的有 5 例。大多数水库诱发地震的震级小于 $M_s 4.0$ (王儒述, 2007)。

由于水库诱发地震的震源浅,引起的灾害较重, $M_s 4.0$ 地震就有可能造成一定的灾害,因此引起国内外水电工程界与地震界的广泛关注。上世纪 80 年代开始,在已发生与被认为有可能发生破坏性诱发地震的水库区,陆续建立水库诱发地震监测网。水库诱发地震的监测网,一般由测震台网、形变台网与地下水井网组成。我国的水力资源多分布在西南部地区,该区是我国未来水电工程开发的重点地区,将建设一系列高坝大库容的大型水电工程。这个地区又是天然地震活动频繁和活动强度较大的地区。因此在我国建设水库诱发地震的监测网的任务将变得越来越突出。

利用地下水动态监视水库区诱发地震活动的科学思想来自实践。首先,在赞比亚-津巴布韦交界处的卡里巴(Kariba)水库(坝高 128 m,库容 $1750 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1959 年开始迅速蓄水后不久地震活动性增强,1963 年 9 月 23 日发生 $M_s 6.1$ 地震),发现随着水库蓄水与地震活动性增强,沿着跨水库的断裂带上出现温泉与井水自流现象(Snow, 1974)。然后,在美国南卡罗来纳州乔卡西(Joccassee)水库(坝高 107 m,库容 $14.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1974 年 4 月开始蓄水,1975 年 10 月开始出现地震活动,1979 年 8 月 25 日发生 $M 3.7$ 诱发地震)发现某些 $M \geq 2.0$ 地震前水氡与井水位的异常现象,并利用水文异常与地震活动性异常开始了诱发地震的预报研究(Talwani, 1981)。接着,在美国南卡罗来纳州蒙特塞洛(Monticello)水库(坝高 55 m,库容 $55 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1977 年 12 月初开始蓄水,当月月底开始地震活动性增强,1978 年 2 月地震活动达到高潮,最大地震为 $M 2.8$),打了两口深井观测断层带孔隙压力扩散过程,结果也发现了地震活动与孔隙压力异常变化有关(Zoback, Hickman, 1982)。

鉴于上述发现与认识,印度地球物理学家首先于 1997 年开始在 Koyna 与 Warna 两个水库联合建设了世界上第一个以监测水库诱发地震前兆为目的的地下水观测网(Chadha, Pandey, 2003),紧接着我国在长江三峡水库区于 1998 年开始建设了世界上第二个水库诱发地震地下水监测网(车用太等, 2003),并已正常运行 9 年。我国在 2006—2009 年在金沙江下游梯级电站响家坝与溪落渡工程区,又建设了由 7 口井组成的我国第二个水库诱发地震地下水监测网。

本文以我国已建成的两个水库诱发地震地下水监测网为基础,参考国内外已发生的水库诱发地震的特点,结合我国地震地下流体观测网建设的经验与已取得的科学认识,探讨水库诱发地震地下水监测网建设中的若干问题。

1 布网区的选择与布网范围的确定

水库诱发地震地下水监测网的布设,其主要目的是监测水库蓄水引发的破坏性地震前兆异常信息.因此,网的布设区自然要选在水库蓄水可能引发地震活动的范围内.

1.1 布网区的选择

首先是布设在水库蓄水后有可能诱发地震的工程区内.世界上已建坝高 10 m 以上的水库有上万亩,但发生诱发地震的水库仅百多座,只有约 1% 的水库蓄水后发生诱发地震(易立新,车用太,2001);库深大于 97 m 与坝高大于 107 m,库容大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的特大型水库中只有 12% 的水库发生诱发地震(王儒述,2007).因此并不是所有大型水库都需要建网,只有在被认为存在发生破坏性诱发地震($M_s \geq 4.0$)可能的库区才需要布网.

水库区范围一般都很大,但诱发地震并不是库区中到处都可能发生.有可能发生诱发地震的地段,一般具有一定的地震活动背景,现代构造活动较强烈,地应力较集中,发育有渗透性较强的岩层与断裂等条件.显然具有特定的地质-水文地质条件的库段上才可能发生诱发地震.因此,监测网要布设在具有诱发条件的库段上.

1.2 布网区的范围

监测网布设范围,一般是在水库最高蓄水位的库岸线两侧约 10 km 范围内,特别是要布设在水库两岸 5 km 范围内.这是基于如下的认识:

根据三峡工程(分 3 次蓄水后库水位最终被抬高约 100 m,海拔高程达 175 m)水库荷载作用下的应力影响区的数值模拟结果(高士钧,1992),在距库岸 5 km 处产生的最大应力变量很小,仅为水库水体荷载的 0.002 倍左右,即相当于 2 m 的水头压力(约 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$).由此可见,水库蓄水影响库岸岩体应力状态的范围是非常有限的.

根据已有的水库诱发地震发生地点的库岸距统计,破坏性诱发地震的震中距库岸的距离一般小于 10 km,多数小于 5 km,都不超过河谷两侧分水岭的范围.据易立新和车用太(2001)资料,我国新丰江水库 6.1 级地震的库岸距小于 1 km,丹江口水库(坝高 97 m)4.7 级地震库岸距小于 1 km,参窝水库(坝高 50 m)4.8 级地震的库岸距小于 2 km.据 Gupta(1992)对国外水库诱发地震的介绍,印度 Koyna 水库 6.3 级地震的库岸距为 2 km,多数地震发生在库岸距小于 10 km 范围,个别不超过 20 km;希腊 Kremasta 水库 6.2 级地震的库岸距为 11 km;赞比亚-津巴布韦交界的 Kariba 水库 6.1 级地震、前苏联 Nurek 水库(坝高 317 m)4.6 级地震、埃及 Aswan 水库(坝高 111 m)5.3 级地震都发生在库岸周围,库岸距小于 10 km;美国米德湖水库(坝高 221 m)4.6 级地震的库岸距为 5 km.

根据 2003—2006 年三峡工程诱发地震地下水观测网观测到的 8 口井(W1—W8)井水位对水库二次蓄水荷载的响应距离的实际观测结果,也不超过 3 km(表 1).

三峡水库自 2003 年 5 月开始蓄水以来,到 2008 年 12 月,共发生约 7000 次小震活动,其震中绝大多数位于距库岸线小于 10 km 的范围内.其中,最为显著的 2008 年 9 月 28 日郭家坝 $M_L 3.7$ 地震与 2008 年 11 月 22 日胡家坪 $M_s 4.1$ 地震的震中库岸距约小于 2 km(车用太等,2009).

2 观测井间距的确定

水库诱发地震地下水监测网建设中,观测井间距的确定是很重要的科学问题.然而,

表 1 三峡井网 8 口井井水位对水库蓄水荷载作用的响应距离

Table 1 Response distance of water-level to reservoir water loading in 8 wells of Three Gorges well network

蓄水时间	观测井	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
2003 年 5—6 月	库岸距/km	2.85	0.24	1.15	0.12	12.0	4.0	6.0	2.0
	响应情况	×	●	×	×	×	×	×	×
2006 年 9—10 月	库岸距/km	2.85	0.20	1.15	0.10	8.0	2.0	5.0	0.10
	响应情况	●	○	○	×	×	×	×	●

注: ●表示响应显著; ○表示有一定响应; ×表示无响应.

目前尚无可依据的资料, 只能参考天然地震地下水前兆监测网建设中的某些理论与方法而定. 在天然地震前兆监测网建设中, 未来要监测的地震大小与可能出现异常的前兆场大小间的关系, 至今仍然也是探索中的问题. 按照多点应力(集中)场的场兆观点(马宗晋, 1980), 前兆场的规模可以很大. 在我国天然地震的震例中, 5 级地震前兆场尺度可达 100—200 km, 6 级地震可达 300—400 km. (万迪堃等, 1993). 按照地震孕育的组合模式下震源应力场控制前兆场的源兆观点(郭增建, 秦保燕, 1991), 震级(M)与前兆场半径(R)的关系为

$$\lg R = 10^{0.508M-1.377} \quad (1)$$

依此估计得到的前兆场大小及按照观测井要布设在有可能显现出前兆异常的区域范围内的原则, 推算出井间的最大距离, 如表 2 所列.

表 2 地震孕育的组合模式下震级(M)与前兆场半径(R)关系Table 2 Relations between magnitude(M) and precursory field radius(R) in the combination model of earthquake preparation

M	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
R/km	4.5	8.1	14.5	26.1	46.9	84.1
井间距/km	9	15	30	50	90	170

然而, 在同样大小的地震孕育的条件下, 水库诱发地震前兆场与天然地震的前兆场大小应该是有差异的. 因为水库诱发地震的震源深度浅, 其前兆场的范围可能偏小, 按照震源深度小一半的情况考虑, 其前兆场尺度可能也应小一半. 此外, 三峡井网对 2008 年 11 月 22 日 $M_s 4.1$ 水库诱发地震的监测结果, W8 井的井震距为 12 km 的情况下, 井水位无前兆异常响应. 由此可认为, 用于水库诱发地震前兆监测的观测井间距应较天然地震前兆监测井间距小一半. 由此提出了如下水库诱发地震前兆监测井间距(表 3).

表 3 水库诱发地震地下水观测井间距要求

Table 3 Distance criterion of observation wells for monitoring reservoir induced earthquakes

水库诱发地震震级(M_s)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
观测井间距/km	4	8	15	25	45

3 观测井位置的选择

观测井位置的选择, 主要考虑 3 个因素: 构造、地貌与含水层(带)条件.

3.1 构造条件

从构造因素上考虑, 观测井应选在活动性断裂及其附近. 首先是因为断裂构造对岩体中的应力分布有重要影响, 无论从光弹性模拟的结果(黄杰著, 1980)还是数值模拟的结果(高士钧, 1992), 都说明活动断裂带, 特别是活动断裂的两端、拐弯处及二组以上断裂交汇部位是应力易集中的部位. 另外, 从三峡井网井水位对水库蓄水后水体荷载作用的响应看, 库岸距相近的条件下, W2 与 W4 井比较(表 1), 尽管 W4 井的库岸距更小, 但 W2 井因位于长木垵断裂与高家冲断裂交汇部位上, 其响应特别明显(车用太等, 2004).

其次, 水库诱发地震绝大多数是发生在断裂带上, 如 Koyna 6.3 级、新丰江 6.1 级、丹江口 4.8 级地震等; 2008 年 9 月 27 日与 11 月 22 日发生在三峡工程区的 M_L 3.8 与 M_S 4.1 两次最大的水库诱发地震也都发生在仙女山断裂带的端部(车用太等, 2009). 此外, 已有水库诱发地震的震例中井水位或孔隙压力的异常多也是出现在沿断裂带分布的观测井(Talwani, 1981; Zoback, Hickman, 1982; Snow, 1974).

另据 1998 年 1 月 10 日河北省张北 M_S 6.2 地震前地下流体异常的震例研究(车用太等, 1999), 该地震前出现的 29 口井(泉)中的 47 个测项前兆异常, 全部都是出现在位于活动断裂带及其两侧的观测井(泉)中, 特别是 83% 的异常井(泉)距活动断裂带的距离 ≤ 5 km, 50% 的异常井(泉)距活动断裂 ≤ 1 km. 由此可见, 观测井的构造部位对前兆异常的表现, 起着非常重要的控制作用. 因此, 水库诱发地震的观测井位置的选择, 首先应从构造条件上考虑.

断层的特征对观测井的映震能力也有一定影响. 一般说来, 断层活动的主动盘(逆断层中的上盘, 正断层中的下盘)上, 构造活动引起的构造应力变化相对明显, 因此观测井的位置宜选在断层活动的主动盘上. 另据数值模拟结果(王博等, 2008), 断层走向与地下水流方向间的夹角越大, 断层面的倾角越大, 对地下水渗流场的影响越大, 因此在水库地区地下水主流方向为分水岭到河谷, 即地下水流向垂直于水库走向的前提下, 宜把观测井选在平行于库岸线的走向的陡倾断裂带上.

3.2 地貌条件

从地貌因素上, 首先要避免把观测井选在滑坡活动区内. 一般说来, 大型峡谷型水库的库岸地区往往是滑坡较为发育的地区, 水库蓄水后不仅会引发古滑坡的活动, 而且还会诱发新的滑坡活动. 因此, 特别要注意不要把观测井选在滑坡活动区内. 三峡井网中, W8 井建井之后, 由于山体坡脚上修筑新的公路时切坡开挖, 导致古滑坡活动, 引起该井水位大幅度上升, 井水位由地面以下 4.16 m(2000 年 3 月 17 日)上升到井口以上并变成自流井(2001 年 3 月). 后经井口接高 1.29 m 并改动水位观测之后, 仍由于该滑坡体的不断活动导致该井水位动态极不稳定, 变得忽上忽下, 起伏不定, 使该井水位观测很难在水库诱发地震监测中发挥应有的作用(车用太, 鱼金子, 2006).

降雨渗入补给是水库诱发地震地下水动态监测中最常见、最大的干扰因素. 因此, 地貌因素中, 还要考虑观测井距大气降雨补给区边界的距离问题. 一般情况下, 大气降雨渗入补给作用主要发生在基岩裸露的山区, 大气降雨由山区渗入地下后使含水层或含水带的裂隙压力升高, 使新增的地下水在含水层中流向观测井区, 影响井水位动态. 然而, 这种影响随着地下水流动距离的增大而逐渐被减弱, 其影响幅度由大变小, 影响的滞后时间由小变大. 以北京地区 1983—1988 年研究结果为例(车用太等, 1993), 在多年平均雨量为

537 mm, 集中降雨时间为 5—8 月的条件下, 随着观测井-降雨渗入补给区边界间距离的增加, 井水位峰值出现的时间、水位年升幅等特征逐渐发生变化(表 4). 在近补给区的观测井水位基本上随补给区降雨量的变化而无规律起伏, 使地震前兆异常信息的识别变得困

表 4 北京地区降雨渗入补给对井水位动态影响与观测井-补给区间距离的关系

Table 4 Relation between the effect of rainfall on well level and the distance from observation well to supply area boundary in Beijing region

井名	温泉井	板桥井	塔院井	通县井
井深(m)/观测层	290/O 灰岩	283/Z 灰岩	361/J 凝灰岩	400/€ 灰岩
观测井-补给区间距离/km	3	6	10	34
井水位峰值出现的时间/月	6—8	6—8	8—9	8—9
井水位年变幅/m	1.78	2.77	0.95	0.87

难. 因此, 拟选的观测井应尽可能远离降雨渗入补给的基岩裸露区.

3.3 水文地质条件

从水文地质条件上考虑, 首先要确保所选的井点地下发育有可供观测的承压含水层, 避免把观测井选在没有含水层发育的地段上, 使未来观测井成为“干”井, 无法实现地下水动态观测.

在库岸地区, 一般是地下水与地表水水力联系较强烈的地区. 因此, 水库诱发地震布设区最常见的干扰因素是地表水, 即库水位的大幅度涨落引起观测井水位的升降变化. 为了减弱这种干扰, 布网区尽可能选择具有隔水层或隔水体发育的水文地质结构区, 以减弱未来观测含水层地下水与地表水水体间的直接的水力联系.

当布网区存在地下水开采井时, 必须使观测井与开采井之间保持足够的距离. 按 GB/T19531.4-2004 的规定(中华人民共和国国家标准, 2004), 在基岩地区观测井与开采井间应保持的最小间距, 可依井区水文地质条件的复杂程度而定(表 5); 在松散砂砾石孔隙含水层发育区, 可依含水层岩性而定, 在粉砂与细砂含水层中井间距不得小于 2 km, 在中砂与粗砂含水层中井间距不得小于 3 km, 在砾石含水层中井间距不得小于 8 km(杜玮, 2004).

表 5 基岩地区观测井与开采井为同一个含水层(体)时两井最小间距的规定

Table 5 Distance criterion between observation well and exploration well in the same aquifer in rock area

水文地质条件分区	简单地区	中等复杂地区	复杂地区
地貌条件	平原或宽谷地区	山间盆地	起伏山区
构造条件	水平岩层与单斜构造为主	有断裂发育的褶皱区	断裂十分发育的断褶区
岩溶发育特征	只有溶孔与溶隙发育	有小规模溶洞发育	有暗河与大型溶洞发育
含水层特征	单层含水层, 边界清楚	多层含水层, 有边界	多层含水层与多个含水带交替, 边界不清
最小井间距/km	1	5	10

4 观测井深度的确定

观测井深度, 从理论来讲应尽可能接近未来诱发地震孕育与发生的震源深度. 水库诱发地震的震源深度, 据易立新和车用太(2001)收集整理的资料, 多数水库诱发地震的深度

为 1—5 km, 如 Monticelo 为 1—5 km, Manic-3 为 0.1—4.5 km, Lake Mead 为小于 5 km; 但较大的地震深度可能大于 5 km, 如新丰江为 4—7 km, 丹江口为 9 km, Koyna 为 5 km, Kremasta 为 7—17 km, Nurek 为 8 km 等。然而, 现有的经济技术条件下, 水库诱发地震的地下水观测井深度要求达到上述深度是不现实的。

观测井深度的确定, 基本原则是观测井井底的海拔高程低于水库蓄水前河床的海拔高程, 以便监测到水库蓄水全过程中库岸岩体中应力状态的最大变化。三峡水库蓄水时, W2 井与 W4 井的库岸距很接近, 但二次蓄水过程中井水位对水体荷载作用的响应差异十分显著(表 1)。W2 井水位响应明显, 而 W4 井则无响应。这种差异除了井点的构造条件差异之外, 主要是由于 W4 井井底海拔高程高于库水位或与水库蓄水水位相当所致, 蓄水过程中其观测含水层没有承受水体荷载的作用或受到的作用力很弱。

在峡谷型水库区, 库岸地形坡度一般都很大, 有些观测井深度难以满足井底海拔高程低于河床海拔高程的要求时, 尽可能使设计的井深加大, 使井底接近河床面, 至少使井底海拔低于最高库水位 50 m 以下。在这样的地区, 还会遇到地下水位埋深很大的问题。当地包气带厚度很大时, 绝对要避免井孔打在包气带中, 即井底处在蓄水前库岸区地下水面上。在金沙江下游工程区地下水观测井建设中遇到类似的问题, 多口井区地下水埋深大于 200 m, 不得不加深观测深度到 300 m 以下。

由上述可见, 水库诱发地震观测井的深度越深越好。然而, 从经济上合理性考虑, 则观测井深度越浅越好。这两个方面的因素是相矛盾的。因此, 最终确定观测井深度的基本要求可概括为: 观测井可揭露出承压含水层, 该层地下水受大气降雨、地表水体、地下水开采的干扰弱。一般情况下观测井的深度以 150—400 m 为宜; 但如果存在封闭性较好的承压含水层(体)且其顶板埋深较浅时, 也可适当减少井深, 但考虑井孔水温观测的技术要求, 最小深度应大于 100 m; 在包气带发育的地区或基岩裂隙水地区, 观测井深度要大一些, 最小深度不应小于 300 m。

5 观测井结构的要求

观测井结构要素包括井深、井径、护井套管与过水断面类型等。观测井深度的要求已在前面说明, 在此只探讨有关井径、护井套管与过水断面的要求。

井径是决定井水位对地壳应力应变乃至地震前兆异常信息响应能力的重要因素。从理论上讲, 当观测含水层受到力的作用而发生孔隙压力变化并导致井-含水层之间引起水流运动时, 流入井筒内的水量是一定的, 而一定水量(Q)转化成井水位升降幅度(Δh)信息时, 其信息量大小与井水位变动段的井径(r_1)关系很大, 其关系是 $Q = \pi r_1^2 \cdot \Delta h$, 即井径越小, 井水位变幅就越大。在我国吉林省通化市云峰井进行的变径条件下井水位潮汐效应、气压效应与地震波效应的观测结果(朱梅武等, 1994), 充分说明了上述认识(表 6)。因此, 合理地设计观测井的井径, 特别是上下井径的比值可以显著提高井水位对地壳应力应变的响应能力。

观测井井径的大小, 还要考虑现有的投入式探头观测条件下水位与水温传感器的直径大小。现行探头的直径一般为 40—60 mm。因此, DB/T20.1-2006 规定观测井井径的基本要求是 100—200 mm(中华人民共和国地震行业标准, 2006), 且要求整个观测井深度上井径变化次数尽可能少, r_1/r_2 比值尽可能接近于 1, 最好是大于或等于 1。

表 6 变径条件下井水位对地壳应力应变信息响应能力的观测试验结果

Table 6 Result of experimental observations on the response of well level to crustal stress-strain variation for the wells with varying hole diameter

试验观测时段	水位变动段井径 r_1/mm	上下井径比 r_1/r_2	井水位日潮差 /mm	井水位气压系数 /mm·(hPa) ⁻¹	井水位记 震能力
1987-07—1990-10	118	1.1132	10—30	2.45—3.22	9.5%
1990-11—1991-03	80	0.7547	40—60	4.23—5.34	42.9%

注：① 井径比指井水位变动段直径(r_1)与过水段直径($r_2=106\text{ mm}$)之比；② 记震能力指井水位记录到的地震波次数与同期全球 $M_s \geq 7.0$ 以上地震发生次数的百分比。

观测井结构的第二个要求是观测井中必须下设护井套管，套管的长度以封闭非观测层段的所有含水层为原则，管材一般应为无缝钢管，套管间应丝扣相连。套管与钻孔岩壁之间的环状间隙，必须用止水材料填死，严防非观测层的地下水沿环状间隙流入观测井筒中来。

观测井结构的第三个要求是合理选择过水断面的类型。过水断面指观测井与观测含水层之间的连接界面，其类型有裸孔、射孔管与滤水管 3 种。裸孔指井-含水层之间无任何结构物，井与含水层间全面无障碍相连，一般适用于含水层井壁岩体坚固稳定的井孔，如基岩裂隙含水层井孔、灰岩岩溶含水层井孔等。滤水管指带孔的套管外包铜丝网或加钢筋骨架等，适用于含水层井壁不坚固不稳定，有可能坍塌的井孔，如断层破碎带、第四系砂砾石含水层中的井孔。这类过水断面的设计要注意合理选择滤水管类型，既要防止井壁坍塌产生的碎屑颗粒随井-含水层间的水流流进井筒内，又要防止对井-含水层间水流流动产生阻力。为了防止碎屑颗粒流入井筒后发生沉淀并引起井孔堵塞，一般还要求滤水管下应设长度 $\geq 5\text{ m}$ 的沉砂管。射孔管指带孔的套管，这个孔多是先下无孔套管后用井下炸弹射孔而产生的，适用于井孔深度较大（一般大于 1000 m ），且含水层不很坚固不很稳定的井孔，如第三系砂岩含水层中的井。

6 观测含水层的要求

观测井网建设中，还应考虑各个井孔所揭露出的观测含水层的特征，包括含水层类型、岩性、渗透性等。

观测含水层的选择中，最基本的要求是观测层为封闭性较好的承压含水层。因为含水层受到力的作用而产生的孔隙压力变化的信息，在承压含水层中是通过截面积很小（相对含水层分布面积而言）的井孔截面集中表现出来，存在信息的放大效应。而在潜水含水层中则通过整个含水层地下水自由面表现出来，孔隙压力变动信息无放大效应而言。因此，含水层中各类地壳应力应变信息，如潮汐效应、气压效应、地震波效应等信息，一般只在承压含水层井水位中可观测到，潜水含水层井水位中基本上观测不到这类信息。由此推测，井水位与井水温度的震前异常信息理应在承压含水层的井孔中表现明显。

观测层岩性以坚硬基岩为宜。这是因为岩体骨架的刚度大，不易变形。因此当其受到力的作用后其变形主要表现在裂隙空间体积的变化上，相应表现为孔隙压力变量大，导致井-含水层之间产生的水力梯度大、水流速度快、流量大，由此产生的井水位反映的含水层应力应变的信息量也大。据我国地震地下水动态观测网的统计（汪成民，1990），作为井水

位反映地壳应力应变能力的主要标志的井水位潮汐效应, 与观测层岩石的坚固程度或弹性模量关系密切, 岩石越坚固的井中水位的日潮差越大(表 7)。因此, 观测含水层的岩性以结晶岩与碳酸盐岩为最佳; 碎屑岩类次之, 碎屑岩类中胶结程度越高越好; 第四系松散砂

表 7 观测含水层岩性与井水位日潮差关系

Table 7 Relation between rock type of aquifer and daily tide range of well level

含水层岩性	统计的井孔数量	平均日潮差/cm	最大日潮差/cm	备注
结晶岩(岩浆岩、变质岩)	9	10.9	23.4	
碳酸盐岩(灰岩、白云岩)	46	8.3	29.0	
火山喷出岩	11	5.7	14.6	
碎屑岩类 前白垩系	17	4.8	15.0	
白垩系	12	1.8	4.5	
第三系	32	1.3	5.8	部分井有潮汐效应
第四系	64	0.4	3.0	多数井无潮汐效应

砾石层最不理想, 亦即观测含水层地下水以坚硬岩体裂隙水与碳酸盐岩岩溶水为佳。

观测含水层以渗透性强与厚度大为宜。这是因为当观测含水层受到力的作用而产生孔隙压力变化时, 含水层的渗透系数(K)与厚度(M)大时, 在一定的水力梯度(I)下, 流入井筒中的水量(Q)多, 其间的关系是 $Q = IK \cdot \omega$ 。其中, ω 为过水断面面积, 其大小与井径(r_2)、含水层厚度(M)有关, 即 $\omega = \pi r_2^2 \cdot M$ 。井-含水层间水流量大, 井筒内水位的变化幅度也大, 即含水层受到相同的力的作用下在井水位反映出的信息量大。据我国湖南省灰岩岩溶含水层中的统计(汪成民等, 1988), 井水位日潮差(Δh)与含水层渗透系数的关系较明显

表 8 含水层渗透系数(K)与井水位日潮差(Δh)关系

Table 8 Relation between permeability of aquifer and daily tide range of well level

$\lg K/m \cdot d^{-1}$	<0.005	0.01	0.1	1.0
$\Delta h/cm$	0	1—5	10—15	15—20

(表 8)。据三峡井网水位对汶川 8.0 级同震响应的研究结果, 同样可以看到观测含水层的渗透系数(K)或导水系数($T = K \cdot M$)大的井水位同震响应幅度总体上偏大的关系(表 9)。

表 9 三峡井网 8 口井水位与汶川地震同震响应幅度及含水层水文地质参数对比

Table 9 Relation between hydrogeological parameters of aquifer and co-seismic variation amplitude of well level during the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake observed in 8 wells of Three Gorges well network

井号	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
渗透系数 $K/m \cdot d^{-1}$	0.075	0.03	0.01	0.013	0.691	0.514	0.170	0.698
导水系数 $T/m^2 \cdot d^{-1}$	0.075	0.15	0.02	0.04	19.30	3.10	0.850	3.40
同震响应幅度/m	>1.16	>1.22	0.178	0.067	0.798	0.446	0.406	>1.72

在当地有地下水开采井时, 拟选择的观测含水层还应尽可能避开地下水开采层; 开采层与观测层为非同层时, 其间应发育有分布稳定, 厚度大于 10 m 的隔水层。

7 结论

综上所述, 水库诱发地震地下水动态观测网建设的基本要求可归纳如下:

1) 井网应布设在被认为有可能发生 $M_s \geq 4.0$ 诱发地震的库段上; 布设的范围应在水

库两岸 10 km 范围内,特别是在 5 km 范围内。

2) 观测井应布设在活动断裂的端点、拐点与交汇点附近,布设在断层活动的主动盘上;观测井距主干断裂的距离宜小于 5 km;有多组断裂发育的地区,观测井尽可能靠近走向与库岸线平行的陡倾断裂上。

3) 观测井要避开滑坡活动区,要尽可能远离降雨渗入补给区,要远离同层开采井所在地,要防止观测层地下水与库水发生强烈的水力联系。

4) 观测井间的距离依未来可能发生的地震大小而定,具体要求是在 4 级地震危险区内应小于 4 km,5 级地震危险区内应小于 15 km,6 级地震危险区内应小于 45 km。

5) 观测含水层以具有良好隔水层的基岩裂隙承压水层和灰岩岩溶承压水层为佳,不宜选第四系松散砂砾石孔隙含水层;观测层应具有较强的渗透性与较大的厚度。

6) 观测井的深度一般要大于 150 m,使井底海拔高程低于原河床面的海拔高程,至少应低于最高库水位 50 m。

7) 观测井的井径以 100—200 mm 为宜,井孔上部水位变动段的直径(r_1)与井孔下部井-含水层间水流流动段直径(r_2)之比尽可能接近于 1;观测井中非观测段含水层必须下设套管封死;井-含水层间界面以确保井壁不坍塌与井-含水层间水流畅通的原则下选取过水断面类型。

在本项研究过程中得到姚运生与温瑞智研究员,孙天林与李介成高级工程师,易立新与杨竹转博士等人的支持与协助,在此表示谢意。

参 考 文 献

- 车用太,鱼金子,张大维. 1993. 降雨对深井水位动态的影响[J]. 地震, (4): 8-15.
- 车用太,鱼金子,刘五洲. 1999. 张北-尚义地震的地下流体异常场及其成因分析[J]. 地震学报, 21(2): 194-201.
- 车用太,鱼金子,刘五洲. 2003. 三峡井网的布设与观测井建设[J]. 地震地质, 24(3): 423-434.
- 车用太,刘五洲,颜萍,刘喜兰,刘成龙. 2004. 三峡井网地下流体动态在水库蓄水前后的变化[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 14-22.
- 车用太,鱼金子(编著). 2006. 地下流体典型异常的调查与研究[M]. 北京: 气象出版社: 214-216.
- 车用太,陈俊华,张莉芬,鱼金子,刘成龙,张卫华. 2009. 长江三峡库区胡家坪 $M_s4.1$ 级水库诱发地震. 地震, 29(4): 1-13.
- 丁原章等. 1989. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社: 93-132.
- 杜玮(主编). 2004. GB/T19531.1-19531.4-2004《地震台站观测环境技术要求》宣贯教材[M]. 北京: 地震出版社: 278-289.
- 高士钧(主编). 1992. 长江三峡地区地壳应力场与地震[M]. 北京: 地震出版社: 75-114.
- 郭增建,秦保燕. 1991. 地震成因与地震预报[M]. 北京: 地震出版社: 78-80.
- 胡毓良. 1994. 水库诱发地震研究的进展[C]// 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社: 623-628.
- 黄杰藩(主编). 1980. 京津及华北地区现今应力场模拟分析[C]// 北京市地震地质会战办公室编: 107-118.
- 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.
- 万迪塑,汪成民,李介成,万登堡,许学礼,黄保大,周旭明(编著). 1993. 地下水动态异常与地震短临预报[M]. 北京: 地震出版社: 150-162.
- 汪成民,车用太,万迪塑,董守玉,等. 1988. 地下水微动态研究[M]. 北京: 地震出版社: 10-23.
- 汪成民(主编). 1990. 中国地震地下水动态观测网[M]. 北京: 地震出版社: 40-44.
- 王博,刘耀炜,孙小龙,任宏微. 2008. 断层对地下水渗流场特征影响的数值模拟[J]. 地震, 28(3): 115-124.

- 王儒述. 2007. 三峡水库与诱发地震[J]. 国际地震动态, (3): 12-21.
- 易立新, 车用太. 2001. 水库诱发地震理论及三峡水利枢纽工程诱发地震预测研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 1-18.
- 中华人民共和国国家标准. 2004. 地震台站观测环境技术要求. 第 4 部分: 地下流体观测(GB/T19531.4-2004)[S]. 中国国家标准化管理委员会发布.
- 中华人民共和国地震行业标准. 2006. 地震台站建设规范. 地下流体台站第 1 部分: 水位和水温台站(DT/T20.1-2006) [S]. 中国地震局发布.
- 朱梅武, 张德魁, 姜齐武, 徐乃贵, 刘亚辉, 朴伦根. 1994. 井水位微动态的变径试验观测[J]. 地震, (2): 92-96.
- Chadha R H, Pandey A P. 2003. Search for earthquake precursors in well water levels in a localized seismically active area of reservoir triggered earthquakes in India[J]. *Geophys Res Lett*, **30**(7): 691-694.
- Gupta H K. 1992. *Reservoir-Induced Earthquakes* [M]. New York: Elsevier: 1-2.
- Snow D T. 1974. The geologic, hydrologic and geomorphic setting of earthquakes at Lake Kariba[C]// *Paper Presented at Int. Colloq. on Seismic Effects of Reservoir Impounding, March 1983*. Royal Society, London.
- Talwani P. 1981. Earthquake prediction studies in South Carolina, an international review[C]// Simpson D W, Richards P G eds. *Earthquake Prediction: An International Review Am Geophys Union, Maurice Ewing Ser*, 4: 381-393.
- Zoback M D, Hickman S. 1982. Physical mechanisms controlling induced seismicity at Monticello Reservoir, South Carolina[J]. *J Geophys Res*, **87**: 6959-6974.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA