

杨明波, 杨竹转, 郑轶文, 马玉川, 王同利, 韩孔艳, 崔博文, 邢成起. 2017. 冷水源井水温固体潮现象及其机理研究——以黄村井为例. 地震学报, 39(3): 420-428. doi:10.11939/jass.2017.03.011.

Yang M B, Yang Z Z, Zheng Y W, Ma Y C, Wang T L, Han K Y, Cui B W, Xing C Q. 2017. Solid tide phenomenon of cold water source well temperature and its mechanism: Taking Huangcun well as an example. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 420-428. doi:10.11939/jass.2017.03.011.

冷水源井水温固体潮现象及其机理研究 ——以黄村井为例^{*}

杨明波^{1),*} 杨竹转²⁾ 郑轶文¹⁾ 马玉川³⁾
王同利¹⁾ 韩孔艳¹⁾ 崔博文¹⁾ 邢成起¹⁾

1) 中国北京 100080 北京市地震局

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所

3) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 该文对黄村冷水源井的水温固体潮现象进行了观测研究, 初步解释了冷水源井的水温固体潮汐的形成机理. 通过对黄村观测井进行水温梯度的详细观测及不同深度水温的对比观测研究, 得到了黄村井水温潮汐现象的观测结果: ① 黄村冷水源井的水温固体潮的相位与水位的相位是相反的; ② 黄村井水温梯度曲线呈下凹型, 特别是在含水层及受含水层进出水影响较大的附近区域下凹程度大, 且随着与含水层底板距离逐渐变大, 下凹程度也变小; ③ 水温传感器的观测值与含水层观测距离存在一定的规律性: 距离含水层越远, 水温潮汐差越小, 直至潮汐变化消失. 这说明冷水源井与热水井的水温潮汐现象是不同的, 前者是吸热过程, 后者是放热过程, 由此造成二者水-热动力学特征的不同.

关键词 冷水源井 水温固体潮 水温梯度曲线 水-热动力学特征

doi:10.11939/jass.2017.03.011 中图分类号: P315.72⁺3 文献标志码: A

Solid tide phenomenon of cold water source well temperature and its mechanism: Taking Huangcun well as an example

Yang Mingbo^{1),*} Yang Zhuzhuan²⁾ Zheng Yiwen¹⁾ Ma Yuchuan³⁾
Wang Tongli¹⁾ Han Kongyan¹⁾ Cui Bowen¹⁾ Xing Chengqi¹⁾

1) *Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China*

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

3) *China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China*

Abstract: In this study, we conducted an observation to monitor water temperature solid tide phenomenon of cold water source well in Huangcun, and preliminarily interpreted its formation mechanism. Based on detailed monitoring data of

* 基金项目 中国地震局监测预报司三结合课题(YC4A04)资助.

收稿日期 2016-06-11 收到初稿, 2017-02-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: yangmb@bjseis.cn



water temperature gradient and the comparison of water temperatures in different depths, we concluded the following conclusions: ① The phase of water temperature solid tide of Huangcun well was opposite to that of water level. ② The water temperature gradient of Huangcun well was of concave-down type. The position that was greatly influenced by influent and effluent water of the aquifer or nearby concaved down the most, and the concave degree getting weaker with the increasing of the distance from the aquifer. ③ There is a rule between data from water temperature sensor and the distance from the observation aquifer: Tidal difference of water temperature became smaller with the increasing of distance until tidal variation faded away. It shows that the water temperature tide phenomenon of the cold-water source well is different from that of hot-water source well. One is endothermic process, and the other is exothermic process, which results in the different characteristics of water thermal dynamics.

Key words: cold water source wells; water temperature solid tide; water temperature gradient curve; hydrothermal dynamic characteristics

引言

自 20 世纪 80 年代高精度的石英温度计问世以来, 我国地震地下流体工作人员已陆续在全国 360 多口观测井中进行了水温动态观测, 并以取得的观测经验为基础组建了我国水温前兆观测网络。该网络曾多次记录到了地震发生前的水温异常现象(陈沅俊, 姚宝树, 1999; 刘耀炜等, 2008), 包括北京及邻区的多次水温观测震例, 例如延庆五里营井和张家口三马坊井在 1998 年 1 月 10 日张北地震前均出现了显著的水温前兆异常(陈沅俊, 姚宝树, 1999)。此外, 水温观测网还在多次地震中记录到了同震阶变现象(刘耀炜等, 2008), 全国所有的水温观测井中有 32 口井记录到了水温潮汐效应(马玉川, 2010), 说明通过井水温动态观测不仅可捕捉到地震前兆异常信息, 还可记录到多种地球动力学信息, 例如低频固体潮和高频地震波, 是一种很有前景的地震前兆观测手段。

水温固体潮效应和水温同震效应是水温对地壳应力应变信息最直接的响应, 且这两类现象具有较明确的物理机制(杨竹转, 2011)。相比于水温同震效应, 水温固体潮效应还具有连续性的特点, 因此, 研究水温固体潮效应, 对解释水温映震机制具有重要的指示意义(车用太, 鱼金子, 2013)。Shimamura 等(1984)根据观测到的水温潮汐现象, 认为地壳的应力-应变变化会导致地下水温的变化, 进而指出井水温观测值与钻孔应变观测值之间可能存在一定的联系。Furuya 和 Shimamura (1988)对日本东海地区 11 口观测井的水温频谱分析结果表明, 水温变化中含有 12 小时的周期分量, 这种周期分量可能与固体潮 M_2 波和 S_2 波有关。Rosaev 和 Esipko (2003)以及 Esipko 和 Rosaev (2007)在分析俄罗斯 Vorotilovo 深井(井深 5 374 m)的观测资料时, 观察到了显著的水温潮汐现象, 进而提出了“分层”的概念, 即每一含水层都有其自身的潮汐响应效能。相比于井水位观测, 水温观测更偏重于“点”观测, 因此对水温潮汐现象的研究可以完善和加深含水层对固体潮响应的认识。本文拟研究冷水源井不同深度处的水温潮汐现象, 探讨冷水源井水温潮汐现象的变化规律。

1 黄村井场地概述

黄村井位于北京市大兴区黄村镇，处于大兴隆起南苑—通县断裂的南侧，所在含水岩组为寒武系岩溶裂隙水含水岩组，发育有30—50 cm的溶洞、小溶孔及溶蚀裂隙，溶洞与溶蚀裂隙交织成网状，含水层连通性良好。

黄村井原为黄村水务局供水用井，井径为350 mm，井深554 m。0—78 m为第四纪地层，钢管护壁，78 m以下为寒武系灰岩，裸孔。27—45 m为非观测含水层，岩性为砂砾石；45—78 m为隔水层，岩性为黏土和黏土夹砾石；78—140 m为观测含水层，发育灰岩角砾岩溶洞（图1）。该井水位探头埋深为10 m，温度探头埋深为200 m，水位仪和水温仪均产自中科光大自动化技术有限公司。自2009年1月1日开始观测，直至2012年9月1日起获得正常连续的观测数据。2014年5月起增加使用中国地震局地壳应力研究所研制的SZW-1A型数字式石英温度计开展不同深度下的温度对比观测研究。水位观测仪的分辨率为1 mm，水温观测仪的分辨率为 10^{-4} °C，采样率为1次/分钟，时间误差在1分钟以内。

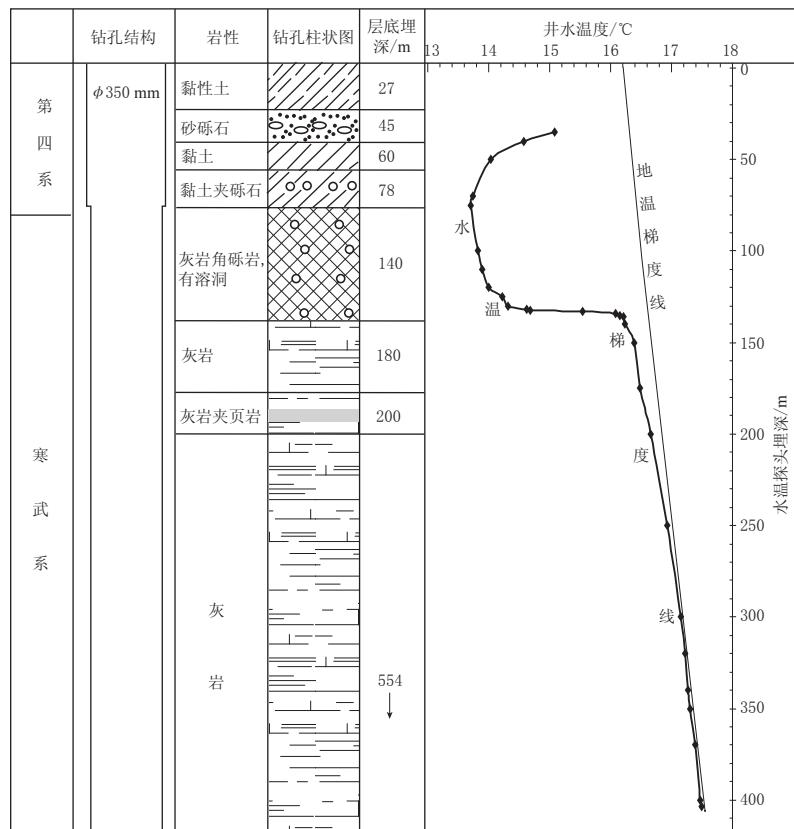


图1 黄村井井孔结构与水温梯度图

Fig. 1 Borehole structure and water temperature gradient of Huangcun well

2 黄村井水温观测资料及潮汐特征

2.1 黄村井水温观测资料及基本特征

黄村井水位和水温在观测期间由于受供电和观测系统稳定性的影响，出现几次断数，

且水温伴有多脉冲影响,但经数据预处理后,消除了因电压不稳产生的脉冲,记录到的水位、水温数据基本可以反映实际观测状况。

从井水位和井水温的长期动态观测数据(图2)可以看出,二者的观测值均表现为一峰一谷的年变形态,其中:2—3月为水位高值时段,水温低值时段;7—8月为水位低值时段,水温高值时段,表现出井水位与水温的反向变化特征(图2a)。根据相关水文动态资料可知,该井水位动态与北京地区区域水位变化基本一致(韩志文,蒙格平,2004)。从井水位和井水温的日变动态曲线可以看出,二者主要表现为单峰单谷变化,井水位与水温呈反向变化特征(图2b)。

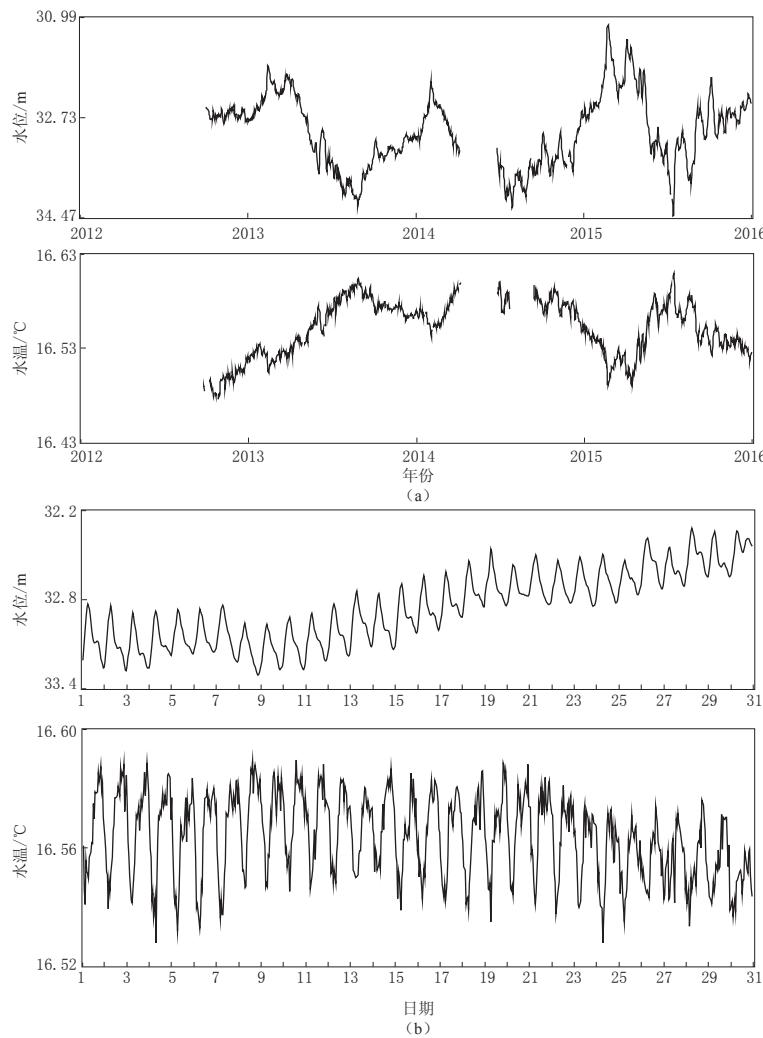


图2 黄村井2012—2015年水位、水温年变(a)及2014年1月日变(b)动态特征曲线

Fig. 2 Dynamic characteristic curves of water level and temperature for Huangcun well in 2014–2015 (a) and January of 2014 (b)

2.2 黄村井水温潮汐动态观测

由于黄村井的观测时间较短,自观测以来,北京及邻近地区未发生M5以上地震,因

此未获得记录到相关前兆信息的震例,但记录到了多次同震响应,且井水位固体潮汐清晰,某些观测段的井水温也出现了清晰的固体潮现象,说明该井对孔隙介质的应力应变响应比较敏感。因此,研究黄村井不同深度下的水温潮汐特征对于提高水温的观测效能具有重要意义。

实验观测数据表明,不同深度下观测到的水温潮汐动态存在明显差异:除水温探头埋深(h)大于400 m无潮汐显示外,其它深度层位均出现了较明显的潮汐现象,且日潮差随深度变化差异明显。从黄村井水温在不同深度处的动态观测曲线(图3)中可看出,水温探头埋深35, 40, 75, 120, 150, 200, 300 m层位的潮汐变化比较明显,50 m层位次之,400 m层位无潮汐变化。为了说明黄村井水位及水温的某些层位存在明显的固体潮汐现象,通过调和分析法计算得到水位、水温数据各主要分波的振幅,并以其中的M₂波潮汐振幅为主进行比较分析(赵丹,王广才,2013)(表1,图4),所得结果与观测数据一致。

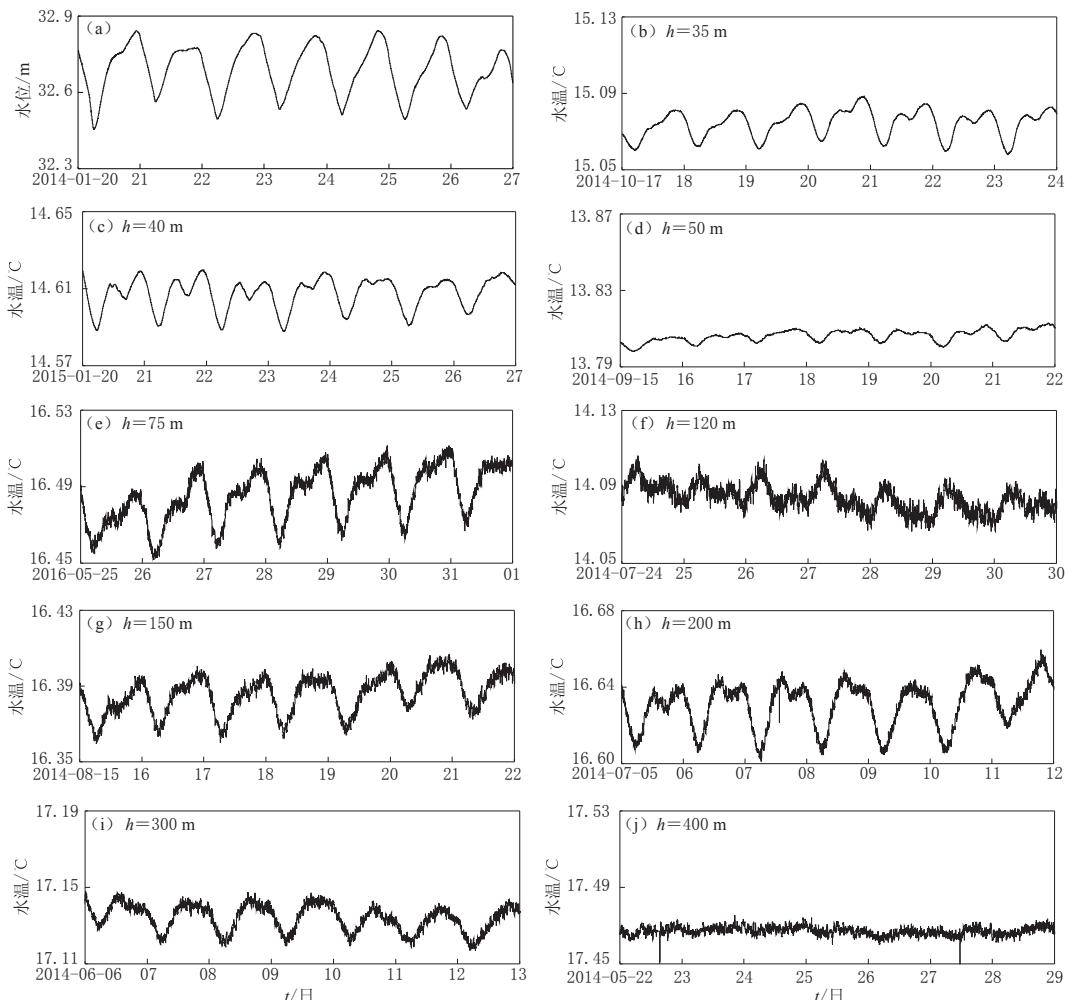


图3 黄村井水位观测曲线(a)和不同水温探头埋深 h 处水温观测曲线(b-j)

Fig. 3 Observation curves of water level (a) and water temperature at different probe buried depths h (b-j) for Huangcun well

表 1 使用调和分析法得到的黄村井水位、水温潮汐分波振幅

Table 1 Tidal component amplitudes of water level and water temperature for Huangcun well using harmonic analysis method

半月波	水位 /cm	理论 固体潮	水温/℃					
			$h=35$ m	$h=40$ m	$h=50$ m	$h=70$ m	$h=150$ m	$h=200$ m
$2N_2$	0.0010	1.1311	0.0003	0.0004	0	0.0003	0.0003	0.0002
N_2	0.0044	7.7826	0.0004	0.0004	0.0002	0.0002	0.0006	0.0012
M_2	0.0281	45.9822	0.0015	0.0026	0.0008	0.0009	0.0022	0.0030
L_2	0.0015	1.3813	0.0002	0.0002	0.0001	0.0003	0.0003	0.0004
S_2K_2	0.0661	20.8173	0.0042	0.0057	0.0019	0.0017	0.0025	0.0059

注: h 为水温探头埋深.

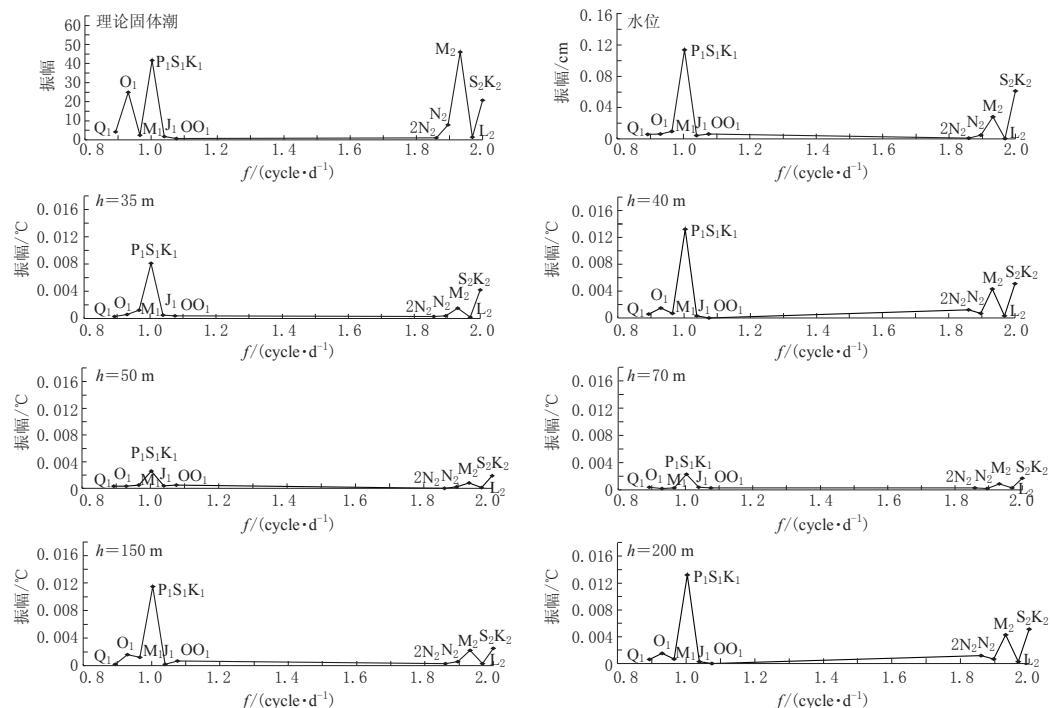


图 4 黄村井水位分波振幅和不同水温探头埋深处的水温潮汐分波振幅对比图

Fig. 4 Comparison between tidal component amplitudes of water temperatures at different probe buried depths and water level for Huangcun well

2.3 黄村井水温潮汐动态变化特征

2.3.1 水温梯度条件与水温潮汐动态特征的关系

1) 水温梯度与水温潮汐相位的关系. 从水温梯度曲线(图 1)可以看出: 以含水层顶板(78 m)为界, 其上水温梯度为负梯度, 水位与水温动态的日变化方向相反; 含水层及其下部水温梯度为正梯度, 水位与水温潮汐动态的日变化方向也是相反的, 表明黄村井水温在有潮汐现象的情况下总是与水位反向.

2) 水温梯度与水温日潮差的关系. 水温梯度的变化与潮汐动态变化幅度存在一定关系. 从图 1 和 3 可以看出, 黄村井水温梯度与水温潮汐差日变幅的关系表现为: 离开含水层一定距离时, 距离含水层越远, 含水层底板以下水温梯度曲线离地温梯度曲线越近, 其

水温日潮差越小；当水温梯度曲线与地温梯度曲线重合后，水温日潮差基本消失(表2)。

2.3.2 含水层顶(底)板距离与水温潮汐特征的关系

黄村井观测含水层距离的远近与水温日潮汐幅度的关系在观测含水层下部表现比较明显，具体体现在离开含水层一定距离后，水温日潮差的大小随距离变化存在一定的规律性：距离含水层底板越近，日潮差越大，反之，日潮差越小(距底板距离与日潮差的关系 $60\text{ m} > 80\text{ m} > 160\text{ m} > 260\text{ m}$)(表2)。水温日潮差在探头埋深200 m处时最大，潮汐动态

表2 距含水层底板距离与水温日潮差变化对比

Table 2 Comparison between distance to observation aquifer floor and water temperature diurnal range

水温探头埋深/m	距含水层底板距离/m	水温日潮差/℃
140	0	0.2857
150	10	0.3349
200	60	0.3743
220	80	0.3546
300	160	0.2364
400	260	0

最清晰，但在探头埋深大于200 m时水温日潮差逐渐变小，水温潮汐动态越来越模糊，400 m深处已基本看不出潮汐现象。

因为上部有非观测含水层，且接近水面后，影响水温潮汐变化的因素更多，规律性亦较差，本文暂不作讨论。

2.3.3 井孔结构与水温潮汐特征的关系

黄村井0—78 m为第四系地层，钢管护壁；78 m以下为裸孔，岩性为寒武系石灰岩。这两段井孔观测到的水温曲线有很大区别：有钢管护壁的上段，水温动态基本

无高频成分，曲线很光滑(图3b-d)；而在下部裸孔区段，高频成分较多(图3f-j)。所以高频成分的有无可能与是否有钢管护壁有关。水温探头埋深75 m处(图3e)因距离78 m埋深的含水层很近，受含水层横向对流的影响较大，故也出现了高频成分。

3 水温潮汐特征形成机理

根据潮汐效应与水温梯度、距含水层顶(底)板距离及井孔结构的关系，本文总结了不同观测条件下水温潮汐动态变化的差异，并结合黄村井水-热系统分析了不同深度处的水温潮汐特征的成因与机理。

黄村井井-含水层中的热系统与其它井一样，均存在两个水温梯度：水温垂向梯度和横向梯度(车用太等，2014)。两个梯度带内的水流运动均会造成井孔内水的上下运动与相应的热对流(存在水平向梯度的观测含水层区段大约为78—140 m)(图5)。黄村井井筒内由于水柱的上下运动，井水与围岩之间的热传导也在不断变化，热传导存在于整个井孔中，但强弱有所区别，裸孔部位强于有井管的，而在有井管的区段中，非观测含水层部位强于隔水层部位。此外还有水面与大气之间的热辐射。以上3种基本形式，即热对流、热传导和热辐射决定了黄村井孔内不同深度处的水温动态变化。

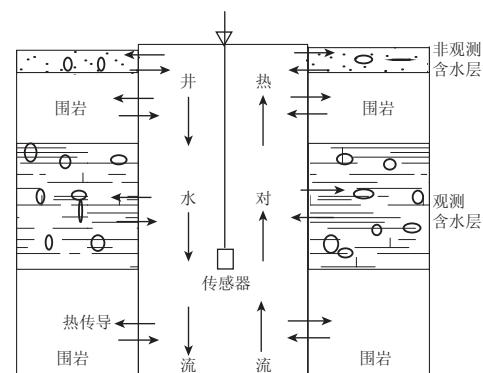


图5 黄村井-含水层系统物理模型示意图

Fig. 5 The physical model sketch of well-aquifer system for Huangcun well

4 讨论与结论

4.1 讨论

1) 冷水源井与平常观测的热水井的水-热动力学机理有很大区别, 前者是吸热, 后者是放热, 因此形成了不同的水温固体潮潮汐现象。水温梯度与水温潮汐相位的关系可以从水-热动力学角度给出科学合理的解释。黄村井-含水层中的水温相对地温背景值要低 13—14℃, 其含水层处于中间部位, 在井筒中无论向上或向下, 其温度均比含水层高。当水位上升时, 含水层的水分别向井筒上、下对流, 低温水补充造成水温下降; 而当水位下降, 井筒中的水又都回流到含水层, 低温水回流至含水层中造成井筒中水温升高, 故而形成水位相位变化与水温相位变化相反的状态, 同时也造成水温梯度曲线在含水层及附近区域形成相对于地温梯度曲线明显下凹的形态。

2) 距离含水层的远近对水温梯度和水温潮汐幅度的影响虽然均与含水层进出水有关, 是井水上下对流运动的结果, 但冷水对流与热水对流所形成的温度有所不同。黄村冷水井表现为随着距含水层距离的增加, 水温潮汐差逐渐减小, 水温梯度曲线下凹的程度逐渐减小, 水温梯度与地温梯度逐渐接近, 直至水温潮汐变化消失, 水温梯度曲线与地温梯度曲线重合。

3) 在本次实验中观察到一个特殊现象, 即含水层距离的远近对水温潮汐动态的影响在一定距离后开始递减, 而在一定距离内, 包括含水层及邻近部位, 水温潮汐反而较小。根据井孔水文地质情况, 我们可以定义“一定距离”为含水层的显著影响范围, 显然在这个显著影响范围内, 除了受到地下水纵向流的影响, 还受到横向流的影响, 所以其日潮差受到消减; 在显著影响范围边界上(一定距离上)横向流的影响急剧减弱, 而纵向流的影响并没有减弱多少, 所以日潮差达到最大, 但超出显著影响范围(一定距离)后日潮差便随着纵向流的减弱而减小, 直至消失。

4.2 结论

通过黄村井水温的对比观测, 得出黄村井水温特殊的潮汐变化机理:

1) 黄村冷水源井水温固体潮的相位与水位的相位相反, 这是由于当井中冷水量增加时, 水温下降, 水位上升, 而当冷水量减少时, 水温上升, 水位下降。这与一般观测井的情况不同, 因为大多观测的井孔一般是热水井;

2) 黄村井水温梯度的变化曲线呈下凹型, 这是由冷水源井的水-热动力学特征所决定的。因为含水层冷水源水的温度低于地温背景值, 从而使水温梯度低于正常地温梯度, 并且在含水层及附近受地下水影响大的部位, 水温梯度曲线下凹程度加大, 随着距含水层距离变大, 其下凹程度也变小;

3) 水温传感器与观测含水层距离之间的关系呈冷水源井的特征: 随着距离的增加, 含水层进出水引起的井水对流对水温的影响逐渐降低, 水温梯度曲线下凹程度变小, 水温潮汐差也变小, 直至水温梯度曲线与地温梯度曲线接近重合, 潮汐变化基本消失;

4) 井孔套管对表现为高频信息的杂流有过滤作用, 非含水层部位均有一些杂流的干扰, 但在有套管的部位水温动态曲线很光滑。

本文在撰写过程中, 得到刘耀炜研究员和车用太研究员的悉心指导, 并得到徐平、胡

平及谷永新等几位领导的支持,作者在此一并感谢!

参 考 文 献

- 车用太, 鱼金子. 2013. 井水温度观测中有待解决的若干基本问题[J]. 中国地震, **29**(3): 306–315.
- Che Y T, Yu J Z. 2013. Some basic problems in well water temperature observation[J]. *Earthquake Research in China*, **29**(3): 306–315 (in Chinese).
- 车用太, 何案华, 鱼金子. 2014. 水温微动态形成的水-热动力学与地热动力学机制[J]. 地震学报, **36**(1): 106–117.
- Che Y T, He A H, Yu J Z. 2014. Mechanisms of water-heat dynamics and earth-heat dynamics of well water temperature micro-behavior[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(1): 106–117 (in Chinese).
- 陈沅俊, 姚宝树. 1999. 张北 6.2 级地震地温短临异常特征[J]. 地震, **19**(2): 179–182.
- Chen Y J, Yao B S. 1999. The features of geotemperature in short-term precursory anomalies before the Zhangbei earthquake with $M_{S}6.2$ [J]. *Earthquake*, **19**(2): 179–182 (in Chinese).
- 韩志文, 蒙格平. 2004. 北京市大兴区岩溶地下水水位变化趋势分析[J]. 北京水利, (6): 21–22.
- Han Z W, Meng G P. 2004. Analysis of the trend of water level of karst groundwater in Daxing district, Beijing[J]. *Beijing Water Resources*, (6): 21–22.
- 刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 任宏微. 2008. 井孔水温异常与 2007 年宁洱 6.4 级地震关系分析[J]. 地震研究, **31**(4): 347–353.
- Liu Y W, Sun X L, Wang S Q, Ren H W. 2008. Relationship of bore-hole water temperature anomaly and the 2007 Ning'er $M_{6.4}$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, **31**(4): 347–353 (in Chinese).
- 马玉川. 2010. 井水温度潮汐效应及其应变响应能力研究[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所: 33–45.
- Ma Y C. 2010. *Tidal Effect of Well Water Temperature and Its Response to Strain*[D]. Beijing: Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration: 33–45 (in Chinese).
- 杨竹转. 2011. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所: 70–76.
- Yang Z Z. 2011. *Coseismic Variations of Well Water Level and Temperature Caused by Earthquake Waves and Their Generating Mechanisms*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 70–76 (in Chinese).
- 赵丹, 王广才. 2013. 地下水位气压效应的消除及主要气压影响分波的识别[J]. 中国科学: 技术科学, **43**(1): 79–86.
- Zhao D, Wang G C. 2013. Removing barometric pressure effects from groundwater level and identifying main influential constituents[J]. *Science China Technological Sciences*, **56**: 129–136.
- Esipko O A, Rosaev A E. 2007. The temperature monitoring in Vorotilovo deep well and global climate warming[J]. *Geophys Res Abstr*, **9**: 00533.
- Furuya I, Shimamura H. 1988. Groundwater microtemperature and strain[J]. *Geophys J Int*, **94**(2): 345–353.
- Rosaev A E, Esipko O A. 2003. Lithospheric tidal effects from observations in deep wells[J]. *Celest Mech Dyn Astr*, **87**(1/2): 203–207.
- Shimamura H, Ino M, Hikawa H, Iwasaki T. 1984. Groundwater microtemperature in earthquake regions[J]. *Pure Appl Geophys*, **122**(6): 933–946.