Sustained Change in Tidal Response of Well Water Levels

: Possible Evidence of Confinement Change of Aquifer

Chen-Yue Hu[1], Xin Liao[2], Xue-Liang Chen[1,*]

[1] *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

[2] *School of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China.*

[*] *Corresponding author. Email: chenxueliang007@126.com*

ABSTRACT

Deep confined aquifers overlain by barrier formations may become leaky after large earthquakes, hydrological processes and even land subsidence. It suggests that monitoring of aquifer confinement may be needed to ensure if the deep aquifer is really confined. In recent studies, several methods have been proposed to determine aquifer confinement based on the response of well water levels to Earth and atmospheric tides. And in this paper, we applied a comprehensive (combination of the three) tidal determination method to a deep CX well (~2400m) in North China, and comprehensively determined the confinement of aquifer observed in CX well. The results showed that well tide could quantitively and continuously determine aquifer confinement. And aquifer confinement determined varied significantly between the tidal and traditional method (using lithology at the time of well formation), suggesting not only that there are differences between the methods, but also that aquifer confinement may change with time. The change of aquifer confinement may influence the safe underground storage of waste. In addition, in seismic subsurface fluid observation, wells with well confinement are usually selected for seismic precursor observation wells. Therefore, the determination of aquifer confinement contributes to the safe underground storage of wastewater and provides a theoretical basis for earthquake monitoring and prediction.

Keywords: *Well water levels, Tidal analysis methods, Aquifer confinement.*

井孔水位潮汐响应的持续变化：

含水层封闭性变化的可能证据

胡陈悦 [1]，廖欣 [2]，陈学良 [1,*]

[1] *中国地震局地球物理研究所，北京 100081*

[2] *防灾科技学院，河北三河 065201*

[*] *通讯作者. 电子邮箱：chenxueliang007@126.com*

摘要

在发生大地震、水文过程、甚至地面沉降之后，被厚的、低渗透性地层覆盖的深层封闭含水层可能会出现渗漏。这表明，可能需要对含水层的封闭性进行监测，以确保深层含水层是否真的受到封闭。在最近的研究中，已经提出了几种基于井孔水位对固体地球潮汐和大气潮汐的响应来判定

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_22

含水层封闭性的方法。本文在华北地区的一口深井（沧县井，井深约 2400 米）中应用了综合（三者结合）潮汐判定方法，综合判定了在沧县井中观测到的含水层的封闭性。结果表明，井孔水位潮汐响应可以定量、连续地判定含水层的封闭性。而潮汐方法与传统方法（利用成井时的岩性）判定的含水层封闭性差异较大，这不仅表明两种方法之间存在差异，而且含水层的封闭性可能会随着时间的推移而发生变化。含水层封闭性的变化可能会影响废物的地下安全储存。此外，在地震地下流体观测中，地震前兆观测井通常选择封闭性良好的井。因此，含水层封闭性的判定有助于污水的地下安全储存，并为地震监测和预测提供了理论依据。

关键字：*井孔水位, 潮汐方法, 含水层封闭性*

1. 引言

封闭含水层与地表条件隔离，因此能更好地防止来自较浅区域的抽水或污染[1]。含水层封闭性与地下水环境安全密切相关。石油/天然气开采过程中会产生大量废水[2][3][4][5]，工业生产的废水被排入厚的，低渗透性岩层覆盖的深层含水层中。由于含水层的脆弱性，这种做法旨在保护浅层地下水和饮用水源免受注入废水的影响。然而，这种做法隐含的假设是，被厚厚的低渗透性岩石覆盖的深层含水层是封闭的，因此深部（封闭）含水层和浅部含水层之间没有明显的水力联系，注入的流体不会向上迁移到浅层地下水中[2]。因此，必须持续监测含水层的封闭性，以确定任何潜在的泄漏，并采取必要措施防止地下水以及周围环境受到污染。此外，在地震地下流体观测研究中，为了减少可能出现的人为因素和其他非构造因素的干扰，同时为了更好的响应构造活动或地震孕育过程中的应力或应变的变化，观测含水层的封闭性好坏是评价观测条件（监测能力）极其重要的基本条件。因此，对地震前兆观测井的封闭性研究刻不容缓。

影响含水层封闭性的因素有很多。例如，近场地震可能导致含水层从封闭变为半封闭状态[6][7][8][18]；降雨补给也可能影响浅层含水层的封闭性[8]。判定含水层封闭性的变化对于监测含水层之间垂直水力联系的变化非常重要，这种变化可能会影响含水层的脆弱性[9]、地下污水储存的安全性以及地下水供应的安全性[2]。传统的含水层封闭性判定方法是定性的，只能代表一定时间内的情况，而忽略了封闭性的动态时间变化[10][11]。因此，有必要开发一种定量方法来连续有效地表征含水层的封闭性。

本研究的目标是判定沧县井观测到的深层含水层的封闭性。我们采用了两种方法（传统方法和综合潮汐判定方法）来判定含水层的封闭性。比较了基于成井时岩性的传统方法和基于井水位潮汐响应的综合判定方法得出的结果，结果表明这两种方法之间不仅存在差异，而且含水层的封闭性可能会随着时间的推移而发生变化。

2. 研究区概况和方法

2.1 判定含水层封闭性的综合方法

月球和太阳运动对地球产生的引力以及自转产生的离心力作用于整个固体地球，在固体地壳内产生微小的径向和垂向应变，导致井孔观测到的含水层中的水在水平和垂直方向流动[12]。这种现象被称为井孔水位的潮汐响应。在此，本文介绍基于井孔水位对固体地球潮汐和大气潮汐的响应来定量判定含水层封闭性的三种单一方法。第一种方法基于 M_2 波的相位移值[13][14]。相位移指的是井水位固体潮汐的相位与理论固体潮汐应变的相位之差（相位移为正或负）。根据 Hsieh 等人（1987）的理论曲线（图 1b, d），当越流量（u）非常小（$<10^{-9}$ s^{-1}）时，含水层表现为封闭含水层，相位移为负值。这是因为含水层中的地下水总是需要时间来对潮汐力做出孔弹性响应，并流入或流出井孔（Liao 和 Wang，2018）。当越流量（u）

非常大（$>10^{-9}$ s^{-1}）时，含水层表现为非封闭含水层，相位移为正值。因此，可以利用 M_2 波的相位移值来判定含水层的封闭性[13]。

第二种方法是基于 M_2 波的振幅比-相位移关系[13][14]。根据 Hsieh 等人（1987）封闭含水层的理论曲线（图 1a,b）和 Doan 等人（2006）非封闭含水层的理论曲线（图 1c,d）在不同越流量（u）下 M_2 波的振幅-相位移关系曲线。显示，对于封闭含水层，越流量的增加会导致振幅（A）和相位移（η）成比例地增加。另一方面，对于非封闭含水层，u 的增加会导致振幅（A）成反比地减小，相位移（η）成反比地增大。因此，可以利用 M_2 波的振幅比-相移关系来确定含水层的封闭性[13]。

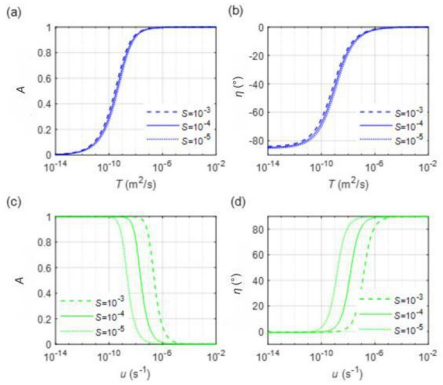

图 1 不同储水系数（S）下封闭含水层和非封闭含水层理论曲线图（修改自 Liao 等，2022）

第三种方法基于 M_2 波和 S_2 波的振幅差[1][14]。M_2 波受固体地球潮汐的影响，因此具有与固体潮汐一致的特征信号；而 S_2 波信号的频率与每日大气压力变化的频率相同，因此具有大气特征。通过测量固体地球潮汐和大气潮汐各自的影响，这两个信号可用于评估含水层的封闭性。当井水位的潮汐响应主要受大气载荷影响时，S_2 波的振幅明显大于 M_2 波的振幅，含水层被判定为非封闭含水层。与之相对应地，当井水位的潮汐响应主要受固体地球潮汐荷载时，S_2 波的振幅明显小于 M_2 波的振幅，含水层被判定为封闭含水层。因此，可以利用 M_2 波和 S_2 波的振幅差来确定含水层的封闭性[1][9]。

为了克服单一方法的局限性，尽量减少结果的不确定性，本研究采用了一种综合方法，将单一方法结合起来。综合法的结果是将各种单一方法的加权结果相加得出的，并通过解释该结果来判定含水层的封闭特性（表 1）。例如，如果含水层被两种单一方法判定为封闭含水层，而另一种单一方法判定为非封闭含水层，则综合值等于 1，该含水层被综合判定为半封闭含水层。如果用两种单一方法判定含水层为非封闭含水层，而用另一种单一方法判定含水层为封闭含水层，则综合值等于-1，含水层被综合判定为半封闭含水层。

从理论上讲，在判定含水层封闭性方面，综合方法比单一方法更有效，因为前者比后者有更多的判定标准，可以减少单一方法带来的不确定性和不稳定性。在第三节中，本研究将基于综合方法判定在沧县井中观测到的含水层的封闭性变化。

表 1 含水层封闭性综合判定对照表

单一方法	权重值	综合方法	综合判定值
封闭含水层	1	封闭含水层	2，3
半封闭含水层	0	半封闭含水层	-1，0，1
非封闭含水层	-1	非封闭含水层	-3，-2

2.2 井孔选择和观测条件

本文利用的是位于华北平原区上的沧县井（38.3°N，116.9°E），如图 2 所示，该井的水位因抽水而呈现典型的下降趋势。沧县井的水位主要是基于高精度（精度达 1 毫米）数字水位记录（10 年数据）。数字压强计读数转换为水位，范围为 0-10 米，采样间隔为 1 分钟。沧县深井（2362 米）记录的水位数据显示，在含水层封闭性发生变化期间（图 3 中的虚线），水位呈持续下降趋势，且未发生任何地震（图 3）。该井的基本信息见表 2。沧县井距离海岸超过 70 千米，因此，忽略海洋潮汐带来的影响[15]。

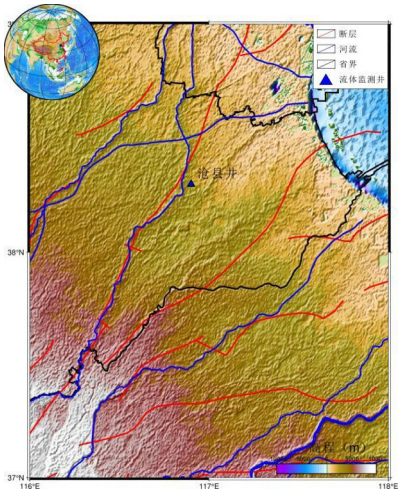

图 2 研究区概况图

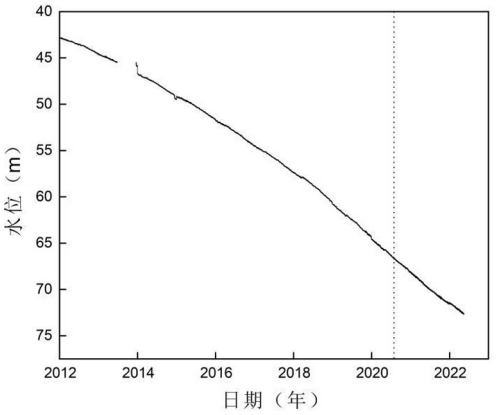

图 3 沧县井水位曲线图

表 2 沧县井基本情况表

井孔名称（缩写）	井深（m）	观测含水层段（m）	含水层厚度（m）	弱透水层厚度（m）	主要岩性
沧县冀 18 井（CX）	2362	1390~1870	480	1390	灰岩

3. 结果和讨论

一般来说，上覆弱透水层的厚度越大，深层和浅层含水层之间建立的水力联系就越少，含水层就越有可能受到封闭。越流系数（$u = K'/b'$）的大小受上覆弱透水层厚度（b'）和垂向导水系数（K'）的影响，从而

影响含水层的封闭性。换言之，观测到的含水层埋藏深度和上覆弱透水层的岩性分别影响弱透水层厚度和垂向导水系数，最终影响含水层的封闭性。在沧县井中观测到的含水层埋深为 1390 米，基于传统方法（即利用成井时的岩性）定性判定为封闭含水层。

图 4 用于判定含水层的封闭性。图 4(a)、(b)和(c)分别显示了 2012 年至 2022 年沧县井 M_2 波的相位移、M_2 波的振幅和相位移以及 M_2 和 S_2K_2 波的振幅随时间的变化。综合方法的结果表明，含水层的封闭性在长期连续监测过程中发生了变化。在含水层封闭性的阶梯状变化中，均未发现地震和降雨的影响。考虑到沧县井位于华北地区的地面沉降中心[16]，含水层封闭性的阶梯状变化可能是由于非均匀固结引起的浅层地层破坏所致，而浅层地层通常起着封闭的作用。

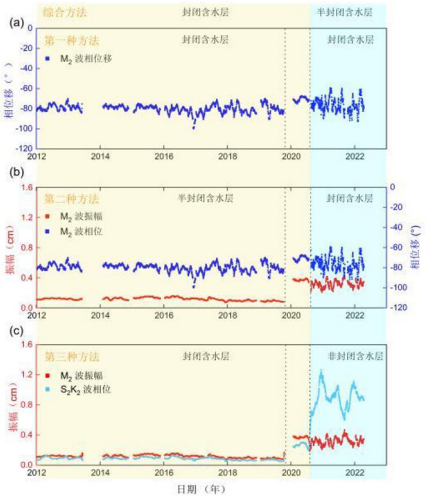

图 4 单一方法的相位移和振幅的时间变化序列图

4. 结论

应用综合潮汐判定方法判定了位于华北地区上的沧县井中观测到的含水层封闭性变化情况。结果表明，井孔水位潮汐响应可用于连续定量监测含水层封闭特性。综合方法的结果表明，即使含水层的埋藏深度较大，沧县井观测到的含水层封闭性也会随着时间的推移而发生变化。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划项目（2023YFC3007305，2019YFC1509403）；国家自然科学基金（51978633，51678537）的资助。

参考文献

[1] Khayyun, A., Rahi, Todd, and Halihan, "Identifying Aquifer Type in Fractured Rock Aquifers using Harmonic Analysis," Groundwater, 2013.

[2] Y. Zhang, C. Y. Wang, L. Y. Fu, and Q. Y. Yang, "Are Deep Aquifers Really Confined? Insights From Deep Groundwater Tidal Responses in the North China Platform," Water Resources Research, vol. 57, 2021.

[3] F. R. Walsh and M. D. Zoback, "Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal," Science Advances, vol. 1, no. 5, pp. e1500195-e1500195, 2015.

[4] S. Ingebritsen and C. E. Manning, "Dynamic Variations in Crustal Permeability: Possible Implications for Subsurface CO2 Storage," 2011.

[5] C. Zhuang et al., "Effects of exponentially decaying aquitard hydraulic conductivity on well hydraulics and fractions of groundwater withdrawal in a leaky aquifer system," Journal of Hydrology, vol. 607, pp. 127439-, 2022.

[6] Y. Shi, X. Liao, D. Zhang, and C. p. Liu, "Seismic Waves Could Decrease the Permeability of the Shallow Crust," Geophysical Research Letters, vol. 46, no. 12, 2019.

[7] Y. Zhang, C. Y. Wang, L. Y. Fu, B. Zhao, and Y. Ma, "Unexpected far-field

hydrological response to a great earthquake," Earth and Planetary Science Letters, vol. 519, pp. 202-212, 2019.

[8] X. Liao, C. Y. Wang, and Z. Y. Wang, "Seasonal change of groundwater response to Earth tides," Journal of Hydrology, 2022.

[9] Allegre et al., "Using earth-tide induced water pressure changes to measure in situ permeability: A comparison with long-term pumping tests," Water Resources Research, 2000.

[10] R. Valois, G. C. Rau, J. M. Vouillamoz, and B. Derode, "Estimating Hydraulic Properties of the Shallow Subsurface Using the Groundwater Response to Earth and Atmospheric Tides: A Comparison With Pumping Tests," Water Resources Research, vol. 58, 2022.

[11] P. A. Cutillo and J. D. Bredehoeft, "Estimating Aquifer Properties from the Water Level Response to Earth Tides," Ground Water, 2011.

[12] X. Liao and C. Y. Wang, "Seasonal Permeability Change of the Shallow Crust Inferred From Deep Well Monitoring," Geophysical Research Letters, vol. 45, 10/10 2018.

[13] C. Y. Wang, M. L. Doan, L. Xue, and A. J. Barbour, "Tidal response of groundwater in a leaky aquifer: application to Oklahoma," Water Resources Research, vol. 54, no. 10, pp. 8019-8033, 2018.

[14] K. Rahi, "Estimating the hydraulic parameters of the Arbuckle-Simpson aquifer by analysis of naturally-induced stresses," Dissertations & Theses Gradworks, 2010.

[15] C. Beaumont and J. Berger, "An analysis of tidal strain observations from the United States of America: I. The laterally homogeneous tide," Bulletin of the Seismological Society of America, 1975.

[16] H. Guo et al., "Land subsidence and its affecting factors in Cangzhou, North China Plain," Frontiers in Environmental Science, vol. 10, p. 1053362, 10/01 2022.

[17] A. Thomas, J. Fortin, V. Benoit, and S. Violette, "Earthquakes and Heavy Rainfall Influence on Aquifer Properties: A New Coupled Earth and Barometric Tidal Response Model in a Confined Bi-Layer Aquifer," Water Resources Research, vol. 59, 04/05 2023.

[18] Y. Zhang et al., "Possible Continuous Vertical Water Leakage of Deep Aquifer: Records from a Deep Well in Tianjin Province, North China," Geofluids, vol. 2022, pp. 1-14, 11/16 2022.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.