

doi:10.3799/dqkx.2015.104

# 承压井含水层孔隙度与固体骨架和水的体积压缩系数之间的关系

丁风和<sup>1</sup>, 韩晓雷<sup>1</sup>, 哈媛媛<sup>2</sup>, 戴勇<sup>1</sup>, 梁莹<sup>1</sup>

1. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古呼和浩特 010010

2. 内蒙古大学交通学院, 内蒙古呼和浩特 010020

**摘要:** 孔隙度和岩石压缩系数等方面的研究在评价油藏弹性产能和动态地质储量方面有重要的应用价值. 结合国家地震前兆台网中心数据库8口井的数字化水位资料等, 研究了承压井含水层介质在不排水状态下的孔隙度、固体骨架的体积压缩系数和含水层内水的体积压缩系数. 结果表明, 孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和含水层内水的体积压缩系数间存在幂函数关系. 在第1象限内, 各井含水层介质固体骨架的体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大; 含水层内水的体积压缩系数随着孔隙度的增大而减小. 固体骨架和含水层内水的体积压缩系数间满足一元二次多项式关系, 且含水层内水的体积压缩系数要比固体骨架的体积压缩系数大, 水更易压缩. 另外, 灰岩骨架的压缩系数相对小于砂岩骨架的压缩系数.

**关键词:** 井水位; 承压井—含水层系统; 体积压缩系数; 孔隙度; 地下水.

中图分类号: P349

文章编号: 1000-2383(2015)07-1248-06

收稿日期: 2014-12-06

## Relationship of Porosity and Volume Compression Coefficient of Solid Skeleton and Water in Artesian Well Aquifer

Ding Fenghe<sup>1</sup>, Han Xiaolei<sup>1</sup>, Ha Yuanyuan<sup>2</sup>, Dai Yong<sup>1</sup>, Liang Yin<sup>1</sup>

1. Seismological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

2. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China

**Abstract:** The study of porosity and rock compressibility etc has important application value in the evaluation of the elastic capacity and dynamic geological reserves of the reservoir. Water level digital data of 8 wells provided by the National Earthquake Precursor Network Center are studied to explore the relationship of porosity and volume compression coefficient between solid skeleton and water in artesian well aquifer medium under undrained condition. The results show that there exists a power function relation between the porosity and the solid skeleton volume compression coefficient and water volume compression coefficient in the aquifer. In the first quadrant, each well aquifer solid skeleton volume compression coefficient increases with increasing porosity, whereas the volume compression coefficient of water decreases with the increase of porosity, with one of two quadratic polynomial relationships between the solid skeleton and water volume compression coefficient in the aquifer. The volume compression coefficient of water in the aquifer is larger than that of the solid skeleton, and water is more easily compressed. In addition, the compression coefficient of limestone skeleton is relatively smaller than that of sandstone.

**Key words:** well water level; artesian well-aquifer system; volume compression coefficient; porosity; groundwater.

孔隙度和岩石压缩系数等方面的研究, 一直是油藏工程领域研究的热点问题之一. 学者们所关心

和研究的岩石压缩系数指的是岩石孔隙体积压缩系数, 它在评价油藏弹性产能和动态地质储量方面有

基金项目: 2014年度震情跟踪合同制定向重点工作任务资助项目(No.2014010301).

作者简介: 丁风和(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地震地下流体方面研究. E-mail: dingfenghe@126.com

引用格式: 丁风和, 韩晓雷, 哈媛媛, 等, 2015. 承压井含水层孔隙度与固体骨架和水的体积压缩系数之间的关系. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1248—1253.

重要的应用价值.但这些参数一般都通过实验仪器测量来获取.而固体骨架的压缩系数则在上述参数确定的基础上,通过理论关系式来求得(李传亮,2003).并且一般认为,对于特定的岩石来说,固体骨架的压缩系数为一常数,即岩石骨架处于压实状态,不存在弹性变形.

而对于地震工作者来说,利用井潮、气压等资料来分析井一含水层系统的固体潮效应、气压效应以及含水层参数(孔隙度、固体骨架和水的体积压缩系数或模量等)等方面的研究较多(Bredehoeft,1967; George and Edwin,1979; Kamp and Gale,1983; Narasinmhan *et al.*,1984; 田竹君和谷园珠,1985; Rojstaczer,1988; 张昭栋等,1989,1995; 李春洪等,1990; Erskine,1991; John *et al.*,1991; Gui *et al.*,2013).譬如,在不排水状态下,一般都是给出气压系数或是潮汐因子和孔隙度、固体骨架的体积压缩系数、水的体积压缩系数间的定量关系,并进行分析讨论.

前人虽然在这些方面取得了非常重要的成果.但孔隙度与固体骨架的体积压缩系数间,孔隙度与水的体积压缩系数间呈怎样的变化规律,其关系式是什么?另外固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数间有着怎样的定量关系.这些方面的研究较少.虽然传统的 Hall 图版(Hall,1953)给出了孔隙度与岩石孔隙体积压缩系数的定量关系(孔隙度与岩石孔隙体积压缩系数间存在系数为常数的幂函数关系).但十余年来,围绕孔隙度与岩石孔隙体积压缩系数间变化关系的研究,一直争论不断(李传亮,2003,2005; 罗瑞兰,2006; 窦宏恩,2010).

本文以从国家地震前兆台网中心数据库下载的8口井数字化水位等资料为基础,基于岩石力学、弹性力学和流体力学的相关理论,利用各井气压效率和潮汐因子,对各井含水层介质在不排水状态下的孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数进行了计算.笔者结合含水层介质在弹性状态下的三相物质体积变化模型,对孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数间的变化规律进行机理分析,并给出了它们间的变化关系式;同时利用含水层岩性资料,对各井固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数间的差异性进行了分析.

## 1 基本理论及参数求取方法

依据前人的研究结果(Bredehoeft,1967; 张昭

栋等,1989,1995; 李春洪等,1990),不排水状态下,井水位的气压效率和潮汐因子可分别表示为:

$$B_p = \frac{nc_w}{c_s + nc_w}, \quad (1)$$

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g [(1-n)c_s + nc_w]}, \quad (2)$$

上两式联合可得到下式:

$$B_g = -\frac{1-n}{\rho g nc_w \left[ \frac{(1-n)(1-B_p)}{B_p} + 1 \right]}, \quad (3)$$

式中: $B_p$ 代表气压效率(mm/hpa); $B_g$ 代表潮汐因子(mm/ $10^{-9}$ ); $n$ 代表含水层的有效孔隙度,无量纲; $c_s$ 代表固体骨架的体积压缩系数( $10^{-10}$ /hpa); $c_w$ 代表含水层内水的体压缩系数( $10^{-10}$ /hpa); $\rho g$ 代表水的重度(0.098 hpa/mm).

其中,潮汐因子 $B_g$ 可由维尼迪柯夫潮汐调和获取,笔者选择 $M_2$ 波进行潮汐调和获取,主要是因为上述8口井都处于中纬度地区,其水位 $M_2$ 波振幅最大,它具有最大的信噪比;气压效率 $B_p$ 可由高阶差分(张昭栋,1986)得到,本文研究取0~3阶差分中,水位和气压相关系数最大的那阶滑动求得.所以含水层的孔隙度 $n$ 、水的体压缩系数 $c_w$ 据式(3)亦可滑动得到.最后利用式(1)或式(2)求出固体骨架的体积压缩系数 $c_s$ .

## 2 含水层介质体积变化模型构建

自然状态下,含水层介质一般是由固相的骨架颗粒、相互连通的孔隙和其中的流体物质耦合在一起而形成的固、液、气三相物体,本文所研究的流体物质主要指水(图1).

假设在弹性状态下,外应力保持不变,外观总体积亦不变.依据含水层介质体积压缩系数的定义(单位压

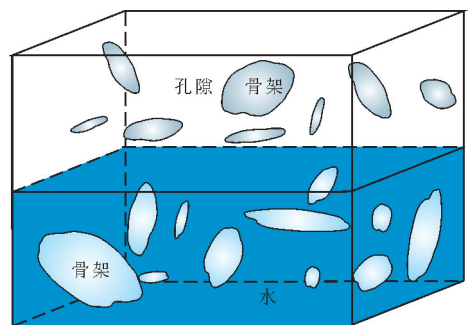


图1 含水层介质构成示意

Fig.1 Schematic of aquifer medium

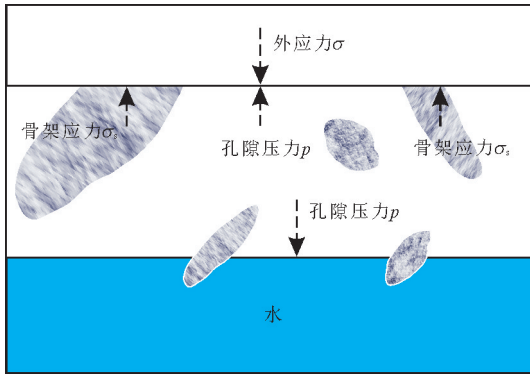


图 2 含水层介质应力关系示意

Fig.2 Aquifer medium stress

力下的体积变化率),水的体积压缩系数可表示为:

$$c_w = \frac{\partial V_w}{V_w \cdot \partial p} \quad (4)$$

固体骨架的体积压缩系数可表示为(秦同洛等, 1989):

$$c_s = \frac{\partial V_s}{V_s \cdot \partial \sigma_s} \quad (5)$$

式中: $c_w$  代表含水层内水的体压缩系数( $10^{-10}/\text{hpa}$ ); $\partial V_w$  代表水的体积变化量( $\text{mm}^3$ ); $V_w$  代表水的体积( $\text{mm}^3$ ); $\partial p$  代表孔隙压力变化量(hpa); $c_s$  代表固体骨架的体积压缩系数( $10^{-10}/\text{hpa}$ ); $\partial V_s$  代表固体骨架的体积变化量( $\text{mm}^3$ ); $V_s$  代表固体骨架的体积( $\text{mm}^3$ ); $\partial \sigma_s$  代表骨架应力变化量(hpa).

结合有效孔隙度定义,当孔隙压力  $p$  减小,则水的体积  $V_w$  增大.在外应力保持不变情况下,骨架应力  $\sigma_s$  就会增大,骨架体积  $V_s$  则减小,并带动孔隙体积  $V_p$  一起减小.换句话说,当  $V_w$  体积变大,而  $V_p$ 、 $V_s$  体积变小时,为有效孔隙度由  $1 \rightarrow 0$  的情形.反之,当  $V_w$  体积变小,而  $V_p$ 、 $V_s$  体积变大时,为有效孔隙度由  $0 \rightarrow 1$  变化的情形(图 2).

### 3 各井体积压缩系数和孔隙度间的变化特征

#### 3.1 有关水井的参数

本文研究的宝坻井、王 3 井、板桥井、昌平井、大灰厂井、宁河井、辛庄井和玉田井,大多是承压水观测井(表 1).由于其运行时间相对较长且连续稳定、固体潮形态明显,其是开展体积压缩系数和孔隙度等研究的理想观测井.这 8 口井的井深、含水层岩性、地下水类型、水位埋深、海拔高度以及资料分析研究起始时间等情况见表 1.

#### 3.2 各井孔隙度和体积压缩系数的关系

(1)从 8 口井各自的孔隙度和固体骨架体积压缩系数的关系可以看出(图 3a 和 3b,表 2),二者间存在明显的幂函数性质,即  $c_s = b(1-n)^c$ .其孔隙度  $n$  的范围为  $0 \sim 1$ ,固体骨架体积压缩系数  $c_s$  的范围为  $0 \sim +\infty$ ,且幂指数  $c < 0$ .这表明在第 1 象限内,各井含水层介质固体骨架的体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大.当骨架应力减小,骨架体积增大(膨胀),其体积变化量(或变化率)亦越大(易压缩).所以,骨架体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大.

(2)另外,8 口井孔隙度和水的体积压缩系数间亦存在明显的幂函数关系,即  $c_w = bn^c$  ( $c < 0$ ).在第 1 象限,各井含水层介质水的体积压缩系数随着孔隙度的增大而呈减函数(图 4a 和 4b,表 2).这是因为当孔隙压力增大时,水体难压缩,则水的体积压缩系数亦减小.

(3)水的体积压缩系数在随孔隙度的增大而减小过程中,水的弹性变形越来越小.这是因为水的压缩系数越来越小,其体积变化量亦越小,水也就越难压缩.与此同时,固体骨架则表现为易压缩、弹性变形渐强的过程.

表 1 开展研究的 8 口井基本情况

Table 1 General information of the 8 wells studied

序号	井点名称	井深(m)	含水层岩性	地下水类型	水位埋深(m)	海拔高度(m)	资料处理起始时间(年-月)
1	宝坻井	427.17	灰岩	承压水	14.0	5.0	2005-04
2	王 3 井	1 077.00	灰岩和白云岩	岩溶自流	0.0	3.5	2002-01
3	板桥井	283.60	硅质石灰岩	裂隙承压水	39.6	41.0	2008-01
4	昌平井	221.60	白云质灰岩	裂隙承压水	68.2	100.0	2002-01
5	大灰厂井	102.00	砂页岩	孔隙裂隙混合水	14.5	147.0	2008-01
6	宁河井	60.00	砂岩和粘土为主	承压水	52.6	2.5	2002-01
7	辛庄井	648.12	砂质粘土及砂土	承压水	102.2	2.0	2008-01
8	玉田井	456.40	奥陶系灰岩	裂隙承压水	7.5	80.0	2002-01

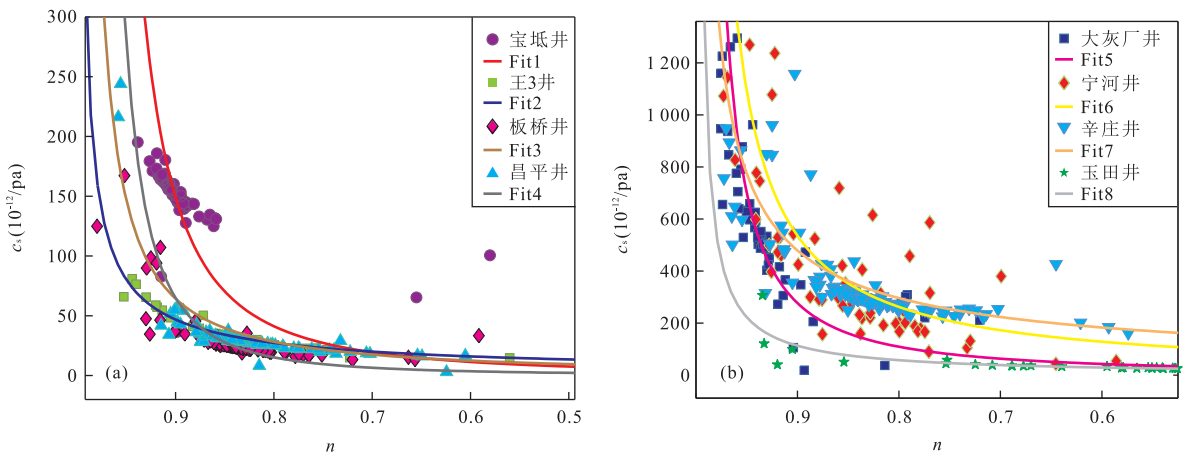


图 3 各井孔隙度(n)和固体骨架的体积压缩系数(cs)间的关系

Fig.3 Relationship between porosity (n) and solid skeleton volume compression coefficient (cs) of the wells

表 2 不排水状态下 8 口井孔隙度和体积压缩系数的拟合结果

Table 2 Undrained condition fitting results of porosity and volume compression coefficient of 8 wells

序号	井点名称	孔隙度 n 和固体骨架的体积压缩系数 cs 间的关系			孔隙度 n 和水的体积压缩系数 cw 间的关系		
		拟合方程	R <sup>2</sup>	标准差	拟合方程	R <sup>2</sup>	标准差
1	宝坻井	$c_s = 0.5756(1-n)^{-1.8550}$	0.3505	104.600	$c_w = 0.000141n^{-4.5610}$	0.6504	426.90
2	王 3 井	$c_s = 4.5950(1-n)^{-0.7749}$	0.9472	4.795	$c_w = 0.90601n^{-1.5590}$	0.5806	59.46
3	板桥井	$c_s = 1.8390(1-n)^{-1.1870}$	0.3811	64.050	$c_w = 0.0403n^{-2.5520}$	0.8204	51.37
4	昌平井	$c_s = 0.1222(1-n)^{-2.0950}$	0.7558	63.250	$c_w = 1.6320 \times 10^{-9}n^{-7.0410}$	0.9111	559.40
5	大灰厂井	$c_s = 4.9300(1-n)^{-1.3450}$	0.7006	370.500	$c_w = 1.6390 \times 10^{-4}n^{-4.1090}$	0.7225	1707.00
6	宁河井	$c_s = 24.3800(1-n)^{-1.0320}$	0.6771	310.900	$c_w = 2.3730n^{-2.1740}$	0.8669	1858.00
7	辛庄井	$c_s = 59.8900(1-n)^{-0.6942}$	0.4510	228.400	$c_w = 2.6030n^{-1.9750}$	0.7023	1240.00
8	玉田井	$c_s = 6.0370(1-n)^{-0.9782}$	0.6709	18.720	$c_w = 3.9830 \times 10^{-8}n^{-7.2260}$	0.8267	129.70

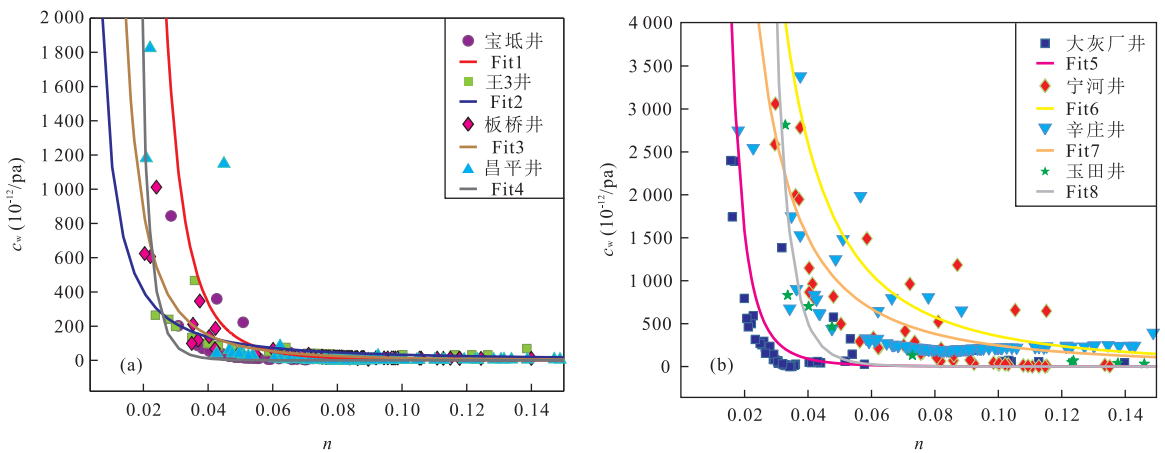


图 4 各井孔隙度(n)和水的体积压缩系数(cw)间的关系

Fig.4 Relationship between porosity (n) and water volume compression coefficient (cw) of the wells

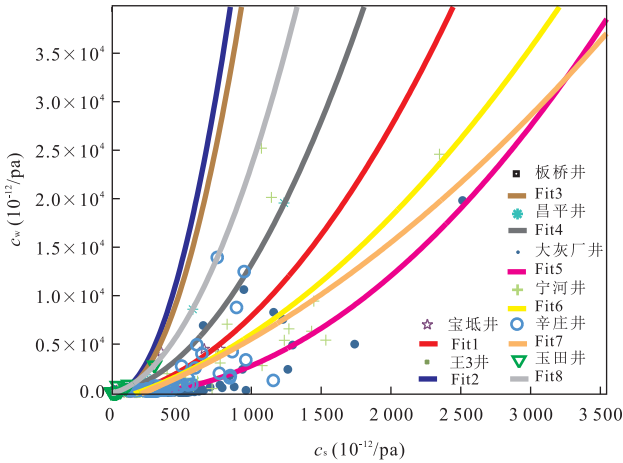
### 3.3 各井固体骨架和水的体积压缩系数间的关系

从 8 口井固体骨架和水的体积压缩系数间的拟合情况来看,固体骨架和水的体积压缩系数间满足一元二次多项式关系,且水的体积压缩系数要比固体骨架的体积压缩系数大(表 3)。当水的体积压缩系数为定值时,固体骨架压缩系数由小到大的井分别

是王 3 井、板桥井、玉田井、昌平井、宝坻井、宁河井、辛庄井和大灰厂井(图 5)。固体骨架压缩系数小,说明骨架的体积变化量小,含水层介质骨架越硬,越难压缩。结合表 1 中各井含水层岩性,王 3 井、板桥井、玉田井、昌平井、宝坻井都以坚硬难压缩的灰岩为主,所以其固体骨架压缩系数相对较小。宁河井、辛

表 3 8 口水井体积压缩系数( $c_s$  与  $c_w$ )间关系统计Table 3 Statistics of the 8 wells volume compression coefficient ( $c_s$  and  $c_w$ )

序号	井点名称	拟合方程	$R^2$	标准差
1	宝坻井	$c_w = 0.005598c_s^2 - 2.778c_s - 507.60$	0.7778	304.20
2	王3井	$c_w = 0.057550c_s^2 - 2.184c_s + 48.70$	0.8594	22.84
3	板桥井	$c_w = 0.048880c_s^2 - 2.746c_s + 53.62$	0.9374	24.50
4	昌平井	$c_w = 0.010890c_s^2 + 2.364c_s - 66.88$	0.9340	484.00
5	大灰厂井	$c_w = 0.003094c_s^2 - 0.01124c_s - 316.20$	0.7337	1686.00
6	宁河井	$c_w = 0.002626c_s^2 + 4.265c_s - 888.80$	0.6229	3132.00
7	辛庄井	$c_w = 0.001572c_s^2 + 5.242c_s - 1286$	0.4405	1404.00
8	玉田井	$c_w = 0.020100c_s^2 + 3.308c_s - 71.85$	0.9439	72.70

图 5 8 口水井体积压缩系数( $c_s$  与  $c_w$ )间关系曲线Fig.5 Relationship curves of volume compression coefficient ( $c_s$  and  $c_w$ ) of the 8 wells

庄井和大灰厂井以相对松散易压缩的砂岩为主, 所以其固体骨架压缩系数相对较大, 即孔隙度相对较大的砂岩其骨架的压缩系数要高于灰岩的。

## 4 认识与讨论

(1) 本文研究的 8 口井各自的孔隙度与固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数之间, 存在明显的幂函数关系, 这和 Hall 图版在表达形式上是类似的, 其定义域(指孔隙度  $n$ )为  $0 \sim 1$ , 值域(指固体骨架的体积压缩系数或水的体积压缩系数)为  $0 \sim +\infty$ , 且幂指数  $c < 0$ . 在第 1 象限内, 各井含水层介质固体骨架的体积压缩系数随着孔隙度的增大而增大, 水的体积压缩系数随着孔隙度的增大而呈减函数。

(2) 通过拟合, 8 口井固体骨架和水的体积压缩系数间满足一元二次多项式关系, 且水的体积压缩系数要比固体骨架的体积压缩系数大, 水更易压缩。王 3 井、板桥井、玉田井、昌平井和宝坻井都以坚硬

难压缩的灰岩为主, 所以其固体骨架压缩系数相对较小, 宁河井、辛庄井和大灰厂井以相对松散易压缩的砂岩为主, 所以其固体骨架压缩系数相对较大。

(3) 虽然上述建立的含水层介质体积变化模型(图 2), 目前仍处在学术争论阶段, 但本文利用 8 口观测井的潮汐因子和气压效率滑动, 求取各井含水层的孔隙度、水的体压缩系数和固体骨架的体积压缩系数, 其结果进一步印证和支持了上述含水层介质体积变化模型。

(4) 本文分析讨论的含水层介质都是弹性的, 但固体物质只能在一定的应力范围内呈现出弹性, 超出这个范围, 即超出材料的弹性极限, 固体物质将出现不可恢复的塑性变形。现实中, 含水层介质固体骨架的体积压缩系数为一常数就是由于这样的原因。

(5) 与传统的现场抽水试验和室内实验等不同, 本项研究结果表明, 利用数字化水位等资料, 结合气压系数和维尼迪科夫潮汐调和分析结果, 从而获取含水层介质的孔隙度、固体骨架的体积压缩系数和水的体积压缩系数是简便易行的。结合上述孔隙度和含水层内水的体积压缩系数等的幂函数关系以及含水层介质的应力关系(图 2), 跟踪分析孔隙度和水的体积压缩系数等的时序动态变化过程, 可进行含水层介质的构造应力变化等分析。这也是进行地震前兆异常和机理分析的最终落脚点。当然, 上述研究都是在假设含水层介质是线性、均质和各向同性的弹性体, 井中的水为理想流体, 同时外应力和外观总体积保持不变的情况下完成的。在实际应用过程中还需进行深入研究。

致谢: 在本研究过程中, 得到了西南石油大学李传亮教授、中国地震台网中心黄辅琼研究员和晏锐博士等的悉心指导和帮助。另外, 中国地震台网中心张晶研究员还提供了维尼迪柯夫潮汐调和分析程序。在此一并表示衷心的感谢。

## References

- Bredehoeft, J. D., 1967. Response of Well-Aquifer Systems to Earth Tides. *Journal of Geophysical Research*, 72(12): 3075—3087. doi: 10.1029/JZ072i012p03075
- Dou, H. E., 2010. The Justice of Rock Pore Compressibility: A Basis of Understanding Low Permeability Reservoirs. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 17(5): 119—122 (in Chinese with English abstract).
- Erskine, A. D., 1991. The Effect of Tidal Fluctuation on a Coastal Aquifer in the UK. *Groundwater*, 29(4): 556—562. doi: 10.1111/j.1745—6584.1991.tb00547.x
- George, H. R., Edwin, S. R., 1979. Determination of Aquifer Parameters from Well Tides. *Journal of Geophysical Research*, 84(B11): 6071—6082. doi: 10.1029/JB084iB11p06071
- Hall, H. N., 1953. Compressibility of Reservoir Rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 5(1): 17—19. doi: org/10.2118/953309-G
- John, B., Keith, E. S., Mousa, D. S., 1991. Estimating Aquifer Parameters from Analysis of Forced Fluctuations in Well Level: An Example from the Nubian Formation near Aswan, Egypt 2 Poroelastic Properties. *Journal of Geophysical Research*, 96(B7): 12139—12160. doi: 10.1029/91JB00956
- Kamp, G., Gale, J. E., 1983. Theory of Earth Tide and Barometric Effects in Porous Formations with Compressible Grains. *Water Resources Research*, 19(2): 538—544. doi: 10.1029/WR019i002p00538
- Lai, G. J., Ge, H. K., Wang, W. L., 2013. Transfer Functions of the Well-Aquifer Systems Response to Atmospheric Loading and Earth Tide from Low to High-Frequency Band. *Journal of Geophysical Research*, 118(5): 1904—1924. doi: 10.1002/jgrb.50165
- Li, C. H., Chen, Y. H., Tian, Z. J., 1990. The Dynamic Response of Well-Aquifer System to Earth Tides and Its Influence Factors. *Earthquake Research in China*, 6(2): 37—45 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. L., 2003. The Relationship between Rock Compressibility and Porosity. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(5): 355—358 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. L., 2005. Low Permeability Rocks are Less Sensitive to Stress. *Oil Drilling & Production Technology*, 27(4): 61—63 (in Chinese with English abstract). doi: 1000—7393(2005)04—0061—03
- Luo, R. L., 2006. Queries to the Viewpoint-Low Permeability Reservoirs Have not the Characteristics of Strong Stress Sensitivity. *Oil Drilling & Production Technology*, 28(2): 78—80 (in Chinese with English abstract). doi: 1000—7393(2006)02—0078—36
- Qin, T. L., Li, D., Chen, Y. Q., 1989. Practical Methods of Reservoir Engineering. Petroleum Industry Press, Beijing, 64 (in Chinese).
- Narasimhan, T. N., Kanehiro, B. Y., Witherspoon, P. A., 1984. Interpretation of Earth Tide Response of Three Deep, Confined Aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 89(B3): 1913—1924. doi: 10.1029/JB089iB03p01913
- Rojstaczer, S., 1988. Determination of Fluid Flow Properties from the Response of Water Levels in Wells to Atmospheric Loading. *Water Resources Research*, 24(11): 1927—1938. doi: 10.1029/WR024i011p01927
- Tian, Z. J., Gu, Y. Z., 1985. Analysis and Processing of Data on Fluctuations of Groundwater Level. *Seismology and Geology*, 7(3): 51—59 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. D., 1986. High-Order Difference Method for Deep Well Water Level Pressure Coefficient. *Journal of Seismology*, (2): 74—78 (in Chinese).
- Zhang, Z. D., Zheng, J. H., Feng, C. G., 1989. Quantitative Relationship between the Earth Tide Effect of Well Water Level, the Barometric Pressure Effect and the Parameters of Aquifers. *Northwestern Seismological Journal*, 11(3): 47—52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. D., Zheng, J. H., Zhang, G. C., 1995. Response Functions of Well Aquifer System to Tide. *Northwestern Seismological Journal*, 17(3): 66—71 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 窦宏恩, 2010. 正确对待岩石孔隙压缩系数是认识低渗透储层的基础——兼答《应科学看待低渗透储集层》一文作者. 特种油气藏, 17(5): 119—122.
- 李春洪, 陈益惠, 田竹君, 1990. 井—含水层系统对固体潮的动态响应及其影响因素. 中国地震, 6(2): 37—45.
- 李传亮, 2003. 岩石压缩系数与孔隙度的关系. 中国海上油气(地质), 17(5): 355—358.
- 李传亮, 2005. 低渗透储层不存在强应力敏感. 石油钻采工艺, 27(4): 61—63.
- 罗瑞兰, 2006. “对低渗透储层不存在强应力敏感”观点的质疑. 石油钻采工艺, 28(2): 78—80.
- 秦同洛, 李璽, 陈元千, 1989. 实用油藏工程方法. 北京: 石油工业出版社, 64.
- 田竹君, 谷园珠, 1985. 地下水微动态资料的分析与处理. 地震地质, 7(3): 51—59.
- 张昭栋, 1986. 高阶差分法求深井水位的气压系数. 地震学刊, (2): 74—78.
- 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚, 1989. 井水位固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系. 西北地震学报, 11(3): 47—52.
- 张昭栋, 郑金涵, 张广城, 1995. 水井含水层系统的潮汐响应函数. 西北地震学报, 17(3): 66—71.