

川滇地区数字化水位孔隙度和渗透系数时序特征分析*

魏建民, 韩晓雷*, 李彬, 刘永梅, 赵星, 王勇

(内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 利用川滇地区12口水井的气压系数和 M_2 波潮汐因子等, 滑动拟合得到不排水状态下, 各井的孔隙度和渗透系数等含水层参数, 并定量分析了这些参数的时序变化特征。结果表明: 各井的孔隙度和渗透系数在大部分历史强震前有明显异常特征, 孔隙度和渗透系数同步性较好, 反应了区域构造应力场的变化。在含水层受力状态变化引起的孔隙率(度)和孔隙压力动态变化过程中, 当含水层介质受压力变形时, 孔隙压力随之增大, 则孔隙率(度)和渗透系数同步减小; 反之亦然。

关键词: 数字化水位; 孔隙度; 渗透系数; 时序特征; 川滇地区

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0449-09

0 引言

水井含水层的水文地质参数具有明确的物理基础与机理。一般情况下, 获取这些参数需要水文地质工作者花费较大的人力、物力和财力。而基于气压系数和潮汐因子获取既简便易行, 又可掌握水位动态变化过程信息。这对于有效地利用水位记录资料分析地震前兆异常和机理具有十分重要的意义。利用井潮、气压等资料分析井-含水层系统的固体潮效应、气压效应、以及它们与含水层参数(孔隙度和渗透系数等)等, 一直以来是国内外地震工作者研究的热点(Brederhoeft, 1967; Kamp, Gale, 1983; Narasimhan *et al.*, 1984; 田竹君, 谷园珠, 1985; 张昭栋等, 1989, 1995; 李春洪等, 1990; Erskine, 1991; 丁风和等, 2007)。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, 相应的贮水率和渗透系数等含水层参数也可获得。在川滇地区, 方慧娜(2013)也仅以四川的南溪、邛崃井等为研究对象, 利用井水位的气压效应和固体体积模量的实验值等, 反演了孔隙度、贮水率、导水系数等含水层参数, 但也是取固体体

积模量的实验值来完成的。而本文可滑动拟合在不排水状态下孔隙度和渗透系数的定量结果, 研究时序特征分析, 对动态捕捉和跟踪异常具有非常重要的意义。

本文剔除川滇地区12口井的水位资料的观测干扰因素后, 利用气压系数和潮汐因子, 滑动拟合得到不排水状态下, 各井含水层的孔隙度、水和固体骨架的体积压缩系数, 在此基础上, 进一步获得各井含水层的渗透系数等, 定量分析区域井孔孔隙度和渗透系数的时序变化过程。

1 资料选取与数据处理

1.1 资料选取

经过初步筛查(预报效能等级大都B类以上, 且有气压辅助观测), 从国家地震前兆台网中心数据库下载的川滇地区数字化水位资料中, 选取运行时间相对较长且连续稳定、固体潮形态明显(井孔承压性相对较好)的泸州13井、南溪井、川32井、红河开远井、德阳井、腾冲井、通海高大井、德宏法帕井、姚安井、永胜井、保山井和丽江井这12口井的数字化水位资料。其分布见图1, 这些井大多是承压水观测井。其运行时间相对

* 收稿日期: 2016-09-12.

基金项目: 2016年度震情跟踪合同制定向重点工作任务资助项目(2016020305)资助。

✉ 通讯作者: 韩晓雷(1964-), 工程师, 主要从事数据处理及信息网络维护等方面研究工作, 近年来也从事地下流体方面的基础研究. E-mail: nmwlhxl@163.com.

较长且连续稳定、固体潮形态明显，是开展井孔含水层参数变化研究的理想观测井。这 12 口井的井深、含水层岩性、地下水类型、水位埋深等情况见表 1。

表 1 川滇地区 12 口井基本情况
Tab. 1 Basic information of the selected 12 wells in Sichuan – Yunnan area

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	资料分析处理起始时间
1	腾冲井	120	安山岩及灰岩	裂隙承压水	7.5	1 650	2007 – 06
2	通海高大井	205	砂岩	孔隙裂隙混合水	3.3	1 422	2007 – 01
3	永胜井	101.0	灰岩和泥岩为主	裂隙承压水	3.0	2 140	2008 – 03
4	德宏法帕井	200.2	泥灰岩	承压水	2.1	880	2007 – 06
5	姚安井	85.9	褐煤及粘土	弱承压水	4.5	1 894	2007 – 06
6	川 32 井	230	砾岩	孔隙裂隙混合水	动水位	1 550	2010 – 01
7	开远井	224	灰岩	裂隙承压水	6.9	1 056	2007 – 01
8	保山井	148.0	砂质粘土	裂隙承压水	动水位	1 659	2007 – 01
9	丽江井	347.3	砂岩和灰岩为主	裂隙承压水	动水位	2 400	2009 – 01
10	泸州川 13 井	300.6	砂岩、粉砂岩	裂隙承压水	0.5	247	2011 – 01
11	南溪川 12 井	101.5	石英砂岩及页岩	裂隙承压水	3.5	325	2007 – 09
12	德阳川 08 井	3072	砂岩	裂隙承压水	动水位	596	2007 – 07

这 12 口井空间范围 (22° ~ 32°N, 97° ~ 106°E) 内，自 2007 年以来，共发生 9 次 $M_s > 6.0$ 强震，其发震时间及发震地点见图 1。针对这 12 口井的井水位进行孔隙度和渗透系数时序特征分析检验。

1.2 数据处理

对收集到的 12 口井的数字化水位资料和其相应的气压整点值资料进行处理，主要有以下步骤：(1) 对每口井的这两项数据按年逐月检查、整理，并改变为统一格式备用（水位单位：m，气压单位：hPa）。(2) 将水位和气压数据整理成数据文本文件，要求每天必须有 24 个数，如有缺数，按照要求用 99 999 标记后，结合 3 次样条插值和一般多项式分段拟合值对其进行替换。同时，对数据进行粗差检查，目的是检查整个数据段内的基线值是否统一，是否有特别明显的错误甚至是非法的数据等。(3) 各井点基本情况表，内容包括：日期、水位、气压和理论固体潮，且是等间隔的整点值，为进行卷积回归法获得剩余水位（仅剩气压项的水位和仅剩固体潮项的水位）提供可靠的数据。需要强调的是，此时水位须由埋深值换算成水头高度值，单位为 m；气压单位为 Pa；理论固体潮单位为 nm/s^2 。(4) 在地球固体潮最主要

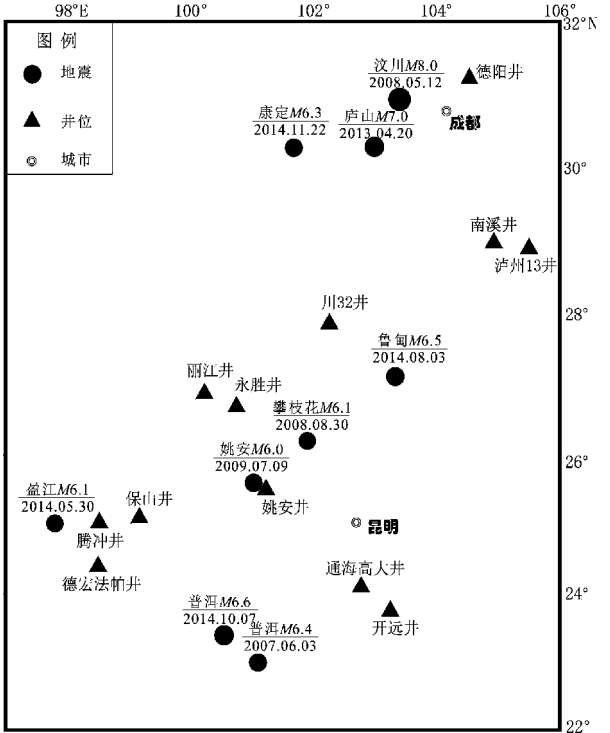


图 1 本文选取川滇地区 12 口井及 2007 年以来 9 次 $M_s > 6.0$ 强震的空间位置示意图
Fig. 1 The sketch map of spatial position of the selected 12 wells and $M_s > 6.0$ earthquakes occurred in Sichuan – Yunnan area since 2007

的 5 种日波群和 5 种半日波群中，考虑到处于中纬度地区的这 12 口井水位 M_2 波振幅最大，具有最大的信噪比，因此选择 M_2 波进行潮汐调和分析。
(5) 连续一个月观测资料计算的井水位 M_2 波潮汐因子具有相对稳定性，月间隔结果基本能满足地震的中、短期预测对资料间隔的需求。本文求取的气压系数、潮汐因子和含水层参数等，都是月值结果。

2 气压系数和潮汐因子等的获取

针对水位与气压间的非线性及考虑滞后的卷积回归法，近年来一直是气压校正的主要方法之一。其核心思想是：引入井水位对气压的阶跃响应函数的概念，通过利用相对应的水位和气压数据拟合出阶跃响应函数的最佳值，再由该最佳阶跃响应函数校正水位。如果考虑固体潮因素（一般由传感器测量或理论固体潮代替），该方法可同时校正观测井水位数据中的气压和固体潮组分（Rasmussen, Crawford, 1997; Toll, Rasmussen, 2007; 王丽亚等, 2012）。

(1) 气压系数的获取：假设将水位的影响因素分解为气压、潮汐、趋势成分和随机成分 4 个分项。首先，用卷积回归法剔除潮汐成分，再用一般多项式分段拟合去趋势和随机成分后，得到剩余水位（只有气压效应项的水位），且趋势明显的气压数据也要事先进行线性去趋势。最后利用剩余水位和校正后的气压采用 1 阶差分来获取气压系数。

(2) 潮汐因子等的获取：首先用卷积回归法剔除井水位的气压成分（气压校正），再用一般多项式分段拟合去趋势和随机成分，得到的剩余水位只有潮汐响应项，最后利用维尼迪柯夫调和和分析程序就可获得各波群的潮汐因子等参数。

值得注意的是，由于大部分井点原始水位的趋势性上升变化，直接受区域降雨量的影响，区域地下水开采的年际变化对井水位的趋势变化有扰动作用。因此，利用卷积回归法进行水位数据中的气压和固体潮组分校正后，还要进一步采用去趋势分析方法，剔除地下水开采和降水补给等长周期干扰对水位的影响。这样可以为下一步进行含水层参数的定量分析等提供可靠的数据。

3 基本原理

依据前人的研究结果（Bredehoeft, 1967; 张昭栋等, 1989, 1995; 李春洪等, 1990; 丁凤和等, 2015a, b），在不排水状态下，井水位的气压系数 B_p 和潮汐因子 B_g 可分别表示为：

$$B_p = \frac{n\beta}{\alpha + n\beta} \tag{1}$$

$$B_g = -\frac{1 - n}{\rho_g [(1 - n)\alpha + n\beta]} \tag{2}$$

(1) (2) 式联合可得到：

$$B_g = -\frac{1 - n}{\rho_g n\beta [\frac{(1 - n)(1 - \beta_p)}{B_p} + 1]} \tag{3}$$

式中： α 为固体骨架的体积压缩系数； β 为水的体积压缩系数； n 为含水层的孔隙度； ρ_g 为水的重度；且 $\rho_g = 0.098 \text{ hPa/mm}$ 。所以含水层的孔隙度 n 、水的体压缩系数 β 依据 (3) 式可滑动得到。最后利用 (1) 式或 (2) 式，可求出固体骨架的体积压缩系数 α 。

相应的贮水率 S_s 也可按照下式求出：

$$S_s = \rho_g [(1 - n)\alpha + n\beta] \tag{4}$$

动态响应条件下，含水层的渗透系数 K 、潮汐波频率 ω 、导压系数 a 和相位滞后 φ 等满足以下 3 个公式（李春洪等, 1990）：

$$\text{tg}\varphi = \frac{r_0^2}{2T} \omega k_0 \tag{5}$$

$$k_0 = \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega}{a}} \cdot r_0} \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{K}{S_s} \tag{7}$$

因为在不排水状态下，相位滞后的正切值为零，也及开尔文函数的实部为零。所以含水层导压系数 a 可写为：

$$e^{k_0} = \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega}{\alpha} \cdot r_0}} = 1 \tag{8}$$

$$a = \frac{\omega \cdot r_0^2}{1.254 \ 4} \tag{9}$$

渗透系数 K 可写为:

$$K = \frac{\omega \cdot r_0^2}{1.254 \ 4} \cdot S_s \tag{10}$$

其中: φ 为 M_2 波相位滞后; k_0 为开尔文函数实部; r_0 为井径; ω 为潮汐波中某一波群的固定频率 (选择振幅大、干扰少的 M_2 波频率, $\omega = 1.932 \ 4$); a 为含水层导压系数; K 为渗透系数。最终可得到各井不排水状态下的含水层孔隙度和渗透系数。

4 各井孔隙度和渗透系数时序特征分析

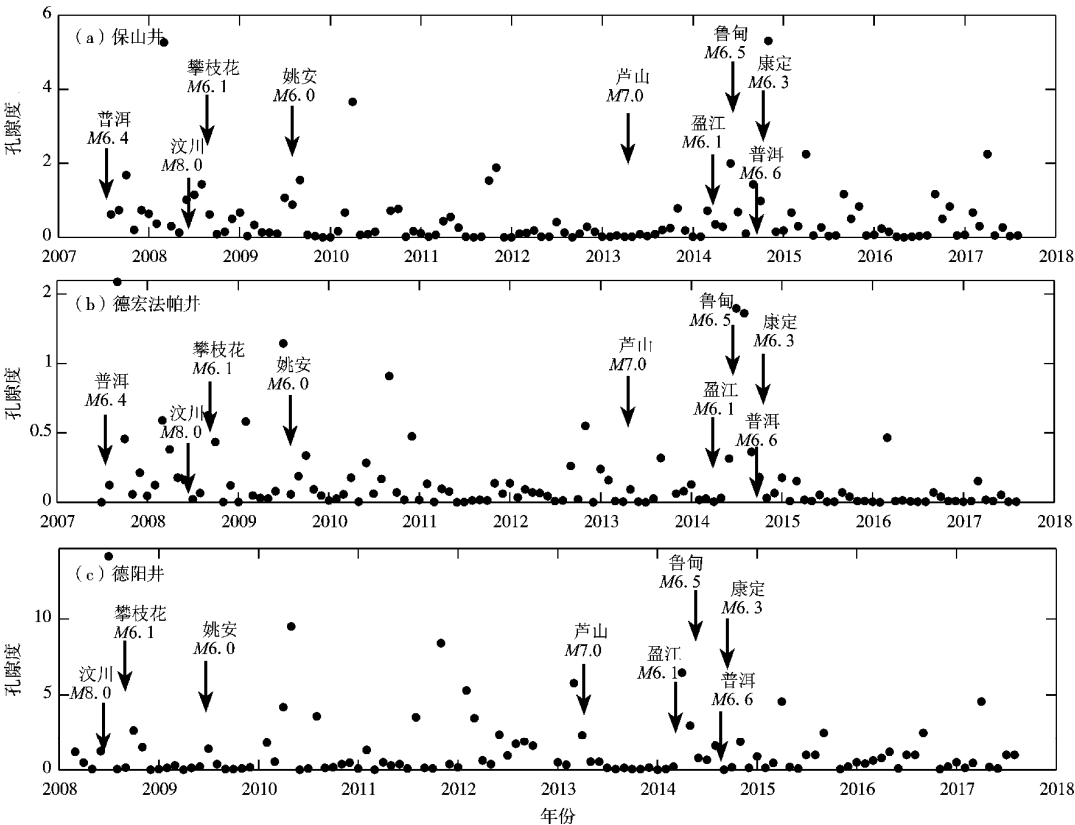
图 2~3 给出了各井的孔隙度和渗透系数的时序月值曲线。各井孔隙度和渗透系数在大部分历史强震前有明显异常特征。如保山井、德宏法帕井、南溪井、腾冲井、泸州 13 井、姚安井、永胜井、开远井和丽江井等在汶川地震和芦山地震前

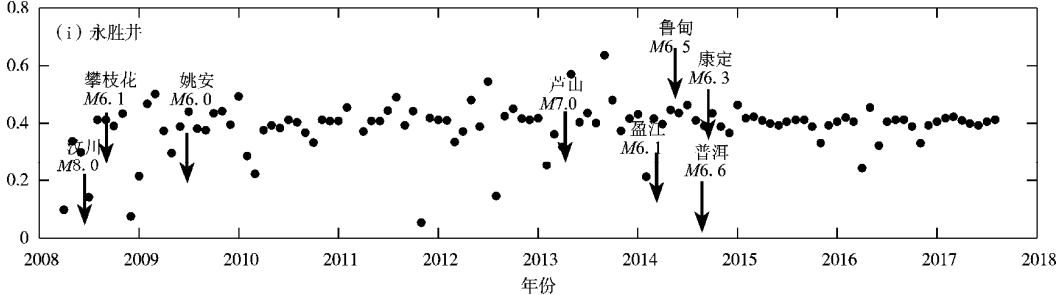
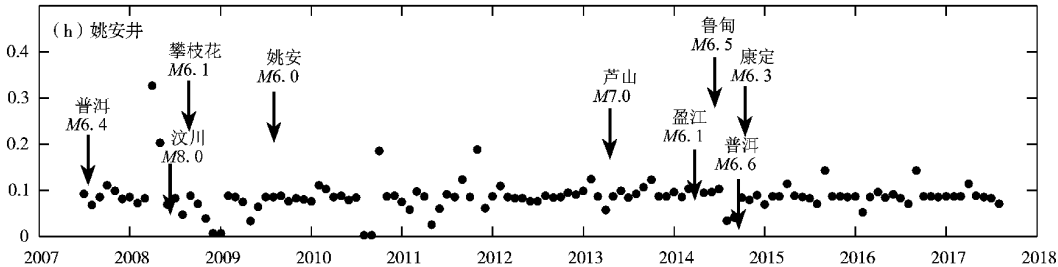
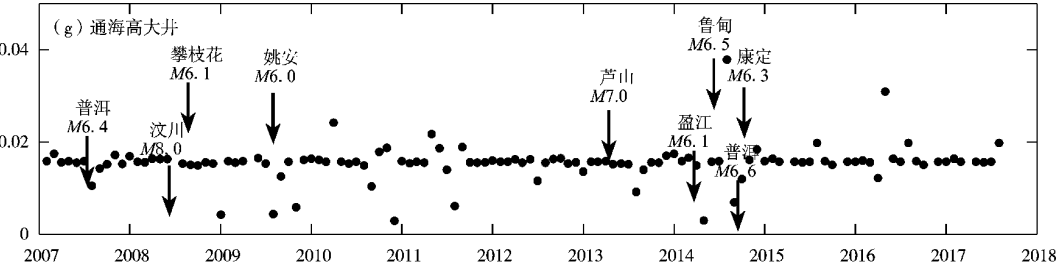
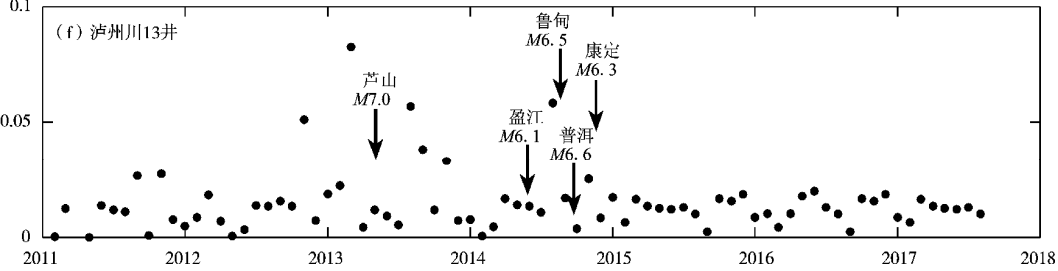
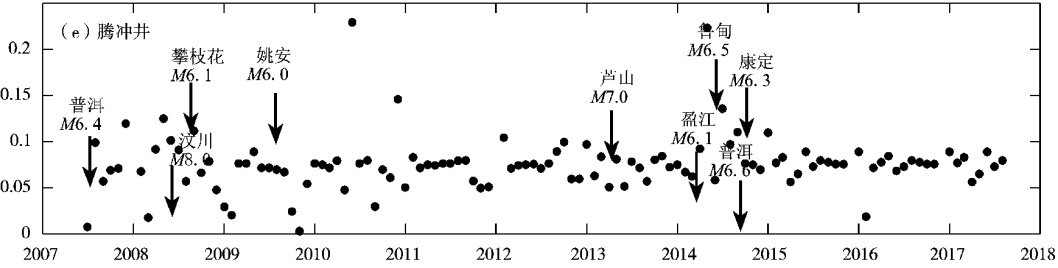
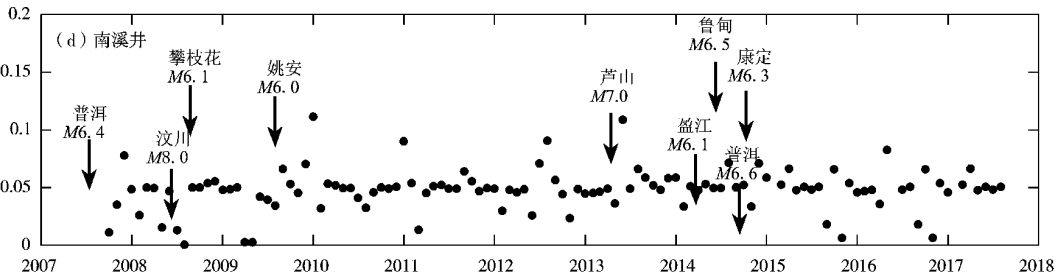
后, 孔隙度和渗透系数同步性较好 (孔隙度和渗透系数增大, 则以构造张应力为主; 反之亦然), 反应了区域构造应力场的变化 (张应力或压应力)。2015 年以来, 大部分井孔的孔隙度和渗透系数变化相对平稳, 后续需进一步跟踪分析。

5 水动力学成因机制分析

针对上述大部分井孔出现的孔隙度和渗透系数同步变化现象, 从应力变化 (拉张和压缩) 方面, 构建了水动力学模型, 分析其变化的成因机制。

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。含水层介质一般有 4 个体积: 总体积 (外观体积)、岩石骨架体积、孔隙体积、水的体积, 且外观总体积等于岩石骨架体积、孔隙体积与水的体积之和。在含水层受力状态变化引起的孔隙率 (度) 和孔隙压力动态过程中 (图 4): 当含水层介质受压力变形时, 孔隙压力随之增大, 则孔隙率 (度) 减小; 反之, 当含水层介质受张力变形时, 孔隙压力亦减小, 则孔隙率





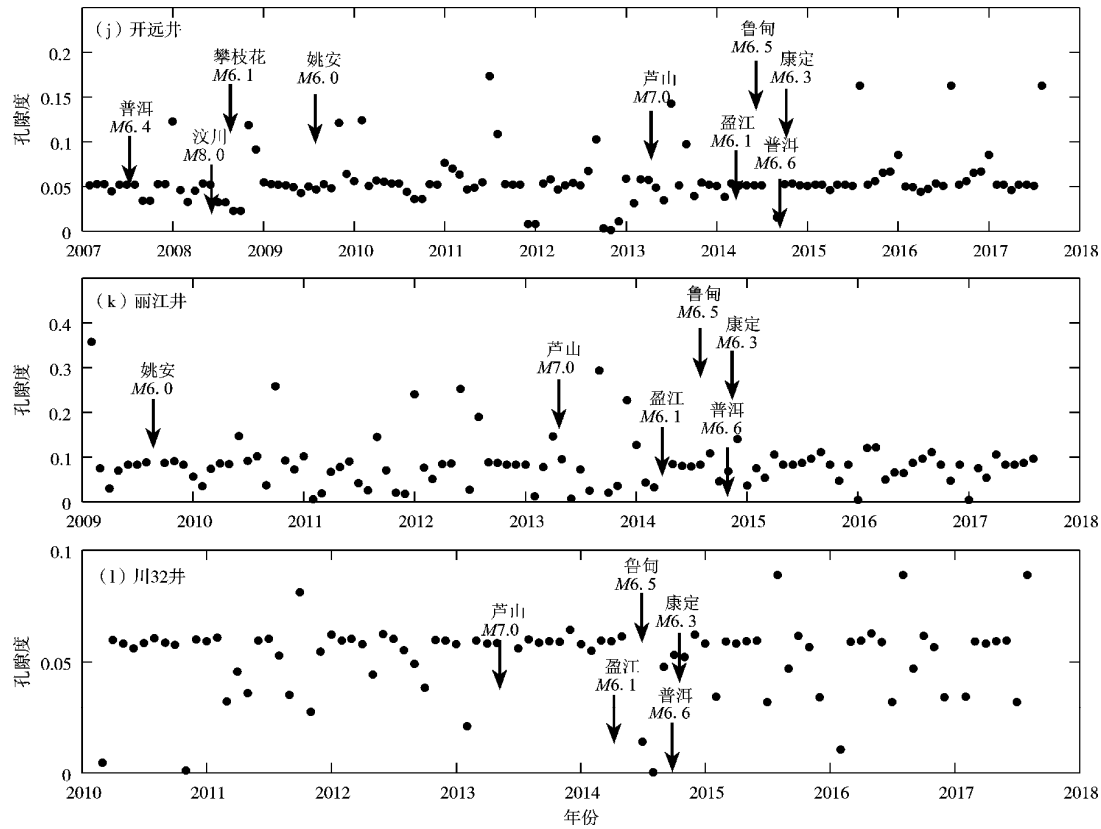
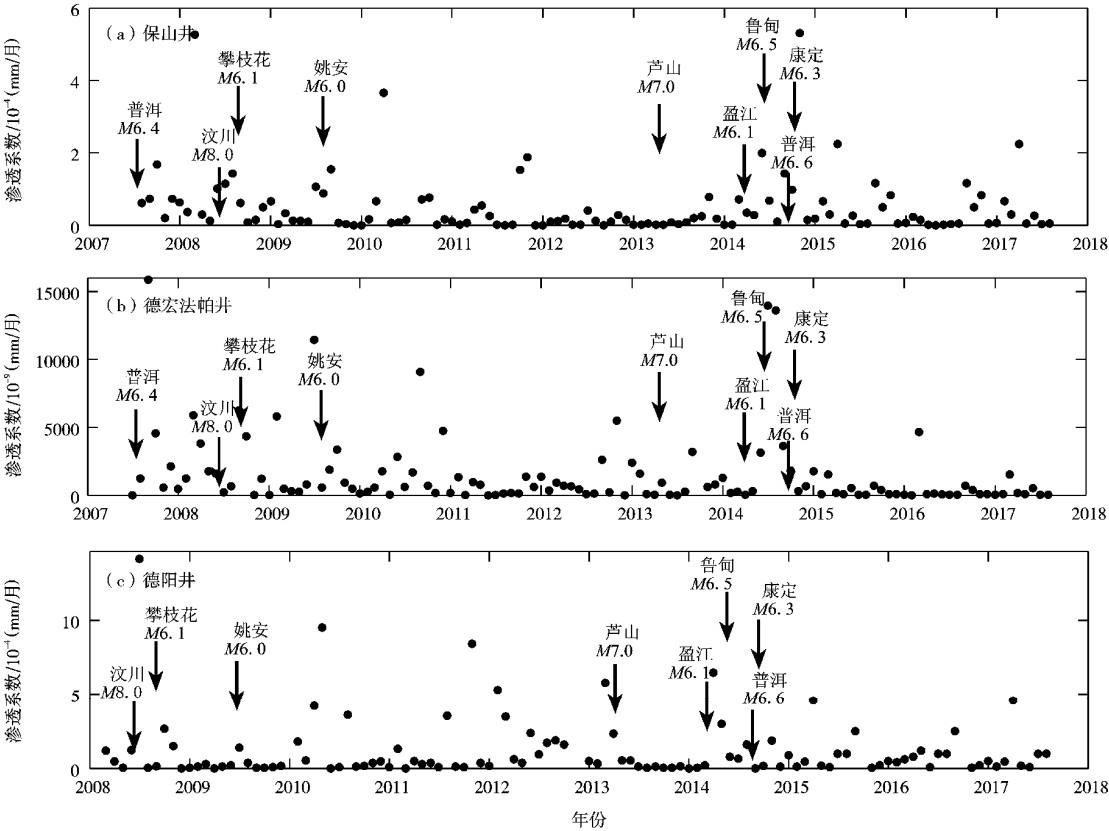
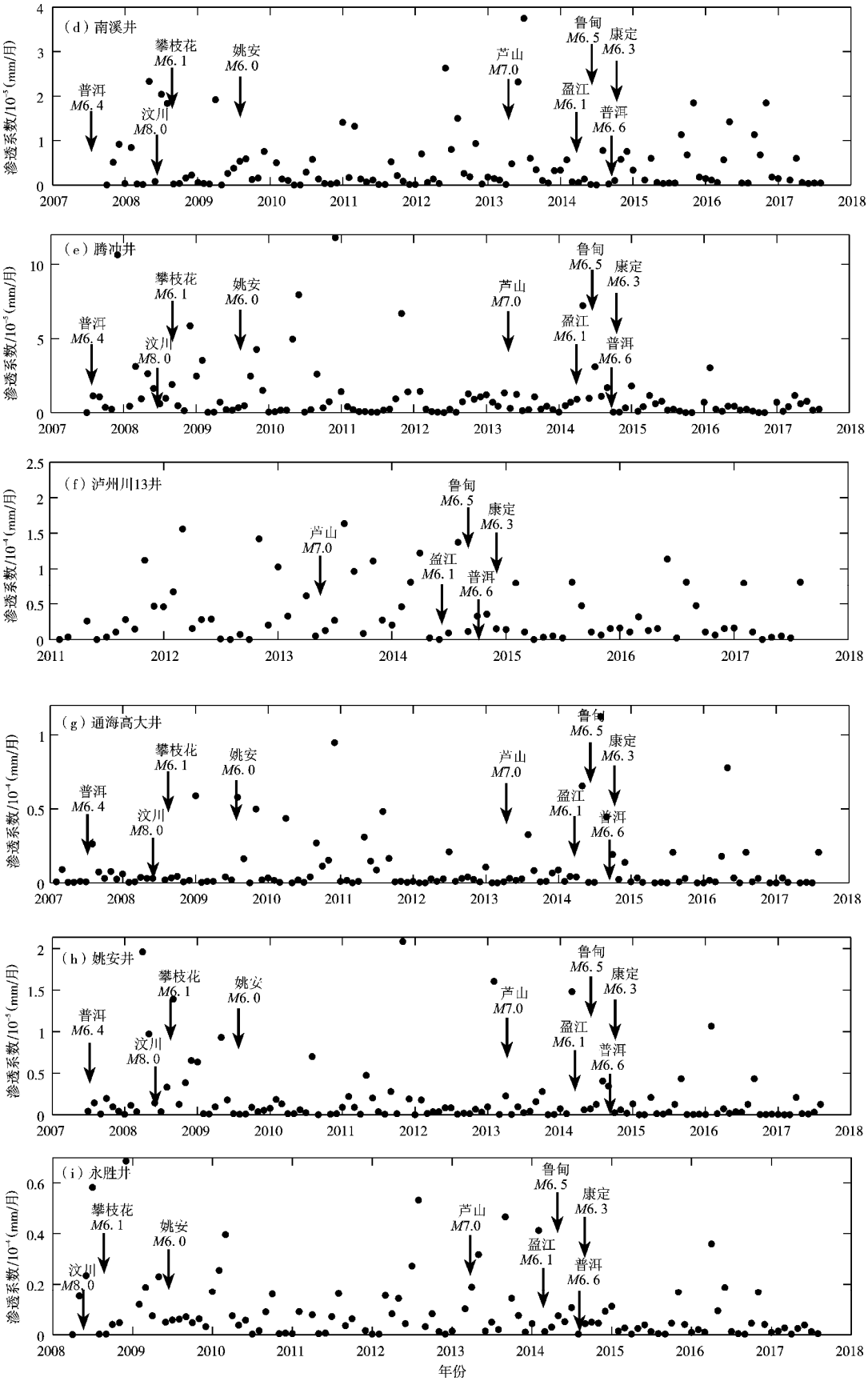


图2 12口井孔隙度月值曲线

Fig. 2 Monthly value curves of porosity for the 12 wells





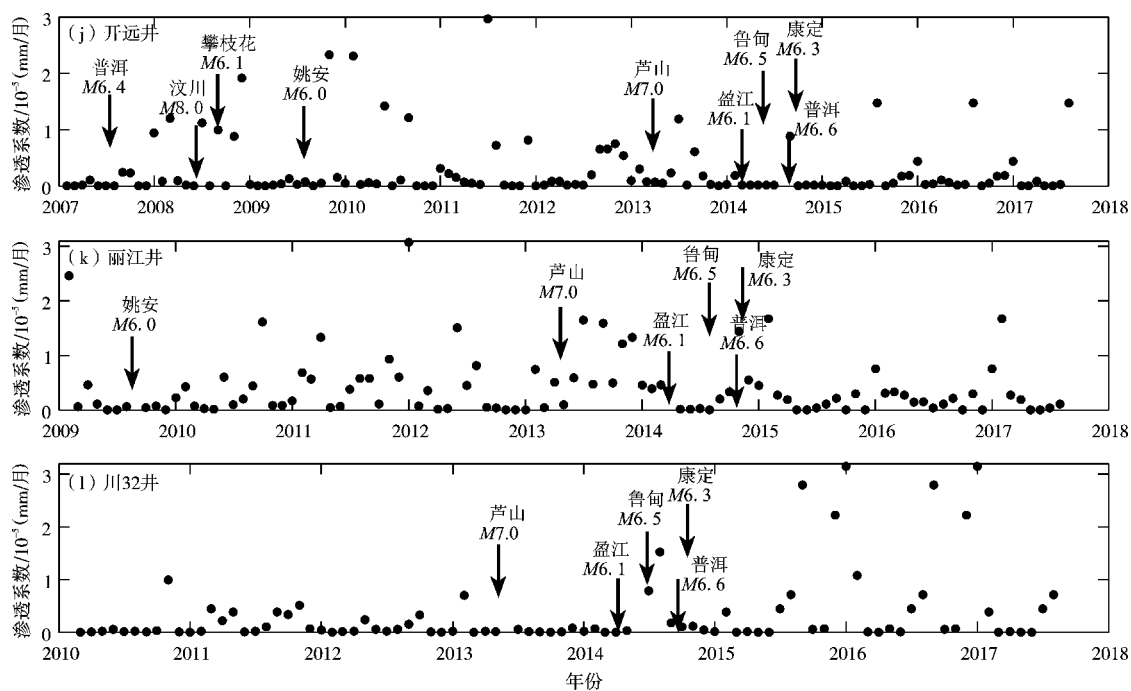


图 3 12 口井渗透系数月值曲线

Fig. 3 Monthly value curves of permeability for the 12 wells

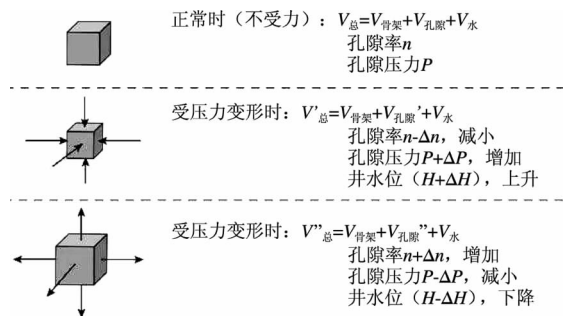


图 4 含水层受力状态变化引起的孔隙率（度）和孔隙压力动态过程示意

Fig. 4 The dynamic state and porosity of groundwater caused by the change of stress state in aquifer

（度）增加。另外，孔隙率（度）和渗透系数间存在明显的幂函数关系，孔隙率（度）在逐渐增大或减小的同时，相应地渗透系数也同步增大或减小（丁风和等，2015c）。

6 结论与讨论

川滇地区作为我国最主要的活动构造带和地震活动区域之一，因其地理位置的重要性、特殊性和震情形势的严峻性而被中国地震局确定为地震强化监视地区。本文利用该区域 12 口井的气压

系数和各井水位的 M_2 波潮汐因子等，滑动拟合得到不排水状态下，各井的孔隙度和渗透系数等含水层参数，并定量分析这些参数的时序变化特征，主要得出以下结论：

- （1）各井孔隙度和渗透系数在大部分历史强震前有明显异常特征，孔隙度和渗透系数同步性较好，反应了区域构造应力场的变化。
- （2）在含水层受力状态变化引起的孔隙率（度）和孔隙压力动态变化过程中，当含水层介质受压力变形时，孔隙压力随之增大，则孔隙率（度）和渗透系数同步减小；反之亦然。
- （3）与传统的通过现场抽水试验和室内实验等不同，本文研究结果表明，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和分析结果，而获取含水层介质的孔隙度和渗透系数是简便易行的。
- （4）与前人所不同的是，本文得到的各井含水层的孔隙度和渗透系数是动态变化的，而前人对这些参数都是定性的分析或者是取其一般的可能值或平均值。
- （5）卷积回归法（针对水位与气压间的非线性及考虑滞后）是进行气压校正和剔除潮汐成分的有效方法。
- （6）进行井孔含水层的孔隙度和渗透系数的

动态时序定量分析，在有效利用数字化水位记录资料来甄别地震前兆异常和机理分析具有重要意义。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等情况下完成的。在实际应用过程中还需通过实践进行深入研究。

在本文研究过程中，得到了中国地震局地壳应力研究所刘耀伟研究员、中国地震台网中心黄辅琼研究员以及中国地震台网中心晏锐部长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潮汐调和程序。在此一并表示衷心的感谢。

参考文献：

丁风和,戴勇,宋慧英,等. 2015a. 大甸子井 - 含水层系统水文地质参数间的变化关系[J]. 地震地质, 37(4):982 - 990.

丁风和,哈媛媛,王勇,等. 2015b. 基于数字化水位的张渤带地区构造应力场时序特征分析[J]. 地震, 35(2):133 - 138.

丁风和,韩晓雷,哈媛媛,等. 2015c. 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[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 40(7):1248 - 1253.

丁风和,赵铁锁,尹占军,等. 2007. 大甸子井水位的气压系数及其震前异常[J]. 西北地震学报, 29(2):174 - 176.

方慧娜. 2013. 利用地下水位气压效应反演汶川地震前后含水层参数的研究[D]. 北京:中国地质大学.

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[J]. 中国地震, 6(2):37 - 45.

田竹君,谷园珠. 1985. 地下水微动态资料的分析与处理[J]. 地震地质, 7(3):51 - 62.

王丽亚,郭海朋,李文鹏,等. 2012. 气压对观测井水位的影响及校正方法[J]. 水文地质工程地质, 39(6):29 - 34.

张昭栋,郑金涵,冯初刚. 1989. 井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J]. 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[J]. 西北地震学报, 17(3):66 - 71.

BREDEHOEFT J D. 1967. Response of well-aquifer systems to earth tides[J]. Geophys Res, 72(12):3075 - 3087.

ERSKINE A D. 1991. The Effect of Tidal Fluctuation on a Coastal Aquifer in the UK[J]. Groundwater, 29(4):556 - 562.

KAMP G, GALE J E. 1983. Theory of Earth Tide and Barometric Effects in Porous Formations with Compressible Grains[J]. Water Resources Research, 19(2):538 - 544.

NARASINMHAN T N, KANEHIRO B Y, WITHERSPON P A. 1984. Interpretation of Earth Tide Response of Three Deep, Confined Aquifers[J]. Journal of Geophysical Research, 89(B3):1913 - 1924.

RASMUSSEN T C, CRAWFORD L A. 1997. Identifying and Removing Barometric Pressure Effects in Confined and Unconfined Aquifers[J]. Ground Water, 35(3):502 - 511.

TOLL N J, RASMUSSEN T C. 2007. Removal Of Barometric Pressure Effects And Earth Tides From Observed Water Levels[J]. Ground Water, 45(1):101 - 105.

Time Series Analysis of Porosity and Permeability Coefficients Based on Digital Water Level in Sichuan and Yunnan Region

WEI Jianmin, HAN Xiaolei, LI Bin, LIU Yongmei, ZHAO Xing, WANG Yong
(Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract

Using the pressure coefficient and the wave tide factor of the 12 wells of the Sichuan and Yunnan area, the permeability coefficient and porosity of each well are obtained under undrained condition. Quantitative analysis of the time series variation characteristics of these parameters is achieved. The results show that the porosity and permeability coefficient of each well have obvious anomalies before strong earthquakes, and the porosity and permeability coefficient have better synchronization, showing the regional tectonic stress changes. During the porosity and pore pressure change caused by the aquifer stress state change process, when the aquifer medium pressure deforms and pore pressure increase, the porosity and permeability coefficients reduce equally, and vice versa.

Keywords: digital water level; porosity; permeability coefficient; time series characteristics; Sichuan and Yunnan region