

苏小芸,陈丽君,王文才,等.甘东南地区水氡浓度的临界慢化现象研究[J].地震工程学报,2020,42(5):1104-1110.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1104
SU Xiaoyun, CHEN Lijun, WANG Wencai, et al. Critical-Slowing-Down Phenomenon of Water Radon Concentrations in the Southeastern Gansu Region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1104-1110. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1104

甘东南地区水氡浓度的临界慢化现象研究

苏小芸^{1,2}, 陈丽君^{1,2}, 王文才^{1,2}, 季婉婧¹, 李 通^{1,2}, 周卫东^{1,2}

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文将临界慢化理论应用于甘东南地区水氡浓度观测资料的处理中,以2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震、2013年7月22日甘肃岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震为例,计算表征临界慢化现象的自相关系数和方差。计算结果表明,甘东南地区多个站点的水氡浓度观测资料在两次地震前均存在较明显的临界慢化现象。并从空间分布、持续时间、变化形态方面分析了异常点水氡浓度变化的临界慢化特征,结合水氡异常的水动力学机制和异常点所在构造,认为2次地震前的临界慢化现象与地震的发生有一定关系。

关键词: 水氡浓度; 临界慢化; 地震前兆异常

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1104-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1104

Critical-Slowing-Down Phenomenon of Water Radon Concentrations in the Southeastern Gansu Region

SU Xiaoyun^{1,2}, CHEN Lijun^{1,2}, WANG Wencai^{1,2}, JI Wanjing¹, LI Tong^{1,2}, ZHOU Weidong^{1,2}

(1. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this study, we applied the critical-slowing-down principle to the processing of water radon concentration observation data in southeastern Gansu and calculated the autocorrelation coefficient and variance, which can characterize the critical-slowing-down. Here, we take the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake that occurred on May 12, 2008, and the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake that occurred on July 22, 2013, as case studies. The results indicated that the water radon concentration at several stations in southeast Gansu showed the critical-slowing-down phenomenon before two earthquakes. Then we analyzed the characteristics of the critical-slowing-down of water radon concentration at abnormal points from the aspects of spatial distribution, duration, and change form. It is believed that the critical-slowing-down phenomenon before the two earthquakes was related to the earthquake occurrence by combining with the hydrodynamic mechanism of water radon anomalies and the structure of abnormal points.

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站基金(2020Y04)

第一作者简介: 苏小芸(1987—),女,助理研究员,主要从事地球物理台网运维及地震监测数据分析工作。E-mail: 345893692@qq.com。

Keywords: water radon concentration; critical slowing down phenomenon; earthquake precursor anomaly

0 引言

甘东南地区是中国构造分区中南北与东西构造分区的交汇位置^[1-2],受青藏高原东北部东昆仑断裂的向北挤压和向东的运动的影响,甘东南地区新构造运动和地震活动强烈^[3],近年来曾发生过多次破坏性地震^[4-5]。地下流体观测能够较好地反映地球物理场、地球化学场异常信息^[6],随着地震地球物理台网的建设及观测资料的积累,用地下流体观测资料开展地震预测研究得了一定的进展。水氡浓度观测是地震科学研究中观测时间最长、研究最广泛的地下流体测项之一,一个观测点上出现的地下流体异常反映了该测点含水层系统的变化,诸多学者在地震发生后对水氡观测资料震前可能的异常进行了回溯性研究,发现临近地震发生前存在水氡浓度观测值增大、持续时间拉长的现象^[7-9],然而,震前能否证实并找到预示地震即将发生的早期异常信号,仍是值得地震工作者深入研究的问题之一。

国内外很多学者研究了生物学、气候学等领域的突变现象,提出当系统趋近于临界阈值附近时,系统将出现临界慢化现象^[10-13],在地震学中,地震具有分形和临界点现象被很多地震学家所认可^[14-16],郭增建曾建议把统计物理学中相态突变前刻发生的现象(即临界现象)用于地震预报,讨论涨落加剧和长程关联在地震预报中的应用^[17-18],郭安宁用临界慢化的观点讨论了玉树大震的前震^[19],晏锐、王熠熙将临界慢化理论应用于龙门山断裂带和南北地震带部分水氡浓度观测资料进行临界慢化研究,结果表明多个台站的水氡资料在震前出现了明显的临界慢化现象^[20-21],这为寻求震前异常提供了新思路。

本文参考目前已有研究,将临界慢化理论用于甘东南地区水氡浓度观测资料的处理中,利用能体现临界慢化特征的方差和自相关系数指标对观测资料进行分析,以 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震、2013 年岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震为例,结合水氡异常的水动力学机制和不同台站所在构造背景探讨了 2 次地震前甘东南地区水氡观测可能存在的临界慢化现象。

1 临界慢化检测方法

随机作用的系统在一个控制参量趋近于阈值处(分叉点)时,临界慢化往往导致自相关和涨落方差

增大现象^[22-23]。首先假定状态变量存在周期为 Δt 的受迫扰动(附加噪声)。在扰动过程中,平衡的回归呈近似指数关系,恢复速度为 λ 。在一个简单的自回归模型中,可以这样描述: $y_{n+1} = e^{\lambda \Delta t} y_n + s \epsilon_n$, 其中 y_n 是系统状态变量到平衡态的偏离量, ϵ_n 为符合正态分布的随机量(系统白噪声), s 为均方差。如果 λ 和 Δt 不依赖于 y_n , 此过程可简化为自回归模型 $AR(1): y_{n+1} = \alpha y_n + s \epsilon_n$, 其中,自相关系数 $\alpha = e^{\lambda \Delta t}$, 对于白噪声,自相关系数恒为 0; 红噪声的相关系数接近 1。对 $AR(1)$ 过程通过方差来分析:

$$Var(y_{n+1}) = E(y_n^2) + (E(y_n))^2 = \frac{s^2}{1 - \alpha^2}。$$

一般的,系统在向临界点趋近的过程中,小幅度扰动的恢复速率会越来越慢^[10-11],当系统趋近于临界点时,恢复速率 λ 将趋于零且自相关项 α 趋近于 1, 方差趋近于无限大。因此可将方差和自相关系数增大作为系统趋近临界点的前兆信号,以此检测临界慢化现象。

2 资料选取和处理

甘东南地区目前存在的模拟水氡观测点有 9 个,甘东南地区水氡观测台站测点位置、环境及观测资料起始时间见表 1。经过多次更换和改造,连续可用的观测资料最早是从 1983 年开始的平凉附件厂水氡观测,最晚的是平凉安国观测站,2012 年开始观测。这 9 个台站观测资料中,其中街子的资料受井水断流影响、通渭温泉的资料受抽水影响数据可用性差,北山与安国的观测时间较短,鉴于此,本文选取了比较连续、人为干扰、系统故障、场地环境干扰引起数据变化较少的 6 个观测点的观测资料为研究对象进行分析计算,即附件厂、北山、殿沟、武山 22 号井、武山 1 号泉和五里铺水氡,具体分布情况见图 1。

数据预处理的步骤为:(1)首先去除观测资料的周期性年变和长趋势变化信息;(2)得到偏离平衡态的高频扰动信息(残差);(3)计算残差信息的自相关系数和方差。

3 计算结果分析

3.1 窗长对计算结果的影响

计算表征临界慢化现象的自相关系数和方差时

表 1 甘东南地区水氡观测台站测点位置及观测资料

台站名	测点位置		所在断裂	台基岩性	数据 起始时间
	经度	纬度			
平凉附件厂	106.6	35.5	六盘山断裂	砂砾岩	1983
平凉北山	106.6	35.5	六盘山断裂	砂砾岩	2008
平凉安国	106.5	35.6	六盘山断裂	砂质泥岩夹灰岩	2012
陇南殿沟	104.9	33.4	光盖山—迭山南	板岩灰岩	1987
武山 22 号井	105.0	34.6	西秦岭北缘断裂、聂河断裂带、蔡家河—马长庄—岸 峪里断裂带的交汇部位	花岗岩	1984
武山 1 号泉	105.0	34.4	西秦岭北缘断裂、聂河断裂带、蔡家河—马长庄—岸 峪里断裂带的交汇部位	花岗岩	1990
天水五里铺	105.8	34.5	西秦岭北缘断裂	松散沉积岩	1991
通渭温泉	105.1	35.2	通渭—会宁	厚层黄土	1990

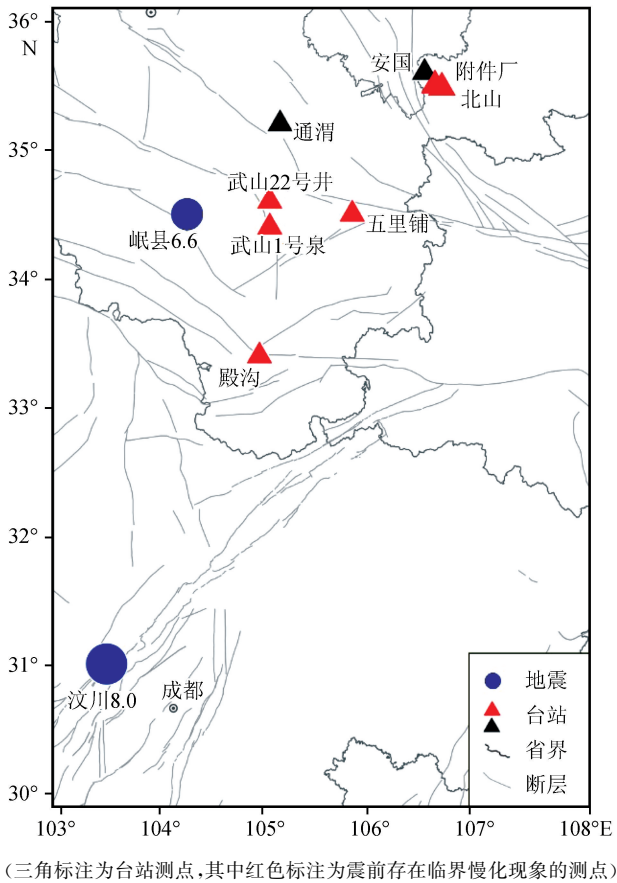


图 1 甘东南地区水氡观测点分布图

Fig.1 Distribution of radon observation points in southeastern Gansu

的窗长可能会影响计算结果^[12,20-21]。以武都殿沟台水氡数据为例,分别选取 3、4、5、6 年窗长,计算殿沟水氡残差信息的自相关系数和方差(图 2)。由图 2 可以看出,在观测资料一定的情况下,适当的选取窗长对计算结果的影响并不大。

3.2 水氡资料的临界慢化现象

通过计算甘东南地区数据质量较好、稳定性较高的 6 个观测点的水氡浓度观测资料的方差和自相

关系数,发现 4 个水氡台站的数据在 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前以及 6 个水氡台站的观测数据在 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震前出现了临界慢化现象,均表现为方差和自相关系数同步增大(表 2)。以五里铺和殿沟台的水氡资料为例说明 2 次地震前的临界慢化现象。

五里铺水氡构造位置处于西秦岭北缘断裂,距离汶川地震震中 455 km、距离岷县地震震中 153 km。图 3 为五里铺水氡观测资料的计算结果,由 a_3 、 a_4 可以看出去除趋势后的五里铺水氡高频信息自 2007 年 8 月左右、2012 年 10 月左右出现了明显的扰动幅度增大、周期逐渐拉长的现象,同时自相关系数和方差出现了明显的增大现象,直至地震发生。这说明五里铺水氡在汶川 $M_s8.0$ 地震、岷县 $M_s6.6$ 地震前 10 个月左右出现了明显的临界慢化现象。殿沟水氡构造位置上处于秦岭构造带西端、武都山字型弧顶端转折部位^[21],自 2007 年 8 月左右殿沟水氡残差数据的方差和自相关系数同步增大(图 4),直至发生汶川地震,震后曲线的阶升为汶川地震的同震响应。岷县地震前 4 个月左右,殿沟水氡的方差和自相关系数曲线也表现出明显的同步增大,值得注意的是 2011 年 4 月左右的这次同步增大现象,是更换闪烁室造成的数据变化。

由表 1 和图 3~6 可知,各测点慢化起始时间各不相同,五里铺的自相关系数曲线形态总体上升,过程中伴随起伏变化,方差系数曲线仅在震前一算时间上升;殿沟的自相关系数曲线和方差曲线总体单调上升,这可能反映了不同测点受到的构造应力作用存在差异,其中汶川地震后殿沟的方差曲线的阶升和自相关系数曲线的阶变是汶川地震的同震响应。根据水氡异常的水动力学机制,当地震孕育的力学过程影响到含水岩体时,即使是很小量级的应

力的作用,完全有可能使岩体变形,变形可引起孔隙压力的变化和渗流场水动力条件的变化,并导致井含水层系统内水流状态的改变,由此产生井水氡含量的异常变化^[24]。岷县—漳县地震震中位于西秦岭北缘断裂和临潭—宕昌断裂之间,靠近临潭—宕昌断裂^[25],该断裂总体性质以向南逆冲为主,具左旋走滑分量^[3];汶川地震中的龙门山活动断裂,同震

变形运动方式具有明显的分段性,既有逆冲又有右旋走滑分量^[26],各断裂段在新构造运动过程中应力集中不均匀会影响到含水岩层的变形,地下流体广泛存在于岩石孔隙中且处在不断的运动中,流体的迁移带动溶解于其中的氡的迁移^[27],计算识别出的慢化时间、变化形态各不相同,可能与测点所处构造位置和不同地震孕育的构造动力背景有关。

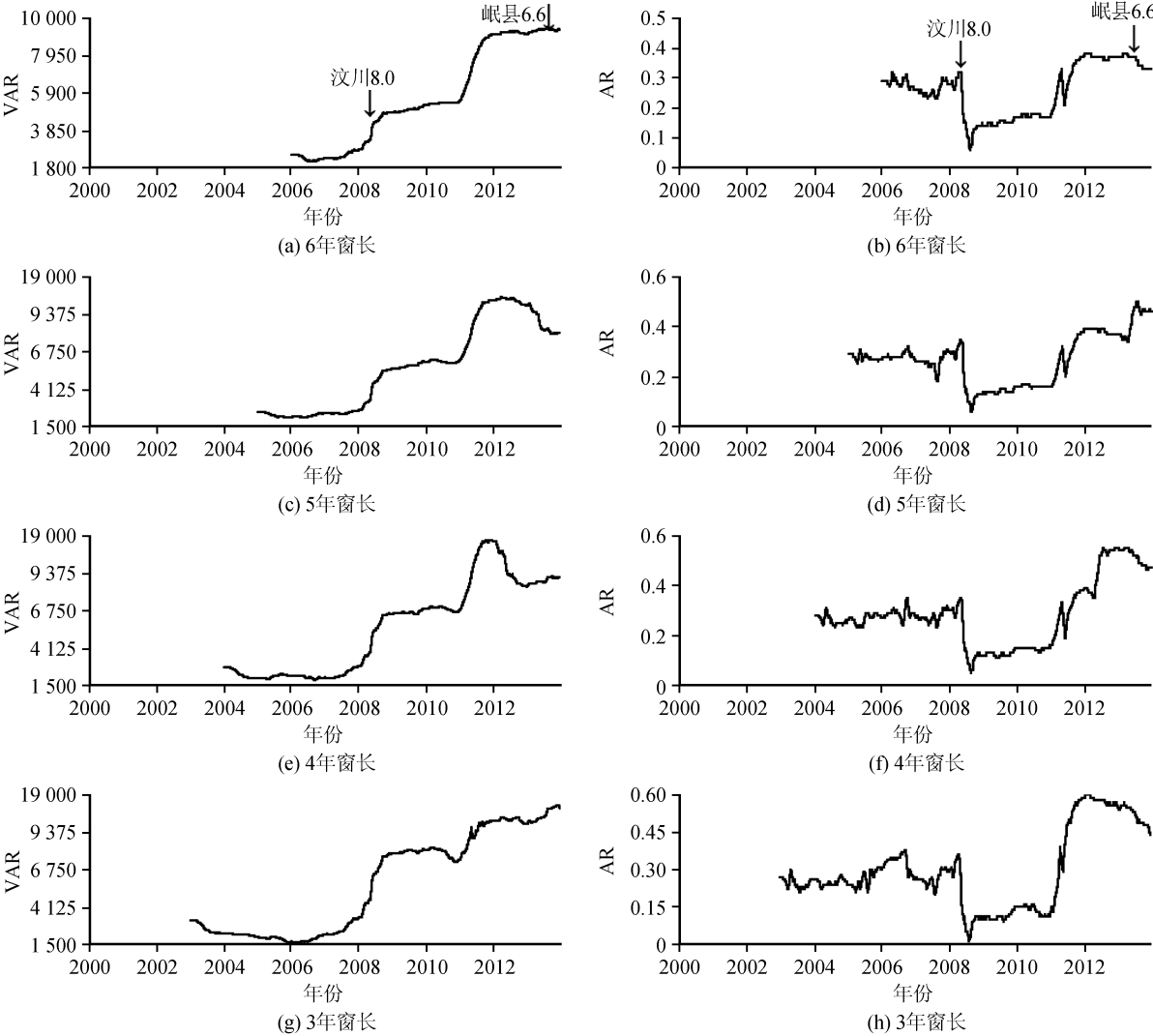


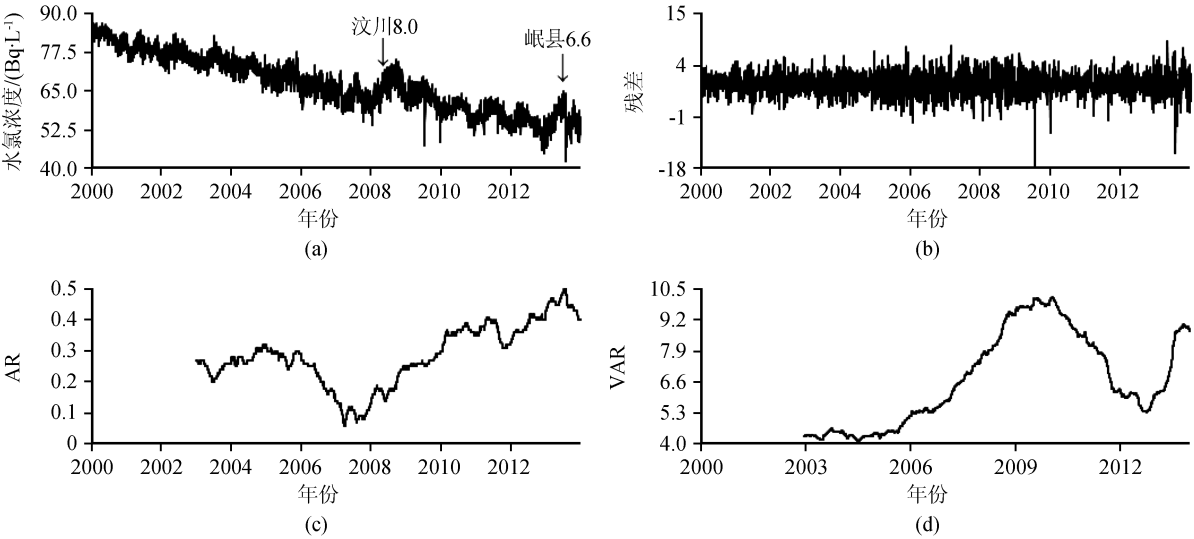
图 2 殿沟水氡不同窗长对方差和自相关系数的影响

Fig.2 Variance and autocorrelation coefficient in different window length for Diangou water radon

表 2 甘东南地区水氡观测点临界慢化时间与震中距关系

Table 2 Relationship between critical slowing time and epicenter distance in southeastern Gansu

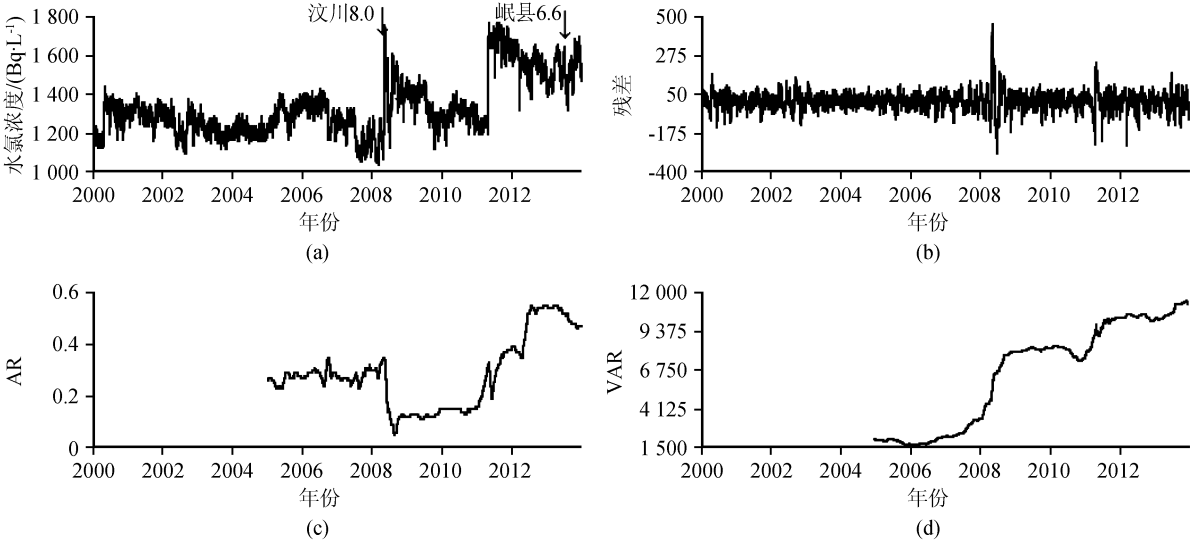
测点	汶川 8.0		岷县—漳县 6.6	
	震中距/km	慢化开始时间	震中距/km	慢化开始时间
附件厂	587	2007 年 1 月	254	2013 年 3 月
北山	590	-	255	2013 年 2 月
殿沟	303	2007 年 8 月	137	2013 年 4 月
武山 22 号井	434	-	80	2012 年 3 月
武山 1 号泉	434	2006 年 11 月	80	2011 年 11 月
五里铺	455	2007 年 8 月	153	2012 年 10 月



(a)为原始水氡观测数据;(b)为去除周期和趋势的高频扰动信息;(c)为高频信息的自相关系数;(d)为高频信息的方差

图 3 五里铺水氡的临界慢化现象

Fig.3 Critical slowing down phenomenon for Wulipu water radon



(其他说明同图 3)

图 4 殿沟水氡的临界慢化现象

Fig.4 Critical slowing down phenomenon for Diangou water radon

甘东南地区出现临界慢化现象的台站相对集中(图 1),且在时间上相对同步,附件厂、殿沟、武山 1 号泉等测点均在 2007 年前后出现明显的增大变化,直至 2008 年 5 月汶川 $M_s8.0$ 地震发生,附件厂、北山、殿沟等测点 2013 年前后出现临界慢化现象,直至 2013 年 7 月岷县 $M_s6.6$ 地震发生。同时出现慢化的测点与 2 次地震在构造断裂上有关联性,因此认为这些异常可能与 2 次地震有关。

4 结论

本文基于临界慢化理论,结合 08 年及 13 年南

北地震带上发生的 2 次中强地震,对甘东南地区水氡浓度观测资料的突变信号进行研究。结果表明在观测资料一定的情况下适当的选取窗长对计算结果的影响并不大,只会影响结果的稳定性,这与文献 [20-21] 的结论一致。因此在计算时可根据观测资料的实际情况适当选取窗长。

本文计算结果表明,甘东南地区水氡观测资料在汶川 $M_s8.0$ 地震、岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震前出现了明显的临界慢化现象,且在时间上相对同步,结合水氡异常的水动力学机制以及构造的关联性 & 地震的破裂方式,认为甘东南地区水氡临界慢化(异常)

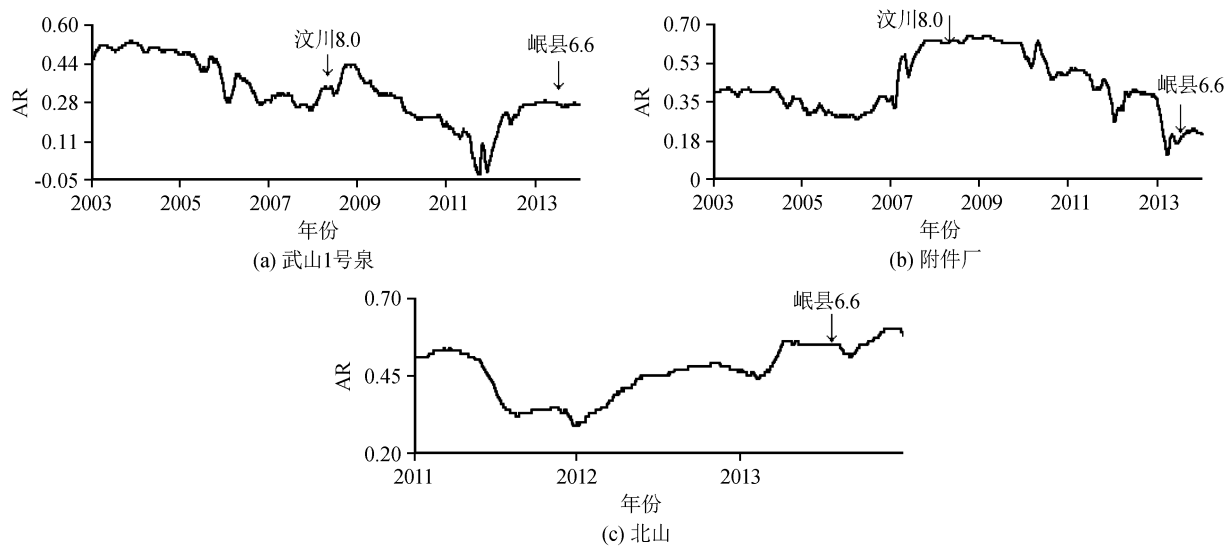


图 5 甘东南地区水氡存在临界慢化现象的 AR 系数曲线

Fig.5 AR coefficient curve of water radon with critical-slowing-down phenomenon in southeastern Gansu

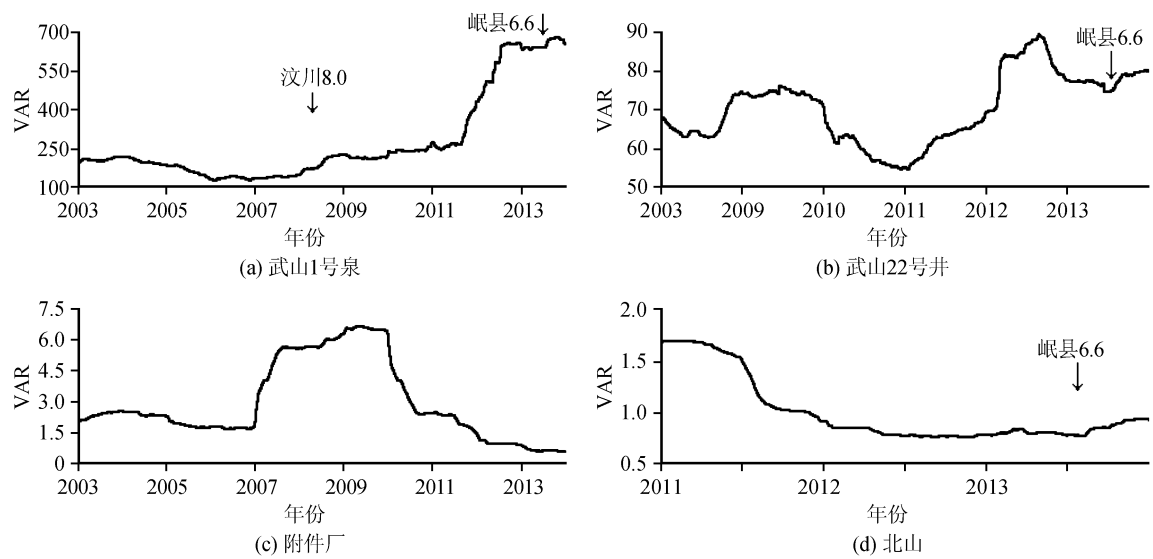


图 6 甘东南地区水氡存在临界慢化现象的 VAR 系数曲线

Fig.6 VAR coefficient curve of water radon with critical-slowing-down phenomenon in southeastern Gansu

与两次地震的发生有一定联系。尽管本文仍属于震例回溯研究,但是临界慢化为判断地震观测资料是否趋于临界阶段、为寻找灾变发生前的早期预警信号提供了新方法,有待积累观测资料和震例资料进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 等. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震震害分布特征及发震构造分析[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 604-615.
ZHENG Wenjun, MIN Wei, HE Wengui, et al. Distribution of the Related Disaster and the Causative Tectonic of the Minxian-zhanxian $M_s6.6$ Earthquake on July 22, 2013, Gansu, China

[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(3): 604-615.
[2] 罗国富, 屠泓为, 马禾青, 等. 甘东南至陕甘宁交界中强震危险区地震活动能量场时空特征[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 132-137.
LUO Guofu, TU Hongwei, MA Heqing, et al. Space-time Distribution Characteristics of Energy Field of Seismic Activity for the Southeastern Part of Gansu Province to Shanxi—Gansu—Ningxia Boundary Region Moderate-strong Earthquake Hazard Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 132-137.
[3] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 级地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4058-4071.
ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geomet-

- ric Pattern and Active Tectonics in Southeastern Gansu Province; Discussion on Seismogenic Mechanism of the Minxian — Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ Earthquake on July 22, 2013 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4058-4071.
- [4] 郑文俊, 刘小凤, 赵广望, 等. 2003 年 11 月 13 日甘肃岷县 $M_{\text{S}}5.2$ 地震基本特征[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1): 61-65.
ZHENG Wenjun, LIU Xiaofeng, ZHAO Guangkun, et al. Principal Features of Minxian $M_{\text{S}}5.2$ Earthquake in Gansu Province, on Nov. 13, 2003 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1): 61-65.
- [5] 袁道阳, 何文贵, 刘小凤, 等. 10 余年来甘肃省中强地震的发震构造特征[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 235-241.
YUAN Daoyang, HE Wengui, LIU Xiaofeng, et al. The Characteristics of Seismogenic Structure of Middlestrong Earthquakes in Recent 10 Years, Gansu Province [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 235-241.
- [6] 王博, 钟骏, 王熠熙, 等. 南北地震带北段流体资料地震预测效能检验[J]. 地震, 2018, 38(1): 147-156.
WANG Bo, ZHONG Jun, WANG Yixi, et al. Testing the Forecast Efficiency of Underground Fluid Observation in the North Segment of North-South Seismic Belt [J]. Earthquake, 2018, 38(1): 147-156.
- [7] 杨兴悦, 王燕, 王建荣, 等. 甘东南地下流体异常与甘肃岷县 6.6 级地震关系探讨[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 808-815.
YANG Xingyue, WANG Yan, WANG Jianrong, et al. The Relationship between Underground Fluid Anomalies in South-eastern Gansu and the Minxian $M_{\text{S}}6.6$ Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 808-815.
- [8] 张彬, 刘耀炜, 杨选辉. 中国大陆井水温对汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级和岷县 6.6 级地震响应特征的对比研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 535-541.
ZHANG Bin, LIU Yaowei, YANG Xuanhui. Contrastive Study on Co-seismic Response Characteristics of Well Water Temperature in Wenchuan ($M8.0$), Yushu ($M7.1$), Lushan ($M7.0$) and Minxian ($M6.6$) Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 535-541.
- [9] 刘耀炜, 曹玲玲, 平建军. 地下流体短期前兆典型特征分析[J]. 中国地震, 2004, 20(4): 372-379.
LIU Yaowei, CAO Lingling, PING Jianjun. Studying on Typical Characters of Fluid Short-Term Precursory [J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(4): 372-379.
- [10] LENTON T M. Early Warning of Climate Tipping Points [J]. Nature Climate Change, 2011, 1(4): 201-209.
- [11] OVERPECK J T, COLE J E. Abrupt Change in Earth's Climate System [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2006, 31(1): 1-31.
- [12] 吴浩, 侯威, 颜鹏程, 等. 基于临界慢化现象的气候突变前兆信号的初步研究[J]. 物理学报, 2012, 61(20): 561-569.
WU Hao, HOU Wei, YAN Pengcheng, et al. The Preliminary Research about the Precursory Signals of Abrupt Climate Change Based on Critical Slowing Down Phenomenon [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(20): 561-569.
- [13] 魏洋, 李忠辉, 孔祥国, 等. 砂岩单轴压缩破坏的临界慢化特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 427-432.
WEI Yang, LI Zhonghui, KONG Xiangguo, et al. Critical Slowing Characteristics of Sandstone under Uniaxial Compression Failure [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 427-432.
- [14] 王静瑶. 分形理论在地震研究中的应用[J]. 国际地震动态, 1991, 21(2): 5-8.
WANG Jingyao. Application of Fractal Theory to Earthquake Research [J]. Recent Developments in World Seismology, 1991, 21(2): 5-8.
- [15] 陈颢, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
CHEN Yong, CHEN Ling. Fractal Geometry [M]. Beijing: Seismological Press, 1998.
- [16] 陈颢, 陈凌, 吴忠良. 自组织临界性与地震预测: 对目前地震预测问题争论的评述(之一) [J]. 中国地震, 1998, 14(4): 3-5.
CHEN Yong, WU Zhongliang. Self Organized Criticality and Earthquake Prediction: a Review on the Current Discussions about Earthquake Prediction (I) [J]. Earthquake Research in China, 1998, 14(4): 3-5.
- [17] 郭增建, 秦保燕. 临界慢化期限与地震短临预报[J]. 内陆地震, 1991, 5(1): 1-10.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. Critical Slow Change Time Limit for Short and Impending Earthquake Prediction [J]. Inland Earthquake, 1991, 5(1): 1-10.
- [18] 郭增建, 秦保燕. 临界慢化与地震预报[J]. 西北地震学报, 1989, 11(1): 68-69.
GUO Zengjian, QIN Baoyan. "Critical Slowing down" and Earthquake Prediction [J]. Northwestern Seismological Journal, 1989, 11(1): 68-69.
- [19] 郭安宁, 郭增建, 焦姣, 等. 青海玉树 7.1 级大震的预测讨论[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 39-43.
GUO Anning, GUO Zengjian, JIAO Jiao, et al. Discussion on the Prediction of the Yushu $M_{\text{S}}7.1$ Earthquake in Qinghai Province in 2010 [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 39-43.
- [20] 晏锐, 蒋长胜, 张浪平. 汶川 8.0 级地震前水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(7): 1817-1826.
YAN Rui, JIANG Changsheng, ZHANG Langping. Study on Critical Slowing down Phenomenon of Radon Concentrations in Water before the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ Earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(7): 1817-1826.
- [21] 王熠熙, 李赫, 王博, 等. 2013 年岷县—漳县 $M_{\text{S}}6.6$ 地震前水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地震, 2018, 38(1): 128-138.
WANG Yixi, LI He, WANG Bo, et al. Critical Slow down Phenomena of Radon Concentrations before the 2013 Minxian — Zhangxian $M_{\text{S}}6.6$ Earthquake [J]. Earthquake, 2018, 38(1): 128-138.
- [22] 封国林, 董文杰, 龚志强, 等. 观测数据非线性时空分布理论和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2006. (下转第 1140 页)

[9] 李清河,张元生.祁连山-河西走廊地壳速度结构及速度与电性的联合解释[J].地球物理学报,1998,41(2):197-210.
LI Qinghe,ZHANG Yuansheng,TU Yimin,et al.The Combined Interpretation of Crustal Velocity and Electrical Resistivity in Qilianshan Mountain-hexi Corridor Region[J].Chinese Journal of Geophysics,1998,41(2):197-210.

[10] 秦满忠,刘旭宙,邹锐,等.甘肃祁连山大容量气枪主动源最大探测范围[J].地震工程学报,2017,39(6):1070-1075.
QIN Manzhong,LIU Xuzhou,ZOU Rui,et al.Maximum Detective Range of the Large-volume Airgun Active Source in Qilian Mountains,Gansu Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1070-1075.

[11] 蒋生森,王宝善,张云鹏,等.噪声对气枪信号叠加效果的影响及自动数据筛选方法[J].地震研究,2017,40(4):534-542.
JIANG Shengmiao,WANG Baoshan,ZHANG Yunpeng,et al.The Influence of Noise on the Stacking Effect of Airgun Signal and the Automatic Data Screening Method[J].Journal of Seismological Research,2017,40(4):534-542.

[12] LIU H F,NIU F L.Estimating Crustal Seismic Anisotropy with a Joint Analysis of Radial and Transverse Receiver Function Data[J].Geophysical Journal International,2012,188(1):144-164.

(上接第 1110 页)

FENG Guolin,DONG Wenjie,GONG Zhiqinag,et al.Nonlinear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Obserbational Data[M].Beijing:the Weather Publishing Company,2006.

[23] 于渌,郝柏林.相变与临界现象[M].北京:科学出版社,1984.
YU Lu,Hao BoLin.Phase Transitions and Critical Phenomena [M].Beijing:Science Press,1984.

[24] 车用太,鱼金子,刘五洲.水氡异常的水动力学机制[J].地震地质,1997,19(4):353-357.
CHE Yongtai,YU Jinzi,LIU Wuzhou.The Hydrodynamic Mechanism of Water Radon Anomaly[J].Seismology and Geology,1997,19(4):353-357.

[25] 孙蒙,王卫民,王洵,等.2013 年 7 月 22 日甘肃岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震震源破裂过程[J].地球物理学报,2015,58(6):1909-1918.
SUN Meng,WANG Weimin,WANG Xun,et al.Rupture Process of the Minxian — Zhangxian,Gansu,China $M_s6.6$ Earthquake on 22 July 2013[J].Chinese Journal of Geophysics,2015,58(6):1909-1918.

[26] 盛书中,万永革.由构造应力场研究汶川地震断层分段性[J].地震学报,2012,34(6):741-753.
SHENG Shuzhong,WAN Yongge.Segmentation of the Wenchuan Earthquake Fault Derived from Tectonic Stress Analysis[J].Acta Seismologica Sinica,2012,34(6):741-753.

[27] 曹玲玲,王宗礼,刘耀炜.氡迁移机理研究进展概述[J].地震研究,2005,28(3):302-306.
CAO Lingling,WANG Zongli,LIU Yaowei.Summarization about the Development of Radon Moving Mechanism Research [J].Journal of Seismological Research,2005,28(3):302-306.