

甘川交界地区近年地震活动与 武都地震台前兆资料变化特征

高曙德¹, 杜学彬², 苏永刚¹, 高原¹, 蒲小武¹, 王军燕¹,
叶媛媛¹, 陈彦平¹, 梅东林¹, 狄国荣¹, 杨斐³

(1. 甘肃省地震局陇南中心地震台, 甘肃 陇南 746000; 2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省地震局平凉中心地震台, 甘肃 平凉 744000)

摘要:位于甘川交界地区的武都地震台在2003—2008年5月4次中强地震前兆资料出现了明显异常变化。主要表现为:武都应变的南北向张应力在2001—2005年间持续增强,2007年转折后4个测向都表现为受压,且快速增强,在高压应力持续7个月后发生汶川8.0级大震;地电阻率显示了长趋势变化的加速、转折和1年尺度上升、下降等异常,各向异性度 S 年变化率在有震年(异常年)是无震年(正常年)的两倍;自然电场在临震前变化具有相似性、重复性、同步性。

关键词:甘川交界地区;武都地震台;前兆异常;应变;各向异性度 S

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)02-0167-07

The Variation Characteristics of Precursor Data in Wudu Seismic Station and the Earthquake Activity in the Boundary Area between Gansu and Sichuan Province in Recent Years

GAO Shu-de¹, DU Xue-bin², SU Yong-gan¹, GAO Yuan¹, PU Xiao-wu¹, WANG Jun-yan¹,
YE Yuan-yuan¹, CHEN Yan-ping¹, MEI Dong-lin¹, DI Guo-rong¹, YANG Fei³

(1. Longnan Center Seismic Station, Gansu Longnan 746000, China; 2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China; 3. Pingliang Seismic Station, Gansu Pingliang 742000, China)

Abstract: Wudu seismic station is located in the boundary area between Gansu and Sichuan provinces. From 2003 to May 2008, before four moderate-strong earthquakes in this area, the observation data from Wudu station had significant precursor anomalies. It mainly showed as follows: the tensile stress in NS direction had been sustained increasing from 2001 to 2005, then turned to compression in four directions in 2007, and rapidly increased. After this high-pressure stress kept seven months, the Wenchuan M8.0 earthquake occurred. The earth resistivity data showed the long trend of acceleration and changing, with increasing, descending etc. anomalies in a year scale. The annual variation ratio of the anisotropic index S is two times in earthquake occurring years (anomaly years) than in quiet years. The variation of natural electric field had likeness, repeatability and similarity in imminent earthquake period.

Key words: Boundary area between Gansu and Sichuan province; Wudu seismic station; Precursor anomaly; Strain; Anisotropic index S

收稿日期:2008-03-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目《强震监测预报技术研究》子专题(2006BAC01B02-04-03);甘肃省地震局地震短临跟踪项目

作者简介:高曙德(1970-),男(汉族),甘肃秦安人,高级工程师,主要从事地震监测、预报等研究。

0 前言

武都地震台位于甘肃省东南部的陇南市。甘东南及其与四川省交界地区属于西秦岭构造带与南北地震带交汇区,区内活动断裂非常发育,地震活动显著,近年来中强地震比较频繁。甘肃省 1995—2008 年 5 月 12 日共发生了 12 次 M_s 5.0 以上的地震(不包括汶川 8.0 级地震余震),其中 1995—2003 年 9 月有 8 次发生在祁连山—河西走廊构造带内;而 2003 年 11 月至 2008 年 5 月有 4 次地震都发生在甘东南及甘川交界活动构造区内^[1-4]。本文以武都地震台监视区近年发生的 4 次中强震作为震例,分析前兆资料的异常变化,总结其变化规律。

1 甘川交界地区的区域构造背景和中强地震活动的基本特征

1.1 区域构造背景

甘东南、甘川地区处在中国中部南北向构造带与西秦岭构造带的交汇区内。青藏高原在向东北方向推挤的过程中,西秦岭东缘相对稳定(包括汉中原),使甘东南地区应力逐年增强。同时,四川盆地一带遭到华南活动地块的强烈阻挡,使得应力在龙门山推覆构造带上高度积累。2003、2004 年岷县的两 5 级以上地震和 2006 年文县 5.0 级地震都发生在这个交汇构造区域内,2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震发生在与该区毗邻的龙门山断裂带上。岷县和文县地震可能是汶川 8.0 级地震的前期应力

调整。

1.2 中强以上地震活动基本特征

自 2003 年 7 月 10 日礼县发生震群性小震后,本地区中强地震活动越来越明显。11 月 13 日岷县、临潭发生了 5.2 级地震;2004 年又相继发生多次中强地震,分别是 3 月 4 日玛曲 M_s 4.8 地震、8 月 26 日礼县 M_s 4.7 地震;和 9 月 7 日岷县 M_s 5.0 地震;进入 2006 年后又发生 1 月 2 日文县梨坪 4.5 级地震、3 月 27 日宕昌 4.8 级地震、6 月 21 日文县 5.0 级地震。2008 年 2 月 27 日四川康定发生 4.7 级地震,到 5 月 12 日发生汶川 8.0 级地震。而在平静期的小震活动却是较少的,这是该区域地震活动的主要特点。

2 4 次中强地震的基本参数

根据甘肃省地震监测中心和中国地震台网中心对 4 次中强地震定位,基本参数见表 1,用 P 波初动求得震源机制解(表 2)。

表 1 4 次中强震基本参数

编号	地点	发震时间	震级 / M_s	仪器震中		震源深 度/km	资料来源
				$\Phi_S/^\circ$	$\lambda_E/^\circ$		
1	岷县	2003-11-13	5.2	34.7	103.9	22	甘肃地震台网 中国地震台网
		2003-11-13	5.2	34.7	103.9		
2	岷县	2004-09-07	5.0	34.17	103.9	32.6	甘肃地震台网 中国地震台网
		2004-09-07	5.0	34.73	103.91		
3	文县	2006-06-21	5.1	33.04	104.54	19	甘肃地震台网 中国地震台网
		2006-06-21	5.0	33.10	104.94		
4	汶川	2008-05-12	8.0	30.57	103.24	33	中国地震台网

表 2 由 P 波初动求得 4 次中强震震源机制解

编号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴		矛盾比
	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	
1	330	27	67	175	65	101	256	20	106	68	350	10	0.095
2	338	44	67	188	50	110	264	3	163	74	355	15	0.00
3	2	68	272	97	78	7	228	7	321	25	124	64	0.00
4	229	43	123	7	55	63	222	67	23	22	116	7	

注:1~3 据刘旭宙,4 来源 IGP-CEA

岷县 5.2、5.0 地震的 P 轴方位近东西向,仰角近水平,反映了近东西向主压应力的水平向挤压逆冲兼走滑活动。根据现场考察结果,发震构造为逆左旋走滑的临潭—宕昌断裂带^[5],与节面 I 走向一致。

文县 5.0 级地震震源机制解反映了近东西向主压应力的水平挤压左旋走滑活动。现场考察结果发震构造与 1879 年武都 8.0 级地震的一致。

汶川 8.0 级地震是一次以逆冲为主、兼一定右旋走滑分量的地震。地震破裂带南段以逆冲为主兼

具右旋走滑分量,北段以右旋走滑为主兼具逆冲分量。

3 武都地震台前兆资料在几次地震前后的变化特征

3.1 应变的异常变化特征

武都应变 NS 向变化从 2000 年 9 月至 2004 年 9 月主要是张应变为主, $N45^\circ E$ 向以压应变为主。从 2000 年 9 月开始张应力积累 14 个月后发生昆仑山口西 8.1 级地震;2003 年 10 月 5 日 NS 向的张应

力急剧加强,11月1日N45°W方向也出现的张应力急剧增长,结果在11月13日发生了岷县5.2级地震;此后NS、N45°W、EW在张应力持续背景下于2004年9月出现了应变缓慢释放的现象(即应变模拟曲线出现岩石破裂研究中快速蠕变曲线形态),9月7日又在老震区发生了5.0级地震^[6]。从2004年底开始,EW、NS、N45°W、N45°E4个方向的应变元件全部表现为受压。2005年10月只有EW向仍表现为受压,其他方向张性变化增强,其中N45°E从这时开始从长达9年的压应力状态转向张应力状

态,反映区域应力场的重大调整。从不同方向的受力元件的变化可以看出,甘东南总体的受力状态是NW-SE向的挤压,NE-SW向的引张。这种受力状态有利于北西向断层的滑动。2006年2月在文县梨坪发生了M_s4.5地震,6月NS向急剧变化时又发生了6月21日文县M_s5.0地震。2007年3月后4个方向的元件受力都表现为受压,年底EW向转折,其它方向在高压状态下持续7个月,发生了汶川8.0级地震。

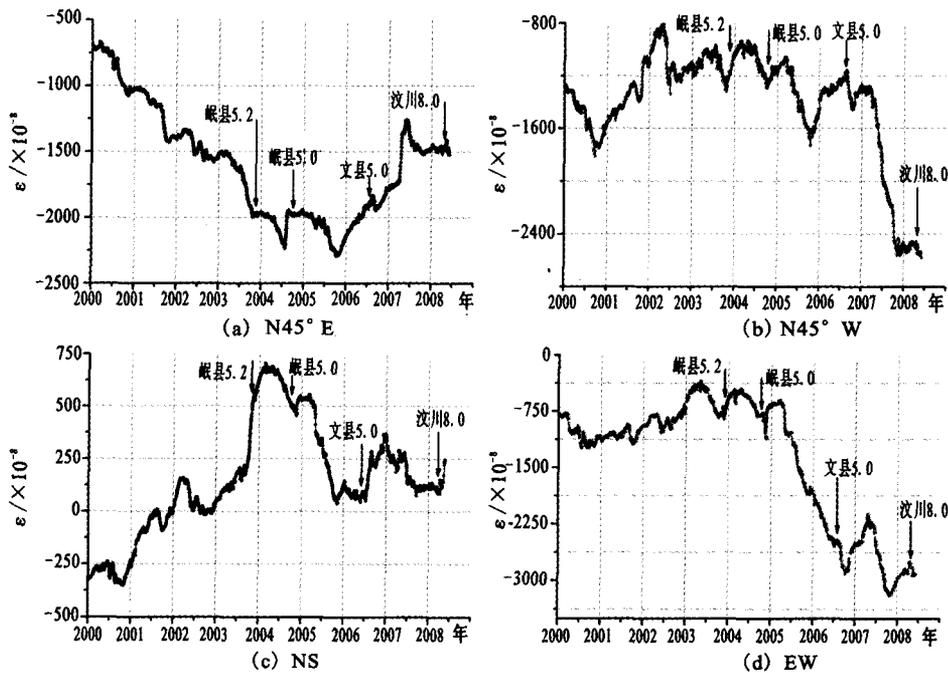


图 1 2000—2008年5月武都应变4个方向日均值变化曲线

Fig. 1 The daily mean value curves of strain in 4 directions recorded by Wudu seismic station from 2000 to May 2008.

3.2 地电阻率的变化形态和异常分析

武都汉王地电测区周围干扰较小,资料基本反映了地下介质的电性变化,其中地电阻率资料因1976年松潘7.2级地震前后的明显变化而闻名中外。为了压制干扰成分,突出趋势性变化,对武都汉王台的地电阻率资料采用月均值法处理和各向异性度计算。以一年的尺度分析,N54°W、N73°W道年变形态呈正弓型(夏高冬低),N85°E道呈反弓型(夏低冬高),但有些年份形态发生了畸变或高值、低值异常(图2(b~d)),这些变化正对应几次地震事件^[7-10]。

(1) 2003年11月13日岷县5.2级地震和2004年9月7日岷县5.0级地震

在两次岷县地震前,N54°W道地电阻率月均值

在2003年1月下降到了4年来最低值10.94Ω·m,与前三年同期均值11.21Ω·m相比下降幅度达到了2.4%,转折上升10个月11月13日地震;N85°E的月均值在2003年9月下降到了4年来最低值19.34Ω·m,与前三年同期均值19.69Ω·m相比下降幅度达到了1.8%,转折上升40多天后11月13日地震,显现了一个完整的下降~上升短临异常;N73°W道月均值在2002年7月打破年变,到2003年5月快速上升,10月达到最大值,幅度达到了4.0%,转折后11月13日地震。N85°E和N73°W两测道的异常变化在时间上是对应的,在形态上两测道大体呈镜像变化。2004年9月7日老震区又发生5.0级地震,异常形态与2003年有相似性,具有重复性。

(2) 2006年6月21日文县5.0级地震

在文县地震前, N54°W 道地电阻率月均值在2006年1月又下降到了最低值 10.97 Ω·m, 与前两年同期均值 11.10 Ω·m 相比下降幅度达到了 1.2%, 转折上升 5 个月发震; N85°E 的月均值在2006年2月到4月一直是 19.59 Ω·m, 5月下降到 19.45 Ω·m, 与前几年同期测值相比变幅较小, 有趋势性变化, 6月转折上升, 21日发震; N73°W 道月均值在2006年1月出现了三年以来最低值, 与同期均值相比幅度达到了 0.9%, 然后转折上升 6月21日发震。

(3) 2008年5月12日汶川8.0级地震

在汶川地震前, N54°W 道地电阻率月均值从2007年整个偏高, 2008年持续上升, 5月初的测值 11.63 Ω·m 与前8年同期均值 11.31 Ω·m 相比, 上升幅度达到了 2.8%; N85°E 的月均值在2008年3月到4月一直是 19.46 Ω·m, 5月下降到 19.37

Ω·m, 与前几年同期测值相比变幅高出 0.4%; N73°W 道地电阻率月均值从2008年2月开始测值 4.44 Ω·m 持续到5月初, 打破了年变, 5月12日发震。

(4) 各向异性度 S'

地电阻率各向异性的变化实质是孕震构造应力场的动态变化^[11-12], 但在实际中, 电阻率观测的布极方向并不一定平行或垂直断裂面, 所以在使用中, 引入了地电阻率各向异性度 S', 每个月的 S' 计算公式为

$$S' = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{SNS}}{\rho_{SEW}} \right)_i - 1 \right| \times 10^3 \quad (1)$$

式中 ρ_{SNS}、ρ_{SEW} 为地电阻率月均值, n 为一个月的天数。在孕震周围无变化时, S' 通常为常数值。利用式(1), 对武都台 2000—2008年5月的 N85°E 测道、N73°W 测道地电阻率进行计算 S' (图 2(a)), 与地震关系如表 3。

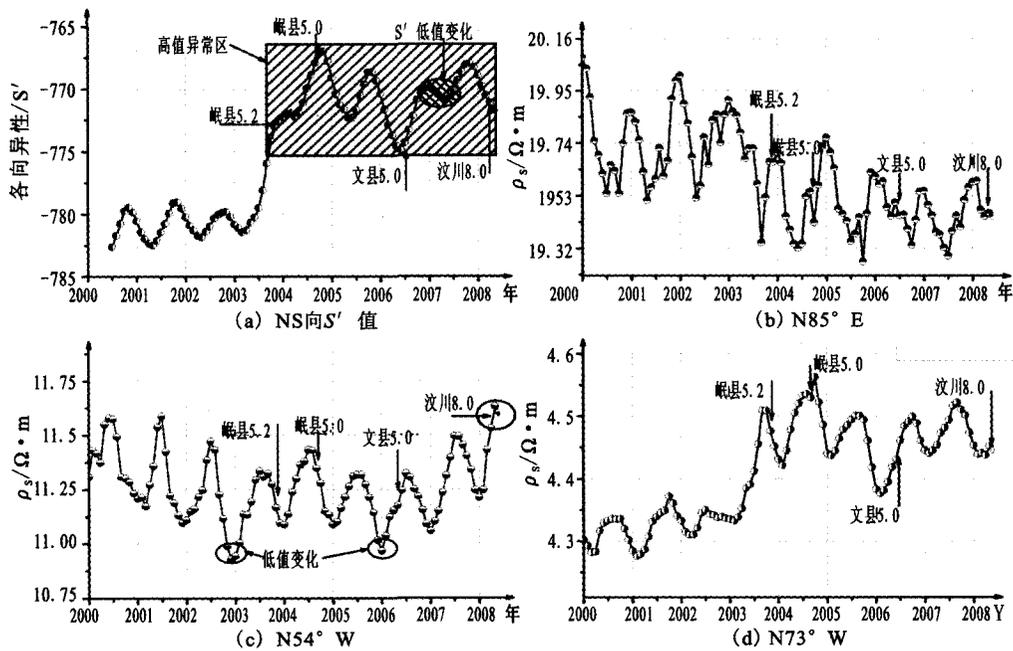


图 2 2000—2008年5月武都地电阻率与各向异性度(S')月均值曲线

Fig. 2 Monthly mean value curves of resistivity and anisotropy(S') in Wudu station from 2000 to May 2008.

从表 3 看出, 有震年份 S' 年变率比无震年要增大 1.4~2.6 倍, 表明震前岩石的各向异性增强。2007年、2008年与前3年均值相比 S' 年变幅明显变小, 这主要是汶川 8.0 级地震前该地区处在高围压状态(图 1)。

3.3 自然电场、地电阻率短临变化特征

在几次地震前, 武都汉王台自然电场早期变化较大, 表层异常信息明显, 参量变化方向在震前突然

大幅度转向, 异常形态具有相似性、重复性、同步性; N73°W 道地电阻率震前多次出现了脉冲突跳。

(1) 在2003年11月13日岷县 5.2 级地震前 10月9日, N85°E 道 V_{sp} 转折上升 35 天; N54°W 道和 N73°W 道 10月21日 V_{sp} 同步开始下降, 26日转折上升 18 天后发震; N73°W 道地电阻率震前 8 天突跳开始, 13日频次增强然后发震。2004年岷县 5.0 变化形态相同(图 3)。

表 3 2000 年—2008 年 5 月 N73°W 与 N85°E 各向异性度(S)与地震关系

年份	地震事件			S 年变化 幅度/N	S 变化率 (N/N')/(倍)	岩石各 向异性	备注
	时间	地点	震级/M _s				
2000				3.15	无震年		
2001				3.47	无震年		
2002				2.03	/	减弱	破年变形态
2003	2003-11-13	岷县	5.2	8.86	+2.6	增强	
2004	2004-09-07	岷县	5.0	5.24	+1.5	增强	
2005				3.69	无震年		
2006	2006-06-21	文县	5.0	4.79	+1.4	增强	
2007				2.99	/	高压	破年变形态
2008	2008-05-12	汶川	8.0	2.78	0.8	高压	截止 5 月 31 日

注: N 表示各向异性度(S)年变化幅度=(年变化最大值-年变化最小值)的绝对值,
N'表示无震年 S 的年变化幅度均值

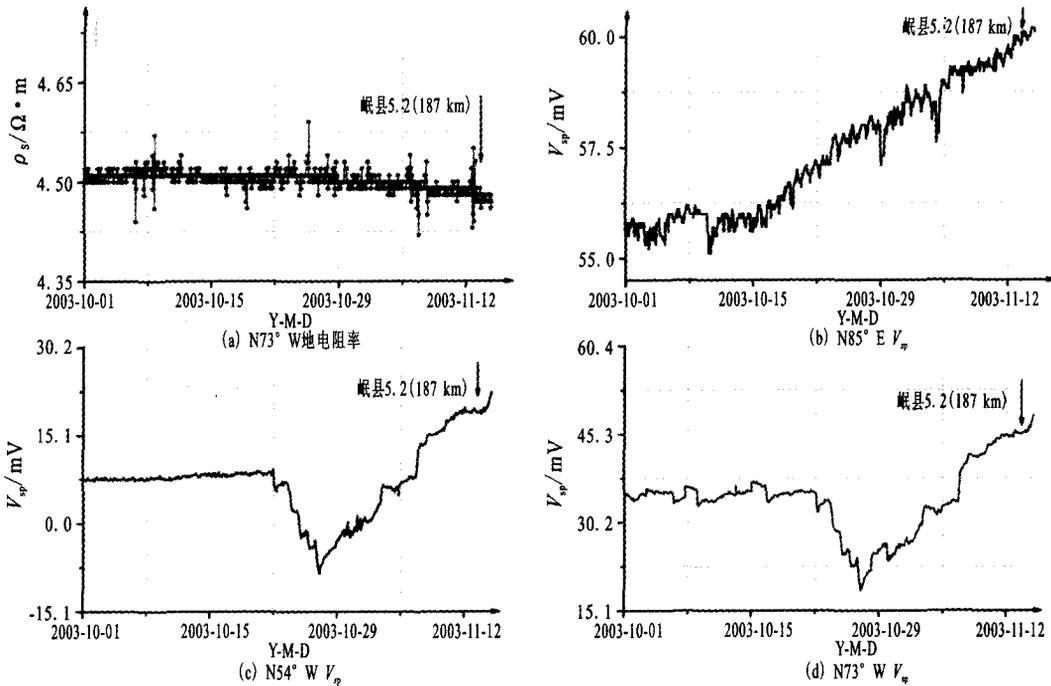


图 3 2003 年 10—11 月武都汉王地电阻率、自然电位整点值曲线

Fig. 3 Hourly value curves of resistivity and natural electric field in Wudu Hanwang station from October to November in 2003.

(2) 2006 年 6 月 21 日文县 5.0 级地震前, N85°E 道 V_{sp} 转折上升 51 天; N54°W 道和 N73°W 道从 2006 年 5 月 V_{sp} 同步开始下降, 到 6 月 16 日转折上升 5 天后发震; N73°W 道地电阻率在 5 月 5 日开始突跳持续到 6 月 12 日, 平静 9 天后发震(图 4)。

(3) 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前, N85°E 道 V_{sp} 从 5 月初逐步下降, 9 日转折上升 3 天发震, 5 月 25 日青川 6.4 级余震有相同的变化形态(图 5(b)); N54°W 道和 N73°W 道 5 月 2 日 V_{sp} 同步下降后上升, 4 日至 8 日 N73°W 道 V_{sp} 出现了脉冲阶跃, 变幅达到 4 mV, 4 天后发震。此后汶川余震序列出现了相似的变化(图 5(c~d)), N73°W 道地

电阻率在 5 月 1 日开始突跳持续到 9 日, 最大变幅超过 3%, 平静 3 天后发震。余震序列变化形态相似(图 5(a))。

4 武都应变剧烈的讨论与结论

由 GPS 观测中国大陆西部地壳水平运动数据显示, 印度板块与欧亚大陆碰撞及其向北的推挤导致了亚洲大陆内部大规模的构造变形, 造成了青藏高原的地壳缩短、地貌隆升和向东挤出。欧亚板块(中国西部的地区)水平运动从 2000 年逐年增强, 每年以 10 mm/a 速度向东移动^[13-16]。2004—2007 年昆仑山南缘、甘川交界地区更加突出。由于青藏高

原在向东北方向运动的过程中,西秦岭东缘相对稳定(包括汉中平原),甘东南地区应力逐年增强。在上述大的应力场背景下,武都应变对甘川交界地区的力学响应为:自 2000 年 9 月至 2004 年 9 月武都 NE 向压应变增强,NS 向的张应力逐步增强,发生了两次岷县地震,地震破裂带走向近东西向,破裂带两侧 NS 向以张裂为主,与武都应变相一致。2007

年该区域的受力全部显示为压应力增强,主要由于四川盆地一带遭到华南活动地块的强烈阻挡,使得应力在龙门山推覆构造带上高度积累,在挤压逐渐增大情况下,2007 年底只有 EW 向转向,其它测向持续 7 个月的高压应力状态,沿映秀—北川断裂突然发生错动,发生汶川 8.0 级强烈地震。

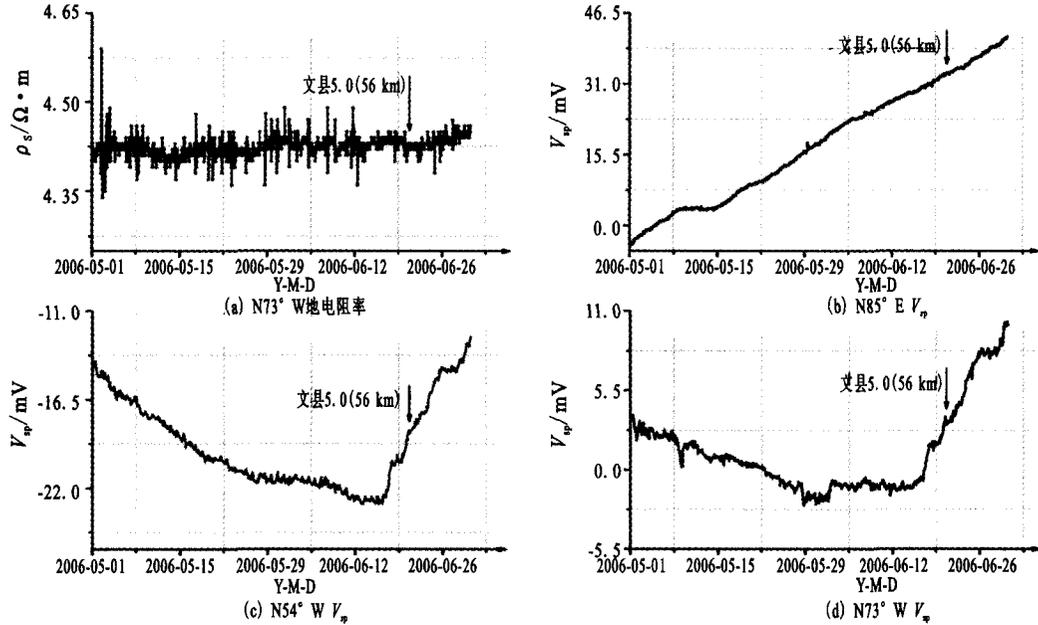


图 4 2006 年 5—6 月武都汉王地电阻率、自然电位整点值曲线

Fig. 4 Hourly value curves of resistivity and natural electric field in Wudu Hanwang station form May to June in 2006.

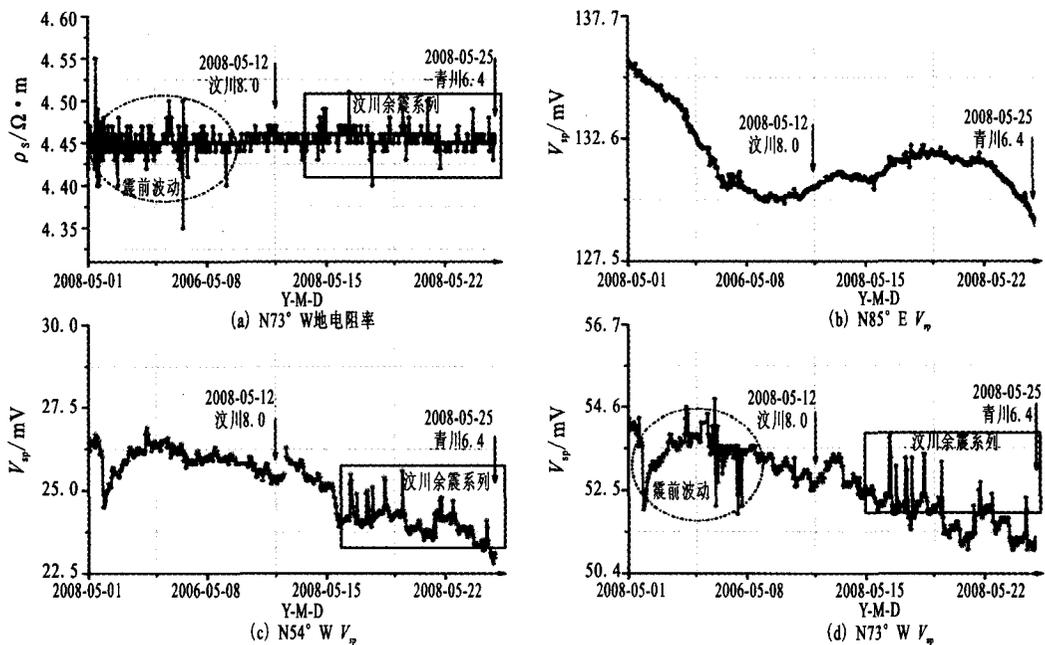


图 5 2008 年 5 月 1—25 日武都汉王地电阻率、自然电位整点值曲线

Fig. 5 Hourly value curves of resistivity and natural electric field in Wudu Hanwang station form 1 to 25, May 2008.

(1) 从甘川交界地区的应力调整来看,武都应变 $N45^{\circ}E$ 受力元件2005年10月开始从长达9年的压应力状态转向张应力状态,这是区域应力场的一个大的转折,预示我国西部长期受东北方向的挤压有所调整。本区NS性的张应力又逐步加强,总体的受力状态是NW-SE向的挤压,NE-SW向的引张。因此NNW、NW向构造发育的甘东南地区具备发生中强震的力学条件,所以本区岷县-宕昌断裂带的地震活动性相对减弱,而南北地震带的地质构造运动会进一步强烈,2006年文县5.0地震是该地震活动的前奏,2008年5月发生了汶川8.0级大震。

(2) 4次地震前武都台观测到了一年尺度各种长趋势的地电阻率上升和下降异常现象,这是在地震孕育过程中岩石的应力变化,使岩石弱化、产生新的裂隙或孔隙度变化等一系列的现象,各向异性度(S)有震年份比无震年要增大1.4~2.6倍,表明震前岩石的各向异性增强。

(3) 在几次地震前,该台自然电场早期变大较大,表层异常信息明显,参量变化方向在震前突然大幅度转向,异常形态具有相似性、重复性、同步性;N $73^{\circ}W$ 道地电阻率在临震前多次出现了脉冲突跳。

研究表明,武都台的应变、地电阻率、自然电场异常变化是能够反映出本区的区域应力场变化,异常对于地震的预测有重要意义。

[参考文献]

- [1] 袁道阳,何文贵,刘小凤,等. 10余年来甘肃省中强地震发震构造特征[J]. 西北地震学报,2006,28(3):235-241.
- [2] 冯希杰,董星宏,刘春,等. 范家坝-临江断裂活动与1879年甘肃武都南8级地震的讨论[J]. 地震地质,2005,27(1):155-163.
- [3] 侯康明,雷中生,万夫岭,等. 1879年甘肃武都南8级大地震及其同震破裂研究[J]. 中国地震,2005,21(3):295-312.
- [4] 邓起东,张培震,冉永康,等. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘,2003,10(增刊):66-73.
- [5] 郑文俊,刘小凤,赵广,等. 2003年11月13日甘肃岷县 $M_s5.2$ 地震基本特征[J]. 西北地震学报,2005,27(1):61-65.
- [6] 高原,苏永刚,康好林,等. 甘肃省民乐6.1与岷县5.2级地震前武都形变资料的变化及临震预测[J]. 西北地震学报,2005,27(增刊):95-99.
- [7] 傅良魁主编. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1983.
- [8] 高曙德,苏永刚,王君平,等. 武都地电阻率在岷县地震前的异常变化[J]. 地震,2005,25(2):115-121.
- [9] 钱复业,赵玉林. 地电阻率的各向异性地震前兆及其在探索震中区域应力场分布中的应用[A]//地震地电学发展与展望编委会. 地震地电学发展与展望[G]. 兰州:兰州大学出版社,1998:64-69.
- [10] 陆阳泉,梁子斌. 岩石电学性质的实验研究概述[A]//地震地电学发展与展望编委会. 地震地电学发展与展望[G]. 兰州:兰州大学出版社,1998:32-34.
- [11] 陆远忠,李胜乐,邓志辉,等. 基于GIS的地震分析预报系统[M]. 成都:成都地图出版社,2002:86-87.
- [12] 赵玉林,钱复业,等. 地电阻率前兆场与应变场关系及其预报地震方法的研究[A]//地震地电学发展与展望[G]. 兰州:兰州大学出版社,1998:41-50.
- [13] 周荣军,李勇, A L Densmore, 等. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石,2006,26(2):40-51.
- [14] 李勇,周荣军, A L Densmore, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究,2006,26(1):41-49.
- [15] 刘宝珺. 青藏高原东缘地质及大陆动力学研究的新进展——《青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应》与《The Geology of the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau》书评[J]. 地质通报,2007,26(8):1056-1058.
- [16] 李亚荣,荣代璐,韩晓明. 2003年岷县5.5级地震地震学前兆特征及预报意义[J]. 西北地震学报,2007,29(2):150-155.