

中国大陆自然电场的前兆机理与特征

汪忠德

(长江大学地球科学学院油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023)

摘要:首先回顾了中国大陆地区震前自然电场前兆特征研究的发展历程。着重论述了震前自然电场的范围、形态、时间、与震级统计关系等前兆特征;指出震前自然电场产生的几种机理:过滤电场、扩散—吸附电位、电化学电位、机电转换效应以及压力作用下黄土层自然电位的变化;分析了自然电场是多种电信号叠加而成的一个综合电位,趋势性背景、季节性变化、地震信号和干扰因素都会引起岩石电阻率、土壤中溶液的溶解度和电离度、地下水的渗透条件、大地电场和自然电场的一系列变化。而面导电机理、体导电结构的变化造成宏观电阻率各向异性的增强并形成各测点间的电位异常,其形成机理和电磁响应特征的研究都能较好地认识地震前兆。

关键词:地震;前兆特征;地电场;电磁响应;形成机理

中图分类号: P319.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)04-0360-06

Possible Precursor Mechanisms and Characteristics of Natural Geoelectrical Field before Earthquakes in Chinese Mainland

WANG Zhong-de

(Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources under MOE,
School of Earth Sciences, Yangtze University, Hubei Jingzhou 434023, China)

Abstract: The development course of research on the precursor characteristics of natureal geoelectric field before earthquakes in Chinese mainland is reviewed firstly. Then the range, figure and period of the field, as well as the statistical relationship with earthquake magnitudes are discussed. Some possible mechanisms of natural electric field before earthquake, such as infiltration electrical field, diffuse-adsorption potential, electro-chemical potential, electro-mechanical transformation effect and natural self-potential variety of loess under pressure, are pointed out. The natural electric field is a summing potential (SP) made of many signals, the trend background, seasonal variation, seismic signal and interference factors can all cause the change of rock resistivity, ionization and solubility of solution in soil, permeability condition of underground water, also the geoelectric field and natural electric field charge. The research on these mechanism of anomalies and characteristics of electromagnetic response will help us to understand the earthquake precursors.

Key words: Earthquake; Precursor characteristic; Geoelectric field; Electromagnetism response; Form mechanism

0 前言

地震预报可分为长期、中期、短期、临震四个阶

段,前两个阶段多利用历史地震记录、地质构造特征、现今地震活动性及水准、地倾斜、地应力、地电阻

收稿日期: 2006-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(40672071); 中国石油天然气集团公司应用基础研究项目(05A10101); 国家“973”煤层气项目(2002CB211709)

作者简介: 汪忠德(1982-), 男(汉族), 湖北黄冈人, 硕士, 主要从事地球探测与信息技术和油气田开发地质方面工作。

率等观测手段来判断^[2];地震短临前兆有:地形变、地应力、地下水位、地球化学、电磁波、地温及水温、重力、次生波、地光地电、生物异常及地震活动性的变化等。新近观测到或利用的异常有:大气电场、电磁波干扰、地气、地温与气温、小范围气象等。无疑地震短临前兆的自然电场变化研究是地震预报的主要课题^[4,5]。为确认震前观测到异常的电磁信号和电阻率变化等一系列的现象,长期连续、高精度的大地电场观测资料已成为问题的关键。

以前自然电场资料使用少的原因有三点^[6]:一是测量电极的极大化,使用的有铅版电极产生的电极极化电位叠加在自然电场上,影响自然电场资料的内在质量和可信度;二是有的测量区地下水或地表水发育,形成过滤电场(如:山地电场、河流电场和裂隙电场等),造成自然电场资料变化剧烈而不能使用;三是自然电场的其他成因复杂,导致前兆形态和特征多种多样,识别起来比较困难。自然电场和电阻率是相伴的两个独立地电参数,但后者研究的广度和深度都要比前者大的多。实际上,自然电场有自己独特的地方,那就是天然场源、测量仪器轻便、方法简单和成本低廉,所以应用前景广阔。

1 自然电场的变化特征

地球表面存在着天然的变化电场和稳定电场,合称大地电场。大地电场是弱电场即静电场^[7]。地球内部存在着许多大区域电场,称作大地电场;地表由于各种物理、化学作用还存着自然电场,如氧化还原电场、过滤电场和电极电场等^[13]。

自然电场正常变化的形态比较复杂。如图1给出了兰州地电台3个测量方向7年的自然电场日均值曲线,同时给出用法国不极化电极作为测量电极的近5年自然电场的日均值曲线(图下方3条)^[9]。可以看出,不同地区不同时间不同测量方向的自然电场的变化形态不同,年变化幅度也不一样:铅电极的自然电场为30~770 mV左右;兰州地电台为390~770 mV;山丹地电台为35~120 mV;临夏地电台为180~220 mV;用法国不极化电极的兰州地电台自然电场为35~180 mV。比较两个时间段的自然电场可以看出,兰州地电台使用两种电极测量自然电场的变化幅度很大,使用不极化电极测量到的自然电场仅为铅电极的0.23~0.09,这是不极化电极的极化小所致;自然电场年变化的极值时间一般是2、3、4、7、8、9月份。

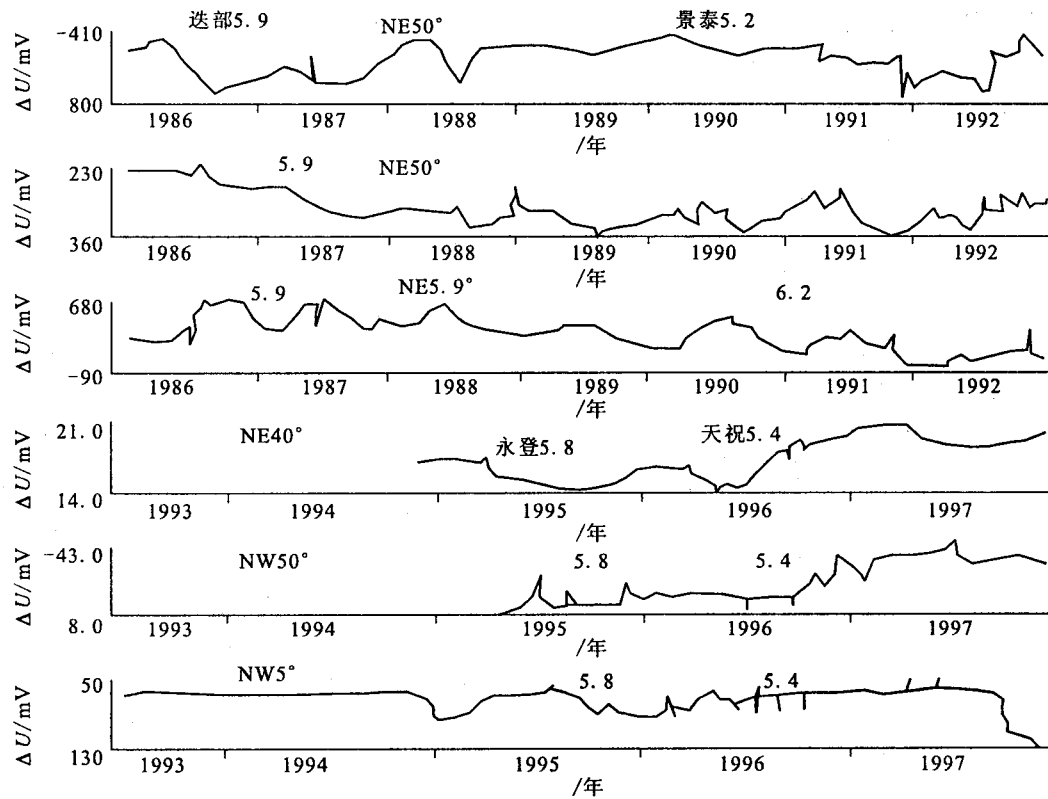


图1 兰州地电台自然电场日均值曲线图
Fig.1 Daily mean value curves of natural telluric field in Lanzhou.

在这里着重指出,自然电场(位)是多种电信号叠加而成的一个综合电位。它有趋势性背景、季节性变化、地震信号和干扰因素。铅电极的极化是地电场方法测量中的主要干扰,地电场方法要用于地震预报必须采用不极化电极代替铅电极,以减少电极极化的影响,突出地震的地电场前兆特征。

2 自然电场的前兆特征

地震前地电场异常变化的机制尚无定论。根据在干岩石标本受力、破裂前产生的电信号,推论可有压电、固态缺陷及电荷重新分布等机制。异常电场的方向可平行断层或垂直断层。流体流的方向既可沿着断层水平流动(电场平行断层);也可从断层带流出或流入,其水平流动分量引起的电场垂直断层^[10]。在水文地质的排水区,高角度断层活动通常引起流体流上涌,断层横穿孔压梯度带引起垂向流体流(上涌或下渗)产生电场,在上涌顶端形成正电荷的累积,流体流携带过剩正的体电荷所形成的电场与点电流源(+I)所形成的电场是等价的;水文地质的补给区,断层活动通常引起流体流下渗,在下渗流体流的起始端(即顶端)形成负电荷的积累,与负的点电流源(-I)所形成的电场等值。为记录过滤电势机制的前兆电场,地电台的台址应选在未来的地震断层或活动断层附近。判别自然电场前兆及其持续时间的方法是半定性半定量的^[11]:(1)前兆出现时具有超过单次测量误差 3 倍以上的变化幅度;(2)前兆出现具有一定时间过程的形态,变化显著,除去单次突跳;(3)前兆出现要求具有连续几天的时间。由表 1 可以看出自然电场的前兆比较复杂。

表 1 部分中国大陆地区震例——临震自然电场异常值(据文献[8])

发震时间	震级 M_L	震中位置	震中距 /km	主异常幅度/mV	主异常超前/天
1981-02-12	5.0	古冶	175	-717	29
1981-03-15	5.3	唐山	190	-863	14
1981-04-06	4.7	古冶	190	-658	6
1981-08-13	$M_S 5.8$	兴和	260	-728	6
1981-09-18	5.3	内蒙	460	-351	11
1981-10-07	4.6	唐山	180	-530	15
1981-11-09	$M_S 6.1$	隆尧	300	-586	8
1982-03-08	$M_S 5.0$	雷庄	210	-764	16
1982-03-30	5.0	古冶	195	-415	11
1982-05-09	5.3	雷庄	200	-420	18
1982-10-19	6.2	卢龙	210	-408	18
1982-12-10	4.9	马道	60	-638	11

2.1 震前自然电场前兆出现的范围

5.4~6.2 级地震前自然电场前兆多集中在 150~200 km 范围内,7.0~7.9 级地震前自然电场前兆出现在 250 km 范围内。但并不是在这个范围内的地电台都会出现前兆。

2.2 震前自然电场前兆的形态

地震前自然电场前兆多数以大速率变化的形式开始,但也有缓慢变化开始的。电离层前兆不仅被作为个案研究,也被统计研究过^[14-15]。在大地震(火山喷发)之前的几天或几小时,在强震和火山活动区的地壳和对流层中存在电磁耦合过程,在电离层内存在异常变化,其中最可能的模型基于大气边界层地壳发射物(氢、惰性气体和金属气溶胶)的化学反应。这些发射物改变了边界层的电导率,从而改变了活动区域内的大气电场值。根据实验测量,在大地震前几天或几小时地表的地震感应的垂直电场强度可达到 1 至几个 kV/m,而在无干扰情况下该值为 100 V/m。异常电场渗透到电离层引起了不同种类的变化(离子成分、电子密度、标高、电子温度等的变化),这些变化可以用实验方法及人造卫星测量到,被称作地震的电离层前兆。电离层前兆的优点在于电离层把活动区域作为一个整体,避免了导致地面测量前兆中出现错误的镶嵌式特征,并有稳定的时间尺度,这使它在短临地震预报中更具实用价值,现有的知识水平使得电离层前兆的短期地震预报成为可能。

2.3 地震发生的时间

地震发生在自然电场前兆的极值处连续多个脉冲之后。统计上证实,以逐日的电离层变化为背景,前兆确认的地震量级阈值是里氏 5 级,并且在地震前的 5 天开始观测到前兆。统计分析以很高的可信度表明与临近地震相关的电离层异常确实存在,前兆被确认的概率随着临近地震震级的增加而增加。基于统计分析,利用 2 维模式识别技术建立了专门的运算法则,用来从电离层数据中自动识别地震前兆。在理解震前现象的物理学(不仅是电离层现象,而且还有不同种类的电磁辐射)的过程中促进了国际科学团体的共同努力。2002 年在 IUGG 协会内部建立了国际工作组“关于地震和火山的电磁研究的内部合作工作组(EMSEV)”。

2.4 自然电场前兆特征量与震级的统计关系

自然电场前兆持续时间 T (前兆出现到地震发生的间隔时间)与地震震级 M 、震中距 R ($R = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$,单位为 km)之间有下列关系:

$$\lg(R,T) = 2.782 + 0.239M \tag{1}$$

$$\lg(R,T) = 1.504 + 0.369M \tag{2}$$

式中 Δ 为震中距; h 为震源深度。式(1)由5.4, 5.8,6.2,7.9级4次地震统计所得,相关系数为0.93,关系式可靠程度参数: $t(\varphi,14) = 20.65$;式(2)由5.9,6.2,7.0,7.2,7.9级5次地震统计得到,相关系数为0.83,关系式可靠程度参数 $t(\varphi,13) = 8.00$ 。两者的关系可靠程度值 $t(\varphi,n)$ 比理论值 $t(0.99,6) = 4.032$ 要大得多,所以式(1),(2)是完全可靠的。

需要指出,同一地电台在不同震级地震前自然电场前兆时间不完全成比例。比如兰州地电台在5.4,5.8和6.2级3次地震前自然电场持续时间 T 、震中距与震级的相关系数为0.58;而武威地电台的相关系数则为0.82。临夏地电台在5.4,5.8,6.2和7.2级4次地震前自然电场前兆持续时间、震中距与震级的相关系数为0.73。这种差异一是反映台址的构造和岩体力学条件不同,存在传递应力应变的差别;二是识别自然电场前兆不准确所致。换言之,震前自然电场的前兆比较难以辨别,只能是定性定量相结合。

3 自然电场前兆的产生的机理探讨

自然条件下地面的自然电场是多种电信号叠加而成的一个综合电场,不同的时空有不同的成份。在自然界单一成因的自然电场可能是不存在的,因为测量自然电场总是受到来自地下、空中成因电场的影响;受到测量仪器和设备、测量者主观因素等方面不同程度的影响,当然后者在一定条件下可忽略^[12]。岩石在高应力状态时,微裂隙和破裂发展起来,孔隙与水的贯通形成了若干个内部的导电面,这些裂隙表面的存在是多种导电机制(如液相、电动效应等)得以发挥作用的前题条件。剖面上尽管主次破裂线很细很窄,但在三维体中它是一个完全沟通的面,造成了该面附近的视电阻率急剧下降。这种复杂的变化形态是很难仅仅根据少量测点上的视电阻率值而进行直接推断。因此自然电场主要取决于不同的时空的影响因素,亦即不同的机理。

3.1 过滤电场

过滤电场又称渗透电场,是流动的地下水在重力或压力作用下,经过多孔岩石或裂隙时,由于大多数岩石颗粒吸附负离子,使流水中集中了相对多的正离子,于是在顺水流方向出现了高电位电场,逆水流方向出现低电位电场。它的量值大小与孔隙压力、溶液的浓度、组分、温度、pH值和孔隙介质特性

有关。当溶液在渗透压力作用下通过岩石颗粒间的孔隙时,颗粒将负离子吸向孔壁,使运动着的溶液中正、负离子的数目不相同,结果是多余的正离子出现在靠近孔隙出口的一端。

电场方向是与溶液流动方向相反的。过滤电位 ΔU^* 可用下述公式计算:

$$\Delta U^* = \frac{\rho_w \theta_e \Delta p}{4\pi\beta} \tag{3}$$

式中, ΔU^* 的单位为mV; θ 为吸附点位,单位为mV; β 为液体的粘滞系数,点位为厘泊; ρ_w 为液体的电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$,其变化范围在 $10^{-1} \sim 10^2 \Omega \cdot m$ 甚至更大,在毛细管表面上控制电位的离子浓度可达 10^{17} 离子/ m^2 ,而相应的电荷密度达到 $10^{-3} \sim 10^{-4} V/m$ 。

近似地

$$\Delta U = 0.77 \cdot \rho_w \cdot \Delta p \tag{4}$$

其中地下水的电阻率 ρ_w 可以按下式来计算:

$$\rho_w = 10 / \sum_{i=1} (a_{1i} b_{1i} c_{1i} + a_{2i} b_{2i} c_{2i}) \tag{5}$$

式中 a_{1i} 、 a_{2i} 分别表示第 i 种盐溶液中阴离子和阳离子的克当量,地下水中分布最广的离子只有7种: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{+2} 和 Mg^{+2} ; b_{1i} 、 b_{2i} 分别表示第 i 种盐溶液中两种电性不同的离子在单位电场作用下的迁移率; c_{1i} 、 c_{2i} 分别表示阴阳离子的离解度。

式(4)表明,过滤电场的电位差随着压力差的增大而增大,同时在压力差变化不大时,水溶液的导电性变化也会引起过滤电位差的变化,而孔隙流体水溶液的 ρ_w 与溶液浓度大小、离子迁移率快慢和离解度高低成反比。应当指出,压力差 Δp 包括重力作用、构造应力差,作用在地球上的离心力和月球、太阳及行星的变化引力场之间不平衡的差应力以及地震孕育过程的应力差等,若要区分这种应力差,特别是地震孕育过程的应力差是比较困难的。低应力差与高阻孔隙流体的岩石相组合,或低阻孔隙流体岩石与高应力差相组合,都能够出现为仪器能测量到的自然电场前兆,其结果可供选择地电场观测点时参考,同时也表明了自然电场前兆特征的复杂性。

3.2 扩散—吸附电位

地震孕育过程中常常伴随着岩石裂开、破裂和断裂,这就导致不同性质的孔隙流体相接触而引起扩散电位。扩散吸附电位的数值主要取值于地层水的电化学活度岩浆的电化学活度,用以下公式计算:

$$E_{ad} = K_{ad} \lg \frac{a_w}{a_{mf}} \tag{6}$$

其中 a_w 为地层水电化学活度; a_m 为虑液电化学活度; K_{ad} 称为扩散电位系数; E_{ad} 为扩散电位, 单位 mA。在压力作用下, 地下水在岩石孔隙中流动时除产生过滤电场之外, 还有岩石对水溶液中的离子有强烈的吸附作用, 结果形成薄膜电位, 称为吸附电位。岩石孔隙大的吸附电位小, 反之吸附电位大。在多孔岩石中离子的扩散现象和吸附现象总是同时发生的, 综合形成一种扩散—吸附电位。在地震孕育过程中当岩石形成裂隙或破坏时, 岩石温度变化和裂隙水溶液的离子扩散和吸附就会导致自然电场变化而成为地震前兆。

3.3 电化学电位

电化学电位(氧化还原电位)是地表水和地下水向地下渗透经过电子导体时产生。由于近地表或高于潜水面的天然水含氧浓度大, 具有较强的氧化作用, 而构成氧化带; 潜水面以下具有较强的还原作用, 称为还原带。电子导体上部分(氧化带)会因氧化失去电子带正电荷, 下部分(还原带)则获得电子带负电荷, 其电化学电位的强度从几 mV 到几百 mV 甚至更大。在矿区(电子导体)里, 由于地震孕育过程引起地下水位变化导致电化学电场的变化, 成为地震的自然电场前兆。

需要指出, 能够引起地下水位变化的因素众多, 例如干旱、洪涝、浇灌和人工开采地下水等, 在特定地区同样产生氧化还原电场, 在预报地震时要特别注意区分。

3.4 机电转换效应

在构造应力作用下, 断裂上的孕震区由于机电转换体活跃而呈现生电现象叠加在自然电场之上, 成为地震的前兆。

(1) 岩石破裂和磨擦生电。在岩石物质破坏与摩擦、双电层断裂过程中, 新生表面的形成伴随有闪光和频带相当宽的电磁辐射, 裂隙表面的电荷密度可达 $10^{-10} \sim 10^{-2} \text{ C/m}^2$ 。当电荷密度达到 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ C/m}^2$ 时, 张开裂缝间隙中的局部电场相应为 $10^9 \sim 10^6 \text{ V/m}$, 超过空气电场的击穿值 $10^5 \sim 10^6 \text{ V/m}$ 而导致放电, 在破裂区产生电磁场, 称为震源电磁场。

(2) 岩石变形生电。变形生电是没有压电效应的物质(如 NaCl, LiF, MgO)形成时在标本和裂隙新表面伴随有电荷出现, 并且有电导率增加的现象, 称之为斯捷潘诺夫效应。电荷密度达 $10^{-5} \sim 10^{-9} \text{ C/m}^2$, 破裂前电流密度达 $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ A/m}^2$, 在变形区形成电流场。

(3) 介质极化生电。介质极化生电是指电介质矿物有压电、热电、酒石酸钾钠电性和压磁性质, 它们(如含石英的岩体)在交变和脉冲型的机械荷载如地震孕育过程中应力作用下会产生电磁场。这种电场能够为地面仪器所检测到。

3.5 压力作用下黄土层自然电场的变化特征

在自然条件下的黄土层上作加压实验, 研究自然电场随压力增大的变化特征。实验结果表明在较低压力时自然电位呈规则的脉冲变化, 并形成一个大鼓包, 幅度达到 60%; 随后出现比较平稳的下降变化, 在大破裂附近下降到极小值, 此处可能就是地震发生的地方。1976 年 8 月 16 日松潘 7.2 级地震前甘肃东部的土地电就呈现这样的变化形态。这种电场的机理可能不同于上述 3 种, 它可能是黄土层受压力作用先逐渐变得致密, 然后出现裂缝, 直到最后破裂。实验结果表明在介质处于低应力状态与已有破裂面的高应力状态时, 电阻率变化的机理十分不同, 无论在分析岩石实验结果或探讨地震前兆时均须将之分开。

4 讨论

(1) 在地震孕育的早期(即中长期)阶段, 介质在低的构造应力场的作用下处于弹性变形阶段。这种形变在微观上的表现为晶粒的位错、孔隙度的改变和流体的运移, 具有很大的随机性, 所以介质能在宏观上表现为整体的均匀、稳定变形。即使在地表许多测点上发现了这种稳态变化, 但受到原生构造与流体的控制与改造, 仍然难以由各测点的资料构成一幅统一的空间异常图像。在这个阶段, 追溯同一台站以前的视电阻率异常曲线的震例, 做类比监测, 可能是较为现实的方法。

(2) 在地震孕育过程中, 由于地应力作用的加强, 会引起岩石电阻率、土壤中溶液的溶解度和电离度、地下水的渗透条件等一系列的变化, 这些都可能引起大地电场和自然电场相应的变化。应当注意, 地电场的变化不仅同震前地应力的变化有关, 而且同天气变化、电极导线的不良影响、大量工业电流渗入地下、有线广播和磁暴等许多因素的变化也有关系。因此测量地电异常时必须注意排除干扰。

(3) 对于电法而言许多有利的高导电通路有可能出现, 其中有两类最重要: 一是面导电机理, 破裂的发展已在三维空间形成了巨大的连贯平面, 沟通了流体并为多种导电机理创造了条件; 另一类是体导电结构的变化, 在破裂面以外的广大介质空间里

含水孔隙与导电颗粒是以某种串联、并联的方式来传导电流的。高应力状态很容易改变孔隙与颗粒的主轴方向,也就改变了它们的串、并联关系。二者的作用不仅造成宏观电阻率各向异性的增强,而且使各测点间的电位异常值出现很紧密的关系,空间分布图像会出现有序性的增强,反映出各种异常形态受着统一电位场的控制。这对地震前兆的发现是重要的。岩石中裂隙的存在和液体的饱和状态是在岩石主破裂前控制电阻率变化的两个最重要的因素。低应力状态和高应力状态的变化机理十分不同:前者属常态导电过程;后者以裂隙表面导电机制为主。此外体导电结构的变化还会在宏观上表现为各向异性的增强。借助这些结果能较好地认识地震电阻率前兆。

[参考文献]

- [1] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社,1990.
- [2] 汪万红,张慧,苏鹤军. 秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系研究[J]. 西北地震学报,2008,30(1):35-39.
- [3] 郝锦绮,冯锐,周建国,等. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]. 地球物理学报,2002,45(3):426-434.
- [4] WANG Zhong-de. The Realization of Algorithm of New Speech Communication System Based on G. 729 Algorithm[J]. Tiny calculator information,2005,23(4):74-80.
- [5] 王辉,张国民,汪素云,等. 应用地震学方法研究中国大陆活动地块应力应变场[J]. 地球物理学报,2004,47(6):1035-1043.
- [6] 王家映. 我国大地电磁探测研究新进展[J]. 地球物理学报,1997,40(增刊):206-217.
- [7] 汪忠德,王新海,王锦芳,等. 低电阻率油气储集层特征和评价技术研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(3):390-195.
- [8] 路鹏,刘瑞丰,李志雄,等. 地震科学数据的分级分类探讨[J]. 西北地震学报,2007,29(3):249-254.
- [9] 王正哲. 震前低空大气层热红外增温异常机理研究[D]. 中国地震局地质研究所,2002:11-20.
- [10] 汪忠德,王新海,张汶,等. BP 人工神经网络法(ANNS)在塔中地区碳酸盐岩测井评价中的应用[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):253-255.
- [11] 张彬,杨选辉,易志刚. 松潘-平武地震前地震视应变场的时空演变[J]. 西北地震学报,2007,29(3):121-123.
- [12] 陈有发,马钦忠,张杰,等. 震前自然电场的前兆及其可能机理[J]. 华南地震,1999,19(3):27-31.
- [13] 张守训,李百祥. 天水及其南北地区温泉分布的地质-地球物理特征[J]. 西北地震学报,2006,28(3):252-257.
- [14] 张国民,马宏生,王辉,等. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报,2005,48(3):602-610.