

隐伏断裂扩展前兆探测新技术的研究

廖椿庭¹⁾ 陈 峰²⁾ 吴满路¹⁾ 安金珍²⁾

(1)中国地质科学院地质力学研究所 ,北京 ,100081 (2)北京大学地球物理系 ,北京 ,100871)

摘 要 本文介绍了探测隐伏断裂扩展前兆的技术方法和原理 ,该方法的特色是 :把岩体受力致裂电阻率变化的各向异性 ,与岩体裂隙扩展的水网络导电通路变化直接相联系 ,避开了地质体最复杂、最难确定的岩体破裂受力状态问题 ,建立用电阻率变化各向异性确定岩体主破裂扩展方向的定量关系。着重介绍该方法的室内大试件模拟试验的结果。试验结果表明 ,定量计算的电阻率变化的各向异性主轴方向 ,与被压裂的试件主破裂方向基本一致。

关键词 岩石电阻率 电阻率各向异性 主破裂扩展方向 地质灾害

A New Technique for Detecting the Spreading Precursor of Underground Concealed Fracture

LIAO Chunting¹⁾ CHEN Feng²⁾ WU Manlu¹⁾ AN Jinzhen²⁾

(1)*Institute of Geomechanics , CAGS , Beijing , 100081* (2)*Department of Geophysics , Peking University , Beijing , 100871*)

Abstract This paper presents the method and principle of the technique for detecting the spreading precursor of underground concealed fracture. In this method , the anisotropy of resistivity variation resulting from the rock fracturing under loading is directly related to the water network electric conduction channel variation caused by rock fissures. In this way , the most difficult and complex problem , i. e. , the determination of stress state of rock fracturing , is avoided. The quantitative relationship is established between the main fracture spreading direction of rock and the anisotropy of the dynamic rock resistivity variation. This paper emphatically reports the results of big sample simulation experiments in laboratory. The experimental results indicate that the directions of principal resistivity changing anisotropy axes deduced from quantitative calculation are essentially identical with the main rupturing orientations of samples under loading.

Key words electric resistivity of rock anisotropy of resistivity main spreading direction of fracture geological hazard

隐伏断裂扩展前兆探测新技术 ,即用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩体破裂前兆和确定主破裂扩展方向新技术。该技术研究的目的在于在地质灾害监测和防治中探测隐伏断裂的动态变化、发展趋势 ,为地质灾害的预警、预报提供可靠的前兆特征信息。为地质灾害(滑坡、崩塌等)监测网的配置提供一种全自动、动态跟踪监测的手段。

1 方法简述

动态岩石电阻率变化各向异性 ,是指含水岩石

(岩体)在受力过程中 ,由于变形或破裂 ,使原有微裂隙发生变化(闭合、张开、弯曲等)或产生新裂隙 ,所引起的岩石(岩体)水网络导电通路畸变 ,而产生的电阻率变化各向异性。

电阻率变化各向异性的原理是 :认为含水岩石(岩体)的导电机制 ,主要是由岩石(岩体)的连通孔隙水和裂隙充填物(水或水膜)形成的水网络导电通路导电。当岩石(岩体)受力后 ,岩石的水网络导电通路发生变化 ,由于孔隙的形状变化远没有裂隙的形状变化严重 ,因此 ,在水网络导电通路变化中 ,裂

隙的变化起主要作用,使得岩石的电阻率变化主要与岩石的裂隙变化相关,而岩石裂隙的变化(张开、闭合、连通、新生...)是各向异性分布,因而由裂隙变化引起的电阻率变化,也会呈现各向异性。当裂隙充填物为低电阻率介质水时,平行裂隙方向的真电阻率比垂直裂隙方向的真电阻率变化要大,特别是随着应力增加,相同取向的裂隙逐渐占优势时,这种差异性会更加明显,因此,由裂隙引起的电阻率变化各向异性主轴方向会沿电阻率变化最大的方向形成优势方向。假设该方向为裂隙集中的优势方向(或主破裂方向),以此为前提进行电阻率变化各向异性计算。然后,用电阻率变化最大的各向异性主轴方向,来定量确定岩石(岩体)的主破裂方向。

设平行于裂隙优势方向的电阻率为 ρ_t ,垂直于裂隙优势方向的电阻率为 ρ_n ,平行加压方向的测线与裂隙优势方向的夹角为 φ_1 ,视各向异性系数为 λ^* ,可建立半空间电阻率均匀各向异性公式,一个各向异性测点的 4 条测线,可建立 4 个联立方程组,解得 4 个 φ_1 和 4 个 λ^* (陈峰 2000a)。

该方法从供电、数据采集、图象处理、数据存储和方程组求解全部由计算机自动监控完成。

水对岩石的物理、化学作用已研究很多(李炳乾,1995a,1995b)。在物理作用方面,水对岩石内分界面的润滑作用,引起岩石内摩擦减少,影响岩石的弹性模量;水的孔隙压会降低围压的有效性,有利于轴向微裂隙的形成;水能降低断层泥的粘滞系数、杨氏模量、抗压强度和残余体应变,产生裂缝弱化效应等。在化学作用方面,主要集中在岩-水体系的地球化学性质和微观结构、水对裂缝的影响、岩石的水解弱化和塑性流动以及压溶等方面。岩-水体系的化学作用不仅能引起岩石微观结构的变化,而且能降低岩石表面自由能,引起岩石的脆性断裂强度和亚临界断裂扩展速度明显改变。水对岩石的这些作用,都是研究地震、地质灾害的孕育、演化和前兆机理所关心的问题。而水的这些作用的结果,直接导致岩石电阻率的变化,特别是岩石裂隙的扩展、导电溶液进入微裂隙后,引起电阻率大幅度的变化。电阻率的这些变化随着岩石裂隙的各向异性而呈现各向异性。通过电阻率变化的各向异性探测岩石裂隙的扩展方向及其动态变化,为滑坡、崩塌等地质灾害研究中了解隐伏裂隙的发展趋势,为灾害的预警、预报提供可靠的前兆特征信息。

2 大试件室内模拟实验研究

大试件模拟实验拟解决:如何通过模型不同部位观测到的电阻率变化形态和各向异性确定主构造变形破裂的方位和发展趋势。

目前,动态岩石电阻率变化各向异性实验研究,已完成单轴压力和围压的差应力试验研究。在单轴压力实验中,把定量计算的电阻率变化的各向异性主轴方向与被压破的岩石标本的主破裂方向,以及未被压破的岩石标本的显微照相提取的微裂隙优势方向对比,二者基本一致。围压试验除证实了单轴压力的实验结果外,还获得了在轴压、围压不同变化情况下,电阻率变化各向异性与岩石破裂的关系,以及电阻率变化各向异性与电阻率变化形态的重要关系(陈峰 2000a,2000b)。

在室内小试件研究成果的基础上,利用大比例尺试件模拟野外现场情况,以便取得更接近于现场测试条件的试验结果,为进一步开展现场试验打基础。实验标本的尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 。制作标本的材料为石英砂(或河砂)混合水泥模压制成。为模拟地球分层结构,实验标本也做成分层结构,有明显的层理面。电极布置在垂直层理面的平面上,以增强实验效果。每块标本上布设 68 个电极(图 1),组合成 7 个视电阻率各向异性测点(表 1),4 条电剖面测线,共 35 条对称四极法视电阻率测线。

此次试验共制做了 9 块大试件,进行剪切、挤压破裂 2 种构造变形试验,试验在已知力源和可见构造变形痕迹条件下,不同方向、不同部位电阻率变化各向异性与构造变形痕迹的相关关系和前兆特征的

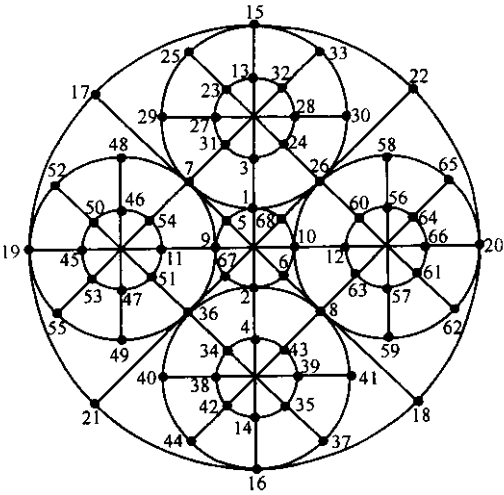


图 1 标本布极图

Fig. 1 Map of arrangement of electrodes

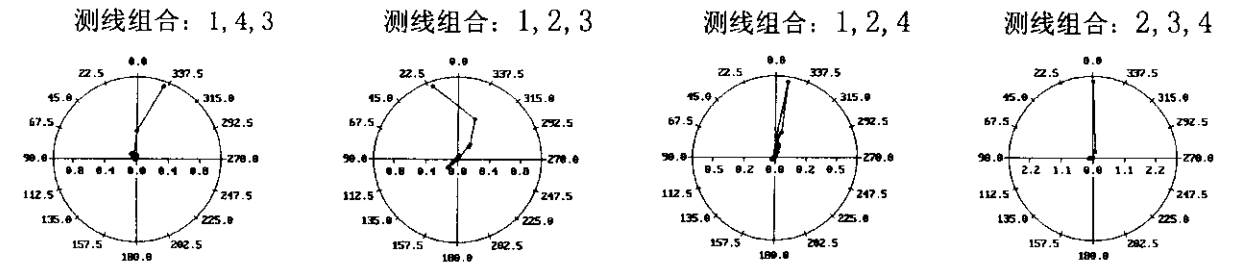
表 1 各向异性测点测线和测量功能组合

Table 1 Arrays and measuring-function combinations for the samples																																		
1 号测点					2 号测点					3 号测点					4 号测点					5 号测点					6 号测点					7 号测点				
测线	电极编号				测线	电极编号				测线	电极编号				测线	电极编号				测线	电极编号				测线	电极编号				测线	电极编号			
编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N	编号	A	B	M	N
1	3	4	1	2	5	1	15	3	13	9	2	16	4	14	13	48	49	46	47	17	58	59	56	57	21	15	16	3	4	25	15	16	1	2
2	7	8	5	6	6	25	26	23	24	10	36	37	34	35	14	52	36	50	51	18	26	62	60	61	22	17	18	7	8	26	17	18	5	6
3	11	12	9	10	7	29	30	27	28	11	40	41	38	39	15	9	19	45	11	19	10	20	12	66	23	19	20	11	12	27	19	20	9	10
4	36	26	67	68	8	7	33	31	32	12	44	8	42	43	16	55	7	53	54	20	8	65	63	64	24	21	22	36	26	28	21	22	67	68

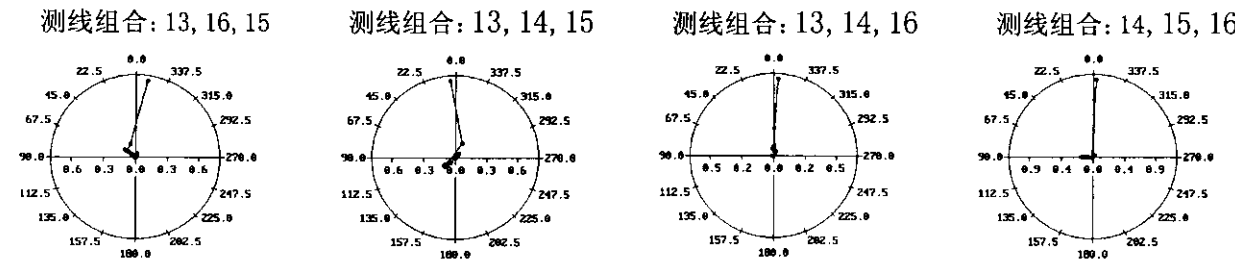
条件下进行。充分利用模型大的特点,用小型特制铅柱电极,在模型不同部位布设能探测不同深度、不同范围的多个各向异性测点,并利用这些测点的电极,用多电极组合法组合成不同位置 and 不同方向的

电剖面 and 电测深测线。用正常速度施力,直到模型破裂。观测模型构造变形引起的不同部位、不同深度、不同剖面的电阻率变化特征,计算不同测点的电阻率变化各向异性,并用此定量确定构造变形的主

1 号测点 1、2、3、4 测线



4 号测点 13、14、15、16 测线



5 号测点 17、18、19、20 测线

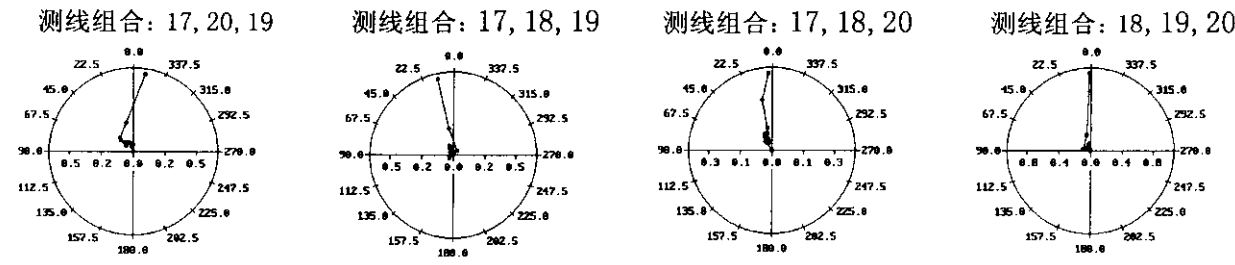


图 2 1 号标本 1、4、5 号各向异性测点各测线 4 种组合的 φ_1 与 $(\lambda^*)^2$

Fig.2 Diagram of φ_1 与 $(\lambda^*)^2$ by using the combination of arrays for 1、4、5 anisotropic measuring points of No.1 sample

破裂方向,与模型实际破裂方向对比。研究处于模型不同部位、不同方向的各向异性测点、电剖面 and 电测深测线与构造变形的关系,特别是与主破裂的关系。同时观测断层以外地区电阻率变化特征。

实验结果如下:

1 号标本为真三轴差应力实验,轴压平行标本层理面,两侧压力比轴压小,实验结果表明,电阻率各向异性主轴方向平行轴压方向,与轴压使标本层理面产生张性破裂相符(图 2)。

图 3 是 1 号标本垂直轴压方向 3 个并排电阻率各向异性测点的实验结果。

2 号标本为直剪实验,因加载时标本转动破裂而失败。

3 号标本也为直剪实验,剪切破裂面偏向标本的右边(图 3),试验结果表明,电阻率各向异性主轴方向与试件破裂的裂隙方位基本一致(图 4)。



图 3 No. 3 标本压裂试验后照片

Fig. 3 Photo of rupture of sample No. 3 under loading

从图 1 和图 2 可以看到,裂隙穿过 3 号标本 1 号测点的第 3 条测线,2 号测点的第 7 条测线,3 号测点的第 11 条测线,5 号测点的第 19 条测线,6 号和 7 号测点的多条测线被穿过,但 6 号测点由于 MN 极距较大(大于 $1/3AB$),测量失真较大。从图 4 可以看到,电阻率各向异性主轴方向 1、2、3 号测点基本相同,这 3 个测点都是 124 测线组合偏离裂隙方位大一些,但还是指向右边的裂隙方向。4 号测点偏离裂隙远一些,其 124 测线组合指向裂隙相反的方向。5 号测点除一条明显的裂隙通过边上外,还有一条不明显的小裂隙从测点中部穿过,4 个组合电阻率变化各向异性主轴方向趋向一致。7 号测点裂隙也穿过中部,4 个组合电阻率变化各向异性主轴方向也趋向一致。

4 号标本为直剪实验,在试验过程中,由于标本扭动,造成破裂方向的偏移,测试资料的整理结果也显示破裂方向的变化。

5 号标本为直剪实验,试验结果表明试件的破裂方向与测试得到的电阻率各项异性主轴方向基本一致。

6 号标本也为直剪实验,试验结果基本上和 5 号标本相似,但除了主破裂外,还有几条微破裂。

7 号和 8 号标本也为直剪实验,主要考虑模拟不同介质电阻率的变化对测试结果的影响,因此标本制作半边采用石英砂与水泥混合,半边采用河砂与水泥混合,分别代表不同电阻率的介质。试验结果表明,不同电阻率介质对试验结果影响不大,即表示不均匀各向异性的岩体,对电阻率各向异性确定岩体主破裂扩展方向的定量关系影响不大。

9 号标本为围压试验,在围压作用下,标本破裂没有主方向,裂隙多而且各个方向的裂隙都有。测试结果也表明了这点,确定不了主方向。

从总体来看,取得了较好的结果,为下一步现场试验打下了坚实的基础。

4 结语和讨论

现场观测实验拟解决:如何克服现场环境条件和气候等系统干扰对测量结果的影响,将室内试验成果运用于现场探测微裂隙演化过程中,并预测其发展趋势。

由室内试验过渡到现场应用需考虑的问题:

(1) 在实际应用中,介质电阻率可能一开始就不是均匀各向同性的,根据理论计算资料,裂隙水的体积导电率与裂隙水膜的表面导电率数量级相同(林长佑,1989),并大于背景干扰,应能被观测到。

(2) 抗干扰问题 野外刮风、下雨、温度...等自然因素变化是长期电阻率监测致命的系统干扰源,隐伏断裂扩展前兆探测新技术在求解过程中,具很好的消除各种均匀系统干扰的能力(包括自然因素变化),使计算结果不受其均匀系统干扰的影响,这一优点,是该方法能过渡到应用的一个非常重要的因素。

利用动态岩石电阻率变化各向异性,探测隐伏断裂扩展前兆的技术方法,在地学中,凡与裂隙的变化和发展有关的研究,都可以应用。比如,探测岩体滑坡破裂面的隐伏位置和发展方向、地下断裂带活动状况及断裂带活动的延伸方向等。在地质灾害监测和防治中,探测隐伏断裂的动态变化、发展趋势,为地质灾害的预警、预报提供可靠的前兆特征信息。

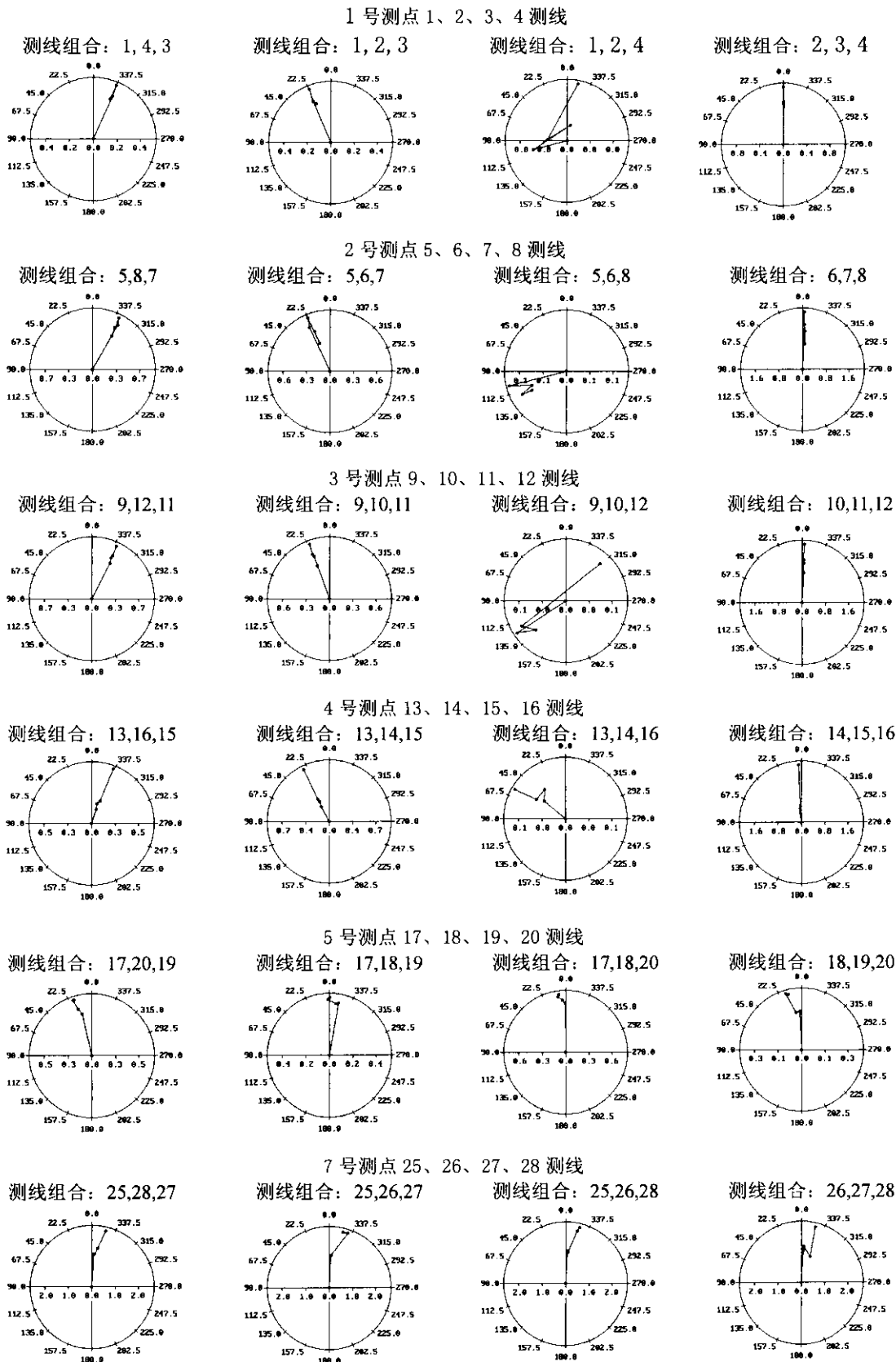


图 4 3 号标本各向异性测点各测线 4 种组合的 φ_1 与 $(\lambda^*)^2$

Fig. 4 Diagram of φ_1 与 $(\lambda^*)^2$ by using the combination of arrays for anisotropic measuring points of No.3 sample

万方数据

亦为地质灾害(滑坡、崩塌等)监测网的配置提供一种全自动、动态跟踪监测的手段。

参 考 文 献

陈峰,修济刚,安金珍等. 2000a. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究. 地震学报, 22(3):310~318.

陈峰,修济刚,安金珍等. 2000b. 用动态岩石电阻率变化各向异性探测岩石破裂前兆和确定主破裂扩展方向. 地震学报, 22(2):210~213.

李炳乾. 1995a. 地下水对岩石的物理作用. 地震地质译丛, 17(5):32~37.

李炳乾. 1995b. 地下流体对岩石化学作用研究的某些进展. 地震地质译丛, 17(2):47~51.

林长佑,武玉霞,刘晓玲. 1989. 地震深部电性变化前兆特征及其机理的初步探讨. 西北地震学报, 11(4):37~44.

References

Chen Feng, Xiu Jigang, An Jinzhen et al. 2000a. Research on dependence of resistivity changing anisotropy on microcracks extending in rock with experiment. Acta Seismologica Sinica, 22(3):310~318 (in Chinese with English abstract).

Chen Feng, Xiu Jigang, An Jinzhen et al. 2000b. Detecting rupture precursors and determining the main fracture spread direction of rock with dynamic rock resistivity change anisotropy. Acta Seismologica Sinica, 22(2):210~213 (in Chinese with English abstract).

Li Bingqian. 1995a. The physical effect of groundwater for rock. Translated World Seismogeology, 17(5):32~37 (in Chinese with English abstract).

Li Bingqian. 1995b. Some development of study on chemical action of subterranean fluids to rock. Translated World Seismogeology, 17(2):47~51 (in Chinese with English abstract).

Lin Changyou, Wu Yuxia, Liu Xiaoling. 1989. Preliminary investigation of the deep electricity change omen feature of earthquakes and its mechanism. Northwestern Seismological Journal, 11(4):37~44 (in Chinese).

CNKI 中国知识基础设施工程

编号 CAJ-SR 2002Z L0180

中国学术期刊综合引证年度报告

(Chinese Academic Journal Comprehensive Citation Annual Report)

期刊名称 地球学报

主办单位 中国地质科学院

标准刊号 ISSN 1006-3021 CN 11-3474/P

引证报告 根据《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED2002)》对 5186 种统计刊源 100 余万篇论文引用参考文献进行的统计,并经综合评价分析,本刊 2001 年度各项文献计量指标如下表:

总被引频次	影响因子	即年指标	2001 载文量	被引半衰期
289	0.8060	0.1782	101	4.3700

引自中国学术期刊(光盘版)电子杂志社文献检索分析中心 2003 年 7 月 1 日报告。