

地震地电阻率前兆 特征及其与某些台址条件的关系

陈有发 侯远文 王玉祥

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文利用 91 个震例资料研究了地震地电阻率的前兆特征。主要结果有:①地电阻率具有以下降为主的阶段性、区域性、方向性和波动性;②地电台址条件特别是岩石力学条件影响地震地电阻率前兆特征量;③地电台应选在电阻率—应力灵敏度值大的地区。

一、前 言

从 1967 年我国第一个用地震预报的地电阻率法观测台河北里坦地电台建立以来到现在已有 25 年之久,从 1967—1991 年间地电阻率方法记录到许多震例,经历了大震及中强地震的多次检验,为研究地震地电阻率前兆特征及其与某些台址条件之间的关系提供了可以对比的丰富的有震及无震期间的资料。

二、地震地电阻率前兆特征

从 1967 年 4 月到 1991 年 3 月期间,据不完全统计,我国地震地电阻率前兆震例有 91 个如表 1 所示。这些资料援引全国地电工作者观测和研究结果。由于本文篇幅有限,在此不一一列出有关的参考文献。表 1 是首次汇集地电阻率前兆时间的震例,前兆幅度以另外的形式来描述。但是,这些震例还需要继续充实。表中 7 级以上震例有渤海 7.4、炉霍 7.9、昭通 7.1、海城 7.3、龙陵 7.3、唐山 7.8、平武 7.2 和耿马 7.6 八处,6.0—6.9 级有 19 次,5.0—5.9 级 33 次,4.0—4.9 级有 23 次,2.9—3.9 级为 8 次。震级越小,地电阻率前兆特征可信度就越低。6.0 级以上地震震例占总数的 29.7%。虽然 7 级以上地震仅 8 处,占总数的比例少,但是,它们能量大,影响范围广,地震地电阻率前兆特征量特别是前兆持续时间(地电阻率出现异常到地震发生时之间的时间)可信度高,为研究地震孕育过程中地电阻率参数时空演化特征提供了可靠的资料,或者说,这些资料也为拟订地电阻率方法预报地震的技术方案打下了坚实的基础。通过实际资料的研究得出 7 级以上地震的地电阻率前兆特征主要是下述几个方面。

1. 地电阻率前兆变化的阶段性 7 级以上地震引起地电阻率前兆变化最基本的特征一就是具有以下降为主的阶段性变化^[1,2]。它被分为早期下降变化、近期平缓变化、短期加速下降变化、临震回返变化四个阶段。实际上,在无震期间地电阻率呈现年复一年的变化,这是一种正

常变化,它衬托地电阻率异常前兆变化的背景。绝大多数的地电台电阻率是 2—3 月份为极大值,8—9 月份为极小值的正常年变化,少数为与引相反的反常年变化。因此,地电阻率前兆变化形态首尾与地电阻率正常变化结合起来就构成地电阻率方法预测地震活动的六个阶段性变化的技术方案,其实测资料如图 1 所示。从图 1 可以看出,1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震前后河北昌黎和天津宝坻地电阻率呈现明显的六个阶段性变化。1976 年 8 月 16 日松潘—平武 7.2 级地震前后武都台也具有类似的特征,如图 2 所示。但是,武都台从开始观测就处于孕育过程中,没有震前无震期间的地电阻率正常变化阶段。

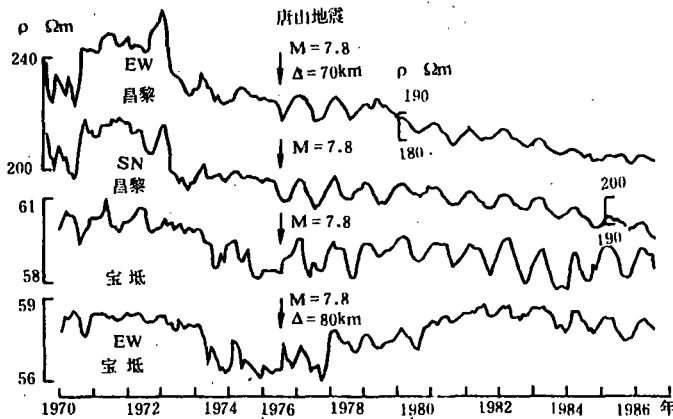


图 1 1976.7.28 唐山 7.8 级地震前后昌黎和宝坻地电阻率变化的阶段性

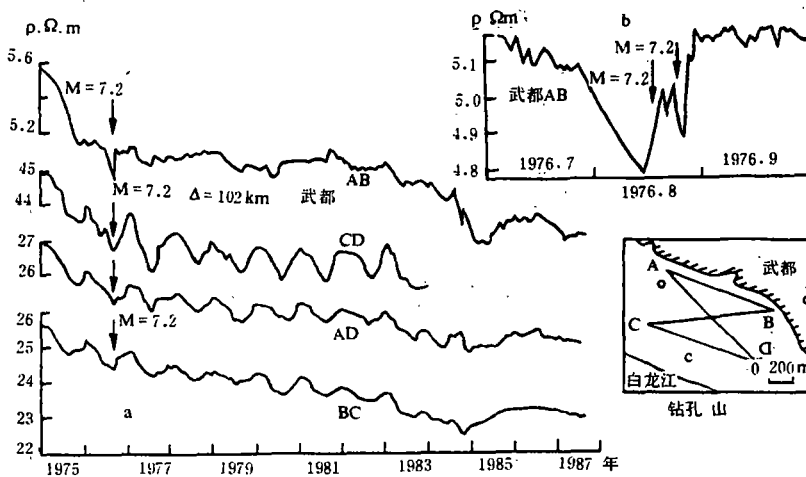


图 2 1976.8.16 松潘—平武 7.2 级地震前后武都
电阻率变化的阶段性

地震地电阻率前兆特征及其与某些台址条件的关系

表 1 地震地电阻率前兆时间震例

发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ_s 异常 时间 (天)	发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ_s 异常 时间 (天)
67.4.19	河北里坦	4.0	里坦台	3	0.2	70.6.17	云南峨山	5.0	楚雄	120	65
68.1.16	河北束鹿南	5.3	大柏舍	20	40	70.9.8	河北牛桥	3.7	大柏舍	2	20
68.3.19	河北东汪	3.9	大柏舍	10	25				牛桥	10	20
68.5.15	河北永福庄	5.0	小吕庄	12	60	70.7.17	甘肃和政	4.6	天水	265	14
			大柏舍	13	60	70.12.3	宁夏西吉	5.5	天水	140	60
			牛桥	20	60				兰州	150	60
68.6.11	河北高邑	3.5	大柏舍	25	10	71.4.28	云南思茅	6.7	楚雄	230	180
68.7.25	河北宁晋东	4.7	大柏舍	18	40	71.6.5	山西和顺	4.7	大柏舍	120	180
69.1.12	河北耿庄桥	4.4	大柏舍	25	15	71.6.28	宁夏吴忠	5.1	银川	60	65
			永福庄	30	15	71.8.16	四川马边	5.9	雅安	140	180
69.3.1	河北牛桥	4.2	大柏舍	15	30	71.9.14	云南思茅	6.2	楚雄	210	180
			大曹庄	20	25	72.4.8	四川康定	5.2	康定	86	105
			永福庄	25	15	72.9.7	河北任县	4.1	大柏舍	5	72
69.7.18	渤海	7.4	牛家桥	380	360	72.9.27	四川康定	5.8	雅安	130	150
			大柏舍	380	360	73.2.6	四川炉霍	7.9	甘孜	50	400
70.2.12	渤海	4.7	山东潍坊	300	40				康定	210	240
70.3.7	河北东汪	2.9	大柏舍	10	4				松潘	310	225
70.5.25	河北丰南	4.6	大柏舍	300	90				红格	510	460
			宁夏固原	720	340				固原	900	165
73.2.28	河北青峰口	3.5	天津宝坻	115	42				银川	1170	130
73.3.22	云南景洪	5.5	云南楚雄	300	60	74.6.2	河北宝坻	3.3	宝坻	22	26
73.4.22	四川彝良东	5.0	西昌	190	38	74.9.22	甘肃金龙岭	4.3	河西堡	100	150
73.5.13	天津宝坻	3.8	天津宝坻	12	51	74.12.15	天津宁河	4.5	唐山	50	65
73.5.22	四川南坪	4.6	松潘	60	180				宝坻	70	60
73.6.2	云南腾冲	5.1	腾冲	30	75				青县	110	30
73.8.11	四川南坪	6.5	松潘	80	150				吕黎	110	40
			固原	410	145	75.1.15	四川康定	6.2	姑咱	100	189
			银川	660	87				甘孜	300	350
			红格	680	70	75.2.4	辽宁海城	7.3	昌黎	310	600
73.9.9	四川甘孜	5.8	甘孜	10	30				宝坻	480	330
73.9.21	河北高安	4.6	宝坻	160	75				大圩河	550	600
73.12.31	河北河间	5.3	宝坻	160	75	76.2.16	云南普洱	5.7	楚雄	210	150
74.3.24	清北永清	3.5	宝坻	65	13				通海	180	150

发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ 异常 时间 (天)	发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ 异常 时间 (天)
74.5.11	云南昭通	7.1	西昌	150	370	76.4.6	内蒙和林格尔	6.2	太原	261	86
			西昌	150	420	76.5.29	云南龙陵	7.3	腾冲	50	540
			米易	230	300				楚雄	292	690
			红格	240	324	76.7.28	河北唐山	7.8	昌黎	77	1165
			康定	290	405				宝坻	83	1139
			青光	110	608	78.8.10	台湾凤林	5.7	福州	160	280
			忠兴庄	150	608	79.1.18	宁夏海源	4.3	西吉	75	90
76.8.16	四川平武	7.2	松潘	60	745				中卫	110	60
			成都	105	630	79.3.15	云南普洱	6.8	通海	195	92
			郫县	220	230	79.7.9	江苏溧阳	6.0	南京	80	360
			通渭	300	300				安庆	250	330
			宝鸡	320	300	79.8.25	内蒙古五原	6.0	乌加河	10	445
			康定	350	300	79.11.6	宁夏银川	4.1	海原	213	100
76.9.23	内蒙阿拉善左旗	6.2	中卫	330	130	80.4.18	青海木里	5.2	嘉峪关	200	81
76.11.7	四川盐源	6.7	渡口	90	790	80.6.18	云南蒙自	5.4	通海	100	33
			米易	110	790	80.7.17	陕西陇县	4.6	西吉	150	365
			西昌	120	360	81.1.24	四川道孚	6.9	甘孜	140	660
			姑咱	300	337				雅安	200	450
76.11.15	天津宁河	6.9	宝坻	63	95	81.7.7	云南盈江	5.4	腾冲	60	108
			徐庄子	86	43	81.8.13	内蒙古丰镇	5.5	阳原	80	120
77.5.12	天津汉沽	6.2	宝坻	63	85				呼和浩特	140	150
77.11.27	河北丰南	5.1	宝坻	63	90				乌加河	150	165
78.4.22	新疆库尔勒	5.4	新疆化工厂	330	63				代县	150	150
78.5.18	辽宁营口	5.9	复县	125	48	81.9.19	云南普洱	5.9	通海	200	140
			大连	220	107	81.11.9	河北宁晋	5.8	大柏舍	30	80
			元氏	50	61	87.2.17	江苏射阳	5.1	江宁	242	257
			邢台	70	207	87.8.10	宁夏银川	5.5	银川	50	44
82.4.14	宁夏高川	5.7	海源	30	395	87.9.12	甘肃张掖	4.9	丰城堡	101	8
			中卫	90	339	87.10.3	甘肃金昌	4.0	丰城堡	81	4
			静宁	150	300	87.12.15	甘肃古浪	4.4	丰城堡	122	3
			通渭	170	390	88.11.16	云南耿马	7.6	通海	290	600
82.6.16	四川甘孜	6.0	甘孜	30	60				腾冲	300	600

发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ_s 异常 时间 (天)	发震 时间	地 点	震 级 M	台站 名称	震 中 距 KM	ρ_s 异常 时间 (天)
82.10.8	云南洱源	5.0	腾冲	180	175	89.4	四川巴塘	6.7	甘孜	195	150
83.11.7	山东菏泽	5.9	菏泽	50	50	89.9.22	四川小金	6.6	甘孜	200	100
			元氏	46	300	89.10.18	山西阳高	5.7	大同	45	110
84.2.17	西藏刚察	5.2	山丹	140	16				宝昌	215	137
84.5.21	南黄海	6.2	阜阳	45	540				子坊	280	127
			广川	75	550				兴济	330	138
			南京	300	300	90.2.10	江苏常熟	5.1	江宁	205	340
85.12.7	内蒙古阿 右 旗	4.1	丰城堡	99	9	90.10.20	甘肃景泰	6.2	武威	130	10
86.7.8	宁夏海源	4.3	海源	12	270				定西	192	26
			西吉	55	350				山丹	285	26
86.8.26	青海门源	6.4	丰城堡	93	76	91.1.29	山西沂州	5.1	代县	70	10
86.12.31	宁夏固原	4.2	固原	20	270	91.3.26	山西大同	5.8	大同	48	56
			海源	65	150				代县	110	5

2. 地电阻率下降变化的区域性 在 8 处 7 级以上地震震例中具有以下降为主的区域性的首推 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震, 它的长轴 300km⁽³⁾。

3. 地电阻率前兆的方向性 样品压力实验已表明, 沿着压力方向成 45° 夹角的则介于二者之间。唐山 7.8 级地震周围地电阻率前兆量是 N25°W—SN—N42°E 方向小 (0—14%), N69°E—EW—E42°S 方向为大 (2.6—17.0%)。地电阻率前兆变化量最大方向与京津唐张地区最大压应力场方向 NEE 基本一致。但是, 标本实验和实测结果不一致, 这可能与受压岩石真电阻率和视地电阻率变化量正好相反有关系⁽⁴⁾。

4. 地电阻率前兆量的差异性
8 次 7 级以上地震的地电阻率前兆量如表 2 所示 (龙陵地震时只有腾冲台, 故未列出)。由于 2 可以看出只有松潘 7.2 级, 海城 7.3 级地震的地电阻率前兆量随震中距增大而呈现杂乱现象, 多数地震的变化规律性都很明显, 随震中距增大而衰减。但是, 并不按某种比例也就是说在相同情况下具有较大的差异性, 不能完全以地电阻率幅度大小来决定未来地震的震级, 如图 3a 所示。由图 3a 可以看出, 一般情况下震级越大地电阻率前

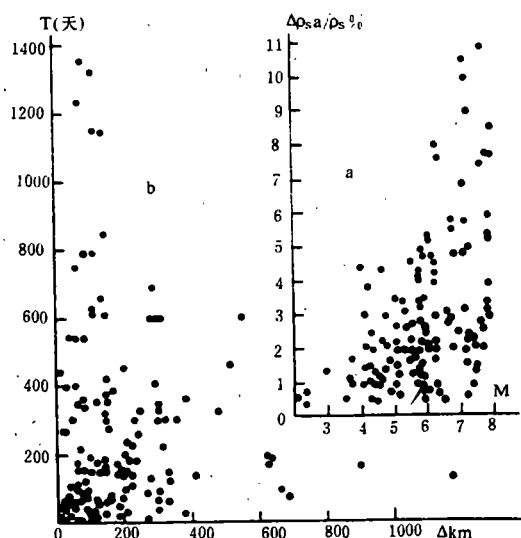


图 3 a—地电阻率前兆量与震级的关系;
b—地电阻率前兆时间与震中距的关系

兆幅度也越大,但相同震级的地电阻率前兆量在 3%—9% 的范围内变化。造成这种差异的原因除地电阻率前兆量受震中距影响外,它更重要的受岩石力学性质因素的控制,下文将要讨论这些问题。

表 2a

7 级以上地震地电阻率前兆特征参数

时 间	地 点 震 级	台 名	震中距 (km)	异常幅度 (%)	时 间	地 点 震 级	台 名	震中距 (km)	异常幅度 (%)
1969. 7. 18	渤海 7. 4	牛桥	360	-1. 4	1975. 2. 4	海城 7. 3	宝坻	480	-2. 1—2. 6
		大柏舍	360	-1. 5	1976. 8. 16	松—平 7. 2	松潘	60	+0. 9—1. 1
1973. 2. 6	炉霍 7. 9	甘孜	50	-10—12			成都	105	-2. 6—14. 3
		康定	210	-2. 6			郫县	220	-1. 6
		松潘	310	-2. 0			通渭	330	-0. 7
1974. 5. 11	昭通 7. 1	西昌	150	-8. 7			宝鸡	320	-2. 3
		米易	230	-5. 8			康定	350	-2. 0
		红格	240	-3. 2	1988. 11. 6	耿马 7. 6	通海	290	-9. 0
1975. 2. 4	海城 7. 3	昌黎	310	-2. 0			腾冲	300	-5. 0

表 2b

7 级以上地震地电阻率前兆特征参数

台 名	震中距(km)	浮土厚度(M)	AB/MN(m)	$\Delta\rho_{sa}/\rho_s(\%)$
唐 山	1. 5	100	1000/200	1. 4—50
马家沟	13	10	170—260/20	-14. 6—28. 3
昌 黎	77	70	900/200—127	-4. 8—6. 5
塘 沽	80	>600	2000/600	0. 9—1. 1
宝 坻	83	180	1000/200	-2. 6—3. 0
西 集	120	377	2100/380	-1. 7—2. 7
忠兴庄	150	80	1000/130	-1. 1—4. 3

5. 监震前兆的波动性 地电阻率前兆阶段性变化的临震回返变化是地震来临的即震信息。如图 2b 所示,这种回返形态具有很好的同步性。桂燮泰将昌黎台 7. 8 级和武都台 7. 2 级地震的临震形态以地震日为零进行统一的处理,得到两处地震临震前兆形态几乎完全重合,同

时离震中较远的地电台电阻率出现大幅度波动,这种大范围(约 600km)波动是反映地震即将发生的标志。

6. 震级一定时震源距和前兆时间之间乘积的稳定性 地震孕育过程是由震源向外逐渐扩展,在近震中区先记录到前兆,远离震中后记录到前兆,如图 3b 所示。也就是说当震级 M 一定时,前兆时间(T)与震中距 Δ 之间的乘积为一个常数。统计 7 级以上地震的有关参数得到式中二者之间的相关系数 $r=0.99$,线性关系式可靠程度 $t(\varphi \cdot n)=97.076$, $R=\sqrt{\Delta^2-h^2}$, h 为震源深度,单位为 km。

$$\text{Log}(R \cdot T) = 2.521 + 0.331M \pm 0.136 \quad (1)$$

(1)式反映震级,震中距和前兆时间之间的关系,因此,既可以利用(1)式来预测未来地震的有关参数,又可以利用它来设置地电台的密度。同时,(1)式也是判别多台资料可信度的一个指标。但是,要指出,由于人为判定前兆时间的主观性,台址条件差异、测量仪器精度高低等因素的影响,也降低了(1)式的统计结果的准确性。

三、中小地震的地电阻率前兆特征

表 1 列出 91 个地震的地电阻率前兆时间震例,6.9 级以下的震例为 83 次。虽然震例多,但震级不大,前兆量小,前兆时间短,往往为各种各样的干扰所污染而成为灰色量,甚至有可能是“弄假成真”。统计 6.9 级以下地震得到

2.9—3.9 级:

$$\text{Log}(R \cdot T) = -0.511 + 0.819M \pm 0.435 \quad r=0.977 \quad t(\varphi \cdot n)=227.851 \quad (2)$$

4.0—4.9 级:

$$\text{Log}(R \cdot T) = 0.635 + 0.654M \pm 0.356 \quad r=0.924 \quad t(\varphi \cdot n)=11.019 \quad (3)$$

5.0—5.9 级:

$$\text{Log}(R \cdot T) = 1.281 + 0.511M \pm 0.182 \quad r=0.954 \quad t(\varphi \cdot n)=23.605 \quad (4)$$

6.0—6.9 级:

$$\text{Log}(R \cdot T) = 1.770 + 0.449M \pm 0.144 \quad r=0.968 \quad t(\varphi \cdot n)=30.867 \quad (5)$$

(2)—(5)式中相关系数均在 0.92 以上,线性关系式可靠程度 t 值远远大于理论值,所以(2)—(5)式是可靠的。但是小于 5 级震例统计关系式误差较大,在 0.36—0.44 之间,而 ≥ 5 级震例的误差较小,在 0.14—0.18 之间。因此,地电阻率方法检测 5 级以上地震的效能更好,要检测小于 5 级地震的地电阻率前兆必须提高台站密度。

四、地电台址条件对地电阻率前兆特征的影响

地电阻率法的台址条件包括台网位置和密度以及台址的发震构造、岩石力学、地层电性、水文地质、地形地貌和电磁干扰条件^[5]。本文着重研究岩石力学条件对地电阻率前兆时间和前兆量的影响。在此拟订第四系松散沉积物厚度作为勘探体内岩石力学性质好坏的一个指标,适当采用岩石孔隙度 φ 来表示岩石坚硬程度,另外拟订单位压力下岩石电阻率变化量的大小(称为电阻率—应力灵敏度 G)表示岩石力学性质是否有利于地电阻率方法测量。

1. 松散沉积物对地电阻率前兆量的抑制作用 松散沉积物(又称浮土)是由许多接触

于孤立点上的分散质点所组成,颗粒之间没有直接连结,仅仅依赖于重力作用而形成一个整体,它的物理性质特点是孔隙度和湿度都较大,平均孔度为 41—56%,平均湿度为 3.3—41.4%。最容易被压缩而在短时间内成为局部致密状态,是一种典型的塑性体,在力学性质方面它的压缩性大,压缩系数为 0.0567 kg/cm^2 ,比岩体的要小得多。因此,松散沉积物在应力作用下容易变形,但是,它又能很快的转化为局部致密状态,而“吸收”和“软化”应力应变。松散沉积物越厚这种效应越显著,所以,它不利于应力和应变传递,对地震电阻率前兆量有抑制作用^[6]。唐山、宝坻和塘沽地电阻率反映唐山 7.8 级地震的震例就充分表明,松散沉积物越厚,前兆量就越小如表 2b 所示,相应地也影响地电阻率出现前兆的时间。较厚的松散沉积物成为地电阻率法的主要干扰之一。在台址选择时要把松散沉积物的厚度控制在 200 米以内。

同时,松散沉积物也影响地电阻率正常变化量,它越厚,地电阻率年变化幅度就越小,如图 4a 所示。在大于 200 米时地电阻率年变化形态就不规律了,其幅度在 4% 以内变化,并带有很大的随机性变化。在小于 200 米时松散沉积物越薄,地电阻率年变化越大。但是,地电阻率方法测量要求既有规律的年变化形态,又不能有过大的年变化幅度,这样就要用加大供电电极距 AB 的办法来减小年变化,以满足测量需要如图 4b 所示。由图可以看得出,当 $AB \geq 1200$ 米时,地电阻率年变化幅度多数在 4% 以内,而且形态也较规则。只有这样,才能利用重复出现的年变化形态来预测本地区无震活动,正常的年变化形态是无震活动的判别标志,在地震预报中具有很重要的科学价值。

2. 岩石孔度对地电阻率前兆量的影响

岩石孔隙结构和孔隙多少以及湿度是表征岩石力学性质强弱的重要指标之一。孔隙度越大,岩石越不坚硬,并且可能含水越多,电阻率就越低。在压力作用下岩石电阻率变化量就成为综合衡量岩石力学性质对民阻率影响的主要参数之一。现约定单位应力下的电阻率变化量称为岩石电阻率—应力灵敏度 G ,表 3 列出了部分岩石电阻率—应力灵敏度值。由表可以看出,①围压下饱和岩石的电阻率—应力灵敏度一般且随孔隙度增大而减少;②单向压缩下未饱和岩石电阻率—应力灵敏度随湿度增大而呈现起伏涨落变化。由于岩石电阻率—应力灵敏度对于不同类型和湿度的岩石具有各种各样的值,在相应力作用下就出现地电阻率前兆量的差异性;③岩石 G 值随矿化度增大而增大(G_{50} 为 50Ω 导电水溶液饱和的岩石, $G_{0.3}$ 为 30Ω 导电水溶液饱和的岩石)。表 4 综合反映了地下岩体力学性质对地电阻率法测量的影响,它表明,(1)随孔隙度增大, G 值减

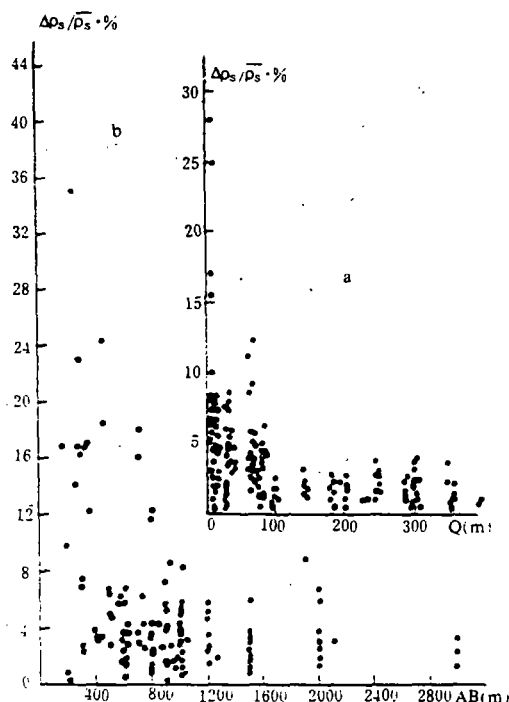


图 4 a—地电阻率年变化幅度与浮土厚度的关系;
b—地电阻率年变化幅度与供电电极距的关系

少;(2)随勘探深度增大,G 值也减少。这样地电阻率方法要在一次地震过程中记录到有较长的前兆时间和前兆幅度,那末台址必须选在未被破坏的完整岩体上。

表 3 岩石电阻率—应力灵敏度 G 值

100b/cm ² 围压下饱和 岩石 G 值			40—390kg/cm ² 单向压力 下未饱和砂岩 G 值		围压下不同浓度 饱和的岩石 G 值		
岩石名称	孔隙度	G($\times 10^{-3}$)	含水量 w(%)	G($\times 10^{-3}$)	p · kb	G50($\times 10^{-3}$)	G0.3($\times 10^{-3}$)
凝灰岩	4×10^{-1}	0	0.64	-0.66	0.05—0.1	3.53	7.10
石灰岩	1.2×10^{-1}	0.21	0.60	-0.70	0.1—0.25	2.67	3.65
石灰岩	2×10^{-3}	14.28	0.56	-0.88	0.25—0.5	1.43	1.72
白云岩	1×10^{-2}	4.66	0.43	-0.48	0.5—1.0	0.95	1.01
白云岩	2×10^{-3}	22.22	0.39	-0.51	1.0—2.0	0.86	0.79
花岗岩	6×10^{-3}	5.91	0.32	-0.97	2.0—4.0	0.37	0.48
花岗岩	7×10^{-3}	8.24	0.23	-0.41	4.0—6.0	0.25	0.34
花岗岩	9×10^{-3}	3.53	0.15	-0.43	6.0—10.0	0.34	0.30

表 4 岩体电阻率—应力灵敏度 G($\Delta \rho_s / \rho_s \cdot 10^{-4} / b$)

G 深度(km)		非膨胀应变地区孔隙率(%)			
		1	3	10	30
深度	0	4	3	0.4	0.2
	1	2	1.5	0.4	0.2
	3	0.7	1.0	0.3	0.2
	10	0.3	0.3	0.2	
		膨胀应变地区孔隙率(%)			
1		3	10	30	
深度	0	5	4	1	0.3
	1	3	2	1	0.3
	3	1	1	0.5	0.3
	10	0.5	0.5	0.3	

五、结束语

本文研究地震地电阻率前兆特征及某些台址条件的关系确定,台址条件尤其是岩体力学条件是地电阻率方法记录到地震前兆的首要应用条件,满足不了技术应用条件的地电阻率方法对地震显然是“视而不见”,“充耳不闻”。当前地震地电阻率方法预报地震的科学技术进展较缓慢的重要原因之一就是台址存在这样那样的问题,导致中强地震前兆再现性太差,要用这样的资料来预报地震的准确性是不言而喻的。地电阻率方法预报地震的难关就在于选择能发挥地电阻率方法检测地震前兆效应的台址。

参考文献

1. 陈有发 东北地震研究 N0:3. 1987
2. 国家地震局科技监测司,地震监测与预报方法实用化研究文集—地磁地电专辑,学术书刊出版社. 1990. P271—277
3. 国家地震局科技监测司,地震监测与预报方法清理成果汇编,地震出版社. 1988. P225—229
4. 陈有发 甘肃科学学报, N0:2. 1992
5. 国家地震局科技监测司,地震监测与预报方法清理成果汇编,地震出版社. 1988. P180—185
6. 陈有发等. 西北地震学报. N0:4. 1982