

地震危险区的地壳偶极电测深

陈有发 康云生 杜学彬 陈宝智 梁戈涑 董永德

(中国兰州 730000 国家地震局兰州地震研究所)

摘要

本文研究了我国首次获得地震危险区地壳偶极电测深的地电阻率 ρ_s 资料。地电阻率一阶差分值的结果表明:(1)测区周围 100km 范围内 $4 \leq M \leq 6.4$ 地震前 3—76 天 ρ_s 有 4% 以上的前兆变化;(2) ρ_s 的季节性变化不明显。

关键词 偶极电测深; 一阶差分; 电阻率前兆

前 言

1974 年后期, 赵玉林和笔者曾倡导原国家地震局兰州地震大队, 在地震危险区开展地壳偶极电测深方法, 进行地震预报的观测研究工作。从 1979—1984 年, 兰州地震研究所先后开展短期固定的试验观测(安福禄, 1984)。从这些结果得出地壳偶极电测深法应该在地震危险区进行长期定点测量的结论, 以确定中等深度 ρ_s 随时间的变化特点。因此, 从 1985 年起, 在甘肃民乐盆地地震危险区东侧山丹县丰城堡—祝家庄地区, 建立起第一个长期定点测量的偶极电测深台网。

一、测区的环境条件

测区在大地构造上属于河西系的山丹—乐都—临夏构造带, 位于龙首山和大黄山之间, 如图 1a, b 所示。在地形地貌上是大黄山和王家滩之间冲积扇地带, 地形比较平坦开阔, 如图 1c, d 所示。钻井资料表明, 测区地层由上往下为第四系、第三系和构成测量主体的下寒武系紫红色变质岩。测区承压水第一层离地面 110—190m 左右, 第二层为 190—250m 左右, 地下水位为冬高夏低; 大黄山(3978.7m)的雨雪为地下水的主要补给区。测区地电断面为 KQH 型, 如图 2a 所示。从图 2b 看出, 浅层介质电阻率变化较大, 深处地层电性较均匀。测区为大陆性气候, 气温为 $-24\text{--}33^\circ\text{C}$ 上下, 冰冻期为每年 9 月至来年 4 月, 最大冻土层深度为 1.5m 左右。年降雨量为 251mm, 蒸发量为 2040—2400mm, 风力可达 7—8 级。测区无工业设施, 电磁干扰少, 10 分钟内自然电位变化约 0.3%。

1989 年 2 月 11 日收到本文初稿, 1991 年 3 月 24 日决定采用。

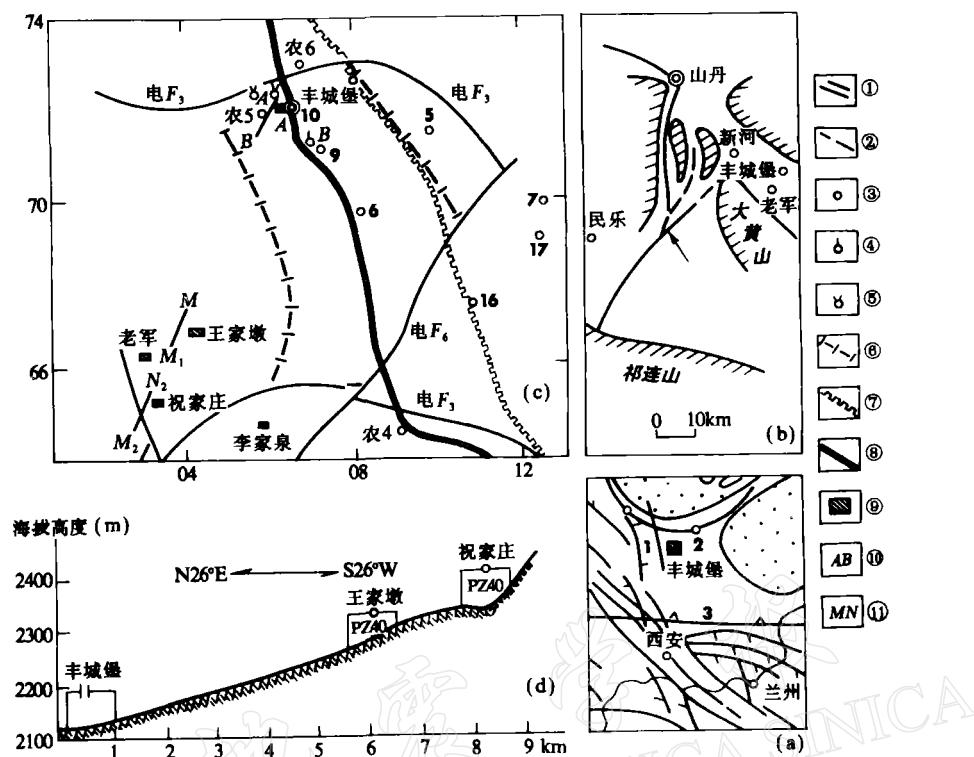
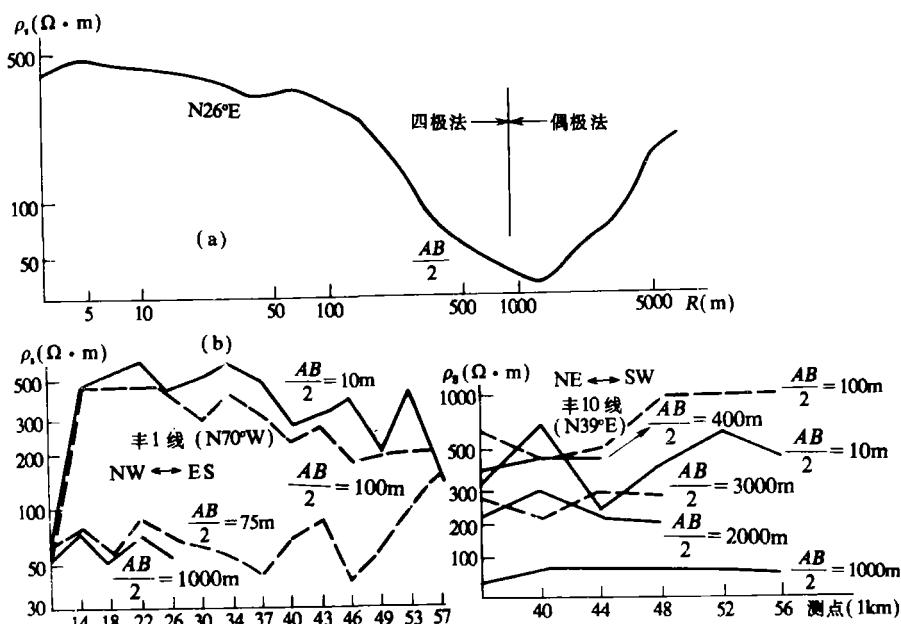


图1 丰城堡—祝家庄地区构造(a),环境(b,c)和布极剖面(d)

(1) 实测逆正断层, (2) 电法推断断层, (3) 浅水孔, (4) 承压非自流水孔, (5) 承压自流孔, (6) 含水区分水边界, (7) 长城,
 (8) 公路, (9) 居民区, (10) 供电偶极, (11) 测量偶极, 1—河西系, 2—弧形构造带, 3—东西向构造

图2 丰城堡—祝家庄地区电测深(a)和等极距(b) ρ_i 曲线

二、装置和测量方法

1985年5月—1986年5月,地壳偶极电测深为轴向装置,布极区中心坐标为N38.529°,E101.342°,偶极装置参数如表1所示。每个供电极为6块0.6m²的铅板组成,埋在地下0.5m处的三芯电缆为供电线,供电回路电阻为16—23Ω;每个接收电极用一块同样大小的铅板,被复线架在间距为30m高4m的水泥杆上作为测量线,电极都埋在地下2m处。1986年6月起用当地抽水钻孔的金属导管作为供电极(图1c中9和10号井),方位为

表1 偶极装置的有关参数

| 偶极装置 | 丰城堡供电偶极 | 王家墩测量偶极 | 祝家庄测量偶极 |
|-------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 经度,纬度 | 101.359°E, 38.368°N | 101.336°E, 38.504°N | 101.324°E, 38.489°N |
| 海拔高度(m) | 2120—2140 | 2280—2320 | 2380—2400 |
| 极距(m) | AB=1000 | M ₁ N ₁ =950 | M ₂ N ₂ =1000 |
| AB中心与MN中心之间距离R(m) | R ₁ =5500 | R ₂ =7900 | |

N24°W,AB=850m,回路电阻为2.5Ω,供电电流强度由原来30—40A增大到60—130A,能检测到人工电位差2—4mV的范围由原来7—8km扩大到15—20km;NE供电极与10号井组成N38°W供电偶极,AB=700m。

每天早晨6—7点进行测量,40和60kW发电机和6000V工业电的电流整流后送入地下,采用正向和反向两种方式供电测量。PZ40型数字地电仪和PZ40型数据处理器配合记录自然电位及其与人工电位的合成电位和电流强度。PZ40的性能是长期稳定的,如表2所示。表中V和V₀分别为仪器读数和标准信号,单位为mV;γ为V与V₀之间相关系数

表2 PZ40型数字地电仪稳定性

| 时间(年·月·日) | 王家墩 | 祝家庄 |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1987.11.21 | V=V ₀ +0.005, γ=1.00 | V=V ₀ +0.005, γ=1.00 |
| 1988.3.15 | V=V ₀ +0.003, γ=1.00 | V=V ₀ +0.004, γ=1.00 |

数。可以看出,仪器性能在1—2μV变化,高于测值1—2个数量级。资料处理采用计算合成电位近似方波的两边幅度平均值的方法,即

$$\Delta V_{MN} = \frac{1}{2} [(\bar{V}_{r1} - \bar{E}_{sp1}) + (\bar{V}_{r2} - \bar{E}_{sp2})] \quad (1)$$

式中, \bar{E}_{sp1} 和 \bar{E}_{sp2} 为供电前和断电后自然电位5个数的平均值; \bar{V}_{r1} 和 \bar{V}_{r2} 为合成电位方波前后沿5个数的平均值。 E_{sp} , V_r 的单位为mV。用下式计算地电阻率:

$$\rho_s = \frac{\pi R^3}{AB \cdot MN [\cos\theta \cos(\beta-\theta) - \frac{1}{2} \sin\theta \sin(\beta-\theta)]} \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (2)$$

式中,θ为AB中心和MN中心连线R与AB夹角,β为MN与AB的夹角,装置系数单位为km。

三、资料质量的评估

用下述三个指标来评估 ρ_s 资料的可信度:

1. ρ_s 日均值误差的平均值 每天测量约 40 组数来计算当天的日均值有一个误差,统计王家墩 1986.6.14—11.30 该误差的平均值为 2.1%;而祝家庄 1986.5.14—11.30 的为 1.8%。从图 3 可以看出,在上述时间段里 ρ_s 的变化是比较典型的,在其它时间段里,尤其是 1985.5—1986.5 期间, ρ_s 变化要小一些。因此,用上述误差估计整个观测资料的误差约为 2.0%。

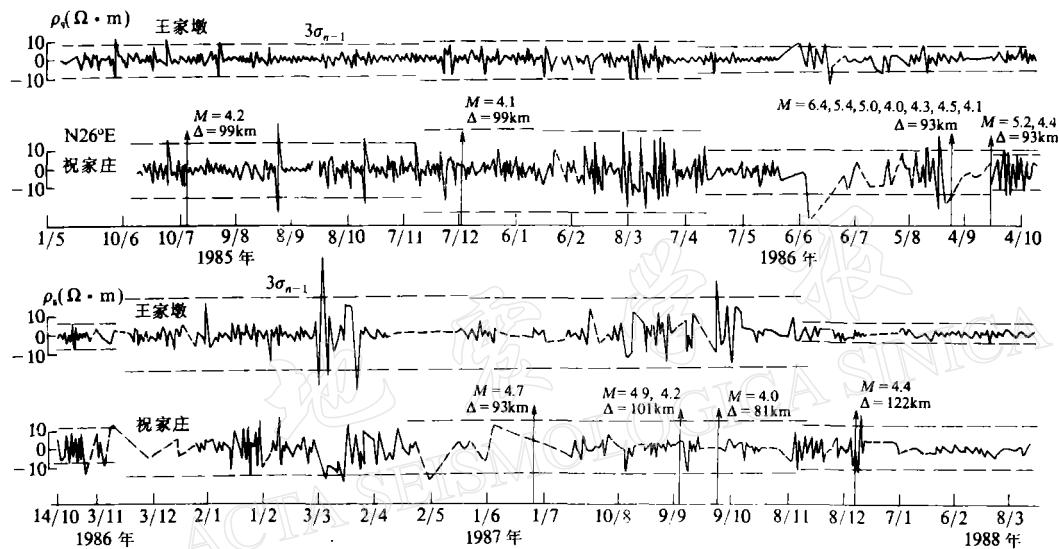


图 3 丰城堡—王家墩—祝家庄 ρ_s 日均值一阶差分曲线

2. ρ_s 资料的时段偏差 以 5 日均值和日均值为基本数据来计算它们的偏差,如表 3 所示。由表 3 可以看出,王家墩 ρ_s 资料质量要比祝家庄的高。

表 3 地电阻率 ρ_s 的时段偏差(%)

| 测 点 | 1985 年 5 月—1986 年 5 月 | | 1986 年 6 月—1988 年 3 月 | |
|-----|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | K_{r1} | K_{r2} | K_{r1} | K_{r2} |
| 王家墩 | 1.3 | 0.6 | 1.6 | 1.4 |
| 祝家庄 | 1.7 | 0.9 | 2.0 | 1.6 |

3. ρ_s 一阶差分的偏差 图 3 是王家墩和祝家庄 ρ_s 日均值一阶差分曲线,图上标出了差分值的三倍均方偏差($3\sigma_{n-1}$)的范围(虚横线)。计算时间分段是 4 月 16 日—11 月 15 日和 11 月 16 日—4 月 15 日期间。为了反映实际测量结果,我们没有作任何取舍,全部保留了原始资料的面貌。1058 个日均值中有 31 个日均值超过 $3\sigma_{n-1}$,占总数 2.8%。这些跳动特别大的个别日均值主要是由于当天测量仪器或供电电源出了故障,致使观测次数少和资料信息量不够而引起的。但是,97% 以上的 ρ_s 资料质量是可靠的,可信度是高的。

应当指出,上述后二者的计算结果包含了 ρ_s 随时间的实际变化,如地震电性前兆和

可能的季节性变化等.因此,实际上给出 ρ_s 资料的偏差是偏大的.

四、观测结果的讨论

1. ρ_s 变化与地震活动性的关系

图 4 给出了丰城堡—王家墩、丰城堡—祝家庄地壳偶极电测深 ρ_s (a) 和 E (b) 月均值

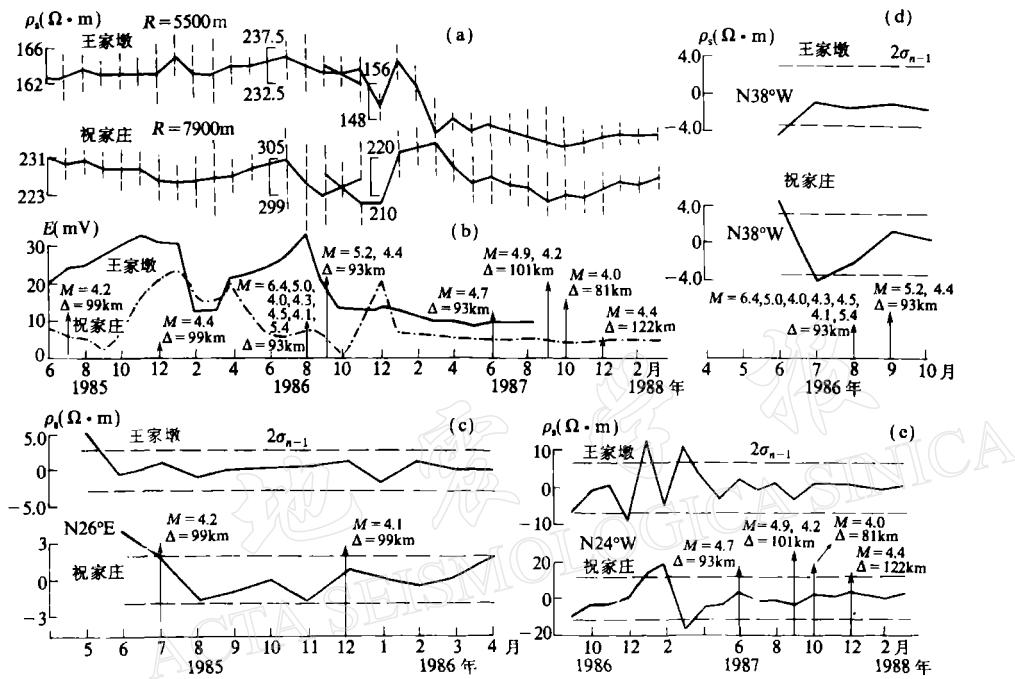
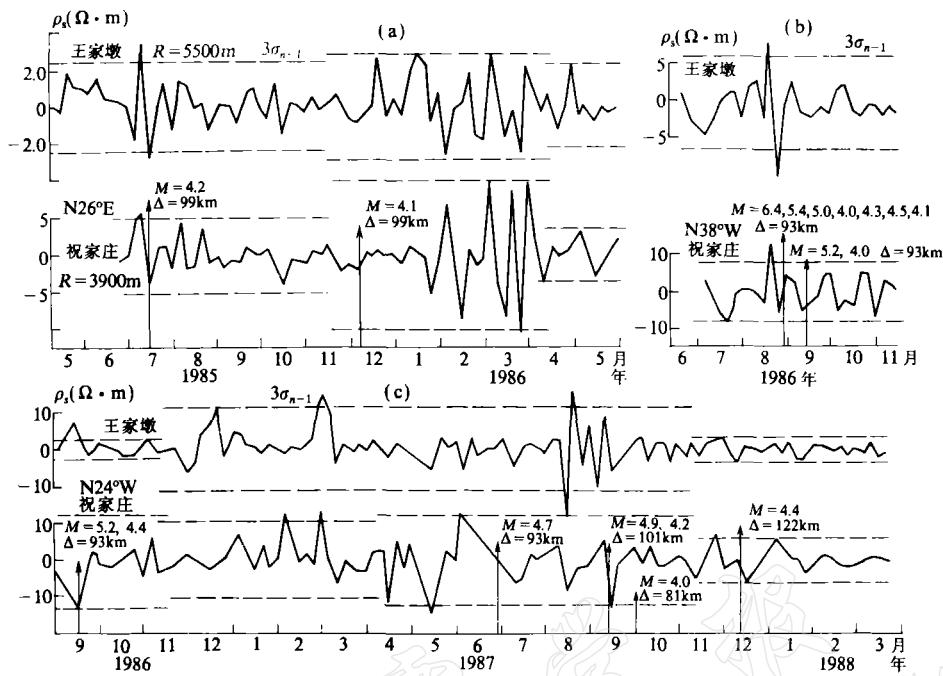


图 4 丰城堡—王家墩—祝家庄地区地壳偶极电测深 ρ_s 和自然电位 E

(a) ρ_s 月均值; (b) E 月均值; (c, d, e) ρ_s 月均值一阶差分曲线

曲线,以及 ρ_s 月均值一阶差分曲线(c, d, e).图 5 给出了 ρ_s 五日均值一阶差分曲线.在图 4a 上虚竖线表示 ρ_s 月均值波动范围.在三个时间段中 ρ_s 月均值波动范围是不一致的,冬天稍大一些.在图 4c, d, e 和图 5 上画出了 $2\sigma_{n-1}$ 和 $3\sigma_{n-1}$ 的范围(虚线).同时,在图 3—5 上用竖线标出了地震发生时间和震级.这 16 个 $M \geq 4.0$ 地震是测区中心 100km 范围($N38.5^\circ \pm 1^\circ, E101.3^\circ \pm 1^\circ$)左右发生的,如表 4 所示.实际上在它 200km 范围内也没有发生比 6.4 级大的地震.从图 4a, b 可以看出, ρ_s 和 E 与地震的对应关系很不明显,难于找到它们与地震之间联系的确切标志.为了从有强干扰背景的 ρ_s 资料中分离出有震的弱信息,我们采用了突出短临地震 ρ_s 前兆的一阶差分方法.用这方法作成 ρ_s 日均值(图 3)、五日均值(图 5)和月均值(图 4)的一阶差分曲线.从图 3 可以看出,七次主要地震前 ρ_s 有接近 $3\sigma_{n-1}$ 的前兆变化,这些地震在表 4 的日均值 ρ_s 栏目中标出了 ρ_s 前兆开始的时间, ρ_s 表现为短期变化形态,最大幅度可达 7.5%, ρ_s 前兆持续时间为 3—76 天.其它 9 次地震是在主震后伴随发生的余震,它们的前兆很难细分,在 ρ_s 日均值一阶差分曲线上

图 5 丰城堡—王家墩—祝家庄地壳偶极电测深 ρ_s 五日均值一阶差分曲线

(a) 1985年5月—1986年5月; (b) 1986年6月—1986年11月; (c) 1986年9月—1988年3月

表 4 16 次地震有关参数与 ρ_s 前兆时间

| 时 间 (年·月·日) | 地 点 | 震中距 Δ (km) | 深 度 h (km) | 震 级 M | ρ_s 五日均值 异常起始 时间 | 五日均值 有无异常 | 月均值有 无异常 |
|-------------------|----------|----------------------|--------------------|---------------|-----------------------------|--------------|-------------|
| 1985. 7.14 | 甘肃九条岭 | 99 | 23 | 4.2 | 7.3 | 有 | 有 |
| 1985.12. 7 | 内蒙古阿拉善右旗 | 99 | | 4.1 | 11.29 | 无 | 无 |
| 1986. 8.26 | 青海门源 | 93 | 14 | 6.4, 5.4, 5.0 | 6.12 | 有 | 有 |
| 1986. 8.27 | 青海门源 | 96 | | 4.0, 4.3 | | | |
| 1986. 8.28 | 青海门源 | 93 | | 4.5 | | | |
| 1986. 8.29 | 青海门源 | 93 | | 4.1 | | | |
| 1986. 9.17 | 青海门源 | 93 | | 5.2, 4.4 | | | |
| 1987. 6.28 | 青海门源 | 93 | 17 | 4.7 | 6.26 | 有 | 无 |
| 1987. 9.12 | 甘肃张掖 | 101 | 9 | 4.9 | 9.5 | 有 | 无 |
| 1987. 9.14 | 甘肃张掖 | 101 | | 4.2 | | | |
| 1987.10. 3 | 甘肃金昌 | 81 | 10 | 4.0 | 9.30 | 有 | 无 |
| 1987.12.15 | 甘肃古浪 | 122 | 8 | 4.4 | 12.13 | 有 | 无 |

没有特别容易分辨的异常。由图 5 可以得出, 16 次地震中震前有 ρ_s 五日均值一阶差分异常(接近 $3\sigma_{n-1}$)的为 6 次。从图 4c, d, e 可以看出, 两个测点 ρ_s 月均值一阶差分值超过 $2\sigma_{n-1}$ 的时间段对应了两次地震活动, 亦即 1985 年 7 月 14 日甘肃九条岭 4.2 级和 1986 年 8 月 26 日青海门源以 6.4 级为主的地震活动, 其余的单个地震对 ρ_s 的前兆时间和前兆量影响都较小。

丰城堡—王家墩—祝家庄地壳偶极电测深 ρ_s 变化主要反映门源 6.4 级地震活动过程的论据还有下列几点:

1. 1985 年 5 月—1988 年 3 月期间, 测区 100km 范围内发生 16 次 4.0 级以上地震, 而门源 6.4 级地震活动从 1986 年 8 月 26 日到 1987 年 6 月 28 日最后一次 4.7 级余震止, 共有 10 次; 3.0—3.9 级地震 53 次。这次地震活动过程的能量占 16 次地震总能量的 99.2% 以上, 6.4 级地震占总能量的 93.4%。

2. 两个测点自然电位的从属函数之和 $\Sigma\mu$ 反应了门源 6.4 级地震的活动过程, 它的计算公式为

$$\mu_i = [1 + \frac{\alpha \cdot \sigma}{(E_{\max} - E_{\min}) + (E_i - \bar{E})}]^{-1} \quad (3)$$

$$\Sigma\mu = \mu_{i1} + \mu_{i2} \quad (4)$$

式中 E_{\max} , E_{\min} , E_i , \bar{E} 和 σ 是计算时间内各测点自然电位极大值、极小值、月均值、平均值和均方差; α 为经验系数, 取 $\alpha=0.5$; μ_{i1} 和 μ_{i2} 表示王家墩和祝家庄的自然电位从属函数。它们的结果如图 6a 所示, 由图可以看出, 1986 年 8 月 26 日青海门源 6.4 级地震前 $\Sigma\mu$ 高于平均值, 而 6.4 级主震发生后 $\Sigma\mu$ 却低于平均值。但是, 它小幅度的波动直到 1987 年 6 月 28 日 4.7 级地震为止, 4.7 级地震后到 1988 年 3 月, 甚至到 1990 年 2 月, 门源地区再没有发生过 4.0 级以上地震。 $\Sigma\mu$ 和图 4b 的自然电位也从 1987 年 6 月后再没有较大地变化,

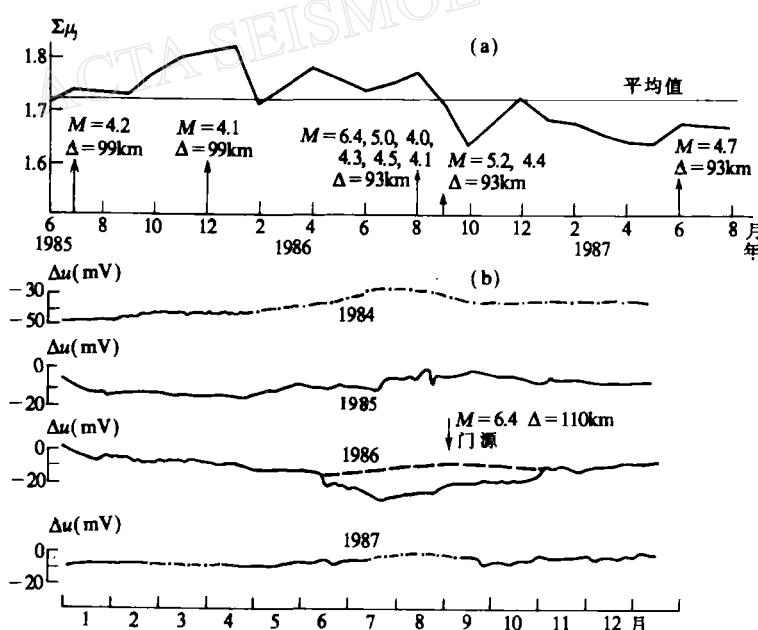


图 6 自然电位

- (a) 王家墩和祝家庄自然电位月均值从属函数之和 $\Sigma\mu$ 曲线;
 (b) 甘肃武威地电台 SN 向自然电位日均值曲线(毛可)

一直处于平稳状态。在这段时间里两个测点的 ρ_s 也少变化(见图 3, 图 4a, 图 5)。因此, 王

家墩和祝家庄 ρ_s 和 E 的前兆变化反应了以门源 6.4 级为主的地震活动过程.

3. 武威地电台 SN 向自然电位 E 明显地反应了门源 6.4 级地震. 图 6b 给出了甘肃武威地电台 ($\Delta=110\text{km}$) SN 向 E 五日均值曲线在 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震过程中的变化状况. 6 月初 E 逐渐下降, 震前达到极小值, 其幅度为 20mV 左右, 震后 1.5 个月恢复正常, 异常特征十分明显突出. 这次异常在 1984—1987 年期间是唯一的一次, 而门源 6.4 级地震也是该台周围一次最强的地震. 因此, 二者之间有内在联系. 同时, 自然电位也是预报地震的一种好的地电学参数, 尤其是它的短临地震前兆特征更具有科学意义.

4. ρ_s 前兆时间 T 与震级 M 、震中距 Δ 和震源深度 h 之间存在相关性. 表 4 中列出的 16 次地震只有 6.4 级是 M_s 震级, 其余都是 M_L 震级. 具有四个参数齐全的有 6 次地震. 它们之间的统计关系为

$$\lg(T \cdot R_0) = 0.474M_L + 0.623 \pm 0.103 \quad (5)$$

式中震源距 $R_0 = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$, 相关系数为 0.840, 线性关系的可靠程度 $t(6) = 6.992$. 根据偶然率 φ , t 及数据个数 n 之间的理论关系可知, 当 $\varphi = 0.99$, $n = 6$ 时, $t_0(6) = 4.032$. 实测值 $t(6)$ 大于理论值 $t_0(6)$, 所以, (5) 式是可靠的. 但是, (5) 式与 1985 年 7 月 14 日九条岭 4.2 级和 1987 年 6 月 28 日门源 4.7 级地震偏离较大, 如果除去这两组数据, 它们的统计关系为

$$\lg(T \cdot R_0) = 0.540M_L + 0.277 \pm 0.004 \quad (6)$$

它们之间的相关系数为 0.994, $t(4) = 164.243$, $t_0(2) = 63.657$, $t(4) >> t_0(2)$. 因此, (6) 式更加可靠.

(5)–(6) 式存在很强的相关性表明 T , M , Δ 和 h 四个参数之间的物理联系. 这种可靠的内在关系说明丰城堡–王家墩–祝家庄地壳偶极电测深 ρ_s 反应了测区周围 16 次 4.0 级以上地震的活动. 这样可以用(6) 式来预报震级和震中距.

另一方面, (6) 式也有非常清楚的物理意义. 当震级一定时, 前兆时间 T 与震源距 R_0 或震中距 Δ 成反比例, 亦即 Δ 越小, T 越大. 换句话讲, 在震中区出现 ρ_s 前兆时间早, 外围区 ρ_s 前兆出现晚, 反之亦然. 地电阻率 ρ_s 法需要记录到较长的前兆时间, 就必须要求观测台网离震中较近. 一般破坏性较大的地震震源深度为 15km 左右, 这样可以用(6) 式来讨论 T , Δ , M 之间的关系, 以满足不同观测目的的要求, 做到合理布设地电台网.

综上所述, 丰城堡–王家墩–祝家庄地壳偶极电测深地电阻率和自然电位的异常变化主要反应了以青海门源 6.4 级为主的七次地震活动过程.

2. 地壳偶极电测深 ρ_s 的季节性变化

1985 年 5 月到 1988 年 3 月期间, ρ_s 变化除主要反应门源 6.4 级地震的活动过程外, ρ_s 变化似乎具有一定的年变化成分(钱家栋等, 1985). 从图 3—5 可以看出, 有些 ρ_s 一阶差分值超过 $(2-3)\sigma_{n-1}$ 后没有发生地震, 对比这些没有地震时间段里的 ρ_s 变化发现, 1985 年 12 月至 1986 年 4 月与 1986 年 12 月至 1987 年 4 月期间, ρ_s 变化似乎具有同步现象. 但是, 1987 年 12 月至 1988 年 3 月, ρ_s 却没有这种现象, 亦即在三年同时期中 ρ_s 变化重复性不好. 因此, 认为 ρ_s 有季节性变化的论点也没有足够充分的论据, 还有待于实践来证实.

五、结束语

地壳偶极电测深方法的定点观测在国内尚属首次进行。在台址条件选择, 装置系统的设置, 测量仪器和供电电源技术指标要求, 测量方法的拟订以及资料处理等方面都有较多的经验和认识。从丰城堡—王家墩—祝家庄地区地壳偶极电测深结果可以得出: (1) ρ_s 和 E 的异常变化与测区周围 100km 范围内的 4.0 级以上地震活动有关, 特别是与青海门源 6.4 级为主的地震活动过程有关。同时, 这种中等深度(2—3km)地层的地震地电阻率 ρ_s 前兆($M=6.4$)似乎比浅部四极法($AB=1\text{km}$ 左右)的要大; (2) 偶极中心间距为 5—8km 时, 地壳偶极电测深的 ρ_s 几乎没有季节性变化。因此, 利用这种偶极电测深法在适合的台址上测量 ρ_s 有利于克服它的年变化, 突出地震 ρ_s 电性前兆信息量; (3) 在地震多发区开展大电流($I=100\text{A}$ 以上)的偶极电测深常规观测时, 一个发射偶极可以为它周围 20km 范围内较多的测量偶极提供电信号, 监测面积可达 10^3km^2 , 甚至更大的范围。这样可节省能源, 增加信息量, 提高资料的可信度。

虽然, 地壳偶极电测深的定点观测取得一些结果, 但是, 在探索地震前兆和正常变化这两个方面还没有积累到更多的规律性认识, 特别是广泛地开展多方位多极距的定点测量, 寻找中等深度(几 km 到十几 km)地层的地震电性前兆指标, 应该是一个方向。在测量仪器高度自动化和供电电源长期稳定可靠两个方面仍有一些问题, 特别是测量仪器除能够测量人工电位差外, 还要能连续测量自然电位和地电学其它参数(综合观测), 以获得更多的电性信息量, 并把这些参数送入计算机进行综合处理。

本项工作得到国家地震局科技司的支持。侯康明、张和全、姜忠贤、梁戈沐、赵家骝、陆其民、安福录参加了观测和有关工作, 在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 安福禄, 1984. 关于偶极法预报地震的试验研究. 西北地震学报, 6, 4, 49—56.
钱家栋、陈有发、金安忠, 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用, 187—225. 地震出版社, 北京.