

关于国内外应用地电于地震研究的现况

刘 心 恒

(云南省地震局)

早在1891年慕尼黑地震和1923年日本关东地震都曾记录到与地震相伴出现的地电变化。但有意识地研究与地震有关的地电变化,只是在六十年代后,由于全球又进入了一个新的地震活动高潮期,人们甚为震害担忧,尤其对于多震国家。因此,各国地球物理学家总希望能否通过某些前兆观测,特别是对于震前各种地球物理场变化的观测,以获取一定地震信息。为了观测地电场的变化,借用了电法中的许多方法进行定点观测、当前应用的主要有表中几种:

1951年, A. C. 谢苗诺夫等人,曾用不极化电极,在苏联的一个多金属地区用自然电流法进行普查时,发现有一种随时间变化的自然电场存在。

各国有意地进行地震地电研究,主要是从六十年代开始,日本稍早些。最普遍采用的是视电阻率法,其次是大地电磁法、自然电位和大地电流。下面依开展时间的先后,并分野外观测、野外试验、室内实验和理论研究予以叙述:

(一) 野外观测: (台站观测)

1. 日本: 以开展短极距四极剖面观测视电阻率为主。1952年就开始有目的地在油壶地壳变动观测所,对视电阻率随时间变化进行观测。结果发现视电阻率的变化与海潮负荷引起的地壳伸缩一致,前者的变化似乎把后者的变化放大了300倍¹⁾。1965年后,重新恢复了观测,并采用了高灵敏度电阻率变化仪和布设在多孔性与渗透性良好的火山砾凝灰岩上的小四极剖面进行观测。多年来的观测结果表明,每当日本及其邻近地区发生较大地震时,似乎都有较为明显的突变出现,它可能与地震后的剩余应变有关,两者比例系数约为 3×10^4 。如1968-1974年间,日本周围共发生了10次 $M \geq 7$ 的地震,记录到有变化的就有8次,占80%。对300公里内 $7 \geq M \geq 6$ 的地震和100公里内的5级地震也能记录到一定突变。完成一次突变

电场性质	方法名称	主要应用
自然场	土地电	前兆观测
	水电阻	
	自然电流	
	大地电流	
	电地波	
	大地电磁法	找寻地壳深部的低阻层,间接监视视电阻率变化
人工场	四极剖面	前兆观测
	偶极法	选择台址
	称对测深	

1) 真正的意义是视电阻率的相对变化量与地壳体应变的比例系数。

所需时间为几十秒到几分。

最近日本油壺地壳变动观测所, 在新建的地下室里, 安装了极间距离为 2 米、1.4 米的装置。它不同于过去 1.6 米间距的装置, 布极方向也由原来 $N81^{\circ}W$ 变为现在的 $N76^{\circ}W$ 和 $N20^{\circ}E$ 近于垂直的两向, 并采用 73HZ 型电阻率变化仪的新观测系统, 于 1977 年 1 月 25 日投入对视电阻率变化监视的观测。

1966 年还在与松代地震群有关的地裂缝上, 布置与其走向平行和垂直两向装置进行视电阻率随时间变化观测。期望能得与地震有关的什么特殊变化, 但结果未能如愿。

2. 苏联: 以开展自然电场、长极距观测视电阻率变化及大地电磁测深为主。1959 年起在勘察加半岛东海岸, 布设了拥有 4 个地电台和 4 个测震、地电综合台的台网。测量极距为 200 米, 使用的电极是铅电极和具有特低自极化薄膜的电极。自 1959 年至 1971 年, 共发生 $7.8 \geq M \geq 4.5$ 地震 13 次 (其中大多数震中距均小于 150 公里), 震前均有不同程度的前兆反映。异常持续时间为 0.13—22 天, 最大异常量为 30—150 毫伏/公里。1972 至 1973 年间, 在斯奇普恩斯基角地电台 (Cope Schipunsky) 周围 250 公里范围内发生的 $M \geq 5.5$ 地震, 大多数震前, 经处理过的信号都显示出异常地增强。A. A. 克若莫夫在一段发生有 12 次 $M \geq 5.5$ 的地震时间段里, 根据地电异常预报的有 8 次, 达 60% 以上。他们的研究结果总的认为, 利用自然电场异常变化, 提前若干天预报 $M \geq 5.5$ 的地震是可能的, 其可能性比概率推测要高两倍。

1967 年加尔姆试验场, 用极距为 6 公里左右的偶极装置进行视电阻率变化观测。自 1967 年至 1972 年, 对测站附近发生的 6 次 $5.7 \geq M \geq 4.2$ 的地震, 震前均有明显的异常变化, 异常持续时间为 57—225 天, 累计异常变化量为 3—18%。研究结果认为, 强震前视电阻率变化会有个明显下降过程, 利用交流和直流电探测还可以粗略地估算震源深度。

1969 年, 在西北利亚维柳依斯克、贝加尔裂谷带, 利用大地电磁测深, 发现深度为 15—20 公里, 电阻率只有几个欧姆—米的低阻层。在一次震源深度为 20 公里的强震之后, 余震分布和这个低阻层分布很一致。

3. 中国: 以开展土地电、自然电位和视电阻率为主, 其次是进行大地电流场, 地下交变电磁场 (电磁波) 和地下水电阻率 (水电流) 变化的试验观测。另外也用了大地电磁测深作了些深部探测。

土地电 1969 年后, 就得到了迅速而广泛地开展, 目前一些多震省份几乎遍及所有专县。尽管它的设备简陋, 干扰因素多, 在机理和主测成份上, 至今认识模糊争论不休。但客观事实说明, 对某些大震和中强震, 确也取得过一定监视效果。特别是震前十多天到数小时内有临震突变。

视电阻率 1967 年邢台地区开展试验以来, 发展很快, 至今遍及所有省市, 全国已有近百个台站进行这项观测。测量使用的是中常大小的四极剖面装置。十多年来观测结果表明, 在我国几次 7 级以上浅源大震前的视电阻率变化, 一般以趋势下降为主。这种趋势变化可归纳为: 初期下降, 中期平稳, 近期加速、末期再加速。它们分别与通常所说的, 长、短、临相对应。地震往往就发生在极小值附近。就时间展布和异常量来说, 一个 7 级以上强震, 其异常范围可达 200—300 公里, 200 公里范围内的台站异常持续时间超过一年, 近震中台站的异常累计幅度为 5—10% 左右。对于 6 级左右地震, 异常时间多超过半年, 异常范围可达 200—300 公里, 过去记录到的最大异常量为 3—4% 左右。5 级左右地震, 其异常量为 1—3 个月, 出现 1% 异常量台站的范围可到 100—200 公里, 近台异常也只是 2% 左右, 对于 4

级左右地震则控制距离大大缩短，常在30—40公里的台站观测到1%左右的异常，异常时间不到一个月。有的大震前半个月和震后一段时间里还会有负脉冲出现，幅度超过平时观测误差的3—20倍，时间可长达13小时左右。

自然电位 近年来也有较快的发展，测量极距为几十米至几百米，用的电极除极少数是Bupr，白金，不锈钢……等不极化电极外，一般为铅电极。多年观测结果表明，某些 $M > 5$ 的地震，震前有过一段趋势变化过程。就异常形态来分，一为封闭式，即异常变化又恢复后发震。二为开放式，即异常发展到极值点附近发震。另外，有时震前几天内还会有突变异常出现。其中尤其突出的是我国辽宁海城地震前冶金102队的自然电位的临震大幅度变化。

大地电流 电磁波法和地下水电阻率，目前仍处于试验阶段。从初步试验结果来看，前两者由于受外空、低空电磁干扰严重，异常与干扰难以分辨。得到的总印象是，大地电流在震前有个缓慢单向变化过程，震后迅速恢复；电磁波在震前可能在某些频段会出现特殊的波形；地下水电阻率在震前可能出现些方向性的差异。

近些年，利用大地电磁测深，发现地震带内地壳中部普遍有低阻层存在，并于松潘地震前记录到震中附近低阻层异常增厚现象。

4. 加拿大 进行过大地电场变化观测和大地电磁测深。

1969年，用大地电磁测深发现过，在阿尔伯特塔坎德蒙顿附近，有一电阻率为2—20欧姆一米，深在8—14.5公里的低阻存在。

1974年起在魁北克市东北，布有4个大地电磁台。计划通过测量大地电场和地磁短周期变化，以探测地壳岩石中电阻率随时间变化。但由于观测期间，测区内没有发生过 $M > 3$ 的地震，未得予期目的。

5. 匈牙利 只是做了些大地电磁测深。

1970年，在喀尔巴阡盆地也发现在16.5—24.5公里深处，有一层电阻率为10欧姆一米的低阻层。

6. 美国 主要是进行偶极法观测视电阻率及大地电磁测深。

1971年，他们也在得克萨斯西北部的21.3—23.3公里深处，发现有一层电阻率为3.5—20欧姆一米的低阻层存在。

1973年，马泽拉(Mazzella, A)和莫里森(Morrison, H.F)在加利福尼亚州霍利斯地区安德烈斯断层上，用大极距的偶极法探测地下几千米深处的电阻率变化。供电电极与测量电极分别布在断层东西两侧。供电是由相距1.5公里，并联有85千瓦电动机发电机组和一个产生换向直流输出的开关整流电桥的铝板进行，电流强度为200安培。供电装置与测量装置间距为1.5公里、10公里和15公里三种，15公里一组设有两个方向。观测结果发现，一次3.5级地震前视电阻率变化达6%。另一次1973年6月22日发生在断层西侧的3.9级地震，视电阻率从四月中旬就开始减小，下降了10%后又回升，到5月底达到极大，比起始水平高出10—15%，累计变化量达20—25%，异常持续时间约60天。

这种大极距偶极装置的试验成功，意味着人们有可能应用这种方法，取得来自孕震区的更可靠、更明显、更有用的地震信息。

(二) 现场实验

目前为止有报导的只有中国。1973年开始在湖南锡矿山，距地表200米深处的开采巷道

中进行。目的在于寻求自然状态下,对岩石进行加压与不加压两种情况,观察其视电阻率与矿山开采所产生的附加应力之间的关系。实验结果表明,视电阻率与其承受的应力—应变状态是密切相关的。一般来说,压缩时视电阻率减小,形变恢复时,视电阻率也在一定程度上恢复。

(三) 室内实验

为了揭示在压力作用下,岩石电阻率会有什么变化。自50年代以来,苏、美、日和中国都相继开展了各种实验。下面分国内外进行叙述:

1. 国外

1960、1963年Parkhomenko和Bondarenko对干燥岩石和部分饱和岩石,在压力作用下进行了电阻率变化实验。

1965、1966、1967、1973年山崎良雄观察了部分饱和的和饱和的岩石在压应力作用下的电阻率变化。

1965、1966、1968年Brace和Orange做了围压条件下饱和结晶岩电阻率变化的实验。

1967年王其允(C、Y、Wang)进行了花岗岩在摩擦滑动中的电阻率变化实验。

以上实验主要结果:

(1) 不饱和岩石在单轴压缩下的结果、电阻率都随应力增大而减小。

(2) 部分饱和的和饱和的岩石在围压下电阻率变化:

a. 对于部分饱和岩石,电阻率随着压力增高迅速下降,而后变平,最后随压力而略有增加。

b. 对于饱和岩石,电阻率随压力增高而增加,最初较迅速,后来渐渐变平缓。

c. 饱和岩石的电阻率与孔隙度密切相关,它随孔隙度的减小而增加。

d. 饱和的和部分饱和的同类岩石电阻率,在6千巴以上压力作用下,达到大致相同的值。

(3) 饱和岩石在恒定围压和恒定孔隙压力下破裂和摩擦滑动时的电阻率变化。

a. 在轴应力增加到破裂应力一半的过程中,电阻率略有增加。

b. 轴应力超过破裂应力裂应力的一半时,电阻率开始下降,最后达到破裂应力的80%后电阻率显著下降。

c. 横向(径向)电阻率和纵向(轴向)电阻率变化不同,在较低的应力下就开始明显下降。这种下降现象在直到破裂前一直持续。

d. 已破裂岩石在继续重复受力时,其电阻率变化和破裂前的电阻率变化显著不同。岩石大破裂后重复加载时,其电阻率只有很小幅度的变化。

综上所述可得结论:岩石在受应力情况下,电阻率要发生变化。一般来说,这种变化随饱和度不同和处于压力的不同阶段而有所差异。

有的实验认为,有可能通过观测野外电阻率变化发现更为微小的应变变化。还可能揭示岩石破裂过程的详细情况或探测受力岩石结构中的微小变化。有的人根据破裂后电阻率变化不大的实验结果认为,既然滑动不能对电阻率产生大的影响,所以布设测量装置要在完整的岩体上,而力求避开断层。

2. 国内

(1) 岩石或土层的视电阻率随应力—应变的变化实验。

1973年北京大学、科学院地质所 在单向压力下岩石的电阻率变化。

1976年陈志辉等 自然状态下的土壤受力所引起视电阻率变化。

1978年国家地震局地质所 在低围压情况下土体电阻率与形变的变化关系。

以上实验结果表明：岩石或土层在受力情况下，电阻率的变化，沿主压应力或剪切力作用方向变化最大。一般来说，这种变化随饱和度不同和压力条件不同而不同，岩石的电阻率变化与应变量的比例系数仅为数十倍左右。

(2) 岩石或土体的自然电位随应力—应变的变化实验。

1976年北京大学、兰州地震大队 对干、湿岩石进行加压观测自然电位变化。

1976年陈志辉等 观察土体在剪切破裂过程中的自然电位变化。

1978年国家地震局地质所 土层中自然电流与变形关系的实验研究。

上述实验结果指出：岩石或土层在受力情况下，自然电位要发生变化。

有的实验认为，凡有压力降的破裂或总破裂，同时都伴随有自然电位突变。凡有压力降的破裂或总破裂之前，至少有一个方向自然电位变化速度要加大。当岩石应变速率大于 10^{-6} /秒时，自然电流的上外或下降基本上与应变积累和释放相对应。在应变速率等于或小于 10^{-7} /秒时，这种对应关系基本消失。当应变速率接近或大于 10^{-4} /秒时，自然电流与应变速率不但有相应变化，而且有明显波动变化特征出现。

(四) 理论研究

1. 两种孕震过程模式对视电阻率变化的解释。

其一美国提出的“扩容—扩散”的湿模式。与“弹性应变积累—扩容—水的流入—应力突降接着有余震”四阶段相应的视电阻率变化为：

基本没有变化—开始上升—继续缓慢上升后迅速下降—震后逐渐恢复。

其二苏联提出的“扩容—不稳定”的干模式。与“弹性应变积累—扩容和裂缝‘骤然’发生—断层带不稳定变形和周围地区应力部分松弛—应力突降接着有余震”四个阶段相应的视电阻率变化为：

基本没有变化—开始下降—继续下降—震后迅速恢复。

2. 浅源地震电阻率变化与大地电磁场变化关系的研究。

研究结果指出：通过地壳浅部视电阻率和电位的观测，难以发现地壳深部孕震体发生的电阻率变化。但对伴随浅源大地震发生的电阻率变化的监视，它是一种有效方法。

3. 据《РефертиВыи Журнал. Геофизика》1975.10报导，有一种新的地震预报理论，它认为地震的发生在很大程度上与地下水的流动有关。地下水流动产生电流，计算结果指出，在1000个大气压下地下水流动可以产生 10^4 — 10^5 伏的电位差。当岩石孔隙为1%时，每平方公里的电流强度可达3—30安培。但这种设想尚未得到观测实践的证实。

参 考 文 献

1. А. С. Семенов Электроразведка Метод естественного Электрического Поля. издательство ленинградского университета 1955.
2. Е. М. 克维亚特柯夫斯基 电法勘探 地质出版社1960.
3. W. F. Brace, A. S. Orange, T. R. Madden The effect of pressure on the electrical resistivity of water-saturated crystalline rocks. J. G. R.

- Vol170№22.1965.
4. Brace, W. F. and Orange, A. S. Electric changes in saturated rock under stress. Science Vol 153.№3744.1966
 5. K. Kawada Electric resistivity measurement along and across a ground fissure in the Matsushiro area. Bull. Earthquake Res. Inst. Vol44 part 4. 1966.
 6. Brace, W. F. and Orange, A. S. Further studies of the effect of pressure on electrical resistivity of rocks. J. G. R. Vol73.№16.1968.
 7. Бердичевский, М. Н. и др. Аномалия электропроводности земной коры в Якутии. изв. Ан СССР. физика земл. №10.1969.
 8. Rankin, D. Reddy. I. A magnetotelluric study of resistivity anisotropy. Geophysics Vol134 №3 .1969
 9. Adam, A. some results of the magneto-telluric survey in Carpathian basin and its complex interpretation. J. Geomg. Geoelec. Vol 22 № 1—2 1970.
 10. Mitchell, B. J, Landisman, M. Electrical and Seismic properties of the earth's Crust in the Southwestern great Plains of the U. S. A. Geophysics. Vol36 №2 1971.
 11. 山崎良雄. 岩石变形と比抵抗 《地震》2.26 55—66.1973.
 12. 北京大学地球物理系地球物理教研室. 中国科学院地质所三室 岩石的结构. 成份与它在单向压力下电阻率变化的初步研究. 地震战线.1973. 4 .
 13. Y. Yamazaki Coseismic resistivity steps. Tectonophysics22.159—171. 1974
 14. 孟玉梅 孙昌军 袁毅 自然条件下形变电阻率模拟实验. 地震战线1974. 4
 15. A. Mazzella, H. F. Morrison Electrical resistivity variations associated with earthquakes on the San Andreas fault. Science Vol.185 №4145.1974
 16. M. A. Sadovaly and I. L. Nersesov Forecasts of earthquakes on the basis of complex geophysical features. Tectonophysics Vol23.№3 .1974.
 17. W. F. Brace Dilatancy-related electrical resistivity changes in rocks. pure and appl geophysic. Vol.113, №1/2 1975.
 18. Y. Yamazaki precursory and coseismic resistivity changes. Pure and appl. geophysic. Vol. 113№1/2 1975.
 19. 陈峰等 视电阻率法测矿井岩石应变实验的初步总结. 地球物理学报28.6. 1976
 20. G. A. Sobolev Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes. Pure and appl. geophysic. Vol. 113 №1/2.1975.
 21. 山崎良雄 地震に伴ら大地比抵抗变化检出限界. 《地震》2.28. 1 .1975.
 22. V. I. Mzachkin, W. F. Brace, G. A. Sobolev and J. H. Dieterich Two models for earthquake forerunners. Pure and appl. geophysic. Vol. 113 №1/2 1975.

23. T. Rikitake Earthquake prediction developments in solid earth geophysics Elsevier scientific Publishing company 1975.
24. 陈志辉 邵必建 视电阻率及自然电场模拟实验. 地震战线1974. 4.
25. T. Rikitake and Y. Yamazaki Resistivity changes as a precursor of earthquake. Journal Geomag. Geoelec. Vol.28. №6 1679.
26. Y. Honkura, E. R. Nielett, R. D. Kurtz Changes in magnetic and telluric fields in a seismically active region of Eastern Canada; Preliminary results of earthquake Prediction studies. Tectonophysics Vol. 34. №. 3-4. 1976.
27. 北京大学地球物理系地震专业, 兰州地震大队 岩石压力实验中自然电场的变化 地震战线 1976. 2.
28. Y. Honkura Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and the its application to earthquake prediction. Journal Geomag. Geoelec. Vol.28. №. 1. 1976.
29. 国家地震局土地电土应力测报地震经验交流会 资料选编 1977. 3
30. 辽宁地震局. 北京市地震队. 河北地震局. 兰州地震大队 大震前后地电前兆特征—关于唐山, 松潘龙陵三处大震前电阻率异常的讨论《全国地电. 地磁. 水化会议报告》1978.
31. 北京大学地球物理系 兰州地震大队预报室 岩石电阻率与压力关系的实验. 《全国地电. 地磁. 水化会议报告》1978.
32. 兰州地震大队预报室 地电组 压力与(岩井岩层)视电阻率关系的实验 《全国地电, 地磁. 水化会议报告》1978.
33. 国家地震局地质研究所 土体电阻率与形变关系的实验研究. 《全国地电, 地磁、水化会议报告》1978.
34. 国家地震局分析预报室 地电组 地震前形变电阻率异常特征《全国地电, 地磁、水化会议报告》1978.
35. 刘心恒 利用地下电流异常变化预报地震的探讨 地震研究1978. 3.
36. 国家地震局兰州地震研究所地电研究组 地下岩石视电阻率年变化与中国大陆(构造)应力场的分布—兼论视电阻率法的干扰—《全国地电, 地磁. 水化会议报告》1978.
37. 山崎良雄: 1978年伊豆大岛近海地震に伴ら油壺四大地比抵抗变化 《地震》2.31. 2. 1978.
38. 赵玉林. 钱复业 唐山7.8级强震前震中周围形变电阻率的下降异常. 地球物理学报 1978.21. 3
39. 国家地震局地质研究所 土层中自然电流与形变关系的实验研究. 《全国地电, 地磁、水化会议报告》1978.
40. 赵玉林 . 钱复业 唐山地震临震前后形变电阻率的脉冲地球物理学报 1979.22. 1.
41. 马淮洲 多变的地电流基值. 地震战线 1979. 4.