

第 1 章 国内外地震地电阻率前兆工作特色及现状

地震地电阻率前兆观测的目的是应用分布于地表固定观测点上的特定装置系统，定时观测地球介质的视电阻率，研究其随时间的变化和这种变化的空间分布规律，以寻求与地震孕育过程之间的内在联系，进而达到监测预报地震时、空、强三要素。

1.1 我国地震地电阻率前兆工作特色

我国地震地电阻率前兆工作始于 1966 年 3 月邢台 6.8 级地震之后，原中国科学院兰州地球物理研究所在邢台震区架设了第一个地电观测台，首先将地球物理勘探电测方法移植于地震监测预报。采用中等极距（1 km 左右）四极对称装置进行观测。随着地震活动高潮到来，在我国主要发震区及重点保卫地区先后建立了 110 余个地电观测台，控制着全国陆地面积的 1/3 左右，形成具有 5、6、7 不同震级的地电监测预报台网（汪志亮，1989，1991）。30 多年来，我国地震地电前兆方法观测到了十分丰富的前兆震例。与日本、前苏联、美国三国相比，我国不仅监测到 9 次 7 级以上大震的地电前兆现象，而且也积累了近 100 余次中强震震例。某些地震，在震前还依据地电阻率前兆异常变化特点，作过一定程度的地震三要素短临预报，取得过较好的社会效益（汪志亮，1991）。

我国地震地电学者依据丰富的地震地电阻率前兆震例，经过 30 多年不懈地实践和探索，形成了具有不同于它国的明显特色。

1.1.1 地震地电阻率方法在监测预报工作中走向实用化

自 1967 年以来，先后在我国地电台网控制范围内，记录到 7 级以上强震 9 次，近 100 次中强地震。通过对这些震例研究，归纳地震地电阻率前兆异常有如下共同特征：

(1) 大震、强震前 200~500 km 范围内地电阻率异常呈现 1~2 年的趋势变化。

(2) 异常幅度一般为百分之几，形态以下降为主。尤其是唐山地震震中周围 200 km 范围内，至少有 8 个台站记录到准同步下降现象，构成一包围震中的地电阻率异常下降区。

(3) 某些强震前部分台站的地电阻率前兆异常还显示出阶段性变化，除趋势异常外尚记录到短临前兆变化。

(4) 强震后多数台站趋势异常发生转折或回升。

(5) 同一台站不同方位异常幅度不同，呈现出异常的各向异性特征。与大震、强震相比，5~6 级中强地震前，趋势异常时间短，为数月至数日，异常幅度较小，大多只有 1%~2%，出现异常台数也相当少。

在 1988~1990 年国家地震局科技监测司组织的地电实用化攻关研究中，根据监测预报工作的需要，对地电阻率正常场的选择、异常的识别标准、异常参数（持续时间、范围、幅度）的计算、异常信度、地震三要素预报及预见意见的适度修正与调整等方面都做出了明确的规定，并编制成了有关运算程序，成为我国地电阻率方法预报地震日常工作的

基本要求。从而使我国地电阻率方法监测预报工作由经验性向半定量化、规范化、程序化、实用化方面迈进。

1.1.2 地震地电阻率方法对中短期监测预报取得明显的实效

1988年以来,我国大陆发生了澜沧—耿马 7.6 级地震、巴塘 6.7 级、小金 6.6 级、大同 6.1 级、天祝—景泰 6.2 级地震及部分 5~6 级中强地震。在这些地震前,据地震地电阻率异常变化都作过不同程度的预测预报。

(1) 1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.6 级地震。1988 年 8~9 月国家地震局分析预报中心和兰州地震研究所分别以信函和电文方式向有关单位落实腾冲、通海等地电台的地电阻率前兆异常。在地震前一个星期还专门发电文询问腾冲等地电台的地电阻率短期变化。

(2) 1989 年 4 月 16 日巴塘 6.7 级及 1989 年 9 月 22 日小金 6.6 级地震。地震前,国家地震局分析预报中心,曾依据甘孜台地电阻率下降变化,在 1989 年初提出“跟踪”预报意见。临震前的 4 月 15 日在分析预报中心周会商会上又提出:“距甘孜 200 km 范围内,发生 6 级以上地震的短临预报意见”(余素荣,1993;汪志亮,1995)。巴塘地震之后,甘孜台地电异常在恢复过程中,又出现转折地电阻率再次下降。据以往的震例经验,国家地震局分析预报中心和地球物理研究所钱复业等人又以此为主要依据,并结合郫县和雅安台地电短期变化,预报在小金地区有 6 级以上地震发生。预报再次获得成功。

(3) 1989 年 10 月 19 日大同—阳高 6.1 级地震。震前内蒙古自治区地震局曾据宝昌台地电阻率(ρ_s)变化特征,于 1989 年 10 月 13 日在该局周会商会上明确提出:“宝昌 ρ_s 值出现趋势性异常,应引起注意。”此会商意见还及时以《简报》形式向国家地震局上报。1989 年 10 月 15 日宝昌 ρ_s 值又出现加速下降变化,幅度最大达 4.8%。该局决定 10 月 19 日前往台站落实异常,18 日已做好出发前的各项准备工作。结果,10 月 19 日凌晨发生了大同—阳高 6.1 级地震。震中距宝昌 215 km。震前虽然没有发出临震预报意见,但震前所做的一切工作,足以说明,宝昌地电阻率的异常变化已多次被有关部门重视(汪志亮,1990)。

(4) 1990 年 10 月 20 日甘肃天祝—景泰 6.2 级地震。10 月 20 日下午,国家地震局科技监测司,曾用电话向甘肃省地震局等五个单位通报。提到的前兆异常资料主要有:宝鸡、通渭、武都地电,弥勒水氡,川滇地磁。刚打完电话不足两小时,在天祝—景泰之间就发生了 6.2 级地震。虽然电话通报中没有明确说是短临预报,但国家地震局科技监测司这种作法是少有的。

上述几个预报实例,虽然,从“三要素”预报角度来看,差距还相当大。但这些震例都是在震前发现地电异常并做出预报的。从而也改变了过去震后分析异常,总结经验的“震后效益”。这对地震预报——世界上未攻克科学难题,不能说不是一大进步。

1.1.3 地震地电阻率前兆机理研究工作的深入

经过 30 多年的观测与预报实践,我国不但为大震、强震及中强震地电阻率前兆信息,积累了世界未有的丰富的前兆资料,而且对地电阻率方法预测预报地震机理的研究工作也取得令人可喜的进展。

多少年来,我国在解释地电阻率预测预报地震机理有多种见解,如,20世纪60年代中期,认为引起地电阻率前兆异常的主要原因是应变-形变力的作用,所以当时命名为“形变电阻率”;70年代后期,汪志亮认为引起电阻率变化的原因是岩(土)层孔隙、裂隙中含水量的变化所致,并引用阿契定律解释地电阻率的变化;80年代中后期,赵玉林等人首先对阿契定律结构指数 n 进行研究,认为:“在受力条件下,岩、土层的结构指数 n ,不再是通常认为的常量,而是应变 ϵ 的函数,即

$$n = -(a + b\epsilon^{0.4})$$

认为高放大系数(或灵敏系数)并不是个别岩石特有的,而是不饱和岩、土层在微小应变条件下的一种较为普遍的规律。还指出,放大系数的大小与受力方向有关。通常,纵向(受力方向)放大系数高,可达 10^3 以上,而横向放大系数较低,有时出现零值或负值。进而指出,选择放大系数 K 不低于 10^3 的地电台进行地电阻率测量,能在强烈地震前观测到5%左右的前兆异常”(赵玉林,1990)。此结果尚能较全面地解释我国地电阻率监测预报中所取得的一些普遍规律,如,异常的趋势性、阶段性、方向性,前兆异常量等方面的特征。为我国利用地电阻率方法预测预报地震提供了较为清楚的物理机制。

1.2 我国地震地电阻率台站现状及监测能力分区

1.2.1 全国地电台网布局概况

地震地电阻率方法自1967年投入地震监测预报工作以来,随着全国地震活动高潮的出现,很快在我国一些主要大城市附近及主要地震活动区域内,先后建立了110余个地震地电阻率观测台,控制了全国陆地区面积的1/3左右,形成了地震地电阻率观测台网,具有一定的监测预报能力(图1.1)。

1.2.2 地电单台监测预报能力分类

要全面评价地电单台监测预报地震的能力是非常复杂的问题。除与台站使用仪器性能、观测精度以及反映地震能力有关外,还与台址条件和分析预报人员水平等方面因素有关。我们暂且把全国地电单台分成三类:

第一类,监测预报能力较好的台。

这类台站对应地震的概率比较高。也就是说从目前所掌握的震例中,在该台站所控制的范围内发生5级以上地震都会出现地电异常。但就各台而言,震例数不等,有的台发生5次地震对应5次,而且这些异常大多数都是震后总结的,因此,尽管这类台站的对应概率比较高,但决不能说,这类台站监测预报能力达到有异常出现必有地震发生的水平。据统计属于这类台站只有14个,只占总数的21%,其比例是非常小的。

第二类,监测预报能力一般的台站。

这类台站共同之处在于有异常的次数与地震次数的比值既不是百分之百,也不是零。地电阻率异常的次数小于地震总次数,与第一类台站相比监测预报能力要低。据统计这类台站共有29个,占总数的44%。

第三类,监测预报能力比较差的台站。

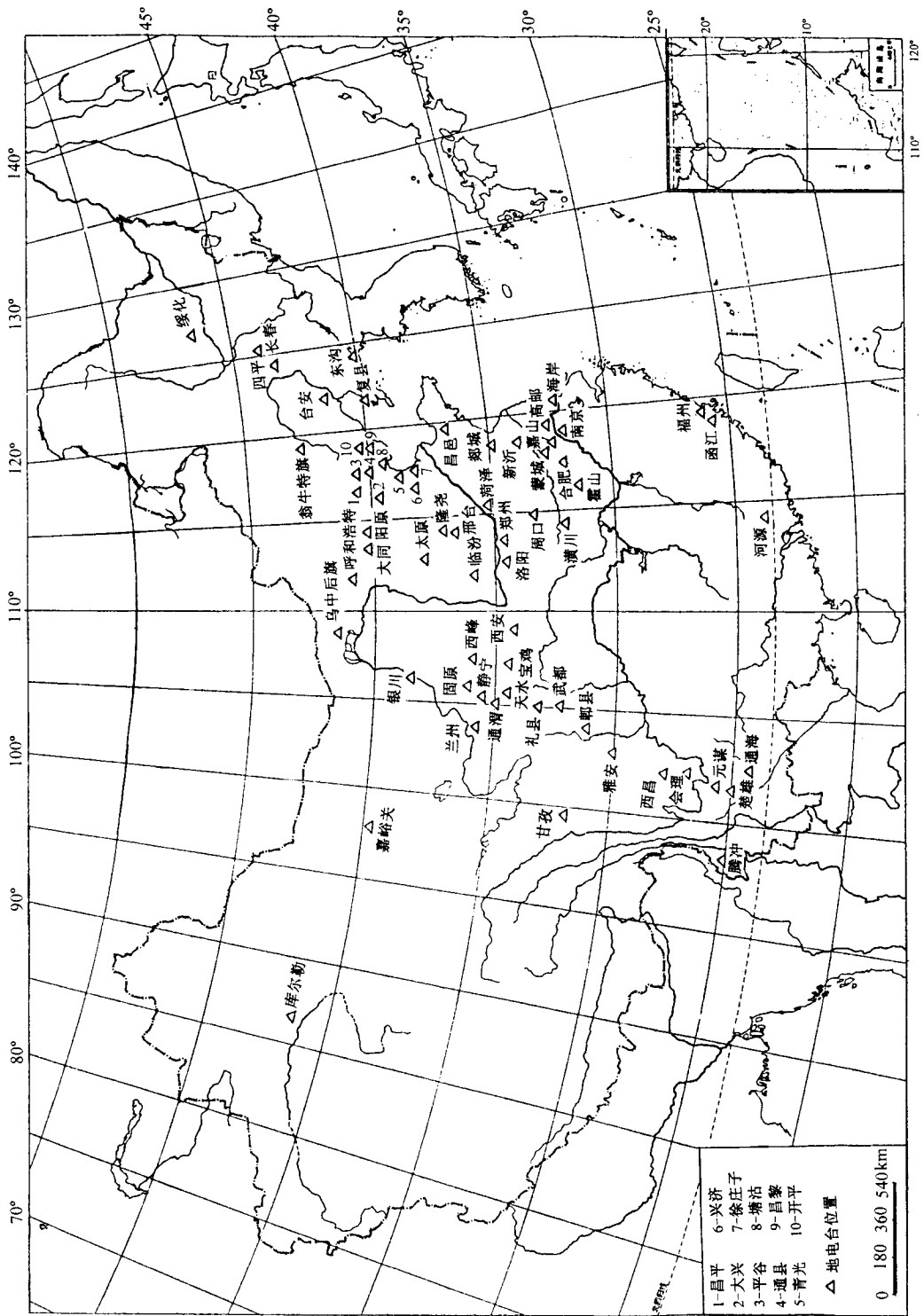


图 1.1 全国地震地电阻率台站分布图

这类台站自建台以来，在其控制范围内发生的各次地震中，从未观测到有意义的异常。因而对应地震的概率为 0。一方面由于地震本身的复杂性；另一方面由于这类台站所处的构造位置、地电断面、台站观测条件所致，所以，这类台站监测预报能力是比较低的。考虑到上述主、客观原因，即使是对应概率为 0，也不等于这类台站一点监测能力也没有，只是相对于上述两类台站监测预报能力较低。据统计，属于这类台站共有 23 个，占总数的 35%。

综上所述，所谓监测预报能力“比较好”、“一般”、“比较差”都是相对的，它们之间的界线仅凭少量的统计数字来划分是很不全面的。

1.2.3 地震地电阻率前兆方法监测预报能力分区

由图 1.1 可看出，全国地电台站布局是不均匀的。据 1984 年地电清理工作的结果，从监测预报地震能力出发，把全国分成 5 个监测预报能力区（图 1.2）。各监测预报区地电台网密度不同，其中：Ⅰ区总面积为 13.77 万 km^2 ，单台控制面积为 1.25 万 km^2 ，平均台距为 111.8 km；Ⅱ区总面积为 17.39 万 km^2 ，单台控制面积为 4.74 万 km^2 ，平均台距为 217.6 km；Ⅲ区总面积为 92.34 万 km^2 ，单台控制面积为 6.16 万 km^2 ，平均台距为 248.0 km；Ⅳ区总面积为 113.4 万 km^2 ，单台控制面积为 7.56 万 km^2 ，平均台距为 274.9 km；Ⅴ区控制面积为 85.36 万 km^2 ，单台控制面积为 12.19 万 km^2 ，平均台距为 319.2 km；全国地电台网控制面积为 352.2 万 km^2 ，约占我国陆地面积 1/3。

1) Ⅰ区 —— 京津唐监测预报区

该区分布在北京、天津以及河北唐山等地，属全国重点监视地区。该区地电台站使用的仪器设备比较先进，观测人员的技术水平比较高。一、二类台站有 11 个，占该区总台站数的 92%，三类台站只有 1 个，占总数的 8%。全区 1968~1982 年，共发生大于或等于 5 级的地震 6 次，有 5 次观测到了地电异常，预报效果为 83%。考虑到上述这些因素，该区划为 5 级或 5 级以上地震监测预报能力区。

2) Ⅱ区 —— 华北地震监测预报区

该区主要位于河北省境内，包括内蒙古、山西、山东、河南等省的一部分。全区有一、二类台 10 个，三类台 2 个。自 1968~1982 年全区共发生 5 级以上地震 6 次，其中 3 次地震前发现地电阻率异常，预报效果为 50%。考虑到本区地电台站的平均台距为 217.6 km，超过 5 级地震的影响范围。因此，该区对 5 级地震的预报能力是比较差的，属于 5 级以上地震监测预报区。

3) Ⅲ区 —— 郯庐深大构造带监测预报区

本区北起黑龙江、吉林，南至山东、河南、安徽、江苏。沿着北东方向的郯庐深大断裂带分布，因此又称郯庐深大构造带预报区，共有一、二类台站 15 个，三类台站 4 个。由于本区地电台站大部分位于气候比较潮湿的地区，地电资料受气候条件影响比较大，给分析判断异常带来困难。据统计，1968~1982 年区内共发生过 5 次 5 级以上地震，其中有 4 次震后能分析出地电阻率异常，但震前很难判断。考虑上述诸因素，本区应划为 6 级左右地震监测预报区。

4) Ⅳ区 —— 西部监测预报地区

该区主要分布在陕西、甘肃、宁夏等地，其中一、二类台 15 个。1968~1982 年全区

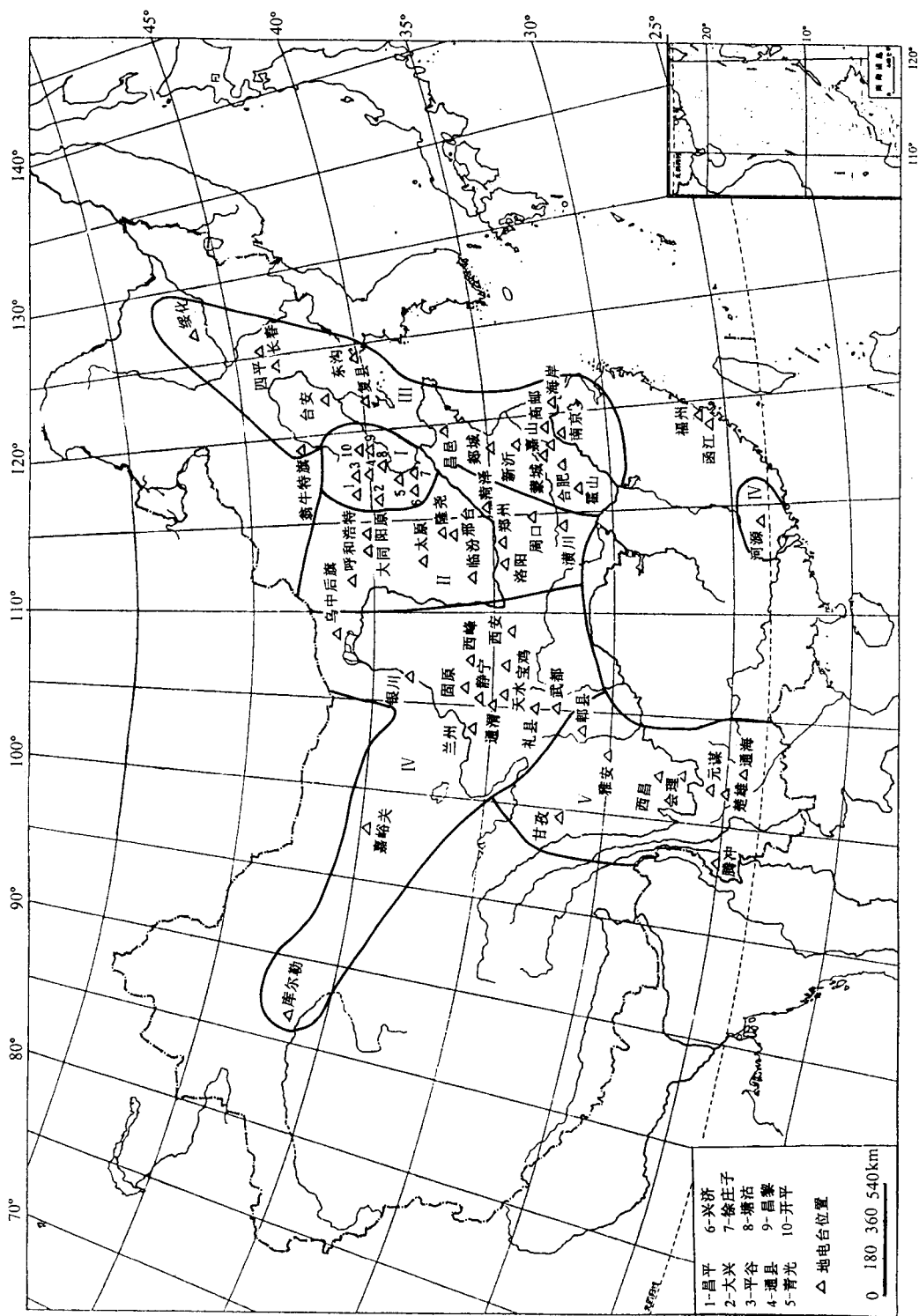


图 1.2 地震地电阻率前兆方法监测预报能力分区图

共发生 5 级以上地震 14 次，有地电阻率异常对应的只有 6 次，预报效果只有 43%，考虑到上述这些情况，我们认为该区利用地电阻率方法预报中强地震是很困难的，定为 6~7 级地震监测预报区。

5) V 区 —— 西南监测预报区

本区主要分布在四川、云南、贵州等地，是我国地震多发地区。全区一、二类台站共有 7 个。1968~1982 年共发生 5 级以上地震 43 次，震前发现地电异常的只有 14 次，预报效果为 32%。

由于本地区台网比较稀，预报效果比较差，在一般情况下，对中强地震预报是非常困难的。所以，该区划为 7 级左右强震监测预报区。

通过对各区监测预报能力的分析，表明各区利用地电阻率监测预报地震能力差距较大。在重点监视区，如京津唐监测预报区，由于该区地电台网密度比较高，技术力量比较强，仪器设备也比较先进，因此该区具有较高的监测预报能力，可以监测预报 5 级或 5 级以上的中强地震。而在其他地区，有的只能监测预报 6 级以上地震，有的只能监测预报 7 级以上的地震。

1.3 国外地震地电阻率前兆工作特色

20 世纪 60 年代中期，随着地震监测预报在世界范围的兴起，世界上主要从事地震地电阻率预报与研究工作的主要国家有中国、日本、前苏联和美国。在各国的研究中，认为地球介电性参数，主要是地球表层介电电阻率，是地震前兆异常研究的一个重要方面。

1.3.1 日本地震地电阻率前兆工作特色

日本地震地电阻率前兆工作仍以研究为主，以地震地电阻率前兆变化及其与地震导致测点处机械应变的关系，以及用地电阻率监测火山物质的升降运动为其主要研究内容。

为了监测与地震有关的地壳应变的变化，1965 年日本东京大学山崎良雄在东京南 60 km 神奈川县油壶地区一个濒临大海的洞穴观测点内开展地电阻率观测试验。在洞穴内的底板和顶板壁上布设极距为 4.8~6.0 m 的小极距四极对称装置，以三条互成 45° 夹角的测线，观测不同方向上的电阻率变化，观测电阻率仪器是自制的抗 50 周电干扰能力较强的交流测试仪器，其观测电阻率相对变化的灵敏度可达 10^{-5} 。日本做了 20 多年的观测与研究，其特点是：

(1) 观测表明，测点处的地电阻率变化与伸缩仪及附近海平面观测结果相对比，三者有很好的 consistency，是世界上第一个应用地电阻率监测潮汐应变的观测试验。

(2) 在长期自动连续电阻率变化的记录中，多次发现有伴随地震 ($\Delta \leq 400$ km, $M \geq 5.0$) 的“同震阶跃”现象。

(3) 对“同震阶跃”前后记录进行滤波处理，发现震前数小时，地电阻率出现临震前兆变化，但变化幅度与震级关系不明显。这种“同震阶跃”现象和震前数小时的临震前兆现象，我国地电学专家赵玉林等人在研究唐山地震前地电阻率频谱规律时，也有同样的发现。

1.3.2 前苏联地震地电阻率前兆工作特色

前苏联的地震地电阻率观测一开始就以捕捉地震前兆为直接目标。其观测工作始于1965年，在中亚多震区加尔姆地区开展观测。为了探测震源或接近震源区介质的电阻率变化，采用大极距偶极装置并用大功率设备供电，使用数十公里远的接收装置。80年代初期，前苏联还开始仿效中国试用的中等极距（1~3 km）的四极对称装置进行浅部电阻率前兆探测试验。总的来看，前苏联的研究带有强烈的试验特色，在长期观测试验期间，在台网内虽然积累了多次4~6级中强地震的地电阻率前兆异常的震例，但缺少强震震例。

他们的长期观测结果还表明，在台网内或其边缘所发生的中强地震，地电阻率异常形态是以下降为主的负异常，异常幅度为百分之十几，持续时间为数月。由于复测周期长，短临异常信息未见报道。

1.3.3 美国地震地电阻率前兆工作特色

美国地震地电阻率观测与研究迟于日本、前苏联及中国。但其试验观测方法多种多样，从极距为数百米的四极对称装置；中心距为数公里、十几公里的偶极台阵，到跨度50 km的大地场张量观测，供电功率从30 W到8 500 kW都有。试验仪器从简单的低精度纸带滚筒记录到数字遥测记录，应有尽有。美国的研究工作由于受科学基金专题拨款制度的制约，虽有多个单位进行研究，但基本上属于专题性的短期试验性研究。试验期间，台网内仅有4级以下小地震发生，缺少中强以上地震震例经验。

美国的研究工作虽然时间不长，但这些专题性工作对电阻率变化机理的研究和对地电阻率变化的分析研究相当深入。其工作特点是：

(1) 模拟孕震过程中各个阶段岩石电阻率变化的实验研究比较完整，为孕震全过程不同阶段上岩石电阻率变化机理提供了丰富的实验资料。

(2) 电阻率变化的微观机理的理论研究比较深入，用物探中的阿契定律对实验中岩石电阻率变化进行深入讨论，对定律中各个参数的作用及对实验和野外观测资料解释等问题进行了较全面的分析。

$$\rho_s = \rho_0 f^{-m} S^{-n}$$

式中， ρ_s 为填充于孔隙中地下水的视电阻率； f 为孔隙度； S 为水与填充孔隙空间的比值； m 、 n 分别为与孔隙的含水率及岩石的胶结程度有关的常数，通常为2.0及1.3~1.95。

(3) 开创了电阻率变化数值模拟研究，Morrison等人结合观测场区的电性结构和装置系统的参数进行多种复杂剖面下地电阻率法的数值模拟，这些数值模拟成为地震地电阻率法研究的另一重要理论支柱。

第 2 章 典型震例及监测预报问题

地震地电阻率前兆方法自 1967 年投入地震监测预报工作以来,在全国地电观测台网控制范围内,先后观测到多次有意义的地震地电阻率前兆异常。在相关的刊物和论著中都有过较详细的报道(赵玉林, 1978; 钱复业, 1980; 金安忠, 1984; 钱家栋, 1985; 安维光, 1987, 1991; 汪志亮, 1989, 1990),在此章集中介绍几个典型震例的地电阻率前兆异常特征和监测预报的经验与教训。

2.1 唐山 7.8 级地震地电阻率前兆异常及监测预报问题

1976 年 7 月 28 日凌晨 3 时 42 分,在河北省唐山市发生了 7.8 级地震,震中烈度高达Ⅺ度。

唐山地震前距震中 500 km 范围内,共有 21 个地电观测台站,其中有 9 个台记录到中期和短临突变异常,占总台数的 42.9%。地震地电阻率前兆随时间的演变过程大致经历了中期异常变化→短临加速异常→震时回返阶跃→震后恢复四个明显的阶段。不同阶段都表现出明显的特征变化(王志贤, 1996)。

2.1.1 地震地电阻率中期异常

地震地电阻率中期异常一般是指半年以上的异常变化。位于震中近区的唐山($\Delta = 4$ km)、昌黎($\Delta = 70$ km)两台于 1973 年底先后出现地电阻率变化。1974 年后,宝坻、青光、忠兴庄等多台相继出现异常。初步形成了以唐山为中心的地电阻率下降异常相对集中区,并表现有明显的向外扩展特征,即异常开始于震中地区的唐山,越靠近地震发生,即离地震发生的时间 T 越短,地电阻率异常扩展的范围越大,大约以 100 km/a 的速度向外扩展,见图 2.1 (b)。扩展半径大致为 150 km,这与笠原庆一认为海城地震前形变峰大约以 10~100 km/a 的速度迁移的结果基本一致。

2.1.2 地震地电阻率短临异常

短临异常是地震短临时间预报的主要依据。唐山地震前观测到了比较丰富的地震地电阻率加速变化的短临异常,其形态特征是在趋势异常变化的背景上呈现急剧加速变化(图 2.1a)其时间分布一般在震前数天至数十天不等,在时间进程上外围地区出现早,震中区相对较晚,有由外围向未来震中区逐渐逼近的特点(图 2.1c)。在空间分布上,要比中期异常广,远至 600 km 的郑州、洛阳等台,且主要集中在阴山-燕山南缘活动构造带和华北平原活动构造带附近。如此之大范围的地电阻率短临异常变化,可能与强震活动过程中区域构造带上的多应变能量释放“点”有关。

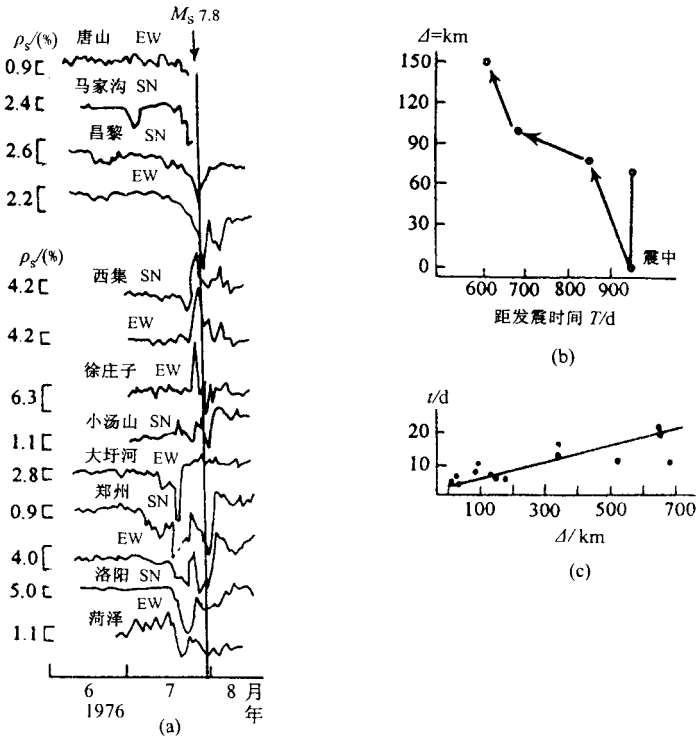


图 2.1 唐山 7.8 级地震 ρ_s 前兆异常变化特征

(a) 短临前兆异常曲线；(b) 中期前兆异常由震中向外扩展图；

(c) 短临前兆异常时间 t 与震距 Δ 的关系

2.1.3 地震地电阻率前兆阶跃特征

关于震时地震地电阻率阶跃变化，国内外文献有广泛的报道。我国由于采用人工间断观测，一般难以获得震时的资料。但整理分析唐山地震前后瞬时测值，发现在地震发生前后相邻两测时点（相隔数小时至十数小时）， ρ_s 发生明显阶跃变化，其阶跃幅度均超过各自平时观测值均方误差数倍或数十倍，是各台自观测以来所未有的变化。据梅世蓉等主编的《一九七六年唐山 7.8 级地震观测资料汇编（地电部分）》（梅世蓉等 1982）记载，震后各台观测仪器标定结果均符合精度要求，观测资料质量可靠。唐山地震前后相邻两点观测值的显著突变与地震发生、应变能突然释放直接有关。笔者称此变化为震时阶跃变化，如表 2.1 和图 2.2 所示。表 2.1 还给出了震前 ρ_s 异常积累变化幅度，以便比较。由于各异常台址电性条件和装置系数不同，进行了台址—装置条件校正，结果列于表 2.1 中。

从图 2.2、表 2.1 可以看出，唐山地震 ρ_s 震时阶跃具有如下特点：

(1) 显著性。多数台的阶跃幅度与震前多年的累积变幅相当或稍大，最大可达 12%，震前无中期异常的塘沽、马坊、青县、徐水等台也观测到了明显 ρ_s 阶跃。

(2) 普遍性。距震中 200 km 范围内的 14 个地电台中，有 11 个记录到了 ρ_s 阶跃，占总台数的 78.5%；空间分布与中短期异常的范围大体一致。

表 2.1 唐山 7.8 级地震前地电阻率变化量 ($\Delta\rho_s/\rho_0$) 统计表

地电台站	唐山	马家沟	昌黎	宝坻	塘沽	马坊	青光	徐庄子	忠兴庄	青县	徐水
震中距/km	4	10	70	80	80	110	110	140	150	160	240
异常量 ($\Delta\rho_s/\rho_0$) /%	-5.5	-15.0	-6.4	-3.8	无	无	-2.7	无	-5.0	无	无
校正结果/%	-5.8	-4.4	-3.7	-3.2	无	无	*	无	-1.8	无	无
震时阶跃幅度/%	+4.7	+12.4	+4.3	+2.7	-3.0	+0.8	+1.9	+3.5	无	+7.4	+0.8
校正结果/%	+5.0	+3.6	+2.6	+2.3	-3.0	+0.8	*	*	无	*	*

注：* 缺台址电性资料，未校正。

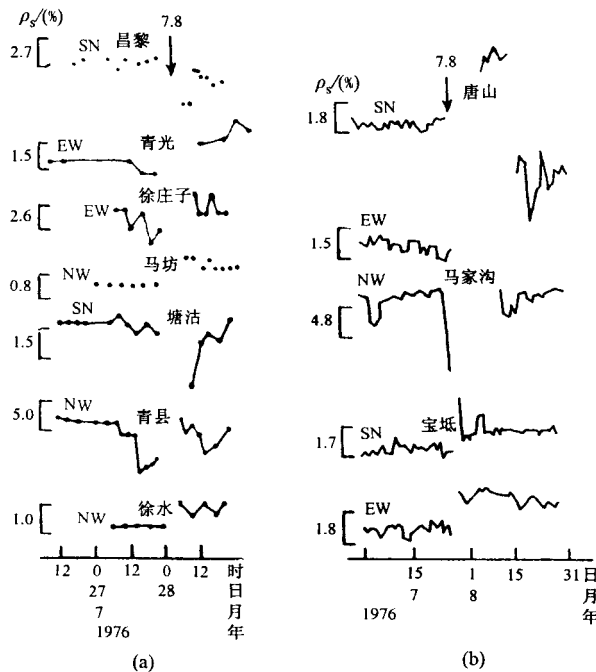


图 2.2 地电阻率瞬时测值 (a) 和日均值 (b) 地震前后突变异常曲线

(3) ρ_s 震时阶跃与震前异常变化性质相反，震前 ρ_s 异常以下降为主，而震时阶跃则以上升为主，两者变化性质完全相反，与弹性回跳理论具有很好的相似性。这可能是孕震过程中应力-应变积累和地震发生能量突然释放两个不同应力-应变状态变化的反映。

2.1.4 唐山地震地电阻率前兆监测预报问题

上述研究表明，唐山地震地电阻率前兆无论是中期异常，还是短临异常及异常的阶跃特征都比较明显，从今天的眼光来看，本应该作出较好或准确的短临预测，但震前为什么没有这样做呢？究其原因有两点：

1) 对地震活动形势严重性认识不足

唐山地震前，在华北地区 1966 年 3 月 8 日，隆尧东发生 6.8 级地震；1966 年 3 月 22 日宁晋东南分别发生 6.7 级和 7.2 级大震；1967 年 3 月 27 日河间发生 6.3 级；1969 年 7

月 18 日渤海发生 7.4 级；1975 年 2 月 4 日海城发生 7.3 级大震。在不到 10 年的时间内华北中北部地区连续发生多次 6 级以上强震和大震。从地震活动观点来看，根据地震孕育过程中能量积累的常理分析，认为在那么短的时间内，特别是离海城震区不远的唐山地区会发生 7 级以上大震无法理解，最高也就是海城地震的强余震，5~6 级水平。

另外，海城地震前，从 1973 年起在华北北部先后出现昌黎、唐山、宝坻、台安等地电台的地电阻率前兆异常，在海城地震时分别有所对应，出现转折变化或恢复（台安台）。至于这些电台的地电阻率前兆异常，虽经暂短的转折后又沿原异常形态继续发展。认为属海城地震的后效。更难判定这些地电阻率前兆异常就是反映比海城地震还要强的唐山 7.8 级大震的中期异常。

总之，无论从华北地区的地震活动的严重性或对地震地电阻率前兆异常的认识都是不够的。在这种思想指导下，即使发现一些地电阻率临震前兆现象，也不可能作出正确的判断。

2) 资料分析研究不够、经验不足

在 2.1.1 至 2.1.3 小节中分别对唐山地震前地电阻率前兆的中期异常、短临异常以及异常的阶跃特征做了深入的研究，取得了明显的成果，但这些成果是唐山地震后，在多位同行的研究基础上取得的，而当时的预报人员是无法知晓或知之不多的，如图 2.1 (b) 所示的唐山地震前各台的短临异常现象，更何况在唐山地震前，地震地电阻率前兆正处在探索和发展初级阶段，无论观测技术或预测预报水平都是不够的。

另外，由于某些地电台站观测资料可靠性比较差，在大震前预报人员虽然发现了一些可疑的短临前兆现象，但心中无数，这样不得不使地电预报人员在临震前还赶赴震区某些地电台落实异常。

2.2 澜沧 - 耿马 7.6 级地震地电阻率前兆异常及监测预报问题

1988 年 11 月 6 日 21 时 03 分，云南省思茅地区澜沧县西北（22.9°N, 99.8°E）发生 7.6 级地震。当夜 21 时 16 分又在其北面耿马东南（23.1°N, 99.4°E）发生 7.2 级地震。在距澜沧 - 耿马地震震中 200~700 km 范围内有腾冲（ $\Delta = 300$ km）、通海（ $\Delta = 290$ km）、楚雄（ $\Delta = 290$ km）、元谋（ $\Delta = 380$ km）、渡口（ $\Delta = 470$ km）和西昌（ $\Delta = 635$ km）6 个地电台站。这 6 个地电台站所处的地理位置及该区主要断裂带如图 2.3 所示。

由图 2.3 可以看到，在震区东北部主要断裂带有鲜水河 - 安宁河 - 小江断裂带和红河断裂带，澜沧 - 耿马地震发生在红河断裂带的西南部。地电台站主要分布在红河断裂带以东的鲜水河 - 安宁河 - 小江断裂带上，而红河断裂带以西只有一个腾冲台。

图 2.3 给出位于澜沧 - 耿马地震震中 200~700 km 范围内全部地电台站的位置分布（汪志亮等，1995）。

2.2.1 腾冲台地电阻率异常特征

腾冲台位于云南省西部邻近中、缅交界地区，距震中 300 km。该台测线位于腾冲县城东南 4 km 一块较平坦山坡下的水稻田中，台站布有 EW、SN 两条测线，供电极距均为 1 400 m，建于 1972 年，但正式连续观测始于 1980 年初。由图 2.4 可见，该台地电阻率

测值自 1984 年起出现年变化幅度逐年加大现象，据 1986 年国家地震局专家组调查，其主要原因是该台线路因长期使用破损日渐严重，导致导线对地绝缘程度降低，特别是雨季；冬季 ρ_s 值回到正常值附近。经云南省地震局台管部门和台上技术人员努力，于 1986 年下半年进行维修和技术改造，从此年变现象减小或消失，其中 EW 向测值年变完全消失，而 SN 方向年变明显减小，且变化形态规则稳定。其年变化可能是因测区表层受到农田灌水、放水而产生的季节性变化的影响。EW 向测值年变不仅消失，而且自 1987 年初起 ρ_s 月均值曲线呈现较大幅度的持续趋势性下降，到 1988 年 9 月异常达到极大值，幅度为 5.0% (负异常)、异常时间为 20 个月，见图 2.4 (a)。

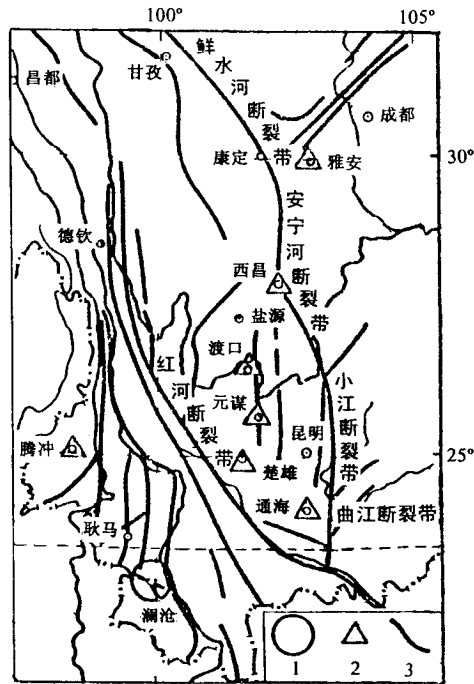


图 2.3 澜沧-耿马 7.6 级地震区主要断裂带及地电台分布图
1. 7.6 级地震震中；2. 地电台；3. 断裂带

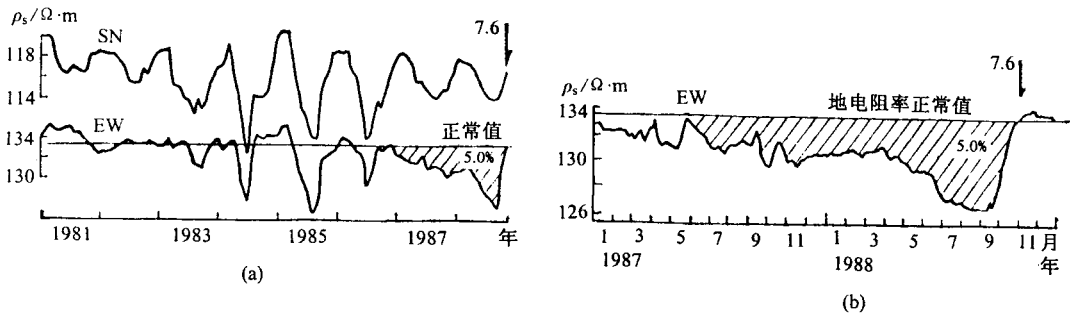


图 2.4 腾冲台地电阻率曲线图 ($\Delta = 300 \text{ km}$)
(a) 月均值曲线；(b) 五日均值曲线

1988 年 11 月 6 日澜沧-耿马 7.6 级地震前，自 9 月 15 日以后该台 ρ_s 五日均值曲线

开始转折回升，回升速率比较快，到 11 月 6 日大震发生时， ρ_s 值回升到正常值，发震后 ρ_s 值回升速率减慢，直至恢复到正常值附近变化，见图 2.4 (b)。

2.2.2 通海台地电阻率异常特征

通海台距澜沧—耿马地震震中 290 km，位于红河断裂带东北侧，曲江断裂带和弧形构造带顶部。该台设有 SN、EW 两条测线，其地电阻率异常曲线如图 2.5 所示。

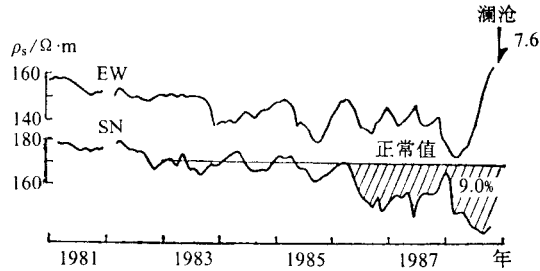


图 2.5 通海台地电阻率月均值曲线图 ($\Delta = 290$ km)

由图 2.5 可以看出，通海台 SN 向 ρ_s 值在 1985 年底以前，呈有规律的年变化。每年冬季 ρ_s 出现极大值，夏季 ρ_s 出现最小值，这种有规律的变化可能与地下水水位和气温有关。从 1986 年初起 ρ_s 值打破正常年变，出现大幅度下降，但 1988 年 1 月 ρ_s 值转折回升，之后又继续下降，直至震前下降到极值，最大幅度达 9.0%。这种长趋势异常，正好与腾冲台 EW 方向测值变化同步，可能是云南西南澜沧—耿马地区地震活动的信息。该台 EW 方向 ρ_s 值没有明显的趋势变化，但 1986 年以来年变形态畸变，而且 1988 年 2 月 ρ_s 值达到最低值后转回升。这种 ρ_s 值年变形态的改变和大震前 (1988 年 2 月以后) ρ_s 值急速回升，也可能是区域地震活动引起的电阻率前兆异常现象。

2.2.3 渡口等台地电阻率异常特征

位于鲜水河—安宁河—小江断裂带上的渡口、西昌、元谋、楚雄等台在澜沧—耿马地震前无明显的趋势变化。

总之，在澜沧—耿马地震前，距震中 $\Delta = 200 \sim 700$ km 范围内，虽然有腾冲、通海、渡口、元谋、西昌和楚雄 6 个地电台站，但由于各台所处的构造位置及震中距离不同，震前只有距震中 $\Delta \approx 300$ km 的腾冲台 EW 向、通海 SN 向地电阻率出现较明显的趋势异常和短期恢复的临震异常现象。

根据作者多年的研究 (汪志亮, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996) 得知，在强震发生之前，以未来强震震中为中心，半径为 500~600 km 范围内会出现多台地电阻率异常。1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.6 级地震前，为什么只在 300 km 范围内的腾冲和通海两个台单方向观测到了趋势异常？可能的原因是：一方面是在距震中 700 km 范围内所建立的地电台站主要分布在红河断裂带以东的南北向构造带上 (图 2.3)，而在红河断裂带以西，只有距震中 300 km 一个腾冲台，在震中以南地区，由于受到国境的限制，国内没有地电台站，这是由于台站布局不均匀性和台网密度偏低所致；另一方面是震区地质构造比较复杂，在澜沧—耿马地震前，由于印度板块向北推移受到红河断裂带阻挡，因

此，只在红河断裂以西的腾冲地电台 EW 向测值和处于红河断裂带的南端，反射弧形构造顶端的通海台 SN 向测值出现趋势异常，而位于红河断裂带以东的鲜水河 - 安宁河 - 小江断裂带上其他地电台站则没有观测到地电阻率趋势异常。

2.2.4 澜沧 - 耿马地震的监测预报问题

1988 年 11 月澜沧 - 耿马 7.6 级地震就像 1976 年 7 月唐山、1973 年 2 月炉霍等 7 级以上强震那样，在震前 1~2 年内观测到了地电阻率趋势性异常，再一次证明地电阻率方法作为地震预报的一种前兆方法的重要意义。但由于每次强震发生的构造位置和地电台网密度不同，所以，每次强震前地电阻率异常的范围和特点也不相同。例如唐山 7.8 级地震前，距震中不超过 500 km 的范围内，共有 21 个地电台，其中有 9 个台站记录到趋势下降异常，占总台数的 42.9%；澜沧 - 耿马地震前， $\Delta < 200$ km 范围内无地电台，而 $\Delta = 200 \sim 700$ km 范围内共有 6 个地电台，震前只有 2 个台单方向记录到了下降趋势异常，占总数的 33%。虽然在震前的 8 月份作者就发现了腾冲台 EW 向测值出现趋势下降变化，具有 7 级以上强震的异常特点，曾去信、去电同云南省地震局从事地电工作的同志研究过，但由于出现异常测值的台站数量少，短期异常形态与以往有所不同，震中和震级都难以判定。另外，唐山地震前，地电阻率出现加速下降现象，临震前尤为明显；而 1988 年澜沧 - 耿马地震前的 9 月中旬腾冲台地电阻率不是加速下降，而是由下降转折加速回升（图 2.4b）。震后才知这种情况可能属远震源区地电阻率异常的特点。由此可见，对 7 级以上大震， $\Delta \leq 200$ km 范围内无地电台，用地电阻率方法预报地震三要素是困难的。但像腾冲、通海等台地电阻率前兆异常现象，在预测区域性大震活动还是很有意义的。

在经验性预报的现阶段，台网过于稀疏的地区，靠单一前兆异常准确地预报地震三要素的可能性是很小的。但澜沧 - 耿马地震给我们积累、补充了 $\Delta \approx 300$ km 的地电阻率实地观测结果。无疑，对我们今后的地震预测预报工作是有重要意义的。

2.3 大同 - 阳高震群地电阻率前兆异常及短临预报的反思

1989 年 10 月 18 日在山西大同 - 阳高（ 39.9°N ， 113.7°E ）发生 5.7 级地震，10 月 19 日又在同地发生 6.1 级地震。

以大同 - 阳高 6.1 级地震震中为圆心，500 km 范围内（面积为 78.5 万 km^2 ）（图 2.6）的地电台站共有 22 个，单台控制面积为 3.57 万 km^2 ，平均地电台距为 106 km。

据地电清理攻关结果：7 级以上强震地电阻率异常范围，最大震中距约为 200~700 km；对 $5 \leq M_S < 6$ 地震，最大震中距为 100~300 km。由上述提供的平均台距来看，若在以震中为圆心，300 km 范围内发生 6 级以上地震时，能记录到 2~3 个台的地电阻率异常。由图 2.6 可以看到，由于地电台分布不均匀，东部京津地区台网密度较大，而京西北地区台网密度比较小，因此不同地区发生地震时，所能记录到地电异常的台站数量是不会相等的。

经对大同 - 阳高 6.1 级地震周围 500 km 范围内 22 个地电台（图 2.6）资料的分析研究，认为震前有异常的台站有宝昌、大同、马坊、青县等，其地震地电阻率前兆特征是明显的，分述如下（汪志亮，1990）。

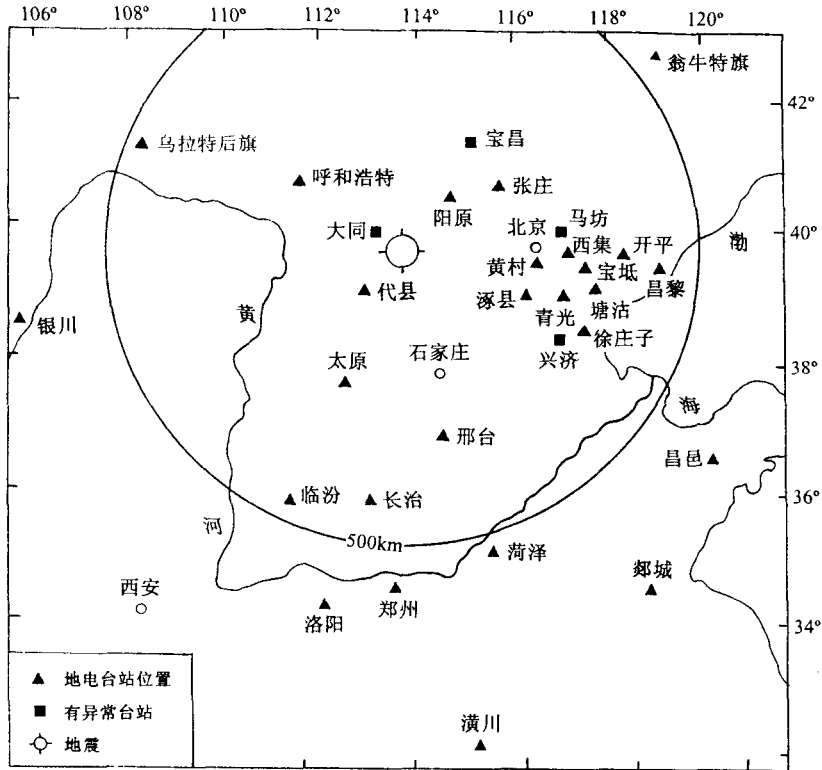


图 2.6 大同 - 阳高地震震中附近地电台站分布图

2.3.1 宝昌台地震地电阻率前兆异常特征

宝昌地电台位于东西向的阴山构造带和山西构造带北端交汇部位。测区为低山丘陵地带，覆盖层较浅，基岩埋深约 90 m，岩性为长石、石英斑岩。距大同 - 阳高 6.1 级地震震中 215 km。

该台测量装置为对称四极，布有 EW、SN 两道测线，供电和测量极距分别为 560 m、80 m，测区周围无工业游散电流干扰。该台于 1980 年 1 月投入观测。

图 2.7 为宝昌台 1988~1989 年地电阻率日均值图。从图中可以看到 SN 和 EW 两道测线地电阻率值从 1989 年 6 月 1 日起开始偏离正常值，出现下降趋势变化。异常时间为 137 天，异常最大幅度，SN 向为 4.0%，EW 向为 3.0%。从异常变化的形态来看，大致可以分为三个阶段：第一阶段从 6 月 1 日至 8 月 25 日为缓缓下降阶段；第二阶段，从 8 月 26 日至 10 月 19 日大同 - 阳高 6.1 级地震发生时为异常加速变化阶段；第三阶段，从震后至 1989 年底为异常恢复阶段。

依据地电清理攻关提供的异常时间 (t) 与震级 (M_S) 的计算公式计算震级 (M_S) 得到

$$\begin{aligned}
 M_S &= 0.5 + 25 \lg t \\
 &= 0.5 + 25 \lg 137 \\
 &= 5.84
 \end{aligned}$$

上述计算结果与实际发生的地震最高震级比较接近，只差 0.26 级。



图 2.7 宝昌台地电阻率日均值图 (1988~1989 年)

2.3.2 大同台地震地电阻率前兆异常特征

大同地电台位于大同盆地口泉断裂带东南侧，距大同—阳高 6.1 级地震震中只有 45 km。该台设有 SN、EW、NW 三道测线，供电和测量极距分别为 1 000 m、300 m、300 m。1982 年 11 月正式观测。

大同台由于 1985 年 4 月在测区西侧修建 100 t 的蓄水池以及沿测区 NE 方向埋设长 2 500 m 的铸铁水管，1986 年更换大功率变压器，1988 年 5 月又更新导线，深埋和更换极板，致使测区环境和观测条件多次发生变化，给该台 1988 年以前地电观测资料的使用带来很大困难。

图 2.8 为大同台 1989 年地电阻率日均值图。从图中看到 6 月底以前三道测线的 ρ_s 离散度都比较大，据说是由于新的观测人员读数误差较大所致。离散度大对于观测值（日均值、月均值、年均值）的异常分析影响不大，因为可以通过滤波方法滤掉干扰因素引起的变化。7 月以后，三组方向的 ρ_s 日均值离散度较小，观测精度提高。三道测线的 ρ_s 曲线近于水平直线，给分析地震前 ρ_s 短临异常变化、确定正常值提供了较稳定的背景。在此基础上，我们可以清楚地看到大同地电台从 9 月底 10 月初起，三道测线的 ρ_s 曲线缓缓地偏离正常的稳定值，SN、EW 方向出现微微上升，NW 方向则出现下降变化，SN 方向测值上升 1.1%，NW 方向测值下降幅度最大达 1.4%，EW 方向测值在 6.1 级地震时达到极大后，又迅速转折返回正常值，变化幅度小于 1.0%。大同—阳高震群后三组方向的 ρ_s 值仍加速变化，NW 方向测值正在逐渐回升到震前的正常值水平，EW 方向测值又开始上升，而且变化速率比震前还大，SN 方向测值上升速度增强，到 12 月底急剧转折下降。

大同台地电阻率值震前无法确定趋势变化，只在震前十几天才出现微小的变化，而震后则出现较大的变化。这种变化特征是不是 6.1 级地震震兆异常，北京大学陈大元认为：“岩石出现不同方向的电阻率变化，肯定是与力的作用有关”。虽然，这种异常形态过去的震例很少，1979 年五原 6.0 级地震时，乌加河地电阻率异常也是震后出现较大变化。另外从大同台多年的地电阻率变化图形来看，这种有规律的变化尚属首次。因此，大同台地电阻率变化应属大同—阳高 6.1 级地震前震中区出现的各向异性特征异常现象，至于如何解释这种异常特征，还有待于进一步研究。