

# 地震地电学发展与展望

—纪念兰州地震研究所开创地电预报地震工作30年

DI ZHEN DI DIAN XUE FA ZHAN YU ZHAN WANG

〈地震地电学发展与展望〉编委会

主 编：石特临

副主编：陈有发 李清河

208



兰州大学出版社

# 鳳凰台上憶吹簫

(憶地電方法預報地震三十年)

郭增建

北方解凍，南方花開，邢台  
大震釀災。驚全國上下，聞者  
皆哀。總理號召預報，眾學者，  
共赴防災。地電隊，開向隆  
堯，餘震未衰。佈點，觀測  
前兆，總結三要素，獵震捕  
隸。果預報應驗，眾顏初  
開。繼續深研妙理，在河間，  
更上新階。喜今日，時歷卅  
載，論著盈齋。

堅持觀測科研預報相結合  
勇攀電法預報地震新高峰

湯泉

一九八八年九月

## 序

中国的地电预报地震的科学研究已30年了。这是一个为人民站岗放哨的30年,是一个科学实验的30年,是许多同志前赴后继的30年,也是取得可喜成就的30年,回顾往昔,展望未来,使人深深体会到什么叫“时代使命”和“时代天职”。我们这些防灾战士就是要为人民减免灾害的。

地电预报地震的工作在这30年的中段和近段的历程和成就已有国内许多刊物发表了论文和一些会议的记载,因之大家比较熟悉,对此我就不多介绍了。我作为地电工作开始时中国科学院兰州地球物理所固体地球物理研究室(当时称为二室,一室是大气物理。二室内包括地震、地磁和地壳物理)的领导仅回顾一下地电预报地震的早期工作。

地电预报地震的工作胎发于大地电磁测深的科研工作。1962年在中国科学院兰州地球物理研究所内成立了地壳物理研究组,当时在兰州刘家坪地球物理现象台进行此项观测工作。这是在已故的顾功叙院士指导下进行的偏于学术性的研究。当时的任务是探测地壳和上地幔中电性分层情况,以便找到可以通讯的高阻层。倘若将来发生战争,空中无线电通讯互相干扰了,则就用地下高阻层通讯。这是在我国三年困难时期所考虑的带有纯学术性的和时间比较宽松的长期科研任务。后来三年困难时期过去了。我国的三线建设任务从1964年就开始大规模开展了。1965年为酒泉—嘉峪关钢铁基地提供抗震的依据—地震烈度,中国科学院西北地震考察队内增设了地壳物理组(考察队的其他组为大震考察组、地震地质组、观测分析组、震源物理组、地震小区划组。考察队由中科院兰州地球物理所、北京地球物理所和地质所以及兰州地质所组成),其任务是在嘉峪关断层附近进行大地电磁测深工作,以了解这个对基地任务至关重要的嘉峪关断层通向地下多深以及断层面向哪边倾斜。由于三线建设任务紧急,所以地壳物理组在嘉峪关戈壁烈日下辛勤的工作,直到天气寒冷蓄电池被冻不能用时才收队。此时任务也完成了。翌年春随考察队在天水大震区探测地下热状态,共同为国防建设地区提供地震烈度。

1966年3月邢台发生了6.8级和7.2级大震,死人甚多,国人为之震惊,这是解放后死人最多的一次地震。该年夏天文化大革命已开展到基层。但由于为贫下中农站岗放哨也是政治任务,所以兰州地球物理所派地壳物理组前去邢台隆尧震区进行大地电磁测深工作,以了解地下深处是否有电性变化的地震前兆。第二年3月,在邢台震区东北200多公里的河间发生了6.7级地震。地壳物理组正式在河间地区开展地电阻率预报地震的工作(当时为强调形变引起电阻率变化,称为形变电阻率,即使有水的运移,认为也是形变所引起)。由于邢台震区强余震较多,故该队后又迁至邢台震区,此时还有贵阳地球化学所的同志参加,共同组成了地电预报地震队。在这期间曾预报了几次接近5级的余震。李四光先生曾高兴地接见了该队负责人钱复业等。另外该队还首次用过滤电势来解释大地电场变化的地震前兆。在进行地电预报地震的创业工作中曾得到秦馨菱先生和曾融生先生的关心和指导。

回顾我国地电队开始工作的时候,国际上日本学者仅作了模拟实验,未在震区进行野外现场观测,苏联学者当时虽在野外进行过少量观测,但仅是观测实验,并未取得地震预报震例,也无实际预报地震的震例。因之可以说我国地电队的工作是开创性工作,是超越前人的工作。后来地电预报地震的工作作为预报地震的重要手段之一在全国许多地震部门开展了。有的同志从理论上进行深入,有的同志从实际观测中进一步排除干扰和识别前兆,有的同志在观测仪器上和观测系统上进行研究,有的同志还把外因、震源过程和前兆联系起来进行研

究,有的还把地电前兆与区域应力场联系起来进行研究,有的已考虑到地壳内电性的多层性和各向异性进行研究。更值得指出的是在边观测、边研究、边预报的战略思想指导下,用地电方法曾预报了一些较强的地震。

在今天纪念中国用地电方法预报地震 30 年的时候,我对这 30 年来在该领域内进行辛勤劳动的每个同志的成就和贡献表示祝贺。也为同志们今后取得更大成就表示具有信心的期待。

现在此 30 周年纪念的文集即将出版,它是又一次向人民的汇报和献礼。我也为此文集的出版而表示祝贺。

最后让我们以现在同志们的名义向当年为大地电磁测深工作和地电预报地震的工作作出贡献而早逝的初洪科同志和林耀明同志表示悼念。另外也为领导和支持地电工作的前兰州地球物理所领导张荣珍同志表示怀念。

前进吧! 中国的地电预报地震的队伍。

郭增建

1997 年 8 月 1 日

于兰州

# 目 录

地震地电学某些发展的回顾·····	陈有发等(1)
地电实验研究的回顾与展望·····	陆阳泉等(9)
回顾地电阻率观测系统的发展·····	赵家骝等(15)
全国地电台网技术管理工作的发展·····	王德志等(19)
低频交流电阻率法监测地震地电前兆的效果和前景·····	戴经安等(24)
甘肃地电阻率预报地震的特点及展望·····	薛顺章(29)
岩石电学性质的实验研究概述·····	陆阳泉等(32)
国外几个主要国家的地震地电学的发展·····	陆阳泉等(35)
地电阻率前兆场与应变场关系及其预报地震的方法·····	赵玉林等(41)
地电阻率异常与强震孕育发生过程的关系研究·····	王志贤等(51)
地震地电阻率异常与短临地震预报·····	杜学彬等(56)
地电阻率的各向异性地震前兆及其在探索震中区域应力场分布中的应用 ·····	钱复业等(64)
地电阻率异常面积预报地震的方法研究·····	张德信等(70)
苍山地震前地电阻率异常分析·····	赵 强等(75)
五次中强地震前河源地电阻率的异常变化·····	秦乃岗(78)
甘肃省 5 级以上地震的地电阻率异常特征及地电台网预报效能的评价 ·····	孙景芳等(83)
甘孜台地电观测的再认识·····	蒋泽雄等(89)
地电阻率多极距观测及其资料反演结果预报地震的优越性和应用前景 ·····	薛顺章等(93)
随深度变化的视电阻率计算核函数法·····	梁子斌等(98)
地震深部电性变化前兆的探索与研究·····	林长佑等(103)
工业干扰源大地电磁法及海洋电流在唐山地震区 MT 法中的应用·····	赵玉林等(112)
大功率偶极电测深法的应用·····	陆阳泉等(117)
天祝地电场三年观测资料的分析与讨论·····	赵和云等(123)
考察希腊地震预报 VAN 法的报告·····	阮爱国(138)
孔压弱化失稳的系统辩认及大地电场短临地震前兆·····	钱复业等(151)
岩石电阻率应变灵敏度与多种因素之间的关系研究·····	陆阳泉等(156)
大尺度标本和原地岩(土)体现场实验研究的方法与技术·····	陆阳泉等(161)
固体不极化电极·····	陆阳泉等(167)
MT-1 系统在地震监测研究中的应用前景·····	王书明等(171)
地电观测中工频干扰的分析·····	谭大成(176)
ZD8 数字地电仪的维修点滴·····	侯远文(184)

# 地震地电学某些发展的回顾

陈有发\* 陆阳泉 薛顺章 梁子斌 丁 卉  
牛耀玲 余存顺

(兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所)

马钦忠

(兰州 730000 兰州大学)

**摘 要** 本文回顾了地震地电学某些发展的主要成就,展望了未来的发展。

## 1 回 顾

地震地电学是我国预报地震的有效学科之一。30多年来,许多科学家为此努力奋斗、锲而不舍,作了许多开创性的科学和技术工作,在纪念我所开展地电预报地震工作30周年之际很有必要回顾一下笔者所了解到的地震地电学的过去和发展,同时也展望一下它未来发展的趋势。

我国著名地震学家郭增建教授于1958年在“1920年甘肃海原大地震调查报告”中<sup>①</sup>,首次总结了海原大地震的前兆现象:前震、地下水、地声、地光、动物、天气、地磁场异常。这个科学总结引起了老一辈地震学家的高度重视,李善邦教授在他的名著“中国地震”中给予高度评价。在郭增建的倡导下,原中国科学院兰州地球物理研究所赵玉林、钱复业、金安忠等人在兰州地球物理现象台建立起大地电场观测台。这是利用地电学方法预报地震的雏形。秦馨菱和曾融生院士是地震地电学预报地震的积极倡导者和支持者,也具体指导过地震地电学的观测与研究。正式应用地电学方法来预测预报地震,始于1967年3月河北省河间县发生6.3级地震后,赵玉林、钱复业、于谋明等人在河间县里坦建立了我国第一个地电台,奠定了我国开展地电学预报地震的基础,并提出了形变电阻率这个概念,虽然这个概念后来不被广泛使用,但是,这个词确实把电阻率(简称 $\rho_e$ )前兆的机理与形变联系起来<sup>[3]</sup>。现在工作时间最长、又有连续资料的是1967年12月建立的河北省大柏舍地电台。1967—1970年,金安忠、苏明达、曲正杰等人研制和生产了第一代大地电磁测深仪。1969年在渤海地震前兆总结会议上对渤海地震前的地电前兆进行了总结<sup>②</sup>。1971年召开了地电预报工作会议,总结了地电测量、地电前兆的经验<sup>[1]</sup>。1971年钱家栋等人与天水长城低压开关厂俞宽鉴合作,研制成功我国 $\rho_e$ 方法供电使用的2A可控硅稳流电源,随后这种电源在全国逐渐普及,替代了 $\rho_e$ 方法使用干电池供电的落后技术。1972—1997年期间赵家骝、陈才军、王亚丽、苏明达等人生产DDC-2型电子自动补偿仪、稳流电源(2A、5A、10A、WL5),研制DD5、Pz40型数字

\* 陈有发,男,研究员,长期从事地震地电学的研究。

① 郭增建、蒋明先、刘成吉、赵荣国、安昌强、王贵美,1958.10.13. 1920年甘肃海原大地震调查报告. 张衡纪念册,中国科学院兰州地球物理研究所资料室,1964。

② 渤海地震前兆总结会议. 地震战线, No. 10, 1969.

地电仪和自动化数字化地电仪 ZD8(ZD8、ZD8A、ZD8B),现在入网的自动化数字化仪器是 ZD8 型地电仪;他们还研制和生产 ZD9 型大地电场仪,都已入网观测;在自动化地电仪器中还有广东省地震局刘昌谋研制的 AST 地电仪在一些地电台使用;黑龙江省地震局屈云升等人研制的 WD-A 地电仪。1973 年原兰州地震大队成立了地电学预报地震研究组,由赵玉林和陈有发负责,同年在原兰州地震大队召开了全国地电学预报地震的学术讨论会,原国家地震局兰州地震大队成为全国地电学的牵头单位。1978 年兰州地震研究所成立地电研究室,这是全国地震系统唯一从事地电学预报地震研究的学科研究室。1972 年赵玉林、卢胜强等人在兰州观象台开展自然条件下黄土层电阻率的压力实验。1973—1977 年张同俊、卢胜强、吕广庭、陈德万、刘建毅、王玉祥和刘生川等人在湖南锡矿山开展矿柱电阻率随矿山开采应力变化而变化的现场观测研究工作,以及矽化灰岩电阻率随湿度和压力变化而变化的室内实验,后来陆阳泉等人开展大尺度混凝土和花岗岩标本电阻率、应变、声发射等参数的压力实验研究工作。1975 年赵玉林和陈有发倡导在我国开展偶极电测深预报地震的观测与研究,陆阳泉、安福录、关华平等入积极筹备,安福录等人于 1979 年正式在甘青宁三省区开展流动观测;1985—1988 年,陈有发、康云生、杜学彬、侯康明等人在甘肃省山丹县丰城堡进行供电偶极中心与测量偶极中心距离分别为 5.5km 和 7.9km 的长期定点地壳偶极电测深;并使用 120A 的供电电流在离供电偶极 20km 的地方进行测量的试验观测<sup>[6]</sup>。1977—1978 年陈有发和吕广庭等人共同制定了第一个地电观测技术规范(试行)<sup>[7]</sup>;1978 年陈有发和薛顺章在国家地震局支持下在天水地震学校第一次举办了“全国地电短训班”。唐山 7.8 级地震后钱家栋、桂燮泰、赵玉林、钱复业、金安忠、汪志亮、王志贤、马熙康、刘允秀等人对唐山地震进行了初步总结和认识<sup>[2-5]</sup>。1978 年于谋明、钱家栋和陈有发招收地电学预报地震的第一个硕士研究生。1980 年陈有发和康云生等人首次在兰州市周围红古、永登、靖远、景泰等地开展  $\rho_s$  方法的流动观测,研究  $\rho_s$  年变化的方向性与兰州地区应力场方向的关系。1985 年钱家栋、陈有发和金安忠首次出版了《地电阻率法在地震预报中的应用》一书。1989 年钱家栋和陈有发出版了《地震地电学论文集》。1989—1990 年陈有发和赵家骝等人编写了“全国基本地电台网调整优化方案”,从  $\rho_s$  法预报地震的实践中提出了基本地电台调整优化的理论依据和具体调整优化方案<sup>①</sup>。1986—1990 年薛顺章等人在滇西地震实验场开展多极距偶极观测资料反演方法预报地震的观测与研究。1990—1992 年陈有发和苏明达等人在青海祁连山开展大地电场、大气电场和电磁辐射 6 个电磁参数的综合观测,在实践中收到较好效果<sup>[4]</sup>。1993—1994 年陈有发在国家地震局支持下编著地震观测技术(工人培训教材)——地震电磁观测技术一书和工人技术等级标准。1993 年钱家栋引进法国 Pb—PbCl<sub>2</sub> 电极,1997 年陆阳泉等研制成功我国的固体不极化电极。这种电极性能稳定、极差小。地电阻率方法经过“六五”的方法清理、“七五”的深化攻关,制定“地电学地震分析预报方法指南及相应软件”,几乎动员了整个地电战线的科技人员参加;钱家栋、赵和云、梁子斌、马钦忠、阮爱国等人对地电阻率作了数值模拟方面的工作,主要有层状介质电阻率计算,研究三维有限元方法,边界元方法及二相介质平面有限方法的应用。目前,地震地电学包括地电阻率法(RM)、大地电磁法(MTM)、激发极化法(IPM)、自然电场法(SPM)、大地电场法(TCM)、压电效应法(PEE)、震电效应法(SEEM)、大气电场法(AEPM)和电磁辐射法(EMRM)9 种;当前,应

① 陈有发、赵家骝,1990,全国基本地电台网调整优化方案,全国地震监测系统调整优化方法(分学科方案),国家地震局科技司。



用最广泛的是  $\rho_s$  法、大地电磁测深法、自然电场法、大地电场法和电磁辐射法；理论和实验上研究比较多的是  $\rho_s$  法。本文主要阐述  $\rho_s$  方法预报地震的发展与展望。

## 2 地震地电学的某些发展

### 2.1 $\rho_s$ 法观测技术工作的发展

地震地电学的发展经历了两次高潮：第一次是 1970 年 1 月 5 日通海 7.7 级地震发生后两年期间兴建 19 个地电台；第二次高潮是 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震发生后两年期间又兴建 19 个地电台；70 年代末到 80 年代初全国地电台达到 110—120 个。从 1979—1988 年期间是稳定时期，此期间里有 90 余个地电台。1989—1997 年为调整优化时期，全国有 60 余个地电台，在此期间主要对地电台进行调整和优化、数字地电仪的入网观测、观测系统的研究与改造。从技术角度上讲，我国的地震地电学可以分成两个阶段：第一阶段，1967—1988 年是 DDC-2 型低精度仪器的人工读数阶段，在此期间部分地电台使用过兰州地震研究所研制的 PZ40 数字地电仪；第二阶段，1988 年以后是逐渐应用高精度（如 0.02% 的 ZD8 地电仪）的自动化数字地电仪替代旧仪器的阶段（参见本书赵家骝的文章）。 $\rho_s$  方法的观测技术是  $\rho_s$  法应用的技术基础， $\rho_s$  法观测技术包括地电台网、地电台址、接收器、测量仪器、导线和观测室等诸方面。

2.1.1 地电台网 应用  $\rho_s$  方法预报地震是一个难度极大的观测与研究课题。地电台网是圈定地震危险区的第一关，要求一个地电台网必须由 3 个以上的地电台组成。在台网选定后还要确定地电台网中地电台的密度（地电阻率方法控制地震的范围，单位为 km）。地电台的密度与监视地震的震级  $M$  大小、需要观测到  $\rho_s$  前兆时间长短  $T(\rho_s)$ （出现异常变化到地震发生的时间，单位为天）、测量仪器的精度高低（发现前兆形变  $\epsilon$  的最小量级）、以及地电台址条件优劣有关系。可以利用陈有发提出的统计公式确定地电台密度，

$$\lg(R, T) = 1.325 + 0.484M \quad (1)$$

式中  $R = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$  为震源距， $\Delta$  为震中距， $h$  为震源深度，它们的单位为 km。

2.1.2 地电台址 地电台址是  $\rho_s$  方法发挥预报地震效能的关键。较好的地电台址条件包括 6 个方面：(1) 台址应位于主要活动断层附近，特别是断层交汇区。但是，地壳断裂具有隔离电阻率前兆的作用。因此，地电台和未来地震应在地壳断裂的同一侧为宜。(2) 台址的岩石力学性质应该是对地震前兆形变具有良好的传递作用。较厚的第四系沉积物对来自震源的力学效应具有一定的“吸收”或“软化”作用；要求第四系沉积物的厚度在 100m 左右为宜。(3) 台址的地电断面应该有利于人工供电电流向地下深处渗透。在地表覆盖层相同时下伏低阻成岩岩体有利于电流向地下深处渗透，抑制表层电干扰和接收来自深部的地震信息，高阻岩体则不利于电流向地下深处渗透。(4) 台址的水文地质是要求地电台测区附近地下水水位稳定。(5) 台址的地形地貌是要求地电台测区地形平坦开阔。(6) 台址的电磁干扰一般都要求信噪比在 40dB 以上。

2.1.3 观测系统技术  $\rho_s$  观测系统主要包含三个方面：(1) 测量接收电极。对电极总的要求是接地电阻越小越好 ( $< 100\Omega$ )。世界各国主要采用铅板 ( $0.6 \times 0.6\text{m}^2$ ) 作为接收电信

号的电极,这种金属电极性能比较稳定,基本上能满足地电学测量的需要。陆阳泉等人研制成功固体不极化电极。这种电极极化小,电极电位稳定,更能提高观测质量(参见本书陆阳泉的文章)。(2)供电电源。最初 $\rho_s$ 方法的供电电源是干电池或蓄电池,这种电源不适合地震 $\rho_s$ 方法测量的需要。70年代初钱家栋等人研制了高精度稳流电源,现在该电源的改进型在全国地电台使用;但是,当前地震地电学的供电电源功率偏小。(3)测量仪器。 $\rho_s$ 方法在地震预报中一开始就使用DDC-2A(B)型电子自动补偿仪,至今还有部分地电台使用这种仪器。80年代赵家骝等人开始研制数字化自动化的地电专用仪器。现在作为入网的全自动ZD8数字地电仪已逐渐替代DDC-2A(B)型电子自动补偿仪。全国60余个地电台已经有40-50个台使用ZD8数字地电仪。

## 2.2 地震地电学其它方法的发展

2.2.1 电位差方法 它是 $\rho_s$ 方法测量人工电位差之前测量的电位差 $\Delta V$ ,每个地电台都有电位差 $\Delta V$ 资料,这个电位差包含稳定电场和变化电场两部分。赵玉林、毛可和陈有发等人都研究过自然电位差的前兆特征。总的来讲,对电位差的研究不够深入,特别是1989年以来使用ZD8数字地电仪所测量的高精度时均值电位差资料具有丰富的信息尚待深入研究。在简化条件下,利用电位差 $\Delta V$ 、电阻率 $\rho$ 和地磁场 $H$ 的资料,能求得电流密度 $j$ 和频率电阻率 $\rho_T$ ,具体计算如下:

$$j(t) = \lambda(t)E(t) = \frac{E(t)}{\rho(t)} \quad (2)$$

$$E(t) = \frac{\Delta V(t)}{MN} \quad (3)$$

$$\rho_{Txy}(t) = 0.2T \left| \frac{E_x(t)}{H_y(t)} \right|^2, \quad \rho_{Tyx}(t) = 0.2T \left| \frac{E_y(t)}{H_x(t)} \right|^2 \quad (4)$$

这种方法可以消除电位差、电阻率和磁场的某些干扰变化,得到不同深度的电阻率,强化地震电磁前兆的信息量。

2.2.2 电磁辐射方法 电磁辐射方法又称电磁波方法,1966年邢台7.2级地震前2-3分钟收音机突然受到强烈电磁干扰,以后在7级以上地震前3-5分钟也都发现类似现象。1976年唐山7.8级地震后陈有发在国家地震局安排下组织同事调研唐山地震前电磁辐射的情况。张以勤、钱书清和张德齐等人较早从事电磁辐射的观测和研究工作。至今,全国已有百余个观测点。观测装置有埋地天线超低频系统、埋地天线宽频放大检波接收系统、铁硅铝天线接收系统、中频观测系统和高频观测系统,使用的观测仪器种类较多。电磁辐射方法在地震预报实践中收到一定效果。

2.2.3 大地电流方法 80年代末赵家骝和苏明达等人研制的ZD9大地电场仪已入网观测,兰州地震研究所建立了祁连、临夏和民勤等大地电流台。高精度分钟值大地电流资料含有丰富的地下介质电性信息,现在已经开展短周期大地电流前兆信息的研究。近几年赵和云与法国合作使用不极化电极研究大地电场卓有成效(参见本书赵和云的文章)

2.2.4 大地电磁深方法 70年代杨国军和毛桐恩等人在甘肃及邻近地区开展流动观测;张云琳等人又在甘肃和青海地区400km长的地段上开展定点复测工作,十多年来获

得地震孕育过程中地壳深部电阻率变化的特征,大地电磁响应多参数一致呈现系统性下降—恢复上升—相对稳定至高值状态的变化规律与研究区不断增强—达到高峰—保持相对稳定平静的地震活动特征相一致;林长佑发现震前 2—10km 地壳电阻率变化为最大(参见本书林长佑的文章)。

2.2.5 大气电位方法 70 年代李海华和王玉玺等人在甘肃地区开展大气电位预报地震的观测与研究;郝建国等人在地震危险区作过实地观测与研究。1990 年陈有发、张勇利等人在祁连运用大气电位方法作跟踪预报,得到空中电磁前兆(大气电位和电磁辐射前兆)出现的时间比地壳中电磁前兆( $\rho_s$ 、自然电位和大地电场前兆)的要晚一些,二者之间有较好的相关性,用  $T_L$  表示地壳中出现地震电磁前兆比空中出现地震电磁前兆要早的时间, $T_L$  与地震震级  $M$  和震中距  $\Delta$  之间的关系为:

$$\lg(\Delta \cdot T_L) = 2.5 + 0.327M \quad (5)$$

该式表明,这个提前时间  $T_L$  随着震级的增大而增大<sup>[4]</sup>。

### 3 大地震前 $\rho_s$ 的特征

#### 3.1 $\rho_s$ 正常变化特征

$\rho_s$  的正常变化是指  $\rho_s$  方法在监测地震能力范围内无地震活动期间的  $\rho_s$  年变化形态。 $\rho_s$  正常变化可分成三类:正常年变化。 $\rho_s$  正常年变化是 3 月份左右为极大值,9 月份左右为极小值,具有正常年变化的地电台为 56.6%;反常年变化。 $\rho_s$  反常年变化是 3 月份左右为极小值,9 月份左右为极大值,具有反常年变化的地电台为 31.6%;波动型变化。 $\rho_s$  在某一数值附近波动变化,具有波动型变化的地电台为 11.8%。 $\rho_s$  年变化幅度为 2%—40%,甚至更大。 $\rho_s$  年变化的成因机理尚不完全清楚,可能与季节性地表电性变化和地球自转有关系。研究得到  $\rho_s$  年变化的方向性与中国大陆构造应力场方向相一致。规则的地电阻率年变化形态特征是  $\rho_s$  方法预报无震活动最重要的标志和指标。这是第一个前兆标志和预报指标。

#### 3.2 $\rho_s$ 前兆特征

1967—1996 年在地电台监测能力控制地区发生 7 级以上地震 6 次(炉霍 7.9、海城 7.3、龙陵 7.4、唐山 7.8、松潘 7.2、耿马 7.6)。钱复业、钱家栋、赵玉林、桂燮泰、金安忠、汪志亮、王志贤、傅德川、马希融、王德富、刘心恒、刘允秀和陈有发等人,总结 6 次 7 级以上地震周围  $\rho_s$  前兆特征与地震孕育过程的关系,并参照独联体的  $\rho_s$  观测结果,得到  $\rho_s$  前兆的四条基本标志和预报的指标。

3.2.1 在时间上以下降为主的阶段性特征 在时间进程上  $\rho_s$  变化由 5 个阶段组成:(1)早期下降变化,在年变化形态畸变或者消失的背景上地电阻率出现下降形态;(2)中期平稳变化, $\rho_s$  围绕某一背景值波动,这个平稳变化的时间随着地震震级  $M$  的增大而增长;(3)短期加速下降变化,震前 15—20 天在平稳变化背景上  $\rho_s$  出现加速下降变化;(4)震前回返变化,震前几天  $\rho_s$  由加速下降变化转变为回返上升变化,在上升变化中发生地震;(5)震后恢复变化,地震后  $\rho_s$  恢复正常变化,出现年变化形态。震后  $\rho_s$  的恢复变化与无震活动时期的  $\rho_s$  正常变化是相似的。这 5 个阶段构成  $\rho_s$  法预报地震的第二个指标。

3.2.2 在空间上以震中为中心的负异常区 在空间上 7 级以上地震是以震中为中心出现  $\rho_s$  最大的负异常区,长轴为 300km 左右,短轴为 150km 左右,这是第三个预报指标。陈

有发统计 5.0—7.9 级地震的  $\rho_s$  前兆时间  $T$ (天)、震源距离  $R$  与震级  $M$  之间的关系为:

$$5.0 - 5.9 \text{ 级: } \lg(R \cdot T) = 1.281 + 0.511M \pm 0.182 \quad (6)$$

$$6.0 - 6.9 \text{ 级: } \lg(R \cdot T) = 1.770 + 0.449M \pm 0.144 \quad (7)$$

$$7.0 - 7.9 \text{ 级: } \lg(R \cdot T) = 2.521 + 0.331M \pm 0.136 \quad (8)$$

上述各式的相关系数都在 0.92—0.99 之间;线性关系式可靠程度  $t$  值远远大于理论值,因此,(6)—(8)式是可靠的。同时,关系式的截距随着  $M$  的增大而增大,斜率和误差随着  $M$  的增大而减小。地震学家认为,在比较低的应力条件下孕震区及其附近地区震前发生扩展—膨胀现象,其范围距震中可达数百公里至 1000km 左右,这是 Crampin 等人提出的 EDA 假说。陈有发统计结果得到  $\rho_s$  前兆的扩展速度(单位为 km/d)为下式,

$$V_p = 1.720 - 0.153M \pm 0.018 \quad (9)$$

(9)式表明, $\rho_s$  前兆扩展速度  $V_p$  随着震级  $M$  的增大而减小,它可以解释为震级越大,震源体越大,在  $\rho_s$  前兆扩展速度  $V_p$  相同时所需要的能量就越大。

3.2.3  $\rho_s$  前兆的方向性 同点三向等极距  $\rho_s$  前兆具有方向性,在同一测点的不同测量方向上  $\rho_s$  前兆量存在着差异性。岩石标本压力实验结果表明,顺着压应力方向  $\rho_s$  前兆量最小,垂直压应力方向  $\rho_s$  前兆量最大,与压应力方向成 45° 的  $\rho_s$  前兆量居中。唐山 7.8 级地震的实际结果是  $\rho_s$  前兆 N25°W—SN—N42°E 方向小( $\leq 14\%$ ),N69°E—EW—E42°S 方向大(2.6—17.0%)。地电阻率前兆量最大方向与京津唐张地区最大压应力 NEE 基本一致。实验结果与实测结果存在的差异可能是前者为“真电阻率”,后者为视电阻率,在压力作用下二者变化正好相反的缘故。

3.2.4 浅部和深部  $\rho_s$  前兆量的差异性 小于 3km 的四极法测到的地电阻率包含地表电性季节性变化成分以及地震前兆;10—20km 深处的地电阻率似乎看不出  $\rho_s$  年变成分,而地震前兆特别突出,深部岩体的电阻率要比浅部的变化量大,低阻(130—200 $\Omega \cdot m$ )岩体要比高阻(800—1600 $\Omega \cdot m$ )岩体的电阻率变化量大,这个观测结果对认识  $\rho_s$  前兆与孕震过程的关系和  $\rho_s$  方法的观测技术都有很重要的科学意义(参见本书陆阳泉的文章)。

## 4 对地震地电学的展望

地震地电学在长时间大范围的地震预报实践中经受了地震的检验,显示出地震地电学的有效性。展望它的未来,很有希望。但应主要在下述几个方面多做工作。

### 4.1 电磁多参数的同步综合观测

首先是电磁多参数综合观测,陈有发在祁连山地震重点监视区开展电磁多参数(大地电流、电磁辐射、大气电位)同步综合观测的工作表明,地壳和空中电磁前兆出现的时间呈现明显的差异性,地壳中的电性前兆出现时间比空中的要早,二者具有较好的相关性;除此之外,还可以扩大电磁多参数的观测项目。其次是探测深度的综合,极距小于 3km 的四极法探测地壳浅部(几百米)的电性变化,几公里至几十公里(6—60km)的偶极法探测地下几公里至 20km 深的电性变化,而大地电磁测深方法则是探测几十公里至几百公里的电性变化。探测不同深度上地壳岩石电阻率的变化特征是寻找地震孕育过程中地壳电阻率前兆标志体系的又一新途径;因此,最好的观测方案是地壳浅(几百米)、中(几公里)、深(几十公里)岩层电性变化的综合观测方法,获得地震孕育过程中震源周围立体上的电性前兆信息,兰州地震研究

所已经开始这一方面的研究工作。最后是测点密集成网,选定地震危险区,布设密集测量台网,检测和探索电磁前兆的非均匀性特性。

#### 4.2 电磁多参数的数字化测量仪器

对测量仪器总的要求是灵敏度高、稳定性好、准确度和精确度高、抗干扰能力强、输入阻抗高。计算机技术给地震地电学观测仪器带来多用化、自动化、数字化和轻便化的前景。一台理想的自动化数字地电仪应该是适应多种电磁前兆参数测量的多通道综合仪器;计算机技术的运用要求地震地电学方法的测量,能够提供可以直接利用计算机进行各种数学方法来处理资料的数据文件。因此,地震地电学多参数测量结果必然是记录在磁盘或传输到数据中心,形成可执行文件,同时能够相互快速交换;最好是数字地电仪与微型计算机合二而一,达到实时处理高精度时均值  $\rho_s$  和电位差的资料,以及分钟值大地电流的资料,及时提取临震的电磁信息,以便作出及时的临震预报。

#### 4.3 电磁多参数数据的快速传输

现代通讯和计算机技术已经达到快速和远程传输数据的水平,这给地震前兆分析和地震预报提供了及时获得数据的机会。同时,地震的短临预报更需要及时的前兆观测数据,因此,实现电磁前兆数据的快速传输,并进行计算机处理是非常必要的。

#### 4.4 电磁参数的综合处理

到目前为止,绝大多数分析预报研究人员在处理  $\rho_s$  和电位差资料时,仍然采用传统的日均值或更长时间的均值作为基本数据。这样损失了周期小于一天的地电学前兆信息,很不利于临震预报。为了获得自动化数字化地电仪测量的高精度时均值  $\rho_s$ 、电位差和分钟值大地电流资料的更多信息,处理资料的数学方法要充分利用这些资料来提取临震预报指标。另一方面,注意发挥这些资料的整体功能作用,压制干扰,集中和突出地震前兆信息。除地电阻率和电位的地震前兆以及陈有发提出的电磁多参数无量纲地震前兆三种类型的地震前兆之外,还可以利用  $\rho_s$  和电位差数据研究电流密度  $j(t)$  (利用(2)、(3)式计算)、 $\rho_r$  (利用(4)式计算)、 $\rho_s$  方法的相对应变灵敏度系数  $K_p(t)$  新型的三种地震前兆,这样不仅增加了地震地电学方法预报地震的参数,而且提高了地震地电学方法抗干扰的能力。 $\rho_s$  方法的相对应变灵敏度系数  $K_p(t)$  的计算公式为:

$$K_p(t) = \frac{\Delta\rho(t)}{\frac{\rho(t)}{\epsilon(t)}} \quad (10)$$

式中  $\epsilon(t)$  为地面倾斜变化值,  $1'' = 5 \cdot 10^{-6}$ 。

### 5 结束语

地震地电学经过广泛实践、长期发展,积累了富含地震孕震信息的连续资料,特别是高精度时均值  $\rho_s$ 、电位差以及分钟值大地电流资料,它们在预报地震中发挥了积极作用,初步寻找到地震地电学预报地震的标志体系和指标体系的规律性认识。总体来讲,地震地电学未来的发展前途是光明的,但是,在观测技术方面没有实质性的进展,面临的科学难度还是很大的。所以,对地震地电学的发展需要信心坚定,热情饱满的科学工作者来攻克它。

#### 参考文献

- [1] 地震战线编辑部,1971.地电预报地震工作会议.
- [2] 钱家栋、陈有发、金安忠,1985.地电阻率法在地震预报中的应用.北京:地震出版社.
- [3] 钱复业、赵玉林,1985.大地震前后地电阻率的前兆现象.地震预报—地电方法专集.福州:福建科学技术出版社,79—92.
- [4] 陈有发、苏明达、张勇利、赵家骝,等,1994.地震危险区电磁多参数的综合观测与研究.中国地震,Vol. 10,增刊:56—62.
- [5] 陈有发、董奇珍、马钦忠、王燕琼、丁 卉、康好林,1994.地电学预报地震的综合跟踪方法.中国地震, Vol. 11, No. 4:405—413.
- [6] 陈有发、康云生、杜学彬、陈宝智、梁戈涑、董永德,1992.地震危险区的地壳偶极电测深.地震学报, \*Vol. 14, No. 2:211—219.
- [7] 陈有发,等,1978.地电观测规范,地震观测规范(试行).北京:地震出版社.

# 地电实验研究的回顾与展望

陆阳泉\* 刘建毅 梁子斌

(兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所)

**摘 要** 回顾了我国地电实验研究的历程、进展及主要特色和成果,展望了未来的发展前景。

## 1 前 言

众所周知,我国利用地电方法(包括地电阻率法和大地电场法)预报地震的探索开始于1966年3月邢台大地震之后。30多年来,地电台站遍及全国各地,它已成为我国预报地震的一种重要手段。为了配合地电阻率法预报地震的基础理论研究,探讨地电前兆特征的物理解释及其与孕震过程的内在联系,逐步建立和完善地电预报地震的机理和前兆模式以及新方法的探索,我们从实际情况出发,开展了岩石电学性质实验研究工作,并获得了一批有价值的实验成果,为地电方法在地震预报中的应用提供了坚实的实验基础。

## 2 地电实验研究的回顾

我国的地电实验研究最早开始于1972年,原兰州地震大队地电实验组的一批老同志20余人先后参加过这项工作,并付出了艰苦的劳动,为后来全面开展地电实验研究奠定了良好的基础。从1978年起,我们紧紧抓住地电预报地震这个中心任务所提出的各种问题,如资料解释、前兆机理、环境干扰、台址条件、观测技术、新方法探索等有计划地、系统地开展实验研究,直到现在为止仍在继续进行。我们采取室内实验与现场实验相结合,小试件与大样本相结合,单手段与综合检测相结合以及多种加载方式等开展了大量实验工作,形成了具有自身特色的研究思路和实验方法,取得了十分丰富的第一手实验资料,并获得了一批有意义的实验结果。值得提出的是,在我国开展实验研究较早的还有北京大学地球物理系和中国科学院地质研究所三室等单位,他们同样做了许多有益的工作,取得了一批较好的实验结果<sup>(1-3)</sup>。但由于实验目的不尽相同,因此在研究思路、实验方法、持续时间等方面都有很大差异,在此不作详细介绍。下面就20多年来我们所做过的一些实验工作进行简要的概括性回顾。

### 2.1 实验室建设

我们开展地电模拟实验研究虽然起步较早,但在开始阶段缺乏经验,也没有固定的仪器设备和专门的实验室,实验工作只是由当时的地电组根据工作需要临时提出任务和抽调人员,利用简单的加载工具(如千斤顶等)对土层加压,并用DDC-2A型电子自动补偿仪测量电阻率变化。1978年筹建了地电模拟实验室,组成了专门的实验研究课题组。从此,地电实

\* 陆阳泉,男,副研究员,长期从事地电学预报地震的实验研究。

验作为地电方法预报地震研究的一个重要组成部分走上了正规化的道路。从那以后,提出了明确的远景规划、目标和任务。在实践中逐步完善了研究思路、实验方法和技术路线,使实验室的建设和发展有了长足进步。在 20 多年的历程中使原来只有几台简陋的实验设备和人工读数测试仪器的实验室发展成为今天拥有多种测试手段和具有综合检测能力的较完备的地电实验室。

## 2.2 室内小样品压力实验研究

(1) 1975 年至 1977 年与北京大学合作开展了岩石单轴压缩实验,研究了饱和水岩石电阻率变化与应力、应变、方向性、裂隙等关系<sup>[4]</sup>。样品尺寸为  $6 \times 6 \times 10 \sim 6 \times 9 \times 15 \text{cm}^3$ 。

(2) 1980 年在湖北宜昌开展了岩石样品不同三轴应力实验,模拟松潘地震前武都台地电阻率前兆特征,研究了电阻率变化与应力积累方式和应变速率的关系<sup>[5]</sup>。样品尺寸为  $7 \times 7 \times 7 \text{cm}^3$ 。

(3) 1986 年在北京开展了岩石剪切电性实验,研究了电阻率变化与岩块摩擦滑动和“断层”的相互关系<sup>[6]</sup>。样品尺寸为  $2 \times 2 \times 6 \sim 2 \times 3 \times 10 \text{cm}^3$ 。

(4) 1987 年至 1989 年分别在兰州和宜昌开展了岩石激发极化法实验,研究了在压应力作用下岩石极化率与应力、应变的关系<sup>[7-9]</sup>。样品尺寸为  $7 \times 7 \times 7 \text{cm}^3$ 。

(5) 1980 年至 1989 年期间实验研究了 149 块不同岩石样品的电阻率与线应变之间的关系,得到了不同岩石电阻率对应变的放大倍率<sup>[10]</sup>。

## 2.3 原地电阻率实验观测研究

(1) 1973 年至 1975 年在湖南某矿区开展了矿山局部应力变化与电阻率关系的实验观测,研究了电阻率变化与“开采应力”和“矿震”的关系<sup>[11]</sup>。

(2) 1983 年至 1984 年为了考察天水地电台的环境干扰,在原地开展了不同极距对比观测实验,研究了该台电阻率变化与地下水位升降、下雨和机井抽水等干扰因素的关系,提出了对该台的改造建议<sup>[12]</sup>。

(3) 1984 年在武都台开展了跨断层观测,研究了电阻率变化与断层活动之间的关系<sup>①</sup>。

(4) 1985 年至 1986 年在兰州安宁人防工程山洞内的花岗岩露头上用赤道偶极法观测原岩电阻率变化,研究了固体潮、地形变、电阻率、地震几者之间的关系<sup>②</sup>。

## 2.4 大尺度岩(土)体现场加载实验

(1) 1972 年至 1978 年期间,原兰州地震大队地电实验组在兰州观象台多次对原地坚固土体进行加载实验,研究了土体电阻率变化与应力大小,力源方位和距离等因素的关系<sup>[13]</sup>。土体尺度为  $160 \times 100 \times 65 \text{cm}^3$ 。

(2) 1974 年至 1975 年在湖南某矿区井下用千斤顶和油压枕对矿壁和原地部分切割岩体进行加压实验,研究了原岩电阻率变化与应力、应变和压力方向的关系<sup>[14]</sup>。岩体尺度为  $35 \times 35 \times 55 \sim 60 \times 60 \times 80 \text{cm}^3$ 。

(3) 1979 年在湖南某矿区结合工程项目用油压枕对三块大型混凝土胶结体进行三轴压缩实验,研究了电阻率、应力、应变、地音、弹性波速度、光应力等各参量的变化特征<sup>[14]</sup>。试体尺度为  $100 \times 100 \times 150 \text{cm}^3$ 。

(4) 1984 年在兰州开展了三层介质模型模拟实验,研究了分层介质的电性特征及不同

① 陆阳泉,武都台跨断层观测实验总结报告,1985。

② 陆阳泉、钱家栋、刘建毅,安宁山洞原岩电阻率实验观测,1987。



测量装置的探测能力<sup>①</sup>。模型尺度为  $200 \times 150 \times 60 \text{cm}^3$ 。

(5)1986年与有关单位合作在四川西昌利用静态破碎技术对两块大型花岗岩标本进行缓慢破裂实验,研究了应力、应变、体电阻率、面电阻率、声发射、弹性波、表面倾斜、温度场等参量的变化<sup>[15]</sup>。标本尺度为  $100 \times 100 \times 100 \text{cm}^3$ 。

(6)1989年结合工程项目与有关单位合作在广东某大型电站探洞内用承压板法和三轴围压对原地花岗岩进行加载实验,研究了电阻率、应力、应变、声发射、地倾斜等参量的变化<sup>[16]</sup>。试体尺度为  $50 \times 50 \times 100 \text{cm}^3$ 。

(7)1992年与俄罗斯科学院合作在莫斯科用5万吨压机对大理岩和灰岩标本进行注水加载实验,研究了直流电阻率、交流电阻率、应力、轴向位移、多点局部应变、声发射、超声波与岩石破裂之间的关系<sup>[17,18]</sup>。样本尺度为  $50 \times 50 \times 100 \text{cm}^3$ 。

(8)1993年与法国宇宙科学院合作,在巴黎近郊地下工程洞室岩柱上开展电阻率实验观测,研究地下构造活动引起岩柱应力变化与电阻率之间的关系,以便和原来已有的其他观测方法相对比。岩柱体积为  $380 \times 260 \times 243 \text{cm}^3$ 。

## 2.5 新方法、新技术试验研究

(1)1976年至1979年为探索地电观测新方法,开展了介质极化率的室内实验研究,为将该法推向实用化观测提供了物理基础。

(2)1995年至1997年开展了固体不极化电极的研制获得成功并已通过了国家地震局鉴定。该电极具有电极差小、稳定性好、噪声低、频带宽、轻便耐用、易于保存、携带和使用方便等优点。在载体选择、配方研究、技术性能等方面都具有创新性。经与国内外同类电极相比达到了国际先进水平,为我国深入开展大地电场观测具有重要意义。

## 3 地电实验研究的主要特色

(1)在原地开展岩(土)体及大尺度标本电性实验是我国地电实验研究的主要特色。原地岩(土)体及大尺度实验实际上是孕震过程的小型物理模拟,它可以在比小标本上大得多的空间范围和较长的时间尺度内研究试件破裂孕育的全过程及各种前兆观测量的时空演化规律,其观测条件更加接近自然状态,是建立地震前兆物理模式及孕震理论的重要途径。目前,这类实验已经成为当今岩石力学和前兆实验研究的前沿课题和发展方向,受到了世界各国地震科学家的关注和重视。

(2)充分利用矿山开采和工程项目,开展已知力源条件下的现场实验,采取室内实验与现场实验相结合是地电实验研究的重要方法。这类实验的优点在于可以充分利用工程项目的已有条件和设备,在与野外地电台站接近或相似的自然环境中,在一个较大的空间范围内进行较长时间的地电实验研究,花钱少、收效快。同时,从现场采集岩石标本进行室内实验,对现场实验结果有很好的验证和补充作用,可以收到较为理想的实验效果。

(3)采用多种实验方法和综合参量检测是地电实验研究的主要内容。在加载方面采用多种组合形式,以便能更好地模拟自然状态下各种复杂的应力条件。如天然力源、单轴压缩、平面荷载、真三轴围压、剪切与摩擦滑动,内部膨胀力源等多种形式。在电性测量方面有二极法,对称四极法,偶极法和激发极化法等。在观测数据的采集方面有应力、应变、电阻率、声发

<sup>①</sup> 陆阳泉,分层介质电性特征模拟实验研究总结报告,1985。