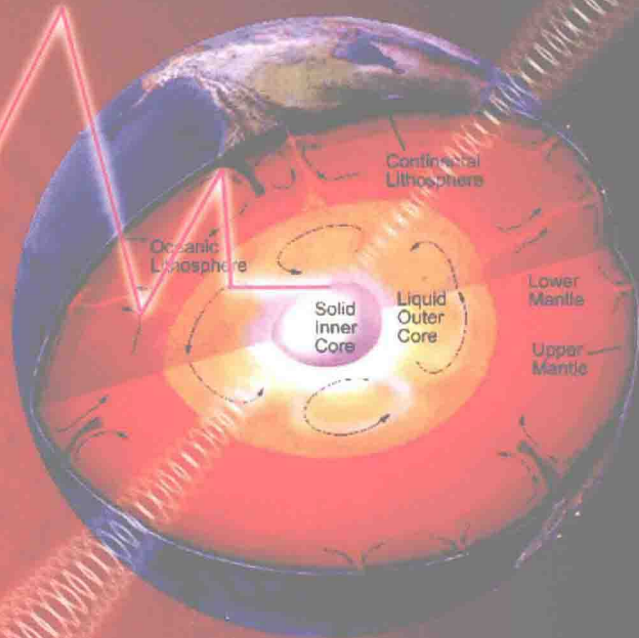




“十五”中国地震预报科技攻关成果系列丛书

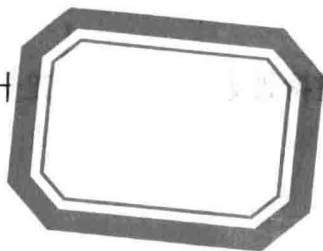
强地震 短期前兆异常的 物理解释

中国地震局监测预报司



地震出版社

“十



攻关成果系列丛书

强地震短期前兆异常的物理解释

中国地震局监测预报司

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

强地震短期前兆异常的物理解释/中国地震局监测预报司. —北京:地震出版社, 2004.10
ISBN 7-5028-2563-0

I. 强… II. 中… III. 地震前兆—研究 IV. P315.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 094918 号

地震版 XT200400216

强地震短期前兆异常的物理解释

中国地震局监测预报司

责任编辑:姚家榴

责任校对:张晓梅

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

版(印)次:2004年10月第一版 2004年10月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:391千字

印张:15.25

印数:001~500

书号:ISBN 7-5028-2563-0/P·1205 (3189)

定价:40.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

丛书编委会

主 任：岳明生

副主任：阴朝民 高荣胜

委 员：张晓东 张天中 张永仙 苏有锦 王海涛
蒋海昆 尹京元 刘耀炜 车 时 刘桂萍
李永林 黄蔚北

本书编委会

主 编：刘耀炜 牛安福 卢 军

编 委：郝 平 张元生 邓志辉 康春丽 刘 放

序 言

地震预报，尤其短时间尺度的预报作为当代自然科学领域里一个难度很大而富有魅力的前沿课题吸引着一代又一代的地震科技工作者为之奋斗不息。其魅力不仅在于地震孕育、发生的许多奥秘有待我们去揭示，更重要的是在于成功的预报可以使许多国人免遭罹难。自从 1966 年我国正式开展地震预报研究与实践以来，我们既有过不少预报成功的欣慰，也经历了许多遭受挫折的悲痛与沉思。但成功与挫折都给我们以有益的启示，说明地震预报决不是“占星术士”的卜算。在现阶段对某些大地震在震前作出一定程度、乃至较成功的科学预报是有可能的，但要对多数大震作出准确的预报，还需要我们长期坚持不懈、坚忍不拔的努力。在人类历史的长河中，人们对任何复杂事物的认识都有一个从不怎么全面、不怎么深入、不怎么准确到逐渐全面些、深入些的过程。毫无疑问，对认识地震孕育发生过程来说，也是如此。只要认真查阅一下近几个五年计划地震预报攻关研究的成果，必然会得出这样的结论，只要认真研读一下国家“十五”科技攻关项目“强地震短期预测及救灾技术研究”成果，就可以看出，我们的认识又有了新的提升。

“强地震短期预测及救灾技术研究”坚持“研、用”结合的原则，既及时地把研究所得到的新认识应用于地震预报实践，又把预报实践中遇到的新问题、发现的新现象作为攻关研究的重要内容；坚持把普遍性寓于特殊性之中的思想方法，在华北、西南、西北、东南等地区强地震短期前兆特征研究的基础上进行归纳和综合分析，既重视强地震短期前兆的共性表现，又注意不同地质构造之间的差异；坚持在继承基础上的创新，既重视已有研究成果预报经验的应用和常规方法的完善，又立足于创新，通过数值模拟、岩石力学实验和数字化观测资料的应用等，加强强震孕育物理过程和前兆机理及相应的预报新理论、新方法的探索。

从而取得了一批既在科学认识上富有新意，又有重要实用价值的研究成果。所编印、出版的这套丛书正是“十五”攻关的这些阶段性成果的集中体现。它既是广大地震科技工作者集体智慧的结晶，又将为广大地震科技工作者深入的地震预报研究与实践提供新的借鉴与思考。

这套丛书为“十五”期间地震预报攻关研究阶段性成果的总结，既为我们提供了许多新的认识，也为我们留下和提出许多新的问题。这意味着“十五”预报攻关研究的总结是新的深入研究的开始。面对地震灾害的威胁，广大同行一定会继续以严谨的科学态度，扎扎实实的工作作风，坚忍不拔的精神，立志地震预报理论、技术、方法的创新，在未来地震预报实践中谱写新的篇章，铸造成功预报的新的辉煌，更好地服务于国家、造福于人民。

陈章立

2004年9月1日

前 言

我国多年来已积累了丰富的地震和前兆观测资料，并从中总结出一些可能的短期前兆现象，随着观测技术的不断发展，预期将会发现更多有意义的现象。然而，由于地震孕育过程受到区域应力环境、断裂构造分布、介质条件特征、流体作用等诸多因素的影响，短期前兆现象比较复杂，目前的观测手段尚难获得地震孕育阶段地球内部构造和介质状态变化的完整信息，给地震分析预报带来了困难。因此，针对野外观测和实验结果提出的有代表性的前兆现象，总结和分析前兆的短期异常典型特征，应用特征统计和数学模型相结合的方法，对强震孕育过程中的短期前兆异常特征进行深入分析和合理的物理解释，对帮助理解野外观测现象，推进地震短期预报物理基础的研究十分必要。

为推进上述研究领域的工作，在“十五”国家科技攻关计划项目“强地震短期预测的物理基础研究”中，设立以“强震短期前兆异常特征的物理分析和解释”为专题的重点攻关项目（2001BA601B-02），由刘耀炜、牛安福、卢军负责组织实施。专题下设8个子专题，分别由卢军、牛安福、刘耀炜、郝平、邓志辉、康春丽、张元生、刘放等同志负责。参加子专题研究工作的都是在本学科领域具有丰富经验和研究能力的中青年科技人员，因此，在研究思路和方法方面提出了一些值得关注的观点，使本项研究工作取得了一些新的进展。

本书在专题研究报告的基础上，经过重新归纳、组合编辑，希望能较全面地把主要研究结果展现给读者。本书的研究内容包括：通过深入研究各类短期前兆异常典型特征，结合实际观测区电阻率、形变、流体物理前兆场的特点，对其短期特征进行物理分析和解释；以断层相互作用等短期前兆物理力学模型，进一步探讨前兆异常短期变化的物理基础；同时，研究了卫星热红外资料前兆异常演化的时间和空间特征，提出了地震短期异常识别和地震预测方法。以上研究的主要成果归纳为以下几个方面。

(1) 为了消除或识别由地下水波动以及降雨量变化引起的电阻率变化，探讨了多极距观测在广义逆最小二乘意义下的反演方法；计算了膨胀-扩散模型中由动电效应产生的地电场变化的异常特征；引入地震学中描述介质弹性各向异性的

EDA 模式, 将应力场变化、裂隙各向异性演化和地电模型三者有机结合起来, 探讨了方位各向异性介质的视电阻率变化机理; 利用三维边界积分方程方法研究了电极附近介质电阻率上升或下降对视电阻率的影响, 取得了一些有意义的结果。

(2) 利用我国连续变形观测 (倾斜、应变、跨断层水准基线和 GPS 基准点等观测) 结果, 研究了持续时间在 15 天至半年左右的突变性变形前兆的特征及与地震之间的关系; 借助点源、线源和位错源引起的形变场理论, 研究了突变性变形前兆可能依赖于断层两侧持续增加的应变积累过程; 借助突变性变形特征与地震之间的统计关系研究, 提出了突变性异常及前兆的识别方法及地震短期预测方法, 并进行了效能检验。

(3) 对全国和不同区域地下流体前兆资料进行了全面分析, 剖析了流体异常的典型特征; 研究了华北地区流体短期前兆特征; 系统总结了复合型 (转折型) 和单一型两类流体短期前兆的“源兆”与“场兆”的特征; 用热物质上涌扰动模型探讨了流体前兆产生机理; 进行了岩石圈热结构特征和岩石圈热应力三维数值模拟, 为深入研究流体作用打下了基础。

(4) 建立具有摩擦状态-速率依从关系的细胞自动机模型, 研究了应力阶跃载荷与地震发生速率的关系。应用库仑破裂应力, 研究了 5 次大地震强余震的触发, 讨论了震中位置、震源机制解的不确定性以及主震破裂尺度、位错量对库仑破裂应力变化计算结果的影响; 讨论了在区域应力场作用下, 昆仑山口西 8.1 级大地震后优势破裂面和后续强余震震源机制解的关系。

(5) 系统收集了地震卫星红外图像数据、震例参数和发震断裂空间属性数据, 研究了近期中国强地震的卫星热红外异常演化过程; 通过分析涡度场和时差场, 提出了辐射强度时空变化幅度和速度对比法以及地表温度场的综合方法, 分析了热红外异常演化特征, 总结了异常识别的指标; 对研究区域内全部网格点的亮温数据进行了定量处理以及逐区异常频率扫描, 并对 1998 年以来中国西部 6 次强震的热红外异常时空分布特征进行了震例研究; 提出了通过活动断裂带内外温度关系分析, 提取地震前卫星热红外异常信息的方法; 提出了应用热红外资料提取真实地表温度场的技术方法, 在一定程度上消除地形、地物、植被等静态因素的影响, 以及大气云层的动态干扰。

本书注重理论与实际的结合, 从观测信息中, 提取孕震过程中短期前兆的典型特征, 应用野外实验和理论研究的结果, 对前兆观测所反映的地震孕育过程短期阶段的特征做出了一定的物理解释, 从而提高短期前兆资料应用的可靠性, 使得对地震前兆物理机理的认识具有实践指导意义。本项研究的成果在有关省

(区)的异常判定和震情分析中获得了广泛应用,取得了一些较好的强震短期预测结果,得到当地政府和地震局的表彰和奖励。

通过以上研究工作,对存在的问题也取得了一些认识:①地震前兆机理解释是需要有可信度高且足够多的前兆观测资料和基础资料,同时也需要成熟可行的技术方法。要深入进行地震前兆机理的研究工作,还需要做大量有针对性的野外试验研究,逐步搞清楚这些前兆产生的动力环境、介质条件和影响因素等。②采用半无限弹性空间的静态库仑破裂应力变化研究强余震触发,得到了比较好的结果,如果能结合动应力和粘弹性模型,可能会解释更多的地震触发现象。③热红外异常的时间和地点预测指标具有较高的信度,几种异常判定的方法也有较好的应用价值,但震例资料还非常欠缺,异常判定指标的重现性问题还需进一步验证。需要加强地表温度与地下浅部温度关系的研究,开展热红外资料与其它观测资料的对比研究,以探讨地震前热红外异常的机理问题。

本书各章的主要作者均在每章第一页的页下标注,全书的统稿和排版、编辑由刘耀炜负责完成。参加本项研究工作的还有:傅征祥、刘桂萍、李丽、田勤俭、高安泰、平建军、刘杰、施锦、阮爱国、刘小凤、毛先进、关华平、张慧、曹玲玲、贾民育、荣代路、潘树新、陆斌、张晶、沈文荣、周昕、吉平、展迎春、张小美、李纲、郭晓等同志,他们精诚合作、刻苦攻关,使得本项研究达到预期目标,取得良好成绩。本研究工作始终得到中国地震局、甘肃省地震局、中国地震局分析预报中心、中国地震局地质研究所、河北省地震局等单位领导和管理部门的大力支持,在此表示衷心感谢。

强震前兆异常机理的解释工作是一项科学难度较大的研究课题,本书只对其中的某些问题依据现有的观测资料进行了有限的探讨,因此,书中观点和结论可能存在很多不完善的方面,甚至错误,真诚欢迎广大读者批评指正,共同为地震科学的发展和完善做出贡献。

刘耀炜 牛安福 卢军

二〇〇四年四月

目 录

第一章 地电短期前兆特征及机理解释	(1)
1.1 地电阻率前兆特征及异常显著性分析	(1)
1.1.1 郫县地电阻率的反常年变化	(1)
1.1.2 唐山地震地电阻率变化的分析	(3)
1.2 地电阻率前兆机理及理论分析	(7)
1.2.1 地电场变化的动电效应机理及其应用	(7)
1.2.2 地电阻率各向异性的研究	(11)
1.3 浅层介质电性特征与地电阻率关系的数值模拟研究	(15)
1.3.1 问题的提出	(15)
1.3.2 表层电阻率变化对地电阻率观测的影响	(16)
1.3.3 电极附近电阻率变化对地电阻率观测的影响	(20)
参考文献	(29)
第二章 地形变短期前兆特征及机理解释	(32)
2.1 形变前兆现象及其特征分析	(32)
2.1.1 地倾斜的突变性变化	(32)
2.1.2 跨断层水准、基线的突变性异常	(34)
2.1.3 地应变和地应力的短期异常变化	(35)
2.2 形变突变性前兆的物理特征研究	(38)
2.2.1 前兆特征与地震断层类型	(38)
2.2.2 前兆性地壳变形突变特征与地震三要素之间的关系	(38)
2.2.3 前兆性地壳变形的识别方法	(42)
2.3 前兆性地壳变形特征的机理解释	(49)
2.3.1 弹性回跳理论	(49)
2.3.2 各种源引起的形变场	(50)
2.3.3 统计关系的解释	(52)
2.3.4 突变性形变过程及分布特征	(52)
2.3.5 地震预测中的应用检验	(53)
2.3.6 突变性变形前兆机理的实例分析	(54)
参考文献	(56)

第三章 地下流体短期前兆特征及机理解释	(59)
3.1 流体短期前兆异常的典型特征分析	(59)
3.1.1 短期前兆异常的典型特征	(59)
3.1.2 短期前兆异常空间演化动态特征分析	(63)
3.1.3 短期异常空间演化统计特征分析	(65)
3.1.4 结论	(67)
3.2 流体前兆机理及理论分析	(67)
3.2.1 华北地区流体短期前兆特征及其机理分析	(67)
3.2.2 前兆成因机理的分类研究	(87)
3.3 流体短期前兆的机理解释	(92)
3.3.1 深部热流体通道的形成和热物质上涌机理	(92)
3.3.2 热流体上涌时的岩石圈热结构特征研究	(102)
3.3.3 热扰动引起的热应力三维数值模拟研究	(118)
参考文献	(129)
第四章 短期地震活动性图像及强余震触发机理	(134)
4.1 短期地震活动性图像机理	(134)
4.1.1 细胞自动机模型	(134)
4.1.2 摩擦状态—速率依从的区域地震触发模型研究	(137)
4.2 强余震触发机理	(140)
4.2.1 基本原理	(141)
4.2.2 典型强震的强余震触发研究	(141)
4.2.3 昆仑山口西地震优势破裂面和余震触发	(167)
4.2.4 花石峡地震和玛尼地震对昆仑山口西地震触发	(173)
4.3 库仑破裂应力变化图像研究	(177)
4.3.1 昆仑山口西、玛尼和花石峡等地震库仑破裂应力变化图像研究	(177)
4.3.2 川滇块体大地震库仑破裂应力变化图像研究	(179)
4.4 结论	(181)
参考文献	(182)
第五章 热红外观测技术与信息提取方法研究	(186)
5.1 卫星遥感技术及其发展	(186)
5.1.1 遥感技术	(186)
5.1.2 卫星遥感技术的发展	(188)
5.2 物体热辐射及其辐射能的传输原理	(189)

第一章 地电短期前兆特征及机理解释*

1.1 地电阻率前兆特征及异常显著性分析

识别与消除干扰是获取确凿前兆证据的关键。在地震监测中, 尽管视电阻率观测受到这样或那样的干扰, 但最主要的和常见的干扰还是地下水的升降以及降雨量的影响, 这就是我国近半数以上的地电台站观测到季节性变化的可能原因。譬如, 对于唐山 M7.8 这样的强震, 在震前其周围仅观测到 3%~5% 的电阻率下降变化; 而目前多数台观测到的年变化也在 5% 左右, 有时甚至高达 25%(嘉峪关台)。因此, 对所测结果进行地下水以及降雨量干扰的排除及异常显著性分析, 尤显重要。

1.1.1 郫县地电阻率的反常年变化

1. 数学物理模式

众所周知, 在室内或现场小极距研究岩石电阻率变化与应变关系时所反映的是岩石的真电阻率变化, 实际在台站上所观测到的视电阻率变化是地下各种岩石介质真电阻率变化的综合反映。

设大地是由 n 种分区均匀的介质组成, 其真电阻率为 $\rho_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 对于所给定的装置、极距和几何关系, 视电阻率 ρ_a 只是真电阻率 ρ_i 的函数, 下列关系成立:

$$\frac{\Delta \rho_a}{\rho_a} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} \quad (1-1)$$

其中灵敏度系数 B_i 为:

$$B_i = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \quad (1-2)$$

式(1-1)表明, 视电阻率的相对变化可以简单地由每种介质真电阻率相对变化的加权 B_i 求和表示。

实际上, 地球物理学中这种位场的级数求和思想较早由 Seigel(1959)在研究激电法时导出。根据 Seigel 理论, 灵敏度系数必须满足下列关系:

$$\sum_{i=1}^n B_i = 1 \quad (1-3)$$

灵敏度系数是个无量纲量, 并且是电阻率分布与几何关系以及观测装置、极距大小和测点位置的函数。

目前, 国内外学者使用这种级数求和及其变形的灵敏度关系来探索解决一些地震地电分析方法的实际问题。Fitterman 和 Madden(1977)用来估算由于日、年温度波动及断层带中观测

* 本章由卢军、阮爱国和毛先进执笔完成。

装置极距的大小对电阻率观测所产生的影响。钱家栋等(1985)、赵和云(1987)用在观测数据分析与地电台址条件的定量化研究。薛顺章等(1988, 1994)用在地电阻率年变消除及多极距观测新方法的研究中。

上述方程是重要的。首先,在大多数情况下,方程(1-1)对任意电阻率模型是有效的,因而当我们考虑地电阻率是时间的函数时,可用来解决地震预报电阻率监测中的一些问题;其次,每种介质的灵敏度系数可分别由方程(1-2)求出,一旦系数已知,视电阻率的相对变化关系就可以被完整地描述了;实际上灵敏度(Fitterman and Madden, 1977)反映了地下每一种介质电阻率相对变化给地面台站观测到的视电阻率相对变化所作的贡献大小,因此,对于研究特定问题,灵敏度系数的大小会影响我们对电阻率方法中装置类型、极距大小的选择,以及对地电资料进行干扰的排除或定量与半定量的解释。

2. 郫县台地电阻率的反常年变化

覆盖层电阻率的变化有时明显地影响着观测结果。一般情况下,在雨季(或夏季)低阻覆盖层的存在将使视电阻率的观测值减小,而在旱季(或冬季)高阻覆盖层则使其观测值增加。但对具有导电基底的水平地层而言,当覆盖层的电阻率发生变化时,较大极距的视电阻率值将出现与上述情况相反的变化,即在雨季低阻覆盖层的作用不是使视电阻率值减小而是增加,高阻覆盖层的作用不是使视电阻值增加而是减小。人们把这种与一般认识相反的现象称为似非而是或佯谬。

为了阐明灵敏度分析的重要性,我们选择了电阻率变化具有负系数的一个实例。在中国,多数台站已经观测到电阻率的季节性变化,其值为夏(雨季)低冬(旱季)高;但相反的情形却在成都(郫县)台被观测到(钱复业等, 1987)。

郫县地电台位于四川省成都市区西北 38 km 的郫县境内,始测于 1974 年 11 月。该台处于龙门山构造带东侧的成都新生代凹陷盆地内,西离安县—灌县断裂仅 20 余 km,东距龙泉山断裂约 60 余公里。该台在 $N48.5^{\circ}W$ 和 $N57.5^{\circ}E$ 两个方向使用对称四极装置,极距值(AB/MN)各为 846m/270m 和 736m/226m,其视电阻率值与多数地电台夏低冬高观测结果有所不同,均出现夏(7~9 月)高冬(1~3 月)低现象。电测深曲线反演结果表明:成都台址地下电性结构属于 KQ 型。该台装置对地层电性变化的灵敏度分析表明:当极距(AB/2)大于 50m 时,所测视电阻率值与地表覆盖层电性变化是相反的或负相关的;而当极距(AB/2)小于 50m 时,它们是相同的或正相关的。因此,对于郫台县而言,由于两道测量极距均大于 50m,当地表覆盖层电性变化时将出现似非而是或佯谬现象,即在水稻种植季节(5~9 月)或雨季(7~9 月),地表覆盖层电阻率是减小的,所测视电阻率值却是上升的;在旱季(1~3 月)则正相反。

图 1-1a 展示的是在 1974 年 11 月至 1981 年 3 月期间,郫县台观测到的视电阻率月均值图。注意到电阻率有一 8% 的变化,并且在雨季(每年 7、8 月)电阻率却是增加的。

电测深数据的解释表明了郫县台地下介质是由 KQ 型的四层介质构成(图 1-1b),并由电测深解释结果计算出权系数分布(图 1-1c)。表 1-1 说明了对于郫县台 368m 的电极距,视电阻率变化是与顶部两层介质负相关的(-0.031 和 -0.003),尤其对 0~2m 的表层介质更敏感些。事实上,负系数是与似非而是的电阻率特性有关,而这种特性早已在地球物理文献中指出(Satpathy, 1974)。当其它层的电阻率变化可以忽略不计时,夏季相对于冬季所观测到的 8% 增加可解释为表层电阻率从 $200\Omega m$ 降到 $20\Omega m$,由于郫县台监测现场夏种水稻,冬种小麦,因而表层电阻率的变化范围大概是合理的。

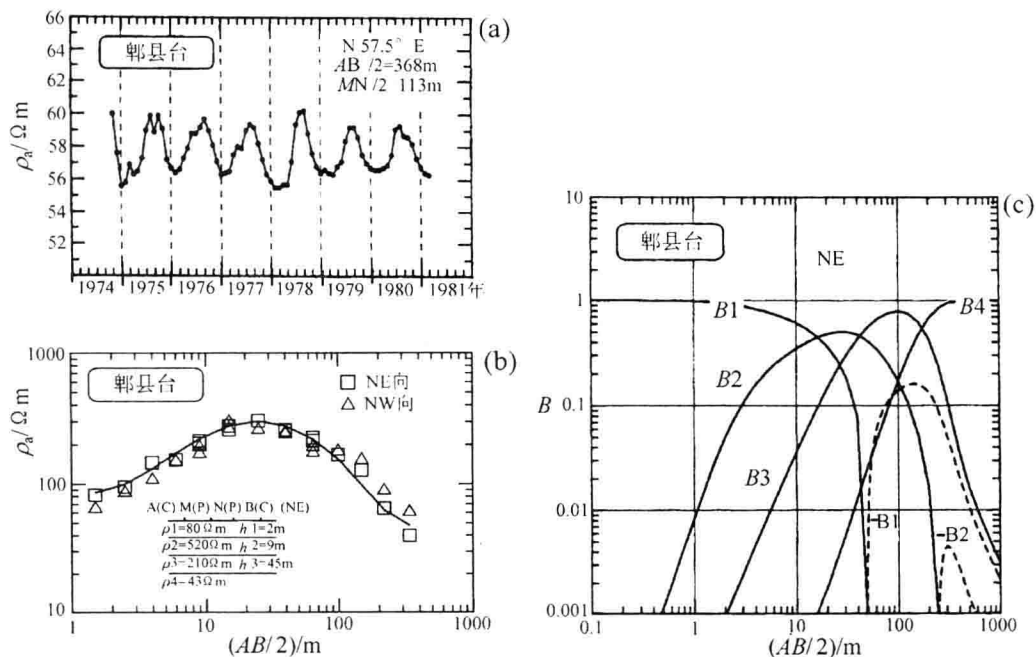


图 1-1 (a) 郫县台记录到的视电阻率月均值曲线; (b) 郫县台电测深数据解释;
三角形和正方形代表数据, 在 NE 方向的电测深解释结果为实线,
有关参数显示在层状模型中; (c) 郫县台 KQ 型地电断面的权系数 B 分布;
层状参数与 (b) 相同, 虚线指示 $-B$ 值

表 1-1 郫县台 ($AB/2=368m$) 对于图 1-1b 中模型的电阻率变化 (%) 分析

层数 (i)	B_i	各层的贡献			
		雨 季		旱 季	
		$\Delta\rho_i/\rho_i$	$B_i \cdot \Delta\rho_i/\rho_i$	$\Delta\rho_i/\rho_i$	$B_i \cdot \Delta\rho_i/\rho_i$
(1)	-0.031	-75	+2.250	+150	-4.500
(2)	-0.003	0	+0.000	0	-0.000
(3)	+0.060	0	+0.000	0	+0.000
(4)	+0.974	0	+0.000	0	+0.000
$\sum B_i = +1.000$		$\Delta\rho_a/\rho_a = +2.250\%$		$\Delta\rho_a/\rho_a = -4.500\%$	

1.1.2 唐山地震地电阻率变化的分析

唐山地震震中 180 km 的半径范围内有 14 个地电台站, 其中 9 个在震前约 2~3 年观测到电阻率下降。下降区是如此广泛, 以至于在京津唐地区可勾绘出平均下降的等值线。另外, 在同一地区同期记录到 17 口深井的水位下降。

我们想了解地下水位下降是如何影响电阻率测量的。无论如何, 研究已经表明在京津唐地区多数地电台站具有高阻基底的 A 型、H 型和 HA 型地电结构, 如前所述, 这种电阻率

序列的地电结构对任何大小的电极距，其权系数都是正值。因此，这一地区地下水位下降应该导致电阻率增加，而不是所观测到的减小(Lu et al., 1999)。

为说明在实际电监测中电阻率变化与水位变化的关系，这里给出了唐山震前视电阻率变化的两个实例。

1. 唐山台

唐山台位于河北省唐山市。在唐山地震前，观测到一个视电阻率的下降趋势（见图 1-2a），而同期在唐山也记录到地下水位的下降(Wang et al., 1979)(见图 1-2b)。

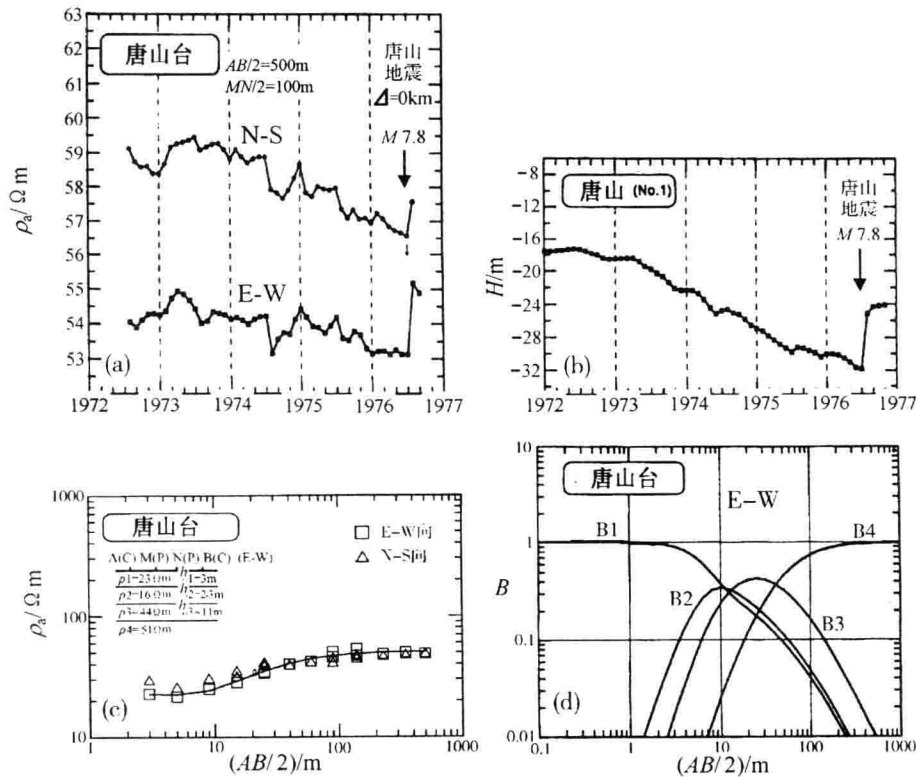


图 1-2 (a) 唐山台记录到的视电阻率月均值曲线， Δ 表示唐山台的震中距；(b) 唐山深井水位变化；(c) 唐山台电测深数据解释，三角形和正方形代表数据，在E—W方向的电测深解释结果为实线，有关参数显示在层状模型中；(d) 唐山台 HA 型地电断面的权系数 B 分布，层状参数与(c)相同

电测深数据的解释表明了唐山台地下介质是由 HA 型的四层介质构成(图 1-2c)，并由电测深解释结果计算出 E—W 方向的权系数分布(图 1-2d)。图 1-2d 表明所有系数都是正的，数值范围从 0 到+1.0。进一步分析，假设各层电阻率变化是+2%和-2%，表 1-2 给出了计算结果。从表 1-2 我们知道，对于唐山台 500m 的电极距，上面三层对总的视电阻率变化的贡献是非常小的，以至于可忽略，因而在唐山震前观测到的 2%~4%的视电阻率下降仅能解释为第四层电阻率的下降，深度在 16.3m 以下，电阻率从 51 $\Omega \cdot m$ 降至 50~49 $\Omega \cdot m$ 。据方程(1-1)，

唐山台的视电阻率相对变化可近似地表达为:

$$\left. \frac{\Delta \rho_a}{\rho_a} \right|_{\text{唐山台}} = \sum_{i=1}^4 B_i \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} \approx 0.983 \frac{\Delta \rho_4}{\rho_4} \quad (1-4)$$

显然，地下水位下降引起的第四层电阻率增大应该导致视电阻率的增大，而不是所观测到的下降。假如我们从视电阻率中消除地下水的影响，则校正后的数值应该比观测到的更低，或者说异常幅度更大。因此，唐山震前约 2~3 年观测到 2%~4% 的视电阻率下降不可能归因于地下水位下降。

表 1-2 唐山台 (AB/2=500m) 对于图 1-3c 中模型的电阻率变化 (%) 分析

层数 (i)	B_i	各层的贡献			
		电阻率增加		电阻率减小	
		$\Delta \rho_i / \rho_i$	$B_i \cdot \Delta \rho_i / \rho_i$	$\Delta \rho_i / \rho_i$	$B_i \cdot \Delta \rho_i / \rho_i$
(1)	+0.003	+2	+0.006	-2	-0.006
(2)	+0.003	+2	+0.006	-2	-0.006
(3)	+0.011	+2	+0.022	-2	-0.022
(4)	+0.983	+2	+1.966	-2	-1.966
$\sum B_i = +1.000$		$\Delta \rho_a / \rho_a = +2.000\%$		$\Delta \rho_a / \rho_a = -2.000\%$	

2. 宝坻台

图 1-3a 展示了宝坻台连续 20 年的电阻率记录，电阻率在唐山震前约 3 年开始持续下降，当其到达较低值时主震发生。唐山地震是该台周围 250 km 范围内的惟一强震，因此，记录到的电阻率下降显然与唐山地震有关。

电测深数据的解释表明了宝坻台是由 HA 型的四层介质构成(图 1-3b)，并由电测深解释结果计算出 E—W 方向的权系数分布(图 1-3c)。图 1-3c 表明所有系数都是正的，数值范围从 0 到+1.0。让我们考虑两种情形，假设各层电阻率变化是+3%和-3%，表 1-3 给出了计算结果。从表 1-3 我们知道，对于宝坻台 500m 的电极距，视电阻率变化对深度从 4~284m 的第三层电性变化最敏感。据方程(1-1)，宝坻台的视电阻率相对变化可近似地表达为：

$$\left. \frac{\Delta \rho_a}{\rho_a} \right|_{\text{宝坻台}} = \sum_{i=1}^4 B_i \frac{\Delta \rho_i}{\rho_i} \approx 0.849 \frac{\Delta \rho_3}{\rho_3} \quad (1-5)$$

显然，真电阻率的增加或减小，将造成所观测的视电阻率的增加或减小。

综前所述，视电阻率变化 $\Delta \rho_a / \rho_a$ 可由权系数 B_i 与各层真电阻率变化 $\Delta \rho_i / \rho_i$ 的乘积的系列求和来获得。对于水平多层介质，假如已知各层电阻率和其厚度，则权系数可用线性滤波方法来计算。当地层中电阻率序列仅包含有 A 型和 H 型时，对于使用施伦贝尔热监测装置，则不可能测到负相关的电阻率变化。

灵敏度分析已表明：在京津唐地区，唐山地震震前约 2~3 年观测到 2%~4% 的视电阻率

下降不可能是由地下水位下降引起的，这是因为具有高阻基底的 A、H 和 HA 型电阻率结构的所有灵敏度系数均为正值。

为了地震预测，在计划电监测前，或企图定量解释电阻率变化与地壳应力或应变变化的关系时，应该知道层状介质的电阻率序列，因为它是特别重要的。

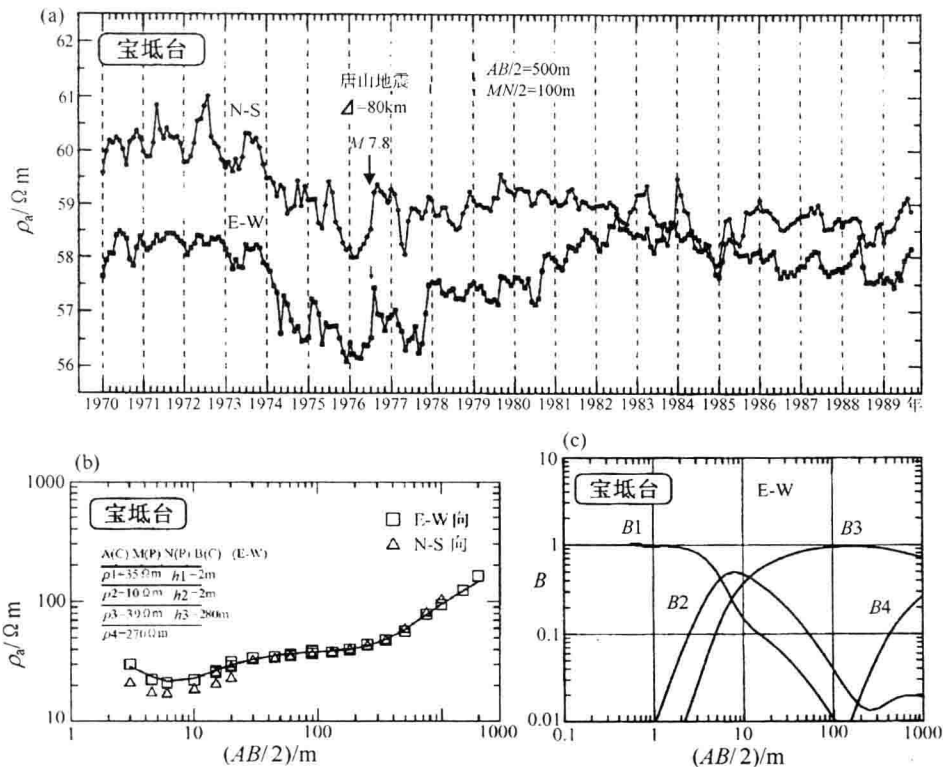


图 1-3 (a) 宝坻台记录到的视电阻率月均值曲线， Δ 表示宝坻台的震中距；(b) 宝坻台电测深数据解释，三角形和正方形代表数据，在 E—W 方向的电测深解释结果为实线，有关参数显示在层状模型中；(c) 宝坻台 HA 型地电断面的权系数 B 分布，层状参数与(b)相同

表 1-3 宝坻台 ($AB/2=500m$) 对于图 1-4b 中模型的电阻率变化 (%) 分析					
层数 (i)	B_i	各层的贡献			
		电阻率增加		电阻率减小	
		$\Delta\rho_i/\rho_i$	$B_i \cdot \Delta\rho_i/\rho_i$	$\Delta\rho_i/\rho_i$	$B_i \cdot \Delta\rho_i/\rho_i$
(1)	+0.005	+3	+0.015	-3	-0.015
(2)	+0.018	+3	+0.054	-3	-0.054
(3)	+0.849	+3	+2.547	-3	-2.547
(4)	+0.128	+3	+0.384	-3	-0.384
$\sum B_i = +1.000$		$\Delta\rho_a/\rho_a = +3.000\%$		$\Delta\rho_a/\rho_a = -3.000\%$	