

地电阻率临震突变与活断层、发震应力场*

杜学彬 赵和云 陈宝智

(中国兰州 730000 国家地震局兰州地震研究所)

摘要

讨论了中国大陆 31 个地震、100 个地电台(次)地电阻率临震变化与活断层、发震应力场之间的关系, 得到如下结论:(1)位于深大活断裂、强烈活断层附近、并且在发震应力方向上的地电台, 临震前一般能观测到地电阻率临震突变。(2)分布在震中与地电台之间的深大活断裂、强烈活断层, 当其走向与发震应力方向交角比较小时, 对地电台观测 ρ_s 突变有“阻隔”作用; 活断层走向与发震应力方向平行, “阻隔”作用最强; 正交时, “阻隔”作用最弱, 这种规律性在我国大陆中强以上地震前有普遍性。

关键词 地电阻率临震突变; 活断层; 发震应力

1. 引言

地电阻率临震突变(以下简称 ρ_s 临震突变)是指震前几小时至一个月左右, ρ_s 均值曲线上相对变幅大于 1.0% 或扣除正常变化和中、短期异常的差值曲线上变化量大于 2 倍均方根误差($2\sigma_{s-1}$)的连续、突发性变化, 并且震后恢复或有明显恢复迹象。一般无需复杂的数学处理就可识别。

ρ_s 临震突变的空间分布极为复杂, 尽管对不少地震都观测到明显或较明显的 ρ_s 临震突变, 但能在震前认识, 用于地震预报的却凤毛麟角。 ρ_s 临震突变的空间复杂性已成为地震地电学科的一大科学难题。笔者曾研究过 1976 年唐山 7.8 级等地震临震前 ρ_s 变化, 提出了认识其复杂性的地电阻率临震突变活断层-应力场效应(杜学彬, 1992), 初步揭示了 ρ_s 临震突变与活断层、发震应力场之间的关系。此后我国大陆又相继发生了小金 6.6 (1989)、大同 6.1(1989)、景泰 6.2(1990)等一系列中强以上地震, 同时又收集到澜沧-耿马 7.6, 7.2(1988), 庐霍 7.9(1973)、道孚 6.9(1981)等地震的有关资料, 对已初步发现的 ρ_s 临震突变与活断层、发震应力场之间的关系作了进一步研究。结果表明: ρ_s 临震突变确实受控于震源区内、外的深大活断裂、强烈活断层的展布特征和发震应力方向。

* 地震科学联合基金会资助项目。

1991 年 5 月 30 日收到本文初稿, 1992 年 7 月 6 日决定采用。

2. 地电阻率临震突变与活断层展布特征、发震应力之间的关系

本文共研究了31个地震前100个地电台(次)的观测结果,得到 ρ 临震突变与震源区内、外活断层展布特征和发震应力场之间有如下关系:(1)位于深大活断裂、强烈活断层附近(20—30 km内)、而且在发震应力方向上的地电台,震前一般能观测到地电阻率临震突变。(2)地电台与震中之间分布的深大活动性断裂、强裂活断层,当其走向与发震应力方向接近时,对地电台观测地电阻率临震突变有“阻隔”作用,活断层走向与发震应力方向平行,“阻隔”作用最强,正交“阻隔”作用最弱。

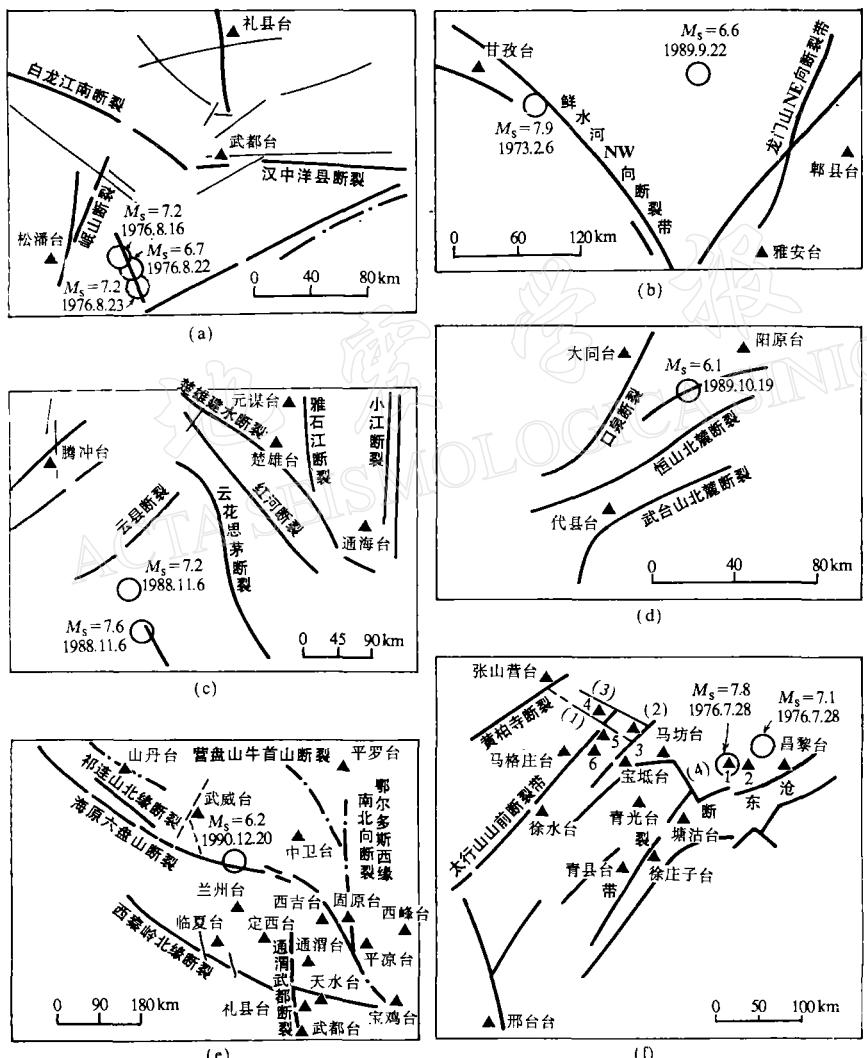


图1 构造分布与地电台站位置图

1. 唐山台, 2. 马家沟台, 3. 西集台, 4. 小汤山台, 5. 八里桥台, 6. 忠兴庄; (1) 南川
逆河断裂, (2) 夏垫永乐店断裂, (3) 二十里长山断裂, (4) 鲜水河断裂

需要指出,发震应力是指导致震源断层错动的应力。对不同地震,可能是压应力,或是张应力,由震源机制解和野外考察作出判断。当地电台—震中的连线与发震应力方向之间的夹角 $\leqslant 30^\circ$ 左右时,本文称地电台位于发震应力方向上。

为了阐明上述规律,以下讨论几个主要震例加以说明:

(1) 1976年松潘地震 这次地震由8月16日7.2级、22日6.7级和23日7.2级3次强震组成,发震构造是NNW向虎牙断裂,3次地震均是NE或近EW向压应力作用下发生的(四川省地震局,1979)。震源机制解主压应力方向分别为 63° 、 110° 和 95° 。震中附近有3个地电台:松潘、武都、礼县台。松潘台与震中之间有NNE向岷江活断裂;武都、礼县台与震中之间有NNW向白龙江南侧活断裂(图1a)。8月16日7.2级地震主压应力方向与白龙江南侧断裂接近正交,与岷江断裂交角较小,为 36° 。松潘台距震中仅45 km,没有观测到 ρ_s 临震突变,但武都台和礼县台虽然震中距较大,却观测到了明显的临震突变(图2)。22日和23日的两次强震主压应力方向与白龙江南侧断裂交角仅为 16° 和 30° ,而与岷江断裂交角为 90° 和 75° 。实际观测结果是:对后两次地震,松潘台有临震突变,而武都台和礼县台则无反映(图2b)。这一事实表明,震中与台站之间的活断层走向与发震应力方向交角比较小时,对地电台观测 ρ_s 临震突变有“阻隔”作用。

(2) 1973年炉霍7.9级地震 这次地震是NEE向压应力作用下导致NNW向断裂重新错动而形成的,主压应力方向 70° (程式、任昭明,1980)。甘孜地电台距震中45 km。该台和震中连线与主压应力方向夹角 70° ,即该台不在发震应力方向上(图1b)。甘孜台未观测到 ρ_s 临震突变(图3a)。

(3) 1988年澜沧-耿马7.6、7.2级地震 震中400 km范围内有腾冲、楚雄、通海和元谋4个地电台。各台与震中之间分别有NE向、NW向多条活断裂(图1c)。这次地震是水平力作用下NNW向发震构造错动形成的,力学性质以右旋剪切为主(毛玉平,1991)。无论这两次地震是近NS向压应力发震,还是近EW向张应力发震,发震应力与NE向和NW向数条断裂的交角都小,“阻隔”作用强。未收集到楚雄台资料,其余3个台均未观测到 ρ_s 临震突变(图3b)。不过,腾冲台有较明显的短期变化。

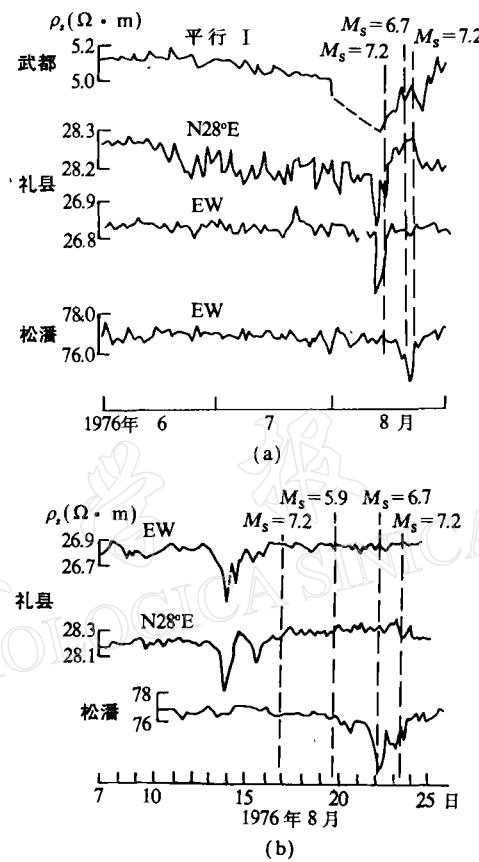


图2 1976年松潘地震地电阻率临震变化
(a)日均值曲线;(b)时均值曲线

(4) 1989 年小金 6.6 级地震 距震中 250 km 范围内有雅安、郫县、甘孜 3 个地电台。震中与甘孜台之间有 NW 向鲜水河断裂带, 与郫县、雅安台之间有 NE 向龙门山断裂带(图 1b)。本次地震的发震应力方向为近 EW 向的压应力(程万正, 1990)*, 与鲜水河断裂带交角约 40°, 与龙门山断裂带交角为 45°。它们的交角都不太大, 有一定的“阻隔”作用。然而甘孜台位于两条活断层附近, 并且在发震应力方向上, 因而观测到了不太明显的 ρ_s 临震变化; 距雅安台 30 km 范围内无活断层、并且和震中连线与发震应力方向几乎正交, 该台没有观测到 ρ_s 临震突变。郫县台附近也无明显的活断层, 但位于发震应力方向上, 震前测值略有变化(图 3c)。

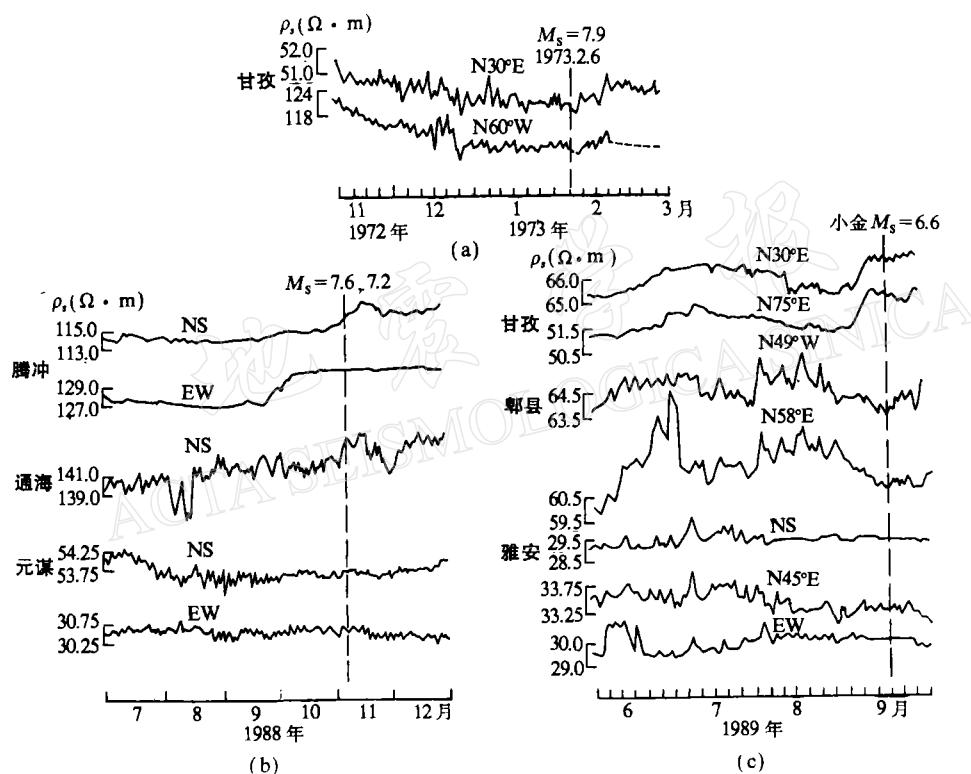


图 3 炉霍 7.9、澜沧 7.6、小金 6.6 级地震前地电阻率临震变化

(a) 炉霍 7.9 级地震前甘孜台地电阻率变化; (b) 澜沧-耿马 7.6, 7.2 级地震前地电阻率变化; (c) 小金 6.6 级地震前地电阻率变化

(5) 1989 年大同 6.1 级地震 震中附近有阳原、大同地电台。震中与大同台之间有 NNE 向口泉断裂(图 1d)。本次地震是 NNW-SSE 的引张作用引起的发震构造走滑兼正断层错动(徐锡伟等, 1991)。口泉断裂走向与发震应力方向的交角较小, 大同台没有观测到 ρ_s 临震突变。阳原台附近没有分布活断层, 并且和 6.1 级地震震中的联线与发震应

* 程万正, 1990. 小金 6.6 级孤立型地震参数、前兆和预报情况.

力方向近于正交, 该台也没有观测到 ρ_s 临震突变(图 4a).

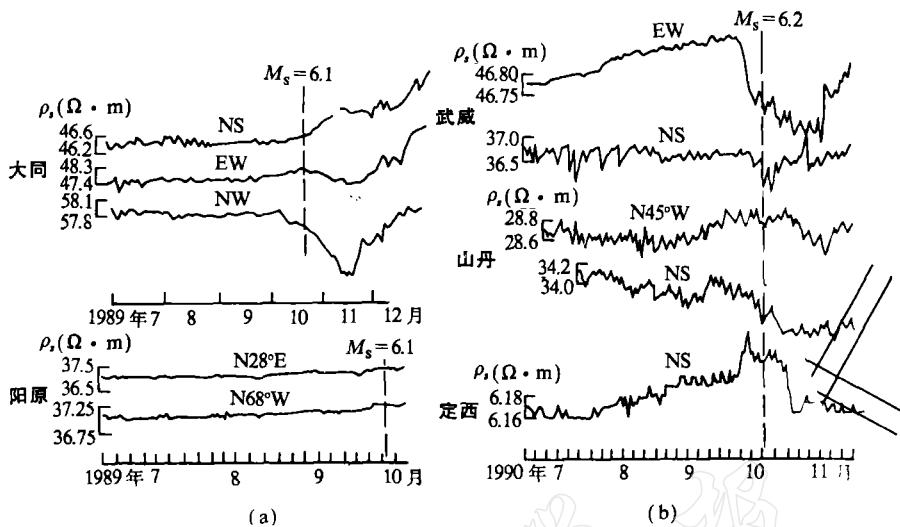


图 4 大同 6.1 级地震、景泰 6.2 级地震前地电阻率短临变化

(a) 大同 6.1 级地震的地电阻率曲线; (b) 景泰 6.2 级地震的地电阻率曲线

(6) 1990 年景泰 6.2 级地震 这次地震的发震应力为 NW 向的张应力(温增平, 1991). 距震中 400 km 范围内有 13 个地电台(图 1e). 西吉、通渭、固原、西峰、礼县和平凉 6 个地电台与震中之间分布有走向与张应力方向交角小的活断层、“阻隔”作用强, 这 6 个台均未观测到 ρ_s 临震突变. 临夏、中卫两个台与震中之间虽无“阻隔”断层, 但临夏台和震中的联线与发震应力方向交角达 60°, 台站附近也没有分布活断层; 中卫台和震中的联线与发震应力方向正交, 这两个台没有观测到 ρ_s 临震突变. 武威、定西、山丹 3 个台与震中之间无“阻隔”断层, 又位于活断层附近和发震应力方向上, 3 个台都观测到了 ρ_s 临震突变. 兰州、天水两台资料不易使用, 故不作讨论. 图 4b 给出 3 个有异常台站的日均值曲线.

(7) 1976 年唐山 7.8 级地震 本次地震压应力起了突出作用, 震源机制解主压应力方向为 75°(国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982; 郭增建、秦保燕, 1979). 震中 250km 范围内有 16 个地电台(图 1f). 马家沟、昌黎两台与震中之间无“阻隔”断层, 两台均位于活断层附近和发震应力方向上, 它们都观测到 ρ_s 临震突变. 马坊、忠兴庄、八里桥、小汤山、马各庄、张山营 6 个地电台与震中之间有 1—3 条 NE 向活断层, 这些活断层走向与发震应力方向交角小、“阻隔”作用强, 6 个台均未观测到对应本次地震的临震突变(小汤山台的震前变化, 笔者认为是 7.1 级强余震的临震前兆). 塘沽、徐庄子、青县、青光台与震中之间分布有 NW 向蓟运河活断层, 其走向与发震应力方向近乎正交, 各台均位于发震应力方向上, 并且塘沽、徐庄子、青县台还处于沧东大断裂上, 这 3 个台观测到了 ρ_s 临震突变. 青光台 50 km 范围内没有分布活断层, 没有观测到临震突变(图 5).

16 个地电台中仅唐山和宝坻台与震中之间无“阻隔”断层, 位于发震应力方向上, 并

且在活断层附近,但未观测到 ρ 临震突变(图 5). 陈大元等(1991)给出一种解释,不过究竟是何原因,还需深入探讨.

邢台台站震中距达 420 km,与震中之间无“阻隔”断层,该台位于发震应力方向上,并且距该台 10 km 处分布有活断层,该台在 7.8 级地震前观测到了 ρ 临震突变(图 5).

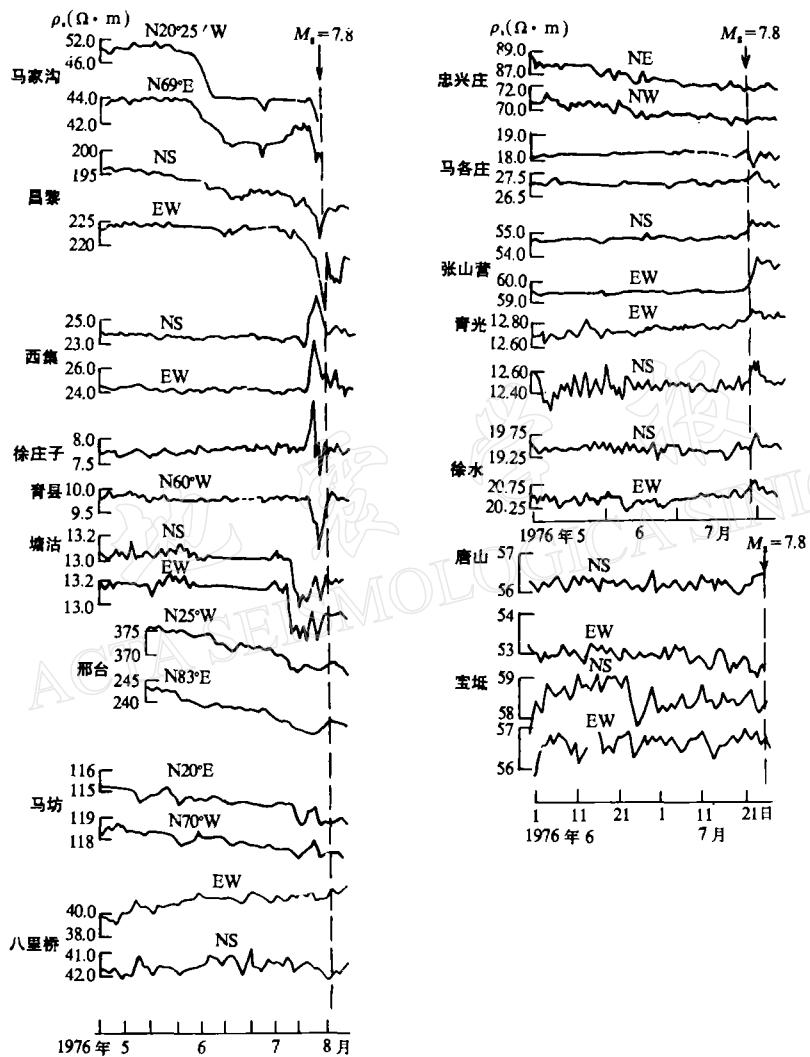


图 5 唐山 7.8 级地震前地电阻率短临变化

(8) 1976 年 7 月 28 日滦县 7.1 级强余震 震源机制解主压应力方向为 297°. 马坊、小汤山、张山营 3 个台与震中之间有 1--3 条 NE 向活断层,与主压应力方向交角约 80°,“阻隔”程度弱;3 个台均位于活断层附近和发震应力方向上,均观测到 ρ 临震突变(图 6). 八里桥、忠兴庄、马各庄 3 个台与震中之间除有 NE 向活断层外,还分布有 NW 向南口-孙河活断层,该断层走向与主压应力方向交角约 17°左右,这 3 个台受到活断层“阻隔”,

没有观测到 ρ_s 临震突变。昌黎台与震中之间无“阻隔”断层，并且位于发震应力方向和活断层附近，观测到了 ρ_s 临震突变（图 6）。蓟运河断裂南侧的塘沽、青光等 5 个台受活断层的“阻隔”，且不在发震应力方向上，没有观测到对应本次地震的临震突变。其余各台在 7.8 级地震后无资料。

此外，我们还对道孚 6.9 级（1982）、海原 5.5 级（1982）等 20 个地震、34 个台（次）的地电阻率变化作了研究，发现地电台能否观测到 ρ_s 临震突变也遵循上述规律。这 20 个地震及其各台观测结果列于表 1。

3. 讨 论

地电阻率临震突变受控于活断层、发震应力方向的规律是从大量实测资料中发现的，其可能机理不妨作如下讨论：

(1) 马宗晋教授提出了“多点应力集中”的理论，地震孕育过程中，除了震源区是一个高应力集中区外，在周围介质中还会形成多个应力集中点。这些应力集中点就分布在活断层上，这是由于活断层是介质非均匀性最为明显的部位。尽管应力水平比震源区低，但也是次一级应力集中点，它对震源的应力变化响应最为灵敏。在地震孕育后期，促使断裂失稳而错动的应力是起主导作用的主力。在这一应力作用方向上介质的原应力状态可能会产生显著的变化，导致介质物性改变，而在其它方向上介质原应力状态相对变化要小一些。因此临震前震源区的应力状态急剧变化时，就牵动了位于发震应力方向上的活断层及其附近的介质中的原应力状态发生变化，从而使处于这些部位的地电台出现临震突变。

从力学的观点，临震前震源区及其外围介质中某一点的位移可用下式表示：

$$u = u_s + u_b$$

其中， u_s 是刚体位移（包括震源孕震引起的平动位移和转动位移）， u_b 是震源孕震引起的形变位移。

很多学者已讨论了形变位移 u_b 与 ρ_s 变化的关系。然而深大活断裂、强烈活断层及其附近是地壳薄弱部位，应变率 ($\Delta V/V$) 虽大，但电阻率对应变的“放大”倍数并不大。在震前几小时至一个月左右出现的临震突变，变幅可达 10^{-2} 量级，有时到 10^{-1} 量级。若要利用电阻率对应变的“放大”倍数反推应变，则应变率会远远超过允许的范围，因此很难把这种变化归因于形变所引起。

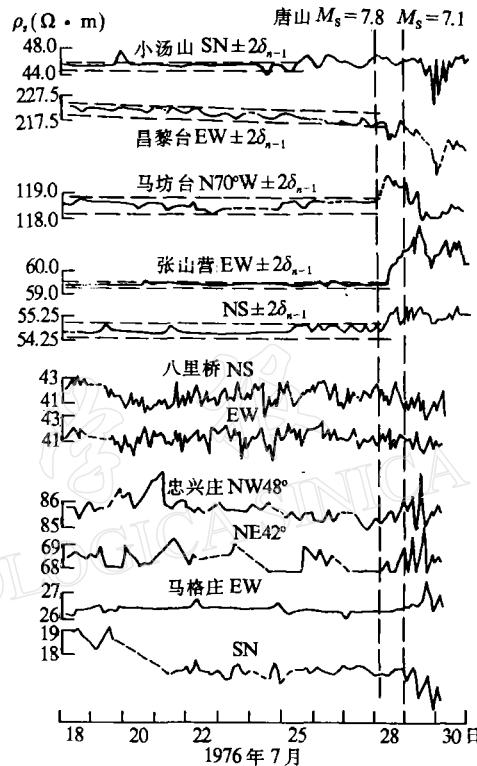


图 6 地电阻率瞬时观测值曲线

表 1 中国大陆部分地震临震前地电阻率观测结果

地 震	发震时间 (年·月·日)	台 站	震中距 (km)	临 震 突 变	变化量 ($\rho_{\text{or}_{n-1}}$)	相对变幅 (%)	说 明
宁河 5.0	1976.10.23	塘沽	45	无			阻 隔
宁河 6.9	1976.11.15	塘沽	35	无			阻 隔
宁河 6.2	1977.5.12	塘沽	40	无			阻 隔
道孚 6.9	1981.1.24	甘孜	140	无			阻 隔
甘孜 6.0	1982.6.16	甘孜	30	无		-2.5	不在发震应力方向上 与 6.0 级地震震中相同
甘孜 3.9	1982.3.25	甘孜	30	有			
海原 5.5	1982.4.14	海源	25	无			不在发震应力方向上
		中卫	82	有	-8	-6.4	
		西吉	90	有	+5	+4.6	阻 隔
		固原	114	无			
		静宁	140	无			不在活断层附近
且马 5.6	1983.1.6	武威	42	有		7.2	
		山丹	140	无			不在发震应力方向上
刚察 5.3	1984.2.17	山丹	130	有		-2.7	
灵武 5.3	1984.11.23	银川	45	有	-23	-17.6	
灵武 5.5	1987.8.10	银川	45	无			不在发震应力方向上
天祝西 4.7	1984.12.7	山丹	220	有		-2.7	
		武威	70	无			阻 隔
门源 6.4	1986.8.26	山丹	120	无			阻 隔
和 5.0		武威	105	无			阻 隔
门源 5.7	1986.9.17	山丹	120	无			阻 隔
和 4.5		武威	105	无			阻 隔
迭部 5.9	1987.1.7	武都	180	有	+5.5	+3.9	
固原 5.1	1989.11.2	固原	3	有		+22	
		西吉	45	无			阻 隔
		平凉	62	无			阻 隔
		通渭	120	无			阻 隔
		西峰	132	无			阻 隔
		中卫	210	有		-4.3	
大同 5.8	1991.3.26	大同	45	无			阻 隔
		阳原	30	无			
		代县	110	有		+1.8	不在活断层附近, 不在发震应力方向上
忻州 5.1	1991.1.29	大同	125	有		+1.1	
		代县	65	无			阻 隔

刚体位移 u_s 在地质块体内不可能引起 ρ_s 变化, 但不同地质体内的 u_s 是不相同的, 其“不连续”的部位就在块体之间, 这就可能引起块体之间的应力发生变化, 以致造成块体之间流体的移动. 已有研究表明: ρ_s 的明显异常与岩石形变的关系极小, 不能作为震前 ρ_s 变化的主要原因, 如果震前应力变化使地下水运动, 引起岩石湿度变化, 则可能观测到明显的 ρ_s 异常(徐世浙, 1981). 深大活断裂、强烈活断层及其附近, 地下水一般是比较发育的. 例如 1978 年唐山 7.8 级地震前 10 天左右沿沧东断裂带地下水普遍上升, 在这条断裂带上分布的地电台一般都观测到了 ρ_s 临震突变(金安忠, 1982); 西集台位于夏垫—永乐店断裂附近, 该断裂历史上发生过 1679 年马坊 8 级大震, 是地下水活跃地区. 在这次

地震前该台两测道都出现了明显的 ρ_s 突变.

(2) 发生在我国板内地震的震源断层错动以平推为主(尤其是发生在上地壳的中强以上地震), 表明震源断层临震前和错动过程中, 某一方向的水平应力分量占绝对优势. 位于震源和地电台之间的深大活断裂、强烈活断裂的断层面上, 正压力分量和剪切分量的比例会随断层走向与发震应力方向的交角大小而改变. 当未来地震发震应力方向与活断层走向交角较大时, 断层面上的正压力分量增大, 震源的应力变化可以影响到断层另一侧的地电台; 反之, 当两者交角较小时, 断层面上剪切力分量增大, 断层可通过“蠕滑”减弱震源对断层另一侧介质中原应力状态的影响, 断层起了“阻隔”作用. 数值模拟的结果也证明了震源和地电台之间的活断层对 ρ_s 变化有“阻隔”作用.

4. 几点认识

(1) 以上讨论的 31 个地震发生在我国不同地震带上, 震源断层错动以平推为主, 100 个地电台(次)分布于大陆不同地区; 因此地电阻率临震突变受控于震源区内外深大活断裂、强裂活断裂和发震应力方向的规律, 对我国大陆中强以上地震具有普遍性.

(2) 由于区域地质体不是一个整体, 在地震孕震过程中会在某些部位反应灵敏. 一次地震前不可能出现很多的临震突变, 这样就出现了临震前地电阻率变化的复杂性和 ρ_s 临震突变的空间零乱性. 传统上认为异常应以震中向外扩展, 就地电阻率临震突变而言, 传统观点仅是一种理想情况, 与实际观测结果不符. 不能期望震中距小的地电台, 临震异常一定出现早、幅度大.

(3) ρ_s 临震突变幅度大, 无需复杂数学处理就可识别. ρ_s 临震突变空间分布受控于活断层和发震应力方向的事实, 一定程度上揭示了临震突变的空间分布规律. 因而利用地电阻率作临震预报时, 一经出现地电阻率突变异常, 应立刻把突变与该区域内深大活断裂、强裂活断裂展布特征和可能的震源机制联系起来, 认清是非震变化, 还是临震突变, 不为异常的空间复杂性、零乱性所迷惑, 及时作出临震预报. 这可能是对我国板内震源断层错动以平推为主的中强以上地震的震中和发震时间作出临震预报的可行途径, 尤其对发生在具有一定密度地电台网内的中强以上地震, 临震前作出预报是可能的.

参 考 文 献

- 陈大元、陈峰、曾其平、于淑海, 1991. 原位岩体剪切和摩擦试验中视电阻率变化特征. 中国地球物理学会年刊, 238. 地震出版社, 北京.
- 程式、任昭明, 1980. 1973 年 2 月 6 日四川省炉霍 7.6 级地震. 中国震例(1966—1975), 98—116. 地震出版社, 北京.
- 杜学彬, 1992. 临震 ρ_s 突变的活断层-应力场效应. 地震, 1: 18—26.
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组, 1982. 一九七六年唐山地震, 28—45. 地震出版社, 北京.
- 郭增建、秦保燕编, 1979. 震源物理, 248—249. 地震出版社, 北京.
- 金安忠, 1982. 唐山地震前近震中区地电阻率的突变现象. 地震学报, 4, 169—173.
- 毛玉平、李盛德, 1991. 澜沧-耿马地震序列图像及发震构造讨论. 西北地震学报, 13, 1, 57—82.
- 阮爱国、赵和云, 1991. 地电台址构造条件的三维有限元数值模拟. 西北地震学报, 13, 4, 22—28.
- 四川省地震局(编), 1979. 一九七六年松潘地震, 4—5, 86—91, 103. 地震出版社, 北京.
- 温增平, 1991. 1990 年 10 月 20 日天祝、古浪 6.2 级地震的震源机制解. 西北地震学报, 13, 1, 92.

徐世浙,1981. 地电阻率前兆机理探讨. 地震科学研究所,2: 25—28.

徐锡伟、车用太、杨士恩、尤惠川、王祥龙、朱玉新, 1991. 大同-阳高地震群发震构造模式的讨论. 中国地震,7,2.77—85.

《中国地震预报概论》

由梅世蓉、冯德益、张国民、朱岳清、高旭、张肇诚六位地震专家撰写的《中国地震预报概论》于今年6月由地震出版社出版发行. 它是我国第一部全面系统论述地震预报理论基础及预测预报方法的专著,也是我国20多年来地震预测工作的科学总结. 全书共分五篇,三十六章,约80万字,275幅图.

第一篇 绪论, 论述我国地震活动概况和地震预报研究概况. 以邢台、海城、唐山、松潘大地震及80年代地震监测预报工作的进展为线索,介绍了中国地震预报的思路、途径、特色的形成历史与工作体制.

第二篇 地震前兆的观测与分析, 分9个学科进行了概述. 第一章重点对测震学各种前兆参数进行叙述. 第二至第八章, 对于其他7个学科, 从理论基础、观测系统、干扰排除及信息提取、异常识别、到前兆特征、预报方法与效能估计等方面进行系统叙述. 第九章论述大震前动物异常特征与机制. 第十章是中强以上地震震例的综合分析.

第三篇 我国地震前兆的综合特征及其形成机理研究. 此篇将地震前兆的分学科研究与分震例总结研究相结合,作了一次更高层次的分析与综合, 是迄今为止最全面的有关我国地震前兆特征的认识,进而对上述特征形成机理进行了初步探讨, 提出了一些有价值的看法, 指出了存在的疑点与问题.

第四篇 地震预报方法论, 包括地震预报的概率统计方法、模糊数学方法、灰色系统理论方法、模式识别方法、物理方法与系统科学方法、经验方法以及专家系统. 该篇集中了我国20年来自己的或引进后发展的几乎所有预报方法,既讲原理,又讲方法和实例.

第五篇 论述地震前兆观测数据的处理. 从数据分类评价、前兆数据的常规处理到前兆数据的数字滤波、谱分析以及模糊模式识别方法、系统分析方法等, 从原理到具体实例进行了全面介绍.

本书的首要特点是: 理论与实际的紧密结合. 该书著者都是长期工作在地震预报第一线的专家, 具有丰富的实践经验, 并在多年的工作中进行了大量的理论研究. 为编好此书, 在汇总全国地震预报经验的基础上, 又进行了许多深入系统的理论研究. 在编写过程中对各类预报方法, 则按理论基础—方法步骤—应用实例的程序进行论述. 这是一部既有理论意义, 又有实用价值的著作.

本书的特点之二是: 内容的系统性与综合性. 本书涉及地震预报有关的广阔领域, 从中国地震预报的发展史, 到目前的研究现状、存在问题; 从观测方法、数据处理方法到预报方法; 从实际震例到理论基础, 可谓系统而且全面. 此一书在手, 可全面了解中国地震预报的概貌. 书中使用的资料主要取材于国内两次攻关研究成果报告. 同时也吸收了不少发表在各类学报、期刊、专集中的论文. 材料的选择本着少而精的原则, 似是而非的则尽量删除.

全书涉及到地震预报有关的广阔领域, 内容丰富、资料翔实, 适于多方面读者的不同需要, 无论是台站观测人员, 地震分析预报工作者, 地震理论研究者, 或地震工作管理干部, 以及大专院校师生均可从该书读到他们关心的内容. 同时也可供地球物理学、地球动力学、工程地震学等有关学科科技人员参考.

本刊编辑部