

地电中期前兆异常特征及其对 强震中期趋势的判断^{*}

王志贤 张学民 李永庆 李玉春 李洪流

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

摘要 在系统处理地电长期观测资料的基础上, 重点研究了 7 级以上强震的地电阻率趋势异常特征及其与孕震过程的相关联系。地电早期快速下降和其后缓慢发展的稳定形态特征是强震地电趋势异常的一个基本特征。一般早期下降和缓慢发展变化的平均持续时间之比约为 1 : 4; 此外, 还研究了唐山 7.8 级和松潘 7.2 级地震地电趋势异常发展变化的扩散特征, 以及唐山地震地电前兆信息量的时空强动态演变特征。结果表明, 这两次地震地电前兆趋势异常的扩展速度分别为 90 km/a 和 100 km/a。地电趋势异常变化特征为强震趋势背景判定和中期预报提供了一些指标。

关键词 地电阻率 扩展速度 动态分布

引言

地震监测预报仍处在探索研究和经验预报阶段。其依据是包括测震学指标在内的各种前兆方法观测到的异常变化, 尽管这些变化具有多样性和复杂性特点, 存在有与地震不确定性的关系。然而仔细研究大陆 7 级以上强震震例, 便可发现震前的异常变化仍表现出稳定形态的重复出现和一些准规律性特征。它们均与孕震过程相联系。本文重点研究了唐山、松潘等 7 级以上强震的地电中期趋势异常变化特征及其与孕震过程的相关联系, 为强震趋势背景的判断和中期预报指标提供了某些有意义的判据。

1 地电趋势异常变化特征

地电异常变化特征已有不少报道(钱复业等, 1982; 王志贤, 1990)。本节重点分析研究了能够用于判断强震中期趋势背景, 并指示出中期预报指标的地电异常变化特征。

1.1 具有稳定形态的地电趋势异常变化

大陆 7 级以上强震前的地电趋势异常变化都具有一个共同的特点, 即地电阻率早期快速下降和较长时间的缓慢发展, 构成了强震前的异常稳定形态变化特征。地电趋势异常的稳定形态变化, 不仅在一次地震前多点观测到(如唐山 7.8 级强震前的昌黎、宝坻、青光、忠兴庄等台的异常变化), 而且在不同地区多次强震前, 以相似的趋势异常形态出现在不

* 中国地震局“九五”地震预报攻关课题(95-04-01-01-09)专题成果之一。
1998-06-22 收到初稿, 1998-11-13 收到修改稿并决定采用。

同构造条件的观测点上(如图1所示). 表明了强震前的地电趋势异常稳定形态变化的普遍性. 这是地电趋势异常的一个基本特征.

表1给出了多次7级以上强震, 不同台站实测到的地电趋势异常早期快速下降和其后缓慢发展过程的时间长度及其比值关系. 从表1可清楚地看出, 地电趋势异常早期快速下降的时间 t_1 与缓慢发展过程的持续时间 t_2 存在着显著差异, 前者一般为2~6个月, 平均为4个月; 后者为8~30个月, 平均为15.2个月. 二者均值之比为3.8, 即地电趋势异常

缓慢发展时期的持续时间比早期快速下降的时间要长得多. 地电趋势异常的稳定形态特征为岩石破裂实验所证实. 激光全息干涉法所得的实验结果(陈颤, 1988), 给出岩石表面上不同位置的位移. 结果表明, 岩石变化早期, 变形随应力的增加而缓慢增加. 临近破裂前, 变形剧烈增加, 即在低应力阶段, 各点观测到的变化是同步的、稳定的, 反映了岩体内部的均匀变形. 这种空间的同步性、稳定性变化是岩样破坏前的长期前兆. 这正是地电所观测到的具有稳定形态的中期趋势异常变化.

表1 地电中期异常不同发展时段

的时间及其比例关系

地震	异常台站	t_1 /月	t_2 /月	比例关系
唐山7.8 (1976)	昌黎	5	30	6
	宝坻	6	22	3.7
	青县	5	29	5.8
渤海7.4 (1969)	牛家桥	2	8	4
永善7.1 (1974)	会理	3	12	4
	米易	2	10	5
松潘7.2 (1976)	松潘	2	8	4
	武都	6	9	1.5
	澜沧-耿马	6	12	2
7.6(1988)	腾冲	3	12	4
	通海	3	12	4
合计		10	40	3.8

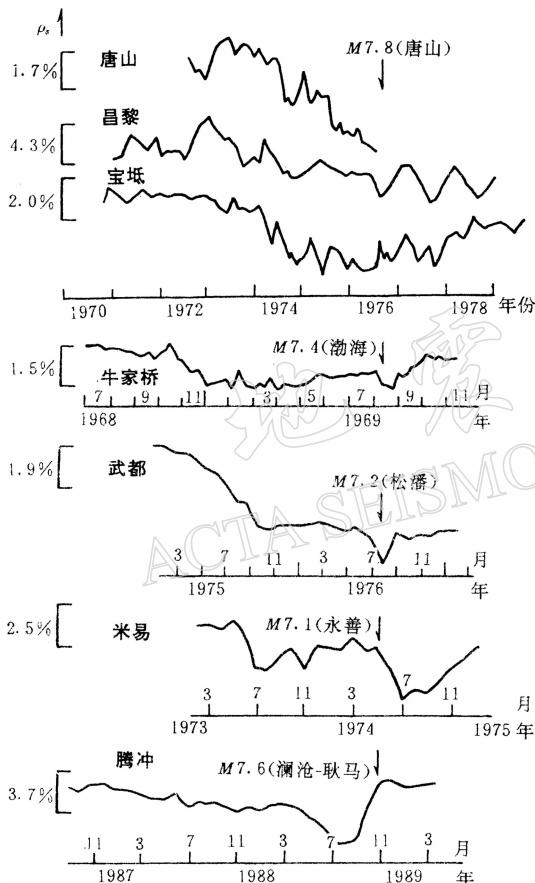


图1 强震前地电阻率趋势异常稳定形态变化曲线

强震地电前兆异常台项多、范围大, 在空间上形成一个相对异常集中区. 如唐山7.8级地震发生在我国台网密集地区, 距震中200 km范围内共有14个地电台. 其中有8个台记录到了趋势异常变化, 为总台项的64%. 位于震中区的唐山、昌黎台出现异常时间较早(约1973年10月开始), 距震中较远的忠兴庄台($\Delta=150$ km)出现异常时间较晚(大约1975年中). 震中距大于150 km的台则无趋势异常变化. 由此可见, 唐山地震地电前兆趋势异常变化, 大约以每年90 km的视速度从未来震中向外围扩展, 扩展半径为150 km. 另外, 与唐山地震相距近两千公里, 且地质构造条件也不相同的松潘7.2级地震, 同样观测到了与唐山地震十分相似的地电前兆异常. 据有关文献(四川省地震局, 1979)报道, 位于

1.2 强震地电群体前兆异常的时空发展 ——扩散特征

松潘震中附近的异常具有时间长、变幅大、出现较早的特点。随着震中距的变大，异常幅度逐渐变小、梯度变缓、出现时间变晚，亦表现出由未来震中区往外围大约以每年 100 km 的视速度扩展。以上结果与钱复业等(1982)给出的结果比较一致。图 2 是唐山、松潘两次地震地电前兆异常时间与震源距的相关关系拟合结果，清楚地显现了地电趋势异常时空发展的扩散特征。其关系为

$$\lg t = 2.976 - 0.810 \lg R \quad (r = -0.966, \sigma_x = 0.256) \quad (1)$$

式中， t 为中期趋势异常时间，单位为“月”； R 为震源距(台站到震源的距离，即 $R = (\Delta^2 + h^2)^{1/2}$ 。 Δ 为震中距， h 为震源深度，单位均是 km，下同)。据震例统计结果和地电指南规定，地电中期前兆是指半年及其以上的趋势。

异常变化。如果对一个 $h = 20$ km 的强震，当 $t = 6$ 个月时， $\Delta = 500$ km； $\Delta = 0$ 时， $t = 84$ 个月。即对于 $h = 20$ km 的 7 级以上地震，在震中区($\Delta = 0$)可望观测到约 7 年时间的中期趋势异常变化，异常范围(指 Δ)可达 500 km。后者与我国西南地区部分震例的观测结果基本一致，如炉霍 7.9 级地震，西昌($\Delta = 430$ km)、米易($\Delta = 540$ km)等台，以及龙陵 7.4 级地震，米易($\Delta = 430$ km)台均观测到了中期趋势异常变化。但截止目前，尚无一例观测到长达 7 年的前兆变化。这可能与台站前兆反映灵敏程度和观测资料时间较短有关。因此，上式的定量相关统计，仅作为定性图像化地说明了地电中期趋势异常的扩展特征。

另外，其它学科也观测到了与地电相类似的异常现象，如唐山、龙陵、松潘等强震地下流体前兆异常的时空变化特征(梅世蓉等，1993)。进一步表明中期趋势异常时空扩散特征似有普遍性。这一特征可能与孕震过程密切相关。地震孕育中期阶段非弹性变形以后的微破裂发育和发展，可能是中期趋势异常时空演变特征的物理基础，地电中期前兆的扩展特征为某些理论模型研究给予了合理的解释。牛志仁和陈党民(1987)对含有粗糙面的滑动弱化地震失稳模型的研究发现，在加压过程的前期，粗糙面(视震源体)整个处于强化阶段，其应力在整个粗糙面上增高，从而导致趋势异常首先在震中区出现。随着震源区的强化和应力水平继续增高，将影响周围地区应力水平的提高，于是在震中的外围地区也陆续出现异常变化。因而就群体异常来说，其时空变化则表现出由震中区往外逐渐扩展的特征。

1.3 强震地电前兆异常强度的时空发展变化——异常信息量的平面动态分布特征

要研究地电异常强度变化的平面动态分布，须具备足够的台网密度。唐山震例提供了很好的资料。另外，由于各地电台所处的台址电性条件和地面装置系统的不同，其观测到的异常强度受到影响，从而表现出明显的差异。根据地电前兆与台址-装置条件关系(汪晓东，关华平，1992)，对各台的前兆异常进行了相应的台址-装置条件校正，然后应用公式

$$R_p = 1 - e^{-ax}$$

分别计算出各台异常强度的信息量。式中， R_p 为异常强度无量纲信息量，其值在 0~1 范围内变化； $x(x \geq 0)$ 为地电阻率异常幅度的相对变化量； a 为经验常系数，取 $a = 0.5$ 。异常

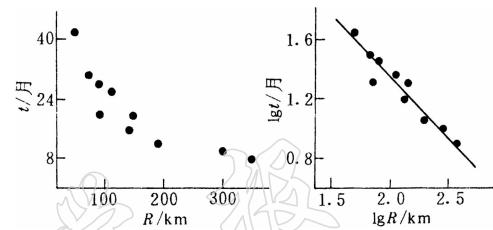


图 2 地电阻率前兆异常时间与震源距关系

(a) 实测结果；(b) 双对数坐标拟合曲线

发展过程中, 不同时间的信息量平面等值线分布计算结果由图 3 给出。从图 3 可以看出, 唐山地震前地电异常变化大致经历了 3 个不同的发展时期: 1973 年 10 月~1974 年 1 月为异常开始时期(图 3a), 该期异常信息量比较微弱, 大致为 0.2~0.3, 集中于唐山震中区附近; 1974 年 7 月~1975 年 7 月是异常变化的集中发育和扩展时期(图 3b), 此期异常信息量强度明显增强, 震中区已高达 0.74, 且随震中距的增加呈衰减趋势; 1975 年 7 月以后, 异常强度和扩展范围均发展变化缓慢, 处于异常相对稳定发展时期, 持续时间大约 1 年(图 3c)。地电异常强度信息量平面分布能够形象地展现唐山震前地电中期趋势异常时空强动态演变全过程, 且较好地反映了地电中期趋势异常早期下降—缓慢发展的基本形态特征。

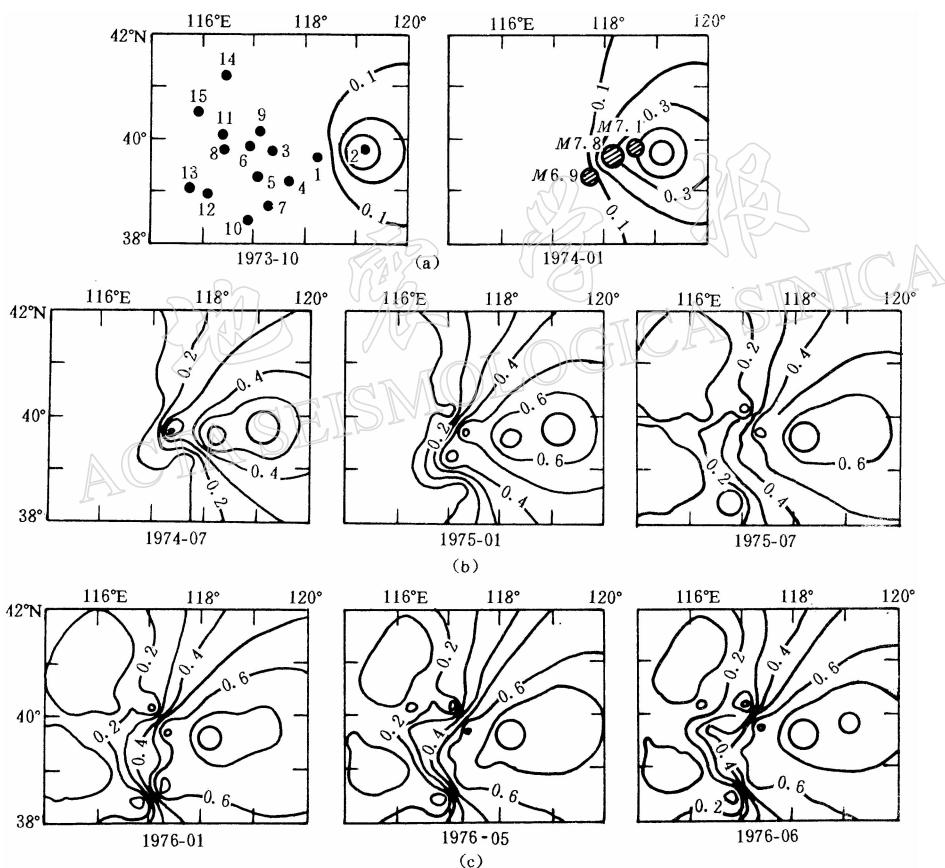


图 3 1976 年唐山 7.8 级地震 ρ_s 异常信息量等值线平面动态分布

1. 唐山, 2. 昌黎, 3. 宝坻, 4. 塘沽, 5. 青光, 6. 西集, 7. 徐庄子, 8. 忠兴庄,
9. 马坊, 10. 青县, 11. 八里桥, 12. 马各庄, 13. 徐水, 14. 小汤山, 15. 张山营

综上所述, 唐山地震前的地电异常信息量时空强动态变化过程具有如下显著特点: ①异常最早开始于震中区附近。随着时间的发展变化, 异常信息由震中区逐渐向外围扩展, 信息强度也不断增大, 异常信息的扩展半径(由震中向西方向)为 150 km, 扩展速度约 90 km/a; ②震前大约 1 年时间, 无论异常信息量强度或异常范围均变化缓慢, 趋于相对稳定变化时期, 时间大约 1 年; ③在异常信息动态发展的全过程中, 震中区的异常信息量值始终处于较高水平, 1976 年 1 月以后高达 0.84 以上; ④唐山震前地电中期趋势异常信息

量时空强演变全过程表现出3个不同的发展变化时期，即异常开始显示期、异常发育和发展期及异常发展相对稳定期。

地电趋势异常信息量不同时间的动态平面分布，直观地展现了唐山地震地电前兆时空强发展演变特征，有可能为强震的背景趋势判断、发震地点和中期（1年或稍长时间尺度）时间预报提供一些有意义的指标。

2 地电中期趋势异常变化与孕震过程关系讨论

地震前兆应是震源形成、发展演化等孕震过程的异常反映，亦即孕震过程中应力应变变化的反映。尽管目前对孕震过程的细节尚缺乏直接的了解，但不少理论研究和模型计算结果都揭示了孕震过程的阶段特征。张国民等对震源体受力、失稳全过程的本构关系研究（张国民，傅征祥，1990），以及牛志仁的震源孕育膨胀-蠕动模型的计算（牛志仁，1978），都表明震源体受力失稳大致经历了弹性形变（长期阶段）—非弹性变形（中期阶段）—应变软化（短临阶段）—岩体失稳（地震）等几个阶段。地电随时间的异常变化、发展、演化特征能否反映孕震过程的这几个阶段特征，是鉴别和辨识地电地震前兆的一个重要标志。

如上所述，唐山7.8级地震前，位于震中区附近的唐山、昌黎、宝坻等台于1973年底和1974年初地电开始异常，尔后向外围逐渐扩展，青光、塘沽、徐庄子、忠兴庄等台也相继观测到地电变化。直到1975年底，在华北北部地区已形成以唐山为中心的地电趋势异常相对集中区。这是地电中期趋势异常时空强动态发展变化时期。大致与此同期，即1973年前后，华北小震活动开始向京、津、唐地区从集，频度增高（国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组，1982）。与地电趋势异常时空变化基本一致。梅世蓉等（1993）指出：“在孕震进入非弹性变形之后，将出现岩石微破裂的发育和发展，由此造成岩石非弹性体积膨胀和其物理化学性质的多种变化，导致震前数年出现地震活动水平的提高和与之相应的一系列地震活动性异常、地电阻率以下降为主的异常变化……”等。张国民和傅征祥（1990）的研究结果，给出了孕震不同阶段的前兆表现情况，指出非弹性变形（孕震中期阶段）是多种前兆趋势异常发育和发展时期，而弹性变形的长期阶段则无明显前兆显示。牛志仁（1978）的研究结果，将前兆分为两大类，其中一类是由孕震体内出现非弹性变形（包括裂隙的扩展和塑性变形）引起的，地电前兆异常属于此类。这就不难理解华北北部地区1973年以后，以唐山为中心所出现的一批地电趋势异常变化和地震活动在京、津、唐地区相对从集、频度增高两者时空分布的一致性，并不是时域上的巧合，而是唐山地震孕育进入中期非弹性变形之后，出现岩体微破裂的发育和发展及其物性变化的反映。

唐山地震前数10天，大范围多台项地电短临加速变化由外围向震中区逼近（王志贤等，1994），反映了临震前破裂传播向震中区迅速发展，微破裂迅速张合和震源应力场急剧变化，这是孕震过程中应变软化阶段的反映，是强震前兆的短临异常标志。当地震孕育到应变软化阶段后，应力高度集中和加强，超过岩体破裂强度失稳而发生地震，应变能突然释放，地电也发生了与震前异常变化性质完全相反的阶跃变化（王志贤等，1997），较好地反映了地震前后应变能积累和释放两个截然不同的应力应变状态变化。

从以上分析可以看出，强震前的地电异常变化全过程能够较好地反映孕震过程阶段特征，从而表明震前的地电异常变化是孕震过程中应力应变变化的反映，与地震孕育、发生相关联。

3 地电强震背景判断和中短期预报

强震的预报应该遵循如下 3 个层次来实现：①强震背景的分析和判定；②一年或稍长时问尺度的中期趋势预报；③短临时间预报。最后一个层次已在“八五”短临预报攻关中进行了专项研究，在此不赘述。

3.1 强震背景的判定标志

强震的孕育是长期构造活动中局部地区应力应变积累和增强的动力学过程。特定地区构造格局及其活动和具有某些特殊的地震活动图象等观测结果可用来判估强震背景，但时间尺度很难给定。地电方法能够观测到孕震进入非弹性变形以后由于微破裂发育、发展等引起的介质电性变化，即地电中期趋势异常。因此，在具备足够台网密度的地区，若检测到多台项稳定形态的地电趋势变化，则预示该区近年内具有发生强震的潜在背景。

3.2 强震中期时间预报标志

在强震背景判定后，重要的是提出中期预报意见和作好短临时间预报。根据 34 次不同强度地震的接近震中的地电前兆异常时间的统计，7 级以上强震的前兆异常时间平均为 1.5 年；6 级地震平均时间为半年，且无一例 1 年以上异常；5 级地震异常时间较短，仅为数月。由此可见，1 年或其以上的地电趋势异常变化时间不仅指示出强震背景，而且也是中期预报的一个时间指标。

另外，从地电异常信息量时空动态变化看出，震前 1 年左右，其异常信息量强度和显示的空间范围都趋于相对稳定状态。该特征表现可作为地电强震中期预报的又一个指标。

3.3 关于震中和强度的判定

根据强震地电趋势异常的扩展特征，接近震中台异常出现早，往外逐渐变晚。因此认为，地电趋势异常出现较早的地区可能是未来地震发生的地区。另外，异常信息量动态分布也明显指示出，震中区的强度大，往外则逐渐衰减。这也是判定震中的一个重要指标。

关于强度的判定，笔者曾研究了全国震例，给出了计算震级的统计公式

$$M_{s_i} = 1.620 \lg(t_i r_i) - 0.602 \quad (\gamma = 0.934, \sigma_x = 0.626) \quad (2)$$

式中， r_i 为震源距； t_i 为相应台的异常持续时间（单位：天）。根据各台计算结果，取其平均值 \bar{M}_s 为所要预报的地震强度。随着异常时间 t_i 的不断延续，计算相应的震级，依次修正前面的震级。

4 结语

我国强地震是一个低概率事件，虽经 30 余年的监测，但获得强震地电前兆资料很少。本文对具有一定台网密度的强震地电前兆异常进行了研究。结果表明，强震前兆趋势异常变化具有稳定形态和扩展特征。其时空强动态分布表现出震中区前兆信息强度大，且随震中距的增大呈衰减趋势。震前 1 年左右，异常信息扩展范围和信息强度均趋于相对稳定。这些研究结果，为强震背景趋势判定和中期时间预报，提供了一些具有参考价值的指标。不足之处是文中使用震例资料有限。所得结果，如地电动态图象演变特征等是否具有普适性，仍有待震例资料的积累和检验。

参 考 文 献

- 陈颙. 1989. 探索地震前兆复杂性. 见: 陈颙主编. 分形与混沌在地球科学中应用. 北京: 学术书刊出版社, 28~29
- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组. 1982. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社, 172~173
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 250
- 牛志仁. 1978. 构造地震的前兆理论. 地球物理学报, **21**(3): 206~207
- 牛志仁, 陈党民, 1987. 含有单一粗糙面的走滑断层和滑动弱化不稳定性. 地震学报, **9**(3): 257~262
- 钱复业, 赵玉林, 于谋明, 等. 1982. 地震前地电阻率异常变化. 中国科学(B辑), (9): 833~839
- 四川省地震局编. 1979. 《一九七六年松潘地震》. 北京: 地震出版社, 18~20
- 汪晓东, 关华平. 1992. 地电阻率前兆与地电台台址-装置条件的关系研究. 地震学报, **14**(3): 339~340
- 王志贤. 1990. 地电阻率震例异常特征及其与地震三要素关系初探. 见: 国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化研究文集地磁地电专辑. 北京: 学术书刊出版社, 257~260
- 王志贤, 彭远黔, 王丽. 1994. 地电阻率短临前兆异常的判定方法研究. 地震, (1): 88~95
- 王志贤, 彭远黔, 郑慰坤. 1997. 唐山地震地电阻率震时突变及前兆标志研究. 中国地震, **13**(2): 189~195
- 张国民, 傅征祥. 1990. 由岩体失稳讨论地震前兆的复杂性. 地震研究, **21**(3): 220~221