

地震电性变化及其物理机理初步讨论

马占虎^{1,2}, 杜学彬^{1,2}, 谭大诚^{1,2}, 陈军营^{1,2}, 赵洁³, 叶青^{1,2}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;

3. 甘肃省地震局嘉峪关地震台, 甘肃嘉峪关 735100)

摘要:依据典型震例中的视电性异常变化,介绍了视电性变化各向异性与震源机制解最大主压应力的关系,讨论了电性变化的物理机理。结果表明,视电性变化与饱水裂隙电阻率 ρ_f 、固架电阻率 ρ_0 和裂隙率 v 有关,与DD模式预言的震源区扩容阶段电阻率变化过程,岩(土)标本加载过程中视电阻率变化相吻合,地震电性变化主要是由于孕震晚期阶段震源区及附近扩容裂隙快速发展、导电通道串通、导电流体活跃而引起的。我国地震地电阻率观测确实检测到了这一变化。

关键词:视电性变化;机理;地电阻率;地震孕震晚期阶段

中图分类号:P315.75*2

文献标识码:A

文章编号:1000-0844(2004)03-0234-06

0 引言

强地震发生在复杂地壳条件中,大型活动构造(断层)切割地壳深度远超过震源深度。我国大陆浅源破坏性地震以水平应力为主,地电前兆观测深度局限于地壳浅层,这些造成了地电前兆异常演化的复杂性。因为人们对前兆的复杂性认识十分有限,对一些强地震前显示的突出电性变化往往在信度方面打折扣或提出质疑。因此,需要在多方面研究地震电性变化,认识与了解其存在的可能性、客观性以及可观测性和可用性。本文从强地震震例、近震中区视电性变化各向异性和电性变化的物理机理讨论等方面研究地震电性变化,期望促进对上述问题的认识与了解。

1 几个震例中的视电性变化

我国在多年的地震地电阻率观测中,积累了相当丰富的震例。某些电性变化在时间上、变化形态上、与其它前兆的协调性方面都显示出与地震的显著相关性。1976年唐山 $M_s7.8$ 和松潘-平武 $M_s7.2$ 地震,近距离的昌黎、平谷和武都台在震前约1年尺度~短临阶段均显示了突出的地电阻率变化信息。由图1可见,这两次大震在时间上与地电阻率的突出下降变化相当对应,并且昌黎、武都地电阻率在震前~震后一段时间内形态变化十分相象,具有明显重现性。同时唐山地震时昌黎台(77 km)的下降变化远比松平地震时武都台(105 km)的下降变化突出。

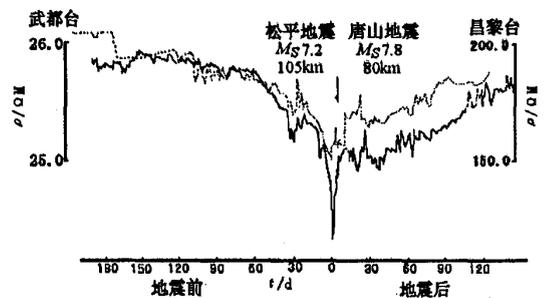


图1 强震前昌黎、武都台的地电阻率异常对比
(虚线为武都台,实线为昌黎台)

Fig. 1 Anomalies of earth-resistivity before two strong earthquakes at Changli and Wudu stations.

收稿日期:2004-08-04

基金项目:中国地震局地震联合基金项目(102058);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20040055

作者简介:马占虎(1978-),男(回族),宁夏海原人,助理研究员,现主要从事地震电磁研究工作。

唐山地震前约1年尺度~短期阶段近距离的平谷地电(111 km)下降和回升变化相当突出(图2)。从震前1975年4月开始,该台两个测向同步下降,约1976年4月份两个测向不同步的回升,强地震发生在恢复性变化期间。

1991年山西大同 $M_s 5.8$ 地震距离河北阳原台仅仅33 km,其电阻率变化与图2所示的平谷台地电阻率变化过程相当符合(图3)。

2003年山西洪洞 $M_s 5.0$ 地震距离临汾台仅仅19 km,该台EW测向仍然显示了震前1年尺度的下降异常和震前短期阶段的恢复性变化(图4)。

以上展示了在三个不同震级的地震前,不同台站、不同距离和不同观测仪器在不同时间的地震前兆性变化震例。三个震例的共同点是:(1)台站位于震中区或附近。按郭增建等(1979)给出的震源体尺度估计公式,这三次地震震中距与震源体尺度相当。(2)前兆性变化在震前1年尺度是显著下降的,在震前短期阶段显著恢复。这个变化过程符合米级尺度含水花岗岩标本自然加载破裂过程中电阻率的变化^[1,2],与DD模式预言的震源区电阻率变化过程吻合。

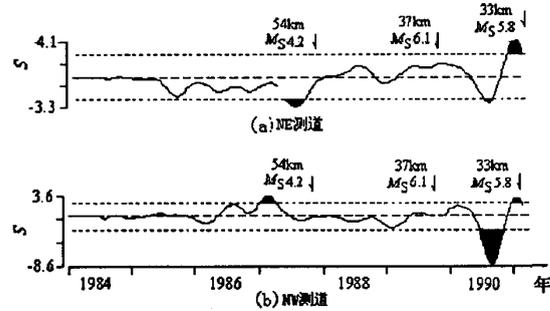


图3 1991年大同地震阳原台地电阻率速率曲线
Fig. 3 Earth-resistivity rate curves before Datong earthquake in 1991.

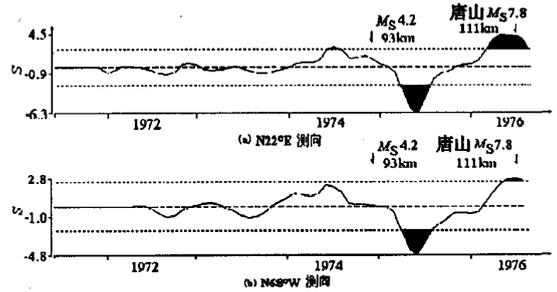


图2 唐山地震前平谷台地电阻率归一化月速率曲线
Fig. 2 Normalized monthly variation rate of Pinggu station before Tangshan earthquake.

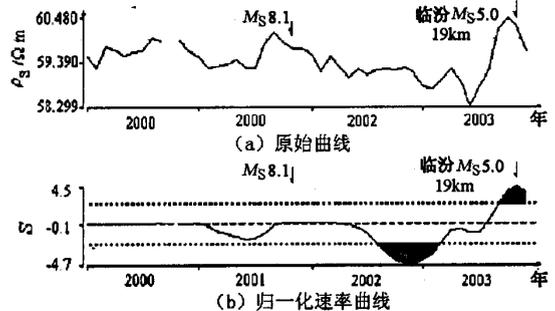


图4 临汾台EW测向地电阻率原始曲线和归一化月速率曲线
Fig. 4 Earth-resistivity original curve and Normalized monthly rate curve of Linfen station.

2 视电性变化各向异性

EDA模式描述上地壳内原生裂隙的排列方式,研究近震中区电性变化的各向异性涉及体积扩容、微裂隙扩展阶段的裂隙定向排列问题,注重EDA模式描述的裂隙排列方式构成的均匀方位各向异性介质^[3]。近年来这个介质模型在地震波传播各向异性、地震电磁现象各向异性研究中应用比较广泛。杜学彬等^[1]讨论了应用均匀方位各向异性介质描述震源区及附近介质的可能性,并研究了在均匀方位各向异性介质中视电性变化各向异性与加载方向理论关系,原因十分清楚:对于地面视电阻率同为上升型变化,加载方向真电阻率的变化幅度大于垂直加载方向,导致垂直加载方向视电阻率变化幅度大于加载方向的变化;对于下降型变化,加载方向真电阻率的变化幅度小于垂直加载方向,导致垂直加载方向视电阻率的变化小于加载方向的变化。也就是说,在加载过程中真电阻率变化与视电阻率变化最大的方向相差90°^②。这个结果清晰的解释了绝大多数岩(土)标本加载过程中视电阻率的方向性变化(地面两个测向的

① 杜学彬,马占虎,等.地震电性变化的各向异性[J].(待刊)

② 马占虎.强地震孕育晚期阶段正震中区电性变化各向异性.兰州地震研究所硕士研究生学位论文,2003.

反向变化尚待研究)。

杜学彬等^①研究了我国大陆 27 次强地震附近 41 个地电台站震前 1 年尺度 ~ 短期阶段视电阻率各向异性变化,得到:在超过 95% 的台站上,视电性变化最突出的测向与强地震震源机制解给出的最大主压应力方位正交或近于正交;视电性变化最小或达不到异常识别标准的测向是在主应力方位或近于主应力的方位。如 2003 年民乐—山丹地震山丹台视电性变化最突出的侧向为 N25°W,而此次地震主压应力方位为 NEE 向。

表 1 强震近震中区地电阻率变化与最大主应力方位

时间	地震		台站	震中距/km	测向	月速率值	λ	主压应力方位					
	地点	震级/ M_s											
1	2003-10-25	民乐—山丹	6.1	山丹	43	N06°E	-4.0	1.12	NEE				
						N25°W							
						N84°W				-3.2			
						宝坻				77	SN	-3.75	1.2
						EW				-2.67			
						马坊				114	N22°E	-6.3	1.14
N68°W	-4.8												
2	1976-07-28	唐山 滦县	7.8 7.1	塘沽	87	N11°W	-4.1	1.2	NEE (NWW)				
						N80°E				-2.9			
						昌黎				73	SN	-8.7	1.21
						EW				-5.9			
						西集				113	SN	-5.9	1.13
						EW				-4.6			

根据图 2 可见,唐山地震时近距离的平谷台在 N22°E 测向上震前 1 年尺度的突出下降型变化和震前短期阶段的恢复性变化明显大于在 N68°W 测线上的同期变化。唐山 7.8 级地震及其当天的滦县 7.1、宁河 6.2 级强余震震源机制解和地震宏观考察给出的最大主压应力方位接近 EW 方向^[4]。大同 5.8 级地震震源机制解和宏观考察给出的最大主压应力方位是 NE 向,附近的阳原台在 N68°W 测线上显示的震前 1 年尺度下降和短期上升变化远比 N22°E 测线上的这些变化突出(图 3)。显然,如果震源机制解和地震宏观考察给出的最大主压应力确实是孕震晚期阶段震源区及附近的最大加载方向,震例显示的视电性变化各向异性与真、视各向异性的理论分析和岩(土)标本加载过程中视电阻率方向性变化是完全吻合的。

根据这个结果,有理由认为震例显示的视电性变化与孕震晚期阶段震源区及附近的力学过程有关,我国现行地震地电阻率观测确实检测了近地表较深部与孕震过程有关的电性变化。

3 电性变化的机理讨论

膨胀流体扩散模式(DD 模式)是基于脆性岩石当其受压超过破裂应力一半时非弹性体积膨胀的事实而建立,特别强调水的作用。DD 模式将孕震过程分为三个阶段,即弹性应变阶段、非弹性体积扩容占优势阶段和外围水进入占优势的阶段。在弹性阶段,介质各种物理性质基本上不变化;在扩容阶段初期,由于裂隙增长,岩石体积膨胀和饱和度变化等原因,岩石的体积弹性模量和其它物理性质均会发生较大的变化,岩石整体的电阻率先略有上升,而后减小;在扩容后期阶段,岩石开始趋于饱和,电阻率继续下降。地震发生后,膨胀区应力释放,裂隙闭合,电阻率回升。DD 模式描述了地震孕育、发生过程中震源区介质的物理过程,预言扩容阶段 ~ 地震发生过程中介质电阻率表现为“略为上升—下降—回升”的变化形态。

实际上,由于目前地电台站供电极距 AB 对应的探测范围内介质一般是富含水的,应用 DD 模式解释

地电阻率变化的机理是比较合理的。由图5可见,唐山地震时昌黎台电阻率大幅度下降的同时,距离地电阻率台很近的昌黎龙家店水位也显示了突出的异常,时间上与电阻率下降非常同步,并且电和水的异常似乎形成了“镜像”反映。一般来说,7级以上地震约100 km范围内、6~7级地震约几十公里范围内的地电阻率中短期异常为下降型变化^[5]。在平谷、阳原台供电极距AB对应的探测范围内,介质富含水,图2和图3震前电阻率变化与DD模式预言的震源区电阻率变化过程基本吻合。显然,这些结果支持DD模式关于电阻率变化的解释。前苏联学者 Барсуков^[6]在DD模式和IPE模式的基础上,综合考虑了岩石扩容阶段裂隙中水的作用和裂隙定向排列的特点,设想在介质内部存在导电通道弯曲效应对介质电阻率的影响,并利用阿契定律 $\rho R = \rho W \phi^{-m}$ 进行了理论计算,解释了地震前电阻率的大幅度下降变化,甚至半个数量级的变化。

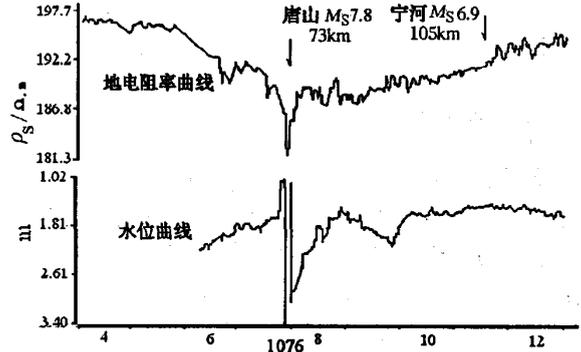


图5 唐山7.8级地震昌黎台地电阻率、水位变化曲线

Fig.5 Curves of apparent resistivity and water level of Changli station in Tangshan Ms 7.8 earthquake.

在实际观测中,强地震地电阻率变化多为百分之几,个别情况下超过10%。按照 Барсуков 的结果,导电流体存在于岩石的孔隙、裂隙和空穴的微细通道之中,是岩石导电性的决定因素。随着孕震过程的发展,岩石进入扩容阶段,岩石中孔隙和裂隙的体积发生变化,同时孔隙、裂隙及空穴微细通道的分布状态也随之改变,导致阿契定律中的结构系数 m 发生变化(考虑导电通道弯曲效应的情况下, $m > 1$),改变了导电流体的分布状态及导电通道,最终导致岩石电阻率的改变。根据梅世容等^[7],岩石标本大破裂前夕微破裂数目指数式增加,由此推断地震孕育后期震源区及附近介质内部微破裂数目也急剧增加,地下介质富含水,显然,地震视电性变化与微破裂发展、地下导电流体活动不无关系。

根据均匀方位各向异性介质中三个主轴方向的真电阻率关系 $\rho_1 > \rho_2 = \rho_3$,地面测线视电阻率变化与主轴方位真电阻率变化的关系为^①

$$\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 \sin^2 \varphi}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \varphi} \times \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} + \frac{1}{2} \frac{2 \cos^2 \varphi + \lambda^2 \sin^2 \varphi}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \varphi} \times \frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} \quad (1)$$

式中各向异性系数 $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} < 1$; φ 为地面测线与电性主轴 ρ_1 的夹角; ρ_2 为加载方向真电阻率; ρ_1 为垂直加载方向真电阻率。由式(1),地面任意测向视电阻率变化是与主轴方向的真电阻率变化直接相关的。

在均匀方位各向异性介质中,真电阻率与饱水裂隙的电阻率 ρ_f 、固架电阻率 ρ_0 和介质单位体积内等效裂隙体积(裂隙率) v 的关系可以表示为下式^②:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_1 &= \rho_0 \cdot (1 - v) + \rho_f \cdot v \\ \rho_2 &= \frac{\rho_0 \cdot \rho_f}{\rho_f \cdot (1 - v) + \rho_0 \cdot v} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

根据式(2),随着裂隙电阻率 ρ_f 减小, ρ_1 和 ρ_2 减小,反之则增大;随着裂隙率增大, ρ_1 和 ρ_2 减小。由式(1)知,真电阻率下降变化将导致视电阻率下降变化。

根据式(2)可导出真电阻率变化与裂隙率变化的关系:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} &\approx \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0/v + \rho_f} \cdot \frac{\Delta v}{v} \\ \frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} &\approx \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_f/v + \rho_0} \cdot \frac{\Delta v}{v} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

因为一般情况下 $\rho_0 \gg \rho_1$, 根据式(3), 裂隙率增大 ($\frac{\Delta v}{v} > 0$), $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1}$ 、 $\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2}$ 负向增大; 裂隙率减小 ($\frac{\Delta v}{v} < 0$), $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1}$ 、 $\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2}$ 正向增大。

公式(2)、(3)的结果与震源区及附近的视电性下降变化的集中, DD 模式预言的震源区扩容阶段的物理过程以及梅世容等预言的震源区介质微破裂的快速发展吻合。据 Барсуков, 当空隙率 $\psi \ll 3\%$ 和导电流体电阻率 ρ_f 远小于骨架电阻率 ρ_0 时, 介质电阻率主要取决于 ρ_f , 这也符合公式(2)、(3)的结果。Барсуков 设想的等效导电通道、弯曲效应等概念的直观物理图象并不十分清晰, 从本文讨论结果看, 裂隙率的增大可能是构成结构复杂性、微细导电通道增长的主要原因之一。由此可见裂隙率 v 和裂隙电阻率对视电性变化、真电性变化的影响相当重要。

据文献[5], 地电阻率中短期异常震前平均持续时间与震级之间存在非线性增长关系: $M_s \leq 5.0$ 地震, 异常时间随震级增大显示较快的线性增长; $5.0 < M_s < 6.5$ 地震, 异常时间逐步转为缓慢增长; $M_s \geq 6.5$ 地震, 异常时间增长十分缓慢。平均异常幅度与震级之间为指数式增长关系: $M_s \leq 5.0$ 地震, 随震级增大异常幅度缓慢增大; $5.0 < M_s < 6.5$ 地震, 异常幅度逐步快速增大; $M_s \geq 6.5$ 地震, 异常幅度快速增大。前兆异常的显示与介质能量的释放有关, 能量释放包括前震活动、微破裂的发育和发展、断层蠕动等多种形式。由杜学彬等利用流变介质模型的模拟结果看^[5], 在地震孕育的中短期阶段, 越接近地震后期或大震级阶段(异常时间越长, 震级越大), 介质内部弹性变形能量的积累和非弹性变形能量的释放越大。模拟结果与震例统计结果十分吻合。从物理过程来看, 在低应力作用下的低裂隙率阶段, 导电流体的作用小, 介质物性变化小, 并且需要较长时间的物理过程改变介质物性, 同时积累的弹性能量小, 能量释放时对应震级不大。远距离的地震或 5 级多地震比强地震近震中区的电阻率显示正异常的几率高, 可能正是此原因。在高应力作用下, 裂隙率增大, 导电流体的作用增强, 介质物性变化大, 并且较短时间内改变介质物性, 同时积累的弹性能量大, 能量释放时对应的震级大。

上述异常机理的讨论中, 没有考虑层状介质情况。实际上, 对一定的电性结构和装置参数, 下覆地层电阻率上升或降低, 地面视电阻率与下覆地层真电阻率变化反向, 这也是地下介质富含水情况下, 视电阻率上升异常的可能原因之一。

4 结论

(1) 震中区及附近的典型震例其视电性变化与 DD 模式预言的震源区扩容阶段电阻率变化过程吻合, 与岩(土)标本加载过程中电阻率变化形态吻合, 物理分析清楚。同时视电性变化的各向异性与震源机制解最大主压应力方位表现出了一致性的相关, 并与岩(土)标本加载过程中电阻率方向性变化吻合。由此证明, 我国现行地电阻率观测确实检测了与强地震孕震晚期阶段地壳较深部的地震电性变化有关的信息。

(2) 在孕震晚期阶段, 随着应力强度逐步增大和高应力作用时间的增长, 震源区及附近介质内部的新生裂隙数目非线性增大, 由于水平差应力作用, 裂隙逐步趋于定向排列, 导电流体活跃, 沟通了地下富含水介质内部的导电通道, 造成介质真电阻率变化而引起视电阻率显示震前突出变化。微裂隙快速发展、相互串通和导电流体活动产生电性变化是最主要的原因之一。

[参考文献]

- [1] 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 23(3): 289-297.
- [2] 陆阳泉, 钱家栋, 刘建毅. 大型花岗岩标本破裂过程中电阻率和声发射前兆特征的实验研究[J]. 西北地震学报, 1990, 12(2): 35-41.
- [3] Crampton S, Evan R, Atkins B K. Earthquake prediction: a new physical basis[J]. Geophys. J. R. astr. soc, 1984, 76(1): 147-156.
- [4] 唐山地震资料汇编组. 一九七六年唐山地震观测资料汇编-地电部分[R]. 1980. 1-58; 193-254; 313-346.

- [5] 杜学彬,薛顺章,张世中,等. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报,2000,22(4):368-376.
- [6] O M Барсуков. 陈有发译. 地震电性前兆的可能原因[A]. 见:地震地电学译文集[C]. 北京:地震出版社. 1989. 312-318.
- [7] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社,1993. 302-307.
- [8] 陈大元,陈峰,王丽华,等. 单轴压力下岩石电阻率的研究—电阻率的各向异性[J]. 地球物理学报,1983,26(Supp):783-792.
- [9] 毛桐恩,王铁城,姚家榴,等. 唐山地震地电阻率各向异性变化研究[J]. 地震学报,1995,17(4):505-510.
- [10] 钱家栋,陈有发,金安忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社. 1985. 116-132.
- [11] 杜学彬,赵和云,陈保智. 地电阻率临震突变与活断层、发震应力场[J]. 地震学报,1993,15(3):303-312.
- [12] 桂莹泰,冠华平,戴经安. 唐山、松潘地震前视电阻率短临异常图像重现性[J]. 西北地震学报,1989,11(4):71-75.
- [13] 阮爱国,李清河. 地壳介质各向异性电性本构关系讨论[J]. 华南地震,1999,19(3):35-42.
- [14] 孙正江,王华俊. 地电概论. (第一版)[M]. 北京:地质出版社. 1984. 3-192.
- [15] J G Negi and P D Saraf. Anisotropy In Geoelectromagnetism[M]. ELSEVIER; Science Publishingers Company Inc. ,1989. 1-18;19-88; 175-232.
- [16] 张肇诚主编. 中国震例[M]. 北京:地震出版社. 2000. 1989-1991.

ELECTRICAL VARIATION AND ITS PHYSICAL MECHANISM IN EARTHQUAKE PROCESS

MA Zhan-hu^{1,2}, DU Xue-bin^{1,2}, TAN Da-cheng^{1,2}, CHEN Jun-ying^{1,2}, ZHAO Jie³, YE Qing^{1,2}

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Jiayuguan Seismological Station, Jiayuguan Gansu 735100, China)

Abstract: Based on the apparent electrical variations anomalies in some typical earthquake examples, the relation between apparent electrical variation anisotropy and maximum principal stress from focal mechanism is introduced, the physical mechanism of this variation is discussed. The result shows that the apparent electrical variation is related with cranny ratio v , resistivity of water filled cranny ρ_f and resistivity ρ_0 of inherent framework, and coordinated with the earth-resistivity variation for dilatancy phase of focal region in DD model and that in loading process to rock (soil) sample. The main reasons of electrical variation are development of new-born crannies, connection of conductive channels and movement of conductive liquid near epicenter region during the late phase of strong earthquake preparation. The earth-resistivity observations in China have examined the information of this variation in deed.

Key words: Apparent electrical variation; Mechanism; Earth-resistivity; Late phase of strong earthquake preparation