

张国苓, 乔子云, 贾立峰, 等. 华北成组地震前地电阻率小波能谱分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(增刊): 046-052. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.增刊.046
ZHANG Guoling, QIAO Ziyun, JIA Lifeng, et al. Wavelet Power Spectrum Analysis of Geo-resistivity Prior to Earthquake Groups in North China[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Supp.): 046-052. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.046

华北成组地震前地电阻率小波能谱分析^①

张国苓, 乔子云, 贾立峰, 罗 娜

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:应用小波变换方法处理了华北地区中强成组地震前后震中附近台站的地电阻率观测数据, 研究地电阻率小波能谱及相对变化特征。结果表明小波能谱在震前中期阶段地电阻率出现异常, 与成组地震活动中地电阻率出现破年变异常相符。中强震前或成组地震过程中地电阻率出现明显小波相对能谱增大异常, 能较好的识别地电阻率短临变化。

关键词:华北; 成组地震; 地电阻率; 小波能谱

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)增刊-046-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.Supp.046

Wavelet Power Spectrum Analysis of Geo-resistivity Prior to Earthquake Groups in North China

ZHANG Guoling, QIAO Ziyun, JIA Lifeng, LUO Na

(Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: In this paper, we investigate the Tangshan M7.8, Datong M5.9, and Zhangbei M6.2 earthquake groups, each of which includes three to four earthquakes of the same magnitude. The case study results of these earthquake groups in north China show that stations near earthquake epicenters can record a significant rate of earth resistivity anomalies, which are characterized by a wide spatial distribution and long duration. We applied the wavelet transform method to analyze the geo-resistivity data observed prior to the occurrence of the earthquake groups to study the wavelet power geo-resistivity spectrum and its relative variation. The results suggest that the wavelet power spectrum can well reflect changes in the geo-resistivity, and is an effective method for extracting short-term geo-resistivity anomalies. In the mid-term stage prior to earthquakes, the wavelet power spectra of geo-resistivity are abnormal. The relative wavelet power spectra show obvious increases prior to moderate earthquakes or an earthquake group, which can well identify short-term and impending changes in geo-resistivity.

Key words: north China; earthquake groups; geo-resistivity; wavelet power spectrum

① 收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH17004Y); 中国地震局震情跟踪定向工作任务青年课题(2016010402)

作者简介: 张国苓(1986—), 女, 硕士, 河北石家庄人, 主要从事电磁学和地震预测研究等。E-mail: zhgl1986@126.com。

0 引言

上世纪五六十年代,日本、前苏联、中国等开展地震地电阻率实验观测,陆续报道了被认为是与地震相关的异常、理论和承载实验方面的研究^[1-5]。我国从 1966 年开展地电阻率观测以来,在大震、中强震前记录到了显著的中短期异常,多以趋势性下降变化、破年变为主^[6-12]。华北块体构造复杂,地震具有分区成组活动的特点,即一个强震发生后,在相隔很短的时间内,在原地或者相邻地区发生同等或者稍小一些的地震^[13-14]。张国民等^[15]提出的构造块体成组孕震模型表明,构造应力场的变化导致区域前兆异常群体性出现。1976 年唐山 7.8、1989 年大同 5.9 和 1998 年张北 6.2 成组地震之前,震中附近地电台站记录到了显著的地电阻率中短期异常变化,具有空间分布范围广,持续时间长,异常具有群体性,而且对每一个异常来说又具有整体性特点^[16-20]。地电阻率的异常变化与成组地震的发生有一定的对应性,异常的时空变化对成组强震活动的迁移有一定的指示意义^[21-24]。地电阻率观测资料有较高的观测精度,对趋势异常与短期异常的识别与分离是极为重要的,通过小波变换可对

不同频率范围内的信息(高频与低频信息)进行识别与分解。趋势异常与短期异常的最大差别在于两者反映不同频率段的异常信息,前者反映的是低频范围内的信息,后者则反映相对高频范围内的异常信息^[25]。本文利用小波变换法处理华北地区地电阻率自观测以来的日均值观测数据,比对中强地震前后地电阻率变化,在地电阻率中短期异常方面获得新的认识。

1 华北成组地震中地电阻率异常信息

在《中国震例》和前人工作成果的基础上,尽可能剔除明显的干扰后,对华北成组中强地震映震较好的地电阻率台站资料进行分析,结果表明震前地电阻率具有明显异常(表 1)。唐山地震组包括 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震、1976 年 7 月 28 日滦县 7.1 级地震和 1976 年 11 月 15 日的宁河 6.9 级地震。大同地震组包括 1989 年 10 月 18 日大同 5.7 级地震、10 月 19 日大同 5.9 级和 5.5 级地震、1991 年 1 月 29 日忻州 5.1 级地震和 1991 年 3 月 26 日大同 5.8 级地震。张北地震组地震包括 1998 年 1 月 10 日张北 6.2 级地震、1999 年 3 月 11 日张北 5.6 级地震和 1999 年 11 月 1 日大同 5.6 级地震。

表 1 华北地区成组地震地电阻率映震情况

发震时间 (年-月-日)	发震震中	震级 M_s	台站	震中距/km	异常持续 时间/月	异常幅度/%	异常描述
1976-07-28	河北唐山	7.8	唐山	0	25	EW 向: -3.3 NS 向: -4.5	震前大幅度下降,震后回升
1976-07-28	河北滦县	7.1	昌黎	70	20	EW 向: -2 NS 向: -1	震前 EW、NS 向趋势下降,短临阶段加速下降,出现破年变
1976-11-15	河北宁河	6.9	宝坻	80	18	EW 向: -3.8 NS 向: -3	震前 EW、NS 向趋势下降,地震前处于低值,强余震前后出现起伏
			马家沟	10	2	NE 向: -5 NS 向: -1.6	震前突降,震后回升 震前 NW 向下降,震后恢复正常后
1989-10-18	山西大同	5.7	大同	45	11	EW 向: -1.4 NE 向: 0.42	又出现新异常 NE、NW 两测道出现年变畸变,震后继续发展
1989-10-19	山西大同	5.9	阳原	50	13	NW 向: -0.62 NS 向: -3.2	震前下降
1991-01-29	山西忻州	5.1	代县	120	10	EW 向: -3.1 NS 向: -4.0	破年变,震前 EW、NS 向下降震后
1991-03-26	山西大同	5.8	宝昌	220	5	EW 向: -3.0	逐步恢复
1998-01-10	河北张北	6.2	阳原	109	23	NE 向: -1.3	NE、NW 两测道出现年变畸变,年变幅变小,几乎消失
1999-03-11	河北张北	5.6	大同	141	21	EW 向: 4.2 NS 向: 1.1	破年变
1999-11-01	山西大同	5.6	宝昌	123	22	EW 向: -0.9 NS 向: -3.1	破年变,震前 EW、NS 向下降震后逐步恢复

地电阻率异常在华北成组地震主震前 4 个月至 1 年半内出现显著的趋势下降变化,异常幅度多大

于 1.5%,且震级越大,异常持续时间越长(图 1)。地电阻率在主震发生后继续下降或维持低值不恢

复,这种异常呈现出比单个地震更为复杂的形态特征,往往持续到成组地震中最后一个强震发生后才结束。某一次地震的发生虽然可能引起异常的局部变化,但不改变其总体变化趋势。地电阻率总体表现为趋势变化背景下的反复升降,呈现出异常持续时间长、幅度大和恢复慢的特点。

2 观测数据与预处理

为反映地震前后地电阻率的变化,一般选用地震之前约两年至成组地震之后两年的数据。唐山地震前昌黎地电阻率日均值数据时间段为 1975 年 1 月 1 日—1977 年 12 月 31 日。大同地震前阳原、代县台地电阻率日均值数据时间段为 1987 年 1 月 1 日—1994 年 12 月 31 日。张北地震前阳原、宝坻台地电阻率日均值数据时间段为 1995 年 1 月 1 日—2000 年 12 月 31 日。

地电阻率观测数据有时会受到漏电干扰,日均值中存在个别突跳点,取其前后相邻数据的均值代替该突跳数据。另外,地电阻率数据信息中包含气温、降雨、大风等引起的表层介质地电阻率的短期干扰变化以及与构造应力相关的底层地电阻率变化。小波分析可以在几乎不损失信息的情况下进行重构^[26]。本文采用 Daubechies(dbN)小波系中的 db8 小波基对地电阻率资料进行小波变换处理。地震前地电阻率中短期异常持续时间往往为 1 年尺度^[27],应用小波变换可以去除地电阻率低频长趋势变化成分,即舍去大于 102.4 天的尺度部分。由于降雨、大风等引起的地电阻率变化时间较短,一般为几小时至几天,可以舍去小于 8 天的短周期高频成分,以此为基础分析小波能谱及相对变化。

3 分析方法

小波变换是一种分析非稳态信号的有效方法,在地球物理学、地震勘探等各项研究中得到了广泛的应用^[28-30]。传统的谱分析方法(傅里叶变换、最大似然法、最大熵谱法等)不具备时间域和频率域同时分析信号的功能。小波变换是一种线性时频分析方法,通过伸缩和平移等运算功能可对函数或信号进行多尺度的细化分析,在时间域和频率域都有很好的局部化性质,因而能有效地从信号中提取信息。对信号低频成分,采用宽的时间窗,得到高的频率分辨率;对信号高频成分,则采用窄的时间窗,得到低的频率分辨率。由于小波变换有多分辨率的特点,可以对各周期分量进行时间定位。有限时间序列的

小波变换定义为积分形式^[31]:

$$W_{\psi}f(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}^{*}(t)dt \quad (1)$$

式中: * 表示对 $\psi_{a,b}(t)$ 取复共轭; a 是尺度伸缩因子; b 是时间平移参数; $W_{\psi}f(a,b)$ 表示经小波变换后的小波系数。 $\Psi_{a,b}(t) = 1/a^{1/2} \cdot \psi[(t-b)/a]$ 是小波母函数,这里我们选择 Morlet 小波。常用的复值 Morlet 小波在频率域为:

$$\phi(\omega) = \pi^{-1/4} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (2)$$

在 $\omega_0 \geq 5$ 时,式(2)近似满足容许条件,将 ω_0 值取为 6^[32]。 $\phi(t)$ 和 $W_{\psi}f(a,b)$ 是复数,通常用振幅的平方 $|W_{\psi}f(a,b)|^2$ 来绘制小波能谱图。小波能谱可在时间域得到信号各频谱成分随时间的变化。本文中除了应用小波能谱方法处理观测数据外,还应用了各频段能谱的相对变化 $R_w(a,b) = |W_{\psi}f(a,b)|^2 / \bar{W}^2(a,b)$ 方法,其中, $\bar{W}^2(a,b) = N^{-1} \cdot \sum_{l=0}^{N-1} |W_l f(a,b)|^2$ 是全局小波能谱,表示在整个事间内将小波能谱对时间取平均, N 表示数据长度。

4 震例分析

(1) 1976 年唐山 7.8 级地震

昌黎台地电阻率自 1975 年底开始出现趋势下降变化,为提取地震前异常,数据选取时间段为 1975 年 1 月 1 日—1977 年 12 月 31 日。图 1 为 1976 年唐山 7.8 级地震前后昌黎台 NS、EW 两个测道地电阻率日均值原始值、小波能谱和各频段能谱的相对变化值。从图 1(a)地电阻率原始曲线可以看出,1975 年 5 月起地电阻率 NS 向年变消失和呈现趋势下降变化,1976 年 7 月地电阻率在震前短临阶开始段出现加速下降,幅度为 -5.9%。在 1976 年 8 月 NS 向地电阻率震后转折回升,并出现规则的年变。从图 1[(a)中]小波能谱图可以看出,1975—1977 年昌黎台 NS 向地电阻率周期约 128—400 天成分的能量谱值最大构成了地电阻率小波能谱变化的主要成分。其他周期成分相对较小。自 1975 年 5 月份开始该频段的能谱值显著增强,明显大于其他频段,对应于地电阻率的短期下降变化,震后逐渐恢复。从图 1[a(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1976 年 5 月开始,16~64 天周期成分的能谱相对值迅速增大,1976 年 7 月最高,约为正常变化的 12 倍,对应于地电阻率的短临阶段的加速下降变化。1976 年 10 月份后各频段逐渐恢复正常

平稳状态,各频段能谱相对变化都维持在较低的水平状态。

从图 1[b(上)]原始曲线可以看出,1975 年 5 月起昌黎 EW 向地电阻率出现短期变化及临震加速下降,临震前半个月,EW 向下降速率达每天 0.2%,累计幅度为-5.6%。EW 向地电阻率在震后转折回升,并出现规则的年变。图 1[b(中)]小波能谱图可以看出,1975—1977 年昌黎台 EW 向地电阻率周期约 128~400 天成分的能量谱值最大,该频段

能谱明显大于其他频段。自 1976 年 7 月份开始 16~124 频段的能谱值显著增强,对应于地电阻率加速下降变化,震后逐渐恢复。图 1[b(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1976 年 4 月开始,16~64 周期成分的能谱相对值迅速增大,1976 年 7 月最高,约为正常变化的 12 倍,1976 年 12 月份后各频段逐渐恢复正常平稳状态。因此,可以认为昌黎台 NS 向、EW 向地电阻率同时记录到了唐山震前中期、短临阶段的小波能谱相对增大的异常。

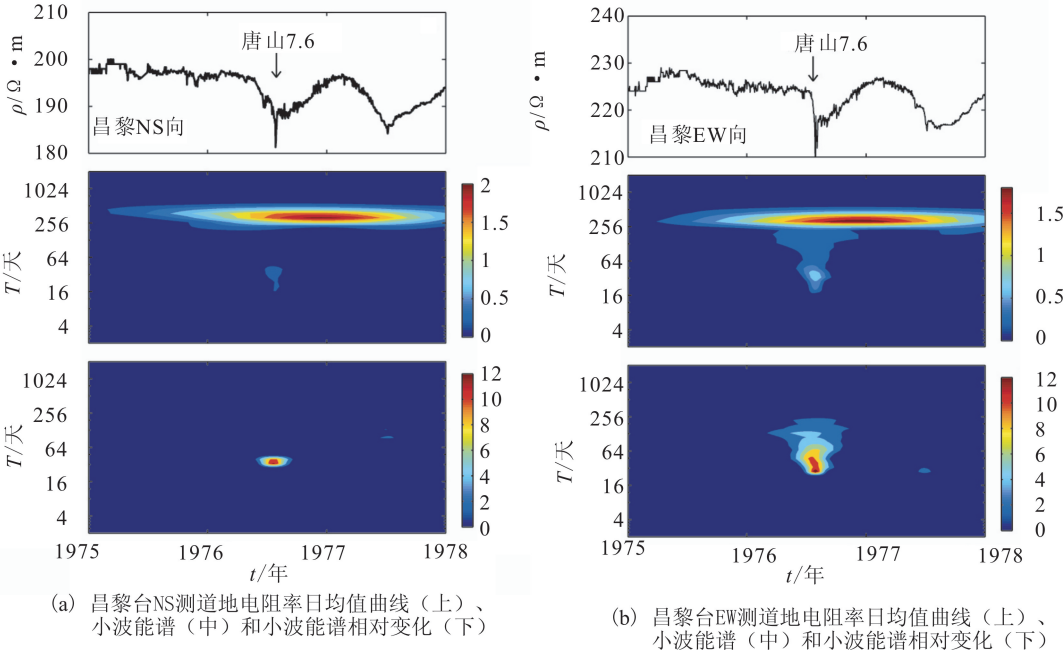


图 1 唐山地震前昌黎台地电阻率小波能谱及相对变化

(2) 1989 年大同 5.9 级地震

图 2(a)给出阳原台 NE 向 1988 年 1 月 1 日—1993 年 12 月 31 日地电阻率日均值原始曲线、小波能谱和各频段能谱的相对变化值。可以看出,阳原 NE 向地电阻率在 1989 年大同地震前年变规律清晰,没有明显地震异常。地震后,1990 年出现年变幅突然增大,NE 向 1991 年年变高值超过往年,随后连续发生两次 5 级以上地震。小波能谱图可以看出,1988—1993 年阳原台 NE 向地电阻率周期约 128~400 天成分的能量谱值最大,其他周期成分相对较小,这些周期成分构成了地电阻率小波能谱变化的主要成分。自 1989 年 1 月份开始该频段的能谱值就显著增强,1991 年 1 月份达到最大值,成组地震后 1992 年底逐渐恢复,该变化与主震后地电阻率年变幅增大较为一致。图 2[a(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1990 年初开始,32~128 周期成分的能谱相对值迅速增大,1990 年 7 月最高,约

为正常变化的 9 倍,对应于成组地震期间地电阻率的快速下降变化。1993 年后各频段逐渐恢复正常平稳状态,各频段能谱相对变化都维持在较低的水平状态。

图 2(b)给出代县台 EW 向 1987 年 1 月 1 日—1994 年 12 月 31 日地电阻率日均值原始曲线、小波能谱和各频段能谱的相对变化值。地电阻率原始曲线可以看出,代县台 EW 向地电阻率在 1989 年大同地震前出现下降变化,高频信息增多,成组地震后恢复正常变化。小波能谱图可以看出,1987—1994 年代县台 EW 向地电阻率周期约 128~400 天成分的能量谱值最大,成组地震前能量谱增大,成组地震过程中能量谱减小,对应于成组地震中地电阻率年变幅减小的变化。自 1989 年 1 月份开始该频段的能谱值就显著增强,1991 年 1 月份达到最大值,成组地震后 1992 年底逐渐恢复。图 2[b(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1988 年初开始,16~64

周期成分的能谱相对值迅速增大,1990 年 7 月最高,约为正常变化的 9 倍,对应于成组地震过程中地电阻率脉冲成分的增加时段,1993 年后各频段逐渐下降至背景值。因此,可以认为阳原台 NE 向、代县

台 EW 向地电阻率同时记录到了大同成组地震中的小波能谱相对增大的异常。

(3) 1998 年张北 6.2 级地震

图 3(a)给出阳原台 NE 向 1996 年 1 月 1 日—

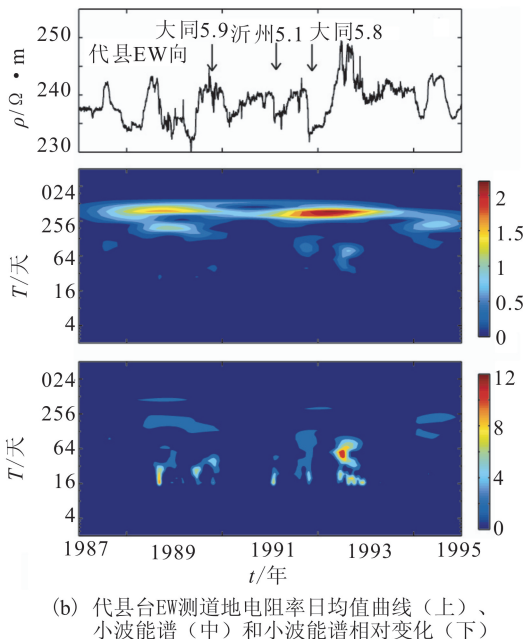
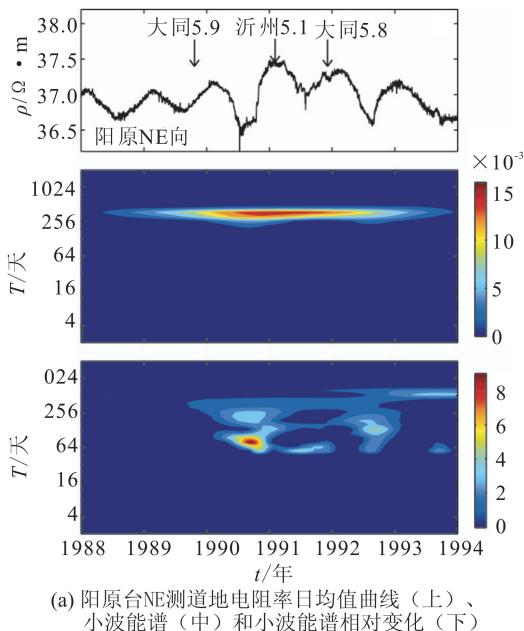


图 2 大同地震前阳原台 NE 向、代县 EW 向地电阻率小波能谱及相对变化

2000 年 12 月 31 日地电阻率日均值原始曲线、小波能谱和各频段能谱的相对变化值。可以看出,张北 M6.2 地震前阳原台 NE 向地电阻率年变幅增大和加速下降变化,可能是正常年变叠加趋势下降的结果,单个地震发生之后,异常未恢复,反而继续下降,在成组地震之后,异常于 2000 年逐渐恢复正常,期间发生两次 5 级以上地震。小波能谱图可以看出,1996—2000 年阳原台 NE 向地电阻率周期约 128~400 天成分的能量谱值最大,该频段能谱明显高于其他频段。自 1997 年 5 月份开始该频段的能谱值就显著增强,1997 年 11 月至 1998 年 1 月份达到最大值,震后逐渐恢复,对应于张北震前年变幅增大的异常变化。图 3[a(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1996—1997 年 4 月,各频段变化比较平稳,1997 年 5 月开始,16~64 周期成分的能谱相对值迅速增大,1999 年 9 月最高,约为正常变化的 15 倍,2000 年后各频段逐渐恢复正常平稳状态。因此,可以认为阳原台 NE 向地电阻率记录到了张北震前中短期阶段的小波能谱相对增大的异常。

图 3(b)给出宝昌台 NS 向 1995 年 1 月 1 日—2000 年 12 月 31 日地电阻率日均值原始曲线、小波能谱和各频段能谱的相对变化值。图 3[b(上)]可以看出,张北 M6.2 地震前宝昌台 NS 向地电阻率年

变消失,可能是正常年变叠加趋势下降的结果,单个地震发生之后,异常未恢复,地电阻率持续下降,在成组地震之后,异常于 2000 年逐渐恢复正常。图 2 [b(中)]小波能谱图可以看出,1995—2000 年宝昌台 NE 向地电阻率周期约 128~400 天成分的能量谱值最大,其他周期成分相对较小,说明宝昌台地电阻率具有明显的年变特征。自 1997 年 5 月份开始该频段的能谱值就显著减弱,对应于地电阻率年变幅减小的破年变变化。图 3[b(下)]可以看出各频段能谱的相对变化,1998 年初至 1999 年底,16~64 周期成分的能谱相对值迅速增大,对应于地电阻率快速下降及回升的变化,成组地震结束后各频段逐渐恢复正常平稳状态。因此,可以认为宝昌台 NS 向地电阻率记录到了张北震前中短期阶段的小波能谱相对增大的异常。

5 讨论

华北中强成组地震前存在显著的地电阻率破年变及短临异常,本文用小波能谱分析方法处理了唐山地震、大同地震、张北地震前后震中周围台站地电阻率日均值,得到了对应地震较明显的小波能谱及相对变化。地电阻率 128~400 天成分的小波能谱最大,明显高于其他频段能谱,能很好的反映

地电阻率的年变。我国大多数的台站存在规律性的年变,年变主要与地电台址电性断面、水文地质条件、布极极距有关^[33-34],经理论模型计算和相关性分析,认为无震时段的年变是在探测深度偏浅时,降雨、地表潜水位年变动引起地表表层介质电阻率的变化,是一种与地震无关的干扰变

化^[35-39]。地震前活动构造块体的运动引起周围地电阻率变化,该变化叠加在正常时段的年变上,出现了震前或成组地震活动过程中显著的破年变异常。小波能谱的增大和减小与地电阻率年变增大和减小相对应,能较好的反映震前地电阻率的中期阶段的破年变异常。

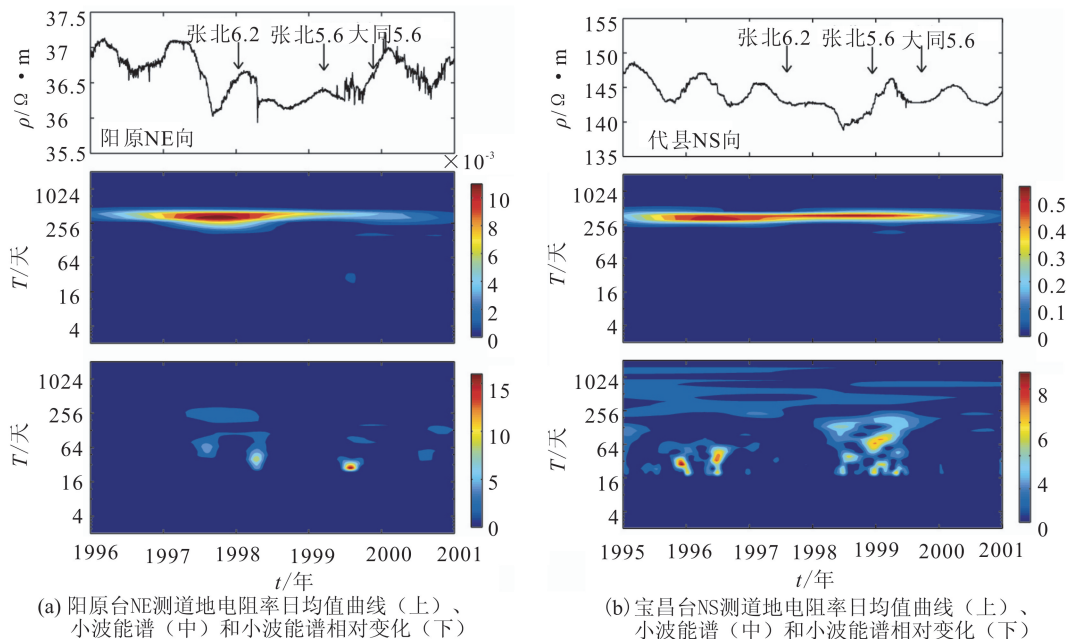


图3 张北地震前阳原台、宝昌台地电阻率小波能谱及相对变化

岩石破裂实验证实,应力增加使岩石中微裂隙增多,水的流入导致地电阻率下降,与膨胀—扩散模式基本一致^[40-41]。唐山地震前,昌黎台地电阻率震前一个月存在显著加速下降的短临变化,与小波相对能谱相对增大的相对应。小波相对能谱能识别地电阻率快速变化,较好的反应短临阶段的异常。汶川地震前也记录到成都台和江油台地电阻率相对能谱显著增大的异常变化^[25]。

6 结论

小波能谱变化及各频段能谱相对变化的理论依据可靠,应用与华北中强成组震前地电阻率异常提取结果表明,该方法提取地震前地电阻率变化信息的有效方法。由于断层异常活动引起地电阻率变化的周期并不确知,在提取长周期变化时,并不希望损失短周期成份。小波分析可在不(或者几乎不)损失原信息的基础上,把信号分解为互不影响的数个频率成份,每一个部分有不同的主导因素,使得物理意义更清楚,也为采用其他地电异常信息提取方法提供了方便。

小波能谱能很好的反映地电阻率的变化部分。

地电阻率小波能谱在震前或成组地震中显示出明显的增大或减小,能较好的识别地电阻率中期阶段的破年变异常。地电阻率小波相对能谱在震前或成组地震中的显示出明显的增大异常,能较好的识别地电阻率短临阶段的快速上升或下降异常。

参考文献

- [1] Brace W F, Orange A S. Electrical Resistivity Changes in Saturated Rock During Fracture and Frictional Sliding[J]. J Geophys Res, 1986, 73(4): 1433-1445.
- [2] Borsukov O M, Sorokin O N. Variations in Apparent Resistivity of Rocks in the Seismically Active Garm Region Izv[J]. Earth Physics, 1973, 10(1): 100-102.
- [3] Mazzella A, Morrison H F. Electrical Resistivity Variations Associated with Earthquakes on the San Andreas Fault[J]. Science, 1974, 185: 855-857.
- [4] Wang C Y, Goodman R E, Sundaram P N, et al. Electrical Resistivity of Granite in Frictional Sliding: Application to Earthquake Prediction[J]. Geophys Res Lett, 1975, 2(12): 525-528.
- [5] Yamazaki Y. Precursory and Coseismic Resistivity Changes[J]. Pure Appl Geophys, 1975, 133(1): 219-227.
- [6] 钱复业, 赵玉林. 地震前地电阻率变化十例[J]. 地震学报, 1980, 2(2): 186-197.

- [7] 钱复业,赵玉林,于谋明.地震前地电阻率异常变化[J].中国科学:B辑,1982(9):831-839.
- [8] 钱家栋,曹爱民.1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J].地震,1998,18(Sup):1-9.
- [9] 赵玉林,卢军,张洪魁,等.电测量在中国地震预报中的应用[J].地震地质,2001,23(2):277-285.
- [10] 张学民,李美,关华平.汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J].地震,2009,29(1):108-115.
- [11] 杜学彬.在地震预报中的两类视电阻率变化[J].中国科学:地球科学,2010,40(10):1321-1330.
- [12] 同睿,朱石军,胡克银,等.北京市延庆地震台地电阻率长期观测数据研究[J].地震工程学报,2015,37(3):724-730.
- [13] 李钦祖,于新昌.华北地区大地震的成组地震活动特点[J].地震科学研究,1980(1):1-8.
- [14] 刘蒲雄.华北成串强震孕育过程探讨[J].地震科学研究,1983(4):1-8.
- [15] 张国民,耿鲁民,张永仙,等.构造块体的成组孕震模型和前兆场某些特征的分析[J].地震学报,1995,17(1):1-10.
- [16] 赵玉林,钱复业.唐山 7.8 级强震前震中周围形变电阻率的下降变化[J].地球物理学报,1978,21(3):181-190.
- [17] 桂燮泰,关华平,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.
- [18] Lu J, Qian F Y, Zhao Y L. Sensitivity Analysis of the Schlumberger Monitoring array: Application to Changes of Resistivity Prior to the 1976 Rathquake in Tangshan China[J]. Tectonophysics, 1999, 307(3): 397-405.
- [19] 王志贤,白云刚,李永庆,等.大同-阳高 6.1 级地震的地电前兆研究[J].山西地震,1999,3(4):22-24.
- [20] 戴勇,闫海宾,丁风和,等.张北 6.2 级地震宝昌地电台地电异常特征及机制分析[J].地震地磁观测与研究,2009,30(1):51-55.
- [21] 王志贤,彭远黔,张学民.地电阻率异常变化与地震成组活动关系的研究[J].华北地震科学,1996,14(1):19-26.
- [22] 汪志亮,王志贤,余素荣,等.地电前兆场特征及有关地震预报问题探讨[J].地震,2000,20(1):147-153.
- [23] 汪志亮,郑大林,余素荣.地震地电阻率前兆异常现象[M].北京:地震出版社,2002,3-47.
- [24] 张学民,刘素英.华北地区成组地震前后的地电阻率异常特征[J].华北地震科学,2002,21(4):10-18.
- [25] 解滔,杜学彬,刘君,等.汶川 M_s 8.0、海地 M_w 7.0 地震电磁信号小波能谱分析[J].地震学报,2013,35(1):61-71.
- [26] 陈顺云,刘培涛,刘力强,等.地表热红外辐射的小波分析及其在现今构造活动研究中的意义[J].地球物理学报,2006,49(3):824-830.
- [27] 杜学彬,薛顺章,郝臻,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.
- [28] Kumar P, Foufoula G E. Wavelet Analysis for Geophysical Applications[J]. Rev Geophys, 1997, 35(4): 385-412.
- [29] 张元生,郭晓,钟美娇,等.汶川地震卫星热红外亮温变化[J].科学通报,2010,55(10):904-910.
- [30] 白泉,韩晶晶,康玉梅,等.小波变换中地震信号的节点序号到频带序号的转换算法[J].地震工程学报,2016,38(6):991-996.
- [31] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 1998, 79(1): 61-78.
- [32] Farge M. Wavelet Transform and Their Applications to Turbulence[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1992, 24(1): 395-458.
- [33] 金安忠.地电阻率正常变化和台站电性剖面关系初步研究[J].地震学报,1981,3(4):389-396.
- [34] 王志贤.地电阻率年变化的一种物理解释:大柏舍台不同极距地电阻率观测结果[J].西北地震学报,1981,3(3):43-47.
- [35] 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.
- [36] 张学民.地电阻率的年变畸变异常分析[J].地震地磁观测与研究,2004,25(1):68-74.
- [37] 宋晓磊,黄清华.降水渗透过程分析及其对视电阻率的影响[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):470-477.
- [38] 张国苓,乔子云,贾立峰,等.隆尧地电阻率与地下水位关系分析[J].地震地磁观测与研究,2013,34(5/6):141-143.
- [39] 贾立峰,张国苓,乔子云,等.河北兴济台地电阻率年变特征分析[J].中国地震,2016,32(1):127-133.
- [40] Scolz, C H. et al. Earthquake Prediction: A Physical Basis, Science, 1973, 131: 4102.
- [41] 路阳泉,钱家栋,刘建毅.大型花岗岩标本缓慢膨胀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.