

# 滇西地区几个测点的大地电磁视电阻率影响系数分析\*

毛先进, 文雯<sup>✉</sup>, 杨玲英, 段炜

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

**摘要:**采用水平分层均匀的地电阻率结构模型,研究了滇西地区3个测点的MT视电阻率影响系数随频率变化的特征。结果表明:①各地层视电阻率影响系数都随周期变化,为了更好地获得地震多发层内地电阻率变化信息,可以通过影响系数值选择合适的电磁场频段;②在某一特定周期内的短周期段,视电阻率主要反映易受干扰的第一层的变化,对于地震观测而言,应避免该周期段,该周期值可以通过影响系数分析确定;③各地层影响系数之和并非常数,而是随周期变化,在不同频段观测的视电阻率反映地层电阻率变化的能力不同。影响系数分析对MT地震观测频段和测点的选择具有一定的指导意义。

**关键词:**大地电磁测深;视电阻率;地震监测;影响系数;滇西地区

**中图分类号:** P315.721

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)04-0732-06

## 0 引言

Reddy等(1976)开展了基于天然电磁场源的大地电磁测深(Magnetotelluric Sounding,简称MT)监测地震的可行性研究,20世纪70年代中期,国内地震学者开始在我国西北和华北地区开展MT定点重复观测研究(张云琳等,1994;汤吉等,1998;陈军营等,2009)。为克服天然场源信号微弱的困难,我国学者还开展了基于大功率人工场源的极低频(Contral Source Extremely Low Frequency,简称CSELF)地震电磁定点观测研究(赵国泽等,2010a),在远区观测时CSELF是与MT等价的,电磁场可以视为平面电磁波(何继善,1990),其数据处理方法在原理上与MT相同。这些工作论述了MT定点重复观测资料与地震活动的关系,并从观测事实和深部介质导电性变化机理方面阐明MT是可以观测到地震前兆信息的(林长佑等,1990;赵国泽等,2007)。晋光文等(1997)从场兆与源兆关系的角度阐述了震源深度处介质电性变化引起MT观测资料显著变化的原因,认为MT具有较好的监测地震活动的能力。

降雨及人类生产活动等因素会导致地下潜水位波动,受其影响的浅部地层含水量变化会导致电阻率变化,这种变化与地震无关;大陆内部地震多发生于地壳的中上部,即深度10~30 km,深部电性变化前兆也有可能主要出现在这一深度及其影响区域(林长佑等,1989)。大地电磁测深具有体积效应,探测范围内各地层电阻率的变化会对各频点观测数据的变化造成不同程度的影响,与地震无关的浅部电阻率变化将对观测造成干扰,可能影响对地震前兆异常的确认。目前尚未见到关于地壳内不同深度地层电阻率变化对MT观测数据变化的影响及其定量特征等方面的研究,本文开展这方面的研究,以期选择合适的MT观测所用的频段和场地,更好地观测到地震电阻率前兆变化信息。

## 1 影响系数简介

由于MT阻抗相位对于地震活动相关的地下介质电性变化不灵敏(张云琳等,1994),结合晋光文等(1997)的研究结果,笔者采用水平分层均匀的地电阻率结构模型,研究不同深度地层的电阻率变化对MT观测到的视电阻率的影响特征。

\* 收稿日期: 2020-02-17.

基金项目: 云南省地震局科技人员传帮带培养项目“地电阻率台站前兆信息获取能力评价及其改进方法研究”(C3-201705)资助.

✉ 通讯作者: 文雯(1982-),女,工程师.主要从事地震活动性、地震电磁学等方面的研究. E-mail: 54549099@qq.com.

假设观测区介质电阻率分层均匀, 共  $n$  层, 第  $i$  层电阻率与厚度分别为  $\rho_i$  与  $h_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。显然, 无论何种定义的 MT 视电阻率  $\rho_a$  都是地下各层电阻率、厚度和电磁波频率  $f$  的函数, 即:

$$\rho_a = f(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}; \omega) \quad (1)$$

其中:  $\omega = 2\pi f$ , 为电磁波圆频率。

在孕震过程中,  $\rho_i$  会变化, 导致各频点观测到的  $\rho_a$  随时间变化, 假定各层介质厚度不变, 对式 (1) 两边取对数并求全微分得到:

$$\frac{d\rho_a}{\rho_a} = \sum_{i=1}^n S_i \frac{d\rho_i}{\rho_i} \quad (2)$$

式中:

$$S_i = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \quad (3)$$

根据式 (1) 可求得不同频率下的  $\rho_a$  (朴化荣, 1990), 然后采用数字方法计算出  $\rho_a$  对各层  $\rho_i$  的偏微分, 并按式 (3) 计算得到  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。从式 (2) 可见, 各地层  $\rho_i$  发生变化时, 各频点  $\rho_a$  的相对变化率等于各地层真电阻率相对变化率的加权求和, 加权系数为  $S_i$ ; 当第  $i$  层电阻率的相对变化率  $d\rho_i/\rho_i$  一定时, 该层对观测数据相对变化率的贡献是  $S_i d\rho_i/\rho_i$ ,  $S_i$  越大, 该层的贡献或是影响就越大, 且式 (2) (3) 与地震直流电法中的影响系数概念 (钱家栋等, 1985; Lu *et al.*, 1999) 类似, 因此本文亦将  $S_i$  称为影响系数。为了考察每一层影响系数在总影响系数中所占的比例, 令:

$$\sum S = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad (4)$$

$$Q_i = S_i / \sum S \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中:  $\sum S$  为总影响系数 (即各层影响系数之和);  $Q_i$  为第  $i$  层的影响系数与总影响系数的比值 (下文简称影响系数占比), 与频率及各层电阻率相关,  $Q_i$  有助于分析各层影响的频率特性。

## 2 各测点的影响系数特征分析

大地电磁测深研究表明, 不同地区地壳上地幔电性结构总体上表现出“横向分块, 纵向分层”

特征 (孔祥儒等, 1987; 孙洁等, 1989; 赵国泽等, 2004, 2010b; 汤吉等, 2005; 詹艳等, 2005, 2014; 韩松等, 2016; 王月, 张捷, 2018), 不同地区电性的纵向分层结构不同。以滇西地区 3 个测点为例, 采用卡尼亚视电阻率定义, 计算其视电阻率和影响系数, 并分析其特征, 各测点分层电性结构参数参考孙洁等 (1989) 的研究, 见表 1。

表 1 滇西地区 3 个测点分层电性结构参数

Tab. 1 Stratified resistivity structure parameters of 3 sites in Western Yunnan

层数	腾冲石坪		漾濞上街		永胜凤鸣	
	电阻率/ ( $\Omega \cdot m$ )	厚度/ km	电阻率/ ( $\Omega \cdot m$ )	厚度/ km	电阻率/ ( $\Omega \cdot m$ )	厚度/ km
第 1 层	66.07	1.95	9.67	0.59	17.29	0.31
第 2 层	351.10	7.55	705.56	23.09	192.09	23.64
第 3 层	6.20	5.11	59.19	7.07	39.33	3.16
第 4 层	2 363.12	49.70	3 000.88	85.30	2 069.03	65.73
第 5 层	3.38	—	21.35	—	18.15	—

图 1 为腾冲石坪测点各层影响系数  $S_i$ 、影响系数之和  $\sum S$ 、各层影响系数占比  $Q_i$  随周期变化的曲线。由图 1 可见: ①各层介质的  $S_i$  都随  $T$  (或  $f$ ) 变化 (图 1a), 由浅至深各层  $S_i$  最大值所对应的  $T$  依次增加 ( $f$  依次降低); 当  $T < 100$  s 时, 最下层  $S_5$  等于或十分接近于 0, 之后逐渐上升。②图 1a 中,  $T$  为 0.001 ~ 0.02 s (即  $f$  为 50 ~ 1 000 Hz) 时,  $S_1$  等于 1, 而  $S_2 \sim S_5$  等于 0。由式 (2) 可知, 若在此频段内的视电阻率发生变化将完全是由第 1 层电阻率变化所致, 其它地层完全没有贡献, 由于第 1 层介质电阻率易受季节以及生产活动的干扰, 故 MT 视电阻率观测应避免 50 Hz 以上的频段。③  $T = 158.49$  s 时,  $S_3$  出现最大值 1.31, 同周期其它地层的  $S_i$  与其相比可以忽略不计, 第 3 层位于地震多发层内 (埋深为 9.50 ~ 14.10 km), 选择以 158.49 s 为中心、宽度合适的频段, 将主要观测到该地层的电阻率变化, 而其它地层的影响可以忽略, 这有利于观测到并确认地震前兆。④计算结果表明  $\sum S$  并非常数, 而是随  $T$  (或  $f$ ) 变化, 会出现多个极大值和极小值 (图 1b), 而直流电法中对于确定的观测装置, 各地层  $\sum S = 1$  (钱家栋等, 1985; Lu *et al.*, 1999; 毛先进等,

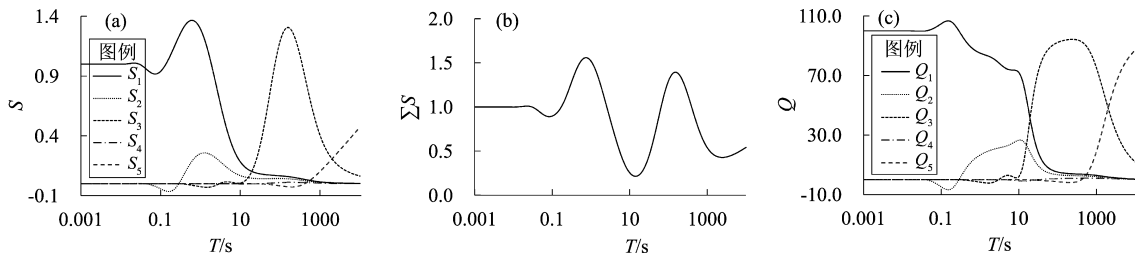


图1 腾冲石坪测点各地层影响系数 (a)、影响系数之和 (b) 及各地层影响系数占比 (c) 随周期变化曲线

Fig. 1 Curves of the influence coefficients of each layer (a), sum of influence coefficients (b), and the ratios of influence coefficients (c) vary with the periodic at Tengchong Shiping site

2014; 解滔等, 2016)。⑤从图 1c 可见, 当  $T > 100$  s 时,  $Q_1$  接近于 0, 近地表干扰可以忽略。

图 2a~c 为漾濞上街测点各层影响系数  $S_i$ 、影响系数之和  $\sum S$ 、各层影响系数占比  $Q_i$  随周期变化的曲线。从图 2a~c 可见: ①各层介质的  $S_i$  都随  $T$  (或  $f$ ) 变化 (图 2a),  $S_1 \sim S_4$  最大值所对应的  $T$  依次增加 ( $f$  依次降低);  $T < 200$  s 时, 最下层  $S_5$  等于或近似为 0, 之后逐渐。②由图 2a 可见,  $T$  为 0.001 ~ 0.013 s ( $f$  为 80 ~ 1 000 Hz) 时,  $S_1$  等于 1,  $S_2 \sim S_5$  等于 0, 若此频段内的视电阻率发生变化, 将完全是由易受干扰的第 1 层电阻率变化

所致, 其它地层完全没有贡献, 故 MT 视电阻率观测宜避开 80 Hz 以上的频段。③第 3 层埋深为 23.68 ~ 30.75 km, 位于地震多发层,  $T = 79.43$  s 时,  $S_3$  达到最大值 0.68, 而  $S_1 = 0.52$ , 与  $S_3$  相比,  $S_1$  不能被忽略。从式 (2) 可见, 若以该周期点为中心频段观测, 则难以确定视电阻率的变化中是否有第 1 层的贡献, 而第 1 层 (厚度为 0.59 km) 易受干扰, 进而可能难以确定异常。④各地层  $\sum S$  随  $T$  (或  $f$ ) 变化 (图 2b), 不是常数。⑤从图 2c 可见, 当  $T > 3 000$  s 时,  $Q_1$  约为 0, 在这种条件下近地表干扰才可以忽略。

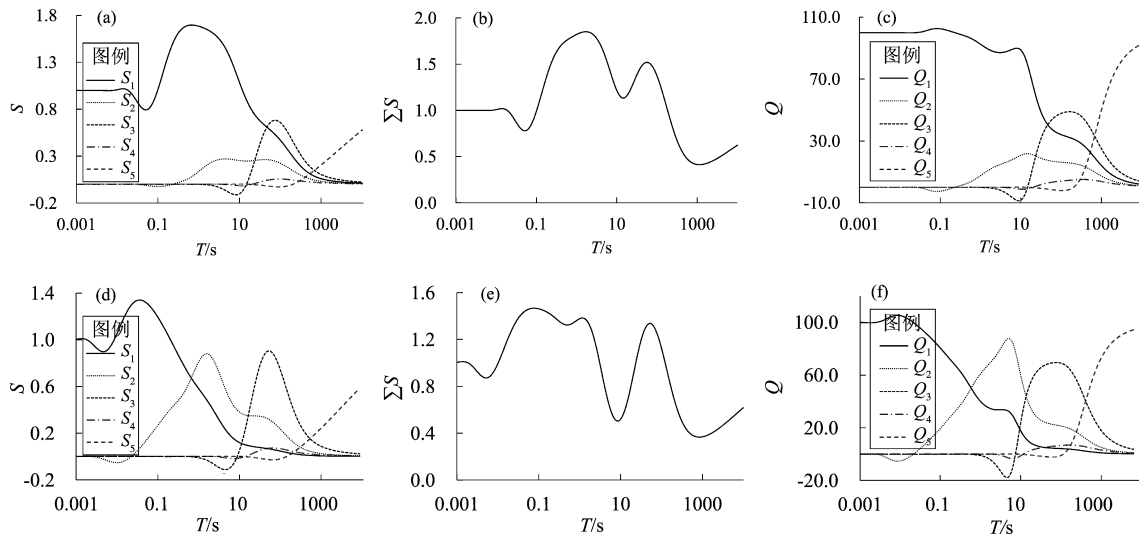


图2 漾濞上街测点各地层影响系数 (a)、影响系数之和 (b) 及各地层影响系数占比 (c) 随周期变化曲线,  $\rho_i$  增加至原值 10 倍后各地层影响系数 (d)、影响系数之和 (e) 及各地层影响系数占比 (f) 随周期变化曲线

Fig. 2 Curves of the influence coefficients of each layer (a), sum of influence coefficients (b), and the ratios of influence coefficients (c) vary with the periodic, and curves of the influence coefficients of each layer (d), sum of influence coefficients (e), and the ratios of influence coefficients (f) varies with the periodic after  $\rho_i$  increased to 10 times of the original value at Yangbi Shangjie site

图3为永胜凤鸣测点各层影响系数 $S_i$ 、影响系数之和 $\sum S$ 、各层影响系数占比 $Q_i$ 随周期变化的曲线。由图3可见:①各层介质的 $S_i$ 都随 $T$ (或 $f$ )变化(图3a), $S_1 \sim S_4$ 最大值所对应的 $T$ 依次增加( $f$ 依次降低); $T < 158$  s时,最下层 $S_5$ 等于或近似为0,之后逐渐增大;②由图3a可见, $T$ 为0.001~0.002 s( $f$ 为500~1 000 Hz)时, $S_1$ 等于1, $S_2 \sim S_5$ 等于0,此频段若视电阻率有变化,将完全是由第1层电阻率变化所致,其它层无贡献,故MT视电阻率观测宜避开500 Hz以上的频段;③第3层埋深为23.95~27.11 km,位于地震多发层内,第2层埋深为0.31~23.95 km,该层中下部位亦是地震多发层, $T = 63.10$  s时, $S_3$ 达到最大值0.40, $S_1, S_2$ 分别为0.15, 0.85,若以该周期点为中心进行观测,视电阻率的变化将主要反映第2层下部以及第3层的电阻率变化,第1层的影响相对较小;④各地层影响系数之和 $\sum S$ 随 $T$ (或 $f$ )变化(图3b),不是常数;⑤从图3c可见, $T > 1\ 000$  s时, $Q_1$ 近似为0,可以忽略近地表干扰。

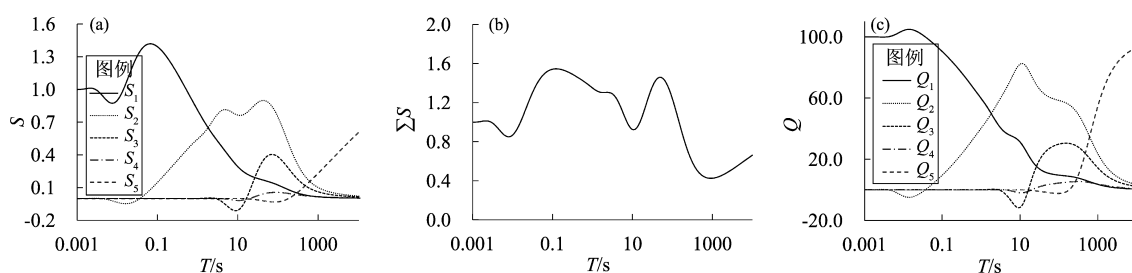


图3 永胜凤鸣测点各地层的影响系数(a)、影响系数之和(b)及各地层影响系数占比(c)随周期变化曲线

Fig. 3 Curves of the influence coefficients of each layer (a), sum of influence coefficients (b), and the ratios of influence coefficients (c) vary with the periodic at Yongsheng Fengming site

### 3 讨论

从地震前兆观测的角度看,若在某频段内位于地震多发层内地层的影响系数远大于其它各层,尤其是地表层的影响系数,例如腾冲石坪测点(图1),在这样较为理想的条件下,观测数据的变化将主要反映该层电阻率的变化,并且几乎不受地表层的影响,这对异常判断是十分有利的。从上述3个测点的计算结果看,是否满足这一条件与地电结构密切相关,而影响系数与地电结构有较为复杂的关系。漾濞上街测点各层影响系数不满足上述条件(图2a),原因是第1,2层电阻率差异较大(表1), $\rho_1/\rho_2 = 9.67/705.56 = 0.0137$ ,如果 $\rho_1$ 增加到原来的10倍,即 $\rho_1/\rho_2 = 96.7/705.56 = 0.1371$ ,各层影响系数与频率的关系如图2d~f所示。由图可见, $\rho_1$ 增加后,在 $S_3$ 的最大值附近频段内, $S_1$ 显著减小,基本满足上述条件。这表明第1,2层电阻率的数量关系是决定上述条件满足与否的重要因素之一,易受干扰的第1层电阻率越低,该层对观测

数据的影响越大,越不利于判断异常;反之,第1层电阻率越高则其影响越小,越有利于判断异常。并且第3层(壳内低阻层)电阻率与其上、下层相比越低,越有可能满足上述条件,从而越有利于观测。

在直流电法中,不论采用何种装置 $\sum S$ 总是等于1;而MT法中, $\sum S$ 随频率变化不是常数,在不同的频点既有可能大于1也有可能小于1,这是与直流电法的一个显著不同之处。在一维的情形下,MT法中只有在各层电阻率各不相同,且 $\sum S$ 才随频率变化,当各层电阻率相同(即均匀半空间)时,各频点的 $\sum S$ 总是等于1;将分层均匀介质中的任一层细分为多个亚层时,这些亚层的 $\sum S$ 等于这一层的影响系数。之所以关注 $\sum S$ ,一是希望在某个频段上多震层的影响系数在 $\sum S$ 中的占比远大于其它层(尤其是易受干扰的第1层);二是因为 $\sum S$ 必定在某些频点上取得极小值并可能比1小得多,

从而在这些频点处观测到的视电阻率的变化率将会比地下介质真电阻率的变化率小很多,观测时宜避开这样的频点。

## 4 结论

本文以滇西地区 3 个测点为例,采用水平分层均匀的地电阻率结构模型,分析其视电阻率和影响系数特征,主要得出如下认识:

(1) 各地层视电阻率影响系数都随电磁场源周期变化,为了获得地震多发层内地层的电阻率变化信息、压制易受干扰的近地表层的影响,可以通过影响系数分析选择合适的电磁场频段进行观测,或者采用宽频带观测,但在预测研究时需选择合适频段的数据进行分析。

(2) 无论何种分层均匀电阻率结构,从影响系数来看,在某一周期(取决于地电结构)内的短周期段,视电阻率主要反映易受干扰的第一层的变化,地震观测时应避开该周期段,该周期的值可以通过影响系数确定。

(3) 各地层影响系数之和并非常数,而是随周期变化,在不同的频点既有可能大于 1 也有可能小于 1,会出现多个极大值和极小值,在不同周期段,观测反映地层电阻率变化的能力也有差别。

## 参考文献:

- 陈军营,杜学彬,谭大诚,等. 2009. 老虎山断裂带大地电磁地震监测研究[J]. 地震, 29(3): 79-85.
- 韩松,韩江涛,刘国兴,等. 2016. 青藏高原东北缘至鄂尔多斯地块壳幔电性结构及构造变形研究[J]. 地球物理学报, 59(11): 4126-4138.
- 何继善. 1990. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1-17.
- 解滔,杜学彬,卢军. 2016. 井下视电阻率观测影响系数分析[J]. 中国地震, 32(1): 40-53.
- 晋光文,孙洁,王继军. 1997. 大地电磁法监测地震活动能力的研究[J]. 中国地震, 13(4): 359-365.

- 孔祥儒,刘士杰,窦秦川,等. 1987. 攀西地区地壳和上地幔中的电性结构[J]. 地球物理学报, 30(2): 136-143.
- 林长佑,刘晓玲,武玉霞. 1990. 试论大地电磁测深法在地震前兆探索中的进一步应用[J]. 地震学报, 12(2): 166-175.
- 林长佑,武玉霞,刘晓玲. 1989. 地震深部电性变化前兆特征及其机理的初步探讨[J]. 西北地震学报, 11(4): 37-45.
- 毛先进,杨玲英,钱家栋. 2014. 水平层状介质中深埋装置系统地电阻率影响系数特征研究[J]. 地震学报, 36(4): 678-685.
- 朴化荣. 1990. 电磁测深法原理[M]. 北京:地质出版社, 48-53.
- 钱家栋,陈有发,金安忠. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社, 103-107.
- 孙洁,徐常芳,江钊,等. 1989. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系[J]. 地震地质, 11(1): 35-45.
- 汤吉,詹艳,赵国泽,等. 2005. 青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究[J]. 地球物理学报, 48(5): 1205-1216.
- 汤吉,赵国泽,王继军,等. 1998. 张北—尚义地震前后电阻率的变化及分析[J]. 地震地质, 20(2): 164-171.
- 王月,张捷. 2018. 地震走时和航空电磁联合反演三维速度和电阻率[J]. 地震研究, 41(1): 22-31.
- 詹艳,赵国泽,王继军,等. 2005. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究[J]. 地震学报, 27(4): 431-440.
- 詹艳,赵国泽,王立凤,等. 2014. 西秦岭与南北地震构造带交汇区深部电性结构特征[J]. 地球物理学报, 57(8): 2594-2607.
- 张云琳,刘晓玲,安海静,等. 1994. MT 重复测量在地震中短期预报中的应用——祁连山中段 MT 剖面监测研究[J]. 地球物理学报, 37(2): 200-210.
- 赵国泽,陈小斌,汤吉. 2007. 中国地球电磁法新进展和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1171-1180.
- 赵国泽,汤吉,詹艳,等. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究[J]. 中国科学:地球科学, 34(10): 908-918.
- 赵国泽,王立凤,汤吉等. 2010a. 地震监测人工源极低频电磁技术(CSELF)新试验[J]. 地球物理学报, 53(3): 479-486.
- 赵国泽,詹艳,王立凤,等. 2010b. 鄂尔多斯断块地壳电性结构[J]. 地震地质, 32(3): 345-359.
- Lu J, Qian F, Zhao Y. 1999. Sensitivity analysis of the schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 Earthquake in Tangshan, China [J]. Tectonophysics, 307: 397-405.
- Reddy I K, Phillips R J, Whitcomb J H, et al. 1976. Monitoring of time dependent electrical resistivity by magnetotellurics [J]. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 28(2): 165-178.

## Analysis on Influence Coefficient of MT Apparent Resistivity at Several Sites in Western Yunnan

MAO Xianjin, WEN Wen, YANG Lingying, DUAN Wei  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

We studied the characteristics of MT apparent resistivity influence coefficients varying with frequency at three sites in Western Yunnan using the stratified homogeneous geo-resistivity structure. The result shows: ① The apparent resistivity influence coefficients of each layer vary with the period, we could select the appropriate electromagnetic field frequency band through the influence coefficient value so as to obtain better information on the change of resistivity of the stratum in the earthquake-prone layers; ② In the short period within a certain period, the apparent resistivity mainly reflects the change of the first layer that is susceptible to interference. This period should be avoided for seismic observation, and the periodic value can be determined by influence coefficient analysis; ③ The sum of the influence coefficients of each layer is not a constant but varies with the period. The apparent resistivity observed in different frequency bands has different ability to reflect the variation of the formation resistivity. The influence coefficient analysis has certain guiding significance for the selection of electromagnetic field frequency band and observation site of MT seismic observation.

**Keywords:** MT; apparent resistivity; seismic monitoring; influence coefficient; Western Yunnan area