

# 高密度电法测量中接地电阻试验研究

张凌云<sup>1</sup>, 刘鸿福<sup>1</sup>, 李成友<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学矿业工程学院, 山西太原 030024; 2. 山西省国土资源厅, 山西太原 030024)

**摘要:** 首先在同一实验场地进行接地电阻均匀与非均匀情况下的电法勘探对比试验, 讨论在地下各层视电阻率变化率及接地电阻对视电阻率的影响灵敏度; 通过逐个舍弃电极实验, 比较舍弃不均匀电极的反演剖面图, 确定出合理舍弃非均匀接地电阻数量的范围; 最后在实例电法测量中运用舍弃非均匀电阻方法有效阻止了异常接地电阻的反演畸变, 提出了合理舍弃高阻电极测量数据的实测视电阻率资料处理方法。

**关键词:** 高密度电法; 接地电阻; 视电阻率

**中图分类号:** P631.3

**文献标识码:** A

高密度电阻率法是 20 世纪 80 年代从美国和日本发展起来的一种新型的电阻率方法。随着高密度电法应用范围的不断扩大, 对该法的研究也越来越深入。就接地电阻对高密度电法探测结果的影响而言, 多数文献着重讨论了该方法在各行各业中的应用, 及各种装置、反演方法和反演次数的研究, 而对接地电阻不均匀产生的反演影响及灵敏度分析的研究不多, 仅在高密度电法应用的文献中提及, 而且也没有详细的统计数据资料<sup>[1]</sup>。

在野外观测时, 高密度电法仪器测量电极  $M-N$  串联在仪器的输入回路中, 因此野外测量过程的仪器线路原理可以用一个输入回路来表示<sup>[2]</sup>。实测电位差  $\Delta V_{MN}$  与待测电位差  $\Delta V'_{MN}$  的关系为

$$\frac{\Delta V_{MN}}{\Delta V'_{MN}} = \frac{R_Z}{R_{MN} + R_Z} \quad (1)$$

式中:  $R_{MN}$  为  $M-N$  电极接地电阻;  $R_Z$  为输入阻抗。

由式(1)可知, 欲使电位差实测值与待测值相等, 可让  $R_Z \rightarrow \infty$  或让  $R_{MN} \rightarrow 0$ , 然而, 仪器的输入阻抗不能无穷大, 否则容易受干扰, 导致仪器的工作稳定时间不长;  $R_{MN}$  不会为 0, 各测量点也不恒定, 故电位差实测值总会因接地电阻的变化而偏离待测值, 产生观测误差。所以, 布极时需注意, 尽量减小因接地电阻变化引起的观测误差。

在实际应用中, 大部分地区地表存在着电阻介质, 对信号的振幅测量和相位测量都有影响<sup>[3]</sup>, 降低了高密度电法勘探的探测精度。常见的克服接地电阻影响的方法有: 盐水注入法、并联电极法<sup>[4,5]</sup>、算法和补偿法等。如果无法改变接地电阻条件时, 接地电阻偏高会影响视电阻率。因此, 本文首先对接地电阻的均匀和非均匀状态进行对比分析, 讨论接地电阻对反演结果的影响; 并对非

均匀电阻进行舍弃试验研究, 讨论舍弃电极比例对反演结果的不同影响。

## 1 高密度电法接地电阻试验

高密度电法多道电极为一次性排列布置, 测量时  $AM=MN=NB$  为一个电极间距,  $A, B, M, N$  逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线; 接着增大一个电极间距, 得到另一条剖面线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。不同电极的接地电阻存在一定的差异, 当差异较大时, 会对测量结果造成影响, 为此有必要对接地电阻的影响进行探讨。

### 1.1 试验区域选择

试验选择在山西晋城某煤矿, 地形平缓, 海拔标高最高为 830.25 m, 最低为 828.95 m。地表均为黄土, 物质均一, 全为第四系黄土覆盖; 地下 45 m 存在一充水采空区地段, 测线长 590 m, 点距(道间距) 10 m。利用高密度电法探测地下煤矿采空区, 电极总数不超过 60, 电极间距一般为 10 m。

对于探测的深度, Wards<sup>[6]</sup> 提出了“有效探测深度”的概念, 并且给出经验深度系数, 其结果与 Roy 等<sup>[7]</sup> 提出的 Depth of Investigation Characteristic (DIC) 的结果相吻合。在国内, 阮百尧等提出当大地可近似看作水平层状进行对称四极电阻率测深时, 要选择最佳供电电极距, 尽可能地使目标矿体或目标层处的勘测灵敏度最大, 可以用  $AB/8$  近

收稿日期: 2009-09-27; 改回日期: 2009-12-07。

第一作者简介: 张凌云(1978—), 女, 太原理工大学在读博士, 主要研究方向为地球物理与勘查工程。

似确定勘探深度<sup>[8,9]</sup>。所有概念均是基于均匀半空间模型,在上述理论的指导下,我们选择探测深度 100 m 分 10 层,这样既保证了探测的深度,又能提高工作效率。

### 1.2 试验设计方案

1) 排列的电极接地电阻较均匀时的试验。

此次试验使用的是二维电阻率层析成像方法<sup>[10]</sup>,选择在地表条件均一的地段,排列的 60 根电极接地电阻比较均匀(均小于 1 000 Ω)。视电阻率断面图是研究沿某测线方向的断面上视电阻率值的变化特征,能较详细地反映出地下地质构造和各种地质体地赋存状态<sup>[11]</sup>。图 1 为接地电阻均匀时的实验结果及反演剖面。与已知资料进行对

比分析,试验线中 265~600 m 处在 2000 年采空,且采空区大量充水,属于低阻异常区,因此认为,均匀接地电阻时探测的采空区位置与实际采空区位置基本相符。

2) 排列的电极接地电阻不均匀时的试验。

在上述试验基础上,在 12~24 号电极一带填埋干燥程度不一的砂土,增大这 13 根电极的接地电阻(10 000~16 000 Ω),试验结果见图 2。由图 2 可知,除与图 1 有相同部分外,在水平 210~240 m,地下 40 m 处该测线出现了异常区,这是由于 12~24 号电极接地电阻大导致所探测视电阻率比接地电阻均匀情况下的小,反演后在此区域形成了假异常。

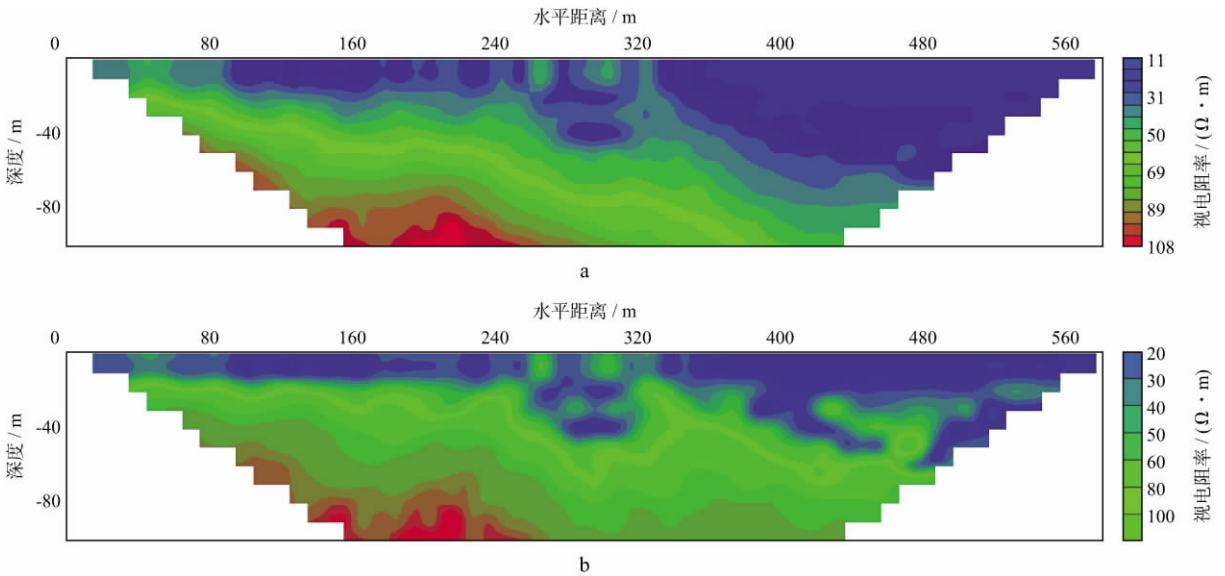


图 1 接地电阻均匀时实验结果(a)和反演剖面(b)

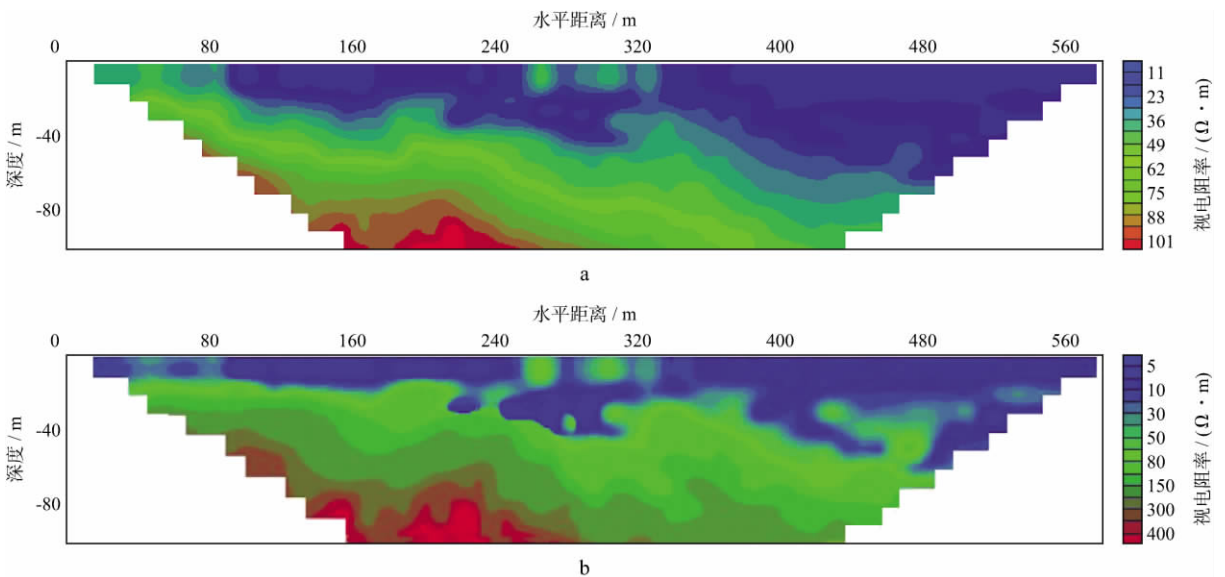


图 2 接地电阻不均匀时实验结果(a)和反演剖面(b)

3) 不均匀接地电阻条件下电极舍弃试验。

本组试验依次递增地舍弃高阻电极 20, 17, 22, 24, 12, 27 号电极, 共做 6 组试验, 将每次试验

的反演图与图 1、图 2 中的反演剖面进行比较, 辨析舍弃每增加一个非均匀电极后反演图中异常体的变化情况, 结果见表 1。

表 1 异常电极舍弃与剖面形态畸变关系

舍弃电极数	$P_1$	$P_2$	$W$	$P_3$	探测结果评价
1	1.6%	7.7%	35	8.0%	与图 2 相比, 异常体形态几乎未畸变
2	3.3%	15.4%	64	14.7%	与图 2 相比, 异常体形态几乎未畸变
3	5.0%	23.1%	93	21.3%	与图 2 相比, 异常体形态发生轻微畸变
4	6.7%	30.8%	118	27.1%	异常体形态发生轻微畸变, 接近图 1
5	8.3%	38.5%	136	31.2%	异常体形态发生畸变, 近似于图 1
6	10.0%	46.2%	166	38.1%	发生较大畸变, 不同于图 1、图 2

注:  $P_1$ —舍弃电极占总电极数百分比;  $P_2$ —舍弃电极占不均匀电阻百分比;  $P_3$ —舍弃数据数占总数据的百分比;  $W$ —舍弃数据个数。

## 2 电阻试验数据分析

### 2.1 不均匀电阻在各层引起的视电阻率变化

视电阻率变化率为

$$Q = \frac{|\rho'_s - \rho_s|}{\rho_s} \times 100\%$$

式中:  $\rho'_s$  为接地电阻不均匀时的视电阻率;  $\rho_s$  为接地电阻均匀时的视电阻率。

由于不均匀接地电阻的影响, 数值计算得到的  $Q$  值在第 1、第 2 层约为 30%, 在第 3 层约为 20%, 在第 4 层约为 16%, 在第 5 层约为 10%, 在第 6 层约为 3%, 在第 7 层~第 10 层约为 2%。因此认为, 当接地电阻在 10 000~16 000  $\Omega$  变化时, 不均匀接地电阻对探测数据的影响随着勘探深度的加大而减小, 即从地层浅部的 30% 减小到深部的 2%。从图 1b、图 2b 可以看到, 浅部由于非均匀电阻的影响有明显变化, 出现相应的低阻异常部分; 而在深部, 反演的高阻值有所提高, 但是整体基本趋势没有大的改变。就地球物理勘探而言, 讨论的是地下物性值整体变化趋势即高阻与低阻视值之间的相对关系, 而不仅仅局限于讨论其具体绝对值的变化。结合反演图与数据的计算结果, 可以认为不均匀接地电阻对视电阻率的影响是浅部明显高于深部。

### 2.2 异常电极舍弃与剖面形态变化关系

通过不均匀接地电阻条件下电极舍弃试验, 比较每组舍弃电极反演图评测结果(表 1)发现舍弃的不均匀电阻不能太少( $P_2 < 30\%$ ), 否则达不到

摒弃异常的目的, 异常体形态几乎未畸变; 如果舍弃的数据太多( $P_3 > 38\%$ ) 又会产生反演图的较大畸变, 因此在应用中要注意舍弃不均匀电阻的范围。

### 2.3 接地电极因素的灵敏度分析

灵敏度是度量一种因子的变化对另一因子的影响程度, 某一模型因变量对模型输入参数的灵敏度可用因变量对该输入参数的偏导数来表示<sup>[12]</sup>, 即

$$X_{i,k} = \partial y_i / \partial a_k$$

式中:  $X_{i,k}$  为模型的因变量对第  $i$  个观测点、第  $k$  个参数的灵敏度系数。为便于比较, 采用灵敏度系数的标准化无量纲形式, 即

$$X_{i,k} = \partial y_i / \partial a_k \approx$$

$$\{[y_i(a_k + \Delta a_k) - y_i(a_k)] / y_i\} / (\Delta a_k / a_k)$$

由上文试验结果可知, 接地电阻对探测数据的影响(视电阻率变化率)将从地层浅部的 30% 减小到深部的 2%, 这说明随着勘探深度的加大, 接地电阻对探测数据的影响将减小。借鉴灵敏度的计算公式, 进行两个变化率的比值计算, 讨论接地电阻对视电阻率的影响灵敏度。影响灵敏度( $S$ )为视电阻率变化率/接地电阻变化率, 但由于不均匀电阻的异常超天性, 为了在图表中能清晰地看出影响度, 以  $1/S$  为纵坐标作图, 图 3 为在同一剖面中第 1、第 3、第 7、第 9 层的影响度示意。同接地电阻的变化情况类似, 随着勘探深度的加大,  $S$  的绝对值逐步减小(1.00%~0.06%), 而且不均匀电阻所处的具体位置可以比照图中位置确定。

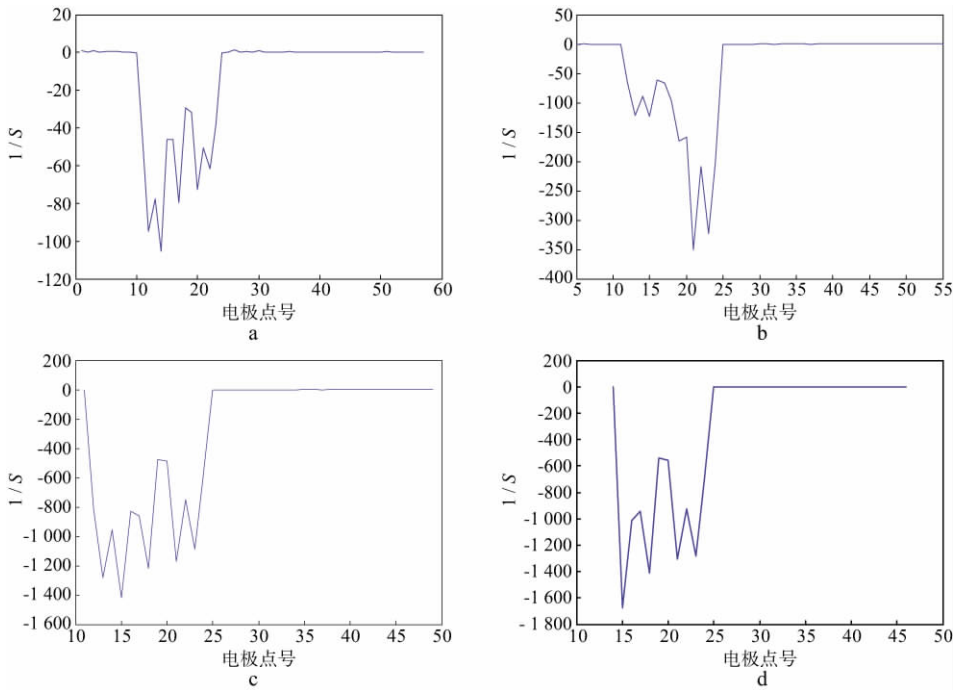


图 3 各层电阻变化率值与视电阻率变化率值的比值  
a 第 1 层; b 第 3 层; c 第 7 层; d 第 9 层

### 3 应用实例

选山西昌都矿为工作区,采用高密度电法探测。工作区地形较为平坦,均为黄土覆盖,地势为北部高南边低,海拔标高最高为 826.85 m,最低为 801.25 m。由于地表存在不均匀介质,对接地电阻变化较大的地区进行了采空区实地探测,并利用异常值舍弃法对高密度电法视电阻率剖面浅层数据进行了异常值的处理。

选取第 14 测线(方位 SN 向,全长 590 m,极距 10 m,共 60 根电极)进行分析。该测线高密度电法存在接地电阻不均匀电极,电极 46~49 号接

地电阻较大,大于 5 000  $\Omega$ 。从 14 测线反演剖面(图 4)可知,视电阻率异常有两处,均为低阻异常。而已知的地质资料显示,实际上只存在一处异常。舍弃不均匀电阻时发现,只舍弃 46 号电极时( $P_2 = 25\% < 30\%$ ,  $P_3 = 7.1\%$ ),实际本不存在的低阻异常依然存在;舍弃 2 根电极时( $P_2 = 50\% > 30\%$ ,  $P_3 = 23.2\%$ ),440~500 m 地下 40 m 处的异常消失。由该测线反演剖面(图 5)可知,剖面线水平距离 240~280 m 地下 70 m 深处出现了较围岩电阻率低的视电阻率异常(小于 60  $\Omega \cdot m$ ),由此推断,这是由地下采空区充水引起的,而水平距离 440~500 m 地下 40 m 处的异常消失,这结果与位于 14 测线附近的钻孔资料相近。

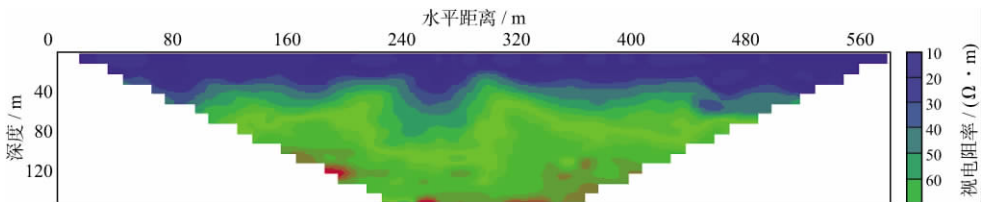


图 4 14 测线高密度电法视电阻率反演剖面(接地电阻不均匀)

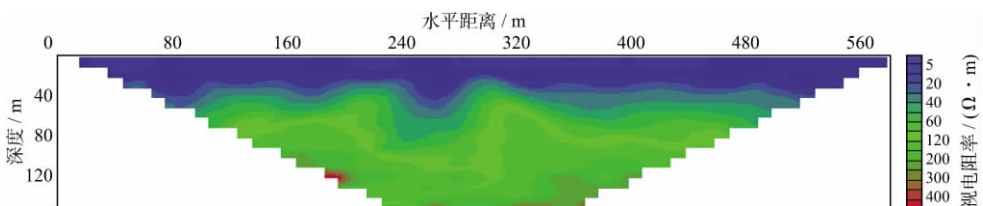


图 5 14 测线高密度电法视电阻率反演剖面(舍弃不均匀电阻)

## 4 结论

1) 对同一剖面的高密度电法而言, 整个排列在单一介质中的电极与排列中有部分电极在高阻介质中的实测电阻率值是存在一定差异的, 而且随着勘探深度的加大, 探测数据视电阻率的变化率将减小。当接地电阻为  $10\ 000 \sim 16\ 000\ \Omega$  时, 接地电阻对探测数据的影响从地层浅部的 30% 减小到深部的 2%; 接地电极因素对视电阻率影响灵敏度较高, 随着深度加深, 灵敏度在 1.00%~0.06% 间变化。故高接地电阻影响浅部探测精度具有一定的效果, 而对深部探测的数据基本不必进行处理。

2) 当部分电极存在高接地电阻时, 采用舍弃高阻电极测量的数据的实测视电阻率资料处理方法。试验表明: 舍弃的不均匀电阻太少 ( $P_2 < 30\%$ ), 达不到摒弃异常的目的, 舍弃的电极数太多 ( $P_3 > 38\%$ ) 又会使反演图发生畸变; 当  $P_1 < 31\%$  时, 其反演的视电阻率曲线与原视电阻率反演曲线(整个排列的电极在单一介质)相比, 整体形态变化不大。在地表介质电阻率较大或不均匀的地区, 通过舍弃接地电阻不均匀电极测量的数据(范围参考  $P_1, P_2, P_3$  值), 可以有效降低接地电阻对高密度电法的影响。

## 参 考 文 献

1 林志军. 高密度电阻率法参数优化设计及工程应用研

究[D]. 长春: 吉林大学, 2008

- 2 张友山, 何继善. 接地电阻对地电场观测的影响及克服方法[J]. 中国有色金属报, 1996, 6(1): 1~5
- 3 程传军, 王兴乾. 降低接地电阻的几种方法[J]. 河南气象, 2003(3): 35~35
- 4 胡文武, 杨海燕, 岳建军, 等. 高密度电阻率法在城市地电勘测中方法和技术的改进[J]. 勘察科学技术, 2007(1): 56~57
- 5 张进国, 徐新学. 高密度电法在地下煤矿采空区探测中地应用[J]. 西部探矿程, 2004, 16(8): 65~66
- 6 Edwards L S. A modified pseudosection for resistivity and IP[J]. Geophysics, 1977, 42(5): 1 020~1 036
- 7 Roy A, Apparao A. Depth of investigation in direct current methods[J]. Geophysics, 1971, 36(5): 943~959
- 8 阮百尧, 吕玉增, 强建科, 等. 直流电阻率测深勘测灵敏度及其应用[J]. 物探与化探, 2002, 26(5): 392~394
- 9 Oldenburg D W, Li Yaoguo. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys [J]. Geophysics, 1999, 64(2): 403~416
- 10 Loke m H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys[EB/OL]. (2004-07-10)[2009-09-27]. [http://www-geo.phys.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke\\_course\\_notes.pdf](http://www-geo.phys.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/loke_course_notes.pdf)
- 11 Griffiths D H, Barker R D. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology[J]. Journal of Applied Geophysics, 1993, 29(3/4): 211~226
- 12 李森, 陈家军, 叶慧海, 等. 地下水流数值模拟中随机因素的灵敏度分析[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 977~984

(编辑: 顾石庆)

(上接第 178 页)

- 8 Igel H, Mora P, Rioulet B. Anisotropic wave propagation through finite-difference grids [J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1 203~1 216
- 9 裴正林. 任意起伏地表弹性波方程交错网格高阶有限差分法数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(6): 629~634
- 10 刘军迎, 雍学善, 高建虎, 等. 多波多分量地震波场数值模拟及分析[J]. 石油物探, 2007, 46(5): 451~456
- 11 夏红敏, 王尚旭, 李生杰. 含气地层的 AVO 响应分析——以苏 4 井为例[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 357~

361

- 12 张广娟, 胡天跃. 地震波 AVO 与地层岩性分析[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(6): 578~584
- 13 苏巍, 陈树民, 刘财, 等. 各向异性介质弹性波场成像的 Thomsen 参数研究与分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 123~126
- 14 谢桂生, 包吉山. 横向各向同性介质中弹性波模拟及波场特征研究[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31(6): 806~814

(编辑: 顾石庆)