

倪 亮,陈大红,徐华文,等. 水域电法在江、湖穿越工程中应用. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2710-2715, doi:10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 06. 051.

NI Liang, CHEN Da-hong, XU Hua-wen, *et al.* Electrical exploration on water region used in the geophysical prospecting cross the river and lake. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2012, 27(6): 2710-2715, doi:10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 06. 051.

## 水域电法在江、湖穿越工程中应用

倪 亮<sup>1</sup>, 陈大红<sup>2</sup>, 徐华文<sup>3</sup>, 张 衡<sup>4</sup>, 金维浚<sup>4\*</sup>, 张文辉<sup>4</sup>, 林达明<sup>5</sup>

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司新疆分公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 宜昌至巴东高速公路建设指挥部, 宜昌市兴山县 443700;

3. 中国石油天然气管道工程有限公司, 廊坊市 065000; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

5. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘 要** 水域电法在水底隧道物探中得到广泛应用, 对比瞬变电磁(TEM)等其它物探方法, 其中高密度电法(DC)采用不同排列布置可达到不同勘探效果和深度. 以中缅输油管道工程澜沧江 8 号断面水域电法勘探为例, 采用单极-单极排列由 48 电极的水下电缆, 96 米排列长度达到了近 90 米勘探深度. 对电阻率剖面给出地质解释, 通过与水中地质钻孔柱状结果对比, 说明这种方法在水域物探中适用性和有效性.

**关键词** 水域电法, 电极排列方式, 勘探深度, 实例

doi:10. 6038/j. issn. 1004-2903. 2012. 06. 051

中图分类号 P631

文献标识码 A

## Electrical exploration on water region used in the geophysical prospecting cross the river and lake

NI Liang<sup>1</sup>, CHEN Da-hong<sup>2</sup>, XU Hua-wen<sup>3</sup>, ZHANG Heng<sup>4</sup>,  
JIN Wei-jun<sup>4\*</sup>, ZHANG Wen-hui<sup>4</sup>, LIN Da-ming<sup>5</sup>

(1. Xinjiang Branch of China Petroleum Pipeline Engineering limited Company(Urumqi, 830000, China);

2. Construction Headquarters of Yichang to Badong Expressway, Yichang Xinshan 443700, China;

3. China Petroleum Pipeline Engineering limited Company, Langfang 065000, China;

4. Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

5. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract** Electrical exploration is widely applied in the underwater tunnel geophysical prospecting. High density direct current(DC) electrical method can get good data and suitable survey depth by the different array configuration compared with the transient electromagnet (TEM). Take No. 8 section on Lancangjiang river as a example, near 90 meters depth is reached with the 96m array length of 48 electrodes underwater cable by the pole-pole configuration. We give the geological explain based on the resistivity section, and show that underwater DC method is effective and suitable after the geological explain results is verified by the underwater borehole column.

**Keywords** electrical exploration on water region, electrodes configuration, exploration depth, example

收稿日期 2012-07-10; 修回日期 2012-09-10. 投稿网址 <http://www. progeophys. cn>

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40830424)和湖北省科技厅科研项目(高速公路岩溶地质因素研究)联合资助.

作者简介 倪 亮,男,1980 年生,工程师,山西忻州人,2004 年毕业于中国地质大学(北京),获学士学位,现在中国石油天然气管道工程有限公司新疆分公司工作,主要从事岩土工程勘察、地质灾害评估研究. (E-mail: niliang@cnpc. com. cn)

\* 通讯作者 金维浚,男,副研究员,勘探地球物理专业. (E-mail: wjjin@mail. iggcas. ac. cn)

## 0 引言

近年来由于管线穿越工程的增多,在施工前查明研究区水上工区内的地质情况,是有效防止施工中各种事故发生的有效手段.在江河湖泊等水域环境中进行工程地质勘察主要采用地质钻探、地震勘探和电法勘探.地质钻探因成孔难,勘探深度有限;另外由于地震波在水中能量衰减很快,因此地震反射波、折射波勘探和面波勘探效果也不佳.瞬变电磁法对电性变化最为敏感,并且利用不接地线圈发射和接收信号,因此得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>.出于安全考虑,管线铺设深度越大,相应地物探勘探深度要求也越大.高密度电法采用水面漂浮电极或水底接触电极,可用于水面下地下地质地层结构和断层构造的探测.实际工作中采用不同装置、不同采集参数,用实测数据和反演结果来判断所使用工作装置是否达到勘探要求.

自上世纪 90 年代初从国外引进高密度电法仪器以来<sup>[3]</sup>,已有地面、井中、水域和不接地拖拽高密度电法系统研发出来<sup>[4]</sup>.目前国内已有多家地面高密度电法仪器制造商,大部分工程勘察单位已有仪器和掌握方法,并在工程物探等方面得到广泛应用,如在工程场址调查,包括了解风化层厚度、地下水位和活动断层调查;环境地球物理研究方面,如地下水污染监测,地下采空区调查、煤炭自燃探测等<sup>[5]</sup>;以及铁路、高速公路路基、边坡调查;隧道开挖,煤矿井下掘进、超前探测<sup>[6,7]</sup>;江河湖泊水库水域水底地质和地球物理调查等方面也有所突破.但是在实施中仍有一些问题需要进一步讨论,从理论基础来加以分析,是了解这种方法针对性和有效性的前提.在高密度电法理论研究方面,有关正反演研究从引入到应用就一直在进行中<sup>[8,9]</sup>(阎永利等,2005;鲁晶津等,2009).Loke(2012)开发的 RES2DINV 和 RES3DINV 软件已广泛应用于数据处理.由于电法勘探特有的体积效应,特别是三维反演是当前的热点之一<sup>[10,11]</sup>,在提高勘探精度和异常准确定位方法有一定提高.

## 1 高密度电法勘探深度问题

常用的高密度电法电极排列方式有温纳-斯伦贝谢(WENNER-SCHLUMB,简记 W-S),偶极-偶极(DP-DP),单极-单极(P-P),单极-偶极(P-DP).吕玉增等(2005)对直流电法有关问题进行讨论,对三极(P-DP,以 AMN 为例)、DP-DP 和 W-S 装置,分

析这三种常用装置对高、低阻异常体的反应情况,为实际工作装置选择提供参考<sup>[12]</sup>.实际工作中根据不同勘探深度要求,和不同电性结构背景情况,因而要按不同要求选择不同排列装置,才能达到好的效果,而不是盲目地认为高密度勘探深度有限,下面将从排列装置特点及点电源影响范围两方面讨论高密度电法的勘探深度.

### 1.1 点电源影响范围

高密度电法是依据点电源在地下传导理论为基础,点电源传导服从 Laplace 方程<sup>[13]</sup>,求解简单地电条件下位场分布,用解析法解球坐标系下不同边界条件拉普拉斯方程.以均匀介质中点源电流场为例讨论地中电流场分布.设在电阻率为  $\rho$  均匀各向同性的无限介质中,  $A$  有一点电流源,求距离  $A$  点为  $R$  处  $M$  点电位公式.由于点电位与方位角和极角无关,故用球坐标系拉普拉斯方程积分两次,通过边界条件限定,求得常数后则得到均匀、各向同性无限介质中,点源电场电位分布公式.半无限介质中,电流密度较无限介质中大一倍,因此  $M$  点电位及电场强度分别为:

$$U = \frac{\rho I}{2\pi R}, \quad (1)$$

$$E = \frac{\rho I}{2\pi R^2}. \quad (2)$$

可见地中点源电流场电位  $U$  和电场强度  $E$  均与供电电流强度  $I$  和电阻率  $\rho$  成正比,  $U$  与  $R$  成反比,  $E$  与  $R$  平方成反比.根据地面点电源的电位和电场强度影响分析,可知地表点电源在地下  $R$  处电位电场强度与地下空间背景电阻率和供电电流强度成正比,与距地表供电点距离成反比.

对背景  $100 \Omega \cdot \text{m}$  电阻率区域,供电电流 0.1 安培时,在 100 m 深度上电位可达到 0.016 V (16 mV),电场强度为 0.16 mT.对于排列长度达 160 m,单极-单极排列勘探深度 150 m 左右时,电位为 0.010 V.其中供电电流与升压器性能和接地电阻有关,大部分情况下供电电流在 100~200 mA.只有达到仪器有效测量精度范围,才能达到好勘探效果,对低阻背景和接地条件不好地区要进行改进.

### 1.2 勘探深度

除仪器满足有效测量精度外,电极排列布置方式也是影响勘探深度的重要因素,不同排列有不同装置系数  $K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$ ,对于 W-S, DP-DP, P-DP 排列,  $AB$  与  $MN$  可取不同比例系数

$n$ ,因而可达到的勘探深度不同.对于 P-P 排列, A, N 位于无穷远处  $K \approx -2\pi BM$ , 最大 BM 为排列长度. Barker(1989) 提出电极排列探测深度应是视电阻率在地表观测值最相关深度, 实际上探测深度取决于地下地层, 低电阻率表层使探测深度降低, 并对均匀各向同性半空间模型进行一般性研究, 对于温纳四极  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  排列用装置系数进行归一化处理, 得到三个排列探测深度特征曲线 (NDIC) [14].  $\alpha$  排列 NDIC 曲线在  $Z/L$  小于 0.13 时急剧上升到峰值, 然后逐渐地趋于零. 虽然  $\beta$  排列 NDIC 曲线在较大  $Z/L$  时上升到峰值, 但 NDIC 曲线形态与  $\alpha$  排列曲线类似, 并在较大  $Z/L$  时 ( $>0.6$ ) 出现很小负值.  $\gamma$  排列当  $b/L$  大于 0.3 时 NDIC 曲线出现单一正峰值. 但  $\gamma$  排列装置系数  $K$  在  $b/L=0.236$  时改变符号, 观测电压穿过测量电极翻转极性点的观测电阻为零, 在这个点信号反向, 零电阻使 NDIC 曲线在  $b/L$  接近 0.236 时变得非常大, 对  $b/L$  小于 0.236 的 NDIC 曲线, 仍然是正值为主. 以上所述  $b$  为电极距,  $Z$  为勘探深度,  $L$  为排列长度.

法国 IRIS 公司在对其仪器 SYSCAL 系列用户培训材料中, 总结了不同排列对分辨率、信噪比和勘探深度的对比, 见表 1. 从表中可见 P-P 排列具有最大勘探深度和良好信号强度, 勘探深度达到排列长度的 0.9 倍. 而 DP-DP 排列有最好横向分辨率, 与 W-S 排列一样, 仅达到排列长度的 0.2 倍, 单极-偶极排列装置勘探深度为排列长度的 0.35 倍. 根据总结的情况, 依据勘探要求选择不同性能仪器和采用不同的野外布置排列方式, 可达到良好效果.

表 1 不同排列方式选择准则 [15]

Table 1 Select criterion of the different configurations

排列	偶极-偶极	W-S	单极-偶极	单极-单极
主要准则	分辨率	最好	一般	较好
	深度	差	差	较好
	野外布置	较好	较好	一般
其它准则	信号	差	较好	一般
	自然噪声	一般	一般	一般
	耦合噪声	好	一般	一般
	估计探测深度	$0.2 \times L$	$0.2 \times L$	$0.35 \times L$

## 2 水域物探方法

### 2.1 水域高密度电法

目前水域高密度电法, 主要采用两种测量方法进行, 一种为电极与河床直接接触, 这种电极主要采用铅材料制成. 其优点是测量结果较准确, 水面以下

勘探深度较大. 缺点是施工条件复杂, 滚动排列之间有一定误差. 另一类是漂浮电极, 电极主要由石墨制成, 可以拖动电极, 也可固定电极进行勘探. 其优点是施工条件较简单, 缺点是勘探深度较浅, 测量结果受水面环境等因素影响较多, 两种电极布置方式见图 1.

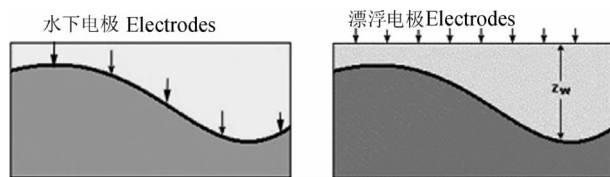


图 1 水域高密度电法勘探两种电极布置方式

Fig. 1 Two different electrode configuration of high density resistivity on water region

### 2.2 水域其它勘探方法

瞬变电磁法以地壳中岩、矿石的导电性、导磁性和介电性为主要物性基础, 根据电磁感应原理, 观测和研究电磁场的空间与时间分布规律. 根据发射场性质的不同, 阶跃瞬变电磁法属于时间域电磁法, 在水域主要采用不接地回线的磁偶源作为场源, 向地下发送一次脉冲磁场, 以激励探测目的物感生二次电流, 在一次脉冲磁场间隙期间, 利用线圈观测二次场随时间变化的响应. 均匀半空间条件下的瞬变响应曲线, 整个瞬变过程可分为三个阶段, 早期(响应电压不随时间变化)、中间过渡期(响应形态随时间变化)和晚期(双对数坐标中是一条直线). 整个瞬变响应过程是一个随时间和地下电导率变化的复杂函数. 在晚期段, 垂向上的瞬变电磁感应电压可以表示为 [1,2]

$$U_z^s = \frac{\mu_0^{5/2} M Q}{20\pi^{3/2} \rho^{3/2} t^{5/2}}, \quad (3)$$

式中  $t$  为电流关掉后的延迟时间 (ms);  $\rho$  为电导率 (s/m);  $\mu_0$  为磁导率 ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m);  $M$  为发射磁距, 对于正方形回线  $M = I \times L^2$ ;  $L$  为正方形发射线圈边长 (m);  $I$  为发射电流 (A);  $Q = N \times S_r$ ,  $S_r$  为接收线圈有效面积 ( $m^2$ ),  $N$  为线圈匝数;  $U_z^s$  为观测的垂向瞬变电磁感应电压 (mV). 从上式可以看出, 瞬变电磁观测的感应电压与电导率  $\rho^{3/2}$  成反比, 电阻率  $3/2$  次方成正比, 而直流电法观测的电位差与电阻率成正比, 所以瞬变电磁法比直流电法对电阻率 (电导率) 变化更敏感, 对有电性差异的目标体有更高分辨能力. 但是 TEM 探测装置布置在水面上, 因而需要克服水体低阻体, 将受到低阻屏蔽作用, 发射

脉冲信号到达水底已衰减很多,勘探深度有限。

### 3 中缅输油管道澜沧江 8 号断面水下电法勘探实例

工作区位于保山地块,地质构造相对简单,发育较宽缓褶皱构造和小断层。地势南高北低,属丘陵地区,海拔高度 1100~1500 m。区域出露地层依次为第四系河床相泥砂砾卵石层,总厚度约为几米~50 m,其下分布早第三系-白垩系红层、三叠系薄层泥灰岩和厚层灰岩和泥盆系砂板岩、变质火山碎屑岩及凝灰岩组成,地层总厚度大于 1000.0 m。在澜沧江北岸主要为早第三系-白垩系红层、三叠系泥灰岩和灰岩为主;南岸为泥盆系变质砂板岩和火山碎屑岩及凝灰岩。本区岩石组成及其电阻率分别为:白垩系红层泥岩 10~100  $\Omega \cdot m$ 、砂岩 100~1000  $\Omega \cdot m$ ;泥灰岩 1~100  $\Omega \cdot m$ 、灰岩 600~6000  $\Omega \cdot m$ 。泥质板岩在 100  $\Omega \cdot m$  左右,砂板岩可达 1000  $\Omega \cdot m$  以上,变质火山碎屑岩及凝灰岩在几千~近 2 万  $\Omega \cdot m$ 。因此地层电性差异较大,为电法勘探提供了物性前提。

#### 3.1 探测布置及电极排列方式

水域电法采用中国科学院地质与地球物理研究所课题组的日本 OYO 公司生产原装水中电缆和意大利 PASI 地震电法系统采集完成。水中电缆电极距 2 m,每条电缆长度 120 m,有 32 个电极,其中无电极段长度约 60 m,电极部分长度 64 m。使用两根电缆滚动进行勘探,每次滚动完成一个排列的采集工作。采用单极-单极排列方式,两根电缆,排列长度达到 120 多米,根据理论分析,可达到 100 多米的勘探深度,本次仅使用了 48 个电极,排列长度 96 m,最大勘探深度约 90 m。澜沧江 8 号断面水域最大深度达到 40 多米,江面宽度 230 m,剖面全长约 250 m 左右,共进行了 4 次滚动勘探。相距 60 多米布置两条水面高密度电法剖面,两条剖面分别位于钻探剖面南北两侧,与 8 号水下隧道断面设计两条轴线基本一致。

#### 3.2 结果及解释

图 2a 剖面位于钻探剖面南 30 m,勘探线长度 250 m,平距 220 m,剖面从浅到深电阻率从十几~近二万  $\Omega \cdot m$ 。表层分布了低阻异常层,为第四系砂泥层,厚度变化较大,从河床边部的十几米,到距江北岸 80~120 m 处达到 30 多米。剖面中部有明显的向下凹陷的异常,其电阻率为 200~1000  $\Omega \cdot m$ ,这是由河床之下泥盆系砂板岩地层背斜褶皱构造,在褶皱转折端发生垂直褶皱轴面的张性破裂引起,在

水体下破裂被水充填,使无破裂的正常地层砂板岩及变质火山碎屑岩及凝灰岩电阻率在几千~上万  $\Omega \cdot m$  降低至几百~1000  $\Omega \cdot m$ ,物探剖面底部背斜构造消失张性破裂减少,正常火山碎屑岩地层电阻率在 20000  $\Omega \cdot m$  左右,为本区泥盆系火山凝灰岩。图 2b 剖面位于钻探剖面以北 30 m,勘探长度 250 m,平距 220 m。该剖面第四系粘土层平均厚度比南部剖面要大,达到 20 m 左右,与南剖面相比第四系粘土层厚度变化较小。电阻率剖面显示出的构造形态以背斜构造为主体,在左岸和右岸边地层产状向两侧倾斜,为背斜褶皱构造核部,由于节理发育而引起岩石电阻率降低,而呈假向斜(图 2c),与南部物探剖面一样到深部背斜褶皱构造消失,为未受张性破裂正常火山碎屑岩地层,电阻率达到 20000  $\Omega \cdot m$ 。两条水面高密度电法剖面结果表明,澜沧江 8 号断面水下地质构造条件较复杂,受背斜核部张性破裂构造影响,河道中部直到河床以下 70~80 m 深度(高程 1120 m)岩石电阻率才增加到未破坏正常地层电阻率值。从电阻率剖面分析河床基岩面起伏,电阻率分布呈层状特征,从浅到深增大,反映其形态为次级背斜褶皱及核部张性破裂构造特征,距河床 30 多米深度存在一层状低阻带,经钻孔勘探表明是泥质板岩段,这一低阻段在水面钻探剖面 4 个钻孔中都出现,说明地层在澜沧江水底部分基本连续,在两条物探剖面上没有发现断层(图 2c)。

在澜沧江水面共钻了 4 个钻孔,深度在 80~100 m,水面 LCJZ1 和 LCJZ4 两钻孔基岩以凝灰质砂质板岩为主,与凝灰质板岩互层,岩石强度较高,在泥岩段强度降低。发育多组节理,多被石英充填,说明为褶皱轴部发育节理。板理倾角较缓,在 5~15°,为宽缓背斜褶皱上发育次组向斜构造特征,没有明显断层,与物探结果一致。其中靠近北岸钻孔 LCJZ1 其覆盖层厚度约 18 m,而近南岸钻孔 LCJZ4 其覆盖层只有约 6 m,与两条电阻率剖面和地质解释图结果较吻合(图 2d)。砂泥层之下基岩以泥盆系板岩为主,向下电阻率增大,变化为砂岩和板岩互层,随深度增加,推测岩性将变为以凝灰质胶结砂岩或火山碎屑岩为主,河道中心的砂板岩段电阻率相对较低,可能是背斜核部裂隙相对发育,其中含水使电阻率降低所致。

#### 4 讨论和小结

实例证明高密度电法与其他物探方法相比,该方法在水域进行工程地球物理勘探,其勘探深度大、

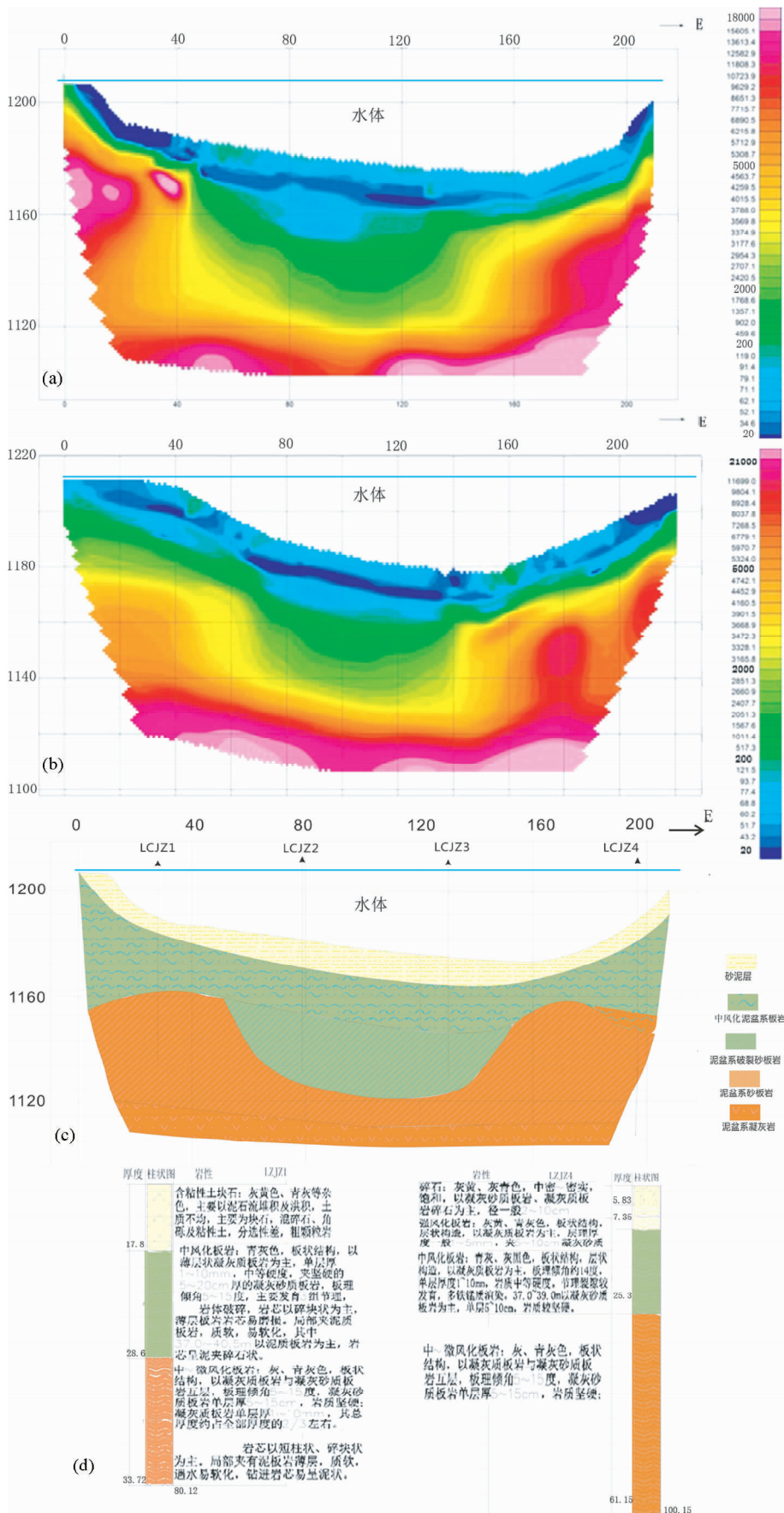


图 2 8 号剖面水域高密度电法电阻率及地质解释图  
Fig. 2 Underwater resistivity and geological interpretation section of No. 8

分辨率高,在水域工程勘察中能够取得较好的效果。尤其在探测基岩面方面,可清晰的划分岩层,确定基岩面埋深及起伏形态,为管道工程穿越设计施工提供可靠电阻率等物性与地质解释资料。

水面高密度电法勘探结果表明,8号断面水面河床以下直到90m深度,电阻率从低阻到高阻变化,两剖面在第四系覆盖层下略有差异是由于沿走向倾伏造成,基岩地层连续深部基本可以对比,没有探测到断层,地层产状表现为背斜构造背景下在轴部发育次级破裂面,造成褶皱轴部地层破裂电阻率降低。

**致 谢** 感谢中国石油天然气管道工程有限公司工程勘查部项目负责人王福东高工,张剑锋高工的指导。中国科学院地质与地球物理研究所国家自然科学基金重点课题负责人刘洪研究员,湖北省交通厅科研项目负责人胡瑞林研究员,尚彦军研究员和刘大安研究员给予了帮助,浙江工勘院对野外采集工作大力协助,藏有恒工程师和中国地质大学(北京)研究生李旭东,牛志飞参加了野外工作,表示衷心感谢。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 方根显. 水域上进行瞬变电磁测深方法效果的探讨[J]. 物探与化探, 1999, 23(6): 467-470.  
Fang Genxian. A Preliminary Discussion on the Effects of Applying Transient Electromagnetic Sounding Technique to Water Areas [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1999, 23(6): 467-470.
- [2] 蒲举. 水域瞬变电磁法的研究与应用[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2011.  
Pu Ju. Research and application of TEM on water region[D]. Master degree paper of Chengdu university of Science and Technology, 2011.
- [3] 白登海, 于晟. 电阻率层析成像理论和方法[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(1): 56-75.  
Bai Denghai, Yu Sheng. Theory and methods of Resistivity Tomography[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(1): 56-75.
- [4] M H Loke. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys [OL]. 2012, <http://www.geotomosoft.com>.
- [5] 张建强, 张全录, 汤跃超, 金维浚. 高压输电线塔基煤矿采空区的高密度电阻率法探查研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 684-689.  
ZHANG Jianqiang, ZHANG Quanlu, TANG Yaochao, JIN

- Weijun. High density electrical resistance exploration on coal mine cavity under the high power tower foundation [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(3): 684-689.
- [6] 王启军, 胡延林, 都兴锋, 李世军. 高密度电阻率法在工程勘查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 335-339.  
Wang QJ, Hu YL, Du XF, Li SJ. Application of the high density resistivity method in project exploration (in Chinese) [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 335-339.
- [7] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1529-1538.  
Huang J G, Wang JL, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(5): 1529-1538.
- [8] 闫永利, 马晓冰, 底青云, 孔祥儒, 高立兵, 陈刚. 层状介质二维电阻率扰动反演方法[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1139-1144.  
Yan Yongli Ma Xiaobing Di Qingyun Kong Xiangru, Gao Libing, Chen Gang. 2D resistivity inversion of perturbation in the layered earth [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2004, 47(6): 1139-1144.
- [9] 鲁晶津, 吴小平, Klaus Spitzer. 三维泊松方程数值模拟的多重网格方法[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 154-158.  
Lu JJ, Wu XP, Klaus Spitzer. Multigrid method for 3D modeling of Poisson equation (In Chinese) [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 154-158.
- [10] Yutaka, Sasaki. 应用有限元方法的3D电阻率反演[J]; 黄力军, 译自 SEG 62 届年会论文摘要, P423-426, 1992.
- [11] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1206-1214.  
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high density E-SCAN resistivity survey [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(4): 1206-1214.
- [12] 吕玉增, 阮百尧. 高密度电法工作中的几个问题研究[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 264-269.  
Lu Yuzeng, Ruan Baiyao. Discuss several problem about high-density resistivity [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(4): 264-269.
- [13] 付良魁主编, 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983, 14-17.  
Fu Liangku (editor). Electrical exploration [M]. Beijing: Geological Publish House, 1983, 14-17.
- [14] R Barker. 共线对称四极排列的探测深度[J]. 黄力军, 译自 Geophysics, 1989, 54(8): 1031-1037.
- [15] J Bernard. Training course on electrical methods [OL]. 2006, <http://www.iris-instruments.com>.