

一种改进的电法勘探技术在探测隐伏溶洞的应用

黄启霖,尹努寻*,杨武,杨德智,金少荣,宋顺昌,陈先童,吕天江,宋启文

(贵州省地矿局地球物理地球化学勘查院,贵州 贵阳 55018)

[摘要] 贵州岩溶地貌分布广泛,地质情况非常复杂,严重影响重大工程建设和地下水安全,文章提出一种改进的电法勘探技术,对不良地质体勘查取得了成功应用。以直流电法理论为基础,该方法是根据视电阻率微分统计原理,由电流密度分布规律与供电电极 AB 两极分布总存在着一定的对应关系,在野外同一供电测线(剖面)上,通过不断加密改变供电电极距 AB 的位置,观测测量电极 MN 之间的电性参数变化,求取剖面相应纵向空间上,较大深度的(近地表的)近似连续视电阻率地电断面异常。此方法在深 300 m 以浅的岩溶区隐患排查中取得较好勘查效果,对煤矿钻孔及页岩气钻孔的选址探测误差能够控制在 7% 以内,值得进一步探索实践。

[关键词] 岩溶地质;测深技术;改进的方法;电法;贵州

[中图分类号] P631.3;P642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2020)-02-199-10

贵州岩溶发育强烈,岩溶类型齐全,岩溶及岩溶地下水极为丰富(韩至钧,1996),这一地质特征导致我省工程项目建设,特别是对清洁能源(如煤层气、页岩气)探采井工程选址造成困难,工程建设(施工)过程中常因地下暗河、溶洞等岩溶地质隐患体极大地影响施工周期,甚至成为废井,造成的重大经济损失和安全事故,所以,在工程建设选址勘察时精准查明隐伏溶洞情况意义重大。目前,地球物理探测隐伏溶洞的方法较多,主要的方法有高密度电阻率法、地质雷达、浅层工程地震法(反射法、折射法、瑞雷波法和映像法)、微重力法、高精度磁测法、地脉动法和测井等方法(赵仁基等,2009),但这些方法探测深度浅,大多数在 30 m 以浅,且精度不高,或者为剖面探测方式,很难实现对地下隐伏岩溶地质精准勘查。鉴于此,本文针对隐伏溶洞探测问题提出一种改进的电法勘查技术,该技术以直流电法理论为基础,根据视电阻率微分式中电流密度分布特征总与供电电极 AB 一一对应,利用微分统计原理,不断加密或增大供电电极距 AB 求取近似

连续视电阻率地电断面,从而实现 300 m 以浅的岩溶地质层不同探测精度需求,为岩溶地区隐伏溶洞探测提供了一种新的方法。

1 研究区地质及地球物理特征

1.1 研究区地质特征

研究区位于贵州省务川县青龙村青龙煤矿矿区,该矿区地质为碳酸盐岩沉积地区(朱永红,2010)(图 1),出露地层有第四系 Q 浮土层,以灰岩、粘帖岩为主的三叠系下统夜郎组 T_{1y} ,以灰岩为主的二叠系上统长兴组 P_3c ,以灰岩、粘帖岩及砂泥岩为主的二叠系上统吴家坪组 P_3w ,以灰岩为主的二叠系中统茅口组 P_2m 。电法探测区东南向分布有一条北东-南西向的向斜构造和一条正断裂,同区有一条西南-北东流向的地表河流,区域内溶蚀漏斗发育,测区整体造发育,地表水和地下水丰富,探测区煤炭储量勘探孔 Zk1501 在深 102

[收稿日期] 2019-11-28 **[修回日期]** 2020-03-28

[基金项目] 贵州省地矿局地质科研项目(黔地矿科合(2018)14号);贵州省地矿局青年地质科研项目(黔地矿科合(2018)38号)。

[作者简介] 黄启霖(1987—),男,工程硕士,工程师,主要从事物探工作。

[通讯作者] 尹努寻(1977—),男,高级工程师,长期从事水文地质、工程地质、环境地质及物化探工作,侧重于地质环境保护及地质灾害防治。

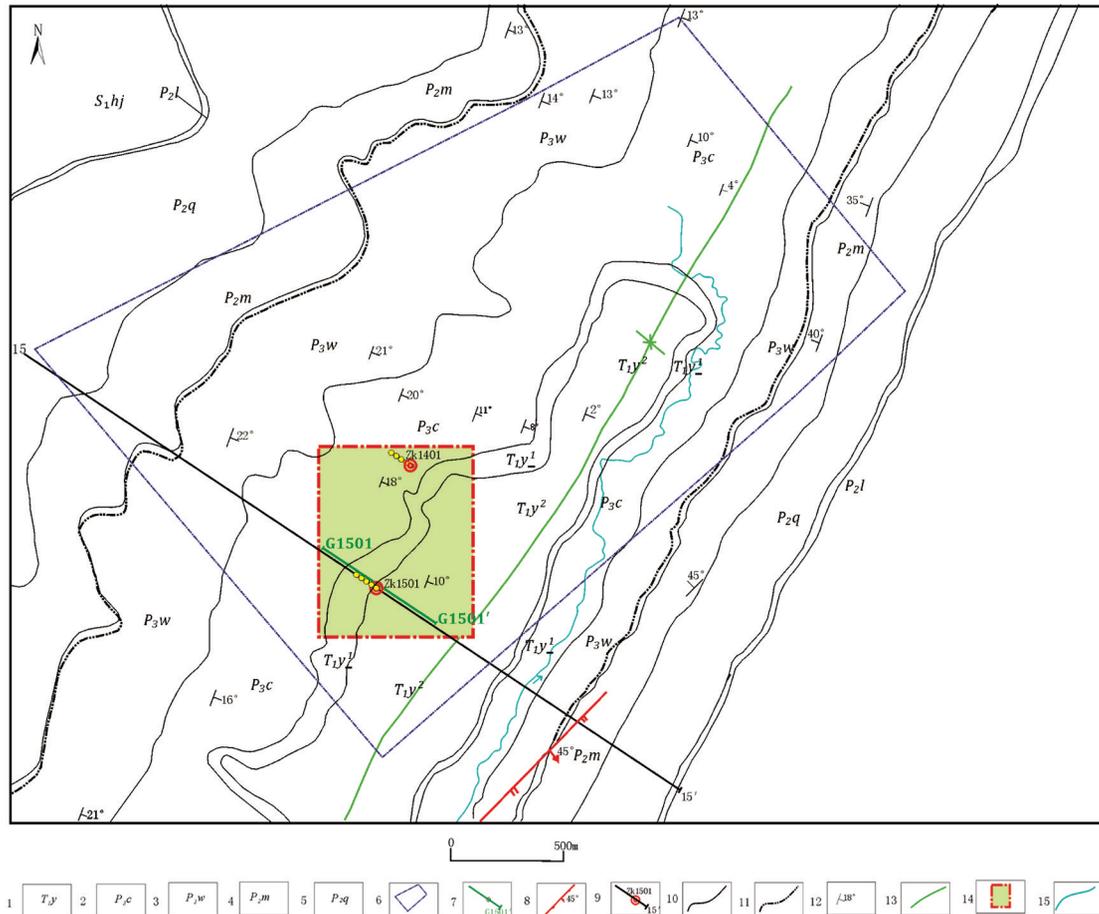


图1 务川县青龙煤矿地质及电法工作布置图

Fig.1 Geological and electrical work arrangement map of Qinglong coal mine, Wuchuan county

1—三叠系下统夜郎组;2—二叠系上统长兴组;3—二叠系上统吴家坪组;4—二叠系中统茅口组;5—二叠系中统栖霞组;6—研究区某煤矿矿权范围;7—高密度电法测线及改进的电法勘探技术采样点;8—正断层;9—地质勘探线及钻孔编号;10—地层界线;11—煤层线;12—产状;13—向斜构造;14—电法重点研究区;15—河流

~112 m 处揭露大型溶洞,为此,选取该探测区作为贵州典型的岩溶地质精细化探测研究区,具有代表意义。

1.2 地球物理特征

在收集以往相邻工作区物性资料的基础上,结合测区内实施煤炭勘探的10个钻孔电测井资料,统计归纳了本区各岩性层电性特征(表1)。

根据各地层岩性及岩石组合类型分析,以三叠系下统夜郎组二段泥灰岩和灰岩、二叠系上统长兴组灰岩、二叠系中统茅口组灰岩为主的岩性层呈相对高阻特征,电阻率值在1 000 Ω·m 以上;以三叠系下统夜郎组一段粉砂泥岩、二叠系上统吴家坪组燧石团块灰岩、硅质岩、粉砂岩泥岩、粘土岩及煤层组成的岩性层呈相对低阻的物性特征,电阻率值在500 Ω·m 以下。

表1 岩(矿)石电性参数特征统计

Table 1 Statistics of rock (ore) of electrical property parameters characteristics

| 岩性名称 | 地层代号 | 电阻率范围(Ω·m) | 电阻率平均值(Ω·m) |
|------|----------------------------------|--------------|-------------|
| 粘土 | Q | 5 ~ 317 | 101.53 |
| 灰岩 | P _{3c} 、T _{1y} | 147 ~ 25 509 | 1 202.12 |
| 砂岩 | P _{3w} 、T _{1y} | 22 ~ 2 375 | 623.54 |
| 泥岩 | P _{3w} | 4 ~ 118 | 80.42 |
| 炭质泥岩 | P _{3w} | 5 ~ 178 | 98.17 |
| 无烟煤 | P _{3w} | 24 ~ 3 566 | 525.61 |
| 灰岩 | P _{2m} | 52 ~ 34 349 | 4 105.83 |

综上所述,由于测区构造发育,地下水丰富,导致岩溶地质发育,各地层岩性电阻率变化大,但地电断面整体反映为高阻-低阻-高阻特征仍然明显,各岩性层组合整体间电阻率差异明显,具备电法勘查的物性基础。

2 电法勘探基本方法与技术改进分述

2.1 电法勘探基本方法

电法勘探方法是以电场理论为数学物理基础,以研究对象与周围环境介质体间电性差异为物质基础,通过研究稳定电场在地下半空间的分布规律,分析推测研究对象(地质体)的埋深及其展布等地质问题的一种勘探方法。根据供电电极与测量电极的排列布局的不同常常分为剖面测量和测深测量两种探测方式,电法测深的电极布设常常遵循以下原则:一是确保最小供电电极 AB_{\min} 应小于第一电性层厚度 h_1 米;二是确保最大供电电极 AB_{\max} 应大于最大目的层厚度的两倍 $2NH_{n-1}$ 米;三是各供电电极 AB 在以 $AB/2$ 为对数轴上应均匀分布,一般使相邻两供电电极距在数模为 6.25cm 对数纸上相距约 0.5 ~ 1.5 cm,采样点分布详见图 2(c),图中 ΔA 为供电电极 AB 的变化量, Δh 为随供电电极的递增变化达到探测不同

深度的递增变化量,单位为米,从而实现对不同深度电性层的探测;四是一般确保测量电极与供电电极之比大于或等于 1/30。

2.2 技术改进分述

该技术在直流电阻率测深法技术成熟理论的基础上,根据电场理论及其特征,地面任意两个异性点电流源 A、B 在地下介质中的电场、电位和电流场分布特征(傅良魁,1983)详见(图 2),可得出两个基础规律为:一是越靠近电极,电位变化越大,在 AB 中间三分之一至二分之一的地段电场、电位相对稳定,这就是电法数据采集段设计在 A、B 电极间中部原因(图 2(a));二是供电电极附近及之间近地表电流密度较大,随着深度 h 的增加迅速衰减(图 2(b))。为了求取 A、B 两电极间任意 h 深度处点 M 点形成的电位及电流密度分布规律,根据电场的叠加原理,可推出电位及电流密度具体表达式如下式 2.1、2.2:

$$U = \frac{PI}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \tag{2.1}$$

$$j_h = 2j_h^A \cos\alpha = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{L}{(L^2+h^2)^{1/2}} \tag{2.2}$$

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \tag{2.3}$$

其中, $AB=2L$, j 为电流密度, I 为电流。

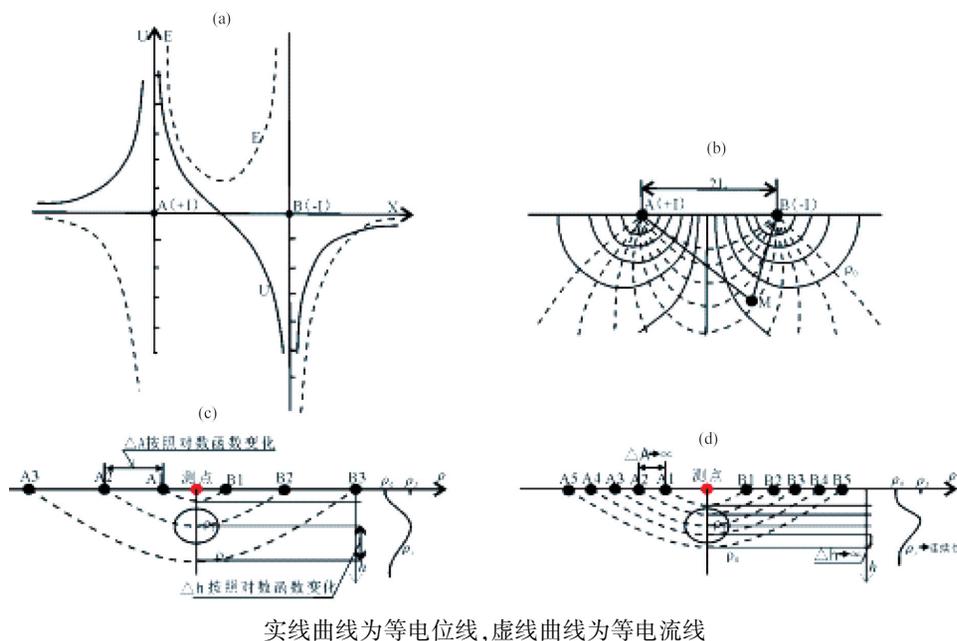


图2 电位(a)、电流密度(b)及传统方法(c)、改进方法(d)的电流密度分布特征图

Fig. 2 Current density distribution characteristics of potential (a), current density (b) and traditional method (c) and improved method (d)

电法改进技术是电法测深技术的基础上,根据视电阻率微分统计原理,利用电流密度分布规律与供电电极 AB 的分布总存在着一定的对应关系,在野外同一供电测线(剖面)上,通过不断加密改变供电电极距 AB 的位置,观测测量电极 MN 之间的电性参数变化,使供电电极递增变化量 ΔA 趋于无穷小,实现垂向探测递增 Δh 趋近于无穷小,进而实现探测视电阻率变化趋近于连续曲线(图 2(d)),求取剖面相应纵向空间上,较大深度的(近地表的)近似连续视电阻率地电断面异常。该种技术除具有常规电法的特征和优势外,较常规电法(图 2(c))分别率得到显著提高,且可根据探测对象规模灵活设计 ΔA 和 Δh 值,实现对目标体的高精度探测。

电法改进技术实在传统电法基础上,通过改变供电电极及测量电极,以实现较传统电法更高分辨率要求,高密度电法是兼顾传统剖面电法和传统测深的一种组合探测方法,电法改进技术较高密度电法在布极及分辨率上更具针对性,在探测精度和探测深度较高密度电法更具优势。

2.3 岩溶地质模型分析

2.3.1 正演模型建立

目前,直流电法正演模型常用方法有二维有限单元法(周熙襄,1982)、积分方程法(G等,1982)、有限差分法(Macki,1994)和边界元法(杨长福等,2005),由于有限元法或有限差分法可以改进计算电阻率的精度,对计算机的内存要求低,有效提高了计算效率,且对网格适应性强,方法技术研究较为成熟等优势受到大众青睐。因此,本文选取了 RES2DMOD ver. 3.01(Loke,2002)正演模拟软件对岩溶地质模型进行模拟计算,模型按照研究区煤炭勘探实测剖面 1501 成果,综合钻孔 Zk1501 揭露地质及岩溶情况设计初始模型参数,测区地层倾角在 10° 以内,故本次就忽略地质对模型的影响。设计模型主要参数(图 3(a))为:第一层为第四系(Q)泥岩,厚度 15 m,电阻率值为 $100 \Omega \cdot m$;第二层为三叠系下统夜郎和三叠系上统长兴组($T_{1y}+P_{3c}$)泥灰岩和灰岩,厚度为 105 m,电阻率值为 $1000 \Omega \cdot m$,该层设计有一溶洞,宽 160 m,高 60 m,电阻率值 $10000 \Omega \cdot m$;第三层为二叠系上统吴家坪组 P_{3w} 灰岩、粘土、泥岩和炭质泥岩,厚 110 m,电阻率值为 $500 \Omega \cdot m$;第四层为

二叠系中统茅口组 P_{2m} 灰岩,厚 100 m,电阻率值为 $4000 \Omega \cdot m$;为满足探测 300 深度,确保目标体有不少于三个探测点覆盖,由于受正演软件网格模块深度计算限制,本次拟设定电极距为 20 m,电极数量 100 个,模型中的模块数为 198 块,伪剖面数 28 层,增加外界噪声影响 6%。

2.3.2 反演剖面对比分析

根据上述模型参数,利用 RES2DMOD ver. 3.01 正演模拟软件分别进行了温纳排列(Wenner Alpha)、偶极排列(Wenner Beta)和微分排列(Wenner Gamma)正演模型计算,再利用 RES2DINV 软件进行理论模型反演计算。图 3 中(b)为改进电法技术微分排列(γ)测量电性断面,(c)为改进电法技术偶极排列(β)测量电性断面,(d)为改进电法技术温纳排列(α)测量电性断面,三种装置成像色谱图均反映出模型设计的四层电性层,与设计岩溶地质模型的“低-高-低-高”电性层对应,均能反映出设计溶洞模型,分层对比分析:浅部低阻层电阻率在 $150 \Omega \cdot m$ 左右,对应设计地层第四系覆盖层泥岩;地下 15~110 m 间为第二电性层,电阻率值为 $1200 \Omega \cdot m$,与模型第二电性层对应,微分排列测量各设计电性层和目标体的电阻率值、电性分界面、目标体形态与设计值最为接近(图 3(b)),对该层分辨最好,偶极次之,温纳最差;地下 110~220 m 间为第三电性层,电阻率值为 $500 \Omega \cdot m$,与模型第三电性层对应,同样可以看出,微分排列对该层分辨最好,偶极次之,温纳最差;地下 220 m 以深为第四电性层,电阻率值为 $4000 \Omega \cdot m$,与模型第四电性层对应,微分排列对该层分辨最好,偶极次之,温纳最差;对溶洞模型反映的分析:三种装置成像色谱图均能有效识别出溶洞模型特征,分布于剖面 860~1020 m 段,埋深 60~80 m,电阻率 $4200 \Omega \cdot m$,与设计溶洞模型对应,微分排列测量成果显示和目标体的电阻率值、电性分界面、目标体形态与设计值最为接近,可见,微分排列对溶洞模型分辨也是最好,偶极次之,温纳最差。

2.3.3 计算方法精度统计

上述排列装置在相同模型初始条件下,均按照改进的电法技术加密测点,微分排列探测深度最大,测量点密度最大,偶极装置次之,温纳装置最差,由图 3 和表 2 统计出三种计算方法的效果对比为:温纳排列装置对第四系泥岩的反映深度

和电阻率值最接近设计电性层,误差为 4.27%;微分排列装置对夜郎组、长兴组 $T_{1y}+P_{3c}$ 灰岩及泥灰岩反映深度和电阻率值最接近设计电性层,误差为 1.26%;微分排列装置对吴家坪组 P_{3w} 灰岩、泥岩及炭质泥岩反映深度和电阻率值最接近设计电性层,误差为 1.82%;微分排列装置对茅口组 P_{2m} 反映深度和电阻率值最接近设计电性层;微分排列装置对设计溶洞反映深度、形态和电阻率值最接近设计电性层,误差为 6.94%;通过岩溶地

质模型模拟计算及反演,三种排列装置按照改进的电法技术均实现了高精度探测;微分排列装置理论反演结果整体最接近设计模型,对设计模型 4 个电性层和高阻溶洞边界反映明显,反演厚度与设计厚度误差最小,平均误差为 3.67%,偶极装置探测效果次之,温纳装置探测效果最差,平均误差为 13.88%;探测分辨率与有效探测深度和垂向测点密度呈正相关,在保证有效探测深度足够大,测点密度足够大,探测精度越高。

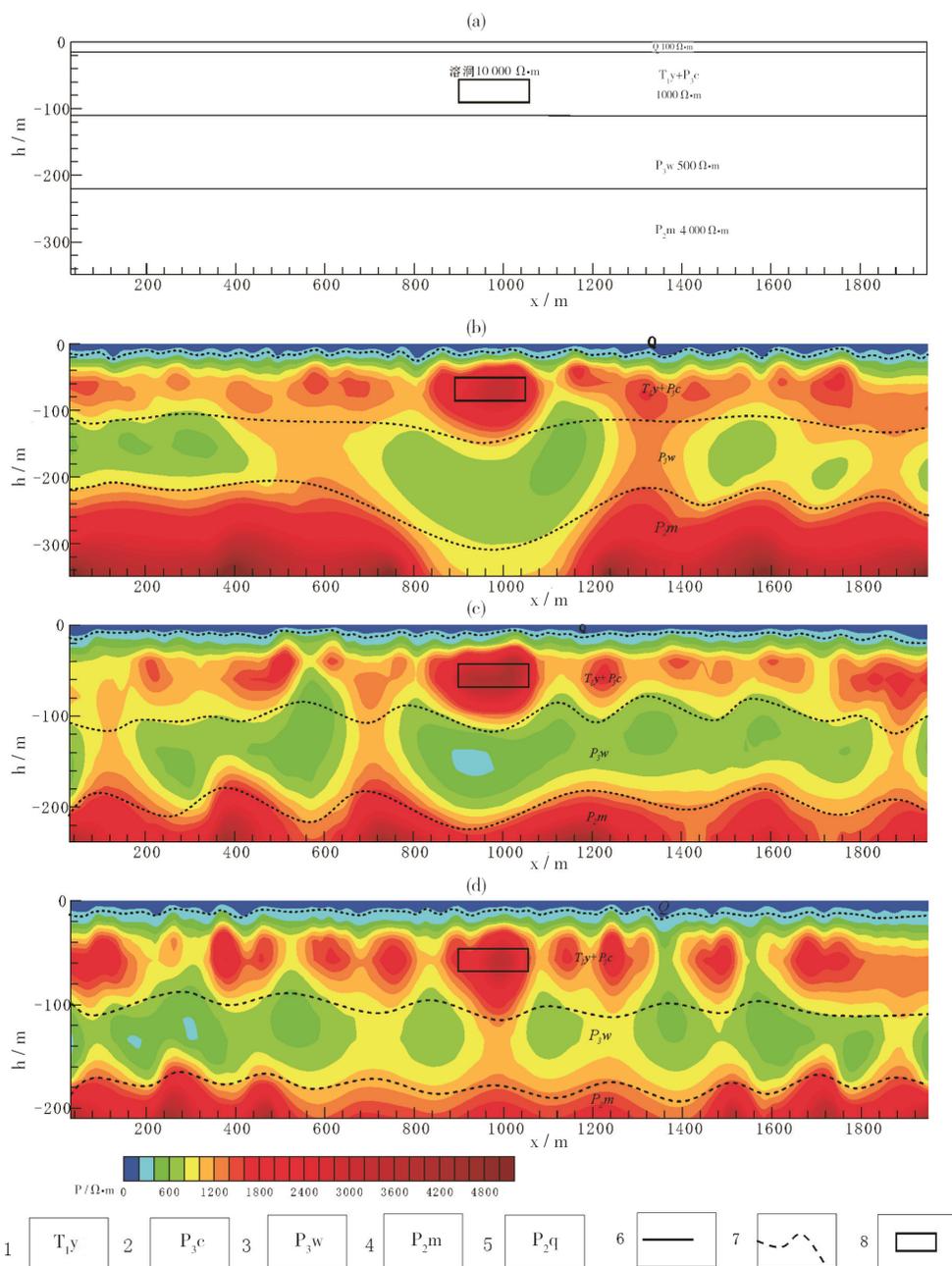


图3 设计的溶洞正演模型及三种电法装置反演剖面异常效果对比图

Fig. 3 Comparison of forward modeling of karst caves and inversion profile anomaly effects of three kinds of electrical method
1—三叠系下统夜郎组;2—二叠系上统长兴组;3—二叠系上统吴家坪组;4—二叠系中统茅口组;5—二叠系中统栖霞组;6—正演模型设计及参数;7—微分排列理论反演断面;8—偶极排列理论反演断面

表2 三种排列装置理论反演成果误差统计表

Table 2 Error statistics of theoretical inversion results of three permutation devices

| 电性层名称 | 电性层厚度/中心埋深 (m) | 设计电阻率 ($\Omega \cdot m$) | 排列方式 | 反演厚度 (m) | 反演电阻率 ($\Omega \cdot m$) | 厚度误差 (%) |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------|-------|-------------|-------------------------------|-------------|
| 第四系 Q | 15.00 | 100 | (a)微分 | 14.30 | 150 | 4.67 |
| | | | (b)偶极 | 14.20 | 150 | 5.33 |
| | | | (c)温纳 | 14.36 | 150 | 4.27 |
| 夜郎组和 长兴组 T_1y+P_3c | 95.30 | 1 000 | (a)微分 | 96.50 | 1 400 | 1.26 |
| | | | (b)偶极 | 93.78 | 1 800 | 1.59 |
| | | | (c)温纳 | 87.17 | 2 400 | 8.53 |
| 吴家坪组 P_3w | 109.80 | 500 | (a)微分 | 107.80 | 600 | 1.82 |
| | | | (b)偶极 | 102.42 | 400 | 6.72 |
| | | | (c)温纳 | 86.27 | 400 | 21.43 |
| 茅口组 P_2m | 128.70 | 4 000 | (a)微分 | - | 3 600 | - |
| | | | (b)偶极 | - | 4 000 | - |
| | | | (c)温纳 | - | 3 200 | - |
| 溶洞 | 73.40 | 10 000 | (a)微分 | 68.30 | 3400 | 6.94 |
| | | | (b)偶极 | 62.23 | 4200 | 15.18 |
| | | | (c)温纳 | 57.79 | 4000 | 21.27 |

3 方法应用实例分析

3.1 野外观测

为达到对务川县青龙煤矿指定区域隐伏溶洞精准探测,本次采样采用重庆地质仪器厂 DUK-2A 电法测量系统。测量方法主要有:高密度电法、电法改进技术测量(包含施能贝尔排列高密度测深和对称四极排列测深)和传统电法对称四极测深,其中,电法改进技术施能贝尔排列高密度测深是按照电法改进技术原理进行测点设计,利用高密度电法系统电极转换器优势及其布设剖面,实现一次布极,完成高密度电法和电法改进技术施能贝尔排列高密度测深测量。完成电法改进技术野外数据采样点 12 个点,常规电法测深野外数据采样点 12 个点(图 1),高密度电法测量剖面 1 条和电法改进技术施能贝尔排列高密度测深剖面 1 条。其中,电法改进技术采用对称四极排列进行数据采样,主要是通过不断加密供电电极距来实现大数据采集目的,以此实现高精度探测要求,探测原理及垂向探测点密度详见图 2、图 4 所示;高密度电法数据采样采用微分装置;测区地层倾角小于 10° ,剖面沿线为第四系浮土覆盖,未见基岩出露,坡度小于 15° ,可近似忽略地形影响,高密度电法剖面、电法改进技术与常规电法测深剖面

均编号为 G1501,与煤炭勘探剖面 14 线同向,三种方法剖面为同一剖面,且均通过钻孔 ZK501,剖面方向 123° 。

3.2 数据处理

高密度电法数据利用 RES2DINV 软件进行数据预览,删除原始数据突跳点、数据的圆滑滤波和地形改正,利用软件中的有限元法和最小二乘法进行反演计算,再利用软件系统对反演数据进行网格化,进而绘制成二维电性断面图。

电法创新技术是利用 DUK-2A 高密度电法测量系常规电法模块采集,数据利用该系统配带软件,删除原始数据突跳点、数据的圆滑滤波和地形改正,求取视电阻率,利用 Surfer 软件进行成图数据处理,并绘制二维电性断面图。

3.3 异常分析

剖面浅部为第四系浮土层,反映为低电阻特征,整条剖面(测线)由浅至深总体表现为“高-低-高”四层电性层特征(图 4),第一电性层总体为相对高阻特征,对应为三叠系下统夜郎组灰岩层,第二电性层总体反映为相对低阻特征,对应为岩溶发育的二叠系上统长兴组灰岩和二叠系上统吴家坪组砂泥岩组合层,第三电性层总体反映为相对高阻特征,对应为二叠系中统茅口组灰岩层;在剖面(图 4(d))0~20 m 之间,埋深 110~130 m

处为高电阻率特征,推测为溶洞(无填充物)反映,对应钻验揭露的溶洞;在剖面(图4(d))30 m附近倾向剖面小号的相对低阻条带,推测为岩溶破碎带反映。

3.4 勘查方法统计说明及验证效果

以原钻孔 Zk501 揭露地质及岩溶地质情况为已知点,分别对高密度电法成果(图4(a))、传统电法测深成果(图4(c))和电法改进技术探测成果(图(b,d))进行深度校正,由各方法成果与钻探验证间误差进行统计(表3),综合图(4)和表3对各勘查方法统计说明如下:

高密度电法电性断面能清晰地分别出第四系粘土层、三叠系下统夜郎组泥灰岩层和二叠系上统长兴组灰岩地质边界及岩溶地质发育情况(详见图4(a)),对浅层的分别率高,推测夜郎组 T_{1y} /长兴组 P_{3c} 岩性层与钻孔揭露地层间平均误差为 6.45%,但探测深度有限,未能探测出钻孔揭露溶洞;

传统电法测深成果能分别出第四系粘土层、三叠系下统夜郎组泥灰岩层、二叠系上统长兴组灰岩和二叠系中统茅口组地质边界及岩溶地质发育情况(详见图4(c)),推测各岩性层与钻孔揭露地层间平均误差为 12.16%,但由于传统电极排列组合测点密度不够,对钻孔揭露溶洞反映存在偏差,仅反映出岩溶溶洞边界风化过渡带低阻电性特征;

改进的电法技术探测成果能够高精度地分辨出第四系粘土层、三叠系下统夜郎组泥灰岩层、二叠系上统长兴组灰岩和二叠系中统茅口组地质边界及岩溶地质发育情况(详见图4(d)),推测各岩性层与钻孔揭露地层间平均误差为 6.71%,新技术通过改变传统电法测深电极排列,不断加密电极距,确保探测目标体至少有 3 个测点覆盖,对钻孔揭露溶洞实现精准识别,清晰分辨出高阻溶洞主体和低阻边界风化带的电性特征,探测效果最佳。

采用电法勘查技术探测成果重新对 ZK1501 钻孔进行选址,并对钻孔揭露地电断面进行推测,由图4(d)和表3成果,推测地电断面、岩性层厚度与钻孔实际揭露情况综合分析:高密度电法推测第四系地层厚度为 2.1 m,钻探揭露该层厚度为 2 m,厚度误差为 5%,最接近地层实际厚度;电法

改进技术两种探测成果推测夜郎组 T_{1y} 地层厚度约为 37.09 m,钻探揭露该层厚度为 40 m,厚度误差为 2.39%,最接近地层实际厚度;电法改进技术探测成果推测长兴组 P_{3c} 地层厚度约为 137.24 m,钻探揭露该层厚度为 148 m,厚度误差为 7.27%,最接近地层实际厚度,电法改进技术(施能贝尔排列高密度测深)方式探测深度无法达到;电法改进技术探测成果推测吴家坪组 P_{3w} 地层厚度约为 244.73 m,钻探揭露该层厚度为 246 m,厚度误差为 0.52%,最接近地层实际厚度;高密度电法由于受深度限制,无法全面精准探测目标地质断面全貌,传统电法测深精度无法精准识别岩性层和目标体,只有电法改进技术实现了高精度识别,精准分辨出各地层组边界线,准确识别出地层内各岩性分布;精准推测成果为:0~2.44 m,电阻率为 $200 \Omega \cdot m$,对应第四系浮土层;2.44~40 m,电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$,对应为夜郎组 T_{1y} 泥灰岩层;40~70 m,电阻率为 $800 \Omega \cdot m$,对应为长兴组 P_{3c} 灰岩,岩溶发育;70~148 m,电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$,对应为长兴组 P_{3c} 灰岩含方解石脉;148~188 m,电阻率 $1400 \Omega \cdot m$,对应为吴家坪组 P_{3w} 灰岩含方解石脉和硅质岩;188~206 m,电阻率 $1200 \Omega \cdot m$,对应为吴家坪组 P_{3w} 灰岩;206~215 m,电阻率 $1000 \Omega \cdot m$,对应为吴家坪组 P_{3w} 粘土和铁质砂岩;215~241 m,电阻率 $3000 \Omega \cdot m$,对应为吴家坪组 P_{3w} 纯灰岩;241~245 m,电阻率 $1000 \Omega \cdot m$,对应为吴家坪组 P_{3w} 炭质泥岩和煤层;245~280 m,电阻率 $3000 \Omega \cdot m$,对应为茅口组组 P_{2m} 纯灰岩,以上推测经钻探揭露证实各岩性地层及目标体推测误差在 0.52%~7.27%之间。

4 结论

(1)电法改进技术以电法勘探技术方法为基础,经实际项目实践,是一种较高密度电法及其测深、常规电法测深,能够探测的隐伏溶洞深度更深、探测精度更高的测深方法,最大可达 300 m。

(2)电法改进技术成果实践证明,电法探测分辨率与有效探测深度和垂向测点密度呈正相关,在能保证有效探测深度足够大,测点密度足够大,能够实现目标体(层)高精度探测(识别)。

(3)利用电法改进技术在文中研究区进行岩

溶地质探测,效果显著,平均精度误差控制在7%以内,值得在岩溶地质勘查中进一步探索实践。文中选取高密度电法、传统电法测深和电法改进

技术进行探测,电法改进技术探测效果最佳,高密度电法次之,但探测深度有限,常规电法测深探测效果最差。

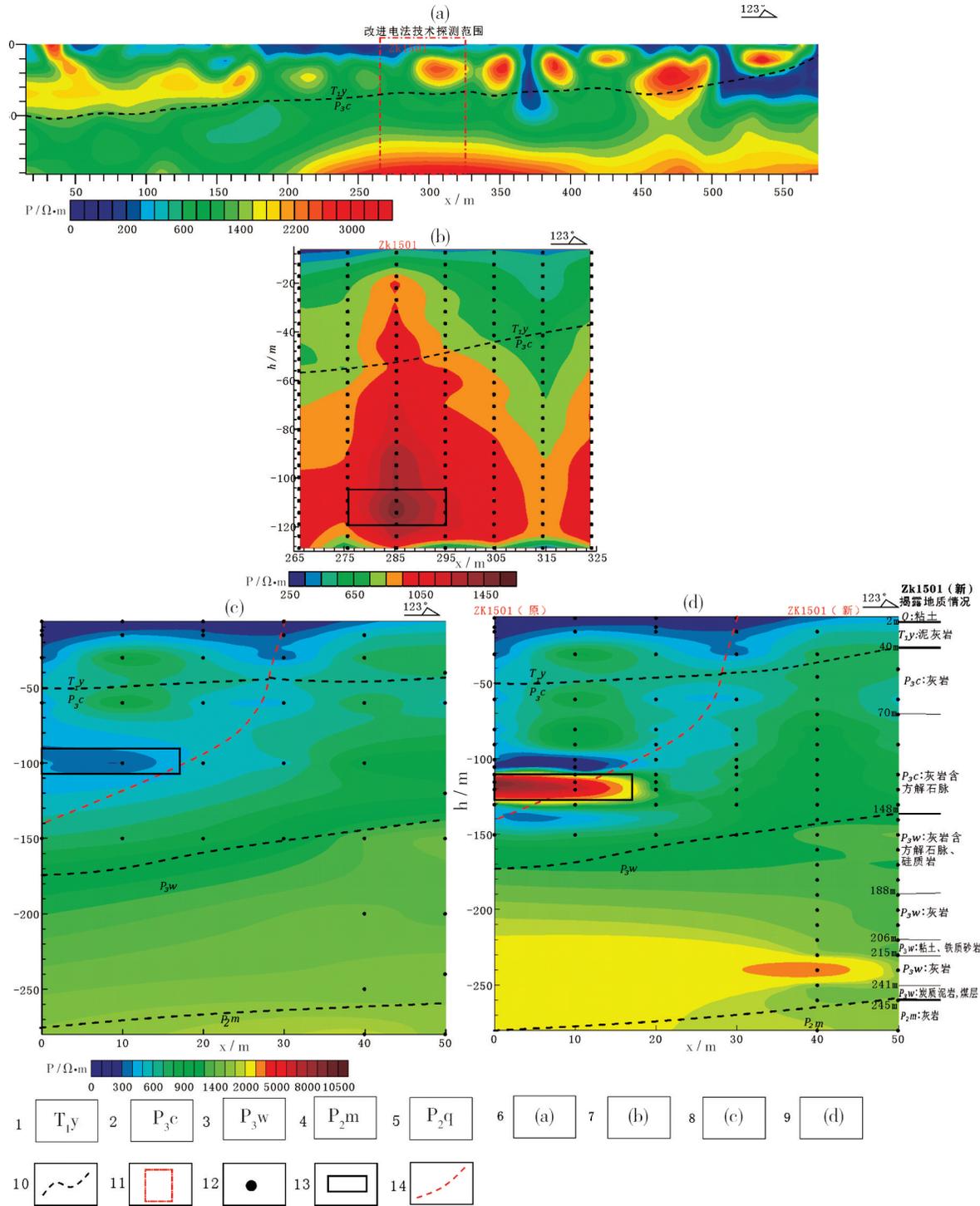


图4 三种电法装置探测异常效果对比图

Fig. 4 Comparison of detection effects of three electrical devices

1—三叠系下统夜郎组;2—二叠系上统长兴组;3—二叠系上统吴家坪组;4—二叠系中统茅口组;5—二叠系中统栖霞组;6—高密度电法电性断面;7—电法改进技术(施能贝尔排列高密度测深)电性断面;8—传统对称四极测深电性断面;9—电法改进技术(对称四极测深)电性断面;10—推测地质边界;11—电法改进技术探测段;12—探测点;13—推测溶洞;14—推测岩溶破碎带

表 3 三种方法勘查成果与钻探验证误差统计表

Table 3 Statistics of exploration results of the three methods and drilling verification errors

| 电性层名称 | 原 Zk1501 孔揭露地层底深(m) | 建议 Zk1501 孔揭露地层底深(m) | 探测方法(图 4) | 推测底深/中心(m) | 电阻率范围($\Omega \cdot m$) | 厚度误差(%) |
|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------|------------|---------------------------|---------|
| 第四系 Q | 6 | 2 | (a) 高密度电法 | 2.10 | 150 | 5.00 |
| | | | (c) 传统测深法 | 2.44 | 200 | 22.00 |
| | | | (d) 电法改进技术 | 2.44 | 200 | 22.00 |
| 夜郎组 T _{1y} | 46 | 38 | (a) 高密度电法 | 35 | 2 200 | 7.89 |
| | | | (c) 传统测深法 | 41.73 | 1 000 | 12.45 |
| | | | (d) 电法改进技术 | 37.09 | 1 000 | 2.39 |
| 长兴组 P _{3c} | 102 m 见溶洞 | 148 | (a) 高密度电法 | 深度不够 | - | - |
| | | | (c) 传统测深法 | 131.67 | 1 200 | 11.03 |
| | | | (d) 电法改进技术 | 137.24 | 1 200 | 7.27 |
| 吴家坪组 P _{3w} | P _{3c} 见溶洞 无法施工 | 246 | (a) 高密度电法 | 深度不够 | - | - |
| | | | (c) 传统测深法 | 241.09 | 800 | 2.00 |
| | | | (d) 电法改进技术 | 244.73 | 800 | 0.52 |
| 茅口组 P _{2m} | P _{3c} 见溶洞 无法施工 | - | (a) 高密度电法 | - | - | - |
| | | | (c) 传统测深法 | - | 2 200 | - |
| | | | (d) 电法改进技术 | - | 2 200 | - |
| 溶洞 | 102 ~ 112 m 为溶洞 | 无 | (a) 高密度电法 | 深度不够 | - | - |
| | | | (c) 传统测深法 | 92.73 | 300 | 13.34 |
| | | | (d) 电法改进技术 | 108.49 | 10 000 | 1.39 |

[参考文献]

傅良魁. 1983. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,18-26.
 韩至钧,金占省. 1996. 贵州水文地质志[M]. 北京:地震出版社: 27-30.
 杨长福,徐世浙. 2005. 国外大地电磁研究现状[J]. 物探与化探, 29(3):243-247.
 赵仁基,林松. 2009. 工程物探方法综述[J]. 科技资讯,2009(3): 2-3.
 周熙襄. 1982. 直流电法正演计算中的有限元法[J]. 物化探电子

计算技术,1982(4):65-75.
 朱永红,徐石辉,王祁仑,等. 2012. 贵州务川汞矿带木油厂矿田地质特征及成矿模式[J]. 地质与勘探,48(1):38-42.
 Hursan G,Zhdanov M S. 2002. Contraction integral method in 3D electromagnetic modeling[J]. Radio Science,2002(6):1089.
 Macki. 1994. Three dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations;The Magnetotelluric example[J]. Radio Science,1994(29):923-935.
 M. H. Loke. 2002. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-element methods[Z]. [S. I.],2002.

Application of An Improved Electrical Prospecting Technique in Site Selection and Disposal of Engineering in Karst Area

HUANG Qi-lin, YIN Nu-xun, YANG Wu, YANG De-zhi, JIN Shao-rong, SONG Shun-chang, CHEN Xiantong, Lv Tian-jiang, SONG Qi-wen

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Bureau of Geology and Mineral Resources, Guiyang 55018, Guizhou, China)

[Abstract] Karst landforms are widely distributed in Guizhou, and the geological conditions are very complicated, which can seriously affect the construction of major projects and the safety of groundwater, etc. This paper proposes an improved electric exploration technique, which has been successfully applied to the exploration

of undesirable geological bodies. Based on the theory of direct current method, this method is according to the principle of apparent resistivity differential statistics, the current density distribution and the total power supply electrode AB the poles distribution, there is a certain relation between the same power supply line (section) in the field, through continuous encryption to change the location of the power supply polar distance AB, observation measurement between the electrical parameters of the electrode MN section to calculate the corresponding longitudinal space, large depth of approximate continuous (near) on the surface of the earth apparent resistivity abnormal electrical section. This method has achieved good exploration results in the investigation of potential hazards in the karst region with a depth of 300m and a depth of less than 300m, and the site selection detection error of coal mine boreholes and shale gas boreholes can be controlled within 7%, which is worthy of further exploration and practice.

[**Key Words**] Karst geology; Sounding technique; Improved methods; Electrical method; Guizhou

(上接第 143 页)

Discovery and Geological Significance of Manganese Bearing Ore Layer in Meitan Formation of Ordovician in Yaoshang of Yinjiang, Guizhou Province

YE Fei^{1,3}, PAN Wen^{1,2,3}, YIN Ting-long^{1,3}, ZUO Yong^{1,3}, QIN Zhi-gui¹,
ZHOU Ling¹, ZHOU Ning¹, ZHAO Shuang^{1,3}, LIU Jian¹

(1.103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development,
Tongren 554300, Guizhou, China; 2.School of Earth Sciences, China University of Geoscience,
Wuhan 4300743, Hubei, China; 3.Guizhou Province Manganese Resource Forecasting
Evaluation Technology Innovation Talent Team, Tongren 554300, Guizhou, China)

[**Abstract**] In the recent Geological Survey of the area of 1:50,000 dam site, manganese deposits were found in Taoximeitanzu on the Yinjiang Kiln. The Aotaoxi, which has been publicly reported in China, is only found in Hunan Taojiang, Yiyang, Anhua and Ningxiang. After comprehensive analysis, it is concluded that the manganese ore can be compared with the “Taojiang type” manganese ore, which has certain scientific and prospecting significance.

[**Key Words**] Ordovician; Meitan formation; “Taojiang” manganese ore