

文章编号: 1004-4140 (2007) 04-0022-09

电阻率成像法在探测溶洞中的应用

李靖辉¹, 李清林², 殷建武¹, 方庆银¹, 李军¹

1. 河南省核工业地质局, 河南 信阳 464000

2. 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

摘要: 电阻率成像法, 是在普通电法装置的基础上, 进行高密度的数据采集, 形成一个高密度的、内容丰富的视电阻率剖面。通过地电数据分析、处理, 可以客观、真实地反映地质体的一些基本特征。本文对地电成像的原理、方法以及溶洞的形成机理作了简单阐述。卢氏县西虎岭风景区溶洞的探测与发现, 对风景区的开发具有重要价值和意义。以电阻率成像法的运用, 使得解释工作更加方便与直观, 并具有较好的实用性、有效性和可操作性。

关键词: 电阻率成像法; 探测; 溶洞

中图分类号: P 319 **文献标识码:** A

常规电阻率法由于其观测方式的限制, 不仅测点密度较稀, 而且也很难从电极排列的某种组合上研究地电断面的结构与分布。因此, 在精细勘探中, 为了提高电阻率法的勘探能力, 使电阻率法在城市工程与环境地质调查中发挥更大的社会效益, 采用电阻率成像法。

电阻率成像法是电阻率勘探的基本方法之一, 是在普通电法装置的基础上, 进行高密度的数据采集, 使每次采集的数据足以形成一个视电阻率剖面, 通过单个或多个剖面数据的分析处理, 可以得到较密集的地电情况, 从而更好地反映出地下地质体。该方法中常用的装置有温纳 (Wenner)、斯伦贝格 (Schlumberger)、二极法 (pole-pole)、三极法 (pole-dipole)、偶极-偶极法 (dipole-dipole)^[1]。

在对卢氏县西虎岭风景区溶洞的探测中, 运用电阻率成像法, 比普通电法, 工作效率高, 成果的解释方便、直观。

1 地电成像法的基本原理和方法

1.1 地电成像法的基本原理

地电成像法在现场测量时, 只须将全部电极设置在一定间隔的测点上, 然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换器, 使电极布设一次完成。测量时测量仪器——多道直流电法仪由程序控制而动作, 从而实现电极排列方式、极距和测点的快速转换, 准确与快速地采集大量数据。利用与该系统配套的系列高级电法处理软件, 对采集的数据进行各种

处理及结果图示,使解释工作更加方便与直观。但该方法的基本原理仍是属于直流电法的范畴^[2]。

地电成像技术的核心是在观测上采用阵列电极系统、数据处理上实施二维或三维反演,由实测的视电阻率值得到真电阻率的分布图像^[3]。由于利用了丰富的信息量和非线性反演,所得结果的分辨率远高于常规电法勘探^[4]。它十分便于地质工作的分析与解释,降低了传统电法的不确定性。由于真电阻率值与地层的岩性、岩石孔隙中液体的性质有着密切关系,所以在识别断层、破碎带、含水层、油气层及其污染源等方面非常有效。地表观测的电成像图像在水平方向可具有 2.0 倍电极距的分辨能力,但在深度方向上的分辨能力较差,一般具有 5.0~8.0 倍(甚至 10.0 倍)电极距深度分辨能力,一级间断面会在图像中表现为渐变的梯度层或过渡带,解释推断中需予以注意。

电成像野外测量的方法分为地表、单孔、跨孔及孔地,均取得视电阻率的原始数据。每种方式下又可设计多种电极的组合排列。比如温纳(α 装置)、偶极(β 装置)和微分(γ 装置),针对不同测量装置所采用的层析成像方法也各不相同。

本次工作采用地表测量。各类测量装置中最重要的两个设计参数是道间距(即电极间距)和隔离系数。

道间距决定着成像的分辨率,数值模拟的结果是:电成像的分辨在隔离系数小于 10 时,水平方向约为 2.0 倍道间距,垂直向为 5.0~8.0 倍道间距;隔离系数较大时,约为 4.0~6.0 倍(水平方向)和 8.0~10.0 倍(垂直方向)道间距。所以,电成像图像的可靠分辨主要是在地质构造的水平方向上,而对深度的控制能力一般都比较弱。

隔离系数决定着探测的深度和浅部的覆盖次数,相当于在一条固定的测量断面下方实施了多少条电剖面测量。隔离系数越大,数据采集量越大,反演时浅部约束条件越多,重建出的图像信息量也越丰富。成像剖面的深度和分辨率是由观测装置、隔离系数和道间距三个参数决定的。

1.2 工作方法

一般采用固定断面扫描测量,最常用的电极装置为 α 排列(温纳装置 AMNB)、 β 排列(偶极装置 ABMN)、 γ 排列(微分装置 AMBN),也可以采用三极装置等。测量时,一次将即可做供电电极又做测量电极的 60~120 根电极按固定点距布设在测线上,通过多芯电缆与多极电路转换器连接,在主机控制下可实现电极排列方式、极距及测点的扫描测量。该方法一次测量可完成一条固定断面下方的 16~39 条剖面、552~2 340 个测点的数据采集工作。

研究认为,装置系统是影响分辨率的重要因素^[5]。微分装置的异常幅值最小,振荡出现最早。温纳四极装置系统振荡稍好,但异常幅值不大。偶极-偶极装置的异常幅值相对较大,分辨能力较强,但振荡却很剧烈,甚至高阻体上方出现低阻异常,反之亦然。不同的装置对于不同的探测目标具有不同的分辨率和探测深度。对于地电成像法,偶极采集系统适应于浅部探测,而温纳采集系统适应于深部探测。对于接地条件差、供电干扰严重的环境,采用温纳采集系统具有一定的优势。

在卢氏县西虎岭溶洞的测量工作中,主要采用温纳四极装置系统。电极装置为 α 排列,采用的参数主要为电阻率。

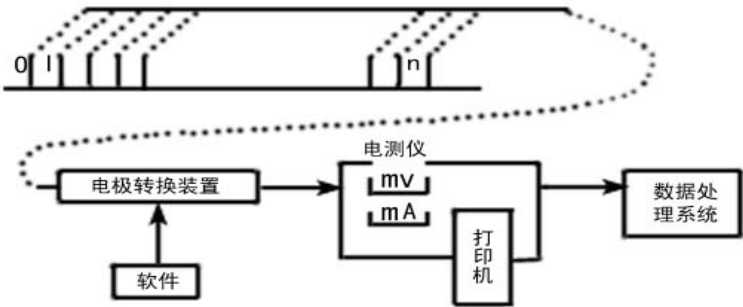


图 1 电阻率成像法测量系统结构示意图

1.3 资料处理与软件

数据处理技术是提高分辨率的重要手段之一。为了提高解释精度，我们采用 EarthImager 2D 最小二乘法计算机反演计算程序进行了正、反演计算。根据地电条件和装置系统，以及正演模拟结果的分析，有针对性地进行高通或低通滤波处理，消除或减小表层干扰和由于极距化而引起的振荡干扰^[6]。该程序使用快速最小二乘法对电阻率数据进行反演，适用装置有温纳 (α 、 β 、 γ)、偶极-偶极、(AB—滚动)、单极-偶极 (A—MN 滚动、MN—B 滚动、A—MN 矩形)、二极 (A—M 滚动)、斯仑贝格 (α 排列、四极测深滚动) 等。可用于约 25~650 个电极采集的大型数据 (约 100~5 000 个数据点) 反演。该程序为商用软件。

2 溶洞形成的机理

溶洞一般发育于灰岩或大理岩的粗砂层及粉质粘土层中，由于岩溶地下水的潜蚀、镂空作用，导致局部区域的粗砂层和粉质粘土层出现软化、松散现象，加之第四系潜水的淋漓作用，将岩土中的亲水性物质如系里细粒矿物质运移到岩溶

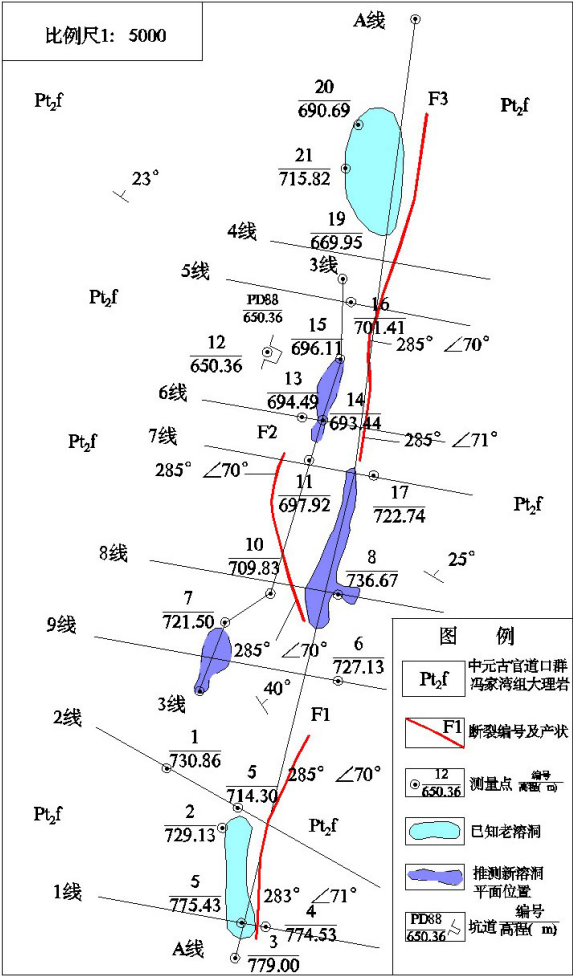


图 2 西虎岭溶洞地质、地电成像测量成果综合平面图

裂隙中，留下粗粒骨架，产生洞腔而形成的一种特殊地质体^[7]。

3 卢氏县西虎岭溶洞区地质概况

该区位于华北地台南缘卢氏-栾川陷褶断束中。地层自老到新的地层为：中元古界官道口群冯家湾组（Pt₂f）和第四系（Q）。冯家湾组（Pt₂f）为一套叠层石白云岩、纹层状白云岩、厚层状含硅质条带白云岩^[8]。区内出露的主要为含硅质条带白云质大理岩，其产状总体倾向为北东 30~70°，倾角 20~40°。此套岩石岩溶较发育，具有形成溶洞的可能性，是本次勘探的主要调查对象，见图 2。第四系（Q）：仅分布于河谷沟底，为砂、砾、卵石堆积层。构造：区域性断裂马超营断裂从工作区南边 500 m（桃花谷口南）通过。该断裂走向为北北西向，是中元古界官道口群冯家湾组与上元古界栾川群煤窑沟组的分界线。区内褶皱构造不发育，但断裂构造十分发育，大体可分为北西向、北东向、近南北向三组，其中，近南北向最发育，规模大小不等，一般延伸数十米至上百米，产状为：倾向 260~285°，倾角 60~75°，最陡达 85°。该组构造基本上控制着区内溶洞的分布及规模。岩浆岩：工作区内岩浆活动不发育，未见有岩浆岩出露地表。

4 勘探工作概况

4.1 使用的仪器设备及主要技术指标

重庆 WGMD-III 型分布式二维高密度激电测量仪器。主要技术指标：

电压通道：±6 V	视极化率测量精度：±1%，±1 个字
测量精度：V _p ≥10 mV 时，±0.5%，±1 个字	对 50 Hz 工频干扰：压制优于 80 dB
V _p ≤10 mV 时，±1%，±1 个字	输入阻抗：≥50 MΩ
电流通道：5 A	最大供电电压：800~900 V
测量精度：I _p ≥10 mV 时，±0.5%，±1 个字	最大供电电流：±5 A
I _p ≤10 mV 时，±1%，±1 个字	仪器电源电流：≤55 mA
	仪器电源：1 号电池 8 节
	工作温度：-10℃~+50℃
	体 积：310 mm×210 mm×210 mm
	重 量：6 kg

由于测区位于僻远的深山，人迹罕至，与最近的居民地也有 3 km，附近也无矿山、建筑工地等干扰因素，故不需作干扰试验。

4.2 完成工作量

在河南省卢氏县磨口乡西虎岭溶洞地区进行了地电成像法勘探，共完成了电法勘探剖面 10 条，其中长剖面 3 条，长度分别为 600 m、300 m、300 m，短剖面 7 条，总勘探长度 2 150 m。本次工作还完成 1：1000 地质调查 0.24 km²，全站仪测量点 35 个。见表 1 和图 2。

表 1 勘探工作量及有关参数

测线编号	测量装置	测线		测线位置	点距/m	异常数量	异常位置(桩号)
		方向	长度/m				
A 测线	α 、 β 排列	10°	600	0 桩号在南	10	1, 3	5~16, 34~38, 25~27, 43~53
1 测线	α 、 γ 排列	100°	300	0 桩号在西, 山下	5	2	13~20, 51~58
2 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在南	3	3	17~21, 31~32, 56
3 测线	α 排列	10°	300	0 桩号在西, 山下	5	1	41~49
4 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	1	47
5 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	无	无
6 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	无	无
7 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	1	37~39
8 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	1	42~44
9 测线	α 排列	100°	180	0 桩号在西, 山下	3	1	20~22

5 地电成像测量资料解释

5.1 A 测线资料解释

A 测线，点距 10 m，测线长度 600 m，测线方向 10 度。0 桩号在南，靠近新溶洞。图 3 是 A 测线 α 排列经过地形改正的二维成果图像，图 4 是 A 测线 α 排列没有经过地形改正的二维成果图像。图 3、图 4 是小排列层析图，图 4 为未经过地形改造的正常倒梯形，图 3 则是采用了外推的数据处理方法得出的结果。图 5 是 A 测线 β 排列经过地形改正的二维成果图像。由图 4 看出， β 排列的解释结果和实际情况相差较大，故在以后的测量工作中，就只进行 α 排列的测量。

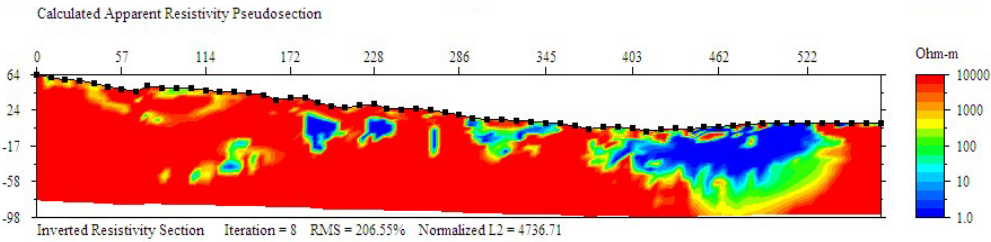


图 3 A 测线 α 排列高密度电阻率二维层析成像图（地改）

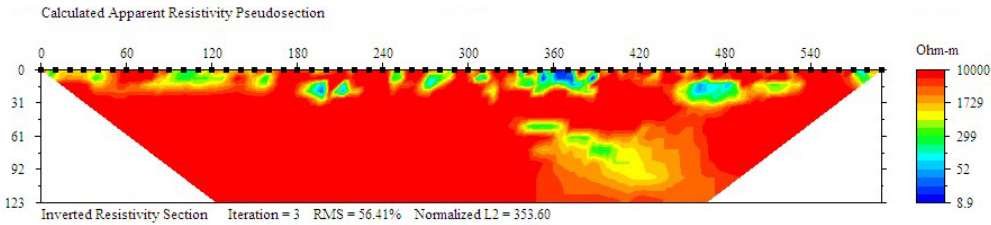


图 4 A 测线 α 排列高密度电阻率二维层析成像图（没有地改）

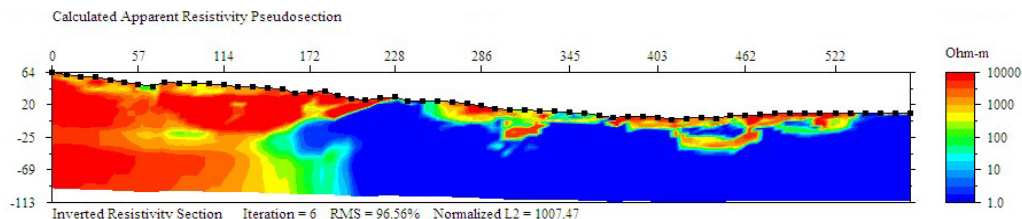


图5 A测线 β 排列高密度电阻率二维层析成像图(地改)

由图可以看出,测线南端出现的负异常,清楚地展示出新溶洞的图像。而其北端也大致表现出老溶洞存在的迹象。

在该测线的中部,也有2个负异常出现,在20~27号桩,32~38号桩,其范围和规模都较小,很难和新、老溶洞处的异常相比。因此,我们推测,这2个异常也可能是溶洞的反映,值得做进一步的探索和研究。

对比图3和图5,可以看出A测线 β 排列的溶洞异常被明显放大,远远超出了溶洞的范围。偶极-偶极装置正因为异常幅值相对较大,分辨能力较强,但振荡却很剧烈,导致异常被放大。虽然偶极-偶极装置适宜于浅部勘探,但使用时要特别注意对比观测,以免误判。

地形复杂情况下的电阻率成像测量存在二个困难,首先在有地势的地表上电极的布置比在平坦地表困难些,其次有地势的电阻率数据的反演是复杂的。在该区地形十分复杂,垂直落差达到近100m。为此,首先采用GPS卫星定位仪和全站仪相结合,精确采集每个电极的位置和高程,然后采用最优化的有限元算法进行地形改正,最大限度地消除地形的影响。

测线是非直线时,如果其弯度有限,一般就视为直线处理;弯度大时,采集经纬度和直角坐标参数,进行地形改正。

5.2 1测线资料解释

1测线,点距5m,测线长度300m,测线方向东西100度,0桩号在西,山下。该测线垂直穿过了新溶洞,图6是1测线 α 排列经过地形改正的二维成果图像。可以看出,在13~20桩号之间,出现了明显的负异常,较好地对应了地下新溶洞的位置,但在51~58桩号之间,也出现了异常范围、量级相对较小的负电阻率异常,若要验证,施工坑道距离远,投资大,风险较大,需慎重考虑。

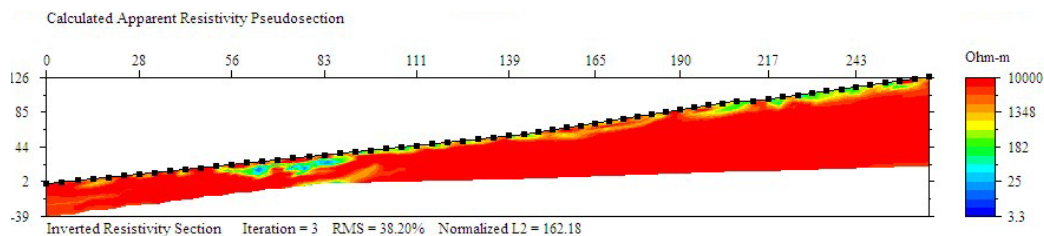


图6 1测线 α 排列高密度电阻率二维层析成像图(地改)

5.3 2测线资料解释

2测线,点距3m,测线长度180m,测线方向125度,0桩号在西,山下。2测线采用

α 排列测量。探测结果在 17~21, 31~32, 56 桩号之间, 出现了三个负电阻率异常, 但其规模较小, 且距新溶洞北端只有 10 m 左右, 因此推测是新溶洞异常的反映。

5.4 3 测线资料解释

3 测线, 点距 5 m, 测线长度 300 m, 测线方向 10 度, 0 桩号在南, 靠近新溶洞, 该测线高程低于 A 测线, 图 7 是 3 测线 α 排列经过地形改正的二维成果图像。可以看出, 在 1~8, 41~49 桩号之间, 出现了 2 个负电阻率异常, 尤其是 41~49 桩号之间的异常规模较大, 异常大小为长 40 m 左右、最大高度 10 m, 异常底板高程 650.71 m, 值得进行进一步的探索和揭露。在 1~8 桩号之间, 异常底板高程 704.50 m, 异常大小为长 30 m、最大高度 5 m。

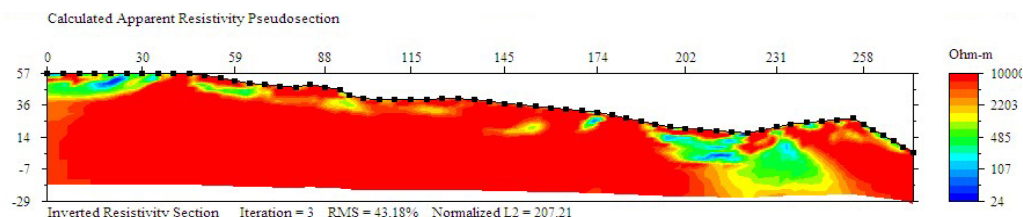


图 7 3 测线高密度电阻率二维层析成像图 (地改)

5.5 4 测线资料解释

4 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向东西 100 度, 0 桩号在西, 山下。在该测线 47 桩号处, 出现了 1 个负电阻率异常, 但该异常比较孤立, 做个检验和验证可以, 但是形成较大规模溶洞的可能性不大。

5.6 5 测线资料解释

5 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向 100 度, 0 桩号在西, 山下。测量结果, 没有异常反映。

5.7 6 测线资料解释

6 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向 100 度, 0 桩号在西, 山下。6 测线采用 α 排列测量。探测结果: 在 21 号桩处有异常反映, 这正好与 3 测线 41~49 号桩之间的异常相吻合。该区段异常规模较大, 其东段有近南北向的陡倾角的断层通过, 有形成溶洞的地质条件, 值得进行探索和揭露。

5.8 7 测线资料解释

7 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向东西 100 度, 0 桩号在西, 山下。该测线在 37~39 桩号之间有异常反映, 可能与 A 线 20~27 号桩之间的异常相连。

5.9 8 测线资料解释

8 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向东西 100 度, 0 桩号在西, 山下。该测线在 42~44 桩号之间有异常反映, 但异常规模、范围均较小, 不可能形成较大溶洞。

5.10 9 测线资料解释

9 测线, 点距 3 m, 测线长度 180 m, 测线方向东西 100 度, 0 桩号在西, 山下。9 测线采用 α 排列测量。探测结果: 该测线在 20~22 桩号之间有异常反映, 这与 3 测线 1~8 号桩之间的异常吻合, 因此该地段也值得进行验证。

6 坑道验证结果

通过地电成像法测量, 发现了三个相对较好的溶洞异常, 即 ① 3 测线 41~49 号桩, 异常底板高程 650.71 m, 异常大小为: 长 40 m 左右、最大高度 10 m; ② A 测线 20~27 号桩, 异常底板高程 729.00 m, 异常大小为: 长 80 m 左右、最大高度 5 m; ③ 3 测线 1~8 号桩, 异常底板高程 704.50 m, 异常大小为: 长 30 m、最大高度 5 m。通过比较, 认为在 3 测线 41~49 号桩的异常比较有价值进行验证, 在 12 号测量点设计坑道验证, 设计坑道方向 95 度, 长 40 m, 设计坑道的高程为 650 m。验证结果: 在坑道 35 m 处, 坑道顶开始渗水, 在向上掘进 3 m, 见到溶洞底部, 溶洞长约 36 m, 最大高度 8 m。

7 结论

本次地电成像法探测结果显示其溶洞体形态明显, 平面圈定的范围与坑道揭露的情况基本一致, 而深度方面, 建立在电阻率成像法基础之上的坑道揭露结果更为直观。对坑道验证后, 其精度可达到 2.2~5 m, 说明电阻率成像法在探测溶洞具有较好的实用性、有效性和可操作性, 也说明该反演程序和地形改正效果较好。

参考文献:

- [1] 何继善. 电法勘探的发展和展望[J]. 地球物理学报, 40(增): 308-316.
- [2] 柯马罗夫 B A. 激发极化法电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1983, 260-280.
- [3] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 202-249.
- [4] 谢忠球, 温佩琳, 喻振华. 提高高密度电阻率成像分辨率的数据处理技术[M]//何继善. 湖南省地球物理理论丛. 长沙: 中南大学出版社, 2001: 74-76.
- [5] 翁爱华, 刘国兴. 垂向电测深交互反演软件设计[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 62.
- [6] 李清林. 郑州市区基底起伏及隐伏断层的探测研究[C]//何继善. 构造地质学——岩石圈动力学研究进展. 北京: 地震出版社, 1999: 381-386.
- [7] 孙升林, 李育芳, 宁书年, 等. 地电影像法在探测土溶洞中的应用[J]. 地质与勘探, 38(6): 76-80.
- [8] 胡受奚, 林潜龙. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988: 1-328.

The Application of Resistivity Tomography Method in Cave Exploration

LI Jing-hui¹, LI Qing-lin², YIN Jian-wu¹, FANG Qing-yin¹, LI Jun¹

1. Henan Nuclear Geology Bureau, Xinyang 464000, China

2. The Geophysical Exploration Center of CEA, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The Resistivity Tomography method is based on ordinary to collect the high-density data and then to form a high-density and rich-content resistively section. It can reflect the basic characteristics of geologic body objectively and exactly through the analysis and processing of the geoelectric data. This paper makes a brief overview on the resistivity tomography of principle, method and mechanism of the formation of cave. The detection and discovery of the cave at Xihuling Scenic Area in Lushi county, that has great significance and value for the development of this place. Using resistively tomography method can make the explanation work more convenient and intuitive, and has good relevance, effectiveness and feasibility.

Keyword: resistivity tomography method; exploration; cave

作者简介: 李靖辉 (1972—), 男, 地质工程师, 1996年毕业于东华理工学院, 主要从事矿产地质勘查与管理工, Tel: 0376-6320821, E-mail: good-wood@163.com。