

Application of Electrical Prospecting in Cave Detection in Loess Area

Zhengke Wang, Lin Lu, Jianrong Liu, Shaohu Hu

The Second Comprehensive Geophysical Exploration Brigade, Bureau of Geology and Mineral Resources
Exploration and Development of Shaanxi, Xi'an Shaanxi
Email: wzkeh3000@126.com

Received: Nov. 29th, 2017; accepted: Dec. 13th, 2017; published: Dec. 20th, 2017

Abstract

The main cave detection way is electrical prospecting by the electricity differences. An example of cave detection can be used to explain the results which can serve the construction projects. The example is given that the shallow cave was detected under the condition of restricted working area. There are many detection methods for the cave being deeply buried (i.e. gob), such as gravity exploration, magnetic method and seismic prospecting. Each method has its own specialty and common characteristics. According to the characteristics of the cave or goaf, the reasonable detection method can obtain the ideal result by analyzing the physical condition of the cave or goaf.

Keywords

Cave Detection, High-Density Electrical Method, Electrical Device, Methods Study

电法勘探在黄土区洞穴探测中的应用

王正科, 卢琳, 刘建荣, 胡少虎

陕西地矿第二综合物探大队, 陕西 西安
Email: wzkeh3000@126.com

收稿日期: 2017年11月29日; 录用日期: 2017年12月13日; 发布日期: 2017年12月20日

摘要

对于洞穴目前使用的探测方法主要是电法勘探, 其是利用洞穴的电性特征来进行探测, 文中通过洞穴探测实例来解释所获得的成果, 并为建设工程服务, 取得了一定效果, 希望对同行有所帮助。这个实例主要是对于地表浅部的洞穴在工作区域受到限制情况下进行探测的, 而对于埋藏较深的洞穴(采空区等),

其探测方法较多，如重力勘探、磁法勘探和地震勘探等，各方法都有其特殊和共同的特性，实际工作中依据洞穴或采空区的特性，分析洞穴或采空区的物性条件，选择合理的探测方法即能获得较为理想的结果。

关键词

洞穴探测，高密度电法，电法装置，方法研究

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于基础建设的迅猛发展，特别是建筑工程以及矿山的开采和挖掘，使得原有的地表以下地质状况遭受破坏，致使后续建设工程和民生工程受到严重影响。对于这种危险而又无法控制的病害的治理工作显出其特殊的必要性。本文通过黄土区洞穴探测实例来探讨洞穴和采空区等病害[1]的探测方法，为工程建设提供基础服务。

黄土洞穴发育，对基本建设、公路铁路工程以及油气管道、厂房、民居等各类工民建构成了不同程度的威胁。此类洞穴由于其特殊形状、产态，用勘探地球物理方法进行探测的前提条件是满足的，可以用电法勘探、重力勘探和地震勘探[2]等方法进行隐伏洞穴的探测。本文通过电法勘探中的不同方法，寻求探测黄土区洞穴的有效性，以期在场地条件受到限制的地段，采用切实有效的方法即可探测类似的黄土洞穴。

2. 探测方法选择

大家知道，对于洞穴，不外乎有两种情形，即：一者是空的洞穴，其中无充填物，则其中由空气充填，二是是不空的洞穴，有水或其它熔融体充填。在实际工作中两者情形都存在，且有时还无法直接进行区分！

鉴于此类情形的存在，要对洞穴或采空区进行探测，必然要选择特定的探测方法，且此类方法必须对洞穴或采空区的实际存在有所反映，并通过对获取的第一手资料进行分析认识将其标识出来，为工、民、建提供服务。

从浅表区域(地表以下 50 m 范围的区域)洞穴或采空区的展现形式来看，再结合现有的探测方法，对洞穴或采空区依据其介质充填物与包围介质的物质的地球物理特征来进行探测，显然这就是非常直接的地球物理勘探方法——电法勘探。

首先，电法勘探主要是利用介质的电性特征来对地表以下地质体进行探测，而洞穴或采空区乃是一种特定的地质体，其电性特征具有以下展现形式：1) 没有充填物时，其中充填的是空气，而空气是不导电的绝缘体，也就是高阻体，即表现为电阻率高；2) 有充填物时，视其充填物性质来确定其电性特征，地下水和以地下水、土为主体的充填物，由于地下水的电性特征，使得充填物表现为低阻体(地下水是良导体)。

确定了探测洞穴的方法，在实际工作中就按照探测方法的技术要求进行实施，利用探测方法的理论特点进行探测就比较容易了。对于利用电法勘探来探测洞穴时，实施方法多种多样，其中的常规探测方

法有联合剖面法[3] [4]、中间梯度法以及高密度电法[5]等。

2.1. 联合剖面法

联合剖面法装置图见图 1，电阻率计算过程如下：

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

式中： ΔV ——测量电极 MN 之间电位差； I ——供电电流； K ——装置系数，由(2)式计算。

$$K = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (2)$$

注：装置系数计算公式中的 AM 、 AN 、 MN 分别为相应电极之间的距离(下同)。

从图 1 看，联合剖面法有两个三极装置($AO = OB = 12.5$ m, $MN = 5$ m)联合组成，测试和计算结果也就有两种结果，即 ρ_s^A 、 ρ_s^B 。由于供电电极和测量电极的排列次序不同，故在通过不同地质体时， ρ_s^A 和 ρ_s^B 曲线特征也不同。依据 ρ_s^A 和 ρ_s^B 两条曲线的角点坐标，可确定不同电阻率地质体的平面投影位置，并由角点性质判明目标地质体相对于围岩电阻率的高低，即“正交点”对应为低阻，“反交点”对应为高阻。这里用这种方法探测洞穴主要对无介质充填的洞穴较为有效，即利用“反交点”可以发现高阻体在实测曲线上的反映，进而达到探测“空”洞穴的目的。

2.2. 中间梯度法

中间梯度法装置图见图 2，电阻率计算过程与联合剖面法类同，装置系数由(3)式计算。

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (3)$$

中间梯度法是供电电极 AB 间距离很大，且固定不变，测量电极 MN 在 AB 之间逐点移动测量。本项目的工作，由于场地所限，供电电极 AB 不够大(70~95 m 之间)，测量电极距 $MN = 6$ m，进行全内域

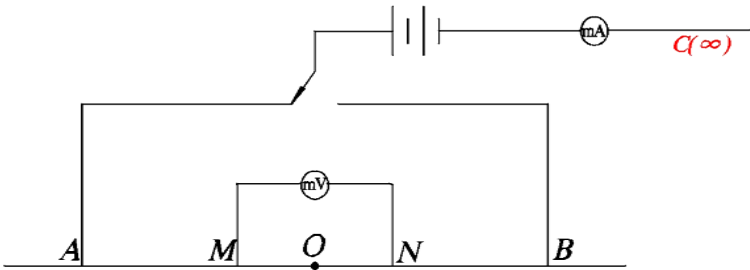


Figure 1. Diagram of resistivity profiling
图 1. 联合剖面装置示意图

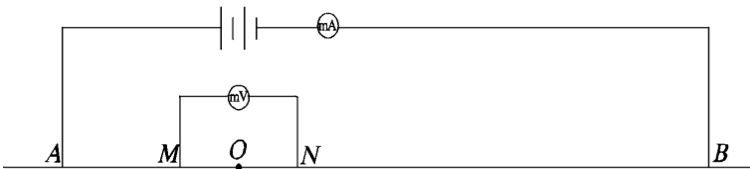


Figure 2. Diagram of central gradient array method
图 2. 中间梯度法装置示意图

测量(即, 测量电极 MN 尽可能测量 AB 之间的全部测点)。

以球体为例说明中间梯度法电阻率曲线特征。即, 球体为低阻时, ρ_s 曲线在球心正上方有极小值, 两侧有极大值; 而球体为高阻时, 在球心正上方 ρ_s 曲线有极大值, 两侧有极小值, 由此判断球心在地面的投影位置(本次工作即是利用这个特征)。

对无充填物的洞穴较为有效, 并结合联合剖面法进行对比解释和认识。

而对于填充低电阻率充填物的洞穴或采空区, 由于低电阻率介质的边界的不确定性, 即随着时间的推移, 低电阻率介质的边界在不断变化, 致使此类洞穴或采空区不易用常规电法勘探方法进行探测。

2.3. 高密度电法

高密度电法是在常规电法勘探基础上发展起来的一种新方法, 通过一次敷设电极(多电极)来测定地表以下地质在电极敷设区域的电性特征, 以获取地表以下地质体的电性特征, 进而达到对洞穴和采空区的认识。

其测量和计算方法与常规电法相同, 在此不再赘述。

对于电法勘探来说, 其在测量过程中受到的影响因素较多, 一般包括接地电阻、电极的极化特性、供电电流等因素。其中: ① 接地电阻较大时, 由于电阻较大, 导致输入地下介质的电流较小, 使得进入地下介质的电流密度减小, 进而测量结果较小而使可信度降低; ② 由于电极极化特性的存在, 使得测量过程中, 测量电极周围形成附加电场, 对原始电场进行干扰, 从而使得观测结果产生较大误差; ③ 供电电流的大小直接影响测量结果, 太小的供电电流会导致测量电极之间电位差小而不可测量, 大电流又导致供电设施笨重而消耗人力、物力。因此, 在实际工作中, 供电电极采用“并联、梅花”状布极、并采用浇灌盐水的方法降低接地电阻。测量电极采用“不极化”电极、测量时采用浇灌盐水的方法增加电极与地面的结合程度。供电电流的大小, 一般采用试验方法确定适合于具体工作的供电电流。

3. 实例应用

3.1. 电性特征

某地为黄土覆盖区, 地表为厚 20 cm 左右的混凝土盖板, 局部由于管道渗水而导致塌陷、混凝土盖板裂缝。

实地调查知: ① 地洞穴埋藏较浅, 大部分位于潜水面以上, 多为空气充填的空洞; ② 过去住户挖掘的渗井或窖井多为水土熔融体充填的洞穴。

为了开展电法勘探工作, 采用钻孔法将供电、测量电极置入混凝土盖板之下黄土层位。

由于地表以下洞穴的展现形式不外乎两种情形, 一是空的洞穴(年代久远, 对其了解甚少), 其中充填物为空气, 电阻率较大(甚至 ∞), 呈高阻; 二是地窖窖(居民用来储藏水的。其较为分散而不连续, 各自利用, 互不联络, 对其了解也甚少), 充填有水、泥土或水土熔融体, 电阻率较小, 呈低阻。

电性特征(表 1)表现为: ① 潜水面以下洞穴的电阻率 $> 100 \Omega \cdot m$; ② 潜水面以上洞穴, 当其无充填物时电阻率为 ∞ , 有水或泥土充填时, 电阻率 $< 100 \Omega \cdot m$; ③ 土层(黄土、粘土)的电阻率与土质结构、孔隙度大小有关, 其电阻率受地表水的影响, 一般在 $n \times 1 \sim n \times 10^2 \Omega \cdot m$ 。

3.2. 试验工作

为了有效地对该地的洞穴进行探测, 首先布置一条试验剖面, 投入的工作方法有: 联合剖面法、中间梯度法和高密度电法, 其中高密度电法采用了 β 、单极-偶极、四极测深等装置进行测试。

图 3 中 30 号测点处的“反交点”[6] (图 3(a)中的“ \ominus ”所示。下同)对应中间梯度法的高阻(图 3(b)

中的高阻)位置为空的洞穴。

从图 4(试验剖面高密度电法观测及解释)看,其中 a 和 b 较为全面地反映出剖面纵断面电阻率特征,而 c(四极测深装置)则受到采集数据的限制,未能反映地电断面的全貌。依据常规电法和高密度电法测试结果,推测试验剖面在 10、20、30 和 73 号点深度约 2~5 m 和 7~10 m 范围内存在直径在 3 m 左右(D1、D3 和 D4)以及高度 2 m 左右宽度近 8 m 的空洞(剖面点距为 1 m)、37~64 号点和深度 4~9 m 范围内的低阻体为住户挖的渗井。由试验测线总结以下解释原则:

1) 以常规电法联合剖面法电阻率曲线的“反交点”来判断沿测线高阻体的水平位置,并由中间梯度法电阻率曲线进行验证;

2) 由高密度电法单极-偶极装置(其它装置数据量限制,显示的地电断面较为模糊或范围有限)地电断面图解释高阻体沿测线的水平位置和埋藏深度(垂向位置);

3) 对于高密度电法地电断面图中的低电阻率(低阻)区域,由于其范围一般较大,边界不易判断,此勘探区的判断标准是将电阻率小于 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 的区域圈定为渗井或窖井。

3.3. 探测结果

对试验测线的结果进行分析认识后,在工作区域共布设 5 条测线(含试验测线),其余四条测线(2[#]、3[#]、5[#]、6[#])的测试结果见图 5~11。

2[#](图 5、图 6)测线中联合剖面法显示的两个“反交点”与中间梯度测试结果的高阻异常对应,受浅部低阻异常(图 5)S2 影响使得低阻异常两侧呈现为两个局部高阻 D5 和 D6。高密度反演结果显示 D5 深度 > 5 m,视电阻率大于 $1500\ \Omega\cdot\text{m}$,呈似圆形且具有向东延伸趋势;D6 异常深度 > 6 m,视电阻率大于 $1500\ \Omega\cdot\text{m}$

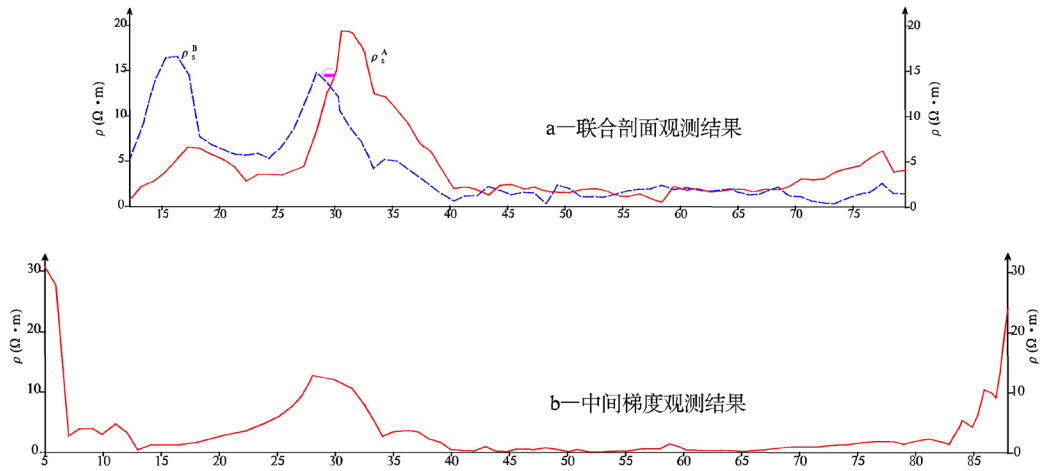


Figure 3. The detection results of conventional electrical method on the 1# line

图 3. 1[#]测线常规电法测试结果

Table 1. The table of electric characteristics

表 1. 电性特征一览表

名称	电阻率	名称	电阻率
黄土	0~200	雨水	>100
粘土	0~200	潜水	<100

注:表中电阻率单位为 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

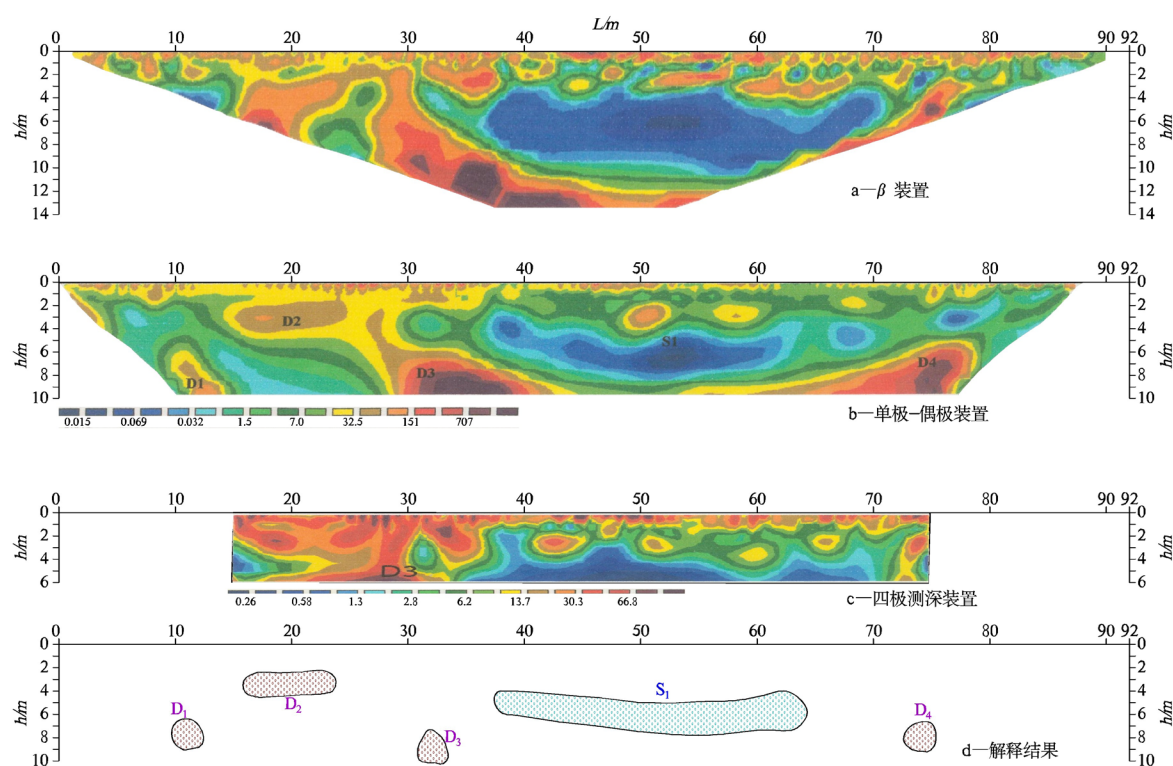


Figure 4. The detection and explanation results of electrical method on the 1# line

图 4. 1#测线电法测试及解释结果

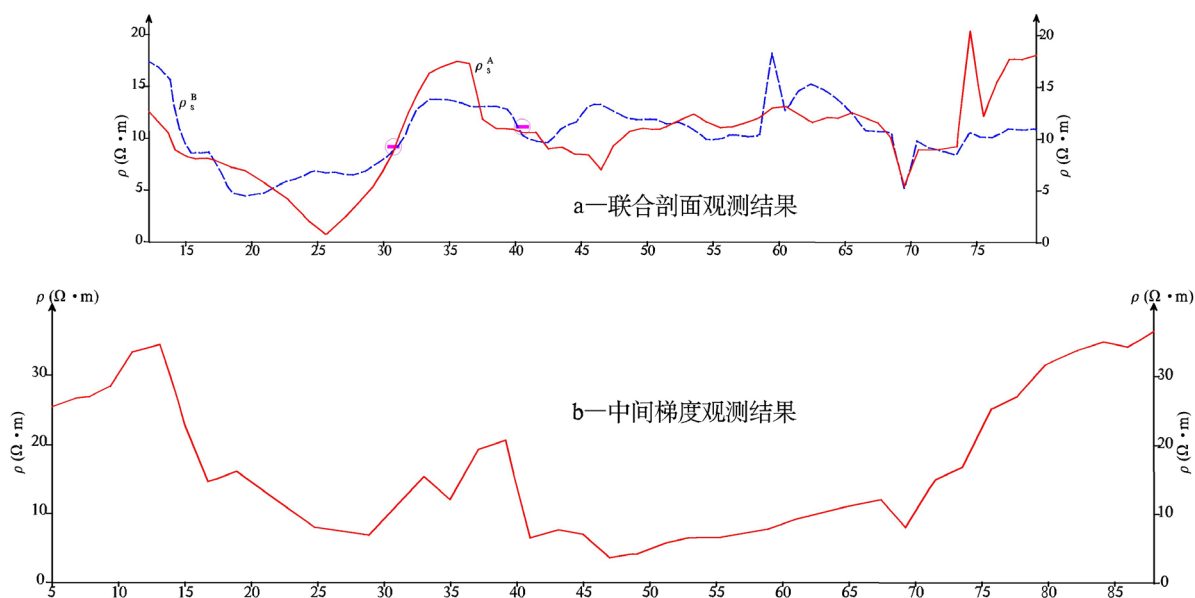


Figure 5. The detection results of conventional electrical method on the 2# line

图 5. 2#测线常规电法测试结果

(由于场地限制, 深部异常不完整); D7 异常深度 5 m 左右, 视电阻率略大于背景值(80 $\Omega \cdot m$)。S2 异常呈近似等轴状, 深度 4 m, 视电阻率 $< 1 \Omega \cdot m$, 判断为窖井渗水区。

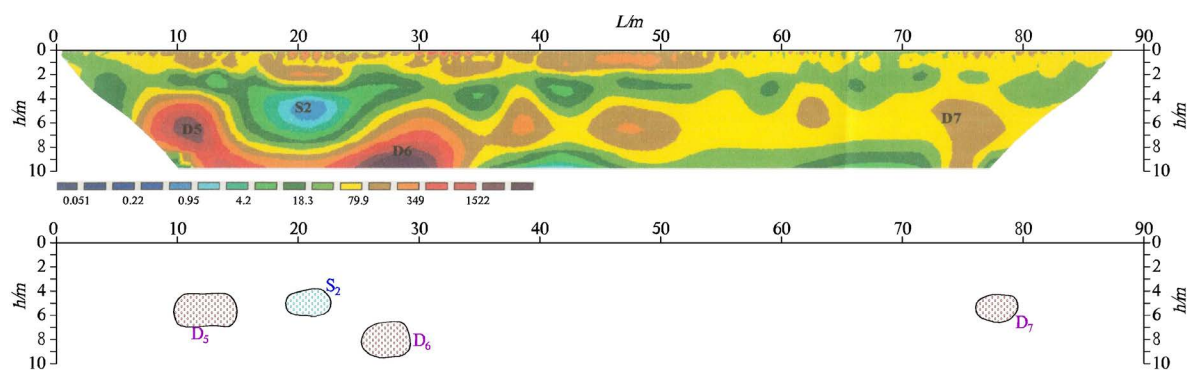


Figure 6. The detection and explanation results of electrical method on the 2# line

图 6. 2#测线电法测试结果

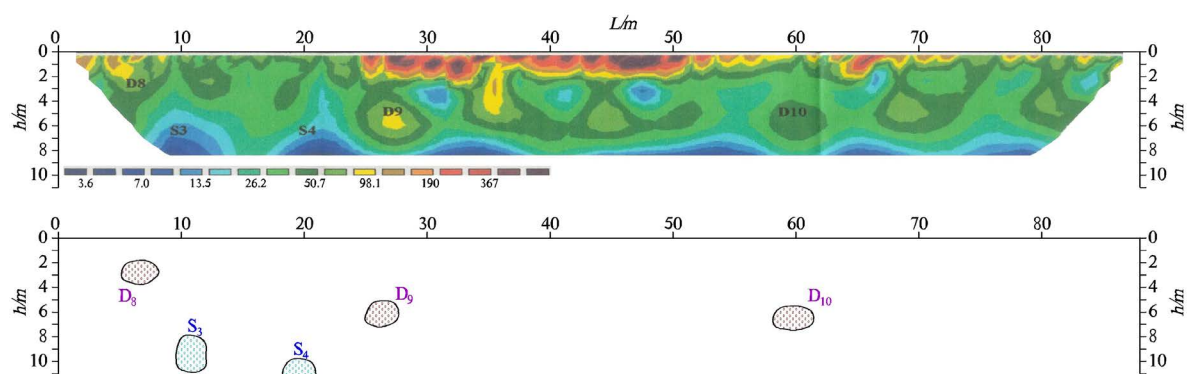


Figure 7. The detection and explanation results of electrical method on the 3# line

图 7. 3#测线电法测试及解释结果

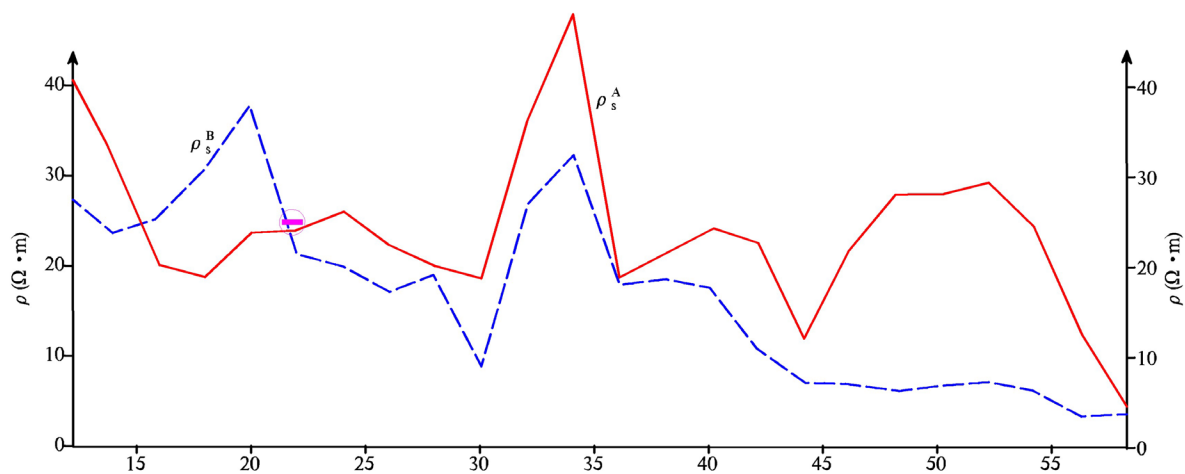


Figure 8. The detection results of electrical method on the 5# line

图 8. 5#测线常规电法测试结果

3#测线所展布位置多窖井口。高密度电法异常有三处高阻(D8、D9、D10)和二处低阻(S3、S4)，结合实地调查及反演结果分析：D8 为化粪池顶部的空旷区，D9 为局部小空洞，D10 为坍塌的空旷区；S3、S4 地电断面不完整，从测线所处位置看，判断低阻异常区域与排水管和雨水导流管充水、渗水有关。

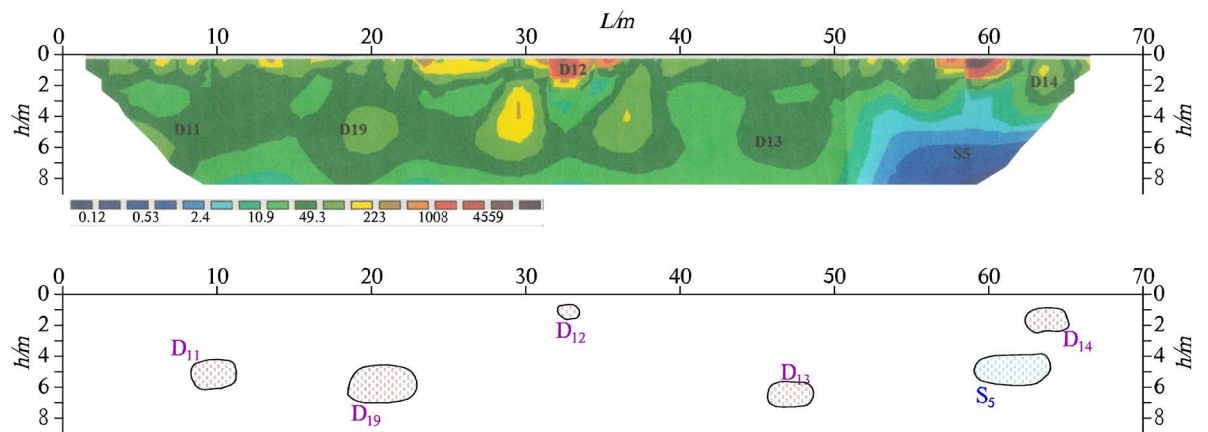


Figure 9. The detection and explanation results of electrical method on the 5# line
图 9. 5#测线电法测试结果

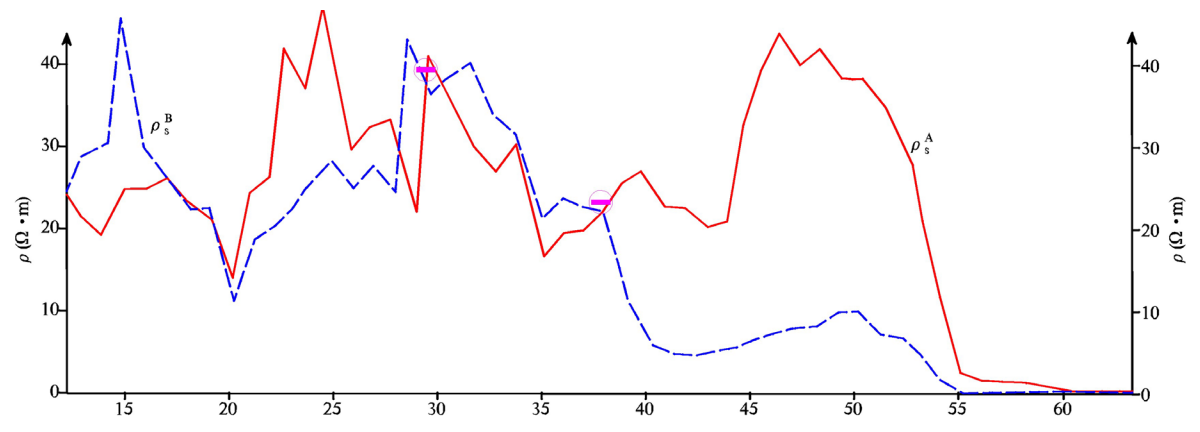


Figure 10. The detection results of electrical method on the 6# line
图 10. 6#测线常规电法测试结果

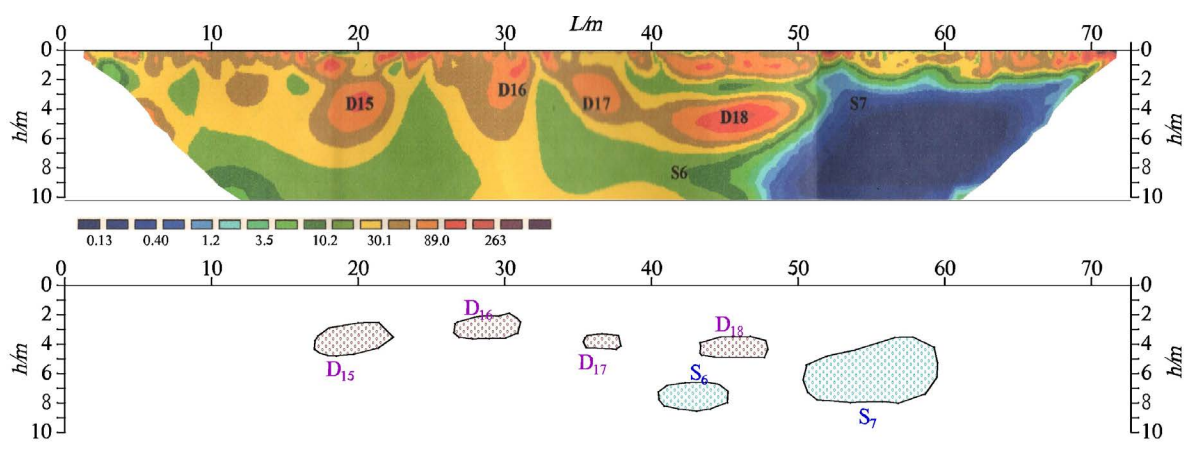


Figure 11. The detection and explanation results of electrical method on the 6# line
图 11. 6#测线电法测试结果

5#测线展布区域地下管道较多(窨井盖 4 处)。
联合剖面测试结果显示 1 处“反交点”(图 8), 其它地段(除大于 45 m 地段)的视电阻率曲线(ρ_s^A 和 ρ_s^B)

处于大于 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻区，且两条电阻率曲线近似平行排列，显示该区域属于高阻区，高密度测试结果也显示了这一点。

高密度地电断面(图 9)显示 5 处(D11、D12、D13、D14、D19)高阻和 1 处低阻(S5)。依据反演结果判断：D11 为排水管道，D12 为排水地沟混凝土构筑物所致，D13、D14、D19 为空洞(其中 D19 与联合剖面的“反交点”相对应)，S5 可能为局部渗水和工业电缆的影响。

6[#]测线与 5[#]测线平行排列，联合剖面视电阻率曲线(图 10)在 0~50 m 区间也为大于 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻区，两条(ρ_s^A 和 ρ_s^B)电阻率曲线(图 9)近似平行排列。

高密度断面显示 4 处高阻(D15、D16、D17、D18)和 2 处低阻(S6、S7)。反演结果显示：D15 为水平展布，埋深 4 m 左右的局部空洞；D16、D17 为规模较小的局部塌陷，其中 D17 与联合剖面的“反交点”对应；D18 为纵向延伸较小的空洞；S6 为埋藏深度较大的充水软泥所致，S7 为工业电缆影响所致(与 5[#]测线相同)。

4. 结论

通过试验剖面的投入的工作方法包括：常规电法中的联合剖面法、中间梯度法和高密度电法中的 β 装置、单极-偶极装置、四极测深装置等(探测成果见图 12)，就其有效性总结有如表 2 的特点，建议在洞穴的探测过程中使用较为合适的方法是非常必要的！

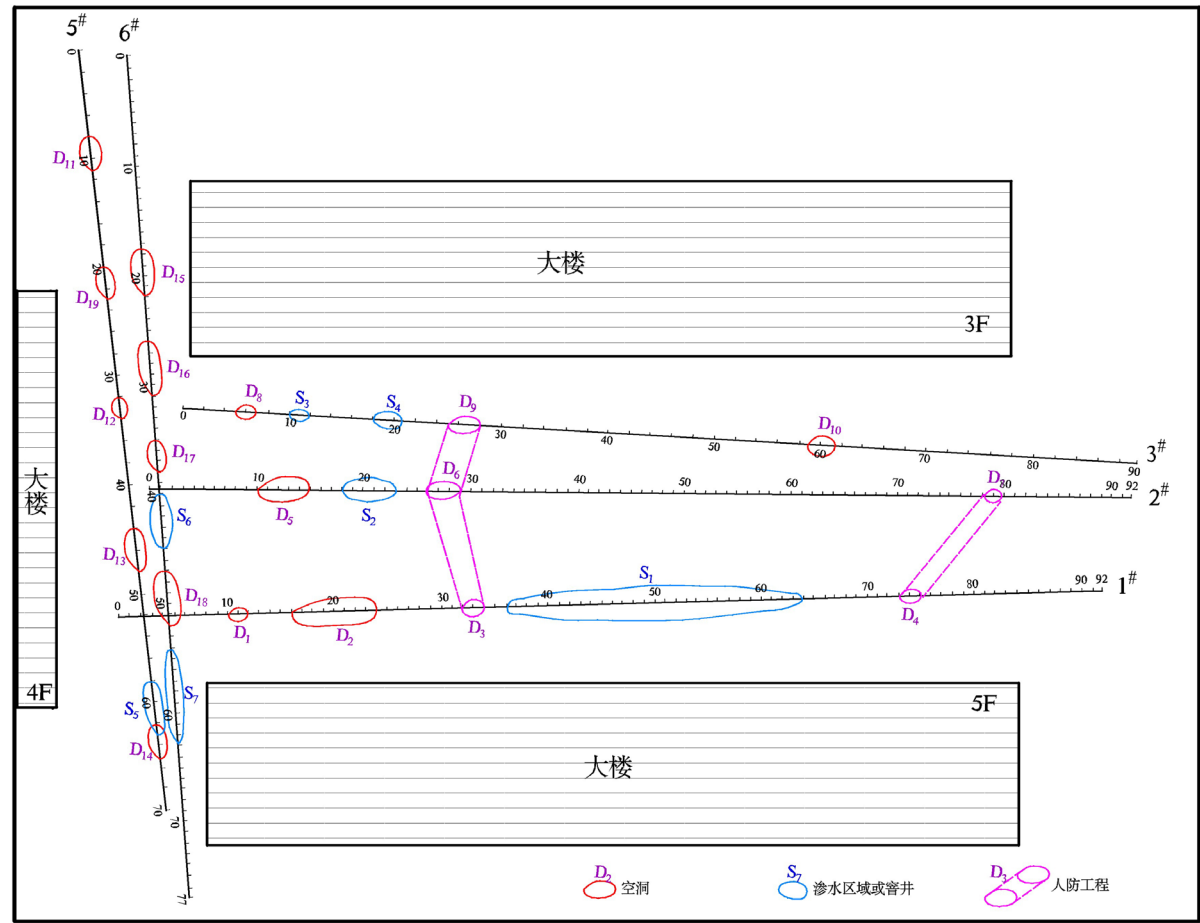


Figure 12. The map of detecting explore
图 12. 探测成果图

Table 2. The feature of the electric methods in the process of detecting caves
表 2. 探测洞穴中电法勘探方法的特点

方法	装置	探测洞穴的特征及效果	评价
常规电法	联合剖面	针对无充填物的洞穴有效。能够分辨平面展布特征，纵向分辨极差。	有效
	中间梯度		
高密度电法	β 装置	所有洞穴均可以探测。	有效
	单极 - 偶极装置	浅表范围平面和纵向分辨较好，深部探测范围有限。	探测范围有限
	四极测深装置	所有洞穴均可以探测。平面和纵向分辨较好，探测范围较大。	非常有效
		所有洞穴均可以探测。	有效

试验工作中的常规电法勘探方法仅可以用于探测高密度洞穴，而高密度电法工作对因各种原因形成的洞穴均有一定的效果，其中的单极 - 偶极装置的探测范围最大， β 装置和四极测深装置也具有一定的效果。但是，在工作区域受到限制时，随着洞穴埋藏深度增大，探测范围受到限制！

由于黄土区地下洞穴的展现形式多种多样，其中的充填物(空的或泥土混合物)呈现高阻(空气充填)或低阻的可能性均存在[7]-[12]。但是，① 对于高阻洞穴，其与周围介质的电阻率是突变的(即电阻率从一个特定值突变为 ∞ (无穷大)，且洞穴的规模特点使得其延伸范围较小，常规电法勘探过程中出现的“反交点”(联合剖面法)和高阻范围(中间梯度法)可以较好地反映出洞穴沿剖面上显现出来，对其埋藏深度的确定不能直接获得！而高密度电法则能够较好地反映出来；② 对于低阻洞穴(或渗水带)，其与周围解释的电阻率呈现渐变特点(即电阻率从非洞穴到洞穴是逐渐变化的)，洞穴与非洞穴之间无明显界限，常规电法仅反映出低电阻率特性(图 3 中 40~70 m 之间的电阻率)，无法准确确定洞穴的剖面 and 纵向特征，而高密度电法呈现的电阻率断面特征则较好地反映了洞穴的剖面 and 纵向特征；③ 对于电缆线，其电阻率非常低，旁侧干扰非常强烈(5[#]、6[#]测线的 50~70 m 段的低阻区域)，会对电法测量结果产生较大影响。

通过上述论述以及实际工作中所获得的经验，在进行黄土区洞穴(不论充填物是高阻还是低阻)探测时可以使用电法勘探方法，在掌握了洞穴充填物的特点后，运用电法勘探中不同装置(不同的测量电极排列方法)进行观测对比均可以获得较好的应用效果。

参考文献 (References)

[1] 彭建兵. 黄土洞穴灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[2] 赵伟, 张青山, 杨锋. 浅层地震与静力触探方法在黄土洞穴探测中的应用[J]. 河南交通科技, 2000(4): 10-12.

[3] 傅良魁, 主编. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983.

[4] 中华人民共和国地质矿产行业标准. 电阻率剖面法技术规程 DZ/T 0073-93[S]. 北京: 地质出版社, 1994.

[5] 李金铭, 罗延钟, 主编. 电法勘探新进展[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[6] 王妙月, 等. 勘探地球物理学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.

[7] 王怀坤, 罗有春, 等. 高密度电法对横向目标体勘探效果比较[J]. 华南地质与矿产, 2008(2): 62-66.

[8] 刘春华, 等. 高密度电法勘探在高速公路勘察中的应用[J]. 山西能源与节能, 2010(5): 29-31.

[9] 刘金涛, 胡晓明. 高密度电法勘探在岩溶查找中的应用[J]. 地质科技情报, 2003(2): 100-102.

[10] 李清林, 秦建增, 谢汝一, 等. 地电成像及其在地学领域中的应用研究[M]. 北京: 地震出版社, 2010.

[11] 李喜安, 彭建兵, 王军. 湿陷性黄土区黄土洞穴对公路的危害研究[J]. 陕西建筑, 2005(2): 19-23.

[12] 彭建兵, 李喜安, 范文, 等. 黄土高原地区黄土洞穴的分类即发育规律[J]. 滴血前缘, 2007(6): 234-244.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org