

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.02.012

“K”反射系数法在低电阻率地质背景下的应用研究

邬健强¹, 刘磊¹, 洪旭程², 刘道涵^{1*}, 刘永亮³

WU Jian-Qiang¹, LIU Lei¹, HONG Xu-Cheng², LIU Dao-Han^{1*}, LIU Yong-Liang³

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 浙江省工程物探勘察设计院有限公司, 浙江 杭州 310000; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004

1. Wuhan Center of Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Zhejiang Engineering Geophysical Prospecting and Design Institute Co., Ltd, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

3. Institute of Karst Geology, GAGS, Guilin 541004, Guangxi, China

摘要:高密度电阻率法因其成本低、效率高等优点而被广泛应用,而对于低电阻率地质背景的区域,如白垩系粉砂岩分布区,其效果并不理想甚至无法分辨有效异常。基于此,笔者通过两个不同地质背景的实例,将高密度电阻率法的结果与通过“K”反射系数法处理后的结果进行了对比应用研究,研究表明:(1)相比视电阻率剖面图,“K”反射系数法得到的“K”剖面图能够有效的放大深部地质弱信号,突出局部异常,且异常位置与钻孔结果对应良好;(2)相比钻孔处的单支视电阻率测深曲线,“K”反射系数法得到的单支“K”曲线对地下的解释更加精细,分辨率更高。

关键词:“K”反射系数法;视电阻率剖面图;单支视电阻率测深曲线;单支“K”曲线;“K”剖面

中图分类号:P631

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2022)02-0312-09

Wu J Q, Liu L, Hong X C, Liu D H and Liu Y L. 2022. Application of “K” Reflection Coefficient Method in Low Resistivity Geological Background. *South China Geology*, 38(2):312-320.

Abstract: High density resistivity method is widely used because of its low cost and high efficiency. For areas with low resistivity of large background, such as Cretaceous siltstone, it is found that the effect is not satisfactory, even the effective anomalies cannot be distinguished on some occasion. Based on this, this study compares the results of high-density resistivity method with those processed by “K” reflection coefficient method through two examples with different geological backgrounds. The results show that, (1)Comparing with the apparent resistivity profile, the “K” profile obtained by the “K” reflection coefficient method can effectively amplify the deep geological weak signal and highlight local anomalies, and the gained abnormal location corresponds well with the drilling results; (2)Compared with the single apparent resistivity sounding curve at the drill hole, the single “K” curve obtained by the “K” reflection coefficient method provides finer interpretation and higher resolution.

Key words: “K” reflection coefficient method; apparent resistivity profile; single apparent resistivity sounding curve; single “K” curve; “K” profile

收稿日期:2022-1-25; 修回日期:2022-3-26

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221634、DD20221755)、国家自然科学基金(42107485)

第一作者:邬健强(1990—),男,硕士,工程师,主要从事地球物理勘探方法的应用研究,E-mail:wjkarst@karst.ac.cn

通讯作者:刘道涵(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事应用地球物理勘查与研究工作,E-mail:ldhwcs@163.com

在湖南等地,广泛分布有中生界白垩纪和侏罗纪的红层(钟共清,2002;程强等,2004;贾龙等,2016),岩性主要由砂岩、粉砂岩、泥岩、砾岩等组成,整体表现为明显的低阻特征(王宇等,2008;邬健强等,2018)。由于其电性差异小,仅通过高密度电阻率法(王怀坤等,2008;焦彦杰等,2011;刘道涵等,2020)测得的结果来分辨异常是很困难的。因此,需要研究是否能通过数据处理来突出有效异常,基于这种思路,笔者拟采用“K”反射系数法对两个不同地质背景的实例进行应用研究。

“K”反射系数法是由孙经荣(1980)先生首先提出的,夏建平(1991)和刘煜洲等(1991)对该方法的实质及理论进行了探讨,之后广泛应用于水利水电工程、水文地质、岩溶探测、煤层采空区探测等领域(王偕军等,1993;刘康和,1993;贾东新和李炜,1998;陈绍求等,2000;李保国,2001;田宗勇等,2002;敬荣中等,2002;杨永明等,2004;黄胜华等,2007;王国瑞,2007;刘继光等,2008;李光辉和梁树昌,2009;薛建球等,2009;潘卫东和韦涛,2021)都取得了不错的效果。

刘海涛等(2013)将“K”剖面法处理的结果与 RES2DINV 软件反演处理的结果进行了比较,发现“K”剖面法勘测的深度大大增加。崔德海(2014)通过对武广高铁路基岩溶勘探的野外工作实践,论述了电测深反射系数分析法的实际应用效果,认为反射系数法能突出弱异常。沙丽(2015)将“K”剖面法应用到高密度电法资料的处理中,圈定异常,取得了一定的效果。宋红磊(2017)将高密度电法和“K”剖面法相结合,成功反映出地下溶洞的存在。段吉学(2019)将反射系数法引入到瞬变电磁数据处理中,发现其可以消除一定的地形影响,在对地层的分辨率方面发挥了不错的效果。

本文主要通过对两个不同地质背景的实例进行“K”反射系数法处理与解释,证明了“K”反射系数法放大深部地质弱信号的有效性,同时结合钻孔地质资料,分析总结了“K”曲线(Zohdy, 1969)对地下电性结构的评价效果。

1 “K”反射系数法的基本原理

“K”反射系数法的实质是将研究视电阻率 ρ_s

的差异转化为研究反射系数“K”的差异。电法勘探中,通常把 ρ_s 称为视电阻率, ρ_1 为第一层的电阻率,把 $\xi = \frac{\rho_s}{\rho_1}$ 定义为视电阻率比,而 AO 为供电电极距, h_1 为第一层深度,把 $A = \frac{OA}{h_1}$ 定义为极距深度比。在“K”反射系数法中,定义视反射系数 K_s 为:

$$K_s = \frac{\lg \xi}{\lg A} \quad (\text{孙经荣, 1980})$$

在实际工作中,资料处理所采用的基本公式为(孙经荣,1980;傅凉魁,1990):

$$\text{视反射系数 } K_s: k_s(n) = \frac{\lg \frac{\rho_s(n+1)}{\rho_s(n)}}{\lg \frac{AO(n+1)}{AO(n)}}$$

反射系数 K:

$$k(n) = \begin{cases} K_s(n) & K_s(n) \geq 0 \\ \frac{K_s(n)[1-K_s(n)]}{1.05[1-K_s(n)]+k_s^2(n)} & K_s(n) < 0 \end{cases}$$

式中 AO(n) 为单支测深曲线的第 n 个供电电极距值; $\rho_s(n)$ 为单支测深曲线的第 n 个供电电极距所对应的视电阻率值; $K_s(n)$ 为第 n 个视反射系数; K(n) 为第 n 个反射系数; $n=1,2,3,N$ 。这也就意味着应用“K”反射系数法的前提是所处理的数据应满足具有电测深曲线的性质。

当 $K_s(n)$ 为正时,若其超过 1,因未作旁侧校正, K(n) 取 1(孙经荣,1980)。

2 实例 1

2.1 测区概况及工作方法

工作区位于怀化市方石坪村,为典型的红层分布区(邬健强等,2018),上覆第四系为砂质黏土、黏质砂土、砂卵石层;下伏基岩为白垩系上统第一岩组(K_1^1),钙质粉砂岩,厚层状,钙质胶结。工作区断裂构造发育(图 1)。已收集的资料表明,地下介质电阻率整体偏低,变化范围在几十到一百 $\Omega \cdot m$ (邬健强等,2018)。根据测区内地形地貌等特点,布置了一条物探测线进行找水工作(图 1)。主要的方法为高密度电阻率法,仪器采用重庆奔腾仪器厂生产的 WGMD-3 型多功能数字直流激电仪。选择矩形 A-MN、MN-B 滚动扫描测量装置进行三极电测深

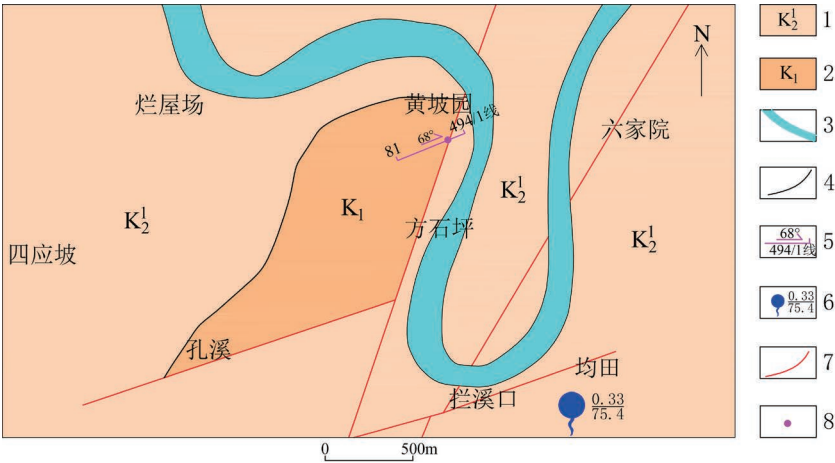


图 1 怀化市方坪村水文地质简图

Fig.1 Hydrogeological map of the Fangshiping village, Huaihua City

1. 上白垩统第一岩组; 2. 下白垩统; 3. 河流; 4. 地质界线; 5. 物探测线; 6. 下降泉; 7. 断层; 8. 钻井位置

测量,同时选择伦贝尔($\alpha 2$)装置进行对称四极电测深测量,测量点距 7 m,采集道数 60 道,采集层数为 20 层,首电极位于 81 m 处,末电极位于 494 m 处,长度为 413 m。

2.2 综合结果分析

对采集到的视电阻率数据采用“K”反射系数法进行处理,然后使用 Surfer 软件将视电阻率数据及“K”值进行成像,结果见图 2 和图 3。

由图 2(a)和图 3(a)的剖面图可知,该区整体视电阻率值范围为 25~155 $\Omega \cdot m$,电性差异小,导致在三极电测深和对称四极电测深的视电阻率剖面上无法分辨出有效异常。横向上,可见在 280~420 m 段为相对高阻段,视电阻率也仅一百多 $\Omega \cdot m$,无法有效判断异常的位置;纵向上,随着供电电极距的增大,视电阻率值也看不出有比较明显的渐变过程,总之仅通过高密度电阻率法的结果来判断该测区的富水位置是比较困难的。

相比之下图 2(b)和图 3(b)的“K”剖面,整体上“K”值的变化差异大,变化范围从 -0.8~1。且无论是在横向还是纵向上,地下的信号都有一定的放大,图中明显能看低“K”值的异常闭合圈闭 I (红色虚线范围),其中图 2(b)的“K”剖面主异常圈闭 I,横向上分布在 300~420 m,纵向上分布在供电电极距 38~90 m 段,小号段 120~280 m 也同样出现低“K”值异常,但该段异常段在图 3(b)却无明

显低“K”值异常,图 3(b)的“K”剖面主异常圈闭 I,横向上分布在 300~440 m,纵向上分布在供电电极距 37~98 m 段。随着供电电极距的增大,在主异常圈闭 I 范围内,横向上 385~400 m 之间,图中显示出“V”或“U”型相对低“K”值异常区(图中红色虚线椭圆),综合推断在 389 m 左右为地下水富集区,故而将钻孔定在 389 m 处(图中红色倒三角位置)。该处抽水试验结果显示最大涌水量为 82.94 $m^3 \cdot d^{-1}$ 。

2.3 钻孔处单支 ρ_s 与“K”曲线的对比分析

表 1 给出了 389 m 处的钻孔信息,覆盖层厚度为 12.2 m,主要由粉质砂土和卵石土构成,厚度分别为 8.5 m 和 3.7 m,基岩为钙质粉砂岩,基岩中发育有溶孔、溶隙。图 4 和图 5 为孔旁 392.5 m 处的单支 ρ_s 与单支“K”曲线对比图,由图中单支 ρ_s 曲线的

表 1 389 m 处钻孔信息

Table 1 Information of drilling hole at 389 m

钻孔深度(m)	岩土体特征
0~8.5	粉质砂土
8.5~12.2	卵石土
12.2~75.3	钙质粉砂岩, 钙质胶结, 其中在 18.4~19.0 m、32.0~33.2 m、34.6~35.0 m、45.0~45.5 m、50.5~51.0 m、53.0~53.5 m 及 63.2~63.6 m 为溶孔、溶隙发育段

电性变化特征可知,曲线为 KQ 型,最小极距从 10.5 m 开始,视电阻率值从大约 $80 \Omega \cdot \text{m}$ 开始增大,然后平缓增大至大约 $120 \Omega \cdot \text{m}$,该段的初始阶段视电阻率值增速较快,表明进入到相对高阻的卵石土层,后续增速下降,表明进入到相对低阻的钙质粉砂岩层。在基岩层中,视电阻率值开始下降,在极距

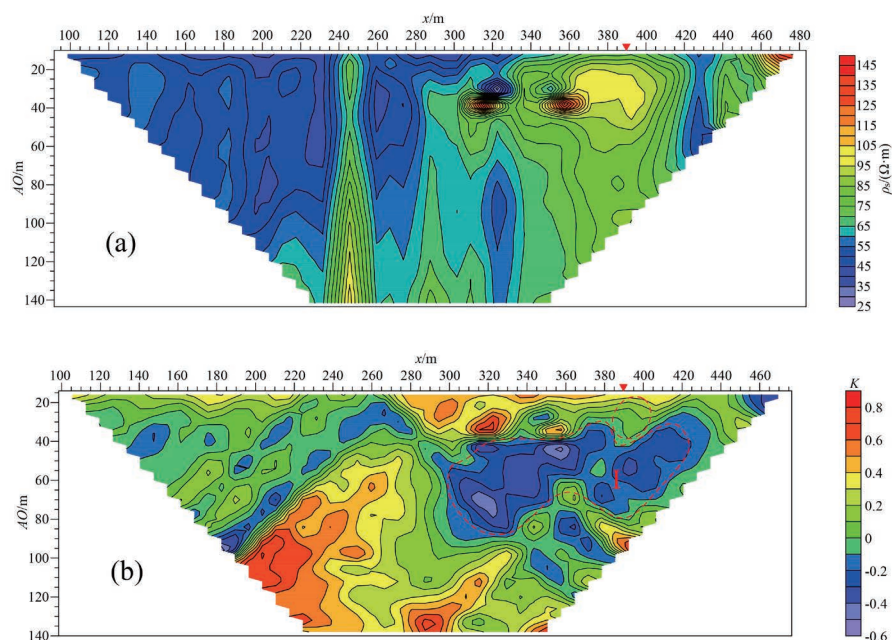


图 2 对称四极电测深视电阻率剖面图(a)及其“K”剖面(b)

Fig. 2 Apparent resistivity profile showing symmetrical four-pole sounding (a) and its “K” profile (b)

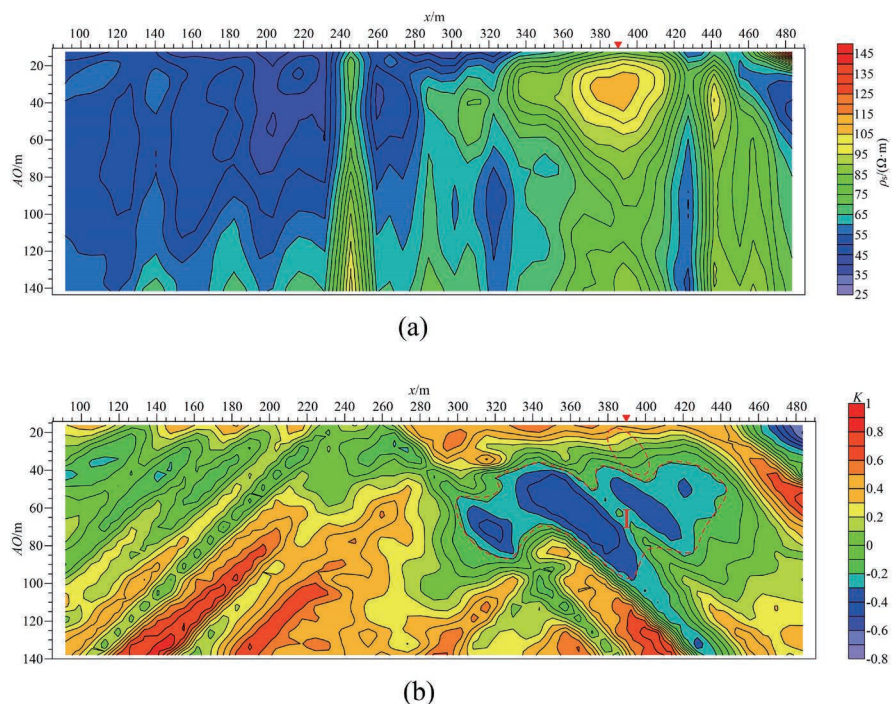


图 3 三极电测深视电阻率剖面图(a)及其“K”剖面(b)

Fig. 3 Apparent resistivity profile showing tri electrode sounding (a) and its “K” profile (b)

大约为 100 m 的位置下降到最小值(约 $80 \Omega \cdot \text{m}$), 表明基岩中存在破碎, 溶蚀等现象。相比之下, 单支“K”曲线变化幅度较大, 尤其在曲线的尾支, 形成了 2 个明显的“V”或“U”型异常段, 分别位于供电极距的 38.5~66.5 m 和 73.5~108.5 m 段, 由于不清楚实际深度与供电极距的对应关系, 仅推测异常段 38.5~66.5 m 与钻孔结果中的 32.0~33.2 m, 34.6~35.0 m 溶孔、溶隙发育段相对应, 而异常段 73.5m~108.5 m 与钻孔结果中的 45.0~45.5 m, 50.5~51.0 m, 53.0~53.5 m 及 63.2~63.6 m 溶孔、溶隙发育段相对应。

3 实例 2

3.1 测区概况及工作方法

工作区位于湖南怀化市长塘村, 测区出露主要地层为石炭系中统黄龙群与震旦系下统南沱组, 黄龙群岩性为灰、灰白色厚层状灰岩, 白云质灰岩及白云岩, 地下水类型为碳酸盐岩裂隙岩溶水, 为测区的含水层, 南沱组岩性为含砾粉砂岩、冰碛砾岩、泥砾岩, 为相对隔水层。测区内发育一条近 EW 向断层(图 6)。已收集的资料表明地下介质除卵石层和灰岩层电阻率较高外, 其他介质电阻率均相对较

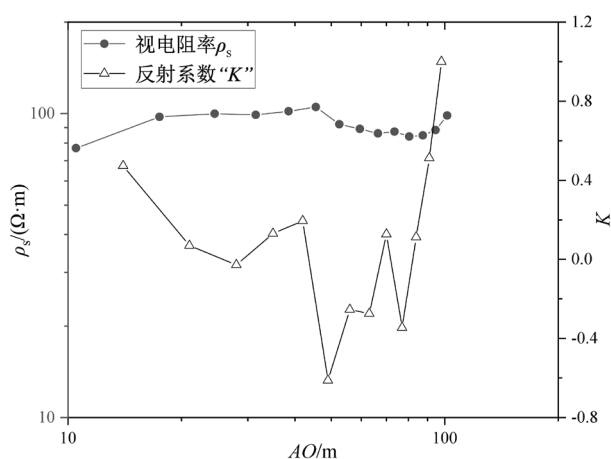


图 4 对称四极电测深 392.5 m 处 ρ_s 及其“K”曲线

Fig. 4 Apparent resistivity curve showing symmetrical four-pole sounding at 392.5 m and its “K” curve

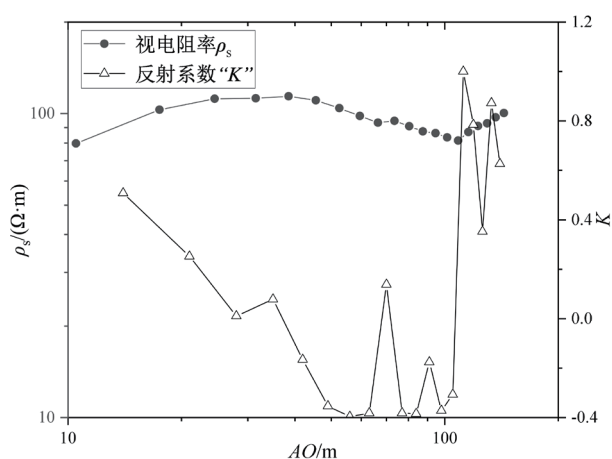


图 5 三极电测深 392.5 m 处 ρ_s 及其“K”曲线

Fig. 5 Apparent resistivity curve showing tri electrode sounding at 392.5 m and its “K” curve

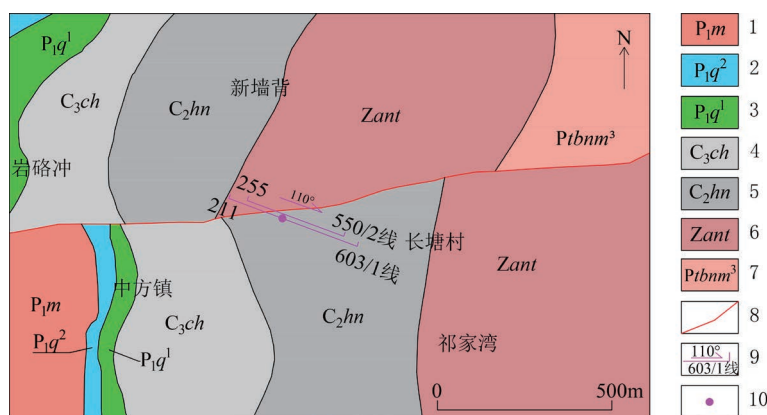


图 6 怀化市长塘村水文地质略图

Fig. 6 Hydrogeological map of the Changtang village, Huaihua City

1. 下二叠统茅口组; 2. 下二叠统栖霞组灰岩段; 3. 下二叠统栖霞组含煤段; 4. 上石炭统船山组; 5. 中石炭统黄龙群; 6. 下震旦统南沱组; 7. 新元古界马底驿组第三段; 8. 断层; 9. 物探测线; 10. 钻井位置

小(邬健强等,2020)。根据测区内地形地貌等特点,布置了两条互相平行的物探测线进行找水工作(图6)。主要采用高密度电阻率法,仪器使用重庆奔腾仪器厂生产的 WGMD-3 型多功能数字直流激电仪。选择伦贝尔($\alpha 2$)装置进行对称四极电测深测量,其中 1 线测量点距 7 m,采集道数 57 道,采集层数为 20 层,长度 392 m;2 线测量点距 5 m,采集道数 60 道,采集层数为 29 层,长度 295 m;两平行线相距约 15 m。

3.2 综合结果分析

同样的,对采集到的视电阻率数据采用“K”反射系数法进行处理,然后使用 Surfer 软件将视电阻率数据及“K”值进行成像,结果见图 7 和图 8。

由图 7(a)和图 8(a)的剖面图可知,该区整体视电阻率值范围为 $60\sim 510\ \Omega\cdot\text{m}$,电性差异比较明显,这也与实际地层的岩性特征相对应,两条线的对称四极电测深视电阻率剖面效果都很好,图中显示出了明显的“V”或“U”型相对低视电阻率异常特征(红色虚线椭圆)。横向上,可见在 1 线 310~335 m,360~390 m 段和 2 线 355~390 m 段存在低视电阻率异常带,推测发育有断层破碎带、裂隙带或溶洞等,由于 1 线和 2 线的平行关系,且距离不远,可

推断 1 线 360~390 m 段和 2 线 355~390 m 段为同一异常引起的结果。纵向上,随着供电电极距的增大,视电阻率值也有明显的渐变过程,表现出了表层低视电阻率值,深层高视电阻率值的典型特征。

相比之下图 7(b)和图 8(b)的“K”剖面,整体上“K”值的变化差异还是很大,变化范围从 $-0.25\sim 1$ 。且无论是在横向还是纵向上,地下的信号都有一定的放大,图中可见低“K”值的异常闭合圈闭(红色虚线范围),异常特征非常明显且孤立,与对称四极电测深视电阻率剖面的异常位置对应良好。综合分析推断在 375 m 左右为地下水富集区,故将钻孔定在钻机容易开展工作的 1 线 375 m 处,见图中红色倒三角的位置。该处抽水试验结果显示最大涌水量为 $146.88\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

3.3 钻孔处单支 ρ_s 与单支“K”曲线的对比分析

表 2 给出了 1 线 375 m 处的钻孔信息,覆盖层厚度为 7.8 m,主要由耕植土、粉质黏土和卵石构成,厚度分别为 3.4 m 和 4.4 m,基岩为白云质灰岩,基岩中发育有全充填充水溶洞。图 9 和图 10 分别为 1 线 375.5 m 处和 2 线 372.5 m 处的单支 ρ_s 与单支“K”曲线对比图,由图 9 中单支 ρ_s 曲线的电性变化特征可知,最小供电电极距从 10.5 m 开始,视电

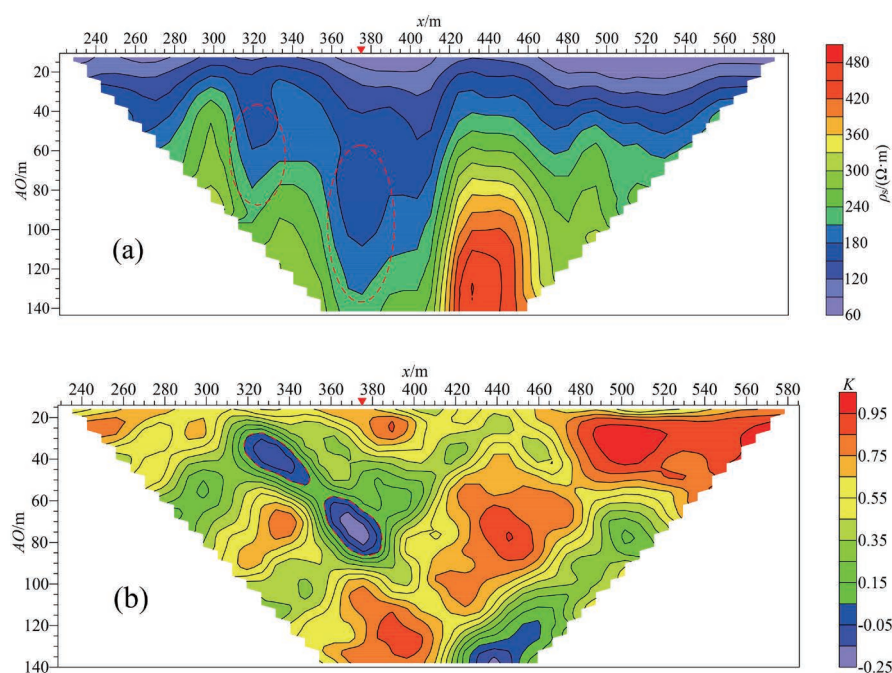


图 7 1 线对称四极电测深视电阻率剖面图(a)及其“K”剖面(b)

Fig. 7 Apparent resistivity profile showing symmetrical four-pole sounding of line 1 (a) and its “K” profile (b)

表 2 1 线 375 m 处钻孔信息

Table 2 Information of drilling hole at 389 m of line 1

钻孔深度(m)	岩土体特征
0~3.4	耕植土、粉质黏土
3.4~7.8	卵石
7.8~38	白云质灰岩, 其中在 12~13.6 m、14.0~15.6 m、19~20.5 m、21~22.7 m、26.3~26.7 m、28.5~29.3 m 及 31~31.7 m 为全充填水溶洞段

阻率值从大约 $75 \Omega \cdot \text{m}$ 开始增大至约 $200 \Omega \cdot \text{m}$, 期间增速有所变化; 初始阶段视电阻率值增速较快, 表明覆盖层薄, 已进入基岩高阻层, 后续增速放缓, 表明基岩存在一定的破碎, 之后从供电电极距 60 m 处开始, 视电阻率值减小, 随后又增大, 表明存在破碎带或充水溶洞等。而对于点距为 5 m 的 2 线来说, 情况基本相似。相比之下, 单支“K”曲线变化幅度比较大, 更能突出异常的细节及位置, 由图 9 中的“K”曲线可见形成了 2 个明显的“V”或“U”型异常段, 分别位于供电电极距的 31.5~59.5 m 和 66.5~87.5 m 段, 由于不清楚实际深度与供电电极距

的对应关系, 仅推测异常段 31.5~59.5 m 与钻孔结果中的 19~20.5 m、21~22.7 m 全充填水溶洞发育段相对应, 而异常段 66.5~87.5 m 与钻孔结果中的 26.3~26.7 m、28.5~29.3 m 及 31~31.7 m 全充填水溶洞发育段相对应。

4 结论

(1) 地质背景为粉砂岩等红层低阻的地区, 由于电性差异小, 仅使用高密度电阻率法来分辨异常是很困难的。相对而言, 灰岩等相对高阻的地区, 高密度电阻率法效果比较好。

(2) 反射系数“K”是一个无量纲的物理量, 它反映的是 $\lg \rho_s$ 曲线对 $\lg AO$ 的变化率, 不管是地质背景为粉砂岩等低阻的地区, 还是灰岩等相对高阻的地区, 都能有效地压制背景值的影响, 提高分辨率。

(3) 对于野外实际的高密度电阻率法工作, “K”反射系数法得到的“K”剖面图及单支“K”曲线均能有效的起到辅助解释的作用, 帮助快速识别有

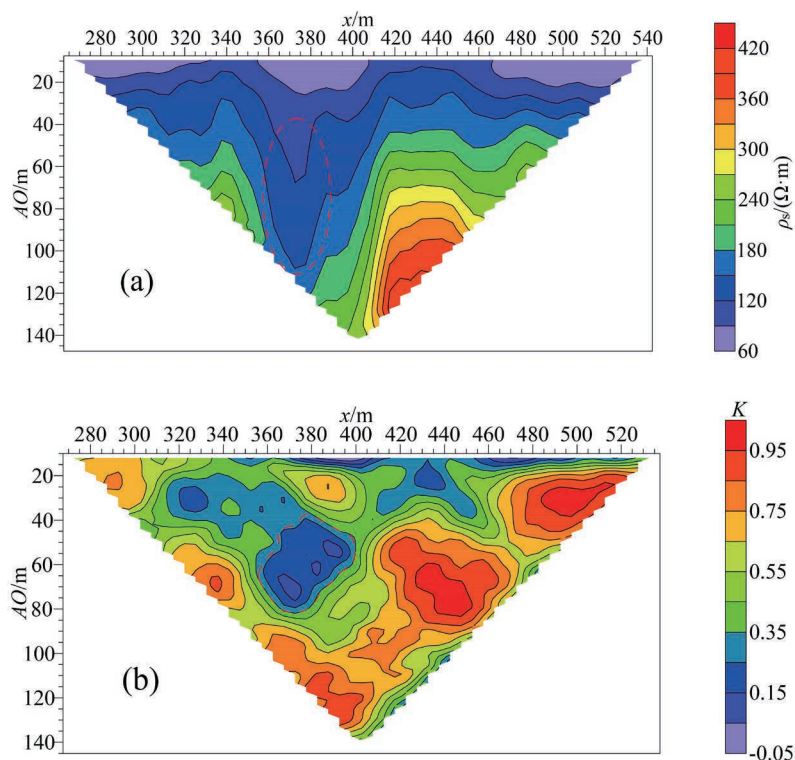


图 8 2 线对称四极电测深视电阻率剖面图(a)及其“K”剖面(b)

Fig. 8 Apparent resistivity profile showing tri electrode sounding of line 2 (a) and its “K” profile (b)

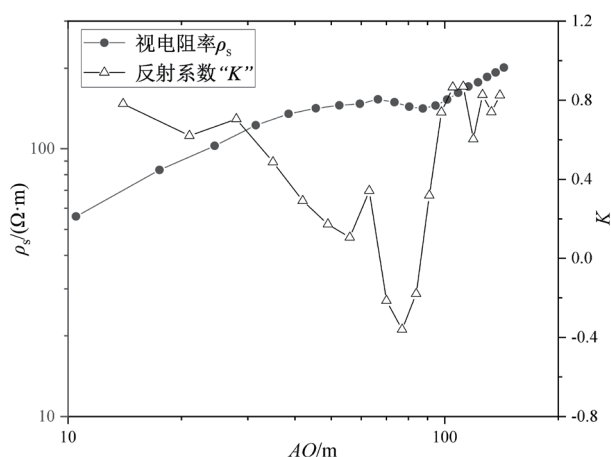
图 9 1 线对称四极电测深 375.5 m 处 ρ_s 及其“K”曲线

Fig. 9 Apparent resistivity curve showing symmetrical four-pole sounding at 375.5 m of line 1 and its “K” curve

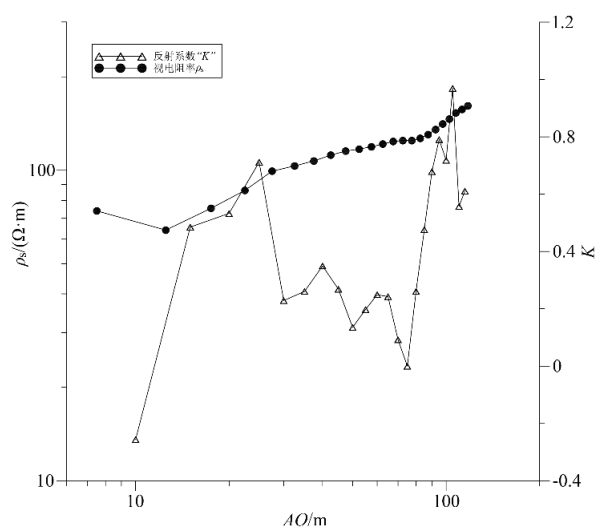
图 10 2 线对称四极电测深 372.5 m 处 ρ_s 及其“K”曲线

Fig. 10 Apparent resistivity curve showing symmetrical four-pole sounding at 372.5 m of line 2 and its “K” curve

效异常,且推断的异常位置与钻孔结果对应良好,该方法是一种有效的技术手段。

参考文献:

- 陈邵求,肖志强.2000.反射系数 K 法在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,24(3):225-229.
- 程强,寇小兵,黄绍槟,周永江.2004.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,12(1):34-40.
- 崔德海.2014.武广高速铁路基岩溶电测深反射系数法勘探应用研究[J].铁道勘察,(5):60-62.
- 段吉学,刘江,许德才,汶小岗,冯西会.2019.高分辨反射系数法在瞬变电磁探测煤矿水害中的应用效果[J].中国煤炭,45(8):25-30+44.
- 傅凉魁.1990.应用地球物理学教程[M].北京:地质出版社.
- 黄胜华,刘勇.2007.K剖面法在黄腊石滑坡勘察中的应用研究[J].工程地球物理学报,4(2):109-112.
- 贾东新,李炜.1998.反射系数电法勘探及应用效果[J].河北煤炭,(1):25-28.
- 贾龙,吴远斌,潘宗源,殷仁朝,蒙彦,管振德.2016.我国红层岩溶与红层岩溶塌陷刍议[J].中国岩溶,35(1):67-73.
- 焦彦杰,吴文贤,杨剑,李富,杨俊波.2011.云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析[J].中国地质,38(3):770-778.

敬荣中,林剑,肖志强.2002.K剖面法在岩溶勘查中的应用[J].地质与勘探,38(2):78-81.

李保国.2001.电反射系数(K)法在解释地质效果中的应用[J].水文地质工程地质,(6):66-67.

李光辉,梁树昌.2009.电测深反射系数法及其应用[J].地质装备,10(2):24-30.

刘道涵,伏永朋,刘慧.2020.高密度电法在丹江口水源区某尾矿库三维探测中的应用研究[J].华南地质,36(1):33-37.

刘海涛,曾峰,王家祥,董亮,张胜军.2013.K剖面法在丹江口库区高切坡治理勘探中的应用[J].人民长江,44(7):37-40.

刘继光,郭栋,马伏生.2008.高分辨率反射系数法在煤层采空区勘探中的应用[J].石油仪器,22(4):66-67+70.

刘康和.应用 K 剖面法探测堤坝隐患[J].地质与勘探,1993,29(2):40-43.

刘焯洲,曹静平,陈福集.1991.微分电阻率测深原理及应用[J].国外地质勘探技术,(10):14-21+34.

潘卫东,韦涛.2021.直流电法在浅覆盖型充水岩溶勘探中的应用[J].工程勘察,49(7):75-78.

沙丽.2015.“K”剖面法对高密度电法资料处理效果初探[J].工程地球物理学报,12(3):338-341.

宋红磊.2017.浅议高密度电法及 K 剖面法相结合在溶洞调

- 查中的应用[J]. 中国勘察设计, (8):92-93.
- 孙经荣. 1980. 反射系数电法勘探(K剖面)浅说[J]. 工程勘察, (6):35-41.
- 田宗勇, 刘海涛, 黄小军, 李会中. 2002. 三峡库区滑坡勘察与K剖面法电法勘探的应用[J]. 湖北地矿, 16(4):138-140.
- 王国瑞. 2007. 电反射系数法在工程勘察中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), (1):255-256.
- 王怀坤, 罗有春, 周文峰, 邹俊. 2008. 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, (2):62-66+71.
- 王伍军, 毛健全, 丁坚平. 1993. 反射系数K剖面法及其在贵州岩溶调查中的应用[J]. 贵州科学, (1):45-53+44.
- 王宇, 朱春林, 李燕, 饶春富, 杨广珠, 王明荣, 李丽辉, 李俊东, 康晓波, 张华. 2008. 红层地下水勘查开发的理论及方法[M]. 北京:地质出版社.
- 邬健强, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 魏巍, 朱超强. 2018. 音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J]. 中国岩溶, 37(6):918-924.
- 邬健强, 赵茹玥, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 朱超强. 2020. 综合电法在岩溶山区地下水勘探中的应用—以湖南怀化长塘村为例[J]. 物探与化探, 44(1):93-98.
- 夏建平. 1991. K剖面法的实质及方法理论问题的探讨[J]. 中国煤田地质, 4(4):75-80.
- 薛建球, 苕有全, 甘斌, 周成福. 2009. 电反射系数(K)技术在乌兰煤化工业区水文地质勘探中的应用[J]. 青海环境, 19(2):95-97.
- 杨永明. 2004. K剖面法寻找富水构造应用效果[J]. 西部探矿工程, (11):99-100.
- 钟共清. 2002. 湖南红层分布与岩溶形态分类探讨[J]. 水利技术监督, (5):45-47.
- Zohdy A A R. 1969. A new Method for differential resistivity sounding[J]. Geophysics, 34(6):924-943.