

陈贻祥, 黄奇波, 覃小群, 等. 自然电场法与高密度电法联作在西江中下游岩溶区找水中的应用[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 684-697.  
DOI: 10.11932/karst20220502

# 自然电场法与高密度电法联作在西江中下游岩溶区找水中的应用

陈贻祥<sup>1,2</sup>, 黄奇波<sup>1,2</sup>, 覃小群<sup>1,2</sup>, 韩凯<sup>1,2</sup>, 肖琼<sup>1,2</sup>, 苗迎<sup>1,2</sup>, 杜成亮<sup>3</sup>, 贺德煌<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 广西建设职业技术学院, 广西南宁 530007)

**摘要:** 基于溶洼区浅层岩溶地下水的渗流特性, 研究富水岩溶地质结构在地下水渗流作用下引起的自然极化及由此形成的自然电场的分布特征, 通过自然电场法与高密度电法联作, 利用科研和中国地质调查局地质调查项目中探采结合井位的综合物探结果, 探讨以自然电场法为主导、辅以高密度电法等综合物探方法, 在西江中下游岩溶石山地区不同水文地质环境中寻找岩溶地下水的成功应用效果与失败的经验教训。研究表明, 感应类电法(如瞬变电磁法、音频大地电磁测深法、地面核磁共振法、激发极化法、声频大地电场法、甚低频电磁法等)受电网、通信网络等人为电磁场干扰较严重; 高密度电法抗人为电磁场干扰的能力较强, 信噪比较高, 但勘探深度相对较浅, 且易受炭泥质灰岩、岩溶矿产等良导电岩矿体的干扰。自然电场法利用岩溶地下水运移引起的富水岩溶地质结构自然极化特征, 自然电场异常与动态地下水的补给与运移状态关系较密切, 自然电场法与基于探测目的体导电特性的高密度电法联作寻找溶洼区浅层地下水可起到方法互补、相互印证、提高探测分辨率与精度的作用。

**关键词:** 自然电场法; 高密度电法; 岩溶洼地; 浅层岩溶水; 西江中下游

**中图分类号:** P631.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810(2022)05-0684-14 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引言

西江中下游岩溶区南邻越南, 背靠我国大西南, 与我国西南的滇、黔、桂、川、渝、湘等省(区)连片, 是全球三大碳酸盐岩连续分布区之一<sup>[1]</sup>, 干旱缺水严重制约着该地区的社会经济发展。开发利用岩溶地下水资源, 是解决我国西南岩溶石山地区干旱缺水问题的有效途径之一。据覃小群等<sup>[2]</sup>有关西江中下游岩溶区岩溶水赋存特征及规律的研究中总结、归

纳成6种找水成井模式: 压扭性断裂旁侧富水模式、相对隔水岩层阻水模式、挡水墙阻水模式、圈闭褶皱蓄水构造模式、向斜或背斜轴部富水模式、白垩系红层盆地找水模式。

在我国西南岩溶石山地区地下水资源调查中, 常用的地球物理勘探方法有高密度电法、激发极化法、充电法、瞬变电磁法、音频大地电磁测深法、地面核磁共振法、声频大地电场法、甚低频电磁法等方法<sup>[3]</sup>, 这些地球物理勘探方法以往曾取得了较好的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572232); 中国地质调查局项目(DD20190343); 科技部援外项目(KY201802009); 广西科技计划项目(桂科AD17129047)

第一作者简介: 陈贻祥(1959—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事岩溶物探方法的应用研究工作。E-mail: 13807737473@163.com。

收稿日期: 2021-12-10

探测效果。随着我国农村社会经济的快速发展,村落及周边地区电网和通信网络密布,人为电磁干扰十分严重,原有探测效果较好的物探方法(如瞬变电磁法、音频大地电磁测深法、地面核磁共振法、声频大地电场法、甚低频电磁法等)的应用受到限制。研究与优化抗干扰能力强、信噪比高、适应我国西南岩溶石山地区干旱缺水村屯浅层岩溶地下水资源调查的探测方法,是地球物理勘探方法面临的新课题。由于富水岩溶地质结构在地下水渗流作用下可引起自然极化,形成自然电场并可用于动态岩溶水的探测,自然电场法对探测场地人为电磁干扰、地形地貌适应性较强,因此,可作为岩溶石山地区干旱缺水村屯浅层岩溶地下水资源探测的方法之一,结合其它地球物理勘探方法,将会有助于提高综合物探方法的探测效果。

在过去的数十年间,国内自然电场法已成功应用于地质找矿、水库与坝体或河堤渗漏探测、地下水水平面流向与流速、地面岩溶塌陷、岩溶深基坑渗漏或涌水勘察等众多领域<sup>[4-9]</sup>。进入 21 世纪以来,随着高精度、高分辨率智能物探仪器的不断完善,国内优化组合的综合物探方法(如高密度电法、激发极化法、充电法、音频大地电磁测深法、地质雷达、微重力法、浅层地震勘探法、地微动法、地面核磁共振测深技术等)在地下水资源、岩溶塌陷、滑坡等方面调查与探测中取得了新的进展和较好的效果<sup>[4-21]</sup>。在国外,Fritjof Fagerlund 等<sup>[22]</sup>在澳大利亚葡萄种植园,测量自然电场在抽水过程中的时间变化规律,通过与试验资料对比、水位升降等来计算含水层的导水系数(aquifer's transmissivity)和平均渗透率(average permeability)。A. Revil 等<sup>[23]</sup>利用自然电场曲线与抽水升降的相关关系来监测地下水位的变化,以及包气带的迁移变化,进而确定包气带的厚度。Jeffrey R. Moore 等<sup>[24]</sup>在美国加利福利亚州内华达山脉—冰川湖,采用自然电场法和高密度电法联合研究水坝渗漏获得成功。

综上所述,自然电场法利用岩溶地下水运移引起的富水岩溶地质结构自然极化特征、高密度电法依据富水岩溶地质结构的良导电特性,二者联作可起到方法互补、相互印证、提高探测分辨率与精度的作用。本文利用探采结合并位的综合物探方法,探讨自然电场法与高密度电法联作,在西江中下游岩溶石山地区不同水文地质环境中寻找岩溶地下水

的应用效果。

## 1 西江中下游岩溶石山地区地下水探测实例

### 1.1 峰丛谷地岩溶管道探测实例——以下贯屯测区为例

#### 1.1.1 测区水文地质概况及物探工作布置

崇左市龙州县下贯屯测区为峰丛谷地地貌,谷地呈东西向分布,谷宽 1~1.5 km,谷底地面起伏不平,总体上由西北向东南微倾,为多年干旱缺水村落。测区第四系土层厚 0~1 m,出露地层为三叠系下统北泗组第二段( $T_1b^2$ )薄层灰岩夹燧石灰岩和碳质灰岩,并在村屯的西侧发育一条北西向逆断层(图 1),该逆断层具有阻水作用,沿断层带发育有季节性的出水洞。地下水由东南向西北方向径流,地下水位埋深 5~10 m,含水层为三叠系下统北泗组第二段( $T_1b^2$ )薄层灰岩,为溶洞裂隙水,由于受岩溶发育不均匀控制,岩溶地下水赋存极不均匀。地面水文地质调查发现,在村屯西北侧 2~4 km 一带发育有数个溢流溶洞或地下水消溢天窗,这些溢流溶洞或消溢天窗呈 320°

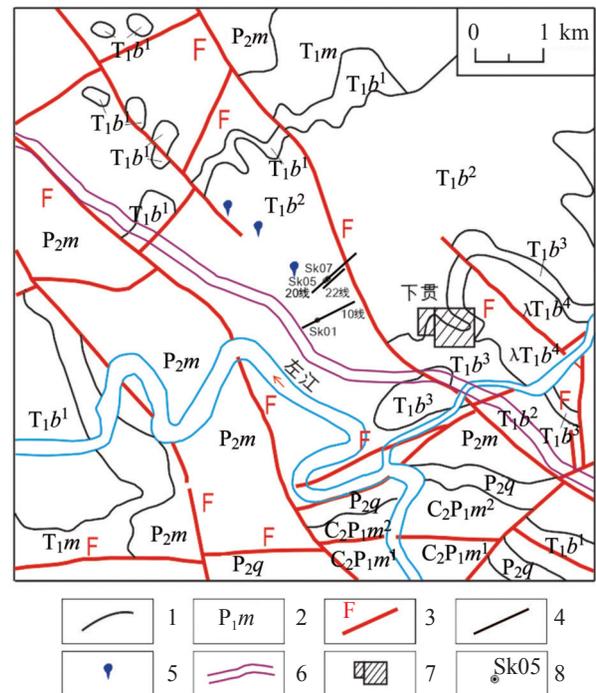


图 1 下贯屯测区水文地质及物探测线布置简图

1. 地层界线 2. 地层代号 3. 断层 4. 物探测线 5. 地下水消溢天窗 6. 公路 7. 农庄 8. 钻孔及编号

Fig. 1 Hydrogeological sketch and geophysical layout in Xiaguang village

方向排列。在左江边由三叠系下统北泗组第二段( $T_1b^2$ )薄层灰岩夹燧石灰岩和碳质灰岩地层形成了地下水局部分水岭,使地下水在谷地一带富集或发育岩溶管道。由此判断村西北侧谷地中沿 $320^\circ$ 方向发育有地下水强径流带或岩溶管道,具有钻孔成井条件。

根据测区水文地质条件,测区共布置物探测线3条,点距10 m,测线地理位置如图1所示,投入的物探方法有自然电场法、高密度电法、视电阻率联合剖面法、三极测深法、充电法,探测方法相互印证。

### 1.1.2 物探异常的地质解释及其效果

测区第20测线综合物探异常解释地质剖面详见图2所示。自然电场法分别在475/20和500/20测点出现电位极小值异常,此外,充电法在488/20测点出现电位极大值异常、视电阻率联合剖面法出现同步低阻异常、高密度电法局部低阻异常。据此,首先在岩溶天窗分布带的延长点(475/20测点)布置了SK05勘探钻孔,此钻孔在5.0~7.9 m孔深揭露充填黏土溶洞,并分别在20 m和29 m孔深揭露充泥溶蚀裂隙,钻至50.69 m深度终孔,钻孔涌水量仍很小,未能满足成井要求。

在综合分析SK05钻孔结果和综合物探异常特征后,推断在495/20测点自然电场法出现的电位极小值异常、电阻率测深法 $\rho_s$ 曲线呈缓升U型异常、电反射系数K值曲线(AO=200、240 m)出现的明显极小值异常与岩溶地下水的运移与富集有关。之后在495/20测点实施的勘探钻孔SK07,该钻孔分别在22.9~23.3 m、35.2~36.1 m和46.4~46.7 m孔深揭露了岩溶管道上的3个溶洞,钻至62.33 m深度终孔,钻孔抽水试验结果表明钻孔涌水量 $60.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。勘探钻孔SK07位于呈 $320^\circ$ 方向排列的地下水消溢天窗的分布带上,综合物探异常解释推断与勘探钻孔SK07揭露的岩溶管道基本吻合。

本测区在SK05勘探钻孔找水效果不佳的情况下,根据岩溶地下水运移产生的过滤自然电位极小值异常,并结合电阻率法的低阻异常特征,认为综合物探异常应与岩溶地下水的运移与富集有关,在距SK05勘探钻孔20 m的位置另增加的勘探钻孔SK07验证了岩溶管道水的存在,体现了自然电场法与其他综合物探相结合、相互印证、综合研究寻找岩溶管道水的优越性。

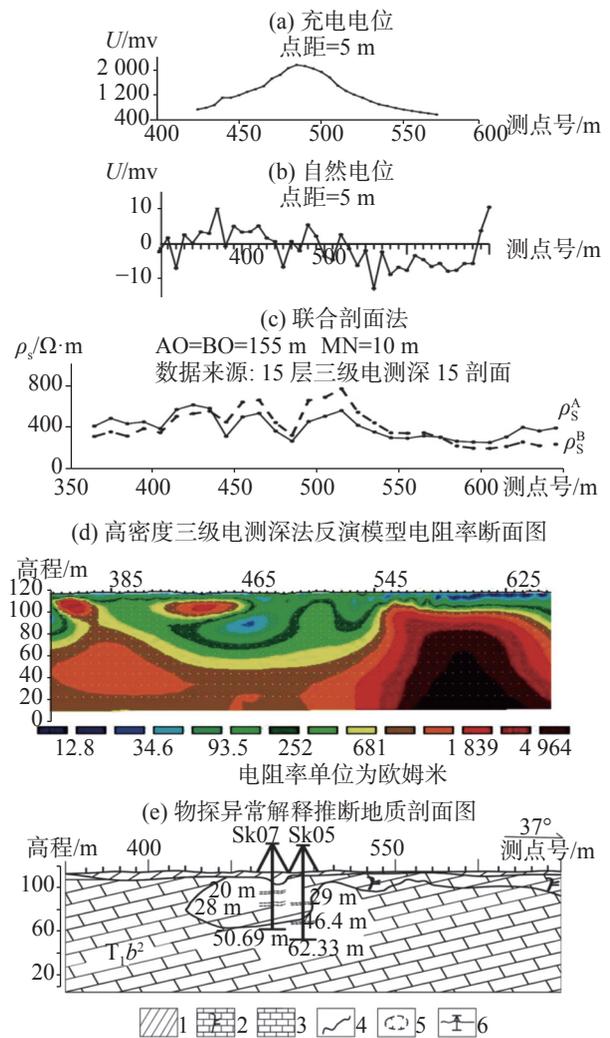


图2 下贯屯测区第20测线物探地质断面图

1. 黏土 2. 溶蚀裂隙灰岩 3. 较完整灰岩 4. 地层界线  
5. 岩溶发育异常区 6. 钻孔

Fig. 2 Geophysical interpretation profile on line 20 in Xiaguang village

## 1.2 峰丛谷地覆盖型断层-溶洞裂隙水探测实例——以江洞屯测区为例

### 1.2.1 测区水文地质概况及物探工作布置

崇左市江洞屯测区为峰丛谷地地貌,谷地呈西北向,谷宽1~1.5 km,谷底平坦,无地表水系,为多年干旱缺水村落。测区位于向斜核部,第四系土层厚0~1 m,向斜核部为三叠系下统北泗组第二段( $T_1b^2$ )薄层灰岩夹燧石灰岩和泥灰岩及磁铁矿,两翼为三叠系下统北泗组第一段( $T_1b^1$ )厚层灰岩,并发育一条NW向断层(图3)。测区地下水由东南向西北方向径流,地下水位埋深5~10 m,含水层为三叠系下统北泗组第二段( $T_1b^2$ )薄层灰岩夹燧石灰岩和泥灰岩。测区地下

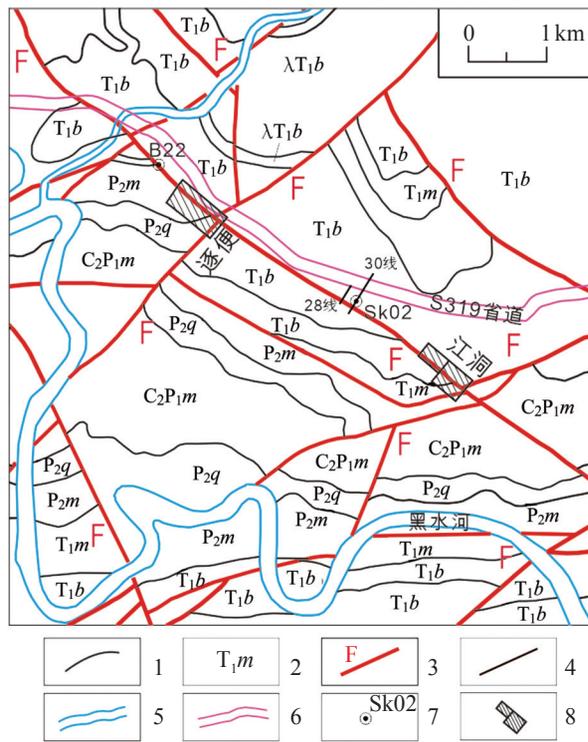


图 3 江洞屯测区水文地质及物探测线布置简图

- 1. 地层界线 2. 地层代号 3. 断层 4. 物探测线 5. 河流
- 6. S319 省道 7. 等高线 8. 农庄

Fig. 3 Hydrogeological sketch and geophysical layout in Jiangdong village

水类型为溶洞裂隙水, 由于受岩溶发育不均匀的制约, 岩溶地下水赋存极不均匀。地面水文地质调查发现江洞屯北侧发育有 B18 溢流溶洞, 江洞屯测区西北侧的逐便屯 2008 年打一深约 70 m 的机井 B22, 出水量较大, 可满足逐便村 300 余人生活用水, 但在机井 B22 南侧的逐便屯村中打找水钻孔 3 个均为干孔, 表明由于受 NW 向断层和向斜控制, 断层及三叠系下统北泗组第二段 ( $T_1b^2$ ) 薄层灰岩溶洞裂隙含水岩组在江洞屯一带水资源较丰富, 具有钻孔成井条件。

为了寻找 NW 向导水断层及岩溶发育带的具体位置, 测区内共布置物探测线 2 条, 点距 10 m, 测线地理位置图如图 3 所示, 投入的物探方法有自然电场法、高密度电法、天然场音频大地电磁法和地微动法。

1.2.2 物探异常的地质解释及其效果

综合方法在测区 475/30 测点出现电阻率联合剖面法“同步低阻”异常、高密度电法低阻接触带异常、视电阻率测深法  $\rho_s$  曲线出现缓升锯齿型异常、天然场音频大地电磁测深法陡立低异常带和地微动法极大值异常(图 4), 该物探异常与水文地质地面调查推

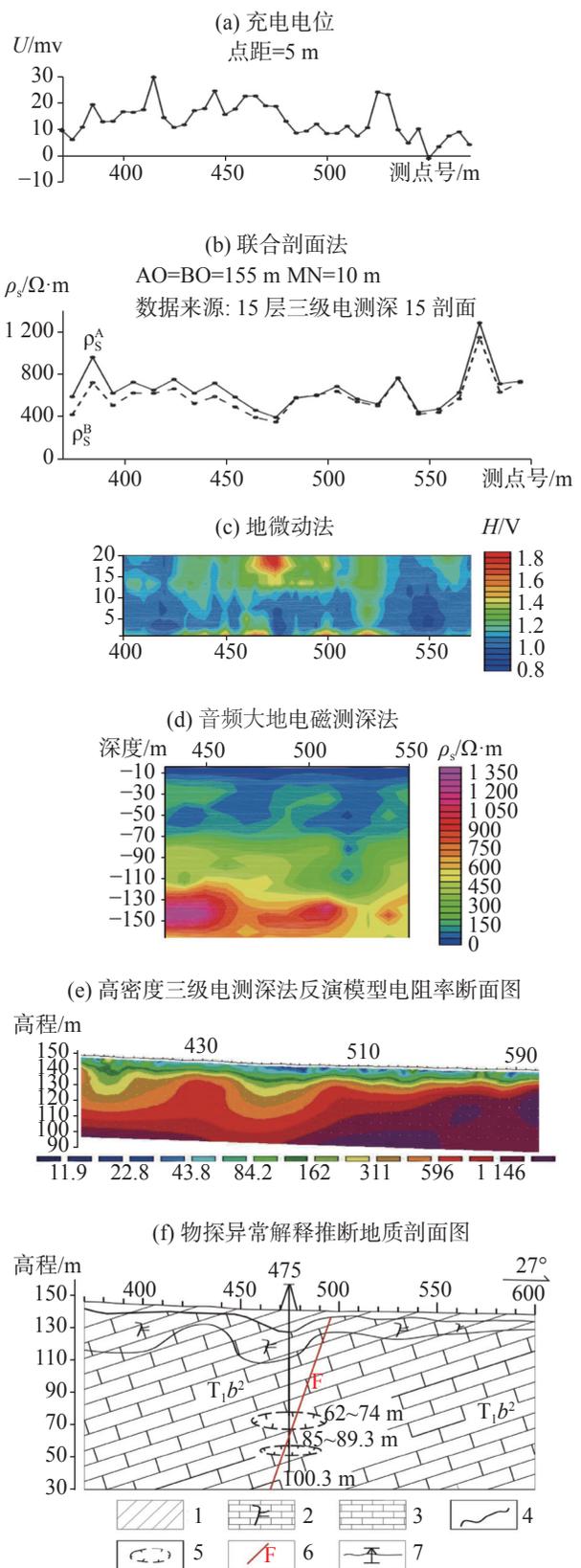


图 4 江洞屯测区第 30 测线物探地质断面图

- 1. 土层 2. 溶隙灰岩 3. 较完整灰岩 4. 地层界线 5. 岩溶发育异常区 6. 断层 7. 验证钻孔

Fig. 4 Geophysical interpretation profile on line 30 in Jiangdong village

测的断层破碎富水带位置基本吻合,自然电场法低电位异常偏移到 485~510/30 测点出现、它实际上指示了北西向断层破碎带的浅部发育与分布位置(图 4)。

综合物探方法在同一区域发现同源异常,特别是自然电场法低电位异常的出现,说明断层破碎带有地下水运移,推断该物探异常由断层破碎富水带引起。根据物探异常解释结果在 475/30 测点布置的 SK02 钻孔,在 62~74 m 和 85~89.3 m 孔深段揭露了富水断层破碎带,钻孔出水量  $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,SK02 钻孔揭露结果与物探异常推断解释结果基本吻合,详见图 4。

本测区以自然电场法为主导方法,多种物探方法优化组合,有效完成峰丛谷地覆盖型断层-溶洞裂隙水探测工作,解决了多年干旱缺水的江洞屯 400 余人的饮水困难。

### 1.3 峰丛洼地浅层岩溶水探测实例——以陇瑞屯测区为例<sup>[5]</sup>

#### 1.3.1 测区水文地质概况及物探工作布置

崇左市陇瑞屯测区为峰丛谷地地貌,谷地呈南北向和北东向,谷地宽 1~2 km,谷底较平坦,总体上是南部高,北部低,无地表水系,为多年干旱缺水村落。

陇瑞洼地由新到老出露地层主要有:第四系

( $Q_4$ )黏土层、三叠系马脚岭组( $T_1m$ )微晶灰岩、二叠系合山组( $P_1h$ )铁质灰岩、二叠系茅口组( $P_2m$ )生物碎屑灰岩、二叠系栖霞组( $P_2q$ )微晶灰岩和二叠系马平组第二段灰岩夹白云岩等。二叠系栖霞组微晶灰岩以深灰、灰黑色中厚层状灰岩为主,夹含燧石结核灰岩和生物碎屑岩。二叠系栖霞组微晶质、灰白色中厚层状灰岩呈条带状分布于陇瑞洼地底部,岩溶发育,为区内主要含水岩组(图 5(a))。

陇瑞洼地周边山体雄厚,基座相连山峰簇拥,洼地第四系土层厚度 0~16 m,位于洼地北东角的岩溶漏斗地势最低洼,其海拔约 130 m,周边山峰顶海拔 400~500 m,相对高程约 300 m,属较典型的溶蚀峰丛洼地。陇瑞洼地呈似菱角状,北西—南东向最宽约 220 m,北东—南西向最长约 650 m,中间耸立一孤峰。洼地北低南高,地表水自南向北排泄,有季节性内涝,在洼地东北角发育的岩溶漏斗及其底部发育落水洞或溢洪洞,汛期溢洪,雨后消水。

地面水文地质调查发现,陇瑞洼地最南端发育一 1#下降泉,由此往北发育 2#下降泉,至洼地东北角的岩溶漏斗中的落水洞或溢洪洞,构成了地下水由南至北经洼地中心部位附近转向东北方向的岩溶水运移通道,该岩溶水运移通道穿过洼地北东角山体,再沿东北向外延至邻谷,并与那里发育的落水洞或溢洪洞构成东北向岩溶发育带或地下河。由此可见,

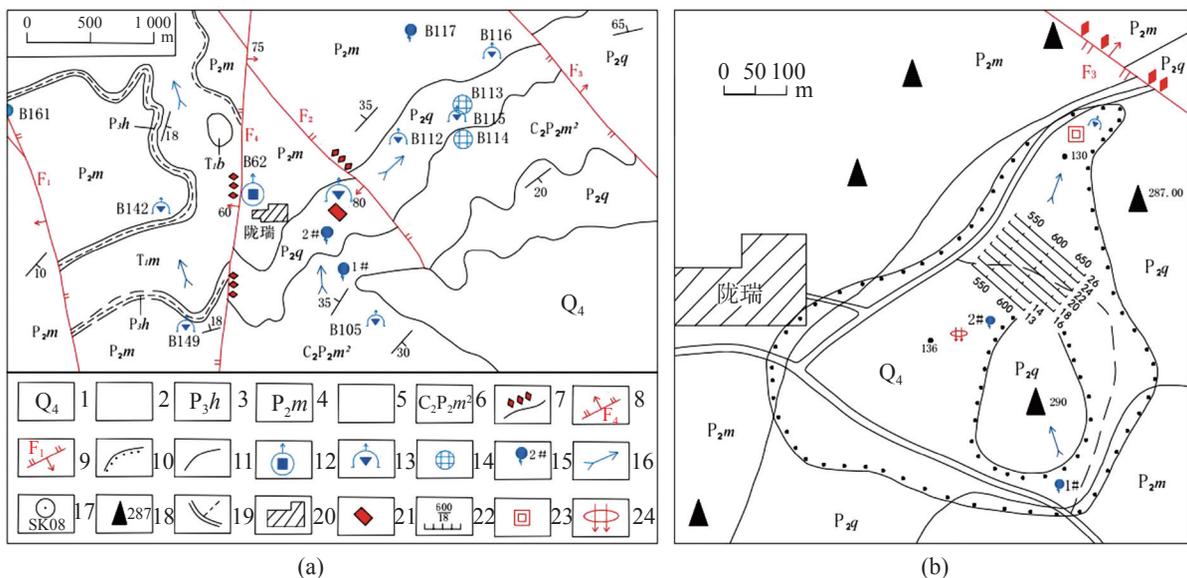


图 5 陇瑞洼地区域地质及物探测线布置简图

- 1. 第四系土层 2. 三叠系马脚岭组微晶灰岩 3. 二叠系合山组铁质灰岩 4. 二叠系茅口组砂质灰岩 5. 二叠系栖霞组微晶灰岩 6. 二叠系马平组第二段灰岩夹白云岩 7. 方解石化 8. 正断层及编号 9. 逆断层及编号 10. 土岩分界线 11. 地质界线 12. 民井 13. 落水洞 14. 地下河天窗 15. 下降泉及编号 16. 地下水流向
- 17. 水文地质钻孔及编号 18. 山峰 19. 乡道及机耕路 20. 村庄 21. 测区 22. 物探测线点/线 23. 自电日变观测点 24. 充电点

Fig. 5 Regional geological sketch (a) and geophysical layout (b) in Longrui valley

陇瑞洼地中心部位下伏二叠系栖霞组微晶质、中厚层状灰岩,岩溶发育相对强烈,水文地质条件有利,且临近 2#下降泉,因此,此处是陇瑞洼地寻找地下水资源理想部位。

物探找水靶区选择在陇瑞洼地地势稍高的洼地中心部位,以免洼地内涝淹没。由于测区岩溶发育带呈东北向分布,探测场地狭窄,陇瑞洼地中心部位地下水资源探测方法以自然电场法为主,辅以直流充电法和小极距高密度电法。测区布置物探测线 8 条,测线方位角 SE140°,测线距 15 m,测点距均为 2.5 m,测线布置如图 5(b)所示。投入的物探方法有自然电场法、高密度电法、视电阻率联合剖面法、对称四极测深法、直流充电法等。

### 1.3.2 自然电位水平梯度局部异常划分及其地质效果分析

以自然电场异常较明显的第 18 测线为例,讨论陇瑞洼地浅层岩溶自然电场分布特征及其地下水探测的效果。陇瑞岩溶洼地自然电场是土层和岩石岩溶蚀裂隙网络中地下水渗流的综合反映或贡献。自然电位  $U_{自}$  在岩溶发育带(615/18 测点附近)取得极小值(-70 mv),在极小值的两侧由于逐渐远离岩溶发育带自然电位幅值逐渐减弱,直至洼地的边缘自然电位趋近于零(图 6(a))。自然电场梯度  $\Delta U_{MN}$  曲线在 615/18 测点附近出现由负值向正值过度的“零点”异常,呈似中心对称曲线。该异常分布范围较大,可视为一区域场背景异常,区域场背景异常所反映的地质结构往往具有隔水性,是岩溶地下水资源开发与利用需避开的部位,在此异常之上(587.5~605/18 测点一带)还叠加一个次一级呈“锯齿状”的局部自然电场梯度异常。此“锯齿状”的局部自然电场梯度异常被区域场背景异常掩盖,异常不明显、不易识别。

为消除区域背景场  $\Delta U_{MN}^R$  影响,突出微弱的自然电位水平梯度局部异常  $\Delta U_{MN}^L$ ,对实测自然电位水平梯度  $\Delta U_{MN}$  剖面曲线采用差分滤波法划分区域背景场  $\Delta U_{MN}^R$  和局部异常  $\Delta U_{MN}^L$ ,差分滤波函数  $F\left(x_{i+1} + \frac{1}{2}h\right)$  采用下式进行计算<sup>[25-26]</sup>:

$$F\left(x_{i+1} + \frac{1}{2}h\right) = (\Delta U_{MN}(x_{i+3}) + \Delta U_{MN}(x_{i+2})) - (\Delta U_{MN}(x_{i+1}) + \Delta U_{MN}(x_i))$$

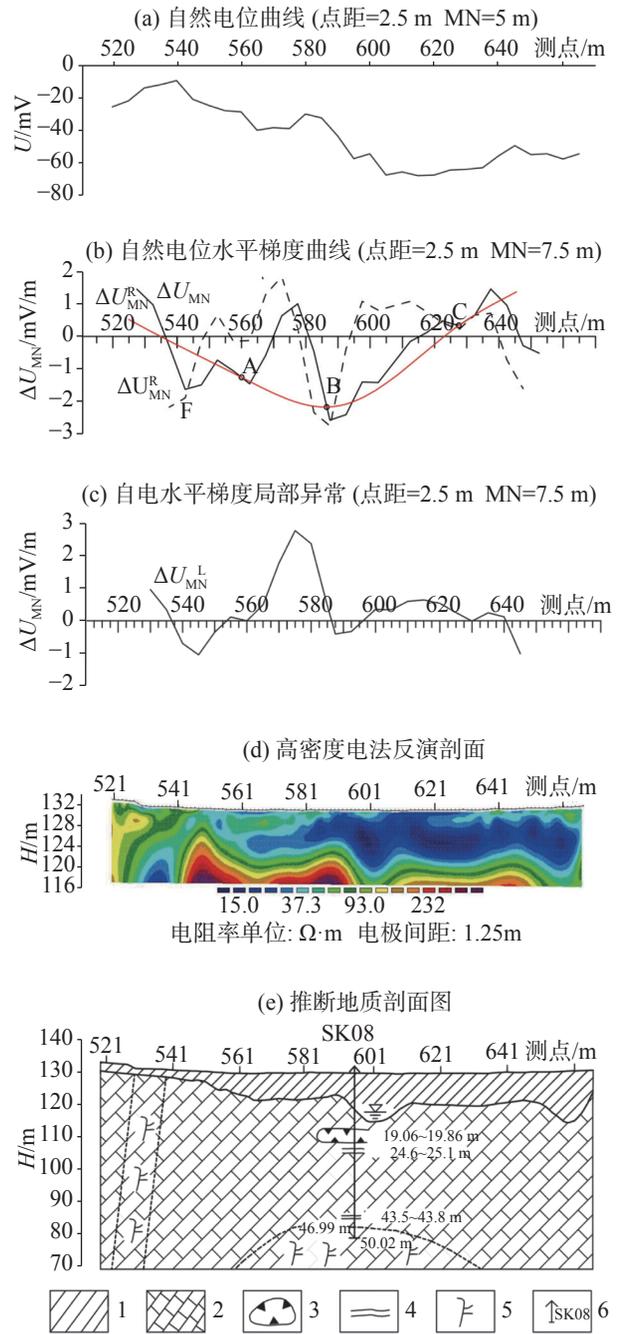


图 6 陇瑞屯测区第 18 测线物探地质断面图

- 1. 土层 2. 较完整灰岩 3. 溶洞 4. 溶隙 5. 溶隙灰岩
- 6. 验证钻孔位置及孔号

Fig. 6 Geophysical interpretation profile on line 18 in Longrui village

式中:  $h$  为自然电位水平梯度测量测点距离 (m);  $x_i$  为测线上第  $i$  测点的横坐标;  $x_{i+j}$  为测线上第  $i+j$  测点的横坐标,  $j=0, 1, 2, 3$ ;  $\Delta U_{MN}(x_{i+j})$  为测线上第  $i+j$  测点自然电位水平梯度实测值 (mv/m);  $F\left(x_{i+1} + \frac{1}{2}h\right)$  为测线上  $\left(x_{i+1} + \frac{1}{2}h\right)$  测点自然电位水平梯度差分滤波

函数。

由差分滤波函数 $F\left(x_{i+1} + \frac{1}{2}h\right)$ 剖面曲线上有意义的极小值点 A、B、C 等对应的自然电位水平梯度区域背景场 $\Delta U_{MN}^R$ 特征点(图 6(b)), 采用作图法分段按顺序画两特征点间的连线即得实测自然电场水平电位梯度区域背景场 $\Delta U_{MN}^R$ (图 6(b)), 最后按下式计算自然电场水平电位梯度局部异常

$$\Delta U_{MN}^L = \Delta U_{MN} - \Delta U_{MN}^R$$

由计算结果可见(图 6(c)), 自然电场水平电位梯度局部异常在 595 测点出现了由负值向正值过度的“零点”异常, 并与高密度电测深反演断面图在 590~605 测点间出现的低阻异常带、电阻率联合剖面法“正交点”异常位置较吻合, 推断此局部异常与洼地主岩溶发育带上发育的局部浅层岩溶有关, 是溶洼地区岩溶地下水资源开发与利用关注的富水有利部位。该异常与岩溶泉分布带、以及水文地质地面调查推测的构造破碎富水带或地下河发育位置基本吻合, 推断该异常由构造破碎富水带引起, 岩溶发育深度 35~40 m。

根据自然电场法异常的幅值强度与分布范围等特征, 在 595/18 测点实施水文地质钻孔 SK08, 钻孔揭露第四系土层厚 16.32 m, 静止水位 13.61 m, 孔深 19.06~9.86 m 为溶洞, 钻探过程掉钻、漏水, 孔深 24.6~25.1 m、43.5~43.8 m 溶隙发育, 钻孔抽水试验结果表明钻孔涌水量  $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 水文地质钻孔 SK08 验证了自然电场法异常的存在。

陇瑞洼地狭窄, 物探找水工作充分利用了洼地岩溶地下水的渗流特性及浅层岩溶地下水运移产生的自然极化电位, 主要采用自然电场法辅以充电法、小极距高密度电法, 查明了洼地浅层岩溶地下水的储存条件、成功地解决了岩溶洼地地区因泉水衰减造成的多年干旱缺水村落的饮水困难, 体现了自然电场法优越性, 其工作方法可为类似场地狭窄、其他物探方法开展工作困难的岩溶石山区洼地浅层岩溶探测借鉴。

## 1.4 山前碎屑岩—碳酸盐岩接触带岩溶水探测实例——以欧寨屯测区为例

### 1.4.1 测区水文地质概况及物探工作布置

恭城瑶族自治县欧寨屯地处海洋山余脉山体与平原地貌过度的斜坡地带, 屯西北侧碎屑岩山体分

布泥盆系中统信都组( $D_2x$ ), 岩性主要为灰色中—厚层粉砂岩、泥质粉砂岩、细砂岩, 夹页岩、砂质页岩、白云质灰岩, 欧寨屯一带为泥盆系中统唐家湾组( $D_2t$ )的灰、灰黑色中—厚层状生物屑微晶灰岩及白云质灰岩, 屯域第四系土层厚度 2~8 m。

测区发育一近 SN 向区域地质构造, 屯前一白云质灰岩孤峰拔地而起, 孤峰东侧 NW 向构造节理和脚洞发育。屯域地势西高东低, 地下水自西向东运移, 地下水埋深 5~16 m, 年变幅大, 为近地下水分水岭的山前地下水补给区, 地下水贫乏, 由于所处的水文地质环境差, 历年曾有多多个勘探单位在该屯进行过地下水源勘察, 实施数个水文地质勘察孔, 均未取得理想的找水效果, 为多年干旱缺水村落。

本次地下水资源勘察在测区内沿白云质灰岩孤峰周围布置物探测线 5 条, 投入的物探方法有自然电场法和高密度电法。

### 1.4.2 物探异常的地质解释及其效果

测区第 2 测线综合物探异常解释地质剖面详见图 7 所示, 虽然, 在 640/2 测点高密度电法发现局部低阻异常、电阻率联合剖面法出现同步低阻异常, 但

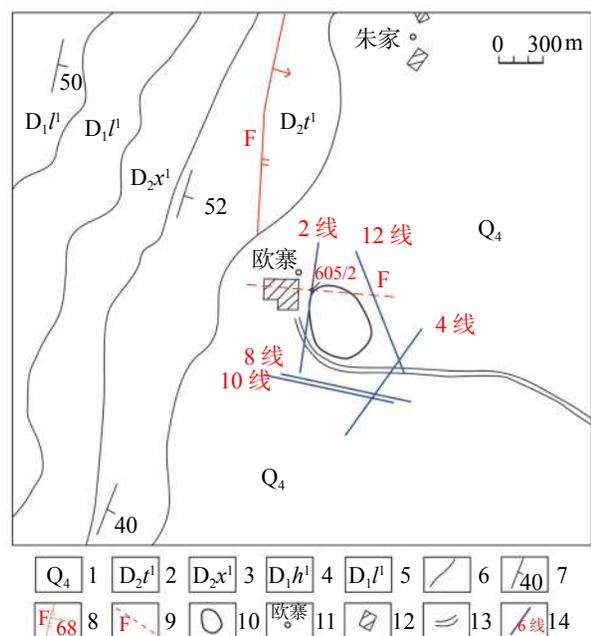


图 7 欧寨屯测区水文地质简图

1. 第四系 2. 泥盆系中统唐家湾组下段 3. 泥盆系中统信都组上段
4. 泥盆系中统贺县组 5. 泥盆系中统莲花山组下段 6. 地质界线
7. 地层产状 8. 正断层 9. 推断层 10. 石灰岩孤峰 11. 村屯位置及村名 12. 建筑物 13. 乡村道路 14. 物探测线及编号

Fig. 7 Regional geological sketch in Ouzhai village

仍然不能识别物探异常的属性,为此增加了自然电场法探测,自然电场法电位曲线分别在 570/2 和 605/2 测点出现极小值异常,分析此综合物探异常,它具有低电阻率和强自然极化特征,推断该异常与富水岩溶结构有关。据此布置于 605/2 测点的水文地质钻孔揭露第四系土层厚度 2 m,在 6~18 m 深度段遇半充填溶洞,在 19.39~21.40 m 深度段钻见溶洞串,钻孔涌水量 $\geq 80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,物探异常推断解释结果水文地质钻孔揭露结果基本吻合(图 8)。

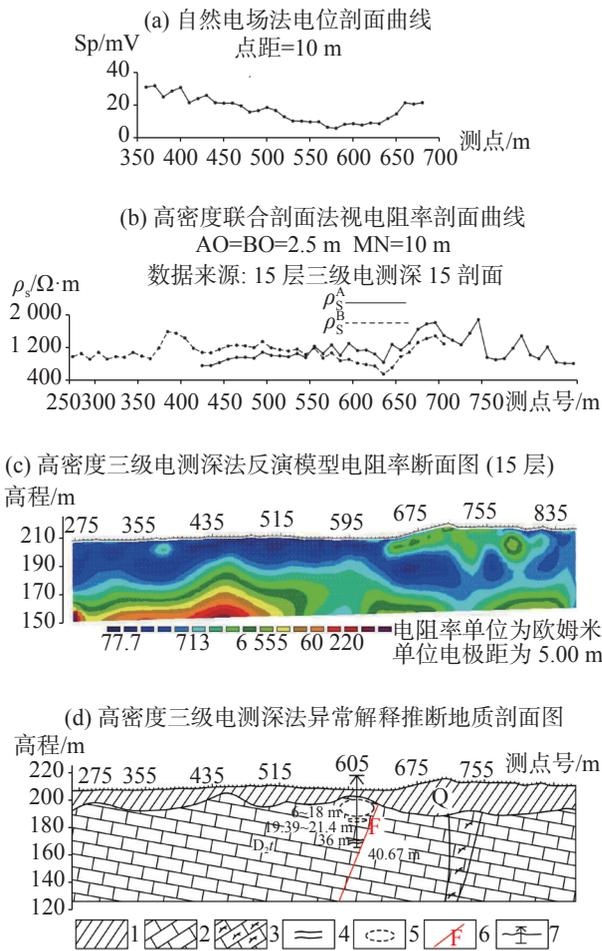


图 8 欧寨屯测区第 2 测线物探地质剖面图

- 1.黏土 2.较完整灰岩 3.溶蚀裂隙灰岩 4.裂隙
- 5.溶洞 6.断层 7.建议钻孔

Fig. 8 Geophysical interpretation profile on line 2 in Ouzhai village

恭城瑶族自治县原为国家级贫困县,党和人民政府曾多次为欧寨屯寻找地下水源,由于屯域水文地质条件差,均未能取得理想的效果。本次物探提供的位于欧寨屯 605/2 测点的水文地质钻孔孔位是新中国成立 70 多年来,各级地方政府历次扶贫攻坚

项目在该地区出水量最大的水井,解决了依地而居的欧寨屯多年干旱缺水困难,本项目的研究成果得到了当地政府和人民群众的高度赞誉。

### 1.5 炭泥质灰岩干扰引起的虚假异常探测实例——以新村屯测区为例

#### 1.5.1 测区水文地质概况

桂林市新村屯所处地貌为峰丛谷地地貌,谷地与周围峰丛相对高差约 200 m,该谷地为一狭长的长条形谷地,开口方向为 $10^{\circ} \sim 190^{\circ}$ 。谷地位于寿城向斜的核部,测区附近发育一近南北向压扭性断层,具阻水作用。谷地土壤为棕色黏土,厚 1~6 m,出露地层为石炭系下统英塘组( $C_{1yt}$ ),岩性为灰—灰黑色泥岩、砂岩、泥质灰岩、燧石灰岩,岩溶中等发育。两翼为石炭系下统尧云岭组( $C_{1y}$ ),岩性为灰—灰黑色灰岩、泥质灰岩、生物碎屑灰岩。谷地周边有较多岩溶竖井和地下河天窗(图 9),地下水埋深 0~10 m,地下水赋存于裂隙和地下河管道中,本次水文地质地面调查结果推测有一地下暗河自北至西南流经本测区,地下水总体由北向南径流。该地区虽有较

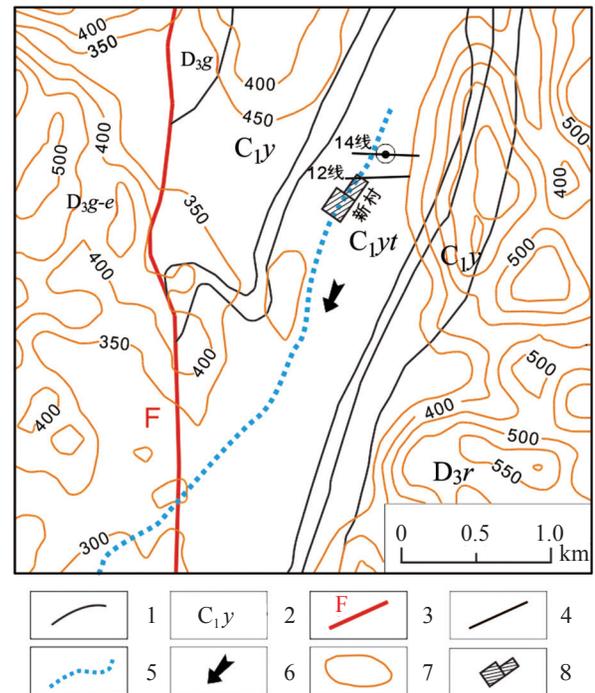


图 9 新村屯测区水文地质物探测线布置简图

- 1.地层界线 2.地层代号 3.断层 4.物探测线
- 5.地下河 6.地下水流向 7.等高线 8.农庄

Fig. 9 Hydrogeological sketch and Geophysical layout in Xincun village

多泉水和岩溶竖井,但农药污染较为严重,水质较差,只能满足灌溉用水,当地村民对洁净的饮用水的需求较大。综合考虑,选择在新村屯附近布设近东西方向的物探线进行探测深部岩溶水。

### 1.5.2 物探工作布置

新村屯测区共布置物探测线2条,点距10m,测线地理位置图如图10所示,投入的物探方法有充电法、高密度电法、视电阻率联合剖面法、三极测深法、对称四极测深法、激发极化测深法。

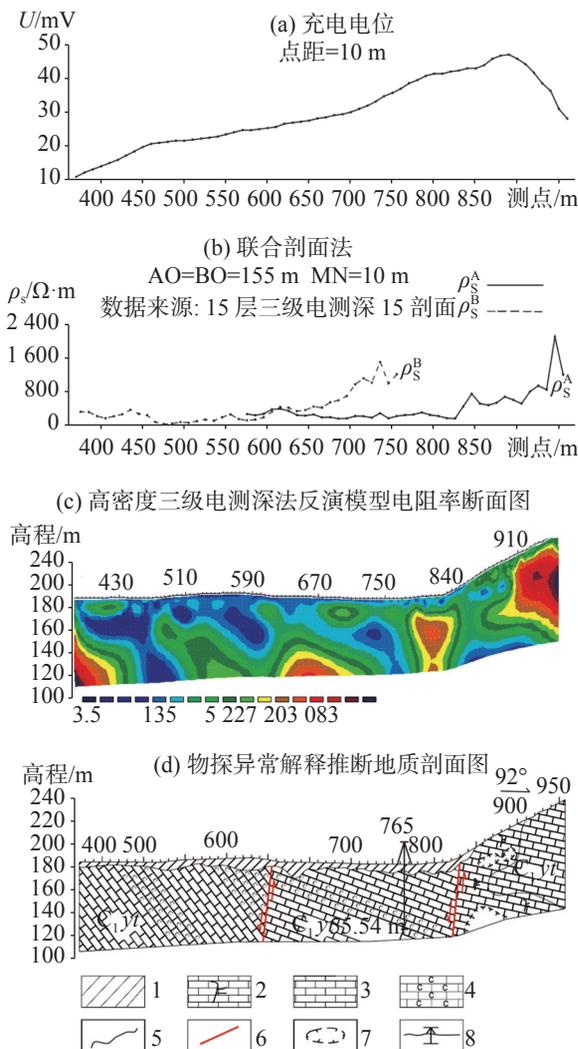


图10 新村屯测区第14测线物探地质断面图

1.土层 2.溶隙灰岩 3.较完整灰岩 4.炭质灰岩 5.地层界线  
6.推测断层 7.岩溶发育异常区 8.验证钻孔

Fig. 10 Geophysical interpretation profile on line 14 in Xincun village

### 1.5.3 物探异常的地质解释

(1)由图10可见,综合物探方法在测区835/14

测点出现高密度电法局部低阻异常、电阻率联合剖面法接触带低阻异常、充电法电位曲线出现次极大值、电阻率测深法AK型异常,该异常点位于NNE向山前脚洞、地下水泉眼、地下水消溢天窗或似线性岩溶塌陷群分布带上,为石炭系下统英塘组( $C_{1y}$ )灰-灰黑色泥岩、泥质灰岩与石炭系下统尧云岭组( $C_{1y}$ )灰-灰黑色灰岩、生物碎屑灰岩的接触带附近,据前人1:20万区域水文地质资料,该异常点与测区内约NE向地下河位置较吻合,推断该异常由岩溶管道带引起,岩溶发育深度30~35m和50~60m,由于村民土地纠纷和村民习俗问题,该测点钻机未能准确就位施工成井,钻探孔位不得不移至765/14测点。

(2)综合物探方法在测区765/14测点出现高密度电法局部低阻异常、电阻率联合剖面法接触带低阻异常、电阻率测深法为缓降U型异常,该异常点位于为石炭系下统英塘组( $C_{1y}$ )灰-灰黑色泥岩、炭质灰岩与石炭系下统尧云岭组( $C_{1y}$ )灰-灰黑色灰岩、生物碎屑灰岩的接触带附近,推断该异常由溶蚀破碎裂隙带所致,物探异常深度50~60m。然而,位于765/14测点的SK10钻孔在40.3~55.54m孔深段揭露的是较完整炭质灰岩,钻孔涌水较小,未能满足成井要求(图10)。重新分析高密度三极电测深法反演模型电阻率断面图可知,615/14测点的电阻率联合剖面法的“正交点”异常为NNW倾向的断层所致,该断层把位于610测点炭质灰岩错段为东西两段,此外,图中在420、550及610测点分别出现向东倾斜的低阻异常层,其中,位于610测点低阻异常层已被SK10钻孔验证为炭质灰岩,其余,在14线420、550测点出现的向东倾斜的低阻层,可类比为炭质灰岩所致。虽然,765/14测点的激发极化测深曲线视极化率 $\eta_s=5.3\% \sim 6.8\%$ ,此视极化率比纯灰岩极化率稍高些,激发极化特征并不明显,但炭质灰岩视电阻率值(150~380  $\Omega \cdot m$ )却很低,易产生虚假低阻异常(图11),这就是位于765/14测点的SK10钻孔未能揭露岩溶地下水的主要原因。

西江中下游岩溶区炭质灰岩、泥质灰岩、断层角砾岩等地层具有低阻、低极化率、低密度特征,是电阻率法的干扰源,易产生虚假低阻异常,此时,电阻率法应结合区域地质及水文地质条件,并辅以自然电场法、地震勘探、放射性测量等综合物探方法,提取有用信息,区分有意义的异常与虚假低阻异常,以

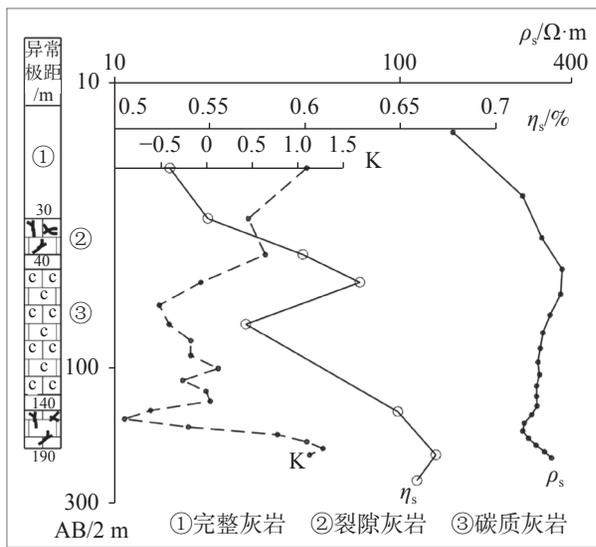


图 11 新村屯测区第 14 测线 ZK3 钻孔旁电测深曲线解释成果图

1.覆盖土层 2.裂隙灰岩 3.碳质灰岩

Fig. 11 Interpretation results of the electric sounding curve near the borehole ZK3 on line 14 in Xincun village

提高钻孔成井率。

## 2 西江中下游岩溶区地面综合物探方法寻找岩溶地下水的几个问题讨论

### 2.1 岩溶区自然电场特征分析

当岩溶洼地土层具有一定厚度时,洼地地下水在一定的渗透压力作用下,通过洼地土层后沿碳酸盐岩溶蚀裂隙网络下渗补给岩溶管道或地下河等深层岩溶水,破坏了岩土中固-液界面偶电层外扩散区中的正、负电荷的局部平衡,在固-液界面产生自然极化现象,形成自上而下的渗透和过滤电位差,在洼地附近形成范围相对较大的“负心”自然电场,其上叠加的次级局部“负心”自然电场异常场往往与岩溶洼地浅层岩溶水的储存和运移有关。因此,通过研究岩溶洼地自然电场的时空分布特征,即可探测洼地浅层岩溶地下水的分布与储存状态。

当岩溶洼地基岩裸露上覆土层很薄或其厚度可忽略不计时,洼地汇水将直接从上部岩石溶蚀裂隙网络流入,补给岩溶管道、地下河等深层岩溶水。此时洼地上覆土层中的自然极化现象很微弱,洼地自然电场将主要由下部溶蚀裂隙网络充填物的自然极化所起。由此可见,位于地下水位以上处于疏干状态的溶蚀裂隙网络,由于没有地下水的渗流的作用,

不产生自然极化现象,无自然电场分布,因此,自然电场法不能用于探测这类岩石中的溶蚀裂隙网络和洞穴。

岩溶洼地地下伏的岩溶管道或地下河,当水力梯度不大时,地下水流速不大,水流近于水平,所产生的自然极化现象也近似水平,且强度不大,自然电场微弱。当在岩溶洼地地下伏的岩溶管道或地下河上方同时发育有似竖向向下延伸的岩溶蚀裂隙网络时,由于洼地汇水沿溶蚀裂隙网络向下补给深层地下水时,会形成近似竖向的自然极化电场。它和岩溶管道或地下河产生的水平自然极化电场叠加,会增强总的自然极化电场。因此,当在岩溶洼地地下伏的岩溶管道或地下河上方同时发育有向下延伸的岩溶蚀裂隙网络时,自然电场法的探测效果异常明显。

### 2.2 岩溶区高密度电测深法勘探深度讨论

高密度电阻率法是西江中下游岩溶区地下水调查常用的物探方法之一,它是集电测深法和电剖面法于一体的一种多装置、多极距的勘探方法,各装置都可通过改变供电电极距的大小来由浅至深探测岩溶的发育情况。不同的装置对不同水文地质条件下的岩溶探测也有不同的探测精度、分辨率和勘探深度。影响高密度电法探测深度的因素较多,如供电电极距 AB 的长度、测量电极的间距、上覆地层电阻率的大小等。据广西、湘西及贵州等测区大量的钻孔资料统计,目前高密度电测深法的勘探深度主要依靠下述经验公式判断,一般经验公式为:

$$H \approx AO/K$$

式中: K 为系数,  $K=1\sim3.9$  ( $AO \leq 300$  m); H 为探测深度(m); AO 为电测深法供电电极距的长度(m)。

由上式可知,当供电电极距 AO 较小时,系数 K 取较小值,当供电电极距 AO 较大时,系数 K 取较大值。系数 K 随供电电极距 AO 逐渐增大而逐渐变大,系数 K 为一缓升型曲线(图 12),高密度电测深法逐渐变小。实践证明,为了取得较好的分辨率,高密度电测深法的测量电极间距 MN 一般不宜太大,这样当电极数一定时,高密度电测深法的供电电极距 AO 和勘探深度就很有有限,勘探深度小是高密度电测深法的弱点,需要其它物探方法来消除。

### 2.3 岩溶区各类物探方法适用性分析

由于人口相对密集地区输电网和通信网络密布,

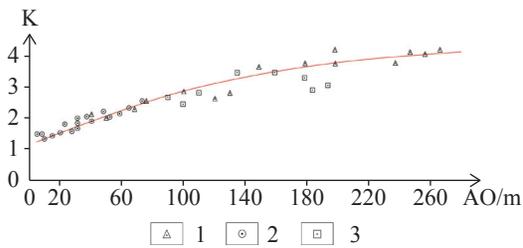


图 12 岩溶区高密度电测深法勘探深度  $H$  与供电极距  $AO$  关系统计曲线

1.广西测区数据点 2.湘西测区数据点 3.贵州测区数据点

Fig. 12 The statistical relationship between exploration depth( $H$ ) and electrode spacing( $AO$ ) of electrical resistivity tomography in karst terrain

原有探测效果较好的感应类电法(如瞬变电磁法、音频大地电磁测深法、地面核磁共振感应法、激发极化法、声频大地电场法、甚低频电磁法等)均受到人为电磁场的严重干扰,这些方法的应用受到限制,这时需采用传导类电法(如高密度电法、充电法、自然电场法等)、地震勘探方法、微重力方法及放射性测量方法来进行补充或替代。实际探测工作证明,对于埋藏深度稍大的微小溶洞或溶蚀裂隙带,所产生的地震勘探和微重力法勘探异常都比较弱,分辨率也很低。高密度电法是西江中下游岩溶区地下水调查常用的物探方法之一,它抗人为电磁场干扰能力较强,信噪比高,但勘探深度相对较浅,有时不能满足探测任务的要求,而且,易受炭泥质灰岩、岩溶矿产等良导电的岩矿体的干扰,造成高密度电法异常解释的错误;虽然,充电法的异常比较直观,除也易受炭泥质灰岩、岩溶矿产等良导电的岩矿体的干扰外,其最大的缺点是还需要有地下水露头或有水钻孔作为充电点,当没有充电点时则不能开展充电法工作;自然电场法充分利用了岩溶地下水的渗流特性以及由此产生的自然极化现象,其异常与岩溶地下水的运移状态关系较密切,且对静态地下水(即无补给来源的地下水)反映差,是溶洼区浅层地下水探测较有效的物探方法;它虽然野外工作方法简单、成本低,但自然电位异常直观,适宜狭窄的岩溶洼地区地下水探测,特别是其它物探方法因场地狭窄或电磁场干扰严重、物探测线布置困难、异常反应不太明显时,自然电场法具有它独特的优点。但自然电场法异常微弱、场强日变化大<sup>[3]</sup>,因此,也需其它物探方法互相配合。总之,各种物探方法都有其优缺点,因地制宜,

优化的综合物探方法组合才能取得事半功倍的探测效果。

### 3 结 论

(1)大气降水渗入岩溶洼地上覆土层后在渗透水压力作用下,经洼地上覆土层过滤后,沿浅层溶蚀裂隙网络或孔隙下渗补给岩溶管道或地下河等深层岩溶水,所产生的自然极化现象而形成的自然电场,使应用自然电场法探测溶洼区浅层岩溶成为可能。基于洼地地下水动力特性,自然电场异常与洼地地下水运移关系较密切,有别于高密度电法等物探方法,自然电场法对运移状态地下水反映较明显,对静态地下水反映差,动态浅层地下水正是溶洼地区村屯找水打井的主要探测目的体。因此,自然电场法以其特有的方法原理及观测模式在溶洼地区浅层岩溶水资源调查方面具有明显的优势。尤其是在探测场地狭窄的溶洼地区,当其它物探方法测线布置困难或对运移状态浅层地下水反应不灵敏时,该方法却更易于圈定浅层岩溶发育范围;

(2)自然电场法探测溶洼区浅层岩溶水资源时需要具备必要的水文地质条件,包括地表水相对集中补给地下水的通道和有利于自然电场形成的场所或空间。位于地下水位以上处于疏干状态的溶蚀裂隙网络,由于没有地下水渗流的作用,不产生自然极化现象,无自然电场分布,因此,自然电场法不能用于研究这类岩石溶蚀裂隙网络发育与分布情况;

(3)压制探测场地电磁场干扰,提高观测数据信噪比和物探异常分辨率,是物探方法面临的新课题,感应类电法受电磁场干扰严重,传导类电法(如高密度电法、充电法等)抗电磁场干扰较强,但勘探深度较浅。自然电场法也有其自身的优缺点,它对动态浅层地下水(即有补给来源的地下水)反映较灵敏,但其异常场微弱,在一些探测场地受表土湿度和大气降水影响较明显、场强日变化较大。因此,需因地制宜、不同的物探方法互补、优化组合是物探方法的发展趋势;

(4)西江中下游碳酸盐岩分布区的泥质灰岩、泥岩、页岩、炭质灰岩、泥质或方解石脉充填的断层角砾岩等一般为非含水岩组,虽然这些岩层激发极化率不高(视极化率值一般小于8%),激发极化特征不

明显, 自然电场异常微弱, 但具有良导性, 可产生虚假低阻异常, 是传导类电法勘探方法找水的干扰源, 区内未来物探找水研究工作中应以为鉴, 注意辨别电法异常的真伪。

**致谢:** 参加研究工作的还有中国地质科学院岩溶地质研究所和自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室的程瑞瑞、李腾芳、甘伏平、赵伟、刘伟、文杰、何长响、卢宗业等同志, 对于他们的辛勤劳动和热忱支持, 在此一并表示感谢! 同时我们还要感谢编辑部付出的辛勤劳动, 并向匿名评审专家致以谢意!

### 参考文献

- [1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.  
YUAN Daoxian. Global view on karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. *Prata-cultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [2] 覃小群, 宋开本, 黄奇波, 蓝芙宁, 黄春阳, 黄辉. 广西岩溶峰林区地下水赋存特征及钻探成井模式[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(5): 618-625.  
QIN Xiaoqun, SONG Kaiben, HUANG Qibo, LAN Funing, HUANG Chunyang, HUANG Hui. Groundwater occurrence characteristics and drilling well models in karst peak forest areas, Guangxi, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 618-625.
- [3] 石昆法, 戚洪彬, 王赧. 地层含水性研究的地球物理方法[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(4): 636-643.  
SHI Kunfa, QI Hongbin, WANG Yun. Geophysical methods to detect the hydrous stratum of the underground water[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(4): 636-643.
- [4] 陈贻祥, 甘伏平, 卢呈杰, 韦吉益. 岩溶塌陷自然电场及其应用[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(4): 480-486.  
CHEN Yixiang, GAN Fuping, LU Chengjie, WEI Jiyi. The self-potential method and its application in karst collapse area[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(4): 480-486.
- [5] 陈贻祥, 覃小群, 黄奇波, 甘伏平, 韩凯, 郑智杰, 贺德煌, 黄德健, 付昱, 蒋莹. 桂南陇瑞洼地浅层岩溶自然电场特征剖析[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 130-138.  
CHEN Yixiang, QIN Xiaoqun, HUANG Qibo, GAN Fuping, HAN Kai, ZHENG Zhijie, HE Dehuang, HUANG Dejian, FU Yu, JIANG Ying. Interpret self-potential anomalous characteristics of shallow karst valley in Longrui, south of Guangxi Province, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 130-138.
- [6] 郑灿堂. 应用自然电场法检测土坝渗漏隐患的技术[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 854-858.  
ZHENG Cantang. The technique to detect the leakage of dam by applying the spontaneous electric field[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 854-858.
- [7] 赫健, 孙从炎, 陈夷. 自然电场法和高密度电阻率法在天子岗水库副坝渗漏隐患探测中的应用[J]. *浙江水利科技*, 2007, 153(5): 45-47.  
HE Jian, SUN Congyan, CHEN Yi. Using natural electric field method and high density electronic resistivity method to measure hidden danger of seepage[J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2007, 153(5): 45-47.
- [8] 刘加文, 王治军, 杜志伟. 自然电场法在场地地下水勘查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2009, 6(5): 612-615.  
LIU Jiawen, WANG Zhijun, DU Zhiwei. Application of natural electric field in site groundwater exploration[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2009, 6(5): 612-615.
- [9] 王俊业. 应用自然电场法研究地下水流场[J]. *物探与化探*, 2002, 26(2): 140-142.  
WANG Junye. The application of natural electric field method to the study of groundwater flow field[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2002, 26(2): 140-142.
- [10] 杨磊, 周启友, 雷鸣, 杨建龙. 基于自然电位方法的非饱和带水分分布和运移情况探测[J]. *工程勘察*, 2012(12): 84-89.  
YANG Lei, ZHOU Qiyu, LEI Ming, YANG Jianlong. Detecting the information of water distribution and transport in unsaturated zone by self-potential method[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012(12): 84-89.
- [11] 陈贻祥, 韦吉益, 喻立平, 赵伟, 崔雷, 李良杰. 黔南岩溶石山区电测深法异常类型及其成因探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(3): 17-22.  
CHEN Yixiang, WEI Jiyi, YU Liping, ZHAO Wei, CUI Lei, LI Liangjie. Discussion of South Guizhou karst region electrical sounding abnormal type and genesis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(3): 17-22.
- [12] 陈贻祥, 甘伏平, 韦吉益, 卢呈杰, 赵伟. 泰安地区岩溶富水构造激电测深法异常类型[J]. *物探与化探*, 2013, 37(3): 427-432.  
CHEN Yixiang, GAN Fuping, WEI Jiyi, LU Chengjie, ZHAO Wei. Types and genesis of I. P. anomalies in the water-rich structure of Taian karst Area[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2013, 37(3): 427-432.
- [13] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 侯丽丽, 王海刚, 何庆成, 王金生, 秦同春, 田小维. EH4和对称四极激发极化联合技术的严重缺水基岩山区找水研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 23-29.  
LI Xia, CHEN Wenfang, WAN Liqin, HOU Lili, WANG Haigong, HE Qingcheng, WANG Jinsheng, QIN Tongchun, TIAN Xiaowei. Groundwater location in bedrock mountains with serious water scarcity using a combination of EH4 and symmetric quadrupole induced polarizations[J]. *Hydrogeology & Engi-*

- neering Geology, 2018, 45(1): 23-29.
- [14] 许艳, 王洪杰, 殷继广, 张红亮, 李刚. 激电测深半衰时参数在东平山丘区找水中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 685-687.  
XU Yan, WANG Hongjie, YIN Jiguang, ZHANG Hongliang, LI Gang. The application of half decay time parameter of IP to exploration of underground water in the hilly area of Dongping[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 685-687.
- [15] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平. 装置和电极距对岩溶管道高密度电法响应特征的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 161-172.  
ZHENG Zhijie, ZENG Jie, GAN Fuping. Research on the effect of device and electrode distance on the characteristics of high-density resistivity method in karst pipeline[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 161-172.
- [16] 梁建刚, 刘黎东, 高学生, 苏永军, 孟利山. 电阻率法和激发极化法在地下水勘查中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(4): 415-420.  
LIANG Jiangang, LIU Lidong, GAO Xuesheng, SU Yongjun, MENG Lishan. The application of resistivity method and induced polarization in groundwater prospecting[J]. Computing techniques for Geophysical and Geochemical exploration, 2014, 36(4): 415-420.
- [17] 张晋, 翁爱华, 赵建粮, 张秋冬, 郑栋材. 综合物探方法在应急抗旱找水中的应用[J]. 地下水, 2014, 36(3): 110-134.  
ZHANG Jin, WENG Aihua, ZHAO Jianliang, ZHANG Qiudong, ZHENG Dongcai. Application of comprehensive geophysical prospecting to water discovery[J]. Ground Water, 2014, 36(3): 110-134.
- [18] 陈斌, 胡祥云, 刘道涵, 张云霞. 磁共振测深技术的发展历程与新进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 650-659.  
CHEN Bin, HU Xiangyun, LIU Daohan, ZHANG Yunxia. The development history and new progress of magnetic resonance sounding technique[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 650-659.
- [19] 陈松, 余绍文, 刘怀庆, 漆剑, 刘道涵. 高密度电法在水文地质调查中的应用研究: 以江平圩幅为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 849-855.  
CHEN Song, YU Shaowen, LIU Huaqing, QI Jian, LIU Daohan. Application and research of high density resistivity method in hydrogeological prospecting—a case study on Jiangping town map[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 849-855.
- [20] 李富, 邓国仕, 袁建飞, 王德伟, 李华, 唐业旗, 周一敏. 确定探采结合井位的综合物探方法技术研究: 以乌蒙山区为例[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1218-1225.  
LI Fu, DENG Guoshi, YUAN Jianfei, WANG Dewei, LI Hua, TANG Yeqi, ZHOU Yimin. Combination of exploration and mining technology research method of geophysical exploration wells: in Wumeng mountain area as an example[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1218-1225.
- [21] Yixiang Chen, Fuping Gan, Yuling Chen, Conghui Wu, Pan Ke, Jiyi Wei, Chenjie Lu. Types and genesis of induced polarization anomalies in the water-rich structures of the Taian karst area[J]. Environ Earth Sciences, 2015, 74: 1047-1059. DOI 10.1007/s12665-015-4065-8.
- [22] Fritjof Fagerlund, Graham Heinson. Detecting subsurface groundwater flow in fractured rock using self-potential(sp) methods[J]. Environmental Geology, 2003, 43: 782-794.
- [23] A Revil, K Titov, C Doussan, V Lapenna. Applications of the self-potential method to hydrological problems[M]. Applied Hydrogeophysics, 2006, 255-292.
- [24] Jeffrey R. Moore, Alexandre Boleve, Johnny W. Sanders, Steven D. Glaser. Self-potential investigation of moraine dam seepage[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 74(4): 277-286.
- [25] Du Chengliang, Chen Yixiang, Zhou Yongsheng, Cheng Bo. Application of a mathematical method in geophysics: Separating anomalies of horizontal gradients of the spontaneous potential field based on first-order difference[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 176: 104009.
- [26] 陈贻祥, 韩凯, 甘伏平, 潘科, 陈玉玲, 郑智杰, 张伟, 杨初长. 基于一阶差分的岩溶管道充电法电位水平梯度异常分离方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1465-1473, doi:6038/pg-20150363.  
CHEN Yixiang, HAN Kai, GAN Fuping, PAN Ke, CHEN Yuling, ZHENG Zhijie, ZHANG Wei, YANG Chuchang. An anomaly separation method for horizontal potential gradients of karst channels in mise a la masse based on first order differential [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1456-1473.

## Application of self-potential and high-density resistivity method to the water exploration in karst terrain of middle-lower reaches of Xijiang River

CHEN Yixiang<sup>1,2</sup>, HUANG Qibo<sup>1,2</sup>, QIN Xiaoqun<sup>1,2</sup>, HAN Kai<sup>1,2</sup>, XIAO Qiong<sup>1,2</sup>,  
MIAO Ying<sup>1,2</sup>, DU Chengliang<sup>3</sup>, HE Dehuang<sup>1</sup>

( 1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning, Guangxi 530007, China )

**Abstract** Based on hydrodynamic conditions of the shallow karst groundwater seepage, we mainly study the natural polarization phenomenon of geological structures in water-enriched karst induced by the action of groundwater seepage and distribution characteristics of the natural electric field therefrom. By comprehensive prospecting with the combination of self-potential method and high-density electronic resistivity method, we analyse and evaluate the application effect of the combination on the exploration of karst groundwater in different hydrogeological environments of middle and lower reaches of Xijiang River. In this study, we also integrate geophysical prospecting results with the data derived from exploration & production wells in the survey project of hydrogeological environment initiated and supported by China Geological Survey. Study results show that induced electrical methods, such as transient electromagnetic method, audio magnetotelluric sounding method, ground nuclear magnetic resonance method, induced polarization method, sonic frequency geoelectric field method, VLF electromagnetic method, etc., are seriously affected by electromagnetic fields like power transmission and communication network. The high-density resistivity method shows a strong anti-interference ability and high signal-to-noise ratio. But its exploration depth is relatively shallow, and it is easily disturbed by ore bodies with high conductivity such as cherty limestones or karst minerals. The self-potential method is used in the situation of polarization of geological structures in water-enriched karst caused by groundwater migration. Anomalies of the natural electric field are closely related to the groundwater recharge and migration. The complementation of self-potential method and high-density electronic resistivity method in groundwater exploration can contribute to the mutual corroboration of prospecting results, hence improving prospecting resolution and precision.

**Key words** self-potential method, high-density resistivity method, karst depression, shallow karst water, middle-lower reaches of Xijiang River

( 编辑 张玲 )