

刘永亮, 刘振宇, 章程, 等. 综合物探方法解译表层岩溶带空间结构特征研究——以广西平果市果化镇生态试验基地坡径流场为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 209-218.

DOI: 10.11932/karst20240109

综合物探方法解译表层岩溶带空间结构特征研究 ——以广西平果市果化镇生态试验基地坡径流场为例

刘永亮^{1,2}, 刘振宇³, 章程^{1,2}, 吴秋菊³, 郭健强⁴, 张伟^{1,2}, 甘伏平^{1,2}, 韩凯^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004;
3. 广西壮族自治区地质环境监测站, 广西 南宁 530201; 4. 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)

摘要: 表层岩溶带是岩溶学研究的重要部分, 其结构的解译对表层岩溶带水循环特征及岩溶水调蓄功能的研究具有重要意义。利用综合物探方法(包括高密度电阻率法、自然电位法和地质雷达法), 对平果市果化镇生态试验基地坡径流场的表层岩溶带空间结构特征进行了探测解译。通过对高密度电阻率数据和自然电位数据反演, 获得坡径流场若干电阻率断面和极化源的空间分布特征, 解译了3处强径流带发育的空间位置; 通过地质雷达影像图划分了表层岩溶带发育深度。此外, 坡径流场地西北侧有深部岩溶裂隙发育, 向东南地势逐渐走低, 岩溶裂隙也逐渐向面上扩大。研究结果表明, 自然电位法是探测岩溶含水构造的有效方法, 结合高密度电阻率法, 可有效解译强径流带的空间发育位置, 而地质雷达法可高分辨地探测表层岩溶带的发育厚度和浅部岩溶裂隙的发育情况; 地质雷达法、高密度电阻率法和自然电位法的综合应用能有效探测表层岩溶带的结构特征, 是解译表层岩溶带厚度和探测强径流带空间分布的有效手段。

关键词: 地球探测与信息技术; 表层岩溶带; 空间结构; 地质雷达; 高密度电阻率; 自然电位

创新点: 1. 将表层岩溶带的电阻率空间分布规律与自然极化源空间位置反演相结合, 多参数解译表层岩溶强径流带的空间发育形迹; 2. 通过多方法、多参数综合研究表层岩溶带的空间结构特征。

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0209-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

袁道先等学者首先在中国使用“表层岩溶带”这一术语, 并取得大量研究成果, 成为现代岩溶学的重要组成部分^[1-4], 为国家“一带一路”倡议、生态文明

发展战略和“双碳”目标等奠定坚实的理论与方法基础^[5], 促进岩溶山水田林湖草生命共同体建设^[6]。表层岩溶带, 是四大圈层(岩石圈、大气圈、生物圈和水圈)的交汇带, 化学反应迅速, 岩溶作用强烈, 对环境变化敏感, 刻录了大量短时尺度的环境变化信息^[7],

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21075002); 广西重点研发项目(桂科 AB23026062); 广西壮族自治区地质环境监测站项目(桂自然资函【2021】415); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021007, 2022002)

第一作者简介: 刘永亮(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 从事岩溶地质勘探方法研究。E-mail: liuyongliang198718@163.com。

通信作者: 刘振宇(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事水工环地质、地质灾害防治相关研究。E-mail: 38378062@qq.com。

收稿日期: 2023-02-27

其特殊的水循环特征增强了岩溶含水层的调蓄功能,也为碳汇研究提供了关键的表层地质空间^[8-9]。其发育程度因地而异,岩性、构造、气候、地貌和土壤都对表层岩溶带的发育具有重要影响^[10-11]。

表层岩溶带的深入研究,离不开其结构特征的准确探测。彭涛等^[12]利用地质雷达法对典型喀斯特坡地表层岩溶带厚度进行了探测解译,分析了地表物质组成与表层岩溶带发育厚度的关系。高强山等^[13]利用地质雷达法定量化解译了表层岩溶带的发育厚度。地质雷达法具有快速、便捷、分辨率高等优点,是划分表层岩溶带的良好方法。但岩溶的发育有强烈的空间不均匀性,还需借助其他有效方法进行识别。

自然电位法和高密度电阻率法在岩溶构造和岩溶水的探测中应用十分广泛,其中,自然电位法对地下水的探测尤其有效。Iuliano 等^[14]提出三维偶极子概率算法,通过自然电位概率成像,研究了岩溶洼地中岩溶水的运移规律。Fritjof fagerlund 等^[15]通过测量自然电位在抽水过程中的变化规律,计算了含水层的导水系数和平均渗透率。刘永亮等^[16]研究了自然电位数据阻尼最小二乘逐步解析反演方法,获得极化源的位置、极化角度和极化强度等参数,以此进行岩溶含水构造的识别与类型划分。Patella 等^[17]提出土层自然电位概率成像方法,通过空间电荷异常分布区,来指示局部松散或孔洞结构中的优势水流。在高密度电阻率方面,冯亮等^[18]将该方法应用于地下溶洞勘查中,确定了地下介质的分界面以及裂隙及溶洞的位置。安邦超^[19]利用高密度电阻率法对公路填方路基进行探测,勘察获得了岩溶异常点。韩鹏^[20]通过不同充填类型的溶洞模型,试验并对比了各种高密度探测装置的探测效果,提出针对不同充填类型的溶洞,应当采用不同的高密度探测装置,尤其当溶洞的充填类型不确定时,可采用偶极-偶极装置进行探测。李望明等^[21]在湘西北岩溶石山区,利用高密度电阻率法,探测地下水赋存区域。高密度电阻率法和自然电位法应用十分广泛,但上述研究方法较单一,多解性问题严重,面对复杂的岩溶地质问题,难以取得良好的解译结果。

本文将地质雷达法、高密度电阻率法和自然电位法三者结合,构建综合探测解译技术,来研究表层岩溶带结构的探测和解译。以各方法的特点和应用性为基础,从介质的介电性、导电性以及电化性质

等多方面综合分析,获取多参数来综合解译表层岩溶带的结构特征。三种方法的有效结合,可完整、有效地刻画表层岩溶带的空间结构,为表层岩溶带的水循环及其调蓄功能的进一步研究,提供定量分析的途径。

1 研究区概况

研究区位于平果市果化镇西南约 5 km 的龙何屯一带,面积 2.66 km²,属典型的峰丛洼地地貌,由高低错落的锥状连座尖峭山峰与其间形态各异的洼地组成。地处南亚热带季风气候区,多年平均气温 20.2~22.6 ℃,无霜期 345 天以上。多年平均降雨量 1 500 mm,雨量充沛,季节分布极不均匀,每年 5 至 9 月为丰水期,4、10 和 11 月为平水期,12 月至次年 4 月为枯水期,具有雨热同季的特点。

研究区地处区域构造龙味背斜北翼,含水层主要为二叠系下统栖霞组(P_1q)、茅口组(P_1m)和石炭系上统(C_3)的碳酸盐岩,区域地表、地下水分水岭构成岩溶水系统的边界,局部分水岭和阻水构造构成表层岩溶泉泉域边界。发育 NW 向断裂,走向 310°,倾向 40°,倾角 82°,断裂破碎带宽 2~3 m,为钙泥质或方解石充填胶结,阻(隔)水。

岩溶水补给来源为大气降水,补给方式主要有两种:一是通过表层裂隙等以面状分散的形式补给;二是经漏斗、落水洞、天窗、竖井、深大溶隙等以集中注入的形式补给。岩溶水的排泄主要为集中排泄和分散排泄等方式,集中排泄以表层岩溶泉、地下河出口为主要排泄形式,分散排泄则主要以分散潜流形式排泄。区内地表漏水严重,大气降水快速转换成地下水,岩溶地下水系统可划分为龙怀和龙何二个岩溶管道流系统。

湿热的气候及丰沛的雨水,为研究区岩溶发育提供了有利条件,地表溶沟、溶槽、溶孔、溶穴、溶痕等发育,坡径流场北部洼地内发育多处落水洞、竖井、天窗,地下发育岩溶管道、岩溶裂隙等。坡径流场坡角为 20°左右,变化平缓,地表局部由碎石和散土覆盖,探测条件较为优异。

2 研究方法及地球物理异常特征

2.1 自然电位法

强径流带内的水流运移会产生自然电场,其空

间结构接近二度体,可以用多个水平圆柱体极化模型叠加进行模拟(图 1),令其走向为 y 方向,则极化公式为:

$$V(x)=K\frac{(x-x_0)\cos\theta+z\sin\theta}{(x-x_0)^2+z^2}$$

式中: V 为自然电位; K 为极化强度; x 为水平坐标; x_0 为圆柱体中心水平坐标; z 为埋藏深度; θ 为极化角度。

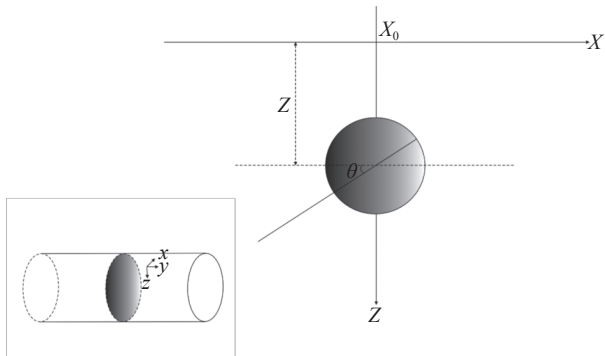


图 1 圆柱体极化模型
Fig. 1 Cylinder polarization model

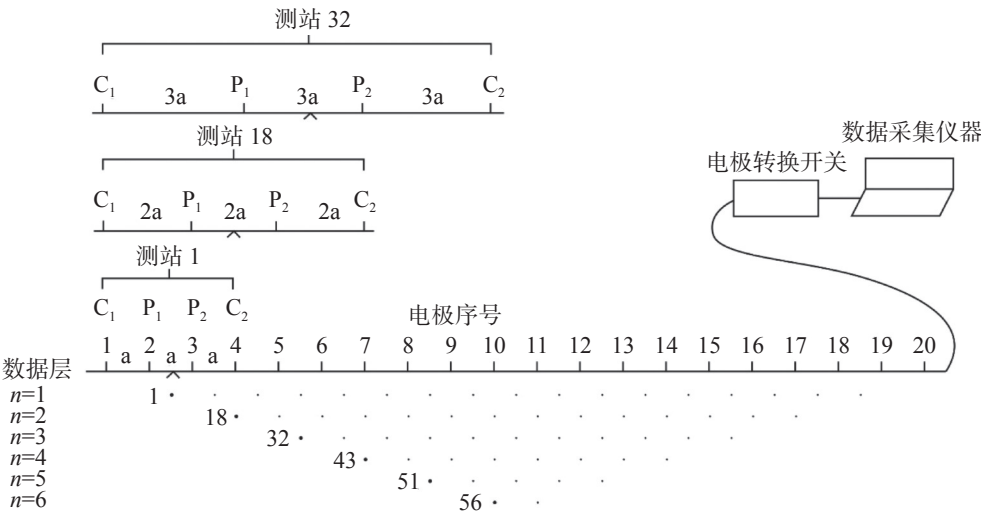


图 2 高密度电阻率法探测原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of detection principle of high-density resistivity method

其特点为: 电极布设一次完成, 减少了因电极设置而引起的故障和干扰, 为野外数据的快速和自动测量奠定了基础; 能有效进行多种电极排列方式的扫描测量, 获得较丰富的地电断面结构特征信息; 野外数据采集实现自动化或半自动化, 采集速度快, 避免了人为错误, 并且成本低, 效率高, 信息丰富; 可对资料进行预处理并显示剖面曲线形态, 可自动绘制和打印各种成果图件, 解释方便。

假设均匀半空间介质中存在若干水平圆柱极化源, 地面观测点的电位 d 则为这些极化源响应的叠加

$$d=\sum V_i, \quad i=1,2\cdots,N$$

式中: i 为极化源编号; V_i 为第 i 个极化源产生的电位; N 为极化源个数。

自然电位数据反演采用阻尼最小二乘逐步解析反演方法^[16], 建立的反演方程为

$$(A^T A+\alpha I)\Delta m=A^T \Delta d$$

式中: I 为单位矩阵; α 为阻尼因子; Δm 为模型更新向量; Δd 为残差向量; A 为偏导数矩阵; m 是由 T 个 K , x , z 和 θ 组成的向量。

通过自然电位反演可获得极化源空间位置, 从而解译强径流带的空间分布。

2.2 高密度电阻率法

高密度电阻率法是以岩土导电性的差异为基础, 研究人工施加稳定电流场的作用下, 地下传导电流分布规律的一种探测方法, 探测装置原理如图 2。

2.3 地质雷达法

地质雷达探测装置如图 3, 其发射脉冲发出的脉宽为毫微秒量级的视频脉冲, 经位于地面上的宽带发射天线耦合到地下, 当发射的脉冲波在地下传播过程中遇到介质界面、目标或其它局部介质不均匀体, 一部分脉冲能量波将反射回地面, 由地面上的宽带接收天线所接收。取样接收电路在雷达主机取样控制电路控制下, 按等效时间取样原理将接收到的

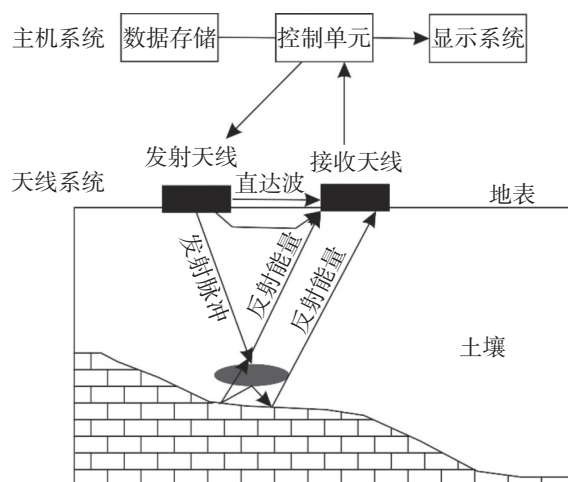


图3 地质雷达法探测原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of detection principle of ground penetrating radar method

高速重复的视频脉冲信号变换成低频信号,送至显示系统进行处理。在实际探测过程中,天线沿地面移动,脉冲信号不断地被发射和接收,显示系统将经A/D转换后得到的数据信号按一定方式进行编码排列及处理,以二维形式(一维是空间坐标,对应于地面上不同的水平位置;另一维是时间坐标,表示回波信号的传播时延,对应于不同的深度)给出连续的地下纵向剖面成像结果,供分析判读。

2.4 地球物理异常特征

坡径流带位于碳酸盐岩(灰岩)分布区,主要介质包括水、黏土和灰岩,这些介质的相对介电常数差异较大,而水、黏土与灰岩的电阻率差异较大,这些物性差异是利用综合物探方法识别坡径流带表层岩溶带结构的物性基础(表1)。

表层岩溶带的探测,主要以浅地表相对微小结构的溶孔、溶隙等为探测目标,这些微小结构的溶孔以及和测线相交的溶隙会在高分辨探地雷达电磁反射波中形成双曲线绕射形态特征,而与测线平行的溶隙则呈现强反射的相互平行的同相轴。由于表层岩溶带内溶孔、溶隙、溶沟等岩溶分布错综复杂而广泛,入射的雷达波形成复杂的电磁波反射、折射,难以识别双曲形态及同相轴特征,表层岩溶带则通过不规则的强反射电磁波来识别。强径流带则通过高密度电阻率法和自然电位法的反演结果综合解译。强径流带内岩溶水的电阻率远低于围岩电阻率,在电阻率反演断面图中呈现低阻异常特征,低阻异常的形态与强径流带断面形态大致相同;强径流带内

表1 研究区岩土介质介电常数、波速及电阻率

Table 1 Dielectric constant, wave velocity and resistivity of rock and soil medium in the study area

介质	相对介电常数	波速/cm·ns ⁻¹	电阻率/Ω·m
空气	1	30.0	∞
水	81	3.3	0.1~100
黏性干土	4~10	9.5~15.0	10~100
黏性湿土	10~30	5.4~9.5	1~10
干灰岩	7	11.3	100~10 000
湿灰岩	8	10.6	10~100
干混凝土	4~40	4.7~15.0	500~1 300
湿混凝土	10~20	6.7~9.5	50~200

岩溶水的运移过程中,伴随着化学反应、离子运移等,而产生极化源,通过自然电位数据反演可获得极化源聚集的空间位置,来解译强径流带的发育位置。

3 工作部署

在广西果化基地生态实验场坡径流带内布置表层岩溶带结构探测测线5条(B2至B6线),进行探地雷达连续扫描,测线平行,长均为106 m,方位角-40°。其中B2线和B5线进行高密度和自然电位测量,点距2 m,测线布置如图4。

地质雷达选取400 MHz天线进行时间连续测量,对应窗口取150 ns,对B2至B6线进行连续扫描,获得的数据利用MATGPR软件进行处理;高密度电阻率法对B2线和B5线进行对称四极测深数据采集,点距2 m,在裸露岩石上用钻头打孔,灌入硫酸铜溶液,插入小铜电极接地,通过电缆连接铜钉和高密度仪器采集道,采集的数据通过Res2D软件进行反演处理;自然电位法采用阵列监测方式对B2线和B5线进行连续采集,采集间隔5 s,获得的数据利用阻尼最小二乘逐步解析反演软件^[16]进行反演处理。

4 结果与分析

通过B2线和B5线高密度电阻率法和自然电位法综合探测,查明了生态试验场坡径流带的强径流带位置(图5)。研究区主要分布灰岩,电阻率一般在2 kΩ·m以上,岩溶水的聚集会产生局部低阻异常,利用高密度电阻率法反演获得电阻率断面图可推测岩溶的优势发育位置;自然电位法则通过反演,将自

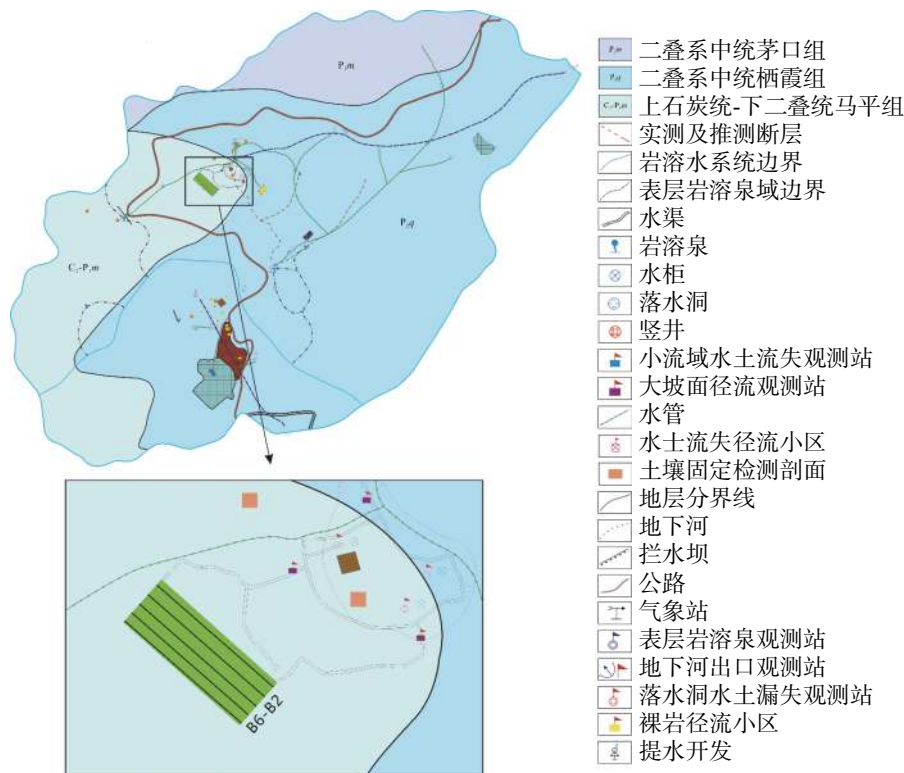


图 4 生态实验场水文地质及测线布置图

Fig. 4 Hydrogeology and layout of survey lines in the ecological experiment base

然电位数据转化为极化源空间位置参数,推测含水岩溶构造的空间发育位置。但两者不可避免地受多解性影响,异常的解析需要综合考虑。下面将异常进行归纳,见表 2。

从反演断面图和异常统计结果来看,电阻率异常个数少、尺度大,大多呈“板状”形态,异常深度和跨度相对较大;而极化源个数多、尺度小,异常深度和跨度较小。总体来看,极化源聚集位置和电阻率异常位置对应较好,只有极化源 C、G、K 号聚集位置和电阻率 J 号异常位置没有对应,这四个异常是出现在剖面两侧,探测数据不足以真实反映岩溶异常信息。其余异常均在剖面中间 3/4 区域,数据量可以保证异常的可靠性,下面具体分析。

综合对比电阻率异常位置和极化源聚集位置,电阻率 A 号异常与极化源 D 号聚集位置重合,电阻率 H 号异常与极化源 L 号聚集位置重合,极化源 M 号和 N 号聚集位置处于电阻率 I 号异常左边界处,极化源 O 号聚集位置处于电阻率 I 号异常右边界处。大部分极化源聚集空间范围要小于电阻率异常范围,可作为强径流带的判别依据。而高密度反演中有光滑因子作用,虽然异常可靠性能有效增强,但却牺牲了一定的分辨率。因此通过两种方法综合解译,既

有可靠性的保证,又可以达到高分辨的要求。可以判定, B2 线 85 m 位置、B5 线 82 m 位置、B5 线 105 m 位置以及 B5 线 123 m 位置有强径流带发育,发育深度在 3~11 m。

B2 线电阻率 B 号异常与极化源 E 号聚集位置有所差异,但综合 B5 线 105 m 处异常来看,存在强径流带的可能性较大,高密度电阻率法的可靠性要高于自然电位法,因此判断 B2 线 100 m 位置(即 II 号异常附近)发育有强径流带。B2 线中 114 m 位置(自然电位 F 号异常)也有强径流带发育的可能,虽然电阻率异常不明显,但对比 B5 线 123 m 处的异常,可能是同一条强径流带,只是 B2 线上该强径流带发育规模较小,高密度电法难以分辨,这两处解译的强径流带发育深度大致在 5~10 m。

通过上述分析,坡径流场内发育 3 条强径流带,具体位置及深度见表 3。

表层岩溶带以不规则的、微小的面型分布岩溶发育结构为特征,需要高分辨的探地雷达技术来识别,本文通过该方法对 B2 至 B6 线表层岩溶带厚度进行了探测解释。该地区表层岩溶带发育深度在大致在 1~7 m^[22],岩溶的双曲形态强电磁波往返时间基本在 100 ns 以内结束,选用 400 MHz(时间窗口为

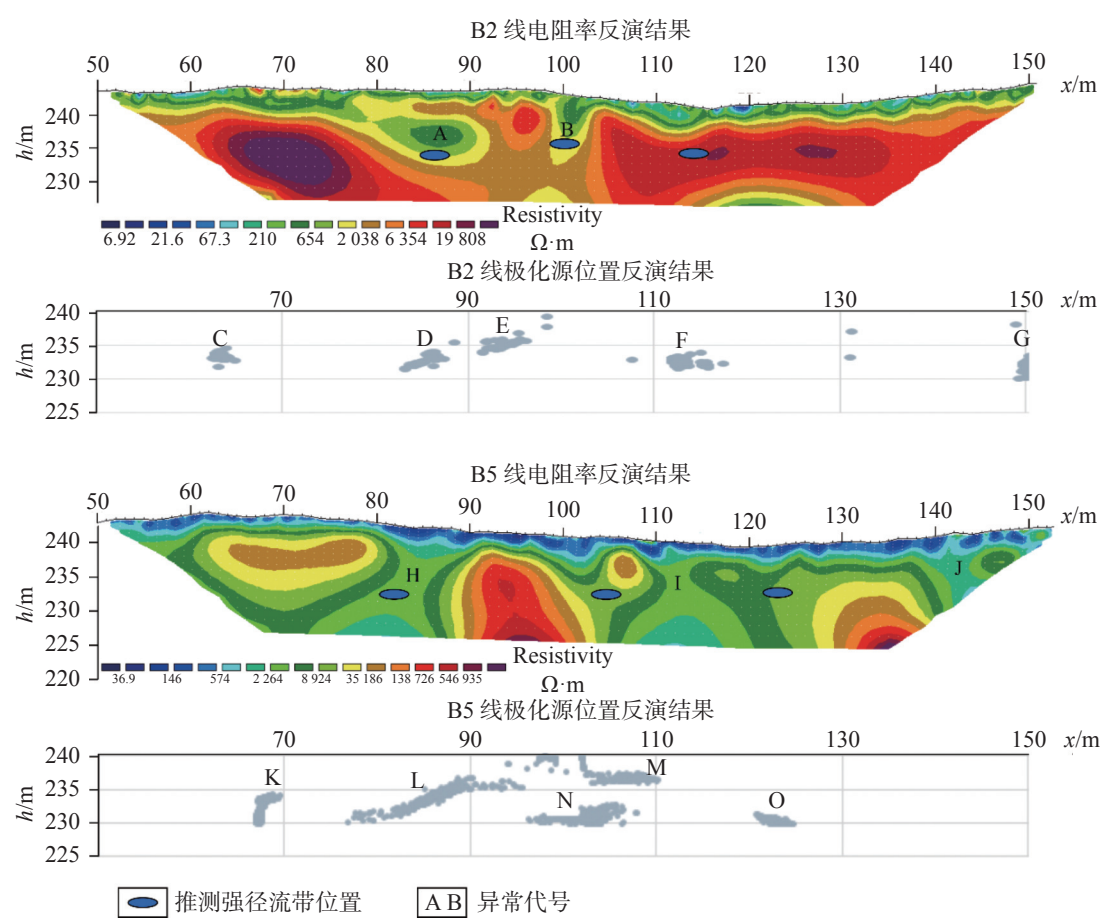


图 5 B2 线和 B5 线强径流带综合物探反演解译图

Fig. 5 Interpretation of integrated geophysical inversion of Line B2 and Line B5 in the strong runoff zone

表 2 电阻率反演结果及极化源反演结果推断异常体统计表

Table 2 Statistics of anomalous bodies inferred from inversion results of resistivity and polarization source

B2线					B5线				
	异常编号	位置/m	发育深度/m	异常形态		异常编号	位置/m	发育深度/m	异常形态
高密度	A	80~90	5~10	管道型	高密度	H	80~90	未见底	倾斜板状
	B	99~103	未见底	竖直板状		I	100~125	未见底	倾斜板状
						J	140~145	未见底	倾斜板状
自然电位	C	61~63	5~8	管道型	自然电位	K	68~70	5~10	竖直板状
	D	82~86	5~8	倾斜板状		L	77~96	3~10	倾向板状
	E	91~97	3~5	倾斜板状		M	102~110	4~5	水平板状
	F	111~116	7~9	管道型		N	97~107	7~11	水平-倾斜板状
	G	149~150	6~10	管道型		O	121~125	8~10	水平板状

表 3 坡径流场内解译强径流带空间位置统计表

Table 3 Statistics of the spatial position of strong runoff belt interpreted in slope runoff field

	径流带1		径流带2		径流带3	
	B2线	B5线	B2线	B5线	B2线	B5线
代表性异常	A、D	H、L	B	I、M、N	F	I、O
发育位置/m	85	82	100	105	114	123
发育深度/m	5~8	3~10	5~10	7~11	7~9	8~10
可靠性	强	强	中	强	弱	强

150 ns, 根据表 1, 取平均波速 $10 \text{ cm} \cdot \text{ns}^{-1}$, 即可探测深度为 7.5 m) 可同时满足探测深度和分辨率的要求。

根据雷达电磁波反射信号的不规则强反射特征划分 B2 至 B6 线表层岩溶带厚度(如图 6 至图 10 白线所示)。根据资料显示, 在 B5 线及 B6 线 50 m 至 85 m 区间的深部存在裂隙构造。表层岩溶带发育不均匀, 起伏变化较大, 各测线表层岩溶带发育深度及变化特征见表 4。

根据统计, 坡径流场地内表层岩溶带的发育不均匀, 在 0.5~6.0 m 之间变化, 总体呈现左深右浅的特征。坡径流场地西北侧有深部岩溶裂隙发育(即 B5 线和 B6 线左侧), 向东南地势逐渐走低, 岩溶裂隙也逐渐向面上扩大, 在 B4 线之后线性发育的裂隙已不见, 发展为面型岩溶, 成为表层岩溶带一部分,

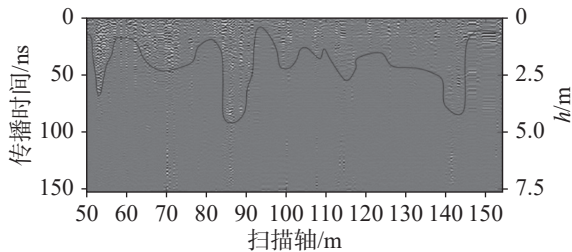


图 6 B2 线地质雷达数据剖面图
Fig. 6 Profile of GPR data of Line B2

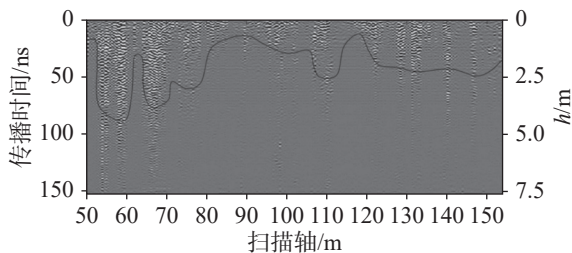


图 7 B3 线地质雷达数据剖面图
Fig. 7 Profile of GPR data of Line B3

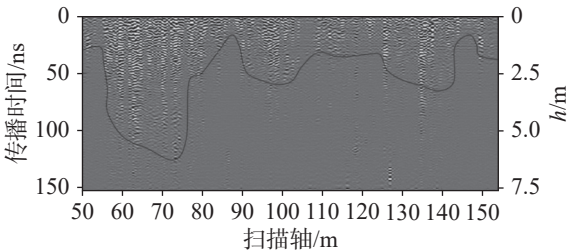


图 8 B4 线地质雷达数据剖面图
Fig. 8 Profile of GPR data of Line B4

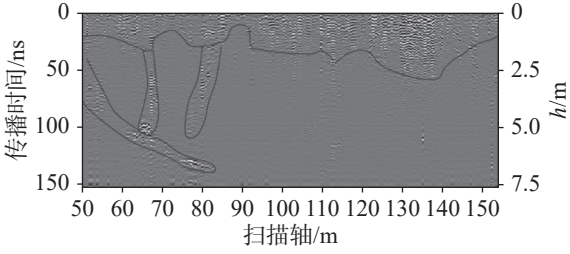


图 9 B5 线地质雷达数据剖面图
Fig. 9 Profile of GPR data of Line B5

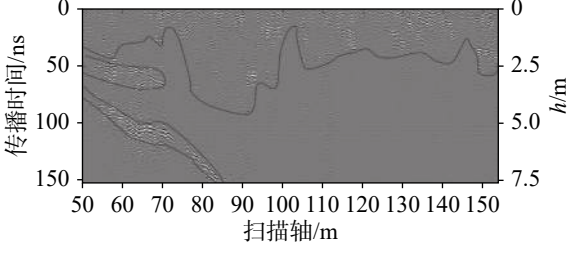


图 10 B6 线地质雷达数据剖面图
Fig. 10 Profile of GPR data of Line B6

而 B3 线之后又向浅部收缩, 到 B2 线北部(剖面左侧)表层岩溶纵向发育优势已消失。

坡径流带表层岩溶带结构地质解译(如图 11), 图中用白色线条画出表层岩溶带发育的底界面, 强径流带用蓝色虚线和箭头画出。表层岩溶带发育深度在 0.5~6.0 m 之间, 起伏变化较大, 准确深度需通

表 4 表层岩溶带发育深度及变化特征汇总表

Table 4 Summary of development depth and variation characteristics of epikarst zone

	B2线	B3线	B4线	B5线	B6线
电磁波往返走时/ ns	20~90	10~90	20~120	10~50	10~90
换算发育深度/m	1.0~4.5	0.5~4.5	1.0~6.0	0.5~2.5	0.5~4.5
剖面表层岩溶带 发育特征	大部分发育深度1.5~2.5 m, 个别地方发育较深如55 m、88 m、142 m等, 宽度较小	呈现左侧深(可达4 m左右), 中部最浅(1 m左右), 右侧略深(2 m左右)	左侧发育较深, 发育深度可达5~6 m, 中部和右侧相对较浅, 在1~3 m之间变化	相对较为平缓, 左浅右深, 左侧深部发育3条岩溶裂隙, 两条竖直发育, 一条水平发育	起伏变化较大, 在80~100 m区间发育较深, 可达4.5 m, 其他区域在2 m左右; 左侧中、深部各发育一条岩溶裂隙, 倾斜发育

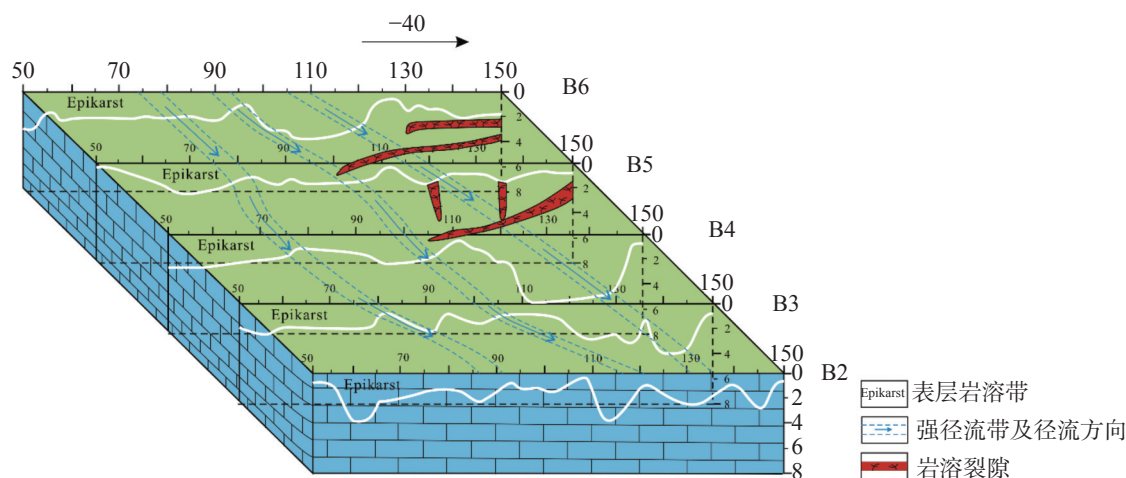


图 11 坡径流带表层岩溶带结构地质解译图

Fig. 11 Geological interpretation of epikarst zone structure in the slope runoff zone

过钻孔测速结果来计算。坡径流带中间区域存在 3 条基本顺坡展布的强径流带,坡径流带西北部存在多条较深的裂隙构造。

5 结 论

(1)根据研究区表层岩溶带的发育背景,地质雷达的天线频率选择 400 MHz 较为适宜。据资料显示,表层岩溶带发育深度约 2.5 m,空间变化较大,另外,坡径流带西侧存在较深的裂隙构造。

(2)综合地球物理方法解译揭示了研究区坡径流带中间区域存在 3 条强径流带,基本顺坡展布,发育深度 5~10 m。

(3)根据自然电位数据反演获得的极化源聚集位置可直接指示地下水的赋存位置,是探测岩溶含水构造的良好方法,结合高密度电阻率反演断面结果,可对强径流带发育位置和空间特征做出准确解译,而地质雷达能够高分辨探测表层岩溶带发育厚度和浅部岩溶裂隙构造发育。这三种方法组合是识别表层岩溶带发育特征的有效手段。

参考文献

- [1] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆出版社,1988:1-332.
- [2] 袁道先.中国岩溶动力系统[M].北京:地质出版社,2002.
YUAN Daoxian. Karst dynamic system in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [3] 袁道先,蒋勇军,沈立成,蒲俊兵,肖琼.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing,

Xiao Qiong. Modern karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.

- [4] 袁道先.碳循环与全球岩溶[J].第四纪研究,1993,13(1):1-6.
YUAN Daoxian. Carbon cycle and global karst[J]. Quaternary Sciences, 1993, 13(1): 1-6.
- [5] 章程.岩溶动力学理论与现代岩溶学发展[J].中国岩溶,2022,41(3):378-383.
ZHANG Cheng. Theory of karst dynamics and development of modern karst science[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 378-383.
- [6] 李玉辉,章程,庄晓东,丁文荣,俞筱桢.中国岩溶研究进展的哲学认知与展望[J].中国岩溶,2022,41(3):401-413.
LI Yuhui, ZHANG Cheng, ZHUANG Xiaodong, DING Wenrong, YU Xiaoya. Philosophical cognition and prospect of karst research in China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 401-413.
- [7] 蒋忠诚,袁道先.表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J].地球学报,1999,20(3):302-308.
JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(3): 302-308.
- [8] 蒋忠诚,章程,罗为群,肖琼,吴泽燕.我国岩溶地区碳汇研究进展与展望[J].中国岩溶,2022,41(3):345-355.
JIANG Zhongcheng, ZHANG Cheng, LUO Weiqun, XIAO Qiong, WU Zeyan. Research progress and prospect of carbon sink in karst region of China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 345-355.
- [9] 章程,肖琼.桂林漓江水体溶解无机碳迁移与水生光合碳固定研究[J].中国岩溶,2021,40(4):555-564.
ZHANG Cheng, XIAO Qiong. Study on dissolved inorganic carbon migration and aquatic photosynthesis sequestration in Lijiang river, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 555-564.
- [10] 闫钊全,刘琦,邓大鹏,王涵.表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J].中国岩溶,2022,41(2):240-248.
YAN Yiquan, LIU Qi, DENG Dapeng, WANG Han. Laboratory

- simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 240-248.
- [11] 覃小群, 蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. *中国岩溶*, 2005, 24(3): 250-254.
- QIN Xiaoqun, JIANG Zhongcheng. A review on recent advances and perspective in epikarst water study[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(3): 250-254.
- [12] 彭韬, 周长生, 宁茂岐, 付磊, 戴德求, 王世杰. 基于探地雷达解译的喀斯特坡地表层岩溶带空间分布特征研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(6): 1262-1270.
- PENG Tao, ZHOU Changsheng, NING Maoqi, FU Lei, DAI Deqiu, WANG Shijie. Study on spatial distribution of epikarst zone on plateau karst slope based on ground-penetrating radar[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6): 1262-1270.
- [13] 高强山, 彭涛, 付磊, 王世杰, 曹乐, 程倩云. 探地雷达技术对表层岩溶带典型剖面组刻画与界面识别[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 759-765.
- GAO Qiangshan, PENG Tao, FU Lei, WANG Shijie, CAO Le, CHENG Qianyun. Structure description and interface recognition on epikarst typical profiles using GPR technology[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 759-765.
- [14] Iuliano T, Mauriello P, Patella D. Looking inside mount vesuvius by potential fields integrated probability tomographies[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 113(3-4): 363-378.
- [15] Fritjof Fagerlund, Graham Heinson. Detecting subsurface groundwater flow in fractured rock using self-potential methods[J]. *Environmental Geology*, 2003, 43: 782-794.
- [16] 刘永亮, 甘伏平, 韩凯, 郭健强, 梁东辉, 张伟, 郑智杰, 刘伟, 陈贻祥. 自然电位数据阻尼最小二乘逐步解析反演研究: 以桂林市寨底地下河为例[J]. *地球物理学进展*, 2018, 34(2): 775-780.
- LIU Yongliang, GAN Fuping, HAN Kai, WU Jianqiang, LIANG Donghui, ZHANG Wei, ZHENG Zhijie, LIU Wei, CHEN Yixi-ang. Damped least squares gradually analysis inversion of self-potential data: Take Zhaidi underground-river in Guilin for example[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 34(2): 775-780.
- [17] Patella D. Introduction to ground surface self-potential tomography[J]. *Geophysical Prospecting*, 1997, 45(4): 653-681.
- [18] 冯亮, 邢尚鑫, 王森, 李冰. 高密度电法在新建住宅区地下溶洞勘查中的应用[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(7): 1461-1464.
- FENG Liang, XING Shangxin, WANG Sen, LI Bing. Application of high-density resistivity method in surveying underground karst cave in newly-built residential area[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(7): 1461-1464.
- [19] 安邦超. 高密度电法在岩溶段填方路基的应用研究[J]. *水利科技与经济*, 2020, 26(8): 81-83.
- AN Bangchao. Application of high-density electrical method in filling subgrade of karst section[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2020, 26(8): 81-83.
- [20] 韩鹏. 高密度电阻率法在探测不同充填类型溶洞中的正反演研究[J]. *地质与勘探*, 2020, 56(6): 1219-1225.
- HAN Peng. Forward modeling and inversion of the high-density resistivity method in detecting karst caves of different filling types[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(6): 1219-1225.
- [21] 李望明, 易强, 刘声凯, 肖利权, 李俊. 湘西北岩溶石山缺水地区直流电法找水实例[J]. *物探与化探*, 2020, 44(6): 1294-1300.
- LI Wangming, YI Qiang, LIU Shengkai, XIAO Liquan, LI Jun. An example of DC method for water exploration in the karst mountain water shortage area of northwest Hunan[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2020, 44(6): 1294-1300.
- [22] 劳文科, 祁晓凡, 刘慧敏, 蒋忠诚, 覃小群, 覃星铭. 广西果化龙何地区表层带岩溶水系统及其水资源特征[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(2): 122-128.
- LAO Wenke, QI Xiaofan, LIU Huimin, JIANG Zhongcheng, QIN Xiaoqun, QIN Xingming. Characters of epikarst water system and water resources in Longhe, Guohua, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(2): 122-128.

Study on spatial structure characteristics of epikarst zone interpreted by integrated geophysical method: Taking the slope runoff field of Guohua town ecological experiment base in Pingguo City, Guangxi as an example

LIU Yongliang^{1,2}, LIU Zhenyu³, ZHANG Cheng^{1,2}, WU Qiuju³,
WU Jianqiang⁴, ZHANG Wei^{1,2}, GAN Fuping^{1,2}, HAN Kai^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. International Research Center on Karst Under the Auspices of UNESCO/National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Geological Environment Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530201, China; 4. Wuhan Center of Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract The epikarst zone is widely distributed in the karst area of Southwest China, and it is the intersection zone

of four circles (lithosphere, atmosphere, biosphere and hydrosphere). It is sensitive to environmental changes, in which rapid chemical reactions and strong karst actions are likely to take place. It records much information on short-term environmental change. It also has the function of regulating and storing karst water, and thus can effectively provide water resources for residents in karst mountainous areas. Therefore, the exploration and interpretation of the structure of epikarst zone is of great significance to the study of water cycle and the storage function of epikarst zone. In this study, comprehensive geophysical methods such as high-density resistivity method, spontaneous potential method and ground penetrating radar method have been used to explore and interpret the spatial structure characteristics of epikarst zone in slope runoff field of Guohua town ecological experiment base in Pingguo City. The high-density resistivity method can obtain the electrical structure section of slope runoff field by data inversion, and divide karst development areas by electrical structure. As an important method to interpret the development position of strong runoff belt, the spontaneous potential method can obtain the spatial position of polarization source through data inversion, and the generation of polarization source is closely related to water flow and electrochemical reaction between water and surrounding rock. With high resolution, the ground penetrating radar method is effective to interpret the development thickness of epikarst zone. The high-density resistivity method and the spontaneous potential method can be used to detect and comprehensively interpret the spatial position of the strong runoff belt in slope runoff field, and the ground penetrating radar method can be used to detect the thickness of the epikarst zone in the slope runoff field. In this study, according to the resistivity inversion cross-section and polarization source inversion results, the spatial positions of three strong runoff zones have been comprehensively explained, and their development depths vary between 5 m and 10 m. The development depth of the epikarst zone has been interpreted by the ground penetrating radar image. According to the development characteristics of epikarst zone in this area, the antenna frequency of the ground penetrating radar has been set as 400 MHz, and the radar wave reflection time has been converted into depth with the combination of the relevant geotechnical dielectric parameters of rock and soil. The development depth of epikarst zone in the slope runoff field is about 2.5 m (about 50 ns, with the speed of $10 \text{ cm} \cdot \text{ns}^{-1}$). The lateral variation of development thickness is significant. The accurate depth needs to be calibrated by the results of velocity measurement through drilling. In addition, there are deep karst fractures in the northwest of the slope runoff field, which gradually descend to the southeast and gradually expand to the surface. The research results show that the location of polarization source obtained by the inversion of spontaneous potential data can directly indicate the location of groundwater; therefore, the spontaneous potential method is effective to detect karst water-bearing structures. Combined with the results of high-density resistivity inversion section, the development location and spatial characteristics of strong runoff belt can be accurately interpreted, and the ground penetrating radar can detect the development thickness of epikarst zone and the development of shallow karst fracture structure with high resolution. In short, the integration of ground penetrating radar method, high-density resistivity method and spontaneous potential method can effectively detect the structural characteristics of epikarst zone, address the multi-solution problem, and hence an effective means to interpret the thickness of epikarst zone and to detect the spatial distribution of strong runoff belt.

Key words earth exploration and information technology, epikarst zone, spatial structure, ground penetrating radar, high-density resistivity, spontaneous potential

(编辑 杨杨)