第 37 卷 第 4 期	中国。	岩 溶	Vol. 37 No. 4
2018年8月	CARSOLOGIC	A SINICA	Aug. 2018

杜成亮,甘伏平,张远海,等.地球物理方法探索隐伏岩溶古河道:以湖南郴州万华岩为例[J].中国岩溶,2018,37(4):624-631. DOI:10.11932/karst20180417

地球物理方法探索隐伏岩溶古河道

——以湖南郴州万华岩为例

杜成亮1,甘伏平2,张远海2,赵伟2,梁东辉2

(1. 桂林理工大学,广西桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林 541004)

摘 要:为探讨湖南郴州万华岩景区上游岩溶古河道的存在性,丰富景区岩溶洞穴科普知识以推动地方旅游 经济发展,探索性地应用高精度磁法、高密度电法、音频大地电磁测深法(EH4)等综合地球物理方法在景区上 游进行了探测研究,其结果发现几处磁、电异常部位,并结合区内岩溶垮塌地貌形态、区域地质背景资料及野 外地质调查成果,认为景区上游存在岩溶古河道,同时确定出岩溶古河道的剖面位置及平面走向。整个研究 思路表明综合地球物理方法在研究岩溶古河道时具有可行性。

关键词:万华岩;岩溶古河道;综合地球物理方法;岩溶垮塌

中图分类号:P631 文献标识码:A 文章编号:1001-4810(2018)04-0624-08

0 引 言

中国岩溶洞穴资源丰富,产生了巨大旅游经济效益,相比之下,旅游溶洞的社会效益,特别是其科普教育功能的发展极不平衡^[1]。地球物理方法在岩溶地 区各种工程地质勘查中的应用已经非常广泛并且成熟:武毅等^[2]应用地球物理勘探技术对西南岩溶区不 同含水介质进行了划分;张加桂等^[3]应用地球物理方 法对三峡库区隐伏岩溶特性进行甄别;郑智杰等^[4]应 用地球物理方法对岩溶塌陷区的岩土层性质进行辨 析;美国 PJ Carpenter 等^[5]利用地球物理方法对伊 利诺州岩溶补给地形进行了调查;周春林等^[6]应用地 球物理方法在岩溶区进行了考古研究。但地球物理 方法在岩溶洞穴科普研究中的应用未见报道。

花岗岩含少量铁磁性矿物具弱磁性,灰岩基本不 含铁磁性矿物,故无磁性^[7],二者磁性差异是开展高 精度磁测工作的前提;岩溶洞穴、地下河等充填水时, 其电磁性与围岩存在明显的差异,是开展高密度电 法、音频大地电磁测深法工作的前提。本研究利用高 精度磁法、高密度电法、音频大地电磁测深法(EH4) 在万华岩景区上游探测岩溶古河道,以期为应用地球 物理方法研究岩溶洞穴提供参考。

1 研究区概况

1.1 地质特征[8]

研究区区域上主要出露晚古生界地层,属浅海相 碳酸盐岩,主要由石炭系岩关阶第三、四段和大塘阶 石磴子组上段、大塘阶测水组测水段组成。石炭系岩 关阶第三段(C₁y³)为泥晶灰岩、砂屑粉晶灰岩,岩层 厚度一般在 277.8~320.6 m,南厚北薄;大塘阶石磴 子组上段(C₁d¹⁻²)分上、中、下三部分,下部为泥一粉 晶灰岩,中部为泥一粉晶白云岩、灰云岩与泥、粉晶灰 岩互层,上部为一套滨海一陆棚过渡带沉积相碎屑 岩,主要为石英粉砂岩、泥质粉砂岩、页岩、粉砂质页 岩及黏土岩,厚度变化大,自南向北由 42.5 m 减至 14.3 m;岩关阶第四段(C₁y⁴)主要由粉一泥晶灰岩 和含生物屑砂屑灰岩组成,岩层厚度一般在 169~

收稿日期:2017-04-20

资助项目:郴州市万华岩景区景观资源整合调查与评价(2002371520009);岩溶洞穴科普教育示范研究(2002371520012);湘江上游岩溶流域1:5 万水文地质环境地质调查(DD20160303)

第一作者简介: 杜成亮(1983-),博士研究生,研究方向:岩溶探测方法。E-mail:chldu_123@163.com。

174 m;大塘阶测水组测水段(C₁d²)分上下两部分, 上部为石英砾岩、砂砾岩、含砾粉砂岩和细粒长石石 英砂岩,下部为细粒石英砂岩、长石石英砂岩,常含铁 锰质和粉砂质结核,岩层厚度为 32.8~183 m。

研究区区域上主要受新华夏系北东一南西向压 扭性断裂及其次级断裂的控制,同时受北西一南东向 断裂影响。区内有贯穿整个测区的北东一南西向断 层 F1 和展布于研究区西北部的北东一南西向断层 F2,F1 为测区主要断层构造,局部地区岩层强烈褶皱 (图 1)。

研究区水文地质条件受岩性、构造及水文地质循 环的影响,地下水类型齐全,主要有赋存并运移于岩 溶化岩层中的岩溶水、残坡积松散岩石及冲积黏土中 的孔隙水及构造岩石裂隙中的少量裂隙水。

区域上有两期五次岩浆侵入活动,其中印支期两 次,燕山早期三次。研究区南部大面积出露印支期细 粒花岗岩(γ¹₅⁻²),印支期中粗粒花岗岩(γ¹₅^{-1a})和中粗 粒斑状花岗岩(γ¹₅^{-1b})。





1.2 地球物理特征

推测隐伏于岩溶古河道中的花岗岩孤石与围岩 灰岩的磁性差异是开展高精度磁测工作的地球物理 前提(表1)。花岗岩的球状风化使大多数花岗岩孤 石呈磨圆度较好的球状或似球状,其单体在剖面上呈 现出的磁异常形态与球状磁化体相似,据此作为判断 花岗岩孤石存在的依据(图2)。



图 2 球状磁性体 GradT 剖面图 Fig. 2 GradT profile of globular magnet

地下水发育的岩溶地区,特别是中国南方部分岩 溶表现为低阻特征^[1]。岩溶洞穴、地下河等充填水 时,其电性与围岩存在明显的差异^[9-11],利用高密度 电法、音频大地电测深法在对岩性破碎带或者充水溶 洞、管道等低阻构造带进行探测时,在视电阻率断面 图上呈现出低阻异常圈闭或低阻带^[12-15]。研究区内 岩溶古河道、岩溶洞隙或导水断裂破碎带与围岩之间 存在明显的电磁性差异,为高密度电法、音频大地电 磁测深法提供了地球物理前提(表 2)。

表1 研究区不同介质磁化率范围值

 Table 1
 Range value of magnetic susceptibility of different medium in the study area

介质	磁化率		
灰岩	10^{-1}		
花岗岩	$0 \sim 10^2$		

表 2 研究区不同介质电阻率范围值

Table 2 Range value of resistivity of different

medium in the study area

介质	电阻率/Ω・m 10 ⁻¹ ~10 ²		
充水溶洞、裂隙			
灰岩	$10^{6} \sim 10^{7}$		
花岗岩	$10^3 \sim 10^5$		

2 研究方法

2.1 物探方法选择

利用花岗岩孤石具有弱磁性的物性特征,选用高 精度磁测判断花岗岩孤石的存在性,间接推断岩溶古 河道存在的位置;利用岩溶古河道电阻率低、电磁波 吸收系数大的物性特征,选用高密度电法、音频大地 电磁测深法推断岩溶古河道位置。

2.2 方法部署及数据质量

本次高精度磁测试验由南向北依次布置4条测 线,每个测点均使用 Stonex6s 准确定位,各测点都进 行了磁场梯度 GradT 观测。高密度电法选用重庆奔 腾数控技术研究所生产的 WGMD~3 性高密度电阻 率测量系统,选择三极测深装置,测点距为 10 m,采 集层数为 18 层,最大供电极距为 185 m。音频大地 电磁测深选用美国 EMI 公司和 Geometrics 公司联 合研制的 EH4 电导率成像系统,选用 10 m 点距, 20 m电极距,电磁频率选择高频的 750~92 KHz (表 3)。

高精度磁法通过试验,仪器各项性能均满足工作 要求。磁测总误差小于±5.0 nT,测量点有 232 个, 检查点有 30 个,检查率为 12.9%。高密度电法:在 "Q distribution Curve"界面中,采集的电压数据质 量 Q 值分布曲线,优良数据的比例大于 85%,为较好 的数据质量。音频大地电磁法:测点有 56 个,检查点 有 6 个,总均方相对误差 M=3.9%。磁法总误差 满足高精度磁测要求,高密度电法、音频大地电磁法 总均方相对误差满足规程要求,野外采集数据质量 可靠。

表 3 完成工作量一览表

Tabel 3 List of completed workload

线号	起点号	终点号	测点数	测线方位	测线长度	测点距	地球物理探测方法
1	0	145	30	95°	145 m	5 m	高精度磁法
2	0	430	87/87	8 0°	430 m	5 m /5 m	高精度磁法/高密度电法
3	0	405	82/40	110°	405 m	5 m /10 m	高精度磁法/ 音频大地电磁测深法
4	0	160	33/16	130°	160 m	5 m /10 m	高精度磁法/音频大地电磁测深法

2.3 资料处理流程

高精度磁法:对原始数据进行日变改正,对日变 改正后的数据进行筛选,去除畸变异常或者受干扰数 据,对筛选后的数据进行基本场改正、高度改正及向 上延拓处理,利用 GRAPHER 软件绘制磁异常垂直 梯度 GradT 的剖面图。

高密度电法:首先对数据进行筛选,去除异常或 者受到干扰的数据;利用高密度处理软件 RES2DINV软件对采集获得的视电阻率直接成图, 或者对数据进行二维反演并输出二维反演图。

音频大地电磁测深法:对野外数据进行 100%的 复核验算;依据实测数据、在电脑上绘制视电阻率断 面等值线图,利用仪器自备软件(imagem)对数据进 行处理和模型反演。

2.4 方法体系建立

前期研究认为:研究区内可能存在岩溶古河道; 古河道的个别地段可能发生过古岩溶垮塌,垮塌造成 古河道堵塞导致河流改道;古河道中存在南部运移过 来具弱磁性的花岩岗孤石。针对前期研究提出的问题,选用不同地球物理方法进行探测研究,并对探测 结果进行成果验证,建立起一套研究岩溶古河道的地 质、地球物理方法流程(图 3)。

3 研究成果

3.1 物探异常特征

L1 测线: L1 测线 20~40 m 测段 GradT 曲线与 球状磁性体异常曲线形态一致(图 2),推测地下有花 岗岩孤石存在(图 4)。

L2 测线:由 L2 测线高密度电法三极测深视电 阻率反演等值线断面图可知:从横向看,32~61 m 测 段有一低阻区,电阻率一般小于 400 Ω • m,分析认 为是由于岩溶古河道垮塌所致;310~430 m 测段电 阻率一般小于 200 Ω • m,推测为构造破碎带;从垂 向来看,地表覆盖层厚度一般在 1~15 m,厚度分布 不均;地表以下约 80 m 处有一个电阻率发生明显变 化的地带,推测为地层岩性接触带(图 5)。

L3 测线: L3 测线的音频大地电磁测深法二维 电阻率反演剖面等值线图中,水平方向 29~70 m 测 段 50 m 下有截面为椭圆形异常区,电阻率在 200~ 500 Ω•m,推测为岩溶发育区;在 80~170 m 测段电 阻率为 100~200 Ω•m,推测为岩溶古河道垮塌区; 205~425 m 测段下部为一垂向陡倾低阻异常带,推 测为断层(图 6)。



图 3 研究方法流程示意图

Fig. 3 Research method flow schematic diagram



Fig. 4 High precision magnetic method geological interpretation profile of line L1

L4 测线:L4 测线 70~160 m 测段 GradT 曲线 与球状磁性体异常曲线形态一致(图 2),推测下伏 地段有花岗岩孤石存在。L4 测线的音频大地电磁测 深法二维电阻率反演剖面等值线图中,水平方向 120~250 m测段下部有一低阻异常带,电阻率为
300~700 Ω·m,推测为岩溶古河道垮塌区;垂向上,
地表 180 m 以下电阻率小于 500 Ω·m,推测为地层
接触带(图 7)。



图 5 L2 线高密度三极电测深法地质解释剖面图

Fig. 5 High density tri-electrode sounding method geological interpretation profile of line L2



Fig. 6 Audio frequency magnetotelluric sounding method geological interpretation profile of line L3



Fig. 7 Comprehensive geological interpretation of high precision magnetic method-audio frequency magnetotelluric sounding method of line L4

3.2 成果验证

通过查阅区域地质资料、野外地质调查,对高精 度磁法、高密度电法、音频大地电磁测深法探测成果 进行验证^[16]。

L1 测线 20~40 m 测段 GradT 曲线与球状磁性 体异常曲线形态一致,L4 测线 70~160 m 测段 GradT 曲线与球状磁性体异常曲线形态一致,推测 地下有花岗岩孤石存在。对异常部位进行岩溶洞穴 调查,发现下伏地段附近有较大的花岗岩孤石存在, 验证了高精度磁测的研究成果(照片 1)。



照片1 万华岩地下河携带的大型砾石(花岗岩类占 85%) Photo 1 Large gravel carried by underground river in Wanhua cave(granite rocks account for 85%)

对垮塌区进行系统调查,发现垮塌区有岩溶古河 道存在的痕迹。垮塌区地下有大量砾石堆积物,据统 计花岗岩类砾石占到 85%以上,鉴于上下游河道中 均有花岗岩孤石存在,认为正是古岩溶垮塌导致上游 冲积而来的花岗岩孤石聚集,证实有岩溶古河道的存 在(照片 2)。



照片 2 岩溶垮塌处发现的花岗岩孤石(花岗岩类占 85%) Photo 2 Granite boulders in karst collapse area (granite rocks account for 85%)

L2 测线地表以下约 80 m 处有一个电阻率发生 明显变化的层位,推测为地层接触带;L4 测线地表约 180 m 以下电阻率小于 500 Ω • m,推测为地层接触 带。结合区域地质资料分析,认为异常由岩关阶第四 段上部、中部地层岩性接触带引起,岩关阶第四段 (C₁y⁴)上部泥晶灰岩、砂屑粉晶灰岩的电阻率小于 岩关阶第四段(C₁y⁴)中部泥一粉晶白云岩、灰云岩与 泥、粉晶灰岩互层。

L2 测线 310~430 m 测段电阻率小于 200 Ω • m,推测为构造破碎带;L3 测线 205~425 m 测段下 部为一垂向陡倾低阻异常带,推测为断层。对两个异 常地带及周边进行野外调查,发现二者地表出露部分 均可见构造破碎带,证实有断层的存在。

4 结 论

(1)高密度电法、音频大地电磁测深法视电阻率 断面在古岩溶垮塌区异常形态表现为平缓"凹"形低 阻特征,揭示了岩溶古河道的存在;四条测线确定出 地下岩溶古河道的位置:L1线20~40 m测段、L2线 20~60 m测段、L3线29~70 m测段、L4线130~ 160 m测段,各测段中心在地质平面图上的投影,揭 示出岩溶古河道的剖面位置及平面方位。由于岩溶 古河道发生跨塌,造成局部堵塞而导致岩溶古河道发 生了由西向东改道,整个过程可反映岩溶古河道历史 变迁。

(2)高精度磁法 L1 测线 20~40 m 测段、L4 线 70~160 m 测段 GradT 曲线与球状磁性体异常曲线 形态一致,推测地下有花岗岩孤石存在,间接证明有 岩溶古河道的存在。古河道中花岗岩孤石由河流的 机械搬运作用带入,因古河道各处形貌各异,花岗岩 孤石堆积位置不同,在发生过古岩溶垮塌处更易 富集。

致 谢:衷心感谢甘伏平研究员在文章撰写过程中给 予的悉心指导和耐心鼓励!同时也感谢张远海研究 员给予的大力支持!参加本次物探野外工作的同志 还有赵伟助理研究员、郑智杰助理研究员。另外,特 别感谢评审专家给予的耐心指导!在此对他们的辛 勤劳动一并表示感谢!

参考文献

- [1] 张远海,史文强,许红根,等.岩溶洞穴科普示范教育研究成果报告[R].桂林:中国地质科学院岩溶地质研究所,2016.
- [2] 武毅,孙银行,李凤哲.西南岩溶地区不同含水介质地球物理勘 查技术[J].中国岩溶,2011,30(3); 278-284.
- [3] 张加桂,陈宝荪,殷跃平,等.三峡库区隐伏岩溶特性的地球物理 探测[J].T.程勘察,2003(1):64-66.
- [4] 郑智杰,陈贻祥,甘伏平.岩溶区岩土层地球物理性质浅析:以吉 利岩溶塌陷区为例[J].地球物理学进展,2016,31(2):0920-0927.
- [5] P J Carpenter, S Ahmed. 美国伊利诺伊州岩溶补给地形的地球 物理调查[J]. 地质学报,2001(3):425.
- [6] 周春林,袁林旺,张惠岩.溶洞穴地球物理考古方法集成研究:以 南京汤山直立人洞穴为例[J].南京师大学报(自然科学版), 2005,128(3):102-105.
- [7] 谭承泽,绍雍.磁法勘探教程[M].北京:地质出版社,1984.
- [8] 湖南省地质矿产局.1:5万区域地质调查报告(宜章幅,F-49-94-D)[R].1995.
- [9] 江为为,郝天珧,胥颐,等.中国中南地区综合地质地球物理研 究[J].地球物理学报,2007,50(1):171-183.
- [10] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制[J]. 广西地质, 1989, 2(2): 80-90.
- [11] 蒙彦,殷坤龙,雷明堂.水位波动诱发岩溶塌陷的概率分析[J].中 国岩溶,2006,25(3):239-241,245.
- [12] 唐海敏,张吉振,王银,等.大地电磁法探测中条山隧道及断层的结构特征[J].铁道工程学报,2015,4(175);9-13.
- [13] 陈乐寿,王光锷.大地电磁测深法[M].北京:地质出版社, 1990.
- [14] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业大学出版 社,2002.
- [15] 李富,王永华,吴文贤, EH-4 电磁成像系统在隐伏构造探测中的应用[J].中国地质,2009,36(6):1375-1381.
- [16] 杜成亮,甘伏平,赵伟,等.湖南郴州万华岩景区综合物探报告
 [R].桂林,中国地质科学院岩溶地质研究所,2015.

Exploratory research on buried karst paleochannels by comprehensive geophysical methods: A case study of Wanhua cave system, Chenzhou, Hunan Province

DU Chengliang¹, GAN Fuping², ZHANG Yuanhai², ZHAO Wei², LIANG Donghui² (1. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The research area is located in the upstream of the Wanhuayan Scenic Area. The outcrop strata are the third to fourth member of Carboniferous Yanguanian Stage, upper member of Datangian Stage Shichengzi Formation, and Ceshui member of Datangian Stage Ceshui Formation, of which the lithologies are characterised by shallow-sea carbonate facies strata, i. e. micrite and limestone. It is structurally controlled by the northeast-south west trending compression-torsional fracture and the secondary fault of the New Neocathaysian system, and is also affected by north west-south east trending fault. In the southern part of the study area, there are large-scale intrusive fine grained., and coarse grained granites and medium-coarse porphyry granite of the Indosinian stage. Groundwater mainly comprises karst water, pore water and a small amount of fissure water. To explore the existence and evolution history of karst ancient rivers in the upper reaches of Wanhua caves for enriching popular science knowledge of the karst caves, the researchers applied comprehensive geophysical methods of high-precision magnetic method, high-density electric method and audio frequency magnetotelluric sounding method (EH4) to explore the upper reaches of the scenic area. The results revealed several magnetic and electrical anomalies. We also have interpreted anomalies and made geological assumptions. The distribution of overburden layer thickness, geological structure and stratigraphic lithology in the study area are well presented by the results from both high density electric and audio geodetic sounding surveys. The high precision magnetic method reveals the granitic boulders deposited underground, which indirectly indicates the presence of karst ancient river channel and restores historical process of its evolution. The whole research idea is practical; and through this study, a approach to applying comprehensive geophysical methods to detect karst ancient river channels can be established.

Key words Wanhua cave system, ancient karst river channels, integrated geophysical methods, method flow

(编辑 黄晨晖)