

张华,张贵,王宇,等.岩溶断陷盆地跨孔CT成像探测岩溶孔隙及赋水状态的实验研究[J].中国岩溶,2020,39(5):737-744.
DOI:10.11932/karst20200510

岩溶断陷盆地跨孔CT成像探测岩溶孔隙 及赋水状态的实验研究

张华¹,张贵¹,王宇²,方永林³,代旭升¹,王波¹,何绕生¹,罗为群⁴,
蓝芙宁⁴

(1. 云南省地质环境监测院, 昆明 650216; 2. 云南省地质调查局, 昆明 650051; 3. 云南地质工程勘察设计院, 昆明 650041; 4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 泸西岩溶断陷盆地西南部既比村一带广泛分布着碳酸盐岩,岩溶极为发育,且极不均匀,地表以溶隙、溶沟为主,溶蚀残丘发育,局部发育溶井,出露有既比村大泉。通过开展1:1万水文地质调查,在综合分析研究基础上,采用高密度电法剖面快速扫面,结合激电测深确定井位,实施的示范孔SK1、SK2钻孔,两个钻孔相距48 m,再进行跨孔CT成像探测地下岩溶发育及地下水的赋存状态实验研究,结果表明跨孔CT成像结果与实际钻探成果解译相差不大,表明该方法能更好地解译出地下岩溶发育及地下水赋水状态特征。采用常规的物探方法仅能推测竖直方向的地质情况,不利于查清横向连续发育的破碎带和溶洞空间分布。跨孔电磁波CT探测技术与钻探相结合,可以弥补这方面的不足。在碳酸盐岩地层中,根据在地下空间中不同发射角度的电磁波能量衰减值,利用反演算法得出地下介质的吸收系数空间分布,重建钻孔之间剖面的吸收系数二维图像,不同的吸收系数判断岩溶发育情况及地下水富水性。跨孔电磁波CT探测在岩溶断陷盆地探测结果说明,这种方法可行有效,为更好地布置钻孔找水提供了先进的技术。

关键词: 岩溶断陷盆地; 泸西; 跨孔CT成像; 赋水状态

中图分类号: P631.3; P641.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2020)05-0737-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

跨孔电磁波透视法是通过在一孔中发射电磁波、另一孔中接收电磁波的衰减幅度,利用计算机对数据处理成像来重建吸收系数的分布,从而达到探查井间的地质结构、构造的目的。由于收、发探头放置于钻孔内、基岩面以下,因而受上覆低阻盖层的影响较小;另外由于天线工作频率高、波长短、剖面内射线覆盖密度高,与地面物探方法相比,异常分辨率

大为提高;除需钻孔外,场地不受限制。上述优点使得跨孔电磁波透视方法在岩溶地基探测、水库渗漏、帷幕灌浆等精细探查领域得到了广泛的应用。孔间电磁波透视法及CT成像研究结果还可用于非岩溶工程平洞隧道和其它大型相关工程中,如拱坝坝肩稳定性和岩体结构评价,同时诊断坝肩绕坝渗漏问题;深覆盖层结构体评价;滑坡结构面的工程评价等^[1-7]。

通过CT成像技术了解地下岩溶的分布、走向、规模、发育情况等特征,从而为岩溶勘察施工、处理等

基金项目:国家重点研发计划项目“断陷盆地地表、地下水资源高效利用与优化调控”(2016YFC0502502);中国地质调查局项目“南方石漠化重点区综合地质调查与评价”(DD20190502)

第一作者简介:张华(1982—),男,本科,高级工程师,现主要从事水文、工程、环境地质调查研究。E-mail:ynddysghs.zhh@163.com。

收稿日期:2019-06-17

工程提供比较准确的依据。在岩溶区由于地表及地下岩溶发育,水源漏失严重,地表干旱缺水,需要合理有效地开发利用地下水为人们的生产生活服务,因此寻找到地下水成为关键目标。目前寻找地下水的技术方法较多,研究较为深入。但在岩溶区由于岩溶水分布均匀性差,导致找水难度大,钻孔成井率普遍较低,一般在40%左右。因此,如何优选井位、提高钻孔成井率,是岩溶区开发地下水要解决的最主要问题。在岩溶区,目前国内外常常采取激电测深、高密度电法、EH等物探方法寻找地下水,而采用跨孔CT寻找地下水富水地段的技术方案尚未见报道。

在自然界中,碳酸盐岩岩体为非均质性,岩体内部存在着形态、方向、大小各异的孔洞、溶蚀裂隙带,形成不连续结构面,在三维空间中呈现复杂的网格状结构特征,在平面和垂向上具有非均质性、隐蔽性、突发性、复杂性的特点。因此,研究岩体结构,对判断岩溶发育特征及地下水赋存的状态有着十分重要的意义^[8-13]。本文采用孔间电磁波透视及CT成像技术,结合泸西岩溶断陷盆地既比村示范孔的实测数据,通过数据计算,研究岩溶发育特征、岩溶孔隙及地下水赋水状态,从而准确判断地下富集地段,实施钻孔找水。

1 研究区概况

跨孔CT成像探测岩溶孔隙及赋水状态的实验研究布置于岩溶泸西断陷盆地西南部既比村^[14]。既比位于泸西县城南西约35 km,属泸西县中枢镇逸圃办事处所辖。该区人口分布较为集中,集中分布于既比、尖山2个自然村及天宝水泥厂,共1 100余人。该区耕地以旱地为主,主要种植烤烟、蔬菜、水果、三七等经济作物,少量玉米等粮食作物。研究区位于泸西盆地下游边缘,地貌上属于盆地沉积平坝区向下游深切河谷转变的地带,岩溶赋水、导水空隙为似层状发育的网状溶孔、溶隙、管道向溶洞、管道转换带,含水层富水显著不均匀。地貌组合类型主要为溶丘谷地、峰丛洼地、侵蚀溶蚀低山、河谷,溶蚀残丘分布较普遍,溶丘多呈浑圆状,高度一般为15~70 m,总体地势为西高东低、北高南低,地形标高在1 725~1 800 m。该区为裸露—覆盖型岩溶山区,山体石漠化严重,以中度石漠化为主。区内年平均气温15.7℃,年降雨量960~1 100 mm,降水多集中在6~8月,约占

全年总降水量的85%。区内地表无常年性河流,旱季缺水十分严重。人蓄用水主要为引自上游山间水库、泉点的自来水,少部分利用地下水,生产用水主要是利用地下水。

2 岩溶发育特征及地下水赋存特性

区域上为泸西小江流域,岩溶极为发育,分层分带现象明显,发育的水平溶洞自上而下可分6层:第一层标高2 180~2 210 m,为干溶洞;第二层标高1 830~1 860 m,溶洞数量较多;第三层标高1 720~1 750 m,是区内规模最大的溶洞分布区,为有水溶洞;第四—六层分布在小江岩溶河谷区,标高分别为1 570~1 610 m、1 420~1 450 m、920~950 m,规模较大,均为有水溶洞^[15-16]。

既比地区处于盆地边缘,在区域上相当于第三层岩溶发育带。区内地质构造简单,总体上为一向南西倾斜的单斜构造,地层向南倾斜,产状 $170^{\circ}\angle 20^{\circ}$,无断层出露。出露的地层为三叠系个旧组第四段(T_3^d)白云岩、白云质灰岩;个旧组第五段(T_3^e)灰岩、灰岩夹白云岩,法郎组下段(T_2^f)灰岩,法郎组上段(T_2^g)泥岩、页岩,乌格组(T_1^n)泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、页岩、砂岩,第四系(Q^{+dl})黏土。岩溶地貌类型主要为溶丘谷地、侵蚀溶蚀低山,地表岩溶形态以溶隙、溶沟为主,溶蚀残丘发育,溶隙主要发育2组,走向为 155° 和 260° ,局部发育溶井,深度小于10 m。据物探、钻探资料,区内地下岩溶发育,水平方向和垂直方向上均匀性都较差,强岩溶发育带深度普遍大于200 m,岩溶形态以溶隙、溶孔为主,局部发育岩溶洞管,洞管中堆积大量粉砂,说明管道系统规模较大,且与地表具有较强的联系,如尖山泉,上游为雨杂落水洞集中灌入补给,洞管特征明显,雨季流量大,常流出浑水,并携带大量褐黄色粉砂。再如ZK5号钻孔,抽水时含砂量大,部分溶隙中被黏土充填(图1)。

既比村一带岩溶较为发育,两个钻孔相距48 m间,水量却不同,差距较大,单位涌水量SK1钻孔为 $1.24\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,SK2钻孔为 $9.71\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,相差近8倍。构造、岩溶发育等表现的不均一特性、多期次性、充水充泥并存等特点,以致于通过水文地质分析推测地下水富集带时难以把握,准确性较差,找水难度较大。

3 物探解译成果分析

根据地方需水,为了提高钻孔成功率,在开展 1:1 万水文地质调查、地下水化学分析及动态观测、综合分析研究后,初步选取既比北部作勘探靶区,采用高密度电法剖面快速扫面,结合激电测深确定井位。依据是该地段处于两条侵蚀、溶蚀沟谷交汇部位,下游沟谷两侧溶蚀丘峰的构成碳酸盐岩层组岩溶发育较弱,起到了局部阻碍及限制径流扩散的作用,有利于地下水的富集和储存。在水文地质分析推测的基础上,布置了 3 条近东西向延伸的高密度电法剖面快速扫面,总长 3 540 m,测点间距 20 m,在高密度电法剖面上选择异常点 9 个作为激电测深点。测量结果显示,各剖面电阻率差异很大,在 100~10 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,表明岩溶发育深度大,均匀性差,

但低阻带与推测的隐伏断裂通过位置、以及有利于径流汇水的地貌部位比较一致,水文地质推测的富水带与物探验证探测结论基本相符。2 号剖面总体上东、西部电性差异大,西部电阻率普遍较低,低阻异常明显,物探解译岩溶发育均匀性差(见图 2),340~400 点间可能存在一条断层破碎带,富水性较好,或为泥质充填的岩溶发育带,探测深度范围大于 120 m 深部岩溶仍较发育。水文地质调查分析认为,300~600 点位于残丘旁,发育有北西向、近东西向延伸的宽缓冲沟汇合地带,有利于地下水的汇流富集,容易形成富水地段。460 号、520 号、580 号测试点处,电测深曲线亦有低阻显示(见图 3),与高密度电法测量结果一致,综合分析物探成果与水文地质调查认识一致,结合施工条件,选择 410 点(SK1)、460 点(SK2)作为钻孔勘查点位。

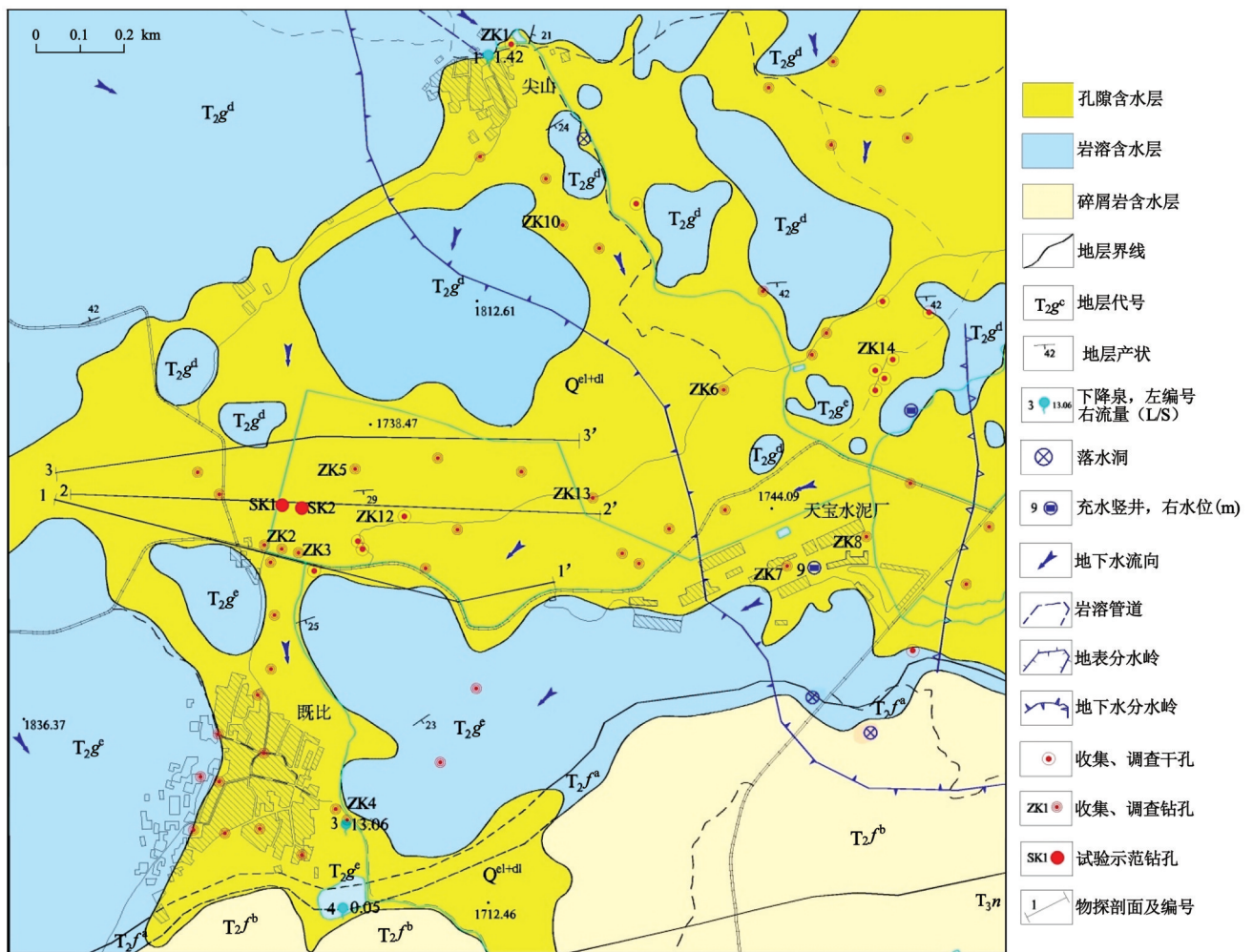


图 1 既比村一带水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological sketch around the Jibi village

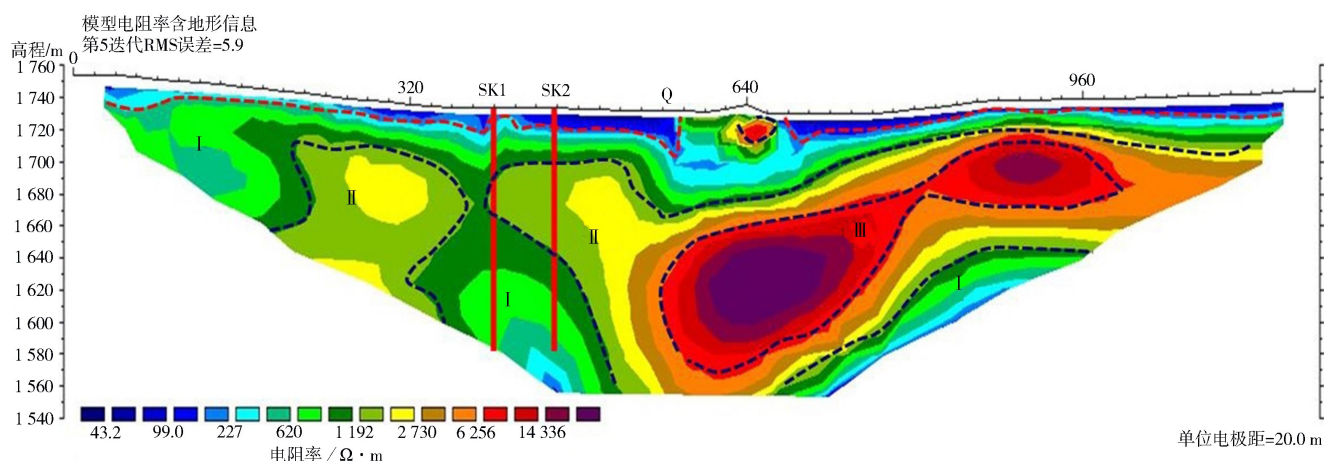


图2 2剖面高密度电法剖面解译图

Fig. 2 Interpretation profile of high-density Electrical Resistivity Tomography (ERT)

I—岩溶强发育带 II—岩溶中等发育带 III—岩溶弱发育带 Q—土层

4 钻探成果分析

经钻探证实,两孔岩溶均较发育,发育程度差异不大,以溶隙、网状溶蚀、蜂孔状溶蚀为主,局部发育小溶洞,垂向上溶蚀发育段总长 SK1 孔为 82.63 m、SK2 孔为 92.76 m。

SK1 孔岩性:0~4.66 m,第四系残坡积(Q^{el+dl})红黏土,4.66~22.5 m,三叠系中统个旧组第五段(T_2g^e)灰—深灰色泥晶、粉晶中层一块状灰岩夹白云质灰岩,22.5~151.53 m,三叠系中统个旧组第四段(T_2g^d),灰—灰白色,泥晶、粉晶中至块状白云岩,局部夹灰色粉晶灰岩。其中,孔深 5.66~20.6 m、28.71~30.96 m、44.80~49.70 m、61.76~68.80 m、75.51~79.88 m、83.13~84.40 m、87.90~93.00 m、98.50~109.00 m、116.05~135.00 m、139.02~151.53 m 溶隙、网状、凹状、蜂孔状溶蚀发育,溶孔孔径 5~100 mm,局部隙面为灰黄色泥质物附着。84.40~85.20 m 为一溶洞,灰褐色软塑状红黏土全充填。钻孔结构:0~12.91 m 口径为 225 mm,12.91~96.23 m 口径为 172 mm,96.23~151.53 m 口径为 150 mm。含水层厚度 146.87 m。经两次降深抽水试验,第一次降深抽水试验,当稳定降深 72.04 m 时,涌水量 $1.24 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($107.14 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),单位涌水量 $0.017 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$;第二次降深抽水试验当稳定降深 41.07 m 时,涌水量 $0.76 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($65.66 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),单位涌水量 $0.019 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ 。

SK2 孔岩性:0~2.76 m,第四系残坡积(Q^{el+dl})红黏土,2.76~37.79 m,三叠系中统个旧组第五段

(T_2g^e)灰—灰白色泥晶、粉晶中至块状灰岩、白云质灰岩夹灰质白云岩,37.79~151.09 m,三叠系中统个旧组第四段(T_2g^d)灰、灰白色,粉晶、泥晶中至块状白云岩,局部夹灰质白云岩。孔深 5.33~13.03 m、17.00~17.60 m、23.7~26.1 m、29.20~47.46 m、55.4~72.05 m、77.50~89.32 m、98.00~104.71 m、108.37~125.45 m、136.05~144.00 m、148.50~150.80 m 溶隙、网状溶蚀、蜂孔状溶蚀发育,溶孔孔径 1~50 mm,溶隙面上多有灰黄色泥质物附着,局部灰黄色红黏土半充填。钻孔结构:0~7.93 m 口径为 225 mm,7.93~90.32 m 口径为 172 mm,90.32~151.09 m 口径为 150 mm。含水层厚度 148.33 m。经三次降深抽水试验,第一次降深抽水试验,当稳定降深 72.87 m 时,涌水量为 $9.71 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($838.94 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),单位涌水量 $0.133 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$;第二次降深抽水试验,当稳定降深 50.04 m 时,涌水量 $8.69 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($750.82 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),单位涌水量 $0.174 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$;第三次降深抽水试验当稳定降深 21.70 m 时,涌水量 $6.28 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($542.59 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),单位涌水量 $0.289 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$ 。

5 跨孔电磁波 CT 探测原理

电磁波 CT 涉及到电磁波在地下有耗介质空间的辐射、传播与接收,其正演与反演问题的基础是电磁场理论与天线理论^[17]。井间电磁波 CT 是在 SK1 和 SK2 钻孔之间的相同或不同深度,由发射机在 SK1 钻孔中不间断地发射具有一定频率范围的电磁波信号^[18],接收机在 SK2 钻孔中接收穿过沿岩层传播的电

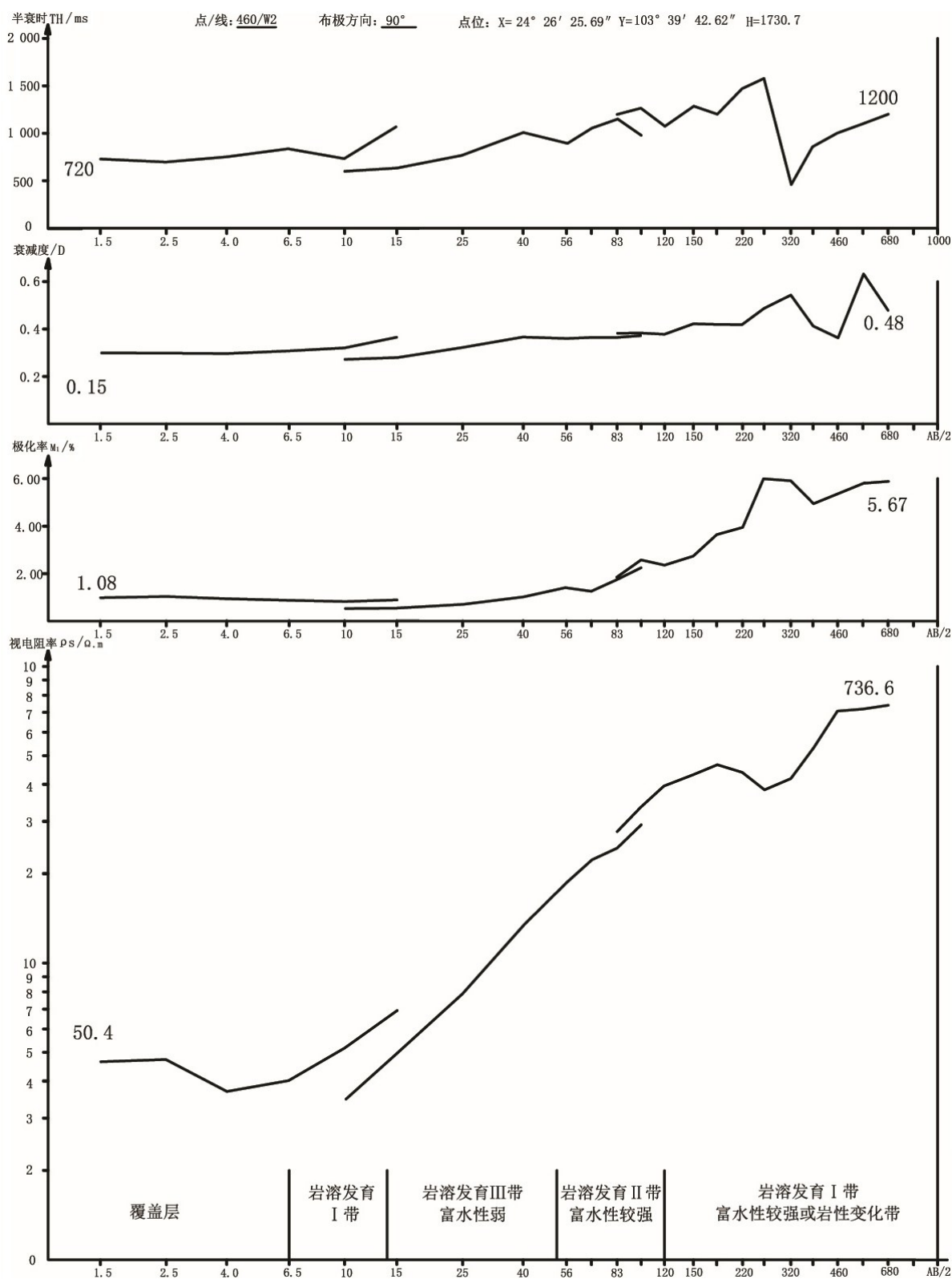


图3 460号点电测深曲线图

Fig. 3 Electrical sounding curve at site No. 460

磁波信号并将其转换成数值(图4)。当电磁波在完整灰岩等相对均匀介质中传播时,因相对均匀介质具有高电阻率和低介电常数性质,对电磁波信号的

吸收作用较弱;当电磁波信号在岩层中传播时遇到岩溶发育区或破碎带等不均匀介质时,会被大幅度吸收而出现强烈衰减^[19-22]。因此可以根据在地下空

间中不同发射角度的电磁波能量衰减值,利用 surfer 软件反演算法,得出地下介质的吸收系数空间分布,重建钻孔之间剖面的吸收系数二维图像^[23-25]。野外测量方式采用水平同步、定点发射两种观测方式,从土层与基岩接触带开始测量。水平同步测量深度范

围为 10~138 m,定点发射测量深度范围为 10~136 m,两种观测方式测试点距均为 1 m。扫描频段参数为 4~12 MHz,扫频间隔为 1 MHz,发射机每向上移动 5 m,接收机测试部位与发射机同一深度的上、下各 20 m,共 40 m 深度范围。

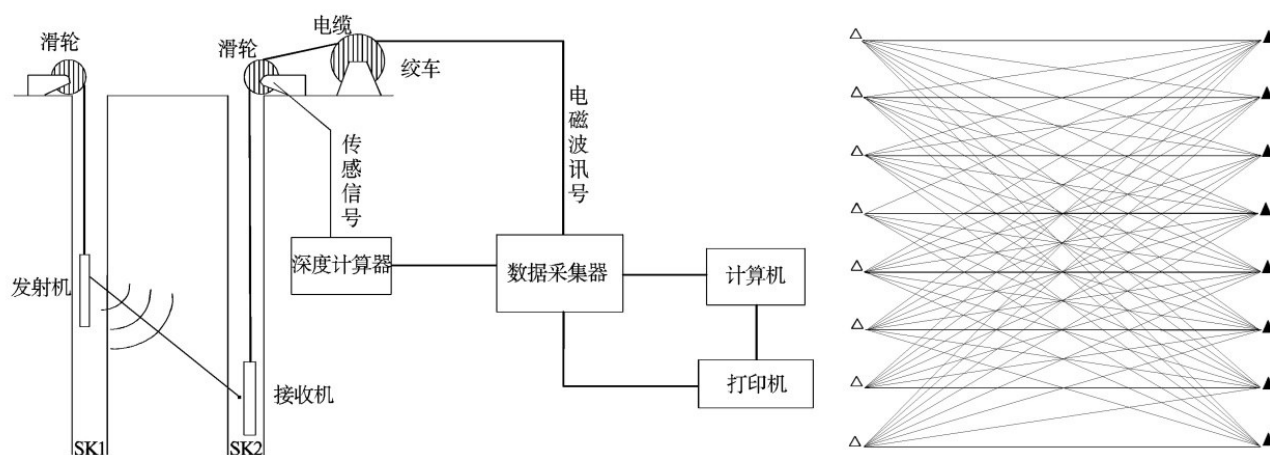


图4 电磁波CT观测系统示意图(吴华平,2012)

Fig. 4 Schematic diagram of the electromagnetic CT observation system (according to WU Huaping, 2012)

6 跨孔CT成像解译

泸西县既比村地下水勘查开发示范区成功实施的2个水文地质勘查示范孔,在两孔间距为48 m条件下实施跨孔CT成像探测,CT成像解译与钻孔揭示岩溶发育结果基本一致。根据地质构造、岩溶发育情况、钻孔编录、抽水试验及高密度、激电测深等成果资料,综合确定吸收系数,判断地下水富水性。在碳酸盐岩地层中,当电磁波吸收系数小于 $1.4 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,岩溶不发育,富水性较差,为非地下水富水地段,赋水状态差;当电磁波吸收系数在 $1.4 \sim 1.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,富水性较好,为地下水富水地段,赋水状态好;当电磁波吸收系数大于 $1.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,岩溶发育,为泥质充填,富水性较差,为非地下水富水地段,赋水状态差(图5)。

成功地利用CT探测方法,准确地圈定了地下水富水地段,找到了丰富的岩溶地下水。既比村两孔相距48 m,SK1孔深151.53 m、水位埋深10.13 m,利用CT探测,在孔深18~25 m段、52~58 m段、85~95 m段、110~115 m段、123~127 m、133~135 m段,为地下水富水地段,富水段总长34 m,其它段为泥质充填段、岩溶不发育段,与钻探结果相符,经抽水试验验证实钻

孔涌水量 $107 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。SK2孔深151.09 m,水位埋深7.3 m,在孔深20~28 m段、35~55 m段、60~100 m段、123~128 m段,为地下水富水地段,富水段总长73 m,其它段为泥质充填段、岩溶不发育段,与钻探结果相符,经抽水试验验证实钻孔涌水量 $839 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

7 结 论

(1) 通过高密度电法在平面上确定可能的低阻区。在碳酸盐岩地区,连续的低阻区一般可推测为溶蚀破碎带或断层破碎带;通过激电效应确定低阻区充填物是黏土还是地下水。富水区将在相应深度(AB/2)同步引起激电测深视电阻率(ρ_s)降低(斜率变较缓或数据的减小),半衰时(TH)、衰减度(D)、极化率(M)数据升高激电效应,可据此推测可能的富水位置及埋深条件;

(2) 研究区在平面上三条高密度电法测线显示有连续的低阻条带,地下水富集的可能性较大,故后续激电测深工作基本上围绕此条带开展。富水区表现在相应深度(AB/2)同步引起激电测深视电阻率(ρ_s)降低(斜率变较缓或数据的减小),半衰时(TH)、衰减度(D)、极化率(M)数据升高激电效应,非富水区表现为高视电阻率或非富水激电效应。在垂向上,

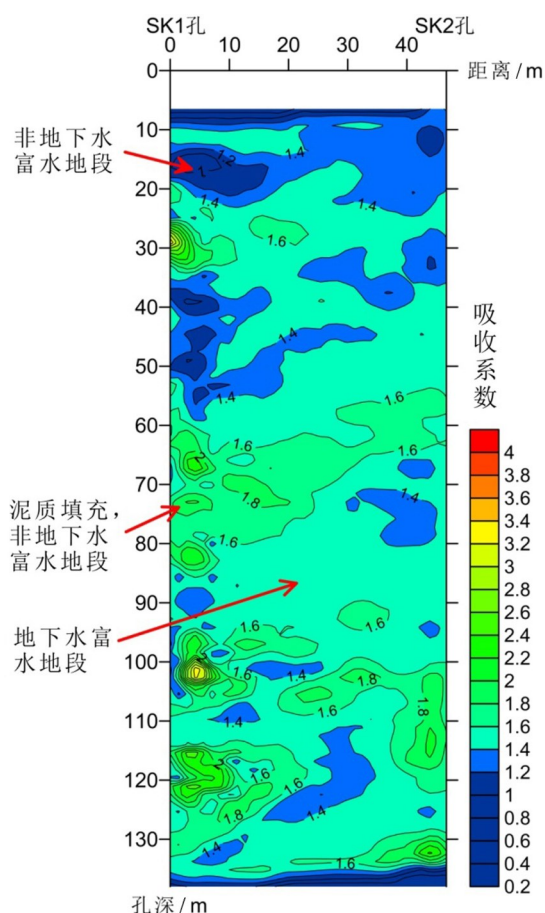


图 5 CT测量地下水富水地段判断结果图

Fig. 5 Contours of electromagnetic wave absorption coefficient showing groundwater-rich sections

岩溶发育特征受地形及断层控制, 钻探成果揭示的岩溶发育情况、地下水富水地段及厚度与电磁波CT揭示岩溶发育等情况基本一致;

(3) 利用已有的2个跨度大、深度大的钻孔, 进行井中电磁波CT数据采集, 再利用surfer软件进行反演计算, 综合判断地下水富水性。在碳酸盐岩地层中, 当电磁波吸收系数小于 $1.4 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 岩溶不发育, 富水性较差; 当电磁波吸收系数在 $1.4 \sim 1.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 富水性较好; 当电磁波吸收系数大于 $1.6 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 岩溶发育, 为泥质充填, 富水性较差。

(4) 跨孔电磁波CT方法判断岩溶发育情况及地下水富水性准确率高, 但是该探测方法必须在钻孔中实施, 故成本高。未来亟待解决的是限制跨孔电磁波CT方法应用于地下找水高成本的问题, 因此, 提升探测仪器的功率, 尽量加大跨空探测的控制间距, 达到借助较少的先导钻孔控制较大的区域, 大幅降低探测成本, 提高找水成效。

参考文献

- [1] 麦瑞浩. 单孔声波测井与跨孔CT成像在岩溶地区地质勘探中的应用[J]. 中南公路工程, 2004, 29(2): 141-144.
- [2] 吴华平. 电磁波CT探测技术在岩溶勘探中的应用[J]. 华南地震, 2012, 32(4): 59-66.
- [3] 叶福光, 黎华清, 徐远光. 电磁波透视法在大龙洞水库查漏中的应用[J]. 广西地质, 1997, 10(4): 83-85, 100.
- [4] 黎华清, 卢呈杰, 韦吉益, 等. 孔间电磁波CT探测揭示水库坝基岩溶形态特征: 以广西靖西大龙潭水库帷幕灌浆为例[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 607-610.
- [5] 梁潮, 黄鹤尤. 孔间电磁波透视及CT扫描在岩溶区地质勘察中的应用[J]. 水利规划与设计, 2010, 4: 25-27.
- [6] 黎华清, 甘伏平, 魏宇, 等. 利用孔间CT成像对喀斯特岩体结构、电站坝基渗漏与稳定性研究[J]. CT理论与应用研究, 2012, 21(4): 635-645.
- [7] 甘伏平, 李金铭, 黎华清, 等. 跨孔电磁波透视法在岩溶探测中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(4): 303-307.
- [8] 黎华清, 徐远光, 甘伏平, 等. 孔间电磁波CT法在左江电站火成岩坝基风化结构评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 430-434.
- [9] 邓争荣, 熊永红, 蔡加兴. 钻孔电磁波CT在岩溶探测中的应用[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2004, 21(4): 32-34.
- [10] 《钻孔电磁波法》编写组. 钻孔电磁波法[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [11] 杨文采. 地球物理反演和地震层析成像[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 153-161.
- [12] 高星. 地震层析成像研究的回顾与展望[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 42-44.
- [13] 黎华清, 甘伏平, 魏宇, 等. 孔间CT成像与岩溶工程基础岩体结构特征研究[A]//. 全国射线数字成像与新技术研讨会·论文集[C]. 2012, 255-258.
- [14] 王宇, 张华, 张贵, 等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
- [15] 云南省地质调查院. 云南泸西小江流域岩溶地下水调查与地质环境整治示范报告[R]. 桂林: 中国地质科学院岩溶地质研究所, 2006.
- [16] 王宇, 李燕, 谭继中, 等. 断陷盆地岩溶水赋存规律[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- [17] 左新军, 刘勇. “CT”技术在岩溶地区桩基中的应用[J]. 中外公路, 2002, 22(5): 107-109.
- [18] 欧阳立胜. 电磁波CT探测技术在长安初级中学教学楼场地熔岩探测中的应用[J]. 华北地震科学, 2002, 30(3): 40-44.
- [19] 罗传华, 昌彦君, 陶喜林, 等. 井间电磁波技术在居民区地下洞穴调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(1): 78-83.
- [20] 苟天红, 陆永坤. 孔间电磁波CT测试在岩溶区工程地质勘察中的应用[A]//贵州省岩石力学与工程学会2014年学术年会论文集[C]. 2014.
- [21] 朱亚军, 龙昌东, 杨道煌. 井间电磁波CT技术在地下孤石探

- 测中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(6):721-725.
- [22] 郭印,彭涛,李天祺,等.井间电磁波CT技术在建筑基底溶洞探测中的应用[J].工程勘察,2009,37(8):92-95.
- [23] 李杨.电磁波CT技术在场地岩溶勘察中的应用[J].福建建筑,2015(6):94-96.
- [24] 胡富彭,吴茂林,许殿博,等.利用电磁波CT技术进行岩溶区透视成像[J].CT理论与应用研究,2018,27(2):205-212.
- [25] 温一波,王赟赟,胡家富,等.跨孔CT法中采集数据精度对成像效果影响[J].云南大学学报(自然科学版),2000(S1):49-53,64.

Experimental study on the detection of karst pores by cross-hole CT imaging and groundwater occurrence in the Luxi karst fault-depression basin

ZHANG Hua¹, ZHANG Gui¹, WANG Yu², FANG Yonglin³, DAI Xusheng¹, WANG Bo¹,
HE Raosheng¹, LUO Weiqun⁴, LAN Funing⁴

(1. Yunnan Institute of Geological Environmental Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China; 3. Yunnan Institute of Geological Engineering Survey and Design, Kunming, Yunnan 650041, China; 4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Around the Jibi village southwest of the Luxi fault-depression basin, carbonate is widely distributed with well developed highly uneven karst. The surface is dominated by dissolution cracks and gullies with numerous mosore and some karst wells, one of which exposes as a big spring at the Jibi village. This work built on an 1:10,000 hydrogeology survey. Using the high-density electrical method section, rapid scanning, combined with the IP sounding, locations of two boreholes to be drilled were determined, where the demonstration holes SK1 and SK2, 48 m apart, were drilled. Then cross-hole CT imaging was conducted to detect the underground karst development and groundwater occurrence state. The results show that the cross-hole CT results are largely consistent with drilling interpretation, permitting to reveal the underground karst and groundwater occurrence. While the conventional geophysical methods can only speculate the geology in vertical direction, not clarifying horizontal fracture zones and karst caves. Combination of cross-hole electromagnetic and drilling can just can make up this deficiency. In carbonate formation, according to attenuation values of electromagnetic wave energy from different emission angles in the underground space, this approach allows to use inversion algorithms to calculate the absorption coefficients of underground media, reconstruct 2D images of the absorption coefficients in profiles between boreholes, and infer the occurrence of karst and groundwater in the subsurface. The detection results of cross-hole electromagnetic CT in the Luxi karst fault-depression basin show that this method is feasible and effective, and provides support for better arrangement of boreholes.

Key words karst fault-depression basin, Luxi, cross-hole CT imaging, groundwater occurrence

(编辑 张玲)