

代方园, 高扬, 宿庆伟, 等. 瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶分布及形态特征的应用: 以山东省济南地区为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 308-317, 328.

DOI: 10.11932/karst20220210

瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶 分布及形态特征的应用 ——以山东省济南地区为例

代方园^{1,2}, 高扬^{1,2}, 宿庆伟^{1,2}, 胡韬^{1,2}, 耿付强^{1,2}, 董亚楠³

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队(山东省地矿工程勘察院), 山东 济南 250014; 2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014; 3. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 文章以山东省济南西南裸露—覆盖型岩溶山区为研究对象, 根据钻探资料, 将区内岩溶发育形态分为小型溶洞与溶孔, 并利用瞬变电磁法、电磁波 CT 成像两种物探方法, 探讨岩溶分布、形态特征与地球物理场的关系。对比瞬变电磁剖面与钻探揭露的岩溶发育段, 确定出 $120\ \Omega\cdot\text{m}$ 作为解释岩溶发育区的分界值, 以此圈定岩溶分布区域, 之后实施钻孔进行验证, 符合性较好; 在验证孔及附近钻孔进行电磁波 CT 成像探测, 进一步验证并刻画两孔间的岩溶发育特征。两种物探方法中, 电磁波 CT 的探测数据离散程度较高; 两种岩溶发育形态中, 小型溶洞的地球物理参数离散程度较大, 同时小型溶洞发育区视电阻率平均值较小, 视吸收系数平均值较大。

关键词: 济南; 岩溶探测; 形态特征; 瞬变电磁; 电磁波 CT

中图分类号: P642.25; P631 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)02-0308-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

自然状况下, 碳酸盐岩岩体为非均匀介质, 成岩矿物本身具有多样性, 空间分布极不均匀, 岩体内部同时还存在形状、方向、尺寸不一的溶孔、溶洞、溶蚀裂隙等, 由此形成独特的地质结构, 在三维空间中呈现复杂的网格状, 在横向和纵向上均具有非均匀各向异性。因此, 研究岩溶区岩体结构, 分析岩溶分布和形态特征有着重要意义^[1-4]。

岩溶形态在工程上属于不良地质, 溶洞的存在

会影响基础承载力、建(构)筑物稳定性、抗浮水位取值、油气储集、泉水喷涌等。溶洞发育状态, 会影响水文地质条件, 进而影响施工处理方法的选择。水文地质条件不清晰, 处理方法选择不当, 往往会导致工程及水文地质问题, 比如沉降较大、底板及隧道突水、水库渗漏、油藏储量估计误差较大等^[5-8]。

岩溶水是岩溶发育的动力条件之一, 岩溶发育是岩溶水存在的空间基础。岩溶发育形态多样, 因此, 岩溶水赋存状态也比较复杂^[9]。岩溶水在宏观上

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QD084); 山东省交通运输科技计划(2021B06)

第一作者简介: 代方园(1989—), 男, 工程师, 一级建造师, 主要从事物探及水文勘察工作。E-mail: 596677856@qq.com。

通信作者: 宿庆伟(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作。E-mail: xdcsl214@126.com。

收稿日期: 2021-05-14

呈层状,微观上其形态更近于网状结构,岩溶水含水层近于网状流,而非层状流。济南地区同一地质单元相距不远的水井,岩溶水水量、水位往往有一定差异,这符合网状流特征。

岩溶探测较常用的物探方法有高密度电法、瞬变电磁法、电磁波 CT 成像、浅层地震、地质雷达法等^[10-16]。溶洞内部与围岩介质的物性参数差异明显^[17-20],本文所述的物探方法是以电性参数差异为基础的瞬变电磁法及电磁波 CT 成像。

瞬变电磁法以不接地回线进行探测,对地面无破坏;在高阻围岩区,无地形引起的假异常;线圈点位及接发距要求相对其他物探方法较宽松,测量工作简单;有穿透低阻覆盖的能力,探测深度大。电磁波 CT 成像具有分辨率高、受外界干扰小、不受地形限制等优点。二者都是解决岩溶发育区探测、含水层富水区识别等问题的理想手段^[10]。

本文将瞬变电磁法与钻探结果对比,统计分析济南岩溶发育区视电阻率值的分布范围、平均值及特征值,圈定岩溶分布范围,再采用电磁波 CT 成像对岩溶分布及发育形态进行精细划分,并使用统计分析方法,计算出岩溶发育区视电阻率与视吸收系数的离散系数及特征值,以期分析溶洞发育程度及形态特征提供另一种解决问题的方法和途径。

1 研究区概况

济南地区岩溶广泛分布,与中国南方地区大尺寸岩溶相比,济南地区岩溶发育尺寸相对较小^[21-22]。同时,由于济南属于亚干旱岩溶区,降水较少,缺少地表径流经常性侵蚀和溶蚀,地表岩溶不甚发育,地下岩溶相对较发育。

济南地处华北地台,在奥陶纪至石炭纪期间,整个地台一直处于上升阶段,并遭受剥蚀,地层出现沉积间断。当时气候温暖湿润,奥陶纪碳酸盐岩形成了面积较广的溶蚀发育带,而后期的构造运动将该地层进行了切割、搬移、扭转,由此形成不同深度的岩溶层^[6,13]。

济南碳酸盐岩主要有鲕状灰岩、泥晶灰岩、白云岩。在形成过程中,各碳酸盐岩的结构、构造、化学成分、矿物成分、地质环境等有所差异,岩溶层的分布及形态特征也不尽相同。就济南地区而言,岩溶最为发育的地层是寒武系张夏组,奥陶系亮甲山组、马家沟组、八陡组;岩溶最为发育的岩性是鲕状灰岩;岩溶发育状态也因岩性而异,鲕状灰岩极易发育成溶孔—溶隙网状系统,泥晶灰岩则以簇状溶隙为主,白云岩以溶孔为主。

研究区属于济南市南部山区,位于二环南路与英雄山路东南区域(图 1),属低山丘陵地貌,东、西、南三面环山,地形整体南高北低,相对高差约 20 m。

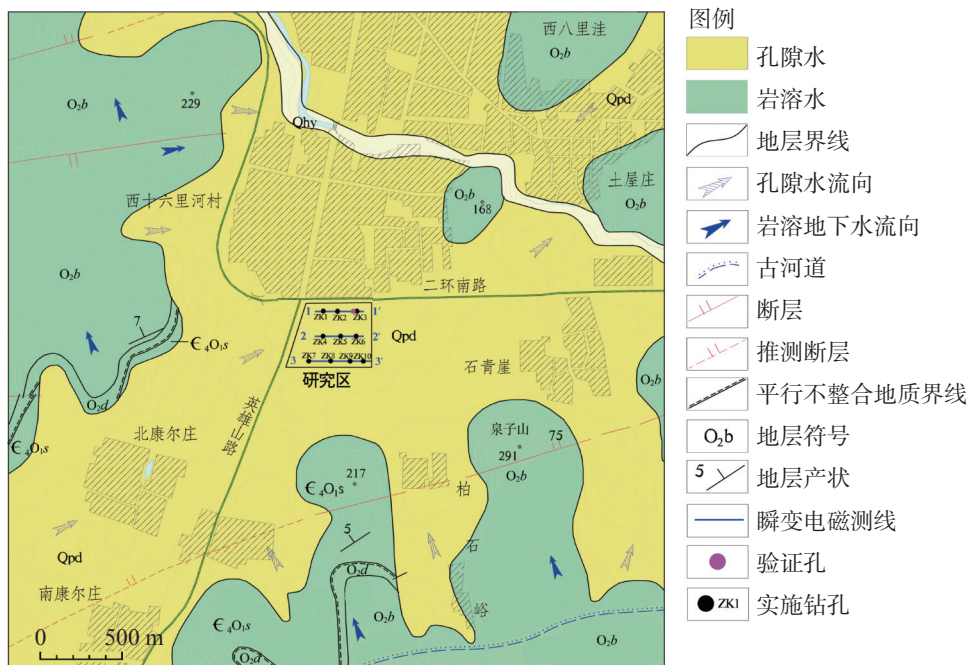


图 1 研究区水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

研究区为裸露—覆盖型岩溶山区,出露地层由老至新依次为古生界寒武系三山子组(C_4O_1s)、奥陶系马家沟群东黄山组(O_2d)、北庵庄组(O_2b)与第四系沂河组(Q_{hy})、大站组(Q_{pd}),古生界地层主要由碳酸盐岩类组成,总体为一北倾单斜构造,倾角 $1^\circ\sim 7.5^\circ$ 不等,呈条带状 EW 向展布,第四系在山前、沟谷地带广泛分布,岩性主要为黏土、粉质黏土、碎石等,厚度 10~15 m。

研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 14.2°C ,年平均蒸发量为 2 263.0 mm,多年平均降雨量为 680 mm,一年之中降水主要集中在 7、8、9 月份,多以暴雨形式降落,三个月的降雨量约占全年降雨量的 70%。区内属于小清河流域,附近河流有柏石峪东沟和柏石峪西沟。柏石峪东沟、西沟河床坡降大,汇水面积有限,长期处于断流状态。在雨季,局部强渗漏河段对研究区浅层地下水具有很好的补给作用。

1.1 岩溶发育特征

本次研究深度 50 m,该范围内,碳酸盐岩地层为寒武系—奥陶系九龙群三山子组,岩性以厚层—中厚层细晶白云岩、角砾白云岩、竹叶状白云岩为主,局部可见燧石结核或燧石条带。三山子组的顶部为角砾状白云岩,岩溶较为发育,底部为中厚层细晶白云岩和竹叶状白云岩,该组在区域上厚度范围是 90~140 m,本研究深度内未揭穿该层。

研究区地表岩溶发育程度一般,主要以层间裂隙为主(图 2)。山体植被发育,地表水、浅层地下水排泄条件较好,但汇水面积较小,地下水径流途经段地形坡度较大,因此地表没有发现一定规模的溶洞、溶沟。区内地下浅层岩溶较为发育。钻探成果显示,埋深 10~40 m 的浅层碳酸盐岩段岩芯普遍较为破碎,



图 2 地表岩溶发育状态

Fig. 2 Surface karst development

局部发育小规模溶洞。图 3 为区内基坑深度 18.5 m 处发育小规模溶洞,溶洞内可见黏性土充填。



图 3 地下浅层岩溶发育状态(埋深 18.5 m)

Fig. 3 Development of underground shallow karst (buried depth at 18.5 m)

1.2 地下水赋存特性

研究区地下水的储存条件及分布规律,受地层、地貌、构造及水文气象等自然条件控制,本次根据含水层的岩性、分布、埋藏深度,将区内的含水层分为孔隙水和岩溶水,相应的地下水类型有松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水两种类型(表 1)。

表 1 地下水类型及富水性分级表

Table 1 Classification of groundwater and grading of water abundance

地下水类型	含水层代号	含水层岩性	富水性/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$
松散岩类孔隙水	Q_4	碎石、粉质黏土、黏土	<500
碳酸盐岩类裂隙岩溶水	C_4O_1s	白云岩	1000~5000

区内孔隙水含水层岩性为碎石、黏土和粉质黏土,埋深 10~15 m,地下水水力性质为潜水,含水层组底界面基本以下伏碳酸盐岩强风化带底界为下限。区内地形坡度较大,枯丰期富水性差别明显,研究期间未见孔隙水地下水位。孔隙水以季节性上层滞水为主,没有固定水位,长期处于疏干状态,单井涌水量均小于 $2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;在丰水季节,孔隙水含水层接受大气降水补给,地下水位抬升,富水性有所改善。孔隙水水位年波动幅度为 8~12 m,在大气降水较为集中的 7-8 月份,孔隙水水位升—降趋势变化明显,水位波幅约 3 m(图 4)。

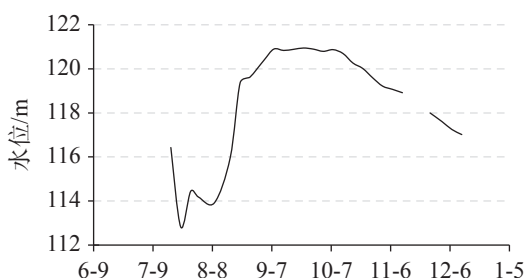


图4 孔隙地下水动态特征

Fig. 4 Dynamic characteristics of pore groundwater

区内岩溶水含水层的岩性为白云岩,埋深在10~15 m以下,含水层对应于寒武系—奥陶系三山子组灰岩,岩溶较为发育。该含水层之下为巨厚炒米店灰岩地层,岩溶发育程度较弱。岩溶水在不同位置含水层富水性差别明显,其中碳酸盐岩裸露的山体区抽水试验结果显示该处涌水量小于 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,而在第四系覆盖的山前区抽水试验结果显示,在降深约25 m时单井涌水量为 $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。岩溶地下水位在区内不同位置随大气降水的波动差别也较为明显,进入雨季(7-8月)以来,岩溶水地下水位基本上呈现持续抬升的趋势(图5),不同位置岩溶水受大气降水滞后性的影响存在明显差异,岩溶地下水变幅约20 m(研究期间岩溶水地下水位埋深10~20 m)。

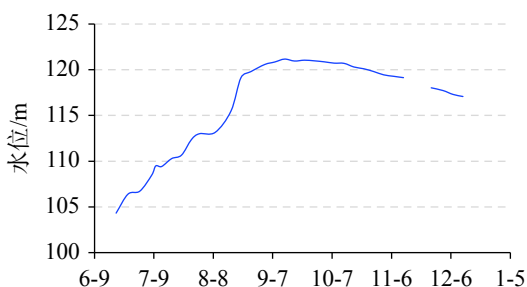


图5 岩溶地下水动态特征

Fig. 5 Dynamic characteristics of karst groundwater

2 研究方法

瞬变电磁法是将不接地回线接通电流,利用回线向工作面发射一次脉冲磁场(一次场),然后切断电流;当发射回线中电流突然断开后,为了维持电流切断之前的磁场(一次场),介质中将激励起二次涡流场。二次涡流场数值大小及衰减特性与介质的电性参数有关。通过测量二次场随时间的变化,处理后可得到工作面之下的视电阻率分布。电磁波CT

成像是通过布置在一个钻孔内的发射天线发送电磁波,另一个钻孔接收天线收集电磁波^[12]。电磁波在两孔之间传播形成电磁场,不同介质会产生不同的电磁反应,电磁波的吸收、衰减与地下介质的物性关系密切。通过测量电磁场变化,进行数据处理后,就可得到介质中电磁波吸收系数的空间分布。

视电阻率及吸收系数的大小与介质的物性、产状等参数相关,据此可推断目标体的几何尺寸、岩性等参数。

本次在研究区内沿东西向布设了3条瞬变电磁法测线(图1),线距相等,为150 m。测线编号分别为1-1'、2-2'和3-3',测线长度分别为300 m、300 m、400 m,共计1000 m;在每条测线上施工钻孔3~4个,共计11个钻孔,包含验证孔1个,孔间距80~120 m,钻孔深度均为50 m,总进尺550 m。选取验证孔及附近钻孔ZK3进行电磁波CT探测。

瞬变电磁法采用中心回线装置,多匝小回线发射,探头接收,点测方式,点距为5 m;电磁波CT定发点距为1.0 m,测点距为1.0 m,选择长度为1.5 m的发射和接收天线,对6、8、10、12四频段进行数据采集。

3 结果与分析

处理及反演分析瞬变电磁数据,绘制出3条测线的视电阻率等值线图,并结合钻探资料,将钻孔位置、揭露岩溶埋深、岩溶充填情况补充到等值线图上,由此得到物探及钻探的综合成果图(图6),并将钻探揭露的岩溶发育形态与物探的视电阻率值进行分析,得到物性参数统计表(表2,表3)。

纵观3条测线视电阻率剖面,可看到整体呈现“红+绿”二元结构。浅部以红色为主,视电阻率值较高,深部颜色以绿色为主,视电阻率值相对较低,深部局部可见蓝色区域,视电阻率值最低。整体来看,与研究区“第四系+白云岩”的二元地层结构较为一致,局部蓝色区域反映了白云岩中的溶蚀发育。由于研究期间孔隙地下水位埋藏较深,第四系基本处于无水状态,而下伏白云岩富含大量岩溶水,因此,第四系地层对应视电阻率值比下伏白云岩高;同时,由于岩溶发育不均匀,因此,蓝色区域分布也不均匀。

岩溶水的溶蚀冲刷引起岩体物理形态及化学性

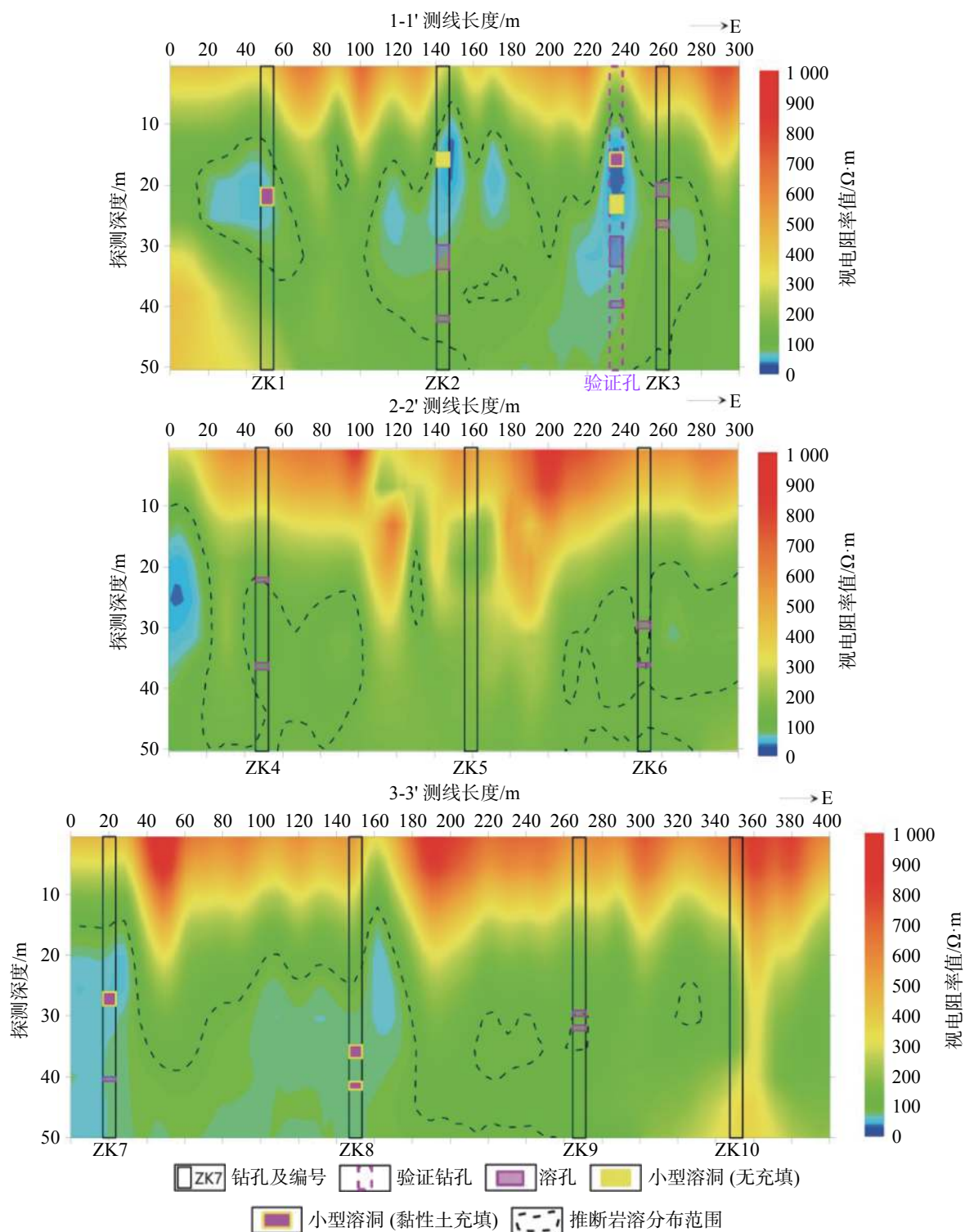


图6 钻探及瞬变电磁综合剖面图

Fig. 6 Comprehensive section of drilling and TEM

质的变化,由于岩体内物性、结构等分布不均匀,岩溶发育区物性参数呈现各向异性^[23-25]。根据钻探资料及物性参数统计表(表2),研究区内岩溶发育形态有两种:小型溶洞(孔径大于20 cm,进尺较快,采取率低)、溶孔(孔径均小于20 cm,进尺正常,采取率较

高),充填状态基本为黏性土充填。小型溶洞视电阻率值范围在39.6~78.4 $\Omega \cdot m$,平均值为67.5 $\Omega \cdot m$,特征值为72.3 $\Omega \cdot m$,离散系数为43.75%,说明视电阻率值比较分散;溶孔视电阻率值范围在68.8~139.2 $\Omega \cdot m$,变化较大,平均值为109.4 $\Omega \cdot m$,特征值为

表 2 不同钻孔揭露岩溶发育段物性参数统计表

Table 2 Statistics of physical parameters of karst development section exposed by different drilling holes

孔号	钻探揭露岩溶埋深/m	视电阻率值/ $\Omega \cdot \text{m}$ 范围值/平均值	岩溶发育形态	溶洞填充状态
ZK1	20.3~23.2	55.6~70.3/59.8	小型溶洞	黏性土
ZK2	14.4~16.9	39.6~71.9/60.8	小型溶洞	无充填
	29.7~33.7	73.0~86.3/77.5	溶孔	黏性土
	41.4~42.5	96.2~98.2/96.9	溶孔	黏性土
ZK3	19.6~21.8	90.7~100.6/96.4	溶孔	黏性土
	25.8~27.0	80.1~84.8/81.9	溶孔	黏性土
ZK4	21.7~22.6	115.1~120/117.7	溶孔	黏性土
	35.7~37.0	113.0~117.5/115.7	溶孔	黏性土
ZK5	/	/	/	/
ZK6	28.9~30.1	118.0~139.2/123.5	溶孔	黏性土
	35.7~36.5	124.6~129.8/127.4	溶孔	黏性土
ZK7	25.9~28.1	58.7~63.9/59.4	小型溶洞	黏性土
	40.1~40.7	68.8~73.2/70.4	溶孔	黏性土
ZK8	34.7~36.6	74.8~77.8/75.3	小型溶洞	黏性土
	40.6~41.8	75.4~78.4/77.7	小型溶洞	黏性土
ZK9	28.9~29.8	103.4~110.7/105.6	溶孔	黏性土
	31.4~32.5	100.4~105.6/103.4	溶孔	黏性土
ZK10	/	/	/	/

表 3 岩溶发育形态对应视电阻率统计表

Table 3 Statistics of apparent resistivity corresponding to different forms of karst development

岩溶发育形态	视电阻率值范围/ $\Omega \cdot \text{m}$	视电阻率值平均值/ $\Omega \cdot \text{m}$	离散系数	特征值/ $\Omega \cdot \text{m}$
小型溶洞	39.6~78.4	67.5	43.75%	72.3
溶孔	68.8~139.2	109.4	30.84%	113.9

113.9 $\Omega \cdot \text{m}$, 均大于小型溶洞, 离散系数为 30.84%, 小于小型溶洞, 这说明溶孔发育区视电阻率值相对较大, 且比较集中。在剖面图中这一特征较为明显, 小型溶洞发育区颜色变化较大, 溶孔发育区颜色变化相对均匀。

岩溶水沿着岩体内部构造径流, 对其表面岩体产生溶蚀冲刷作用, 一般构造越发育的地方, 岩溶越发育, 在地球物理场中的表现越明显^[26-31]。溶孔发育区一般比溶洞区发育时间短, 对碳酸盐岩体改变程度相对较小, 同时, 溶孔尺寸较小, 溶孔发育区孔洞所占比例相对较小, 因此视电阻率平均值及特征值均较大; 与稍大尺寸的溶洞相比, 溶孔发育区相对更加均匀, 物性参数更为集中, 离散程度较低, 离散系数数值较小。

在溶洞相同条件下, 水与黏土结合形成的结构导电性更好, 因此, 无充填溶洞(充水时)电阻率一般要高于黏性土充填溶洞的电阻率。ZK2 钻孔在 14.4~16.9 m 深度区间岩溶发育形态为小型溶洞, 无

充填, 视电阻率平均值为 60.8 $\Omega \cdot \text{m}$, 最大值为 71.9 $\Omega \cdot \text{m}$, 对应的 ZK1 钻孔在 20.3~23.2 m 深度范围为小型溶洞, 黏性土充填, 视电阻率平均值为 59.8 $\Omega \cdot \text{m}$, 最大值为 70.3 $\Omega \cdot \text{m}$ 。与黏性土充填相比, 无充填溶洞视电阻率的平均值与最大值均较大。

分析以上数据, ZK6 号钻孔视电阻率值与平均值偏差较大, 其余钻孔揭露的岩溶发育区域视电阻率值均小于 120 $\Omega \cdot \text{m}$, 因此, 从整体考虑, 将 120 $\Omega \cdot \text{m}$ 作为岩溶发育区的临界值, 小于此值的区域推断为岩溶发育区, 即如图 6 中虚线所绘范围。由图 6 可知, 该范围与钻探揭露岩溶发育段对应较好, 与验证孔对应也较为一致。为进一步刻画岩溶发育形态, 在验证孔与 ZK3 钻孔中进行跨孔电磁波 CT 成像。

4 钻探实施验证

在 1-1'测线的 238 m 处实施 1 眼钻孔(图 7), 用来验证上述推断成果, 钻探结果如下: 16.0~17.7 m 为

小型溶洞,黏性土充填;21.4~23.8 m 为小型溶洞,无充填;26.8~30.7 m 为溶孔发育,黏性土充填;35.1~35.9 m 为溶孔发育,黏性土充填。

由综合剖面图(图 8)可知,钻探揭露岩溶发育区域与电磁波 CT 成像对应较好,在岩溶发育区域,视吸收系数相对较大。根据表 4、表 5 统计结果,钻探揭露的岩溶发育区域视吸收系数值最小为 1.8,最大值为 7.6;以不同岩溶发育形态划分,小型溶洞视吸收系数范围为 4.1~7.6,平均值为 5.1,溶孔视吸收系数范围为 1.8~4.2,平均值为 2.9,相对较小。二者离散系数也不尽相同,溶孔发育区视吸收系数的离散系数相对较小,在视电阻率值中,溶孔发育区的离散

系数也较小。与围岩相比,水和黏性土对电磁波吸收程度较强;小型溶洞发育区无充填时溶洞内介质为水,充填时溶洞内介质为黏性土,与溶孔相比,小型溶洞孔隙率较大,水或黏性土占比相对较大,对电磁波强烈吸收。因此,小型溶洞视吸收系数大于溶孔发育区的视吸收系数。

小型溶洞中,填充物对视吸收系数影响不明显。黏性土充填时,视吸收系数平均值为 5.4,无充填时,



图 7 验证孔岩心照片

a.小型溶洞(16.0~17.7 m,黏性土充填) b.小型溶洞(21.4~23.8 m,无充填)
c.溶孔(26.8~30.7 m) d.溶孔(35.1~35.9 m)

Fig. 7 Photos of the core in verification pore

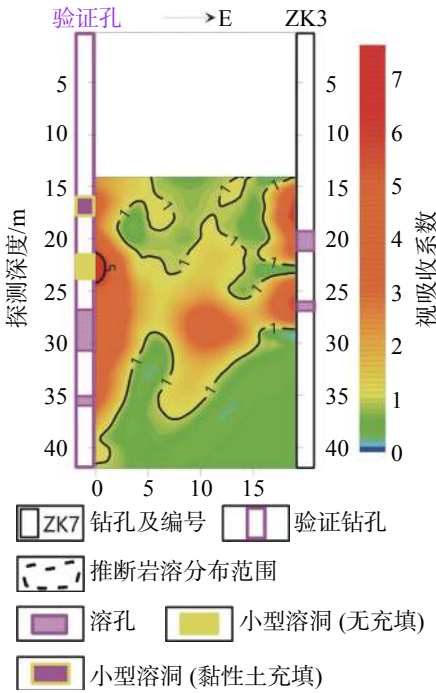


图 8 钻探及电磁波 CT 成像综合剖面图

Fig. 8 Comprehensive section of drilling and CT imaging of electromagnetic wave

表 4 不同钻孔岩溶发育段物性参数统计表

Table 4 Statistics of physical parameters of karst development section in different boreholes

孔号	钻探揭露岩溶埋深/m	视吸收系数范围值/平均值	岩溶发育形态	溶洞填充状态
验证孔	16.0~17.7	4.1~5.9/5.4	小型溶洞	黏性土
	21.4~23.8	5.4~7.6/6.1	小型溶洞	无充填
	26.8~30.7	3.3~4.2/3.6	溶孔	黏性土
	35.1~35.9	2.6~3.6/3.1	溶孔	黏性土
ZK3	19.6~21.8	1.8~3.7/2.1	溶孔	黏性土
	25.8~27.0	3.1~3.8/3.4	溶孔	黏性土

表 5 岩溶发育形态对应视吸收系数统计表

Table 5 Statistics of apparent absorption coefficient corresponding to different forms of karst development

岩溶发育形态	视吸收系数范围	视吸收系数平均值	离散系数	特征值
小型溶洞	4.1~7.6	5.1	56.06%	5.85
溶孔	1.8~4.2	2.9	43.65%	3.13

视吸收系数平均值为6.1, 两者相差0.7, 变幅不大。

5 结 论

(1) 碳酸盐岩区, 岩体物性参数分布、大小及离散程度, 可作为分析岩溶发育及形态特征的重要依据。地球物理探测参数因岩溶发育的形态特征而异。本研究两种物探方法的成果数据, 离散程度表现一致, 小型溶洞数据的离散程度均较大, 小型溶洞的离散系数分别为43.75%、56.06%, 均大于溶孔发育区的30.84%、43.65%, 但数据平均值及特征值的表现不相同: 在瞬变电磁法中, 小型溶洞发育区视电阻率平均值为 $67.5 \Omega \cdot \text{m}$ 、特征值为 $72.3 \Omega \cdot \text{m}$, 均小于溶孔发育区的平均值 $109.4 \Omega \cdot \text{m}$ 、特征值 $113.9 \Omega \cdot \text{m}$; 在电磁波CT成像中, 小型溶洞发育区视吸收系数平均值为5.1, 特征值为5.85, 均大于溶孔发育区的平均值2.9、特征值3.13;

(2) 不同岩溶发育形态的地球物理场, 理论上应有所差异, 限于仪器分辨率、外界环境干扰、处理方法精度等, 差异表现并不完美。瞬变电磁的解释主要基于视电阻率空间分布。地下岩溶发育和富水情况主要通过低阻区的分布情况来判断(本次选择 $120 \Omega \cdot \text{m}$ 为临界值)。瞬变电磁探测存在体积效应, 分辨率有限, 导致10 m以下呈现大片低阻区, 虽然这些区域内实际情况也存在较好的岩体, 但这些低阻区里不排除发育有裂隙、溶蚀或小型溶洞。整体来看, 通过钻探与瞬变电磁资料对比分析后, 在碳酸盐岩地区, 连续的低阻区推断为岩溶发育区是可行的。

参考文献

- [1] 张华, 张贵, 王宇, 方永林, 代旭升, 王波, 何绕生, 罗为群, 蓝美宁. 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.
ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Yu, FANG Yonglin, DAI Xusheng, WANG Bo, HE Raosheng, LUO Weiqun, LAN Funing. Experimental study on the detection of karst pores by cross-hole CT imaging and groundwater occurrence in the Luxi karst fault-depression basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 737-744.
- [2] 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.
- [3] 胡富彭, 欧元超, 付茂如. 不同充填介质下的溶洞跨孔电阻率CT探查数值模拟[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 766-773.
HU Fupeng, OU Yuanchao, FU Maoru. Study on numerical simulation of karst cross-hole resistivity CT exploration at cave with different filling media[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 766-773.
- [4] 汤克轩, 赵楠. 可溶岩地层的地球物理特征及其地质解译[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 578-583.
TANG Kexuan, ZHAO Nan. Geophysical characteristics and geological interpretation of karst strata[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 578-583.
- [5] 高宗军, 王敏, 成世才, 钱丽丽. 岩溶地面塌陷的水—岩耦合模型[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2009, 34(3): 6-11, 23.
GAO Zongjun, WANG Min, CHENG Shicai, QIAN Lili. Water-Rock Coupled Forecasting Model of Karst Collapse[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology), 2009, 34(3): 6-11, 23.
- [6] 艾合买提江·阿不都热和曼, 钟建华, 李阳, 钟富平, 高玉飞. 碳酸盐岩裂缝与岩溶作用研究[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 485-493, 578.
AIHEMAITIJIANG abudurehman, ZHONG Jianhua, LI Yang, ZHONG Fuping, GAO Yufei. Study on effect between karstification and fracture in carbonate rocks[J]. Geological Review, 2008, 54(4): 485-493, 578.
- [7] 胡政, 田茂中, 陈再谦, 王平易, 汪东. 不同岩溶形态场地抗浮水位取值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1322-1330.
HU Zheng, TIAN Maozhong, CHEN Zaiqian, WANG Pingyi, WANG Dong. Study on Valuing of Anti-floating Water Level in Different Karst Forms Site[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1322-1330.
- [8] 杨丽芝, 韩晔, 佟照辉, 刘春华, 尚浩. 重大工程建设对济南泉水的影响研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(5): 42-48.
YANG Lizhi, HAN Ye, TONG Zhaozhui, LIU Chunhua, SHANG Hao. Research of the impact of major construction projects to Jinan spring[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(5): 42-48.
- [9] 王强, 牟慧蓉, 刘太福. 北京西山奥陶系岩溶发育特征及成因初探[J]. 北京地质, 1998(3): 2-10.
WANG Qiang, MU Huirong, LIU Taifu. A primary study on the genesis and features of karst from Ordovician system in the Xishan hill of Beijing[J]. Beijing Geology, 1998(3): 2-10.
- [10] 李术才, 苏茂鑫, 薛翊国, 张文俊, 邱道宏, 林春金. 城市地铁跨孔电阻率CT超前地质预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 913-920.
LI Shucai, SU Maoxin, XUE Yiguo, ZHANG Wenjun, QIU Dao-hong, LIN Chunjin. Study on computed tomography of cross-hole resistivity in urban subway geological prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 913-920.
- [11] 李术才, 刘征宇, 刘斌, 许新冀, 王传武, 聂利超, 孙怀凤, 宋杰, 王世睿. 基于跨孔电阻率CT的地铁盾构区间孤石探测方法及

- 物理模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(3): 446-457.
- LI Shucui, LIU Zhengyu, LIU Bin, XU Xinji, WANG Chuanwu, NIE Lichao, SUN Huaifeng, SONG Jie, WANG Shirui. Boulder detection method for metro shield zones based on cross-hole resistivity tomography and its physical model tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(3): 446-457.
- [12] 周黎明, 陈志学, 周华敏, 付代光. 堤防隐患瞬变电磁三维正演模拟及分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(10): 146-150, 156.
- ZHOU Liming, ZHEN Zhixue, ZHOU Huamin, FU Daiguang. Three-dimensional Forward Modeling and Analysis of Transient Electromagnetic for Detecting Embankment's Hidden Danger[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(10): 146-150, 156.
- [13] 孟奇猛. 岩溶场地勘察电测深资料的解释与应用[J]. *工程勘察*, 1998(2): 73-76.
- MENG Qimeng. Interpretation and Application of Electrical Sounding Material in Karstic Site Investigation[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 1998(2): 73-76.
- [14] 王军, 赵虎, 邬凯. 钻孔式三维激光扫描仪在岩溶空穴形态测量中的应用[J]. *勘察科学技术*, 2018(4): 56-58.
- WANG Jun, ZHAO Hu, WU Kai. Application of Borehole Three-dimensional Laser Scanner in Morphometry of Karst Cavitation[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2018(4): 56-58.
- [15] 李祖能. 基于Voxler平台地震波CT岩溶探测三维建模研究[J]. *土工基础*, 2018, 32(1): 88-92.
- LI Zuneng. 3D Modeling of the Seismic Wave CT Karst Rock Characteristics Using Voxler Platform[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2018, 32(1): 88-92.
- [16] 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): 920-927.
- ZHENG Zhijie, CHEN Yixiang, GAN Fuping. Brief analysis of the geophysical properties of rock and soil in karst area-taking Geely karst collapse area as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(2): 920-927.
- [17] 袁道先. 新形势下我国岩溶研究面临的机遇和挑战[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(4): 329-331.
- YUAN Daoxian. Challenges and opportunities for karst research of our country under the new situation[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(4): 329-331.
- [18] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 363-380.
- LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 363-380.
- [19] 冯亚伟. 山东省岩溶塌陷分布规律及成因机制[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 205-214.
- FENG Yawei. Distribution and genesis of karst collapse in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 205-214.
- [20] 陈贻祥, 邬健强, 黄奇波, 甘伏平, 韩凯, 魏巍, 郑智杰. 水中自然电场法探测病态水库岩溶渗漏通道: 以金鸡河水库一级水电站为例[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 883-891.
- CHEN Yixiang, WU Jianqiang, HUANG Qibo, GAN Fuping, HAN Kai, WEI Wei, ZHENG Zhijie. Detection of karst leakage passages in sick reservoirs by the self-potential method on the water: An example of the first-class hydropower station on the Jinjihe reservoir[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(6): 883-891.
- [21] 李玉辉. 中国云南石林岩溶形态类型与特征[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(3): 165-172.
- LI Yuhui. Morphological types and their features of Shilin karst in Yunnan, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(3): 165-172.
- [22] 陈鸿汉, 朱远峰, 邹胜章. 中国北方岩溶区含水岩溶裂隙介质的序列指示模拟研究[J]. *地球科学*, 2002, 27(2): 168-172.
- CHEN Honghan, ZHU Yuanfeng, ZOU Shengzhang. Aligned Indicator Conditional Simulation of Probability of Karst-Fissure Media in Karst Area of Northern China[J]. *Earth Science*, 2002, 27(2): 168-172.
- [23] 潘凯, 谢春庆, 程瑞驭, 徐腾辉. 山区机场场地下岩溶综合勘察工程实例[J]. *勘察科学技术*, 2017(1): 28-32.
- PAN Kai, XIE Chunqing, CHENG Ruiyu, XU Tenghui. Engineering Example of Comprehensive Prospecting of Underground Karst in Mountain Airport Area[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2017(1): 28-32.
- [24] 康志宏, 陈琳, 鲁新便, 杨敏. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 110-120.
- KANG Zhihong, CHEN Lin, LU Xinbian, YANG Min. Fluid dynamic connectivity of karst carbonate reservoir with fracture & cave system in Tahe Oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 110-120.
- [25] 李苍松, 吴丰收, 赵岩杰, 王福刚, 曹玉清. 基于溶蚀实验的微观岩溶形态分形特征和水化学动力学特征研究[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(2): 110-120.
- LI Cangsong, WU Fengshou, ZHAO Yanjie, WANG Fugang, CAO Yuqing. Fractal and Hydro-Chemical Characteristics of Microscopic Karst Morphology Based on Dissolution Experiments[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(2): 110-120.
- [26] 文欢. 基于正演模拟的溶洞充填性分析[J]. *石化技术*, 2016, 23(8): 86-87.
- WEN Huan. Analysis of Karst Cavern Filling Property Based on Forward Modeling[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2016, 23(8): 86-87.
- [27] 孙海宁, 王晓梅, 刘来祥. AVO技术在识别充填流体溶洞中的应用[J]. *物探与化探*, 2008, 32(4): 397-400.
- SUN Haining, WANG Xiaomei, LIU Laixiang. The application of AVO to the predication of water-eroded caves filled with liquids for carbonate reservoirs[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(4): 397-400.
- [28] 唐文榜, 刘来祥, 樊佳芳, 韩革华, 马学军. 溶洞充填物判识的频率差异分析技术[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(1): 41-44.

- TANG Wenbang, LIU Laixiang, FAN Jiafang, HAN Gehua, MA Xuejun. Analytic technique of frequency difference for discrimination of Cavity fillers[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(1): 41-44.
- [29] 路洪海, 章程. 济南泉域岩溶水质演变及其对人类活动的响应[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(6): 238-240.
- LU Honghai, ZHANG Cheng. The Variations of Groundwater Quality and Its Relationship with Human Activity[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(6): 238-240.
- [30] 祁晓凡, 李文鹏, 李海涛, 杨丽芝. 济南岩溶泉域地下水位、降水、气温与大尺度气象模式的遥相关[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6): 18-28.
- QI Xiaofan, LI Wenpeng, LI Haitao, YANG Lizhi. Teleconnections between groundwater levels, precipitation, air temperature of the Jinan karst springs watershed and large scale climatic patterns[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 18-28.
- [31] 代方园, 雷炳霄, 宫亮, 张哲. 电磁波CT技术在济南地铁岩溶勘察中的应用[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(2): 61-66.
- DAI Fangyuan, LEI Bingxiao, GONG Liang, ZHANG Zhe. Application of Electromagnetic Computerized Tomography in Karst Detection along Ji'nan Subway[J]. *Shandong Land and Resources*, 2020, 36(2): 61-66.

Application of transient electromagnetism and cross-hole CT imaging to detect karst distribution and morphological characteristics: A case study of Jinan, Shandong Province

DAI Fangyuan^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, SU Qingwei^{1,2}, HU Tao^{1,2}, GENG Fuqiang^{1,2}, DONG Yanan³

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial Geomaterial Engineering Exploration Institute), Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China; 3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract The study area is located in the southern mountainous area of Jinan City, which is an exposed-covered karst mountainous area with low hilly landform surrounded by mountains on the east, west and south sides. The overall terrain is high in the south and low in the north, and is generally a north inclined monoclinic structure with exposed strata of Cambrian, Ordovician and Quaternary. Precipitation in this area is mainly concentrated in July, August and September. The catchment area of nearby rivers is limited and cut off for a long time.

The development of surface karst in the study area is ordinary, but the underground shallow karst is relatively developed. There are two types of groundwater, pore water and karst water. The karst water aquifer corresponds to the limestone of Cambrian-Ordovician Sanshanzi formation in which karst is relatively developed. The depth of study area is 50 m with dolomite as its the main lithology. There are two kinds of karst development in this area, small karst caves with the pore diameter greater than 20 cm, fast footage and low sampling rate and dissolved pores with the pore diameter less than 20 cm, normal footage, and high sampling rate. Caves and pores are basically filled with cohesive soil.

This study is aimed to calculate the dispersion coefficient and eigenvalue of apparent resistivity and apparent absorption coefficient in karst development area, and to explore a method to analyze the development degree and morphological characteristics of karst cave. The research methods include Transient Electromagnetic Method (TEM), cross-hole electromagnetic tomography and drilling. In TEM, the central loop device, multi-turn small loop emission and point measurement are adopted. The distance between fixed sending points and measuring points of cross-hole electromagnetic tomography is 1.0 m, and data is collected in the four frequency bands of 6, 8, 10 and 12.

In this study, the transient electromagnetic profile is compared with the karst development section exposed by drilling, and 120-ohm meter is determined as the boundary value for interpreting the karst development area, so as to delineate the karst distribution area. Then the drilling is carried out for verification, and its result is in conformity with that of TEM. Imaging detection of the cross-hole electromagnetic tomography in the verification hole and nearby boreholes is conducted to further verify and characterize the karst development between these two types of holes. By

(下转第 328 页)