

doi: 10. 11720/wtyht. 2021. 1211

陆泽峰. 高山峡谷地区桥址区岩溶发育特征地球物理勘察[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 252–256. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1211>

Lu Z F. Geophysical exploration of karst development characteristics in bridge site of the alpine gorge area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 252–256. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1211>

高山峡谷地区桥址区岩溶发育特征地球物理勘察

陆 泽 峰^{1,2}

(1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007; 2. 南京勘察工程有限公司, 江苏 南京 210007)

摘 要: 发育深度、充填物、展布方向等岩溶发育特征是在高山峡谷地区进行桥址区地球物理勘察时需要重点考虑的问题, 受风化物、岩层、地下水和地形等因素影响, 很难得到满意的地球物理勘察信息。某悬索桥建于岩溶发育的高山峡谷地区, 为了提高勘察效率, 采用浅层地震、音频大地电磁、对称四极测深 3 种地球物理勘察方法, 勘察精度依次提高, 勘察内容相互印证, 得到表观、宏观和微观岩溶发育特征。上述地球物理综合勘察方法能为类似地区岩溶发育地球物理勘察提供借鉴。

关键词: 高山峡谷; 岩溶; 浅层地震法; 音频大地电磁法; 对称四极测深法

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)01-0252-05

0 引言

在高山峡谷地区进行交通基础设施建设时, 需要修建数量众多的桥梁。修建桥梁前需对桥址进行比选, 岩溶发育特征是桥址比选时需要重点考虑的问题。查明岩溶发育特征, 可用地质调查、地球物理勘察、钻探的方法, 但地质调查只能得到表观岩溶发育特征, 地球物理勘察能在纵剖面上得到宏观上不同深度的岩溶发育特征, 钻探只能得到微观上不同深度的岩溶发育特征。在碳酸盐岩发育地区选择桥址时, 通常采用地质调查先行、地球物理勘察跟进、钻探验证, 即表观、宏观、微观三者结合, 经济高效的岩溶发育特征勘察方法。其中, 适用于岩溶发育特征的地球物理勘察方法包括浅层地震、地面电磁波法、电法、钻孔电磁波法、探地雷达^[1], 不同的地球物理勘察方法有各自的特点: 浅层地震层勘察精度低, 但能提供宏观上岩溶发育特征; 地面电磁波法勘察深度大, 受地形影响小, 但勘察费用高; 电法勘察费用低, 勘察精度高, 但野外跑极工作量大, 工作效率低; 钻孔电磁波法需要钻孔, 费用高, 有效勘察距离不超过 30 m; 探地雷达法有效勘察深度通常不超过 10 m, 且对场地平整度要求高。所以, 大面积岩

溶发育特征勘察通常采用浅层地震法、电法和地面电磁波法。

在高山峡谷地区如何进行高效经济的岩溶发育特征勘察是一个值得研究的问题, 本文以浅层地震法、地面电磁波法、电法对某特大桥桥址区岩溶发育深度、充填物、展布方向等岩溶发育特征进行了勘察, 并用钻探进行了验证。

1 工程地质条件

某特大桥采用悬索桥形式, 桥长 1 450 m, 跨越一箱形峡谷。峡谷中河流走向 N30°W, 河谷两岸地形呈不对称展布, 东岸河谷地形宽缓, 地形坡度 15°~30°, 局部达 60°~70°; 西岸河谷地形坡度 40°~70°, 其中近峡谷一带为陡崖, 陡崖边坡坡度 70°, 坡高 300 m, 岩层走向与边坡走向平行, 岩层倾向河流, 倾角 70°(图 1)。

桥址区地层为三叠系碳酸盐岩、碎屑岩(表 1)。碳酸盐岩分布于河谷两岸, 形成陡崖、陡坡, 碎屑岩分布在东岸谷底、缓坡部位。桥址区地层构造上为倒转向斜, 向斜走向 N30°W, 轴面倾向 N60°E, 倾角 70°, 核部地层为三叠系上统把南组, 位于河谷东岸。

收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-08-14

作者简介: 陆泽峰(1963-), 男, 汉族, 江苏常州人, 高级工程师, 从事岩土工程勘察施工、地质灾害评估的生产管理和科研工作。

万方数据

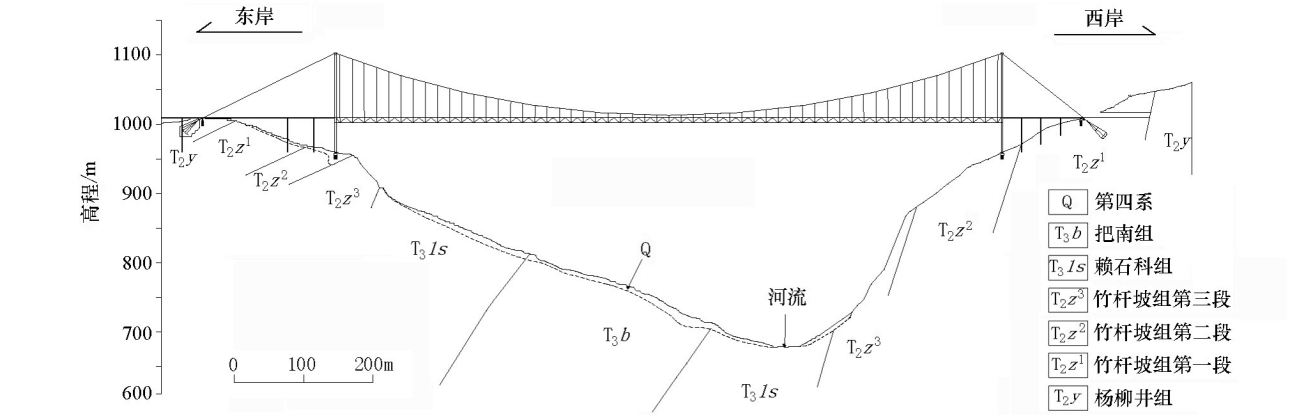


图 1 特大桥总体布置

Fig.1 General layout of bridge

表 1 桥址区地层岩性特征

Table 1 Stratigraphic table of bridge site

地层	岩性特征
第四系(Q)	残坡积层,红黏土,含碎块石,厚度 0~7 m
三叠系上统把南组(T ₃ b)	石英砂岩、泥质砂岩与泥岩呈不等厚互层,厚 120 m
三叠系上统赖石科组(T ₃ Is)	泥岩、钙质泥岩、砂质泥岩、岩屑粉砂岩不等厚互层,厚 180 m
三叠系中统竹杆坡组第三段(T ₂ z ³)	砂质灰岩,块状构造,坚硬岩,厚 105 m
三叠系中统竹杆坡组第二段(T ₂ z ²)	泥灰岩,层状构造,厚 120 m
三叠系中统竹杆坡组第一段(T ₂ z ¹)	泥晶灰岩,单层厚度稳定在 10~25 cm 之间,厚 155 m
三叠系中统杨柳井组(T ₂ y)	白云岩、角砾状白云岩和白云质灰岩,厚 500 m

2 地球物理特征

桥址区河谷西岸为碳酸盐岩,在特大桥荷载作用下,顺向坡的稳定性是桥址比选时需要首先解决的问题。考虑以下几点:①岩层倾角(70°)≥天然边坡角(15°~30°,局部达 60°~70°),所以峡谷西岸顺向坡在自然状态下是稳定的^[2-3];②要解决顺边坡稳定性问题需要获得桥址区岩溶发育特征,以便为桥墩位置、桥墩深度、成墩方式、墩下岩层是否需要注浆等提供基础;③西岸锚碇位于碳酸盐岩内;所以,文中主要介绍西岸的地球物理勘察工作。

对西岸桥址区岩土层样品进行了纵波速、电阻率测试,结果(表 2)可见:①第四系土层及强风化岩层与下伏弱风化岩层纵波波速差异明显,前者 $v_p =$

表 2 西岸岩土层波速、电阻率特征值

岩土层	v_p	ρ	备注
	$/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\Omega \cdot \text{m})$	
第四系土层及强风化岩	398~888	33.8	底界面反射层 T ₁
弱风化砂质灰岩	2975	1025	底界面反射层 T ₂
弱风化泥灰岩	1757	784	底界面反射层 T ₂
弱风化泥晶灰岩	2147	1584	底界面反射层 T ₂
弱风化白云岩	3922	3922	底界面反射层 T ₂

398~888 m/s,后者 $v_p = 1\,757 \sim 2\,975 \text{ m/s}$,是理想的波阻抗分界面,从而为浅层地震勘察提供了基础;②土层、强风化岩层与下伏弱风化岩层电性差异十分明显;弱风化碳酸盐岩组、段之间存在电性差异,电阻率由低向高依次为泥灰岩→砂质灰岩→泥晶灰岩→白云岩,从而为地面电磁波法、电法勘察奠定了基础。

3 岩溶发育特征地球物理勘察

采用浅层地震法^[4-5]、音频大地电磁法(地面电磁波法)^[6-9]和对称四极测深法(电法)^[10-12]进行勘察,测线均沿桥中轴线布置。

3.1 浅层地震法

受地形限制,浅层地震测线位于西岸末端至西岸陡崖以上,物探点号 160~300,长度 172 m,从西岸小物探点号起至大物探点号之间对应的地层依次为白云岩、泥晶灰岩和泥灰岩。工作参数:3 次覆盖,单边放炮,滚动观测系统;偏移距 36 m,道距 3 m,炮距 12 m;孔中激发;记录长度 512 ms;采样间隔 0.5 ms;采样点数 1 024。采用常规处理流程的专用软件完成数据处理(图 2)。

图 2 中的反射波组特征较明显,存在 1~2 个反射波同相轴,第一个同相轴为强风化层底界面

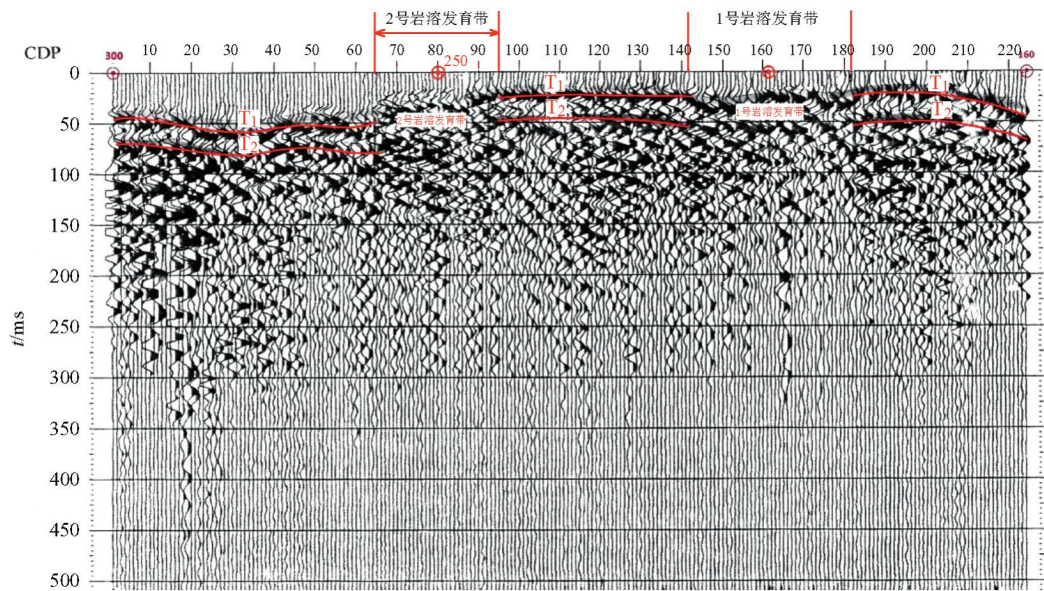


图 2 浅层地震勘察时间剖面

Fig. 2 Time profile of shallow seismic exploration

(T_1),第二个同相轴为弱风化层底界面(T_2)。其中, T_1 反射波组可以分辨,但起伏较大,连续性略差, T_2 反射波组分辨较困难,连续性差,各道能量差异较大。图 2 为水平 3 次叠加之后的时间剖面,根据强风化层底以上地层平均纵波叠加速度 $v_{\sigma}=600$ m/s、强风化层底与弱风化层底之间地层平均纵波叠加速度 $v_{\sigma}=2\,000$ m/s,得到 T_1 底深度 6~15 m,平均深度 8.5 m, T_2 底深度 15~21 m。图中局部地段有一些弱反射或波组振动,推测这些部位为岩溶发育带,均位于泥晶灰岩中,其中 1 号岩溶发育带的中心物探点号 160,宽度 31 m,2 号岩溶发育带中心物探点号 250,宽度 22 m。

3.2 音频大地电磁法

由于地形起伏较大,在物探点号 140~340 之间布置了音频大地电磁探测,测线长度 250 m,工作参数: $MN=5$ m,点距=5 m。探测结果见图 3a。

由图可见:①沿测线方向逐点测量的电位差 ΔU_s 曲线在局部高值异常形状如缺少底边、尖头向上的三角形;②在实际工作中, ΔU_s 曲线由低向高的起跳点为岩性、岩溶裂隙发育带分界点,受高阻岩溶裂隙带的影响, Δv_s 曲线的分层能力变差,仅白云岩与泥晶灰岩的界面明显,为由低向高的起跳点;③岩层倾角较陡,地下水位埋深很大,造山运动使地壳抬升,岩溶裂隙发育程度较低,以垂直溶蚀为主,在浅部易形成空的溶蚀裂隙,故 ΔU_s 曲线的高值异常区解释为岩溶裂隙发育带。

3.3 对称四极测深法

在物探点号 140~330 之间进行了电测深,长度

233 m。工作参数: $AB/2=1.5,2.5,4,6,9,15,25,40,65,100$ m; $MN/2=0.5,3,12$ m,总共 12 个点。数据处理结果见图 3b、表 3。

由图 3b、表 3 可见:① ρ_s 曲线的上升趋势明显,且 ρ_s 值高,在 $AB/2=1.5$ m 时, ρ_s 值一般均大于 $50\,\Omega\cdot m$,部分电测深曲线在中段或尾支出现平直段或下降段;②岩石的电阻率值较高,部分电测深曲线从前支到尾支均呈近 45° 上升,反映基岩完整,无溶蚀裂隙发育;部分电测深曲线前支上升,中段下降或呈平直,尾支呈近 45° 上升,反映了岩体中充填黏土的溶洞裂隙的存在;③160 点附近,肉眼可见的岩溶竖井上方, ΔU_s 曲线均呈高阻反映,同时在图 3b 中 $AB/2=25$ m 处呈高阻闭合圈($800\,\Omega\cdot m$)。

3.4 综合成果解释

进行岩溶发育特征综合成果解释时,遵循以下原则:①以地面地质调查为基础,参考浅层地震的解释出来的强风化岩层底界面(T_1)、弱风化岩层底界面(T_2)、1 号岩溶发育带及 2 号岩溶发育带;②将 ρ_s 及 ΔU_s 曲线的高值异常区解释为岩溶裂隙发育带;③岩溶发育带的平面位置依据对称四极测深 ρ_s 等值线断面图、音频大地电磁法 ΔU_s 曲线图显示的位置,发育深度依据对称四极测深 ρ_s 等值线断面图确定的深度(表 3);④岩性分界面取序为音频大地电磁法剖面→对称四极测深 ρ_s 等值线断面图。根据上述原则进行了岩溶发育综合成果解释,成果见表 4。

根据研究结果得出以下结论:①强风化层深度较小,一般在 3~10 m,平均深度 5 m;②在白云岩、泥

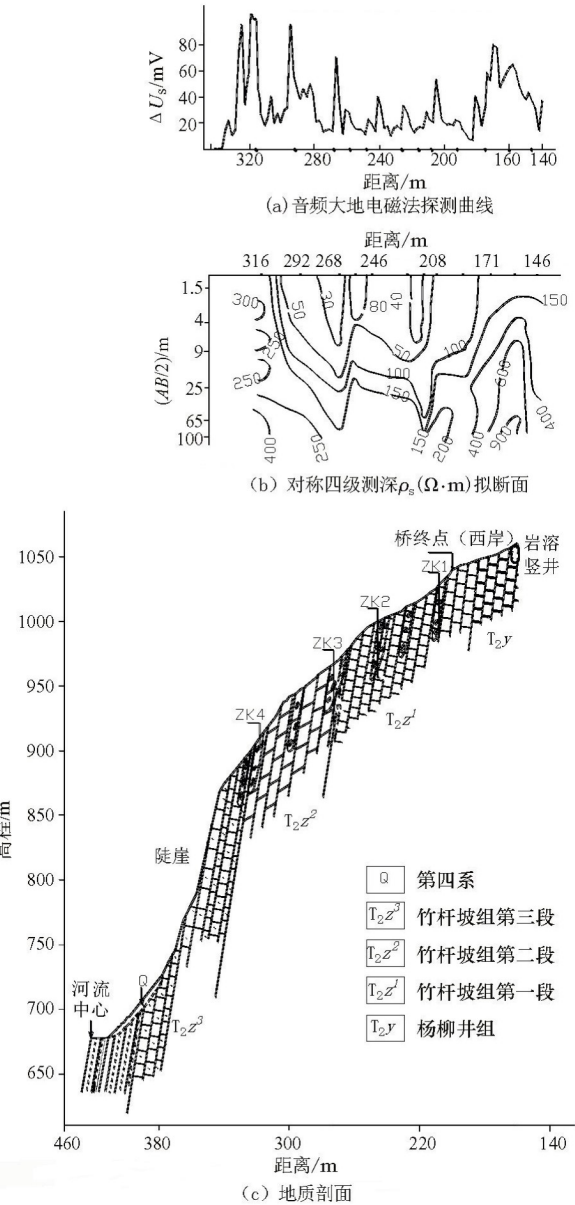


图3 音频大地电磁法、对称四级测深法和地质剖面解释

Fig.3 Explanatory chart of audio-frequency magnetotelluric method,symmetric four-pole sounding method and geological profile

晶灰岩、泥灰岩、砂质灰岩段均发育岩溶;③综合地球物理勘察及钻探资料,岩溶形态以近顺层发育的层间溶蚀裂隙为主,在浅部多为无充填物的空溶隙,在深部多充填可塑状黏土,在垂向上呈多层发育,规模一般较小;④岩溶裂隙在0~40 m 较为发育,50 m 以下岩溶欠发育。

4 结语

1) 在高山峡谷地区进行岩溶发育特征勘察时,由于风化物薄,岩层裸露,地下水埋深大,可以采用浅层地震法、音频大地电磁法和对称四级测深法,此

表 3 电测深解释成果				
Table 3 Interpretation results of electric sounding				
物探点号	$\rho_{\text{强风化层}} / (\Omega \cdot \text{m})$	界面深度/m	$\rho_{\text{弱风化层}} / (\Omega \cdot \text{m})$	异常状况
316	30	30	833	AB/2=40 m 前呈锯齿状,岩溶发育
292	50	6	350	AB/2=15~40 m,岩溶发育
268	35	6.2	283	AB/2=40~65 m,岩溶发育
258	50	7.8	377	
246	48	4.5	300.0	AB/22=4~40 m,岩溶发育
226	45	7.0	618.0	AB/2=40~65 m,岩溶发育
216	30	3.0	200.0	AB/2=15~25 m,岩溶发育
208	65	4	250.0	AB/2=40~65 m,岩溶发育
192	50	2.5	250.0	AB/2=4~40 m,岩溶发育
171		<1.5	557	AB/2=9~40 m,岩溶发育
160		<1.5	80~300	AB/2=9~40 m,岩溶发育
146		<1.5	100~200	基岩破碎

表 4 岩溶发育综合解释成果			
Table 4 Comprehensive interpretation results of Karst development			
物探点号	宽度/m	深度/m	备注
324~328	10	40	ZK4 在 8.04~18.64 m、23.24~24.36 m、41.4~41.7 m 见溶隙
294~298	10	40	电测深解释岩溶发育
264~270	12.5	35~50	ZK3 在 16.7~18.3 m、29.8~30.8 见溶洞
249~254	12.5	35~50	电测深解释岩溶发育
240~245	12.5	35~50	ZK2 在 1.5~3.8 m、7.92~11.24 m、17.31~17.66 m、18.55~18.90 m、32.04~36.95 m 见多层溶洞或溶隙
204~209	12.5	35~50	ZK1 在 21.9~23.0 m、27.8~28.9 m、30~32.3 m 见溶洞
168~171	17.5	9~40	电测深解释岩溶发育
158~162	10	9~40	电测深解释岩溶发育

三种方法能相互印证,勘察精度依次提高,效果好。

2) 由于高山峡谷地区地形起伏较大,可选择地形影响因素较小的音频大地电磁法,但受高阻岩溶裂隙带的影响,电位差曲线的地层分层能力变差,需要其他地球物理勘察方法补充。

3) 应用电法勘探时,应尽量避免 A、M、N、B 这 4 个电极连线方向地形的起伏。

参考文献 (References):

[1] 郭健强,赵茹玥,甘伏平,等.综合电法在岩溶山区地下水勘探中的应用——以湖南怀化长塘村为例[J].物探与化探,2020,44(1):93~98.

Wu J Q,Zhao R Y,Gan F P, et al. The application of electrical prospecting method to groundwater exploration in karst mountainous areas:A case study of Changtang Village Huaihua area,Hunan

Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 93-98.

[2] 庞旭卿. 基于降雨入渗试验的黄土边坡稳定性研究[J]. 河南科学, 2018, 36(3): 419-423.

Pang X Q. Stability of loess slope based on the rainfall infiltration test[J]. Henan Science, 2018, 36(3): 419-423.

[3] 孙孝于, 蒋甫玉, 常文凯, 等. 基于高密度电法的水利工程枢纽区隐伏断层探测[J]. 河南科学, 2017, 35(9): 1523-1528.

Sun X Y, Jiang F Y, Chang W K, et al. Buried fault exploration in hydro junction area based on high density resistivity method[J]. Henan Science, 2017, 35(9): 1523-1528.

[4] 丁荣胜, 张殿成, 王仕昌, 等. 高密度电阻率法和地震映像法在采空区勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(6): 732-736.

Ding R S, Zhang D C, Wang S C, et al. The application of high-density resistivity method and seismic image method to the exploration of exhausted areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 732-736.

[5] 武毅, 郭建强, 曹福祥, 等. 多种物探技术勘察宁南深层岩溶水的组合试验[J]. 物探与化探, 2002, 26(2): 113-117.

Wu Y, Guo J Q, Cao F X, et al. The combination of varied geophysical techniques in exploring deep-seated karstic water of south Ningxia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(2): 113-117.

[6] 张超, 陈大磊, 王阳, 等. 层状介质下张量 CSAMT 最小收发距研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 156-164.

Zhang C, Chen D L, Wang Y, et al. Research on minimum transmit-receive distance of tensor CSAMT in layered media[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 156-164.

[7] 区小毅, 黎海龙, 杨富强, 等. 音频大地电磁法在广西北海市海水入侵调查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 66-73.

Ou X Y, Li H L, Yang F Q, et al. A preliminary study of the application of audio magnetotelluric method to the investigation of seawater intrusion in Beihai City, Guangxi[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 66-73.

[8] 林昌洪, 谭捍东, 佟拓. 利用大地电磁三维反演方法获得二维剖面附近三维电阻率结构的可行性[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 245-256.

Lin C H, Tan H D, Tong T. The possibility of obtaining nearby 3D resistivity structure from magnetotelluric 2D profile data using 3D inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 245-256.

[9] 邹宗霖, 翁爱华, 周子琨, 等. 非线性共轭梯度三维反演在山西河津铁矿音频大地电磁数据勘察中的应用[J]. 世界地质, 2020, 39(1): 167-175, 184.

Zou Z L, Weng A H, Zhou Z K, et al. Application of NLCG 3D inversion of AMT data exploration in Hejin iron deposit, Shanxi[J]. Global Geology, 2020, 39(1): 167-175, 184.

[10] 张来福, 李士强, 刘国强, 等. 输电杆塔下采空区电法探测电极系统设计[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 220-225.

Zhang L F, Li S Q, Liu G Q, et al. The design of electrode system for electrical detection of goaf under transmission tower[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 220-225.

[11] 陈玉玲, 甘伏平, 卢呈杰, 等. 裸露岩溶区地下河管道综合地球物理方法探测研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1608-1616.

Chen Y L, Gan F P, Lu C J, et al. The study of underground river course detection by integrated geophysical methods in bare karst area[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1608-1616.

[12] 杨镜明, 魏周政, 高晓伟. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘察及注浆检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 362-369.

Yang J M, Wei Z Z, Gao X W. The application of the methodes of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 362-369.

Geophysical exploration of karst development characteristics in bridge site of the alpine gorge area

LU Ze-Feng^{1,2}

(1. Nonferrous Metal East China Geological Exploration Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210007, China; 2. Nanjing Survey Engineering Co., Ltd., Nanjing 210007, China)

Abstract: Karst development characteristics such as depth, fillings and distribution direction are key questions during geophysical survey of bridge site in Alpine gorge area. Satisfactory information of geophysical survey is not available due to influences of weathering, rock, groundwater and topography. In order to improve efficiency of geophysical exploration, shallow seismic method, audio frequency magnetotelluric method and symmetric four-pole sounding method are used for raising geophysical exploration efficiency. As a result, exploration accuracy is improved in turn, and content of exploration is verified by each other. Characteristics of apparent, macroscopic and microcosmic Karst development are obtained. Method of geophysical comprehensive exploration mentioned above can provide reference for similar projects.

Key words: alpine gorge area; karst; shallow seismic method; audio frequency magnetotelluric method; symmetric four-pole sounding method