

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190282

# 综合物探方法在城市应急水源地调查评价中的应用

马 健<sup>1,2</sup>

(1.山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队,山东 潍坊 261021;  
2.山东省地矿局海岸带地质环境保护重点实验室,山东 潍坊 261021)

**摘要:**以潍坊应急水源地东小营富水区为例,在充分了解研究区水文地质及地球物理特征的基础上,分别对高密度电阻率法和水文测井的原理、工作方法及应用效果进行综合分析,解释推断研究区含水层结构特征,建立水文地质参数测井解释模型,对含水层的矿化度、渗透系数及单位涌水量等参数进行估算。结果表明,物探解释成果与抽水试验及水质分析结果吻合度较高。研究认为,综合物探方法在水文地质特征分析中具有较好的适用性,可为应急水源地调查评价提供技术支撑。

**关键词:**综合物探;应急水源地;水文地质;高密度电阻率法;水文测井

**中图分类号:**TV21

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)05-0049-05

应急水源地是指在现有水源地出现问题的情况下,为解决生产及生活用水压力,而采用的一种非常规的、有一定开采周期的临时性供水水源地<sup>[1]</sup>。目前,我国正进入城市发展的加速阶段,多个城市存在水资源保障程度不足的问题,随着城市供水风险的加剧和水资源的短缺,应急水源地开发成为了维持城市可持续发展的必要条件<sup>[2]</sup>。近年来,我国多个城市陆续组织开展了了一系列的地下水应急水源地论证、建设和运行管理等工作,国内众多学者也对应急水源地的调查评价进行了大量的研究工作,取得了丰硕的成果。邹友琴<sup>[3]</sup>等根据南昌市水文地质条件,选定尤口、谢埠、桃花三个富水地段作为应急供水水源地,并应用GMS软件模拟了各个水源地在最不利降水条件下的应急供水情况。张凯<sup>[4]</sup>等根据应急水源地选取原则,在保证供水量的前提下,结合水质、规划及交通条件等因素,在宿州市选取了顺河和西二铺两处应急水源地,提高了宿州市供水抗风险能力。张琦伟<sup>[5]</sup>等应用可控源音频大地电磁法(CSAMT)在北京市潮白河、怀河地区进行了相关的勘查研究工作,查清了奥运应急水源地的地下水赋存情况,为应急水源地的研究工作提供了可靠的证据。郭高轩<sup>[6]</sup>等利用对称四极电测深法,确定了北京—张坊应急水源地断裂构造的位置和走向,对第四系进

行了分带研究,结合区域地质情况布设开采井,取得了良好效果。以往的研究成果表明,地下含水层的岩性、空间分布及相关水文地质参数特征,是城市应急水源地选址及后续工程建设的关键所在。在众多应急水源地调查评价方法中,物探技术是简单易行、效果可靠的重要手段。

潍坊市人均水资源占有量不足300m<sup>3</sup>,低于山东省平均水平,仅为全国水平的1/7,属于严重缺水城市<sup>[7]</sup>。为缓解城市供水压力,加强城市应急供水机制建设,保障城市供水安全,潍坊市于2016年启动应急水源地调查评价工作。

本文以潍坊应急水源地东小营富水区调查评价工作为例,在充分了解研究区地层沉积特征的基础上,结合不同物探方法的适用性,通过高密度电阻率法研究地层分布,结合钻孔资料推断含水层结构特征,并利用测井资料估算相关水文地质参数,为后续水源地建设工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质背景

研究区位于白浪河流域冲积平原,地层以第四纪松散沉积物为主,厚度不一,最厚达400m,成因类型

收稿日期:2019-08-21

基金项目:潍坊市应急水源地调查评价项目(潍国土资字[2015]128号)

作者简介:马健(1985-),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,主要从事水文地质及物探方法应用研究工作。E-mail:wts\_mj@163.com

及岩石组合复杂(见图1)。

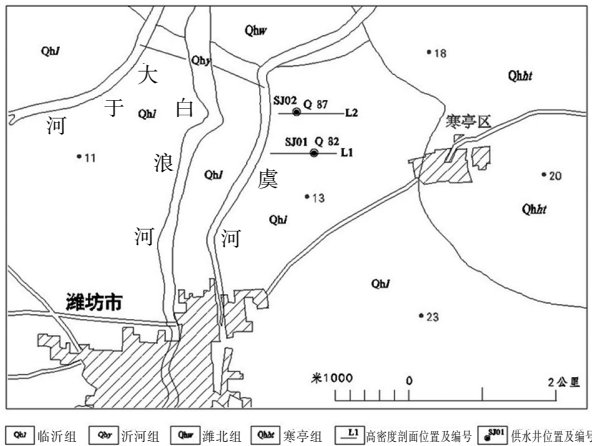


图1 研究区区域地质略图

Fig.1 The sketch map of regional geology in the study area

临沂组(Qhl)。在研究区内分布广泛,地表多为耕植土,以灰黄色黏土质粉砂、粉砂质黏土为主,下部可见粗砂,厚度较小,多在1m左右,沉积在基岩之上者厚度较大,可达数米至10余米。

沂河组(Qhy)。现代河道的近代沉积,呈带状分布,岩性较粗,岩性以含砾砂层为主。

潍北组(Qhw)。研究区北部发育潍北组,岩性主要为灰、灰黄、灰黑色的砂、淤泥沉积,厚百余米至数百米,由北西向南东渐薄。寒亭组(Qhht)。寒亭组为风积成因,来源于海滨沙岸的风积砂。主要岩性为分选良好的中、细砂、粉砂,局部含少量黏土夹层,见风成斜层理。厚度大于2m,最厚处可达5~10m。下伏层位为临沂组或潍北组。

## 1.2 水文地质特征

研究区内第四系广泛分布,地下水赋存条件较好,含水层岩性主要以粗砂及砂砾石层为主,埋深14~37.63m,厚度3.4~8.6m,富水性较强<sup>[9]</sup>。区内地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水,补给来源主要为大气降水入渗及白浪河侧渗补给,排泄方式主要为人工开采及侧向径流排泄。

## 1.3 地球物理特征

由研究区地层电性参数统计表(见表1)可知,含水层主要岩性为中粗砂及砂砾石层,其视电阻率值一般大于 $20\Omega\cdot m$ ,整体呈高阻电性特征<sup>[9-10]</sup>;而隔水层(粘土、粉质粘土等)由于泥质含量较高而呈现低电阻率特征,其视电阻率值小于 $20\Omega\cdot m$ ,两者之间存在明显的电性差异。当高密度电法测量反演断面上出现局

部高阻异常,并且其深度、形态和范围等与已知含水层规模大体相当时,即可认为是含水层的电性反映。因此,利用高密度电法对地下含水层的分布特征及空间赋存形态进行勘查是切实可行的。

表1 研究区地层电性参数统计

Table1 The statistics of stratigraphic electricity parameters in the research area

地层时代	岩性	电阻率 $\rho/\Omega\cdot m$	地层性质
第四系	粘土	5~10	隔水层
	粉质粘土	10~20	
	中粗砂	20~40	含水层
	砂砾石层	30~50	

## 2 工作方法及原理

### 2.1 高密度电阻率法

#### 2.1.1 方法原理

高密度电阻率法以地下目标体和周围介质间的电性差异为基础,通过对地下半空间中传导电流的分布规律进行研究,获取地下介质电阻率,推断地下空间电性异常体的分布特征<sup>[9-10]</sup>。高密度电阻率法有多种排列方式,如温纳装置、斯伦贝谢装置、三极装置及偶极—偶极装置等(见图2)。

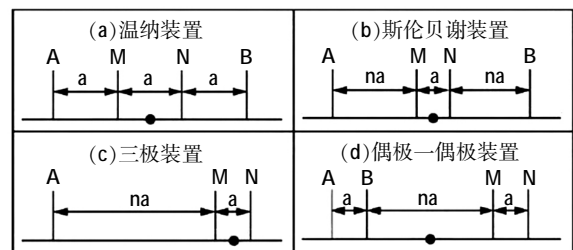


图2 高密度电法常用装置

Fig.2 The common devices using high density resistivity method

#### 2.1.2 工作方法及数据处理

为取得合适的装置参数与高质量的原始数据,正式工作前在研究区已知井旁布设一条剖面进行方法有效性试验,即选择不同的装置类型分别测量。经数据对比分析,温纳装置对电阻率的垂向变化最敏感且装置系数最小,因此在探测水平目标体时,可观测到较强的信号,应用效果良好。故本次工作采用温纳装置,选择测量点距10m,供电电压100V,供电脉冲宽度为2s。为查明研究区地层分布特征及含水层赋存形态,本次工作共布设剖面2条,编号分别为L1、L2。

高密度电法的理论模型是一个各向同性的均匀地质体,但实际工作中,所测的视电阻率断面受地形起伏、接地条件不良及点位误差等因素影响,往往与实际模型不符,需要对原始数据作相关预处理<sup>[10]</sup>,如数据拼接、地形校正及剔除畸变数据等。

本次采用瑞典高密度电法处理软件 Res2Dinv 对预处理后的数据进行反演计算并成图。初始模型为均匀地下半空间,反演方法采用阻尼最小二乘法。它是基于最小二乘法的一种反演算法,通过在计算模型修正量时增加阻尼因子,改善最小二乘法的收敛性,在电法勘探中有着广泛的应用。经试验,迭代 3~5 次后反演结果最接近实际情况,拟合误差 RMS<10%,故本次反演采用迭代 3~5 次后的结果。

## 2.2 水文测井

水文测井是在钻孔中研究地下含水层特征的各种物探方法的统称。它对于寻找工农业用水和解决水文地质及工程地质问题具有一定意义。主要任务包括:划分含水层与隔水层,并确定其深度和厚度;确定含水层的孔隙度和渗透率,并估算其涌水量;研究地层水矿化度,评价地下水质量。根据任务的不同,可以单独或综合应用各类测井方法。

根据研究区水文地质及地球物理特征,本次工作采用三侧向电阻率测井、声波时差测井、自然伽玛测井及自然电位测井四种方法。本文通过对水源地以往取得的物探测井实际资料的研究,建立水文测井解释模型,对含水层的地下水矿化度、渗透系数及单位涌水量等参数进行估算。

### 2.2.1 地下水矿化度

地层的电阻率是由多种因素综合决定的。在含水层岩性、厚度和孔隙度等基本相同的条件下,视电阻率测井曲线的平均值与地层水矿化度之间具有较好的相关性,地层水的矿化度越高,导电性能越好,电阻率就相应降低;矿化度越低,导电性能变差,相对应的电阻率值升高。因此,通过研究区范围内 12 眼已知井抽水化验的矿化度与对应的含水层视电阻率平均值进行回归统计,得到研究区矿化度解释模型:

$$C_w = 4.582 \times 10^4 \times \rho^{-1.25} \quad (1)$$

式中: $C_w$  为地下水矿化度,mg/L; $\rho$  为地层视电阻率平均值, $\Omega \cdot m$ 。

### 2.2.2 泥质含量

研究区地下水类型主要为第四系松散层孔隙水,主要富水层位为砂层,主要隔水层位为粘土层。在第四

系地区,地层的放射性强弱与地层水和钻井液的矿化度无关,仅受地层吸附能力影响,地层颗粒越细,泥质含量越高,吸附的放射性物质越多,自然伽玛曲线读数越高。因此,可以利用自然伽玛测井曲线计算含水层泥质含量:

$$SH = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (2)$$

$$V_{sh} = \frac{2^{SH \cdot GCUR} - 1}{2^{GCUR} - 1} \quad (3)$$

式中:GR 为自然伽玛测井值,API;GR<sub>max</sub> 为自然伽玛测井最大值,API;GR<sub>min</sub> 为自然伽玛测井最小值,API;V<sub>sh</sub> 为地层泥质含量,%;GCUR 为地区经验系数,研究区第四系地层取 3.7。

### 2.2.3 孔隙度

根据研究区含水层性质,按其物质组成可以分为地层骨架、地层泥质和孔隙水,由体积物理模型的思想,声波时差测井响应值为各部分之和。研究区地层压实程度较低,声波时差偏大,计算孔隙度偏高,需要进行压实校正。故利用声波时差计算地层的孔隙度见式(4):

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times \frac{1}{C_p} - \frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times V_{sh} \quad (4)$$

式中: $\Delta t$  为声波时差测井值, $\mu s/m$ ; $\Delta t_{ma}$  为地层骨架声波时差值, $\mu s/m$ ; $\Delta t_f$  为孔隙流体声波时差值, $\mu s/m$ ; $\Delta t_{sh}$  为粘土层声波时差值, $\mu s/m$ ; $V_{sh}$  为地层泥质含量,%; $C_p$  为压实系数,研究区第四系地层取 1.3; $\phi$  为孔隙度值,%。

### 2.2.4 渗透系数

渗透系数是描述含水层透水能力的重要指标,是评价一个地区水文地质条件不可缺少的重要参数。在不考虑水质的影响下,渗透系数与含水层岩性、结构有关,含水层的颗粒越粗、孔隙越大则渗透系数亦大,反之亦小。利用声波时差测井求出的孔隙度与已知井抽水试验计算的渗透系数建立一相关曲线,经回归统计计算,研究区渗透系数与孔隙度的相关关系见式(5):

$$K = 3.12 \times e^{25 \times \phi} \quad (5)$$

式中: $\phi$  为孔隙度值,%; $K$  为渗透系数,m/d。

### 2.2.5 单位涌水量

研究区按承压含水层完整井的裘布依公式计算单位涌水量:

$$q = 0.0316 \times \frac{K \times M}{\lg R - \lg r} \quad (6)$$

式中:q 为单位涌水量,l/s·m; $K$  为渗透系数,m/d; $M$  为含水层厚度,m; $R$  为影响半径,m; $r$  为水井滤水管半

径,m。

通过对研究区周边已知井的抽水试验确定影响半径为 34.80m,成井滤水管半径为 0.125m。因此,式(6)可以简化为:

$$q=0.013 \times K \times M \quad (7)$$

对于存在多个含水层时,混合抽水的单位涌水量可以近似的认为是每个含水层单位涌水量之和,即:

$$q=0.013 \times \sum_{i=1}^n K_i \times M_i \quad (8)$$

式中: $K_i$ 、 $M_i$  分别为第  $i$  含水层的渗透系数和厚度。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 高密度电法成果解释

从 L1、L2 线高密度剖面二维电阻率反演获得的断面图上看(见图 3-4),2 条剖面反映的电性特征基本一致,整体电性层状特征明显。80m 以上的深度范围内,按视电阻率值的高低大体可以分为 3 个电性层,具有“两低夹一高”的特征。浅部(<10m)视电阻率表现为连续的低阻层,厚度变化较小,为表层粘土的电性反映,局部视电阻率值较高,推测该段土层干燥,体现了表层粘土的不均匀性;中部(10~40m)表现为连续的高阻层,视电阻率值整体高于  $20\Omega \cdot m$ ,层状特征明显且横向连续性好,为含水层的电性反映;深部(>40m)整体为低阻层,电阻率随深度的增大由  $20\Omega \cdot m$  减小至  $10\Omega \cdot m$ ,层状特征明显,推测为粉质粘土的电性反映。

L1 线、L2 线电性特征较为一致,含水层自西向东有逐渐变薄的趋势。其中,L1 线含水层厚度变化较小,

在 51~66 点范围内视电阻率值整体高于  $35\Omega \cdot m$ ,表现为连续且稳定的高阻异常体,说明该处含水层颗粒较粗,为砂砾石层的电性反映;L2 线厚度变化较大,在 15~21 点、45~51 点范围内,含水层分布较薄且连续性较差,与 L1 线相比,呈现视电阻率值稍低且高阻范围及规模缩小的趋势,表明在此范围内含水层在厚度、连续性和完整性上较 L1 线稍差。

综合来看,L1 线 51~66 点、L2 线 33~42 点含水层在深度及水平范围内呈现厚层、连续分布的特点,具备建设供水井的前提条件。

#### 3.2 水文测井成果解释

根据水文测井解释模型,对研究区供水井的矿化度、渗透系数、涌水量等进行分析预测,其解释成果见表 2。

由表 2 可知,测井解释矿化度与水质分析矿化度较为接近,误差范围在  $\pm 100\text{mg/L}$  之间;渗透系数最大误差为  $2.3\text{m/d}$ ,平均误差为  $0.84\text{m/d}$ ;抽水试验确定的单位涌水量与测井解释成果基本一致,最大误差为  $0.42\text{ l/s} \cdot \text{m}$ ,测井解释结果与试验结果吻合度较高。

### 4 结语

(1)高密度电法采用温纳装置进行采集,垂直方向分辨率较高,取得了良好的观测数据。根据高密度反演成果,结合研究区地质资料及含水层电性特征,推断解释了含水层的埋深、水平分布及厚度特征,为供水井建设提供优选区域。

(2)根据建立的测井解释模型计算了水文地质参数,结果表明,测井解释的矿化度、渗透系数、单位涌

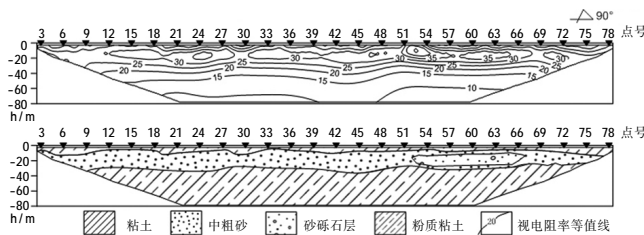


图3 L1线高密度电法二维反演解释成果

Fig.3 The two-dimensional inversion interpretation result of L1 line high density resistivity method

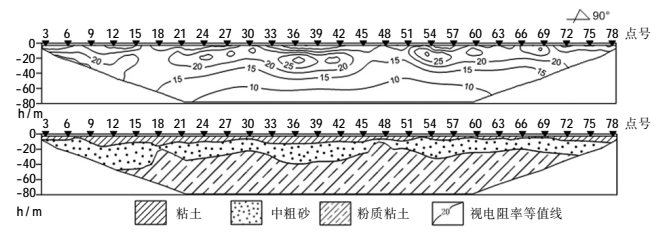


图4 L2线高密度电法二维反演解释成果

Fig.4 The two-dimensional inversion interpretation result of L2 line high density resistivity method

表2 研究区水文测井解释成果

Table2 The results of hydrological logging interpretation in the research area

编号	水质分析与抽水试验成果			测井解释成果		
	矿化度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	单位涌水量( $\text{l/s} \cdot \text{m}$ )	矿化度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	渗透系数/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	单位涌水量( $\text{l/s} \cdot \text{m}$ )
SJ01	598	12.991	2.371	538	15.291	2.791
SJ02	899	5.897	1.676	820	5.273	1.499

水量与抽水试验和水质分析结果吻合度较高。

(3)综合物探方法具有成本低、效率高、探测准确、信息丰富等优点。在应急水源地调查评价中,首先利用高密度电阻率法圈定含水层分布范围及厚度特征,确定供水井建设位置;其次,根据供水井测井资料计算相关水文地质参数,对应急水源地水质、储量等进行评价,具有明显的应用效果。

#### 参考文献:

- [1] 卜华,孙英波.山东省重点城市应急供水水源地研究[J].水文地质工程地质,2008,35(6):42-45. (BU Hua, SUN Yingbo. Research on the emergency water source field in key cities of Shandong Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,35(6):42-45. (in Chinese))
- [2] 戴长雷,迟宝明,刘中培.北方城市应急供水水源地研究[J].水文地质工程地质,2008,35(4):42-46. (DAI Changlei, CHI Baoming, LIU Zhongpei. Research on city's emergency water source field in North China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,35(4):42-46. (in Chinese))
- [3] 邹友琴,周文斌,兰盈盈,等.南昌市突发性应急供水水源地模拟研究[J].水文地质工程地质, 2013,40(4):20-24. (ZOU Youqin, ZHOU Wenbin, LAN Yingying, et al. Research on numerical simulation on sources of emergency water supply in Nanchang City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013,40(4):20-24. (in Chinese))
- [4] 张凯,王少龙,高志强,等.宿州市地下水应急水源地研究[J].上海国土资源, 2018,39(4):103-106. (ZHANG Kai, WANG Shaolong, GAO Zhiqiang, et al. An emergency groundwater source in Suzhou, Anhui province [J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(4):103-106. (in Chinese))
- [5] 张琦伟,安志国,林万顺,等.北京市潮白河、怀河地区奥运应急水源地CSAMT 勘查研究[J].地球物理学进展, 2010,25(1):337-342. (ZHANG Qiwei, AN Zhiguo, LIN Wanshun, et al. A exploration study of emergent water sources for the Olympic games with the CSAMT method along the Chaobaihe river and Huaihe river area, Beijing [J]. Progress in Geophysics, 2010,25(1):337-342. (in Chinese))
- [6] 郭高轩,辛宝东,刘文臣.电测深在北京—张坊应急岩溶水源地勘查中的应用[J].物探与化探, 2010,34(2):225-228. (GUO Gaoxuan, XIN Baodong, LIU Wenchen. The application of electric sounding in investigation of zhangfang emergency karst wellfield, NW-Beijing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010,34(2):225-228. (in Chinese))
- [7] 王奎峰.山东半岛资源环境承载力综合评价与区划[D].徐州:中国矿业大学, 2015. (WANG Kuifeng. Comprehensive Evaluation and Zoning of Resource Environmental Bearing Capacity in Shandong Peninsula [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese))
- [8] 王松涛,高美霞,吴衍华.山东省潍坊市地下水应急供水水源地研究[A]. 加强地质工作促进社会经济和谐发展—2007年华东六省一市地学科技论坛论文集[C].合肥:合肥工业大学出版社, 2007,433-437. (WANG Songtao, GAO Meixia, WU Yanhua. Study on the source land of groundwater for urgent supply in Weifang, Shandong Province [A]. Strengthening Geological Work to Promote Harmonious Development of Social Economy—Papers Collection of the Regional Science and Technology Forum of Six Provinces and One City in East China in 2007 [C]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2007,433-437. (in Chinese))
- [9] 范剑,马为,夏训银,等.高密度电阻率法在天津市七里海牡蛎礁博物馆选址中的应用[J].地球物理学进展, 2018,33(2):790-796. (FAN Jian, MA Wei, XIA Xunyin, et al. Application of high density resistivity method on site-selection for the oyster reefs museum in Qilihai, Tianjin [J]. Progress in Geophysics, 2018,33(2):790-796. (in Chinese))
- [10] 张先林,许强,彭大雷,等.高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J].地球物理学进展, 2017,32(4):1862-1867. (ZHANG Xianlin, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Application of high-density resistivity method to groundwater exploration in Heifangtai [J]. Progress in Geophysics, 2017,32(4):1862-1867. (in Chinese))

## Application of Integrated Geophysical Method on Investigating and Evaluating the Urban Emergency Water Sources Field

MA Jian<sup>1,2</sup>

(1. NO.4 Geological Team of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, China)

Abstract: Taking Dongxiaoying water-rich area of Weifang emergency water sources as an example, on the basis of fully understanding the hydrogeological and geophysical characteristics of it, this paper comprehensively analyzed the principles, working methods and application effects of high-density resistivity method and hydrological logging, interpreted the structural characteristics of aquifers in the study area, and established hydrogeological parameters Logging interpretation model to estimate the salinity, permeability coefficient and per unit of water inflow. The results show that the geophysical interpretation are in good agreement with those of pumping test and water quality analysis. It is concluded that the comprehensive geophysical prospecting method has good applicability in the analysis of hydrogeological characteristics and can provide technical support for the investigation and evaluation of emergency water sources.

Key words: comprehensive geophysical prospecting; emergency water sources area; hydrogeology; high density resistivity method; hydrological logging