

EH4电磁成像系统在莱州湾地区探测海水入侵界限的调查研究

苏永军,黄忠峰,匡海阳,张国利,刘宏伟,梁建刚,高学生

(中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170)

摘要:利用EH4电磁成像系统在莱州湾地区探测了海水入侵界限,结果表明,EH4电磁成像视电阻率反演断面图不仅能反映地下咸淡水水体层位垂向的厚度变化、横向上延伸情况,建立各层位的相互关系,还可以反映层位的埋深及起伏形态,而且根据该断面图勾划出来的咸淡水分界线与水文地质调查结果基本吻合,说明这种方法在该地区有效而可行。EH4电磁成像系统对探测海水入侵具有简单、快速等特点,应用前景很好,值得推广。

关键字:EH4电磁成像系统;视电阻率;海水入侵;莱州湾地区

中图分类号: P613.3*25

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2014)04-0264-05

目前,全世界已经有六十多个沿海国家和地区,几百个地方发现了海水入侵问题,海水入侵给各国沿海地区带来严重危害,造成巨大经济损失,严重阻碍经济社会的持续发展,已经引起国际社会的共同关注,并积极开展海水入侵问题的研究和治理。我国首先于1964年在大连发现海水入侵,到20世纪70年代后期又在莱州湾发现海水入侵,进入80年代,海水入侵现象又发现多处。在河北秦皇岛、沧州以及山东的宁津、济阳、寿光、昌邑等地发生了咸水下移和入侵,直接导致地下水环境的逐渐恶化,地下水的适用性降低,使有限的地下淡水资源更为紧缺。随着海水入侵范围逐渐扩大^[1],入侵速度逐年加快,给人类带来的危害也越来越严重。其中以山东半岛的莱州湾地区海水入侵最为严重,区内海岸低平,入侵发生于沿岸平原,如龙口、招远、莱州、平度、昌邑、寒亭、寿光、广饶等县市。地球物理方法被广泛应用在评估和监测地下水和海水入侵调查研究^[2-5],并根据海水入侵界限来采取防治对策和工程措施。2013年度本项目组在莱州湾地区做了大量物探剖面测量工作,勾画出莱州湾地区海(咸)水入侵界线,本文针对EH4电磁成像系统在莱州湾地区寿光、昌邑等地海水入侵区探测效果进行分析,说明该物探方法在确定咸淡水界面工作中的有效性。

1 理论依据

影响海水入侵的因素很多,其中人为因素最为

主要,当人超量开采地下水,咸淡水平衡被破坏,极易使滨海地区形成地下水负值区,而负值区一旦形成,海(咸)水就会乘虚而入,使地下水的矿化度随含水层中氯离子的增加而变大,其地层电阻率则相应降低。地层电阻率的变化与地层的岩性、内部结构及其含水、含盐状况有关,其关系可用阿尔奇公式表示为:

$$\rho_s = a \phi^m s^{-N} A_c C^{-1}$$

式中: a 为常数;在滨海平原区测深点附近,当地层岩性比较均匀时,其孔隙度基本相同,所以 ϕ 和其指数 m 可视为常数; s 为饱和度,由于海水入侵主要发生在地下水位以下,岩层处于饱和状态,饱和度 s 和其指数 N 亦可视为常数; A_c 为与地下水溶液化学成分有关的系数,因为海水成分主要为氯化钠,化学成分基本稳定,所以 A_c 变化也不大; C 为地下水的矿化度,是影响地层电阻率的决定因素。依据海水侵入区与电阻率之间的关系^[6],便可确定咸水入侵的变化规律。

2 EH4电磁成像系统

EH4电磁成像系统^[7-9]是基于大地电磁测深原理的一种新的地球物理勘探方法,它通过对地面电磁场的观测,来研究地下电阻率大小的分布规律。本次使用的仪器是美国Geometrics公司和EMI公司联合研制的双源型StratagemTMEH4电磁成像系统,它

收稿日期:2014-09-29

基金项目:中国地质调查项目:莱州湾地质环境调查评价(12120113003800)

作者简介:苏永军(1981-),男,硕士,地球物理和地质工程双硕士研究生,主要从事地球物理勘查及研究工作,Email:syj95123@163.com。

依靠先进的电磁数据自动采集和处理技术,将CSAMT和MT方法结合起来,成为一种全新概念的张量式电导率测量系统。它实现了天然信号源与人工信号源的采集和处理,是国际先进的可控源与天然场源相结合的一种大地电磁测深系统。该系统是采用了最新的数字讯号处理器的硬、软件装置。其观测的基本参数为:正交的电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y)。如果将地表天然电场与磁场的比值定义为地表波阻抗,那么,在均匀大地的情况下,此阻抗与入射场极化无关,只与大地电阻率以及电磁场的频率有关:

$$Z = \sqrt{\pi \rho \mu} f(1-i) \quad (1)$$

通过测量相互正交的电场和磁场分量,可确定介质的电阻率值,计算公式为:

$$\rho = 1/5f \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (2)$$

式中: Z 为大地波阻抗, ρ 为电阻率, μ 为磁导率, f 为频率, i 为虚数符号。对于水平分层大地,上述表达公式仍然适用。用它计算得到的电阻率将随频率的改变而变化,因为电磁波的大地穿透深度或趋肤深度与频率有关: $H \approx 503 \sqrt{\rho/f}$, H 单位m。

当地下介质不均匀时,式(2)计算得到的电阻率为视电阻率。在一个宽频带上测量E和H,依据电磁波在介质中传播原理,趋肤深度或勘探深度随频率的降低而增大,通过改变并观测不同频率的电磁信号,就可获取不同深度的电性信息,继而结合淡水区电阻率一般较大,与咸水区具有明显的电阻率差异的特征,可利用视电阻率断面图划分地下咸、淡水的界线,确定咸、淡水体的顶、底界面埋深情况。

3 应用实例

3.1 地质概况

工作区地处莱州湾凹陷,是渤海湾盆地东南部郯庐断裂带内一个箕状凹陷,属于发育在中生界基底之上的新生代凹陷。区内第四系沉积厚度在200 m左右,各统基本发育齐全。下更新统—中更新统岩性以棕色粘土和黄褐色粉土为主,夹粉细砂;上更新统岩性与现代黄河冲积物相似,为灰黄色粉土、粉砂互层,夹部分褐黄色粉质粘土;全新统一般均可三分,中部为海相层,上下均为陆相沉积层,但在近海岸区则常为海相层和滨岸相地层。流经工作区内的主要河流有小清河、淄河、弥河、白浪河、潍河等,水系

较发育,工作区地势平坦。

1976年莱州湾沿岸的寿光、寒亭、莱州等地的地下水动态长期监测井中首先发现水质变咸、 Cl^- 浓度增高海(咸)水入侵现象,当时仅为几处孤立的点状入侵,整个70年代末80年代初发展比较缓慢,入侵面积小;80年代中后期,入侵面积迅速扩大,入侵速度增大,整个莱州湾东、南沿岸入侵区连为一片;90年代以来,海水入侵速度减慢,局部地段有减弱趋势。

3.2 电性特征

工作区主要地层为新生界,岩性以粘土、粉砂、细砂为主,由于该区地下水位浅,各地层均处于饱和状态,矿化度就成为影响视电阻率变化的主要因素。根据以往资料^[10]和笔者项目组在该区做的工作成果,可知该地区主要含水层为咸水、淡水(分浅层淡水和深层淡水),其电阻率具有明显的差异。将矿化度大于2 g/L的地下水定为咸水,咸水(矿化度>2 g/L)电阻率一般为1~10 $\Omega \cdot m$,卤水(矿化度>50 g/L)电阻率一般为1~2 $\Omega \cdot m$,高浓度卤水(矿化度>100 g/L)电阻率一般小于1 $\Omega \cdot m$,最低可达0.4~0.6 $\Omega \cdot m$;淡水电阻率一般为10~30 $\Omega \cdot m$,其中浅层淡水的电阻率相对高些,一般为20~30 $\Omega \cdot m$,深层淡水的电阻率相对低些,一般为10~20 $\Omega \cdot m$;不含水的地层或基岩电阻率一般大于30 $\Omega \cdot m$,甚至大于100 $\Omega \cdot m$ 。

含水层的矿化度与其电阻率呈负相关关系,矿化度越高,电阻率越低。在实际工作中,咸淡水没有严格的界限,在其分界面附近,咸淡水基本呈逐渐过渡的状态(咸水—半咸水—微咸水—淡水),只是不同地段过渡带的梯度大小不同而已。在研究区的南段(远离海岸线),为全淡水区,地下无咸水体,其电阻率一般较大,含水层电阻率多为10~30 $\Omega \cdot m$,无水层电阻率多大于30 $\Omega \cdot m$,与靠近海岸线的北段含咸水区具有明显的电阻率差异,可利用视电阻率断面图确定咸淡水体的分界线,咸淡水水体的在平面分布情况和垂向变化情况,为查清海水入侵等环境地质问题提供可靠的基础资料。

3.3 实例分析

3.3.1 昌邑西剖面

昌邑西EH4剖面位于昌邑市西约10 km,剖面起于昌邑市远东庄村东,至南褚村,全长5 km,剖面点距为500 m,测线方位为138°。从EH4视电阻率综合反演断面图1可以看出,剖面自0 m至2900 m之间浅

部-100 m 以上电阻率值在 $1 \sim 10 \Omega \cdot m$ 之间,结合水文地质调查资料推测该段浅部区域为咸水分布区域,该段深部电阻率值在 $10 \sim 30 \Omega \cdot m$ 之间,推测为淡水-微咸水分布区域;在剖面 2900 m 至 3050 m 之间,浅部电阻率值在 $10 \sim 15 \Omega \cdot m$ 之间,推测为微咸水分布区;在剖面 2900 m 处电阻率等值线梯度变化较大,初步推测为咸淡水分界线;自剖面 3050 ~ 5000 m 之间,电阻率值在 $10 \Omega \cdot m$ 以上,推测为淡水分布区。

为了更准确的查明咸淡水的界线和突出细节信息,在点距 500 m 的基础上对该剖面 2600 ~ 4000 m 段进行点距为 50 m 的 EH4 加密剖面测量,从昌邑西

EH4 加密剖面视电阻率反演断面图 2 可以看出,50 m 小点距加密剖面与原 500 m 大点距剖面整体电阻率特性一致性较好,小点距剖面地质信息更丰富,在剖面 2930 m 处电阻率等值线梯度呈低阻至中高阻过渡,推断为咸淡水入侵界线。该剖面所推测咸淡水入侵界线与水文地质绘制的水样 2 g/L 矿化度等值线较为吻合。

3.3.2 大王镇东剖面

大王镇东 EH4 剖面位于寿光市大王镇东,全长 4.5 km,剖面点距为 50 m,测线方位为 11° 。从大王镇东 EH4 剖面视电阻率反演综合断面图 3 可以看出:

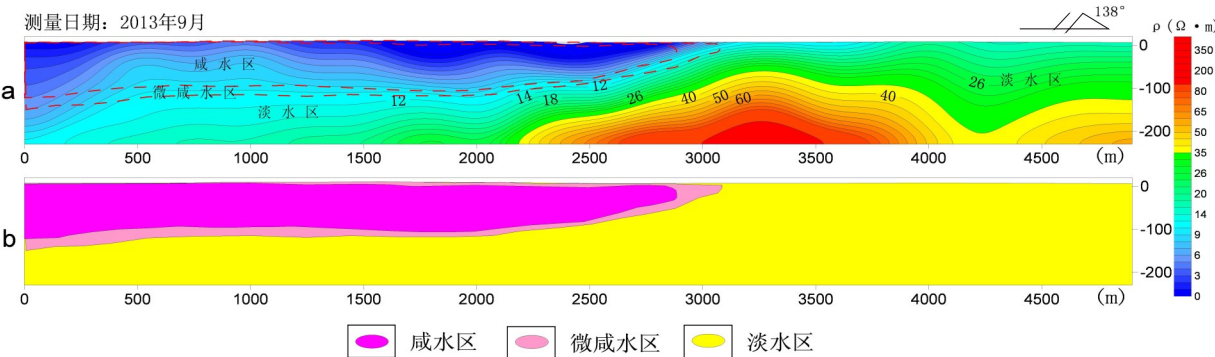


图1 昌邑西 500 m 点距视电阻率反演断面图(a)和综合解译断面图(b)

Fig.1 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and integrated interpretation (b)of Changyi west section with 500 m measuring point distance

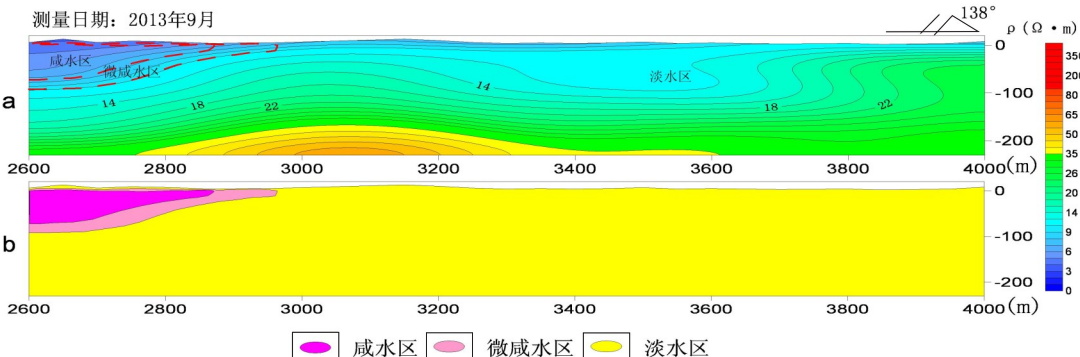


图2 昌邑西 50 m 点距视电阻率反演断面图(a)和综合解译断面图(b)

Fig.2 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and integrated interpretation (b)of Changyi west section with 50 m measuring point distance

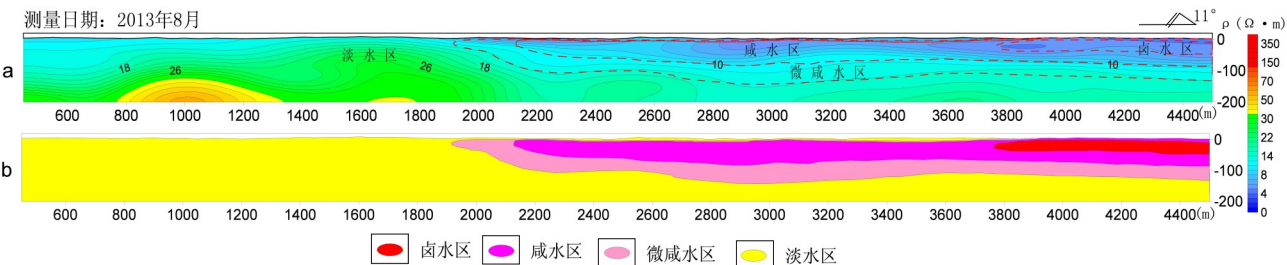


图3 大王镇东 50 m 点距视电阻率反演断面图(a)和综合解译断面图(b)

Fig.3 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and integrated interpretation (b)of Dawang town east section with 50 m measuring point distance

剖面电阻率整体呈现南高北低的趋势,总体电阻率等值线平稳连续,与工作区地质特征相吻合。自剖面0~2100 m,电阻率值在10~300 Ω·m之间,推测为淡水及微咸水分布区;自剖面2100~4500 m之间,浅部(-100 m以上)电阻率值在1~10 Ω·m之间,推测为咸水-卤水分布区;深部(-100 m以下)电阻率值在10~30 Ω·m之间,推测为深部淡水分布区;在剖面2100 m附近,电阻率值自几Ω·m变化至十几Ω·m以上,且电阻率等值线呈低缓梯度变化,结合海咸水入侵特征及水文地质资料分析,推测为咸淡水分界线。该界线与水文地质绘制的2 g/L水样矿化度等值线吻合较好。

3.3.3 固堤镇东剖面

固堤镇东EH4剖面位于潍坊市寒亭区固堤镇东,剖面南起固堤镇李家东庄村北,北至固堤镇鱼洞埠村北,全长9 km,剖面点距为500 m,测线方位为21°。从固堤镇东EH4剖面视电阻率反演断面图4可以看出:剖面整体电阻率呈现北低南高的趋势。自剖面0~2250 m附近,电阻率值一般在15~几百Ω·m之间,推测为整体淡水分布区;自剖面2250~2400 m之间,浅部(-120 m以上)电阻率值一般在

10~15 Ω·m之间,推测该段为微咸水分布区;在剖面2400 m附近,电阻率等值线梯度变化较大,初步推测该处为咸淡水分界线。

为了更准确的查明咸淡水入侵界线,在点距500 m的基础上对固堤镇东EH4剖面1700~3400 m段进行了点距为50 m的EH4加密测量。从固堤镇东EH4加密剖面视电阻率反演综合断面图5可以看出:加密剖面与原长剖面整体电阻率特征吻合较好,加密剖面在2480 m附近电阻率等值线呈现梯度变化较大,结合水文资料资料及其电阻率值分析,推测该处为咸淡水分界线。

4 结论和建议

通过在莱州湾地区海水入侵过渡带做了大量物探剖面测量工作,查明该地区海水入侵界线和莱州湾地区电阻率值整体呈现南高北低的趋势,浅部较低,深部稍高,并且电阻率等值线呈平缓分布特征,这与工作区海陆相交沉积物组成的平原地质特征相吻合。剖面浅部电阻率值较低,等值线平稳连续,主要推测为浅层孔隙水分布区,其垂向分布呈现南浅北深的特征;浅层孔隙水底界面推测为一薄层状

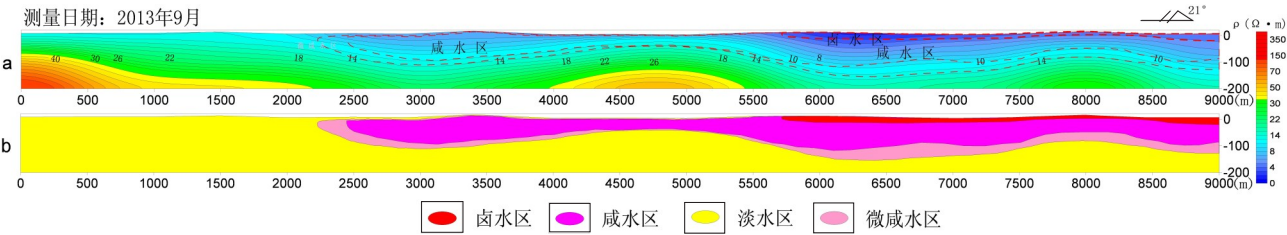


图4 固堤镇东500 m点距视电阻率反演断面图(a)和综合解译断面图(b)

Fig.4 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and integrated interpretation (b) of Gudi town east section with 500 m measuring point distance

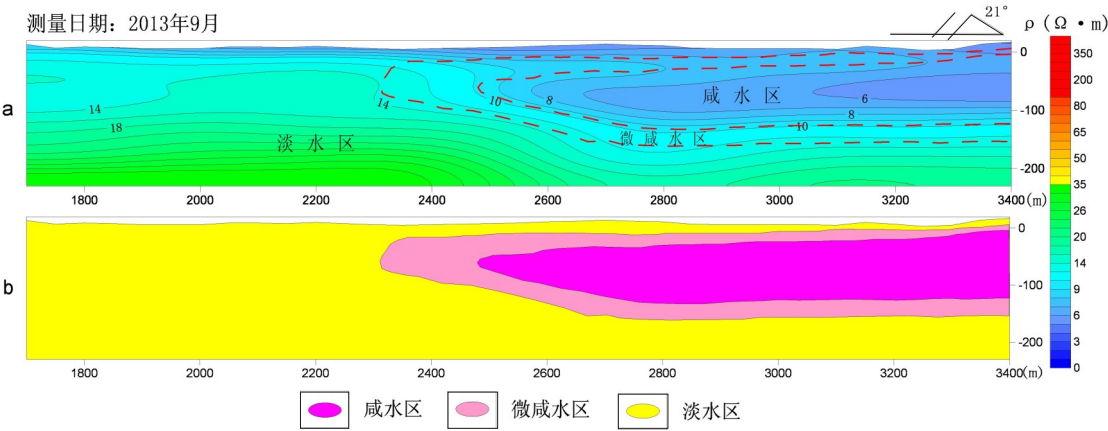


图5 固堤镇东50 m点距视电阻率反演断面图(a)和综合解译断面图(b)

Fig.5 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and integrated interpretation (b) of Gudi town east section with 50 m measuring point distance

相对隔水层存在,其厚度约为10~30 m之间;中深部电阻率值在20~30 $\Omega \cdot m$ 之间,等值线平稳连续,推测为中部及深部承压水,其底界面埋深在-40~-400 m之间,南浅北深;在剖面深部,电阻率值逐渐升高,推测为基岩区。

在本次工作中,EH4电磁成像系统采用大点距探测海水入侵大致位置,然后采用小点距探测的方式划出的咸淡水界线与水文地质水样矿化度2 g/L等值线分布,两界线基本吻合,表明该方法的有效性,可行性。该方法在该地区探测海咸水入侵界线取得了全面的、可靠的资料,对研究莱州湾地质环境调查评价提供了基础的地球物理资料。

参考文献:

- [1] 孙晓明,徐建国,杨齐青,等.环渤海地区海(咸)水入侵特征与防治对策[J].地质调查与研究,2006,29(3):203-211.
- [2] Tomas Feseker. Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany [J]. Hydro-geology Journal,2007,15:267-279.
- [3] 苏永军,范 剑,刘宏伟,等.高密度电阻率法探测海水入侵咸淡水界限初步调查研究—以莱州湾为例[J].地质调查与研究,2014,37(3):177-181.
- [4] 傅竹武,徐 旌,周廷梅.地球物理方法在地下水污染监测中的应用[J].云南地理环境研究,2005,17(6):76-81.
- [5] 张慧静,孙 志.地球物理方法在环境监测中的应用[J].北方环境,2012,24(1):114-117.
- [6] 刘冀闽,师沙沙,韩 涛.电导率法在海水入侵监测中的应用[J].中国环境管理干部学院学报,2009,19(1):77-82.
- [7] 李 磊,王新建,马安丽. EH4 电磁成像系统在云南干旱地区地下水勘查中的应用[J].地下水,2012,34(2):96-98.
- [8] 李国占,孙银行.地下水地球物理勘查技术模式[J].物探与化探,2010,34(2):202-204.
- [9] 李金锁,齐 文,许文鼎.探找热水的有效方法—以EH4电导率成像系统在西藏尼玛县找热水为例[J].地球物理学进展,2012,27(3):1243-1253.
- [10] 徐建国,卫政润,张涛,等.环渤海地区(山东部分)地下水资源与环境地质调查评价报告[R].山东省地质调查院,2003.

Survey and Study on Exploring the Interface of Saltwater Intrusion by Using the EH4 Electromagnetic Imaging System in Laizhou Bay Area

SU Yong-jun, HUANG Zhong-feng, KUANG Hai-yang, ZHANG Guo-li, LIU Hong-wei,
LIANG Jian-gang, GAO Xue-sheng

(Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China)

Abstract:Through the analysis of the application cases by using the EH4 electromagnetic imaging system to explore seawater intrusion in Laizhou bay area, we found that apparent resistivity inversion section of the EH4 electromagnetic imaging system contains a large amount of geological information, inversion section reflects not only the strata thickness variation of the vertical and horizontal extension on saltwater and freshwater, and establishes the relationships of every strata, but also the burial depth of stratum and the strata of ups and downs. We use the cross section of apparent resistivity to identify boundary of salt water and freshwater. The result of saltwater and freshwater interface with the inversion section of the EH4 electromagnetic imaging system is almost consistent with the result of hydrogeological survey, and this method is effective and feasible in Laizhou bay area. The application of the EH4 electromagnetic imaging system in the exploration of seawater intrusion has the advantages of simple, fast and so on, it has very good prospects and worth spreading and popularizing.

Key words: EH4 electromagnetic imaging system; apparent resistivity; saltwater intrusion; Laizhou bay area.