

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

苏永军¹, 范 剑², 刘宏伟¹, 张国利¹, 刘继红¹, 匡海阳¹, 黄忠峰¹, 范翠松¹

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 天津华北地质勘查局, 天津 300170)

摘 要: 本文从理论上阐述了高密度电阻率法探测海水入侵界限的可行性, 对该方法在莱州湾地区实例分析表明, 根据高密度电阻率法反演视电阻率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, 说明了该方法在莱州湾地区具有较好的有效性和可行性。笔者还利用视电阻率断面图确定了咸淡水水体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。该方法在探测海水入侵方面具有简单、快速、低廉、无破坏性原位探测等特点, 其应用前景可观, 值得推广。

关键字: 高密度电阻率法; 视电阻率; 海水入侵; 莱州湾地区

中图分类号: P641.2; X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2014)03-0177-05

目前, 全世界已经有六十多个沿海国家和地区的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。全球范围海水入侵的普遍性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, 且海水入侵范围逐渐扩大^[1], 入侵速度逐年加快, 危害越来越严重。我国沿海岸从北向南, 发现海水入侵的地区有葫芦岛市、大连市、秦皇岛市、天津市、山东半岛、上海市、宁波市等, 其中以山东半岛的莱州湾地区海水入侵最为严重。

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中^[2-4], 2013年度笔者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。本文对高密度电阻率法在寿光市侯镇南马家庄附近海水入侵区探测效果进行了分析, 认为该方法在探测海水入侵方面行之有效。它具有成本低、速度快、周期短等特点, 显示出很好的应用前景。

1 理论依据

海水入侵的影响因素很多, 其中人为因素最为主要。当超量开采地下水, 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^[5]表示为:

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

式中: a 为常数; φ 为孔隙度, 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, 因为海水成份主要为氯化钠, 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。

收稿日期: 2014-06-26

资助项目: 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。

2 高密度电阻率法

高密度电阻率法^[7]在原理上属于电阻率法的范畴,是一种以地下介质体的电阻率差异为地球物理前提,用直流电阻率法的阵列形式,即采用一次性布设几十甚至几百根高密度电极布点,可进行一维(1D)二维(2D)、三维(3D)^[8]和四维(4D)地电断面测量的电阻率层析成像勘查技术。该方法成本低、效率高、信息丰富、解释方便,被广泛应用在水、工、环物探工作中。其工作流程见图1。

高密度电阻率法数据采集系统由主机、多路电极转换器、电极系共三部分组成。多路电极转换器通过电缆控制电极系各电极的供电与测量状态。主机通过通讯电缆、供电电缆向多路电极转换器发出工作指令、向电极供电并接收、存贮测量数据。数据采集结果自动存入主机,主机通过通讯软件把原始数据传输给计算机。计算机将数据转换成处理软件要求的数据格式,经相应处理模块进行畸变点剔除、地形校正等预处理后,进行二维反演计算,绘制二维反演拟断面图。在等值线图上根据视电阻率的变化特征结合钻探、地质调查等资料作相应的地质解释,并绘制出物探成果解释图。

本次工作采用的是美国AGI公司的SuperSting R8/IP高密度电阻率仪器,取得良好的应用效果。根据海水入侵区具有明显视电阻率差异特征,利用反演出的视电阻率断面图确定咸淡水水体的顶、底界面埋深,研究咸淡水水体的空间分布情况,同时划出海水入侵的界限,其结果被水文地质调查成果所证实。

3 应用实例

3.1 地质概况

工作区在大地构造上,位于中朝准地台的两个Ⅱ级构造单元—华北台坳和鲁西中台隆,以齐河—广饶断裂为界相应划分为华北平原、鲁西两个地层分区。华北平原地层区位于齐河—广饶断裂以北,全区为第四系覆盖。前寒武纪结晶基底由花岗片麻岩和片岩组成,古生界由灰岩、砂岩、泥岩组成,中生界由砂岩、泥岩组成。区内第三系厚度巨大,古近系为一套以泥岩、砂岩为主夹灰岩的含油沉积;新近系主要为细砂岩、泥岩。

工作区地处莱州湾凹陷,该凹陷为渤海湾盆地东南部郯庐断裂带内一个箕状凹陷,是在中生界基底之上发育的新生代凹陷。工作区内第四系沉积总厚度在200 m左右,第四系各统基本发育齐全。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。

3.2 电性特征

研究区的主要地层为第四系和第三系,其岩性以粘土、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^[9]和笔者项目组在该

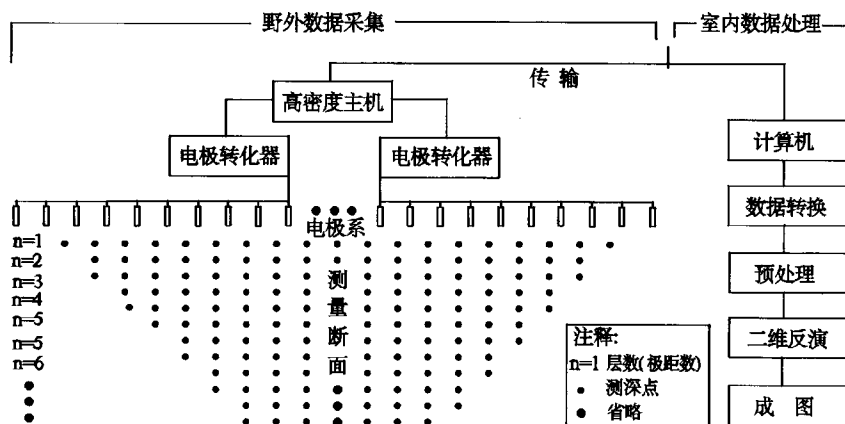


图1 高密度电阻率法工作流程图

Fig.1 The flow chart of the high-density resistivity method

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 $\Omega\cdot\text{m}$,卤水(矿化度>50 g/L)电阻率一般为1~2 $\Omega\cdot\text{m}$,高浓度卤水(矿化度>100 g/L)电阻率一般小于1 $\Omega\cdot\text{m}$,最低可达0.4~0.6 $\Omega\cdot\text{m}$;淡水电阻率一般为10~30 $\Omega\cdot\text{m}$,其中浅层淡水的电阻率相对高些,一般为20~30 $\Omega\cdot\text{m}$,深层淡水的电阻率相对低些,一般为10~20 $\Omega\cdot\text{m}$;不含水的地层或基岩电阻率一般大于30 $\Omega\cdot\text{m}$,甚至大于100 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

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 $\Omega\cdot\text{m}$,无水层电阻率多大于30 $\Omega\cdot\text{m}$,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 解释原则

二维视电阻率反演断面图包含有丰富的地质信息,它不仅能反映地下各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、断裂构造及构造单元等特征。视电阻率反演断面推断解释,要根据工作区海水入侵区电阻率断面图中背景值、低阻异常的形态及低阻异常值等地球物理特征,结合区域地质及水化学分析等水文地质资料建立断面解释原则,在此基础上进行地电断面的推断解释。

3.4 成果分析

本次采用的偶极—偶极装置,滚动测量方式,电极距10 m,分布式电缆一次性布设28根电缆112个电极,单点采集时间1.2 s,采样误差最大5%。

高密度电阻率法剖面位于寿光市侯镇南马家庄附近,布设了6条线距10 m平行走向的高密度电阻率剖面,测线方位角77°,其中4线为主剖面。

4线高密度主剖面全长2.08 km(1800~3880 m),从侯镇南4线高密度剖面视电阻率反演综合断面图

(图2)可以看出:自剖面1800 m至2460 m之间电阻率值一般在10~30 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,推测该段为浅层淡水、微咸水及深部淡水分布区;在2460 m至3880 m浅部-60 m以上至-10 m之间电阻率值在1~10 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,推测该段为咸水—卤水分布区;浅部-10 m以上区域电阻率等值线呈较薄盖层状,推测有浅部淡水存在;在该段深部-60 m以下区域,电阻率值一般在十几至数百 $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,推测为深部淡水区;在2460 m电阻率等值线变化明显,电阻率值自几 $\Omega\cdot\text{m}$ 过渡至十几 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上,推测为咸淡水分界线。推断解释的结果与水文地质调查绘制的2 g/L的水样矿化度等值线吻合性较好。

其他5条(1、2、3、5、6线)高密度剖面与4线高密度主剖面平行,但测线长度较4线高密度剖面略短,均为1.35 km。从图3可以看出这5条剖面与4线剖面整体电性特征较为一致,各测线根据反演视电阻率特征划分的咸淡水入侵分界线在2420~2460 m之间,其中,1线2423 m,2线2439 m,3线2456 m,4线2460 m,5线2420 m,6线2431 m。综上所述,咸淡水分界线在6条剖面上的空间形态类似于一个“C”字形,相邻平行高密度剖面的布设对该段咸淡水入侵界线有更直观的认识。根据高密度电阻率法反演出视电阻率断面图勾划出来的咸淡水分界线与水文地质调查结果吻合。

4 结论和建议

(1)通过2013年在莱州湾地区海水入侵过渡带所做的大量物探剖面测量工作,查明了该地区海水入侵界线和咸淡水界面分布状况;在综合分析研究的基础上,绘制了咸淡水入侵界线成果平面图。在本次工作中,利用高密度电阻率法划出咸淡水界线与水文地质水样矿化度2 g/L等值线分布基本吻合,表明该方法的有效性和可行性。在该区初次采用多条二维高密度电阻率法剖面组成的准三维测量方式,从结果来看效果非常好,为以后在本区进行海水入侵监测提供了新思路。

(2)进一步总结了该区电性特征为:靠近莱州湾北部海边区域属于卤咸水入侵区,电阻率值一般低于3 $\Omega\cdot\text{m}$;自卤咸水入侵区向远离海岸区域的咸水区域,电阻率值一般在3~10 $\Omega\cdot\text{m}$;在咸水入侵过渡的微咸水区域,电阻率值一般自1~10 $\Omega\cdot\text{m}$ 过渡至10 $\Omega\cdot\text{m}$ 以上,而在全淡水区域,电阻率值一般在

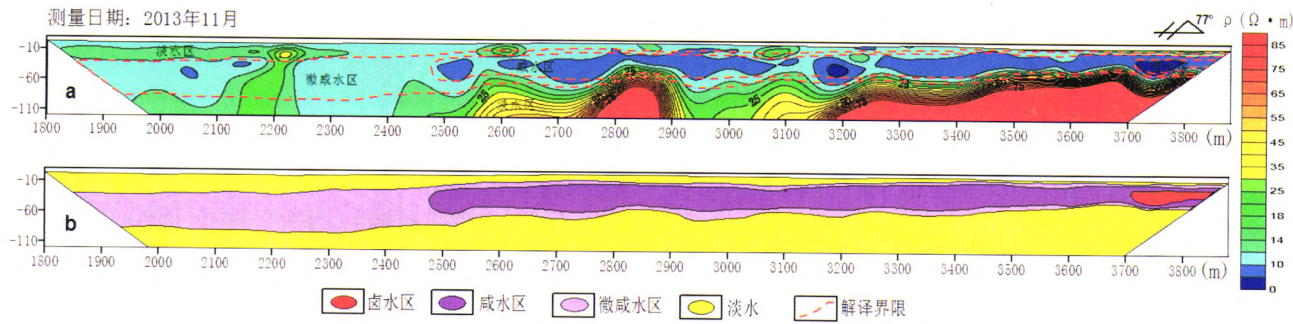


Fig.2 Inversion cross section of apparent resistivity (a) and interpretation (b)of principal section

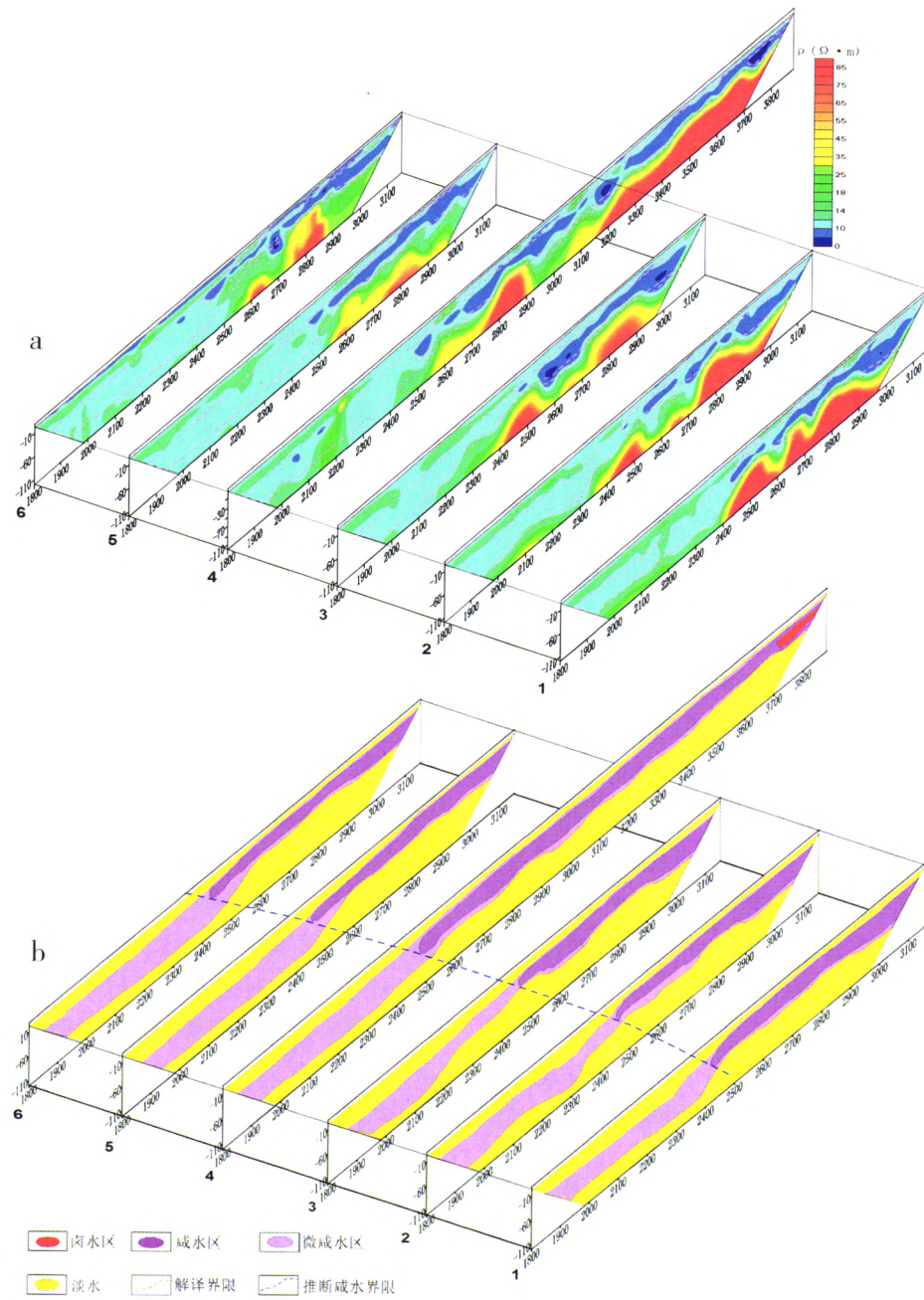


Fig.3 Pseudo-3D cross section of apparent resistivity (a) and interpretation (b)of line1-line6

15 ~ 100 $\Omega \cdot m$ 之间。

(3)本次海咸水入侵监测取得了全面的、可靠的物探资料,为研究莱州湾地质环境调查评价提供了基础的地球物理依据。建议以后每年在重点地段进行动态监测,建立莱州湾地区海咸水入侵地球物理动态监测网,为有效预测莱州湾地区海咸水入侵发展变化趋势提供依据。

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. 地质调查与研究[J]. 2006, 29(3): 203-211.
- [2] Tomas Feseker, Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15: 267-279.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杨学明, 苏永军, 杜东, 等. 音频大地电磁法在海水入侵动态监测中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 301-305.
- [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] 李金铭, 罗延中. 电法勘探新进展[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 98-101.
- [8] Adrian D W, Mark B, Vincent E A P, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. Advances in Water Resources, 2013, 51(3): 3-26.
- [9] 徐建国, 卫政润, 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.

Preliminary Survey and Study on Exploring Saltwater Freshwater Interface of Saltwater Intrusion by Using the High-density Resistivity Method: A Case Study on Laizhou Bay

SU Yong-jun¹, FAN Jian², LIU Hong-wei¹, ZHANG Guo-li¹,
LIU Ji-hong¹, KUANG Hai-yang¹, HUANG Zhong-feng¹, FAN Cui-song¹

(1. Tianjin Center, China geological survey, Tianjin, 300170, China;

2. Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin, 300170, China)

Abstract: This article expounds the orethically the feasibility of exploring saltwater intrusion with the high-density resistivity method, through effect analysis of an example in Laizhou bay area, it shows that the result of saltwater-freshwater interface with the inversion section of the high-density resistivity method is almost consistent with the result of hydrogeological survey. This method is effective and feasible in Laizhou bay area. Authors use the cross section of apparent resistivity to identify boundary of saltwater and freshwater, horizontal distribution of fresh-salt water bodies and vertical variation, this method provides reliable basic data for environmental and geological problems. The application of the high-density resistivity method in the exploration of seawater intrusion has the advantages of simple, fast, inexpensive and non-destructive field exploration, it has very good prospects and worth spreading and popularizing.

Key words: the high-density resistivity method; apparent resistivity; saltwater intrusion; Laizhou bay area