

音频大地电磁测深法在锦州海水入侵调查中的应用

郇恒飞, 郭常来*, 崔健, 倪金, 石旭飞, 马宏伟

HUAN Hengfei, GUO Changlai*, CUI Jian, NI Jin, SHI Xufei, MA Hongwei

中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China

摘要: 锦州大、小凌河区域内的海水、咸水入侵严重影响了当地的经济和人民生活质量, 为查明研究区海水、咸水入侵的界线变化及污染范围, 在研究区完成了5条音频大地电磁测深(AMT)剖面。剖面数据采用改进非线性共轭梯度(NLCG)法反演, 二维反演结果直观反映了研究区咸淡水分布范围, 给出了咸淡水的分界线位置。结果表明, L0和L1剖面处的海侵范围未扩大; L2剖面处海侵范围在扩大; L3剖面处地下古咸水已污染部分淡水; L4剖面处存在古咸水但未污染淡水; 这与水文地质钻孔及机民井调查资料基本吻合。总之, 在锦州地区使用AMT方法研究海水、咸水的赋存状态及变化规律可行、有效, 可以为锦州环境水文地质调查提供基础的地球物理资料。

关键词: 锦州; 海水、咸水入侵; 音频大地电磁测深; 反演; 咸淡水分界线

中图分类号: P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)10-1720-09

Huan H F, Guo C L, Cui J, Ni J, Shi X F, Ma H W. Application of audio magnetotelluric sounding to the seawater intrusion survey of Jinzhou. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1720-1728

Abstract: The invasion of sea and salt water in big and small Linghe region of Jinzhou City has seriously affected the local economy and people's quality of life. In order to find out the boundary change and pollution scope of the sea and salt water in the study area, five AMT profiles have been completed. The profile data is inverted by the improved NLCG method. The two-dimensional inversion results directly reflect the distribution range of the salt and fresh water in the study area, and give the boundary location of the salt and fresh water. The results show that the transgressive range of L0 and L1 profile does not expand, the transgressive range of L2 profile is expanding, part of fresh water has been polluted by the underground ancient saline water at L3 profile, and the fresh water is not polluted at L4 profile, which are basically consistent with the hydrogeological drilling and mechanical well survey data. In a word, AMT method is feasible and effective to study the occurrence state and change rule of sea and salt water in the Jinzhou area, which can provide basic geophysical data for environmental hydrogeology investigation.

Key words: Jinzhou; invasion of sea and salt water; AMT; inversion; salt and fresh water interface

中国沿海城市都面临着海水入侵污染的困扰, 如何解决好这一环境水文地质问题, 关系到当地的经济发展和人民生活质量。作为临渤海城市, 锦州同样面临着海水入侵的灾害, 主要集中在大、小凌

河冲积扇前缘滨海地带及入海口区内, 同时面临的另一灾害是咸水入侵, 主要是以往发生海侵而遗留的古咸水, 由于当地过度抽取淡水或盲目打井, 导致地下赋存的古咸水污染淡水, 造成咸水入侵灾害。

收稿日期: 2020-06-19; 修订日期: 2021-04-04

资助项目: 中国地质调查局项目《辽西凌河地区综合地质调查》(编号: DD20180977)、《大连海岸带陆海统筹综合地质调查》(编号: DD20189504)、《东辽河流域生态地质调查与保护修复示范》(编号: DD20211395)

作者简介: 郇恒飞(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事地球物理资料处理与解释综合研究。E-mail: huanhengfei@126.com

* 通信作者: 郭常来(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事国土空间规划、水工环等工作。E-mail: guochanglai@126.com

针对海、咸水入侵这一环境水文地质问题,地球物理工作者在物探领域进行了许多研究,取得了很好的观测效果。随着电法方法理论、仪器和计算机技术的发展,国内外学者将电法广泛应用于海水入侵的调查研究中,主要有电阻率法、高密度电阻率法、音频大地电磁测深法(AMT)、瞬变电磁法、航空电磁探测法等。Swartz^[1]首次将电阻率法应用于夏威夷岛咸淡水界面的探测,并取得了成功。刘青勇等^[2]应用电阻率法和瞬变电磁法有效监测海、咸水入侵,确定咸、淡水界面。唐新强等^[3]研究表明,Wenner法非常适宜监测海水入侵的动态。Adepelumi等^[4]采用电测深法划分海水入侵,Hodlur等^[5]采用综合物探方法对海水、淡水进行分层,都取得了不错的效果。杨学明等^[6]利用咸淡水电性特征的差异,通过AMT法立体刻画了海水入侵的范围及方式。苏永军等^[7-8]将EH4电磁成像系统和高密度电阻率法应用于沿海地区的海水、咸水入侵界线探测,都很好地反映了咸淡水在空间上的分布变化情况。El-Kaliouby等^[9]用TDEM识别出地下水的盐度变化情况。何玉海^[10]、Kazakis等^[11]应用高密度电阻率法成功圈定了海水入侵范围。刘宏伟等^[12]利用AMT和高密度电阻率法均可有效识别咸水入侵分界线。陈松等^[13]利用高密度电阻率法能有效地识别咸淡水的空间展布形态,结果与已有资料基本吻合。Prashant等^[14]应用高密度电阻率法和激发极化法成功圈定海水入侵范围。以上物探方法的研究为本文研究海水入侵和古咸水赋存形态奠定了坚实的基础。

目前,在辽宁锦州地区利用物探方法研究海水入侵问题的研究较少,而且对收集资料中的海水入侵区范围变化及古咸水的地下赋存形态均未知。由于该区古咸水的赋存深度较大,结合常用电法的优缺点及地区环境,决定采用AMT法对锦州海水、咸水入侵的重点区域进行研究。本文通过对几条典型剖面反演结果进行分析,探讨AMT法在锦州地区的适用性,划分海水入侵的咸淡水界线和圈定古咸水的地下空间赋存形态,为锦州环境水文地质调查提供基础物探资料。

1 研究区地质地球物理特征

1.1 地质概况

研究区广布第四系,其中东南部下伏新近系,

而西北部丘陵区广泛分布中生界白垩系和侏罗系,局部分布有古生界、中—新元古界及太古宇。研究区东、西部第四系的分布差异较大,西北部丘陵山区沿大、小凌河河谷及两侧谷地、山麓丘坡、山间盆地分布;东南部平原第四系广泛分布,层位齐全,更新统、全新统发育完整,厚度可观。由西北向东南变化的规律是:厚度由薄变厚,由20 m渐变为280 m;岩相在水平方向上,由卵石、圆砾为主的极粗颗粒相变至圆砾、粗砂、砂夹粘性土的过渡相,最后相变为细砂、中砂及砂夹粘性土薄层的较细颗粒相。第四系物质来源于辽西丘陵区,以冲洪积、坡洪积、冲积和局部冰水堆积为主,在南部沿海一带形成海陆交互相沉积^①。

研究区地质构造较复杂,具有东西向、北北东向和北东向构造。区内东西向构造展布局限,发育于早古生代,延至晚侏罗世,具多期活动性。北北东向构造主要由锦州盆地、锦州断裂、鞍子山—松山断裂带组成,主要活动于晚侏罗世—早白垩世,但最早发育时间可能为印支期。北东向构造区内较发育,开始活动于印支期,一直延续到晚侏罗世及晚近期仍有活动,规模较大的构造有松山—石山背斜、松山—锦县断裂带和高升—张家屯断裂,而高升—张家屯断裂隐伏于第四系之下,个别切穿了新近系,表明其新生代以来具活动性^①。

1.2 海水、咸水入侵因素分析

研究区海水入侵区含水层岩性单一,为砂、圆砾或卵石层,粘性土夹层少,地下水类型为潜水及微承压水,地下水与海水水力联系密切,海水通过沙质海滩及小凌河故道、潮沟渗入区内。由于低于海平面的含水层没有隔水层阻挡,海水沿含水层向内陆呈楔形侵入到淡水体下部,形成上淡下咸型水质结构,咸淡水赋存于同一含水层中,咸淡水界面向内陆倾斜,界面依赖于咸淡水压力平衡保持动态稳定性,是极易引发海水入侵的地区。由此可见,水文地质环境是该区海水入侵的前提条件,人为因素是该区海水入侵加剧的决定性条件,其中过量开采地下淡水是最主要、最直接的原因。由于集中、过量开采地下淡水,使区域形成大面积的降落漏斗,漏斗中心水位降至海平面以下,咸淡水边界处淡水水位下降,淡水与咸水压力天然平衡状态受到破坏,从而引发海水入侵,咸水埋藏深度变浅,界面向内移。另外,养虾、晒盐、海盐的加工处理及河道管

理不善等人为活动,对海水入侵也起着不同程度的促进作用。研究区海水入侵的总体状况如图 1 所示。

研究区咸水入侵灾害主要分布于大凌河冲积扇前缘滨海地带。更新世中期—全新世中期,辽东湾有 3 次海侵波及研究区,最后一次海侵自全新世早期开始,属最大一次海侵,范围达娘娘宫—阎家—西八千—安屯一带,是制约研究区地下咸水形成和分布的基本因素。而该区含水层具多层结构,岩性以粗砂、中砂、细砂为主,粘性土夹层多,为承压水区,咸、淡水体与海水之间均为粘性土所隔,地下水与海水无直接水力联系。现今区内咸水的形成和分布受第四纪以来海侵和区内地下水开采的共同影响。第四纪海积层呈多层超覆分布,控制了咸水的空间分布,形成了东部沿海地区大面积浅层咸水体超覆于淡水体之上的分布格局。每次海积层中保留了原来沉积水,同时在古水文地质条件下,海水必然侵入下部含水层中,使原来的淡水咸

化,咸水的分布复杂化。在人为因素影响下,由于淡水过量开采,或者在咸淡水垂向分布不清的情况下,盲目打井,止水部位不准确,导致咸水入侵灾害。

1.3 电性特征分析

研究区广布第四系,东南部下伏新近系,岩性以粘土、砂质粘土、粉砂、中细砂为主,其中粘土、砂质粘土电阻率低于粉砂、中细砂,具有明显的电性差异。而地下水本身也具有低阻的电性特征,其电阻率与氯离子含量、矿化度呈负相关关系,氯离子含量、矿化度越高,电阻率越小^[15]。结合收集的资料和本次工作成果,研究区的咸水电阻率一般为 $1 \sim 12 \Omega \cdot m$;微咸水—淡水电阻率一般为 $12 \sim 30 \Omega \cdot m$;含水地层的电阻率一般大于 $30 \Omega \cdot m$;粘土、砂质粘土的电阻率一般为 $45 \sim 300 \Omega \cdot m$,砂岩的电阻率一般为 $200 \sim 1000 \Omega \cdot m$,而基岩的电阻率更高,本次电法勘探工作就具备了应用前提。实际工作中,咸淡水没有严格的界限,在其分界面附近,

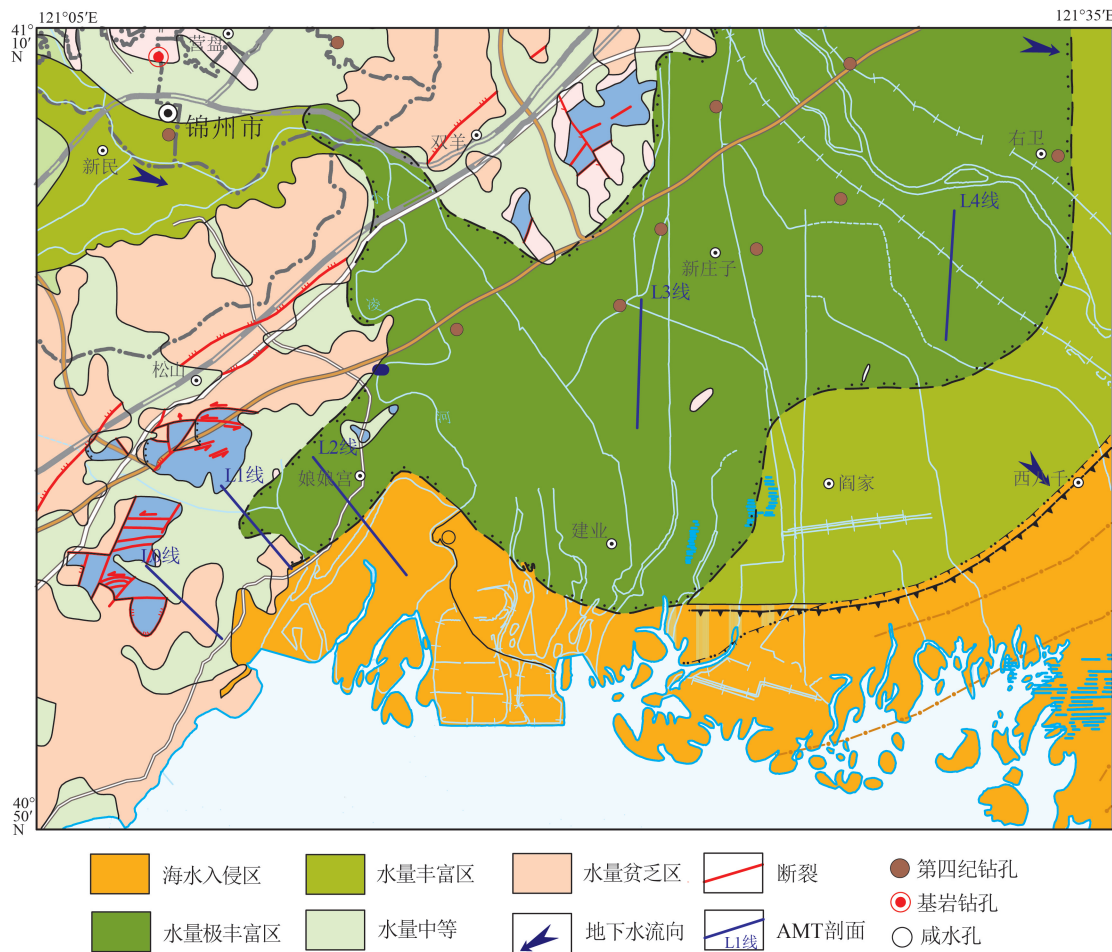


图 1 研究区水文地质概况图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

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^[6]。

2 AMT 数据采集、处理与反演

通过对研究区的电性特征分析,该区具备明显的电性差异,这是本次进行电法勘探的基础条件。研究区人文环境复杂,为尽量避免对本方法的不利影响,结合项目的任务共布设5条AMT剖面(位置见图1),其中,编号L0~L2测线布设在小凌河西侧,目的是查明该区海水入侵的分布范围;L3~L4测线布设在建业—西八千一线北侧,目的是查明该区地下古咸水的赋存状态。5条剖面长度依次约为4.25 km、4.5 km、5.75 km、5 km和5 km,点距约为250 m,依据现实情况适当调整,测点共计100个。

AMT数据采集使用加拿大Phoenix公司生产的V8多功能电法仪。为了解仪器性能,开工前进行标定试验、平行棒试验和一致性试验,收工后又

再次进行一致性试验,试验表明仪器各项指标均满足规范要求。为保证数据采集质量,每个测点采集时间为1 h,数据记录频带为0.035~10400 Hz,磁棒、电极按磁南北、磁东西方向布设,同时采集2个正交磁场和2个正交电场分量。野外采集的4个分量时间序列通过SSMT2000软件进行FFT、频谱分析等计算后,获得该测点的视电阻率和相位曲线,图2为部分测点的视电阻率和相位曲线。从图中曲线看出,大于10 Hz视电阻率和相位曲线表现很连续,电阻率呈先降低后升高的趋势,表现为H型曲线;而小于10 Hz的频段受探头和采集时间的综合影响,视电阻率曲线较散乱,相应的相位曲线也受到影响,且该频段数据为近场数据,反演时不采用该频段数据。为确保本次数据质量,对质量检查点的数据进行均方相对误差计算,结果均符合规范小于5%的要求。图3为部分检查点的视电阻率和相位曲线,可以看出被检点与质检点的曲线形态局部略有差异,但整体具有很好的一致性。

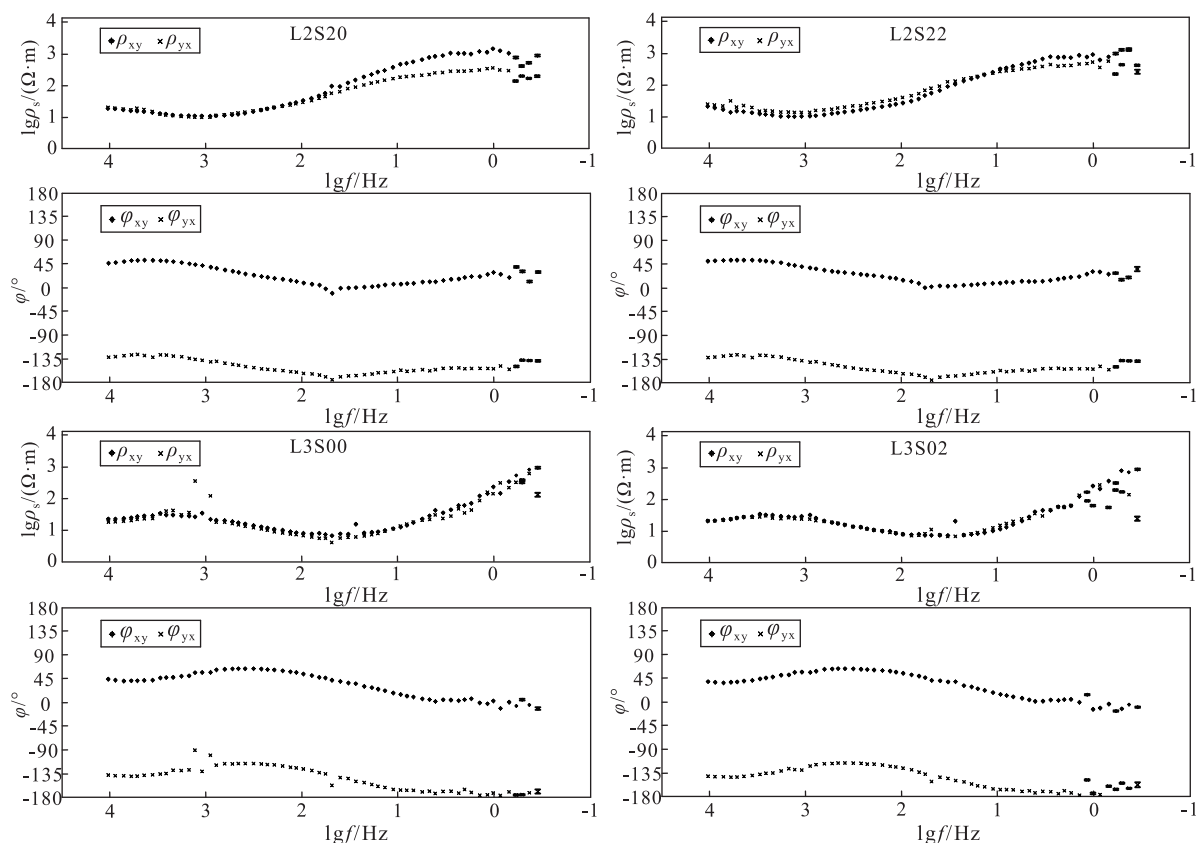


图2 AMT测量部分测点视电阻率和相位曲线图

Fig. 2 Apparent resistivity and impedance phase curves of some points for AMT measurements

ρ_s —视电阻率; f —频率; φ —相位

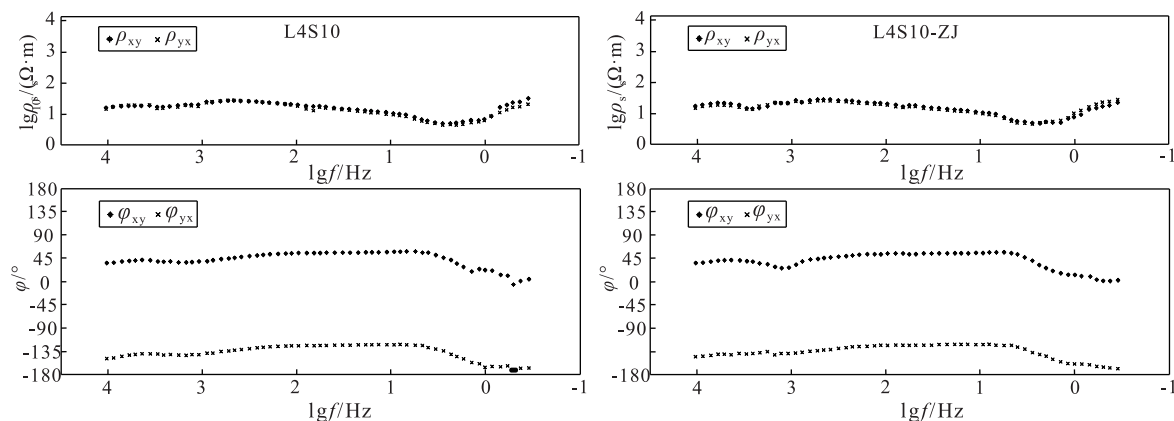


图3 AMT测量部分检查点视电阻率和相位曲线图

Fig. 3 Apparent resistivity and impedance phase curves of some check points for AMT measurements

ρ_s —视电阻率; f —频率; φ —相位

剖面数据反演前,先将预处理后的数据在MTeditor软件中适当进行人工编辑,用编辑后的数据进行反演。数据反演采用MTSoft2D软件,先对观测数据进行编辑平滑、静态校正等预处理,再采用反演模块中的改进非线性共轭梯度(NLCG)法进行反演。该方法的核心是先采用Occam反演方法进行一维反演形成拟二维地电剖面,然后将该结果作初始模型进行二维非线性共轭梯度(NLCG)反演,充分利用Occam和NLCG反演方法的优点,形成优势互补^[16]。

3 实例成果分析

小凌河西侧娘娘宫镇范围具有较典型的海水入侵地段,而建业—西八千一线北侧具有较典型的古咸水赋存区,文中分别对5条音频大地电磁测深剖面反演结果进行分析。

实例1:在小凌河西侧海水入侵区,共布设了3条AMT剖面(位置见图1),结合实际工作环境,L0剖面只能布设在紧邻海水入侵界线的西北侧,L1剖面稍跨过以往调查的海水入侵界线,而L2剖面横跨了以往调查的海水入侵界线。

L0剖面位于锦州市单家窝堡东侧,剖面起于东南屯北侧,至上眼泉沟东侧,剖面长度约为4.25 km,测点16个,测线方位为314°;L1剖面位于锦州市东窑屯东侧,剖面起于邵屯东侧,至冯家窝堡以北,剖面长度约为4.5 km,测点18个,测线方位为316°。L0和L1剖面的反演结果(图4、图5)显示,反演的电阻率值都在60 $\Omega \cdot m$ 以上,说明这2条测线经过的区域未被海水入侵,无咸水分布,L0剖面

处的海水入侵界线未继续向内陆推移,L1剖面处的海水入侵界线在远离内陆。

L2剖面位于锦州何家窝棚东侧,剖面起于南凌村北侧,至娘娘宫镇西北侧,剖面长度约为5.75 km,测点24个,测线方位为322°。L2剖面的反演结果(图6)显示,剖面整体呈浅部低阻、深部高阻特征。剖面0~4200 m之间浅部约-60 m以上电阻率值在3~12 $\Omega \cdot m$ 的部分,推测该段浅部区域为咸水分布区域,而且越靠近测线东南端电阻率越小,说明海水由测线的东南端沿通道侵入淡水区。剖面0~5750 m之间的电阻率值在12~30 $\Omega \cdot m$ 的部分,推测为淡水—微咸水分布区域,为咸淡水的过渡带,且在剖面的末端为一延伸向地面的梯度带异常,说明此处为受海水入侵影响的界线。整条剖面深部约-80 m以下电阻率值在30~500 $\Omega \cdot m$ 的部分,推测为含淡水的区域。而从深部电阻率异常特征可以推测研究区的构造发育,使得基岩不完整,为无水区。与以往水文地质资料相比,L2剖面处调查的海水入侵范围在扩大,咸淡水变化带位置在远离海岸线,值得引起重视。

实例2:在建业—西八千一线的北侧古咸水赋存区,共布设了2条AMT剖面,分别为L3和L4剖面(位置见图1)。这2处水量极丰富,但L3处农业灌溉用水较多。

L3剖面位于锦州建业镇以北,剖面起于位子村东侧,至后博字屯东侧,全长约为5 km,测点21个,测线方位为3.5°。L3剖面的反演结果(图7)显示,剖面整体呈上部低阻、下部高阻特征。剖面0~1800 m之间深部-180~-300 m之间电阻率值为5~12 $\Omega \cdot m$,

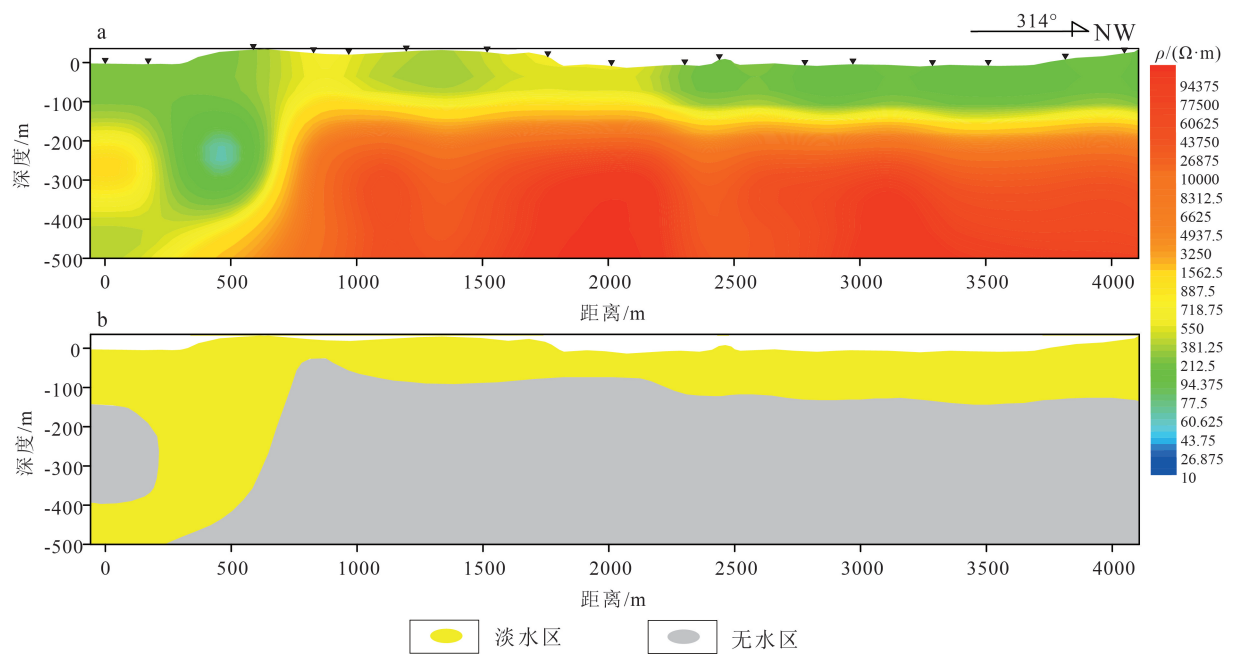


图 4 L0 剖面视电阻率反演图(a)和推断解译图(b)

Fig. 4 Apparent resistivity inversion (a) and inferred interpretation (b) of section L0

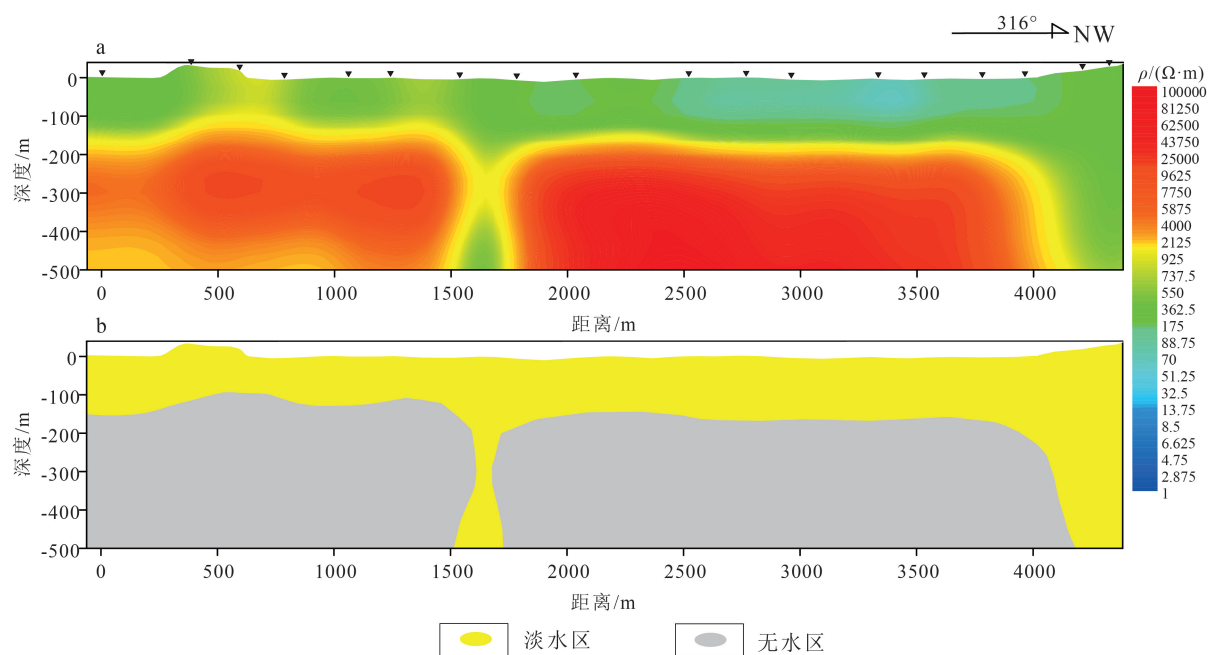


图 5 L1 剖面视电阻率反演图(a)和推断解译图(b)

Fig. 5 Apparent resistivity inversion (a) and inferred interpretation (b) of section L1

结合水文地质资料,推测该段深部区域为以往海侵遗留的古咸水分布区域。在 0~3000 m 之间的电阻率值在 12~30 $\Omega \cdot \text{m}$ 的部分,推测为淡水-微咸水分布区域,为咸淡水的过渡带,3000 m 以远区域还未被古咸水污染。通过研究 1000 m 处和 2000~3000 m 之间的异常形态,推测当地人为过度抽取地下淡水,使古咸水与淡水之间平衡赋存状态遭到破坏,造成了古咸水污染淡水。在 0~1800 m 和

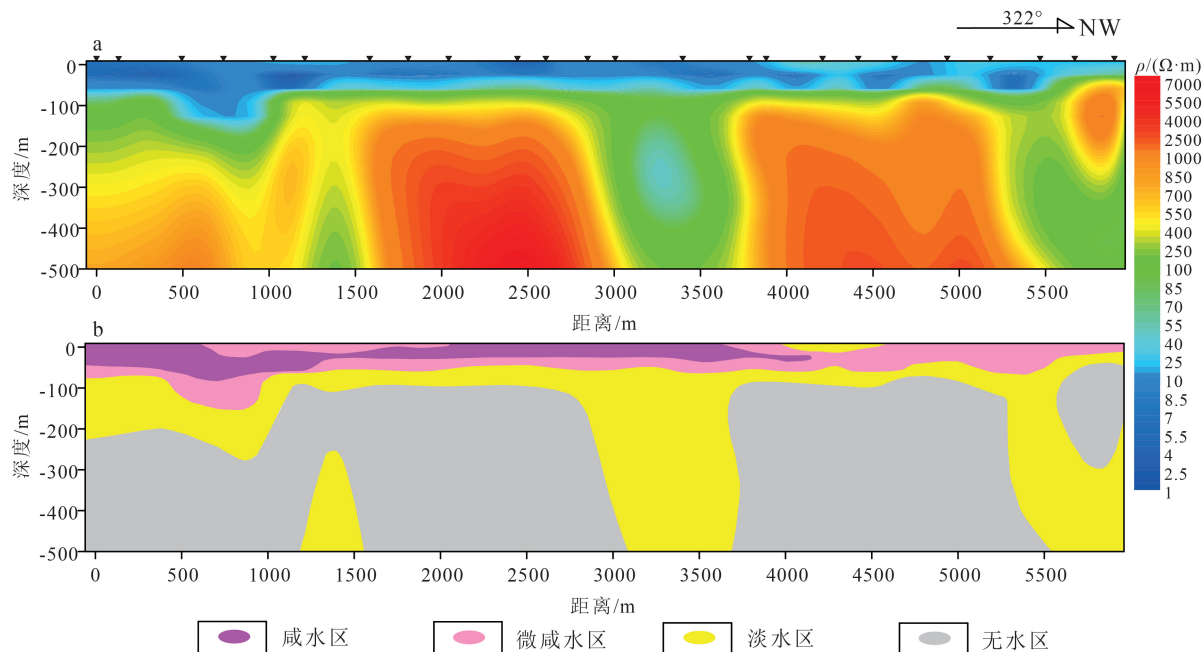


图6 L2剖面视电阻率反演图(a)和推断解译图(b)

Fig. 6 Apparent resistivity inversion (a) and inferred interpretation (b) of section L2

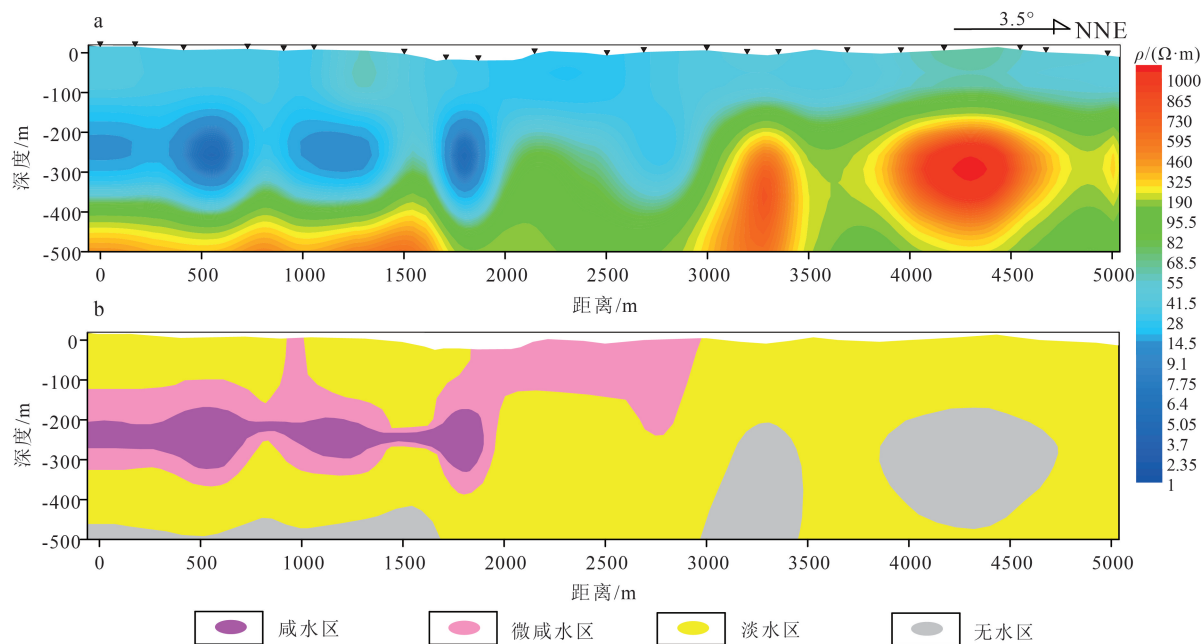


图7 L3剖面视电阻率反演图(a)和推断解译图(b)

Fig. 7 Apparent resistivity inversion (a) and inferred interpretation (b) of section L3

3000~5000 m 之间浅部-100 m 以上电阻率值在 30~60 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间,推测为淡水分布区;而剖面的其他部分电阻率值在 60~400 $\Omega \cdot \text{m}$ 之间,推测为含淡水的区域。深部电阻率异常特征显示基岩不完整,基岩区域为无水区。该处为地下水富水区,但存在以往海侵遗留的古咸水,而且已经污染了部分

淡水,为防治咸化污染,需加强地下水的用水管理。

L4 剖面位于锦州市西假河以北,剖面起于西假河北侧,至大凌河南侧,剖面长度约为 5 km,测点 21 个,测线方位为 3.7°。L4 剖面的反演结果(图 8)显示,剖面 0~1600 m 之间深部-200 m 以下电阻率值为 3~12 $\Omega \cdot \text{m}$,2200~3400 m 之间深部-230~-360 m

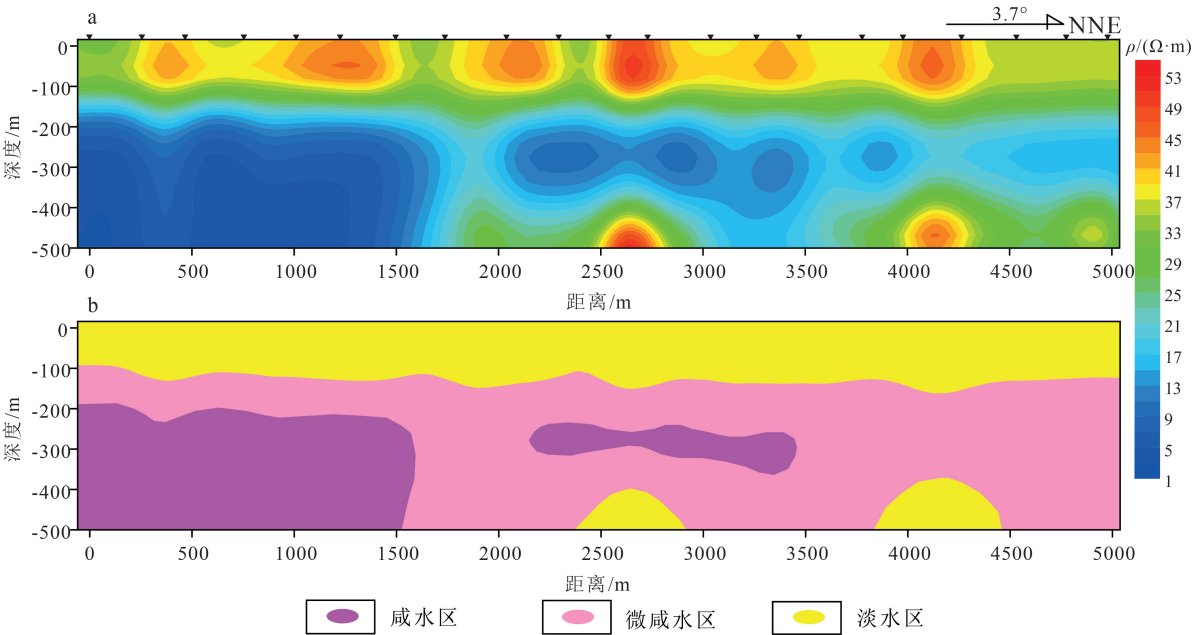


图 8 L4 剖面视电阻率反演图(a)和推断解译图(b)

Fig. 8 Apparent resistivity inversion (a) and inferred interpretation (b) of section L4

间电阻率值为 5~12 Ω·m,结合水文地质资料,推测这 2 处为以往海侵遗留的古咸水分布区;而在整条剖面的浅部约-100 m,存在明显的梯度带,推测为咸淡水分界面,结果很好地反映以往海侵遗留古咸水的规模及空间赋存形态,且下部咸水未污染浅部的淡水层。

4 讨 论

锦州沿海地区由于海水入侵、古咸水赋存对当地的淡水需求构成威胁,需要查清海水、咸水的范围及变化情况,为当地政府治理提供依据。为此,本文采用音频大地电磁法对海咸水空间赋存形态进行研究,L2 线结果显示,海水入侵范围在变大,应与该区耕地多、人口较密集,以及对地下水的的需求大有关。L3-L4 线古咸水赋存区域,农作物多为水稻,对地下水的的需求较大,容易造成古咸水污染,建议当地优化农作物种植,减小对地下水的依赖。

本次工作区人文环境相对复杂,这对该方法的影响一定程度上降低了勘查精度。以后在该区进行该方法时,可考虑增设远参考站,降低电磁干扰,提高结果的精度。

在调查该区海水入侵问题时,深度相对较小,一般在 100 m 左右,而 AMT 方法勘探深度大但浅

部分分辨率低,可以结合高密度电阻率法,该方法探测深度小但分辨率高,应用效果已被国内外学者验证^[8, 10-14]。

5 结 论

本文在锦州地区 AMT 方法探测海、咸水入侵结果分析的基础上,获得认识如下。

(1)通过 AMT 探测,L0 和 L1 剖面这 2 处的海侵界线未有扩大的趋势;L2 剖面处查明了娘娘宫镇南侧海侵趋势在扩大;L3 剖面处存在古咸水,但开采地下水不当造成了古咸水污染淡水,应采取必要的防治措施;L4 剖面结果较好地刻画了深部赋存古咸水的空间展布形态,且未污染浅部的淡水层。

(2)实例说明 AMT 方法在圈定咸淡水的分布范围、立体刻画咸淡水大体埋深及空间展布形态上,具有较好的应用效果,对今后该区海水、咸水问题调查的物探方法选取有积极的参考意义。

(3)为深入研究海水、咸水的运移规律,达到更好的防治效果,建议在海水入侵典型区进行动态监测。

参考文献

[1] Swartz J H. Resistivity studies of some salt-water boundaries in the Hawaiian Islands[J]. Transactions American Geophysical Union, 1937,

- 18(2): 387-393.
- [2] 刘青勇,董广清.电阻率法在防治莱州湾地区海水入侵中的应用[J].物探与化探,1999,23(5): 368-372.
- [3] 唐心强,康桂红,大年邦雄,等.Wenner 法探测淡盐界面的调查研究[J].地下水,2006,28(3): 83-88.
- [4] Adepelumi A, Ako B D, Ajayi T R, et al. Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria[J]. Environmental Geology, 2009, 56(5): 927-933.
- [5] Hodlur G K, Dhakate R, Sirisha T, et al. Resolution of freshwater and saline water aquifers by composite geophysical data analysis methods[J]. Hydrological Sciences Journal, 2010, 55(3): 414-434.
- [6] 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.
- [7] 苏永军,黄忠峰,匡海阳,等.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[J].地质调查与研究,2014,37(4): 264-268.
- [8] 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.
- [9] El-Kaliouby H, Abdalla O. Application of time - domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 115: 59-64.
- [10] 何玉海.高密度电法在莱州湾海水入侵调查中的研究与应用[J].海洋环境科学,2016,35(2): 301-305.
- [11] Kazakis N, Pavlou A, Vargemezis G, et al. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 373-387.
- [12] 刘宏伟,黄忠峰,郭旭,等.地球物理技术在识别海(咸)水入侵界线中的应用[J].海洋地质前沿,2016,32(9): 58-63.
- [13] 陈松,刘磊,刘怀庆,等.北部湾咸淡水分界面划分中的电法应用分析[J].地球物理学进展,2019,34(4): 1592-1599.
- [14] Prashant K, Prarabdh T, Anand S, et al. Electrical resistivity and induced polarization signatures to delineate the near-surface aquifers contaminated with seawater invasion in Digha, West-Bengal, India[J]. Catena, 2021, 207: 1-17.
- [15] 余海忠,冯书才,曾奇.采用物探方法研究深圳西部海水入侵现状[J].山西建筑,2015,41(14): 56-58.
- [16] 余年,庞方.音频大地电磁测深法在地热勘查中的应用研究[J].水文地质工程地质,2010,37(3): 135-138.
- ① 辽宁工程勘察院.辽宁省锦州市市区及凌海市地质灾害调查与区划报告.2005.