

doi: 10.11720/wtyht.2021.1571

陈学群,李成光,田婵娟,等.高密度电阻率法在咸水入侵监测中的应用[J].物探与化探,2021,45(5):1347-1353. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1571>

Chen X Q, Li C G, Tian C J, et al. The application of high density electrical resistivity method to monitoring saltwater intrusion[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1347-1353. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1571>

# 高密度电阻率法在咸水入侵监测中的应用

陈学群<sup>1,2</sup>, 李成光<sup>1,2</sup>, 田婵娟<sup>1,2</sup>, 刘丹<sup>1,2</sup>, 辛光明<sup>1,2</sup>, 管清花<sup>1,2</sup>

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250013)

**摘要:** 应用高密度电阻率法测量手段,结合水质调查取样,对山东寿光市咸水入侵过渡带的基本特征进行了研究。通过对典型高密度电阻率法测量剖面的视电阻率进行分析,初步确定  $10 \Omega \cdot m$  作为该区域咸淡水界面线的视电阻率指示值,并初步推断了咸淡水过渡带的咸水区、咸淡水过渡区及淡水区的位置。结果表明高密度电阻率法具有高效、省时、成本低等优点,可以配合其他方法,作为大范围咸水入侵监测的有效手段。

**关键词:** 高密度电法;咸水入侵;视电阻率;咸淡水界面线;监测

**中图分类号:** P631;TV211.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)05-1347-07

## 0 引言

海水入侵现象是滨海平原地区常见的地质灾害,世界上已经有几十个国家和地区的几百个地方出现了海水入侵问题<sup>[1]</sup>,海水入侵灾害已成为制约各国滨海地区经济和社会发展的因素之一<sup>[2-3]</sup>。目前国际上通常以  $Cl^-$  浓度作为判定海水入侵的主要指标<sup>[4]</sup>,但是,实际工作过程中, $Cl^-$  浓度指标的获取往往受到监测井点数量和监测层位信息等因素的限制,在监测井点较少或者监测层位不明确区域开展海水入侵监测,必须采用其他方法或者多种方法配合使用才能获取可靠的信息。

近年来,直流电法在包括海水入侵领域<sup>[5-8]</sup>在内的多个领域得到了广泛的应用,高密度电阻率法是直流电法的一种,相比传统直流电法,高密度电法更加简单、高效、直观<sup>[9]</sup>,因此越来越受到国内外学者的关注。杨伟俊<sup>[10]</sup>对超高密度直流电法勘探反演系统在边坡地质勘察中的应用进行了研究;郭龙凤<sup>[11]</sup>运用高密度电阻率成像法在米级实验室尺度

上对海水入侵运移规律和特征进行了研究;赵战坤等<sup>[12]</sup>利用高密度电阻率探针观测系统在实验室尺度内远程实时监测了海水入侵的过程;何玉海<sup>[13]</sup>利用高密度电法对莱州湾地区不同地质特征区域海水入侵界面的视电阻率特征值进行了研究;陈松等<sup>[14]</sup>应用高密度电法对北部湾咸淡水界面划分进行了研究;苏永军等<sup>[15]</sup>应用高密度电法对莱州湾地区的海水入侵界面进行了探测。本文以寿光为例,通过高密度电阻率法测量,结合水质取样和地层分析,对咸水入侵过渡带的电阻率分布特征进行了研究,初步确定了咸淡水界面线的电阻率指示值,并对其咸—淡水界面线进行了划定。

## 1 研究区概况

寿光市位于山东省中北部,渤海莱州湾西南岸,是全国闻名的“蔬菜之乡”,也是山东省重要海洋化工工业基地。由于寿光市南部地下水超采严重,致使北部咸水不断向南部入侵,成为制约寿光市经济社会发展的重要因素。图 1 为寿光市水文地质略图

收稿日期: 2020-12-21 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400905);水利部技术示范项目(SF-201803);国家自然科学基金(40706050);山东省级水利科研项目(SDSLKY201809)

第一作者: 陈学群(1979-),男,高级工程师,研究方向为水文与水资源。

通讯作者: 李成光(1988-),男,工程师,博士,研究方向为水文与水资源。Email: licgsky@126.com

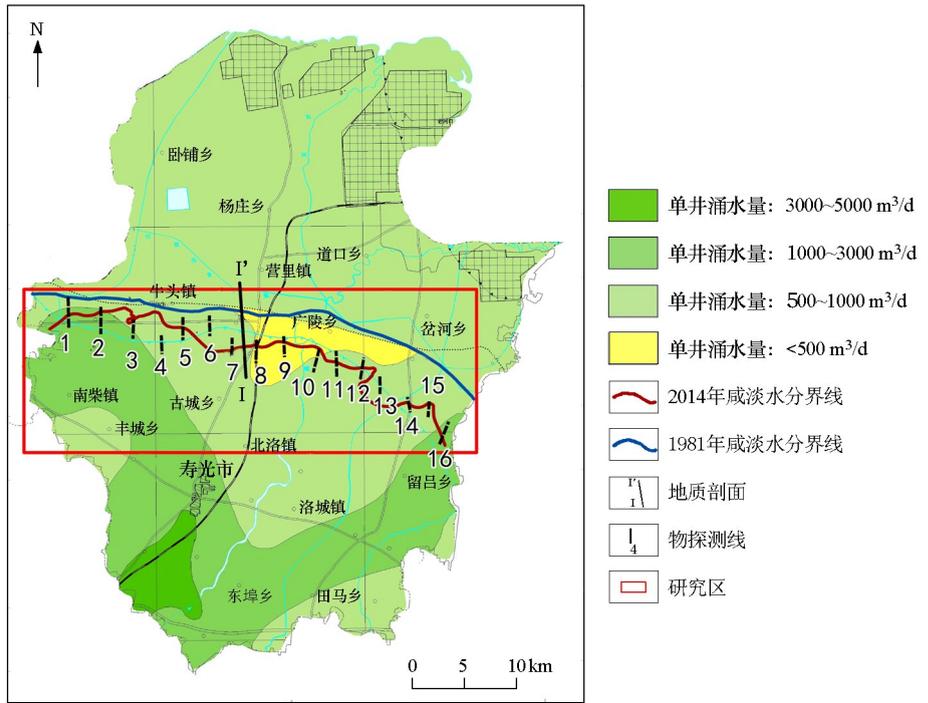


图 1 寿光市水文地质略图及勘探线布置

Fig. 1 Hydrogeological outline and exploration line layout of Shouguang

及勘探线布置,从图中可以看出,寿光市地层以第四系松散沉积物为主,第四系地层在该区广泛分布,厚度不一,最厚达 400 m,其成因类型及岩石组合复杂,分布明显受构造、地貌制约,区内自下而上可分为更新世和全新世两个时期。区内自晚更新世以来经历了 3 次大的海平面升降变化,历史上 3 次海侵形成了 3 层海相地层(地下卤水层),地下卤水埋藏深度为 0~60 m 左右,上部为潜水卤水层,下部两层为承压卤水层。根据寿光市 1981 年和 2014 年咸水入侵调查的研究成果,结合咸水入侵运动规律,本次研究区范围选定为 2014 年咸淡水分界线南北两侧的潜在发生咸水入侵的区域,重点是咸淡水分界线以南的区域。

## 2 高密度电阻率法勘探原理

高密度电阻率法勘探与传统的直流电法勘探的原理是大体相同的,都是利用地下岩石及地质构造的电性差异,把不同的岩石构造区分开来的一种地球物理勘探方法<sup>[16]</sup>,不同的是高密度电阻率法采用了阵列式布极方式,实现了剖面 and 测深同步测量,具有直观、高效、高分辨率、高精度等特点。目前高密度电法有多达十几种不同的装置类型,它们都有其各自的特点,其中比较常用的是温纳( $\alpha$ )装置、偶级( $\beta$ )装置、微分( $\gamma$ )装置和联剖( $\delta$ )装置。

本次勘探采用美国 AGI 公司生产的八通道高密度电法仪,主要由数据采集系统和数据处理系统组成。数据采集系统主要由主机、多路电极转换器、电极系 3 部分组成,采集的数据自动存入主机,计算机将数据处理成符合要求的格式,经相关模块进行预处理后,最终反演成图<sup>[17]</sup>。

## 3 电阻率特征值的确定

应用高密度电法进行咸水入侵监测,首先要确定咸淡水界面线的电阻率特征值,本次选取大尺度 I—I' 水文地质剖面附近的崔家剖面(图 1 中 7 号测线)进行电阻率特征值的确定(崔家剖面是在 I—I' 水文地质剖面附近选取的较小尺度高密度测量剖面,其测量成果需要结合大尺度水文地质剖面进行分析)。崔家剖面测量方位为 NW1°,测量长度 1025 m,测点平均间距 12.5 m,测量深度约 64 m,采用数据质量高、信噪比高的分布式高密度电法仪器,选取信噪比较好的温纳( $\alpha$ )装置排列方式进行测量,测量范围从咸水区开始至淡水区终止。实际测量过程中,将根据历史咸淡水界面及水质调查分析初步成果,进行高密度电法剖面布设。

图 2 为崔家剖面高密度电法测量解释成果。可以看出,该剖面在水平方向上,自北向南电阻率呈现明显的渐变过程,以 30~60 m 深度范围为例,电阻

率主要分为 3 段:第一段为 0~500 m, 视电阻率值均小于  $5 \Omega \cdot \text{m}$ ;第二段为 500~950 m, 电阻率值逐渐增大到  $5 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ ;第三段为 950 m 以远, 电阻率值逐渐增大, 均高于  $10 \Omega \cdot \text{m}$ , 符合咸水入侵过渡带的基本特征。初步推断 0~500 m 处为咸水区, 500~950 m 处为咸淡水过渡区, 950 m 以后为淡水区, 咸淡水过渡区域呈现明显的楔形入侵模式<sup>[18]</sup>。此外, 从图中还可以看出, 0~15 m 深度范围内电阻率自北向南无明显变化, 原因可能是该层位地下水含水层疏干, 电性差异不明显所致。

为进一步研究该剖面电阻率的垂直分布特征, 确定该区域咸淡水分界线的电阻率指示值, 分别选

取 106.25 m、556.25 m、1 006.25 m 处测线, 结合地质剖面(图 3)和水质调查取样(图 4)进行分析。

图 5a 为 156.25 m 处测线电阻率的垂向分布, 其中 0~15 m 处电阻率为  $10 \sim 50 \Omega \cdot \text{m}$ , 15~30 m 处电阻率为  $5 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ , 30~64 m 处电阻率低于  $5 \Omega \cdot \text{m}$ ;从地质剖面(图 3)可以看出, 0~15 m 主要为粉质黏土和粉砂反映, 15~30 m 主要为粉土和中粗砂反映, 30~64 m 处主要为中粗砂反映。该处附近水井调查混合水样(sgx-31)的  $\text{Cl}^-$  浓度为 930.2 mg/L, 前文已提到, 该区域 0~15 m 处含水层已疏干, 因此该处  $\text{Cl}^-$  浓度是 10~60 m 区域的综合反映(下同);以 250 mg/L 作为判定咸水入侵的  $\text{Cl}^-$  浓度标准<sup>[19-20]</sup>,

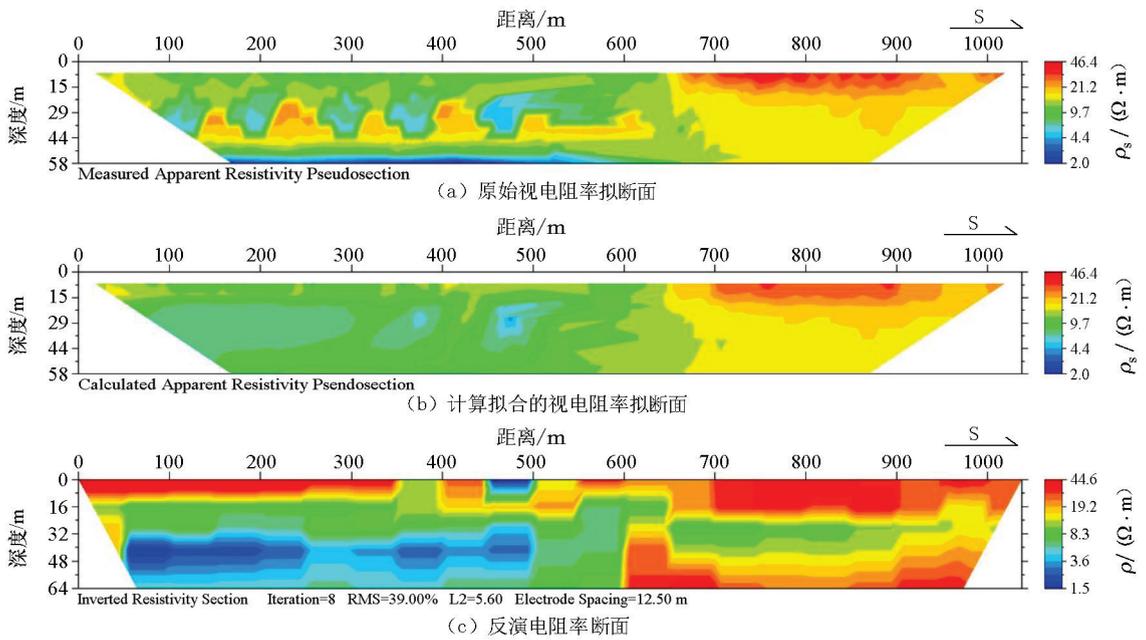


图 2 崔家高密度电阻率法探测解释成果

Fig. 2 Interpretation results of high density survey section in Cuijia

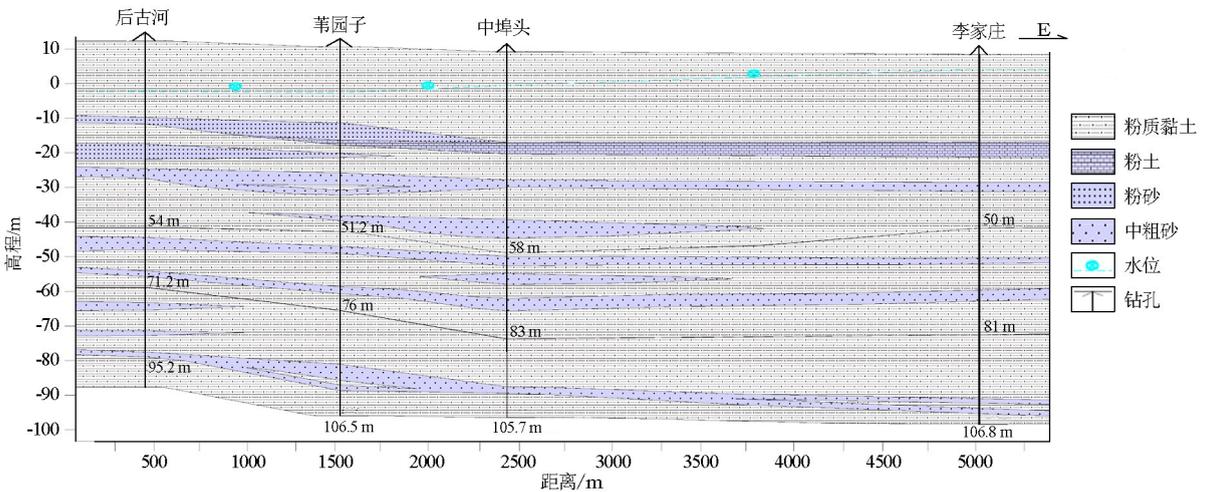


图 3 崔家附近剖面 I-I'地质剖面

Fig. 3 Geologic section I-I' near Cuijia area

则该处为咸水区,且底部  $\text{Cl}^-$  浓度要高于上部  $\text{Cl}^-$  浓度,咸水体主要集中在 30~64 m 层位。图 5b 为 556.25 m 处测线电阻率的垂向分布,其中 0~15 m 处电阻率为 10~40  $\Omega \cdot \text{m}$ ,15~64 m 处电阻率为 5~10  $\Omega \cdot \text{m}$ ,该处附近水井调查混合水样 (sgx-32) 的  $\text{Cl}^-$  浓度为 290.8 mg/L,是 10~60 m 区域的综合反映,整体表现为微咸水,较 156.25 m 处有所降低。图 5c 为 1006.25 m 处测线电阻率的垂向分布,其中 0~64 m 处电阻率整体上均处于 10~40  $\Omega \cdot \text{m}$ ,该处附近水井调查混合水样 (sgx-33) 的  $\text{Cl}^-$  浓度为 210.8 mg/L,是 15~60 m 区域的综合反映,整体表现为淡水。通过对 3 条测线的分析,进一步验证了上述咸淡水过渡区域的推断。

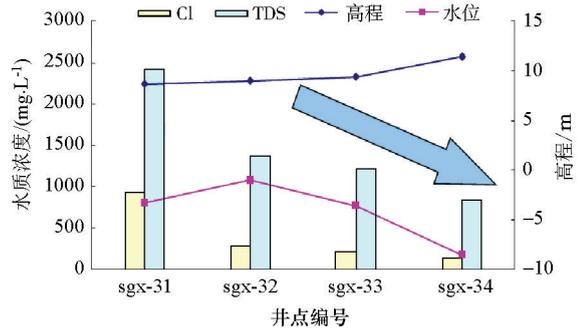


图 4 崔家高密度测量剖面(水井调查取样 10 号剖面)  $\text{Cl}^-$  及矿化度浓度变化

Fig. 4  $\text{Cl}^-$  and salinity concentration profile of high density survey section (No. 10 section of well survey and sampling) in Cuijia

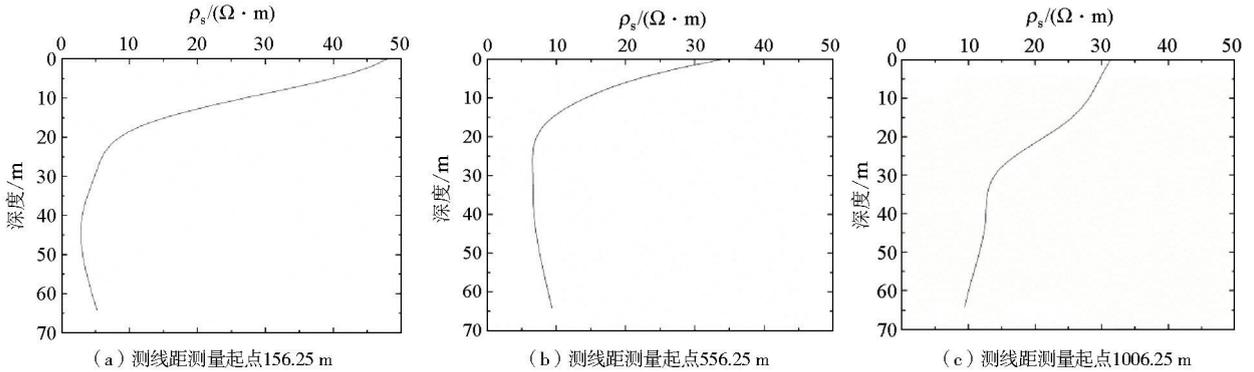


图 5 不同测线视电阻率的垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of apparent resistivity of different measuring lines

在上述分析的基础上,综合本次高密度测量剖面电阻率变化特征及水质调查取样数据,初步确定 10  $\Omega \cdot \text{m}$  作为该区域咸淡水交界线的视电阻率指示值,该指示值可以作为该区域咸水入侵监测的技术依据。

#### 4 成果解释

根据寿光市咸水入侵咸淡水界面线视电阻率特征值,在研究区共布设 16 个高密度电法测量剖面(见图 1),分别应用高密度电阻率法和水质调查取样方法对寿光咸水入侵咸淡水界面线进行划定,并进行对比分析。实际工作中,每条测量剖面布设的位置和方向,将根据地下水流场的方向及相关水质调查取样成果进行确定。

图 6 为寿光市 2019 年高密度电阻率解释咸淡水界面点和水质调查取样确定的咸淡水界面对比以及历年咸淡水界面测量成果对比。可以看出,2019 年用高密度电阻率法确定的咸淡水交界线与应用水

质调查取样手段确定的咸淡水交界线变化规律基本一致,表明高密度电阻率法可以作为咸水入侵监测的有效手段。此外,不难看出,部分区域高密度电阻率法测量结果与水质调查取样结果相差较大,分析其可能的原因:一是高密度电阻率法测量结果会受到地层结构、人工开采、数据反演等多因素的影响导致其精度降低;二是受水井条件限制,绝大部分水井调查水样为不同含水层位的混合水样,导致水质调查结果本身存在一定的误差。综上,高密度电阻率法在咸水入侵监测中具有高效、省时、成本低等优点,可以配合其他方法,作为大范围咸水入侵监测的有效手段。从图 6 中还可看出,与 1981 年和 2014 年的咸淡水交界线相比,2019 年的咸淡水交界线在空间上整体向南迁移,导致咸水入侵区域逐年增加。

图 7、图 8 分别为 1981 年和 2019 年的地下水位等值线平面。1981 年地下水自南向北径流,属于自然径流排泄,而近年来,由于地下水超采严重,区内出现了不同程度的超采区。从 2019 年地下水位等值线图中可以看出,区内出现了 3 处地下水漏斗区,

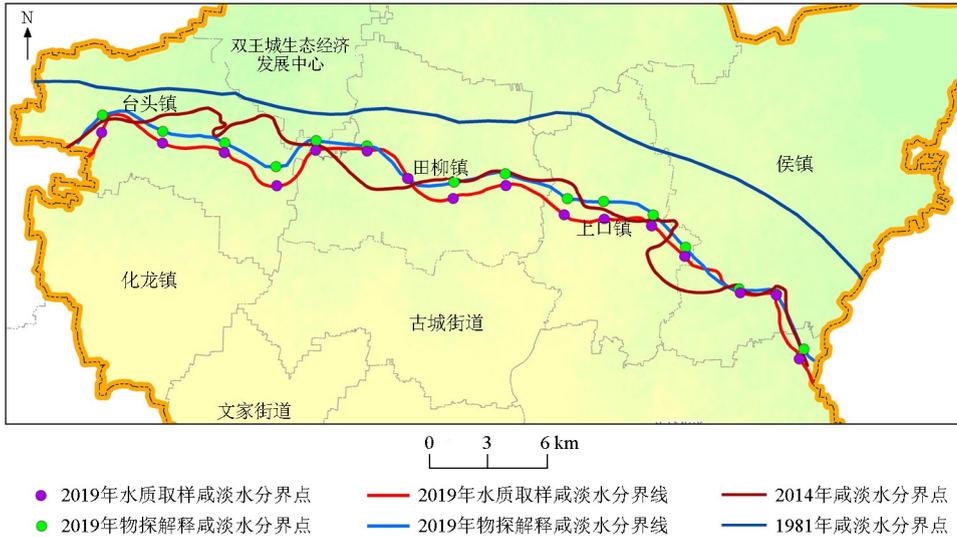


图 6 历年咸淡水界面线测量成果对比

Fig. 6 Measurement results of brackish and fresh water interface line

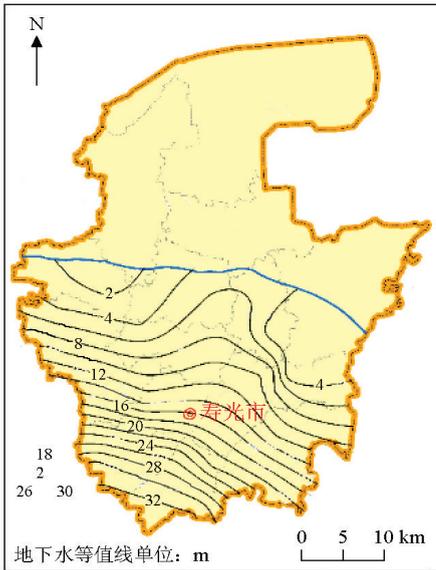


图 7 寿光地下水位等值线(1981年5月)

Fig. 7 Contour map of Shouguang groundwater Level (May 1981)

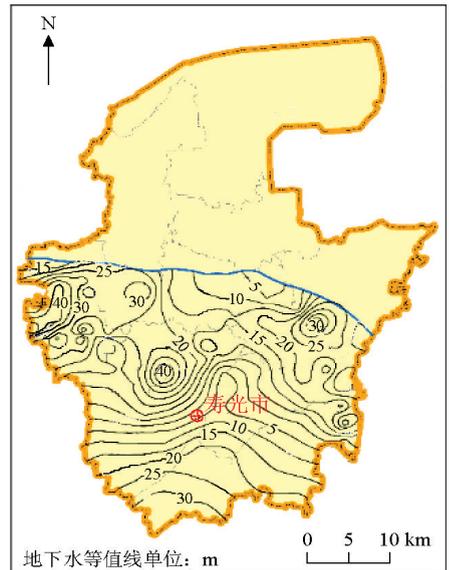


图 8 寿光地下水位等值线(2019年6月)

Fig. 8 Contour map of Shouguang groundwater Level (June 2019)

分别为化龙镇、圣城街道、侯镇地下水漏斗区,漏斗中心最低水位分别为 $-45\text{ m}$ 、 $-40\text{ m}$ 、 $-40\text{ m}$ 。由此可见,近年来,受人工开采的影响,寿光市原有的咸淡水平衡关系遭到破坏,地下水径流方向发生明显的变化,导致地下水逐渐向淡水区迁移,咸水入侵进一步加剧。

## 5 结论

1) 综合高密度测量剖面电阻率分布特征及水质调查取样数据,初步确定  $10\ \Omega \cdot \text{m}$  为测区咸淡水分界线的视电阻率指示值,可作为该区域咸水入侵

监测的技术依据。

2) 高密度电阻率测量剖面自北向南视电阻率呈现明显的渐变过程,符合咸水入侵过渡带的基本规律,初步推断  $0\sim 500\text{ m}$  处为咸水区,  $500\sim 950\text{ m}$  处为咸淡水过渡区,  $950\text{ m}$  以后为淡水区,咸淡水过渡区域呈现明显的楔形入侵模式。

3) 以寿光为例,采用高密度电法对其 2019 年的咸淡水界面线进行了划定。该分界线与应用水质调查取样手段确定的寿光市 2019 年咸淡水分界线变化规律基本一致,表明高密度电法在咸水入侵监测中具有高效、省时、成本低等优点,可以配合其他方法,作为大范围咸水入侵监测的有效手段。

4) 与 1981 年和 2014 年的咸淡水分界线相比, 2019 年的咸淡水分界线在空间上整体向南迁移, 咸水入侵区域逐年增加。

## 参考文献 (References):

- [1] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15.  
Guo Z R, Huang Y P. Comprehensive study on seawater intrusion [J]. Hydrology, 2003, 23(3): 10-15.
- [2] 赵景丽, 邓跃, 徐艳东, 等. 2011~2016 年莱州市海水入侵发展趋势分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(9): 136-142.  
Zhao J L, Deng Y, Xu Y D, et al. Development trend analysis of seawater intrusion in Laizhou from 2011 to 2016[J]. Marine Sciences, 2017, 41(9): 136-142.
- [3] Barlow P M, Reichard E G. Saltwater intrusion in coastal regions of North America[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1): 247-260.
- [4] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春. 海水入侵研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6): 29-33.  
Xue Y Q, Xie C H, Wu J C. Seawater intrusion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(6): 29-33.
- [5] Choudhury K, Saha D K, Chakraborty P. Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 46(3): 189-200.
- [6] 唐心强, 董洁, 大年邦雄, 等. 电法探查海岸带含水层咸淡水界面的调查研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(1): 38-43.  
Tang X Q, Dong J, Ohtoshi K, et al. Survey on fresh-saline groundwater interface in coastal aquifers with electrical techniques [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(1): 38-43.
- [7] 李福林, 张保祥. 水化学与电法在海水入侵监测中的应用[J]. 物探与化探, 1999, 23(5): 376-379.  
Li F L, Zhang B X. The Application of Hydro-chemical and electrical quantified indices in the monitoring of seawater encroachment [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(5): 376-379.
- [8] 窦旭强, 韩冬梅, 曹天正, 等. 直流电阻率法在洋戴河平原海水入侵识别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 65-73.  
Dou X Q, Han D M, Cao T Z, et al. Assessment of seawater intrusion in the coastal plain aquifers of Yang-dai river using DC-resistivity methods[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(8): 65-73.
- [9] 刘道涵, 罗士新, 陈长敬. 高密度电阻率法在丹江口水源区尾矿坝监测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(1): 215-219.  
Liu D H, Luo S X, Chen C J. The application of high density resistivity method to the monitoring of tailings dam[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 215-219.
- [10] 杨伟俊. 超高密度直流电法勘探反演系统在边坡地质勘察中的应用研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.  
Yang W J. Applied research of ultra-high density DC prospecting system in the geological survey of slope[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013.
- [11] 郭龙凤. 基于高密度电阻率成像法的海水入侵运移规律试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.  
Guo L F. Experimental research of seawater intrusion migration law using high-density electrical resistivity tomography [D]. Tai'an Shandong Agricultural University, 2019.
- [12] 赵战坤, 贾永刚, 郭磊, 等. 高密度电阻率探针原位监测海水入侵过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 868-876.  
Zhao Z K, Jia Y G, Guo L, et al. Experimental research on monitoring of seawater intrusion process using high-density resistivity probe[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 868-876.
- [13] 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.  
He Y H. Research and application of high-density resistance method in seawater invasion investigation of Laizhou Bay [J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(2): 301-305.
- [14] 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.  
Chen S, Liu L, Liu H Q, et al. Application analysis of electrical method in dividing saltwater and freshwater interface in beibu bay [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1592-1599.
- [15] 苏永军, 范崇松, 赵更新, 等. 综合电法在探测海水入侵界面中的研究与应用——以莱州湾地区为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 704-708.  
Su Y J, Fan C S, Zhao G X, et al. Research and application of comprehensive electrical method in detecting saltwater intrusion interface: A case study of Laizhou Bay area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 704-708.
- [16] 吕惠进, 刘少华, 刘伯根. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 381-386.  
Lyu H J, Liu S H, Liu B G. Application of resistivity tomography survey method in detecting ground subsidence [J]. Process in Geophysics, 2005, 20(2): 381-386.
- [17] 刘晓东, 张虎生, 朱伟忠. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. 工程勘察, 2001(4): 64-66.  
Liu X D, Zhang H S, Zhu W Z. Application of high density electrical method in engineering geophysical exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(4): 64-66.
- [18] 刘森. 莱州湾南岸地下咸水演化和咸水入侵过程机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.  
Liu S. The evolution of ground-saline water and process mechanism of saline water intrusion in southern Laizhou Bay [J]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2018.
- [19] Daily W, Ramirez A L. Electrical imaging of engineered hydraulic barriers [J]. Geophysics, 2000, 65(1): 83-94.
- [20] 王潘平, 李天科, 王兵, 等. 莱州湾海水入侵原因分析与防治措施[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2009(1): 96-100.  
Wang P P, Li T K, Wang B, et al. The cause analysis and prevention about seawater invasion in Laizhou Bay [J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2009(1): 96-100.

## The application of high density electrical resistivity method to monitoring saltwater intrusion

CHEN Xue-qun<sup>1,2</sup>, LI Cheng-guang<sup>1,2</sup>, TIAN Chan-juan<sup>1,2</sup>, LIU Dan<sup>1,2</sup>,  
XIN Guang-ming<sup>1,2</sup>, GUAN Qing-hua<sup>1,2</sup>

(1. *Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China*; 2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment, Jinan 250013, China*)

**Abstract:** In this paper, high density electrical resistivity method was employed to study the salt-water intrusion transition zone combined with water quality survey sampling. Through an analysis of typical high density measurement section,  $10 \Omega \cdot \text{m}$  is preliminary determined as the apparent resistivity indicator of the brackish water boundary in this area, and the location of brackish water zone, brackish water transition zone and fresh water zone in brackish and fresh water transition zone is preliminarily deduced. The result shows that the high density electrical resistivity method has the advantages of high efficiency, time saving and low cost, and can be used as an effective means to monitor the large range of salt water intrusion together with other methods.

**Key words:** high density electrical resistivity method; salt-water intrusion; apparent resistivity; brackish water boundary; monitor

(本文编辑:沈效群)