

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1299

单希鹏, 谢汝宽, 余学中, 等. 频率域航空电磁法在雄安新区浅层(微)咸淡水调查中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 504–511. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1299>

Shan X P, Xie R K, Yu X Z, et al. Application of the frequency-domain airborne electromagnetic method in shallow (brackish) saline water and freshwater surveys in the Xiong'an New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 504–511. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1299>

频率域航空电磁法在雄安新区浅层(微)咸淡水调查中的应用

单希鹏, 谢汝宽, 余学中, 梁盛军, 李健

(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 探明含(微)咸水地区的浅层咸淡水分界现状, 对于当地浅层水资源的开发利用具有指导意义。笔者通过对雄安新区频率域航空电磁数据反演, 得到地下浅层电性结构特征, 进而推断新区浅层(微)咸淡水分界线。通过对比 1998 年、1999 年两次水文地质调查咸淡水分界线, 结合地面水文地质资料, 笔者发现浅层地下水降落漏斗会影响咸水侵入的趋势; 雄县东北处的胥岗—米家务—双堂一带(微)咸水侵入是由于胥岗水漏斗的存在而趋于稳定, 但水漏斗也同时加剧了胥岗镇地区南部(微)咸水入侵; 安新县城西侧由于容城水漏斗水位上升, 相较 1999 年(微)咸水范围有所减少; 高阳水漏斗地区水位持续下降, 导致芦庄—高阳方向(微)咸水范围将继续扩大。通过预测的(微)咸水侵入趋势为新区建设中水资源的合理开发利用提供了数据依据。

关键词: 频率域航空电磁法; 雄安新区; 浅层水资源; 咸淡水分界

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)02-0504-08

0 引言

微咸水是指矿化度为 2~5 g/L 的水资源^[1], 在水资源匮乏的国家及地区被广泛使用。我国也在多个地区对微咸水进行开采利用, 例如在宁夏吴忠、山东滨州利用微咸水灌溉可以提高番茄、冬小麦等农作物的产量^[2-3]; 在新疆阿瓦提县、河北衡水及饶阳等地使用合理盐度微咸水灌溉棉田, 并不会造成明显减产^[4-6]。据统计, 中国微咸水储量达 277 亿 m^3/a , 其中可开采量为 130 亿 m^3/a , 绝大部分位于地下 10~100 m 处, 宜于开采^[7]。因此, 微咸水的调查研究不仅可以缓解我国部分地区水资源需求压力, 而且可以指导微咸水地区水资源合理开采利用, 进而支撑当地的农业灌溉及工业生产。

相较于传统的水文地质、地面物探调查, 航空物

探在水资源调查中具有覆盖面积大、效率高、不受地面障碍物限制等优势。频率域航空电磁法是根据地下物质的导电性、导磁性(有时也包括介电性或电化性)的差异, 通过航空仪器测量不同频率变化下的电磁场的空间分布和频率特性, 进而推断地下不同物质的分布, 从而解决各类地质问题的方法^[8]。淡水电阻率一般大于 $25 \Omega \cdot \text{m}$, 在淡水区电阻率值主要取决于地层岩性的颗粒度, 颗粒度由粗到细电阻率值逐渐降低; 而咸水区, 咸水呈相对低阻, 矿化度越高电阻率越低, 且当矿化度大于 10 g/L 时, 电阻率值与岩性变化关系不大, 主要由矿化度决定^[9]。在国内外, 航空电磁法已被广泛应用于水资源调查; 20 世纪 80 年代末, 满延龙^[10]就在河北南宫、曲周地区利用频率域航空电磁法进行水质填图, 在咸水区划分淡水资源范围; 孟庆敏^[11]在西北敦煌地区使用三频航电划分了咸淡水界线, 为当地淡水

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“全国国土空间生态风险综合调查与区划”(DD20221772)、“雄安新区资源环境承载力综合监测和透明雄安数字平台建筑”(DD20189143)

第一作者: 单希鹏(1989-), 男, 工程师, 主要从事航空电磁数据采集、处理与解释工作。Email: shan_job@yeah.net

通讯作者: 谢汝宽(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事综合航空地球物理勘探工作。Email: xierk@foxmail.com

资源调查提供了物探资料;王卫平等^[12]利用频率域航空电磁法在黄河口海侵地区寻找浅层淡水,取得了不错的效果;Lipinski 等^[13]使用直升机电磁法在怀俄明州波德河流域煤层气开采地区探测地下含水层,并计算矿化度,以评价开采过程对地下水的污染程度;Siemon 等^[14]在德国西北的波库姆岛使用频率域航空电磁法寻找浅层淡水资源,以缓解当地旅游业发展带来的淡水资源短缺问题;Chandra 等^[15]同样使用航空电磁法在印度普拉亚格拉寻找淡水资源;Jorgensen 等、Gunnink 等以及 Gottschalk 等^[16-18]将航空电磁法应用于海岸带海水入侵调查,在划分海水入侵界线上均有不错效果。从前人的研究结果可以看出,航空电磁法在地下水资源调查中应用广泛,且咸水和淡水的电性差异明显,利用频率域航空电磁法进行咸淡水调查具备物性基础。

雄安新区地处华北平原,地下水利用量达到总

用水量的近 70%。其中,河北平原浅层淡水开采潜力一般,已存在超采情况,局部已无可持续利用的潜力,需适度控制;区内微咸水、咸水资源开采潜力分别为较大、大,在技术条件允许的情况下,可以扩大开采^[19],以缓解地下水用水压力。华北平原地层在新构造运动以来,持续的沉降造成了 3 次以上不同程度的海水入侵^[20],造成雄安新区东测浅层存在(微)咸水(图 1)。1998 年的雄县和 1999 年的安新县 2 次水文地质调查,均证实研究区内存在浅层(微)咸水;安新王岳村附近测得矿化度达 5.5 g/L,已达到咸水级别^[22-23]。20 世纪雄安新区两次水文地质调查仅在局部地区划分了咸淡水分界,且缺乏分界线的变化趋势探讨。因此,探明雄安新区浅层(微)咸淡水分界现状对于指导当地水资源开发利用具有重要意义。

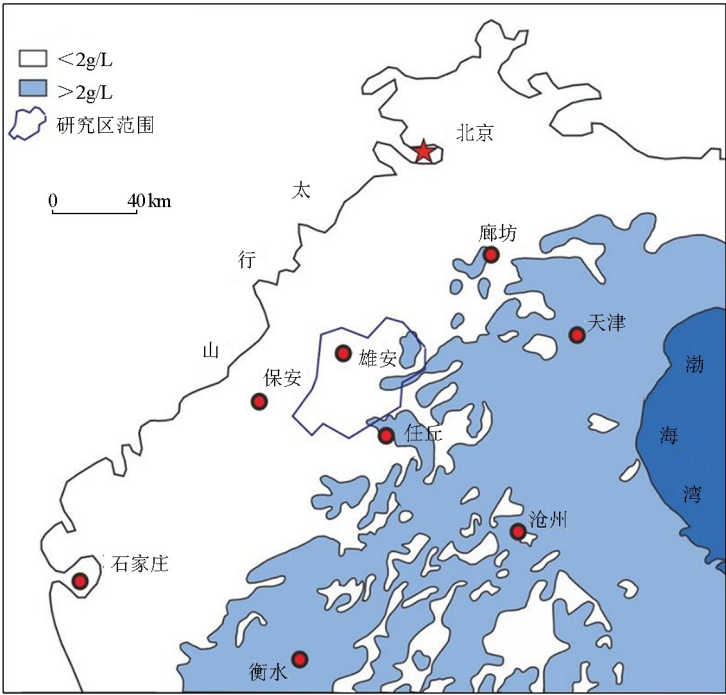


图 1 华北平原地下浅层(微)咸水平面分布^[21]

Fig. 1 Distribution map of subsurface shallow (micro) saline water in the North China Plain^[21]

1 研究区概况

雄安新区位于河北省中部、太行山东麓,地处北京、天津和保定腹地,涵盖河北省雄县、容城县、安新县及周边部分区域^[24]。新区整体地势相对平坦,容城—雄县一线以北为冲(湖)积微倾斜平原,上部为近代河流冲积层或扇前洼地堆积物,下伏冲洪积层;

容城—雄县一线以南为冲(湖)积低平原,由近代河流冲积和湖沼沉积形成^[25]。

雄安新区及周边区域地下水类型主要为松散岩类孔隙水,含水层主要以第四系中、细砂为主^[26]。雄安新区浅层地下水水位埋深一般为 5~20 m,浅层地下水沿白洋淀淀区周边水位最高,从淀区往容城县、雄县米家务乡和新区西南部 3 个方向流动,水位逐渐降低(图 2);浅层地下水可分为潜水和浅层承压水,

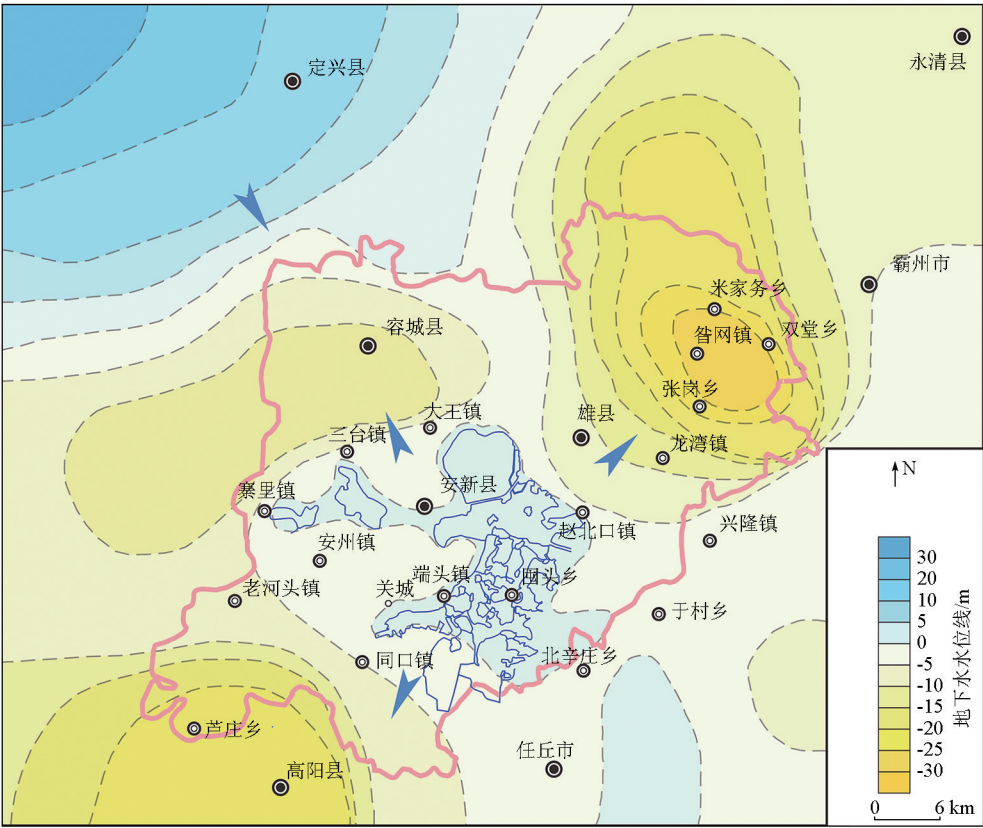


图 2 雄安新区浅层地下水等水位线^[27]

Fig. 2 Map of shallow groundwater level elevation in Xiong'an New Area^[27]

含水层岩性主要以粉细砂、细砂为主^[27]。多年来,雄安新区地下水资源处于消耗状态,区域地下水位下降是地下水资源消耗的直接表征,而地下水开采被认为是该区域地下水位下降的主要原因^[26,28]。

2 数据获取及处理

本次研究使用中国地质调查局航空物探遥感中心于 2018 年在雄安新区开展的频率域航空电磁测量数据。使用设备为基于固定翼飞机(Y-12)的 AGS-863 型自研国产频率域航空电磁系统(图 3)。AGS-863 系统设计发射频率分别为 520、2 020、8 020 Hz;3 个频率磁矩分别为:323、102、122 Am²;电磁装置为垂直共面;收发距 18.9 m。

研究区设计测网覆盖雄安新区全境,共计 9 500 km,测量比例尺 1:5 万,测线方向 140°~320°。使用中国地质调查局航空物探遥感中心的 GeoProbe Mager 及加拿大 Geosoft 公司的 Oasis Montaj 两个软件完成采集数据的处理。主要的处理步骤包括:归一化校正和零点漂移校正。归一化校正就是将电磁相应的电位值转换为 $\times 10^{-6}$,不同频率按照不同系数进行转换。

测量系统在测量过程中随着环境温度等外界因素的影响,零值会产生漂移;而零点校正是利用测量前和测量后高空(500 m 以上地面电磁信号为零)基线飞行测得的响应值之差来消除这类影响。处理完的原始数据使用丹麦奥胡斯大学的 Aarhus Workbench 进行反演,反演方法采用横向约束反演(laterally constrained inversion,简称 LCI)^[29]。LCI 反演是一种拟二维反演方法,它是通过将剖面数据集成反演,并施加横向约束,同时反演出同一条测线上多测点的地电参数^[30]。对反演得到每个点不同深度的电阻率数据进行可信深度评价(depth of investigation,简称



图 3 测量系统及搭载飞机示意

Fig. 3 Schematic diagram of measuring system and carrying aircraft

DOI), 低于 DOI 的数据会被删除^[31]。

3 结果

3.1 浅层(微)咸淡水分界

通过数据反演得到研究区浅层地下电性结构模型。由于研究区浅层地下水水位埋深 5~20 m, 因此笔者着重研究 35 m 以浅电性结构^[27]。图 4 为不同测线的电阻率剖面, 剖面在西北、东南两侧在地表下具有明显的电阻率差异。剖面西北侧电阻率以高值为主, 而东南侧电阻率明显要低于西北侧。且东南侧反演有效深度受低阻地质体影响明显小于西北侧。

为了更好探究研究区电阻率平面分布规律, 笔者提取地表以下 5~35 m 5 个不同深度范围的电阻率形成等值线平面(图 5)。从图中可以看出, 在不同深度上测区均大致以 NE—SW 为界, 电性特征存在明显差异: 西北侧电性特征主要以高阻为主, 而另外一侧则主要以低阻为主。在分界线以东大部分地区电阻率值在 $36\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下, 雄县东、安新县西南部地区电阻率值在 $24\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下; 而分界线西侧地区几乎无低电阻率值区域, 绝大部分地区电阻率值在 $45\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上。

统计资料显示, 含矿化度 2 g/L 咸水的细粉砂电阻率值在 $15\sim24\ \Omega\cdot\text{m}$; 而矿化度达到 5 g/L 时, 电阻率一般在 $3\sim4.8\ \Omega\cdot\text{m}$ ^[32]。因此, 推断研究区东南侧电阻率值在 $24\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下的低阻体主要由含(微)咸水的含水地层引起的, EN—WS 方向上的电阻率特征分界线即为(微)咸淡水分界线。

3.2 分界线变化趋势分析

根据 2019 年雄安新区地下水统测数据分析, 研究区内存在 3 个较为明显的浅层地下水降落漏斗, 分别为: 昝岗、容城及高阳^[27]。3 处浅层水漏斗对于(微)咸淡水分界线变化的影响有所区别(图 6)。

由于水漏斗的存在, 导致昝岗镇附近浅层地下水向漏斗中心流动, 一定程度上阻止了浅层(微)咸水继续向米家务乡西北方向侵入。因此, 1998 年雄县水文地质调查所测的咸淡水分界线(以 2 g/L 为界)在昝岗—米家务—双堂一线没有明显变化。但昝岗水漏斗同时也增加了张岗—龙湾—史各庄—刘家铺区域(微)咸水侵入的可能性。

2014 年研究区禁(限)采地下水以来, 浅层地下水水位下降减缓, 加之受降水量增加、南水北调补水、引黄济淀和种植结构调整等因素影响, 白洋淀水位以及容城县周边地区浅层地下水水位上升明显, 容城县浅层水漏斗面积也呈明显减少趋势^[27]。由此导致大王—安新一端村一侧, 对比 1999 年安新县水文地质调查分界线(以 2 g/L 为界)明显向东侧推移。但在局部地区依旧有(微)咸水区域存在, 例如大王—三台之间的民用水井在 2019 年水文地质调查中测到微咸水。因此, 如果浅层水位保持稳定, 安新县东侧分界线将趋于稳定。

在安州—关城一侧, 相较于 1999 年所划界线有较为明显的(微)咸水侵入趋势。1999 年安新县水文地质调查时, 在寨里镇辖区内未发现咸水。但 2019 年水文地质调查在寨里镇附近测得一口矿化度大于 2 g/L 的民用水井, 这也从侧面印证了安州—关城一带是有侵入迹象。

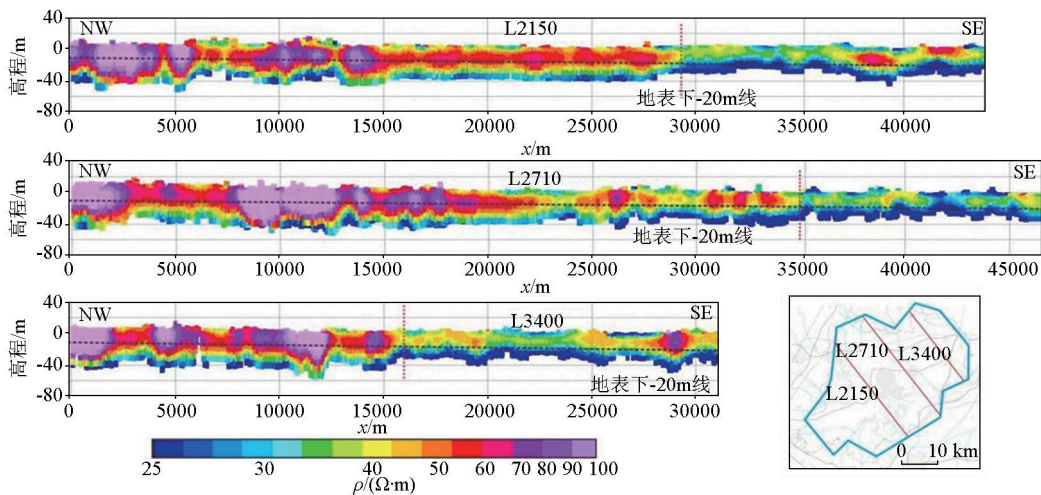


图 4 雄安新区不同测线的电阻率剖面

Fig. 4 Resistivity profile of different lines in Xiong'an New Area

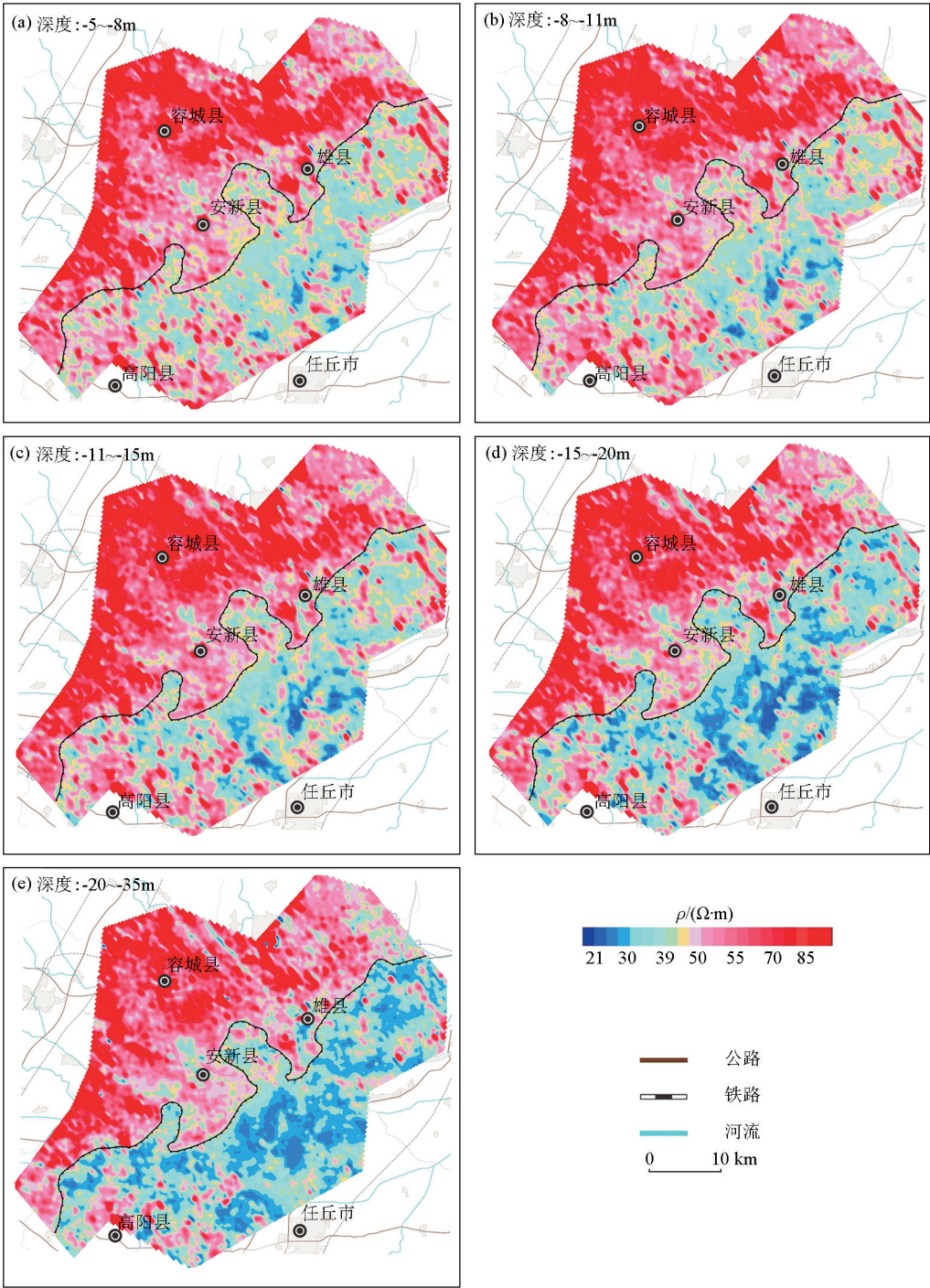


图 5 雄安新区不同深度电阻率等值线平面

Fig. 5 Contour map of resistivity at different depths in Xiong'an New Area

2019 年,安新县西南部(芦庄—高阳一带)浅层地下水降落漏斗面积较上年增加了 16.5%^[27],也是新区内增加最多的区域。这加剧了(微)咸水向芦庄—高阳方向的侵入。未来该地区浅层地下水水位下降趋势如果得不到缓解,芦庄—高阳方向(微)咸水范围会继续扩大。

4 结论

笔者通过对雄安新区的频率域航空电磁数据反

演,得到了研究区地下 5~35 m 的电性分布特征,以此推断研究区内(微)咸水与淡水的分界线。得到以下结论:①频率域航空电磁法结合地面验证可以有效应用于浅层(微)咸水与淡水的分界线识别及变化趋势评估。②浅层地下水降落漏斗会影响咸水侵入的趋势:雄县东北处的胥岗—米家务—双堂一带(微)咸水侵入由于胥岗水漏斗的存在而趋于稳定,但水漏斗也同时加剧了胥岗镇地区南部(微)咸水入侵;安新县城西侧由于容城水漏斗水位上升,

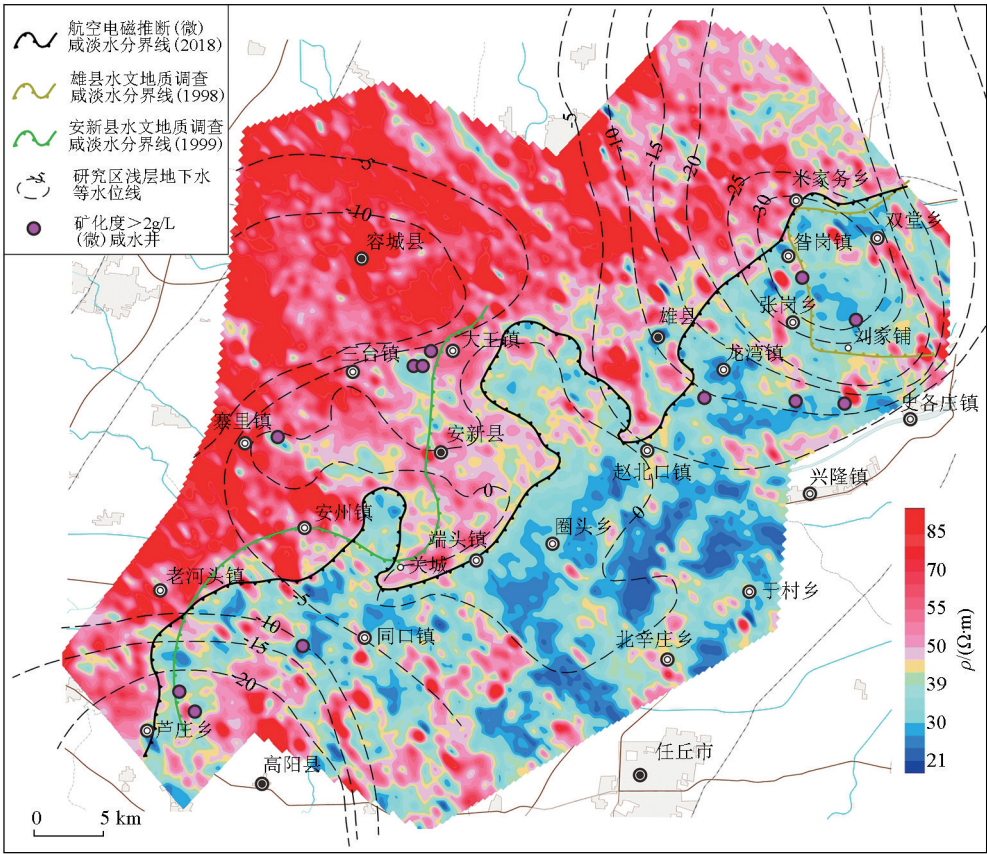


图 6 雄安新区-15 ~ -20 m 电阻率平面等值线综合

Fig. 6 Comprehensive map of resistivity contour at -15 ~ -20 m depth in Xiong'an New Area

相较 1999 年(微)咸水范围有所减少;高阳水漏斗地区水位持续下降,导致芦庄—高阳方向(微)咸水范围将继续扩大。

新区建成后,常住人口的增长会导致用水需求增加。因此,地下水资源的合理开发利用变得尤为重要。容城县大部及雄县西北部地区的浅层地下水位近几年持续回升,且水质较佳,可作为饮用水供水水源。在容城县东南、雄县东部以及安新县南部等(微)咸水区,浅层地下水不可用作饮用水,但可以作为农业灌溉、工业用水的水源。农业灌溉应避免漫灌,尽量采取滴灌或渠灌。对于胥岗、高阳两个浅层地下水降落漏斗区,应做好用水规划,减少两个地区浅层地下水开采量,以缓解浅层地下水位下降带来的(微)咸水侵入。(微)咸水区浅层地下水过度开采且得不到及时补充,还会引起当地土壤盐碱化、地面沉降等问题。此外,应对(微)咸淡水边界地区进行定期监测,为当地浅层地下水的开采利用规划提供依据。

致谢:感谢中国地质调查局环境监测院李海涛教授、赵凯博士在文章编写过程中给予的帮助,提供的水文监测井数据对于本文的研究具有重要的验证作用。同时,感谢评审专家、期刊编辑提出的宝贵修

改意见。

参考文献 (References):

[1] GB/T 50363—2006 节水灌溉工程技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
GB/T 50363—2006 Technical specification for water-saving irrigation engineering[S]. Beijing:China Planning Press,2006.

[2] 庞桂斌,张立志,丛鑫,等.微咸水灌溉下冬小麦光合作用与光响应曲线模拟[J].农业机械学报,2021,52(11):333-342.
Pang G B,Zhang L Z,Cong X,et al. Leaf photosynthesis and light response curve simulation of winter wheat under brackish water irrigation[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machine,2021,52(11):333-342.

[3] 杨官凯,武育芳,曹行行,等.微咸水灌溉对玉米秸秆有机复合基质番茄生长及品质特性的影响[J].华北农学报,2021,36(S):81-88.
Yang G K,Wu Y F,Cao H H,et al. Effects of organic compound substrate from corn stalk tomato growth and fruit quality under brackish and fresh water irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2021,36(S):81-88.

[4] 冯隼,张俊鹏,曹彩云,等.适宜棉花成苗的咸水灌溉方式及矿化度指标确定[J].农业工程学报,2014,30(22):95-101.
Feng D,Zhang J P,Cao C Y,et al. Optimal irrigation method in pre-sowing irrigation with saline water and determination of mineralization degree index for cotton seedling[J]. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 95-101.
- [5] 王广恩,郭丽,钱玉源,等.不同咸水利用方式对棉花叶绿素荧光参数及土壤盐分的影响[J].棉花学报,2021,33(1):13-21.
Wang G E, Guo L, Qian Y Y, et al. Effects of different saline water irrigation on chlorophyll fluorescence parameters in cotton and the soil salt content [J]. Cotton Science, 2021, 33(1): 13-21.
 - [6] 郭仁松,林涛,徐海江,等.微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J].水土保持报,2017,31(1):211-216.
Guo R S, Lin T, Xu H J, et al. Effect of saline water drip irrigation on water and salt transport features and cotton yield of oasis cotton field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 211-216.
 - [7] 马中昇,谭军利,魏童.中国微咸水利用的地区和作物适用性研究进展[J].灌溉排水学报,2019,38(3):70-75.
Ma Z B, Tan J L, Wei T. The Variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70-75.
 - [8] 王卫平,周锡华,范正国,等.吊舱式直升机电磁技术示范应用[J].中国地质调查,2015,2(5):1-7.
Wang W P, Zhou X H, Fan Z G, et al. Demonstration application of towered bird helicopter-borne electromagnetic technique [J]. Geological Survey of China, 2015, 2(5): 1-7.
 - [9] 王卫平,余学中,郭华,等.水工环航空地球物理探测技术及应用[M].北京:地质出版社,2021.
Wang W P, Yu X Z, Guo H, et al. Hydrological engineering environmental airborne geophysical technique and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
 - [10] 满延龙.频率域航空电磁法浅层水资源调查的试验研究[J].地球物理学报,1990,33(5):604-610.
Man Y L. Investigation of shadow water resources using frequency domain aeroelectromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(5): 604-610.
 - [11] 孟庆敏. Y11B 航空物探(电/磁)综合站西北找水初步成果[J].物探与化探,1998,22(4):241-246.
Meng Q M. Preliminary achievements obtained by Y11B aerogeophysical (electric / magnetic) integrated station in water exploration of northwest China [J]. Geophysical and Geochemical, 1998, 22(4): 241-246.
 - [12] 王卫平,王越盛.航空电磁法在黄河口地区寻找浅层淡水的地质效果[J].物探与化探,1999,23(2):115-121, 127.
Wang W P, Wang Y S. The application of airborne electromagnetic method to the exploration of shadow fresh water at the mouth area of the Yellow River [J]. Geophysical and Geochemical, 1999, 23(2): 115-121, 127.
 - [13] Lipinski B A, Sams J I, Smith B D, et al. Using HEM surveys to evaluate disposal of by-product water from CBNG development in the Powder River Basin, Wyoming [J]. Geophysics, 2008, 73(3): B77-B84.
 - [14] Siemon B, Christiansen A V, Auken E. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration [J]. Near Surface Geophysics, 2009, 7, 629-646.
 - [15] Chandra S, Tiwari V M, Vidyasagar M, et al. Airborne electromagnetic signatures of an ancient river in the water-stressed Ganga plain, Prayagraj, India: A potential groundwater repository [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(23): e2021GL096100.
 - [16] Jorgensen F, Scheer W, Thomsen S, et al. Transboundary geophysical mapping of geological elements and salinity distribution critical for the assessment of future sea water intrusion in response to sea level rise [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16: 1845-1862.
 - [17] Gunink J L, Bosch J H, Siemon B, et al. Combining ground-based and airborne EM through artificial neural networks for modelling glacial till under saline groundwater conditions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16: 3061-3074.
 - [18] Gottschalk I, Knight R, Asch T, et al. Using an airborne electromagnetic method to map saltwater intrusion in the northern Salinas Valley, California [J]. Geophysics, 2019, 85(4): B119-B131.
 - [19] 钱永,张兆吉,费宇红,等.华北浅层地下水可持续利用潜力分析[J].中国生态农业学报,2014,22(8):890-897.
Qian Y, Zhang Z J, Fei Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890-897.
 - [20] 刘元晴,周乐,何锦,等.华北平原浅层(微)咸水开发利用现状[J].灌溉排水学报,2015,34(S1):137-141.
Liu Y Q, Zhou L, He J, et al. Research status and trend of shadow brackish exploration in North China Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 34(S1): 137-141.
 - [21] 方生,代文元.华北平原咸水区雨洪控制利用[J].南水北调与水利科技. 2003, 1(1): 38-43.
Fang S, Dai W Y. Control and utilization of rainwater in saline groundwater region of North China Plain [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(1): 38-43.
 - [22] 河北省环境地质勘察院.河北雄县区域水文地质调查报告[R].1998.
Hebei Survey Institute of Environmental Geology. Regional hydrogeological survey report of Xiongxian County, Hebei Province [R]. 1998.
 - [23] 河北省环境地质勘察院.河北安新县县区域水文地质调查报告[R].2000.
Hebei Survey Institute of Environmental Geology. Regional hydrogeological survey report of Anxin County, Hebei Province [R]. 2000.
 - [24] 赵本龙,马占辉,赵建永.雄安新区水文要素特性分析[J].水科学与工程技术,2018(3):47-49.
Zhao B L, Ma Z H, Zhao J Y. Analysis of the characteristics of hydrological factors in Xiong'an New Area [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2018(3): 47-49.
 - [25] 马岩,李洪强,张杰,等.雄安新区城市地下空间探测技术研究[J].地球学报,2020,41(4):535-542.
Ma Y, Li H Q, Zhang J, et al. Geophysical technology for underground space exploration in Xiong'an New Area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 41(4): 535-542.
 - [26] 凤蔚,初晓凡,李海涛,等.雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J].水文地质工程地质,2017,44(6):1

-8.
Feng W, Chu X F, Li H T, et al. Wavelet analysis between ground-water level regimes and precipitation, north pacific index in the Xiong'an New Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 1-8.

[27] 马震, 夏雨波, 李海寿, 等. 雄安新区自然资源与环境—生态地质条件分析 [J]. 中国地质, 2021, 48(3): 677-696.
Ma Z, Xia Y B, Li H T, et al. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area [J]. Geology in China, 48(3): 677-696.

[28] 袁瑞强, 龙西亭, 王鹏, 等. 白洋淀流域地下水更新速率 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 381-388.
Yuan R Q, Long X T, Wang P, et al. Renewal rate of groundwater in the Baiyangdian Lake Basin [J]. Progress in Geography, 2015, 34(3): 381-388.

[29] Auken E, Christiansen A V. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data [J]. Geophysics, 2004, 69(3): 752-761.

[30] 蔡晶, 齐彦福, 殷长春. 频率域航空电磁数据的加权横向约束反演 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 953-960.
Cai J, Qi Y F, Yin C C. Weighted laterally-constrained inversion of frequency-domain airborne EM data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 953-960.

[31] Christiansen A V, Auken E. A global measure for depth of investigation [J]. Geophysics, 2012, 77(4): WB171-WB177.

[32] 赵建粮, 张笑笑, 李志丹, 等. 电法勘探在地下咸淡水划分中的应用 [J]. 冶金管理, 2020, 15: 108-110.
Zhao J L, Zhang X X, Li Z D, et al. Application of electrical survey in the division of salt and fresh water in groundwater [J]. China Steel Focus, 2020, 15: 108-110.

Application of the frequency-domain airborne electromagnetic method in shallow (brackish) saline water and freshwater surveys in the Xiong'an New Area

SHAN Xi-Peng, XIE Ru-Kuan, YU Xue-Zhong, LIANG Sheng-Jun, Li Jian
(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Nature Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Determining the boundary between shallow saline water and freshwater in areas containing (brackish) saline water can guide the exploitation and utilization of local shallow water resources. This study analyzed the characteristics of underground shallow electrical structure through inversion based on the frequency-domain airborne electromagnetic data. Then, it inferred the boundary between the shallow (brackish) saline water and freshwater in the study area. By comparison with the boundaries between saline water and freshwater obtained from two hydrological surveys in 1998 and 1999 and by combining the surface hydrogeological data, this study revealed that the shallow groundwater cones of depression affect saline water intrusion trends in the Xiong'an New Area, and the details are as follows: The (brackish) saline water intrusion in the Zangang-Mijiawu-Shuangtang area in the northeast of Xiongxian County tends to be stable due to the presence of the Zangang groundwater cone of depression. However, this cone has also intensified the (brackish) saline water intrusion in southern Zangang Town. Compared to 1999, the (brackish) saline water range on the west side of Anxin County has continuously decreased due to the rise in the water level of the Rongcheng groundwater cone of depression. The continuous decrease in the water level of the Gaoyang groundwater cone of depression determines that the (brackish) saline water range in the Luzhuang-Gaoyang direction will continuously expand. These predicted (brackish) saline water intrusion trends will provide data support for the rational exploitation and utilization of water resources in the construction of the Xiong'an New Area.

Key words: frequency-domain airborne electromagnetic method; Xiong'an New Area; shallow water resources; boundary between saline water and freshwater

(本文编辑:王萌)