

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.

直流电阻率法在洋戴河平原海水入侵识别中的应用

窦旭强^{1,2}, 韩冬梅^{1,2*}, 曹天正^{1,3}, 宋献方^{1,2}, 左文喆⁴

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190; 4 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210)

摘 要:海水和淡水之间的显著电性差异使得直流电阻率法可用于识别和监测海水入侵。洋戴河平原不同海水入侵程度含水层, 其电阻率呈现出显著分异, 一般规律为: 严重入侵 ($<5 \Omega \cdot m$), 轻度入侵 ($5 \sim 13 \Omega \cdot m$), 未入侵 ($13 \sim 150 \Omega \cdot m$)。结合水文地质钻孔资料, 依靠含水层电阻率分布识别海水入侵。结果表明, 洋戴河平原部分地区海水入侵进程具有明显的季节效应, 由于农灌开采地下水导致 6 月海水入侵程度较为严重, 3、11 月海水入侵程度相对较弱。研究区滨海浅层地下咸水 (微咸水) 区主要分布在河道两侧, 并向周围抽水灌溉区发展, 其主要来源是海水沿河床入侵后形成的混合咸水以及灌溉回归水。现有的措施已经对海水入侵发展起到了一定的减缓作用, 但仍需加强典型地段的防治。

关键词:洋戴河平原; 垂直电测深; 高密度电阻率层析成像; 海水入侵识别

中图分类号: P631; P738

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.014

0 引言

地下水超采引发的海水入侵已经成为全球滨海地区面临的重要资源环境问题, 在人口密集以及高度依赖地下水的区域这一问题尤其突出^[1-3]。我国海岸线绵延长达 18 000 km, 沿线广泛分布遭受海水入侵的城市^[4], 其中环渤海滨海平原地区海水入侵形势最为严峻。超量开采地下水用于农业灌溉以及城市供水是滨海地区地下水咸化的主要人为驱动因子, 从长远来看, 全球气候变化也将会对沿海地区的海水入侵产生重要影响^[5]。滨海地区可通过制定地下水适应性管理方案以控制地下水咸化过程, 而对海水入侵机理的深入研究以及现状的充分认识是其重要前提。

地下水位监测、水化学同位素示踪、地球物理探测、数值模拟等方法被广泛用于海水入侵的成因机理与作用机制、咸淡水界面的分布和演化规律、海水入侵发展趋势等方向的研究。这些方法各有优势, 侧重方向各不相同, 本文采用地球物理方法中的直流电阻率法, 一方面因为它不具备破坏性, 另一方面能够以低成本获得空间范围内的高密度连续数据集, 可以将水文地质空间结构和地下水盐度分布刻画得更加精细。Swartz^[6] 最早使用直流电阻率法研究了夏威夷岛的咸淡水界面垂向深度。这种早期的直流电阻率法主要包括电测井法和垂直电测深法 (VES), 受条件限制只能进行一维探测, 之后随着集成电路、自动控制等技术的发展, 二维以及三维高密度电阻率法 (ERT) 方法得以实现^[7]。在过去十多年中, 直流电阻率法中的 VES 和 ERT 已经成为海水入侵问题的重要研究方法, Zarroca 等^[8] 结合 VES 和 ERT 研究了西班牙北部地区地下水不同程度咸化区的历史分布及演化过程; Alabjah 等^[9] 结合水化学方法和直流电阻率法识别了海水入侵地区地下水咸化的来源, 并确定海水向陆入侵的范围以及形状; 何玉海等^[10]、刘宏伟等^[11] 利用高密度电阻率法在莱州湾南岸地区识别出了海水入侵界

收稿日期: 2020-02-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (41371057); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目 (2012040)

作者简介: 窦旭强 (1994—), 男, 在读硕士, 主要从事海水入侵调查方面的研究工作. E-mail: douxq.17s@igsrr.ac.cn

* 通讯作者: 韩冬梅 (1978—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事滨海水循环与地下水水文过程方面的研究工作. E-mail: handm@igsrr.ac.cn

面的位置。

秦皇岛市是我国环渤海经济圈的重要港口、旅游城市,隶属“京津冀一体化”规划中的东部滨海发展区,保障秦皇岛滨海地区地下水水质安全对当地社会经济发展以及生态环境保护具有重要意义。从20世纪70年代开始,由于集中超采地下水和连年干旱,枣园水源地地下水位负值区逐渐发展形成,洋河、戴河平原海水入侵迅猛发展,地下咸水范围快速向陆推移,造成巨大经济社会损失。许多学者就这一区域的海水入侵问题,利用地下水位监测、水化学同位素示踪、数值模拟等方法开展了一系列调查研究^[3,12-18],在区域尺度上对该地海水入侵进行了调查评价,探讨了海水入侵的成因机理、发展过程,对未来进行了情景预测并提出了相应的防治对策。然而,研究区地质结构的非均质性以及地下水位大幅季节变动使得该地区的海水入侵具有强烈的时空变异性,同时近年来也采取了一些海水入侵防治措施(如拦河坝、限制地下水开采等)。为进一步加深对该地海水入侵的认识,给当地海水入侵治理以及地下水管理提供参考,本文在前人的研究基础上利用直流电阻率法中的VES和ERT在连续二维空间内识别含水层系统中的咸水分布,揭示海水入侵的时空变化特征。

1 研究区概况

洋戴河滨海区位于河北省秦皇岛市北戴河新区北部。区内旅游业、海水养殖、葡萄酒等综合性产业发达,是秦皇岛地区主要的农业经济区。研究区为暖温带半湿润季风气候,年平均降水614 mm,多年平均气温10.3℃,多年平均蒸发量为1469 mm。洋河(支流浦河)和戴河构成了研究区的主要水系。从20世纪80年代开始,由于上游建库截流加上连年干旱,河口入海水量大幅减少,海水倒灌进入河道,洋、戴河潮汐界向上延伸,同时洋、戴河河口的无序挖沙破坏了河床,导致倒灌海水入渗速度加快,以及倒灌海水滞留时间延长。2010年之后,洋河、戴河入海口前相继修建了拦潮坝^[19],以抬升河道水位,阻止海水沿河道上溯。平原西部留守营与东部枣园水源地开始出现由地下水集中开采导致的地下水位负值区,并有扩大联通的趋势。当地开采地下水主要用于农业灌溉,每年3—6月春灌期间,大

规模地下水开采会导致地下水位的剧烈波动^[20-21]。

研究区位于燕山褶皱带东南部的边缘地区,自吕梁运动以来长期以构造上升运动为主,早期受东南部挤压形成EW向的构造,自晚生代以来被新构造运动改造,新构造运动以垂直升降为主,陆区部分不断上升,渤海盆地沿NE向断裂呈阶梯式下降,形成NE向断裂。平原基底以片麻岩类和混合花岗岩为主。第四系地层厚度普遍在20~40 m,自西向东主要分布洪坡积物、冲洪积物、冲积物,沿海分布有海积物(图1)^[20]。

2 研究方法

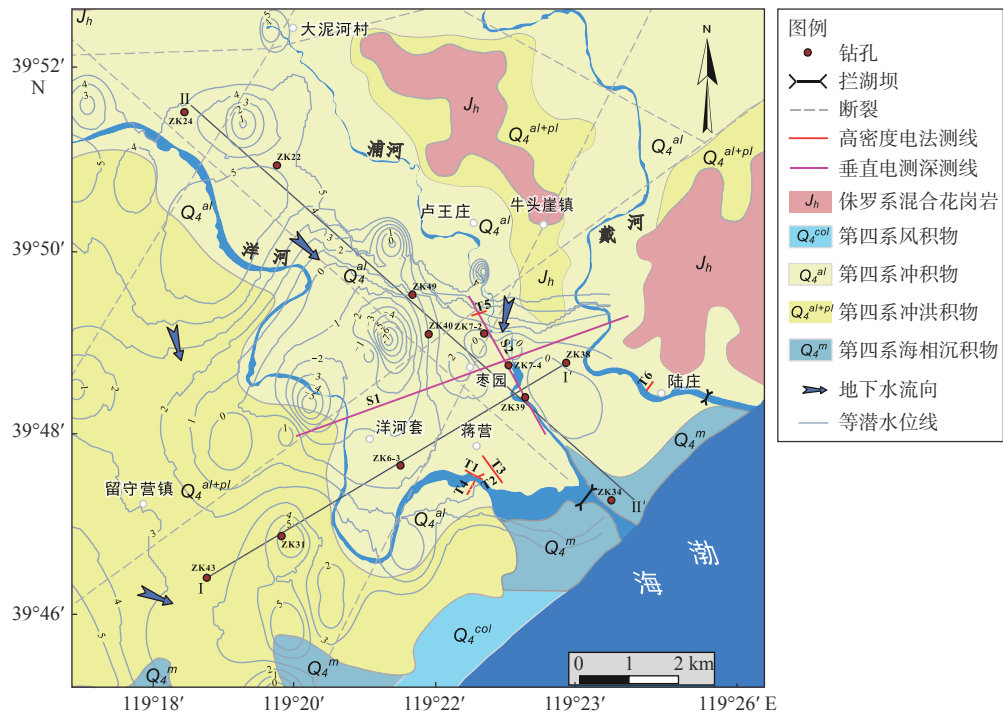
本研究结合垂直电测深(VES)和高密度电阻率法(ERT)2种直流电阻率法识别研究区内不同程度的海水入侵影响区。

2.1 垂直电测深法

垂直电测深以测线形式布置。测线长度和位置依据该区环境地质条件以及历史海水入侵的范围等确定。2002年3月,秦皇岛水文地质大队在该地布设了S1和S2测线进行了勘测,平行海岸线的S1测线位于洋河套-枣园地区,垂直海岸线的测线S2沿浦河布置,具体位置如图1所示。S1测线长7 km,测点距离100 m,测点范围为30~100,测线方向为70°;年内6、11月以及2003年3、6、11月于测点40~50间进行了追加勘测,测线长度为1 km;S2测线长3 km,测点距离100 m,测点从20~50,测线方向为150°,年内6、11月以及2003年3、6、11月于测点20~39间进行了追加勘测,测线长度为2 km。工作仪器包括DDC-2B型电子自动补偿仪和DZD—4型直读电测仪2种,测得数据的一致性对比结果显示2台仪器无明显差异。测点电极排列方式全部采用施伦贝格排列(A-MN-B),最大供电电极距(AB/2)为100~220 m,最小3 m。结合研究区现有的钻孔岩性资料,定性解释视电阻率拟断面图反映的海水入侵影响区分布变化。

2.2 高密度电阻率法

高密度电阻率法共布设6条测线,于2018年8月完成勘测,测线基本布置在洋戴河河岸两边,T1、T3两条测线位于洋河东岸,T1长315 m,极距5 m,



注: 等潜水位线据 2018 数据; 水文地质剖面位置 (I-I', II-II') 引自文献 [20-21]; 电阻率法测线 (S1, S2, T1-T6) 位置

图 1 研究区地质图

Fig.1 Geological map

测线方位为 127° , T3 长 410 m, 极距 7 m, 测线方位 145° ; T2、T4 两条测线布置于洋河两侧, T2 位于洋河北岸, 长 155 m, 极距 5 m, 测线方位为 65° , T4 位于洋河南岸, 长 300 m, 极距 5 m, 测线方位 45° ; T5 测线位于浦河西侧, 长 265 m, 极距 5 m, 测线方位为 73° ; T6 测线位于戴河东侧, 长 120 m, 极距 3 m, 测线方位为 37° , 具体位置如图 1 所示。使用的仪器为 SuperSting R8/IP (AGI) 高密度电测仪, 采用温纳排列, 电极数量 64 个, 最大极距为 10 m, 根据现场情况选取适当极距, 确保布极时接地电阻 $<10 \text{ k}\Omega$ 。数据预处理包括对明显畸变、偏离的数据点进行平滑或剔除, 之后使用 AGIEarthimager 2D-2.4.4.649 程序对数据进行二维反演, 反演方法选择基于圆滑约束的最小二乘法, 使用预置初始反演模型。研究区地势平坦, 反演过程中没有进行高程赋值。所有断面使用统一的色标表示电阻率变化。

3 结果与讨论

3.1 含水层视电阻率与海水入侵之间的关系

地层电阻率 ρ_f 与地层岩性、内部结构及含水、

含盐状况有关, 这种关系可以用阿尔奇公式^[22]表示为

$$\rho_s = \alpha A_c C^{-1} \Phi^{-m} S^{-n} \quad (1)$$

式中: α 为由岩性决定的饱和系数 (0.6~2);

A_c 为与溶质组成相关的系数, $\Omega \cdot \text{m}$;

C 为地下水中的 TDS (溶解性总固体);

Φ 为有效孔隙度, %;

m 为由孔隙形状和岩石压密度决定的胶结指数 (1.3~2.2);

S 为饱和度;

n 为饱和指数 (多数孔隙结构饱和度在 20%~100% 时取值为 2)。

研究区上覆第四系地层主要由粉质黏土、砂和砾卵石层等构成, 表 1 是根据历史资料统计的该区域第四系物性测定结果; 基底中混合花岗岩的电阻率范围在 $250 \sim 1\,500 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 之间, 片麻岩的电阻率范围在 $350 \sim 1\,000 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$; 山前洪积扇前缘地下水为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 电阻率为 $40 \sim 50 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$, 渤海海水电阻率为 $0.5 \text{ }\Omega \cdot \text{m}$, 滨海砂质含水层中的侵入咸水为 Na-Cl 型水, 电阻率大小介于前两者之间, 与 TDS 成反比例关系^[23]。

表 1 该地第四系部分岩性电阻率范围 (引自文献 [23])

Table 1 The resistivity of Quaternary sediment of the study area (from reference[23])

岩性	电阻率/(Ω·m)	岩性	电阻率/(Ω·m)
粉质黏土	25~35	含咸水中粗砂	5~15
中粗砂	80~150	含淡水砾卵石	20~30
砾卵石	100~300	含咸水砾卵石	2.5~4

对于纯净的、无泥质且百分百含水的砂岩,其电阻率与孔隙水 TDS 成反比,比例系数为地层因子 $F^{[22]}$,此时阿尔奇公式简化为 $\rho_s=FC^{-1}$ 。依据秦皇岛水文地质大队在该区测定的砂质含水层视电阻率值(ρ_s)及同一点位钻孔水质分析资料中 TDS (C)值,回归分析可得 $\rho_s=12.82 C^{-1}$ (图 2),可决系数 R^2 为 0.95。

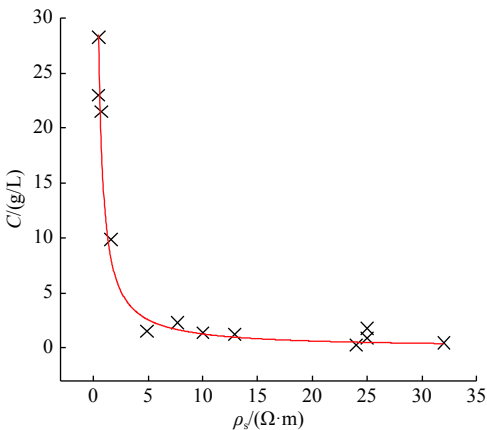


图 2 含水层视电阻率与地下水溶解性总固体之间的关系
Fig.2 The relation of aquifer’s resistivity and TDS

一般使用 Cl^- 和 TDS 作为划分海水入侵程度的指标,参照前人的划分结果^[24-25],结合上述地层视电阻率与地下水 TDS 之间的关系,可以给出研究区如表 2 所示的海水入侵程度与含水层视电阻率之间的关系。这也与其他^[8-11, 26-27]滨海第四系松散沉积环境中地层视电阻率变化规律相似。

表 2 海水入侵等级分类

Table 2 Classification of seawater intrusion degree

海水入侵等级	I	II	III
海水入侵程度	未入侵	轻度入侵	严重入侵
水体咸化程度	淡水	微咸水	咸水
$Cl^-/(mg \cdot L^{-1})$	<250	$250 \sim 1\,000$	$>1\,000$
$TDS/(mg \cdot L^{-1})$	$<1\,000$	$1\,000 \sim 3\,000$	$>3\,000$
$\rho_s/(\Omega \cdot m)$	$13 \sim 150$	$5 \sim 13$	<5

3.2 海水入侵影响区时空变化特征

(1) 东西向平行海岸线测线 S1

S1 测线 2002 年 3 月监测结果显示(图 3),自西向东对应区内 3 条河流(洋河、浦河、戴河)河床下均出现了低阻、极低阻($<13 \Omega \cdot m$)海水入侵区。测点 40 洋河和测点 95 戴河附近,形成了近水滴形的轻度入侵区;测点 76 浦河附近,近水滴状入侵区中间极距($AB/2=50 m$)附近出现严重入侵区。结合水文地质资料,推测河床下的海水入侵过程不仅包括咸潮入侵河道后沿河床的垂向入渗,还包括海水沿高渗透性含水层的侧向入侵。浦河深部的严重海水入侵则可能是由海水沿深部的基岩断裂向陆入侵造成的。

枣园测点存在呈朝上的锥状轻度入侵区。枣园曾以地下水作为水源地,持续开采地下水使得该处形成了地下水位负值区,周围地下水向此处汇流,沿断裂入侵的海水向枣园侧渗流,并在抽水处形成咸水上升锥,从而形成了该处的咸水分布特征。洋河—洋河套以及浦河—戴河之间的大片轻度入侵区推测是由抽水导致的河床中咸水侧向流动以及灌溉回归水共同造成的。

洋河至洋河套之间农业活动密集,多次监测结果显示该地海水入侵程度存在明显变化。地下水雨季(7、8 月)得到补充,咸水被冲淡,到 11 月中度入侵区大幅减小。这之后虽然淡水补给较少,但地下水开采量较少,地下水位仍保持高位,因此,直到次年 3 月入侵区的范围变化不大。从 5 月份开始,由于开始大规模抽取地下水灌溉,同时淡水补给不足,区域地下水位迅速下降,河床中咸水向抽水处渗流,6 月电测结果显示,洋河与洋河套处的轻度入侵区已经连成一片,海水入侵程度达到年内的峰值期。洋河套地区离海岸较远,地下水的集中开采以及高渗透性含水层通道是该地地下水咸化的主要原因。

(2) 南北向垂直海岸线测线 S2

S2 测线 2002 年 3 月监测结果显示(图 4),表层($AB/2<10 m$)和深层($AB/2>100 m$)存在极高阻区($>150 \Omega \cdot m$),分别是包气带和基岩的电测反映,测点 33 以北,中间层($AB/2=50 m$)为代表淡水含水层的中高阻区($13 \sim 150 \Omega \cdot m$),沿测点 33 以南至测点 38 中间层视电阻率急剧减小至极低阻($<5 \Omega \cdot m$),

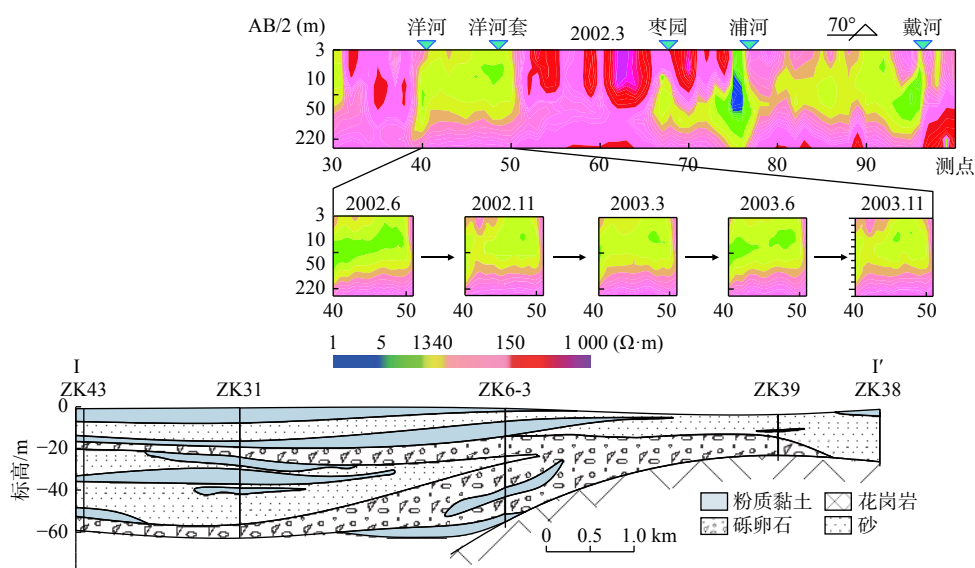


图 3 S1 测线视电阻率拟断面图 (2002 年 3 月) 和近测线方向偏南 2 km 水文地质剖面 I-I'

Fig.3 Resistivity cross sections S1(2002.3), hydrogeological cross section 2 km away from the south of the line(I-I')

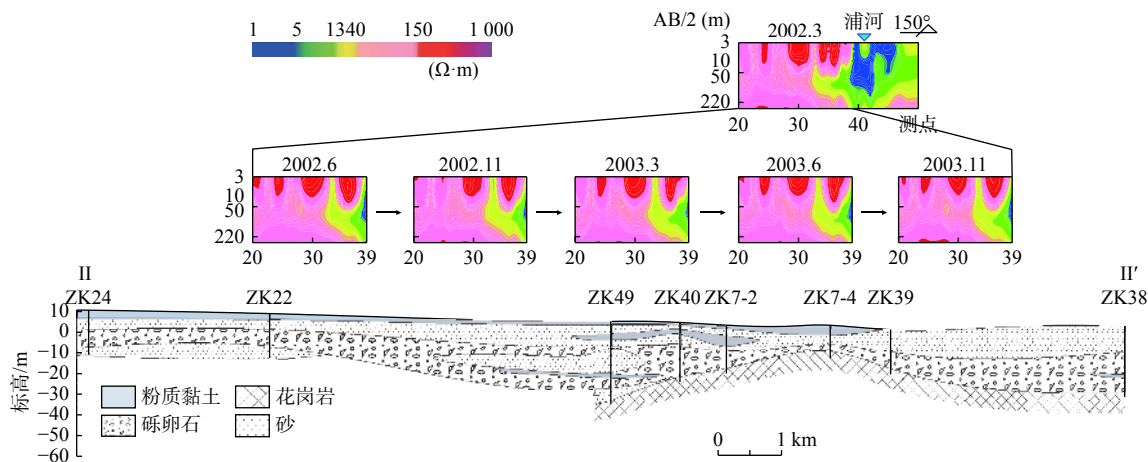


图 4 S2 测线视电阻率拟断面图 (2002 年 3 月) 和测线偏西 20° 方向水文地质剖面 II-II'

Fig.4 Resistivity cross sections S2(2002.3), hydrogeological cross section 20° west of the line of survey(II-II')

极低电阻率出现在浦河河床深处, 这种明显的变化指示出了海水沿浦河剖面向上游入侵的距离, 约为 5 km。33 测点距离枣园水源地最近, 枣园的抽水活动致使该处咸水有扩散的趋势。

S2 测线 20~39 测点多次监测结果显示, 沿浦河剖面海水入侵距离总体变化不大, 这表明地下水位的变化对该处海水入侵的影响较小。其中的原因可能与地质条件有关, 从水文地质剖面图(图 4)中可以看出, 33 测点附近基岩埋深大幅减小, 一定程度上阻止了咸水进一步向北发展。

(3) 平行于洋河测线 T1、T3

T1—T4 测线位置分布相对集中, 钻孔 ZK6-3

可揭露第四系的岩性和厚度。图 5 中 T1 和 T3 反演电阻率断面呈现出一定程度上的相似变化, 电阻率分布大致可划分为 4 层: 表层(<5 m)主要为低阻、极低阻(<13 Ω·m); 次表层(5~15 m)主要为中阻(13~40 Ω·m); 中间层(15~60 m)则呈现低阻向高阻(>40 Ω·m)过渡变化; 深层(>60 m)则表现为高阻。洋河附近的地下水埋深在 3~5 m 之间, 结合地层分布特征, 表层含水层中主要分布应是低阻(极低阻)微咸水(咸水)带, 河岸周边浅层地下水与河水交互作用较强, 周边又普遍存在农业灌溉区, 则咸水来源可能是海水沿河床入侵后形成的混合咸水以及包含农业污染的灌溉回归水。次表层的

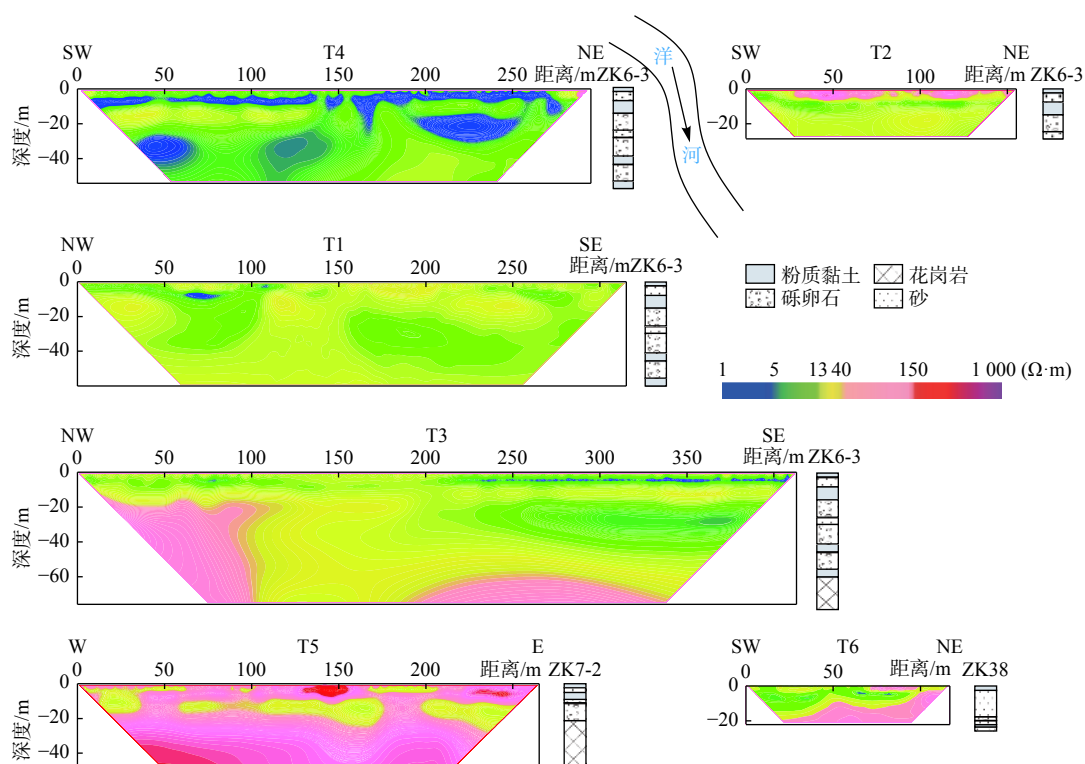


图 5 T1—T6 测线反演电阻率断面图 (2018 年 8 月)

Fig.5 T1-T6 ERT profiles(2018.8)

中阻对应了一层主要的粉质黏土层。中间层主要是由砂和砾卵石组成的含水层,该处井深 20 m 的地下水样为微咸水^[3],本次电测结果也显示存在舌状微咸水(咸水)体位于淡水上方,微咸水范围向陆(NW 方向)逐渐缩减向淡水过渡。深层的高阻区反应了基岩裂隙淡水的存在。咸水沿洋河河床向蒋营一侧渗流的距离约为 300 m,沿蒋营垂直于海岸线剖面海水入侵距离约为 3 km,而前人监测到的该处海水入侵距离约在 4~5 km^[20-21],表明该处海水入侵范围已出现了一定程度上的缩减。

(4) 垂直于洋河测线 T2、T4

从 T2、T4 反演电阻率断面中可以看出(图 5), T2 和 T4 次表层(5~15 m)同样有粉质黏土层造成的中阻区。T2 位于凹岸侵蚀岸,渗透性相对较差,浅层存在淡水含水层,粉质黏土层以下表现为高阻淡水;T4 位于凸岸堆积岸,渗透性相对较强,浅层基本都是极低阻咸水带,在 160~175 位置咸水带向下发展,说明该处粉质黏土层出现了缺失, T4 中间层主要分布低阻微咸水,并有呈斑状的极低阻咸水区的出现,显示出非均质含水层中海水入侵的优先通道。

(5) 枣园水源地北部测线 T5

钻孔 ZK7-2 揭露了该处第四系的岩性和厚度。该处地下水埋深在 3~5 m 之间。T5(图 5)表层<5 m 以及深度>30 m 处的极高阻反映分别是由包气带和基岩造成的,中间主要是砾卵石、砂含水层,主要分布中高阻淡水,但也出现了一小块的低阻微咸水区,他人的水化学调查也显示该处基本为未入侵的淡水^[15]。因此,沿浦河剖面的海水入侵在该处影响已十分微弱,可将其作为该剖面上的最远入侵位置,距海岸线约 5.3 km。

(6) 垂直于戴河测线 T6

钻孔 ZK38 揭露了该处第四系地层的岩性和厚度。地下水埋深 2~3 m。T6(图 5)5~20 m 的砂质含水层中出现了明显的低阻微咸水区,随深度增加,向高阻淡水区过渡变化。沿远离戴河方向淡水区厚度逐渐增加,微咸水区的厚度沿着此方向逐渐减小,表明该处咸水(微咸水)来自于戴河河床中咸水的侧向渗流,渗流距离约为 100 m。咸水入侵锋曲折变化,最主要的影响因素是含水层渗透性的变化,入侵锋沿高透性地层形状发展。

3.3 洋戴河平原海水入侵过程概念模型

根据直流电阻率法的监测结果, 结合前人的研究成果绘制了洋戴河平原海水入侵概念图(图 6)。洋戴河平原海水沿含水层侧向入侵形成的咸水楔形体, 是由滨海地下水向海排泄时地下水非稳定对流过程及溶质弥散过程共同作用的结果, 其广泛存在于沿海近岸地区, 楔形体的形状主要受控于含水层的水文/几何边界条件和水文地质参数。20 世纪 80 年代开始, 枣园水源地集中开采地下水形成的局部地下水位漏斗区, 加上该处高渗透性的含水层以及基岩中的断裂带, 使其成为洋戴河平原海水入侵的中心位置, 该处海水入侵距离达到 5 km 左右, 2000 年之后枣园水源地限采, 地下水位漏斗中心向西转移, 令海水入侵开始沿洋河套方向快速发展^[21]。同时在洋戴河未设立拦潮坝之前沿河道的垂向海水入侵盛行, 河

流径流量不足或偶发海洋事件(风暴潮等)时海水大量倒灌进入河道, 混合咸水就会沿着河床垂向入渗侵入浅层地下水。将 2018 年高密度电法结果与 2002 年垂直电测深监测结果以及 1987 年^[20]、2005 年^[21] 监测到的海水入侵界线对比, 可以发现整体上该地的海水入侵出现了一定程度的减轻; 但从枣园的监测结果来看, 高渗透性含水层及深部断裂带作为海水入侵快速通道仍没有得到有效控制。

集中开采地下水会改变局部地下水流场, 海水入侵楔形体上方的抽水活动会在原来的楔形体上部形成咸水“上升锥”; 近岸河道附近的抽水活动会使河床中的侵入咸水更多更远向周围含水层渗流, 近海地区开采地下(微咸水)水用于灌溉、养殖后, 经历入渗过程中的进一步蒸发浓缩, 将在地下水表层形成咸水带, 同样会受到抽水造成的局部流场影响, 造成地下水咸化范围扩大。

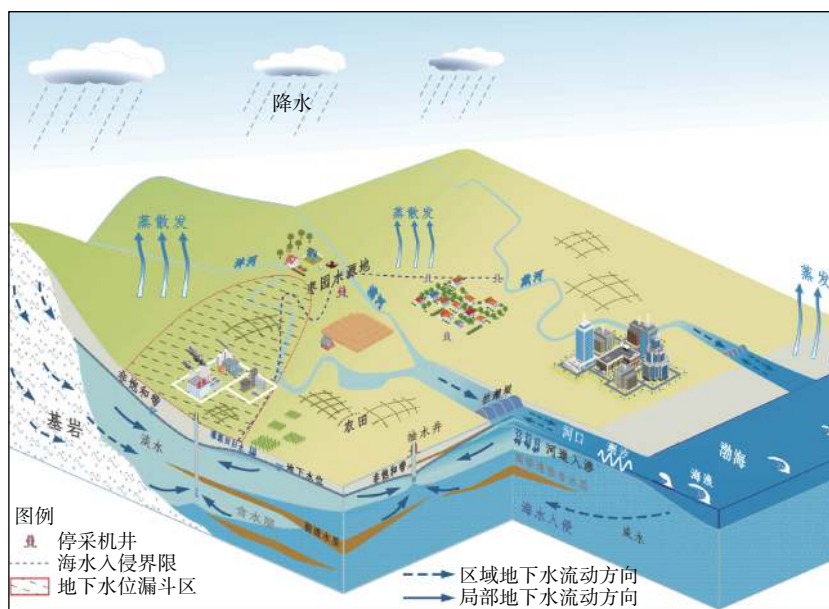


图 6 洋戴河平原海水入侵概念图

Fig.6 Conceptual model of seawater intrusion in the Yang-Dai river plain

4 结论

结合水文地质资料, 直流电阻率法在洋戴河平原的实际应用中能够精细识别海水入侵的空间变化和影响范围, 是一种有效的海水入侵识别手段。最终得出了如下主要结论:

(1) 秦皇岛洋戴河滨海平原不同海水入侵程度对应的地层电阻率范围分别为: 严重入侵($<5 \Omega \cdot m$), 轻度入侵($5 \sim 13 \Omega \cdot m$), 未入侵($13 \sim 150 \Omega \cdot m$)。

(2) 洋戴河平原部分地区海水入侵过程具有季节效应, 农灌开采地下水是该地 6 月份海水入侵加重的主要原因; 2018 年 8 月, 蒋营剖面海水入侵距离约为 3 km, 浦河剖面海水入侵距离约为 5.3 km;

咸水沿洋河河床向蒋营一侧浅层地下水渗流的水平距离约为 300 m, 而沿戴河河床向陆庄一侧浅层地下水渗流的水平距离约为 100 m。对比不同时期的监测结果, 蒋营等地海水入侵程度明显减弱, 枣园等地海水入侵程度基本保持稳定。

(3) 拦潮坝的修建和水源地限采使该地海水入侵有所减缓。重点区域(河道、灌区、海水养殖区等地)周边的地下水开采会扩大浅层含水层的咸化范围。建议减少近海重点区域周边的地下水开采活动, 加强地下水的动态监测, 并在洋河河口近海处修建地下防渗墙, 在雨洪季节进行人工补给含水层, 进一步驱替地下咸水。

参考文献:

- [1] Werner A D, Bakker M, Post V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 3-26.
- [2] Santucci L, Carol E, Kruse E. Identification of palaeo-seawater intrusion in groundwater using minor ions in a semi-confined aquifer of the Río de la Plata littoral (Argentina)[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 566/567: 1640-1648.
- [3] Han D, Currell M J. Delineating multiple salinization processes in a coastal plain aquifer, northern China: hydrochemical and isotopic evidence[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, 22(6): 3473-3491.
- [4] 黄磊, 郭占荣. 中国沿海地区海水入侵机理及防治措施研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(2): 118-123.
- [5] Aslam R A, Shrestha A S, Pandey V P. Groundwater vulnerability to climate change: A review of the assessment methodology[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 612: 853-875.
- [6] Swartz J H. Resistivity studies of some salt-water boundaries in the Hawaiian Islands[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1937, 18(2): 387-393.
- [7] Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques[J]. *Computers and Geosciences*, 2001, 27(9): 1019-1029.
- [8] Zarroca M, Bach J, Linares R, et al. Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (Alt Empordà, Northern Spain)[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1): 407-422.
- [9] Alabjah B, Amraoui F, Chibout M, et al. Assessment of saltwater contamination extent in the coastal aquifers of Chaouia (Morocco) using the electric recognition[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 363-376.
- [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] 刘宏伟, 黄忠锋, 郭旭, 等. 地球物理技术在识别海(咸)水入侵界线中的应用——以莱州湾冲洪积扇区为例[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(9): 58-63.
- [12] 韩再生, 高恩厚. 洋河、戴河冲洪积平原水文地球化学特征及其成因分析[J]. *勘察科学技术*, 1988(4): 16-20.
- [13] 韩再生. 秦皇岛市洋河、戴河滨海平原海水入侵的控制与治理[J]. *现代地质*, 1990, 4(2): 105-115.
- [14] 鲍俊. 秦皇岛地区海水入侵的二维数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [15] 杨吉龙, 韩冬梅, 肖国强, 等. 秦皇岛洋河-戴河冲洪积平原第四系含水层海水入侵机理分析[J]. *地质调查与研究*, 2009, 32(2): 144-149.
- [16] 左文喆, 杨燕雄, 董军义, 等. 秦皇岛洋河-戴河沿海平原海水入侵数值模拟分析[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2087-2095.
- [17] 章斌, 宋献方, 郭占荣, 等. 用氯和氢氧同位素揭示洋戴河平原地下水的形成演化规律[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 2965-2972.
- [18] Sun Z, Song X, Bu H, et al. Origin of groundwater salinity and hydrochemical processes in an unconfined aquifer: case of Yang-Dai River basin in Qinhuangdao (China)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 1-12.
- [19] 臧文学, 刘文军, 郭巨, 等. 河北省秦皇岛市海水入侵地质灾害及其防治措施[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(4): 120-125.
- [20] 韩再生. 滨海孔隙含水层海水入侵的研究——以秦皇岛市洋河戴河冲洪积平原为例[D]. 北京: 中国地质大学, 1988.
- [21] 左文喆. 秦皇岛洋戴河平原海水入侵调查与研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [22] Archie G E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics[M]. *Transactions of American Institute of Mining Metallurgical Engineers*, 1942.
- [23] 张福振, 刁世铭. 电测深方法在滨海平原区水文地质环境调查中的应用[J]. *低碳世界*, 2014(7): 197-198.
- [24] 罗文艺, 靳孟贵, 刘延锋, 等. 深圳南山区海水入侵综合研究[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(9): 8-12, 19.
- [25] 韩冬梅. 基于环境同位素及水化学的莱州湾海水入侵机理研究[R]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.
- [26] De Franco R, Biella G, Tosi L, et al. Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy)[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(3): 117-130.
- [27] Goebel M, Pidliseck Y A, Knight R. Resistivity imaging reveals complex pattern of saltwater intrusion along Monterey coast[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 746-755.

ASSESSMENT OF SEAWATER INTRUSION IN THE COASTAL PLAIN AQUIFERS OF YANG-DAI RIVER USING DC-RESISTIVITY METHODS

DOU Xuqiang^{1,2}, HAN Dongmei^{1,2*}, CAO Tianzheng^{1,3}, SONG Xianfang^{1,2}, ZUO Wenzhe⁴

(1 Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4 College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: The distinct electrical difference between seawater and fresh water makes the Direct Current (DC) resistivity method useful for detecting and monitoring seawater intrusion (SWI). The aquifers invaded by seawater in different degrees exhibit significant resistivity difference, which could be classified into 3 groups: serious SWI ($< 5 \Omega \cdot m$), mild SWI ($5 \sim 13 \Omega \cdot m$), and non-SWI ($13 \sim 150 \Omega \cdot m$). Combined with the hydrogeological borehole data, the DC resistivity method can be used to identify the seawater intrusion affected areas after deleting the low resistance interference caused by clay layers. The results show that the seawater intrusion process in the Yang-Dai River plain has significant seasonal effects. It is relatively serious in June, the irrigation season and alleviated in March and November. The coastal shallow subsurface saltwater (brackish water) area in the study area is mainly distributed on the two sides of the river and gradually expanded into the surrounding irrigation area. Mixing of fresh and saline water from SWI and irrigation return flow is responsible for the saltwater sources. Near the coastline, sea farming could be the additive source for the saltwater input. The existing measures have played a certain role in slowing down the process of seawater intrusion, but it is still necessary to strengthen the measures to prevent and control seawater intrusion.

Key words: coastal plain of Yang-Dai river; vertical electric sounding; electrical resistivity tomography; seawater intrusion assessment