

doi: 10.11720/wtyht.2022.1220

孙建宏,程立群,赵伟锋,等.海水入侵区视电阻率与氯离子浓度关系研究——以秦皇岛地区为例[J].物探与化探,2022,46(2):518-524. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1220

Sun J H, Cheng L Q, Zhao W F, et al. Relationship between apparent resistivity and chloride ion concentration in seawater intrusion areas: A case study of Qinhuangdao[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 518-524. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1220

海水入侵区视电阻率与氯离子浓度关系研究 ——以秦皇岛地区为例

孙建宏,程立群,赵伟锋,任改娟,孙冠石,王瑞鹏,裴明星

(河北省地矿局第八地质大队,河北秦皇岛 066000)

摘要:为划分海水入侵界线,在秦皇岛沿海疑似海水入侵地区开展了高密度电阻率法勘察工作,并基于该成果对视电阻率与氯离子浓度的关系进行了分析总结。从统计分析不同地质分区的电法测井视电阻率值与对应井所采集水样得到的氯离子浓度的对应关系着手,通过数理分析求取二者之间的相关关系,得出研究区内二者的对应线性关系式,利用该关系式并结合高密度电法测量成果划分出研究区海水入侵界线。本次研究过程及最终所得关系式成果将为类似区域后续工作提供经验借鉴和方法指导。

关键词:海水入侵;高密度电阻率法;数理统计;线性回归;秦皇岛

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)02-0518-07

0 引言

随着工业、农业的发展以及城市化进程的不断加快,沿海地区的海水入侵形势日趋严峻,国内外对海水入侵问题的研究也逐渐深入^[1-6]。同时,由于海水入侵问题所引起的近岸海域的环境质量和生态功能退化问题也日益显现,已经影响到了人民群众的生产生活和旅游事业的发展,受到了各级政府和公众的高度关注。

近些年,我国对海水入侵问题的研究及治理工作逐步展开,但是研究的广度分布不均,只有山东的莱州湾^[7-11]、广西的北部湾^[12-13]等个别沿海地区有所开展,其中尤以莱州湾地区研究程度较高,其他地区研究成果相对较少。秦皇岛地区对海水入侵工作的研究处于起步阶段,利用高密度电阻率法在该区开展此类研究尚属首次。该研究主要是利用高密度电阻率法划分研究区的电阻率高低,结合入侵区和非入侵区的水质分析圈定海水入侵电阻率特征值,从而圈定海水入侵界限^[14-18],其目的是与水质分析

互相印证,提高划界准确率,另外,也可以将该研究成果在其他工作空白区域进行推广,指导新区海水入侵划界工作,并为后期采取进一步整治工作提供依据。

1 秦皇岛沿海地区地质特征

1.1 地层地质特征

秦皇岛地区海岸带自北向南全长约 126 km(图 1),均为第四系覆盖区域,岩性主要为黏土、亚黏土、亚砂土、砂及砾石、卵石等。砂、砾石、卵石构成了研究区内第四系含水层主要岩组,其下伏基岩主要为太古宇片麻岩和混合花岗岩。区内第四系厚度变化较大,自北向南由山海关沿海岸线向昌黎方向厚度整体逐渐加深,其中昌黎地区(南区)第四系厚度普遍超过 100 m,山海关、海港区、抚宁县范围(北区)第四系厚度普遍小于 50 m。第四系的地层颗粒度自北向南也存在明显差异,其中北区第四系地层以颗粒较大的卵石、砾石、砂为主,南区第四系地层以细颗粒的黏土、细砂等为主。

收稿日期:2021-04-19;修回日期:2021-10-12

基金项目:国家海洋局、财政部“蓝色海湾整治行动”资金项目(国海办字[2016]612号)

第一作者:孙建宏(1979-),男,高级工程师,长期从事地球物理勘查工作。Email:65400484@qq.com

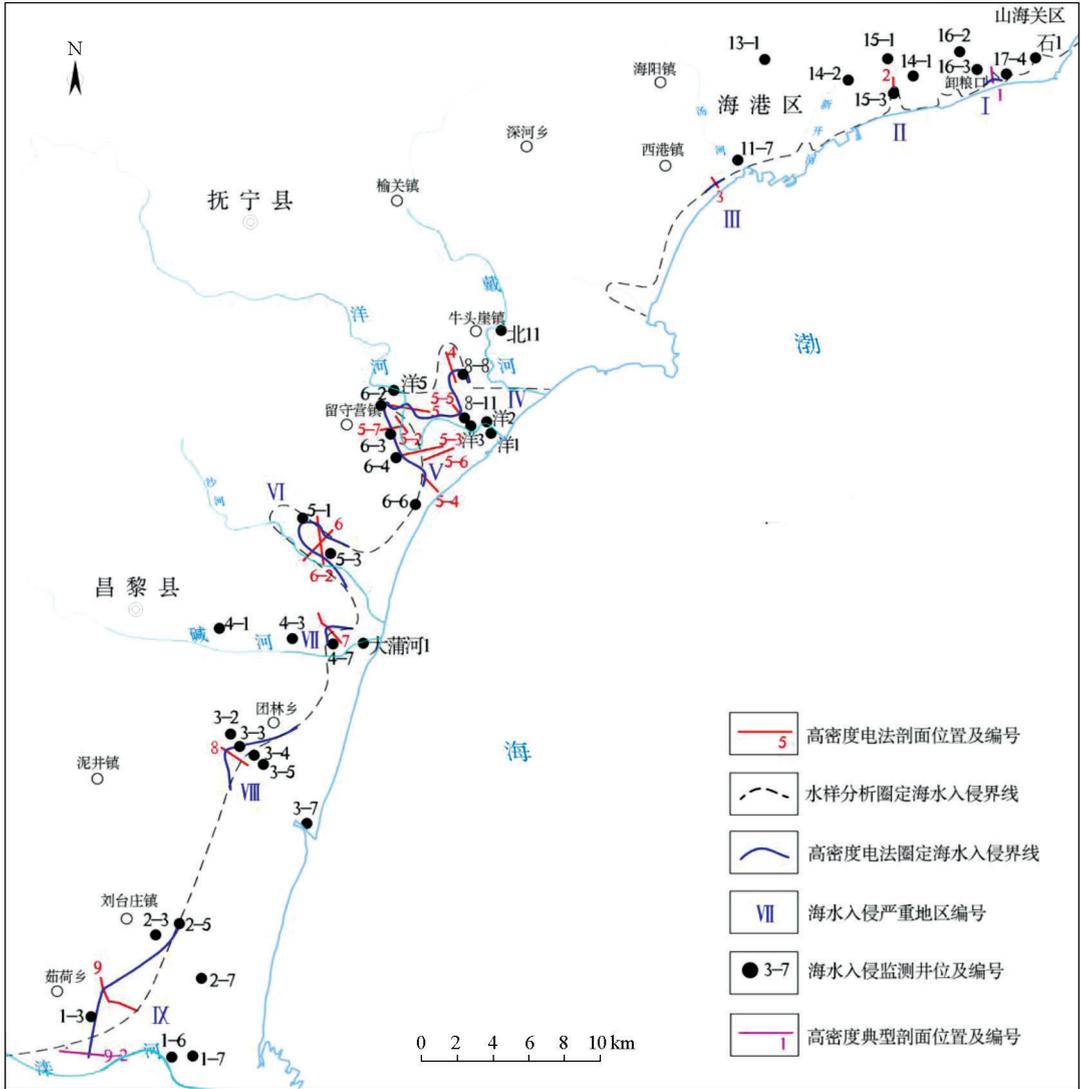


图 1 秦皇岛近岸海域海水入侵界线及监测测线布置

Fig. 1 Seawater intrusion boundary and monitoring line layout in Qinhuangdao coastal waters

根据前期分析的海水入侵程度和当地水系分布、入侵界线的复杂程度及地层特点等进行测线布置,在 9 个重点地区 (I ~ IX) 布置了高密度电法剖面共计 17 条 (见图 1)。

1.2 地层电性的数据采集及特征

本次高密度电法采用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 多功能直流电法仪和 DUK-2 多路转换器联合开展工作。采用装置形式为单边三极连续滚动测量装置。测线布置初期设计每个重点区域 (I ~ IX) 布设 1 条剖面,方向垂直前期水样分析成果划定海水入侵界线。后期根据物探测量成果在部分河流入海口,海水入侵界线复杂区域增加剖面,以方便解释。根据地层特征将研究区分为北区和南区 2 个大的分区,北区第四系覆盖层较薄测点距为 5 m,南区

覆盖层较厚测点距为 10 m。高密度测量结果采用 RES2DINV 程序进行反演解释。

咸、淡水导电离子量的不同,即含水层矿化度的高低会引起地层视电阻率的差异,而海水入侵区矿化度高低主要取决于氯离子浓度的高低^[7,9]。因此在施测高密度电法的同时,对研究区内的监测井进行了电阻率物性测井工作 (监测井由南向北编号从小到大编排,井位集中区编号分别按 1-1~1-n 区分,除备注中河水、海水外水样均为井水),并结合水质分析结果,对氯离子含量 ($\rho(\text{Cl}^-)$) 和视电阻率 (ρ_s) 的关系进行了初步统计 (表 1,图 2)。通过数据分析,发现测井视电阻率和氯离子含量之间存在负相关关系,即咸、淡水之间存在明显的电性差异。

表 1 物性测井视电阻率与氯离子浓度统计

Table 1 Statistics of resistivity and chloride ion concentration of physical property logging

| 序号 | 井号 | $\rho_s / (\Omega \cdot m)$ | $\rho (Cl^-) / (mg \cdot L^{-1})$ | 分区 | 水样来源 | 序号 | 井号 | $\rho_s / (\Omega \cdot m)$ | $\rho (Cl^-) / (mg \cdot L^{-1})$ | 分区 | 水样来源 |
|----|-----|-----------------------------|-----------------------------------|----|------|----|------|-----------------------------|-----------------------------------|----|------|
| 1 | 1—1 | 59 | 79.63 | 南区 | 井水 | 25 | 洋3 | 61.17 | 61.94 | 北区 | 河水 |
| 2 | 1—3 | 3.8 | 221.89 | 南区 | 井水 | 26 | 洋5 | 84.6 | 31.31 | 北区 | 河水 |
| 3 | 1—6 | 3.4 | 1163.89 | 南区 | 井水 | 27 | 8—8 | 16.5 | 724.88 | 北区 | 河水 |
| 4 | 1—7 | 17.8 | 286.55 | 南区 | 井水 | 28 | 8—11 | 17.8 | 535.66 | 北区 | 井水 |
| 5 | 1—9 | 1.4 | 9678.7 | 南区 | 井水 | 29 | 9—1 | 65.4 | 115.71 | 北区 | 井水 |
| 6 | 2—3 | 29.9 | 142.25 | 南区 | 井水 | 30 | 9—3 | 63.4 | 46.96 | 北区 | 河水 |
| 7 | 2—5 | 28.9 | 159.95 | 南区 | 井水 | 31 | 9—4 | 30.3 | 263.41 | 北区 | 井水 |
| 8 | 2—7 | 18.4 | 322.28 | 南区 | 井水 | 32 | 9—6 | 75.2 | 76.91 | 北区 | 河水 |
| 9 | 3—2 | 13.3 | 330.11 | 南区 | 井水 | 33 | 11—7 | 50.5 | 27.91 | 北区 | 汤河 |
| 10 | 3—3 | 37.2 | 132.72 | 南区 | 井水 | 34 | 13—1 | 53.8 | 126.6 | 北区 | 井水 |
| 11 | 3—4 | 17.5 | 262.05 | 南区 | 井水 | 35 | 14—1 | 60.7 | 96.65 | 北区 | 井水 |
| 12 | 3—5 | 22.6 | 244.35 | 南区 | 井水 | 36 | 14—2 | 30.7 | 330.11 | 北区 | 井水 |
| 13 | 3—7 | 7.92 | 598.96 | 南区 | 河水 | 37 | 15—1 | 78.7 | 86.44 | 北区 | 井水 |
| 14 | 4—1 | 33.7 | 136.81 | 南区 | 井水 | 38 | 15—3 | 33.2 | 296.08 | 北区 | 井水 |
| 15 | 4—3 | 48.7 | 106.86 | 南区 | 井水 | 39 | 16—1 | 57.9 | 70.79 | 北区 | 井水 |
| 16 | 4—7 | 9.2 | 611.9 | 南区 | 井水 | 40 | 16—2 | 32.3 | 387.28 | 北区 | 汤河 |
| 17 | 5—1 | 35.6 | 153.14 | 南区 | 井水 | 41 | 16—3 | 57.3 | 115.03 | 北区 | 汤河 |
| 18 | 5—3 | 3.2 | 912.06 | 南区 | 井水 | 42 | 17—3 | 70.8 | 82.36 | 北区 | 井水 |
| 19 | 6—2 | 54 | 159.95 | 北区 | 井水 | 43 | 17—4 | 55.9 | 125.92 | 北区 | 井水 |
| 20 | 6—3 | 73.7 | 57.85 | 北区 | 井水 | 44 | 18—2 | 69.8 | 59.22 | 北区 | 河水 |
| 21 | 6—4 | 66.4 | 40.16 | 北区 | 井水 | 45 | 18—5 | 5.04 | 25.86 | 北区 | 河水 |
| 22 | 6—6 | 40.5 | 211 | 北区 | 河水 | 46 | 大1 | 0.41 | 14592.92 | 北区 | 海水 |
| 23 | 洋1 | 1.93 | 5349.83 | 北区 | 海水 | 47 | 大2 | 0.38 | 11053.59 | 北区 | 海水 |
| 24 | 洋2 | 72.7 | 72.83 | 北区 | 河水 | | | | | | |

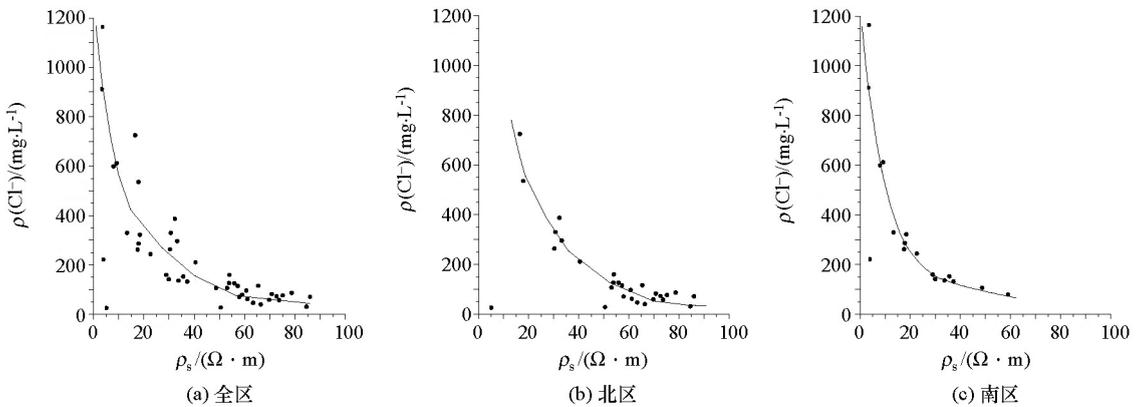


图 2 测井视电阻率与氯离子浓度关系曲线

Fig. 2 Relationship between logging resistivity and chloride concentration

$$\lg [\rho (Cl^-)] = a + b \lg \rho_s。$$

2 氯离子浓度与视电阻率对应关系分析

图 2 显示测井视电阻率与氯离子浓度存在负相关关系,即氯离子含量愈高,视电阻率愈小,反之氯离子含量愈低,视电阻率愈大。对上述视电阻率和氯离子浓度分别进行对数变换,它们在直角坐标系中基本位于一条直线附近(图 3),因此可近似表示为一元线性相关函数关系式:

但是,鉴于工区范围较大,自北向南岩性有较明显差别,因此按岩性相近划分成 2 个分区:洋河以北的抚宁县、海港区 and 山海关区基岩较浅,第四系岩性以大颗粒的砂、砾石、卵石为主,为北区(I~V);洋河以南的昌黎平原地区,基岩较深,第四系岩性以细颗粒的细砂、黏性土为主,为南区(VI~IX)。研究过程中数据分析也按照从整体到局部的思路,利用线性回归方法分别进行数理统计分析。

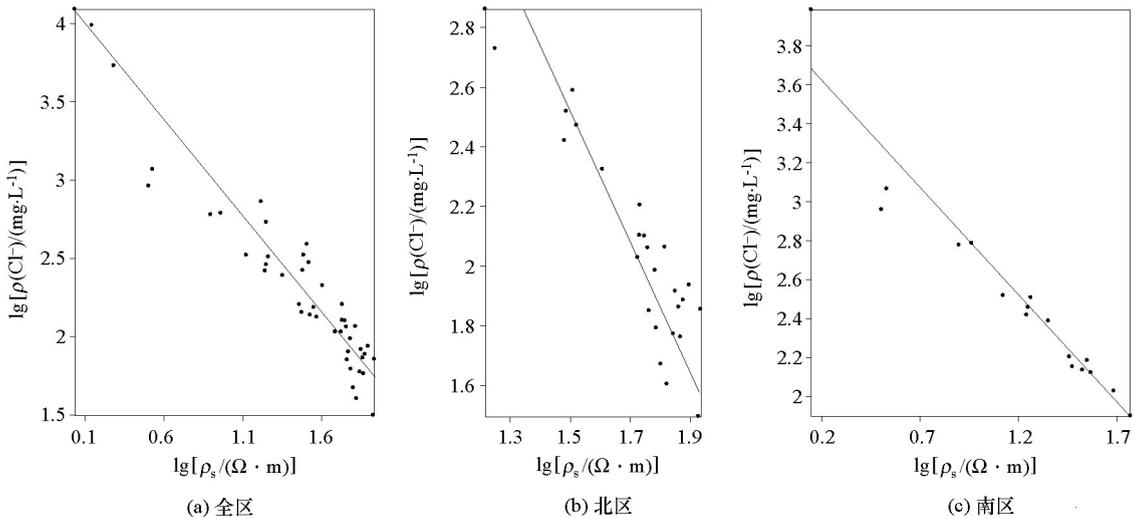


图3 变换后的视电阻率与氯离子浓度关系曲线

Fig. 3 Relationship between logging resistivity and chloride concentration after transformation

2.1 全区统计分析

利用线性回归分析法建立一元回归模型。设因变量 $y = \lg[\rho(\text{Cl}^-)]$; 自变量 $x = \lg\rho_s$, 则它们之间的关系可以用一元线性回归模型表示为: $y = a + bx$; 其中 b 为回归系数, a 为回归常数。利用普通最小二乘法求出回归系数及回归常数:

$$b = \frac{\sum xy - \bar{x} \sum y}{\sum x^2 - \bar{x} \sum x} = -1.11993,$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 3.94098,$$

式中: \bar{x} , \bar{y} 分别为 x , y 的算术平均值。可得出:

$$y = 3.94098 - 1.11993x,$$

即: $\lg[\rho(\text{Cl}^-)] = 3.94098 - 1.11993 \lg\rho_s$ 。

为检验上述 2 个变量之间的线性相关关系的密切程度, 用相关系数法进行检验。利用相关系数公式:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

求得 $R = -0.95489$ 。

R 在 -1 和 1 之间, R 的绝对值越接近 1 , 表明线性关系越好; 反之 R 的绝对值越接近 0 , 表明线性关系越不好。只有当 R 的绝对值达到一定程度时, 才能确定该线性关系成立。因此求出 R 值后在自由度 $n-2$ (n 为样本数量, 这里 n 为 45 , 结合未做变换处理时图 2 双曲线关系曲线图离散情况, 舍弃左下角 2 组跳点数据, 北区 1 组, 南区 1 组) 和显著性水平 $\alpha = 0.01$ (一般取 $\alpha = 0.05$ 即可, 这里取 $\alpha = 0.01$, 更加严格) 下查线性相关系数显著性检验表得到临

界值 $R_{0.01} = 0.38014$ 。因为 $|R| = 0.95489$, $|R| > R_{0.01}$, 故在 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验水平上检验通过, 说明 $\lg[\rho(\text{Cl}^-)]$ 与 $\lg\rho_s$ 线性关系合理。

为更加精确求取二者相关关系, 结合前面对地层特点的分析, 将工区地层差别较明显的南、北两个区的数据分别进行分析, 建立各自的回归模型。

2.2 北区统计分析

北区舍弃一组跳点数据后, 共有数据 28 组, 由公式求得 $b = -1.38889$, $a = 4.47253$, 则有:

$$y = 4.47253 - 1.38889x,$$

即: $\lg[\rho(\text{Cl}^-)] = 4.47253 - 1.38889 \lg\rho_s$,

求得相关检验系数 $R = -0.90145$ 。

在自由度 $n-2$ (这里 n 为 28) 和显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下查线性相关系数显著性检验表, 得到临界值 $R_{0.01} = 0.47851$, 即 $|R| > R_{0.01}$, 故在 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验水平上检验通过, 说明 $\lg[\rho(\text{Cl}^-)]$ 与 $\lg\rho_s$ 线性关系合理。

2.3 南区统计分析

南区共有数据 17 组 (同前舍弃一组跳点数据), 利用公式求得 $b = -1.07637$, $a = 3.79269$, 则有:

$$y = 3.79269 - 1.07637x,$$

即: $\lg[\rho(\text{Cl}^-)] = 3.79269 - 1.07637 \lg\rho_s$;

求得相关检验系数 $R = -0.96787$ 。

在自由度 $n-2$ (这里 n 为 17) 和显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下查相关系数检验表得到临界值 $R_{0.01} = 0.60551$, $|R| > R_{0.01}$ 成立, 故在 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验水平上检验通过, 说明 $\lg[\rho(\text{Cl}^-)]$ 与 $\lg\rho_s$ 线性关系合理。

综合来看,lg [ρ(Cl⁻)]与lgρ_s线性关系最好的是南区,R=-0.96787;其次为全区,整体考虑时线性关系R=-0.95489;最后为北区,线性关系R=-0.90145。虽然相关检验系数各有大小,但是根据回归分析理论,3个关系式线性关系均成立,具体实践应用时可根据实际情况灵活选取关系式,区域越具体结果会越精确。

3 划分海水入侵界线的方法

3.1 利用高密度电阻率法

由于研究区范围较大,地层岩性结构变化也很大,因此要想在大范围内建立一个统一的衡量尺度难度较大,地层岩性结构及测点干扰情况的不同也会影响高密度电法的探测结果。总体来看,本次高密度电法反演电阻率剖面(图4)可概括为2种等值线形态特征。一种是等值线断面图中存在明显的高、低阻变化梯级带,且大海方向为明显低阻显示,陆地方向为明显高阻显示,但是咸、淡水过渡区范围较大,且与低阻咸水区交叉分布,单纯以电阻率数值划分界线有难度。因此,利用该类型判别海水入侵界线,主要以等值线梯级带作为海水入侵界线,北区均为此类型剖面形态,其中1线最为典型(图4a)。

该线位于研究区东北部山海关区卸粮口村附近,长度882 m,方位175°。在图4a中,左侧为明显的高阻显示,电阻率值普遍大于50 Ω·m,为淡水区;右侧为明显的低阻显示,电阻率普遍小于30 Ω·m,为咸水和咸淡水混合区;在水平距离605~705 m范围,等值线高低阻变化梯级带明显,而咸淡水过渡区与咸水区不易区分,因此以电阻率变化梯级带作为海水入侵界线。

另一种是等值线断面图中电阻率梯度变化较小,等值线连续变化,差异不明显,直接从等值线断面图上较难判断海水入侵界线。对于这类剖面就必须根据不同地层岩性特征并结合上述视电阻率特性与氯离子浓度对应关系所总结出的咸淡水分界面特征值进行划分。南区均为该类型剖面形态,主要由地层结构不同所决定,9-2线特征尤其明显(图4b)。该线位于研究区西南部昌黎县茹荷乡滦河北岸,长度2445 m,方位96°。图4b中左侧为高阻区,电阻率值普遍大于20 Ω·m,为淡水区;右侧低阻区电阻率普遍小于10 Ω·m,为咸水区;中间10~20 Ω·m范围等值线呈连续平缓变化,海水入侵界线是在结合计算特征值和咸、淡水过渡区中心平均电阻率值综合考虑下圈定。

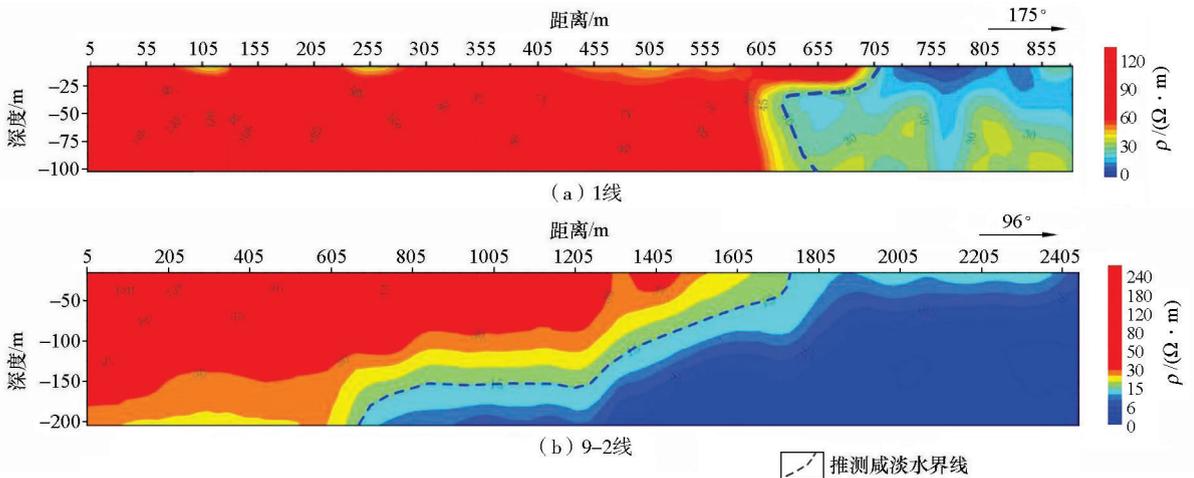


图4 研究区高密度电阻率法反演电阻率断面

Fig. 4 Inversion of resistivity profile by high density resistivity method

3.2 通过数据分析统计求取特征值

根据前人研究经验,在利用水样分析判断海水入侵界线时,地下水中氯离子浓度含量是否达到250 mg/L被当作判断海水入侵的临界值^[18]。本次研究按照前面数理统计分析所求得的研究区视电阻率与氯离子浓度关系成果,将该海水入侵氯离子浓度临界值代入公式中,可分别求出研究区以及分开

考虑的北区、南区的高密度电阻率海水入侵特征值:
 全区 lg [ρ(Cl⁻)] = 3.94098 - 1.11993lgρ_s,
 求得 ρ_s = 23.9 Ω·m;
 北区 lg [ρ(Cl⁻)] = 4.47253 - 1.38889lgρ_s,
 求得 ρ_s = 31.2 Ω·m;
 南区 lg [ρ(Cl⁻)] = 3.79269 - 1.07637lgρ_s,
 求得 ρ_s = 19.7 Ω·m。

结合本次研究,如果工作区地层结构已知,应该用更精确的分区关系式;如果地层结构未知则宜采用全区关系式,因为全区关系式包含了不同的地层结构。

在本次利用高密度电阻率法划分海水入侵界限过程中,按照上述总结出的关系式并结合电阻率等值线形态特征以及不同地层岩性结构特征,综合确定各区的海水入侵电阻率特征值^[7]。南区基岩较深,第四系岩性以颗粒较小的细砂、黏性土为主,电阻率特征值按公式计算为 $19.7 \Omega \cdot m$;但是结合 9-2 线来看,剖面的咸淡水过渡区梯度变化不大,且较稳定,可近似确定过渡区平均值 $15 \Omega \cdot m$ 为特征值更合理一些。北区第四系岩性以大颗粒的砂、砾石、卵石为主,电阻率特征值按上述公式计算为 $31.2 \Omega \cdot m$;结合 1 线剖面成果,等值线梯级带虽然较明显,但是咸淡水过渡范围较大,且无规律可言,结合剖面图确定特征值为 $31.2 \Omega \cdot m$,与等值线剖面图梯级带对应也较好,因此采用计算值即可。

本次研究以计算特征值为依据并结合电阻率等值线剖面图成果圈定了新的更精确的海水入侵界线(见图 1)。

4 结论

1)通过对研究区划分海水入侵界线工作的探索和总结,得出秦皇岛沿海地区第四系含水层视电阻率与氯离子浓度对应定量关系的初步成果。适用于秦皇岛沿海地区的关系式为 $\lg[\rho(Cl^-)] = 3.94098 - 1.11993 \lg \rho_s$,其他地区可用本文方法求取适用于当地的关系式。另外,也可在已知一个变量的情况下求取另一个变量,或用大家公认的划分咸、淡水界线的氯离子浓度的临界值求出该地区的代表海水入侵的视电阻率特征值。

2)本次成果显示通过高密度电阻率法成果指导秦皇岛沿海地区海水入侵划界工作具有较好的效果,本文总结的初步理论成果具有较好的可靠性,为后期在理论研究方面及其他地区实际工作提供了相应的依据。

3)根据高密度电法成果在研究区重点区域重新划分了海水入侵界线,圈定了海水入侵范围,为后期的海岸带综合治理工作提供了可靠的数据支撑。

参考文献 (References):

[1] 刘杜娟. 中国沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(1): 31-36.

Liu D J. Current situation and analysis of seawater intrusion in coastal areas of China [J]. *Geological Disasters and Environmental Protection*, 2004, 15(1): 31-36.

[2] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15, 9.

Guo Z R, Huang Y P. Review of seawater intrusion [J]. *Hydrology*, 2003, 23(3): 10-15, 9.

[3] 崔相飞, 周训, 徐中平, 等. 海岸带咸淡水界面的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 29-35.

Cui X F, Zhou X, Xu Z P, et al. Research progress of saline freshwater interface in coastal zone [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45(2): 29-35.

[4] Werner A D. A review of seawater intrusion and its management in Australia [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 281-285.

[5] 李雪, 叶思源. 海水入侵调查方法研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 211-217.

Li X, Ye S Y. Research progress of seawater intrusion investigation methods [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 211-217.

[6] 苏永军, 黄忠峰, 范翠松, 等. 三维高密度电法在海水入侵界面探测中应用——以莱州湾地区为例[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(2): 134-137, 152.

Su Y J, Huang Z F, Fan C S, et al. Application of 3D high-density electrical method in detection of seawater intrusion interface: A case study of Laizhou Bay Area [J]. *Geological Survey and Research*, 2018, 41(2): 134-137, 152.

[7] 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 electrical method in seawater intrusion investigation in Laizhou Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(2): 301-305.

[8] 苏永军, 范翠松, 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 integrated electrical method in detecting seawater intrusion interface: A case study of Laizhou Bay Area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(3): 704-708.

[9] 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.

Liu Q Y, Dong G Q. Application of resistivity method in preventing seawater intrusion in Laizhou Bay Area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 23(5): 368-372.

[10] 李波, 胡舒娅, 赵全升. 莱州湾沿岸海水入侵区地下水化学特征[J]. 世界地质, 2020, 39(4): 971-977.

Li B, Hu S Y, Zhao Q S. Chemical characteristics of groundwater in coastal seawater intrusion area of Laizhou Bay [J]. *World Geology*, 2020, 39(4): 971-977.

[11] 崔震, 陈广泉, 徐兴永, 等. 北长山岛海水入侵成因机理及现状评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 930-936.

Cui Z, Chen G Q, Xu X Y, et al. Mechanism and status evaluation of seawater intrusion in beichangshan Island [J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 930-936.

- [12] 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. Analysis of the application of electrical method in dividing the brackish water interface in Beibu Gulf [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1592-1599.
- [13] 区小毅,黎海龙,杨富强,等. 音频大地电磁法在广西北海市海水入侵调查中的应用[J]. 物探与化探,2020,44(1):66-73.
Ou X Y, Li H L, Yang F Q, et al. Application of audio frequency magnetotelluric method in seawater intrusion investigation in Beihai City Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 66-73.
- [14] 张宇. 基于高密度电法监测海水入侵的综合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京),2019.
Zhang Y. Comprehensive research on monitoring seawater intrusion based on high density electrical method [D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [15] 陈礼明. 高密度电法在海岸带海水入侵研究中的应用[J]. 福建地质,2015,34(3):246-252.
Chen L M. Application of high density electrical method in coastal seawater intrusion research [J]. Geology of Fujian, 2015, 34(3): 246-252.
- [16] 苏乔,彭昌盛,徐兴永,等. 基于高密度电法的潮汐作用对潍坊滨海地下水影响分析[J]. 海洋环境科学,2015,34(2):286-289.
Su Q, Peng C S, Xu X Y, et al. Analysis of influence of tide on coastal groundwater in Weifang based on high density electrical method [J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(2): 286-289.
- [17] 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, Danian B X, et al. Investigation and study on the electric method for detecting the interface between salt water and fresh water in coastal aquifer [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(1): 38-43.
- [18] 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. Application of hydrochemical and electrical methods in seawater intrusion monitoring [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(5): 376-379.

Relationship between apparent resistivity and chloride ion concentration in seawater intrusion areas: A case study of Qinhuangdao

SUN Jian-Hong, CHENG Li-Qun, ZHAO Wei-Feng, REN Gai-Juan,
SUN Guan-Shi, WANG Rui-Peng, PEI Ming-Xing

(No. 8 Geological Team, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: This study mainly analyzes and summarizes the relationship between the apparent resistivity and chloride ion concentration in the process of determining the seawater intrusion boundaries of suspected seawater intrusion areas in Qinhuangdao coastal areas using results obtained by the high-density resistivity method. Firstly, this study conducted the statistical analysis of the corresponding relationship between apparent resistivity values obtained through resistivity logging in different geological zones and the chloride ion concentration obtained from water samples collected from corresponding wells. Based on this, the correlation between them was obtained through mathematical analysis, and then the corresponding linear relationship between them was determined. Finally, seawater intrusion areas in the study area were delineated using this relationship combined with the measurement results obtained by the high-density resistivity method. The research process and the final linear relationship will provide experience and methodological guidance for the follow-up work in similar regions.

Key words: seawater invasion; high-density resistivity method; mathematical statistics; linear regression; Qinhuangdao

(本文编辑:沈效群)