

高密度电法在莱州湾东南岸海水入侵监测中的应用

赵书泉^{1, 2} 徐军祥² 李培远⁵ 张荣敏⁵

(¹中科院东北地理与农业生态研究所²山东省地矿局³山东省物化探研究院)

摘要: 海水入侵是由于滨海地区地下水动力条件发生变化, 造成海水向陆地淡水含水层入侵的现象。由于海水入侵, 地下淡水水质恶化, 致使大量的水井报废, 粮食减产, 果园被毁, 严重阻碍了当地的工农业生产的发展, 给人民的生活造成极大危害。莱州湾地区是我国海水入侵比较典型的地区之一, 研究程度较高。但采用二维高密度电法对海水入侵界面的变化进行监测研究, 在该区尚属首次。本文对高密度电法的工作原理以及海水入侵的电性特征进行了论述, 根据实际工作案例, 结合水质分析结果, 对高密度电法的成果进行了验证, 在此基础上, 圈定了莱州湾东南岸地区海水入侵的范围。

关键词: 高密度电法; 海水入侵; 莱州湾

1 海水入侵概况

1. 1 海水入侵发展概述

莱州湾的海水入侵发现于 1976 年, 在西由镇东北村长期监测井中, 首先发现水质变咸, 当时未统计范围, 估计面积数平方公里。二十多年来, 随着国民经济的持续高速发展, 海水入侵的规模不断扩大, 沿海岸线形成具一定宽度, 呈北东——南西走向入侵带。区内历年海水入侵面积变化见图 1.1 (山东省莱州市水利局, 2003 年)。可以看出, 自上世纪七十年代发现海水入侵以来, 海水入侵面积不断增加, 1976 年至 1979 年海水入侵面积为 12.31km^2 。在八十年代海水入侵速度明显加快, 入侵范围得到扩大, 至 1984 年入侵面积达到 46.26km^2 , 5 年间增加了 33.95km^2 , 年均入侵面积 6.79km^2 , 至 1989 年入侵面积达到了 115.40km^2 , 5 年增加了 81.45km^2 , 年均入侵面积 16.29km^2 。而进入九十年代后, 海水入侵速度明显放缓, 到 1995 年海水入侵面积为 148.24km^2 , 比 1989 年增加了 32.84km^2 , 年平

均入侵面积为 5.47 km²，1995 年至 1999 年海水入侵面积呈递减趋势，4 年间减少了 3.39 km²，年平均减少入侵面积为 0.85 km²。

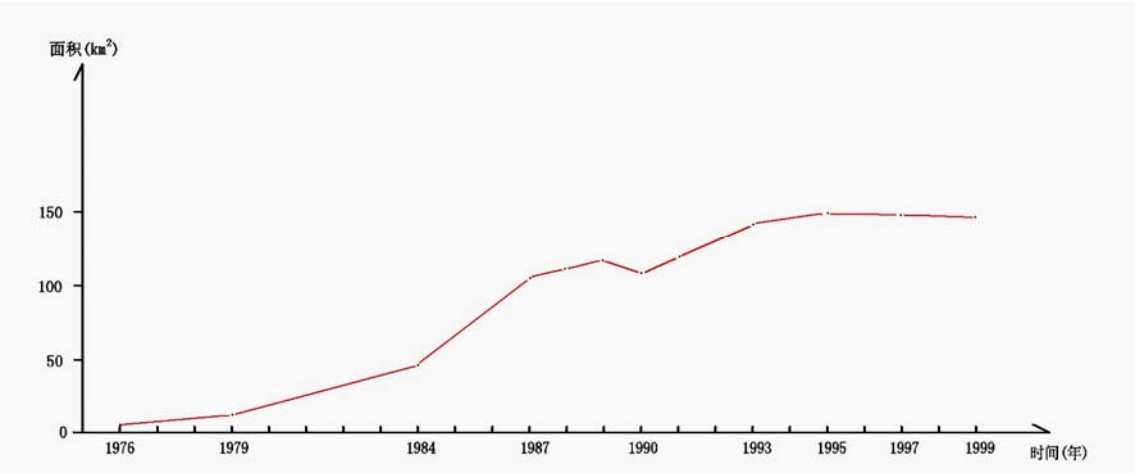


图 1.1 莱州湾东南岸地区海水入侵面积变化图

1. 2 水文地质概况

本区地下水类型主要为松散岩类孔隙水松散岩类孔隙水，分为山前平原冲积、冲洪积松散岩类孔隙水和滨海平原海积层孔隙水。山前平原冲积、冲洪积松散岩类孔隙水赋存在第四系冲积、冲洪积层中，由王河、朱桥河、万深河等河流的山前冲积、冲洪积物毗连而成。冲洪积层多以混杂的相互交错叠置的粘质砂土夹砂砾石透镜体为主，分选性较差，富水性一般，单井涌水量一般小于 500m³/日，地下水位埋深一般在 3~13m。

该类型地下水，由于海水入侵造成局部水质恶化，地下水化学类型复杂，主要为 Cl 型、Cl · HCO₃ 型和 HCO₃ · Cl 型，矿化度 0.5 ~ 2.0g/l。

滨海平原海积层孔隙水分布工作区西部沿海低洼地带，含水层为海相的砂及砾卵石层。由于海水入侵，海积层中孔隙水均为咸水，地下水化学类型为 Cl 型，矿化度大于 5g/L，水位埋深 2~8m，单井涌水量在

500~1000m³/d之间。

2 高密度电法工作原理与方法

2.1 工作原理

海水入侵是一种隐蔽、复杂、多变的现象，研究和认识这一现象目前还没有完全成熟的方法，现在只是处于探索阶段。

地面电阻率法是水文物探的主要勘探方法。由于滨海地区含水层、咸淡水关系复杂性，加之地面电阻率法自身的某些局限，目前应用该方法研究海水入侵相对较少。美国、苏联、荷兰、以色列、台湾等国家和地区虽有应用实例^[1]，但是理论、方法上取得的经验尚不系统，国内应用则不多见。为了揭示莱州市海水入侵现状问题，我们应用地面电阻率法对海水入侵的某些规律进行了探索。

高密度电法是基于常规电法勘探的基础上利用计算机技术发展起来的一项电法勘探技术，其测量结果为二维视电阻率断面。高密度电法具有点距小、数据密度大、工作效率高的特点，能较直观、准确地反映地下电性异常体的形态^[2]。其工作流程见图 2.1。

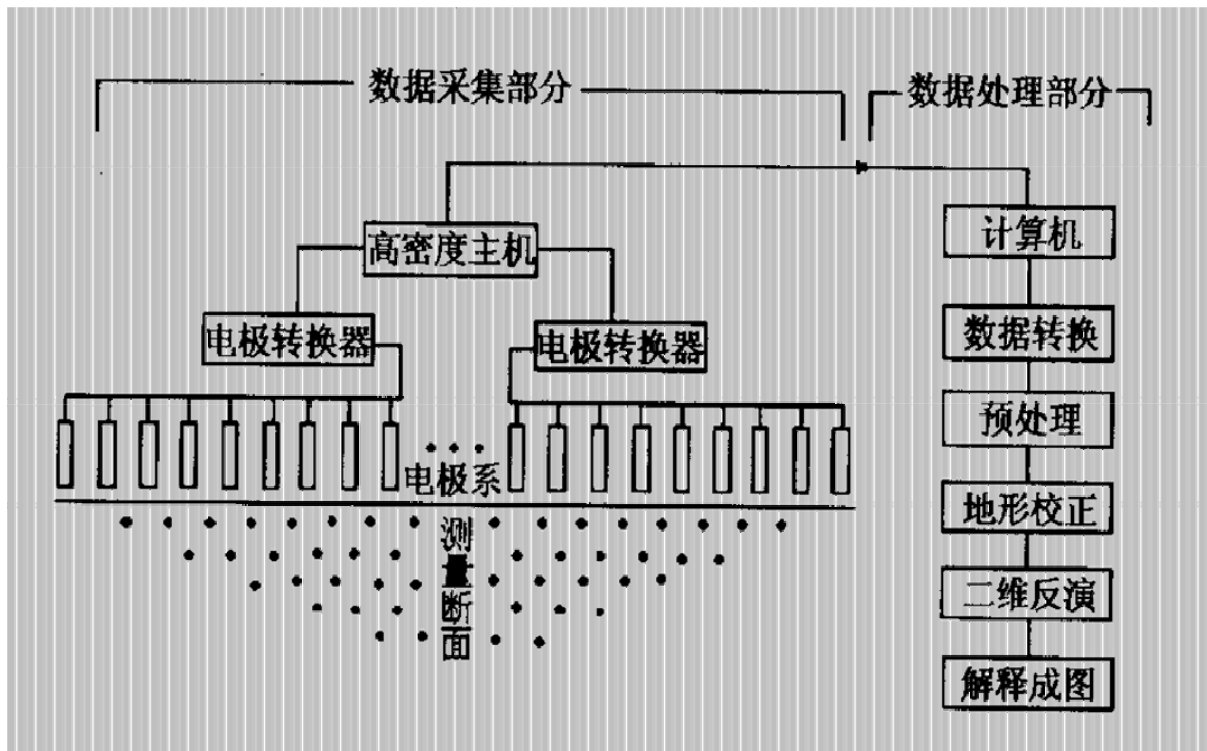


图 2.1 高密度电法工作框图

2. 2 工作方法与部署

a、工作前在已知海水入侵区段上进行试验，目的是选择合适的测量装置形式和观测参数。

b、按照设计好的装置形式布设电极，主机接地线设置在距第一根电极 5 倍电极间距远的位置。

c、在每个排列观测之前，操作员均对电极开关和极间接地电阻进行了测试，保证每个电极开关工作正常，极间接地电阻小于 $3k\Omega$ 。

d、由于仪器在测量过程当中对每个测点的“ I ”、“ ΔV ”、“ R ”值及图形均能时时显示在屏幕上，操作员可时时监控数据采集的质量，对于畸变点及干扰，操作员都及时采取了措施以消除干扰，保证了数据的采集质量。

e、数据采集完成后及时存盘，并在记录本上做好相应的记录以便于后期的资料整理工作。

根据水质调查和水质分析测试结果，在西由—新城一带重点海水入侵区段布置了七条高密度电法勘探剖面（图 2.2），共完成剖面测试长度 9.50Km。

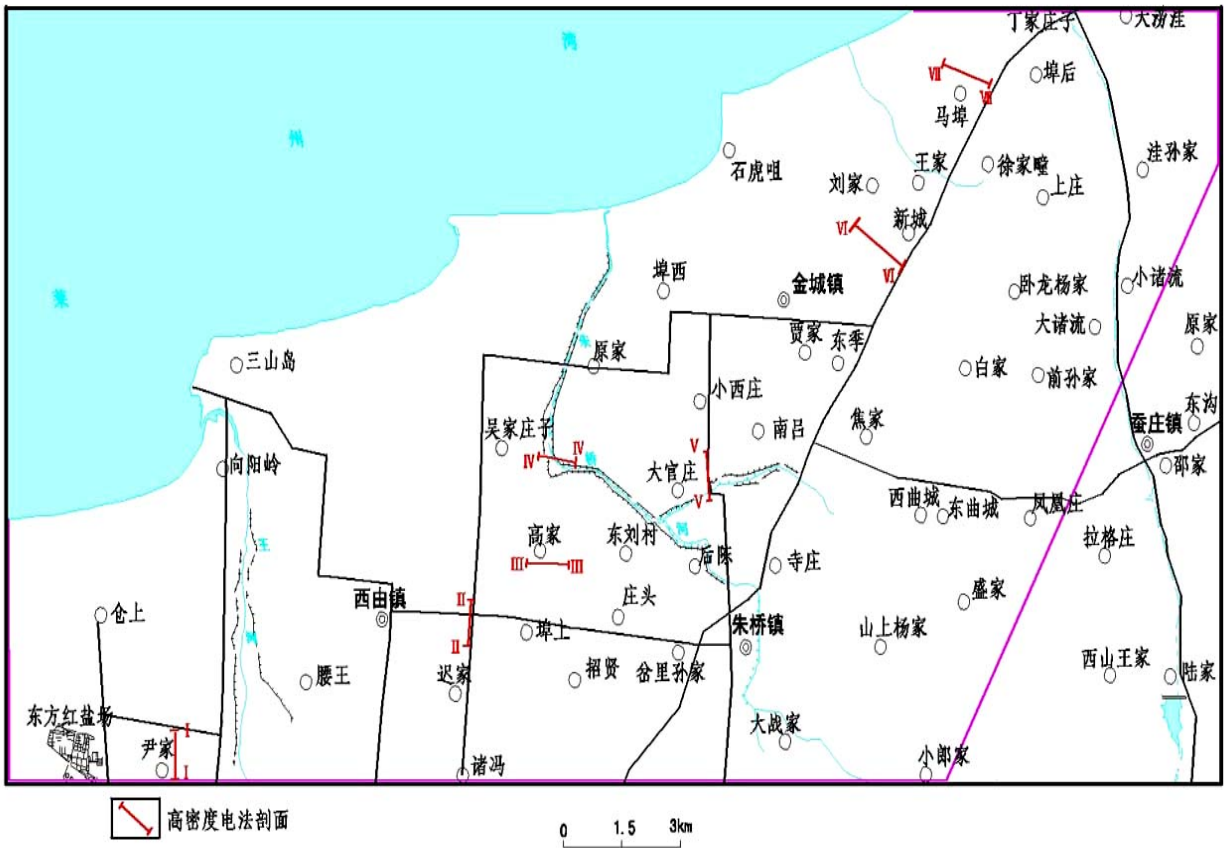


图 2.2 高密度电法工作剖面布置图

3 成果解译与应用

3. 1 海水入侵的判别标准的确定

海水入侵的判别标准，在国际、国内都是以Cl⁻浓度达到某一临界值作为海水入侵的水质标准。表 3.1 为世界部分沿海国家海水入侵Cl⁻浓度标准

^[3]，从表中可以看出，各国所采用的标准不一致，Cl⁻浓度在 200~350mg/L 之间。目前国内常采用的Cl⁻含量标准分别为 200mg/L、250 mg/L、300 mg/L。莱州湾东南岸地区多年来对海水入侵的监测和研究所采用的Cl⁻含量标准，1990 年以前采用 300 mg/L，1991 年以后采用 250 mg/L。本次工作采用Cl⁻ 浓度 250 mg/L作为海水入侵的判别标准^[4]。

表 3.1 世界部分沿海国家海水入侵氯离子含量标准

国家（地区）	Cl ⁻ （毫克/升）	国家（地区）	Cl ⁻ （毫克/升）
日 本	200	南斯拉夫	250
美 国	250	瑞 典	300
欧州卫生组织	350	墨西哥	250
法 国	250	印 尼	250
荷 兰	250	苏 联	350

3. 2 高密度电法确定咸淡水界面的依据

3. 2. 1 方法的有效性

通过在不同的第四纪沉积层中海水入侵区与非入侵区、同一种地层中采用不同的装置形式测试，并与水文地质资料对比，获得本区地层的不同电性特征数值（表 3.2）。

表 3.2 莱州市第四系电性特征值表

岩层名称	常见电阻率值 ($\Omega \cdot m$)	饱和咸水时电阻率 ($\Omega \cdot m$)
砂质粘土、粘质砂土	30~50	
细 砂	40~80	5~15
中 粗 砂	80~150	>5
砂 砾 石	100~300	2~5
干燥中粗砂	400~1200	
基岩风化壳	>150	2~5

从表中可知，同类岩性在海水入侵区与非海水入侵区其电阻率存在着

明显的电性差异，说明通过测量电阻率参数，划分海水入侵区界线是切实可行的。

3. 2. 2 海水入侵区氯离子含量与地下水的电性特征

为了研究地层电阻率与地层含盐量的关系，1989 年中国科学院地理研究所在莱州市朱旺建立了海侵监测剖面，该剖面是为了研究海水入侵专设的固定剖面，在垂直海岸 2000 多米的范围内打了 7 组观测井，每组分三个不同深度定期取样化验水质。1989 年 4 月 15 日和 1990 年 4 月 16 日在两次取样化验水质的同时，对相应深度地层的电阻率值进行了测定，并绘制了电阻率与氯离子含量相关曲线^[5]（图 3.1）。

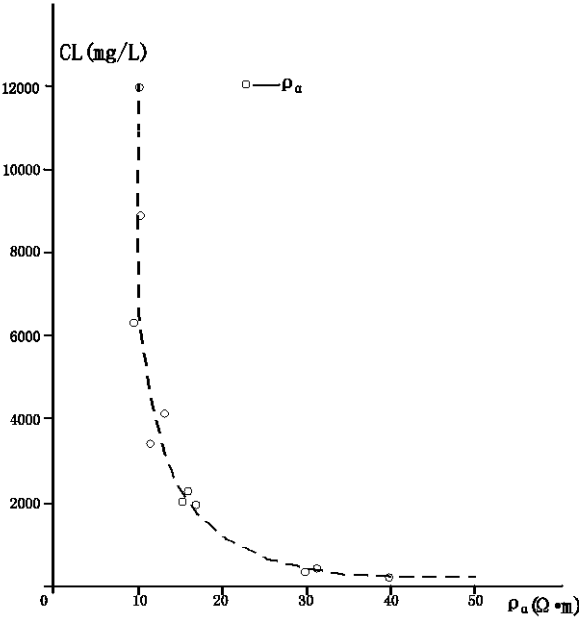


图 3.1 电阻率与氯离子含量相关曲线

从曲线看出，电阻率与氯离子含量存在着负相关关系，氯离子含量越高，电阻率越小。经对曲线进行详细分析，氯离子含量对电阻率的影响可分三段：在氯离子含量小于 250mg/L，电阻率随氯离子含量的增加而减小的速度特别快；在氯离子含量在 250~5000mg/L，电阻率随氯离子含量

增加而减小的速度变缓；在氯离子大于 5000mg/L，电阻率随氯离子增加而减小的速度非常缓慢。这说明氯离子的含量对电阻率的影响也是有一定的范围的，超出这个范围就不明显了。

3. 2. 3 咸淡水界面 ρ_a 特征值的确定

根据中科院地理研究所对莱州市海水入侵区电测资料^[5]，海水严重入侵区 ($\text{Cl}^- > 1000\text{mg/L}$)，电阻率一般在 $2 \sim 17 (\Omega \cdot \text{m})$ 之间；轻度入侵区 ($\text{Cl}^- \approx 250 \sim 1000\text{mg/L}$)，电阻率一般在 $17 \sim 30 (\Omega \cdot \text{m})$ 之间；非入侵区 ($\text{Cl}^- < 250\text{mg/L}$)，电阻率一般在 $30 \sim 100 (\Omega \cdot \text{m})$ 。

另外从图 3.1 可以看出，当 $\text{Cl}^- = 250$ 毫克/升时（咸淡水界面），该地区地层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ ，当 $\text{Cl}^- < 250$ 毫克/升时，地层电阻率迅速上升，曲线在此产生台阶状变化。

根据以上试验资料，我们确定出了 $\rho_a = 30 \Omega \cdot \text{m}$ 为莱州市滨海第四系地层中咸淡水界面的特征值，即在同类地区测量时，凡 $\rho_a < 30 \Omega \cdot \text{m}$ 的地区即为入侵区，大于这个数值即为非入侵区。

3. 3 海水入侵边界线的确定

3. 3. 1 海水入侵边界线的确定依据

海水入侵边界线的确定是准确划分海水入侵范围、评价海水入侵危害的基础。海水入侵边界线受人工开采，降雨及水文地质条件的影响，形态较为复杂，所以必须采取多种手段，综合分析确定^[6]。

在具体工作中，主要以水质调查和水化学分析资料从区域上划分出入侵区和非入侵区，在边界线的具体确定上，采用高密度电法剖面进行圈定。边界线圈定的依据如下：

a. 在区域范围内 Cl^- 含量大于 250mg/L 。

b.在一定范围内视电阻率小于 $30 \Omega \text{ m}$ 的低阻电性层。

3.3.2 海水入侵边界线确定

依据上述海水入侵边界线的确定原则，确定区内海水入侵边界线位于招远市丁家庄子东——洼曲家——莱州市新城——东季——小官庄——彭家——埠上——东南村——腰王——尹家村东南一带（图 3.2）。入侵地段呈北东——南西向沿海岸线分布，区内总长度 28.0km，宽度变化较

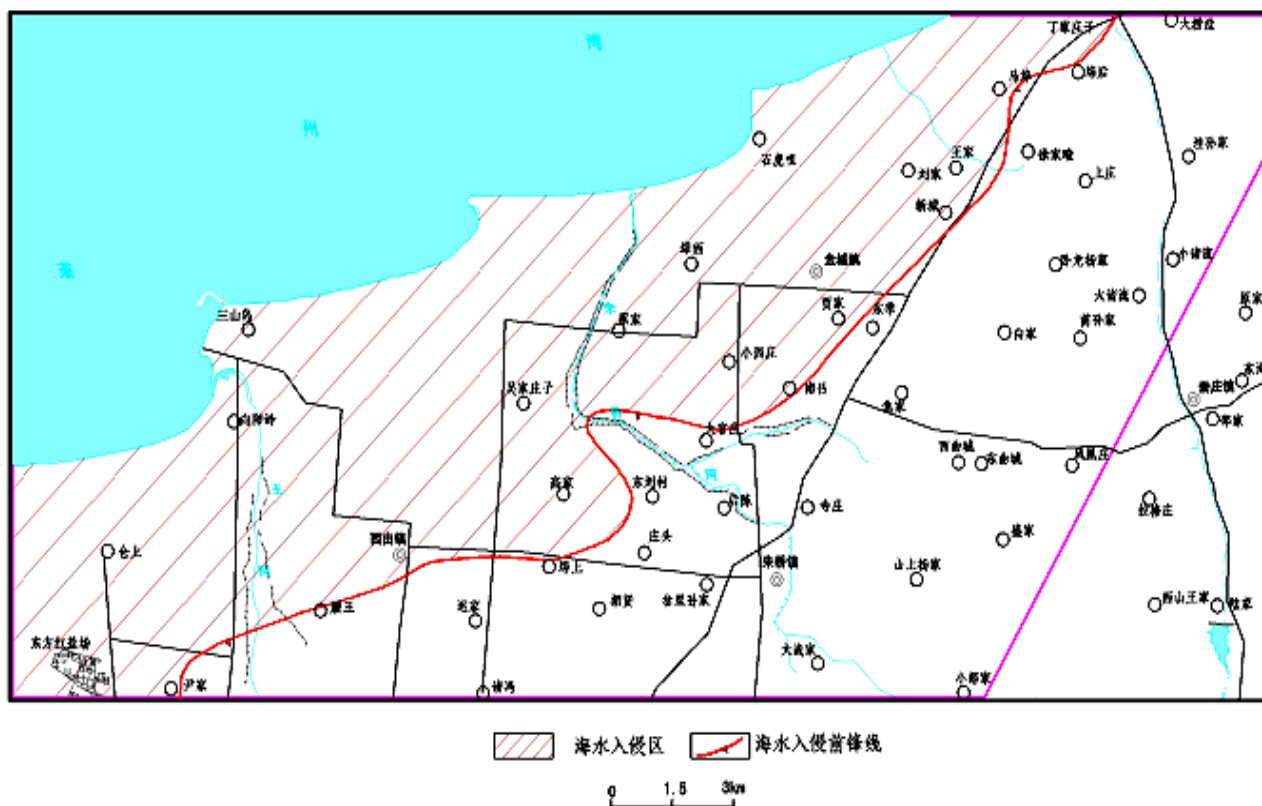


图 3.2 采用高密度电法圈定的海水入侵范围（2002 年 7 月）

大，工区北段马埠庄子一带宽度最小为 2.2km，南段可门高家一带宽度最大达 7.5km，至 2002 年 5 月，区内海水入侵面积为 180 km^2 。

3.3.3 海水入侵边界线验证

为了验证电法成果的可靠性，从区内主要监测断面区地下水水样进行水质分析，其 Cl^- 含量变化情况见表 3.3。可以看出，各监测断面 Cl^- 含量

由滨海向内陆逐渐降低，Cl⁻最高含量达 1911.6mg/L，海水入侵现象和规律性明显。

表 3.3 **区内主要监测断面 Cl⁻ 含量变化情况表** 单位：mg/L

三山岛一盆	监测点	三山岛	小沙岭	埠上	岔里新庄	
里新庄	Cl ⁻ 含量	1012.0	771.0	493.5	85.7	
原家一大	监测点	原家	风毛寨	小西庄南	南吕村南	大坡
坡监测断面	Cl ⁻ 含量	1911.6	460.0	405.1	208.1	157.04
后邓—诸冯	监测点	后邓	后吕	诸冯		
测断面	Cl ⁻ 含量	772.2	185.1	207.9		

4 结论

4. 1 高密度电法可应用于海水入侵的过程监测，是电阻率成像法监测应用的一部分。由于在海水和淡水之间存在的明显的电性差异，使得该方法在确定咸淡水界面的空间分布特征和移动方面效果明显。在实际应用中，形象直观且精度可靠效率高^[7]。

4. 2 本次研究仅从静态、二维的角度研究、验证了咸淡水界面的电性特征，并根据综合因素圈定了莱州湾东南岸地区的 2002 年夏季海水入侵的范围。由于海水入侵是一个复杂的、动态的地质灾害过程^[8]，因此，应进一步研究探索以高密度电法为核心，结合常规地下水监测，对海水入侵进行动态三维监测，以便更好地服务于当地的社会经济发展之需要。

参考文献

- [1]周启友 从高密度电阻率成像到三维空间上的包气带水文学[J] 水文地质工程地质, 2003, 6: 97-102
- [2]王士鹏 高密度电法在水文地质和工程地质中的应用[J] 水文地质工程地质, 2000, 1: 52-54
- [3]Yang C H, Tong L T, Huang C F. Combined application of dc and TEM to sea-water intrusion mapping[J]. Geophysics, 1999,64(2):417-425
- [4]Daily W, Ramirez A L. Electrical Imaging of Engineering Hydraulic barriers[J]. Geophysics,2000,65(1):83-94
- [5]尹泽生主编 莱州市滨海区与海水入侵研究[M], 北京: 海洋出版社, 1992, P93-112
- [6] 段永侯等, 中国地质灾害[M], 北京: 中国建筑工程出版社, 1993, P87-89
- [7] 朱颜明、何岩等编著, 环境地理学导论[M], 北京: 科学出版社, 2002, P231-150
- [8] 哈承佑 中国环境地质学的进展与发展[J] 中国地质, 2002, 13(1), P1-3

Application Of High-Density Resistance For Monitoring Of Seawater

Invasion In The Southeast Bank Of Laizhou Bay

Abstract Seawater invasion is referred to the phenomenon that the seawater invades to the fresh aquifer due to the change of dynamic condition of groundwater in the seashore area. The local people and authority has been suffering from the seawater invasion which caused the fresh water deteriorate, making

lots of wells useless, reducing the output of grain. The seawater invasion in the area of Laizhou Bay is one of the typical areas with high degree of research. But it is the first time to use the high-density resistance to carry out the monitoring study of the change of the seawater invasion. The principle of the method and the character of resistance of the seawater invasion are discussed in the paper. According to the result of the method, the extension of the seawater invasion is marked with circle in the paper.

Key words The Method Of High-Density Resistance; Seawater Invasion; The Laizhou Bay

