

技术方法

基于模糊数学与高密度电法的烟台东部高技术海洋经济新区海水入侵综合评价研究

赵国鹏¹, 李金鸿^{2*}, 于克臣³

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264000; 2. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 山东 青岛 266000; 3. 金建工程建设有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要:烟台东部高技术海洋经济新区存在不同程度的海水入侵, 对新区的规划和发展存在潜在影响。本文通过监测点地下水样的水质分析, 以 Cl^- 、TDS 和 钠吸附比(SAR)作为模糊数学综合评价模型的参数, 利用高密度电法划分海水入侵程度的边界, 对烟台东部新区 153 个监测点水样进行海水入侵程度模糊综合评价, 进一步分析了海水入侵问题, 提出了应对措施, 保障了烟台东部新区海岸带建设的顺利推进, 为新区经济的可持续发展提供科学依据。

关键词:海水入侵; 地下水; 高密度电法; 模糊数学综合评价模型; 烟台市

中图分类号:X143

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.008

0 引言

近年来, 城市经济的快速发展和人口的不断扩大, 使得烟台东部沿海地区面临的海水入侵问题对区域规划的影响愈发显著。地下水含水层遭受了不同程度的污染, 对海岸带的发展构成了严重威胁^[1]。通过监测和水文地球化学方法研究, 结合现场取样、水化学分析及数学模型^[2], 评估海水入侵状况; 利用地球物理方法^[3], 确定海水入侵程度的分界线和具体分界面^[4]。

国外学者利用水化学方法研究海水入侵。如 Moujabber 等^[5] 使用水化学方法和地球物理方法对黎巴嫩沿海监测井进行长期监测, 并评估该区域海水入侵的状况; Langman J B^[6] 在对突尼斯滨海地区海水入侵分布特征的分析研究中, 地球物理和水文地球化学相结合的方法得到应用。国内学者也对海水入侵进行深入研究, 房琦等^[7] 发表了关于

建立以 Cl^- 浓度为 250 mg/L 的模糊综合评价模型, 并结合单因素定义对海水入侵程度进行综合评价; 苏永军等^[8] 在莱州湾进行了三维高密度电法试验, 成功应用于海水入侵界面探测, 直观展现了海水入侵的形成与发展过程; 连晨艳等^[9] 基于水化学等方法, 进行秦皇岛昌黎县海水入侵时空变化特征评价研究。

在海水入侵调查评价工作中, 通过选取合理的评价指标, 科学判断并系统评价海水入侵的分布特征及危害程度, 利用高密度电法明确海水入侵程度的边界, 界定淡水与咸水区域, 为分析海水入侵程度和区域划分构建数据模型。基于现有数据, 全面综合评价海水入侵状况, 为应对海水入侵引发的生态环境问题提供坚实的数据支撑^[10]。不仅为地方政府部门决策管理海水入侵提供了依据, 也为促进烟台东部经济社会可持续发展提供了重要参考^[11-12], 对保护地下水资源, 提升烟台沿海地区防灾减灾能力具有深远意义。

收稿日期: 2025-01-08; 修訂日期: 2025-04-29; 编辑: 曹丽丽

地调项目: 山东省国土资源厅, “山东省烟台东部高技术海洋经济新区地质环境调查与评价”, 项目编号: 鲁勘字[2012]7 号

作者简介: 赵国鹏(1985—), 男, 山东烟台人, 高级工程师, 主要从事水工环地质、地质灾害调查及治理、矿山生态修复、地球物理勘探等工作; E-mail: lqq578@163.com

* 通信作者: 李金鸿(1986—), 女, 山东青岛人, 高级经济师, 主要从事治理工程预算、水工环地质调查、地质调查审计等工作; E-mail: lilimile@163.com

1 研究区概况

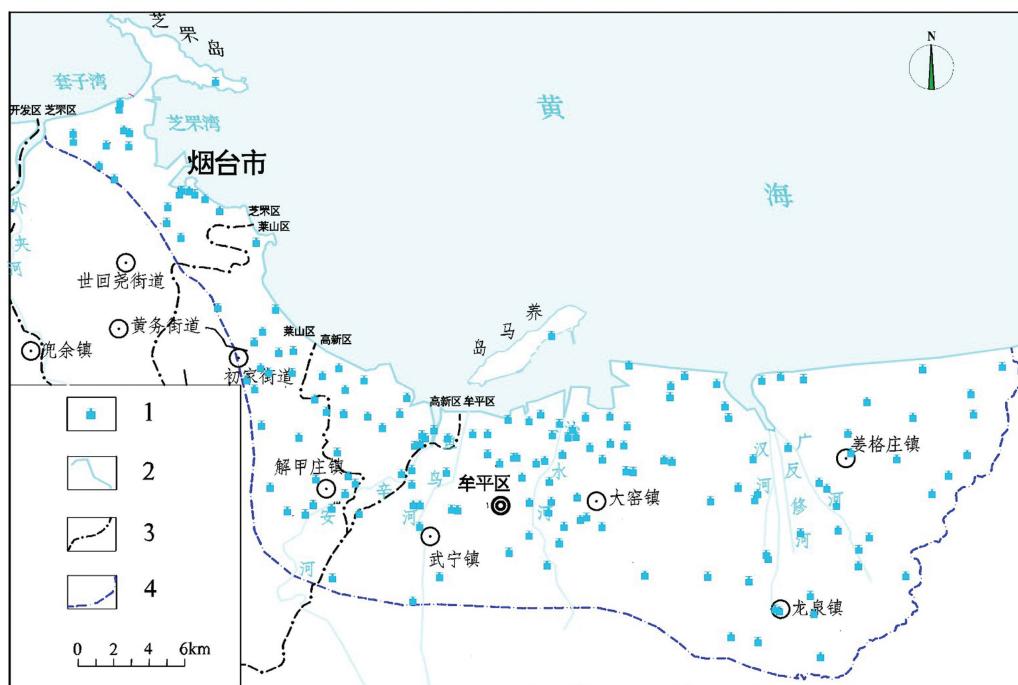
研究区位于胶东半岛东北部,烟台市东北区域,北部临黄海海区,面积约 636 km^2 。研究区地形整体地貌呈SN走向,由南向北逐渐延伸到山麓平原和滨海平原,海拔不超过50 m。北部海岸地势尤为低洼,表面平坦且微微倾向海面,海拔0~10 m,构成了典型的沿海低丘景观。研究区属中纬度暖温带季风型大陆气候,地处胶东半岛北部,受海洋调节,昼夜温差小。研究区河流隶属于半岛水系,半岛的山脊自然成为了分水岭,河流大多向北流淌,源头较短,最终大部分汇入大海。研究区里出露的地层包括新生代第四纪松散沉积物、中元古界芝罘群等区域变质岩系、古元古界荆山群和粉子山群以及太古

界胶东岩群。研究区的地质构造主要分为褶皱构造和断层构造。含水层类型和地理位置是鲁东低山丘陵水文地质区。

烟台东部高技术海洋经济新区是山东半岛蓝色经济区的重要组成之一,属于山东省社会经济发达地区,近几年的经济发展速度高于全国平均水平。

2 研究区海水入侵评价

按照 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的单元格,将研究区划分为728个小区。在沿海地带,河口周边地带及直通大海的断裂带周边布设取样点153个,通常利用当地机井进行取样,针对特定区域则布设水文钻孔以完成水样采集(图1)。



1—地下水取样位置;2—海岸线;3—行政区界线;4—研究区范围线。

图1 地下水取样位置分布图

在研究区内从147处机井和6个水文孔中采集水样,经实验室分析后获得了大量数据结果。但是判定海水入侵必须具备水动力条件和海水侵入通道。研究区中河流入海口区域都属于滨海平原分区,属于砂质、泥砂质海岸,透水性强,一旦地下淡水水位降低就会引起海水入侵;还有在海边陆地养殖区,将海水引入水池,如果咸水池底部透水性强,咸水就会渗入地下,污染地下水。研究区中一些同位素超标区域,如研究区西侧的芝罘岛区域TDS、

Na^+ 、 Cl^- 超标,但是芝罘岛的地质岩性属于石英岩,透水性差,没有通入大海的破碎带,海水也没有从地表流入,为古咸水,所以并不具备海水入侵的条件;研究区中部,牟平区和武宁镇范围TDS也超标,根据这些区域地层岩性分析其透水性差,没有构造破碎带通入大海,距离海边过远,排除海水地表流入可能,所以不具备海水入侵条件,因此这些区域都不属于海水入侵范围。

为了精确地了解烟台东部海岸带海水入侵程

度,采用模糊数学方法进行海水入侵程度评价,并利用 MapGIS 空间分析功能进行评价区划。

2.1 基于模糊数学法评价海水入侵

由于我国对海水入侵的研究起步较晚,对于海水入侵评价比较混乱,在相关的《海水入侵监测技术规程中》对于水化学的评价指标只有简单的氯离子和溶解性固体总量 2 个指标,按照试行规范,以氯离子含量高于 250 mg/L、TDS 高于 1.0 g/L 作为海水入侵的评价标准。然而,TDS 和氯离子易受其他因素干扰,难以准确反映海水入侵情况。现行的规范指标对于复杂且不同的地质条件和气象水文条件的沿海地区进行海水入侵评价是远远不够的。众多学者采用多个评价因子,方法各异,但普遍倾向于模糊评价法。

2.1.1 水化学评价指标

判断海水入侵的直接依据是水化学特征。规范中常常用氯离子和 TDS 来衡量(表 1)。淡水和海(咸水)水中氯离子浓度和 TDS 存在明显差异,然而氯离子浓度和 TDS 还受到工业废水、生活污水等多种因素影响,因此只凭规范中这两个因素进行评估是不够的。本次引用多个评价指标作出模糊数学评价来评判海水入侵。

表 1 按照规范要求分级

分级指标	I	II	III
氯度 Cl ⁻ /(mg/L)	<250	250~1000	>1000
TDS(g/L)	<1.0	1.0~3.0	>3.0
入侵程度	没有入侵	入侵较轻	入侵严重
水质分类范围	淡水	微咸水	咸水

硫酸根离子(SO₄²⁻)在海水中比较稳定,但是在淡水中含量较少,因此本文引用硫酸根离子为海水入侵的水质评价指标之一。

钠吸附比(SAR)既能反映土壤中钙镁离子对交换性钠离子碱化作用的中和作用,也可以指导土壤的灌溉。海水中钠离子含量比淡水钠离子含量高 2~4 个数量级。由于海水入侵,地下水中的 Na⁺含量变大,在一定程度上,土壤将盐碱化。因此用到钠吸附比(SAR)评判,钠吸附比就是指溶液中钠离子(Na⁺)浓度与钙离子(Ca²⁺)、镁离子(Mg²⁺)浓度平均值的平方根的比值^[13]。钠吸附比见公式(1):

$$SAR = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

式中:r 代表毫克当量。

海水入侵程度见表 2。

表 2 海水入侵程度指标

分级指标	分级		
	Ⅲ 严重海水入侵	Ⅱ 轻度海水入侵	Ⅰ 无海水入侵
Cl ⁻ /(mg/L)	<250	250~1000	>1000
TDS/(g/L)	<1.0	1.0~3.0	>3.0
SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	<200	200~800	>800
SAR	<2.0	2.0~5.7	>5.7
水质分类范围	淡水	微咸水	咸水

2.1.2 数学模型评判

(1) 评判模型

应用模糊变换原理和最大隶属度原理,对每个目标分配一个实值作为评价指标,使综合评价指标的大小反映总体评价水平。

有 4 种常用的综合评价函数^[13-14],见公式(2)~(5):

$$\text{模型 1: } f_1(z_1, z_2, \dots, z_n) = \bigvee_{j=1}^n (\alpha_j \wedge z_j) \quad \alpha_j \in [0, 1] \quad (2)$$

$$\text{模型 2: } f_2(z_1, z_2, \dots, z_n) = \bigvee_{j=1}^n b_j z_j \quad b_j \in [0, 1] \quad (3)$$

$$\text{模型 3: } f_3(z_1, z_2, \dots, z_n) = \sum_{j=1}^n c_j z_j \quad c_j \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{模型 4: } f_4(z_1, z_2, \dots, z_n) = \bigvee_{j=1}^n z_j^{d_j} \quad d_j > 0 \quad (5)$$

模型 1 是对有突出型制约性主因的综合评价。模型 1 简写为 $M(\vee, \wedge)$ 。

模型 2 也是对制约因素的综合评价。模型 2 缩写为 $M(\vee, \cdot)$ 。

模型 3 是加权平均综合评价。模型 3 简写为 $M(+, \cdot)$,不失一般性的情况下,可令 $c^1 + c^2 + \dots + c^n = 1$ 。

模型 4 是一个综合性的限制性和全面促进类型的评价,简化为 $M(\vee, \wedge)$ 。

根据 4 种模型的情况,与评价对象情况进行比较,所以选择加权平均综合评价(模型 3)进行模糊评价。

(2) 评判步骤

使用权平均综合评价的模型 3 评价。

建立一套判断对象影响的指标集合,见公式(6):

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (6)$$

各元素 $u_i = (i=1, 2, \dots, n)$ 代表各影响指标。

建立评价集制,见公式(7):

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (7)$$

所组成的集合为评价及评判者对评判对象可能做出的各种总的评判结果。各元素 $v_j = (j = 1, 2, \dots, n)$ 代表各种可能的评判结果^[13-14]。

模糊综合评判法的基本原理见公式(8)(9)：

设选定因素集

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (8)$$

设评价集

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\} \quad (9)$$

模糊矩阵 R 用于描述评价集与因素集之间的模糊关系, 见公式(10)：

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} J = 1 \text{ 区} \quad R &= \begin{cases} 1 & x_i \leqslant U_{ij} - b \\ \frac{U_{ij} - x_i}{b} & U_{ij} - b < x_i < U_{ij} \\ 0 & x_i \geqslant U_{ij} \end{cases} \\ J = 2 \dots n \text{ 区} \quad R &= \begin{cases} \frac{x_i - (U_{i(j-1)} - b)}{b} & U_{i(j-1)} - b < x_i < U_{i(j-1)} \\ 1 & U_{ij} < x_i < U_{i(j+1)} - b \\ \frac{U_{i(j+1)} - x_i}{b} & U_{i(j+1)} - b < x_i < U_{i(j+1)} \\ 0 & x_i \leqslant U_{i(j+1)} - b \text{ 或 } x_i \geqslant U_{i(j+1)} \end{cases} \\ J = n \text{ 区} \quad R &= \begin{cases} 1 & x_i \geqslant U_{ij} \\ \frac{U_{ij} - x_i}{b} & U_{ij} - b < x_i < U_{ij} \\ 0 & x_i \leqslant U_{ij} - b \end{cases} \end{aligned}$$

U_{ij} 指某类(i)因素的分区阈值。

2.1.3 将数据代入得出评价结果

根据以上公式, 对 153 个水样进行分析, 几个有代表性的数据如表 3 所示。

(1) 指标等级划分。代入公式前需要划分指标等级, 确定其代表值, 等级划分代表值见表 4。

(2) 代入数据。选取其中一组数据代入, 结果见表 5。

设高新区马山南寨 x_i 为实测值之一, 其中 $i = 1, 2, 3, 4, 4$ 种指标分别为氯度、TDS、硫酸根离子、钠吸附比的实测值。 $x_1 = 341.5, x_2 = 1.35, x_3 =$

式中: $r_{ij} = u(x_i, u_j)$ ($0 < r_{ij} < 1$), 表示从因素 x_i 角度谈事物能被评为 u_j 的隶属度。矩阵 R 中第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 表示第 i 个因素的单要素评判, 它是 U 上的模糊子集。建立单因素 x_i 在总评价中所起作用大小的模糊子集, 即权向量 A , 见公式(11):

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m) (a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1) \quad (11)$$

将权向量与模糊矩阵进行合成, 求评价集 B , 见公式(12):

$$B = A \cdot R \quad (12)$$

根据最大隶属度标准, 取 $\text{Max}(b_i)$ 所代表的评价等级为对应的评价分级。

定量指标的隶属度函数采用梯形函数表示(其中梯形上下边差值的平均值设为 b), 见公式(13):

$$\begin{aligned} x_i \leqslant U_{ij} - b & \\ U_{ij} - b < x_i < U_{ij} & \\ x_i \geqslant U_{ij} & \\ U_{i(j-1)} - b < x_i < U_{i(j-1)} & \\ U_{ij} < x_i < U_{i(j+1)} - b & \\ U_{i(j+1)} - b < x_i < U_{i(j+1)} & \\ x_i \leqslant U_{i(j+1)} - b \text{ 或 } x_i \geqslant U_{i(j+1)} & \\ x_i \geqslant U_{ij} & \\ U_{ij} - b < x_i < U_{ij} & \\ x_i \leqslant U_{ij} - b & \end{aligned} \quad (13)$$

$$200, x_4 = 1.72.$$

指标氯度(Cl^-)含量 $x_1 = 341.5$, 计算各等级的隶属度:

$$100 < x_1 < 600 \text{ 时}, r_{11} = \frac{600 - 341.5}{600 - 100} = 0.517; r_{12} =$$

$$\frac{341.5 - 100}{600 - 100} = 0.483; x_1 < 600 < 1500 \text{ 时}, r_{13} = 0.$$

指标 TDS 含量 $x_2 = 1.35$, 计算各等级的隶属度: $0.5 < x_2 < 2$ 时, $r_{21} = \frac{2 - 1.35}{2 - 0.5} = 0.4333; r_{22} = \frac{1.35 - 0.5}{2 - 0.5} = 0.5667; x_2 < 2 < 3.5$ 时, $r_{23} = 0$ 。

表3 海水入侵取样数据

样品编号	位置			评价指标			
	位置区域	坐标X	坐标Y	Cl ⁻ /(mg/L)	M/(g/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	SAR
sw1115	高新区马山南寨	4145380	21369961	341.15	1.35	200	1.72
sw1158	芝罘区东口	4164087	21359585	468.25	1.349	120	2.22
s17	高新区西谭家泊	4144171	21371208	35.77	0.521	84.64	6.92
sg4	莱山区刘家滩	4147833	21363981	1080.32	2.567	290	8.54
CS02	牟平区宋家庄	4147478	21361289	240.81	1.105	160	1.31
CS18	牟平区北系山	4145554	21377885	354.53	0.918	120	1.62
CS20	牟平区东系山	4144216	21378697	293.13	1.274	375	1.45
CS22	牟平区盐田	4145283	21381647	776.78	1.814	205.39	6.21
CS18	牟平区北系山	4145554	21377885	354.53	0.918	120	1.62
CS20	牟平区东系山	4144216	21378697	293.13	1.274	375	1.45
CS28	牟平区郝家疃	4143415	21391770	239.66	0.818	51.45	2.7
s4	芝罘区芝罘屯	4160490	21354538	218.39	1.449	285.24	1.69
s13	莱山区刘家滩	4148905	21363977	3632.16	6.965	625.63	15.38
s15	高新区草埠	4146748	21366537	97.85	1.07	225	0.72
cs30	芝罘区北马路	4158046	21357520	92	0.625	170	1.14

表4 海水入侵程度等级划分指标的代表值

分级指标	分级		
	I (无海水入侵)	II (轻度海水入侵)	III (严重海水入侵)
Cl ⁻ /(mg/L)	100	600	1500
M/(g/L)	0.5	2.0	3.5
SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	200	500	1300
SAR	2.0	3.8	10
水质分类范围	淡水	微咸水	咸水

表5 选定单一取样数据值

编号	位置			实测值			
	位置区域	坐标X	坐标Y	Cl ⁻ /(mg/L)	M/(g/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	SAR
sw1115	高新区马山南寨	4145380	21369961	341.15	1.350	200	1.72

指标硫酸根(SO₄²⁻)离子含量 $x_3 = 200$, 计算其各等级的隶属度: $r_{31} = \frac{500 - 200}{500 - 200} = 1$; $200 = x_3 < 500$ 时, $r_{32} = 0$; $x_3 < 500 < 1300$ 时, $r_{33} = 0$ 。

指标钠吸附比(SAR)含量 $x_4 = 1.72$, 计算各等级的隶属度: $x_4 < 2$ 时, $r_{41} = 1$; $r_{42} = 0$; $r_{43} = 0$ 。

得出本次实测含量的综合评判矩阵, 见公式(14):

$$R = \begin{bmatrix} 0.517 & 0.483 & 0 \\ 0.4333 & 0.5667 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

(3) 确定代入指标的权重, 见公式(15)(16)。

$$w_i = \frac{x_i}{s_i} \quad (15)$$

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (16)$$

式中: x_i 为各个指标的实测值; s_i 为各指标等级(a_{ij})的算术平均值; n 为分级数。

对各个单项指标进行归一化处理, 见公式(17):

$$w_i^- = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_i} \quad (17)$$

得出所在地的测量指标权重, 如表6所示。

表6 海水入侵程度等级划分指标的权重

项目	各项指标			
	Cl ⁻	M	SO ₄ ²⁻	SAR
x_i	341.5	1.35	200	1.72
s_i	733.33	3	666.67	5.267
w_i	4.657	0.45	0.300	0.327
w_i^-	0.812	0.079	0.052	0.057

得出权重 $A = [0.812, 0.079, 0.052, 0.057]$ 。

(4)进行模糊综合评价,见公式(18):

$$B = AR = [0.812, 0.079, 0.052, 0.057] \begin{bmatrix} 0.517 & 0.483 & 0 \\ 0.4333 & 0.5667 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据最大隶属度准则,取所代表的评价等级为对应的评价分级,根据数据情况,利用模型电子计算机制定程序录入得出结果^[13],显示该区域海水入侵程度为Ⅱ级,海水入侵为轻度。

对153个区域水样的分析评价,得出海水入侵情况。将调查区划分为1 km×1 km的单元网格,共计728个,对每个单元格进行统计。本次评价运用计算机编程进行运算,结合MapGIS的空间分析功能,依据实际调查结果进行适当的调整,大体圈定海水入侵程度的范围。

2.2 高密度电法划分海水入侵程度界线

2.2.1 划分方法

模糊性数学评价仅界定了海水入侵的大致范围,初步指示了严重海水入侵区域的方向,为了确定海水入侵边界和微咸水界面的分布,在海水入侵过渡带设置了高密度电法剖面进行综合分析,根据电阻率的变化情况,绘制咸淡水入侵界线及入侵程度界线^[15]。

在松散岩类孔隙水区域,按照前期水化学特性,大致区分为重度海水入侵区域、轻度海水入侵区域、非海水入侵区域,并用高密度电法测定电阻率在这些区域的区间范围值,但是要注意每个地方的地质情况都各有差别,电阻率情况不能完全一致。在进一步细分轻度海水入侵区域和非海水入侵区域时,在原先大致确定区域范围间,垂向进行高密度电法切线测量,电阻率变化别明显的地段,即为轻度海水入侵和非海水入侵的界线点。重度海水入侵区域和轻度海水入侵区域电阻率变化不是很明显,需要利用到该区域前期用高密度电法测定的电阻率取值范围值,随后取轻度海水入侵电阻率范围的最小值和重度海水入侵电阻率最大值生成重度海水入侵与轻度海水入侵界线取值范围,然后垂向做轻度海水入侵和重度海水的入侵区域之间的切线,根据界线取值范围生成界线点。随后将这些界线点连接就能划出比较详尽的入侵程度界线。

2.2.2 划分结果

根据烟台东部新区海水入侵程度及界线划分,

海水入侵主要集中在5个区域。

(1)外夹河入海口处

烟台东部新区西端,外夹河入海口东侧,套子湾南岸(烟台芝罘区)区域,海水入侵现象多发。从西到东沿着幸福十四队、幸福十二队、新胜村、得利村以北的区域,浅层海水入侵严重。芝罘岛东南侧、东口村以西存在小范围的海水入侵现象,根据测得的取样埋深数据,破碎带区域海水入侵严重。高密度电法综合解译剖面显示(图2),横向1170 m点位电阻率变化明显,将其定为轻度海水入侵和非海水入侵界线点,在点位两边一定的距离做高密度电法的平行切线,找出电阻率变化一致的点,其连接的线为外夹河入海口的轻度海水入侵和非海水入侵界线^[16]。外夹河入海口东侧属于沿海平原的泥沙和沙质沿海地区以及河流的下游,地形平缓,海水入侵带主要为第四系孔隙水分布区。当过度开采地下水改变微咸水的平衡时,地下水位漏斗区发生在海平面以下,海水沿着渗透性好的含水层侵入内陆^[17]。

(2)北海岸莱山区与高新区之间

从西向东为刘家滩东北、孔家滩以北、草埠以北、西泊子西北区域,根据现场水样埋深数据,中部砂砾层海水入侵严重。高密度电法综合解译剖面(图3)显示,横向50 m点位和190 m点位是电阻率有明显变化的地段,均定为轻度海水入侵和非海水入侵界线点,在点位两边一定的距离做高密度电法的平行切线,找出电阻率变化一致的点。其连接的线为轻度海水入侵和非海水入侵界线。莱山区和高新区的河口区域,海水入侵向内部扩展较深,呈带状向西南方向发展,与莱山区和高新区一条经常干枯的无名河流有关,在河流枯水期或者少水期,海水沿着河床深入内陆,因此形成以河床为发展带的海水入侵区。

(3)辛安河入海口处

自西向东为高新区海岸土成子山东侧,马山南寨东北,马山村以东、王家沙子以北、牟平区南官庄以北、坝疃西北、开发区北岸的盐滩。根据现场水样埋深数据,浅层和中部砂砾层海水入侵严重。

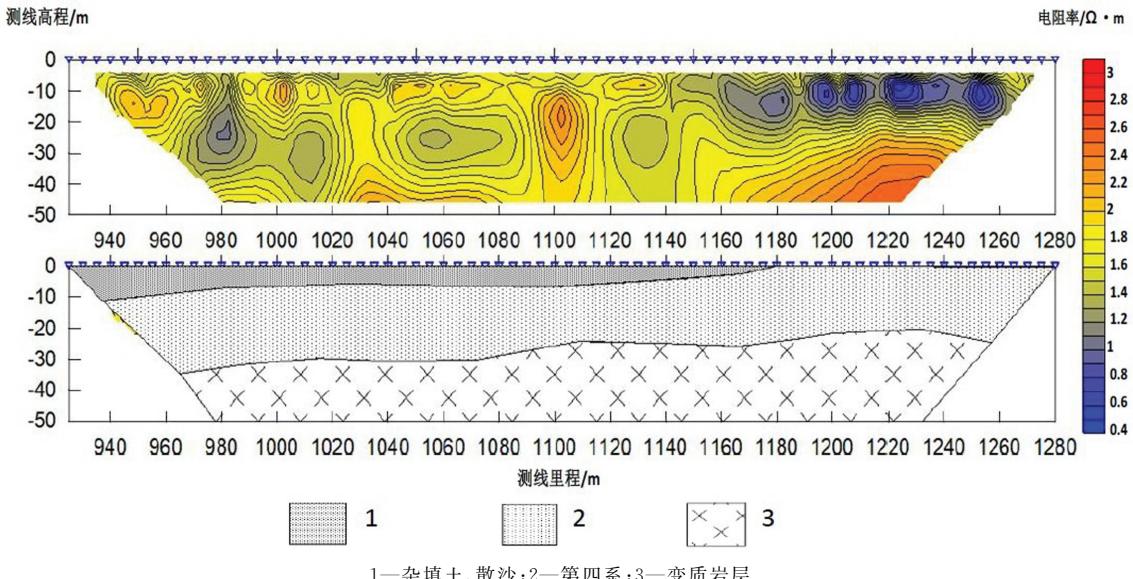


图2 外夹河入海口处高密度电法电阻率等值线剖面推断解释地质剖面图

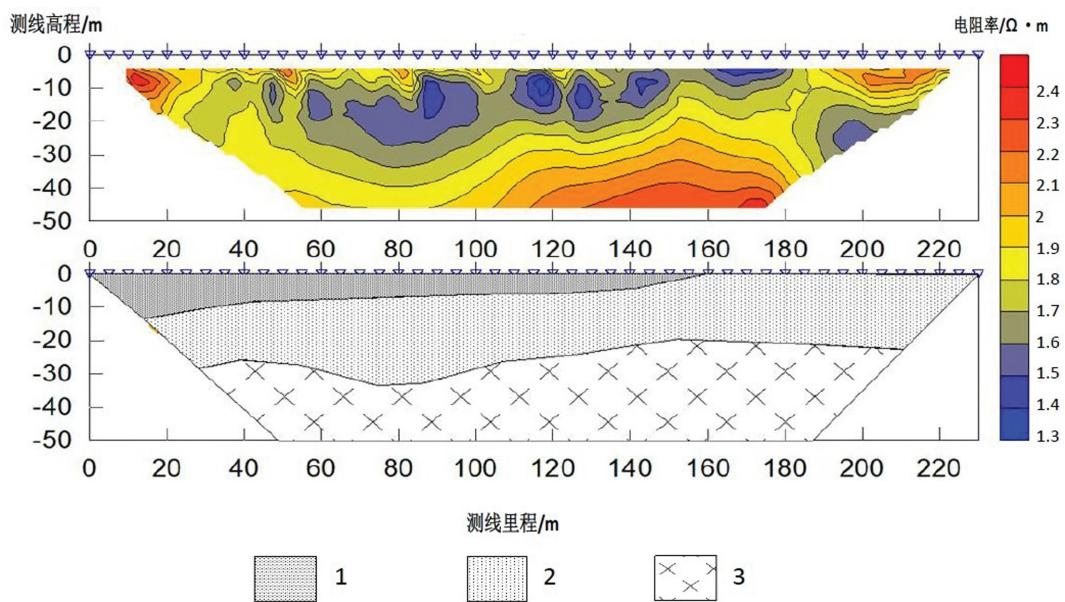


图3 北海岸莱山区与高新区之间高密度电法电阻率等值线剖面推断解释地质剖面图

高密度电法综合解译剖面显示(图4),横向360 m点位和150 m点位电阻率变化明显,因此将360 m点位定为轻度海水入侵和非海水入侵界线点,150 m点位定为轻度海水入侵和重度海水的入侵区域界限点。继续在点位两侧做高密度电法平行切线,划分出区内海水入侵程度的两条界线。辛安河和鱼鸟河入海口区域属于堆积山川平原、滨海平原亚区,海岸为砂质、泥沙质海岸,透水性较强,海水入侵较为严重;而且新安河、鱼鸟河解家庄和武宁周边修建的蓄水工程对海水入侵都有一定的影响。

(4)沁水河入海口处

从西向东沿着北系山、东系山(即系山山脚东侧一线)一直向东至营城盐场,东北方向至堠至山和马鞍山西侧,而后向北至海边。根据现场水样埋深数据,中部砂砾层海水入侵严重。

高密度电法综合解译剖面显示(图5),横向1100 m点位电阻率变化最为明显,采用相同方法,在点位两边一定的距离做高密度电法的平行切线,找出电阻率变化一致的点,各点连接线即为沁水河入海口的轻度海水入侵和重度海水的入侵界线。沁

水河入海口处区域属于沿海平原的泥沙和沙质沿海地区以及河流的下游,地形平缓,海水入侵带主要为第四系孔隙水分布区,当过度开采地下水改变微咸

水的平衡时,地下水位漏斗区发生在海平面以下,海水沿着渗透性好的含水层侵入内陆^[17],海水入侵严重。

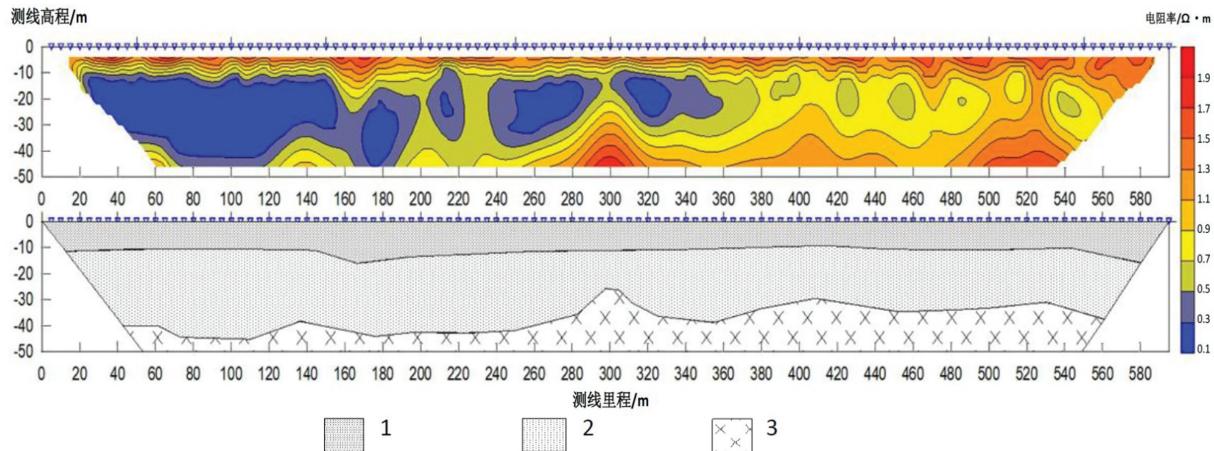


图4 辛安河入海口处高密度电法电阻率等值线剖面推断解释地质剖面图

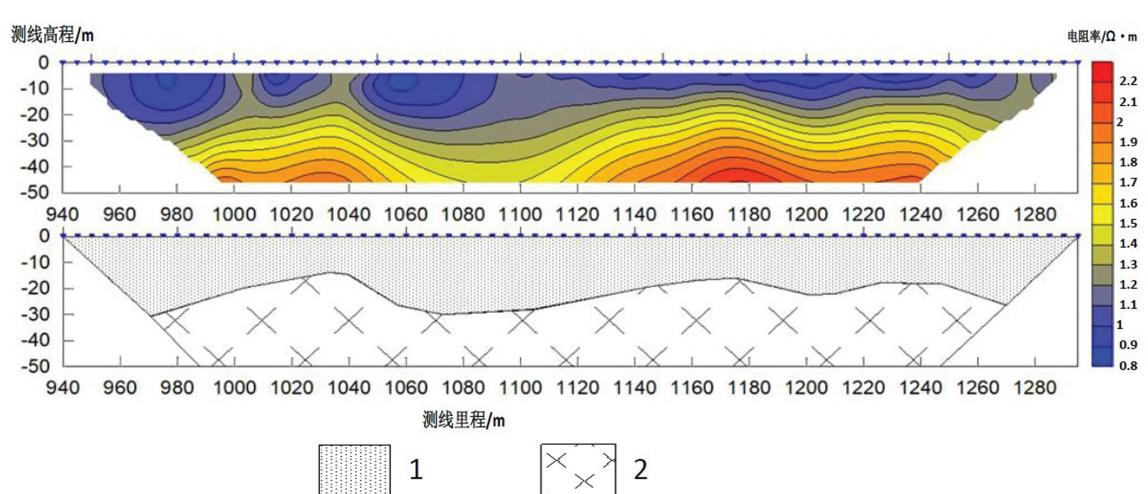


图5 沁水河入海口处高密度电法电阻率等值线剖面推断解释地质剖面图

(5)汉河广河及反修河交汇入海口的东侧

主要分布在汉河广河及反修河交汇入海口的东侧(牟平区台湾工业园)。从西向东为入海口东部至云溪、金山上寨、金山下寨以北,而后至大庄西北直到海边区域,根据现场水样埋深数据,中部砂砾层海水入侵严重。高密度电法综合解译剖面显示(图6),横向1100 m点位电阻率变化明显,因此将其作为重度海水入侵和轻度海水入侵的界面,在点位两边一定的距离做高密度电法的平行切线,找出电阻率变化一致的点,将其连接的线为轻度海水入侵和重度海水的入侵界线。汉河广河及反修河交汇入海口的东侧区域属于滨海平原亚区,海岸为砂质海岸,

透水性较强,并且周边的牟平区北侧养马岛周边和广河东姜格庄北侧由于生产和生活用水的增加,地下水开采量大于以往,北部沿海平原和其他地方的地下水位逐年下降,形成了一个大型地下水开采漏斗,地下水淡水体的顶部水面低于咸水体的顶部水面^[17],咸水被推向淡水(内陆)方向,形成连续的海水入侵。

2.3 综合评价海水入侵

2.3.1 用单元网格法进行统计

研究区1 km×1 km的单元格共计728个。本评价利用计算机编程进行计算,通过对每个单元格数据进行统计分析,并结合MapGIS软件强大的空

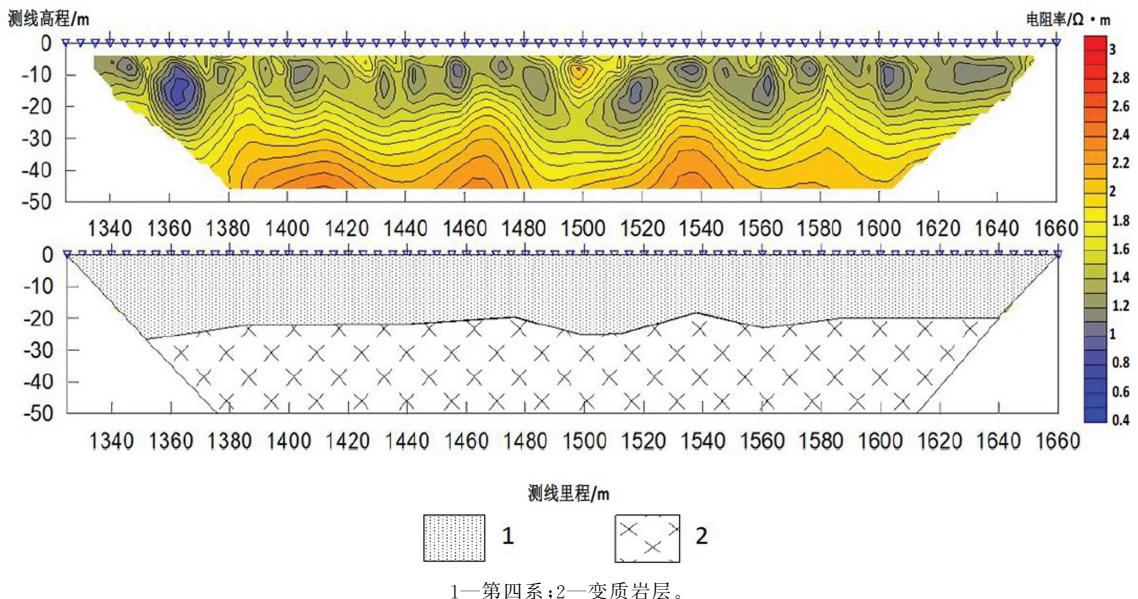


图 6 汉河广河及反修河交汇入海口的东侧高密度电法电阻率等值线剖面推断解释地质剖面图

间分析功能,得出了各单元的海水入侵评价结果,然后根据实际调查情况进行必要的修正^[18];根据所取的水样,还有高密度电法进行的海水入侵程度分界线^[19],详细划分海水入侵区域和程度(图 7)。评价结果为养马岛南侧对岸的两个人海口、芝罘湾西侧、莱山区与高新区之间区域以及牟平区广河东侧海岸区域海水入侵严重。

2.3.2 海水入侵程度及界线划分

根据烟台东部新区海水入侵程度及界线划分,海水入侵主要集中的 5 个区域海水入侵水文地质特征及面积具体为:

(1) 外夹河入海口处

主要在外夹河入海口东侧,套子湾南岸(烟台芝罘区),整个海水入侵区域面积 4.120 km^2 ;重度海水入侵区域在外夹河入海口东端以及靠近海边沿线,重度海水入侵面积为 0.923 km^2 ,越是海水入侵严重区域地下水中氯离子、钠离子、镁离子增加,重度海水入侵区域水化学类型用舒卡列夫式表达主要为 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水或 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水。还有在芝罘岛东南侧,该区域面积 0.397 km^2 ;重度海水入侵在海岸边石英岩破碎比较严重的区域,该区域面积 0.119 km^2 ,重度海水入侵区域水化学类型主要为 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水或 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水。

(2) 烟台北海岸莱山区与高新区之间

主要分布在烟台北岸的莱山区和高新区之间,

整个海水入侵区域面积为 3.661 km^2 ;重度海水入侵区域在沿海区域高新区和莱山区界限偏西,并由入海口水道向内陆延伸,重度海水入侵面积为 0.296 km^2 ,重度海水入侵区域水化学类型用舒卡列夫式表达主要为 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水或 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水。

(3) 辛安河入海口处

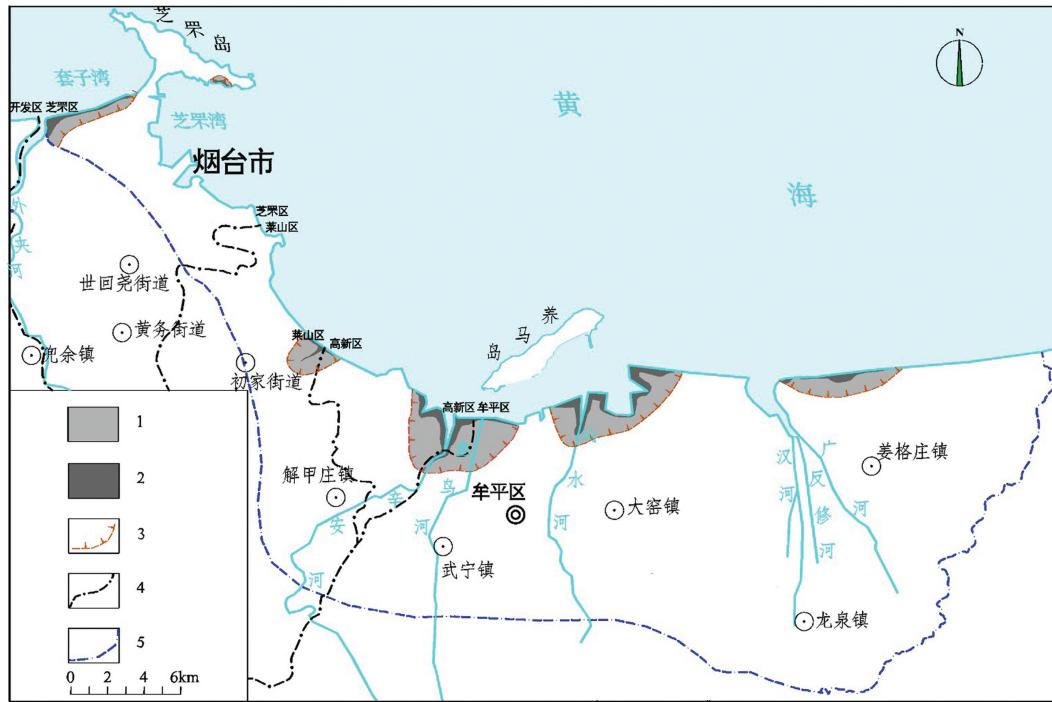
主要分布在辛安河和鱼鸟河入海口区域(烟台高新区和牟平区的),整个海水入侵区域面积 15.880 km^2 ;重度海水入侵区域在沿海区域及河流入海口周边区域,重度海水入侵面积为 2.345 km^2 ,在辛安河西侧重度海水入侵区域水化学类型主要为 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水或 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水;在辛安河以东重度海水入侵区域水化学类型用舒卡列夫式表达主要为 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Ca}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水。

(4) 沁水河入海口处

主要分布在沁水河入海口处(烟台牟平区),整个海水入侵区域面积为 13.421 km^2 ;重度海水入侵区域主要在盐田及盐场区域以及沿海区域和河流入海口周边,重度海水入侵面积为 3.159 km^2 ,重度海水入侵区域水化学类型用舒卡列夫式表达主要为 $\text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水、 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Na}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Ca}$ 型水、 $\text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水。

(5) 汉河广河及反修河交汇入海口的东侧

主要分布在汉河广河及反修河交汇入海口的东



1—海水入侵区；2—严重海水入侵区域；3—海水入侵线；4—行政区界线；5—研究区范围线。

图7 研究区海水入侵分布图

侧(牟平区台湾工业园),整个海水入侵区域面积 5.957 km^2 ;重度海水入侵区域主要入海口东侧区域及沿海区域,重度海水入侵面积为 0.766 km^2 ,重度海水入侵区域水化学类型用舒卡列夫式表达主要为 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水或 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水。

综上所述,海水入侵总面积为 43.437 km^2 。占整个烟台东部新区面积的6.83%。重度海水入侵区域占海水入侵总面积的17.52%。

3 结论

海水入侵一直是严重制约沿海城市经济发展的客观因素,影响海岸带地区人民生活水平的提高和经济的可持续发展。本文通过山东半岛烟台东部高技术海洋经济新区海岸带海水入侵调查与评价,根据监测点地下水样的水质分析,以 Cl^- 、TDS、钠吸附比作为模糊数学综合评价模型的参数,利用高密度电法划分海水入侵程度的边界,对烟台东部新区153个监测点水样进行海水入侵程度模糊综合评价。结果表明,烟台东部海岸带5个区域存在明显的海水入侵:养马岛南侧对岸的两个入海口区域、芝罘湾西侧区域、莱山区与高新区之间带状区域以及姜格庄镇北侧区域和牟平区的北部广河东侧海岸海

水入侵严重。

海水入侵区主要分布在烟台东部新区的沿海地带,这些区域作为城市发展繁华区和工业园区,严重影响烟台东部新区经济发展。根据海水入侵的调查评价结果,能够有效地分析海水入侵的成因,并针对性地制定治理措施。例如,面对日益严峻的海平面上升问题,可以通过保护沿海生态资源,构建海平面上升的三维防御体系。例如,加强沿海珊瑚礁、湿地和其他生态系统的重建和恢复。海水入侵的生态防护措施主要有生态护坡和海水入侵区河流恢复工程,有利于维护河流保护系统的生态平衡;制定地下水开发利用规划;针对污水过度开采问题,相关省市应制定地下水压力提取措施。

参考文献:

- [1] 朱红晔,武文,余静,等.基于层次分析法的胶东半岛海岸带地质灾害风险评估与区划[J].海洋湖沼通报,2024,46(2):209-216.
- [2] 邱伟鹏,黄耀裔,苏建云,等.基于模糊数学评判法对福建省晋江市海水入侵现状评价[J].商丘师范学院学报,2017,33(3):71-75.
- [3] 魏名地.浅表地球物理勘探方法在城市地下水水源调查中的应用[J].信息系统工程,2024(12):36-38.
- [4] 何绍歌.高密度电阻率法在湛江市硇洲岛海水入侵探测应用

- [J].云南地质,2024,43(4):663-666.
- [5] MOUJABBER M E, SAMRA B B, Darwish T, et al. Comparison of Different Indicators for Groundwater Contamination by Seawater Intrusion on the Lebanese Coast [J]. Water Resources Management, 2006, 20(2):161-180.
- [6] LANGMAN J B, ELLIS A S. A multi-isotope approach for identifying saltwater intrusion and resolving groundwater evolution along the Western Caprock Escarpment of the Southern High Plains, New Mexico[J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(1):159-174.
- [7] 房琦,范尧,程鹏,等.单因子界定联合模糊综合评判的海水入侵评价方法:以日照两城河地下水海水入侵现状评价为例[J].安全与环境工程,2017,24(5):9-14.
- [8] 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.
- [9] 连晨艳,张耀文,程国胜,等.秦皇岛昌黎县海水入侵时空变化特征[J].防灾科技学院学报,2022,24(1):70-78.
- [10] 王尚玉,庄会波,刘丹,等.变质岩山丘区裂隙水海水入侵监测技术研究:以荣成市俚岛镇为例[J].地下水,2021,43(2):74-76.
- [11] 姚春梅,颜景生,范庆祥,等.龙口市海水入侵灾害及防治对策[J].山东国土资源,2000,16(4):45-49.
- [12] 李振函,朱伟.日照市海水入侵现状与治理方案[J].山东国土资源,2009,25(6):22-25.
- [13] 虞未江,贾超,狄胜同,等.基于模糊数学和改进层次分析法的海水入侵程度评价[J].海洋科学,2018,42(6):19-29.
- [14] 李家栋.模糊综合评判法在府谷西王寨井田地下水水质评价中的应用[J].地下水,2022,44(5):30-33.
- [15] 宋希利,宋鹏,时彦芳,等.山东烟台大季家地区海水入侵界面划分的意义[J].山东国土资源,2014,30(6):61-64.
- [16] 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),2020.
- [17] 管清花,陈学群,张婧.平度市海水入侵成因及防治对策[J].山东国土资源,2012,28(3):20-24.
- [18] 徐铭霜.某沿海地区海水入侵动态变化规律及防治措施研究[D].青岛:青岛理工大学,2023.
- [19] 姜丹.丹东市海水入侵程度评价[J].黑龙江水利科技,2023,51(11):45-50.

Study on Comprehensive Evaluation of Seawater Intrusion in High Tech Marine Economic New Area in Eastern Yantai City Based on Fuzzy Mathematics and High Density Electrical Method

ZHAO Guopeng¹, LI Jinhong², YU Kechen³

(1. No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Yantai 264000, China; 2. Qingdao Geo-engineering Exploration Institute(Qingdao Geo—engineering Explorarion Institute), Shandong Qingdao 266000, China; 3. Jinjian Engineering Design Limited Company, Shandong Yantai 264000, China)

Abstract: There are varying degrees of seawater intrusion in High tech Marine Economic New Area in eastern Yantai city. It has potential impacts on the planning and development of the new area. Through analyzing water quality of groundwater samples at monitoring points, by using Cl⁻, TDS and sodium adsorption ratio (SAR) as a parameter in the fuzzy mathematical comprehensive evaluation model, the boundary of seawater intrusion degree has been divided by using high-density electrical method. The fuzzy comprehensive evaluation of seawater intrusion degree has been carried out on 153 monitoring points in the eastern new area of Yantai city. The problem of seawater intrusion has been further analyzed, and countermeasures have been proposed to ensure smooth progress of coastal zone construction in the eastern new area of Yantai city and provide scientific basis for sustainable development of the new area's economy.

Key words: Seawater intrusion; groundwater; high density electrical measurement; fuzzy mathematics comprehensive evaluation model; Yantai city