doi: 10.11720/wtyht.2026.0004
强萌麟, 于林弘, 杨宁, 等. 莱州湾南岸典型卤水开采区地下水化学及海咸水入侵分析[J]. 物探与化探, 2026, 50(5): 986-990. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0004
Qiang M L, Yu L H, Yang N, et al. Groundwater hydrochemistry and marine saltwater intrusion in a typical brine exploitation area along the southern coast of the Laizhou Bay[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(5): 986-990. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0004

莱州湾南岸典型卤水开采区地下水化学及海咸水入侵分析

强萌麟[1,2,3], 于林弘[1], 杨宁[1], 汤世凯[1,2,3], 刘玲[1], 于雪艳[1]
(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264004; 2. 自然资源部 南黄海地球多圈层野外科学观测研究站, 山东 烟台 264004; 3. 山东省地矿局 近海海洋地质调查与监测评价创新团队, 山东 烟台 264004)

摘 要: 莱州湾南岸是我国重要的地下卤水资源分布区, 同时也是海咸水入侵最为典型和严重的地区。本文通过对莱州湾南岸土山地区的 278 件地下水样品进行测试分析, 参考海咸水入侵通用标准, 结合地区钻孔资料, 总结该区域内海咸水入侵的空间分布特征。结果表明, 区内地下卤水水化学类型为 Cl-Na 型, 来源主要为海水, 矿物含量和卤水浓度呈正相关, 卤水卤度在 5.0～14.8 °Bé间不等; Cl^-浓度介于 117.57～83 092.53 mg/L 之间, 咸水分布区面积达 137 km^2, 垂向上共发育 3 层承压卤水层, 空间上具有“上咸下淡”的二元水质结构。研究结果显示, 受卤水持续开采影响, 研究区咸水入侵锋线呈后退趋势, 咸水区分布面积缩减明显。

关键词: 莱州湾; 地下卤水; 水化学特征; 海咸水入侵
中图分类号: X142; P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)05-0986-05

0 引言

海咸水入侵是指在自然因素或人为条件的影响下, 含水层的水动力条件发生改变, 破坏了淡水与海水、咸水之间的平衡, 进而导致海水或咸水沿含水层向周围侵染的过程与现象, 是自然和社会环境中诸多因素长期协同作用的结果[1-3]。

莱州湾南岸地形、地貌条件复杂, 是胶莱河、潍河、弥河、白浪河及小清河等众多河流冲积形成的砂质或淤泥质平原海岸[4]。该地区地形平坦, 潮间带广阔, 经历海进海退过程后, 地层中赋存了大量的古海水, 经过长时间的蒸发浓缩后, 埋藏封存, 在莱州湾南岸形成了浓度高、分布广、储量大的地下卤水资源, 使之成为全国重要的海盐及盐化工生产基地[5-7]。

莱州湾南岸土山地区长期的卤水资源开采产生了一系列地质环境问题, 其中海咸水入侵已成为该地区最为突出的问题之一, 不断加剧的海咸水入侵对当地的工业、农业和生态环境造成了严重影响[8-11]。本文以该地区 278 件地下水样品作为研究对象, 以期厘清该区域内海咸水入侵的空间分布特征, 并对卤水资源的开发利用提出建议。

1 研究区概况

研究区位于莱州湾南岸滨海平原东部、胶莱河下游东岸, 面积约 200 km^2, 隶属莱州市土山镇(图 1)。该区地貌属微倾斜低平原, 地形平坦, 东南高、西北低。气候属暖温带大陆性气候, 气候干燥, 年总降水

收稿日期: 2026-01-07; **修回日期:** 2026-04-02
基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局 2020 年度局控地质勘查和科技创新项目“山东省海岸带地质环境演变规律与机制”(202003)
第一作者: 强萌麟(1991-), 男, 汉族, 高级工程师, 2016 年毕业于中国地质大学(北京), 主要从事海岸带地质环境、海洋地质研究工作。Email: 398485035@qq.com
通讯作者: 汤世凯(1988-), 男, 汉族, 高级工程师, 2013 年毕业于中国地质大学(武汉), 主要从事海岸带地质与海岸沉积研究工作。Email: tsktop@163.com

量约 500～600 mm, 多集中在七、八月份; 年总蒸发量约 2 200～2 400 mm, 为降水量的 4～5 倍。

研究区位于胶北隆起带的西缘, 出露地层为第四系, 厚度由东向西、由南向北逐渐变厚; 依据不同的岩性组合、沉积特征划分为旭口组、沂河组和临沂组, 其中旭口组分布面积最广, 岩性主要为细砂、粉砂和淤泥。沉积物具有明显的沉积旋回, 按成因可分为冲积、海积和冲洪积 3 种沉积成因, 其中冲积层以沂河组、临沂组为代表, 海积层以旭口组为代表, 冲洪积层分布于上述两个沉积层之下。

独特的气候和地质条件使研究区赋存了丰富的地下卤水资源, 分布多个棋盘状人工盐田。改革开放后, 随着政策的改变、投资环境的宽松及市场需求的加大, 溴素、盐的价格大大提高, 区内涌现了较多晒盐及溴加工企业, 提高了卤水资源的综合利用, 有效避免了资源的浪费[12]。

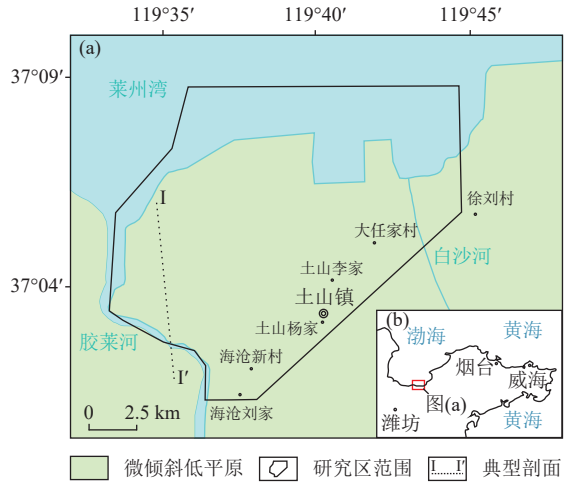


图 1　研究区范围(a)及区域位置示意(b)

Fig. 1　The scope of the study area (a) and its regional location illustration (b)

2　样品采集与分析

于 2022 年在研究区内共采集地下水样品 278 件, 其中基本分析样品 253 件, 组合分析样品 25 件。水样采集严格按照相关标准进行, 采集前先用待取水样将水样瓶涮洗 3 次, 水样用聚乙烯塑料瓶装取; 测试由山东省第三地质矿产勘查院实验室完成, 检测依据为《地下水质检验方法》, 其中采用发射光谱法测定 Na^+、K^+等, 定量限分别为 0.60 μg/mL、0.01 μg/mL, 采用滴定法测定 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、HCO_3^-等, 定量限分别为 4 mg/L、3 mg/L、3.0 mg/L、5 mg/L。

3　结果与讨论

3.1　地下卤水化学成分特征

通过对试验数据的分析研究, 区内地下卤水化学成分中阳离子主要有 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}, 阴离子主要有 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-等, 并富含 Br、Li、B 等微量元素。其中, Na^+在阳离子中占绝对优势, 平均值为 20.85 g/L, 占阳离子含量的 77%; Cl^-在阴离子中占绝对优势, 平均值为 42.21 g/L, 占阴离子含量的 88%, 地下卤水的水化学类型为 Cl-Na 型。

依据组合分析样品的检测结果, 经过计算可知区内地下卤水主要矿物为 NaCl、$MgCl_2$, NaCl 含量介于 3.32%～8.44% 之间, 平均 5.03%; $MgCl_2$ 含量在 0.70%～3.79% 之间, 平均 1.28%, 其 Na、Mg 比值在 2.12～7.60 之间, 均值为 5.39, 比海水(均值为 8.30)偏低, 这说明研究区地下卤水基本来源于海水, 同时接受了其他非卤水含水层的补给。

通过对组合分析样的统计分析, 区内地下卤水中 NaCl、$MgCl_2$、Br 和 Li 的平均含量与卤水浓度密切相关, 总体呈正相关关系, 即地下卤水浓度越高, NaCl、$MgCl_2$、Br 和 Li 的平均含量就越高(图 2)。

在卤水研究中, 卤度, 即卤水浓度, 特指卤水矿化程度的高低, 通常用波美度(°Bé)作为核心度量指标。波美度基于卤水密度与纯水的相对差异, 综合表征溶解盐类总量, 本次研究采用波美计直接测定。研究区内, 地下水卤度为 5.0～14.8 °Bé, 且分带特征明显, 卤度等值线整体呈北东向展布, 高值区主要位于研究区中西部, 低值区位于西北部胶莱河入海口处、东部白沙河一带以及东南部靠近村庄一带, 整体由东南向西北, 卤度值表现为低—高—低的分布规律, 基本呈对称状, 具透镜体的特征(图 3)。

3.2　海咸水入侵现状

3.2.1　海咸水入侵平面分布特征

参照通用标准[13-16], 以 Cl^-浓度 250 mg/L 作为海咸水入侵的指标。依据本次测试数据, 研究区 278 件地下水样品的 Cl^-浓度介于 117.57～83 092.53 mg/L 之间; 至 2023 年, 咸水入侵锋线位于海沧刘家—海沧新村—土山杨家—土山李家—大任家村—徐刘村一线(图 3), 咸水区面积达 137 km^2。

从图中可以看出, 2005～2023 年期间, 咸水入侵锋线总体呈后退趋势, 局部时间段内具有动态变化特征; 研究区范围内, 咸水区分布面积由 146 km^2 缩减至 137 km^2, 入侵锋线最大后撤距离约 1.8 km。

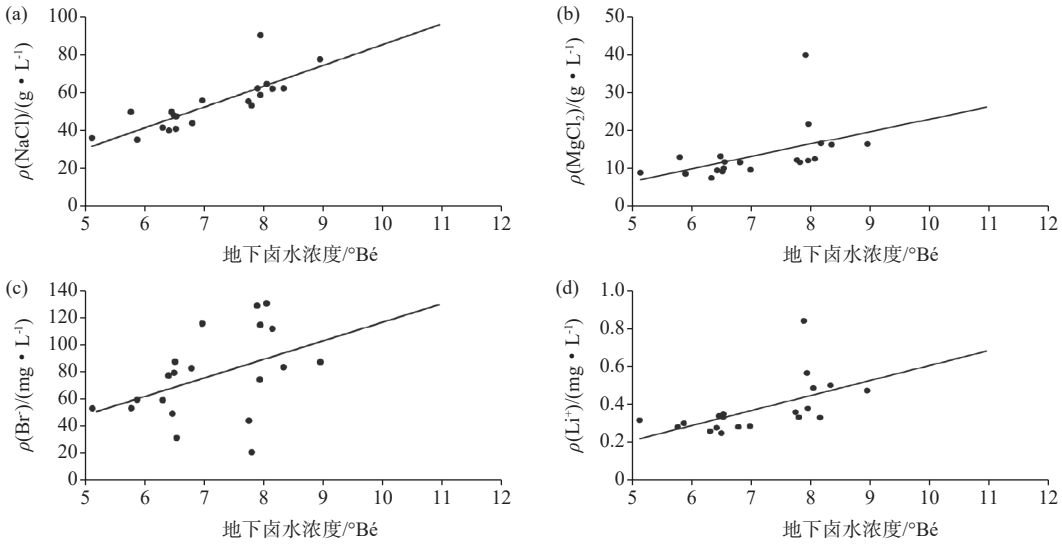


图 2　地下卤水浓度与离子浓度相关关系

Fig. 2　The correlation between the concentration of underground brine and the concentration of ions

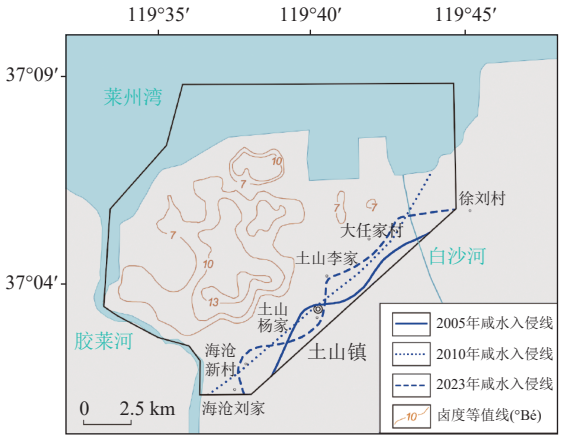


图 3　研究区地下水卤度等值线及海咸水入侵线历史变迁

Fig. 3　Groundwater salinity contours and historical changes of the seawater intrusion line

3.2.2　海咸水入侵垂向分布特征

晚更新世以来，研究区区域上发生了 3 次范围不一的海进海退，进而形成了相应的 3 个海相地层，其中赋存的海水经蒸发浓缩、埋藏、封存，形成了地下卤水矿层[17-19]。在前期已有及新施工钻孔资料的基础上，于研究区西侧选定长度约 8.5 km 的研究剖面，结合地质编录和地下水样品分析结果可以发现，研究区卤水层总体可分为 3 层，各层之间均有一定厚度的隔水层(图 4，剖面位置见图 1)。

3.3　海咸水入侵演化

2005～2023 年期间，咸水入侵锋线总体呈后退趋势，逐渐向渤海一侧靠近。咸水入侵锋线的变化受到多种因素的共同作用，主要影响因素包括地下卤水的开采、地表水和大气降水的补给及南部地下

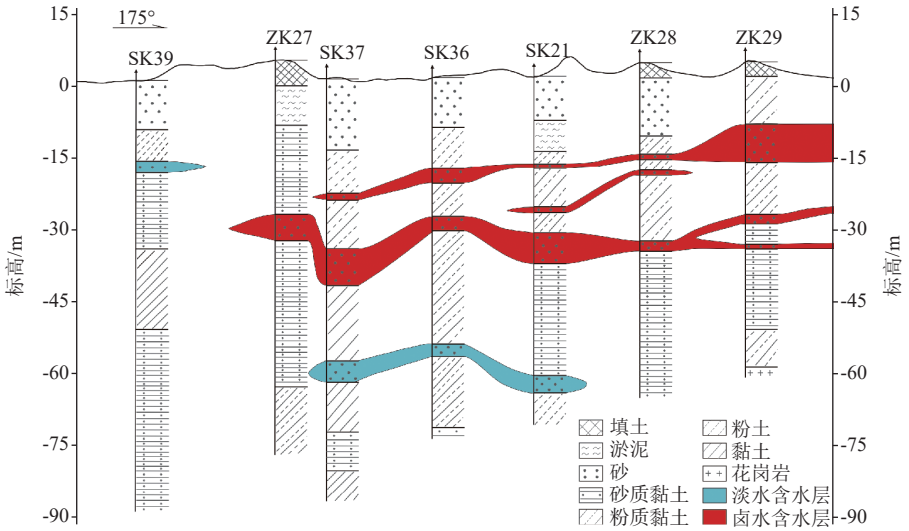


图 4　典型水文地质剖面

Fig. 4　Typical hydrogeological profile

淡水的开采等。

21 世纪以来大规模的地下卤水开采, 造成了地下水位的持续下降, 卤水开采区内形成了以多个盐场为中心的大型降落漏斗, 降落漏斗深度约在 10～40 m 间不等, 其卤水工业品位也逐年下降; 卤水水位的持续下降增大了与南部淡水水体之间的水力梯度, 淡水水体不断侵入卤水体, 引发“卤水淡化”, 从而使咸水区分布面积减少, 咸水入侵锋线后退。

3.4　建议意见

鉴于研究区地下卤水水位持续下降、工业品位逐步降低, 咸水区分布界线逐步向海靠近, 建议相关部门科学调控地下卤水开采总量, 开展长期监测, 实现地下卤水资源的可持续开采。

受限于项目周期、研究水平等, 本文仅对研究区地下水卤度的分布特征进行了现状表述, 对其成因未开展深入研究, 后续可开展持续监测工作, 结合工业开采活动等因素, 进一步研究其特征形成的原因机理。

4　结论

1)土山地区地下卤水化学成分中阳离子主要有 Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}, 阴离子主要有 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 等, 并富含 Br、Li、B 等微量元素; 其中 Na^+占阳离子含量的 77%, Cl^-占阴离子含量的 88%, 地下卤水的水化学类型为 Cl-Na 型; Cl^-浓度介于 117.57～83 092.53 mg/L 之间, 卤度在 5.0～14.8 °Bé间不等。

2)研究区咸淡水分界线位于海沧刘家—海沧新村—土山杨家—土山李家—大任家村—徐刘村一线, 咸水分布区面积约 137 km^2。垂向上, 卤水含水层共分为 3 层, 岩性以粗砂、砾砂、中砂为主, 各层之间均有一定厚度的隔水层。第三承压卤水层之下, 发育淡水含水层, 形成了“上咸下淡”的二元水质结构。

3)2005～2023 年期间, 受大规模开采地下卤水的影响, 地下卤水水位持续下降, 咸水区分布面积逐渐缩小, 咸水入侵锋线总体呈向北后退的趋势, 最大后退距离达 1.8 km。

参考文献(References):

[1] 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]. Global Geology, 2020, 39(4): 971−977.

[2] 蒙永辉, 傅建, 王志成, 等. 潍坊北部海咸水入侵特征及现状评价 [J]. 山东国土资源, 2014, 30(6): 62−66.
Meng Y H, Fu J, Wang Z C, et al. Characteristics and evaluation of present condition of sea salt water intrusion in northern Weifang City[J]. ShangDong Land and Resources, 2014, 30(6): 62−66.

[3] 李臣哲. 海水入侵影响下山东沿海地下水水文化学特征研究 [D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2023.
Li C Z. Hydrochemical characteristics of groundwater in Shandong coast under the influence of seawater intrusion[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography of the Ministry of Natural Resources, 2023.

[4] 杜国云. 莱州湾南岸地貌及第四系发育对区域构造响应 [J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1136−1144.
Du G Y. Geomorphic and quaternary response to the regional tectonics along the south coast of the Laizhou Bay[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(6): 1136−1144.

[5] 冷维亮, 毕钦祥, 朱琳琳, 等. 莱州湾地区咸水入侵状况分析及对策 [J]. 治淮, 2013(1): 95-96.
Leng W L, Bi Q X, Zhu L L, et al. Analysis and countermeasures of salt water intrusion in Laizhou Bay area[J]. Harnessing the Huaihe River, 2013(1): 95-96.

[6] 杨巧凤. 莱州湾沿海带浅层地下咸(卤)水的成因研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
Yang Q F. Origin of shallow salt(brine) water salinity in the coast of Laizhou Bay[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.

[7] 凌奇, 黄汇林, 管超, 等. 莱州湾地下卤水资源利用与相图分析 [J]. 盐科学与化工, 2023, 52(4): 42−47.
Ling Q, Huang H L, Guan C, et al. Utilization of underground brine resources and phase diagram analysis in Laizhou Bay[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2023, 52(4): 42−47.

[8] 郑懿珉. 莱州湾南岸海岸带地质环境评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Zheng Y M. Geological environment evaluation of the coastal zone on the south bank of Laizhou Bay[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[9] 蒋文婷. 莱州湾南岸地质环境脆弱性分析与评价 [D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2008.
Jiang W T. Analysis and evaluation of geological environmental vulnerability on the south bank of Laizhou Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography of the State Oceanic Administration, 2008.

[10] 李明波, 周勇, 张金鑫, 等. 开采期停采期莱州湾地下卤水盐分来源及盐分组成变化规律 [J]. 山东国土资源, 2023, 39(10): 18−25.
Li M B, Zhou Y, Zhang J X, et al. Salt source and salt composition change rule of underground brine in Laizhou Bay during mining and stoppage period[J]. Shandong Land and Resources, 2023, 39(10): 18−25.

[11] 杨帆. 潍北平原地下水咸化及环境效应研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
Yang F. Study on groundwater salinization and environmental effects in the Weibei Plain[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

[12] 于云汉. 莱州湾南岸盐业的阶段性发展及其特征 [J]. 盐业史研究, 2020(1): 40−49.

Yu Y H. Periodical development and characteristics of salt industry on the south bank of Laizhou Bay[J]. Salt Industry History Research, 2020(1): 40−49.

[13] 董凡, 张晓影, 陈广泉, 等. 莱州湾南岸海水入侵特征及基于 WANARX 混合模型的动态预测 [J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 81−97.
Dong F, Zhang X Y, Chen G Q, et al. Seawater intrusion characterization and dynamics prediction based on WANARX hybrid model in the south of Laizhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2022, 44(3): 81−97.

[14] 刘宏伟, 陈社明, 郭旭, 等. 潍北平原海(咸)水入侵现状评价 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(1): 213−218.
Liu H W, Chen S M, Guo X, et al. Evaluation of present sea/saltwater intrusion into Weibei Plain[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(1): 213−218.

[15] 束龙仓, 黄蕾, 陈华伟, 等. 基于 AHP-EWM 的莱州市海岸带海水入侵灾害风险评价与区划 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2023, 53(6): 1864−1879.
Shu L C, Huang L, Chen H W, et al. Risk assessment and zoning of seawater intrusion hazard in coastal region of Laizhou City based on AHP-EWM method[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2023, 53(6): 1864−1879.

[16] 蒙永辉, 王集宁, 张丽霞, 等. 潍河下游典型卤水开采区海咸水入侵趋势研究 [J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 66−70, 122.
Meng Y H, Wang J N, Zhang L X, et al. Study on the sea salt water intrusion in typical brine exploration area of the lower Weihe River[J]. Yellow River, 2018, 40(1): 66−70, 122.

[17] 高茂生, 郑懿珉, 刘森, 等. 莱州湾地下卤水形成的古地理条件分析 [J]. 地质论评, 2015, 61(2): 393−400.
Gao M S, Zheng Y M, Liu S, et al. Palaeogeographic condition for origin of underground brine in southern coast of Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Geological Review, 2015, 61(2): 393−400.

[18] 刘森. 莱州湾南岸地下咸水演化和咸水入侵过程机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
Liu S. The evolution of ground-saline water and process mechanism of saline water intrusion in southern Laizhou Bay[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2018.

[19] 刘莹, 姜锡仁, 王兴, 等. 莱州湾南岸海水入侵变化趋势及成因分析 [J]. 海洋科学, 2018, 42(2): 108−117.
Liu Y, Jiang X R, Wang X, et al. The trend and influencing factors of seawater intrusion in the south coast of the Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2018, 42(2): 108−117.

Groundwater hydrochemistry and marine saltwater intrusion in a typical brine exploitation area along the southern coast of the Laizhou Bay

QIANG Meng-Lin [1, 2, 3], YU Lin-Hong [1], YANG Ning [1], TANG Shi-Kai [1, 2, 3], LIU Ling [1], YU Xue-Yan [1]

(1. *Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources*, *Yantai* 264004, *China*; 2. *South Yellow Sea Multi-sphere Field Scientific Observation and Research Station of Ministry of Natural Resources*, *Yantai* 264004, *China*; 3. *Innovative Team for Marine Geological Survey*, *Monitoring and Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources*, *Yantai* 264004, *China*)

Abstract: The southern coast of the Laizhou Bay represents a significant distribution area of subsurface brine resources in China, while also emerging as an area with the most representative and serious marine saltwater intrusion in China. In this study, 278 groundwater samples from the Tushan area along the southern coast of the Laizhou Bay were analyzed and tested. Based on the general standards for marine saltwater intrusion, combined with regional drilling data, this study summarized the spatial distribution characteristics of marine saltwater intrusion in the area. The results indicate that subsurface brine in the Tushan area exhibits a chemical type of Cl-Na, originating primarily from seawater. The brine concentration, ranging from 5.0 °Bé to 14.8 °Bé, exhibits a positive correlation with mineral content. The Cl^- concentration in subsurface brine ranges from 117.57 mg/L to 83 092.53 mg/L, with the saltwater distribution area reaching up to 137 km^2. Three confined brine layers are identified vertically, demonstrating a binary water quality pattern characterized by high and low salinity in the upper and lower parts, respectively. The results indicate that under the influence of continuous brine exploitation, the saltwater intrusion front shows a retreat trend in the Tushan area, with the saltwater distribution area thinking significantly.

Key words: Laizhou Bay; subsurface brine; hydrochemical characteristics; marine saltwater intrusion

(本文编辑: 蒋实)