

张耀文, 李海君, 赵倩, 等. 兴城市典型海水入侵区水文地球化学特征[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(8): 32-41.

ZHANG Yaowen, LI Haijun, ZHAO Qian, et al. Hydrogeochemical characteristics of typical seawater intrusion in Xingcheng City[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 32-41.

兴城市典型海水入侵区水文地球化学特征

张耀文^{1,2}, 李海君^{1,2*}, 赵倩³, 贾进军⁴, 王贺¹

(1 防灾科技学院, 廊坊 065201; 2 河北省资源环境灾变机理及风险监控重点实验室, 廊坊 065201; 3 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210000; 4 河北省地质矿产勘查开发局第四水文工程地质大队, 沧州 061000)

摘要:为了揭示兴城滨海平原区海水入侵过程中地下水化学成分演化规律和复杂的水文地球化学作用,在兴城河曹庄镇段至烟台河沙后所镇段内采集了 44 个地下水样本和 1 个海水样本,测定其水化学成分及氢氧同位素,通过分析其变化特征探讨兴城典型海水入侵区的水文地球化学特征及其形成作用。结果表明:①区内地下水化学场呈明显的水平分带性,水质由内陆到滨海依次为淡水、微咸水-咸水,地下淡水的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ 以及 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型等,微咸水及咸水的水化学类型主要为 Cl-Na 型或 Cl-Ca 型;②区内地下水主要由大气降水补给,地下淡水主要受控于溶滤作用,而微咸水因受到蒸发作用及混合作用影响,造成氧漂移;③微咸水以 Cl^- 组分为代表的海水与淡水混合比例为 0.45%~3.46%,咸水的混合比例约为 15.85%,微咸水、咸水的形成为混合作用、蒸发浓缩作用以及阳离子交替吸附作用等共同影响所致。

关键词:兴城滨海平原区; 同位素特征; 水化学类型; 海水入侵

中图分类号:P736; P641

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.291

0 引言

兴城滨海地区因其独特的地理位置、气候条件、水文地质条件、地下水开采以及海水养殖等因素,成为中国辽东湾砂质海岸带海水入侵的典型区。尤其是兴城曹庄镇因海水养殖、大量开采地下水以及河口上溯等因素,形成了带状分布的海水入侵严重区^[1],进而导致区内地下水水质咸化、地下淡水资源量锐减、土壤盐渍化加重、农业耕地退化等生态环境地质问题。显然,兴城地区海水入侵防治研究是区内海岸带防灾减灾任务的重点。而准确

地判别海水入侵过程中的地下水化学特征及其形成作用,是开展海水入侵形成机理与防控研究的重要基础^[2-6]。因此,判断兴城海水入侵过程中的咸淡水混合关系,分析区内地下水水化学特征变化及其形成机制,阐明导致地下水咸化的水文地球化学作用过程,对预防和减缓兴城地区地下水进一步咸化,合理开发利用地下淡水资源具有重要的实际意义。

水化学分析结合氢氧同位素方法可有效指示地下水中盐分来源、运移与演化过程,是研究地下水咸化问题的重要方法^[7-9],且广泛应用于滨海平原区地下水化学场演化规律研究^[10-13]。已有学者从兴城滨海地区的水文地质条件出发,对含水层特征、水资源开发利用情况、海水入侵程度进行了研究^[14-15],但对于区内海水入侵过程中复杂的水文地球化学作用研究还较为缺乏。因此,本文在分析兴城典型滨海区地下水化学特征的基础上,利用离子比值法、海水与淡水的混合比例分析法、氢氧同位素法等,对区内海水入侵过程中的水文地球化学特征及其作用进行探讨,研究结果可为进一步开展兴

收稿日期: 2023-12-24

资助项目: 河北省教育厅科学研究项目(QN2024093, QN2022192); 廊坊市科技局科学研究与发展计划自筹经费项目(2023013089); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2022GJJG487); 防灾科技学院 2022 年校级教研教改项目(JY2022RC13)

第一作者: 张耀文(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事水文地质方面的研究工作。E-mail: zhangyaowen@cidp.edu.cn

* 通讯作者: 李海君(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害方面的研究工作。E-mail: lhjun777@cidp.edu.cn

城地区海水与地下水相互作用的过程模拟提供一定参考, 为该区域海水入侵预测评价及灾害防控等提供科学依据。

1 研究区概况

兴城市位于辽宁省西南部、渤海辽东湾西海岸, 隶属于葫芦岛市。研究区位于兴城市东部, 自南向北介于烟台河至兴城河之间(图 1), 属于北温带亚湿润季风气候, 年平均气温 9.6℃, 年平均降水量可达 620 mm, 夏季高温多雨, 7—8 月份降水量约占全年降水量的 59%, 平均蒸发量可达 1 685 mm。区内主要河流为兴城河、东沙河与烟台河, 自西北流向东南, 最终流入渤海。兴城市地处松岭山脉的东南缘, 地势总体西北高、东南低。西北为丘陵区, 最高峰首山海拔 329.7 m, 东南平原区地面高程一般介于 2~20 m。地层出露由老至新主要为长城系、侏

罗系、白垩系以及第四系。其中, 第四系地层主要分布在沿海平原及山前扇裙地带, 地层厚度从山前至沿海递增, 最厚 30 余米。区内地下水类型可分为基岩裂隙水与松散岩孔隙水, 其中, 基岩裂隙水含水层主要分布在山区, 岩性以花岗岩、闪长岩、安山岩等为主; 而松散岩类孔隙水含水层主要分布于冲洪积平原与冲海积平原, 分布较为连续, 且厚度最多可达 40 m, 岩性主要为砂砾石、含砾中粗砂、中细砂等, 为孔隙水的主要储存空间。孔隙含水层自西北向东南, 厚度增大, 颗粒变细, 亚砂土、亚黏土等夹层增多, 地下水类型由单一潜水转变为潜水与微承压水并存, 其中, 潜水含水层厚约 5.5~6.5 m, 微承压含水层厚约 10~15 m。区内地下水埋深较浅, 补给方式以大气降水与地表水入渗补给为主, 排泄方式以潜水蒸发和人工开采为主, 地下水同时存在垂直运动与水平运动, 地下水整体由西北向东南方向径流。

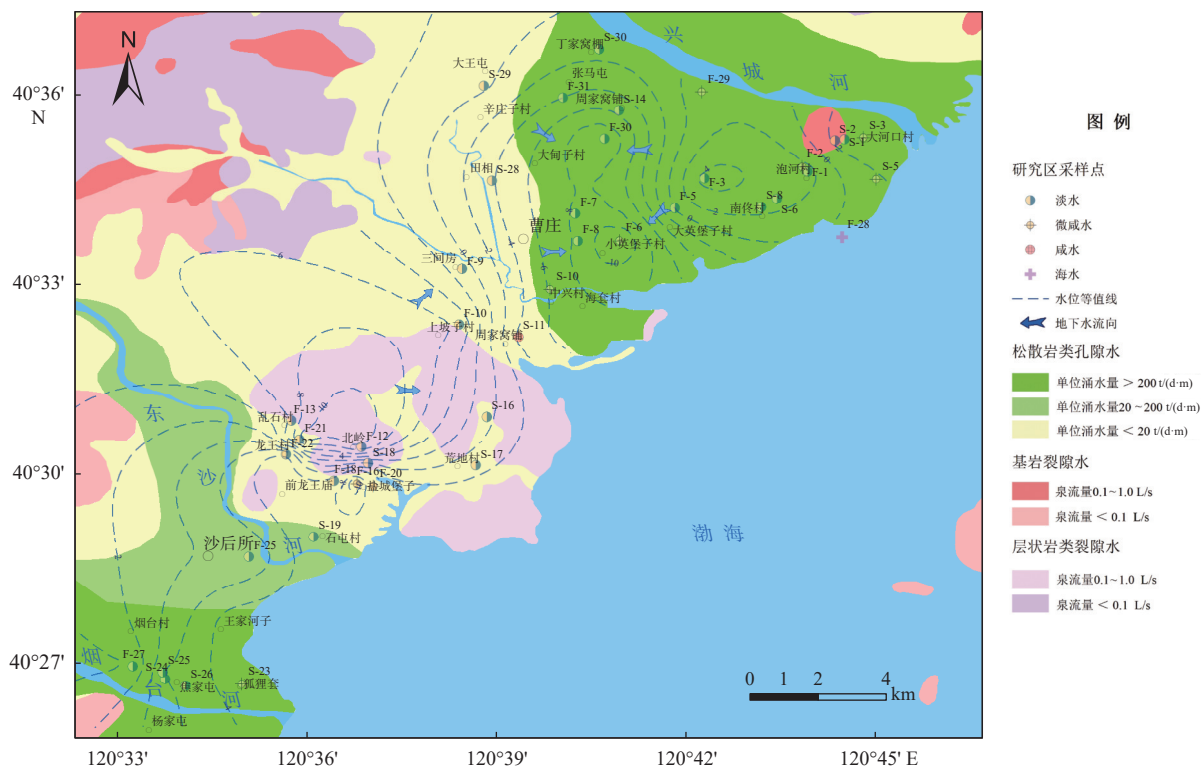


图 1 研究区水文地质略图

Fig.1 Schematic hydrogeological overview map of the study area

罗地区从 20 世纪 70 年代前后开始大规模开采地下水。因农业灌溉主要利用地下水, 地下水的开采量急剧增加, 造成地下水位逐年持续下降, 沿海地带形成小块的点状海水入侵区并逐渐向内

陆延伸、扩展; 到 20 世纪 80 年代早期, 点状海水入侵区扩大成片状; 20 世纪 90 年代后, 工、农业的快速发展和居民生活用水量的增长, 使得地下水位大幅度降落, 形成了地下漏斗区, 海水入侵区由点连

成片,并以面状态势向四周扩展,海水入侵面积显著增大。2000年后,水利部门开始限制地下水的开采,使得地下水位降落速率有所减缓,海水入侵面积变化也趋于稳定。

2 数据与方法

2.1 样品采集与测试

于2021年11月对研究区的沿海地区进行系统性采样,此次调查共采集45组水样(采样点分布见图1),其中,海水水样1组,浅层地下水水样44组。地下水水样主要为潜水,采样深度为1~15 m。分2次对样品的水化学成分进行测试:①在现场简易测定部分地下水理化指标,如溶解性总固体(TDS)、 HCO_3^- 、pH值和温度。其中,TDS和温度由便携式TDS检测笔测定, HCO_3^- 在取样现场采用酚酞-甲基橙滴定法测定,pH值使用pH计测定;②水样的化学组分由防灾科技学院地下水污染评价实验室参照《地下水水质分析方法》(DZ/T 0064—2021)进行测定,使用离子色谱仪(型号为美国赛默飞公司ICS-2100)测定水样主要离子组分如 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 的浓度,其精度达到1%;采用同位素质谱仪(型号为德国Thermo Finnigan MAT253)测定水样中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$,测定结果以相对于VSMOW标准的千分差表示,测定精度分别为 $\pm 2.0\text{‰}$ 和 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

2.2 研究方法

在对已有地质、水文地质资料以及地下水动态

观测成果进行梳理和总结的基础上,采用SPSS 26软件分析水化学指标的统计特征,利用AqQA、Origin及Arcgis10.7软件分别绘制了Piper三线图、离子比值图以及地下水水化学类型分区图。

3 结果与讨论

3.1 地下水化学特征

通过统计分析水样中各离子的组分含量,得到研究区地下水化学成分的变化特征(表1)。由表1可知,区内地下水的pH值为6.630~11.900,平均为7.754,为弱碱性水,pH的变异系数 $< 11.091\%$,表明地下水中pH指标的含量空间变异性较小,相对稳定。TDS值为256.215~5 449.670 mg/L,均值为824.464 mg/L,TDS的变异系数为97.261%,空间变异性较大;参照地下水分类标准(表2),区内微咸水($1\text{ g/L} < \text{TDS} < 3\text{ g/L}$)水样比例占22.7%,咸水($\text{TDS} > 3\text{ g/L}$)水样比例占2%。地下水中阳离子平均含量从大到小排序依次为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,变异系数(CV)分别为199.405%、40.973%、86.171%和280.518%。地下水中阴离子含量均值排序为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$,变异系数(CV)分别为183.121%、52.875%、98.163%。地下水样品中 Cl^- 、 Na^+ 和 K^+ 变异系数较大, $\gg 100\%$,地下水表现出强烈的空间变异性,由淡水向咸水过渡过程中,水化学成分逐渐接近海水,显示受到了海水入侵的影响;其余离子的变异系数介于30%~100%,显示中等变异特征。如图2所示,地下水中TDS的变化与主要阴阳离子含量呈正相关,尤其是TDS与 Na^+ 、 Cl^- 均

表1 地下水水化学参数特征值统计

Table 1 Statistics of groundwater hydrochemical parameters

指标	pH	TDS/(mg/L)	Na^+ /(mg/L)	K^+ /(mg/L)	Mg^{2+} /(mg/L)	Ca^{2+} /(mg/L)	Cl^- /(mg/L)	SO_4^{2-} /(mg/L)	HCO_3^- /(mg/L)
平均值	7.754	824.464	137.737	8.249	28.903	95.552	228.936	110.271	144.525
最小值	6.63	256.215	15.319	0	7.764	25.978	17.962	17.814	52.46
最大值	11.9	5 449.67	1 714.188	142.231	158.752	215.339	2 645.812	697.507	403.82
标准偏差	0.86	801.885	274.655	23.14	24.906	39.151	419.23	108.245	76.418
变异系数	11.091	97.261	199.405	280.518	86.171	40.973	183.121	98.163	52.875

表2 地下水按溶解性总固体的分类^[16]

Table 2 Classification of groundwater according to total dissolved solids^[16]

溶解性总固体/(g/L)	< 1.0	1~3	3~10	10~50	> 50
地下水分类	淡水	微咸水	咸水	盐水	卤水

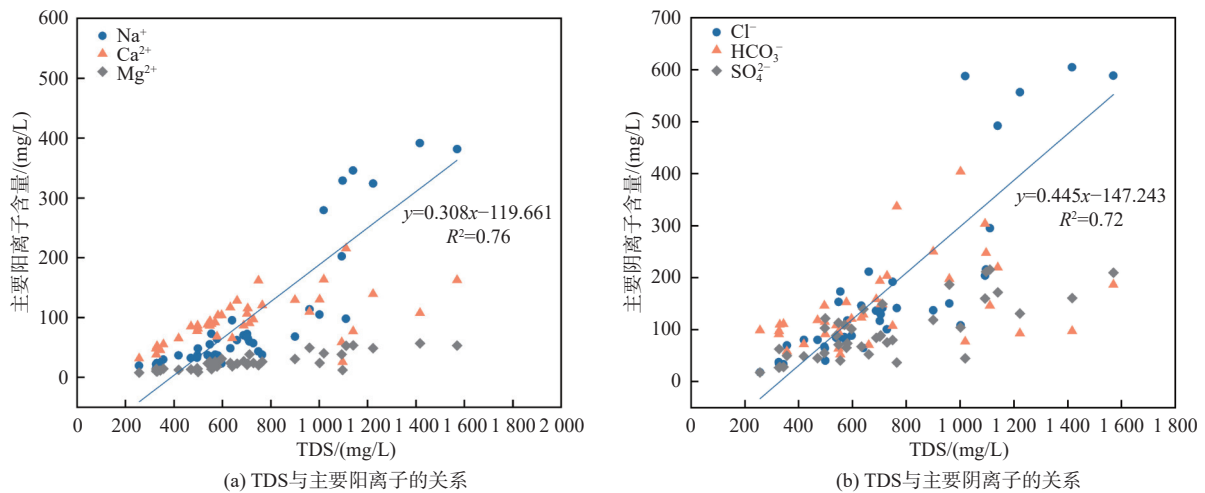


图 2 TDS 与主要离子的关系

Fig.2 Relationship between TDS and major ions

呈强正相关, 其相关系数分别为 0.76 和 0.72, 这也表明地下水 TDS 升高主要是与海水入侵带来的高浓度的 Na^+ 和 Cl^- 有关。

3.2 地下水化学类型

分析研究区地下淡水、微咸水、咸水以及海水水样的水化学成分测试结果, 并利用舒卡列夫分类法对区内地下水与海水的水化学类型进行分类 (图 3、4)。由图 3 可知, 研究区不同类型水样中阳离子与阴离子的变化均表现为显著差异, 水化学类型复杂多样。地下淡水 Cl^- 的浓度介于 17.96~211.64 mg/L, 微咸水-咸水的 Cl^- 浓度介于 108.1~2 645.82 mg/L, 海水的 Cl^- 浓度为 16 508.63 mg/L。图 3 中大部分微咸水与咸水水样处于淡水与海水

的理论混合线附近, 表明微咸水-咸水的形成受控于淡水与海水的混合作用, F-2、F-6 等个别微咸水水样偏离了混合线, 可能是由于混合过程中还发生了阳离子交替吸附作用。

如图 4 所示, 区内地下水化学场呈明显的水平分带性, 水质由内陆到滨海依次为淡水、微咸水-咸水, TDS 的变化范围为 256.22~5 449.67 mg/L。区内地下淡水的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ 以及 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型等, 淡水主要分布在烟台村—龙王村—上坡子村—大甸子村一带。微咸水及咸水的水化学类型主要为 Cl-Na 型或 Cl-Ca 型, 其中, 微咸水主要分布在盐城堡子—中心村—大河口村一带, 咸水主要分布在海套村—周家窝铺村以东的地区。总体上, 区内地下水化学类型由西北到东南表现为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 或 $\text{SO}_4\text{-Ca}(\text{Na})$ 逐渐转变为 Cl-Ca 、 Cl-Na 型水, 在海水入侵影响下, 地下水的咸化趋势明显, 咸化的地下水平行于海岸带呈 NE 走向的条带状分布。

3.3 氡氧同位素特征

在自然水体中, 氡(D)氧(^{18}O)稳定同位素是常见的环境同位素, 由于海水和地下水的氡氧同位素含量存在很大区别, 所以氡氧同位素特征变化可以有效体现海水入侵过程的水化学作用。本次研究的氡氧同位素测试结果见图 5。图中 GMWL 和 LMWL 线分别为全球大气降水线和当地大气降水线, 其中, 当地 LMWL 线($\delta^2\text{H}=5.57\delta^{18}\text{O}-11.4$)根据国际原子能全球大气降水同位素观测网锦州站数据求得, 该数据能够代表研究区的大气降水线方程。在研究区地下水样品中, 地下淡水 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围为

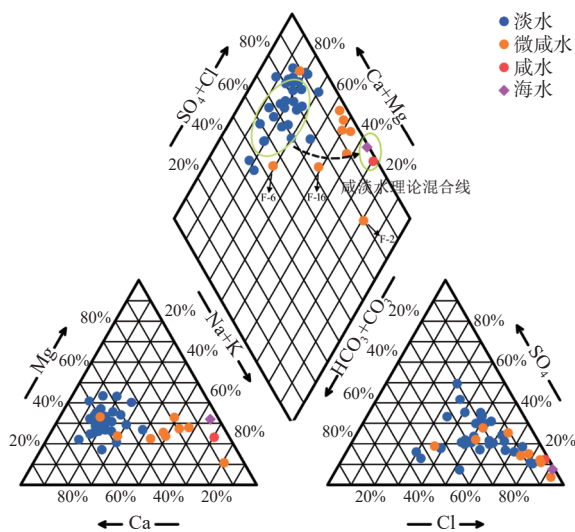


图 3 研究区不同水体水样的 Piper 三线图

Fig.3 Piper trilinear plot of different groundwater samples in the study area

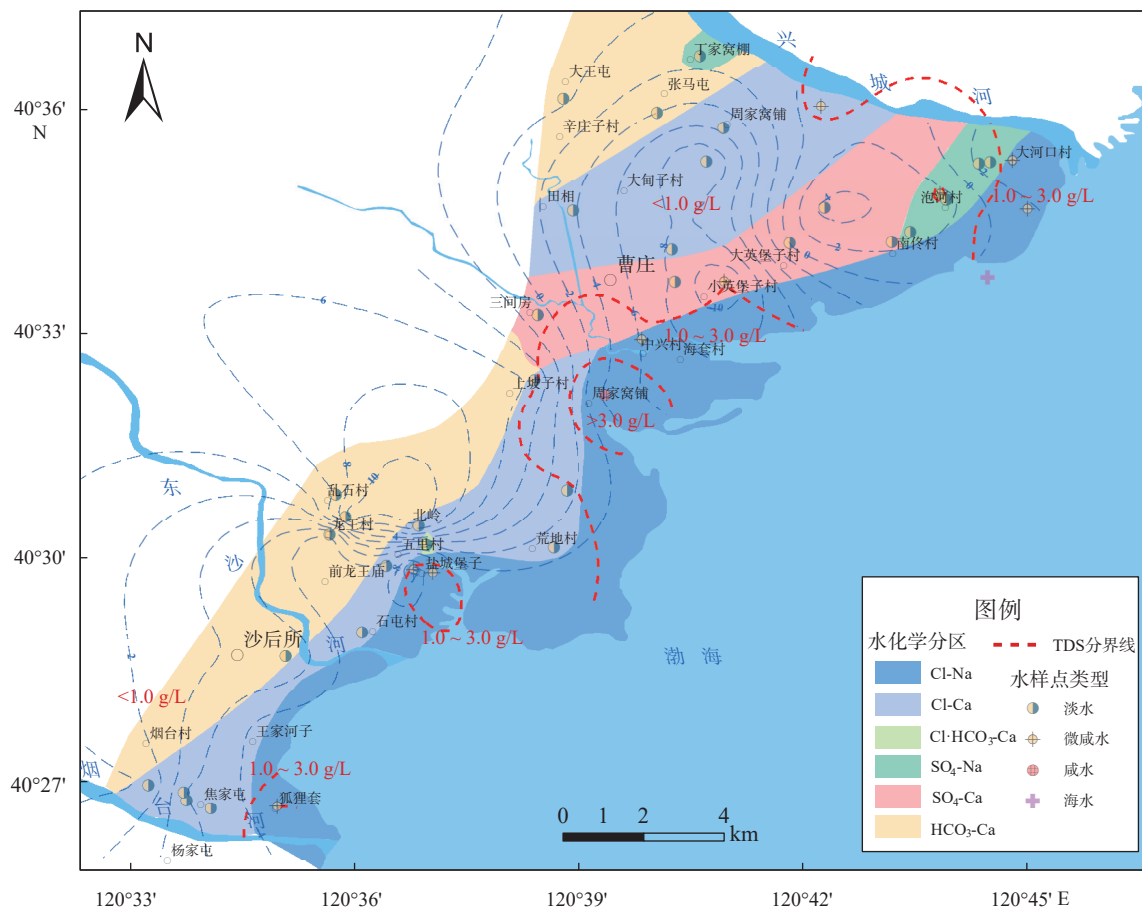
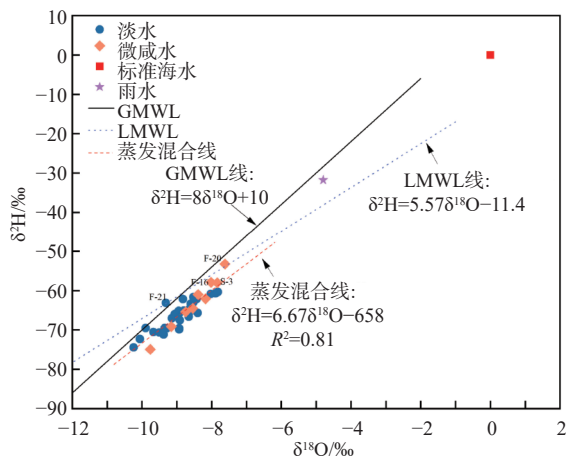


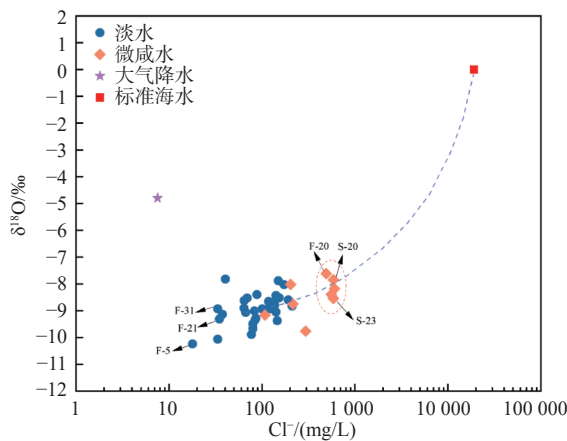
图4 研究区水化学类型分布

Fig.4 Distribution of groundwater chemical types in the study area

$-74.45\% \sim -60.34\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-10.24\% \sim -7.82\%$; 微咸水 $\delta^2\text{H}$ 的变化范围为 $-74.94\% \sim -53.23\%$, $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围为 $-9.76\% \sim -7.62\%$ 。由此可见, 由海岸带向内陆方向, 微咸水比淡水中的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值高, 这也反映了同位素的大陆效应, 即大气降水的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值随远离海岸线而减小,

导致近海岸带分布的微咸水富集 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 。如图5所示, 研究区地下水稳定同位素组成点大部分分布于全球大气降水线及当地大降水线的附近及右下方, 表明研究区地下水主要由大气降水补给, 由于受到不同程度的蒸发作用及混合作用影响, 造成氧漂移。F-21 淡水采样点位于全球大气降水线的上方(图5), 这是由于其位于山前地区, 地下水埋深大, 几乎不受蒸发作用影响, 主要接受大气降水补给; 而 F-16、S-3、F-20 微咸水采样点分布在蒸发混合线附近, 其 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于地下淡水和海水之间, 说明受到蒸发浓缩作用和海水入侵混合作用的共同影响较为明显, 这与采样点位于盐城堡子、大河口村地区及临近兴城河入海口密切相关。此外, $\text{Cl}^- - \delta^{18}\text{O}$ 关系图也有助于判别不同水体的混合过程和混合程度。如图6所示, 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 Cl^- 浓度基本呈正相关, $\delta^{18}\text{O}$ 在 Cl^- 浓度增大方向富集。F-20、S-20、S-23 等5个微咸水点($\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-8.54\% \sim -7.61\%$, Cl^- 介于 $492.15 \sim 588.63 \text{ mg/L}$)较 F-5、F-21、F-31 等地下淡水点($\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-10.24\% \sim -7.82\%$, Cl^- 介于 $17.92 \sim 211.64 \text{ mg/L}$)富集重同

图5 研究区不同水体的 $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ Fig.5 $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ values among different water bodies in the study area

图 6 研究区不同水样中 Cl^- 浓度与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系Fig.6 Relationship between Cl^- concentration and $\delta^{18}\text{O}$ in various water samples

位素,且主要分布在地下淡水和海水的混合线上。基于同位素的质量平衡方程,以海水与区内背景淡水为 2 个典型端元,以水中 $\delta^{18}\text{O}$ 为指标,经海水与淡水的二元混合模型^[17]计算可知,微咸水的海水混合比例均值为 17.27%,淡水的水混合比例均值为 12.64%,一定程度上说明了区内微咸水较淡水接受海水的补给量比例明显升高,微咸水与海水的水力联系较密切,表明微咸水的形成受到了海水混合作用的控制,但同时也与蒸发浓缩作用以及季风气候、蒸发量高于降水量等因素有关。

3.4 水文地球化学作用

3.4.1 混合作用

为进一步定量说明海水入侵造成的海水与地下水混合程度,下面以 Cl^- 浓度为指标,计算地下水与海水的混合比例。若研究区地下水和海水的各个组分在混合过程中只发生混合作用,不发生其他水文地球化学作用,那么利用研究区地下淡水和海水 2 个不同端元中各组分的浓度和实际测试的采样点各组分的浓度,可以求得各组分代表的海水与淡水的混合比例。由于 Cl^- 是地下水中的保守示踪剂,几乎不与地下淡水和含水介质发生反应,对海水入侵反映最为敏感,因此,根据 Cl^- 计算得出的混合比例可作为研究区海水与淡水的理论混合比例,其计算公式如下^[18]:

$$f_{\text{Cl}^-} = \frac{C_{\text{Cl}^-} - D_{\text{Cl}^-}}{S_{\text{Cl}^-} - D_{\text{Cl}^-}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f_{Cl^-} 为以 Cl^- 为代表的海水与淡水的混合比例;

C_{Cl^-} 是地下水样中 Cl^- 的浓度, mg/L;

D_{Cl^-} 是淡水端元 Cl^- 的浓度, mg/L;

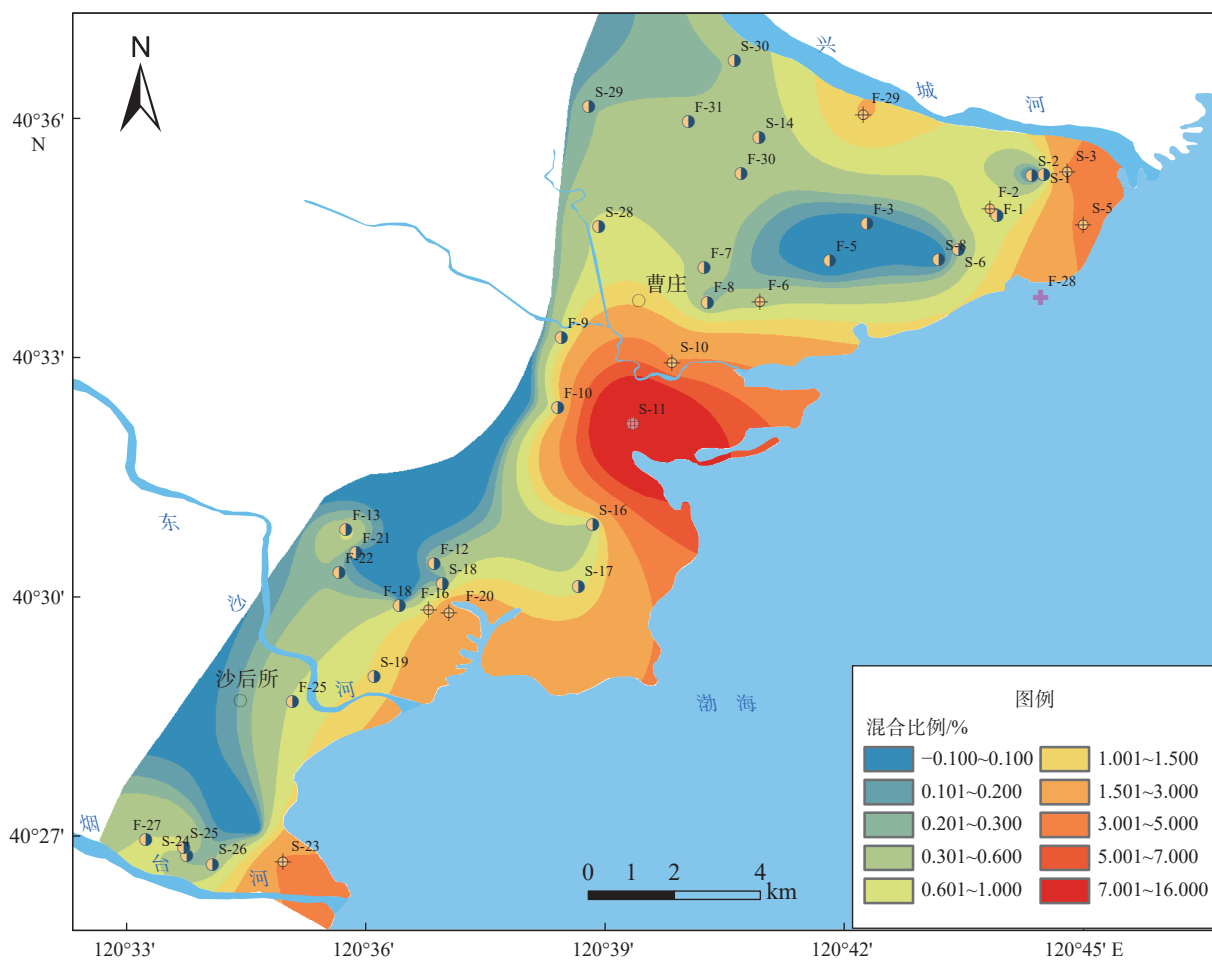
S_{Cl^-} 是海水端元 Cl^- 的浓度, mg/L。

以 Cl^- -Na 型的海水 F-28 (Cl^- 浓度为 16 508.63 mg/L, TDS 为 31 442.01 mg/L) 为海水端元,地下水中以距海较远不受海水入侵影响的 HCO_3^- -Ca 型水 F-31 (Cl^- 浓度为 33.48 mg/L, TDS 为 329.92 mg/L) 为淡水端元,并利用 Arcgis 软件的空间分析功能对计算结果进行克里金插值计算(图 7)。由分析插值计算结果可知,微咸水以 Cl^- 组分代表的混合比例介于 0.45%~3.46%,咸水的混合比例约为 15.85%。需要指出的是,本次仅采集了 1 个咸水水样,因而咸水混合比例的计算结果代表性较弱,考虑在下次野外调查中补充采样。由图 7 看出,曹庄镇南部中兴村—海套村—周家窝铺村附近海水混合的比例最高,受到海水入侵影响最为严重,主要有 2 个方面原因:①该区域受地下水开采影响形成了地下水位负值区,最低水位约为 -6 m,为海水入侵提供了水动力条件;②该区临近兴城现代渔业园,长期高水位海水养殖加剧了海水入侵的程度。整体来说,由沿海到内陆地下水受到海水入侵混合作用的影响逐渐减弱。

3.4.2 阳离子交替吸附作用

海水入侵地下水过程中,地下水化学成分变化并不仅是简单的海水与淡水的混合作用结果,水与岩土之间发生的阳离子交替吸附也起到了重要的作用。 $(\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-) / (\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-)$ 关系图可有效指示阳离子交替吸附作用的发生, $(\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-)$ 代表了地下水中盐岩溶解产生的 Na^+ 以外多余的 Na^+ 含量, $(\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-)$ 代表了地下水中除碳酸盐岩、硫酸盐岩溶解产生的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 以外多余的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量。在阳离子交替吸附作用强烈地区,水中的 $(\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-)$ 与 $(\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-)$ 呈明显的负相关,其比值趋于 -1^[19]。如图 8 所示,通过对研究区地下水水样数据进行拟合,拟合线斜率为 -0.99 接近 -1, R^2 为 0.68,进一步说明该地区地下水中阳离子交替吸附作用强烈。而微咸水水样点偏离拟合线,则说明其混合作用相比于交替吸附作用强烈,占主导地位。

为进一步探讨海水入侵影响下地下水中阳离子交换程度,可引入氯碱指数(CAI)进行分析^[19]。如果 CAI-I 和 CAI-II 为正值,表明地下水中 Na^+ 置换了含水介质中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,发生了逆向的离子交换反应;如果 CAI-I 和 CAI-II 为负值,表明地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换了含水介质中的 Na^+ ,发生了

图7 研究区地下水 Cl^- 代表的混合比例空间分布Fig.7 Spatial distribution of mixing proportion represented by Cl^- in groundwater of the study area

正向离子交换反应, 并且阳离子交换作用越强, 氯碱指数的绝对值越大^[20]。如图9所示, 87.8%的地下水水样 CAI-I 和 CAI-II 为正值, 表明海水入侵区地下水中 Na^+ 含量升高, Na^+ 置换了含水介质中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 发生了逆向的阳离子交替吸附作用, 并

且微咸水及咸水的 CAI-I 和 CAI-II 值远高于淡水, 说明入侵区咸、淡水交界面处阳离子交替吸附作用强烈。

$$\text{CAI-I} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{Cl}^- \quad (2)$$

$$\text{CAI-II} = \text{Cl}^- - \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{SO}_4^{2-}} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- \quad (3)$$

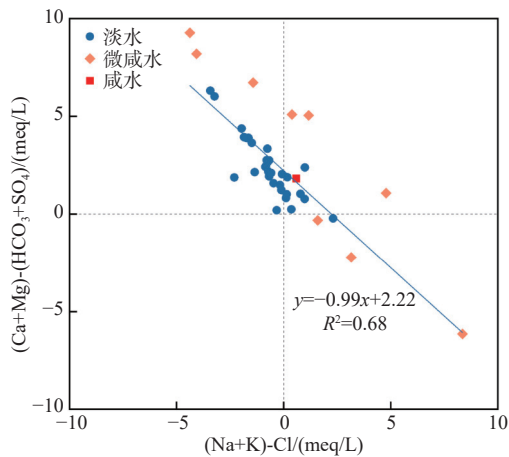
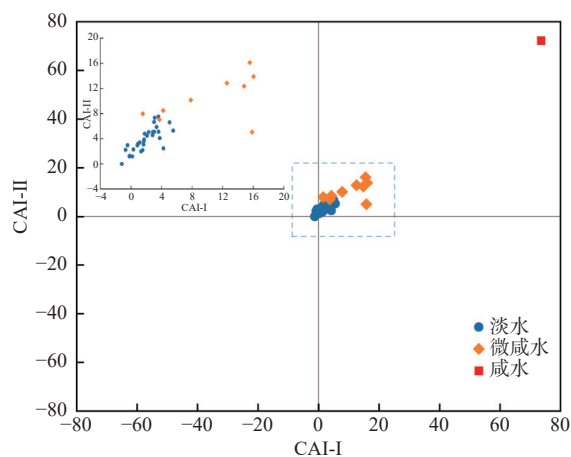
图8 $(\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-) / ((\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-))$ 与 $(\text{Na} + \text{K}) - \text{Cl} / (\text{meq/L})$ 线性关系Fig.8 $(\gamma\text{Na}^+ - \gamma\text{Cl}^-) / ((\gamma\text{Ca}^{2+} + \gamma\text{Mg}^{2+}) - (\gamma\text{SO}_4^{2-} + \gamma\text{HCO}_3^-))$ 

图9 氯碱指数图

Fig.9 Chloride alkali index diagram

3.4.3 溶滤作用

(1) Gibbs 图

Gibbs 图可表征地下水中阳离子比 $\gamma\text{Na}^+/\gamma(\text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$ 和阴离子比 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 与 TDS 的关系, 被广泛运用于分析地下水中化学组分形成的水文地球化学作用^[21]。据图 10 中各采样点的分布可知, 区内地下淡水 TDS 介于 0.26~0.96 g/L, $\text{Na}^+/\text{Na}^++\text{Ca}^{2+}$ 比值基本 <0.5 , 大部分 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 的比值 <0.5 或接近于 0.5, 主要受水岩之间的溶滤作用影响, 其次受到蒸发浓缩作用的影响; 而随着 TDS 不断增大, 微咸水介于 1.00~1.56 g/L、咸水 TDS 为 5.50 g/L, 大部分 $\text{Na}^+/\text{Na}^++\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 的比值 >0.5 并接近于 1, 咸水接

近海水的化学成分, 表明受到蒸发浓缩作用和咸淡水混合作用的双重影响。

(2) $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 和 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$

$\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 是指示水体中 Na^+ 富集程度的一个水文地球化学参数, 一般岩盐地层溶滤成因的地下水中 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 值接近于 1, 标准海水中 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 值为 0.85^[22]。由图 11a 可以看出, 大部分淡水水样点分布在 1:1 线附近, 表明区内低 TDS 的地下淡水 Na^+ 主要源自大气降水对岩盐及钠盐地层的溶滤; 而部分地下淡水点如 F-21、F-12 等处于地下水位漏斗区且受到入海河流补给, $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-) < 0.85$; 个别微咸水点如 F-29、S-23 等位于 1:1 线的下方, 受河口海水上游影响, $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 也

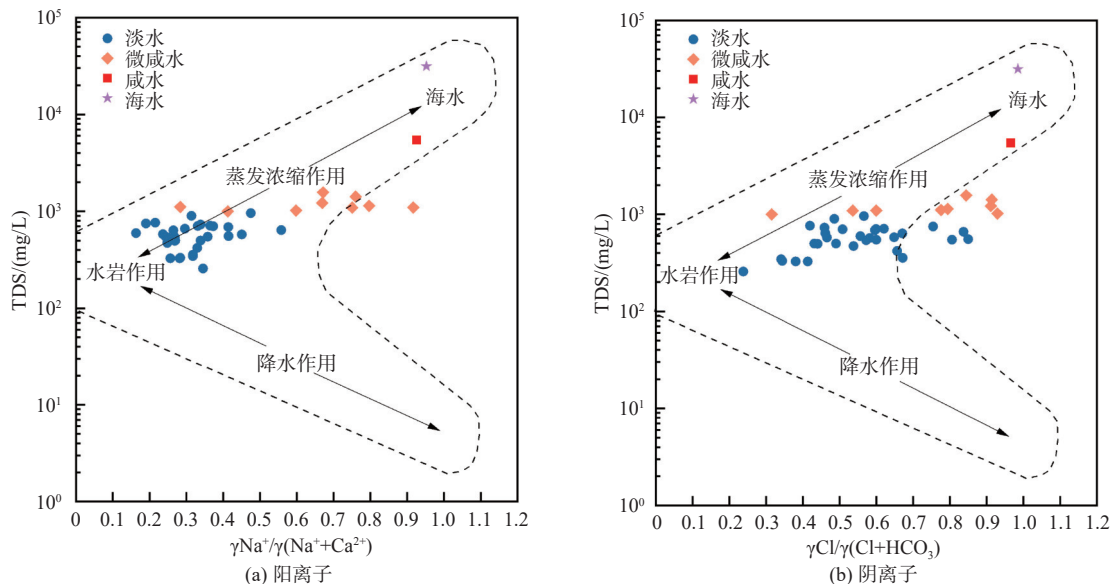
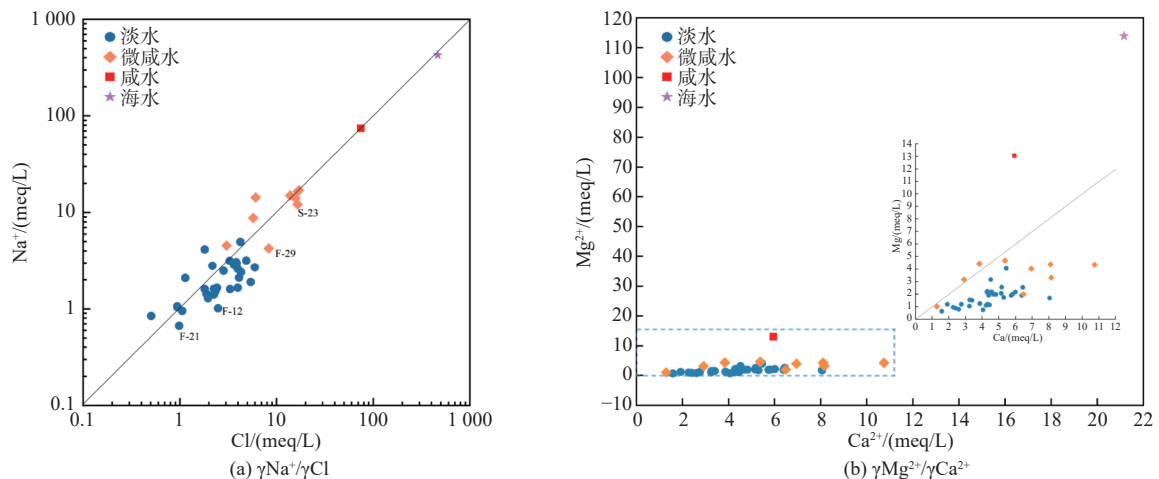


图 10 研究区地下水 Gibbs 图

Fig.10 The Gibbs diagram of groundwater in the study area

图 11 研究区地下水中 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ 和 $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 比值图Fig.11 $\gamma\text{Na}^+/\gamma\text{Cl}^-$ and $\gamma\text{Mg}^{2+}/\gamma\text{Ca}^{2+}$ in the groundwater of the study area

<0.85。

海水中 Mg^{2+} 总比 Ca^{2+} 多, 其 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值约为 5.4^[23], 而一般地下水中 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值远小于该值, 故 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 也可表征地下水化学成分形成特征。如图 11b, 本次采集的海水与咸水水样的 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值分别为 5.38 与 2.2, 可见咸水水样受海水混合影响明显。而地下淡水与微咸水水样的 $\gamma(\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 值分别介于 0.18~0.74、0.3~1.14, 二者均远小于海水的比值 5.4, 说明区内地下淡水与微咸水中的 Ca^{2+} 主要来源于含钙矿物的风化溶解, 也存在通过阳离子交替吸附作用将含水介质吸附的部分 Ca^{2+} 置换到地下水中。

4 结论

本文在分析兴城滨海地区水文地质条件的基础上, 从地下水的理化参数、水化学类型等特征入手, 结合氢氧同位素、海水与淡水的混合比例、氯碱指数等指标综合研究了海水入侵过程中的水文地球化学特征与形成作用, 主要结论如下:

(1) 研究区地下水化学类型自西北内陆向东南沿海表现为由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 或 $\text{SO}_4\text{-Ca(Na)}$ 逐渐转变为 Cl-Ca 、 Cl-Na 型, 海水入侵影响下地下水的咸化趋势明显, 咸化的地下水平行于海岸带呈 NE 走向的条带状分布。其中, 微咸水主要分布在盐城堡子—中心村—大河口村一带, 咸水主要分布在海套村—周家窝铺村以东地区。

(2) 氢氧同位素结果分析表明, 区内地下水主要由大气降水补给, 因受到不同程度蒸发作用及混合作用影响, 造成氧漂移。微咸水受到蒸发浓缩和海水入侵混合作用的共同影响较为明显。以 Cl^- 浓度为混合比例指标, 经计算, 微咸水的混合比例介于 0.45%~3.46%, 咸水的混合比例约为 15.85%。

(3) 区内地下淡水化学组分的形成主要受控于溶滤作用, 且 Na^+ 、 Ca^{2+} 主要来源于含岩盐地层的风化溶解, 化学成分同时受蒸发浓缩作用的影响, 而海水入侵区的微咸水、咸水的化学成分变化为不同程度的蒸发浓缩、海水与淡水的混合以及阳离子交替吸附等综合作用的结果。

参考文献:

- [1] 张耀文, 李海君, 连晨艳, 等. 辽宁省兴城市海水入侵程度的熵权属性识别评价 [J]. 海洋环境科学, 2022, 41(5): 774-782.
- [2] 袁晓婕, 黄向青, 甘华阳, 等. 海南岛南部沿岸地下水水化学要素变化及海水入侵特征 [J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(8): 32-

- 40.
- [3] 李志威, 张晓影, 张明珠. 海水入侵指标对比分析与评价: 以珠江口地下水含水层为例 [J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 16-24.
- [4] 侯国华, 高茂生, 党显璋. 唐山曹妃甸浅层地下水水化学特征及咸化成因 [J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 49-57.
- [5] 张耀文. 海水入侵作用下滨海盐渍土演化过程研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
- [6] 王玉雪. 山东龙口地区海水入侵过程中的水文地球化学作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2020.
- [7] BELKHIRI L, BOUDOUKHA A, MOUNI L et al. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater—a case study: Ain Azel Plain (Algeria) [J]. Geoderma, 2010, 159(3/4): 390-398.
- [8] CAROL E, KRUSE E, MASPLA J. Hydrochemical and isotopic evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina [J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 335-345.
- [9] 祁惠惠, 马传明, 和泽康, 等. 水文地球化学和环境同位素方法在地下水咸化中的研究与应用进展 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(4): 97-105.
- [10] AHIALEY E K, KORTATSI B K, ANORNU G K, et al. Hydro-geochemical processes influencing groundwater quality in the Black Volta Basin of Ghana [J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, 2015, 11(9): 975-982.
- [11] 赵倩, 张耀文, 迟宝明, 等. 锦州市小凌河扇地地表水与地下水水化学特征 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 65-69.
- [12] 侯国华, 高茂生, 叶思源, 等. 黄河三角洲浅层地下水盐分来源及咸化过程研究 [J]. 地学缘, 2022, 29(3): 145-154.
- [13] 岳冬冬, 苏小四. 沂沭河下游平原地下水化学及氢氧稳定同位素特征 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 13-19.
- [14] 李慧. 葫芦岛地区海水入侵区的成因及规律分析 [J]. 吉林水利, 2010(2): 9-10, 19.
- [15] 迟宝明, 丁元芳, 崔新颖, 等. 沿海地区井盐水资源评价及其合理开发利用: 以兴城现代渔业园区为例 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2007, 37(5): 955-960.
- [16] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础 (第七版) [M]. 北京: 地质出版社, 2018: 53-54.
- [17] 张应华, 仵彦卿, 丁建强, 等. 运用氧稳定同位素研究黑河中游盆地地下水与河水转化 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 106-110.
- [18] 赵长荣, 杨吉龙, 肖国强, 等. 大连大魏家水源区海水入侵过程中水文地球化学作用分析及定量模拟 [J]. 地质调查与研究, 2012, 35(2): 154-160.
- [19] 刘贯群, 朱利文, 孙运晓. 大沽河下游地区地下咸水的水化学特征及成因 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科版), 2019, 49(5): 84-92.
- [20] 何军, 肖攀, 彭轲, 等. 江汉平原西部浅层孔隙水水文地球化学特征 [J]. 中国地质调查, 2019, 6(5): 36-42.
- [21] 冯晨馨, 邱隆伟, 高茂生, 等. 山东半岛北部泥质海岸带地下水水化学演化 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 16-25.
- [22] 冯欣, 张亚哲. 深圳地区地下水离子比例系数分析研究 [J]. 中

国农村水利水电, 2014, 4: 18-20, 24.

[23] 肖国强, 杨吉龙, 胡云壮, 等. 秦皇岛洋-戴河滨海平原海水入

侵过程水文化学识别 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 32-39.

Hydrogeochemical characteristics of typical seawater intrusion in Xingcheng City

ZHANG Yaowen^{1,2}, LI Haijun^{1,2*}, ZHAO Qian³, JIA Jinjun⁴, WANG He¹

(1 Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Langfang 065201, China; 2 Hebei Key Laboratory of Resource and Environmental Disaster Mechanism and Risk Monitoring, Langfang 065201, China; 3 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China;

4 The 4th Hydrogeology Engineering Geological Team, Geology and Mineral Exploration and Development Bureau of Hebei Province, Cangzhou 061000, China)

Abstract: To reveal the evolution of groundwater chemical composition and the complex hydrogeochemical interactions due to the seawater intrusion in Xingcheng coastal plain, Liaoning, NE China, 44 groundwater samples and 1 seawater sample were collected from the Caozhuang Town section at Xingcheng River to Shahouzu Town section at Yantai River. The chemical composition, and hydrogen and oxygen isotopes of the samples were determined. The hydrogeochemical characteristics and formation processes in typical seawater intrusion areas and their variations were analyzed. Results show that, the chemical field of groundwater in the area exhibited obvious horizontal zonation, and the water quality changed from freshwater to brackish water and to saline water successively from inland to coastal areas. The chemical types of groundwater were mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Ca}$, and $\text{SO}_4\text{-Ca}$, while those of brackish water and salt water were mainly Cl-Na or Cl-Ca . Groundwater in the area was recharged by mainly atmospheric precipitation, with groundwater in the inland freshwater mainly controlled by dissolution and filtration processes, while brackish water was influenced by evaporation and mixing processes, leading to oxygen drift; The mixing ratio of seawater represented by Cl component with freshwater in brackish water ranges from 0.45% to 3.46%, while the mixing ratio of saline water was about 15.85%. The formation of brackish water and saline water was due to the combined effects of mixing, evaporation concentration, and cation exchange adsorption.

Key words: Xingcheng coastal plain area; isotope characteristics; hydrochemical types; seawater intrusion