

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.

FENG Chenxin, QIU Longwei, GAO Maosheng, et al. Hydrochemical evolution of groundwater in muddy coastal zone of the northern Shandong Peninsula[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 16-25.

# 山东半岛北部泥质海岸带地下水水化学演化

冯晨馨<sup>1,2,3</sup>, 邱隆伟<sup>1</sup>, 高茂生<sup>2\*</sup>, 侯国华<sup>2</sup>, 党显璋<sup>2</sup>, 孙启明<sup>2</sup>

(1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266555; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

3 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

**摘要:** 山东半岛北部是中国海(咸)水入侵典型区域之一, 沉积环境复杂, 地下水水质类型多样。该区域多条河流频繁摆动发育河流三角洲, 同时受多次海侵海退事件影响, 沉积海陆交互地层, 形成了复杂的地下水含水层系统。近几十年来, 人类活动过量开采地下水, 导致形成了淡水降落漏斗与卤水降落漏斗, 改变了局部地下水的水动力条件, 对地下水形成演化产生影响。根据研究区沉积背景与含水层分布特征, 划分为 3 个流域、2 层地下水。综合运用海洋地质学、环境同位素与水化学方法, 分析结果表明, 浅层地下水演化过程存在明显的地域差异性, 弥河流域与白浪河流域主要接受大气降水补给, 漏斗区以 Cl-Ca 型水为主, 处于地下水咸化过程; 潍河流域主要接受河水补给, 漏斗区以 HCO<sub>3</sub>-Cl-Na 型水为主, 处于地下水淡化过程。深层地下咸、卤水形成过程主要受混合作用控制, 是一个淡水、海水、卤水三端元混合过程。

**关键词:** 卤水; 三端元混合; 地下水演化; 水化学; 山东半岛; 泥质海岸带

中图分类号: P736; P641

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.315

## 0 引言

山东半岛北部泥质海岸带是渤海沉积结构的主要组成部分, 明显受渤海沉积演化影响。早—中更新世时期, 局部地区出现少量海侵层, 大部分区域在新生代大地构造条件下, 形成大面积陆相沉积区, 主要是多条河流形成的冲击扇带<sup>[1-2]</sup>。晚更新世以来经历多次海侵海退事件, 形成 3 个海相层, 分别对应沧州海侵(距今约 110~70 ka BP)、献县海侵(距今约 40~21 ka BP)和黄骅海侵(距今约 7~2.5 ka BP), 在弥河、白浪河、潍河等多条河流共同作用下, 形成海-陆相交互的沉积地层, 低渗透率的海相沉积层中赋存大量古海水, 在海退期被陆相

沉积物覆盖, 形成由海向内陆约 40 km 地下咸水分布区<sup>[3]</sup>。

晚更新世以来数次海侵海退及多源河流三角洲沉积体系, 为地下卤水资源的生成创造了良好的补给、运移、过滤、储存、封盖条件。李道高等<sup>[4]</sup>识别研究区埋藏古河道(埋深 60 m 内)分为弥河、白浪河和潍河 3 个系统, 其空间分布与其所属河流的冲洪积扇的分布范围一致。当河流向海供应物质的速度大于河流搬运速度, 河口处就形成三角洲沉积<sup>[5]</sup>。有研究指出, 晚更新世以来海退阶段, 潍河、白浪河、弥河等多条河流共同塑造的三角洲向海进积 20~55 km, 构成了现今的河海积平原<sup>[6]</sup>。海退时期气候干旱, 蒸发作用强, 而三角洲进积过程中形成的潟湖-沙坝为海水提供稳定的蒸发环境, 从而形成高矿化度潟湖水。高矿化度潟湖水在重力作用下, 下渗促使盐分不断在地下水中累积, 经历离子交换、矿物蚀变等作用后, 沿潮坪、三角洲前缘生成地下卤水<sup>[7]</sup>。

通过对地下水水化学、稳定同位素特征及地下水形成过程中沉积环境进行分析, 可以解释地下水

收稿日期: 2021-12-09

资助项目: 国家自然科学基金(U2106203; 41977173)

作者简介: 冯晨馨(1996—), 女, 硕士, 主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail: fxcaptx4869@163.com

\* 通讯作者: 高茂生(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海岸带环境水文地质和海洋沉积方面的研究工作。E-mail: gms532@163.com

补径排特征,进一步分析地下水演化过程。刘恩峰<sup>[8]</sup>通过对莱州湾南岸沉积环境变化分析,总结出地下咸(卤)水可能是由古海水蒸发浓缩下渗形成的。随着研究进一步深入,海水蒸发浓缩成卤逐渐受到了质疑,许博超等<sup>[9]</sup>通过对莱州湾沿岸地下卤水中铀、钴等元素调查后发现,其含量为正常海水的 30~4 000 倍,与卤水浓度呈非线性关系,这与简单的海水蒸发浓缩不相符。韩冬梅等<sup>[10]</sup>在潍河流域运用地下水测年、水文地球化学和稳定同位素等方法,得出该区地下卤水的水分与盐分来源并不相同,水分来源于大气降水和河流侧渗补给,盐分来源于蒸发盐的溶解。

山东半岛北部地下水整体表现为由南向北流动,随着地下水持续开采,地下水位不断下降,海水-地下水-地表水之间关系发生明显变化<sup>[11-12]</sup>。北部沿海地区持续开采地下卤水资源,形成地下卤水降落漏斗,降落漏斗最深处的地下水位埋深接近 50 m (表 1)。南部作为主要的地下水供水源地,持续开采地下淡水形成范围较大的地下水淡水降落漏斗,漏斗中心最深处地下水位埋深已超过 30 m<sup>[13]</sup>。地下漏斗的存在破坏了原本地下水由南向北的流向,改变为由漏斗边缘地区向漏斗中心汇聚,造成咸水入侵<sup>[14-15]</sup>。其中,1991—2004 年间,地下水开采强度显著增加,咸化面积达到最大;2005—2014 年间,随着跨流域调水等一系列治理措施实施,咸水区面积的扩大趋势得到遏制<sup>[16]</sup>。

表 1 地下水降落漏斗分布

Table 1 Distribution of groundwater depression cone

流域	卤水降落漏斗		淡水降落漏斗	
	中心位置	最大降深/m	中心位置	最大降深/m
弥河流域	大家洼	>20	寿光西	>15
白浪河流域	央子	44.60	固堤	8.78
潍河流域	下营西	>10	昌邑	22.70

注:数据引自文献<sup>[11,13]</sup>。

自然状态下,莱州湾南岸地表水(河流或湖泊)-地下水-海水处于相对稳定状态,人类对地下水的过量开采导致局部地下水水头发生改变,原有的水文地质条件改变,水化学演化过程随之改变。前人通过水化学与环境同位素方法,对水盐来源分别剖析,总结了莱州湾地下水形成过程与演化机制,但对近几十年来人类高强度开采条件下,原有水文地质条件的改变对地下水演化过程的影响认识不足。本文在东西长约 100 km、南北约 50 km 研究区范围内,选取弥河、白浪河、潍河 3 条主要河流,结合区内沉

积背景与含水层分布情况,利用水化学及稳定同位素等方法,对地下水分不同流域、不同深度进行讨论,识别“弥河流域”、“白浪河流域”及“潍河流域”地下水的补给条件与盐分来源,分析河水-地下水-海水之间相互作用,总结地下水演化特征,以期与研究区地下水合理开发利用提供科学参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 气象与水文

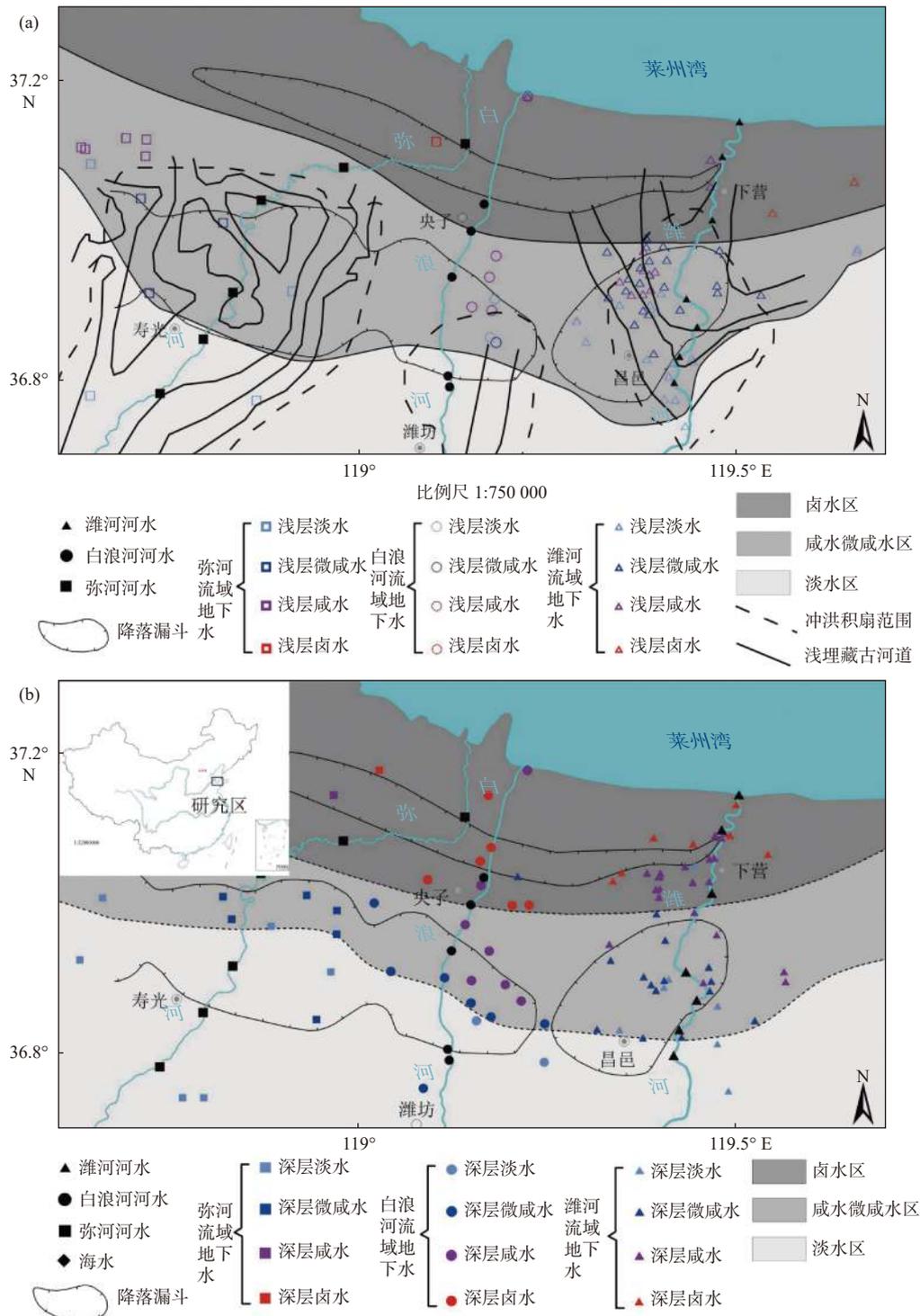
研究区位于山东半岛北部(图 1),地势南高北低,地形平坦开阔,平均向海倾斜 0.5%,南部为低山丘陵区,海拔最高可达 200 m,向北逐渐降低过渡为 5~7 m<sup>[17]</sup>。研究区属于暖温带大陆性季风气候,具有大陆性半干旱气候特征,年平均降水量 559.5 mm,主要集中在 6—9 月份,年平均蒸发量 1 936.7 mm,主要集中在 5—9 月份,且年平均蒸发量远大于年平均降水量。

区内中短源河流发育,自西向东依次为弥河、白浪河、虞河、潍河等,多条河流发源于南部低山丘陵区,流经山前平原区向北汇入莱州湾,其中径流量以潍河最高、弥河次之,输沙量以潍河最高、弥河次之<sup>[18]</sup>(表 2)。受气候影响,河流汛期主要集中在 7、8 月份。

### 1.2 水文地质条件

研究区内地下水自南向北分布淡水、微咸水、咸水、卤水,含水层岩性以粉砂、细砂、中砂为主,局部赋存有咸水和卤水的含水层岩性以细砂、黏土质粉砂为主。地下淡水(TDS≤1 g/L)的水化学类型以 Cl·HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca·Na 型、Cl-Ca·Na 型、HCO<sub>3</sub>-Ca·Na 型、HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Cl-Na 型为主;微咸水(1 g/L<TDS≤3 g/L)、咸水(3 g/L<TDS≤50 g/L)和卤水(50 g/L<TDS)的水化学类型逐渐过渡为 Cl-Na·Ca 型、Cl-Na·Mg 型、Cl·SO<sub>4</sub>-Na 型、Cl-Na 型<sup>[19]</sup>。

以地下卤水为例,根据埋深条件、水文地质特征与形成年代,将地下卤水分为 3 层(表 3),自上而下为:潜水-微承压卤水含水层(第 1 含卤层),TDS 值 50~130 g/L,该层位埋深较浅,含水层底板埋深 20~25 m,与大气降水响应良好,能够接受大气降水与研究区内河流的侧向补给,地下水动态特征属于气象-开采型;第 1、2 承压卤水含水层(第 2 含卤



(a)浅层地下水; (b)深层地下水

图 1 采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites

层), TDS 值 50~165 g/L, 分布范围广, 为研究区内卤水浓度最大且较为集中的层位, 是研究区内卤水开采的最主要层位, 地下水动态特征属于开采型; 第 3、4 承压卤水含水层(第 3 含卤层), TDS 值 50~140 g/L<sup>[20]</sup>。晚更新世早期与晚期的界面位于

39 m 处<sup>[21-22]</sup>, 接近第 2 与第 3 含卤层的分界。在实地考察过程中发现, 第 1 含卤层与第 2 含卤层为混采, 缺少比较明确的界限, 研究时可看作一层。结合上述实际情况, 为方便讨论, 本次研究选取 40 m 作为浅层地下水与深层地下水界限。

表 2 河流径流量与输沙量对比

Table 2 Comparison in runoff and sediment discharge among three rivers

	径流量/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a)			输沙量/(10 <sup>4</sup> t/a)		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
弥河	4.277	15.470	1.201 0	84.59	314	1.59
白浪河	0.391	1.559	0.057 4			
潍河	14.610	22.610	7.553 0	107.85	205	28.30

注: 数据来源于文献[6]。

表 3 研究区含卤层分布特征

Table 3 Distribution characteristics of underground brine in the study area

	顶板埋深/m	底板埋深/m	平均厚度/m	矿化度/(g/L)	地下水动态特征
第1含卤层	2.80~28.65	5.00~31.30	7.7	50~130	气象-开采型
第2含卤层	7.00~33.80	24.20~74.50	16.5	50~165	开采型
第3含卤层	30.30~74.20	48.40~88.00	9.9	50~140	开采型

注: 数据来源于文献[20]。

## 2 样品与方法

本研究过程中所依据的水化学数据获取途径有本次野外采集和搜集前人数据等。其中, 野外采集包括 2020 年 6 月 8 日—2020 年 6 月 13 日与 2021 年 4 月 6 日—2021 年 4 月 10 日 2 次野外工作采集到的地下水样 124 件。严格按照采样要求保存样品, 并由自然资源部海洋地质实验检测中心进行测试分析, 包括  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$  以及稳定同位素  $\delta^2\text{H}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  数据。同时, 搜集研究区内 DU<sup>[23]</sup>、ZHANG 等<sup>[24]</sup>、HAN 等<sup>[25]</sup>公开发表过的数据并进行筛选整理。整理后共有地下水水化学数据 194 组, 其中, 浅层地下水(深度 < 40 m)数据 80 组, 深层地下水(深度 > 40 m)数据 96 组, 河水样品 18 组; 稳定同位素数据 73 组, 其中, 浅层地下水(深度 < 40 m)数据 18 组, 深层地下水(深度 > 40 m)数据 40 组, 河水样品 15 组。绘制位置分布如图 1 所示(图例全文统一)。

## 3 分析与讨论

### 3.1 水化学特征

如图 2 所示, 研究区内水质类型多样, 淡水以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$  型水为主, 有少量  $\text{Cl}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$  型水分布; 微咸水以  $\text{HCO}_3\text{-Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$  型水为主, 咸水主要是  $\text{Cl}\text{-Na}\cdot\text{Ca}$  型水, 卤水为  $\text{Cl}\text{-Na}$  型水。在 Piper 三线图上, 按流域将地下水降落漏斗区分区, 弥河流域与白浪河流域降落漏斗附近位于 A 区, 以  $\text{Cl}\text{-Ca}$  型水为主;

潍河流域降落漏斗附近位于 B 区, 主要是  $\text{HCO}_3\text{-Cl}\text{-Na}$  型水, 主要离子成分存在差异。A 区主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ , 主要阴离子为  $\text{Cl}^-$ , 指示 A 区地下水在地下水运移中处于较咸水体(主要阳离子为  $\text{Na}^+$ )侵入较淡水水体(主要阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ )过程, 主要受咸水入侵影响, 而 B 区水质类型主要为微咸水, 但主要阳离子为  $\text{Na}^+$ , 指示 B 区地下水主要接受淡水补给<sup>[26-27]</sup>。

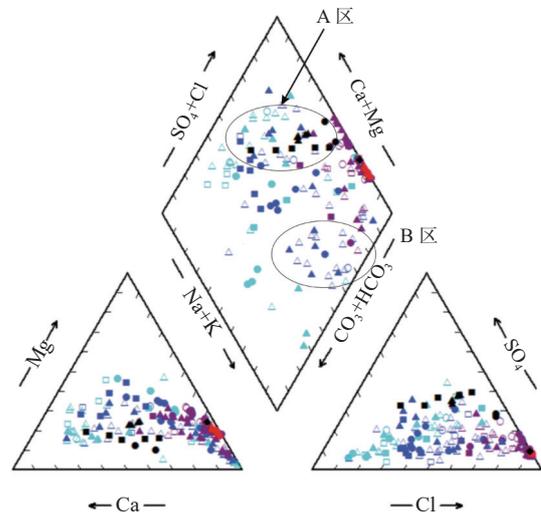


图 2 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram

### 3.2 地下水补给来源

地下水中的氢氧同位素值与补给水源、不同端元之间的混合与形成过程中经历的蒸发作用等有关, 因此常用来判断地下水中水分的来源<sup>[10]</sup>。区内地下水氢氧同位素关系如图 3 所示, 图中黑色实线为全球大气水线(GWML), 黑色虚线为当地大气水

线(LWML),绿色虚线为淡-卤混合线,红色实线为蒸发线<sup>[28]</sup>,区内地下水 $\delta^2\text{H}$ 值在 $-74\text{‰}\sim-16.6\text{‰}$ , $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $-9.7\text{‰}\sim-1.9\text{‰}$ ,浅层地下水分布在当地大气水线附近,河水主要分布在当地大气水线之下并沿当地大气水线分布,而深层地下水沿蒸发线与淡-卤混合线分布。

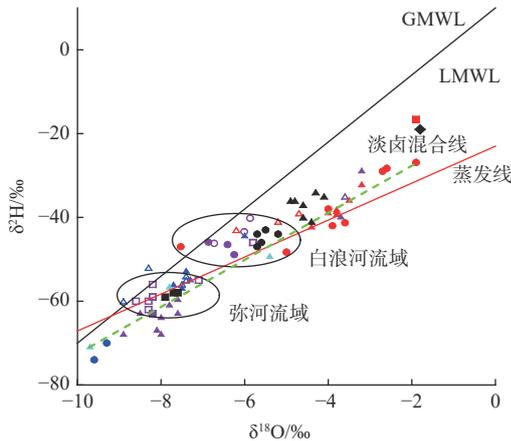


图3  $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig.3 Relationship between  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$

潍河与白浪河河水氢氧同位素值较弥河河水明显富集,指示潍河与白浪河河水均受上游水库大面积蒸发效应影响<sup>[28-29]</sup>;弥河流域、白浪河流域浅层地下水均位于河水附近,说明水分补给来源主要是河水;潍河流域浅层地下水多沿当地大气水线分布,说明潍河流域更多地接受大气降水补给。深层地下水主要分布于淡-卤混合线周围,部分向蒸发线偏移,说明深层地下水形成过程中主要受混合作用控制,且受蒸发作用显著,随矿化度增高(淡水至卤水),氢氧同位素值更加富集;海水较深层地下卤水的氢氧同位素值更为富集,指示深层地下卤水中水的来源并非完全是古海水经蒸发作用<sup>[30-31]</sup>;结合晚更新世以来的沉积背景,认为深层地下水是地质历史时期古大气补给或沉积海水,在漫长的形成过程中经历混合作用与蒸发作用的结果。

### 3.3 盐分来源

图4为主要离子与 $\text{Cl}^-$ 关系图,其中海水蒸发线绘制依据黄郁华等<sup>[32]</sup>的研究成果。 $\text{Cl}-\text{Na}$ 关系(图4a、b)与 $\text{Cl}-\text{Mg}$ 关系(图4c、d)中, $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 相对于 $\text{Cl}^-$ 呈线性增长,微咸水、咸水大多位于海水稀释线附近,随地下水中 $\text{Cl}^-$ 浓度逐渐增大,样品点与海水稀释线相关关系更好,表明地下水中盐分来源可能是溶滤作用或者海水。卤水主要离子浓度大于海水,且分布在海水蒸发线附近,表明其盐分可

能来自浓缩咸水(海水蒸发后形成)。

在 $\text{Cl}-\text{SO}_4$ 关系(图4e、f)与 $\text{Cl}-\text{Ca}$ 关系(图4g、h)中,淡水、微咸水、咸水大致分布在海水稀释线上方,卤水分布在海水稀释线下方,即在淡水、微咸水、咸水中, $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 相对于 $\text{Cl}^-$ 富集。淡水、微咸水主要分布在河水附近,随着 $\text{Cl}^-$ 浓度增大逐渐靠近海水稀释线。结合稳定同位素关系(文中3.2部分),进一步分析得出地表水为淡水与微咸水的主要补给来源,在补给地下水的过程中,溶滤了沉积物中矿物或蒸发盐,如石膏、方解石等,使淡水、微咸水水样明显偏离海水稀释线(图4e-h)。而随着地下水变咸,咸水与卤水中的主要离子占据优势,溶滤作用变得不明显。值得注意的是,卤水的 $\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 均位于海水蒸发线上,而 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 均位于海水蒸发线下,且 $\text{Ca}^{2+}$ 偏离程度更大,表明研究区内卤水形成过程中经历海水蒸发作用且浓缩过程中可能出现含Ca矿物沉淀过程。

$\text{Br}/\text{Cl}$ 常被用于说明地下水中盐分的来源,在大气降水或海水蒸发过程中, $\text{Br}/\text{Cl}$ 比值保持恒定,直到达到饱和<sup>[33]</sup>。图5为地下水样品中 $\text{Br}-\text{Cl}$ 相关关系图,其中海水蒸发线绘制依据黄郁华等<sup>[32]</sup>的研究成果,可以看出,相较于弥河流域和白浪河流域,潍河流域咸水和卤水中的 $\text{Br}/\text{Cl}$ 值更接近与海水比值线,在这种前提下,表明潍河流域卤水形成过程中以蒸发作用为主,而非盐溶作用,指示该区域盐分的主要来源为海水。而在弥河、白浪河流域的地下水 $\text{Br}/\text{Cl}$ 值呈现出在海水稀释线或海水蒸发线附近波动,表明地下水盐分可能为蒸发盐的溶解。

通过对研究区内盐分来源的分析可以得出,研究区内淡水与微咸水主要接受地表水补给,补给过程中经历了溶滤作用,而卤水的盐源更接近于海水或与海水成分类似的地下水,形成过程中主要经历蒸发作用,后发生矿物沉淀。由于淡、卤水降落漏斗的形成,使得降落漏斗边缘地下水向中心汇聚,发生咸水入侵淡水含水层,地下水运移过程中发生蒸发盐溶解等作用。

## 4 地下水水化学演化

### 4.1 水岩作用

离子比相关关系图可以用来解释地下水形成过程中的水岩作用。图6为主要离子比相关关系图,其中海水比值线中海水数据来源于实际采集的莱州湾海水(非河口海水)样品。 $\text{Ca}/\text{SO}_4-\text{Cl}$ 关系

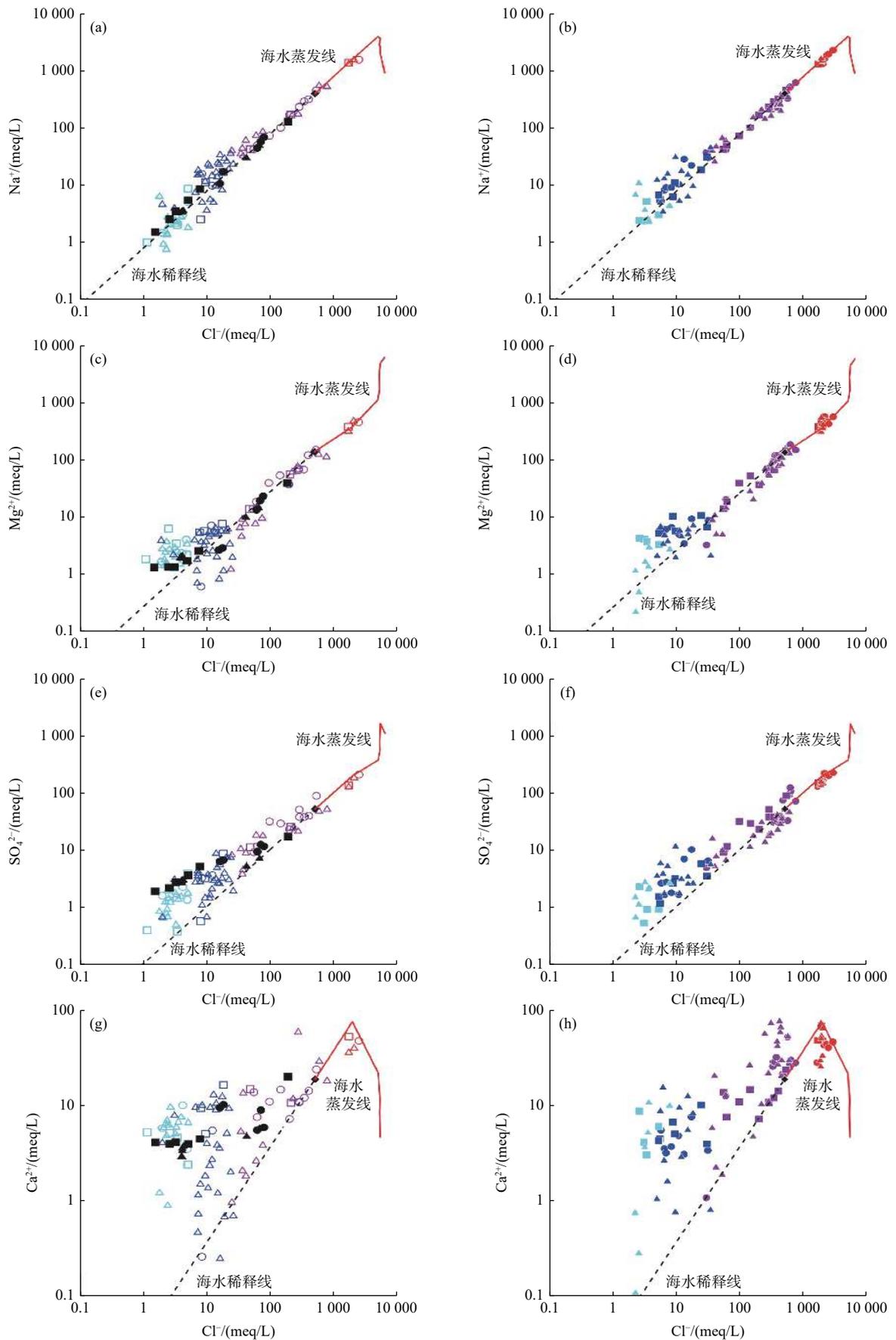


图 4 地下水主要离子相关关系

Fig.4 Correlation among main ions in groundwater

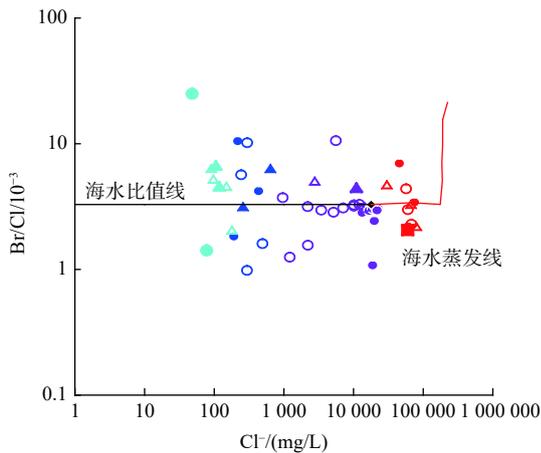


图 5 地下水 Br-Cl 关系图

Fig.5 Br-Cl diagram of the groundwater

(图 6a、b)中, 地下淡水、微咸水具有较高的 Ca/SO<sub>4</sub> 值, 其中弥河流域浅层地下水 Ca/SO<sub>4</sub> 值范围为 0~16, 结合地下水稳定同位素组成(图 3)与主要离子相关关系(图 4), 指示弥河流域浅层地下水、微咸水在接受大气降水补给过程中, 受溶滤作用影响明显。深层地下水 Ca/SO<sub>4</sub> 值范围为 0~8, 与浅层地下水的 0~16 相比存在较大差异, 且深层地下水

受大气降水与地表水影响较弱, 这指示地下水中, 除河水入渗补给外, 咸水入侵淡水含水层时造成的阳离子交替吸附作用也不可忽视。

Mg/Ca-Cl 关系(图 6c、d)中, 淡水与微咸水的 Mg/Ca 值较为稳定, 随着 TDS 逐渐增大, 文石开始沉淀, 水中 Ca<sup>2+</sup>减少, Mg/Ca 值变大。值得注意的是, 卤水中的 Mg/Ca 值存在明显的界限, 据前人研究成果, 文石完全沉淀时, TDS 约为 103 g/L, 石膏开始沉淀时 TDS 为 148.4 g/L<sup>[32]</sup>, 其中 Mg/Ca 值位于 7.16~8.70 区间内的卤水矿化度均介于 100~120 g/L, 该区间内的卤水石膏尚未开始沉淀, 仅有文石沉淀。Mg/Ca 值位于 10.51~13.62 g/L 区间内的卤水矿化度多 > 140 g/L, 可以认为是石膏开始沉淀, 因此, 石膏是否开始沉淀可能是造成卤水 Mg/Ca 比值存在明显区分的原因。

为进一步探究地下水演变过程中的离子交换作用, 绘制(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)与(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)关系图, 若存在离子交换作用, 则(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>)与(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)会呈现出负相关性, 沿 y = -x 线分布<sup>[34]</sup>。

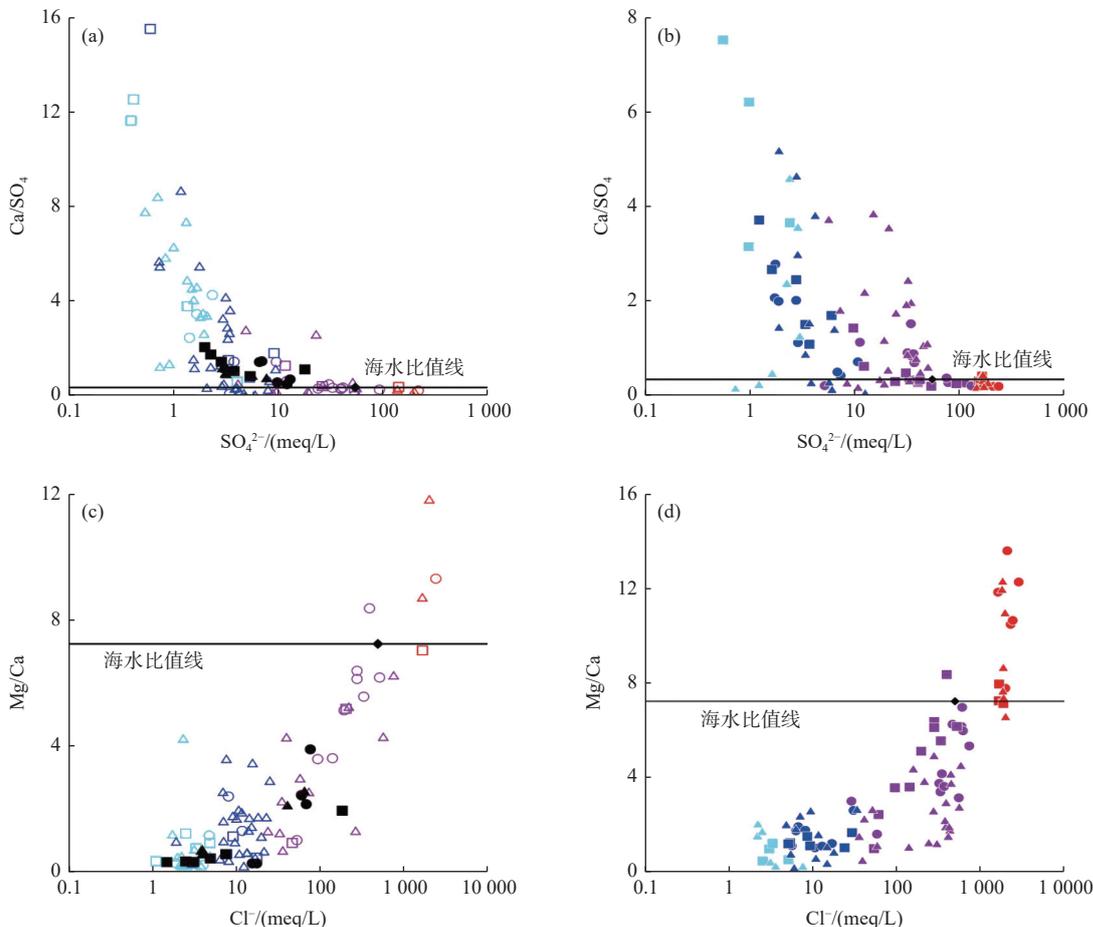


图 6 地下水主要离子比

Fig.6 Main ion ratios of the groundwater

如图 7、8 所示, 深层地下水与浅层地下水均沿  $y=-x$  线分布, 说明其演化过程中存在离子交换作用, 卤水漏斗区的咸水与卤水位于第 4 象限, 发生了水中的  $\text{Ca}^{2+}$  置换出沉积物颗粒中吸附的  $\text{Na}^+$  的过程, 是较淡水体在补给卤水漏斗区的过程中, 发生了  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  的离子交换作用。淡水漏斗区的微咸水与咸水位于第 2 象限, 发生的是水中的  $\text{Na}^+$  置换沉积物颗粒中  $\text{Ca}^{2+}$  的过程, 淡水漏斗区的部分补给来源为北部较咸水体, 较咸水体进入淡水漏斗区的过程中发生了  $\text{Na}^+$  与  $\text{Ca}^{2+}$  的离子交换作用。除此之外, 深层地下水中咸水与卤水更多的位于  $y=-x$  线的下方, 表明  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Na}^+$  并非等量交换,  $\text{Ca}^{2+}$  相对于  $\text{Na}^+$  而言偏少, 说明除离子交换作用外, 也存在含  $\text{Ca}$  矿物沉淀的过程使得卤水中的  $\text{Ca}^{2+}$  减少, 这一点与 3.3 部分中分析结果一致。

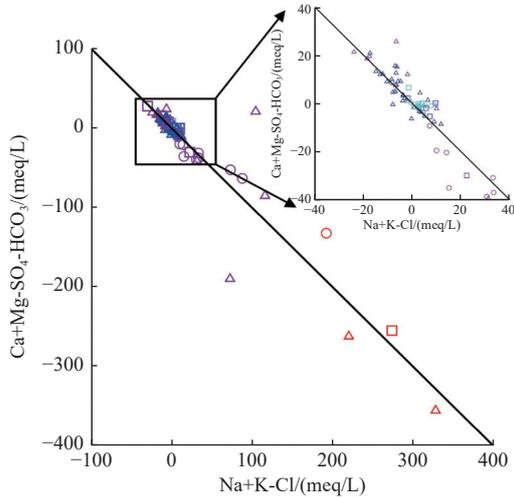
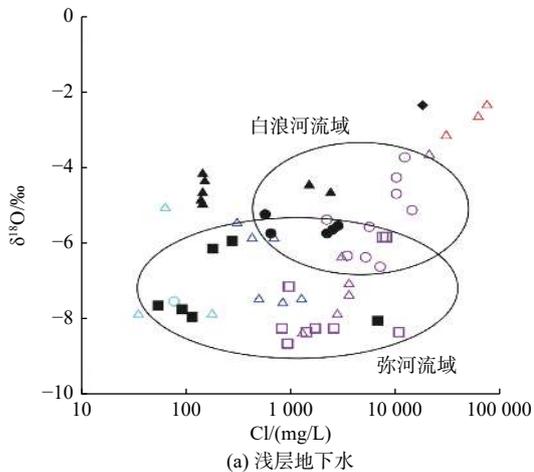


图 7 浅层地下水 ( $\text{Na}^+\text{K}^+\text{Cl}^-$ ) 与 ( $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-$ ) 关系

Fig.7 Relationship of ( $\text{Na}^+\text{K}^+\text{Cl}^-$ ) and ( $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-$ ) of the shallow groundwater



(a) 浅层地下水

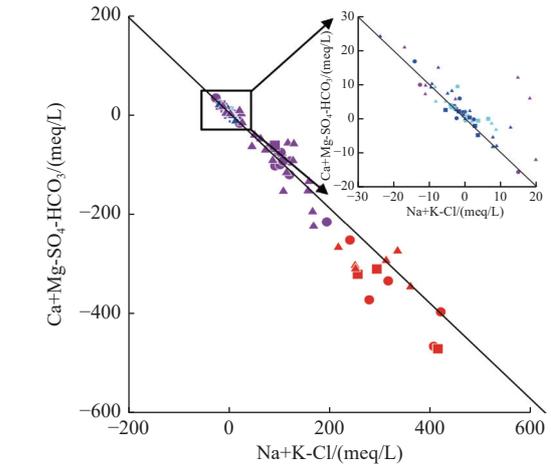


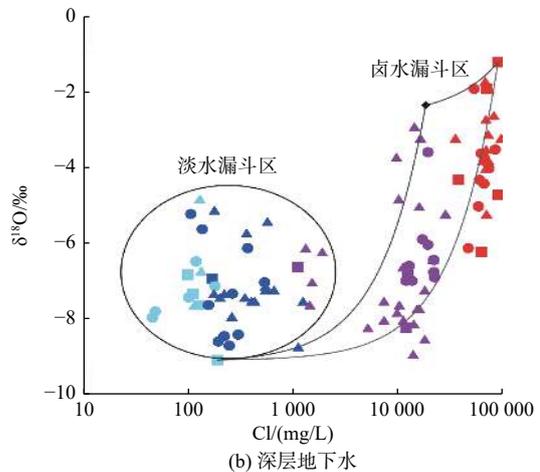
图 8 深层地下水 ( $\text{Na}^+\text{K}^+\text{Cl}^-$ ) 与 ( $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-$ ) 关系

Fig.8 Relationship of ( $\text{Na}^+\text{K}^+\text{Cl}^-$ ) and ( $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{SO}_4^{2-}\text{HCO}_3^-$ ) of the deep groundwater

通过对水岩作用分析可以得出, 地下淡水、微咸水形成接受大气降水补给, 经历溶滤作用, 在降落漏斗边缘地下水向中心汇聚过程中, 发生阳离子交替吸附作用; 地下卤水形成过程中则明显经历矿物沉淀作用。

#### 4.2 混合过程

从地下水  $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}^-$  关系(图 9)可以看出, 浅层地下水中, 弥河流域与白浪河流域  $\delta^{18}\text{O}$  值随  $\text{Cl}^-$  浓度变化的变化幅度较小, 较为集中, 分布在河水附近, 可能主要受后期河水的溶滤补给, 研究区内白浪河与弥河淡水降落漏斗深度较潍河淡水降落漏斗更浅, 因此相对于潍河而言, 白浪河与弥河的浅层地下水与地表水关系更为密切, 这与 3.2 部分中地下水补给来源分析结果是一致的; 潍河流域浅层地下



(b) 深层地下水

图 9 研究区地下水  $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}^-$  关系

Fig.9 Relationship of  $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}^-$  of the groundwater in the study area

水  $\delta^{18}\text{O}$  值随  $\text{Cl}^-$  浓度变化的变化区间较大,且在咸水、卤水范围内, $\delta^{18}\text{O}$  与  $\text{Cl}^-$  呈现出一定的正相关关系,推测淮河流域浅层卤水含水层内可能还赋存有埋藏古海水,或浅层卤水层形成过程中受到海水影响。

深层地下水识别卤水混合区与淡水混合区,其中淡水混合区主要包括部分低矿化度咸水、微咸水与淡水, $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围与河水变化范围相似,为  $-9\text{‰} \sim -4\text{‰}$ ,指示深层淡水区地下水在运移过程中仍接受河水与大气降水补给,该区咸水与微咸水多发生 Na-Ca 阳离子交换作用,指示正在经历咸水入侵过程;北部卤水区主要包括卤水与咸水,以淡水、卤水、海水为三端元做混合线后,发现大部分咸水、卤水点位落在三端元混合区内,表明深层卤水在运移时,地下水主要发生的是淡水、卤水、海水之间的三端元混合过程。结合地下水降落漏斗来看,卤水降落漏斗中只有白浪河流域卤水降落漏斗深度达到 44.64 m,超过了本次研究划分深浅层地下水的标准,相较于淮河流域与弥河流域而言,白浪河流域深层地下卤水更大程度地受到了卤水降落漏斗的影响落在混合区外,表明卤水从漏斗边缘向漏斗中心运移过程中,除了受到三端元混合过程控制,也存在其他因素,结合 3.2 与 3.3 部分的内容,可能是蒸发作用的影响,使得白浪河卤水在赋存、运移过程中发生了  $\delta^{18}\text{O}$  的偏移。

## 5 结论

研究区浅层地下水与外界联系密切,受大气降水、河水与地下水开采的共同影响,地表水持续过量开采形成降落漏斗,通过改变地下水流向导致不同类型地下水在运移过程中发生混合,混合过程中存在明显阳离子交替吸附作用,但不同流域内浅层地下水演化过程又各自存在差异性。

研究区深层地下水形成过程与降落漏斗关系较弱,受混合作用控制,蒸发作用显著,但并非完全是简单的海水蒸发。淡水与微咸水仍与地表水有较密切联系,卤水咸水区则主要呈现出淡水、卤水、海水的三端元混合,仅白浪河流域受到降落漏斗影响有偏移。

整体来看,研究区地下水水分来源与盐分来源并不完全一致,二者不可分割,相互影响。浅层地下水主要接受河水与大气降水补给,发生溶滤作用,局部受人类活动影响流场发生改变,发生阳离子交替吸附作用,深层地下水则经历古海水滞留、古气候降水、混合作用等多种作用共同结果;地下水盐分并不完全来源于古海水蒸发浓缩,在形成过程中

同时经历岩盐溶解、矿物沉淀等多种作用。整体看来,浅层地下水受地表水影响强烈,主要经历溶滤作用、蒸发作用;深层地下水主要是一个三端元混合过程,并且在形成过程中经历过强烈蒸发浓缩作用,从而有矿物沉淀产生。

### 参考文献:

- [1] GUO F, GAO M, HOU G, et al. Source tracing of rare earth elements: a case study of core 07 on the southern coast of Laizhou Bay [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 136: 29-38.
- [2] 郭飞. 莱州湾晚更新世以来的沉积演化及物源分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [3] LIU S, GAO M, TANG Z, et al. Responses of submarine groundwater to silty-sand coast reclamation: A case study in south of Laizhou Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 181: 51-60.
- [4] 李道高, 赵明华. 莱州湾南岸平原浅埋古河道带研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 23-29.
- [5] 师长兴. 现代黄河三角洲沉积演化与形成机理研究[J]. *地理研究*, 1989, 8(1): 99-100.
- [6] 薛春汀, 丁东. 渤海莱州湾南岸潍河-弥河三角洲: 沉积序列和沉积格架[J]. *地理科学*, 2008, 28(5): 672-676.
- [7] 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.
- [8] 刘恩峰. 莱州湾南岸滨海平原沉积环境变化与咸水入侵关系研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2002.
- [9] 许博超, 于志刚, 刘东生, 等. 莱州湾南岸地下卤水高浓度溶解铀及其成因研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(11): 81-85.
- [10] HAN D, KOHFAHL C, SONG X, et al. Geochemical and isotopic evidence for palaeo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou Bay, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(5): 863-883.
- [11] 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]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [12] LIU S, TANG Z, GAO M, et al. Evolutionary process of saline-water intrusion in Holocene and Late Pleistocene groundwater in southern Laizhou Bay [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 586-599.
- [13] 苗晋杰. 莱州湾南岸海(咸)水入侵动态监测及演化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [14] 蒙永辉, 王集宁, 张丽霞, 等. 1979—2012年莱州湾南岸海水入侵与区域海岸线变动时空耦合分析[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(3): 189-195.
- [15] 李雪. 莱州湾南岸海(咸)水入侵数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [16] 高茂生, 骆永明. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1197-1203.
- [17] 胡云壮. 莱州湾典型剖面海(咸)水入侵过程中水文地球化学作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [18] 庄振业, 许卫东, 李学伦. 渤海南岸6000年来的岸线演变[J].

- 青岛海洋大学学报, 1991, 35(2): 99-110.
- [19] 毕延凤, 于洪军, 徐兴永, 等. 莱州湾南岸平原地下水化学特征研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(3): 241-247.
- [20] 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 晚更新世以来莱州湾南岸地下水卤水资源分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(5): 11-18.
- [21] 黄永波, 侯建华, 朱学强, 等. 莱州湾南岸XZK2钻孔晚更新世以来的沉积环境探讨[J]. *山东国土资源*, 2016, 32(7): 7-11.
- [22] 李琰. 28 ka以来莱州湾南岸的沉积学记录及环境意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [23] DU Y, MA T, CHEN L, et al. Genesis of salinized groundwater in Quaternary aquifer system of coastal plain, Laizhou Bay, China: Geochemical evidences, especially from bromine stable isotope[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 59: 155-165.
- [24] ZHANG X, MIAO J, HU X, et al. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in intruded coastal brine aquifers (Laizhou Bay, China) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(26): 21073-21090.
- [25] HAN D, SONG X, CURRELL M J, et al. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 12-27.
- [26] 杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等. 莱州湾南岸卤水的稳定同位素与地球化学特征[J]. *地质论评*, 2016, 62(2): 343-352.
- [27] 胡云壮, 李红, 李影, 等. 山东莱州湾南岸典型剖面海(咸)水入侵过程的水文地球化学识别[J]. *地质调查与研究*, 2015, 38(1): 41-50.
- [28] 杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等. 莱州湾白浪河河水和河口海水的水化学和氢氧稳定同位素特征[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(5): 48-55.
- [29] CLARK I D, FRITZ P. *Environmental isotopes in hydrogeology* [J]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1997: 328.
- [30] 杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等. 莱州湾沿岸寿光、莱州和龙口地下水的稳定同位素与地球化学[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 801-817.
- [31] 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.
- [32] 陈郁华. 黄海水25℃恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. *地质学报*, 1983, 57(4): 379-390.
- [33] BOTTOMLEY D J, GREGOIRE D C, RAVEN K G. Saline ground waters and brines in the Canadian Shield: geochemical and isotopic evidence for a residual evaporite brine component [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(5): 1483-1498.
- [34] 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化学识别[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(2): 32-39.

## Hydrochemical evolution of groundwater in muddy coastal zone of the northern Shandong Peninsula

FENG Chenxin<sup>1,2,3</sup>, QIU Longwei<sup>1</sup>, GAO Maosheng<sup>2\*</sup>, HOU Guohua<sup>2</sup>, DANG Xianzhang<sup>2</sup>, SUN Qiming<sup>2</sup>

(1 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 3 School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The northern Shandong Peninsula is one of the typical areas of seawater (saline water) intrusion in China, with complex sedimentary environment and various types of groundwater quality. Influenced by multiple transgressions and regressions, the aquifer system is complicated by the fact that the stratum in study area is composed of cyclic interbedding of unconfined river delta sand bodies and shelf muddy deposits in a high-amplitude sea level change setting. In recent decades, excessive exploitation of groundwater by human activities has resulted in fresh depression cone and brine depression cone, which have changed the hydrodynamic conditions of local groundwater and influenced the formation and evolution of groundwater. Based on the sedimentary background and distribution characteristics of aquifers in the study area, we divided the groundwater into three basins and two layers, on which analysis and discussion were conducted in marine geology, environmental isotopes, and hydrochemistry. Results show that there are obvious regional differences in the evolution of shallow groundwater, Mihe River and Bailang River are mainly recharged by precipitation, and the depression cone is dominated by Cl-Ca water, reflecting groundwater salinization. Weihe River is mainly recharged by runoff, and the depression cone is dominated by HCO<sub>3</sub>-Cl-Na water, indicating groundwater desalination. Therefore, the formation of saline and brine in deep groundwater of the study area is mainly controlled by mixing among fresh water, seawater, and brine.

**Key words:** brine; three-endmember mixing; groundwater evolution; hydrochemistry; Shandong Peninsula; muddy coastal zone