潍北平原卤水入侵层位识别及垂向分布时空特征

郭抒燕[1], 王晓玮[2,3*], 张庆晓[4], 吴光伟[2,3], 杨培杰[2,3], 陈建辉[5]

（1. 天津市龙网科技发展有限公司, 天津 300161；
2. 山东省国土空间生态修复中心, 山东 济南 250014；
3. 自然资源部 黄河三角洲土地利用安全野外科学观测研究站, 山东 滨州 251900；
4. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450000；
5. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222）

摘　要：通过在年内枯、丰水期对咸水入侵锋线处的地下水进行分层监测和取样，利用水化学和稳定同位素测试结果，分析惰性示踪剂和反应示踪剂的空间和时间变化特征。结果表明：从卤水入侵的空间分布特征上，浅表层地下水与卤水入侵的相关性较差，卤水入侵主要发生在浅层和中层地下水含水层中、深层地下水入侵程度相对较弱；不同地区入侵层位存在差异，弥河冲洪积扇入侵层位为浅表层及浅层，白浪河冲洪积扇入侵不明显，潍河冲洪积扇入侵层位为中深层。在平面上呈现南部偏淡、中部为卤水分布区、北部为海水的分布形态。淡水样品呈现中深层咸水入侵为主导的现象。咸水入侵呈现顺层楔形入侵，局部发生一定程度的越流入侵，即下部地下咸水入侵上部地下淡水。从卤水入侵的时间分布特征上，枯水期时咸水入侵在垂向上呈现楔形态势，丰水期时 20～50 m 的主要入侵层位的淡水向滨海推进，浅部和深部的入侵仍然在持续进行，深层水咸水入侵程度更高。本研究加深了对潍北平原咸水入侵的认识。为了进一步探明咸水入侵的周期性规律，进行水文地球化学长期分层监测十分具有必要性。

关键词：潍北平原；卤水入侵垂向特征；顺层楔形入侵；时间分布特征；周期性规律
中图分类号：P736.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-3682(2024)01-0024-14
doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20230510001
引用格式：郭抒燕, 王晓玮, 张庆晓, 等, 2024. 潍北平原卤水入侵层位识别及垂向分布时空特征[J]. 海岸工程, 43(1): 24-37. GUO S Y, WANG X W, ZHANG Q X, et al, 2024. Recognition and vertical spatiotemporal distribution of brine intrusion in the Weibei Plain[J]. Coastal Engineering, 43(1): 24-37.

咸水入侵是我国北方平原区一种常见的地下水环境问题，通常指在第四纪形成的地下含水层中赋存的咸(卤)水，由于水动力条件的改变，推动淡咸水界面向淡水一侧推进。这一过程在平面或垂向上均能发生，在海岸带地下水咸(卤)水分布区，入侵常以面状、带状、脉状和越流入侵等方式频繁发育。

潍北平原位于山东半岛北部、莱州湾南岸，是我国北方典型的泥质海岸带，第四纪以来在滨海地区沉积形成了大范围的卤水。在自然条件和人类活动的共同影响下，受工农业生产影响，该处产生了较为严重的卤水入侵，引发了一系列地下水环境问题，包括地下淡水可利用量减少、土壤盐渍化、工业减产以及由于人畜饮用劣质水而导致疾病增加等，严重阻碍了社会经济的可持续发展。

收稿日期：2023-05-10
资助项目：山东省地下水资源动态监测评价项目(山东省级财政项目)
作者简介：郭抒燕(1990—)，女，工程师，硕士，主要从事地下水资源调查监测评价方面研究. E-mail: cugbgsy@163.com
*** 通信作者：**王晓玮(1982—)，男，正高级工程师，博士，主要从事地下水资源调查监测评价方面研究. E-mail: wangxiaowei@shandong.cn

（陈　靖　编辑）

已有学者采用数值模型方法、物探、水文地球化学方法分析了海岸带咸水入侵现象，其中，水文地球化学方法作为近年来发展迅速的学科，在研究具有水平分带性的海岸带地下水样品特征、确定咸水入侵的分布范围以及识别入侵过程中发挥了重要作用(韦政, 2010; 孙宗勋等, 2011; 杨吉龙等, 2012; 胡云壮等, 2015; 刘宏伟等, 2015; 杨巧凤等, 2016; 刘森, 2018; 熊贵耀, 2020; 王建, 2020)。除了水平分带性，海岸带地下水还具有垂直分层的特征，特别是在入侵锋线部位，不同层位的地下水受沉积环境、季节因素和水动力条件的影响，其入侵程度存在较大的差异(Dakin et al, 1983; 尹泽生, 1992; Barbecot et al, 2000; Edmunds et al, 2005; Schiavo et al, 2009; 杨巧凤等, 2010; 苗晋杰, 2014)。现有研究多基于单期数据进行分析，较少分析海岸带卤水入侵锋线处垂向剖面的水文地球化学特征的时空演化，缺少多期典型数据的对比，难以精细刻画咸水入侵在不同层位上的发育水平，以及年内的动态特征(韩非, 2011; 胡云壮, 2014; 杨帆, 2023)。

本研究基于地下水分层监测数据，联合运用水文地球化学方法中的离子比例系数分析法和同位素方法(张宝祥等, 2019)对潍北平原典型地段枯水期和丰水期的咸水入侵锋线处的地下水水文地球化学特征进行分层对比分析。通过研究卤水入侵混合端溶剂和溶质在不同深度、不同季节的变化特征，分析混合地下水的空间分布规律与丰枯变化特征，识别主要的入侵层位。本文研究结果可为有针对性地开展卤水入侵程度评价和防治工作提供更精细的数据支撑，对区域的规划建设和可持续发展具有重要参考意义。

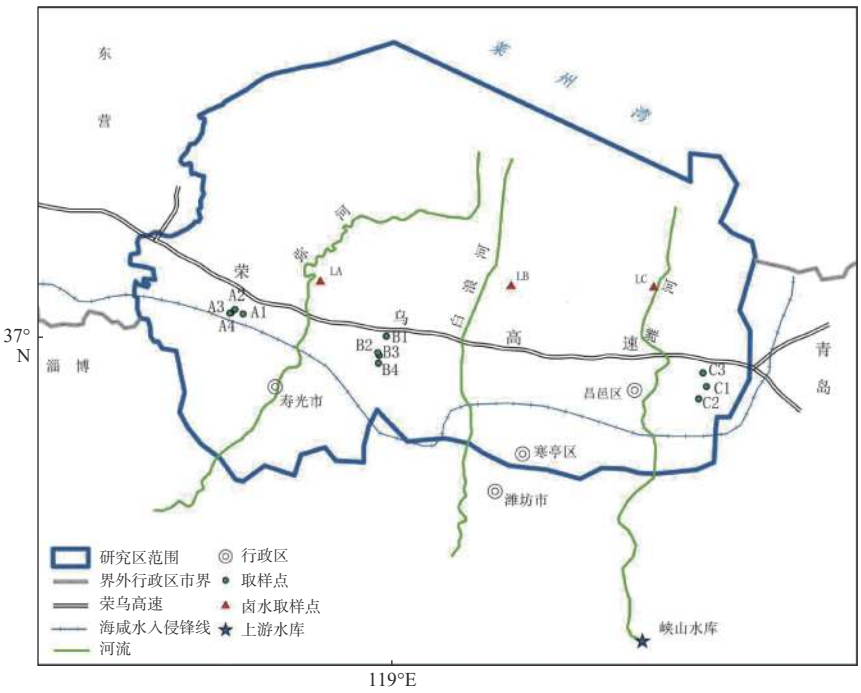
1　材料与方法

1.1　研究区概况

潍北平原西起寿光市，东至昌邑市，总体地势南高北低，弥河、白浪河、潍河等河流流经并入海(图 1)。北部滨海地区卤水分布总面积约 1 500 km^2，依托卤水资源开采形成了规模庞大的原盐、纯碱和溴化物产业。中南部形成了具有品牌效应的特色农业机械制造、纺织印染、食品加工等工业产业，经济建设及各项社会事业全面高速发展，水资源需求量巨大。

潍北平原地下水类型为松散岩类孔隙水，含水层以粉砂为主，单井涌水量为 500～1 000 m^3/d。地下水水质在垂向上表现为“上咸-下淡”的两层结构：上层微咸，咸水矿化度为 2～50 g/L，水化学类型主要为 Cl-HCO_3 型和 Cl-Na 型，北部卤水区矿化度大于 50 g/L；下层为淡水，矿化度一般小于 2 g/L，水化学类型主要为 Cl-Ca 型和 HCO_3-Ca 型。

潍北平原南部地下淡水位呈区域性下降趋势，水位标高负值区面积整体上呈逐年扩大趋势，自 2011 年以来，寿光、寒亭和昌邑三个漏斗区连成一片，2017 年枯水期，水位标高负值区面积达 1 694 km^2，比 2010 年同期增加了 354 km^2，平均每年增加 50 km^2。区内地下淡水资源量分布不均，开采量差异显著。寿光市地下水资源比较丰富，主要开采层位为 16～24 m 和 150 m 以下，地下淡水天然资源量为 26 191.30 万 m^3/a，开采资源量为 13 415.85 万 m^3/a；寒亭区主要有潍寒水源地和朱里水源地，开采层位一般为 10～50 m，地下淡水天然资源量为 10 793 万 m^3/a，开采资源量为 11 417.69 万 m^3/a；昌邑市北部地下水开采层位一般位于 9～30 m，地下淡水天然资源量为 13 175.60 万 m^3/a，开采资源量为 6 305.48 万 m^3/a。受地下淡水开采格局影响，目前卤水入侵锋线基本沿荣乌高速展布。



注：该图基于山东省标准地图服务网站下载的标准地图（审图号为鲁 SG（2021）026 号）制作，底图无修改。

图 1 研究区概况与取样点分布

Fig. 1 Outline of the study area and locations of the sampling

1.2 样品采集

在研究区内布设 3 组卤水入侵锋线地下水采样点（图 1）：A 组位于西部弥河冲积层，设置 A1～A3 三个采样点，采样深度分别为 8、18 和 55 m；B 组位于中部白浪河冲积层，设置 B1～B4 四个采样点，采样深度分别为 10、23、55 和 100 m；C 组位于东部潍河冲洪积层，设置 C1～C3 三个采样点，采样深度分别为 8、30 和 61 m。

于 2020 年枯水期和丰水期分别采取一次水样，在中国地质科学院水文地质环境地质研究所检测了水化学常规离子、卤族元素 δD 值和稳定同位素 δ^{18}O 值。按照采样深度及含水岩组赋存条件，将样品分为浅表层地下水（10 m 以浅）、浅层（30 m 以浅）、中层（30～70 m）和深层（70 m 以深）四类。另外，在 3 组采样点北部对应选取了 3 处卤水取样点（LA、LB 和 LC），以对照分析样品和卤水样品（图 1），用于分析地下水中溶解盐受到卤水中溶解盐影响的程度。在潍河上游峡山水库采取上游水库样品，作为地表淡水对照样品进行分析。

1.3 研究方法

沿海岸带附近的地下水受到更靠海一侧高盐分卤水的强烈影响，水文地球化学特征表现为卤水和淡水的混合特征，为准确刻画地下水在空间上和时间上的变化情况，以卤水和地表淡水作为端元，研究不同水文地球化学指标在端元之间的变化，分析卤水入侵情况（尹泽生, 1992; 杨巧凤等, 2010）。另外，咸水和地下淡水的混合包括溶剂和溶质的混合（Dakin et al, 1983; Barbecot et al, 2000; Edmunds et al, 2005; Schiavo et al, 2009），其中惰性示踪剂（稳定同位素 δD 和 δ^{18}O）可以表征卤水水分子和淡水水分子的混合，反应示踪剂（以 Cl 为代表）常用于表征卤水溶解盐分和淡水溶解盐分的混合，研究卤水与地下淡水混合过程中不同示踪剂的变化特征，对卤水的入侵时空变化特征进行量化分析。

2　结果与分析

2.1　惰性示踪剂指示结果

2.1.1　δD-δ^{18}O 关系

根据 IAEA 网站(https://www.iaea-online.org/)发布的全球降水同位素网 GNIP 数据可知，烟台站(121°24′00″E, 37°31′48″N)距离研究区最近，该站高程 47 m，但仅有 1986—1991 年的监测数据。由这些数据中的月降水 δD 和 δ^{18}O 值拟合出的当地大气水线(图 2 中的虚线)方程为：

$$\delta D = 6.29\delta^{18}O - 3.63。$$

本次采集的地下水样品点多数偏离当地降水和标准海水的连线，位于连线下方(图 2)，可认为是蒸发和咸水混合影响。受到敞开水面的影响(苗青等, 2013)，上游水库样品位于当地大气降水线的下方。

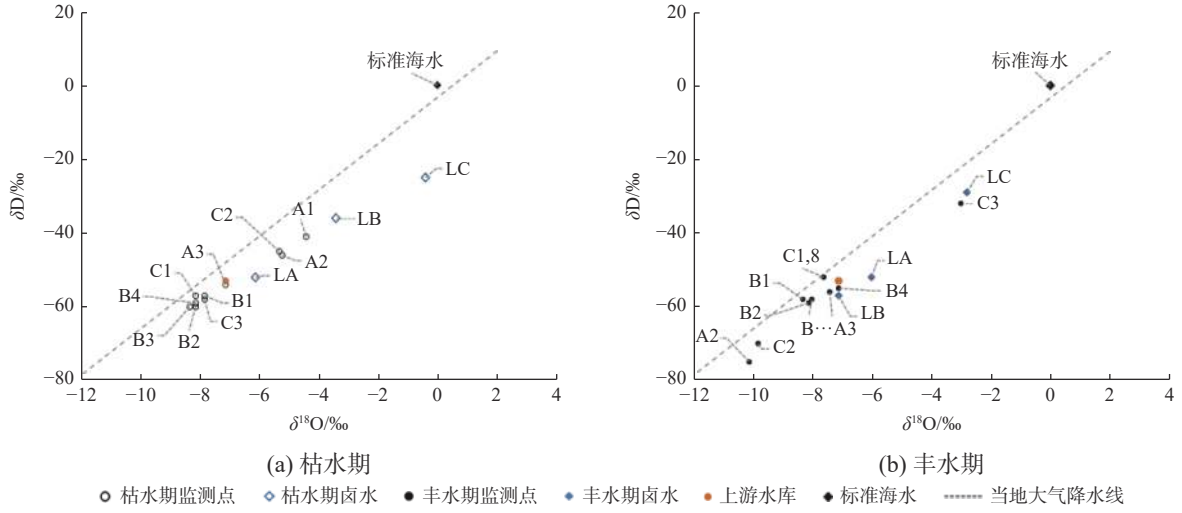


图 2　δD-δ^{18}O 关系

Fig. 2　Relationship between δD and δ^{18}O

不同深度样品之间的差异主要受水文地质条件和卤水入侵条件的影响。浅表层地下水主要是大气降水在地表 10 m 范围内形成的上层滞水。由图 2 可知，对于 B1 和 C1 浅表层地下水样品：B1 枯水期位于卤水点与地表水的连线上，丰水期接近当地大气降水线；C1 枯水期已经从卤水点与地表水的连线偏向当地大气降水线，丰水期则基本偏移到了当地大气降水线上。2 个样品的分布表明浅表层地下水与卤水入侵的相关性较差。

浅层和中层地下水样品都位于卤水点与地表水的连线上(图 2)，表明平原区潜水-微承压水主要接受南部山区地下水和北部卤水的混合，但是不同深度的混合比例有一定的差异。浅层地下水在枯水期和丰水期主要补给来源转换明显，在枯水期南部淡水补给较少的情况下，主要接受北部卤水补给，丰水期则以南部淡水补给为主。反映在图形上，即样品点位从枯水期由卤水端附近移动到丰水期的淡水端，其中 A 组和 C 组样品移动距离较远，说明转换十分明显，而 B 组样品移动较短且偏向当地大气降水线幅度更大，与当地的含水层条件有关，分析原因为白浪河冲洪积扇规模相对较大，砂层厚度大且连续性较好，南侧淡水补给在枯水期也较为充分。中层地下水基本都在卤水端与地表水的连线上，A3 更靠近卤水端，与枯水期相比，基本未发生变化，虽然该地区中层

含水层本身接受上游来水补给，但未发生明显移动，说明仍受到一定规模的卤水入侵；B3 样品枯水期远离卤水端，丰水期点位也基本无变化，说明该含水层受卤水入侵的影响较小。而 LB 样品，从枯水期位于 LA 和 LC 中间位置，移动到丰水期 LA 左侧，说明 B 组卤水样品在丰水期受到较大规模淡水的补给。C3 样品的变化特征则明显受到当地水文地质条件的影响，该区域基底隆起较高，南侧无大规模山前冲洪积扇发育，含水层总体规模较小。C3 含水层以下即全部为咸水，补给能力明显较弱，一旦枯水期大规模开采，北部卤水即大规模入侵，同时南侧淡水补给和入侵的卤水混合明显，反映在图形上即为 LC 在丰水期更靠近当地大气降水线，C3 在枯水期更靠近 LC。

参考卤水向海水端的移动分析唯一的深层地下水样品 B4 的变化情况，与枯水期相比，B4 在丰水期向卤水端小幅移动，可以认为深层地下水补给相对缓慢，枯水期的大规模开采造成的咸水入侵在丰水期开始显现，来自上游的补给被北部的卤水补给抵消。对比基本同深度的 LB 在枯水期向卤水端移动较大，说明虽然在北部深层卤水受到海水入侵影响较大，但也很难影响到南部深层地下水。

通过分析 δD-δ^{18}O 关系可知，枯水期淡水呈现垂向上楔形被入侵的形态，即浅表层无入侵，浅部、中部入侵程度显著，深部入侵程度较低。随着丰水期上游淡水补给量的增加，入侵形态被扭转，枯水期入侵程度最强的 20～50 m 含水层（在潍河冲洪积扇为 50～70 m 含水层），入侵程度呈现反楔形形态，淡水大规模补给卤水，而具有重要供水意义的深部含水层，即使在丰水期也存在着入侵程度加剧的情况。

2.1.2 Cl-δ^{18}O 关系

根据样品的 Cl-δ^{18}O 关系（图 3）将样品分为两部分进行讨论。第一部分样品的 δ^{18}O 值为−9.0‰～−7.0‰，代表了当地大气水入渗的区间值（当地降水入渗多年平均值为−7.7‰），A 组的 A3、C 组的 C1 和 B 组全部样品符合这种情况。δ^{18}O 值和 Cl^-浓度之间缺乏相关关系，符合大气水源中盐分的溶解、蒸发规律，地下水和卤水混合关系不明显。第二部分样品的 δ^{18}O 值大概分布在降水线区间外，且丰水期和枯水期数据位于降水线两侧或距离较远，可以认为 Cl-δ^{18}O 关系具有一定的相关性。对于 A2、C2 样品，丰水期与枯水期相比，Cl-δ^{18}O 关系成正比减少，地下水中 δ^{18}O 存在明显的贫化过程，卤水入侵程度减弱。对于 A4、C3 样品，Cl-δ^{18}O 关系成正比增加，地下水存在明显的咸化过程，卤水入侵程度加剧。

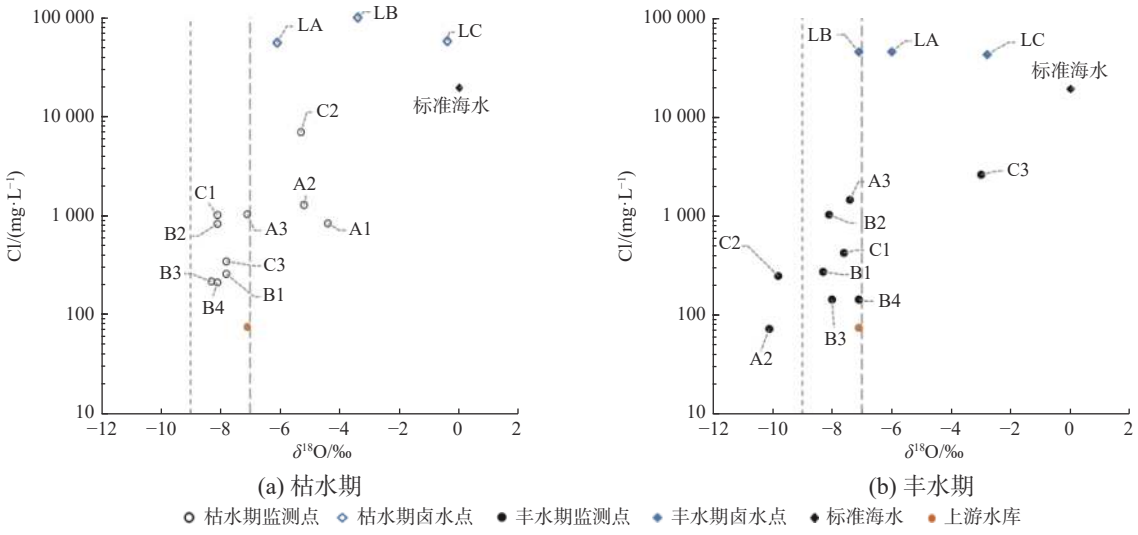


图 3 Cl 浓度-δ^{18}O 关系

Fig. 3 Relationship between Cl and δ^{18}O

2.1.3　Br/Cl-Cl 关系

通过分析 Cl-δ^{18}O 浓度关系可知，锋线附近样品都存在蒸发盐的溶解，Br/Cl 比值会受到盐分蒸发的影响。在沿海地带因为降水的 Br/Cl 比值和海水比值相似，所以海水比值同样也是地下水 Br/Cl 比值变化的起始值。随着 Cl^-浓度的增加，蒸发盐影响也增大。同时还会受到人工污染物的输入影响。根据图 4 所示的 Br/Cl-Cl 关系可知，除 A1 丰水期、B1 枯水期的 Br/Cl 比值高于海水线外，其余数据均在海水线以下，无明显的 Br/Cl 比值异常情况。A1 点 Br/Cl 比值为 0.020 6，较海水线高出一个数量级，Cl 浓度为 829.8 mg/L，可能是受当地养殖业的人为污染物输入的影响。

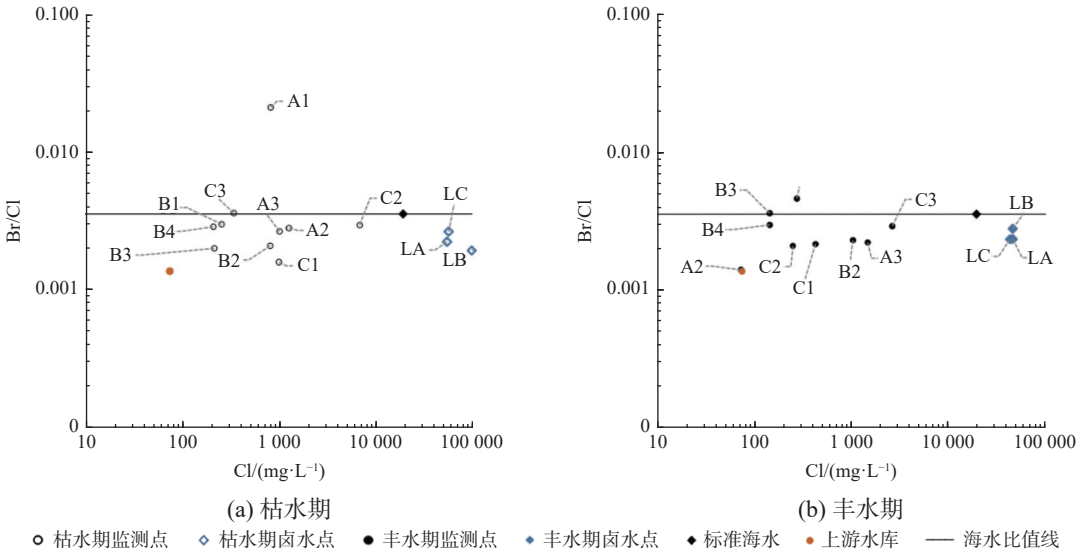


图 4　Br/Cl-Cl 浓度关系

Fig. 4　Relationship between Br/Cl and Cl

在枯水期样品中，A 组样品中除 A1 外，A2 和 A3 属于同一区域，Cl 和 Br/Cl 比值均高于深层的 A4，更靠近卤水端，表明受到的入侵程度更高。B 组样品 B1、B3 和 B4 属于同一区域，虽然 Br/Cl 比值有差别，但 Cl 浓度相对较低，B2 中 Cl 浓度相对更高，接近 1 000 mg/L。C 组样品类似于 B 组样品，C2 更靠近海水端。这说明枯水期入侵的主要层位是 20～50 m 深度的 2 层和 3 层。

对比枯水期和丰水期的变化，A2 和 C2 存在 Cl 和 Br/Cl 同向减小的情况，但 A4、C3 样品的 Cl 和 Br/Cl 关系呈同向增加，虽然滨海地区海相沉积物中海洋有机质不断释出 Br，使得地下水中的 Br/Cl 比值升高，但不足以使 Br/Cl 在年内数据翻倍，表征为卤水入侵。

对于 B 组数据，B2 丰水期 Br/Cl 变化不大，其他 B 组样品均存在 Cl 浓度不变甚至减小情况下 Br/Cl 增加的情况。其变化虽然不如 A 组和 C 组强烈，但仍说明 Br/Cl 的增加是在蒸发盐的溶解和海水入侵共同作用下产生的。

2.1.4　I-Cl 关系

地下水中的 I 主要来源于有机质分解，枯水期卤水样品的 I 和 Cl 浓度比值集中在检出限附近（图 5），丰水期卤水样品中 I 浓度则远高于检出限，并呈现沿海水比值线分布的形态，表明在丰水期深层卤水受到海水强烈输入。

从 I-Cl 的关系图中可以看出，有相当比例样品位于检出限以下。在 I 检出样品中，仅 C3 样品在枯水期、丰水期均检出，其他样品检出主要集中在浅层、深层地下水中，中层地下样品水均未检出。说明 I 溶度分布在垂向上呈现浅层和深层有机质分解程度高、中层有机质分解程度低的楔形形态。

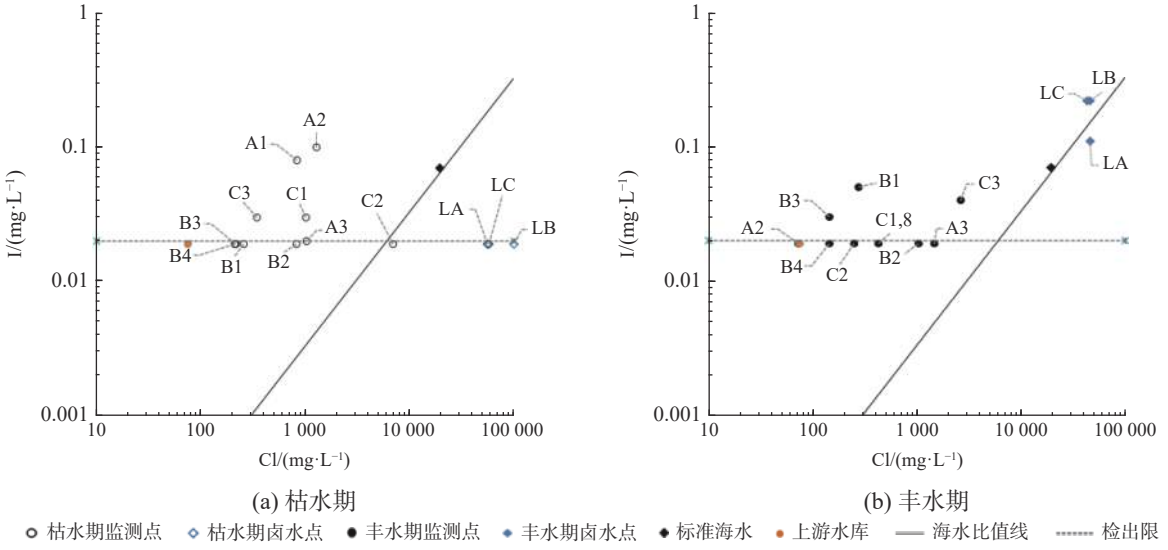


图 5 I-Cl 浓度关系

Fig. 5 Relationship between I and Cl

2.2 反应示踪剂指示结果

2.2.1 主要离子与 Cl 浓度关系

1)Na、Ka 与 H_2SiO_3-Cl 浓度关系

在 Na-Cl 关系图(图 6)上，样品 Na 和 Cl 整体上成正比关系。A3、B2 样品基本贴近海水比值线。除 A3 样品丰水期、B2 和 C2 样品枯水期在海水比值线下方外，其余样品均位于海水比值线上方。

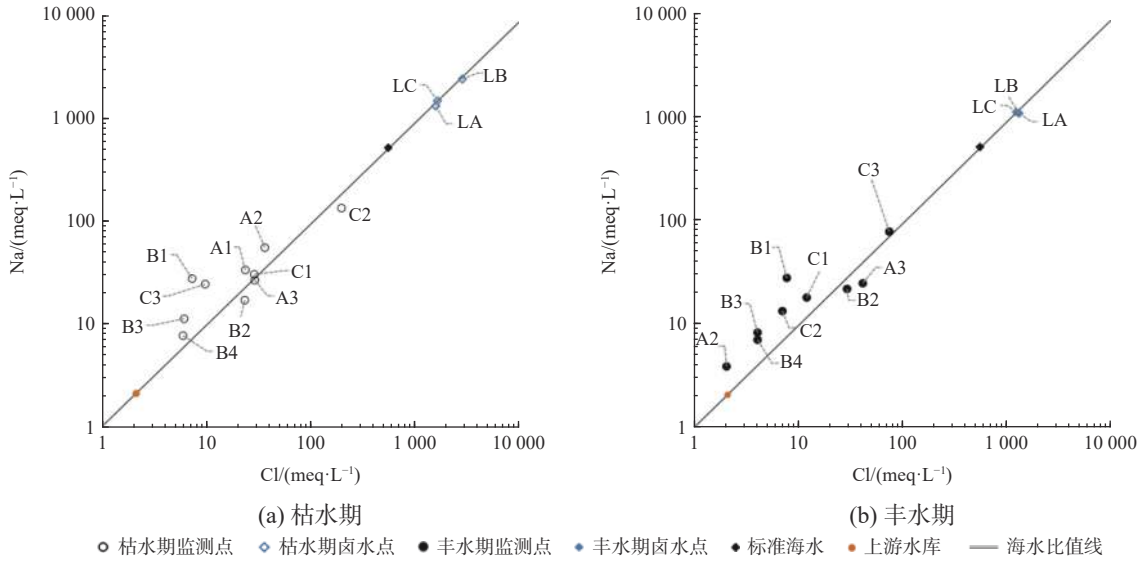


图 6 Na-Cl 浓度关系

Fig. 6 Relationship between Na and Cl

与淡水相比，海水中 Na、Mg、Ka、SO_4 都占主导，但这些元素与 Cl 的比值，与沿海地区的降水和河水相似。在 Ka-Cl 关系图(图 7)上，样品枯水期、丰水期数据均沿着海水比值线方向分布，卤水样品则均分布于海水比值线下方且接近标准海水。

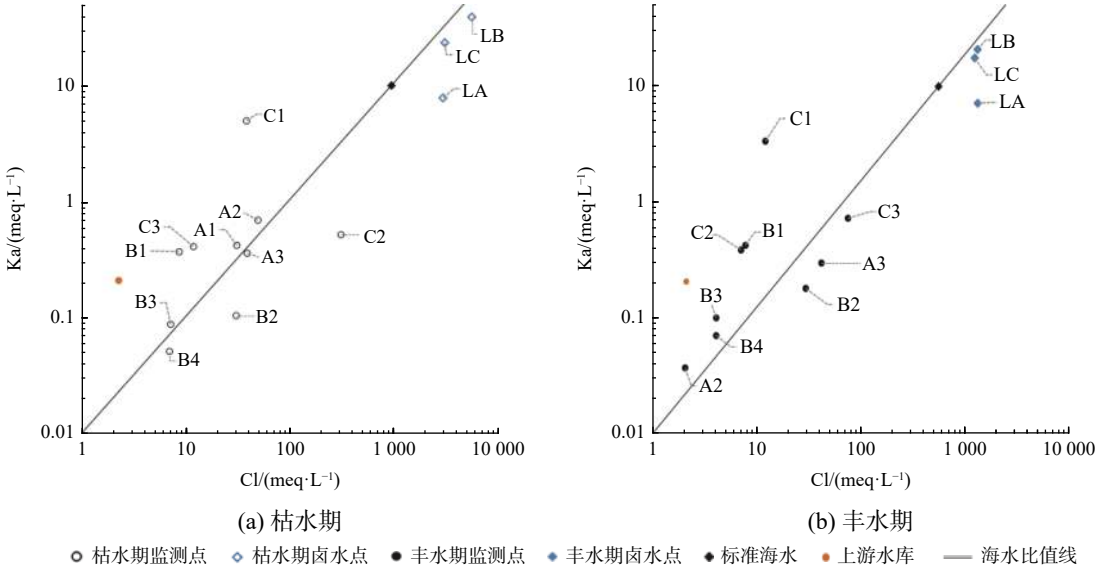


图 7　Ka-Cl 浓度关系

Fig. 7　Relationship between Ka and Cl

从 H_2SiO_3-Cl 的图(图 8)上可以看出，卤水样品在海水比值线附近且靠近标准海水，仅有枯水期 LB 稍有偏离。淡水样品中 H_2SiO_3 的浓度趋向于固定的区间，和 Cl 的增长无关，反映出土壤带 CO_2 的输入也是受限制的。与枯水期相比，丰水期数据中 H_2SiO_3 的浓度无明显变化。

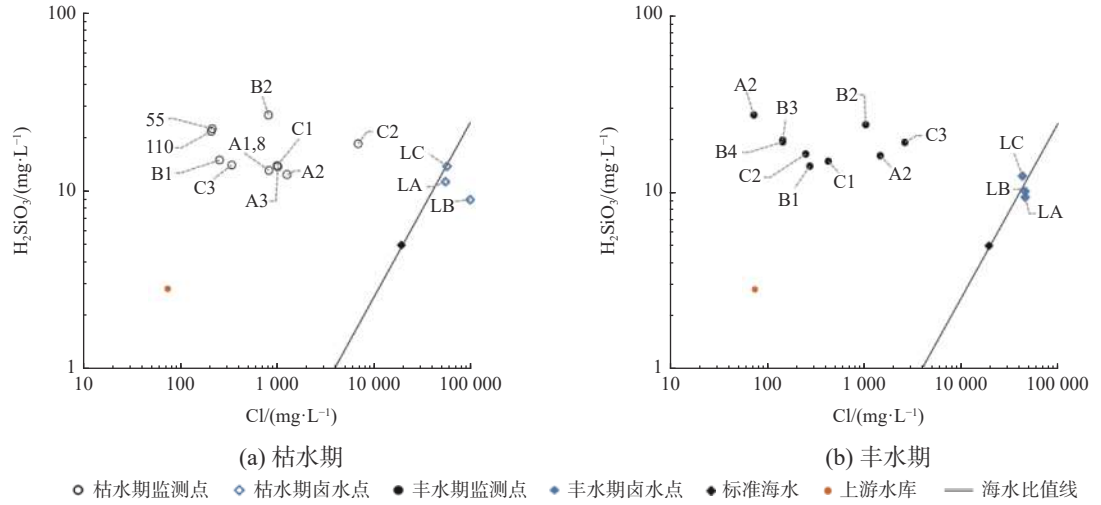


图 8　H_2SiO_3-Cl 浓度关系

Fig. 8　Relationship between H_2SiO_3 and Cl

2)(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)-Cl 浓度关系

卤水和淡水的阳离子比值存在差异，淡水具有较高的 Ca/Na 比值，而卤水具有较高的 Na/Ca 比值。当区内卤水进入到原先由淡水占据的含水层，或当地下淡水进入原先由卤水占据的含水层时，均会发生离子交换。前者会引起 Na 的减少，后者会引起 Na 的增长。通常用 Na/Cl 来表征这个过程，对于咸度大的地下水还可以用(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)/Cl 来表征(Tellam et al, 1986)。由图 9 可知，研究区内卤水样品(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度值均在海水比值线上方；除 C2 枯水期外，淡水样品(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度值均在海水比值线的下方。

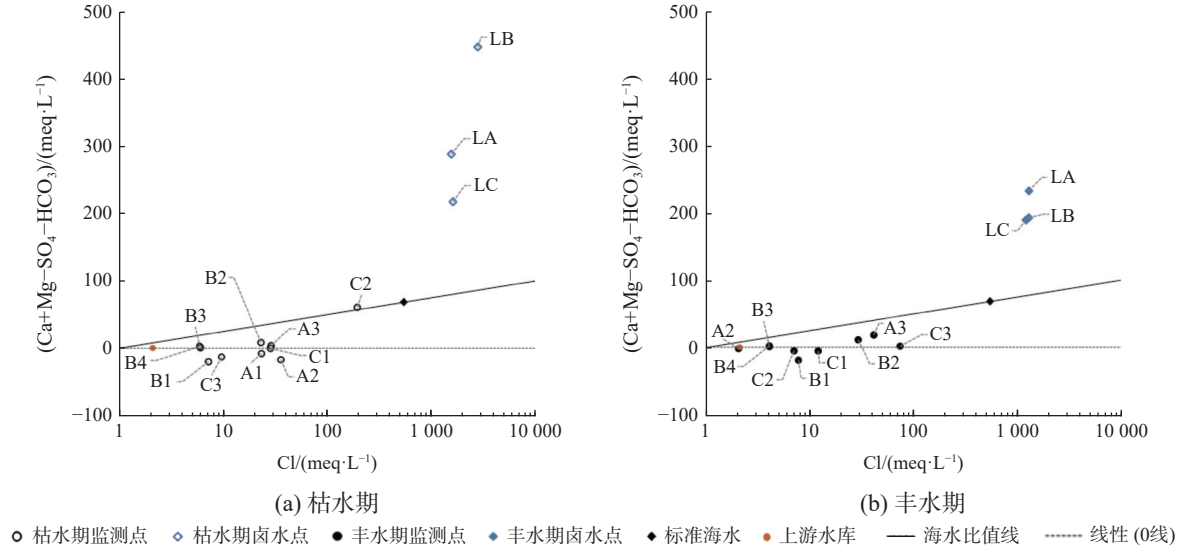


图 9 (Ca+Mg-SO_4-HCO_3)-Cl 浓度关系

Fig. 9 Relationship between (Ca+Mg-SO_4-HCO_3) and Cl

A 组样品中除 A3(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度>0 外，其余样品浓度值均在 0 线下方，为负值，表明地下淡水正在冲洗咸水。从丰枯数据变化来看，A2、A3 样品表现为丰水期(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度更高，表明丰水期地下淡水冲洗更充分；A4 表现为枯水期浓度更高，表明深层水在丰水期卤水入侵程度更高。

B 组样品中除 B1(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度在 0 线下方外，其余样品均表现为浓度大于 0，表明海水正在咸化地下淡水。从丰枯数据变化来看，B 组样品丰枯期(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度数据无明显差异，说明地下淡水与地下咸水的相互作用在丰枯变化不明显，相对稳定。

C 组样品中除 C2 枯水期、C1 丰水期(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度大于 0 外，其余样品浓度值均在 0 线下方，表明地下淡水正在冲洗咸水。从丰枯数据变化来看，C1 样品枯水期(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)浓度略高于丰水期，C2 样品枯水期浓度远高于丰水期，C3 样品则表现为枯水期浓度低于丰水期。这表明在丰水期和枯水期，地下淡水和地下咸水之间的转化关系是不稳定的。

3)NO_3-Cl 关系

样品中 NO_3 主要来源于污染，从 NO_3-Cl 的关系图(图 10)中可以看出，除 B1 丰水期、C2 外，其余样品 NO_3 浓度均高于 6 mg/L，说明地下水受附近居民生活或工农业活动的影响比较显著。A 组样品除 A2 丰水期、A4 枯水期外，样品中 NO_3 浓度出现明显的聚集趋势。B 组和 C1 样品 NO_3 浓度普遍高于 100 mg/L，说明存在严重的地面污染。C 组样品分布较为分散，且在垂向上呈现浅、深层污染程度高，中层污染程度低的楔形形态。污染物在地下水中不断被稀释，又在卤水入侵过程中不断加剧。

对比枯水期和丰水期结果，A1、A2、B1、C1 和 C2 浅层地下水 NO_3 浓度枯水期浓度高于丰水期；A4 和 B4 深层地下水 NO_3 浓度丰水期浓度高于枯水期；A3、B2、B3 和 C3 中层地下水 NO_3 浓度基本稳定。这说明在浅层地下水中枯水期受污染源影响显著，在深层地下水中丰水期受污染源影响显著，在中层地下水中则污染源的影响和淡水对污染的稀释达到了一种平衡。

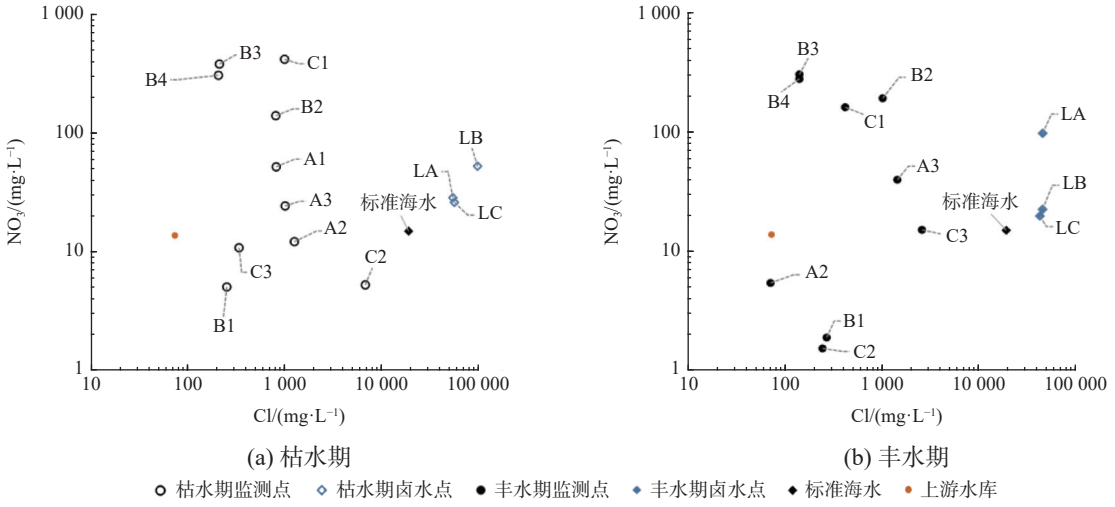


图 10　NO_3-Cl 浓度关系

Fig. 10　Relationship between NO_3 and Cl

2.2.2　微量元素

F 在地下水中主要源自水-岩石相互作用，雨水的输入浓度约为 0.1 mg/L，其余来源主要包括矿物氟石和硅酸盐矿物磷灰石，亦可从主要硅酸盐岩石(黑云母和普通角闪石)的风化中释出。从 F-Cl 关系图(图 11)可知，所有样品均分布在海水比值线的上方：A 组样品的 F 浓度为 0.41～4.24 mg/L，B 组样品的 F 浓度为 0.89～3.28 mg/L，C 组样品的 F 浓度为 1.34～2.72 mg/L。结合 Ca-F 图(图 12)，可发现样品数据均呈现出地下水 F^-浓度和 Ca 浓度近似反比的关系。这证明了氟石的溶解度对水中 F 浓度有控制作用，而 Ca 浓度的增高可以影响氟石的溶解。

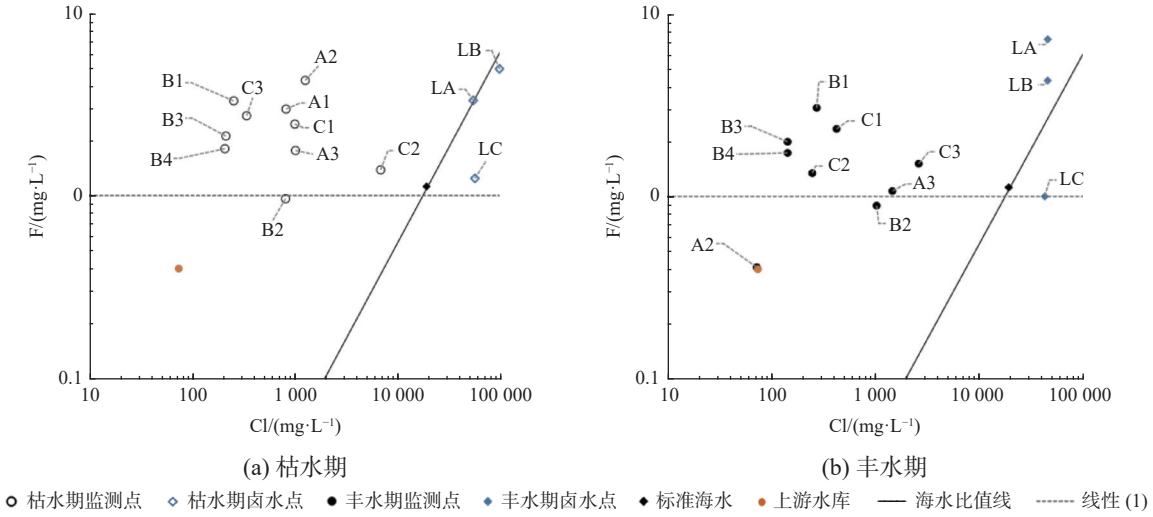


图 11　F-Cl 浓度关系

Fig. 11　Relationship between F and Cl

对比枯水期与丰水期数据，B 组、C 组 F 浓度没有明显变化。A 组中 A2 枯水期 F 浓度明显高于丰水期，A4 则呈现出丰水期 F 浓度高于枯水期的趋势。说明在浅层和深层地下水中，卤水入侵程度的不同导致了 F 浓度的差异，而在中层地下水中 F 浓度和氟石的溶解度接近，达到互相牵制的平衡状态。

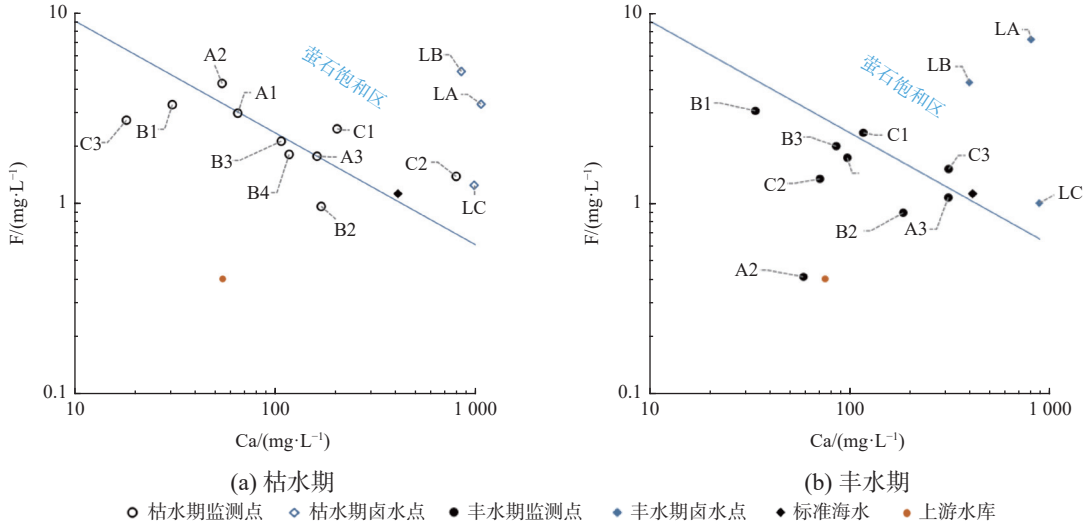


图 12 Ca-F 浓度关系

Fig. 12 Relationship between Ca and F

2.3 总溶解固体（TDS）与 Cl

根据 TDS、Cl 浓度与取样深度绘制 TDS-埋深、Cl 浓度-埋深关系曲线，如图 13 所示。对比同一时期不同深度的差异，枯水期垂向上 TDS 和 Cl 浓度在不同地段均呈现楔形形态，即在中层入侵程度最高，入侵速度最快，浅层和深层次之；在丰水期，A、B 组 TDS 和 Cl 浓度均呈现楔形态形，A 组的入侵形态更为典型，但 B 组中深层入侵程度差异较小，说明 B 组中深层之间存在较好的水力联系，C 组样品 TDS 和 Cl 浓度呈现反楔形。主要是由于地下水补给在丰水期极为强烈，淡水对入侵卤水进行了大量的稀释与冲刷。

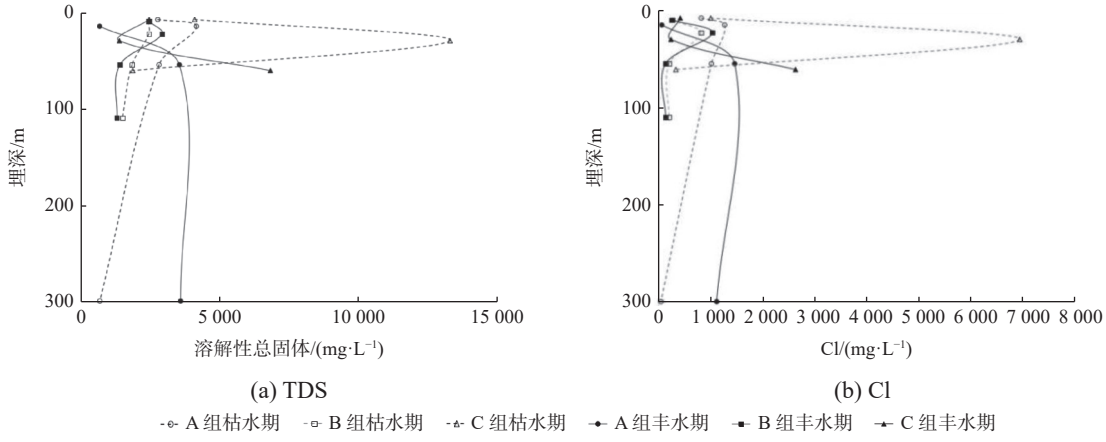


图 13 总溶解固体（TDS）和 Cl 浓度与取样深度关系

Fig. 13 Relationship between TDS, Cl and sampling depth

对丰水期情况做进一步分析，A 组样品中浅层水丰水期 TDS 和 Cl 浓度更低，深层水更高，表明在丰水期卤水入侵程度在中深层更为强烈，浅层则得到了大量的淡水补给。B 组中浅层水样品 TDS 和 Cl 浓度保持稳定，中层水样品丰水期浓度略高，深层水在丰水期略低，表明淡水补给与卤水入侵在浅层达到相对平衡状态，中层丰水期入侵程度略强，深层略弱。C 组样品中，浅层水样品

在丰水期 TDS 和 Cl 浓度低，深层水样品高，中层水数据表现为丰水期极低枯水期极高的特征，表明在丰水期发生了强烈的淡水冲刷，入侵程度较枯水期明显减弱。整体上，样品浓度分布呈现时空变化对比强烈的特征。

3　结　论

潍北平原南部地下水由于过量开采，导致北部卤水入侵淡水含水层，形成了明显的卤水入侵锋线。本研究在潍北平原卤水入侵锋线附近弥河冲积层、白浪河冲积层和潍河冲积层，分别采取浅表层（10 m 以浅）、浅层（30 m 以浅）、中层（30～70 m）和深层（70 m 以深）枯丰两期地下水样品，并在南部补给区采取 1 组水库地表水样品，共 24 组样品进行水质全分析和 δD、δ^{18}O 稳定同位素分析。基于水文地球化学方法，利用样品不同组分之间的指示关系，选择 δD-δ^{18}O、Cl-δ^{18}O、Br/Cl-Cl、I-Cl 等表征咸水水分子和淡水水分子的混合程度的指标，以及 Na-Cl、Ka-Cl、H_2SiO_3-Cl、Ca+Mg-SO_4-HCO_3-Cl、NO_3-Cl、TDS-Cl 等表征咸水溶解盐分和淡水溶解盐分混合程度的指标，研究区内卤水与不同深度地下水的混合特征，分析不同时段卤水入侵程度的差异。得出主要结论如下。

1）从平面分布特征看，弥河冲洪积扇卤水入侵层位发生在浅表层及浅层，白浪河冲洪积扇入侵层位不明显，潍河冲洪积扇入侵层位主要发生在中深层。

2）从垂向分布特征看，卤水入侵呈现楔形态势，即浅表层地下水和深层地下水与卤水入侵的相关性较差，浅层和中层地下水含水层入侵程度较强；卤水入侵的发育程度与水文地质结构密切相关，在垂向水力联系紧密地区楔形发育较浅，反之则楔形发育显著。

3）从时间特征看，枯水期卤水入侵在垂向上呈现更为明显的楔形状态，丰水期主要入侵层位的淡水向滨海推进，浅部和深部的入侵仍然在持续进行，深层水咸水入侵程度较枯水期更高。

卤水入侵给潍北平原带来了一系列地下水生态环境问题，合理判定卤水入侵程度对当地制定合理的防控治理措施及评价治理效果具有重要的意义。本研究表明，水文地球化学指标对卤水入侵程度具有较好的指示意义，应进一步研究基于水文地球化学特征指标的入侵程度定量评价指标体系及方法，并开展有关指标长期监测以探明咸水入侵的周期性规律，为生态文明建设提供连续可靠的数据支撑。

参考文献 (References)：

韩非, 吴吉春, 张永祥, 2011. 咸/卤水入侵越流含水层的数值模拟——以山东省莱州湾南岸为例[J]. 南京大学学报(自然科学), 47(3): 281-290. HAN F, WU J C, ZHANG Y X, 2011. Numerical simulation for the salt/brine water intrusion in a leaky aquifer: a case study of the southern beach of Laizhou Bay, Eastern China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 47(3): 281-290.

胡云壮, 2014. 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). HU Y Z, 2014. Hydrogeochemical reactions in sea water intrusion process at Changyi-Liutuan in Laizhou Bay[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

胡云壮, 李红, 李彤, 等, 2015. 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, 38(1): 41-50. HU Y Z, LI H, LI T, et al, 2015. Hydrogeochemical Recognization of Seawater Intrusion Process at the Typical Profile in Laizhou Bay[J]. Geological Survey and Research, 38(1): 41-50.

刘宏伟, 马震, 陈社明, 等, 2015. 基于水化学与地球物理法的莱州湾南岸海(咸)水入侵勘察[J]. 现代地质, 29(2): 337-343. LIU H W, MA Z, CHEN S M, et al, 2015. Saltwater intrusion measurement in Laizhou Bay southern area based on hydro-chemical and geophysical methods[J]. Geoscience, 29(2): 337-343.

刘森, 2018. 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). LIU S, 2018. The evolu-

tion of ground-saline water and process mechanism of saline water intrusion in southern Laizhou Bay[D]. Wuhan: China University of Geosciences.

苗晋杰, 2014. 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). MIAO J J, 2014. Dynamic monitoring and evolution study of saline intrusion at south coast of Laizhou Bay[D]. Beijing: China University of Geosciences.

苗青, 陈广泉, 刘文全, 等, 2013. 莱州湾地区海水入侵灾害演化过程及成因[J]. 海岸工程, 32(2): 69-78. MIAO Q, CHEN G Q, LIU W Q, et al, 2013. Disaster evolution and genesis of seawater intrusion in the Laizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 32(2): 69-78.

孙宗勋, 陈军, 谢强, 等, 2011. 珠江口西岸海水入侵现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 34(8): 81-84. SUN Z X, CHEN J, XIE Q, et al, 2011. Status quo of seawater intrusion western coatal area of Pearl River Estuary: survey and diagnosis[J]. Environment Science & Technology, 34(8): 81-84.

王建, 张军强, 任寒寒, 等, 2020. 莱州湾南部沿海地区环境地质现状及成因研究[J]. 海洋科学进展, 38(2): 336-347. WANG J, ZHANG J Q, REN H H, et al, 2020. Current situation and genesis of environmental geology in the coastal region of southern Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 38(2): 336-347.

韦政, 2010. 莱州湾海水入侵的时空演化特征研究[D]. 青岛: 青岛科技大学. WEI Z, 2010. The temporal evolution of seawater intrusion in the Laizhou Bay[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology.

熊贵耀, 2020. 基于水化学和地球物理方法的莱州湾南岸咸水入侵研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京). XIONG G Y, 2020. Study on seawater intrusion on the south bank of Laizhou Bay based on hydrochenmical and geophysical methods[D]. Beijing: China University of Geosciences.

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

杨吉龙, 韩冬梅, 苏小四, 等, 2012. 环境同位素特征对滨海岩溶地区海水入侵过程的指示意义[J]. 地球科学进展, 27(12): 1344-1352. YANG J L, HAN D M, SU X S, et al, 2012. Environmental tracers (δ^2H-δ^{18}O, δ^2H-δ^{34}S, δ^{13}C) as indicators of seawater intrusion processes in the coastal karst area[J]. Advances in Earth Science, 27(12): 1344-1352.

杨巧凤, 李文鹏, 王瑞久, 2010. 深圳沿海表层海水与地表水关系的地球化学分析[J]. 水文地质工程地质, 37(1): 45-49. YANG Q F, LI W P, WANG R J, 2010. Geochemical analyses of tthe relationship between surface water and surficial seawater along the coast of Shenzhen[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 37(1): 45-49.

杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等, 2016. 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, 43(5): 48-55. YANG Q F, WANG R J, XU S N, et al, 2016. Hydrochemical and stable isotopic characteristics of estuarial seawater and river water of Bailang River in Laizhou Bay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 43(5): 48-55.

尹泽生, 1992. 莱州市滨海区域海水入侵研究[M]. 北京: 海洋出版社: 43-59. YIN Z S, 1992. A study on seawater intrusion in the coastal area of Laizhou City[M]. Beijing: Ocean Press: 43-59.

张宝祥, 张超, 2019. 水文地球化学方法在地下水研究中的应用综述[J]. 人民黄河, 41(10): 135-142. ZHANG B X, ZHANG C, 2019. Progress on hydrogeochemical method applied in groundwater study[J]. Yellow River, 41(10): 135-142.

BARBECOT F, MARLIN C, GIBERT E, et al, 2000. Hydrochemical and isotopic characterization of the Bathonian an Bajocian coastal aquifer of Caen Area (Northern France)[J]. Applied Geochemistry, 15(6): 791-805.

DAKIN R A, FARVOLDEN R N, CHERRY J A, et al, 1983. Origin of dissolved solids in groundwaters of Mayne Island, British Columbia, Canada[J]. Journal of Hydrology, 63(3/4): 233-270.

EDMUNDS W M, SMEDLEY P, 2005. Impacts of the natural environment on public health[C]//SELINUS O. Burlington: Elsevier Academic Press: 812.

SCHIAVO M A, HAUSER S P, POVINEC P, 2009. Stable isotopes of water as a tool to study groundwater-seawater interactions in coastal south-eastern Sicily[J]. Journal of Hydrology, 364(1/2): 40-49.

TELLAM J H, LLOYD J W, WATERS M, 1986. The morphology of a saline groundwater body: its investigation, description and possible explanation[J]. Journal of Hydrology, 83(1/2): 1-21.

Recognition and Vertical Spatiotemporal Distribution of Brine Intrusion in the Weibei Plain

GUO Shuyan[1], WANG Xiaowei[2,3], ZHANG Qingxiao[4], WU Guangwei[2,3], YANG Peijie[2,3], CHEN Jianhui[5]

（1. *Tianjin Lonwin Technology Co.*, *Ltd*, Tianjin 300161, China;
2. *Shandong Provincial Land and Space Ecological Restoration Center*, Jinan 250014, China;
3. *Field Scientific Observation and Research Station of Land Use Safety in the Yellow River Delta*, *Ministry of Natural Resources*, Binzhou 251900, China;
4. *Institute of Natural Resources Monitoning and Comprehensive Land Improvement of Henan Province*, Zhengzhou 450000, China;
5. *Bei Fang Investigation*, *Design & Research Co.*, *Ltd*, Tianjin 300222, China）

Abstract: To learn the distribution of the position of brine intrusion in the study area, the stratified monitoring and sampling of groundwater at the front line of brine intrusion are carried out respectively in dry season and wet season of a year, the water chemistry and stable isotopes of the groundwater are detected and the spatiotemporal variations of inert tracers and reaction tracers are analyzed. The results indicate that the spatial distributions of the brine/saltwater intrusion show that the correlation between the shallow surface groundwater and the brine intrusion is poor, the brine intrusion occurrs mainly in the shallow and middle groundwater aquifers, and the degree of the intrusion is relatively weak in the deep groundwater. The layer position of the brine intrusion varies in different regions. In the Mihe River Alluvial Fan the brine intrusion occurs in the shallow surface and shallow layers, in the Weihe River Alluvial Fan it occurs in the medium deep layer and in the Bailang River Alluvial Fan the position of the intrusion is not obvious. In the horizontal distribution, the layer of brine intrusion is thin in the south, brine occurs in the middle and seawater is distributed in the north. The freshwater samples exhibit a phenomenon dominated by brine intrusion in the mid-to-deep layer. The brine intrudes in a wedge-shaped form along the layer. Locally, there is a certain degree of overflow intrusion. that is, the lower underground saltwater intrudes into the upper underground freshwater. From the perspective of the temporal distributions, the brine intrusion shows a wedge-shaped trend in the vertical direction in dry season, whereas in wet season the freshwater in the major intrusion layer of 20−50 m thick is advanced towards the shore and the shallow and deep intrusions are still ongoing, with the degree of the deep brine intrusion being even higher. This study can further deepen the understanding of brine intrusion in the Weibei Plain and suggests that in order to further explore the periodic law of the hydrogeochemical characteristics of brine intrusion, it is necessary to carry out long-term hydrogeochemical stratification monitoring.

Keywords: Weibei Plain; vertical characteristics of brine intrusion; wedge-shaped intrusion along the bed; temporal distribution characteristics; periodic law

Received: May 10, 2023