

# 胶南隆起区日照段地下水 水化学特征及成因分析

邢洪连<sup>1</sup>, 秦福锋<sup>2</sup>, 郭本力<sup>1\*</sup>, 袁杰<sup>1</sup>, 魏同政<sup>1</sup>, 康日斐<sup>1</sup>, 朱传熙<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>, 李小东<sup>1</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队(山东省第八地质矿产勘查院), 日照市土地质量评价与污染修复重点实验室, 山东 日照 276826; 2. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 为查明胶南隆起区日照段地下水水化学特征及其成因, 对研究区域地下水资源开发利用和生态环境保护提供科学依据。本次研究在综合分析胶南隆起区日照段水文地质条件的基础上, 系统采集了研究区地下水样品 71 件, 综合运用描述性统计、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析、离子比值端元图等方法, 系统分析了地下水水化学组分空间分布、水化学特征及成因。结果表明, 胶南隆起区日照段地下水整体呈弱碱性, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 松散岩类孔隙水中离子含量变化相对稳定, 基岩裂隙水  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量较为稳定, 其他阴阳离子在地下水中的含量变化较大; 地下水化学类型复杂多样, 主要有  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水, 其分布从补给区到排泄区呈明显的分带性。区内松散岩类孔隙水和基岩裂隙水主要受水岩相互作用控制, 离子来源主要受是硅酸盐岩溶解的作用。

**关键词:** 地下水; 水化学特征; 成因分析; 日照段; 胶南隆起区

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2025.08.003

## 0 引言

地下水是人类生存和发展不可或缺的重要自然资源, 是维持社会可持续发展和生态环境系统稳定的基本要素<sup>[1-2]</sup>。地下水的水化学演化是研究地下水环境变化的重要手段<sup>[3-5]</sup>, 地下水水化学成分是地下水循环过程中不断与周围环境(大气、地表水、岩石)长期相互作用的结果<sup>[6-9]</sup>, 而明确其形成机制也是地下水资源和质量评价的重要内容<sup>[10-12]</sup>。因此, 系统研究地下水形成的控制因素, 对区域地下水资源开发利用和生态环境保护与建设具有现实的意义<sup>[13-17]</sup>。

近年来, 随着日照市社会、经济的快速发展和城市化进程的加快, 对地下水资源需求量的不断增加, 地下水资源供需矛盾日益突出。自 20 世纪 80 年代末, 海岸带海产养殖业迅速兴起, 地下水开采量猛增, 致使地下水位下降, 破坏了咸淡水之间的平衡, 引发了一系列地下水环境问题, 直接表现为海水入

侵。因此研究地下水动态演化特点, 必须研究其动态影响要素的变化规律, 以便更好地把握其变化趋势, 采取相应的对策, 消除其造成的环境问题<sup>[18]</sup>。本文选取日照市代表性地点采集了 71 件地下水分析样品, 利用水质全分析数据, 对本区水化学特征及其成因进行分析, 以期为该区域地下水资源合理开发利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理条件

研究区所属胶南隆起区日照段属暖温带海洋性季风气候区, 具有春季干燥多风, 夏季炎热多雨, 秋季晴和气爽, 冬季寒冷少雪的气候特征。冬季以北风为主, 夏季以南风、东南风为主, 多年平均气温为 12.7℃。多年平均干燥度为 0.94, 平均湿度为 72% 左右, 平均风速 3.5 m/s, 平均年日照时数为 2 532.9 h, 无霜期 215 d, 最大冰冻深度为 0.32 m。

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-03-21; 编辑: 曹丽丽

作者简介: 邢洪连(1989—), 女, 山东滕州人, 高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质工作; E-mail: 993301816@qq.com

\* 通信作者: 郭本力(1983—), 男, 山东鄄城人, 高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质、环境地质工作; E-mail: 286486736@qq.com

多年平均降水量为 834.73 mm, 多年平均蒸发量为 997.9 mm。年内降水量集中于 7、8 月份, 约占全年降水量的 50%, 降水量分配极为不均, 蒸发量 4—6 月份最高, 月均变化不明显。总体看, 区域 7—9 月份降水量明显大于蒸发量, 其余月份蒸发量大于降水量。

区内水系较发育, 东南部为黄海, 陆域水系受地形、地势影响, 均属山溪性河流, 源短流浅, 河流补给主要为天然降水, 雨季涨水, 枯季部分断流, 水系形态呈树枝状, 自西向东流入黄海。研究区内地表水系发育傅疃河、两城河。

## 1.2 水文地质条件

研究区内地下水根据赋存条件, 岩石的水理性质及其地下水的水力特征, 划分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水 2 种类型(图 1)<sup>[19-20]</sup>。松散岩类孔隙水主要分布在傅疃河、两城河等河流两岸及其支流地段中, 含水层岩性为第四系冲积、冲洪积的中—粗砂及砂砾石, 厚度一般为 5~10 m, 最厚达 22.5 m。地下水类型多为潜水, 局部地段具承压性。水位埋深 3~5 m 不等, 年变幅 2 m 左右。在河流中下游地段单井涌水量为 1 000~3 000 m<sup>3</sup>/d, 水化学类型主要为  $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  型水, 矿化度小于 1.0 g/L, 水质良好。本次研究的重点主要为两城河和傅疃河下游孔隙水。

两城河位于研究区北端, 为常年性河流, 自 204 国道至入海口约 6 km, 两岸地形平坦开阔, 第四系冲积层发育, 厚度一般为 5~10 m, 具二元结构。上部 0.5~1.5 m 为砂质黏土或粉细砂, 下部为含砾中粗砂, 具有良好的储水空间, 有利于大气降水和地表水的渗透补给。地下水位随季节变化, 但变化幅度较小, 在 0.5~2 m 之间, 一般水位埋深为 1~3 m, 富水性较强, 单井涌水量大于 1 000 m<sup>3</sup>/d。由于地形低洼、海拔较低、离海近, 大量抽取地下水使得海水入侵严重, 加上两城街道生活及工业污水排入该河, 导致安家村至入海口 3 km 内的河流两岸地下水严重污染, 水厂搬迁西移。

傅疃河是研究区内最大的河流, 中下游为市区主要供水水源地, 研究区内分布长度约 22 km。下游平坦开阔, 地形坡降小, 两岸第四系中粗砂—砂砾石含水层平均厚度 5.92 m, 最大厚度可达 17.58 m, 上覆不连续透水性较好的砂质土层, 下为不透水的变质岩、岩浆岩隔水底板, 其间具有良好的储水空

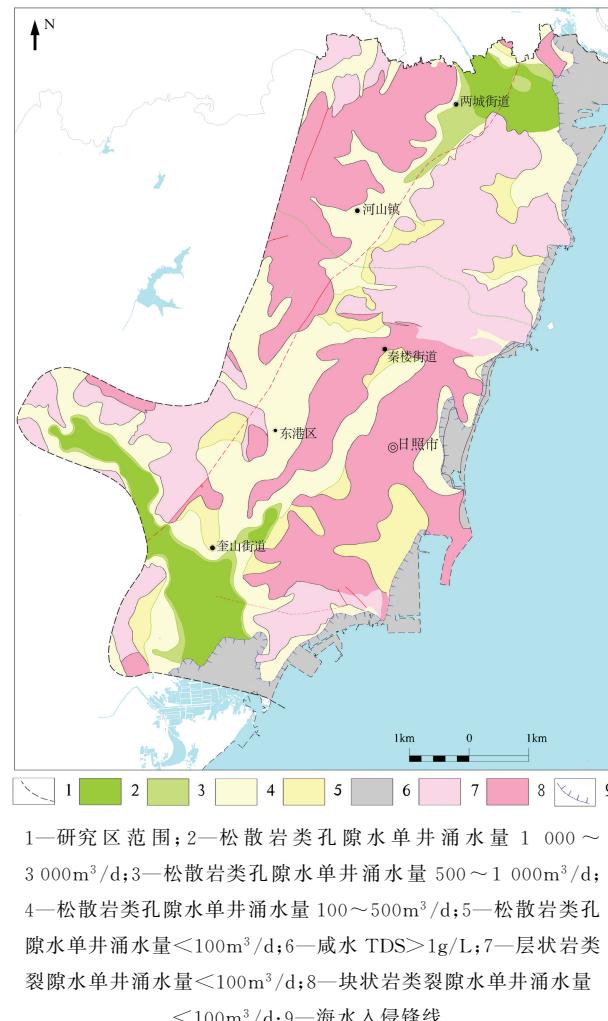


图 1 胶南隆起区日照段水文地质图

间。富水性较强, 地下水主要接受大气降水及河流侧渗补给, 水位随季节变化, 年变幅 0.5~2 m, 单井涌水量达 2 034~4 059 m<sup>3</sup>/d。

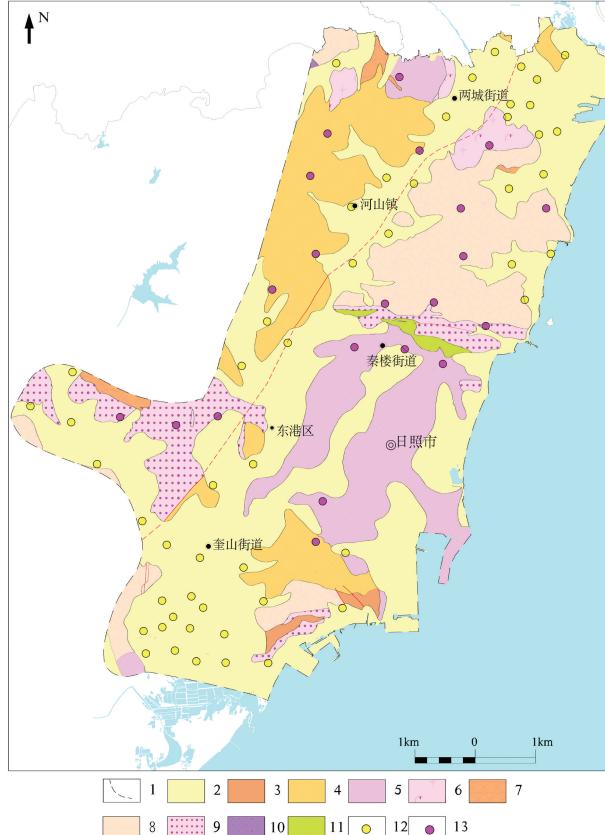
区内基岩分布广泛, 除滨海平原、河谷漫滩及其两侧的倾斜台地上被第四系覆盖外, 均为基岩出露区, 出露面积接近研究区一半, 岩性主要为不同时期的花岗岩、变质岩等。其富水性主要受构造裂隙、风化裂隙的发育程度及所处地形地貌环境的控制。

本区断裂构造除 NE 向日照断裂规模较大外, 其余均为较小的压扭性断裂, 对基岩含水条件影响不大。地下水主要赋存于基岩风化裂隙中, 区内风化带厚度变化较大, 在地形高处 0.2~2 m, 涌水量很小, 在地形低洼处风化带深度可达 20 m 以上, 单井涌水量小于 50 m<sup>3</sup>/d, 局部受地形及构造的复加影响, 单井涌水量大于 100 m<sup>3</sup>/d, 地下水化学类型

为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$  型水, 矿化度小于 0.5 g/L, 是乡村居民的主要水源。

## 2 样品采集与分析

为符合地下水观测数据统一性、区域代表性及可对比性的要求, 本文综合考虑了研究区的地形地貌、补径排条件、地下水类型、环境地质问题等因素, 选择代表性地点采取了 71 件地下水分析样品, 其中松散岩类孔隙水 50 件, 基岩裂隙水 21 件, 基本控制了本区地下水动态分布特征和化学成分的分布情况(图 2)。



1—研究区范围;2—第四系;3—荆山群;4—崂山序列;5—伟德山序列;6—玲珑序列;7—柳林庄序列;8—月季山序列;9—荣成序列;10—海阳所序列;11—莱州序列;12—松散岩类孔隙水取样点;13—基岩裂隙水取样点。

图 2 取样点分布图

本次采样在枯水期进行, 采样时要抽出井内的积水, 然后再取样。取样时盛样容器先用蒸馏水或样品清洗, 盛样容器要用所采水样洗 3 次以上, 然后装入所采样品。针对测试不同元素的要求, 采取的每一个水样均应分别加入相应的稳定剂, 盖上瓶盖

后用封口膜将瓶口封紧, 以保证水样不会外漏。采样后, 样品放置在采样车中的恒温箱中保存运输, 在规定的时间内安全送抵实验室进行检测。本次研究采取的所有样品均在山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队实验测试中心进行分析。分析指标主要有  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{TDS}$  等, 采样点分测试结果见表 1。

## 3 结果与讨论

### 3.1 地下水水化学组分描述性统计特征

根据研究区地下水各离子组分含量测试结果可知(表 1), 松散岩类孔隙水  $\text{pH}$  处于 7.24~8.52 之间, 整体呈弱碱性。地下水总硬度偏高, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主。水中主要阴阳离子含量的变异系数为 42.46%~149.30%, 仅有  $\text{K}^+$  属强变异, 其余均属于中等变异, 说明松散岩类孔隙水中离子含量变化相对稳定。基岩裂隙水  $\text{pH}$  处于 7.61~8.23 之间, 整体也呈弱碱性。地下水总硬度偏高, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主。水中主要阴阳离子含量的变异系数为 49.74%~341.85%, 仅有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  为中等变异, 其余均属于强变异, 说明基岩裂隙水  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量较为稳定, 其他阴阳离子在地下水中的含量变化较大, 同时这些组分是随环境和人为因素变化的敏感因子。

### 3.2 地下水化学类型划分

Piper 三线图表示溶液中主要化学成分的相对组成, 用以判断水化学类型。研究区地下水化学类型复杂多样, 水化学类型有  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{Cl} - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  等。

从图 3 可知, 松散岩类孔隙水阳离子以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  为主, 其毫克当量百分比为 23.07%~84.58%, 平均为 42.0%, 其次为  $\text{Ca}^{2+}$ , 其毫克当量百分比为 7.25%~56.36%, 平均为 38.31%; 阴离子  $\text{HCO}_3^-$  为主, 其毫克当量百分比为 26.67%~83.89%, 平均为 52.01%。区内松散岩类孔隙水样品大部分投射到 1 区(碱土金属区)、3 区(弱酸区)与 4 区(强酸区)重叠的 9 区和 5 区, 5 区地下水主要受溶滤作用控制,

9 区为溶滤作用和海水入侵混合作用区,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+$  含量升高, 但各阴阳离子含量均不超过

50%; 水化学类型以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水为主。

表 1 样品测试结果统计表

地下水类型	统计	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	TDS	pH
孔隙水	最大值/(mg/L)	54.9	182	219.0	64.6	507.96	420.62	364.2	1134.52	8.52
	最小值/(mg/L)	0.29	19.7	27.20	13.3	77.37	1.98	33.5	299.72	7.24
	平均值/(mg/L)	7.44	56.43	93.12	29.16	202.04	67.71	106.85	570.21	7.93
	标准差	11.11	28.79	39.35	13.45	108.65	62.52	58.47	202.72	0.34
	变异系数/%	149.30	51.02	42.46	46.13	53.78	92.33	54.72	35.55	4.26
裂隙水	最大值/(mg/L)	69.5	2962.00	240.00	266.00	878.00	4565.69	761.98	8880.98	8.23
	最小值/(mg/L)	0.67	12.00	38.70	6.72	26.91	1.97	15.11	209.22	7.61
	平均值/(mg/L)	6.39	192.18	96.2	33.88	221.64	288.42	112.63	927.44	7.96
	标准差	15.02	635.88	47.89	55.19	176.66	985.98	151.02	1847.73	0.20
	变异系数/%	235.02	330.88	49.74	162.91	79.71	341.85	134.09	199.23	2.51

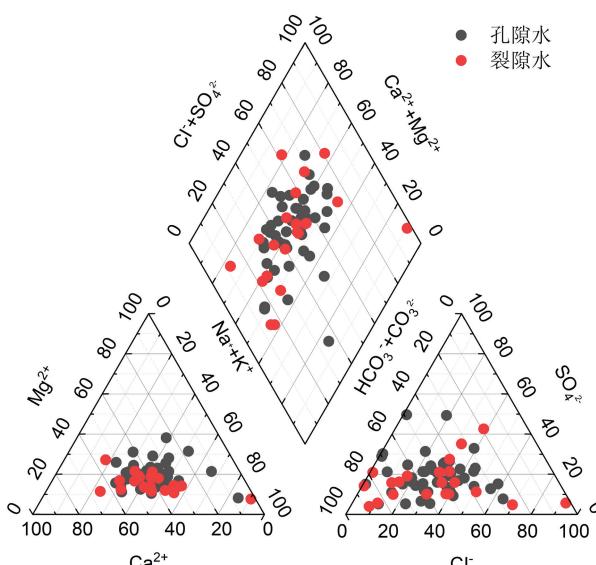


图 3 地下水 Piper 三线图

基岩裂隙水阳离子以  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  为主, 其毫克当量百分比为 17.86%~90.31%, 平均为 42.76%, 其次为  $\text{Ca}^{2+}$ , 其毫克当量百分比为 2.02%~65.12%, 平均为 41.49%; 阴离子  $\text{HCO}_3^-$  为主, 其毫克当量百分比为 2.21%~87.93%, 平均为 53.53%。区内基岩裂隙水样品大部分投射到 1 区(碱土金属区)与 3 区(弱酸区)重叠的 9 区和 5 区, 碱土金属离子大于碱金属离子, 弱酸根超过强酸根, 水化学类型以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水为主。

### 3.3 地下水化学类型空间分布特征

通过对地下水化学性质的分析, 可以看出阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 本区地下水形成了  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水, 其中以  $\text{HCO}_3^-$  型水为主。

$\text{HCO}_3^-$  型水分布于研究区大部分地带, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子不一, 傅疃河流上游以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主, 靠近黄海位置以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 其他地段主要为  $\text{Ca}^{2+}$ , 形成了  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca} \cdot \text{Na}$  型水。

$\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ 、 $\text{SO}_4^-$  型水是本区除了重碳酸型地下水外分布面积最大的地下水类型。以  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$  型为主, 分布在傅疃河、两城河中上游山前平原两侧, 主要有  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$  型水。

$\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型地下水在本区呈条带状分布在河流入海口上游, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  型为主, 有  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- - \text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$  型水, 反映了咸淡界面内地下水径流条件和循环交替强度的变化规律。 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水分布的地区为傅疃河、东黄家庄村下游入海区域, 地形平缓, 砂砾石层发育为流域地下水和地表水汇聚之地, 近海经潮湿空气、降水、海积地层及直接海侵形式造成氯含量高。

$\text{Cl}^-$  型地下水主要位于两城河、傅疃河入海口附近。该区水位埋深较浅, 蒸发作用较强, 水走盐留, 加之地下水过度开采, 导致海水倒灌, 阳离子为  $\text{Na}^+$  为主, 形成  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$  型水。氯离子含量一般大于 250 mg/L, 溶解性总固体一般 1 g/L 以上, 形成了微咸水、咸水。

### 3.4 地下水水化学成因机制

#### 3.4.1 相关性分析

地下水化学组分中离子浓度之间的变化存在相互联系, 化学特征的变量之间也存在一定的关联。采用相关分析可以揭示地下水水化学参数的相似

性,并判断化学成分来源的一致性和差异性。表 2 为地下水中化学组分的相关性分析结果,可以看出,研究区地下水  $\text{Na}^+$  与  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  显著性相关,相关系数均大于 0.8,说明其存在着相似的来源。其中  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$ 、TDS 相关系数分别达到 99.3% 和

98.2%,这可能是海水入侵引起的。 $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  显著性相关,这可能是因为受到海水入侵和海水入侵地层溶解等作用<sup>[21-24]</sup>。TDS 与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  均有较好的相关性,表明这些离子对 TDS 的贡献较大。

表 2 地下水主要指标相关系数矩阵

组分	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	TDS
$\text{Na}^+$	1								
$\text{K}^+$	0.620 **	1							
$\text{Ca}^{2+}$	0.097	0.161	1						
$\text{Mg}^{2+}$	0.909 **	0.633 **	0.333 **	1					
$\text{Cl}^-$	0.993 **	0.598 **	0.122	0.906 **	1				
$\text{SO}_4^{2-}$	0.842 **	0.544 **	0.269 *	0.896 **	0.828 **	1			
$\text{HCO}_3^-$	0.037	0.264 *	0.231	0.121	0.010	0.028	1		
$\text{NO}_3^-$	-0.059	-0.071	0.657 **	0.158	-0.052	0.096	-0.216	1	
TDS	0.982 **	0.636 **	0.265 *	0.952 **	0.981 **	0.874 **	0.075	0.087	1

### 3.4.2 Gibbs 图解模型

利用 Gibbs 图可以判断地下水受大气降水、蒸发—浓缩和水岩作用等因素影响下的水化学特征,诸多学者也利用 Gibbs 图反映各主要离子的形成机制。根据研究地下水 Gibbs 图可知(图 4),地下水 TDS 集中在 100~1 000 mg/L,离子比值集中在

0.02~0.67 之间,松散岩类孔隙水和基岩裂隙水大部分落在水岩作用控制端元,说明该区地下水主要受水岩相互作用控制。仅一组基岩裂隙水水样分布在 3 个区域外,可能是受到人类活动或离子交换作用的影响。

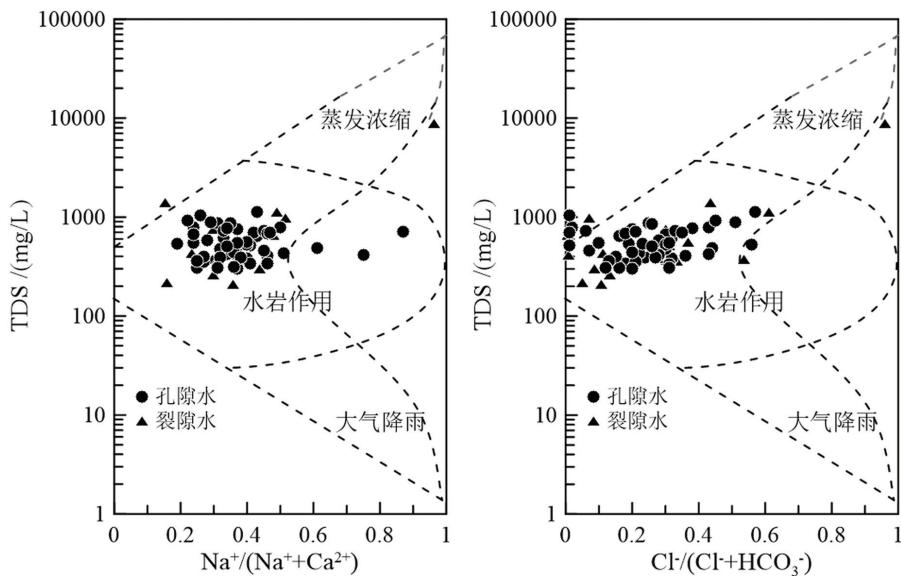


图 4 地下水 Gibbs 图解

### 3.4.3 离子比值分析

地下水中对主要离子进行  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$  比值分析,可以揭示水化学的成因,即地下水中主要离子来源受何种矿物溶解的控制。从离子比值端元图(图 5)可以看出,松散岩类孔隙水和基岩裂隙水水样点主要落在硅酸盐岩与碳

酸盐岩端元之间,且更接近硅酸盐岩端元,说明该区地下水水化学主要受是硅酸盐岩溶解的控制。松散岩类孔隙水个别水样点在蒸发盐岩和硅酸盐岩之间,说明蒸发盐岩作用对孔隙水离子来源亦有一定影响。

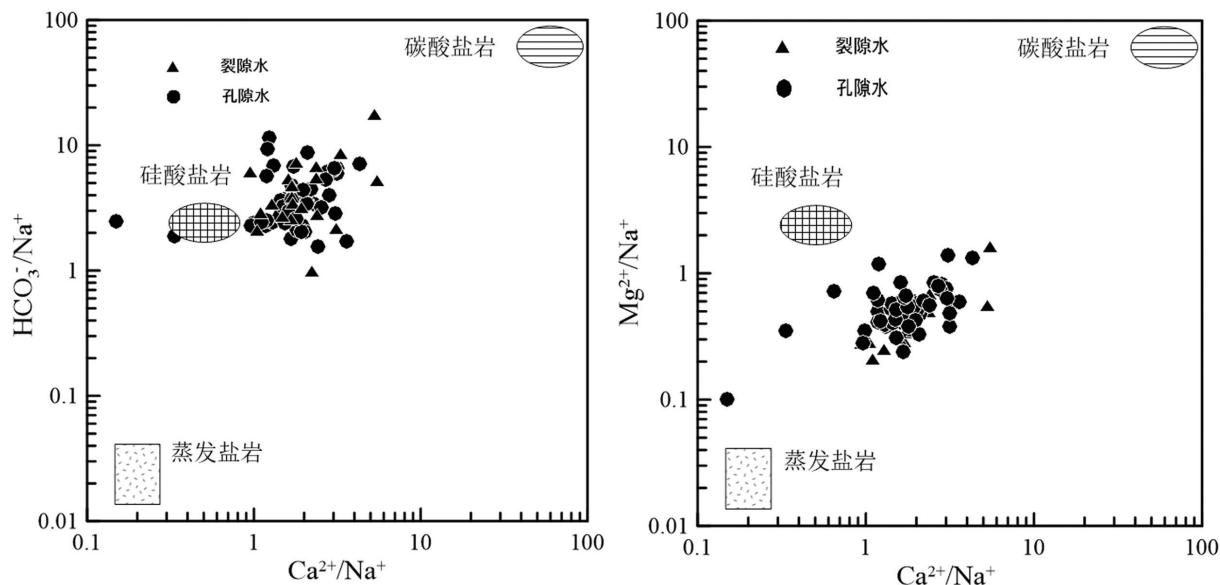
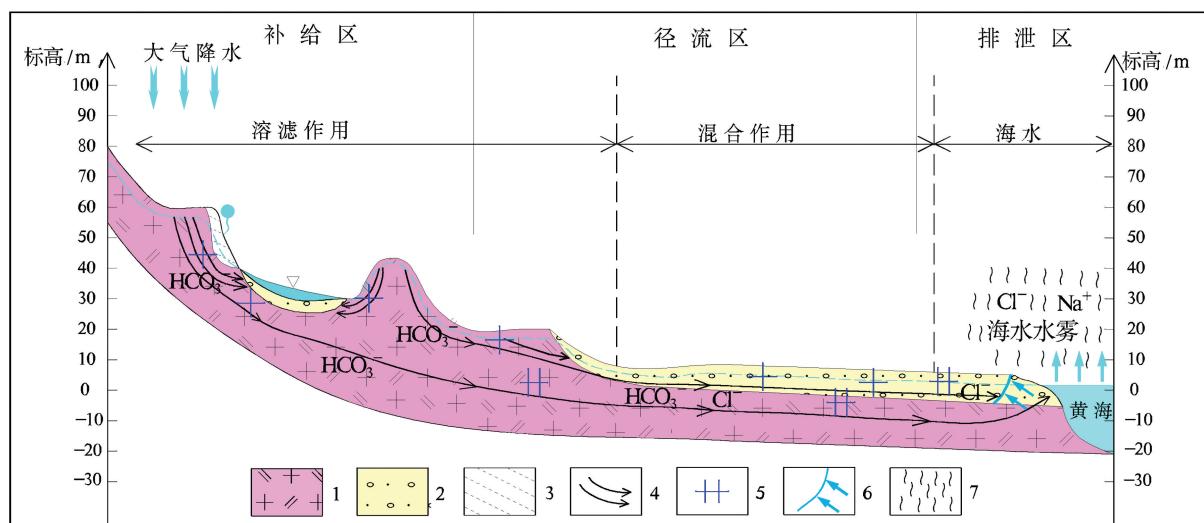


图 5 地下水离子比值端元图

### 3.5 讨论

本区地下水总硬度偏高, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主。本区地下水化学类型复杂多样, 主要地下水类型有  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水。地下水主要受水岩相互作用控制, 水中离子主要来源于硅酸盐岩溶解。结合区内水文地质条件分析, 地下水的化学成分随径流、

气象等条件的变化而变化, 从补给区到排泄区呈明显的分带性。地下水自补给区向排泄区由  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}$  型向  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}$  型演化, 径流区为混合型。在补给区地下水为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}$ , 以硅酸盐溶滤作用为主, 在向下游径流过程中, 受海洋气候影响,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  含量不断升高, 呈现混合型地下水类型, 在排泄区受海水入侵影响, 地下水类型为  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}$  型(图 6)。



1—2—长花岗岩; 2—砂砾岩; 3—强风化层; 4—地下水水流线; 5—地下水矿化度; 6—海水入侵锋线; 7—蒸发。

图 6 地下水形成模式示意图

## 4 结论

(1) 胶南隆起区日照段地下水整体呈弱碱性, 地下水总硬度偏高, 阴离子以  $\text{HCO}_3^-$  为主, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主。松散岩类孔隙水中阴阳离子含量变化相对稳定, 基岩裂隙水  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  离子含量较为稳定, 其他阴阳离子在地下水中的含量变化较大, 这些组分是随环境和人为因素变化的敏感因子。

(2) 本区地下水水化学类型主要有  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  型水, 以  $\text{HCO}_3^-$  型水为主, 分布于研究区的大部分地区。研究区地下水自补给区向排泄区呈明显的分带性, 由  $\text{HCO}_3^- \text{--} \text{Ca}$  型向  $\text{Cl}^- \text{--} \text{Na}^+$  型演化, 径流区为混合型。

(3) 本区松散岩类孔隙水和基岩裂隙水主要受水岩相互作用控制, 个别水样可能受到人为活动或离子交换作用的影响。松散岩类孔隙水和基岩裂隙水地下水中离子来源主要受硅酸盐岩的溶解作用, 蒸发盐岩溶解对于松散岩类孔隙水离子来源亦有一定贡献。

## 参考文献:

- [1] CHATTERJEE S, DUTTA S. Assessment of groundwater potential zone for sustainable water resource management in south-western part of Birbhum District, West Bengal[J]. Applied Water Science, 2022, 12(3): 40.
- [2] 李晓波, 李静. 大汶河流域中下游浅层地下水水化学特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2024, 37(5): 1015–1026.
- [3] 张中祥, 祝子慧, 刘传娥, 等. 山东典型岩溶水水源水质演化预测[J]. 山东国土资源, 2014, 30(9): 30–34.
- [4] 张丰, 李爱军. 邹城市双村岩溶水系统水化学演化分析[J]. 山东国土资源, 2015, 31(5): 54–56.
- [5] 李青梅, 刘志涛, 李艾银. 博兴县浅层地下水水化学演化分析研究[J]. 山东国土资源, 2016, 32(8): 53–57.
- [6] JANG Y, ZHANG C, YUAN D, et al. Impact of land use change on groundwater quality in a typical karst watershed of southwest China: a case study of the Xiaojiang watershed, Yunnan Province[J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(4): 727–735.
- [7] AHIRWAR S, SHUKLA J P. Assessment of groundwater vulnerability in upper Bebra river watershed using GIS based DRASTIC Model[J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, 91(3): 334–340.
- [8] JARRY H, ZAMMOURI M, OUESSAR M, et al. GIS based DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment: case study of the shallow mio–plio–quaternary aquifer (Southeastern Tunisia)[J]. Water Resources, 2017, 44(4): 595–603.
- [9] 张福初, 吴彬, 高凡, 等. 奎屯河流域平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1663–1671.
- [10] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4011–4020.
- [11] 刘海, 魏伟, 宋阳, 等. 郊庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 2665–2677.
- [12] Bouderbala A, Remini B, Saeed Hamoudi A, et al. Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza, North Algeria)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3): 181.
- [13] 寇雅威, 徐仲仪, 张恒, 等. 山东泰安大汶口化工集聚区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. 山东国土资源, 2023, 39(6): 15–25.
- [14] Yetis R, Atasoy A D, Demir Yetis A, et al. Hydrogeochemical characteristics and quality assessment of groundwater in Balikligol Basin, Sanliurfa, Turkey[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(11): 331.
- [15] 张俊, 尹立河, 顾小凡, 等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 185–195.
- [16] 韩朝辉, 王郅睿, 田辉, 等. 汉中盆地地下水水化学特征及其成因研究[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 263–273.
- [17] 汪馨竹. 吉林省西部地下水埋深时空变化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [18] 高宗军, 张洪英, 孙梦醒, 等. 山东省日照沿海浅层地下水化学特征与成因探讨[J]. 地下水, 2017, 39(4): 1–4.
- [19] 杨鹏, 计量, 朱伟, 等. 沂源县地下水水质评价及成因分析[J]. 节水灌溉, 2018(12): 65–69.
- [20] 夏璐, 游海池, 刘久潭, 等. 胶东半岛沿海地区地下水水化学特征及水质评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 1–10.
- [21] GUO B, YANG P, ZHOU Y, et al. Numerical Simulation of Carbon Tetrachloride Pollution – Traceability in Groundwater System of an Industrial City[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 16113.
- [22] 郭本力, 杨鹏, 袁杰. 日照市松柏地热井水化学特征及地热成因分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 15–23.
- [23] GUO B L, ZHANG S C, LIU K, et al. Prediction of groundwater level under the influence of groundwater exploitation using a data-driven method with the combination of time series analysis and long short-term memory: a case study of a coastal aquifer in Rizhao City, Northern China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023(11): 1253949.
- [24] 杨鹏, 张寿川, 郭本力, 等. 山东日照地区不同类型含水层地下水位多年动态变化特征及其影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 967–979.

## Hydrochemical Characteristics and Origin Analysis of Groundwater in Rizhao Section in Jiaonan Uplift Area

XING Honglian<sup>1</sup>, QIN Fufeng<sup>2</sup>, GUO Benli<sup>1</sup>, YUAN Jie<sup>1</sup>, WEI Tongzheng<sup>1</sup>, KANG Rifei<sup>1</sup>, ZHU Chuaxi<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, LI Xiaodong<sup>1</sup>

(1. No.8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province), Rizhao Key Laboratory of Land Quality Assessment and Pollution Remediation, Shandong Rizhao 276826, China; 2. No.1 Exploration Brigade of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Shandong Qingdao 266555, China)

**Abstract:** It is of great significance to study hydrochemical characteristics and origin of groundwater in Rizhao section in Jiaonan uplift for the development and protection of groundwater resources. Based on comprehensive analysis of hydrogeological conditions in Rizhao section in Jiaonan uplift area, 71 groups of groundwater samples from the research area have been collected systematically. By using descriptive statistics, Piper plots, Gibbs plots, correlation analysis and ion ratio method, spatial distribution, hydrochemical characteristics and origin of groundwater chemistry have been analyzed. It is showed that groundwater in Rizhao section in Jiaonan uplift area is generally weak alkaline, with  $\text{HCO}_3^-$  as main anion, and  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  as main cations. The ion content in loose rock pore water is relatively stable, while  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  content in bedrock fissure water are relatively stable. The content of other anions and cations in groundwater varies greatly. The groundwater chemical types are complex and diverse, including  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$  type water. Their distribution shows a distinct zonation from the recharge area to the discharge area. The pore water and bedrock fissure water within the area are mainly controlled by water-rock interactions, and the ion source is mainly the dissolution of silicate rocks.

**key words:** Groundwater; hydrochemical characteristics; origin; Rizhao section; Jiaonan uplift area