

曾蛟, 李海波, 徐华源, 等. 山东莱州-平度一带水化学特征成因分析及水质评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 15-24.

ZENG Jiao, LI Haibo, XU Huayuan, et al. Genetic analysis of hydrochemical characteristics and water quality assessment in Laizhou-Pingdu area, Shandong[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 15-24.

# 山东莱州-平度一带水化学特征成因分析及水质评价

曾蛟<sup>1,2</sup>, 李海波<sup>3\*</sup>, 徐华源<sup>4</sup>, 褚宏宪<sup>1,2</sup>, 赵正鹏<sup>1,2</sup>, 庞国涛<sup>1,2</sup>, 王丽鑫<sup>1,2</sup>, 孔令号<sup>1,2</sup>

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000; 2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000; 3 龙口市海洋发展和渔业局, 烟台 265701; 4 寿光市海洋渔业发展中心, 潍坊 262700)

**摘要:**地下水(潜水)和地表水是莱州-平度一带重要的生产生活用水,为了探究该区地下水和地表水的化学特征和水质质量,系统采集了39件地下水和41件地表水样品,运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、离子比值法分析水化学特征及影响因素,并采用 WQI 水质综合指数法、钠吸附比法(SAR)和钠百分比法(SSP)对区内饮用水和灌溉水水质进行评价。结果表明:研究区地下水和地表水均为弱碱性水,南部浅丘地下水化学类型主要为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ , 滨海平原地下水主要为  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+}$ , 地表水主要为  $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 。岩石风化是控制地表水和南部浅丘地下水化学特征的主要因素,滨海平原地下水受控于蒸发浓缩-海水作用,人类活动一定程度上影响着水化学组分,滨海平原地下水  $\text{Cl}^-$  极高值体现了局部地区海水入侵分化加剧。农业活动氮肥的使用和生活污水排放是造成  $\text{NO}_3^-$  污染的主要原因,高  $\text{NO}_3^-$  含量的地下水不适宜直接饮用,可进行除硝处理来降低风险。灌溉水质评价表明,区内地表水和南部浅丘地下水整体水质优良,合理的灌溉不会造成植物和土壤的盐碱害,滨海平原地下水水质较差,可引入优良区地表水。

**关键词:**莱州;平度;地下水;地表水;水化学特征;水质评价

中图分类号:P736;P641.69

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.012

## 0 引言

水为人类生产生活提供了保障,是人类生存不可或缺的重要资源。近年来,随着极端气候的频现与人类活动加剧,各种环境地质问题也随之而来,对生态环境及社会发展造成了重要影响,特别是水资源面临着水量减少和水质恶化的双重威胁<sup>[1-3]</sup>。水化学特征受大气降水、蒸发浓缩、岩石风化及人类活动等的共同影响<sup>[4]</sup>,开展区域地下水和地表水

化学特征成因分析及水质评价,可以揭示水化学组分来源和影响因素,对长期合理规划和保护水资源具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

研究区地处胶东半岛西北部的莱州和平度一带,属莱州湾沿海较为发达的地区。区域内地表水化学特征及水质评价研究较少,多为研究区北部莱州沿海地区地下水研究。以国内学者提出的  $\text{Cl}^-$  浓度 250 mg/L 作为判断海水入侵指标<sup>[7]</sup>,莱州是中国地下水受海水入侵引起环境问题最为严重的地区之一<sup>[8]</sup>。滨海平原地区地下咸水和微咸水分布广泛,淡水资源较匮乏,人类活动带入的  $\text{NO}_3^-$  严重影响了当地地下水水质<sup>[9]</sup>。海水入侵严重影响了莱州滨海地区地下水化学特征,前人将海水入侵划分为初始、发展、恶化、缓解、分化5个阶段<sup>[10-12]</sup>,安兆利<sup>[13]</sup>对莱州市水资源量进行了评价并提出了一系列开发利用建议。但莱州南部及平度地区水化学特征分析及饮用灌溉用水水质评价还缺乏相关研究。

收稿日期: 2024-01-09

资助项目: 中国地质调查局项目“莱州湾海岸带自然资源综合调查”(DD20230411)

第一作者: 曾蛟(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事分析测试方面的研究工作。E-mail: 416892321@qq.com

\* 通讯作者: 李海波(1973—),男,工程师,主要从事海域海岛管理方面的研究工作。E-mail: lkshyjlbh@163.com

本文以莱州-平度一带地表水、南部浅丘地下水和滨海平原地下水作为研究对象,通过系统采集地下水和地表水样品,进行水化学特征、主控因素、演化特征分析,并开展饮用水和灌溉用水水质评价,旨在为该区域水资源开发利用和保护管理提供科学参考。

## 1 研究区概况

研究区地处山东半岛重要节点位置,行政区划属莱州市、平度市,坐标范围为  $36^{\circ}50' - 37^{\circ}30'N$ 、 $119^{\circ}50' - 120^{\circ}20'E$ 。其西北部毗邻莱州湾,是山东半岛重要经济区,区内人口众多,交通便利。研究区属东亚季风区大陆性气候,多年平均气温  $12.4^{\circ}C$ ,年平均降水量超  $600\text{ mm}$ ,夏季多雨,占全年总降水量的  $60\%$  以上,降雨量受季风和地形影响,降雨分布趋势自东南向西北递减。区内河流众多,主要有白沙河、朱桥河,均北流入莱州湾,河流为雨源型,比降约为  $10\%$ <sup>[13-14]</sup>。研究区地形总趋势是东南高、西北低,自东南向西北依次为浅切割低山区、丘陵区、准平原区、冲洪积平原、海积平原区地貌。区内地下水可划分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩溶岩水,松散岩类孔隙水含水层主要为中粗砂、砂砾石、细砂,基岩裂隙水含水层为主要花岗岩、变粒岩、片岩,碳酸盐岩类岩溶裂隙水含水层主要为大理岩<sup>[9,11]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与测试

根据前期调查成果,于 2022 年 8 月进行水样采集工作,共采集 39 件地下水和 41 件地表水样品,地下水样品中的 29 件采自南部浅丘区,10 件采自滨海平原区,采样点分布见图 1。地下水样来自饮用水井和灌溉用井,地表水样来自水库、河流和矿坑积水,取样器具采用聚乙烯塑料瓶,取样前先将取样所用的容器用所取水样清洗 3~5 次,取样后将瓶口蜡封。采用哈希 DS5 水质仪测试现场测试样品的 pH 值、电导率(EC)、矿化度,其他参数由烟台海岸带地质调查中心分析测试实验室检测。阳离子采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定,阴离子采用离子色谱法、滴定分析法检测。 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^{+}$ 、 $K^{+}$ 、 $NH_4^{+}$ 、 $HCO_3^{-}$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $Cl^{-}$ 、 $NO_3^{-}$ 、

$NO_2^{-}$ 检测精密度分别为 0.7%、1.1%、1.5%、1.6%、2.4%、0.6%、0、1.4%、2.3%、3.2%,检测准确度分别为 104%、104%、98.5%、95.4%、95.2%、93%、100%、102%、97.5%、97.5%,样品各离子平衡误差均  $< \pm 5\%$ ,检测数据可靠。

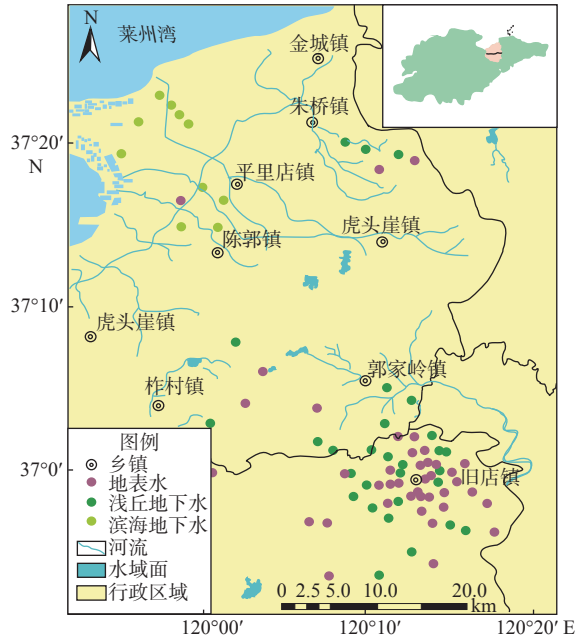


图 1 采样点分布示意图

Fig.1 The distribution of sampling sites

### 2.2 数据分析与评价方法

本文运用社会科学统计软件(SPSS)对检测结果进行统计分析,采用 Piper 三线图和舒卡列夫分类法确定水化学类型,利用 Gibbs 图判断水化学组成来源,使用离子比值法探究水化学控制因素,采用综合水质指数法(WQI)、钠吸附比(SAR)和钠百分比(SSP)分别评价饮用水和灌溉用水质量。

#### 2.2.1 饮用水水质评价方法

采用 WQI 水质综合指数法进行水质适宜性评价,根据 WHO 建议的离子标准浓度和参数权重比例<sup>[15]</sup>,计算单一组分污染指数,再将单一污染指数累计得到 WQI 综合指数。

$$WQI = \sum [W_i \times (C_i / S_i) \times 100] \quad (1)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  种参数实测值,  $mg/L$ ;

$S_i$  为第  $i$  种参数世卫组织 WHO 浓度标准<sup>[15]</sup>,  $mg/L$ ;

$W_i$  为第  $i$  种参数的权重值比例(表 1)。

根据各样品的 WQI 值将地下水分为 I ( $WQI < 50$ )、II ( $50 \leq WQI < 100$ )、III ( $100 \leq WQI < 200$ )、IV ( $200 \leq WQI < 300$ )、V ( $WQI \geq 300$ ) 共 5 类<sup>[16]</sup>。

表 1 WQI 法参数指标

Table 1 Parameter indicators in WQI method

| 参数                     | pH      | TDS     | EC      | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|------------------------|---------|---------|---------|------------------|---------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| w <sub>i</sub>         | 3       | 5       | 4       | 3                | 2                               | 3                | 4               | 3                             | 5                            | 3                             |
| W <sub>i</sub>         | 0.085 7 | 0.142 9 | 0.114 3 | 0.085 7          | 0.057 1                         | 0.085 7          | 0.114 3         | 0.085 7                       | 0.142 9                      | 0.085 7                       |
| S <sub>i</sub> /(mg/L) | 8.5     | 1 000   | 1 500   | 200              | 200                             | 150              | 250             | 250                           | 20                           | 500                           |

注: w<sub>i</sub>为参数权重值。

2.2.2 灌溉水水质评价方法

灌溉水中所含盐类成分不同,对作物有不同的影响,对作物生长最有害的是钠盐,采用钠吸附比与电导率评价灌溉水盐碱害<sup>[17-18]</sup>,采用钠百分比与电导率进行水质分类<sup>[19]</sup>。

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

$$SSP = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}} \quad (3)$$

式中:金属离子单位为 meq/L。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

根据研究区水化学参数统计数据(表 2)可知:南部浅丘地下水 pH 值为 7.4~8.5,均值 8.0;北部滨海平原地下水 pH 值为 7.6~8.6,均值 7.9;地表

水 pH 值为 7.5~8.3,均值 8.0,均为弱碱性水。南部浅丘地下水 EC 与总溶解性固体(TDS)均值分别为 965 μs/cm 和 581 mg/L,变异系数均为 0.40,显示 EC 和 TDS 在空间上分布较为均匀。北部滨海平原地下水 EC 与 TDS 均值分别为 7 508 μs/cm 和 5 025 mg/L,变异系数均>1,显示 EC 和 TDS 在空间分布显著不均匀,沿向海方向 EC 和 TDS 整体上逐渐增大,并在莱州港附近出现了 28 300 μs/cm 和 20 396 mg/L 的极大值。地表水 EC 与 TDS 均值小于北部滨海平原地下水,与南部浅丘地下水均值接近,分别为 1 001 μs/cm 和 620 mg/L。

以 Cl<sup>-</sup>浓度为 250 mg/L 作为判断海水入侵的指标<sup>[7]</sup>,滨海平原地下水 10 件样品中,有 8 件 Cl<sup>-</sup>浓度远高于 250 mg/L 的限值,最大为 10 748.9 mg/L,远超前人监测结果<sup>[9,20]</sup>,莱州市近年地下水超采面积达 850 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>,地下水补给量远低于开采量,导致地下水位持续降低<sup>[22]</sup>,加剧了海水入侵,使得滨海地区海水入侵发生了分化并在局部呈点状加剧的趋势,严重影响了滨海地区地下水水质。

表 2 研究区水化学参数统计

Table 2 Statistics of hydrochemical parameters in the study area

| 参数                            | 南部浅丘地下水(n=29) |        |        |      | 滨海平原地下水(n=10) |           |          |      | 地表水(n=41) |          |        |      |
|-------------------------------|---------------|--------|--------|------|---------------|-----------|----------|------|-----------|----------|--------|------|
|                               | 最小值           | 最大值    | 平均值    | 变异系数 | 最小值           | 最大值       | 平均值      | 变异系数 | 最小值       | 最大值      | 平均值    | 变异系数 |
| pH                            | 7.37          | 8.51   | 8.01   | 0.03 | 7.64          | 8.57      | 7.94     | 0.04 | 7.49      | 8.29     | 7.96   | 0.03 |
| EC                            | 287           | 1 787  | 965    | 0.40 | 1 927         | 28 300    | 7 508    | 1.10 | 195       | 2 810    | 1 001  | 0.50 |
| TDS                           | 181           | 1 012  | 581    | 0.40 | 1 320         | 20 396    | 5 025    | 1.20 | 109       | 2 188    | 620    | 0.60 |
| Ca <sup>2+</sup>              | 24.00         | 186.00 | 92.00  | 0.40 | 15.40         | 366.50    | 254.40   | 0.40 | 13.70     | 293.20   | 75.50  | 0.60 |
| Mg <sup>2+</sup>              | 9.00          | 65.00  | 31.70  | 0.50 | 33.60         | 594.10    | 163.40   | 1.10 | 4.00      | 94.20    | 27.50  | 0.50 |
| Na <sup>+</sup>               | 15.60         | 122.70 | 45.90  | 0.50 | 59.00         | 6 182.00  | 1 292.40 | 1.50 | 14.10     | 210.00   | 84.60  | 0.70 |
| K <sup>+</sup>                | 0.70          | 58.40  | 8.80   | 1.50 | 0.80          | 243.50    | 56.90    | 1.40 | 1.20      | 101.60   | 9.70   | 1.70 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 54.00         | 471.90 | 157.70 | 0.50 | 193.20        | 925.40    | 432.90   | 0.60 | 18.40     | 239.20   | 111.10 | 0.40 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 42.80         | 463.60 | 169.40 | 0.60 | 144.70        | 2 155.60  | 886.00   | 0.80 | 23.60     | 1 317.00 | 279.40 | 0.90 |
| Cl <sup>-</sup>               | 20.60         | 188.40 | 72.00  | 0.50 | 138.80        | 10 748.90 | 2 000.50 | 1.60 | 14.30     | 263.70   | 74.90  | 0.50 |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0.80          | 253.00 | 77.80  | 0.90 | 5.90          | 463.50    | 145.70   | 1.20 | 0.20      | 119.40   | 12.20  | 2.00 |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0.00          | 1.90   | 0.20   | 2.00 | 0.00          | 0.10      | 0.02     | 1.00 | 0.00      | 4.80     | 0.30   | 2.20 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0.00          | 35.90  | 1.50   | 4.40 | 0.00          | 0.10      | 0.01     | 3.20 | 0.00      | 2.30     | 0.20   | 2.10 |

注:EC单位为μs/cm, TDS单位为mg/L, 其他化学组分的浓度单位为mg/L; n为样品数量。

从氮元素组分来看,南部浅丘地下水  $\text{NO}_3^-$  浓度为  $0.8 \sim 253.0 \text{ mg/L}$ , 均值为  $77.8 \text{ mg/L}$ , 其中, 23 件样品超过  $10 \text{ mg/L}$ , 占比 79%,  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度均值分别为  $0.2$ 、 $1.5 \text{ mg/L}$ 。北部滨海平原地下水  $\text{NO}_3^-$  浓度为  $5.9 \sim 463.5 \text{ mg/L}$ , 浓度均值为  $145.7 \text{ mg/L}$ , 其中, 7 件样品  $\text{NO}_3^-$  浓度  $> 10 \text{ mg/L}$ , 占比 70%。 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度均值分别为  $0.02$ 、 $0.009 \text{ mg/L}$ 。地表水  $\text{NO}_3^-$  浓度为  $0.2 \sim 119.4 \text{ mg/L}$ , 浓度均值为  $12.2 \text{ mg/L}$ , 其中, 10 件样品  $\text{NO}_3^-$  浓度  $> 10 \text{ mg/L}$ , 占比 24.3%,  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  浓度均值分别为  $0.3$ 、 $0.2 \text{ mg/L}$ 。地下水和地表水具有低  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$ 、高  $\text{NO}_3^-$  浓度的特征, 且地下水  $\text{NO}_3^-$  浓度远高于地表水。自然界水中  $\text{NO}_3^-$  浓度限值通常为  $10 \text{ mg/L}$  [23], 研究区是莱州湾重要的农耕区, 农业活动大量使用含氮化肥, 使得地下水接受大气降水、灌溉水补给时带入了  $\text{NO}_3^-$ , 是造成地下水  $\text{NO}_3^-$  浓度严重超标的主要原因。氮元素组分变异系数均  $> 0.9$ , 空间上分布显著不均匀, 经实地检验, 高值点多分布于村庄、农耕集中区域。区域内地下水和地表水均不同程度地受到了人类活动的影响, 地下水受影响程度远大于地表水。

从宏量组分来看, 南部浅丘地下水阳离子与阴离子平均浓度从大到小排序分别为:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ >$

$\text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ , 各离子浓度变异系数除  $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  外均  $< 0.6$ , 反映其组分呈现中等变异。北部滨海平原地下水阳离子与阴离子平均浓度从大到小排序分别为:  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  和  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ , 各离子浓度变异系数除  $\text{Ca}^{2+}$  外均  $> 0.6$ , 反映其组分呈现显著的空间差异, 组分具有较大波动, 受海水入侵影响较大。地表水中阳离子与阴离子平均浓度从大到小排序分别为:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ , 各离子浓度变异系数除  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$  外均  $< 1$ , 说明地表水组分在空间上总体属于中等变异性。

### 3.2 水化学具体类型

采用 Piper 三线图进行水化学类型分析(图 2)。南部浅丘地下水中阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为主, 占比分别为 79.3%、13.8%; 阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  为主, 占比分别为 48.3%、37.9%。滨海平原地下水中阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  为主, 占比均为 50%; 阴离子以  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 占比分别为 70.0%、30.0%。地表水优势阳离子与地下水一致, 以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 占比分别为 56.1%、41.5%; 阴离子优势型以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  为主, 占比分别为 58.5%、34.1%。

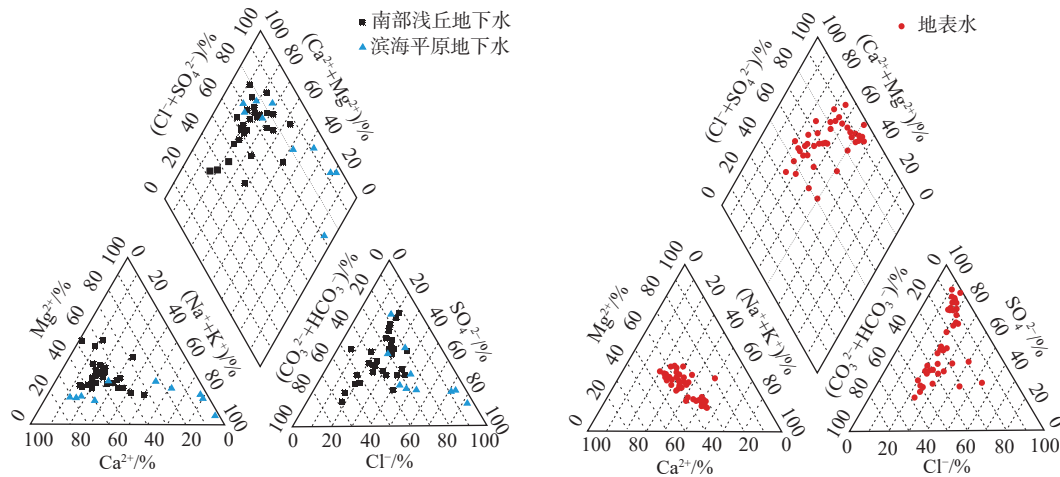


图 2 地下水和地表水 Piper 三线图

Fig.2 The Piper diagram of groundwater and surface water

水化学类型分类普遍采用舒卡列夫分类法 [24]。南部浅丘地下水化学类型主要有  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$  等 15 种, 北部滨海平原地下水化学类型主要有  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+}$  等 7 种, 地表水化学类型主要有  $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} \cdot$

$\text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  等 12 种。

### 3.3 主要影响因素

利用 Gibbs 图可以判断水化学形成机制, 即蒸发浓缩、岩石风化、大气降水和海水的 4 种控制类型 [25-26]。由图 3 可知, 南部浅丘地下水大部分点位



$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}) < 0.4$ , 滨海平原地下水  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  比值分为 2 部分, 一部分比值  $> 0.7$  位于蒸发浓缩-海水控制区域, 另一部分位于岩石风化区并有向控制线外延伸趋势, 地表水  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  比值整体大于南部浅丘地下水。南部浅丘地下水和地下水  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  较为接近, 随着  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  比值的增大, TDS 值也明显增大, 两者具有较好的线性相关性, 说明一些因素在改变  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- +$

$\text{HCO}_3^-)$  比值的同时, 也影响着 TDS 值。除 5 个滨海平原地下水点位于蒸发浓缩-海水控制区外, 大部分位于岩石风化区, 具有向蒸发浓缩延伸的趋势, 并远离大气降水区, 表明地表水和南部浅丘地下水化学组成主控因素为岩石风化作用, 蒸发浓缩-海水控制着滨海平原地下水化学组成, 大气降水对研究区的水化学特征影响较小。个别点位于控制线外, 表明人类活动对水化学成分具有一定影响<sup>[27]</sup>。

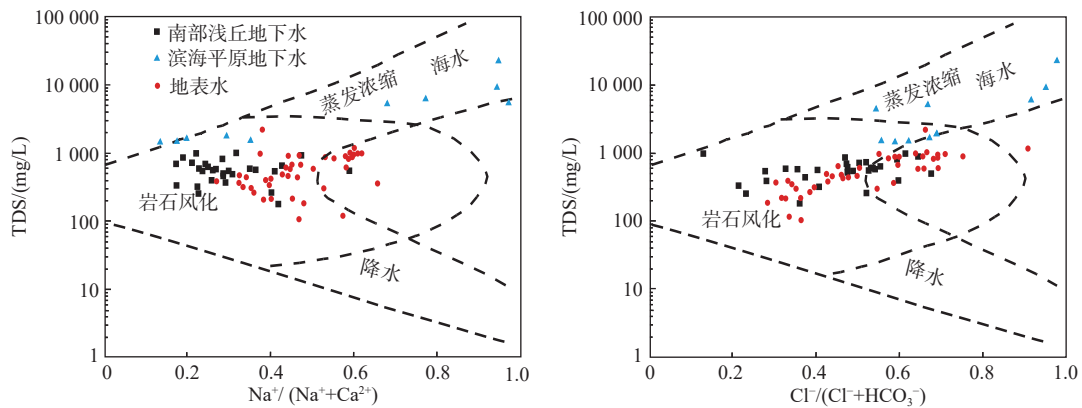
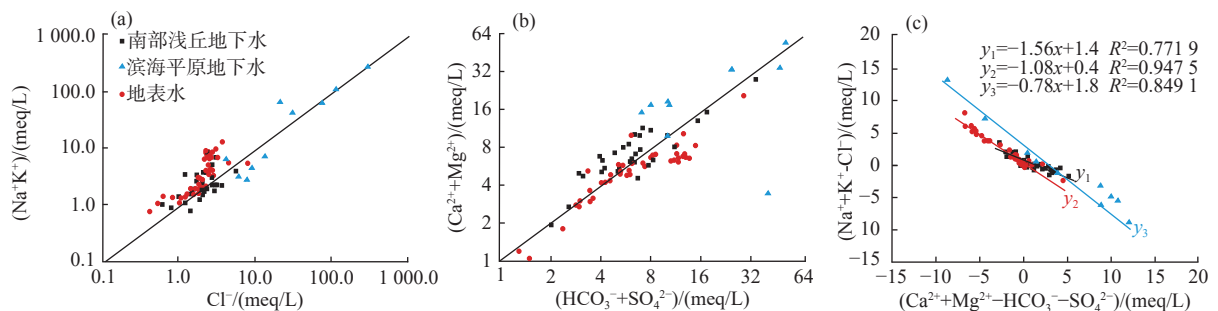


图 3 地下水和地表水 Gibbs 图

Fig.3 The Gibbs diagrams of groundwater and surface water

采用样品的主要阴阳离子关系分析研究区水化学组分来源<sup>[28]</sup>。一般说来, 若  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$  当量浓度比接近 1,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  主要来自岩盐溶解; 若  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^- > 1$ , 则  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  主要来源于硅酸盐溶解; 当值  $< 1$ , 说明  $\text{Na}^+$  存在外界 (如人为源) 输入<sup>[29-31]</sup>。由图 4a 可知, 地下水和地表水具有不同的离子比值, 地下水大部分样品位于 1:1 线附近及

下方, 地表水大部分样品位于 1:1 线附近及上方, 两者整体比值接近 1, 但地下水比值整体略低于地表水, 说明岩盐溶解是地下水和地表水  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的主要来源, 硅酸盐溶解也影响着地表水  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  含量, 地下水较低的  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$  比值说明存在外界来源的  $\text{Cl}^-$ , 可能是人类活动对地下水的污染影响了地下水比值。



$y_1$  为南部浅丘地下水拟合斜率,  $y_2$  为地表水拟合斜率,  $y_3$  为滨海平原地下水拟合斜率,  $R^2$  为拟合优度

图 4 主要离子比值关系

Fig.4 The plots of the major ions ratios

$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  值可以用来判断地下水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  来源, 当碳酸盐溶解时, 比值  $> 1$ , 当蒸发岩及硅酸盐溶解时, 比值  $< 1$ <sup>[32-34]</sup>。由图 4b 可知, 大部分点位在 1:1 等值线的附近, 地下

水整体偏于等值线上方, 地表水偏于等值线下方。研究区地下水和地表水  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于硅酸盐和碳酸盐的溶解, 碳酸盐溶解对地下水影响更加显著。

阳离子吸附交换作用可采用  $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^{-}-SO_4^{2-})/(Na^{+}+K^{+}-Cl^{-})$  值判断,若拟合直线斜率接近-1,说明发生了强烈的离子交换作用<sup>[4,35]</sup>,  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 吸附于水中介质占位析出  $Na^{+}$ 。由图 4c 可知,地下水和地表水  $Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^{-}-SO_4^{2-}$  与  $Na^{+}+K^{+}-Cl^{-}$  均呈负相关,地表水斜率为-1.08,  $R^2$  为 0.9475,南部浅丘地下水斜率为-1.56,  $R^2$  为 0.7719,滨海平原地下水斜率为-0.78,  $R^2$  为 0.8491,地表水斜率更接近-1,说明地下水及地表水均发生了阳离子交换作用,阳离子交换作用强度由大到小依次为地表水、滨海平原地下水、南部浅丘地下水。矿物颗粒的种类、粒径和有机质含量影响着阳离子交换量<sup>[36-37]</sup>,黏土矿物诸如蒙脱石、蛭石、伊利石等颗粒细小,相比长石、石英、碳酸盐等矿物具有更大的阳离子交换量。研究区地下水主要为基岩裂隙水、岩溶裂隙水及松散岩类孔隙水,岩性主要为花岗岩、变粒岩、片岩、片麻岩及第四系砂砾层,而地表水底部分布着蒙脱石、蛭石、伊利石黏土层,故阳离子交换吸附作用更强。

### 3.4 饮用水和灌溉水适宜性评价

#### 3.4.1 饮用水适宜性评价

利用 WQI 水质综合指数法对研究区饮用水质进行综合评价,结果如图 5 所示,研究区地表水整体优于地下水,南部浅丘地下水优于北部滨海平原地下水。地表水均为优良水质,Ⅰ、Ⅱ类水质占比>90%,占比最大的为Ⅰ类,占比 48.8%,Ⅱ、Ⅲ类分别为 43.9%、7.3%。南部浅丘地下水Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类占比分别为 20.7%、34.5%、41.4%、3.4%。滨

海平原地下水水质较差,Ⅳ、Ⅴ类占比为 90%,其中,8 件样品  $Cl^{-}$  浓度>250 mg/L,显示高  $Cl^{-}$  特征,6 件临近村庄的样品  $NO_3^{-}$  值>20 mg/L,最大值为 463.5 mg/L。滨海平原地区人口稠密,分布着大量农田,导致含氮化肥大量使用,并且养殖废水和生活废水多未经处理排放,加之海水入侵,使得滨海平原地区地下水水质变差。

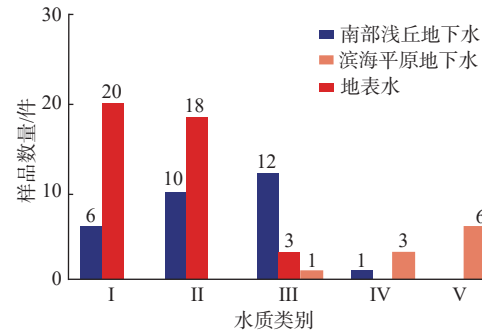


图 5 WQI 水质综合指数法评价结果

Fig.5 The WQI comprehensive index method for water quality evaluation

为直观了解单一污染因子对水质的影响程度,将单一污染因子得分值除以 WQI 总值,计算出污染指数贡献值(表 3)。南部浅丘地下水污染指数贡献最大为  $NO_3^{-}$ ,占 45.7%,其中 19 件样品贡献指数>49%,其次为 pH 占 11.5%、TDS 占 10.0%。滨海平原地下水污染指数贡献最大为  $NO_3^{-}$ ,占 31.4%;TDS 占 15.1%; $Cl^{-}$  占 14.5%。地表水污染指数贡献值最大的为 TDS,占 17.5%;其次为  $SO_4^{2-}$ ,占 17.3%;EC 占 14.7%。人类活动带入的  $NO_3^{-}$  成为该区地下水最大污染因素,滨海地区海水入侵造成地下水咸化也是造成该区地下水污染的重要影响因素。

表 3 污染因子指数贡献率

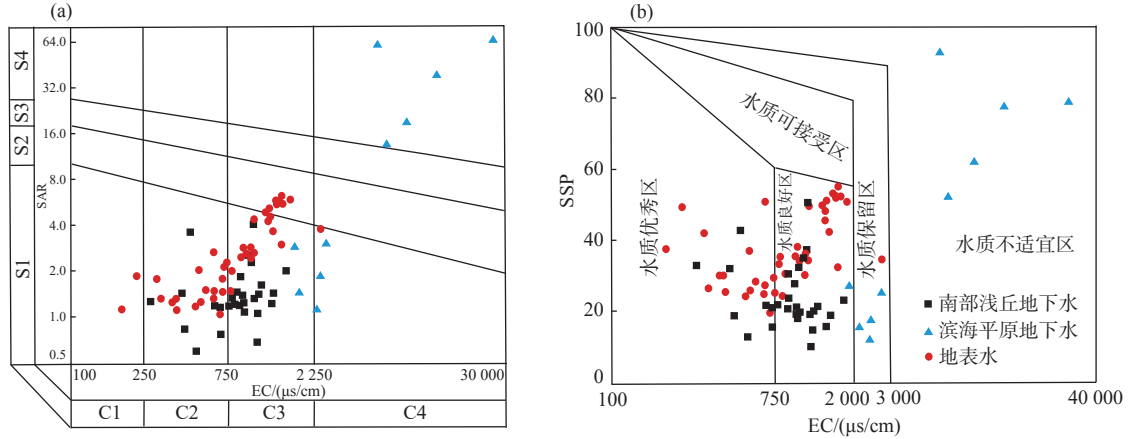
Table 3 The contribution rates of pollution factor indexes

| 参数             | 南部浅丘地下水(n=29) |      |      | 滨海平原地下水(n=10) |      |      | 地表水(n=41) |      |      |
|----------------|---------------|------|------|---------------|------|------|-----------|------|------|
|                | 最小值           | 最大值  | 平均值  | 最小值           | 最大值  | 平均值  | 最小值       | 最大值  | 平均值  |
| pH             | 3.2           | 32.5 | 11.5 | 0.6           | 8.0  | 2.8  | 4.7       | 37.8 | 13.3 |
| EC             | 4.8           | 17.2 | 8.9  | 3.9           | 18.6 | 12.3 | 4.9       | 17.4 | 14.7 |
| $Na^{+}+K^{+}$ | 0.5           | 6.5  | 2.0  | 0.5           | 16.6 | 7.0  | 1.0       | 7.3  | 4.6  |
| $Ca^{2+}$      | 2.1           | 10.5 | 4.8  | 0.3           | 9.2  | 3.6  | 2.4       | 8.9  | 5.8  |
| $Mg^{2+}$      | 0.9           | 5.7  | 2.2  | 0.5           | 4.1  | 2.1  | 1.1       | 4.7  | 3.0  |
| $NO_3^{-}$     | 1.7           | 74.2 | 45.7 | 0.5           | 81.2 | 31.4 | 0.1       | 72.5 | 13.0 |
| $Cl^{-}$       | 1.8           | 8.2  | 3.9  | 2.3           | 37.1 | 14.5 | 2.1       | 13.7 | 6.5  |
| $SO_4^{2-}$    | 1.7           | 22.5 | 7.2  | 1.2           | 23.1 | 8.8  | 2.3       | 32.2 | 17.3 |
| $HCO_3^{-}$    | 0.7           | 12.6 | 3.9  | 0.6           | 6.4  | 2.4  | 0.3       | 11.3 | 4.4  |
| TDS            | 5.3           | 19.1 | 10.0 | 4.6           | 22.7 | 15.1 | 5.5       | 22.3 | 17.5 |

### 3.4.2 灌溉用水适宜性评价

钠吸附比(SAR)主要用于表征灌溉水对土壤与植物的钠害<sup>[38]</sup>。由 USSL 图(图 6a)可知,南部浅丘地下水 SAR 值普遍较低,均位于 S1 区,大部分 $<2$ ,主要为 C3S1、C2S1,占比分别为 72.4%、27.6%。

滨海平原地下水主要位于 C4S4、C4S1,占比分别为 50.0%、30.0%,水质较差。地表水 SAR 值普遍高于地下水,可能是阳离子交换吸附作用更强使地表水富集了更多的  $\text{Na}^+$ ,地表水点位主要位于 C2S1、C3S1 和 C2S2,占比分别为 36.6%、31.7%、24.4%。



(a) USSL 图; (b) Wilcox 图

图 6 灌溉用水水质评价

Fig.6 Evaluation of irrigation water quality

由 Wilcox 图(图 6b)可知,南部浅丘地下水水质优良的样品 29 件,占比 100%。滨海平原地下水点位位于保留区和不宜区的样品共 9 件,占比 90%。地表水水质优良的样品为 40 件,占比 97.67%,仅有 1 个点位位于保留区,该采样点附近为金矿开采区,矿石中较高含量的黄铁矿,为含硫矿物生物氧化提供了大量的硫,增大了  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量。

研究区地表水的水质整体优于南部浅丘地下水,滨海平原地下水水质较差。地表水和南部浅丘地下水的 SAR、SSP 值普遍较低,适合农业用水,但是较高的 EC 值降低了水质。大部分地区地表水是可以直接灌溉的,合理使用地表水不会造成土壤的盐碱害。地下水空间上分为 2 个区域,南部浅丘地下水水质较好,可直接用于灌溉;北部滨海平原地下水大部分水质较差,直接用于农业灌溉会对土壤和作物带来危害,且地下水的大量使用也会一定程度改变水动力条件,进一步加剧海水入侵,应引入优良区的地表水进行灌溉,以改善当地土壤和地下水水质。

## 4 结论

(1)研究区地下水和地表水均呈弱碱性,按阴阳离子浓度分析,南部浅丘地下水的优势组分为

$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,滨海平原地下水为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ ,地表水为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 。南部浅丘地下水化学类型主要为  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ ,滨海平原地下水主要为  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+}$ ,地表水主要为  $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 。

(2)研究区地表水和南部浅丘地下水化学组分主要受岩石风化作用影响,滨海平原地下水受控于蒸发浓缩-海水作用。岩盐溶解是地下水和地表水  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的主要来源, $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来源于硅酸盐和碳酸盐溶解,阳离子交换作用也一定程度影响着区域水化学组分,地表水受阳离子交换作用影响程度大于地下水。

(3)研究区地下水  $\text{NO}_3^-$  存在严重超标,农业活动氮肥的使用和生产生活污水直接排放是造成  $\text{NO}_3^-$  污染的主要原因。滨海平原地区高  $\text{Cl}^-$  浓度特征表明海水入侵改变着地下水化学特征, $\text{Cl}^-$  浓度极高值的出现表明海水入侵在空间上发生了分化,局部地区海水入侵加剧。

(4)WQI 水质综合指数法表明,地表水整体优于地下水,55.2% 的南部浅丘地下水和 92.7% 的地表水符合优良饮用水标准,滨海平原地下水水质较差, $\text{NO}_3^-$  和 TDS 分别是地下水和地表水最大污染因素。灌溉水质评价表明,地表水总体优于地下水,大部分为优良水源,合理灌溉不会造成植物和土壤

的盐碱害,滨海平原地下水水质较差,应减少地下水的抽取并引入优良区地表水进行生产生活。

#### 参考文献:

- [1] 蓝楠,陈燕,彭泥泥.地下水资源保护立法问题研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2010:12-14.  
LAN Nan, CHEN Yan, PENG Nini. Research on Legislative Issues of Ground Water Resource Conservation [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2010: 12-14.
- [2] 凌卫宁,范继辉.广西水资源近年来变化趋势及可利用水资源潜力分析[J].广西水利水电,2011,4(4):45-48.  
LING Weining, FAN Jihui. Latest change tendency and utilizable potentiality of water resources in Guangxi[J]. *Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 4(4): 45-48.
- [3] 张岳.中国水资源与可持续发展[M].南宁:广西科学技术出版社,2000:4-5.  
ZHANG Yue. Water Resources and Sustainable Development in China [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 2000: 4-5.
- [4] 鲍丽然,李晓东,刘小龙.嘉陵江河水主要离子化学组成的时间和空间变化特征[J].水利水电科技进展,2010,30(4):35-40.  
BAO Liran, LI Xiaodong, LIU Xiaolong. Space-time variation of chemical composition of major ions in Jialing River[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(4): 35-40.
- [5] 李晓波,李杭,杨宝萍,等.泰安市旧县水源地下水化学特征及成因分析[J].环境工程技术学报,2022,12(6):2002-2010.  
LI Xiaobo, LI Hang, YANG Baoping, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of water source area in Jiuxian County, Tai'an City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 2002-2010.
- [6] 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.  
HOU Guohua, GAO Maosheng, DANG Xianzhang. Hydrochemical characteristics and salinization cause of shallow groundwater in Caofeidian, Tangshan City[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 49-57.
- [7] 薛禹群,吴吉春,谢春红,等.莱州湾沿岸海水入侵与咸水入侵研究[J].科学通报,1997,42(22):2360-2368.  
XUE Yuqun, WU Jichun, XIE Chunhong, et al. Research on seawater intrusion and saltwater intrusion along the coast of Laizhou Bay[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(22): 2360-2368.
- [8] 易亮,于洪军,徐兴永,等.莱州湾海岸带环境与功能区划初探[J].海岸工程,2010,29(1):30-39.  
YI Liang, YU Hongjun, XU Xingyong, et al. Preliminary study on coastal zone environments and functional zoning in Laizhou Bay[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 29(1): 30-39.
- [9] 张传奇,王晓曦,陈曦.莱州湾东岸地下水化学特征及水质评价[J].环境保护与循环经济,2020,40(4):56-61.  
ZHANG Chuanqi, WANG Xiaoxi, CHEN Xi. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of groundwater on the east coast of Laizhou Bay[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2020, 40(4): 56-61.
- [10] 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.
- [11] 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 Bo, HU Shuya, ZHAO Quansheng. Chemical characteristics of groundwater in coastal seawater intrusion area of Laizhou Bay[J]. *Global Geology*, 2020, 39(4): 971-977.
- [12] 冯嵩.莱州湾南岸水化学特征及其海底地下水排泄研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.  
FENG Song. Study of hydrochemistry characteristics and submarine groundwater discharge at south coast of Laizhou Bay [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [13] 安兆利.莱州市水资源评价分析讨论[J].陕西水利,2022,5(5):50-52.  
AN Zhaoli. Analysis and discussion on water resources evaluation in Laizhou City[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2022, 5(5): 50-52.
- [14] 孟春霞,郑西来,王成见.平度市高氟地下水分布特征及形成机制研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2019,49(11):111-119.  
MENG Chunxia, ZHENG Xilai, WANG Chengjian. Study on distribution characteristics and formation mechanism of high fluoride groundwater in Pingdu City[J]. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2019, 49(11): 111-119.
- [15] WHO. Guidelines for Drinking Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum[S]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [16] 刘鑫,向伟,司炳成.渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J].环境科学,2021,42(6):2817-2825.  
LIU Xin, XIANG Wei, SI Bingcheng. Hydrochemistry and its controlling factors and water quality assessment of shallow groundwater in the Weihe and Jinghe River catchments[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(6): 2817-2825.
- [17] ZHANG Q Y, XU P P, QIAN H. Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2020, 12(3): 487-500.
- [18] XU P P, FENG W W, QIAN H, et al. Hydrogeochemical characterization and irrigation quality assessment of shallow groundwater in the central-western Guanzhong Basin, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(9): 1487-1492.
- [19] WILCOX L V. Classification and Use of Irrigation Waters[S]



- Washington D.C.: United States Department of Agriculture, 1955.
- [20] 吴吉春, 薛禹群, 刘培民, 等. 龙口-莱州地区海水入侵的发展与水化学特征 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 1994, 30(1): 98-110.
- WU Jichun, XUE Yuqun, LIU Peimin, et al. Development and hydrochemical characteristics of sea water intrusion in Longkou-Laizhou district[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 1994, 30(1): 98-110.
- [21] 王辉, 许学工. 海水入侵胁迫下的莱州市水资源承载力评价 [J]. *中国农村水利水电*, 2016(6): 43-46.
- WANG Hui, XU Xuegong. Evaluation of carrying capacity of water resources under the pressure of seawater intrusion in Laizhou, Shandong Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(6): 43-46.
- [22] 王蜜蕾, 窦衍光, 邹亮, 等. 青岛崂山周边地下水化学特征与矿泉水成因分析 [J]. *海洋地质前沿*, 2021, 7(9): 17-24.
- WANG Milei, DOU Yanguang, ZOU Liang, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and genesis of mineral water at Laoshan Mountain and surrounding areas, Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 7(9): 17-24.
- [23] 张传奇, 温小虎, 高猛, 等. 莱州湾东岸地下水化学及盐化特征 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(5): 584-591.
- ZHANG Chuanqi, WEN Xiaohu, GAO Meng, et al. Hydrochemical characteristics and salinization characteristics of groundwater in the east coast of the Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(5): 584-591.
- [24] 周迅, 叶永红. 地下水舒卡列夫水化学分类法的改进及应用: 以福建省晋江市地下水为例 [J]. *资源调查与环境*, 2014, 35(4): 299-304.
- ZHOU Xun, YE Yonghong. Improvement and application of Schukalev groundwater hydrochemical classification method: taking groundwaters in Jinjiang City, Fujian Province as an example[J]. *Resources Survey and Environment*, 2014, 35(4): 299-304.
- [25] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [26] 庞国涛, 阎琨, 李伟. 钦州钦南区水化学特征及健康风险评价 [J]. *环境化学*, 2022, 41(11): 3558-3568.
- PANG Guotao, YAN Kun, LI Wei. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of Qinnan District, Qinzhou City[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(11): 3558-3568.
- [27] 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素 [J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1706-1713.
- ZHANG Jie, ZHOU Jinlong, ZENG Yanyan, et al. Hydrochemical characteristic and their controlling factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1706-1713.
- [28] 纪媛媛, 周金龙, 孙英, 等. 新疆昌吉市平原区地下水化学特征及质量评价 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2021, 19(3): 551-560.
- Ji Yuanyuan, ZHOU Jinlong, SUN Ying, et al. Chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in plain area of Changji City, Xinjiang[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science Technology*, 2021, 19(3): 551-560.
- [29] 肖勇, 莫培, 尹世洋, 等. 北京南郊平原地下水水化学特征及成因分析 [J]. *环境工程*, 2021, 39(8): 99-107.
- XIAO Yong, MO Pei, YIN Shiyang, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in southern suburb of Beijing plain[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(8): 99-107.
- [30] 田辽西, 刘德玉. 甘肃民勤绿洲北部荒漠区地下水水化学特征及成因分析 [J]. *地质论评*, 2023, 69(5): 1834-1844.
- TIAN Liaoxi, LIU Deyu. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the northern desert area of Minqin Oasis[J]. *Geological Review*, 2023, 69(5): 1834-1844.
- [31] 吴平, 闫中永, 李英, 等. 青铜峡市北部地下水水化学特征及成因分析 [J]. *宁夏工程技术*, 2019, 18(4): 379-384.
- WU Ping, YAN Zhongyong, LI Ying, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the north of Qingtongxia[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2019, 18(4): 379-384.
- [32] 吴晓丽, 张杨, 孙媛媛, 等. 平朔矿区地下水水化学特征及成因 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2021, 57(3): 417-425.
- WU Xiaoli, ZHANG Yang, SUN Yuanyuan, et al. Chemical characteristics and origin of groundwater in Pingshuo mining area[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, 57(3): 417-425.
- [33] 刘凯旋, 刘启蒙, 柴辉婵, 等. 孙疃矿区地下水水化学特征及其控制因素研究 [J]. *煤炭工程*, 2019, 51(4): 74-79.
- LIU Kaixuan, LIU Qimeng, CHAI Huichan, et al. Chemical characteristics and control factors of groundwater in Suntuan coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(4): 74-79.
- [34] 孔晓乐, 杨光辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 [J]. *环境科学*, 2021, 42(9): 4202-4210.
- KONG Xiaole, YANG Yonghui, CAO Bo, et al. Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River Basin[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4202-4210.
- [35] 张春潮, 侯新伟, 李向全, 等. 三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(3): 62-71.
- ZHANG Chunchao, HOU Xinwei, LI Xiangquan, et al. Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 62-71.
- [36] 王文艳, 张丽萍, 刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 123-127.
- WANG Wenyan, ZHANG Liping, LIU Qiao. Distribution and affecting factors of soil cation exchange capacity in watershed of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 123-127.
- [37] 杨树俊, 韩张雄, 王思远, 等. 土壤阳离子交换量与有机质、机械组成的关系 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(7): 2799-2805.

YANG Shujun, HAN Zhangxiong, WANG Siyuan, et al. The relationship between cation exchange capacity and organic matter, mechanical composition in soil[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(7): 2799-2805.

[38] TAHMASEBI P, MAHMUDY-GHARAIE M H, GHASSEMZADEH F, et al. Assessment of groundwater suitability for irrigation in a gold mine surrounding area, NE Iran.[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(22): 1-6.

## Genetic analysis of hydrochemical characteristics and water quality assessment in Laizhou-Pingdu area, Shandong

ZENG Jiao<sup>1,2</sup>, LI Haibo<sup>3\*</sup>, XU Huayuan<sup>4</sup>, CHU Hongxian<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhengpeng<sup>1,2</sup>, PANG Guotao<sup>1,2</sup>,  
WANG Lixin<sup>1,2</sup>, KONG Linghao<sup>1,2</sup>

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China; 2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China; 3 Longkou Marine Development and Fisheries Bureau, Yantai 265701, China; 4 Shouguang Marine Fisheries Development Centre, Weifang 262700, China)

**Abstract:** Groundwater (or phreatic water) and surface water are important water sources for industry and household in Laizhou-Pingdu area, Shandong, East China. To investigate the hydrochemical characteristics and water quality in this region, 39 groundwater samples and 41 surface water samples were collected systematically. Their hydrochemical characteristics and influencing factors were analyzed using mathematical statistics, the Piper trilinear diagrams, Gibbs diagrams, and ion ratios. In addition, a comprehensive water quality was evaluated using water quality index, sodium adsorption ratio, and sodium percentage methods for drinking and irrigation water in this region. The results show that both groundwater and surface water are weakly alkaline. The major hydrochemical types of groundwater in the southern shallow hilly area are  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{M}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ . In the coastal plain, groundwater is primarily  $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^- \cdot \text{Ca}^{2+}$ , while surface water is mainly  $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ . Rock weathering is the main factor on the hydrochemical characteristics of surface water and groundwater in the southern shallow hilly area, whereas groundwater in the coastal plain is influenced by evaporation concentration-seawater processes. Human activities have a certain impact on hydrochemical components, and the extremely high value of  $\text{Cl}^-$  in coastal plain groundwater indicate that seawater intrusion in some areas is intensified. The use of nitrogen fertilizers in agricultural activities and sewage discharge are the primary causes of  $\text{NO}_3^-$  pollution, which is not suitable for direct drinking. The evaluation of irrigation water quality show that in overall, surface water and groundwater in the southern shallow hilly area have good quality, and reasonable use for irrigation will not cause salinity or alkalinity damage to plants and soil. However, groundwater quality in the coastal plain is relatively poor, and introducing high-quality surface water is advised.

**Key words:** Laizhou; Pingdu; groundwater; surface water; hydrochemical characteristics; water quality assessment