

刚什婷, 吕明荟, 卢茜茜, 等. 基于多变量统计分析和水化学特征的海水入侵特征研究——以青岛市崂山区为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(5): 982-994.

DOI: 10.11932/karst20230509

基于多变量统计分析和水化学特征的 海水入侵特征研究 ——以青岛市崂山区为例

刚什婷^{1,2}, 吕明荟^{1,2}, 卢茜茜^{1,2}, 高 帅^{1,2}, 赵志强^{1,2}, 陈奂良^{1,2},
彭同强^{1,2}, 王 玺^{1,2}, 邢立亭³, 李莉霞^{1,2}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队 (山东省地矿工程勘察院), 山东 济南 250014;

2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014;

3. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022)

摘 要:沿海地区地下水环境问题日益突出, 进行地下水水化学特征及演化规律的研究, 能够更有效地开展地下水环境的监测和保护。以青岛市崂山区地下水为研究对象, 综合运用统计分析、主成分分析、Piper图解法、HFE-D图解法、Chadha's矩形图法等方法, 对研究区海水入侵特征与地下水水化学特征演化进行分析, 探究地下水水化学特征及演化规律, 并进一步评价了海水入侵现状。结果表明, 研究区地下水以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主要优势离子, 地下水化学类型多为 $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{Na}$ 型和 $\text{SO}_4-\text{Cl}-\text{Ca}-\text{Mg}$ 型。地下水中 Cl^- 浓度变化幅度较大, 且其均值超出了有无海水入侵的分界值($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 地下水可能发生一定程度的海水入侵; 青岛市崂山区地下水呈中性至弱碱性(pH 均值=7.0~8.0), 是沿海地区长期的水文地球化学过程的影响; 地下水化学变化主要受自然因素(岩石与水的相互作用)或人为因素(农业和家庭活动)的控制; 采用反距离加权(IDW)方法, 结合地理信息系统(GIS), 进行海水入侵位置的空间映射, 研究结果表明崂山区海水入侵主要分布于江家土寨东-浦里社区北入侵段, 王哥庄-港西-港东入侵段、仰口湾入侵段、登瀛村-栲栳岛入侵段。

关键词:地下水; 沿海含水层; 水化学特征; 地下水化学演化; 海水入侵; 青岛市崂山区

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)05-0982-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

海水入侵是一种在海平面上升等自然因素下或者大量开采内陆地下水等人类活动影响下, 地下水淡水与海水之间的平衡状态遭到破坏, 引起海水和地下水淡水交界面向内陆含水层推进的现象^[1-3]。海水入

侵是全世界沿海含水层面临的主要环境问题^[4-5]。海水入侵会破坏淡水资源、改变当地生态地质环境、腐蚀地下设施、造成土壤盐渍化等问题。为防止海水入侵, 国内外学者在海水入侵机理、影响因素、预测分析和防治措施等领域开展了大量的研究^[6-8]。

沿海含水层的咸化可能是由于简单的、直接的

基金项目: 山东省地矿局八〇一水文地质工程地质大队(暨山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心)基金项目(801KY2021-4)

第一作者简介: 刚什婷(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水污染控制与数值模拟研究。E-mail: gangshenting@163.com。

通信作者: 吕明荟(1982—), 女, 工程师, 主要从事水文地质研究工作。E-mail: lmhyoxiang@163.com。

收稿日期: 2023-04-20

海水入侵造成的,也可能涉及一系列复杂的地球化学过程,例如,岩石风化、蒸发浓缩、补径排、离子交换、氧化还原作用和人类活动等,这些过程以不同的方式影响水质变化^[9]。因此利用水化学指标来分析水化学特征,探究水化学演化规律及影响因素是研究沿海含水层咸化的化学过程以及盐度的来源最常见有效的方法^[10]。目前,对于水化学过程研究,最广泛使用的水文地球化学技术是主要、次要和微量元素的离子比率、离子比值法、混合计算和地球化学模型^[11-16]。

青岛市的海(咸)水入侵起源于 20 世纪 70 年代后期,到 20 世纪 80 年代中期,青岛地区发生连续多年干旱,地下水严重超采,海水入侵形成迅速蔓延趋势,导致区域水资源贫乏,尤其基岩地区贫水最甚,海水入侵严重威胁着青岛市崂山区弥足珍贵的地下水资源^[17-25]。本研究以青岛市崂山区地下水为主要研究对象,研究:①研究区水文地球化学特征;②取样井的主要离子化学特性及影响因素;③地下水的水文地球化学演变过程;④对海水入侵现状进行评价。旨在为研究区及类似沿海地区地下水水化学特征研究以及生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于青岛市崂山区,北起土寨河北岸,与即墨市海岸接壤;南至麦岛,与市南区海岸相接;东至海岸线;自海岸线向内陆延伸 3~5 km 为西部边界,研究区位置见图 1。研究区地貌主要为游冲积平原及山前冲洪积平原,部分为滨海养殖滩涂地带,面积约 245 km²。属温带大陆季风气候区,四季分明,雨量较为丰富,多年平均降水量 828.3 mm,多年平均蒸

发量 1 461.1 mm,多年平均气温 12.1 ℃。境内河流水系主要为沿海近缘水系,共有 23 条大小河流,呈放射状展布。河流特点是河长短、流速快、多直流入海、属于季节性河流。

研究区出露的地层较简单,从老至新依次为:元古界、中生界白垩系和新生界第四系。根据研究区含水介质类型和埋藏条件,将地下水划分为三大类:松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙-裂隙水和基岩裂隙水(图 2,图 3)。第四系孔隙含水岩组为主要含水层,主要分布在研究区河流中下游的河谷平原,该区域渗透能力较好,含水量随含水层厚度的增加而增大,其单井出水量在 100~500 m³·d⁻¹ 之间。碎屑岩类孔隙-裂隙水仅赋存于研究区东南的黄山-青山村一带,含水层透水性、富水性均较弱。

2 研究方法

2.1 样品采集与测试

本研究采用的数据均来自青岛市崂山区水文地质调查数据(2016—2017 年),所有水样检测分析均在山东省地矿工程勘察院实验室完成,测试内容主要包括 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、可溶性总固体(TDS)、总碱度(TA)、总硬度(TH)、pH 等指标。采样点位置如图 4。采用 Origin2017 软件对水化学参数进行描述性统计分析,绘制了 Piper 三线图、Chadha's 矩形图、Chadha's 矩形图,并运用主成分分析法讨论研究区地下水主要影响因素。借助 ACRGIS 软件空间分析功能对研究区浅层地下水海水入侵现状的空间分布规律进行分析,结合自然条件及人类活动背景资料,揭示研究区地下水化学特征及成因。

2.2 统计和水化学特征分析

主成分分析法经常被用来确定地下水质量的主要影响因子^[26-27]。这种方法在许多研究中被证实是非常有效的^[28-32]。利用水化学分析方法研究地下水特征和演化有助于识别地下水的水文地球化学过程。Piper 三线图是运用最广泛的水化学分析方法之一,但该方法只能表示地下水的化学组成,不能表示地下水化学演化。Giménez-Forcada 提出了水化学相演化图 HFE-D,根据海水阳离子/阴离子的组成,可以有效地检查海水入侵的位置和淡水/海水的混合百分比^[33-34]。

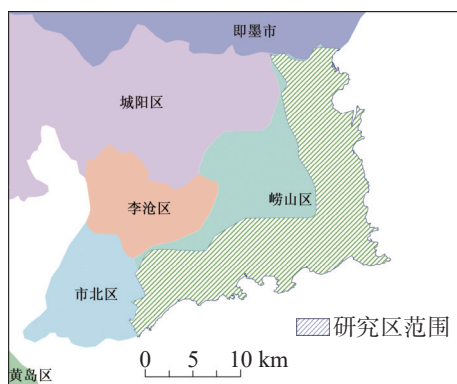


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

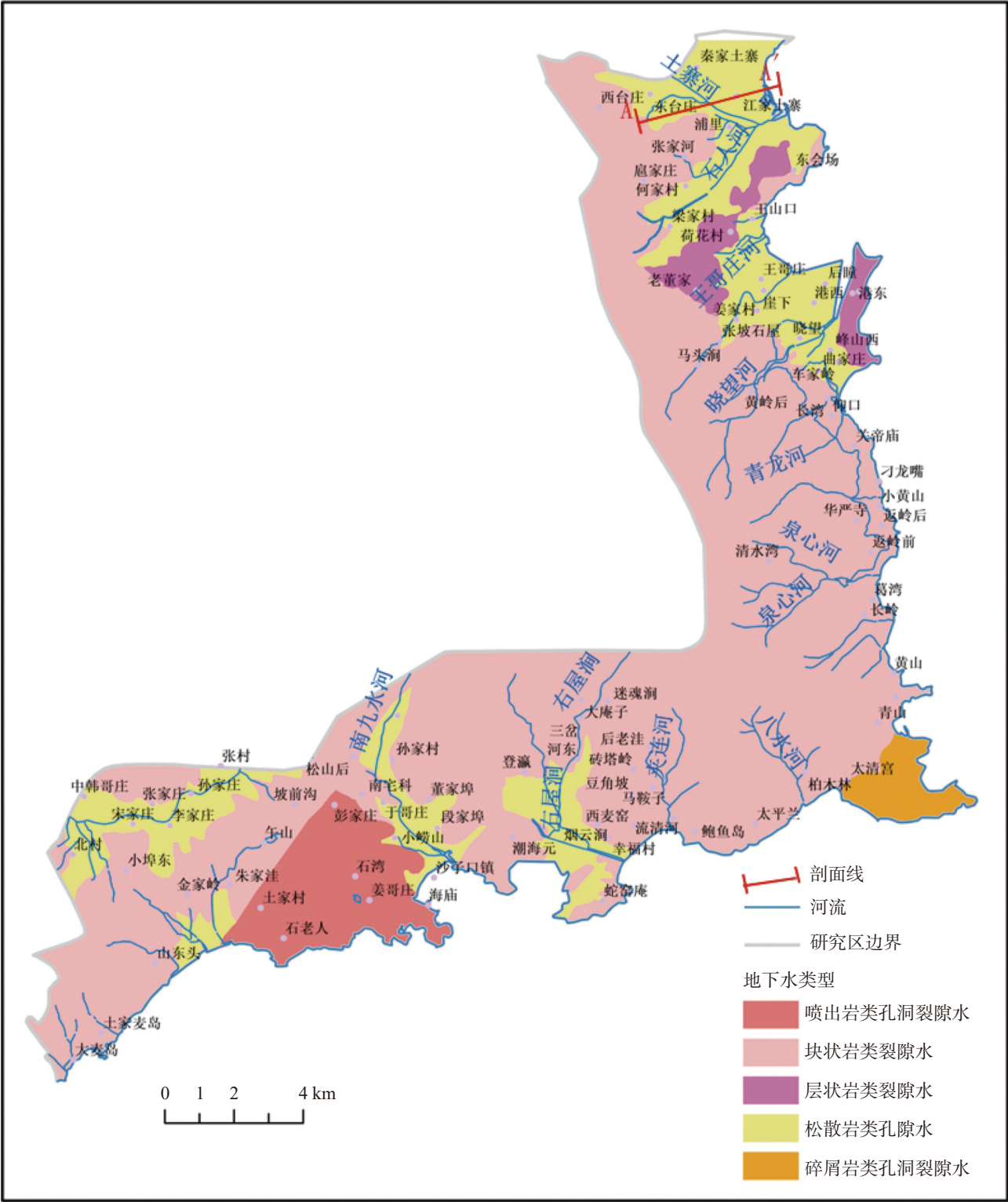


图2 青岛崂山区水文地质略图

Fig. 2 Hydrogeological sketch of Laoshan district, Qingdao

HFE-D 的计算过程涉及的阳离子有 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，阴离子有 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 。海水入侵的水文地球化学过程复杂，HFE-D 在简化复杂过程时忽略了一些次要过程，因此 HFE-D 的绘制过程只考虑占比最大的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、

SO_4^{2-} 。其中 K^+ 、 Mg^{2+} 不在图中展示，仅在计算中使用。另外 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 都可以代表淡水，在图中一个指标表示即可。本文选取 HCO_3^- 作为淡水中的特征阴离子。HFE-D 中横纵坐标均用各阴阳离子在总阴、总阳离子的浓度百分比表示。HFE-D 把含水层发生海

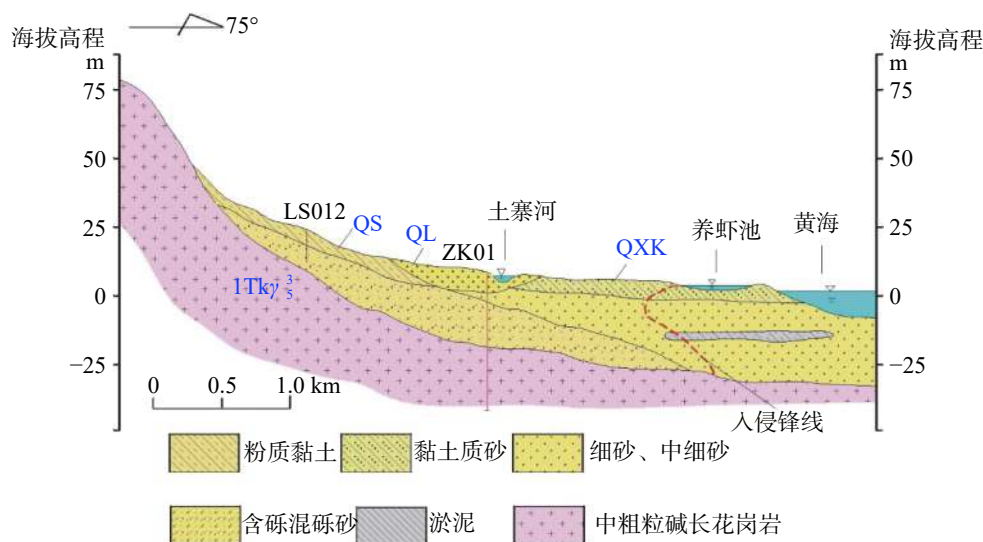


图 3 土寨河流域水文地质剖面图 A-A'

Fig. 3 Hydrogeological profile(A-A') of the Tuzhai river basin

水入侵时的水化学演化分为侵入期和恢复期, 分别表示咸化过程和淡化过程。

一般来说, Na^+ 和 Cl^- 是海水/盐水的主要离子、而 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 通常是淡水的主要离子^[35]。因此, 沿海地下水中高浓度的 Na^+ 和 Cl^- 离子可能表明海水混合的显著影响和盐水的出现, 而大量的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 主要反映了水-岩石相互作用的贡献^[36]。通过绘制 Chadha's 矩形图可以确定地下水盐化的来源。Chadha's 矩形图中阴阳离子的值都为相对质量浓度, 阴阳离子的和分别为 100%。大矩形可以分为四个大区, 分别代表①补给水; ②反向离子交换水; ③海水入侵; ④离子交换水。每个大区分为 4 个次级的矩形, 总计 16 个次一级的矩形, 每一个矩形都以 $c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - c(\text{Na}^+)$ 为 X 轴, $c(\text{HCO}_3^-) - c(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ 为 Y 轴。

海水入侵地下水质量指数^[37] GQI_{SWI} 由 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 七种离子浓度计算得到, 该指数实现了把海水入侵过程中一系列复杂的水文化学过程量化。在 GQI_{SWI} 图中可以把 Piper 三线图划分成 I 到 VI 区(图 5), 并给各分区分别赋值, 实现把 Piper 三线图结果量化。

3 结果与讨论

3.1 水化学指标统计结果分析

对地下水样品检测结果的主要指标进行数理统计分析。表 1 中给出各水化学指标的最小值、最大值、平均值和标准偏差。表中各数据, 尤其是 TDS、

TH、 Na^+ 、 Cl^- 等水质指标, 变化较大, 表明研究区内地下水化学组分有很大差异。地下水中阳离子以 Na^+ 为主, 浓度均值关系为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; 阴离子浓度 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ 。pH 是一个可以反映水文地球化学平衡信息的重要因子, 结果表明, 研究区地下水 pH 均值处于 7.0~8.0 之间, 变异系数为 0.04, 说明该地区的地下水呈中性至弱碱性, 在区域变化较小。表中各数据, 尤其是 TDS、TH、 Na^+ 、 Cl^- 等水质指标, 变化较大, 表明研究区内地下水化学组分有很大差异。地下水中 Cl^- 浓度变化幅度较大, 且其均值超出了《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)^[38] 的限值 ($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和海水入侵的分界值 ($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 说明地下水可能发生一定程度的海水入侵, 且基岩裂隙水中 Cl^- 浓度远低于第四系孔隙水浓度, 说明降雨使地下水 Cl^- 浓度降低。TDS 质量浓度变化比较大, 最大值为 $17\,138.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据 TDS 含量分类^[39], 地下水存在淡水、微咸水、咸水, 部分地区地下水为盐水。

在进行主成分分析时, 有 9 个变量被考虑在内: Na、Mg、Ca、K、Cl、 SO_4 、 HCO_3 、 NO_3 、pH。由 Total Variance Explained(主成分特征根和贡献率)可知, 特征根 $\lambda_1=4.76$, 特征根 $\lambda_2=1.725$, 前两个主成分的累计方差贡献率达 72.06%, 即涵盖了大部分信息。表明前两个主成分能够代表最初的 9 个指标来分析地下水水化学情况, 故提取前两个主成分即可。主成分分别记作 PC1、PC2。正如预期的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在 PC1 有较高的荷载(表 2, 图 6), 相

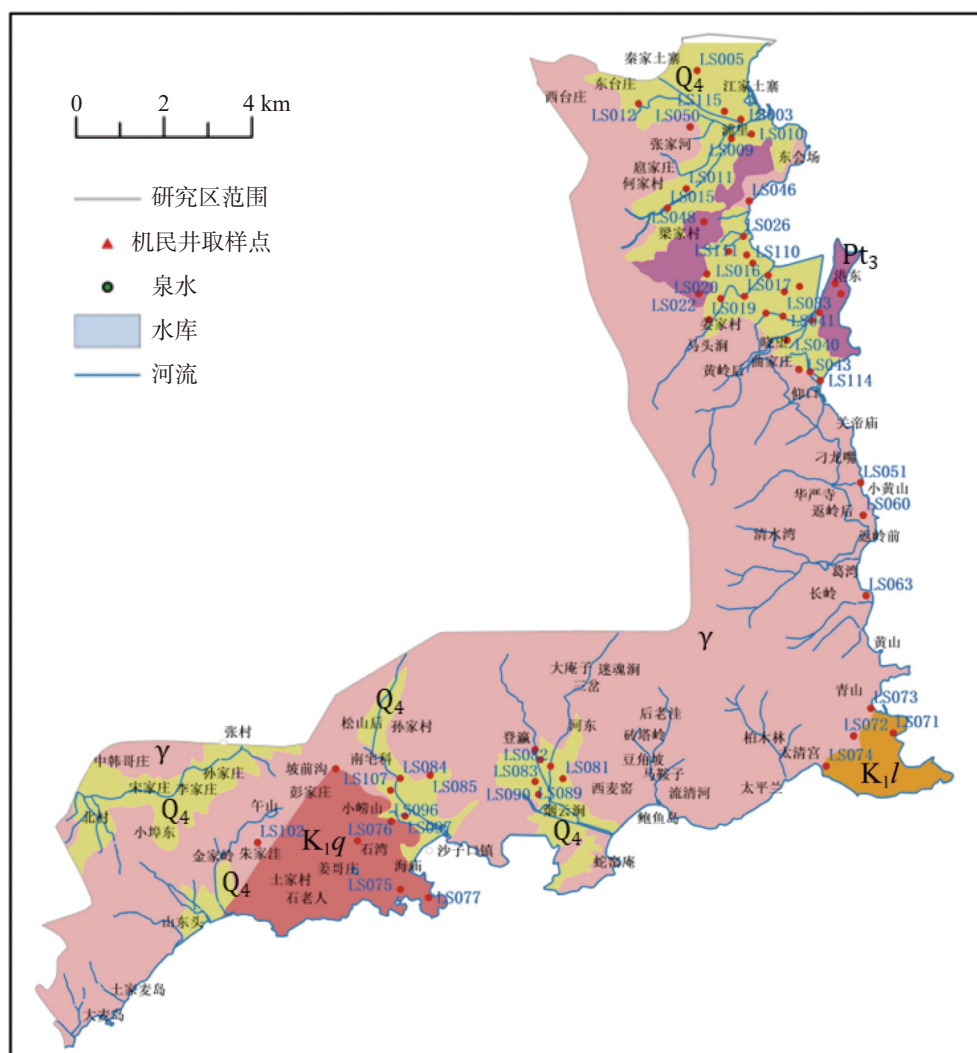


图4 取样监测点位置图

Fig. 4 Locations of sampling and monitoring sites

关性强,反映的是水-岩作用对水化学的影响,如蒸发、岩石与水的相互作用,以及可能与海水入侵有关。为证实这一假设,研究 Piper 三线图、HFE-D 图、Chadha's 矩形图等其他相关指标, pH、 HCO_3^- 、 NO_3^- 在第二主成分上有较高载荷,相关性强,说明发生了碳酸盐矿物的溶解; NO_3^- 为负值(NO_3^- 代表了农业活动和碱性矿物肥料的主要特征),反映了农业活动对地下水的影响,也可能与降水直接补给有关。由于农业和人类活动对青岛市地下水质量的影响前人已有大量研究^[40,25],本文只关注海水入侵对地下水的影响,因此对 NO_3^- 不做过多研究。

3.2 水化学特征分析

3.2.1 Piper 三线图解析水质演化

Piper 三线图能反映地下水主要离子组成变化和

水化学特征,可以用来划分水化学类型。对于阳离子(图7左下三角形),大部分数据中主导阳离子是 Ca^{2+} ,平均毫克当量百分比为75%,碱土金属元素($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$)浓度大于碱金属元素($\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$),仅在少数水样中碱金属元素($\text{K}^{+}+\text{Na}^{+}$)大于碱土金属元素($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$)。对于阴离子(图7右下三角形),大部分数据主导阴离子是 HCO_3^- ,平均毫克当量百分比为75%,弱酸根离子(HCO_3^-)浓度大于强酸根离子($\text{Cl}^{-}+\text{SO}_4^{2-}$)。研究区地层中常见的矿物有方解石(CaCO_3)、白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)等碳酸盐矿物,石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)等硫酸盐矿物,由此初步判断地下水水化学组分受碳酸盐矿物和硫酸盐矿物溶滤作用较强。

按照 GQI_{SWI} 中对 Piper 图中水化学类型的划分,崂山区地下水多为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型地下水,部分地区为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca}$ 型,还有少数监测点地下水为 $\text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型水组成。 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca}$ 型是淡水的主要

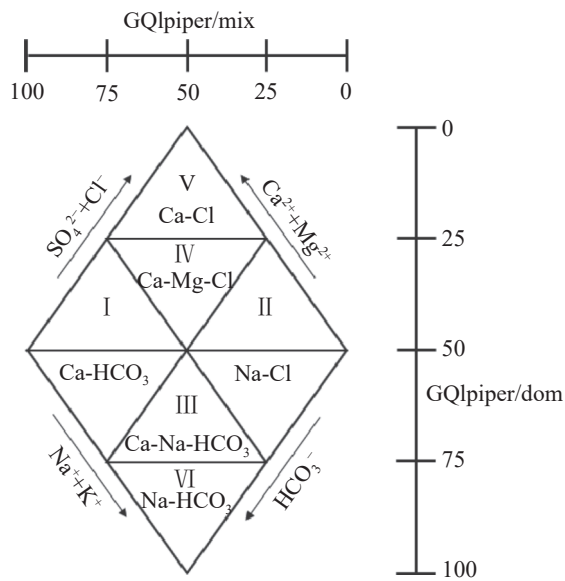


图 5 GQI_{swi} 对 Piper 图的分区
Fig. 5 Domains of GQI_{sw} in piper diagram

特征, Cl-Na 型是海水的主要特征, Cl-Ca·Mg 和 HCO₃-Na 型是咸淡水之间过渡的水化学类型。图 7 表明取样点位置只有少部分地区地下水是 HCO₃-Ca 型淡水, 多数地区地下水中 Cl⁻ 含量较大, 并且有部分区域的地下水化学类型为 Cl-Na 型, 上述研究结果表明, 部分地区已经发生了严重的海水入侵现象, 且多数地区地下水化学类型处于咸淡水之间的过渡阶段。

地下水化学类型分布较一致, 河流中上游阳离子主要以 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为主, 阴离子主要以 HCO₃⁻ 为主,

由陆地向海洋, 主要阳离子逐渐向 Na⁺ 变化, 阴离子向 Cl⁻ 变化。图中取样点水化学类型由地势高的地方向海洋趋近, 水化学类型由 HCO₃-Ca 型逐渐向 Cl-Na 型演化, 可能沿径流路径发生了阳离子交换, 以及海水不同程度的混合作用。如在石人河, LS015、LS011、LS009、LS010 从上游到海岸边依次排列, 水化学类型分别由 HCO₃-Cl-Ca·Mg→SO₄-Cl-Ca·Mg→Cl-Ca·Mg→Cl-SO₄-Na 变化; 在土寨河, LS012、LS005、LS001、LS003、LS010 从上游到海岸边依次排列, 水化学类型分别由 SO₄-Ca·Mg→SO₄-Cl-Na·Ca·Mg→SO₄-Cl-Ca·Mg→SO₄-Cl-Na·Mg→SO₄-Cl-Na 变化; 在王哥庄河 LS019、LS020、LS016、LS033、LS035 从上游到海岸水化学类型由 HCO₃-Cl-Ca·Mg→HCO₃-Cl-Na·Ca·Mg→HCO₃-Cl-Na·Ca·Mg→Cl-Ca·Mg→Cl-Na·Mg 变化; 在南部的大河东—小河东 LS085、LS081、LS082、LS092、LS089、LS090 从上游到海岸边依次排列, 水化学类型分别由 HCO₃-Cl-Na·Ca·Mg→HCO₃-Na·Ca→Cl-Na·Ca→SO₄-Cl-Na·Ca·Mg→SO₄-Cl-Na·Ca·Mg→Cl-Na·Ca·Mg 变化。根据各取样点离子浓度关系, 绘制了地下水七大离子浓度占比图(图 8)。由图 8 可知, 地下水中 Cl⁻ 含量占主导地位, 阳离子以 Ca²⁺、Na⁺ 为主。

3.2.2 HFE-D 图解水文地球化学过程

崂山区地下水 HFE-D 如图 9 所示, 显示了研

表 1 地下水水化学参数统计特征值 (单位: mg·L⁻¹, pH 除外)
Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of groundwater (unit: mg·L⁻¹, except for pH)

分区	项目	pH	TDS	TH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
基岩裂隙水	Mean	7.34	998.81	380.60	94.23	34.71	1.78	199.04	104.33	135.62	385.94	35.94
	SD	0.27	2032.16	670.59	200.68	46.61	2.49	512.01	82.42	218.81	1103.45	32.57
	Cv	0.04	2.03	1.76	2.13	1.34	1.40	2.57	0.79	1.61	2.86	0.91
	Min	6.90	67.21	46.12	12.93	3.36	0.13	2.17	7.65	3.05	21.53	0
	Max	8.20	8 877.64	3 064.85	910.97	191.90	8.82	2 125.00	306.08	778.46	4 812.71	101.35
第四系孔隙水	Mean	7.20	1 435.83	554.26	88.35	81.04	12.92	277.95	108.77	235.23	560.83	69.69
	SD	0.38	3 211.69	802.72	63.12	163.27	36.36	927.56	75.61	403.37	1 722.63	67.98
	Cv	0.05	2.24	1.45	0.71	2.01	2.81	3.34	0.70	1.71	3.07	0.98
	Min	6.50	74.83	39.20	8.31	4.48	0.17	6.67	15.30	10.68	13.13	0.36
	Max	8.50	17 138.10	3 597.12	263.18	728.01	200.00	5 000.00	369.84	1 617.98	9 160.70	244.75
地表水	Mean	7.30	301.99	138.71	40.88	8.90	4.43	30.69	85.07	56.11	40.91	23.25
	SD	0.32	302.26	127.06	35.80	9.18	5.75	41.82	90.26	62.81	53.38	33.27
	Cv	0.04	1.00	0.92	0.88	1.03	1.30	1.36	1.06	1.12	1.30	1.43
	Min	6.80	91.69	48.54	15.43	2.31	0.16	4.43	27.98	19.21	7.18	5.52
	Max	7.60	814.84	351.78	100.80	24.31	12.59	103.60	243.46	165.70	132.78	82.60

注: Min 为最小值, Max 为最大值, Mean 为平均值, SD 为标准差, Cv 为变异系数。
Note: Min represents minimum value; Max represents maximum value; Mean represents average value, SD represents standard deviation; Cv represents variation coefficient.

表 2 主成分分析法组成矩阵
Table 2 Matrix formed by principal component analysis

	PC1	PC2
pH	0.007 70	0.641 80
Ca ²⁺	0.270 27	-0.106 40
Mg ²⁺	0.431 21	-0.056 97
K ⁺	0.396 81	-0.004 19
Na ⁺	0.444 05	0.006 05
HCO ₃ ⁻	0.099 17	0.482 26
SO ₄ ²⁻	0.414 96	-0.072 80
Cl ⁻	0.447 43	-0.016 36
NO ₃ ⁻	-0.063 99	-0.579 08

究区地下水部分采样点为 Cl-Na 型海水, 表明河流中下游沿海地区地下水发生了海水入侵。部分采样点位于混合线以下, 表明该区域地下水正处于海水侵入阶段, 并且多数地区地下水已经完成由 HCO₃-Ca 型向 Cl-Ca 型的演化。HFE-D 图隐藏了坐标轴 0~33.3% 段各离子浓度相对均衡的区域, 用“Mix”表示图中主导离子浓度占比小于 50% 的水

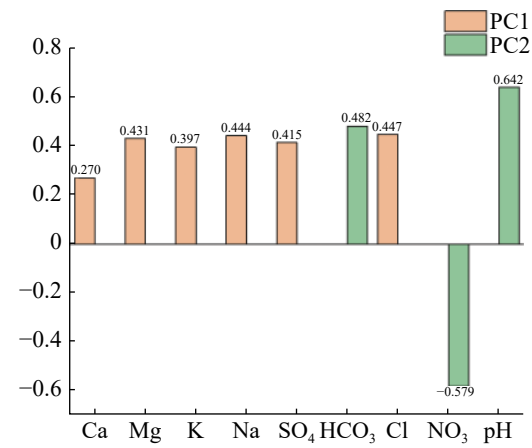


图 6 主成分分析结果图:PC1、PC2
Fig. 6 Results of principal component analysis: PC1 and PC2
化学类型^[33]。

3.2.3 Chadha’s 矩形图解析水质演化

根据 Chadha’s 图(图 10), 受海水入侵影响的钻孔(LS010、LS029、LS082 号样品)位于海岸线上, 分别对应江家土寨东-浦里社区北入侵段、王山口南-

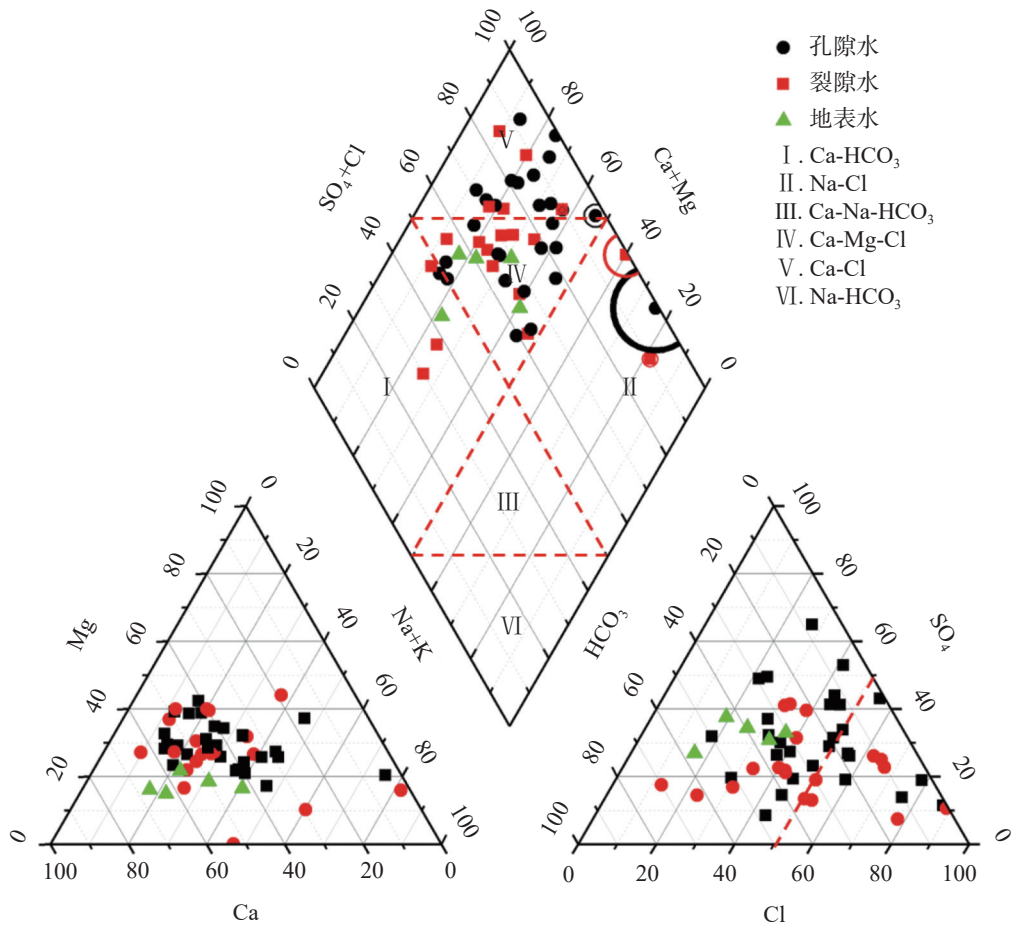


图 7 地下水水化学 Piper 图
Fig. 7 Piper diagram of groundwater hydrochemsitry

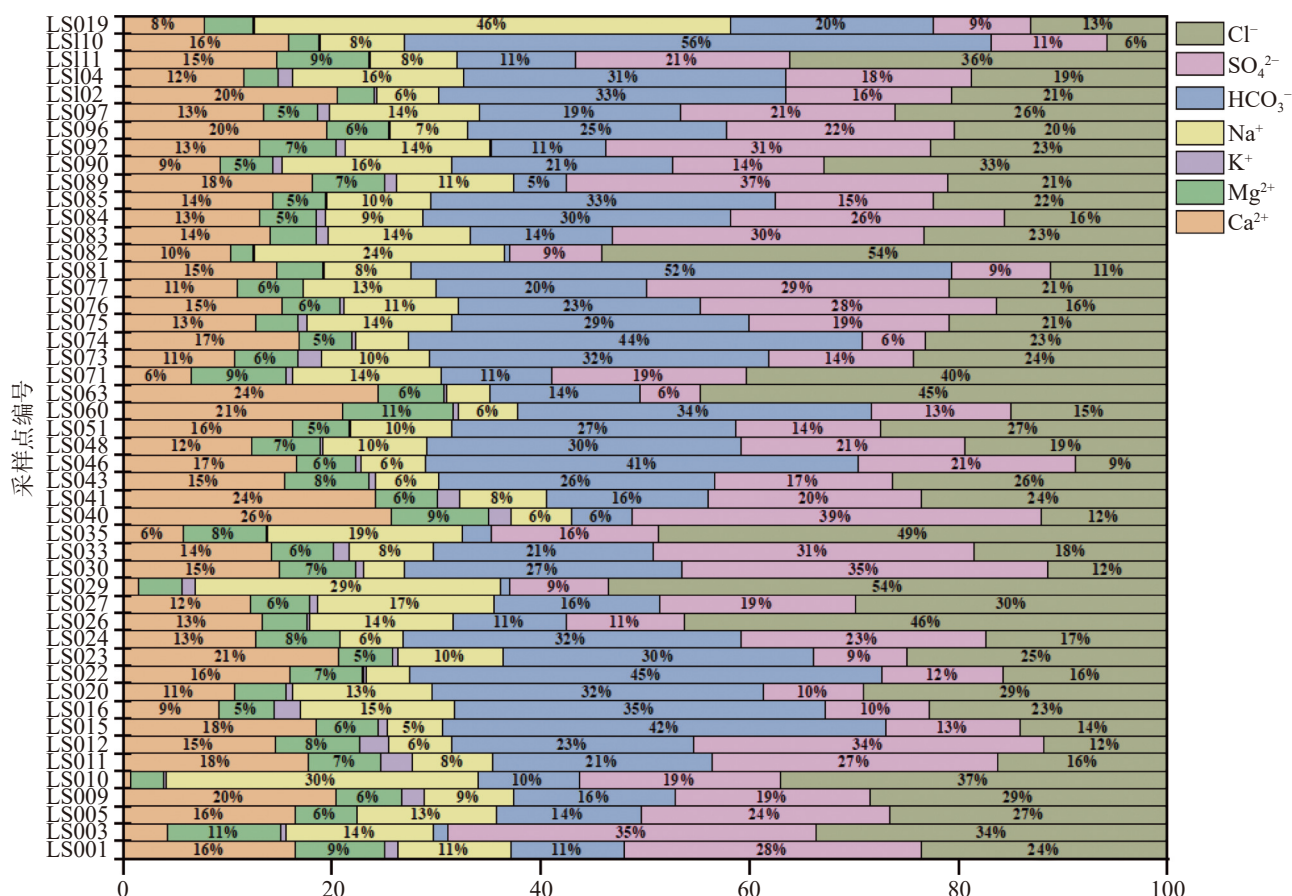


图 8 采样点地下水七大离子浓度占比图

Fig. 8 Percentages of concentrations of the seven ions in groundwater of the sampling sites

桑园社区北-王哥庄-港东入侵段、登瀛村南-栲栳岛入侵段。区域②、③表示 $c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > c(\text{Na}^{+})$, 其中 $c(\text{Na}^{+}) < 25\%$, $25\% \leq c(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-}) \leq 75\%$, 此区内地下水化学类型为 $\text{HCO}_3^{-} \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^{-} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型或 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^{-} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水(采样点 LS009、LS019、LS030、LS040、LS023、LS024、LS102、LS110、LS081、LS022、LS046、LS060、LS074、LS015)。

区域④表示 $c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > c(\text{Na}^{+})$ 和 $c(\text{HCO}_3^{-}) < c(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})$, 并且 $c(\text{Na}^{+})$ 和 $c(\text{HCO}_3^{-})$ 相对质量浓度均小于 25%, 这种水有永久硬度, 用于灌溉时, 不会形成 NaCO_3 盐沉积, 地下水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^{-} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水(采样点 LS001、LS089、LS111、LS033)。

3.3 海水入侵现状评价

采用基于熵权的集对分析法和 GIS 软件结合, 选取了 Cl^{-} 、矿化度、 SO_4^{2-} 、 $\gamma\text{Cl}^{-}/\gamma\text{HCO}_3^{-}$ 、SAR 五项化学特征指标作为评价因子, 评价因子等级划分指标见表 3, 对崂山区 53 个监测井点海水入侵程度分别进行了评价, 并绘制了海水入侵现状图(图 11)。由

图 11 可以看出, 青岛市崂山区地下水综合质量较好, 受海水入侵影响较少, 海水入侵主要分布于沿海冲洪积平原、河流下游及河道两侧区域, 尤其是河流入海口。自沿海地区向内陆地区海水入侵现状逐渐减缓, 海水入侵主要分布于江家土寨东-浦里社区北入侵段, 王哥庄-港西-港东入侵段、仰口湾入侵段、登瀛村-栲栳岛入侵段。

4 结论

本文以 2016—2017 年地下水水质调查数据为背景, 以地下水中主要离子浓度为水化学指标, 对青岛市崂山区地下水化学特征及海水入侵状况进行分析, 得出以下结论:

(1) 水化学指标统计分析结果显示 TDS、TH、 Na^{+} 、 Cl^{-} 等水质指标变化较大, 表明研究区内地下水化学组分有很大差异。地下水中 Cl^{-} 浓度变化幅度较大, 且其均值超出了《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) 的限值 ($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和海水入侵分界值

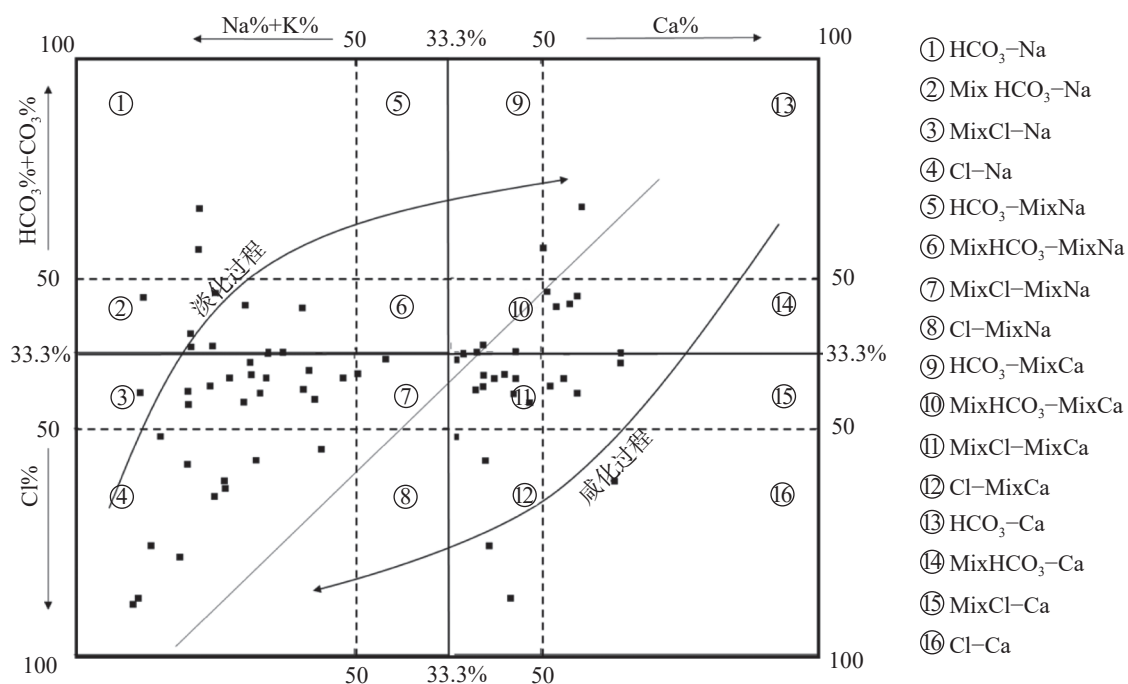


图9 崂山区地下水 HFE-D

Fig. 9 Evolution of hydrochemical facies of groundwater in Laoshan district

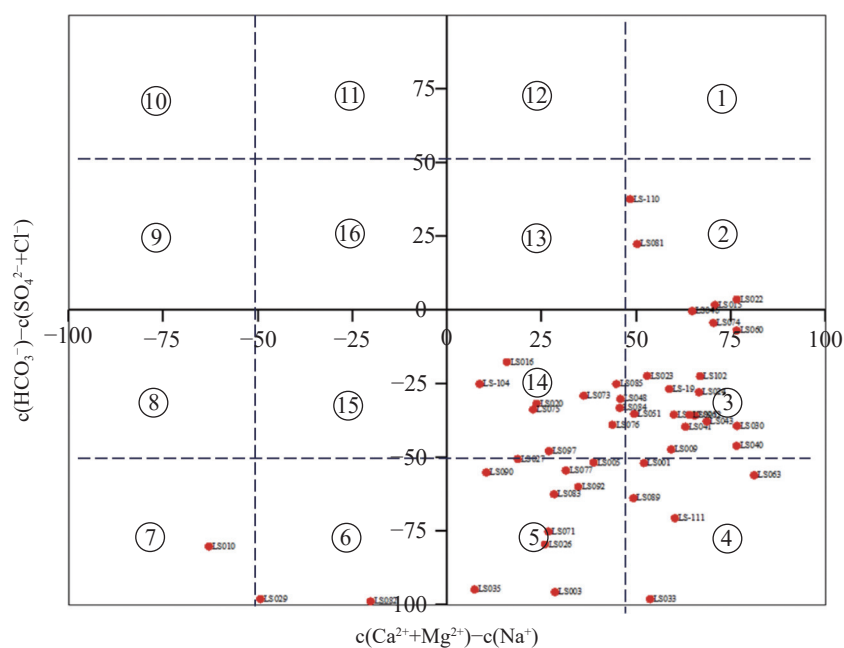


图10 Chadha 矩形水化学类型图

Fig. 10 Chadha rectangle hydrochemical diagram

表3 海水入侵指标的等级划分 (单位/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)Table 3 Classification of indexes of seawater intrusion (unit/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

特征因子	I 无入侵	II 轻度入侵	III 中度入侵	IV 严重入侵
Cl^-	≤ 250	≤ 600	$\leq 1\,500$	$> 1\,500$
SO_4^{2-}	≤ 200	≤ 450	$\leq 1\,200$	$> 1\,200$
M	$\leq 1\,000$	$\leq 2\,000$	$\leq 3\,000$	$> 3\,000$
SAR	≤ 2	≤ 3.55	≤ 10	> 10
$\gamma\text{Cl}/\gamma\text{HCO}_3$	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 6.6	> 6.6

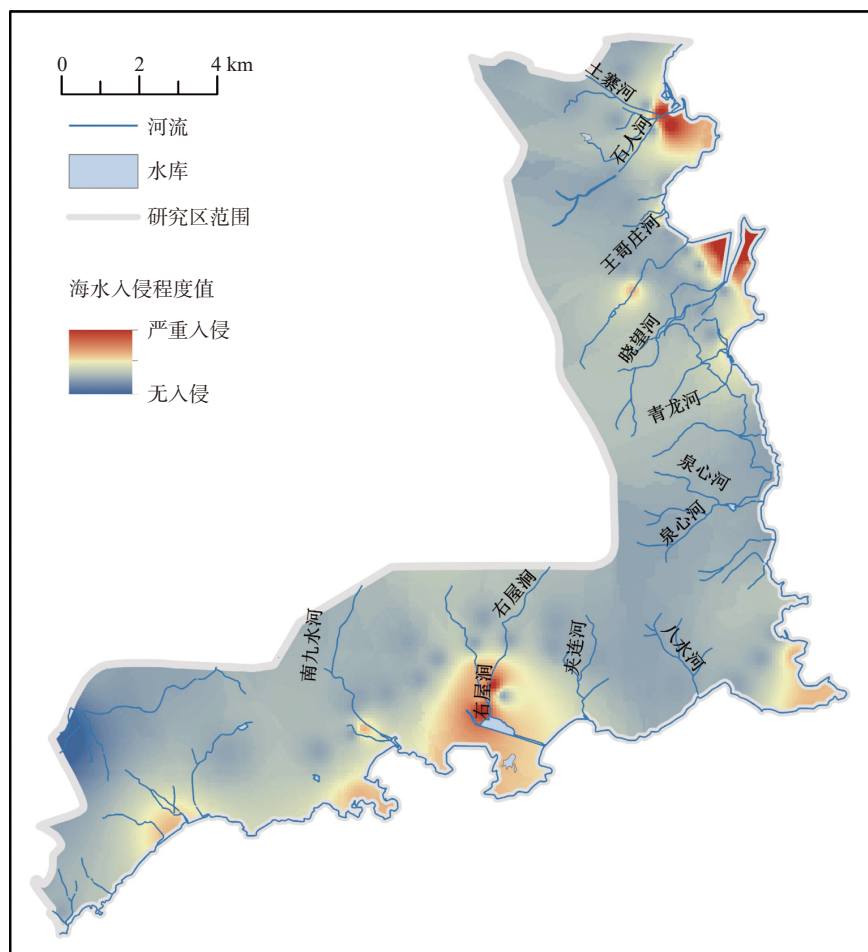


图 11 青岛市崂山区海水入侵空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of seawater intrusion in Laoshan district, Qingdao City

($250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 说明地下水可能发生一定程度的海水入侵。根据主成分分析可知控制研究区地下水水质的因素主要有大气降水和人为活动。

(2)Piper 三线图、HFE-D、Chadha's 矩形图结果显示, 取样点位置只有少部分地区地下水是 HCO_3^- -Ca 型淡水, 多数地区地下水中 Cl^- 含量较大, 并且有部分区域的地下水化学特征是 Cl^- -Na 型, 表明部分地区已经发生了严重的海水入侵现象, 多数地区地下水化学类型处于咸淡水之间的过渡阶段。研究区地下水海水入侵有向内陆扩展的趋势。

(3)根据海水入侵评价结果显示, 海水入侵水主要分布于江家土寨东-浦里社区北入侵段, 王哥庄-港西-港东入侵段、仰口湾入侵段、登瀛村-栲栳岛入侵段。

参考文献

- [1] Andersen M S, Nyvang V, Jakobsen R, Postma D. Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 3979–3994.
- [2] Werner A D, Simmons C T. Impact of sea-level rise on seawater intrusion in coastal aquifer[J]. *Groundwater*, 2009, 47: 197-204.
- [3] Liu Y, Jiao J J, Liang W, Kuang X. Hydrogeochemical characteristics in coastal groundwater mixing zone[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 85: 49-60.
- [4] Kazakis N, Pavlou A, Vargemezis G, Voudouris K S, Soulios G, Pliakas F, Tsokas G. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Theraikos Gulf, Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 373-387.
- [5] Alfarrah N, Walraevens K. Groundwater overexploitation and seawater intrusion in coastal areas of arid and semi-arid regions[J]. *Water*, 2018, 10(2): 143.
- [6] Bovolo C I, Parkin G, Sophocleous M. Groundwater resources, climate and vulnerability[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(3): 35001.
- [7] 郭明华, 王敬, 戴长国, 蒋雷, 张浩清, 柳超. 文登区浅层地下水化学演化与海水入侵研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(7): 57-65.

GUO Minghua, WANG Jing, DAI Changguo, JIANG Lei,

- ZHANG Haoqing, LIU Chao. Study on the hydrochemical evolution of groundwater and seawater intrusion in the shallow layer of Wendeng district[J]. *Marine Science*, 2021, 45(7): 57-65.
- [8] 赵倩. 锦州小凌河扇地海水入侵过程中水文地球化学作用及影响因素研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2021.
- ZHAO Qian. Hydrogeochemistry and influencing factors in the process of seawater intrusion in Xiaoling river fan, Jinzhou City[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2021.
- [9] Mondal NC, Singh VP, Singh VS, Saxena VK. Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388, 100-111.
- [10] 王昊, 王中良. 天津北大港水库水质咸化的地球化学机理分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 29-34.
- WANG Hao, WANG Zhongliang. Geochemical analysis on water salinization mechanism of the Tianjin Beidagang reservoir[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(6): 29-34.
- [11] 辛祥. 大沽河下游地区地下水氯离子时空变化特征与调控的数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2019.
- XIN Xiang. Numerical simulation of spatial and temporal characteristics and control of chloride ion in groundwater in the downstream area of Dagou river[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019.
- [12] 林曼曼. 青岛近海海域灾害地质特征研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2014.
- LIN Manman. The study on the characteristics of geo-hazard factors in Qingdao offshore[D]. Shijiazhuang: University of Economics, 2014.
- [13] 陆求裕. 长乐滨海地区海水入侵现状及成因分析[J]. *地质灾害与环境保护*, 2020, 31(4): 101-105.
- LU Qiuyu. The present situation of the seawater intrusion along the coastal area of Changle[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2020, 31(4): 101-105.
- [14] 梁彬, 关碧珠, 崔光中, 揭江, 唐祚旺. 广东湛江开发巨型盆地防治海水入侵研究[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(1): 77.
- [15] 秦凯凯. 管状海水入侵形成机理及影响因素研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- QIN Kaikai. Study on formation mechanism and influencing factors of tubular seawater intrusion[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [16] 崔震, 陈广泉, 徐兴永, 王东亮, 喻龙. 北长山岛海水入侵成因机理及现状评价[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 930-936.
- CUI Zhen, CHEN Guangquan, XU Xingyong, WANG Dongliang, YU Long. Mechanism and assessment of seawater intrusion in the northern Changshan island[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 930-936.
- [17] 徐铭霜. 某沿海地区海水入侵动态变化规律及防治措施研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- XU Mingshuang. Research on the dynamic variation rule of seawater intrusion and controlling measures in a coastal area[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.
- [18] 王蜜蕾, 窦衍光, 邹亮, 薛碧颖, 胡睿, 岳保静, 徐刚, 林曦, 李林森. 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, 37(9): 17-24.
- WANG Milei, DOU Yanguang, ZOU Liang, XUE Biying, HU Rui, YUE Baojing, XU Gang, LIN Xi, LI Linsen. Hydrochemical characteristics of groundwater and genesis of mineral water at Laoshan mountain and surrounding areas, Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(9): 17-24.
- [19] 胡慧君. 青岛市大沽河典型区非饱和-饱和带地下水耦合模型[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- HU Huijun. An integrated modeling of variably saturated groundwater flow system in a typical area of Dagou river basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [20] 刘久潭, 周丹, 高宗军, 王敏, 马媛媛, 张洪英, 时孟杰, 董杰. 青岛西海岸新区地下水水化学特征及水质评价[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(2): 14-24, 43.
- LIU Jiutan, ZHOU Dan, GAO Zongjun, WANG Min, MA Yuanyuan, ZHANG Hongying, SHI Mengjie, DONG Jie. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Qingdao West Coast New District[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 38(2): 14-24, 43.
- [21] 尹子悦, 林青, 徐绍辉. 青岛市大沽河流域地下水水化学时空演化及影响因素分析[J]. *地质论评*, 2018, 64(4): 1030-1043.
- YIN Ziyue, LIN Qing, XU Shaohui. Spatial-temporal variations and controlling factors of groundwater hydrochemical characteristics in the Dagou river basin[J]. *Geological Review*, 2018, 64(4): 1030-1043.
- [22] 康晓雨. 青岛市典型富水区地下水环境质量评价及演化规律[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2017.
- KANG Xiaoyu. Groundwater quality evaluation and evolution law of typical rich water area in Qingdao Hebei[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2017.
- [23] 肖菲, 周勇华, 陈小英. 青岛沿岸(咸)水入侵灾害的成因与现状[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(5): 54-58.
- XIAO Fei, ZHOU Yonghua, CHEN Xiaoying. Research on the origin and current status of sea (salt) water intrusion in coastal areas of Qingdao[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(5): 54-58.
- [24] 姜兴钰. 青岛新河地区海水入侵综合研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2010.
- Jiang Xingyu. Comprehensive research on seawater intrusion in the Xinhe area of Qingdao[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2010.
- [25] 董少杰, 孟春霞, 王成见. 青岛市地下水源地水质评价及污染原因分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2006(6): 54-57.
- DONG Shaojie, MENG Chunxia, WANG Chengjian. Water quality evaluation and reasons analysis of pollution for groundwater sources in Qingdao[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006(6): 54-57.
- [26] Shaheen A, Iqbal J, Hussain S. Adaptive geospatial modeling of soil contamination by selected heavy metals in the industrial area of Sheikhpura, Pakistan[J]. *International Journal of Environ-*

- mental Science and Technology, 2019, 16(8): 4447-4464.
- [27] Khan M K, Ayoub W, Saied S, Hussain M M, Masood S S, Siddique A, Khwaja H A. Statistical and geospatial assessment of groundwater quality in the megacity of karachi[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, 11(3): 311-332.
- [28] Fatma B B, Emna B, Jalila M, Salem B. Evaluation of groundwater hydrogeochemical characteristics and delineation of geothermal potentialities using multi-criteria decision analysis: Case of Tozeur region, Tunisia[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 113: 104504.
- [29] 周爱红, 牛鹏飞, 袁颖, 黄虎城. 基于PCA-PSO-SVM的凡口铅锌矿地区岩溶地表塌陷危险性预测[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(4): 622-628.
- ZHOU Aihong, NIU Pengfei, YUAN Ying, HUANG Hucheng. Prediction of karst surface subsidence risk in the Fankou lead-zinc mine area based on PCA-PSO-SVM[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 622-628.
- [30] 叶慧君, 张瑞雪, 吴攀, 李学先, 覃应机, 查学芳, 韩志伟. 基于主成分分析的岩溶水化学组成及影响因素研究: 以贵州水城盆地为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 215-225.
- YE Huijun, ZHANG Ruixue, WU Pan, LI Xuexian, QIN Yingji, ZHA Xuefang, HAN Zhiwei. Hydrochemical characterization of groundwater and surface water and their influencing factors based on principal component analysis: An example in the Shuicheng basin of Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 215-225.
- [31] 赵艳丽, 王敏, 李常锁. 山东省淄河流域地下水化学污染源解析[J]. *人民长江*, 2022, 53(12): 37-43, 49.
- ZHAO Yanli, WANG Min, LI Changsuo. Analysis of chemical pollution source of groundwater in Zhihe river basin of Shandong Province[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(12): 37-43, 49.
- [32] 张洁, 梁杏, 刘延锋, 张鑫, 孙立群, 赵枫, 付鹏宇. 基于主成分的协克里金法对地下水砷空间分布预测[J]. *地球科学*, 2023, 48(10): 3820-3831.
- ZHANG Jie, LIANG Xing, LIU Yanfeng, ZHANG Xin, SUN Liqun, ZHAO Feng, FU Pengyu. The cokriging method is based on principal components to predict the spatial distribution of arsenic in groundwater[J]. *Earth Science*, 2023, 48(10): 3820-3831.
- [33] Giménez Forcada E. Dynamic of sea water interface using hydrochemical facies evolution diagram[J]. *Groundwater*, 2010, 48: 212-216.
- [34] Giménez Forcada E. Space/time development of seawater intrusion: A study case in Vinaroz coastal plain (Eastern Spain) using HFE-Diagram, and spatial distribution of hydrochemical facies[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 617-627.
- [35] Chadha D K. A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999(7): 431-439.
- [36] Mondal N C, Singh V P, Singh V S, Saxena V K. Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388: 100-111.
- [37] Nosair A M, Shams M Y, AbouElmagd L M, Hassanein A E, Fryar A E, Abu Salem H S. A predictive model for progressive salinization in a coastal aquifer using artificial intelligence and hydrogeochemical techniques: A case study of the Nile Delta aquifer, Egypt[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(6): 9318-9340.
- [38] GB/T 14848-2017. 地下水质量标准[S].
- GB/T 14848-2017. Standard for Groundwater Quality[S].
- [39] Wang Min, Yin Yueping, Wen Dongguang. Handbook of hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 2012.
- [40] 寇馨月, 丁建军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄珊. 青岛市农区地下水硝态氮污染源解析[J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3232-3241.
- KOU Xinyue, DING Junjun, LI Yuzhong, MAO Lili, LI Qiaozhen, XU Chunying, ZHENG Qian, ZHUANG Shan. Identifying the sources of groundwater NO₃⁻-N in agricultural region of Qingdao[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3232-3241.

Characterization of seawater intrusion based on multivariate statistical analysis and water chemistry characteristics: A case study of Laoshan district, Qingdao City

GANG Shenting^{1,2}, LYU Minghui^{1,2}, LU Qianqian^{1,2}, GAO Shuai^{1,2}, ZHAO Zhiqiang^{1,2}, CHEN Huanliang^{1,2}, PENG Tongqiang^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, XING Liting³, LI Lixia^{1,2}

(1. 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China;

3. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China)

Abstract Groundwater is an important source of freshwater in coastal areas. With the rapid development of industrialization and urbanization, the water demand for production and living in coastal areas has been rising year by year. Therefore, the increasing exploitation of groundwater has triggered seawater intrusion and increasingly prominent environmental problems of groundwater in many places. Researching the hydro-chemical characteristics and evolutionary patterns of groundwater enables effective monitoring and protection of the groundwater environment.

Taking the groundwater in Laoshan district, Qingdao City as the research object, we mainly focused on the issues of groundwater chemical characteristics, groundwater chemical processes, the degree of seawater intrusion and its impact on groundwater. In addition, under the theoretical guidance of hydrogeology, we analyzed the characteristics of seawater intrusion and evolution of groundwater hydrochemistry in the study area by means of data collection, theoretical analysis, field investigation and sample collection and testing. The research findings can provide a scientific basis for the rational development and utilization of groundwater in the area.

The results show that the groundwater in the study area has Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , and SO_4^{2-} as the main dominant ions, and most of the groundwater chemistry types are $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ and $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca-Mg}$ types. The Cl^- concentration in the groundwater varied considerably and its mean value exceeded the cut-off value for the presence or absence of seawater intrusion ($250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), indicating that some degree of seawater intrusion may have occurred in groundwater. Groundwater in the Laoshan district of Qingdao City is neutral to weakly alkaline (mean $\text{pH}=7.0\text{--}8.0$), which is an effect of long-term hydrogeochemical processes in the coastal area. The results obtained by the PCA model show that changes in groundwater chemistry are mainly controlled by natural factors (rock-water interaction) or anthropogenic factors (agricultural and domestic activities). The five chemical characteristics of Cl^- , mineralization, SO_4^{2-} , $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{HCO}_3^-$ and SAR were selected as evaluation factors. Based on the inverse distance weighting (IDW) method and geographic information systems (GIS), we achieved the spatial mapping of seawater intrusion locations, showing that the seawater intrusion, in Laoshan district was mainly distributed in the intrusion sections such as the east of Jiangjia Tuzhai—the north of Puli community, the area of Wanggezhuang-Gangxi-Gangdong, Yangkou bay and the area of Danying village-Quanzhou island. The study results are of great significance for the use of groundwater resources and the prevention and control of seawater intrusion in Laoshan district. In addition, the research ideas and methods provide a reference for the study of groundwater genesis in other coastal areas in the world.

Key words groundwater quality, coastal aquifer, hydrochemistry, chemical evolution of groundwater, seawater intrusion, Laoshan district

(编辑 杨杨张玲)

(上接第 981 页)

water.

In addition, the research results also reveal that the supply area of geothermal water of Chengning Uplift is located in the Mount Tai area, and the heat source of its geothermal system is the heat flow conducted from the deep crust and a small part from the upper mantle. The deep fault in the study area generated a certain amount of frictional heat during its active period, and also served as a good channel for underground heat flow, connecting and conducting upwards the heat generated by magma in the deep crust and upper mantle. In addition, the area is a sedimentary basin with deep depression, which generates gravity compression heat under the pressure of the thick Meso-Cenozoic sedimentary layer. The heat generated by these sources is stored in the pores and cracks of the thermal reservoir under the thermal insulation effect of the cover layer with strong thermal resistance and poor thermal conductivity, and is the main heat source for the formation of hot water in the area.

Key words the Chengning Uplift Area, hydrochemistry, isotope technique, genesis model of thermal reservoir, geothermal reservoir

(编辑 杨杨张玲)