

引用格式:刘久潭,周丹,高宗军,等.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.

LIU Jiutan,ZHOU Dan,GAO Zongjun,et al. 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.

青岛西海岸新区地下水水化学特征及水质评价

刘久潭¹,周丹²,高宗军¹,王敏¹,马媛媛¹,张洪英¹,时孟杰¹,董杰³

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛266590;2. 青岛地矿岩土工程有限公司,山东青岛266100;

3. 青岛地质工程勘察院,山东青岛266100)

摘要:为了解青岛西海岸新区地下水水化学特征及地下水质量,选取2017年35个地下水水质监测数据,综合运用数理统计、水化学、模糊综合评价以及因子分析等方法进行研究。结果表明:研究区地下水中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 相对含量较高,阴离子呈 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系,阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 的关系。地下水水样pH均值7.22,呈弱碱性;TDS含量100.20~1498.60 mg/L,均值421.40 mg/L;TH均值248.23 mg/L,为硬水。地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$,水岩作用是地下水水化学组分的主要控制因素。基于内梅罗指数法和模糊综合评价法进行水质评价,认为研究区地下水水质整体较差。基于因子分析法对研究区地下水进行污染源解析,共提取4个主因子,累积方差贡献率73.747%。公因子中, F_1 解析为来自农业生产活动, F_2 主要与地质因素有关, F_3 表征为生活污水排放, F_4 代表工业生产活动,其贡献率分别为:35.697%、15.148%、12.131%和10.771%。

关键词:地下水;水化学特征;水质评价;污染源解析;青岛西海岸新区

中图分类号:P641.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)02-0014-11

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.02.002

Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Qingdao West Coast New District

LIU Jiutan¹, ZHOU Dan², GAO Zongjun¹, WANG Min¹, MA Yuanyuan¹,
ZHANG Hongying¹, SHI Mengjie¹, DONG Jie³

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Qingdao Geologic and Mineral Geotechnical Engineering Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266100, China;

3. Qingdao Geologic-engineering Exploration Institute, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In order to understand the hydrochemical characteristics and quality of groundwater in Qingdao West Coast New District, 35 monitoring data of groundwater quality in 2017 were selected and studied by means of mathematical statistics, hydrochemistry, fuzzy comprehensive evaluation and factor analysis. The results showed that the concentrations of Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- and SO_4^{2-} in groundwater were relatively higher, and the anions had the relationship

收稿日期:2018-09-16

作者简介:刘久潭(1991—),男,山东安丘人,博士研究生,主要从事水文地质方面的研究. E-mail:740058441@qq.com

高宗军(1964—),男,山东泰安人,教授,博士生导师,主要从事水文地质方面的研究,本文通信作者.

E-mail:gaozongjun@126.com

of $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ while the cations concentration had the relationship of $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. With the average pH value of 7.22, which is weak alkaline on the whole, the concentration of TDS ranging from 100.20 to 1 498.60 mg/L, the TDS average value of 421.40 mg/L and the TH average value of 248.23 mg/L, the groundwater belongs to hard water. The hydrochemical types of groundwater were mainly $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}^+ \cdot \text{Ca}^{2+}$. Water-rock interaction was the major controlling factor of the chemical composition of groundwater. Based on Nemerow index method and fuzzy comprehensive evaluation method, it is concluded that the groundwater quality in the study area is generally poor. Pollution source analysis was conducted based on factor analysis. Four principal factors were extracted and the cumulative variance contribution rate was 73.747%, among which F_1 was identified as agricultural production activities; F_2 was mainly related to geological factors; F_3 was characterized as domestic sewage discharge; and F_4 represents industrial activities. Their contribution rates are 35.697%, 15.148%, 12.131%, and 10.771%, respectively.

Key words: groundwater; hydrochemical characteristics; water quality assessment; pollution source analysis

地下水是我国重要的供水水源,是支撑我国经济社会和谐快速发展的重要战略资源,对维持社会经济的快速发展和维系良好的生态环境具有不可替代的作用^[1-3]。地下水水质的好坏直接关系到当地居民的饮水安全和健康问题,影响社会的稳定和发展^[4]。地下水化学组分的含量与分布特征受多种因素影响和控制,如:大气降水、气候、地形地貌、海拔、岩石风化以及人为因素等等,而且地下水还与周围的环境发生各种复杂的水文地球化学作用^[5-7]。因此,开展区域地下水水化学特征以及水质评价研究,对地下水资源的合理开发利用和生态环境的保护与建设具有重要实际意义。目前,有关青岛市地下水水化学及水质的研究较多,如:李艳梅等^[8]分析了青岛市水质状况,并进行了评价及污染趋势研究;刘建霞等^[9]对青岛大沽河水源地地下水水质进行了数值模型预测;董少杰等^[10]对青岛市18处地下水源地水质进行评价并分析了污染原因;刘贯群等^[11]基于多种方法分析了青岛大沽河平原区地下水硝酸盐污染来源;方运海等^[12]基于模糊综合与可变模糊集耦合对青岛大沽河水源地的地下水质量评价;尹子悦等^[13]分析了青岛市大沽河流域地下水水化学时空演化及影响因素。然而,针对青岛西海岸新区地下水水化学特征以及水质评价的研究相对较少,如胡浩等^[14]对青岛西海岸地下水特征进行了分析,得出水质整体较差,但限于胶州湾地区;付佳妮等^[15]对青岛市黄岛区潮河水源地地下水进行了数值模拟,表明地下水位降低在不同程度上影响周围村民生活和农业生产,但缺少水质系统研究。因此,本研究利用青岛西海岸新区2017年35处地下水水质监测资料,综合运用数理统计、水化学方法、模糊综合评价法以及因子分析对地下水水化学特征和水质进行综合评价,并进行污染源解析,以期为该区地下水资源的合理开发与可持续利用提供一定的科学依据。

1 研究区概况

青岛西海岸新区位于青岛市胶州湾西岸(图1),地理坐标:北纬 $35^{\circ}35' \sim 36^{\circ}08'$,东经 $119^{\circ}30' \sim 120^{\circ}18'$,地处京津冀和长三角两大都市圈之间,是山东半岛蓝色经济区的核心地带,区位优势,交通便捷。研究区属温带季风气候区,南临黄海,空气湿润,气候温和,雨量较多,四季分明。年平均气温 12.9°C ,年平均降雨量 755.13 mm (1991—2017年)。研究区属东南沿海水系,均为季节性河流。因境内山水相连,形成了源短流急,单独直接入海的特点。较大的河流有曹汶-岛耳河、王戈庄河、白马-吉利河、两城河、辛安河、南辛安河、镰湾河、独垛子西河等。

研究区属滨海低山丘陵区,境内山峦起伏,沟壑纵横。地貌类型分为:低山区、丘陵区、山间平原区和微倾斜低平原区。地下水类型主要有松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩裂隙岩溶水和基岩裂隙水四种类型。地下水的赋存条件和分布与地层岩性、地形地貌、地质构造等因素密切相关。研究区属鲁东低山丘陵水文地质大区,胶南-崂山中低山丘陵水文地质亚区。山体主要为不同时期岩浆侵入形成的花岗岩及少量变质岩、沉积岩组成,岩石致密坚硬,赋存风化、构造裂隙水;地下水主要受大气降水补给,因所处地势高,地形坡降大,补给源贫乏,地下水赋存条件差,富水性弱。低山丘陵前缘的侵蚀剥蚀台地地区,地形坡度较缓,冲沟及基岩裂隙发育,表层不连续地覆盖着 $0 \sim 3\text{ m}$ 厚度不等的第四系松散堆积物;地下水除接受大

气降水补给外,还接受低山丘陵区基岩裂隙水补给,其赋存条件及补给源均比前者优越,富水性较前者好。在山间河谷及滨海地带,广泛分布着第四系松散堆积物,地形平坦、坡降小,主要岩性由粘质砂土、砂质粘土、砂、砂砾石、卵砾石组成,赋存孔隙水。河谷上游地段,含水层颗粒粗,含水层岩性为粗砂砾石;赋存条件好,但堆积物厚度较小,富水性弱;河流中游以及河流汇合地带,地形坡度变缓,第四系沉积厚度增大,富水性中等。河谷下游即山前地带地形平坦、第四系厚度大、分布广,颗粒变细,分选性好,赋存条件好,富水性强。

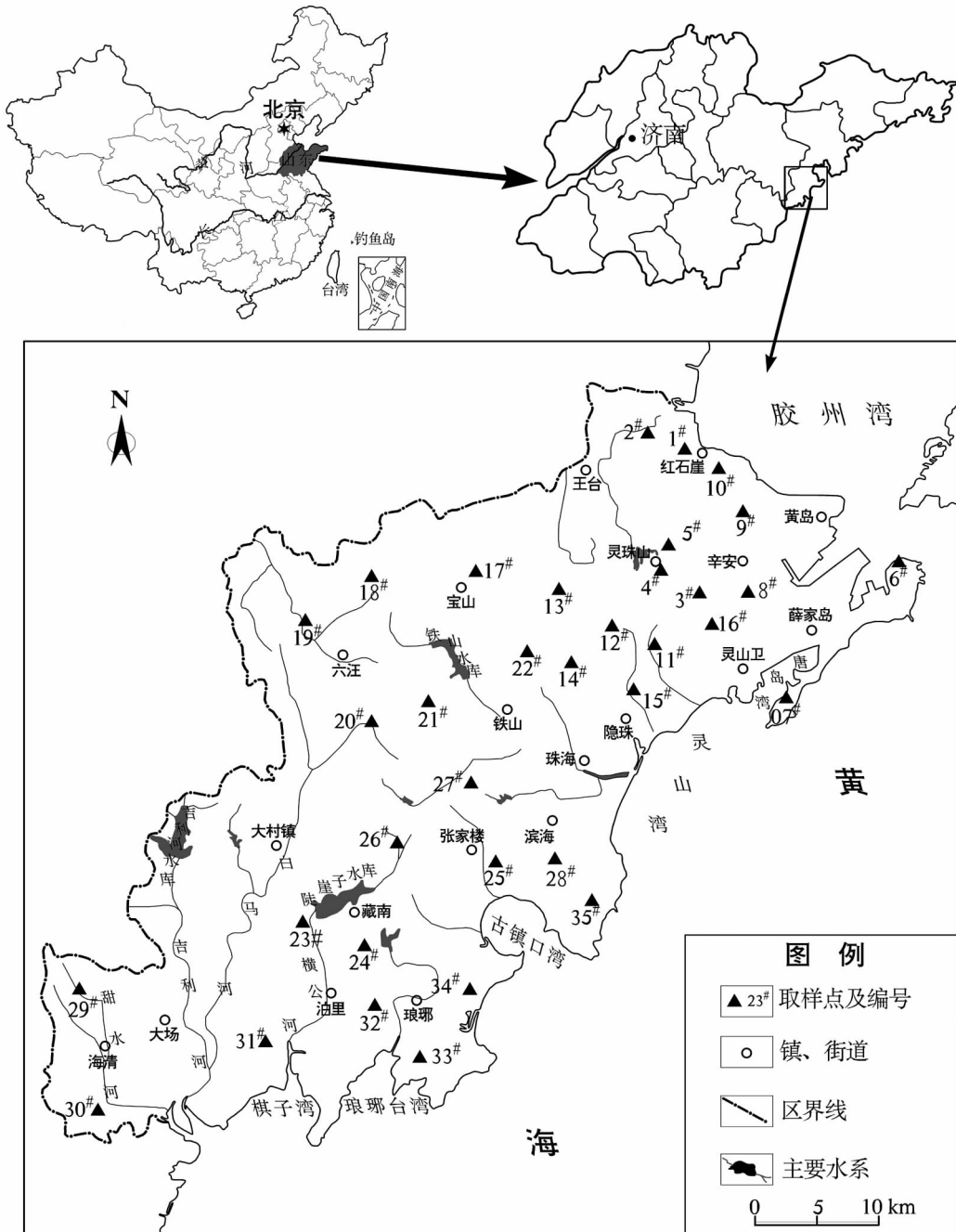


图 1 研究区位置及取样点分布图

Fig. 1 The location and sampling point distribution of study area

2 材料与方法

2.1 数据来源

青岛西海岸新区地下水监测数据由青岛地质工程勘察院提供,地下水观测点位置分布见图 1,共选取地下水监测点 35 个,地下水水质取样时间为 2017 年 10 月。地下水分析指标包括 pH、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、总硬度(total hardness, TH)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、氨氮、化学需氧浆(chemical oxygen demand, COD)、Fe、Mn、Zn、Pb 等相关组分。

2.2 样品分析

取样时采用清洁、干燥的聚乙烯塑料瓶,先用蒸馏水洗涤样品瓶 2~3 次,再用待测水洗涤样品瓶 2~3 次,再进行取样,取样后,送至青岛地质工程勘察院试验测试中心进行水质检测。Fe、Mn、Zn 和 Pb 采用原子吸收分光光度计测定(PE AA600、PE AA400),PHS-3C 酸度计测定 pH 值,TH、COD 和 HCO_3^- 均采用滴定法测定, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 采用离子色谱仪(戴安 ICS200)测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 采用离子色谱仪(瑞士万通 930)测定,TDS 采用称量法测定,氨氮采用 TU-1810 紫外可见分光光度计测定。

2.3 数据处理

运用 SPSS21.0 软件进行统计分析,用最大值(*Max*)、最小值(*Min*)、平均值(*Mean*)、标准偏差(*SD*)、变异系数(*Cv*)和箱线图描述地下水主要化学组分的基本统计特征;采用 AqQA 软件作 Piper 三线图、Gibbs 模型图解探讨地下水水化学的主要控制因素;运用内梅罗指数法和模糊综合评价法对地下水水质进行评价,基于多元统计-因子分析法(factor analysis, FA)进行污染源解析。并运用 MAPGIS6.7、Origin2017、Photoshop 等软件进行图件绘制。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

3.1.1 地下水主要化学组分统计特征

青岛西海岸新区 2017 年地下水水化学主要组分统计结果见表 1、图 2。由统计结果可知:研究区地下水 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 相对含量较高,阴离子呈 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系,平均浓度分别为 165.25、83.44、63.95、61.33 mg/L;阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 的关系,平均浓度分别为 70.37、45.49、17.61、2.82 mg/L。

表 1 地下水主要化学组分统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of the major chemical composition of groundwater

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	TDS	TH	pH
<i>Max</i>	110.03	12.53	280.35	36.46	382.12	223.11	291.33	410.85	1498.60	850.14	8.15
<i>Min</i>	14.46	0.34	16.23	3.05	45.34	11.70	21.21	0.59	100.20	57.66	6.30
<i>Mean</i>	45.49	2.82	70.37	17.61	165.25	61.33	83.44	63.95	421.40	248.23	7.22
<i>SD</i>	26.03	3.33	45.83	9.38	75.41	48.21	54.63	82.07	263.37	144.13	0.50
<i>Cv/%</i>	57.21	118.13	65.12	53.23	45.63	78.61	65.48	128.34	62.50	58.06	7.00

研究区地下水水样 pH 值范围为 6.30~8.15,均值为 7.22,整体上呈弱碱性。TDS 含量 100.20~1498.60 mg/L,均值 421.40 mg/L。水样总硬度(TH)为 57.66~850.14 mg/L,平均值 248.23 mg/L。按硬度分类^[15-16]:75~150 mg/L 为软水,150~300 mg/L 为中硬水,300~450 mg/L 为硬水,青岛西海岸新区地下水为中硬水。pH 变异系数较小,说明其在地下水中十分稳定,而 NO_3^- 的变异系数较大,说明其在地下水中含量不稳定,这可能与人类活动有关。

3.1.2 地下水水化学类型

Piper 三线图^[17]可用来了解地下水水化学的主要离子组成特征^[5]。由图3可以看出,研究区地下水阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,在阴离子三角图中靠近 HCO_3^- 和 Cl^- 轴分布;阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 为主,在阳离子三角图中靠近 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 端分布。按舒卡列夫分类法,研究区地下水 $\text{TDS} < 1\ 500\ \text{mg/L}$,属 A 组,地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 等。

3.1.3 地下水水化学控制因素

Gibbs 模型图解^[18]常用来识别自然水体中各种离子的起源,如:水岩作用、大气降水和蒸发-结晶作用。Gibbs 图(图4)的纵坐标为 TDS 的对数坐标,横坐标为阴、阳离子的比值,即 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 。在 Gibbs 图中,右下角区域 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值接近于 1,且 TDS 含量较低,此区域表示地下水主要受到大气降水的控制;中部区域 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.5 或者在 0.5 左右,代表了地下水水化学组分主要受水岩作用控制;而右上角区域, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值较高接近于 1,且 TDS 含量很高,表示地下水主要受到蒸发-结晶作用控制。由图4可以看出,青岛西海岸新区地下水水样点主要落在中间区域内,位于水岩作用控制区域,说明地下水水化学组分主要受水岩作用的控制,而大气降水和蒸发结晶作用不是主要控制因素。

3.2 地下水质量评价

目前,地下水水质评价常用的方法主要有单因子评价法、内梅罗指数法、神经网络评价法和模糊综合评价法等^[19-20]。本研究依据青岛市西海岸新区 35 处地下水监测数据,选取 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、TH、 NH_4^+ 、挥发酚、COD、TDS、Fe、Mn、Zn、Pb、pH 等 14 项影响因子,以地下水质量标准 (GBT/14848-2017) 为评价标准,运用内梅罗指数法和模糊综合评价法,进行地下水水质综合评价。

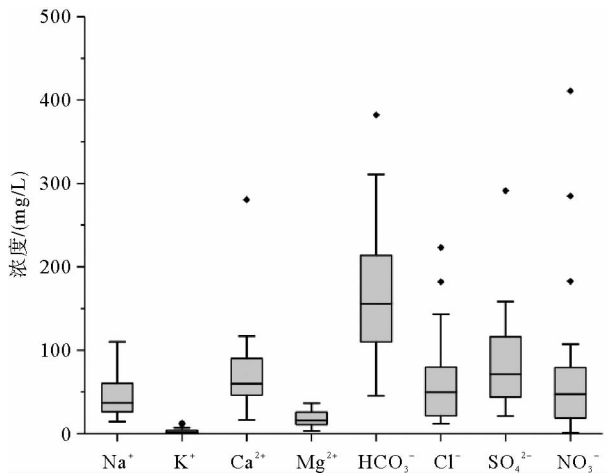


图2 地下水主要离子浓度箱图

Fig.2 Box plots showing variations of the major concentrations in groundwater

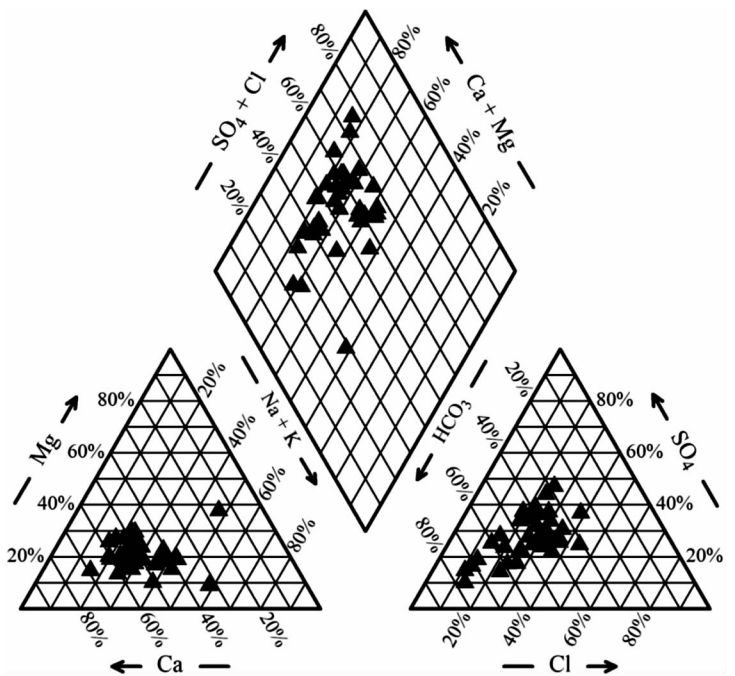


图3 地下水 Piper 三线图

Fig.3 Groundwater Piper trilinear chart

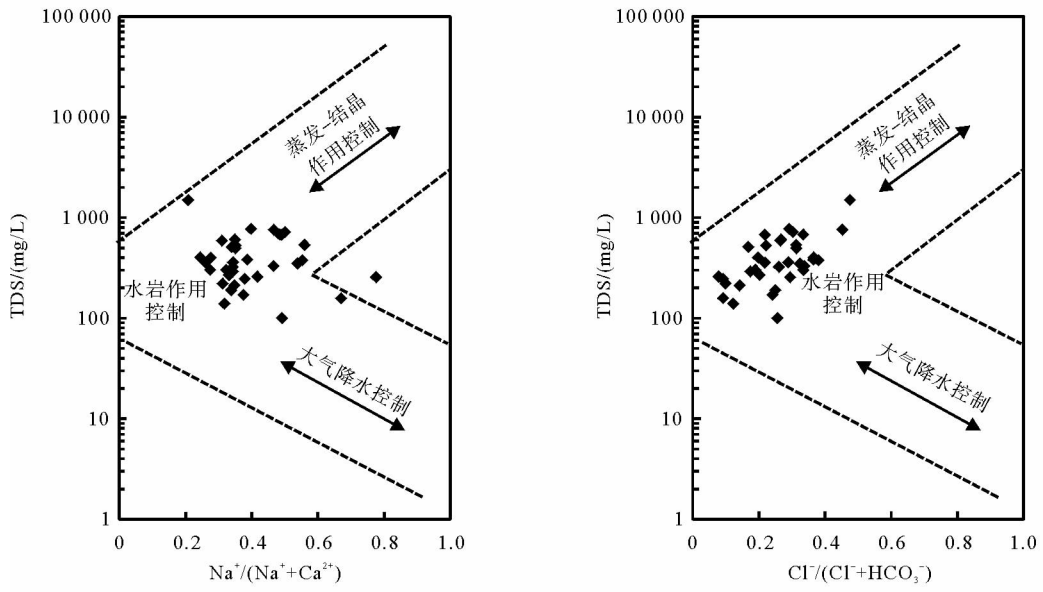


图 4 地下水水化学 Gibbs 图

Fig. 4 Hydrochemical Gibbs figures of groundwater

3.2.1 内梅罗指数法

内梅罗指数法^[20], 先进行各单项组分评价, 划分组分质量类别确定单项组分评价分值(表 2), 然后计算综合评分值, 最后划分地下水质量级别(表 3)。其方法如下:

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F} + F_{\max}^2}{2}}, \quad (1)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i. \quad (2)$$

式中: \bar{F} —各单项组分评分值 F_i 的平均值; F_{\max} —单项组分评价分值 F_i 中的最大值; n —项数。

3.2.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法基本思路为: 建立地下水质量综合判别隶属度集, 确定评价集, 建立隶属函数。首先建立隶属函数, 其方法如下:

1 级水的隶属函数, 即 $j=1$:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & X_i \leq S_{ij} \\ \frac{X_i - S_{i(j+1)}}{S_{ij} - S_{i(j+1)}}, & S_{ij} < X_i < S_{i(j+1)} \\ 0, & X_i \geq S_{i(j+1)} \end{cases}, \quad (3)$$

2 级至第 $(m-1)$ 级, 即 $j=2, 3, \dots, (m-1)$:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & X_i \leq S_{i(j-1)} \\ \frac{X_i - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}}, & S_{i(j-1)} < X_i < S_{ij} \\ \frac{X_i - S_{i(j+1)}}{S_{ij} - S_{i(j+1)}}, & S_{ij} \leq X_i \leq S_{i(j+1)} \end{cases}, \quad (4)$$

表 2 地下水质量评分表

Tab. 2 Groundwater quality score

类别	I	II	III	IV	V
F_i	0	1	3	6	10

表 3 地下水质量分级表

Tab. 3 Groundwater quality classification

类别	优良	良好	较好	较差	极差
F	<0.80	0.80~2.50	2.50~4.25	4.25~7.20	>7.20

m 级,即 $j = m$;

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1, & X_i \geq S_{ij} \\ \frac{X_i - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}}, & S_{i(j-1)} < X_i < S_{ij} \\ 0, & X_i \leq S_{i(j-1)} \end{cases} \quad (5)$$

其中: X_i 是第 i 中水质污染因子的实测值; S_{ij} 是第 i 种因子第 j 级水的标准值。

各因子地下水质量的隶属度可组成模糊矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ij} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

权重因子的确定:

$$W_i = \frac{\frac{C_i}{S_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}} \quad (7)$$

其中: W_i 是第 i 种污染物的权重因子; C_i 是第 i 种污染因子的实测值; S_i 是第 i 种污染物标准值的平均值。

最后,得出地下水质量综合判别模型: $D = W \cdot R$ 。

3.2.3 评价结果

1) 水质评价结果

内梅罗指数法评价结果见表 4,地下水水样水质良好的有 8 个,而较差及其以下有 27 个,约占 77%;由模糊综合评价结果(表 4)可知,研究区地下水水样中质量达到 III 级及以上的共有 13 个,其中水质为 I 级的有 7[#]、19[#]、30[#]、33[#],评价结果为 V 级的共有 22 个,约占 63%。研究区东北胶州湾附近的 2[#] 和 9[#] Cl^- 含量较高,这可能与海水入侵有关。

2) 评价结果分析

内梅罗指数法突出了主要污染因子对水质评价结果的影响,评价结果对水质变化的灵敏度较低。模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。模糊综合评价充分考虑了地下水水质分级界限的模糊性,数据具有连续性,并且计算了每种污染因子对各级标准的隶属程度,评价结果更接近实际^[19]。

基于模糊综合评价法,对地下水水质进行分区,如图 5 所示,总的来看,研究区地下水水质较差,这与胡浩^[14]等研究结果较一致。在城市的快速发展中,应该科学、合理地开发和利用地下水资源。加强对研究区内各类工矿企业、养殖业和生活排污的监管,控制地下水污染源,提高污水处理效率,改善地下水水质;完善地下水环境监督管理,加强对地下水动态监测,从而实现地下水资源的可持续利用。

表 4 地下水质量评价结果

Tab. 4 Groundwater quality assessment results

模糊综合评价法	数量	占比/%	内梅罗指数法	数量	占比/%
I	4	11.43	良好	8	22.86
II	7	20.00	较差	16	45.71
III	2	5.71	极差	11	31.43
V	22	62.86			

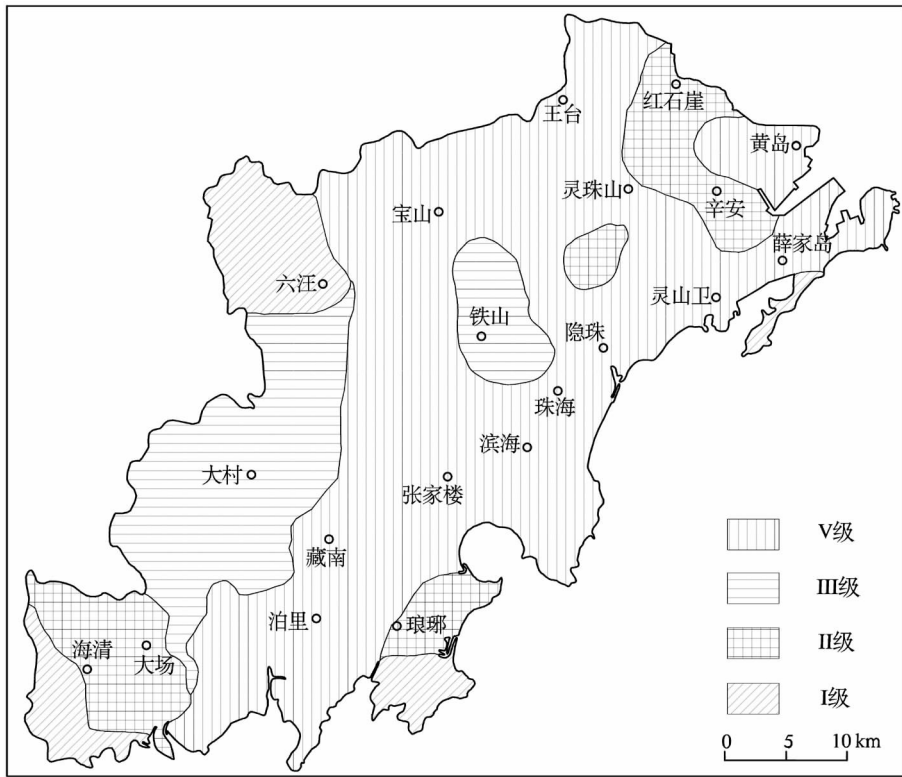


图 5 地下水水质综合评价图

Fig. 5 Comprehensive evaluation chart of groundwater quality

3.3 地下水污染源解析

多元统计是用于提取复杂数据中有效信息的有效方法,在地下水污染源解析的应用研究中已得到广泛应用^[21-23]。其方法是运用数学方法对地下水数据进行降维,提取地下水数据基本结构的代表性因子,来解释污染物的污染源情况^[22]。本次研究选取地下水水质评价的 14 项影响因子,基于多元统计——因子分析法^[21-23],借助 SPSS 21.0 软件,对地下水进行污染源解析,以期为研究区地下水的合理开发和利用、科学保护与管理提供一定的参考。

因子分析具体数学模型如下:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \mathbf{E}, \mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times m}, \quad (8)$$

即:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11} F_1 + a_{12} F_2 + \cdots + a_{1m} F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21} F_1 + a_{22} F_2 + \cdots + a_{2m} F_m + \varepsilon_2 \\ \vdots \\ X_n = a_{n1} F_1 + a_{n2} F_2 + \cdots + a_{nm} F_m + \varepsilon_n \end{cases}, \quad (9)$$

其中: X_n 表示各地下水水质指标, F_m 表示公因子分类, a_{ij} 表示水质指标隶属于公因子分类系数, ε_n 表示特殊因子。

在进行因子分析之前,为消除各指标间的尺度范围差异,首先需要将数据进行归一化处理,公式如下:

$$R_i = \frac{F_i - F_{i\min}}{F_{i\max} - F_{i\min}}. \quad (10)$$

其中, R_i 为指标 i 归一化处理后的结果, F_i 为指标 i 的检测指标, $F_{i\max}$ 为指标 i 的最大值, $F_{i\min}$ 为指标 i 的最小值。

对数据进行标准化处理后,采用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett 球形检验,来检验地下水数

据是否适合因子分析。KMO 测度为 0.594, Bartlett 检验具有显著性, 可知适合进行因子分析(表 5)。

按照特征值大于 1 的原则, 本次共提取 4 个主因子(表 6)。由表 6 可知, 累积方差贡献率 73.747%, 表明可以较好地代表地下水水质数据的特征。其中, 第一公因子(F_1)解释了总方差的 35.697%, 第二公因子(F_2)解释了总方差的 15.148%, 第三公因子(F_3)解释了总方差的 12.131%, 第四公因子(F_4)解释了总方差的 10.771%。其中: 第一公因子(F_1)与 TDS、TH、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 以及 Na^+ 具有较好的相关性, 说明 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 Na^+ 对 TDS 的贡献率较大, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 主要来自氮肥和硫肥的使用, F_1 可以解析为来自农业生产活动的影响; 第二公因子(F_2)与 Mn 和 Fe 有较大的相关性, 研究区内燕山期花岗岩类岩石分布广泛, 含铁锰矿物, 经长期风化、溶滤以及氧化还原作用随地下水径流迁移, 且研究区地下水补给区主要位于西北山区, 因此 F_2 与地层岩性有关, 则可以解析为地质因素; 第三公因子(F_3)与 COD、 NH_4^+ 相关性较大, 人类生活污水中有机物在微生物的分解下会产生 NH_4^+ , 且会增加 COD 的含量, 因此, F_3 代表了生活污水的排放; 第四公因子(F_4)与 Zn 和 Pb 具有较好的相关性, Zn、Pb 主要来源于冶炼、制造、工矿、化工等, 因此 F_4 代表了与工业有关活动。

通过 SPSS 软件计算各水质监测点的公因子得分, 运用 SURFER 进行 Kriging 插值并结合 MAPGIS 软件绘制研究区因子得分等值线图, 如图 6 所示。因子得分越高表明所受污染越严重。

由图 6 可知, F_1 得分较高的区域主要集中在研究区北部的红石崖街道、王台镇、黄岛街道、宝山镇、辛安街道和灵珠山街道, 以及南部的大村镇、泊里镇、琅琊镇和藏南镇。农业化肥中氮肥、硫肥的使用会增加地下水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的含量。 F_2 得分除部分滨海地, 大部分区域均大于 0.1, 这与研究区地层岩性有较好的对应; 灵山卫街道出现了局部的高值区, 可能与企业的影响有关, 但从整体上来看, F_2 主要与地质因素有关。另外, 各种工业排放废水中的有机酸也会加速 Mn、Fe 由岩石进入地下水的过程^[23]。 F_3 得分较高区域主要分布在铁山街道、六汪镇、宝山镇、王台镇、红石崖街道, 以及研究区西南的大场镇和大村镇, 生活污水的排放使得地下水有机质含量增加, 在微生物的作用下 COD 和 NH_4^+ 的含量随之增加。 F_4 得分在宝山镇最高, 另外在王台镇以及滨海地带的滨海街道和张家楼镇的得分也较高, 工矿企业的污水排放会增加地下水中 Pb 和 Zn 的含量, 其中炼油、造纸、纺织印染等化工产业最为严重。

表 5 KMO 和 Bartlett 检验结果

Tab. 5 Results of KMO and Bartlett's tests

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 检验值		0.594
	检验值 χ^2	418.950
Bartlett 的球形度检验	自由度 df	91
	显著性水平 Sig.	0.000

表 6 旋转成分矩阵

Tab. 6 Rotated component matrix

指标	因子			
	F_1	F_2	F_3	F_4
TDS	0.987	0.077	0.054	-0.002
TH	0.956	0.110	0.080	0.071
SO_4^{2-}	0.950	-0.041	0.157	0.078
Cl^-	0.926	-0.022	-0.079	0.028
NO_3^-	0.789	0.090	0.186	-0.043
Na^+	0.765	-0.168	-0.209	-0.200
Mn	0.195	0.846	0.105	0.133
Fe	-0.028	0.835	-0.070	0.275
pH	-0.161	0.655	0.070	-0.411
COD	-0.101	-0.267	0.786	0.008
NH_4^+	0.202	0.150	0.770	-0.003
挥发酚	-0.032	-0.291	-0.583	0.324
Zn	0.081	-0.018	-0.029	0.798
Pb	-0.137	0.209	-0.091	0.671
特征值	4.998	2.121	1.698	1.508
贡献率/%	35.697	15.148	12.131	10.771
累计贡献率/%	35.697	50.845	62.976	73.747

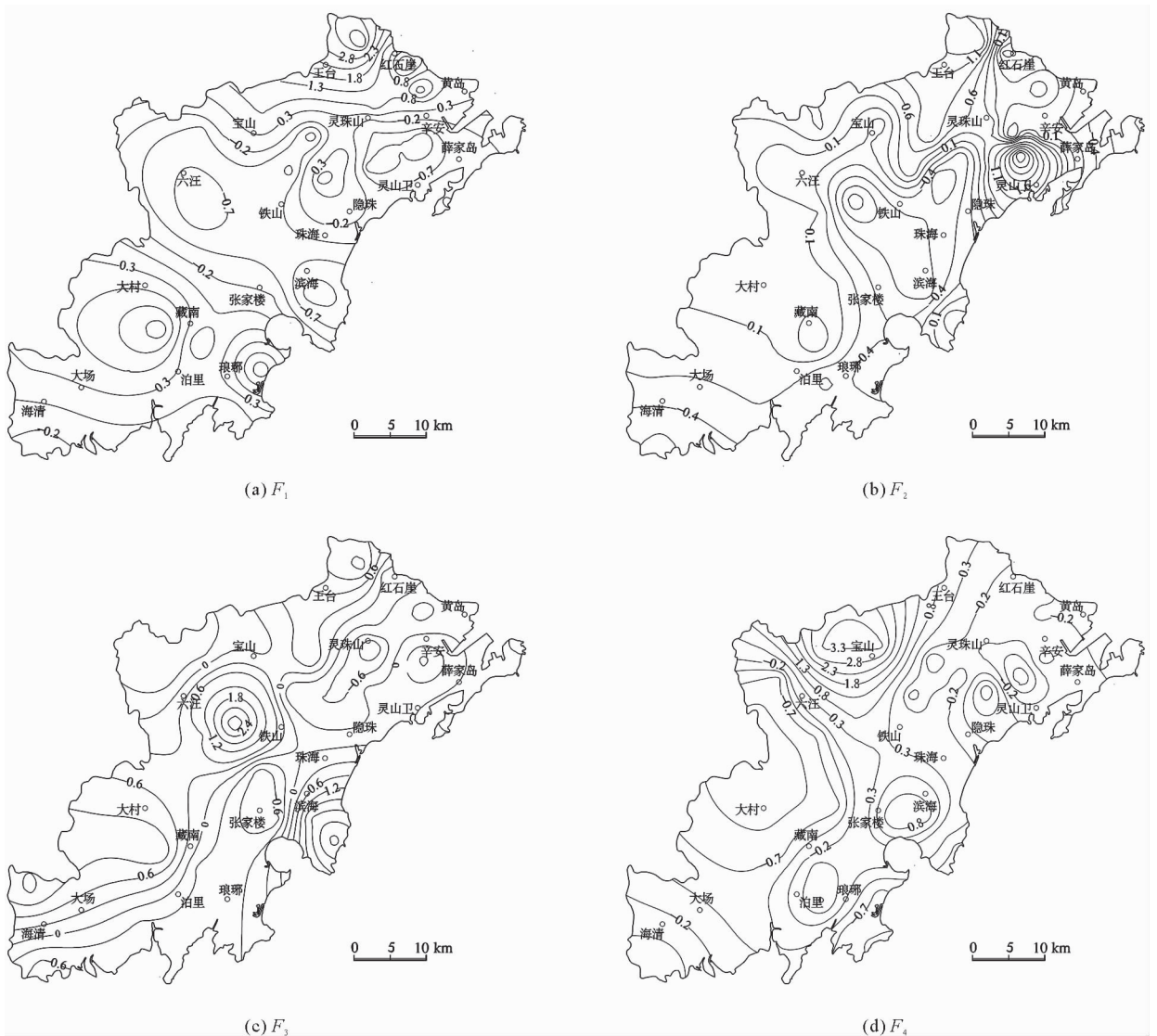


图 6 因子得分等值线图
Fig. 6 Factor score contour map

4 结论

1) 青岛市西海岸新区地下水中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 相对含量较高,阴离子呈 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系,阳离子浓度存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 的关系。地下水水样 pH 值为 6.30~8.15,均值 7.22,整体呈弱碱性;TDS 含量 100.20~1 498.60 mg/L,均值 421.40 mg/L;TH 值为 57.66~850.14 mg/L,均值 248.23 mg/L,为中硬水。

2) 地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型。地下水水化学组分主要受大气降水和蒸发结晶作用影响微弱,水岩作用为主要的控制因素。

3) 基于内梅罗指数法和模糊综合评价法分析,认为研究区地下水水质整体较差。在城市的快速发展中,应科学、合理地利用和开发地下水资源,控制污染源,提高污水处理效率,加强对地下水动态监测。

4) 基于因子分析法,共提取 4 个主因子,累积方差贡献率 73.747%。公因子 F_1 解析为来自农业生产活动, F_2 主要与地质因素有关, F_3 表征为生活污水排放, F_4 代表工业生产活动。4 个主因子方差贡献率分别为:35.697%、15.148%、12.131%和 10.771%。

参考文献:

- [1]胡云虎,张付海,钮志远,等.皖北地区集中式深层地下水饮用水源地水化学特征及水质评价[J].中国科学技术大学学报,2014(11):913-920.
HU Yunhu,ZHANG Fuhai,NIU Zhiyuan,et al. Hydro-chemical characteristics of groundwater in centralized drinking water sources and its quality assessment in northern Anhui Province[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014(11):913-920.
- [2]孙从建,陈若霞,张子宇,等.山西浅层地下水水化学特性时空变化特征分析[J].干旱区地理,2018,41(2):315-324.
SUN Congjian,CHEN Ruoxia,ZHANG Ziyu,et al. Temporal and spatial variation of hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Shanxi Province[J]. Arid Land Geography,2018,41(2):315-324.
- [3]吴爱民,荆继红,宋博. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用[J].地质学报,2016,90(10):2939-2947.
WU Aimin,JING Jihong,SONG Bo. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater[J]. Acta Geologica Sinica,2016,90(10):2939-2947.
- [4]安红梅,邓利君,赵矿,等.西藏地下水水化学特征及水质评价[J].水利规划与设计,2018(8):45-47.
AN Hongmei,DENG Lijun,ZHAO Kuang,et al. Hydrochemical characteristics and water quality evaluation of groundwater in Tibet[J]. Water Resources Planning and Design,2018(8):45-47.
- [5]张涛,蔡五田,李颖智,等.尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J].环境科学,2017(11):4537-4545.
ZHANG Tao,CAI Wutian,LI Yingzhi,et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River basin[J]. Environmental Science,2017(11):4537-4545.
- [6]左禹政,安艳玲,吴起鑫,等.贵州省都柳江流域水化学特征研究[J].中国环境科学,2017,37(7):2684-2690.
ZUO Yuzhe,AN Yanling,WU Qixin,et al. Study on the hydrochemical characteristics of Dulu River basin in Guizhou province[J]. China Environmental Science,2017,37(7):2684-2690.
- [7]孙平安,于爽,莫付珍,等.不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例[J].环境科学,2016,37(1):123-131.
SUN Pingan,YU Shi,MO Fuzhen,et al. Hydrochemical characteristics and influencing factors in different geological background:A case study in Darongjiang and Lingqu basin,Guangxi,China[J]. Environmental Science,2016,37(1):123-131.
- [8]李艳梅,董少杰,王成见,等.青岛市水质状况评价及污染趋势分析[J].水文,2002(4):53-56.
LI Yangmei,DONG Shaojie,WANG Chengjian,et al. Evaluation of water quality and analysis of pollution trend in Qingdao [J]. Hydrology,2002(4):53-56.
- [9]刘建霞,袁西龙.青岛大沽河水源地地下水水质的数值模型预测[J].海洋地质动态,2006,22(2):9-14.
LIU Jianxia,YUAN Xilong. Application of numerical modeling to prediction of water quality in Dagu River groundwater source area,Qingdao[J]. Marine Geology Letters,2006,22(2):9-14.
- [10]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 & Water Engineering,2006(6):54-57.
- [11]刘贯群,周书玉,黄修东,等.多种方法识别青岛大沽河平原区地下水硝酸盐污染来源[J].环境科学学报,2017,37(1):347-356.
LIU Guanqun,ZHOU Shuyu,HUANG Xiudong,et al. Multiple methods to recognize sources of underground water nitrate contamination in plain area of Dagu River,Qingdao,China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(1):347-356.
- [12]方运海,郑西来,彭辉,等.基于模糊综合与可变模糊集耦合的地下水质量评价[J].环境科学学报,2018,38(2):546-552.
FANG Yunhai,ZHENG Xilai,PENG Hui,et al. Groundwater quality evaluation based on fuzzy synthetic evaluation and variable fuzzy sets [J]. Acta ScientiaeCircumstantiae,2018,38(2):546-552.
- [13]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):1030-1044.
YIN Ziyue,LIN Qing,XU Shaohui. Spatial-temporal variations and controlling factors of groundwater hydrochemical characteristics in the Dagu River Basin[J]. Geological Review,2018,64(4):1030-1044.
- [14]胡浩,纪仁忠,路忠诚.青岛西海岸地下水特征分析[J].地下水,2015(1):33-36.
HU Hao,JI Renzhong,LU Zhongcheng. Characteristics of groundwater in the West Coast of Qingdao[J]. Groundwater, 2015(1):33-36.

- [12]袁春兰,熊宗龙,周雪花,等.基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J].激光与红外,2009,39(1):85-87.
YUAN Chunlan, XIONG Zonglong, ZHOU Xuehua, et al. Study of infrared image edge detection based on Sobel operator [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 85-87.
- [13]高文娟,李健.一种基于 Freeman 差分码的双目立体匹配算法研究[J].微电子学与计算机,2009,26(5):209-215.
GAO Wenjuan, LI Jian. Stereo match algorithm research based on freeman differential code[J]. Microelectronics & Computer, 2009, 26(5): 209-215.
- [14]王文慧.基于内容的图像检索技术研究[D].长沙:国防科技大学,2001.
- [15]魏立飞,刘文凤,张帆,等.归一化转动惯量特征的遥感影像检索[J].测绘科学,2017,42(2):115-119.
WEI Lifei, LIU Wenfeng, ZHANG Fan, et al. Remote sensing image retrieval based on normalized moment inertia characteristic[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(2): 115-119.
- [16]郝玉保.基于边缘特征的遥感图像检索技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2009.
- [17]包倩,郭平.基于直方图的遥感图像相似性检索方法比较[J].遥感学报,2006,10(6):894-900.
BAO Qian, GUO Ping. Comparative studies on similarity measures for remote sensing image retrieval based on histogram [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6): 894-900.
- [18]杨帆.窗口自适应的目标跟踪算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 24 页)

- [15]付佳妮,孙建明,林青.青岛市黄岛区潮河水源地地下水数值模拟[J].山东国土资源,2015(7):45-49.
FU Jiani, SUN Jianming, LIN Qing. Numerical simulation of groundwater sources of Chaobai River in Huangdao District in Qingdao City[J]. Land and Resources in Shangdong Province, 2015(7): 45-49.
- [16]ZHAO X Y. Impacts of human activity on environment in the high-cold pasturing area; A case of Gannan pasturing area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 141-149.
- [17]PIPER A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 1944, 25(6): 27-39.
- [18]GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3985): 870.
- [19]彭康宁,张卫,朱恒华,等.山东招远市地下水水化学特征及水质评价[J].安全与环境工程,2018,25(4):107-111
PENG Kangning, ZHANG Wei, ZHU Henghua, et al. Hydro-chemical characteristics and quality evaluation of groundwater in Zhaoyuan City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(4): 107-111.
- [20]刘久潭,王敏,刘书江,等.日照市涛雒地区浅层地下水环境质量综合评价[J].地下水,2016,38(2):97-99.
LIU Jiutan, WANG Min, LIU Shujiang, et al. Comprehensive evaluation of shallow groundwater environmental quality in Taoluo Area, Rizhao City[J]. Groundwater, 2016, 38(2): 97-99.
- [21]左锐,韦宝玺,王金生,等.基于多元统计分析的地下水水源地污染源识别[J].水文地质工程地质,2012,39(6):17-21.
ZUO Rui, WEI Baoxi, WANG Jinsheng, et al. Identification of groundwater pollution sources based on multivariate statistical approach[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(6): 17-21.
- [22]刘久潭,王敏,刘书江,等.日照市涛雒地区浅层地下水污染源解析[J].人民长江,2017,48(9):12-15.
LIU Jiutan, WANG Min, LIU Shujiang, et al. Pollutant source apportionment of shallow groundwater in Taoluo Area, Rizhao City[J]. Yangtze River, 2017, 48(9): 12-15.
- [23]孟利,左锐,王金生,等.基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J].中国环境科学,2017,37(10):3773-3786.
MENG Li, ZUO Rui, Wang Jinsheng, et al. Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3773-3786.

(责任编辑:高丽华)