

引用格式:冯建国,鲁统民,高宗军,等.新泰市地下水水化学特征及成因探讨[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):11-20.

FENG Jianguo, LU Tongmin, GAO Zongjun, et al. Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Xintai city[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(1): 11-20.

新泰市地下水水化学特征及成因探讨

冯建国¹, 鲁统民¹, 高宗军¹, 李贵恒¹, 刘久潭¹, 杨海博²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国冶金地质总局 山东正元地质勘查院, 山东 泰安 271000)

摘要:为查明新泰市地下水水化学特征及其离子来源,分别于2017年9月和2018年5月各采集29件地下水水样,综合运用数理统计、相关性分析、Piper三线图、Gibbs图以及离子比等方法对水样测试结果进行分析。结果表明,新泰市地下水环境较前人研究发生了较大的变化;丰枯水期主要阳离子为 Ca^{2+} ,阴离子由前人研究以 HCO_3^- 为主变为以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主;丰枯水期地下水按TDS划分,均处于淡水和微咸水等级;水化学类型在空间上变化较大,出现了多种类型,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主,这也说明地下水环境受到外界的影响;新泰市地下水离子主要来源于硅酸盐岩和碳酸盐岩等的风化溶解,同时也受到人类生活、工业生产以及农药化肥过量使用的影响。

关键词:新泰市;丰水期;枯水期;水化学;成因;地下水

中图分类号:P641

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)01-0011-10

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.01.002

Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Xintai city

FENG Jianguo¹, LU Tongmin¹, GAO Zongjun¹, LI Guiheng¹, LIU Jiutan¹, YANG Haibo²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Shandong Zhengyuan Institute of Geological Exploration,

China Metallurgical Geology Bureau, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: To identify the hydrochemical characteristics and ion sources of groundwater in Xintai city, 29 groundwater samples were collected in September 2017 and May 2018. Statistical analysis, correlation analysis, Piper diagram, Gibbs graph and ion ratio were used to analyze the test results of water samples. The results show that the groundwater environment in Xintai city has changed significantly compared with previous studies. The main cation is Ca^{2+} , and the anions have changed from HCO_3^- to HCO_3^- and SO_4^{2-} in the flood and dry periods. Groundwater in both periods can be classified as freshwater and brackish water according to TDS. Substantial changes have taken place in hydrochemical types in space and many hydrochemical types, with $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ as the main type, have appeared, which also indicates that the groundwater environment is affected by the outside world. Groundwater ions derive mostly from the weathering and dissolution of silicate rocks and carbonate rocks, and are also affected by hu-

收稿日期:2019-03-26

基金项目:山东省地下水水源地调查评价(泰莱盆地)(鲁地环 201604)

作者简介:冯建国(1976—),男,河北卢龙人,讲师,博士,从事水文地质方面的教学与研究工作。

E-mail: fengjianguo20316@sohu.com

高宗军(1964—),男,山东泰安人,教授,博士生导师,从事水文地质方面的教学与研究工作,本文通信作者。

E-mail: gaozongjun@126.com

man life, industrial production and the overuse of pesticides and fertilizers.

Key words: Xintai city; flood period; dry period; hydrochemistry; genesis; groundwater

地下水在生态环境系统中是一个最为活跃的因子,其化学成分特征既可提供十分珍贵的环境变化信息,也可以反映地下水的历史演变。Carol 等^[1]对滨海平原地区地下水的盐化过程进行了研究,认为地下水的盐化受溶滤作用、蒸发作用以及人类活动的影响。周俊等^[2]运用描述性统计、相关性分析、Gibbs 图、阴阳离子三角图和主成分分析法,对贡嘎山海螺沟流域水化学主离子特征及其控制因素进行了分析,认为岩石的化学风化是主离子来源的主要控制因素,碳酸盐岩的风化是海螺沟流域岩石风化的主要类型。张涛等^[3]综合运用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法对尼洋河下游河水及沿岸地下水水化学特征进行研究,认为该流域水化学离子组成受岩石风化和硅酸盐岩的溶解控制,碳酸盐岩的溶解也是离子组成的重要原因。刘久潭等^[4]运用数理统计及因子分析法对青岛西海岸新区地下水水化学特征进行研究,认为研究区水化学组分主要受水岩作用的控制,且污染源主要来自农业生产活动、地质因素、生活污水排放及工业生产活动的影响。通过对水体中水化学离子特征的研究,对了解水体中离子来源及生态环境保护具有重要意义。

地下水资源在新泰市城市和工农业发展及居民生活中占据了至关重要的地位。截止到目前为止,对新泰市地下水水化学特征的研究工作较少,只有韩锋等^[5]运用相关性分析和因子分析的方法对新泰市地下水水化学特征进行分析,得出该地区地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,水化学组分受岩石风化、蒸发浓缩、大气降雨以及人为活动的影响,但近 4 年内未曾有相关学者对新泰市的水化学现状及成因进行探讨。为此,本文依托“山东省地下水水源调查与评价(泰莱盆地)”项目,选取 2017 年 9 月(丰水期)和 2018 年 5 月(枯水期)29 件地下水水样检测数据,运用数理统计、相关性分析、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法,分析该地区地下水水化学丰枯水期变化特征及离子来源,分析其成因,为新泰市水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新泰市位于鲁中山区,隶属于山东省泰安市,极值地理坐标为东经 $117^{\circ}14'30''\sim 117^{\circ}59'58''$,北纬 $35^{\circ}39'00''\sim 36^{\circ}06'40''$ (图 1)。属温带季风大陆性气候,多年平均气温为 13.6°C ,1956—2017 年平均降水量为 739.14 mm。研究区内水系发育,主要河流有柴汶河、小汶河、平阳河、西周河、崖头河、羊流河等,86.26% 的流域面积属大汶河水系,13.74% 的流域面积属沂河、泗河水系。地势自东向西倾斜,南北东三面环山,中部和西部为平原。地貌形态有山地、丘陵和山间平原三种类型。发育地层有太古界、古生界、中生界和新生界,岩性有第四系(Q)粉砂、砾石、粘土等,古近系(E)石灰质角砾岩、灰质砾岩、紫红色泥岩、粉砂岩等,白垩系(K)粉砂岩、页岩、砂质灰岩等,侏罗系(J)浅紫色长石砂岩、夹碳质页岩或煤线等,二叠系(P)砂岩及煤层,石炭系(C)砂岩、煤层、泥岩等,奥陶系(O)灰岩、云斑灰岩、白云岩等,寒武系(ϵ)微晶灰岩、藻屑灰岩、鲕状灰岩、薄层灰岩、竹叶状灰岩等,以及泰山岩群(Ars)角闪变粒岩、石英长石片岩、黑云变粒岩夹斜长角闪岩。

1.2 样品采集

本次研究采用新泰市 2017 年 9 月(丰水期)和 2018 年 5 月(枯水期)地下水水样各 29 件的检测数据(图 1)。水样多采自农业灌溉机井和居民饮用水井。样品采集前,取样瓶进行酸洗和蒸馏水冲洗,采样时用新鲜水冲洗至少 3 次,取样点均为经常提水的开采井或压水井,取水前抽水 10 分钟以上,保证取得的水样可以反映采样点地下水的真实状况。样品送至有检测资质的山东省地矿工程勘察院检测。

1.3 研究方法

目前,国内外学者在研究地下水水化学特征及成因分析时,常采用数理统计、Piper 三线图、Gibbs 图、相关性分析、钠吸附比、饱和指数及同位素示踪、离子比等方法^[6-13]。采用数理统计、相关性分析、Piper 三线图、Gibbs 模型和离子比等方法对新泰市地下水水化学特征及成因进行分析。



图 1 研究区位置及取样点分布图

Fig. 1 Location and sampling point distribution map of the study area

2 结果与讨论

2.1 主要离子特征

新泰市丰枯水期地下水常规指标统计特征如表 1 所示。总体而言,丰枯水期水质存在明显的差异,各离子含量较前人研究成果都有明显提高^[5]。除 H_2SiO_3 外,其他指标枯水期均值均大于丰水期均值,这是由于丰水期降雨入渗补给量大,从而使得各离子浓度得到了稀释。而 H_2SiO_3 含量丰水期高于枯水期,这是因为海拔较高的基岩山区的硅酸盐矿物受丰水期多雨水的影响,随着降雨次数的增多,雨水溶解硅酸盐量也相继增加,从而入渗到地下水中,使地下水中硅酸盐含量增加。丰水期变异系数较枯水期偏高,说明丰水期地下水水质存在较大的空间差异,而枯水期相对较稳定。丰枯水期 pH 值变异系数相同且较小,说明丰枯水期 pH 值时空差异性较小。丰、枯水期 pH 均值分别为 7.37 和 7.55,接近中性。丰水期溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)的变化范围 $285.00 \sim 1\,550.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值 $759.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,按 TDS 划分淡咸水的方法,淡水、微咸水分别占水样的 65.5%、34.5%。枯水期 TDS 变化范围 $265.00 \sim 1\,610.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均值 $937.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,淡水、微咸水分别占水样的 72.4%、27.6%。丰枯水期微咸水类的地下水有 7 个样点(K01、K03、K05、K08、K11、Y08、L07)取样地点相同。丰枯水期阳离子均存在 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 的关系,说明新泰市 Ca^{2+} 为优势阳离子,较前人研究成果优势阳离子没有改变,但 Na^+ 占比增加。阴离子在丰水期存在 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系,而在枯水期呈 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的关系,但

SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的相差不大且含量均较高,说明新泰市丰枯水期 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为优势阴离子, NO_3^- 和 Cl^- 含量占据的比重也较大,较前人研究成果增加了优势阴离子 SO_4^{2-} 。因研究区煤层发育,而煤层中常含有黄铁矿,黄铁矿易被氧化形成 SO_4^{2-} ,使得地下水中 SO_4^{2-} 含量增加。

表 1 新泰市地下水水化学特征统计

Tab. 1 Statistics of groundwater hydrochemical characteristics in Xintai city

时间	项目	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	TDS	pH
丰水期	最大值	7.50	90.91	346.69	52.50	320.85	630.15	587.35	432.45	61.27	1 550.00	7.80
	最小值	0.26	3.75	42.08	1.46	8.51	79.25	61.34	1.29	12.88	285.00	6.60
	平均数	1.54	35.04	167.73	26.91	67.69	211.86	257.19	101.22	31.60	759.72	7.37
	标准差	1.56	24.45	79.63	13.65	67.17	145.68	119.08	102.78	12.96	357.23	0.24
	变异系数	1.01	0.70	0.47	0.51	0.99	0.69	0.46	1.02	0.41	0.47	0.03
枯水期	最大值	7.78	163.30	397.79	66.96	344.25	530.25	502.21	361.14	45.81	1 610.00	8.10
	最小值	0.34	6.61	47.09	5.35	11.70	47.55	73.42	1.83	11.66	265.00	7.00
	平均数	4.06	84.96	222.44	36.16	177.98	288.90	287.82	181.49	28.74	937.50	7.55
	标准差	1.59	39.01	101.16	15.56	91.12	142.90	101.98	103.00	10.85	450.85	0.24
	变异系数	0.39	0.46	0.45	0.43	0.51	0.49	0.35	0.57	0.38	0.48	0.03

注:除 pH 外,其余检测指标浓度单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

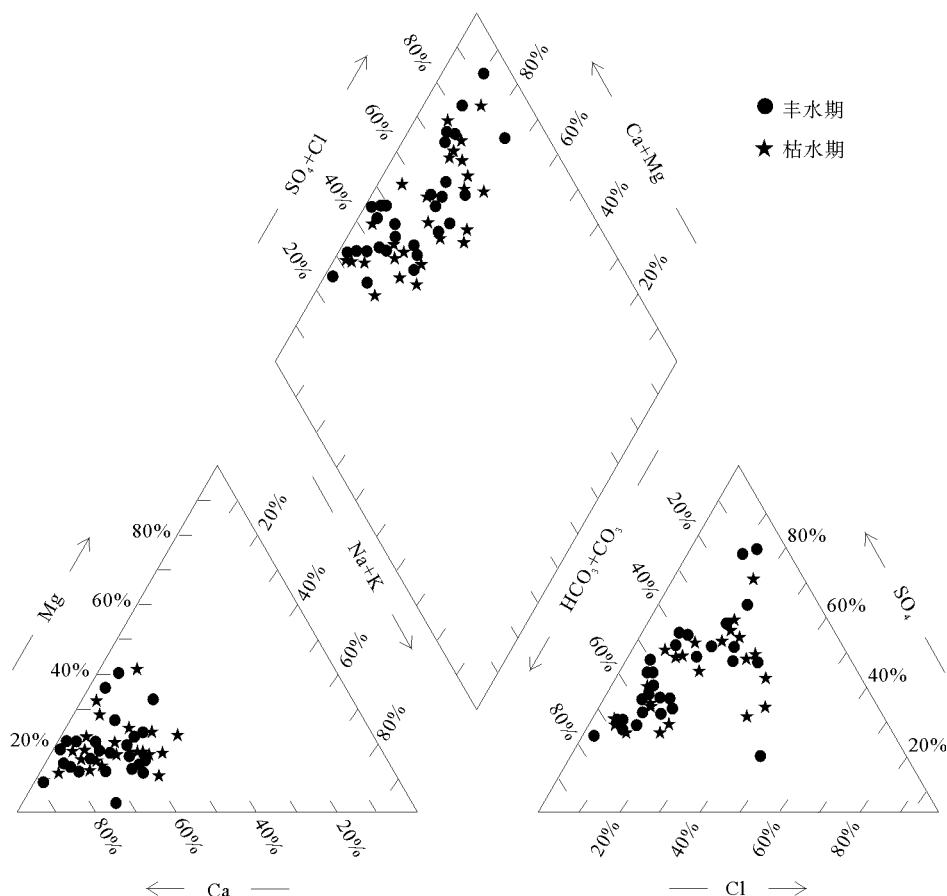


图 2 新泰市地下水派珀三线图

Fig. 2 Piper diagram of groundwater in Xintai city

2.2 水化学演化特征

派珀(Piper)三线图是一种常用的水化学图示方法^[13]。如图 2 所示,新泰市地下水水化学类型在丰水期共出现 8 种类型,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主,占水样的 58.6%,其次为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,在果都镇北石沟村附近(K03)和青云街道龙山村附近(L02)出现较复杂的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca}$ 型。枯水期共出现 9 种类型,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca}$ 型为主,占水样的 48.3%,其次为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,在天宝镇时家庄村附近(K04)、汶南镇陈粮村附近(K11)以及青云街道龙山村附近(L02)同样出现 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Ca}$ 型水,在羊流镇官桥村附近(L05)出现了更为复杂的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 型。这与韩锋等^[5]2014 年研究成果以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主不同,水化学类型更为多样复杂,说明近几年新泰市地下水离子组分含量发生了巨大变化,而短时间内地质条件不会发生太大的变化,说明人为因素起主导作用。总体来说,新泰市丰枯水期水化学特征在时间上变化不大,只是空间上存在一定的变化,因此新泰市地下水类型主要受区内物理化学及人类作用的影响^[12]。

2.3 地下水离子组分天然形成因素探讨

2.3.1 离子相关性分析

各离子之间的相关性是判断离子同源性的一种方法^[14]。运用 SPSS 软件对新泰市丰枯水期地下水常规水化学参数进行相关性分析。从表 2 中可以看出,丰枯水期 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 呈显著正相关关系,说明存在硅酸盐矿物的风化溶解; SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 呈显著的正相关关系,说明三者有共同的来源,可能与岩盐、石膏等硫酸盐岩的风化溶解有关。丰水期 TDS 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 之间的相关性显著,说明这几种离子决定了研究区丰水期水化学类型;枯水期 TDS 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 之间的相关性显著,说明这几种离子决定了枯水期水化学类型。

表 2 新泰市地下水主要水化学离子相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of main hydrochemical ions in groundwater in Xintai city

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	丰水期(2017 年 9 月)									
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	TDS
K^+	1	0.449 *	0.129	0.222	0.178	0.274	-0.114	0.23	0.348	0.274
Na^+		1	0.596 **	0.437 *	0.685 **	0.655 **	0.26	0.199	0.099	0.719 **
Ca^{2+}			1	0.630 **	0.685 **	0.826 **	0.296	0.599 **	-0.348	0.966 **
Mg^{2+}				1	0.549 **	0.606 **	0.368 *	0.331	-0.104	0.714 **
Cl^-					1	0.490 **	0.234	0.216	-0.074	0.708 **
SO_4^{2-}						1	-0.002	0.458 *	-0.055	0.882 **
HCO_3^-							1	-0.246	-0.519 **	0.223
NO_3^-								1	-0.097	0.633 **
H_2SiO_3									1	-0.197
TDS										1
项目	枯水期(2018 年 5 月)									
	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	H_2SiO_3	TDS
K^+	1	0.390 *	0.267	0.407 *	0.251	0.307	-0.136	0.608 **	0.373 *	0.384 *
Na^+		1	0.660 **	0.789 **	0.787 **	0.732 **	0.532 **	0.416 *	0.189	0.806 **
Ca^{2+}			1	0.781 **	0.894 **	0.876 **	0.539 **	0.657 **	-0.182	0.968 **
Mg^{2+}				1	0.792 **	0.752 **	0.604 **	0.600 **	-0.033	0.875 **
Cl^-					1	0.773 **	0.501 **	0.543 **	0.018	0.918 **
SO_4^{2-}						1	0.391 *	0.460 *	-0.016	0.902 **
HCO_3^-							1	0.071	-0.449 *	0.530 **
NO_3^-								1	0.046	0.693 **
H_2SiO_3									1	-0.047
TDS										1

* 表示在 0.05 水平上显著相关;** 表示在 0.01 水平上显著相关

2.3.2 Gibbs 图离子分析

Gibbs 设计了半对数坐标图,可根据离子与 TDS 之间的关系分析地表水的离子成因(蒸发结晶、岩石风化和大气降水),同时也可以用于探讨地下水离子来源问题^[6,15]。在 Gibbs 图中(图 3),当 TDS 值较低且 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值大于 0.5 时,说明区域水化学组分主要受大气降水作用控制;当 TDS 值为中值且 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值小于 0.5 时,说明区域水化学组分主要受岩石风化作用控制;当 TDS 值较高且 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值接近于 1 时,说明该区域水化学组分主要受蒸发-结晶作用控制。从图 3 可以看出,研究区丰、枯水期地下水水样点主要分布在岩石风化控制区,只有部分水样点有向蒸发-结晶控制作用区移动的趋势,并远离大气降水控制区域,这表明研究区岩石风化作用对离子浓度的影响占主导作用。但因地下水离子来源的广泛性和复杂性,需要选用其他方法进一步分析离子来源^[12]。

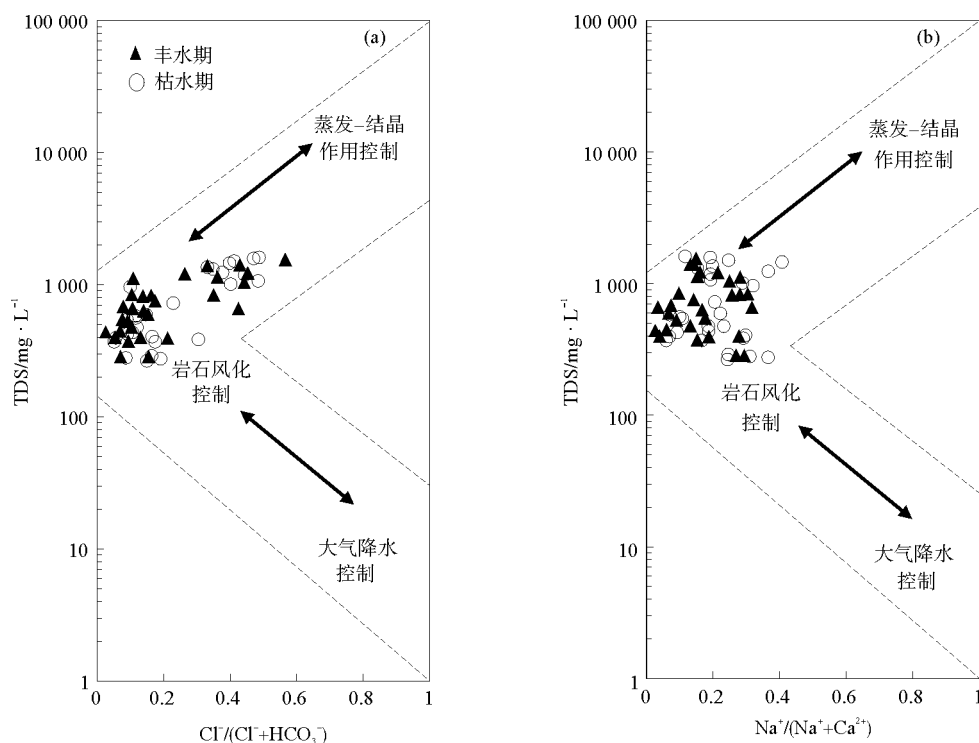


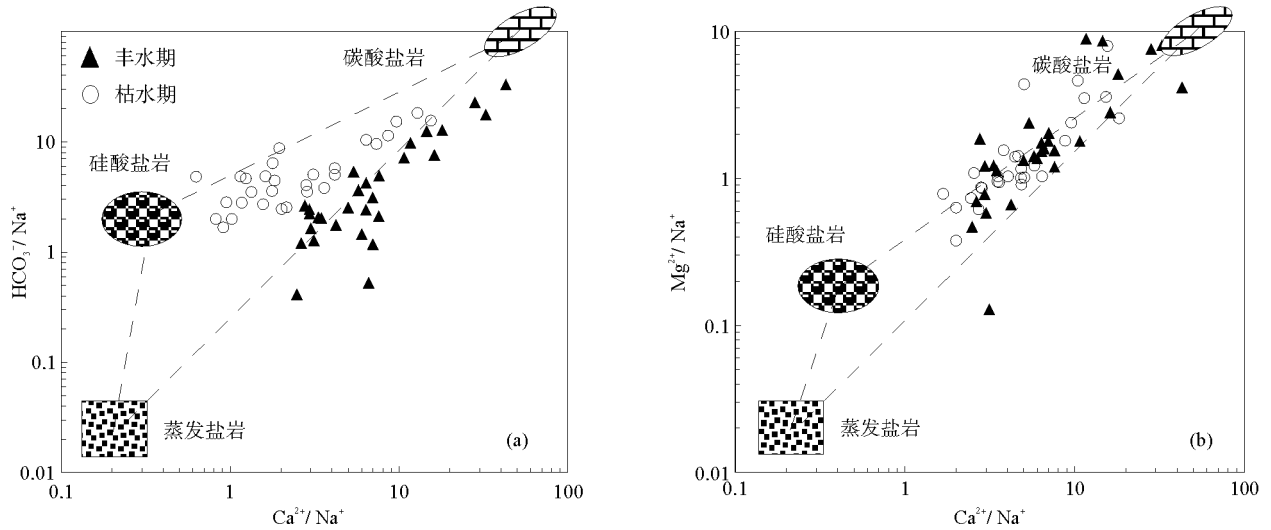
图 3 Gibbs 水化学图

Fig. 3 Gibbs hydrochemical diagram

2.3.3 离子比分析

1) $\gamma\text{Ca}^{2+} / \gamma\text{Na}^+$ 、 $\gamma\text{Mg}^{2+} / \gamma\text{Na}^+$ 与 $\gamma\text{HCO}_3^- / \gamma\text{Na}^+$ 的比值

利用 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 离子的毫克当量比值,可以进一步探讨地下水化学离子组分来源^[16]。研究区丰枯水期水样点均分布在碳酸盐岩和硅酸盐岩控制区(图 4),这表明研究区主要受碳酸盐和硅酸盐风化溶解的共同作用,蒸发盐岩的控制作用较小。结合当地地质条件,南部、北部和东部为隆起的花岗岩以及寒武和奥陶系碳酸盐岩,中部和西部为平原,且在楼德—宫里—谷里一带存在隐伏碳酸盐岩,为碳酸盐岩和硅酸盐的风化溶解提供了有利条件。从图 4 可以看出,地下水水化学特征受硅酸盐岩控制作用要大于受碳酸盐岩的控制作用,这是由于硅酸盐类在新泰市东、南、北侧都有分布,面积大,而碳酸盐岩主要分布在南部,还有部分隐伏于第四系以下,这就使得硅酸盐比碳酸盐岩溶解的要多。

图 4 地下水 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 元素比值Fig. 4 The ratio of $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ to $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ elements in groundwater2) $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-})$

利用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 和 $(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-})$ 的毫克当量比值, 可以判断出 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源, 当取样点分布于 $\gamma(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 1$ 上方时, 说明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐岩和蒸发盐岩的风化溶解; 当取样点分布于 $\gamma(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) = 1$ 下方时, 说明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的风化溶解^[6,17]。从图 5(a) 可以看出, 丰枯水期水样点绝大部分位于 $\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 上方, 只有极少部分水样点位于下方, 这说明研究区 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩的溶解, 只有少部分点与硅酸盐和蒸发盐岩的溶解有关。

3) $\gamma(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-}$

利用 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 和 Cl^{-} 的毫克当量比值, 可以判断出地下水 Na^{+} 和 K^{+} 的来源。当取样点分布于 $\gamma(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-} = 1$ 上方时, 表明 Na^{+} 和 K^{+} 来源于岩盐的风化溶解; 当取样点分布于 $\gamma(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-} = 1$ 下方时, 表明 Na^{+} 和 K^{+} 来源于硅酸盐的风化溶解^[14]。从图 5(b) 可以看出, 丰水期取样点分布于 $\gamma(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-} = 1$ 上下两侧, 其中分布于下方的取样点数多于上方的, 说明丰水期地下水 Na^{+} 和 K^{+} 来源于岩盐和硅酸盐溶解, 且硅酸盐溶解贡献大于岩盐溶解; 枯水期取样点亦分布于 $\gamma(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-} = 1$ 上下两侧, 但与丰水期不同, 分布于上方的点数多于下方, 说明枯水期地下水 Na^{+} 和 K^{+} 来源于岩盐和硅酸盐溶解, 但岩盐溶解贡献大于硅酸盐溶解。因此, 研究区地下水 Na^{+} 和 K^{+} 来源于岩盐溶解和硅酸盐溶解的共同作用。

4) $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\gamma\text{HCO}_3^{-}$

计算 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})$ 和 HCO_3^{-} 的毫克当量比值, 可以用来判断地下水离子的来源。当取样点分布于 $\gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\gamma\text{HCO}_3^{-} = 1$ 的上方时, 说明地下水离子主要来源于蒸发盐岩的溶解; 当落于下方时, 则说明地下水离子主要来源于碳酸盐岩的溶解^[18]。从图 5(c) 可以看出, 研究区丰枯水期地下水取样点分布于 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\gamma\text{HCO}_3^{-} = 1$ 上下两侧, 且两侧数量相当, 这说明研究区地下水离子来源与蒸发盐岩溶解、碳酸盐岩溶解都存在一定的关系。

5) $\gamma(\text{Na}^{+} - \text{Cl}^{-})/[\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^{-})]$

$\gamma(\text{Na}^{+} - \text{Cl}^{-})$ 与 $[\gamma(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \gamma(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^{-})]$ 之间的比值可以反映出阳离子交换作用^[19]。从图 5(d) 可以看出, 研究区丰水期水样分布在斜率为 -0.413 4 的直线周围, $R^2 = 0.477 7$; 枯水期水样分布在斜率为 -0.436 2 直线周围, $R^2 = 0.666 7$ 。丰枯水期水样的斜率远离 -1, 说明研究区阳离子交换作用较弱, 也说明了 Gibbs 阳离子图中的水样点分布集中。

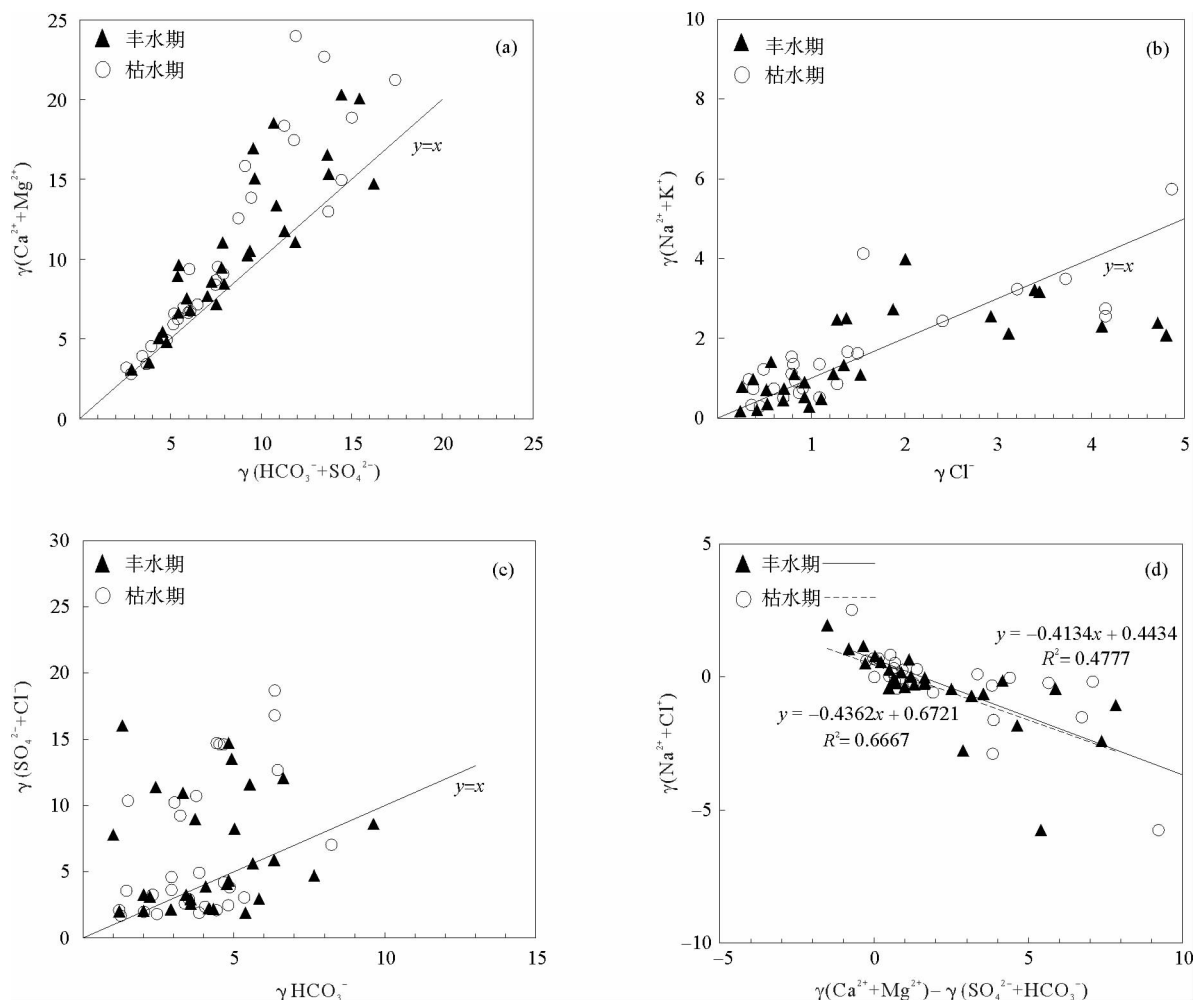


图5 研究区地下水离子比值图

Fig. 5 Groundwater ion ratio in the study area

2.4 人为活动对地下水离子组分的影响探讨

研究区矿产丰富,北部山区及丘陵区主要有金、建筑用花岗岩、长石等,中部平原区主要有煤、耐火粘土、铝土矿、陶瓷粘土等,南部丘陵区主要有金、石灰岩、白云岩等,矿产的开采和利用会对地下水造成一定的影响。采用水样点的离子比值趋势图^[20]对研究区地下水进行分析,从图 6(a)可以看出,丰枯水期 K04 取样点、丰水期 K11 取样点以及枯水期 K09 取样点 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{NO}_3^-$ 均大于 1,这说明该地区受生活污水的影响。为更清楚地看出丰枯水期各取样点的离子比值关系,将以上能明显看出 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{NO}_3^-$ 大于 1 的点去除,重新绘制离子比值趋势图。从图 6(b)可以看出,丰枯水期取样点较均匀的分布于 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{NO}_3^- = 1$ 轴上下两侧,说明研究区有一半的取样点受到生活污水的影响;除丰水期 K11 外,其余丰枯水期取样点 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{SO}_4^{2-}$ 值均较小,说明研究区也受到了工业影响; $\gamma\text{SO}_4^{2-}/\gamma\text{NO}_3^-$ 的值较小,说明研究区丰枯水期还受到了农业污染的影响。确定污染源、污染途径及污染方式,为制定污染防治规划、确定污染防治措施提供依据^[21]。

3 结论

1) 新泰市丰枯水期地下水 pH 值均呈弱酸性;丰水期 TDS 值介于 $285.00 \sim 1\,550.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,枯水期 TDS 值介于 $265.00 \sim 1\,610.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均处于淡水和微咸水等级;丰枯水期阳离子以 Ca^{2+} 为主,阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主。

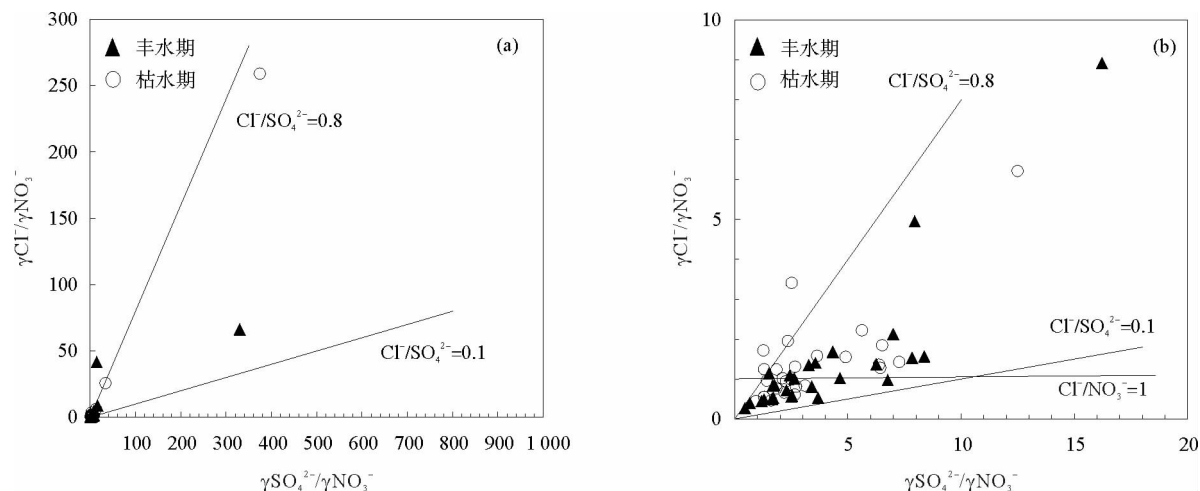


图6 地下水离子含量比值趋势图

Fig. 6 Trend diagram of ion content ratio in groundwater

2) 新泰市地下水水化学类型多样,丰水期水化学类型有8种,枯水期水化学类型有9种,都以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca型为主,其次为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ -Ca·Mg型。在丰枯水期都出现了较为复杂的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}$ -Ca型,在羊流镇官桥村附近(L05)枯水期水样中出现了更为复杂的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}$ -Na·Ca型。

3) 新泰市丰枯水期地下水水化学特征受到碳酸盐岩和硅酸盐岩风化溶解的控制,同时也受到煤层及煤层所夹黄铁矿的氧化作用影响;人类生活污染、工业生产以及农业活动也对地下水水化学特征造成了影响。

参考文献:

- [1]CAROL E, KRUSE E, MASPLA J. Hydrochemical and isotopical evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Samborombon Bay, Argentina[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 335-345.
- [2]周俊, 吴艳宏, 贾嘎. 海螺沟水化学主离子特征及其控制因素[J]. 山地学报, 2012, 30(3): 378-384.
ZHOU Jun, WU Yanhong. Major ion chemistry of waters in Hailuoguo Catchment and the possible controls[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(3): 378-384.
- [3]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, 38(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, 38(11): 4537-4545.
- [4]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.
- [5]韩锋, 陈田华. 泰安新泰市地下水化学特征研究[J]. 四川地质学报, 2014, 34(2): 215-217.
HAN Feng, CHEN Tianhua. Study of chemical characteristics of ground water in Xintai, Taian [J]. Acta Geologica Sichuan, 2014, 34(2): 215-217.
- [6]栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380-389.
LUAN Fengjiao, ZHOU Jinlong, JIA Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol-Yiwu basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380-389.
- [7]刘久潭, 高宗军, 马媛媛, 等. 堆龙河谷平原下游地下水水质变化特征[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 39-42.
LIU Jiutan, GAO Zongjun, MA Yuanyuan, et al. Characteristics of groundwater quality change in lower reaches of Duilong river valley plain[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(8): 39-42.
- [8]高宗军, 张洪英, 孙梦醒, 等. 山东省日照沿海浅层地下水水化学特征与成因探讨[J]. 地下水, 2017, 39(4): 1-4.
GAO Zongjun, ZHANG Hongying, SUN Mengxing, et al. The chemical characteristics and causes of shallow groundwater in

- the Rizhao coastal area of Shandong[J].Groundwater,2017,39(4):1-4.
- [9]RAJESH R,BRINDHA K,ELANGO L.Groundwater quality and its hydrochemical characteristics in a shallow weathered rock aquifer of Southern India[J].Water Quality,Exposure and Health,2015,7(4):515-524.
- [10]NEMATOLLAHI M J,EBRAHIMI P,EBRAHIMI M.Evaluating hydrogeochemical processes regulating groundwater quality in an unconfined aquifer[J].Environmental Processes,2016,3(4):1021-1043.
- [11]郭琴,龙健,廖洪凯,等.贵州高原喀斯特流域浅层地下水化学特征及质量评价:以普定后寨河为例[J].环境化学,2017,36(4):858-866.
- GUO Qin, LONG Jian, LIAO Hongkai, et al. Chemical characteristics and quality evaluation of shallow groundwater in a typical Karst plateau basin of Guizhou province: A case study of Houzhai river in Puding county[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(4): 858-866.
- [12]王卓微,赵新锋,庞园,等.流溪河流域地下水水化学时空特征及源辨析[J].环境化学,2017,36(12):2701-2710.
- WANG Zhuowei, ZHAO Xinfeng, PANG Yuan, et al. Spatial and seasonal geochemical and stable isotopic characteristics of groundwater associated with flow system and source identification in Liuxi river catchment[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(12): 2701-2710.
- [13]PIPER A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. EOS Transactions of American Geophysical Union, 1944, 25(6): 27-39.
- [14]张艳,吴勇,杨军,等.阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J].环境科学,2015,36(9):3230-3237.
- ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi town, Langzhong city[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3230-3237.
- [15]张洪英,高宗军,李伟,等.不同类型岩土浸泡水实验分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(6):10-16.
- ZHANG Hongying, GAO Zongjun, LI Wei, et al. Analysis of different types of rock-soil in soaking experiment[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(6): 10-16.
- [16]曾妍妍,周金龙,贾瑞亮,等.新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):64-70.
- ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, JIA Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristics and causes of surface water in Qimantage area, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2017, 31(6): 64-70.
- [17]安乐生,赵全升,叶思源,等.黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用[J].环境科学,2012,33(2):370-378.
- AN Lesheng, ZHAO Quansheng, YE Siyuan, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the Yellow river delta[J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 370-378.
- [18]李小等.青海省诺木洪地区地下水化学特征及演化规律[D].西安:长安大学,2012.
- LI Xiaodeng. Study on the groundwater chemistry evolution of Nuomuhong area in Qinghai province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [19]ZHU G F, SU Y H, HUANG C L, et al. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe river basin, northwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(1): 139-153.
- [20]赵江涛,周金龙,曾妍妍,等.新疆焉耆盆地平原区地下水质量评价与污染成因探讨[J].地球与环境,2015,43(6):628-636.
- ZHAO Jiangtao, ZHOU Jinlong, ZENG Yanyan, et al. Assessment of organic pollution and study on pollution cause of groundwater in the plain area of Yanqi basin, Xinjiang[J]. Earth and Environment, 2015, 43(6): 628-636.
- [21]高宗军,田红,张春荣.水环境评价概述[J].山东科技大学学报(自然科学版),2007,26(1):20-22.
- GAO Zongjun, TIAN Hong, ZHANG Chunrong. Outline of water environment evaluation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 26(1): 20-22.

(责任编辑:高丽华)