

王巧焕, 卢玉东. 内蒙古腰坝绿洲地下水化学特征及成因分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 81-88.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.011

内蒙古腰坝绿洲地下水化学特征及成因分析

王巧焕^{1,2}, 卢玉东²

1. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013;

2. 长安大学水利与环境学院/长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054

摘要 选取内蒙古自治区腰坝绿洲 66 个地下水样点的化学数据为研究对象, 运用经典统计学、Piper 三线图、Gibbs 图、主离子浓度关系图等方法, 对地下水化学特征和成因进行分析。研究结果显示, 研究区地下水呈弱碱性微咸水, 化学过程主要以蒸发浓缩-岩石风化作用为主, 地下水化学组分以方解石、白云石、岩盐与石膏的溶解沉淀为主要来源。研究结果表明, 研究区从东北向西南地下水化学类型由 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型转化为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型, 形成高盐分离子的富集, 水体总体咸化程度明显。

关键词 地下水; 化学特征; 成因分析; 主离子浓度; 总溶解性固体; 水质评价; 水资源保护; 腰坝绿洲
中图分类号 P 641 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0081-08

地下水的化学成分是地下水与环境长期相互作用的产物, 也是地下水循环演化规律和地下水系统特征的集中反映^[1]。开展地下水的化学特征及成因分析是水文地质学的重要研究内容, 也是地下水资源质量评价与管理不可缺少的部分, 它对流域生态环境保护与建设具有重要意义^[2-3]。

腰坝绿洲是内蒙古自治区阿拉善盟十大绿洲之一, 该区干旱少雨, 水资源匮乏, 地下水是该区社会经济和生态环境发展的主要水资源。自 1970 年代以来, 随着该区社会经济的快速发展, 对水资源的需求越来越多, 地下水开采量逐年增加, 造成了地下水水位下降、水质恶化, 可利用地下水资源日趋减少, 制约了该绿洲的可持续发展。在这样的背景下, 彭翠华^[4]对地下水水质演化进行了研究, 得出地下水水质恶化的主要原因是过量开采导致高矿化咸水入侵, 并通过建立地下水水质预测模型, 预测在不改变现有的开发利用方式和力度, 该区地下水水质会不断地恶化; 姜凌等^[2, 5-6]对地下水化学成分的时空变异特征与演化规律进行了研究, 得出地下水东北部总溶解性固体(total dissolved solids, TDS)较低, 西南部较高, 且自开采以来地下水 TDS 总体上呈增加趋势, 水体总体向咸化方向发展。

为了解腰坝绿洲地下水化学成分特征及成因,

进一步为该区地下水水质评价提供数据基础, 笔者在前人研究成果的基础上, 通过野外地下水水样采集、现场测定、实验室测定获得水样化学成分, 综合运用经典统计学^[7]、相关性分析^[8]、Piper 三线图^[9]、Gibbs 图^[10]、Schoeller 图^[11-12]等方法, 揭示研究区地下水化学成分的演化规律、形成机制, 以期合理开发利用和保护地下水资源提供理论依据, 最终为该区域生态环境和社会经济的可持续发展提供科学保证。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

腰坝绿洲灌区位于贺兰山西侧山前洪积倾斜平原的边缘, 向西伸入腾格里沙漠, 地理坐标范围为东经 $105^{\circ}34' \sim 105^{\circ}39'$, 北纬 $38^{\circ}25' \sim 38^{\circ}36'$ 。该区总面积为 81.2 km^2 , 是阿拉善左旗的主要农牧区。研究区深居我国西北内陆, 属典型大陆性干旱气候, 降雨稀少, 蒸发强烈。据统计, 该区多年平均降雨为 198 mm , 年内降雨多集中在 6 至 9 月份, 其降雨量约占全年降雨量的 70% 左右; 多年平均蒸发量为 2394 mm , 最大蒸发量主要集中在 5 至 7 月份, 约占全年总蒸发量的 45% 左右。

研究区地形呈东、北和南部地势高, 西部地势低

收稿日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771070); 阿拉善 SEE 生态协会基金项目(220029150182); 江西省教育厅项目(GJJ160562)

王巧焕, E-mail: chuanyil57@126.com

通信作者: 卢玉东, E-mail: 550417761@qq.com

的簸箕状。区内地下水主要来源于第四系含水岩组,在绿洲中部的厚度 206 m,在绿洲外防洪坝以东厚度大于 200 m,由颗粒粗大的砾石、卵砾及砂砾混合沉积物组成单一潜水区,缺乏粘土隔水层,此带宽 4~7 km。地下水位埋深大于 60 m,位于贺兰山西麓山前倾斜洪积扇的中下部,主要补给来源为贺兰山的山前侧向径流,整体径流方向为自东北向西南方向,在天然条件下主要以地下径流方式向西部相

邻系统排泄。此外,西部潜水浅埋区还以蒸发方式排泄或溢出形成湖沼洼地。同时,人为开采也成为第四系孔隙水大量排泄的方式之一。井灌区主要开采由含砾中细砂、中粗砂、细砂、粗砂组成,砂层含有卵砾石或夹有卵砾石层,砂层赋存孔隙承压水,含水层累计厚度 20~40 m,该含水岩组在东侧埋深约 40~60 m,在中部及西部的埋深约 60~70 m(图 1)。

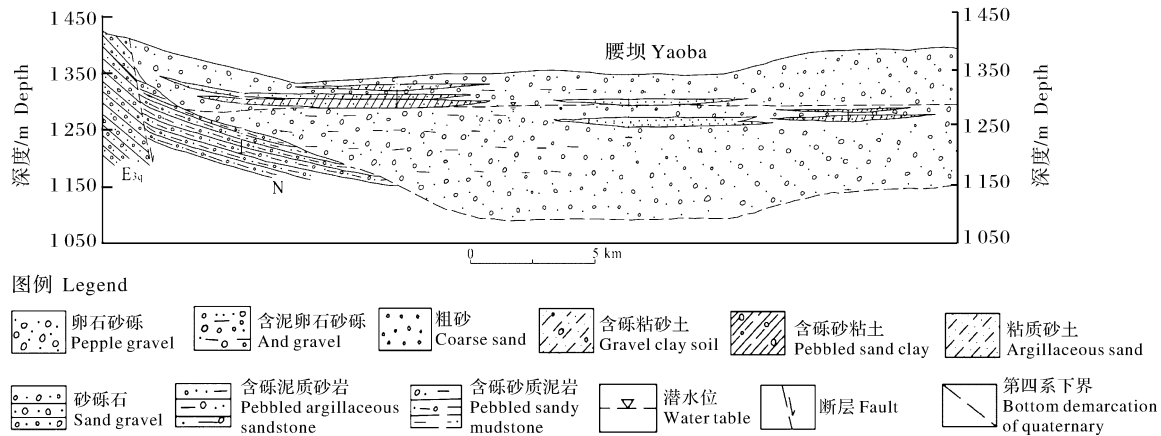


图 1 研究区水文地质剖面图

Fig.1 Hydrogeological profile of the study area

1.2 水样采集与分析

本研究运用遥感影像和 GPS 定位,设计规划水样采样点分布。水样点布设根据机井分布背景采取棋盘式的布设方法,使采样点遍布全区,尽量遵循均匀性原则。采样区面积为 81.2 km²,每个取样点控制面积约 1.23 km² (1.11 km×1.11 km),共采集 66 个水样点,使用 Surfer 11 绘制采样点示意图(图 2)。

水样采集依据《水质样品的保存和管理技术规范》(HJ 493—2009)的要求,各采样点采集水样 2 瓶 (500 mL)和 1 桶 (5 L),用于送检机构的水质分析及样品备用;现场测定 pH 值、游离二氧化碳(CO₂)等项目,在实验室测定 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺+Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、总溶解性固体(total dissolved solids, TDS)、总碱度、总硬度等主要化学成分。

1.3 研究方法

本研究采用 Excel 软件对数据进行基本处理和筛选,再利用 SPSS 24.0 软件对水样各化学组分进行统计分析。同时还利用 Origin 软件绘制 Piper 图以阐释地下水主要阴离子和阳离子浓度关系以及推

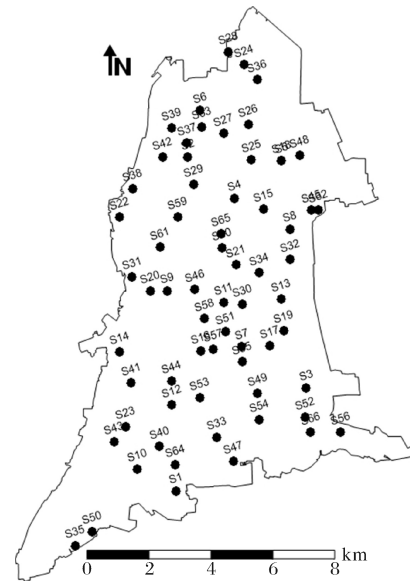


图 2 研究区地下水样品采样点

Fig.2 Groundwater sample sampling points in the study area

断地下水水文地球化学相,绘制 Gibbs 图用来识别控制地下水化学成分形成和演化的影响因素,分析研究区地下水主要指标的成因及来源。

2 结果与分析

2.1 地下水化学特征

利用描述性统计分析法对研究区 66 组地下水样品的测定结果进行统计分析(表 1)。从表 1 可以看出,地下水 pH 值变化范围为 7.6~8.2,平均值

7.9,呈弱碱性,变异系数为 1.3%,呈弱变异性,说明研究区地下水 pH 值空间差异较小。TDS 变化范围为 721.6~6 923.4 mg/L,平均值为 1 773 mg/L,地下水水质整体呈微咸水,变异系数为 57.9%,呈中等变异性,说明研究区地下水 TDS 空间差异较大。

表 1 研究区地下水化学特征值描述(n=66)

Table 1 Descriptive chemical statistics of groundwater in the study area(n=66)

参数 Parameters	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数/% Variable coefficient
pH	7.6	8.2	7.9	0.1	1.3
Ca ²⁺ /(mg/L)	40.1	290.6	109.4	49.7	45.4
Mg ²⁺ /(mg/L)	30.4	328.2	124.7	65.3	52.4
(K ⁺ +Na ⁺)/(mg/L)	12.2	1 598.1	213.4	237.6	111.3
SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	228.1	2 713.7	666.4	408.5	61.3
Cl ⁻ /(mg/L)	70.9	1 764.0	400.9	294.5	73.5
HCO ₃ ⁻ /(mg/L)	177.0	414.9	258.2	51.6	20.0
CO ₂ /(mg/L)	4.4	16.5	7.7	2.6	33.8
TDS/(mg/L)	721.6	6 923.4	1 773.0	1 027.3	57.9
总硬度/(mg/L) Total hardness	275.3	2 077.1	786.4	383.4	48.8
总碱度/(mg/L) Total alkalinity	145.0	340.0	211.8	42.3	20.0

地下水中阳离子含量为(Na⁺+K⁺)>Mg²⁺>Ca²⁺,各自平均含量分别占阳离子总量的 47.7%、27.9%和 24.4%。从变异系数来看,Ca²⁺、Mg²⁺的变异系数分别为 45.4%和 52.4%,均呈中等变异性,说明研究区地下水中 Mg²⁺、Ca²⁺离子含量空间差异性较大,而 Na⁺+K⁺的变异系数为 111.3%,呈强变异性,说明研究区地下水中 Na⁺+K⁺离子含量空间差异非常大。

地下水中阴离子含量大小为 SO₄²⁻>Cl⁻>HCO₃⁻,各自平均含量分别占阴离子总量的 50.3%、30.2%和 19.5%,其变异系数分别为 61.3%、73.5%和 20.0%,均呈中等变异性,说明研究区地下水中各阴离子含量空间差异较大。

地下水总硬度平均值为 786.4 mg/L,依据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中标准限值,该区地下水整体为 V 类水(>650 mg/L),变异系数为 48.8%,呈中等变异性,说明研究区地下水总硬度空间差异较大。地下水总碱度平均值为 211.8 mg/L,其变异系数为 20%,呈中等变异性,说明研究区地下水总碱度空间差异较大。

根据样品测定结果分析,研究区地下水化学类型

较复杂,结合地下水化学成分 Piper 三线图(图 3)可以看出,自东北(补给区)向西南(排泄区)地下水化学类型由 SO₄·Cl-Ca·Mg 型和 SO₄·HCO₃·Cl-Mg·Na 型经 Cl·SO₄-Ca·Mg 型转化为 SO₄·Cl-Ca·Na 型水,总体上研究区地下水以硫酸型和氯化型为主。

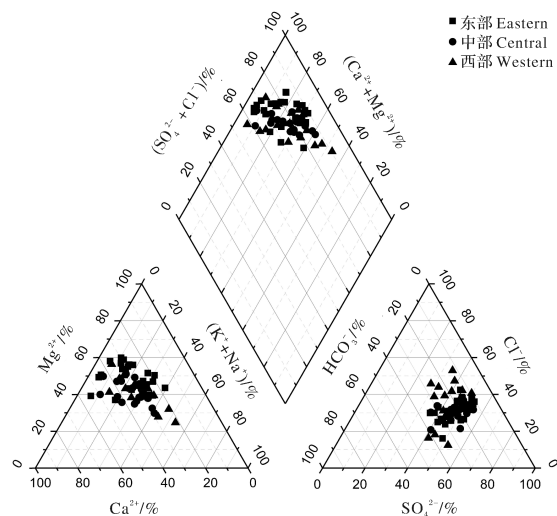


图 3 研究区地下水化学成分 Piper 三线图
Fig.3 Piper trilinear diagram of groundwater chemical composition in the study area

2.2 成因分析

1) 相关性分析。运用 Pearson 相关分析对腰坝绿洲地下水化学成分间的内在关联性进行分析(表 2)。由表 2 可知, 研究区地下水除 HCO_3^- 、pH 和 CO_2 外, 其余各成分之间存在着显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数均大于 0.8; 尤其是 TDS 与 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、总硬度、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的相关系数均高于 0.9, 较好的相关关系反映了地下水的成因。在补给区有白云石、方解石等溶解, 使得 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 成为地下水的主要离子成分, 进而与

TDS 存在显著相关性。在地下水径流过程中, 随着白云石、方解石沉淀, 石膏、盐岩、钾盐、萤石等溶解, 钙离子吸附和钠离子解吸, 使得地下水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 成为主要的离子成分, 进而与 TDS 存在显著相关性。

总碱度与 HCO_3^- 存在高度显著相关关系, 相关系数为 1.0, 即地下水的碱性取决于 HCO_3^- 的含量, 而 pH 值在 4.3~8.3 时, 地下水中只有 HCO_3^- , 根据研究分析, 腰坝绿洲的地下水 pH 在 7.6~8.2, 这与总碱度和 HCO_3^- 的相关性相符合。

表 2 研究区地下水化学参数相关系数矩阵 ($n=66$)

Table 2 Correlation matrices of groundwater chemical parameters in the study area ($n=66$)

参数 Parameters	pH	TDS	总硬度 Total hardness	总碱度 Total alkalinity	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_2
pH	1										
TDS	-0.154	1									
总硬度 Total hardness	-0.232	0.946**	1								
总碱度 Total alkalinity	0.217	-0.012	-0.057	1							
Ca^{2+}	-0.257*	0.903**	0.947**	-0.142	1						
Mg^{2+}	-0.212	0.932**	0.989**	-0.016	0.889**	1					
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	-0.105	0.974**	0.855**	-0.07	0.826**	0.838**	1				
SO_4^{2-}	-0.200	0.985**	0.940**	-0.063	0.903**	0.924**	0.954**	1			
Cl^-	-0.124	0.978**	0.937**	-0.046	0.891**	0.925**	0.955**	0.934**	1		
HCO_3^-	0.217	-0.012	-0.057	1.000**	-0.142	-0.016	-0.070	-0.063	-0.046	1	
CO_2	-0.692**	0.155	0.202	0.437**	0.166	0.211	0.069	0.164	0.107	0.437**	1

注 Note: * 表示相关性显著 ($P < 0.05$)。** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。* represent the correlation is significant. ** represent the correlation is significant.

2) 水化学空间变化趋势分析。根据水样测定结果, 考虑东部、中部、西部分配均匀, 选取有代表性的 28 个水样点, 绘制出表征地下水化学特征的 Schoeller 图(图 4), 从图 4 可以直观分析各水样中主要离子的质量浓度变化和水化学变化趋势^[12-13]。图 4 中每条折线代表着 1 个水样, 同一水化学类型的水样折线基本平行, 且随着地下水流动, 水化学组分由质量浓度相对低点向质量浓度相对高点运移^[14]。研究区各个地下水参数变化趋势基本一致, 表明地下水的化学演化规律基本相似^[15], 也表明地下水补给来源基本一致。

3) 水化学形成机制分析。Gibbs 图是半对数坐标图解, 用来分析水化学成分演化过程主控作用的一种重要方法, 一般控制内陆区地下水化学形成机

制主要包括大气降水型(APD)、岩石风化型(RWD)和蒸发浓缩型(ECD)3 种^[16-18]。研究区地下水中 TDS 变化范围 721.6~6 923.4 mg/L, 阳离子 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 变化范围为 0.1~0.8, 阴离子 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 变化范围 0.2~0.9。从图 5 可以看出, 无论是 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的 Gibbs 图, 还是 TDS 与 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 的 Gibbs 图, 地下水水样点都远离 APD 控制区域, 均落在 RWD 和 ECD 区域内, 并且多数水样点落在 ECD 区域内, 说明蒸发浓缩作用是控制该区地下水化学成分形成和演化的主要影响因素, 其次为岩石风化作用。这与腰坝绿洲所属的降雨稀少、蒸发量大的气候条件极为符合。

另外还可以利用不同离子浓度之间比例关系曲

线图来研究地下水化学成分的来源及形成过程^[17]。图 6A 只有 1 个水样点位于 $\gamma(K^+ + Na^+)/\gamma(Cl^-) = 1 : 1$ 的等量线上方,其余水样点均位于等量线下方,但都靠近等量线,表明岩盐溶解是地下水中 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 的主要来源。图 6B 大部分水样点位于 $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(HCO_3^-) = 1 : 1$ 等量线上方,小部分水样点位于等量线下方,这说明含水层中方解石、白云石的溶解为地下水 HCO_3^- 的主要来源之一,但仍有部分水样点中 Ca^{2+} 含量高于等量线,说明 Ca^{2+} 有石膏的溶解与沉淀来源。图 6C 所有水样点均位于 $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(SO_4^{2-}) = 1 : 1$ 等量线下方,

Ca^{2+} 随 SO_4^{2-} 的增加接近线性增长,说明了石膏溶解的存在,补充了 Ca^{2+} 的来源,随着 SO_4^{2-} 的富集,可能出现 Ca^{2+} 的贫化或是阳离子交替吸附作用。图 6D 绝大部分水样位于 $\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^- + SO_4^{2-}) = 1 : 1$ 等量线下方,少部分水样点位于等量线上方,都基本位于等量线附近,说明含水层中主要发生方解石、白云石、岩盐与石膏的溶解沉淀,芒硝的溶解与沉淀对 Na^+ 及 SO_4^{2-} 有所影响,此外阳离子交替吸附作用也可致使水样点在图 6 中相对于等量线的偏离。

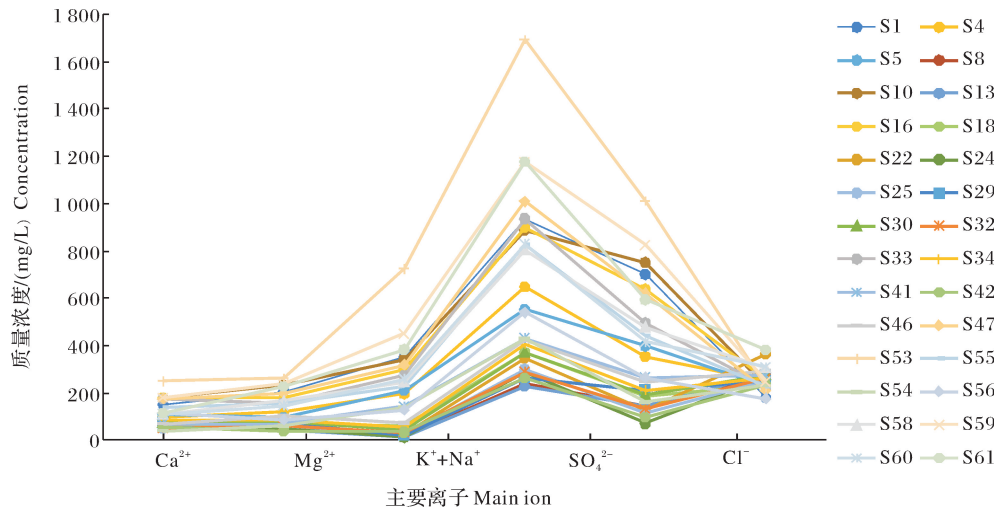
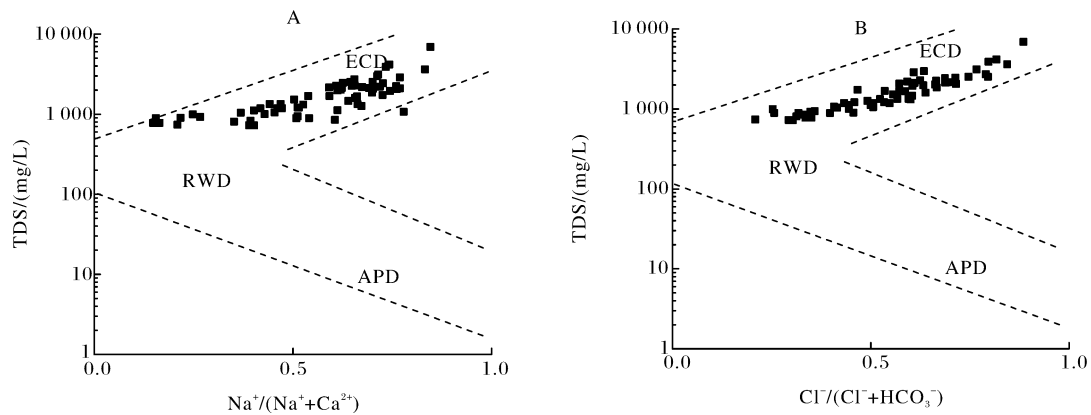


图 4 研究区地下水化学特征的 Schoeller 图

Fig.4 Schoeller diagram of groundwater chemical characteristics in the study area



ECD:蒸发浓缩型 Evaporation concentration dominance; RWD:岩石风化型 Rock weathering dominance; APD:大气降水型 Atmospheric precipitation dominance.

图 5 研究区地下水化学特征的 Gibbs 图

Fig.5 Gibbs diagram of groundwater chemical characteristics in the study area

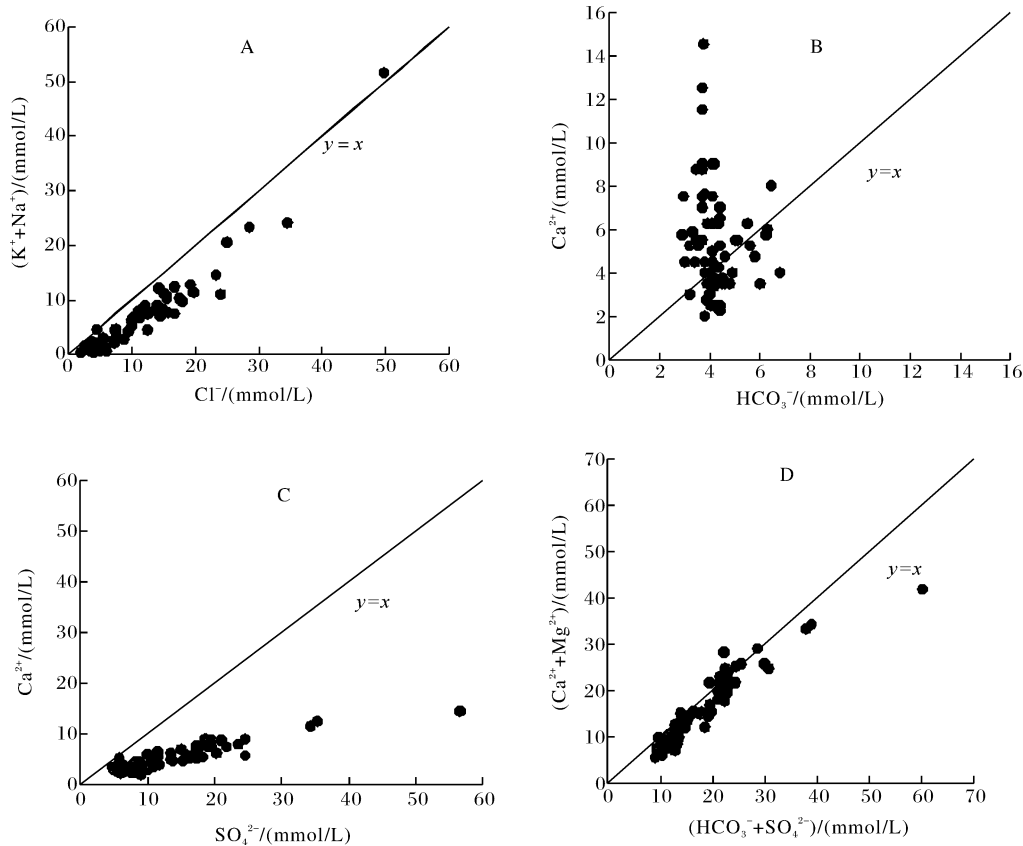


图 6 研究区地下水中主要水化学离子浓度关系图

Fig.6 Hydrochemical relationships between the main ion concentrations of groundwater in the study area

3 讨论

本研究结果显示,研究区 pH 值变化范围为 7.6~8.2,呈弱碱性;TDS 变化范围为 721.6~6 923.4 mg/L,呈微咸水;水化学类型自东北(补给区)向西南(排泄区)由 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型经 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型转化为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水,总体上研究区地下水以硫酸型和氯化型为主。研究区所有水样点在 Gibbs 图中均落在 RWD 和 ECD 区域内,并且多数水样点落在 ECD 区域内,说明蒸发浓缩作用是控制该区地下水化学成分形成和演化的主要影响因素,其次为岩石风化作用。根据研究区水化学离子比例关系分析可知,该区地下水主要离子来源以方解石、白云石、岩盐与石膏的溶解沉淀为主。

地下水化学特征主要针对研究区地下水化学成分、化学类型及空间分布规律进行分析研究^[15]。地下水化学演化是一个长期的水-岩相互作用的复杂过程^[18],研究区属于典型山前洪积倾斜平原边缘的

水文地质单元,地下水主要来源于第四系含水岩组的潜水区,井灌区开采由含砾中细砂、中粗砂、细砂、粗砂组成的含水层中水,整体径流方向为自东北向西南方向,在东北部补给区,径流交替速度快,形成“盐随水走”的流动特征,并随着白云石、方解石等溶解,使得 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 成为地下水的主要离子成分,与 TDS 存在显著相关性,地下水化学类型以 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型为主;在中部径流减缓的情况下,地下水化学类型演化为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型;在西南部排泄区,地下水水流速度缓慢,蒸发浓缩作用增强,形成“水走盐留”的流动特征,地下水 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 成为主要的离子成分,与 TDS 存在显著相关性,地下水化学类型以 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型为主。因此,研究区地下水从东北向西南逐渐出现高盐离子富集,水体总体向咸化方向发展,与姜凌^[5]早期研究的结果相符。

天然条件下地下水离子成分主要受大气降水作用、蒸发浓缩作用和岩石风化作用控制形成。侯庆秋等^[18]研究分析了内蒙古四子王旗浅层地下水离

子成分形成作用,其结果表明干旱区地下水离子成分主要受蒸发浓缩作用影响。本研究区位于西北内陆,属于典型大陆性干旱气候,降水较少,蒸发较大,导致该区地下水离子成分形成主要受蒸发浓缩作用影响,与前人研究成果符合。

地下水中主要离子浓度比例关系能够有效地分析地下水中离子成分来源和形成过程。研究区地下水离子浓度 $\gamma(K^+ + Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 小于1,表明其主要来源为岩盐溶解; $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(HCO_3^-)$ 大于1,说明其主要来源为方解石、白云石的溶解, $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(HCO_3^-)$ 小于1,表明其主要来源于石膏的溶解与沉淀; $\gamma(Ca^{2+})/\gamma(SO_4^{2-})$ 小于1,表明其主要来源于石膏溶解,也表明存在阳离子交替吸附作用或 Ca^{2+} 的贫化现象; $\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ 小于1,其主要作用为方解石、白云石、岩盐与石膏的溶解沉淀。因此,该区地下水中各离子输入和化学组分来源为岩石风化溶解与沉淀,也存在阳离子交替吸附作用。

本研究仅分析了某一时间段的地下水化学成分状况,并未考虑不同季节、不同灌水期前后地下水化学成分随时间的变化规律及空间分布规律。因此,后续仍需进一步在时间和空间上开展地下水化学成分的研究,并对未来水质发展趋势进行预测分析。

参考文献 References

- [1] 刘伟坡,沙娜,程旭学,等.海原县山前地下水化学特征分析[J].人民黄河,2019,41(8):82-87. LIU W P, SHA N, CHENG X X, et al. Study on hydro-geochemical characteristics in piedmont of Haiyuan County[J]. Yellow River, 2019, 41(8): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [2] 姜凌,李佩成,郭建青,贺兰山西麓典型干旱区绿洲地下水水化学特征与演变规律[J].地球科学与环境学报,2009,31(3):285-290. JIANG L, LI P C, GUO J Q. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in typical oasis of arid areas on the west of Helan Mountain[J]. Journal of earth sciences and environment, 2009, 31(3): 285-290 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王晓曦,王文科,王周锋,等.滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J].水文地质工程地质,2014,41(1):25-33,73. WANG X X, WANG W K, WANG Z F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China[J]. Hydrogeology and engineering geology, 2014, 41(1): 25-33, 73 (in Chinese with English abstract).
- [4] 彭翠华.阿拉善盟腰坝绿洲地下水水质演化及其预测研究[D].西安:长安大学,2007. PENG C H. Groundwater quality evolution and prediction of Yaoba Oasis in Alashan[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [5] 姜凌.干旱区绿洲地下水水化学成分形成及演化机制研究[D].西安:长安大学,2009. JIANG L. Study on hydrochemical composition formation and evolution mechanisms of the groundwater in oasis of arid areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [6] 姜凌,李佩成,胡安焱,等.内蒙古阿拉善腰坝绿洲地下水水化学特征[J].干旱区资源与环境,2009,23(11):105-110. JIANG L, LI P C, HU A Y, et al. The groundwater chemical characteristics in the Yaoba Oasis of Alxaarea, Inner Mongolia[J]. Journal of arid land resources and environment, 2009, 23(11): 105-110 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 Y, WU Y, YANG J, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental science, 2015, 36(9): 3230-3237 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵江涛,周金龙,梁川,等.新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析[J].环境化学,2017,36(6):1397-1406. ZHAO J T, ZHOU J L, LIANG C, et al. Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang[J]. Environmental chemistry, 2017, 36(6): 1397-1406 (in Chinese with English abstract).
- [9] MA J, EDMUNDS W. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia[J]. Hydrogeology journal, 2006, 14(7): 1231-1243 (in Chinese with English abstract).
- [10] SHANYENGANA E S, SEELY M K, SANDERSON R D. Major-ion chemistry and ground-water salinization in ephemeral floodplains in some arid regions of Namibia[J]. Journal of arid environments, 2004, 57(2): 211-223 (in Chinese with English abstract).
- [11] WANG L H, DONG Y H, XU Z F, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the northeastern Tennger Desert, northern China [J]. Hydrogeology journal, 2017, 25(8): 2363-2375 (in Chinese with English abstract).
- [12] MAGHRABY M M E. Hydrogeochemical characterization of groundwater aquifer in Al-Madinah Al-Munawarah City, Saudi Arabia[J]. Arabian journal of geosciences, 2015, 8(6): 4191-4206 (in Chinese with English abstract).
- [13] 姜体胜,曲辞晓,王明玉,等.北京平谷平原区浅层地下水化学特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):122-127. JIANG T S, QU C X, WANG M Y, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater and the origin in the Pinggu plain, Beijing[J]. Journal of arid land resources and environment, 2017, 31(11): 122-127 (in Chinese with English abstract).
- [14] SARIKHANI R, DEHNAVI A G, AHMADNEJAD Z, et al.

- Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Bushehr Province, SW Iran[J]. Environmental earth sciences, 2015, 74(7): 6265-6281 (in Chinese with English abstract).
- [15] 彭磊, 比拉力·依明, 万彦博, 等. 沙漠腹地达理雅博依绿洲浅层地下水水化学特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(3): 88-95. PENG L, BI L L · YI M, WANG Y B, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Dali Yaboyi Oasis in the hinterland of the desert[J]. Journal of arid land resources and environment, 2021, 35(3): 88-95 (in Chinese with English abstract).
- [16] 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 685-692. YU H T, MA T, DENG Y M, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jiangnan Plain[J]. Earth science, 2017, 42(5): 685-692 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨芬, 高柏, 葛勤, 等. 信江流域地下水水化学特征及形成机制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3505-3512. YANG F, GAO B, GE Q, et al. Hydro-chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Xinjiang River Basin[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(9): 3505-3512 (in Chinese with English abstract).
- [18] 侯庆秋, 董少刚, 张旻玮. 内蒙古四子王旗浅层地下水水化学特征及其成因[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 116-121. HOU Q Q, DONG S G, ZHANG M W. Chemical characteristics and genesis of shallow groundwater in Siziwang Banner, Inner Mongolia[J]. Journal of arid land resources and environment, 2020, 34(4): 116-121 (in Chinese with English abstract).

Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Yaoba Oasis of Inner Mongolia

WANG Qiaohuan^{1,2}, LU Yudong²

1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. School of Water and Environment, Chang'an University/Ministry of Education Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract Groundwater is very important water source for the survival and development of oasis in arid area. The hydrochemical data of 66 groundwater samples in Yaoba Oasis of Inner Mongolia were selected to analyze the hydrochemical characteristics and genesis of groundwater with methods of classical statistics, Piper trigraph, Gibbs graph, main ion concentration graph, etc to understand the chemical characteristics and causes of groundwater, and also to provide the basis of data for water quality evaluation. Results showed that the groundwater presented weak alkalinity and brackish water. The main chemical processes were evaporation concentration and rock weathering. The main sources of groundwater chemical components were dissolution and precipitation of calcite, dolomite, rock salt and gypsum. From northeast to southwest, the chemical types of groundwater changed from $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ and $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ to $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$. The high salt ions were enriched. The overall salinization degree of the groundwater body is obvious. It will provide guidance for rational exploitation and protection of groundwater in this area.

Keywords groundwater; chemical characteristics; genesis analysis; main ion concentration; total dissolved solids; water quality evaluation; water resources conservation; Yaoba Oasis

(责任编辑:陆文昌)