

新疆汉水泉地区地下水水化学特征及形成机理

吴霞¹, 吴津蓉², 周金龙¹, 杜江岩³, 李巧¹

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业职业技术学院食品科技分院, 新疆昌吉 831100;
3. 新疆地勘局第二水文地质工程地质大队, 新疆昌吉 831100)

摘要: 研究处于天然状态地区的地下水水化学特征对地下水污染调查分析具有重要意义。利用新疆汉水泉地区 39 组地下水水样, 依据研究区水文地质条件, 运用舒卡列夫分类法和 SPSS、MAPGIS 与 Surfer 等软件进行综合分析, 揭示地下水水化学组分在水平和垂直方向的演化规律。结果表明: 研究区共存在 4 种水化学类型, 分别为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 和 $\text{Cl} \cdot \text{Na}$; 潜水 TDS 与 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 和 Cl^- 呈显著相关性, 承压水 TDS 与 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 Cl^- 呈显著相关性, 主要离子浓度的空间分布特征与 TDS 近于一致; 汉水泉地区地下水水化学类型、TDS 与主要离子浓度存在明显的分带规律, 水化学特征的形成主要受溶滤作用、阳离子交换吸附作用、浓缩作用与混合作用影响。

关键词: TDS; 水化学特征; 地下水; 新疆汉水泉地区

中图分类号: P342 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)05-0953-06

Groundwater chemical characteristics and formation mechanism of Hanshuiquan region in Xinjiang

WU Xia¹, WU Jin rong², ZHOU Jin long¹, DU Jiang yan³, Li Qiao¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Food Science and Technology Branch of Xinjiang Agricultural Vocational Technical College, Changji 831100, China;
3. The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Changji 831100, China)

Abstract: Study on the groundwater chemical characteristics in natural state is of great importance for the investigation and analysis of groundwater contamination. In this paper, the statistical analysis method of Shukarlev classification, and software of SPSS, MAPGIS, and Surfer were used to analyze the evolution characteristics of chemical components in the horizontal and vertical directions based on the 39 groundwater samples collected from the Hanshuiquan region in Xinjiang and the hydrogeological conditions in the area. The results showed that (1) there are four hydrochemical types including $\text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$, $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$, and $\text{Cl} \cdot \text{Na}$; (2) TDS has significant correlation with $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, and Cl^- in unconfined groundwater while TDS has significant correlation with $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ and Cl^- in confined groundwater; (3) spatial distribution of the main ion concentrations is consistent with that of TDS; (4) The TDS, main ion concentrations, and groundwater hydrochemical types have apparent zonations; and (5) leaching, ion exchange, concentration, and mixing are the major processes to form the groundwater hydrochemical type.

Key words: TDS; hydrochemical characteristics; groundwater; Hanshuiquan region in Xinjiang

在我国, 大部分的城市、乡村的经济发展和居民生活用水均以地下水为重要供水水源, 但地下水也与其它环境资源一样, 其污染问题越来越严重, 人类活动已成为控制某些地

区地下水环境演化的主导力量^[1-2]。目前, 全国 25% 的地下水体遭到污染, 平原区约有 54% 的地下水不符合生活用水水质标准^[3]。因此, 地下水水化学特征及其形成机理问题必须

收稿日期: 2014-10-28 修回日期: 2015-08-17 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2028.007.html>

基金项目: 新疆自治区地质调查基金项目(S12FXJ01); 新疆自治区地方公派出国留学成组配套项目“水资源高效利用”(XJDF201307); 新疆自治区水文学及水资源重点学科基金(xjswszyzdxk20101202)

作者简介: 吴霞(1989-), 女, 安徽安庆人, 主要从事地下水环境影响评价方面研究。E-mail: 1063865647@qq.com

通讯作者: 周金龙(1964-), 男, 浙江衢州人, 教授, 博导, 主要从事干旱区地下水资源评价与保护、灌区土壤水-盐运移监测与模拟等方面研究。E-mail: zjzhoujl@163.com

引起高度关注^[3]。汉水泉地区位于新疆维吾尔自治区哈密地区巴里坤县,是哈密地区重要的煤炭基地。该地区无可开发利用的地表水资源,只有地下水可供利用。目前除进行过煤炭资源勘探以外,基本无人类活动,地下水处于天然状态。研究该地区地下水水化学特征及其形成机理,可为该地区地下水水质现状评价和地下水污染预测提供依据。

1 区域水文地质条件

汉水泉地区北部为大哈甫提克山、呼洪得雷山,南部为白依山。总体地势北部高于南部、西部高于东部。区内海拔

460~1700 m,地形较平坦开阔,地形坡降约为 40‰~90‰。区内出露地层主要为泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、新近系与第四系,地质构造极为发育。根据成因类型及形态特征,将其地貌类型划分为构造侵蚀地貌(构造侵蚀中山区)和堆积地貌(包括波状平原、砾质平原、细土平原等)。依据地貌特征,该地区大致以 m² 背斜核部为界,分为库木苏洼地和汉水泉洼地(图 1)。汉水泉地区包括第四系松散孔隙含水介质和新近系碎屑岩类孔隙裂隙含水介质两种类型。研究区内地下水类型为多层结构,即上覆第四系松散岩类孔隙潜水,下伏碎屑岩类孔隙裂隙承压水及基岩裂隙水,地下水循环状况见图 2。

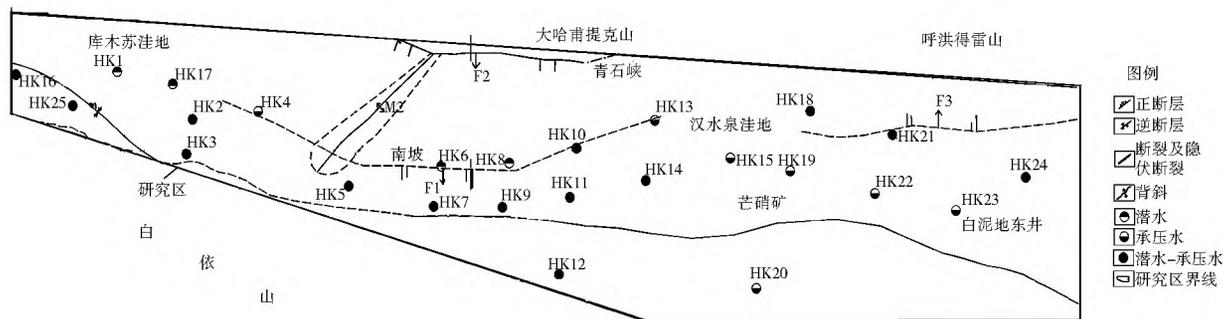


图 1 汉水泉地区地质构造及地下水采样点分布

Fig. 1 Geological structure and distribution of groundwater sampling sites in the Hanshuiquan region

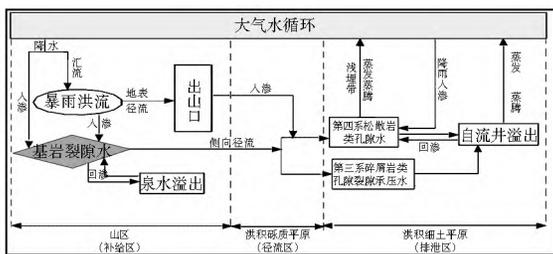


图 2 汉水泉地区(包含山区)地下水循环框图

Fig. 2 Groundwater cycle in the Hanshuiquan region (including mountain area)

1.1 第四系松散岩类孔隙潜水

区内松散岩类孔隙潜水主要分布在库木苏洼地、汉水泉洼地的平原区,从洪积砾质平原下部到细土平原区,含水层岩性主要为砂砾石、中粗砂、细砂。潜水富水性由洼地中间向四周呈现由强逐渐变弱的变化规律。

1.2 新近系碎屑岩类孔隙裂隙承压水

新近系碎屑岩类孔隙裂隙承压水广泛分布于区内,含水层岩性为砂岩、砾岩等。在库木苏洼地内新近系碎屑岩类孔隙裂隙承压水从洪积砾质平原上部至汉水泉-老爷庙断裂,富水性呈现由弱至中等的变化规律。而在汉水泉洼地内,富水性强区位于中间,近南北向,从中间向四周富水性由强逐渐变弱,仅有白泥地东井东北部出现中等富水性区。

2 材料与方法

2.1 样品采集与检测

2012 年 5 月-12 月,在汉水泉洼地和库木苏洼地 25 眼井(其中库木苏洼地 7 眼、汉水泉洼地 18 眼)共采集水样 39 组,其中潜水水样 18 组,承压水水样 21 组,采样点位置见图 1。在地下水样品采集前,对采样机井抽水 20~30 min,确保所取水样为能代表水体自然环境特征的地下水。

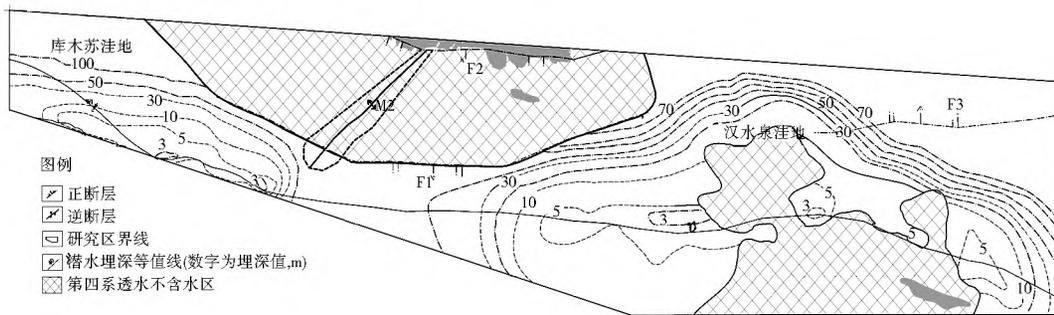


图 3 潜水埋深等值线

Fig. 3 Water depth contour in the unconfined aquifer

水样测试由新疆地勘局第二水文地质工程地质大队实验室完成,分析依据为《GB/T 8538-2008 饮用天然矿泉水检验方法》及《GB/T 5750.1-5750.13-2006 生活饮用水标准检验

法》。测试项目包括 TDS、pH 值、K⁺ + Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻ 等^[5]。其中, pH 采用玻璃电极法测定(检测下限为 0.01); K⁺ 和 Na⁺ 采用火焰原子吸收分光光度法

测定(检测下限分别为 0.05 和 0.01 mg/L); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 采用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定(检测下限为 1.0 mg/L); Cl^- 采用硝酸银容量法测定(检测下限为 1.0 mg/L); SO_4^{2-} 采用硫酸钡比浊法测定(检测下限为 5 mg/L); TDS 使用电子天平 MP8-1 测定(不确定度 ± 0.0001 g)。

2.2 数据分析方法

采用舒卡列夫分类法^[6]分析地下水水化学类型,并利用对矿化度与主要离子浓度关系进行相关性分析,综合判断地下水水化学成因。

3 结果和讨论

3.1 地下水化学类型

汉水泉地区潜水和承压水水化学类型水平分带和垂向相似性^[7]规律明显,从近山区区域(补给区)到平原区(排泄区):库木苏洼地潜水呈现出 3 种不同的水化学类型,分别为 $SO_4-Na \cdot Ca$ 、 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 和 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$, 而承压水只有 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型 1 种水化学类型;汉水泉洼地潜水呈现出 4 种不同的水化学类型,分别为 $SO_4-Na \cdot Ca$ 、 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 和 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 和 $Cl-Na$ 型,承压水呈现出 3 种不同的水化学类型,分别为 $SO_4-Na \cdot Ca$ 、 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$

和 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型。依据其水文地质条件,将其划分潜水和承压水分别讨论。

3.1.1 水平分带

(1) 潜水。

库木苏洼地潜水从补给区向排泄区呈现出明显的南北向水平分带性。北部大哈甫提山为补给区,地下水由北向东南径流,流经山前洪积砾质平原区、洪积细土平原区与最终排泄区的过程中,先后受到溶滤、混合及蒸发浓缩等作用^[8,13]的影响,水化学类型为 $SO_4-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型(见图 4)。

汉水泉洼地潜水接受南北两侧山区的侧向径流补给,北侧以北部大哈甫提克山区为补给区,由北向南,从山区高海拔区向山前洪积砾质平原低海拔区,再向细土平原区最终至芒硝矿附近的排泄区,受溶滤、混合及蒸发浓缩等作用的影响,水化学类型由 $SO_4-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $Cl-Na$ 型;南侧以南部白依山山区为主要补给区,由南向北径流,从山区高海拔区向山前洪积砾质平原低海拔区,再向细土平原区径流最终至芒硝矿附近蒸发排泄的过程中,汉水泉洼地南侧水化学类型由 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $Cl-Na$ 型(图 4)。

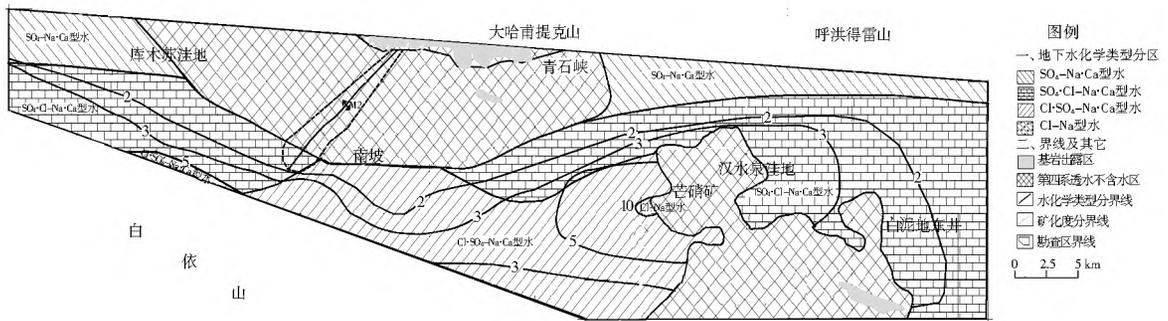


图 4 潜水水化学类型与 TDS 等值线

Fig. 4 Hydrochemical types and TDS isograph of unconfined groundwater

(2) 承压水。

库木苏洼地中承压水水化学类型较为单一,主要为 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型(见图 5)。

汉水泉洼地北侧以北部大哈甫提克山区为主要补给区,由北向南,从山区高海拔区向洪积砾质平原低海拔区再向细土平原区最终至汉水泉洼地的过程中,区内水化学类

型由 $SO_4-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型 \rightarrow $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型;南侧以南部白依山山区为主要补给区,由南向北径流水化学类型为 $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Ca$ 型,从山区高海拔区向山前洪积砾质平原区再向细土平原区最终至汉水泉洼地,当到达汉水泉洼地后,其水化学类型主要为 $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Ca$ 型(图 5)。

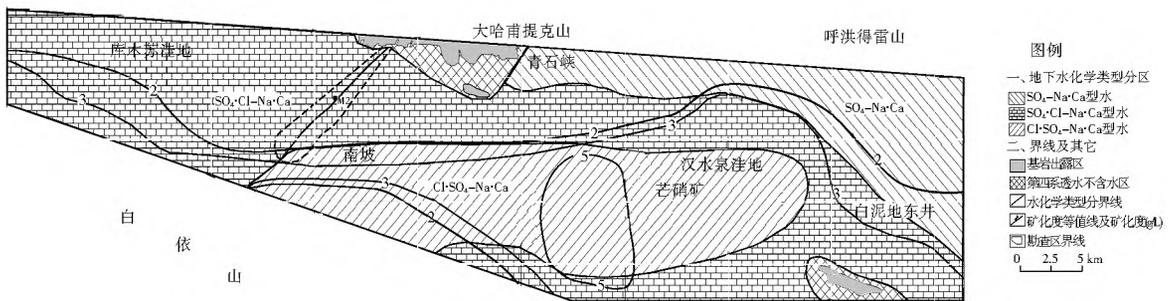


图 5 承压水水化学类型与 TDS 等值线

Fig. 5 Hydrochemical types and TDS isograph of confined groundwater

3.1.2 垂向相似性

对比图 4 和图 5 可以发现:汉水泉洼地潜水和承压水水

化学类型与 TDS 在垂向上有较好的相似性。在整个区域上,由于地质构造复杂,存在多条断裂,且在汉水泉洼地芒硝

矿北部存在承压自流水顶托补给潜水,即存在第三系承压水和第四系潜水之间的相互转换,因此潜水和承压水垂向上的水力联系较强。

3.2 地下水 TDS 空间分布及其与主要离子浓度的相关性分析

研究区地下水 TDS 可划分为 4 个区^[14,15],即 1~ 2 g/L 分布区;2~ 3 g/L 分布区;3~ 5 g/L 分布区和 5~ 10 g/L 分布区。下面利用 SPSS 软件对 TDS 和八大离子的空间分布及其相关性进行分析。

3.2.1 潜水

(1) 库木苏洼地。主要由北向东南径流,最终汇入库木苏洼地植被分布区。TDS 为 1~ 2 g/L 的地下水主要在近山前洪积砾质平原区地下水径流区,分布面积最广,呈东西

向条带状;TDS 为 2~ 3 g/L 的地下水在山前洪积砾质平原区低洼处,呈东西向条带状分布;TDS 为 3~ 5 g/L 的地下水主要在库木苏洼地南部植被分布区(图 4 和表 1)。TDS 与 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 呈显著相关性,相关系数都在 0.9 以上(表 2),表明潜水中 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等主要离子浓度的空间分布特征总体上与 TDS 近于一致,沿地下水流向 TDS 逐渐增大, $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子浓度也逐渐增大; HCO_3^- 离子与 TDS 的相关性较差,表明随着 TDS 的增加, HCO_3^- 呈逐渐降低的趋势。在库木苏洼地, $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 绝对含量较大,为潜水中的主要阴、阳离子,是决定潜水盐化作用的主要变量; Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子在盆地内绝对含量少,离子浓度变化幅度较小。

表 1 汉水泉地区地下水 TDS 分区面积统计

Tab. 1 Statistics of groundwater TDS zonation area in the Hanshuiquan region

地区	地下水类型	统计量	1~ 2 g/L	2~ 3 g/L	3~ 5 g/L	5~ 10 g/L	> 10 g/L	合计
库木苏洼地	潜水	面积/km ²	113.44	34.20	52.61	6.09	0	206.34
		占总面积比例(%)	54.98	16.57	25.50	2.95	0	100.00
	承压水	面积/km ²	223.52	59.91	48.97	0	0	332.40
		占总面积比例(%)	67.24	18.03	14.73	0	0	100.00
汉水泉洼地	潜水	面积/km ²	293.35	196.12	178.27	69.29	1.72	738.75
		占总面积比例(%)	39.71	26.55	24.13	9.38	0.23	100.00
	承压水	面积/km ²	392.45	163.00	455.49	77.43	0	1088.37
		占总面积比例(%)	36.06	14.98	41.85	7.11	0	100.00

(2) 汉水泉洼地。TDS 在 1~ 2 g/L 的地下水主要分布在大哈甫提克山洪积砾质平原中下部、白依山西北部及白泥地东井以东地区,分布面积最广;TDS 在 2~ 3 g/L 的地下水在汉水泉洼地平原区以北方向及白泥地东井北以东方向,呈条带状分布;TDS 在 3~ 5 g/L 的地下水分布在汉水泉洼地平原区周边;而 TDS 大于 5~ 10 g/L 的地下水主要分布在芒硝矿附近(图 4 和表 1)。TDS 同 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 呈显著相关性,相关系数都在 0.9 以上(表 2),表明潜水中 $K^+ +$

Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 等主要离子浓度的空间分布特征总体上与 TDS 近于一致,沿地下水流向 TDS 逐渐增大, $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子浓度也逐渐增大,且 $K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 绝对含量较大,为潜水中的主要阴、阳离子,是决定潜水盐化作用的主要变量; Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子同 TDS 的相关性皆较差,表明随着 TDS 的增加, Mg^{2+} 和 HCO_3^- 离子相对含量呈逐渐降低的变化趋势, Mg^{2+} 离子浓度一般为 23.43~ 73.49 mg/L, HCO_3^- 离子浓度一般 36.61~ 150.11 mg/L。

表 2 潜水水化学组分相关性分析

Tab. 2 Correlation of chemical components in the unconfined groundwater

位置	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	
库木苏洼地	$K^+ + Na^+$	1	0.981	0.621	0.998	0.970	0.999	
	Ca^{2+}		1	0.742	0.982	0.915	0.976	
	Mg^{2+}			1	0.639	0.456	0.602	
	Cl^-				1	0.960	0.997	
	SO_4^{2-}					1	0.977	
	HCO_3^-						1	0.886
	TDS							1
汉水泉洼地	$K^+ + Na^+$	1	0.833	0.226	0.967	0.420	0.982	
	Ca^{2+}		1	0.305	0.818	0.626	0.907	
	Mg^{2+}			1	0.302	0.057	0.043	0.261
	Cl^-				1	0.294	0.063	0.958
	SO_4^{2-}					1	0.246	0.485
	HCO_3^-						1	0.009
	TDS							1

3.2.2 承压水

(1) 库木苏洼地。TDS 变化情况同潜水基本一致。TDS

为 1~ 2 g/L 的地下水呈条带状分布在近山前洪积砾质平原区地下水径流区,分布面积最广;TDS 为 2~ 3 g/L 的地下水

主要分布山前洪积砾质平原区低洼处(图 5 和表 1)。TDS 与 $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 呈显著相关性,相关系数都在 0.9 左右(表 3),表明承压水中 $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子在空间上的变化规律同 TDS 一致,从补给区向排泄区 TDS 逐渐增大, $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子也呈逐渐增大的趋势; Mg^{2+} 同 TDS 的相关性较差,同时在区内绝对含量少,离子浓度变化幅度较小,其离子浓度仅在 6.85~35.86 mg/L。区域 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 绝对含量较大,为承压水中的主要阴、阳离子,是决定承压水盐化作用的主要变量。

(2) 汉水泉洼地。TDS 在 1~2 g/L 的地下水分布在南坡南、北两侧平原地区及白泥地东井东北地区;TDS 在 2~3 g/L 的地下水主要分布汉水泉洼地北部细土平原区,呈条东

西向带状分布;TDS 在 3~5 g/L 的地下水主要分布在汉水泉洼地平原区以北、以西、以东三个方向;TDS 大于 5 g/L 的地下水分布在汉水泉洼地芒硝矿西部的区域(图 5 和表 1)。TDS 与 $K^+ + Na^+$ 与 Cl^- 呈显著相关性,相关系数在 0.9 左右(表 3),表明承压水中 $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 离子在空间上的变化规律同 TDS 一致,随着 TDS 从补给区向排泄区逐渐增大, $K^+ + Na^+$ 和 Cl^- 离子也呈逐渐增大的趋势; Mg^{2+} 和 HCO_3^- 与 TDS 的相关性较差,且绝对含量少,离子浓度变化幅度较小, Mg^{2+} 离子浓度仅为 0.11~62.6 mg/L, HCO_3^- 离子浓度一般为 12.2~157.42 mg/L。汉水泉洼地 $K^+ + Na^+$ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 绝对含量较大,为承压水中的主要阴、阳离子,是决定承压水盐化作用的主要变量。

表 3 承压水水化学组分相关性分析

Tab. 3 Correlation of chemical components in the confined groundwater

位置	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS	
库木苏洼地	$K^+ + Na^+$	1	0.750	0.191	0.892	0.960	0.652	0.982
	Ca^{2+}		1	0.684	0.935	0.688	0.939	0.856
	Mg^{2+}			1	0.457	0.155	0.674	0.305
	Cl^-				1	0.793	0.899	0.953
	SO_4^{2-}					1	0.571	0.935
	HCO_3^-						1	0.768
	TDS							1
汉水泉洼地	$K^+ + Na^+$	1	0.744	0.014	0.880	0.657	0.079	0.932
	Ca^{2+}		1	0.131	0.627	0.534	0.163	0.684
	Mg^{2+}			1	0.007	0.007	0.101	0.001
	Cl^-				1	0.492	0.037	0.933
	SO_4^{2-}					1	0.416	0.741
	HCO_3^-						1	0.125
	TDS							1

3.3 地下水水化学的形成

汉水泉地区地下水水化学的形成主要受到含水层岩性、水文地质结构和地下水循环条件等诸多因素制约,且其水化学场的形成主要受溶滤作用、阳离子交换吸附作用、浓缩作用和混合作用影响^[8,14]。现从潜水和承压水成因及水化学作用来分述区内地下水水化学的形成。

3.3.1 潜水水化学形成分析

(1) 库木苏洼地。主要形成原因为北部的大哈甫提克山洪积砾质平原受季节性洪水和侧向径流的补给,溶滤作用^[8,9,11,12]强烈,水动力条件好,形成 TDS 为 1~2 g/L 的 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型水。当径流到中部砾石带时,天然补给量减少,水力坡度减小,水动力作用逐渐减弱。随着溶滤作用减弱及西北部地下水径流、北部地下水径流与东北部地下水混合作用增强,逐渐转换为 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型水。在径流到库木苏洼地细土平原区,地下水埋深较浅(图 3),主要受蒸发浓缩作用^[9],转换为 TDS 大于 3 g/L 的 $Cl \cdot SO_4 \cdot Na \cdot Ca$ 型水。整个过程中由于阳离子交换吸附作用^[11]阳离子由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 转换为 Na^+ 。

(2) 汉水泉洼地。潜水水化学的形成与库木苏洼地地下水水化学的形成相比而言稍显复杂。在汉水泉北部一带,地下水类型主要为 $SO_4 \cdot Na \cdot Ca$ 型水,分布于洪积砾质平原中

上部,补给区地下水水质较好。汉水泉洼地的西南部为 $Cl \cdot SO_4 \cdot Na \cdot Ca$ 型水,是因为位于汉水泉洼地的南部洪积砾质平原地下水运移距离长,水化学溶滤作用比北部山区弱,进而形成了 $Cl \cdot SO_4 \cdot Na \cdot Ca$ 型水。 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型水在汉水泉洼地内从西向东大面积分布,其形成原因主要是北部补给在径流过程中经过溶滤作用,导致各种离子含量的变化形成了 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型水。 $Cl \cdot Na$ 型水主要分布于芒硝矿一带,为汉水泉洼地的汇水中心。该处地下水埋深浅,含水层盖层岩性以粉土、粉砂为主,颗粒较细,有利于地下水的蒸发,再加上地表植被生长相对茂盛,植被的蒸腾也使地下水浓缩,TDS 增高,水质变差,地下水在芒硝矿一带经过蒸发浓缩作用水化学类型最终转化为 $Cl \cdot Na$ 型。

3.3.2 承压水水化学形成分析

(1) 库木苏洼地。承压水水化学类型较为单一,形成原因为地下水受北侧向径流补给,沿地下水流向流至地势较平坦的平原区,溶滤作用^[8,9,11,12]弱,首先形成 TDS 为 1~2 g/L 的 $Cl \cdot SO_4 \cdot Na \cdot Ca$ 型水,蒸发浓缩作用增强,最终形成 TDS 大于 3 g/L 的 $SO_4 \cdot Cl \cdot Na \cdot Ca$ 型水。整个区内受阳离子吸附交换作用影响,使得阳离子由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 转换为 Na^+ 。

(2) 汉水泉洼地。北部大哈甫提克洪积砾质平原承压水主要受侧向径流补给,水动力条件好,溶滤作用强烈,首先形

成 TDS 为 1~2 g/L 的 $\text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型。随后沿地下水流向流至汉水泉洼地北部细土平原区,地下水水力条件逐渐变差,溶滤作用减弱,北部地下水径流与东北部地下水混合作用增强,TDS 升高,形成 TDS 在 2~3 g/L 的 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型。当在最终汇入芒硝矿周边的汇水中心时因蒸发浓缩作用,TDS 进一步升高,形成 TDS 大于 5 g/L 的 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水。南部为白依山前洪积砾质平原中下部,水动力条件较差,溶滤作用弱,首先形成 TDS 为 1~2 g/L 的 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水,之后沿地下水径流方向水动力进一步变差,受阳离子吸附交换作用和混合作用^[1]形成 TDS 在 2~3 g/L 的 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型,并最终在整个芒硝矿汇水区内形成 TDS 大于 5 g/L 的 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水。

4 结论

(1) 汉水泉地区潜水和承压水水平分带规律明显。主要离子浓度的空间分布特征总体上与 TDS 近于一致。库木苏洼地地下水单元内离子浓度和 TDS 呈现出由潜水(近山前)→承压水(山前洪积砾质平原区)→潜水(山前洪积砾质平原区、细土平原区)渐增的分带规律;而汉水泉洼地内离子浓度和 TDS 呈现出由潜水(近山前)→承压水(洪积砾质平原区)→承压水(细土平原区)渐增的分带规律。

(2) 潜水和承压水的水化学类型、TDS 在垂向上均呈现较好的相似性,原因是潜水和承压水之间水力联系较好,存在相互转换的现象。

(3) 影响汉水泉地区地下水化学组分演化的主要水文地球化学作用是溶滤作用、浓缩作用、阳离子交换作用和混合作用。

参考文献(References):

- [1] 张宗祜,施德鸿,沈照理,等.人类活动影响下的华北平原地下水环境的演化与发展[J].地球学报,1997,18(4):337-344. (ZHANG Zong-hu, SHI De-hong, SHEN Zhao-li, et al. Evolution and development of groundwater environment in North China Plain under human activities[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18(4): 337-344. (in Chinese))
- [2] 王旭虎,徐先英,柴成武,等.民勤绿洲苦咸水空间分布及成因分析[J].干旱区研究,2014,31(2):193-200. (WANG Xu-hu, XU Xian-ying, CHAI Cheng-wu, et al. Spatial distribution of brackish groundwater and its formation causes in the minqin oasis in lower reaches of the Shiyang River[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(2): 193-200. (in Chinese))
- [3] 董少杰,董哲,李艳梅,等.大沽河中下游地区地下水环境特征与污染机理研究[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):111-114. (DONG Shao-jie, DONG Zhe, LI Yan-mei, et al. Research on the groundwater environment characteristics and pollution mechanism of in the middle and lower reaches of Daguhe River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(6): 111-114. (in Chinese))
- [4] 白铭,李续续,张静,等.新疆三塘湖煤田供水水文地质详查报告[R].新疆地矿局第二水文工程地质大队,2013. (BAI Ming, LI Xu-xu, ZHANG Jing, et al. Water Supply Hydrogeological Survey Report in Northern Santanghu Coalfield of Xinjiang[R]. The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2013. (in Chinese))
- [5] 李巧,贾瑞亮,周金龙,等.新疆阿克苏地区高氟地下水水化学特征分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(12):87-92. (LI Qiao, JIA Rui-liang, ZHOU Jin-long, et al. Analysis of chemical

- characteristics of high fluoride groundwater in Aksu prefecture, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 87-92. (in Chinese))
- [6] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2011. (ZHANG Ren-quan, LIANG Xing, JIN Meng-gui, et al. Fundamentals of Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [7] 郭春艳,马震,张兆吉,等.唐山市平原区浅层地下水环境特征研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(4):77-80. (GUO Chun-yan, MA Zhen, ZHANG Zhao-ji, et al. Shallow groundwater environment in Tangshan Plain Area [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 77-80. (in Chinese))
- [8] CHEN L, WANG G C, HU F S, et al. Groundwater hydrochemistry and isotope geochemistry in the Turpan Basin, northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 378-388.
- [9] KORTATSI B K. Hydrochemical characterization of groundwater in the Accra plains of Ghana [J]. Environmental Geology, 2006, 50(3): 299-311.
- [10] 高翠萍,杜新强,刘铁银,等.黑龙江省桦南县城地下水化学特征与成因分析[J].节水灌溉,2012(2):44-45. (GAO Cui-ping, DU Xin-qiang, LIU Tie-yin, et al. Characteristics of groundwater chemistry and its formation reasons in Huanan County of Heilongjiang Province [J]. Water Saving Irrigation, 2012(2): 44-45. (in Chinese))
- [11] SENTHILKUMAR M, ELANGO L. Geochemical processes controlling the groundwater quality in lower Palar river basin, southern India [J]. Journal of Earth System Science, 2013, 122(2): 419-432.
- [12] 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. (WANG Xia-xi, WANG Wei-ke, WANG Zhou-feng, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of river water and groundwater along the downstream Luanhe River, northeastern China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 25-33. (in Chinese))
- [13] 周亚红,郝凌霄,李俊峰.山东省梭罗树水源地地下水化学特征及形成机理[J].南水北调与水利科技,2014,12(5):38-42. (ZHOU Yang-hong, HAO Ling-xiao, LI Jun-feng. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Suoluoshu groundwater source area of Shandong province [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 38-42. (in Chinese))
- [14] 赵振华,袁革新,吴吉春,等.西北某放射性废物处置预选区地下水水化学特征及地球化学模拟[J].水文地质工程地质,2011,38(4):4-7. (ZHAO Zhen-hua, YUAN Ge-xin, WU Ji-chun, et al. Hydrochemical characteristics and hydrogeochemical modeling of groundwater in a certain potential radioactive waste disposal site in Northwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 4-7. (in Chinese))
- [15] 苏莹.微咸水地面灌溉试验研究[D].西安:西安理工大学,2006. (SU Ying. Experimental studies on saline water surface irrigation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese))