

二塘沟流域地下水化学组分来源及空间分布特征

吴豪¹, 吴彬¹, 杜明亮¹, 钟瑞森²

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 地下水是二塘沟流域居民生活饮用、农业灌溉的主要水源,对地下水的水化学特征的研究有助于了解地下水水化学环境与可再生能力,以便科学有效地管理和利用地下水资源,保护和改善地下水水质。采用数学统计方法、三线图解法以及 Gibbs 图分析了二塘沟流域地下水水化学组分的空间分布规律。结果表明:地表水水化学类型是 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$, 北盆地浅层地下水由地表水补给,经过硫酸盐矿物溶滤,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, 再经过南盆地平原绿洲区含氯化物矿物溶解及蒸发浓缩作用水化学类型为 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, 最终排向艾丁湖附近形成 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型水。北盆地地表水水质较好,而地下水有变差趋势,即在火焰山北部山前有明显上升;南盆地地下水在山前及灌区四周水质较差。

关键词: 地下水; 水化学特征; 空间分布特征; 二塘沟流域

中图分类号:TV213.4; P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0116-06

Chemical composition source and spatial distribution of the groundwater hydrochemistry of Ertanggou Basin

WU Hao¹, WU Bin¹, DU Mingliang¹, ZHONG Ruisen²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: In Ertanggou Basin, groundwater is the main water resource of residents' drinking and agriculture irrigation. Study on the hydrochemical characteristics of groundwater can help people understand the underground water chemical environment of renewable ability, scientific and effective management, protection and rational development and utilization of water resources. The spatial distribution pattern of groundwater hydrochemistry in Ertanggou Basin was analyzed using mathematical statistics method, piper diagram method and the Gibbs diagram analysis. The hydrochemical type of surface water is $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$, The shallow groundwater in the north basin is replenished by surface water, leaching of sulphate minerals. The hydrochemical type is $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, and then go through the dissolved of chlorides and evaporative concentration in the oasis of the South basin plain. The chemical type of groundwater is $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, the final discharge to Aydingkol Lake and forming the $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ type of water. The surface water quality of north basin is better, and the groundwater has a bad trend. There is a clear rise in the front of the Flame Mountain, and the water quality of the South basin is poor in the Piedmont and around the irrigation area.

Key words: groundwater; hydrochemistry characteristics; spatial distribution; Ertanggou Basin

1 研究背景

要研究合理利用地下水资源以及区域水循环机

理等问题,要对区域的水化学特征进行深入探索。Singh 等^[1]通过对印度北部加济阿巴德地区地下水化学特征进行分析,发现人类活动区域的地下水化

收稿日期:2018-03-13; 修回日期:2018-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41272277); 新疆水文学及水资源重点学科基金项目(xjxszyzdxk20101202)

作者简介:吴豪(1992-),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者:吴彬(1972-),男,甘肃定西人,博士,教授,博士生导师,研究方向为地下水资源利用。

学成分受季节变化的影响较大;张清寰等^[2]和党慧慧等^[3]对甘肃梨园河流域水化学特征进行分析,结合环境同位素揭示地下水补给来源;章斌等^[4]通过分析地表水和地下水中氯离子浓度和 δD 、 $\delta^{18}O$ 值的空间分布特征,揭示了秦皇岛洋戴河平原地下水的形成演化规律;曹星星^[5]以草海流域为例分析了该流域内水化学特征变化规律,并根据不同季节分析了该湿地水文地球化学过程中的主要控制因素;杨炳超等^[6]运用 Piper 图解法和离子比值法对诺木洪河流域地下水化学演化特征进行了分析;杨敏等^[7]运用离子比值法和饱和指数法对柳林泉域的水化学特征及演化规律进行研究,并利用 PHREEQC 反向模拟揭示了岩溶含水层中的水岩相互作用。吕婕梅等^[8]对贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源进行分析,探讨了上游工矿企业活动对流域水化学的影响;杨丽芝等^[9]分析了济南泉水水化学特征,探讨了引起泉水水化学变异的原因。

许多学者在吐鲁番盆地也做了一些研究,周文等^[10]通过化学简分析对鄯善县地下水化学分布基本特征及地下水化学组分变化特征进行了分析。刘宗鑫等^[11]通过分析鄯善县地表与地下水体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 和d值的分布规律,得到地下水与地表水之间的水力联系以及不同深度地下水之间的水力联系。王欣^[12]运用单因子指标分析和水化学分析对吐鲁番盆地水质变化和潜在影响做了相关分析研究。陈鲁^[13]通过环境同位素及水文地球化学研究并分析了吐鲁番盆地的水化学特征;蔡月梅等^[14]利用无机离子示踪的方法,分析了吐鲁番盆地地下水和地表水成分的变化规律。

本文在前人研究基础上对二塘沟流域的地下水化学离子来源与空间分布规律做了深入研究,掌握地下水系统的水化学演化过程,明确地表水与地下水的转化规律,有助于水资源的可持续利用及对地下水资源的有效管理,防止人为活动影响地下水水质。因此,有必要更深一步进行地下水化学演化方面的研究工作^[15]。

2 研究区概况

研究区位于吐鲁番盆地鄯善县境内,横跨南北两盆地,东西最宽约 60 km,南北长约 250 km,总面积 $0.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。东接鄯善县柯柯亚河流域,西连吐鲁番市。

二塘沟河源头位于博格达山南坡,山区地势北高南低,以山前为界,北为博格达山,南为吐鲁番盆

地,由北向南,地貌上可分为典型的侵蚀、剥蚀山区与山前冲洪积砾质倾斜平原两大地貌单元。侵蚀、剥蚀山区主要指博格达山主峰以南至吐鲁番盆地北缘的高、中山区。山前冲洪积砾质倾斜平原 博格达山南坡各河流出口山口后,由于河水搬运能力陡然减弱,变成以堆积作用为主,在沟口形成冲洪积扇,随着冲洪积扇逐渐增大并相互连接,在山前形成巨大的冲洪积砾质倾斜平原。

研究区水文地质条件十分复杂,地下水经多次转化利用,地下水开采形式多样,有泉水、坎儿井、机电井。总体来看,地下水经过 3 次大的转化,即地下水在天山山前一带以泉水、坎儿井水及机电井等形式开采利用后,入渗补给地下;在火焰山北山前一带经泉水、坎儿井利用后补给地下;在火焰山南山前一带以通过泉水、坎儿井利用后入渗地下;在研究区下游以机电井形式开采利用后入渗;最终汇入艾丁湖。

3 采样与测试

2015 年在研究区内抽取地下水化学简分析样品 20 组,其中 5 个地表水样、12 个地下水样和 3 个坎儿井水样。具体取样位置如图 1 所示。在本研究中根据取样深度及坎儿井源头,确定坎儿井为浅表层地下水^[16]。根据经验及相关资料分析,取样机井水为浅层地下水。

地下水简分析样品委托新疆地矿局第二水文地质大队测试。实验室内采用 ICP 测量水体 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度,采用酸式滴定法测定 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 质量浓度,采用离子色谱法分析 SO_4^{2-} 和 Cl^- 质量浓度。

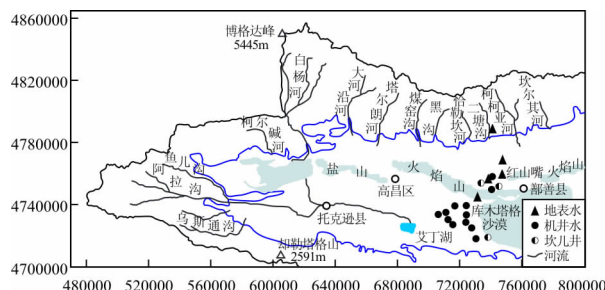


图1 二塘沟流域采样点分布图

4 地下水化学特征及空间分布特征

4.1 地下水水化学特征

根据地下水取样类型以及空间分布(见图1),将地下水化学资料进行统计分析,计算出研究区地下水主要组份含量特征值,统计结果见表1、2。

表 1 火焰山南北盆地地下水化学参数统计特征值

mg/L

检测项目	火焰山北部					火焰山南部				
	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数
K ⁺ + Na ⁺	93.82	16.23	44.50	23.86	0.54	656.27	65.00	152.24	168.92	1.11
Ca ²⁺	176.72	28.44	68.91	49.48	0.72	255.94	21.13	86.30	67.05	0.78
Mg ²⁺	18.73	4.93	10.57	5.18	0.49	54.46	4.93	16.78	14.21	0.85
Cl ⁻	225.60	14.19	72.27	76.14	1.05	688.85	42.57	181.26	192.70	1.06
SO ₄ ²⁻	199.20	36.23	101.41	50.23	0.50	888.09	53.96	214.25	240.11	1.12
HCO ₃ ⁻	219.72	85.45	118.25	42.90	0.36	220.94	67.14	134.37	41.08	0.31
TDS	823.92	179.44	356.78	215.10	0.60	2487.40	289.51	718.00	635.25	0.88
pH 值	7.89	7.54	7.75	0.11	0.01	8.01	7.39	7.69	0.18	0.02

表 2 不同水样类型化学参数统计特征值

mg/L

水样类型	特征值	pH 值	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
地表水	最小值	7.77	16.23	28.44	4.93	14.19	36.23	85.45	179.44
	最大值	7.89	52.01	56.88	9.86	49.66	127.50	109.86	313.63
	平均值	7.82	33.39	41.03	7.54	24.12	80.82	100.09	236.94
	标准差	0.04	13.52	9.12	1.99	13.76	31.47	9.13	54.71
	变异系数	0.00	0.41	0.22	0.26	0.57	0.39	0.09	0.23
机井水	最小值	7.39	65.00	21.13	4.93	42.57	53.96	85.45	289.51
	最大值	8.01	264.41	255.94	34.50	418.56	453.02	220.94	1380.49
	平均值	7.69	105.37	87.18	13.80	142.65	156.84	147.09	579.38
	标准差	0.17	55.43	65.34	7.63	106.02	108.31	40.19	301.23
	变异系数	0.02	0.53	0.75	0.55	0.74	0.69	0.27	0.52
坎儿井水	最小值	7.54	47.17	65.81	10.10	97.19	81.48	67.14	351.49
	最大值	7.69	656.27	166.16	54.46	688.85	888.09	128.17	2487.40
	平均值	7.63	250.51	111.85	27.52	306.94	365.35	97.65	1111.00
	标准差	0.06	286.92	41.38	19.32	270.48	370.09	24.92	975.00
	变异系数	0.01	1.15	0.37	0.70	0.88	1.01	0.26	0.88

从表 1、2 可以看出,地表水及地下水 pH 值均大于 7,均为碱性水且从山北和山南的变异系数来看,火焰山北部 Cl⁻,南部 K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻,变异系数均属于强变性,说明这几种离子空间差异非常大。且南盆地的 TDS 变异系数也较大,接近 100%,说明南盆地可能受人为活动及蒸发浓缩等的影响更大。

从不同水样类型来看,地表水的 Cl⁻ 变异系数较大,而其他离子变异性较弱;浅层地下水与地表水相比,各离子浓度均较大且变异性强,可能是由于地表水更新快,且主要由冰雪融水及大气降水补给;而浅层地下水更新相对较慢,且受人为因素及水文地质条件的影响,由于蒸发浓缩、岩石风化溶解等作

用、导致水中主要离子空间变异性较大,质量浓度也比地表水高。而浅表层地下水各离子浓度相对更高,但从原始资料分析,浅表层地下水样空间差异大,水样数量少是导致变异系数大的一个原因。

化学及水文地球化学分析是确定地下水来源和类型及分布的直接方法之一^[17]。结合 Piper 三线图(图 2)得出:水样中阳离子主要以 Na⁺、Ca²⁺ 为主,强酸根离子高于弱酸根离子,阴离子以 SO₄²⁻、Cl⁻ 为主。各水样阴离子变化不明显。相反,阳离子中 Na⁺、Ca²⁺ 变化趋势较明显,且浅层地下水比地表水变化明显,因为地表水又有融雪和降雨直接补给且有防渗渠道不易受到干扰。地表水水化学类型主要是 HCO₃⁻—Na⁺,浅层地下水水化学类型为 HCO₃⁻ +

$\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, 浅表层地下水水化学类型主要是 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$, 经筛选发现, 北盆地的浅层地下水与地表水水化学类型相似, 推测北盆地地表水首先补给浅层地下水。浅层地下水与浅表层地下水在地下水化学类型上有一定差异, 但其阳离子基本没有变化, 表明在径流和垂向补给可能存在着 Na^+ 和 Ca^{2+} 之间的交替吸附等化学作用。

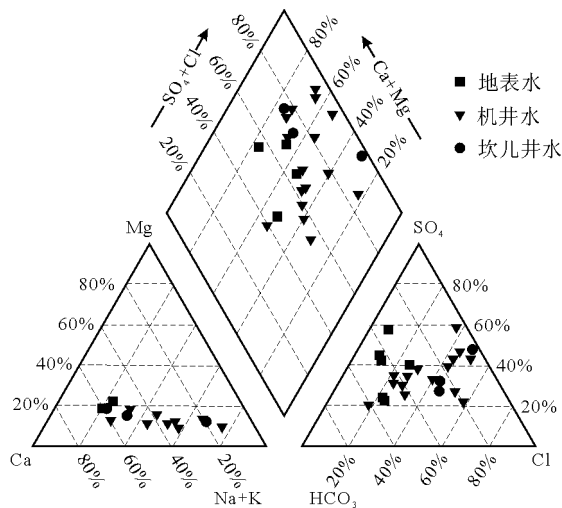


图2 二塘沟流域地下水 Piper 图

4.2 水化学组分来源

地下水的水化学成分取决于区域水文地质条件和人为因素等多种因素的综合作用^[18-19]。早期 Gibbs^[20] 运用半对数散点图, 分析了地下水中的离子特征及成因。本文利用 Gibbs 图对研究区水样进行分析。将样品化验分析的数据绘制成图(图3), 由图3可以看出:(1)所有水样点都远离“降水控制区域”, 符合吐鲁番盆地降雨稀少、蒸发量大的气候条件;(2)浅层及浅表层地下水以岩石风化作用为主, 部分向蒸发浓缩型偏移, 经查证偏蒸发浓缩作用的离子均为南盆地水样, 说明北盆地地下水中各离子主要受岩石风化影响, 南盆地地下水水化学组分同时受岩石风化及蒸发浓缩作用影响;(3)地表水 TDS 值大小适中、 Na^+ 与 $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 比值基本小于 0.5 的区域, 这部分地表水离子组分主要来自于岩石风化作用。

为进一步阐明地下水的起源以及矿化过程, 绘制了地下水主要离子关系曲线图, 如图4所示。其中图4(a)中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 与 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ 两个参数之间的关系曲线可以用来评价水-岩相互作用对水化学的作用^[15], 如果两

个参数之间具有 1.0 的斜率线性关系, 则矿物的风化溶解和离子交替吸附是控制该区域地球化学组成的主要因素。

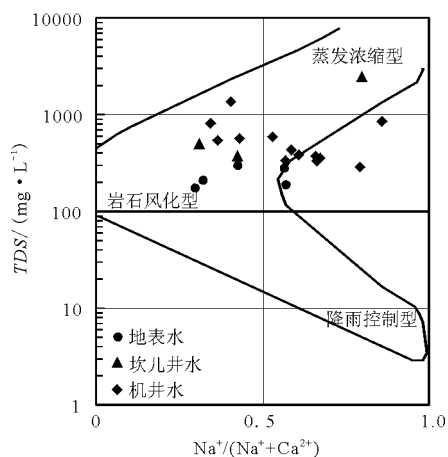


图3 水化学组成吉布斯图

从 Na^+ 与 Cl^- 关系图(图4(b))中可以看出, Na^+/Cl^- 值基本位于 1:1 线(岩盐溶解线)附近, 造成这种现象的原因包括 3 个方面: 含 Na^+ 矿物的风化溶解、 Na^+ 与 Ca^{2+} 的交替吸附以及蒸发浓缩作用。地表水和地下水的 Na^+ 、 Cl^- 的形成略有不同。从出山口到冲积扇平原区, 地下水中 Na^+ 和 Cl^- 不断增加, 地表水中的 Na^+ 和 Cl^- 主要以溶解作用为主, 平原区地下水中的 Na^+ 和 Cl^- 除了溶解作用, Na^+ 从交替吸附作用中释放还有蒸发浓缩作用。图3和4(a)可进一步验证。

从 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 关系图(图4(c))中可以看出, $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 值在 1:1 线(石膏溶解线)附近, 说明 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的来源基本相同, 均来源于石膏或者硬石膏。 $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 值在 1:1 线之下有两种原因: 一是含 SO_4^{2-} 矿物的风化溶解, 二是 Na^+ 与 Ca^{2+} 离子的交替吸附, 吸附 Ca^{2+} 释放 Na^+ 。 $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ 值在 1:1 线之上的原因主要是碳酸盐矿物的风化溶解。从图4(c)中可以看出地表水和地下水中的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 形成原因主要是碳酸盐矿物的风化溶解, 从图3和图4(d)中可以进一步验证。

4.3 水化学组分空间分布特征

4.3.1 空间分布特征分析 沿地下水径流方向作地下水化学组分的变化见图5。由图5可看出, 以火焰山为分界线, 上游出山口至冲洪积扇缘 TDS 变化不大, 但在扇源处的点 J17 的 TDS 值突然增大, 而地表水 DB05 却是相对稳定状态。下游灌区地下水和渠水 TDS 相当, 在灌区周边稍有上升, 但在达浪坎乡和老迪坎乡 TDS 升高明显。

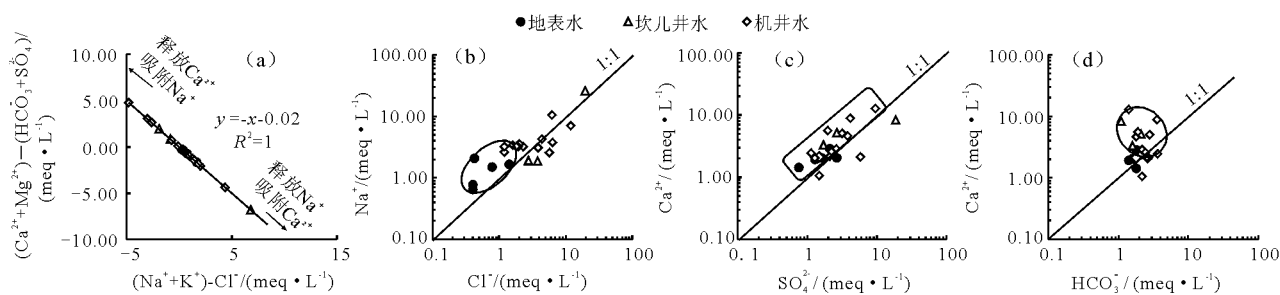


图4 研究区地下水主要离子关系曲线图

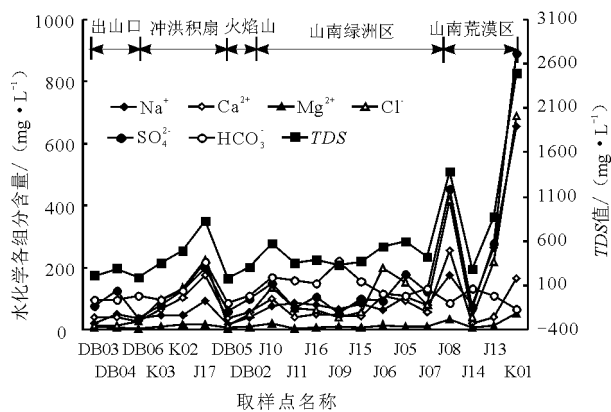


图5 各离子浓度沿径流方向变化图

根据图5对其6种离子进行分析:(1) Na^+ 含量从出山口到冲积扇扇缘均有小幅增大,而在火焰山南部明显增大,后趋于平稳。平原区 Na^+ 含量普遍较高,尤其到山南荒漠区 Na^+ 质量浓度达到最高峰;(2) Ca^{2+} 含量在北盆地从出山口到平原区基本变化不大,经过火焰山阻隔后离子浓度上升明显,而在南盆地平原区中部较稳定,四周偏大。根据对离子来源的分析,地下水经过火焰山流向南盆地的过程中发生了溶滤作用并有 Ca^{2+} 与 Na^+ 发生阳离子交换吸附作用;(3) Cl^- 含量在北盆地变幅很小,而在山南平原区增幅明显增大,推测可能由于灌溉使含氯矿物溶解到了地下水中;(4) SO_4^{2-} 含量只在火焰山附近有所增加,由于火焰山-盐山一带有的石膏矿存在,因此受溶滤作用影响为主;(5)地下水水样除特殊点外均为 HCO_3^- 含量较高,在J09处明显与规律性不符,这是因为平原区的大水漫灌使 CO_2 进入地下水,引起 HCO_3^- 浓度升高。且这一现象与样品测试均为偏碱性水相一致。而在达浪坎乡(点J08) TDS 升高,其他离子浓度也升高而 HCO_3^- 保持不变,这是由于蒸发浓缩和脱碳酸同时作用的结果,使得 HCO_3^- 达到平衡状态。

从图5可以看出J17的 TDS 有明显升高,经过对该点地形和补给条件分析,发现该点位于两补给

源交接地带,连木沁灌区开采地下水致使地下水位下降,而J17附近不能及时得到补给,另一方面二塘沟水渠防渗率的提高,地表水渗漏补给减少,因此推测该点有盐渍化趋势。再参考周围取样点,地表水及坎儿井水均无明显变化,证明推测具有可靠性。

4.3.2 饱和指数法指示作用分析 通过前面对离子组分来源的分析后,最终选定 CaSO_4 、 CaCO_3 、 CO_2 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和 NaCl ,用饱和指数定量地分析地下水离子来源的实际形式。用 SI 来表达矿物饱和指数,公式为:

$$SI = \lg \left(\frac{LAP}{K} \right)$$

式中: LAP 为矿物溶解反应中相关离子活度积; K 为设定条件下的平衡常数。

此次计算选择沿径流方向选择5个点即4条路径进行模拟,模拟结果如表3。

表3 “可能矿物相”饱和指数模拟计算结果

可能矿物项		饱和指数(SI)				
矿物名称	分子式	A	B	C	D	E
硬石膏	CaSO_4	-2.28	-1.95	-2.18	-1.39	-0.35
文石	CaCO_3	1.90	-1.33	-0.01	0.45	2.39
方解石	CaCO_3	2.01	-1.13	0.14	0.60	2.53
CO_2	CO_2	-5.70	-1.22	-2.32	-2.39	-5.02
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	4.08	-2.18		1.25	5.02
岩盐	NaCl	-8.25	-6.66	-6.90	-5.22	-3.22

5个点分别为北盆地出山口地表水、北盆地平原区浅层地下水、北盆地火焰山山前浅表层地下水、南盆地火焰山山前浅层地下水、南盆地绿洲区浅层水、艾丁湖排泄区浅层地下水。沿径流方向上, CaSO_4 值均为负值,但由于没有沉淀矿物,说明有被析出趋势; NaCl 和 CO_2 均为负值,说明处于不饱和状态,这就意味着离子会不断进出溶液进行着交换; CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 矿物在后两个过程中变为正值处于

沉淀状态。因此可以推测北盆地浅层地下水主要受二塘沟上游地表水入渗补给,过程中发生氯化物的溶滤作用。径流至火焰山隆起后向上补给浅表层水,发生石膏的溶解。在地下水从北盆地的补给区至下游南盆地排泄区的变化过程中,又受到蒸发浓缩作用为主且伴随有阳离子交替吸附和 HCO_3^- 、 Cl^- 间的交换的径流过程,最后在艾丁湖附近形成 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型水。

5 结 论

(1) 流域各水样阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,阴离子以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 为主;地表水水化学类型是 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$,浅层地下水水化学类型是 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$,浅表层地下水水化学类型主要是 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ 。

(2) 北盆地浅层地下水由地表水补给,径流至火焰山后由于火焰山地质构造条件限制,浅层地下水补给浅表层水并流向南盆地,在南盆地平原绿洲区灌溉及人为因素影响下,中部水位低,四周地下水向中部补给,最后随径流方向流向艾丁湖。

(3) 地表水中各离子主要以碳酸盐矿物的风化溶解作用为主,平原区地下水中的主要离子 Na^+ 和 Cl^- 除了溶解作用、 Na^+ 从交替吸附作用中释放还有蒸发浓缩作用;地表水和地下水中的 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 形成原因主要是碳酸盐矿物的风化溶解。

(4) 地下水各离子质量浓度和 TDS 值由于空间分布地形影响具有空间变异性,北盆地地表水水质较好,而地下水有变差趋势,即在火焰山前有明显上升,南盆地地下水在山前及灌区四周水质较差。研究发现,火焰山以南大量开采地下水,农业灌溉以大水漫灌为主,灌区中部地下水位急剧下降,因而引起四周向中部补给的现象,导致灌区中部水质较好,四周水质较差。

参考文献:

- [1] SINGH K P, GUPTA S, Mohan D. Evaluating influences of seasonal variations and anthropogenic activities on alluvial groundwater hydrochemistry using ensemble learning approaches[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511(4): 254 - 266.
- [2] 张清寰,齐 识,马金珠. 甘肃梨园河流域地下水来源及其水化学特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(5): 898 - 906.
- [3] 党慧慧,董 军,董 阳,等. 甘肃梨园河流域地下水水化学演化规律[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(4): 454 - 461.
- [4] 章 斌,宋献方,郭占荣,等. 用氯和氢氧同位素揭示洋戴河平原地下水的形成演化规律[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 2965 - 2972.
- [5] 曹星星. 基于水化学与稳定同位素的岩溶湿地流域地球化学过程研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2016.
- [6] 杨炳超,李小等,张 戈,等. 诺木洪河流域地下水水化学特征及演化规律研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10): 214 - 220.
- [7] 杨 敏,卢耀如,张凤娥,等. 柳林泉域岩溶水化学演化及地球化学模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 127 - 134.
- [8] 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1565 - 1572.
- [9] 杨丽芝,刘春华,祁晓凡,等. 济南泉水水化学特征变异研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 59 - 64.
- [10] 周 文,董新光,吴 彬,等. 鄯善县地下水化学演变规律研究[J]. *人民黄河*, 2014, 36(1): 71 - 74.
- [11] 刘宗鑫,董新光,吴 彬,等. 新疆鄯善县水环境氢氧同位素特征及其指示作用[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 162 - 165 + 171.
- [12] 王 欣. 新疆吐鲁番市灌溉水资源水质特征评价分析研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.
- [13] 陈 鲁. 吐鲁番盆地水文地质条件及地下水循环研究[D]. 北京:中国地质大学, 2014.
- [14] 蔡月梅,王文祥,张明江,等. 吐鲁番盆地地表水和地下水主要化学成分的形成与演化[J]. *现代地质*, 2016, 30(3): 680 - 687.
- [15] 滕彦国,左 锐,王金生,等. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 127 - 136.
- [16] 江 晔. 新疆坎儿井[J]. *地理教学*, 2006(9).
- [17] DOMENICO P A. Concepts and models in groundwater hydrology[M]. New York: McGraw - Hill, 1972: 494 - 495.
- [18] SCHUH W M, KLINKEBIEL D L, GARDNER J C, et al. Tracer and nitrate movement to groundwater in the Northern Great Plains[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(5): 1335 - 1347.
- [19] ZHU Gaofeng, SU Yonghong, HUANG Chunlin, et al. Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Heihe River Basin, northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(1): 139 - 153.
- [20] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 17: 1088 - 1090.