

doi: 10.12029/gc20180604

孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128–1141.
Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 45(6): 1128–1141(in Chinese with English abstract).

哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化

孙厚云 毛启贵 卫晓锋 张会琼 蕙玉泽

(北京矿产地质研究院, 北京 100012)

摘要:哈密盆地地下水系统形成受构造运动与水文地质条件共同控制,通过划分哈密盆地地下水系统,分区阐述哈密盆地地下水水文地球化学特征与水化学成因及控制因素,从水文地球化学的角度阐明盆地系统的地下水水化学演化规律。结果表明,哈密盆地地下水水化学特征呈明显分带性,沿地下水流动方向,水化学类型逐渐由HCO₃型演化为SO₄型、最终演化为Cl型;水体TDS含量不断升高,地下水由淡水逐渐演化为微咸水、咸水。地下水离子来源主要为硅酸盐岩与蒸发岩盐溶解,水化学过程受蒸发浓缩作用控制,岩石风化作用与季节变化共同影响。沿地下水径流方向,地下水经盐分溶滤、盐分迁移并在排泄区附近形成盐分聚集带;盐分迁移沿程溶滤作用逐渐减弱,蒸发浓缩作用逐渐增强。哈密盆地地下水化学空间演化主要受自然因素影响驱动,时间演化驱动因素主要为气候变化和工矿活动农业灌溉等人类活动。

关键词:水化学;地下水系统;哈密盆地;形成演化

中图分类号:P641.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2018)06-1128-14

Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin

SUN Houyun, MAO Qigui, WEI Xiaofeng, ZHANG Huiqiong, XI Yuze

(Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China)

Abstract: The groundwater system of the Hami basin can be divided into three subregions based on hydrogeological conditions and structural characteristics. The investigation illustrates the controlling factors of hydrochemical and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin through analysis and comparative study of different distributing disciplinarian characteristics of three subregions from the hydrogeochemical perspective. The results show that the distribution of hydrochemical characteristics in the Hami basin has obvious zoning features. The hydrochemical type gradually evolves from HCO₃ type to SO₄ type and eventually to Cl type while the TDS increases gradually from fresh water into brackish water and salt water in the water flow direction. The main source of water ion is from the dissolution of silicate rock and evaporite salt, and the hydrochemical compositions of groundwater in the study area are mainly controlled by evaporation and influenced by rock

收稿日期:2018-03-13; 改回日期:2018-09-21

基金项目: 中国地质调查局项目“新疆东天山中段有色金属基地综合地质调查”(DD20160071)资助。

作者简介: 孙厚云,男,1990年生,硕士,助理工程师,主要从事环境水文地质研究;E-mail:shyun2016@126.com。

weathering and seasonal changes. The groundwater salt goes through filtration, migration and aggregation in the groundwater system, while the filtration effects become relatively weakened and the evaporation concentration increases gradually along the water flow direction. The chemical spatial evolution of groundwater in Hami basin is mainly driven by the influence of natural factors while the main driving factors for the time evolution are climate change and human activities such as industrial and mineral irrigation.

Key words: hydrogeochemistry; groundwater; Hami basin; evolutionary mechanism

About the first author: SUN Houyun, male, born in 1990, master, assistant engineer, engages in the research on environmental hydrogeology; E-mail: shyun2016@126.com.

Fund support: Supported by the program of China Geological Survey (No. DD20160071).

1 引言

新疆内陆干旱区地处亚欧大陆腹地,降雨稀少,蒸发强烈,属典型的戈壁沙漠生态环境严重脆弱区。地下水环境的变化对干旱地区经济和生态具有重要影响(Chen,1994;窦妍等,2010)。20世纪以来,中国学者(陈梦熊,1997;李文鹏和郝爱兵,1999;张光辉等,2014;陈宗宇等,2015;Zhu, et al, 2011;Huang et al, 2012;Li et al, 2015)对准噶尔、塔里木、柴达木和河西走廊等内陆盆地地下水系统形成与演化开展了系列研究,表明西北内陆干旱区主要的储水构造是盆地地下水系统(陈梦熊,1997),但盆地地下水补给来源单一,主要为盆地周边的高山冰川、冰雪融水补给,如祁连山、天山、昆仑山等,地下水资源在西北干旱区具有不可替代的作用(滕彦国等,2010)。近年来,受气候变化与人类活动影响,有“中亚水塔”之称的天山地下水补给量持续萎缩(Chen et al, 2016)。西北干旱区山前平原地下水位快速下降、泉流量减少、溢出带下移,区域地下水系统日渐脆弱,不利于地下水资源的可持续利用。

水化学特征分析是研究水体化学组成与地下水演化过程的基础(Patrick et al, 2012),水体主离子组成可以指示地下水补给、径流、排泄过程所经区域的岩石岩性、气象水文与环境特征;示踪地下水循环途径,反映地下水流系统特征;识别水化学演化的控制因素(高彦芳等,2008;蒲焘等,2012;郭晓东等,2014;张艳等,2015;Niu et al, 2014;Yang et al, 2017)。基于水化学特征分析的内陆盆地地下水形成演化研究,可以有效揭示地下水与环境的相互作用机制,对干旱区地下水资源评价、管理、规划、可持续开发与利用具有重要意义。本研究通过剖析哈密盆地地下水系统水文地球化学特征,阐明哈

密盆地地下水水化学类型时空分布特征;结合水文地质条件与构造特征分析了地下水水化学成因与控制因素,从水文地球化学的角度阐明了盆地系统的地下水水化学演化规律。

2 研究区概况

哈密盆地地处新疆东天山南缘,属大陆性干旱气候,降水稀少,蒸发量居新疆之冠。盆地由东北向西南倾斜,南北两侧高,中间低洼,总体形成三大地貌单元——北部山地、中部平原和南部剥蚀残丘台地,构成一个向西半闭合的断陷盆地(胡汝骥等,2003)。盆地北部为博格达山,东北部为哈尔里克山;中部为哈密盆地平原绿洲资源集中分布区;南部为觉罗塔格低山丘陵及冲积台地(赵兴有和乔木,1994)。

哈密盆地是在古近—新近系强烈褶曲和地堑型断陷基础上,经中、新生代强烈升降运动发展演变而成的介于古老地槽褶皱带之间的叠加型断陷盆地,盆地两侧受继承性活动大断裂控制(陈玉华等,2003)。盆地经由北向南展布的四处近平行的活动断裂(吐鲁番—哈密拗陷北缘大断裂、吐鲁番—三道岭大断裂、南湖大断裂、阿奇克—库都克大断裂)所分割(图1)。在地形地貌、岩性构造共同控制下,哈密盆地形成一个典型的地下水循环系统,水文地质条件具有明显分带特征。山前槽状断拗带扇状倾斜平原为地下水补给带,主要分布第四系巨厚层洪积相卵、砾石层含水层与古近—新近系碎屑岩含水层。哈密绿洲冲洪积平原为地下水径流带,主要分布砂砾与亚砂土互层组成的冲—洪积或冲积层含水层。山前312国道北部潜水埋深20~80 m,312国道以南细土平原区,地下水位埋深一般小于15 m。沙尔湖—库茹克郭勒一带以盐土为主的

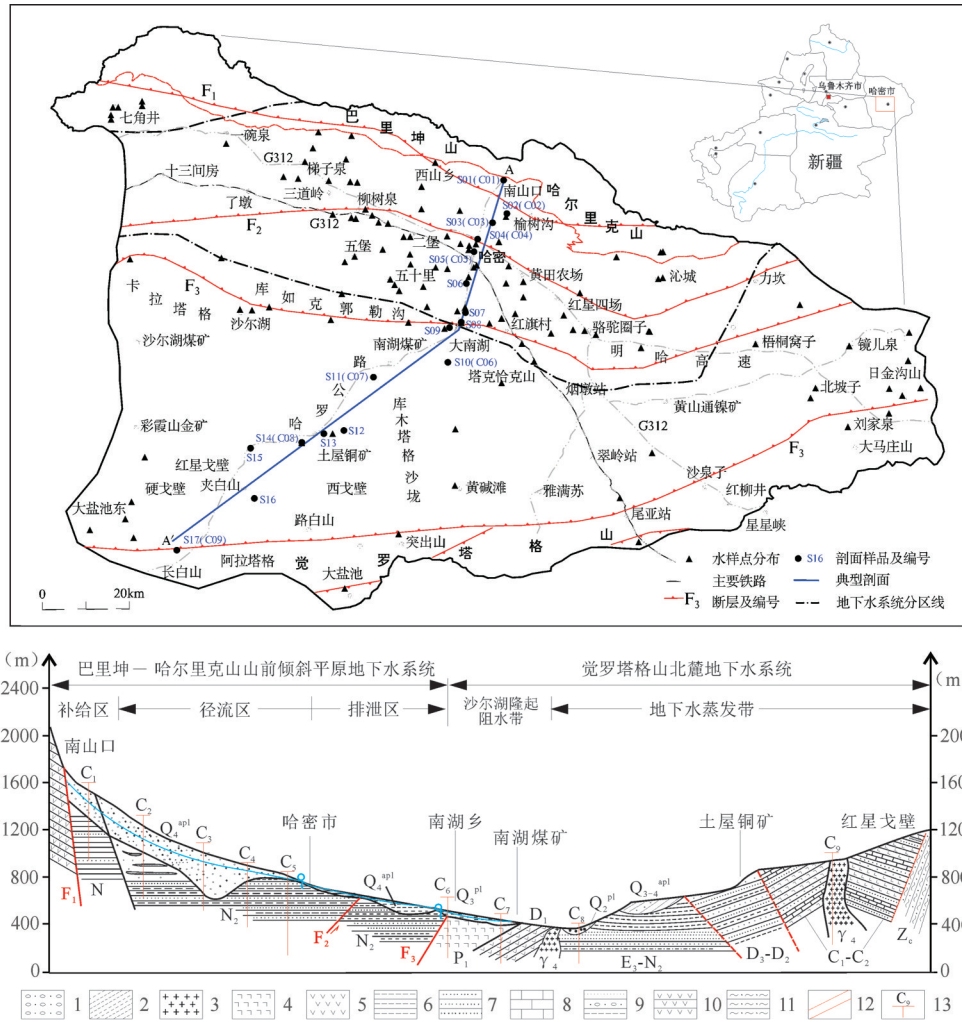


图1 哈密盆地地理位置与水质样品采集位置分布图

- 1—砂砾卵石层; 2—亚砂土; 3—花岗岩; 4—杏仁状玄武岩; 5—安山岩; 6—砂质泥岩; 7—砂岩; 8—灰岩; 9—含砾砂岩、泥岩互层;
- 10—安山凝灰岩; 11—凝灰质砂岩; 12—断层; 13—承压水监测井及编号

Fig.1 Sketch map of the Hami basin and the sampling sites

- 1—Gravel layer; 2—Subsandy soil; 3—Granite; 4—Amygdaloid basalt; 5—Andesite; 6—Sandy mudstone; 7—Sandstone; 8—Limestone;
- 9—Conglomerate-bearing sandstone interbedded with mudstone; 10—Andesite tuff; 11—Tuffaceous sandstone; 12—Fault;
- 13—Confined water monitoring well and its serial number

细土平原为地下水溢出带, 主要分布冲积相细颗粒含水层与古近—新近系碎屑岩类含水层。区内地下水埋深较浅, 一般小于5 m, 如五堡乡水文监测孔20年来各年平均水位2.33~6.01 m; 南湖乡托布塔村各年平均水位2.48~4.58 m。局部地区丰水期地下水自流, 水头高出地面0.35~1.0 m。北部觉罗塔格北麓戈壁丘陵区及风蚀风积沙丘带为地下水垂向排泄带, 为古近—新近系及中生界砂岩、泥岩、砂砾岩孔隙裂隙含水层, 石炭系、泥盆系碎屑岩类、火山岩裂隙含水层, 同时在区内北缘沙尔湖隆起形成阻

水带。区内水位埋深多大于20 m; 低洼地区(如觉罗塔格大盐池、东戈壁等)埋深多小于5 m。沿地下水径流方向含水层富水性由强到弱, 水质由淡水演变为微咸水或咸水。

哈密盆地具有完整、独立的地下水补给、径流、排泄体系, 为一级地下水系统。在对哈密盆地含水介质空间展布研究的基础上, 以盆地内的地表分水岭为界, 将哈密盆地划分为3个二级地下水系统: 巴里坤山—哈尔里克山南麓系统(I区), 觉罗塔格北麓系统(II区), 七角井盆地系统(III区)(李崇博等, 2016)。

3 材料与方法

3.1 样品采集与测试

哈密盆地地下水动态类型主要为径流—蒸发型与蒸发型,地下水枯水期为8~9月,丰水期为4~5月,其他时间为平水期。在充分考虑样品点的代表性、控制性、地下水流场特征等因素的基础上,本次研究共采集样品210件。研究所采集样品包括井水、泉水、水库坑塘样,部分井水样分浅层地下水与深层地下水样(承压水);样品按丰水期、平水期、枯水期分3次采集,其中浅层地下水175组,承压水水样24组,地表水水样11组;I区水样134件,II区水样56件,III区水样9件;具体采样点分布位置见图1。水样采集使用500 mL PET塑料瓶保存,清洗及保护剂添加参照水质样品的保存和管理技术规定执行。现场测试使用多参数水质快速检测仪(德国Multi 3430型)测量水体温度、pH、电导率(EC)、溶解氧(DO),便携式哈希浊度(2000Q型)测定仪测定水体浊度。

室内水质分析由新疆地矿局第一水文工程地质大队实验测试中心完成, K^+ 、 Na^+ 采用火焰原子吸收光谱仪进行测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用EDTA滴定法测定, Cl^- 和 SO_4^{2-} 采用离子色谱仪分析测定, HCO_3^- 用盐酸滴定法测定,溶解性总固体(TDS)利用烘干法进行测定,pH用玻璃电极法测定。测试结果根据离子平衡原理进行误差分析,样品化学分析误差均小于5%。

3.2 数据分析方法

在样品分析基础上,利用SPSS对水化学参数进行基本统计(袁建飞等,2016;孙厚云等,2016)与Pearson相关性分析(陈盟等,2016),并对各水样进行舒卡列夫水化学类型分类,确定研究区水化学组成特征及空间分布规律。绘制水化学Piper(1944)三线图、Gibbs(1970)图、离子比例系数图与典型剖面离子含量变化曲线,揭示研究区水化学主要形成作用与控制因素。

4 地下水化学特征

4.1 水化学组成特征及水化学类型

4.1.1 主要水化学离子分布特征

根据地下水系统分区,分别对浅层地下水、承压水、地表水水样数据的常规水化学参数进行数理统计分析(表1),由分析统计结果可知:

I区浅层地下水TDS变化范围为2.30~5725.00 $mg \cdot L^{-1}$,平均值为702.74 $mg \cdot L^{-1}$,主体为淡水,至库茹克郭勒沟一带逐渐变为微咸水;pH值范围在7.02~10.57,总体呈弱碱性。阳离子质量浓度大小依次为 $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$,平均质量浓度分别为105.53 $mg \cdot L^{-1}$ 、94.34 $mg \cdot L^{-1}$ 、28.18 $mg \cdot L^{-1}$ 、2.82 $mg \cdot L^{-1}$;阴离子质量浓度大小依次为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$,平均质量浓度分别为187.11 $mg \cdot L^{-1}$ 、173.28 $mg \cdot L^{-1}$ 、167.95 $mg \cdot L^{-1}$,含量相差较小。浅层地下水中优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ ,优势阴离子沿地下水径流方向由 HCO_3^- 逐渐变为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 。I区承压水TDS变化范围为112.40~576.20 $mg \cdot L^{-1}$,平均值为241.34 $mg \cdot L^{-1}$,主要为淡水;pH值范围在7.97~8.04,呈弱碱性。阳离子质量浓度大小顺序与浅层地下水一致,优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ ;阴离子质量浓度大小依次为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$,平均质量浓度分别为146.25、48.24、20.29 $mg \cdot L^{-1}$,优势阴离子为 HCO_3^- 。I区地表水主要在哈密绿洲地下水排泄带出露,沿花园子水库、大南湖水库呈近东西向分布。地表水TDS均小于1000 $mg \cdot L^{-1}$,平均值为362.57 $mg \cdot L^{-1}$;pH值范围在7.33~8.18,呈弱碱性,地下水优势离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} ,地表水化学参数变异系数均小于1.0,地下水排泄区水化学离子含量较稳定。I区浅层地下水变异系数 C_v 多大于1.0,说明地下水径流方向沿程地下水主离子变化较大,TDS波动明显,地下水运动较频繁,水岩相互作用强烈;承压水地下水变异系数 C_v 多小于1.0,主离子含量较稳定,TDS波动较小,地下水循环运动较浅层地下水缓慢。I区为区域性地下水系统,地下水补径排速度较快,地下水溶滤作用强烈,为地下水积极循环交替带。

II区浅层地下水TDS变化范围为324.60~287725.40 $mg \cdot L^{-1}$,平均值为28039.12 $mg \cdot L^{-1}$,地下水由微咸水过渡至咸水、卤水;pH范围4.57~8.72,变化较强烈,总体呈弱碱性。阳离子质量浓度大小依次为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$,平均质量浓度较I区高,分别为9728.87 $mg \cdot L^{-1}$ 、569.87 $mg \cdot L^{-1}$ 、210.00 $mg \cdot L^{-1}$ 、67.01 $mg \cdot L^{-1}$,优势阳离子为 Na^+ ,占其阳离子总量的91.99%;阴离子质量浓度大小依次为 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$,平均质量浓度远高于I区,分别达12213.73 $mg \cdot L^{-1}$ 、5245.91 $mg \cdot L^{-1}$ 、201.24 $mg \cdot L^{-1}$,优势阴离子为 Cl^- ,占其阴离子总量的69.16%。II区

表 1 研究区水化学参数统计

Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of the study area											
区	类别	项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	pH	TDS
I 区	浅层地下水	Min	0.30	4.30	8.00	1.20	3.50	1.90	36.60	7.02	2.30
		Max	32.70	678.20	1242.50	303.80	2924.60	1152.70	549.20	10.57	5725.00
		Mean	2.82	94.34	105.53	28.18	167.95	187.11	173.28	7.90	702.74
		Std.	3.89	130.29	172.76	43.39	425.51	268.02	97.36	0.48	936.93
		Cv	1.38	1.38	1.64	1.54	2.53	1.43	0.56	0.06	1.33
	承压水	Min	0.80	6.80	20.00	2.40	7.10	1.90	76.30	7.97	112.40
		Max	4.80	159.80	72.10	19.40	60.30	211.30	231.90	8.13	576.20
		Mean	2.21	32.12	35.59	9.42	20.29	48.24	146.45	8.04	241.34
		Std.	1.27	41.04	16.54	6.73	16.15	56.07	55.54	0.06	130.89
		Cv	0.58	1.28	0.46	0.71	0.80	1.16	0.38	0.01	0.54
	地表水	Min	1.20	11.30	32.10	7.80	11.30	40.30	81.80	7.33	184.20
		Max	6.60	152.10	121.80	30.60	120.50	368.90	257.50	8.18	932.80
		Mean	3.21	49.93	54.29	13.27	43.24	116.63	150.46	7.80	362.57
		Std.	1.79	49.34	30.52	7.96	37.22	113.85	53.18	0.29	256.93
		Cv	0.56	0.99	0.56	0.60	0.86	0.98	0.35	0.04	0.71
II 区	浅层地下水	Min	0.07	13.51	0.72	0.08	30.10	91.30	2.40	4.57	324.60
		Max	646.20	107870.70	10681.30	2454.30	141587.30	49951.2	1180.1	8.72	287725.4
		Mean	67.01	9728.87	569.87	210.00	12213.73	5245.91	201.24	7.73	28039.12
		Std.	134.49	19232.84	1227.77	397.16	25306.33	8859.36	184.25	0.59	52284.88
		Cv	2.01	1.98	2.15	1.89	2.07	1.69	0.92	0.08	1.86
	承压水	Min	1.30	36.20	16.00	5.80	18.40	51.90	70.80	7.46	169.00
		Max	78.60	17282.10	801.60	133.60	20171.00	7809.70	268.50	9.08	47275.00
		Mean	12.36	2313.90	213.15	53.98	2768.85	1474.87	134.51	7.98	7023.55
		Std.	22.92	5082.84	272.41	48.54	6029.80	2241.79	66.79	0.46	13888.24
		Cv	1.85	2.20	1.28	0.90	2.18	1.52	0.50	0.06	1.98
	地表水	Min	1.00	50.20	1.60	1.50	19.90	5.80	36.60	7.00	143.80
		Max	8.00	565.60	196.40	68.50	570.70	693.60	537.00	8.27	2232.50
		Mean	5.13	330.78	98.20	20.65	336.95	391.48	195.25	7.63	1330.18
		Std.	3.35	240.43	79.89	32.10	250.34	302.87	230.50	0.58	968.02
		Cv	0.65	0.73	0.81	1.55	0.74	0.77	1.18	0.08	0.73
III 区	浅层地下水	Min	3.60	273.08	96.20	26.70	230.40	518.70	79.30	7.45	1287.40
		Max	4.70	519.10	136.30	82.60	478.60	878.90	238.00	8.03	2145.80
		Mean	4.02	403.71	110.20	46.83	336.71	698.48	136.97	7.70	1709.51
		Std.	0.35	117.07	16.76	17.13	101.23	152.10	51.32	0.18	359.48
		Cv	0.09	0.29	0.15	0.37	0.30	0.22	0.37	0.02	0.21

注:Min表示最小值;Max表示最大值;Mean表示均值;Std表示标准偏差;Cv表示变异系数;pH无量纲,其余单位为mg·L⁻¹。

承压水 TDS 变化范围为 169.00~47275.00 mg·L⁻¹, 平均值为 7023.55 mg·L⁻¹, 主要为微咸水、咸水;pH 范围 7.46~9.08, 总体呈弱碱性。承压水阳离子质量浓度大小顺序与浅层地下水一致, 优势阳离子为 Na⁺, Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 平均质量浓度分别为 2313.90 mg·L⁻¹、213.15 mg·L⁻¹、53.98、12.36 mg·L⁻¹; 优势阴离子为 Cl⁻、SO₄²⁻。II 区地表水零星出露, 主要为短时降雨径流汇集或小流量泉集河形成, TDS 变化范围为 143.80~2232.50 mg·L⁻¹, 平均值为

1330.18 mg·L⁻¹, 优势阳离子为 Na⁺、Ca²⁺, 优势阴离子为 SO₄²⁻、Cl⁻。

II 区觉罗塔格北麓系统由于断裂阻水构造控制, 且侵入岩体分布较广, 形成若干局部滞留型地下水流系统。浅层地下水与承压水水化学离子含量变异系数 Cv 多大于 1.0, 地下水离子与 TDS 含量分布差异性显著。浅层地下水主离子含量远高于承压含水层主离子含量, 承压水 Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻、Ca²⁺ 质量浓度分别为浅层地下水的 4.41、4.20、3.55、2.67

倍,浅层地下水咸化主要受蒸发浓缩作用影响,下部承压水含水层仍为TDS相对较低的含水层。

III区为一山间子盆地系统,地下水水化学离子含量相对I区、II区较稳定,水样离子含量变异系数均小于37%,其地下水形成演化与I区、II区相比相对单一,故样品仅采集浅层地下水。浅层地下水TDS变化范围为1287.40~2145.80 mg·L⁻¹,平均值为1709.51 mg·L⁻¹,为微咸水—咸水;pH范围7.45~8.30,地下水呈弱碱性。阳离子质量浓度大小依次为Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺;阴离子质量浓度大小依次为SO₄²⁻>Cl⁻>HCO₃⁻,优势离子为Ca²⁺、SO₄²⁻、Na⁺。

4.1.2 水化学类型及分布特征

随着地貌单元的变化,哈密盆地地下水水化学离子浓度具有明显的分带性,相应的水化学类型分布亦呈明显分带特征。沿典型剖面TDS变化曲线(图7)可知,浅层地下水由I区山前至山前倾斜平原TDS较稳定,浅层地下水TDS平均值为702.74 mg·L⁻¹,承压水TDS平均值为241.34 mg·L⁻¹,主体为淡水;沿地下水径流方向至I区细土平原带,浅层地下水与承压水TDS均逐渐升高,地下水TDS变化较大,水体TDS由低于1.0 g·L⁻¹,上升至1~10 g·L⁻¹,地下水由淡水逐渐演化为微咸水。沿地下水径流方向至II区低山丘陵带,浅层地下水与承压水TDS继续升高,

地下水TDS由低于10 g·L⁻¹,上升至10~100 g·L⁻¹,平均值达28.04 g·L⁻¹,地下水由微咸水过渡至咸水、卤水。

Piper 三线图解常用以分析水化学成分的变化规律,可以直观反映水化学主要离子的相对丰度和分布特征,从而辨别水化学形成与演化的控制端元(Huh et al, 1998)。I区含水层由山前洪积相粗颗粒沉积层逐渐过渡到哈密绿洲砂砾与亚砂土互层组成的冲—洪积或冲积层、古近—新近系砂砾岩含水层,地下水补给条件好,径流速度快,更新速率高。水样主要落在Piper图解的1/3/5区,表明I区水样主离子碱土金属(Ca²⁺、Mg²⁺)毫克当量百分比超过碱金属离子(Na⁺、K⁺),弱酸根毫克当量百分比(HCO₃⁻)含量超过强酸根离子(Cl⁻、SO₄²⁻),水体碳酸盐硬度超过50%,地下水离子含量主要受溶滤作用影响。II、III区水样在Piper图解上分布较为集中(图2, Piper图解红色线内),主要落在2/4/7区,表明水样主离子碱金属离子(Na⁺、K⁺)毫克当量百分比高于碱土金属(Ca²⁺、Mg²⁺)离子,强酸根离子含量(Cl⁻、SO₄²⁻)毫克当量百分比高于弱酸根离子含量(HCO₃⁻),水化学离子以Na⁺、Cl⁻为主,主要受蒸发岩盐风化作用影响。

地下水系统I区浅层地下水化学类型较为多

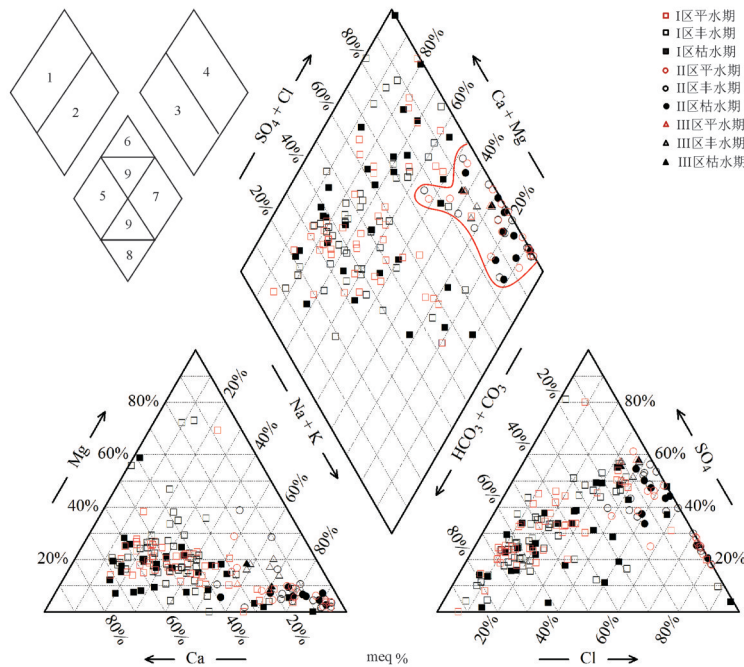


图2 研究区地下水水化学Piper图

Fig.2 Piper diagram of hadrochemistry of groundwater in the study area

样,主要为 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 HCO_3-Ca 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,分别占总样品的18.70%、13.82%、9.76%、11.38%、7.32%;其次为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型等。承压水主要类型为 HCO_3-Ca 型与 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。II区浅层地下水化学类型主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,分别占总样品的60.38%、15.09%、13.20%;承压水水化学类型主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,分别占72.72%、18.18%,局部水样为 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型水。II区浅层地下水化学类型与承压水化学类型一致,指示地下水系统为局部滞留型水流系统,垂向迁移运动相对强烈。III区浅层地下水化学类型单一,主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ 型地下水,占80%,其余为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型,与局部子盆地系统地下水交替速率缓慢,地下水滞留时间较长有关,地下水化学过程主要为蒸发浓缩作用与混合作用。

研究区地下水化学类型分布呈现明显的分带性,自山前扇状倾斜平原地下水补给带、低平原细土地下径流带、哈密绿洲地下水溢出带至觉罗塔格戈壁荒漠蒸发排泄带,浅层地下水类型逐渐由 HCO_3 型($\text{HCO}_3-\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}\rightarrow\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$)演化为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 型($\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}$)与 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型($\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$)、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型($\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$),最终演化为 Cl 型水($\text{Cl}-\text{Ca}\rightarrow\text{Cl}-\text{Ca}\cdot\text{Na}\rightarrow\text{Cl}-\text{Na}$)。承压水交替相对缓慢,但地下水亦呈现相同分带规律,地下水补径排沿程地下水类型逐渐由 HCO_3-Ca 型、 $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型演化成 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Ca}$ 型、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型及 $\text{Na}-\text{Cl}$ 型。

4.1.3 水化学相关性分析

对水样离子含量进行相关性分析,利用Pearson相关性系统聚类可以反映地下水主离子与TDS之间的相关性,推测出各离子之间是否具有相同来源(Pacheco et al, 2018; 张艳等, 2015)。对I区、II区地下水水化学进行相关性分析(III区属局部封闭型滞留型盆地地下水亚系统,地下水水化学相对较为稳定,故相关性分析聚类分析时III区未作讨论);并根据地下水主离子、TDS之间相关程度进行Pearson相关性系统聚类。

由相关系数矩阵与系统聚类得到的树状图(图3)可知,I区TDS与 Ca^{2+} 、 Cl^- 呈显著相关关系, Ca^{2+} 、 Cl^- 属系统聚类第一组;TDS与 Ca^{2+} 、 Cl^- 属系统聚类第二组,相关性显著,相关系数分别为0.953、0.910;由于I区地层以新近系砂泥岩为主,推测I区地下水主离子主要来源于硅酸盐矿物的风化溶解。II区TDS与 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 呈显著相关关系,相关系数分别为0.998、0.997、0.964;TDS与 Na^+ 、 Cl^- 属系统聚类第一组,与 SO_4^{2-} 属系统分类第二组;说明 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 三者有共同来源,据此可初步推断II区地下水离子主要来源为钠长石等硅酸盐岩矿物与岩盐、芒硝等蒸发岩矿物的风化溶解。

4.2 水化学形成作用与控制因素

4.2.1 蒸发浓缩作用

Gibbs图可以直观地表征自然水体主要离子的化学组成与变化趋势,判断其来源主要受降水、岩石风化或蒸发-浓缩哪一水化学作用控制(Kortatsi, 2007)。根据地下水系统分区,将水化学数据绘于Gibbs图中(图4),I区水样主要分布在Gibbs模型中上部,水样品TDS含量为 $100\sim 10000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明水化学离子组成由岩石风化作用与蒸发浓缩作用共同控制,大气降水作用微弱。II区水样主要分布于Gibbs模型右侧,水化学离子组成受到岩石风化和蒸发浓缩作用的共同影响,且蒸发浓缩作用对水化学离子组成影响更显著。III区水样主要分布在Gibbs模型右上部,水体TDS含量较高,水化学离子组成主要受蒸发浓缩作用控制。II区水样部分分布于Gibbs模型中部,虚线右侧,主要为承压水,其TDS含量较浅层地下水低,水化学离子组成蒸发浓缩作用弱于浅层地下水。区内浅层地下水主要受到岩石溶滤作用影响,蒸发浓缩作用控制。

4.2.2 溶滤作用

Gaillardet等(1999)根据单一岩性小流域的水化学特征,总结了硅酸盐岩、蒸发盐岩、碳酸盐岩三大岩类端元的水化学溶滤作用特性,通过 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 关系可以判别不同岩石风化溶滤对水体溶质的影响。从图5可以看出,研究区水样点较为集中分布在硅酸盐岩端元附近,表明该区水化学离子主要来源于硅酸盐岩风化溶解;II区部分样品分布于蒸发盐岩端元,表明该区水化学过程受蒸发盐岩和硅酸盐岩风化溶滤作

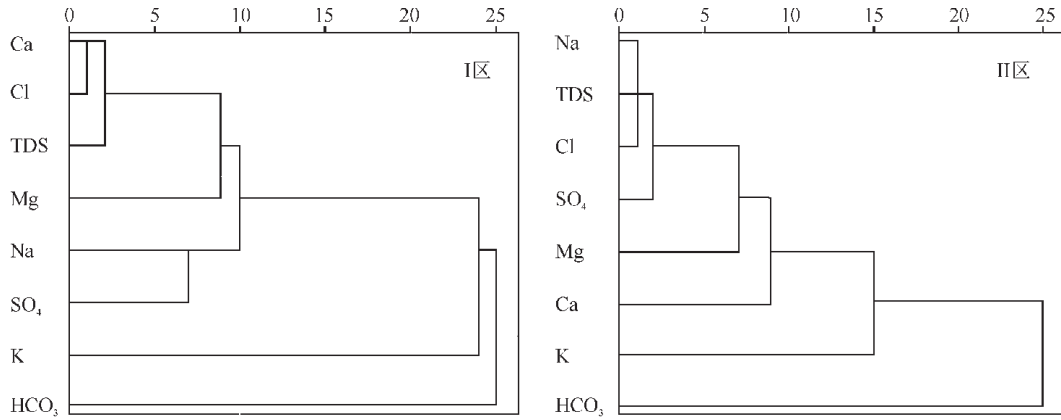


图3 研究区水化学系统聚类树状图

Fig.3 Dendrogram by systematic clustering of hydrochemistry in the study area

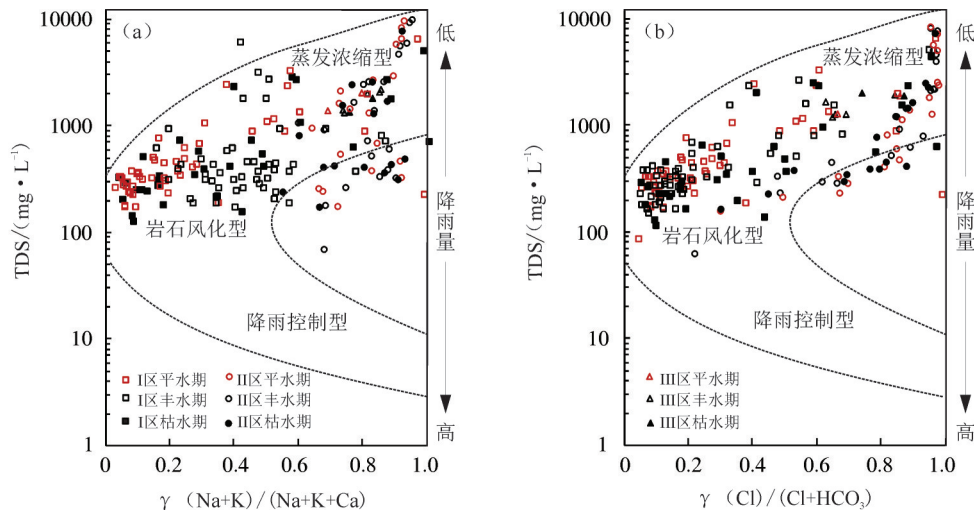


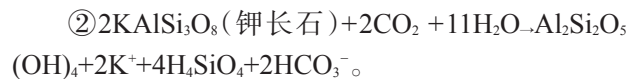
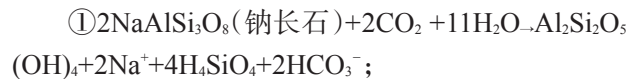
图4 研究区地下水Gibbs图

Fig.4 Gibbs diagram of groundwater in the study area

用共同控制。研究区跨越哈尔里克、觉罗塔格与中天山3个地层小区,I、III区主要分布一套古近—新近纪岩屑砂岩、砂砾岩、泥岩地层,局部分布有碳酸盐岩(D,d);II区主要发育火山岩与碎屑岩建造,岩石化学富钠贫钾;岩石多为硅酸盐类,富钠贫钾,水化学溶滤作用特征与区域地质背景较为一致。

通过计算水体阴阳离子间的比值关系可以指示水体溶滤作用,反映水化学形成及演化特征(Abhijit et al,2008)。 $\gamma(\text{Na}^+\text{+K}^+)/\text{Cl}^-$ 毫克当量比值关系可以反映 Na^+ 和 K^+ 的来源(栾凤娇等,2017),如图6a所示,I、III区水化学离子 $\gamma(\text{Na}^+\text{+K}^+)/\text{Cl}^-$ 值约为0.30,远小于1,表示I区 Na^+ 和 K^+ 主要来源为钠长石、钾长石等硅酸盐岩的溶解;II区水化学离子 $\gamma(\text{Na}^+\text{+K}^+)/\text{Cl}^-$ 值总体接近1:1线,部分略高于1:1,

表明II区 Na^+ 和 K^+ 主要来源为蒸发盐岩与硅酸盐岩的溶解。可能存在风化过程如下:



地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要是来自碳酸盐或硅酸盐及蒸发盐岩的溶解,因此可以用 $\gamma(\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 毫克当量比值来判断 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源(Li et al,2015),如图6b所示,II区 $\gamma(\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值约为0.33,远小于1,地下水水化学主要过程是硅铝酸盐矿物溶解,水体 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自硅酸盐及蒸发岩的溶解,I区 $\gamma(\text{Ca}^{2+}\text{+Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值总体接近1:1线,为1.12,地

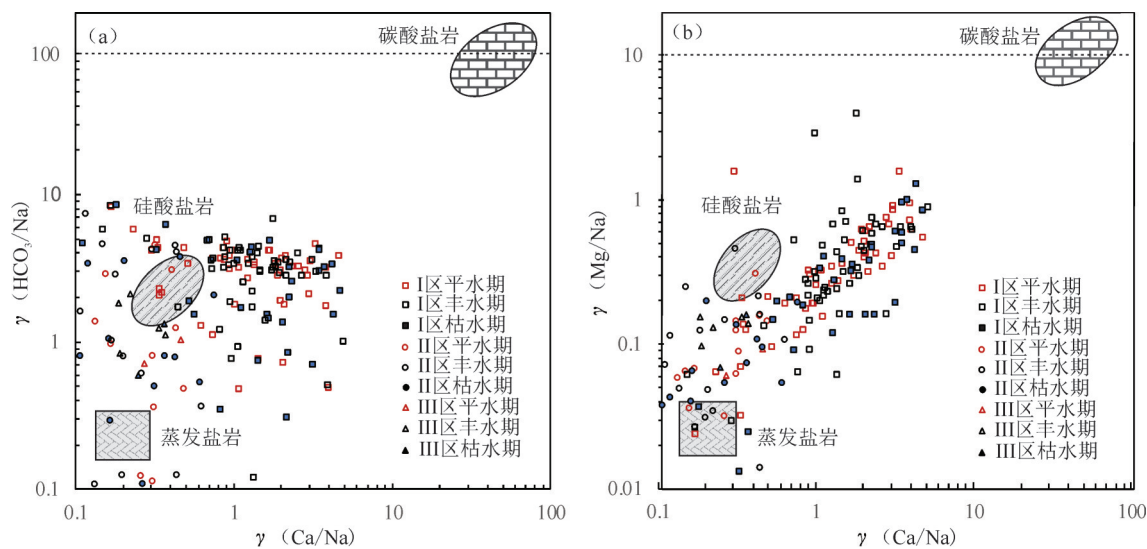


图5 研究区水化学 Ca^{2+}/Na^+ 与 HCO_3^-/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 与 Mg^{2+}/Na^+ 关系图
Fig.5 Relationship of Ca^{2+}/Na^+ and HCO_3^-/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ and Mg^{2+}/Na^+ in the study area

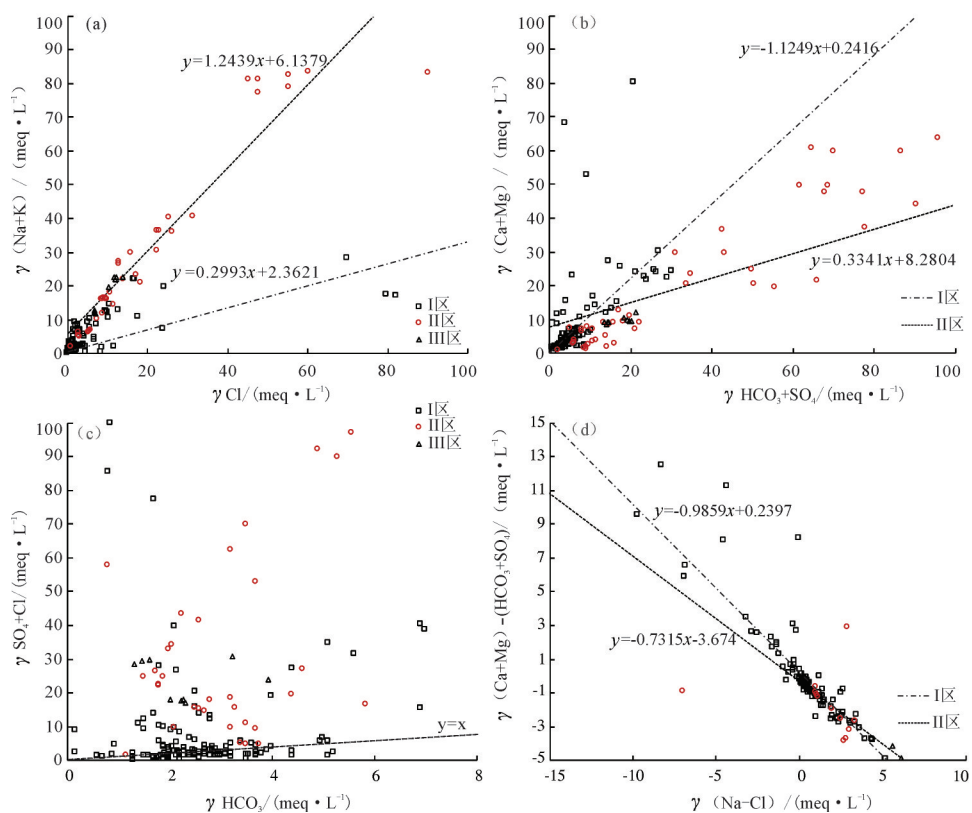


图6 地下水离子比值相关图
Fig.6 Relationships between the rates of the selected ions of groundwater

下水中Ca²⁺和Mg²⁺主要来自硅酸盐溶解,部分来源于碳酸盐溶解。图6c为水化学 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/(\text{HCO}_3^-)$ 毫克当量比值散点图,可以反映水体中溶解的碳酸盐情况(Tang et al, 2013), II、III区水样点主要分布与1:1直线上部,地下水水化学SO₄²⁻与Cl⁻离子来源主要来自蒸发盐岩(岩盐、石膏、芒硝等)的溶解, I区水样部分布与1:1直线下部,水化学SO₄²⁻与Cl⁻少部分来自碳酸盐矿物的溶解。研究区水化学Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻部分来自于碳酸盐矿物溶解,与区内出露的下泥盆统大南湖组(D_{1d})夹中基性火山熔岩和碳酸盐岩,下石炭统干墩岩组(C_{1g})含生物碎屑灰岩及碳酸盐糜棱岩(图1剖面)分布较为一致。

4.2.3 阳离子交换吸附作用

阳离子交替吸附作用是指在一定条件下,岩石或土壤颗粒将吸附地下水中某些阳离子,而将其原来吸附的部分阳离子转化为地下水中的组分(刘文杰等, 2013)。水化学 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/(\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-))$ 比值关系可以反映阳离子交换作用强度。如图6d所示, I区水体离子 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/(\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-))$ 表现出显著的负相关性,水样较为集中分布在斜率为-0.986的直线周围; II区水体离子 $\gamma(\text{Na}^+-\text{Cl}^-)/(\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-))$ 值斜率为-0.731,负相关性明显,但弱于I区。地下水径流方向沿程,随着水体碱金属(Na⁺+K⁺)含量的升高,碱土金属(Ca²⁺和Mg²⁺)含量降低(图7),表明地下水中发生了阳离子交换作用,且I区阳离子交换作用强于II区,地下排泄区附近阳离子交换吸附作用最为明显。

4.2.4 混合作用

III区七角井山间盆地靠近北侧巴里坤山区为地下水补给区,盆地中游为径流区,盆地中心为蒸发排泄区,地下水补径排受地形控制明显。盆地四周基岩裂隙水接受大气降水和冰雪融水的入渗补给,盆地中央蒸发与开采排泄强烈,从盆地四周补给区到盆地中央,地下水存在不同程度的混合作用,且与I、II区地下水水力联系小,形成了较为稳定的地下水化学场,地下水化学优势离子为Ca²⁺、SO₄²⁻、Na⁺,水化学类型主要为SO₄·Cl-Na型,地下水离子主要来自于大气降水与地下水的混合作用与蒸发盐岩风化溶解相互控制。

(5) 气候变化影响

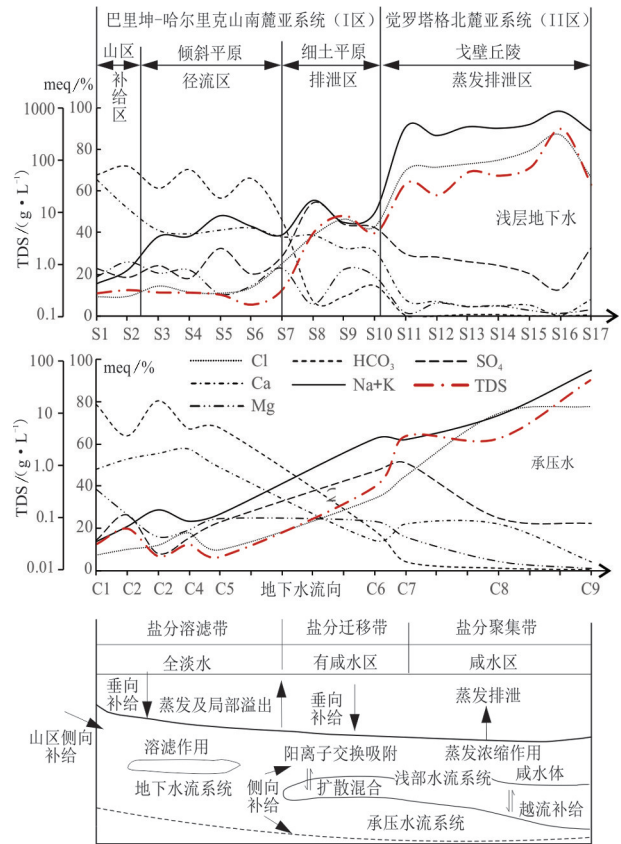


图7 哈密盆地地下水流系统水循环与水化学演化示意图 (据李文鹏, 1999; 张光辉等, 2014 修改)

Fig.7 Sketch map of the groundwater flow system and the salt accumulation process of Hami basin

研究区属温带大陆性干旱气候,年、日温差大。I区地下水接受山前融雪与地表径流补给,地下水动态季节性变化明显; II区降雨稀少,蒸发剧烈,气温变化强烈,水化学溶滤作用与蒸发浓缩作用一定程度上受气候影响。由Piper图2与图4b可知, I区丰水期、枯水期、平水期不同水体离子波动较大; II区不同季节阴离子含量较为稳定,而阳离子组分则相对波动较大,平水期与枯水期 $\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+)/(\text{Na}^++\text{K}^++\text{Ca}^{2+})$ 值总体大于丰水期,说明平水期与枯水期水化学岩石风化作用强于丰水期,平水期与枯水期戈壁荒漠干旱区昼夜温差大,丰水期地下水滞留时间短,硅酸盐类矿物风化受温度与地下水位下降影响,风化速率快。

5 水化学成因与演化讨论

5.1 水化学形成演化规律

根据地下水系统分区,选取沿地下水径流方向

表2 哈密盆地水化学成分相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of groundwater chemical composition in Hami basin

分区	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TDS
I 区	Ca ²⁺	1.000						
	Mg ²⁺	0.718*	1.000					
	Na ⁺	0.745*	0.592	1.000				
	K ⁺	0.327	0.231	0.322	1.000			
	HCO ₃ ²⁻	0.114	0.237	0.401	0.269	1.000		
	SO ₄ ²⁻	0.577	0.754*	0.798*	0.291	0.520	1.000	
	Cl ⁻	0.970**	0.660*	0.722*	0.279	-0.034	0.452	1.000
	TDS	0.953**	0.799*	0.886*	0.349	0.272	0.773*	0.910**
II 区	Ca ²⁺	1.000						
	Mg ²⁺	0.723*	1.000					
	Na ⁺	0.716*	0.769*	1.000				
	K ⁺	0.647*	0.423	0.537	1.000			
	HCO ₃ ²⁻	0.005	0.477	0.321	-0.18	1.000		
	SO ₄ ²⁻	0.830**	0.855**	0.951**	0.596*	0.349	1.000	
	Cl ⁻	0.716*	0.768*	0.998**	0.538	0.319	0.944**	1.000
	TDS	0.748*	0.789*	0.998**	0.552	0.32	0.964**	0.997**

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

的典型剖面A-A'(图1),绘制浅层地下水与承压水水化学主离子与TDS变化曲线(图7,横轴S1~S17代表典型剖面上浅层样品采样点,C1~C7代表典型剖面上对应深层样品采样点),可知沿地下水径流方向,地下水水体Na⁺、Cl⁻毫克当量百分比逐渐升高,HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺毫克当量百分比逐渐降低;阳离子Ca²⁺主导地位逐渐被Na⁺取代,优势阴离子由HCO₃⁻变为Cl⁻。水体TDS由低于1.0 g·L⁻¹,上升至100~1000 g·L⁻¹,地下水由淡水逐渐演化为微咸水、咸水。根据区域地形地貌、构造特征、水文地质条件、水化学变化特征将哈密盆地地下水系统划分为四级水流系统与3个盐分迁移特征带:即山前至盆地中心地下水补给区,地下水径流区、地下水排泄带、地下水垂向排泄带;盐分溶滤带、盐分迁移带,盐分聚集带。

地下水补给区,地下水径流区、地下水排泄区组成了巴里坤山—哈尔里克山地下水亚系统(I区),具有完整的补径排特征,为区域性地下水流系统。山前扇状倾斜平原地下水补给区与绿洲冲洪积平原地下水径流区沿程地下水主离子变化较大,TDS波动明显,地下水更新速率高,属地下水积极循环交替带。地下水存在蒸发与局部溢出及地下

水垂向补给,水文地球化学作用主要受岩石风化溶滤作用控制,蒸发浓缩作用影响,地下水离子来源主要为硅酸盐岩溶解与少部分碳酸盐岩溶解。I区地下水溢出带为细土平原,分布冲积相细颗粒含水层与古近—新近系碎屑岩类含水层,地下水埋深浅,富水性好,水文地球化学作用主要受蒸发浓缩作用与溶滤作用共同控制,且阳离子交换吸附作用强烈。I区地下水补给区,地下水径流区、地下水排泄区共同组成盐分溶滤带、盐分迁移带,沿程溶滤作用逐渐减弱,蒸发浓缩作用逐渐增强。

北部觉罗塔格北麓戈壁丘陵区及风蚀风积沙丘带(II区),受断陷盆地与阻水岩体控制,形成若干局部滞留型地下水流系统,地下水类型主要为裂隙水,富水性差,水位埋深大,地下水运动主要为垂向蒸发排泄与越流补给下部承压含水层。区内地下水垂向蒸发强烈,导致TDS不断升高,地下水变为咸水甚至卤水。水文地球化学作用主要受蒸发浓缩作用控制,岩石风化溶滤作用与气候变化影响。地下水离子主要来源为钠长石等硅酸盐岩矿物与岩盐、芒硝等蒸发岩矿物的风化溶解,水体主离子含量较稳定,地下水循环交替较缓慢,停滞时间长,

利于盐分聚集。七角井山间盆地系统地下水离子主要来自于补给径流与地下水的混合作用与蒸发盐岩风化溶解相互控制。

承压水循环属区域循环水流亚系统,水化学沿程变化特征总体上与浅层地下水一致,与浅部地下水具有一致的地球化学演化环境,地下水补给来源主要为侧向径流补给与浅层含水层越流补给。承压水离子含量与TDS变化区间较浅层地下水小,与承压水埋深较大,处于封闭环境,交替循环运动相对较缓有关。

5.2 水化学形成演化控制因素

地下水化学演化受自然因素与人类活动共同影响(苏贺,2017),自然因素主要包括地形地貌、气候水文与构造、地质背景;人类活动主要为地下水开采相关的人类经济活动。哈密盆地地下水化学空间演化主要由自然因素影响驱动,降雨分布、地形地貌、构造与岩性在区域上的空间分带分布决定了哈密盆地地下水系统的空间展布,使得各地下水系统亚区在较长时间尺度上地下水化学均处于一个相对稳定的状态。

盆地下水化学时间演化序列驱动因素主要为气候变化和人类活动,随着人类活动增强,地下水化学演化驱动因素由自然因素逐渐转化为气候变化与人类活动因素。气候变暖导致干旱地区干旱时间延长,农作物需水量增加,农业用水开采强度增大,改变了原有地下水流场,影响地下水化学演化(Mcmahon et al,2006)。哈密地区为新疆北部重要的工农业经济带,是新疆主要煤、铁矿、铜镍矿产区(陈世平,2006)。近20年来,哈密盆地内工矿活动、水利工程、农业灌溉对地下水地球化学演化有显著的影响(郑昊安等,2013),盆地内有近50%的面积地下水累计降深超过15m。I区哈密绿洲农业集中区地下水超采严重,地下水位大幅下降,形成多处地下水降落漏斗(大泉湾乡以南地区与二堡乡中部地区形成地下水埋深超过40m的降落漏斗,陶家宫乡以南地区形成了地下水埋深超过30m的漏斗),盆地北部地下水位下降剧烈;农灌区农业用水地下水开采夺取了大量北部的山前侧向补给量以及原有的地下水静储量。II区主要为工矿活动揭露破坏含水层,导致地下水出露,蒸发浓缩作用增强;工矿用水开采量增加,导致区域地下水位下降进而影响区域地下水化学演化。如雅满苏铁矿水源地,年平

均水位从1992年至2016年由4.82 m降至18.81 m;大盐池、彩霞山、东戈壁、阿齐山露天矿坑揭露地下水致地下水蒸发浓缩作用强度增大,周边地地下水TDS含量逐渐增高。综上所述,哈密盆地地下水化学空间展布演化主要由自然因素影响驱动,时间演化序列驱动因素主要为气候变化和人类活动;随着人类活动增强,地下水化学演化驱动因素由自然因素转化为气候变化与人类活动因素共同控制。

6 结 论

(1)哈密盆地地下水系统形成受构造运动与水文地质条件共同控制,水化学特征呈明显分带性,沿地下水径流方向,水体 Na^+ 、 Cl^- 含量逐渐升高, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量逐渐降低,水体TDS含量不断升高,地下水由淡水逐渐演化为微咸水、咸水;水化学类型逐渐由 HCO_3^- 型演化为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4$ 型、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型,最终演化为 Cl 型水。

(2)哈密盆地地下水系统水体主离子来源主要为硅酸盐岩与蒸发岩盐溶解,水化学主离子的水平和垂直分布特征是岩石风化溶滤和蒸发浓缩共同作用的结果,其中巴里坤—哈尔克里山南麓亚系统受溶滤作用控制,觉罗塔格北麓与七角井盆地亚系统受蒸发浓缩作用控制,受阳离子交换吸附作用、混合作用与季节变化共同影响。

(3)哈密盆地具有完整的地下水循环系统,由中天山南缘至觉罗塔格北麓地下水补给区,地下水径流区、地下水排泄区、地下水垂向排泄区不同的水化学作用决定了地下水水化学离子的形成演化。地下水经盐分溶滤、盐分迁移并在排泄区附近形成盐分聚集带;沿程溶滤作用逐渐减弱,蒸发浓缩作用逐渐增强。

(4)哈密盆地地下水化学空间演化特征主要受自然因素影响驱动,时间演化特征驱动因素主要为气候变化和工矿活动农业灌溉等人类活动。

致谢:感谢新疆维吾尔自治区地质矿产勘查局第一水文工程地质大队在样品测试中给予的支持和幫助。

Reference

Abhijit Mukherjee, Alan E Fryar. 2008. Deeper groundwater chemistry and geochemical modeling of the arsenic affected western Bengal

- basin, West Bengal, India[J]. *Applied Geochemistry*, 23(4) :863–894.
- Chen Meng, Wu Yong, Gao Dongdong, Chang Ming. 2016. Shallow groundwater hydrogeochemical evolution process and controlling factors in plain zone of Guanghan City[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46 (3): 831–843 (in Chinese with English abstract).
- Chen Mengxiong. 1994. Characteristics of inland Quaternary basins in Northwest China with reference to their hydrological significance[J]. *Engineering Geology*, 37: 61–65.
- Chen Mengxiong. 1997. The water resources related with Quaternary basin in arid area of Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 17 (2):2–9.(in Chinese with English abstract).
- Chen Shiping, 2006. Study on Mineralization Regularity and Mineral Resource Assessment in Hami, Xinjiang[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 3–8 (in Chinese).
- Chen Yanning, Li Weihong, Deng Haijun, Fang Gonghuan, Li Zhi. 2016. Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future[J]. *Scientific Report*, 6:35458.
- Chen Yuhua, Shi Huan, Hou Guangcai. 2003. Water– bearing mechanism of the structures and their significance for looking for groundwater in the East Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, (3): 246–249 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zongyu, Wang Ying, Nie Zhenlong, Chen Jiang. 2015. Groundwater Evolution in Northern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 16–21 (in Chinese).
- Dou Yan, Hou Guangcai, Qian Hui, Yin Lihe, Wang Xiaoyong. 2010. Hydro– geochemical evolution of groundwater in arid and semi– arid area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 24 (3):88–92(in Chinese with English abstract).
- Gailla Jrdet J, Dupré B, Louvat P. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 159(14) : 3–30.
- Gao Yanfang, Li Hongchun, Shen Licheng, Yang Pingheng. 2008. Geochemical characteristics and spatial distribution of spring water at Jinfo Mountain, Chongqing [J]. *Geology in China*, (2): 322–330 (in Chinese with English abstract).
- Gibbs J R. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 170 (3962) : 1088–1090.
- Guo Xiaodong, Zhao Haiqing. 2014. Hydrochemical characteristics and correlation analysis of groundwater in Hunchun basin[J]. *Geology in China*, 41(03):1010– 1017(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruji, Wang Yajun, Jiang Fengqing, Zhao Xingyou.2003. Hami: A typical Oasis Group nourished by ground water in arid land[J]. *Arid Land Geography*, 2:136–142(in Chinese with English abstract).
- Huang Tianming, Pang Zhonghe. 2012. The role of deuterium excess in determining the water salinization mechanism :A case study of the arid Tarim river Basin, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 27:2382–2388.
- Huh Y, Tsoi M Y, Zaitsev A, et al. 1998. The fluvial geochemistry of the rivers of eastern Siberia: I. Tributaries of the Lena river draining the sedimentary platform of the Siberian Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (10) : 1657–1676.
- Kortatsi B K. 2007. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana[J]. *Aquatic Geochemistry*, 13(1) : 41–74.
- Benony K. Kortatsi. 2007. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana[J]. *Aquatic Geochemistry*, 13(1) : 41–74.
- Li Chengcheng, Gao Xubo, Wang Yanxin. 2015. Hydrogeochemistry of high– fluoride groundwater at Yuncheng Basin, northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 508:155–165.
- Li Chongbo, Chu Hongkuan, Song Yu, Wang Tuo.2016. Study on the classification and characteristics of groundwater system in the Hami Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 34(1):139–143 (in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Pang Zhonghe, Klaus Froehlich, Huang Tianming, Kong Yanlong, Song Wenhui, Yun Hongxiang. 2015. Paleo–environment from isotopes and hydrochemistry of groundwater in East Junggar Basin, Northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 529(2):155–165.
- Li Wenpeng, Hao Aibing. 1999. The formation and evolution model of groundwater and its significance in inland arid basin, northwest china [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 26(04):28–32 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Wenjie, Su Yongzhong, Yang Rong, Lu Xiaodong.2009. Hydrochemical characteristics and spatial– temporal variation of mineralization for the groundwater in Minqin Oasis[J]. *Environmental Science*, 30(10):2911– 2917(in Chinese with English abstract).
- Luan Fengjiao, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, Lu Chengxin, Bai ming, Liang Hongtao. 2017. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in plain areas of Barkol– Yiwu Basin, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 36(2): 380–389 (in Chinese with English abstract).
- McMahon P B, Dennehy K F, Bruce B W, et al. 2006. Storage and transit time of chemicals in thick unsaturated zones under rangeland and irrigated cropland, High Plains, United States[J]. *Water Resources Research*, 42(3):288–295.
- Niu Beibei, Loáiciga Hugo A, Wang Zhen, Zhan F Benjamin, Song Hong. 2014. Twenty years of global groundwater research: A Science Citation Index Expanded– based bibliometric survey (1993–2012)[J]. 519(A):966–975.
- Pacheco Castro, R., Pacheco Ávila, J., Ye M, et al. 2018. Groundwater quality: Analysis of its temporal and spatial variability in a karst aquifer[J]. *Groundwater*, 56(1) :62–72.
- Patrick L B, William A A.2012. Water chemistry: Fifty years of change and progress[J]. *Environmental Science and Technology*, 46(11) : 5650–5657.
- Piper A M. 1994. A Graphic Procedure in Geochemical Interpretation of Water Analyses[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 25: 915–923
- Pu Tao, He Yuanqing, Zhu Guofeng, Zhang Wei, Cao Weihong, Chang

- Li, Wang Chunfeng. 2012. Geochemistry of surface and ground water in the Lijang Basin, Northwest Yunnan[J]. 33(1): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Su He. 2017. Research on Hydrogeochemistry Evolution and Driving Mechanism of Groundwater: A Case Study from Shenmu County, Northwest China[D]. Xi'an: Northwest University, 153–168(in Chinese).
- Sun Houyun, Zhang Yan, Yang Jun. 2016. Hydrochemistry characteristics of groundwater in Siyi Town, Langzhong City [J], Groundwater, 38(1):25–29(in Chinese with English abstract).
- Tang Qingfeng, Xu Qing, Zhang Fuchun, Huang Yuanying, Liu Jiuchen, Wang Xiaochun, Yang Yongliang, Liu Xiaoduan. 2013. Geochemistry of iodine-rich groundwater in the Taiyuan Basin of central Shanxi Province, North China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 135:117–1123.
- Teng Yanguo, Zuo rui, Wang Jinsheng, Lin Xueyu. 2010. Progress in geochemistry of regional groundwater revolution[J]. Advances in Water Science, 21(1):127–136(in Chinese with English abstract).
- Yang Pingheng, Cheng Qun, Xie Shiyong, Wang Jianli, Chang Longran, Yu Qin, Zhang Zhaojun, Chen Feng. 2017. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China[J]. Journal of Hydrology, 549:50–61.
- Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xu Fen, Tang Yeqi, Li Yuepeng. 2016. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie City, Guizhou Province[J]. Geology in China, 43(4):1446–1456(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Nie Zhenlong, Yan Mingjiang. 2014. Theory and method of regional groundwater evolution and evaluation[M]. Beijing: Science Press, 246–248 (in Chinese).
- Zhang Yan, Wu Yong, Yang Jun, Sun Houyun. 2015. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City[J]. Environmental Science. 36(9) : 3230–3237 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinyou, Qiao Mu. 1994. Elementary characteristics of regional geomorphology in the Hami Basin, Xinjiang, China. Arid Land Geography, 17(2): 39–41(in Chinese with English abstract).
- Zheng Haoan, Wu Bin, Li Shen. 2013. Groundwater change tendency in Hami Basin in the past 20 years[J]. Yellow River, 35(12): 73–76 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingqi, Yang Xiaoping, Patrick Rioual, Qin Xiaoguang, Liu Ziting, Xiong Heigang, Yu Jingjie. 2011. Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW China[J]. Applied Geochemistry, 26(8):1535–1548.
- 及其控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(3): 831–843.
- 陈梦熊. 1997. 西北干旱区水资源与第四纪盆地系统[J]. 第四纪研究, 17(2):2–9.
- 陈世平. 2006. 新疆哈密地区矿产资源成矿规律及评价研究[D]. 北京:中国地质科学院, 3–8.
- 陈玉华, 史华安, 侯光才. 2003. 新疆东天山地区构造控水机制及找水意义[J]. 干旱区地理, (3):246–249.
- 陈宗宇, 王莹, 聂振龙, 陈江. 2015. 中国北方区域地下水演变[M]. 北京:地质出版社, 16–21.
- 窦妍, 侯广才, 钱会, 尹立河, 王晓勇. 2010. 干旱-半干旱地区地下水水文地球化学演化规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 24(3):88–92.
- 高彦芳, 李红春, 沈立成, 杨平恒. 2008. 重庆金佛山泉水地球化学特征及其空间分布意义[J]. 中国地质, (2): 322–330.
- 郭晓东, 赵海卿. 2014. 珲春盆地地下水水化学特征分析[J]. 中国地质, 41(03):1010–1017.
- 胡汝骥, 王亚俊, 姜逢清, 杨发相, 赵兴有. 2003. 哈密——一个典型的地下水补给型荒漠绿洲区[J]. 干旱区地理, (2):136–142.
- 李崇博, 褚宏宽, 宋玉, 王拓. 2016. 哈密盆地地下水系统划分及特征研究[J]. 新疆地质, 34(1):139–143.
- 李文鹏, 郝爱兵. 1999. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J]. 水文地质工程地质, 26(4):28–32.
- 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 陆成新, 白铭, 梁红涛. 2017. 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, 36(02):380–389.
- 刘文杰, 苏永中, 杨荣, 吕晓东. 2009. 民勤地下水水化学特征和矿化度的时空变化[J]. 环境科学, 30(10):2911–2917.
- 蒲焱, 何元庆, 朱国锋, 张蔚, 曹伟宏, 常丽, 王春风. 2012. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 33(01): 48–54.
- 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 1993. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 7–89.
- 苏贺. 2017. 地下水化学演化及驱动机制研究——以神木县为例 [D]. 西安:西北大学, 153–168.
- 孙厚云, 张艳, 杨军. 2016. 阆中市思依镇地下水水化学特征分析[J]. 地下水, 38(1):25–29.
- 滕彦国, 左锐, 王金生, 林学钰. 2010. 区域地下水演化的地球化学研究进展[J]. 水科学进展, 21(1):127–136.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质, 43(4): 1446–1456.
- 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 严明疆. 2014. 区域地下水演化与评价理论方法[M]. 北京:科学出版社, 246–248.
- 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云. 2015. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 36(9): 3230–3237.
- 赵兴有, 乔木. 1994. 哈密盆地区域地貌的基本特征[J]. 干旱区地理, 17(2):39–45.
- 郑昊安, 吴彬, 李绅. 2013. 近 20a 来哈密盆地地下水埋深变化趋势[J]. 人民黄河, 35(12):73–76.

附中文参考文献

陈盟, 吴勇, 高东东, 常鸣. 2016. 广汉市平原区浅层地下水化学演化