

天山哈密榆树沟流域地下水化学特征及其来源

王晓艳¹, 李忠勤², 蒋缠文¹

(1 渭南师范学院 化学与环境学院/陕西省河流湿地生态与环境重点实验室, 陕西 渭南 714000;

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 根据天山哈密榆树沟流域地下水的pH值、总可溶性固体(TDS)、电导率(EC)和主要化学离子的测定,运用综合特征描述法、三角图示法、相关性分析和主要离子比值法,探讨了流域地下水的水化学特征及其形成原因。分析结果表明:地下水的pH值为中性略偏碱性;阳离子中Ca²⁺质量浓度含量最高,阴离子中HCO₃⁻浓度最高,阳离子质量浓度序列为Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺,阴离子质量浓度序列为HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻;该流域地下水主要离子类型为HCO₃⁻-Ca²⁺;TDS含量分别为104.33 mg·L⁻¹和99 mg·L⁻¹,属于弱矿化度水;地下水中离子组成主要受碳酸盐风化作用的影响。

关键词: 地下水;水化学类型;离子来源;水岩作用;榆树沟流域

中图分类号: P342 文献标识码:A 文章编号:1000-6060(2017)02-0313-09(313~321)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.02.009

地下水在循环的过程中不断与含水层及外部环境进行着物质交换,造成化学组分不断发生变化^[1-2]。因此,地下水化学特征不仅能够体现流域的水文地质和环境变化情况,而且可以反映人类活动对地下水周围环境的影响程度。地下水是干旱-半干旱区重要的水资源^[3-4],地下水环境的变化对于干旱区和半干旱区经济和生态稳定起到了举足轻重的作用。地下水化学的特征及影响因素的研究,对于该地区水资源的合理规划、利用和管理具有非常重要的作用^[5-8]。

天山哈密榆树沟流域是哈密市伊州区工农业生产、城市生活的重要水源。流域位于西北内陆干旱区,气候极为干燥,降水稀少,水资源短缺。地下水是榆树沟流域山区重要的水源形式。已有研究表明,地下水与河水具有密切的水力关系,地下水可直接补给河水;地下水在夏季接受冰雪融水和降水补给的同时经历了较强烈的蒸发作用^[9]。因此,该流域的地下水化学特征有其特殊性,该化学特性对于河流以及流域水资源的利用都具有重要的影响。而目前关于流域地下水化学特征的研究还是空白。本文通过榆树沟流域地下水化学特征的研

究,揭示地下水环境的相互作用机制,探讨流域地下水演变的规律,以期为研究区水化学研究、水资源综合利用提供基础资料和数据积累。

1 研究区概况

哈密榆树沟流域(93°57'~94°19'E、43°02'~43°11'N)之间位于天山山脉东部喀尔里克山南坡,向南流入辽阔的哈密盆地^[10]。流域出山口以上15 km出设有流域唯一水文监测站—榆树沟水文站(海拔1 670 m,93°57'E,43°05'N)^[11]。监测站以上河长34 km,集水面积308 km²,平均高度3 091 m,流域平均坡度38.2‰。榆树沟流域地质构造主要由石灰岩和华力西期花岗岩组成^[12]。河流两岸多为丘陵地形,第四系地层多分布于河流及河床形成的阶地,阶地级数有五级。最高一级比河面高70 m以上。土壤主要为高山和亚高山草甸土、石灰岩风化土和山地栗钙土^[13]。流域高山区有永久性积雪和冰川,中高山区有季节性积雪,冰川总面积约22.85 km²,冰储量1.58 km³,每年4~5月份有积雪融水(春洪),7~8月份有暴雨与高山冰川消融水混合而成的洪

收稿日期:2016-05-16; 修订日期:2016-07-12

基金项目:国家重大科学研究计划项目(超级973项目)(2013CBA01801);渭南师范学院科研计划项目(16ZRRC03,16ZRRC02)

作者简介:王晓艳(1984-),女,山东临沂人,博士,讲师,主要从事同位素水化学研究。Email:wangxiaoyan_84@163.com

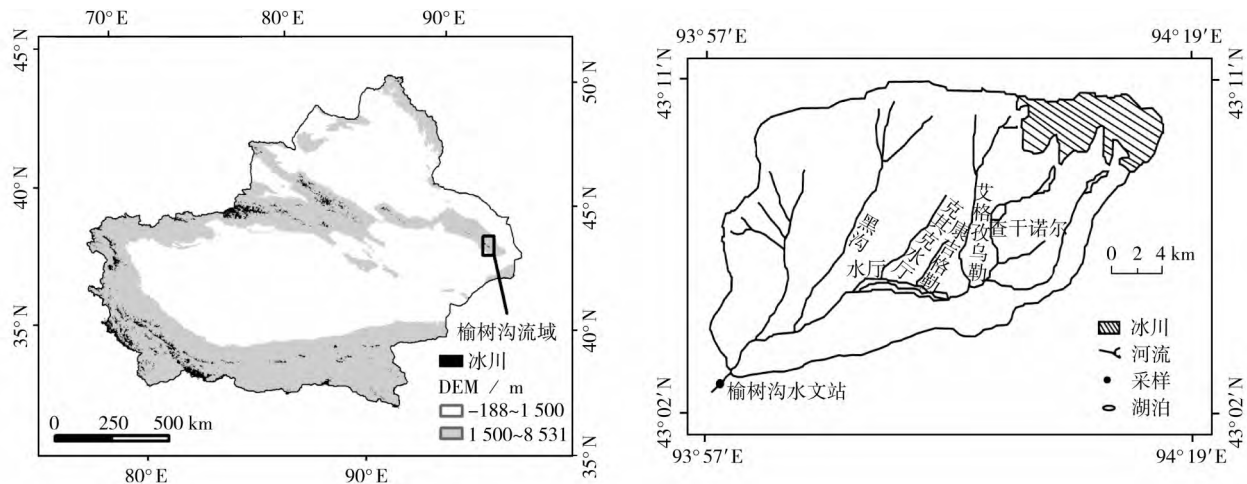


图1 榆树沟流域山区位置及流域水系图

Fig.1 Location of Yushugou River basin and Hydrographical chart

水(夏季洪水)。榆树沟水文站多年平均径流量是 $5.188 \times 10^4 \text{ m}^3$ (1985年)^[11], 多年平均年径流深为 142 mm, 该流域径流量年内变化大。榆树沟水文站历年极端最高气温 34.2°C , 极端最低气温 -25.8°C , 年平均气温 5.9°C ^[11]。

2 样品采集与测试

2013年4月26日~5月2日(春洪期)和8月(夏洪期), 于榆树沟水文站附近采集地下水, 共采集样品 13 个。所有样品水化学指标的测定工作均在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室内进行。

(1) pH值: 使用 PHJS-4A (0.001) 测试水样的 pH;

(2) 电导率 (EC) 和 TDS: 用 DDS-308A (0.001) 电导率仪分析样品的电导率 EC 和 TDS;

(3) 阴阳离子的测试: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等阳离子浓度使用 DX320 型离子色谱仪进行测试, Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 三种阴离子浓度使用 ICS 1500 型离子色谱仪分析, 精度可以达到 ng/g 量级, 测试数据与标准样的误差控制在 5% 以内。地下水中 HCO_3^- 浓度通过阴阳电离平衡法得到^[14-15]。

3 结果分析

3.1 水化学特征及其指示意义

如表 1 和 2 所示, 榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水的 pH 值、盐度、TDS 和电导率均大于同时期

的相应地表径流值^[16-17]。这说明地下水在流动过程中发生了更强烈的水岩作用。春洪期地下水的 pH 值得变化范围较小, 介于 $8.03 \sim 8.18$ 之间, 平均值为 8.10; 夏洪期地下水的 pH 值得变化范围略大 ($7.43 \sim 8.06$), 平均值为 7.82, 均为中性略偏碱性。春洪期和夏洪期 EC 分别介于 $178.3 \sim 259 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $187.7 \sim 237 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间, 春洪期逐日变化较夏洪期大。春洪期 TDS 值也大于夏洪期。阳离子质量浓度序列为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; 阴离子中 Ca^{2+} 质量浓度含量最高, 平均分别为 $33.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $31.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别其占阳离子总数的 73.6% 和 67.07%; 其次为 Na^+ 和 Mg^{2+} , 同属一个量级, K^+ 质量浓度最低。阴离子质量浓度序列为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$; 其中 HCO_3^- 浓度最高, 分别是 $110.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $126.06 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 远远超过其它离子, 分别占其阴离子总数的 80.55% 和 88.12%; 其次分别为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 。依据前苏联学者舒卡列夫水化学类型划分方法^[18]可知, 榆树沟流域地下水的主要离子类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型。

春洪期和夏洪期地下水中阳离子平均浓度总和 ($\text{TZ}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$) 分别为 $45.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $47.64 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 阴离子平均浓度总和 ($\text{TZ}^- = \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$) 分别为 $136.61 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $143.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, TDS 含量分别 $104.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 说明该流域地下水的淡水矿化度较低 ($< 1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 属于弱矿化度水, 按地下水质量标准分类标准, 归为 I 类水, 是优良的饮用水源。由于地下水中溶质组分的演化与地下水流路径、水-岩相互作用都有着密切的关系^[19-20], 后两者均与地下

水滞留时间有很大关系,所以地下水的低矿化度特征被认为是地下水仅参与地下浅部循环、滞留时间较短的有力证据。水样中 NO_3^- 的浓度最高值也仅为 $4.38 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,表明地下水补给区的水质受到农业生产等人类活动的影响很小,其水化学特征基本反映了该区的水文地质条件^[23]。这也与采样点的位置位于山区有很大关系。

3.2 离子组成来源及演化

目前,关于影响地下水的水文地球化学特征因素的研究手段已有很多,其中最行之有效的、应用最广泛的是水中各离子含量比值法^[21]。

三角图示法可以较直观地解释离子交换等地下水演化现象^[22]。运用三角图示法对春洪期和夏洪期地下水样品进行解析(图2),结果显示阳离子分布在左下角 Ca^{2+} 的高值端,表明 Ca^{2+} 在阳离子组成中站绝对优势;阴离子三角图显示地下水水样组成元素位于 HCO_3^- 轴的高端值,而且位于 (NO_3^-) 的低端值分布,说明地下水中 NO_3^- 的含量微乎其微。同时期地下水中的主要离子含量明显高于河水中的主要离子含量,但是两者的主要离子类型相似表明,在春洪期和夏洪期河水和地下水之间都存在快速的转换和频繁的交互作用,即地下水常以泉水的形式补给地表水,同时地下水也受到了河水径流的快速补给。地下水与岩石发生水岩作用时,矿物溶

解过程中需要有大量的 CO_2 、 H^+ 持续补给,因此该过程主要发生在开放的含水层系统^[24]。一般而言,地下水中的离子,如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 等均来自于矿物溶解。位于河流补给区的潜水含水层,河水和地下水的水力联系紧密,河水中的大量 CO_2 、 HCO_3^- 持续补给地下水,对矿物的溶解起到了协调促进的作用。

通过地下水中各离子间的相关性分析,根据水化学参数的相似和相异性,可以揭示其离子的来源的一致性和差异性^[25]。如表3所示,春洪期地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 与对应的TDS值得相关性非常高(相关系数 >0.90),表明该时期地下水的矿化度高低主要受这6种离子的控制。地下水的EC和TDS之间存在着高度的正相关关系,表明地下水EC的大小与TDS的高低之间存在密切的关系。且pH值与各离子和TDS均呈现出负相关,说明离子在溶入水中的同时水中 H^+ 增多,这可能是由于其它离子来源于偏酸性物质。各离子间都有很好相关性,表明其来源具有一致性。夏洪期,pH值与 Mg^{2+} 、 K^+ 和TDS均呈现出负相关(表4),且 Mg^{2+} 、 K^+ 与其他离子的相关性都较差,而其他离子的相关性都较好,说明 Mg^{2+} 、 K^+ 有其独特的来源,并且镁盐和钾盐的溶解浓度对该时期地下水pH值有一定的影响。榆树沟水中 Na^+ 含量相对较低,说明硅酸盐

表1 春洪期地下水pH、EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)、TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及无机离子($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)日均值

Tab.1 Daily value of pH, EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and inorganic ions ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) in spring flood period

时间(年-月-日)	pH	EC	TDS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl ⁻	HCO_3^-
2013-4-26	8.03	259	124.7	36.26	5.44	9.36	0.83	22.57	4.38	9.98	114.22
2013-4-27	8.12	258	124.5	38.34	5.36	9.58	0.79	22.17	4.35	9.59	121.9
2013-4-28	8.11	208	100	32.68	4.06	6.95	0.54	17.04	2.66	6.65	127.7
2013-4-29	8.12	189.2	91	31.38	3.19	5.31	0.51	12.9	1.5	4.96	100.42
2013-4-30	8.18	178.3	85.8	28.53	3.51	5.54	0.47	13.86	1	5.27	92.63
2013-5-01	8.03	236	113	36.29	4.26	7.98	0.61	18.27	2.02	7.27	116.81
2013-5-02	8.16	189.9	91.3	29.92	3.12	5.8	0.51	13.11	1.42	5.02	96.61

表2 夏洪期地下水pH、EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)、TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)及无机离子($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)日均值

Tab.2 Daily value of pH, EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), TDS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and inorganic ions ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) in summer flood period

时间(年-月-日)	pH	EC	TDS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl ⁻	HCO_3^-
2013-8-1	8.06	197	94.9	34.49	4.65	11.12	0.84	14.26	0.58	3.94	134.22
2013-8-3	7.82	203	97.4	33.91	4.59	10.91	0.87	13.26	0.77	3.81	132.87
2013-8-5(A)	7.99	187.7	90.1	32.86	4.42	10.3	0.9	12.67	0.5	3.83	128.2
2013-8-5(B)	7.93	195	93.6	31.83	4.31	9.87	0.84	12.52	0.43	3.64	123.88
2013-8-24	7.43	237	114	31.2	4.68	9.92	0.88	12.53	0.37	3.35	124.58
2013-8-27	7.69	217	104	27.57	4.52	9.52	0.85	12.11	0.2	3.18	112.59

岩风化对河水中阳离子的贡献率很低,表明榆树沟水体中离子的主要来源不是硅酸盐岩的风化。流域岩性为华力西期花岗岩、石灰岩,因此, Mg^{2+} 含量相对较低。由于该流域处于高寒地带,受农业和工业污染干扰极少,因此,水体阴离子中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 含量都较少,且两者的相关性很高,说明两者的共

源性,而 SO_4^{2-} 的含量比 NO_3^- 高,可能是由于大气沉降的原因。春洪期 Cl^- 与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 具有显著的相关性,说明 Cl^- 主要来自于 $NaCl$ 和 $MgCl_2$ 等盐岩的风化;而夏洪期 Cl^- 与 Na^+ 、 K^+ 具有显著的相关性很高(表4),与 Mg^{2+} 的相关性很差,这可能是由于受到大气降水的影响所致。

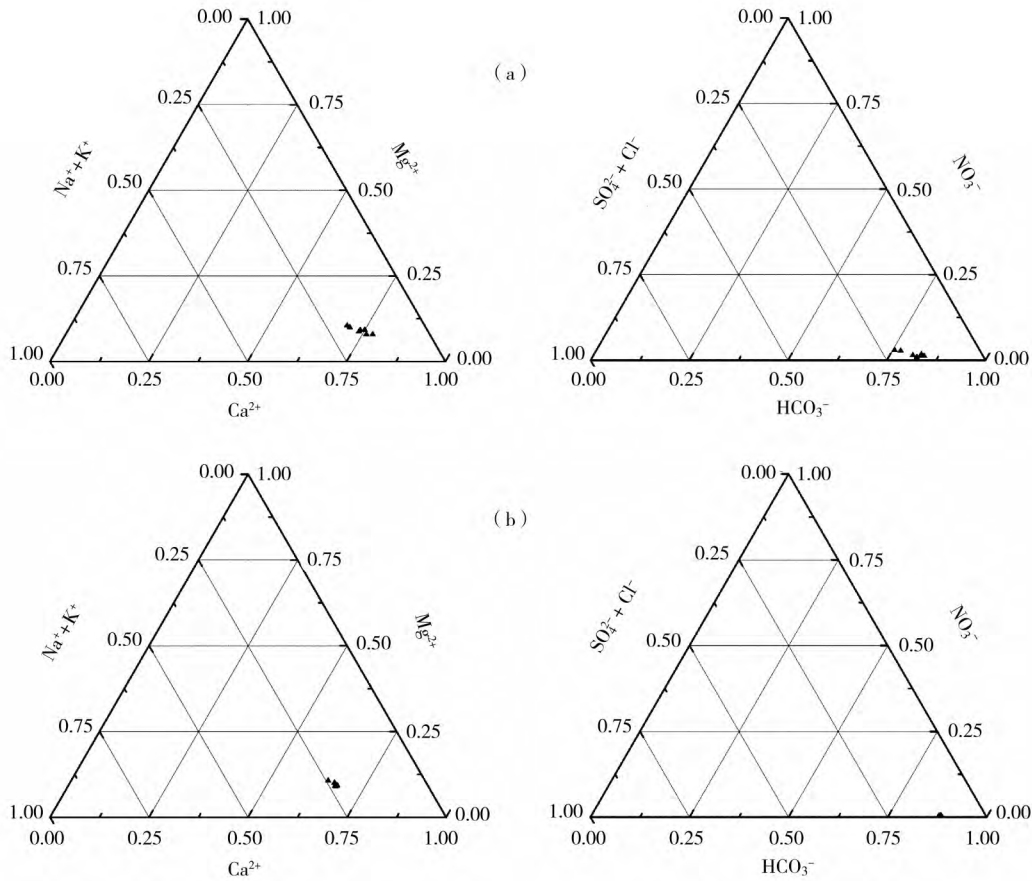


图2 地下水中主要的阴阳离子组成三角图(a.春洪期;b.夏洪期)

Fig.2 Piper trilinear nomograph for the cations and anions in groundwater(a. spring flood period;b. summer flood period)

表3 春洪期地下水中各离子之间的相关系数

Tab.3 Spearman correlation of ion in groundwater in spring flood period

	pH	EC	TDS	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
pH	1										
EC	-0.74	1									
TDS	-0.74	0.99	1								
Cl ⁻	-0.64	0.97	0.97	1							
NO ₃ ⁻	-0.54	0.92	0.92	0.96	1						
SO ₄ ²⁻	-0.66	0.97	0.97	0.99	0.95	1					
HCO ₃ ⁻	-0.58	0.71	0.70	0.67	0.70	0.72	1				
Na ⁺	-0.66	0.99	0.99	0.98	0.93	0.99	0.72	1			
K ⁺	-0.63	0.96	0.96	0.98	0.96	0.95	0.56	0.95	1		
Mg ²⁺	-0.61	0.95	0.96	0.99	0.95	0.99	0.68	0.98	0.96	1	
Ca ²⁺	-0.74	0.97	0.96	0.90	0.85	0.91	0.77	0.94	0.88	0.88	1

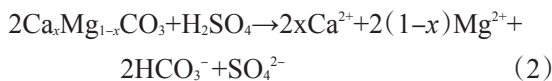
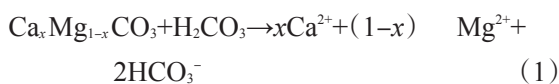
表4 夏洪期地下水中各离子之间的相关系数

Tab.4 Spearman correlation of ion in groundwater in spring flood period

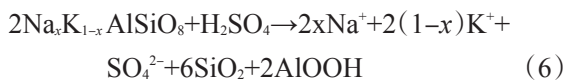
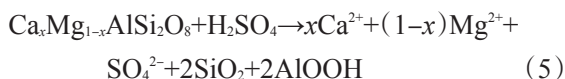
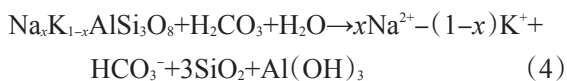
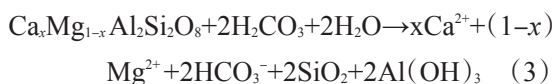
	pH	EC	TDS	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
pH	1										
EC	-0.96	1									
TDS	-0.95	0.99	1								
Cl ⁻	0.80	-0.77	-0.76	1							
NO ₃ ⁻	0.45	-0.46	-0.46	0.84	1						
SO ₄ ²⁻	0.56	-0.37	-0.35	0.78	0.70	1					
HCO ₃ ⁻	0.49	-0.43	-0.42	0.91	0.91	0.84	1				
Na ⁺	0.55	-0.44	-0.42	0.87	0.89	0.94	0.93	1			
K ⁺	-0.24	0.07	0.06	0.07	0.15	-0.26	0.15	-0.01	1		
Mg ²⁺	-0.43	0.60	0.61	-0.06	0.18	0.45	0.28	0.40	0.08	1	
Ca ²⁺	0.56	-0.52	-0.50	0.94	0.90	0.81	0.99	0.90	0.12	0.16	1

榆树沟流域广泛分布有石灰岩和花岗岩等,根据流域的地质条件,具体的化学风化侵蚀方程如下:

1. 碳酸盐岩风化($0 \leq x \leq 1$):



2. 硅酸盐岩风化($0 \leq x \leq 1$):



Na⁺/Cl⁻可以用来指示地下水中Na⁺的富集程度。通常情况下,Na⁺/Cl⁻比例系数是恒定的,标准海水的Na⁺/Cl⁻比例系数的平均值为0.85。盆地地下水Na⁺/Cl⁻比例系数>0.85,是在随后的演化过程中形成的。从图3a可以看出,榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水中Na⁺的含量比Cl⁻高,Na⁺/Cl⁻摩尔浓度比的平均值分别为1.62和4.38,两者的比值均大于1(Y/X>1),表明该流域春洪期和夏洪期地下水都发生了强烈的水岩相互作用。而且地下水中Na⁺和Cl⁻浓度表现出显著的相关关系($R^2=0.97, 0.75$),这

可能是由于地下水补给来源单一和强烈的蒸发作用所导致的。同时地下水中Na⁺/Cl⁻的不成比例增加表明,矿物溶解不只有NaCl的溶解,少量的硅酸盐岩的风化以及钠长石和MgCl₂等矿化物的溶解影响了地下水中的Na⁺/Cl⁻平衡关系。

一般来说,地下水中Na⁺来源于斜长石等含钠矿物或硅酸盐岩的风化溶解,Cl⁻主要来源于可溶性岩盐颗粒等的溶解,Cl⁻与(Na⁺+K⁺)的比值为1。榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水中(Na⁺+K⁺)浓度较Cl⁻浓度高,两者的摩尔浓度比((Na⁺+K⁺)/Cl⁻)均>1(图3b)。干旱区很少发生降水,大气降水对盐岩类NaCl矿物离子的影响较小,比值>1表明该流域山区地下水在通过含水层补给河流的过程中发生了多次水岩溶滤作用。并且河水中含有的HCO₃⁻和CO₂为促进钠钾盐的分解提供了良好的物质基础,使得地下水的Na⁺+K⁺浓度偏高。此外,地下水的一个重要指标就是K⁺/Na⁺的比值较低,平均值为0.19,这也说明该流域钠长石对离子的贡献大于钾长石。

HCO₃⁻能够反映CaCO₃和MgCa(CO₃)₂的溶解程度(反应式1)。Na⁺的含量受岩盐溶解控制,Ca²⁺、Mg²⁺来源于CaCO₃、MgCa(CO₃)₂及CaSO₄·2H₂O,这一过程可用(Ca²⁺+Mg²⁺)-(HCO₃⁻+SO₄²⁻)与(Na⁺+K⁺-Cl⁻)的比值表示^[26]。如果发生了显著的离子交换,两参数应为线性相关关系。如图4所示,在春洪期,两者的相关关系不显著, $R^2=0.22$,表明榆树沟流域春洪期地下水的阳离子交换不显著;而在夏洪期,两者的相关关系非常显著, $R^2=0.99$,表明榆树沟流域夏洪期地下水的阳离子交换频繁。

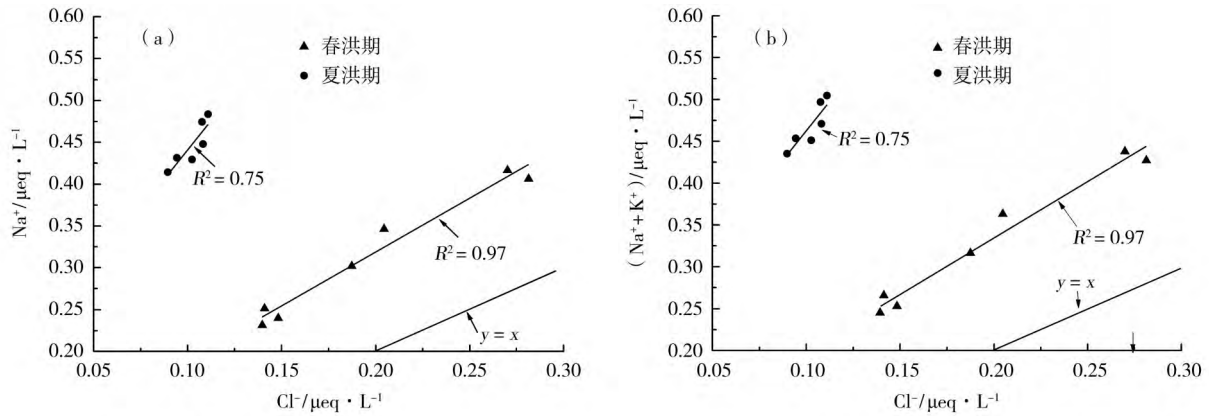


图3 春洪期和夏洪期地下水中Na/Cl、(Na⁺+K⁺)/Cl⁻的对比关系

Fig.3 Relationship of Na/Cl, (Na⁺+K⁺)/Cl⁻ for groundwater in spring and summer flood period

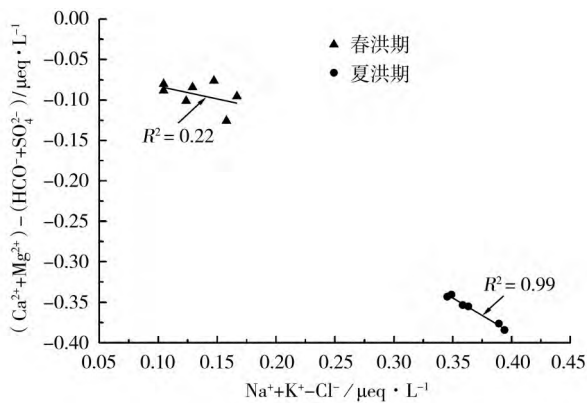


图4 春洪期和夏洪期地下水中(Ca²⁺+Mg²⁺)-(HCO₃⁻+SO₄²⁻)与(Na⁺+K⁺-Cl⁻)的对比关系

Fig.4 Relationship between (Ca²⁺+Mg²⁺)-(HCO₃⁻+SO₄²⁻) and (Na⁺+K⁺-Cl⁻) for groundwater in spring and summer flood period

由Ca²⁺+Mg²⁺与HCO₃⁻+SO₄²⁻的关系图(图5a),可以看出所有的Ca²⁺+Mg²⁺值均分布于y=x的下方,且(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻+SO₄²⁻)的值为1左右,表明流域碳酸盐岩的风化过程有H₂SO₄的参与,碳酸盐矿物的溶解和硫酸盐矿物的溶解是该流域地下水水化学形成的主要作用;夏洪期样品的比值为0.84,说明Ca²⁺和Mg²⁺并不足以平衡HCO₃⁻和SO₄²⁻,还需要少量的Na⁺、K⁺等来维持平衡(反应式4和6),但由表2可知,地下水中含有较少的Na⁺、K⁺,显示了该流域地下水水化学组成还受少量的硅酸盐岩风化的影响。H₂CO₃风化碳酸盐岩,(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻)的当量比值为1(反应式1);H₂SO₄风化碳酸盐岩(HCO₃⁻)/(SO₄²⁻)的当量比值为2,(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻)的当量比值为2(反应式2)。由图5b可知,春洪期地下

水的(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻)的当量比值为1.12,稍大于1,仅凭HCO₃⁻并不足以平衡Ca²⁺、Mg²⁺,需要SO₄²⁻等加以平衡。说明该流域春洪期地下水的化学风化作用主要是H₂CO₃风化碳酸盐岩,伴有少量的H₂SO₄风化碳酸盐岩。夏洪期地下水的(Ca²⁺+Mg²⁺)/(HCO₃⁻)的当量比值为0.96,稍小于1,表明该时期流域主要以碳酸盐风化为,并伴有极少量的硅酸盐岩溶解(反应式3和4)。

另外,(Ca²⁺+Mg²⁺)、(Na⁺+K⁺)与阳离子总量关系图显示(图6),春洪期和夏洪期地下水的(Na⁺+K⁺)与阳离子总量的比值较低,平均值分别仅为0.14和0.19,而(Ca²⁺+Mg²⁺)与阳离子的当量浓度比的平均值很高,分别为0.86和0.81,这反映了研究区地下水中主要阳离子的主要来源是碳酸盐的风化作用,受硅酸盐岩的风化作用影响很小。

图7为研究区地下水Mg²⁺/Ca²⁺、Na⁺/Ca²⁺的比值散点图。从图中可以看出,榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水的Mg²⁺/Ca²⁺、Na⁺/Ca²⁺的比值均<1,其均值均为0.2左右,说明该流域地下水的水岩作用以方解石矿物溶解作用为主。这与前文中地下水化学类型的分析结果相一致,即Ca²⁺-HCO₃⁻水化学类型与当地的岩性有关。

5 结论

(1)榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水的pH值均为弱碱性。阳离子质量浓度序列为Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺,阴离子质量浓度序列为HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻;该流域地下水主要离子类型为HCO₃⁻-

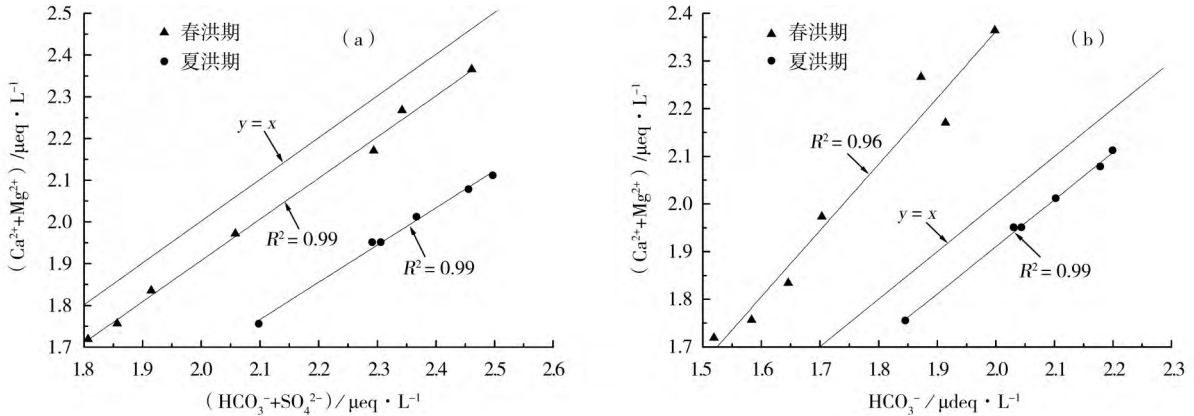


图5 春洪期和夏洪期地下水中 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ 和 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-)$ 的对比关系
Fig.5 Relationship of $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ and $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-)$ for groundwater in spring and summer flood period

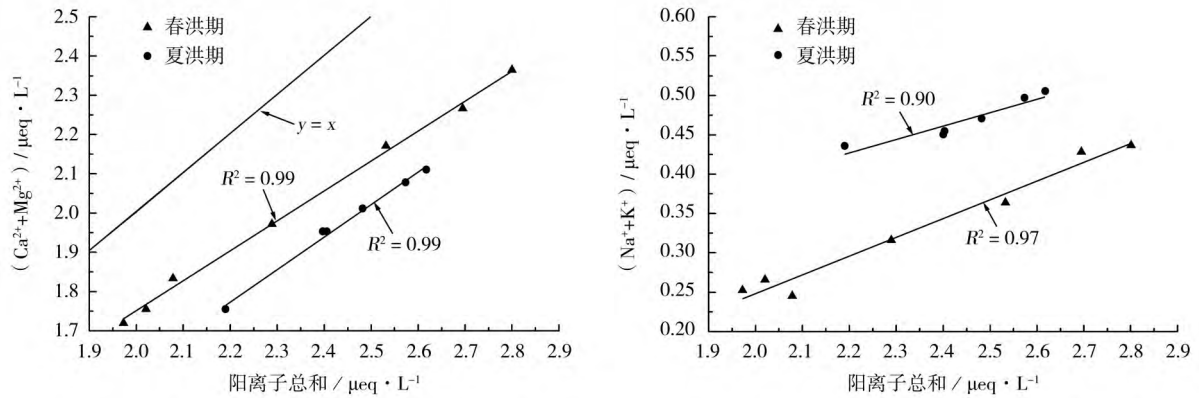


图6 春洪期和夏洪期地下水中 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ 、 (Na^++K^+) 与阳离子总量关系
Fig.6 Relationship of $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$, (Na^++K^+) and cation for groundwater in spring and summer flood period

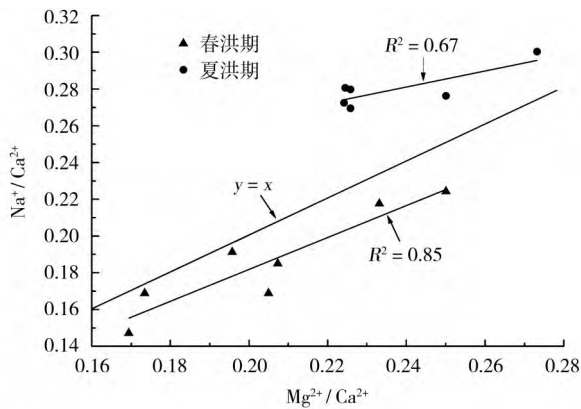


图7 春洪期和夏洪期地下水中 Mg^{2+}/Ca^{2+} 和 Na^+/Ca^{2+} 关系
Fig.7 Relationship between Mg^{2+}/Ca^{2+} and Na^+/Ca^{2+} for groundwater in spring and summer flood period

Ca^{2+} 。TDS含量分别 $104.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属于弱矿化度水。

(2)榆树沟流域春洪期和夏洪期地下水中离子组成主要受碳酸盐风化作用的影响。春洪期地

下水的矿化度高低主要受这六种离子的控制。夏洪期镁盐和钾盐的溶解浓度对该时期地下水pH值有一定的影响。该流域受农业和工业污染干扰极少。

(3)春洪期地下水的阳离子交换不显著,而夏洪期地下水的阳离子交换频繁。流域春洪期地下水的离子主要源于 H_2CO_3 风化碳酸盐岩,受 H_2SO_4 风化碳酸盐岩的影响较小;夏洪期地下水的离子来源主要是碳酸盐风化,并伴有极少量的硅酸盐岩溶解。

参考文献(References)

[1] 陈亚宁,李卫红,陈亚鹏,等.新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J].生态学报,2007,27(2):539-544.[CHEN Yaning, LI Weihong, CHEN Yapeng, et al. Water conveyance in dried-up riverway and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 539-544.]

- [2] 刘春葵, 刘志雨, 谢正辉. 地下水对气候变化的敏感性研究进展[J]. 水文, 2007, 27(2): 1-6. [LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, XIE Zhenghui. Recent advances in research on sensitivity of groundwater to climate changes [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(2): 1-6.]
- [3] 朱海勇, 陈永金, 刘加珍, 等. 塔里木河中下游地下水化学及其演变特征分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 8-18. [ZHU Haiyong, CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, et al. Variation and evolution of groundwater chemistry in the middle and lower reaches of the Tarim River [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 8-18.]
- [4] 赵玮, 马金珠, 何建华. 党河流域敦煌盆地地下水补给与演化研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1133-1141. [ZHAO Wei, MA Jinzhu, HE Jianhu. Groundwater recharge and geochemical evolution in the Dunhuang Basin of Danghe River, northwest China [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1133-1141.]
- [5] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of ground-water conditions to soil and water salinization [J]. J. Hydrol., 1999, 7: 46-64.
- [6] KARRO E, MARANDI A, VAIKMAE, R. The origin of increased salinity in the Cambrian-Vendian aquifer system on the Kopl Peninsula, Northern Estonia [J]. Hydrogeol. J., 2004, 12: 424-435.
- [7] SUBYANI A M. Hydrochemical identification and salinity problem of ground-water in Wadi Yalamlam basin, Western Saudi Arabia [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 60: 53-66.
- [8] 丁贞玉, 马金珠, 何建华. 腾格里沙漠西南缘地下水水化学形成特征及演化[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 948-957. [DING Zhenyu, MA Jinzhu, HE Jianhua. Geochemical evolution of groundwater in the southwest of Tengger Desert, NW of China [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 948-957.]
- [9] WANG Xiaoyan, LI Zhongqin, Edwards Ross, et al. 2015a. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the spring flood period in Yushugou River Basin, Eastern Tianshan Mountains, China [J]. Journal of Earth System Science, 124(1): 115-124.
- [10] 骆光晓, 艾力, 祁先明, 等. 榆树沟流域水文特征[J]. 新疆气象, 2002, 25(5): 19-20, 37. [LUO Guangxiao, AI Li, QI Xianming, et al. Hydrological characteristics of the Yushugou Valley [J]. Xinjiang Meteorological, 2002, 25(5): 19-20, 37.]
- [11] 张洪艳, 刘虹. 新疆榆树沟流域水文水资源分析[J]. 黑龙江水利科技, 2011, 39(5): 8-9. [ZHANG Hongyan, LIU Hong. Analysis of hydrology and water resources in Yushugou River basin, in Xinjiang [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2011, 39(5): 8-9.]
- [12] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录(III)-天山山区(东部散流内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 69-70. [Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China (III)-Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Scattered Flow in East) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 69-70.]
- [13] 新疆哈密市地方志编纂委员会编. 哈密县志 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1990. [Xinjiang, Hami City Local Chronicles Compilation Committee. Hami County annals [M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 1990.]
- [14] MITAMURA O, SEIKE Y, KONDO K, et al. First investigation of ultra-oligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre-Himalaya, China [J]. Limnology, 2003, 4: 167-175.
- [15] MURAKAMI T, TERA I H, YOSHIYAMA Y, et al. The second investigation of Lake Puma Yum Co located in the Southern Tibetan Plateau, China [J]. Limnology, 2007, 8: 331-335.
- [16] 王晓艳. 天山哈密榆树沟流域水体水化学和同位素特征研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [WANG Xiaoyan. A Study of Hydrochemical and Stable Isotope Characteristics in Yushugou River basin, Eastern Tianshans, China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]
- [17] 王晓艳, 李忠勤, 周平, 等. 天山哈密榆树沟流域春洪期水化学特征及其控制因素研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 922-930. [WANG Xiaoyan, LI Zhongqin, ZHOU Ping. River water chemical characteristics and controls during the spring flood period in Yushugou Bbasin, Hami, Eastern Tianshan Mountains, China [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 922-930.]
- [18] SU Y, ZHU T G, FENG Q, et al. Environmental isotopic and hydrochemical study of groundwater in the Ejina Basin, northwest China [J]. Environmental Geology, 2009, 58, 601-614.
- [19] EDMUNDS W M. Geochemistry's vital contribution to solving water resource problems [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24: 1058-1073.
- [20] 杨丽芝, 张光辉, 胡乃松, 等. 利用环境同位素信息识别鲁北平原地下水的补给特征[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 515-521. [YANG Lizhi, ZHANG Guanghui, HU Naisong, et al. Recognition of ground water supplying features for northern Shandong plain, China using environmental isotope information [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 515-522.]
- [21] KARRO E, MARANDI A, VAIKMAE. The origin of increased salinity in the Cambrian-Vendian aquifer system on the Kopl Peninsula, Northern Estonia [J]. Hydrogeol J, 2004, 12: 424-435.
- [22] DEUTSCH W J. Groundwater geochemistry fundamentals and applications to contamination [M]. Boca Raton: Lewis Publisher, 1997: 3-73.
- [23] WILLIAM I. Segars. Nitrates in groundwater: some facts on occurrence [J]. Poultry Digest, 1995, 24-25.
- [24] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization [J]. J. Hydrol., 1999, 7: 46-64.
- [25] 章光新, 邓伟, 何岩, 等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 20-28. [ZHANG Guangxin, DENG Wei, HE Yan, et al. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 20-28.]
- [26] GARCIAL M G, DEL H M, BLESA M A. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina [J]. Journal of Hydrology, 2001, 9: 597-610.

Chemical characteristic and sources of the groundwater in Yushugou River basin, Hami, Tianshan Mountains

WANG Xiao-yan¹, LI Zhong-qin², JIANG Chanwen¹

(1 College of Chemistry and Environment, Weinan Normal University / Key Laboratory for Ecology and Environment of River Wetlands in Shaanxi Province, Weinan 714000, Shaanxi, China; 2 State Key Laboratory of Cryosphere Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The groundwater chemical characteristics for river basin have important influence on river and river basin water resources utilization. Through the research of groundwater chemical characteristics in Yushugou River basin, Hami, Tianshan Mountains, Xinjiang, China, this paper aims to: (1) reveal the interaction mechanism of the groundwater environment; (2) discuss the evolution rule of groundwater in river basin; (3) provide basic data and data accumulation for the water chemistry research, water resources comprehensive utilization and protection of the ecological environment in the study area. According to the measurement of pH, *TDS*, *EC* and major ion composition of groundwater in Yushugou River basin, by combining comprehensive character description method, triangular diagrams of anions and cations, correlation analysis and main ion ratio method, this paper discussed the chemical characteristics and the reasons of groundwater. The results show that the groundwater is weak alkaline. The most main anion and cation are HCO_3^- and Ca^{2+} , respectively. The concentration orders of cations and anions are $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, respectively. The hydrochemical type of groundwater is $\text{H}_2\text{CO}_3\text{-Ca}^{2+}$. The average value of *TDS* is $104.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in spring flood period and $99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in summer flood period, belonging to the weak water salinity. The ions composition in groundwater is mainly influenced by carbonate weathering. The correlations between *TDS* and Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ in groundwater during spring flood period are very high, which shows that the salinity level in groundwater is mainly controlled by the six kinds of ions during the period. During summer flood period, the relationships between pH and Mg^{2+} , K^+ and *TDS* both present negative correlation. This indicates that dissolved concentration of magnesium salt and potassium salt in this period influence the groundwater pH value in some degree. We can judge the basin rarely influenced by agricultural and industrial pollution by the high correlation and less content of anion SO_4^{2-} and NO_3^- in groundwater. The cation exchange of groundwater during spring flood period is not significant while during summer flood period the cation exchange is very frequent. In the spring flood period, the ions mainly come from H_2CO_3 weathering carbonate rocks, with less affected by H_2SO_4 weathering carbonate rocks. In summer flood period, the weathering process is accompanied by a tiny amount of dissolved silicate rock.

Key Words: groundwater; hydrochemical type; ion source; water-rock interaction; Yushugou River basin