

# 石羊河流域地下水化学环境演化特征研究<sup>①</sup>

史基安 赵兴东 王琪 师育新 李春圆

(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

**摘要** 作者在系统研究石羊河流域地下水化学类型和演化特征的基础上,应用地球化学计算机模拟方法,模拟了研究区地下水中各元素存在的形式、方解石、白云石等矿物的饱和指数,进而判断了水岩作用的方向和程度,揭示了石羊河流域地下水化学环境演化机制。

**关键词** 地下水化学环境 地球化学模拟 水岩作用

**第一作者简介** 史基安 男 40岁 研究员 沉积学

我国西北地区降雨稀少,年内分配不均,干旱时段明显,沙漠广布,土地干旱、盐渍化、风沙化现象十分突出。区域生态环境十分脆弱,这些地段的地下水资源显得尤为重要。由于一个流域可以看作一个生态系统,其中大气降水—地表水—地下水之间可以相互转化,水量和水质联系密切,并且它们直接控制着区域水环境和水生态系统,故以流域为生态单位对其水资源与环境进行研究已成为必然趋势。

## 1 区域水文地质条件

石羊河流域位于甘肃河西走廊东段,发源于祁连山冷龙岭冰川,尾水消失于腾格里沙漠,武威盆地和民勤盆地是石羊河流域中的两个主要盆地。祁连山是近代强烈上升区,在山前大断裂的控制下,形成了山前凹陷带,武威盆地即处于此凹陷带之中。盆地内堆积了巨厚的第四系松散沉积物(最厚处达 1000 米以上),为地下水的储存提供了良好的场所。根据水文地质特点,盆地又可分为断层台阶带和盆地两部分。断层台阶带位于盆地南部,处于山前洪积扇的顶部,第四系厚度在 50 米以下,含水层由砂砾卵石堆积物组成,地下水流通畅,富水性较差,是本流域地下水补给区。盆地部分为地下水富集带。由于由南向北含水层颗粒逐渐变细,地下水流速逐渐变慢,地下水位升高,并且随着第四系基底的抬高,含水层埋深逐渐变浅,使地下水于武威盆地中部溢出,成为石羊大河的补给源。

民勤盆地相邻武威盆地,是远离祁连山的走廊

北盆地。盆地内发育巨厚的第四系松散沉积物(300~400 m),含水层以砂、粉砂为主,被亚粘土层或亚砂土层分割成数层(10~15 层),同时其南部也分布砂砾石,形成一复杂的含水体系。

祁连山区基岩裂隙水是本流域地下水的主要补给源,多来自大气降水、冰雪融水及山地沼泽水的入渗。大气降水时空分布受地形高度的控制(本区地势每升高 500 m 降雨量增加 120 mm)。山区地下水地表水主要通过山区河流排泄,进而成为武威盆地平原区地下水的主要补给源。武威盆地地下水一部分消耗于开采、蒸发,一部分则通过地表地下径流进入民勤盆地。民勤盆地地下水主要来源于上游补给,该盆地的地下水主要消耗于蒸发、开采。

## 2 地下水水化学特征及分布规律

石羊河水从冰川源头流入沙漠腹地,流域范围几乎包括了湿润区、半湿润区到半干旱区、干旱区的各个地带。这种垂直气候条件的分异决定了该流域地下水的水化学水平和垂直分带性以及水化学特征。

### 2.1 水化学水平分带

石羊河流域的地下水水化学由南向北水化学类型经历了  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$  过渡(图 1)。

### 2.2.1 武威盆地

南部分布  $\text{HCO}_3^- \text{—Ca}$  或  $\text{HCO}_3^- \text{—Ca—Mg}$  型水。如上所述此区为地下水补给区,其来源为大气降水,同时本区含水层砾卵石为主,地下水流畅通,地

<sup>①</sup> 国家科委特别资助项目、中国科学院重点基金资助项目  
收稿日期 1998-04-01

下水处于积极循环状态,水岩作用时间短,因而水化学类型表现为低矿化度的重碳酸盐型地下水

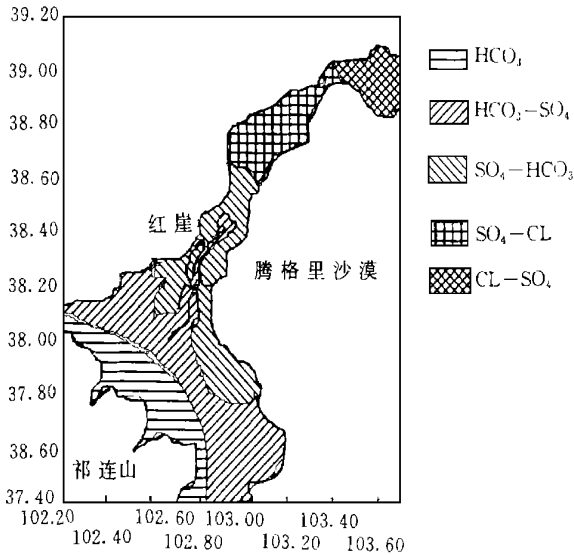


图 1 石羊河流域水化学分区图

Fig. 1 Distribution of water chemistry types in the Shiyang river basin

中部逐渐过渡为  $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  型或  $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+$  型水;盆地北部(石羊河以西,洪水河两岸及重兴一带)断续分布着  $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  型水,盆地最北端蔡旗一带出现  $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  型水

在石羊河两侧发育有一条重碳酸盐硫酸盐带,系河水入渗地下而成的淡化带。

这种区域性水化学分带与含水层中的径流方向一致,南部为重碳酸盐(淡水)带,中部为重碳酸硫酸盐(淡水)带;北部为硫酸重碳酸盐(亚淡水)带,最后出现硫酸盐咸水带。

### 2.2.2 民勤盆地

长城遗址以南,分布  $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$  型水;

从苏武山北麓到中渠乡以北,分布  $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^- - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$  型水;

在盆地东北部即流域的最下游(西硝池、马王庙湖及梭梭门一线,东、西碱湖)分布  $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ (卤水)型水。

民勤盆地水化学特征较为复杂,皆因含水层颗粒变细,地下径流迟缓,水位抬高,含水层埋深变浅,加之区内气候干燥,造成地下水的强烈蒸发使矿化度急剧升高,同时由于含水层的复杂性使水化学类型表现出明显的区域差异。

### 2.2 水化学垂直分带

在世界很多地区的地下水调查研究中已发现:补给区内,浅层地下水中的溶解总固体量要比同一系统中较深处地下水中的少一些(上淡下咸)。排泄区内,深处地下水中溶解的固体量要比浅层地下水中少(上咸下淡)。我们称这种现象为水化学垂直分带现象。这虽是一种较普遍的现象,但不同的区域其成因是由不同的因素造成的。在武威盆地南部的地下水补给区,由于含水层比较薄,加之径流条件好,地下水处于积极交替状态,这种现象不明显。在民勤盆地的地下水排泄区,却存在着明显的地下水层状分异(大部分地区上咸下淡)。关于其成因有不同的说法,笔者认为主要是由地下水的蒸发浓缩作用造成的,在下面的水化学模拟结果将证明这一点。

### 3 地下水地球化学的计算机模拟

地下水在不停地同含水层中各种矿物、气体进行着物质交换,其内部也在不断发生各种络合反应,而且在矿化度较高的情况下,离子的浓度与其表现出的活度也会有较大差距。因此要正确判断水岩作用的方向和程度,需要计算出各元素在水中的存在状态,及其游离态离子的活度<sup>[1]</sup>。笔者利用地球化学计算机模拟的方法,在充分考虑溶液中离子强度、矿物的溶解沉淀平衡、各种络合反应的影响的前提下,模拟出了本区地下水中各元素的存在形式、各种矿物的饱和指数,进而判断了水岩作用方向和程度。由于各种化学反应都向平衡方向进行,即达到自由能最低的状态,据此对地下水进行模拟有两条途径:化学平衡法和自由能最低法,笔者选取第一种方法。

#### 3.1 利用饱和指数判断矿物沉淀与溶解

饱和指数是确定水与矿物处于何种状态的参数,以符号“SI”表示

$$SI = IAP/K$$

IAP 指定矿物对应离子的活度积  
K 指定矿物的沉淀溶解平衡常数

当  $SI = 1$  时,矿物溶解达到平衡。 $SI < 1$  时矿物处于不饱和状态。 $SI > 1$  时矿物处于过饱和状态(在自然条件下饱和指数在  $-0.1$  到  $0.1$  [SI 对数值] 范围内,就认为这个水样是饱和了的)。

从武威盆地、民勤盆地的方解石、白云石饱和指数变化状况可以看出:

武威盆地南部山前补给区方解石饱和指数说明在此区域方解石处于不饱和状态,方解石不断溶解,输入地下水,此区为方解石溶解区。武威盆地中北部

方解石饱和指数大部分在 1.0~ 1.2 之间,方解石已处于饱和状态,不再溶解,此区为方解石饱和区。由于红崖山水库向地下水的渗透作用,在红崖山水库附近形成了一方解石不饱和区。

民勤盆地除个别小区外方解石饱和指数均在 1.2 以上,处于过饱和状态。因该区位于石羊河流域的下游,地下水已经过了充分的水岩作用,饱和了方解石等常见矿物。另外该区的强烈蒸发浓缩作用也使方解石饱和指数上升达到过饱和状态。

白云石与方解石相似,且规律性比方解石强。

### 3.2 利用饱和指数判断地下水的成因

从方解石饱和指数季节变化图(图 2)和白云石饱和指数季节变化图(图 3)可以发现:

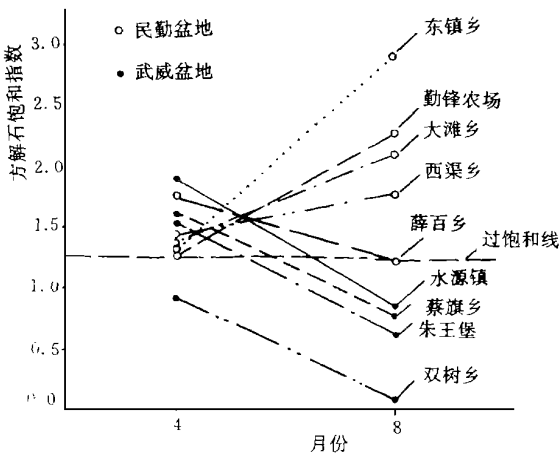
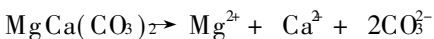
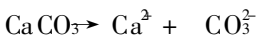


图 2 方解石饱和指数季节变化图

Fig. 2 Seasonal changes of calcite saturation index

四月份武威盆地的大部分井点,四月、八月份民勤盆地全部井点方解石和白云石同时达到了过饱和状态,可以认为是由蒸发浓缩作用造成的。因为方解石与白云石在沉积地层中是普遍存在的,它们与地下水作用的化学反应方程式如下:



由于它们溶解过程中都产生  $\text{Ca}^{2+}$ ,这两种矿物的溶解是相互制约的,如果一种矿物达到过饱和(在通常情况下是可能的),由于同离子效应,另一种矿物在没有外界因素作用的条件下,几乎不可能达到过饱和,即两种矿物不能同时达到过饱和。

笔者认为能使两种矿物同时达到饱和的外界因素有两种:

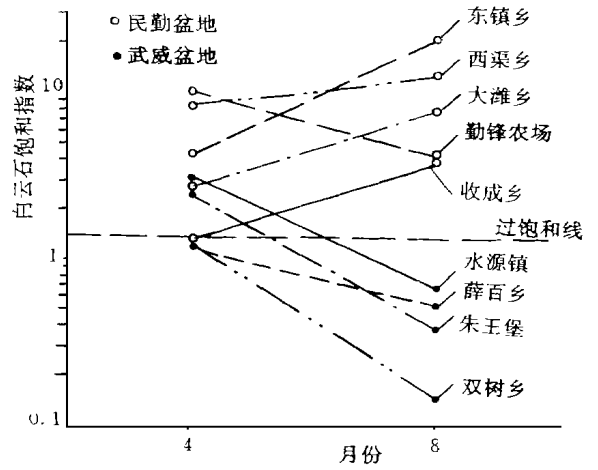


图 3 白云石饱和指数季节变化图

Fig. 3 Seasonal changes of dolomites saturation index

#### (1) 石膏的溶解

石膏溶解的方程式如下:

$\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$  石膏在溶解过程中会产生  $\text{Ca}^{2+}$ ,如果足量的石膏在水中溶解,就有可能使方解石和白云石同时达到饱和。但石膏或硬石膏自然界不多,在水中很少超过微量的程度。在很多浅层带内,这些矿物就从未存在过,或者即便存在,也被前期地下水流动所带走<sup>[2]</sup>。因此这种因素影响一般不占主导地位。

#### (2) 蒸发浓缩作用

地下水在蒸发浓缩作用下,其组分的浓度将急剧上升,从而使水中各矿物达到热力学不稳定状态,甚至过饱和。由于干旱、半干旱地区蒸发强度大,特别是埋深浅的地下水,这种因素普遍存在。

武威盆地和民勤盆地的蒸发量均大于降雨量,尤其是冬季和春季干旱严重<sup>[3]</sup>,这种现象主要是由蒸发浓缩作用引起的。

### 3.3 根据模拟结果分析地下水水质变化趋势

通过对该流域沙漠边缘一水井多年数据的模拟分析不难发现以下趋势:

矿化度基本逐年增高,  $\text{SO}_4/\text{HCO}_3$  比值逐年上升,方解石白云石饱和指数逐年下降(图 4), pH 值逐年下降。

笔者认为引起上述变化的原因可由下列化学方程式表示:

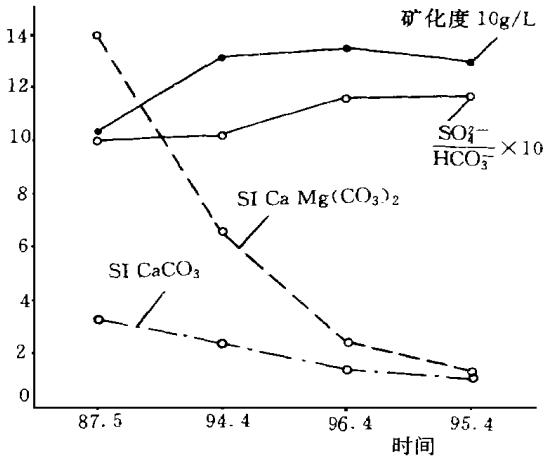
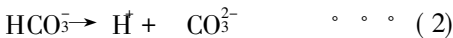


图 4 TDS- SI CaCO<sub>3</sub>- SI MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对比图

Fig. 4 Correlation among TDS- SI CaCO<sub>3</sub>- SI MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>



随着反应 1 的进行, Ca<sup>2+</sup> 浓度及 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 浓度下降使方解石白云石的饱和指数降低, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 浓度的降低使反应 2 向右进行释放 H<sup>+</sup>, 地下水的酸性增强, pH 值下降, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 比值上升。

### 4 几点认识

(1) 石羊河流域地下水化学类型表现出完整的

分带性, 在流域上游山区裂隙水及山前砾石带为重碳酸盐带, 流域中游的山前冲洪积湖积平原为硫酸盐带, 流域下游的荒漠区及积盐洼地为氯化物带。

(2) 石羊河流域上游(武威盆地)和下游(民勤盆地)的地下水在四月份(旱季)时其中的方解石和白云石都达到过饱和状态。在八月份(雨季)武威盆地地下水中方解石和白云石饱和指数均显著降低, 未达到饱和状态, 而这时民勤盆地地下水中的方解石和白云石饱和指数不但没有降低, 反而明显增高, 均处于过饱和状态, 由于该区即使在雨季降雨量也非常有限, 而蒸发作用则更加强烈。可见, 石羊河流域地下水化学环境受蒸发浓缩作用的强烈影响, 生态环境十分脆弱。

(3) 近十年来石羊河流域地下水的过度开采, 使下游地区(特别是沙漠边缘地带)地下水化学类型由重碳酸盐型向硫酸盐型甚至向氯化物型演化, 矿化度显著增高, 地下水水质恶化趋势明显。

### 参 考 文 献

[1] 郭永海, 沈照里. 河北平原地下水环境演化的地球化学模拟, 中国科学 D 辑, 27(4): 1997. 360- 365  
 [2] 弗里泽 RA, 彻里 JA. 地下水. 吴静方译. 北京: 地震出版社, 1987. 178- 180  
 [3] 陈昌毓. 甘肃干旱半干旱地区降水特征及其对农业生产的影响. 干旱区资源与环境, 1995, 9(1), 25- 32

## Study on the Evolution Characteristics of Groundwater Chemistry Environment in the Shiyang River Basin

Shi Ji'an Zhao Xingdong Wang Qi Shi Yuxin Li Chunyuan

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

Based on the systematic study on the groundwater chemistry typer and their evolitional characteristics in the Shiyang river basin, the author has the evolution mechanism of chemical environment of the groundwater in the Shiyang river basin by the saturation index (SI) obtained through chemical simulation program. Some cognitions are reached as follows

1. Groundwater chemistry types of the Shiyang river basin show the complete zonation, i. e., bicarbonate zone is mainly distributed in the mountainous fissure water in the upper reach and mountain front gravel area; sulfate zone is in the mountain front alluvial and fluvial plain in the middle reach; and chloride zone is in the desert and salt depression area in the lower reach.

2. In April (dry period), the calcite and dolomite are oversaturated both in the upper reach (Wuwei basin) and the lower reach (Minqing basin), but in August (rain period) the SI of the calcite and dolomite