



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.027

孙一博, 刘朋飞, 王文科, 等. 渭河流域地下水的水化学特征及形成机制[J]. 2016, 14(2): 152-158.

SUN Yi bo, LIU Peng fei, WANG Wen ke, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Wei River Basin[J]. 2016, 14(2): 152-158. (in Chinese)

渭河流域地下水的水化学特征及形成机制

孙一博¹, 刘朋飞², 王文科³, 刘树林¹

(1. 重庆市地勘局南江水文地质工程地质队, 重庆 401120; 2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023; 3. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054)

摘要: 在对渭河流域 407 组地下水的水化学数据及 139 组含水层岩土样数据分析的基础上, 运用图解法、数理统计法、Gibbs 半对数法及 PHREEQC 模拟等方法对渭河流域地下水的水化学特征及形成机制进行了研究, 取得了一些新的认识。根据地下水系统划分原则, 将整个渭河流域的地下水系统划分为 5 个二级地下水系统: 陇西黄土高原子系统、陇东黄土高原子系统、陕北黄土高原子系统、关中盆地子系统以及秦岭北麓子系统。渭河流域水化学类型主要是以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}$ 为主, 北部和中部还分布有 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{SO}_4^- \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}$ 及 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Na}$ 型水, 大部分地区地下水中的 TDS 为小于 1 g/L 的淡水。地下水化学成分的形成主要受含水层矿物的溶解/沉淀、蒸发浓缩及阳离子交换作用的影响。

关键词: 渭河流域; 地下水; 水化学特征; 形成机制; 溶解/沉淀; 蒸发浓缩; 离子交换

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)02-0152-07

Chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Wei River Basin

SUN Yi bo¹, LIU Peng fei², WANG Wen ke³, LIU Shu lin¹

(1. Chongqing Geological prospecting Bureau of Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing 401120, China; 2. Chongqing Survey, Design and Research Institute Co., Ltd. of CREEG, Chongqing 400023, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on analysing 407 hydro-chemical data and 139 aquifer rock soil samples date of groundwater from Wei River Basin, China, the graphical method, mathematical statistics, Gibbs semi logarithm diagram and phreeqc simulation method were applied to study the chemical characteristics and formation mechanism of groundwater. According to the principle of division of the groundwater system, the study area was divided into five secondary groundwater system, namely, Longxi Loess Plateau subsystem, Longdong Loess Plateau subsystem, Shanbei Loess Plateau subsystem, Guanzhong basin Loess Plateau subsystem and Qirgling Mountains subsystem. The hydro-chemical types of the groundwater in the Wei River Basin were mainly $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}$ and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}$, in northern and central there were also distributed water types of $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{SO}_4^- \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na}$ and $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4^- \cdot \text{Na}$. The groundwater TDS of most areas were less than 1 g/L of fresh water. The formation of the chemical compositions of groundwater were impacted by aquifer mineral dissolution/precipitation, evaporation concentration and cation exchange.

Key words: Wei River Basin; groundwater; water chemical characteristics; formation mechanism; dissolution/precipitation; evaporation concentration; cation exchange

收稿日期: 2015-03-04 修回日期: 2015-10-12 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1433.004.html>

基金项目: 中国地质调查局地质大调查计划项目(1212010634700)

Fund: Geological Survey Project of China Geological Survey(1212010634700)

作者简介: 孙一博(1983-), 女, 河南商丘人, 博士, 主要从事水资源方面的研究。E-mail: sunyb67@163.com.

渭河流域位于我国西北地区东部,主要包括陕西、甘肃、宁夏三省,流域面积约 13.5 万 km²,该区域内蕴藏着丰富的石油、煤炭、天然气等自然资源,是我国新兴的能源化工基地。但是近年来,随着经济的发展和能源的开发,城镇人口的不断增长,该区域对地下水资源的需求量日益增大,从而加剧了水资源的供需矛盾。严重制约当地人民生活水平的提高和经济社会的发展。因此,开展渭河流域地下水的水化学特征及形成机制研究,为推动西北地区的新农村建设和饮水安全工程的实施提高有力的理论依据。

1 研究区概况

研究区属大陆性气候,多年平均气温介于 6℃~13℃之间,年降水量介于 304~816 mm 之间,年平均蒸发量为 1 000~2 000 mm,无霜期 120~220 d,多年平均降水量 650 mm。渭河的各支流水系较多,其中,南岸的河流数量多于北岸,较大支流多集中在渭河北岸,水系呈树枝状分布,泾河与北洛河分别是渭河的第一、第二大支流。研究区整体地形趋势为西高东低,地形自西向东逐渐变缓,河谷逐渐变宽。地貌类型主要有山地、黄土丘陵、黄土阶地和河谷冲积平原。

2 渭河流域地下水系统划分

根据同一个地下水系统内部的地下水补给源相同,水力之间具有密切联系,且具有相同时空演变规律的原则^[1]。确定地下水系统划分的主要依据是以地下水之间是否存在水力联系或者以水力联系之间的强弱作为标准来划分。由于渭河流域面积较大、地层岩性多样、地质构造较复杂、地下水的水循环条件不同、含水层介质分布不同、水动力特征差异大等特点,因此,本文在充分考虑渭河流域地质背景的基础上,将该区域的地下水系统划分为以下 5 个二级地下水系统,即陇西黄土高原子系统(\tilde{N})、陇东黄土高原子系统(\tilde{O})、陕北黄土高原子系统(\tilde{O})、关中盆地子系统(\tilde{O})以及秦岭北麓子系统(\tilde{O})(见图 1)^[2]。

陇西黄土高原子系统(\tilde{N}):该地下水系统位于渭河的上游,东面以六盘山地表分水岭为界,西、南、北以渭河流域的边界线为界。该系统的主要含水层为渭河干支流河谷的冲洪积砂、砾石层,地下水的主要补给来源为大气降水的入渗,地下水主要向渭河及河谷两侧的沟谷中排泄。

陇东黄土高原子系统(\tilde{O}):该地下水系统位于渭河的中游,北面以渭河流域的边界为界,南面以北

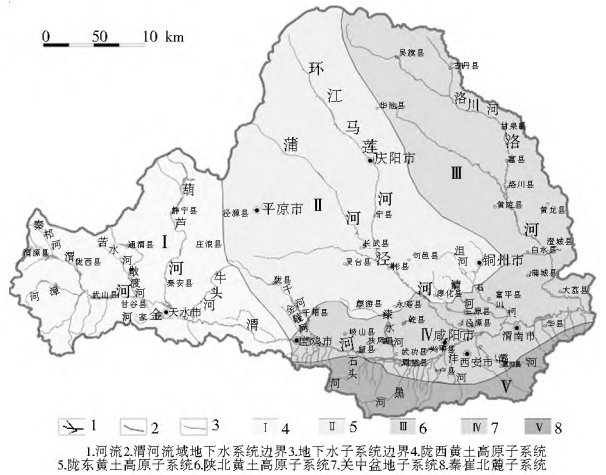


图 1 渭河流域地下水系统分区

Fig. 1 The partition map of Wei River Basin groundwater system

山为界,东以子午岭为界,西与陇西黄土高原子系统为邻。该系统的主要含水层为呈带状分布在泾河河谷中及山前冲洪积扇区的洪积砂及冲积砂层。地下水主要接受大气降水的入渗及河水的侧向补给,最终以泉点的形式排泄于陕西省彬县的水帘洞。

陕北黄土高原子系统(\tilde{O}):该子系统属于渭河支流洛河流域,北、东以渭河流域的边界为界,南以北山为界,西与陇东黄土高原子系统为邻。该系统的地下水主要接受大气降水及河流入渗的补给,自西北向东部流动,最终排泄于洛河中。

关中盆地子系统(\tilde{O}):该子系统位于汾渭断陷西段,该区域渭河河漫滩低地及山前洪积层地下水资源较丰富,主要含水层为冲洪积的粗砂砾石层,含水层平均厚度约 60 m。地下水主要接受大气降水的补给,主要以蒸发、泉及人工开采的方式的形式排泄。

秦岭北麓子系统(\tilde{O}):该子系统内地层主要为太古代的变质岩系及火山岩,地下水类型主要为风化裂隙水,富水性较差。大气降水的入渗是地下水的主要补给源,该类型地下水主要以地表径流的方式流入关中盆地。

3 样品采集及分析测试

本文以中国地质调查局项目“地方病严重区地下水勘查与供水安全示范”子课题“渭河流域典型地方病区生态地球化学编图与饮水安全研究”为依托,开展渭河流域地下水的水化学特征及形成机制的研究,课题组分别在 2011 年 10 月、2012 年 7 月及 2013 年 5 月对研究区先后进行三次采样,共采集水样 407 组,土样 139 组(见图 2)。

本次研究中,在野外采集每个不同水样点时用 GPS 全球定位系统进行实时定点,记录当地的地面

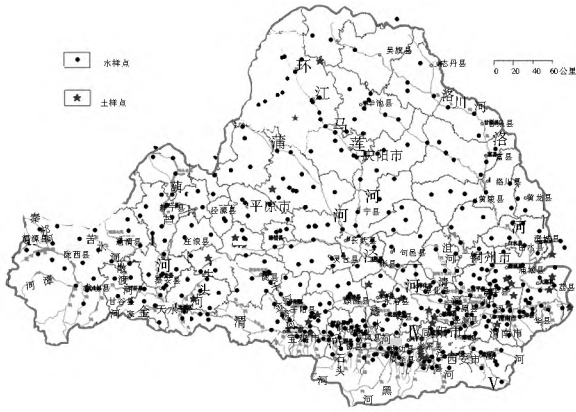


图 2 渭河流域采样点分布

Fig. 2 The distribution of groundwater samples in the Wei River Basin
 高程及地理坐标,并分别利用便携式 pH 计、温度计及电导仪在现场测定 pH 值、水温及电导率(EC),其它水化学指标将送至中国建筑材料工业地质勘查中心陕西测试研究所进行测试。其中: K^+ 、 Na^+ 采用火焰原子吸收分光光度法(WFX-110B)进行测试; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 滴定法进行测试; SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 F^- 、 I^- 采用离子色谱法(HLC-601)进行测试; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用酸碱滴定法进行测试; Al、As、Cr、Se、Mn、Hg 等微量元素采用等离子体质谱仪 ICP-MS 进行测定。

4 研究区地下水水化学特征

4.1 水化学类型分布特征

本文参照舒卡列夫水化学类型分类法对整个渭河流域地下水水化学类型进行分区(图 3)。整体来看,研究区的水化学类型主要以 HCO_3-Ca 、 HCO_3-Na 为主,而在北部和中部还分布有 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$ 、 $SO_4 \cdot Cl \cdot HCO_3-Na$ 及 $Cl \cdot SO_4-Na$ 型水。其中陇西黄土高原子系统及秦岭北麓子系统的水化学类型相对简单,是以重碳酸型水为主,主要有 HCO_3-Ca 、 HCO_3-Na 型水。由于该区域是地下水的主要补给形成区,水质相对较好,故水化学类型相对简单。而陇东黄土高原子和陕北黄土高原子系统总体上自北向南水化学类型由复杂逐渐变为简单,地下水水化学类型变化规律为 $SO_4 \cdot ClNa \rightarrow HCO_3 \cdot SO_4 \cdot ClNa \rightarrow HCO_3-Ca$ 型水,主要与第三系含水层介质的矿物成分有关。关中盆地子系统属渭河流域地下水的排泄区,地下水化学类型渭河以南及渭北泾河以西较为单一,泾河以东水化学类型复杂。并且水化学类型自西向东逐渐由单一变得复杂,依次为 $HCO_3-Ca \rightarrow HCO_3-Na \rightarrow HCO_3 \cdot SO_4 \cdot ClNa \rightarrow SO_4 \cdot ClNa \cdot Mg \rightarrow Cl \cdot SO_4-Na \cdot Mg$ 型水,具明显的分带性。且从盆地边缘至中心水化学类型逐渐变得复

杂,变化规律为 $HCO_3-Ca(HCO_3-Na) \rightarrow HCO_3 \cdot SO_4-Na \rightarrow SO_4 \cdot Cl \cdot HCO_3-Na \rightarrow Cl \cdot SO_4-Na \cdot Mg$ 型水,水化学类型呈明显的水平分带性规律。

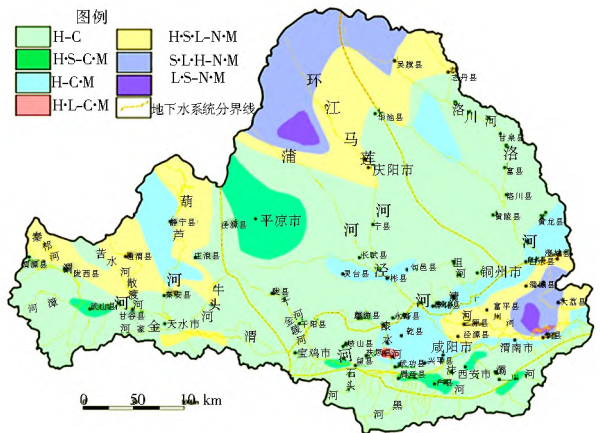


图 3 渭河流域地下水水化学类型分布

Fig. 3 The hydrochemistry type distribution of groundwater in the Wei River Basin

4.2 TDS 分布特征

从图 4 中可以看出,研究区大部分地区的地下水中 TDS 为小于 1 g/L 的淡水。研究区 $1 g/L < TDS < 3 g/L$ 的弱咸水主要位于陇东黄土高原子系统及陕北黄土高原子系统北部的环江—马莲河一带及洛河上游,关中盆地渭河以北泾河以东黄土台塬及冲积平原的大部分地区也有分布。 $3 g/L < TDS < 10 g/L$ 咸水主要分布在环江的上游,关中盆地蒲城的卤泊滩,甘肃庆阳的宁县还有零星分布。 $TDS > 10 g/L$ 的强咸水主要分布在庆阳环县山城乡及陕西关中卤泊滩党睦镇一带。

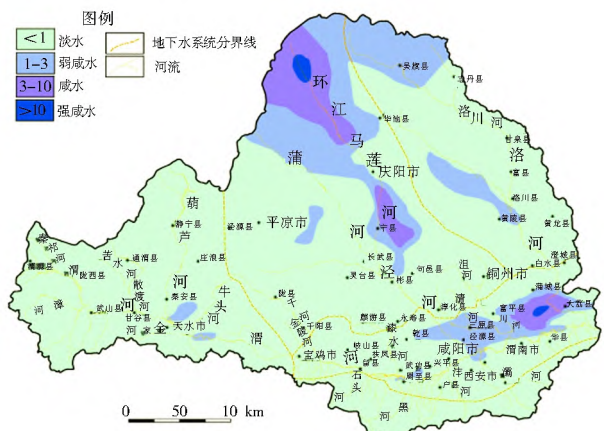


图 4 渭河流域地下水中 TDS 分区

Fig. 4 The TDS distribution of groundwater in the Wei River Basin

5 研究区地下水水化学成分的形成机制

5.1 含水层的矿物组成

根据本次野外调查及对所采集的 139 组含水层

介质样品进行 X 射线衍射、荧光分析结果(表 2 和表 3)表明,研究区各地下水系统中含水层介质矿物中含有石英、方解石、白云石、斜长石、钾长石、角闪石、及蒙脱石、高岭石、绿泥石、伊利石等黏土矿物。由此可见,长石类硅酸盐、铝硅酸盐及碳酸盐(方解石、白云石)矿物是渭河流域含水层介质的主要矿物。

表 2 含水层介质矿物 X 射线衍射分析结果

Tab. 2 Aquifer medium mineral X-ray fluorescence analysis results

样品编号	矿物相对含量 $\omega(B)/10^2$				
	石英	斜长石	钾长石	方解石	白云石
HXT002	42.8	19.2	10.0	8.4	2.0
LQT001	44.5	17.2	3.5	13.4	0.5
ZJCT001	48.3	13.3	3.9	12.7	0.9
YS001	66.9	18.9	2.9	1.6	1.6
YS002	29.5	21.3	6.5	12.8	

样品编号	矿物相对含量 $\omega(B)/10^2$				
	角闪石	高岭石	绿泥石	蒙脱石	伊利石
HXT002	1.1	8.0	8.5		
LQT001	1.9	10.0	9.0		
ZJCT001	1.4		9.5	2.0	8.0
YS001	0.8	2.0	3.0	2.0	2.0
YS002	2.3	1.5	1.5	22.0	3.0

表 3 含水层介质矿物 X 射线荧光分析结果

Tab. 3 Aquifer medium mineral X-ray diffraction analysis results

离子种类	样品含量 $\omega(B)/10^2$				
	HXT002	LQT001	ZJCT001	YS001	YS002
SiO ₂	60.18	55.16	57.20	64.62	49.82
Al ₂ O ₃	11.76	13.04	12.56	14.76	11.81
Fe ₂ O ₃	4.12	4.93	5.01	5.60	6.05
CaO	8.63	10.52	9.02	1.91	10.77
MgO	2.33	2.15	2.14	2.00	3.08
K ₂ O	2.16	2.26	2.48	2.38	2.02
Na ₂ O	1.83	1.44	1.15	1.39	1.55

5.2 溶解/沉淀作用

本文应用 PHREEQC 地球化学模拟软件分别计算了研究区方解石、白云石、萤石和石膏的饱和指数,并绘制了饱和指数与 TDS 之间的相互关系(图 5),进一步分析研究区地下水水化学演化过程中的溶解/沉淀作用。

从图 5 中可以看出,整个研究区除了秦岭北麓子系统外,其它四个子系统中的大多数地下水相对于白云石与方解石都处于饱和状态($SI_{白云石} > 0$ 、 $SI_{方解石} > 0$),而整个研究区的地下水相对于萤石和石膏均处于非饱和状态($SI_{萤石} < 0$ 、 $SI_{石膏} < 0$)。表

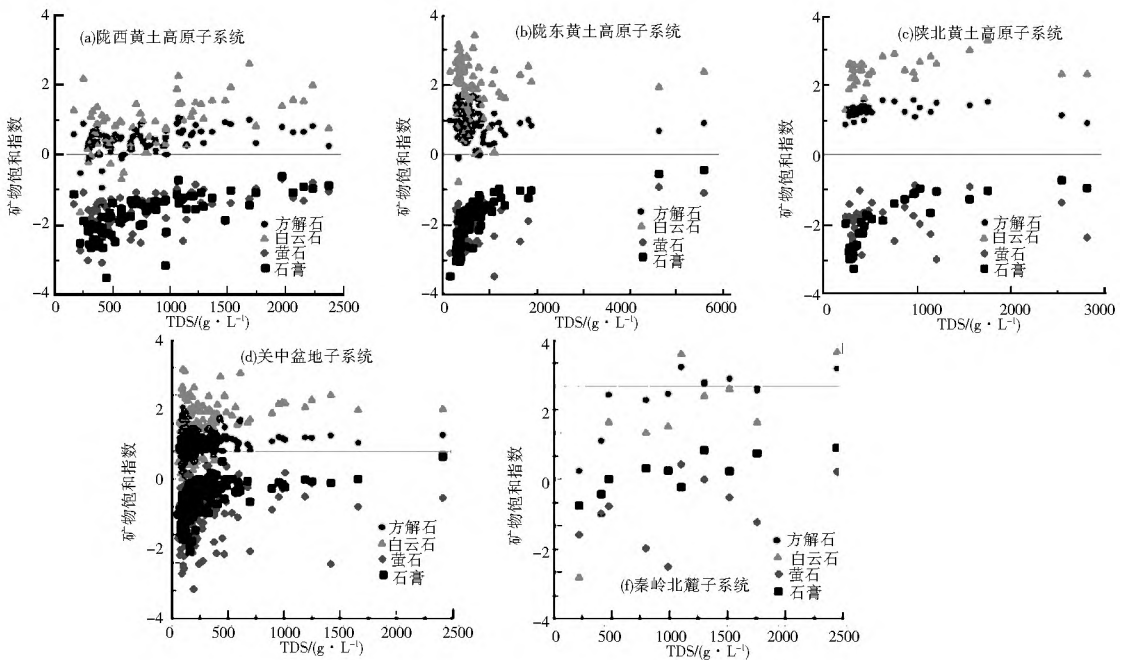
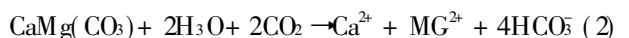
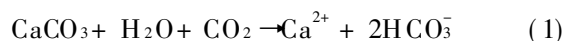


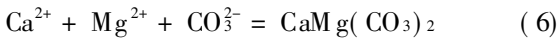
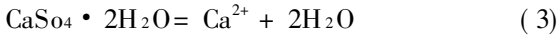
图 5 渭河流域矿物相的饱和指数与 TDS 的变化关系

Fig. 5 The changes in relationships between mineral phase saturation index and TDS of Wei River Basin

明在研究区,秦岭北麓子系统中发生了白云石、方解石、萤石及石膏的溶解作用。其它子系统中则发生了白云石、方解石的沉淀及萤石、石膏的溶解作用。

反应机理如式(1) - 式(6)所示。





为进一步研究含水层介质中硅酸盐、铝硅酸盐矿物的溶解平衡过程,本文还绘制了 $\text{Na}^+ - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}^{2+} - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ 系统矿物平衡体系图(图 6),将研究区所有的地下水样投在该图上。

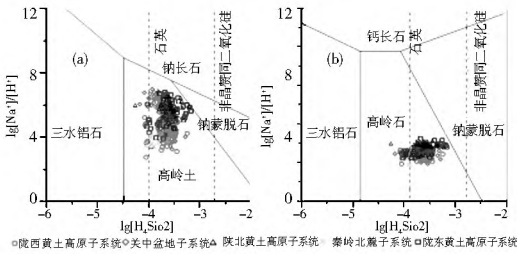


图 6 渭河流域地下水 $\text{Na}^+ - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ (a) 和 $\text{Ca}^{2+} - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ (b) 系统矿物平衡体系

Fig. 6 Activity diagram for the $\text{Na}^+ - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ (a) and $\text{Ca}^{2+} - \text{H}^+ - \text{SiO}_2$ (b) systems of Wei River Basin

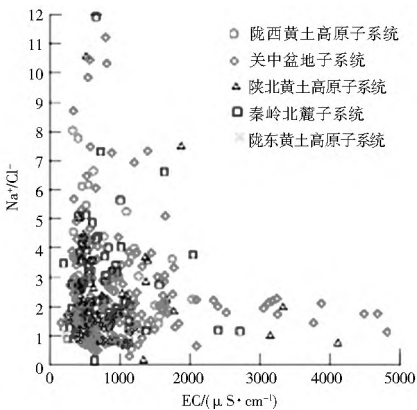
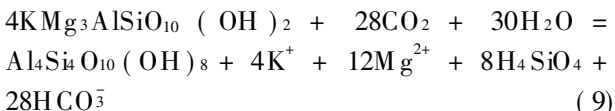
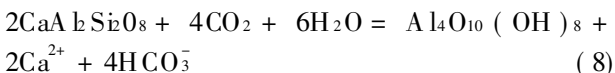
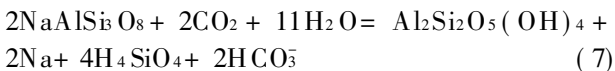


图 7 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 与电导率 (EC) 之间的散点

Fig. 7 The scatter plot between $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ and conductivity (EC)

从图 6 中可以看出,所有水点都落在高岭土稳定区内,无水点落在钠长石或钙蒙脱石稳定区内。这说明研究区内含水介质中的钙长石、钠长石、黑云母等矿物发生了非全等溶解,水解为高岭土。反应机理如式(7)~式(9)所示^[3]。



由于这些原生造岩矿物在地下水中没有达到饱和,仍具有一定的溶解能力,可形成次生矿物。所以在地下水流动的过程中,水解过程在形成了高岭土的同时,还产生了 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等离子。

5.3 蒸发浓缩作用

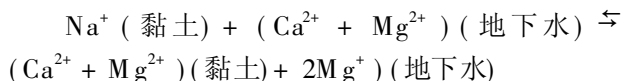
在地下水化学成分形成的过程中,如果蒸发作用占主导地位,且地下水流动的过程中,没有矿物发生沉淀,则 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 的比值保持不变,故 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 与电导率(EC)之间的散点图应该是一条水平线,这条水平线就是判断蒸发浓缩作用是否存在的有效指示器^[4]。若地下水中的 Na^+ 主要来源于岩盐矿物的溶解,则 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 比值约等于 1,若比值大于 1,则表明地下水中的 Na^+ 还有一部分来自于硅酸盐的风化作用^[5]。从图 7 中可以看出,大约有 86% 的水样点比值大于 1,仅有 14% 的水样点比值小于 1。且 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 与电导率(EC)关系的趋势线是倾斜的,表明蒸发浓缩作用在水化学形成过程中并不占主导作用,而硅酸盐矿物的风化溶解作用占主导地位,图 8 渭河流域浅层地下水 Gibbs 图也可以进一步证实该结论。

本次研究利用吉布斯^[6]设计的半对数坐标图对研究区地下水的水化学形成机制进行了研究,在该图中横坐标为普通的直线坐标,表示河水中阴、阳离子比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 、 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$;纵坐标为对数坐标形式,代表河水中的溶解性总固体(TDS)。目前,Gibbs 图已成为定性判断大气降水、蒸发浓缩作用及区域岩石风化作用对河水化学影响的一种重要手段^[7-8]。很多研究表明,利用 Gibbs 图解法不但可以分析河水的离子起源,还可以分析地下水^[9-14]。本文将渭河流域 5 个地下水子系统的水化学数据投到 Gibbs 图上(见图 8)。

由图 8 可以看出,研究区五个子系统中的大多数水样点落在图的中部岩石风化带,说明研究区绝大多数的地下水的形成要受岩石风化作用的影响。除了秦岭北麓子系统外,其它四个子系统中有少数水样点落在图的右上角蒸发-浓缩带,说明这些地下水的形成受蒸发-浓缩作用的影响,主要是由于这些水点主要分布于地势较低,水位埋深较浅的地区,故蒸发浓缩作用比较强烈。

5.4 阳离子交换吸附作用

地下水中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 阳离子交换在地下水化学成分形成过程中极其重要,反应机理如下式:



地下水在流动过程中,是否发生离子交换,可用氯化物碱性指数(CAI-1 和 CAI-2)来判断^[15]。表示如下,单位为 meq/L。

$$\text{CAI-1} = \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$$

$$\text{CAI-2} = \text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-$$

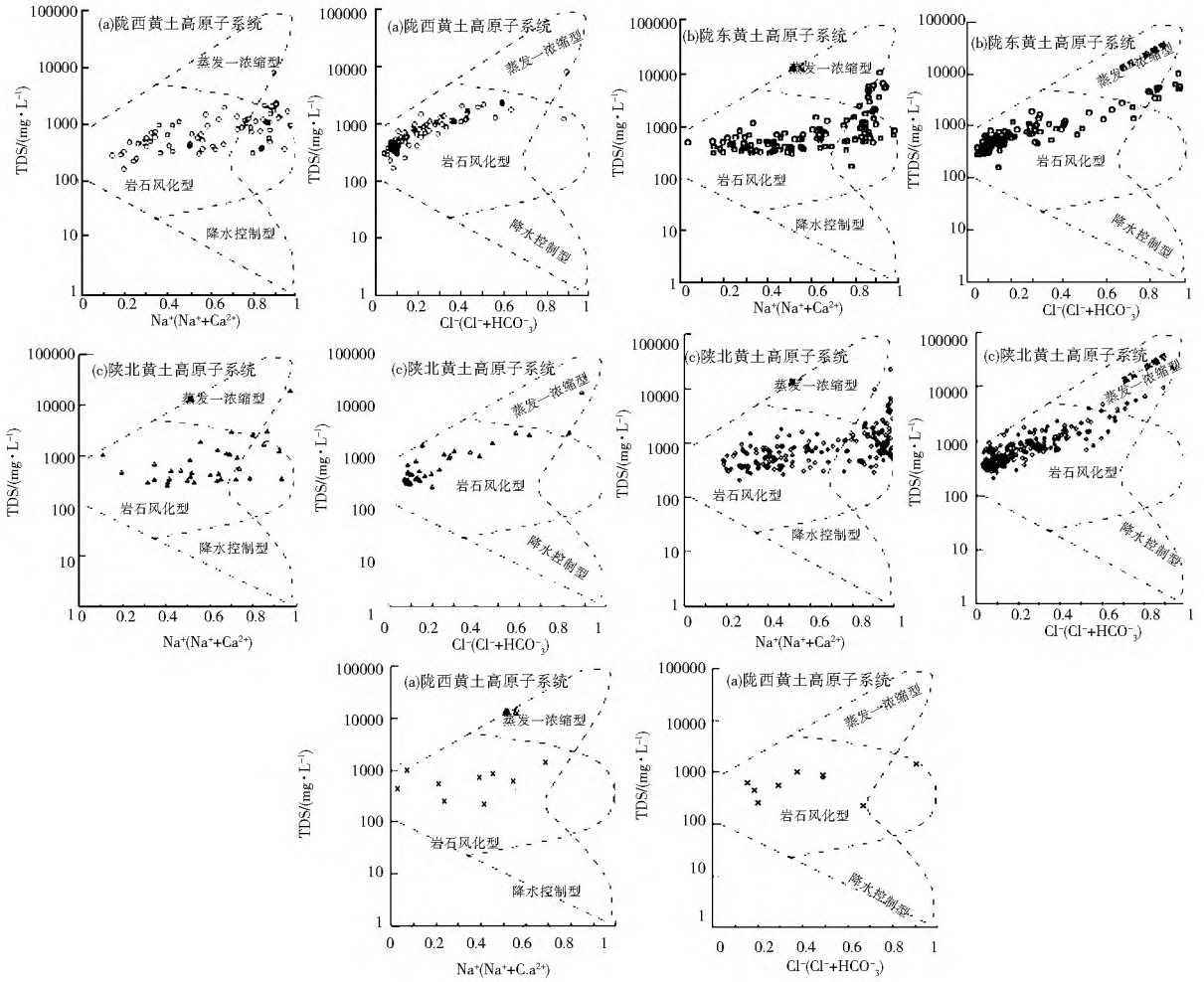


图 8 渭河流域五个地下水子系统 Gibbs 图

Fig. 8 The Gibbs diagram of five groundwater subsystem from Wei River Basin

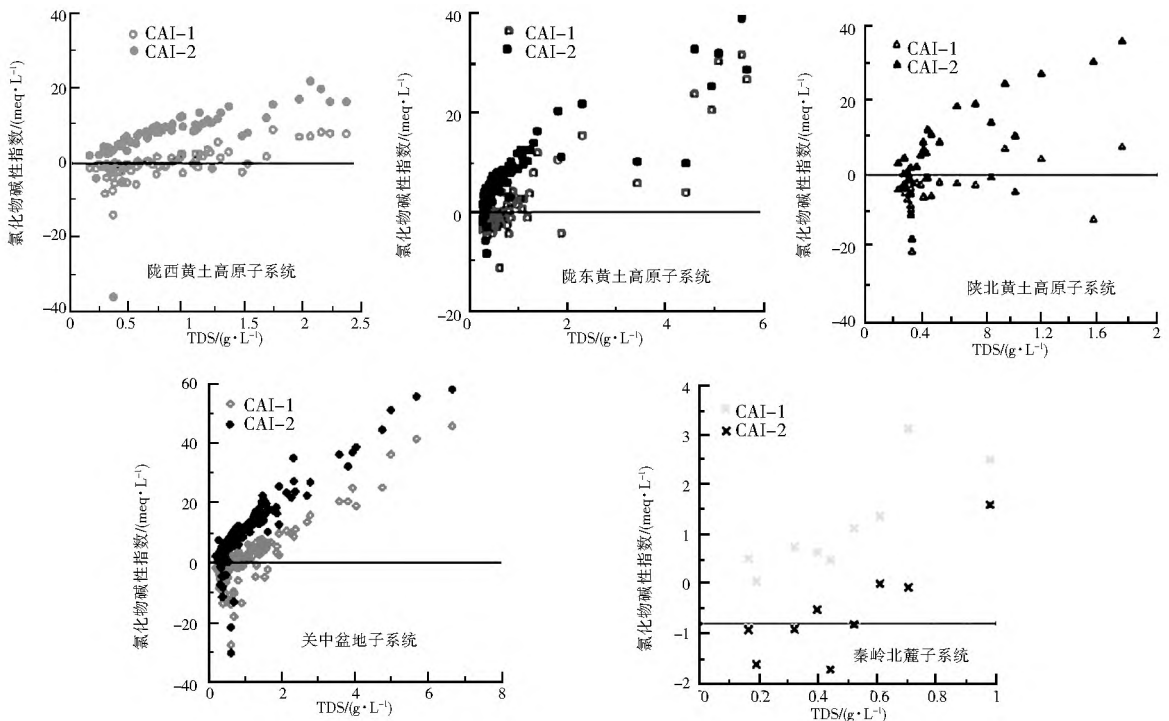


图 9 渭河流域五个地下水子系统 Gibbs 图

Fig. 9 The Gibbs diagram of five groundwater subsystem from Wei River Basin

当地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水层颗粒表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 发生离子交换时, CAF1 和 CAF2 均大于 0, 当发生相反方向的离子交换时, CAF1 和 CAF2 均小于 0。

从图 9 中可以看出, 随着矿化度的增加, 陇西黄土高原、陇东黄土高原及关中盆地子系统中大多数水样点的 CAF1 和 CAF2 都大于 0, 表明该区域存在着地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水层颗粒表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 的离子交换, 从而使地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量随着矿化度的增加逐渐减少, 而 Na^+ 、 K^+ 的含量逐渐增多。

6 结论

(1) 渭河流域的水化学类型主要以 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 为主, 在北中部还分布有 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \text{Na}$ 、 $\text{SO}_4^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \text{Na}$ 及 $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^- \text{Na}$ 型水。

(2) 渭河流域 TDS 小于 1g/L 的淡水, 水化学类型主要是以 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 为主, 分布于研究区的大部分地区。1g/L < TDS < 3 g/L 的弱咸水, 水化学类型以 $\text{SO}_4^- \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 为主, 主要分布研究区的北部, 环江—马莲河一带及洛河上游, 关中盆地渭河以北泾河以东黄土台塬及冲积平原的大部分地区。3 g/L < TDS < 10 g/L 的咸水, 水化学类型以 $\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^- \text{Na}$ 为主, 主要分布在环江的上游, 关中盆地蒲城的卤泊滩。10g/L < TDS < 50g/L 的强咸水, 水化学类型以 $\text{SO}_4^- \cdot \text{Cl}^- \text{Na}$ 为主, 主要分布关中蒲城党睦镇一带。

(3) 渭河流域地下水化学成分的形成主要受溶解/沉淀、蒸发浓缩及阳离子交换作用的影响。其中, 陇西黄土高原、陇东黄土高原及关中盆地子系统的地下水主要受铝硅酸盐、萤石及石膏的溶解, 碳酸盐(方解石、白云石)的沉淀和阳离子交换作用的影响; 陕北黄土高原子系统的地下水主要受铝硅酸盐、萤石、石膏的溶解, 碳酸盐(方解石、白云石)的沉淀影响; 秦岭北麓子系统的地下水主要受碳酸盐(方解石、白云石)、铝硅酸盐、萤石、石膏溶解的影响; 另外除了秦岭北麓子系统外, 其它四个子系统在地势较低, 水位埋深较浅的区域地下水还受蒸发浓缩作用的影响。

参考文献(References):

[1] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. (WANG Da chun, ZHANG Ren quan, SHI Yi hong, et al. General Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese))

[2] 孙一博. 渭河流域地下水中氟和碘的形成机理及其对人体健康

的影响[D]. 西安: 长安大学, 2014. (SUN Yi bo. For mation mechanism and human health influence of fluorine and iodine of groundwater in Wei River Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))

[3] De Montety V, Radakovitch O, Valler Coulob C, et al. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer Case of the Rhone delta (Southern France)[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(8): 2337-2349

[4] Jankowski J, Acworth R I. Impact of Debris Flow Deposits on Hydrogeochemical Process and the Development of Dryland Salinity in the Yass River Catchment, New South Wales, Australia[J]. Hydrogeology Journal, 1997, 5(4): 71 - 88

[5] Mayback M (1987) Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. American Journal of Science, 1987, 287(5): 401 - 428

[6] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090

[7] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因[J]. 地质通报, 2010, 29(2~3): 446-456. (WANG Ya ping, WANG Lan, XU Chun xue, et al. Hydro geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2~3): 446-456. (in Chinese))

[8] 夏星辉, 张利田, 陈静生. 岩性和气候条件对长江水系河水主要离子化学的影响[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(2): 246-252. (XIA Xing hui, ZHANG Li tian, CHEN Jing sheng. The effect of lithology and climate on major ion chemistry of the Yangtze River system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2000, 36(2): 246-252. (in Chinese))

[9] Mamatha P, Sudhakar M R. Geochemistry of fluoride rich groundwater in Kolar and Tumkur Districts of Karnataka[J]. Environmental earth sciences, 2010, 61(1): 131-142

[10] 田西昭, 单强, 宋利震. 唐山沿海地区地下水化学特征及演化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1): 139-144. (TIAN Xi zhao, SHAN Qiang, SONG Li zhen. Analysis of water chemistry characteristics and evolution trends of groundwater in Tangshan Coastal Areas[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 139-144. (in Chinese))

[11] Wang Y X, Shvartsev S L, So C L. Genesis of arsenic/fluoride enriched soda water: a case study at Datong, northern China[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(4): 641-649

[12] Feth J H, Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation crystallization process [J]. Science, 1971, 172(3985): 870-872

[13] Kilham P. Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers: Data from Africa[J]. Limnology and oceanography, 1990, 35(1): 80-83

[14] N grel P. Geochemical study of a granitic area the Margeride Mountains, France: chemical element behavior and 87Sr/86Sr constraints[J]. Aquatic geochemistry, 1999, 5(2): 125-165

[15] Schoeller. Hydrodynamique dans le karst (écoulement emmagasinement) [M]. Actes Colloques Doubronik, I, AIHS et UNESCO, 1965: 3-20