

## 鄂尔多斯盆地盐池-定边地区水化学场分布特征及形成机理

叶 阳, 常 园

中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100

**摘 要:** 根据盐池-定边地区水化学场分布特征及其自然地理、地质构造、水文地质背景、岩相古地理和古水文地质条件, 以水文地球化学理论为指导, 采取野外水文地质调查、水样采集与测试及水文地球化学方法分析研究了该水化学场的形成机理及影响因素。研究表明, 鄂尔多斯盆地盐池-定边地区水化学场分布主要有  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$  型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$  型、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  型和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$  型场, 在白于山分水岭向北和西北的水平分带明显, 水化学场与地下水流向呈逆向分布。本区水化学特征主要受古沉积中心及地层原始含盐量、地质构造、混合作用、地下水运动规律、古地下水等综合因素的影响。

**关键词:** 水化学场; 分布特征; 形成机理; 鄂尔多斯盆地

## DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND FORMATION MECHANISM OF HYDROCHEMICAL FIELD IN YANCHI-DINGBIAN AREA OF ORDOS BASIN

YE Yang, CHANG Yuan

*Geological Survey Institute Co., Ltd., Sino Shannxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, China*

**Abstract:** According to the distribution characteristics of hydrochemical field in Yanchi-Dingbian area, as well as its geography, structure, hydrogeological background, lithofacies paleogeographical and paleohydrogeological conditions, guided by hydrogeochemical theory, the field hydrogeological survey, water sampling and testing and hydrogeochemical methods are used to analyze the formation mechanism and influencing factors of hydrochemical field. The results show that the hydrochemical fields mainly include  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ ,  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$ ,  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  and  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$  types, with obvious horizontal zoning in the north and northwest of Baiyushan watershed, and the hydrochemical field and groundwater flow direction in reverse distribution. The hydrochemical characteristics of the area are affected by the comprehensive factors, mainly paleo-depocenter and initial salt content in strata, geological structure, migmatization, groundwater movement and fossil groundwater.

**Key words:** hydrochemical field; distribution characteristics; formation mechanism; Ordos Basin

### 0 引言

鄂尔多斯盆地属黄河中游地区, 蕴藏着丰富的地下水资源<sup>[1]</sup>, 近几年来, 在鄂尔多斯盆地进行的水文地

球化学研究中, 对该地区水化学场特征和成因提出了各种观点<sup>[2-11]</sup>. 本文从水化学场的分布特征、岩相古地理和古水文地质条件、地质和水文地质背景等方面进

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2020-02-20. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局“鄂尔多斯盆地地下水勘查”项目(编号 1212010331302).

作者简介: 叶阳(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质研究工作, 通信地址 陕西省西安市长安区航天大道 396 号, E-mail//1013553633@qq.com

行综合分析,研究其形成机理,探讨其成因类型,为鄂尔多斯盆地地下水开发利用提供新思路.

## 1 地质-水文地质背景

盐池-定边地区位于鄂尔多斯盆地中西部,白于山分水岭北侧,属沙漠草原高原区.地形波状起伏,海拔 1200~1600 m 之间,高差一般在 30~80 m 之间,从南向北缓倾.地貌由波状高平原、台塬、沙地及盐湖草地等地貌形态组成.

本区构造处于西部拗陷与东部斜坡交接部位<sup>[12]</sup>.出露地层主要为下白垩统志丹群华池-环河组( $K_1h-h$ )和第四系松散层.华池-环河组岩性为砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩,第四系为冲洪积、风积、湖积物.在华池-环河期,盐池-定边地区为主要沉积中心,以河流相和湖积相沉积为主,沉积粒度从北东向南西由粗变细,厚度增大.区内发育有南北向、东西向和北东向 3 组断裂构造(见图 1)<sup>[13-14]</sup>,形成时期不同,但大多具有继承活动特点.它们不仅控制了区域基底和盖层的古地理环境,而且控制了地下水的水动力条件和水化学元素迁移富集程度<sup>[15]</sup>.

区内主要赋存松散岩类孔隙潜水、碎屑岩类孔隙裂隙潜水和承压水<sup>[16]</sup>.华池-环河组碎屑岩类为本区的主要含水岩组,含水岩性为灰白、棕红、灰绿色砂岩、粉砂岩、砂砾岩.含水层呈多层结构,岩相和渗透性能变化较大,含水层和隔水层在水平方向上都不稳定,分界不明显且相互交错出现,层位多变复杂,造成水文地质条件复杂.地下水水位变化较大,一般在 10~30 m,较深处达 50 m.地下水补给来源于大气降水.径流分为两大系统,一个是浅部径流循环系统,另一个是深部径流循环系统.浅部径流循环系统由白于山分水岭向北径流,深部径流循环系统在本区内主要是通过构造向上径流.蒸发作用是区内地下水的主要排泄方式<sup>[17-19]</sup>.

## 2 水化学场的分布特征

区内水化学成分复杂,各种水化学类型均有分布,主要为  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$  型、 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$  型、 $HCO_3 \cdot Cl-Na \cdot Ca$  型、 $SO_4-Na$  型、 $HCO_3-Ca \cdot Na$  型水;矿化度一般在 3~10 g/L 之间,最高达 33.34 g/L,最低为 0.32 g/L; pH 值为 7.1~8.4,属中性-弱碱性水; $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  一般大于 1.0,局部小于 0.5,  $\gamma_{SO_4}/\gamma_{Cl}$  一般在 1.0 左右,  $\gamma_{Ca}/\gamma_{Na}$

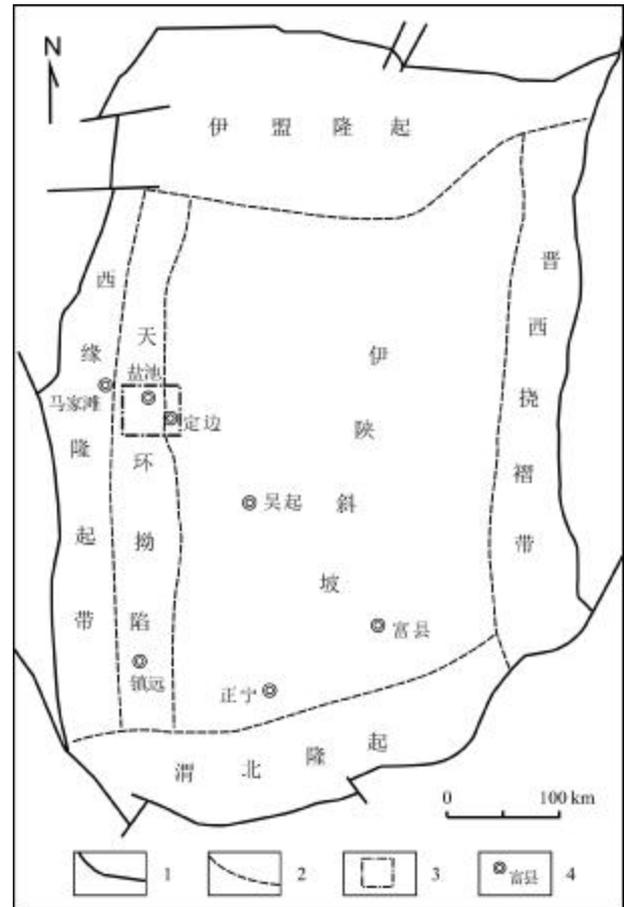


图 1 研究区地质构造及位置示意图

Fig. 1 Geological structure sketch map of the study area with location

1—盆地边界(basin boundary); 2—二级构造单元界线(boundary of second-order tectonic unit); 3—研究区(study area); 4—地名(place name)

在 0.5~3.0 之间.水化学场分布主要有  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$  型、 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$  型、 $HCO_3 \cdot Cl-Na \cdot Ca$  型和  $HCO_3-Ca \cdot Na$  型场.其分布在白于山分水岭向北和西北的水平分带明显,但出现两种水平分带:一是从北部向南和西南隅的水平分带,由  $HCO_3-Na$  型淡水区(0.5 g/L)→ $HCO_3 \cdot Cl(HCO_3 \cdot SO_4)-Na$  型淡水区(0.5~1.0 g/L)→ $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Mg$  型微咸水区,与水文地质补给区→径流区→内流排泄区相对应;二是从白于山分水岭向北和西北的水平分带,由  $SO_4 \cdot Cl-Na \cdot Mg$  型半咸水区→ $HCO_3 \cdot SO_4-Na \cdot Mg$  型淡水区(0.5~1.0 g/L)→ $Cl \cdot SO_4-Na \cdot Mg$  型微咸水区,与水文地质补给区→径流区→内流排泄区相反,即与地下水流向呈“逆”现象,称为“逆向”水平演化分布(见图 2).

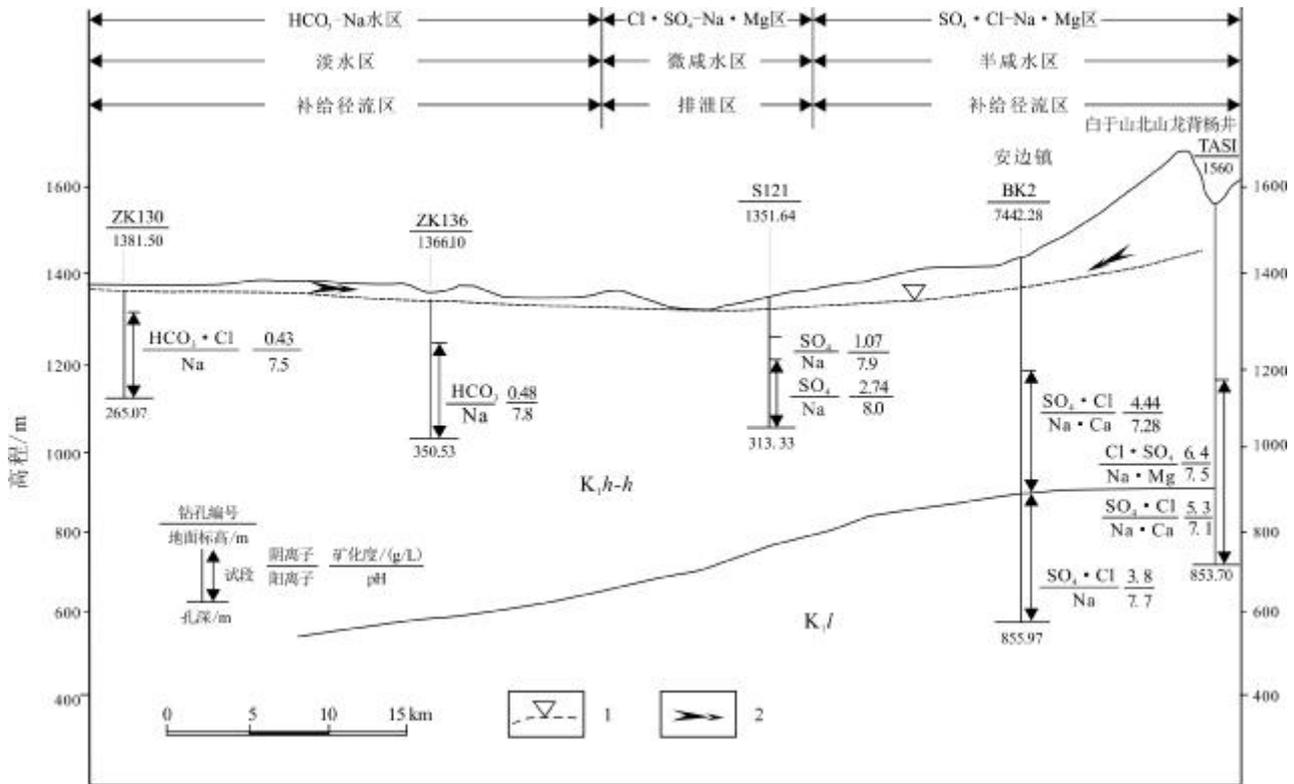


图2 安边镇一带承压水水文地球化学水平分带示意图

Fig. 2 Hydrogeochemical horizontal zonation of the confined water in Anbian Town

1—水位线(water line); 2—地下水流向(groundwater flow direction)

### 3 水化学场的形成机理分析

影响本区水化学场的因素错综复杂,运用现代水文地球化学理论<sup>[20]</sup>,从水化学场的分布特征、岩相古地理和古地下水、地质构造、水文地质条件等因素综合分析,主要有如下几个方面。

#### 3.1 古沉积中心及地层含盐量

古沉积中心及地层原始含盐量是影响该区水化学场的最基本因素。从盐池—定边地区地下水矿化度等值线图和本区白垩系华池—环河组地层底板等高线图(图3)可见,承压水和潜水矿化度大于3 g/L的场分布形态和范围完全与该地层底板等高线低于700 m标高相一致,表现出水化学场与白垩系沉积中心的因果关系。如沉积中心S121号钻孔在117.47~120.15 m的泥质砂岩中分布着微细石膏层,地下水中矿化度2.74 g/L,水化学类型Cl·SO<sub>4</sub>·Na型就是例证。在白垩系华池—环河组沉积期后,该区还发生过两次较为明显的沉积,即古近纪渐新世含盐建造沉积和第四纪中晚更新世湖相沉积,每次沉积均以本区为沉积中心<sup>[21-23]</sup>。如盐池以

西渐新统地层中的盐36号钻孔中,E3地层厚36 m,含多层石膏层,地下水矿化度为6.3 g/L,水化学类型为Cl·SO<sub>4</sub>·Na·Mg型水;第四系中晚更新统在本区分布面积较广,一般厚度60~80 m,最厚149.66 m,其沉积物下部含盐量较高(据地质编录资料推断),如S160、S137、S128等钻孔岩心发白,呈现白色盐霜等(见表1),地下水矿化度17.11~31.65 g/L,水化学类型Cl·Na·Mg型或Cl·SO<sub>4</sub>·Na·Mg型水。以上特征,反映出水化学场的形成与古沉积中心及地层原始含盐量关系密切。

#### 3.2 地质构造

从图3可见,矿化度大于3 g/L的水化学场分布区,断裂构造纵横发育,几条主要近南北向的F<sub>31</sub>、F<sub>34</sub>、F<sub>45</sub>和近东西向的F<sub>13</sub>、F<sub>44</sub>、F<sub>14</sub>构造均通过水化学场区,水化学场的南北向轴与F<sub>31</sub>、F<sub>34</sub>构造方向相吻合,水化学场的东西向延伸与F<sub>13</sub>、F<sub>14</sub>相一致。水化学场的南北向盐池—姬源水化学带主要受F<sub>31</sub>和F<sub>34</sub>两条断裂带的影响,在盐池以北的布隆庙这两条断裂带多有泉水涌

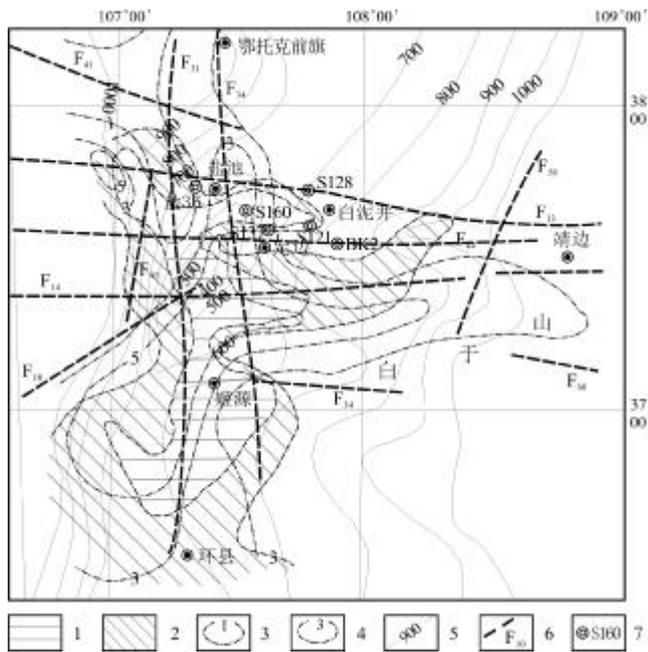


图 3 盐池-姬源水化学场与古沉积中心及断裂构造关系图  
Fig. 3 The relation between Yanchi-Jiyuan hydrochemical field, paleo-depocenter and fault

1—承压水矿化度>5g/L (confined water salinity greater than 5 g/L); 2—承压水矿化度 3~5g/L (confined water salinity of 3~5 g/L); 3—承压水矿化度等值线及量值(g/L) (contour and value of confined water salinity); 4—潜水矿化度等值线及量值 (g/L) (contour and value of phreatic water); 5—底板等高线及数值(m) (bottom contour and value); 6—断裂及编号(fault and number); 7—氯化物水样取样钻孔及编号(chloride water sampling hole and number)

出, 是明显的含水断裂带. 水化学场中的东西向水化学带主要受东西向 F<sub>14</sub>、F<sub>44</sub> 和 F<sub>13</sub> 等 3 条断裂构造带的影响, 卫星图像上明显显示为含水断裂带, 特别是位于定边的 F<sub>44</sub> 和以南的 F<sub>14</sub> 是控制东西向水化学场的主要断裂带. 综上, 断裂构造带明显影响着该段水化学场的分布形态和范围, 南北和东西向断裂构造带的相互作用, 是形成该区水化学场分布形态的重要因素.

晚更新世以后, 该地区受喜马拉雅晚期振荡运动的强烈影响, 差异升降运动造成了白于山较快抬升和

山前断裂的发生, 盐池-定边地区相对呈东西向拗陷, 较快抬升的白于山使古沉积中心含盐量高的岩段一起抬升. 如在白于山分布的 4 个钻孔一般标高 1524~1619 m, 第四系中更新统厚度 112~180 m, 这些含盐量高的地层同样可在地势高处形成高矿化度的地下水 (见图 4). 同样白垩系华池-环河组也属古沉积中心形成的含盐量高的地层, 在地势高处, 含水构造层相对开启, 加之富水性差, 径流缓慢, 强化了盐量在地下水中的积聚, 从而形成了补给区的高矿化度水, 出现了逆地下水流方向的矿化度增高现象.

### 3.3 混合作用

混合作用对形成该区水化学场逆向分布起着重要作用. 四十里梁-定边南北向分水岭与白于山东西向分水岭在该地区西南隅一带交接, 两个不同分水岭从不同方向径流汇集的地下水的混合作用, 形成了以白于山补给区(半咸水场)至定边西梁间洼地排泄区(淡水场)之间夹径流区混合水(微咸水场)的水化学场逆向分布特征. 盐池-定边一线以北的淡水分布区, 系北部地下水径流排泄系统, 该系统在地势高处的淡水(0.5~1 g/L)从北向南径流, 与白于山径流排泄系统的排泄区半咸水(3~10 g/L)混合作用, 形成了排泄区地下水矿化度较低的微咸水(1~3 g/L), 从而造成了排泄区地下水的淡化, 促进了该区水化学场的逆向分布的发展. 排泄区内地势较高的梁岗, 由于基岩裸露, 裂隙发育, 易于大气降水的渗入, 多形成局部淡水体分布. 这些局部淡水体分布与白于山排泄区的半咸水的混合作用, 同样促进排泄区地下水淡化和水化学成分的改变, 造成该地区水化学场逆向分布特征.

### 3.4 地下水运动规律

地下水运动规律会影响水化学场的形成. 前述在红柳沟至白于山一带地层含盐量影响水化学场逆向分布特征较为突出, 而在苟池至白于山一带, 这种逆向分布已变弱, 地下水水化学场改变成较正常的顺向分布.

表 1 定边县 3 个咸水孔水化学特征表

Table 1 Hydrochemical characteristics of three saline drill holes in Dingbian County

孔号	抽水试验段/m	岩性特征描述	矿化度/(g/L)	$\gamma_{Na/\gamma_{Cl}}$	水化学类型
S160	59.6-77	K <sub>1</sub> h-h 中细砂岩夹紫红色泥岩, 其泥岩夹 1.10 m 石膏层及灰绿色砂岩, 岩心有盐霜	17.02	0.792	Cl-SO <sub>4</sub> -Na-Mg
S128	40.88-48.77	Q <sub>1</sub> <sup>1</sup> 黄土状粉土、粉质黏土、粉砂等互层, 岩心干后有大量盐霜	18.45	0.823	Cl-Na-Mg
S137	51.0-60.73	Q <sub>2</sub> <sup>1</sup> 粉砂与细砂互层, 底部砾石层, 岩心发白, 有盐霜, 有咸苦味	25.40	1.033	Cl-SO <sub>4</sub> -Na-Mg

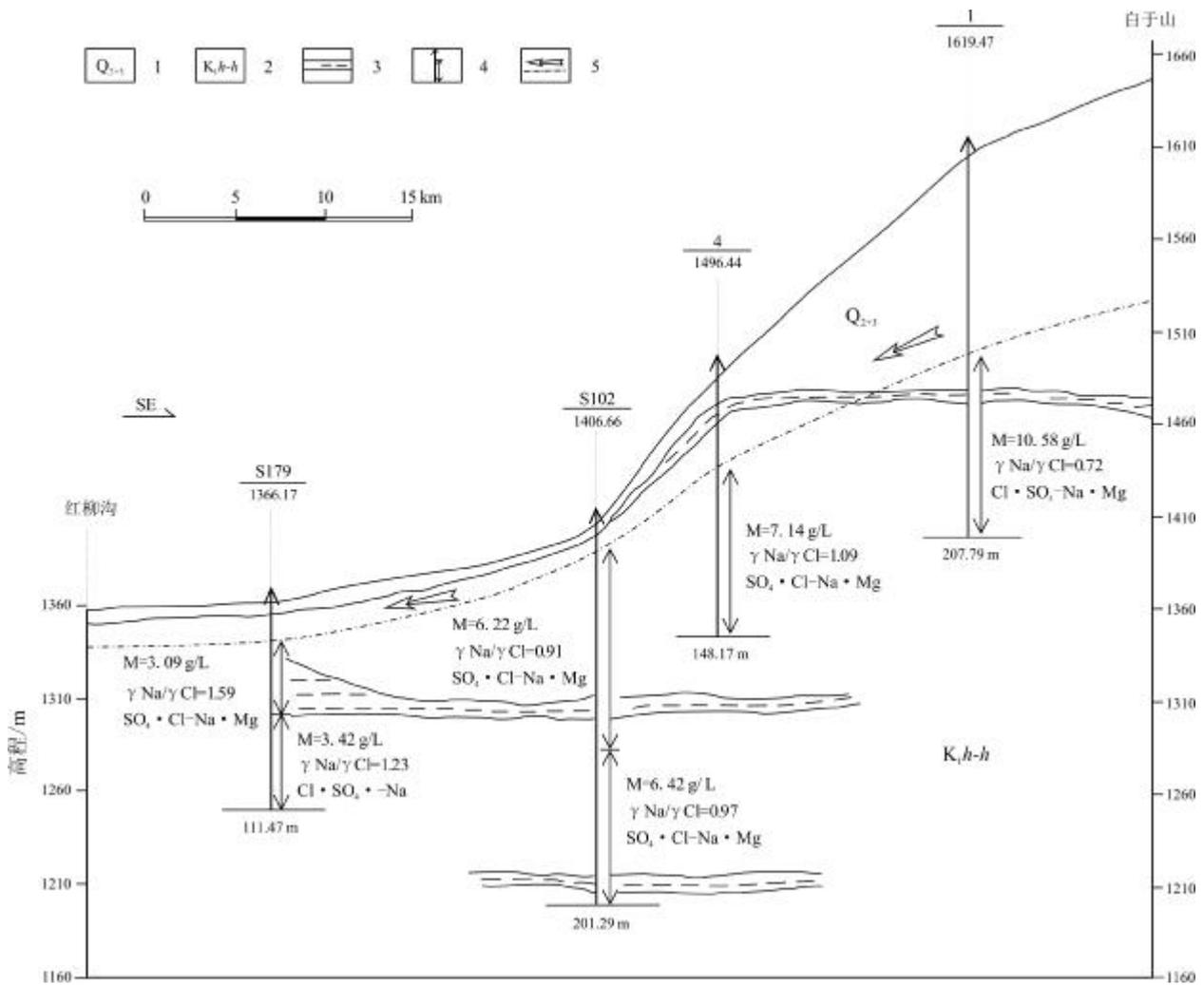


图4 盐池-定边地区红柳沟至白于山地段水文地球化学剖面图

Fig. 4 The Hongliugou-Baiyushan hydrogeochemical profile in Yanchi-Dingbian area

1—中上更新统(Middle-Upper Pleistocene); 2—白垩系华池-环河组(Cretaceous Huachi-Huanhe fm.); 3—泥岩(mudstone); 4—钻孔及抽水试验段(drill hole and pumping test section); 5—地下水位线及流向(groundwater table and flow direction)

从图5来看,白于山东段较西段地下水运动速度大,水交替强烈,水质相对较好.但总观东西两段,对研究目的层白垩系华池-环河组地下水来说,由于受岩石原始含盐量高的影响,地下水水质变化不大,仍属水质较差的地区.

### 3.5 古地下水

该地区承压水水化学场中,水化学类型多为Cl·SO<sub>4</sub>-Na·Mg型水,局部有Cl-Mg型、Cl-Na型、Cl-Na·Mg型水出现,一般γCl>γSO<sub>4</sub>>γHCO<sub>3</sub>,γNa>γMg>γCa,有7个孔γNa/γCl<1,γSO<sub>4</sub>/γCl介于0.222~0.267,γCa/γNa介于0.133~0.5,明显反映出深部承压水的特征<sup>[24]</sup>.由于断裂构造带起着导水排泄地下水的作用,在天环向

斜南端古沉积中心的古洼中,海拔标高在550m以下的埋深处,残存的古地下水在其静水压力和地静压力的作用下,沿断裂构造带向上排泄,与该地区地下水混合,形成明显受断裂构造带控制的水化学场.

### 4 结语

鄂尔多斯盆地盐池-定边地区水化学场的形成条件错综复杂,是受多种因素综合影响的结果.地层原始含盐及古沉积中心是水化学场形成的基本要素,地质构造、水文地质条件是形成水化学场的主要控制因素,古地下水和混合作用是形成水化学类型复杂的重要因素.从水化学场的形成机理分析本区地下水的形

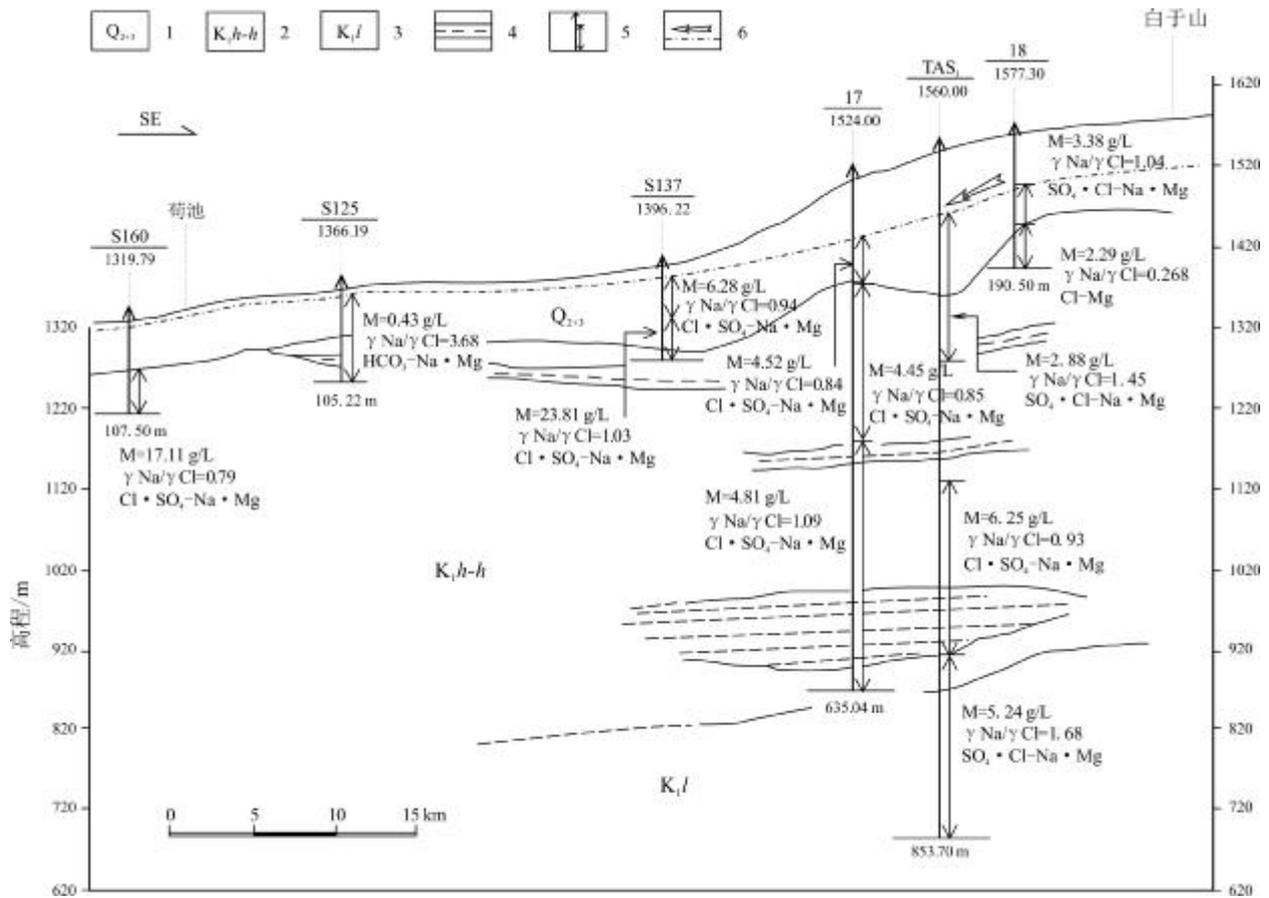


图 5 盐池-定边地区苟池至白子山地段水文地球化学剖面图

Fig. 5 The Gouchi-Baiyushan hydrogeochemical profile in Yanchi-Dingbian area

1—中上更新统(Middle-Upper Pleistocene); 2—华池-环河组(Huachi-Huanhe fm.); 3—含水层(aquifer); 4—隔水层(aquiclude); 5—钻孔及抽水试验段(drill hole and pumping test section); 6—地下水位线及流向(groundwater table and flow direction)

成条件也是十分复杂的,不能单一考虑从大气降水来,或深部补给,应从多方面考虑,才能客观评价本区地下水,合理开发利用地下水. 盐池-定边地区水化学场是鄂尔多斯盆地中较复杂地区,它既具有盆地的同一性,又有它的独特性. 通过该项研究工作,可为进一步认识了解盆地水文地质条件及地下水开发利用提供参考.

参考文献:

[1]侯光才,张茂省,刘方,等. 鄂尔多斯盆地地下水勘查研究[M]. 北京:地质出版社,2008:93-153.  
 [2]徐中华,李云峰,姜凌,等. 鄂尔多斯盆地南区环河组地下水水岩作用研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(9):160-168.  
 [3]张宇龙,范洪海,贺峰,等. 鄂尔多斯盆地南缘彬县地区水文地球化学及铀成矿作用特征[J]. 地质通报,2017,36(4):503-510.

[4]李云峰,李金荣,侯光才,等. 从水文地球化学角度研究鄂尔多斯盆地南区白垩系地下水的排泄途径[J]. 西北地质,2004,37(3):91-95.  
 [5]张蕊蕊. 鄂尔多斯盆地北部白垩系地下水水化学特征及影响因素研究[J]. 煤炭与化工,2019,42(1):57-60,64.  
 [6]张治波,刘腾,李丽荣,等. 鄂尔多斯盆地 CD 区块长 6 地层水化学性质及其地质意义[J]. 矿物岩石,2017,37(3):61-68.  
 [7]吴春勇,苏小四,郭金森,等. 鄂尔多斯沙漠高原白垩系地下水水化学演化的多元统计分析[J]. 世界地质,2011,30(2):244-253.  
 [8]Yang Q C, Wang L C, Ma H Y, et al. Hydrochemical characterization and pollution sources identification of groundwater in Salawusu aquifer system of Ordos Basin, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216:340-349.  
 [9]杨郅城,沈照理,文冬光,等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源[J]. 地球学报,2008,29(5):553-562.  
 [10]苏耀明,朱琳,苏小四,等. 基于 GIS 的鄂尔多斯白垩系盆地浅层地下水水质分布规律研究[J]. 水文地质工程地质,2009,36(1):24-29.

(下转第 293 页 /Continued on Page 293)

- [6]石雅静. 电感耦合等离子体发射光谱法在各个领域的应用综述[J]. 当代化工研究, 2018(5):82-84.
- [7]辛仁轩. 等离子体发射光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 161.
- [8]任玲玲, 戚振南, 王兵. 谱线拟合校正-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钢铁中锌的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2018, 54(10):1222-1224.
- [9]韩晓. 电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法测定铜原矿和尾矿中的多元素[J]. 中国无机分析化学, 2016, 6(3):27-31.
- [10]赵庆令, 李清彩. 电感耦合等离子体发射光谱法同时测定土壤样品中 54 种组分[J]. 岩矿测试, 2011, 30(1):75-78.
- [11]孙晓慧, 李章, 刘希良. 微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定土壤和水系沉积物中 15 种组分[J]. 冶金分析, 2014, 34(11):56-60.
- [12]杨柳, 高慧莉, 汪寅夫, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测高纯银中 19 种微量元素[J]. 地质与资源, 2019, 28(1):95-97.
- [13]邬晓蒙. 发射光谱法测定区域化探样品中的 Pb、Sn、Mo、V 元素[J]. 地质与资源, 2018, 27(6):582-585.
- [14]胡璇, 李跃平, 石磊. 基体匹配法和内标法-电感耦合等离子体原子发射光谱测定铸造锌合金中高含量铝和铜光谱干扰校正的比较[J]. 冶金分析, 2014, 34(4):17-20.
- [15]潘慧, 冯光勇, 康元. ICP-AES 标准加入法测定电镀排放废水中 Cd、Cr、Ni[J]. 工业水处理, 2014, 34(12):82-83, 90.
- [16]龚琦. 对电感耦合等离子体发射光谱法中一些问题的认识[J]. 冶金分析, 2018, 38(9):26-30.

(上接第 265 页 /Continued from Page 265)

- [11]胡鹏, 于兴河, 王娇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组地层水化学特征与天然气成藏意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(1):92-100, 109.
- [12]罗建强, 何忠明. 鄂尔多斯盆地中生代构造演化特征及油气分布[J]. 地质与资源, 2008, 17(2):135-138.
- [13]刘亚洲, 刚文哲, 陈果, 等. 鄂尔多斯盆地盐池一定边地区长 7 段烃源岩芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4):818-828.
- [14]杨才, 冯岩, 白灵麒, 等. 鄂尔多斯盆地北部太原组海陆过渡相页岩孔缝特征及油气地质意义[J]. 地质与资源, 2018, 27(4):389-395.
- [15]王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1):6-14.
- [16]徐志玲, 徐永利, 李燕萍. 鄂尔多斯地下水分布特征研究[J]. 内蒙古水利, 2010(4):93-94.
- [17]聂振龙, 张光辉, 申建梅, 等. 西北内陆盆地地下水功能特征及地下水可持续利用[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1):63-66.
- [18]董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水矿化度和主要离子浓度的分布规律[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4):11-16.
- [19]董维红, 苏小四, 侯光才, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2):288-292.
- [20]钱会, 马致远. 水文地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2005:25-113.
- [21]郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J]. 古地理学报, 2019, 21(2):293-320.
- [22]谢渊, 王剑, 殷跃平, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学初探[J]. 地质通报, 2003, 22(10):818-828.
- [23]谢渊, 邓国仕, 刘建清, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系主要含水岩组沉积岩相古地理对地下水水化学场形成和水质分布的影响[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3):64-74.
- [24]万玉玉, 苏小四, 董维红, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地中深层地下水可更新速率[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3):623-630.