

文章编号: 1009-3850(2012)03-0064-11

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

谢 渊¹, 邓国仕¹, 刘建清¹, 董维红², 鲁洪江³

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2. 吉林大学, 吉林 长春 130021; 3. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 通过典型水文钻孔和露头剖面沉积地质、水文地质调查、样品测试及综合研究表明, 鄂尔多斯盆地白垩系含水层形成时, 北部环河组、洛河组均广泛发育河流相沉积, 而南部环河组湖泊相为主、洛河组沙漠沙丘相广泛分布的沉积古地理格局, 这对含水岩石中长石、粘土矿物、方解石、石膏等重要矿物组成和易溶盐含量及其空间分布形成明显控制, 也控制了含水层和隔水层空间分布, 并显著影响了深层地下水循环交替条件的区域分布变化。在沉积-成岩环境条件下, 影响地下水水化学场形成和水质分布变化的主要水-岩作用包括硫酸盐、碳酸盐及硅酸盐矿物的溶解溶滤和阳离子交换作用等水文地球化学作用。受含水层沉积岩相古地理、地下水循环及水岩作用等因素控制, 环河组、洛河组地下水总体表现为盆地北区 TDS 低、淡水发育、以 HCO_3^- 型为主, 南区 TDS 高、微咸水和咸水发育、以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型为主的分布规律, 地下水水化学和水质分布在北区分布变化小、在南区上下含水层分布变化复杂。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 洛河组和环河组; 沉积岩相古地理; 含水岩石矿物和化学组成; 水-岩作用; 地下水水化学场形成与水质分布

中图分类号: P641.11

文献标识码: A

1 引言

鄂尔多斯盆地蕴藏着丰富的油气、煤炭、铀矿及钾盐等矿产资源, 但地表水资源匮乏, 赋存于白垩系等地层中的地下水, 是当地能源资源开发和生产生活的重要水源。

白垩系主要分布于盆地中西部, 面积达 13 万余平方公里, 厚逾千米, 自下而上发育洛河含水岩组 (K_1l , 包括宜君组 K_{1y} 和洛河组 K_{1l})、环河含水岩组 (K_1h , 包括华池组和环河组)、罗汉洞含水岩组 (K_1lh , 包括罗汉洞组和分布极为局限的泾川组) [3]

套碎屑岩含水岩组, 构成一个由多套含水层和隔水层叠加、结构复杂、厚度巨大的巨型地下水盆地^[1-8]。由于不同地区自然地理、含水岩石形成的沉积环境、水文地质结构、地下水赋存条件以及循环条件等方面的差异, 白垩系地下水水化学类型和水质空间分布极为复杂^[1-8], 极大地制约了地下水资源的有效高效开发利用。

本文针对鄂尔多斯盆地白垩系洛河组、环河组两套主要含水岩组地下水水化学类型和水质形成与空间分布复杂的科学问题, 基于地下水水化学形成的物质来源与背景条件并从演化的角度, 通过大

收稿日期: 2012-09-30

作者简介: 谢渊 (1971 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质、沉积地质及水文地质调查研究。E-mail: chdxyuan@sina.com

资助项目: “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室基金项目 (PLC200803)、国家自然科学基金项目 (40872085、40302020)、国土资源大调查项目 (200112100006、1212010331302ZT1-2) 及四川省杰出青年学科带头人培养计划项目 (07ZQ026-037) 联合资助

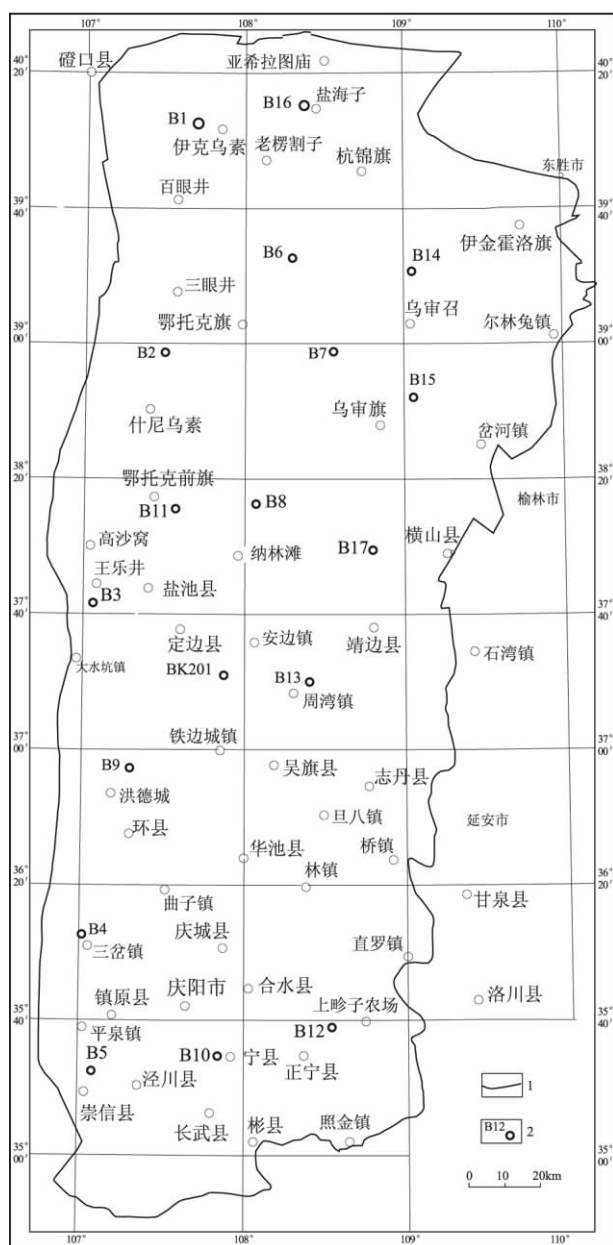


图1 研究区位置及主要采样水文钻孔分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of hydrological boreholes

量典型水文钻孔(图1)和露头剖面沉积地质、水文地质调查研究工作,分析了洛河组、环河组沉积时的岩相古地理特征,及其所控制(影响)的含水岩石主要碎屑矿物、碳酸盐矿物、粘土矿物、石膏等典型填隙矿物和易溶盐含量分布特征,进而深入探讨了岩相古地理条件对地下水的水化学和水质的形成与分布的影响关系,为深入揭示白垩系地下水水质成因与空间分布规律、促进地下水开发利用提供了重要的地质依据。

2 含水岩石沉积古地理环境特征

在以往工作基础上^[2-10],通过大量典型露头剖面、水文钻孔及石油钻井资料的沉积地质分析、样品测试及综合研究表明,洛河组和环河组沉积时,鄂尔多斯盆地总体呈北高南低、东高西低的古地形特征,北部河流、沙漠发育,南部沙漠、湖泊发育(图2)。其中,洛河组沉积时,盆地北部主体为河流和沙漠沙丘环境,南部沙漠沙丘环境广布,局部为沙丘间和沙漠湖。因此,受沉积岩相古地理的控制,洛河组含水砂岩在全盆分布稳定、厚度较大,而泥质岩等隔水层厚度小、分布不稳定。这对后期及现今洛河含水岩组地下水循环交替作用、水化学组成、水质的形成与分布有着重要的控制作用。

环河组沉积时,盆地北部总体属于河流环境,南部主要为湖泊、三角洲环境。因此,受沉积岩相古地理的控制,盆地北部含水砂岩多呈厚层稳定分布、厚度较大,泥质岩等隔水层不发育;而南部含水砂岩厚度小、分布不稳定,呈薄层状或透镜状与泥质岩等隔水层犬牙交错叠置。这对后期及现今环河含水岩组地下水循环交替作用、水化学组成、水质的形成与分布产生了深远影响。

此外,通过沉积地球化学特征对洛河组、环河组沉积水体环境化学特性进行了恢复。大量泥质岩、泥质粉砂岩等岩石样品微量元素测试分析表明,洛河组沉积岩中 B、Sr、Ga、V、Ni 等微量元素平均含量分别为 38.4 $\mu\text{g/g}$ 、223.4 $\mu\text{g/g}$ 、11.3 $\mu\text{g/g}$ 、18 $\mu\text{g/g}$ 、50.6 $\mu\text{g/g}$, B/Ga、Sr/Ba、V/Ni 比值平均分别为 4.5、0.4、3.9;环河组沉积岩中 B、Sr、Ga、V、Ni 等微量元素平均含量分别为 85.6 $\mu\text{g/g}$ 、393.7 $\mu\text{g/g}$ 、18.7 $\mu\text{g/g}$ 、91.9 $\mu\text{g/g}$ 、34.7 $\mu\text{g/g}$, B/Ga、Sr/Ba、V/Ni 比值平均分别为 5.1、0.9、2.8。结合以往沉积地球化学研究认识^[3-5,11-14]和洛河组、环河组沉积岩常量、微量元素含量分布特征分析表明,两套含水岩组沉积水体盐度时空分布非均一性较强,盆地北部洛河组、环河组沉积时总体为淡水环境,水体盐度正常且分布稳定。而南部水体盐度时空分布较为复杂,洛河组沉积水体盐度较低。环河组沉积水体盐度偏高,大多介于海水与淡水之间,部分达到海水级别,尤其是西南缘盐度最高,仅局部水体盐度正常。沉积水体环境化学特性及分布,对洛河组、环河组含水岩石化学组成、地下水水化学形成与演化,以及水质空间分布产生源头性影响。

3 含水岩石矿物和化学组成及其分布特征

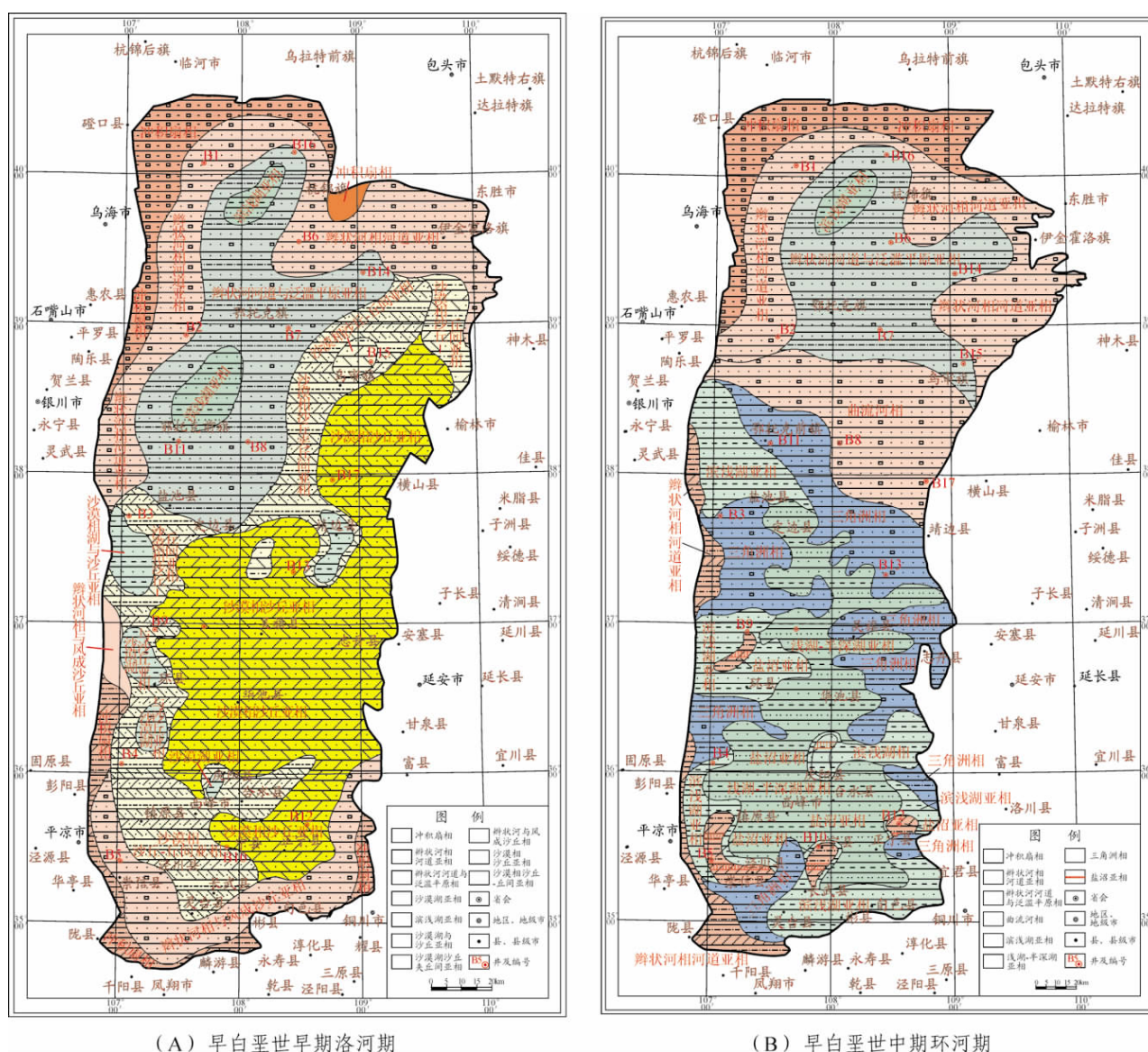


图2 鄂尔多斯盆地早白垩世早中期沉积岩相古地理概略图

Fig. 2 Simplified sedimentary facies and palaeogeographic maps of the Ordos Basin during the early (A) and middle (B) stages of the Cretaceous

3.1 含水砂岩主要碎屑矿物组成及其分布特征

在以往工作基础上^[3-6,10],结合大量薄片鉴定和全岩X衍射测试结果分析表明,洛河组含水砂岩中石英含量平均为68%,以单晶为主;长石平均含量为22.4%,主要为斜长石和钾长石,且盆地北部长石含量总体高于南区;岩屑含量平均为8.5%,成分以沉积岩、变质岩为主;含少量钙质、铁泥质填隙物,岩石胶结较弱、结构疏松。

环河组含水砂岩石英含量平均为66.5%,以单晶为主;长石平均含量为23.5%,主要为斜长石和钾长石,盆地北部长石含量高于南区;岩屑含量平均为9.6%,成分以沉积岩、变质岩为主。与洛河组相比,环河组含水砂岩中长石、岩屑含量有所增加,

而石英略微减少,且以泥质、泥钙质胶结为主,次为钙质胶结。

全盆两套含水砂岩中,长石均以斜长石($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ 和 $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$)为主、正长石(主要为钾长石, $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)次之,反映出白垩系砂岩中硅酸盐矿物相对富含 Na^+ 和 Ca^{2+} ,而贫 K^+ 。此外,盆地北部两套含水砂岩甚少见白云石,而在南区白云石尽管含量低但分布普遍,表明盆地南部含水砂岩较北区富含 Mg^{2+} 。盆地北部两套砂岩中均很少发现黄铁矿,但南区相对较多见,可见盆地南部砂岩沉积-成岩环境较北区偏还原。

3.2 含水岩石粘土矿物组成及其分布特征

大量岩石薄片、X射线衍射、扫描电镜及阴极发

光等分析测试表明,洛河组含水砂岩粘土矿物含量平均为 3%,环河组均值高达 9%,砂岩粘土矿物组合均以 I+C+I/S 型、I+C 型为主,缺少高岭石、蒙脱石和绿/蒙混层粘土矿物^[15]。

洛河组含水砂岩粘土矿物中,伊利石、绿泥石、伊/蒙混层平均含量分别为 41%、22%、30%,23% 的样品中见少量高岭石(平均含量为 5%)。盆地北部伊利石、绿泥石平均含量分别为 42%、23%,大部分样品含较多伊/蒙混层矿物(平均含量为 29%),少部分样品(13 件)见少量高岭石(平均含量 4%);盆地中部伊利石、绿泥石平均含量均降低 10% 左右,伊/蒙混层矿物含量升高至 40%;盆地南部伊利石、绿泥石含量与盆地北部大体一致,但伊/蒙混层矿物含量(27%)均低于盆地北部和中部,27% 的样品含有 9% 的高岭石。

环河组砂岩粘土矿物中伊利石、绿泥石含量(分别为 43%、27%)较洛河组略有增加,仅 5% 的样品见少量高岭石(2%)。盆地北部砂岩伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物含量分别为 41%、27%、30%;中部伊利石、绿泥石粘土矿物含量较北部略有减少,伊/蒙混层矿物含量略有升高(32%),个别样品见少量高岭石;南部伊利石、绿泥石含量均较中部、北部大幅增加,分别为 52%、28%,但伊/蒙混层矿物含量大幅降低至 20%。

综合分析表明,洛河组、环河组含水砂岩粘土矿物兼有陆源碎屑成因与沉积-成岩过程自生成因两种类型,粘土矿物组成总体反映出沉积当时处于干旱-半干旱气候环境,物理风化作用强烈,而化学风化淋滤作用较弱,局部时段因气候波动处于湿热气候环境。同时也显示出,洛河组、环河组沉积期及埋藏成岩过程中,水介质总体具有盐度较高,偏碱性,富 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的化学特点。从洛河组、环河组含水砂岩在盆地北部伊利石、绿泥石粘土矿物含量低于南部的总体分布特点来看,盆地南部沉积-埋藏环境的水介质盐度均高于北部,且更趋偏碱性,更富 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 。从洛河组砂岩伊利石、绿泥石含量均以 1~5% 的差量低于环河组显示出,环河组沉积-埋藏环境的水介质盐度高于洛河组,且更趋偏碱性,更富 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 。

3.3 含水岩组石膏类矿物组成及其分布特征

地层中石膏等硫酸盐矿物是地下水中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 等离子的富集的重要物源。大量水文钻孔岩心观察和含水岩石薄片鉴定等研究表明,洛河组、环河组不同程度地分布有石膏类硫酸盐矿物,以石

膏最为常见,次为硬石膏。据产出状态可分为 3 类石膏类矿物:一是层状石膏岩层;二是沿裂隙、裂缝、层理缝产出的脉状石膏类矿物;三是以胶结物等形式产出的石膏类矿物^[16]。

洛河组中,石膏类矿物总体上分布局限、产状单一。在盆地北部部分钻孔中,于洛河组中下部见到胶结物型石膏、少量胶结型硬石膏,仅在处于盆地南北过渡带的 B8 孔见到极薄层纤维状石膏(B8-b61);在盆地南部所有水文钻孔中,洛河组下部多见胶结型石膏。

环河组中,石膏类矿物在盆地北部少见,但在南部分布广泛、产状复杂。南部几乎所有水文钻孔中都可见到石膏类矿物,层状石膏、裂隙状石膏脉及胶结物型石膏或硬石膏均较发育,尤其多见层状石膏层和裂隙状石膏脉。

分析认为,洛河组中下部形成的胶结型石膏类矿物,与上覆地层硫酸盐矿物的溶解、地下水循环变得滞缓、离子富集而引起的沉淀胶结有关,尤其是在盆地南部,受到上覆环河组中层状、裂隙状、胶结型石膏类矿物的溶解作用的源头性影响。

3.4 含水岩组阴阳离子含量及易溶盐总量区域分布特征

大量含水岩石易溶盐含量测试分析表明,盆地北区洛河组、环河组易溶盐平均含量分别为 110 mg/100g、151.2 mg/100g,总体上均低于盆地南部环河组(249.6 mg/100g),而略高于盆地南部洛河组(82.3 mg/100g)。

盆地北部,洛河组含水岩石中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要阳离子含量和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子含量及阴阳离子总量与环河组基本相当,这一方面是因为二者基本上都主要是河流相沉积,含水砂岩孔渗性较好、隔水层不发育,水循环交替活跃,盐分富集程度和水-岩化学成分交换条件基本相当。

而盆地南部,洛河组含水岩石中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要阳离子含量和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子含量及阴阳离子总量均明显低于环河组,这主要是因为洛河组沉积时主要为干旱气候沙漠沙丘砂岩沉积,盐分物质稀少,加之主要为结构疏松的砂岩沉积,成岩及水岩作用过程中水循环和化学成分交换活跃,因此沉积砂岩易溶盐含量低;而环河组主要为干旱-半干旱湖泊沉积,盐分物质较为富集,加之主要为结构致密细碎屑及泥质岩沉积,成岩及水岩作用过程中水循环和化学成分交

换作用滞缓,因此沉积岩石盐分较为富集、易溶盐含量较高。

4 沉积岩相古地理对地下水水化学和水质的形成与分布的影响

4.1 沉积岩相古地理条件对地下水循环条件的影响

受沉积岩相古地理控制,盆地北部洛河组、环河组均广泛发育河流相砂岩等中粗碎屑岩(图2)。含水砂岩宏观上呈厚层稳定分布,泥质岩等隔水层不发育,含水砂岩孔渗性普遍较好,既有利于地下水的赋存,更有利于地表水入渗,地下水流动交替,地下水循环积极活跃。因此盆地北部洛河组、环河组总体上为一套厚度巨大、均质性较强的地下水赋存-循环系统^[3-6]。

而在盆地南部,洛河组、环河组沉积相垂向演化复杂、横向变化频繁^[3-6](图2)。含水岩石与隔水层岩石交错分布,地下水循环交替条件复杂。上部的环河组主要为湖泊、三角洲相泥质岩、中细砂岩等碎屑岩组成。宏观上含水砂岩呈薄层或透镜状不稳定分布,与泥质岩等隔水层犬牙交错叠置,加之含水砂岩孔渗性相对较差,客观上造成既不利于地下水赋存,更不利于地下水循环交替。但下部洛河组沙漠沙丘砂岩广泛发育,含水砂岩纵向上分布连续稳定。含水岩石本身孔隙发育、渗透性良好,具有良好的地下水循环流动通道。但由于受其上覆环河组广泛分布的泥质岩层的阻隔,对地表水垂直下渗参与洛河组地下水循环的积极活跃程度造成严重消极作用,也对白垩系地下水循环条件纵横向分布格局产生极其重要的影响。

4.2 沉积-成岩背景条件下地下水水化学场和水质的形成作用

综合前人大量地下水测试数据综合分析认为,影响盆地白垩系洛河组、环河组地下水水化学场和水质形成的地质作用,主要包括溶滤作用、阳离子交替吸附作用、蒸发浓缩作用和混合作用^[1-2,8,17-19],这些作用无疑是在沉积-成岩环境中发生并受其影响而控制着地下水水化学场和水质的形成与分布。

1. 溶滤作用

溶滤作用是洛河组、环河组地下水水化学场和水质形成的主要地质作用,地下水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要阳离子与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子就主要是通过溶滤作用源于含水介质。

从含水介质易溶盐组分含量与地下水化学相

应组分含量良好正相关关系可见,溶滤作用是地下水水化学场和水质形成的主要地质作用。盆地北部、东部大部分环河组和洛河组河流相、沙丘相含水岩层易溶盐含量一般小于 $50mg/100g$, 其中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等主要阳离子与 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等阴离子与地下水中达到基本平衡,地下水水化学类型多为 $HCO_3^-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3^-Na \cdot Mg$ 型,矿化度小于 $1 g/L$; 而盆地南部大部分环河组湖泊相含水岩层易溶盐含量一般在 $100mg/100g$ – $200mg/100g$, 地下水矿化度大都大于 $1 g/L$ 。盆地北部 B6 孔白垩系地下水 TDS 低值带与岩石易溶解盐含量低值带基本一致,在 $700 \sim 800m$ 深度区间地下水 TDS 含量与易溶盐含量一同出现高值带(图3),底部($900m$ 左右)地层易溶盐含量低而地下水 TDS 含量较高,可能是因为该处深部地下水处于滞留时间久的驻点附近,因长时间水-岩作用所致。盆地东北部 B15 孔洛河组岩石易溶盐含量呈现出垂向均一性($300mg/kg$ 左右),而地下水 TDS 除在浅部偏高外,也表现出垂向均一性;浅层地下水 TDS 偏高可能是因地表强烈蒸发浓缩作用所致。

从含水层中典型碳酸盐和硫酸盐矿物饱和指数看,溶滤作用是地下水水化学场和水质形成的主要地质作用。B1、B6、B16 等水文钻孔 Packer 地下水分层取样测试获得方解石矿物饱和指数 SI 值介于 $-1.45 \sim -0.89$, 平均值为 -0.08 , 其中 B1、B6、B16 孔等盆地北部摩林河-盐海子和 B14 孔等无定河-乌兰木伦河一带 SI 值为负值,说明方解石矿物在上述地区主要发生溶解作用;而在盆地其它地区,地下水中方解石已处过饱和状态,主要表现为沉淀作用。此外,全盆洛河组、环河组地下水中石膏和岩盐的饱和指数均为负值,表明其主要发生了溶解作用。

从吉布斯图(图4)也可反映不同地区溶滤作用在水化学场形成中的重要作用。盆地北部补给区,地下水 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值与溶解性固体(TDS)较低(B6、B7、B8 孔等鄂托克-四十里梁分水岭附近),显示岩石风化溶滤作用下形成的典型地下水特征。B15 孔附近地势较高并向东迅速降低,导致该区地下水也以垂向向下径流为主。在径流和排泄区,地下水与岩石作用时间较长,随着径流地下水中盐分逐渐积累,溶解度不同的矿物成分依次达到饱和而不断发生沉淀作用。由于碳酸盐类矿物在水中的溶解度小于岩盐,因此从地下水径流区到排泄区,随着水-岩作用的进行, HCO_3^- 在阴离子中

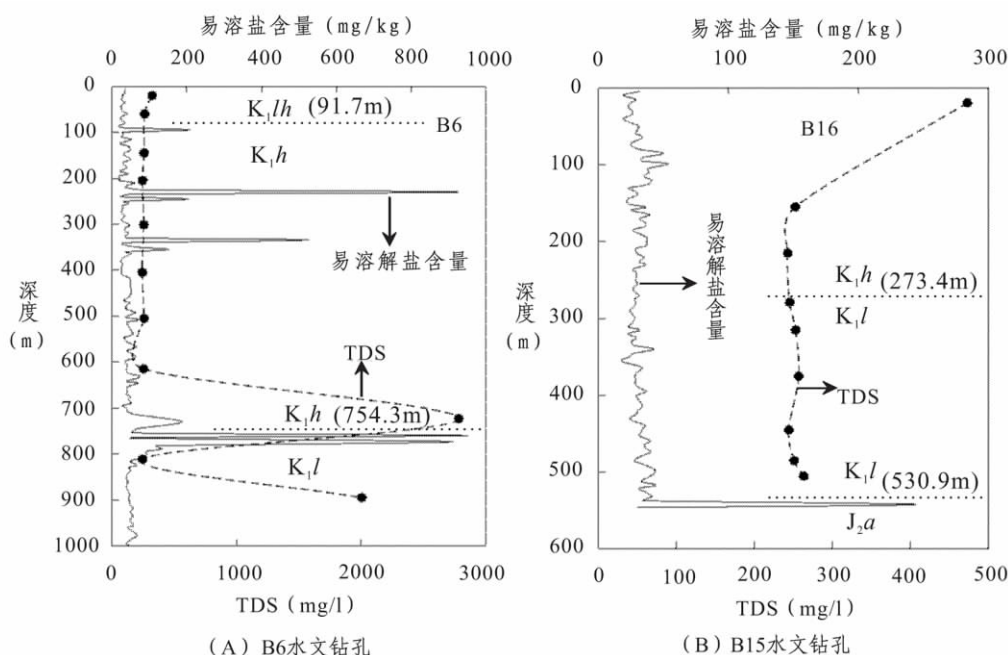


图3 白垩系典型水文钻孔岩石易溶盐含量与地下水 TDS 随埋深变化图

Fig. 3 Soluble salt contents and TDS as a function of burial depths through the representative hydrological boreholes in the Cretaceous aquifers from the Ordos Basin

所占比例逐渐减小而 Cl^- 所占比例逐渐增大,地下水总溶解固体含量也逐渐增大。在地下水径流区 TDS 多数大于 2 g/L , $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值为 $0.2 \sim 0.8$ (B13、B14 孔); 而在排泄区 TDS 多数大于 3 g/L , $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值为 $0.5 \sim 1.0$ (B1、B2、B3、B16、B17 孔), 说明径流和排泄区矿物沉淀作用逐渐增强。由于 B11 孔地处闭流区, 地下水流缓慢, 具有排泄区地下水化学特征, 因此位于吉布斯图中的排泄区范围内。

此外, 从地下水样测试获得的 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 关系图(图 5) 也可见溶滤作用在水化学场形成中起到的关键性作用。盆地北部鄂尔多斯市-陶乐县以南大部分地区地下水样品(B3、B13、B15、B17) 的 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值接近于 1, 表明碳酸盐、硅酸盐矿物的溶解是该区地下水化学形成的主要作用; 而以北大部分地区地下水样品(B1、B2、B14、B16) 的 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值远小于 1, 反映该区主要发生硅酸盐或硫酸盐矿物的溶解; 而局部地区(如位于闭流区内的 B6 孔、位于四十里梁分水岭附近的 B8 孔) 地下水的 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 值变化较大, 反映水化学形成作用比较复杂, 碳酸盐矿物、硫酸盐矿物和硅酸盐矿物均发生了溶解, 共同影响着地下水化学组分的形成。

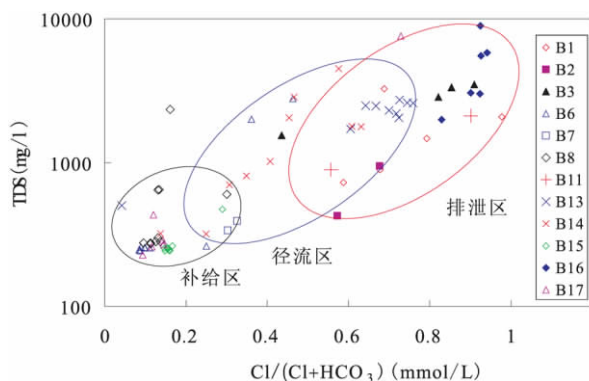
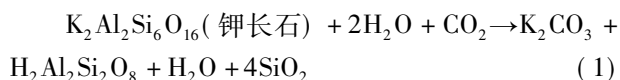


图4 白垩系典型水文钻孔地下水样吉布斯图

Fig. 4 Gibbs diagram showing the effects of the dissolution on the formation of the hydrochemical fields and distribution of the groundwater

此外, 由 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 的关系图可以看出, 地下水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 远远大于 Cl^- (图 6), 说明地下水中的 K^+ 和 Na^+ 离子除了来源于岩盐的溶解以外, 普遍受到钾长石、斜长石等硅酸盐矿物溶解(1) 的影响。



2. 阳离子交替吸附作用

阳离子交替吸附作用是洛河组、环河组地下水化学场和水质形成的重要地质作用。阳离子交换反应主要包括以下典型反应方式:

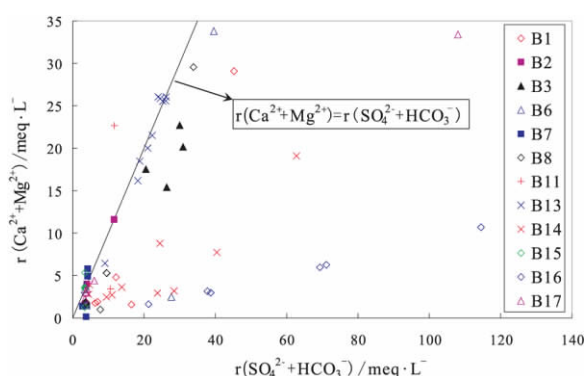
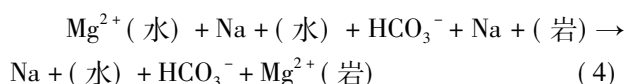
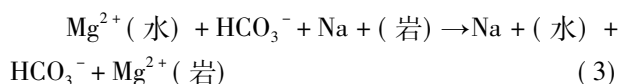
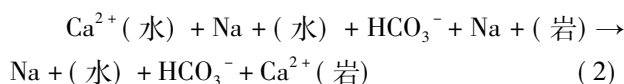
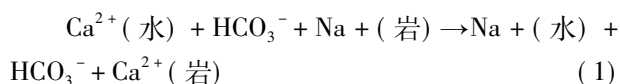


图5 白垩系典型水文钻孔地下水样主要阴阳离子含量散点关系图

Fig. 5 $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ vs. $r(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ diagram for the groundwater samples from the representative hydrological boreholes in the Cretaceous aquifers from the Ordos Basin

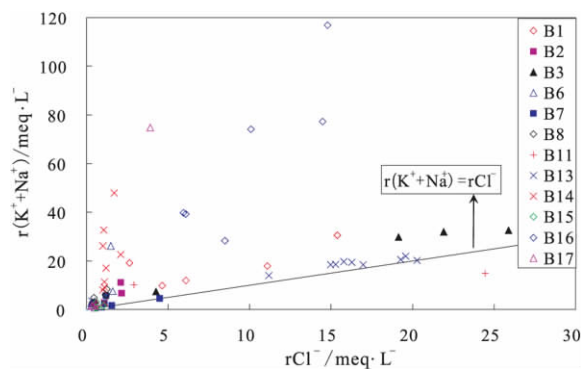


图6 白垩系典型水文钻孔地下水样典型阴阳离子含量散点关系图

Fig. 6 $r(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ vs. $r\text{Cl}^-$ diagram for the groundwater samples from the representative hydrological boreholes in the Cretaceous aquifers from the Ordos Basin

在鄂托克旗-乌审旗剖面东部环河组地下水的钠吸附比值(SAR)顺地下水流向变化较大,水化学类型变化也与SAR类似,从 $\text{HCO}_3^- \text{Ca}$ 型到 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型以及 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型呈现规律性变化。由于在盆地上部环河组分布大面积的浅湖-半深湖亚相沉积和三角洲相沉积,而在深层洛河组中仅局部分布沙漠湖亚相沉积,因此,上部含

水岩组中发生的阳离子交替吸附作用应该强于深层。在白于山以北的乌审旗、杭锦旗、鄂托克旗地区,环河组地下水矿化度一般小于0.5g/L,多为 $\text{HCO}_3^- \text{Na}$ 型水、 $\text{HCO}_3^- \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水或 $\text{HCO}_3^- \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水,其主要原因是阳离子交替吸附作用。

白垩系盆地多数地区地下水的 $r\text{Na}^+ / r\text{Ca}^{2+}$ 大于1,仅乌审旗地区B15孔不同深度的地下水样品和B3、B6、B7、B8、B14孔局部深度范围的地下水样品的 $r\text{Na}^+ / r\text{Ca}^{2+}$ 小于1(图5),说明多数地下水存在 Ca^{2+} 缺失的现象,而地下水中 Ca^{2+} 的缺失一般都是蒸发沉淀作用和阳离子交换作用的结果。

3. 混合作用

在含水层沉积岩相古地理条件、水文地质结构、地下水循环条件等因素的共同影响下,洛河组、环河组不同水体间的混合作用对地下水化学场的形成及空间分布产生重要的影响。在盆地北部,洛河含水岩组、环河含水岩组由于缺乏区域稳定隔水层,含水层之间连通性好,垂向水力联系十分密切,整体构成一个巨厚含水层,强烈的混合作用是产生淡水分布区域广、发育深度大的最重要的水文地球化学作用。在补给区,低矿化的大气降水在垂直向下入渗过程中使得地下水矿化度降低;而在排泄区,中、深层高矿化的地下水在向上顶托排泄过程中与上部的浅层地下水之间的混合作用使得排泄区浅层地下水矿化度明显增高。在盆地南部,上部环河含水岩组分布较广的隔水层,含水层之间连通性相对较北部差,尤其对下伏洛河含水岩组的水力联系相对较弱;但在补给区,低矿化的大气降水在垂直向下入渗过程中仍可使得地下水矿化度降低;在排泄区,中、深层高矿化的地下水在向上顶托排泄过程中与上部的浅层地下水之间的混合作用仍可使得排泄区浅层地下水矿化度明显增高。

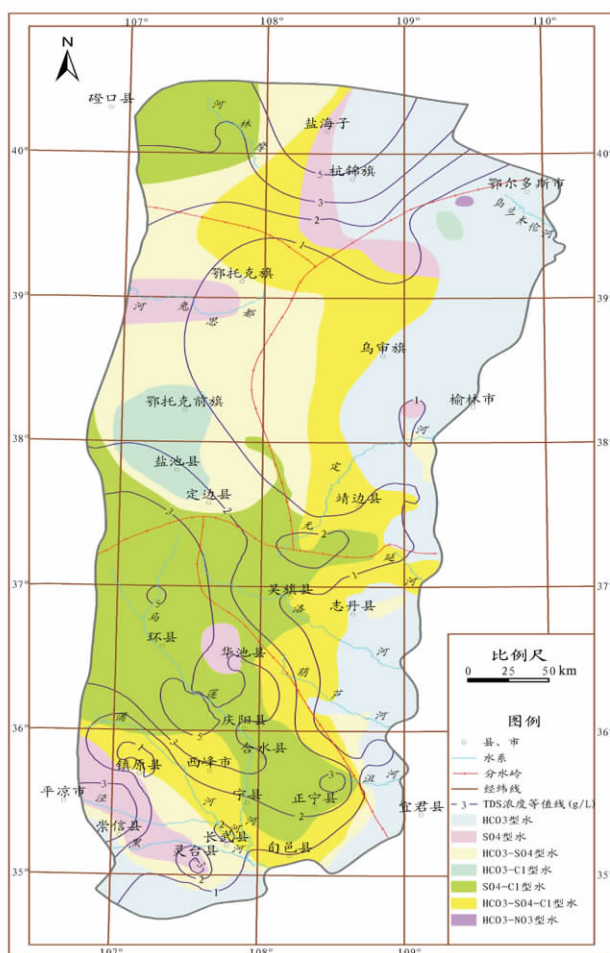
4. 蒸发浓缩作用

蒸发-浓缩作用在洛河组、环河组地下水水化学成分和矿化度的形成与改造过程中也起着较为重要的作用。由于现今盆地位于干旱-半干旱气候区,大气降水稀少,蒸发-浓缩作用强烈,这直接影响着区内地表水体和浅层地下水的水化学成分和矿化度。盆内新能源基地大部分地区属于波状起伏高原区,在现代内流区洼地浅层地下水位埋深较浅,一般为1m左右,地下水的蒸发浓缩作用十分强烈,形成了矿化度多大于1g/L的 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ 型水。

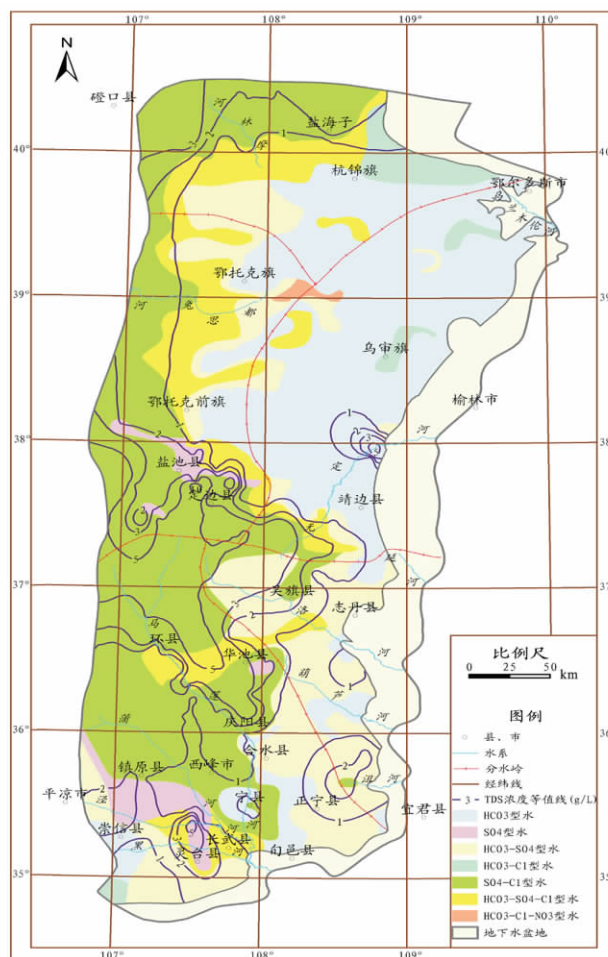
4.3 沉积岩相古地理条件对地下水水化学类型和水质分布的影响

大量地下水测试和水文地质调查资料综合分析表明,鄂尔多斯盆地洛河组、环河组地下水水化学类型和水质分布大致以白于山隆起带为界的南北两区呈现明显差异性,总体表现为盆地北部洛河

组、环河组地下淡水分布广泛、TDS 低,以 HCO_3 型水为主;盆地南南部地下水 TDS 普遍偏高,微咸水和咸水发育,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水为主^[8,17-19](图 7, 8)。



A
(洛河含水岩组)



B
(环河含水岩组)

图 7 鄂尔多斯盆地洛河含水岩组与环河含水岩组水化学类型分布和 TDS 等值线图

Fig. 7 Contour diagram showing the distribution of hydrochemical types and TDS for the Luohe aquifers (A) and Huanhe aquifers (B) in the Ordos Basin

盆地北部,环河含水岩组与洛河含水岩组地下水水化学场相似(图 7, 8),大部分地区水质较好, TDS 一般小于 1g/L ,以 HCO_3 型水为主。大致以安边-四十里梁-东胜梁地表分水岭为界,西部和北部边缘水质较差, TDS 一般为 $1 \sim 3\text{g/L}$ 。

其中,环河组地下水在北部多数地区为淡水, TDS 一般小于 1g/L 或介于 $1 \sim 2\text{g/L}$,具有从东向西、西北, TDS 值由小于 1g/L 逐渐增加到大于 3g/L 、水化学类型从 HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型的分布规律。在两条分水岭地区因补给径流条件较好使得 TDS 多小于 1g/L 。

L; 顺地下水流向,地下水矿化度逐渐递增,在新召苏木分水岭西北、安边-四十里梁-东胜梁分水岭西南部和东部无定河下游局部地区的地下水排泄地带,地下水水质变差, TDS 较高,一般大于 3g/L 。在定边、盐池一带出现了 TDS 局部高值区,部分地区 TDS 大于 5g/L ,最高可达 16.96g/L 。

洛河组地下水化学特征及水质分布与环河组大致相似。但因埋藏深, TDS 小于 1g/L 的淡水分布范围减小。在北区西南部的定边、盐池等地下水闭流区分布有 TDS 大于 3g/L 的咸水,沿地下水流向向北部边界和西南方向的摩林河以东、杭锦旗以北

一带分布有大面积 TDS 大于 5g/L 的咸水, 总体呈现由东向西南、向西、向西北 TDS 值由小于 1g/L 逐渐增加到大于 3g/L(甚至是 10g/L)、水化学类型从

HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4$ 型($\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型) 的分布规律。

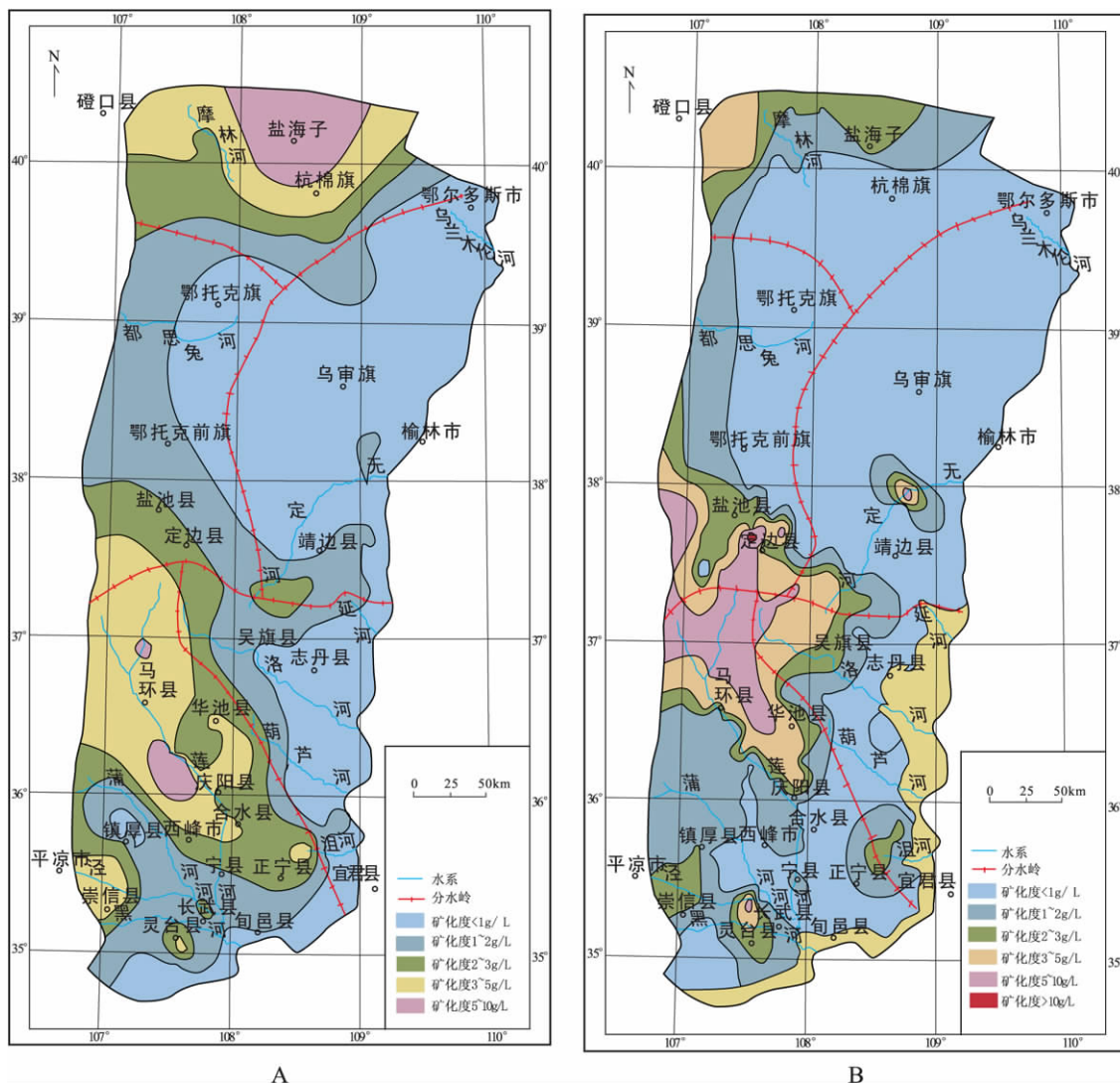


图8 鄂尔多斯盆地洛河含水岩组与环河含水岩组地下水水质分区预测评价图(据侯光才等(2008) 修编)

Fig. 8 Assessment of the groundwater from the Luohe aquifers (A) and Huanhe aquifers (B) in the Ordos Basin

盆地南部, 环河含水岩组与洛河含水岩组各自具有相对独立的水化学场(图 7, 8), 大部分地区 TDS 为 1 ~ 3g/L, 局部达 5 ~ 10/L, $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型水较多, HCO_3 型水很少。地下水分层径流明显, 水化学类型复杂, 总体上呈现以定边-环县-合水-华池-吴旗-定边为中心, 北部由北向南、东部由东向西、南部由西南向东北的水平化学分带规律。

其中, 环河组大面积分布微咸地下水和咸地下水, 淡水分布范围明显小于盆地北部, TDS 值明显高于盆地北部。马莲河、泾河、洛河河谷及其支流分布区成为该区环河组地下水 TDS 的局部高值区, 且子午岭分水岭西侧地下水 TDS 明显高于其东侧, 西

侧地下水中 TDS 多大于 1 g/L, 而东侧地下水 TDS 多小于 1 g/L。总体上, 盆地南部环河组地下水呈现以马莲河为中轴线, 在其西侧由崇信县向东北方向沿地下水流向, 水化学类型表现为从 HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型演化规律; 在其东侧由东北向西南方向水化学类型总体变化表现为从 HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型。

洛河组地下水在东部边界 TDS 较低, 多小于 1g/L, 而在吴旗县以西至子午岭一带, TDS 大于 1 g/L, 地下水 TDS 最大值为 1.6 g/L; 西部除旬邑县以南的南部边界地带地下水 TDS 较低外, 大部分地下

水 TDS 值均较高,大于 1 g/L。地表水系分布区成为地下水 TDS 和主要离子浓度的局部高值区,如马莲河中游的 TDS 高达 12.58 g/L。地下水水化学类型的分布以马莲河为中线呈近似对称分布,在中轴线以西由西南向东北方向水化学类型的变化为 HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型;在中轴线以东由东北向西南方向水化学类型的变化为 HCO_3 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型 $\rightarrow\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型 $\rightarrow\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型。

结合前述洛河组、环河组含水层沉积岩相古地理特征,及其所控制(影响)的含水岩石主要碎屑矿物及特征矿物、易溶盐化学组分分布特征研究认为,洛河组、环河组地下水水化学场、水质的时空分布(图 7,8)与沉积岩相古地理时空格局(图 2)、含水岩石主要碎屑矿物及特征矿物和易溶盐化学组分的时空分布具有良好的相关关系。含水层沉积岩相古地理条件及其所控制(影响)的含水岩石主要碎屑矿物及特征矿物、易溶盐化学组分分布特征对地下水化学的形成演化与水质分布有着源头性的控制(影响)作用^[3-5,11,15-16],它们与地形地貌、地下水循环交替和水岩作用,共同决定着地下水化学的形成演化与水质分布。

参考文献:

- [1] 刘世安,黄忠信,陈延,等.鄂尔多斯盆地白垩系地下水形成分布规律[J].干旱区资源与环境,1996,10(1):4-14.
- [2] 王德潜,刘方,侯光才,等.鄂尔多斯盆地地下水勘查[J].西北地质,2002,35(4):167-174.
- [3] 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,(12):818-828.
- [4] 谢渊,李明辉,王剑,等.鄂尔多斯盆地白垩系岩相古地理及其水文地质意义[A].侯光才,张茂省.鄂尔多斯盆地地下水资源与可持续利用[C].西安:陕西科学技术出版社,2004.149-165.
- [5] 谢渊,王剑,李明辉,等.鄂尔多斯盆地早白垩世岩相古地理与地下水水质和分布的关系[J].地质通报,2004,23(11):1094-1102.
- [6] 谢渊,王剑,江新胜,等.鄂尔多斯盆地白垩统含水层储水岩石特征与介质结构研究[J].水文地质工程地质,2005,32(2):11-19.
- [7] 侯光才,林学钰,苏小四,等.鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(3):391-398.
- [8] 侯光才,张茂省,等.鄂尔多斯地下水勘查研究[C].北京:地质出版社,2008.
- [9] 程守田,李思田,黄焱球,等.风成沉积体系—鄂尔多斯盆地白垩统风成沉积与内陆古沙漠环境[A].含能源盆地沉积体系[C].武汉:中国地质大学出版社,1996.
- [10] 邓国仕,谢渊,杨桂花,等.鄂尔多斯盆地白垩系含水砂岩的特征[J].四川地质学报,2008,28(2):124-130.
- [11] 孙国华,彭国田.淮北平原晚更新世以来岩相古地理及其水文地质意义的初步研究[J].水文地质工程地质,1987,(1):41-43.
- [12] 《沉积地球化学应用讲座》编写组编.微量元素在沉积学研究中的应用[J].岩相古地理,1988,3-4:108-116.
- [13] 《沉积地球化学应用讲座》编写组编.微量元素在沉积学中的应用[J].岩相古地理,1988,5:51-61.
- [14] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997.
- [15] 谢渊,王剑,李令喜,等.鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物分布特征及其沉积-成岩环境意义[J].地质通报,2010,29(1):93-104.
- [16] 谢渊,李令喜,谢正温,等.鄂尔多斯盆地白垩系石膏类矿物分布特征及其对地下水水化学类型和水质的影响[J].水文地质工程地质,2008(增刊):55-62.
- [17] 沈照理.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993.5-59.
- [18] 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.
- [19] 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.

The effects of sedimentary facies and palaeogeography on the formation and distribution of the deep groundwater of the Cretaceous strata in the Ordos Basin

XIE Yuan¹, DENG Guo-shi¹, LIU Jian-qing¹, DONG Wei-hong², LU Hong-jiang³

(1. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China*; 2. *Jilin University, Changchun 130021, Jilin, China*; 3. *Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The integration of sedimentary geological and hydrogeological survey and sample analysis of the representative Cretaceous hydrological boreholes and outcrops has disclosed that during the formation of the Cretaceous aquifers, the fluvial deposits were wide-spread in the Huanhe and Luohe Formations in the northern part while the lake deposits occupied in the Huanhe Formation, and desert deposits occurred in the Luohe Formation in the southern part of the Ordos Basin. The framework of sedimentary facies and palaeogeography has exercised a major control not only on mineral compositions such as feldspar, clay minerals, calcite and gypsum in the aquifer systems, soluble salt contents and their spatial distribution, but also on the spatial distribution of the aquifers and impermeable beds, regional distribution of the deep groundwater circulation and alternation. The water-rock interactions influencing the formation of the hydrochemical fields and distribution of the groundwater include the dissolution of sulfate minerals, carbonate minerals and silicate minerals, rock salt leaching and cation exchange. Controlled by sedimentary facies and palaeogeography, groundwater circulation and water-rock interaction, the groundwater from the Huanhe and Luohe Formations are characterized by lower TDS, enriched freshwater and dominant HCO_3^- type in the northern part whereas higher TDS, enriched brackish water-saline water, and $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^-$ type in the southern part of the basin.

Key words: Ordos Basin; Huanhe and Luohe Formations; sedimentary facies and palaeogeography; mineral and chemical compositions of the aquifers; water-rock interaction; formation of the hydrochemical fields and distribution of the groundwater