

·水文地质·环境地质·

鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学初探

谢 渊¹, 王 剑¹, 殷跃平², 武选民², 文冬光²江新胜¹, 罗建宁¹, 魏伦武¹, 李明辉¹, 郑万模¹

(1.中国地质调查局成都地质矿产研究所,四川 成都 610082 2.中国地质调查局,北京 100083)

摘要: 含水层沉积学 是沉积学、水文地质学、油气储层地质学、地球化学等相互交叉综合的产物,是以沉积学、水文地质学理论为基础,以沉积含水层为主要研究对象,以查明地下水赋存和循环条件、地下水系统结构特征、地下水水质成因与分布以及地下水富集规律为主要研究内容,最终服务于地下水资源勘查评价的一门边缘分支学科。含水层沉积学及水文地质综合研究表明,受到沉积相类型及其空间展布的明显控制,鄂尔多斯盆地白垩系地下水赋存、循环、富集条件以及地下水水质分布总体具有北好南差、盆地南部具有下好上差的宏观规律。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 白垩系; 含水层沉积学; 地下水赋存-循环条件; 水质形成与分布; 地下水富集规律

中图分类号: P534.53; P512.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-255X(2003)12-0818-11

随着全球人口的迅猛增长和社会经济的飞速发展,水资源短缺问题日益突出,已对人类生存、社会经济及生态环境的可持续协调发展构成瓶颈性制约。作为水资源重要组成部分的地下水,越来越成为人类不可回避的选择。

以地下水为研究对象的“水文地质学”,于19世纪初在欧洲被正式提出,在经历100多年发展后的今天,已进入现代水文地质学的新发展时期,其研究范围已经扩大到整个水系统及其与人类活动、自然生态环境系统和社会经济系统之间相互关系等诸多领域^[1-7]。但是,目前在区域地下水资源形成、演变及其与其他圈层或系统之间的相互作用关系等水文地质方面,还缺乏系统、深入的基础研究^[7]。尤其是对由含水层和隔水层组成的具有统一水力联系的含水岩系所构成的“地下含水系统”的研究,相对于“地下水流动系统”而言显得滞后^[4]。因此,专家们指出,21世纪初水文地质学的发展与地下水的勘查开发,要提高对地下水系统的认识,要进一步强调基础地质、水文地质研究、水文地质概念与定性分析的重要性,更好地掌握水文地质学研究的基础,多学科、多手段、多目标的综合研究已经成为水文地质学发展的必由之路^[1-8]。

沉积学,作为系统研究沉积岩石特征、分布及其形成环境演化的一门重要基础地质学科,同样是由地质学与水文学交叉渗透形成的水文地质学^[3]研究的重要理论基础和基本技术方法。它在含水岩组划分、地下水系统空间结构建造、地下水补径排规律、地下水流系统特征、富水带圈定、各种水文地球化学作用以及水文环境地质等诸多方面的研究中发挥了重要的基础性作用。然而,尽管应用沉积学理论研究地下水形成与分布规律已有几十年的历史,也取得较多研究成果和良好应用效果^[9-14],但与其在油、气及其他地质矿产勘探开发中广泛而又成功的应用相比,沉积学方法在水文地质条件、地下水系统结构特征等水文地质研究中还未得到广泛深入的应用,其基础性作用还未得到充分发挥。因此,应用沉积学理论和方法进行水文地质条件研究仍然是一个值得系统、深入研究的课题。

作为水文地质研究重要对象之一的含水层,既是地下水储藏空间的一个基本水文地质单元,也是地下含水系统的核心组成部分,还是地下水流系统的最基本物质载体。因此,应用沉积学理论和方法,系统、深入研究含水层的宏观、微观物理化学特

收稿日期: 2003-06-13; 修订日期: 2003-10-10

地调项目: 中国地质调查局“鄂尔多斯盆地白垩系岩相古地理与地下水形成条件研究”项目资助。

作者简介: 谢渊(1971-)男,博士,副研究员,从事油气沉积学、储层地质学及水文地质学研究。

征,对查明地下水储集空间、水质分布与变化、赋存和富集规律意义重大,有助于系统分析地下水形成与分布规律,有助于推动地下水系统理论的发展。

作者把长期应用沉积学方法进行油气储层地质研究所取得的成功经验,应用到鄂尔多斯盆地白垩系地下水勘查之中,对白垩纪岩相古地理与地下水形成条件进行了研究,尤其是对白垩系含水层进行了系统研究,初步提出含水层沉积学的概念。

1 含水层沉积学概念及解决的关键性科学问题

含水层沉积学是沉积学、水文地质学、油气储层地质学、地球化学等相互交叉综合的产物,是以沉积学、水文地质学理论为基础,以沉积含水层为主要研究对象,对含水层古地理、沉积相、岩石化学、成岩作用、孔隙演化及其与含水层发育、演化、分布之间的关系进行研究,并研究相对隔水层的成因与分布,进而为有利含水层的勘探和预测、地下水系统结构特征、地下水循环条件、地下水水质形成与分布以及地下水资源分布研究提供科学依据的边缘分支学科。

长期以来,含水层空间展布的复杂性及其储水条件的宏观—微观非均质性和差异性、地下水水质成因及空间分布的多样性,一直构成水文地质条件、地下水系统结构研究以及地下水资源勘查开发的最大障碍,也是水文地质研究的薄弱环节之一。在水资源日益严重短缺的今天,地下水勘探开发利用已面临新的更高要求。人们在重视继续深入勘查研究埋深几十米到300多米的浅层地下水的同时,新的目标已经转向数百米乃至上千米的深层地下水(如鄂尔多斯盆地白垩系含水层)。而深部含水层形成与分布、含水层储集空间类型及成因、含水层与隔水层配置样式与区域变化、地下水循环条件、水质成因及分布等的复杂性、多样性更为明显,地下水勘查开发研究的难度空前。

因此,重视从区域沉积地质背景的角度去全面认识含水盆地中含水层的形成环境与分布规律,系统开展含水层沉积学研究,已经成为水文地质研究的重大课题之一。具体而言,含水层沉积学主要侧重以下关键科学问题的研究。

(1) 含水层沉积环境与空间展布

地质环境既是地下水赋存与循环的空间,又是地下水获得一定物理与化学性质的场所。因此,从分析

沉积环境与沉积旋回入手,从成因上阐明不同类型的沉积环境和沉积旋回中含水层、隔水层的发育程度及空间展布规律,恢复沉积水动力、水化学条件,乃是划分隔水层与含水层、确定含水岩组分布、查明地下水系统结构特征、掌握地下水水量与水质形成和分布规律的基础,是研究沉积岩区地下水特征的关键,也是含水层沉积学研究的核心内容。

(2) 含水层储水空间及其演化

含水层空隙空间既是地下水的储集场所,又是地下水循环流动的通道网络。而沉积岩含水层储水空间的形成与演化主要受到沉积相与成岩作用的综合控制。因此,通过含水层沉积学研究,可以揭示特定环境下不同沉积水动力条件所决定的不同成因类型沉积物(岩)原生孔隙网络类型及发育程度,并通过成岩—孔隙演化研究,查明含水层孔渗性、孔隙网络、储水空间的发育与分布变化,掌握地下水的赋存状态与循环流动特征。

(3) 含水层与地下水循环条件

含水层岩石的孔渗性和透水性,以及含水层与隔水层的发育及其空间配置关系,很大程度上决定了地下水循环交替条件。通过含水层沉积学对含水层发育及空间展布、含水层储水空间发育与分布的研究,可以查明地下水循环交替条件的区域变化。

(4) 含水层(隔水层)形成环境水体化学性质与地下水水质

地下水水质形成与分布受含水层形成环境水体化学性质的影响很大。通过含水层沉积学、岩石地球化学、气候学研究,可以恢复含水层形成环境的水体化学性质,进而掌握沉积水的化学特性、沉积岩含盐量分布,并通过水循环条件和水—岩作用研究,历史地系统地分析地下水水质的形成与分布变化。

(5) 含水层沉积学与地下水系统

地下水系统是摆脱了长期统治水文地质界的“含水层思维”的产物^[5,45],是力求用系统的观点去观察、分析与处理地下水问题的结果。但是,含水层作为地下水系统的基本物质构架,其展布规律及其与隔水层的配置样式仍是地下水系统地质结构特征研究的核心。应用含水层沉积学对盆地含水层与隔水层特征、分布及其配置样式的系统研究,是确定含水系统边界、掌握含水系统内部架构特征、划分含水系统类型、预测含水系统分布的关键,也是揭示地下水流动系统介质场特征、渗流场、化学场及温度场分布

及变化规律的前提。

(6) 含水层沉积学与地下水资源评价

地下水资源计算与评价,在很大程度上依赖于对含水岩石空隙度、渗透系数、给水度、含水层厚度及分布面积、含水系统的边界条件等诸多参数和条件的研究和圈定,而这在很大程度上需要通过含水层沉积学对含水层岩石物理特征、空间展布规律的研究来获取。

2 鄂尔多斯盆地白垩系含水层沉积学与水文地质

鄂尔多斯盆地是中国中西部一个大型沉积盆地,分布于盆地中西部的白垩系(图1)赋存的大量地下水资源已经成为该地区人们生活、工业生产、社会经济发展及生态环境建设所依赖的重要水源。多年来,对鄂尔多斯盆地白垩系水文地质勘查研究取得的成果^[14 100]表明,盆地是由白垩系多套不同特性的地下含水层上下叠置和侧向交错、不同含水系统之间发生局部水力联系而构成的一个巨大而复杂的半开启型地下水盆地;自下而上发育宜君—洛河组、华池—环河组、罗汉洞—泾川组3套含水岩组,前两者广泛分布于全盆地,为主要的区域性含水岩组,后者仅局限于盆地北缘和西缘;含水层厚度巨大,储存空间发育,地下水资源丰富(天然资源总量达 $67.23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)^①,资源开采潜力巨大($30.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)^②。但是,盆地中白垩系地下水赋存、循环、富集条件极为复杂,水质分布变化较大;盆地内部分地区仍面临严重的水质型或水量型缺水问题;目前对盆地白垩系整体,尤其是埋深大于300 m的深层地下水赋存条件、水质变化及空间分布等方面仍缺乏深入系统的详细研究。近年来,作者通过含水层沉积学研究认为,盆地白垩系地下水赋存、循环、水质形成及空间分布等水文地质特征受到沉积相的明显控制,深入系统地开展含水层沉积学研究是整体查明白垩系地下水赋存条件、水质变化及空间分布的关键。

2.1 含水层沉积学与地下水赋存条件

含水层作为地下水赋存与循环的空间场所,是

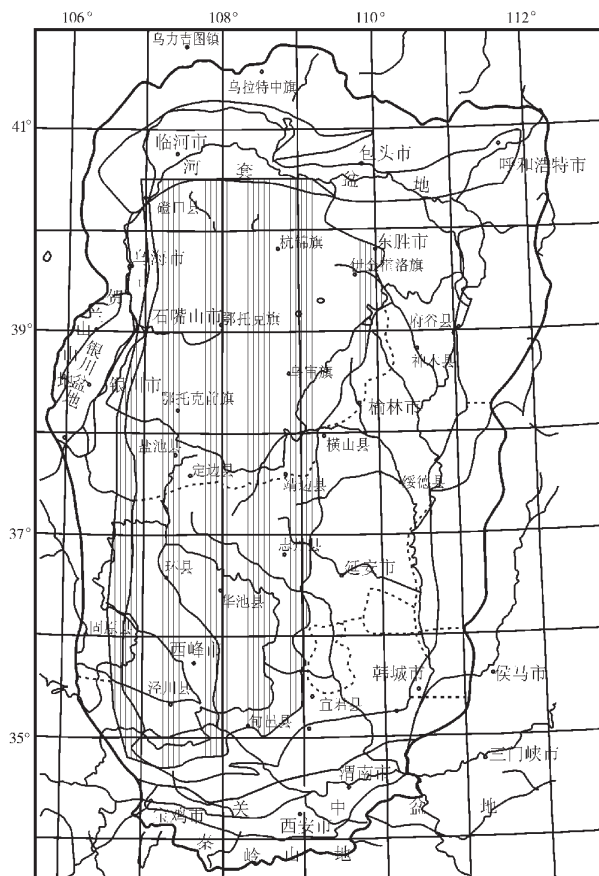


图1 鄂尔多斯盆地白垩系分布区位置简图

Fig. 1 Schematic map showing the location of the area of the Cretaceous in the Ordos basin

地下水赋存条件研究的核心内容。应用含水层沉积学方法,对含水层宏观和微观物理特征的系统研究,是查明地下水赋存条件、了解地下水系统地质结构特征的关键。

2.1.1 地下水微观赋存条件分析

地下水微观赋存条件主要指含水岩石的空隙发育情况、孔喉网络结构特征、孔隙度、渗透系数等表征含水层储水性、透水性的变量,是查明地下水系统微观储集空间分布与微观流动体系的基础。应用沉积学方法,分析不同沉积成因类型含水岩石的空隙类型特征、发育情况及成岩—孔隙演化等微观特征,划分含水层、隔水层、弱透水层,确定含水岩石给水度、

① 内蒙古地质局104水文地质工程地质队,等.陕甘宁内蒙古白垩系自流水盆地地下水资源评价报告.1986.

② 黄忠信,刘世安,王世德,等.陕甘宁盆地白垩系地下水资源研究.长庆石油勘探局勘探处、勘探开发研究院,1993.

③ 西安地质矿产研究所.鄂尔多斯盆地地下水勘查报告.2003.

持水度、容水度及渗透系数、导水系数等水文地质参数,并依据沉积相空间展布、成岩演化规律预测岩石孔隙发育的空间分布及演化规律,从而可以评价地下水微观赋存条件的区域变化与分布。

含水层沉积学研究表明,鄂尔多斯盆地白垩系地下水微观赋存条件的区域变化与分布受到沉积相类型及展布的明显制约。盆地北部,整个下白垩统主要发育冲积扇、河流相、沙丘亚相粗—中粒长石砂岩、长石石英砂岩等含水岩石,由于较强的沉积介质动力条件和较弱的成岩胶结作用,岩石结构和成分成熟度较高,结构疏松、残余粒间孔隙发育(平均孔隙度大于18.6%)^①,孔隙结构均质性强,具备良好的储水性和导水能力。盆地南部,白垩系下部含水岩组洛河组主要为一套稳定展布的沙漠相沙丘亚相长石砂岩、长石石英砂岩沉积,含水砂岩单层厚度巨大且延伸稳定,岩石结构疏松、胶结较差,具有极为发育的粒间孔隙和连通的中粗喉道,孔隙结构均质性强,具备良好的储水性和导水能力;而上部含水岩组华池—环河组,除了该组下部发育的沙丘、三角洲、滨浅湖亚相含水砂岩具有较好的储水性和导水能力外,其上部主要为滨浅湖—半深湖、前三角洲、河流泛滥平原亚相细碎屑岩和泥质岩沉积,岩石结构致密,孔隙不发育(仅局部在应力作用较强的情况下可形成一些裂隙),岩石孔隙结构非均质性较强,储水性和导水能力较差,多主要形成透水性弱、胶结致密的隔水层。

因此,受沉积相构成与展布的控制,盆地白垩系储水性和导水能力等地下水微观赋存条件总体上具有北好南差、盆地南部具有下好上差的区域性

变化规律。

2.1.2 地下水宏观赋存条件分析

地下水宏观赋存条件主要指含水层的空间分布规模及其与隔水层的立体配置样式,是研究地下水宏观储存空间与流动场所的关键,也是地下水系统物质构架的基础。应用含水层沉积学,分析含水层的沉积环境与沉积演化旋回,从成因上阐明沉积相和含水岩层的纵横向变化规律,宏观地分析预测含水层的层数、厚度、延伸分布及其与隔水层的空间叠置展布变化,从而可以系统地揭示地下水的宏观赋存条件和地下水系统的结构特征。

通过含水层沉积学研究得出,沉积相的空间展布决定了盆地白垩系含水层与隔水层的空间分布及其配置样式的区域变化。在平面上,盆地北部大部分地区和南部的东侧,冲积扇、河流及沙丘、三角洲前缘亚相发育较好的含水层(表1,图2、3、4),含水层空间展布稳定、规模巨大(一般为200~600m),均质性强,形成区域性分布的较好含水层,具有良好的地下水宏观赋存条件和结构较为均一的地下水系统。而盆地北部西侧局部和盆地南部的中西部地区,主要为透水性弱、胶结致密的湖泊相、沙漠丘间亚相细碎屑岩和泥质岩沉积(表1,图5、6),主要发育分布稳定、厚度较大的多个隔水层,尽管其中夹有一定厚度的砂岩层(砂岩厚度一般为100~300m,砂岩比小于50%),但其展布不稳定、厚度小、侧向变化频繁、规模不大,与隔水层常形成犬牙交错的配置样式,总体上地下水赋存条件差于北部,地下水系统结构较为复杂,非均一性极强。

在垂向上,盆地白垩系是一套由多个含水岩组叠加而成的含水岩系。其中,宜君—洛河组是一套遍

表 1 白垩系各组含水层、隔水层岩石厚度组成及分布
Table 1 Thicknesses, compositions and distributions of rocks in aquifers and aquifuges
in various formations of the Cretaceous

层位	含水层岩石(细砂岩粒级以上)				粉砂岩				泥岩			
	厚度/m		比值/%		厚度/m		比值/%		厚度/m		比值/%	
	范围	均值/井数	范围	均值/井数	范围	均值/井数	范围	均值/井数	范围	均值/井数	范围	均值/井数
K _{1j}	20~272	78/11	7.4~77.8	41.3/11	0~40	12/10	0~27.4	7.3/10	0~256	74.2/10	0~57.4	37.5/10
K _{1lh}	5~493.8	112/37	24.5~100	80.5/37	0~98.7	11/34	0~42	4.7/34	0~135.6	28/34	0~36.8	29/34
K _{1h}	12~736	168/82	3~100	45.4/82	0~205	46/52	0~43.8	11/52	2~536.5	227/72	2.2~90.4	48.6/72
K _{1y} —f	12~886.9	268/94	23.4~100	88.9/94	0~231	10/86	0~66.3	3/86	0~141.5	23/86	0~35.7	7.5/86

① 谢渊,等.鄂尔多斯盆地白垩纪岩相古地理与地下水形成条件研究报告.成都地质矿产研究所,2003.

布全盆的沙漠相、河流相砂岩含水岩组(砂岩比一般大于85%),具有厚度巨大、空间展布稳定、孔隙发育等显著特征,构成盆地范围内的区域性含水层;环河组在盆地北部为一套巨厚河流相沉积,形成大范围稳定分布、均质性较强的含水岩组,而在盆地南部大部分地区主要为湖相沉积,含水层厚度较小(砂岩比小于60%),为一套含水层分布不稳定、非均质性较强的含水岩组,发育区域性隔水层;罗汉洞组在盆地北部和西缘局限分布,但其中沙漠相、河流相砂岩结构疏松、孔隙发育,是极具潜力的局部含水岩组;泾川组在盆地北部边缘地带的河流相沉积可以构成局部含水层。

可见,盆地白垩系地下水宏观、微观赋存条件变化极大,含水层与隔水层空间叠置与展布样式区域分布较为复杂,但这都与沉积相的空间展布关系密切,并总体表现为盆地白垩系地下水赋存条件北好南差、盆地南部下好上差的区域性变化规律。

2.2 含水层沉积学与地下水循环条件

地下水循环条件受到含水层、隔水层发育程度及其空间配置样式等多种地质因素的综合控制,而含水层、隔水层发育程度及其空间配置样式主要取决于沉积相的构成与展布,因此含水层沉积学研究是查明地下水循环条件区域变化的基础。

含水层沉积学研究表明,盆地白垩系地下水循环条件的空间变化受到沉积相的明显影响。大致以白于山为界的盆地北部地区,白垩系总体为一套冲积扇、河流、沙漠沙丘亚相中粗碎屑岩沉积,岩石结构疏松,孔隙发育、喉道连通、孔隙结构均质性强,具有较强的导水性;含水层呈厚层稳定展布,隔水层为薄层不连续分布,具有良好的地下水循环流动网络。而在其以南的盆地中部、南部地区,白垩系环河组河流、湖泊沉积频繁交互叠置,含水层岩石粒度细,孔隙不发育、喉道连通性差、孔隙结构非均质性强,导水性和透水性差,且含水层多呈薄层不连续分布,隔水层为厚层稳定展布。因此,环河组地下水循环条件较差,尤其在陇东环县至正宁一带的半

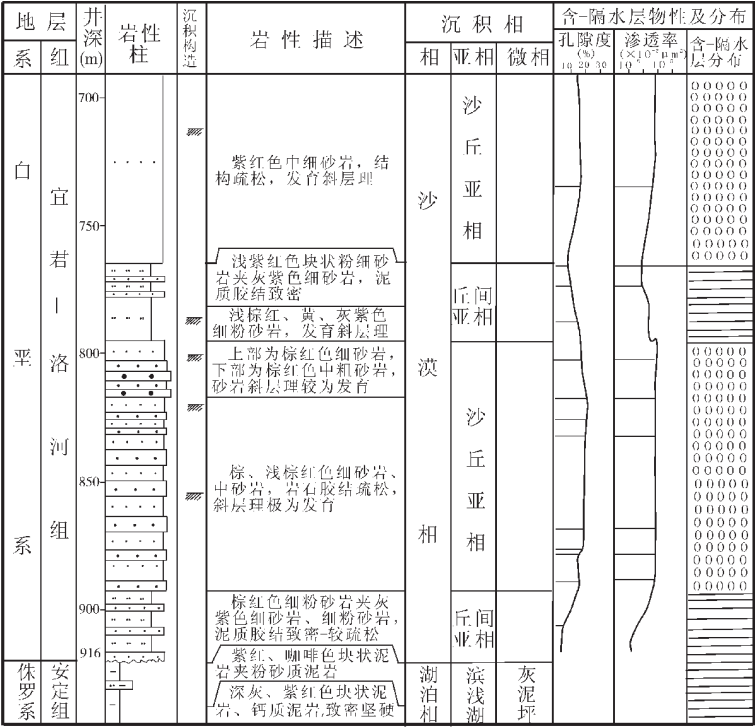


图2 盆地西缘 B3 井白垩系宜君-洛河组沙漠相沙丘亚相-丘间亚相沉积序列及含水层分布综合柱状图

Fig. 2 Composite column showing the sedimentary sequences of the dune subfacies-interdune subfacies of the desert facies of the Cretaceous Yijun-Luohe Formation in well B3 and aquifer distribution on the western margin of the Ordos basin

深湖沉积区,含水层呈透镜状分布,地下水循环条件极差,不利于地下水的补给、径流、越流及排泄;相反,环河组之下的洛河组为大面积发育的沙丘砂岩沉积,岩性结构均一,分布不稳定,具有畅通的地下水循环条件。

由上可见,受沉积相单元构成的控制,盆地北部具有良好的地下水循环条件,而盆地南部除洛河组地下水循环条件较好外,环河组地下水循环条件较差。

2.3 含水层沉积学与地下水水质成因、分布规律

地下水水化学成分和水质的形成与分布,尽管受到许多地质因素的综合影响,但沉积环境及其所形成岩石的物理化学特征是最为根本的地质因素,其他因素都是在这物质基础上发挥其不同程度的影响作用。首先,不同气候条件、不同沉积相带水体化学性质决定了沉积水的水化学组成和水质特征,因而对现今由多类来源混合形成的地下水的水化学组成、水质有明显影响,尤其是在承压水盆地中,深

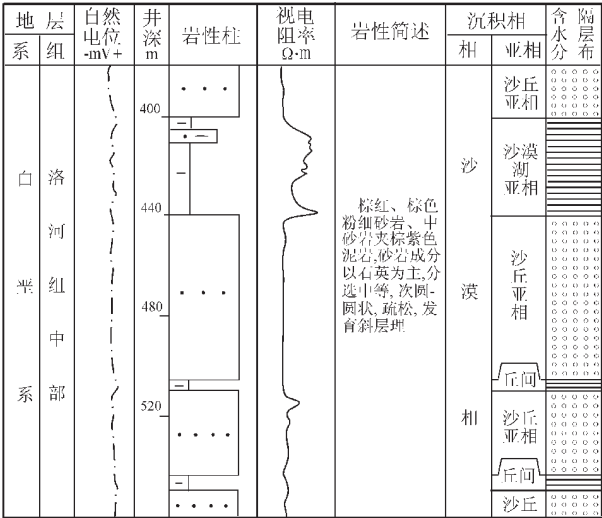


图 3 盆地南部 B22 井白垩系洛河组沙漠相沙丘-丘间-沙漠湖亚相沉积序列-测井响应及含水层分布柱状图

Fig. 3 Column showing the log response to the sedimentary sequences of the dune subfacies-interdune subfacies of the desert facies of the Cretaceous Yijun-Luohe Formation in well B22 and aquifer distribution in the southern part of the basin

层地下水与大气降雨下渗水的循环交替滞缓,地下水的水化学成分和水质受到沉积水化学性质的影响尤为显著。其次,不同相带沉积水化学性质决定了沉积岩石含盐量的差异,通过地下水循环过程中的水-岩作用而对地下水水质分布与变化产生深远的影响。再次,不同沉积相带因岩石组成、展布及成

岩-孔隙演化强度的差异而具备不同的地下水循环条件,导致地下水循环交替强弱、水-岩作用类型、水-岩化学成分交换变化强度不同,从而对地下水水化学和水质的形成与分布产生重要影响。

含水层沉积学研究表明,尽管因受现代气候、地貌、第四系地质、白垩系沉积岩相、含水层上覆地层厚度及岩性以及地下水补给、径流、排泄条件诸多因素的综合作用,盆地白垩系地下水区域水化学、水质变化规律复杂,但是,在总体上,白垩系地下水水化学和水质分布仍具有一定的规律,而且与沉积环境的关系极为密切。

在平面上,盆地白垩系地下水矿化度存在由北向南、自东到西由小变大的区域性变化规律,矿化度小者为0.2~1g/L,高者为3~6g/L或更大(11g/L)。大体上以白于山(地貌及地下水位)分水岭为界,盆地北部白垩系总体为一套冲积扇、河流、沙漠沙丘亚相中粗碎屑岩沉积,岩石具有较强的透水性和导水性,含水层呈厚层稳定展布,地下水循环交替作用积极,沉积水介质盐度低,岩石含盐量少(表2)^①,白垩系中地下水一般水质较好(表3)^②,矿化度多小于1g/L。而盆地南部,白垩系地下水水质普遍较差(表4)^③,除子午岭以东及盆地西南边缘区因白垩系埋藏浅而与大气降雨下渗水循环交替作用积极而导致地下水矿化度小于1g/L外,其他地区矿化度多为1~5g/L,白于山分水岭以南与子午岭以东是盆地高矿化度地下水集中分布区。这主要与该区沉积相有关。首先,该区华池-环河期处于干旱-半干旱气候条件(以松粉属

表 2 白垩系含水岩石可溶盐含量与水质对应关系
Table 2 Correspondence between the soluble salt content and water quality in Cretaceous water-bearing rocks

地 区		层 位	可溶盐含量(mg/100g)	溶解性总固体 TD(g/L)
盆地北部	高头窑 - 伊克乌素 - 托克庙	K ₁ lh	50 ~ 100	0.47 ~ 2.2
	伊金霍洛旗 - 鄂托克旗	K ₁ h	< 50	< 0.5
	乌加庙	K ₁ lh - K ₁ j	100 ~ 1969	1.91 ~ 4.44
盆地南部	吴仓堡 - 桥镇剖面	K ₁ h 上部	49 ~ 58	0.48 ~ 4.54
		K ₁ y - K ₁ l	< 50	< 1
	安边 BK2 井	K ₁ h 上部	54 ~ 243/均值 118	1.43
		K ₁ h 下部	73 ~ 1078/均值 288	4.44
盆地南部	环县北部	K ₁ lh - K ₁ j	200 ~ 800	> 5
南部	环县南部	K ₁ lh - K ₁ j	100 ~ 200	3 ~ 5
西侧	洪德 - 环县 - 虎洞	K ₁ lh	50 ~ 100	1 ~ 3

① 黄忠信,刘世安,王世德,等. 陕甘宁盆地白垩系地下水资源研究. 长庆石油勘探局勘探处、勘探开发研究院,1993.

(*Pinuspollenites*) 云杉粉属(*Piceapollenites*)、内环粉属(*Classopollis*)、麻黄粉属(*Ephedripites*)等针叶林亚热带、热带裸子植物占绝对优势的裸子植物孢粉组合)的湖盆沉积中心、沉积水体盐度较高(B、Sr 平均含量分别为70μg/g、392μg/g), 沉积岩石含盐量丰富(表2);其次, 该区环河组为河流、湖泊沉积频繁交互叠置, 细碎屑岩、泥质岩沉积发育, 孔隙不发育、喉道连通性差、孔隙结构非均质性强, 导水性和透水性差, 地下水循环交替滞缓, 尤其在陇东环县至正宁一带的半深湖沉积区含水层呈透镜状分布, 地下水循环条件极差, 不利于地下水的补给、径流、越流及排泄, 盐分难以因滞缓的水-岩化学成分交替作用而降低;再次, 该区长期为水流汇聚的湖泊沉积区, 盐分多在此聚集。这些因素的共同作用, 导致盆地南部地下水水质明显差于盆地北部。

在垂向上, 由于沉积相、地下水循环条件等多种因素的影响, 盆地白垩系地下水水化学垂向分带规律复杂。盆地北部白垩系水化学垂向分带现象不十分明显, 主要是由于白垩系总体为一套岩性较均一、导水性较强的中粗碎屑岩含水岩系, 沉积水体盐度不高, 岩石含盐量低, 不同深度地下水循环交替作用均较为强烈, 形成了白垩系上下不同含水岩组地下水矿化度均小于1g/L, 仅局部显现随埋深加大地下水矿化度略有升高的趋势。

盆地南部由于沉积相、地下水循环条件等的复杂性, 导致水化学垂向分带规律复杂。除局部地区因受到循环条件和大气降水补给、混合作用等影响而出现随埋深加大、地下水矿化度升高的正常水化学垂向分带现象外, 许多地区出现下部洛河组地下水矿化度低于上覆环河组的水化学垂直分带倒置现

象。如, 志丹县顺宁镇ZX2孔上部环河组湖泊相沉积中地下水矿化度为0.464g/L, 与深部洛河组风成砂岩含水层混合抽水, 矿化度为0.388g/L, 表明深部洛河组地下水矿化度低于0.388g/L; 吴旗县铁边城镇

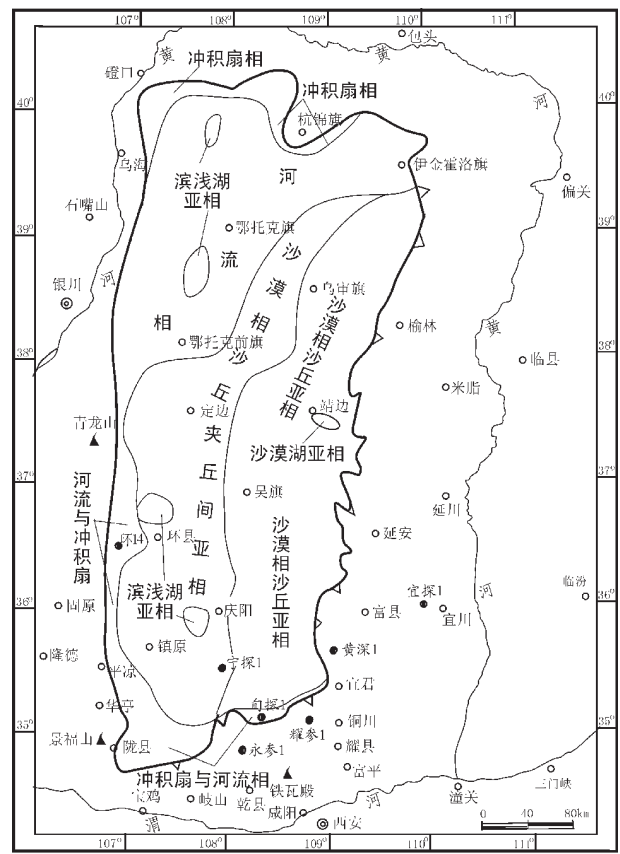


图 4 鄂尔多斯盆地早白垩世宜君-洛河期岩相古地理示意图

Fig. 4 Schematic map showing the lithofacies-paleogeography of the Early Cretaceous Yijun-Luohe stage in the Ordos basin

表 3 盆地北部白垩系水化学、水质特征与沉积相的关系

Table 3 Hydrochemical and water quality characteristics of the Cretaceous in the northern part of the basin and their relations to sedimentary facies

地 区	地层	沉积相	矿 化 度		水化学类型
			范围/均值	总体值	
补给区	四十里梁	K ₁ ⁵⁻⁶	河流	0.23 ~ 0.27/0.26	HCO ₃ ⁻ - Ca ²⁺ · Na ⁺ · Mg ²⁺
	- 阿拉庙	K ₁ ³⁻⁴	河流	0.2 ~ 0.31/0.28	HCO ₃ ⁻ - Na ⁺
径流区	布伦庙	K ₁ ⁵⁻⁶	河流	0.47 ~ 0.80/0.5	HCO ₃ ⁻ · Cl ⁻ - Na ⁺
	- 鄂托克前旗	K ₁ ³⁻⁴	河流 - 三角洲	0.61 ~ 0.89/0.77	Cl ⁻ · HCO ₃ ⁻ - Na ⁺
排泄区	乌加庙 - 都思	K ₁ ⁵⁻⁶	河流	1.19 ~ 4.44/2.88	Cl ⁻ · SO ₄ ²⁻ - Na ⁺
	兔河下游	K ₁ ³⁻⁴	河流 - 湖泊	1.01 ~ 11.11/6.22	Cl ⁻ · SO ₄ ²⁻ - Na ⁺ SO ₄ ²⁻ · Cl ⁻ - Na ⁺ · Mg ²⁺

表 4 盆地南部白垩系宜君 – 华池组含水岩石水化学、水质特征与沉积相的关系
Table 4 Hydrochemical and water quality characteristics of the Cretaceous Yijun – Huachi Formation in the southern part of the basin and their relations to sedimentary facies

位 置		代表性钻孔	矿化度(g/L)		水化学类型	沉积相
			范围值	总体值		
西侧	环县西 – 镇原 – 泾川一线以西	W591、W641、W281	1.0 ~ 6.6	< 3.0	SO ₄ ²⁻ · HCO ₃ ⁻ – Na ⁺	河流
中部	环县 – 合水 – 宁县	环水 1、庆水 5、 华水 1 等 5 口井	2.0 ~ 6.0	> 3.0	SO ₄ ²⁻ · Cl ⁻ – Na ⁺	沙丘 – 丘间、 三角洲、湖泊
东侧	子午岭西麓区	H1 等	0.9 ~ 3.0	< 3.0	SO ₄ ²⁻ · HCO ₃ ⁻ – Na ⁺ SO ₄ ²⁻ – Ca ²⁺ · Mg ²⁺	沙丘与丘间、 湖泊

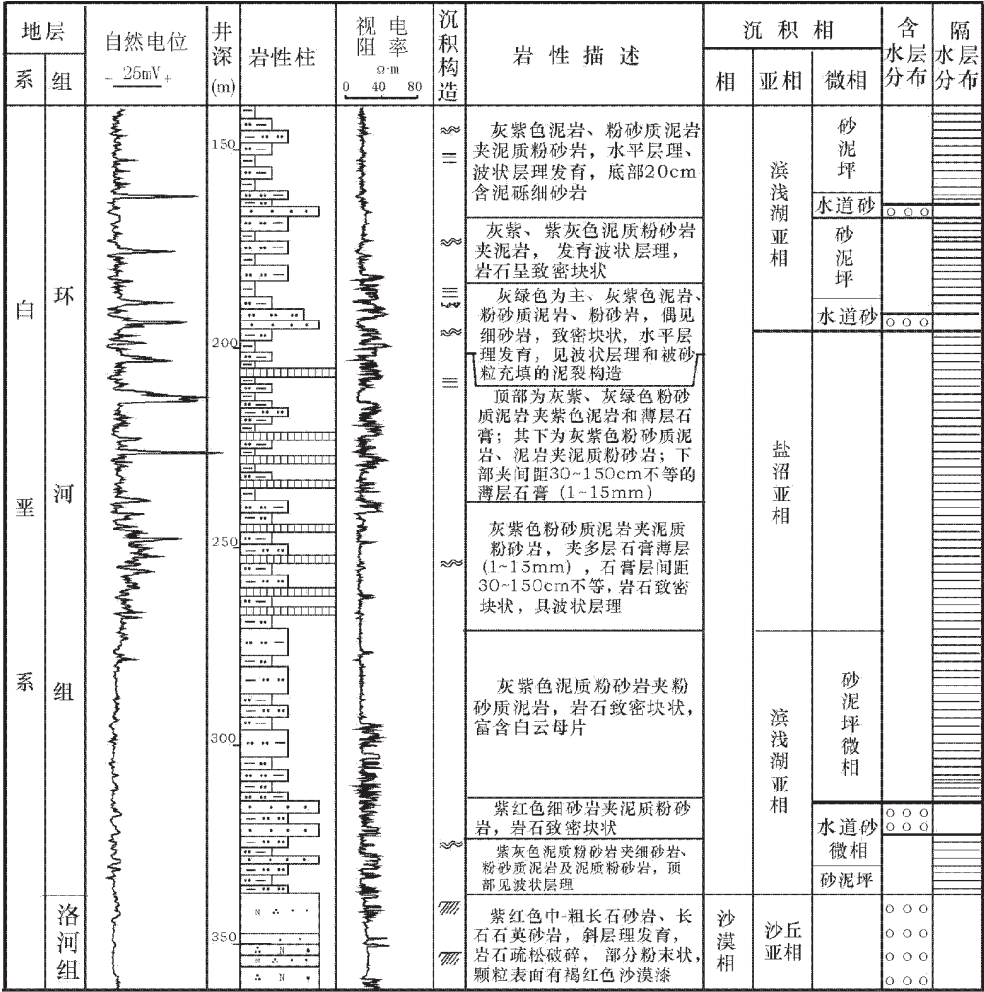


图 5 盆地东南缘 B12 井白垩系环河组沼 – 滨浅湖亚相与含水层分布柱状图

Fig. 5 Column showing the salt swamp–lakeshore–shallow subfacies and aquifer distribution in the Cretaceous Huanhe Formation in well B12 on the southeastern margin of the basin

ZX1孔上部环河组湖泊沉积中地下水固形物含量达 2.586g/L，而洛河组地下水固形物含量仅 1.433g/L；定边县油房庄乡 BK0201井中，华池 – 环河组岩石含盐总量多大于 1 g/kg，而随着埋深加大，洛河组岩石含盐总量多稳定在 1 g/kg 上下(图 7)。形成这种倒置的地下水水化学分带现象的原因，在于沉积相起到

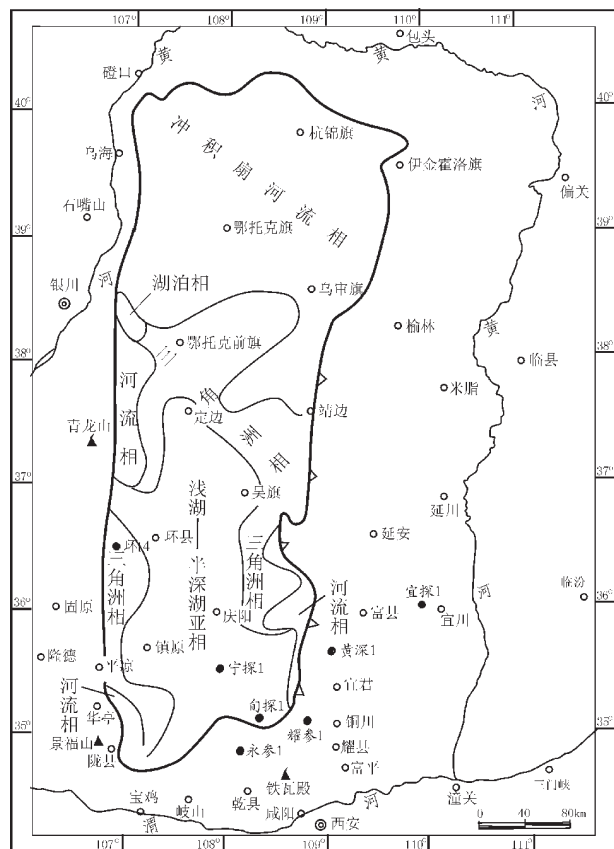


图6 鄂尔多斯盆地早白垩世华池-环河期岩相古地理示意图

Fig. 6 Schematic map showing the lithofacies-paleogeography of the Early Cretaceous Huachi-Huanhe stage in the western part of the Ordos basin

主要的直接或间接控制作用,该区环河组为湖泊相砂泥岩互层沉积,沉积水盐度较高,岩石中盐分富集,加之岩层透水性和导水能力差,水循环滞缓,导致水质较差;还因上覆环河组透水性和导水能力差,其高矿化度地下水对下伏洛河组沙丘亚相砂岩中的地下水水质没有产生较大的影响;也正是由于盆地南部洛河组主要为一套孔隙发育、水循环条件较好、径流活跃、水交替积极的沙漠相沙丘亚相沉积,导致其中所赋存的地下水水质总体较好于上覆环河组,形成水化学垂向分带的反常现象(表3)。

综上所述,由于沉积环境水体盐度、岩石含盐量、地下水循环条件分布的差异性,在很大程度上造成盆地白垩系地下水水质具有北好南差、盆地南部下好上差的宏观分布规律。

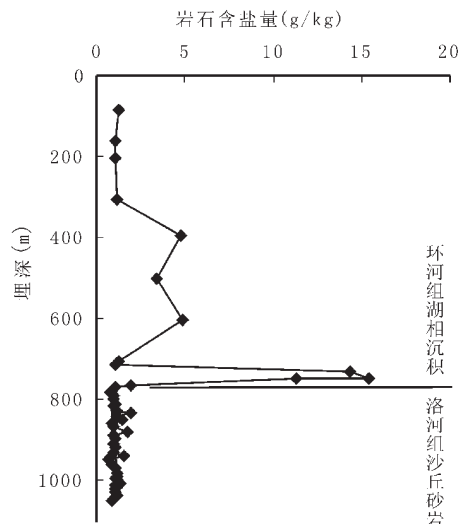


图7 定边县油房庄BK0201孔白垩系洛河组沙丘砂岩和环河组湖相沉积含盐量与埋深的关系
Fig. 7 Diagram showing the relationships of the salt contents in dune sandstone of the Cretaceous Luohe Formation and lacustrine deposits of the Huanhe Formation in well BK0201 at Youfangzhuang, Dingbian County, to their burial depths

2.4 含水层沉积学与地下水富集规律

含水层沉积学与水文地质学综合研究表明,尽管受到沉积相及其他水文地质条件的共同影响,盆地白垩系地下水赋存、富集条件区域变化复杂,但沉积相及其展布、沉积环境演化仍是控制盆地白垩系地下水富集的重要因素,且地下水富集仍具明显的区域性规律可循。

(1) 盆地北部富水性强、变化小,南部富水性弱、变化大

受沉积相条件的控制,盆地南北含水岩石类型和厚度的差异,导致盆地白垩系富水性分布总体上具有北强南弱的显著特点。盆地北部(大致以白于山为界的盆地北部)总体上是粗碎屑岩石丰富的冲积扇、辫状河及沙漠相沉积区,含水岩石(细砂岩及其以上粒级碎屑岩)厚度巨大(200~900 m),加之含水岩组埋藏相对较浅,透水性强,接受大气降水补给和沙漠区大气凝结水补给条件较好,平均补给模数为 $3 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$ ^①,因而形成相对富水区,单井涌水量一般大于 $1000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$,局部达 $3000 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$ 以上^②。盆地南部地区(大致以白于山为

① 西安地质矿产研究所. 鄂尔多斯盆地地下水勘查报告. 2003.

② 内蒙古地矿局104水文地质工程地质队,等. 陕甘宁内蒙古白垩系自流水盆地地下水资源评价报告. 1986.

表 5 白垩系宜君 – 洛河组含水层沉积特征与地下水矿化度的关系

Table 5 Sedimentary characteristics of aquifers in the Cretaceous Yijun – Luohe Formation and their relations to the mineralization degree of groundwater

	南 部		北 部	
	鄂 东	陇 东	陕 北	鄂 西
岩石组合	中细砂岩 泥岩层多且厚	中细砂岩 泥岩较少	中粗粒砂岩 夹薄层泥岩	较疏松、含砾 中粗粒砂岩
沉 积 相	湖泊相	沙丘与丘间亚相	冲积扇、河流相	冲积扇、河流相
水动力分区	深层径流、排泄区	浅层补给、径流区	深层径流、排泄区	浅层补给径流区
渗透系数(m·d)	0.45	0.7	1.3	1.3
矿化度(g/L)	1 ~ 3	0.5 ~ 1.7	0.5 ±	< 0.5

注 :数据资料根据黄忠信等 ,1993.

界的盆地南部),总体上主要为中细碎屑岩发育的河流、沙漠、湖泊相沉积频繁交替演变,含水岩石厚度较小(100~600 m);不同含水岩组之间垂向水力联系不密切,越流交替补给条件较差,埋藏相对较深,特别是上部含水岩组(环河组)透水性弱,接受大气降水补给条件较差,平均补给模数仅 $3\times10^4\text{m}^3/\text{a}\cdot\text{km}^2$;总体上南部地区白垩系单井涌水量小于 $100\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,多为 $500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以下,仅洛河组局部地区单井涌水量可达 $1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以上。

(2)盆地南部东弱中西部强

尽管盆地南部白垩系富水性总体较差(单井涌水量小于 $1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$),纵横向分布复杂,但该区白垩系富水性分布仍有东缘、西南缘弱,而中西部富水性较强的特点。形成这种分布格局的原因是复杂的,但主要是受沉积背景条件、构造形态及水动力场的主导性控制。盆地南部的东侧和西南边缘地区尽管总体上是河流、沙漠相发育区,岩石粒度粗、孔渗性好,具有良好的导水性,水循环条件较好,但是含水岩石厚度小,且处于地层上倾部位的补给–径流区而非汇水区,因此富水性较差,单井涌水量多为 $100\sim500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,甚至更小;而盆地南部的中西部地区,受天环向斜的控制,主要为地下水的径流和汇聚区,加之发育厚度较大的洛河组沙丘含水砂岩和环河组下部三角洲、滨浅湖相含水砂岩,因此富水性较强,单井涌水量多在 $500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以上。

(3)盆地南部东缘强西缘弱

盆地南部的东缘各含水岩组岩性总体较粗,特别是洛河组为展布稳定的沙漠相砂岩,具有良好的储水性和透水性,埋藏浅,接受大气降水补给条件好,加之受局部水动力场的控制,形成多个较

好的富水区,单井涌水量可达 $1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以上。而西部边缘地区岩性展布复杂,为地下水流场的高势能区,地下水汇聚不显著,含水层厚度不大,因而富水性较差,单井涌水量多为 $100\sim500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,甚至在 $100\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以下。

(4)北部上强下弱,南部上弱下强

盆地北部环河组岩性总体较粗,含水岩石厚度巨大(可达 600m 以上),埋藏较浅,具有良好的透水性,埋藏浅,接受大气降水补给和沙漠区大气凝结水补给条件较好,形成多个较好的富水区,单井涌水量多为 $1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以上;而洛河组尽管岩性较粗,但沉积厚度明显小于环河组,含水砂岩一般厚 $100\sim250\text{m}$,埋藏较深,接受大气降水补给较差,因而富水性相对差于环河组,单井涌水量多为 $500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 上下。因此北部白垩系富水性总体呈现上强下弱的规律。盆地南部洛河组岩性较粗,含水岩石厚度较大(一般厚 $100\sim300\text{m}$),具有良好的地下水富集条件,形成多个强富水区,单井涌水量多为 $500\sim1000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$,局部达 $3000\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$;而环河组岩性较细,含水层累计厚度不大,一般小于 150m ,尽管埋藏浅于洛河组,但因泥质岩隔水层发育而导致接受大气降水补给的能力较弱,因而富水性差,单井涌水量多在 $500\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{m}$ 以下。因此盆地南部白垩系富水性呈现上弱下强的特点。

3 结束语

随着人类生存和社会经济可持续发展对水资源需求的日益增长,伴随现代科学技术的迅猛发展,水文地质学迎来了空前的发展机遇,也面临着更大的挑战,多目标、多学科、多手段的综合研究已成为其

发展的趋势。深入含水层沉积学研究,既是沉积学服务于应用领域的进一步拓展,也是在充分应用现代新技术、新方法进行现代水文地质勘查与研究同时,应该充分重视的一种基本技术方法,它可为新技术、新方法的有效应用提供坚实的基础地质平台和前提性保证,可为整体地、历史地、系统地分析区域性水文地质条件、地下水含水系统地质结构以及地下水流动系统的介质场特征、地下水水资源计算与评价提供可靠的地质基础。

致谢:在成文中得到成都地质矿产研究所刘宝珺院士和丁俊、王洁民、牟传龙、秦建华等研究员,中国地质调查局汪民、邱心飞、韩再生等研究员及“鄂尔多斯盆地地下水勘查”项目负责人王德潜、孙永明、侯光才、刘方、曹建科等教授级高级工程师的指导和帮助,承蒙西安地质矿产研究所及陕西、宁夏、内蒙古、甘肃等省区地质调查院领导和同志的大力支持,得到项目组吴剑、宁宪华、闵际坤等同志和相关部門的协助,在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 陈梦熊. 新中国水文地质学发展的四个时期[A]. 见:中外地质科学交流史[C]. 北京:石油工业出版社,1992.
- [2] 陈梦熊. 现代水文地质学的演变与发展[J]. 水文地质工程地质,1993,20(5).

- [3] 王大纯. 我国水文地质学的展望[J]. 地球科学,1995.
- [4] 张永波,等. 水工环研究的现状与趋势[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [5] 张人权. 水文地质学发展的若干趋向[J]. 水文地质工程地质,1987(2):1~2.
- [6] 沈照理,刘光亚,杨成田,等. 水文地质学[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [7] 袁道先. 以地球系统科学理论推动水文地质学发展[J]. 水文地质工程地质,2003,30(1):1~44.
- [8] 孙连发,张人权. 模型·拟合·预测[J]. 水文地质工程地质,1991(5).
- [9] 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初步研究[J]. 水文地质工程地质,1987(1):41~43.
- [10] 张之淦,张洪平,孙继朝,等. 河北平原第四系地下水年龄、水流系统及咸水成因初探[J]. 水文地质工程地质,1987(4):1~6.
- [11] 孙文承. 河套平原咸水分布特征及其成因分析[J]. 水文地质工程地质,1987(6):1~5.
- [12] 高照山. 赤峰地区高氟地下水的分布与形成初探[J]. 水文地质工程地质,1986(2):44~46.
- [13] 聂世平. 川中北白垩系红层咸水水文地质特征及形成条件的初探[J]. 水文地质工程地质,1986(5):20~22.
- [14] 李文鹏,郝爱兵. 中国西北内陆干旱盆地地下水形成演化模式[J]. 水文地质工程地质,1999(4).
- [15] Engelen G B, Jones G P. Developments in the analysis of groundwater flow systems[M]. IAHS Press,1986.

Sedimentology of Cretaceous aquifers in the Ordos basin

XIE Yuan¹, WANG Jian¹, YIN Yueping², WU Xuanmin², WEN Dongguang²,
JIANG Xinsheng¹, LUO Jianning¹, WEI Lunwu¹, LI Minghui¹, ZHENG Wanmo¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Chengdu 610082, Sichuan, China;

2. China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: “Aquifer sedimentology” is a product of crossing and integration of sedimentology, hydrogeology, petroleum accumulation geology and geochemistry and a borderline subdiscipline that is based on sedimentological and hydrogeological theories, with sedimentary aquifers as its object of research, and mainly deals with studies of conditions of groundwater occurrence and circulation, structural characteristics of groundwater systems, quality, origin and distribution of groundwater and regularities of groundwater concentration and finally serves groundwater exploration and assessment. Integrated study of aquifer sedimentology and hydrogeology indicates that under the distinct control of the types and spatial distribution of sedimentary facies the occurrence, circulation and concentration conditions and water quality distribution of Cretaceous groundwater in the Ordos basin are good in the north and poor in the south and good in the lower part and poor in the upper part for the southern part of the basin.

Key words: Ordos basin; Cretaceous; aquifer sedimentology; groundwater occurrence—circulation conditions; water quality formation and distribution; regularity of groundwater concentration