

文章编号: 1000-0550 (2005) 01-0073-11

鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征 及其水文地质意义

谢渊¹ 王剑¹ 江新胜¹ 李明辉¹ 谢正温² 罗建宁¹
侯光才³ 刘方⁴ 王永和³ 张茂省³ 朱桦³ 王德潜⁵ 孙永明⁶ 曹建科⁴

1 (成都地质矿产研究所沉积与能源研究室 成都 610082)

2 (长庆石油勘探局 西安 710059) 3 (陕西省国土资源厅 西安 710060) 4 (陕西省地调院 西安 710060)

5 (西安地质矿产研究所 西安 710054) 6 (宁夏区地调院 银川 750000)

摘要 白垩纪鄂尔多斯盆地在燕山期抬升—沉降及气候演变的背景条件下,受水力、风力等地质作用,经历了早白垩世宜君—洛河期—环河期与罗汉洞期—泾川期两个沙漠沉积演化阶段。其中,洛河期和罗汉洞期是沙漠发育的两个主要时期,形成了旱谷、沙丘、丘间及沙漠湖等多类型沙漠亚相碎屑岩沉积。沙丘沉积砂岩作为白垩系沙漠相最主要的沉积岩石,具有分布稳定、厚度巨大、含盐量低、孔隙空间发育、储水性和透水性强等特点,不但具有良好的地下水赋存和循环条件,而且一般赋存着水质较好的地下水。

关键词 鄂尔多斯盆地 白垩系 沙漠相沉积特征、展布及演化 地下水赋存条件 地下水循环条件 水质

第一作者简介 谢渊 男 1971 年出生 博士 副研究员 油气沉积学、储层地质学及水文地质学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

沙漠沉积因其不但刻录了古气候、古环境等方面特殊的地质信息,且具储存油、气、水的良好物性条件,而成为地质学家极为关注的一个研究领域。自上世纪 50 年代以来,国内外许多学者就对不同地区、时代、类型的沙漠及其沉积物进行了较系统的研究和划分,取得了重要研究进展^[1-19]。

位于我国中西部的鄂尔多斯盆地,白垩纪沙漠沉积极为发育。自上世纪 90 年代以来,齐骅、程守田、江新胜、李孝泽等主要通过典型露头地质工作就该盆地白垩纪沙漠沉积和气候演变等方面进行了研究^[9,10,13-19],但由于缺乏对覆盖区深部白垩系沉积岩性特征的了解,因而迄今对盆地白垩纪沙漠沉积的时空展布尚乏全面、系统的认识。随着近年来鄂尔多斯盆地地下水资源勘查的不断深入,白垩系沙漠沉积与地下水的关系日益得到重视,系统研究白垩纪沙漠沉积的发展演化及其时空分布、深入分析沙漠沉积与地下水的密切联系,已经成为目前白垩系地下水勘查所面临的一个重大现实问题和颇具挑战性的基础地质理论课题。

在此背景下,从 2001 年以来笔者在该盆地开展

了大量的露头地质调查与石油钻井、水文钻孔资料的综合分析工作,对白垩纪整个盆地的沙漠相沉积特征及其空间展布进行了系统研究^[19],并发现沙漠相沉积具有重要的水文地质意义。

1 地层特征

鄂尔多斯盆地是我国中西部一个资源富集的大型构造沉积盆地,发育除志留—泥盆纪之外的较为完整的古—中—新生代地层系统。其中,中生代盆地为受控于西缘逆冲推覆作用的类前陆盆地^[20],于早白垩世形成一套主要分布于盆地中西部、厚逾千米的下白垩统陆相碎屑岩沉积。自下而上,下白垩统可分为宜君组、洛河组、华池组、环河组、罗汉洞组和泾川组六个主要地层单元:

宜君组 (K₁y):局限分布于盆地西缘、东南缘及南缘,为冲积扇相紫红、灰紫色砾岩,颗粒分选较差,地层厚度一般为 40~60 m,总体向盆地内部呈楔形迅速变薄至尖灭。

洛河组 (K₁l):全盆广泛分布,主要为一套河流、沙漠相紫红、棕红色块状粗—中—细粒砂岩沉积,夹

少量泥岩,盆地北部含砾,岩性总体单一、颗粒较粗;砂岩发育巨型交错层理。厚度一般为 100~400 m,盆地东北最厚达 529 m,盆地西缘最厚达 855 m,地层总体上自东向西变厚。

华池—环河组 (K_1h):广泛分布于全盆,以浅水湖泊、河流、三角洲相砂泥岩沉积为主;盆地北部主要为砂岩、含砾砂岩;南部以泥岩、砂岩为主。厚度一般为 100~750 m,盆地北部最厚达 915 m,西南部盐池—环县一带厚度多为 550~750 m,最厚达 914 m,总体自东向西变厚。

罗汉洞组 (K_1l):呈“厂”字形局限分布于盆地北缘和西缘。北缘为一套河流相棕红、灰绿、灰紫色含砾砂岩、砂岩夹泥岩沉积;西南缘主要为沙漠、河流及湖泊相棕红、桔黄色砂岩夹紫红色泥岩,砂岩发育大型交错层理。厚度一般为 50~200 m。

泾川组 (K_1j):呈不连续“厂”字形、狭窄带状局限分布于盆地北缘和西南缘。北缘为黄绿、灰绿色砾岩夹棕红、灰白、灰黄色砂岩、含砾粗砂岩,富含钙质结核;西南缘为暗紫、浅灰色砂质泥岩与泥质粉砂岩互层,局部夹浅灰色泥灰岩和砂岩。厚度一般为 50~100 m。

2 沙漠相主要沉积类型及特征

通过典型露头、水文钻孔岩芯、石油钻孔岩屑录测井剖面的调查研究得出,沙漠相是早白垩世鄂尔多斯盆地中最具特色的沉积相类型,广泛发育于洛河期盆地中南部、罗汉洞期盆地西南部,局部地区华池组、泾川组也夹有风成砂沉积。据沉积地形地貌、岩石特征、沉积构造及地质营力作用等差异,沙漠相可划分为戈壁、旱谷、沙丘、丘间、沙漠湖五种亚相^[8~10,19],它们在盆地白垩系沙漠相中都有不同程度的分布(表 1)。

表 1 鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相亚相划分简表

Table 1 Classification of the Cretaceous desert facies in Ordos basin

相	亚相	地质营力	发育情况	
沙漠相	戈壁亚相	水力为主	少	
	旱谷亚相	水力为主	常见	
	沙丘亚相	风力为主	广泛	
	丘间亚相	干丘间亚相	风、水交替	广泛
		湿丘间亚相	水力为主	广泛
	沙漠湖及盐碱滩亚相	水力为主	局部	

2.1 戈壁亚相

亦称砾漠亚相,主要由风力从洪冲积物中搬运走细粒物质后残留下来的棱角状或被磨圆的砾石、卵石及粗砂等风蚀残积物组成,多见于沙漠盆地边缘。在盆地北缘东侧东胜南部^[16]、南缘东侧彬县洛河组露头中,可见戈壁砾石(风棱石)层与风蚀作用改造的砾质冲积物或风成席状砂、沙丘沉积交互出现^[17,19]。砾石层砾石分选差、平坦分布,表面呈水平状,厚度仅几厘米到几十厘米(1~2个颗粒厚),侧向延伸较远,有时具缓倾斜的大型波浪层;砾石之间的砂质填隙物常形成一个硬结壳,它与风棱石都是戈壁亚相特征性的沉积指相标志。

2.2 旱谷亚相

主要为干旱区突发的间歇性水道含砾中粗砂岩沉积,因此亦称为“干旱谷”。多发育于沙漠盆地边缘,但有时因季节性河流的远距离延伸也可在沙漠腹部呈夹层产于沙丘砂岩层之间及丘间亚相之中。在平面上从盆地边缘的冲积扇、旱谷扇向沙漠区演变为旱谷河道、水道,到沙漠内部变薄直至消失,代之而发育沙丘;在垂向上可与冲积扇、沙丘、丘间沉积交互叠置,在强烈风蚀作用下可进一步形成戈壁残留物。

沙漠盆地边缘的旱谷沉积,一般厚度大、粒度粗。盆地南缘(彬县虎家湾、朱家湾、大佛寺、铜川焦坪等地)洛河组(图 1)、西缘环县等地罗汉洞组露头剖面中,旱谷亚相由杂色砾岩、棕红色含砾粗—中粒砂岩组成,垂向剖面中向上因较强的风蚀作用代之而发育由交错层理发育的桔红色中细砂岩组成的沙丘甚至丘间砂、泥质沉积,因此构成多个旱谷—沙丘(丘间)的旋回性叠置组合。

向沙漠盆地内部,旱谷沉积岩石粒度变细、砾石变小且减少,厚度变薄乃至消失。如盆地南部剖 20 井洛河组中发育的旱谷亚相沉积,由棕、棕红色含砾中砂岩组成,具有高阻测井响应,与其上覆低电阻率沙丘沉积和丘间泥质沉积形成鲜明对比(图 2、4、5)。盆地东南缘 B12 井洛河组底部也可见较薄(60 cm)的棕红色砾岩、含细砾粗粒石英砂岩旱谷沉积,其上发育厚层块状棕红色中细粒长石石英砂岩、长石砂岩沙丘亚相,砂岩交错层理发育,岩石疏松多孔。

2.3 沙丘亚相

2.3.1 沙丘亚相沉积特征

沙丘是盆地白垩系最典型、最主要、最容易识别的一类沙漠沉积亚相,广泛分布于洛河组、罗汉洞组,

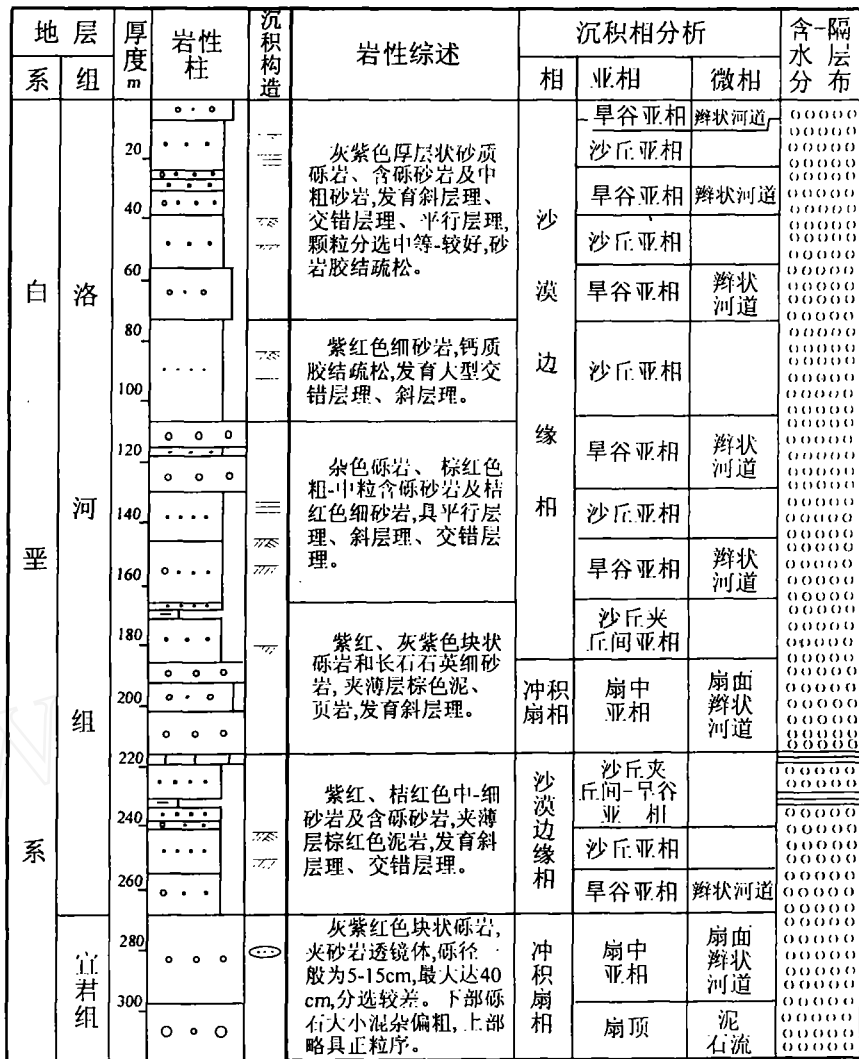


图 1 盆地东南缘虎家湾—大佛寺宜君—洛河组露头剖面沙漠边缘旱谷—沙丘亚相沉积及含水层分布综合柱状图

Fig 1 Column showing the wady and dune subfacies and aquifer distribution in the margin of desert of Yijun-Luohu Formation in the Hujiaowan-Dafosi outcrop section on the southeastern margin of the Ordos basin

沉积砂岩具有独特的颜色、岩石组分、结构、沉积构造、电测井响应等特征。

(1) 沙丘砂岩颜色

由于形成环境的干旱和强氧化条件及岩石中较高的长石含量,白垩系沙丘砂岩多呈砖红、棕红、紫红色,部分因后期淋滤、胶结等作用而呈褐黄色甚至白色,如一个前积层的上部砂岩为紫红色、结构疏松,到下部却变为白色、结构致密。

(2) 沙丘砂岩组分

白垩系洛河组和罗汉洞组沙丘砂岩石英、长石含量较高,较少含云母片和粘土,故显得干净而无杂质;岩性主要为长石石英砂岩、石英砂岩、长石砂岩,少量岩屑长石砂岩、岩屑石英砂岩。

因风力作用强度、频率、持续时间以及沉积速率等差异,沙漠盆地不同地区沙丘砂岩的类型和成分有所不同。如洛河期沙漠中心地区(志丹永宁、吴旗、富县张家湾及靖边杨桥畔等地)的沙丘砂岩,石英颗粒含量一般大于 85%~90%,而长石和岩屑及其它矿物仅占 5%~15%;从沙漠中心向盆地边缘砂岩中略显石英减少、长石和岩屑增加的趋势,可出现岩屑长石砂岩、岩屑石英砂岩。

(3) 沙丘砂岩结构

颗粒粒度:沙丘砂岩粒度多集中在细—中粒级(2~4,图 3),次为粗砂和粉砂粒级,粒度中值为 0.14~0.23mm,分选系数一般为 0.9~1.16,分选较好—好,峰态值为 2.38~4.23;粒度曲线上砂粒以悬

浮和跳跃段为主,缺乏河流沉积的粗尾滚动段。岩石结构疏松,胶结差,颗粒支撑。由于风蚀作用强度、持续时间以及沉积速率的差异,沙漠中心沙丘砂岩分选性明显好于沙漠中心外侧和沙漠盆地边缘。

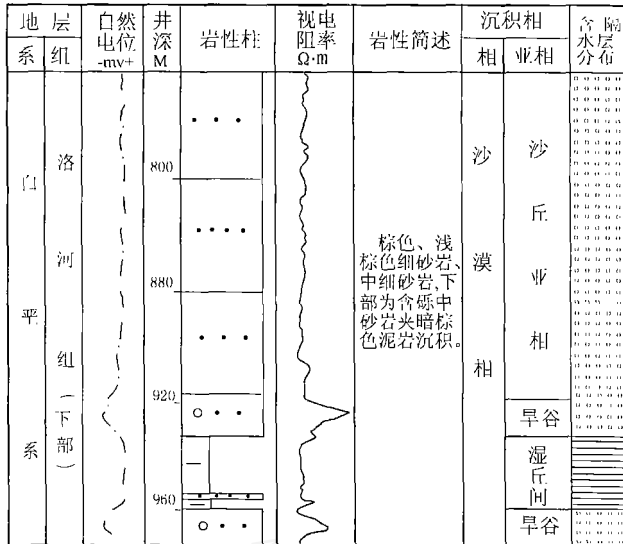


图 2 盆地地面剖 20 井白垩系洛河组下部沙漠相旱谷—丘间—沙丘沉积亚相—测井响应及含水层综合柱状图
Fig 2 Column showing the log responses to the sedimentary sequences of the wadi-interdune-dune subfacies of desert facies of the lower Luohe Fomation of Cretaceous in well pou20 and aquifer distribution in the southern of the basin

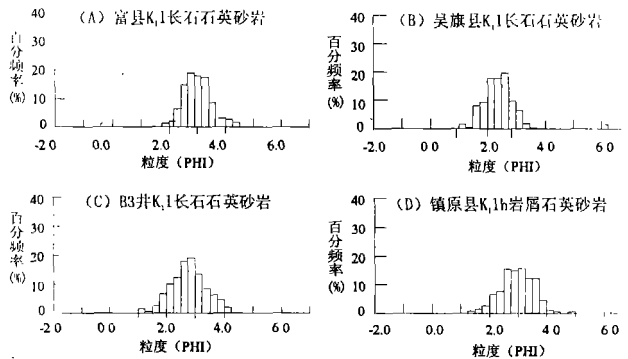


图 3 白垩系沙丘亚相砂岩粒度分布百分频率直方图
Fig 3 Straight column showing the percent frequency of the grain size distribution of the dunes subfacies sandstones in Cretaceous of the basin

颗粒形态与表面结构:沙丘砂岩颗粒多呈次圆状,具较高的磨圆度,且常附有泥质包壳,石英颗粒表面以常见的碟形坑、上翻晶面薄片、毛玻璃化等机械成因结构为标志,还可见一些化学成因和附生成因的结构特征,这些都是沙丘砂岩别于其它环境成因砂岩

的重要微观标志 (表 2)^[18,21]。

表 2 各种环境成因砂岩石英砂颗粒表面形态特征^[21]

Table 2 The surface micro-textures of the quartz sand grains from different environments

颗粒表面特征	环境成因	风化作用	风成	河流	湖泊相	三角洲
	成岩作用	成岩作用	砂岩	砂岩	砂岩	相砂岩
次圆(棱)状颗粒	*			***	***	**
磨圆颗粒	***		***			*
贝壳状断口				**		
撞击沟				**		
V形撞击坑			*	**	**	**
碟形撞击坑			***			
上翻晶面薄片	***		***	*	**	**
硅质薄膜	***		***		*	*

出现机率:***大,**中,*小

鄂尔多斯盆地白垩系沙漠中心沙丘砂岩石英颗粒磨圆度高、多为次圆—圆状,碟形坑较发育,分选性好,填隙物不发育;而沙漠中心外侧,沙丘石英颗粒分选性和磨圆度变差(次棱角—次圆状),碟形坑少见,填隙物相对发育;这主要是由于沙漠中心沙丘砂岩是经受长时间、反复的风蚀作用而缓慢沉积形成,而沙漠中心外侧沙丘砂岩经受较短时间的风蚀作用而快速沉积形成,同时也与盆地沙漠发育期物源丰富、沉积速率总体较高的地质背景关系密切。

(4) 沙丘砂岩沉积构造

沙丘砂岩沉积构造以交错层理、平行层理、小型轻度翘曲、倒转褶曲等多类型层理和准同生变形构造发育为特征。其中,交错层理是盆地白垩系洛河组和罗汉洞组沙丘最典型的沉积构造,类型多、规模巨大。交错层理前积层上倾角很大,上部通常可达 29°~30°,甚至可达 34°,而顺坡向下角度减小,近底处多与下界面近于水平相切,从而形成倾斜而上凹的纹层;层理规模大,一个单斜层理厚度从十几厘米到数米不等,其中单个前积纹层也较厚(1~5 cm);横向延伸稳定,在露头上可见一个层理侧向延伸数百米甚至上千米。交错层理之间的界面常是一个平整的风蚀面,多个交错层理组成的交错层组厚度可达 10 m 以上,甚至达 52 m (志丹永宁剖面洛河组沙丘)。风成沙丘交错层理的这些特征是其它沉积介质条件成因的砂岩所难以见到的。

受古地形条件、沉积介质动力条件(风力作用强

弱、风向变化、堆积速率大小以及水力作用参与程度)的影响,交错层理类型丰富,交错层组规模大小不等。洛河组和罗汉洞组露头上主要发育以下类型交错层理:

大型—巨型板状单斜层理:大型—巨型单斜层夹于水平层或波形状层之间,呈巨厚平板状,前积层上端与上覆层底面高角度相交(22°~34°),下端与下伏层面水平相切,前积纹层的微凹面向上。其横向延伸很远,达数十米至 1000 m 以上(志丹—甘泉一带)。单个斜层理厚度 0.3~2 m,多个单斜层理组合的厚度可达数米至 10 m 以上,表明沙丘形成时沉积地形平坦、潜水面平稳,在多次同向风的风积、风蚀作用下,堆积、削切形成多个平板状单斜层理叠置组成。

大型楔状交错层理:产于沙丘特殊部位的沉积中,是上下界面有交角的楔状交错层,其成因包括由背风坡爬升沙波所致,抑或是整个沙丘向一个斜坡爬升造成,还可能是由于风向变化等多种因素所致。楔状交错层的频繁出现,往往代表当时风向多变、潜水面极低,水平削切面不发育。在彬县朱家湾、黄陵、志丹洛河组露头及镇原、环县、泾川等地罗汉洞组露头中比较普遍。

大—巨型板状—楔状交错层理:是由大—巨型板状交错层理与楔状交错层理叠置组成的复合层理组,这是在沙丘迁移演化过程中,侧向上因地形和风向等条件变化、在垂向上因风向等条件的演变所致。在白垩系洛河组、罗汉洞组露头中常见板状交错层理与楔状交错层理组成规模巨大的复合层理组。

上述交错层理(层理组)在洛河期和罗汉洞期沙漠盆地不同地区分布发育情况不同。沙漠盆地边缘主要发育大型板状—楔状交错层组、大型楔状交错层理(盆地南缘彬县朱家湾、大佛寺洛河组露头,泾川县罗汉洞组露头),而在盆地沙漠中心地带则主要发育大型—巨型板状交错层组、板状—楔状交错层组(盆地中南部志丹洛河组、西部镇原等地罗汉洞组)。

(5) 沙丘砂岩测井电性响应

本次研究发现,沙丘砂岩沉积在电测井中具有普遍的特征性电性响应,即沙丘沉积视电阻率、自然电位等测井曲线一般都呈低幅度、平直光滑的电性模式,明显区别于与其相邻的丘间、沙漠湖、旱谷以及冲积扇相等主要受水流作用的沉积(图 1、2、4、5)。从其平直光滑的测井响应,不难读出沙丘沉积是因受风力搬运作用而形成岩性组成均一、组分少变的地质信息,它与主要受流水作用而形成的组分多变、泥质含

量受水流强弱变化而变化的水成沉积形成鲜明对照。这些特征的电性响应成为埋藏区白垩系沙丘沉积识别划分的重要标志。

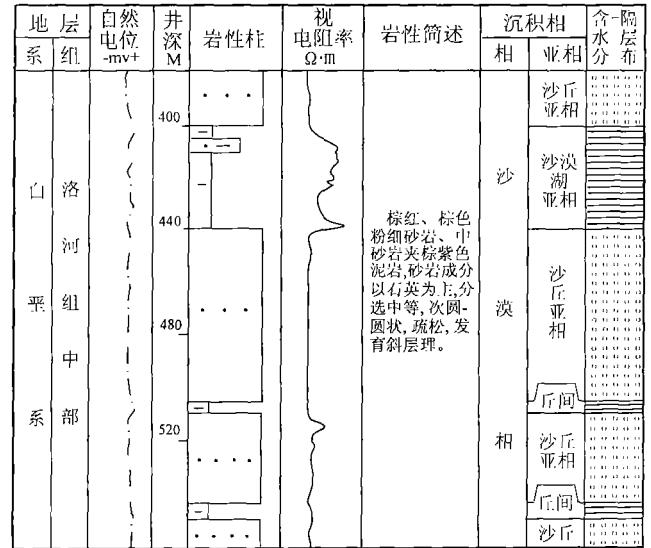


图 4 盆地南部剖 22 井白垩系洛河组沙漠相沙丘—丘间—沙漠湖沉积亚相—测井响应及含水层分布柱状图
Fig 4 Column of the log responses to the sedimentary sequences of the dune-interdune-desert lake subfacies of the Cretaceous Luohe Formation in Well Pou 22 and aquifer distribution in the south part of the basin

2.3.2 沙丘沉积的发育与演化

沙丘亚相的发育主要受风力作用、地形条件及潜水面的控制。早白垩世鄂尔多斯沙漠盆地边缘,由于间歇性较强水动力作用的参与和坡度明显的地形条件,沙丘沉积一般难于大规模稳定发育并保存下来,因此在垂向和侧向上一般是厚度不大的沙丘亚相与冲积扇、旱谷、丘间沉积频繁交错叠置相伴而生(图 1、2、4、5)。而在沙漠盆地内部,地形相对低平宽缓,在干旱气候条件下,水力作用强度明显减弱,风力的肆虐和多次反复作用,大规模、大厚度的沙丘亚相沉积得以形成并被保存下来;在气候变化、降雨发生时,相对低洼区可形成规模不等的暂时性积水丘间泥质沉积或沙漠湖泥质沉积,因此沙漠盆地内部一般发育占主导地位的、厚度巨大且延伸稳定的沙丘亚相沉积,间或在垂向和侧向上可见厚度巨大的沙丘亚相与厚度较小的丘间、沙漠湖沉积相伴而生(图 1、2、4、5)。

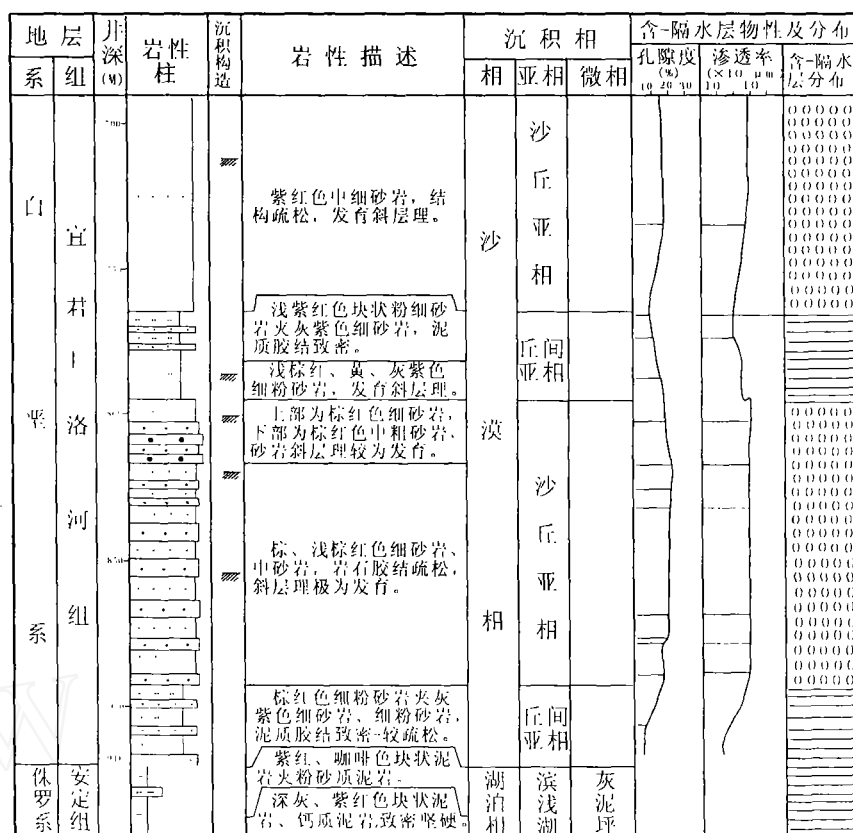


图 5 盆地西缘 B3 井白垩系宜君—洛河组沙漠相沙丘亚相—丘间亚相沉积序列及含水层分布综合柱状图

Fig 5 Column showing the dune-interdune subfacies of the Cretaceous Yijun-Luohe Formation in well B3 and aquifer distribution in the western margin of the basin

2.4 丘间亚相

丘间亚相是沙丘与沙丘之间的局部地形平坦低洼地带, 因暂时性水流汇聚而形成的以细碎屑岩 (泥质岩) 为主的水力沉积物, 常伴随沙丘环境而存在, 大多呈夹层或透镜状包裹于沙丘沉积中。丘间可分为湿丘间、干丘间及蒸发丘间三类, 其中前者在白垩系极为发育, 也最易于识别。湿丘间一般是由于风蚀作用形成的沙丘间相对洼地, 因潜水面抬升或间歇性降雨而暂时性积水形成的紫红色泥岩或粉砂质泥岩沉积; 可见微细水平层理, 并发育因强烈蒸发逐渐干涸而形成的泥片、泥裂缝, 而泥裂缝又多被下一次风力携带的风沙灌入填满而形成湿丘间特征性的砂柱沉积构造; 其沉积厚度一般较小 (几厘米—十多米), 分布不稳定, 范围局限。在测井剖面中, 湿丘间沉积常常形成幅度异常的指状测井响应, 与沙丘沉积的平直型、低幅度测井响应形成鲜明对照 (图 2, 4, 5)。

2.5 沙漠湖亚相

沙漠湖是沙漠盆地中因构造或风蚀作用形成的较大范围的洼地, 在降雨或潜水面上升时形成的水体较浅的湖泊, 也可由分布范围较小的潮湿丘间演化而成规模变大的小型沙漠湖泊。它在侧向和垂向上常与沙丘过渡演变, 因此以细碎屑岩 (泥质岩) 为主的沙漠湖沉积中可夹存厚度不大的风成沙丘砂岩沉积; 当沙漠边缘旱谷 (辫状水道) 延伸至沙漠湖时, 水流可将各种粒度的碎屑带入湖内; 当气候持续干旱, 强烈的蒸发导致湖水干涸可演化成内陆盐碱滩, 常见沙、粉沙、粘土、石膏等盐类等沉积。陕西横山—靖边县一带洛河组剖面中的沙漠湖沉积较为典型, 主要由泥岩、粉砂岩夹薄层细砂岩组成, 岩石普遍含钙质, 具水平层理, 沉积厚度 20~40 m, 其视电阻率等测井曲线一般都呈较高幅度、指状、齿状特征 (图 4)。此外, 在盆地南部西侧西 5 井区洛河组中也有小型沙漠湖发育 (图 6)。

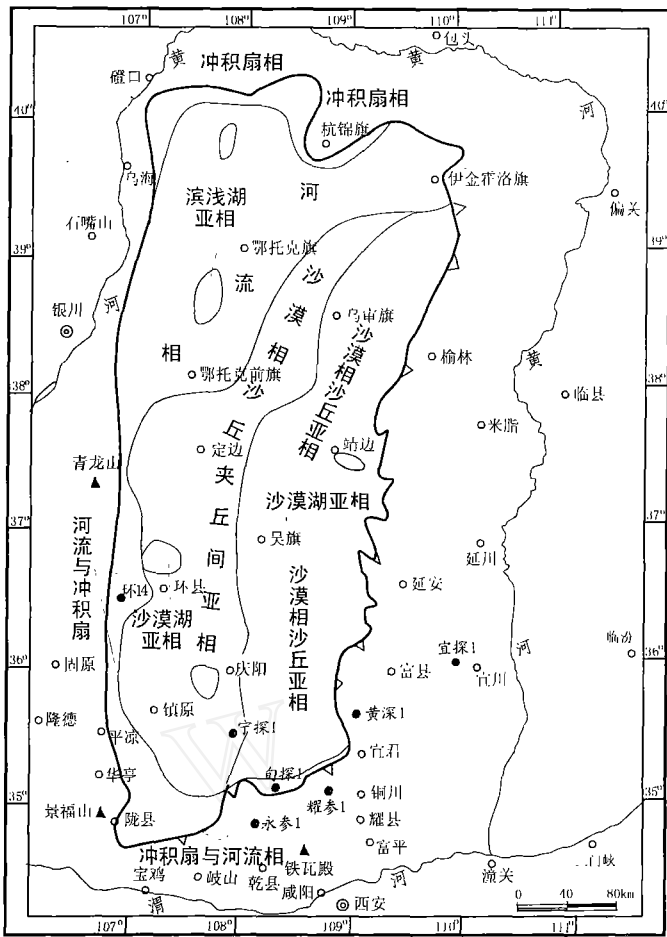


图 6 早白垩世宜君—洛河期鄂尔多斯沙漠盆地岩相古地理简略图

Fig 6 Schematic map showing the lithofacies-paleogeography of the early Cretaceous Yijun-Luohu stage in Ordos basin

3 沙漠相沉积展布与演化

3.1 白垩纪沙漠盆地沉积演化

受燕山—幕运动的影响,鄂尔多斯盆地发生强烈的整体抬升,早白垩世已经形成一个四周隆起、封闭统一、范围缩小的内陆盆地。由于早白垩世盆地位于亚热干旱带北缘^[9, 10, 19],总体处于干旱—半干旱气候条件,盆地周缘分布的陆地和高山物源供给充足(尤以西北部、北部物源最为丰富),受当时所处的副热带高压行星风系的控制,而形成早白垩世鄂尔多斯山型地带性沙漠盆地^[10, 19],并成为我国白垩纪自西北向东南横贯大陆的红色沙漠带的重要组成部分^[13, 15, 19]。

然而,由于气候的非均一性和构造活动的非长期稳定性,早白垩世鄂尔多斯并非一直是一个以沙漠广布、沙丘独霸天下的均一沙漠沉积盆地。在气候由干

旱—相对潮湿的两次非均一性演变、盆地抬升—沉降的两次非稳定性构造演化背景下,沉积物源供给条件和沉积介质动力条件也发生了相应的变化,导致早白垩世鄂尔多斯沙漠盆地先后经历了宜君—洛河期—环河期、罗汉洞期—泾川期两个沙漠发育—扩张—萎缩—消亡的沙漠沉积演化阶段^[19]。其中,宜君—洛河期与罗汉洞期是早白垩世盆地主要的沙漠发育—扩张期,此时盆地内沙漠广布、沙丘异常发育,仅在盆地北部及其它边缘地带发育冲积相沉积、局部发育小型湖泊相沉积;环河期与泾川期是早白垩世盆地沙漠萎缩—消亡期,此时盆地内以河流、湖泊相沉积广布为特征。而且,即使是在沙漠发育—扩张的时期,由于地形、物源及水流作用的差异,盆地内沉积相构成与展布也并非沙漠相沙丘亚相一统天下,而是占优势的风成沙漠相与其它水成沉积相在空间上呈有机的配置组合。

3.2 宜君—洛河期沙漠相沉积展布

宜君—洛河期是早白垩世鄂尔多斯盆地第一个沙漠发育—扩张期。其中,早白垩世之初的宜君期,受燕山—幕运动的影响,盆地四周为山地所包围,充足的物源在阵发性流水作用下开始了不(假)整合于侏罗系安定组之上的填平补齐式充填沉积。在盆地南缘(宜君、彬县、千阳)、西缘及北缘等地,形成了山前冲积扇粗碎屑岩快速堆积,厚度一般为 40~60 m。由于气候的干旱和降水的阵发性,盆地边缘辫状水道未能远距离向盆内延伸,因而盆地边缘的冲积扇、河流相沉积向内部呈楔形迅速变薄至尖灭。

至洛河期,随着气候的干旱化和风力作用的加强,盆地进入白垩纪第一个沙漠沉积发育的鼎盛时期,并先后经历了西风与东北风交替盛行—西风盛行的风向演变,沙丘总体向东、东南迁移^[15, 19],在盆地北部沙丘可能向西南迁移。此时,盆地白于山以北的西侧主要为冲积扇、河流相夹小型湖泊沉积,该区河流相带宽阔,占据盆地北部的大部分区域,据其沉积物以灰绿、黄绿、灰紫、紫红色混杂为主的特点,可见该区气候条件可能不及盆地其它大部分以紫红、棕红色为主色调的沉积砂岩分布区那么干旱;东侧气候较西侧干旱,地势低缓,为河流与沙漠旱谷、沙丘沉积交互,并向盆地南部逐渐演变为沙漠相沙丘夹旱谷沉积(图 6)。盆地白于山以南除边缘局部为狭窄带状的冲积扇、辫状河流相分布外,其它广大地区沙漠沙丘亚相几乎独霸天下,志丹—吴旗一带为此时的沙漠中心,沙丘沉积厚度最大(300 m 左右)。其中,盆地南

部东侧地形相对较高和平坦,沙丘砂岩沉积为发育,甚少见到丘间泥质沉积,丘间泥质岩厚度不及地层厚度的 10%,仅靖边局部有小型沙漠湖发育;而其西侧地形相对低洼,沙漠丘间沉积增多,但仍多呈薄层交互于厚层沙丘砂岩沉积之中,丘间泥质岩沉积可达地层厚度的 10% 以上,但不及 20%,仅局部地带(西 5 井区)有小型沙漠湖或沙漠边缘滨浅湖沉积。由上可见,沙漠相是宜君—洛河期盆地的一大古地理景观,此时在炎热干旱的亚热带内陆信风带存在面积巨大的古鄂尔多斯沙海,是中国白垩纪红色沙漠带的重要组成部分^[13, 15, 19]。

继宜君—洛河期沙漠发育—扩张期之后到环河期,由于受气候的相对湿润化和构造沉降作用的控制,湖侵发生且规模逐渐扩大,形成湖泊、河流、三角洲沉积广布全盆而仅南部局部残留沙漠相沙丘沉积的岩相古地理格局,逐渐进入早白垩世第一次沙漠沉积的萎缩期直至消亡。

3.3 罗汉洞期沙漠沉积展布

到罗汉洞期,盆地再次抬升,气候又逐渐向干旱转化,开始了早白垩世第二个沙漠发育—扩张演化期。此时,盆地边部发育冲积扇、河流相沉积,向盆地西南中心逐渐过渡为沙漠相、河湖相沉积。其中盆地北部和西北部的内蒙古境内主要为冲积扇、河流相沉积,局部夹有小型残留湖泊相沉积。盆地西侧西南缘局部发育辫状河和滨浅湖亚相沉积;西侧的中南部盐池—环县—镇原—泾川一带则为沙漠相广布,以沙丘亚相夹旱谷亚相、河流相沉积为特征;从环县向南到镇原一带沙漠沙丘夹丘间沉积最为发育,风成沙丘前积层倾向表明当时西风盛行,沙丘向东迁移^[15, 19],该区沙丘沉积厚度最大,交错层理发育且规模巨大,属于此时的沙漠中心。相对宜君—洛河组沙漠发育—扩张演化期的沙漠而言,罗汉洞期沙漠残存分布范围小,发育时间较短,沙漠中心已从宜君—洛河期的志丹—吴旗一带西移至环县向南的镇原一带,但此时的沙漠也是我国白垩纪沙漠带的重要组成部分之一^[13, 15, 19]。

此后到泾川期,气候再次由干旱逐渐向湿润转化,盆地内不均衡升降,进入早白垩世第二个沙漠萎缩—消亡期,河湖相发育成为此时的岩相古地理特征。到晚白垩世,因强烈的整体构造抬升,盆地沉积历史宣告结束。

4 沙漠相沉积的水文地质意义

前述表明,沙漠相沙丘沉积是鄂尔多斯盆地白垩

系的一大特色。而无论是从其展布稳定、厚度巨大、分布广泛的产出特征,抑或是从其良好的孔渗物性条件和发育的连通网络结构,还是从其沉积岩石的低含盐量和通畅的循环系统来看,对白垩系地下水而言,沙漠相沉积都具有极其重要的水文地质意义^[19]。

4.1 沙漠相沉积具有良好的地下水赋存条件

4.1.1 沙漠相沉积砂岩具有良好的宏观地下水赋存条件

洛河期和罗汉洞期是早白垩世沙漠发育鼎盛时期,其中,洛河期沙丘砂岩广泛分布于盆地北部东侧和南部(图 9),区域展布极为稳定,厚度较大,一般为 100~350 m^[19],盆地东北巴 3—伊 6—伊 9 井(伊 6 井达 529 m)、中部西 182—塞 162 井区及西部天深 1 井区厚度达 450 m 以上,盆地西南部黄 4—环 25—盐 26 井区厚度达 700 m 以上,总体上洛河组厚度展布呈自东向西变厚的特点;沙丘亚相中粗碎屑岩沉积为主,储水岩层空间展布稳定、均质性强、规模巨大;在盆地南部的中西部,呈厚度薄且不稳定分布的夹层或透镜体产于沙丘亚相中的丘间、沙漠湖亚相细碎屑岩及泥质岩沉积,仅形成分布局限的弱透水性、胶结致密的隔水层。罗汉洞组呈“厂”字形局限地分布于盆地北部、西部及西南部,沙漠相沙丘亚相砂岩分布于盆地南部环县—镇原—泾川一带,厚度大(100~200 m),含水砂岩层发育,具有良好的地下水赋存集条件。

总体上,洛河组构成一套分布稳定的区域性良好含水岩组(尤其以盆地中东部大面积分布最佳),罗汉洞组在盆地西部、西南部(环县—镇原—泾川一带)的沙漠相沙丘亚相砂岩构成一套地区性良好含水岩组,具有优越的地下水赋存、富集条件。

4.1.2 沙漠相沉积砂岩具有良好的微观地下水赋存条件

洛河组、罗汉洞组沙丘砂岩主要为中—细粒石英砂岩、长石石英砂岩及长石砂岩,次为粗砂岩及少量粉砂岩。砂岩颗粒均匀,杂基稀少,成分和结构成熟度均较高;岩石颗粒抗压实能力强,胶结较弱,结构疏松,孔隙发育,并以原生粒间孔隙为主,少量粒间溶孔,孔径较大,孔喉连通性好,主要为大孔粗喉型、大孔中—细喉型及部分中孔细—微细喉型孔喉组合,具有发育良好、均质性较强孔喉网络系统;大部分样品的孔隙度为 15%~25% (最高达 35%),渗透率为 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (最高达 $8000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) (图 5),具有较强的储集性能和透水能力。因

此,洛河组、罗汉洞组沙漠相沙丘砂岩是盆地白垩系重要的储水岩石类型,具有良好的微观地下水赋存富集条件。

综上所述,受沙漠相沉积演化及展布的控制,白垩系洛河组构成一套区域分布稳定的良好含水岩组,罗汉洞组于盆地南部环县—镇原—泾川一带形成一套分布较稳定的良好含水岩组层,具有优越的地下水赋存、富集条件。

4.2 沙漠相沉积具有良好的地下水循环条件

白垩系洛河组、罗汉洞组沙漠相以沙丘沉积广泛发育为特征,沙丘砂岩多呈厚层—巨厚层、块状产出,单层厚度较大(一般为 10~40 m)(图 1~5),砂岩累计厚度占地层厚度的 80%~100%,横向展布稳定;垂向上沙丘砂岩夹较薄(一般为 2~8 m)的丘间泥质岩隔水层,但泥质隔水层侧向分布极不稳定,多形成不稳定断续分布的夹层或透镜状局域性隔水层。沙丘砂岩孔隙发育、喉道连通性好,形成均质性较强的良好孔—喉网络结构。可见,洛河组、罗汉洞组沙漠相沙丘砂岩不但具有极强的稳定性和均质性,在空间上构成极为有利的储水配置样式^[19],而且具有良好的储水性和透水性,因此沙漠沙丘沉积具有宏微观均质性极强的含水系统结构特征和良好的地下水渗流系统,不但极有利于地下水的赋存和富集,也极有利于地下水的渗流、循环。

4.3 沙漠相沉积赋存水质较好的地下水

鄂尔多斯盆地白垩系地下水水化学组成、水质的区域分布极为复杂,受到气候、地貌、含水层沉积是相特征、上覆地层特征以及地下水补径排条件等诸多因素的控制。其中,含水层沉积相作为地下水赋存的物质载体和循环交替的空间场所,是影响地下水水质最为根本的地质因素,其它因素都是在这一物质基础上

发挥不同程度的影响作用^[19]。

分析表明,白垩系洛河组、罗汉洞组沙漠相沙丘砂岩良好的物性条件和低含盐量的化学组成,决定了赋存、循环于其中的地下水水质除了在地下水汇聚区较差外,一般都较好(表 3)。这是因为,首先,沙丘沉积砂岩尽管形成于气候干旱、蒸发作用强烈的地质背景下,但主要靠水流汇聚与蒸发而引起的盐分聚集作用,在以风为主要沉积介质和动力的沙丘砂岩沉积之中却难以发生,加之沙丘沉积少有粘土物质而不可能吸附多少盐分,即使有盐分也因其极强的渗透循环条件而使盐分随下渗水流而被带走,因此沙漠沉积砂岩本身含盐量就少;其次,沙漠沉积砂岩在被埋藏及其以后的地下水循环过程中,由于良好的导水性、透水性等有利的地下水渗流循环系统,水流通畅、地下水循环交替强烈,因此除了在汇水区外,盐分一般难以聚集。

如定边县 BK0201 水文孔中,埋深 780 m 之上的华池—环河组中岩石可溶盐含量多远大于 1 g/Kg,而 780 m 以下的洛河组岩石含盐量并未随埋深加大而增加,多稳定在 1 g/Kg 上下(图 7)。吴旗县 ZX1 孔地下水固形物含量在白垩系上部华池—环河组湖泊相砂泥岩中达 2.586 g/L,而其下部深层宜君—洛河组沙丘砂岩中仅为 1.433 g/L;志丹县 ZX2 孔上部华池—环河组湖泊相砂泥岩中地下水矿化度为 0.464 g/L,而其下部宜君—洛河组沙丘砂岩地下水水质矿化度小于 0.388 g/L。

形成上述白垩系地下水水化学和水质垂直分带“上差下好”倒置现象的原因,除了是地下水循环、径流、补给、水动力场等水文地质条件的综合作用外,在很大程度上就是由于沙丘沉积砂岩与湖相砂泥岩沉积自身条件差异的影响。华池—环河组湖泊相砂泥岩

表 3 白垩系宜君—洛河组含水层沉积相特征与矿化度特征对比表

Table 3 Sedimentary characteristics of aquifers in the Cretaceous Yijun-Luohu Formation and their relations to the mineralization degree of groundwater

水文地质特征	南 部		北 部	
	陇 东	陕 北	鄂 西	鄂 东
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	沙丘与丘间	冲积扇、河流	冲积扇、河流
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 / ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.45	0.7	1.3	1.3
矿化度 / (g/L)	1~3	0.5~1.7	0.5 ±	<0.5

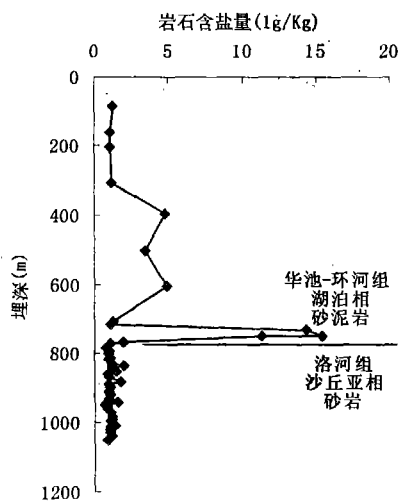


图 7 定边县 BK0201 孔白垩系沙丘亚相砂岩与湖泊相砂泥岩可溶盐含量与埋深关系图

Fig 7 The relationships of the salt contents in dune sandstones and lacustrine deposits of the Cretaceous to their burial depths in well BK0201 at Dingbian County

本身含盐量较下伏洛河组沙丘岩石高,且透水性和导水能力差,尽管处于上部更易于与大气降水发生化学成分交替,但水循环交替滞缓和岩石本身较高的含盐量而导致其中的地下水盐度偏高;而下伏洛河组沙丘亚相砂岩本身岩石含盐量低、地下水循环交替作用积极,决定其中地下水盐度低、水质好^[19]。

致谢 本文承蒙成都地质矿产研究所刘宝珺院士,中国地质调查局汪民、殷跃平、文冬光、邱心飞、武选民、韩再生等研究员的指导;涉及的部分资料得到西安地矿所,陕西、内蒙、宁夏及甘肃地调院,以及中国地大(武汉)、西安石油学院、长庆石油勘探局等有关单位领导和同事们的大力支持,项目组吴剑、宁宪华、闵际坤等同志和相关各部门给予了大力协作,在此一并致以衷心感谢!

参考文献 (References)

- Cooke R, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology. London: UCL Press, 1993.
- Springer M E. Desert pavement and vesicular layer of some desert soils in the desert of the Lahontan Basin. Soil Science Society of America, Proceedings 22, 1958. 63 ~ 66
- Sugden W. Origin of faceted pebbles in some recent desert sediments of southern Iraq. Sedimentology, 1964, 3: 65 ~ 74.
- Ryszard Gradzinski, Tomasz Jerzykiewicz. Dinosaur and mammal-bearing aeolian and associated deposits of the upper cretaceous in the gobi desert, Mongolia. Sedimentary Geology, 1974, 12: 249 ~ 278.
- 陈荣林. 苏南上白垩统赤山组风成沙初探. 石油实验地质, 1982, (2): 23 ~ 26 [Chen Ronglin. Primary study on aeolian sandstones of Chishan Formation, Upper Cretaceous, in Southern Jiangsu Province. Petroleum Geology & Experiment, 1982, (2): 23 ~ 26]
- 文琼英. 古代沙漠沉积的识别. 岩相古地理研究与编图通讯, 1983, (1 - 2): 1 ~ 10 [Wen Qiongying. Distinguishing palaeodesert sediments. News Report of Research and Charting of Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1983, (1 - 2): 1 ~ 10]
- 张川波, 何元良. 辽宁北票附近中侏罗世晚期的沙漠沉积. 沉积学报, 1983, 1(4): 7 ~ 8 [Zhang Chuanbo, He Yuanliang. Desert sediments of Late middle-Jurassic nearby Beipiao, Liaoning province. Acta Sedimentologica Sinica, 1983, 1(4): 7 ~ 8]
- 刘宝珺, 曾允孚主编. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社, 1985 [Liu Baojun, Zeng Yunfu. Basis and Study Method of Sedimentary Facies and Palaeogeography. Beijing: Geological Publishing House, 1985]
- 齐骅, 李国栋, 李玉文. 鄂尔多斯盆地志丹群中的沙漠相. 岩相古地理, 1993, 14(2): 64-65 [Qi Hua, Li Guodong, Li Yuwen. Cretaceous desert facies of Zhidan Group in Ordos Basin. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1993, 14(2): 64-65]
- 江新胜, 李玉文. 中国中东部白垩纪沙漠的时空分布及其气候意义. 岩相古地理, 1996, 16(2): 42 ~ 51 [Jiang Xinsheng, Li Yuwen. Spatio-temporal distribution of the Cretaceous desert in central and eastern China and its climatic significance. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(2): 42 ~ 51]
- 秦作栋, 冯起. 塔克拉玛干沙漠北部平原区全新世沉积与气候变化的关系——以肖塘剖面为例. 沉积学报, 1997, 15(1): 168 ~ 171 [Qin Zuodong, Feng Qi. Relationship between Holocene sediment and climatic change in the plain area of northern Taklimakan Desert—Take Xiaotang section as example. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 168 ~ 171]
- 魏文寿. 沙漠表层粒度与水热变化的环境效应分析——以古尔班通古特沙漠为例. 沉积学报, 1998, 16(1): 152 ~ 156 [Wei Wenshou. Analysis on sand granularity and the effects of water and heat change on environment—A case study in Gurbantunggut Desert. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 152 ~ 156]
- 李孝泽, 董光荣, 靳鹤龄. 鄂尔多斯盆地白垩系沙丘岩的发现. 科学通报, 1999, 44(8): 874 ~ 877 [Li Xiaozhe, Dong Guangrong, Jin Huoling. Discovery of dune sandstones of Cretaceous in Ordos Basin. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(8): 874 ~ 877]
- 刘星, 程守田, 郭秀蓉. 陆相干旱盆地充填的沙漠层序——以鄂尔多斯盆地白垩系为例. 西北地质, 2000, 33(1): 50 ~ 55 [Liu Xing, Chen Shoutian, Guo Xiurong. The desert sequences filling in the arid continental basins: Example from Cretaceous strata of Ordos Basin. Northwest Geology, 2000, 33(1): 50 ~ 55]
- 江新胜, 潘忠习, 付清平. 鄂尔多斯盆地早白垩世沙漠古风向变化规律及其气候意义. 中国科学 (D 辑), 2000, 30(2): 196 ~ 201 [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Fu Qingping. Regularity of palaeowind directions of the Early Cretaceous desert in Ordos basin and climatic significance. Science in China (Series D), 2000, 30(2): 196 ~ 201]

- 16 程守田,刘星,郭秀蓉,等.古沙漠沉积及其层序单元—以鄂尔多斯盆地白垩系为例.地球科学,2000,25(6):587~591 [Chen Shoutian, Liu Xing, Guo Xiurong, *et al* Palaeo-desert deposition and sequence stratigraphic units: An example from Cretaceous continental palaeo-desert basin in Ordos. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(6): 587~591]
- 17 江新胜,潘忠习.中国白垩纪沙漠中的戈壁沉积.矿物岩石,2001(3):74~80 [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi Gobi sediments in the Cretaceous Desert of China. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, (3): 74~80]
- 18 江新胜,徐金沙,潘忠习.鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征.沉积学报,2003(3):416~422 [Jiang Xinsheng, Xu Jinsha, Pan Zhongxi Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2003(3): 416~422]
- 19 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.地质通报,2003,22(10):818~828 [Xie Yuan, Wang Jian, Yin Yueping, *et al* Sedimentology of Cretaceous aquifers in the Ordos basin. Geological Bulletin of China, 2003, 22(10): 818~828]
- 20 陈刚.中生代鄂尔多斯盆地陆源碎屑成分及其构造属性.沉积学报,1999,17(3):409~413 [Chen Gang Terrigenous clastic composition and its tectonic texture in the Mesozoic of the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 409~413]
- 21 任明达,缪昕.石英砂表面的微结构.地质论评,1984,30(1):36~41 [Ren Mingda, Miao Xin. The surface micro-textures of the quartz sand grains. Geological Review, 1984, 30(1): 36~41]

Sedimentary Characteristics of the Cretaceous Desert Facies in Ordos Basin and Their Hydrogeological Significance

XIE Yuan¹ WANG Jian¹ JIANG Xin-sheng¹ LIM ing-hui¹ XIE ZHENG-wen²
 LUO Jian-ning¹ HOU Guang-cai³ LU Fang⁴ WANG Yong-he³
 ZHANG Mao-sheng³ ZHU Hua³ WANG De-qian⁵ SUN Yong-ming⁶ CAO Jian-ke⁴

1(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082)

2(Changqing Bureau of Petroleum Exploration, Xi'an 710059)

3(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054)

4(Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710060)

5(Land and Resources Department of Shaanxi Province, Xi'an 710060)

6(Ningxia Institute of Geological Survey, Yinchuan 750000)

Abstract During Cretaceous, Ordos Basin had gone two desert sedimentation evolution stages involved from Yijun-Luohe stage to Huanhe stage and from Luohandong stage to Jingchuan stage, controlled by areolation and hydro dynamism, under the climate evolution and tectonic lifting and subsidence. Luohe stage and Luohandong stage are two major sedimentation stages of desert facies, desert facies can be divided five sub-facies such as gobis, wades, dunes, inter-dunes, and desert lakes. Among them, sandstones of dunes are the most important desert sediments of Cretaceous; they have many pores, big thickness, stable distribution, lower salt content, and good capability of water-bearing, water-leading, water penetrating. So, dunes sediments not only have good groundwater occurrence-circulation conditions, but also bear groundwater of better quality.

Key words Ordos basin, Cretaceous, sedimentary Features, distribution and evolution of desert facies, groundwater occurrence conditions, groundwater circulation conditions, groundwater quality