



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309209

引用格式:郭雅倩,李元昊,杨龙华,等.鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世-早白垩世构造沉积响应[J].科学技术与工程,2025,25(6):2237-2252.

Guo Ya-qian, Li Yuanhao, Yang Longhua, et al. Middle-late Jurassic-Early Cretaceous tectonic-sedimentary response in the southern Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2237-2252.

鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世-早白垩世 构造沉积响应

郭雅倩^{1,2}, 李元昊^{1,2*}, 杨龙华^{1,2}, 翟文彬^{1,2}, 刘迎宝^{1,2}, 赵文暄^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065)

摘要 沉积盆地底部及周边的构造活动必然会引起盆地沉积充填特征及演化发生变化,这些沉积特征变化是沉积地层对构造活动响应的记录。根据测井解释、野外露头等资料,采用古地理和沉积相恢复的方法,对盆地中晚侏罗世-早白垩世沉积演化规律深入分析。研究表明,盆地南部发育多期次冲积扇相、河流-三角洲-湖泊和沙漠相沉积体系,出现沉积东西分异,沉积中心由东向西迁移。这一时期盆地主要受控于燕山运动影响,盆地周边发生了强烈的构造活动,盆地内部形成了东部抬升倾斜、西部下沉拗陷的构造格局。盆地西缘强烈的构造活动还导致了晚侏罗世芬芳河期西南缘发育陆内前陆盆地以及晚侏罗世和早白垩世等多套磨拉石建造和不整合接触。根据以上认识建立了中晚侏罗世-早白垩世构造沉积演化模式图,这些沉积事件的发生是对燕山运动早中期的响应记录,证明了沉积演化与秦祁造山带和吕梁隆起之间有着密切的关系。这些认识不止是对燕山运动时期盆地南部构造-沉积响应理论的补充完善,同时对盆地南部油气和铀矿等矿产资源的勘探开发具有现实意义。

关键词 鄂尔多斯盆地; 中晚侏罗世-早白垩世; 构造沉积响应; 沉积中心迁移; 燕山运动

中图分类号 P531; **文献标志码** A

Middle-Late Jurassic-Early Cretaceous Tectonic-Sedimentary Response in the Southern Ordos Basin

GUO Ya-qian^{1,2}, LI Yuan-hao^{1,2*}, YANG Long-hua^{1,2}, ZHAI Wen-bin^{1,2}, LIU Ying-bao^{1,2}, ZHAO Wen-xuan^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Formation Geology, Xi'an 710065, China)

[Abstract] The tectonic activities at the bottom and surrounding the sedimentary basin will inevitably lead to changes in the sedimentary filling characteristics and evolution of the basin. These changes serve as records of the sedimentary strata's response to tectonic activities. Based on logging interpretation and outcrop data, the sedimentary evolution of the Middle and Late Jurassic to Early Cretaceous in the Ordos Basin was analyzed through paleogeography and sedimentary facies restoration. The results indicate that the southern part of the basin developed multi-phase depositional systems, including alluvial fan, river-delta-lake, and desert phases. There was a sedimentary divergence from east to west, with the sedimentary center migrating from east to west. During this period, the basin was primarily influenced by the Yanshan Movement, with strong tectonic activities occurring around it. Consequently, a tectonic pattern emerged within the basin, characterized by uplifting and tilting in the east and sinking and depression in the west. The intense tectonic activities at the western edge of the basin also led to the development of an intralittoral foreland basin at the southwestern edge during the Late Jurassic Fenfanghe Stage. Additionally, multiple sets of molasse formations and unconformity contacts were present during the Late Jurassic and Early Cretaceous periods. Based on these insights, a model map of the Middle and Late Jurassic to Early Cretaceous tectono-sedimentary evolution has been established. The occurrence of these sedimentary events serves as a record of the basin's response to the early and middle stages of the Yanshan Movement, proving a close relationship between sedimentary evolution and the uplift of the Qinling-Qilian Mountain orogenic belt and the Lvliang Mountains. These insights not only complement and improve the theory of tectonic-sedimentary response in the southern basin during the Yanshan Movement but also have practical significance for the exploration and development of mineral resources such as oil, gas, and uranium in the southern basin.

收稿日期: 2023-11-23; 修订日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230815)

第一作者: 郭雅倩(1995—),女,汉族,安徽蚌埠人,硕士研究生。研究方向:构造沉积。E-mail:1947843221@qq.com。

* 通信作者: 李元昊(1976—),男,汉族,河南商丘人,博士,副教授。研究方向:石油地质。E-mail:liyuanh@xsyu.edu.cn。

[**Keywords**] Ordos Basin; Middle-Late Jurassic-Early Cretaceous; tectono-sedimentary response; sedimentary center migration; Yanshan movement

鄂尔多斯盆地位于中国华北克拉通西部,晚古生代-新生代演化受到特提斯洋、古亚洲洋和环太平洋构造域的共同影响,形成一个整体坳陷、构造简单的多旋回叠合型克拉通盆地^[1]。前人有关鄂尔多斯盆地构造演化和盆内沉积演化进行了众多深入而细致的研究,彭恒等^[2]通过磷灰石裂变径迹结合热史模拟分析,指出祁连山东缘在中晚侏罗世-早白垩世进入挤压环境,晚侏罗世达到高峰,持续至早白垩早期。马静辉等^[3]采用不整合面分析法和低温热年代学方法,研究认为盆地西缘抬升发生在中-晚侏罗世与早白垩世末。郭艳琴等^[4]较全面、系统地研究了鄂尔多斯盆地沉积体系的类型和特点,她认为晚三叠世至白垩纪,盆地的沉积环境逐渐转变为以陆相沉积为主的沉积格局。张倩等^[5]通过整体研究鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积体系及古地理演化特征,结果表明鄂尔多斯盆地侏罗系发育有冲积扇、河流、三角洲、湖泊沉积体系。杨君等^[6]通过对环县地区直罗组沉积相及其对铀矿化的关系进行研究,表明沉积相对该区铀成矿具有明显的控制作用。以往研究偏重于某一时期沉积盆地某一方面,如沉积和构造等,而对中晚侏罗世-早白垩世时期构造与沉积演化相结合分析响应关系的研究则相对较少。近年来,构造事件对盆地沉积演化及其成矿作用影响的重要性受到越来越多的关注^[7-10],如何将沉积演化与构造地质研究相结合,深入探讨鄂尔多斯盆地的构造演化及其沉积响应与多种能源矿产的共存和富集关系,已经成为地质领域热点问题。

本次研究以鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世-早白垩世为研究区,以测井资料、钻井岩心以及野外露头剖面等为基础分析其沉积演化特征,根据盆地以及周缘地区主要地质构造特征和构造事件,分析鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世-早白垩世区域构造演化对盆地沉积演化的影响,对研究鄂尔多斯盆地构造-沉积响应对能源矿产勘探方面具有一定的现实意义。

1 区域地质概况及研究方法

1.1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国华北克拉通的西部,是一个典型的多旋回叠合型盆地,其东、西分别位于太行山、贺兰山为界,南、北边界分别位于秦岭和阴山山脉。根据地层发育特征和构造形态,可将鄂尔多斯盆地划分为西缘冲断带、晋西挠褶带、天环坳

陷、伊陕斜坡、伊盟隆起和渭北隆起6个一级构造单元^[11],如图1(a)所示。除盆地边缘的褶皱山系和隆起地区外,盆地内部地层平缓,由东向西倾斜 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。

本文研究区为盆地南部,中晚侏罗世地层主要发育延安组、直罗组、安定组;早白垩世主要发育洛河-宜君-华池-环河、罗汉洞-泾川两个沉积旋回地层,如图1(b)所示,主要为陆相大型河湖-沼泽相、沙漠相沉积,地层分布具有西厚东薄的特征。

1.2 研究方法

通过对鄂尔多斯盆地南部庆阳、千阳、泾川、陇县、彬县等地区考察,观察剖面、描述野外露头,收集研究区岩心、测井资料等,重点研究了鄂尔多斯盆地南部晚侏罗世-早白垩世沉积地层变化,细分构造演化阶段并阐述其特征,并系统地分析该区域盆地南部晚侏罗世-早白垩世不同层位沉积特征、沉积中心的与构造运动之间的响应关系。这对深化盆地构造-沉积响应关系及资源效应具有重要意义,也对研究鄂尔多斯盆地构造特征与沉积演化之间的关系有重要参考价值。

2 沉积体系类型及特征

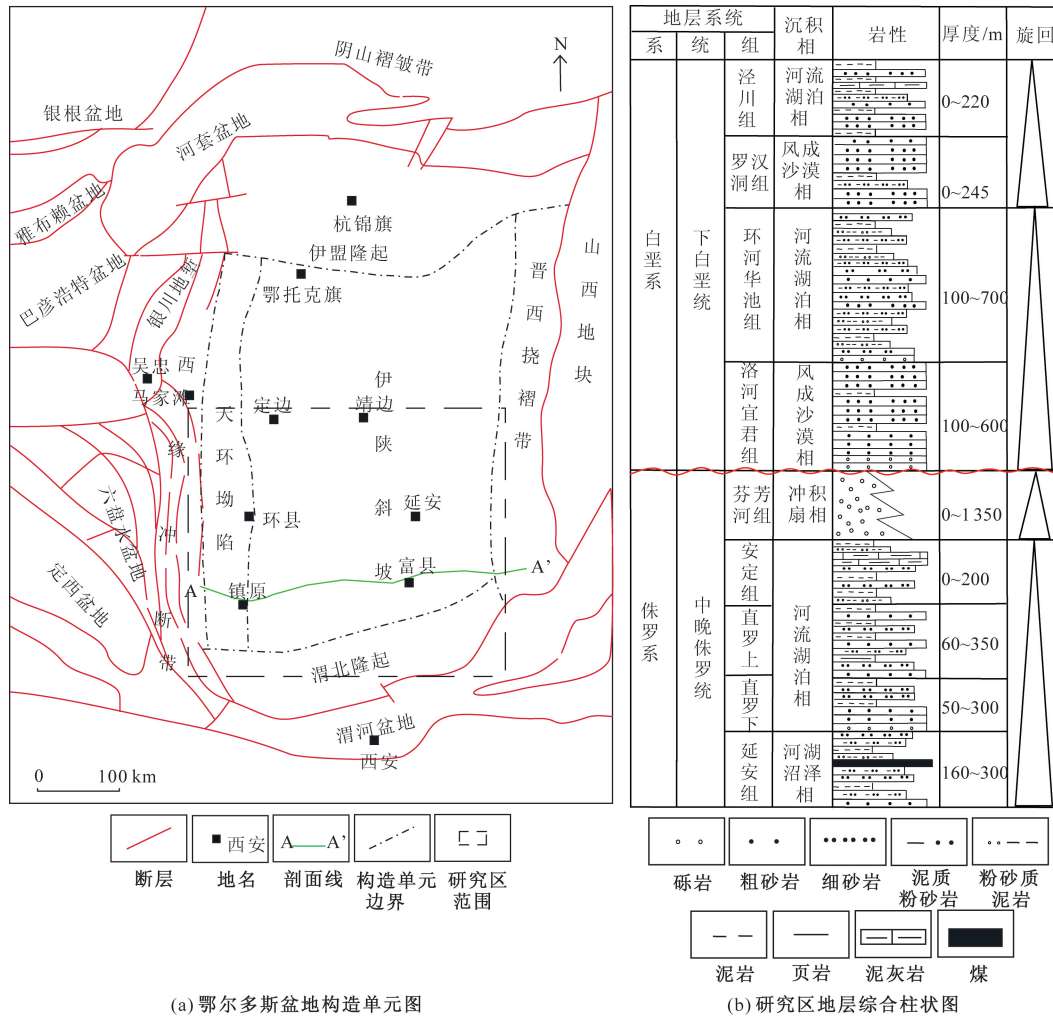
根据野外露头、岩心照片和沉积构造等资料将鄂尔多斯盆地中晚侏罗世-早白垩世内陆沉积体系进行划分。主要为冲积扇、河流、湖泊,三角洲及沙漠沉积5种类型。

2.1 冲积扇沉积体系

冲积扇主要受构造、洪水等因素影响,发育在坡降较大的山谷,沉积于坡降较缓的山麓,呈扇形分布。中晚侏罗世-早白垩世,在研究区主要发育侏罗纪芬芳河组砾岩和白垩纪宜君组砾岩[图2(a)和图2(b)],芬芳河组砾岩主要呈棕红色、紫灰色块状巨砾岩,分选和磨圆度较差,其中夹有棕红、灰色砂岩和泥质粉砂岩,有时可见平行层理和交错层理分布范围较为局限,分布在盆地西缘、西南缘。

2.2 河流沉积体系

河流沉积体系按照砂体几何形态和旋回特征,一般分为辫状河和曲流河,在研究区晚侏罗世-早白垩世各组均有发育。辫状河一般为多河道的低弯度河,河道宽而浅、水动力强,垂向加积为主,河道心滩发育,迁移迅速等特点,如图2(c)和图2(e)所示。砂体多正旋回叠置,主要由含砾粗砂岩和砂岩组成,具有明显的板状交错层理,如图2(d)所示。曲流河沉积物粒度较细,主要由中-细粒砂岩、粉砂



(a) 鄂尔多斯盆地构造单元图

(b) 研究区地层综合柱状图

构造单元图修改自文献[11]

图1 鄂尔多斯盆地构造单元图和研究区地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic unit map of the Ordos Basin and stratigraphic composite histogram of the study area

岩、粉砂质泥岩组成,侧向加积为主,河漫滩较为发育,河道裁弯取直形成牛轭湖与泛滥平原,如图2(f)~图2(i)所示。

2.3 湖泊沉积体系

河流侵蚀搬运大量沉积物,汇入湖泊发生沉积作用形成巨厚的碎屑沉积体系。沉积物粒度较细,从湖岸到湖盆主要为砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩,水平层理较为发育。鄂尔多斯盆地侏罗纪主要在延安、志丹、富县一带发育浅湖沉积,如图3(a)所示,深湖相沉积仅在安定组时期局部地区发育。早白垩世环河-华池组湖相发育最为广泛,泾川组湖泊出现白云岩[图3(b)]。

2.4 三角洲沉积体系

三角洲处于河流与湖泊沉积的过渡地区,据河流性质不同,将三角洲分为辫状河三角洲和正常三角洲,这两类三角洲在研究区中晚侏罗世-早白垩世时期有典型发育,主要涉及直罗组、安定组、环河-华

池组。三角洲可进一步划分为三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲亚相。三角洲平原是三角洲沉积的陆上部分,其沉积环境、特征与河流相类似。而三角洲前缘则主要为灰绿色砂岩与泥岩的互层,岩性主要为粗、中、细砂岩,各类交错层理发育,常见碳化的植物碎片,区别与三角洲平原由粗变细的正旋回,整体发育由细变粗的反旋回[图3(c)]。

2.5 沙漠沉积体系

早白垩世沙漠分布广泛,前人在沉积厚度及分布范围均有研究[12-14]。沙漠与冲积扇、河流、湖泊等环境共存。根据不同的地貌特征和沉积作用,可分为不同的沉积亚相,包括沙丘、丘间、旱谷、砾漠及沙漠湖。研究区风成沉积以洛河组最为广泛发育,罗汉洞组次之,这两组沙丘亚相主要发育细砂岩,并具有大型板状、槽状及楔状交错层理等构造特征[图3(f)];在研究区西南部沙漠与河流水道交互沉积,沙丘砂岩与丘间泥岩交互沉积[图3(d)和

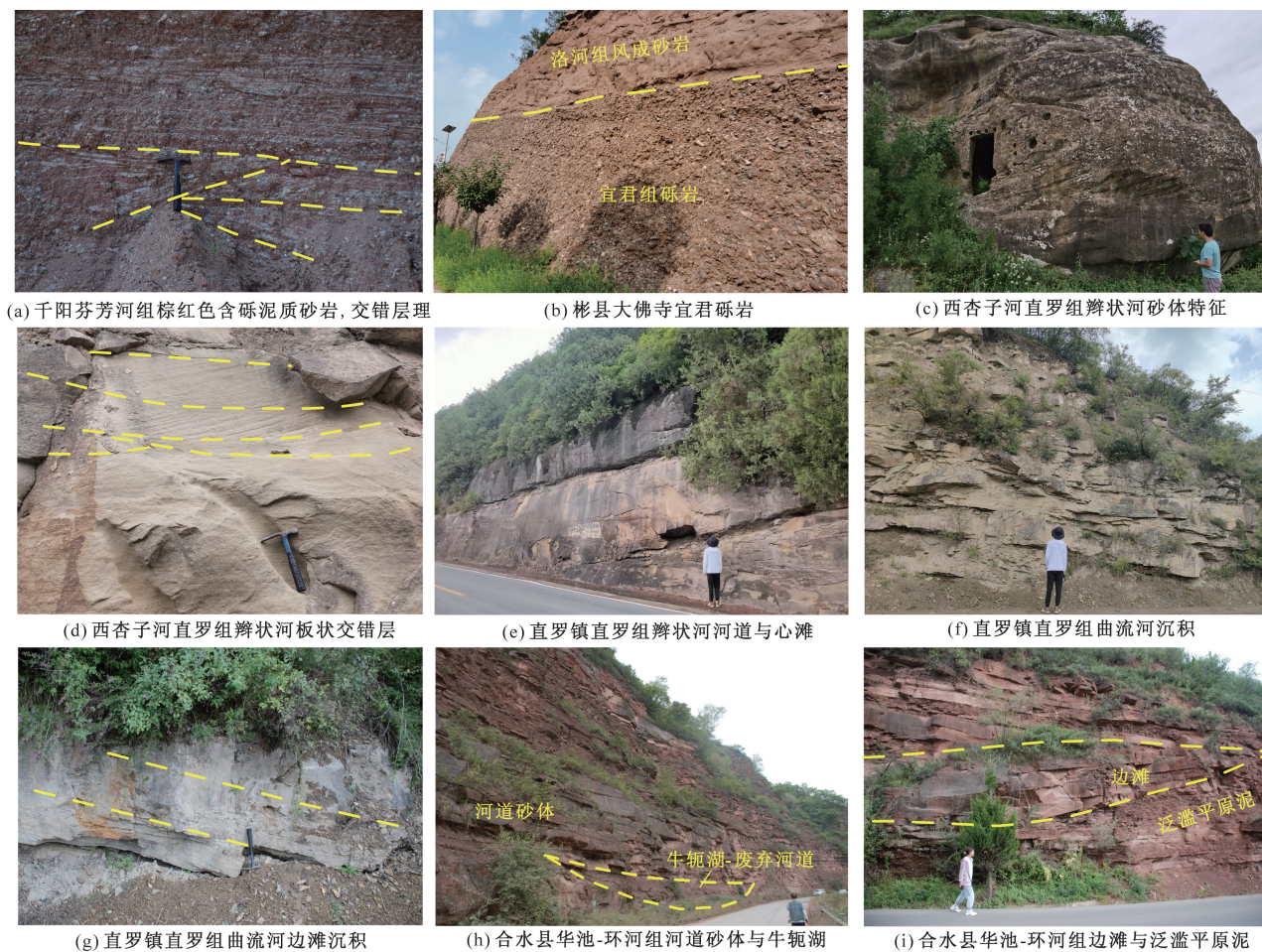


图2 鄂尔多斯盆地侏罗纪-白垩纪地层冲积扇相、河流相野外露头照片

Fig. 2 Photographs of field outcrops of alluvial fan and fluvial phases of Jurassic-Cretaceous strata in the Ordos Basin

图3(e)]。罗汉洞组风成砂岩的颜色与洛河组不同,主要为橘红色,且多为中厚层状砂岩。

3 中晚侏罗世-早白垩世沉积古地理演化

基于野外露头、测井分析以及砂地比统计等资料的综合分析,编制研究区沉积相剖面图和沉积相平面图进行研究,研究分析鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世-早白垩世沉积相展布规律和沉积演化的过程,便于之后推测其沉积演化的控制因素。

3.1 中晚侏罗世古地理演化

鄂尔多斯盆地中晚侏罗世发育延安组、直罗组、安定组沉积。在直罗组的底部,延安组顶部有侵蚀不整合面,反映了盆地曾受到抬升和不均匀的剥蚀作用,改变了盆地内直罗组-安定组的分布和厚度^[15]。盆地内部,直罗组、安定组沉积广泛分布,芬芳河组沉积局限分布。

延安组是鄂尔多斯盆地最重要的含油气层和含煤层之一,前人对延安组沉积体系的研究做了大量工作^[4,5,12-19],延安组主要为河湖沼泽相沉积,泥炭沼泽

发育,成煤条件好分布范围广,前人认为该时期沉积中心在米脂-靖边-吴旗-宜君一线以东范围。

3.1.1 直罗期

直罗组根据测井资料分析,其岩性一般可分为两个旋回:直罗上段和直罗下段。从演58井-庄46井沉积相连井剖面看(图4),研究区西南部直罗组下段三角洲平原砂体发育,砂体厚度大延伸距离远,沉积范围广。研究区西北部沉积体系虽也发育辫状河沉积,但与西南沉积相比砂体相对不发育,反映了沉积时物源区远、供屑能力不足的特征(图5)。直罗组下段砂地比一般为0.6以上,延安地区发育浅湖[图6(a)]。直罗上段砂地比一般在0.3以上,则是以曲流河-三角洲-湖泊相沉积为主,湖泊范围较直罗下段明显扩大[图6(b)]。

3.1.2 安定期

安定组相较于直罗组砂体减少,泛滥平原较为发育,三角洲前缘和湖泊显著扩大,安定组早期与直罗组沉积格局相似,但湖泊很快加深范围扩大,如图6(c)所示,湖泊早期为黑色油页岩为较深湖相,晚期因气候炎热干燥,形成泥灰岩碳酸盐岩沉积。

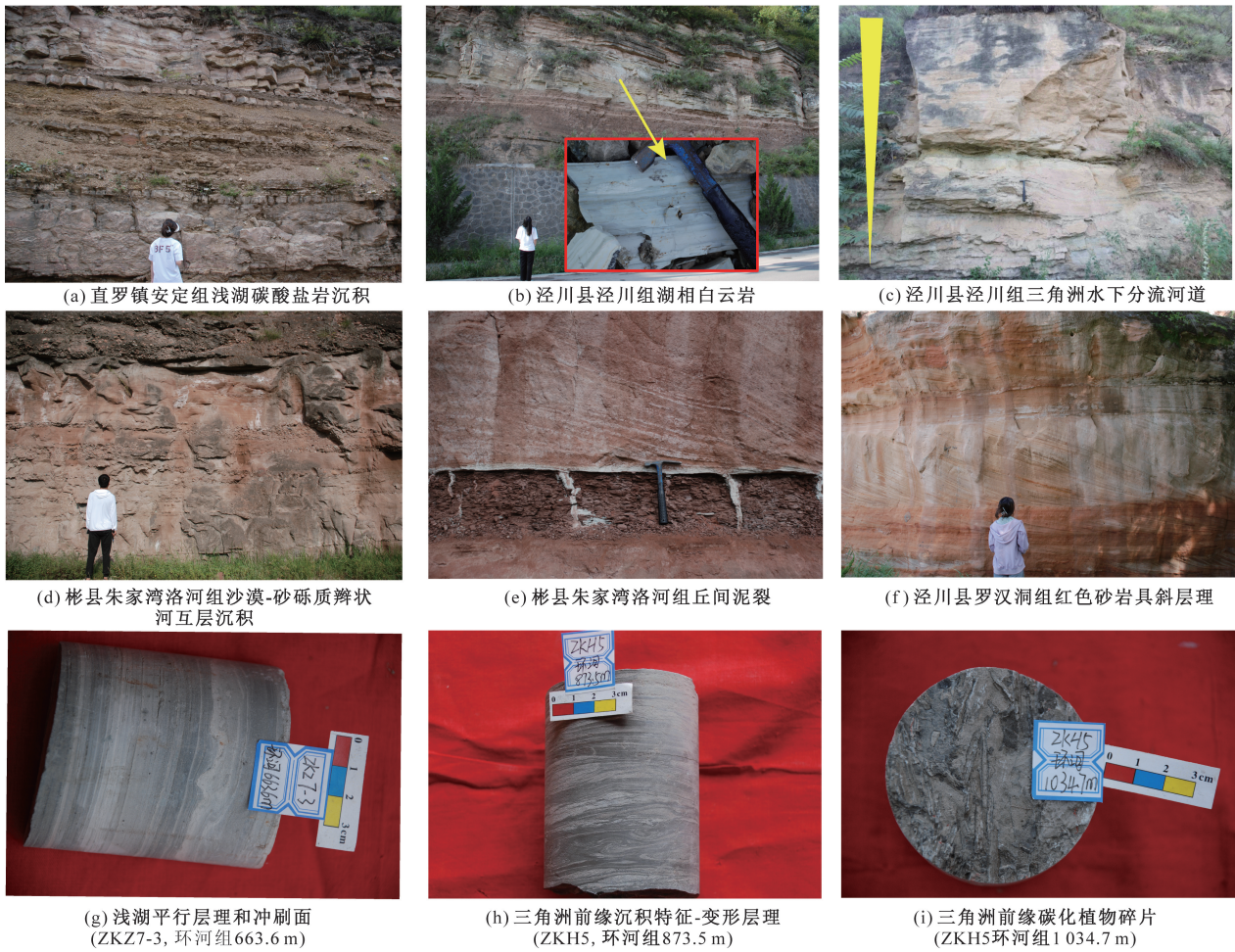


图3 鄂尔多斯盆地侏罗纪-白垩纪地层冲湖泊、三角洲、沙漠相野外露头照片

Fig. 3 Photographs of field outcrops in the Jurassic-Cretaceous strata of the Ordos Basin with alluvial lakes, deltas, and desert phases

3.1.3 芬芳河期

晚侏罗世,在盆地西缘冲断褶皱构造带前缘拗陷内^[20],快速沉积了巨厚的芬芳河组砾岩,呈带状南北向展布,在贺兰山东麓盐池、环县、千阳一带等地区局限分布^[21]。芬芳河组主要呈红色,与上、下地层之间的接触通常表现为角度不整合(图7)。芬芳河组沉积是在较强烈构造背景作用下形成的,局限分布于盆地西缘天环拗陷,使盆地形成西厚东薄的层特征,后期盆地继续东升西拗,剥蚀强度东强西弱的改造发生,进一步促进了盆地地形东高西低、地层西厚东薄格局的形成。

3.2 早白垩世古地理演化

早白垩世总体处于伸展构造环境,区域沉降,广泛接受沉积,依次形成了洛河-宜君组、环河组-华池组和罗汉洞-泾川组两个沉积旋回,鄂尔多斯盆地南部下白垩统环境以干旱为主,多次转换,沉积演化与侏罗纪不同。

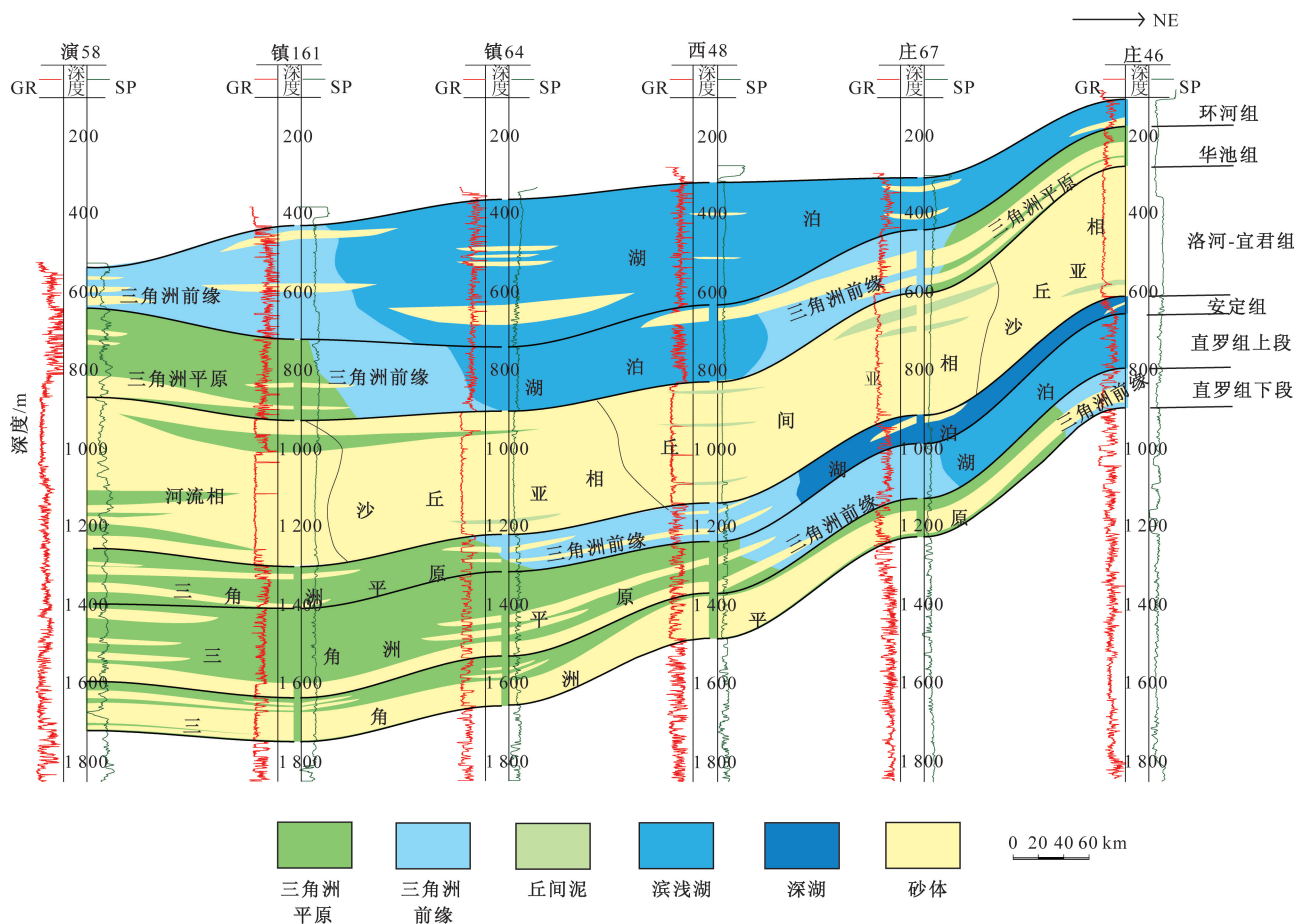
3.2.1 洛河-宜君时期

洛河-宜君时期气候干旱、沉积范围广泛,其中

宜君组在南部盆地边缘形成了一套近物源山前冲积扇沉积,而盆地南部大部分地区并没有沉积记录,只在南缘的彬州、宜君、旬邑地区发现存在宜君砾岩。依据前人对古流向和砾石成分等研究,推测其物源区为盆地南部的秦岭一带^[22-23]。洛河期盆地抬升气候转向干旱和风力作用的加强,形成以红色砂岩沉积为主,分布广泛的风成沙漠相,砂地比在0.7以上,沙丘发育较为典型,局部夹有丘间泥质沉积,泥裂发育,表明在洛河期出现了短暂的湿润时期,但整体依旧处于干旱环境;在鄂尔多斯盆地的盐池-庆阳-宁县一带地区,存在一些的丘间湖泊相,分布分散不连续。从两条沉积相连井剖面和沉积相平面图可以看出,西北沉积体砂体大规模发育,主要发育沙丘亚相和丘间亚相(图5)。西南沉积体系较为多样,夹有丘间泥质沉积(图4),发育冲积扇相-河流相-丘间亚相,由盆地向边缘过渡。

3.2.2 华池期和环河期

华池组和环河组在盆地南部成一套湖相且分布范围广的泥岩,盆地南部主要发育河流相与湖泊



剖面位置见图6和图8;GR为自然伽马测井;SP为自然电位测井

图4 演58井-庄46井直罗组-环河组沉积相剖面图

Fig. 4 Sedimentary phase section of Zhiluo Formation-Huanhe Formation in wells 58 and 46

相,泥岩、灰岩沉积发育,砂岩不发育(图4和图5)。华池期气候由于旱转向湿润发育河流相和湖泊相,湖泊位于环县-庆城-合水一线以南地区[图8(b)],环河组时期湖盆全面下沉,湖泊范围进一步扩大,标志着白垩纪湖相沉积发展到了顶峰[图8(c)],湖相细粒沉积在研究区广泛分布。

3.2.3 罗汉洞期和泾川期

罗汉洞时期,盆地抬升,气候逐渐转向干旱。随着时间的推移,盆地南部边缘逐渐向中心依此发育冲积扇、河流、湖泊以及风成沙漠相沉积,但分布范围较小。泾川期盆地沉降,气候再次转向湿润,罗汉洞时期的沙漠衰退消亡,发育冲积扇-河流相,晚期发育河流相^[23]。泾川组在盆地内的分布范围非常小,早期主要为冲积扇-河流相,晚期发育湖泊相,其岩性为灰色泥灰岩、浅棕红色泥岩,中间夹有一层较厚的白云岩,沉积残留厚度不大,仅分布在研究区西南部地区。

综上所述,鄂尔多斯盆早白垩世出露地层总体呈东老西新特点,研究区西部的定边、环县、镇原、泾川一带地区呈南北走向,可见洛河-宜君组、华池-

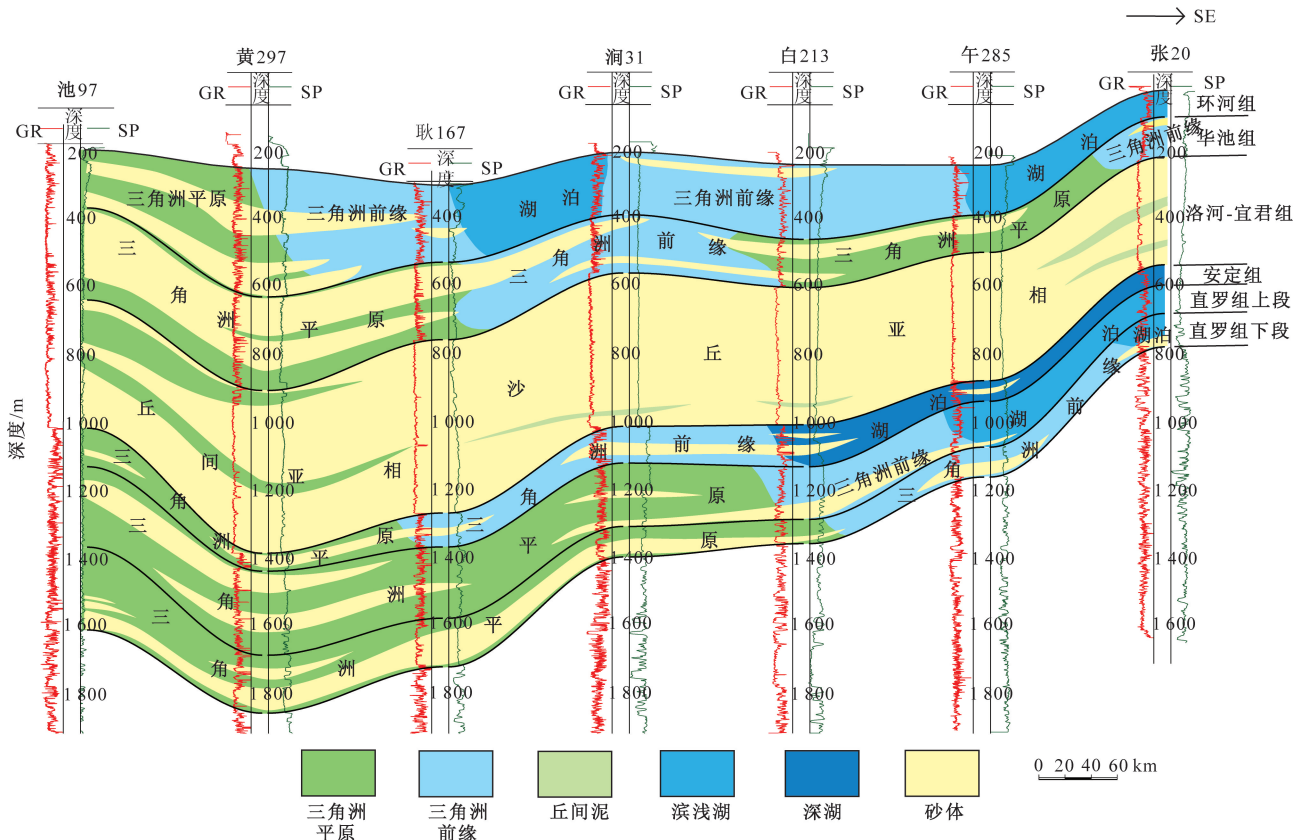
环河组,罗汉洞、泾川组,地层保留相对完整,从残存分布特征说明盆地由东向西剥蚀程度是依次减弱的,东部、南部地层剥蚀最为强烈,而西部地区剥蚀较弱;从宜君组到环河、华池组,岩性由砾岩-含砾粗砂岩-中粗砂岩-粉砂岩-泥岩、灰泥,构成了第一个旋回;从罗汉洞组到泾川组,是中、粗砂岩-砂质泥岩-泥岩、白云岩、泥质粉砂岩,构成了第二个不完整的旋回。

4 构造活动与鄂尔多斯盆地演化

4.1 构造背景

中生代,鄂尔多斯盆地受古亚洲洋、古特提斯洋和环太平洋三大构造域影响^[24]。中晚侏罗世-早白垩世时期是鄂尔多斯盆地发育的主要时期,这一阶段主要受燕山运动的影响,在鄂尔多斯盆地和周边地区可分为性质不同的两个构造演化阶段,分别是中晚侏罗世的多向挤压应力环境和早白垩世的弱伸展应力环境^[25]。

中晚侏罗世,由于古太平洋板块和欧亚板块之间的斜向相撞,使得今天鄂尔多斯盆地区域出现了强烈



剖面位置见图6和图8;GR为自然伽马测井;SP为自然电位测井

图5 池97井-张20井直罗组-环河组沉积相剖面图

Fig. 5 Sedimentary phase profile of Chi 97 wells-Zhang 20 wells, Zhiluo Formation-Huanhe Formation

的构造变形和隆起,这个过程鄂尔多斯地块受近东-西向的挤压应力,盆地南部则形成了以北东-南西方向为主的挤压构造应力场^[26],导致了盆地西缘冲断带和东部吕梁隆起等地质特征的形成和演化。

侏罗纪至白垩纪时期的燕山运动在鄂尔多斯内陆盆地的演化历史中具有重要的地质意义。根据前人研究可将燕山运动分为早、中、晚三期,具体可分为5次构造幕^[26],中晚侏罗世-早白垩世盆地主要受燕山运动早期、中期影响。在直罗组沉积前延安组时期,发生了燕山运动第I幕。此时盆地处于构造应力场转换期,燕山运动I幕对晚印支运动具有一定的继承性。受秦岭造山带构造活动影响,表现为南北向的差异隆升,且南部的剥蚀强度(或隆升高度)高于北部,直罗组覆盖在延安组之上,为平行不整合。此时古地貌为南高北低,西高东低,反映了整体抬升的不均衡。中侏罗世末,发生了燕山运动第II幕,此次运动仍是盆地较大范围的抬升,研究区东部抬升幅度较为显著[图9(a)]。在晚侏罗世芬芳河期,鄂尔多斯盆地经历了燕山运动的第III幕,这一时期受到特提斯域诸地块多向汇聚挤压和祁连山快速向东挤压作用的影响,东部抬升并开始受到剥蚀、盆地西缘则发生强烈逆冲推覆变

形[图9(b)],研究区地层厚度自西向东变薄,与白垩系地层呈现角度不整合接触。

早白垩世,研究区处于整体持续抬升阶段,阿拉善东部地区出现了陆内拉斑玄武岩的喷发和晶屑凝灰岩夹层的发育^[27],表明了早白垩世早期鄂尔多斯盆地及其周边地区处于一种相对弱伸展的构造环境中[图9(c)],盆地边缘地区仅发生轻微的褶皱与断裂,研究区东部不断向西抬升,西部继续向东逆冲推覆。盆地抬升剥蚀持续到晚白垩世发育消亡时期,鄂尔多斯盆地发育结束。

4.2 构造-沉积响应分析

中晚侏罗世-早白垩世盆地在燕山运动影响下形成了西缘推覆逆冲和东部吕梁隆起^[29],使研究区内部物源发生沉积分异沉积中心位置迁移、西缘沉积磨拉石建造形成前陆拗陷盆地等,这些沉积事件发生与构造变化密切相关,是对构造演化的响应记录。

4.2.1 盆地南部沉积中心的迁移

通过沉积相图(图6和图8)可以看出中晚侏罗世-早白垩世鄂尔多斯盆地研究区东西部在不同时期沉积特征上存在差异,沉积中心存在明显的迁移现象。燕山期,古太平洋板块开始向新兴的欧亚大

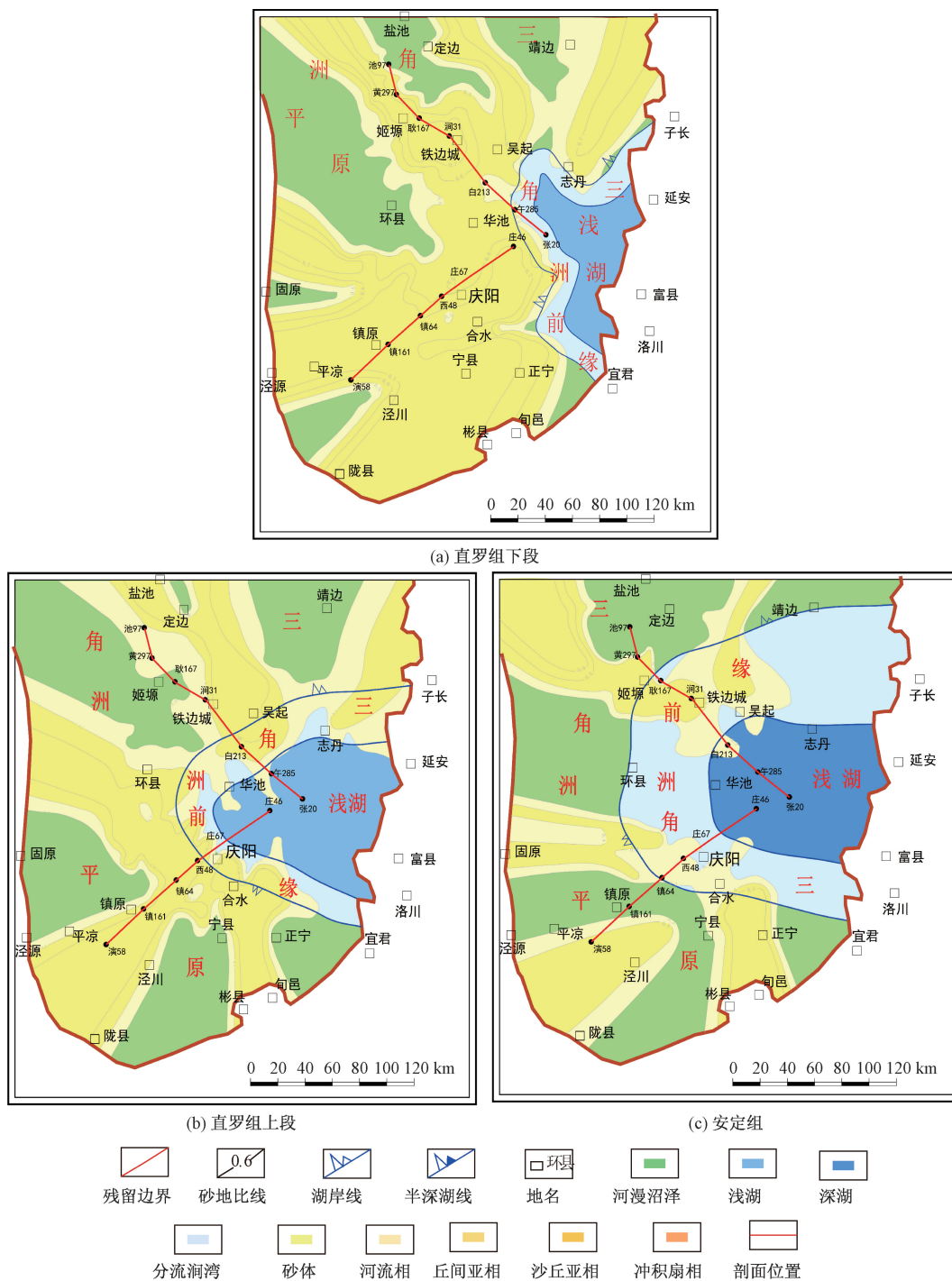


图6 鄂尔多斯盆地直罗组-安定组沉积相图

Fig. 6 Sedimentary phases of Zhiluo Group-Aning Group in Ordos Basin

陆俯冲挤压,鄂尔多斯盆地及其周边地区发生了重大的地质构造变化,形成了鄂尔多斯地块近东西向的挤压构造应力场,主要以北西-南东向挤压为主,盆地西南缘的构造应力场则以北东-南西方向为主。结合选取了1条东西向剖面(剖面位置见图1),三叠纪之后进入侏罗纪延安组时期,西缘发生了多次强烈变形构造,东部受到向西的挤压应力盆地不断抬升,形成西部下沉拗陷、东部倾斜隆升的地形特

征^[30][图10(c)],晚侏罗世是燕山运动的主幕,近东西向挤压应力下,西缘逆冲构造带和东部持续隆起[图10(b)],盆地逐渐形成由西高东低转向西拗东高的古构造格局,在沉积响应上表现沉积中心由东向西迁移。

侏罗纪延安组最大沉积中心主要位于延安-富县地区偏北的位置^[19]。沉积相图(图6和图8)直罗组下段最大沉积中心主要位于延安-富县地区,直

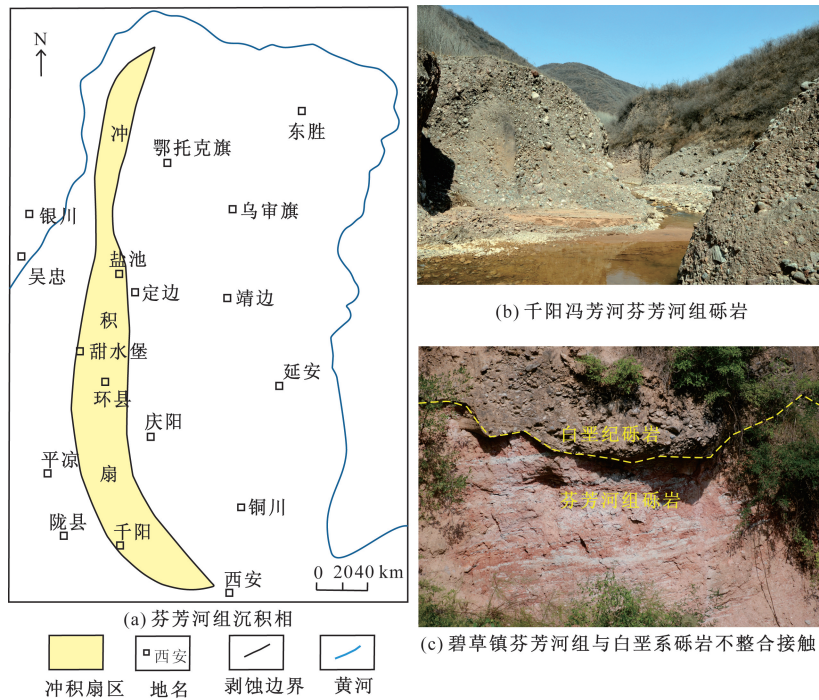


图 7 鄂尔多斯盆地芬芳河组沉积相恢复图和地层露头

Fig. 7 Sedimentary phase recovery map of the Fenfange Formation in the Ordos Basin stratigraphic outcrops

罗组晚期,湖泊扩大至华池-庆阳地区;到了安定组时期,湖泊持续扩大,湖泊位于靖边-姬源-环县-合水一线以东地区;早白垩世洛河-宜君组因受构造运动及气候变化的因素影响盆地发育风成沙漠相。之后进入华池组,此时的沉积中心位于盆地南部环县-庆阳-合水一线以南地区,环河组时期最大沉积中心位于盆地南部环县-姬源-华池一线以南地区(图 8)。一般来说,盆地中深水沉积多代表了盆地的沉积中心,与盆地周边构造演化之间密切相关^[31]。结合地层厚度图(图 11)可知,侏罗世延安-直罗-安定期沉降中心一直处于盆地西部。早白垩世,鄂尔多斯地块处于弱伸展构造环境中,但东部地层不断抬升,西部继续逆冲挤压,沉积中心由延安直罗时期位于盆地东部不断向西迁移,沉降中心依旧位于盆地西部天环坳陷,至早白垩世末,沉降中心和沉积中心趋于一致,位于盆地西南部。由此可以看出中晚侏罗世-早白垩世鄂尔多斯盆地南部沉降、沉积中心东西分异和物源的供给从区域上看,与该时期板块汇聚和多向挤压碰撞过程密切相关。

4.2.2 盆地南部西缘陆内前陆盆地形成

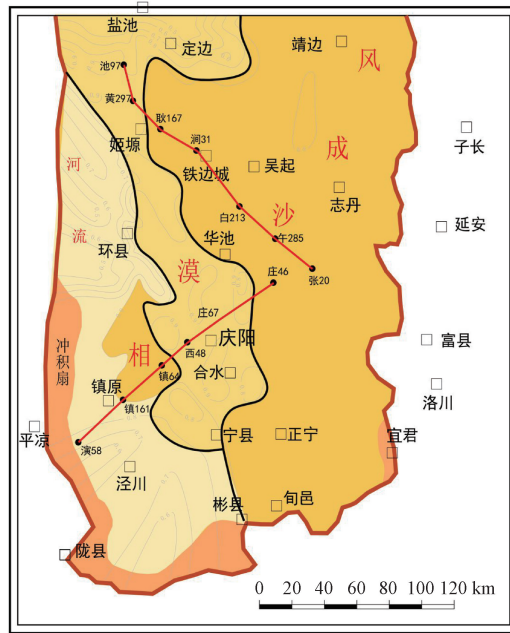
前人的研究表明,在印支期盆地西南缘经历了来自西南方特提斯板块从西向东的碰撞挤压作用,导致古老的秦祁造山带重新活动起来。到了燕山时期,这种冲断活动不断向稳定地块方向挤压迁移,使鄂尔多斯盆地进入了陆内前陆盆地的演化阶段^[32]。

中晚侏罗世,燕山运动在鄂尔多斯地块活动强烈,形成逆冲推覆构造,发育规模巨大南北向条带状分布的前陆坳陷(图 11)。充填了安定组河流相沉积和芬芳河组沉积,沉降中心向东偏移,在逆冲带前缘的前隆带附近堆积,造成了研究区大部分地区的侏罗系与白垩系之间不整合接触。造山带由西向东逆冲推覆,在前缘靠近克拉通一侧挠曲挤压加上前缘堆积于前隆带附近,该隆起使山前坳陷和克拉通分开,此时,鄂尔多斯盆地南部西缘构造格局基本定型,陆内前陆盆地雏形形成^[33-36]。

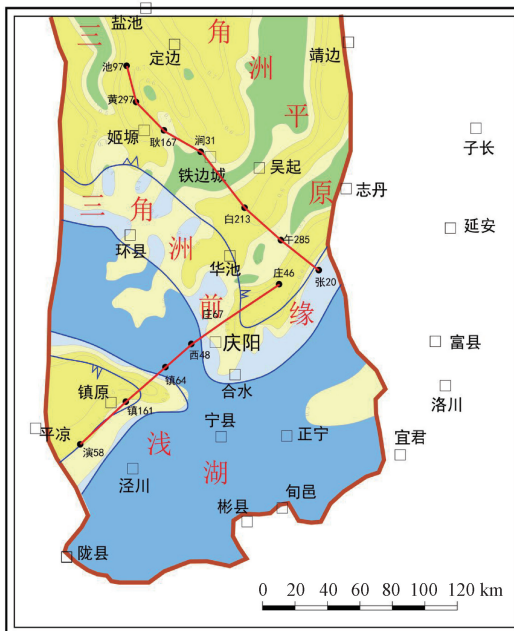
早白垩世,盆地南部构造格局西低东高并整体沉降,西缘地区的隆坳格局与现今盆地的结构及沉积范围较为一致。西缘逆冲带沉积厚度较薄,而西南部沉积范围较广,盆地沿西南边界前逆冲带形成的坳陷中沉积厚度较大。姬源-庆阳一带为湖相沉积,两个坳陷之间为低幅度隆起区,即前隆带,表现出陆内前陆盆地的构造特点。表明了盆地南部西缘地区中生代陆内前陆盆地的形成于晚侏罗世,在早白垩世发展。

4.2.3 盆地南部边缘粗粒沉积变化

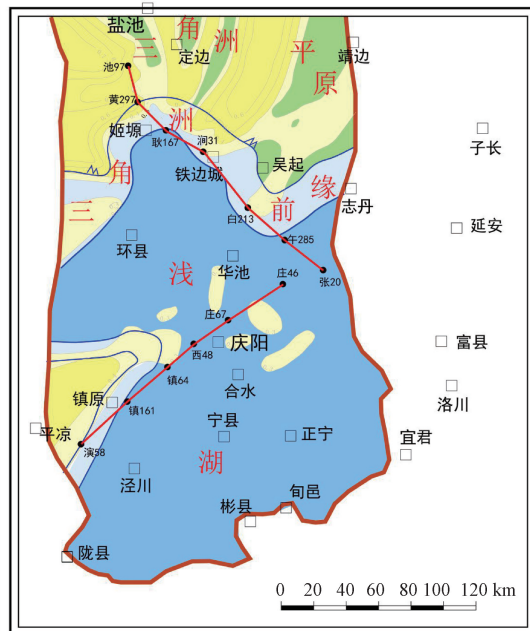
地块的强烈抬升必然会引发周围堆积物的变化,会导致同期或后期快速剥蚀、堆积的事件沉积的发生^[36]。在中晚侏罗世-早白垩世时期,直罗组、芬芳河组和宜君组先后在南部盆地周缘发育磨拉石建造。



(a) 洛河-宜君组



(b) 华池组



(c) 环河组

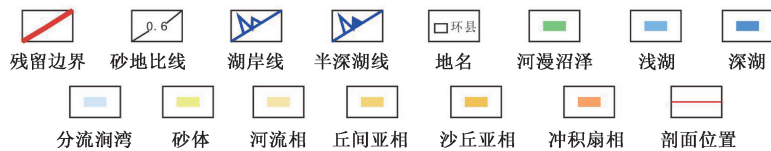


图8 鄂尔多斯盆地洛河-宜君组-环河组沉积相图

Fig. 8 Sedimentary phases of Luohe-Yijun Formation-Huanhe Formation in Ordos Basin

在延安组时期,此时为印支运动向燕山运动构造应力转化阶段,该阶段盆地差异抬升,南部抬升较大剥蚀较为严重,南部此时主要受秦岭造山运动影响,故在直罗组底部发育存在一套厚层砾岩-含砾砂岩。在燕山运动中期第Ⅲ幕是盆地西部逆冲推覆构造的主要形成时期,此时盆地西缘开始挤压隆

升,祁连山的快速隆生产生强烈的逆冲推覆构造并向盆地内部快速挤压推进,导致芬芳河组巨厚的磨拉石建造堆积在盆地边缘。芬芳河组的形成与堆积,代表了现今盆地范围西低东高结构的雏形出现。燕山运动后期,早白垩世早期鄂尔多斯盆地西缘及其周缘处于弱伸展的构造环境中,伸展环境的

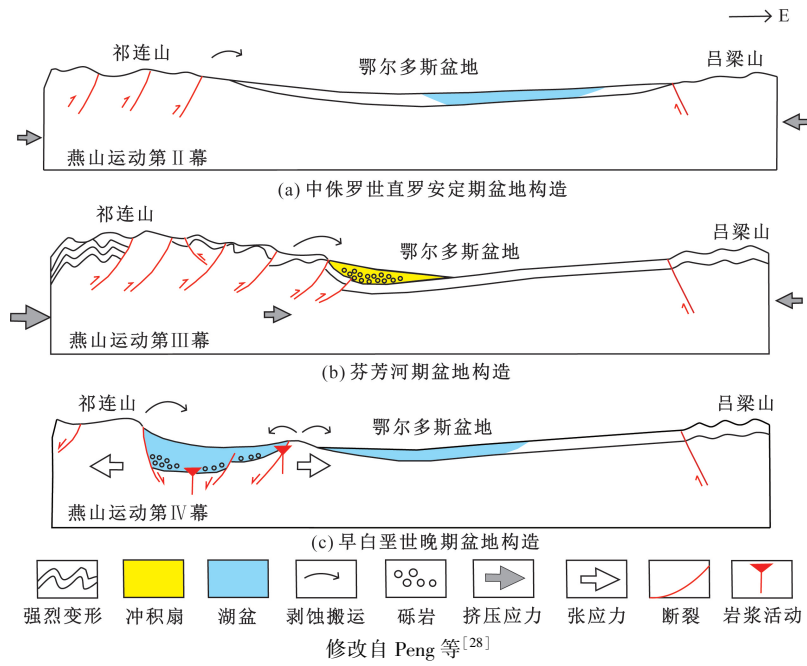
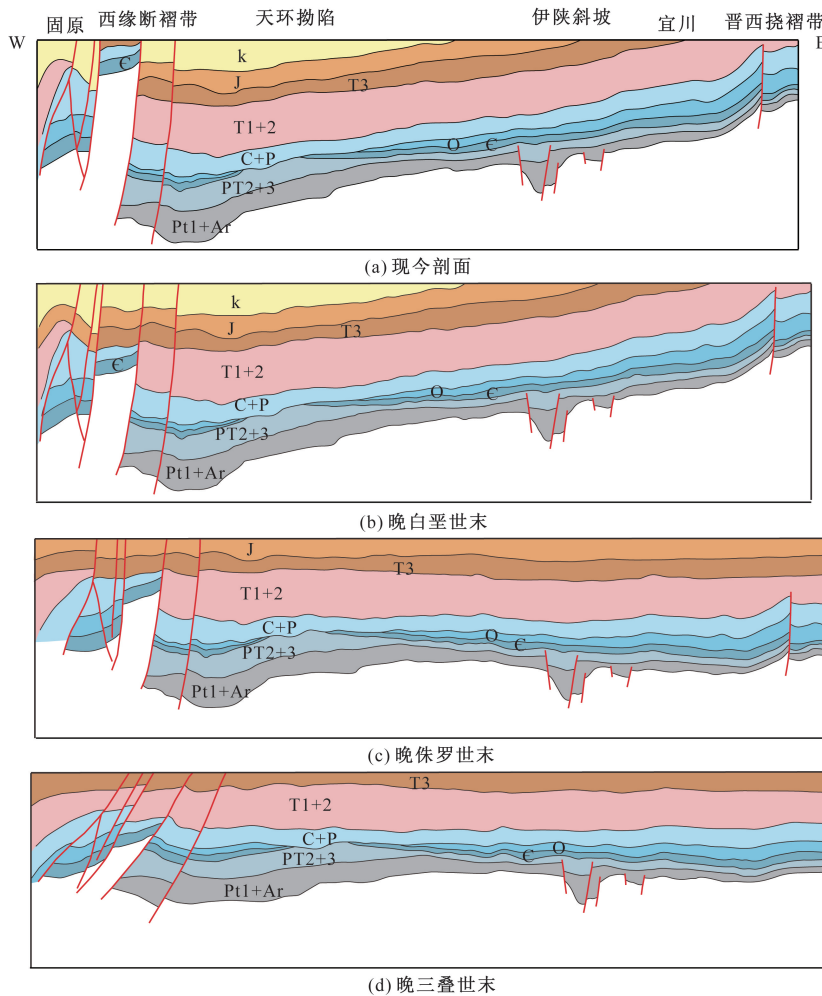


图9 鄂尔多斯盆地燕山运动构造演化示意图

Fig.9 Schematic diagram of the tectonic evolution of the Yanshan movement in the Ordos Basin



剖面位置见图1

图10 A-A'剖面平衡演化图

Fig.10 Equilibrium evolution of the A-A' profile

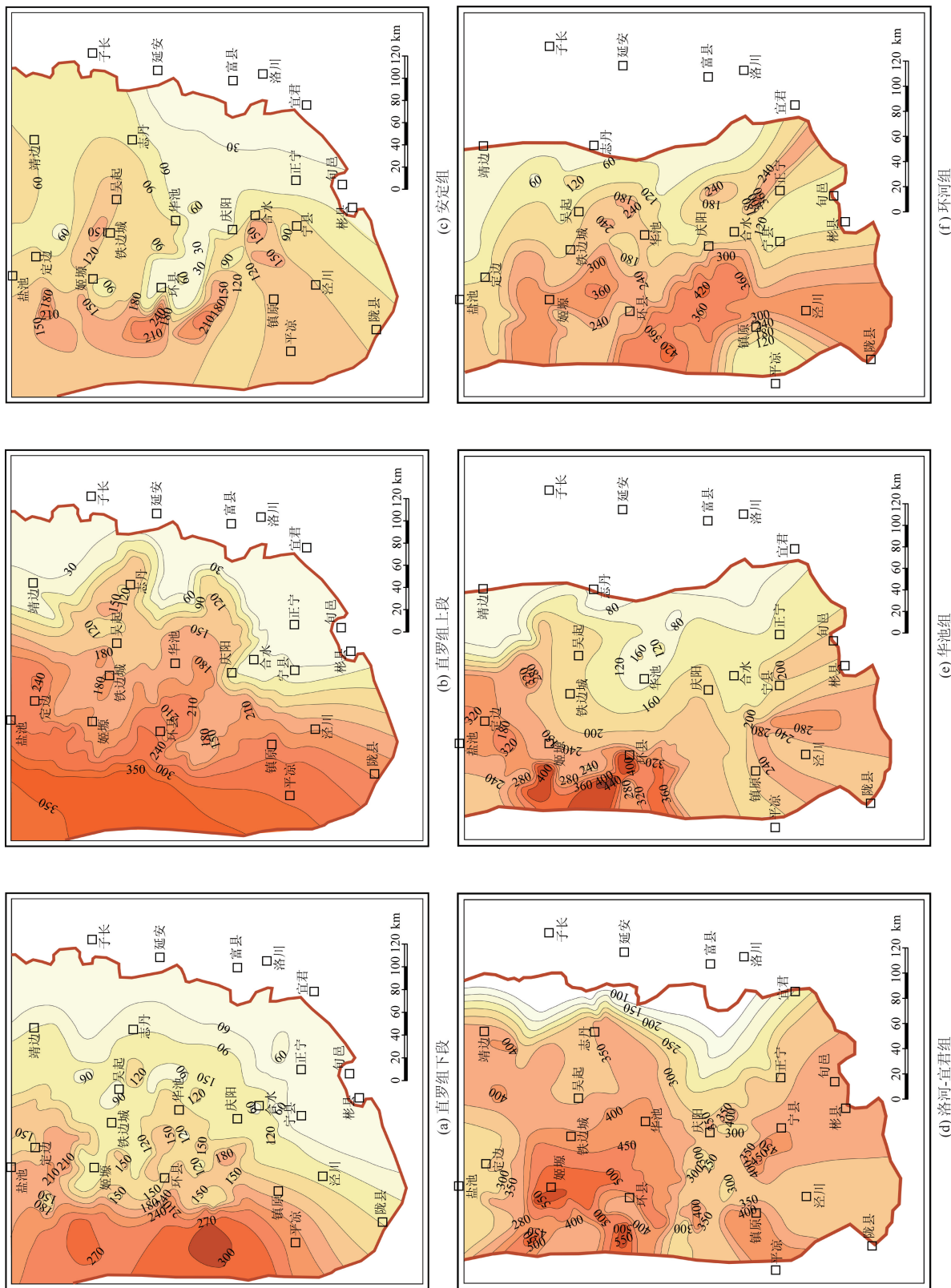


图11 鄂尔多斯盆地直罗组-环河组地层厚度图
Fig.11 Stratigraphic thickness map of Zhiluo Group-Huanhe Group in Ordos Basin

形成可能与晚侏罗世强烈造山后的应力松弛有关, 在沉积上的响应表现为分布范围广具有一定分选和磨圆的宜君砾岩。盆地的砾岩沉积以及多个区域性不整合关系的存在, 实际上记录了燕山运动期间多次发生的构造事件, 这些地层记录提供了关于盆地构造演化的重要信息。

4.3 构造-沉积响应模式

通过对中晚侏罗世-早白垩世构造变革事件、沉积演化的研究以及对构造-沉积响应的分析, 本文研究建立了中晚侏罗世-早白垩世构造-沉积演化模式如图 12 所示, 此模式表明构造事件和沉积演化之间密不可分的关系, 沉积体系在构造运动影响下发生了一系列的变化, 在阿拉善地块东向挤压作用下, 直罗组西缘秦祁造山带活化隆升, 此时鄂尔多斯盆地内部较为稳定, 研究区西部发育河流相, 东部发育湖泊相。安定组研究区东部抬升幅度较大, 在沉积体系上延续直罗组的沉积体系, 但随着东部

吕梁山隆升, 安定组的湖泊范围向西扩大; 直至芬芳河组时期西缘的祁连山快速隆升推覆挤压, 在研究区西部边缘堆积形成巨厚的磨拉石建造, 而其他地区未发现芬芳河组沉积记录。造山带由西向东的快速挤压, 在前缘靠近克拉通一侧挠曲抬升形成前隆带, 陆内前陆盆地雏形形成。早白垩世盆地整体处于伸展的构造环境, 广泛接受沉积, 在沉积上的响应表现为大范围分布的、具有一定分选和磨圆的宜君砾岩, 而东部持续抬升。随着气候的干旱化和风力作用的加强, 洛河-宜君组主要发育风成沙漠相。由于东部持续抬升, 华池-环河时期湖泊已经迁移至研究区西南部, 湖泊范围扩大, 表明了白垩纪广泛的湖侵并发展到鼎盛时期。构造演化是沉积发生的基础和背景, 后者对前者有明显的响应。构造活动不断改变盆地的沉积, 而沉积作用又影响着各类能源矿藏的形成, 鄂尔多斯盆地中晚侏罗世-早白垩世构造演化的各阶段与多种能源矿产聚集、成

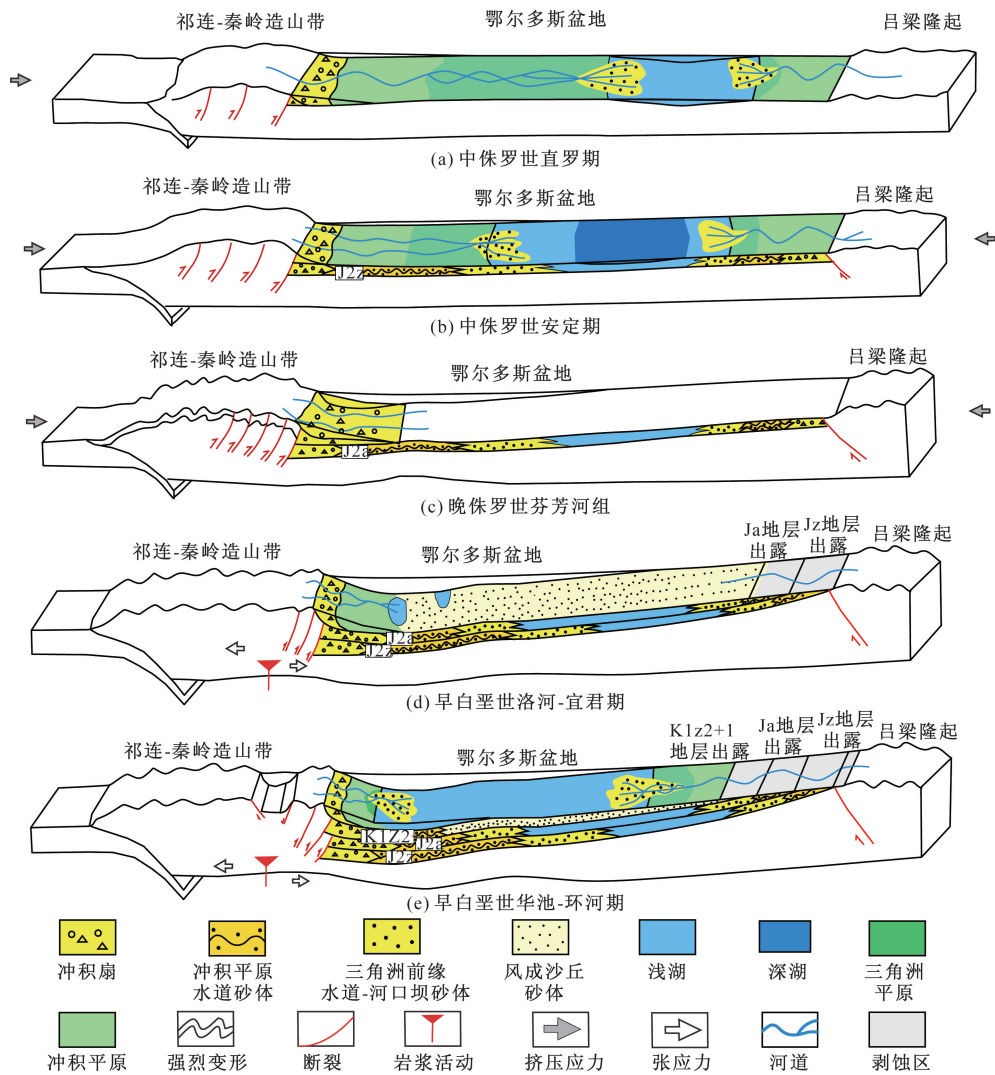


图 12 鄂尔多斯盆地中晚侏罗世-早白垩世构造-沉积响应模式图

Fig. 12 Tectonic-sedimentary response pattern of the Middle and Late Jurassic-Early Cretaceous of the Ordos Basin

藏期次有着密切关联。建立中晚侏罗世-早白垩世构造-沉积响应模式不仅有助于完善中生代构造-沉积响应的理论,还在后续的鄂尔多斯盆地油气和矿产资源勘探方面具有重要的实际意义。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地南部中晚侏罗世主要发育地层为延安组、直罗组、安定组和芬芳河组,延安组发育湖泊沼泽相沉积,直罗组和安定组为河流-三角洲-湖泊相沉积,延安组和直罗组湖相都位于东部,安定期湖相沉积范围向西扩大,局部出现深湖沉积。芬芳河组主要分布在研究区的西部和西南部,为冲积扇沉积。早白垩世主要发育洛河-宜君组,环河、池华和罗汉洞以及泾川组,洛河-宜君时期气候干旱、沉积范围广,主要发育风成沙漠相;华池环河期沉积范围比早期范围缩小,主要以河流-三角洲-湖泊相沉积为主,湖泊范围扩展到研究区西部,达到最大湖泛时期。罗汉洞期,南部沉积范围明显减小,发育冲积扇、河流、湖泊和风成沙漠相,气候干旱,主要分布在研究区的西南地区。泾川期沉积在研究区分布范围小,残留地层厚度少,气候湿润,发育河流-湖泊相。

(2)鄂尔多斯盆地中晚侏罗世-早白垩世的构造演化明显受控于古特提斯洋、古亚洲洋和环太平洋三大构造域的作用,在中晚侏罗世至早白垩世鄂尔多斯盆地构造演化与燕山运动密切相关,燕山期,鄂尔多斯地块受近东-西向为主要挤压方向的构造应力场,而研究区南部以北东-南西方向为主要挤压方向的构造应力场,研究区东部向西倾斜抬升,西缘发生逆冲推覆构造,使盆地南部形成了西部下沉拗陷、东部倾斜抬升的构造特征。

(3)中晚侏罗世-早白垩世受多方构造影响,研究区西南缘造山带活跃和陡坡的形成成为南部提供了充足的物源供给,盆地南部发生东西沉积分异,并且造成沉积中心由东不断向西迁移,与沉降中心趋于一致。盆地西部随着秦祁造山带的活化,盆地西部发育规模巨大的前陆拗陷,盆地西部发育陆内前陆盆地。研究区西南缘发育中晚侏罗世直罗组芬芳河组和早白垩世宜君组等多套磨拉石建造,存在多个平行不整合或角度不整合,并建立了中晚侏罗世-早白垩世构造沉积演化模式图。

参 考 文 献

[1] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2002.
Yang Junjie. Structure and oil and gas distribution law of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.

[2] 彭恒, 刘显阳, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代中晚期构造体制转化过程及其动力学背景[J]. 地质学报, 2022, 96(2): 387-402.
Peng Heng, Liu Xianyang, Liu Chiyang, et al. Spatial-temporal evolution and the dynamic background of the translation of Mid-Late Mesozoic tectonic regimes of the southwest Ordos Basin margin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 387-402.

[3] 马静辉, 何登发, 开百泽, 等. 贺兰山构造带构造—地层层序及构造演化[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 852-876.
Ma Jinghui, He Dengfa, Kai Baize, et al. Tectono-stratigraphic sequence and tectonic evolution in the Helanshan Mountains tectonic belt[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 852-876.

[4] 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.
Guo Yanqin, Li Wenhui, Guo Bincheng, et al. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 293-320.

[5] 张倩, 李文厚, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积体系及古地理演化[J]. 地质科学, 2021, 56(4): 1106-1119.
Zhang Qian, Li Wenhui, Liu Wenhui, et al. Jurassic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(4): 1106-1119.

[6] 杨君, 王善博, 刘飞. 鄂尔多斯盆地西缘环县地区直罗组沉积相及其与铀矿化的关系[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 64-70.
Yang Jun, Wang Shanbo, Liu Fei. Sedimentary facies of the Zhiluo Formation and its relationship with Uranium Mineralization in the Huanxian Area, West of Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(17): 64-70.

[7] 卢亚运, 陈江源, 陈志鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘 HFU-109 异常特征及找矿意义[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 56-60.
Lu Yayun, Chen Jiangyuan, Chen Zhipeng, et al. Characteristics and prospecting significance of HFU-109 airborne radioactive anomalies in the Southern Margin of Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 56-60.

[8] 刘文辉, 潘和平, 冉利民. 鄂尔多斯盆地非常规资源微孔隙储层测井评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6203-6210.
Liu Wenhui, Pan Heping, Ran Limin. The logging evaluation of non-conventional micro-porosity reservoirs in Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6203-6210.

[9] 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Liu Chiyang. Research progress on the coexistence and enrichment of multiple energy minerals in the basin[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[10] 陈刚, 李向平, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地构造与多种矿产的耦合成矿特征[J]. 地学前缘, 2005(4): 535-541.
Chen Gang, Li Xiangping, Zhou Lifa, et al. Coupled mineralization characteristics of Ordos Basin structure and a variety of minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2005(4): 535-541.

[11] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1255-1269.
He Dengfa, Bao Hongping, Kai Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and

- adjacent area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [12] 程守田, 刘星, 郭秀蓉, 等. 古沙漠沉积及其层序单元: 以鄂尔多斯白垩纪内陆古沙漠盆地为例[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2000, 25(6): 587-591.
Cheng Shoutian, Liu Xing, Guo Xiurong, et al. Palaeo-desert deposition and sequence stratigraphic units: an example from Cretaceous continental palaeo desert basin in Ordos[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(6): 587-591.
- [13] 庞军刚, 国吉安, 李文厚, 等. 古沙漠记录的沉积体系及层序地层研究进展——以鄂尔多斯盆地白垩系为例[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(1): 95-102.
Pang Jungang, Guo Jian, Li Wenhou, et al. Advance of depositional system and sequence stratigraphy in palaeodesert record: taking the Cretaceous strata in Ordos Basin as an example[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(1): 95-102.
- [14] 朱欣然, 刘立, 贾士璐, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系洛河组风成砂岩地球化学与物源区特征: 以靖边县龙洲乡露头为例[J]. *世界地质*, 2018, 37(3): 702-711.
Zhu Xinran, Liu Li, Jia Shilu, et al. Geochemical and provenance characteristics of eolian sandstone of Cretaceous Luohe Formation in Ordos Basin: an example from outcrop in Longzhou, Jingbian[J]. *Global Geology*, 2018, 37(3): 702-711.
- [15] 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 等. 鄂尔多斯盆地中侏罗世直罗—安定期沉积构造特征[J]. *石油与天然气地质*, 2006(2): 159-166.
Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, et al. Tectonic characteristics of regular sedimentary structures of the Jurassic Zhiluo-Amprian in the Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2006(2): 159-166.
- [16] 王科, 赵俊峰, 薛锐, 等. 鄂尔多斯盆地延安组河流沉积类型及演变——来自典型露头精细解剖的证据[J]. *沉积学报*, 2022, 40(5): 1367-1377.
Wang Ke, Zhao Junfeng, Xue Rui, et al. Fluvial sedimentary types and their evolution in the Yan'an Formation in the Ordos Basin: evidence from the detailed anatomy of typical outcrops[J]. *Acta Sedimentology Sinica*, 2022, 40(5): 1367-1377.
- [17] 郝毅, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地镇-泾地区中侏罗统延安组沉积体系及聚煤特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008(2): 89-95.
Hao Yi, Chen Hongde, Zhao Junxing, et al. Depositional systems and coal accumulation in the Middle Jurassic Yan'an Formation in the Zhenyuan-Jingchuan region, Ordos Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2008(2): 89-95.
- [18] 时志强, 韩永林, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地中南部中侏罗世延安组沉积体系及岩相古地理演化[J]. *地球学报*, 2003(1): 49-54.
Shi Zhiqiang, Han Yonglin, Zhao Junxing, et al. Sedimentary system and lithofacies paleogeographical evolution of the Middle Jurassic Yan'an period in the south-central Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003(1): 49-54.
- [19] 赵辉, 杨学武, 岳文成, 等. 靖安地区延安组沉积相特征及砂体叠置关系[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(4): 646-657.
Zhao Hui, Yang Xuewu, Yue Wencheng, et al. Sedimentary facies characteristics and sandbody superimposition relation of Yan'an Formation in Jing'an Area[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(4): 646-657.
- [20] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006(5): 617-638.
Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006(5): 617-638.
- [21] 赵红格. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化[D]. 西安: 西北大学, 2004.
Zhao Hongge. Tectonic characteristics and evolution of the western Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2004.
- [22] 庞军刚, 李文厚, 国吉安, 等. 鄂尔多斯盆地白垩纪沉积体系及古地理演化[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(2): 314-324.
Pang Jungang, Li Wenhou, Guo Jian, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the Cretaceous of Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(2): 314-324.
- [23] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(5): 15-20, 151.
Zhao Zhenyu, Guo Yanruo, Wang Yan, et al. Research progress on tectonic evolution and paleogeographical characteristics of Ordos Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2012, 19(5): 15-20, 151.
- [24] 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地中-晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. *地球学报*, 2015(1): 21-29.
Li Zhenhong, Dong Shuwen, Feng Shengbin, et al. Sedimentary response to middle-late Jurassic Tectonic events in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015(1): 21-29.
- [25] 张义楷, 周立发, 党犇, 等. 鄂尔多斯盆地中生代构造应力场与油气聚集[J]. *石油实验地质*, 2006(3): 215-219.
Zhang Yikai, Zhou Lifa, Dang Ben, et al. Mesozoic tectonic stress field and hydrocarbon accumulation in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2006(3): 215-219.
- [26] 尚景武. 鄂尔多斯盆地构造演化历程[J]. *产业与科技论坛*, 2020, 19(7): 46-47.
Shang Jingwu. Tectonic evolution of the Ordos Basin[J]. *Industry and Technology Forum*, 2020, 19(7): 46-47.
- [27] 郭庆银, 李子颖, 于金水, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中生代构造演化与铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2010, 26(3): 137-144.
Guo Qingyin, Li Ziyang, Yu Jinshui, et al. Meso-Neozoic structural evolution in the western margin of Ordos Basin with respect to uranium ore formation[J]. *Uranium Geology*, 2010, 26(3): 137-144.
- [28] Peng H, Wang J Q, Liu C Y, et al. Thermochronological constraints on the Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Haiyuan-Liupanshan Region, Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 183. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.103966.
- [29] 赵俊峰, 刘池洋, Nigel Mountney, 等. 吕梁山隆升时限与演化过程研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1427-1438.
Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Nigel Mountney, et al. Study on the uplift time limit and evolution process of Lüliang Mountain[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2015, 45(10): 1427-1438.
- [30] 陈刚, 王志维, 白国娟, 等. 鄂尔多斯盆地中生代峰值年龄

- 事件及其沉积-构造响应[J]. 中国地质, 2007(3): 375-383.
- Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Goujuan, et al. Mesozoic peak age events and their sedimentary-tectonic responses in the Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2007(3): 375-383.
- [31] 阮壮, 罗忠, 于炳松, 等. 鄂尔多斯盆地中—晚三叠世盆地原型及构造古地理响应[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 12-32.
- Ruan Zhuang, Luo Zhong, Yu Bingsong, et al. Protogeographic response of the Middle to Late Triassic basin prototype and tectonic paleogeographic response in the Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 12-32.
- [32] 张天舒, 吴因业, 郭彬程, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘晚三叠世前陆冲断活动控制的沉积层序特征[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 40-50.
- Zhang Tianshu, Wu Yinye, Guo Bincheng, et al. The characteristics of Late Triassic depositional sequence controlled by foreland thrust-faulting in south-western Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 40-50.
- [33] 刘池洋, 王建强, 黄雷, 等. 沉积盆地类型及其成因和称谓研究回顾与进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 891-909.
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Huang Lei, et al. Retrospective and progress on types, genesis and nomenclatures of sedimentary basins [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(6): 891-909.
- [34] 刘亢, 曲国胜, 许华明. 前陆盆地构造作用的沉积响应[J]. 新疆石油地质, 2008(6): 778-781.
- Liu Kang, Qu Guosheng, Xu Huaming. The sedimentary response to the tectonism in Foreland Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008(6): 778-781.
- [35] 李斌, 孟自芳, 宋岩, 等. 鄂尔多斯盆地西缘前陆盆地构造-沉积响应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007(4): 703-709.
- Li Bin, Meng Zifang, Song Yan, et al. Tectonic-sedimentary response of foreland basin in Western Margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007(4): 703-709.
- [36] Marco G, Malusà, Paul G. Fitzgerald fission-track thermochronology and its application to geology [J]. *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-89421-8.