



·鄂尔多斯盆地岩相古地理与沉积演化·

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长10—长8段 沉积演化特征

邓秀芹,庞锦莲,孙勃

(低渗透油气田勘探开发国家工程实验室/中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西 西安 710018)

摘要 通过分析鄂尔多斯盆地延长组长10—长8段沉积期地层发育特征、碎屑充填结构变化、沉积相展布,并结合岩石学、元素地球化学分析,提出受秦岭造山作用的影响,长10—长8段沉积期为鄂尔多斯盆地强烈沉降成盆期、台-盆发展转换期、气候环境转折期:①明确长10段沉积期发生了显著的沉降作用,沉降中心位于盆地西南环县—镇原—正宁一带,不对称性显著,粗碎屑快速充填,厚度巨大,长9段、长8段沉积期是构造平稳阶段气候控制为主的沉积,沉积物粒度相对较细;②提出长10期沉降作用结束了晚古生代稳定的地台性质的沉积,开始了内陆盆地演化阶段,在碎屑沉积物的成熟度、供屑原岩特征等方面均留下了造山带构造活动影响下的台-盆转化与盆地演化的示踪信息;③长10段沉积期结束了晚二叠世以来长期的干旱炎热的气候,经历了半干旱、半潮湿向温暖湿润气候转变;④长10—长8段构成了延长组下部沉降-充填旋回,该旋回在沉降中心厚1 000~1 550 m,具有粗碎屑快速充填、颗粒向上变细的特点。本研究深化了鄂尔多斯盆地形成、演化的认识。

关键词 长10—长8段;长10沉降作用;台-盆转化;气候转折;鄂尔多斯盆地演化
中图分类号:P512.2 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-06-012

Evolution characteristics of Ordos Basin in sedimentary period of Chang 10-Chang 8 member of Yanchang Formation

DENG Xiuqin, PANG Jinlian, SUN Bo

(Exploration and Development Research Institution of Changqing Oilfield Company/
National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China)

Abstract By analyzing the stratigraphic development characteristics, clastic filling structure and sedimentary facies distribution of the Chang 10-Chang 8 sedimentary period of the Yanchang Formation in the Ordos Basin, combined with petrological and geochemical analysis, it is proposed that affected by the Qinling orogeny, Ordos Basin strongly subsided, transformed from platform to basin, and climate shifted sharply at the Chang 10-Chang 8 sedimentary period: ① It is cheared that significant subsidence occurred during the sedimentary period of the Chang 10, and the subsidence center is located in Huanxian-Zhenyuan-Zhenning area, the southwestern basin, with significant asymmetry rapidly filled by thick coarse clastic. Chang 9 and Chang 8 member are stable deposits dominated by climate in a stable tectonic environment, with relatively fine sediment. ② It is

收稿日期:2024-09-11

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001)

第一作者:邓秀芹,博士,教授级高工,从事沉积学、石油地质综合研究, dxq1_cq@petrochina.com.cn。

proposed that the Chang 10 subsidence ended the stable platform during the late Paleozoic and began the evolution of inland basin. The platform-basin transformation and basin evolution under the influence of orogenic tectonic activities have left traces in the maturity of clastic sediments and the characteristics of detrital protoliths. ③The sedimentary period of Chang 10 member ended the long-term arid and hot climate since the Late Permian, and began the transition to semi-arid and semi-humid, and to warm and humid climate. ④The Chang 10-Chang 8 members constitute a subsidence-filling cycle of lower Yanchang Formation, about 1 000 ~ 1 550 m thick in the subsidence center. This study furthers the understanding of the formation and evolution of the Ordos Basin.

Keywords Chang 10-Chang 8 member; Chang 10 subsidence; platform-basin transformation; climate shift; evolution of Ordos Basin

中元古代—古生代,鄂尔多斯盆地一直属于华北克拉通的组成部分,具有稳定地台的沉积特征,直至进入中生代中晚期华北地台开始构造东西分异,鄂尔多斯盆地独立成盆。鄂尔多斯盆地处于古亚洲动力体系域、特提斯动力体系域、环太平洋动力体系域的结合部位,不同地质历史阶段几大体系域相互作用,不同构造层次在盆地相互叠加,造成盆缘活动带与盆内沉积充填复杂的耦合样式,也控制了石油、天然气等能源矿产的成藏与成矿作用、赋存与富集特点及分布特征^[1-3]。

鄂尔多斯盆地油气资源丰富,其中石油资源主要分布在中生界三叠系延长组和侏罗系延安组、富县组。目前盆地已探明石油地质储量超过100亿吨,其中90%以上分布于延长组。延长组为低渗透-非常规含油气系统,主要的油藏类型有特低渗透、致密油、页岩油等^[4]。由于延长组主要的产油层为长8以上的层系,因此,针对长8以上层系开展了大量的综合地质研究工作,在沉积相分布与演化、烃源岩展布与生烃潜力分析、储层特征与评价、成藏特征与石油富集规律等方面取得了丰富的研究成果^[1-7]。然而延长组下部层系,尤其是长10段研究薄弱,而且过去盆内钻穿延长组的探井有限,特别是在中南部地区,打穿延长组的井仅20余口,资料的欠缺与重视程度不足影响了对延长组下部地层分布、沉积演化的研究。近年来,盆地南部上古生界发现了多个气田,这些探井为研究延长组下部层系提供了丰富的资料。基于这些深井资料,本文系统分析了地层发育情况、沉积特征,进一步深入研究中三叠世造山带构造活动在相邻盆地的沉积响应及沉积表现形式。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地周缘被山系包围,南北向近长方形展布。其北部为阴山山系,南部为秦岭造山带,西部为贺兰山、六盘山,东部为吕梁山系,面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 〔见图1(a)〕。

中晚三叠世延长组沉积期处于印支运动阶段。印支构造运动在中国大地构造发展史上是一个重要转折期。晚古生代,中国大陆的形成演化主要受古亚洲、古特提斯动力体系联合作用的控制,以秦岭—祁连—昆仑山为界南海北陆的古地理格局分异显著,现今展示出的构造线方向近东西向。印支运动阶段中国大陆进入了中特提斯—古太平洋动力体系联合作用演化阶段,受太平洋板块NNW方向向欧亚板块俯冲的影响,东部地壳开始活化,形成了华北克拉通东隆西拗的格局,古构造线方向开始转变为NE—NNE向。印支构造阶段随着华北板块与扬子板块的碰撞拼接,在各板块边缘和内部都发生了广泛的、强烈的褶皱变形、逆掩、地壳叠复及缩短。中国南北陆地连为一体,全国大部分地区处于陆地环境^[8-10]。

秦岭的形成经历了多期构造活动,是不同构造体制发展演化而形成的复合型造山带,其主造山作用板块构造演化阶段(Pt_3 — T_2)是华北、扬子、秦岭3个板块沿商丹带、勉略带两个消减带俯冲碰撞,经历了漫长复杂的造山过程。从裂谷构造体制转换为板块构造体制,从扩张、俯冲到碰撞,于 T_2 末全面隆升成山^[11]。秦岭造山过程对其北部相邻的鄂尔多斯盆地的形成演化及沉积充填结构产生了重要的影响。

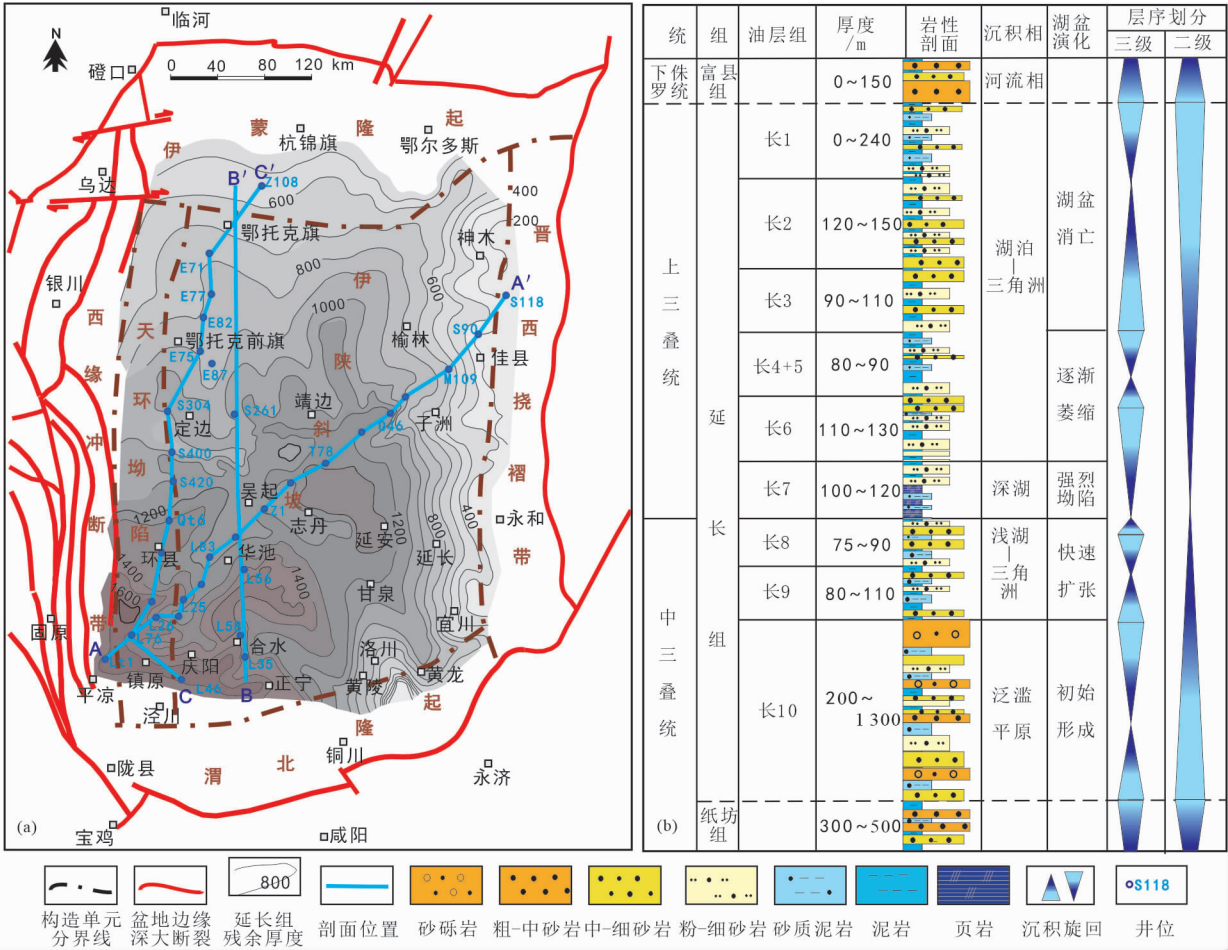


图 1 研究区位置及延长组基本特征

Fig.1 Location of study area and characteristic of Yanchang Formation

鄂尔多斯盆地延长组以灰绿色中细砂岩、细砂岩、粉砂岩与灰色、灰黑色、黑色泥岩、页岩等岩性组合为主,夹多层凝灰岩薄层、纹层,为温暖潮湿气候条件下河流、三角洲、湖泊、重力流沉积。延长组按照沉积旋回可划分为10段,自上而下为长1—长10段(相应的沉积期,后面简称为长1—长10期),其中长10—长8段属于中三叠统,长7—长1段属于上三叠统[见图1(b)]^[12-13]。盆地腹部延长组残余厚度为500~1700 m,在盆内呈现出北薄南厚的分布特点,其中盆地西南环县、镇原、庆阳、正宁一带,延长组残余厚度最大,一般1500~1700 m[见图1(a)]。延长组记录了湖盆完整的水进水退过程,从长10期湖盆初始形成,至长7期最大湖泛,之后逐渐萎缩消亡。

2 长10—长8段发育特征

延长组长10段与下伏的中三叠统纸坊组为平行不整合接触,长10—长8段为连续的碎屑岩

沉积,沉积物结构成熟度和成分成熟度均较低,碎屑颗粒呈现出向上变细的特征。其中,长10段地层厚度、岩性组合在不同区域差异较大,长8、长9段地层厚度在全盆地分布稳定,但岩性组合存在一定的差异。

2.1 长10段

长10段主要为肉红色、灰绿色细-粗粒长石砂岩、长石岩屑砂岩夹灰色、灰黑色粉砂质泥岩、泥岩、碳质泥岩,砂岩中钾长石含量相对较高,且多为沸石胶结,普遍见麻斑状结构。盆地东部野外地质剖面显示,长10下部泥岩以灰色、灰黑色为主,局部层段显示为紫灰色、灰棕色,长10底部以厚层、块状的中细砂岩为主,发育大型交错层理。盆地西部、南部野外剖面,长10泥岩主要为灰色、深灰色和灰黑色,底部多见砾岩,如平凉甘沟窑中三叠统上部崆峒山组(相当于延长组)发育厚层褐色、灰褐色中、细砾岩夹砂岩条带,厚度2885.9 m^[14];华亭策底坡剖面,长10下部见三套灰、灰绿色砾岩,砾岩单层厚度由下向上由0.3 m

增加到 5 m; 纳水河剖面长 10 底部为滞流沉积, 见起伏不大的侵蚀面, 侵蚀面之上为含泥砾的中、粗砂岩; 汝箕沟长 10 底部见 21.2 m 细砾岩^[15]。盆内钻孔取芯显示, 长 10 主要为细-粗砂岩夹泥岩, 目前未钻遇砾岩。

长 10 段厚度在不同地区差异较大, 总体表现为由北部、东部向南西方向厚度增大, 在鄂托克前

旗—子洲以北地区, 地层厚度一般小于 200 m, 环县—华池以南地层厚度急剧增大, 一般大于 500 m, 其中环县—镇原—庆阳—正宁一带为厚度最大的地区, 一般 800 ~ 1 300 m (见图 2), 以叠置的厚层砂岩为主, 连井剖面 (见图 3) 和地震剖面 (见图 4) 展示了长 10 段自北东向南西方向楔形增厚的特征。

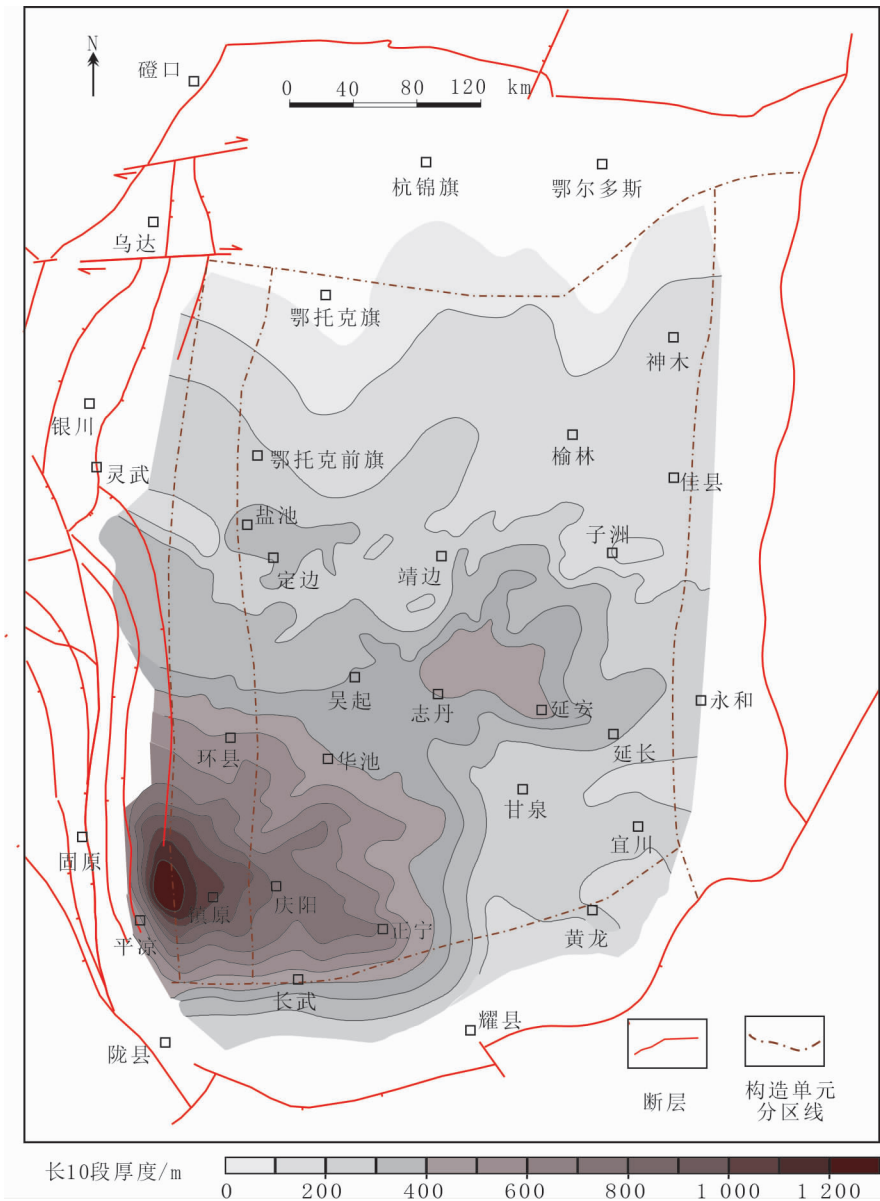


图 2 鄂尔多斯盆地长 10 段厚度图

Fig. 2 The thickness map of Chang 10 member in Ordos Basin

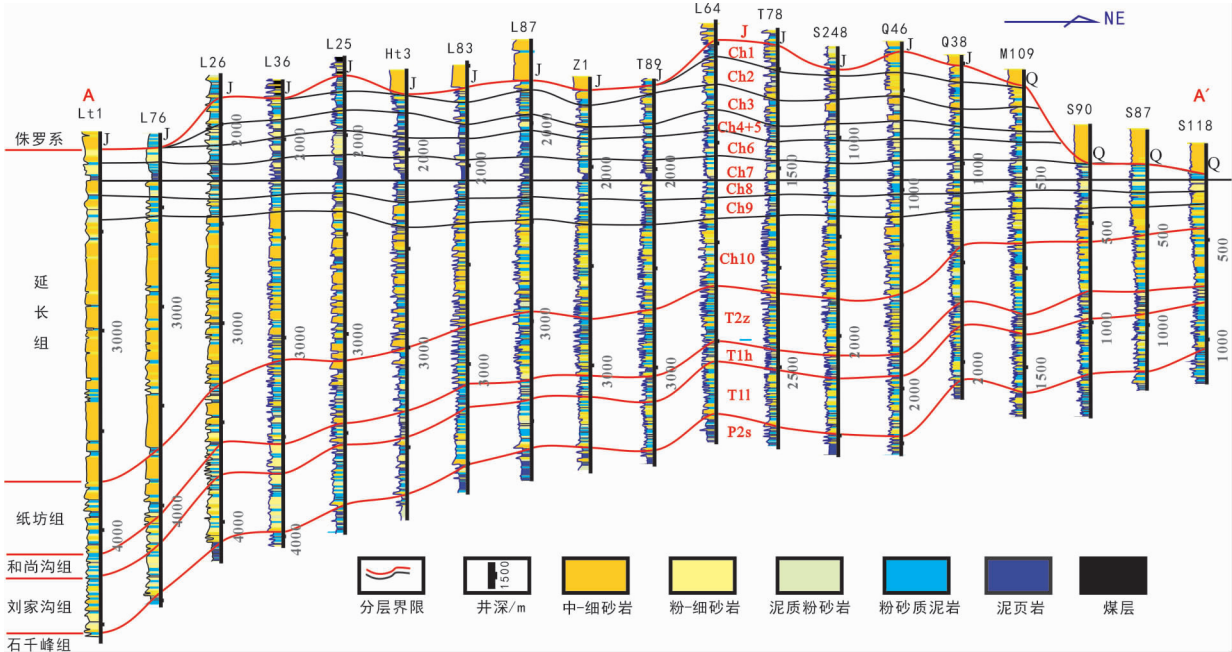
2.2 长 9 段

长 9 段主要为灰绿色、灰色细-中粒岩屑长石砂岩、长石砂岩与灰色、深灰色、灰黑色粉砂质泥岩、泥岩、页岩, 中上部见薄层凝灰岩。各区长 9 段岩性组合差异较大。西北部岩性粗, 灵武石沟驿剖面长 9 发育中厚层状含砾中-粗砂岩、中-粗

砂岩, 泥质不发育。向东至盐池地区, 以厚层块状中-粗粒岩屑砂岩为主, 单层厚度大, 常常见 20 ~ 50 m 连续厚砂岩。西南部靠近物源的华亭纳水河剖面长 9 段以厚层、块状含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩夹泥质岩沉积为主, 向盆地腹部逐渐过渡为细-中粒砂岩, 泥岩的厚度逐渐增加。盆地东

缘、南缘沉积粒度较细,常常以细砂岩和泥岩互层沉积为主,局部见厚层的细-中砂岩(如神木窟野河剖面、清涧秀延河剖面,延长延河剖面)^[15],在志丹—富县—洛川一带,长 9 段发育多层灰黑色、

黑色页岩,其分布范围可向东南方向继续延伸,泥岩中见丰富的叶肢介、介形虫等化石,并见鱼的鳞片 and 牙齿,植物化石碎片很少。长 9 段厚度在盆地腹部分布稳定,一般 80~100 m(见图 3、4)。



注:Q:第四系;J:侏罗系;Ch1—Ch10:长 1 段—长 10 段;T₂z:纸坊组;T₁h:和尚沟组;T₁l:刘家沟组;P₃s:石千峰组;剖面位置见图 1(a)。

图 3 鄂尔多斯盆地甘肃平凉—陕西神木三叠系地层对比图
Fig. 3 Triassic stratigraphic correlation of Pingliang of Gansu-Shenmu of Shaanxi, Ordos Basin

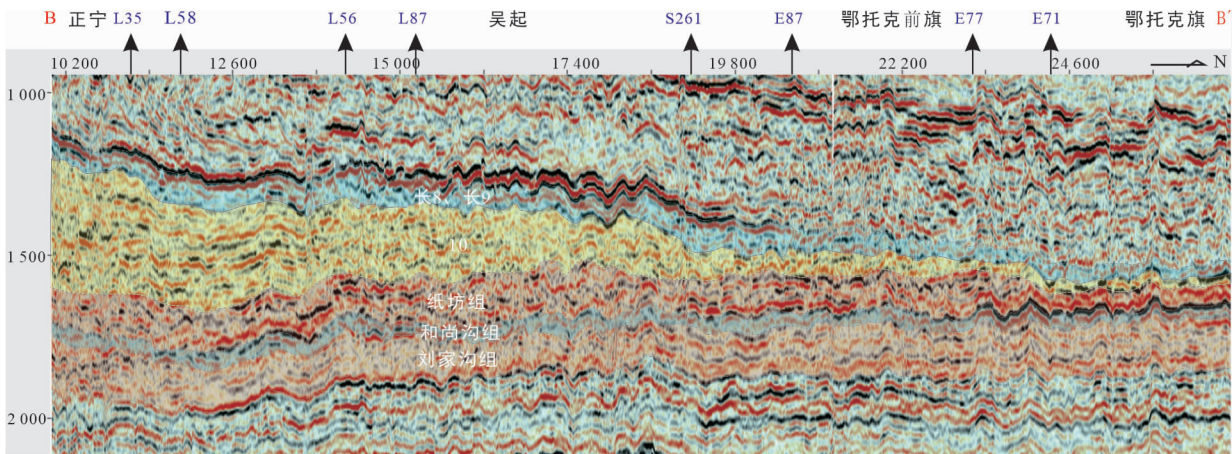


图 4 鄂尔多斯盆地内蒙古鄂托克旗—甘肃正宁上三叠系地震反射特征图(剖面位置见图 1(a))

Fig. 4 The seismic reflection characteristics of the Middle-Upper Triassic from Zhenning, Gansu to Etuokeqi, Inner Mongolia, Ordos Basin

2.3 长 8 段

长 8 段岩性组合主要为灰绿色、灰色细-中粒岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩与灰色、深灰色、灰黑色粉砂质泥岩、碳质泥岩、泥岩、煤线。不同地区的砂岩类型存在一定的差异,盆地东北地区主要为岩屑长石砂岩,其次为长石砂岩、长石岩屑砂

岩;西南地区 and 西北地区主要为岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩。在靠近盆地边缘的地区沉积物粒度较粗,砂岩厚度大(如灵武石沟驿剖面、平罗汝箕沟剖面、神木窟野河剖面、宁武杜家村剖面等^[15]),向盆地腹部志丹、铜川、富县等地区,砂体厚度减小,泥岩厚度增加,常常呈互层状产出。长

8 段厚度在全盆地范围内分布稳定,一般 73 ~ 85 m(见图 3、4)。

3 长 10—长 8 期沉积相展布

长 10—长 8 段,以温暖的半干旱、湿润气候条件下的三角洲和淡水湖泊沉积为主,不同阶段各个沉积体系三角洲的发育程度和湖泊水体的范围均显示出较大的差异。

3.1 长 10 期

长 10 期盆内主要发育冲积平原、三角洲平原和滨浅湖沉积。盆地西南、西部和西北部物源供给充沛,沉积速率快。在环县—庆城以西地区,地层砂/地比一般大于 50%,环县—镇原以西地区砂/地比甚至超过 90%。来自西北物源区的盐池西三角洲延伸到盐池一定边一带。南部物源区三角洲规模相对较小。东北物源的三角洲砂体可推进到志丹—甘泉一带。此时统一的湖盆尚未形成,发育庆城—黄陵、志丹、吴起等多个小型汇水区,砂/地比值多小于 40%〔见图 5(a)〕,泥岩相对较发育,部分地区在泥岩层面见介形虫等湖生生物化石和垂直虫孔,发育变形层理,基本不含高等植物化石,具有水下沉积的特征。

3.2 长 9 期

长 9 期为延长组沉积早期的一次重要湖侵作用,以浅湖和三角洲沉积为主,局部地区发育半深

湖及深湖亚相,湖泊面积约 $9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在志丹—甘泉—黄龙一带为半深湖及深湖亚相,沉积了 5 ~ 15 m 厚的富有机质页岩和暗色泥岩,层面见丰富的介形虫、叶肢介、鱼鳞片等化石,具有深水的特征,代表了长 9 期的湖盆沉积中心^[16-17]。西北、西部和西南三角洲发育,尤以西北部三角洲规模最大,单砂体厚,砂/地比一般大于 50%,局部地区甚至达到 60% ~ 90%,砂体分布稳定,向东抵达定边、吴起一带。西部三角洲与西南三角洲汇合,向东北方向继续延伸至吴起地区。南部三角洲规模仍较小,向北仅影响到黄陵一带。东北三角洲建设作用相对较弱,三角洲规模相对较小,砂体厚度相对较薄,该三角洲延伸到志丹—甘泉一带〔见图 5(b)〕。

3.3 长 8 期

长 8 期,湖泊水域宽广,湖水整体较浅,主要发育滨浅湖和三角洲。湖底地形较平坦,随着湖岸线迁移摆动,水上、水下沉积交替的滨岸沉积发育,常见煤线、根土岩、变形层理、垂直虫孔等,汇水中心位于吴起—志丹—富县一带,砂/地比一般小于 20%。长 8 期为重要的三角洲建设时期,各个物源控制下的三角洲均衡发育,但整体规模比长 10、长 9 期三角洲规模小,三角洲推进的位置与早期基本一致〔见图 5(c)〕。在长 8 早期,滨岸带发育成排成带平行湖岸线分布的滩坝沉积。

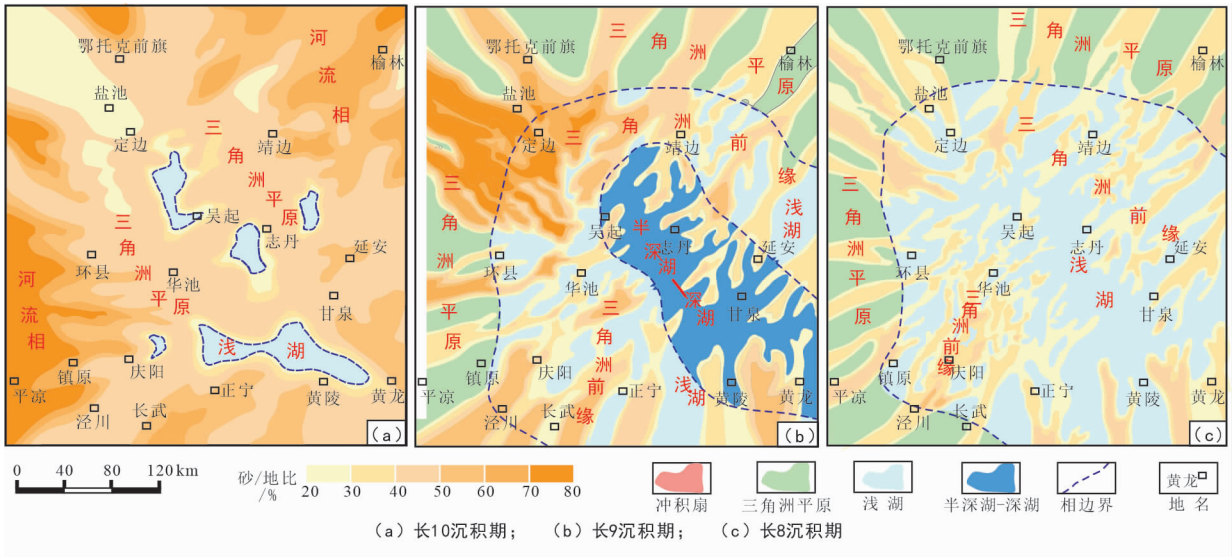


图 5 鄂尔多斯盆地延长组长 10—长 8 段沉积相图
Fig. 5 The sedimentary facies maps of Chang 10-Chang 8 members, Yanchang Formation, Ordos Basin

4 长 10—长 8 期盆地演化特征

三叠纪鄂尔多斯盆地演化与其南部的秦岭造山运动密切相关。前人围绕秦岭造山带的印支构造活动特征做了大量的工作,研究成果显示秦岭地区的印支运动主要与勉略带碰撞造山有关。勉略洋于泥盆纪—石炭纪由扩张裂谷演化至初始洋盆,自二叠纪中晚期开始向北俯冲消减,于印支期完成洋-陆俯冲到陆-陆俯冲碰撞造山作用^[11,18]。强烈碰撞造山过程中引发板块边缘结合部及两侧早期形成的沉积岩系和火山岩系等遭受强烈的变质变形、频发的岩浆活动及显著的成矿作用,构造活动具有多期活动的特征。中晚三叠世秦岭造山岩浆活动,可划分两个阶段(距今 235 ~ 250 Ma 和距今 185 ~ 235 Ma)^[19]。早期花岗质岩石以 I 型为特点,岩石类型主要为石英闪长岩和斜长花岗岩,部分岩石显示较高的 Sr、Y 含量比值^[20,21],为勉略洋向北俯冲的产物。晚期花岗岩广泛发育于西秦岭和南秦岭,在东秦岭零星出露,以花岗闪长岩、二长花岗岩为主,显示 I、I-A 和 A 型花岗岩的演化特点,并发育一些具有埃达克质特点的花岗岩体和环斑结构花岗岩,为同碰撞、后碰撞的产物^[21-22],指示秦岭已转入伸展拉张的板内演化阶段。这两个阶段截然不同的应力场对鄂尔多斯盆地成盆演化具有重要的控制作用。

4.1 长 10—长 8 期沉降及充填演化

过去由于盆内打穿长 10 的探井少,对长 10 段的发育特征主要是根据有限的钻井并参考野外剖面地层发育情况,普遍认为长 10 段北薄南厚,在盆地北部厚度不足百米,南部厚 300 m 左右。然而近两年通过 500 余口古生界为目的层的天然气探井资料分析揭示,盆地西南沉积了巨厚的长 10 段,存在一个沉降带,该沉降带不对称性显著(见图 2)。北部鄂托克旗地区地层厚度小于百米,南部沉降中心地层厚度超过千米,以叠置的厚层砂岩为主。虽然盆地西南部环县—镇原以西、子长—横山—鄂托克前旗之东北方向都具有高砂地比值的特征,但前者处于沉降中心,地层厚度大,一般为 800 ~ 1 300 m,而后者远离沉降中心,地层厚度仅 50 ~ 200 m,展示了该期沉降的强烈不对称性。与延长组其他层段相比,长 10 段碎屑粒度较粗,主要为中粗砂岩、中细砂岩,在靠近物源地区部分层段含砾石,发育大型板状交错层理、

槽状交错层理、平行层理等。

长 9 段、长 8 段沉积期,构造环境相对稳定,沉积作用主要受控于气候环境,在局部气候环境影响下,各个沉积体系发育程度、沉积组合、湖盆的范围与水体深浅等可能存在差异,但是表现为盆地整体变化,长 8—长 9 段厚度分布稳定,富含植物化石,与长 10 段沉积期相比湖盆水体范围明显增大,地形平缓,主要发育滨浅湖和三角洲沉积,局部沼泽化,可见炭质泥岩和劣质煤线^[16],志丹—宜川一带长 9 段局部发育富有机质泥页岩^[16-17],反映气候比长 10 段沉积期更湿润。

综上所述,长 10 段是构造控制的大幅度沉降成盆与充填作用的结果,碎屑较粗;长 9 段、长 8 段是构造平稳阶段气候控制为主的稳定沉积,沉积物粒度相对较细。总体上长 10—长 8 期为盆地发展阶段,湖盆范围不断扩大。之后的长 7 期,受构造影响,盆地再次发生沉降,形成了深大湖盆,湖盆面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,深拗陷内充填了深水泥页岩和重力流砂岩^[15]。

4.2 台-盆发展转化

4.2.1 台-盆转化特征

鄂尔多斯盆地北部阴山褶皱山系的形成与古亚洲洋演化密切相关,古亚洲洋的闭合时代自西向东逐渐变晚,西段早石炭世末期完成洋陆转化,东段洋陆转化发生在二叠纪至早三叠世^[23-24]。古亚洲洋俯冲关闭和西伯利亚板块、华北板块的拼接碰撞,使得盆地北部抬升,沉积古地形具北高南低的特征,由此控制了晚古生代沉积体系发育,直至中三叠世纸坊组沉积期,盆内构造环境稳定,地形平坦,坡降非常小,地层发育稳定。下二叠统山西组—中三叠统纸坊组沉积地层厚度一般 1 100 ~ 1 300 m,具有稳定地台的沉积特征(见图 6)。

印支构造运动结束了特提斯洋在秦岭地区的演化,该构造阶段特提斯洋的分支洋勉略洋完成了向北俯冲,华北和扬子两大板块的碰撞。长 10 期,在勉略洋向北俯冲的挤压构造应力影响下,位于俯冲碰撞活动带北侧的华北地台岩石圈发生挠曲,表现为鄂尔多斯地区西南部剧烈的不平衡的沉降,沉降中心位于环县—镇原—合水一带。秦岭造山带大幅度的隆升,伴随着强烈的物理风化与剥蚀作用,物源区物质供给充足,在鄂尔多斯盆地南部沉降中心快速充填了巨厚的粗碎屑。虽然长 10 期,受构造运动控制盆地经历了快速、巨幅

的沉降,但在沉降中心和沉积中心均未见到深水沉积,说明碎屑供给充足,快速沉降产生的可容纳

空间很快被碎屑充填,具有边沉降边沉积、补偿-过补偿沉积特点。

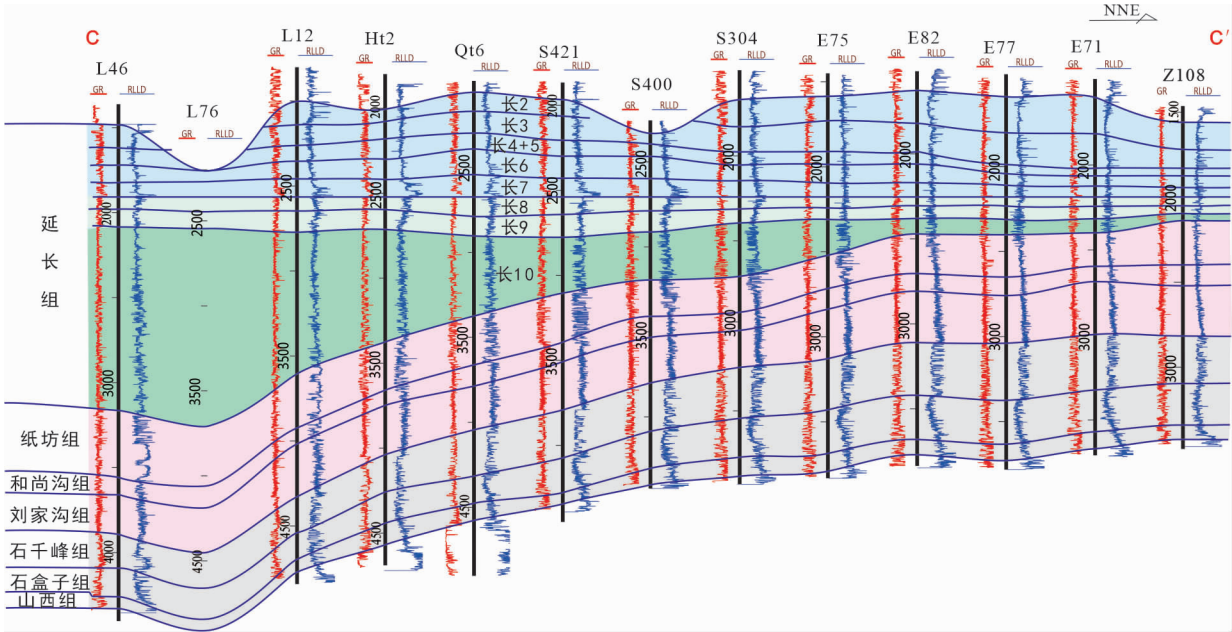


图 6 鄂尔多斯盆地甘肃庆阳—内蒙古鄂托克旗二叠系山西组—三叠系延长组地层对比图〔剖面位置见图 1(a)〕
Fig. 6 Stratigraphic correlation of Permian Shanxi Formation-Triassic Yanchang Formation from Qingyang, Gansu to Etouke, Inner Mongolia, in Ordos Basin

由此可知,二叠纪—中三叠世早期,现今的鄂尔多斯盆地处于大华北台地的西部,为平缓稳定的地台型沉积,中三叠世晚期开始进入了克拉通边缘大鄂尔多斯盆地演化阶段。长 10—长 8 段构成了延长组下部的沉降-充填旋回,该旋回在沉降中心厚 1 000 ~ 1 550 m,具有粗碎屑快速充填、沉积物向上变细的特点。长 7—长 1 段构成延长组上部沉降-充填旋回,具有细粒物质缓慢充填、沉积物向上变粗的特点^[25]。

4. 2. 2 台-盆充填物质组成及原岩属性

盆地中充填的沉积物,在一定程度上记录着相邻剥蚀区隆升与剥蚀强弱演化的信息,砂岩碎屑矿物组分变化可以用以追索蚀源区、再造源区隆升剥蚀过程、判别源区构造属性及其演变。

秦岭基本的地壳的物质组成包括:①两类不同的造山带基底岩系(晚太古代—早元古代变质结晶杂岩系基底、早中元古代火山-沉积浅变质岩系);②晚元古代—中三叠世广泛发育的从裂谷型火山建造演化为两类古大陆边缘沉积和裂陷沉积,形成不同类型蛇绿岩与花岗岩;③中新生代陆内断陷和造山带前后陆盆地沉积及构造岩浆活动^[26]。其中太古代—中三叠世造山过程中形成的复杂的变质岩、岩浆岩和沉积岩系成为鄂尔多

斯盆地西南地区延长组沉积期重要的物源。伴随着幕式构造运动,延长组不同层段的碎屑物质组成也存在明显的差异。

从碎屑物质的结构成熟度分析,位于延长组下部的纸坊组碎屑沉积物磨圆度较差,颗粒以次棱角状为主,少量为次圆状,分选中-好;长 10 段碎屑颗粒磨圆度较差,以次棱角状为主,少量为次圆-次棱角状,分选中等为主,少量分选差或好;长 9、长 8 段碎屑颗粒磨圆度也较差,颗粒以次棱角状为主,少量为次棱次圆状,分选中-好。由此可知纸坊组、长 9 和长 8 段颗粒分选、磨圆度均好于长 10 段。

从碎屑物质的成分成熟度分析(见表 1),从纸坊组到长 7 段发生了两次成熟度的突变。一是纸坊组与长 10 段的突变,表现为碎屑物质的成分成熟度和结构成熟度变差,稳定组分石英含量明显减少,碎屑成分成熟度〔石英含量/(长石 + 岩屑)含量〕从 0. 59 降低到 0. 41。长 10—长 8 段,碎屑成熟度逐渐增大,成分成熟度由 0. 41 逐渐增大到 0. 46。第二次突变见于长 8 与长 7 段,相比长 8 段,长 7 段石英、沉积岩屑含量明显增大,长石、变质岩屑含量明显降低,碎屑成分成熟度从 0. 46 突然增大至 1. 07。

表 1 鄂尔多斯盆地西南地区纸坊组—延长组下部层系碎屑组成

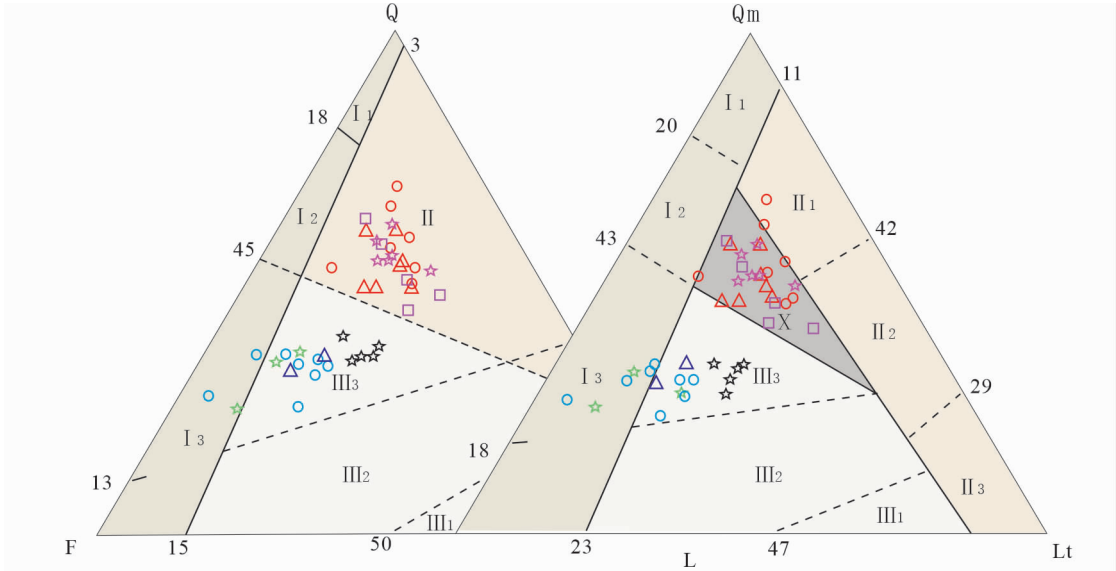
Tab. 1 Detrital composition of Zhifang-lower Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin 单位: %

层位	岩浆岩屑						变质岩屑						沉积岩屑					
	石英	长石类	花岗岩	喷发岩	隐晶岩	小计	石英岩	高变岩	片岩	千枚岩	变质砂岩	板岩	小计	粉砂岩	泥岩	灰岩	白云岩	小计
长 8	29.8	32.1	0.0	6.7	1.8	8.6	4.0	3.1	3.4	5.7	4.1	3.2	23.4	0	0.3	0.2	0.2	0.7
长 9	27.7	41.8	0.0	4.9	1.5	6.4	3.1	2.2	2.5	4.9	3.3	2.3	18.4	0	0.1	0.0	0.0	0.1
长 10	27.5	49.2	0.3	3.8	1.1	5.2	2.0	1.3	1.4	3.9	2.2	1.4	12.2	0	0.1	0.0	0.0	0.1
纸坊组	36.4	51.7	0.0	1.5	2.3	3.9	1.1	0.0	0.3	3.3	1.3	0.1	6.1	0	0	0	0.1	0.1

Dickinson(1983)根据 10 000 多个已知构造背景的现代和古代砂岩统计分析,编制了包括 QFL、QmFLt 等的系列碎屑模型与古构造关系图,制定了系统的碎屑-物源-板块构造三位一体的分类方案^[27],并广泛应用于构造与沉积耦合演化分析。位于盆地西南部的庆阳—正宁地区三叠系砂岩在 QFL、QmFLt 三角图投影上也呈现了明显的变化(见图 7)。可以划分为 3 个不同的数据群组:①刘家沟组—纸坊组,砂岩的原岩构造属性主要为隆升基底和切割弧;②延长组长 10—长 8

段,碎屑物质的原岩属性为切割弧,少量投影到隆升基底;③长 7 段以上地层,碎屑的原岩属性基本上都落在再旋回造山带区域,集中在混合再旋回造山带。

砂岩的碎屑组分变化说明进入延长组沉积期,秦岭地区构造活动具有阶段性特征,其中长 10 期和长 7 期为构造活跃阶段,强烈的构造活动使得作为盆地南部物源的地质体发生了重要的变化,进一步造成碎屑组分的突变。



☆:刘家沟组、和尚沟组、纸坊组;○:长10段;△:长9段;☆:长8段;☆:长7段;△:长6段;□:长4+5段;○:长2—长3段

注:Q,石英颗粒的总数;Qm,单晶石英颗粒;F,长石颗粒总数;Lt,岩屑颗粒总数;L,不稳定岩屑总数;Ⅰ₁:克拉通内部;Ⅰ₂:过渡大陆;Ⅰ₃:隆升基底;Ⅱ:再旋回造山带;Ⅱ₁:石英再旋回造山带;Ⅱ₂:过渡再旋回造山带;Ⅱ₃:岩屑再旋回造山带;Ⅲ₁:未切割弧;Ⅲ₂:过渡弧;Ⅲ₃:切割弧 X:混合带。

图 7 鄂尔多斯盆地三叠系砂岩 QFL、QmFLt 三角图解

Fig. 7 QFL, QmFLt triangle diagram of sandstone, Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin

4.3 气候重大转折

4.3.1 碎屑沉积与生物表征

三叠纪继承了二叠纪晚期的炎热干燥的气候特点,干旱气候盛行,一直持续到中三叠世早期。上二叠统石千峰组—中三叠统纸坊组近千米的沉积物中,细粒物质呈现出棕红色、棕灰色、灰紫色、

紫红色,代表了一套干旱炎热气候条件下的河湖相沉积,植物化石较少,生物物种单一,仅一些耐旱属种得以生存。

直至中三叠世晚期,气候发生重大变革,向温湿过渡,长 10 期正处于炎热干燥向温暖潮湿的转变时期,细粒沉积物主体颜色为灰色、灰黑色、黑

色,局部地区长10段沉积物中仍可见少量薄层的棕色、紫色泥岩、粉砂岩,该期高等植物化石含量增多;至长9、长8段,常见高等植物、炭化植物茎秆,并发育煤线,温暖潮湿气候环境下沉积的延长组下部地层,生物变得繁盛,发育 *Aunalepis-Tongchuanophyllum* 植物组合,这一组合已发现的有15属30种;介形虫组合中,除 *Darwinula* 外,还有 *Shensinella Lutkevichinella*, *Tungchuanin* 等属,属种多,个体较丰富,叶肢介组含有 *Iolygrapta*, *Lioes-theria*, *Brachysthsria*, *Eueslheria*, *Howellites*, *Aquilonoglypta* 等6属16种,等^[28]。晚三叠世受全球卡尼期洪水事件(CPE)影响转为潮湿气候,植被快速复苏,蕨类、种子蕨类、松柏类、苏铁类繁盛,陆相碎屑岩沉积物颜色主要为灰色、灰绿、灰黑色、黑色等,有些地区发育含煤层系、富有机质泥页岩。

4.3.2 地球化学表征

物质在风化、搬运和沉积过程中,元素的迁移、富集、赋存状态受气候、氧化还原条件、搬运和沉积水体性质等多种因素的影响,并在沉积物中留下痕迹,因此可以通过主量、微量和稀土元素的丰度、分布特征、特定元素的比值等推断反演地质历史阶段古地理、古环境与古气候特征。Sr/Ba、Ca/(Ca + Fe)比值常常用于判断水体的盐度,通常 Sr/Ba 比值小于0.6、0.6~1、大于1分别指示淡水、微咸水、咸水环境^[29];Ca/(Ca + Fe)比值是一个反映海水盐度的指标,比值越大含盐度越高^[30]。利用微量元素分析氧化还原条件基本原理是基于其对变价元素迁移、沉淀的控制作用,氧化条件下U、Mo、V、等呈高价(U^{6+} 、 Mo^{6+} 、 V^{3+})易迁移,还原条件下呈低价(U^{4+} 、 Mo^{4+} 、 V^{3+})易沉淀;Fe、Mn、Cu、Eu等氧化条件下呈高价(Fe^{3+} 、 Eu^{3+})易沉淀,还原条件下呈低价(Fe^{2+} 、 Eu^{2+})易迁移;Co和Cr不受氧化还原条件控制^[31],因此这些元素之间的比值关系被广泛应用于沉积环境判识中,Th/U比值越低、V/Cr、V/(V + Ni)等参数值越高,多指示有机质富集的环境越还原^[32-33]。Mo与U在氧化环境中溶解于水中,聚集很有限,缺氧条件下聚积于沉积物中。近年的很多研究利用Al标准化的富集系数来评估古水体氧化还原条件。Mo与U富集系数(Mo_{EF}/U_{EF})的计算公式为: $XEf = (X/Al)_{样品} / (X/Al)_{ucc/PAAS}$,式中X、Al代表元素Mo或U元素、Al的

质量浓度,样品一般用土地壳岩石(UCC)或澳大利亚后太古宙平均页岩(PAAS)来标准化。Cu、Sr分别容易富集于潮湿、干旱条件下的化学风化产物中,Sr/Cu比值越大,气候越干旱^[34-35]。在干旱的古气候条件下蒸发更强烈、矿化度与碱性增强导致Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba等元素析出并富集,从而使C值减小[C值 = $\Sigma(Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co) / \Sigma(Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)$]^[35]。当沉积物具有较低的沉积速率时,黏土与稀土元素接触时间延长,这将导致REE(稀土元素)的总量增高,因此这些元素可以用来分析湖盆水体的古生产力、沉积速率等。延长组地球化学气候环境指标如下(见表2)。

1) 古盐度。本次对延长组长6—长10段和纸坊组主量元素、微量元素和稀土元素分析结果进行统计,结果表明,大部分层段Sr/Ba小于0.4,纸坊组、长8段大于0.6,大部分层段Ca/(Ca + Fe)小于0.4,仅长6比值介于0.4~0.8的之间,指示中晚三叠世湖盆水体为淡水-微咸水环境。

2) 氧化还原性。从Th/U、V/Cr、V/(V + Ni)、 U_{EF} 、 Mo_{EF} 指标的变化趋势分析,中晚三叠世盆地氧化还原条件发生了两次重要转变,一是纸坊组沉积期与长10期之间的转变,由纸坊组沉积期的富氧环境向长10期贫氧环境转变,表现为Th/U比值的显著减小,V/Cr比值的明显增大等;长10—长8期还原性进一步逐渐增强。第二次转变发生在长8与长7期,虽然仍是向还原性增强的方向转变,但大部分参数在长7段数值上呈现突变,如 U_{EF} 、 Mo_{EF} 异常增大,Th/U比值纵向上长7最小,V/Cr、V/(V + Ni)比值在纵向上最大等。长7期之后环境向还原性减弱的方向发展。

3) 古气候。纸坊组Sr/Cu比值平均8.93,到长10段明显减小到6.70,Rb/Sr值由平均0.40快速增长至0.81,指示气候由半干旱-干旱向半潮湿转变,长10—长8期气候进一步向湿润发展。长8期与长7期之间再次存在明显的变化,纵向上长7段Sr/Cu比值最小,Rb/Sr比值较大,长7段的C值较上下邻层也明显增大,表明气候在长7期达到最湿润的阶段。沉积物的粒度最细,沉积速率慢,黏土与稀土元素接触时间延长,致REE总量最高。

表2 鄂尔多斯盆地西南地区延长组地球化学气候环境指标

Tab.2 Geochemical indicators of climate environmental, Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin

地层 单元	Sr/Ba	Th/U	Ni/Co	V/Cr	V/ (V + Ni)	Sr/Cu	Rb/Sr	Ca/ (Ca + Fe)	U _{EF}	Mo _{EF}	C 值	ΣREE
长 6	0.22	4.08	2.10	1.48	0.76	3.04	1.53	0.56	35.84	87.07	0.75	194.52
长 7	0.29	2.60	1.90	2.40	0.80	3.00	1.10	0.27	21.80	45.60	1.17	249.26
长 8	0.68	3.33	2.22	1.29	0.74	5.07	0.97	0.31	1.38	1.02	0.74	178.00
长 9	0.37	2.99	2.26	1.67	0.74	6.61	0.71	0.15	1.49	1.25	0.76	192.97
长 10	0.38	2.96	2.61	1.46	0.73	6.70	0.81	0.14	1.60	1.42	0.72	195.01
纸坊组	0.69	6.13	2.13	1.14	0.73	8.93	0.40	0.24	/	/	/	232.22

5 结论

1) 长 10 期为强烈沉降、初始成盆期。长 10 段沉积期发生了显著的沉降作用,沉降中心位于盆地西南环县—镇原—正宁一带,不对称性显著,快速充填厚度巨大。虽然沉降幅度巨大,但碎屑物质的补偿-过补偿供屑,使得长 10 期未出现深湖沉积。

2) 长 10 期为台-盆发展转换关键期。长 10 的沉降作用,结束了晚古生代稳定的地台性质沉积,开始了内陆盆地演化阶段,造山带构造活动影响下的台-盆转化与盆地演化在碎屑沉积物的成熟度、供屑原岩特征等方面均留下了示踪。

3) 长 10—长 8 段构成了延长组下部沉降-充填旋回。长 10 段为构造控制下构造沉降,沉降中心巨厚的粗碎屑快速沉积;长 9 段、长 8 段是构造平稳阶段气候控制为主的、粒度相对较细的稳定沉积。总体上长 10—长 8 段沉积物具有向上变细的特点。

4) 长 10 期为重要的气候转折期。长 10 段沉积期结束了二叠纪以来长期的干旱炎热的气候,经历了半干旱、半潮湿向温暖湿润气候的转变。

参考文献

[1] 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989.

[2] 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, 80(5): 617-638.

LIU C Y, ZHAO H G, GUI X J, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.

[3] 何登发. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 24-59.

HE D F. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydro-carbon occurrence[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 24-59.

[4] 邓秀芹, 张文选, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地中: 上三叠统沉积充填特征与延长组低品位含油气系统的关系[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 622-632.

DENG X Q, ZHANG W X, LI W H, et al. The relationship between depositional filling architecture and the low grade petroleum system, Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 622-632.

[5] 邓秀芹, 姚泾利, 胡喜锋, 等. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透岩性油藏成藏流体动力系统特征及其意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 1044-1051.

DENG X Q, YAO J L, HU X F, et al. Characteristics and geological significance of hydrodynamic system on ultra-low permeability reservoir of Yanchang formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 1044-1051.

[6] 尚婷, 王斌, 杨庆坤, 等. 孔隙演化定量分析及在盆地模拟中的应用: 以鄂尔多斯盆地合水地区长 8 油层为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023, 53(5): 843-846.

SHANG T, WANG B, YANG Q K, et al. Quantitative analysis of pore evolution and its application to basin-simulation: A case from Chang 8 reservoir in Heshui Area, Ordos Basin, NW China. [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2023, 53(5): 843-846.

[7] 王秀娟, 陈冬霞, 郭文杰, 等. 拗陷湖盆“古湖岸线”“古深湖线”位置判别方法: 以鄂尔多斯盆地上三叠

- 统延长组长6油层组为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 495-507.
- WANG X J, CHEN D X, GUO W J, et al. Location discrimination methods of "ancient lake shoreline" and "ancient deep lake line" in continental lacustrine basin: Taking Chang 6 layers of Yanchang Formation in Ordos Basin as an example[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 495-507.
- [8] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 中国地质科学院院报, 1984, 9: 31-34.
- REN J S. The Indosinian orogeny and its significance in the tectonic evolution of China[J]. Journal of Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 9: 31-34.
- [9] 卢欣祥, 李明立, 王卫, 等. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 2008, 27(6): 762-773.
- LU X X, LI M L, WANG W, et al. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(6): 762-773.
- [10] 张义平, 陈宣华, 张进, 等. 印支运动在鄂尔多斯盆地和四川盆地启动时间的讨论: 来自生长地层的证据[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1021-1038.
- ZHANG Y P, CHEN X H, ZHANG J, et al. Discussion on the initial timing of the Indosinian movement in the Ordos Basin and the Sichuan basin: Constraints from growth strata evidence[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1021-1038.
- [11] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(3): 193-200.
- ZHANG G W, MENG Q R, YU Z P, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen[J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 193-200.
- [12] 邓秀芹, 李文厚, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1089-1096.
- DENG X Q, LI W H, LIU X S, et al. Discussion on the stratigraphic boundary between Middle Triassic and Upper Triassic[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1089-1096.
- [13] ZHU R K, CUI J W, DENG S H, et al. High-precision dating and geological significance of Chang 7 tuff zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in central China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93(6): 1823-1834.
- [14] 何自新, 杨华, 袁效奇. 鄂尔多斯盆地地质剖面图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [15] 李文厚, 陈强, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地野外剖面沉积相图集[M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- [16] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 443-455.
- DENG X Q, FU J H, YAO J L, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 443-455.
- [17] 王子野, 毛治国, 袁选俊, 等. 鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长9段事件沉积类型、特征及地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 516-529.
- WANG Z Y, MAO Z G, YUAN X J, et al. Types, characteristics and geological significance of event deposits of Chang9 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 516-529.
- [18] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1121-1135.
- ZHANG G W, DONG Y P, LAI S C, et al. The formation and evolution of the Mianlue ocean in the Mianlue structural zone and the Mianlue suture zone on the southern margin of the Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Science in China (Series D), 2003, 33(12): 1121-1135.
- [19] 王晓霞, 王涛, 张成立. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1109-1125.
- WANG X X, WANG T, ZHANG C L. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 45(8): 1109-1125.
- [20] 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 304-316.
- ZHANG C L, WANG T, WANG X X. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 304-316.
- [21] WANG X X, WANG T, ZHANG C L. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72: 129-151.

- [22] DONG Y P, LIU X M, ZHANG G W, et al. Triassic diorites and granitoids in the Foping area: Constraints on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 123-142.
- [23] 李皓东, 周建波, 李功宇, 等. 南天山—北山—索伦—长春缝合带的性质与演化[J]. *地质论评*, 2022, 68(3): 797-816.
- LI H D, ZHOU J B, LI G Y, et al. Nature and evolution of the South Tianshan mountains-Beishan Mountains-Solonker-Changchun Suture[J]. *Geological Review*, 2022, 68(3): 797-816.
- [24] JIAN P, LIU D Y, KRÖNER A, et al. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived central Asian orogenic belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth[J]. *Lithos*, 2008, 101(3): 233-259.
- [25] 邓秀芹, 楚美娟, 王龙, 等. 中晚三叠世鄂尔多斯盆地两期沉降及其形成机制[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 501-512.
- DENG X Q, CHU M J, WANG L, et al. Two stages of subsidence and its formation mechanisms in Mid-Late Triassic Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 501-512.
- [26] 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化[J]. *陕西地质*, 1997, 15(2): 1-14.
- ZHANG G W, DONG Y P, YAO A P. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling Orogenic belt[J]. *Geology of Shaanxi*, 1997, 15(2): 1-14.
- [27] DICKINSON W R. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. *Geology Society of America Bull*, 1983, 94(2): 222-235.
- [28] 陕西省地质调查院. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [29] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. *同济大学学报*, 1979, 7(2): 51-60.
- WANG Y Y, GUO W Y, ZHANG G D. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu depression, Kiangdu province [J]. *Journal of Tongji University*, 1979, 7(2): 51-60.
- [30] 雷卞军, 阙洪培, 胡宁, 等. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 2002, 22(2): 70-79.
- LEI B J, QUE H P, HU N, et al. Geochemistry and sedimentary environments of the Palaeozoic siliceous-rocks in western Hubei[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2002, 22(2): 70-79.
- [31] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 缺氧环境及地球化学判识标志的探讨: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2004(2): 365-372.
- TONGER, LIU W H, XU Y C, et al. The Discussion on anoxic environments and its geochemical identifying indices[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004(2): 365-372.
- [32] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone Wabaunsee county Kansas U. S. A[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99: 65-82.
- [33] ALBERDI G M, TOCCO R. Trace metals and organic geochemistry of the Machiques Member (Aptian-Albian) and La Luna Formation (Cenomanian-Campanian) Venezuela [J]. *Chemical Geology*, 1999, 160: 19-38.
- [34] 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等. 异常高有机质沉积富集过程与元素地球化学特征[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4): 931-948.
- QIU Z, WEI H Y, LIU H L, et al. Accumulation of sediments with extraordinary high organic matter content: Insight gained through geochemical characterization of inductive elements [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4): 931-948.
- [35] 刘翰林, 邹才能, 邱振, 等. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制: 以鄂尔多斯盆地长7段为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1810-1829.
- LIU H L, ZOU C N, QIU Z, et al. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales: A case study of the Chang 7 member in the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1810-1829.

(编辑 邵煜)