

鄂尔多斯盆地西缘石沟驿向斜的形成演化 与致密砂岩气成藏模式

何登发¹,孙方源¹,翟咏荷¹,包洪平²,马静辉¹,开百泽¹

[1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2. 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:向斜构造是一种基本的褶皱样式,是煤层气、致密砂岩气、页岩气、盐类以及铀矿等矿产资源赋存的主要场所之一。研究向斜的形成机制将为剖析褶皱冲断带的构造演化及矿产资源的分布特征奠定重要基础。以鄂尔多斯盆地西缘的石沟驿向斜为例,应用新的高分辨率地震剖面与深探井资料,解析向斜的深层地质结构及其成因机制。研究表明,石沟驿向斜处于鄂尔多斯盆地西缘北段与中段的过渡部位,形成于中侏罗世末期—晚侏罗世,是在以羊虎沟组—山西组含煤岩系为滑脱层形成的叠瓦冲断系统基础上,下伏的早期阶状正断层组合反转形成的大型构造楔的上层褶皱体系;惠安堡断层为一正反转断层,在该区起构造—沉积分划作用;石沟驿向斜及邻区的上石炭统一二叠系的致密砂岩气具有自生、自储、自封闭成因,于早白垩世成藏。石沟驿向斜的形成期早于油气成藏高峰期,天然气资源丰富,有较好的勘探前景。

关键词:致密砂岩气;构造楔;褶皱样式;石沟驿向斜;鄂尔多斯盆地西缘

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Syncline development and tight sandstone gas accumulation model in Shigouyi area at western margin of Ordos Basin

He Dengfa¹, Sun Fangyuan¹, Zhai Yonghe¹, Bao Hongping², Ma Jinghui¹, Kai Baize¹

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Development Research Institute under Changqing Oilfield Branch, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China]

Abstract: Syncline as a basic type of folds is one of the main structures hosting coal-bed gas, tight gas, shale gas, salt and gypsum, and uranium, etc. The study on the formation mechanism of syncline means significantly to analyzing the tectonic evolution and resource distribution in fold zones. The deep structure and forming mechanism of the syncline in Shigouyi area at the western margin of Ordos Basin were analyzed based on recent high-resolution seismic profiles and deep borehole data. It is shown that the syncline was formed during the end of the Middle Jurassic and Late Jurassic and located at the transitional area between the northern and central segments of the western foreland margin of the Ordos Basin. Based upon the large-scale imbricate thrust system detached along the coal measures of the Upper Carboniferous Yanghugou Formation and the Lower Permian Shaanxi Formation, the syncline is the upper folding system of a large-scale tectonic wedge underthrust by underlying earlier domino-style normal fault blocks. A positive reverse fault named Hui'anpu in the area can be used to define the tectonic and depositional domains. The Upper Carboniferous and Lower Permian tight sandstones in the syncline and adjacent areas were the trinity of source rocks, reservoirs and cap-rocks for gas during the Early Cretaceous. The syncline, coupled with the fact that it was formed prior to gas pooling peak period, is therefore considered rich in gas and a good exploration target.

Key words: tight sandstone gas, tectonic wedge, folding style, Shigouyi syncline, western margin of Ordos Basin

向斜是一种基本的褶皱样式,在造山带、盆—山过渡带与盆地内部较为常见。向斜可以在挤压、拉张与

收稿日期:2020-05-16;修订日期:2020-12-09。

第一作者简介:何登发(1967—),男,教授、博士生导师,构造地质与油气地质。E-mail:hedengfa282@263.net。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001-001);国家重点研发计划项目(2017YFC0601405);国家自然科学基金重点项目(41430316)。

走滑等多种构造环境下形成^[1-3]。但相对于背斜而言,对其成因与演化的认识程度较低。在断层相关褶皱理论中,向斜的轴面与下伏断层的转折点(fault-bend)或构造楔的楔端点(wedge-tip)相连^[1,4],断层面上盘的运动滑移经过此处时被褶皱,因此向斜轴面为活动轴面(active axial surface),向斜也就成为重要的运动学标志之一。研究向斜的形成机制是解析褶皱带演化与圈闭发育的重要窗口之一。

向斜也是油、气、煤、盐类、稀土和铀矿等多种矿产资源赋存的重要场所^[5-11],尤其在煤层气、致密砂岩气、页岩气以及砂岩型铀矿的研究中已逐渐成为热点^[7,9,12-13]。剖析其形成的时期、变形机制以及褶皱调节断层、裂缝系统在油气运移、聚集与保存中的作用具有提高勘探成效的重要意义^[14-15]。

鄂尔多斯盆地西缘的石沟驿向斜是主要的煤矿生产基地^[16],在与其毗邻的刘家庄背斜发现了鄂尔多斯盆地的首个气田^[17],在相邻的胜利井、大水坑和马家滩等地发现了一系列与逆冲断层相关的油(气)田,表明该区具有丰富的油气资源^[17-19]。对于石沟驿向斜,因其地表为新生界覆盖,出露零星,或因早期地震资料品质很低,对其地下地质结构难以清晰刻画^[20-21],关于其成因、演化及构造对油气、煤、铀矿等矿产的富集机制的研究程度较低^[13,16,22-28],制约了该区矿产资源勘探的进一步拓展。

本文利用2018年在该区采集的高分辨率地震资料以及近年新的钻探资料,在地震地质层位精细标定与追踪的基础上,开展系统的构造解释,利用断层相关褶皱作用原理与方法开展构造成因分析,从构造形成机制出发探讨天然气聚集的时、空匹配关系,建立天然气的成藏模式,可望对该区的油气及其他矿产资源的勘探提供参考依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地西缘处于中国南北构造带的北段^[17,20-21,29-34],石沟驿向斜处于其中部地区,NNE-SSW向的桌子山-贺兰山构造带的前缘在此与NNW-NNW向的六盘山弧形构造带的前缘相接与过渡(图1a)^[35-44]。六盘山弧形构造带由香山、烟筒山-黑鹰弯山、牛首山-罗山等冲断席构成,新生代期间自SW向NE逆冲推覆,牛首山-罗山-云雾山断裂带构成其东侧与鄂尔多斯盆地之间的界线;贺兰山为燕山期形成的陆内挤压造山带^[33,45-46],新生代其核部垮塌形成银川地堑,其东侧冲断隆起的残余部分以陶

乐-灵武逆冲断裂与鄂尔多斯盆地相接。

鄂尔多斯盆地西缘中段自西向东依次发育罗山、韦州、石沟驿、烟墩山、海子井与马家滩等6个逆冲席^[28,47-50],以惠安堡-沙井子断裂为界,其东侧的烟墩山、海子井与马家滩3个逆冲席为以上石炭统一下二叠统含煤岩系煤层、泥岩等为滑脱层的浅层滑脱构造变形系统,而其西侧的3个冲断席则改造了鄂尔多斯地块西缘古生代的伸展边缘,具有早期正断层、后期正反转特征^[28]。石沟驿冲断席呈向斜形态,夹持于东侧的惠安堡-沙井子断裂与西侧的青龙山断裂之间(图1b)。

石沟驿向斜主体由三叠系与侏罗系组成,向斜西南端有上石炭统、二叠系零星出露。在向斜内部的忠1、忠6、发参1和发东1等井钻揭上述地层。向南至青龙山一带蓟县系、寒武系、下奥陶统自东向西依次出露,构成西倾东冲的推覆体;大、小罗山一带出露中奥陶统,构成东冲的冲断推覆体。

石沟驿向斜所在的鄂尔多斯盆地西缘中段地区经历了4个构造演化旋回:1)中元古代伸展裂陷,形成向盆地内部延伸的宁-蒙裂陷带,新元古代则隆升剥蚀;2)寒武纪一中奥陶世裂陷,形成向西阶梯状下掉的边缘构造带,晚奥陶世挤压反转,志留纪一早石炭世隆升;3)中-晚石炭世再次伸展裂陷,二叠纪一中侏罗世拗陷^[51],期间三叠纪末期有长短不一的隆升事件^[45];晚侏罗世挤压造山^[52-54];4)早白垩世区域伸展、拗陷,晚白垩世挤压反转,古-始新世隆升剥蚀;5)渐新世-中新世拗陷,上新世-第四纪隆升剥蚀。在寒武系底界、上石炭统底界、上侏罗统底界、下白垩统底界、渐新统底界、中新统底界、第四系底界发育7个区域性不整合面。石沟驿向斜主要形成于早燕山期,并在晚燕山期、喜马拉雅期遭受了不同程度的改造。NW-NNW向的石沟驿向斜推覆体掩冲于NW向的海子井冲断席与磁窑堡一带的NE向的刘家庄、胜利井背斜之上。

2 石沟驿向斜的形成与演化

2.1 石沟驿向斜的地层特征

该地区地表出露三叠系、侏罗系与白垩系,区内及邻区的忠1、忠探1、发参1、发东1、驿探1、惠探1、苦深1、古探1、梁探1、天深1以及芦参1等井钻遇长城系、蓟县系、寒武-奥陶系、石炭-二叠系及中生界。根据钻井岩性、生物地层及地震地质层位的精细标定建立了该区的地层系统。

2.1.1 地震地质层位标定

依据区域内及相邻的单井地震合成记录标定地震地质层位,再在区域内进行地震层位追踪与解释。其中,侏罗系的次级地震层序依据延133、延163井的地震标定成果;三叠系及其以下(T、P、C、O、Є、Jx、Ch)的地震次级层序依据忠1、忠探1、天深1、古探1、惠探1及芦参1等井的地震层位标定成果并据区域连井追踪对比延入研究区。

2.1.2 地层系统

石沟驿地区内自下而上可划分为基底岩系、长城-蓟县系、寒武-奥陶系、石炭-二叠系、三叠系-白垩系、新生界等6个构造-地层层序(图2)。

1) 基底岩系

对应一套杂乱的地震反射波组,鄂尔多斯盆地包括泛华北古陆的结晶基底是由多个地体拼贴、固结而成,其固结时期在古元古代末的吕梁-中条运动时期。

2) 中元古界

长城系对应一套中弱振幅断续、局部杂乱反射;与上覆蓟县系呈低角度不整合,与下伏古元古界或太古界之间接触关系不太清晰,在贺兰山一带长城系与下伏太古界多呈角度不整合,推测区内二者呈低角度不整合。古深1井、天深1井等揭示长城系为滨岸-滨海潮上带的石英砂岩,局部夹薄层泥岩、泥质、云质、灰质的云、灰岩;向西,泥、灰质增多、增厚。在长城系沉积时,该区处于甘陕-宁蒙裂陷带之间的过渡区。

蓟县系为一套弱连续、断续、局部杂乱的反射波组,向东减薄,与上覆寒武系呈平行不整合,与下伏长城系呈低角度不整合。岩性、岩相与青龙山一带的露头类似,为滨海潮上带云坪、灰云坪环境下的灰、灰白色薄-中厚层状含硅质条带、燧石条带白云岩、结晶白云岩,底部可能发育有滨岸相石英砂岩、角砾岩等(图2)。

3) 下古生界寒武系和奥陶系

寒武系在地震剖面上具有低频、强振幅、连续断续、局部杂乱反射特征。为碳酸盐岩台地与台缘带的沉积,下统以砂岩为主;中统向上为薄-中厚层状灰岩,见多层鲕粒灰岩,以张夏组最为发育,具有台缘高能环境下粒屑滩的沉积特征;上统三山子组以白云岩为主。

奥陶系在地震剖面上对应一套中低频、中弱振幅、弱连续、断续反射波组,局部杂乱或丘状反射。下统的中下部为深灰色、灰黑色、灰色、褐灰色结晶(岩化)白云岩,顶部为深灰色、灰黑色泥晶灰岩,局部存在粒屑、

生屑滩沉积。中统下部为深灰色、灰黑色钙质泥岩、泥岩、泥灰岩、砂粒屑灰岩;上部为深水陆棚相灰色、浅灰色灰质砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与泥、页岩、砂质泥岩不等厚互层;奥陶系整体呈碳酸盐岩台地-浅海斜坡碎屑岩的沉积演化特征,各组间均呈整合接触。

4) 上古生界石炭系和二叠系

上石炭统本溪组(C_2bx)或羊虎沟组(C_2y):石炭系对应一套中低频、中振幅、弱连续、断续反射,向东连续性变差,与下伏奥陶系在剖面的中西段呈角度不整合,向东呈低角度或假整合接触。石炭系羊虎沟组(C_2y)在石沟驿向斜内自东向西增厚,灰黑色泥岩为主,与深灰色细-粉砂岩构成不等厚互层沉积,上部见多层煤岩;向东减薄[称本溪组(C_2bx)],厚度仅几十~十几米^[55]。

二叠系自下而上可划分为下统太原组(P_1ty)、山西组(P_1s)、中统石盒子组(P_2sh)和上统石千峰组(P_3s),对应一套中弱振幅、断续反射波组,底部为一套中强振幅、连续反射。

下二叠统太原组(P_1ty)、山西组(P_1s)为海陆交互相的碎屑岩含煤建造。太原组(P_1ty)岩性为灰黑色、深灰色泥岩夹灰色细砂岩、砂质泥岩;下部为灰、深灰色中砂岩,粉、细砂岩夹灰黑色炭质泥岩薄层及煤层;山西组(P_1s)岩性为深灰色、灰色泥岩、砂质泥岩与中砂岩、细砂岩不等厚互层,下部夹煤层。

中二叠统石盒子组(P_2sh)下部为灰色-深灰色中细砂岩与深灰色泥岩、砂质泥岩;中上部为杂色砂质泥岩、细砂岩构成不等厚互层,为滨湖沼泽相-河流相沉积。

上二叠统石千峰组(P_3s)上部为棕红、褐棕色砂质泥岩、泥岩夹粉砂岩;中下部为褐棕色、浅棕色细、粉砂岩与褐色、褐棕色砂质泥岩不等厚互层,为河流相河道、河漫滩亚相沉积(图2)。

5) 中生界

在地震剖面上,三叠系下部为断续或杂乱反射,中上部对应一套中弱振幅、连续-弱连续的相位大致平行的反射波组。其中,延长组(T_3yc)长7段的深湖相深灰色、灰黑色、黑色的泥岩、泥页岩、炭质泥页岩、油页岩呈中强振幅连续反射,局部存在由东向西的似上超的杂乱反射。三叠系为一套湖进-水退沉积。由下至上,刘家沟组(T_1l)为厚层状褐色、深灰色细砂岩夹薄层状深灰色、棕红色砂质泥岩;和尚沟组(T_1h)下部为杂色泥质砂岩,中部为棕红色泥岩,上部为灰色细砂岩;纸坊组(T_2z)为灰色细砂岩与砂质泥岩、泥岩不等厚互层;延长组(T_3yc)为灰黑色、深灰色泥岩、页岩、砂

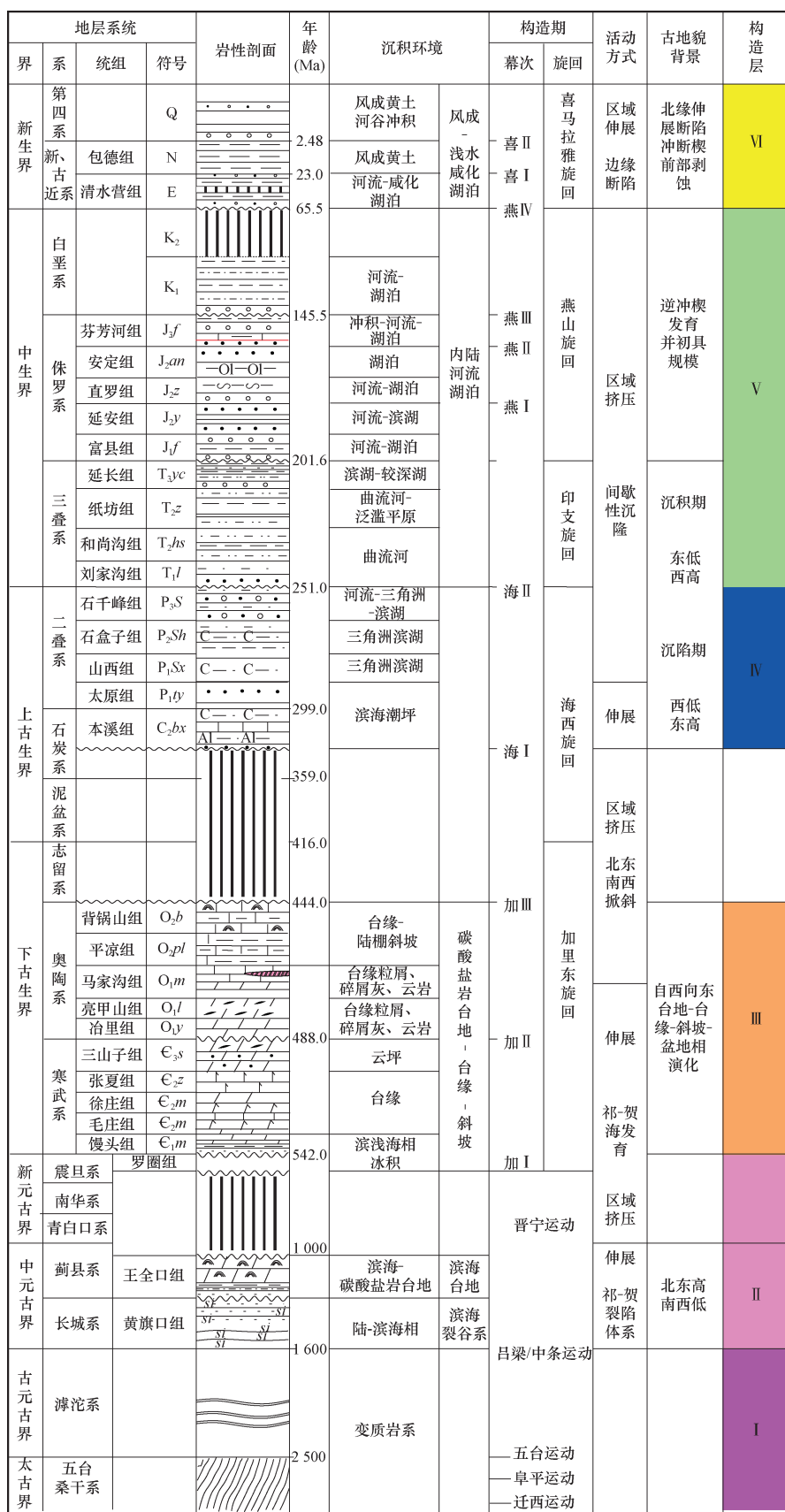


图2 石沟驿-惠安堡地区地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Shigouyi-Hui'anpu areas

质泥岩、泥质砂岩、细砂岩不等厚互层,顶部砂质增多增厚(图2)。

侏罗系缺失下统,中统发育,上统零星分布。地震剖面上,延安组(J_2y)对应一套连续、弱连续的相位大致平行的反射波组,直罗组(J_2z)对应一套断续或杂乱反射。延安组(J_2y)以深灰色泥岩为主,与细砂岩构成不等厚互层,含多层煤;直罗组(J_2z)下部顶底为含砾粗砂岩,中部为厚18 m的灰黑色泥岩,向上灰色泥岩与细砂岩构成不等厚互层;安定组(J_2a)中下部为棕红色泥岩、局部夹细砂岩,上部为棕红色泥岩、砂岩不等厚互层(图2)。

白垩系保存有下统,统称为志丹群,地震剖面上层序底部见下超反射,逐渐过渡为进积型的上超反射;顶部存在具有生长地层特征的低角度的上超反射。为棕红色细砂岩夹泥岩,向上泥岩增厚。

6) 新生界总体较薄。在惠安堡—海子井一带发育清水营组(E_3q),为粉细砂岩夹泥岩,区域性不整合于下伏地层之上;其上为新近系棕红色砂岩夹泥岩,分布于石沟驿向斜西侧;第四系为黄色亚粘土夹黄褐色、浅棕色砂质粘土及砂砾石层,分布于向斜内低洼地带。

2.2 石沟驿向斜的构造特征

2.2.1 地面地质特征

石沟驿向斜呈NW—NNW走向,长约52 km,宽约26 km,长宽比为2:1。其西北端为陶乐—灵武断层所截,隐伏于第四系之下;东南端在发东1井一带上翘(图1b),为渐新统与第四系不整合覆盖,向南与青龙山冲断席斜接;西接牛首山、大、小罗山冲断席,为中新统所不整合;东侧南段掩冲于海子井、烟墩山冲断席之上,北段则掩冲在由刘家庄背斜(刘庆1、2井钻遇)、磁窑堡背斜(驾探1井、驾参1井钻遇)等NNE向的背斜、向斜构成的褶皱系之上。石沟驿向斜与刘家庄背斜呈近垂直相交。

石沟驿向斜为一个大型宽缓向斜,轴面倾向北东,西南翼较陡,倾角介于 $45^\circ \sim 60^\circ$,北东翼较缓,倾角在 25° 左右,核部出露侏罗系,两翼主要出露三叠系(图1c);剖面AB西南段在三叠系内发育5排逆断层,长3~6 km,逆断层倾向北东,运动指向北西,倾角在 $45^\circ \sim 60^\circ$,这些逆断层向下滑脱终止于二叠系底部,表现为向斜外冲断层(out-of-syncline fault)特征,即在向斜形成过程中调节位移而形成的褶皱调节断层,指示向斜形成时有自东向西挤压的相对位移。

2.2.2 地震构造解释与变形样式

通过对区域内2018年采集的高精度地震剖面进

行综合解释,对石沟驿向斜的构造形态有了整体的认识。下面选择东西向的H186503+03251剖面(CD剖面)(图3)进行解析。

1) 以惠安堡(F_2)断裂为界,剖面分为东、西两段。西段由青龙山冲断席(F_1)、石沟驿向斜冲断席构成;东段由烟墩山、海子井、马家滩3个冲断席及天环向斜组成。

2) 东段以本溪组、山西组含煤岩系为界,分为上、下两套构造变形系统。本溪组(对应西段的羊虎沟组)在东段厚度减薄,起滑脱层作用的主要是山西组(P_1s)煤层。烟墩山断裂(F_3)、海子井断裂(F_4)与马家滩断裂(F_5)在山西组发生滑脱;前两者自西向东逆冲,而后者则自东向西冲断,海子井断裂(F_4)与马家滩断裂(F_5)之间构成I型三角带。烟墩山冲断席为背斜前翼发生突破的断层传播褶皱,断层端点向上突破至地表,在背斜后翼向斜部位也发育一反冲断层,与主断层一起形成冲起(pop-up)(或称为突发)构造,石油上俗称背冲断块。海子井冲断席也为断层传播褶皱背斜,但在西翼发育2条逆冲断层,使其复杂化,同样形成了冲起构造。这2个冲断席实际上也具有前端背斜、后端向斜的构造形态。马家滩反冲席前翼窄、后翼宽,后翼地层倾角较马家滩断层的倾角缓得多,从构造形态上指示其为一剪切断层转折褶皱背斜(shear fault-bend fold),发生剪切滑脱的层在山西组一下石盒子组,马家滩断层在后期沿背斜前翼发生突破,但从图3来看,突破位移量很小。

东段的下部构造变形系统为太古界—奥陶系,自西向东发育5条正断层,左侧3条构成西倾阶梯状正断层,右侧2条正断层构成地堑形态。这些正断层主要截切中元古界长城系与蓟县系,指示中元古代它们(及其西段的惠安堡等断层)的伸展活动。元古界地层厚度在断层下降盘增厚。

东段的另一个重要特点是以马家滩为界,以东地层水平,以西基底—三叠系向西倾斜,清楚地显示出受西侧早期拉张下掉、后期挤压挠曲作用的影响。马家滩地区所处部位表现为枢纽转折带。

3) 西段以羊虎沟组为界,也具有上、下分层构造变形特征。上层变形系统包括青龙山、石沟驿2个冲断席。青龙山冲断席在青龙山一带沿蓟县系底部滑脱,冲断至地表,蓟县系、寒武系、下奥陶统为冲断系统,但在石沟驿一带,滑脱层则在羊虎沟组,明显变浅。石沟驿冲断席的地层组成为上石炭统羊虎沟组—侏罗系,中侏罗统直罗组(J_2z)构成向斜核部;向斜核部西翼发育2条西冲逆断层,断层上陡下缓,在延长组内部

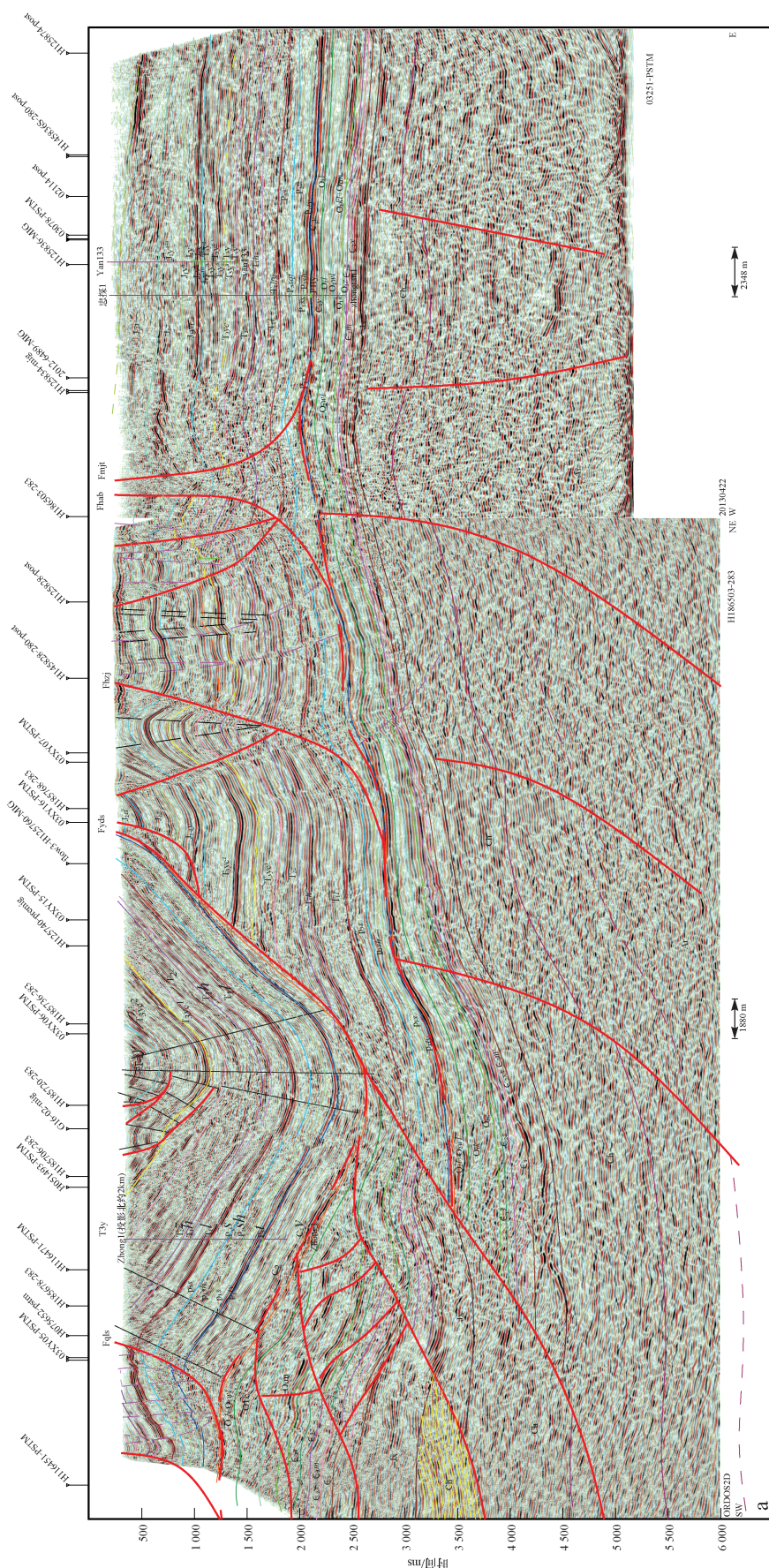
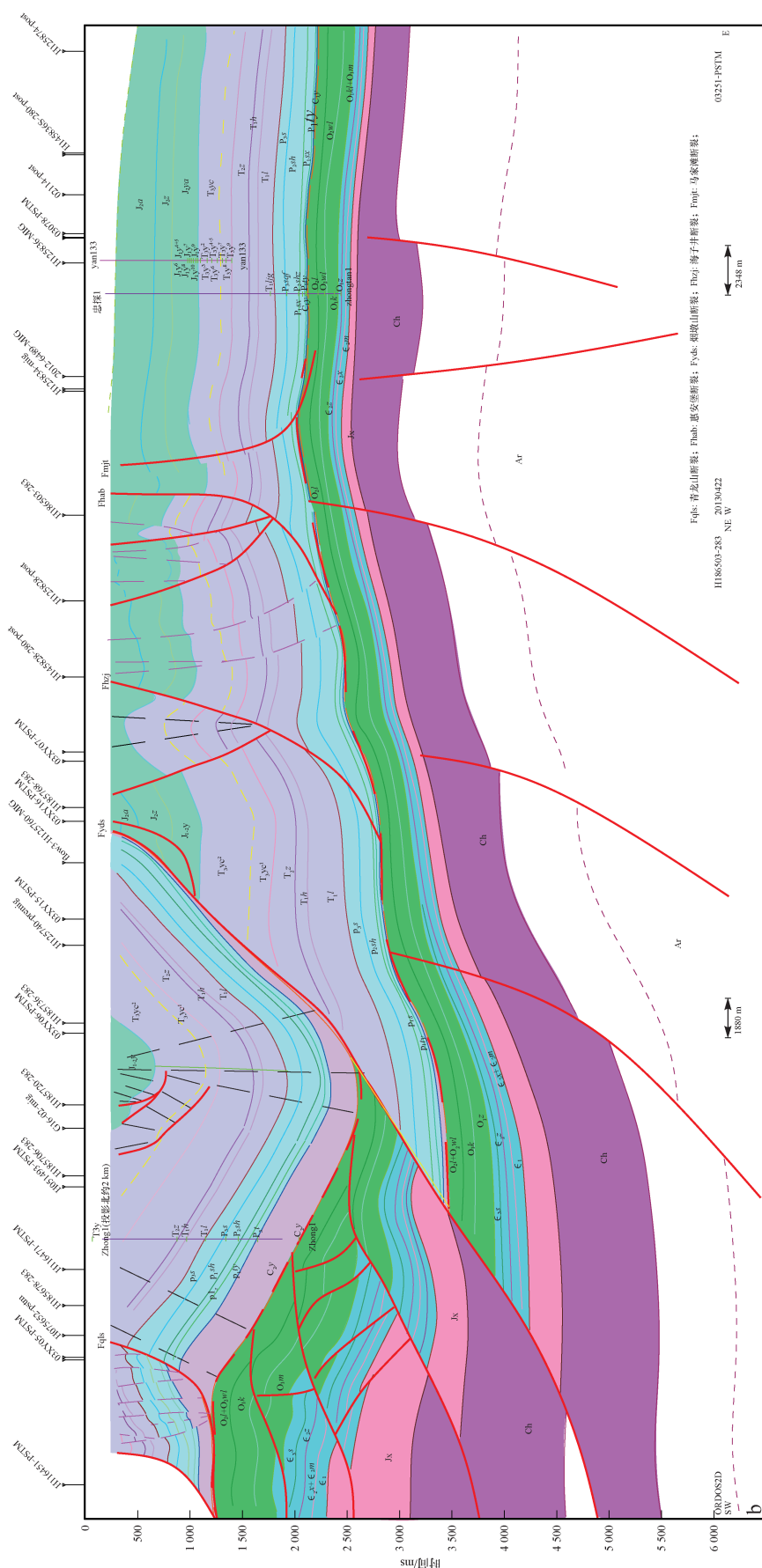


图3 石沟驿向斜过忠1—忠探1井东西向地震地质解释剖面(a、b)(剖面位置见图1CD)

Fig.3 EW-trending seismic section interpretation (a) and line-drawing (b) along Wells Zhong 1 to Zhongtan 1 in the Shigouyi syncline (see Fig.1 CD for the section location)

Fqls: 青龙山断裂; Fhab: 惠安堡断裂; Fyds: 烟墩山断裂; Fhzj: 海子井断裂; Fmjt: 马家滩断裂;



续图3 石沟驿向斜过忠1—忠探1井东西向地震地质解释剖面(a, b)(剖面位置见图1CD)

Fig.3 EW-trending seismic section interpretation (a) and line-drawing (b) along Wells Zhong 1 to Zhongtian 1 in the Shigouyi syncline (see Fig.1 CD for the section location)

F₁: 青龙山断裂; F₂: 惠安堡断裂; F₃: 烟墩山断裂; F₄: 海子井断裂; F₅: 马家滩断裂

或底部滑脱,为向斜形成时的调节断层。羊虎沟组向西厚度增大,向东至惠安堡断层上盘减薄尖灭,即惠安堡断层上段的上盘为羊虎沟组—侏罗系。西段的下部变形系统为由长城系—奥陶系组成的4个冲断席,长城系、蓟县系、寒武系和奥陶系都具有向西厚度增大的趋势,这些冲断席以羊虎沟组底部泥岩为顶板、以基底内部韧性剪切层为底板构成双重构造,冲断席由东向西逐步抬高,也将石沟驿向斜区西翼逐步抬高。

由上所述,石沟驿向斜及邻区具有分层构造变形特点。从图3可见,惠安堡断层下段截切太古界—奥陶系,断距较小;但上段断距明显增大。形成这种现象的原因将在下文予以讨论。从构造样式上来看,石沟驿向斜之下发育双重构造,它们共同组成了构造楔变形系统。

2.3 石沟驿向斜的形成时间

区域性地层不整合面揭示了该区所经历的主要构造变形期次:1)上石炭统与其下地层的不整合面,如在发参1井的西南侧可见二者的平行不整合接触,指示加里东期构造运动在该区的存在;2)上侏罗统芬芳河组砾岩与其下地层之间的低角度不整合,在石沟驿煤矿沿G211公路,芬芳河组砾岩近于水平,与下伏延安组、直罗组之间的交角为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ (图4a),芬芳河组砾岩在刘家庄背斜、磁窑堡背斜(胜利井气田所在)构成的褶皱带中处于向斜核部,呈NE走向(图1b);这一不整合面指示了燕山早期运动;3)刘家庄背斜、磁窑堡背斜为三叠系、侏罗系组成的背斜,在其西翼、北端、东南翼均为下白垩统砂砾岩不整合覆盖(图1b),指示了燕山中期运动;4)渐新统与下伏白垩系之间也为区

域性低角度不整合接触,沿S307公路桥附近,渐新统砾石层与下伏下白垩统之间的角度差为 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$,指示了燕山晚期运动;对这一期性质还有待于进一步研究,晚白垩世晚期或末期有隆升剥蚀历史,晚白垩世早期应有相当厚度的沉积,这从下白垩统的成岩程度可以推测出来;5)中新统(N_1h)、第四系不整合于下伏不同时代地层之上(图1b),在石沟驿向斜西翼可见到这些不整合的分布(图1b),但角度较缓,表明该区在喜马拉雅期处于隆升、剥蚀状态。

从石沟驿地区砂岩低温热年代学分析结果来看^[45-46,56-57],石沟驿地区在侏罗—白垩纪经历了4期隆升事件:第一期发生在 $165 \sim 141 \text{ Ma} \pm$,峰值年龄为 150 Ma ;第二期发生在 $115 \sim 113 \text{ Ma} \pm$,峰值年龄为 114 Ma ;第三期发生在 $100 \sim 81 \text{ Ma} \pm$,峰值年龄为 90 Ma ;第四期发生在 $66 \sim 59 \text{ Ma} \pm$,峰值年龄接近 63 Ma 。分别与上、中侏罗统之间的不整合面、早白垩世晚期隆升、晚白垩世晚期隆升与渐新统(或西缘南段始新统)底界不整合面对应。地质学与低温热年代学证据较为吻合,清楚地指示了晚侏罗世—早白垩世是该区强烈挤压构造活动时期,发生了强烈的陆内构造变形。石沟驿向斜形成于这一时期。

2.4 石沟驿向斜的构造演化与成因机制

2.4.1 构造演化

石沟驿地区的构造演化可划分为结晶基底形成期(吕梁构造旋回)、裂谷发育期(中元古代)、台缘斜坡—台地发育期(加里东构造旋回)、海—陆转换期(晚海西构造旋回)、冲断期(印支—燕山构造旋回)、调整期(喜马拉雅旋回)等6个演化阶段(图5)。

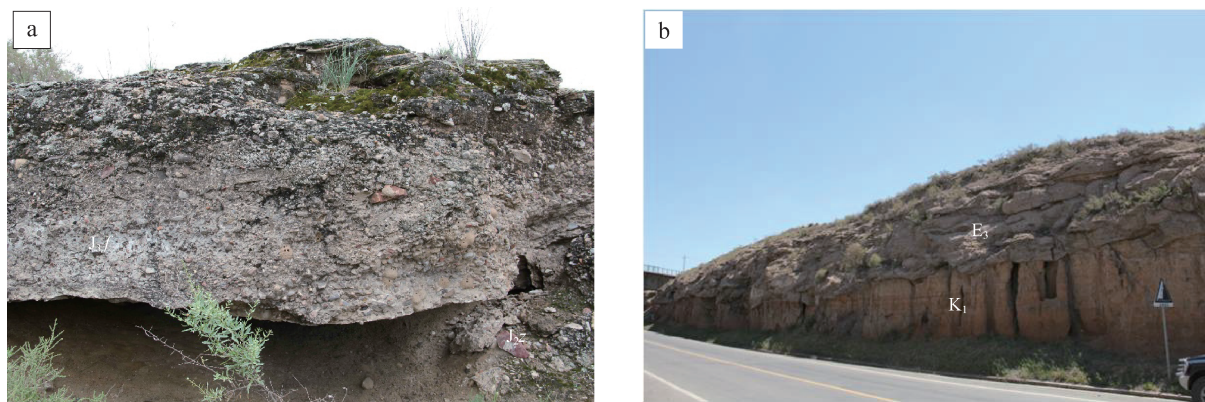


图4 石沟驿向斜及邻区地层角度不整合接触关系

Fig. 4 Angular unconformity contacts between sequences in the Shigouyi syncline and adjacent areas

a. 石沟驿煤矿, G211公路边上侏罗统芬芳河组砾岩角度不整合于中侏罗系直罗组之上,说明该地区褶皱变形时期为中侏罗世晚期;b. 沿S307公路桥附近($N38^{\circ}74'05''.785^{\circ}$, $E106^{\circ}31'55''.105^{\circ}$), 渐新统砾石层与下白垩统之间低角度不整合接触, 地层产状, $E_3: 256^{\circ} \angle 3^{\circ}$; $K_1: 239^{\circ} \angle 10^{\circ}$

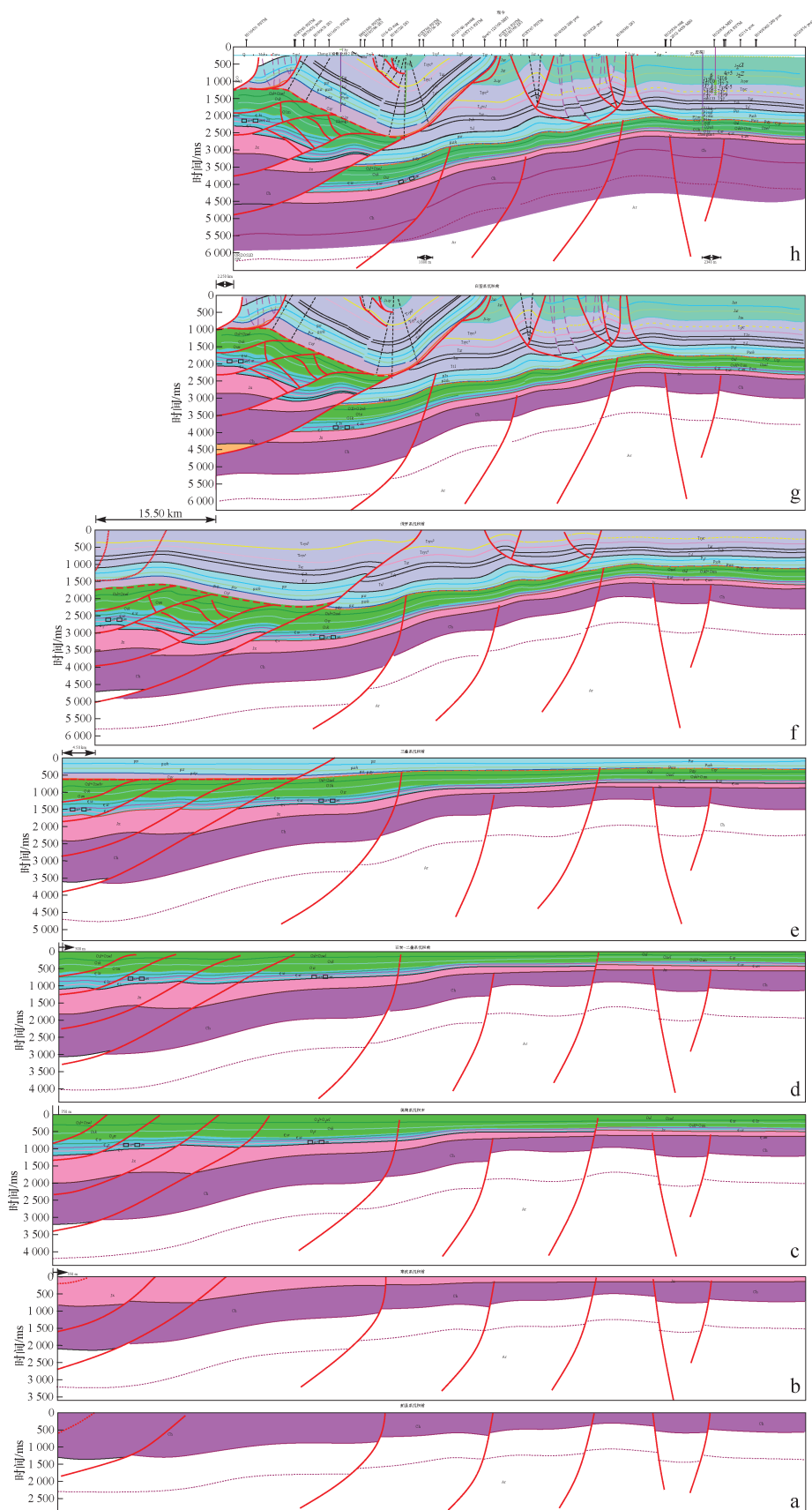


图5 石沟驿向斜东西向构造演化剖面

Fig. 5 EW-trending sections showing the tectonic evolution of the Shigouyi syncline

a. 裂谷期; b. 裂谷末期; c. 被动陆缘期; d. 回返期; e. 海陆转换期; f. 初始冲断期; g. 冲断活跃期; h. 调整期

1) 基底形成演化阶段

吕梁(或中条)运动(2 100 ~ 1850 Ma),规模大小不等的古陆块或微陆块拼贴、增生、固结,形成泛华北(克拉通)古陆。该区地处鄂尔多斯地块北部,基岩主要由太古宇贺兰山岩群、乌拉山岩群及古元古界的赵池沟岩群构成。

2) 裂谷发育期

中元古代(1 850 ~ 1 600 Ma),泛华北古陆裂解^[58],在鄂尔多斯盆地自北而南形成宁蒙、甘陕、秦晋3个呈NE走向的裂谷系。石沟驿地区介于宁蒙、甘陕裂谷系的过渡部位,同时也处于华北古陆与秦祁海的陆缘过渡带,区内东、西部之间断裂的产状、样式存在差异。在西段为断阶状,可见4~5条西倾的正断层,反映陆缘伸展正断裂的组合特征;东段则多呈堑、垒式断裂组合,显示陆内裂陷的特性(图3),自东向西沉积了厚度差异较大的长城系滨岸-滨海相碎屑岩夹薄层泥岩、云岩、灰岩沉积(图5a)。中元古代蓟县期伸展活动减弱,盆地具有拗陷性质,形成浅海相泥岩、云岩、灰岩、硅质岩沉积建造。新元古代,盆地周缘洋盆与裂谷相继关闭,鄂尔多斯地块及邻区处于挤压环境,致使长城系、蓟县系遭受剥蚀(图5b);石沟驿地区缺失新元古界。

3) 陆棚斜坡-台地边缘演化时期

元古代末期(约550 Ma),盆地南、西缘秦祁海发育,鄂尔多斯地块再次处于拉伸背景,发育形成了贺兰裂陷槽,该区处于裂陷槽东部断阶带边缘,受正断层活动强度的控制,这一边缘结构相对复杂。在此背景下发育了寒武-奥陶系的陆棚斜坡-台缘-台地相碳酸盐岩沉积建造,西侧含泥质成分相对高些;奥陶纪中晚期(克里摩里组、乌拉力克组、拉什仲组、公乌素组),区内接受较深水的泥岩、泥灰岩及泥质或碎屑、生屑灰岩沉积,是下古生界烃源岩较发育时期(图5c)。受正断层活动影响,断层下降盘发育深水沉积,上升盘在其肩部发生旋转,有高能滩相沉积(梁探1井钻遇),其东侧可有潟湖相沉积,再向东过渡为台地沉积。

在图5中,蓟县系沉积前剖面长96.450 km,至奥陶纪末剖面长97.0 km,伸展量约0.550 km,在该剖面范围内伸展率约0.57%。

石炭-二叠系沉积前剖面长96.250 km,与奥陶纪末相比,加里东晚期的构造缩短量为0.750 km,缩短率约0.77%。

4) 海陆转换期

大致从中奥陶世晚期开始,华北古板块周缘洋盆向华北克拉通地块之下俯冲,鄂尔多斯盆地及邻区整

体抬升遭受剥蚀,缺失上奥陶统一石炭统,其间经历约1.5亿年的沉积间断(图5d)。晚石炭世,贺兰裂陷槽再次发育,接受上石炭统羊虎沟组灰黑色泥岩、细粉砂岩沉积,东部接受本溪组泥岩、砂岩沉积,其中上部普遍含煤(图6)。忠1井以西发育海湾相;以东存在潟湖及潮坪沉积(图6a)。二叠纪早期延续石炭纪晚期沉积模式,但海水逐渐退出,逐渐向广覆型的冲积平原及河湖相沉积转化,发育三角洲沉积体系,本区以三角洲平原及前缘相为主(图6b)。海西晚期构造活动在盆地的表现较弱(图5e),物源来自北侧、西北侧,表明北部山系的发育。

5) 冲断期

初始冲断期。晚三叠世,处于相对稳定湖侵环境,发育上三叠统暗色泥岩或油页岩沉积;三叠纪晚期,古特提斯洋趋于关闭。鄂尔多斯地块区域抬升,阿拉善与鄂尔多斯地块之间可能存在相对位移^[36],所产生的挤压作用导致鄂尔多斯西缘逆冲带初始发育,在西缘有4.50 km的构造缩短量,致使三叠系被剥蚀及下侏罗统的缺失,但在盆地区影响较小(图5f),石沟驿地区出现侏罗系与三叠系之间的平行不整合。

冲断活跃期。燕山构造运动在盆地表现为两个沉降-隆升旋回,中侏罗世延安期沉积一套河流-湖泊相砂泥岩含煤沉积,是盆地的重要成煤期^[16];直罗组、安定组沉积时,西缘的构造活动并不强烈,末期,受相邻地体活动的影响,挤压作用沿奥陶系顶面、局部沿二叠系顶面向盆地区推滑,西缘的冲断与褶皱活动趋于强烈,既造成侏罗系与白垩系之间的角度不整合接触,还导致西缘约15.50 km的构造缩短,石沟驿向斜基本形成,西缘逆冲带已达一定的规模(图5g)。从上侏罗统芬芳河组产状较平来看,石沟驿向斜主要形成于中侏罗世末期。

侏罗系沉积前剖面长91.5 km,三叠系沉积前剖面长95.750 km,印支末期、燕山早期的构造缩短量分别为4.250、15.50 km,缩短率分别为4.44%、16.94%。

在经历侏罗纪末燕山中期强挤压活动后,白垩纪早期处于挤压后的松弛期,沉积了一套粗粒序的河湖相沉积,并伴随强烈的岩浆活动,在六盘山盆地、陇县、伊盟隆起等区的白垩系可见较大范围岩浆侵入与喷发;早白垩世晚期,西缘逆冲带一度活跃,但强度明显较燕山早期弱,仅造成下白垩统与第三系之间的低角度不整合(图4b),其构造缩短量仅2.25 km(图5h)。

6) 调整改造期

受新特提斯构造体系和太平洋构造体系联合作用的影响^[59-60],盆地本部相对隆升,周边相对下降,周缘

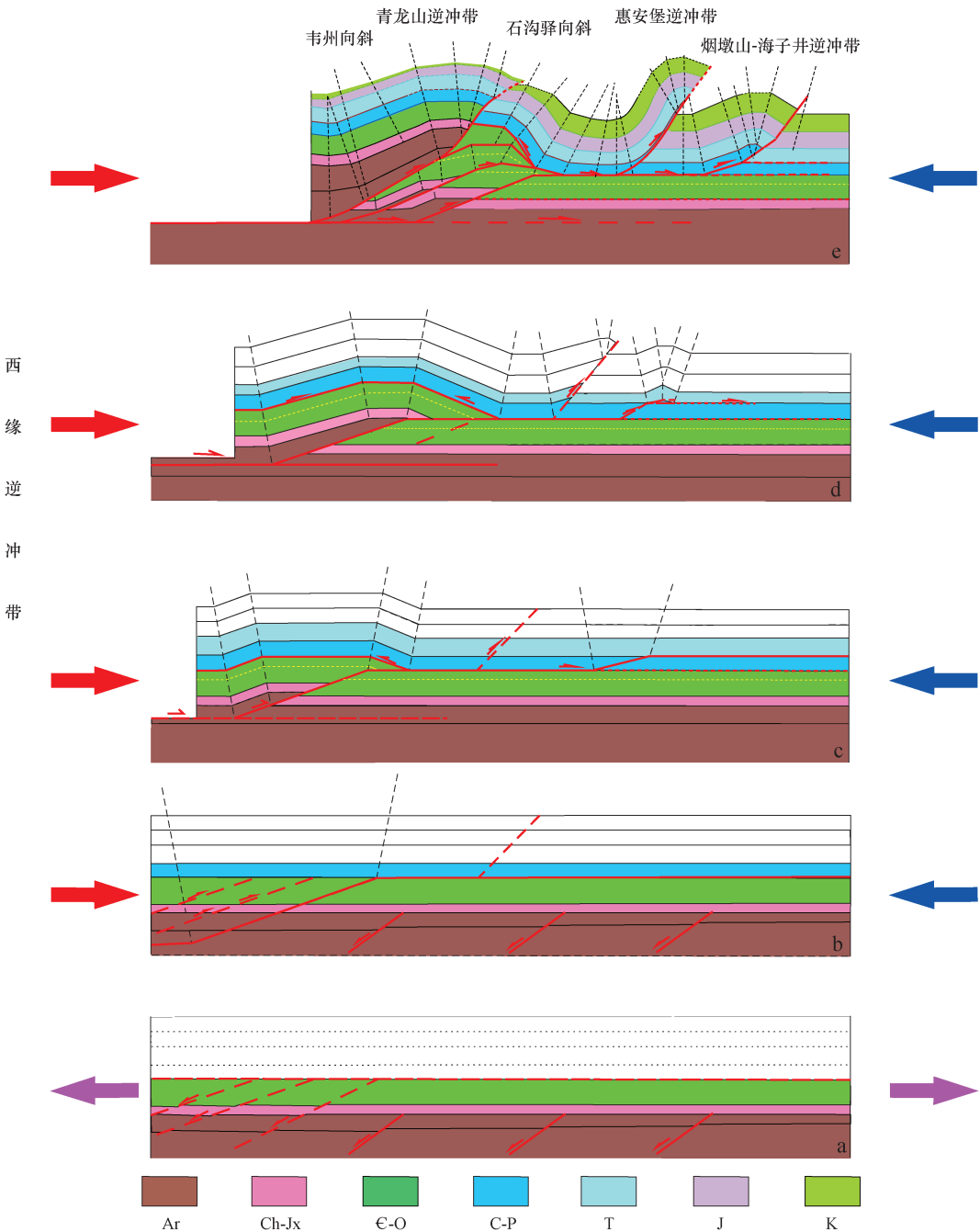


图 6 石沟驿向斜形成演化的构造运动学模型

Fig. 6 Structural kinematic models for the formation and evolution of the Shigouyi syncline

形成一系列断陷盆地,包括河套盆地、巴彦浩特盆地、银川盆地、渭河盆地、山西地堑等。这一时期,盆地本部以差异升降为主;相对于西缘逆冲带,石沟驿地区处于弱挤压和走滑环境。2 Ma 以来,受青藏高原东北缘扩展的影响,六盘山弧形体系形成,其前锋扩展至该区。以惠安堡断层为界,NNW 向的石沟驿冲断席斜冲于刘家庄、磁窑堡等 NNE 向的褶皱系之上(图 1b),反映出喜马拉雅期的调整改造。

图 5 所约束的现今剖面长 73.750 km,白垩系沉

积前剖面长 76.0 km,燕山晚期—喜马拉雅期的构造缩短量为 2.250 km,构造缩短率约 3.0%。

自石炭—二叠纪至今,石沟驿地区整体构造缩短量为 23.250 km,构造缩短率 24.0%,这一位移促使石沟驿向斜形成。

2.4.2 石沟驿向斜的形成机制

在前述剖面反演及地质证据的约束下,可以建立图 6 所示的正演构造模型。在剖面的深部,长城系—

蓟县系、寒武—奥陶系层序内以正断层发育为主,剖面西段多呈断阶状组合(图6a),对地层的分布有重要影响。海西末期挤压作用,部分正断层亦随之发生反转,但构造活动强度相对较弱(图6b)。印支末期,西缘逆冲带开始活动,形成断层转折褶皱,其中,断层上段沿奥陶系与石炭系间的风化壳挤压滑移,远端沿二叠系与深断陷间的不整合面滑动并向上传播,形成高角度冲断层、以及断层转折褶皱与断层传播褶皱,导致部分三叠系上部地层被剥蚀(图5c,d)。燕山期冲断活动呈阶段性逆冲作用,致使深部逆冲楔相互叠置与叠覆,形成堆垛式组合,并导致上覆层序被动上隆褶皱,前锋部位仍以冲断为主,整体东冲西倾的西缘逆冲体系基本形成(图5e)。

由上所述,石沟驿向斜的形成主要有3种机制,第一种是西缘逆冲带在燕山期的强烈挤压,使冲断系统沿上石炭统一二叠统底部的煤系形成滑脱冲断系统,其前锋到了马家滩一带。由于局部挤压应力的变化,西缘北段以NNW—SSE向挤压为主,在其前锋形成刘家庄、磁窑堡等NNE向褶皱体系;西缘中段以EW、NEE向挤压为主,形成青龙山、石沟驿、烟墩山、海子井与马家滩等SN向或NNW向冲断系统(图1);二者之间的过渡关系有待进一步分析。第二种是在前一冲断体系基础上,惠安堡及其西侧的多条正断层反转,如惠安堡断层在中元古代、寒武纪—奥陶纪为正断层,控制了台地边缘与台缘斜坡相的发育;在侏罗纪晚期正反转,正断层的上端点平行断层面向上突破,形成典型的构造楔结构^[61](图7),从下伏的双重构造由4个冲断席组成来看(图3),下部阶状正断层反转形成的冲断结构也是自西向东发生的,而它们的位移沿着被动顶板向东传递,至惠安堡断层与羊虎沟组煤层滑脱层相交的楔端点处,位移向上传播,这一深层冲断系统的活动导致上覆石炭系—侏罗系被动褶皱,形成向斜;且这一向斜是自东向西相对运动形成的,如西翼的延伸较短的逆断层带的活动所示;向斜西翼的长度代表了下伏双重构造系统的挤压位移量。惠安堡断层的位移下小上大,二叠系底界的位移在12km以上,也清楚地指示了它的正反转活动特点^[28]。第三种是喜马拉雅期的斜冲作用,使其改造定型。

因此,石沟驿向斜的形成可以总结为“西缘大型冲断体系形成整体背景下,早期台缘阶状正断层反转形成深层双重构造,上部滑脱系统反向滑动形成向斜构造,二者构成构造楔;喜马拉雅期调整并最终定型”,即为“大型冲断推覆体系形成、构造楔叠加改造”成因。

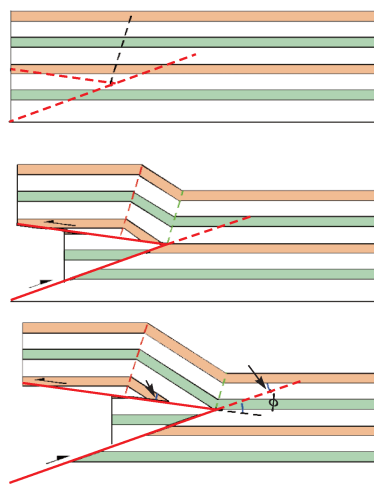


图7 楔端点沿断层向上传播形成上盘向斜的构造模式^[61]

Fig. 7 Structural model for the hanging-wall syncline due to the wedge-tip propagation upward along the fault surface^[61]

(倾斜断坡、反冲顶板断层组成构造楔,变形过程中构造楔端点沿倾斜断坡向上前方突破滑移。)

3 石沟驿向斜石炭—二叠系油气成藏模式

3.1 烃源岩发育特征

石沟驿地区在晚石炭世—早二叠世处于秦祁海与华北海过渡区^[62],发育海湾—潟湖相沉积(图8,图9)。盆地西部惠—沙断裂以西祁连海域范围内石炭系沉积早于盆地本部,主要发育滨岸沼泽(潟湖)—滨浅海沉积环境。石炭系羊虎沟组(本溪组)厚度向西逐渐增大(图8a),惠安堡—沙井子断层以西达600~1500m(图8a,图9b)。下二叠统太原组厚300~400m(图8,图9b)。

石沟驿地区上古生界发育优质煤系烃源岩。石炭系羊虎沟组和二叠系太原组、山西组发育暗色泥岩、碳质泥岩、泥质灰岩和煤岩等多种烃源岩,暗色泥岩厚度一般为60~300m;煤层厚度一般为15~30m,羊虎沟组煤层主要发育在上段,分布连续,规模较大。山西组、太原组和羊虎沟组暗色泥岩烃源岩有机碳含量依次升高,各类烃源岩平均有机碳含量达5.11%,有机质干酪根类型主要为Ⅲ型,次为Ⅱ₂型, R_o 值为1.98%~2.14%,达高成熟干气生成阶段,有利于天然气的生成。

钻探揭示,羊虎沟组煤系烃源岩的煤岩TOC平均值73.1%,暗色泥岩TOC介于0.30%~31.81%,平均值4.67%, R_o 值为1.81~2.36%,煤系烃源岩生烃潜力较大。以向斜核部忠1井为例(图8),该井二叠系

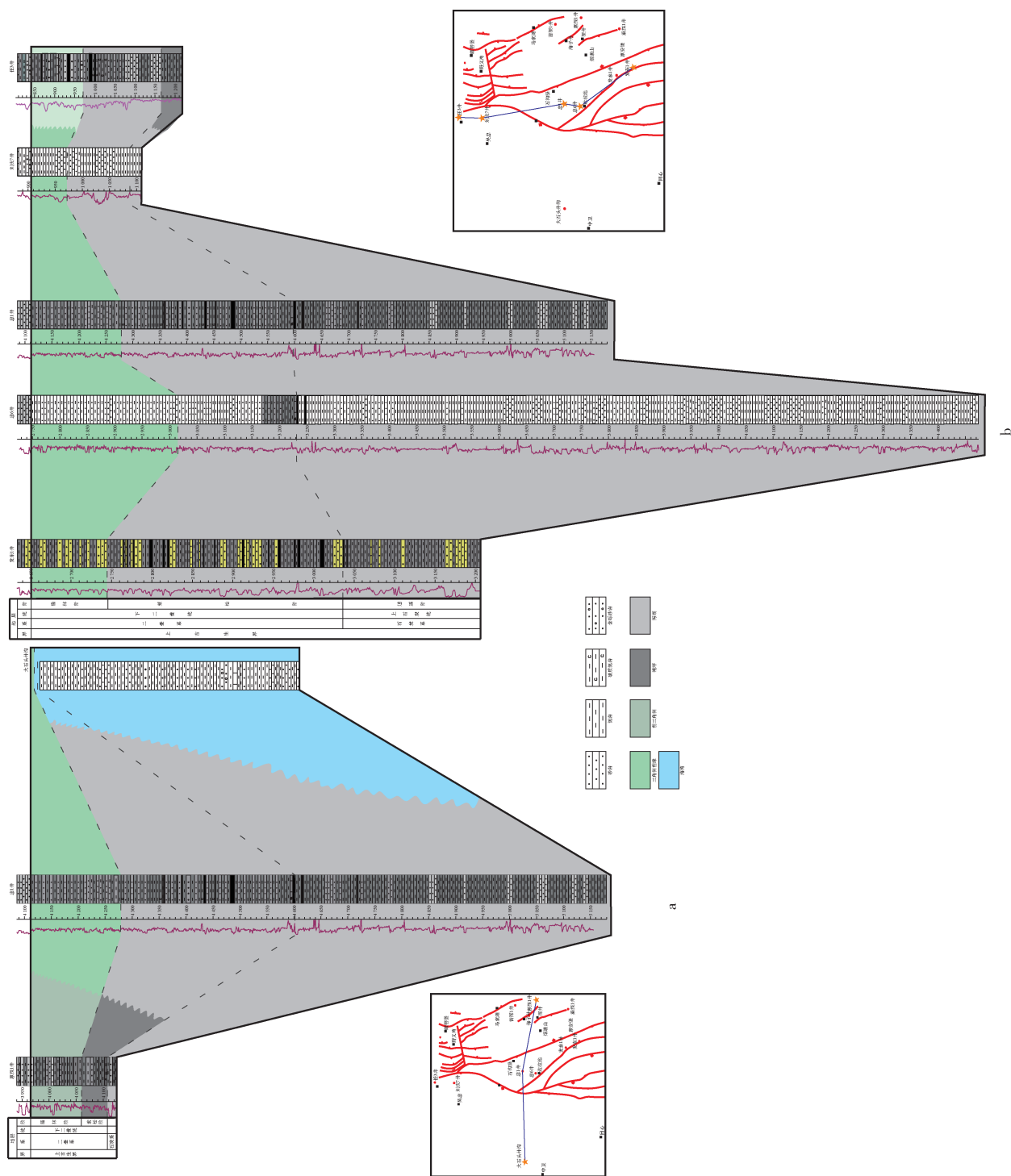


图8 石沟驿向斜区石炭—二叠系东西向(a)与南北向(b)沉积相剖面
Fig.8 EW-(a) and SN-(b)trending sections of the sedimentary facies from the Carboniferous to Permian in the Shigouyi syncline

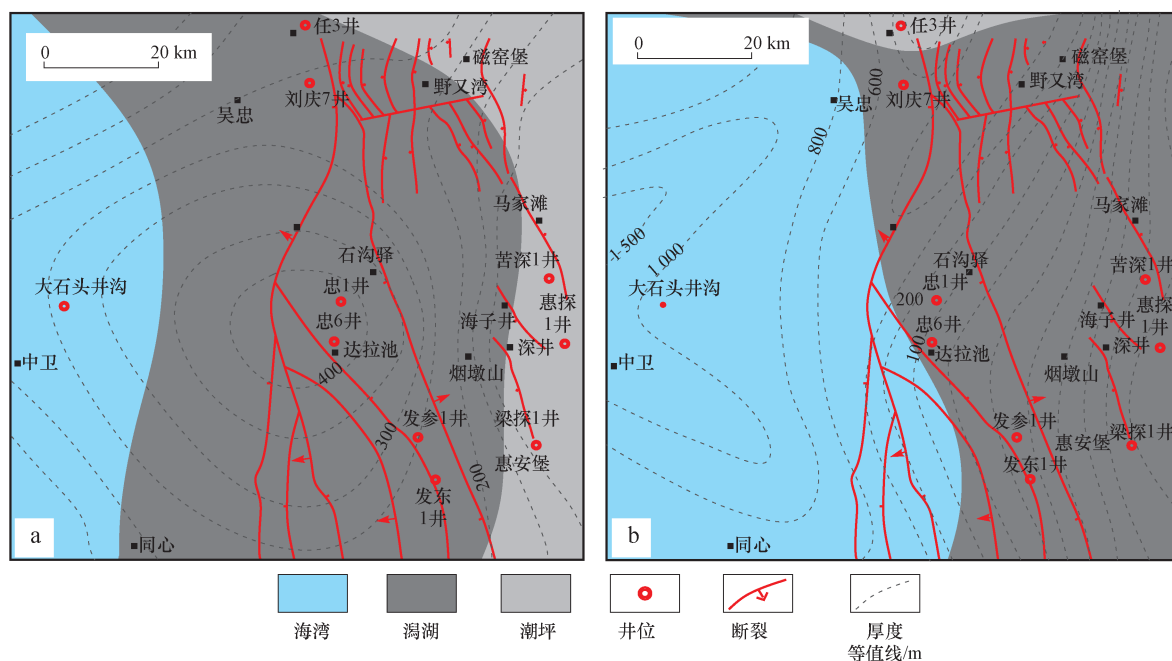


图9 石沟驿地区太原组(a)和羊虎沟组(b)沉积相

Fig.9 Sedimentary facies of the Lower Permian Taiyuan Formation (a) and the Upper Carboniferous Yanghugou Formation (b) in Shigouyi area

山西组—石炭系羊虎沟组发育巨厚煤系烃源岩,其中暗色泥岩累计厚 675 m,煤岩厚 29 m,泥质灰岩厚 10 m;烃源岩占地层厚度 66%。山西组厚 166.8 m,泥岩累计厚 72.4 m, TOC 值为 1.32% ~ 10.69%, R_o 为 1.96%。太原组厚 323 m,其中煤层 10 层,累计 21 m;泥灰岩 4 层共 12 m,泥岩累计厚 193 m, TOC 值为 1.40% ~ 4.94%,孢粉颜色呈棕、暗褐色, R_o 为 1.98% ~ 2.1%。钻入羊虎沟组 578 m,其中暗色泥岩 424 m, TOC 值为 6.14% ~ 20.45%,孢粉颜色为褐色—棕色, R_o 为 1.81% ~ 2.36%;煤岩 3 层,累计厚 8.2 m;泥灰岩 2 层,累计厚 2 m, TOC 值为 1.40% ~ 4.94%; TOC 值为 2.23% ~ 3.46%;均进入成熟—过成熟演化阶段。

3.2 储集体发育特征

含煤岩系烃源层内发育羊虎沟组一盒八段致密砂岩储层(图 8),砂岩厚达 100 m 以上。

石沟驿地区羊虎沟期主要发育潟湖、海湾相沉积(图 9b)。可分为两大区域性海进、海退旋回,下部海进旋回以海湾—潮坪沉积为主;上部海退旋回以三角洲沉积为主。羊虎沟期在纵向上以海湾—泻湖—障壁岛—沼泽相的海进—海退旋回变化为特征。其中潟湖相沉积环境中局部发育障壁岛砂体,呈小范围分布。忠 1 井区,羊虎沟组的砂地比 8.2%,砂岩厚 47.6 m,砂厚范围 2 ~ 5 m,层数 17 层。砂岩主要为岩屑砂岩

和岩屑质石英砂岩,石英含量为 30% ~ 80%,长石含量小于 5%,岩屑含量为 15% ~ 65%;多为次棱角状或棱角状,分选较好,以孔隙式胶结为主。

太原组砂地比为 8.4%,砂岩厚为 27.1 m,砂厚范围 3 ~ 9 m,层数 6 层。砂岩主要为岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩。石英含量为 30% ~ 75%,平均含量为 63%;长石含量小于 5%,平均含量为 2%;岩屑含量为 24% ~ 69%,平均含量为 35%。岩屑主要为变质岩和岩浆岩岩屑,变质岩岩屑主要为千枚岩,含少量变质砂岩和板岩;岩浆岩岩屑主要为隐晶岩。填隙物含量为 25% ~ 48%,平均含量为 39%;主要为铁白云石、水云母、菱铁矿以及少量绿泥石膜。粒度较细,以孔隙式胶结为主,分选较好,多为次棱角状或棱角状。孔隙度为 1.3% ~ 2.6%,平均为 2.1%;渗透率为 $(0.004 \sim 0.177) \times 10^{-3} \mu m^2$,平均为 $0.018 \times 10^{-3} \mu m^2$,储层物性相对较差。

山西组 2 段砂岩发育,砂地比 21.2%;砂岩厚 17.9 m,砂厚范围 6 ~ 7 m,层数 4 层。砂岩主要为岩屑砂岩和岩屑质石英砂岩,石英含量为 18% ~ 81%,平均为 56%;长石含量小于 3%,平均 1%;岩屑含量为 19% ~ 82%,平均含量为 43%。填隙物含量为 8% ~ 40%,平均含量为 23%;主要为水云母、铁白云石、菱铁矿以及高岭石。多为次棱角状或棱角状,粒度不等,碎屑分选差—中等;孔隙式和基底—孔隙式胶结。孔隙度在 0.8% ~ 8.4%,平均达 6.21%,渗透

率为 $(0.035 \sim 1.21) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层的最大孔喉半径为 $0.65 \mu\text{m}$;中值半径为 $0.07 \mu\text{m}$,孔喉主体以细孔喉分布为主,排驱压力 1.1 MPa ,储层物性相对较差。

盒8段砂地比 23.8% ,砂岩厚 16.2 m ,砂厚范围 $3 \sim 10 \text{ m}$,层数2层,为低渗透储层。分析表明,石沟驿向斜羊虎沟组—山西组致密砂岩多为长石砂岩、岩屑砂岩,石英砂岩少见;成分成熟度和结构成熟度低,长石和岩屑含量普遍较高。颗粒大小混杂,分选和磨圆较差,泥质含量高;为孔隙式和基底—孔隙式胶结。

孔隙类型以次生孔隙为主,同时有部分原生孔隙。次生孔隙包括溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙、晶间微孔和溶蚀充填物内孔隙。原生孔隙包括粒间孔隙和残余粒间孔隙。孔隙度不大,渗透率变化范围较大。裂缝(隙),裂缝(隙)的存在能改善储层的渗流通道,可增加孔隙的连通性。

羊虎沟组中下部,砂层发育较为集中,含气显示也较普遍,忠1井羊虎沟组气测峰值为 16.7159% ,基值 1.3109% 。测井解释含气层 3.4 m ($4915 \sim 4918 \text{ m}$ 井段)。局部层段储集性较好、可作为规模改造中的“甜点”。

3.3 致密砂岩天然气成藏模式

石沟驿向斜邻区的刘家庄气藏是鄂尔多斯盆地的第一个气田,具有该盆地天然气勘探划时代的意义^[17]。刘家庄气田为一半背斜圈闭,长为 8.5 km ,宽为 2 km ,圈闭面积为 17 km^2 ,闭合幅度为 300 m 。在山西组、下石盒子组发现了3个气层(图10a),探明天然气 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。刘家庄气田任13井山2段产凝析油 $0.72 \text{ m}^3/\text{d}$,任6井盒7段产轻质油 $2.736 \text{ m}^3/\text{d}$ 。天然气聚集在构造高点(刘庆1井),构造低部位产水,为典型的边水(驱动)气藏。胜利井气田为一断背斜圈闭,长 11 km ,宽 2.2 km ,圈闭面积 19.1 km^2 ,闭合幅度 $280 \sim 330 \text{ m}$ 。在山西组、下石盒子组发现了3个气层,盒8段产凝析油 1.6 m^3 。探明天然气 $18.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,断层具有封闭性质。

刘家庄气田与胜利井气田为上石炭统一二叠统自生自储形成的成藏组合,首次证实了鄂尔多斯盆地这一区域性天然气成藏组合的现实性,后来的苏里格特大型气田充分证明了这一点^[63]。刘家庄背斜形成于侏罗纪末期,其上为下白垩统不整合覆盖,正是由于较厚的下白垩统覆盖,上石炭统一二叠统煤系烃源岩生烃并在源内短距离运移成藏,油气成藏于早白垩

世末期^[64]。虽在晚白垩世—新生代隆升,气藏有所调整^[65],但由于煤系泥岩的封盖及后期断层的封闭,气藏得以保存。

上述气田距离石沟驿向斜很近,石沟驿向斜形成于同一时期或略早一点,上石炭统一二叠统煤系烃源岩更厚一些,具有相同的生烃与运聚时期。由于下白垩统较厚地层的覆盖,上石炭统一二叠统煤系砂岩趋于致密化(这一过程仍需深入研究),从而具有自生、自储、自封闭保存的特点。

向斜式天然气聚集的保存条件较好,这在于羊虎沟组、太原组、山西组与下石盒子组泥岩、煤层与砂岩之间的互层式结构,结构非均质性是天然气保存的必要条件。这类似于川东、鄂西地区向斜中的常压页岩气聚集机制。在此可能表现为向斜两翼及核部的规模性天然气聚集(图11),在上石炭统羊虎沟组、下二叠统太原组、山西组与下石盒子组多层系聚集成藏。推测该向斜之下的寒武—奥陶系双重构造也可成藏,形成多个背斜气藏;而在惠安堡断层的下盘,上石炭统一二叠统同样也可以形成致密砂岩气藏。

2020年,忠6井在羊虎沟组试气获 $2052 \text{ m}^3/\text{d}$,突破出气关,指示了其较好的勘探前景。

4 结论

1) 石沟驿向斜地处鄂尔多斯盆地西缘北段与中段冲断系统的前锋带过渡部位,NNE向褶皱带与NNW向褶皱带在此发生复合。

2) 石沟驿向斜形成于中侏罗世末期—晚侏罗世,在晚白垩世—始新世发生隆升剥蚀,在喜马拉雅期发生调整并定型。

3) 石沟驿向斜是在中侏罗世末期—晚侏罗世,鄂尔多斯地块西缘以羊虎沟组—山西组含煤岩系为滑脱层形成的大型叠瓦冲断系统的基础上,下伏的早期阶状正断层组合反转形成双重构造,其上地层被动褶皱而形成向斜,双重构造与向斜构成大型构造楔;向斜西翼的长度代表了下伏断层的挤压位移量。

4) 惠安堡断层的断距下段小、上段大,为早期正断层反转成因;它控制了早期的台地边缘及晚期的构造变形分带,在鄂尔多斯盆地西缘具有明显的构造—沉积划分性意义。

5) 石沟驿向斜及邻区油、气、煤、铀等矿产资源丰富。上石炭统一二叠系的致密砂岩气具有自生、自储、自盖成因,主要为早白垩世末期成藏,在后期调整、改造程度较弱,勘探前景广阔。

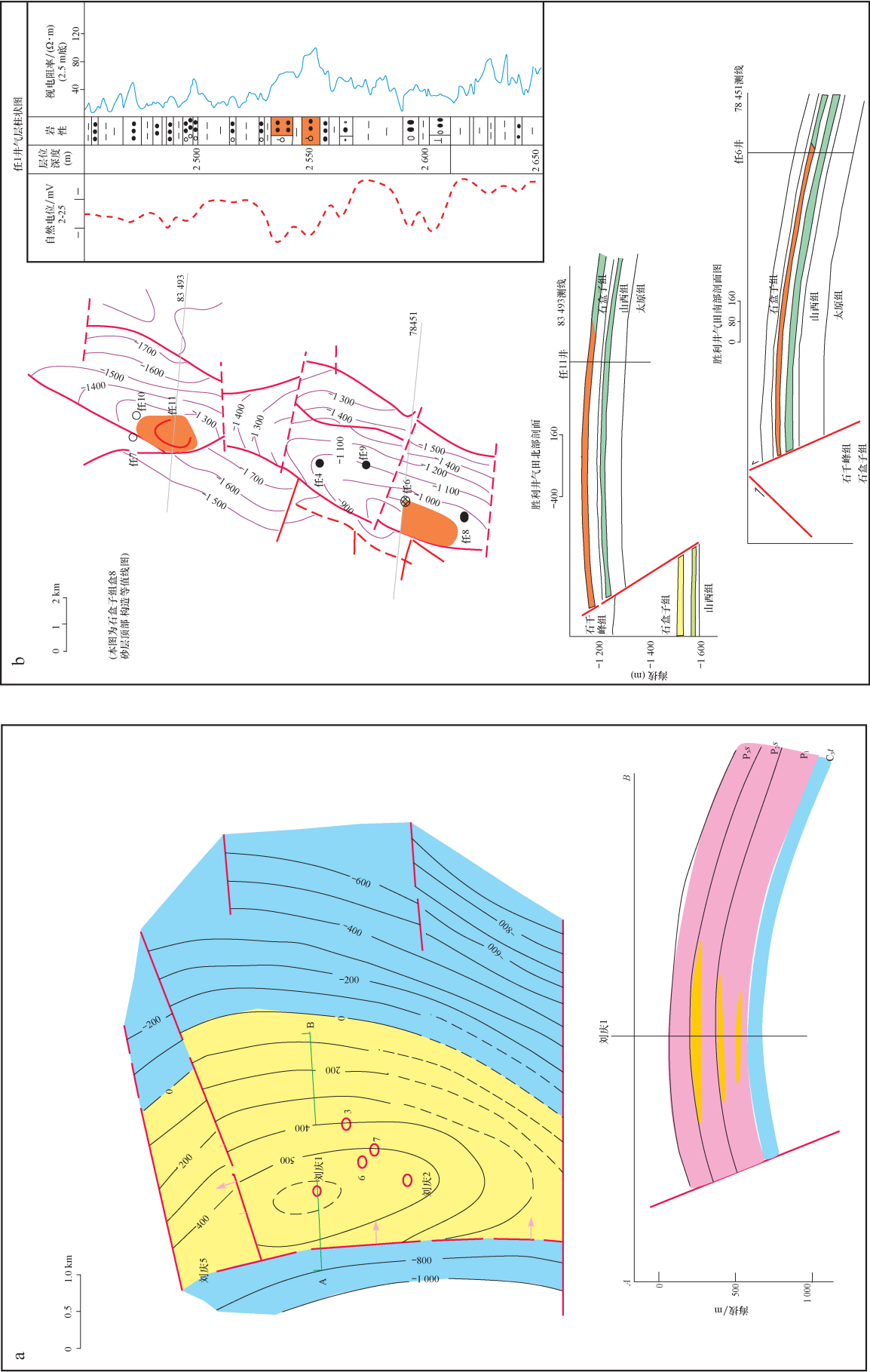


图 10 刘家庄气藏 (a) 和胜利井气藏 (b) 综合图 (据中石油长庆油田, 2000)

Fig.10 Composite diagram showing the Liujiashuang gas field (a) and the Shengliji gas field (b) (modified after that from PetroChina Changqing Oilfield Branch Company,2000)

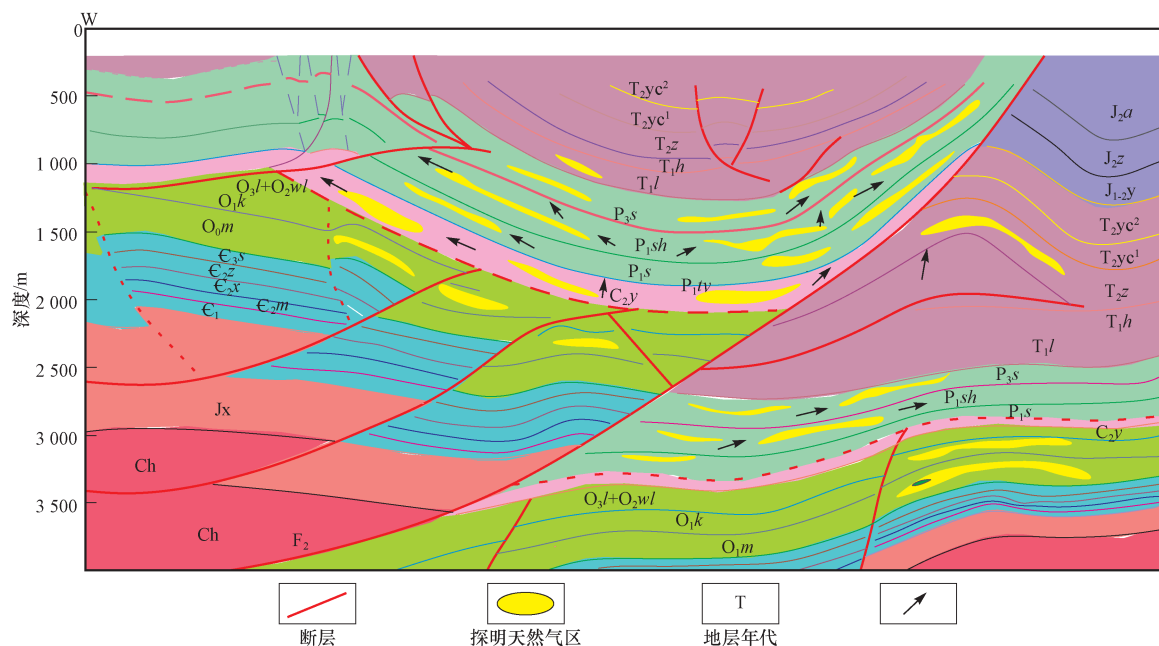


图 11 石沟驿向斜东西向天然气成藏剖面示意图

Fig. 11 EW-trending cross-section showing the gas pooling model in the Shigouyi syncline

沿 H186459 剖面,石沟驿向斜中上石炭统—下二叠统煤系多层系天然气聚集,其下寒武统—奥陶系双重构造发育背斜型气藏,储集体可能为奥陶系礁滩、白云岩或风化壳
F₂:惠安堡断层

致谢:在野外工作过程中,得到欧阳征建、郝松立高级工程师的帮助。在与刘池洋、郭彦如、陈刚、赵红格、张才利等教授的交流中,受益匪浅。在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding [J]. American Journal of Science, 1983, 283: 684–721.
- [2] 杨俊杰,张伯荣. 扭裂型地堑与伴生的冲断带[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(2): 1–8.
Yang Junjie, Zhang Borong. Torsional rift type graben and associated thrust belt [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(2): 1–8.
- [3] 杨俊杰,张伯荣. 扭裂型冲断及扭裂型冲断的构造特征[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(6): 8–14.
Yang Junjie, Zhang Borong. Tectonic features of torsion-compressional and torsion-fracturing thrusts [J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(6): 8–14.
- [4] Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds; an AAPG atlas [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005: 1–156.
- [5] 戴金星. 向斜中的油、气藏[J]. 石油学报, 1983, 4(4): 27–30.
Dai Jingxin. Oil and gas pools in syncline [J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(4): 27–30.
- [6] 陈刚. 沁水盆地向斜型水封气藏形成条件探讨[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 302–306.
Chen Gang. Formation condition of synclinal hydrosealed gas pools in qinshui basin [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(4): 302–306.
- [7] Law B E. Basin-centered gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1891–1915.
- [8] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851–1852.
- [9] 李贵中,王红岩,吴立新,等. 煤层气向斜控制论[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 26–28.
Li Guizhong, Wang Hongyan, Wu Lixin, et al. Theory of syncline-controlled coalbed methane [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 26–28.
- [10] 吴河勇,梁晓东,向才富,等. 松辽盆地向斜油藏特征及成藏机理探讨[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(2): 185–191.
Wu Heyong, Liang Xiaodong, Xiang Caifu, et al. Characteristics of petroleum accumulation in syncline of the Songliao Basin and discussion on its accumulation mechanism [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2007, 37(2): 185–191.
- [11] 吴河勇,王跃文,梁晓东,等. 向斜成藏理论及其石油地质意义[J]. 地质前缘, 2015, 22(1): 181–188.
Wu Heyong, Wang Yuewen, Liang Xiaodong, et al. Theory of petroleum accumulation in syncline and its significance to petroleum geology [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 181–188.
- [12] Perrodon A. Dynamics of oil and gas accumulations; Pua [J]. Elf Aquitaine, 1983, 187–210.
- [13] 包洪平,邵东波,武春英,等. 鄂尔多斯西缘冲断带中南段构造特征及其对古生界天然气成藏演化的影响[J]. 地质科学, 2018, 53(2): 434–457.
Bao Hongping, Shao Dongbo, Wu Chunying, et al. The structural characteristics of southern segment of Western Ordos Thrust Belt, and its influence on gas reservoir forming of Paleozoic [J]. Chinese Jour-

- nal of Geology, 2018, 53(2): 434–457.
- [14] 朱世新. 向斜中油气藏圈闭条件的探讨[J]. 石油实验地质, 1985, 7(3): 212–217.
- Zhu Shixin. Discussion on the condition of forming petroleum traps in syncline[J]. Experimental Petroleum Geology, 1985, 7(3): 212–217.
- [15] 刘宗堡, 付晓飞, 吕延防, 等. 大型凹陷向斜区油气倒灌式成藏—以松辽盆地三肇凹陷扶杨油层为例[J]. 地质论评, 2009, 55(5): 685–692.
- Liu Zongbao, Fu Xiaofei, Lu Yanfang, et al. Hydrocarbon Reversed Accumulation Model of Big Depression Syncline Area—A Case of the Fuyang Reservoir in the Sanzhao Depression[J]. Geological Review, 2009, 55(5): 685–692.
- [16] 曹代勇, 徐浩, 刘亢, 等. 鄂尔多斯盆地西缘煤田构造演化及其控制因素[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 410–427.
- Cao Daiyong, Xu Hao, Liu Kang, et al. Coalfield tectonic evolution and its controlling factors at the western margin of Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(2): 410–427.
- [17] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地西缘掩冲带构造与油气[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990: 91–105.
- Yang Junjie. Structures and Oil and Gas in the Thrust Zone on the Western Margin of Ordos Basin[M]. Lanzhou: Ganshou Science and Technology Press, 1990, 91–105.
- [18] 赵重远. 鄂尔多斯西缘构造演化及板块应力机制初探[C]//内蒙古自治区石油学会. 编鄂尔多斯盆地西缘地区石油地质论文集. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1983: 20–28.
- Zhao Chongyuan. Preliminary study on tectonic evolution and plate stress mechanism of western Ordos[C]//Petroleum Society of Inner Mongolia Autonomous Region. Petroleum Geology Symposium of the Western Edge of the Ordos Basin. Hohhot: The People's Publ. House of Inner Mongolia, 1983: 20–28.
- [19] 陈发景, 孙家振, 王波明, 等. 鄂尔多斯西缘褶皱—逆冲断层带的构造特征和找气前景[J]. 现代地质, 1987, 1(1): 103–112.
- Chen Fajing, Sun Jiazhen, Wang Boming, et al. Tectonic characteristics and gas exploration potential of the Western Ordos Fold-Thrust Belt[J]. Geoscience, 1987, 1(1): 103–112.
- [20] 汤锡元, 郭忠铭, 王定一. 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带特征及其演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9(1): 1–11.
- Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Wang Dingyi. Characteristics and evolution of the thrust nappe tectonic belt and its potential in the west Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1988, 9(1): 1–11.
- [21] 汤锡元, 郭忠铭, 陈荷立. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992: 4–13.
- Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Chen Heli. The Study and Petroleum prospect of the thrust nappe in the west margin of Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992: 4–13.
- [22] 张伯荣. 略论马家滩褶皱断裂带的扭动特征[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 15–20.
- Zhang Borong. On the twisting feature of the fold-fault zone in majiatan[J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(2): 15–20.
- [23] 夏义平, 徐礼贵, 郑良合, 等. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲断裂带构造特征及油气勘探方向[J]. 石油地质, 2005, 10(5): 13–19, 72.
- Xia Yiping, Xu Ligui, Zhang Lianghe, et al. Structural features and oil-gas prospecting targets of thrusting fault belt in western edge of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology, 2005, 10(5): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王锋, 刘池阳, 赵红格. 鄂尔多斯盆地西部陆内前陆盆地的晚期发育与油气聚集[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1): 46–47.
- Wang Feng, Liu Chiyang, Zhao Hongge. Later stage development and hydrocarbon accumulation of intracontinental foreland basin in western Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 2006, 25(1): 46–47.
- [25] 张松航, 汤达祯, 李丹梅, 等. 鄂尔多斯盆地西缘复杂断块区构造控气作用[J]. 中国煤层气, 2006, 3(1): 28–32, 46.
- Zhang Songhang, Tang Dazhen, Li Danmei, et al. Tectonic characteristics of complex fault block in western margin of Ordos Basin and their control on CBM[J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(1): 28–32, 46.
- [26] 冯胜斌, 袁效奇, 贺静, 等. 鄂尔多斯盆地西缘石沟驿地区晚三叠世沉积构造环境及其地质意义[J]. 世界地质, 2008, 27(4): 378–386, 394.
- Feng Shengbin, Yuan Xiaoqi, He Jiang, et al. Geological environment of Upper Triassic sediment in Shigouyi region of western Ordos Basin and its geological significance[J]. Global Geology, 2008, 27(4): 378–386, 394.
- [27] 贾恒, 李保侠, 荆国强. 鄂尔多斯盆地西缘惠安堡地区构造地质及铀成矿特征[J]. 铀矿地质, 2012, 28(3): 148–151, 186.
- Jia heng, Li Baoxia, Jing Guoqiang. Structural geology and mineralization of Uranium deposits in the Huianpu area, West of Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 2012, 28(3): 148–151, 186.
- [28] 何登发, 邵东波, 开佰泽, 等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区的构造样式与圈闭分布规律[J]. 地球学报, 2019, 40(1): 219–235.
- He Dengfa, Shao Dongbo, Kai Baize, et al. Structural style and trap distribution in Majiatan area on the western margin of Ordos Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(1): 219–235.
- [29] 彭希龄. 有关陕北盆地西部边缘的一些构造问题[J]. 地质学报, 1955, 35(4): 405–417.
- Peng XiLing. Some tectonic problems concerning the western limit of the North-Shaanxi Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1955, 35(4): 405–417.
- [30] 赵重远. 鄂尔多斯地块西缘构造单位划分及构造展布格局和形成机制[C]//杨俊杰主编. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带构造与油气. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990: 40–53.
- Zhao Chongyuan. Division of the western Ordos thrust belt and its mechanism[C]//Yang Junjie. The Structures, Oil and Gas of Western Ordos Basin. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990: 40–53.
- [31] 张进, 马宗晋, 任文军. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带南北差异的形成机制[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 124–133.
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. The mechanism of the difference between the Northern part and the Southern part of the fold and thrust Belt on the western edge of the Ordos Basin, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(2): 124–133.
- [32] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属

- 性[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 737-747.
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Feng, et al. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 737-747.
- [33] 何登发, 邵东波, 崔永平, 等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩古隆起的厘定、成因及地质意义[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 609-619.
- He Dengfa, Shao Dongbo, Cui Yongping, et al. Delineation, formation, and geological significance of Majiatan paleo-uplift at the western margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 39(6): 609-619.
- [34] 董云鹏, 张国伟, 孙圣思, 等. 中国大陆“十字构造”形成演化及其大陆动力学意义[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 769-797.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Sun Shengsi, et al. The “cross-tectonics” in China continent: formation, evolution, and its significance for continental dynamics[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 769-797.
- [35] 刘和甫, 陆伟文, 王玉新. 鄂尔多斯西缘冲断褶皱带形成与形变[C]//杨俊杰. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带构造与油气. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990: 54-75.
- Liu Hefu, Lu Weiwen, Wang Yuxin. 1990. The formation and deformation of the fold and thrust belt of western Ordos[C]//Yang Junjie. The Structures, Oil and Gas of Western Ordos Basin. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990, : 54-75.
- [36] 刘少峰, 杨士恭. 鄂尔多斯盆地西缘南北差异及其形成机制[J]. 地质科学, 1997, 32(3): 397-408.
- Liu Shaofeng, Yang Shigong. The Differences between the Southwestern and the Northwestern Ordos Basin and their forming mechanism[J]. Science Geologica Sinica, 1997, 32(3): 397-408.
- [37] 孙肇才. 简论鄂尔多斯盆地地质构造风格及其油气潜力—纪念朱夏院士逝世10周年[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 291-296, 306.
- Sun Zhaocai. A brief discussion on the geological structure style and oil and gas potential of ordos basin; the 10th anniversary of academician ZHU Xia[J]. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(4): 291-296, 306.
- [38] 何天翼, 刘弢, 李刚. 鄂尔多斯盆地西缘地质构造特征及勘探方向[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(S1): 65-68, 138.
- He Tianyi, Liu Tao, Li Gang. Geological and structural features and the exploration trend in the western edge of Ordos Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(S1): 65-68.
- [39] 杨圣彬, 耿新霞, 郭庆银, 等. 鄂尔多斯盆地西缘北段中生代构造演化[J]. 地质评论, 2008, 54(3): 307-315.
- Yang Shengbin, Geng Xinxia, Guo Qingyin, et al. Mesozoic tectonic evolution in North section of the western margin of Ordos basin[J]. Geological Review, 2008, 54(3): 307-315.
- [40] 杨圣彬, 侯贵廷, 郭庆银, 等. 鄂尔多斯盆地西缘北段逆冲推覆带缩短量分形研究[J]. 现代地质, 2006, 20(1): 35-41.
- Yang Shengbin, Hou Guiting, Guo Qingyin, et al. Fractal theory applied to the study of cross section shortening amount in northern thrust-nappe belt of the western Ordos Basin[J]. Geoscience, 2006, 20(1): 35-41.
- [41] 张家声, 何自新, 费安琪, 等. 鄂尔多斯西缘北段大型陆缘逆冲推覆体系[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 251-281.
- Zhang Jiasheng, He Zixin, Fei Anqi, et al. Epicontinental mega thrust and nappe system at north segment of the western rim of the Ordos Block[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(2): 251-281.
- [42] 赵红格, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中部的横向构造带探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 490-496.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Transverse structure in the middle of west margin of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 490-496.
- [43] 杨华, 陶家庆, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造特征及其成因机制[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 863-868.
- Yang Hua, Tao Jiaqing, Ouyang Zhengjian, et al. Structural characteristics and forming mechanism in the western margin of the Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(5): 863-868.
- [44] 欧阳征健, 陈洪德, 冯娟萍. 鄂尔多斯盆地西缘中南段构造特征与演化[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 691-695.
- Ouyang Zhengjian, Chen Hongde, Feng Juanping. Structural characters and evolution of the Mid-South section at the west margin of Ordos Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(4): 691-695.
- [45] 赵红格, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世构造属性探讨[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 384-391.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Tectonic attribute of the western Ordos basin during the Late Triassic[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 384-391.
- [46] 马静辉, 何登发. 贺兰山构造带及邻区中-新生代构造事件: 来自不整合面和裂变径迹的约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1121-1142.
- Ma Jinghui, He Dengfa. Meso Cenozoic tectonic events in the Helanshan Tectonic Belt and its adjacent areas: Constraints from unconformity and fission track data[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(4): 1121-1142.
- [47] 张庆龙, 解国爱, 任文军, 等. 鄂尔多斯盆地西缘南北向断裂的发育及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 119-125.
- Zhang Qinglong, Xie Aiguo, Ren Wenjun, et al. Development of the NS fault on the western margin of the Ordos Basin and its geological significance[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2002, 24(2): 119-125.
- [48] 赵红格, 刘池洋, 王峰. 鄂尔多斯盆地西缘的构造分区性探讨[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 542.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang, Wang Feng. Study on the structural zoning of the western margin of ordos basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 542.
- [49] 罗群. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区冲断带断裂特征及其控藏模式[J]. 地球学报, 2008, 29(5): 619-627.
- Luo Qun. Characteristics of fault in Majiatan area of western Ordos Basin and their petroleum reservoir controlling model[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 29(5): 619-627.
- [50] 庞崇友, 张亚东, 王静, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中段构造特征与油气勘探前景[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 274-285.
- Pang Chongyou, Zhang Yadong, Wang Jing, et al. Structural features

- of the middle section and its petroleum exploration prospects in the west margin of Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2016, 30 (2): 274 – 285.
- [51] 杨华, 付金华, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地西缘晚三叠世构造 – 沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29 (3): 427 – 439.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Ouyang Zhengjian, et al. Analysis of tectonic-sedimentary setting in Middle and Upper Triassic in the West Margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29 (3): 427 – 439.
- [52] 张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代 – 新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. *中国地质*, 2006, 33 (1): 28 – 40.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen. Transition of the Late Mesozoic-Cenozoic tectonic regimes and modification of the Ordos basin [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1): 28 – 40.
- [53] 张岳桥, 施伟, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J]. *地质学报*, 2006, 80 (5): 639 – 647.
- Zhang Yueqiao, Shi Wei, Liao Changzhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (5): 639 – 647.
- [54] 张岳桥, 廖昌珍, 施伟, 等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. *地学前缘*, 2007, 14 (2): 182 – 196.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, et al. On the Jurassic deformation in and around the Ordos Basin, North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (2): 182 – 196.
- [55] 陈全红, 李文厚, 胡孝林, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析[J]. *地质学报*, 2012, 86 (7): 1150 – 1162.
- Chen Quanhong, Li Wenhui, Hu Xiaolin, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86 (7): 1150 – 1162.
- [56] 陈刚, 孙建博, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的裂变径迹年龄记录[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37 (s1): 110 – 118.
- Chen Gang, Sun Jianbo, Zhou Lifa, Zhang Huiruo, et al. Fission-track-age records of the Mesozoic tectonic-events in the southwest margin of the Ordos Basin, China [J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2007, 37 (s1): 110 – 118.
- [57] 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, 34 (3): 375 – 383.
- Chen Gang, Wang Zhiwei, Bai Guojuan, et al. Meso-Cenozoic peak-age events and their tectono-sedimentary response in the Ordos basin [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (3): 375 – 383.
- [58] 王少昌, 付瑛堂, 李熙哲, 等. 鄂尔多斯盆地西缘古生代槽台过渡带裂谷系弧形构造带的形成与发展及对油气聚集富集规律的影响[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16 (4): 421 – 427.
- Wang Shaochang, Fu Suotang, Li Xizhe, et al. The Influence to the accumulation of oil and gas, of the development of the arcuate structure Zone in the transition zone from the plat to the geosyncline in the West of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16 (4): 421 – 427.
- [59] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 2007, 81 (11): 1449 – 1461.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (11): 1449 – 1461.
- [60] 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. *地球学报*, 2008, 29 (3): 306 – 317.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Chen Xuanhua, et al. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29 (3): 306 – 317.
- [61] Shaw J H, Connors C, Suppe J. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds-An AAPG Seismic Atlas [J]. *Studies in Geology*, 2004, 53, 1 – 150.
- [62] 万丛礼, 付金华, 张军. 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造热事件与油气运移[J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27 (2): 43 – 47.
- Wan Congli, Fu Jinhua, Zhang Jun. Tectono-thermal event in west foreland basin of Ordos and its effects on oil-gas migration [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27 (2): 43 – 47.
- [63] 何自新, 付金华, 席胜利, 等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. *石油学报*, 2003, 24 (2): 6 – 12.
- He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24 (2): 6 – 12.
- [64] 席胜利, 李文厚, 李荣西. 烃源岩生烃期次与油气成藏 – 以鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区长7烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35 (6): 657 – 663.
- Xi Shengli, Li Wenhui, Li Rongxi. Hydrocarbon generation and reservoir formation: A case from Chang 7 source rock in Majiatan area, west margin of Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35 (6): 657 – 663.
- [65] 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J]. *石油学报*, 2003, 24 (2): 34 – 37.
- Di Lingjun, Zhang Dongyang, Wang Hongke. Primary discussion on Himalayan tectonic movement and petroleum reservoir in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24 (2): 34 – 37.

(编辑 董立)