

鄂尔多斯盆地伊盟隆起南部构造边界厘定 及其油气勘探意义

田刚^{1,2,3,4}, 卢明德⁵, 薛海军^{1,3}, 汶小岗^{1,3}, 马丽^{2,3}, 袁安龙⁵, 宋立军⁶, 蒲仁海⁴, 贾会冲⁷,
陈杰⁸, 陈硕^{1,2}, 吴大林¹, 杨明慧⁸

[1. 陕西省煤田物探测绘有限公司, 陕西 西安 710005; 2. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021; 3. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 4. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069; 5. 中国石油辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 6. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 7. 中国石化华北油气分公司, 河南 郑州 450006; 8. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249]

摘要:有关鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起与伊陕斜坡两个构造单元边界的认识至今存在分歧。通过对盆地北部基底起伏、地层展布、基底断裂、构造演化过程及油气分布特征等多方面研究分析,结果表明:盆地北部WE—NE向基底断裂以中元古代之前分隔不同构造单元边界的新召北—泊尔江海子南基底先存断裂带(F4+F10)为界,呈对冲构造样式控制了伊盟隆起的形成;杭锦旗断裂带横贯盆地北部,是由上述基底先存断裂带在加里东期选择性活化、呈雁列式展布的泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井等大型基底断裂组成。在海西期、印支期和燕山期杭锦旗断裂带持续继承性活动,控制了盆地北部各时期构造—沉积演化格局。以杭锦旗断裂带为界,南部和北部构造活动强度、烃源岩展布和成熟度、储层特征和物性变化以及油气圈闭类型等均存在较大差异,揭示该断裂带控制了盆地北部油气形成与分布。因此,以杭锦旗断裂带作为伊盟隆起和伊陕斜坡两大构造单元的边界更为合理,这对深化鄂尔多斯盆地北部地质认识和指导油气勘探方向具有重要意义。

关键词:油气勘探;构造边界;杭锦旗断裂带;伊盟隆起;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Delineation of the southern structural boundary of the Yimeng Uplift in the Ordos Basin and its implications for hydrocarbon exploration

TIAN Gang^{1,2,3,4}, LU Mingde⁵, XUE Haijun^{1,3}, WEN Xiaogang^{1,3}, MA Li^{2,3}, YUAN Anlong⁵, SONG Lijun⁶,
PU Renhai⁴, JIA Huichong⁷, CHEN Jie⁸, CHEN Shuo^{1,2}, WU Dalin¹, YANG Minghui⁸

[1. Shaanxi Coalfield Geophysical Prospecting and Surveying Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710005, China; 2. Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 4. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield of CNPC, Panjin, Liaoning 124010, China; 6. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 7. North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China; 8. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The boundary between two tectonic units in the northern Ordos Basin, namely the Yimeng Uplift and the Yishan Slope, remains controversial. In this study, we analyze the basement relief, stratigraphic distribution, basement faults, tectonic evolution, and hydrocarbon distribution characteristics in the northern Ordos Basin. The results indicate that the EW-NE-striking basement faults in the northern Ordos Basin governed the formation of the Yimeng Uplift as ramp structures. Among these basement faults, the pre-existing Xinzha North-Porjianghaizi South (F4+F10) basement

收稿日期:2024-05-14;修回日期:2024-11-30。

第一作者简介:田刚(1991—),男,博士、工程师,构造地质。E-mail: 691561570@qq.com。

通信作者简介:杨明慧(1962—),男,博士、教授,盆地构造。E-mail: yangmh@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572102);陕西省煤田地质集团科技创新项目(SMDZ-2023ZD-09, SMDZ-ZD2024-09);陕西省科技厅重点科技研发项目(2023-YBGY-305)。

fault zone serves to separate the structural units before the Mesoproterozoic. The Hangjinqi fault zone (HFZ) runs across the northern Ordos Basin and consists primarily of three large-scale basement faults arranged in en echelon arrays, including the Porjianghaizi, Wulanjilinmiao, and Sanyanjing faults, which evolves from the selectively reactivated basement fault zone pre-existing as mentioned above during the Caledonian. During the Hercynian, Indosinian, and Yanshanian, The HFZ continued its inherited activities, having governed the tectono-sedimentary evolutionary framework of the northern Ordos Basin throughout various geological periods. The northern and southern basin separated by the HFZ exhibit significant differences in tectonic activity intensity, distribution and maturity of source rocks, variations in reservoirs and their physical properties, and hydrocarbon trap types. It can be concluded thereby that the HFZ controls the hydrocarbon generation and distribution in the northern Ordos Basin. It is, thereby, more reasonable to take the HFZ as the boundary between Yimeng Uplift and Yishan Slope, which will be of great significance to deepening understanding on the geology of the northern Ordos Basin and thereby guiding the hydrocarbon exploration therein.

Key words: hydrocarbon exploration, structural boundary, Hangjinqi fault zone (HFZ), Yimeng Uplift, Ordos Basin

引用格式:田刚,卢明德,薛海军,等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起南部构造边界厘定及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2025,46(1):108-122. DOI:10.11743/ogg20250108.

TIAN Gang, LU Mingde, XUE Haijun, et al. Delineation of the southern structural boundary of the Yimeng Uplift in the Ordos Basin and its implications for hydrocarbon exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 108-122. DOI: 10.11743/ogg20250108.

构造单元划分是盆地构造地质研究的基础问题,也是油气资源评价和优化油气勘探方案的重要依据,因此不断精细和完善构造单元划分方案是十分必要的^[1-2]。鄂尔多斯盆地形成于前寒武系变质结晶基底之上,是在中元古代裂谷充填与克拉通沉积背景下,由下古生界浅海台地相盆地和上古生界滨海平原相-中生界陆相盆地组成的大型叠合盆地^[3-4],经历了多期差异沉降与隆升的构造演化历史。这一特征决定了盆地构造单元、构造边界以及油气勘探的复杂性和多样性。关于鄂尔多斯盆地构造单元的划分方案,不同学者提出了多种不同的认识^[5-10],其中最具有代表性的方案是郭忠铭(1989)根据现今盆地构造形态和演化历史,将其划分为伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断构造带、晋西挠褶带、天环坳陷和伊陕斜坡6个一级构造单元^[8](图1a)。

尽管该方案已普遍被石油地质界接受并在生产实践中广泛应用,但由于油气勘探初期钻井和地震资料缺乏,这些构造单元之间的界线划分依据不明确,缺乏详细论证,导致对不同构造单元之间边界的认识存在争议,如盆地北部伊盟隆起与伊陕斜坡两个构造单元的边界线至少存在以乌海东—乌审召—准格尔旗一线、以铁1—苏100—准1井一线、以苏357—乌审旗—准格尔旗一线和以伊23—伊22—东胜一线等7种不同的认识^[4-7, 9-11](图1a),这制约了对盆地北部构造—沉积演化过程的理解以及油气勘探工作的进一步深化。因此,依据盆地北部钻井和地震的新资料,从基底起伏特

征、地层展布特征、基底断裂特征和构造演化过程等多方面对伊盟隆起与伊陕斜坡两个构造单元的边界进行重新厘定,并探讨构造边界对油气勘探的意义,为克拉通盆地地质研究和油气勘探工作提供借鉴。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地是华北板块西部典型的克拉通叠合盆地,经吕梁运动形成变质结晶基底之后,相继经历了晋宁期、加里东期、海西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期等多期构造旋回演化(图1b),现今周缘分别被河套盆地、银川盆地、六盘山盆地、渭河盆地和吕梁山隆起带等围限(图1a)。盆地北部西以桌子山断裂为界,东以离石断裂为界,北以黄河断裂为界,中西部基本被下白垩统和第四系覆盖,零星出露三叠系和侏罗系;盆地东部大致以黄河为界,东侧主要出露了奥陶系和少量的寒武系和二叠系,西侧主要出露中、下三叠统和中侏罗统(图2)。盆内发育由泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井等大型基底断裂组成的近WE向杭锦旗断裂带^[12-13],北部主要包括伊盟隆起和伊陕斜坡两个一级构造单元(图1a,图2)。其中,伊陕斜坡又称陕北斜坡,位于鄂尔多斯盆地内部,主要经历了中元古代NE向裂谷,古元古代—早古生代早期整体隆升,中、晚寒武世—奥陶纪古隆起形成及晚古生代—中生代稳定升降、翘倾等阶段^[14-16],其斜坡雏形显于晚侏罗世,基本定形于早白垩世,表现为同时期地层由东向西逐渐增厚^[17]。

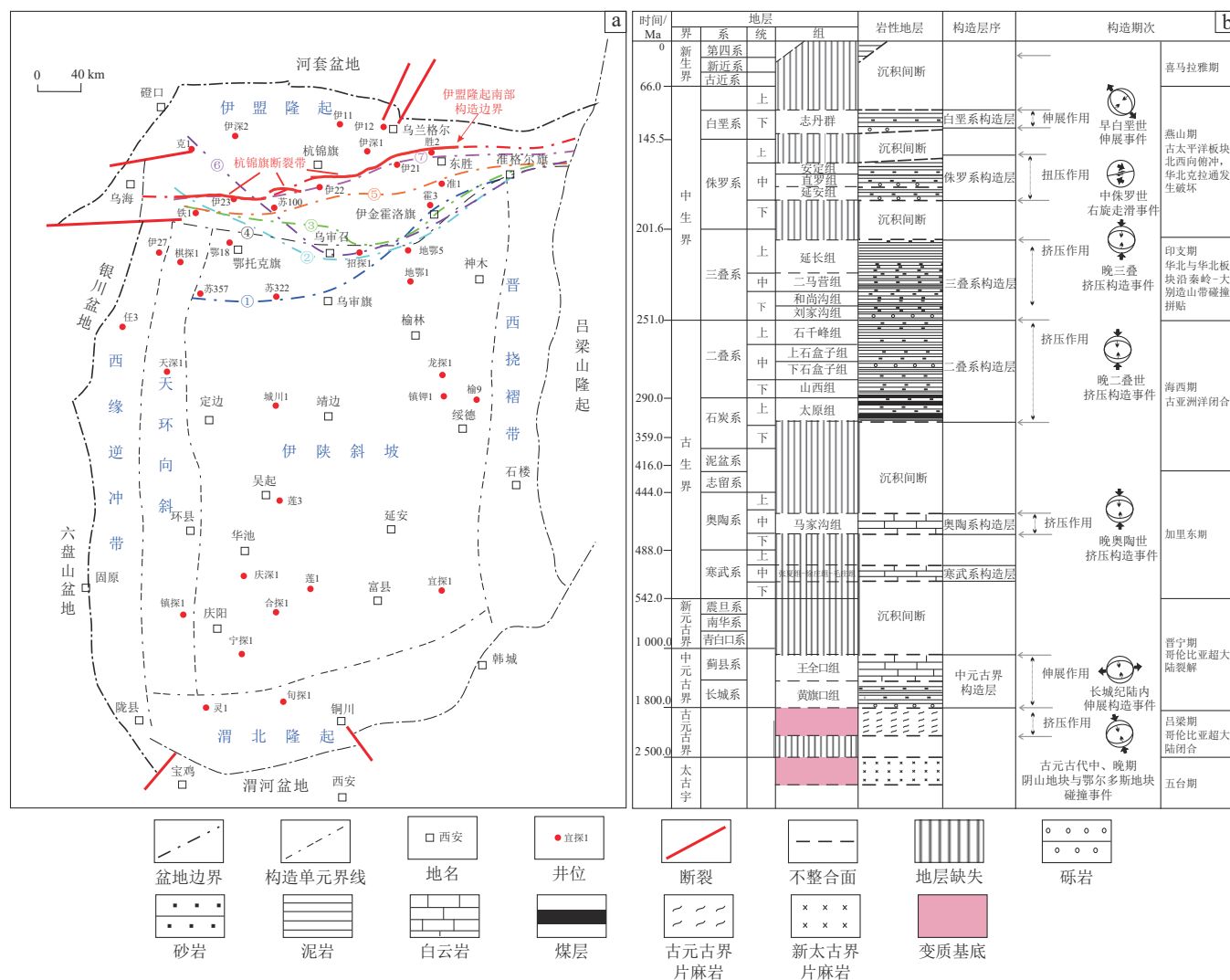


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分(a)及盆地北部构造演化地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Map showing the structural unit division of the Ordos Basin (a) and composite stratigraphic column showing tectonic evolution in the northern part of the basin (b)

①苏357-乌审旗-准格尔旗一线^[7];②铁1-乌审召-准格尔旗一线^[9];③铁1-乌审召北-准格尔旗一线^[6];④铁1-苏100-准1井一线^[4];⑤铁1-苏100-准1井一线^[5];⑥克1-乌审召-准格尔旗一线^[10];⑦伊23-伊22-东胜一线^[11]

伊盟隆起最早形成于约1.95 Ga阴山地块与鄂尔多斯地块陆-陆碰撞事件^[18-19],后经中元古代近WE向拉张改造,在其中、西部形成多个近NS走向、不同规模的西倾裂陷槽^[20],该时期东北部仍为隆起状态,缺乏地层沉积,称之为乌兰格勒凸起^[21]。古生代以来,伊盟隆起为一个继承性的隆起带和剥蚀区,中寒武统、中奥陶统、上古生界以及中生界整体由南向北逐渐减薄和尖灭,最终由下白垩统志丹群完全超覆于古隆起之上,地层沉积厚度一般为800~3 500 m。新生代,河套地堑两侧正断裂活动将北侧阴山构造带与南侧伊盟隆起分开(图2),其中伊盟隆起继承了燕山期的构造格局,总体表现为东北高、西南低的构造特征^[8, 21]。

2 构造单元划分原则

合理划分构造单元是明确盆地沉积构造与演化特征、深化油气成藏规律研究以及指导油气勘探工作的基础和前提^[7]。同一构造单元通常具有相同的基底特征、地层系统、沉积充填和构造演化过程,因此可以根据基底属性、地层沉积特征、地质构造形态、构造演化历史和地球物理特征等进行盆地构造单元的综合划分。不同构造单元边界也多为基底断裂带及走向趋势线、地层尖灭线、主要目的层构造等深线、构造体系包络线和台缘坡折带转折端线等^[1, 22-23]。

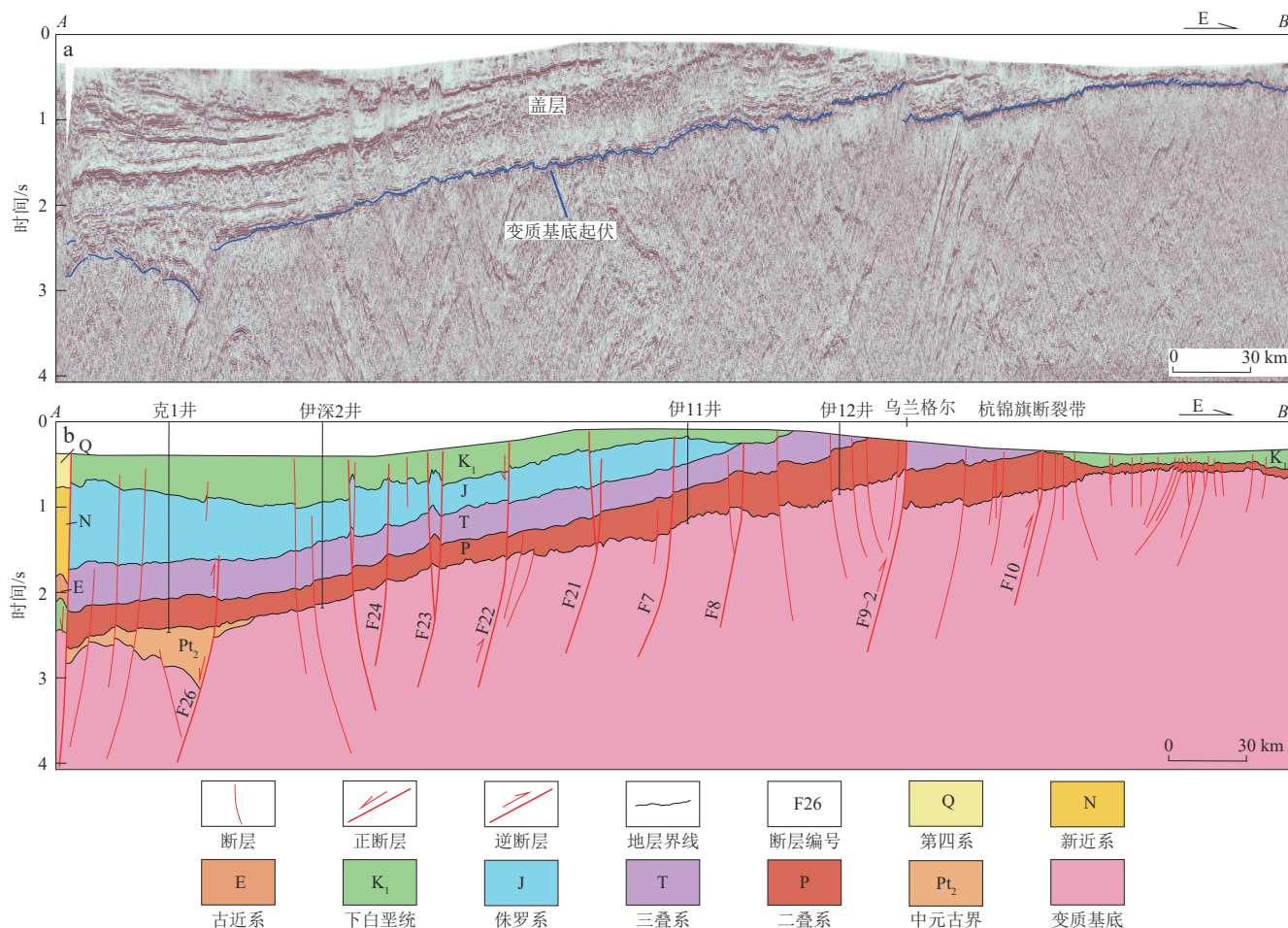


图3 鄂尔多斯盆地北部A—B地震剖面解释(剖面位置见图2)

Fig. 3 Geological interpretation from seismic section A—B in the northern Ordos Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 地震剖面;b. 地震剖面解释成果

承性古隆起之上,盆内区域整体填平补齐,以上其他地层基本全区发育(图4)。

2.3 盆地北部基底断裂特征

为了明确鄂尔多斯盆地北部基底断裂特征,采用小波多尺度分解和功率谱分析技术获取了基底重磁异常场数据,进行了位场边界线性构造识别技术处理,并辅以多条地震剖面的解释成果以及对区域地质构造的认识,从平面和剖面上对盆内基底断裂进行了识别^[22]。从盆地北部基底断裂平面分布图可以看出(图5),研究区整体上以NE向和WE向基底断裂为主,NW向和NS向构造斜交分布的构造格局,其中NE向和WE向断裂早期属于一条大型基底断裂构造带,后期分别被NW—NS向浩饶召—乌审召西断裂(F23)右行和NW—NS向新召东断裂(F26)左行走滑错断。从解译的基底断裂性质来看,以新召北断裂(F4)和泊尔江海子南断裂(F10)为界,北部近WE向基底断裂多北

倾,南部近WE向基底断裂多南倾,整体构成对冲断裂组合样式;结合盖层期基于地震资料识别的基底断裂展布(如杭锦旗断裂带)(图5)和基底构造变形与长城系不整合接触关系(图6,图7),反映近WE向的基底断裂属于是基底形成期阴山地块与鄂尔多斯地块在近NS向构造挤压应力体系下形成的收缩构造变形^[25],部分基底先存断裂在盖层期选择性复活,持续活动(图5,图6)。NNW—NS向基底断裂是上述陆陆碰撞过程中形成的撕裂断层^[25],中元古代在近WE向拉张应力场下存在选择性激活(图3,图4)。

2.4 盆地北部杭锦旗断裂带特征

地震资料已经证实,盆地北部古生代以来存在大量基底断裂活动,具有一定规模的断裂多达30余条,且分布不均,整体以近WE向、NE向和NW向为主^[12]。规模最大的当属杭锦旗断裂带,它横贯盆地北部,是由近WE向、呈雁列状展布的泊尔江海子断裂、乌兰吉林

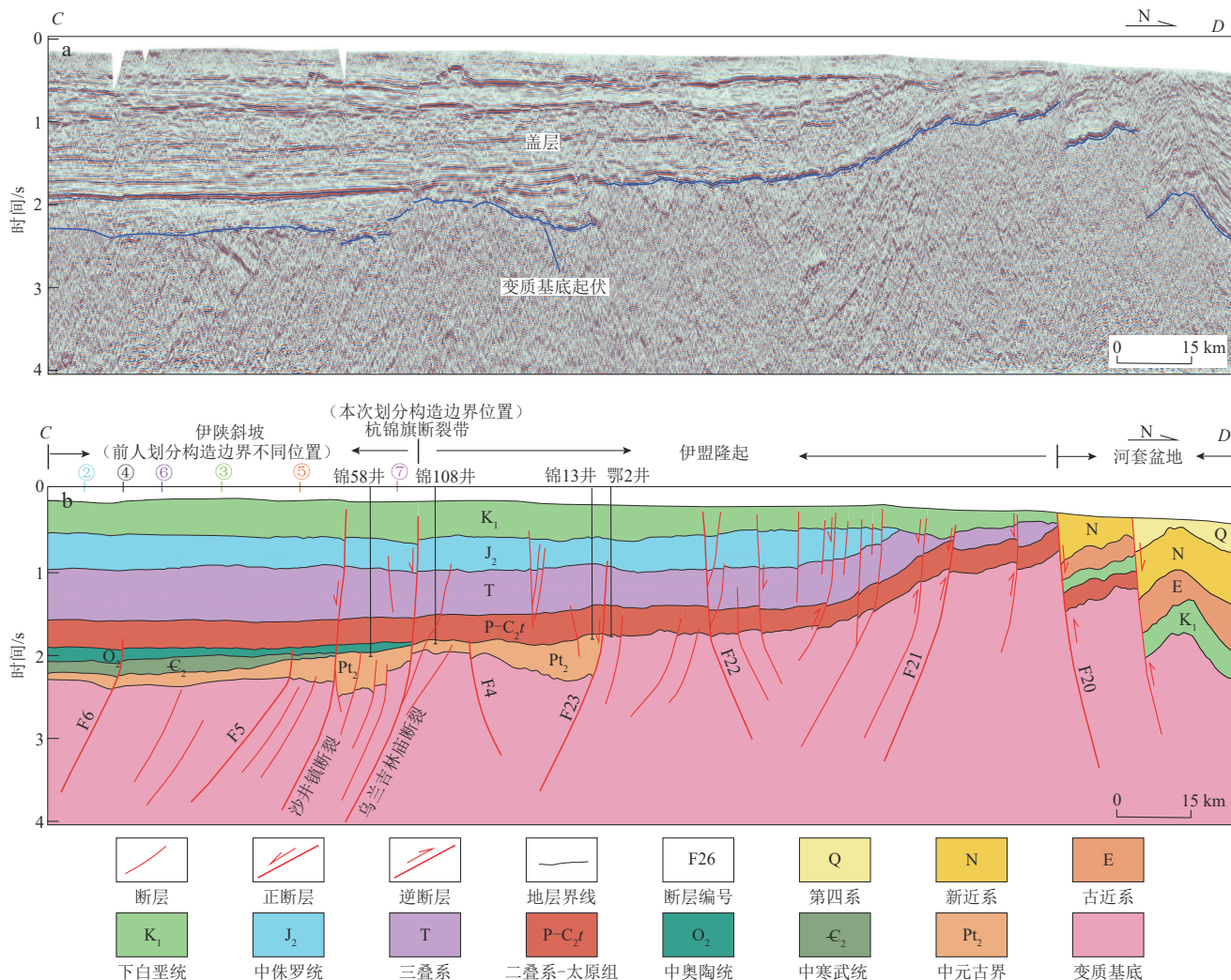


图4 鄂尔多斯盆地北部C—D地震剖面解释(剖面位置见图2)

Fig. 4 Geological interpretation from seismic section C-D in the northern Ordos Basin (see Fig. 2 for the section location)

a. 地震剖面; b. 地震剖面解释成果

(②—⑦解释见图1。)

庙断裂和三眼井断裂等组成,与重磁解译的基底断裂平面展布特征显示了较好的对应关系(图5),属于复活型-基底先存断裂带(图6—图8)。其中,泊尔江海子断裂位于研究区中、东部,是由两条走向近平行、断面北倾的次级断层构成;大致以锦48井为界,以西WE走向延伸至锦126井,以东NE走向延伸至胜2井以北,长度超过120 km(图2)。该断裂在基底内显示为由多条北倾的次级断裂组成,其中最北侧断裂在盖层期选择性复活,垂向上表现为断面上陡下缓,错断白垩系底至上古生界底之间的所有层位,局部向上出露于地表;垂直断距下大上小,表现为长城系—古生界同相轴错断最大,呈逆断距;三叠系同相轴错断不明显,三叠系以上层位同相轴错断加强,局部分散成多条断层,甚至在断裂中、西段已反转为正断距,显示多期断裂活动(图6)。

乌兰吉林庙断裂位于泊尔江海子断裂西南侧(图2),是一条断面南倾、走向NE向转近WE向、延伸长度约39 km的断裂。三眼井断裂位于杭锦旗地区西部,断面南倾、走向近WE向、区内延伸长度约为81.8 km。依据杭锦旗工区西侧地震剖面资料中显示的多地层错断断距,推测三眼井断裂向西继续延伸(图2)。在NS向剖面上(图7,图8),这两条断裂基底部分均显示为南倾、较宽强振幅地震反射带,其上与长城系底界不整合接触,揭示了两条同属于南倾基底先存构造带在后期选择性复活的断裂。垂向上,这两条断裂性质也较为相似,断面上陡下缓,错断了白垩系底—古生界底之间的所有层位,向下断穿基底,向上“通天”或消失在下白垩统志丹群中。断裂垂直断距呈上大下小的特征,以正断距为主,揭示其经历了多期构造活动。

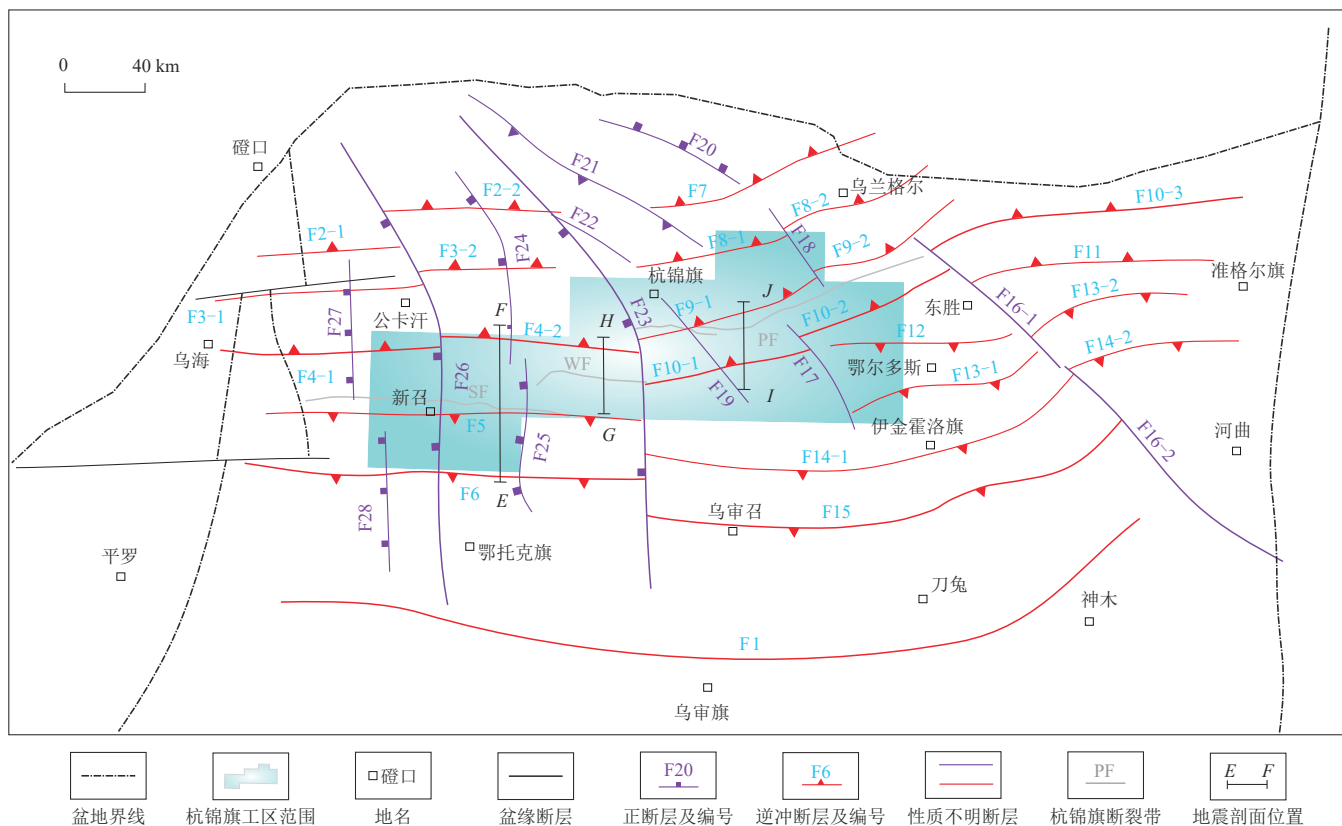


图5 鄂尔多斯盆地北部基底断裂识别平面分布

Fig. 5 Planar distribution map of basement faults identified in the northern Ordos Basin

2.5 盆地北部断裂构造演化特征

鄂尔多斯盆地北部在约 1.95 Ga 与阴山地块沿近 WE 向发生陆-陆碰撞^[19],形成 WE—NE 向基底先存断裂带和近 NS 向撕裂构造^[25],具体表现为新召北-泊尔江海子南基底断裂带(F4+F10)向南逆冲,在其南侧伴生大量对冲构造,导致伊盟隆起快速形成。盖层期,在区域构造运动的制约下,该地区先后经历了中元古代长城期伸展-裂陷阶段、加里东期—海西期多期挤压阶段、印支期挤压阶段及燕山期早期伸展-中期挤压-晚期再伸展阶段(图 1b)。

2.5.1 中元古代长城期伸展-裂陷阶段

中元古代长城期,盆地北部在近 NS 走向贺兰裂陷槽开启的 WE 向拉张应力作用下,导致前长城纪约 1.95 Ga 陆-陆碰撞造山形成近 NS 向的基底先存撕裂构造带选择性复活^[25],在研究区中、西部发育了多条近 NS 向西倾的道劳、乌兰素和塔木汗等大型正断层,分别控制蒋家梁、独贵和百眼井等半地堑式的裂陷槽演化^[20](图 9a)。该时期盆地北部 WE 向断裂构造基本不发育,只在三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂与大型 NS 向断裂交切位置的局部段正断层活动。

2.5.2 加里东期—海西期多期挤压阶段

早古生代,伊盟隆起持续隆升,寒武系—奥陶系均向北逐渐尖灭,其中盆地北部地区只沉积了中寒武统和中奥陶统马家沟组,且主要分布于杭锦旗断裂带南侧,揭示加里东期杭锦旗断裂带已经选择性激活,整体以逆断层形式活动,控制盆地北部下古生界沉积(图 9b)。晚古生代,盆地北部基本继承了早古生代北高南低的构造格局,在古特提斯洋向北俯冲和古亚洲洋板块向南俯冲碰撞消减产生的近 NS 向挤压作用下^[26],杭锦旗断裂带再次被激活,断层活动呈早强晚弱的趋势,主要控制上石炭统太原组和下二叠统山西组厚度和展布,最终盆地内区域古隆起被石盒子组上超覆盖(图 9c)。

2.5.3 印支期挤压阶段

晚三叠世末,华北板块北侧受蒙古-鄂霍茨克洋向南俯冲挤压,南侧与扬子板块沿秦岭-大别造山带剪刀式碰撞闭合^[26],在这 NS 向强挤压构造应力场下,伊盟隆起再次隆升,杭锦旗断裂带以继承性高角度逆断层活动,造成延长组顶部地层大量差异剥蚀以及下侏罗统区域性沉积间断。据杭锦旗断裂带两侧钻井延长组厚度对比发现,断裂上、下盘地层厚度差可达 100 m 以上(图 9d)。

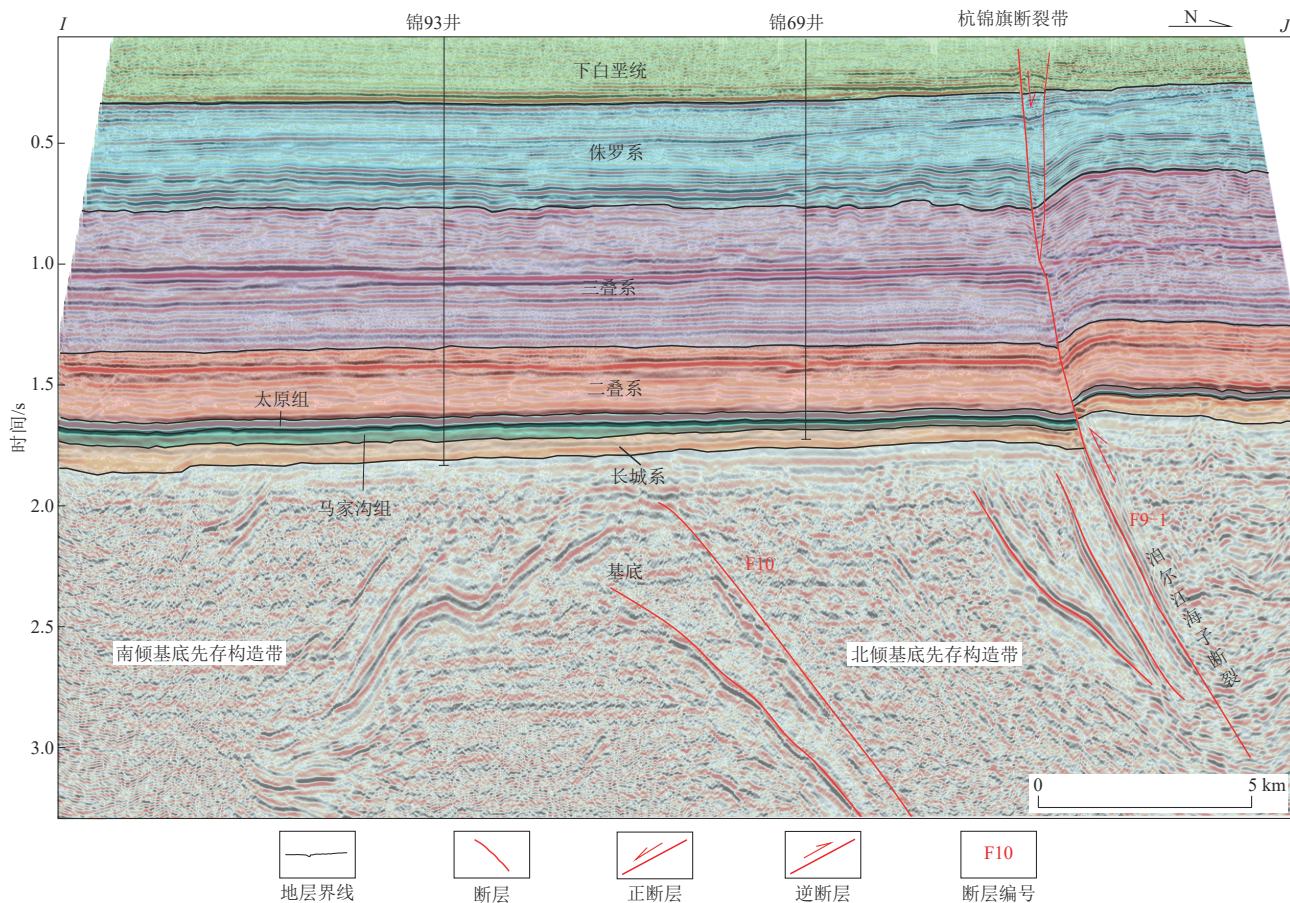


图6 鄂尔多斯盆地北部泊尔江海子断裂地震剖面解释(剖面位置见图5)

Fig. 6 Interpreted seismic section showing the Porjiahaizi fault in the northern Ordos Basin (see Fig. 5 for the section location)

2.5.4 燕山期早期伸展-中期挤压-晚期再伸展阶段

中侏罗世,古太平洋板块向东亚大陆NW向俯冲,形成了以NW向挤压占主导的构造应力场,导致鄂尔多斯盆地北部杭锦旗断裂带在右旋走滑运动下再次被激活,造成印支末期逆断层在张扭作用下反转为正断层^[12, 13]。晚侏罗世,鄂尔多斯盆地处于多向汇聚挤压作用环境^[27],伊盟隆起持续隆升,杭锦旗断裂带再次反转为逆断层,断裂上盘中侏罗统在逆牵引构造作用下发育了串珠状展布的背斜构造带并造成中侏罗统上部地层的剥蚀(图9e)。早白垩世晚期,受太平洋板块俯冲回撤的影响,华北板块整体以岩石圈引张作用为主^[27],鄂尔多斯盆地北部杭锦旗断裂带再次以正断层形式活动,控制志丹群沉积(图9f)。晚白垩世至今,伊盟隆起构造继承了燕山期的构造格局,总体表现为东北高、西南低的构造特征(图9g)。

3 伊盟隆起南部构造边界

鄂尔多斯盆地北部伊盟隆起与伊陕斜坡一级构造单元边界的划分多样(图1a),且缺乏明确依据和详细论

证,仅部分学者简单交代参考了鄂尔多斯盆地北部航磁的特征,认为盆地北部新召—乌审召—伊金霍洛旗一带近WE向、略向南凸出的串珠状高航磁异常条带是基底大断裂的表现,北侧多发育WE—NE向断裂,南侧多发育NE向断裂,将其视为不同构造单元的边界,但前人划分伊盟隆起南部构造边界的位置在二维地震剖面上并没有基底断裂在盖层期持续活动的明显显示(图4)。从基底断裂平面分布图来看(图5),盆地北部基底断裂整体是以NE向和WE向断裂为主,它们早期属于同一条大型断裂构造带,是约1.95 Ga前阴山地块与鄂尔多斯地块在陆-陆碰撞过程中形成的近NS向构造挤压应力体系作用的产物^[25]。目前基底锆石测年资料表明,新召北—泊尔江海子南基底断裂带(F4+F10)上盘为新太古代岩石,下盘为古元古代岩石,支持该断裂带在中元古代之前是一条不同构造单元的分界线^[28]。

从二维和三维地震资料解释成果来看,盖层期在不同区域应力场叠加作用下,盆地北部大多数NE—WE向基底先存断裂带除杭锦旗断裂带外并没有大规模复活,仅存在局部复活。以盆地北部南北走向二维C—D地震剖面(图4)为例,尽管盆地北部结晶基底起

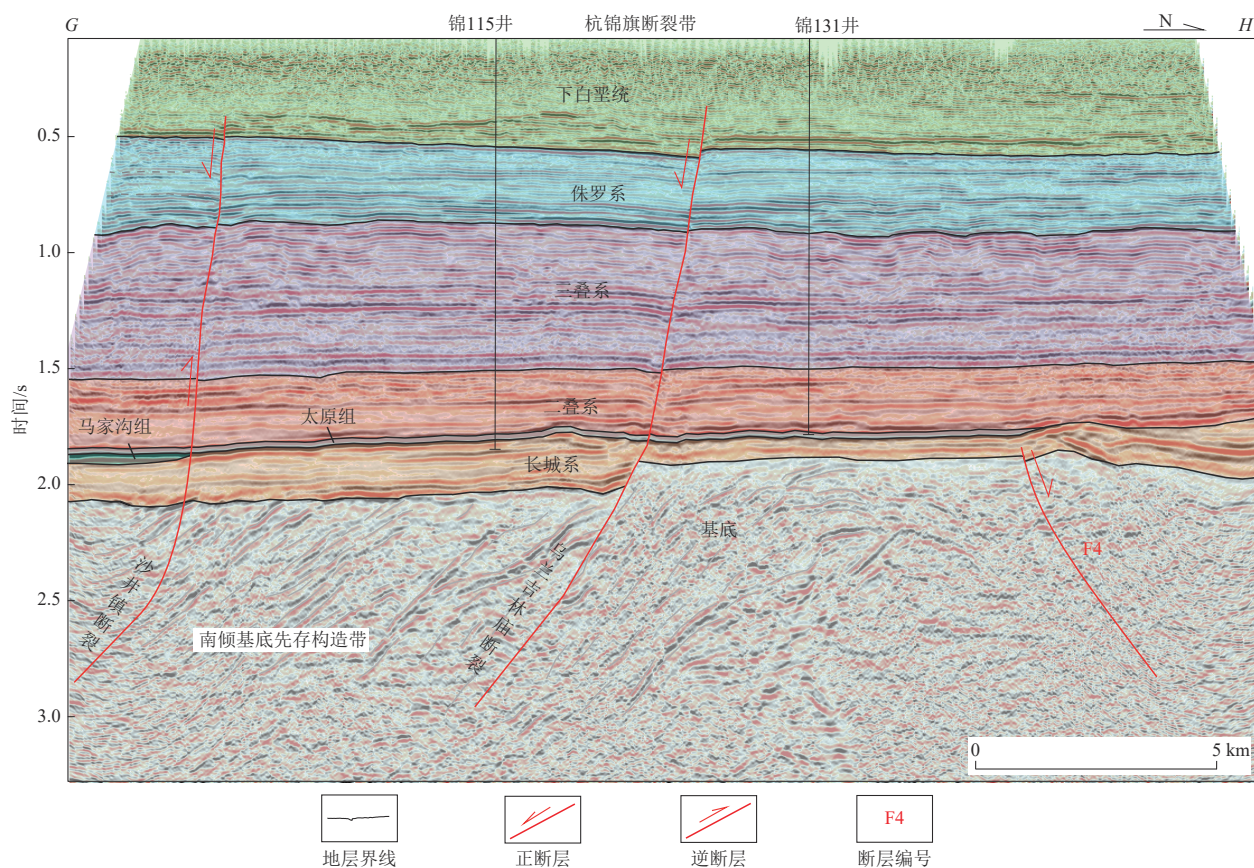


图7 鄂尔多斯盆地北部乌兰吉林庙断裂地震剖面解释(剖面位置见图5)

Fig. 7 Interpreted seismic section showing the the Wulanjilinmiao fault in the northern Ordos Basin (see Fig. 5 for the section location)

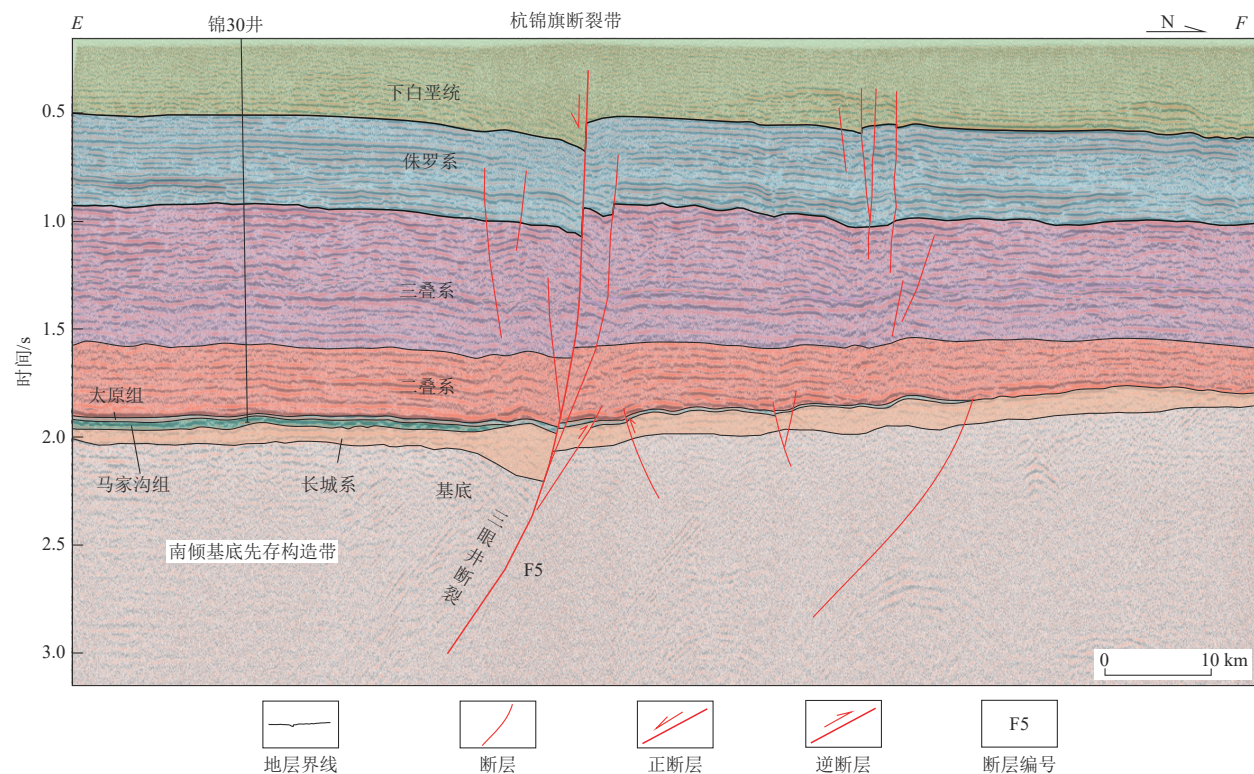


图8 鄂尔多斯盆地北部三眼井断裂地震剖面解释(剖面位置见图5)

Fig. 8 Interpreted seismic section showing the Sanyanjing fault in the northern Ordos Basin (see Fig. 5 for the section location)

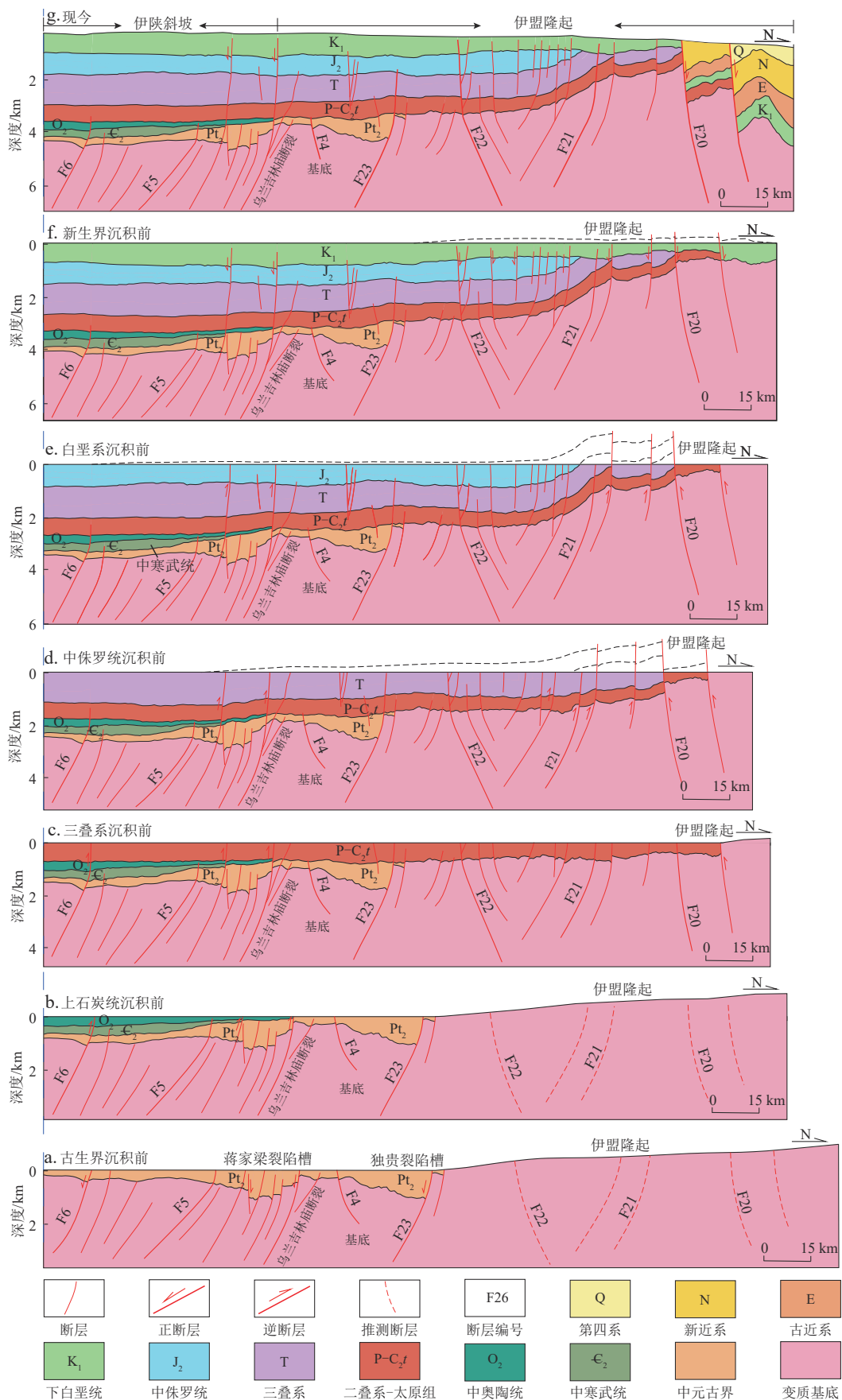


图9 鄂尔多斯盆地北部构造演化过程

Fig. 9 Schematic diagram showing the tectonic evolutionary process of the northern Ordos Basin

伏受中元古代裂陷作用和燕山运动不平衡抬升的影响差异大,但以乌兰吉林庙断裂为界,向北二叠系底界同相轴起伏较大、断续分布,上覆地层同相轴整体错断较多,向南二叠系底界同相轴较为平坦、明显连续,上覆地层同相轴错断也较少,指示以乌兰吉林庙断裂为界,古生界以来北部构造活动要远强于南部构造活动(图4)。钻井和地震资料均揭示盆地北部古生代—中生代地层在杭锦旗断裂带南、北部存在明显沉积厚度差异,尤其是奥陶系和晚石炭统太原组展布,受杭锦旗断裂带活动控制最为明显,地层沉积主要分布在杭锦旗断裂带以南(图2,图4)。从盆地北部构造演化过程来看,新召北—泊尔江海子基底断裂带(F4+F10)在中元古代之前是一条不同构造单元的分界线;杭锦旗断裂带作为上述先存构造带在盖层期的复活型—基底断裂带,古生代以来一直持续活动,控制着盆地北部的构造—沉积格局,与不同层系富集的多种能源矿产关系密切^[29,30],比目前流行以乌海—鄂托克旗—准格尔旗一线划分现今伊盟隆起和伊陕斜坡两大构造单元的边界更为合理。

4 油气勘探意义

4.1 杭锦旗断裂带控制烃源岩展布和成熟度

鄂尔多斯盆地北部烃源岩主要为上古生界太原组和山西组煤层、暗色泥岩和炭质泥岩,其中太原组烃源岩主要分布于杭锦旗断裂带的南部,为一套海—陆交互的滨浅海和潮坪沉积,厚度一般在10~40 m;山西组烃源岩较太原组分布更广,为一套陆相扇三角洲沉积,杭锦旗断裂带北部厚度在5~20 m,南部厚度10~40 m,厚度差距明显^[31]。整体上,杭锦旗断裂带晚古生代的构造活动控制着上古生界烃源岩分布和厚度变化,断裂带南部厚度一般在30~70 m,北部厚度一般在10~30 m,从东南向西北方向逐渐减薄,煤层厚度与烃源岩厚度变化趋势一致^[29](图10)。

从杭锦旗断裂带南、北部烃源岩热演化史来看(图11),晚三叠世延长期之前,南部和北部烃源岩整

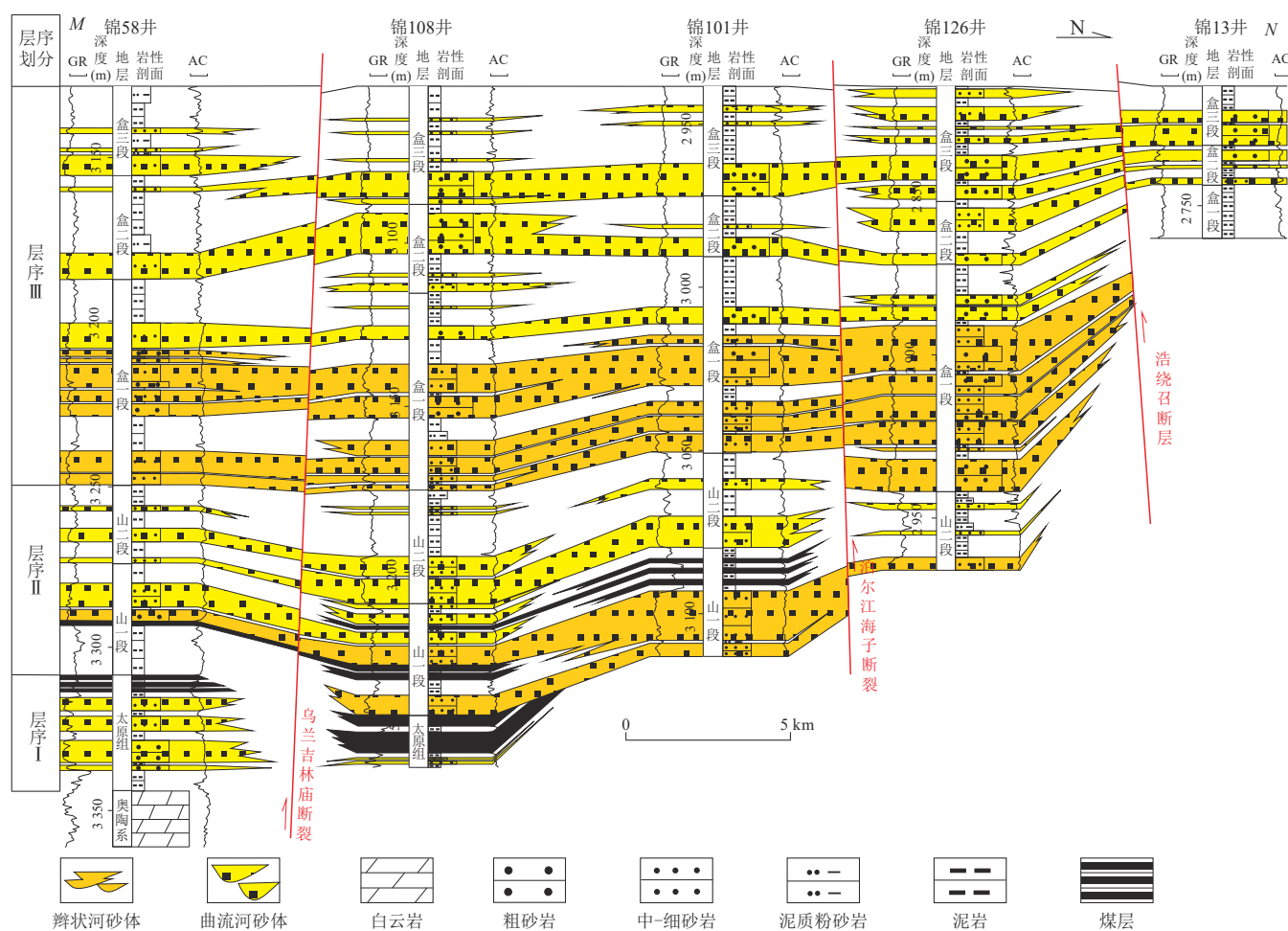


图10 锦58—锦108—锦101—锦126—锦13井连井层序地层剖面(剖面位置见图2)

Fig. 10 Sequence stratigraphic section crossing wells Jin-58, Jin-108, Jin-101, Jin-126, and Jin-13 in the HFZ (see Fig. 2 for the section location)

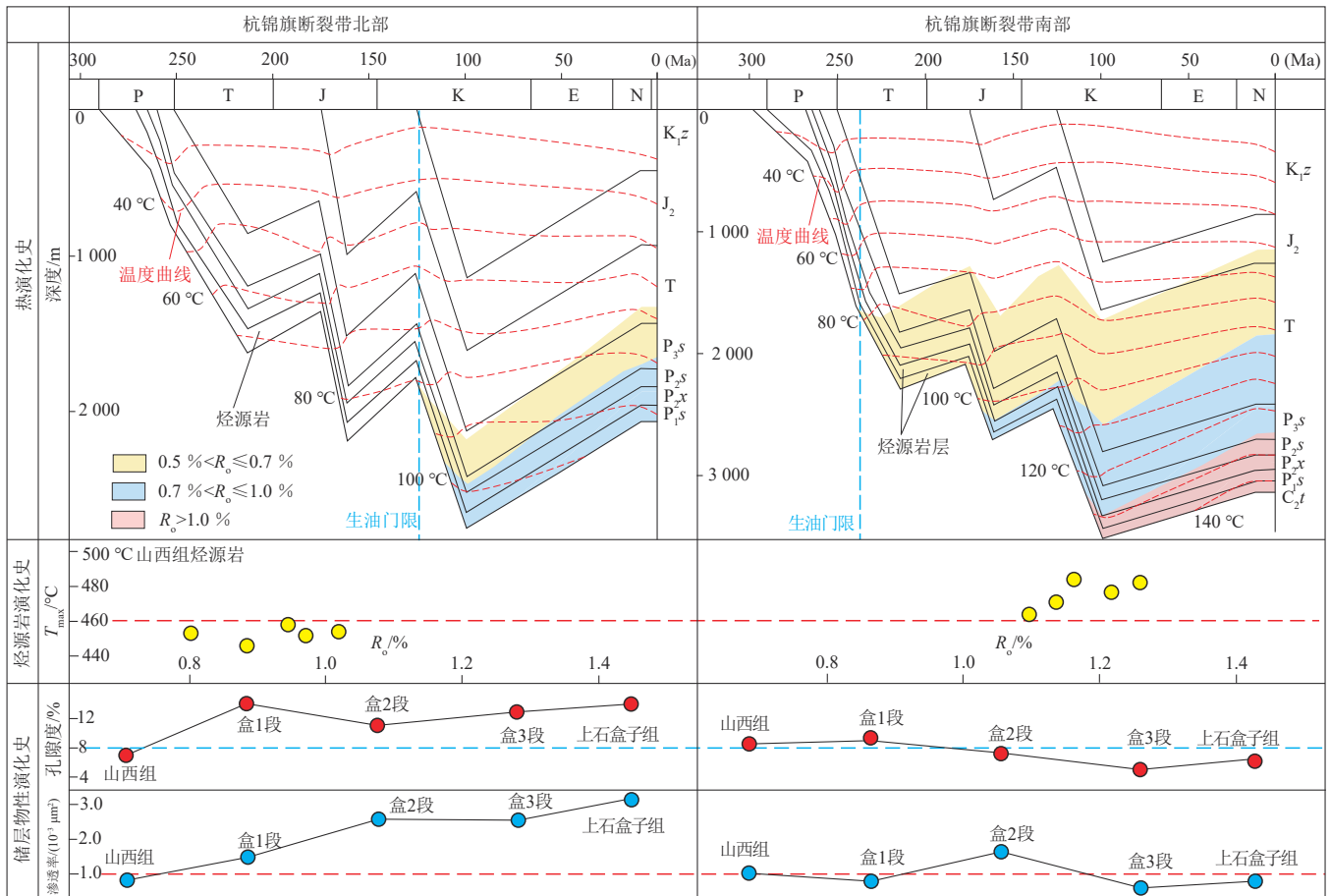


图11 杭锦旗断裂带南、北部上古生界烃源岩演化史及储层物性差异

Fig. 11 Schematic diagram showing the Upper Paleozoic evolutionary history of source rocks and differences in reservoir physical properties between the north and south of the HFZ

体持续埋深,热演化程度稳步增加,但受杭锦旗断裂带多期差异构造活动的影响,南部烃源岩埋深远大于北部烃源岩,并于早三叠世开始生油(镜质体反射率 $R_o=0.5\%$),北部烃源岩直到早白垩世中期才开始生油($R_o=0.5\%$);南、北部烃源岩均于早白垩世晚期达到最大埋深,有机质成熟加快;现今杭锦旗断裂带以南山西组样品 R_o 平均值为 1.20% ,处于成熟晚期—高成熟期演化阶段,北部山西组样品 R_o 平均值为 0.92% ,主体处于成熟早期阶段^[32]。山西组烃源岩热解烃最高热解峰温(T_{max})也以杭锦旗断裂带为界,北部 T_{max} 平均为 458°C ,南部 T_{max} 平均为 476°C ,存在较大差异,指示断裂带活动对上、下盘烃源岩演化阶段有重要控制作用(图11)。

4.2 杭锦旗断裂带控制储层展布和物性变化

杭锦旗地区晚古生代的物源区位于鄂尔多斯盆地北缘,上古生界砂体分布受断层、沉积及物源控制,且断层作用逐渐减弱^[29]。在垂利物源方向的南北向连井剖面上(图10),杭锦旗断裂带两侧的砂岩厚度变化

较大;在泊尔江海子断裂北侧,太原组普遍缺失,山西组厚度较薄,导致砂岩厚度较薄;上、下石盒子组砂/地比高,砂岩厚度较大,其中盒(石盒子组)1段的单层砂体最大厚度达 20 m ;断裂以北局部厚层砂体常发生尖灭,说明断裂活动影响了砂体的南北向连通;断裂以南情况恰好相反,砂体垂向叠置多、横向连通性好,但砂/地比低;各层系的有利砂体发育区带多呈近南北向或北东向展布,部分层系存在多个砂体发育中心,受杭锦旗断裂带横向构造活动差异控制。

从盆地北部数千个钻孔孔隙度和渗透率统计平均值来看(图11),以杭锦旗断裂带为界,北部山西组—上石盒子组岩石物性整体呈递增趋势,孔隙度平均值 $11\%\sim 12\%$,渗透率平均值 $(2.4\sim 2.8)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,物性较好,属于中孔、中渗储层;断裂带以南,山西组—上石盒子组岩石物性整体呈递减趋势,局部存在波动,孔隙度平均值 $6\%\sim 7\%$,渗透率平均值 $(0.8\sim 1.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,物性相对较差,属低孔、低渗储层。总体上,上古生界各沉积时期储层物性整体受杭锦旗断裂带控制,呈北优、南劣的特征。

4.3 杭锦旗断裂带控制油气圈闭类型

杭锦旗断裂带以北上古生界起伏较大,形成多个局部凸起,且次级断层较为发育,大多断穿太原组和山西组(图4,图12),多形成挤压褶皱背斜圈闭、潜山披覆圈闭、鼻状构造圈闭和逆牵引背斜圈闭等构造圈闭^[33],如什股壕、拉不仍和阿日柴达木北等。杭锦旗断裂带以南的上古生界构造相对平缓,断裂较少,局部构造鲜有发育,多以岩性-地层圈闭为主^[34](图12)。目前,断裂带以南的十里加汗区带上古生界盒1段—盒3段、山(山西组)1段—山2段和太原组等6个层系均已钻遇气层,气层分布特征与伊陕斜坡南部的大牛地气田和苏里格气田类似,具有大型岩性圈闭纵向上多层叠合、横向上复合连片的特征,支持将杭锦旗断裂带作为划分伊盟隆起南部构造边界的认识(图12)。

4.4 杭锦旗断裂带控制上古生界油气运移和聚集

与杭锦旗断裂带南部地区相比,北部地区虽然烃源岩厚度较薄、成熟度较低,但天然气资源却十分丰富。断裂带南、北两侧天然气成因和气-源对比等研究表

明,断裂带北部地区天然气主要是从断裂带以南地区运移而来^[30, 35-36]。现今勘探已经证实,杭锦旗断裂带断距大的北部区域分布大量工业气流井,如什股壕气区和拉不扔气藏,而其南部工业气流井少;断距小的南部区域分布较多的工业气流井,如十里加汗气区,北部仅分布少数低产气流井,多数为干井^[34, 37],揭示了杭锦旗断裂带通过断裂侧向和垂向封闭性差异控制了南、北两侧天然气运移-富集区域及主力含气层系(图12)。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地北部主要发育WE向和NE向基底断裂,它们整体形成于约1.95 Ga鄂尔多斯地块与阴山地块沿近WE向发生的陆-陆碰撞事件,以对冲构造样式控制伊盟隆起的形成;其中新召北-泊尔江海子南基底先存断裂带(F4+F10)在中元古代之前是一条分隔不同构造单元的边界线。

2) 杭锦旗断裂带横贯盆地北部,主要是由呈雁列式展布的泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井等大型基底断裂组成;它们是新召北-泊尔江海子南基底先存

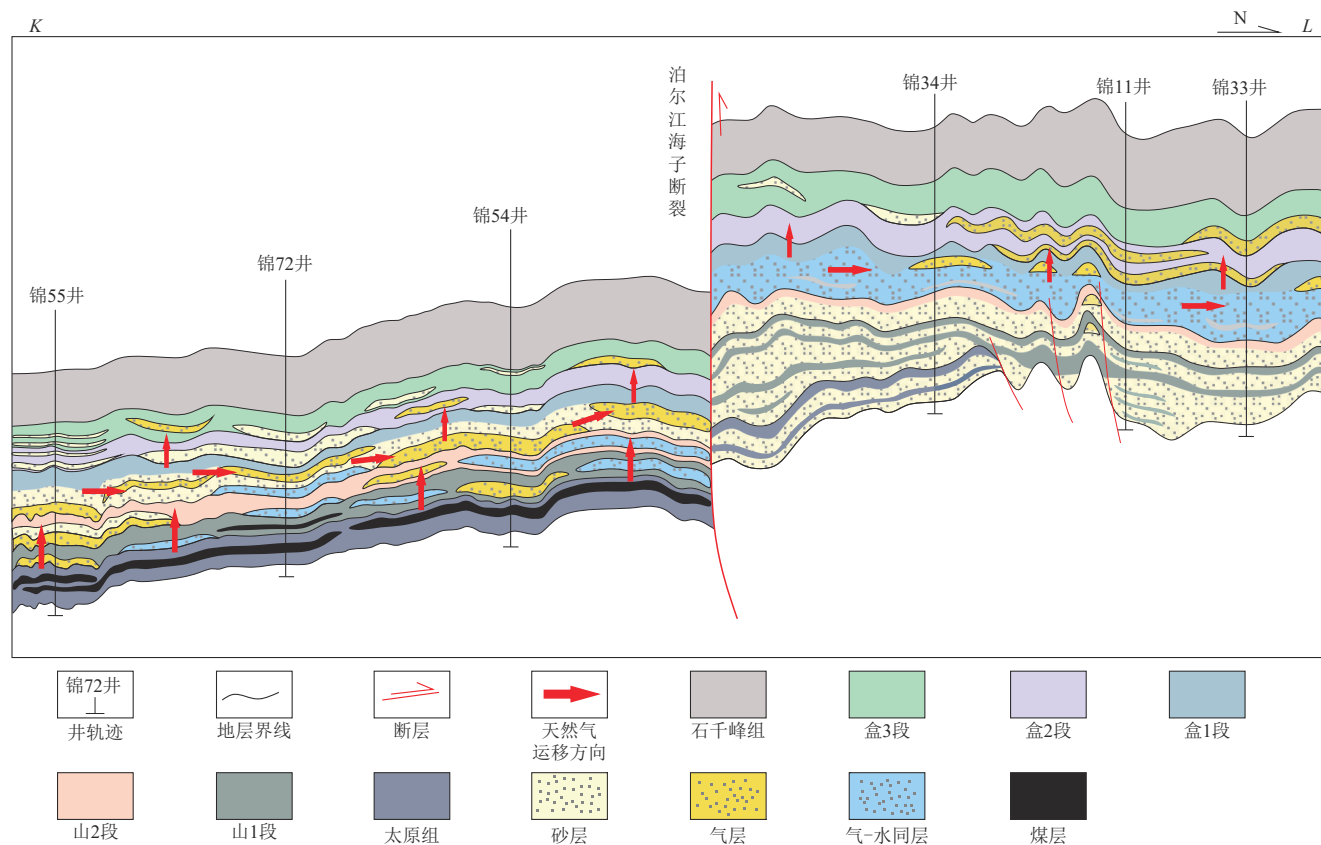


图12 杭锦旗断裂带南、北部差异成藏模式示意图(修改自李功强等, 2017^[31]; 剖面位置见图2)

Fig. 12 Schematic diagram showing the differences in the accumulation patterns between the north and south of the HFZ (modified after reference [31]; see Fig. 2 for the section location)

断裂带(F4+F10)在加里东期的复活型基底断裂带;海西期、印支期和燕山期伊盟隆起发生多期继承性隆升,杭锦旗断裂带也持续继承性活动,一起控制盆地北部各时期构造-沉积演化格局;结合盆地北部整体构造演化历史认为,以杭锦旗断裂带作为伊盟隆起和伊陕斜坡两大构造单元的边界更为合理。

3) 盆地北部的烃源岩展布、成熟度、储层特征和物性变化、油气圈闭类型以及油气分布等方面,均以杭锦旗断裂带为界呈现出较大差异,表明杭锦旗断裂带通过断层上、下盘差异构造活动控制着盆地北部油气形成与分布,进一步支持将其作为伊盟隆起南部构造边界的认识。

参 考 文 献

- [1] 杨海波,陈磊,孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 686-688.
YANG Haibo, CHEN Lei, KONG Yuhua. A novel classification of structural units in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(6): 686-688.
- [2] 张吉光,王英武. 沉积盆地构造单元划分与命名规范化讨论[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 309-313, 318.
ZHANG Jiguang, WANG Yingwu. Discussion on standard of classification and nomenclature of structural elements in sedimentary basins [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(4): 309-313, 318.
- [3] 王同和. 晋陕地区地质构造演化与油气聚集[J]. 华北地质矿产杂志, 1995, 10(3): 283-398.
WANG Tonghe. Evolutionary characteristics of geological structure and oil-gas accumulation in Shanxi-Shaanxi area [J]. Journal of Geology and Mineral Resources North China, 1995, 10(3): 283-398.
- [4] 杨华,席胜利,魏新善,等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 17-24.
YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in ordos [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 17-24.
- [5] 张福礼,黄舜兴,杨昌贵,等. 鄂尔多斯盆地天然气地质[M]. 北京:地质出版社,1994.
ZHANG Fuli, HUANG Shunxing, YANG Changgui, et al. Natural gas geology in the Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [6] 周雁,付斯一,张涛,等. 鄂尔多斯盆地下古生界构造-沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 264-275.
ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleogeographic reconstruction, and favorable hydrocarbon-bearing zones division of the Lower Paleozoic in the Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(2), 264-275.
- [7] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [8] 翟咏荷,何登发,开百泽. 鄂尔多斯盆地及邻区中一晚二叠世构造-沉积环境与原型盆地演化[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 32-44.
Zhao Yonghe, He Dengfa, Kai Baize. Tectonic-sedimentary environment and prototype basin evolution of the Ordos Basin and its adjacent areas during the Middle-Late Permian [J]. Lithologic Oil and Gas Reservoirs, 2024, 36(1), 32-44.
- [9] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷12 长庆油田[M]. 北京:石油工业出版社,1992.
Changqing Oilfield Petroleum Geology Compilation Team. Petroleum geology of China: Vol. 12 Changqing Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [10] 王锡福,陈安福. 鄂尔多斯盆地非地震油气勘探[M]. 北京:地质出版社,1992.
WANG Xifu, CHEN Anfu. Non-seismic exploration for oil and gas in Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [11] 常兴浩,孙晓,杨明慧. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区构造单元划分新方案及地质意义[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(30): 8892-8899.
CHANG Xinghao, SUN Xiao, YANG Minghui. Discussing on division scheme of sub-tectonic units in Hangjinqi area, Ordos Basin and the geological significance [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(30): 8892-8899.
- [12] YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al. Segmentation and inversion of the Hangjinqi fault zone, the northern Ordos Basin (North China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 70/71: 64-78.
- [13] YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al. Mesozoic structural evolution of the Hangjinqi area in the northern Ordos Basin, North China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66 (Part 4): 695-710.
- [14] 张春林,邢凤存,张月巧,等. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 89-100.
ZHANG Chunlin, XING Fengcun, ZHANG Yueqiao, et al. Tectonic evolution of Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts during the Early Paleozoic and its control on Cambrian lithofacies paleogeography in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 89-100.
- [15] 张春林,邢凤存,张月巧,等. 鄂尔多斯盆地早古生代庆阳和乌审旗古隆起构造演化及其对寒武系岩相古地理的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 89-100.
ZHANG Chunlin, XING Fengcun, ZHANG Yueqiao, et al. Tectonic evolution of the Qingyang and Wushenqi paleo-uplifts in the ordos Basin during the Early Paleozoic and their control on the lithofacies paleogeography of the Cambrian [J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(1), 89-100.
- [16] 何登发,包洪平,开百泽,等. 鄂尔多斯克拉通地块活化了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1271-1291.
HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Has the ordos block, a cratonic block been reactivated? [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1271-1291.
- [17] 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 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, 80(5): 617-638.
- [18] 田刚,杨明慧,宋立军,等. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及演

- 化过程新认识[J]. 地球科学, 2024, 49(1): 123-139.
- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al. New understanding of basement structural characteristics and its evolution process in Ordos Basin[J]. Earth Science, 2024, 49(1): 123-139.
- [19] ZHAO Guochun, SUN Min, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 177-202.
- [20] 张威, 闫相宾, 刘超英, 等. 鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 168-178.
- ZHANG Wei, YAN Xiangbin, LIU Chaoying, et al. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 168-178.
- [21] 孙肇才. 鄂尔多斯盆地北部地质构造格局及前中生界的油气远景[J]. 石油学报, 1980, 1(3): 7-17.
- SUN Zhaocai. The tectonic framework and petroleum prospectivity of pre-Mesozoic in the northern part of the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 1(3): 7-17.
- [22] 马庆佑, 吕海涛, 蒋华山, 等. 塔里木盆地台盆区构造单元划分方案[J]. 海相油气地质, 2015, 20(1): 1-9.
- MA Qingyou, LYU Haitao, JIANG Huashan, et al. A division program of structural units in the Paleozoic platform-basin region, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2015, 20(1): 1-9.
- [23] 郭宏辉, 冯建伟, 赵力彬. 塔里木盆地博孜—大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 962-975.
- GUO Honghui, FENG Jianwei, ZHAO Libing. Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in the Bozi-Dabei area, Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(4): 962-975.
- [24] 何紫娟. 重磁综合处理解释在鄂尔多斯区域构造中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 30-40.
- HE Zijuan. The application of gravity and magnetic data processing and interpretation in regional tectonic analysis of Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013: 30-40.
- [25] 田刚, 汶小岗, 薛海军, 等. 鄂尔多斯盆地北部重磁场及其基底断裂特征研究[J]. 地球学报, 2024, 45(3): 279-290.
- TIAN Gang, WEN Xiaogang, XUE Haijun, et al. Study on gravity and magnetic fields and characteristics of basement faults in the northern Ordos Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2024, 45(3): 279-290.
- [26] DONG Yunpeng, SUN Shengsi, SANTOSH M, et al. Central China orogenic belt and amalgamation of east Asian continents[J]. Gondwana Research, 2021, 100: 131-194.
- [27] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(6): 913-938.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, et al. The Yanshan movement and the multi plate convergence structure of the Late Mesozoic era in east Asia: Commemorating the 90th anniversary of the Yanshan movement[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(6): 913-938.
- [28] TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al. Late Neoproterozoic plate subduction in western North China Craton: Evidence from ca. 2.51 Ga to 2.46 Ga basement rocks in northern Ordos Basin[J]. Precambrian Research, 2023, 387: 106979.
- [29] YANG Minghui, LI Liang, ZHOU Jin, et al. Structural evolution and hydrocarbon potential of the Upper Paleozoic northern Ordos Basin, North China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89(5): 1636-1648.
- [30] BAI Donglai, YANG Minghui, LEI Zhibin, et al. Effect of tectonic evolution on hydrocarbon charging time: A case study from Lower Shihezi Formation (Guadalupian), the Hangjinqi area, northern Ordos, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106465.
- [31] 薛会, 张金川, 徐波, 等. 鄂尔多斯北部杭锦旗探区上古生界烃源岩评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 21-28.
- XUE Hui, ZHANG Jinchuan, XU Bo, et al. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(1): 21-28.
- [32] 张威. 鄂尔多斯盆地北部上古生界源储配置演化与气水分布响应[D]. 武汉: 中国地质大学(北京), 2022.
- ZHANG Wei. Upper Paleozoic source-reservoir configuration evolution and gas-water distribution response in northern Ordos Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.
- [33] 李勇霖, 倪智勇, 李晓光, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区断控气藏差异[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 773-783.
- LI Yonglin, NI Zhiyong, LI Xiaoguang, et al. Differences in fault-controlled gas reservoirs in the Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(3): 773-783.
- [34] 李功强, 贾会冲, 潘和平, 等. 内蒙古杭锦旗探区石炭—二叠系天然气成藏模式[J]. 现代地质, 2017, 31(3): 587-594.
- LI Gongqiang, JIA Huichong, PAN Heping, et al. The Permian-Carboniferous gas reservoir forming model of Hangjinqi exploration area in northern Ordos Basin, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2017, 31(3): 587-594.
- [35] LIU Kai, WANG Ren, SHI Wanzhong, et al. Tectonic controls on Permian tight gas accumulation: Constrains from fluid inclusion and paleo-structure reconstruction in the Hangjinqi area, northern Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: 103616.
- [36] 张迈, 宋到福, 王铁冠, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 124-135.
- ZHANG Mai, SONG Daofu, WANG Tieguan, et al. Geochemical characteristics of natural gas and gas source exploration in the Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(1): 124-135.
- [37] 李淮莲, 纪文明, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地北部泊尔江海子断裂对上古生界天然气成藏的控制[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 584-590.
- LI Weilian, JI Wenming, LIU Zhen, et al. Control of Boerjianghaizi fault on gas accumulation of Upper Paleozoic in northern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2015, 29(3): 584-590.