

## 河套盆地临河坳陷及其周边地区中-新生代成盆演化特征

张锐锋<sup>1</sup>, 于福生<sup>2</sup>, 刘喜恒<sup>3</sup>, 刘静<sup>3</sup>, 陈树光<sup>3</sup>, 吴晨林<sup>4</sup>, 王逸群<sup>2</sup>, 王盛亮<sup>4</sup>

[1. 中国石油 华北油田公司 勘探事业部, 河北 任丘 062550; 2. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油 华北油田公司 勘探开发研究院, 河北 任丘 062550; 4. 中国石油 华北油田 巴彦勘探开发分公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015000]

**摘要:**河套盆地经历40余年勘探, 近期获得重大突破, 吉华2X井和松5井高产油流证明临河坳陷内中-新生代层系具有较大的勘探潜力, 因此开展中-新生代盆地构造演化研究, 对分析沉积充填过程与圈闭形成条件具有借鉴意义。通过野外露头调查、岩心观察、地球物理资料解释及构造演化阶段分析等综合研究认为: 临河坳陷及周边地区中-新生代发育挤压、伸展、走滑和反转等多种构造变形样式, 经历了挤压拗陷(早白垩世李三沟组沉积期)、拗-断转换(早白垩世固阳组沉积期)、隆升剥蚀(晚白垩世—古新世)、弱断陷(始新世—渐新世)、强烈断陷(中新世—上新世)和走滑改造(更新世—全新世)等多期构造演化阶段, 盆地类型属于多旋回叠合盆地。建立了早期差异挤压、晚期差异伸展叠加盆地成因模型。

**关键词:**反转构造; 构造演化; 中-新生代; 临河坳陷; 叠合盆地; 河套盆地

**中图分类号:**TE121.2

**文献标识码:**A

## Evolutionary characteristics of Linhe Depression and its surrounding areas in Hetao Basin from the Mesozoic to Cenozoic

Zhang Ruifeng<sup>1</sup>, Yu Fusheng<sup>2</sup>, Liu Xiheng<sup>3</sup>, Liu Jing<sup>3</sup>, Chen Shuguang<sup>3</sup>, Wu Chenlin<sup>4</sup>, Wang Yiqun<sup>2</sup>, Wang Shengliang<sup>4</sup>

[1. Exploration Department of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062550, China;  
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
3. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062550, China;  
4. Bayan Branch of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Bayan Nur, Inner Mongolia Autonomous Region 015000, China]

**Abstract:** A major breakthrough, marked by two high-yield wells (Jihua 2X and Song 5), has been made recently in the Linhe Depression of the Hetao Basin after more than 40 years of exploration, thus revealing the great hydrocarbon potential of its Mesozoic-to-Cenozoic strata. A study on the tectonic evolution of the basin from the Mesozoic to Cenozoic may be of great contribution to the analysis of the deposition process and conditions for forming oil/gas traps. As a result, an integrated analysis of field outcrops, cores, geophysical data, and structural evolution of the basin was carried out and shows that a variety of structural deformation patterns are developed in the Linhe Depression and its surrounding areas from the Mesozoic to Cenozoic, including compression, extension, strike-slip, and inversion structures. The study area thereby experienced multiple-stage evolution from compressional depression (during the deposition of Lisangou Formation in the Early Cretaceous), depression-to-faulting conversion (during the deposition of Guyang Formation in the Early Cretaceous), uplifting and denudation (during the Late Cretaceous to Palaeocene), to weakly rifted depression (during the Eocene to Oligocene), strongly faulted depression (during the Miocene to Pliocene), and strike-slip transformation (during the Pleistocene to Holocene). The basin belongs to the multi-cycle superimposed type. And a genetic basin model was established to incorporate an early differential compression and a superimposition with late differential extension.

**Key words:** inverted structure, tectonic evolution, Mesozoic to Cenozoic, Linhe Depression, superimposed basin, Hetao Basin

收稿日期: 2019-11-22; 修订日期: 2020-10-28。

第一作者简介: 张锐锋(1964—), 博士、教授级高级工程师, 地质综合研究和勘探管理。E-mail: ktb\_zrf@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技攻关项目(2019D-0815); 国家自然科学基金面上项目(42072144)。

河套盆地在平面上呈狭长的弧形展布于巴彦乌拉山-狼山构造带、贺兰山构造带、阴山褶皱带与鄂尔多斯盆地之间,面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。前人根据基底隆升幅度、沉积厚度和主要断裂分布特征将盆地自西向东划分为临河凹陷、乌拉山隆起、乌前凹陷、包头隆起和呼和凹陷5个(两隆三拗)一级构造单元(图1)<sup>[1]</sup>,另有研究者划分为吉兰泰凹陷、磴口隆起、临河凹陷、乌拉山隆起、乌前凹陷、包头隆起和呼和凹陷7个(三隆四拗)一级构造单元<sup>[2-6]</sup>。其中,临河拗

陷第四系覆盖区面积约为 $2.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,属于河套盆地内分布面积最广、沉降深度最大的拗陷。随着2018年JHZK2井在600 m以下的吉兰泰潜山(太古界)获日产 $21.59 \text{ m}^3$ 高产工业油流、吉华2X井和松5井先后在古近系获日产 $10.26 \text{ m}^3$ 和 $62.6 \text{ m}^3$ 高产油流后,吉华4X和吉华8X井又先后在白垩系获日产201.9和 $301.8 \text{ m}^3$ 高产工业油流,证明了临河拗陷是一个富含油气的中-新生代拗陷。但是,关于中-新生代河套盆地的性质及成因存在认识差异。前人根据盆地内

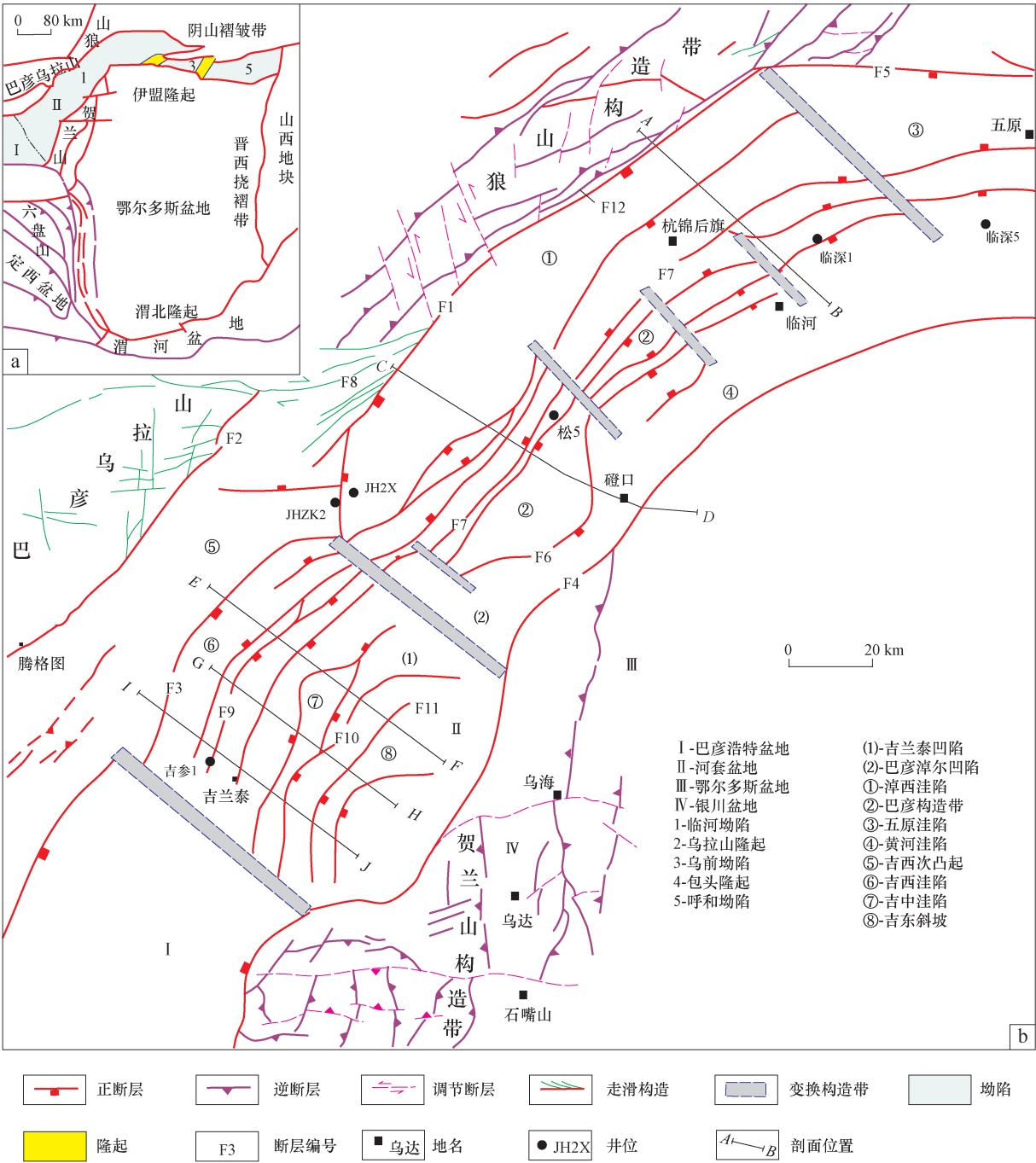


图1 河套盆地构造单元划分(a)及临河拗陷构造纲要图(b)  
Fig.1 Tectonic units of the Hetao Basin (a) and sketch map of the Linhe Depression (b)



发育大量的正断层认为河套盆地是一个中-新生代(拱张)断陷盆地<sup>[3-6,8-10]</sup>;另一部分研究者认为中生代是挤压拗陷盆地,而新生代是伸展断陷盆地<sup>[1-2,7,11]</sup>,在挤压拗陷和伸展断陷的同时,因局部构造走向与构造应力场之间交角差异导致局部走滑构造发育<sup>[1-2,7]</sup>,而少部分研究者则根据弧形构造形态认为河套盆地是在前寒武系花岗岩、石英岩及变质岩基底基础上发育的中-新生代弧形走滑拉分盆地<sup>[12-13]</sup>。

产生上述分歧的主要原因是没有采用露头资料与地震剖面解释成果相结合的方法来分析盆地的构造演化特征。本文在野外大量露头剖面测量基础上,结合二维、三维地震测线解释,识别出挤压、伸展、走滑、反转等多种构造变形样式,划分了临河拗陷中生代以来的构造演化阶段,阐明了盆地性质,建立了早白垩世差异挤压、始新世—上新世差异伸展叠加盆地成因模型,为临河拗陷有利目标勘探优选提供了理论依据。

## 1 区域地层发育特征

河套盆地是在华北克拉通结晶基底之上发育的中-新生代盆地,其弧形展布形态与周缘造山带的走向基本一致。根据内蒙古自治区岩石地层划分方案,河套盆地及周边地区划归华北地层大区,其西北部的巴彦乌拉山-狼山构造带和北部的阴山褶皱带属于华北地层大区内的阴山地层分区,而其东南部的鄂尔多斯盆地和贺兰山构造带则属于鄂尔多斯地层分区<sup>[14]</sup>。根据研究区1:200 000区域地质图信息和本次野外调研、岩心分析测试结果认为,河套盆地及周边地区广泛发育太古界、元古界、古生界、中生界及新生界等多个构造-沉积旋回,构成太古界-古元古界、中-新元古界、下古生界、上古生界、中生界侏罗系、白垩系、新生界古近系-新近系和第四系8个构造层,每个构造层之间以角度不整合或平行不整合相分界,其间缺失上奥陶统、志留系、泥盆系、下石炭统、上二叠统、三叠系、上白垩统和古新统。太古界-古元古界构造层岩性主要为斜长角闪片麻岩、夕线石石榴石片麻岩、绿泥石阳起石片岩及石英岩、大理岩和变粒岩,它们构成盆地的结晶基底。中-新元古界构造层岩性主要为板岩、千枚岩、片岩、结晶灰岩及长城系下部发育的斜长角闪片麻岩,角度不整合在太古界-古元古界构造层之上,原岩主要为海相碎屑岩和碳酸盐岩,并发育海相火山岩,体现了由拗拉谷转化为拗拉槽的“开合”演化旋回<sup>[15-17]</sup>。中-新元古界构造层的变质岩系在河套盆地内部构成中-新生代盆地的变质基底,而在盆地

的边缘则逆冲在侏罗系或白垩系之上。古生代的寒武系-中奥陶统为边缘海环境下沉积的碳酸盐岩建造夹碎屑岩;上石炭统-下二叠统为海陆交互相建造<sup>[18]</sup>,这两套地层表现为平行不整合接触,它们构成了中-新生代盆地的褶皱基底。

中生代以来,河套盆地及周边地区完全进入了陆相沉积发育时期,沉积地层主要为侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。中-下侏罗统石拐群在狼山前缘零星分布,岩性为灰绿色砂砾岩、砂岩和砂质页岩,逆冲在下白垩统李三沟组之上;而在狼山镇北部的呼勒斯泰以北的山区发育的北东走向的中-下侏罗统石拐群主要为杂色碎屑岩建造,夹有灰岩透镜体。此次经过野外调研对比,认为狼山前缘发育的红色砾岩、砂岩夹泥岩相当于李三沟组下部岩性组合;狼山北部繁荣乡乌盖沟内广泛发育的灰绿色砂岩、暗色泥岩夹薄层粉砂岩相当于李三沟组上部岩性组合,且具有类似的化石组合特点。庆格勒图大水沟地区发育的下白垩统岩性为紫色砂岩夹紫色泥岩、灰黑色泥岩及白云岩,在泥岩中发现的化石与固阳盆地的李三沟组化石组合相似,所以应该划归为下白垩统李三沟组。

综上所述,在临河拗陷的西北缘露头区广泛发育李三沟组,所以,推测临河拗陷内部也应该发育李三沟组。在过吉参1井的地震剖面上也证实有李三沟组的存在。通过野外露头取样和岩心取样分析,下白垩统李三沟组、固阳组和古近系临河组的暗色泥岩有机碳平均含量在1.0左右,可以作为烃源岩。由此说明临河拗陷内至少发育李三沟组、固阳组和临河组3套烃源岩,具有充足的油源条件。

## 2 构造特征

### 2.1 构造格架特征

河套盆地在平面上呈NE-SEE向弧形展布于巴彦乌拉山-狼山构造带、贺兰山构造带、阴山褶皱带与鄂尔多斯盆地之间,现今的盆地与造山带之间均表现为断层接触关系(图1),断层性质多为高角度正断层或张扭性断层(图2)。NE走向边界断层与近EW走向边界断层相互联结在一起与盆地内部的次级控带断层构成醒目的向NW方向凸出的弧形构造体系<sup>[1-2]</sup>,它们是多期次、多体制构造运动叠加的结果。现今在盆地边缘露头区展布的不同尺度和不同性质的断层之间相互组合关系反应了不同时期古构造格架特征。临河拗陷西部北段边界断层为狼山前缘断裂(F1)、南段边界断层为巴彦乌拉山前缘断裂(F2),这两条断裂在

走向上表现为右阶叠接关系(图 1),并被庆格勒图右行走滑断层(F8)连接在一起。狼山构造带内部发育的 NE 走向逆断层与狼山前缘断裂(F1)大致平行或小角度相交,并伴生有大量 NE 走向的背斜褶皱构造<sup>[11]</sup>。巴彦乌拉山构造带内部发育的 NW,NNE,NEE 向 3 组次级断裂与巴彦乌拉山前缘断裂(F2)构成简单剪切成因的走滑构造组合,它们是第四纪走滑变形的产物。临河坳陷北缘断裂(F5)自西向东延伸长约 200 km,走向由近 EW 向转为 NW 向,然后再转为近 EW 向后与乌拉山隆起相交,该断裂的走向斜切阴山褶皱带内的 NE 向构造行迹,表现出张扭活动的特点。河套盆地东南缘分界断裂为弧形的黄河断裂(F4),其西南部的 NE 向段形成临河坳陷与贺兰山构造带的分界断裂,东部的近 EW 向段形成河套盆地与鄂尔多斯盆地的分界断裂。位于黄河断裂(F4)东南地区的鄂尔多斯盆地内发育二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系<sup>[18]</sup>,而在河套盆地内部却只发育白垩系以上的地层,其直接下伏在

元古界变质基底之上,该条断层在地震剖面上表现为先逆后正的负反转构造特点(图 2b)。贺兰山构造带发育 NNE 向逆冲断层和近 EW 向变换断层(图 1b),一起控制鄂尔多斯盆地西缘的构造变形特征,并对南部的银川盆地具有控制作用。

临河坳陷内部发育 NE 向的正断层和 NW 向的变换构造,根据控凹、控带断层展布特点与沉积充填差异,本文将临河坳陷划分为吉兰泰凹陷和巴彦淖尔凹陷两个二级构造单元,其间被吉北变换构造带分隔;将吉兰泰凹陷划分为吉西次凸起、吉西洼陷、吉中洼陷和吉东斜坡等 4 个三级构造单元;将巴彦淖尔凹陷划分为淖西、巴彦断裂构造带、黄河洼陷和五原洼陷等 4 个三级构造单元(图 1b)。各构造单元空间展布特征表明临河坳陷具有东西分带、南北分段的构造格局。

2.2 构造变形样式

临河坳陷及周边地区经历了太古宙、元古宙、古生

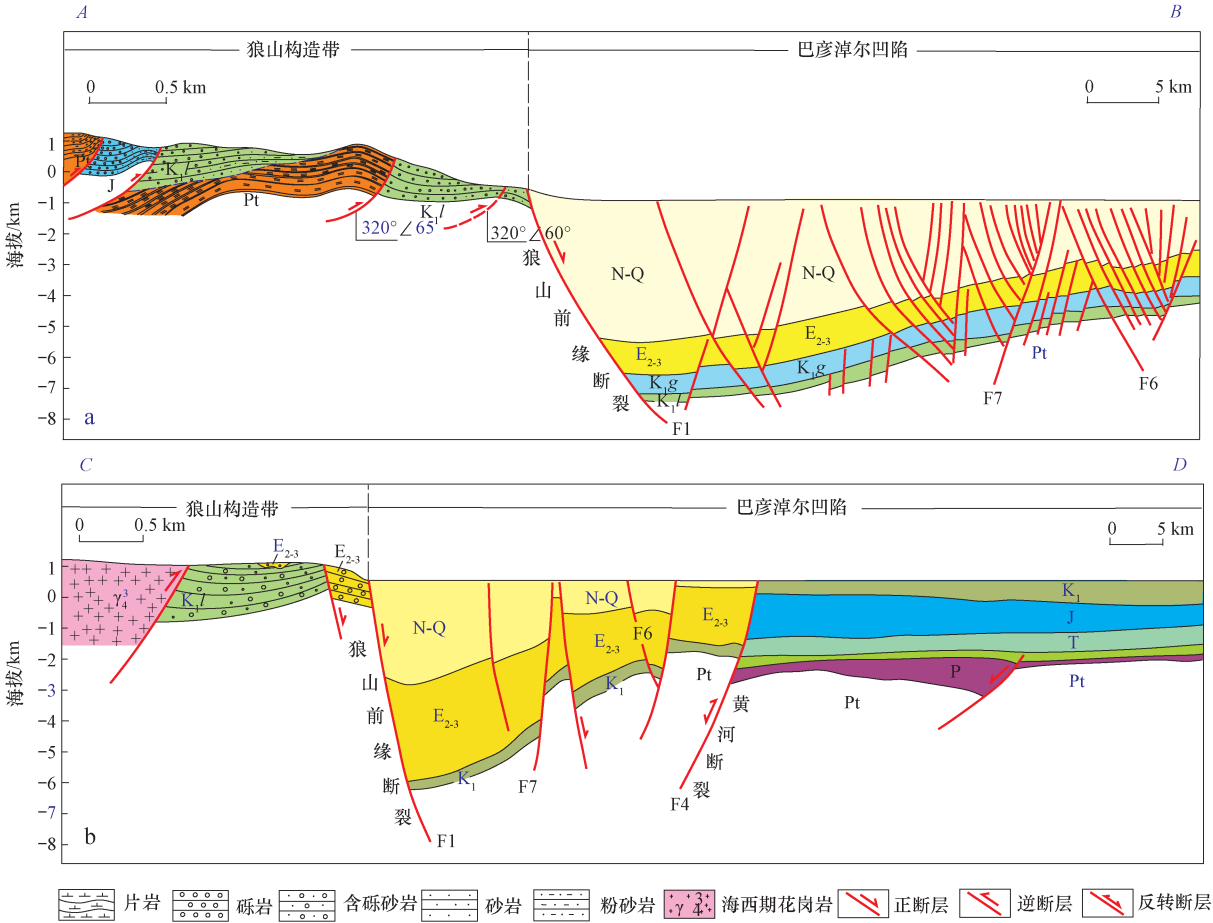


图 2 河套盆地临河坳陷及其周边地区构造格架大剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 2 Interpretation of seismic section across the Linhe Depression and its surrounding areas in the Hetao Basin (see Fig. 1 for the section location)

Pt. 元古宇;P. 二叠系;T. 三叠系;J. 侏罗系;K<sub>1</sub>. 下白垩统;K<sub>1</sub>l. 下白垩统李三沟组;K<sub>1</sub>g. 下白垩统固阳组;  
E<sub>2-3</sub>. 始新统-渐新统;N-Q. 新近系-第四系;F<sub>1</sub>. 断层编号

代、中生代和新生代等多期构造演化旋回,自中生代以后进入板内变形阶段。由于临河坳陷内的油气勘探目的层主要是中生界白垩系固阳组和新生界古近系临河组,所以本文描述的构造行迹主要集中在中生代以来发育的构造变形样式。通过野外露头区调查、地震剖面解释,在临河坳陷及周边地区识别出挤压、伸展、走滑、反转等中生代以来发生的构造变形样式,它们是不同的构造演化阶段变形的结果,现今表现的构造状态是叠加残留的构造行迹,为恢复不同时期构造应力状态提供了依据。

2.2.1 挤压构造

挤压构造主要发育在狼山构造带、贺兰山构造带和阴山构造带等露头分布区,以及临河坳陷内部的吉兰泰凹陷,主要表现为逆冲断层和褶皱构造。根据逆冲断层的组合样式可划分为单冲式、叠瓦式、背冲式、对冲式和背坳式等断层组合样式(图 3)。其中,单冲式构造样式分布在狼山构造带白垩系李三沟组沉积盆

地的边界,表现在前中生代不同时期的地层或变质岩体逆冲在下白垩统李三沟组之上,断层面倾向北西,倾角大约在 30°左右(图 3a),局部断层面因受后期走滑作用改造,产状变陡达 60°以上。断层下盘的李三沟组岩性为块状巨砾岩,砾石成分主要为断层上盘的岩石碎块,最大的碎块直径达到 1m 以上,大小混杂,大多数呈棱角状,表现为盆地边缘就近堆积的特点,而远离盆缘断裂,沉积物粒度逐渐减小,且发育交错层理等沉积构造。在狼山构造带前缘分布的李三沟组西部边界为北东走向的逆冲断层(F12)控制,东部边界被狼山前缘正断层切割,盆地自北西向南东逐渐超覆在中元古界变质岩系之上,变质岩系又逆冲在李三沟组砂砾岩之上,整体构成背坳式盆地组合,具有前陆盆地沉积特点(图 3e)。在吉兰泰凹陷二维地震测线剖面上可以看到两条以上的逆冲断层组成叠瓦式组合(图 3b)和背冲式组合(图 3c),表现为盆地基底岩石逆冲在下白垩统或侏罗系之上,部分断层在剖面上现今表现为下逆上正的负反转构造特点,因晚期发生伸展作用而使

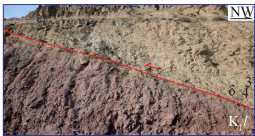
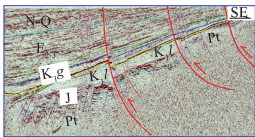
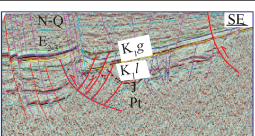
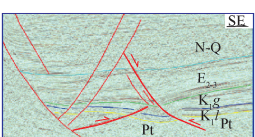
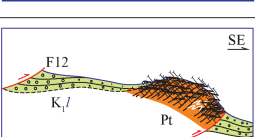
| 断层形态    | 剖面组合样式 |      | 实例剖面                                                                                | 平面组合样式     |      | 分布区域                      |
|---------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|---------------------------|
|         | 名称     | 组合形态 |                                                                                     | 名称         | 组合形态 |                           |
| 平面式逆冲断层 | 单冲式    |      |  | 单条断层       |      | 狼山前缘东升庙一带白垩系李三沟组盆缘断裂      |
|         |        |      |                                                                                     |            |      |                           |
| 铲式逆冲断层  | 叠瓦式    |      |  | 同向倾斜平行式斜列式 |      | 157577测线<br>177375测线      |
|         | 背冲式    |      |  | 相向倾斜平行式    |      | 107277测线                  |
|         | 对冲式    |      |  | 相背倾斜平行式    |      | 81148测线<br>acan1-bacan2测线 |
|         | 背坳式    |      |  | 同向倾斜平行式    |      | 狼山前缘东升社一带白垩系李三沟组分布区       |

图 3 河套盆地临河坳陷及其周边地区中生代挤压构造样式

Fig. 3 Compressional patterns of the Mesozoic Linhe Depression and its surrounding areas in the Hetao Basin

Pt. 元古宇;J. 侏罗系;K<sub>1</sub>l. 下白垩统李三沟组;K<sub>1</sub>g. 下白垩统固阳组;E<sub>2-3</sub>. 始新统-渐新统;N-Q. 新近系-第四系;δ<sub>4</sub><sup>3</sup>. 海西期闪长岩



断层面上部产状变陡。对冲式构造变形在巴彦淖尔凹陷北部的地震测线剖面上偶尔见到,表现为基底地层逆冲在下白垩统之上(图3d),类似的构造在临河拗陷南部的巴彦浩特盆地内广泛发育<sup>[19-21]</sup>。

与逆冲断层伴生的褶皱构造在狼山前缘构造带内广泛发育,褶皱的轴向与白垩纪盆地边界断裂(F12)走向一致,褶皱的类型有斜歪褶皱、倒转褶皱、冲起背斜和蛇头背斜等构造类型(图4),反映出强烈的挤压构造变形特点。

### 2.2.2 伸展构造

伸展构造形成的正断层是临河拗陷内部发育最广的一类断层样式,在地震剖面上表现为阶梯式、多米诺式、垒堑式等组合样式(图5),这些正断层切割了中生代和新生代地层。从断层上、下盘地层厚度分析,主边界断层上盘控制的古近系与新近系厚度向断层根部逐渐增厚,大量次级断层切割至第四纪,但断错新近纪的断距最大,所以认为伸展活动最强烈的时期发生在新近纪。此时期形成的垒堑式断层组合是形成巴彦构造带的主要原因。地震剖面上发育的大量“y”型、反“y”型组合样式(图5)说明伸展应力与主干断层走向具有一定交角;而滚动背斜构造样式是在伸展量较大的铲式边界正断层(F1)上盘发育的逆牵引构造,随着逆牵引程度的增加,在滚动背斜的核部发生塌陷,形成许多共轭式次级正断层,这些正断层对油气的输导和圈闭的形成具有双重作用,有利于油气聚集成藏。吉华2X井含高产油流井的发现证实这种类型的圈闭构造应该是临河拗陷内重点寻找的勘探目标。

### 2.2.3 走滑构造

由扭应力或剪应力引起地壳或岩石圈沿着某些构造边界或特定的构造带发生走滑变形的构造作用称为走滑作用,由走滑作用形成的构造称为走滑构造。其中的走滑断层通常包括转换断层、变换断层和平移断层3种类型。变换断层是板内地壳中与正断层或逆冲断层在运动学上联系在一起的横向断层,其活动是由正断层或逆冲断层活动诱导产生的,或在统一应力场中共生的断层,具有与转换断层类似的运动学性质。临河拗陷内部吉兰泰凹陷与巴彦淖尔凹陷之间发育的吉北变换构造带在新生代伸展过程中调解两侧半地堑的发育规模,前人曾认为是磴口隆起<sup>[2-6]</sup>。而与挤压构造相伴生的变换断层主要发育在狼山构造带,多条北北西走向的变换断层调节逆冲断层向东南方向的逆冲位移,这些北北西走向的断层与北西西走向的庆格

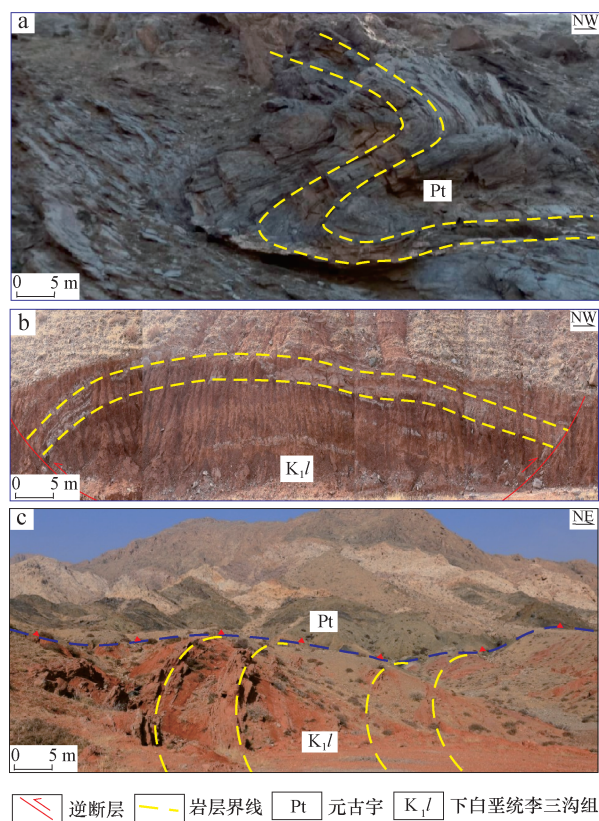


图4 河套盆地临河拗陷狼山前缘构造带挤压褶皱类型(露头照片)

Fig. 4 Compressional folds developed in the front of Langshan structural belt in the Linhe Depression, Hetao Basin (outcrop pictures)

a. 元古宇内平卧褶皱;b. 白垩系内冲起背斜;c. 白垩系内斜歪褶皱

勒图断层一起构成共轭式剪切断层,切割的最新地层为下白垩统,指示当时的挤压应力场方向(最大主应力 $\sigma_1$ )为北西向。平移断层发生在第四纪时期,地貌上显示临河拗陷的西部边界具有明显的线性地貌特点,巴彦乌拉山前缘断层(F2)与狼山前缘断层(F1)组成右阶式叠接组合,两组剪切破裂与主断层之间的交接关系显示主断层具有右行走滑特点,因此在两条主断层之间叠接区域形成第四纪拉分盆地(图1)。

### 2.3 反转构造

反转构造是吉兰泰凹陷内普遍残留的构造变形样式,在地震剖面上表现为下逆上正的负反转构造特点(图6),下部逆断层卷入的地层为李三沟组,上部正断层卷入的最新地层为新近系-第四系,说明发生反转的主要时期在新近纪。反转断层下部的逆冲断层控制下白垩统李三沟组的沉积边界,而且地层沉积形态表现为断超型,断层上盘的李三沟组厚度很薄或缺失,而断层下盘的李三沟组向断层根部增厚,这些特征与露

| 断层<br>形态    | 剖面组合样式         |      | 实例剖面 | 平面组合样式           |      | 分布区域                                                     |
|-------------|----------------|------|------|------------------|------|----------------------------------------------------------|
|             | 名称             | 组合形态 |      | 名称               | 组合形态 |                                                          |
| 正<br>断<br>层 | 铲式扇            |      |      | 平行式<br>斜列式       |      | 157601测线                                                 |
|             | 铲式<br>半地堑      |      |      | 平行式<br>斜列式       |      | 155628测线<br>155610测线<br>155644测线<br>177375测线<br>177435测线 |
|             | 同向<br>调节<br>断层 |      |      | 同向<br>平行式<br>分叉式 |      | 855520-289测线<br>155628测线<br>177435测线                     |
|             | 反向<br>调节<br>断层 |      |      | 反向<br>平行式<br>分叉式 |      | 157601测线                                                 |
|             | "y"型<br>反"y"型  |      |      | 相向<br>交叉式        |      | 175578测线<br>157553测线<br>155680测线<br>155592测线<br>155610测线 |
|             | 滚动<br>背斜       |      |      | 断背<br>斜圈闭        |      | 155680测线                                                 |

图 5 河套盆地临河拗陷及其周边地区新生代伸展构造样式

Fig. 5 Extensional structures of the Cenozoic Linhe Depression and its surrounding areas in the Hetao Basin

Pt. 元古宇;K<sub>1</sub>l. 下白垩统李三沟组;K<sub>1</sub>g. 下白垩统固阳组;E<sub>2-3</sub>. 始新统 - 渐新统;N - Q. 新近系 - 第四系

头上所观察的断控沉积特征极为相似,说明逆冲断层的形成时期主要在李三沟组沉积时期,属于同沉积控凹的逆冲断层。这些逆冲断层在当时可能表现为背坳式构造,在古近纪伸展阶段形成的正断层利用了逆断层的局部断层面,形成阶梯式正断层组合。当正断层断距大于逆冲断距时形成完全负反转构造,如 F9 号断层(图 6a,b),当正断层断距小于逆冲断距时形成局部负反转构造,如 F10 号断层(图 6)。值得思考的是在横过临河拗陷的地震大剖面上可以发现拗陷边界断层也具有下逆上正的特点,而且在断层的下盘二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系发育,而缺失新生代地层,但在断层的上盘(现今的下降盘)反而缺失白垩系以前的地层,这说明临河拗陷在白垩系沉积之前一直处于隆升剥蚀状态,白垩纪以后才开始处于下降状态。

3 构造演化阶段与性质

前述的河套盆地临河拗陷及周边山区地层发育特点显示研究区经历了太古代—古元古代、中 - 新元古代、古生代 3 次大的“开合”旋回后进入中生代陆内构造 - 沉积演化阶段<sup>[15-17]</sup>。根据中生代以来残存地层之间的接触关系、构造变形样式可划分为中生代挤压拗陷、古近纪—新近纪伸展断陷和第四纪走滑改造等 3 大构造演化阶段,每个大阶段内包含不同的强弱时期,最终形成现今的构造 - 沉积展布面貌(图 7)。

3.1 中生代挤压拗陷阶段

临河拗陷内部残存的中 - 下侏罗统与下白垩统为角度不整合接触关系,边界受逆冲断层控制(图 7);临

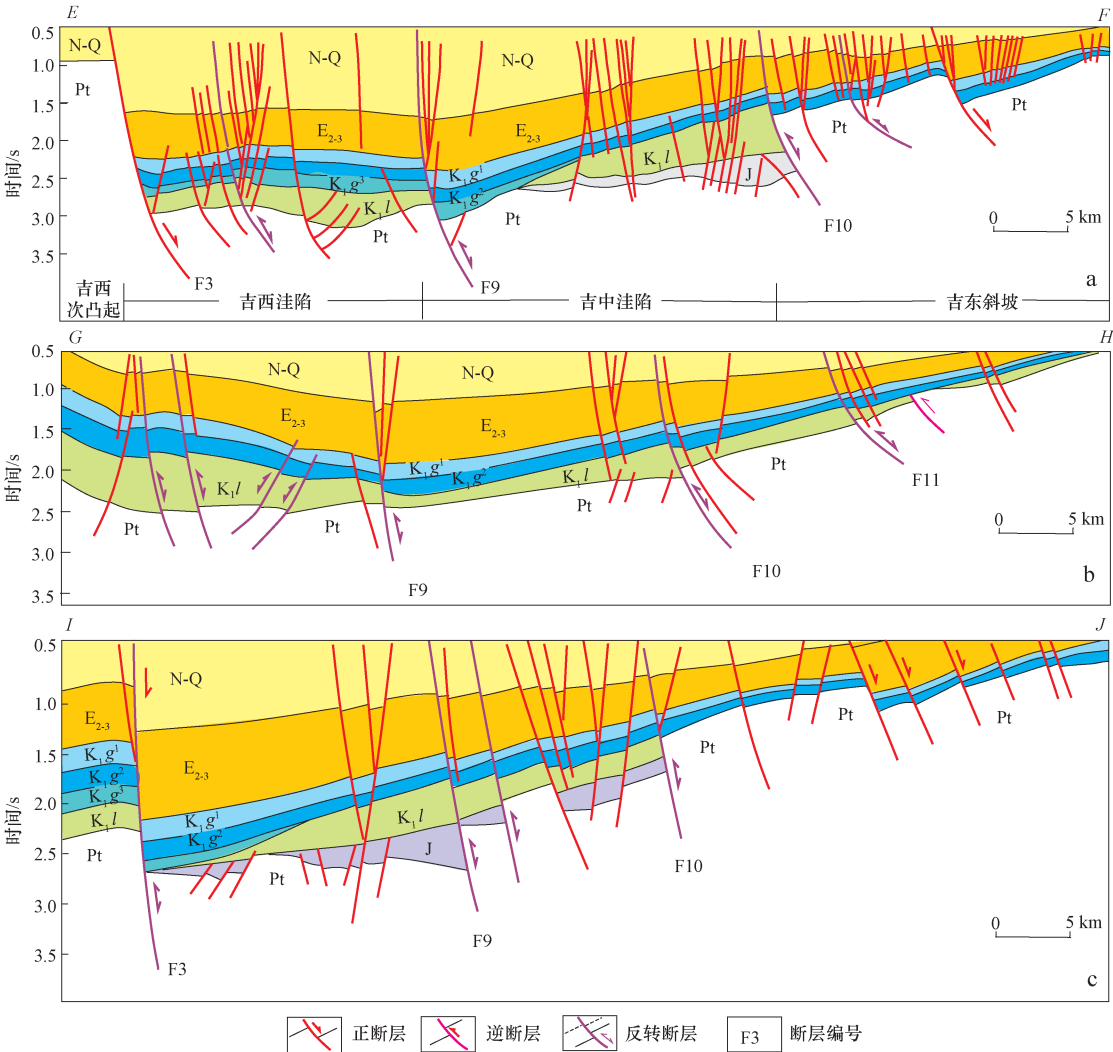


图6 河套盆地临河拗陷吉兰泰凹陷负反转构造样式剖面(剖面位置见图1)

Fig.6 Seismic section showing the negative structural inversion in the Jilantai Sag of the Linhe Depression, Hetao Basin (see Fig.1 for the section location)

Pt. 元古宇;J. 侏罗系;K<sub>1</sub>l. 下白垩统李三沟组;K<sub>1</sub>g<sup>3</sup>. 下白垩统固阳组三段;K<sub>1</sub>g<sup>2</sup>. 下白垩统固阳组二段;K<sub>1</sub>g<sup>1</sup>. 下白垩统固阳组一段;E<sub>2-3</sub>. 始新统—渐新统;N—Q. 新近系—第四系

河拗陷西部狼山前缘残存的中—下侏罗统也受逆冲断层控制;临河拗陷北部的呼勒斯泰盆地内发育的中—下侏罗统也受边界逆冲断层控制,而且盆地边缘发育的沉积物都是快速堆积的冲积扇相,残存盆地的走向都为北东向,与盆地边界断层的走向一致,这些特征说明中—下侏罗统沉积时期是受挤压拗陷作用控制的。临河拗陷周边地区缺失上侏罗统,说明在中—下侏罗统石拐群沉积之后研究区遭受了挤压隆升剥蚀作用,其后,下白垩统才开始接受沉积,并角度不整合在中—下侏罗统或之前的地层之上。下白垩统李三沟组沉积盆地的边界断层均为逆断层,沉积充填特征也表现为逆断层控制的冲积扇相堆积特点,而且在地震剖面上显示地层呈向边界逆断层下盘根部楔状增厚的特点(图7a)。在狼山构造带野外观察到李三沟组具有西

断东超的结构特征,而在吉兰泰凹陷的地震剖面上表现为东断西超的沉积特点。这些特征说明下白垩统李三沟组沉积时期盆地的性质为差异挤压拗陷型盆地(图7a),盆地的走向保持北东—南西走向特点。固阳组与李三沟组野外露头区具有整合接触关系,地震剖面上表现为超覆接触关系,固阳组的分布范围大于李三沟组,同时地层基本等厚分布,除了少数先期断层继承性微弱活动外,基本没有新生性断层产生,说明这一时期的构造作用比较微弱,处于继承性沉降的拗陷向断陷过渡时期(图7b—d)。

3.2 古近纪—新近纪伸展断陷阶段

在固阳组沉积之后,研究区进入整体隆升剥蚀阶段,使晚白垩世—古新世地层遭受剥蚀,盆地及周边地



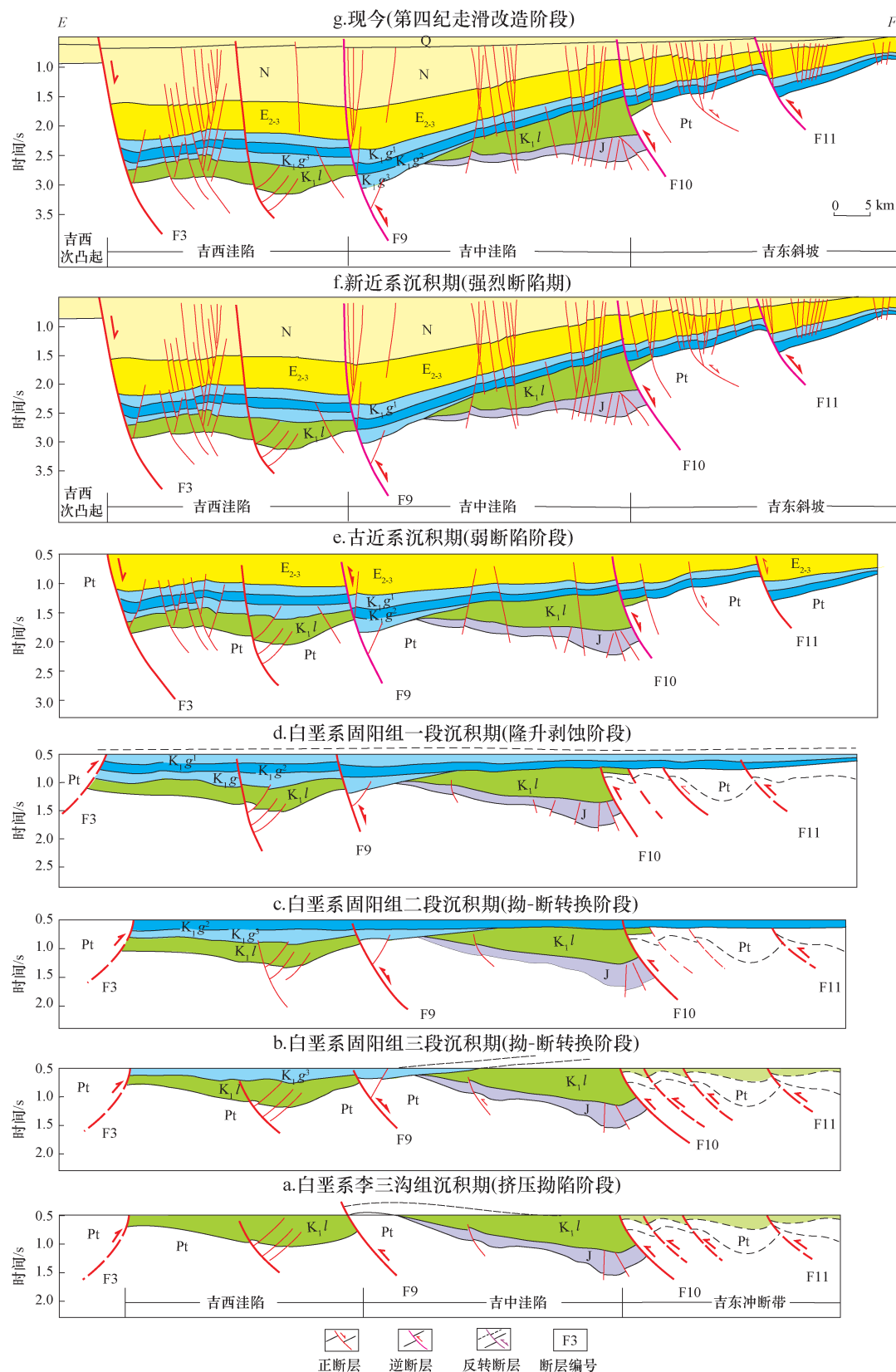


图7 河套盆地临河坳陷吉兰泰凹陷E—F测线剖面构造演化图(剖面位置见图1)

Fig.7 Seismic section showing the structural evolution along the seismic line E-F in the Jilantai Sag of the Linhe Depression, Hetao Basin  
(see Fig.1 for the section location)

Pt. 元古宇; J. 侏罗系;  $K_1l$ . 下白垩统李三沟组;  $K_1g^3$ . 下白垩统固阳组三段;  $K_1g^2$ . 下白垩统固阳组二段;  
 $K_1g^1$ . 下白垩统固阳组一段;  $E_{2-3}$ . 始新统 - 渐新统; N - Q. 新近系 - 第四系



区仅有少量残留地层。可能由于没有明显的水平挤压作用,始新世临河组平行不整合在固阳组之上,地震剖面上看到的临河组与固阳组基本上是连续的地震反射特点,但在临河拗陷的北部的兴隆构造带可以见到削截接触关系。在狼山构造带与巴彦乌拉山构造带交接部位的野外露头区可以观察到始新世临河组微角度不整合在李三沟组之上,而且临河组现今处于很高的海拔部位,说明当时在沉积临河组时期,巴彦乌拉山-狼山构造带还处于较低的构造部位,还没有形成现今的高山地貌形态。从地震反射特征上分析,临河组沉积厚度具有向拗陷西部边界断层(F1)略加增厚的特点,并且地层内部发育少量的正断层。这些特征说明始新世时期研究区已经进入弱断陷阶段(图7e)。

进入新近纪,断层强烈活动,新形成的正断层不但切割了古近系、新近系,还切割了白垩系乃至基底地层,并使早白垩世形成的逆断层发生局部或完全反转,形成本区特色的负反转构造样式(图7f)。受狼山边界断层控制,新近纪地层沉积结构表现出西断东超的半地堑结构特征,并在主边界断层上盘发育滚动背斜构造。由于强烈的差异升降作用,正断层上升盘强烈隆升形成现今巴彦乌拉山-狼山构造带雏形,在组成构造带的各种时代地层之上都没有发现新近系沉积。

### 3.3 第四纪走滑改造阶段

进入第四纪以后,由于印度板块与欧亚大陆板块俯冲碰撞产生的远程效应的影响,使临河拗陷及周边地区遭受近南北向剪切作用,导致先期发育的临河拗陷西侧边界断层发生走滑改造,在巴彦乌拉山前缘断裂带产生同向里德尔剪切(R)、反向里德尔剪切(R')、同向剪切破裂(P)与主位移带(PDZ,即F2)之间的走滑构造组合,并在两条右行右阶的边界断层叠接部位形成小型拉分盆地。由于第四纪走滑作用,在盆地内的断阶带再次活动,形成花状组合构造样式(图7g)。不但地震剖面上可见走滑断层切割至地表,而且在露头区也可以观察到第四纪松散的堆积物被走滑断层错开的现象。巴彦乌拉山-狼山构造带前缘多期冲积扇形成的台地地貌特征说明晚更新世以来发生过多次的构造运动,古地震研究成果也证明了狼山山前断裂(F1)晚更新世以来可能至少发生了5次地表破裂型强震活动<sup>[19]</sup>。这些特征说明第四纪发生的走滑构造只是对前期形成的断裂构造进行改造,并受到先存基底断层走向控制,而对盆地内部沉积充填没有明显的控制作用。

## 4 盆地成因模式

区域应力场研究表明,受燕山运动影响,临河拗陷在早白垩世总体处于挤压构造应力场<sup>[1-2,7-8,11]</sup>。在吉兰泰凹陷受到来自东侧的贺兰山和西侧的巴彦乌拉山双向逆冲作用的控制,形成了对冲式挤压构造,应力可能来源于祁连山-秦岭-大别构造带向NE向逆冲和贺兰山西缘向NW向逆冲产生的具有限制性边界的侧向挤出作用<sup>[20]</sup>。而北部的巴彦淖尔凹陷主要受到来自NW向的天山-兴蒙褶皱带的单向挤压作用,导致狼山构造带向SE向逆冲,形成单向逆冲叠瓦式构造、或背坳式盆地构造组合<sup>[11]</sup>。由于临河拗陷南部和北部所受的挤压应力方式不同,导致挤压拗陷变形样式具有南北分段的差异,所以认为临河拗陷早白垩世盆地性质属于差异挤压拗陷型盆地(图8)。

始新世以来受太平洋构造域和喜马拉雅构造域影响<sup>[21-22]</sup>,鄂尔多斯地块向东南方向相对运动,临河拗陷北部受到SE向的强烈拉张作用而断陷沉降<sup>[1-2]</sup>,而临河拗陷的南部受到巴彦乌拉山和贺兰山伸展造山作用影响,造成NW-SE向双向伸展作用,形成的差异伸展断陷盆地叠加在早白垩世的差异挤压拗陷型盆地之上。由于吉兰泰凹陷与巴彦淖尔凹陷基底结构差异、早白垩世构造变形差异导致在磴口附近形成近东西走向的吉北变换构造带;以及在松五、扎格和兴隆构造带之间发育次级的变换构造带(图8),它们构成油气侧向和垂向运移通道<sup>[23]</sup>。在早白垩世挤压拗陷时期形成的盆地结构类似于前陆盆地,靠近主边界断裂的前渊带虽然沉降深度较大,但是堆积的充填物主要是粗碎屑,而细碎屑物主要分布在拗陷的缓坡带,烃源岩可能分布在远离西侧主边界断层,更靠近东侧的巴彦构造带的西侧。在伸展断陷阶段形成的盆地结构具有地堑、半地堑组合特点,凹陷的沉降中心与沉积中心大致处于相同的构造部位,泥岩主要发育在正断层控制的深陷带,即临河拗陷西北部深凹陷区。

第四纪以来,由于走滑作用的改造,使得早期形成的逆断层、正断层受到破坏,并沿着规模较大的盆地边界断层优先发生走滑活动,对第四系沉积具有控制作用。

综上所述,临河拗陷盆地性质应该为差异负反转盆地。前中生代发生的3次大的“开合”旋回造就的基底非均一性是导致临河拗陷构造变形东西分带的主要原因;中-新生代发生的差异挤压和差异伸展叠加是导致临河拗陷构造变形南北分段的主要原因。挤压构造应力场方向与伸展构造应力场方向没有较大的差

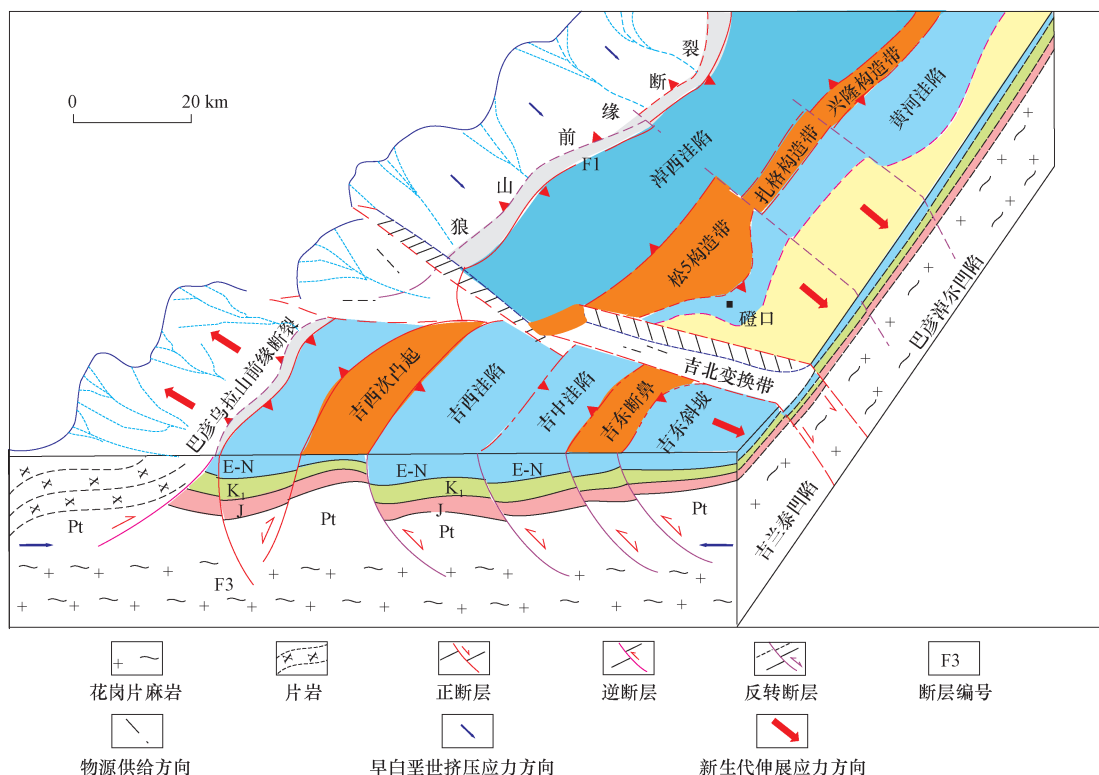


图8 河套盆地临河拗陷负反转盆地成因模式

Fig. 8 Genetic model of the basin under negative structural inversion in the Linhe Depression, Hetao Basin

Pt. 元古宇; J. 侏罗系; K<sub>1</sub>. 下白垩统; E-N. 古近系-新近系

异,只是应力极性发生了变化,从而使始新世与下伏的下白垩统之间表现为平行不整合接触或超覆接触,造成类似整合接触的假象。由于挤压拗陷型盆地与伸展断陷型盆地对烃源岩的控制作用不同,明确了盆地成因类型对指导烃源岩目标区的探寻具有指导意义。

## 5 结论

1) 河套盆地临河拗陷及周边地区发育太古界-古元古界、中-新元古界、古生界、中生界、新生界等多个构造-沉积旋回,自中生代开始进入陆相沉积充填阶段,下白垩统李三沟组、固阳组、始新统临河组发育烃源岩。

2) 临河拗陷及其周边地区中-新生代发育挤压、伸展、走滑、反转等构造变形样式,经历了早白垩世挤压拗陷、古近纪-新近纪伸展断陷、第四纪走滑改造等构造演化阶段。

3) 临河拗陷中-新生代盆地属于负反转盆地,建立了早期差异挤压、晚期差异伸展叠合盆地成因模型。

## 参 考 文 献

[1] 郭忠铭,于忠平.河套弧形地堑系构造特征和演化机制及其油气

勘探[J].石油勘探与开发,1990,17(3):11-20.

Guo Zhongming, Yu Zhongping. Structural characteristics, mechanism of evolution and petroleum prospecting of Hetao Grabensystem[J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 17(3): 11-20.

[2] 赵重远,郭忠铭,惠斌耀.河套弧形构造体系及其形成和演化机制[J].石油与天然气地质,1984,5(4):349-361.

Zhao Chongyuan, Guo Zhongming, Hui Binyao. Hetao arcuate tectonic system and their mechanism of formation and evolution[J]. Oil & Gas Geology, 1984, 5(4): 349-361.

[3] 杨华,李民才,崔永平.河套盆地生物气成藏条件及勘探前景[J].中国石油勘探,2005,(3):16-21.

Yang Hua, Li Mincai, Cui Yongping. Accumulation condition and exploration prospects of biogenic gas in Hetao Basin. China Petroleum Exploration[J], 2005, (3): 16-21.

[4] 周红飞.河套盆地页岩气资源潜力调查评价与选区[D].中国地质大学(北京),硕士学位论文,2012:10-42.

Zhou Hongfei. Assessment of resource potential and area selection concerning shale gas in Hetao Basin[D]. A dissertation submitted to China University of Geosciences for Master degree. 2012: 10-42.

[5] 王磊,张小龙.河套盆地白垩系-古近系地层体系及烃源岩评价[J].地下水,2014,36(6):236-237.

Wang Lei, Zhang Xiaolong. Cretaceous-Paleogene stratigraphic system and source rock evaluation in Hetao Basin. Ground Water, 2014, 36(6): 236-237.

[6] 杨雪,雷越,张金川.河套盆地临河拗陷吉兰泰地区基岩裂隙含油特征及评价[J].特种油气藏,2019,26(4):1-8.

- Yang Xue, Lei Yue, Zhang Jinchuan. Oiliness characterization and evaluation of the jilantai bedrock fissures in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(4): 1-8.
- [7] 付锁堂, 付金华, 喻建, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质特征及勘探前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 749-763.
- Fu Suotang, Fu Jinhua, Yu Jian, et al. Petroleum geological features and exploration prospect of Linhe Depression in Hetao Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 749-763.
- [8] 赵孟为. 河套盆地断裂活动的特征及其与油气的关系[J]. *西北大学学报*, 1988, 18(2): 85-94.
- Zhao Mengwei. Characteristics of the fault activity in Hetao Basin and its relation with oil and gas[J]. *Journal of Northwest University*, 1988, 18(2): 85-94.
- [9] 杨会峰, 张翼龙, 孟瑞芳. 河套盆地构造控水研究及地下水系统划分[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(3): 177-185.
- Yang Huifeng, Zhang Yilong, Meng Ruifang. Study on water controlling mechanism of structures and dividing result of groundwater system in Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(3): 177-185.
- [10] 蔡茂堂, 叶培盛, 杨星辰, 等. 河套盆地北部 344 ka 以来沉积环境演化[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(2): 253-262.
- Cai Maotang, Ye Peishen, Yang Xingchen, et al. Evolution of sedimentary environment in the north Hetao basin since 344ka[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(2): 253-262.
- [11] Brian J D, Bradley D R. Mesozoic structural architecture of the Lang Shan, North-Central China: Intraplate contraction, extension, and synorogenic sedimentation[J]. *Journal of Structural Geology*, 2007, 29: 2006-2016.
- [12] 张以明, 张锐锋, 王少春, 等. 河套盆地临河坳陷油气勘探重要发现的实践与认识[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(5): 1-11.
- Zhang Yiming, Zhang Ruifeng, Wang Shaochun, et al. Practice and understanding of great discovery in oil and gas exploration in Linhe depression of Hetao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(5): 1-11.
- [13] 杜晓宇, 丁文龙, 焦保程, 等. 河套盆地临河坳陷流体势特征及油气运聚单元划分[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(4): 9-15.
- Du Xiaoyu, Ding Wenlong, Jiao Baocheng, et al. Fluid potential and hydrocarbon migration-accumulation unit classification in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2019, 26(4): 9-15.
- [14] 全国地层多重划分对比研究(15)—内蒙古自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社(北京), 1996: 114-308.
- Multiple classification and correlation of the stratigraphy of China (15)-Stratigraphy (lithostratic) of Nei Mongol Autonomous Region[M]. Beijing: China University Geosciences Press(Beijing), 1996: 114-308.
- [15] 万天丰. 中国大地构造纲要[M]. 北京: 地质出版社(北京), 2004: 26-213.
- Wan Tianfeng. Outline of geotectonics in China[M]. Beijing: China University Geosciences Press(Beijing), 2004: 26-213.
- [16] 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 等. 内蒙古狼山-渣尔泰山中元古代被动陆缘裂陷槽槽解过程中的火山活动及其示踪意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1007-1017.
- Peng Runmin, Zhai Yusheng, Han Xuefeng, et al. Sinsedimentry volcanic activities in the cracking process of the Mesoproterozoic aulacogen of passive continental margin in Langshan-Zhaertai area, Inner Mongolia, and its indicating significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 1007-1017.
- [17] 康东雅, 向芳, 邹佐元, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩岩石学特征及岩性差异[J]. *断块油气田*, 2019, 26(3): 299-303.
- Kang Dongya, Xiang Fang, Zou Zuoyuan, et al. Petrological characteristics and lithological differences of Upper Paleozoic sandstone of Ordos Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(3): 299-303.
- [18] 邱隆伟, 穆相骥, 李浩, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(1): 24-34.
- Qiu Longwei, Mu Xiangji, Li Hao, et al. Characteristics of detritus development in the Permian lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(1): 24-34.
- [19] 董绍鹏, 张培震, 郑文俊, 等. 河套地区狼山山前断裂的古地震研究—构造及地震危险性启示[J]. *地震地质*, 2018, 40(6): 1216-1239.
- Dong Shaopeng, Zhang Peizhen, Zheng Wenjun, et al. Paleo-seismological research on the Langshan range front fault, Hetao area, China: Insights for studies on tectonics and seismic risk[J]. *Seismology and Geology*. 2018, 40(6): 1216-1239.
- [20] Liu Shaofeng. The coupling mechanism of basin and orogens in the western Ordos Basin and adjacent regions of China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(4): 369-383.
- [21] 杨超. 内蒙古巴彦浩特盆地北部构造研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013: 42-49.
- Yang Chao. A structural study of the northern part of Bayanhaote Basin, Inner Mongolia[D]. Chengdu: Chengdu University. 2013: 42-49.
- [22] 于福生, 董月霞, 童亨茂, 等. 渤海湾盆地辽河西部凹陷古近纪变形特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 51-61.
- Yu Fusheng, Dong Yuexia, Tong Hengmao, et al. Characteristics and origins of structural deformation in the Paleogene in the Western Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 51-61.
- [23] 孙同文, 高喜成, 吕延防, 等. 断裂转换带作为油气侧向、垂向运移通道的研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 1011-1022.
- Sun Tongwen, Gao Xicheng, Lyu Yanfang, et al. Research progress in fault transformation zones as lateral or vertical hydrocarbon migration pathways[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1011-1022.