

doi: 10.12029/gc20210217

刘天顺, 张锐锋, 丁文龙, 焦保程, 王少春, 吴晨林, 杜晓宇, 周志成, 薛明旺. 2021. 河套盆地临河坳陷下白垩统内部不整合的发现及对构造演化的启示[J]. 中国地质, 48(2): 593–604.

Liu Tianshun, Zhang Ruifeng, Ding Wenlong, Jiao Baocheng, Wang Shaochun, Wu Chenlin, Du Xiaoyu, Zhou Zhicheng, Xue Mingwang. 2021. Discovery of Lower Cretaceous unconformity in Linhe Depression of Hetao Basin and its implication to structural evolution[J]. Geology in China, 48(2):593–604(in Chinese with English abstract).

河套盆地临河坳陷下白垩统内部不整合的发现 及对构造演化的启示

刘天顺^{1,2,3}, 张锐锋⁴, 丁文龙^{1,2,3}, 焦保程^{1,2,3}, 王少春⁴,

吴晨林⁴, 杜晓宇^{1,2,3}, 周志成^{1,2,3}, 薛明旺^{1,2,3}

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 非常规天然气地质评价与开发北京市重点实验室, 中国地质大学, 北京 100083; 3. 自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室, 中国地质大学, 北京 100083; 4. 中国石油华北油田分公司, 河北 任丘 062552)

摘要:河套盆地临河坳陷是一个 NE-SW 向展布的中—新生代的弧形走滑拉分盆地。依据地层古生物微体化石组合特征、不整合体的测井响应特征(包括声波时差法确定不整合面)、不整合面的地震响应特征等方法综合研究,发现了下白垩统内部不整合。不整合面之上发育固阳组,之下发育乌尔塔组。固阳组全盆普遍发育,地层厚度差异不大。乌尔塔组主要分布在靠近狼山断裂附近的两个小凹陷内,地层厚度整体由西北向东南递减。地震资料的时深转换结果显示:南部小凹陷地层厚度大于北部小凹陷,在南部最厚处约 800 m,北部最厚处约 600 m。乌尔塔组沉积后,盆地受中燕山运动的影响,受到 NW-SE 向挤压应力,由于挤压作用差异抬升,地层遭受剥蚀,形成下白垩统内部不整合。该不整合具备从西北往东南由平行不整合逐渐转变为角度不整合的特征。结合不整合的成因特征和地层厚度变化,将早白垩世盆地的构造演化分为早白垩世早期断陷阶段、早白垩世中期挤压抬升剥蚀阶段、早白垩世晚期弱伸展拗陷阶段。

关键词:临河坳陷;下白垩统;不整合;测井响应特征;地震响应特征;油气勘查工程

中图分类号:P542.34 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)02-0593-12

Discovery of Lower Cretaceous unconformity in Linhe Depression of Hetao Basin and its implication to structural evolution

LIU Tianshun^{1,2,3}, ZHANG Ruifeng⁴, DING Wenlong^{1,2,3}, JIAO Baocheng^{1,2,3},
WANG Shaochun⁴, WU Chenlin⁴, DU Xiaoyu^{1,2,3}, ZHOU Zhicheng^{1,2,3}, XUE Mingwang^{1,2,3}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development, China University of Geosciences, Beijing 100083, China 3. Key

收稿日期:2019-12-29;改回日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41372139)和国家科技重大专项专题(2016ZX05046-003-001、2016ZX05033-002-004、2016ZX05033-002-005、2016ZX05034-004-003)联合资助。

作者简介:刘天顺,男,1996年生,硕士生,主要从事石油构造分析、非常规油气储层裂缝形成机制与定量表征及工程甜点评价预测等研究;E-mail:937231974@qq.com。

通讯作者:张锐锋,男,1964年生,博士,教授级高级工程师,主要从事油气勘探工作;E-mail:ktb_zrf@petrochina.com.cn。

Laboratory of Strategy Evaluation for Shale Gas, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: The Linhe Depression of Hetao Basin is a NE–SW trending Meso–Cenozoic arc-shaped strike-slip pull basin. Based on the combination of microfauna fossils, logging response characteristics (including the method of acoustic wave time difference to determine unconformity) and seismic response characteristics of unconformity, an unconformity within the Lower Cretaceous was identified. The unconformity is distinguished by the overlying Guyang Formation and underlying Urtu Formation. The former is generally developed throughout the basin, and its thickness does not change much, and the latter with thickness decreasing from northwest to southeast as a whole is mainly distributed in two small sags close to the Langshan fault. The time and depth conversion results of the seismic data show that the thickness of the Urtu Formation in the south is greater than that in the north. The thickest formation in the south is about 800 meters, and the thickest formation in the north is about 600 meters. After the deposition of the Urtu Formation, the basin was affected by the Middle Yanshan Movement and subjected to the northwest–southeast compression. Due to the squeezing effect, the strata were uplifted and suffered erosion, resulting in the internal unconformity within the Lower Cretaceous. The unconformity is characterized by gradually changing from parallel unconformity to angular unconformity from northwest to southeast. Combined with the causes of the unconformity and the change of the thickness of the strata, the structural evolution of the basin in the early Cretaceous can be divided into three stages: the fault depression stage in the early Early Cretaceous, the uplift and erosion stage in the middle Early Cretaceous and the weak extension depression stage in the late Early Cretaceous.

Key words: Linhe depression; Lower Cretaceous; unconformity; logging response; seismic responses; hydrocarbon accumulation; oil and gas exploration engineering

About the first author: LIU Tianshun, male, born in 1996, master incandidate, engaged in oil structure analysis, fracture formation mechanism and quantitative characterization of unconventional oil and gas reservoirs, evaluation and prediction of engineering desserts; E-mail: 937231974@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Ruifeng, male, born in 1965, senior engineer, doctor, engaged in oil and gas exploration, E-mail: ktb_zrf@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41372139), Special topics of major national science and technology projects (No.2016ZX05046–003–001、No.2016ZX05033–002–004、No.2016ZX05033–002–005、No.2016ZX05034–004–003).

1 引 言

河套盆地临河坳陷的石油勘探工作始于20世纪70年代末。盆地的构造特征及演化,以及油气成藏条件的研究仍然是近些年来研究的热点。而前人对于盆地内不整合的研究与关注也较少,认为盆地主要存在两套不整合,即古近系与白垩系之间的不整合和下白垩统与前寒武系的不整合。由于实钻井较少且位于构造高部位,地震资料和录井测井资料的限制,关于早白垩世地层划分、对比,构造特征及演化一直以来存在较大争议。前人未将吉兰泰地区与临河地区早白垩世地层进行统一对比,认为临河坳陷早白垩世只发育下白垩统固阳组且地层整合接触(张以明等,2018;王飞等,2019)。本文依据地层古生物微体化石组合特征、不整合体三层

结构及测井响应特征(包括声波时差法确定不整合面)、不整合面的地震响应特征等方法综合研究,发现了下白垩统内部不整合。该不整合的发现,对早白垩世盆地的构造演化阶段划分具有重要的启示作用。

2 地质背景与下白垩统研究现状

2.1 地质背景

河套盆地主体上位于华北板块西北部,北临阴山山脉,南接鄂尔多斯盆地伊盟隆起。盆地东西长600 km,南北宽30~90 km,面积约4万km²。河套盆地在整体轮廓上呈弧形,是一个发育在前寒武纪变质岩基底上的北西陡东南缓的中—新生代走滑拉分盆地,自西向东可划分为“三坳两隆”5个一级构造单元,依次是临河坳陷、乌拉山隆起、乌前坳

陷、包头隆起、呼和拗陷(图1)。研究区临河拗陷位于盆地西南部,东北方向长320 km,西北方向宽为70 km,面积约2.43万km²,剖面上呈不对称的箕状断陷(付锁堂等,2018;张以明,2018)。临河拗陷可划分为吉兰泰凹陷、吉兰泰斜坡、吉兰泰凸起、临河凹陷和临河斜坡5个次一级构造单元。

临河拗陷自下而上发育下白垩统固阳组、古近系始新统乌拉特组、渐新统临河组、新近系中新统五原组、上新统乌兰图克组和第四系河套群(图2)。沉积岩厚度大多为3000~8000 m,最厚处可达14000 m(孙六一等,2018)。其中下白垩统固阳组和渐新统临河组发育湖相暗色泥岩层是主要生烃层系(门相勇等,2016)。下白垩统固阳组是盆地勘探的目的层系,拗陷发育自生自储、上生下储、下生上储等多种生储盖油气组合(张昊祉,2015;王飞,2018)。盆地主要存在两套不整合:一套是古近系与白垩系之间的不整合,缺失一部分始新统及整个上白垩统;另一套是下白垩统与前寒武灰绿色花岗片麻岩不整合,缺失早中生界及整个古生界。

河套盆地是在三叠纪以后在一个大型长期隆起的基础上发展起来的(赵重远等,1984;郭忠铭等,1988),构造成因与鄂尔多斯地块活动规律有密切关系,其形成和发育主要受燕山期、喜山期构造

运动的影响。在燕山晚期—喜山期,青藏高原向北东方向的强烈挤压,在鄂尔多斯地区形成了北东—南西挤压,北西—南东拉张的应力场,强大的挤压应力引发了鄂尔多斯地块发生了逆时针旋转,地块的逆时针旋转形成了周缘的剪切拉分断陷带,包括河套、渭河、汾河和银川盆地等(靳久强,2005)。

2.2 下白垩统研究现状

20世纪60—70年代,宁夏地质局及第三地质普查大队分别对该区普查钻探,依据岩性和古生物特征,将下白垩统划分为乌拉塔组、大水沟组。80年代,前人根据该区已钻14口探井所获得的岩性和古生物特征对早白垩世地层进行划分,由于各自划分标椎不同,划分方案依旧存在争议(表1),主要有两种不同观点:黄育庆(1985)、胡显穆(1986)和蔡友贤(1988)认为下白垩统发育乌拉塔组和大水沟组,而赵重远(1984)、周季陶(1986)认为下白垩统只发育固阳组。

近些年来,专家学者们更倾向于下白垩统只发育固阳组的地层划分方案(付锁堂等,2018;张以明等,2018;孙六一等,2018;王飞等,2019),认为固阳组自上而下可分为3段(固一段、固二段、固三段)。固一段上部为棕红、浅灰、灰绿色砂泥岩互层,下部以灰色泥岩、泥质砂岩为主;固二段以深

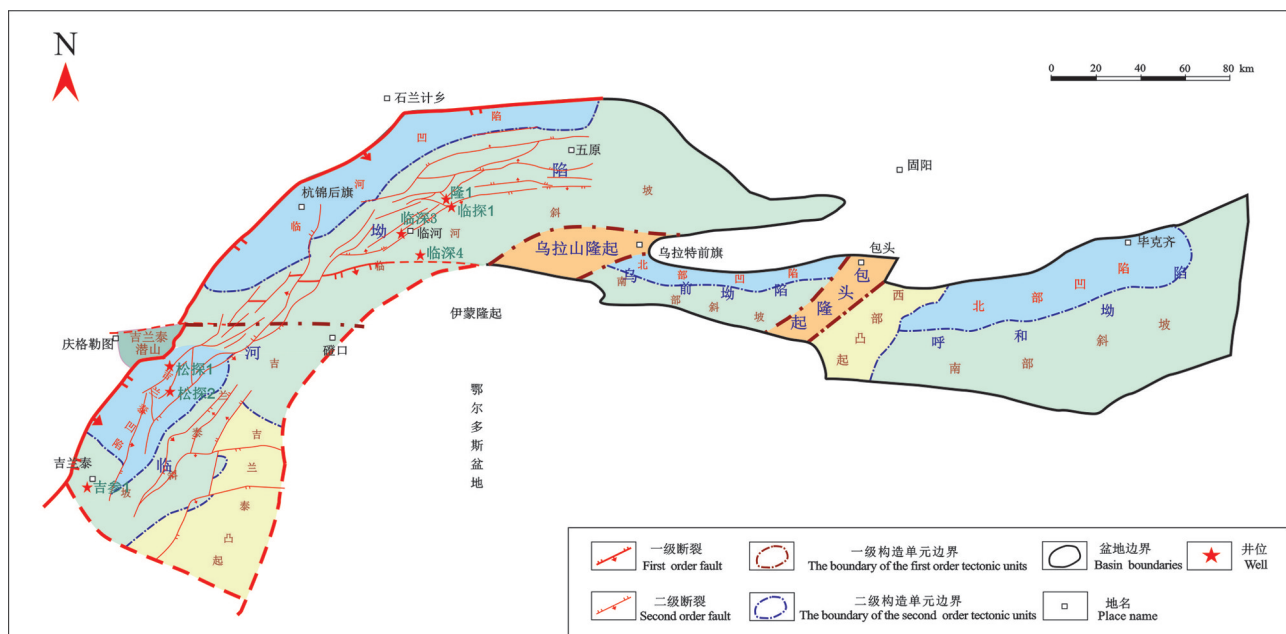


图1 河套盆地构造单元划分图
Fig.1 Tectonic unit division of the Hetao Basin

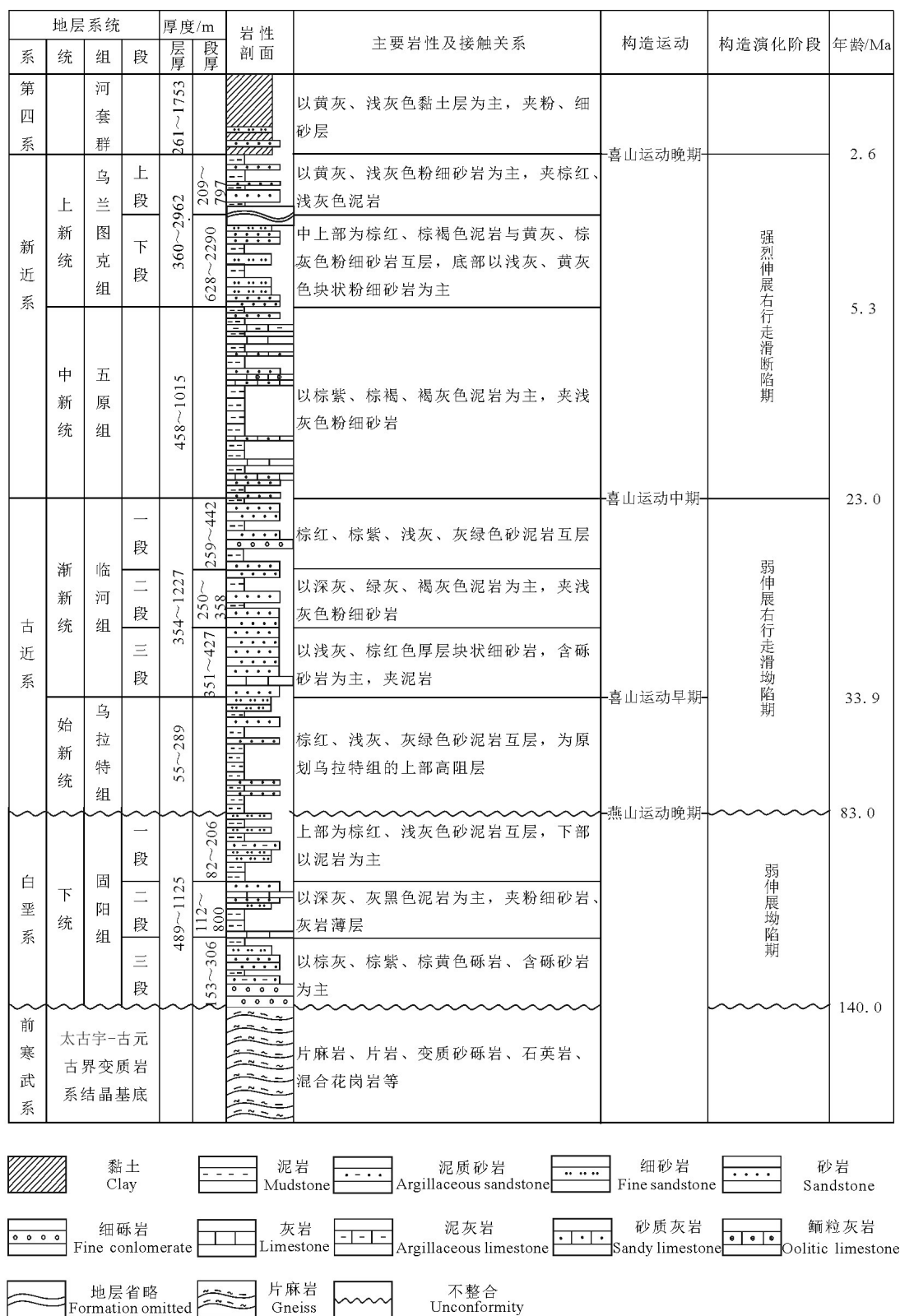


图2 河套盆地临河拗陷地层综合柱状图(据付锁堂等,2018;杜晓宇,2019;有修改)

Fig.2 Comprehensive column of strata in Linhe Depression, Hetao Basin
(modified from Fu Suotang et al.,2018; Du Xiaoyu, 2019)

表1 河套盆地下白垩统地层划分

Table 1 Division of the lower Cretaceous strata in Hetao Basin

	宁夏地层表 (1982)	赵重远等 (1984)	黄育庆等 (1985)	胡显穆等 (1986)	周季陶等 (1986)	蔡友贤等 (1988)	付锁堂等 (2018)	张以明等 (2018)	本文
下白垩统	大水沟组	固阳组 (J ₃ -K ₁)	大水沟组	大水沟组	固阳组 (K ₁)	大水沟组	固阳组 (K ₁)	固阳组 (K ₁)	固阳组
	乌尔塔组		乌尔塔组 固阳组	乌尔塔组		乌尔塔组			乌尔塔组

灰、灰黑色泥岩为主,夹粉细砂、灰岩薄层;固三段以棕灰、棕紫、棕黄色砾岩为主。其中固二段是固阳组中的主要生气层系。在以往的研究中,前人未提出下白垩统内部存在沉积间断。晚燕山运动使得盆地区域性挤压抬升剥蚀,上白垩统在临河坳陷内几乎剥蚀殆尽。

3 下白垩统内部不整合的发现及识别证据

近些年来,随着对不整合认识的不断深入,国内外学者在不整合的识别(杨勇等,2007;Lin et al, 2012)、结构特征(何碧竹等,2013)、分布范围(刘景彦等,2008;Ghienne et al., 2013)等方面,开展了一系列卓有成效的工作。含油气盆地内不整合研究的方法和手段也日趋丰富,形成了利用钻井录井资料、测井资料、地震资料和区域地质背景分析等综合研究的方法(官伟等,2019)。本文将依据地层古生物微体化石组合特征、测井响应特征(包括声波时差法确定不整合面)、不整合面的地震响应特征等方法识别并分析下白垩统内部不整合。

3.1 微体化石组合带特征

乌尔塔组以介形类 *Cypridea kansuensis*—*Djungeria* 组合;孢粉 *Classopollis*—*Perinopollenites*—*Cicatricosporites* 组合为特征(图3)。本组中未发现被子类花粉,只见裸子类花粉和蕨类孢子。介形类 *Cypridea vitimensis*, *C. koskulensis*, *C. kansuensis* 是早白垩世介形类组合的重要分子(蔡友贤,1990)。与国内早白垩世含热河生物群地层相当,时代为贝里阿斯期—巴雷姆期(145~125 Ma)。

固阳组以介形类 *Cypridea tera*—*Lycoptero-cypris*—*Metacypris* 组合;孢粉 *Lygodiumsporites*—*Hsuisporites*—*Classopollis* 组合;轮藻 *Atopochara trivolvris trivolvris* 带为特征(图3)。本组依旧以裸子

类花粉和蕨类孢子为主,被子花粉仅占3%,而且未发现热河生物群(蔡友贤,1988)。轮藻 *Atopochara trivolvris trivolvris* 广泛分布在世界各地的阿普特期地层中,故本组时代为阿普特期—阿尔布期(125~100.5 Ma)。

综合吉参1井、临深3井和临深4井中的孢粉、介形类及轮藻化石的种类与时代,可确定乌尔塔组地质时代为早白垩世早期,而固阳组为早白垩世中、晚期,孢粉、介形类及轮藻化石组合的差异表明乌尔塔组与固阳组之间存在明显的沉积间断。

3.2 不整合的测井响应特征

何登发等(2007)、吴孔友等(2009)学者对不整合体结构进行了划分,发现一个理想的不整合体常发育三层结构,即不整合之上的岩石(底砾岩、水进砂岩)、风化黏土层(黏土层)及不整合之下的半风化岩石(风化淋滤带、半风化淋滤带)。测井信息包含地球物理信息和地质演化信息(王建功等,2009;李慧琼,2017),而不整合面是众多地质特征发生突变的界面,这些突变在一定程度上可以在测井曲线上反映出来,因此可以通过测井曲线来识别不整合面。

临河坳陷吉参1井和松探1井下白垩统的测井信息证实了乌尔塔组与固阳组之间不整合体的存在。两口实钻井在该期不整合附近具有相似的测井特征。以松探1井为例,不整合面之下半风化岩石测井特征为自然伽马低,电阻高;风化黏土层由于富含铝、铁等元素,表现为自然伽马高,电阻低等特征;不整合之上的水进砂岩(含砾石)的特征为自然伽马低,电阻率中等(图3)。这期不整合自下而上的三层岩石——不整合之下的半风化岩石、风化黏土层及不整合之上的岩石的自然伽马值依次表现为:低、高、底,电阻率值依次表现为高、低、中。风化黏土层由于风化严重具有不整合体结构中最高的自然伽马值和最低的电阻率值。虽然下白垩

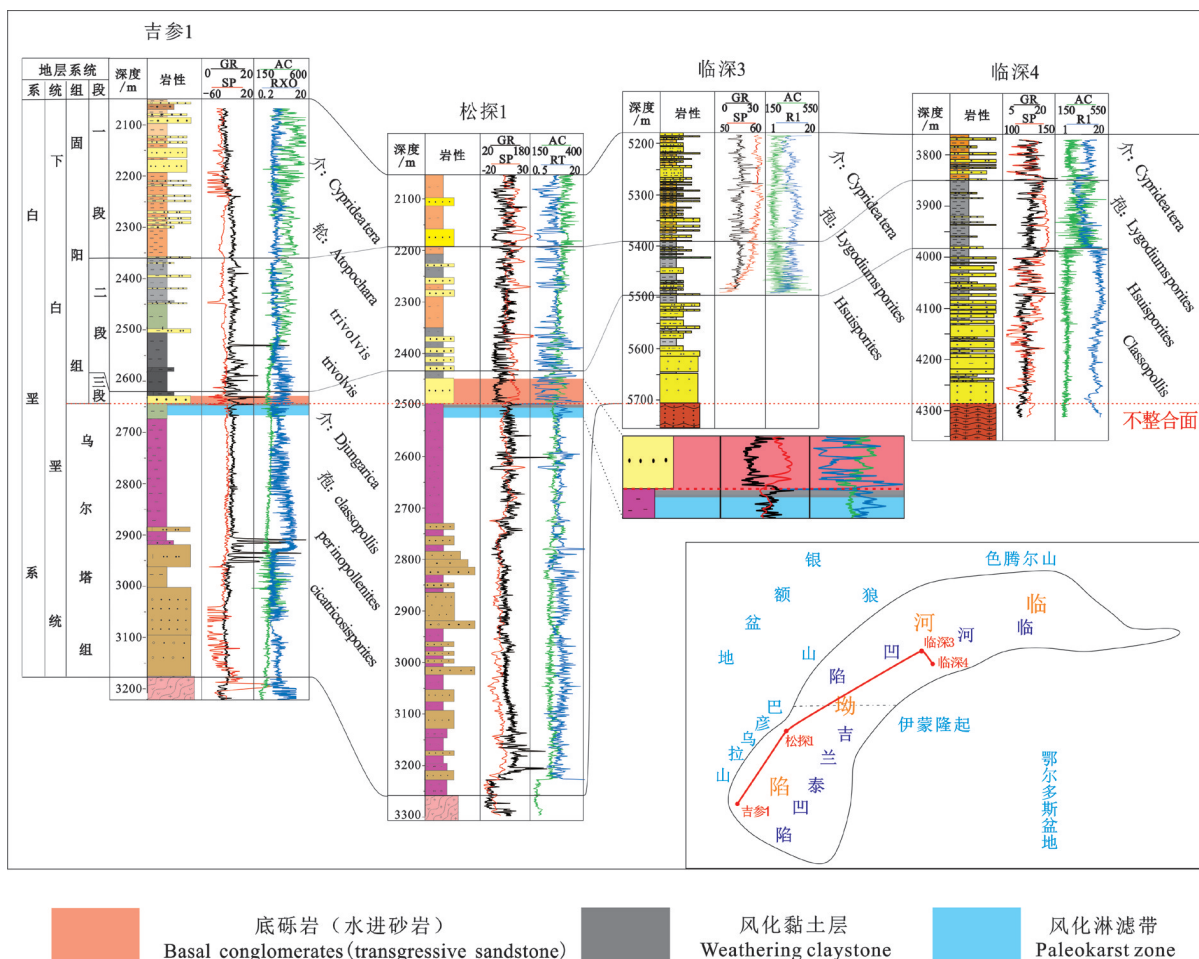


图3 临河坳陷吉参1-松探1-临深3-临深4连井剖面
Fig.3 Profile of Linhe Depression Jishen1-Songling 1-Linshen 3-Linshen 4 Union well

统内部不整合之下的岩石和风化黏土层均为泥岩,但其三层结构所表现的测井曲线特征符合理想不整合的测井响应特征。

如果两套地层存在沉积间断,那么压实作用就会存在差异,而孔隙度一般可以反映地层的压实情况,故也可以根据声波时差计算的孔隙度与埋深的关系来识别不整合面。

Magara 在研究用声波时差恢复剥蚀量时认为声波时差与埋深呈如下关系:

$$\Delta t = \Delta t_0 e^{-CH} \quad (1)$$

该式可变形为:

$$H = \frac{\ln(\Delta t_0) - \ln(\Delta t)}{C} \quad (2)$$

式中; Δt 为任一埋深泥岩的声波时差值, $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; Δt_0 为地表泥岩的声波时差值, $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; C 为正常压实曲线的斜率,对于特定地层为特定常数; H 为泥

岩埋藏深度,m。

由变形式(2)可知在正常压实且未经历剥蚀的一套地层其埋深 H 与 $\ln(\Delta t)$ 为一次函数关系,若地层中存在剥蚀,其 $\ln(\Delta t)$ 会发生突变(图4),在突变界面即为不整合面。通过对吉参1井和松探1井下白垩统泥岩声波时差数据分析,认为乌尔塔组与固阳组之间存在一个不整合。

3.3 不整合的地震响应特征

在钻井地层划分的基础上,依据临河坳陷内多口实钻井的地震合成记录,对二维地震资料进行标定。图5a为吉参1井的过井地震剖面的标定。

(1)TK反射界面代表下白垩统底界面,为稳定发育的区域不整合面,表现为上部强振幅、下部强—中振幅的两个负相位夹的强振幅正相位反射,稳定,可连续追踪对比。

(2)TKg反射界面代表下白垩统乌尔塔组与固

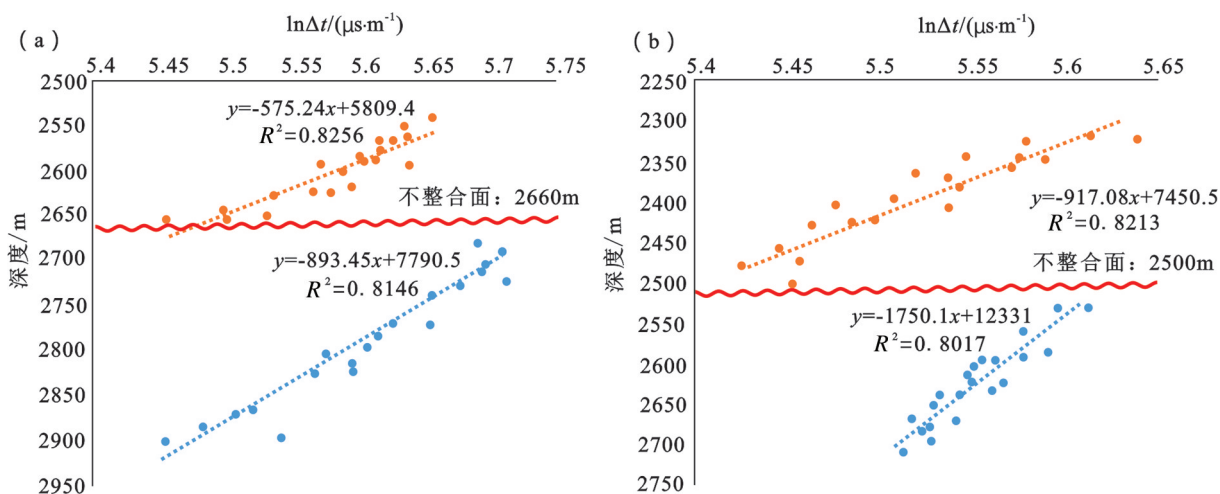


图4 临河拗陷声波时差法确定不整合面

a—吉参1井; b—松探1井

Fig. 4 The acoustic wave time difference method used for determination of the unconformity in Linhe Depression

a—The well of Jican 1 ; b—The well of Songtan 1

阳组的分界面,为区域不整合面,表现为上部存在弱—中振幅,下部强振幅的两个正相位夹的强振幅负相位反射。

(3) TE反射界面代表古近系底界面,上下地层多为平行不整合接触,局部存在角度不整合,表现为中振幅的两个负相位夹的强振幅正相位反射,下部存在若干弱振幅连续性较好的正负相位反射,全区连续追踪。

河套盆地临河拗陷的北西—南东向(图5a、b、d)剖面及北东—南西向地震剖面(图5c)综合揭示:削截现象存在于乌尔塔组与固阳组之间,而超覆现象存在于固阳组与盆地基底之间,固阳组沉积时盆地范围变大,只能在斜坡位置才可见超覆(图5a)。乌尔塔组沉积时范围比较局限,在盆地上表现为南北两个小凹陷,仅在狼山断裂附近沉积(图6),地层厚度整体呈现由西北向东南变薄的趋势。结合临河拗陷内钻井资料,对地震资料进行时深转换,结果表明南部小凹陷乌尔塔组地层厚度要大于北部小凹陷,在南部最厚处约800 m,而北部最厚处约600 m,说明乌尔塔组沉积时南部的沉积可容纳空间要大于北部(图6)。乌尔塔组沉积结束之后到固阳组沉积之前,盆地先是经历了小幅度的抬升剥蚀,后整体沉降,盆地范围变大,表现为盆大湖浅的特征。固阳组沉积时,临河拗陷普遍接受沉积,固阳组在盆地的短轴方向上厚度变化不大(图5a、b、c)。

4 讨论

4.1 不整合成因及特征分析

早白垩世早期,即乌尔塔组沉积时期,盆地处于断陷阶段,乌尔塔组分布受狼山断裂控制,断裂活动性的差异导致盆地在乌尔塔组沉积时期仅在南北的两个小凹陷内接受沉积,而且整体具有东厚西薄的地层发育特征。早白垩世晚期,即固阳组沉积时期,盆地处于弱伸展拗陷期,盆地开始大幅度整体沉降,致使固阳组全盆分布且在盆地的短轴方向上地层厚度变化不大。乌尔塔组与固阳组的地层发育特征具有显著区别,研究分析认为主要是受中燕山运动的影响,盆地受到NW—SE向挤压应力,乌尔塔组沉积后,盆地由于挤压作用差异抬升,遭受剥蚀;到了早白垩世晚期,区域从挤压背景转变为NW—SE向弱伸展背景,盆地整体沉降,沉积了普遍分布于全盆的固阳组(图7)。因此,在乌尔塔组与固阳之间形成相应的不整合面,表现为从西往东由平行不整合逐渐转变为角度不整合的构造型不整合特征。

4.2 对盆地早期构造演化的启示

不整合面识别、类型划分、特征及成因分析对于盆地的构造层划分、盆地形成演化等方面具有重要的启示作用(Brown et al., 1980; Anadón et al., 1986; Beer et al., 1990; 陈发景, 2004; 陈世悦等,

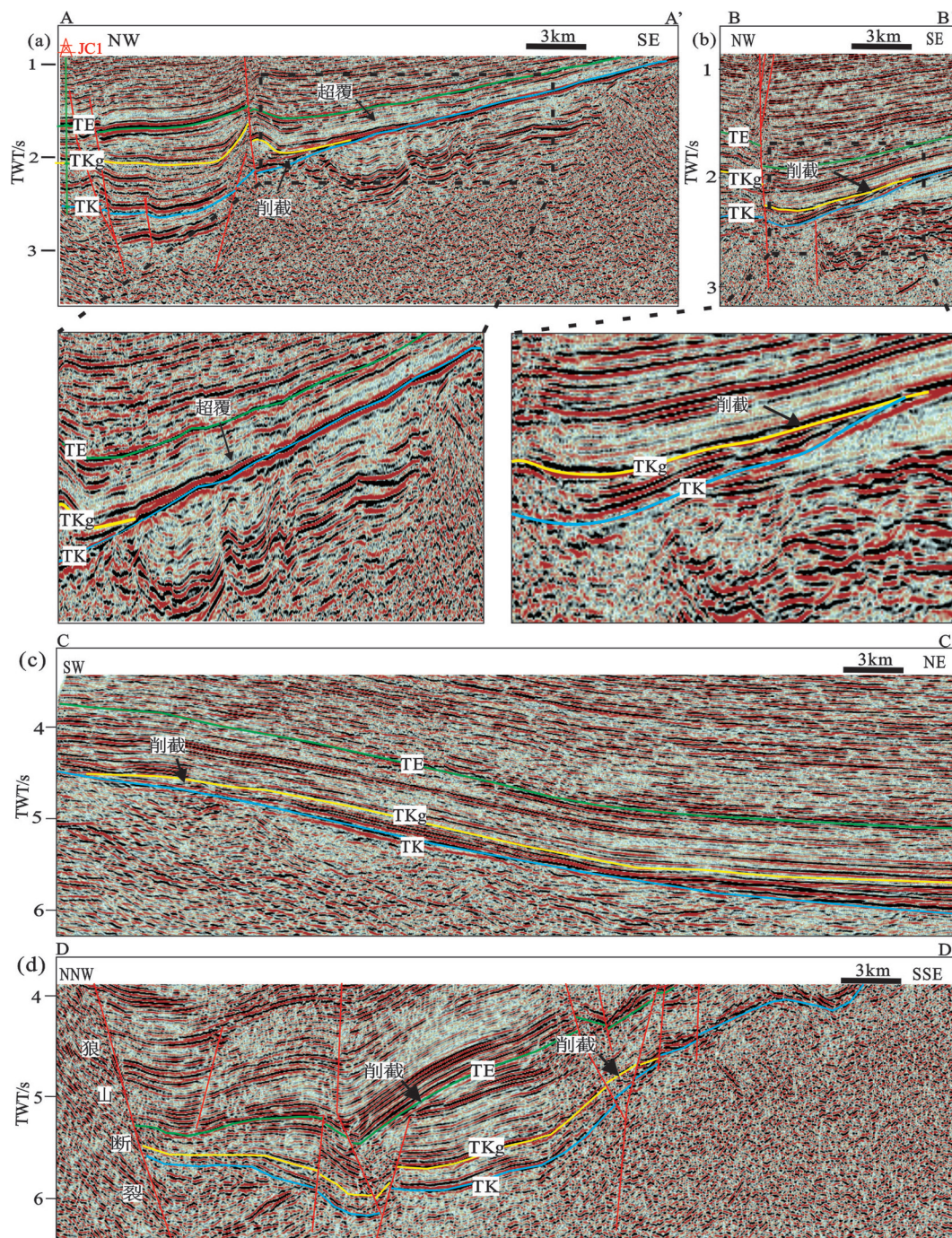


图5 吉参1井过井地震标定及临河坳陷典型地震剖面(位置见图6,说明见正文)

Fig.5 Seismic calibration of wells in Jishen 1 well and typical seismic section of Linhe depression
(Location shown in Fig.6, illustration see text)

2011)。邵浩浩等(2019)在河套盆地西边的河西走廊的平山湖盆地也发现了这期构造运动,认为盆地在早白垩世早期发育挤压构造盆地,在早白垩世晚期发育伸展断陷盆地。前人在河套盆地构造演化方面做过大量工作,但都未将下白垩统内部的不整

合考虑进去。在前人对河套盆地的构造演化和狼山的形成演化(包创等,2013)的研究基础上,结合下白垩统内部不整合的分布特征、形成原因以及乌尔塔组和固阳组的地层厚度变化,认为早白垩世河套盆地发育早白垩世早期断陷构造层、早白垩世晚

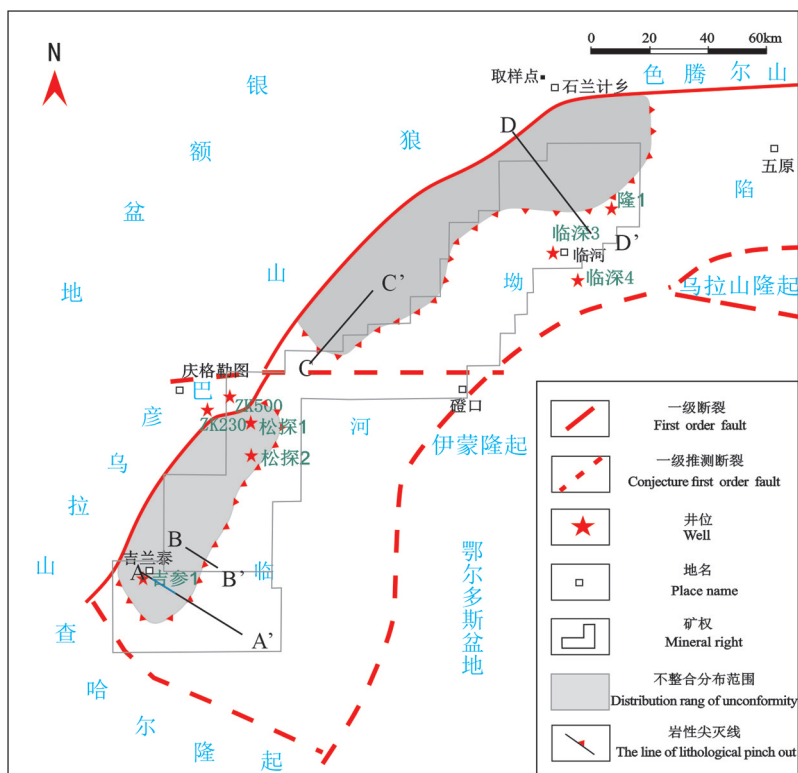


图6 临河坳陷下白垩统内部不整合平面分布图

Fig.6 Geological plan map showing the Lower Cretaceous unconformity in Linhe depression

期弱伸展坳陷构造层。早白垩世盆地的构造演化可分为3个阶段,即早白垩世早期断陷阶段、早白垩世中期挤压抬升剥蚀阶段、早白垩世晚期弱伸展坳陷阶段。

4.2.1 早白垩世早期断陷阶段

早白垩世早期,盆地受到NW-SE挤压应力作用,狼山断裂开始活动(以左行走滑为主),形成了南北两个小凹陷。南部断裂活动性强于北部,南部沉积地层厚度大于北部。早期狼山断裂的形成成为河套盆地临河坳陷的形成提供了物源区,奠定了河套盆地临河坳陷形成的基础。

4.2.2 早白垩世中期挤压抬升剥蚀阶段

早白垩世中期,受中燕山运动影响,NW-SE挤压作用增强。盆地由于挤压作用差异抬升,遭受剥蚀,形成了下白垩统内部的不整合,乌拉塔组顶部遭受剥蚀。

4.2.3 早白垩世晚期弱伸展坳陷阶段

早白垩世晚期,盆地受NW-SE向挤压应力变弱,狼山断裂活动性弱,加之局部岩浆活动使得地壳减薄,盆地整体处于弱伸展环境。盆地整体沉降,范围扩大,表现为盆大湖浅的特征,使得固阳组

在短轴方向上的地层厚度变化不大。

5 结 论

(1)依据地层古生物微体化石组合特征、测井响应特征(包括声波时差法确定不整合面)、不整合面的地震响应特征等方法综合研究,分析发现了下白垩统内部不整合。不整合面之上发育固阳组,之下发育乌拉塔组。固阳组全盆普遍发育,地层厚度差异不大。乌拉塔组主要分布在靠近狼山断裂附近的两个小凹陷内,地层厚度整体由西北向东南递减;南部小凹陷地层厚度大于北部小凹陷地层厚度。

(2)乌拉塔组沉积后,盆地受中燕山运动的影响,受到NW-SE向挤压应力,由于挤压作用差异抬升,遭受剥蚀;到了早白垩世晚期,区域从挤压背景转变为NW-SE向弱伸展背景,盆地整体沉降,沉积了厚度差异不大普遍分布于全盆的固阳组。因此,在乌拉塔组与固阳之间形成相应的不整合面,表现为从西往东由平行不整合逐渐转变为角度不整合的构造型不整合特征。

(3)早白垩世河套盆地发育早白垩世早期断陷构造层、早白垩世晚期弱伸展坳陷构造层。早白垩

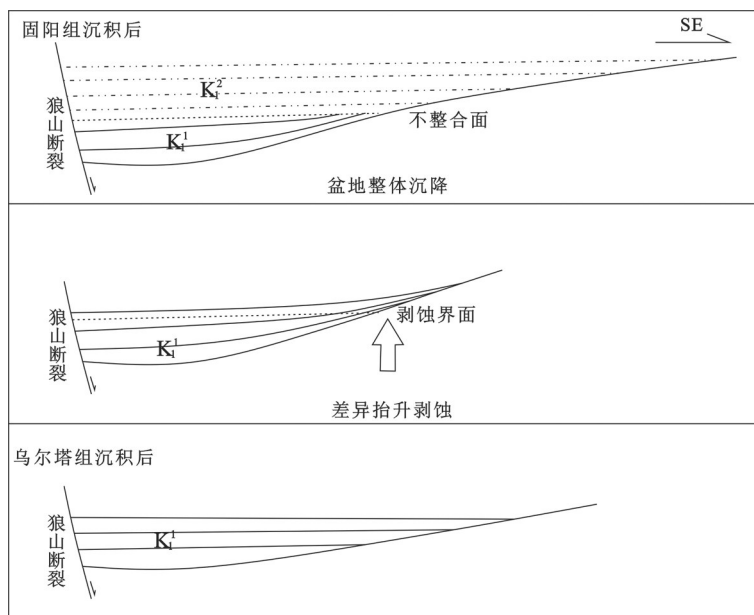


图7 河套盆地临河坳陷下白垩统内部角度不整合成因分析模式图

Fig.7 Genetic analysis map of the Lower Cretaceous internal angle unconformity of in the Linhe depression, Hetao Basin

世盆地的构造演化可分为3个阶段,即早白垩世早期断陷阶段、早白垩世中期挤压抬升剥蚀阶段、早白垩世晚期弱伸展坳陷阶段。

致谢:行文过程中得到华北油田分公司大力支持;审稿专家及责任编辑对论文提出了宝贵的修改意见,在此谨致以衷心感谢。

References

- Anadón P, Cabrera L, Colombo F, Marzo M, Riba O. 1986. Syntectonic intraformational unconformities in alluvial fan deposits, eastern Ebro Basin margins (NE Spain) [J]. *Foreland Basins*, 8: 259–271.
- Bao Chuang, Chen Yuepeng, Li Dapeng. 2013. LA–ICP–MS zircon U–Pb age and Hf isotopic composition of the Paleoproterozoic plagioclase amphibolite in Bayanwula mountain, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1514–1524 (in Chinese with English abstract).
- Beer J A, Allmendinger R W, Figueroa D E, Jordan T E. 1990. Seismic stratigraphy of a Neogene Piggyback Basin, Argentina [J]. *AAPG Bulletin*, 74(8): 1183–1202.
- Cai Youxian. 1988. New data of Late Cretaceous strata in Hetao Basin, Inner Mongolia [J]. *Journal of Stratigraphy*, (4): 273–280 (in Chinese with English abstract).
- Cai Youxian. 1988. Discussion on the Cretaceous stratigraphic sequence and oil-bearing strata in Hetao Basin, Inner Mongolia [J]. *Petroleum Exploration and Development*, (3): 31–36 (in Chinese with English abstract).
- Cai Youxian. 1990. Cretaceous paleoclimate, sedimentary environment and prospect of oil and gas exploration in Hetao Basin, Inner Mongolia [J]. *Geological Review*, 36(2): 105–115 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fajing, Zhang Guangya, Chen Zhaonian. 2004. Unconformity analysis and its significance in the study of continental basin tectonics [J]. *Modern Geology*, 18(3): 269–275 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shiyue, Li Cong, Zhang Pengfei, Wang Yuejun. 2011. The unconformable distribution of Caledonian and Indosinian strata in Jiangnan–Xuefeng area [J]. *Geology in China*, 38(5): 1212–1219 (in Chinese with English abstract).
- Du Xiaoyu, Ding Wenlong, Jiao Baocheng, Zhou Zhicheng, Xue Mingwang. 2019. Fluid potential characteristics and hydrocarbon migration–accumulation unit classification in Linhe Depression of Hetao Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 26(4): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Fu Suotang, Fu Jinhua, Yu Jian, Yao Jingli, Zhang Caili, Ma Zhanrong, Yang Yajuan, Zhang Yan. 2018. Petroleum geological characteristics and exploration prospects of Linhe Depression in Hetao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 5–18 (in Chinese with English abstract).
- Ghienne J, Moreau J, Degermann L, Rubino J. 2013. Lower Palaeozoic unconformities in an intracratonic platform setting: Glacial erosion versus tectonics in the eastern Murzuq Basin (southern Libya) [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 102: 455–482.
- Guan Wei, Xu Huaimin, Li Han, Cheng Lei, Ma Yonghui. 2019. Study

- on structural characteristics of unconformity: Take Jurassic–Cretaceous unconformity in Yong 1 well area as an example [J]. *Geoscience*, 33 (2): 153–163(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhongming, Yu Zhongping. 1990. Structural characteristics and evolution mechanism of Hetao arced tectonic system and its petroleum exploration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, (3): 15–24(in Chinese with English abstract).
- He Bizhu, Jiao Cunli, Xu Zhiqin, Liu Shilin, Cai Zhihui, Li Haibing, Zhang Miao. 2013. Unconformity structure and tectonic paleogeographic environment: A case study of the northern margin of the Qinghai–Tibet Plateau and the Tarim Basin in the middle Caledonian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2184–2198(in Chinese with English abstract).
- He Dengfa. 2007. Structure and hydrocarbon accumulation of unconformity surface[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34(2): 142–149(in Chinese with English abstract).
- Jin Jiuqiang. 2005. Discussion on the formation mechanism of the Cenozoic fault depression in the Ordos block[C]//Analysis of the Mesozoic–Cenozoic evolutionary dynamics and its resource–environment effects in the Ordos Basin and its adjacent areas, 1(in Chinese with English abstract).
- Li Huiqiong, Pu Renhai, Qu Hongjun, Zhao Deyong. 2017. Discussion on logging recognition method of Triassic and Jurassic unconformity in Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, (4): 577–583(in Chinese with English abstract).
- Lin C, Yang H, Liu J, Rui Z, Cai Z, Zhu Y. 2012. Distribution and erosion of the Paleozoic tectonic unconformities in the Tarim Basin, Northwest China: Significance for the evolution of paleo–uplifts and tectonic geography during deformation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 46, 1–19.
- Liu Jingyan, Lin Changsong, Peng Li, Chen Qingqing, Zhang Xiangxiang, Zhou Xiaojun. 2008. Distribution patterns of structural unconformity and their constraints on stratigraphic traps—a case study of the end of the middle Devonian in the Tarim Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 29(2): 268–275(in Chinese with English abstract).
- Men Xiangyong, Zhao Wenzhi, Li Xiaodi, Zhang Yijie, Chen Qian. 2006. Analysis of petroleum geological conditions of key targets for strategic petroleum area selection in Petrochina and suggestions of exploration[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(9): 1064–1067 (in Chinese with English abstract).
- Men Xiangyong, Zhao Wenzhi, Zhang Yan, Li Xiaodi. 2006. Characteristics of petroleum geology of Linhe Depression in Hetao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 26(1): 20–24(in Chinese).
- Shao Haohao, Chen Xuanhua, Zhang Da, Shao Zhaogang, Li Bing, Wang Zengzhen, Zhang Yiping, Xu Shenglin, Shi Jianjie, Miao Huixin. 2019. The Lower Cretaceous tectonic deformation stages and detrital zircon U–Pb ages of Pingshanhu Basin in Hexi Corridor[J]. *Geology in China*, 46(5): 1079–1093(in Chinese with English abstract).
- Sun Liuyi, Pu Renhai, Ma Zhanrong, Wang Fei. 2018. Source rock distribution and exploration prospect of Jilantai Sag in Hetao Basin, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40 (5): 612–626(in Chinese with English abstract).
- Wang Fei, Ma Zhanrong, Pu Renhai, Zhang Caili. 2019. Cretaceous stratigraphic division and geological characteristics in Jilantai area, Hetao Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 39(4): 656–664(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangong, Wang Tianqi, Wei Pingsheng, Shi Lanting, Han Xiaoqiang, Liu Caiyan, Shi Yongsu. 2009. Discovery of unconformity at the bottom of the third member of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin and its significance in petroleum geology [J]. *Chinese Journal of Geology*, (1): 80–90 (in Chinese with English abstract).
- Wu Kongyou, Li Linlin, Zha Ming. 2009. Unconformity longitudinal structure and its physical modeling of reservoir formation [J]. *Petroleum Experimental Geology*, 31(5): 537–541(in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Zha Ming, Hong Taiyuan, Liu Guande. 2007. Progress in unconformity classification and new classification schemes [J]. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 288–295(in Chinese with English abstract).
- Zhang Haozhi. 2015. Analysis of Geological Conditions of Hydrocarbon Accumulation in Linhe Depression of Hetao Basin [D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yiming, Zhang Ruifeng, Wang Shaochun, Liu Xiheng, Li Yongjun, Liu Jing, Wang Huilai, Wang Jian, Wu Chenlin, Dan Weining. 2018. Practice and understanding of important discoveries in oil and gas exploration in Linhe Depression of Hetao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 23(5): 5–15(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chongyuan, Guo Zhongming, Hui Binyao. 1984. The arc-shaped arc structure system and its formation and evolution mechanism[J]. *Oil & Gas Geology*, (4): 349–361(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包创,陈岳龙,李大鹏. 2013. 内蒙古巴彦乌拉山古元古代斜长角闪岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *地质通报*, 32(10): 1514–1524.
- 蔡友贤. 1988. 内蒙古河套盆地白垩纪地层层序及生油层时代讨论[J]. *石油勘探与开发*, (3): 31–36.
- 蔡友贤. 1988. 内蒙古河套盆地晚白垩世地层新资料 [J]. *地层学杂志*, (4): 273–280.
- 蔡友贤. 1990. 内蒙古河套盆地白垩纪古气候、沉积环境及油气勘探远景[J]. *地质论评*, 36(2): 105–115.

- 陈发景, 张光亚, 陈昭年. 2004. 不整合分析及其在陆相盆地构造研究中的意义[J]. 现代地质, 18(3):269-275.
- 陈世悦, 李聪, 张鹏飞, 王岳军. 2011. 江南—雪峰地区加里东期和印支期不整合分布规律[J]. 中国地质, 38(5): 1212-1219.
- 杜晓宇, 丁文龙, 焦保程, 周志成, 薛明旺. 2019. 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, 26(4):9-14.
- 付锁堂, 付金华, 喻建, 姚泾利, 张才利, 马占荣, 杨亚娟, 张艳. 2018. 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, 45(5):5-18.
- 官伟, 徐怀民, 李涵, 程磊, 马永辉. 2019. 不整合体结构特征研究: 以永1井区侏罗系—白垩系不整合为例[J]. 现代地质, 33(02):153-163.
- 郭忠铭, 于忠平. 1990. 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, (3):15-24.
- 何碧竹, 焦存礼, 许志琴, 刘士林, 蔡志慧, 李海兵, 张森. 2013. 不整合结构构造与构造古地理环境——以加里东中期青藏高原北缘及塔里木盆地为例[J]. 岩石学报, 29(6): 2184-2198.
- 何登发. 2007. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 34(2): 142-149.
- 靳久强. 2005. 鄂尔多斯地块周缘新生代断陷形成机制探讨[C]//鄂尔多斯盆地及邻区中生代演化动力学和其资源环境效应学术研讨会论文摘要汇编, 1.
- 李慧琼, 蒲仁海, 屈红军, 赵德勇. 2017. 鄂尔多斯盆地三叠系与侏罗系不整合面测井识别方法讨论[J]. 西北大学学报(自然科学版), (4):577-583.
- 刘景彦, 林畅松, 彭丽, 陈清清, 张响响, 周小军. 2008. 构造不整合的分布样式及其对地层圈闭的制约——以塔里木盆地中泥盆世末为例[J]. 石油与天然气地质, 29(2):268-275.
- 门相勇, 赵文智, 李小地, 张义杰, 陈谦. 2006. 中国石油战略选区重点目标油气地质条件分析及勘探建议[J]. 地质通报, 25(9): 1064-1067.
- 门相勇, 赵文智, 张研, 李小地. 2006. 河套盆地临河坳陷油气地质特征[J]. 天然气工业, 26(1):20-24.
- 邵浩浩, 陈宣华, 张达, 邵兆刚, 李冰, 王增振, 张义平, 徐盛林, 史建杰, 苗慧心. 2019. 河西走廊平山湖盆地早白垩世构造变形期次及其碎屑锆石U-Pb年龄约束[J]. 中国地质, 46(5): 1079-1093.
- 孙六一, 蒲仁海, 马占荣, 王飞. 2018. 河套盆地吉兰泰凹陷烃源岩展布与勘探潜力[J]. 地球科学与环境学报, 40(5):612-62.
- 王飞, 马占荣, 蒲仁海, 张才利. 2019. 河套盆地吉兰泰地区白垩系地层划分及地质特征[J]. 西安科技大学学报, 39(4):656-664.
- 王建功, 王天奇, 卫平生, 石兰亭, 韩小强, 刘彩燕, 史永苏. 2009. 松辽盆地青山口组三段底界不整合面的发现及石油地质学意义[J]. 地质学报, (1):80-90.
- 吴孔友, 李林林, 查明. 2009. 不整合纵向结构及其成藏作用物理模拟[J]. 石油实验地质, 31(5):537-541.
- 杨勇, 查明, 洪太元, 刘冠德. 2007. 不整合分类研究进展与新型分类方案[J]. 地层学杂志, 31(3): 288-295.
- 张昊祉. 2015. 河套盆地临河坳陷油气成藏地质条件分析[D]. 西安: 西安石油大学.
- 张以明, 张锐锋, 王少春, 刘喜恒, 李拥军, 刘静, 王会来, 汪剑, 吴晨林, 谈伟宁. 2018. 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, 23(5):5-15.
- 赵重远, 郭忠铭, 惠斌耀. 1984. 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, (4):349-361.