

松辽盆地大庆长垣中浅层断层形成演化的新模式

黄磊, 童亨茂, 杨东辉, 范晋煜, 黄浩天

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

内容提要:松辽盆地油气集中富集的中浅层断层十分发育,不同反射界面断层发育存在差异,前人认为是多期构造活动的结果。本文应用先存构造条件下断层作用模式,利用三维地震资料,对中浅层的断裂系统重新进行构造解析。结果表明,①松辽盆地大庆长垣中浅层断裂系统按照错断层位、断距、延伸长度、走向可划分为8个类型;② T_2 、 T_1 、 T_{06} 反射层断层的平均走向分别为 322° 、 320° 和 316° ,断层平均走向从下往上存在逆时针旋转的变化趋势;③大庆长垣自中浅层形成以来,构造应力机制由泉头组—明水组沉积时期的伸展应力机制转变为明水组沉积末期的走滑应力机制,但构造应力场的主应力方向没有发生改变;④研究区复杂的断裂系统是在构造应力场主应力方向保持相对稳定的条件下,在递进变形过程中逐渐形成的。该断层形成演化的新模式更合理地揭示了松辽盆地中浅层断层发育规律和成因机制,对研究区进一步的勘探开发有指导意义。

关键词:大庆长垣;断裂系统;先存断裂;递进变形;应力机制

松辽盆地位于中国东北境内,总体呈NE向展布,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,属中生代大型陆相沉积盆地(Hu Wangshui et al., 2005; Feng Zhiqiang et al., 2012),划分为6个二级构造单元(图1)(Shu Liangshu et al., 2003; Hou Qijun et al., 2006)。盆地沉积物总厚度超过10000m(表1),主要为白垩系。基底为前中生界变质岩、岩浆岩和火山岩(Fu Xiaofei et al., 2007),为天山-兴-蒙褶皱带的变质岩系。盆地形成于滨太平洋构造域背景(Yin Jinyin et al., 2002)。

松辽地区经历了3个构造演化阶段,即火石岭组—营城组沉积时期的断陷阶段、登娄库组—依安组沉积时期的拗陷阶段、新近纪以来的萎缩阶段。松辽盆地在这3个演化阶段的边界条件、沉降机制、动力学背景各不相同(Chen Junliang et al., 1999; Li Juan et al., 2002; Sun Yonghe et al., 2013a)。

大庆长垣位于松辽盆地北部的齐家-古龙凹陷与三肇凹陷之间,是松辽盆地中央拗陷区内的二级构造单元(图1),是松辽盆地油气最为富集的区域。

大庆长垣背斜构造带总体上呈“S”型展布,轴向NNE,具有“南宽北窄”的特点。地层整体表现为西翼陡、东翼缓,由上向下倾角逐渐变大,厚度由两翼向顶部逐渐减薄的特征(Lin Jingye et al., 2003; Zhao Bin et al., 2006)。

松辽盆地的油气资源主要富集在盆地的中浅层(泉头组三段—明水组)。前人对盆地中浅层的构造应力场演化认识总体表现为:发生多期构造活动、应力场主应力方向不断发生突变。Chen Zhaonian et al. (1996)认为伸展-挤压构造作用的交替,其中挤压变形表现为先存正断层的反转和褶皱两种方式。嫩江期末形成反转构造雏形,明水期末定形。Hou Guiting et al. (2004)认为松辽盆地中浅层应力机制不断发生转变:青山口组—嫩江组沉积时期,水平应力基本平静,以垂向沉降为主;四方台组—明水组沉积时期,由于太平洋板块的俯冲作用,NW向挤压;新近纪由于受日本海的扩张作用,NWW向挤压。反转构造可划分为3期,即晚白垩世嫩江组沉积末期、明水组沉积末期和新生代晚期(第四纪早期)。

注:本文为国家自然科学基金项目(编号41272160)和国家油气重大专项(编号2016ZX05024-005-004)资助成果。

收稿日期:2017-11-06;改回日期:2018-06-16;网络发表日期:2018-12-20;责任编辑:周健。

作者简介:黄磊,男,1984年生。博士研究生,主要从事盆地构造演化研究。Email:huanglei0429@163.com。通讯作者:童亨茂,男,1967年生。教授,从事盆地构造分析研究和教学工作。Email:tonghm@cup.edu.cn。

引用本文:黄磊,童亨茂,杨东辉,范晋煜,黄浩天. 2019. 松辽盆地大庆长垣中浅层断层形成演化的新模式. 地质学报, 93(3):597~605, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019040.
Huang Lei, Tong Hengmao, Yang Donghui, Fan Jinyu, Huang Haotian. 2019. A new model for the formation and evolution of middle-shallow faults in the Daqing placanticline, Songliao basin. Acta Geologica Sinica, 93(3):597~605.

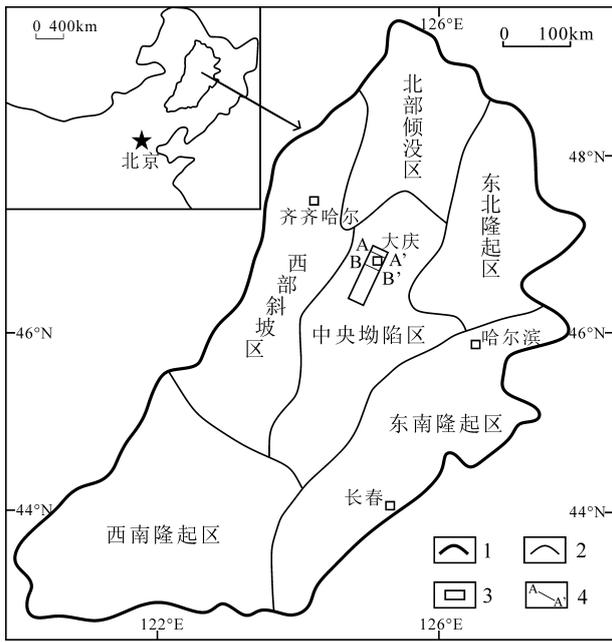


图1 松辽盆地构造单元划分图

Fig. 1 Division diagram of tectonic units in Songliao basin

1—盆地边界; 2—二级构造单元; 3—研究区; 4—剖面位置

1—Basin boundary; 2—secondary structural unit line;

3—study area; 4—profile location

Ren Yanguang et al. (2004)认为松辽盆地构造应力场在青山口组沉积期为近EW向伸展,姚家组沉积末期为近SN向伸展,明水组沉积时期为近SN向左行压扭作用。Chen Xiao et al. (2010)认为嫩江组

沉积末期为SN向差异升降活动,形成了区域伸展不整合面;明水组沉积末期从区域伸展作用转为挤压作用,盆地表现为EW向缩短,形成了反转构造。综上所述,前人认为大庆长垣中浅层构造应力场演化过程比较复杂,缺乏规律性。邻区渤海湾盆地最新的构造研究表明,应用先存构造条件下的断层作用模式(Tong Hengmao et al., 2010, 2011a, 2011b),南堡凹陷沙河街组二段(底界为40Ma)以上复杂的断裂系统是在南北向伸展的应力体制下、在递进变形过程中逐渐形成(Tong Hengmao et al., 2013),该模式很好地揭示了不同断层间的成生联系,并且具有很好的预测性。本文按照先存构造条件下的断层作用模式,利用三维地震资料,对大庆长垣中浅层断层的成因进行重新解释。结果表明,该地区复杂的断裂系统并非是多期构造活动、应力场主应力方向不断发生改变的结果,而是在主应力方向保持不变、递进变形过程中的产物。

1 中浅层断裂系统的构造解析

利用大庆长垣高精度三维地震资料(图2),对中浅层断层进行了系统的构造解析,编制了T₂、T₁、T₀₆反射层断层分布图(图3);根据断层的剖面特征(断距、错断层位)、平面特征(走向、延伸长度),将长垣中浅层发育的断层分为8类(图2,表2),并进一步阐述分析不同反射层断层的分布特征和规律。

表1 松辽盆地地层简表

Table 1 Stratigraphic table of Songliao basin

| | 系 | 统 | 组 | 段 | 反射层 | 年龄 (Ma) |
|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------|
| 新生界 | 第四系 | | | | | |
| | 新近系 | 上新统 | 泰康组N ₂ t | | | |
| | | 中新统 | 大安组N ₁ d | | | |
| 古近系 | 渐新统 | 依安组E ₃ y | | | | |
| 中生界 | 白垩系 | 上白垩统 | 明水组K ₂ m | 一二段 | T ₀₂ | |
| | | | 四方台组K ₂ s | | | |
| | | | 嫩江组K ₂ n | 三四五段 | T ₀₃ | 73 |
| | | | 姚家组K ₂ y | 一二三段 | T ₀₆ | 83 |
| | | | 姚家组K ₂ y | 一二三段 | T ₁ | 88.5 |
| | | 青山口组K ₂ qn | 一二三段 | T ₁₁ | 88.5 | |
| | | 下白垩统 | 泉头组K ₁ q | 一二三四段 | T ₂ | 97.5 |
| | | | 登娄库组K ₁ d | 一二三四段 | T ₃ | 113 |
| | | | 营城组K ₁ y | 一二三四段 | T ₄ | 119 |
| | | | 沙河子组K ₁ sh | 一二段 | T ₄₁ | 125 |
| 沙河子组K ₁ sh | 一二段 | | T ₄₂ | 134 | | |
| 侏罗系 | 上侏罗统 | 火石岭组J ₃ h | | | T ₅ | 144 |
| 古生界 | | | | | | |

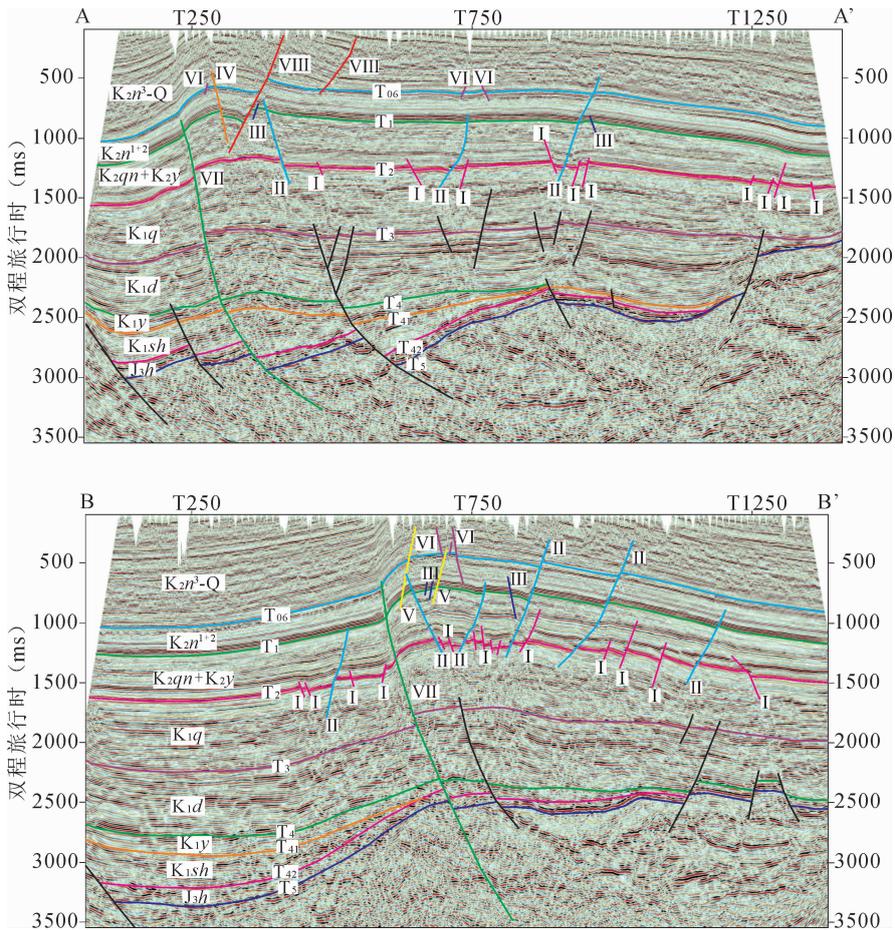


图 2 大庆长垣三维地震剖面(剖面位置见图 1, 断层类型 I ~ VIII 同表 2)

Fig. 2 3D seismic profiles in Daqing placanticline, Songliao basin

(the profiles location shown in Fig. 1, fault types I ~ VIII same as in Table 2)

T_2 反射层断层发育数量最多(2256 条), 走向以 NW、NNW 为主, 断距 30~80m, 延伸长度 1~3km (见图 3a)。断层受基底先存构造影响明显, 主要分布在基底断裂上方、基底断陷边界部位, 呈密集带状分布特征。断层以 I、II 类为主, 发育少量 VII、VIII 类断层。其中 I 类断层北部均匀分布, 南部带状分布; II 类断层中南部带状分布, 北部稀疏发育在中央部位。

T_1 反射层断层发育数量较多(754 条), 走向以 NW、NNW 为主, 少数 NE、SN。断距 10~50m。延伸长度 500~2000m(见图 3b)。断层以 II、III 类为主, 发育少量 IV、V、VII、VIII 类断层。中南部断层分布较为均匀, 北部密集分布在中央部位。

T_{06} 反射层断层发育数量最少(697 条), 走向以 NW 为主, 部分 NNW、NE。断距 10~40m。延伸长度 300~1000m(见图 3c)。发育断层数量以 VI 类最多, 部分 II、IV、V 类断层, 少量 VII、VIII 类。中南部断层分布稀疏, 较为均匀; 北部断层分布密集, 主要

发育在中央部位。

研究区共发育 8 类断层, 各类断层有如下特征和分布规律(表 2): ① I 类断层只错断 T_2 反射层, 断距 30~50m, 部分大于 100m。延伸长度 500~2000m, 部分大于 4km。全区密集分布, 南部较稀疏, NW、NNW 向排列。② II 类断层错断 T_2 反射层并向上错断 T_1 反射层, 部分错断 T_{06} 反射层。断距表现为“下大上小”的特征, T_2 反射层断距 50~80m, 少数大于 200m, T_1 反射层断距 40~60m, T_{06} 反射层断距 10~30m。断层延伸长度表现为“下长上短”的特征, T_2 反射层断层延伸 1~3km, 最长可达 8km, T_1 反射层断层延伸 500~3000m, T_{06} 反射层断层延伸长度 500~2000m。平面上, 断层分布不均匀, 北部主要分布在中部, 发育数量较少, 南部分布均匀, 发育数量较多。断层总体 NW 向排列, 少数 NNW 向、近 SN 向排列。③ III 类断层只错断 T_1 反射层断层, 断距 10~30m, 延伸长度 300~1000m。断层规模较小, 数量较多, 分布不均匀, 主要分布在

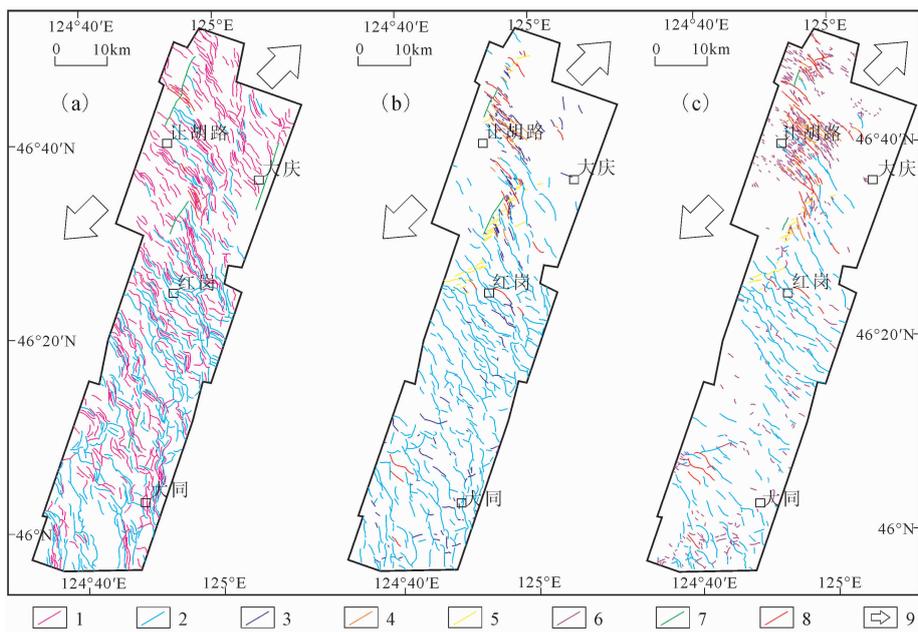


图3 大庆长垣中浅层断层分布图

Fig. 3 Middle-shallow faults distribution maps of Daqing placanticline, Songliao basin

(a)— T_2 反射层;(b)— T_1 反射层;(c)— T_{06} 反射层;

1—Ⅰ类断层;2—Ⅱ类断层;3—Ⅲ类断层;4—Ⅳ类断层;5—Ⅴ类断层;6—Ⅵ类断层;7—Ⅶ类断层;8—Ⅷ类断层;9—伸展方向

(a)— T_2 reflector layer; (b)— T_1 reflector layer; (c)— T_{06} reflector layer; 1—type I faults; 2—type II faults;

3—type III faults; 4—type IV faults; 5—type V faults; 6—type VI faults; 7—type VII faults; 8—type VIII faults; 9—extension directions

北部,南部零星散布。断层NW向排列,少数NNW、NE向排列。④Ⅳ类断层断穿 T_1 反射层并向上错断 T_{06} 反射层,走向NW。该类断层断距10~30m,延伸长度1~2km。断层集中发育在北部构造高点,其他地区不发育。⑤Ⅴ类断层断穿 T_1 反射层并向上错断 T_{06} 反射层,走向NE。该类断层断距10~30m,延伸长度1~2km。断层集中发育在北部构造高点,其他地区不发育。⑥Ⅵ类断层只错断 T_{06} 反射层,断距10~20m。延伸长度200~500m。断层发育数量较多,分布不均匀,主要分布在北部,南部少量发育。断层多数NW向排列,部分NNW、NE向排列。⑦Ⅶ类断层为逆断层,研究区北部西侧发育2条规模较大的逆断层,错断 T_{06} 及以下反射层,走向NNE。⑧Ⅷ类断层断穿 T_{06} 、 T_1 反射层,部分向下错断 T_2 反射层。断距表现为“上大下小”的特征, T_2 反射层断距20~30m, T_1 反射层20~40m, T_{06} 反射层30~50m。断层延伸长度2~5km。北部发育较多,南部发育较少,NW向排列。结合构造演化史(图4),分析各类断层形成演化时期(表2):Ⅰ、Ⅱ类断层形成于青山口组沉积时期,Ⅰ类断层在后续地质历史时期停止活动,Ⅱ类断层在后续地质历史时期重新复活,一直持续到嫩江组沉积时期。Ⅲ类断层形成于姚家组沉积时期。Ⅵ类断层形

成于嫩江组二段沉积时期。Ⅳ、Ⅴ、Ⅶ类断层形成于明水组末期区域反转作用下。Ⅷ类断层形成于反转之后。

2 构造应力场分析

按照先存构造条件下的断层作用模式,构造应力场的突变(主应力方向的改变)必然会形成区域性不整合面(Tong Hengmao et al., 2013);而出现不整合面并非一定反映构造应力场的突变。因此,不整合面的出现是构造应力场产生突变的必要条件,而不是充分条件。

松辽盆地泉头组—明水组沉积时期(中浅层地层沉积时期),地层接触关系都为整合接触,未见明显的角度不整合,预示着松辽盆地中浅层沉积时期,区域构造应力场没有发生突变,推测不同反射层构造变形(断层分布)的差异不是由区域构造应力场改变造成的,而是受先存构造影响、在递进变形过程的不同时期有序变化的结果。

2.1 伸展期(泉头组—明水组沉积时期)应力场主应力方向的确定

按照先存构造条件下的断层作用模式(Tong Hengmao et al., 2010, 2011b, 2014a),结合构造物理模拟实验结果(Tong Hengmao et al., 2009, 2014b),

表 2 大庆长垣中浅层断层特征表

Table 2 Characteristics chart of middle-shallow faults in Daqing placanticline, Songliao basin

| 类型 | 断层性质 | 走向 | 断穿层位 | 断距(m) | 长度(km) | 数量(条) | 分布特征 | 形成演化时期 | 成因机制 | 断层发育类型模式图 |
|------|------|-----------|---|---|---|-------|--------------|------------------------------------|-------|-----------|
| I | 正断层 | NW NNW | T ₂ | 30~50 | 0.5~2 | 1810 | 密集带状 | K ₂ qn | 短暂活动型 | |
| II | 正断层 | NW NNW | T ₂ -T ₁ T ₂ -T ₀₆ | T ₂ 50~80 T ₁ 40~60 T ₀₆ 10~30 | T ₂ 2~4 T ₁ 0.5~3 T ₀₆ 0.5~2 | 434 | 北疏南密 | K ₂ qn-K ₂ n | 持续活动型 | |
| III | 正断层 | NW NNW | T ₁ | 10~30 | 0.3~1 | 207 | 北部带状 南部零星 | K ₂ y | 短暂活动型 | |
| IV | 正断层 | NW | T ₁ -T ₀₆ | 10~30 | 1~2 | 30 | 构造高点 | K ₂ y-K ₂ n | 短暂活动型 | |
| V | 正断层 | NE | T ₁ -T ₀₆ | 10~30 | 1~2 | 36 | 构造高点 | K ₂ y-K ₂ n | 短暂活动型 | |
| VI | 正断层 | NW NNW | T ₀₆ | 10~20 | 0.2~0.5 | 517 | 北部均匀 南部零星 | K ₂ n | 短暂活动型 | |
| VII | 逆断层 | NNE | T ₃ -T ₀₆ | 30~80 | 5~14 | 2 | 北部 | K ₂ m | 持续活动型 | |
| VIII | 正断层 | NW | T ₀₆ T ₀₆ -T ₁ T ₀₆ -T ₂ | T ₀₆ 30~50 T ₁ 20~40 T ₂ 10~30 | 2~5 | 51 | 北部均匀 南部零星 | K ₂ m | 后期活动型 | |

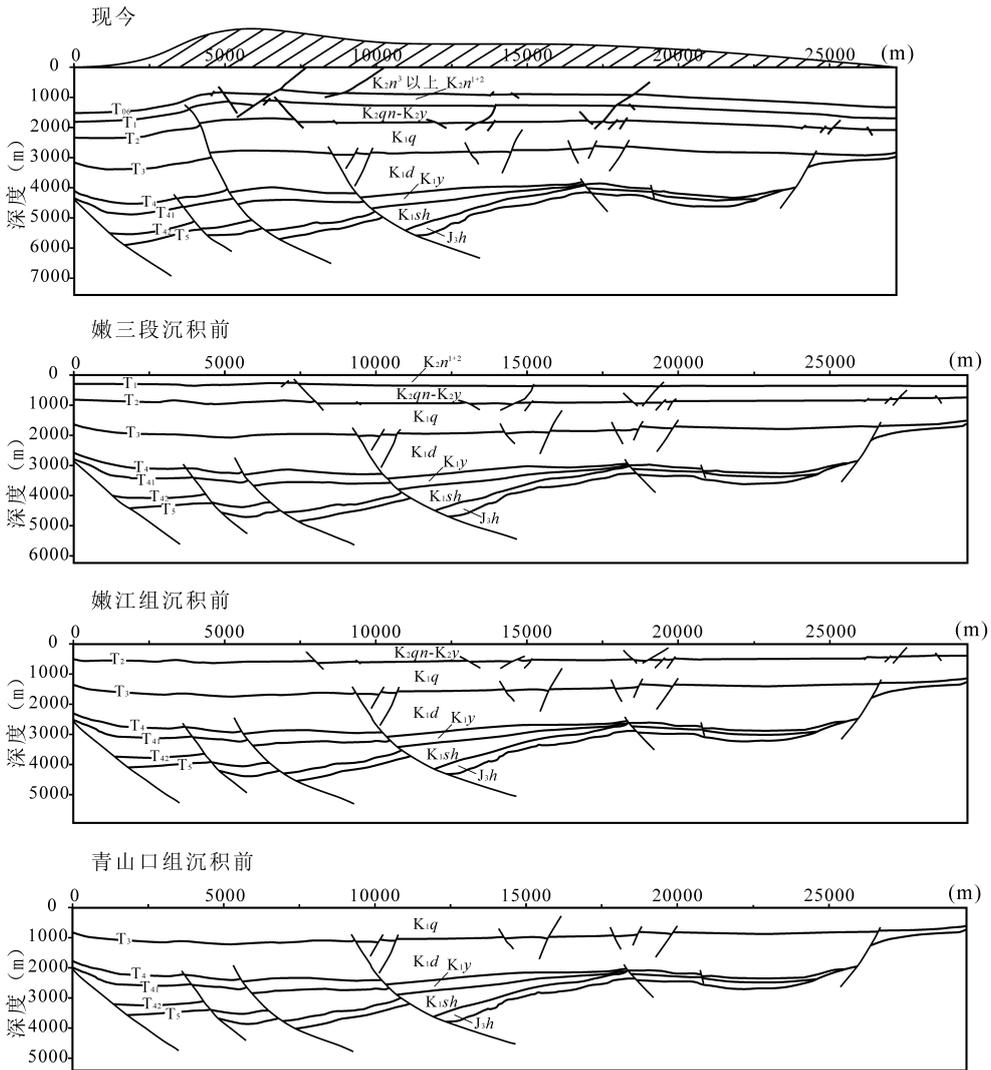


图 4 长垣构造演化剖面

Fig. 4 Structural evolution profile of Daqing placanticline, Songliao basin

先存构造条件下断层形成顺序是有规律、可预测的：首先形成先存构造复活断层，然后形成先存构造相

关断层，最后才形成反映区域构造应力方向的库伦断层。因此，不同成因类型的断层中，只有与先存构

造无关的库伦断层才能用来确定应力场的主应力方向。本文在对断裂系统特征定量分析及成因分类(表2)的基础上,确定应力场的主应力方向。

根据大庆长垣 T_2 、 T_1 、 T_{06} 反射层断层分布图(图3),统计各层断层走向,编制断层走向玫瑰花图(图5)。可以看出, T_2 、 T_1 、 T_{06} 三反射层断层80%以上都是NW向排列。统计上述三个地震反射层发育的NW向断层,计算断层走向加权平均值,得到 T_2 反射层断层优选走向为 322° , T_1 反射层断层优选走向为 320° , T_{06} 反射层断层优选走向为 316° 。以上分析发现大庆长垣中浅层断层优选走向发生了逆时针的旋转。

受基底先存构造影响(Liu Delai et al., 1996; Sun Yonghe et al., 2013b),大庆长垣 T_2 反射层上形成一系列NW向正断层,这些断层主要发育在基底断裂带、构造转折带和基底凸起上(Hu Wangshui, 1995)。随着构造活动的持续进行, T_1 反射层上的断层走向逐渐向西偏移,而在 T_{06} 反射层上,断层优选走向进一步向西偏转,形成许多小断层。该类断层只错断 T_{06} 反射层,断距较小,延伸长度较短,优选走向为NW 316° 。这些小断层就是库伦断层,不受先存构造影响,反映区域伸展方向。因此,大庆长垣泉头组—明水组沉积时期复杂的断裂系统并非是多期构造活动、应力场主应力方向不断发生突变的结果,而是在NE-SW(46°)方向伸展作用下递进变形过程中的产物。

此时,大庆长垣处于伸展作用状态,最大主应力 σ_1 为直立状态,中间主应力 σ_2 方向为NW 316° ,最小主应力 σ_3 方向为NE 46° (图6a)。

2.2 反转期应力场特征(明水组末期)

走滑作用是指岩石圈沿着某些构造边界或特定的构造带发生走向滑动变形的构造作用。明水组沉积末期,松辽盆地发生区域性构造挤压(反转)作用,

形成了大庆长垣、长春岭、绥棱、克山-依龙等规模较大的反转构造(Chen Junliang et al. 2009; Chen Xiao et al., 2010)。区域性构造挤压作用在长垣地区表现为压扭性作用,局部构造应力场表现为走滑应力机制,即 σ_2 直立, σ_1 和 σ_3 水平。

构造应力机制的转变,造成下伏NNE向先存构造(沙河子期断层)发生构造反转形成逆走滑断层,泉头组及其以上地层发生褶曲形成“西翼陡、东翼缓”的长垣背斜构造带。背斜的走向受控于基底先存构造,是下伏断陷期先存构造重新活动的结果。

反转断层是下伏先存构造重新活动的结果,不直接反应区域构造应力场方向。反转作用末期,大庆长垣背斜构造带上形成了一些NW向的晚期断层,此类断层切割了长垣背斜构造带,反映区域构造应力场方向。此时构造应力场为NW-SE向挤压(NE-SW向伸展), σ_1 方向为NW 316° , σ_2 方向为直立, σ_3 方向为NE 46° (图6b)。

通过对比发现,伸展期和反转期应力体制由伸展应力状态转变为走滑应力状态,但是三轴应力方向没有发生变化,只是主应力数值发生了变化。伸展期 σ_1 方向为直立, σ_2 方向为NW 316° , σ_3 方向为NE 46° (图6a)。反转期最大主应力和中间主应力发生了互换,伸展状态下的中间主应力数值变大成为最大主应力, σ_1 方向为NW 316° , σ_2 方向为直立, σ_3 方向为NE 46° (图6b)。

3 断层形成机制

根据前面的分析,大庆长垣中浅层发育了8类断层(表2)。本文根据先存构造活动性准则和摩尔空间理论(Tong Hengmao et al., 2010, 2011b, 2014b),结合区域应力场的演化,对这些不同类型断层的成因进行力学机制分析,把上述8类断层概括为3种成因类型:短暂活动型、持续活动型和后期

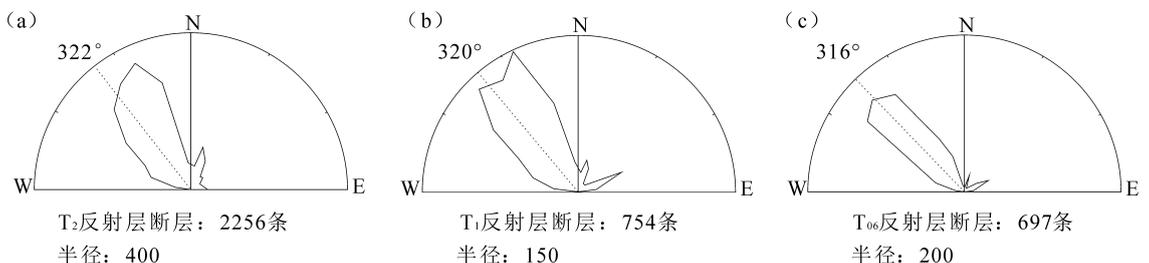


图5 大庆长垣断层走向玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagram of faults strike in Daqing placanticline, Songliao basin

(a)— T_2 反射层;(b)— T_1 反射层;(c)— T_{06} 反射层

(a)— T_2 reflector layer;(b)— T_1 reflector layer;(c)— T_{06} reflector layer

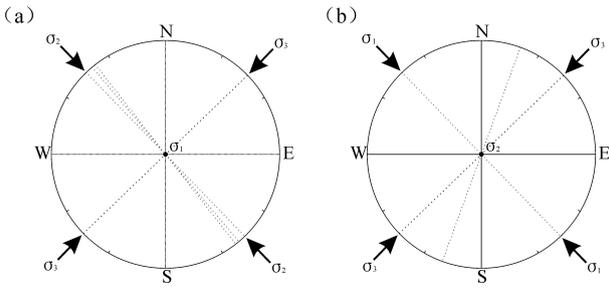


图 6 大庆长垣中浅层构造应力机制转换图
 Fig. 6 Transition maps of tectonic stress mechanism in middle-shallow layers in Daqing placentiline, Songliao basin
 (a)—Extension mechanism; (b)—strike-slip mechanism

活动型。

短暂活动型断层: I、III、IV、V、VI 类断层属于这一成因类型,具有活动时间短这一共同的特征。根据摩尔空间分析,该类断层受区域伸展应力作用下,达到断裂发育条件形成正断层(图 7a 左)。随着沉积物厚度的不断增大,围压增大,摩尔空间向右移动(图 7a 右),导致断层活动需要的差异应力不断增加,原先活动的断层逐渐达不到活动条件而停止活动(图 7a 右)。

从地质成因上分析, I、III、VI 类断层与区域伸展作用有关(与区域伸展方向垂直); IV 和 V 类断层发育在大庆长垣北部构造高点上,与局部构造作用(褶皱作用)有关,其中 IV 类断层形成于褶皱的纵张作用, V 类断层形成于褶皱的横张作用。

持续活动型断层: II、VII 类断层属于该成因类型。摩尔空间分析认为,在产状一致的情况下,沿先存构造活动要比库伦破裂更为容易。因为在 $\sigma\tau$ 坐标系中,先存构造活动线低于库伦破裂包络线,应

力状态虽然达不到库伦破裂的条件,但可以达到先存构造复活的条件(图 7b 左)。这类断层形成后,在后续的构造作用中均能满足先存断裂复活的条件,从而发育成为持续活动型断层(图 7b 右)。

后期活动型断层 (VIII 类断层): 该类断层受区域构造应力作用,达到断裂发育条件形成正断层(图 7c)。该类断层形成后,盆地趋于萎缩,上覆沉积物很少增加,围压(或 σ_1)变化不大,摩尔空间不发生移动(图 7c)。随着后期构造作用的停止,断层停止活动。

4 讨论

对于白垩纪末构造应力体制发生转变的原因, Li Juan et al. (2002)、Ge Rongfeng et al. (2010)认为松辽盆地白垩纪末期盆地的反转作用可能与古太平洋板块(伊泽纳奇板块)消亡、现今太平洋板块开始俯冲这一转换过程有关。

前人对大庆长垣反转构造的形成时间争议较大: 一些学者 (Hou Guiting et al., 2004; Hu Wangshui et al., 2005; Gao Xiang et al., 2017)认为大庆长垣的形成经历了三期构造反转,即晚白垩世嫩江组沉积末期、明水组沉积末期和新生代晚期; 还有一些学者 (Chen Zhaonian et al., 1996; Lin Jingye et al., 2003; Ge Rongfeng et al., 2010)认为经历了二期构造反转,即嫩江组沉积末期和明水组沉积末期; 部分学者 (Chen Junliang et al., 2009; Chen Xiao et al., 2010)通过构造物理模拟实验,认为大庆长垣的反转构造是明水组沉积末期一期构造活动的结果。

结合本文的研究成果,作者认为松辽盆地明水组沉积末期的反转构造作用形成了大庆长垣背斜构造带,是白垩纪末期的伸展应力体制向走滑应力体制转变的结果。

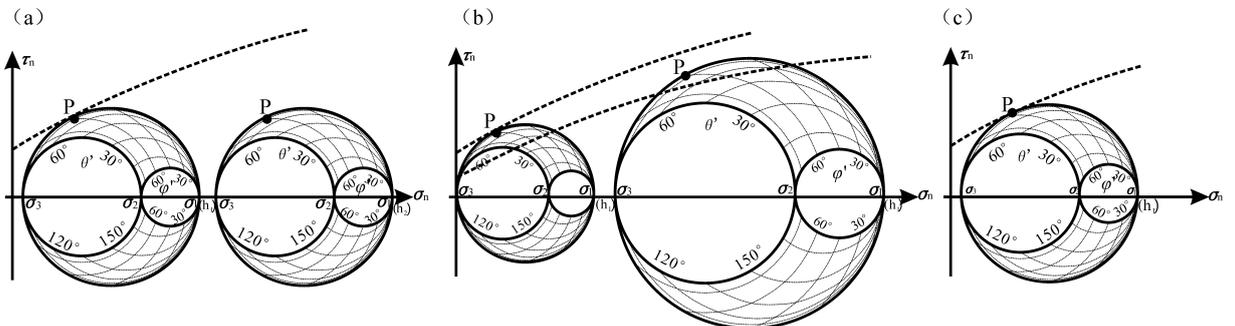


图 7 大庆长垣中浅层断层成因机制图
 Fig. 7 Genetic mechanism map of middle-shallow faults in Daqing placentiline, Songliao Basin
 (a)—Short-term activity type; (b)—continuous activity type; (c)—late activity type

5 结论

(1) 松辽盆地大庆长垣中浅层复杂的断裂系统按照错断层位、断距、延伸长度、平面展布方向可分为8类断层。

(2) T_2 、 T_1 、 T_{06} 反射层断层的平均走向分别为 322° 、 320° 和 316° ，断层平均走向从下往上存在逆时针旋转的变化趋势。

(3) 自中浅层形成以来，大庆长垣构造应力机制由泉头组—明水组沉积时期的伸展应力机制转变为明水组沉积末期的走滑应力机制，但构造应力场的主应力方向没有发生改变。

(4) 研究区复杂的断裂系统是在构造应力场主应力方向保持相对稳定的条件下、在递进变形过程中逐渐形成的。

References

- Chen Junliang, Cai Xiyuan, Lin Chunhua, Wang Hongyan. 1999. Tectonic characteristic and episodic evolution of the northern fault depression in Songliao basin. *Acta Petrolei Sinica*, 20(4): 14~20(in Chinese with English abstract).
- Chen Junliang, Li Zhongquan, Ying Danlin, Lin Chunhua. 2009. 3D tectonophysical modelling of the inversion structures in the latest Cretaceous in the northern Songliao basin. *Chinese Journal of Geology*, 44(1):63~73(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiao, Li Zhongquan, Chen Junliang, Li Hongkui, Zhang Tong. 2010. Determination of the reverse period of Songliao basin. *Geological Bulletin of China*, 29(2~3):305~331(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhaonian, Chen Buke. 1996. Inversion structures and their relationship to hydrocarbon accumulation in Songliao basin. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 23(4):50~57(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Fu Xiuli. 2012. Depositional evolution and accumulation response of Yaojia-Nenjiang formation in Songliao basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1):78~87(in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofei, Wang Pengyan, Lü Yanfang, Fu Guang, Yang Mian, Meng Qingfen. 2007. Tectonic features and control of oil-gas accumulation in the west slope of Songliao basin. *Chinese Journal of Geology*, 42(2):209~222(in Chinese with English abstract).
- Gao Xiang, Liu Zhihong, Nie Zhiyang, Yao Yong, Jia Wo, Wang Chao, Song Jian. 2017. Determination of timing and its geological significance of Daqing placanticline in Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth science edition)*, 47(1):74~83(in Chinese with English abstract).
- Ge Rongfeng, Zhang Qinglong, Wang Liangshu, Xie Guoai, Xu Shiyin, Chen Juan, Wang Xiyong. 2007. Tectonic evolution of Songliao basin and the prominent tectonic regime transition in eastern China. *Geological Review*, 56(2):180~195(in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Feng Dachen, Wang Wenming, Yang Mohan. 2004. Reverse structures and their impacts on hydrocarbon accumulation in Songliao basin. *Oil and Gas Geology*, 25(1):49~53(in Chinese with English abstract).
- Hou Qijun, Wei Zhaosheng, Zhao Zhanyin, Song Lizhong, Mao Chaolin. 2006. Deep basin reservoir in Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(4):406~411(in Chinese with English abstract).
- Hu Wangshui. 1995. " T_2 " fault system and early Qingshankou stretched rifting in Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 22(2):8~12(in Chinese with English abstract).
- Hu Wangshui, Lü Bingquan, Zhang Wenjun, Mao Zhiguo, Leng Jun. 2005. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao basin. *Chinese Journal of Geology*, 40(1):16~31(in Chinese with English abstract).
- Li Juan, Shu Liangshu. 2002. Mesozoic-Cenozoic tectonic features and evolution of the Songliao basin, NE China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 38(4):525~531(in Chinese with English abstract).
- Lin Jingye, Zhang Ge, Yang Qingjie, Hao Aihong. 2003. Analysis on exploration potential of fuyang reservoir in Daqing placanticline. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 22(3):16~18(in Chinese with English abstract).
- Liu Delai, Chen Fajing, Wen Xiangquan. 1996. Analysis on the origin of T_2 post-rift formations in Songliao basin. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 20(1):23~27(in Chinese with English abstract).
- Ren Yanguang, Chen Junliang, Feng Zhiqiang, Lin Chunhua, Leng Penghua. 2004. Impacts of Himalayan movement on petroleum system in Songliao basin. *Oil and Gas Geology*, 25(2):185~190(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Mu Yufu, Wang Bochang. 2003. The oil-gas-bearing strata and the structural features in the Songliao basin, NE China. *Journal of Stratigraphy*, 27(4):340~347(in Chinese with English abstract).
- Sun Yonghe, Chen Yibo, Sun Jigang, Fu Xiaofei, Hu Ming. 2013a. Evolutionary sequence of faults and formation of inversion structural belts in the northern Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3):275~283(in Chinese with English abstract).
- Sun Yonghe, Bai Lu, Fu Xiaofei. 2013b. Genetic mechanism of T_2 reflector fault dense zones in northern Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(4):797~806(in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Meng Lingjian, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li Xushen, Liu Mingquan. 2009. Fault formation and evolution in rift basin; sandbox modeling and cognition. *Acta Geologica Sinica*, 83(6):759~774(in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li Xiaoguang, Li Xushen, Meng Lingjian. 2011a. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain. *Science China; Earth Science*, 44(9):158~168(in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Yin An. 2011b. Reactivation tendency analysis; a theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. *Tectonophysics*, 503:195~200.
- Tong Hengmao, Zhao Baoyin, Cao Zhe, Liu Guoxi, Dun Xiaomei, Zhao Dan. 2013. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu sag Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 87(11):1647~1661(in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Wang Jianjun, Zhao Haitao, Li Bo, Hao Huawu, Wang Mingyang. 2014a. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness. *Science in China; Earth Sciences*, 57(7):1595~1604.
- Tong Hengmao, Koyi Hemin, Huang Scott, Zhao Haitao. 2014b. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models. *Tectonophysics*, 626:197~212.
- Yin Jinyin, Liu Hefu, Chi Haijiang. 2002. Evolution and gas-accumulation of Xujiaweizi depression in Songliao basin. *Acta Petrolei Sinica*, 23(2):26~29(in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin, Liu Cai, Wang Shiyu, Li Peng, Liu Yang, Feng Xuan. 2006. The modalities and recognition methods of reversal construct in Daqing placanticline. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(Sup.):101~103(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈均亮,蔡希源,林春华,王洪艳,雷茂盛. 1999. 松辽盆地北部断陷盆地构造特征与幕式演化. 石油学报, 20(4): 14~20.
- 陈均亮,李忠权,应丹琳,林春华. 2009. 松辽盆地北部白垩纪末反转变形的三维构造物理模拟. 地质科学, 44(1): 63~73.
- 陈骁,李忠权,陈均亮,李洪奎,张彤. 2010. 松辽盆地反转期的界定. 地质通报, 29(2~3): 305~331.
- 陈昭年,陈布科. 1996. 松辽盆地反转构造与油气聚集. 成都理工学院学报, 23(4): 50~57.
- 冯志强,张顺,付秀丽. 2012. 松辽盆地姚家组一嫩江组沉积演化与成藏响应. 地学前缘, 19(1): 78~87.
- 付晓飞,王朋岩,吕延防,付广,杨勉,孟庆芬. 2007. 松辽盆地西部斜坡构造特征及对油气成藏的控制. 地质科学, 42(2): 209~222.
- 高翔,刘志宏,聂志阳,姚勇,贾卧,王超,宋健. 2017. 松辽盆地大庆长垣形成时间的厘定及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 47(1): 74~83.
- 葛荣峰,张庆龙,王良书,解国爱,徐士银,陈娟,王锡勇. 2007. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换. 地质论评, 56(2): 180~195.
- 侯贵廷,冯大晨,王文明,杨默涵. 2004. 松辽盆地的反转构造作用及其对油气成藏的影响. 石油与天然气地质, 25(1): 49~53.
- 侯启军,魏兆胜,赵占银,宋立忠,毛超林. 2006. 松辽盆地的深盆油藏. 石油勘探与开发, 33(4): 406~411.
- 胡望水. 1995. 松辽盆地“T₂”断层系及青山口早期伸展裂陷. 石油勘探与开发, 22(2): 8~12.
- 胡望水,吕炳全,张文军,毛治国,冷军,官大勇. 2005. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨. 地质科学, 40(1): 16~31.
- 李娟,舒良树. 2002. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化. 南京大学学报(自然科学), 38(4): 525~531.
- 林景晔,张革,杨庆杰,郝爱宏. 2003. 大庆长垣扶余杨大城子油层勘探潜力分析. 大庆石油地质与开发, 22(3): 16~18.
- 刘德来,陈发景,温源泉. 1996. 松辽盆地坳陷期 T₂ 断层成因机制分析. 大庆石油学院学报, 20(1): 23~27.
- 任延广,陈均亮,冯志强,林春华,冷鹏华. 2004. 喜山运动对松辽盆地含油气系统的影响. 石油与天然气地质, 25(2): 185~190.
- 舒良树,慕玉福,王伯长. 2003. 松辽盆地含油气地层及其构造特征. 地层学杂志, 27(4): 340~347.
- 孙永河,陈艺博,孙继刚,付晓飞,胡明. 2013a. 松辽盆地北部断裂演化序列与反转构造带形成机制. 石油勘探与开发, 40(3): 275~283.
- 孙永河,白鹿,付晓飞. 2013b. 松辽盆地北部 T₂ 反射层断裂密集带成因机制. 地球科学——中国地质大学学报, 38(4): 797~806.
- 童亨茂,孟令箭,蔡东升,吴永平,李绪深,刘明全. 2009. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识. 地质学报, 83(6): 759~774.
- 童亨茂,蔡东升,吴永平,李晓光,李绪深,孟令箭. 2011. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定. 中国科学: 地球科学, 44(9): 158~168.
- 童亨茂,赵宝银,曹哲,刘国玺,顿小妹,赵丹. 2013. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析. 地质学报, 87(11): 1647~1661.
- 殷进垠,刘和甫,迟海江. 2002. 松辽盆地徐家围子断陷构造演化. 石油学报, 23(2): 26~29.
- 赵斌,刘财,王世煜,李鹏,刘洋,冯恒. 2006. 大庆长垣反转构造样式及其识别方法. 吉林大学学报(地球科学版), 36(专辑): 101~103.

A new model for the formation and evolution of middle-shallow faults in the Daqing placanticline, Songliao basin

HUANG Lei, TONG Hengmao*, YANG Donghui, FAN Jinyu, HUANG Haotian

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, 102249

* Corresponding author: tonghm@cup.edu.cn

Abstract

The middle-shallow faults, which host a large amount of concentrated oil and gas, are well developed in the Songliao Basin. There exist some differences in development of faults on different reflection interfaces. Previous studies believed they were the products of multi-stage tectonic activities. Based on the modes of faulting in the conditions of previous existing structures, this study analyzed the middle-shallow faulting system using 3D seismic data. The result shows that: (1) the middle-shallow faulting system of the Daqing placanticline in the Songliao basin can be divided into eight types based on faulted successions, displacements, extents and strikes; (2) the average strikes of faults for T₂, T₁ and T₀₆ reflection interfaces are 322°, 320° and 316°, respectively, with change trend of an anti-clockwise rotation of the faults from bottom up; (3) tectonic stress mechanisms had been transformed from extension during sedimentation of Quantou Formation - Mingshui Formation to strike-slip at the end period of the Mingshui Formation since formation of middle-shallow successions in the Daqing placanticline; and (4) the complicated faulting system in the study area formed from the process of the progressive deformation under the condition of maintaining a relatively steady principal direction of tectonic stress field. The new model for the evolution of the faults reasonably reveals the development rule and mechanism of the middle-shallow faulting system in the Songliao Basin, and will has guiding significance for further exploration and development of the study area.

Key words: Daqing placanticline; fault system; pre-existing faults; progressive deformation; tectonic stress mechanism