

川西双鱼石构造反转的有限元模拟证据

杨晓强,陈伟,孟立丰,余养里

(西南石油大学地球科学与技术学院,成都 615000)

摘要: 川西双鱼石研究区位于龙门山构造带北段,近年双鱼石区块进行的油气勘探证明该区具有良好的油气资源条件,查明该区构造发育特征和构造演化历史对区内油气勘探和开发具有重要意义。本文通过野外地质调研和地震资料解释,认为双鱼石研究区具有构造正反转特征;通过有限元模拟分析,印证了双鱼石研究区构造演化经历了晚三叠世之前被动大陆边缘环境,发育高角度正断层,而后在燕山期和喜山期受到龙门山造山运动影响构造反转,早期高角度正断层上下相邻软弱层诱发逆断层。

关键词: 双鱼石;有限元;构造反转;川西地区

中图分类号: P548 **文献标识码:** A

0 引言

川西双鱼石研究区位于四川盆地西北缘,龙门山构造带北段^[1-3]。龙门山构造带是我国典型的陆内挤压造山带,学界已经对其进行了深入的研究,认为其形成经历了晚三叠世之前的被动大陆边缘环境^[4-5],晚三叠世末期构造环境发生剧烈变化,转变为构造挤压环境,后期燕山期和喜山期造山运动的挤压造山运动叠加改造^[6-11]。前人对双鱼石区块的油气勘探、研究成果显示,该区具有良好的油气前景^[1-2,5-6]。因此,查明该复杂构造区的构造发育特征和构造演化历史,可以帮助研究该区油气成藏历史,指导龙门山隐伏构造带进一步油气勘探开发。

1 区域地质概况

双鱼石研究区北西为龙门山构造带的前锋带,其余大部分位于山前隐伏构造带(图1),即龙门山

南东隐伏边界大断裂(广元—大邑断裂)的南东面,其地表出露地层和地表地质变形较简单,但是地下构造发育,对该区的地下构造变形研究主要借助地震资料和钻井资料。

川西北部具有良好的生储盖层组合,双鱼石区块勘探的主要目的层仍然是二叠系碳酸盐岩,在二叠系栖霞组多口探井获得了工业气流。但是研究区二叠系地层具有复杂的构造变形样式,断裂与褶皱十分发育,形成了很多局部小背斜和向斜,具备较好的油气圈闭特征。

2 野外地质调研的三叠系正断层

本次工作对双鱼石研究区北边和西边进行了野外地质调研。在双鱼石西边的野外地质剖面中,发现在三叠系飞仙关组中发育高角度正断层,断层断距2 m左右,错断地层为三叠系飞仙关组(T_1f)泥岩,断层与层理面夹角大于 70° (图2)。通过层面对比,发现断层上盘标志层厚度大于断层下盘标志层厚度,该特征符合同沉积正断层的特征^[12-15]。说

收稿日期: 2020-05-26; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 国家科技重大专项“山前带海相层系复杂构造解析与区带评价”子课题(编号:2017ZX05005001-002)资助。

作者简介: 杨晓强(1993—),男,硕士研究生,主要从事地震资料构造综合解释、构造三维建模和构造演化史分析工作。通信地址:四川省成都市新都区新都大道8号,西南石油大学地球科学与技术学院;邮政编码:615000;E-mail:dwyane_youngyxq@163.com

通信作者: 陈伟(1963—),男,教授,博士,主要从事构造几何变形分析与数字模拟、构造裂缝分析等方面的教学、科研工作。通信地址:四川省成都市新都区新都大道8号,西南石油大学地球科学与技术学院;邮政编码:610500;E-mail:chenweiswpi@163.com

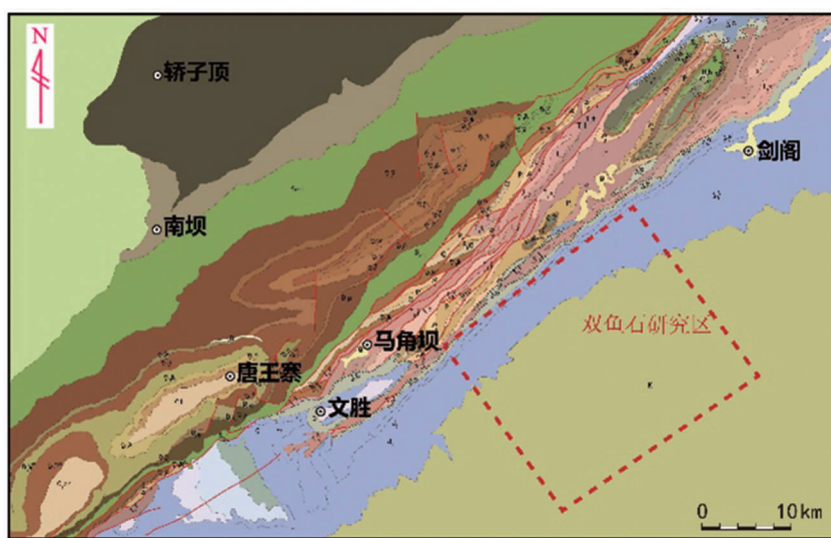


图 1 川西双鱼石研究区位置简图

Fig. 1 Structural location of Shuangyushi study area in western Sichuan

明飞仙关组沉积时期该处即发育有小断距正断层, 断层下盘一边往下运动一边接受沉积, 造成该处标志层厚度上盘大于下盘。双鱼石研究区在早三叠世仍为稳定被动大陆边缘环境, 有生长同沉积正断层发育。

3 地震剖面的三叠系正断层

双鱼石研究区地震剖面显示, 在该区二叠系到中三叠统中, 发育有大量断层和褶皱构造。被高角度逆断层错断的断层两盘有明显的相同地层厚度不

等的情况(图 3)。本研究对该地震剖面的断层进行了去断距处理(图 4), 沿着断层面将断距减小, 直到 T_1j 地层面的断层两盘实现对接, 发现去掉断距之后 T_1f 地层面不能完美对接, 且上盘的 T_1f 去断距之后位于下盘 T_1f 层面的下方(图 4a→图 4b→图 4c), 说明断层表现为同沉积正断层的特征。

4 有限元模拟正断层发育

近年来计算机技术迅猛发展, 有限元方法也已经广泛应用于地质研究中^[16-20]。本次研究通过建

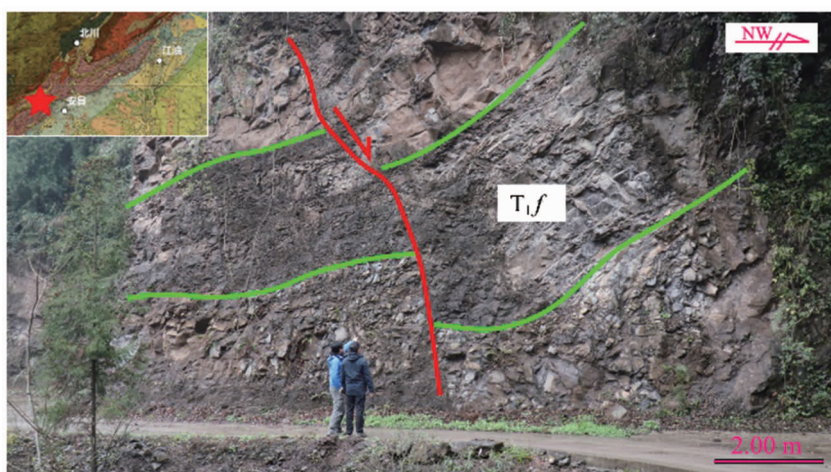


图 2 双鱼石南西剖面飞仙关组泥岩发育高角度正断层

Fig. 2 Normal fault in mudstone of Feixianguan formation at southwestern section of Shuangyushi

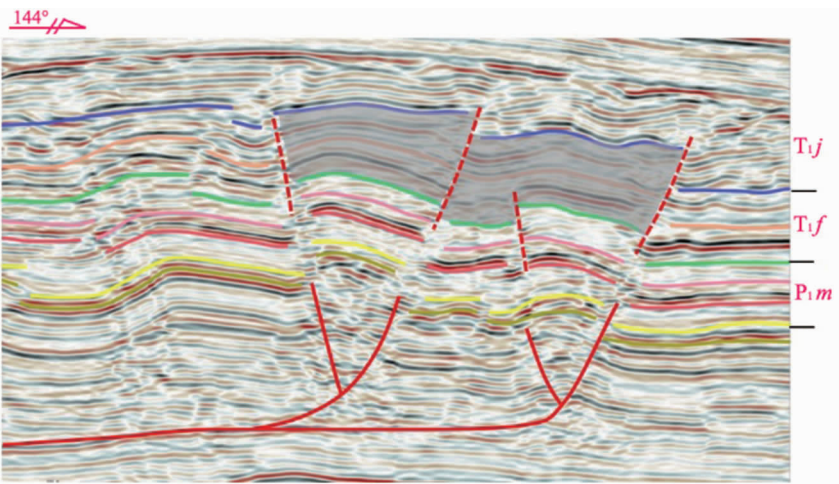


图 3 双鱼石研究区地震剖面解释

Fig. 3 Seismic section interpretation of Shuangyushi study area
 T_{1j} 嘉陵江组; T_{1f} 飞仙关组; P_{1m} 茅口组

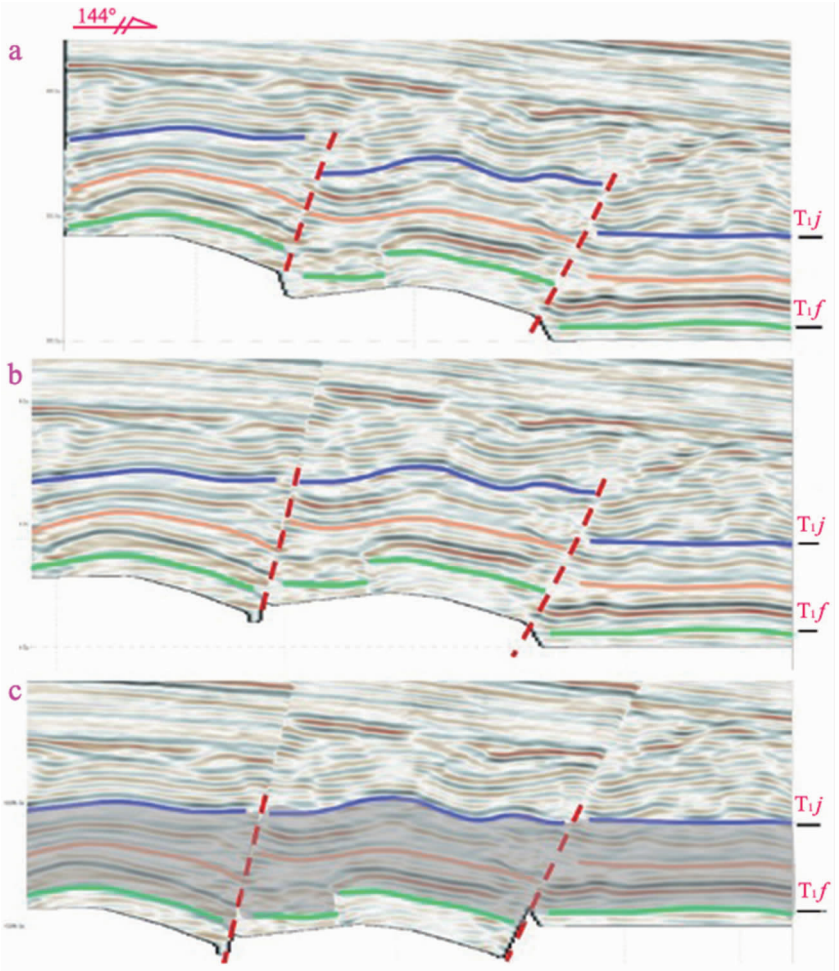


图 4 双鱼石研究区剖面某部分去断距

Fig. 4 Unfaulting section of Shuangyushi study area
 T_{1j} 嘉陵江组; T_{1f} 飞仙关组

立二维剖面有限元分析模型,利用各向同性的层状均质材料模拟地下可变形岩层,通过施加一定的边

界条件和荷载,研究可变形体的变形特征,模拟内部发育小断距正断层的地下岩层受到后期挤压构造运

动影响的变形特征。

(1)有限元模型设置

有限元模型需要建立可变形体的空间位置,并划分一定的网格。本次研究建立的有限元分析模型为二维剖面分析模型。剖面南北长 1000 m,上下一共有 4 层,每一层厚 100 m,其中有脆性岩层发育倾角 65°左右、宽 25 m 的断距可忽略的断层破碎带如图 5 所示。

本研究的有限元模拟用各向同性的等厚均匀层状材料模拟地下可变性岩层,其材料属性如表 1 所述。其中最下层用来模拟该区坚硬下伏层,屈服强度最大,在有限元模拟中不容易发生屈服,表示不容易发生破坏。软弱层杨氏模量稍小,表示容易发生变形;屈服强度也更小,表示在有限元模拟计算中容易发生屈服,所模拟的材料容易发生破坏。脆性材料杨氏模量更小,屈服强度介于下伏层和软弱层之间。并且上覆脆性岩层中发育有高角度正断层破碎带,该破碎带断距较小,本模拟中忽略其断距,一方面可以简化模型,另外一方面也可以避免有限元分析中的几何异常点对计算结果的影响。断层破碎带的密度、杨氏模量和泊松比参数与脆性层的属性一致,但是摩擦角很小,表示其模拟的断层破碎带岩层强烈破碎,屈服强度也很小,表示容易发生破坏。

整个有限元分析模型一共含两个分析步骤:第一步,给模型施加向下的重力荷载;第二步,使模型上覆三层的南边界往北边推移 50 m,模拟向北推移的构造运动。第一步和第二步的边界条件也有所不同:第一步,使下伏层下边界固定,整个模型的南边界和北边界限制南北平移和旋转;第二步,取消模型上覆三层的南边界限制,使其可以向北平移。

(2)有限元模拟结果

有限元分析中,用塑性应变表示材料发生的不可恢复的破坏,狭长的塑性应变集中带表示岩层破碎产生新的断层(图 6)。

从图 6 中可以看出,从剖面南往北的荷载刚开始作用,运动位移不大时,首先在脆性层的先存断裂位置发育塑性应变,以及相邻软弱层与断层接触位置发育塑性应变。表示在岩层中存在早期发育的小断距正断层时,后期挤压构造作用下先存正断层位置及相关位置最开始有岩层微破裂发生(图 6a)。

随着荷载的增大,先存断层破碎带首先发育塑性应变高值的集中带(图 6b、图 6c),同时在相邻上下软弱层中,与先存断裂接触位置也发育塑性应变的集中带,且南侧塑性应变值较大,形成的塑性应变高值集中带区域也较大。

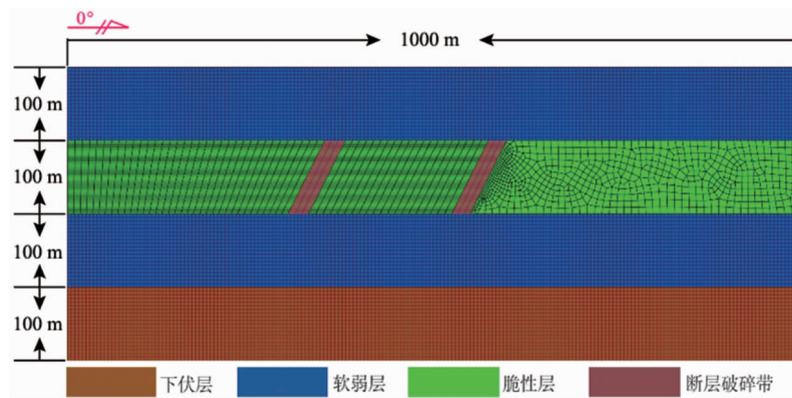


图 5 有限元模型尺寸及网格划分

Fig. 5 Mesh of finite element model

表 1 有限元模拟中用到的材料属性

Table 1 Material property of finite element model

参数材料层	密度/kg·m ⁻³	杨氏模量/10 ⁶ Pa	泊松比	摩擦角/(°)	屈服强度/10 ⁶ Pa
断层破碎带	2500	16000	0.25	4	50
脆性层	2500	16000	0.25	26	90
软弱层	2520	18000	0.25	20	60
下伏坚硬层	2550	20000	0.25	30	1200

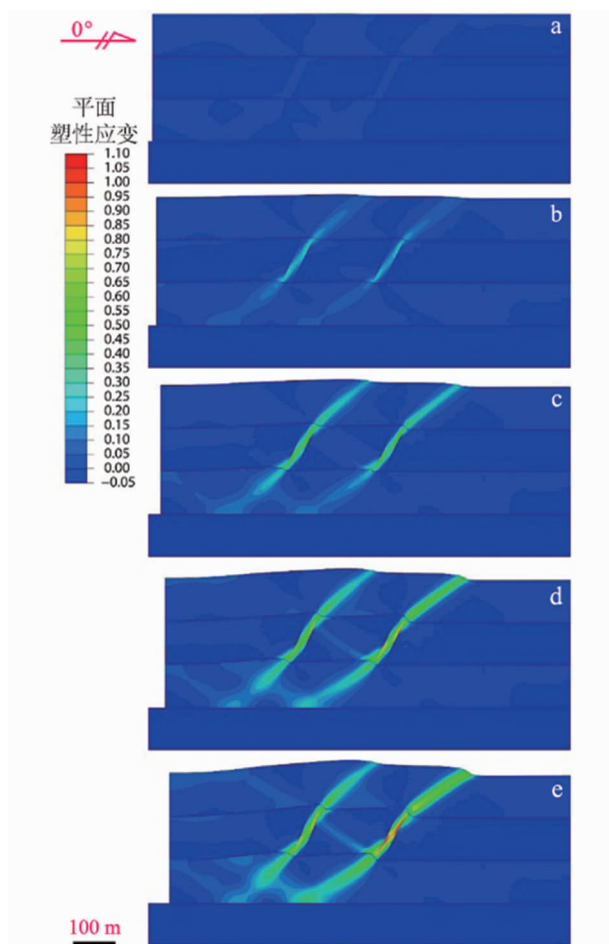


图6 二维剖面有限元模拟塑性应变云图和变形过程

Fig. 6 Plastic strain and deformation history

load: 10→20→30→40→50 m

a. 荷载 10 m; b. 荷载 20 m;

c. 荷载 30 m; d. 荷载 40 m; e. 荷载 50 m

有限元模拟的荷载继续增大时,发现塑性应变最大值仍位于先存断层破碎带的位置,且可以发现北侧的断层位置塑性应变值更大(图 6d,图 6e)。在相邻上下软弱层中,也会在与脆性层中先存断层破碎带接触位置发育明显的塑性应变高值集中带,而且在北侧发育的新断层处塑性应变值更大,形成的塑性应变高值集中带范围也更大。说明北侧的上下软弱层中发育的断层断距更大,断层破碎带岩层破坏更强。而且上覆软弱层中发育的塑性应变值大于下伏软弱层相似位置的塑性应变值,这说明上覆软弱层与脆性层接触位置形成的断层断距更大,断层破碎带岩层破碎最强。

有限元模拟荷载施加的最后阶段,可以发现在脆性层和相邻软弱层中都会出现有与明显塑性应变集中带共轭的一个塑性应变值更小的另一个塑性应

变带(图 6e),说明在构造挤压运动的后期,会在岩层中发育共轭反冲逆断层。

5 结论

(1)有限元模拟方法可以很好地模拟地质构造变形样式和构造演化历史,对分析构造变形演化历史具有重要作用。

(2)地下岩层中早期发育的断距很小的断层破碎带,其位置决定了后续挤压构造作用时相邻岩层中发育相关断层的位置,先存断裂的倾向也决定了相邻岩层发育的断层的倾向。

(3)双鱼石地区的野外地质调研和地震剖面资料指示该区三叠系地层发育早期正断层,断距不大,并且有在后期构造作用中发生了构造正反转的特征。

(4)有限元模拟的结果证实,双鱼石研究区经历了早三叠世之前的稳定大陆边缘的拉张环境,到后期印支期和喜山期的挤压环境的构造正反转过程,形成了双鱼石地区的高角度逆断层。

参考文献:

- [1] 蒲柏宇,张连进,兰雪梅,等.川西北地区双鱼石区块栖霞组沉积微相特征[J].天然气勘探与开发,2019,42(4):8-18.
- [2] 李荣容,杨迅,张亚,等.川西北地区双鱼石区块二叠系栖霞组气藏储层特征及高产模式[J].天然气勘探与开发,2019,42(4):19-27.
- [3] 黄晶.川西北部双鱼石地区构造特征及变形机制研究[D].成都:成都理工大学,2019.
- [4] 王丽宁,陈竹新,李本亮,等.龙门山冲断带北段构造解析及有利区带预测[J].石油勘探与开发,2014,41(5):539-545.
- [5] 刘树根,李智武,曹俊兴,等.龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J].地质科学,2009,44(4):1151-1180.
- [6] 陈竹新,李伟,王丽宁,等.川西北地区构造地质结构与深层勘探层系分区[J].石油勘探与开发,2019,46(2):397-408.
- [7] 杨跃明,陈聪,文龙,等.四川盆地龙门山北段隐伏构造带特征及其油气勘探意义[J].天然气工业,2018,38(8):8-15.
- [8] 李勇,贺佩,颜照坤,等.晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(4):401-411.
- [9] 郑虹,胡明,陈英明.四川盆地北部构造特征及盆山耦合分析[J].特种油气藏,2008(4):24-27+105.
- [10] 陈竹新,贾东,魏国齐,等.龙门山北段矿山梁构造解析及其油气勘探[J].地学前缘,2005(4):445-450.
- [11] 贾东,陈竹新,贾承造,等.龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J].高校地质学报,2003(3):402-410.

- [12] 胡望水, 柴浩栋, 李瑞升, 等. 平衡剖面技术对东海西湖凹陷正反转构造及其成藏控制的研究[J]. 特种油气藏, 2010, 17(1):15-19+121.
- [13] 鲍倩倩, 吴智平, 李伟, 等. 济阳坳陷东营组沉积末期正反转构造研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(3):31-34+106.
- [14] 沈华, 陈发景, 尹微. 伸展构造体系中反转构造研究[J]. 特种油气藏, 2005(1):23-25+106.
- [15] 郭真, 刘池洋, 田建锋. 东海盆地西湖凹陷反转构造特征及其形成的动力环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(3):59-67.
- [16] Wei Ju, Guiting Hou, Bo Zhang. Insights into the damage zones in fault-bend folds from geomechanical models and field data [J]. Elsevier B V, 2014: 610.
- [17] Erickson S G, Jamison W R. Viscous-plastic finite-element models of fault-bend folds [J]. Elsevier Ltd, 1995, 17(4):561-573.
- [18] 汪道兵, 秦浩, 马海燕, 等. 多裂缝“应力阴影”的有限元数值模拟[J]. 北京石油化工学院学报, 2020, 28(1):22-28.
- [19] 向用发, 卢玺, 徐宇浩, 等. 有限元数值模拟法基本原理及其在地质构造变形研究中的应用综述[J]. 四川地质学报, 2019, 39(4):581-588.
- [20] 薄江伟, 罗明良, 温庆志, 等. 致密砂岩储层压裂有限离散元分析[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1):152-157.

Evidence from finite element modeling for structural reverse of Shuangyushi, northwestern Sichuan

YANG Xiaoqiang, CHEN Wei, MENG Lifeng, YU Yangli

(College of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The study area is located in the northern part of Longmenshan Belt, the oil and gas exploration in this area in recent years has proved that this area has good oil and gas resource conditions and the structural development characteristics and structural evolution history of this area is significant for oil and gas exploration and development. Field geological survey and seismic data interpretation indicate that change of fault from normal to reverse took place in this area. Finite element modeling verifies that the structural evolution of this area experienced the passive continental margin environment before the late Triassic, and developed high-angle normal faults. Then, the structure reversed under the influence of Longmenshan orogeny in the Yanshan and Himalayan movement periods, and reverse faults were produced in the adjacent weak layers above and below the early high-angle normal faults.

Key Words: Shuangyushi; finite element model; structural reverse; western Sichuan