

断层分段生长定量判别标准的建立及其地质意义

——以松辽盆地杏北开发区萨尔图油层为例

王海学¹⁾, 李明辉²⁾, 沈忠山³⁾, 付晓飞¹⁾, 程志远¹⁾, 王彪¹⁾

1) 东北石油大学, 地球科学学院, 黑龙江大庆, 163318;

2) 大庆榆林油田开发有限责任公司地质研究所, 黑龙江大庆, 163453;

3) 大庆油田有限责任公司第四采油厂地质大队, 黑龙江大庆, 163511

内容提要: 为了降低地震断层解释中的不确定性, 以松辽盆地杏北开发区三维地震资料为靶区, 以断层“转换位移/离距(D/S)”为基础, 建立了断层平面分段生长定量判别标准, 其中, 侧列叠覆、开始破坏和完全破坏3个阶段的临界D/S分别为0.27和1。研究表明, ①杏北开发区278+273断层是由278断层和273断层侧列叠覆组成, 同时验证了断层分段生长定量判别标准的可靠性; ②断圈类型由单断下盘翘倾型断圈校正为侧列叠覆断层孤立型断圈, 同时断圈范围也明显变小; ③断层封闭性评价由整体评价校正为278断层和273断层分别独立评价。因此, 断层组合校正对油气田勘探开发方案的精确部署具有重要的指导意义。

关键词: 分段生长; 定量判别标准; 地震精细解释; 断圈风险性; 松辽盆地

断层是油气田勘探开发过程中重要的构造, 近年来主要侧重于研究断裂在油气成藏中的作用(付广等, 2010; 孙同文等, 2012; 付晓飞等, 2012)。然而, 由于地震分辨率限制, 地震解释中经常忽略一种重要的地质现象——断层分段生长。裂陷盆地断层分段生长具有普遍性(Peacock, 1991; Trudgill et al., 1994; Cartwright et al., 1995; Kim et al., 2005; Yang Minghui et al., 2008; 王海学等, 2013), 分段生长是裂陷盆地断层形成演化过程必不可少的阶段, 主要经历三个阶段: 孤立成核阶段、“软连接”阶段和“硬连接”阶段, 不同生长阶段伴随不同类型断圈的形成。断圈的划分与岩层区域倾向(Kim et al., 2005)和断层分段生长组合方式具有密切关系, 在岩层区域倾向一定条件下(以反向断层为例), 分段生长断裂可能表现为四种类型断圈: 单断上盘断弯遮挡型、单断下盘翘倾型(Childs et al., 1995)、侧列叠覆断层共控型(Childs et al., 1995)和侧列叠覆断层孤立型断圈; 同时断圈类型划分是封闭性评价的基础, 即断层组合模式不同直接影响断圈类型划分和封闭性评价。针对这一问题, 本文欲以松辽盆地杏北地区萨尔图油层为例, 结合转换(relay)位移(即叠覆段断层系的位移之和)与离距(separation)的关系

(Soliva et al., 2004, 2008)、叠覆段最大长度与断层系总长度的关系(Acocella et al., 2000, 2005)、差异伸展量或伸展系数以及断层系总长度与离距的关系等相关参数研究, 建立一套平面断层分段生长连接标准, 厘定断层组合方式的正确性, 明确断圈类型, 从而为封闭性评价奠定基础, 同时为有效降低油气勘探开发的风险性提供理论和方法的指导。

1 断层分段生长定量判别标准的建立

断层分段生长具有普遍性, 由于地震分辨率限制, 常见分段生长的两条断裂被解释成一条断裂的现象。为了有效降低断层解释的不确定性, 结合Soliva等(2004)等的研究成果, 提出了应用“转换位移(D)/离距(S)”定量厘定断层生长阶段的方法——断层分段生长定量判别标准。然而, 不同断层生长阶段转换位移和离距的确定具有一定差异, 对于“软连接”侧列叠覆断层, 转换位移(D)是指叠覆断层段中心处两条断层位移之和, 离距是指叠覆断层段中心处两断层间的垂直距离(Soliva et al., 2004, 2008)(图1a); 对于硬连接断层, 转换位移是断层A与消亡(abandoned)断层B叠覆段中心处两条断层位移之和, 离距是指断层A与消亡

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号41272151)和东北石油大学研究生创新科研项目(编号YJSCX2014-002NEPU)的成果。

收稿日期: 2013-10-22; 改回日期: 2014-09-11; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 王海学, 男, 1987年生。博士研究生。主要从事断层生长机制及控藏机理方面研究。Email: wanghaixue116@163.com。

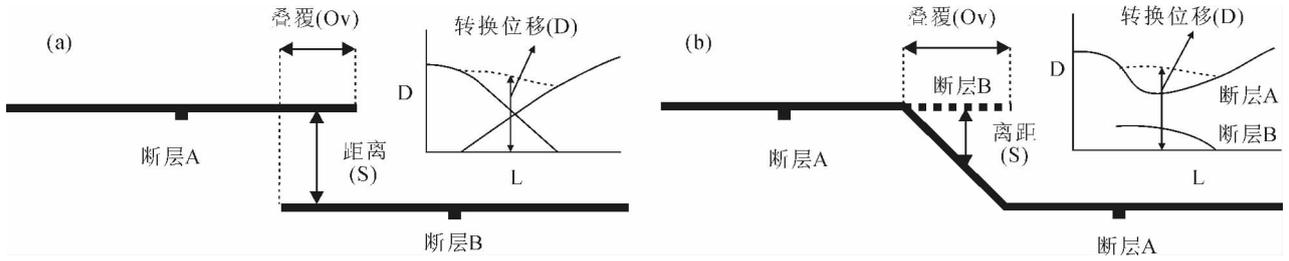


图1 “软连接”和“硬连接”断层相关术语

Fig. 1 The related terminology of “soft-linkage” and “hard-linkage” fault

(a) “软连接”组合断层; (b) “硬连接”组合断层

(a) “soft-linkage” assemblage fault; (b) “hard-linkage” assemblage fault

(abandoned) 断层 B 叠覆段中心处两条断层间的距离 (图 1b); 如果由于地震分辨率限制, 消灭断层 B 可能不发育, 转换位移等于断层走向突变段中部位移, 离距等于近平行段断层间的距离的一半 (图 1)。

结合国内外已发表断层相关数据 (Soliva et al., 2004, 2008), 以松辽盆地三维地震数据为基础, 统计断层转换位移 (D) 与离距 (S) 数据, 完善断层分段生长连接定量判别标准。当 D/S 小于 0.27 时, 断层段处于侧列叠覆阶段——“软连接”阶段, 两断层相互作用, 其间具有典型转换斜坡特征; 当 D/S 介于 0.27 ~ 1 时, 处于开始破裂阶段——“软连接”阶段, 断层叠覆区开始发育次级断层或彼此开始相互生长连接; 当 D/S 大于 1 时, 断裂处于完全破裂阶段——“硬连接”阶段, 两断层生长连接形成一条规

模较大的断层, 即划分为侧列叠覆、开始破坏和完全破坏 3 个阶段 (图 2)。

2 分段生长断层的识别及平面组合校正

断层生长是一个动态的过程, 经历了不断的破坏——连接——再破坏的过程。分段生长是由 Segall 等 (Segall et al., 1980) 研究不连续断层机制时提出的, 是指大量较小位移的正断层随着远程应力的增大, 逐渐相互作用分段生长连接形成少量规模较大断层的过程。裂陷盆地断层分段生长具有普遍性 (Peacock, 1991; Kim et al., 2005; 王海学等, 2013), 断层位移—距离曲线是识别断层分段生长

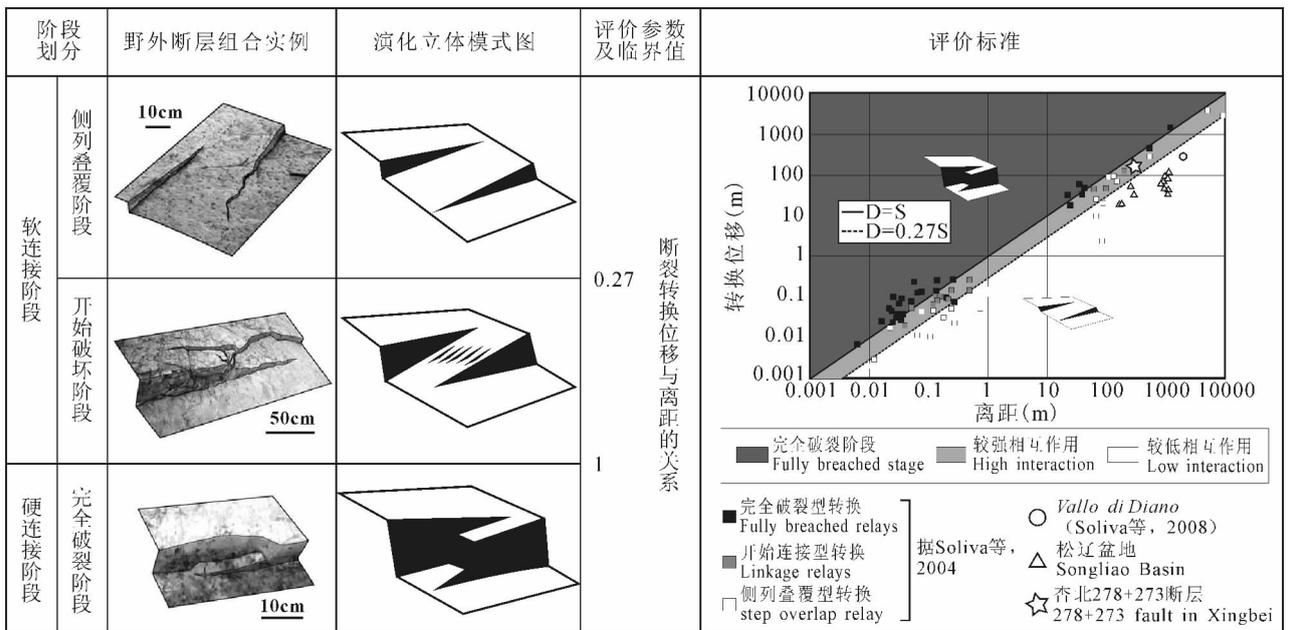


图2 断层分段生长定量判别标准

Fig. 2 The quantitative discrimination criterion of fault segmentation growth

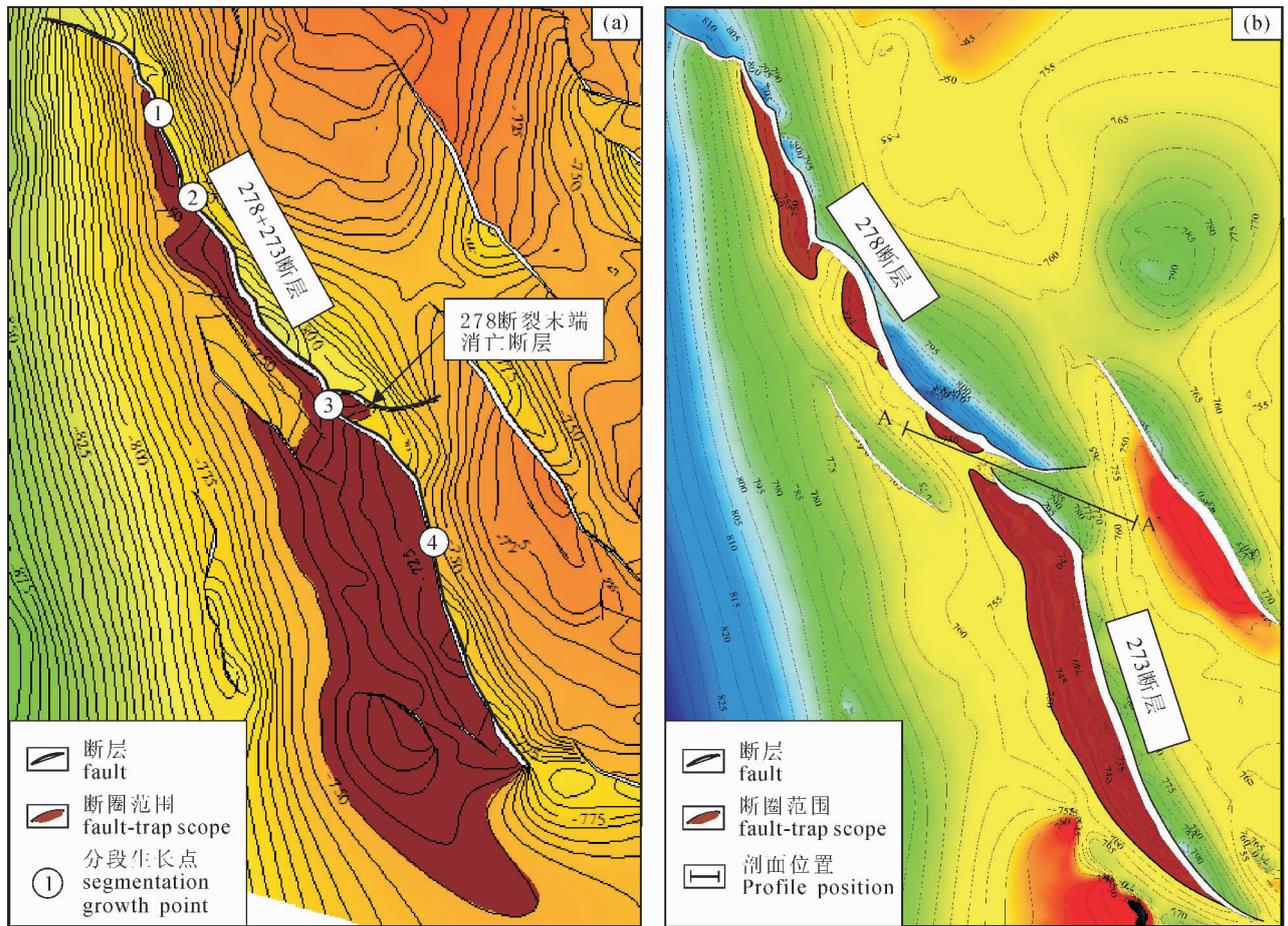


图 3 松辽盆地杏北区块校正前和校正后 278 + 273 断层分布特征

Fig. 3 The distribution characteristic of fault 278 + 273 before and after correction in Xingbei Block, Songliao Basin

(a) 校正前断裂分布; (b) 校正后断裂分布

(a) Distribution of fault before correction; (b) Distribution of fault after correction

的重要方法之一,应用最广泛,位移存在低值区即为分段生长断层 (Peacock et al., 1994; Fossen, 2010; 刘哲等, 2012; Giba et al., 2012), 反之则为孤立断层, 由于位移与断距呈线性规律, 因此应用断距—距离曲线定量厘定分段生长断层和孤立断层。

杏北开发区 278 + 273 断层原始解释为两条硬连接断层, 278 断层发育末端消亡断层, 断层下盘发育 1 个断圈, 其上盘与消亡断层相交部位发育一个

小断圈 (图 3a)。从 278 + 273 断层断距—距离曲线来看, 该断层为典型分段生长断层, 发育 4 个断层分段生长点 (分别为①、②、③和④), 表现为 5 段式生长特征 (图 4)。基于断层分段生长定量判别标准, 杏北开发区 278 + 273 断裂在③号分段点 (Trace1021) D/S 为 0.55 (表 1), 两断层在萨尔图油层顶面应处于“软连接”阶段——开始破裂阶段; 结合过叠覆区地震精细解释, 证实 278 和 273 断裂叠

表 1 278 + 273 断层转换位移与离距关系

Table 1 The relationship between separation and relay displacement of 278 + 273 fault

分段断裂名	转换位移和离距测量位置	转换位移 (m)	离距 (m)	转换位移/离距	组合方式
278 + 273 断层	T764	76.1	42	1.81	硬连接
	T816	109.31	79.3	1.38	硬连接
	T1021	123.4	225.3	0.55	开始破裂阶段
	T1073	77.65	68	1.14	硬连接

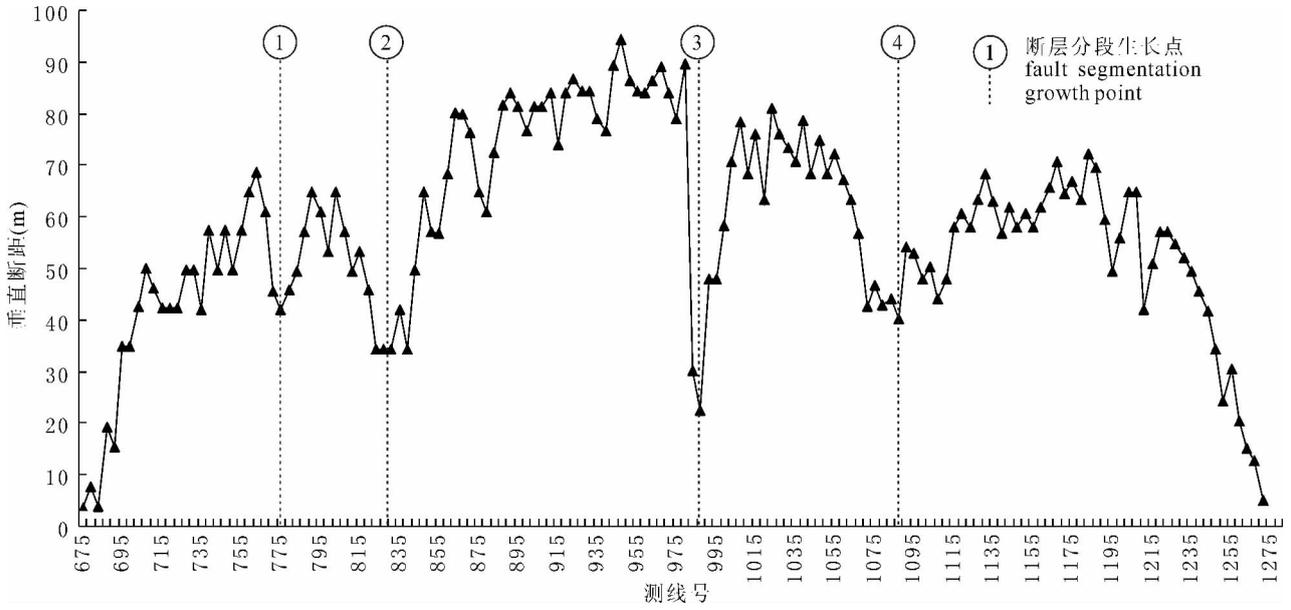


图4 萨尔图油层顶部 278 + 273 断层断距—距离曲线

Fig. 4 The throw—distance curve of 278 + 273 fault in top surface of Saertu reservoirs

覆区地震反射连续(图5),因此,该断层是由 278 断层和 273 断裂侧列叠覆组成(图 3b)。而①、②和④号分段生长点 D/S 值均大于 1(表 1),处于“硬连接”阶段。

3 断层组合校正的地质意义

油田勘探实践表明:断层组合校正正是断圈类型

划分及封闭性评价的基础。从杏北开发区典型实例可以看出,断层校正前 278 + 273 断层下盘发育一个整体翘倾断圈,上盘与消亡断层形成一个断弯遮挡型断圈(图 3a,图 6);断层组合校正后,该断层明显是由 278 断层和 273 断层侧列叠覆组成,断圈类型由单断下盘翘倾型断圈校正为侧列叠覆断层孤立型

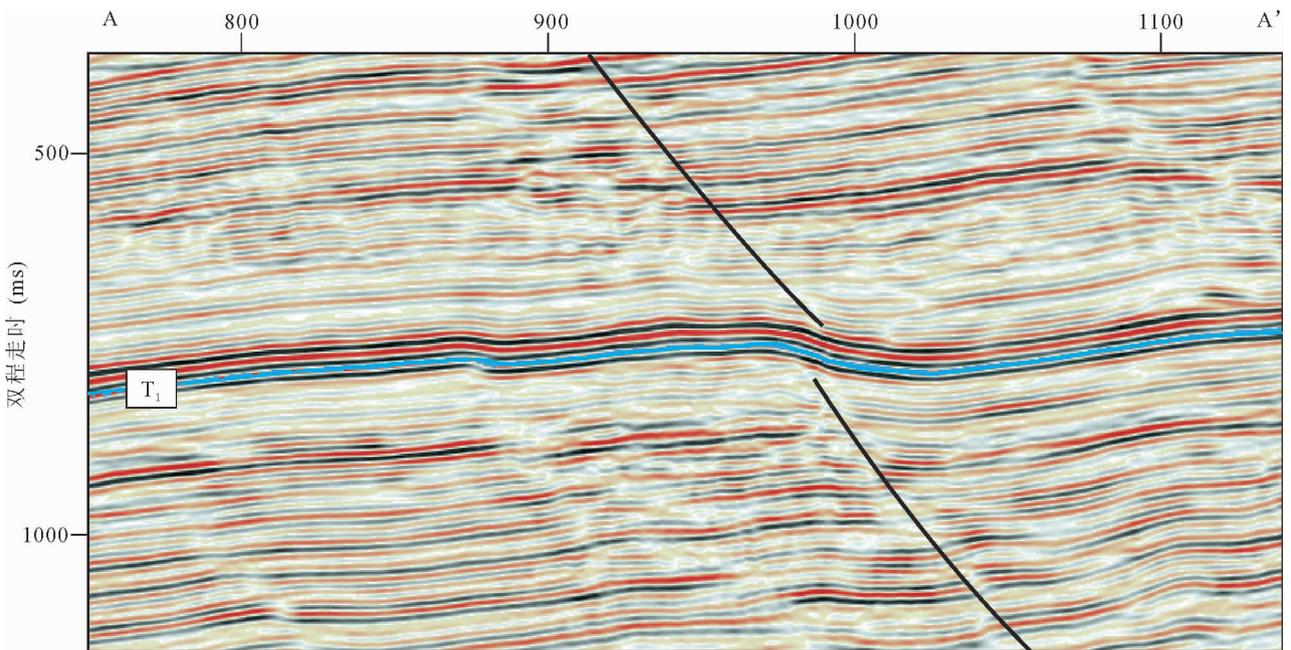


图5 松辽盆地杏北地区典型地震剖面(平面位置如图 3b)

Fig. 5 The typical seismic profile in the Xingbei block, Songliao Basin(The plane position as shown in figure 3b)

圈闭类型	平面图	剖面图	立体模式图	封闭性评价	典型实例
单一断层控制的断圈				F1和F2	校正前 278+273 断层上盘
				F1	校正前 278+273 断层下盘
断列叠覆断层控制的断圈				F1和F2	
				F1和F2	校正后 278和273 断层断圈

图 6 断层平面组合对断圈类型划分和封闭性评价的影响

Fig. 6 The effect of fault plane assemblage on classification of fault-trap type and sealing evaluation

断圈,其中 278 断层下盘发育 3 个断圈,273 断层下盘发育一个断圈(图 3b,图 6)。

同时断圈类型划分是封闭性评价的基础(付晓飞等,2011),即断层组合校正也影响断层侧向封闭性定量评价。断层组合校正前,278 + 273 断层下盘封闭性按照 1 个断圈整体评价,该断层上盘需要考虑进一步消亡断层侧向封闭能力;经断层组合校正后,需要分别评价 278 断层和 273 断层的封闭能力(图 3,图 6),因此断层组合校正明显制约着油气田勘探开发方案的精确部署。

4 结论

(1)完善了断裂平面分段生长连接定量判别标准,当 D/S 小于 0.27 时,断层段处于侧列叠覆阶段——“软连接”阶段,当 D/S 介于 0.27 ~ 1 时,处于开始破裂阶段——“软连接”阶段,当 D/S 大于 1 时,断裂处于完全破裂阶段——“硬连接”阶段;建

立了一套快捷有效的断层组合定量校正方法。

(2)应用断层分段生长定量判别标准,结合断距—距离曲线和地震剖面特征分析,认为 278 + 273 断裂是由 278 断层和 273 断层侧列叠覆组成;断圈类型由单断下盘翘倾型断圈校正为侧列叠覆断层孤立型断圈。

(3)断层组合校正是断圈类型划分和封闭性评价的基础,明显制约着油气田勘探开发的精确部署,应用断层分段生长定量判别标准可以有效降低油气田勘探开发的断圈风险性。

参 考 文 献 / References

付广,雷琳. 2010. 油源区内断裂控藏作用差异性研究——以松辽盆地三肇凹陷和长 10 区块扶余杨大城子油层为例. 地质论评,56(5):720 ~ 725.
 付晓飞,李文龙,吕延防,贺向阳,刘哲. 2011. 断层侧向封闭性及对断圈油水关系的控制. 地质论评,57(3):387 ~ 397.
 付晓飞,郭雪,朱丽旭,吕延防. 2012. 泥岩涂抹形成演化与油气运移及封闭. 中国矿业大学学报,41(1):52 ~ 63.

- 刘哲, 吕延防, 孙永河, 李彦彬, 张东伟. 2012. 同生断裂分段生长特征及其石油地质意义. *中国矿业大学学报*, 41(5): 793 ~ 799.
- 孙同文, 付广, 吕延防, 赵荣. 2012. 断裂输导流体的机制及输导形式探讨. *地质论评*, 58(6): 1081 ~ 1090.
- 王海学, 吕延防, 付晓飞, 孙永河, 王海风, 李培海. 2013. 裂陷盆地转换带形成演化及其控藏机理. *地质科技情报*, 32(4): 102 ~ 110.
- Acocella V, Gudmundsson A, Funicello R. 2000. Interaction and linkage of extension fractures and normal faults: examples from rift zone of Iceland. *Journal of Structural Geology*, 22(9): 1233 ~ 1246.
- Acocella V, Morvillo P, Funicello R. 2005. What controls relay ramps and transfer faults within rift zones? Insights from analogue models. *Journal of Structural Geology*, 27(3): 397 ~ 408.
- Cartwright J A, Trudgill B D, Mansfield C S. 1995. Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 17: 1319 ~ 1326.
- Childs C, Wsterson J, Walsh J J. 1995. Fault overlap zones within developing normal fault systems. *Journal of the Geological Society*, 152: 535 ~ 549.
- Fossen H. 2010. *Structural geology*. New York: Cambridge University Press, 119 ~ 185.
- Giba M, Walsh J J, Nicol A. 2012. Segmentation and growth of an obliquely reactivated normal fault. *Journal of Structural Geology*, 39: 253 ~ 267.
- Kim Y S, Sanderson D J. 2005. The relation between displacement and length of faults: a review. *Earth-Science Review*, 68: 317 ~ 334.
- Peacock D C P, Sanderson D J. 1994. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 78(2): 147 ~ 165.
- Peacock D C P. 1991. Displacement and segment linkage in strike-slip fault zones. *Journal of Structural Geology*, 13(9): 1025 ~ 1035.
- Segall P, Pollard D D. 1980. Mechanics of Discontinuous faults. *Journal of Geophysical Research*, 85: 4337 ~ 4350.
- Soliva R, Benedicto A. 2004. A linkage criterion for segmented normal faults. *Journal of Structural Geology*, 26: 2251 ~ 2267.
- Soliva R, Benedicto A, Schultz R A, Maerten L, Micarelli L. 2008. Displacement and interaction of normal fault segments branched at depth: Implications for fault growth and potential earthquake rupture size. *Journal of Structural Geology*, 30: 1288 ~ 1299.
- Trudgill B, Cartwright J. 1994. Relay ramp forms and normal-fault linkages, Canyonlands National Park, Utah. *Geological Society of America Bulletin*, 106: 1143 ~ 1157.
- Yang Minghui, Zhou Xinhui, Wei Gang, Liu Le, Li Chunxia, Zheng Xiaofeng, Liu Xiaojian, Gao Libao. 2008. Segment, linkage and extensional fault-related fold in Western Liaodong Bay Subbasin Northeastern Bohai Sea, China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(6): 602 ~ 610.

The Establishment and Geological Significance of Quantitative Discrimination Criterion of Fault Segmentation Growth

—An Example from Saertu Reservoir in Xingbei Development Area of Songliao Basin

WANG Haixue¹⁾, LI Minghui²⁾, SHEN Zhongshan³⁾, FU Xiaofei¹⁾, CHENG Zhiyuan¹⁾, WANG Biao¹⁾

1) *College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318;*

2) *Daqing Yushulin oilfield development limited company Institute of Geology, Daqing, Heilongjiang, 163453;*

3) *No. 4 Production Plant, Daqing oilfield Limited Company. , Daqing Heilongjiang, 163511*

Abstract: In order to reduce the uncertainty in the seismic fault interpretation, taking Xingbei development area of Songliao Basin as example and based on the fault transfer displacement/separation (D/S), quantitative discrimination criterion of fault segmentation growth on the plane is established. The critical D/S value of the three periods (arrangement overlap, initial break, total break) is 0.27 and 1. The research shows: ① Fault 278 + 273 in Xingbei development area is consist of fault 278 and fault 273 which are arrangement overlap and the quantitative discrimination criteria of fault segmentation growth and is reliable. ② The type of fault trap is corrected from single fault trap whose footwall tilting to isolated fault trap which is arrangement overlap. At the same time, the range of fault trap becomes significantly smaller. ③ The assessment of fault sealing is corrected from general evaluation to independent evaluation on fault 278 and 273 respectively. Therefore, fault combination correction has great significance on precise deployment of exploration and development in oilfield.

Key words: segmentation growth; quantitative discrimination criterion; seismic fine interpretation; fault trap risk; Songliao Basin