

文章编号: 0253-2697(2007)05-0034-05

# 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用

吕延防 沙子萱 付晓飞 付广

(大庆石油学院 黑龙江大庆 163318)

**摘要:** 断层垂向封闭性主要取决于断裂充填物的排替压力,而排替压力的大小与充填物的成岩程度有关,成岩程度又受控于断面所承受的正压力大小。据此提出了定量评价断层垂向封闭性的方法,其基本原理是:首先计算断点处断面正压力;根据地静压力与地层埋深关系计算该断面压力所相当的地层埋深;最后,根据研究区所建立起来的盖岩排替压力与埋深关系,确定该地层埋深下断裂充填物的排替压力。如果所断移的盖层段内存在地层孔隙流体超压,断层的垂向封闭能力应是断裂充填物排替压力与孔隙流体超压之和。用断层垂向封闭性研究结果同研究区与断层有关的圈闭高度比较,可预测圈闭的油气充满程度。该方法在库车坳陷得到了成功应用。

**关键词:** 断层; 垂向封闭性; 盖层; 断裂; 充填物; 排替压力; 定量评价方法

**中图分类号:** TE112.1      **文献标识码:** A

## Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application

Lü Yanfang Sha Zixuan Fu Xiaofei Fu Guang

(Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

**Abstract:** The vertical sealing ability of fault is mainly determined by the displacement pressure of filler in fault, while the displacement pressure has some relation with the diagenesis grade being controlled by the positive pressure exerted on the fracture surface. A quantitative method for evaluating the vertical sealing ability of fault was proposed. The positive pressure in the break point and the buried depth of strata corresponding to the pressure exerted on the fracture surface are calculated according to the relationship between geostatic pressure and buried depth of strata. The displacement pressure of filler in the fracture corresponding to the buried depth of strata is determined according to the relationship between the displacement pressure of caprock and buried depth. The vertical sealing ability should be the combination of displacement pressure of fillers in the fractures and porous fluid overpressure of strata. The filling degree of oil and gas in trap can be predicted by comparing the vertical sealing ability of fault and closure altitude of trap. This method is applicable to Kuche Depression.

**Key words:** fault; vertical sealing ability; caprock; fracture; filler; displacement pressure; quantitative evaluation method

断层既作为油气运移的重要输导通道,也作为油气聚集的重要遮挡条件,其在油气运移和聚集过程中,这两种不同性质作用的决定因素是断层本身的封闭性,断层开启时起输导通道作用,断层封闭时起遮挡油气作用。同一条断层在其发育的全过程中,可能要经历多期开启与封闭过程,准确认识断层封闭与开启性及其发育历史,有助于正确认识油气运移、聚集、散失过程及油气现今分布规律。自 20 世纪 60 年代初期,Smith 发表的第一篇关于断层封闭性研究的文章以后,已有众多研究者对此进行过深入研究,并取得了许多重要研究成果<sup>[1-18]</sup>。目前的研究成果均属于定性描述,缺少定量评价。

### 断层封闭性评价分侧向封闭性和垂向封闭性评价

两部分内容,断层侧向封闭性评价主要是针对储层而言,断层垂向封闭性研究主要是针对盖层而言。因此,研究断层封闭性时应视不同岩性层段研究不同方向的封闭能力。

### 1 断层垂向封闭性形成机理

断层一旦形成或再次活动以后,断层两盘块体之间必然形成断层裂缝,该裂缝通常被两种来源的物质所充填,一种是断裂活动过程中从围岩上刮削下来的岩石碎屑,被称之为碎屑充填物质;另一种则是在地应力作用下塑性岩石的流动进入到断层裂缝中,具有与围岩相同成岩程度的充填物质,这种充填物通常被称之为泥质涂抹层,对断层的侧向封闭性起重要作用。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2001GB209104)资助。

**作者简介:** 吕延防,男,1957 年 12 月生,1992 年获中国地质大学(北京)博士学位,现为大庆石油学院教授,博士生导师,主要从事油气保存条件、油气运移和油气资源评价研究。E-mail:571128lyf@dqpi.edu.cn

如果断层错断的是纯砂岩地层,断层裂缝中不可能有泥质涂抹层的存在,碎屑充填物质也是砂岩碎屑。此种情况下,有必要研究断层侧向封闭性。如果断层错断的是砂泥岩互层,两种充填物质均存在。如果断层错动的是大套泥质岩层,且断距小于泥岩层的厚度,即断层没有将泥岩层错开,断层裂缝中的充填物质主要是泥质成分,即使所确认的盖层段中有砂岩夹层,砂岩层所占的比例也应该远小于泥岩层(否则不应被定为盖层段),该段地层被错动以后,断裂充填物质中自然以泥质为主,砂岩碎屑占次要位置。

泥质涂抹与碎屑物质在断层裂缝中共同存在(图1),各自所占的比率取决于断层性质和地层的塑性程度。在强塑性地层中发生的逆断层裂缝中,泥质涂抹

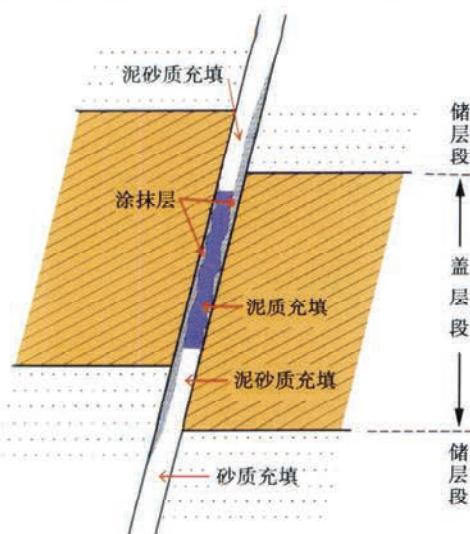


图1 断裂带不同性质充填物分布示意图

Fig. 1 The sketch map of distribution of different fillers in fault

相对发育,正断层裂缝中或正常压实的泥岩层段中,碎屑充填物质相对发育。然而,无论两种充填物质的比率多少,断层垂向封闭性的决定因素是碎屑充填物质,因为泥岩涂抹层刚一形成时其成岩程度就与原岩相当,具有较强的封闭能力;而碎屑充填物质在填入断层裂缝时呈松散状,具有很低的封闭能力,如果此时有油气沿断层裂缝向上运移,油气必然选择通过碎屑充填物质的孔隙运移。因此,断层裂缝中碎屑充填物质的成岩程度决定了断层的垂向封闭性能。

断层裂缝的碎屑充填物质可被视之为斜置的沉积地层,其成岩程度的高低取决于该地层所承受地静压力和成岩作用时间,在地质时间单元中,时间的作用可以被忽略,地静压力便成为了碎屑充填物质成岩程度的关键因素。

断层一旦活动之后,来自于侧向挤压或引张的地应力可近似地视为零,断裂充填物质所承受的压力主要是

上覆地层重力作用在断面上的正压力,其大小为

$$p = \rho Z \cos \theta \quad (1)$$

式中  $p$  为断面所承受的正压力, MPa;  $\rho$  为上覆地层平均密度, kg/m<sup>3</sup>;  $Z$  为断点埋深, m;  $\theta$  为断层倾角,(°)。

在断层活动后造成的裂缝空间内往往形成地层负压或低压,使储层内地层水迅速进入裂缝,并充满断层裂缝碎屑充填物质的孔隙之中,形成相对围岩有较大孔隙度和含水量的断裂充填物。该充填物在断面正压力的作用下逐渐排出孔隙水,慢慢压实成岩,这种岩石被称之为断层岩。断层裂缝充填物向断层岩演化的过程是孔隙度逐渐变小、成岩程度逐渐提高、封闭能力逐渐形成和变强的过程,断层充填物的封闭能力即表达了油气沿着断层作垂向运移的难易程度。可见,评价断层垂向封闭性的关键是评价断裂充填物的封闭能力。

## 2 断层垂向封闭能力的评价方法

根据断层封闭性形成机理,评价盖层段内断层的垂向封闭能力实质是评价断裂缝充填物的封闭能力。在盖层封闭性的评价中,用盖层岩石的排替压力评价盖层的物性封闭能力。该参数可用于评价断裂充填物的物性封闭能力,其意义与盖层评价相同。研究盖层排替压力时,一般选择盖层底部为研究对象;同样,研究断层充填物的排替压力时,也应选择盖层底部断点处断裂充填物为对象。具体按以下步骤求取断裂充填物的排替压力:

(1) 确定静岩压力随埋藏深度关系。先建立研究区岩石密度随深度的变化关系(图2),再利用下式求取各深度点处的静岩压力为

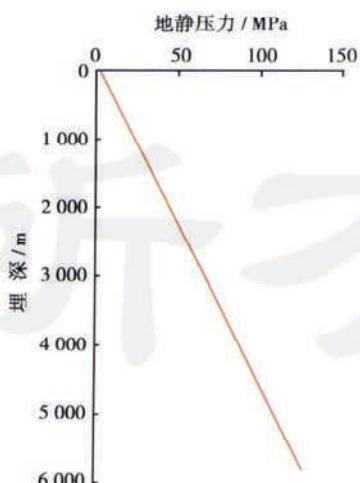


图2 库车坳陷地层静岩压力随深度的变化

Fig. 2 The geostatic pressure changed with depth in Kuche Depression

$$p_r = \rho Z \quad (2)$$

式中  $Z$  为地层埋深, m;  $\rho$  为深度  $Z$  以上地层的平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $p_r$  为埋深  $Z$  处的静岩压力, MPa。

(2) 求取断层面正压力。根据断层倾角和断点埋深, 按式(1)求得断层面的正压力。

(3) 确立盖岩排替压力随埋藏深度变化关系。有两种确定方法: ①根据不同埋深盖岩样品实测排替压力值, 绘出排替压力随深度变化的散点图, 并据此拟合出排替压力随深度变化的数学表达式; ②根据研究区盖岩样品实测排替压力值, 读取对应样品埋深处的测井声波时差值, 建立声波时差与样品排替压力之间的数学统计关系; ③根据单井泥质岩声波时差随深度的变化曲线, 按上述关系将其转换成泥质岩排替压力随深度变化曲线(图 3)。

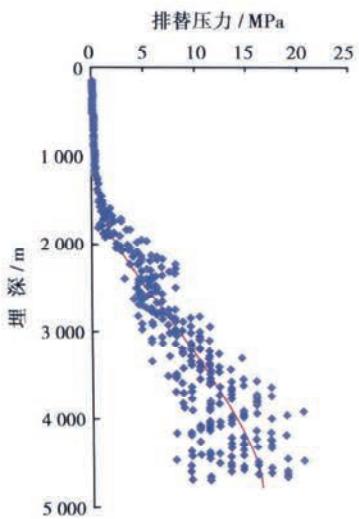


图 3 库车坳陷英买 9 井盖岩排替压力随埋深变化关系

Fig. 3 The displacement pressure of caprock changed with depth in Yingmai 9 Well of Kuche Depression

(4) 求取断点处断裂充填物排替压力。根据式(1)求得断面正压力以后, 将该压力视为断裂充填物质所承受的静岩压力, 并将其代入式(2), 求得该压力对应的地层埋深  $Z$ , 深度  $Z$  随排替压力变化的关系式为

$$p_r = 0.02135 Z \quad (3)$$

由式(3)便可求得该深度下盖岩的排替压力, 这个排替压力值即为所研究的断点处断裂充填物的排替压力。可见, 断点所承受的断面正压力越大, 断裂充填物的成岩程度越高, 其排替压力也越大, 封闭油气的能力也就越强。

如果被评价的盖层段存在孔隙流体超压, 该超压必然传递到断裂充填物中, 并与断裂充填物排替压力方向一致, 两者形成合力共同阻止油气通过断裂穿盖

层向上运移。因此, 当盖层段存在孔隙流体超压时, 断层的垂向封闭能力应为断裂充填物的排替压力值与盖层段孔隙流体超压值之和。

岩石的封闭能力也可用所能封闭的气柱高度表示。研究表明, 1 MPa 的封闭能力大约可以封闭 100 m 高的气柱。由此便可达到定量评价断层垂向封闭性的目的。

(5) 表征断层封闭性。断层垂向封闭性研究的是断裂充填物质对盖层之下储层中向上运移油气的阻止能力, 断层垂向封闭性研究的目的层段是盖层段, 研究的对象是上升盘盖层底面与断层面交线上各点断裂充填物的排替压力和断层附近盖层段内孔隙流体超压。由于断层的断距、倾角及被错断盖层底面的埋深在沿断层走向的各点都不同, 因而在断层走向上各处断裂充填物的成岩程度也不一样, 其封闭能力必然也不同。所以, 需对断层走向上盖层底部各点的断层垂向封闭性进行评价, 然后将各点评价结果用等值线连接并绘成断层封闭性平面分布图。评价结果既可以用封闭能力表达, 也可以用所能封闭的气柱高度表示。如果断层所能封闭的气柱高度大于或等于圈闭的闭合高度, 在其他地质条件具备的情况下, 该圈闭有可能完全被油气充满; 如果断层垂向开启, 断层则成为油气散失的通道, 圈闭的溢出点上移, 闭合高度减小甚至达到零, 油气的充满度降低甚至为零; 如果断层有一定封闭能力, 但所能封闭的气柱高度小于圈闭的闭合高度, 则圈闭的最大充满度等于断层所能封闭的气柱高度。

### 3 评价方法的应用

库车坳陷位于塔里木盆地北部, 是塔里木盆地内的一个在古生代被动大陆边缘和中生代陆内坳陷基础上发育起来的新生代前陆盆地, 面积约 42 700 km<sup>2</sup>。目前在克-依构造带和秋里塔克构造带先后发现了克拉 2 气藏、依南 2 气藏、大北 1 气藏、迪那 2 气藏、迪那 1 气藏和大宛齐油藏。库车坳陷油气主要来自于三叠系的克拉玛依组和塔里奇组以及侏罗系的阳霞组和克孜勒努尔组。主要储层是白垩系巴什基奇克组砂岩和古近系库姆格列木群底部砂砾岩及海相白云岩。区域性盖层有两套, 一套是古近系库姆格列木群膏泥岩层; 另一套是新近系吉迪克组膏泥岩层。

库姆格列木群膏泥岩层全区分布厚度为 100~1 000 m, 坎陷北部较厚, 最大厚度区位于东秋 5 附近。向南向东及向西逐渐减薄, 至东南部牙哈 4 和东北部依深 2 以东一带, 盖层厚度小于 100 m(图 4)。该盖层段内存在孔隙流体超压, 超压值为 10~16 MPa, 全区均有分布, 且超压值变化不大。其分布趋势是北大南

小,东、西部相对大,中部相对小。新近系吉迪克组膏泥岩盖层最大厚度可达1500 m,主要分布于库车坳陷东部,是迪那2气田的主要盖层。

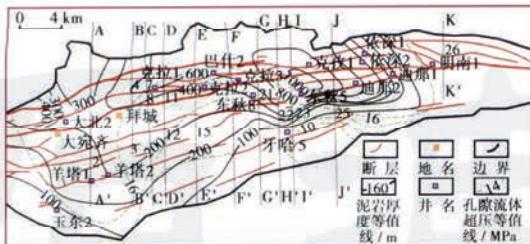


图4 库车坳陷库姆格列木群膏泥岩盖层与断裂分布

Fig. 4 The distribution of gypsum mudstone caprock and faults of Kumugeliemu Group in Kuche Depression

与其他前陆盆地一样,库车坳陷逆掩断裂十分发育,呈近东西向和北东向展布(图4),断层在平面上可划分为5个带,从北向南依次为北部边缘冲断带、依奇克里克断裂带、大宛齐断裂带、克拉苏断裂带和秋里塔克断裂带。单条断层的延伸长度为30~150 km,断穿库姆格列木群膏泥岩盖层的断层断距一般200~800 m,最大约为2000 m。断距的变化趋势也比较明显,总体上由南向北、由西向东断距急剧增大。库车坳陷极其发育的断裂为天然气的垂向运移与聚集提供了极好的输导条件,但也对天然气的盖层有严重的破坏作用。特别是目前在库车坳陷发现的构造圈闭,几乎均与断层有关。断层的封闭性决定了圈闭可容纳天然气体积的大小,甚至于决定了圈闭的真假。因此,对断层封闭能力的定量评价是非常必要的。

通过切割库车坳陷的11条南北向构造地质剖面,读取各断层在库姆格列木群底部的断层倾角和埋深,利用式(1)计算了各断点处的断面正压力。

将图3排替压力与埋藏深度关系拟合成数学表达式为

$$p_d = -5 \times 10^{-10} Z + 5 \times 10^{-6} Z - 0.0072 Z + 2.9711 \quad (4)$$

式中  $Z$  为盖岩埋藏深度, m;  $p_d$  为盖岩排替压力, MPa。

将断面正压力视为静岩压力,代入式(3)求得相应埋深  $Z$ ,然后将其再代入式(4),便求得断裂充填物质的排替压力。求出各断点排替压力之后,便可绘出排替压力平面分布图(图5)。由图5可见,克拉3—牙哈3以东地区,由于库姆格列木盖层被完全错开,断层垂向上封闭能力为零,其以西地区断裂充填物质的排替压力一般为10~20 MPa,最高可达25 MPa。高值区有2个,分别是大宛齐—西秋1—英买7地区和牙哈3地区。



图5 库姆格列木盖层底部断裂充填物质排替压力等值线

Fig. 5 The contour map of displacement pressure of the filler at the bottom of Kumugeliemu caprock

将断裂充填物质排替压力等值图与库姆格列木盖层孔隙流体超压分布图叠置相加,便得到断层垂向封闭能力(排替压力与孔隙流体超压之和)评价图(图6)。

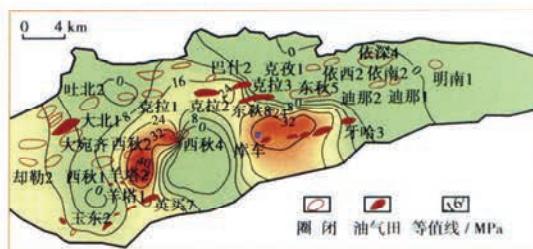


图6 断层封闭能力(排替压力和孔隙流体超压)评价图

Fig. 6 The evaluation map of the sealing ability (displacement pressure and porous fluid overpressure) of fault

由图6可见,库车坳陷断层在库姆格列木群底部的垂向封闭能力一般在8~24 MPa,高值区位于西秋2地区和牙哈3地区,最大封闭能力可达40 MPa。如果用所能封闭的气柱高度表示,一般可封闭800~2400 m高的气柱,最大可以封闭4000 m高的气柱。本区所发现的构造圈闭闭合高度一般在200~500 m,均小于断层所能封闭的气柱高度。目前库车坳陷在库姆格列木群盖层之下所发现的油气藏均分布在断层封闭能力值较大的区域。在东秋5以东地区和西秋4以南地区,由于库姆格列木盖层被断层彻底断开,断层垂向封闭能力为零,盖层失去了封闭能力,以库姆格列木膏泥岩为盖层的圈闭在这个区域内均为假圈闭。一般情况下,这些圈闭中很难有油气聚集。勘探实践证实,在这个区域内库姆格列木群盖层之下确实没有发现油气,已发现的迪那2气田是吉迪克组膏泥岩盖层所封盖的。

## 4 结 论

(1) 决定断层垂向封闭能力的是断层碎裂物质的排替压力,而排替压力的大小则取决于碎裂物质的成岩程度,碎裂物质的成岩程度又取决于断面正压力的大小。

(2) 根据泥质岩排替压力与埋藏深度的关系,便可求得地层埋深下断层充填物质的排替压力,该排替压力即为断层的垂向封闭能力。如果研究区盖层段存在地层孔隙流体超压,断层的实际垂向封闭能力为充填物质排替压力与孔隙流体超压之和。

(3) 断层垂向封闭性研究方法在塔里木盆地库车坳陷应用结果表明,克拉 3—牙哈 3 构造以东地区库姆格列木群膏泥岩段断层不具垂向封闭性,其以西地区断层在该地层段内垂向封闭能力一般为 8~24 MPa,最大封闭能力可达 40 MPa;库车坳陷库姆格列木盖层之下在克拉 3—牙哈 3 构造以东地区确实没有发现油气田,所发现的油气藏均分布在克拉 3—牙哈 3 构造及其以西地区。勘探实践证实了断层垂向封闭性评价方法的正确性。

### 参 考 文 献

- [1] Smith D A. Theoretical consideration of sealing and nonsealing faults[J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363-374.
- [2] Smith D A. Sealing and nonsealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt Basin[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(2): 145-172.
- [3] Weber K J, Mandl G, Pilaar W F, et al. The role of faults in hydrocarbon migration and trapping in Nigerian growth fault structures[R]. OTC 3356, 1978: 2643-2653.
- [4] Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 (3): 803-811.
- [5] Lindsay N G, Murphy F C, Walsh J J. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces[C]// Flint S S, Bryant I D. The geological modeling of hydrocarbon reservoir and outcrop analogues. The International Association of Sedimentologists Special Publication 15, 1993: 113-123.
- [6] Bouvier J D, Kaars-Sijpesteijn C H, Kluesner D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River field, Nigeria[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(11): 1397-1414.
- [7] Lehner F K, Pilaar W F. On a mechanism of clay smear emplacement in synsedimentary normal faults[M]// Moller-Pedersen P, Koestler A G. Hydrocarbon seals: Importance for exploration and production. Amsterdam: Elsevier, 1997: 39-50.
- [8] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [9] Steven L, Lorraine B E, Martin S, et al. Vertical and lateral fluid flow related to a large growth fault, South Eugene Island Block 330 field, Offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(2): 244-276.
- [10] Knipe R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (2): 187-195.
- [11] Knipe R J, Jones G, Fisher Q J. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs: An introduction[M]// Jones G, Fisher Q J, Knipe R J. Faulting and fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs. Geological Society Special Publication 147. London: Geological Society, 1998: vii-xxi.
- [12] 吕延防, 张发强, 吴春霞, 等. 断层涂抹层分布规律的物理模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 30-32.
- [13] Lü Yanfang, Zhang Faqiang, Wu Chunxia, et al. Simulation experiment on distribution of fault smear layer[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 30-32.
- [14] 吕延防, 王跃文, 李国会, 等. 断层封闭性定量研究[J]. 石油学报, 1996, 17(3): 39-45.
- [15] Lü Yanfang, Wang Yuewen, Li Guohui, et al. Quantitative analyses in fault sealing properties[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17 (3): 39-45.
- [16] 周新桂, 孙宝珊, 谭成轩, 等. 现今地应力与断层封闭效应[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 127-130.
- [17] Zhou Xingui, Sun Baoshan, Tan Chengxuan, et al. State of current geo-stress and effect of fault sealing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 127-130.
- [18] 付广, 于丹. 苏仁诺尔断裂垂向封闭时空分布及其与油气聚集的关系[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 40-45.
- [19] Fu Guang, Yu Dan. Time-space distribution of vertical seal in Shurenouer Fault and its relation with oil-gas accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 40-45.
- [20] 万天丰, 王明明, 殷秀兰, 等. 渤海湾地区不同方向断裂带的封闭性[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 157-163.
- [21] Wan Tianfeng, Wang Mingming, Yin Xiulan, et al. Sealing properties of different direction faults in the Bohai Bay area[J]. Geoscience, 2004, 18(2): 157-163.
- [22] 付晓飞, 吕延防, 付广, 等. 逆掩断层垂向封闭性定量模拟实验及评价方法[J]. 地质科学, 2004, 39(2): 223-233.
- [23] Fu Xiaofei, Lü Yanfang, Fu Guang, et al. Quantitative simulation experiment and evaluation method for vertical seal of overthrust[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 223-233.
- [24] 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2005, 30 (3): 328-336.
- [25] Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lü Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(3): 328-336.