

## 四川盆地东部建南地区飞仙关组三段 储层裂缝预测与评价

何利<sup>1,2</sup>, 谭钦银<sup>1,2</sup>, 宋春彦<sup>1,2</sup>, 王瑞华<sup>1,2</sup>, 王正和<sup>1,2</sup>, 程锦翔<sup>1,2</sup>

(1 成都地质矿产研究所; 2 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室)

**摘要** 下三叠统飞仙关组三段是四川盆地东部建南地区油气勘探的重点层位。在分析了影响该区飞仙关组三段裂缝发育程度的诸多因素的基础上,应用分形法和构造面曲率法预测了区内与断层和褶皱相关的裂缝的发育情况。根据区内28口井的实际生产情况,进行了相关性检验,应用综合评判法对建南地区储层裂缝进行了综合评价,指出构造裂缝发育程度与研究区内的油气聚集成藏具有较好的正相关性,经实践检验评价结果合理可信。

**关键词** 四川盆地; 建南地区; 飞仙关组; 裂缝型储层; 裂缝预测

**中图分类号**: TE122.2<sup>4</sup>

**文献标识码**: A

建南地区位于四川盆地东部,是川东重要的油气富集带,也是中国南方油气勘探的重点区块之一。建南地区的油气储集层主要分布于上二叠统长兴组二段和下三叠统飞仙关组三段(以下简称飞三段),其中,飞三段储层可与普光气田进行对比<sup>[1-2]</sup>,是目前油气勘探的重点层位。“三元控储”理论<sup>[3]</sup>的提出,表明储集条件是决定该区油气勘探成败的关键因素之一。研究表明,建南地区飞仙关组储层包括孔隙型、裂缝型和孔-缝型三种;白云岩、碎屑灰岩为孔隙型储层,泥晶灰岩为裂缝型储层<sup>[4]</sup>。大量钻探资料证实,裂缝型灰岩是建南地区飞仙关组的重要储层类型,裂缝发育程度是影响建南地区油气储集性能的重要因素<sup>[4]</sup>。

迄今为止,对于建南地区飞三段储层的研究主要集中于孔隙型储层<sup>[5-7]</sup>,而对裂缝型储层尚未得到足够重视,对于该区裂缝发育情况认识的不足,已经严重制约了油气勘探工作的深入。笔者基于地震资料,应用分形法、构造主曲率法分别对该区与断层和褶皱相关的裂缝进行了预测,再结合岩性类型对裂缝发育程度进行了综合评价。结果表明,应用分形法和构造主曲率法能够很好地描述该区裂缝发育程

度,预测结果是可信的。

### 1 地质背景

四川盆地东部地区经历了早燕山期和喜马拉雅期的挤压褶皱变形,形成了方斗山背斜带、石柱向斜带、齐岳山背斜带、利川向斜带等数个巨型构造单元(图1)。它们均呈典型的侏罗山式褶皱变形,主要表现为复背斜带高陡、复向斜带宽缓、隆坳相间、呈“S”形展布的区域构造面貌<sup>[8]</sup>。

建南地区构造上位于川东褶皱带与湘鄂西褶皱带的结合部位,处在石柱向斜带内部(图1)。地表出露的岩石以石灰岩为主,属山地地貌区,海拔高度一般为1 000~1 500 m,面积约1×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。建南地区飞三段顶面构造整体为北东—南西向展布(图1)。其中:断层多为逆断层,主要发育三条近于平行的主干断裂:磨刀溪断层、太平镇断层和龙3断层;三条断层之间发育数个构造圈闭。

根据岩性特征,建南地区飞仙关组大致可以划分为四段:一段和二段为陆棚—斜坡沉积,岩性为灰色薄层泥晶灰岩、泥晶泥质灰岩及泥晶含泥质灰岩互层,底部发育厚度不等的灰黑色泥页岩;三段主要

收稿日期: 2013-08-29; 改回日期: 2013-11-29

本文受中国地质调查局“中上扬子重点地区沉积与油气地质条件研究”项目(编号:1212011120969)资助

何利:女,1983年生,硕士,工程师。主要从事沉积储层及构造地质学研究。通讯地址:610081 四川省成都市一环路北三段2号;  
E-mail: 76069804@qq.com

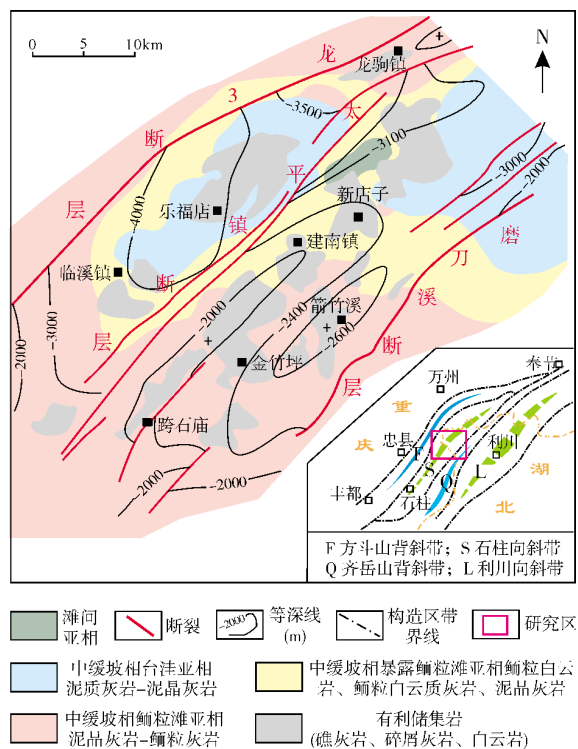


图1 研究区构造位置及下三叠统飞仙关组三段岩相分布与顶面构造叠合图

为浅滩相亮晶鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩和泥晶灰岩等,是建南地区主要的储层段;四段为局限台地相及台地蒸发岩相沉积,岩性为灰色泥晶含膏白云岩及紫红色、绿灰色白云质泥岩夹泥晶灰岩,为一套区域性盖层。飞仙关组总层厚约300~800 m,其中三段层厚约60~380 m。区内飞三段岩相平面分布特点(图1)为:中北部主要为中缓坡相台洼亚相泥质灰岩—泥晶灰岩微相和中缓坡相暴露鲕粒滩亚相鲕粒白云岩、鲕粒白云质灰岩、泥晶灰岩微相;北部边缘和中南部主要为中缓坡相鲕粒滩亚相泥晶灰岩—鲕粒灰岩微相。其中,有利储集岩(礁灰岩、碎屑灰岩和白云岩)呈北东—南西向分布于研究区中部,由众多孤立次级区块构成。

对野外露头 and 岩心中的裂缝研究后发现,建南地区飞三段中的裂缝以构造裂缝为主,主要表现为三种类型:被方解石脉充填的无效裂缝、被油气充填的有效裂缝、未被充填的有效裂缝。

## 2 裂缝预测方法

随着油气勘探开发的深入,裂缝性油藏和受裂

缝影响的油藏在已发现油气藏中所占的比例逐渐增大,储量和产量的比例也逐渐上升,储层裂缝预测的研究日益受到重视<sup>[9]</sup>。裂缝预测是针对储层内裂缝集合所构成的裂缝系而言,并不是指特定时期或特定类型的裂缝,因而,这就常常需要对研究区内多期裂缝的综合发育程度进行定性评价和定量化预测。由于储层裂缝的规模、类型和性质等千变万化,要对复杂多变的储层裂缝进行精细描述和定量化预测是目前石油地质界的一个世界性难题<sup>[9]</sup>。多年来的油气勘探结果表明,构造裂缝是储层裂缝中最主要的类型,其他性质的裂缝或多或少也与构造裂缝具有一定的联系,因此,对构造裂缝进行定量预测便抓住了裂缝的主体,有利于指导油气勘探。

目前,储层裂缝描述与预测的方法较多,主要包括:基于岩心的裂缝统计法、基于裂缝对物理场影响的测井和地震法、基于断裂的分形法和断裂因子法、基于褶皱变形的曲率分析法、基于古应力场的有限元数值模拟法<sup>[10-12]</sup>。在众多方法之中,分形法和曲率法两者相对于其他方法而言,均是借助于宏观构造去预测微小构造,逐渐受到了石油构造地质学家的重视。

分形理论是关于复杂系统自相似性(或标度不变性)的描述,按照Mandelbrot的定义<sup>[13]</sup>,只要组成部分与整体之间具有某种相似的形态,就称之为分形。日本学者平田隆幸<sup>[14]</sup>首次证明了断层和裂缝具有自相似的分形结构,只是尺度上存在差异。因此,通过分析断层的分形特征(分数维)和断裂强度便可以定性预测储层裂缝的发育程度。例如,张吉昌等<sup>[15]</sup>曾指出储层构造裂缝的复杂形态及其分布具有分形特征,并且应用分形方法预测了储层构造裂缝的分布;乐友喜等<sup>[16]</sup>应用分形理论进行测井资料的裂缝解释;苏玉平等<sup>[17]</sup>从断裂与裂缝的期次、组成形态和展布方位三方面论证了同一区块的断裂和裂缝具有自相似性,满足分形理论,并进行了裂缝预测,经钻探证实其效果良好。

1968年,Murry<sup>[18]</sup>将构造横剖面看作弯曲的“梁”,用几何方法导出了剖面曲率值与裂缝孔隙度之间的计算公式,对裂缝作了初步定量研究。构造面曲率在一定程度上控制了裂缝发育的密度、方向、宽度和深度。曲率是一条曲线的二维属性,它的大小反映了一个弧形的弯曲程度;对于脆性岩层而言,其弯曲程度越大,则构造变形越强,构造裂缝也就越发育<sup>[19]</sup>。近年

来,曲率法在油气储层裂缝预测方面应用越来越广泛。例如,周文等<sup>[20]</sup>利用主曲率法很好地预测了泌阳凹陷安棚油田核桃园组三段储层的裂缝发育情况;汪必峰等<sup>[21]</sup>应用剖面曲率法对东营凹陷牛庄油田牛35块沙河街组三段中部储层裂缝进行了预测,结果检验表明剖面曲率法适合于与褶皱相关的裂缝预测。

由以上分析可见,分形法主要是预测与断层构造相关的裂缝,曲率法则主要预测与褶皱构造相关的裂缝,将这两种方法结合起来便能够对构造成因裂缝进行很好地预测。因此,本文应用分形法和曲率法对建南地区飞三段储层裂缝的发育程度进行综合预测与评价。

3 裂缝预测结果与检验

3.1 分形法预测结果

在分形裂缝预测方法中,常用的分维计算方法有豪斯道夫(Hausdorff)维数、自相似维数和盒维数<sup>[22]</sup>。通过对比分析,认为适合于油气储层构造裂缝分维

数测定的统计方法是盒维数,即网格覆盖法。该方法的基本步骤如下:用边长为 $r$ 的正方形网格覆盖在储层构造图上,然后统计其包含裂缝的正方形格子数 $N$ ;逐步改变正方形网格的边长 $r$ ,统计相应的 $N$ ;再以 $r$ 为横坐标, $N$ 为纵坐标,在双对数坐标系中采用最小二乘法对统计数据作回归分析,回归直线的斜率即为裂缝分布的分维值 $D$ 。

本次研究在建南地区飞三段的顶面构造图上,用边长为4.0 km的方格将其分成83个子区域,然后再分别用边长为2.0、1.0、0.5、0.25、0.125 km的方格网对83个子区域进行覆盖,并对每个子区域记录其对应不同边长 $r$ 的网格划分时所含有断裂的网格数 $N$ ,经回归分析,得到那个子区域上裂缝分布的分维值 $D$ (图2)。

结果显示,几乎所有 $\ln r$ 和 $\ln N$ 的相关系数介于0.95~0.99之间,故本次研究的断层,分维特征很明显,预测结果可信度高。将83个子区域的分维值归一化后,绘制了建南地区飞三段顶面的分维值趋势图(图2)。由于断裂与裂缝有自相似性,因此,可

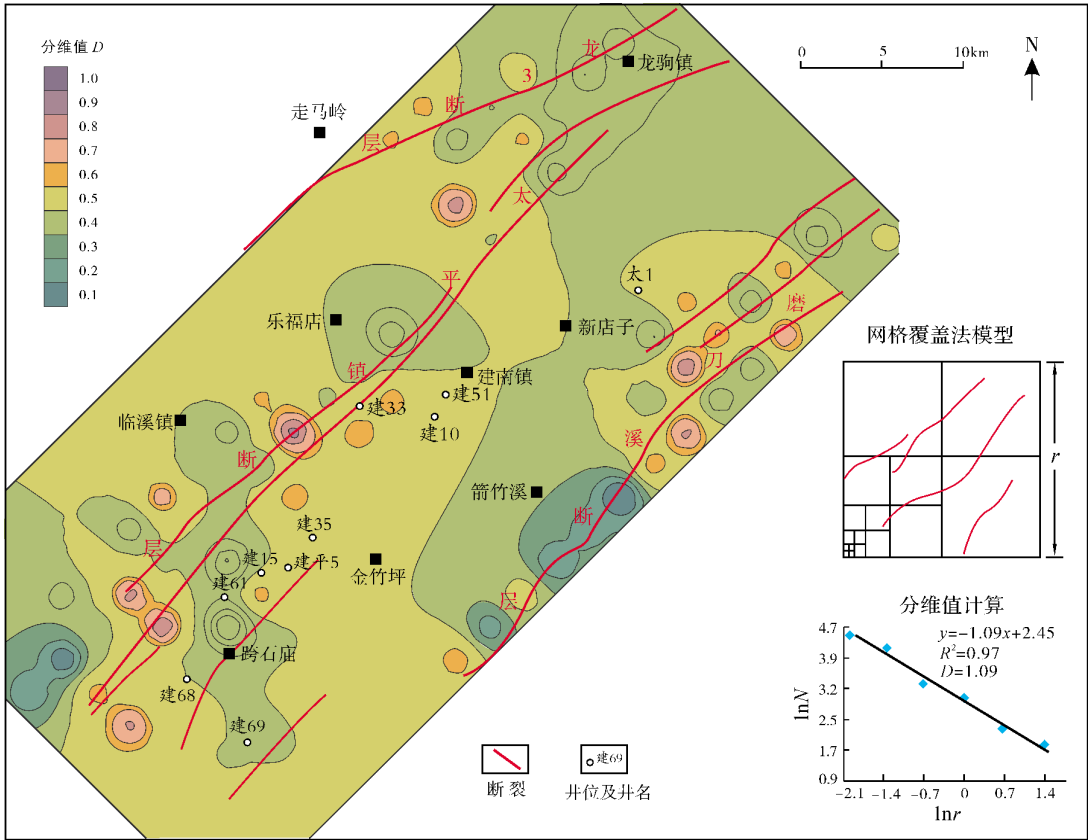


图2 建南地区飞仙关组三段储层构造裂缝的分形法预测结果

以把图2看作是该区域飞三段储层与断层相关的构造裂缝发育图,图中,分维值 $D$ 作为描述储层裂缝发育程度的定量参数<sup>[23]</sup>,分维值越大则裂缝越发育,分维值小则裂缝相对不发育。

3.2 曲率法预测结果

曲率分析有趋势面法和差分法两种方法,本文采用九点差分法计算飞三段顶面的曲率,具体方法如下:首先应用边长为 $t$ 的网格将曲面进行网格化,再对网格中每个交叉点分别计算曲率值。计算的时候该点编号为0点,相邻的8个点依次编号为1~8;然后根据点1~8的高程(或深度)应用差分公式计算0点的两个主曲率值(图3)。在计算出所有网格交叉点

的主曲率值之后,选取其中绝对值的较大者作为各网格点的评价值,最后绘制曲率等值线图。

本文首先应用边长为1 km的网格对建南地区飞三段储层顶面进行网格化,总共划分了1 000多个正方形网格。在网格化过程中,对不同的构造带分带进行,一般不跨越断层线;同时考虑到等深线的疏密程度,对密集的地方缩小网格,对稀疏的地方加大网格。网格化之后,采用九点差分法对其主曲率进行计算,总共计算了700多个点位的主曲率值,最后将各点最大主曲率值归一化后,绘制了建南地区飞三段储层顶面的主曲率等值线图(图3)。根据前面的分析,图3代表了建南地区飞三段储层中与褶皱相关的纵张裂缝的分布情况。

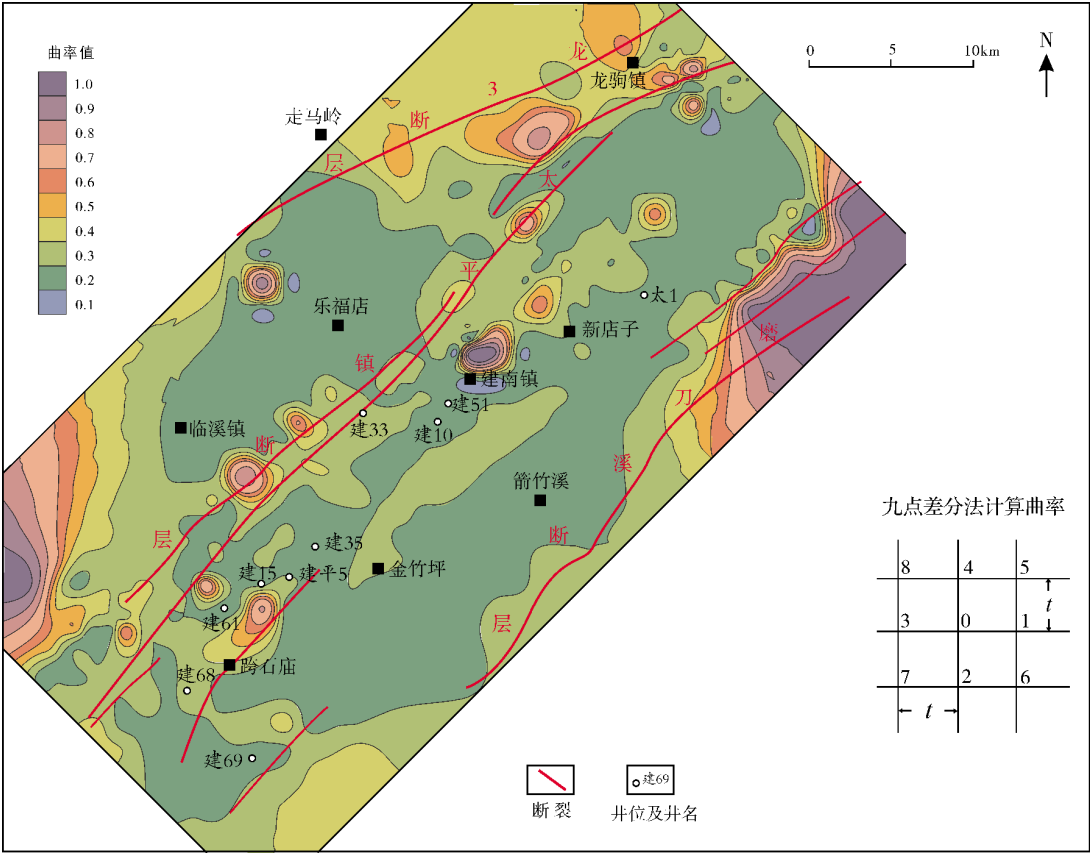


图 3 建南地区飞仙关组三段储层构造裂缝的曲率法预测结果

3.3 综合预测结果

如前所述,分形法和曲率法是分别基于宏观上断层和褶皱与构造裂缝之间的关系来进行裂缝预测的,这两种预测结果应代表了两类不同性质裂缝的

发育情况。为了尽可能地对储层中发育的多期不同性质裂缝进行完整而科学的预测,通常会将不同方法得到的结果进行综合。

本文对分形法预测结果、曲率法预测结果以及岩性类型三个要素进行了综合考虑,来定性预



测研究区内构造裂缝的发育情况。进行构造裂缝预测时,岩性是不得不考虑的一个关键因素。岩性是裂缝发育的内因,对裂缝的发育存在显著的影响。岩性主要由岩石成分和岩石结构两个因素共同决定,这两个因素决定了岩石的硬度和非均质性,硬度是岩石抵抗外力作用的衡量标准,非均质性决定了岩石受力后其内部是否会产生局部应力集中<sup>[9]</sup>。

然而,要用数字来定量评价岩性是很难实现的,虽然前人曾主观地对不同岩性进行过赋值<sup>[24-25]</sup>。为慎重起见,本文采用叠加法,即对分形法预测结果、曲率法预测结果和岩性类型三者叠加起来综合预测研究区构造裂缝的发育情况。叠加法相当于将不同的因素或结果平等对待,从而避免了人为赋值的主观性和权重因子计算的不可靠性。

叠加之前,先把分形法预测结果(图2)、曲率法预测结果(图3)和岩性(图1)三个因素分别划分为“好”和“差”两种结果:前两者以归一化后的0.5

为分界进行划分;岩性方面则将孔隙发育的岩石(礁灰岩、碎屑灰岩和白云岩)划为“好”,因孔隙发育的岩石非均质性较强,裂缝易于产生;而成分单一、结构简单、致密的泥晶灰岩划为“差”,因其均质性较强,相对不易形成裂缝。综合分析时,当三个因素均为“好”时,划为裂缝特别发育区;只有两个为“好”时,划为裂缝发育区;只有一个因素为“好”时,划为裂缝不太发育区;三个因素均为“差”时,划为裂缝不发育区。

综合评价结果(图4)显示,研究区内裂缝特别发育区位于北部的龙3断层附近和南部的跨石庙附近,其面积比较小,且临近断裂带;裂缝发育区主要发育于新店子、建南及其以南部分地区,多被夹在三条主干断层之间,且与断层之间的垂直距离小于10km;裂缝不太发育区约占整个研究区面积的40%,它们一般位于两条断裂带之间的中部地区;裂缝不发育区约占整个研究区面积的50%,集中于研究区内的西北和东南部。



图4 建南地区飞仙关组三段储层构造裂缝的综合预测结果图

### 3.4 结果检验

首先,从图 2 和图 3 分析,图 2 中与断层相关的裂缝主要发育在研究区内三条主干断层附近,靠近断层处发育,远离断层处则不发育,因此分形法的预测结果比较合理;图 3 中与褶皱相关的裂缝主要发育于研究区内三条主干断层的中间,特别是建南构造高点上,因此曲率法的预测结果也是可信的。

其次,为了进一步检验两种方法预测结果的可靠性,本文将研究区内 28 口钻井处的分维值和曲率值相加,然后与每口井的日产气量进行相关分析(图 5)。结果显示,研究区大部分钻井的日产气量与分维值与曲率值的和具有很好的正相关性,即分维值与曲率值的和越大,日产气量越高。由此表明,本文预测的裂缝综合发育程度对油气藏具有正面作用,预测结果具有一定的实际勘探价值。

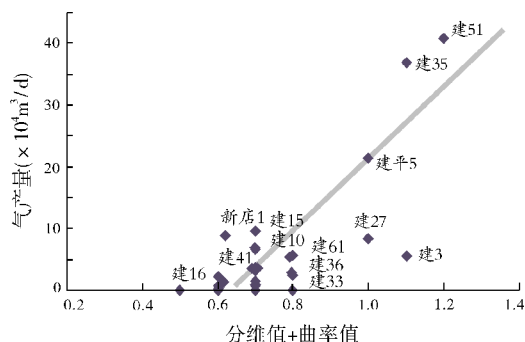


图 5 建南地区飞仙关组三段储层分维值与曲率值之和与日产气量的相关性

最后,通过部分钻井的日产气量来检验本文的综合预测结果(图 4),即考虑了裂缝和岩性两个因素之后的预测结果。位于裂缝特别发育区的建 15 井、建平 5 井和建 61 井的日产气量分别为  $9.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $21.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;位于裂缝发育区的建 51 井、建 35 井和建 10 井的日产气量分别为  $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $36.9 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $6.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;位于裂缝不太发育区的建 68 井和太 1 井的日产气量分别为  $0.9 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $0.82 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;位于裂缝不发育区的建 69 井和建 33 井的日产气量非常低,仅为  $0.015 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $0.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。总体上,研究区内裂缝的发育程度与日产气量具有较高的一致性,这

表明裂缝发育情况在一定程度上控制了研究区内的油气聚集成藏。由此表明,本文的预测结果具有较高的可信度。

### 4 结束语

采用分形法和曲率法较好地预测了四川盆地东部建南地区飞仙关组三段储层中构造裂缝的发育情况;综合分析法相对于单一方法而言,避免了单一方法的某些不足,能够更加科学地预测裂缝的发育程度,与实际资料的吻合度较高,对实际勘探可能具有一定的指导意义。但由于研究中较多地突出了储层裂缝因素,故在油气勘探实践中应合理使用。

#### 参考文献

- [1] 马永生,郭旭升,郭彤楼,等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质评论,2005,51(4):477-480.
- [2] 管宏林,蒋小琼,王恕一,等. 普光气田与建南气田长兴组、飞仙关组储层对比研究[J]. 石油实验地质,2010,32(2):130-135.
- [3] 马永生,蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质,2006,27(6):741-750.
- [4] 黄强,高秀娥,吴丽萍. 对建南构造南飞三气藏储层地质特征的认识[J]. 江汉石油职工大学学报,2011,24(2):6-8.
- [5] 易积正,张士万,梁西文. 鄂西渝东飞三段鲕滩储层及控制因素[J]. 石油天然气学报,2010,32(6):11-17.
- [6] 秦军,陈玉明,伍宁南. 建南地区生物礁滩储层预测的几点认识[J]. 天然气勘探与开发,2010,33(3):12-17.
- [7] 鲍云杰,王恕一,蒋小琼,等. 建南气田飞三段储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质,2011,33(6):564-568.
- [8] 秦军,葛兰,陈玉明,等. 川东建南地区飞仙关组地震储层预测[J]. 海相油气地质,2011,16(2):9-17.
- [9] 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展[J]. 新疆石油学院学报,2004,16(2):9-13.
- [10] 童亨茂. 储层裂缝综合预测方法在 GBEIBE 油田的应用[J]. 中国石油勘探,2007,12(3):77-80.
- [11] 周文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都:四川科学技术出版社,1998:39-88.
- [12] 周文,刘家铎,胡文艳,等. 埕岛中东部潜山带古生界和太古界储层裂缝分布评价[J]. 矿物岩石,2000,20(1):52-56.
- [13] MANDELBROT, B. B. The fractal geometry of nature[M]. New York: W H Freeman and Company, 1983: 1-468.
- [14] 平田隆幸. 断层与分数维[J]. 地震地质译丛,1990,12(1):

- 53-56.
- [15] 张吉昌,田国清,刘建中. 储层构造裂缝的分形分析[J]. 石油勘探与开发,1996,23(4):65-68.
- [16] 乐友喜,王才经. 多重分形在测井资料裂缝研究中的应用[J]. 石油物探,1998,37(1):109-114.
- [17] 苏玉平,吕延防,付晓飞,等. 分形理论在贝尔凹陷基岩潜山裂缝预测中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(4):563-569.
- [18] MURRY G H. Quantitative fracture study—Sanish pool, McKenzie County, North Dakota[J]. AAPG Bulletin,1968,52(1): 57-65.
- [19] 陶洪辉,秦国伟,徐文波,等. 地层主曲率在研究储层裂缝发育中的应用[J]. 新疆石油天然气,2005,1(2):22-25.
- [20] 周文,张银德,闫长辉,等. 泌阳凹陷安棚油田核三段储层裂缝成因、期次及分布研究[J]. 地学前缘,2009,16(4): 157-165.
- [21] 汪必峰,戴俊生,盛学香,等. 牛 35 断块沙三中储层裂缝预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(3):18-22.
- [22] 董连科. 分形理论及其应用[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1991:30.
- [23] 尹燕义,柳成志,陈洪波,等. 裂缝型储层裂缝发育程度分形描述方法[J]. 大庆石油学院学报,1998,22(1):8-11.
- [24] 李兴伟,沈占锋,卢双舫,等. 综合评判法在松辽盆地徐家围子断陷营城组地层裂缝预测中的应用[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(3):10-12.
- [25] 江同文,颜其彬,洪庆玉. 灰色综合评判法在裂缝预测中的应用[J]. 石油勘探与开发,1996,23(2):35-37.

编辑:董庸,金顺爱

## Fracture Predication and Evaluation of Lower Triassic Feixianguan-3 Reservoir in Jiannan Area in the East of Sichuan Basin

He Li, Tan Qinyin, Song Chunyan, Wang Ruihua,  
Wang Zhenghe, Cheng Jinxiang

**Abstract:** Fractures quite develop in the Lower Triassic Feixianguan-3 carbonate reservoir that is the target for petroleum exploration in Jiannan area in the east of Sichuan Basin. In accordance with data from 28 producing wells, the extent of development and distribution of the fractures associated with faulting and/or folding is predicated by using fractal and curvature methods. According to the result of comprehensive evaluation, it is suggested that development of the fractured reservoir is preferably positive in correlation with hydrocarbon accumulation at this area. This method of evaluation is proved to be reasonable and believable. The reservoir area favorable for exploration is also suggested.

**Key words:** Lower Triassic; Feixianguan Formation; Fractured reservoir; Fractures predication; Sichuan Basin

He Li; female, MSc., Geology Engineer. Add: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, 2 Bei Sanduan, Yihuan Rd., Chengdu, Sichuan, 610081, China