

川南地区茅口组储层裂缝系统预测方法探讨

程光瑛 庞加研

(成都地质学院)

张长盛

(川南矿区)

通过对川南茅口组裂缝-孔洞型储层的研究,作者总结了控制裂缝发育情况的主要地质因素,提出了三维空间单元体综合类比预测法,探讨了与裂缝系统有关的各类定性、定量变量的选取和预处理问题,编制了相应的裂缝预测程序包。

一、地质背景

四川盆地南部地区下二叠统茅口组是一套浅海碳酸盐台地相厚层块状生物灰岩,成分纯,泥质含量低,岩性和厚度均较稳定(可在全区进行较好对比),与上覆龙潭组及下伏栖霞组分别呈假整合、整合接触,可分为4段8小层(表1)。茅口组岩石致密,孔隙度和渗透率都很低。事实上,致密岩块为气藏创造了良好的封闭条件,裂缝和溶蚀孔洞构成的裂缝系统则为气体提供了主要的储聚空间和渗滤通道,一个封闭的裂缝系统就是一个气藏。控制裂缝系统发育的主要地质因素是:

表1 川南新统茅口组小层划分表

统	组	段	岩 性	厚度 (m)
新 统	茅 口 组	阳三 ⁴	深灰带褐色生物灰岩	0—39
		阳三 ³	灰—浅灰色生物灰岩,含燧石结核	27—45
		阳三 ² _A	灰—深灰色夹褐灰色生物灰岩,荷叶藻灰岩为标志层,含燧石结核和不规则燧石层,中部可豹斑状白云化	44—48
		阳三 ² _B		46—47
		阳三 ² _C		42—55
		阳三 ¹ _A	黑色—深灰色泥质生物灰岩及生物灰岩,具眼皮眼球状构造	22—25
		阳三 ¹ _B		10—12
		阳三 ¹ _C		20—22

1. 褶曲 在背斜高点、长轴、鼻凸、鞍部等部位,裂缝及溶蚀缝洞发育,气井成功率较高。背斜翼部、向斜等部位,裂缝不发育,钻井成功率较低(表2)。

2. 断层 四川盆地的断层几乎全为挤压性及压扭性逆断层。这类非张性力所形成的断层,由于断面紧闭,本身对储层的缝洞发育并不一定有利,而可能起着封隔油气

表2 不同构造部位钻井成功率统计表

构造部位	高点	鞍部	轴部	翼部	向斜
总井数	106	24	144	82	10
气井数	57	13	61	31	2
气井成功率(%)	54	54	42	38	20

(据王勤江等)

的作用。然而,不可忽视的是断面附近的各种伴生构造,比如羽状张裂缝、正牵引构造以及由此形成的次一级剪裂缝和张裂缝等,都改善了岩石的储渗特征。实钻资料也说明,气井成功率与断层有关(表3)。

表3 气井成功率与到断层平距关系统计

气井到断层平距(m)	总井数	气井数	气井成功率(%)
0—100	73	40	54.8
100—300	94	41	46.8
300—500	49	23	46.9
500—800	44	22	50.0
800—1000	30	12	40.0
>1000	71	23	32.4

(据王勤江等)

3. 岩溶 一个裂缝系统所储集的天然气量,在很大程度上取决于溶蚀孔洞的发育程度。裂缝是流体的主要渗滤通道,溶蚀孔洞则是主要的储集空间。裂缝改善了储层的渗滤特征,使岩溶作用更易进行;而已有的溶蚀孔洞又使储层在各种应力作用下更易产生裂缝。因此,岩溶作用是裂缝系统发育的主要控制因素之一。溶蚀孔洞在茅口组上部较发育,岩溶本身的发育与构造部位无关,但因裂缝作用的影响,放空、井漏的比例在构造有利部位略高,放空距及漏失量也较大。

二、裂缝系统预测方法

本文提出的三维裂缝系统预测的单元体综合类比预测法,保持了多元统计分析方法的基本优点,并能进行混合变量的综合处理和分析,实现三维空间中预测不同级别的研究区。为检验其适用性及有效性,作者选取丹凤场构造茅口组上部储层进行了预测。现将主要步骤分述如下:

1. 建立适当的三维空间直角坐标系,沿坐标轴方向按一定间隔值 Δx , Δy , Δz 对所研究的地质体进行三维分划。设共将研究对象划分为 N 个单元体,每个单元体的体积为 $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$,则这些单元体的总体积为 $V = N \cdot \Delta V$ 。每个单元体的空间位置由其中中心点位置确定。显然,单元体越小,其总体越能真实反映地质体的形态。这种三维分划,是我们进行空间特征研究的基础。

丹凤场构造为近南北向低丘状短轴背斜,本次坐标系的选择与三维地震测线方向

一致, X 轴方向为地震纵测线方向, Y 轴与 X 轴均位于海平面上但互相垂直, Z 轴则铅直向上。预测对象为阳新统上部(顶面至以下100 m), 所采用的三维分划共有4种方案。按最细的一种划分方案, 每个单元体的体积为 0.00125 km^3 , 单元体总数为8360个, 总体积为 10.45 km^3 , 覆盖面积为 104.5 km^2 。图1为丹凤场构造阳新统上部坐标选取与单元体划分示意图, 表4为单元体划分的基本数据表。

2. 根据研究目的、实际资料情况以及专家意见, 选取有关的 M 个定性及定量变量 $x_1, x_2, \dots, x_M$ 。本次共选用的

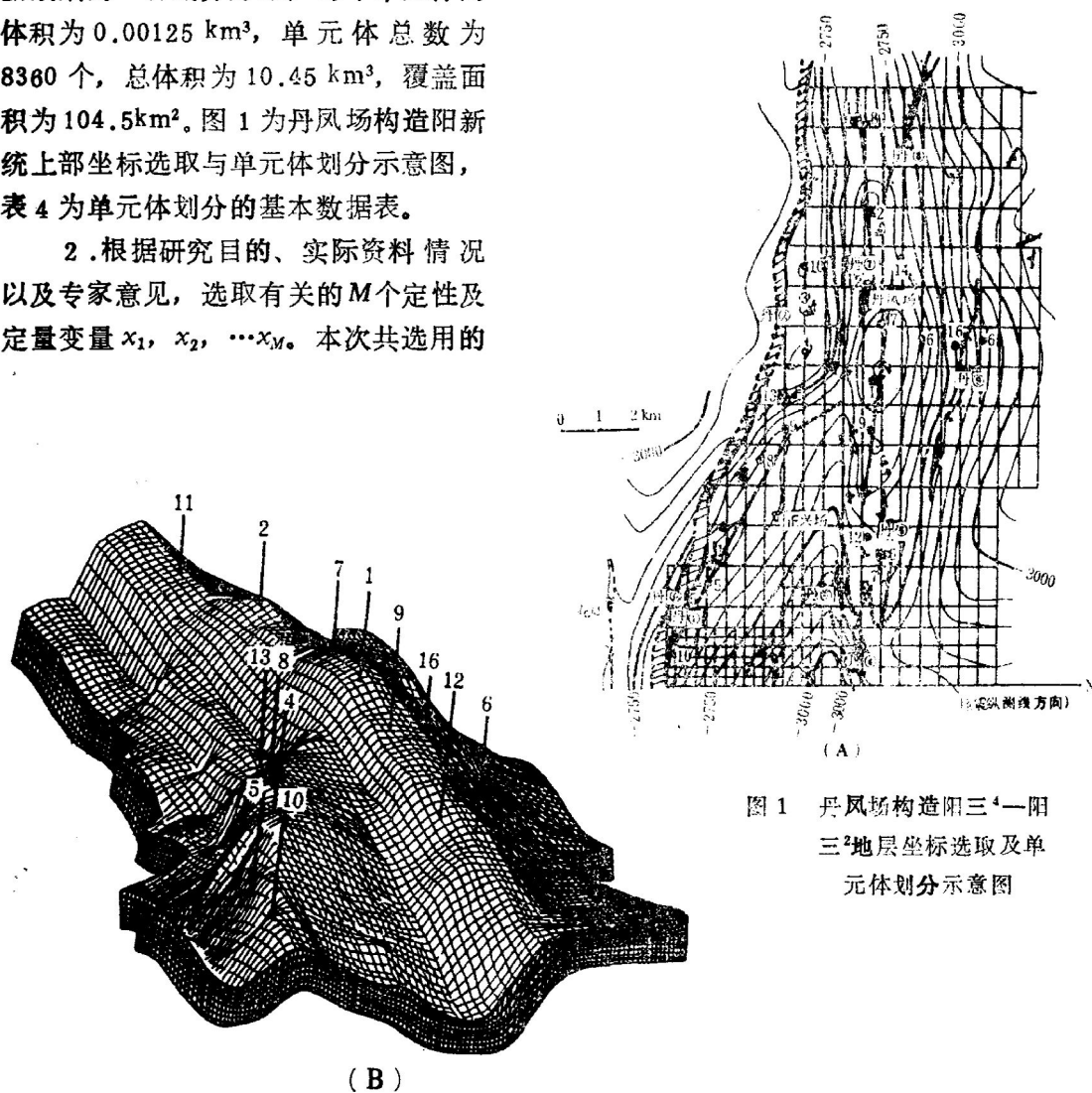


图1 丹凤场构造阳新统上部坐标选取及单元体划分示意图

表4 各种单元体划分方案基本数据表

方案号	参数	$\Delta x (\text{km})$	$\Delta y (\text{km})$	$\Delta z (\text{km})$	单元体体积 (km^3)	各层单元体数	总计单元体数
1		0.50	1.00	0.02	0.01000	209	1045
2		0.50	0.50	0.02	0.00500	418	2090
3		0.25	0.50	0.02	0.00250	836	4180
4		0.25	0.25	0.02	0.00125	1672	8360

6个变量分别为: ①各单元体距阳新统顶面距离, ②平均面曲率, ③构造部位, ④各单元体距最近构造高点、轴线距离, ⑤距最近断层面垂距, ⑥最近断层诸要素综合特征。

然后,根据所选变量,求出各单元体变量原始取值矩阵

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

再由统计特征及人们已有的认识对各变量进行预处理,确定其数值大小或不同类别对研究目的的有利性 $Y^{(0)}$, 作为变量指示值。

$$Y^{(0)} = (y_{ij}^{(0)}) = [f_i(x_{ij})] \quad \begin{matrix} i=1, 2, \cdots, M \\ j=1, 2, \cdots, N \end{matrix} \quad (2)$$

这里, f_i 是变量 x_{ij} 与有利性 $Y_i^{(0)}$ 之间的某种对应关系。它可以是回归分析确定的方程,也可以是数值模拟得到的某种对应关系,或是自变量与因变量之间的模糊关系等等。有利性越大, $y_{ij}^{(0)}$ 值越大。对于前述6个变量的取值及有利性变换预处理,均根据大量统计及研究成果,分别采用了回归分析、数值模拟和数量化理论等方法来实现。对于第1个变量和第6个变量,据回归分析结果所采用的变换函数为式(3)及表5。

表5 断层诸要素综合取值

$y_{ij}^{(0)}$	$f_6(x_{6j})$
断层位于构造高点	0.9988
断层在轴线附近且倾向与地层倾向夹角 $> 70^\circ$	0.9093
断层在翼部且走向与地层走向夹角 $> 15^\circ$, 倾向与地层倾向夹角 $> 70^\circ$	0.7094
断层在翼部且倾向与地层倾向夹角 $\leq 70^\circ$	0.3991
其它断层	0.1000

$$y_{1j}^{(0)} = f_1(x_{1j}) = 0.1352 - 0.7126x_{1j} + 1.0939x_{1j}^2 \quad (3)$$

第2个变量取值大小与有利性一致,故取

$$y_{2j}^{(0)} = f_2(x_{2j}) = x_{2j} \quad (4)$$

构造部位的取值及有利性变换则根据各单元体与邻近各单元体所处位置的相对高低,取其等级值作为有利性取值。第4、5两个变量则由数值模拟方法分别确定其变换函数为:

$$f_4(s_1, s_2) = e^{-1.8188(s_1^2 + s_2^2)} \quad (5)$$

$$f_5(x_5) = \begin{cases} e^{-(x_5 - 0.08)^2 / 0.17} & \text{一类断层 } x_5 \in [0.02, 0.50] \\ e^{-(x_5 - 0.12)^2 / 0.25} & \text{二类断层 } x_5 \in [0.04, 0.70] \\ e^{-(x_5 - 0.20)^2 / 0.30} & \text{三类断层 } x_5 \in [0.06, 1.00] \\ e^{-(x_5 - 0.32)^2 / 0.57} & \text{四类断层 } x_5 \in [0.10, 1.20] \\ 0.001 & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

式中 s_1 和 s_2 分别为各单元体距最近构造高点及轴线的距离。

为统一尺度和便于下一步处理和分析,再将有利性之值 $y_{ij}^{(0)}$ 进行极差变换,使各变

量指示值 y_{ij} 正规化, 即令: $0 \leq y_{ij} \leq 1$ 。极差变换公式为:

$$y_{ij} = \frac{y_{ij}^{(0)} - y_{i(\min)}^{(0)}}{y_{i(\max)}^{(0)} - y_{i(\min)}^{(0)}} \quad (7)$$

$y_{i(\max)}^{(0)}$ 和 $y_{i(\min)}^{(0)}$ 分别为第 i 个变量指示值的最大值和最小值, $y_{ij}^{(0)}$ 与 y_{ij} 则为变换前后的指示值。变换后各单元体指示值所组成的矩阵则为:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{M1} & y_{M2} & \cdots & y_{MN} \end{pmatrix} \quad (8)$$

3. 如果区内有已知裂缝系统, 则这些裂缝系统必分属于 N 个单元体中某 K 个单元体, 我们称这 K 个单元体为模型单元体。根据类比原则, 模型单元体的 M 个变量指示值所具有的组合特征

$$Z = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + \cdots + a_M y_M \quad (9)$$

就是研究目的的组合特征。 Z 值称为单元体诸变量指示值综合指标(单元综合指标), $a_1, a_2, \cdots, a_M$ 为各变量指示值 y_i 之权系数。因此, 只要由模型单元体求得 a_i , 就可按(9)式计算区内所有单元体的综合指标, 从而进行综合类比预测。这可由式(8)抽出各模型单元指示值组成模型单元体数据阵:

$$R = \begin{pmatrix} y_{1j_1} & y_{1j_2} & \cdots & y_{1j_k} \\ y_{2j_1} & y_{2j_2} & \cdots & y_{2j_k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{Mj_1} & y_{Mj_2} & \cdots & y_{Mj_k} \end{pmatrix} \quad (10)$$

($j_1, j_2, \cdots, j_k$)为(1, 2, $\cdots$, N)的某 K 个值。再据 $R_{(M \times K)}$ 阵及主成分分析法确定 M 个变量指示之权系数, 即由对称阵

$$R^* = R \cdot R^T = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{MM} \end{pmatrix} \quad (11)$$

出发, 求出 R^* 的最大特征值 $\lambda_{(\max)}$ 和对应的特征向量:

$$A = (a_1, a_2, \cdots, a_M) \quad (12)$$

a_i ($i=1, 2, \cdots, M$)就是式(9)中各变量指示值的权系数。权系数的大小, 标志着相应变量的重要性; 权系数越大, 其相应变量对预测目的越重要。因此, 可以据此确定各个变量在预测过程中的主次地位。

丹凤场构造目前进入茅口组储层的钻井中, 有5口为该储层之气井, 分属于5个不同的裂缝系统。这5口气井所在的产层段在第4种单元体划分方案中分属10个单元体, 根据这10个模型单元体求出的有利于裂缝系统发育的组合特征是:

$$Z = 0.26y_1 + 0.41y_2 + 0.30y_3 + 0.49y_4 + 0.25y_5 + 0.61y_6 \quad (13)$$

对于没有已知模型单元体的研究区, 可以借用邻区资料或专家打分确定各变量指示值权系数。

4. 由式(9)计算研究区内所有单元体之综合指示值 Z , 该值越大, 表示该单元体与模型单元体越相似, 对研究目的越有利。也就是说, Z 值越大, 将该单元体作为预测有利单元体的把握性越大。如果选用大小不同的 Z 值作为各单元体综合类比预测的下限值, 则 Z 值越大, 预测结果的可靠性越大。下限值的选取可参考已知模型单元综合指标之最大值、最小值或平均值确定, 也可根据实际情况进行调整。设所选下限值为 $Z^{(1)}$ 、 $Z^{(2)}$ 、 $Z^{(3)}$, 且有:

$$Z^{(1)} > Z^{(2)} > Z^{(3)} \quad (14)$$

则凡是满足 $Z_i \geq Z^{(1)}$ ($i=1, 2, \dots, N$) 的所有单元体都是有把握的一级预测单元, 而满足 $Z_i \geq Z^{(2)}$ 或 $Z_i \geq Z^{(3)}$ 的所有单元体则分别为二级或三级预测单元体。根据各级预测单元体的空间位置, 可在三维空间中圈出可靠性不同的各级预测区域。

根据丹凤场构造10个模型单元体综合指标值,确定以1.2181、1.1381和1.04作为各级预测的下限值。据此,一级预测区共有预测单元体447个,二、三级预测单元体分别为564个和821个。图2为将距离阳新统顶面20—40m各级预测单元体叠合而成的预测成果图。用同样的方法还可得到不同深度的各级裂缝系统预测成果图,达到三维空间预测裂缝系统的目的。

单元体综合类比预测方法
流程见图3, 相应的裂缝系统
预测程序包由14个程序组
成, 使用FORTRAN语言, 在IBM PC/XT及其兼容机上均可使用。用户只要按规 定格
式输入预测所要求的基本数据, 如构造面已知点纵横坐标及海拔高程数据、断层数据、
已知构造高点、轴线位置数据等, 就可由计算机自动完成单元体划分与定位、变量取

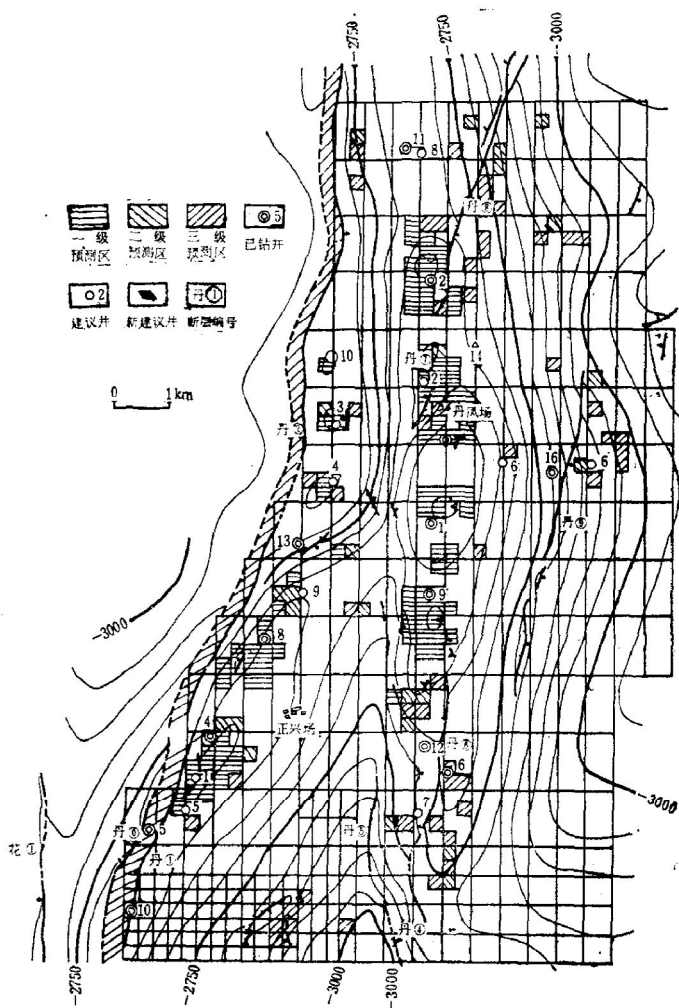


图2 丹凤场构造阳新统顶面以下20—40 m 各级裂缝系统预测成果图

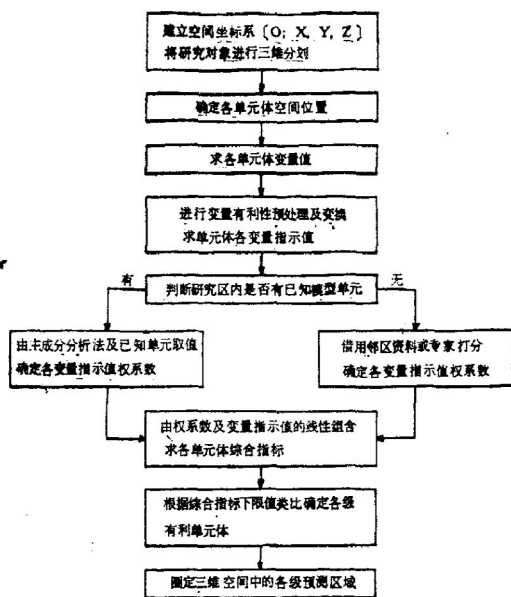


图3 单元体综合类比预测方法流程框图

值、预处理及变换, 最终输出不同深度的各级预测成果图。

三、实际应用效果与结论

从丹凤场构造实际预测结果可知, 使用该方法得到的主要预测区域都在构造有利部位, 但构造有利部位又并非都是预测区域。这与裂缝系统分布的不均匀特征以及人们的一般认识都相吻合。5口工业性气井与预测情况完全一致, 而其余7口干井均不在一、二级预测区中。另外, 预测结果与三维地震油气检测异常区也基本一致, 且较异常区区分更细致、更集中、更清晰, 还可以剔除异常区中裂缝不发育区域, 判别预测区可靠性大小, 确定最佳钻

探井位和试气层段等。

总之, 从丹凤场构造裂缝系统预测结果可知, 本文所提出的预测方法和相应的程序包都是切实可行的, 其特点是:

1. 将地质体置于三维空间中, 并分割成为若干具有一定体积的小单元体, 这不仅能够保持研究对象固有的三维空间存在形式, 充分体现其本身的空间形态, 更重要的是, 这种三维分割可以尽量利用各变量平面上及纵向上的变化特征, 进行三维空间的预测研究。如果去掉任意一个或两个方向的分割, 同样可以进行二维或一维的预测研究。

2. 采用变量指示值进行综合类比分析, 使变量选取、取值及预处理更为灵活, 有利于针对不同的研究目的和变量选用不同的取值和预处理方法。

3. 预测成果为不同可靠程度的各级预测区, 有利于根据勘探条件确定不同时期的重点勘探区域。用空间有利单元体的位置可以大致描绘各个裂缝系统不同可靠程度的空间位置和形态特征, 从而确定最佳布井位置和试气层段, 估算各个裂缝系统的储量或资源量, 反算含气岩石总孔隙度等。这无论对于勘探新区还是开发老区都有非常重要的参考价值。

本文撰写过程中得到了川南矿区赵玉龙、王勤江、杨茂康、耿文志等同志以及西南石油地质局的大力支持和帮助, 作者向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 张继铭、黄鉴平, 1984, 天然气勘探与开发, 第4期。
- [2] 赵鹏大等, 1983, 矿床统计预测, 地质出版社。
- [3] McCammon, R.B. et al., 1983, Geological Mathematics, Vol.15, No.1.
- [4] 于崇文等, 1980, 数学地质的方法与应用, 冶金工业出版社。

PREDICTING METHOD OF THE RESERVOIR FRACTURE SYSTEM OF THE MAUKOU FORMATION IN SOUTHERN SICHUAN

Cheng Guangying Pang Jiayan

(Chengdu College of Geology)

Zhang Changsheng

(Southern Sichuan Mining Region, Sichuan Petroleum Administration)

Abstract

Studied the fracture-cavity reservoir of the Permian Maukou Formation in southern Sichuan Basin, the main geological factors that controlled fracture development are summarized, the predicting method of 3-D unit by synthetic analogy is proposed, the selection and pretreatment of various qualitative or quantitative variates related to the fracture system are studied and the prediction program package of fracture system is designed by the authors.

中国南方天然沥青与油气研讨会概况

湖北省石油学会、中国地质学会石油地质专业委员会联合召开的中国南方天然沥青与油气研讨会，于1987年11月17日至19日在武汉召开。参加研讨会的有地质矿产部、石油工业部、煤炭工业部及院校共22个单位的46名代表。会议收到论文19篇。

我国已在南方9个省区内发现了80处以上的沥青脉。根据多年的研究，与会者对天然沥青的分类、形成机制、与油气的关系等阐述了各自的看法。提出两个有代表性的分类方案，其一，根据天然沥青产出的地质特征，划分为原生-同层沥青、后生-储层沥青（又分A、B两亚类）、岩浆热变质沥青和浅层氧化沥青四类；其二，根据天然沥青原始有机质类型和演化变质程度，划分为未变质沥青类（包括油沥青组、软沥青组、硬沥青组和硫沥青组），变质沥青类（包括焦沥青组、碳沥青组、类石墨和石墨组），异化沥青类（包括煤化沥青组、沥青煤组和藻煤或石煤组）。

大多数代表认为，天然沥青的出现，代表着一个从生油、运移、聚集到破坏的完整过程，对追索一些在特定条件下被保留下来的油气田（藏）具借鉴作用。我国南方晚元古-古生代地层中多有这种被破坏的古油藏，其圈闭类型有背斜型、不整合型、岩性型、断层遮挡型、复合型等。保存条件是该区寻找油气的关键。关士聪教授认为，只要勇于探索那些具有志留系盖层保护的可靠圈闭，将会取得重大的油气突破；而对若干地区的上古生界，例如，南盘江流域，更应寄予希望。与会者还就该区找油找气工作，提出了具体建议。

(王雄飞)