

用示踪剂测试方法进行油藏描述

W.E.Brigham, Stanford U.

M.Abbaszadeh-Dehghani, Johnston-Macco

司艳姣 译

王波 校

一、引言

无论何时,只要油藏工程师考虑某一油藏的提高采收率(EOR)方案,就会提出有关详细了解该油藏的问题。当油藏已经开始注水采油时,常常也提出这些问题(并部分得到答案)。但是,实施任何一种提高采收率方案都比注水花钱多得多,因此,更强调需要对油藏作详细的描述。

帮助确定油藏及其非均质性的传统方法有地质、地球物理、取心、测井和试井等方法。重要的是要把这些方面的研究协调配合起来,以使油藏的综合描述结果与所有方法得到的资料相一致。为了评价提高采收率方法,需要了解的最重要的资料是井间的流动特性,所以,那些能提供这类资料的测试方法具有特殊的价值。

近年来,已在较大范围应用的两种测试方法是井间不稳定压力测试法和井间示踪剂测试法。这两种方法对定量确定油藏中的优先流动通道有很大的作用。而且,这两种方法都比单井不稳定压力测试方法多花很多时间。井间不稳定压力测试必须持续到在邻近的井上能观察到压力的变化并对其进行解释为止。持续时间的长短取决于油藏的性质和井间的距离,一般为几小时至几个星期。示踪剂测试需要的时间更长,这是因为必须有足够长的时间让含有示踪剂的流体从一口井流到另一口井。

油藏工程师中有这样一种想法,即认为没有必要既进行压力干扰试井又进行井间示踪剂测试,理由是这两种方法都是用来确定井间流动性质的。这种想法是不对的,因为这两种方法测量不同的性质。压力干扰试井倾向于测量井间的平均性质,并且对于确定是否存在定向渗透性倾向,效果也很好;而示踪剂测试则能够显示使压力干扰试井测得那种平均性质的非均质性的存在范围。并定量提供过早见到驱替流体的特征。过早见到驱替流体会严重影响油藏的最终采收率。因此这两种方法是互相取长补短的,而不是互相对立的。

本文将比较详细地讨论井间示踪剂测试可能得到的示踪剂响应的特性以及如何分析这种测试所取得的结果,从而评价油藏的非均质性。另外,还将讨论人们为分析裂缝型系统所作的研究。尽管这方面的研究进展很快,但仍然处在初期阶段。最后,将简单地讨论将来为提高这些测试方法的作用所要作的研究工作。

二、示踪剂的流动性质

当进行井间示踪剂测试时,通常先注入一个示踪剂小段塞,接着注入不含示踪剂的流

体, 示踪剂在向生产井移动的途中与油藏流体混合而被稀释。要了解示踪剂的流动性质, 正如在下面各段将要叙述的, 比较容易的方法是把混合与稀释机理分解为几个组成部分来加以考虑。

示踪剂流动性质的理论和分析方法, 是在假设流度比等于1的基础上提出来的。因为这是在理论上解决这个问题的唯一途径。因为大多数示踪剂测试是在流度比接近于1的系统中进行的, 所以这种假设并不是一个严重问题。示踪剂测试, 或者是在水驱过的油藏中进行, 以评价在该油藏中实施提高采收率方案的可行性, 在这种油藏中绝大部分的可动流体是水; 要么是在实施提高采收率方案的过程中进行, 在这种情况下, 已经认识到控制流度比的重要性, 而且总是把流度比控制在接近于1。

让我们首先考虑一个假设的均质系统, 并往该系统中连续注入示踪剂浓度一定的流体, 还假设注入后, 这种流体不与系统中原有的流体相混合。这样, 我们将只考虑系统的几何形状对其生产历史的影响。从图1(a)可以看到一个四分之一五点井网中流体的位置。该井网原先充满流体A, 尔后注入驱替流体B, 两种流体之间不发生混合, 而且流体B有一个尖的前缘。由于井网几何形状的影响, 在生产井中产出的是流体A和B的混合物。见驱替流体曲线的演变, 是用该系统的流线严格确定绘制出来的。流体B或A的分流量, 可以按照生产井处的角度, 即刚突入生产井的流线的角度精确地确定出来。流体B的分流量与注入体积的关系曲线如图1(b)所示。

现在考虑另一种情况, 即先注入一小的段塞流体B, 然后再注入流体A。同样假设两种流体互不混合。图2(a)表示流体B在井网中的位置。进入生产井的流体B的分流量, 也用流体B入井的总角度来表示。这个角度也受流体A驱替B的流线的影响。我们将看到相同的突入生产井的特征曲线, 但A驱替B的曲线, 在注入体积坐标上滞后一个等于流体B注入体积的量。这种概念示于图2(b), 图上同时给出了见到前缘和后缘的曲线, 它们仅沿X轴发生一定的位移。

产出液中流体B的浓度等于图2(b)中两条曲线的纵坐标之差, 如图中划竖线面积所示。注意, 即使流体在油藏中不发生混合, 产出液中流体B的浓度也总是小于100%, 这是由流型的几何形状造成的, 而且始终是如此。图2(a)中划斜线部分的总面积等于流体B的注入体积。

最后我们考虑示踪剂(流体B)与系统中的流体发生混合所造成的影响, 这种影响如图2(b)中的虚线所示。由于流体间的混合, 实际上, 见示踪剂的时间要比连接竖线顶部曲线所表示的时间稍微提前一些, 而且其峰值高度降低并稍微有所滞后。虚线下面的面积等于划竖线部分的面积。还要注意, 这些曲线只考虑了从该井网流入的流体。在实际生产井中, 还有来自井网以外的流体。这会进一步降低产出液中示踪剂的浓度。

在研究示踪剂流动理论和示踪剂测试结果的分析方法时, 要定量应用上述概念。下面我们首先讨论几何形状的影响。

1. 几何形状的影响

几何形状的影响可以用井网见示踪剂曲线(类似于图1(b)中的曲线)表示。对于任何一种规则的井网来讲, 由于流线是一定的, 所以这些曲线也是一定的。见给定流线的时间仅是从注入井到生产井的线性积分, 而且这个时间可能与注入体积有关^[1]。不同井网见示踪剂曲线如图3所示。

下一步是用无因次注入体积将这些见示踪剂曲线相关成单一的曲线（见图4）。在该图上只示出一条曲线，是因为尽管得到这些曲线的椭圆积分有些不同，但相关的结果十分相近，以致于示出许多曲线就无法彼此互相区别开来，所研究的井网有：五点井网、七点井网、各种d/a比值的对直行列井网和交错行列井网。这一相关曲线符合下面的经验方程：

$$f_D = 1 - 0.5 [e^{-1.810(V_{PD})^{0.530}} + e^{-0.715(V_{PD})^{0.972}}] \quad (1)$$

式中 f_D 为产出液中驱替流体的分流量，用小数表示。无因次孔隙体积的定义如下：

$$V_{PD} = \frac{V_D - (V_D)_{bt}}{1 - (V_D)_{bt}} \quad (2)$$

式中 V_{PD} ——无因次注入孔隙体积；

V_D ——注入的孔隙体积；

$(V_D)_{bt}$ ——见示踪剂时注入的孔隙体积。

正如我们将在后面看到的，在相关不同井网中示踪剂的流动性质时，这个相关式是非常有用的。但在考虑如何估算采收率时，相关式本身也是很重要的。因为这个相关式对所研究的所有规则井网，包括具有不同几何形状和波及系数的井网，都十分有效，因此，完全可以假设它适用于任何一种平衡的井网。由于分流量曲线以上的积分是波及的面积，看来，该相关式还是一个预测任何一种注入方案的采收率的快速方法。预测时，只需要计算每口生产井见到驱替流体的时间，而当流度比近似等于1时，这个计算十分容易。下面我们接着考虑流线内的混合特性。

2. 流线内的混合

当少量示踪剂在一条流线内流动时，按照扩散方程，示踪剂会被稀释。如果沿流线的平均距离是 $\bar{s}$ ，我们要确定离注入井距离为 s 处的示踪剂浓度，那么，浓度可定义如下：

$$\frac{C(s)}{C_0} = \frac{W(\bar{s})}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp \left[-\frac{(s-\bar{s})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

式中 $C(s)$ ——在距离 s 处的浓度；

C_0 ——注入时的浓度；

$W(\bar{s})$ ——在距离 $\bar{s}$ 处未稀释示踪剂段塞的宽度；

σ ——标准偏差。

标准偏差 σ 是在距离 $\bar{s}$ 处示踪剂混合量的量度。Abbaszadeh-Dehghani^[2]曾证明， σ 可以用一个线性积分来定义如下：

$$\sigma^2(\bar{s}) = 2\alpha v^2(\bar{s}) \int_0^{\bar{s}} \frac{ds}{v^2(s)} \quad (4)$$

式中 $v(s)$ ——在距离 s 处的流速。

3. 综合考虑混合作用与波及的面积

每条流线中发生的混合可以与见到每条流线的的数据结合起来，对均质井网得到一条总的见示踪剂曲线。这要通过应用复合积分法来完成。要将方程（3）中的距离变量变成注入体积变量，将产出液中示踪剂的浓度变成无因次浓度，是很方便的。例如，对于一个交错行列井网来说，这个复合积分变为：

$$\bar{C}_D = \frac{4\sqrt{K(m)}K'(m)}{\pi^2\sqrt{\pi}} \int_0^{\pi/4} \frac{\exp \left\{ -\frac{K(m)K'^2(m)}{\pi^2 Y(\psi)} \frac{a}{\alpha} [(V_D)_{bt}(\psi) - V_D]^2 \right\} d\psi}{\sqrt{Y(\psi)}} \quad (5)$$

式中 $K(m), K'(m)$ ——第一类互补椭圆积分;

a ——同类井之间的距离, 英尺;

α ——混合常数, 英尺;

$(V_p)_{bt}(\psi)$ ——在见到流线 ψ 时注入的孔隙体积;

V_p ——注入的孔隙体积;

ψ ——所考虑的流线。

在这个方程中, 函数 $Y(\psi)$ 是当速度与流线相关时, 解方程(4)的线性积分得到的一个超椭圆积分⁽²⁾。无因次浓度 $\bar{C}_D$ 的定义如下:

$$\bar{C}_D = \frac{\bar{C}}{\bar{C}_o F_T \sqrt{a/a}} \quad (6)$$

式中 $\bar{C}$ ——产出液中示踪剂的浓度;

F_T ——注入示踪剂段塞的大小, 占孔隙体积的百分数。

解方程(6)就能得到见示踪剂曲线, 如图5所示, 即为 $d/a=1.5$ 的交错行列井网的这种曲线。对于这种井网来说, 见示踪剂时的波及效率发生在注入孔隙体积为0.85处。注意, 所有的曲线都显示在注入孔隙体积小于0.85处见示踪剂, 而峰值在注入孔隙体积大于0.85处, 如图2(b)①所示。曲线的形状取决于以 a/α 表示的混合量的相对大小。

对其它的井网也可看到类似的解和特性。如图6所示, 就是五点井网、对直行列井网和交错行列井网的求解的结果。得到这些曲线的方程在形式上与方程(5)类似, 只是它们的积分限和(或)椭圆积分值不同而已。

4. 考虑油藏的各个分层

当油藏中有几个互不连通的层时, 示踪剂产量曲线是每一层示踪剂产量的总和。注入每一层中的示踪剂量取决于该层的 kh 值与整个油藏的 kh 值之比, 每一层见示踪剂的时间取决于该层的 k/ϕ 值。

通过假设每一层的渗透率并考虑一个非线性优化程序, 可以用上述概念将一条实际见示踪剂曲线与一条计算曲线相拟合, 用多次回归分析法求得数据的最佳拟合, 这样做可以求得每一层的实际渗透率和厚度的最佳近似值。这一方法是Abbaszadeh-Dehghani^[2]提出的, 而且应用效果很好。

图7中的实线表示在有四个分层的油藏中一个五点井网的理论曲线, Abbaszadeh-Dehghani用出现明显峰值时的体积(看图中X轴上的箭头), 估算了各层的渗透率。然后, 他用优化程序求得了数据的最佳拟合, 图上用圆圈表示。在图中还画出了用优化程序得到的实际峰值的位置。这些峰值在X轴上用虚线表示。注意, 这些峰值与起初选取的峰值不同。然而, 它们与用来作理论曲线的各值非常接近, 最大差别为0.01%。

上述结果表明, 了解和定量计算示踪剂流动结果的理论已经建立。但它能否用来分析现场得到的结果, 还有待证明。

三、现场测试结果分析

Conoco^[3]在一个已经水驱到经济极限的重油油藏中进行现场示踪剂测试, 测试时注入硫

①似应为图5所示。——校者

氰酸铵作示踪剂,井网的布置及其重要特性如图8所示。要特别注意测试的井网是不平衡的,在分析示踪剂测试结果时,这一点十分重要。

示踪剂产量曲线见参考文献[2]和[3]。简单地讲就是,井A和井D产出大量示踪剂,井C产出的量要少得多,而且见示踪剂的时间也比井A和井D晚。在一个月的测试过程中,井B未产出示踪剂。

要分析这次(或任何)测试结果,必须估算从注入井流到每口生产井的相对体积流量。为此,可以通过观察每口生产井开始见到示踪剂的时间和测试过程中产出的示踪剂总体积来进行。这两个参数能表示流向每口井的相对体积。如果这些井有干扰试井资料,那么也可用这些资料来估算相对的总产量。但是,由于这些井过去没进行过干扰试井,所以只能利用示踪剂测试资料进行分析。

由于井B未产出示踪剂,所以很明显,沿着这个方向的流量很小。取流到井B的流体量为50桶/日左右的任意值。这与井B的实际情况是相符的,即井B至今尚未见到示踪剂,但由于地质评价并未证明该地区有封闭断层,因而仍有一些流体朝井B流动。其余的550桶(水)/日的注入量按其余生产井的产率进行分配,从这些生产井见示踪剂的时间和示踪剂的累计体积产量来看,这样分配也似乎是正确的。这样,假设225桶(水)/日流往井A;120桶(水)/日流往井C;205桶(水)/日流往井D。总共注入200磅硫氰酸铵,那么流入井D的硫氰酸铵量总共为 $(200 \times 205) / 600 = 68.3$ 磅。以此作基础对井D进行分析。

最后评价示踪剂产量曲线,而且还有必要评价由于来自井网以外的产量所造成的稀释效应。在井D中,总产量为240桶(水)/日,而来自注入井的产量为205桶(水)/日。为考虑这个问题起见,将观察到的浓度乘以240/205,而将体积除以240/205,假如这个井网完全是平衡的,那么这个比值应为4/1。在现场,这样的比值确实是罕见的。

在对示踪剂测试进行评价之前,进行所有上述的流动分析是很关键的。如果不进行这种分析,即使每一层的相对k和h值将是正确的,但其绝对值与井网象限内的平均值相比可能出入很大。

一旦确定了流到每口井的相对流量,就可以用回归程序选取示踪剂所“见到”的各层的渗透率和厚度最佳值。图9和10就是通过优化得到的两条曲线。图9是用7个分层拟合得到的,图10是用10个分层拟合得到的。注意这两次拟合都得到了令人满意的好结果。在这两张图中,X轴上的箭头表示开始进行优化时选择的峰值位置,虚线则表示优化程序选取的峰值位置。

优化程序得到的各层的渗透率和厚度见表1。表中有几个重要地方需要注意。首先,尽管每层的渗透率和厚度值不同,但用示踪剂测试资料估算的总厚度几乎相等。7个分层的总厚度与10个分层的总厚度的差别只有1.5%。示踪剂测试涉及的厚度占总厚度的14%。

其次在7个分层和10个分层两种情况下,示踪剂测试估算的总kh值也几乎相等,约为油藏总kh值的三分之一,两者相差仅1.1%。事实上,如果按Schmalz和Rahme[4]的方法作 Σkh 与 $\Sigma h\phi$ 的关系曲线,那么,两种情况下的曲线将几乎相同。

最后,还要注意,在油藏的总厚度中示踪剂测试只能探测一小部分厚度,而它所“见到”的油藏kh值部分要大得多。因此,这个或任何一个示踪剂测试就更突出了渗透率较高的分层。示踪剂测试极少持续足够长的时间以研究油藏的大部分厚度。有人可能认为,这一限制降低了测试结果的使用价值,但从下面的分析可以看出,这一看法是不正确的。

表 1 在油藏分别为 7 个分层和 10 个分层的情况下,在井 D 中进行示踪剂测试计算得到的各层的渗透率和厚度^①

分 层 号	7 个 分 层		10 个 分 层	
	厚度(英尺)	渗透率(毫达西)	厚度(英尺)	渗透率(毫达西)
1	0.0602	4890	0.0439	4926
2	0.1824	4320	0.0530	4531
3	0.3247	4045	0.1342	4285
4	0.2036	3712	0.2716	4070
5	0.2241	3492	0.1028	3902
6	0.3357	3249	0.1839	3881
7	0.3351	2928	0.2050	3490
8			0.3256	3253
9			0.2910	2947
10			0.0811	2768

① 此表中的厚度和渗透率是在孔隙度 $\phi=0.26$ 和 $\Sigma kh=18,000$ 毫达西·英尺的情况下计算得到的。

将 10 个分层情况下的结果绘制在 Dykstra-Parsons 对数概率图上,如图 11 所示。图中横坐标为 50% 处的圆圈表示的是平均渗透率。一般说来,这应是干扰试井求得的渗透率值,并且这一点很重要,因为它“锚住”了整个曲线。画出如图所示的直线,可以估算出 Dykstra-Parsons 渗透率变异系数,对于这个有 10 个分层的油层,变异系数为 0.41。不知道低渗透层的各值是无紧要的,因为在渗透率预测中,主要影响生产历史的是与平均值相比渗透率较高分层的相对大小和相对渗透率。

观察一下这里介绍的整个分析结果与后来在这一井网进行注热水现场试验所得结果是否一致是很有意义的。从 Martin 等人^[5]得到的图 12 中至少可以看到这一问题的部分答案。热水驱热前缘的面积波及方式与示踪剂测试得到的相对流量值拟合得很好,而且, Martin 等人讨论的水窜情况与由示踪剂测试结果得到的渗透率分布也吻合得很好。

四、油藏的分层性问题

这里讨论的油藏分层模式是由许多个互不连通的层组成的通常称为“多层饼”模式的概念为基础的。尽管许多砂岩油藏在地质上似乎符合这个模式,但是,更多的砂岩油藏是不符合的,而且实际上,所有的碳酸盐岩油藏都不符合这个模式。然而,仍然可以将一个实际油藏看作是多层分的。下面考虑图 13 中系统的图形。

图 13(a)所示的是一个四分之一五点井网,图上并排表示出两个完全不同的系统。由于井网的对称性,流度比为 1 时的生产历史与两个彼此上下分布而互不连通的分层形成的系统的生产历史完全一样。

图 13(b)更为复杂。图上画出了具有三种不同渗透率的五个不同层带。对于这个系统,让我们考虑一下图 4 所示并在前面讨论过的通用见示踪剂相关曲线的含义。基本思想是,任何一个固定的流动系统都应该用图 4 中的曲线进行相关。这样,就可以希望图 13(b)所示的复杂流动系统能用具有不同渗透率的 3 个(或更可能是 5 个)不同的分层来模拟。很可能,用来拟合

图13(b)系统生产历史的准多分层系统各层的表观渗透率与各层带的实际渗透率不同。但这一点并不重要。重要的是实际生产历史能否很好拟合。而图4的相关式表明它可以做到这一点。我们回头再看图11, 当对现场试验发现 Dykstra-Parsons 渗透率变异系数为 0.41 时, 人们应当记住, 能得出这一渗透率变异系数的油藏可能实际上并不是由多分层组成的, 只不过它表现得像个多分层油藏而已。

1. 试井中的渗透率分层性

最近, Mishra 和 Ramey^[6]针对一个有定压外边界的五点井网系统, 研究了渗透率分层性对试井和示踪剂测试结果的影响。定压外边界是在平衡条件下注采任何一个系统的正确边界条件。

图14是Dykstra-Parsons渗透率变异系数为0.34时一个10分层系统的示踪剂产量曲线。注意, 从图上可以看出每一层的效应, 而通常在实际油藏系统中每一层的峰值没有这么明显。还要注意, 首次见示踪剂的时间要比注入孔隙体积为0.72的时间小得多, 这确实象是一个多分层油藏的表现。

图15对具有不同渗透率变异系数(分别为0.34和0.54)的两个油藏给出了压力恢复试井曲线。将示踪剂测试结果同这些曲线进行比较, 尽管在生产时间较长时, 它们之间有一些差别, 但试井结果的分析并没有提供油藏是多分层的证明(据文献报道, 对封闭系统出现有峰值的压力恢复曲线)。还要注意, 图中所有的数据都表现出了能给出油层平均渗透率的正确斜率。简而言之, 在注采平衡的情况下, 不要指望通过试井发现油藏的分层性。

2. 裂缝系统

许多储层系统含有多重裂缝, 特别是在地热储层和正考虑用来处置放射性废物的储层中尤其如此。研究裂缝型系统的最好的论著可能是在地下水和地热的文献中^[7,8,9]。

许多油藏也是裂缝型的。如果在这种油藏中进行井间示踪剂测试, 那么就会过早见到示踪剂, 随后是一个十分漫长的微量示踪剂的产出过程。如果用本文讨论的多分层模式来分析测试结果, 那么就会得出错误的结论。如果这种分析得到一个渗透率非常高、厚度非常小的层带, 那就表明可能有裂缝存在。然而, 这样的数值结果是毫无意义的。裂缝的实际渗透率比计算值大, 而实际宽度比计算值小。这是示踪剂在通过裂缝的过程中扩散进入基质岩块又流出基质岩块造成的结果。

Horne及其合作者^[7,8]提出了表示这种流动性质的两个模式。如果系统中只有一条或两条裂缝, 那么可以用这两个模式计算裂缝参数。迄今为止, 研究过这类流动系统的人中, 仍无人能解决具有多重裂缝而且有几何形状影响的系统的问题。正如我们已经看到的, 这些影响十分重要, 现在更多的研究正在进行, 以求解决这些问题。

五、结 语

本文没有试图讨论示踪剂在油藏中流动期间发生的吸附或化学反应问题。只要示踪剂大致遵守不吸附、不反应的规则就行了, 因为要确定示踪剂在油藏中的吸附量和反应量几乎是不可能的。应用效果好而且价格相对便宜的化学示踪剂有卤化物和硫氰酸盐类。一般来说, 最好的示踪剂是半衰期比较长的放射性示踪剂, 用这个示踪剂比用其它示踪剂便宜得多, 这是因为分析这种示踪剂测试结果的技术灵敏度高, 而且, 只要使用得法, 即可避免放射性造

成的危险。

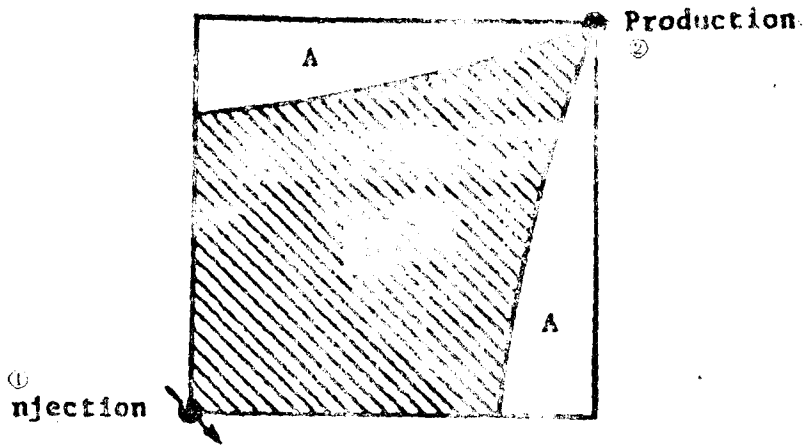
一般地,若用井间示踪剂测试法分析油藏非均质性,从定量诊断方面来看,其结果是十分有用的。井间示踪剂测试应当与不稳定试井(包括单井和多井)结合起来进行。这些不稳定试井能给出油藏的平均性质,并帮助判断是否存在渗透率各向异性问题。这两种测试(示踪剂和压力)方法互相取长补短,从而可以较好地了解油藏特性的全貌。

目前,示踪剂测试理论只适用于流度比等于1的流动系统。尽管由于所研究的系统的流度比接近于1,因而流度比的限制并不像我们想象中的那样重要,但是,仍然有必要将这种分析方法推广到流度比不等于也不接近1的流动系统。这个工作看起来容易,做起来却很难,因为处理这种流动系统的唯一方法是某种数值法,而且需要极高的精度。通常,在进行数值计算时,认为按百分之几计算面积涉及效率就可以了。而为了对示踪剂曲线作适当的评价,我们首先要有与波及面积微分有关的分流量曲线,然后,必须将分流量曲线求导,以计算见示踪剂曲线。这样的计算要求有很高的精度。

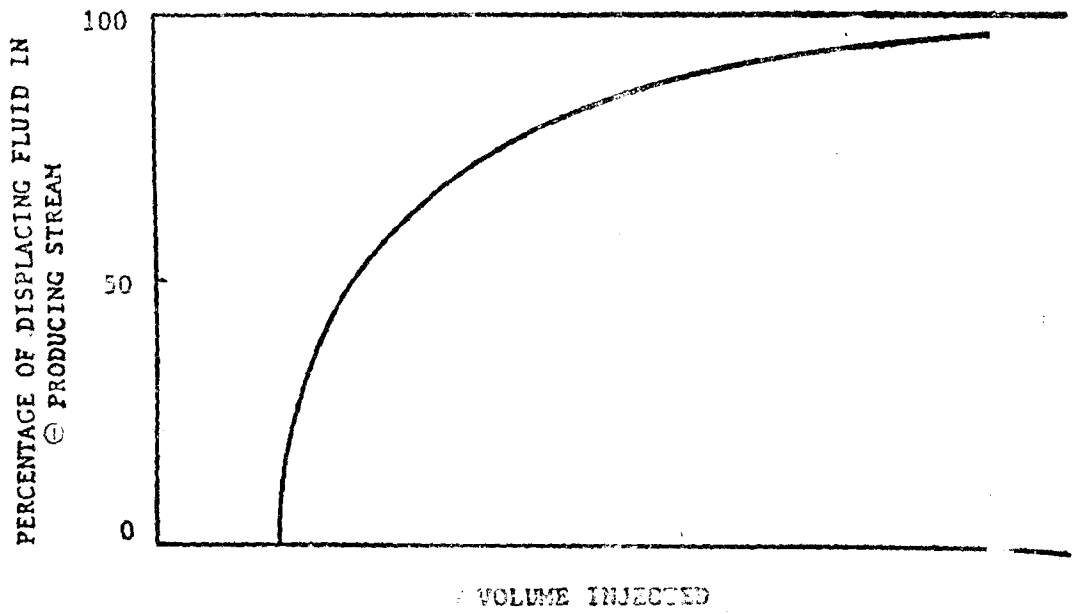
当油藏中的大量流量是来自裂缝的时候,本文描述的分析技术是不适用的,尽管通常可以用这种分析技术对裂缝进行定性描述。最近,分析裂缝中示踪剂流动性质的方法有许多进展,我们期望不久的将来,在这方面能取得更大的进步。

参 考 文 献

1. Abbaszadeh-Dehghani, M. and Brigham, W.E.: "Analysis of Well-to-Well Tracer Flow to Determine Reservoir Layering," *J. Pet. Tech.* 36, No. 4 (October 1984), 1753-1762.
2. Abbaszadeh-Dehghani, M.: "Analysis of Unit Mobility Ratio Well-to-Well Tracer Flow to Determine Reservoir Heterogeneity," PhD dissertation, Stanford U., Stanford, CA (August 1982); Also SUPRI TR-36 (February 1983) (DOE/ET/12056-34).
3. Brigham, W.E. and Smith, D.H., Jr.: "Prediction of Tracer Behavior in Five-Spot Flow," paper SPE 1130 presented at Production Research Symposium, Tulsa (May 3-4, 1963) and 40th Annual SPE Fall Meeting, Denver, (Oct. 3-6, 1965).
4. Schmalz, J.P. and Rahme, H.D.: "The Variation of Waterflood Performance With Variation in Permeability Profile," *Prod. Monthly* 15, No. 9 (1950) 9-12.
5. Martin, W.L., Dow, J.N., Powers, M.L., and Steves, H.B.: "Results of a Tertiary Hot Waterflood in a Thin Sand Reservoir," *J. Pet. Tech.* 20, No. 7 (July 1968) 739-750.
6. Mishra, S. and Ramey, H.J., Jr.: "A Comparison of Pressure Transient and Tracer Concentration-Time Data for Layered Reservoirs Under Injection," paper SPE 14170 presented at 60th Annual Technical Conference and Exhibition of SPE, Las Vegas (Sept. 22-25, 1985).
7. Jensen, Clair L. and Horne, Roland N.: "Matrix Diffusion and its Effect on the Modeling of Tracer Returns From the Fractured Geothermal Reservoir at Wairakei, New Zealand," *Proceedings 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University (December 1983), 323-329.
8. Walkup, Gardner W., Jr.: "Forecasting Thermal Breakthrough of Rejected Water Using a Dispersion-Retention Model for Tracer Test Interpretation," *Transactions 9. Geothermal Resources Council Meeting*, Kona, Hawaii (August 1985) 369-374.
9. Neretnieks, I., Ericksen, T. and Tahtinen, P.: "Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and Their Interpretations," *Water Resources Research* 18, No. 4 (1982) 849-858.



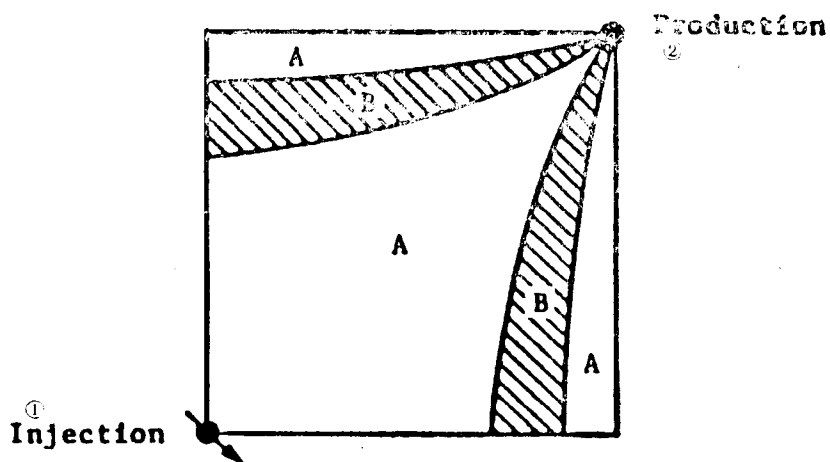
(a)前缘位置
①注入井；②生产井



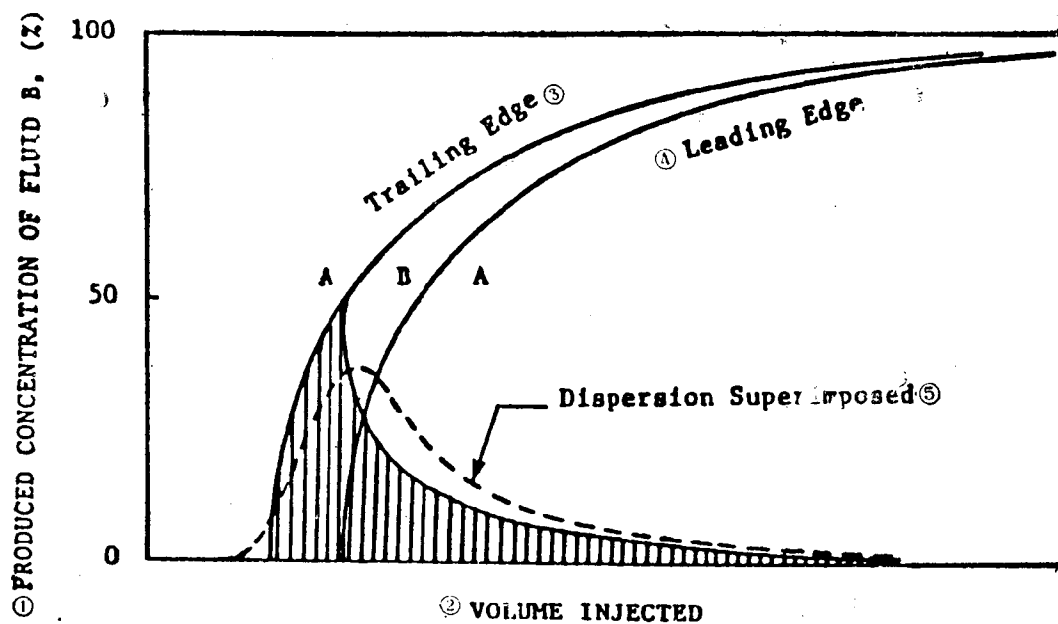
(b)见驱替流体的曲线

①产出液中驱替流体的百分比；②注入体积

图 1 在流体之间不发生混合的情况下，一种流体驱替另一种流体时的前缘位置和见到驱替流体的曲线



(a) 前缘位置
① 注入井；② 生产井



② VOLUME INJECTED

(b) 见流体B的曲线

① 产出液中流体B的浓度，%；② 注入体积；③ 后缘；④ 前缘；⑤ 加上分散混合的影响

图 2 对流对见到小段塞流体B的影响

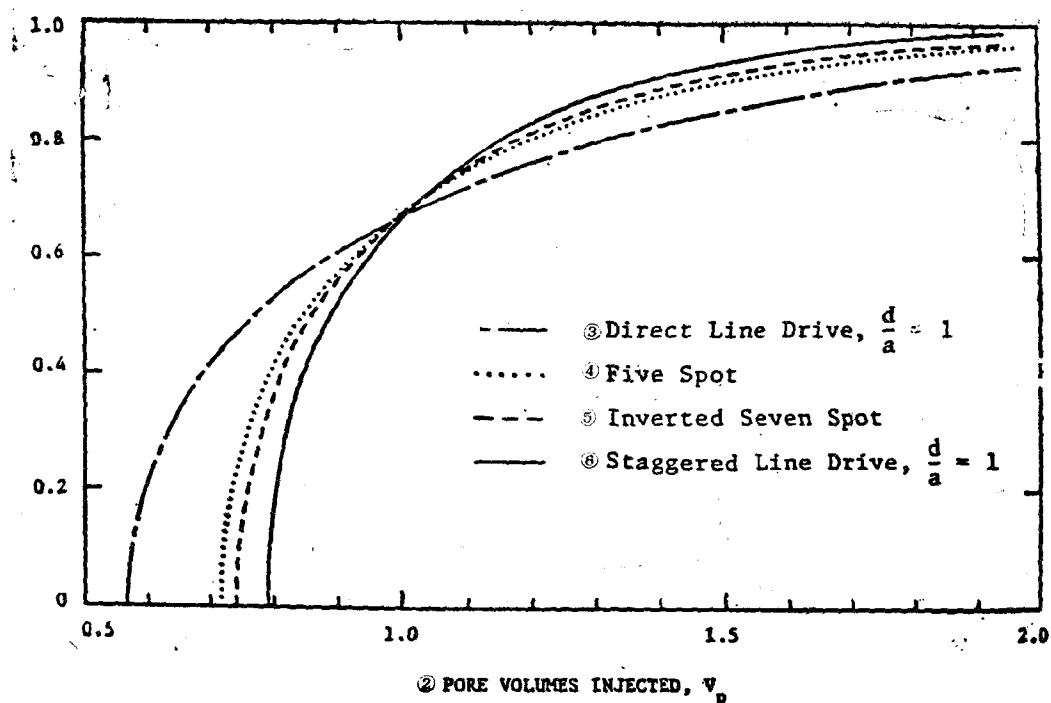


图 3 流度比等于1时开发系统各种井网见示踪剂曲线
①产出液中驱替流体的分流量, f_D ; ②注入量, 孔隙体积的倍数, V_p ; ③对直行列井网, $d/a=1$; ④五点井网;
⑤反七点井网; ⑥交错行列井网, $d/a=1$

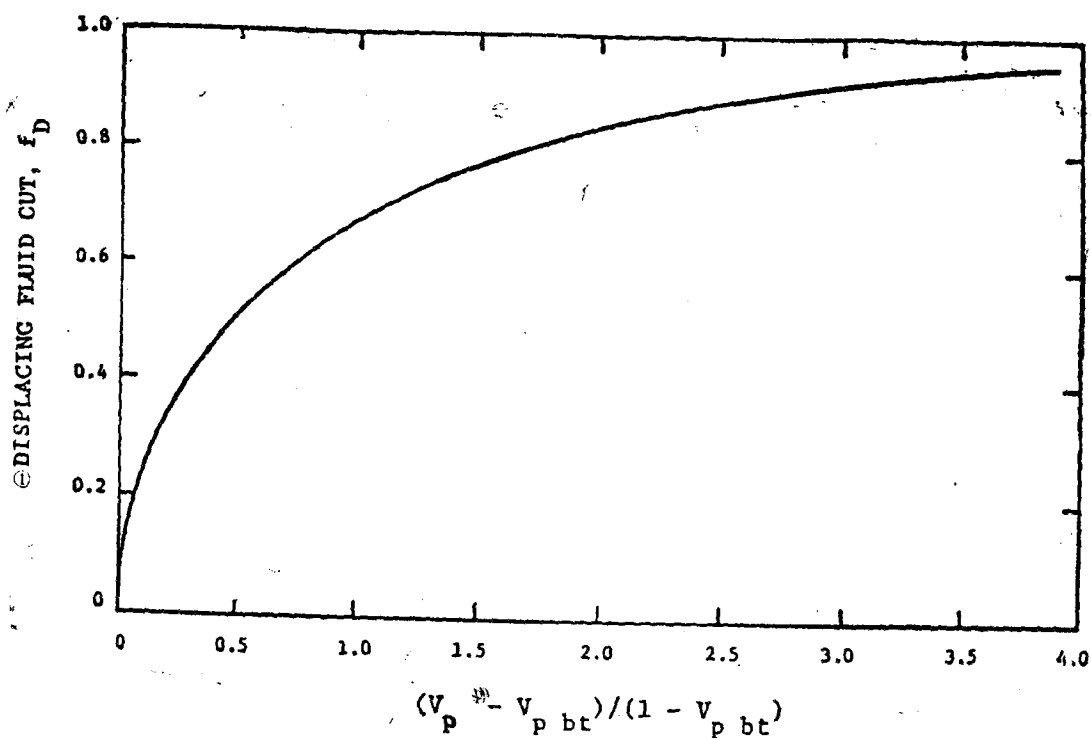


图 4 流度比等于1时开发井网见示踪剂曲线的相关关系
①产出液中驱替流体的分流量, f_D

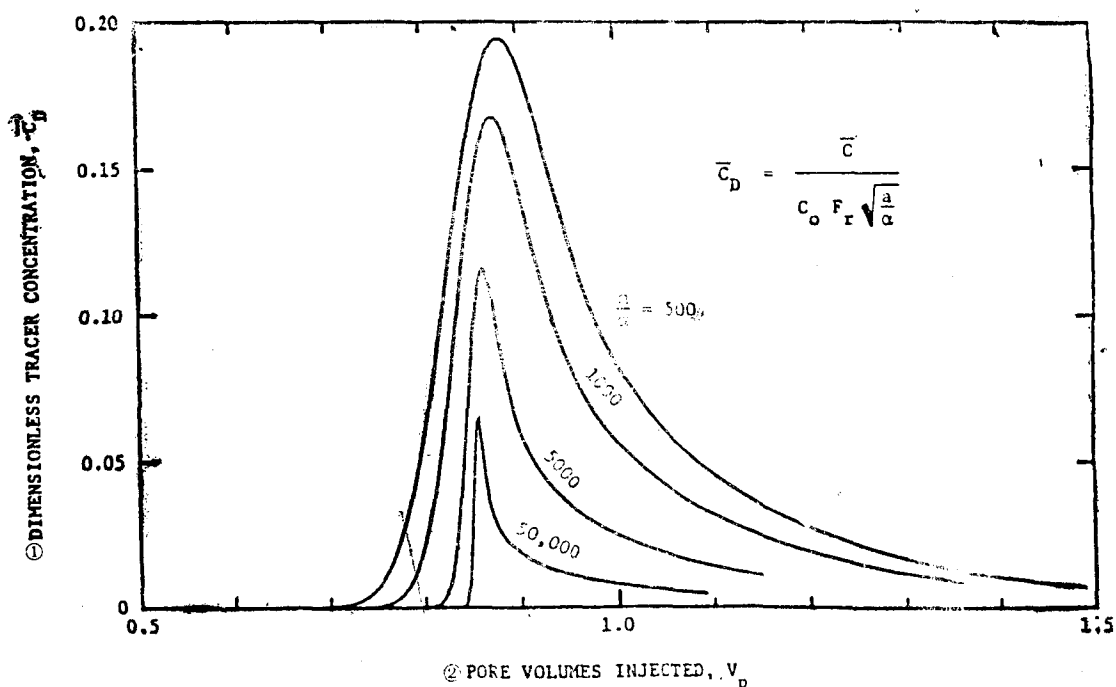


图 5 无因次示踪剂浓度与注入孔隙体积的关系曲线—— $d/a=1.5$ 的交错行列井网
①无因次示踪剂浓度 $\bar{C}_D$ ；②注入的孔隙体积， V_p

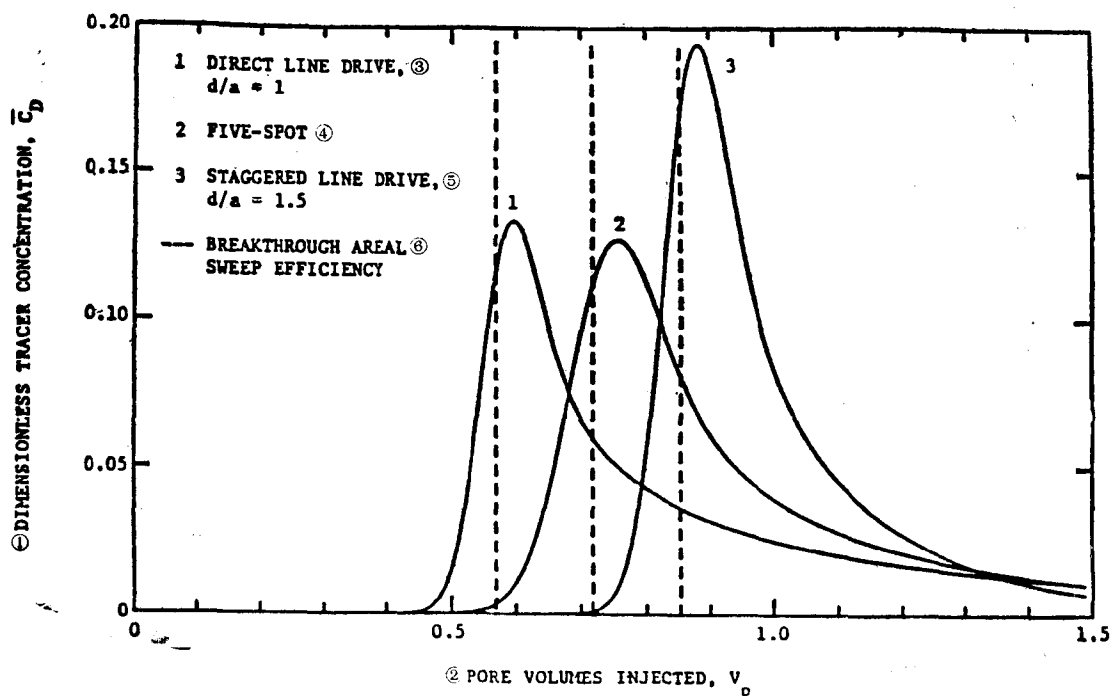


图 6 $a/d=500$ 的各种均质井网的示踪剂产量曲线

①无因次示踪剂浓度， $\bar{C}_D$ ；②注入孔隙体积， V_p ；③对直行列井网， $d/a=1$ ；④五点井网；⑤交错行列井网， $d/a=1.5$ ；⑥见示踪剂时的面积波及系数

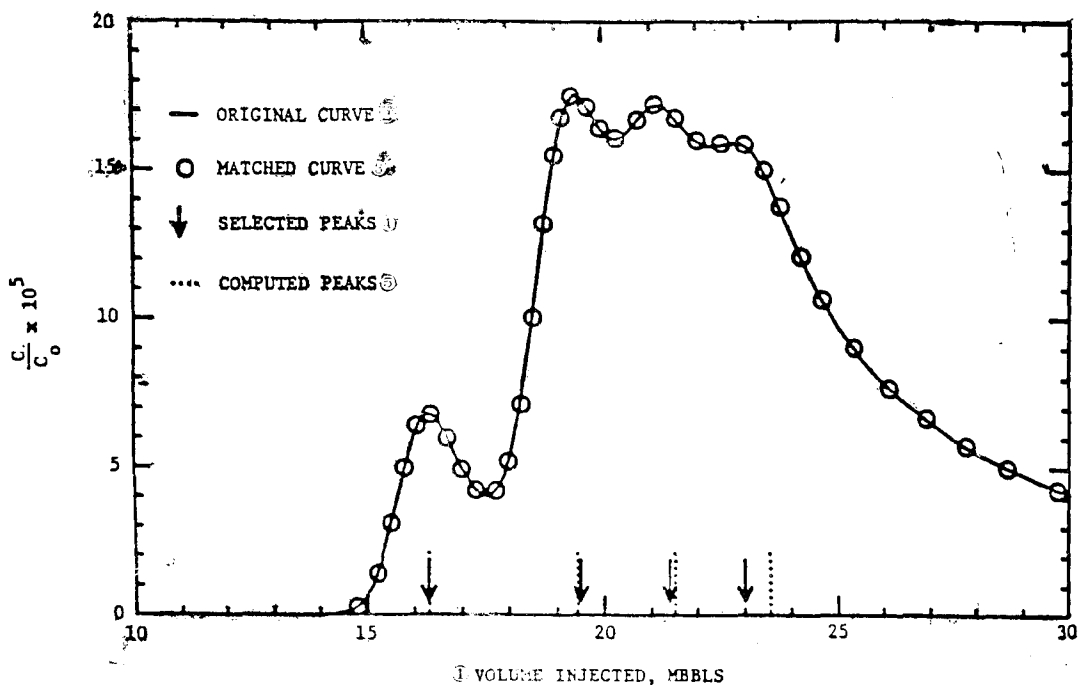


图 7 对四层系统用优化程序求得的拟合曲线, “第二个例子”
 ①注入体积, 10^6 桶; ②原始曲线; ③拟合曲线; ④选择的峰值; ⑤计算的峰值

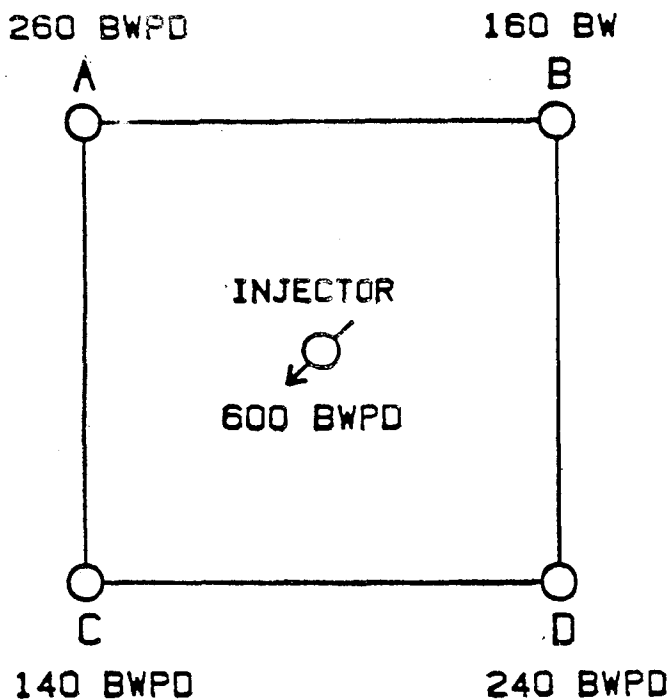


图 8 现场测试的井网示意图和油藏数据
 井网面积=2.5英亩; 生产井间的距离, $a=330$ 英尺; 注入示踪剂的总量=200磅; 油藏有效厚度=12英尺; 平均渗透率=1,500毫达西; 平均孔隙度=0.26; 平均含水饱和度=0.55; 混合常数, $\alpha=0.05$ 英尺;
 五点井网中心为注入井

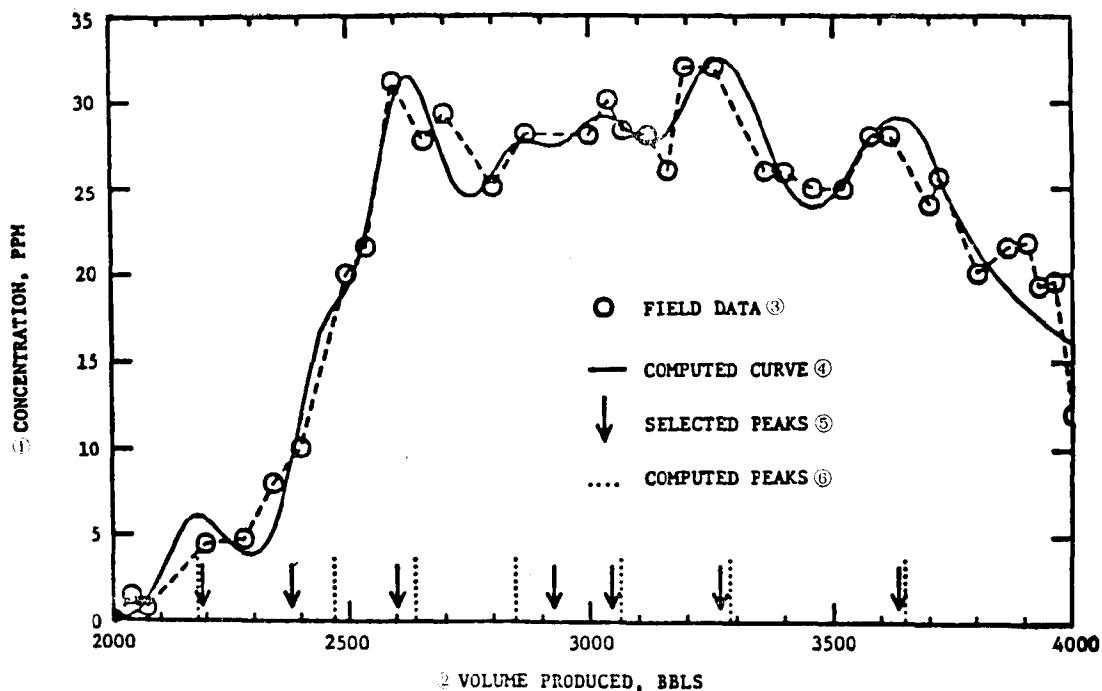


图 9 有7个分层的井D的示踪剂测试资料分析
①浓度, PPM; ②产出体积, 桶; ③现场数据; ④计算曲线; ⑤选择的峰值; ⑥计算的峰值

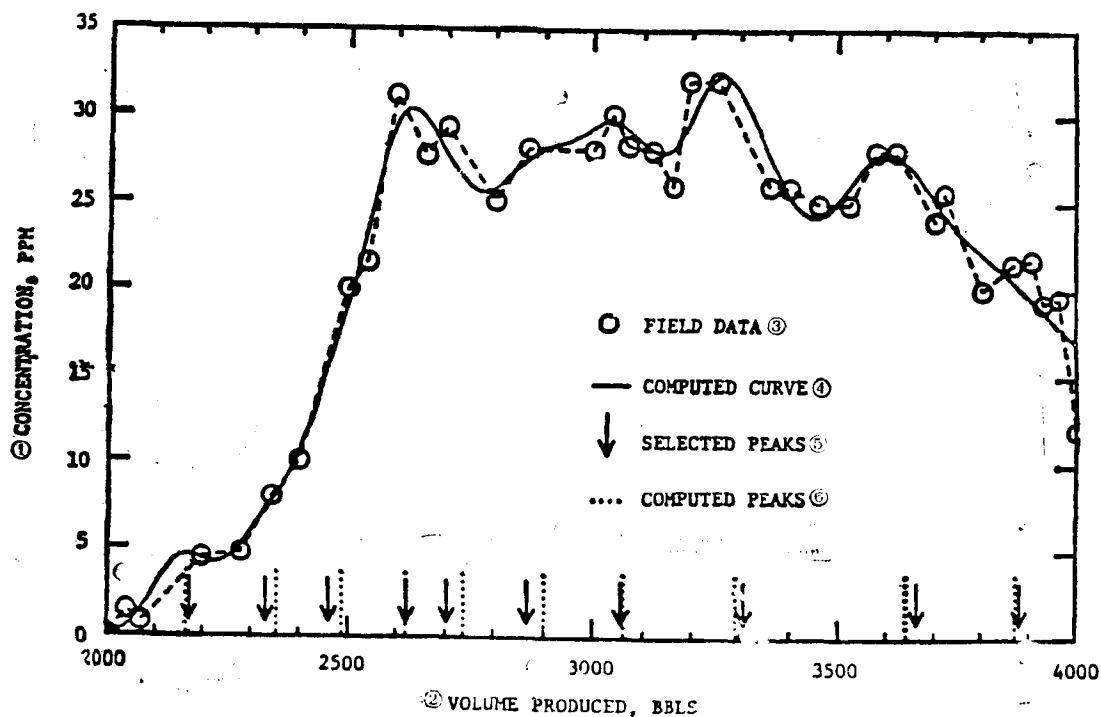


图 10 有10个分层的井D的示踪剂测试资料分析
①浓度, PPM; ②产出体积, 桶; ③现场数据; ④计算曲线; ⑤选择的峰值; ⑥计算的峰值

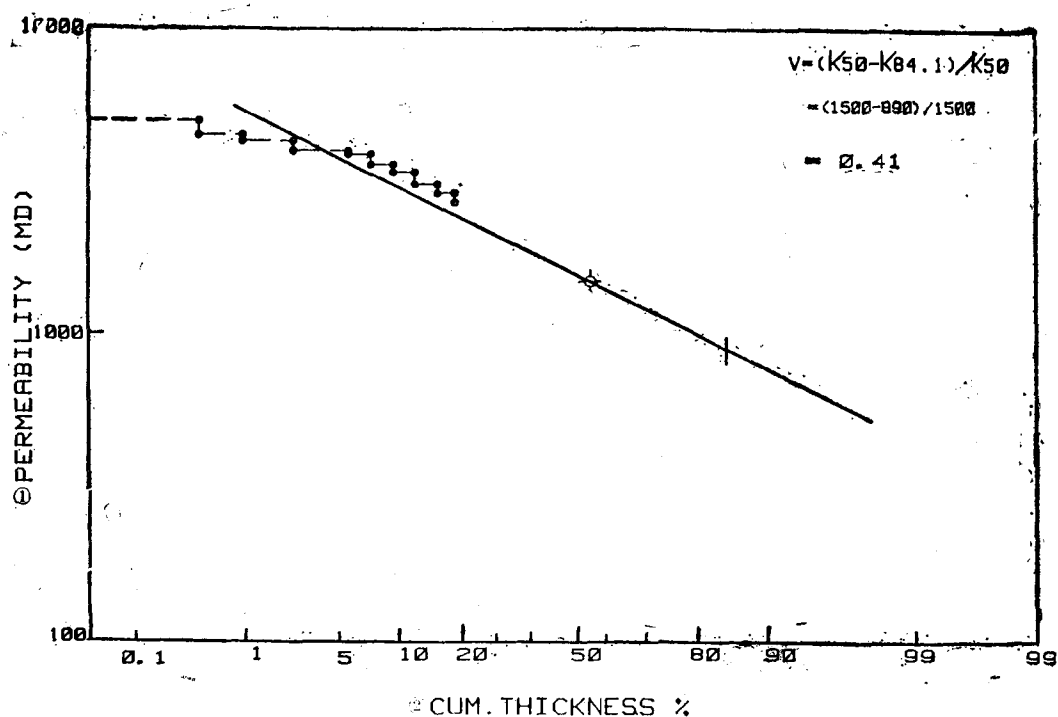


图 11 井D中示踪剂测试结果的Dykstra-Parsons分析
 ①渗透率, 毫达西; ②累计厚度, %

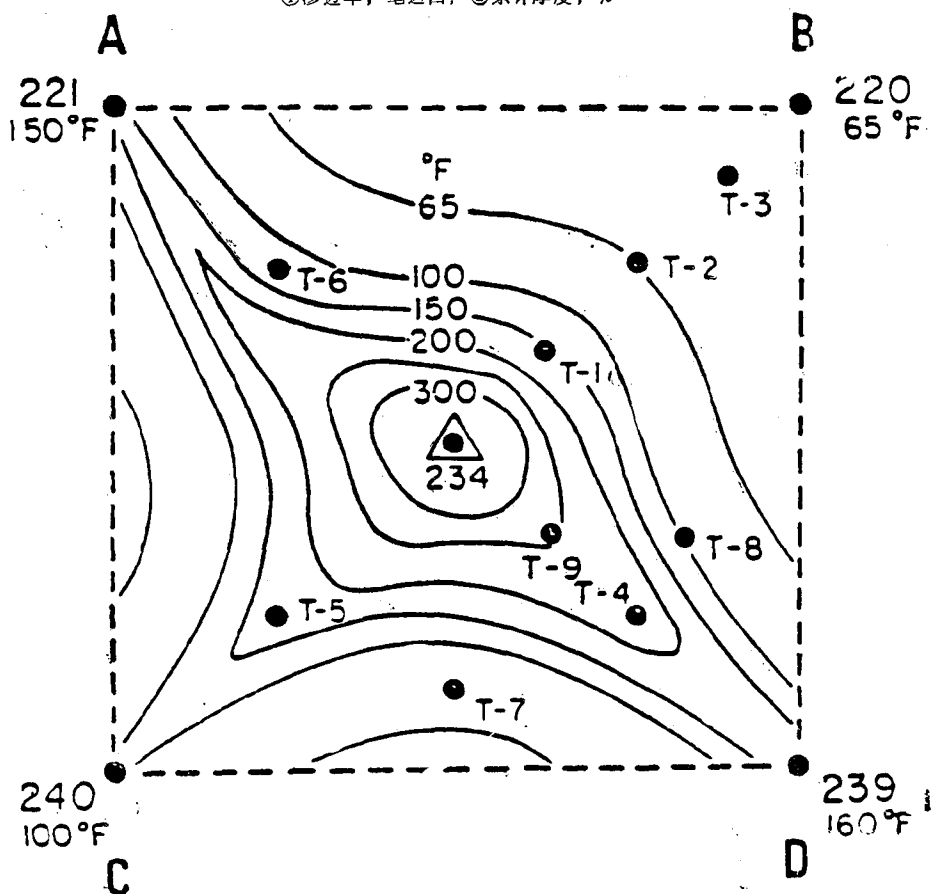
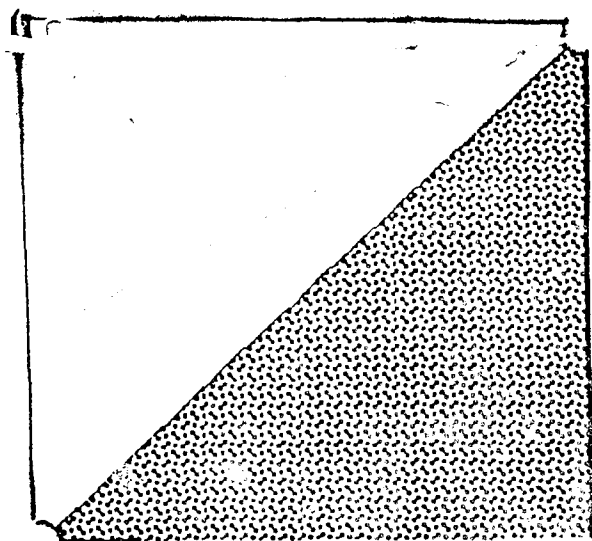
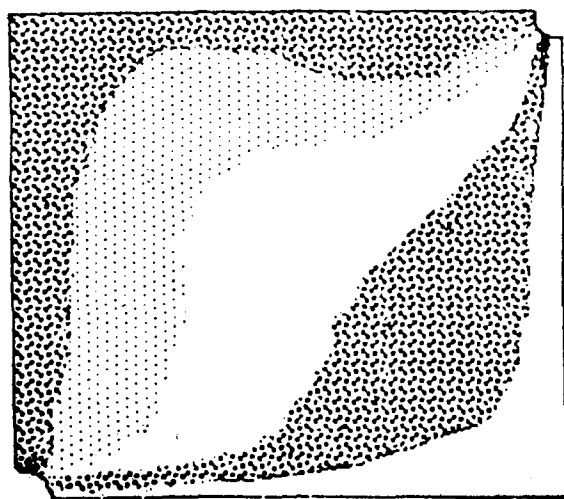


图 12 热水驱过程中砂层平均温度的等温线 (引自Martin等人的论文, 参考文献[5])



(a) 五点井网系统中可能存在的准分层性



(b) 五点井网系统中更复杂的准分层性

图 13 五点井网系统中的准分层性

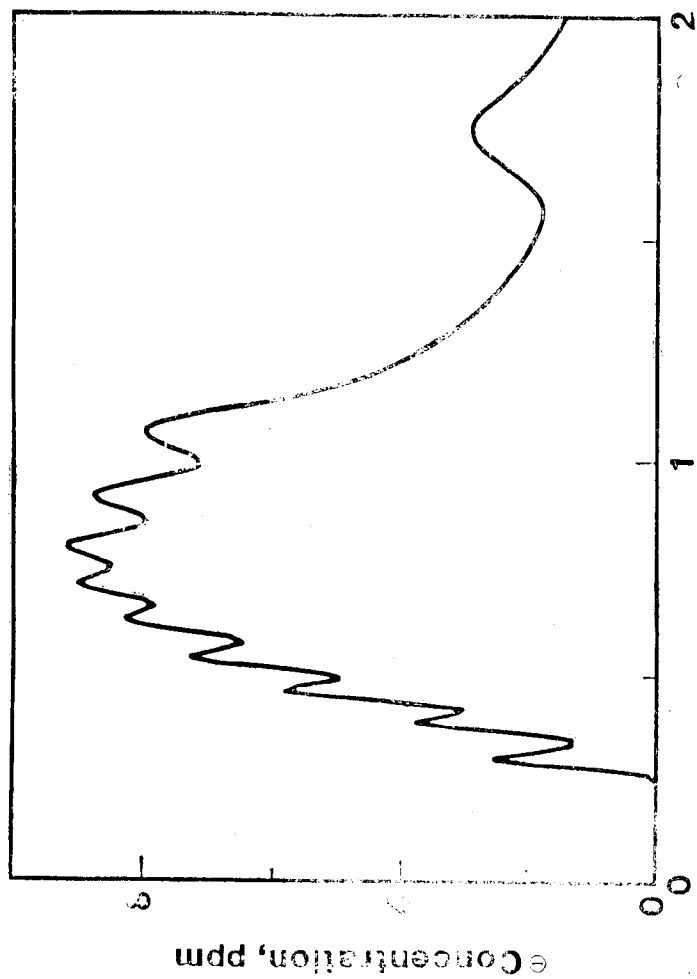


图 14 在渗透率变异系数为0.34、有10个分层的系统中见示踪剂曲线
(引自Mishra和Ramey的论文, 参考文献(6))
①浓度, ppm; ②产出孔隙体积