

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

试论复杂油气田勘探

张 湘 宁

(石油工业部勘探司, 北京)

复杂油气田在油气勘探中占据重要地位。本文将复杂油气田分为四类, 即复杂断块油气田; 复杂岩性油气田; 复杂地层油气田和复杂裂缝油气田。以陆相盆地复式油气聚集区石油地质勘探新理论为基础, 建立适合于复杂油气田勘探的新程序, 划分预探、初探、早期滚动勘探开发和晚期滚动勘探开发四个阶段。运用控制论思想控制勘探系统工程诸环节, 充分有效地综合利用勘探新技术。最终实现以提高复杂油气田勘探效益为目的的最优化勘探。

从 1985 年下半年开始, 世界油价暴跌。与 1985 年相比, 1986 年我国原油出口创汇减少 57.6%, 这对石油工业及整个国民经济的持续稳定发展无疑是一个严重的挑战!

目前, 石油、天然气勘探投资短缺, 唯一的出路就是不断提高勘探经济效益, 否则, 有限的勘探资金, 将无法确保产量稳定上升必需的油气储量大幅度增长, 其结果必然严重影响整个国民经济的发展。如何提高油气勘探经济效益呢? 复杂油气田勘探蕴藏着巨大的潜力!

复杂油气田系指常规勘探方法难以发现、认识的油气田。

一、复杂油气田勘探概况

(一) 复杂油气田勘探的地位

随着我国油气勘探程度的提高, 复杂油气田勘探比例与日俱增, 其储量所占比重越来越大(表 1)。由于复杂油气田的勘探风险远远超出简单油气田, 导致复杂油气田勘探初

表 1 全国新增储量中各种类型油田所占比例

Table 1 The percentages of field types in new added reserves

油田类型 时间	简单背斜油田	复杂断块油田	复杂地层岩性油田	复杂裂缝油田	复杂油气田总计
1949—1984	41%	43%	5%	9%	57%
1985	18.6%	34%	40%	7.4%	81%
1986	33.7%	33%	31%	2%	66%

本文于 1987 年 11 月在北京由中国地质学会召开的首届全国青年地质科技工作者学术讨论会上被评为大会优秀论文。作者张湘宁, 男, 1962 年 11 月生, 1983 年毕业于西南石油学院, 获学士学位。

本文由胡亚昌编辑。

期整个油气区勘探经济效益急剧下降。

纵观世界,油气勘探高速发展,简单背斜圈闭油气田的主导地位也正在逐渐削弱,代之以复杂油气田的大量出现。例如勘探程度较高的美国,在可采储量为 1400 万吨以上的 321 个油气田中,地层与岩性油气田就有 70 个,占 21.8%。可见随着勘探程度提高和技术的发展,复杂油气田的勘探将占据越来越重要的地位。

(二) 我国复杂油气田勘探的地质背景

中国含油气盆地分布广、类型多,油气资源十分丰富。特别是陆相含油气盆地往往以一个沉积凹陷为单元作为一个复式油气聚集区。由于近物源、多物源,并且物源方向和沉积速度变化频繁,因此,形成了各种复杂岩性圈闭。在漫长的地质历史发展过程中,因区域构造变动强烈,陆相湖盆升降频繁,导致区域或局部的地层超覆、尖灭及区域性不整合^[1],从而形成大量的复杂地层圈闭。自中生代以来,由于太平洋板块向西南俯冲潜没,致使东部地区断块活动剧烈,尤其是我国主要产油区渤海湾盆地,历经多次断块活动,形

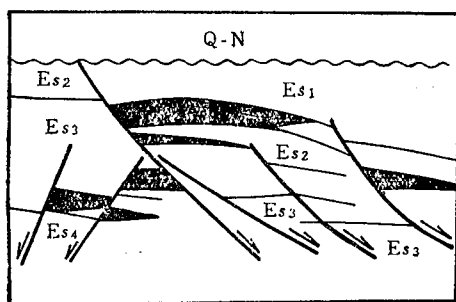


图 1 复杂断块油气田

Fig. 1 Complicated faulted-block oil and gas field

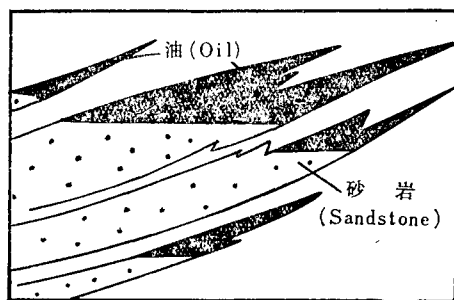


图 2 复杂岩性油气田

Fig. 2 Complicated lithological oil and gas field

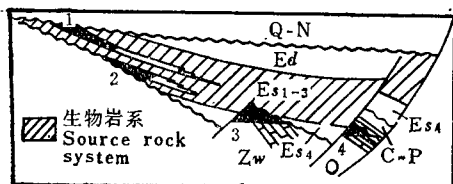


图 3 复杂地层油气田

Fig. 3 Complicated stratigraphic oil and gas field

- 1—不整合圈闭; 2—地层超覆圈闭; 3—“古潜山”圈闭; 4—“古潜山”内部不整合圈闭
1—Unconformity trap; 2—Formation overbure trap; 3—“Buried hill” trap; 4—Unconformity interval “buried hill” trap

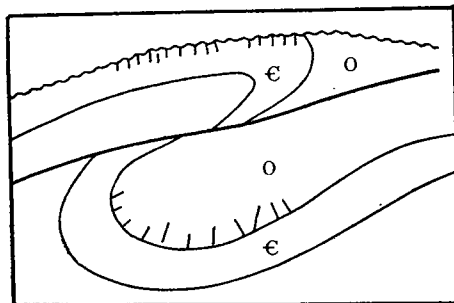


图 4 复杂裂缝油气田

Fig. 4 Complicated fracture oil and gas field

成了众多的复杂断块构造。此外,我国还广泛存在着以复杂裂缝为主的储集条件,即由地壳弯曲变形、区域拉张和剪切、地壳的脆弱带、上覆岩层载荷的剥蚀卸荷、岩石固结收缩以及地震活动等因素形成的裂缝储集体^[2]。这些种类繁多的复杂圈闭都可以在具有雄厚油源岩的物质基础上组合形成各种复杂油气藏。这样,就为我国油气勘探提供了一个十分现实而又非常广阔的领域。从勘探实际出发,根据各类油气藏的特征及在一个复式油气田中的主导地位,可将复杂油气田大致分为四类;即复杂断块油气田(图 1)、复杂岩性油气田(图 2)、复杂地层油气田(图 3)和复杂裂缝油气田(图 4)。

(三) 复杂油气田勘探典型实例的启示

1. 复杂油气田的探索

四川桂花油田是受裂缝和岩性控制的复杂裂缝油田。位于高点的井钻入侏罗系珍珠冲组发生强烈井喷之后,裸眼钻杆投产,最高日产 300 吨。不久,在高点附近 12km² 范围内连接钻井 12 口,加深老井 2 口,结果均未获工业油气流,勘探效益很差。其原因是尚未认识裂缝控制因素,就匆忙密集布井,招致失败。

四川石宝寨气田石宝 1 号井在二叠系长兴组生物礁白云岩获高产气流,当地震测网尚处普查阶段(图 5),没有摸清礁的产状及其分布规律,新布 3 口探井,钻探结果全部落空。

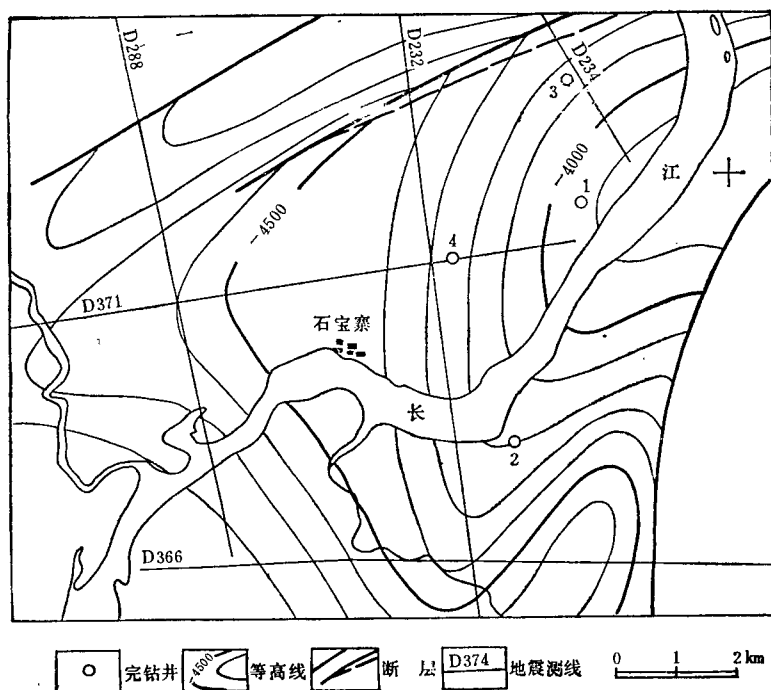


图 5 石宝寨下二叠统构造图

Fig. 5 Shibaozhai lower permian structural map

河北采育地区是砂砾岩锥体油藏组成的复杂岩性油田(图 6),1986 年初桐 28 井首获高产油气流后,新布 3 口探井,有 2 口中途测试获工业油流,紧接着又部署了 11 口井,结果口口无油层。失败的主要原因是没有认识清楚砂砾岩与火山岩体的横向分布特征。

2. 复杂断块油田勘探的启示

八面河复杂断块油田勘探经历了曲折的历程。1964 年开始勘探,但直至 1984 年勘探没有重大突破。1985 年基于济阳坳陷复式油气区斜坡带上油气聚集主要受反向断层和地层超覆因素控制的认识,对本工区进行了 $600 \times 600 \text{ m}$ 数字地震,查明了八面河断裂构造格局,新发现 5 个鼻状构造。1986 年初,布预探井 5 口,第二季度初完井试油。面 1 和面 4 井相继在沙河街组得到高产油流,从而打开了八面河油田勘探局面。

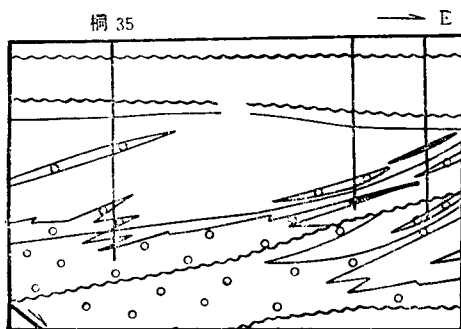


图 6 桐 35 井—桐 101 井油藏剖面图

Fig. 6 Tong35—Tong101reservoir section

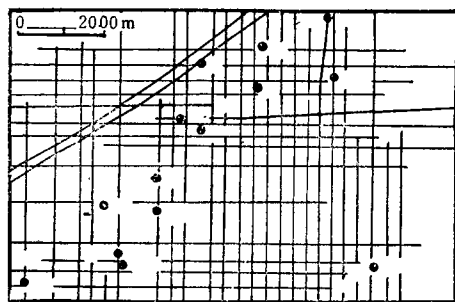


图 7 八面河地震数字测线图

Fig. 7 Baimianhe numerical seismic line

五月份集中 5 个地震队突击完成探区 $300 \times 300 \text{ m}$ 数字地震测网(图 7),同时加强综合录井、测井数字处理、地层测试和地质综合研究,开始整体评价八面河构造带和外围探井的部署。至七月底完钻,评价井 21 口,基本探明了富集区块。

八月,油田即转入滚动勘探开发,集中 21 台钻机,到 1986 年底,完成了 7 个断块基础井网钻井工作。在短短一年内即探明地质储量,又为 1987 年建设原油生产能力奠定了坚实的基础。

勘探正、反两方面的经验教训给我们以重要启示:我们可能用勘探简单背斜油气田的老方法在新地区找到油气田,却很难想象用老方法在老地区找到复杂油气田。我们必须用新思想、新技术和新方法才能开拓新的勘探领域,增加新储量。

二、复杂油气田勘探

(一) 复杂油气田勘探新理论

油气存在于地下是一客观事物,其分布有着不为人们意志所转移的客观规律。我国老一辈地质学家曾经发展了陆相生油理论,导致石油勘探发生了一场深刻的革命。近二十多年来,我国石油勘探工作者通过复杂油气田勘探,特别是渤海湾盆地复式油气田勘探实践总结了一套新的石油地质勘探理论。

断陷盆地中的油气分布是围绕生油凹陷呈环带状展布¹⁾,自内向外依次为凹中油气聚集区;凹边油气聚集区;斜坡油气聚集区;边缘凸起油气聚集区。不同的油气聚集区(带)其油气聚集控制因素及油气藏类型各具特色。

复式油气聚集区(带)的石油地质特征十分复杂,由于油气藏类型丰姿多采,油气富集区分布不均,如果按照勘探简单背斜油气田的老方法,很难发现、认识复杂油气田。因此,一个复式油气聚集区(带)发现后,应反复认识,不断发现新的领域,增加油气储量,提高勘探效益,采用新的勘探程序。例如:山东东营凹陷、辽宁大民屯凹陷就是从区块含油逐步连片成整带含油,一直发展到今天的“整凹含油”(“满盆含油”),储量成倍增长。国外在墨西哥湾、加利福尼亚等地区也不乏其例。

(二) 复杂油气田勘探新程序

从我国油气勘探实践可以看出,虽然复杂油气田的地质条件纷繁多样,但是仍然具有一定的油气聚集规律。因此,在新的理论指导基础上建立一套符合客观规律的科学勘探程序,不仅必要,而且可能。总结我国复杂油气田勘探的经验教训,参考国内复杂断块油田滚动勘探开发²⁾、美国的“循序渐进”法(Step by Step Progression)³⁾,以及苏联的“先期生产井”法(Опережающая Скважина),可以将复杂油气田勘探分为四个阶段(图8),即预探、初探、早期滚动勘探开发和晚期滚动勘探开发。

1. 预探

预探是在完成二级构造带地震详查和圈闭评价提供大量可供钻探的圈闭基础上,优选最有利圈闭进行以发现油气田为目的的钻探。

预探是关系到整个构造带的油气评价和突破出油关的重要阶段,因此要精选井位,而且,只有获得对圈闭含油气性的新认识以后,才能决定是否钻探本构造带的第二口预探井。预探井必须配置最有效的技术装备,保证快速获取齐全准确的地质资料,并做好综合地质研究,开展单井评价,计算探明储量、控制储量,圈闭预测储量。综合评价后的勘探风险系数⁴⁾达到0.15—0.5。

根据苏联1966—1973年统计,全苏74%的新油气田是前2口预探井发现的(发现井概率0.5),86%的新油气田是前3口井发现的,我国预探井成功率与此相当。因此,在预探阶段老油气区新油气田预探井不能多于2口,新油气区新油气田不宜超过3口。

预探的核心是优选圈闭,及时开展勘探综合研究,做好单井评价、进行横向预测,指出进一步勘探的方向。

2. 初探

初探是在圈闭预探获工业油气流之后,对整个二级构造带进行初步勘探,包括地震精查细测(或利用新资料,如VSP重新做精细和特殊处理)、初评钻探和择优详评钻探。初步探明油气田规模,分油气田分圈闭(区块)分油气层系进行初步地质、技术和经济评价;

1) 张文昭,1985,中国陆相盆地油气藏类型及其复式油气聚集区

2) 张文昭,1986,渤海湾盆地复式油气聚集区(带)滚动勘探滚动开发。

3) 李国玉、周永康,1985,美国复杂断块油田的滚动勘探开发方法考察报告

4) 指钻井成功的概率,为计算风险储量的系数。

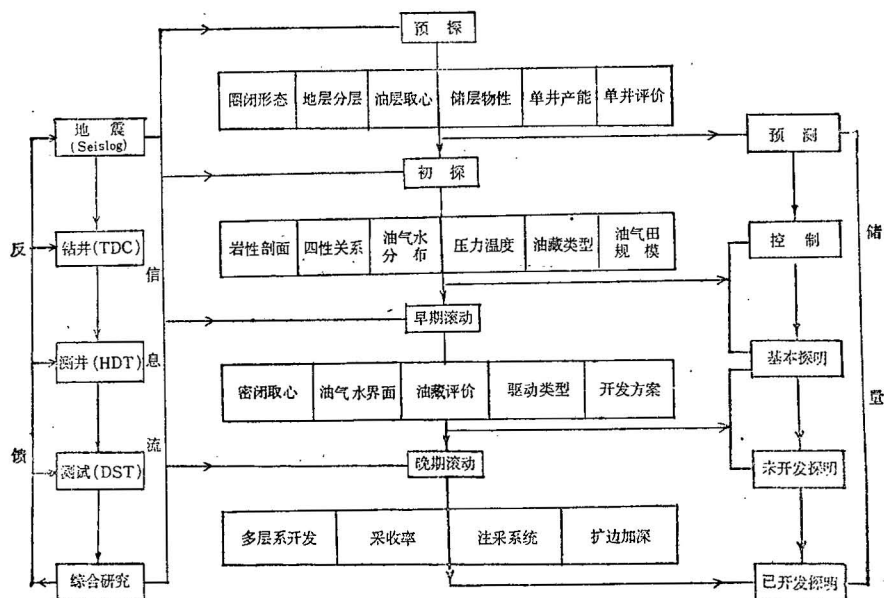


图 8 复杂油气田勘探控制系统运行程序框图

Fig. 8 Procedures of the controlling system of complicated oil and gas exploration

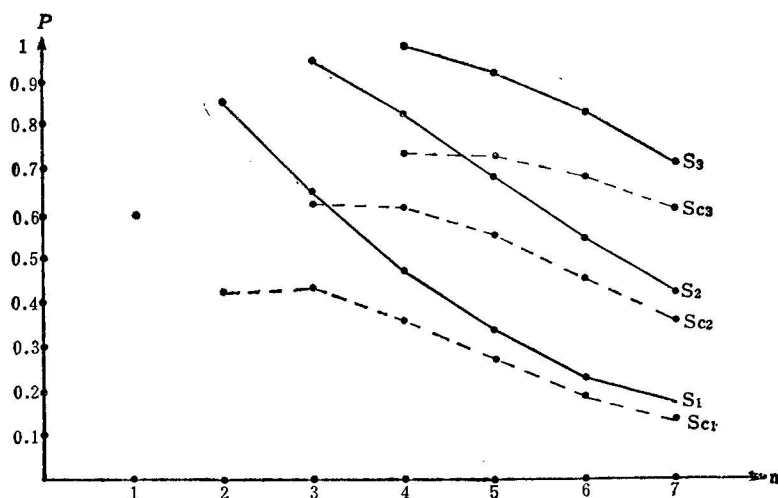
选择高丰度、高产能、多层系的优质圈闭(区块)开展详评,基本查明主力油气藏和主要油气层系,为滚动勘探开发创造条件。

参考D油田探井成功率18%(截止1978年),根据二项分配公式^[1]进行风险勘探主观概率估计^[3],一个圈闭(区块)初评并以2口为最佳,最多不能超过3口(表2)。详评井要分期分批部署,同一认识程度下钻井数量要严格控制。第一批详评井(成功率60%)一个圈闭(区块)最多只能布3口(图9)。待完钻井获得新资料进行重新评价,提高了决定探井成功率的主要因素圈闭、储层和地震地层学三项概率后,根据具体地质情况需要,再布第二批详评井,达到以最少的详评井获得最大的探明储量的目的。

表 2 钻 n 口井至少 $n-1$ 口井成功的概率Table 2 The probability of $n-1$ successful wells of n wells drilled

$n \backslash P$	2	3	4	
$S(18\%)$	0.33	0.09	0.02	
S_c^*	0.17	0.06	0.015	
$S(60\%)$	0.84	0.65	0.48	
S_c	0.42	0.43	0.36	$*S_c = S \cdot \frac{n-1}{n}$

$$1) (S + D)^n = C_0^n S^n + C_1^n S^{n-1} D + C_2^n S^{n-2} D^2 + \dots + C_n^n D^n$$

图9 钻 n 口井至少 $n-k$ 口成功的概率Fig. 9 The probabilities of $n-k$ successful wells out of n wells drilled

初探的核心是着眼整个二级构造带,认识整体含油规模。对单个圈闭不做过多的工作,即使是富集区块也只能钻少量详评井,获基本探明储量。这一阶段主要目的是估算整个构造带的控制储量,风险系数达到 0.5—0.7。这样,既可避免以往许多详探井落空的危险,又为总体判断、决策和编制中长期规划提供了依据。

3. 早期滚动勘探开发(详评与开发相结合)

这一阶段详评是在地震细测或三维地震解释成果的基础上,通过初探重新评价油气田后,对地质情况更为复杂的圈闭(区块)逐块逐层详细评价钻探。然而,复杂油气田地质条件决定了它难以通过短期勘探完全认识整个油气田。为了少打详评井,缩短发现井到油气田开发的周期,提高经济效益,必须实行开发向前延伸,即在油气富集圈闭(区块)落实基本探明储量后,迅速开辟生产试验区。一方面用生产资料井代替一部分详评井,加深对油藏地质特征的认识,一方面研究驱动类型、开采方式、试算可采储量、编制一次开发方案。通过早期滚动,储量升级至未开发探明储量,风险系数提高到 0.7—0.9。

至此,可以利用各个圈闭(区块)不同级别的储量与其相应的勘探风险系数乘积之和计算风险储量,作为油田开发和生产建设的依据。

4. 晚期滚动勘探开发

这阶段以开发为主,伴随评价勘探。开发是在提交未开发探明储量并完成生产试验区评价的地区实施一次开发方案。成熟一块开发一块。评价勘探主要是利用少量的评价井在开发过程中所认识的新领域(新块、新层系)进行评价勘探,为先期开发区提供新的接替区块。在晚期滚动勘探开发过程中及时部署并实施二次开发方案(包括调整、补充井)。这一阶段提供已开发探明储量,勘探风险系数大于 0.9。

滚动勘探开发的特点是:勘探、开发同时并举,地震、探井和开发井交叉展开。但是,就具体的每一个圈闭(区块)勘探开发要按部就班,循序渐进。

有了适合于复杂油气田勘探的新程序,必须有新的有效的勘探手段,才有大幅度提高勘探效益的可能。

(三) 复杂油气田勘探新技术

1. 三维地震 (3-D Seismic)

(1) 3-D 剖面反映地质体真实情况

3-D 提供的大量的三维显示剖面 (约为同等勘探面积里的二维地震详查剖面的数十倍,甚至上百倍。)以及特有的水平切片可以精雕细刻小圈闭(断块),精确修改构造图。

(2) 3-D 可以应用于复杂地层岩性油田

地层时间切片排除了构造影响,可以直接描述该层位的沉积特征。可以广泛应用于地层岩性解释。

3-D 丰富的信息、灵活的手段结合钻井、测井、测试和试采信息,可以全面深入地开展勘探综合研究,有效地指导勘探,大大提高勘探效益。通过随时接收反馈信息,还可以不断完善解释,自始至终指导复杂油气田勘探和开发,因此,3-D 被誉为“最终地震勘探”。

2. 综合录井技术 (Total Drilling Lontrol)

(1) 油气层评价

TDC 能够连续监测反映油气层出现的多种参数,当气测值超出报警值(区域异常值的低限值),计算机就会自动报警,指示气测异常。通常还相应泥浆体积增加、比重降低、温度升高、电导率降低,钻时降低等录井参数异常显示,经综合判断能及时准确地发现和评价油气层。

(2) 地层压力预测

TDC 只有在近平衡钻进条件下其录井参数才能有油气异常响应值。怎样才能实现近平衡钻进呢?老办法是凭“压而不死,活而不喷。”的经验,结果导致“好油层压不死,压死的不是好油层”等违背客观实际的结论。TDC 正为我们建立近平衡钻井系统提供了行之有效的科学依据。

TDC 压力录井可以由计算机系统随钻绘制 dc 指数和井温随深度变化等曲线,预测地层压力,指导建立近平衡钻井系统。为各种手段获取大量的地质信息创造了条件。

3. 垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profile)

(1) VSP 是地球物理测井和地面地震的桥梁

VSP 能测得较精确的平均速度和分层很细的层速度,从而成为地面地震和井眼测井的纽带,有利于地层岩性、速度对比和制作合成地震记录,以及合成速度测井剖面 (seislog),为横向预测开辟了广阔的前景。

(2) VSP 探测范围大

声波测井曲线探测范围很有限,即便是长源距声波测井,探测深度也不超过 10m。VSP 较常规井下测井的优越性正是它能够在井附近的蚀变带和侵入带范围之外获得地震资料(在地面条件允许的情况下),其最大半径约等于反射层埋深的一半,从而为研究井旁地质结构和地层变化情况提供了条件。图 10 是江苏油田富 44 井 VSP 剖面与普通地震剖面的对比,显而易见,插在普通剖面中间的 VSP 具有较高的分辨率和信噪比。VSP

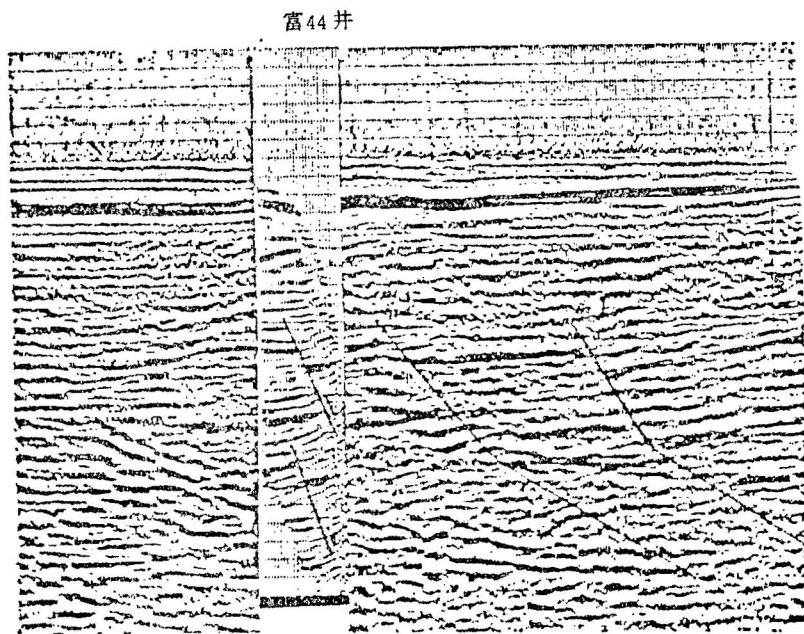


图 10 江苏富 44 井 VSP (中)与普通地震剖面的对比

Fig. 10 Comparison of VSP with seismic profile of Fu 44 Jiangsu

还可以探测检波器以下地层反射的上行能量,为推断纵深构造和地层变化情况提供依据。

4. 钻杆测试 (Drill Stem Testing)

(1) DST 反映地下真实情况,及时发现新油气层

常规试油用通井机进行提捞、抽汲、混气水排液、打水泥塞等作业,不但时效低造成大量探井积压延缓了新油气层的发现,而且造成完井液长时间污染油气层,以及试油作业中的多次污染,极大地损害了油气层,掩盖了地层的真实面貌。

DST 可以在油气层污染最小的情况下进行随钻测试,因此,获得的高压流体样品、产量等真实可靠,能够及时发现新的油气层。

(2) DST 功能多、效益高

常规试油一般只能提供产能情况, DST 除求产能外,还能够通过压力恢复曲线确定储层渗透率、油藏压力等重要参数,而且能估计被机械作用引起的损害,以便拟定有效的措施提高产量,甚至还可以测试可动油半径,为确保合理的井距提供依据。在测试半径内若有断层或边界存在,可以通过压力分析计算出距离。即便是求产, DST 诱喷方式也优于常规试油。据华北等油气区试验表明, DST 提高试油速度 4—7 倍,其成本大约只有常规试油成本的一半。

对于不同地质情况要具体研究最有效的勘探方法,而它往往是几种手段的综合,是多种新技术的配套使用。例如复杂裂缝油气田测井,在四川仅评价裂缝性储层的新方法就有地层倾角-裂缝识别 (HDT-FIL), 声波全波列 (波形-WF、变密度-VDL), 电磁波传播 (EPT), 岩性密度 (LDL) 以及地层微电子扫描仪 (FMS) 等等。

(四) 复杂油气田勘探是一个系统工程

由于历史的原因,我国石油勘探战线长期存在着“一切为了保钻井,钻井是龙头,所有专业都要围绕钻井转”的思想观念。现代油气勘探表明复杂油气田勘探必须应用多学科、使用诸兵种协同作战,其特点是:勘探涉及地震、钻井、测井、测试和地质综合研究诸环节。每个环节的活动目标、功能取决于各自在油气田勘探过程中的地位和任务。各环节之间,由于自身在勘探过程中所处地位和承担任务不同,其相应的活动机制、内容亦不同,从而决定了它们各自的独立性;然而,因为它们之间在技术上相辅相成,导致彼此之间互相关联,互相制约。这种独立和制约关系又要服从于勘探发现油气田,探明储量的整体目标。

这些特点正是“系统”的要素,所谓系统,是指由彼此独立而又互相关联互相制约的各个部分组成的具有一定功能的总体。因此,油气田勘探是一个系统工程。

认识勘探系统是为了更好地控制系统,而控制的目的在于充分有效地利用新技术,按照最优程序勘探,实现最高经济效益。为此,要求油气田勘探形成和实施应用的整体化技术与方案(图 8),从整体上建立标准或依据(包括技术、经济和时间等方面),使各个子系统的战术在效率、效果上与整体同步,在相关环节上和谐。也就是说:油气勘探各个子系统以查明圈闭、发现油气层、认识油气层、解放油气层为出发点和落脚点,最终实现油气勘探系统少投资,多拿储量的总体功能。

目前,石油勘探战线开展的科学打探井试验正是运用控制论实现油气勘探系统最佳功能的一个初步尝试。其效益明显,可以说是运用勘探系统工程理论的一个良好开端,由此发展到整个复杂油气田勘探系统,必将取得巨大的经济效益。

结 束 语

鉴于复杂油气田勘探效益低的现状,亟需做如下工作:

1. 继续深入研究复杂油气田油气聚集规律,不断总结经验,指导复杂油气田开展科学勘探。

2. 改革旧的勘探程序,建立新的适合于复杂油气田的勘探程序。各个不同的勘探阶段有相应的探井限额,同一认识程度下不能大量钻井。

3. 执行新勘探程序必须推进新技术、新方法,特别要加强单井评价、横向预测工作。减少大批详探井。

4. 石油勘探是一个系统工程,各个环节不能偏废,必须运用控制论思想控制每一个环节。最终实现油气勘探系统少投资,多探明储量的总体功能。

本文在写作过程中承蒙查全衡、张文昭、陆邦干、赵化昆和李干生等同志指导并提出许多宝贵意见,作者在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 《大庆石油地质与开发》编辑部,1984,中国隐蔽油气藏勘探论文集。黑龙江科学技术出版社。
- [2] 徐旺译(E. P. Thomas 著),1987,裂缝性油藏。油气勘探译丛,第3期,第1页。
- [3] 李国玉等译,(美 R. E. 麦格尔著),1982,油气勘探经济学概论。石油工业出版社

EXPLORATION OF COMPLICATED OIL AND GAS FIELDS

Zhang Xiangning

(Exploration Department of Petroleum Ministry, Beijing)

Abstract

China is very rich in oil and gas resources. With exploration in more detail, the complicated oil and gas fields play a more and more important part in oil and gas exploration, and their reserves increases rapidly. The exploration effectiveness of these fields has a great influence on the economic effectiveness of petroleum industry as a whole. Is it possible to improve the exploration effectiveness and how to do it? By examining the case histories of exploration of complicated oil and gas fields, the answer is YES, but there is only one approach, that is exploring for them scientifically.

In this paper four types of complicated oil and gas fields have been distinguished from exploration practice, i.e. (1) complicated fault-block oil and gas fields; (2) complicated lithology oil and gas fields; (3) complicated formation oil and gas fields and (4) complicated fracture oil and gas fields. Based on the new petroleum geological exploration theories of composite oil and gas accumulations in continental oil-bearing basins, a new exploration sequence suitable for the exploration of complicated oil and gas fields can be established, which comprises four stages of exploration: (1) primary exploration, (2) preliminary exploration, (3) early step-by-step exploration and development, and (4) late step-by-step exploration and development. By using the method of subjective probability appraisal of risk exploration, the reasonable number of exploration wells can be determined at a certain level of understanding. The exploration of oil and gas is a systematic project, and the combination of multidisciplinary exploration, the application of contrallism to all the links of the systematic project of exploration of complicated oil and gas fields and the effective and integrative uses of new exploration techniques, e.g. three-D seismic (3-D), total Drilling control (TDC), Vertical seismic profile (VSP) and drilling stem testing (DST), can lead to the ultimate realization of optimal exploration and thence improve the exploration effectiveness of complicated oil and gas fields.