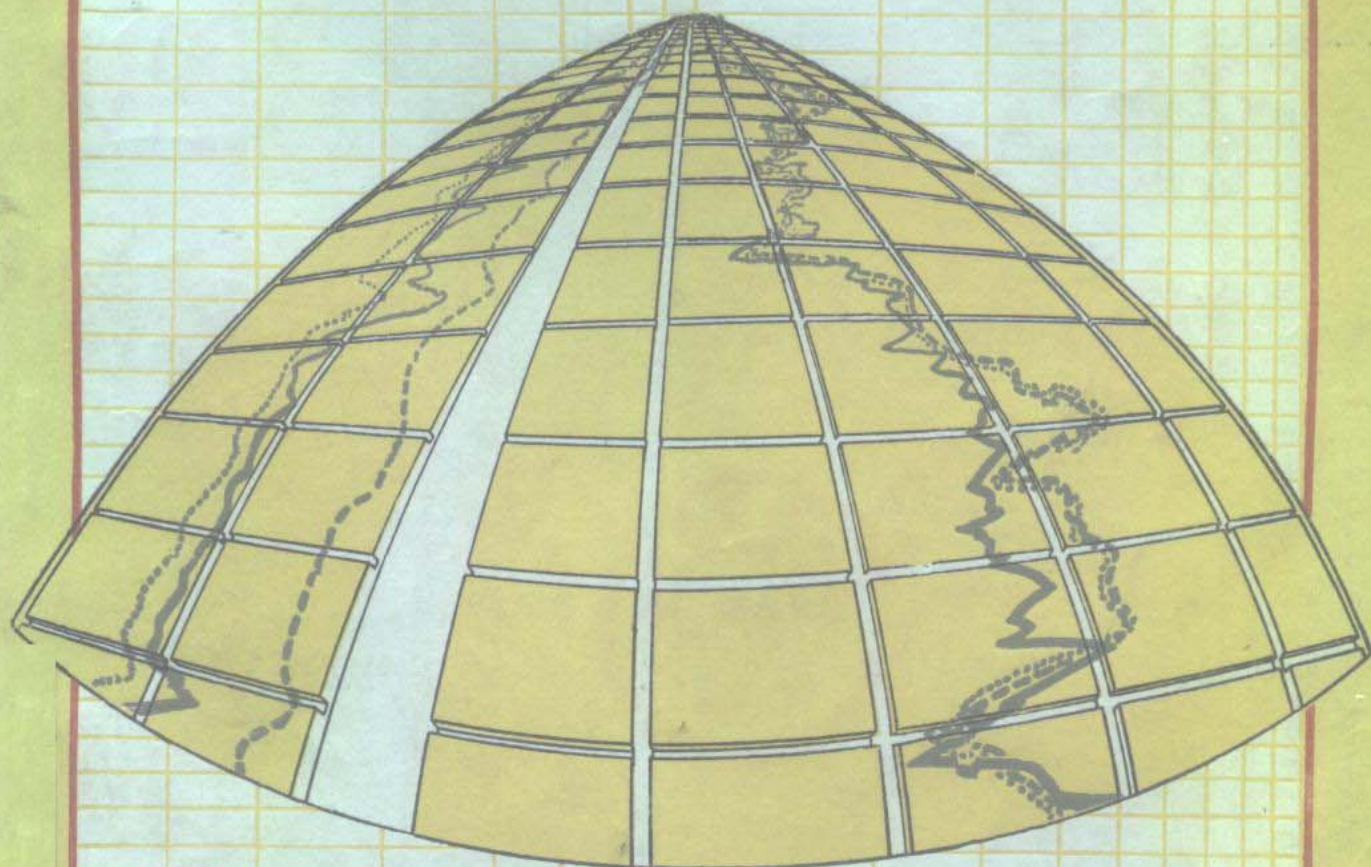


APPLICATION OF WELL-LOGGING DATA IN GEOLOGY

测井资料的地质应用

中国石油学会石油测井学会 编



石油工业出版社·石油工业出版社·石油工业出版社

测井资料的地质应用

中国石油学会石油测井学会 编

石油工业出版社

出版者的话

中国石油学会石油测井学会于1989年10月18日至23日在山东省烟台市召开了第四届测井学术年会——测井资料地质应用学术讨论会。会上共交流了40篇论文。这些论文展示了近年来我国在引进测井新技术条件下，利用现代测井资料在油（煤）田地质领域中的应用成果，其中包括：地质构造研究和沉积环境分析；岩性、矿物组分和测井沉积相研究以及如何应用重复式地层测试器资料研究断块油气藏井间（或层系间）压力系统。为了提高测井解释精度，还介绍了一些新的测井专用软件和专家系统方面的研究与地质应用成果。同时，对于油田开发过程中剩余油饱和度的动态监测技术及生产测井资料的各种地质应用也有重点地进行了展示。这些内容基本上反映了我国目前测井资料地质应用的现状与水平。另外，还说明了近年来我国用测井手段获得的信息量、信息精度和测井资料的丰富程度已有了大幅度的提高，测井资料解释与研究已从纵向判断油、气、水系统的单一方向，向着储集层、储集构造以及油藏描述等全方位地质应用的研究方向发展。

“水淹层岩心电阻率变化规律的研究”一文，虽然与本文集主题结合不甚密切，但它是测井解释工作的基础，而且该论文受到与会代表的关注和赞许，因而也收编到本文集中。

为了总结测井资料地质应用方面的成功经验，促进各油（煤）田以及国际间的技术交流，推动测井地质工作的进展，并拓宽其应用领域，第四届测井学术年会论文评审组在群众评议的基础上，推荐出25篇有代表性和较优秀的论文，汇编成《测井资料的地质应用》一书，并由我社正式出版发行。

本文集在编辑出版过程中，华北石油管理局测井公司给予了大力帮助，中国石油学会石油测井学会的张春生、该会出版组邱玉春等同志做了大量的组织工作，包括稿件的收集和部分审稿工作，特此致谢。

目 录

一、应用测井资料对 Y 气田南断块含气情况的分析	欧阳健 刘珂 (1)
二、测井资料在东海和南黄海地区的地质应用	徐国庆 (17)
三、辽河油田地层倾角测井的地质应用	吴其琛 (36)
✓四、用地层倾角测井资料解释沉积相	焦大庆 王新运 费伯良 (53)
五、测井资料在建立高陡构造模式中的应用	刘志鉴 杨先杰 (63)
✓六、聚类分析在测井相分析中的应用	范宜仁 王曰才 (70)
七、用椭圆形井眼长轴方位研究构造应力	潘贵强 李楚吟 (81)
八、STRATA 程序的参数调试及其地质应用	张金珠 (86)
九、测井解释专家系统在砂泥岩地层中的应用	人工智能研究组 (99)
十、四川地区应用纵波等效弹性模量差比法识别气层	吴岳仙 (114)
十一、利用测井资料确定粒度中值和泥质含量的方法	丘琳 (124)
十二、阿尔善地区火成岩解释方法探讨	张国杰 (133)
十三、模糊数学识别火成岩岩性的方法及地质效果	卞德智 邱子刚 刘明高 (147)
十四、应用数字测井资料确定煤岩层强度	李兆慧 (157)
十五、测井资料在煤田中的计算机岩性解释及实例	孙新华 (166)
十六、重复式地层测试器在复杂断块油田中的应用及效果	符仲金等 (177)
十七、重复式地层测试器在胜利油田勘探和开发中的应用	杨庆祥 高中民 (187)
十八、RFT 压力资料在油藏评价中的地质效果	谢知义 (195)
十九、碳氧比能谱测井在大港油田的应用及效果	施锬 李盛岩 (202)
二十、“测一吐一测”技术的应用效果	刘 应 (216)
二十一、产出剖面测井的地质效果分析	王秀兰 (220)
二十二、水淹层岩心电阻率变化规律的研究	牛超群 张守谦 韩有信 (227)
二十三、剩余油饱和度监测技术在孤东观 1 井的试验和应用	霍树义 (235)
二十四、生产测井地质应用及效果	陈士铎 (244)
二十五、长源距声波测井在套管井的应用	何中兴 林宝芳 (252)
附录 石油测井中常用的许用单位与非许用单位换算表	(259)

一、应用测井资料对 Y 气田南断块 含气情况的分析

欧阳健

刘珂

(海洋石油测井公司) (海洋石油研究中心)

摘要 Y 气田是近年来我国海上发现的大气田, 它被一条近东西向断层切割为南、北两个断块。北断块气层厚度约 400ft (121.92m), 南断块 3 号井经测井与测试分析, 气层厚度仅为 88ft (26.828m), 气-水界限明显高于北断块。如何分析这一现象, 对 3 号井的地层 E_3^1 与 E_3^2 的界面划分是至关重要的。这不仅是地层归属问题, 而且是关系到气藏类型与储量大小的关键问题。首先以电缆式地层测试器测量的压力剖面为依据提出了 3ST 井水层的地层归属问题, 再通过对自然伽马能谱测井、声波全波测井、地层倾角测井等各项测井资料与钻井 (古生物分析)、经过特殊处理的地震资料的综合分析, 对 Y 气田南块 3 号井的 E_3^1 、 E_3^2 地层进行了正确的分层。3 号井的气-水界面恰好是地层分界面, 清楚地反映出气层段钻遇的断层及其走向。同时, 还对南断块含气范围与气-水界面做了分析, 认为它与北断块有统一的气-水界面, 远离 3 号井的南断块仍会有与北断块气层相近厚度的气层。该结论已被两年后 6 号井的钻探所证实。

引 言

Y 气田是我国海域中新发现的一个气田, 其构造是在基底隆起背景上发育的披覆半背斜构造, 它被一条近东西向断层切割为南、北两个断块 (图 1)。

目前, 已在气田上钻探 4 口井, 南断块的 3 号井因事故而进行侧钻, 把侧眼井称为 3ST 井。4 口井的钻探都发现了下第三系渐新统第二组 E_3^2 地层富含天然气, 经测试证实 Y 构造是一个具有较高产量的大气田。

Y 气田属地层, 构造复合圈闭, E_3^2 气藏为层状边水气藏。北断块气层平均厚度约为 400ft 左右, 气-水界面深度为海拔-12992ft。南断块 3ST 井经测井解释并测试, 气层厚度仅为 88ft, 气-水界面深度抬高为海拔-12530ft, 如图 2 所示。对南断块气-水界面明显地高于北断块的这一现象如何解释? 一种意见认为, 该构造被东西向断层切割, 形成沉积环境、岩石特征及含气范围与高度等截然不同的两个独立断块。另一种意见认为, 3ST 井在含气层段钻遇断层, 致使气层的大部分地层缺失, 仅余气层的下部; 该井钻遇的气-水界面是气层与下伏之非气层的地层分层界面, 而不是南断块 E_3^2 组地层中的真实气-水界面。后一种观点认为南、北两断块具有统一的气-水界面。

上述两种意见的分歧是对 3ST 井地层划分不同所致。因此, 正确划分 3ST 井第三系地层, 不单纯是层位时代归属的问题, 而是关系到气藏类型和储量大小的关键。通过对各项测井资料与钻井 (古生物分析), 地震资料特殊处理的综合分析研究认为, 测井资料在 3ST 井第三系地层划分中有较高的地质应用价值, 是测井分析 Y 气田含气情况成功的地质应用实例。

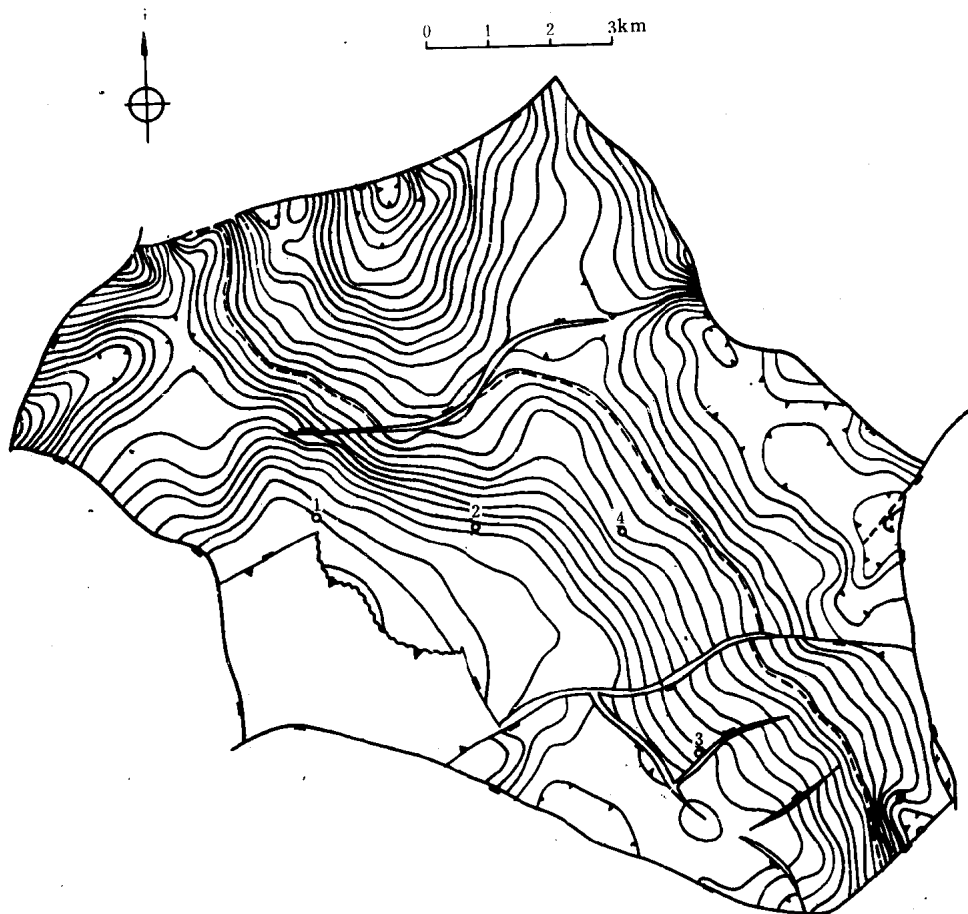


图1 Y构造下第三系 E_3^2 组气层顶部构造图

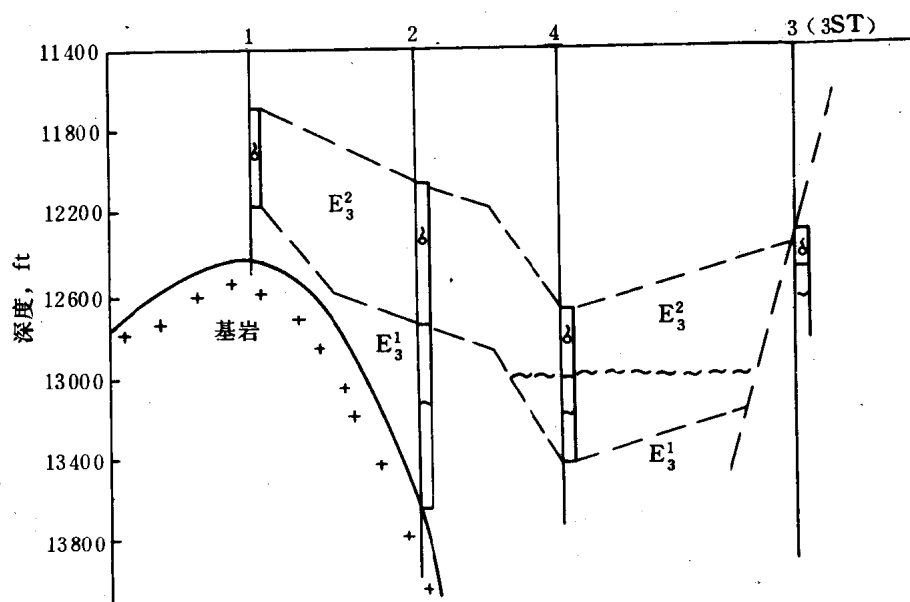


图2 Y气田4口探井 E_3^2 气层示意图 (经测井解释与测试验证)

地层顺序与层组划分

Y 构造所在盆地系在前第三纪基底之上发育的新生代沉积盆地，它经历了早第三纪断陷和晚第三纪拗陷两个构造运动阶段。因此，Y 构造在前第三系基岩上发育了与断陷湖有关的一套下第三系陆相碎屑岩建造，随着拗陷加深、海水入侵，上第三系和第四系成为一套与海洋沉积有关的碎屑岩与碳酸盐岩建造。

Y 构造层组的划分如图 3 所示。

地层单位	符号	分组	厚度 (ft)	岩性剖面	岩性描述	沉积相
第四系	Q		5764 ±		粘土和粘土岩和砂质土岩为主，夹薄层石英砂和砂岩夹层，局部见煤线	浅海相
上第三系	N ₂		5365 ±		以厚层灰色粘土岩、砂质粘土岩为主、局部夹紫灰色粉砂岩、泥质粉砂岩和薄层灰~深灰色泥页岩，偶有煤线	浅海~滨海相
	T ₂	第二组	1109 ±		灰质粉砂岩、钙质泥岩、泥灰岩、泥质粉砂岩互层，局部为灰岩或砂质灰岩，常见白垩质	浅海相
	T ₄	第一组	738 ±		浅灰色砂岩、粉砂岩，泥岩	滨海
	T ₆	第二组	752 ±		浅灰色砂岩夹薄层泥岩，局部为砂砾岩	扇三角洲
	T ₇	第一组	780 ±		上部灰~深灰色泥岩夹灰色细粉砂岩夹煤层，下部为长石英砂岩与泥岩互层，底部紫红色砂砾岩	沼泽湖泊
下第三系	E ₃ ²					
前第三系	E ₃ ¹					
前第三系					花岗岩、变质岩	

图 3 Y 气田地层柱状剖面图

前第三系

由花岗岩及变质岩组成基岩，分别由 1 号井与 2 号井钻到。

下第三系渐新统第一组 (E_3^1)

浅湖—滨岸沼泽相沉积：灰白色砂岩、含砾砂岩、深灰色泥岩、页岩及煤层呈不等厚互层，底部具有紫红色泥岩及棕红色砂砾岩。因基岩块体的翘倾活动形成充填式沉积，地层厚度变化很大，经测井解释与测试证实 E_3^1 不含气。

下第三系渐新统第二组 (E_3^2)

从灰白色粗—中粒长石石英砂岩及含砂不等粒砂岩为主体的地层，夹有薄层状灰色泥岩。属滨海湖盆环境形成的扇三角洲沉积，由于海水多次入侵使淡水咸化，具有少量底栖类有孔虫，普遍发育海绿石，沉积物具有明显的海、陆过渡相特征。构造高部位 E_3^2 全部剥蚀，1 号井、2 号井、4 号井钻遇的 E_3^2 都具有 100m 以上的厚度，经测试证实为 Y 气田的主力气层。

上第三系中新统第一组 (N_1)

渐新世末地壳上升，地层广遭剥蚀形成沉积间断；至上第三纪海水由东、南西方向入侵，沉积了一套滨海—浅海相层层超覆地层。岩性以灰—浅灰色含钙质细砂岩与含钙质泥岩为主，具较多的砂质与底栖类的有孔虫，说明海水较浅，属潮间—浅水内潮下带环境。4 号井钻遇的两层楔状砂体含天然气。

上第三系中新统第二组 (N_2)

灰黄、黄褐、灰色砂质灰岩，泥灰岩，有孔虫灰岩，灰质白云岩与泥岩。石灰岩中普遍含砂质，具大量浮游类有孔虫，属浅海的内潮下—外潮下带沉积环境。

上第三系上新统—第四系 (N_2-Q)

灰色泥岩夹薄层粉砂岩，含多种浮游类有孔虫，为开阔海的外潮下一半深海环境。

用自然伽马能谱测井划分地层

自然伽马能谱测井是对地层中具有天然放射性的元素——钾、钍、铀的含量进行定量估价的一种测井方法，这是根据它们各自发射的伽马射线能量不同而实现的。自然伽马能谱测井提供以百分浓度表示的钾含量，以 mg/L (ppm) 表示的钍、铀含量，以及由 API 表示的总自然伽马与无铀自然伽马。

沉积岩中所含的钍、铀、钾含量主要取决于环境和成岩后发生的变化。 N_1 为海相沉积地层， E_3^2 地层以海陆交互相沉积为主， E_3^1 为陆相沉积地层。显然， E_3^1 与其上地层的沉积环境明显不同。2 号井 11810~13620ft (3600~4150m) 的铀、钍、钍/钾比与自然伽马等曲线及它们的频率直方图 (图 4) 表明，自然伽马能谱测井可以清楚地识别 E_3^1 与 E_3^2 地层，前者的铀、钍含量较高，后者的铀、钍含量明显降低，其分层界限为 12480ft (3913.6m)。陆相沉积的 E_3^1 地层由于含丰富的有机质而具有高的铀含量，而且残留或吸附于粘土的钍含量也高。2 号井 E_3^1 与 E_3^2 的分层界限已被其它各项地质资料所证实。由 3ST 井 12400~13200ft 的铀、钍、钍/钾比、自然伽马曲线 (图 5) 上可以见到在 12535ft 存在一明显的地层分层界限，它应是 E_3^1 与 E_3^2 的界限，其规律与 2 号井相同，详细数据见表 1。

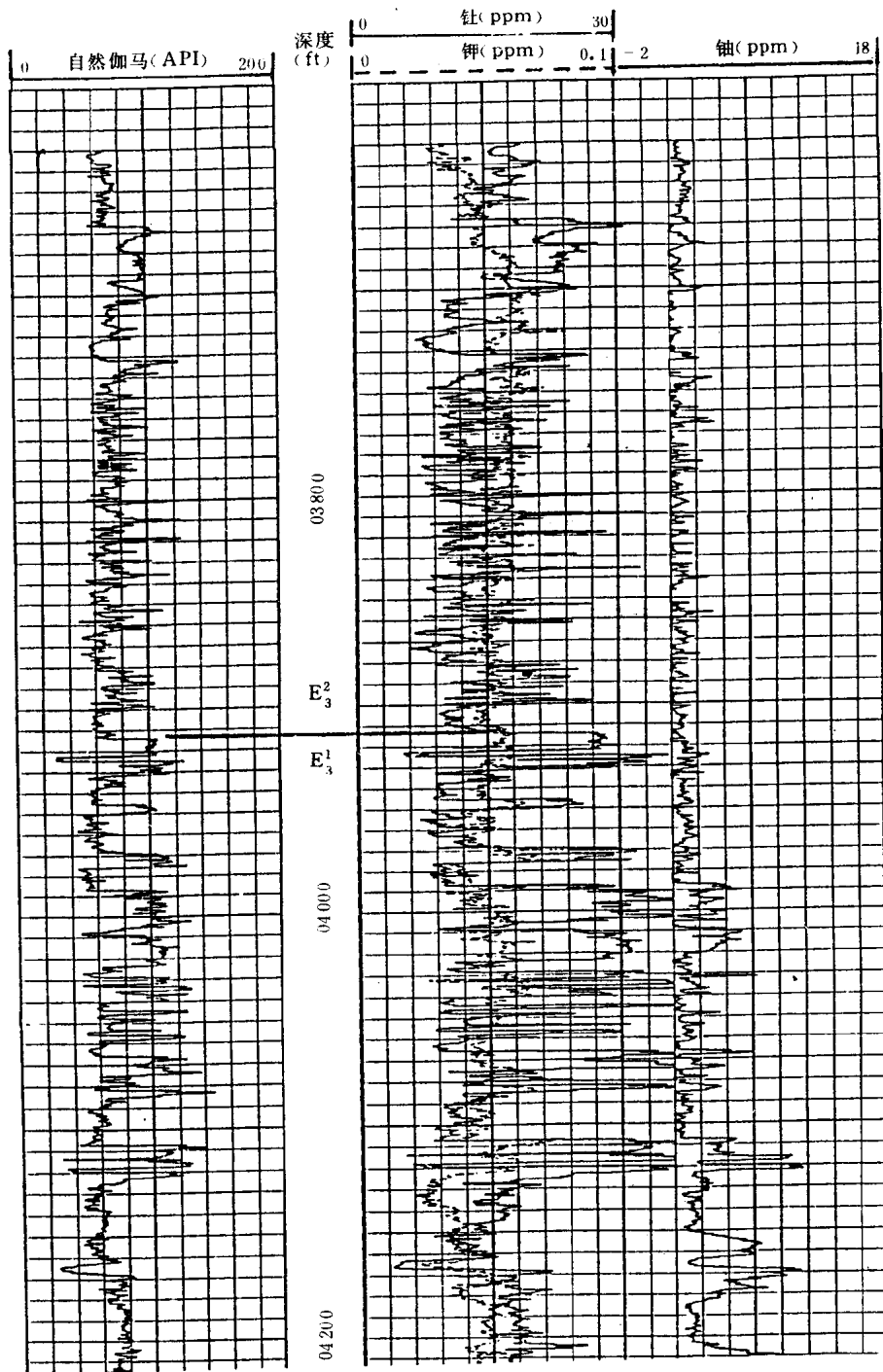


图 4A 2 号井自然伽马能谱测井

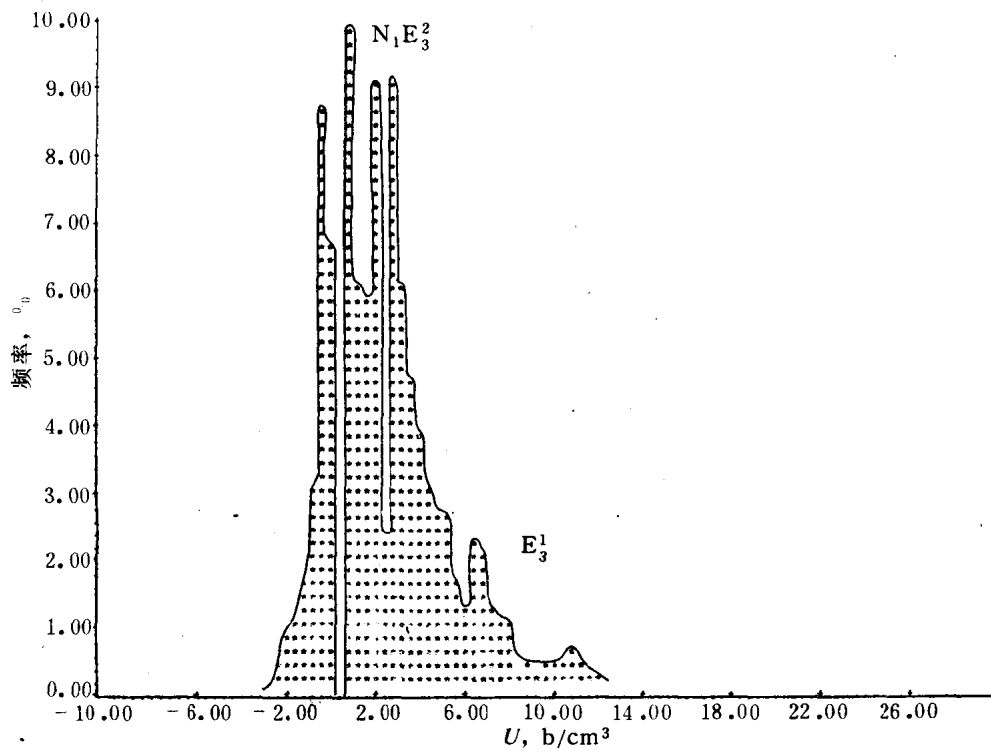


图 4B 2 号井铀曲线直方图

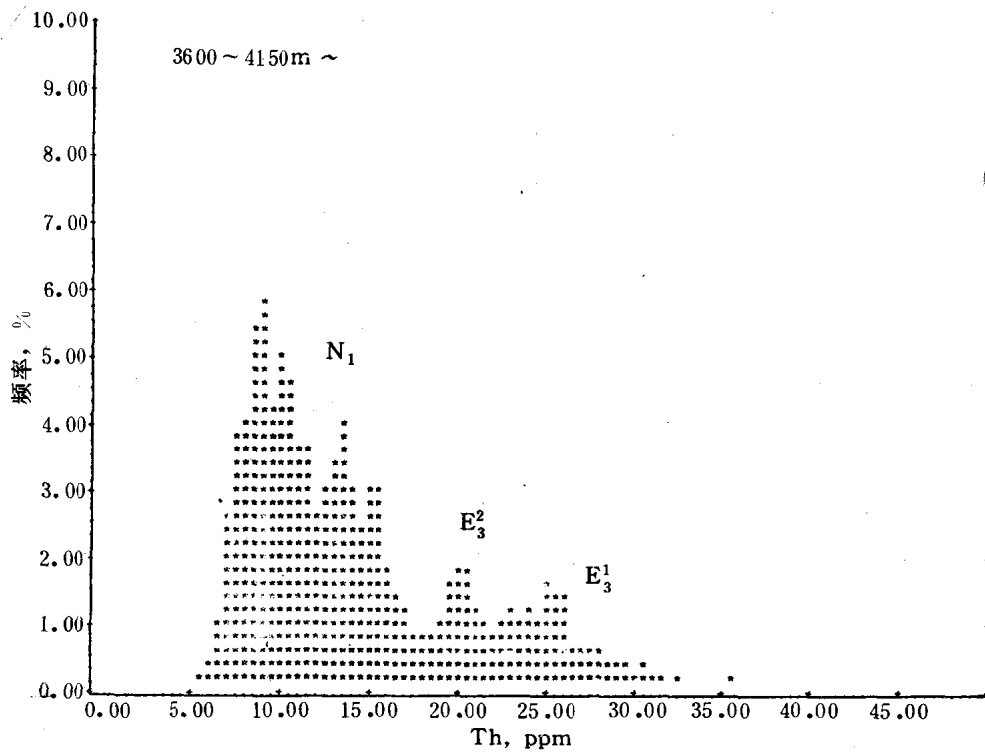


图 4C 2 号井钍曲线直方图

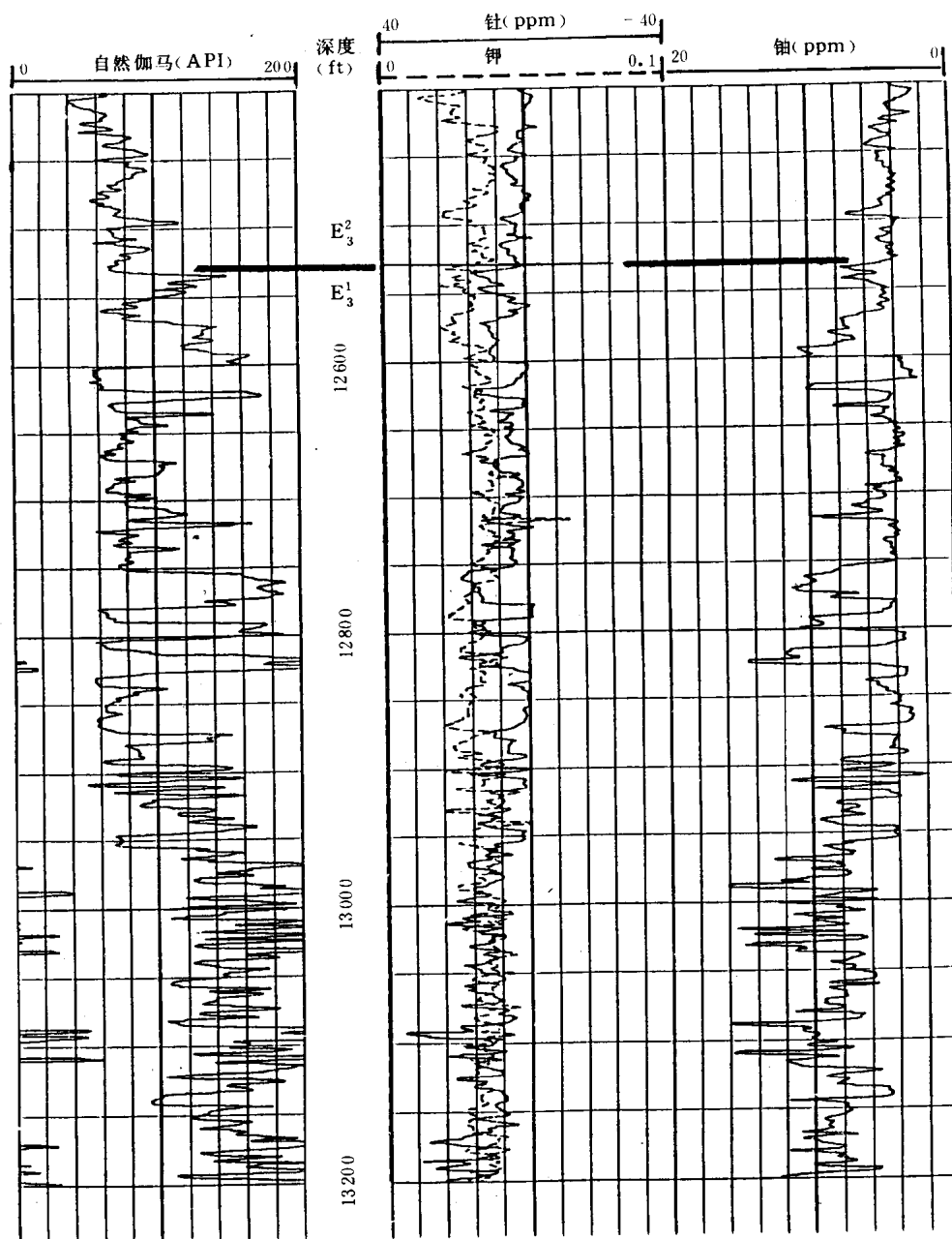


图 5A 3ST 井自然伽马能谱测井

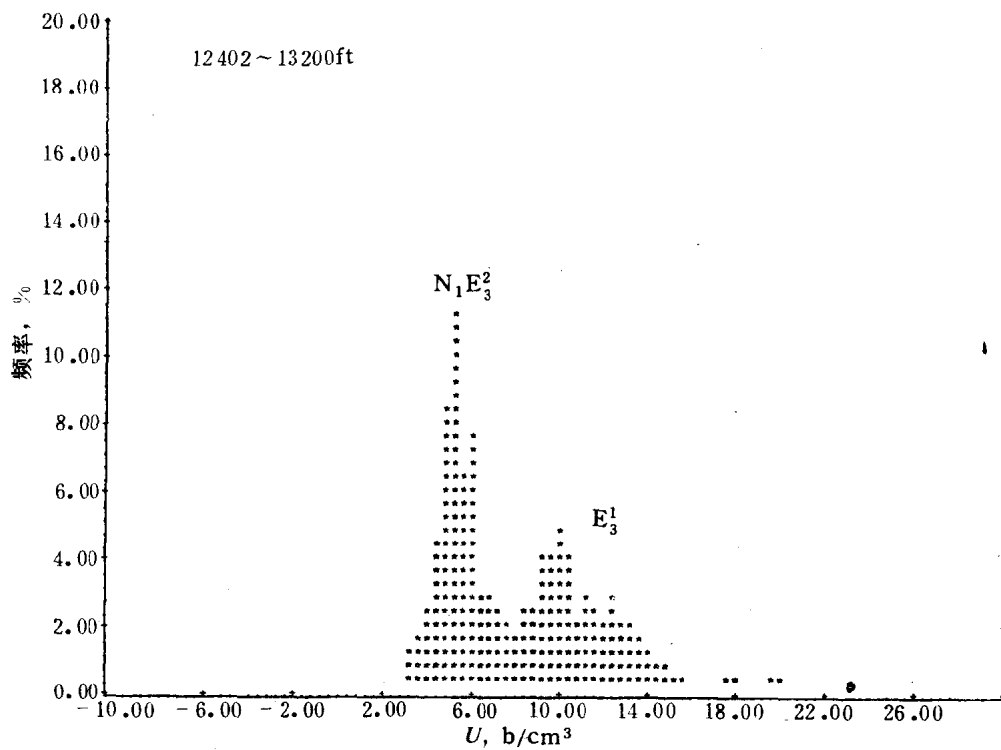


图 5B 3ST 井铀曲线直方图

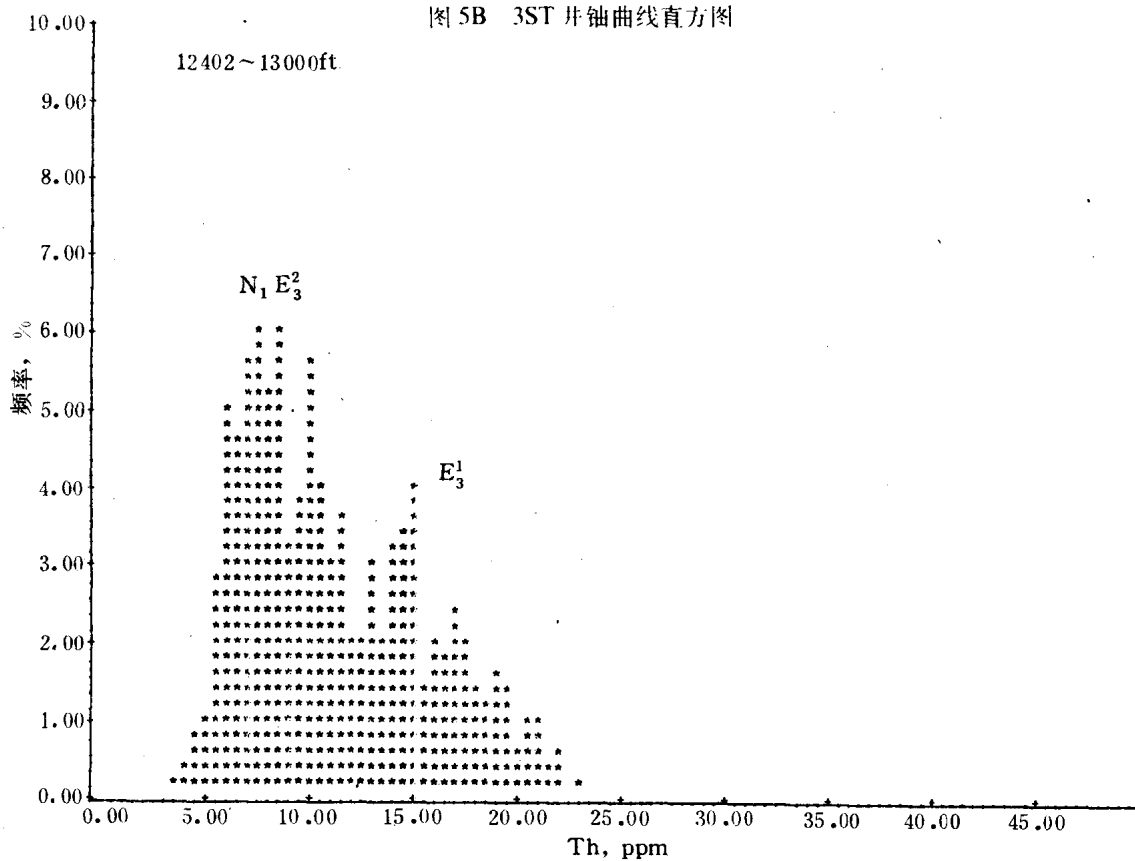


图 5C 3ST 井钍曲线直方图

表 1 用自然伽马能谱测井划分 E_3^1 与 E_3^2 地层的数据表

地 层	2 号 井			E_3^2/E_3^1 分层深度	3ST 井			E_3^2/E_3^1 分层深度
	铀 (ppm)	钍 (ppm)	钍/钾		铀 (ppm)	钍 (ppm)	钍/钾	
N_1^1	≤ 2	8~16	5		6	10	4.5	
E_3^2	3	15~20	4		6	8	3	
E_3^1	7~12	25~30	8.5	12840ft (3913.6m)	10~13	15~20	8	12535ft (3820m)

通过地层压力测试分析地层的压力系统

首先, 要对各井的电缆地层测试压力数据 (包括钻井中测试的某些 DST 数据) 进行质量检查、必要的校正和数据整理, 然后作出该气田的压力剖面图 (图 6)。从图中可以看出, E_3^2 组气层的压力梯度为 $0.092\text{psi}/\text{ft}$ ($0.0021\text{MPa}/\text{m}$), 水层的压力梯度为 $0.49\text{psi}/\text{ft}$ ($0.011\text{MPa}/\text{m}$), 显示为静水压力系统。3ST 井气层的压力系统与北断块气层相同。还可看出, E_3^2 地层的气-水界面在 12990ft。 E_3^1 组水层的压力梯度在诸井中各异, 变化范围为 $0.7\sim 2.87\text{psi}/\text{ft}$ ($0.016\sim 0.066\text{MPa}/\text{m}$), 可见 E_3^1 砂岩皆为异常压力系统。显然, 3ST 井的水层属此类, 而不是 E_3^2 组的静水压力系统。 E_3^1 与 E_3^2 的分层界限应在 12460~12520ft 之间。该井的地层分层问题首先是由地层压力测试发现的。 E_3^1 地层的异常压力系统可能是由其沉积环境决定的, 砂岩由一些封闭的、互不连通的砂岩体组成。在此压力剖面中可以从各井的压力测试点推断出 E_3^2 与 E_3^1 地层界面所在的深度区间 (表 2)。

表 2 根据各井压力剖面推断出 E_3^2 与 E_3^1 分层界面所在的深度区间

井 号	1	2	3ST	4
界面深度区间 (ft)	12160~12250	12770~12840	12460~12520	未测试 E_3^1

岩石力学性质分析

应用声波全波测井记录的磁带提取纵波、横波速度并结合密度测井可以计算地层的机械力学参数——泊松比、切变模量、拉梅系数、杨氏模量、体积模量等, 从而可以计算地层的裂缝压力 (HORI) 和破裂压力差 (DRDN)。裂缝压力定义为在钻开的目的层井壁处使地层中原有的裂缝打开的压力; 破裂压力差定义为压开地层在砂岩颗粒表面产生新的剪切裂缝, 从而诱导出地层中流体而需要的压力差。根据各井声波全波测井与密度测井计算出地层的 HORI 与 DRDN。图 7、图 8 为 2 号井与 3 号井的成果图。对各井计算结果取值可见表 3。从各井计算的地层压力 (PORE) 数据分析中可看出, HORI 一般比 PORE 大 3000~4000psi ($21\sim 28\text{MPa}$), 3 号井与 3ST 井的 HORI 比其它井的大一些, 特别是 DRDN 明显高于其它井, 12370~12406ft 地层比其它井相应的层段高出 3~5 倍。这一现象可解释为 3

号井穿过的这一段地层曾受过强烈挤压，从而使地层的 DRDN 增大。因此，可以认为 12370~12547ft 井段中可能有段层通过。

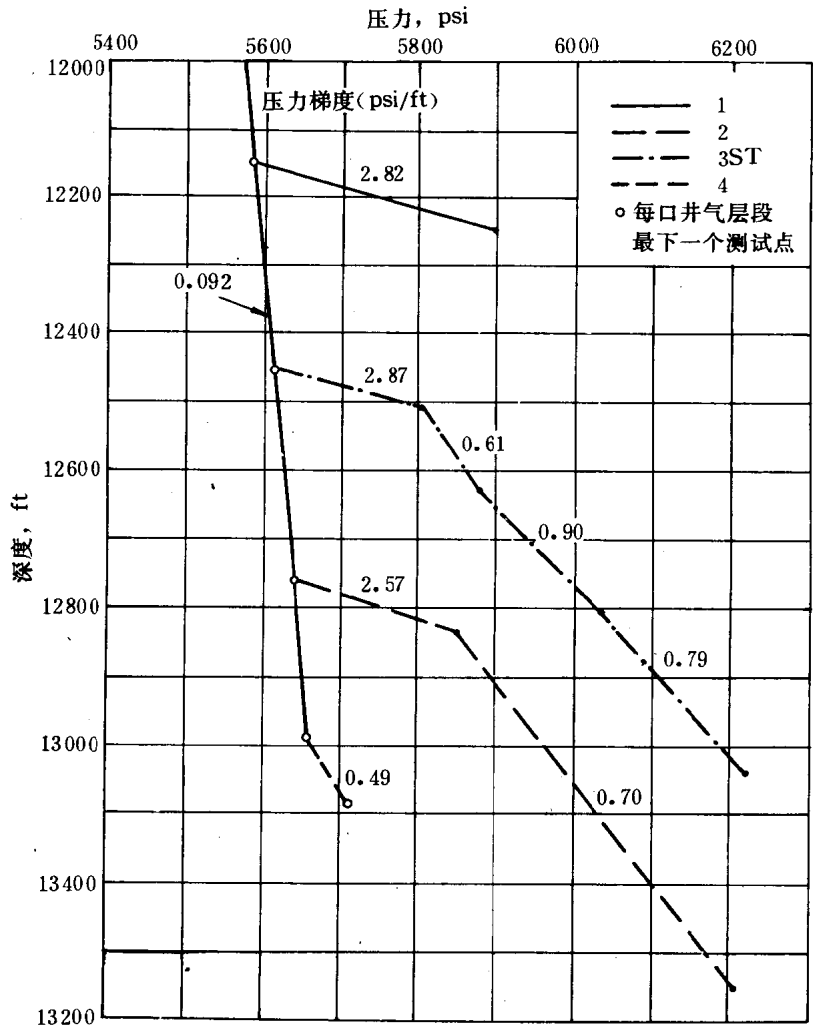


图 6 Y 气田地层测试压力剖面图

表 3 各井地层压力 (PORE)、破裂压力 (HORI) 和破裂压力差 (DRDN)

井号	井 段 (ft)	PORE (psi)	HORI (psi)	DRDN (psi)	井 段 (ft)	PORE (psi)	HORI (psi)	DRDN (psi)
1	11722~11767	5517	9185	8344	11767~12175	5548	9414	11597
2	12149~12245	5601	8867	6343	12245~12843	5652	9473	11533
3ST	12370~12406	5608	10325	20568	12406~12530	5611	10107	14219
3	12384~12406	5340	10421	42780	12406~12547	5378	10061	20568
4	12787~12868	5561	10042	8617	12868~12980	5567	10064	10462

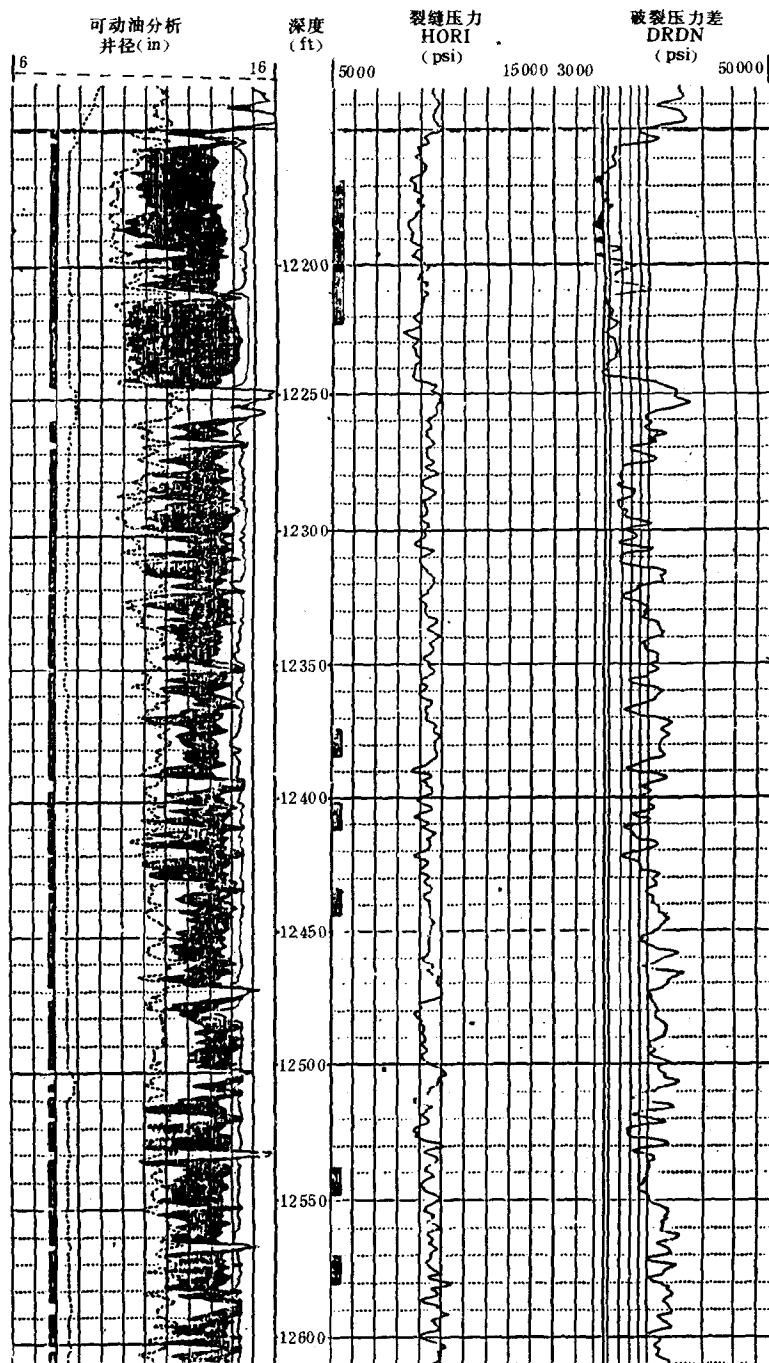


图7 2号井声波全波测井处理图

从井径曲线与地层倾角测井中的双井径曲线可以看出，3号井12380~12960ft井段地层的力学性质与其它井相比是异常的（图8），该段的泥岩全部坍塌，钻头直径为8.5in，而泥岩处井径扩大到20in以上，其中12380~12700ft段井壁坍塌最为严重，仪器测量已达极

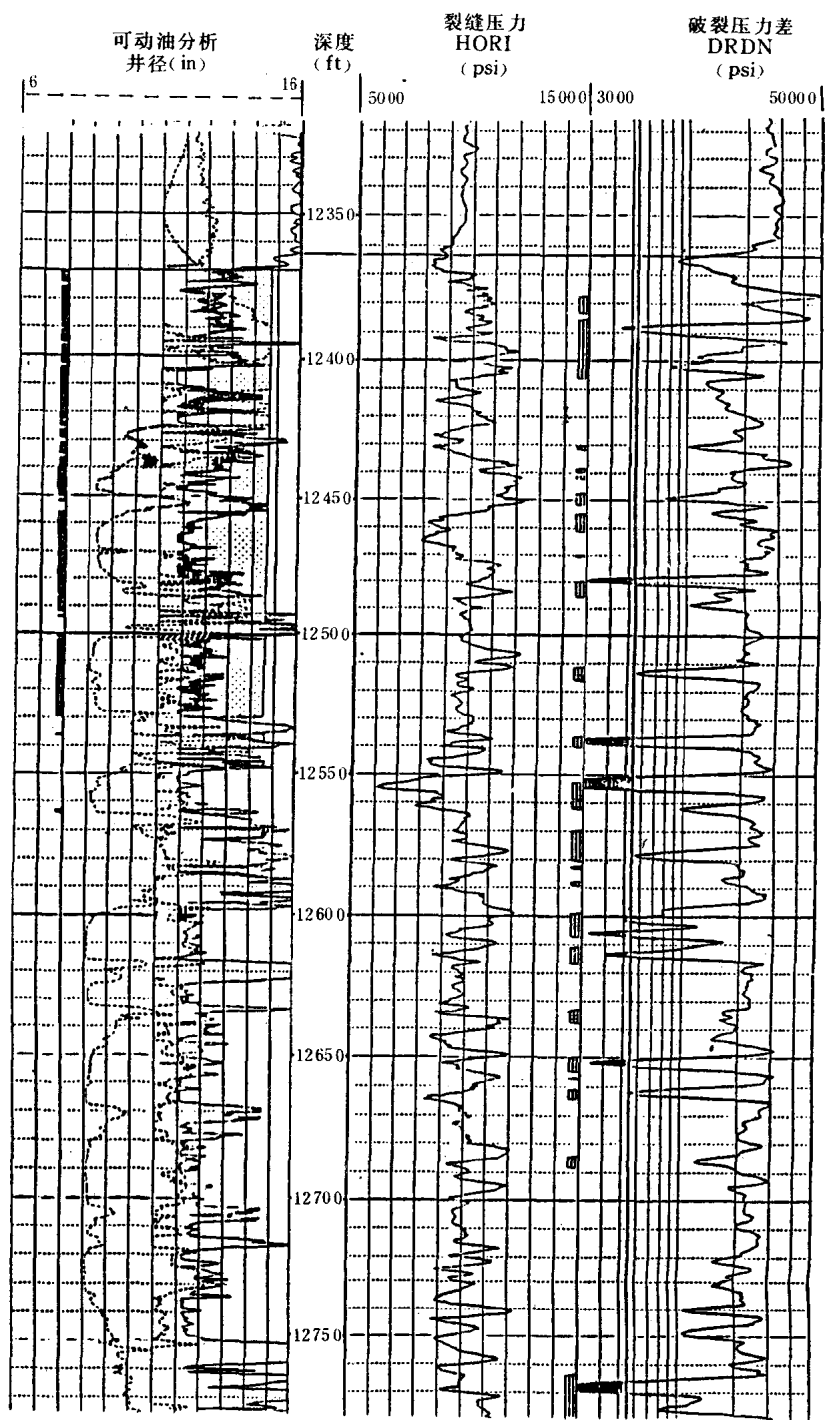


图 8 3号井声波全波测井处理图

限。在断层通过井的附近 (12450~12480ft) 钻井取心证实是砂岩的地层也出现井壁坍塌现象。双井径分析整个层段中井壁坍塌部分的井眼形状呈椭圆形, 井眼拉长方向为 $80^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 近东西方向, 与 3 号井邻近的断层走向相似。该层段的泥岩电阻率 (侧向、感应测

井) 皆比相邻地层低 $2 \sim 3\Omega \cdot m$ 。该气田其余的井无论是砂岩、泥岩地层皆无井壁坍塌现象 (如图 7 所示)。3 号井、3ST 井与其它诸井的钻井条件、泥浆性能都相近: 泥浆比重为 $10.3 \sim 10.5 lb/gal$, 粘度为 $47 \sim 49s$ 。由此可见, 3 号井与 3ST 井 $12380 \sim 12960ft$ 地层可能是由于断层通过而受到异常地应力作用, 致使泥岩地层发生破碎。

用地层倾角测井确定断点

在 3 号井与 3ST 井, 由斯仑贝谢公司进行了地层学高分辨率地层倾角测井 (SHDT), 并用 MDS 程序进行构造分析的处理 (图 9)。从图 9 中可见, 在 $12380 \sim 12480ft$ 井段,

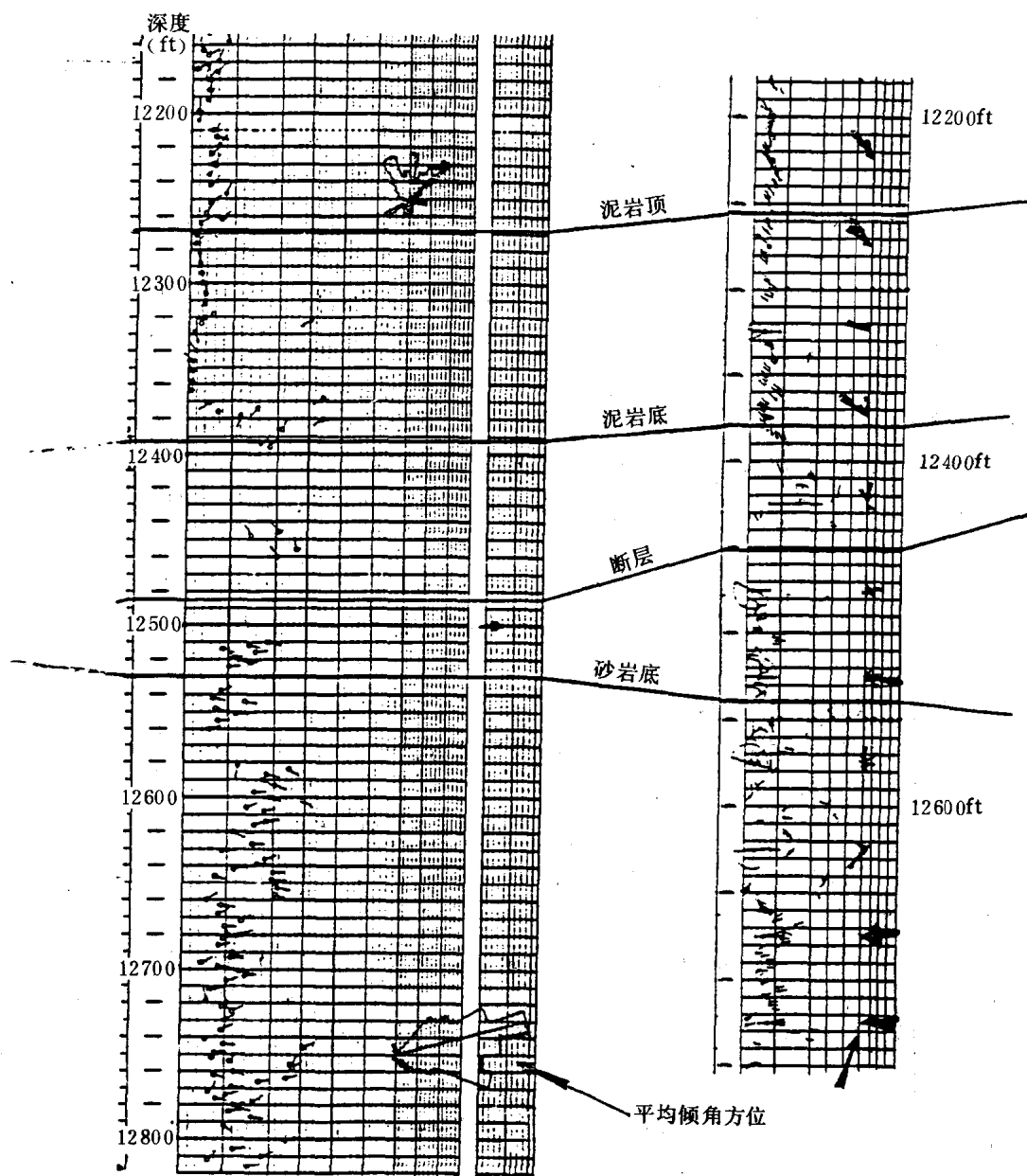


图 9 3 号井、3ST 井地层倾角矢量图