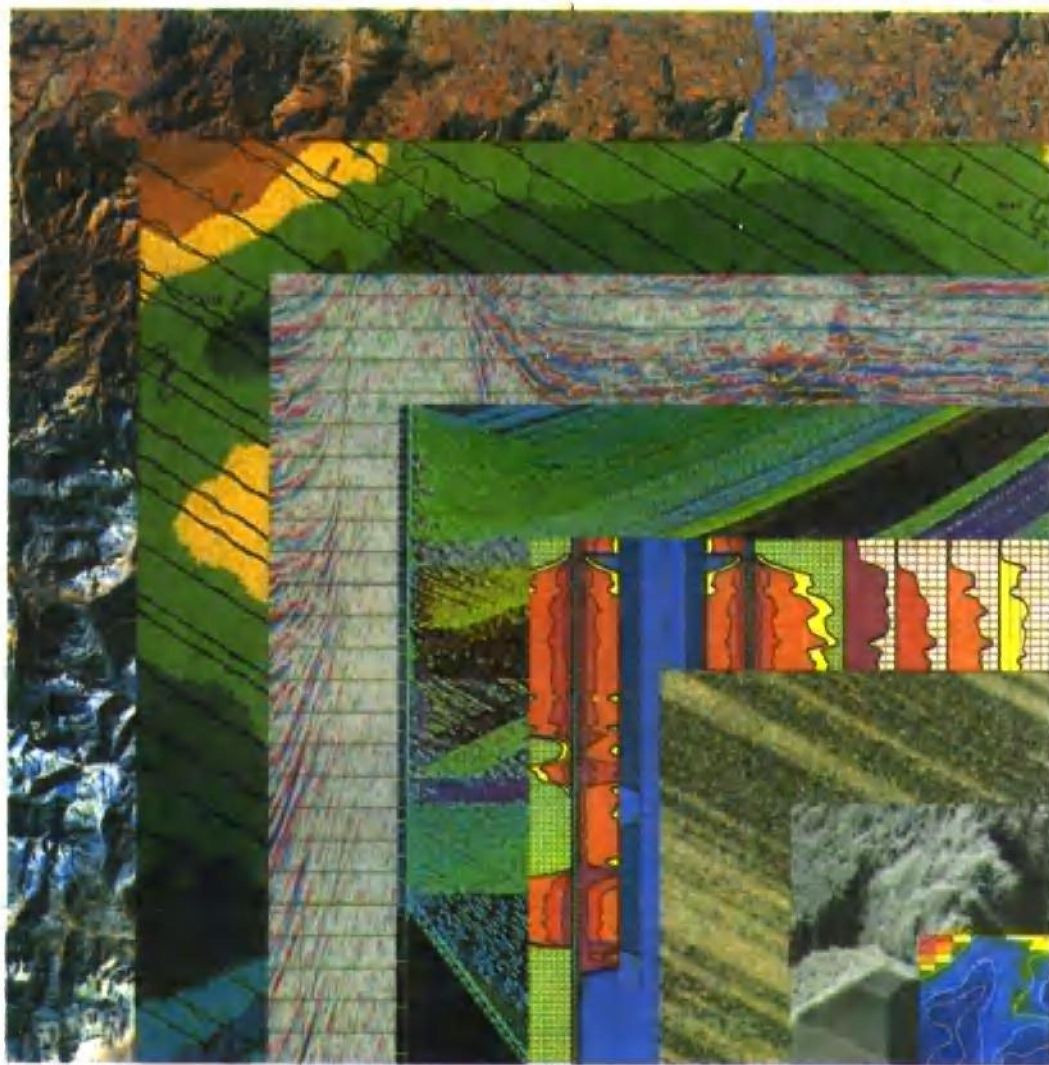


测井地质学在油气勘探中的应用

(译文集)

Applications of well-log geology in petroleum exploration (transactions)



石油工业出版社

P618.130.8/002

070010



测井地质学在油气勘探中 的应用(译文集)

肖慈珣 欧阳健 施发祥 等译
朱克安 等校

8406/06



200403562

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面而系统地介绍了测井地质学在油气勘探方面的应用。译者共收集近年来国外测井界在 AAPG, SPE, SPWLA 及 The Log Analyst 等上发表的具有一定学术价值或实用价值的论文21篇,并按其论述的内容进行分类。全书共分四个部分,书中重点论述了利用地层倾角、自然伽马能谱、自然电位等测井资料及交会图技术预测油气区域,评价油气藏,研究沉积环境和地质构造。同时,还介绍了如何利用测井资料研究生油岩及其它岩性特征。为便于读者学习与借鉴,书中还附有大量的现场应用实例及图幅。

本书可供测井解释人员,石油地质和油田开发工作者以及有关院校师生参考。

测井地质学在油气勘探中的应用 (译文集)

肖慈珣 欧阳健 施发祥 等译
朱克安 等校

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京昌平振南印刷厂排版
北京顺义燕华印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 18³/₄ 印张 472千字 印 1—1,500

1991年3月北京第1版 1991年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0473-9/TE·454

定价: 5.50元

前 言

近年来，大量国外研究文献表明，测井信息的地质应用领域正不断扩大，并已开始形成一门新的地质分支——测井地质学。

测井地质学的含义同目前普遍熟悉的单井岩石物理参数的定量研究是有根本区别的。它在于将测井资料同许多地质现象更加紧密地结合在一起，用测井的手段来研究沉积学和地层学等方面的问题，实现预测和圈定一定范围的油气资源，最终达到查明油气分布规律的目的。

随着现代测井技术的迅速发展，加之计算机处理测井资料的广泛应用，测井地质学实质上已发展成为应用数理分析等数学方法和计算机处理技术研究大量测井资料和地下地质资料的多领域的综合性学科。它已成为油气田勘探与开发，以及寻找地下隐蔽油气藏的一种新的有利手段。

近年来，有关测井地质学的研究，已经引起了国内外广大地质、测井工作者的兴趣与关注。然而，象 G.E. Payton 所编《地震地层学》那样，若有一本能较集中的介绍有关这一学科的基本特点、研究内容和研究方法的参考书，对于从事或愿意从事这方面研究的人员也许是有裨益的。本书正是从这一愿望出发，在查阅了国外有关文献的基础上选译、汇编而成的。

全书共分四个主要部分，第一部分为利用测井资料进行油气区域预测；第二部分介绍利用测井资料研究沉积环境；第三部分是利用测井资料研究生油岩；第四部分是利用测井资料进行油藏描述。

参加本文集翻译的人员还有陶淑娴、丁怀芳、罗大山、朱孔彰、李兴国、雍世和、李瑞及章成立等。朱克安和肖慈珣对全书进行了统校。

由于我们水平有限，加之阅历不深、收集的文章还不够全面，书中错误或不妥之处在所难免，请同志们批评指正。

译者

目 录

第一部分 利用测井资料进行油气区域预测	(1)
一、地质勘探综合分析系统——RECON-地质勘探服务	(1)
二、油气勘探中的区域分析	(20)
三、今后十五年的投影测井解释	(39)
四、测井图头记录的温度在勘探中的应用——一种有希望的预测油气方法	(52)
五、用地温图确定井位	(71)
六、印度上阿萨姆河谷的温度分布及其与油气聚集的关系	(79)
第二部分 利用测井资料研究沉积环境	(91)
一、测井对沉积学与地层学的贡献	(91)
二、用测井资料解释砂岩沉积环境	(110)
三、应用地层倾角测井资料解释复杂碳酸盐岩-碎屑岩沉积环境	(121)
四、用测井资料绘制堪萨斯州中南部Viola灰岩岩相图	(138)
五、怀俄明州 Powder 盆地 Hartzog Draw 油田多井相测井评价	(155)
六、根据自然电位曲线利用计算机解释砂岩沉积环境的方法	(171)
第三部分 利用测井资料研究生油岩	(180)
一、利用密度-电阻率和声波-电阻率交会图识别生油岩	(180)
二、应用自然伽马测井资料确定阿巴拉契亚泥盆系页岩的有机质含量	(191)
三、利用地层密度测井资料确定页岩的有机质含量——美国阿巴拉契亚盆地泥盆系页岩应用该方法的实例	(208)
四、生油岩测井	(215)
五、利用测井资料的多元统计分析确定生油岩的特征	(227)
六、自然伽马能谱测井测定生油岩的潜力	(244)
第四部分 利用测井资料进行油藏描述	(250)
一、应用测井资料地质统计分析评价油气藏	(250)
二、测井在储集层模拟中的作用	(269)
三、利用地层倾角测井的微电阻率曲线改进印度尼西亚加里曼丹东北部薄砂岩层的地层评价	(284)

第一部分 利用测井资料进行油气 区域预测

一、地质勘探综合分析系统——RECON —地质勘探服务

W.L. Macbride J.D. Doyle

丁怀芳 欧阳健 施发祥 译

摘要 RECON-地质勘探服务是美国科学软件公司研究的一个综合地质分析系统。它把传统的地质分析方法与由数字化测井资料计算的一系列变量参数相结合, 绘制储集层与非储集层的定量图, 用来勘探地层圈闭油气藏。

RECON 用于勘探服务已十多年, 为三十七家石油公司, 在北美洲大部分主要盆地中进行了服务。绘制油田开发地质图, 进行一系列的区域性研究。

RECON 不仅备有将各类测井资料标准化的精密设备, 同时还为地质学家研究提供一种或多种测井参数。有时, 在不知道岩性时, 也可以预测地层圈闭。

RECON 可用计算机同时研究不同地区的若干层段, 以高质量的测井数据建立测井数据库, 同时, 还大量地应用了概率统计技术。RECON 可以一次处理 200 口以上的井, 并可提供多种地质图。

RECON 概念

这部分有助于初步了解 RECON 服务的一般流程。下面几步在后面各节中将进行讨论。

可行性研究

对研究区域作初步讨论之后, RECON 工作人员必须进行可行性研究。

可用于评价的测井资料, 了解工程设计的对象, 提出 RECON 设计及相应的费用和进度表。

测井曲线数字化

对提出的每项工程设计都要专门收集典型的测井曲线, 进行数字化, 除非当事人另有规定外, 一般只对目的层段和有关的标准化井段的曲线进行数字化。在每条曲线上, 每隔一英尺确定一个值。数字化质量控制是 RECON 工作人员的职责。质量控制要求通过数字回放在原始曲线道 1/2 线宽范围内产生一条曲线。

测井曲线标准化

测井标准化技术已得到发展, 并将继续发展这一技术。大量的时间用在准备数据这个最重要的阶段。不仅要考虑井眼条件, 还要尽力减少由不同仪器、不同测井公司所测曲线之间的差别。

地质分析——地层对比和等厚图

RECON 工程设计的关键部分是综合地质分析。要对比时代相同的地层，用剖面图和等厚图表示其成果，鉴别并证实预计出现的圈闭。研究构造、岩性和沉积环境，并应用这些变量绘图。

计算和筛选变量

RECON 变量是由数字化、标准化的测井曲线计算得到的，这些变量涉及的范围可从简单的常规参数（如平均值）到用数学方法（如主因素分析）求得的复杂变量。对一个早已取得经验的地区，我们计算有把握的变量，再加个别成功可能性较大的变量。对其它地区，则需要计算与油气存在有关的每一个变量。

绘图之前，大量的 RECON 变量文件要经各种统计方法的处理及鉴别，并识别与油气藏距离有关的较小的变量组。

成果

用统计筛选出来的各个变量作图，并研究这些图的关系，对那些已知的生产区，绘制图件之后，可扩大到包括整个工程设计的地区，以便进行远景评价。

RECON 工程设计是以综合的总结报告和图件形式进行全面地解释和说明，并对如何更好地应用这些成果提出建议。另外，还要由 RECON 工程设计的地质家做口头介绍。

RECON 成果

RECON 工程设计的成果以正式文字报告和图件提交给用户。下面首先说明总结报告说明部分，之后再介绍不同类型作图的研究方法的实例。

总结报告

一个关于全部计算结果和地质资料的完整报告，是以专题报告的形式提出的。它包括与测井数字化、标准化、地层和岩相研究有关的一切成果。

报告中列出所用到的全部 RECON 变量，详细地说明那些被认为在作已知生产区域图件时有特殊意义的参数，对其提出地质解释，并对统计方法的应用作出全面说明。

要按照地质和统计的可信程度对该工程设计勘探阶段所预测的前景进行分类，详细讨论和评价每一种前景的技术指标。前景评价分类结果用单独的表格列出。

图件

图件是提供综合利用 RECON 变量和常规地质变量描述远景地区的图幅，所给出的工程设计图件是包括多方面的，以下列出其中的一部分：

- 1) 沉积环境图；
- 2) 渗透率相关变量图；
- 3) 胶结指数图；
- 4) 粘土含量图；
- 5) 碳酸盐百分含量图；
- 6) 孔隙度图；
- 7) 含盐量图；
- 8) 等厚图；
- 9) 以截止值为基础的岩性等值图；

10) 构造图。

另外，还包括说明地层关系的全套剖面图。

沉积环境分类

根据自然伽马平均值图，很难区分高能三角洲前缘的沉积环境与高能河道充填的沉积环境。这两种沉积环境都是以自然伽马低值为特征。但是自然伽马的一阶导数（自然伽马曲线呈锯齿状）可以十分有效的区分这两种环境。对于 RECON 来说，计算机通过多次测量的组合可以划分砂岩体，并且同时能对每一个变量和用其它方法获得的变量作出评价。这种主轴分类法将在后面说明。

沉积环境解释

通过对图 1 中几种图形的研究表明，用七种自然伽马变量可以区分出六种不同的沉积环

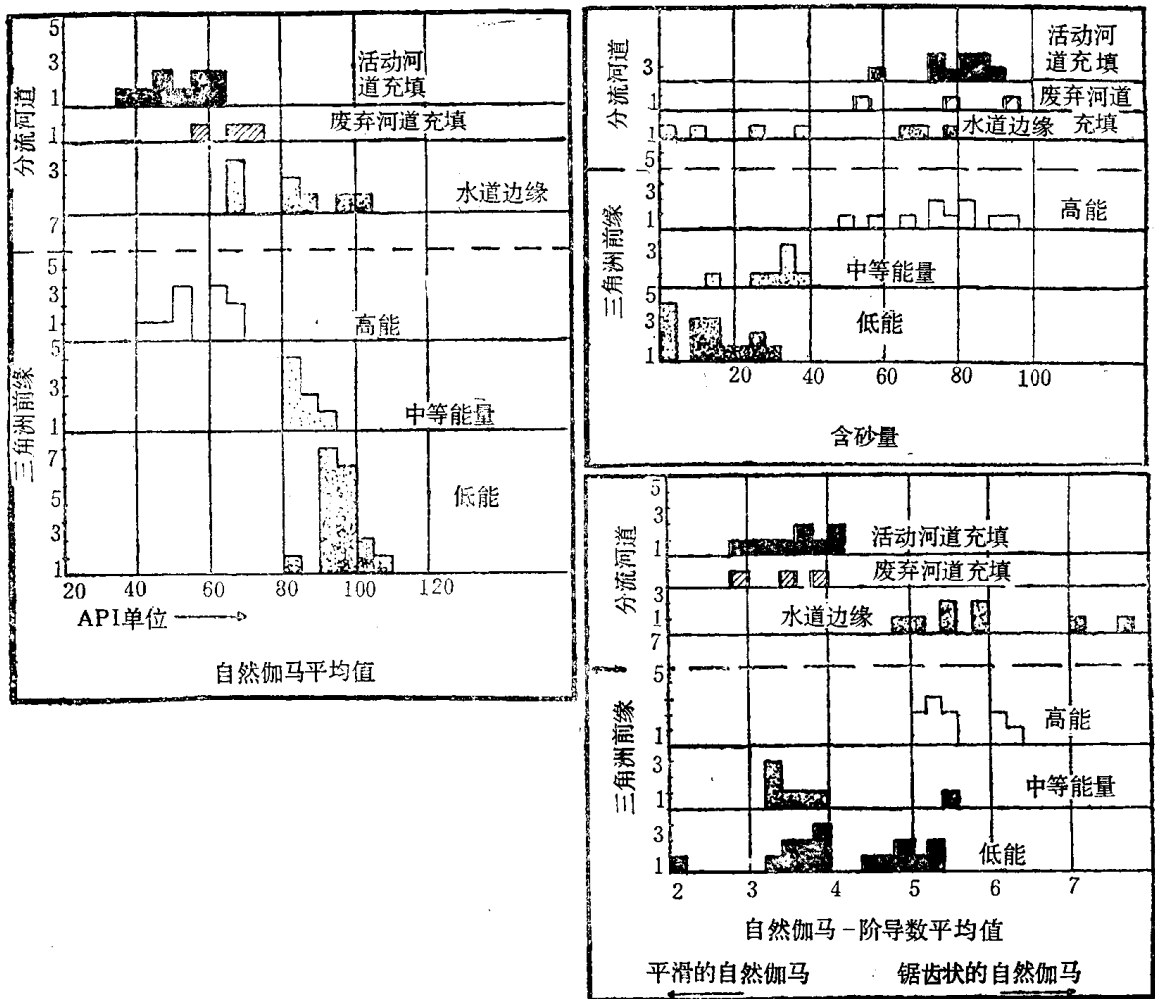


图 1 自然伽马变量统计图

境。图 2 是用同样的研究方法作出的，在此基础上，再加上其它一些类似的图形，则可看出每种沉积环境具有以下特征：

沉积环境	未证实层	证实层	致密层	有工业价值层
活动河道充填	1	5		5
废弃河道充填	3			
边滩	7	1	1	
高能三角洲前缘	2	8	7	1
中等能量三角洲前缘	6	1	1	

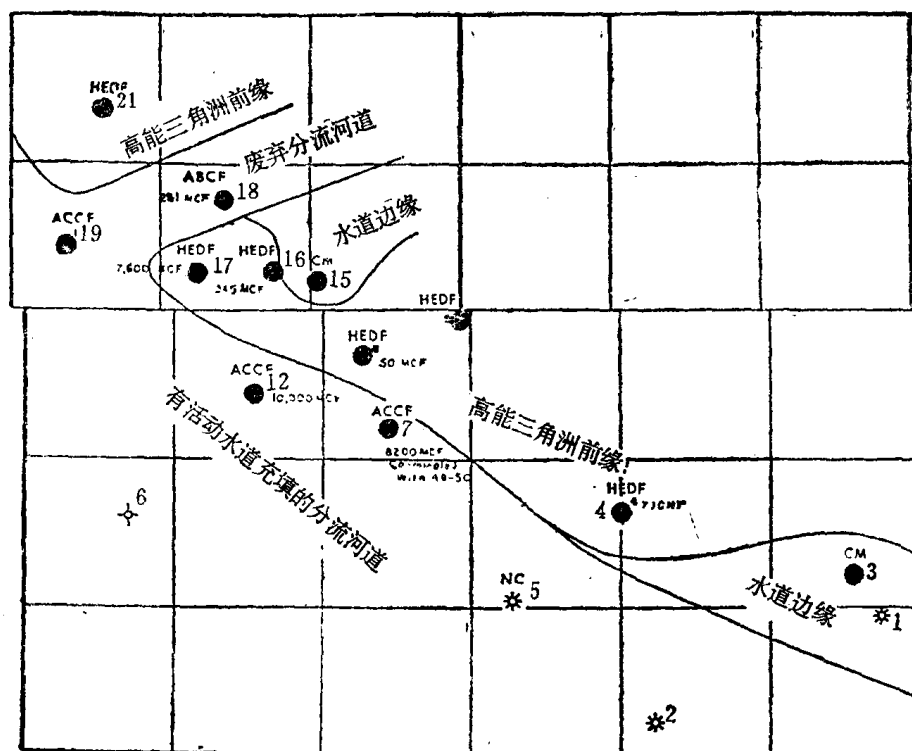


图 2 层段50~52沉积环境解释

ACCF—活动河道充填;
 ABCF—废弃河道充填; CM—边滩;
 HEDF—高能三角洲前缘;
 MEDF—中等能量三角洲前缘;
 LEDF—低能量三角洲前缘

尽管在自然伽马曲线上高能三角洲前缘沉积和活动河道充填沉积都是低值,但很明显,最好的储集层几乎都在活动河道充填沉积中。

绘制油气运移路径图

很多地区,要确定地层圈闭位置,其关键是要判明每个孔隙性地层所能提供油气运移的能力(图3)。在高渗透区,油气可以自由的运移,而低渗透区则起到侧向封堵的作用,并可能会圈闭油气。这两种区域之间的分界线位置在许多勘探工作中起着决定性的作用,在岩性渐变的地区尤其突出。虽然大多数情况不可能直接用测井资料作出渗透率图,但在勘探中,RECON技术可作出具有重要用途并与渗透率相关的图件。这些图件是依据盆地和储集层的类型利用自然电位、自然伽马或伽马-孔隙度测井的综合资料作出的。

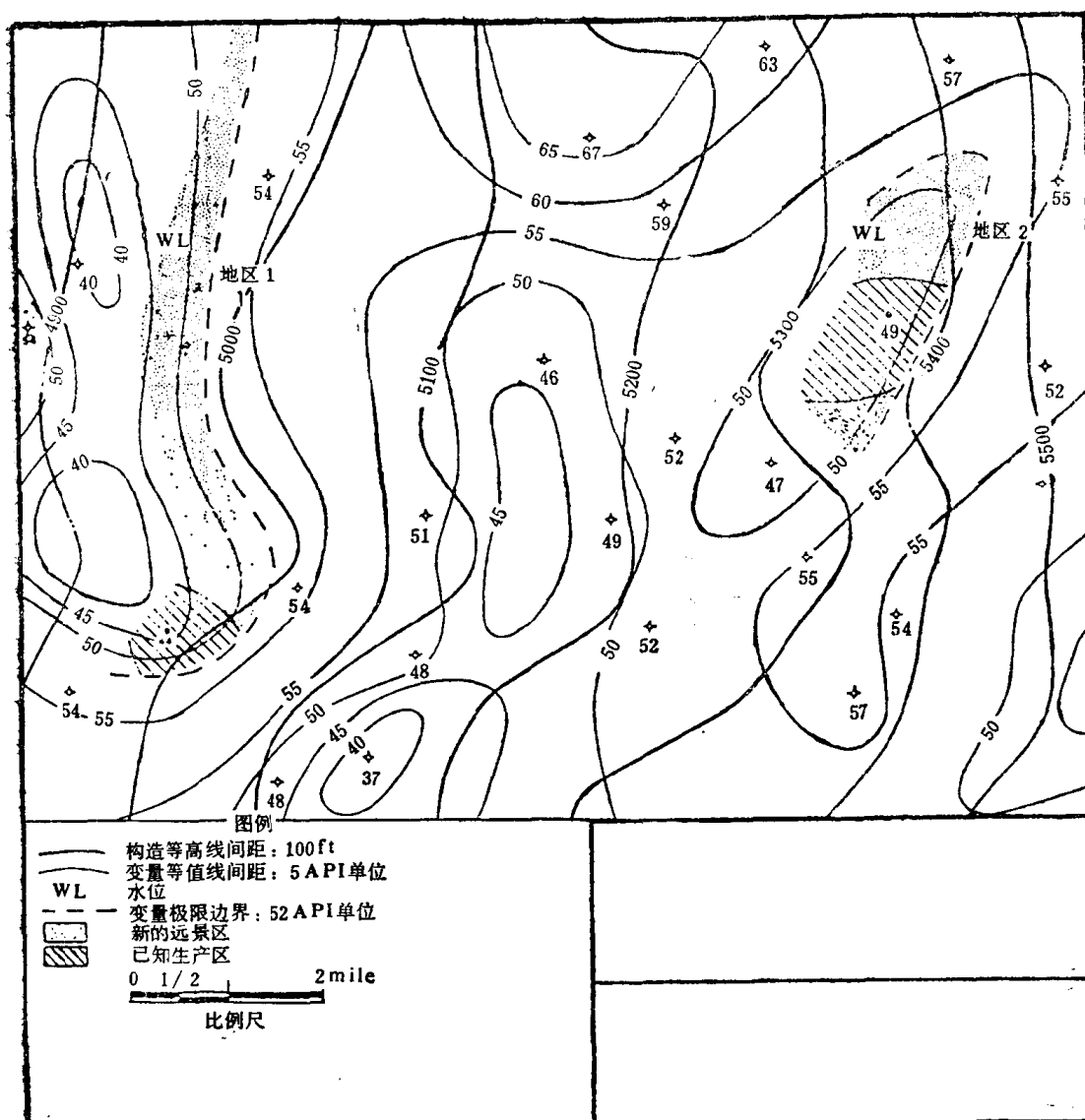


图 3 RECON 构造图和油气运移能力

岩性分类交会图

在图 4 中，用交会图取值进一步细分岩性类别。各类岩性由行、列数字确定。由些，可根据研究区域内各井的泥灰岩百分数作出胶结指数图。

胶结指数图

由于不同型式的地层水循环以及胶结物来源或岩石的组成不同，胶结作用可以有地区性的变化。在粘土和钙或粘土与硅质胶结的地区，计算胶结指数需要采用伽马测井和孔隙度测井。岩性致密常常导致干井，图中显示为胶结较差区域的储集层，不但每口井可能获得较高产量，而且可以达到2~3倍的成功率。应用计算机有可能计算许多不同层的胶结指数图（图 5），并将这些图“叠合”起来，圈出胶结较差地层的最大范围。

地质模拟过程

作为 RECON 技术在勘探地层圈闭时特别有用的实例，研究在泥岩层段中确定孤立的礁块。图 6 表示礁块及礁屑沉积侧向与周围的页岩是相当的。在接近礁块的页岩中含较多的

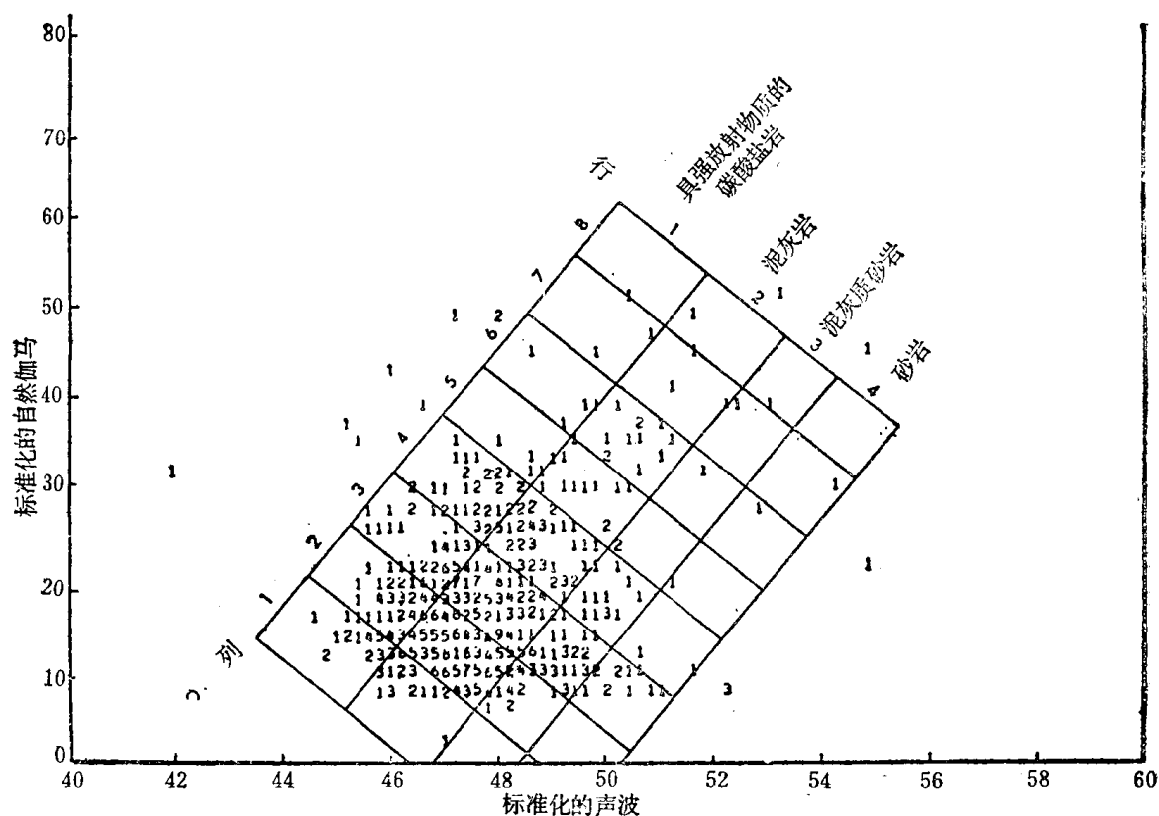


图 4 岩性交会图

钙质，并出现几乎是纯石灰岩的夹层。经验表明，根据现有的测井曲线的类型和质量，有一个与钙质成分或石灰岩-页岩互层有关的参数，经识别和验证后，可用它作出从已知井附近到礁块边缘地带的邻近值(距离)图。为了完成这项工作，利用围绕边缘明确的已知岩体的干井测井资料可以计算许多有用的变量。从周围各井到已知礁块边缘的距离是测量得到的，这样可以成功地确定出已知孤立礁块“模型”邻近值的参数，再根据其它已知孤立礁块进行检验(图 6)。如果这一参数在试验区内通过作图能获得成功，就可用来确定其它干井之间的新的远景地区。

工程方案的审定

在顾主和科学软件公司协同推广和实施一项 RECON 工程设计之前，必须先要进行以下两个预备性步骤。

工程设计地区性考察

工程设计考察是在顾主与 RECON 工作人员、地质家之间进行的一种非正式讨论，以初步确定将 RECON 方法应用于共同感兴趣的一个或一些具体地区。某些基本的问题必须得到答复，因为它关系到具体的地质目标。这个地区井的密度是多少？主要的圈闭类型是什么？有哪些类型的测井曲线，可以利用的测井曲线有多少？这个地区的区域地质历史如何？对于 RECON 工程设计，你的目的与要求是什么？

如果科学软件公司的地质家在你感兴趣的地区有经验的话，他可以知道对于你的设计有帮助的具体的测井参数和作图方法。

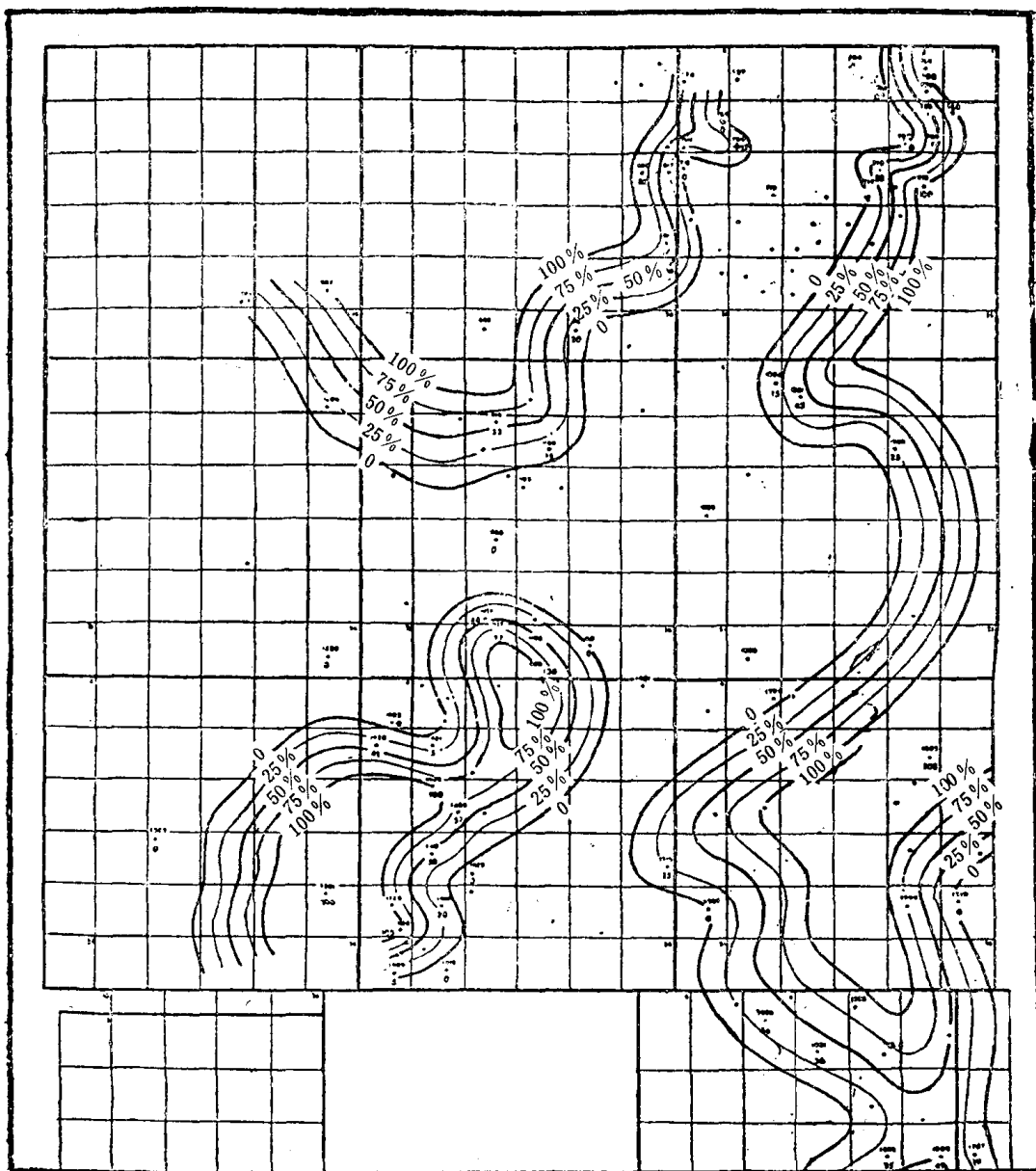


图 5 胶结指数图 (层段20~30的全部砂岩的胶结指数分为22级)

这个过程需要 3~4 小时才能完成，其结果可形成一个文字材料，其中概括地讨论一些情况，提出可行性研究是否合理的结论，但对该区初期评论不承担义务。

可行性研究

一次可行性研究的目的是要充分证明为 RECON 设计而预先研究的区域是合格的。据此，为了达到下列目标，对研究区内的每一条测井曲线都要检查。

- 1) 确定所利用的井位；
- 2) 选择每口井中要数字化的测井曲线；
- 3) 选择要研究的地质层段；
- 4) 确定合适的标准层；
- 5) 预计工程所需的时间和费用。

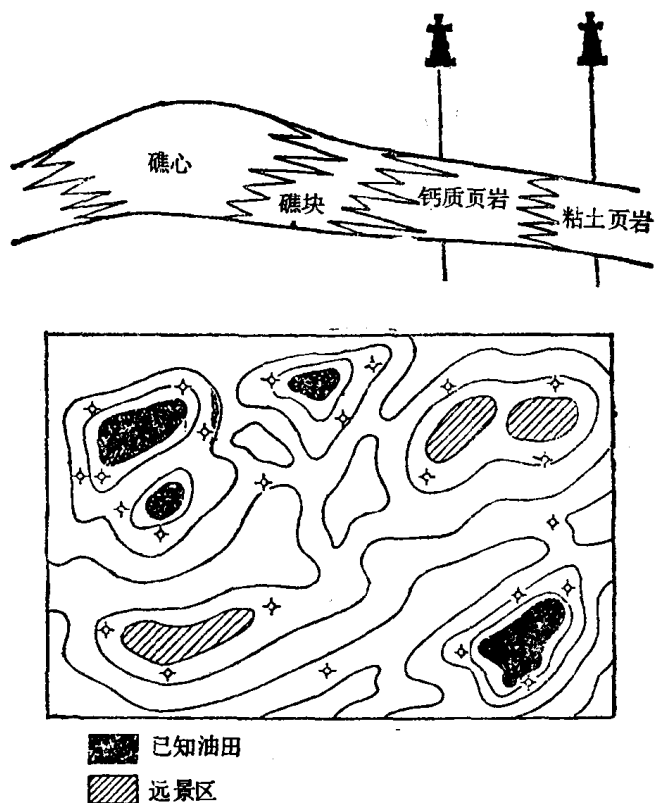


图 6 预测礁块

可行性研究的结果在正式报告中提出,并附有工程设计所需井的基础图件。报告中将详细叙述设计的目标和采用的主要技术。如果可行性研究的建议可以被采纳,那末在可行性研究报告的基础上,将以协议的形式签订工程设计合同。

范围

RECON 工程设计的范围是不同的,油田开发研究的最小范围是:

- 1) 60 口井;
- 2) 井段长 200ft;
- 3) 每口井用 3 条曲线;
- 4) 在区域范围内有 6 个区块;
- 5) 作出 10 张图。

区域性填图工程设计可以达到较大的范围:

- 1) 400 口井;
- 2) 井段长 2500ft;
- 3) 每口井 5 条曲线;
- 4) 区域范围达 30000mile²;
- 5) 作出 100 张图。

不管如何应用,设计范围要在可行性研究时确定。

技术说明

地质分析

对所研究区域的地质情况要作全面的了解,这是 RECON 工程成功的关键。我们发现,

只有使计算机处理与 RECON 统计学相结合,才能综合确定圈闭机理、古构造、沉积环境、地层以及有关的地质因素,以便得到最佳的 RECON 结果。RECON 工程成功的关键还要知道所研究的区域存在哪些地质模式以及这些地质模式与油气聚集的关系。这项工作包括下列内容:

1. 考察圈闭机理

已知油气圈闭的实质是什么?它们在该勘探区域内会预期出现吗?这种统计分析的方法为检验合理选择 RECON 参数作为邻近值指示打下了基础,而不是利用随机的试凑法。

2. 完整的地层分析

精确细致地对比各测井曲线,绘制一些横向剖面图,以便全面了解整个区域剖面。这里先定义一下“地层”,其目的是为了确定一个井段,以便计算其中的各个 RECON 变量。然后,对每个地层层段中的每组变量进行统计分析和作图。在岩相变化与油气圈闭有关的地方,这些岩相图常常作为检验 RECON 变量的地质模型。

3. 掌握区域地质

掌握区域地质特征能使地质家确定某些层段作为测井标准化的标准层,并计算出这些层段的 RECON 变量。另外,它还能使 RECON 工作人员建立起该区域已知的地质模型,筛选变量,评价成果,为 RECON 数据库统计分类提供一套连续程序。这项工作很重要的一部分是,评价各参数在绘制与模型特征相差很远的已知特征时所起的作用,以此来证实这些参数是否有明显的功效。这就是所谓的根据模拟一个已知的地质模型来“检测”变量的方法。

4. 勘探与解释

完成地质模拟和检测工作之后,就要绘制该探区内各变量图,它们视为与邻近指示器一样。地质人员必须对这些图形作出评价。这就是适用于模型区域的某一 RECON 近似方程的地质解释过去常常用作分类勘探的原因。

RECON 变量

通常,在给定的地层圈闭中,用户或 RECON 工作人员都知道利用关键性的地质参数作图。在其它圈闭中,也必须找出关键性的地质参数,RECON 变量和地质统计分析能提供这种关键性地质参数。

业已强调,RECON 方法的主要目的是要精选出隐藏在测井曲线(这些测井曲线一般是标准勘探程序中所必备的)中的不易分辨的但却有用且有效的信息。为了能定量分析测井信息,我们精心设计出一套可以确定一条测井曲线上所有相应特征的综合性的统计参数或变量。将这些测井变量输入到 RECON 计算机文件中,与井的生产能力、与发育有利油藏的距离(近似值)或其它重要的地质参数等有关的独立数据进行对比。这个文件作为数据库是用作以后所有统计分析或评价和绘制图件。

要测定夹杂在典型干扰的测井资料中微细的地质信息,则需要仔细、周密地安排和深刻地分析各种变量。因此,RECON 变量的确定是整个工作中最关键的步骤之一。一般来说,不可能建立一套可以全部包括各种情况的变量,因为 RECON 研究的每种地质条件和勘探目的都是独特的。因此,在处理每个勘探项目时,要利用一组不同的变量。为了满足每种研究的特殊需要,则要设计特殊的变量。

以可产生的几种 RECON 变量为例。假设要描述图 7a A-B 之间所示的自然伽马曲线,则需要设计一组变量。对任何曲线而言,这组变量可用代表该曲线上波幅和波形信息的两种补充方法来描述。

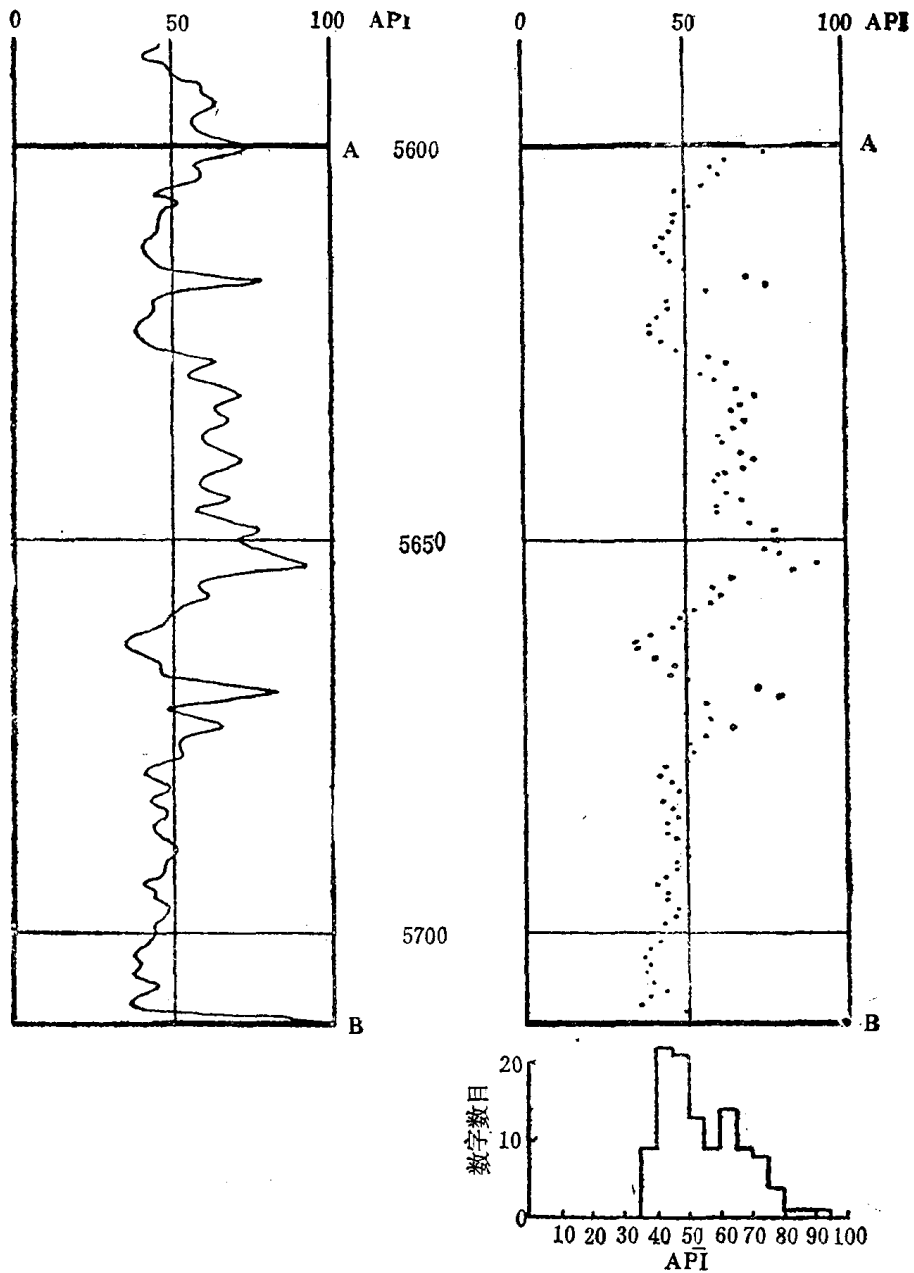


图 7a 典型的自然伽马测井曲线 (其 RECON 变量有待计算, 设计层段在 A、B 之间)

图 7b 按一英尺间距取值测量的自然伽马曲线的数字化显示图 (直方图是通过把落到每个指定的 API 级别上的数字加起来而绘出的)

1. 波幅特征

如图 7b 所示, 在地层 AB 间隔内, 这条曲线 (以 API 为单位) 按一英尺间隔取一个数字 (点), 则该曲线的波幅成分可绘制成全部数字点的直方图。然后, 可对这个直方图的所有性质进行定量分析, 并加入到一组 RECON 变量中去。

例如:

1) 可推测 AB 层段内的平均泥质含量或许与储集层的发育成反比的关系。从直方图(图

8) 中的全部数据的平均值 ($\bar{x}$) 可给出这个变量的值。在此条件下, $\bar{x}=53.9\text{API}$ 。

2) 直方图的平均变化或“伸展”值的量度为标准偏差 (s), 它说明这个层段内 泥质含量变化范围较宽。数值小 ($s=12.5\text{API}$) 表示泥质含量相对稳定。

“按平均值计算, 纯度为多少定为最纯的砂岩?” 对这个问题的回答可以通过计算称之为“低侧平均值”的自然伽马变量 (图 8 中 $\bar{x}_1$ 表示的) 而解决。在该例中, 它被确定为只有落在平均小于 1 个标准偏差单位的下面, 或是落在 $(\bar{x}-s)$ 下面的那些数字的平均值。所有小于 $(\bar{x}-s=41.4\text{API})$ 的数字的平均值为 $\bar{x}_1=39.1\text{API}$ 。

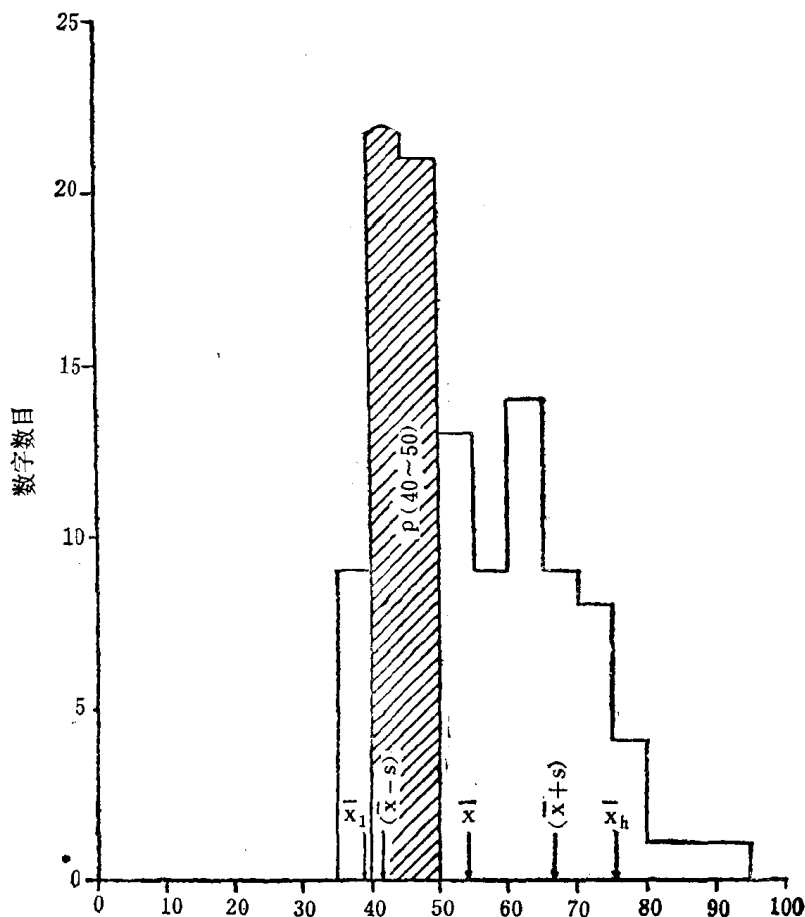


图 8 图7b中自然伽马曲线直方图的数字放大形式

$\bar{x}$ 为平均值, $\bar{x}_h$ 为高侧平均值, $\bar{x}_1$ 为低侧平均值, 数字比例在 40~50API ($p(40\sim50)$) 层段内

可以定义和计算一个与上述类似的变量——“高侧平均值” ($\bar{x}_h$), 用以描述粘土平均含量值较高的岩性特征。高侧平均值和低侧平均值用以说明直方图的“尾部”, 其特征不论是用 $\bar{x}$, 还是用 s 都不能很准确地描述。

3) 在研究特殊的目的层的岩性 (具有专门已知的测井响应) 特征时, 对于给定的井, 这些岩性特征的重要性可以由落入指定的波幅范围的那部分数字 (p) 来确定。例如: 假设地质工作者对自然伽马射线强度在 40~50API 范围内的泥质砂岩感兴趣, 在这口井中落入这一级别的那部分数字应为 $p_{(40\sim50)}=0.39$ (图 8)。同样, 其它任何级别也可以确定, 并可算出它们的比例数字。

2. 频率特性

测井曲线的波形或频率范围可以反映地层特征。有许多不同的方法可以确定这些地层的

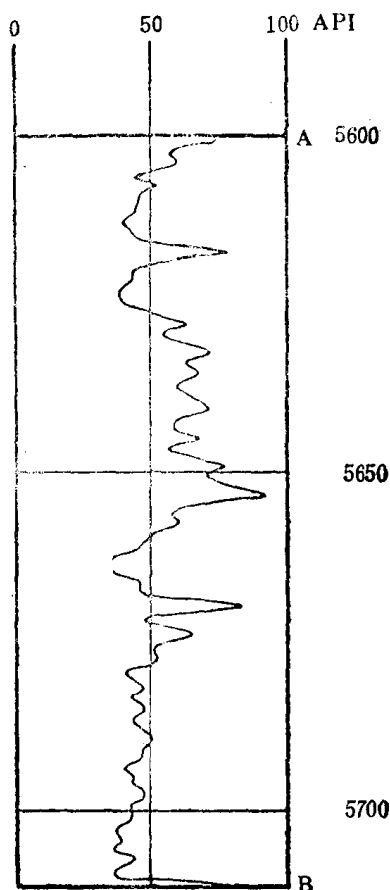


图 9 截止值为 50 API 时曲线通过的情况

频率,这取决于哪种特征更有意义。在这些频率变量中最常见的一种是每单位厚度内有多少个单位地层(例如砂岩)。象这样的变量在正常情况可用一个固定的砂岩的截止值,并统计测井曲线通过这个截止值的次数来确定。图 9 是说明这种“曲线通过”的变量。或者,假若地质人员怀疑地层特征(由自然伽马曲线“抖动”所反映的特征)可能与有利的储集层岩相的发育有关,RECON“频谱”变量就要测定这样的波形或频率特征。这些变量是以三角法(或傅立叶)系列的理论为基础,允许任何一组真实的数据被表示为具有不同波幅、波长(或频率)和延迟(或相位)的一组正弦曲线之和。图 10 所示就是这种制图方式的假设的例子。从直观上看,合成曲线的波形不规则,它由三条不同波幅、波长和相位的子曲线所造成的。正如图 10 所示,合成曲线总的幅度变化可以根据子正弦波的波幅来分解。

依照同样方式,任何测井曲线都可分解成一系列正弦曲线。用规定的任一组波长的正弦曲线的贡献,可以计算总曲线变化的百分数,然后绘制成 RECON 变量图。例如:波长在 2

~4ft 之间的正弦曲线的贡献与自然伽马曲线(图 7a)的比率为 0.35,或是为总变化的 35%。这个贡献算是相当高的,反映了这条曲线的高频特点。

3. 地层变量

频率和波幅这两个 RECON 变量的重要特征是它们与该层段中地层的位置无关。为了确定各层位在特定测井曲线上的特征,必须定义一组特殊的变量。

例如:假设我们要在图 7a 中用自然伽马测井曲线确定 A~B 层段内最纯砂岩的地层分布状况。我们希望根据平均值确定最纯的砂岩位置,并且还要确定这些砂岩是围绕这个平均地层位置趋向于集中分布,还是分散分布在整个层段之内。

利用加权平均值(加权量为曲线波幅的函数)可以确定数字化测井曲线的上述的以及其它类似的性质。在该例中,选择砂层截止值为 50 API,把根据自然伽马测井曲线和这个截止值之间计算的低侧差值作为加权量(图 11)。然后利用下式计算出加权的平均测井深度:

$$D = \sum W_i d_i / \sum W_i$$

式中 D ——纯砂岩的平均深度;

W_i ——加权量;

d_i ——每英尺砂岩的测井深度。

同样地,对每英尺砂岩减去 D 值的距离进行均方根加权,便可确定砂岩在 D 值内集中的情况。可以列式表示为: