

长庆石油测井论文集

(1970 — 2000)

杨玉征 刘思明 主编

(北京)

53

石油工业出版社

Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书共收录了成果、论文 36 篇，其反映了在长庆低孔、低渗油气田的测井、解释等方面的丰富成果和经验，内容包括：方法研究和综合解释、测井仪器、气测录井及解释、计算机应用、生产测井、射孔技术、岩电实验等七个方面，具有很好的启发性和实用性。

可供从事测井、地质的技术人员及测井、地质专业的大中专学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

长庆石油测井论文集：1970—2000/杨玉征，刘显明主编．
北京：石油工业出版社，2000.9

ISBN 7-5021-3139-6

I. 长…

II. ①杨…②刘…

III. 采油井—测井—文集

IV. TE151-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 52131 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 544 千字 印 1—1200

2000 年 9 月北京第 1 版 2000 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3139-6/TE·2389

定价：42.00 元

序

长庆测井伴随着长庆油田的发展走过了三十年不平凡的历程。三十年来，长庆测井职工在极其艰苦的条件下胸怀找油、找气大目标，在陕、甘、宁、蒙四省区二十余万平方公里的土地上，转战沟壑山川，驰骋沙漠荒原，为在长庆找到大气油田做出了无私贡献。可以说，长庆油气田的每一口油井的出油，每一口气井的出气，都凝聚长庆测井工作者的一份心血。

三十年来，长庆测井始终围绕服务于油气勘探开发这一宗旨，针对长庆油田“低孔、低渗、低产”的地质特点，开展科学研究和科学试验，不断积累，逐步形成了适应鄂尔多斯盆地低渗透地质特点的测井技术系列和解释系统。同时，在长庆多年的油气勘探开发中锻造出了一支作风顽强，技术过硬的测井技术队伍。为长庆的油气储量、产量的逐年大幅度增长，为测井学科技术的发展做出了应有的贡献。

为了适应长庆油气勘探开发的需要，长庆测井处先后引进了 PE3230 计算机、SUN 工作站，3700 测井仪、DDL—PL 数控测井仪、5700 成像测井仪、气测综合录井仪，购进了几十套国产数控测井仪、数控射孔仪，使所有测井作业队都实现了数控化，极大地提高了资料采集质量。同时，紧密结合长庆低孔、低渗油气层的地质特点开展科研攻关，涌现了一大批科研、技术能手。发表了一大批成果和论文，并在勘探局、总公司获奖，部分论文还在国际会议上发表，受到好评。

为了庆祝长庆测井三十周年，长庆测井处选编了这本论文集，旨在回顾三十年来的发展历程，展示三十年来的发展成果，以激励和鞭策广大职工为油田建设和测井技术的发展作出更大的贡献。我认为，这是一件大好事。我历来十分热爱测井这支队伍，几乎所有老的测井解释专家都是我的朋友，他们在极其艰苦的条件下为长庆油气的勘探开发立下了不可磨灭的功勋，为长庆石油勘探事业献出了自己的青春，献出了自己的终生，甚至儿孙。我向诸位老一代的测井解释专家表示深深的敬意。今天，我更喜爱正在战斗中成长着的年轻一代测井、解释专家，他们掌握了更多、更新的测井、解释技术，他们既有朝气蓬勃的今天，也有着不可限量的未来，我祝愿他们新的科研、生产实践中发挥更大的作用，为长庆油气的腾飞立新功。

庆祝长庆测井三十周年！

何自新

2000 年 7 月 26 日于西安

前 言

今年是长庆测井三十周年，三十年来，我们长庆测井职工奋战在陕、甘、宁、蒙四省区，为长庆的油气勘探与开发作出了重要的贡献。长庆油气田所在的鄂尔多斯盆地是我国的第二大沉积盆地，由于其储层、构造的特殊性，使油气田也具有与其它油气田不同的特征。长庆油气田的特点是：

(1) 长庆油气田横跨陕、甘、宁、蒙四省区，分布面积广，油气资源丰富，发展潜力巨大。

(2) 含油气层系多。有中生界侏罗系的直罗组、延安组、富县组油层，还有全区大面积含油的三叠系延长组油层；有上古生界石盒子组、山西组、太原组、本溪组的砂岩气层，还有下古生界的奥陶系风化壳气层，在陕北富县和尚塬地区还有三叠系气层。

(3) 岩性变化大。既有砂岩油、气层、又有碳酸盐岩气层，既有中、粗砂岩、含砾砂岩油气层，又有细砂岩、甚至粉、细砂岩油气层。

(4) 非均质性强，物性差。长庆的油、气田绝大部分都是低孔、特低渗、低压的“三低”油、气层，如下古生界奥陶系风化壳的碳酸盐岩储层，平均孔隙度仅 5.3%~5.9%，渗透率 $0.01 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均压力系数 0.955，低于静水柱压力。八五以来，长庆勘探、开发的重点油层——三叠系延长组长₆油层，平均孔隙度也仅有 12%~13%，平均渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。

由于长庆油气田特殊的地质特征，给测井解释工作带来了较大的困难。

(1) 由于分布面积广，储层的测井曲线响应特征多种多样，既有中、高阻油、气层，又有低阻油、气层；既有纯油层，底水油帽层，还有比较多的油水同层、气水同层，这是由于长庆的构造平缓，岩性细，油水分异差所致。如陕北大量的长₂油层，部分下古生界气层，这些油（气）层的电阻率与水层相当，区分困难。

(2) 由于储层孔隙度小，所以，对曲线的精度要求高。如长₆油层孔隙度为 12%，若含油饱和度 50%，则储层含油孔隙体积仅 6%，其余 94% 均为岩石骨架和水，再加上地层压力低，泥浆滤液的侵入，仪器探测深度大多小于 2.0m，大部分仪器探测深度仅 0.2~0.3m 左右，所以油的信息对测井的贡献远小于 6%，下古生界储层，平均孔隙度仅 5.3%~5.9%，加上气的流动性更大，储层气的信息对测井曲线的贡献就更小，一般的国产仪（包括 3700 仪）很难满足解释的精度需要，易造成解释失误。

(3) 低孔、低渗储层都必须经压裂改造才有产能，而测井曲线反应的仅是改造前的地层信息，压裂效果的好坏，压后储层的裂缝情况都是未知数，同时，由于很多区块水层发育，试油压裂改造的难度大，压裂强度小了，油层得不到很好的改造，产油量低或试不出油来，压裂强度大了又容易压窜水层，造成油、水同出，或只产水不出油，使测井解释更加困难。

困难大，储层复杂，就更能锻炼队伍，更是测井科技人员施展才华的好战场。三十年来，在长庆这块黄土地上涌现出了一大批优秀的科技人才。

为了庆祝长庆测井三十周年，我们挑选了长庆测井职工在这三十年中的部分科研项目（改写成论文）、技术论文，编辑了这本论文集。论文集共分 7 部分，具有 3 个特点：

(1) 内容较丰富。其包括了方法研究, 综合解释, 测井仪器, 气测录井, 计算机应用, 开发测井, 射孔技术, 岩电实验等;

(2) 紧密结合长庆勘探、开发的实际, 具有较强的可操作性;

(3) 长庆油气田所在的鄂尔多斯盆地, 其油气储层均属低孔、低渗的储层, 文集中有较多的论文阐述了低孔、低渗储层的解释方法, 油气层机理, 岩电实验, 气测录井等, 是一本较系统、较全面的论述低渗储层的论文集。

我们选编这本论文集的目的主要有两方面:

(1) 将三十年来各阶段、各专业有代表性的项目、技术论文收集、整理, 以供年轻和在职的测井职工学习和借鉴。

(2) 向测井同行和地质家介绍长庆测井的部分解释方法, 科研成果, 工作经验, 以达互相学习、交流的目的。

所选的 70 年代、80 年代的部分成果, 由于时间间隔长, 可能已失去了其应用价值, 但老一代测井工作者结合生产刻苦攻关的精神和在解决实际问题中的分析方法仍值得我们学习和借鉴。

由于篇幅有限, 仅选取了部分论文和研究成果, 还有大量的高水平论文、项目都未入选, 尤其是最近几年来涌现出的部分中青年优秀科技人员的论文未能入选, 今后, 在条件允许的情况下, 我们将陆续整理、出版, 敬请大家谅解。由于时间仓促, 在论文编辑和项目改写过程中错误在所难免, 请长庆测井职工和读者批评指正。

编 者

2000 年 7 月

目 录

陕北靖安地区中生界低渗储层测井参数评价及油水层综合解释方法研究	杨玉征 刘显明 马昌旭 (1)
复杂泥质低阻油层的测井解释方法	汪仕杰 孙君明 徐文珍 (18)
全性能综合解释法	曹国栋 胡德华 (30)
陕甘宁盆地中部奥陶系碳酸盐岩储层参数计算及气层识别	程启荣 姚克学 许家玉 (41)
用测井方法综合评价风化壳储层裂缝	侯哲国 (49)
陕甘宁盆地中部气田测井解释综合研究及气水层识别方法	杨玉征 程启荣 刘显明 (58)
陕甘宁盆地中部气田的测井多井评价方法	杨国忠 胡启月 孙志明 贺小陆 (70)
成像测井在陕甘宁盆地中部气田的初步应用	马东明 (97)
陕北地区中生界含油层系测井系列选择及综合解释方法	杨玉征 刘显明 刘复屏 (102)
低孔、低渗储层测井精细解释方法	侯哲国 高山荣 申辉林 陈钢花 (119)
陕北安五地区低渗、低阻油水层特征与测井解释方法	杨玉征 刘显明 杨双定 孙志明 (127)
低阻油层的测井解释方法	许与非 杨双定 (139)
气层识别及储层评价	刘显明 林伟川 罗中文 (148)
低孔、低渗砂泥岩水淹层测井资料的定性与定量解释	关亥生 (164)
长庆—78 型微球测井仪	马万生 李生瑚 (174)
FBM—781 型补偿密度测井仪	杨玉征 曹国栋 (182)
3700 数控测井系统深度记号显示和记录的实现方法	张新江 (191)
提高 3700 曲线质量的几种新方法	王洪备 (194)
放射性讯号模拟器的研制及其应用	牟金东 (199)
天然气识别测井技术系列	许敏 赵建武 (203)
XSKC—92 数控测井仪推广应用	王成来 范永维 (210)
低渗透砂岩气层的气测判别方法	康文理 (224)
转碟式电动脱气器的研制	何 骥 (230)
中部气田上古生界气测解释方法研究	王 健 夏育新 (234)
安塞现场微机测井资料处理解释工作站的研制	胡启月 杨永发 (241)
生产测井资料处理软件平台的研制及其应用	姚绪钢 刘拥军 (251)
引进软件在陕甘宁盆地中部气田的应用	孙志明 李俊平 (257)
中低渗透性地层同位素吸水剖面测井	景 卫 王学斌 王家树 (267)
油、气、水三相流生产测井模拟试验装置总结报告	朱文甫 李会文 王家树 丁志敏 (281)
漂珠低密度水泥固井质量的评价	陈开元 (288)

天然气井测试技术	沈麟书	唐文辉	(293)
油管输送负压射孔联作技术的应用	段立进		(305)
水平井自定方位射孔技术	王新田		(309)
水平井射孔自动定位检测器的研制	王鼎梁	马瑞林	(317)
束缚水饱和度的测定、求取和应用	汪仕杰	孙君明	甄廷江 (320)
增水法在储集层中的应用	甄廷江	田 方	(328)

陕北靖安地区中生界低渗储层 测井参数评价及油水层综合解释方法研究

杨玉征 刘显明 马昌旭

摘要 本文对该区主要目的层长₆“上水下油”现象的机理进行了分析;分区块确定了油层、油水层的下限值和判识标准;首次采用测井流体相方法自动判识油层;并对该区的地层孔隙压力、岩石破裂压力进行了研究。

前 言

靖安地区经集团公司新区事业部两年多来的勘探,先后发现了新红油田、五里湾油田,拿下了二亿多吨的地质储量。该区面积大,含油层系多,油水关系复杂,大多数油层都属低孔、低渗的三叠系延长统油藏,储层须经过压裂改造后才有产能。由于水层较发育,其试油、压裂的难度较大。压裂强度太小,油层得不到很好的改造,产油量低或试不出油来;压裂强度太大,又容易压窜水层,造成油和水同出或只产水不出油,增加了测井解释和方法研究的难度。

针对本区油水关系复杂,在部分井中同一砂层曲线显示为“上水下油”的独特现象,利用测井、录井、薄片、压汞等资料进行了综合分析,得出了“上水”现象是由渗透率低、束缚水饱和度高造成的,在试油中不可能产液的观点。

利用近 70 口井的试油资料,分区确定了长₆主力油层的测井参数下限值及用测井参数判别靖安地区油水层的方法。

用测井相分析理论并建立了油层、油水层的测井判别模型,并研制了相应的软件,实现了对低孔、低渗油层和油水层的自动识别与解释。该方法的研制成功,提供了一种解释油水层的新思路,即将测井相分析原理用于油、水层识别。

同时,利用测井资料对靖安地区 11 口探井进行了“三力”(地层孔隙压力,岩石破裂压力和地应力)处理,总结出了该区压力预测的计算方法和处理方法。

测井曲线标准化

1. 电阻率曲线

电阻率曲线标准化的基本思路是:在储层的地层水矿化度变化不大的区域,标准纯水层的电阻率为一常数($R_{低}$),同时将岩性比较稳定的高阻层也近视为一常数($R_{高}$)。将新井标准层的电阻率最高、最低值校正为 $R_{低}$ 和 $R_{高}$ 后,其储层的电阻率也就达到了校正的目的。

电阻率的校正乘法因子 K 、加法因子 A 由下式确定

$$K = (R_{高} - R_{低}) / (R_{max} - R_{min}) \quad (1)$$

$$A = R_{\text{低}} - K \times R_{\text{min}} \quad (2)$$

式中, R_{max} 为被校井电阻率钙质夹层的最高电阻率; R_{min} 为长₂、长₃ 水层的最低电阻率; $R_{\text{高}}$ 、 $R_{\text{低}}$ 分别为该区块标准层的最高、最低电阻率。

$$R_1 = R_{\text{ILD}} \times K + A \quad (3)$$

2. 密度曲线

根据以前的研究成果, 长₂、长₆ 储层的粘土成分均以绿泥石为主。绿泥石的密度值可高达 2.76g/cm^3 以上, 远大于其它粘土的密度值, 也大于石英砂岩的骨架值 (2.65g/cm^3), 所以, 在长₂ 至长₆ 的储层中, 当泥质含量增高时, 往往使储层的密度值增大。在本区低孔、低渗的三叠系储层中, 密度曲线不仅成为估算孔隙度大小的重要资料, 也成为评价储层泥质含量、渗透性和流体性质的重要曲线。但是, 由于密度仪是一种带推靠器的仪器, 受井壁影响大, 生产中采用的国产补偿密度仪精度低于进口仪器, 所以, 在曲线的使用中必须对其进行标准化校正。为此, 我们将本区用 3700 测过岩性密度的 11 口井和用 MAXIS-500 测过岩性密度的 1 口井的资料进行了分析研究。

(1) 标志层的选择。

由于该区三叠系长₂~长₆ 层没有稳定的泥岩标志层, 且普通砂岩孔隙度变化大, 不能作为标志层, 为此, 选择了长₄~长₆ 层段的钙质砂岩夹层作为标志层。该夹层一般厚度在 0.3~1.0m, 平均约 0.5m, 并且在大范围内普遍存在。但由于薄层作为标志层不理想, 故采用 5 个层平均作为标志层以消除随机误差的影响。

(2) 钙质砂岩密度平均值。

据 1 口的 MAXIS—500 (ZJ5 井) 测得的密度数据和 11 口用 3700 测得的岩性密度数据统计, 其钙质砂岩密度平均值是 2.656g/cm^3 , ZJ5 井钙质砂岩密度平均值是 2.658g/cm^3 , 故将其标准值定为 2.66g/cm^3 。

(3) 标准值的可靠性分析。

ZJ3 和 ZJ122 井五块孔隙小于 2.0% 的钙质砂岩资料见表 1。其密度平均值为 2.643g/cm^3 , 虽然比 2.66 低 0.017, 但表中的数据是地面分析的密度值, 它应略低于地层高压下的密度值, 其在地层条件下与 2.66g/cm^3 相差会更小一些。

表 1 钙质砂岩分析资料表

井号	井段 (m)	ϕ (%)	ρ_b (g/cm^3)	碳酸盐含量 (%)	井号	井段 (m)	ϕ (%)	ρ_b (g/cm^3)	碳酸盐含量 (%)
ZJ3	1653.68~1654.04	0.56	2.67	35.2	ZJ12	1651.17~1651.66	1.78	2.63	未分析
ZJ3	1653.68~1654.04	1.88	2.65	未分析	ZJ12	1651.17~1651.66	1.20	2.64	未分析
ZJ12	1651.17~1651.66	1.41	2.64	未分析	ZJ12	1651.17~1651.66	1.54	2.63	28.0

根据该区长₆ 储层的密度—孔隙度计算公式, 当用 2.66g/cm^3 标准值代入后, 其计算孔隙度为 0.664%, 当 $\phi=0$ 时, $\rho_b=2.674\text{g/cm}^3$, 与表 2 中第一块样的分析值相当。通过以上分析, 我们认为该区五个最大钙质砂岩的密度平均值定为 2.66g/cm^3 是合理的。

测井曲线特征与“上水下油”机理分析

1. 测井曲线特征

陕北延长统油层的测井曲线特征，除自然电位、自然伽马的低异常，声波曲线的高时差和低密度等常规响应外，油、水层的判别还要依靠电阻率参数。但由于其岩性十分复杂，测井曲线一直没有类似“三高一低”的简单结论。

(1) 基本状态。

经对现有 60 多口井分析后发现，如下的八口井的十个层位具有典型意义，其典型曲线如图 1~3 所示。其产液性质和有关参数之间的关系见表 2。

表 2

井号	产量 (油/水) (t/m ³)	产层性质	微电极 ($\Omega \cdot m$)	双感应—八侧向 ($\Omega \cdot m$)	真电阻率 ($\Omega \cdot m$)	电阻率 曲线形状	渗透率 ($10^{-3} \mu m^2$)
ZJ6	15.6/0	油	正均匀	正差异	27	相对高	5.0
ZJ53	13.1/0	油	正均匀	负差异	30	相对高	4.5
ZJ38	20.7/0	油	正均匀	负差异	27	相对高	7.1
ZJ42	15.6/0	油	正均匀	负差异	15	相对低	15.2
ZJ42	8.2/0	油	正, 不均匀	负差异	33	相对低	6.2
DP1	0/25.7	水	正, 小均匀	负差异	10	相对低	2.5
ZJ21	7.9/1.9	油水	正, 不均匀	无差异	21	相对高	8.0
ZJ39	0/4.9	干	无, 不均匀	无差异	14	相对低	0.6
XP7	0/2.5	干	无, 不均匀	正差异	33	相对高	0.3
XP7	0/6.3	干	无, 不均匀	小正差异	26	相对高	2.2

由表 2 可知，在宏观上，除微电极曲线可区分渗透性外，其余多不明显。微电极差异与渗透率的关系如图 4 所示。该图表明，凡属于均匀正差异或不均匀正差异的层都有较高的渗透率。反之，小的差异或无差异的层的渗透率均较小。

图 5 为双感应—八侧向三条电阻率曲线差异与产液量大小、孔隙度的关系。该图表明，只要有差异，不论其差异是正还是负，都有一定的产液能力。但差异的正负、大小并不能区别油水层性质。

(2) 造成的测井曲线异常特征的基本原因。

由上可以看出，油水层测井曲线的典型特征不很明显。之所以如此，是由于该地区的沉积环境是内陆淡水—咸水湖泊三角洲体系。其指状砂体和朵状砂体等相间分布。纵向上砂泥岩互变频繁，与砂岩相邻的岩相组合十分复杂。这就是这一地区长期没有找出其测井曲线典型特征的原因。

靖安地区覆盖的范围大，纵横跨度达几十公里，同一油水层的地球物理性质差别亦较大，电阻率最小值仅 $9.6\Omega \cdot m$ (XP11)；最大值却达 $46.6\Omega \cdot m$ (ZJ27)，这就决定了用于靖安地区油水层判断的电阻率标准将是多变的。

(3) 油水层曲线复杂特征剖析。

在上述的测井曲线特征中，除微电极外，双感应—八侧向视电阻率差异与油水层的特征关系也较明显。众所周知，电阻率差异是由于侵入引起的，除了压力差之外，渗透率是关键

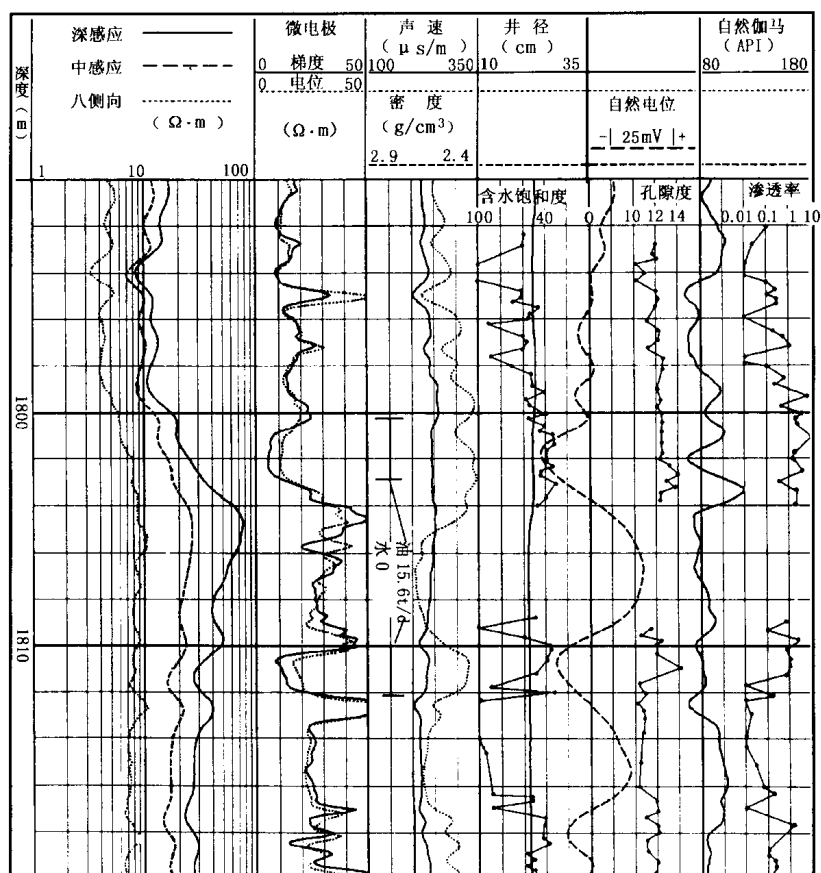


图 1 ZJ6 井油层测井曲线 (油, 15.6t/d, 水, 0)

因素。

图 4、图 5 表明孔隙度和产液量的相关性较差，而产液量与渗透率却有较好的相关性。这说明，在这一地区影响产液量的是渗透率。

除此之外，图 1~图 3 的油层在空间分布上也很有特点，好的油层多数都在砂层组的底部，其上都有一部分砂层含油性很差，甚至不含油，含水饱和度接近 100%。通常，称其为“上水下油”现象，这与常规的气、油和水从上到下分布规律完全相反，这就需进一步向较深的层次追溯。

这些层在测井曲线上多数表现为低电阻率，高含水饱和度。所以，曾一度把其解释为水层，现今多解释为干层。如何认识这些层的性质，不仅可以更好地理解测井曲线的内涵，而且，对今后油田开发也有好处。

2. “上水下油”储集层性质分析

(1) 储集层的基本性质。

在以往对长₆地层的认识中，有一种看法是裂缝对渗透率有一定的影响。如果真是如此，前述的产液量和其性质与渗透率相关就很可能是一种随机现象。那么，以渗透率判断油水层性质时就应该考虑其他因素。

为了澄清这一看法，查阅了有关资料，郑瑞琳《陕北志靖地区中生界储集层研究》指出：“长₆砂层为孔隙型储层，微裂缝不普遍也不发育，仅有局部改善渗透能力的作用。”用

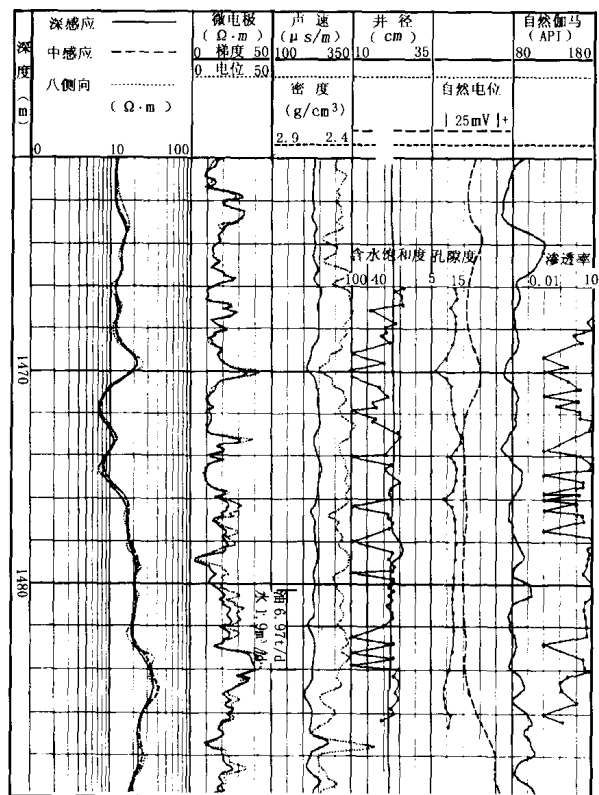


图2 ZJ21井油水层测井曲线 (油, 6.97t/d, 水, 1.9m³/d)

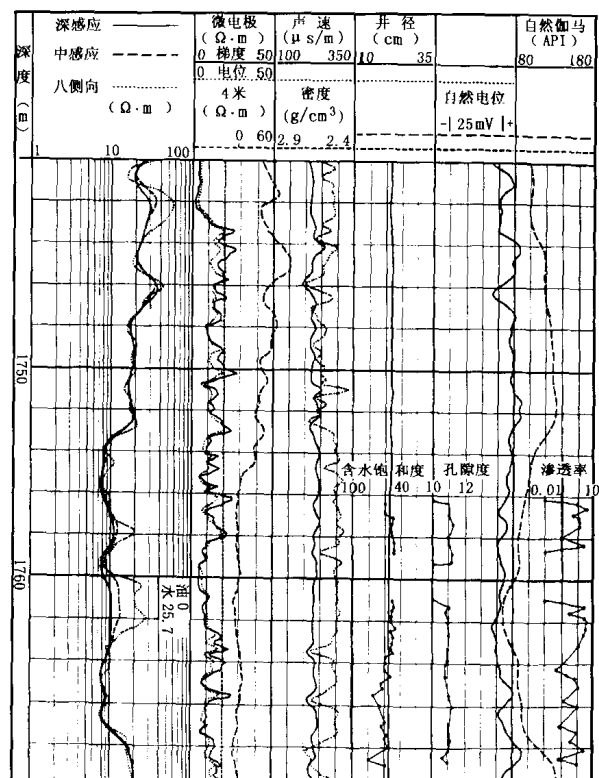


图3 DP1井水层测井曲线 (油, 0; 水, 25.7m³/d)

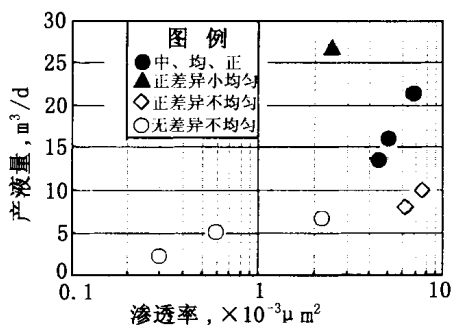


图4 产液量、渗透率与微电极异常的关系

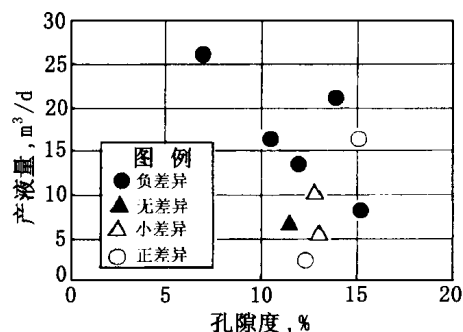


图5 产液量、孔隙度与双感应八侧向形态的关系

收集到的平均毛管半径与渗透率、孔隙度资料交会，二者都有较好的相关性，综合面孔率和原生粒间孔等其他资料，认为，长₆层为孔隙型储集层。这就确定了长₆储集层性质研究就要从多孔介质理论着手，排除了裂缝的因素，也就确定了研究“上水下油”现象主要应从沉积理论着手。

(2) 孔隙结构参数与储集层参数之间的关系。

多孔介质的研究属孔隙结构理论，但这种资料十分有限，特别是其样品数量和取样密度通常都远远少于常规的孔、渗等资料，因而，由其得出结论的代表性远不如前者。为此，首先研究孔隙结构和孔隙度、渗透率等之间的关系，确定了其间的关系后，再用较多的常规分析资料进行研究，以使所得的结果有较好的代表性。

选择了孔隙结构资料最多、选样密度最大的三口井，其井号分别为：ZJ6、ZJ21、XP7，其样品数分别为 35、22、12（长₆）。

其物性和岩性之间的关系如图 6 所示。该图表明，仅在渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时孔隙结构渗透率值比常规岩性分析渗透率值要大一些；约大 14.6%，对于研究的低渗透层来说，该误差在实用中影响不大。

图 7、8 为平均毛管孔径与孔隙度和渗透率的关系。它与渗透率表现了较好的相关性。

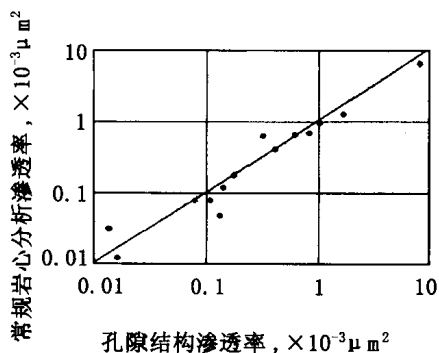


图6 渗透率分析质量检验

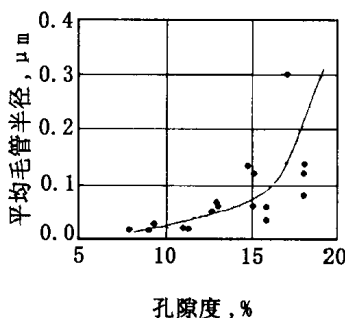


图7 孔隙度与平均毛管半径的关系

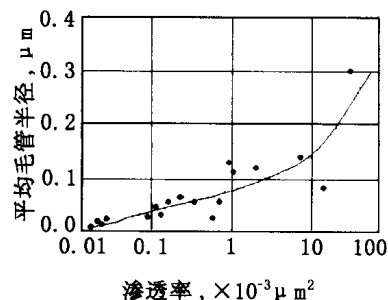


图8 渗透率与平均毛管半径的关系

(3) 含水饱和度和储集性之间的相互关系。

在宏观上，渗透率也表现了对含水饱和度的强烈控制作用。ZJ6 井、ZJ21 井长₆井段内储层参数平均值如表 3 所示。

表 3 渗透率、孔隙度与含水饱和度关系

ZJ6 井				ZJ21 井			
层号	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	含水饱和度 (%)	层号	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	含水饱和度 (%)
1	12.2	0.28	60.0	1	15.4	9.4	49.5
2	13.1	2.58	40.3	2	14.7	2.7	57.5
3	10.7	0.5	50.5	3	13.8	5.6	51.2
4	11.0	0.29	46.9	4	13.5	3.6	48.0
5	11.2	0.53	41.8				

这两口井的共同特点都是在同一砂层内，当渗透率差别很大时，其含水饱和度也差别明显；高渗透率层的含水饱和度低，反之亦然。说明，渗透率对含水饱和度有控制作用。

(4) 颗粒粒度与含水饱和度的关系。

在石油地质学中，表示岩性的直接参数是颗粒粒度。ZJ6 井的岩石粒度大小与含水饱和度、渗透率的关系如图 9、图 10 所示。该图表明，粒度大小与含水饱和度之间的相关程度不如其与渗透率那么密切。这是因为粒度参数不考虑胶结物和孔隙结构。但是，这种关系说明，岩石颗粒粒度大小对储层的含油性的控制作用是有决定性意义的。

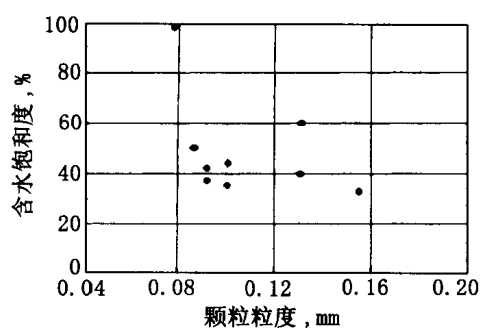


图 9 颗粒粒度与含水饱和度关系

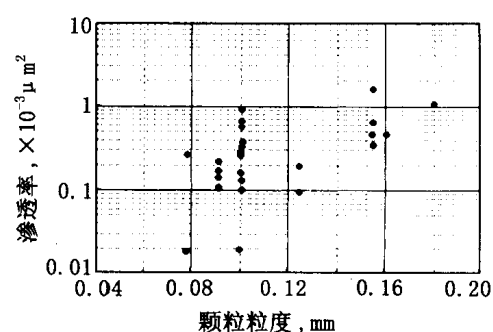


图 10 颗粒粒度与渗透率关系

(5) “上水下油”的沉积意义与形成机理。

为了了解岩性在区域上的控制作用，用 JZ—6 等 3 口井的 84 个样品作了如图 11、图 12 所示的岩石颗粒粒度和岩石性质关系图。该图与图 9、图 10 不同之处在于它增加了岩石性质。虽然图中的井数有所增加，分布范围更广，但其结论与图 9、图 10 完全相同，说明，岩性在横向上对含油的影响有区域意义。

在纵向剖面上，有意义的高渗透油层大多都在一个砂岩层组的底部，上部地层的物性多数都较差，所选的典型测井曲线组合清楚地表明了这一点。这些层为典型的正韵律沉积规律，其储层特点是砂层组底部岩石颗粒粗、渗透率高；其顶部则相反，岩性细，渗透率低。本地区系河流、湖泊相沉积，所以，这种地层出现的格外频繁。这种岩性、渗透率等对含油性的强烈控制作用形成了靖安地区大量的“上水下油”现象。

综上所述，“上水下油”现象是由于沉积控制岩性、岩性控制渗透性，渗透性控制含油性的结果。显然，这与常规均匀地层中由重力分异所产生的“上气、中油、下水”现象有本

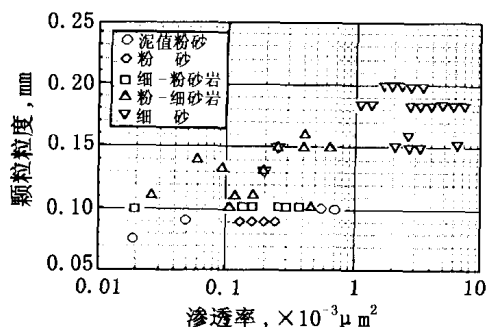


图 11 渗透率与颗粒粒度的关系

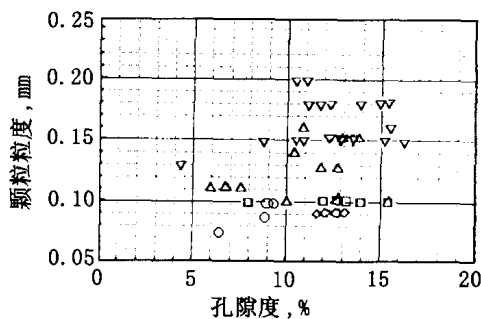


图 12 孔隙度与颗粒粒度的关系

质上的差别。

3. “上水下油”的流体力学意义

地层的产液量与渗透率大小成正比这是达西定律肯定了的，但在同一水动力系统中不同渗透率的层系组合之间是否也存在这种关系，人们是经过了一段时间实践之后才有了一些较为明确的认识的。如玉门油田 L 层的合采即为一例。实验室模拟实验发现，在渗透率连续变化的层系中，当其相互之间差别在 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，流体则仅沿高渗透层流动，直至水淹，而其他层都不再见水，后来，国外学者的实验也有类似的结论。

最近，在马岭油田的水淹研究中出现了这类现象，典型的是南检—1 井，它是南 29—24 井的检查井，南 29—24 井在顶部射孔时产纯油 52.6t。十几年后，在其检查井南检—1 井相同层位的顶部射孔时，仅见油花，产水 28.4m³。南检—1 井的岩心表明，底部地层已强水洗，上部地层仅为弱见水，其渗透率从上到下的分布状态如表 4 所示。

表 4 南检—1 井水洗情况

储层水淹情况	弱见水	弱见水	见水	水洗	强水洗
储层渗透率	23	58.9	436.5	1698.2	3548
储层渗透率比值	0.0065	0.017	0.123	0.48	1.0

依定义，见水的这一部分地层中的原油基本上未动。那么，上述数字表明，该区最大可能见水的比值是 0.48，最小比值 0.12，平均约 0.30，与常见数值相当。马岭油田和靖安地区相近，显然，在靖安地区把这一类砂层判断为干层是有充分根据的。有意思的是南检—1 井的岩心剖面表明，当同一砂层内渗透率有差别时，对低渗透层（弱见水段）射孔，该地层仍不产流体，流体仅来自下部的高渗透层。

用测井解释参数综合判别油水层

1. 全区长₆油层、油水层的识别方法

在 1995 年以前的勘探中，长₆油层测井曲线一般显示为低孔高阻，而在今年的探井试油中，在吴 60 井以南地区，发现了高孔低阻类型的长₆油层，使测井解释难度增加，影响了测井解释符合率。最典型的如 ZJ42、ZJ43、ZJ68 等井的长₆油层，这类长₆油层的测井显示为高时差（237~257μs/m）、低电阻率（5~15Ω·m），而且地质录井显示良好，自然电位

幅度大（自然电位相对比值大于 0.55）。测井曲线显示，这类长₆油层和以往所认识的低孔高阻油层有明显的物性差别。

(1) 饱和度计算。

对于低孔高阻油层仍选用老的饱和度计算公式

$$S_w = \sqrt{\frac{2.7055 \times R_w}{\phi^{1.688} \times R_t}} \quad (4)$$

对于高孔低阻油层因没有现成的饱和度计算公式，且储层测井曲线基本上与长₃地层一致，所以，选用长₃层的饱和度计算公式

$$S_w = \sqrt{\frac{R_w}{\phi^{1.83} \times R_t}} \quad (5)$$

(2) 地层水电阻率计算。

根据几十口井的试油资料，长₆油层的地层水矿化度大约为 85000mg/l。其在实验室 18℃ 条件下，电阻率为 0.1Ω·m。由于储层埋藏深度不同，温度随井深变化，故采用如下公式计算地层水的电阻 R_w

$$R_w = 71.4 \times 0.1 / (55.2 + 0.05148 \times \text{DEP}) \quad (6)$$

式中，DEP 为储层深度。

(3) 用测井解释的含水饱和度与自然电位比值 α 判别油水层。对于低孔高阻储层 ($\Delta t < 237 \mu\text{s/m}$)，其自然电位比值为 $\alpha = \text{SP} / \text{SP}_{\max}$ ，其中，SP 为目的层自然电位幅度， $\text{SP}_{\max}$ 为本井长₃最大自然电位幅度。图 13 是低孔高阻储层含水饱和度与自然电位比值交会图，图中，

水线方程 $S_w = 13.8\alpha + 37.5$

油线方程 $S_w = 4.4\alpha + 34.3$

图版符合率 $(83 - 12) / 83 = 85.54\%$

对于高孔低阻储层 ($\Delta t < 237 \mu\text{s/m}$)，其含水饱和度与自然电位比值交会图如图 14。图中，

水线方程 $S_w = 12.9\alpha + 42.1$

油线方程 $S_w = 8.72\alpha + 33.9$

图版符合率 $(42 - 5) / 42 = 88.1\%$

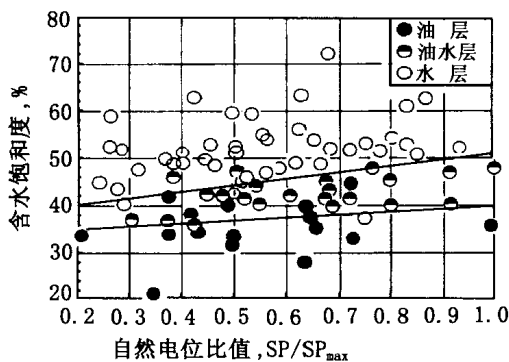


图 13 长₆低孔高阻储层含水饱和度与自然电位比值交会图

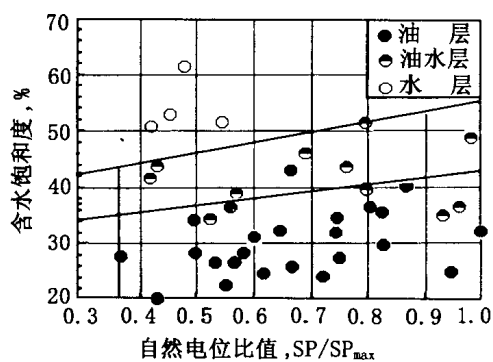


图 14 长₆高孔低阻储层含水饱和度与自然电位比值交会图

从图 13、14 的水线、油线趋势知，油层、油水层的含水饱和度限定值不是一个常数，它随自然电位比值的增加而增大，即渗透率变好，含水饱和度的限值增大。如图 13 中，当 α 达到 0.9， S_w 小于 50% 时，储层就可能产油；而当 α 等于 0.3， S_w 必须小于 42% 才能产油。

2. 分区块、分层系确定油层、油水层的下限值和判别标准

靖安地区南北长约 45km，东西宽约 35km，面积约 1500km²。因其油区范围大，故其储层的电性特征变化亦大。我们对 70 多口井的试油成果进行了分析和研究。

该区 l_6 是主力油层，在整个油区范围内普遍含油。为此，我们对 l_6 油层分区块进行研究，因 l_{4+5} 储层性质与 l_6 相当，故归并为一类。延安组、 l_2 油层，因其仅是部分井含油，试油层点少，故只进行分层研究。

油区可分为三块，即东区、南区、北区。南区是一套以高时差、低电阻率为主的 l_6 油层。北区是一套以低时差，高电阻率为主的油层，并部分有 l_{4+5} 油层。东区，由于储层深度相对变浅，地层水电阻率相对高一些，含油层系也由西部的以 l_6 为主变为以 l_6 为主。

(1) 参数的选取和计算（共选用了 11 个测井解释参数）。

电阻率 (R_t)。其由深感应经前面所述的方法校正后确定。

声时差 (AC)。其校正方法是选 $l_4 \sim l_6$ 层钙质砂岩的 10 个层点的平均值，大于 200 μ s/m 减；小于 200 μ s/m 加。

密度 (DEN)。其采用前面所述方法校正。

自然电位比值 (α)。其采用储层的自然电位与 l_2 、 l_3 的最大自然电位相比，延安组的最大自然电位采用本地层段的最大值。

孔隙度 (ϕ)。其用声波时差的经验公式求取。

含水饱和度 (S_w)。其采用阿尔奇公式求取。

含水饱和度比值 (S_{wk}/S_w)。

S_{wk} ，即油层段附近含水饱和度最大处（致密层尖子除外）的 S_w 。采用含水饱和度比值，其目的一是可以消除因地区范围大，地层水电阻率变化所带来的影响。因为选用的是油层附近的水层，其 R_w 相等，

$$\frac{S_{wk}}{S_w} = \left[\frac{a \cdot b \cdot R_w / (R_{t1} \cdot \phi_1^n)}{a \cdot b \cdot R_w / (R_{t2} \cdot \phi_2^n)} \right]^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{R_{t2} \cdot \phi_2^n}{R_{t1} \cdot \phi_1^n} \right) \quad (7)$$

式中， R_{t1} 、 ϕ_1 是水层的电阻率、孔隙度； R_{t2} 、 ϕ_2 为目的层的电阻率、孔隙度。

另一方面，其也可较好地消除因曲线测量误差造成的影响。由上式可知，当电阻率或孔隙度偏高或偏低时，其分子、分母都同时增加或减小，其比值可近似认为不变。

视含油体积 ($\phi * S_o$)。其采用含油饱和度和孔隙度乘积，即单位储层体积中油的含量。

自然伽马相对值 (ΔGR)。 $\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}}$

砂层厚度 (H) 即解释层所在的砂岩体厚度。

微电极形态。将微电极形态定性分为三类，第一类显示“好”，即曲线显示为“中、均、正”，“中”即数值高于大井眼段，显示为中等值；“均”曲线变化均匀，近似一条直线；“正”电位值大于梯度值，为正差异；第二类显示为“中等”，曲线变化较均匀，但无差异或