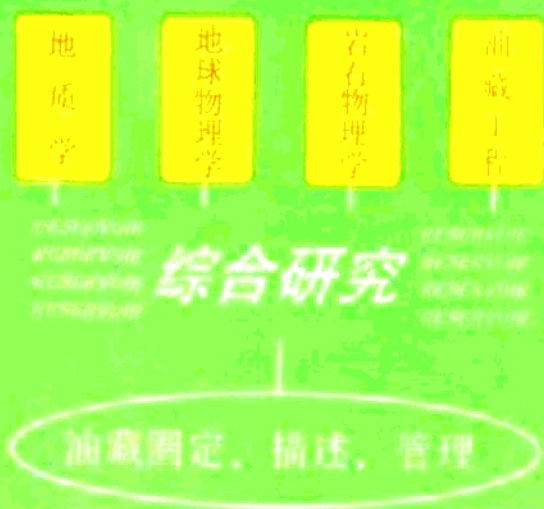


油气藏多学科综合研究

张一伟 刘洛夫 欧阳健
傅全全 王伟华 严俊君

编



石油工业出版社

登录号	126790
分类号	P618.13
种次号	031

油气藏多学科综合研究

张一伟 刘洛夫 欧阳健 编
傅全全 王伟华 严俊君

5234/07



石油0122210

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要根据第一届阿尔奇会议论文集编译而成,同时还收集了数篇与油气藏研究有关的综述性文章或科研成果,是一部对油气藏(田)进行多学科综合研究的内容丰富,新颖的著作。可代表国际上90年代油气储层研究及油藏描述的最高水平。包括多学科综合研究,岩石物性评价及岩石描述,储层特性和模拟,储层性质预测,裂缝储层成因、描述和评价,精细油藏描述,以及油气藏的开发和科学管理等内容。

本书可供石油工业部门勘探、开发及管理方面的决策人员,各油田的科研及工程人员,石油高校的有关科研、教学及科技开发人员(含研究生)参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气藏多学科综合研究 / 张一伟等编
—北京:石油工业出版社, 1995.8
ISBN 7-5021-1493-9

I. 油…
II. 张…
III. 油气—综合研究—文集
IV. P618.13

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开 $15\frac{1}{4}$ 印张 380千字 印1—2000
1995年8月北京第1版 1995年8月北京第1次印刷
定价:16.00元

前 言

油气藏多学科综合研究在国外已开展多年,其效果是令人瞩目的。众所周知,地球科学,特别是油气地质勘探发展到今天,再用单一学科或单一方法手段来研究地质问题已显得软弱无力了。石油勘探与开发的深入发展,就有赖于多学科的联合攻关,发挥地质学、地球物理学、岩石物理学、石油工程、计算机技术、油田管理等各个方面的优势,综合解决问题,以期达到最佳的勘探和开发效果。近10年来,石油大学在培养复合型人才,进行综合性研究方面做了很多工作,但是如何成功地组织多学科人员,集中他们的智慧,来达到共同的目的——寻找和开发油气,尚有很多问题待探讨。为了经常了解世界科技发展动态,也为了迎接“九五”油气成藏的系统研究,因此编译了这本书。我们相信,对油气藏进行多学科的综合研究已是必然的发展趋势,也是一百多年石油勘探开发实践给广大石油工作者提出的客观要求。综合研究必将在今后的油气生产中带来巨大的效益。

本书主要是在“第一届阿尔奇会议”论文汇编基础上编译而成,并收集了一些与油气藏研究有关的综述或成果文章。书中包含了目前国际上油气藏勘探开发及管理方面的最新方法及科研成果,以多学科综合评价方法来发现和解决石油勘探和开发中的有关问题,特别是油区的进一步勘探及老油田的开采等,具有较高的理论及实用价值,对指导我国东部地区特别是深部油藏及碳酸盐岩油藏的勘探开发具有重要的意义。与其他同类论著相比,本书的显著特点是提倡、促进各门学科间的协作精神,并展示了通过岩石物理学、沉积学、构造地质学、水动力学、钻井、测井、地震、油藏描述、油田工程、油田管理、计算机技术等多学科综合研究所取得的丰硕成果。组织多学科综合研究队伍,各门学科间相互配合,使得我们能跨越资料不足的鸿沟,造就一种相互协作、优势互补的环境,迅速提高认识,互相支持,互相理解,从而成倍或数十倍地提高工作效率,增加油气储量和产量。

本书分油气藏综合研究论文和摘要部分。共有论文31篇,摘要23篇。全书的翻译和校对工作靠集体的智慧和劳动完成。石油大学盆地分析和油藏描述中心和石油地质教研室的20多位老师、研究生以及中国石油天然气总公司勘探局的8位同志参加了翻译和校对工作。译文和稿件由刘洛夫做了统一校核。最后,由刘洛夫、傅全全、王伟华、严俊君进行全书的编辑工作。

参加这项工作的人员有:

石油大学:张一伟、刘洛夫、傅全全、王伟华、严俊君、金之钧、刘国臣、张周良、康永尚、谌卓恒、刘银河、邱楠生、吕修祥、熊琦华、陈亮、纪发华、曾溅辉、蔡毅、刘震、童亨茂、姚亭亭、何萍、徐新德、唐守安、赖泽武、黄述旺、吴欣松。

中国石油天然气总公司勘探局:欧阳健、刘殿升、辛文杰、韩征、毛志强、王玉新、郭黔杰、赵彤。

本书从翻译到出版的整个过程中,得到中国石油天然气总公司勘探局丁贵明局长和石油大学盆地分析和油藏描述中心金之钧主任的大力支持,勘探局欧阳健副总工程师给我们查找了一批文章的原文。在此一并致谢!

张一伟

1995.4.8

目 录

1.石油测井解释——分析油藏中油气饱和度的技术	(1)
2.当代油气综合勘探发展综述	(14)
3.油藏地球化学	(19)
4.综合油藏解释的三维交互式建模系统	(21)
5.岩石物理综合研究的过程及其价值	(28)
6.综合地层评价提高了储层的精细描述	(34)
7.多学科综合研究优化了英国北海布瑞 (Brae) 地区的油田开发	(38)
8.用于储层管理的英国北海 Brent 油田 Brent 群第Ⅲ旋回段的综合储层特征	(43)
9.改进 Sole pit 盆地致密储气层性能的整体性方法	(49)
10.印度尼西亚 Java 西北海域 Bima 油田的多学科油藏研究	(56)
11.伊利诺斯盆地储层特征的综合评价	(73)
12.得克萨斯州 Rusk 县 Oak Hill 油田 Taylor 砂岩的储层地质学研究:综合运用岩石学、 沉积学和测井分析致密含气砂岩的储层性质	(81)
13.多学科油藏描述在阿肯色州 Columbia 和 Lafayette 县 Walker Creek 油田中的 应用	(92)
14.协作研究对油藏精细描述和配产的意义	(103)
15.岩石力学相在岩石分类、表征和对比中的应用	(110)
16.在少量测井资料控制的地区由地震响应推断出的油气藏特征	(118)
17.现代工艺在老油区——重查 Marchand 油田	(120)
18.一支综合队伍是如何将一个 50 亿立方英尺的气藏转变为 1 万亿立方英尺气田的	(122)
19.裂缝型油藏——一种新定义方法	(125)
20.地震解释和储层评价中的断层解释	(129)
21.利用岩心、露头、地震资料和弯曲空间分析对加州近岸区 Point Arguello 油田 P-0315 区块的裂缝评价	(145)
22.逐渐完善的裂缝性碳酸盐岩储层的油藏描述	(157)
23.储层电性特征的参数化和整体平均: 生产过程中电法/电磁法评价的基本部分	(165)
24.油藏监测的声波层析成像方法	(172)
25.露头岩层伽马测量方法在油气勘探开发中的应用	(179)
26.分形几何学在储层非均质性描述中的应用	(184)
27.一种预测岩石物理特征的成因方法	(191)
28.在开发和勘探地质中以计算机为基础的岩石描述	(200)
29.工艺开发协作的一个实例分析	(209)
30.团体协作的经济价值	(215)
31.协作	(217)
32.摘要	(222)

石油测井解释

——分析油藏中油气饱和度的技术

欧阳健*

中国石油天然气总公司勘探局

引 言

石油测井解释的任务是在石油勘探开发中对油气层进行定量评价与描述。它的主体是岩石物理学研究，其内容是由各种物理方法，包括井下的各种测井方法与实验室的各种实验、分析方法，对充满油（气）、水的储层（岩石），包括裂缝性储层的物理性质进行研究，以及研究油藏中油（气）饱和度的分布规律。岩石物理研究的核心是储油层的含油饱和度与其相关的各种物理性质。支持测井解释学的相关学科有：岩石和矿物学、油层物理学、岩石实验学、电测井、声测井、核测井等。在岩石物理研究基础上，开展测井储层参数计算方法（我们称之为“岩心刻度测井”）和储层描述方法的研究，其中包括对油气层的测井评价方法。本文简要介绍上述三方面内容。

岩石物理研究

无论砂岩或碳酸盐岩，它们的储集性质在不同程度上都受孔隙结构的影响。孔隙结构的宏观参数主要是：孔隙度、渗透率、比表面、地层电阻率系数和窜通毛细管压力。由于孔隙几何形态的不规则与结构的复杂，对其微观研究尚处于半定量阶段，其微观参数如描述孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及相互连通的关系，可通过压汞法、铸体薄片、扫描电子显微镜和 CT 扫描成像等实验分析手段进行研究与描述，其中包括拓扑学特征研究、吸附等温线法、定量体视学、分数维特征描述研究，还有岩电参数微观数值模拟等。目前，对于用微观孔隙结构模型来预测多孔介质的宏观性质仍存在不少问题，但是用它来说明宏观参数之间的联系却十分有益。

油藏的形成过程是受油、水孔隙系统所控制，油（气）首先进入与较大孔隙喉道连接的大孔隙中，然后，随着烃类物质驱替力（主要为浮力）的增加，油（气）将逐步进入更小的孔隙喉道，因此，油藏中距自由水平面之上愈高，油（气）饱和度则愈大。在油藏中油（气）水的分布反映出毛细管压力与油（气）水两相压力差平衡的结果。显然，油藏内不同位置处的饱和度受自由水平面之上的高度、孔隙结构以及油水密度差（流体性质）等因素控制。

1. 孔隙度与孔隙结构

砂岩中存在四种基本孔隙类型：粒间孔、溶蚀孔、微孔隙和裂缝。砂岩孔隙的大小和形

* 参加此项工作的同志还有林纯增、燕军、章成广、毛志强等。

状取决于沉积环境与成岩后生作用。在高能量水动力条件下沉积的粗粒砂岩，再加上次生溶蚀作用，其孔隙空间大、渗透性好。含有较多粘土矿物的细颗粒砂岩，则具有大量微孔隙，其渗透性差。对于陆相沉积碎屑岩，当物源有多个时，可能在不同层段与相邻地区的砂岩颗粒成分有较大差异，再由于沉积微相的差别及成岩作用的结果，它们的孔隙结构可能有较大的不同，相应的测井响应也将各异。

此外，孔隙类型很少是单一的。因此，对包含显著微孔隙和连通大孔隙的双组孔隙系统的砂岩，它们或以薄互层状、或以粘土部分充填在大孔隙中、或以泥膜形式包住砂岩颗粒，这都可能形成渗透性较好的低电阻油（气）层，给测井解释带来困难。

碳酸盐岩储层中，除了粒间孔隙与砂岩类似外，其中裂缝、溶孔（洞）等次生孔隙相对发育。对于裂缝性灰岩储层，其裂缝孔隙度很小，但却是主要的渗滤通道，我国西部奥陶系灰岩某油藏，统计 7 口井 358m 岩心，2900 余条裂缝，基质孔隙度平均小于 1.5%，裂缝宽度主要为 20~300 μm （占 90.8%），裂缝孔隙度在 0.006%~0.3%（占 80.3%），最大为 1%，裂缝发育程度与双侧向测井降低幅度与差异关系较好。

2. 饱和度

确定油层原始含油（气）饱和度的方法一般有：岩心直接测定法、测井解释法、毛细管压力计算法、相关统计法等。

(1) 岩心直接测定法 其最大困难是无法保持地下原始状态的岩心，当前最好的方法是油基钻井液取心，由于油基钻井液含水极少，失水量为零，从而可以保持岩心中的束缚水不变。可是，油层的含水饱和度是在一定毛管压力条件下与油、水两相压力差平衡的结果，它并非全是束缚水，可以理解为不动水，它们的大小与距自由水平面之上的高度呈负相关。当岩心取到地面，压差超过油藏内的平衡点，油层中不动水的某些部分可能溢出，因此取心分析的结果距自由水平面愈近处，分析的含水饱和度比实际偏小的愈多。图 1 为 D11 井厚油层段测井解释方法与油基钻井液取心分析的含水饱和度对比图，油藏上部测井解释，含水饱和度偏大 6%，往下逐渐增大到 8%~12%。这证明了取心分析的误差往下增大。另外，对气层与轻质油层，当油气大量溢出岩心时，可能会带出更多的不动水。在干旱地区，从岩心出筒到测量之间的时间内，岩心中的不动水蒸发量较大，将会引入误差。用蒸馏法测量束缚水量只能得到无盐的淡水，盐分留在岩心中影响孔隙度的称重测量，其误差可达 1%~3%。

此外，岩心直接测定法是由蒸馏出的水量除以孔隙体积得到含水饱和度，而孔隙度是在地面测定的，它比在油藏条件下偏大，因此，不完全反映油藏条件。目前，惯用的做法是用 CMS-200（或 300）型流体静力压缩仪模拟地层的上覆压力，对取至地面的岩心进行三轴加压测定其孔隙度，然后把它换算为实际地层承受的单轴上覆地层压力条件下的孔隙度，美国岩心公司总结了如下经验公式：

$$\phi_r = \phi_s - (\phi_s - \phi_3) r \quad (1)$$

$$r = \frac{1}{3} \left(\frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} \right) \quad (2)$$

式中 ϕ_r ——地层孔隙度；

- ϕ_s ——地面测量孔隙度;
- ϕ_3 ——CMS 流体静力仪模拟地层压力测量的三轴孔隙度;
- r ——与岩石泊松比有关的转换因子;
- λ ——岩石泊松比, 一般在 0.25~0.35, 平均为 0.3。

中国西部 DH 油田的油层埋深 5800m (压力 64MPa), 岩心公司测量其地层孔隙度与地面孔隙度的关系如下式, 相差 1.2% 左右。

$$\phi_f = -1.2869 + 1.0035 \phi_s \quad (3)$$

模拟油藏条件的加压岩心测量孔隙度的前提条件是假设岩心的形变在弹性范围内。对 TZ 地区岩心加压测量之后 24h, 再重复测量 (岩心公司), 在 42.03~31MPa 范围内孔隙度误差为 0.1%~0.2%。岩心加压测量仪模拟了压力条件, 而未模拟油藏的温度条件, 温度增加使岩石体积膨胀。

总之, 岩心直接测定法存在不少比较难以克服的困难与误差, 很难准确反映原始油层情况, 但是它毕竟是直接得到的第一手资料。

(2) 测井解释法 测井曲线具有连续、高分辨率和精确刻度等其他方法不可取代的优点, 用它来计算油藏条件下含水饱和度的基础是岩电实验, 建立尽可能符合油藏条件的阿尔奇公式, 这就要求满足下述实验条件:

- ①油藏条件下的温度、压力;
- ②油(气)驱水实验中按油藏高度设计驱替压差, 并在驱替中满足毛管压力平衡;
- ③满足油层实际的润湿性与流体性质。

目前, 我们已经发现按上述条件做的实验与常规方法差别较大, 但是同时满足上述条件的实验, 现在尚无法做到。表 1 为采用半渗透隔板法按上述第二项要求做毛管压力—含水饱和度—电阻率联测的结果与常规方法对比, 实验中的驱替压力按毛管压力理论与油藏高度设计, 详见下一小节中公式 (4)。该实验驱替过程的压力平衡时间很长, 一次完整的驱替周期约需要 1~3 个月以上, 而常规岩电实验仅为 1 天至几天。

表 2 为高温高压条件实验的地层电阻率系数 (地层因素) 与孔隙度关系和常规实验结果

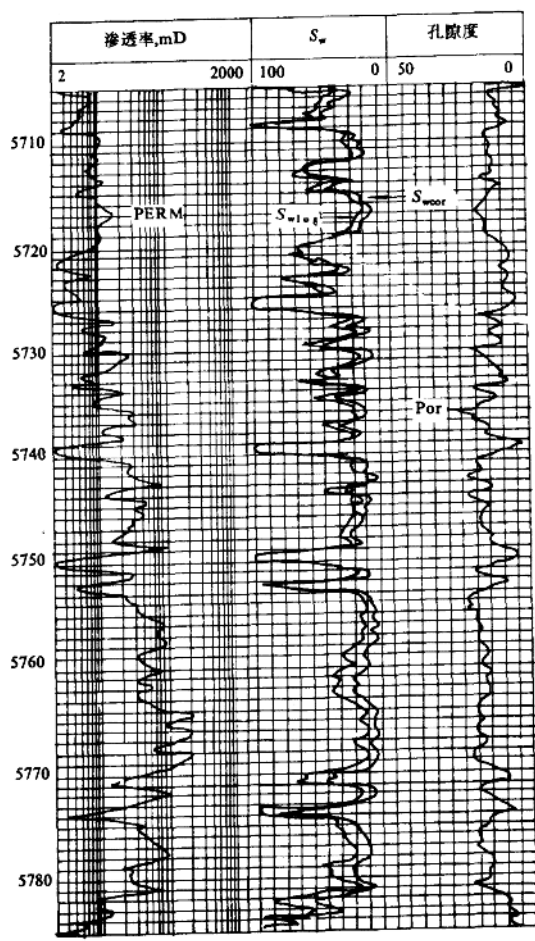


图 1 D11 井测井解释法与油基钻井液岩心分析的含水饱和度 (S_{wlog}, S_{wcor}) 对比
 $1mD = 10^{-3} \mu m^2$

对比, 从表中可见, 由于在油藏条件 (承压与高温) 孔隙喉道变小, 导致电阻率系数 m 值增大。高温高压实验结果与水线法 (即用井下水层实测电阻率统计的 m 值) 相近, 也说明了这一道理。

表 1 常规与隔板法岩电实验 n 值对比

	TZ	实验室及孔隙度范围	JL	实验室及孔隙度范围
常规法 1	1.5149	HNLAB.10.5%~25.7%	1.559	HNLAB.20.33%~29.62%
常规法 2	1.5145	HBLAB.10.47%~21.53%	1.615	HBLAB.11.8%~28.4%
隔板法 1	1.7191	岩心公司.9.5%~22.1%		
隔板法 2			1.9146	BJLAB.21.3%~26.6%

表 2 地面与高温高压实验及水线法统计的 m 值对比

	TZ	实验室及孔隙度范围	JL	实验室及孔隙度范围	LN	实验室及孔隙度范围
地面实验 1	1.670	岩心公司.9.5%~22.1%	1.783	HNLAB.20.3%~29.6%	1.6273	$a=1.32 \times \text{JLAB}$
地面实验 2	1.694	HNLAB.10.5%~25.7%	1.80	HBLAB.11.8%~28.4%		
地面实验 3			1.846	HBLAB.19.4%~28%	1.7691	HBLAB.3.6%~22.9%
地面实验 4			1.83	BJLAB.21.3%~26.6%		
高温高压	1.837	SNLAB.45MPa, 50℃	2.1017	SNLAB.50MPa	2.202	SNLAB.50MPa
水线法	1.8584		2.1423		2.24	$b=0.726$

①泥质 (粘土) 对阿尔奇公式中系数的影响 若为纯砂岩, 岩电实验研究表明, 阿尔奇方程中的系数 m 、 n 是常数, 它仅仅反映岩石粗细不均匀的孔隙结构特征, 不受水矿化度的影响。但是, 若砂岩中含有一定数量的泥质, 它不仅复杂化了岩石孔隙结构, 而且还与地层水起水化学作用, 对岩石的电性有不同程度的影响。岩心实际测量表明, 岩心中含有不同泥质时, 用不同电阻率 ($10 \sim 0.1 \Omega \cdot \text{m}$) 的盐水饱和岩心时, 然后测量电性参数, 结果发现阿尔奇方程中 m 、 n 值是岩心中水的电阻率和岩心自身泥质含量的函数。

②润湿性对油层中油水分布的影响 液体对固体表面润湿与否, 取决于液体对固体及液体自身的分子吸引力。在固体表面上, 研究某一液体 (或气体) 润湿与否, 总是相对于另一相而言, 即为三相体系。相对一相为润湿的, 另一相则是非润湿的。

影响油层润湿性的因素有矿物成分 (硅酸盐、碳酸盐亲水, 有机物质亲油)、流体成分、石油中的极性物质 (对石油在矿物表面上的润湿性会产生复杂影响)、矿物表面粗糙度。目前的研究认为: 油层的润湿性是不均匀的, 无论从宏观、微观的角度来看皆如此。

目前, 一般用储油层岩石的吸油量与吸水量大小进行润湿性分类, 可分为亲水、亲油与中性三类。油层的润湿性是控制孔隙中油 (气)、水分布的重要因素, 因此它对电阻率增大系数有较大影响。目前不少国外实验室都在研究这一问题。常规的岩电实验采用中性油 (变压器油) 和中性气 (氮气或空气), 避开了润湿性这一较复杂的因素。

(3) 毛管压力理论计算含水饱和度 目前国内常规的毛管压力测量是用压汞法, 用它计算平均毛管压力曲线即 J 函数法来估算含水饱和度, 由于压汞法为水银—空气系统, 加上其实验方法并非模拟油藏内油 (气) 驱替水的过程, 用它来估算油藏内的含水饱和度是不严格

的。应该讲, 压汞法毛管力分析资料是作为研究储层孔隙结构的有效手段。本文介绍半渗透隔板法测量毛管压力用于计算含水饱和度, 它是一种经典的、接近于油藏形成中油(气)驱水的过程, 可以模拟原油—盐水与天然气—盐水系统。它的实验条件与驱替压力的设计都十分严格。压力平衡时间长, 精度高。对于气藏, 此方法易达到要求精度; 对于油藏, 则难度较大。我国西部某气藏用这一方法测得一批样品的毛管压力曲线 $(p_c)_{lab}$, 把它换算为气藏条件下的 $(p_c)_{Res}$, 然后, 把它转换为气柱高度 h , 可得下式:

$$p_c = \frac{(\sigma \cos \theta)_{lab}}{(\sigma \cos \theta)_{Res}} (\rho_w - \rho_g) gh \quad (4)$$

式中 p_c 为实验室测定的毛管压力 $(p_c)_{lab}$; 实验室条件测量的气/盐水系统岩石表面张力 $\sigma = 77.55 \text{ mN/m}$, 接触角 $\theta = 0$; 油藏条件 ($p = 45 \text{ MPa}$, $T = 110^\circ \text{C}$) 得气/盐水系统岩石的 $\sigma = 44.46 \text{ mN/m}$, $\theta = 0$, 气的密度 $\rho_g = 0.3351$, 地层水矿化度 20 万 ppm*, $\rho_w = 1.109 \text{ g/cm}^3$, 重力加速度 g 为 9.8 m/s^2 。

式 (4) 经单位换算可得 $(p_c)_{lab}$ (单位 MPa) 与气藏高度 h (单位 m) 的关系:

$$(p_c)_{lab} = 0.0132h \quad (5)$$

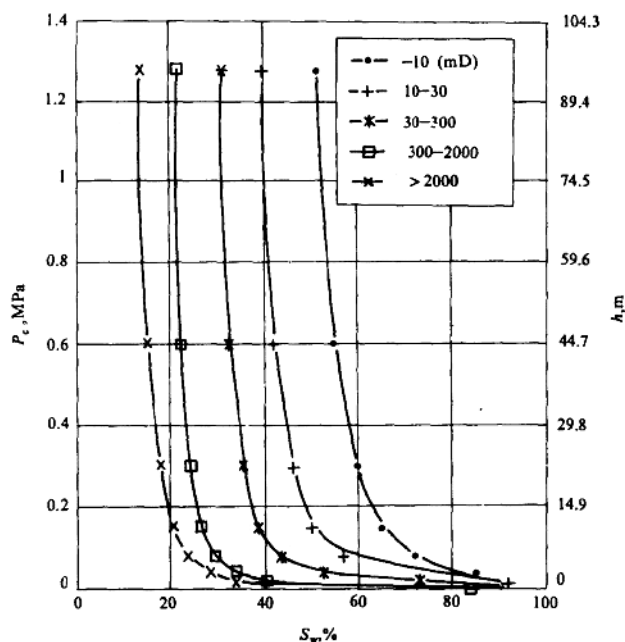


图2 J气藏半渗透隔板法毛管压力资料计算含水饱和度

* 1ppm = 1mg/L

从而得到 $p_c/h-S_w$ 关系图, 可得到气藏中不同位置处的含水饱和度, 图 2 为几十块样品平均的毛管压力曲线。

3. 液体性质

储集层中的流体包括天然气、石油和地层水, 这一系统中的介质表面现象和毛细管效应都与岩石与流体的物理、化学性质密切相关。

油藏中烃类的相态变化一方面取决于其化学组成, 另一方面则是油藏内的温度与压力条件。油气藏按照地下状态及流体组成可以划分为下述系列类型。气藏(干气、湿气藏)、凝析气藏(无油环、带油环凝析气藏、凝析气顶油藏)、临界态油气藏(近临界态凝析气藏、临界态油气藏、近临界挥发油藏)、油藏(轻质油藏、低密度油藏)、常规黑油藏、稠油油藏。

通过测试的气油比、油、气密度等可以初步识别各类油气藏, 对于复杂的过渡类型油气藏必须在井口严格取样、配样, 做一系列的 PVT 实验, 然后, 进行实验数据拟合与相态分析, 从而得到原始油气比、流体组成等结果和进行油气藏分类。

油气藏内流体的组成不同, 测井的响应各异, 例如气藏与黑油油藏, 在相同物性条件下, 气藏的油水密度差大, 其过渡段短、含气饱和度高, 孔隙度测井受天然气影响大, 要考虑校正。对近临界态凝析气藏(地下为气态)与挥发油藏(地下为液态)或凝析油气藏等, 测井要准确识别流体相态就面临较大困难。

测井储层参数研究

立足岩石物理研究, 深入应用各种高质量的地球物理测井方法, 形成一套“岩心刻度测井”的计算机定量分析技术, 实现测井资料的精细处理, 不仅为储量计算提供较可靠的单井储层参数, 更为重要的是, 在地质与测井解释学指导下实现测井储层描述与油气层评价。

测井储层参数研究(岩心刻度测井)大致可概括为以下几项内容, 全部工作在专用数据库与图形处理支持的工作站上进行。

1. 可行性分析

对研究区域的测井系列、系统取心、油田地质、岩石物理实验与分析资料、测试等的内容与可靠性进行调查与评估。要求关键取心井 3 口以上, 目的层取心收获率应大于 90%, 并要求有 3 口井在钻开油气层三天之内及时进行电阻率测井。

2. 测井曲线的编辑、环境校正与标准化

(1) 曲线编辑 对研究层段内, 由于井内环境等原因造成测井曲线跳动、不正常等, 应用人机交互式解释软件进行合理的编辑与拼接, 包括精确地对各测井曲线深度对齐。

(2) 测井环境校正 我们的研究方法是立足岩心分析数据, 关心的是二者相关性, 因此, 对相同井径等背景影响因素可以不予考虑。关注的是那些变化的环境因素对测井的影响, 例如泥岩段中坍塌井壁处井径对自然伽马等测井的影响、钻井液滤液侵入储层对感应测井影响较复杂, 将单独讨论。

(3) 斜井测井曲线的垂深校正 对于低幅度油藏, 尤其幅度小于 30m 时, 深井或斜度较大的井, 必须进行较精细的垂深校正, 才能精细分析油水界面。

(4) 测井标准化 选择研究区域内的标准层对各测井曲线进行检验, 仅对个别井出现明显系统误差者可校正, 质量不好的井宁可不用。

3. 感应测井的侵入校正

当储层被钻开后, 钻井液侵入地层是一个复杂的物理过程, 它包括静滤失 (初期的喷失和后期的渗滤) 与动滤失 (在钻井液循环中的滤失)。实践与理论研究说明, 钻井液滤液侵入油气层对双感应测井影响甚大, 尤其是气层与轻质油层。

为了应用感应测井准确计算含油饱和度, 进行侵入校正是必须的。用正演计算的简化侵入校正交会图版, 其精度较差无法接受。实用的侵入校正方法是尽量采用本油田的实际资料建立经验性模型, 例如:

(1) 及时测井校正。选择 2~3 口井在钻开油层三天内及时测井, 再经过正常完井周期一般半个月以上的完井测井, 统计二者关系建立本区的感应测井侵入校正公式。当然, 所谓及时测井也不完全反映原状油气层情况。

(2) 如果本区有油基钻井液取心井, 可得到原状油气层感应测井, 换水基钻井液后划眼去滤饼造成水基钻井液滤液侵入油气层, 再进行感应测井, 从而建立较精确的感应测井在油气层的侵入校正关系。

(3) 利用质量可靠的毛管压力资料计算油藏中饱和度与自由水平面之上的高度关系, 并用实际的岩电实验结果推算出油层原状电阻率, 从而建立经验的侵入校正关系。

(4) 用双感应时间推移测井 (2 次以上) 作为已知点, 采用钻井液滤液侵入油气层的数值模型 (详见下节) 反演原状油气层的电阻率。

4. 岩石物理研究与建立测井解释模型

(1) 岩心与测井的深度归位与数据匹配 深度归位一般采用地面测量岩心自然伽马与井下测井曲线归位和岩心分析视密度或孔隙度与相应测井曲线归位, 利用交互式解释工作站高精度地完成。

由于储层的纵向非均质性, 岩心物性分析一般每米 5~10 块, 其分辨率高于测井, 而不同测井方法反映了相应源距范围内的地层平均值。可采用相适应的分辨率窗长对岩心数据进行等权或加权平滑滤波, 从而提高了“岩心刻度测井”的精度, 对第 K 点岩心数据进行滤波的公式为:

$$Cor(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^n PAR(n) \times Cor(k - \frac{N}{2} + n - 1) \quad (6)$$

式中 N ——滤波窗长的采样点;

$PAR(n)$ ——权系数组。

如果岩样间距不等, 可用非线性插值。

(2) 岩心刻度测井 用地面岩心分析与实验数据刻度测井是实用而可行的方法。有大量的数据可反映实际规律, 它和地层条件下的参数只是一个系统差别。从测井解释学理论出发, 按照不同孔隙结构类型与明显不同矿物成分来分别建立测井解释模型是合理和可取的。

由于是岩心刻度测井, 在进行回归统计时, 考虑自、因变量选用不同而造成方程的不唯一性, 故应该选择岩心数据为自变量 X 、测井数据为因变量 Y , 建立解释模型。例如, 建立的测井孔隙度解释模型, 用岩心分析的骨架密度检验证明这种做法是合理的。

图 3 为生物碎屑灰岩的测井电阻率—孔隙度交会图, 可以看出有三种孔隙结构: 含水微孔隙发育的低渗透层 (粒间孔隙为主的灰质白云岩)、低孔隙的致密高电阻灰岩 (粒间孔隙

为主，部分层段有微裂缝发育）、溶蚀孔隙发育的中等电阻灰质白云岩（以次生孔隙为主的储层）。用粒间孔隙为主前两段地层的岩心数据与声波测井（主要反映均匀分布的粒间孔隙）建立计算基质孔隙度的解释模型，用中子—密度测井与全部地层（矿物成分有白云石、方解石）的岩心孔隙度数据，建立计算总的有效孔隙度的解释模型。实践的效果很好。

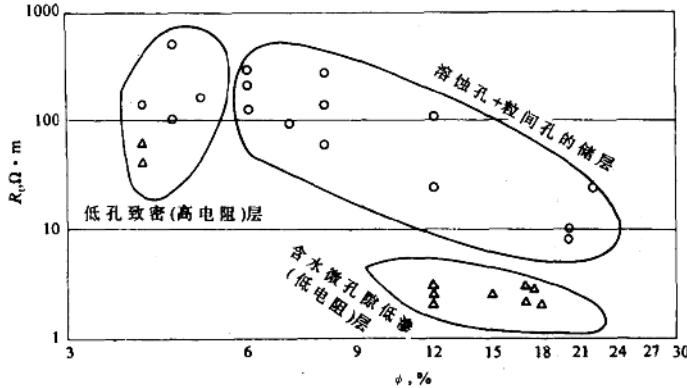


图3 孔隙度—电阻率交会图识别生物碎屑灰岩孔隙结构

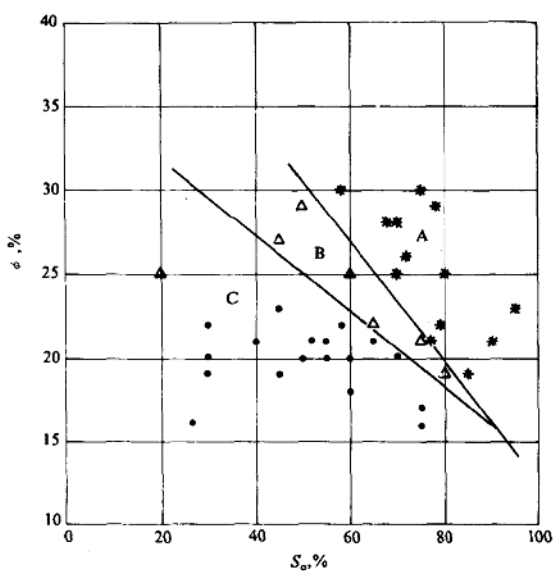


图4 ××油田气层含油饱和度、孔隙度与中子—密度交会程度关系图

A—中子—密度孔隙度有明显影响；
B—中子—密度孔隙度交会不明显；C—中子—密度孔隙度重合

某油田裂缝性灰岩的基质孔隙度 1%~1.5%，裂缝孔隙度一般为 0.006%~0.3%，前者的双

(3) 提高测井解释模型的精度

当沉积环境相差较大时，可以考虑按不同沉积微相来建立计算孔、渗、饱等参数的解释模型，提高精度。

含气饱和度较高的气层对孔隙度测井有明显影响，图 4 为 16 口井 41 层气层的统计，A 区范围明显受气层影响，C 区无影响，这是在钻井液相对密度为 1.25 条件下的反映。对于 A 区计算孔隙度应进行气校正，采用气层岩心分析的孔隙度与测井统计经验校正系数。校正方法有两种：一种是用中子—密度（或声波）测井进行加权平均，统计经验性权系数，这一方法较实用；另一种方法则是采用单一孔隙度测井，如密度或声波测井建立冲洗带含气饱和度校正公式与含水饱和度等方程用迭代法联立求解。

(4) 裂缝性灰岩同样采用“岩心

刻度测井”方法取得明显效果 西部

侧向测井为 $2000 \sim 3000 \Omega \cdot m$ ，而其降低的显示（几十～数百欧姆米）皆反映了裂缝，大量实验证明双侧向测井反映裂缝十分有效。

通过对岩心的系统描述与观测，改进了计算裂缝孔隙度的常规平板模型，采用不同裂缝切割岩心方式的体孔隙度计算方法，同时开展双侧向测井对裂缝地层的响应的数值计算研究，考虑各向异性导电特性的高效数值计算方法，建立了一组高、低角度裂缝灰岩的双侧向响应图版与简化公式，用岩心系统观测与双侧向测井计算的裂缝孔隙度与等效裂缝宽度建立统计关系（岩心刻度测井 4 口井 92 层点），相关系数达 0.859

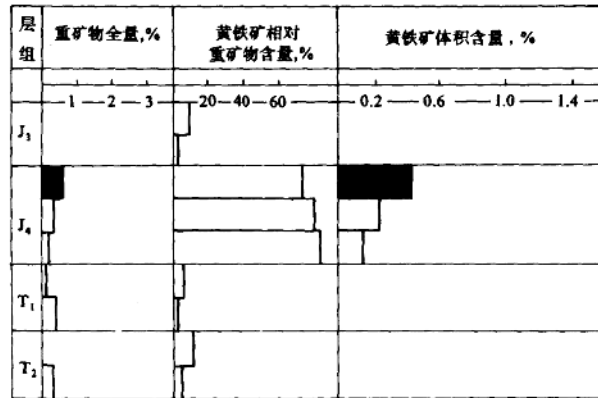


图 5 C-1 井各油组岩心分析重矿物与黄铁矿含量分布图

(5) 低电阻油层的研究 高产油层的感应测井电阻率低至接近水层甚至比它还低，对 J4 油层的研究发现，它是由于含微量黄铁矿（0.2%～0.5%）所致，见 C-1 井重矿物分析（图 5）。更为重要的是微量黄铁矿的分布形式对高频交流电磁场感应测井影响尤为明显，从岩心与薄片（镜下）观察，分布形式有成层、结核、浸染、分散状等。理论分析与实验测量表明，它们对感应测井的影响从后往前依次增大。层状比分散状分布（相同含量）对感应测井影响大 10 倍以上。

5. 成果检验与测井储层参数计算

在确认正式成果之前，要按关键井的要求，再选择几口系统取心井对成果进行检验。以岩心数据为标准，用直方图、交会图、杆状图等形式对比数值、分布、平均值、离散度等。还要对油藏内纵向、物性、区域等进行规律性分析与检查。发现系统误差，返回从头做。

综上所述，用“岩心刻度测井”并计算以含油饱和度为中心的一系列储层参数，这是一项实用的综合性岩石物理研究技术，它的成败与好坏取决于测井解释学的指导和基础工作的可靠程度。

测井储层描述与油气层评价

研究油藏中油气分布规律是测井储层描述的重要任务，相应地对低幅度油藏的评价、水淹油藏的测井描述、油层产能评价等都可以有效地发挥测井高分辨率和精确刻度的优势。

1. 油藏中饱和度分布规律

本文第一段已论述了油藏内饱和度受自由水平面之上的高度、孔隙结构及油水密度差等因素控制的规律，公式（4）作了定量描述。用测井储层参数：孔隙度、渗透率、含水饱和度和来油分析油气在油藏中的分布规律完全符合毛管压力理论的分析，图6反映了孔隙结构（物性）对油水过渡段与含油饱和度的影响。

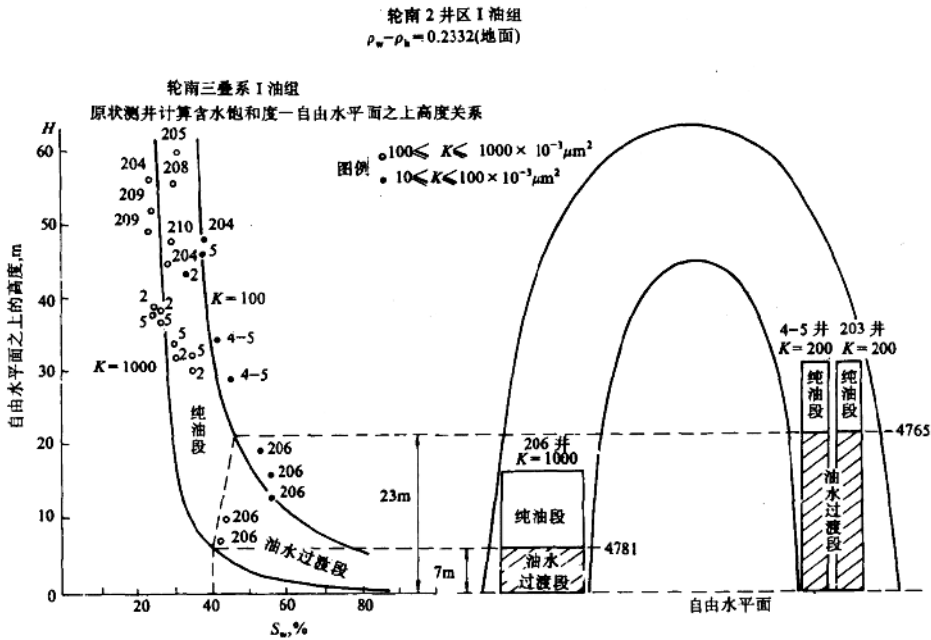


图6 油藏所需的最小闭合高度（即纯油段底）受储层的物性（渗透率）及油水密度差控制

油水过渡段长度及其含油饱和度随高度的变化率取决于砂岩的物性好坏，即物性愈好的油藏，其油水过渡段愈短，相反则长。统计了6个油藏的油水密度差与油水过渡段长度的关系（图7），二者关系密切，油水密度差为0.34时，过渡段长度为1m，而密度差小于0.16时，则过渡段长度变化到9m。在相同高度处，油水密度差大的油藏内含油饱和度大，从上述6个油藏统计高度为25m处，油水密度差大于0.3的油藏中含油饱和度为85%~90%，而油水密度差小于0.27者，含油饱和度为65%（图8）。

2. 评价含油圈闭的油气丰度

由前述可知，一个圈闭内的储油层要产出纯油，必须具备一定的闭合度，使其含油饱和度达到出纯油界限之上，如果圈闭幅度达不到产纯油的最小闭合高度，即小于油水过渡段高度，则该圈闭只能同时产出出水或以产水为主。另外，即使圈闭超过了最小含油幅度，其含油饱和度的大小也直接影响圈闭内的含油丰度。因此，最小含油幅度与其中含油饱和度的大小对低幅度圈闭的含油气评价具有十分现实的意义。

前述油藏（图6），对于渗透率为数百至 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的较好储层，其油水过渡段，即最小含油幅度为7m，而物性差的储层（渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ），其最小含油幅度23m。在较好物性条件下，油水密度差分别为0.16, 0.23, 0.3, $0.33\text{g}/\text{cm}^3$ ，其最小含油幅度相应为9, 7, 3, 1m（图7）。

由上可见,物性愈好,油水密度差愈大的油藏,所需最小含油幅度愈小,反之则大。因此,采用精细地震构造解释结果、精细解释的测井储层孔隙度、渗透率、含油饱和度、纯油层与油水过渡段等结果,综合油气性质等资料,对低幅度含油圈闭的油气丰度进行有效地评价是十分重要的。

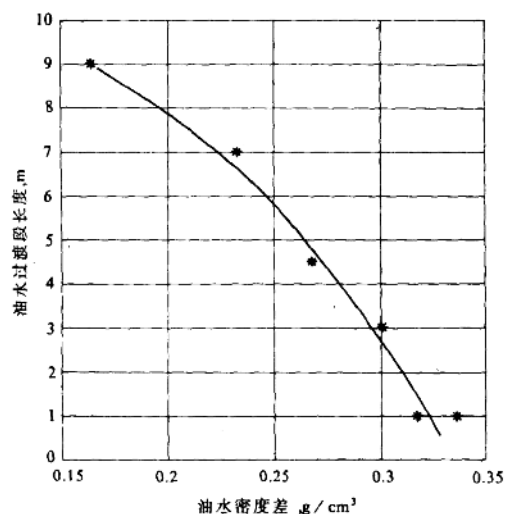


图7 油水密度差与油水过渡段长度的关系

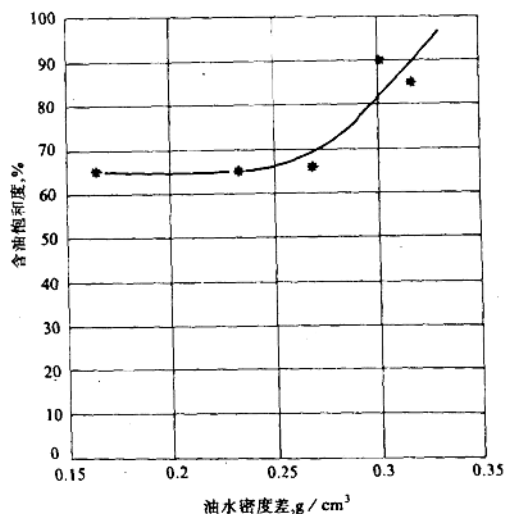


图8 油水密度差与距自由水平面 25m 处的含油饱和度关系

3.低幅度油气藏的含油气潜力

对于幅度小于 50m 的圈闭,油水过渡段长度对其有效含油层厚度影响极大,前者短则纯油层段长,相反则差。因此,储层物性好坏至关重要,对于渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,幅度小于 20m 的圈闭,含纯油的可能性极小。这种物性差的圈闭,即使幅度大至上百米,其上部含油饱和度一般也超不过 80%。

对于储层渗透率特高 (大于 $2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的凝析气藏,即使圈闭幅度小于 10m,其含油丰度与潜力仍可观。例如 12 号构造,油水过渡段小于 1m,在 FWL 之上 1, 2, 6m 处的含油气饱和度由零突变到 80%, 90%, 95%。考虑到圈闭内纯油段的有效高度、物性、含油饱和度和产能,从经济观点评价,这种高油气丰度幅度圈闭的潜力是不可忽视的。

4.用相渗透率概念解释油、水层

用上述方法计算孔、渗、饱等参数,再利用岩心相渗透率实验结果建立用测井计算油、水相渗透率 (K_{ro} 、 K_{rw})、束缚水饱和度 (S_{wi}) 和残余油饱和度 (S_{or}) 的解释模型。

$$\log K_{ro} = C_0 + C_1 \log \left(\frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right) \quad (7)$$

$$\log K_{rw} = D_0 + D_1 \log \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \right) \quad (8)$$

式中 C_0 、 C_1 、 D_0 、 D_1 是孔隙结构的函数，从而可以计算含油层的含水率 F_w ：

$$F_w = 1 / [1 + K_{ro} \mu_w / (K_{rw} \cdot \mu_o)] \quad (9)$$

式中 μ_w 、 μ_o 为水与油的粘度，可见，油层 $F_w=0$ ，水层 $F_w=1$ ，油水过渡带 F_w 在二者之间。通过地质、测试等其他资料的综合分析，对 S_{or} 、 S_{wi} 等参数作必要的修正。

如果油藏下部为水淹，则其中饱和度纵向分布出现异常（含油饱和度明显偏小），可以用式（7）—（9）建立水淹油层测井解释模型，并进行评价。

5. 双感应时间推移测井定量解释方法

钻井中钻井液滤液侵入油气层是一个复杂的物理过程，从中国西部将近 15 口的双感应时间推移测井，发现油气层在钻井液滤液不断侵入的情况下对感应测井影响较大，而且存在很好的规律。

（1）了解钻井液滤液侵入油气层对双感应测井影响的程度，从而发展反演解释方法求准原状油气层的电阻率，以便算准含油饱和度；利用侵入带内饱和度变化规律及双感应测井的响应，从而可用时间推移测井估算含油层的饱和度和渗透率及识别油气层。

（2）钻井液滤液侵入油层的物理实验，包括侵入带内饱和度与电阻率分布规律的研究。钻井液滤液侵入油层的数值模拟包括：①油水两相渗流方程；②水的对流方程，饱和度不均匀分布引起不同矿化度水的混合；③由侵入剖面中矿化度分布计算水的电阻率；④侵入剖面中地层电阻率计算；⑤双感应测井对侵入过程响应的数值计算。

在时间推移感应测井的实用中取得成效：①应用双感应测井交会点（ $R_{ILD} = R_{ILM}$ ）时间估算含油层饱和度（图 9），以及浸泡油层时间比它短或长时的双感应测井变化规律来识别油气层；②应用交会点时间在低渗透地层估算储层的渗透率（图 10）。

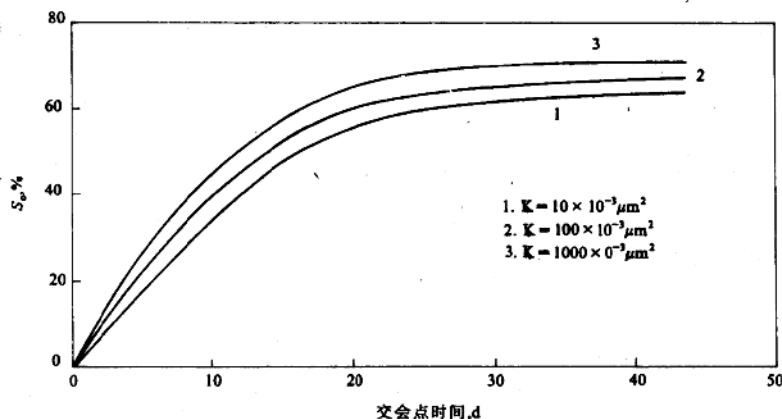


图 9 双感应测井交会点（ $R_{ILD} = R_{ILM}$ ）时间—含油饱和度关系
($\phi = 20\%$)