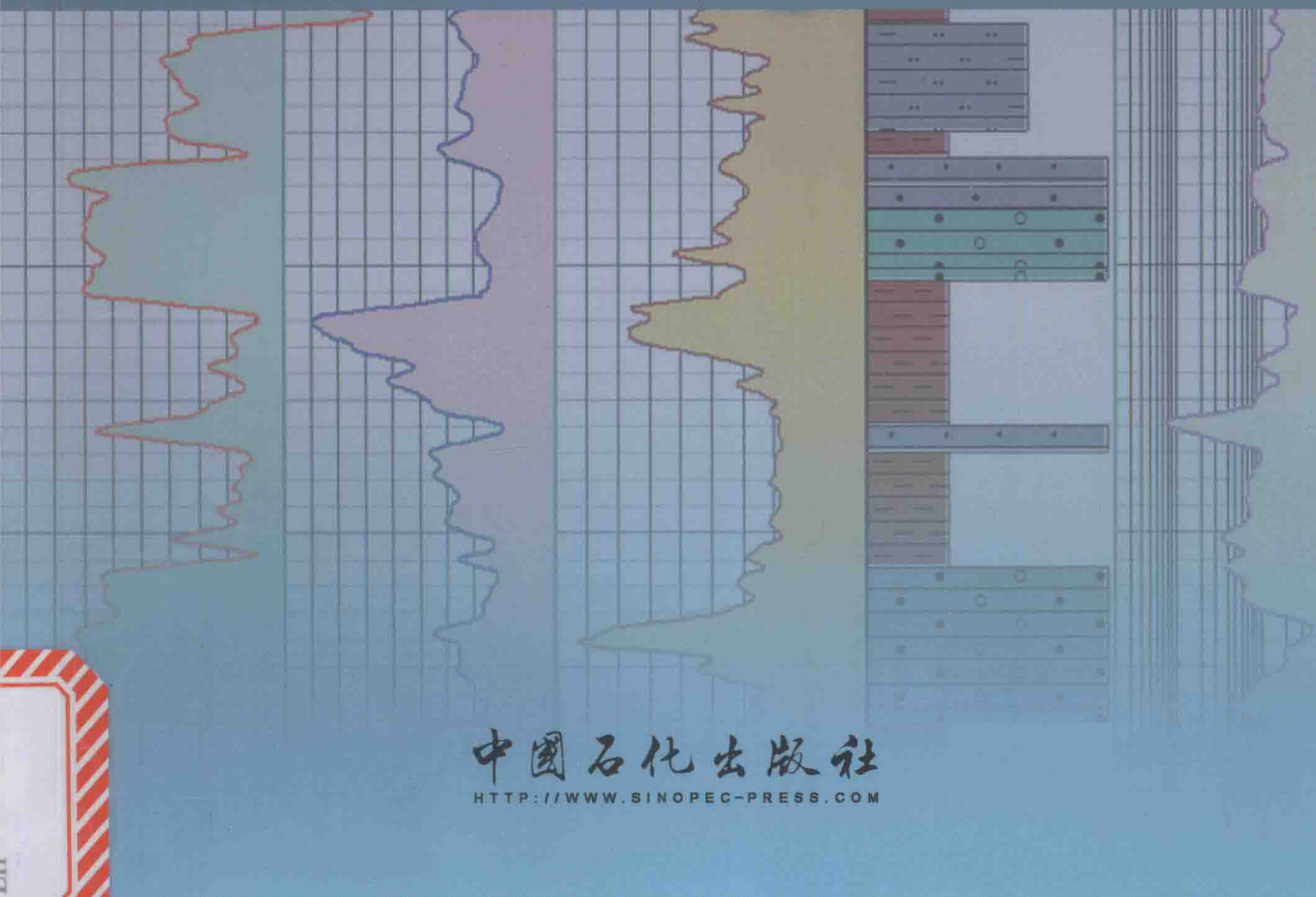


NOVEL GEOLOGICAL ANALYSES OF
WELL LOGS

测井曲线 地质含义解析

李浩 刘双莲◎编著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

测井曲线地质含义解析

李浩 刘双莲 编著

中国石化出版社

内容提要

本书以地质事件为基本研究单元,以地质成因为理论基础,探索系统解读测井曲线的地质含义。第一章和第二章讨论了现代测井评价技术面临的问题及地质与测井评价的内在关系;第三章和第四章根据测井地质学的发展历程和启示,论证测井地质学发展的障碍及方向,并提出测井曲线的3个地质属性及其类型;第五章至第十章介绍了以测井地质属性为理论基础的研究新思路;第十一章和第十二章以案例形式,介绍了本书中涉及方法的一些延伸应用及效果。

本书可供从事测井、地质以及对测井感兴趣的人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

测井曲线地质含义解析 / 李浩, 刘双莲编著.

—北京: 中国石化出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5114-3639-9

I. ①测… II. ①李… ②刘… III. ①测井曲线—地质事件—研究 IV. ①P631. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 230657 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 9.25 印张 215 千字

2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定价: 56.00 元

前言

测井曲线的含义早有定论,它是测井评价的基础。但 21 世纪初,测井评价的环境与条件已发生巨变,致密油气、煤层气及页岩油气等大量涌现,导致测井评价精度骤降,什么才是准确的测井评价,又成困惑。《道德经》中有句哲言“反者道之动,弱者道之用”——矛盾着的对立物各自向着自己的对立面转化。危机对于探索者有时就像一丝暗光,为其指引着似有似无的方向,测井曲线是否还别有含义,这也许是新线索,也许是未知迷雾。

纵观测井发展史,曲线含义的解放伴随其间,地质学家每次重视测井技术,也均因曲线含义有了新解。例如阿尔奇先生 1941 年 10 月提出的著名公式,使人们认识到“中等孔隙度和中等渗透率”储层与油气之间的测井曲线新意,这次认识的解放,使该类储层的流体判别能力空前提高;又如 20 世纪 60 年代中期,皮尔森等学者提出了测井曲线的地下地质分析方法,他们提出利用测井曲线识别沉积环境,这大大提升了地质学家预测沉积环境的能力,曾有史料记载,地层异常压力预测技术的出现,使墨西哥湾的钻井成本下降了三分之一。这些测井曲线含义的解放,都激发了人们探索地下地质的热情和地质研究水平。可见,测井曲线含义的真正解放,有助于大幅降低勘探开发成本,促进低成本油气勘探开发技术的进步。

然而,人们探索大自然又很像一场又一场的捉迷藏游戏。当时间、环境和条件变换,无往不利的旧认知会瞬间变成画地为牢的禁锢,使人愕然。世纪之交就像大自然重设了游戏场景,储层的主角由“中等孔隙度和中等渗透率”变成了“低孔隙度和低渗透率”,当人们习惯性地采用阿尔奇公式解读这新主角,结果总不尽人意。且储层越复杂致密,评价便越不准,很多人不知不觉中走入刻舟求剑的认知误区——“舟已行矣,而剑不行,求剑若此,不亦惑乎?”这正是现今很多测井评价技术应用的真实写照。

挫折是变革萌发的种子,面对现状,反思测井曲线的含义,也许是一种觉醒。测井曲线已久历研究,为何还有尚未破解的含义呢?两个因素待推敲:一是人们难以穷尽对自然界的认识。因此,所推演的测井曲线含义,只能不断逼近地下地质原貌。二是不排除人们固有认知的可能遗漏。如测井行业长期将地球物理作为理论基础,而其评价地层的终极目标又需借助地质思维,这难免导致不同认知体系存在兼容隐患。当地层油气信号丰富时,测井曲线的显著特征,能迅速区分油气层与水层、干层,这恰好遮住了种种潜伏的隐患。但是,面对现今地层微弱的油气信号,继续运用上述方法,必然会诱使这些隐患一一爆发,如今,这隐患已如开启的“潘多拉魔盒”,一次又一次刺痛人们的认知。

测井地质学的难以为继,究其原因,在于它仍以地球物理为基础,而不是地质,属于“无根之水”。实践证明,现代测井评价已离不开地质背景的准确解读,论证并建立以地质成因为理论基础的评价方法,尚属新知,对它的探索,有可能解开众多的测井认知困惑,为地质专家和地震解释专家提供关键证据,有利于油气藏的精确论证。从这个意义上看,重新讨论测井曲线的含义,对于测井评价技术,甚至是石油地质研究,将可能是一场意义深远的认知解放或变革。

本书以地质事件为基本研究单元,以测井曲线内含的3个地质属性为理论基础,尝试探索测井曲线地质含义的解析思路。书中内容主要分4个部分:第一章和第二章主要讨论现代测井评价技术面临的问题及地质与测井评价的内在关系;第三章和第四章主要根据测井地质学的发展历程和启示,论证测井地质学发展的障碍及方向,提出测井曲线的3个地质属性及其类型;第五章至第十章介绍了以测井地质属性为理论基础的研究新思路;第十一章和第十二章主要以案例形式,介绍了本书方法的一些延伸应用及效果。由于本书是全新的尝试,其中许多内容需测井和地质知识的反复交融,有些认识难免稚嫩或存有瑕疵,欢迎广大读者批评指正。

目 录

第一章 现代测井评价技术的困境与对策	(1)
第一节 测井评价问题产生的原因分析	(2)
第二节 地质、工程因素变化与测井评价的关系	(3)
第三节 现代测井评价的关键因素分析	(13)
第四节 现代测井评价的对策分析	(13)
第二章 地质背景解读与测井评价	(15)
第一节 避免测井评价隐患的关键因素	(16)
第二节 测井评价的常见地质问题分析	(16)
第三节 地质背景难以解读的原因与对策	(23)
第三章 我国测井地质学的发展历程与启示	(25)
第一节 测井地质学的定义与研究内容	(25)
第二节 我国测井地质学的发展现状分析	(26)
第三节 测井地质学发展中的得失反思	(31)
第四节 测井地质学的发展思路探讨	(32)
第五节 测井地质学继续发展的条件	(34)
第四章 测井地质属性的提出与论证	(35)
第一节 地质背景不同必然导致测井响应不同	(35)
第二节 测井地质属性的提出与研究目的	(39)
第三节 测井地质属性的存在性论证	(40)
第四节 测井地质属性的主要类型	(47)
第五节 测井地质属性研究的障碍与难点	(48)
第五章 基于地质刻度的测井地质属性研究	(52)
第一节 研究思路	(52)
第二节 基于岩心刻度的测井地质属性研究	(52)
第三节 基于地质界面刻度的测井地质属性研究	(58)
第六章 基于归因分析的测井地质属性研究	(64)
第一节 归因分析的研究依据	(65)
第二节 测井地质属性一般表现方式	(67)
第三节 测井地质属性的归因识别方法	(68)

第七章 基于岩石成因的测井地质属性研究	(73)
第一节 成岩时期与测井地质属性研究.....	(73)
第二节 成岩物质与测井地质属性研究.....	(74)
第三节 成岩温度与测井地质属性研究.....	(75)
第四节 沉积相、成岩相与测井地质属性研究	(75)
第五节 物性特征与测井地质属性研究.....	(78)
第六节 其他条件与测井地质属性研究.....	(78)
第八章 基于事件成因的测井地质属性研究	(80)
第一节 地质事件与测井曲线的因果辨别.....	(80)
第二节 基于构造事件的测井地质属性研究.....	(81)
第三节 基于沉积事件成因的测井地质属性.....	(88)
第四节 其他事件的测井识别分析.....	(90)
第九章 基于成因界面识别的地层对比研究	(94)
第一节 地质事件的突变与不整合识别.....	(94)
第二节 碎屑岩地层不整合面的测井识别.....	(96)
第三节 碎屑岩与碳酸盐岩不整合面的测井曲线差异.....	(99)
第四节 测井技术识别不整合的几点认识.....	(102)
第五节 一般地质界面的测井识别研究.....	(102)
第十章 测井地质属性的两个关键问题探讨	(104)
第一节 固有知识与破旧立新.....	(104)
第二节 认知与发现.....	(105)
第三节 共性与个性的关系论证.....	(110)
第十一章 井震结合的探索与应用	(112)
第一节 井震结合技术的主要原理及其局限性分析.....	(112)
第二节 可相互辨识地质属性的提出.....	(113)
第三节 可相互辨识地质属性的实例应用.....	(114)
第四节 井震信息对同成因目标的追踪研究.....	(115)
第十二章 基于测井曲线地质属性的预测研究	(123)
第一节 低电阻率油层的预测案例分析.....	(123)
第二节 裂缝性储层的预测案例分析.....	(125)
第三节 测井曲线地质属性的预测应用展望.....	(132)
参考文献	(133)
后 记	(138)
致 谢	(141)

第一章 现代测井评价技术的困境与对策

近年来,测井仪器创新如雨后春笋,效果却难掩尴尬。先是测井地质学的探索热潮渐退,甚至否定其存在性;后是致密油气、煤层气和页岩油气的测井评价屡屡受挫,质疑之声不绝。测量手段不可谓不多,但难题之困,不可谓不窘,常有山穷水复疑无路之感。

世间万物皆有因果,测井解释亦然。关于测井曲线的成因,前人多归之于仪器,认为仪器是信号之源,测井曲线始于仪器信号。但这些信号却至少包含两种元素,一是仪器原理的固有表达;二是地下地质情况的宿命结局。每款仪器诞生时,其原理已定型,但地下地质情况却千变万化,以致人们不得不面对如下事实——20年来,相同仪器的测量原理未变,但地层评价与流体识别却越来越难,且随着测量对象由简到繁,难度逐级抬升。因此推测,仅采用固有的地球物理含义试图破译多变的地下地质(地下地质已变而测井曲线的含义未变),极可能是导致现今诸多问题的根源。

20世纪,人们用电法测井判别油气几乎所向披靡,原因在于当时的流体信号占测井曲线比重很大,故电法区分流体较易。近20年测井曲线的信息结构已发生质变:一是信号比重之变。其他信号不断挤占流体信号,矿物成分、成岩及孔隙结构等的信号比重日益强大,从而使流体信号日渐衰弱,甚至几乎可以忽略,显然电法测井已无把握。二是饱和度之变。致密储层变成评价主角,使多数油气层饱和度已低至经济开采边缘,对测井解释精度提出巨大挑战。三是探测目标之变。“小而隐蔽”油气藏已成主要目标,怎样寻找和发现这些目标,成为所有勘探开发技术的共同难题。这些变化对测井解释提出巨大挑战,技术变革势在必行。

有道是“人有所执,必为所缚”。纵观人类历史,发展之惑常在于人们走不出固有认知!测井曲线结构的上述巨变,之所以存在而难以引起测井学者关注,究其原因在于地下地质的变化极难用地球物理思维去察觉和描述,以致困境来而人不自知,这是当前测井行业的真实写照。一边是固有认知束缚着探索的冲动;另一边是地质信号的测井含义长期掩盖于测井曲线的表象,致使许多异常信号反复出现,人们却视而不见。

不解其因,自然遇难而少策。把希望寄托于新仪器是当前之策,希冀新的探测手段,获得地下地质的准确判断。但如果只创新仪器,而不探究测井曲线的成因本质,则难免有舍本逐末之嫌。该方案实施多年,仍难以破解测井困境,可见一斑。

探求曲线本质或另觅良策。测井仪器的原理实为死物,测井曲线之所以多变,实际多为地下地质所致!测井技术的评价对象毕竟是地质本源,本源内涵的关键之变常有信号的映射之对,其对虽隐,但绝非无迹可寻。因此,重新研究测井曲线的地质含义,利用曲线密码的不断破译,寻找还原地质本源的方法,无疑是可选之策。因此,以地质本源认知为



核心的测井评价技术,可能是破解现代测井评价难题的有效途径。

测井解释评价的目的,就是为决策者提供准确依据。有了上述分析,测井技术的困境就易于理解。首先,传统测井地质学原理主要来自于地球物理学基础,即地球物理响应的显著变化是识别地质体的核心依据,但是当研究对象复杂化和隐蔽化时,地球物理响应转为隐性,此时依原有方法按图索骥,则难获真实原因;其次,研究对象和目标的深刻变化,使地质学家对测井技术依赖强烈,这种压力迫使测井行业寄希望于新仪器,试图改善传统仪器的不足。由于没能探索测井曲线响应结构巨变引发的测井解释原理的变革,测井地质学与解释评价技术至今缺少质的突破。

第一节 测井评价问题产生的原因分析

众多事实证明,随着致密、低丰度油气藏成为我国油气研究的主角,标志着复杂贫矿研究时代的来临。当前测井评价的焦点是:地质内因与现代测井解释关系的认知不对称。

针对复杂隐蔽油气藏,如何寻找地质学家所需的关键证据?如何为地震解释提供可靠追踪依据?如何准确识别致密贫矿中的“甜点”?传统测井技术难以作答,一方面大量测井曲线信息仍是未知密码,缺少破解手段;另一方面各测井地质研究还依赖显著曲线特征的岩心刻度,地质内因的本源探索较匮乏。

就油气藏评价而言,油气识别与地质研究是测井技术的阴阳两极,二者不可偏废,阴阳调和,方有活力。因此,以测井评价面临问题的学术现象分析为纬,以测井问题出现的规律性研究为经,则可从新视角再度审视现代测井解释的面貌。

一、国内学者的观点

2000年前后,我国测井解释技术新问题频现,其共性是利用测井技术识别与发现油气日益困难,不仅油气层与水、干层难区分,甚至一些油气层与围岩也难辨别,其原因仍在讨论中,近年来学者们不断反思,该认识过程正由现象走入本质。

2001年欧阳健先后撰文,率先讨论我国测井解释面临的问题,提出“三低”问题,即储层低孔隙度、低渗透率及低电阻率。2004年李国欣等认为,中国石油天然气股份有限公司(简称中石油)低孔、低渗油气藏储量已占新增储量的65%(其孔隙度一般小于12%、渗透率一般小于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。他们将测井评价难题概括为“三低两高一复杂”:“两高”即开发区含水率高、采出程度高。据2002年统计,中石油的主力原油开发区平均含水率为83%,部分油田的含水率甚至达88%以上。同时,这些油区的采出程度也已很高,平均达72%以上,“两高”的出现,加剧了剩余油识别与开采的难度;“一复杂”即储层岩性/储集空间类型与分布复杂。白建峰(2007年)将我国测井评价难点概括为“三低二复杂”,其“三低”同于前者,“二复杂”即储层岩性/储集空间类型与分布复杂,其特点是岩性种类多样且组分变化大及储集空间类型复杂且分布极不均匀,储层类型包括碳酸盐岩、火成岩、砾岩等岩性复杂的储层;油水关系复杂,其特点是地层水在纵向和横向上变化范围大,或油层中的地层水矿化度与水体不同。曾文冲(2006年)提出“传统测井理论的不适应性”问题,



其基本认识为：适用碎屑岩储层的许多成熟评价技术和分析方法，对于复杂的非均质储层，其有效性往往发生退化甚至无效。因此传统测井解释理论需进一步优化和更新。

总体而言，近 10 年来我国测井解释技术面临的难题有增加趋势，现行的方法与手段局限性明显，行业现状堪称严峻。

二、测井评价问题产生的规律

整理上述观点可发现，专业人士看待测井解释问题，往往聚焦于矛盾的凸显，缺少背景变化与问题产生的内在关系的反思。将测井解释问题的历史因素作为分析视角，也许今后有助于发现测井解释问题的成因及解决思路。

从历史因素看，测井解释技术问题的出现，常有短期集中爆发的特征。具体表现为：每隔一段时间测井解释技术会出现对评价目标的明显不适应现象，诸如水淹问题、低孔渗复杂储层评价问题及煤层气、页岩油气评价等，其原因在于该时间段内，油气勘探开发中的某一地质条件或工程参数发生质变而测井评价方法不变，即以不变的技术方案评价已变化对象。我们可把这一因素称作动态因素或时空变化因素，该因素的出现极可能使测井解释技术误入“刻舟求剑”式的分析误区；从认知因素看，任何问题不会凭空出现，它有因有果。但分析测井解释与生产测试的矛盾时，常见解释不清的情况，其因何在？不可否认存在一定的测试错误，但测井解释的认知误区肯定更多，如一些油水关系倒置的储层，如果不了解地层层序与油气运移演化的影响，单一的测井解释肯定难以作答。另如岩屑砂岩储层（骨架常多变），如果不了解构造与物源因素的影响，就会出现孔隙度与油气饱和度计算不准而不知其因的现象。因而忽视或背离地质背景的本质内涵，结果是常常对矛盾问题束手无策，难免出现回避或束之高阁的态度。我们也可把该因素称作静态因素或背景解读因素，它的出现极可能使测井解释技术误入“盲人摸象”式的分析误区。

三、勘探目标变化与测井评价的关系分析

根据上述分析可知，地质背景和工程条件的深刻变化才是测井解释技术不适应的根本所在。我国测井解释评价技术从 20 世纪 90 年代末至 21 世纪初普遍出现问题绝非偶然，其深层次因素是勘探、开发目标的巨变。以勘探为例，2000 年之前，勘探目标多为大构造、富油气、相对简单孔渗结构，其含油气测井响应明显，因而评价时，应用传统阿尔奇公式（解释参数相对稳定），可以比较准确地描述储层的含油气特点；2000 年之后，勘探目标多为复杂背景、隐蔽构造、相对复杂孔渗结构，其含油气测井响应不明显，尤其是复杂孔渗结构，目前还难以找到准确的数学描述方法（解释参数具可变性），因此传统测井解释方法，难以做到准确评价其含油气特点。

第二节 地质、工程因素变化与测井评价的关系

前文提到，地球物理原理长期占据测井评价的主体，但很多地质与工程因素在测井曲线中难以被观察到，容易成为认知盲点，因而缺乏系统研究，更谈不上拥有可依托的理论



基础。实际上,如果站在宏观视角分析可见地下地质的不同,同样深刻地影响着测井曲线特征,例如岩石成因不同,测井曲线特征就不同,这是由于其地质含义发生根本变化,另外盆地演化、成岩作用、储层含油气丰度及岩石组分等不同,均可造成测井流体识别或测井解释规律的很大不同;另观工程因素,也可见随工程影响的深化(如井型改变、长期注采等),测井信息的响应及测井解释模型的选取均随之而变。

这些隐性而暂时缺乏原理依托的测井曲线含义,如果不能被及时发现,就会成为测井评价的巨大隐患,甚至导致测井评价失败。在这里试举部分例子作为佐证。

一、地质因素改变与测井解释参数的两大变化

(一) 阿尔奇解释参数的巨变

目前,地质因素对测井评价的突出影响为:测井解释参数的两大巨变。首先是阿尔奇解释参数(a 、 b 、 m 、 n 值或其中之一)巨变的挑战。现代测井解释由于勘探目标与储层性质变迁,其孔隙结构复杂已造成阿尔奇公式的解释参数常具可变性,如火山岩、碳酸盐岩及致密砂岩等以低孔渗为主的储层,都面临阿尔奇解释参数多变的评价难题,怎样捕捉其参数的变化规律成为困扰测井解释的难点之一。

图 1-1(a) 为渤海湾含油气区常规砂岩的地层因素与孔隙度关系图,由该图可知二者关系相对简单,地层因素变化稳定,采用固定的阿尔奇解释参数即可做好测井解释;图 1-1(b) 为某气田碳酸盐岩储层的地层因素与孔隙度关系图,由于微观地质条件较前者已发生根本变化,图中二者关系变复杂,地层因素变化很不稳定,采用固定的阿尔奇解释参数开展测井解释容易出错,其测井曲线中的成岩作用和孔隙结构部分有可能会参与阿尔奇公式的饱和度计算,造成部分储层的计算结果失真。这是由于地质条件差异隐蔽地影响到了测井曲线响应内涵,并进一步影响到油气评价技术思路的选择。

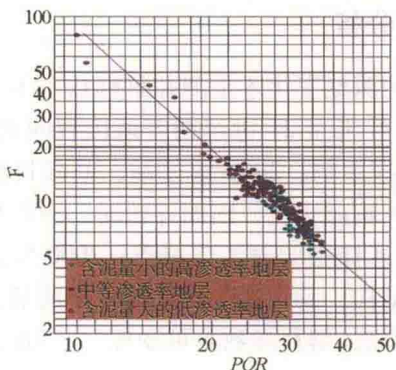


图 1-1(a) 砂岩地层因素与孔隙度关系图(据曾文冲)

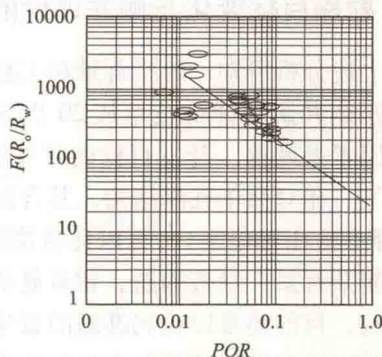


图 1-1(b) 碳酸盐岩地层因素与孔隙度关系图(据曾文冲)

(二) 岩石骨架参数巨变

测井解释参数的另一巨变是岩石骨架参数巨变。传统测井解释的岩石骨架参数常相对稳定,如矿物单一的石英砂岩或矿物组合稳定的碳酸盐岩(由灰岩与白云岩等构成稳定的骨架组合),根据这类岩石骨架求取的储层孔隙度精度很高;现代测井解释由于勘探开发



目标扩大,岩屑砂岩、火山岩、页岩及变质岩已成研究对象,这些岩石由于地质条件改变,骨架常不稳定,其测井曲线的含义较前者发生本质变化,而测井专家采用地球物理分析思路又难以察觉,因此常常求不准储层孔隙度和饱和度,造成测井解释与测试结果矛盾重重。

事实上,每种岩石骨架均形成于某一特定地质条件,即岩石的物源、搬运筛选与沉积条件等,决定了岩石骨架的最终构成。当岩石骨架相对稳定时,其在测井曲线中具有相对显性特征,易于识别;当矿物构成复杂,引起岩石骨架不稳定时,其在测井曲线中为隐性特征,难以识别和判断。油气勘探本身遵循由简至繁,储层油气的丰度总体由富渐贫,岩石骨架总体由简至杂,因此岩石骨架不稳定这一潜在问题,及其常与低丰度油气的相互伴生,成为近年来逐步显现的难题,该现象在测井界还未能引起足够重视,研究也不多。下面以鄂尔多斯盆地某气田为例,加以说明。

1. 地质背景条件与岩屑砂岩含量的关系分析

鄂尔多斯盆地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,其北界为阴山西段的大青山及狼山,南界为秦岭,西边以贺兰山、六盘山为界,东界以吕梁山为限,为我国大型的古、中、新生代沉积盆地。其晚古生代由克拉通盆地逐渐向内陆盆地演化,在盆地北部发育了广阔的近海、沼泽煤系(烃源岩层)→三角洲砂体、河流砂体(储集岩层)→泛滥平原、湖相泥质岩层(区域盖层)层序。

图1-2与表1-1揭示:盆地内某气田从海相(二叠系太原组)到海陆过渡相(二叠系山西组)再到陆相(二叠系下石盒子组)沉积环境的每一次变迁,都引起砂岩中岩屑含量的突变。其中,太原组以石英砂岩为主,岩屑含量最低,为12.2%;至山西组1段时,岩屑含量突然增加到27.7%,山2段由于构造运动相对稳定,岩屑含量有所下降,主要为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩储层;随着构造运动的进一步演化,下石盒子组的岩屑含量又有一次突变。

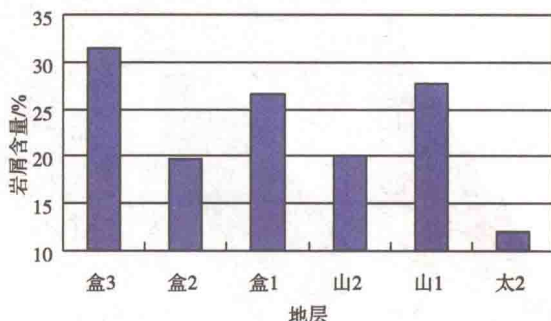


图1-2 鄂尔多斯某气田地层岩屑含量直方图

分析表明,石英砂岩与岩屑砂岩地质条件的根本区别在于构造。其中,岩屑含量的纵向变化受构造演化控制:每一次构造抬升(落差加大)都是岩屑砂岩含量剧增的主因,反之构造趋缓则岩屑砂岩含量降低。利用岩心分析孔隙度检验测井计算孔隙度时,石英砂岩储层的孔隙度计算精度高,与岩心吻合好;而岩屑砂岩储层的孔隙度计算很不稳定,与岩心吻合差。这是地质条件改变引起测井曲线含义发生本质变化的结果。



表 1-1 鄂尔多斯某气田岩石成分分析表

层位	碎屑成分/%											内 碎 屑/ %	碎 屑 总 量/ %	填隙物/%								
	石英			长石			岩屑							泥 质	高 岭 石	菱 铁 矿	方 解 石	褐 铁 矿	石 英	白 云 石	填 隙 物 总 量	
	石 英	燧 石	石 英 总 量	钾 长 石	钠 长 石	长 石 总 量	火 成 岩	变 质 岩	沉 积 岩	云 母	岩 屑 总 量											
盒3	49.7	6.8	54.2	16	3	14.3	4	6.67	3.33	8	32	2	85.9	9.7	3		3.17		2		14.08	
盒2	69.6	4.6	73	8.02		7.33	10.5	9.17	3.67	4.4	20	3.7	91.8	5	1.5		4.25		1.9		8.174	
盒1	65.9	4	69.8	3.52	29	3.63	10.5	5.89	3.87	3.9	27	3.5	89.3	7.4	2.85	0.7	3.23		2		10.65	
山2	76.2	2.5	74.5	1.33		0.76	10.4	6.53	4.45		20	2.6	88.2	7.3	2.6		3.18		1		11.81	
山1	60.9	10	69.9	2.45	3.6	1.7	9.61	4.18	3.15	2.8	28		89.3	8.2		1.37	4.23	0.67	1.4	1.84	10.72	
太2	82	7.6	87.3	1.13		0.56	3.64	3.33	2.17	1.5	12		88.3	7.1		1.5	7.88		5.6	1.11	11.75	

其机理如下：首先，太原期准平原化的结果，使砂岩搬运较远和分选较充分，故抗风化能力弱的岩屑含量低（见表 1-1、图 1-3），储层以石英砂岩为主；其次，早二叠世山西期，盆地北缘以阴山隆起为代表的构造活动强烈，伊盟北部晚石炭世即已存在的三角洲沉积作用得到进一步增强（见图 1-4），陆缘碎屑供给充分，但因近源快速堆积的条件，使矿物的搬运、分选有限，致岩屑含量突然增大（见表 1-1）；第三，早二叠世晚期下石盒子期，盆地北部地壳明显抬升（见图 1-5），物源区侵蚀作用再次加剧，大量碎屑物供给充足，但其中的岩屑含量和成分均有所变化（见表 1-1），如云母含量比山西组明显增加，说明岩屑的矿物成分受构造演化而变化，使矿物骨架更为复杂。

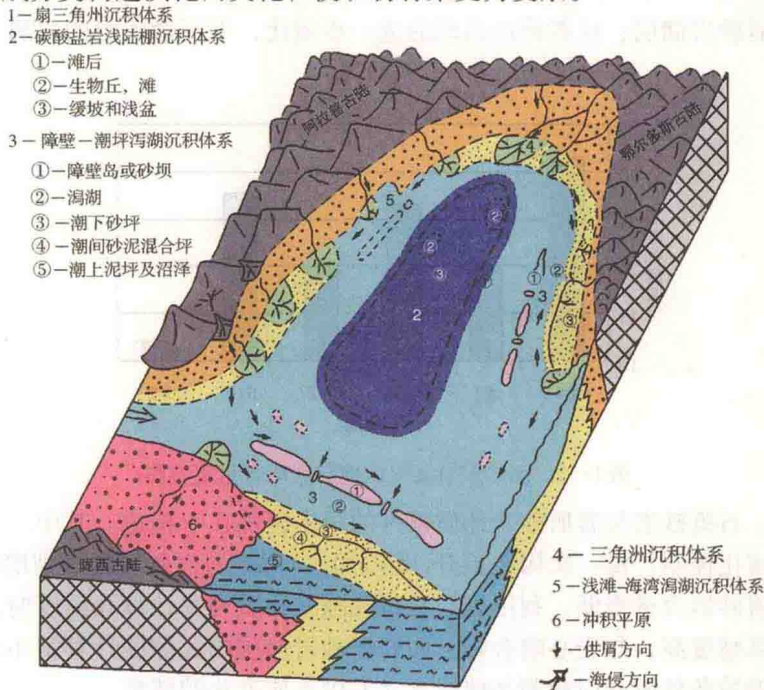


图 1-3 鄂尔多斯盆地西缘石炭纪(太原期)沉积模式(据中石油, 2005)

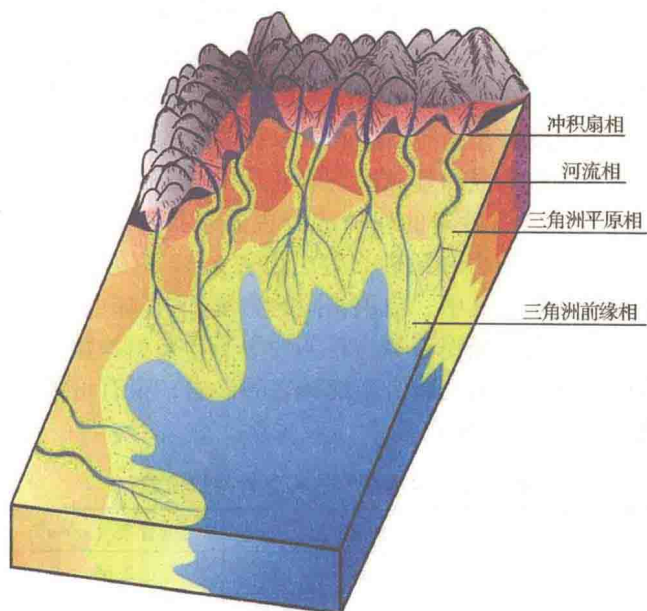


图 1-4 鄂尔多斯盆地早二叠世早期山西期沉积模式(据中石油, 2005)

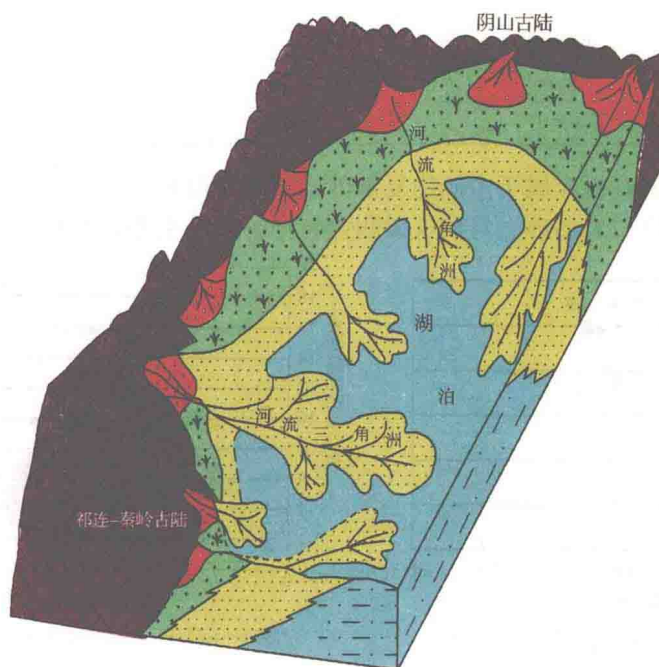


图 1-5 鄂尔多斯盆地早二叠世晚期下石盒子期沉积模式(据中石油, 2005)

2. 岩屑砂岩骨架变化对测井解释的影响因素分析

由于专业思维所限, 测井评价技术解读地质背景的能力相对薄弱, 容易将岩屑砂岩混入石英砂岩的解释范畴。以石英砂岩骨架作为测井解释计算依据, 通常其中子骨架为 -4% ,



密度骨架为 2.65g/cm^3 ，声波时差骨架为 $55.5\mu\text{s/ft}$ 。根据阿尔奇公式，其实质可被理解为储层的含气饱和度主要是孔隙度和电阻率的函数关系。这样解释因忽视岩屑砂岩的矿物复杂性，而一直缺少科学论证，在很多地区被沿用至今。当岩屑砂岩含量高到引起岩石骨架发生较大变化时，容易造成测井技术难以准确求取孔隙度的现象，并进一步波及饱和度计算精度。对岩屑砂岩测井响应的成因基础缺乏研究是根本原因。

岩心分析表明，该气田岩屑砂岩的岩屑成分主要包括片岩、灰云岩、千枚岩、凝灰岩、中酸性喷发岩、花岗岩、板岩和粉砂岩等。由表 1-2 可见，矿物实验数据揭示：岩屑砂岩矿物具有复杂的骨架值。其中，应用相同的测量方法（如中子测井）测量不同的岩屑矿物，如千枚岩、云母、板岩、绿泥石等与石英的中子骨架相差数倍甚至数十倍的骨架测量差异，可见仅仅应用石英砂岩的实验骨架解释岩屑砂岩，很有可能与生产实际反差比较大的测井解释结果（容易误导生产）。

表 1-2 岩屑砂岩的实验骨架数值表

矿物	成分	中子骨架/%	密度骨架/ (g/cm^3)	声波骨架/ $(\mu\text{s/ft})$
石英砂岩	石英	-4	2.65	55.5
岩屑砂岩	云母	30	3.14	64
	片岩	6.5	2.79	60
	千枚岩	8	2.79	58.5
	凝灰岩	?	1.38	65.1
	板岩	44	2.38	32.3
	绿泥石	52	2.79	?

由此可见，岩屑砂岩应属于多矿物复杂砂岩的解释范畴，研究中应考虑用复合骨架参数评价岩性和孔隙度。岩屑砂岩对该气田测井解释的影响主要表现在 3 个方面：

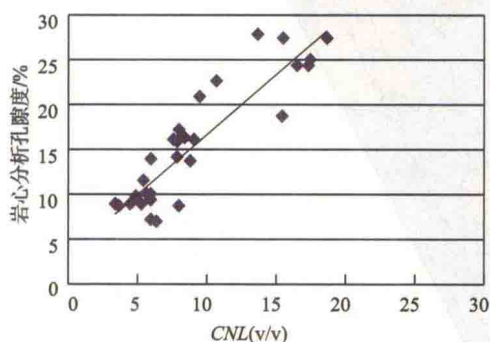


图 1-6(a) 印尼某区孔隙度交会图

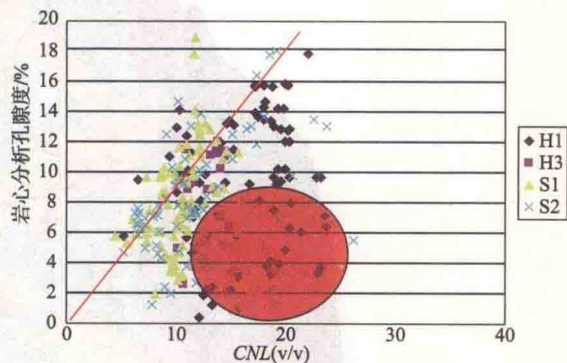


图 1-6(b) 鄂尔多斯某区孔隙度交会图

一是测井响应特征混乱、多变。以中子测井为例，纯砂岩与岩屑砂岩的中子测井响应特征完全不同。图 1-6(a) 为印尼某区石英砂岩的中子孔隙度与岩心分析孔隙度交会图，其中子孔隙度与岩心分析孔隙度有着较好的相关性；图 1-6(b) 为该气田中子孔隙度与岩心分析孔隙度交会图，其中子孔隙度与岩心分析孔隙度关系很差，凸显出测井曲线含义的巨变，这种响应就是由岩屑矿物成分的差异所致，其中比较多的岩心分析为低孔隙度，中

子孔隙度却能达到 20% 左右(红圈内数据)。

二是物性求取难。图 1-7 为某取心井岩心孔隙度与测井孔隙度对比图(据中国石油化工股份有限公司华北分公司)。其中,深度段 1 和段 4 的岩心孔隙度从 16% 下降到 8%, 声波时差变化趋势同于岩心分析孔隙度, 密度反之; 深度段 2 和段 3 的孔隙度相差 2% ~ 3%, 密度变化趋势同于岩心分析孔隙度, 但声波时差值反之。孔隙度求不准成为测井解释大患。孔隙度测井曲线的不一致, 常常是由岩屑砂岩的响应所致, 也是其测井曲线含义的某种表现。

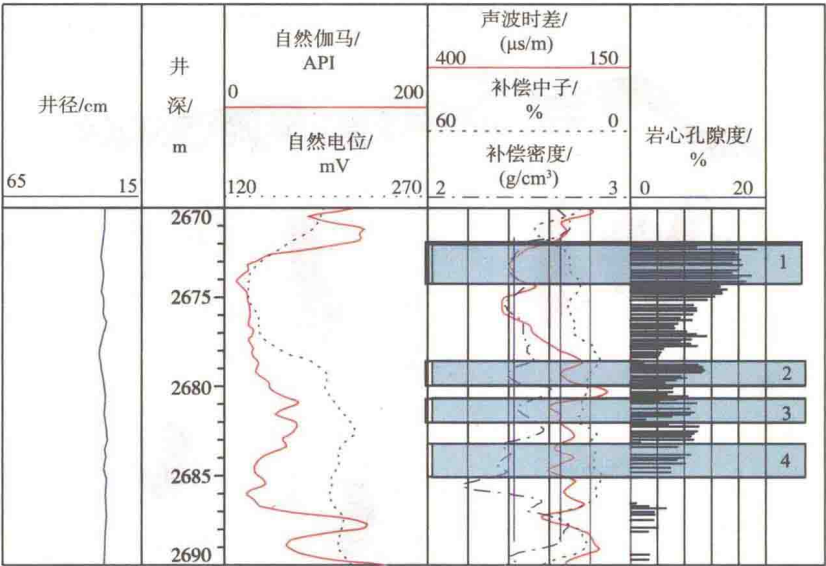


图 1-7 某取心井岩心孔隙度与测井孔隙度对比图(据华北分公司)

三是生产测试与测井解释误差大。该气田测井解释与生产、测试的大量矛盾关系表明: 岩屑砂岩含量高是造成这种矛盾关系的重要原因。其突出特点是: 低产层有时计算的孔隙度比较高, “高孔隙度干层”的频繁出现[见表 1-3(a)和表 1-3(b)]就是这种矛盾的典型表现。岩屑砂岩矿物复杂性所造成的测井响应复杂性, 导致许多矛盾被掩盖至今。

图 1-8 可看出, 实测产能统计数据中, 大约接近 50% 测试的天然气产能小于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中很多储层难以获得经济效益。

表 1-3(a) 某气田单试低产层孔隙度统计表

井名	地层	平均孔隙度/%	无阻流量/ ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	解释结论	试气结果
2-31	山 1	8.175	0	气层	干层
4-11		5.842	0.29		低产
35-2		5.386	0		干层
66-1		6.575	0.47		低产

表 1-3(b) 某气田单试高产层孔隙度统计表

井名	地层	平均孔隙度/%	无阻流量/ ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	解释结论	试气结果
4-111	山 1	7.198	7.78	气层	气层
4-19		7.394	6.41		
4-25		5.21	10.5		
4-27		6.227	7.58		

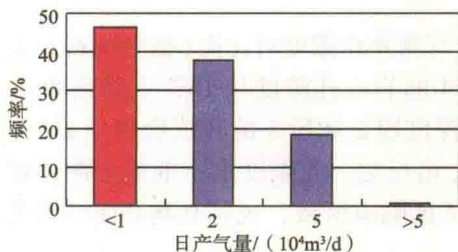


图 1-8 某气田测试产能分类统计图

研究表明, 岩屑砂岩在我国中西部盆地及一些小型断陷盆地的含油气储层中广泛分布, 这与其储层形成的构造演化密切相关, 图 1-2 和图 1-9 表明, 即使在同一盆地内, 岩屑砂岩在纵向上变化也较复杂, 其测井解释有可能是中国前古近系碎屑岩含油气地层面临的主要测井评价问题之一。

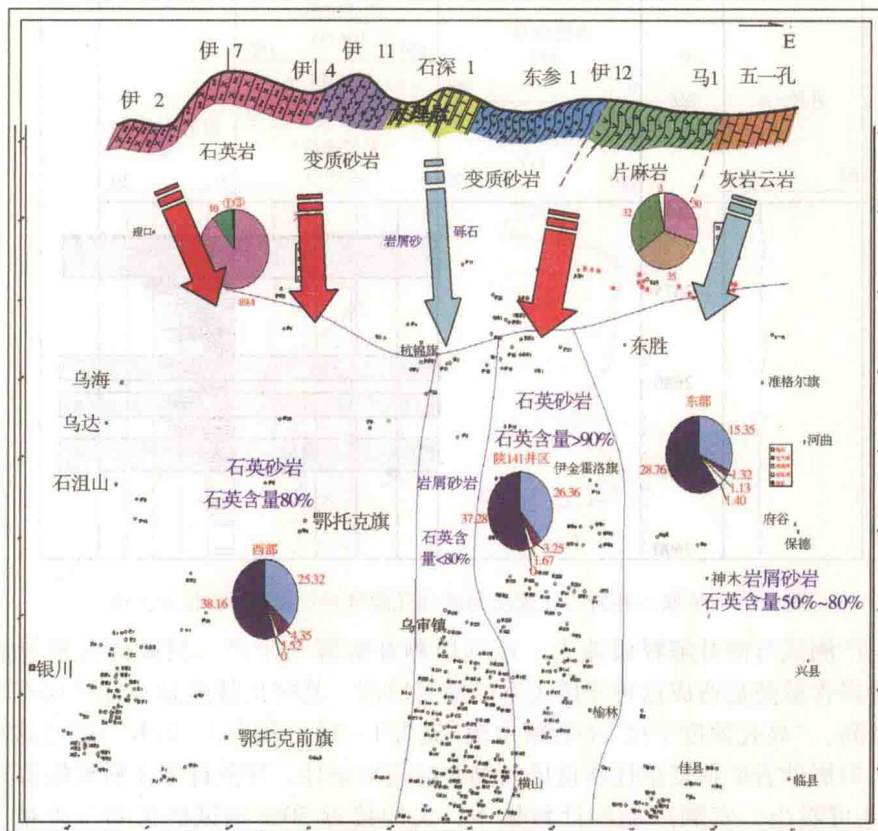


图 1-9 鄂尔多斯盆地山西组岩屑砂岩分布图(据中石油)

二、地质因素改变与非阿尔奇评价现象

利用阿尔奇公式准确评价储层流体性质的基本条件有两个, ①现有技术能准确测量或还原地层孔隙度和电阻率; ②找到正确的岩石骨架及阿尔奇解释参数(或者是二者变化规律)。这两个基本条件缺一不可, 否则会造成测井解释精度低。

油气勘探开发目标及其地下地质条件的巨变, 对测井解释冲击巨大。有些地层难以找全上述两个基本条件, 因此非阿尔奇评价问题已成为测井解释技术的全新课题。图 1-10 为叙利亚某油田一碳酸盐岩储层, 地质研究表明, 该油田碳酸盐岩储层纵向上发育大量收缩缝, 因泥浆侵入, 导致油田几乎所有井的地层电阻率测井数据失真, 纵向上油层、水层