

237299

[苏联] B·H·达哈諾夫
Л·П·多利娜

中南礦冶學院

圖書館藏

研究油、气貯集层的 地球物理方法

李舟波譯

中国工业出版社

前 言

地球物理測井方法的綜合应用，不仅能成功地划分井下地质剖面 and 找出有用矿层，而且还可以更詳細地了解被钻开岩层的岩石特性。特别是在不取岩心的条件下用来确定岩石孔隙度、泥质含量、渗透率和含油气饱和度等参数。了解这些参数对于研究油气井的地质剖面、划分和评价目的层、編制油气田的合理开发方案，都具有很大的实际价值。

虽然地球物理方法有可能解决許多地质問題，但是这些方法目前还远远沒有被石油工业部門的許多油矿地质人員充分运用，在效果上也沒有达到应有的高度。

对于不取心研究岩层的渗透性和油、气饱和度的地球物理方法的推广是很慢的，这在很大程度上是由于在这方面缺乏專門的著作所致。本书在叙述用地球物理方法研究岩层貯集特性和含油、气饱和度的实际应用同时，作者力图在某种程度上弥补这个缺点。

按照提出的問題，在本书中談以下几方面內容：

1) 根据单独的及綜合的地球物理資料，从井下剖面中划出貯集层（第一章）；

2) 地层水电阻率和矿化度的研究（第二章），岩石孔隙度的确定（第三章），孔隙孔道弯曲度的研究（第四章），渗透率的研究（第五章），以及岩石中泥质含量的研究（第六章）；

3) 划分含油气岩层（第七章），含油气饱和度的确定（第八章）和利用矿场地球物理資料計算油气儲量（第九章）。

作者在本书中所引述的內容，使讀者們能够对用地球物理方法解决划分岩性、确定貯集特性和含油气饱和度等問題的发展現

状有一清楚的認識，并且使讀者能进一步的了解这些方法在具体地质条件下的实际运用。

本书的緒論，第一、二、四、六、七、九章，第三章的第13节和第21节，第五章的第26节—第28节，第八章的第39节是由B.H.达哈諾夫写的；第三章的第9节—第12节，第14节—第16节，第五章的第24节和第25节，第八章的第38节是由Л.П.多利娜写的；第三章的第17节—第21节是由B.B.拉廖諾夫写的。

目 录

前言	
緒論	1
第一章 划分貯集层	6
第1节 电法	6
第2节 放射性法	13
第3节 热测井及其他方法	18
第4节 各种方法的綜合应用	20
第二章 地层水电阻率的确定	24
第5节 直接測量地层水样电阻率	24
第6节 根据地层水化学成分計算其电阻率	24
第7节 根据岩层电阻率的測量結果确定地层水电阻率	27
第8节 利用自然电位法确定地层水电阻率	29
第三章 岩石孔隙度的确定	40
第9节 一般概念	40
第10节 用电阻率法确定孔隙度	41
第11节 根据橫向測井資料确定孔隙度	53
第12节 根据微电极測井資料确定孔隙度	58
第13节 根据对称梯度电极系的視电阻率資料确定孔隙度	78
第14节 根据自然电位測量結果确定孔隙度	82
第15节 根据自然电位異常幅度相对值确定孔隙度的方法	85
第16节 根据自然电位異常幅度絕對值 Δu_{on} 确定孔隙度	92
第17节 根据放射性測井資料确定孔隙度	106
第18节 根据中子- γ 法資料确定孔隙度	110
第19节 根据中子-中子法資料确定孔隙度	129
第20节 根据其他放射性測井方法确定孔隙度	130
第21节 国外采用的某些确定孔隙度的方法	134
第四章 岩石孔隙孔道弯曲度的确定	140
第22节 一般概念	140
第23节 根据岩石电阻率确定孔隙孔道的弯曲度	142

第五章 岩石渗透率的研究	146
第24节 一般概念	146
第25节 用电阻率法确定渗透率	148
第26节 用自然电位法确定渗透率	171
第27节 用人工电位法确定渗透率	172
第28节 根据孔隙弯曲度确定渗透率	180
第六章 貯集层含泥量的确定	183
第29节 用自然电位法确定泥质含量	183
第30节 用自然 γ 射线法确定泥质含量	188
第31节 用电阻率法确定泥质含量	190
第七章 划分含油及含气岩层	194
第32节 电阻率法	194
第33节 自然电位法	201
第34节 放射性法	203
第35节 热测井、钻时及井径测量	208
第36节 气测井及荧光法	210
第37节 根据综合地球物理测井资料划分含油、气层	213
第八章 确定含油饱和度	217
第38节 用电阻率法确定含油饱和度	217
第39节 国外采用的划分含油岩层及估计含油 饱和度方法的某些特点	233
第九章 利用矿场地球物理资料计算油、气储量	240
第40节 石油储量的计算	240
第41节 天然气储量的计算	247
参考文献	249

緒 論

为了有效的开发油气田，不仅需要对油气藏的范围（面积和厚度）和成层条件有全面的了解，而且还需要掌握它的构造、貯集特性和含油气饱和度的詳細資料。有了这些資料就能更准确地計算油气儲量，使开发方案的地质依据更加可靠，从而为高效率地开发油气藏創造必要的条件。

在研究钻井的綜合地球物理方法还没有建立以前，有关貯集层孔隙度、渗透率、含油气饱和度及其结构的資料，是根据岩心的分析結果来确定的。这样取得的关于目的层结构、貯集特性和含油气饱和度的資料，虽然看起来好像很完滿，可是在絕大多数情况下，由于下列原因在解决上述問題时达不到所需要的精确度。

1. 目前的深井取心方法是很不完善的。由于取心钻头结构的缺点，岩心收获率很少超过 50%，一般岩心收获率只有 20—40%，并且取出的多半是坚硬的岩石。因此，根据岩心資料不可能很完整地研究井下剖面，特别是在比較疏松的含油气岩层中更是这样。因为在取心过程中常常会漏掉很好的貯集层，所以根据岩心資料編制的井下剖面图会出现很大錯誤。例如，在最初勘探奥齐克-苏阿特油田Ⅱ层以及在其他一些油田中所見到的那样。煤层的岩心收获率也是很低的。

2. 岩心的岩样体积是很小的（特别是再加上取心不足），它不可能給出关于貯集层的完整概念，和估計其工业价值所必須的資料。例如，按照岩心資料，巴什基里亚和韃靼泥盆紀产油层的结构是相当均匀的，然而这些油层經過微电极系法和接地电阻差值法詳細測井后，結果証明，这些地层在垂向有很大的变化（在貯集层中交互有粉砂岩，有时还有薄的泥岩夹层）。类似的情况在克拉斯諾达尔边区阿那斯达希耶夫-特略琴柯油气田的主要厚产油层中也看到。

3. 在钻井取心过程中, 岩心结构常常被破坏, 因此就不能准确地测定岩石貯集特性。岩心無論在取心过程中还是在以后存放(放干了)期間都会产生裂隙, 都使实验室中所测定的渗透率值增大。此外, 实验室中测量岩石貯集特性通常都是在正常大气压力下进行的。实验研究结果〔67〕指出, 在这样条件下测出的孔隙度和渗透率, 比这些岩样在深度2,000米以下岩层中时的实际数值, 分别增大了6%和50%(或更大)。

4. 按照岩心分析資料, 在大多数情况下都不能准确的定出孔隙中介质的成分。特别是不能根据岩心資料确定岩层含油饱和度(使用油基泥浆钻开的不含水层例外), 特别是含气饱和度。确定地层水矿化度也是非常复杂的。测定时要求停止钻井, 并对相应地层要作很麻煩地試驗工作。

过去在研究产油层特性时, 有时是取該层在邻区的露头上或浅井中的岩样进行分析, 这样得到的資料的可靠程度就更差了。目的层的结构及其孔隙度、渗透率, 不論在橫向或垂向上其变化都是很劇烈的, 因此用近似地外推法是会造成很大誤差的。

近十几年来, 由于綜合地球物理方法的建立, 使得对井下地质剖面的研究, 特别是对含油气目的层的研究工作, 有了很大的改进。

地球物理方法与实验室岩心分析不同, 它能够直接研究目的层在自然成层条件下的特性。同时, 研究人員可以詳細研究井下剖面, 划出剖面中的薄夹层; 或研究大組岩层(体积达几立方米)的平均性质。地球物理方法在大多数情况下, 都比根据小块岩样的分析資料更能代表目的层的特性(例如, 在确定貯集层孔隙度、渗透率和含油气饱和度时)。此外, 通过地球物理方法能得到連續的岩层物理参数曲綫(視电阻率 ρ_n , 自然电位 u_{en} 和人工电位 u_{an} , 自然 γ 射綫强度 I_n 和二次(中子) γ 射綫强度 $I_{n\gamma}$, 溫度变化 Δt 等曲綫)。由于曲綫图形的直观性和岩石物理参数的明显差異, 可以察觉出钻井剖面上岩层岩性的非常細小变化。这

样，就保証能够最可靠地划分井下剖面 and 进行对比。

在研究岩石物理性质（电阻率、自然和人工电化学反应性，放射性等）方面取得的成果，以及这些性质与岩层貯集特性（孔隙度，渗透率，分散性）及含油气饱和度之間明显关系的确立，就有可能根据地球物理方法定量地确定这些岩层的貯集特性和含油气饱和度。在钻井中直接观测的 ρ_k , u_{cn} , u_{sn} , I_v , I_n , 和其他一些物性参数值，以及这些参数与貯集特性之間的定量关系曲线，是进行定量解释的原始依据。这些定量关系曲线是根据实验室对岩样分析的物性资料与貯集特性资料相互对比，或者根据地球物理测井结果与岩性稳定地层的岩心分析资料对比而制出。

根据地球物理资料确定岩层貯集特性与含油气饱和度的准确程度，主要取决于对本区岩石物性的研究程度和 ρ_k , u_{cn} , u_{sn} , I_v , I_n , 及 Δt 等物性参数的测定质量。

为了能够用地球物理方法不取岩心地进行钻井剖面的地质編录工作，对岩石物理性质及其与岩性相互关系的研究，是和地质工作中对岩层的岩石学性质所作的研究，有着同等重要的意义。因此，岩石物性的研究不仅是为了获得对它的一般了解，而更主要是为了确定可能使今后向更有效的不取岩心钻进过渡的客观关系。这方面的研究必須給予很大注意。应该記住，要想准确地回答井中所钻开的是什么岩层？它的结构如何？孔隙度、渗透率和含油气饱和度是多大？只有在岩石物理性质及其和該岩层的岩石学性质之間的关系已知时，才能用現有的地球物理测井方法解决。

但是很可惜，这一点沒有被矿场和探区的地质及地球物理有关部門給予应有的重視。一般对于岩心的岩相和古生物学特点研究得很仔細，但是对其物理性质几乎沒有作什么研究。其实以后的钻井基本上都不采用取心的办法，而是根据地球物理资料进行钻井剖面的地质編录工作。因此，按上述情况安排工作，就不能对地球物理资料科学地作出有根据的解释。特別对岩层貯集特性和含油气饱和度的研究更是如此。在这样条件下，对钻井地质剖

面、岩层貯集特性和含油气情况所作出的判断，常常是建立在不够充分地和非常主观地推想基础上，因而也就难以保证解释结果所必需的准确度。分析一下用地球物理资料划分钻井地质剖面时出现的误差，就可以看出，大多数情况是由于解释人员对所研究地层的物性资料缺乏了解，和解释曲线时没有考虑本区岩石的特殊性质所引起的。像这样地解释曲线，就会使测井这一最新方法的效果受到影响。

只有当解释人员在自己的工作中是从本地区的具体地质条件出发，并能够根据试井资料确立了一定规律性的条件下，本书中介绍的地球物理测井资料定量解释方法，才能获得最好的效果。在进行地球物理资料定量解释时，达到了上述要求的地区（如格罗兹内、巴什基里亚和其他油田的某些矿场，以及国外一些地方），其应用地球物理方法的效果都很好，并且成为详细研究钻井剖面的主要工具。

为了提高地球物理资料解释结果的精度，必须经常对曲线质量提出严格要求。但是很可惜，许多地区的曲线质量是不高的，以致使一些很有用的参数，如岩层自然电位、自然 γ 射线强度和 neutron- γ 射线强度等得不到利用。而地质及地球物理部门对消除这些缺欠并没有采取必要的措施。到目前为止，自然电位仍然是用极化电极和不够准确的比例进行记录；放射性测井仪器在测量之前也多半没有进行标准化；记录钻时曲线时也没有同时记录井底压力。在这种情况下所获得的资料只能用来定性地判断井下地质剖面（划分开岩性差别很大的岩层），而不能得出准确的定量结论。其实，要弥补上述的不足和使测井结果适合于定量研究，并不需要花费很大劳动。

地球物理方法，其中特别是核子地球物理方法对于研究井下岩层的各种可能性，还没有很充分了解。到目前为止，用矿场地球物理方法能够成功地解决的有下面这样一些问题，如确定岩石孔隙度、含油气饱和度，在条件有利时确定岩石渗透率等。现在我们应该进一步要求它解决更复杂的问题，例如，把不同类型的

孔隙（粒間的还是裂隙的，有效的还是开放的）区分开；把不同存在状态的地层水（束縛的还是自由的）区分开等等。但是由于实验、研究的工作量小和能用来制成关系曲线的实际资料数量都还很有限，所以目前要解决上述问题还是有困难的。随着地质及地球物理研究工作量的增多，对岩石物理性质的了解也将越深入，同时也越有可能在实际工作中创造性地运用它们和确定出还不知道的一些新关系。

电阻率与孔隙度及含油饱和度之间的关系是1934年由阿塞拜疆石油研究所的И.М.科岡及列宁格勒大学物理研究所最早发现的。后来，这个工作成果被总结归纳，并提出了用相对电阻率确定孔隙度和含油饱和度的方法。最初利用这些关系时，常常引起不少相反意见。甚至一些著名的地质学者及地球物理学者也提出很错误的意见。他们认为利用物性参数和所确定的规律不能詳細研究岩层。这一点实际上已经被在这方面取得的科学和技术成就所駁倒。而持有这种保守看法的人总是对于这些方法的作用估计不足。纵然像用电阻率法确定岩石孔隙度和含油饱和度这样一些在国外好久以前已运用很成功的方法，实际上这方面我們已经有些落后了。

石油工业部門有关的地质及地球物理工作单位，应该创造性地运用国内和国外根据地球物理资料詳細总结研究岩层貯集特性和含油气饱和度等方法的經驗，并且促使其更加完善。

第一章 划分貯集层

大孔隙的渗透性岩层——油气貯集层——可以根据视电阻率、自然电位、人工电位、自然放射性、中子 γ 和散射 γ 射线强度，以及温度变化和井径等曲线的综合分析结果，很准确地被划分出来。

按照上述任何一种参数划分貯集层的可靠程度，不仅取决于岩石的有效孔隙度和渗透率数值，同时还和充满在孔隙中的介质的特性有关。孔隙中充满高矿化水的貯集层，比较容易划分出来。而油层，特别是气层的研究是比较复杂的问题。但是，当正确地选择了综合地球物理测井方法后，这个问题的解决并不是非常困难的。

我们下面分别讨论一下，根据各种地球物理测井曲线划分貯集层的方法。

第1节 电 法

利用现有的电测井方法，在大多数情况下，特别是当孔隙中充满着高矿化水时，可以划分高孔隙和高渗透性的岩层。具有高有效孔隙度和高渗透率的岩层，在各种电测井曲线上的特征如下。

1. 视电阻率曲线

在标准电极系记录的视电阻率曲线上，地层水矿化度相当高的含水貯集层，通常表现为比较低的电阻率值（1欧姆-米以下）。但是应该注意，泥岩、某些煤层和多数矿化了的岩层的电阻率，可能具有同样数量级。所以，低电阻是划分水层的必要条件，但并不是唯一的条件。还必须参考其他物理参数进一步确定它。

油层、气层和含淡水的貯集层表现为高电阻率（达100欧姆

-米或更高些)。根据单独的视电阻率曲线区分油层和气层是困难的。

用下面的视电阻率法能够很好的划分出低电阻层：1) 根据两种电极距——长和短的 ρ_s 曲线；2) 根据短电位或短梯度电极系在不同时间两次测得的 ρ_s 曲线。

上述两种方法，要在泥浆电阻率和地层水电阻率间有很大差别时采用。

根据两条不同电极距的 ρ_s 曲线划分层。当泥浆滤液电阻率 ρ_f 比地层水电阻率 ρ_w 高时，对着渗透性地层用短电极距 L 测得的视电阻率值，比用长电极距测得的 ρ_s 值高。这是由于低矿化度的泥浆滤液侵入层，形成一个高阻的渗透带的缘故（图1）。

地层在充满高矿化度地层水时所具有的上述特征，在下列情况表现不出来。

(1) 岩层从被钻开到测量其电阻率所间隔的时间不够长，此时泥浆滤液渗透还不够深，所以测得的曲线还达不到足够清晰的程度。

(2) 充满高矿化液体的小孔隙不渗透岩石（如石灰岩）发生盐的浸析现象时，围绕井壁造成一个电阻很高的薄层（由于岩石孔隙度很小）。按照等价原理〔17〕，这一层和高电阻泥浆滤液浸入地层很深的情况等效。

(3) 对着高电阻薄地层，当较大的电位电极系或梯度电极系的电极距分别大于岩层厚度的0.3和0.7倍时，由于低电阻邻层或岩层屏蔽电流的影响，会使较大电极距测得的视电阻率的值降低。

如果泥浆电阻率和地层水电阻率的数值差别不是很大，层就不能在电阻率曲线上清晰的反映出来，并且当泥浆滤液电阻率 ρ_f 和地层水电阻率 ρ_w 的直接接近时，便不能确定出层在剖面上的位置。

如果泥浆滤液电阻率比地层水电阻率小很多时，短电极系将

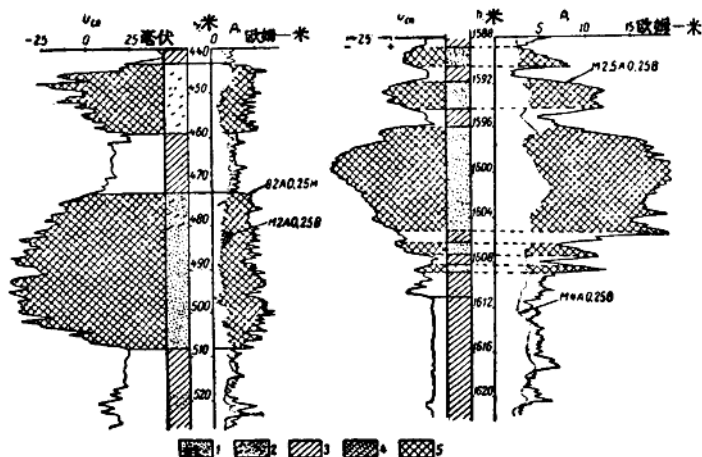


图 1 用大电极距梯度电极系和小电极距电位电极系视电阻率曲线划分贮集层的示例

1—砂层和砂岩；2—泥质砂岩；3—泥岩；4—砂质泥岩；5—贮集层。

在贮集层上，电位电极系比梯度电极系记录的视电阻率值显著升高。

比长电极系测得的视电阻率值为低。

按短电极距电极系两次测得的 ρ_s 曲线划分贮集层。用短电极系两次测得的 ρ_s 曲线来划分贮集层的方法，是比较准确的方法之一。它是记录两条短电极距（1—2倍井径）的梯度或者电位电极系 ρ_s 曲线。第一次测量是在钻开岩层50—200米后立刻进行；第二次是在5—10天以后进行。这时（图2），贮集特性愈好的岩层，第二次测量的视电阻率和第一次记录的相比，差别也就愈大。特别是，这个方法消除了因岩层厚度不大引起的误差（见前面方法的第三种情形），而且当两次测量的间隔时间不太长时，由于泥浆浸析造成的误差（见前面方法的第二种情形）也不会很大。

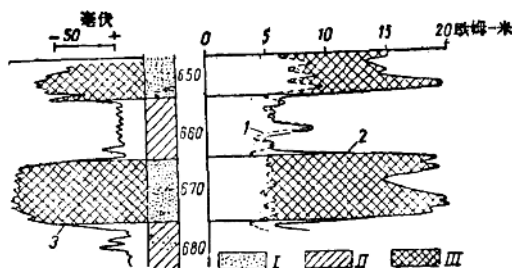


图 2. 根据不同时间记录的视电阻率曲线划分貯集层
(由于低矿化度泥浆向貯集层中渗透, 便使不同时间记录的 ρ_K 值发生了变化) 的例子

1—钻开岩层后立即用 B3A0.5M 电位电极系测出的 ρ_K 曲线;
2—一个星期以后, 再用同样电极系测出的 ρ_K 曲线。

I—砂子和疏松砂岩; II—泥岩; III—貯集层。

在貯集层上, 第二次测量的 ρ_K 值明显升高; 致密岩层 (如 653—663 米一段) 的视电阻率没有随时间变化。

2. 微电极系曲线

大孔隙的渗透性岩层, 在微电极系曲线上的视电阻率值, 一般不高于泥浆电阻率的 10 倍 (极个别的达到 20 倍), 并且由长电极 (微电位电极系) 所记录的视电阻率数值比短电极 (微梯度电极系) 所记录的视电阻率值高出很多 (图 3)。当视电阻率比泥浆电阻率高出 10 倍或更多时, 通常是表示高电阻的、有效孔隙度和渗透率不大的岩层 (致密石灰岩或致密砂岩)。如测得的视电阻率值很低, 长短电极测得的 ρ_K 值又几乎一样, 并且接近泥浆电阻率时, 是表示不渗透的低电阻地层: 泥岩、泥质页岩或泥质石灰岩 (图 3)。

3. 横向测井曲线

在地层水电阻率低于泥浆滤液电阻率时, 渗透性吸收地层的横向测井曲线形状是 $\rho_o < \rho_{mn} > \rho_n$ 的三层曲线 (钟形曲线) (图 4

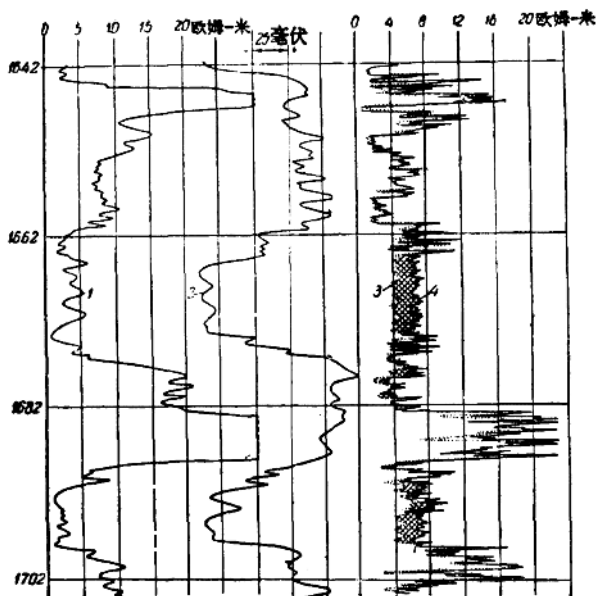


图 3 用微电极测井曲线划分貯集层的例子

- 1—视电阻率曲线（电极系为 B7.5A0.75M）；2—自然电位曲线；3—微梯度电极系（A0.02M0.02N）曲线；4—微电位电极系（A0.04M0.4N）曲线。

貯集层（画黑线部分）是根据不太高的视电阻率值及明显正幅度差划出。

a)。但是在解释时应该注意防止作出错误结论，因为在下述情况曲线也有相似的形状：

- 1) 对着不渗透的高电阻地层，当最大电极距接近其厚度 h ：

$$L_{\text{梯度}}^{\text{MARCO}} > \frac{2}{3} h; L_{\text{电位}}^{\text{MARCO}} > \frac{1}{3} n \text{ 时 (图 4 6);}$$

2) 含有高矿化度地层水的、几乎不渗透的小孔隙地层发生盐分被泥浆浸析的现象时。

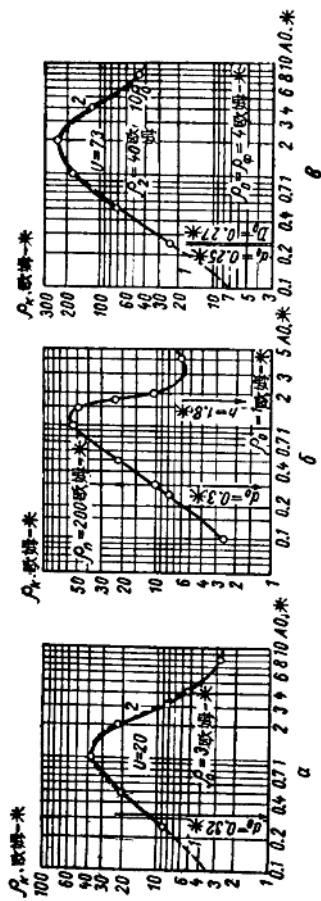


图 4 不同岩层的横向测井曲线示例

a—高有效孔隙度和渗透性岩层的B33曲线；b—高电阻薄层的B33曲线；c—高电阻薄层，但孔隙度小和存在盐分被浸析现象的B33曲线。1—理论B33曲线；2—实测电深曲线。

和渗透性良好的岩层（图4a）不同，高电阻薄层的B33曲线右肢比较高，而且随电极距增加，视电阻率仍然在升高。当存在盐被浸析现象时，视电阻率显著升高（与图4a及4c比较）。

前面曾經說過，当发生盐分被浸析的現象时，在井壁的岩石中造成一电阻率极高的脱盐的薄层，其厚度往往不超过1—2厘米。該层使横向测井曲线形状（图1B）和低矿化度泥浆滤液向渗透性地层中浸入很深时的EΘ3曲线（图4a）很相似。上述两种情况，由于曲线形状的相似，会使解释造成錯誤。这一点和前面談过的，用两条不同电极距的 ρ_s 曲线（当 $\rho_o > \rho_n$ ）划分渗透性地层时遇到的情况一样。

当泥浆电阻率比地层水电阻率小很多时，渗透性吸收地层的假想井径与钻头直径相比是增大了。

这时，和利用两条 ρ_s 曲线划分渗透性地层时一样，也可能发生錯誤，因为从横向测井曲线形状上来看，此时与井径扩大处的EΘ3曲线相似。为消除由此可能作出的錯誤結論，解释EΘ3曲线时，必須参考井径曲线。

4. 岩层自然电位曲线

当泥浆滤液电阻率 ρ_o 和对着所研究岩层的泥浆柱静水压力 P_o ，分別大于地层水电阻率 ρ_n 和地层压力 P_n 时，在自然电位曲线上，渗透性地层一般表现为低值（图1、2、5和6）。自然电位值增高通常是反映岩石中泥质含量增加、渗透性变坏和有效孔隙度变小。当 $\rho_o < \rho_n$ 和 $P_o < P_n$ 时，渗透性地层的自然电位显示与上述相反，表现为高值（見后面图19的曲线3）。

应当注意，致密的純石灰岩和白云岩（特別当地层水含氯化鈣时）以及純的致密砂岩和夹在泥质岩层中的不含泥质的水化学岩层，在自然电位曲线上也都表现为低值。

如果渗透性地层的压力比泥浆柱静水压力小很多，同时地层水的矿化度是低的时候，当 ρ_o 相当大（>1欧姆-米），但小于 ρ_n 和 $P_o > P_n$ 时，也可以观察到負的 u_{cn} 异常。

5. 人工极化电位曲线

在人工电位曲线上，渗透性地层的 u_{cn} 值只是稍微升高一些