

油水接触面及含油边缘 移动情况的测算

[苏联] C. A. 苏尔坦诺夫 著
B. A. 哈尔科夫

洪嘉禾 周春虎 译
沈志成 傅鑫生

中国工业出版社

С.А.Султанов В.А.Харьков
**КОНТРОЛЬ ЗА ПРОДВИЖЕНИЕМ
ВОДО-НЕФТЯНОГО КОНТАКТА
И КОНТУРОВ НЕФТЕНОСНОСТИ**
ГОСТОПТЕХИЗДАТ—1962

* * *
油水接触面及含油边缘移动情况的测算

洪嘉禾 周春虎 譯
沈志成 傅鑫生

*
石油工业部石油科学技术情报研究所图书編輯室編輯(北京北郊六鋪炕)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*
开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张5·插頁1·字数113,000

1965年2月北京第一版·1965年2月北京第一次印刷

印数0001—1,390·定价(科六)0.80元

*
統一书号: 15165·3279(石油-188)

本书介绍了采用边内、边外注水开发油田时，测算油水接触面及含油边缘的各种方法，包括电测井法、放射性测井法，以及根据产出液性质观察油水接触面推移情况和用水动力学方法测算含油边缘的推移情况。书中还介绍了利用矿场地球物理方法确定油水接触面时的选井问题。

本书可供油田开发、开采工程技术、科学研究及教学人员参考。

目 录

第一章 油水接触面和含油边缘	1
§ 1. 油水接触面的概念	1
§ 2. 含油边缘的概念	8
第二章 利用电法测井确定油水接触面位置	10
§ 1. 电法测井的物理基础	10
§ 2. 确定油水接触面的方法	14
§ 3. 利用电测井结果检查油水接触面和含油边缘移动情况	25
第三章 利用放射性测井确定油水接触面	32
§ 1. 放射性测井法的物理基础	33
§ 2. 利用中子伽玛法确定油水接触面	34
§ 3. 利用中子中子法确定油水接触面	41
§ 4. 利用次生活化法划分含油和含水岩层	44
§ 5. 利用脉冲中子发生器确定油水接触面	52
§ 6. 放射性同位素法的应用	54
§ 7. 利用放射性测井的结果检查油水接触面及含油边缘的 移动情况	57
第四章 用矿场地球物理方法确定油水接触面时井的选择	64
§ 1. 检查井的选择	64
§ 2. 确定油水接触面用的生产井的选择	65
§ 3. 油井技术情况的研究	66
第五章 根据采出液体性质的变化测算油水接触面的移动	82
§ 1. 生产井水淹动态的观察	82
§ 2. 生产井水淹资料的应用	85
§ 3. 根据石油遮光率的变化测算原油的水平移动	91
第六章 测算含油边缘移动的水动力学方法	95
§ 1. 用水动力学方法确定目前含油边缘位置	95

IV

§ 2. 利用等压图确定目前含油边缘的位置	107
§ 3. 含油边缘移动的电模拟研究	112
第七章 综合利用有关油水接触面位置的资料测算油水接 触面及含油边缘的移动	116
§ 1. 反映油水接触面移动特点的图表材料的应用	116
§ 2. 油水接触面、油层开采厚度和含残余油厚度图的使用	128
§ 3. 在油田开发过程中水推油时油水接触面的形状	139
結束語	147
参考文献	149

第一章 油水接触面和含油边缘

§ 1. 油水接触面的概念

許多专门研究油水接触面的性质的著作〔51, 54, 57, 63, 104, 109〕认为, 把油水接触面看作一个石油与水之间的分界面只是一种假设。在有底部水的油藏里, 在各种因素(毛细管力, 石油和水的比重等等)的作用下有一个由石油到水逐渐过渡的区域(称之为“过渡带”), 过渡带的厚度与儲集层的性质有关, 可以由几厘米变到几米。

在过渡带里, 特别是在油水分布面积宽广的地台型油田的过渡带里, 聚集着大量的石油。所以, 为了正确地計算石油儲量、設計油田开发方案和开发油田, 必須对过渡带的性质有明确的概念。

由油到水的过渡带, 可以是在油藏形成的过程中形成, 也可以在它的开采过程中, 当水排挤油时形成。

在油藏形成阶段, 岩石的不潤湿性、矿物成分和岩性特征不同的条件下, 由于重力場中毛细管力的作用, 在油与水接触的区域形成了过渡带。許多实验研究和理論計算表明, 生产层剖面上, 儲集层油水饱和比例不同。油层上部含有很少量的处于束縛状态的地层水, 这种水在通常的压差下是不会流动的, 它处于薄膜状态, 薄膜厚度为百分之几和千分之几微米〔51〕。1928年H.T. 林德脫罗勃和B.M. 尼科拉耶夫第一次在油层中发现了这种束縛水(有时称为封存水, 残余水或共生水)〔55〕。根据C.И. 查克斯的資料及矿場地球物理測井的資料, 束縛水的含量占孔隙体积的百分之几到70%, 大多数儲集层的束縛水体积为孔隙体积的20~30%。国外大量研究工作确定, 岩石渗透性愈差, 束縛水就愈

多。含水饱和度沿地层向下不断增高，而且自由水的含量也加大了。地层油水饱和度分布的一般特征示于图 1。

根据 H. H. 索赫兰諾夫的資料[78]，含油饱和度是按下列公式变化的：

$$k_n = 1 - AZ^{-\frac{1}{m}} \quad (1)$$

式中 A ——常数；

m ——取决于空隙空间结构的系数，其数值变化范围为 1.5 到 2.25；

Z ——离下部百分之百含水带之距离。

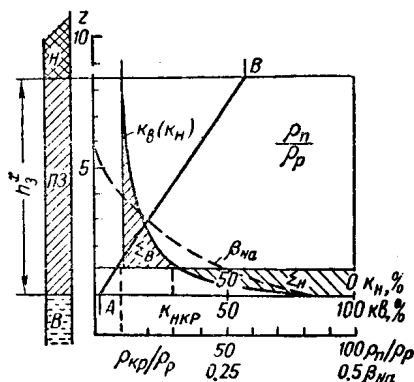


图 1 地层含水饱和度及比值 ρ_n/ρ_{su} 与离百分之百含水带之距离 Z 的近似关系曲线
 ρ_n —地层电阻率； ρ_{su} —百分之百含水时地层的电阻率； H —含油带； B —含水带； $H3$ —过渡带

对杜瑪茲和巴夫雷油田 $A=33$ ， $m=1.8$ [78]。

由图 1 及公式 (1) 可看出，从过渡带的底面向上，含油饱和度迅速增长，当 $Z=1$ 米时达 60~70%，然后就逐渐上升到 $1-k_{so}$ (k_{so} 为残余水或束缚水的含量)。

因为 k_{so} 是无量纲的值， Z 的量纲是长度， m 是变量，所以比较确切的是将 (1) 式写为

$$k_n = 1 - (aZ)^{-\frac{1}{m}}$$

式中 a 为常数，其量纲为 L^{-1} 。

图 2 是划分过渡带的实例。过渡带的存在，表现在由地层含

① 原文为“离油水接触面之距离 Z ”，这与文内对 Z 的说明不一致；同时，在下面的叙述中作者认为油水接触面位于过渡带中，而不与百分之百含水带的顶面相一致，这样，原文中的图的说明也是不确切的。——译者

水部分到含油部分，电阻率及氯和锰的次生活化法效应 β_{cl} 和 β_{Mn} 是逐渐变化的(见图2)。

試油时，具有过渡带特征的儲集层通常是油水同出的，在个别情况下曾从过渡带得到純原油。

在孔隙度高的均质儲集层中，油田开发的初期，通常沒有过渡带；此时油水接触面表现为电測井曲綫图上視电阻率曲綫明显和急剧的下降(如图8所示)。沒有过渡带时，在一些岩样上也能发现明显的油水分界面[58]。在不均质砂岩里，过渡带厚达5~6米以上[41, 63, 64]。

图3所示为过渡带厚度与儲集层渗透率之間的关系曲綫，渗透率增大时过渡带就縮小了。

由于在同一油藏中儲集层的孔隙度和渗透率是不均匀的，所以过渡带的束縛水和重力水(活动水)的含量变化很大，結果油藏不同地区的含油饱和度也就不一致了。

地层中存在过渡带时，划分油水接触面的位置是不同的。通常，把以視电阻率曲綫划分出来的过渡带的頂面假設为油水接触面。M.A. 日坦諾夫[41]在实际的計算中主張把油水接触面划在过渡带的中間。另外一些研究人員[101]以过渡带的底面作为油水接触面。最好还是根据过渡带內电阻率的大小确定油水接触面的位置，关于这个問題将在第二章的第2节予以敘述。

但是，在很多情况下(特别是在不均质儲集层中)实际上不可能确定过渡带的电阻率。根据H.H. 索赫兰諾夫的意見[78]，在这种情况下油水接触面的假定位置应当划在过渡带底面以上1~1.5米的地方。

油水接触面移动的地区內，油井的矿場-地球物理測井資料表明，在地层开采过程中，过渡带的厚度在增长。B.П. 奧諾普列恩科[63]在地层模型上所作的以水排油的实验也証实了上述現象。图4所示是用水排挤均质砂岩岩样中的石油时，岩样含水饱和度和典型的分布情况。

从图4可看出，含水饱和度沿驅油方向下降，其变化范围从

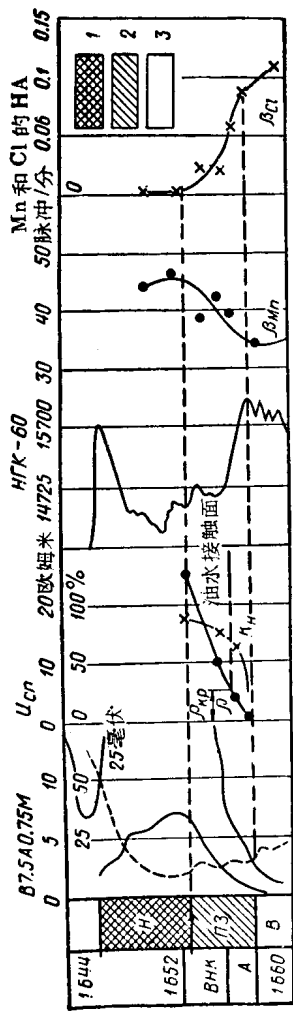


图 2 根据电测井及放射性测井资料划分过渡带和确定油水接触面
1—地层的含油部分; 2—过渡带; 3—地层的含水部分

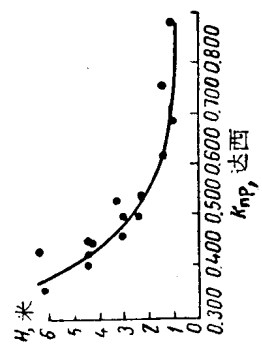


图 3 过渡带厚度与储集层渗透率之
关系曲线

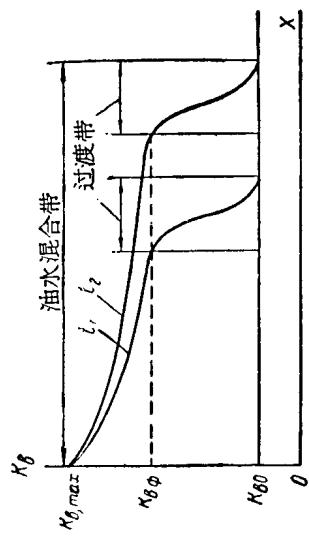


图 4 不同时刻 $t_2 > t_1$ 均质砂岩中以水排油时含水饱和度 k_e 的变化特点

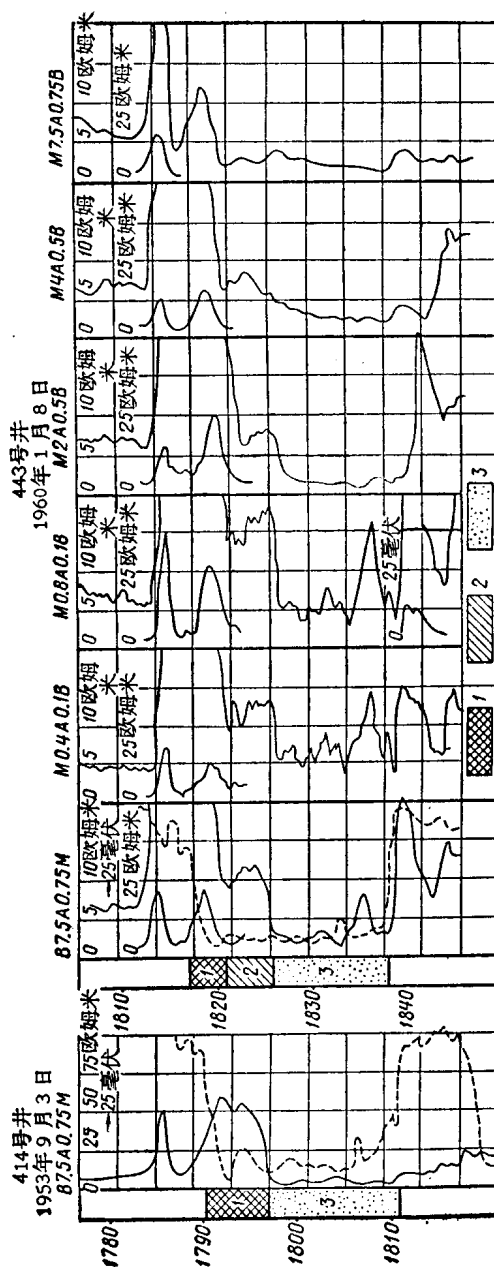


图 5 划分油水接触面移动过程中形成的油水接触过渡带的例子(巴夫雷油田443号井)
1—含油部分; 2—过波带的被冲洗部分(即开采过程中形成的过渡带——译者); 3—含水部分

极大值 $k_{o,max}$ (相当于岩样最大原油采收率的含水饱和度)到封存水的饱和度 k_{oo} (为了统一本书所采用的符号,前面已用 k_{oo} 表示封存水或束缚水,所以把这里原文的 k_{ou} 也改成 k_{oo} ——译者)。

由含水饱和度为 $k_{o,max}$ 的点到含水饱和度为 k_{oo} 的假设驱油前缘之间的曲线段陡度不大,它表明在这段油水混合带内油是逐渐被挤走的。含水饱和度由 k_{oo} 变到 k_{oo} 的 $k_o = f(x)$ 曲线段比前一段陡得多,它相当于过渡带。重力场中毛细管力作用的结果,在地层中保留了封存水,并形成了原始的过渡带。水动力压力场阻碍着油水之间产生一个明显的界限,所以,无论初期存在与不存在过渡带,在地层开采过程中,水动力场就导致过渡带的形成。图5是巴夫雷油田443号井过渡带厚度增大的实例。此井内开采过程中形成的过渡带在小极距梯度电极系曲线显示为锯齿状的 ρ_k 曲线,同时视电阻率数值较低。

该部分油藏开发前所钻各井(如图5所示414号井)中,油水接触面的初始位置是很明显的,其绝对标高为-1486.4米。六年以后,油水接触面的位置提高到-1481.2米。根据横向测井资料,冲洗带

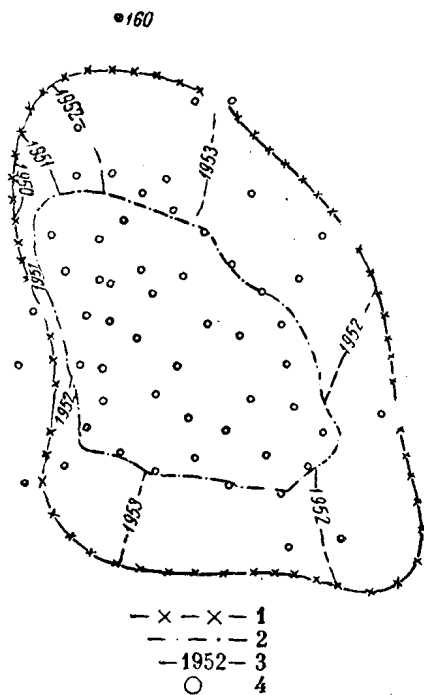


图6 索科洛娃山油田泥盆纪地层初始油水接触面图

1—含油外边缘; 2—含油内边缘; 3—油水接触面等高线; 4—井

內約含40%的原油。

同一油藏範圍內初始的油水接觸面并非在所有情況下都是水平的，接觸面的特性取決於供水區的大小及位置、地層滲透率分布情況和地層水的動態。

圖6是索科洛娃亞山油田泥盆紀地層初始油水接觸面圖。由圖6可知，接觸面是由構造較陡的西翼向平緩的東翼傾斜的，初始油水接觸面的絕對標高從1950米變到1953米，相差約3米。巴夫雷油田 A_1 層的油水接觸面初始標高相差5~6米（見圖78）。

在其他一些地台型油田里也能看到類似的現象。如在什卡波沃油田，在相距約20公里的地方，油水接觸面由於傾斜的緣故其絕對標高相差5米。卓里內·奧弗拉克油田 B_2 層初始油水接觸面也不是水平的，其標高由南翼的-1015米變到北翼的-1022米。

在杜瑪茲油田西北翼的初始油水接觸面的標高比東南翼高5~6米，或更多一些。

在羅馬什金諾油田，初始油水接觸面由北-北西向南-南東方向傾斜，其絕對標高相差5~6米。B.Π.薩夫欽科認為，油水接觸面傾斜是因為在地層水流動的影響下油藏發生了位移[71]。他指出，當地層的壓力差等於0.1大氣壓時，油藏沿地層水流方向的位移超過2米。

B.Π.薩夫欽科建議使用以下公式計算油藏底面位移的大小：

$$h_u = \frac{10(p_1 - p_2)}{\gamma_o - \gamma_u} \quad (2)$$

式中 h_u ——油藏底面的位移； $p_1 - p_2$ ——壓力降； γ_o 和 γ_u ——地層條件下水和石油的比重。

知道每公里距離上的壓力降及 γ_o 和 γ_u ，可以計算出油藏的位移 h_u 大小。

對較粗一些油田進行計算的結果表明，計算所得的油藏位移 h_u 與根據油礦地質及地球物理資料確定的實際位移大小是接近的。

除了油水接触面总的倾斜以外，也观察到接触面局部上升和下降的现象。许多研究工作者确定了，由于毛细管力的作用，地层的渗透率愈小，初始的油水接触面就愈高。

Ю. И. 加登贝尔盖尔[20]在分析什卡波沃油田油水接触面位置的基础上确定：平均起来看，当渗透率改变10毫达西时，油水接触面就至少提高0.1米。

§ 2. 含油边缘的概念

含油边缘有外边缘与内边缘之分，它们在平面图和剖面图上的位置示于图7。含油外边缘是油水接触面与生产层顶面的交线，在平面图上为 ada 线，在剖面图上 a' 和 d' 相当于接触线与生产层顶面之交点；同样，内边缘是油水接触面与生产层底面的交线，在平面图上为 $bc b$ 线，在剖面图上 b' 和 c' 相当于接触线与生产层底面之交点。因此，含油内边缘及外边缘是受实际上不渗透地层（一般为泥岩层）的顶面和底面所控制的。含油内边缘圈定的范围内，地层是完全含油的。在含油外边缘与内边缘之间是油水同存带（有些人不正确地把它叫做“水浮”油区）。油水同存带的大小取决于油藏的规模及生产层的倾角。许多地台型油田，其地质构造的倾角很小，所以油水同存带的面积很大，有时还超过油藏纯含油带的面积。

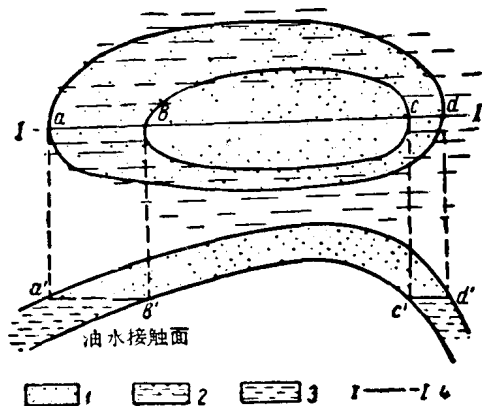


图7 含油外边缘与内边缘位置示意图

1—储集层的含油部分；2—油水同存部分；3—含水部分；4—剖面线

罗玛什金诺油田，泥盆纪油藏的三分之一左右的面积有底部

水，巴夫雷油田 A_1 层初始含油面积中62%以上有底部水。如果油藏中到处有底部水，如古比雪夫州穆汉諾沃油田 IV-6 层的油藏和巴夫雷油田 A_2 层的油藏，那么在平面图上只能构划出含油外边緣。

油田开发过程中既应检查和控制含油外边緣，也应检查和控制內边緣。对圓形油藏开发的理想情况是均衡地将含油边緣收縮到油藏中心，对带状油藏則要均衡地縮成一根綫。例如带状油藏上钻了五排生产井，那末中央的一排井就是收縮井排。

应当指出，在含油带和含水带之間也沒有絕对的界限，在假設的理想的含油外边緣以外在儲集层頂部經常还有数量达 30~40%，有时甚至更多的非工业性原油。

第二章 利用电法测井确定油水接触面位置

研究井的地质剖面的电法测井（视电阻率 ρ_k 法和自然电位 U_{cn} 法），自它們誕生以后，就不仅用来划分和对比井剖面，而且还用来划分电阻率差别很大的含油和含水地层。

测量技术和解释方法改进后，利用电法测井不但能确定油水接触面的位置，而且能定量地估計儲集层的油水饱和度、孔隙率、渗透率和泥质含量等等。在电法测井发展的初期，它們只作为勘探有用矿产的一种方法，而現在已广泛地用来监察油田的开发过程。这样就提高了井的利用效率，并保証了对油水接触面和含油边缘移动进行监察的合理开发油田方法的实现。

§ 1. 电法测井的物理基础

利用电测井資料划分含油和含水地层的基础是，这些地层具有不同的电阻率。

石油和岩石骨架（只有很少例外，如在骨架成份中含有如硫化物、某些氧化物和石墨等导电矿物时）具有很高的电阻率。但实际上含油岩石的电阻率相对地說并不大。这是因为在含油儲集层中有束縛水（共生水）或自由水（重力水）存在，并且由于矿化度相当高，水的电阻率低。束縛水受分子吸引力的作用，以薄膜形式束縛在顆粒表面上，束縛水的含量取决于固体顆粒的比面 S_0 。大家都知道，比面的大小随岩石分散度增大而增大。因此細粒砂岩的束縛水含量比粗粒砂岩大。这样，含油儲集层的含水饱和度和电阻率取决于它的分散度。含油岩石电阻率的变化范围在几欧姆米到1000欧姆米以上。

在表 1 中列举出伏尔加-烏拉尔含油区中研究得最詳細的几

个油田的一些油层的电阻率 ρ_{nn} 。电阻率 ρ_{nn} 值是在含油内边缘范围内的一些井中利用横向测井资料求出来的。

含水储集层的电阻率与孔隙空间中所含地层水的数量和矿化度成正比。岩石中所含水量的数量，取决于孔隙空间的体积（孔隙率），而地层水的矿化度取决于地层水中溶解的盐的数量。

某些油层的电阻率

表 1

油 田	层	ρ_{nn} 变化范围(欧姆米)		最常遇到的 ρ_{nn} 值 (欧姆米)	
		自	到	自	到
巴 夫 雷	A_1	8	650	50	100
杜 瑞 茲	A_1	5	1000	20	60
	A_{II}	5	160	40	80
左里内-奥符拉克	B_2	16	4000	100	300
波克罗夫卡	B_2	23	1250	50	200

地层水中的盐分子通常是全部离解。地层水的正离子中 Na^+ 的含量最大，其次是 K^+ 、 Mg^{++} 、 Ca^{++} ；负离子中以 Cl^- 为主， SO_4^{--} 、 HCO_3^- 的含量较小。

在文献[27, 28, 47]中详细地研究了地层水的电阻率与它们的矿化度、化学成份和地层温度之间的关系。

地层水和钻井液中离子的迁移率彼此差别不大。所含水的化学成份对岩石电阻率的影响比较小[28]。此外，在油田和气田的地层水中，氯化钠占优势。在地层水中，氯化钠可占总含盐量的70%到95%[47]。因此，地层水的电阻率主要决定于溶解在地层水中的氯化钠含量。

伏尔加-乌拉尔含油区中油田的泥盆纪和石炭纪储集层的地层水具有高的矿化度，并属于氯化钙型。

乌拉尔-伏尔加含油区某些油田地层水的典型特征列于表2中。

地层水的矿化度、

油 田	沉 积	地 层	水的比重 d_{20}^{20}	毫克当量		
				Cl'	HCO ₃ '	SO ₄ '
杜 瑪 茲	泥盆紀	A_1, A_{II}	1.189	411.81	0.028	0.037
什卡波沃	泥盆紀	A_1	1.181	385.70	0.030	0.086
什卡波沃	泥盆紀	A_{II}	1.177	372.80	0.028	0.127
罗瑪什金諾	泥盆紀	A_1, A_{II}	1.188	407.33	0.050	0.050
巴 夫 雷	泥盆紀	A_1	1.193	409.74	0.100	0.010
卓里內-奧符拉克	石炭紀	B_2	1.163	370.90	0.460	0.050
波克罗夫卡	石炭紀	A_4	1.105	238.43	0.680	3.000
波克罗夫卡	石炭紀	B_2	1.148	324.14	0.260	1.830

从表2中可見，在地层水中阴离子Cl'占优势，它的含量从每100厘米³中324.14毫克当量（波克罗夫卡油田 B_2 地层）变到411.8毫克当量（杜瑪茲油田泥盆紀陆源儲集层的地层水）。阳离子中以Na⁺+K⁺含量最多，从100厘米³的201.23毫克当量（什卡波沃油田 A_{II} 地层水）变到314.90毫克当量（卓里內-奧符拉克油田 B_2 层地层水）。

由于地层水的矿化度高（214.2~285.7克/升），因此这些油田地层水的电阻率是低的，从0.045到0.05欧姆米（温度为18°C时）。在古比雪夫州波克罗夫卡油田， A_4 和 B_2 层的地层水电阻率略有上升（0.06~0.075^①欧姆米）。

在同一油田范围内（除了少数例外），地层水的化学成份和它們的温度变化是不大的。因此在同一油藏上地层水的电阻率是一个常数，并且对大多数油田來說，其值为百分之几欧姆米。烏拉尔-伏尔加油区含泥盆紀和石炭紀陆源沉积生产层位中的含水层电阻率的变化范围从在十分之几到几个欧姆米。电阻率的变化主要是由于岩石孔隙空間体积不同时，岩石含水量发生变化的緣故。

文献〔28〕中研究了不同类型岩石含水层的电阻率与岩石孔隙率之間的关系。为了消除地层水矿化度的影响，通常不用电阻率

① 原文誤为0.75欧姆米。——譯者