

油气層水文勘探

苏联 В.П.雅可甫列夫著

石油工業出版社

內 容 提 要

本書詳細介紹作者研究彈性半波(壓力波)在孔隙岩層中傳佈的基本規律的結果。

書內闡述了以壓力波的物理學定律為基礎的水文勘探法的實質，引証了水文勘探實際應用的結果，並探討了水文勘探的進一步發展和應用的可能性。

本書可供油礦地質師、工程師以及高等石油學校的師生閱讀。

В. Я. ЯКОВЛЕВ

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ

И ГАЗОВЫХ ГОРИЗОНТОВ

根據蘇聯國立石油燃料技術書籍出版社(ОСТОПТЕХИЗДАТ)

1953年列寧格勒版翻譯

統一書號：15037·259

油氣層水文勘探

王 徽譯

*

石油工業出版社出版(地址：北京六鋪炕石油工部局十號樓)

北京市書刊出版業營業許可證出字第083號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 印張7 $\frac{1}{4}$ * 162千字 * 印1—1,600冊

1957年7月北京第1版第1次印刷

定價(11)1.60元

原出版者的話

B. П. 雅可甫列夫提出的油气層水文勘探法，早已在油矿工作人員中獲得普遍的傳佈。

這本書內所闡述的該方法的理論基礎和应用效果，都曾經廣泛地討論過，參加的有個別專家，也有油矿工程師和科學研究機構的全体工作人員（阿塞拜疆、格羅茲內、黑海油田的全蘇工程技術科學協會石油工作者集體，全蘇地質勘探科學技術研究所水文組全体人員以及其他）。在許多次會議上，大家一致認為 B. П. 雅可甫列夫所提出的研究油气層的方法，對於擬訂油田勘探和開采計劃，特別是在应用二次采油法時，有極大的幫助。

但是還應當指出，在 B. П. 雅可甫列夫所寫的這本書內，闡述水文勘探理論基礎和应用效果的理論部份，還保留許多值得討論的地方，有待於今後進一步的檢查和確定。

由於本書所涉及的一些問題，對實際工作來說都具有極大的重要性，雖然在內容方面還存在一些值得商討的地方，但本社仍決定將此書出版，目的是使石油工作者能了解本書所闡述的事實和見解，並加以批判研討，以保證這種勘探方法更趨於完善。

目 录

原出版者的話

第一章 水文勘探的实質、初步效果及其繼續

發展的可能性	1
水文勘探的实質	1
已經得到的效果	3
§ 1. 有关采油的一些基本問題，以及这些 問題在边緣运动学上的解答	11
§ 2. 边緣运动学要点	16
压力場的干扰規律及液流的組合	18
齐动水淹边緣	24
自然边緣和以井組对均質油層排油之不完全性	25
合理冲洗均質水淹地層的残余石油	27
不渗透边界对于冲洗石油方法的影响	30
§ 3. 边緣运动学結論的实驗檢証	31
用甘油試驗	32
用石油試驗	33
油舌	35
錐进的基本規律	37
§ 4. 边緣运动学的实际效果	41
根据波前綫到达的时间 t 所解决的問題	41
根据井內压力增量 S 对時間 t 的关系曲綫 $S = f(t)$ 的縱座标数值所解决的問題	43
根据 $S = f(t)$ 曲綫与“标准”型曲綫的偏差 所解决的問題	51

第二章 压力波的物理学要点	55
压力波.....	55
液面随时间变化的标准曲线 $S=f(t)$ 及其获得的方法.....	57
弹性重量的相似原理.....	59
主要术语.....	61
关于不稳定过程的实验研究方法.....	63
§ 5. 实验、理论和 1940 年矿场工作的 简短科学总结	64
关于函数 $S=f(t)$ 的形状.....	65
压力波的干扰.....	66
压力波的反射, 吸蚀和屈折.....	68
确定到反射面之距离及其在平面上之方位.....	72
近处边界的勘探.....	74
压力波的扩散.....	75
水力体系的特征曲线.....	76
1940 年工作的其他结果.....	78
从 1940 年工作中所得的结论.....	79
弹性重量类似法的理论检查.....	81
§ 6. 单向流动	82
等量汲出时第三时期的等时线之形状 (在弹性驱动时).....	82
关于推测等时线形状正确性的第一准则(条件).....	87
自由自喷第三期的正弦线.....	89
自由自喷第一期等时线的形状及运动.....	92
关于推测等时线形状正确性的第二准则(条件) (对惯性的校正).....	96
“产量对时间”[$Q=f(t)$]及“总产量对时间”	

[$V=f(t)$]]的曲線	99
确定慣性校正值及波前綫运动的瞬息速度	102
第一期等量汲出等时綫的运动和等时綫的形狀	114
自噴很久的井停止后等时綫的形狀	123
用自由自噴和等量汲出时产量和体积的比較	
来檢查波前綫运动速度	125
压力波的反射和吸蝕現象之理論証实	127
自由自噴單向流动时标准曲綫 $S=f(t)$ 的形狀	130
等量汲出、單向流动时标准曲綫 $S=f(t)$ 的形狀	133
§ 7. 徑向流动	135
等量汲出第三期的等时綫	135
等量汲出第一期的等时綫	138
第一期等时綫的运动	143
等量汲出情况下的等时綫	144
徑向自噴停止后的等时綫	144
等量汲出时的曲綫 $S=f(t)$	145
§ 8. 各种水文勘探工作公式的推論	149
時間 t 对于冲击 ΔQ 大小的关系	149
時間 t 对于地層滲透率 D 的关系	149
時間 t 对于粘度 μ 的关系	150
時間 t 对于壓縮系数 c 的关系	150
時間 t 对于孔隙度 p 的关系	150
綜合公式 $R=f(t)$	151
波前綫到达時間 t 对冲击的性質無關	152
$R=f(t)$ 关系的矿場檢驗	157
ΔS 数值对不同因素的关系	158
ΔS 值对产量 Q 值改变的关系	159
ΔS 值对油層孔隙空間的厚度 m 的关系	160

ΔS 值对激动井与感受井間距离 R_0 的关系	160
ΔS 值对压缩系数的关系	160
ΔS 值对渗透率的关系	161
水文勘探基本公式的要素彙列	162
§ 9. 依地表面載荷, 按照油層压力的漲落, 来測定水和油的視压缩系数	164
第三章 水文勘探仪器及矿場工作方法	167
§ 10. 雅可甫列夫仪器	168
关于浮标的結構	172
用浸沉浮标的操作	173
靜液面落后于油層压力的改变	174
对大气压力的校正	175
長期观测的仪器裝置	176
§ 11. 水銀压力仪	176
§ 12. 科尔尼留卡-雅可甫列夫的压力仪	177
仪器的操作	179
正确量計绝对压力的裝置	181
第四章 近距水文勘探	182
按方法及目的划分水文勘探工作	182
詳細勘探老油田的准备工作	185
确定小油瀋的孔隙空間容量及其生产系数的例子	188
水力体系構造的特点	192
“可融殘油”和渗透性小的夾層对于水淹油井的 供油作用	192
某些油矿的不渗透边界的性質	196
关于石油游移及泥火山的水动力学	198
关于屏障及屏障油藏	201
新开发油田的近距水文勘探方案概要及措施	202

第五章 远距水文勘探	205
§ 13. 远距(区域性的)水文勘探的实例	206
油層体系的水文勘探	206
油層Ⅱ的体系	212
油層Ⅱ的生产系数和原始(最大)靜液面	212
油層Ⅲ及Ⅴ的体系	214
油層Ⅲ反射波法的区域勘探	216
德克薩斯东部华特本油層边水視压缩系数的測定	224
§ 14. 关于应用水文勘探探查構造軸傾沒 部份和翼部的懸掛油藏	235
§ 15. 关于气田, 凝析气田和帶有气帽 的油田的水文勘探	239
§ 16. 自流水層和新含油省的水文勘探	240
参考文献	242

第一章 水文勘探的實質、初步效果 及其繼續發展的可能性

水文勘探的實質

由于我們党和政府对于發展科学研究，一向予以深切的关怀和極大的注意，致使苏維埃的工業、技术以及科学有着急剧的高漲。旧的科学課目不断地在革新和改进，新的科学部門，为国外所还未予注意的、或者差不多不知道的科学部門，正在不断地創立。在科学-技术这一条前綫上，已产生了越来越多的部門和日益扩大的領域，使我們苏維埃的科学家一直居于首要的地位。

在这些实用学术方面，有一門就是在苏联所研究出的、勘探油層和自流水層的一种新的地球物理勘探方法，叫做“水文勘探法”[16, 17, 18]。

这一种新的勘探方法，是以“压力波物理学”作为理論基础的；而“压力波物理学”也是一門新的科学。一直到目前为止，在所有地球物理方法中，能够在較远的距离上把具有孔隙的岩層追跡探索出来，水文勘探算是唯一的一种方法了。如果电測井能給出有关整个井身所穿透的岩層剖面的概念，但不出井所通过的狹窄地帶，那么，水文勘探就能提供出，不論是在井与井之間还是远在已鑽井的地区以外，地層的厚度和走向是否存在有連續性这一个概念。

水文勘探主要是对于停产井进行靜液面或靜压力的变化

作观察，这种变化是由于从相鄰各井中采取同一地層的液体时所發生的。当井停产时，在井周圍的地層压力就要开始上升，这是大家所知道的。这种过程，就是以所謂“压力波”的形式向各方面傳播的过程。压力波一經傳播到停产各井，就把在这些井內的靜压力提升起来。上述压力的上升，可借助于精密的仪器，按压力波到达的时间，波的大小和所具的特征，能用以判定地層的許多性質——傳导压力波的导体的性質。

水文勘探油層的方法，在1934年已經提出[16, 17]。

但这种方法在1938年發現了一些油層水淹規律并开始有了“边緣运动学”以后显得特別重要[19, 20, 21]。

边緣运动学，使我們覺察到，一直到現在还存在着的一种非常不合理的措施，就是把相当均質的油層，用有規則的几何形棋盤格子和正方格子的井位網佈滿起来的油田开采方案；根据边緣运动学还解决了許多这样重大的問題，像在最近一个时期采油工程方面縮減采油井数的效用問題，以所謂“假想廊道”来代替这些井位網問題等等。到現在，这些結論已經成为一般所公認[3]。

为了要把这些边緣运动的理論推广到实际工作中去，就只有建立起这样信念，就是我們必須要从地質圖以及其他地質文件中找出控制液体流向油井途中所有的不渗透边界，并把这些为数不多的边界在我們計算边緣运动时都考虑进去。可是，最初进行的一些水文勘探工作(1934—1938)都已經証明：在油層中，实际情况远不像一般地質圖所繪的或地質資料所述的那样簡單。在1939年已經显然看出，这些革新的边緣运动結論，只能用于具有某些已知边界的油層，如果我們不能确切知道每一个开采油層的运动边界，来証实这些結

論，那么，这些革新的結論，仍旧是一种僵死的科学方案。因此，就感觉有迫切需要找出一种能探明并确定这些边界的方法。我們所用的这种方法，就是水文勘探法。在我們的不少著作中 [16, 17, 18]，曾把水文勘探法竭力地介紹給了石油工作者。可是这些建議由于某种原因，还没有能够引起广大石油工業界人員的重視，因而，在一段相当長的时间內，这种方法的研究，始終沒有超过小規模的个人单独研究这一个范围(一般都是以业余兴趣作为出發点的研究工作)，而只是从1947年起，水文勘探才开始在某一个勘探区域内有系統而規模相当大地来进行。

这一項事業的巨大成就，应当归功于总地質师 Ю.И. 柯尔涅留克，由于他本人大胆地倡导，坚决地采用水文勘探法，才把托拉斯的地質处动員起来。总地質师这样的坚决态度，使某些工作有完成的可能，其完成工作的一部分效果，將在下面述及。除此而外，在某些地区的有些油矿上也进行了一些規模不大的水文勘探工作。所以，在最近三年內，只有一个采油区曾比較認真地应用过水文勘探法。另有四个地区虽然也在进行，可是按工作量來說，是微不足道的。不管水文勘探法在实际使用上有这样的局限性，可是已經得到不少重大的实用效果，而且可能对于許多油田作出許多共同性質的結論。

已經得到的效果

水文勘探已經証明，某些油田的断層裂縫，不仅仅是它本身不能通过液流，不能作为油液縱向移流的途徑，并且也阻碍了液体在同一含油層內作橫穿断層裂面的流动。因此，

这些区域内一些不大的断層，不管它們的断距怎样小，不管岩層的各位移部份之間在断層面上有直接的接触，一般都成为不滲透的边界。这里的原因以后將詳細敘述。

水文勘探曾經証明，由於上述情况，以及由于岩層本身岩相上的变化往往未被覺察出来而沒有繪到地質圖上去，所以岩層的結構远不像地質圖上所描繪的那樣簡單。不滲透的边界，把含油岩層分割成为一些單独的、“运动学上”互不相通的油区和油瀝，这些不滲透边界的数目，比断距大的断層数目要超过許多；可是按原来的地質圖来看，只認為这些断距大的断層才是确实可靠的不滲透边界。

有些油田的油層地質構造圖，运用水文勘探資料修正以后，大大改变了某些部份的構造形狀和有关那些油層所具的旧概念。例如，有一油層，在旧的一些著述中，总認為是在这一个油田里面最能保持均質的油層，那里知道，就在这層油層的西部發現有最不能保持均質的油層，而且是由三个不同砂夾層中的許多連通性差的小鏡体和零散油場所組成。这些油層中，有一層在原来的地質圖上只分为三个油場，后来就不得不分成为七个油場，像这样的例子还很多。

水文勘探曾証实了一些根据电測井数据認為在某一油田內的厚層油層中有不滲透的薄粘土夾層的推測，但也曾否定了一些这样的推測。水文勘探認為这些夾層是把整个油層分为兩個完全独立的开采对象的。水文勘探并帮助把这些夾層在平面上分布的边界确定出来。

水文勘探也曾确証，当任何翼部上的一口井的周圍地区已被水淹而它的采油率还能提高，那是由于在構造上高于这口井的地方一般存在不滲透的屏障的緣故。

当边水外緣在采油时向構造軸部作总的推进，这种屏障就会滯留了一部份油液于比井高的地方；而当鄰近各井，甚至于在構造上部各井都已經全部水淹的时候，这一部份滯留的油液仍能繼續向这一口井流入。許多水文勘探实例，也証实了边緣运动学理論上的結論：关于当已有“承繼井”^①时，开采被水淹得很厉害的井是徒勞無益的；以及关于把这些水淹劇烈的井轉变为回采上部油層、或者轉变为注入井、或者簡直就作为观察井，还能有其效用。如果不把这些井轉变为回采上層，就不可能每年采得几百万吨的油，倒要抽出几千万吨的水，結果就会使油層靜压力和靜液面降低，因而在采取一吨油上就要消耗許多动力能量、供应物料、机器設備，以及人力劳动。

由水文勘探証实边緣运动所推得的結論，还有許多其他实例，像关于不能容許把所謂“本場的末后”井移轉到回采上層的理論，就是由水文勘探来証实的。如事先沒有应用水文勘探檢查这样的移轉回采是否正确，而就把井从原所采取的一層轉到上一層去采取，我們每年也会遭受好几百万吨無可挽回的油量損失。

在許多实例中，水文勘探并且还証实了边緣运动的兩個理論上的結論：

- (1) 关于“本場末后”井的强烈排出大有成效的結論；
- (2) 关于被水强烈淹浸而有“承繼井”存在的各井不适宜于强烈排出的結論。

从水文勘探工作和边緣运动学的結論来看，美国石油工

① 所謂“承繼井”应理解为能从中采得在鄰近已經廢棄的井中所采不到的油的井。

作者在企圖解決在各采油井之間必然有一個最適宜的井距這樣一個基本問題而整整爭論了十五年之久，原來純粹是一場誤會。水文勘探證明，統一的最適宜的井距，是決不可能選擇出來的；不只是對於整個聯邦來說，像一直到近几年為止在美國所做的，就是對於同一油田內一些個別的油層，也不能找到有這樣的統一井距。由邊緣運動一些著作[20, 21]，以及從“十月油田”和其他油田開采完成工作的實踐中，就能看出，在同一油層中，所謂最適宜有利的井距，就可以有從十几公尺到好几百公尺的變化。例如，在不久以前，我們不得不把兩口采油井配佈在彼此相距為 15 公尺的距離上。這兩口井被不滲透邊界所分隔，因此，不能容許再把这个井距增大，不然就會減低油層的儲量采收率。同時，在這一采油場內，第 58 號和第 59 號兩口采油井之間的距離，却為 345 公尺，與其說前面兩口井的距離是不夠，不如說後面兩口井的距離是嫌太大。

但是，不得不選取極近的井距來進行鑽鑿，不只是由於這些井被不滲透邊界所分隔的這一情況。通常，在同一均質油層的同一采油場內，也必須以顯然不同的各種井距來配佈油井。可以把同一油層所鑽的第 2 號井和第 3 號井來作為例子（如圖 22 所示）。這兩口井並沒有被不滲透邊界分隔開來。可是頭兩口井，2 號和 3 號之間的距離為 200 公尺，顯然很小，而 2 號井與 115 號井的井距，只有 45 公尺，但能適應油層的需要，因此，也可以認為不算太近。不管 2 號和 115 號井相距是如何接近，因為 2 號井反正是不可能把 115 號井範圍內的儲量採取出來，所以 115 號井還是絕對有其必要。另外的例子，還可舉出在同一采油場上的 50 號，59 號，60 號

这三口井(圖 18)。要把位于 59 号井北面, 并且按構造來說比 59 号井位置高的油層內的油儲采取出来, 60 号井和 59 号井之間距离为 120 公尺是完全不够的, 而 59 号井和 50 号井之間采用 40 公尺的井距, 証明是确有必要。像这样的例子, 还可举出很多。

所有这些事实都証明, 我們在 1938 年所建議的, 由于有極多的不滲透边界, 所以对于均質油層單純的按廊道体系来配佈井位, 在应用范围上受到很大的限制, 并且不經過水文勘探, 要应用廊道体系来配佈井位, 一般也是不可能的。

水文勘探曾指出, 油田开采工作在極大多数情况下, 是不应当像按照油層結構为均一的理論所想像的方案那样, 采用几何圖形的井位網或者廊道式的井位佈置来开采; 而是应当用一系列的廊道分段和个别井列适当地配佈于实际开采層上面。

水文勘探虽然一直到現在还没有能够研究出如何确切地判定一些極小油瀝的边界在平面圖上的分布, 但是已經可以把这些不大油瀝的“孔隙空間的容积”, 以及油瀝与油瀝之間的溝通程度, 便利而迅速地測定出来。这就有可能預先估計到在任何相互作用情况下, 这些油瀝內油層靜压力的將來变化。我們在 1941 年曾計劃并且以后也实现了从 63 号井获得預計試驗性的人工噴油, 这就是对于这一点的明証。第 63 号井的靜液面, 在注水于鄰井的影响下, 經過 39 个小时以后, 恰如預計的那样上升 150 公尺到井口就开始溢流。因此, 在那个时候, 对于油層压力有控制的可能性, 算是一种原則性的新的証明。到現在大家知道, 接近注水井的各井, 在注水于油層內的影响下, 是会有油液溢流出来的, 而这样

的溢流，正如我們所習見的任何現象一樣，是早就可以預料而加以規劃的。

而且水文勘探还不只是可以在小油瀝內測定油層孔隙空間容積以及油層靜壓力將來的動態而已；它也能在構造內，划分出一些大的水力系統，並能把在這些系統內液體靜壓力將來的變動進程預報出來。對於這些預報，並不需要預先通曉采油層系的大小以及其他種種性質（由鑽井所得的資料）。相反地，所有這些性質能按油藏開采過程中油層壓力的動態來確定之。從水力系統所揭露出這些性質當中，以知道在平面圖上所分布的這些垂直的不滲透邊界為最關重要。

把探測到的這些邊界位置來和有關油層傾角和走向的概念（即使應用地震探測法測得的資料）進行比較，就能使勘探工作人員在勘探區域範圍內新的“懸掛”油藏、斷層下油藏和地層型油藏時，得到重大指示性的線索。

水文勘探證明，美國在油田勘探方面，不僅僅是他們所談的探求井最適當有利的井距問題毫無意義，就是和這些理論相類似的——[席爾雪斯，赫斯脫，麥斯凱特，以及其他等人]所謂“彈性”驅動的理論，也是不正確的。我們對於這些人的計算進行了檢查，結果證明為了說明美國德克薩斯州東部的華特本油層所發生的壓力降，沒有絲毫必要把充滿油層孔隙中水的壓縮系數，一定要增加到12倍，像美國石油工作者一向被迫着要這樣來做。他們為了要使自己計算出的結果，和實際情形不管怎樣地聯繫起來，就假定水的“視壓縮系數”的這樣增大，可能是由於在油層內存在着無數的“氣窩”而造成的。他們計算要得到這樣的壓縮系數，氣窩的總容積應當一共只佔有“華特本”油層容積的4.9%。在“華特

本”油層的巨大容积和極大压力(到 150 个大气压)的情况下,这个 4.9% 的容积,就有 12.15 千兆立方公尺充滿气体的空間,而沒有溶解于水中的气体就約有 1820 千兆立方公尺。假定气体比重为 1 时,这个容积的气体重量約为 2.3 千兆吨。这就是說,这里存在世界上最大的气田。“华特本”油層的可采油儲量为 4.5 亿吨,它的气儲量大概要比油儲量多到五倍。如果能發現这样大的气藏,在油、气工業史上可以算是極其重大的事件了。可是这样巨大的气藏一直沒有發現过,就是在將來也不会發現。根本就不存在这样大儲量的气藏。

另外有一些著者,以充滿矿化水的孔隙岩層具有極大彈性的說法,来解釋美国石油工作者所得的結果[12]。按照我們的計算,对美国石油工作者所得結果的这两种解釋,都是不正确的。这里的问题,不是在于有沒有这样的气矿,也不在于油層是否有極大的彈性,而实际上增加“华特本”油層彈性的,是油層本身所含的水的彈性,这样的彈性,正如我們油層中所含的水的彈性一样,比真实水的壓縮系数(0.000047)只大到 1.8 倍,並沒有大到 12 倍。这里的问题只是在于所有这些“古典学派的理論”,都是以数学上繁雜的計算作为基础,而存在不少缺陷的,因此,很难适用于实际工作。下面第二章和第五章內,將对这一种肯定的說法再加以証明。

在油田構造的翼部,有不少帶狀型和地層型的油藏,偶然在鑽井地帶範圍內碰到,因而把这些油藏發現出来;所以,沿着構造翼部向下更深傾沒处,以及在鑽井地帶範圍以外的地区,一定还可以發現帶狀型和構造型的油藏,这是毫無疑義的。应用反射波和直达波的方法,就能把促成这些油藏形成的屏障探測出来;在老的、含油丰富的、可是已經开