

油气田开发系列丛书③

水驱采出程度的综合矿场地质监测

(数学地质方法在油田开发中的应用)

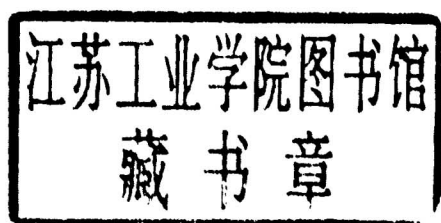
〔苏〕M. A. Токарев著 蔡尔范 罗昌燕等译

中国石油天然气总公司科技发展局

1993年11月

水驱采出程度的综合矿场地质监测
(数学地质方法在油田开发中的应用)

M. A. Ток а р о в 著 蔡尔范 罗昌燕 译



中国石油天然气总公司科技发展局

内容提要

在对原油储量采出过程管理方面,为采用经科学论证技术措施研究了各开发阶段对采出程度的综合监测系统;论述了地质和工艺因素对当前和最终采收率的影响程度;描述了考虑其对单井控制储量分布影响的方法;提出了对油藏不同井点处采收率进行监测的有效研究组合。本书第一部分(前言,1~5章)由蔡尔范译校;第二部分(6~8章,结论,附录)除第六章第一节为赵子亨翻译外,均为罗昌燕译,第二部分由金振武校对。

水驱采出程度的综合矿场地质监测
(数学地质方法在油田开发中的应用)

Токарев М.А.

Комплексный геолого-промысловый контроль за текущей нефтеотдачей при вытеснении нефти водой. М.: Недра, 1990.

中国石油天然气总公司科技发展局
江汉石油学院印刷中心印刷

787×1092毫米16开本 印张10.75 25.8千字 印0~1000

1993年10月第一版

1993年10月第一次印刷

目 录

前言

第一部分 对水驱油开发层系当前采收率的矿场地质监测

第一章	开发分析时与监测当前采收率时所用地质物理与工艺参数的特征.....	6
§ 1	表示所饱含流体物理化学非均质特征的基本参数.....	6
§ 2	开发层系的地质物理性质及其表示方法.....	7
§ 3	在系统结构分析基础上所得到的地质非均质性综合指标.....	10
§ 4	与油藏注水和布井系统有关的工艺参数.....	18
第二章	开发分析油田的地质特征.....	23
§ 1	统计模拟层系的选择论证.....	23
§ 2	油藏结构与产层岩石基本特征.....	26
§ 3	储集层及其所饱含流体的地质物理特征.....	27
第三章	在建立采油统计模型时开发层系分类和对油层地质物理参数信息性的评价....	33
§ 1	用主成分法对开发层系分类.....	33
§ 2	对油层地质物理参数信息性评价.....	43
§ 3	对地质物理参数与开发指标相互关系的分析.....	50
第四章	层系开发现状的油矿地质解释.....	54
§ 1	开发层系采收率评价.....	54
§ 2	层系的开发现状.....	59
§ 3	各井储量分布情况对(具有不同地质物理特征)油藏开采特征的影响.....	63
§ 4	开发层系识别时,地质非均质性定量值的应用.....	70
第五章	用地质统计关系对整个开发层系当前采收率的监测.....	76
§ 1	为获得地质统计关系对采油过程的模拟原理.....	76
§ 2	对现有采油统计模型的简要分析,以及对其新模型的研制.....	78
§ 3	对所划分层系组开采过程的地质统计模型.....	82
§ 4	监测当前采收率时地质统计模型的应用.....	94

第二部分 对水驱油地层各点处剩余油分布、当前含油饱和度、采收率的监测

第六章	利用测井方法监测检查井、评价井和生产井储量动用状况的矿场地质效果...	104
§ 1	检查井测试的矿场地质效果.....	104
§ 2	对当前采收率进行监测时利用评价井的矿场地质效果.....	114
§ 3	根据矿场地质测试资料对油层“工作”厚度和注水波及程度的评价.....	121

前 言

在油田开发有着显著技术经济效益的情况下, 为了保持全国高速采油, 提高油层当前与最终原油采收率是个有着重大国民经济重要性的任务。为了完成该项任务, 就需对油田开发作综合设计, 分析与监测。

本书论述了对综合矿场地质监测问题的研究成果, 并研究了对储量采出的两个基本监测问题。

第一个问题是用建立地质统计模型的办法对整个层系当前采收率进行油田开发监测的矿场地质方法。这种地质统计模型是在对大量碎屑岩油田矿场地质资料作归纳与分析的基础上建立的。

第二个问题是为监测层系各井点处的当前采收率, 矿场地质与地球物理的开发监测组合。为此, 曾对一系列油田(其检查井与评价井测试资料作过详细分析的)当前采收率的评价进行了研究。在所推荐的组合里, 包括对已下套管井的电测。本书作者曾领导并参与了其技术、工艺与测试方法的研制工作。

为了开发对整个层系当前采收率的监测方法, 曾进行了下列研究。研究了在对采收率监测、开发分析时所用的地质物理与工艺指标特征, 并表明了其地质物理指标对采收率的主要影响。研究了地质非均质性指标对当前采收率的影响程度, 所作的分析可以划分出属于五个特征组的26个重要地质物理指标, 以及6个工艺指标。它们可以更好地用来作油田开发分析, 以及对当时采收率的监测。根据本纲要曾经分析了114个属于碎屑岩的层系。用因子分析法曾对所划分出来的同一组层系进行了分类, 并评价了其最有信息性的参数。对层系分类, 以及地质物理与工艺指标关系, 与信息性的评价已实际应用于伏尔加—乌拉尔含油气区的所有碎屑岩油藏, 所研制的计算方法也可用于原苏联其它油区。

对用因子分析法所划分出来的层系组所进行的开发现状分析, 表明其所有生产指标的动态有着明显的差异, 这再次肯定了所作的层系分组客观性。

由对开发指标动态所作的分析, 可得出下列结论, 即它们与地质物理和工艺指标之间有很复杂的相互关系。当对开发指标(其中包括当前采收率)进行监测时, 为了搞清这些相互关系应当利用地质统计关系式。

统计模拟——这是反映像采油过程那样复杂过程的一种方法。在统计模拟方面进行了理论研究的有 А.Г. Аганбегян, М.Т. Аббасов, Дж. Девис, Л.Ф. Дементьев, Е.З. Демиденко, Н. Драйпер, Г. Смит, А.И. Холин 与 М.М. Элланский 等人。

在 И.И. Абызбаев, Т.Ю. Багаров, В.К. Гомзиков, М.М. Иванова, С.В. Кожакин, Ф.Ф. Крейг, А.П. Крылов, Л.Н. Гужновский, А.Х. Мирзаджанзаде, Ч.А. Султанов 等人著作中都有在预测最终采收率建立统计模型方面的研究成果。

对统计模拟的现有经验进行分析表明, 为预测最终采收率利用地质统计模型的有效性, 以及描述整个采油过程模型的缺乏。

对在因子分析基础上划分出来的同一层系组建立了能描述整个采油过程的地质统计模型。

对模型的每一个方案可得出对不同地质物理工艺指标的若干地质统计关系式。这样就能对不同地质物理条件预测其当前采收率，并选用具有最可靠地质物理参数的关系式。

根据地质统计关系的上述纲要所得到的，就可以用来评价各种地质物理与工艺参数对采收率的影响程度，并为了使最终采收率能达到最大对工艺参数进行了最优化选择。描述采油过程的地质统计模型可以用来评价层间与同一小层区块间的窜流方向和窜流量，开发层系储量偏高还是偏低，以及对油层作用的效果等。

除了对整个开发层系评价当前采收率以外，为采油过程的优化调整，以达到最高采收率，还必须了解油层各点处的当前采收率和剩余储量的分布情况。本书中所研究的第二个任务是该问题的求解。

在对杜玛兹油田 Д.У. 与 Д.Х., 谢拉菲莫夫油田 Д.У. 层所有检查井与评价井矿场地质资料与地球物理测试资料归纳的基础上，研究了矿场地质解释问题与这些研究的有效性。

对检查井矿场地质效果的上述分析表明，为生产井数1.5~2%的检查井数就可以表示整个油层内油水界面上升动态特征，但要详细地描述每一个具体区块中的分布特征，这些资料是不够的。

研究证明对评价井应用电测有着很好效果，并且这时的主要问题是对井不可能进行定期测量。

对罗马什金与萨莫特洛尔油田下套管井中进行电测的矿场试验表明，在下特殊套管的井中多次进行电测可以对当前含油饱和度与采收率动态进行监测。

曾研究并开发了对当前采收率的综合矿场地质监测方法，该方法可以对任何给定时间评价对整个油层的当前采收率，并评价其相应的地质物理和矿场地质开发条件，还可以评价油层个别点处的当前采收率与剩余油的分布情况。

作者感谢 М.М. Иванова, Л.Ф. Дементьев, В.Г. Каналин, В.Г. Тропин, И.П. Чоловский, В.М. Шаховкин, Е.Н. Шевкунов, М.М. Элланский，为他们在著作写作过程中所给予的珍贵指教。

对产层开采与水淹进行监测所进行的矿场试验是在作者的领导下，在鞅鞭石油设计所，巴什基尔石油设计所，下瓦尔托夫油气设计所同事的一起努力下进行的。为在下套管井中进行电测的矿场试验，作者感谢 Р.Х. Муслямов, И.А. Ткаченко, В.Г. Сафин。

第一部分

对水驱油开发层系当前采收率的矿场地质监测

第一章 开发分析时与监测当前采收率时 所用地质物理与工艺参数的特征

在矿场地质分析实践中要应用很多系数、参数与综合指标。仅仅是表示地质非均质性的专门指标就超过40个。可以应用完全不同的地质物理参数组,以及其它开发指标来建立与采油过程相适应的数学模型。这是由于在油藏很多地质物理参数之间有着明显的相关性,因此完全没有必要在模拟时力图研究其所有可能的参数与系数。

很多参数,实质上所表示的是同一天然因素的特征。实践表明,在建立统计模型时应当利用能反映下列因素的地质物理指标:原油的物理化学性质,油层的储集性与厚度特征,表示地质非均质性的专门指标,表示油藏结构特征的指标,能确定油水过渡带面积与原油储量的指标,以及能表示开发工艺特征的指标。

§ 1 表示所饱含流体物理化学非均质特征的基本参数

研究原油物理化学性质对采油过程与最终采收率的影响,就可以认为在很多情况下,这一影响是一定的。

随着地下原油粘度的增长,出现粘性不稳定的可能性就增加了。粘性不稳定性就会造成水淹的“舌状”推进,在其间将留下原油未开发区。正如А.Ф.Мирзаджанзаде等人所指出的那样,高粘度原油大都具有异常性质,在当前采收率较低的情况下,采出物的含水率却很高。作者所进行的高粘原油对当前与最终采收率,以及水油比的影响分析可作为其例证(表1)。分析是以泥盆系20个碎屑岩层系与石炭系18个碎屑岩层系的平均数据为例进行的。两个组所选择的层系在地质非均质性方面是很接近的,但在原油粘度方面则有明显差别。泥盆系油藏的平均粘度值为2.9mPa·s,而石炭系碎屑岩油藏为13.5mPa·s。

表1的数据表明,对下石炭纪碎屑岩层,在同一含水率情况下,其当前采收率要比泥盆系碎屑岩层系低,而水油比则明显地高。最终采收率的预测值表明,当含水率达98%时,高粘度原油油藏的平均采收率为50%。这时水油比的预测值要比泥盆系的开发层系的高4.5倍。考虑到要采出这么多液量,就要求有很长的开发阶段,并且大幅度地增加生产成本。很可能这样的最终采收率将是永远达不到的。下石炭系碎屑岩油藏的当前采收率,在采出相同体积液量的情况下,仅为泥盆系油藏到开发结束时采出油量的35%。

所分析层系组的当前采收率与水油比动态有着明显的差异。

对于泥盆系低粘度原油油藏,其地质储量的最大采出是在含水率小于10%的开发初期。

对于含有高粘度原油油藏,各含水阶段的采出较为均匀。如果对于泥盆系油藏,随着其

含水率的增长，可观察到采油速度的不断下降，则对于高粘度油藏，根据矿场统计方法预测资料，其采油速度一直保持较高。当采出液的含水率为着60到90%时，高粘度油藏的开采量将为泥盆系油藏的2~5倍，因为这时他们还留下大量未被注入剂作用波及到的原油储量（见表1）。

表1 不同含水率情况下的平均当前采收率（ η_T ）与水油比（ВНФ）

指标	含水率									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	98
ВНФ _{C/TC}	0,08	0,14	0,23	0,32	0,43	0,59	0,87	1,63	3,4	6,44
	5,5	8,7	13,6	17,5	19,5	25,3	29,4	35,3	49,2	52,9
	0,04	0,07	0,11	0,16	0,21	0,27	0,34	0,44	0,61	1,43
ВНФ _{D/TC}	26,6	32	36,7	40,2	42,6	43,3	44,8	46,6	49,3	55,1
	0,21	0,59	0,98	1,2	0,83	6,85	2,73	2,72	5,19	0,38
$\Delta\eta_{TC}/\eta_{TC}$	2	2	2,75	1,8	2,2	2,67	4	7,6	10,4	3,71
$\Delta\text{ВНФ}_C/\Delta\text{ВНФ}_D$	0,45	0,72	0,68	—	0,95	—	1,3	—	1,7	1,08

注：T—采液速度；C—下石炭系碎屑岩层系；D—泥盆系碎屑岩层系

在给定含水率情况下，整个开发期间水油比的增长速度，对高粘度层系要比泥盆系的高2~10倍。

原苏联很多油田原油具有非牛顿性质，对其曾进行大量实验研究，以研究各种因素对这些原油特性的影响。原油的非牛顿性质取决于其极限剪切应力 τ_0 ， τ_0 为原油粘度、原油的胶质沥青质含量和地层温度的函数。因为对于很多油藏，剪切应力目前还未能以足够精度加以确定，则在建立采油统计模型时分析了（取决于非牛顿性的）参数与采油指数的关系。在

领导下，一些学者对阿塞拜疆的58个基尔马金组（KC）已证实其原油具有非牛顿性质的油藏，以及28个认为其具有非牛顿性质特征的KC油藏，所确定的平均采收率进行了统计分析。其平均最终采收率实际上很接近，等于0.19。

其采收率较低的原因，可能不仅仅是液体非牛顿性质所造成的，而且其地质条件（油层含泥量与高残余水饱和度）所造成的。这表明原油非牛顿性影响决不能脱离油层地质性质来研究。И. Л. Мархасин的研究曾确定在原油—岩石接触处的边界小层对采收率有很大的影响。边界层的厚度为原油物理化学性质的函数，它是随着原油中沥青质含量的增长而增长。

在现有采油统计模型中，作为能表示原油物理化学性质特征的参数，通常为原油粘度 μ_n 或原油相对粘度 μ_0 。^[16]这些参数是对开发层系，开发层或开发面积取平均值的。由于原油物理化学性质一般在油藏面积与厚度内变化很大，因此在模拟时最好考虑的不仅仅是其平均值，还应考虑其非均质指标（方差D与变异系数W），即必须考虑其物理化学性质的非均质性。实际资料的不足往往使得只能限于利用其平均值。考虑到在（处于不同热力学条件下的）原油化学组分与粘度之间的相互复杂关系，为建立统计模型，最好能分析（对最终开发指标有影响的）不仅仅是粘度，而且还有沥青质（A）含量（%），胶质沥青质含量（

$A+C$), 原油密度 ρ_n , 温度 $T, ^\circ C$, 体积气油比 G 等。在利用分类统计方法时, 采用这一组能表示原油物理化学性质特征的参数, 就能在建立采油统计模型时避免对参数选择的主观性。

В. В. Девликамов, З. А. Фаббуллин, М. М. Кабиров 等人在原油组分对 (用极限动切应力表示的) 非牛顿性质和采收率影响的研究表明, 在这些特征与相对参数 A/C 之间有着紧密的关系, 这说明其间有着成因关系。

§ 2 开发层系的地质物理性质及其表示方法

油层储集性能及其统计特征

产层的重要特征 (孔隙度 m , 含油饱和度 k_n 与渗透率 k_{np}) 就决定了其容积与渗流性质。在不同的地质物理条件下, 这些参数之间的相关关系是有意义的, 并取决于油藏的形成条件。储集层的孔隙度、渗透率与其重要特征 (比面) 在成因上是紧密相关的。而比面又决定了开发时的驱油系数, 因而也决定了最终采收率。所有这三个参数实际上都取决于一个因素, 并在统计模型里可以只用其中的一个, 以避免其相互影响^[15]。虽然, 渗透率值在开发指标水动力学计算中是主要参数之一, 但其在油藏上测定的点很少。对渗透率的地球物理评价方法通常是不能与实验室测定和试井方法确定的值相比较。

对于有大量实验室测定或试井渗透率值的区块, 要找出渗透率分布规律及其统计特征是不难的, 但对于小区块, 由于测定量很少或完全没有, 这个问题就难以解决了。这样, 在作统计模型时最好是用孔隙度与含油饱和度两个参数中的一个。因为这些参数在计算储量时已考虑了, 它们通常是对每一个层交叉点加以确定的。在对属于同一构造单元与同一地层单元的开发层系作分析时, 储集性能的平均值 (特别是孔隙度, 含油饱和度) 在数值上可能很接近, 相差只有百分之几, 而其用标准偏差 σ_m , σ_{k_n} 与变异系数 W_m , W_{k_n} 所表示的统计特征可能相差百分之几十与几百。这反映了所研究层系内部非均质性特征。因此当评价储集层非均质性的容积特征时, 在很多情况下不是取参数绝对值, 而是取其统计特征。

油层的厚度特征

在对开发层系进行分类以及作统计模拟时, 小层厚度特征起着很重要的作用。其作用可以用小层厚度与储集性能的紧密关系来确定。在碎屑岩储集层中该关系表示为在沉积物中一定的韵律层的存在。决定油层容积与渗流特征的储集性能, 通常与小层厚度有直接关系。这是由于在较厚的层中, 储集层与非储集层间的过渡差异相对值比薄层中的要明显小得多。在薄层中整个层实际上可能由过渡差异所组成。在小层厚度与储集性能之间存在着紧密关系, 使得 В. Л. Комаров 建议利用这些关系来确定其储集性能。随着小层厚度的增加, 因而, 随着储集性能过渡差异相对值的减少, 小层的生产可能性将得到改善。小层厚度对最终生产结果的影响, 是以过程中关闭井为例进行研究的 (图1)。II, 小层的160口井在30年开发期间完全水淹, 并停产。

对这些井储量开采情况的分析表明, 在单一小层开采特征与分叉小层开采特征之间有着差异。图1 为每米厚度累积产油量 $Q_{н.к}$ 与 (在小层分叉情况下) 小层有效厚度关系曲线。

在小层有效厚度由2 到12米范围内，每米厚度的累积产油量，随着其分叉性的不同而有明显变化。这一点，不论是对纯油区的井，还是过渡带的井都能观察到。例如，当有效厚度为6 米时，每米厚度的平均产油量对单一小层为15kt，而当其分叉为二个小层时——5kt， 当其分叉为三个小层时——1kt。在小层有效厚度为12米的情况下，每米厚度的平均产油量，对于单一层为17kt，对于分叉为两个小层的为16kt，对于分叉为三个小层的为15kt。因此，当小层厚度增长，并小层分叉性减少时，当小层平均厚度超过5 米时，每米厚度的累积产油量增长，每米厚度累积产油量的差值是不大的，而属于单一层的有这样厚度的碎屑储集层具有很好的储集性能。

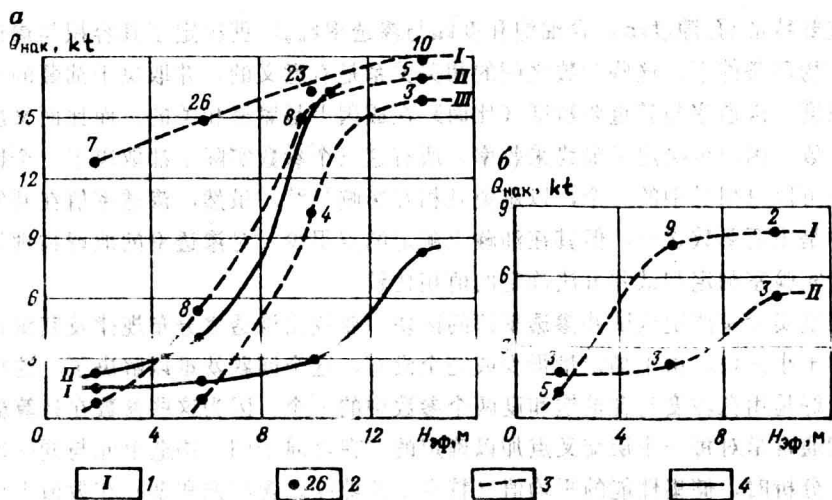


图1 在小层不同分叉情况下，对纯油区(a)与过渡带(σ)累积产油量与厚度关系曲线
1—小层分叉性(韵律数相对应于小层数)；2—对其计算平均值的井数；3—产油量；
4—产水量

所得出的结论被评价井中对被冲洗小层确定当前采收率的资料所肯定。上述分析表明，被冲洗层当前采收率的增长，在其厚度超过5 米时不明显。

因此，随着小层厚度达到一定值，小层的分叉性对采收率的影响就将较小。因此，在对采油过程作统计模拟时，在选择地质物理参数时，可用考虑小层平均有效厚度来取代其分叉性。这样处理的合理性需要在今后作统计校核。И. П. Чоловский 也曾评价地质非均质性与最终采收率时利用了小层厚度。

常常用小层厚度的标准差 σ 与变异系数 W 来评价地质非均质特征。在统计模型中，这些特征还未利用。因此，对其信息性应作补充研究，并研究其与当前和最终采收率的紧密关系。

地质非均质性的专门指标

开发层系地质结构的复杂性，以及用传统水动力学方法所确定的设计指标与实际值的偏

差,使得有必要在矿场地质实践中引入地质非均质性的专门指标。这样作的必然性在М. Н. Кочетов, В. К. Гомзиков等人的著作中有令人信服的论证。在大量矿场地质资料汇总的基础上,作者指出,在同一原油粘度与渗透率的情况下,最终采收率实质上取决于油层的非均质性。这意味着,在所有水动力学计算中作为基本参数的渗透率,不可能单值地表示油层的非均质性。Е. И. Семин所引入的地质非均质性专门指标(砂岩系数,分层系数,岩性联通系数),在很多著作中已论述了其确定方法与应用方法的发展,并已广泛地用于矿场实践。

在М. М. Иванова, Ю. П. Борисов, З. К. Рябинина, И. П. Чоловский, В. В. Воинов, В. А. Бадьянов, В. С. Ключарев, В. С. Мелик-Пашаев, Л. Х. Дементьев等人的大量著作中论述了(与地层断续性或宏观非均质性有关的)地质非均质性评价方法的发展情况。

目前广泛地利用着下列能对大多数油田实际加以确定的非均质性指标:砂岩系数 K_{Π} (它等于地层有效厚度与地层从顶到底岩石总厚度之比——译者注),联通系数 $K_{\text{св}}$ (它等于二个地层联通、汇合的面积与开采区总面积之比。它也可以根据剖面中砂岩联通井所占的比例来确定。这个系数是复杂层系的特性系数,因为在计算它时要考虑二个砂岩层的结构特点以及其间的非渗透层情况——译者注);分层系数 $K_{\text{л}}$ (它是每口井中小层数之和与总井数的比值。分层系数代表某一个开采区块范围内平均的小层数。在砂岩系数与分层系数之间有一个统计关系。随着分层系数的增加,地层的砂岩系数减少——译者注)岩性稳定系数 $K_{\text{л.н}}$ (或称为储集层分布系数。它代表该储层的发育面积与开采区块总面积之比——译者注)等。

在Л. Х. Дементьев, Ю. П. Борисов, В. В. Воинов, Е. И. Семин等人著作中论述了这些参数的确定方法。В. В. Воинов曾指出,至今还不能确定单一指标,或非均质指标组合,甚至不同研究者对系数的理解并不一致。这说明,提出这些地质非均质指标的作者们,特别是对新提出的,没有给以明确的介绍,对其在不同地质条件下的应用也没有给以相应的限制。为解决某些矿场地质问题应采用那个地质非均质指标的问题,实际上并未进行广泛研究。这些指标常被用来按其地质非均质性对开发层系进行排列,而且这种排列并不总是与按其采收率对开发层系的排列相符合。

在(最终采收率与油层地质物理特征关系曲线)^[16]数学模型中,实际上这方面利用的只是砂岩系数。但是,至今为止不同研究者对该指标采用不同的确定方法。为了能更正确地确定 K_{Π} 值,应当采用В. С. Мелик-Пашаев的方法,并与В. В. Воинов和Е. И. Семин所提出的方法作比较。

求 K_{Π} 方法的差异是与确定地层总厚度的方法有关。在В. С. Мелик-Пашаев的著作中,地层厚度是作为其顶部与底部之间的厚度确定的,而不管其边缘小层是怎样的岩性差别,而在В. В. Воинов著作中,该值是由最上部的顶到渗透层最下面来确定其厚度的。因此,按В. В. Воинов方法所确定的 K_{Π} ,与当前采收率之间有着反比关系^[17]。

当进行矿场地质研究时,在很多情况下可限于应用 $K_{\text{л}}$, K_{Π} 与 $K_{\text{л.н}}$ 。可根据其间的相互关系来限制表示油层断续性的指标数。

表示油水过渡带结构特征的参数

油水过渡带的大小与结构对当前与最终采收率，以及水油比有着实质性的影响。油水过渡带结构的多样性就有必要对其统一规格。这时应考虑过渡带和整个油藏的面积和储量关系，地层含油厚度和总厚度，以及其它类似参数之间的关系。当对开发层系组进行对比时，事实证明这样来处理是完全正确的。

每一个具体层系的过渡带结构，实际上要复杂的多，并要求进行详细的地质研究。通常，过渡带具有无接触区，即在原始油水边界高程处的地层为非渗流小层（图2）。无接触区，以及在油水边界以上有不渗透层分布区的存在，在合理布置生产井时，将有利于提高过渡带的开发效果。

对杜玛兹油田 II₁ 层过渡带结构分析（图2）表明，在油水边界以下没有不渗透小层的过渡带，其面积是不大的。

决不能同意那种认为过渡带最终采收率要比纯油层低1~2倍的观点。他们认为过渡带是按稀井网钻井的，所以其部分储量简直没有进入开发，这一点已为钻评价井的结果所证实。过渡带的部分原油将由（原先按比过渡带较密的井网钻井的）纯油区的井采出，这一点在对最终采收率作预测时应考虑到。最后，过渡带的地质非均质性通常都比其相邻油区的要严重。例如杜玛兹油田 II₁ 层过渡带的非均质系数 $K_{H.0. n}$ 为1.35，而纯油区的仅为0.51^[17]。

因此，具有过渡带开发层系的采收率取决于开发工艺，地质非均质性，过渡带的大小，及其结构特征。过渡带结构特征与大小，在很大程度上可用非均质综合指标来反映。

所以，在对当前与最终采收率过程模拟时，应当用其相对面积或相对储量值来表示过渡带的特征。选择这个或那个过渡带结构特征将取决于对层系的研究程度。

§3 在系统结构分析基础上所得到的地质非均质性综合指标

【系统结构分析是近十年来苏联在油矿地质方面一种常用的方法。因此译者在这里对系统结构分析作一简要介绍。】

【当系统结构分析时，油气藏被看作为是由很多元素与子系统组成的多层次复杂系统。

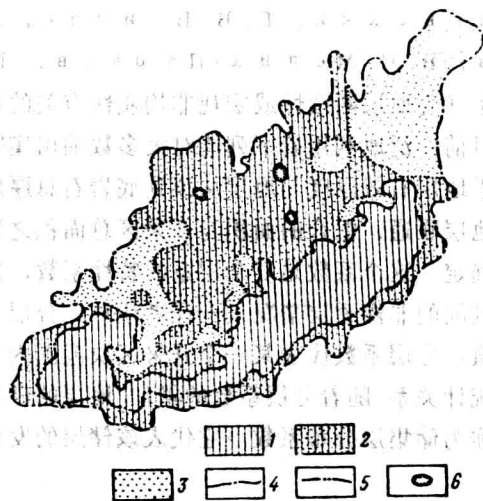


图2 杜玛兹油田 II₁ 层油水界面附近不渗透层分布图

1与2——分别为在油水界面处与高于油水界面处不渗透小层分布区；3——不渗透层缺失区；4——原始外含油边界；5——内含油边界；6——储集层缺失区。

对于这样的系统可以，而且需要从多方面进行研究。这时系统的所有方面是相互有联系，相互有作用的，并以很复杂的形式对其工作的最后结果有影响。】

【系统结构分析就是要加强对层系结构的研究，加强在对层系结构作分析与对其渗流规律性研究时可能划分出来的部分在开发过程中的相互作用研究。正是在这方面，实质性地克服了解析与整体结构分析方法的局限性。在作解析与整体结构分析时很多性质与现象，特别是那些由于其部分相互作用结果所产生的性质与现象，是无法解释清楚的。】

【在作开发设计与开发分析时系统结构分析起着特别重要的作用。因为这时对一定系统出现了建立和构成的必要性，并在开发过程中对较长时间阶段需在地质因素的基础上对油藏动态作出预测。系统结构分析可以综合考虑系统的地质、技术与经济特征，考虑并建立系统设计与工作时的各种定量准则。对于油气矿场地质层系，系统结构分析历来要求在所研究层系范围内自觉地、有目的地划分出元素与子系统来，明确地指出需要考虑与研究的标志，确定元素与子系统相互作用的方式与特征。当作系统结构分析时可以完全一定地指出，在那些方面所研究层系作为一个系统，对其结构的详细程度可提出明确要求，也就是能确定对系统结构需要考虑与研究的等级水平。】

获取能表示地质非均质特征新综合指标的必要性

上面所研究的，能表示地质非均质性特征的参数有着实质性的缺陷，即其与开发指标关系的相重性。

在按大小排列的采收率值与单个非均质性指标之间所观察到的关系往往很差。这说明，其他地质参数对其有着更重要的影响。这可以在小层分层性与累积产油量的关系曲线（见图1）上看到。为了能更单值地确定能表示地质非均质性特征的参数组，可采用等级处理法，或用在系统结构分析基础上的获得的综合参数来评价其值。【18】

非均质性综合指标应包括对于开发层系任何区块都较容易确定的地质参数，这些地质参数应与储集岩的活跃组分有关。对于伏尔加—乌拉尔含油气区泥盆系碎屑岩油藏与亚斯诺波良上亚油藏，岩石最活跃组分是泥质胶结物。

在对谢拉非莫夫与奥里叶巴什油田作地质物理研究时，在系统结构分析基础上曾获得了综合非均质指标，并对于伏尔加—乌拉尔含油气区大多数油田，该指标作了检验。

泥质混合物对容积与渗流特性的影响

在Т. Т. К л у б о в а 著作中所归纳的大量实际资料表明，伏尔加—乌拉尔含油气区碎屑储集层，一般含有多矿物泥质胶结物。亚斯诺波良上亚层储集岩含有下列泥质矿物：高岭石，水云母，蒙脱石，无序混合层状蒙脱石—水云母类组分。在图利层（除C_{II}层以外）的岩石中只是作为少量混合物存在。Т. Т. К л у б о в а 的研究表明，在泥盆系碎屑储集层中有类似矿物组成的泥质混合物存在。砂岩储集层与泥质复盖层的泥质胶结物组成，通常是相同的。

泥质矿物的存在对砂岩，粉砂岩孔隙结构的形成有很大的影响，因而对原油通过储集层的渗流有很大影响。当泥质胶结物均匀分布时，死孔隙的数量将增加，而其连通孔隙具有复杂的外形。泥质矿物的活跃性造成了吸收的高折算容量。它们是随着泥质矿物分散性的增加而增长的。吸收的折算容量是由高岭土向蒙脱石泥土方向增加。影响该值的有矿物的吸附能力与催化性质，这些性质最终将决定储集层的渗流可能性。

М. А. Цветкова, С. Жакен, Т. Т. Клубова 等人曾研究了泥质矿物与驱油剂性质对渗流的影响机理。

矿物的催化性质就决定了矿物表面活性区域有机离子的吸附。在吸附的有机离子与泥质矿物之间将产生键, 该键的牢固程度取决于有机离子的大小 (其变化的范围很大)。有机离子越大, 则泥质矿物表面的吸附越牢。因为这些离子, 除了静电引力之外, 还有范德瓦力, 后者将随着有机离子大小的增大而增加。

很多泥质矿物在储集层水淹时会改变自己的性质。С. Жакен 在具有不同含泥量的人造岩样上所作的大量实验表明, 当水的矿化度下降到一定极限值时, 其渗透率将发生不可逆的变化。淡水对含有蒙脱石储集层的水淹, 影响特别明显。如果大粒石英砂中只是添加 2% 的蒙脱石, 则其渗透率将下降 10 倍。这已为矿场试验所肯定。

如果储集层孔隙空间中有泥质矿物, 则应注意注入到这些储集层水的不利影响。这时泥质矿物导致结晶内膨胀 (蒙脱石, 不同退化程度的水云母)。在原油中高分子烃类含量越多, 则其对渗流可能性的影响越小。原油的这些高分子烃类坚固地处于可交换位置上, 它对泥质矿物形成了自己的保护层, 从而阻凝这些泥质矿物在注入水的作用下膨胀。

由于碎屑岩泥质矿物的高度活性, 对储集层的很多性质有根本性的影响。储集层的含泥量为模型的组分。这些模型可以用岩石物性 (例如导电性, 孔隙度, 渗透率, 含水饱和度等) 关系式, 也可以用地层开采特征 (例如绝对自由产量, 生产能力) 来评价。

评价地质非均质性的系统结构处理

在作系统结构分析时, 地质非均质性应在不同等级水平上进行研究。当对碎屑油层划分等级结构时, 我们将采用近似于 Л. Х. Деметьев 所提出的系统, 即由四级结构水平所组成 (图 3) :

I — 岩石单元体积级, 可评价骨架的矿物组成与胶结物含量;

II — 由一种岩性类型岩石所组成的地质体级, 对于给定情况为砂岩小层级;

III — 水动力学连通系统的地质体级

IV — 表示为水动力学不连通小层系统的地质体级, 其每一个小层在一般情况下为有水动力学连通小层系统。

对第一等级水平, 在实验室条件下确定储集层的储集性能, 矿物组成, 以及胶结物的泥质含量。

对第二等级水平, 根据地球物理测井资料确定储集层性质与含泥量。所有地球物理方法

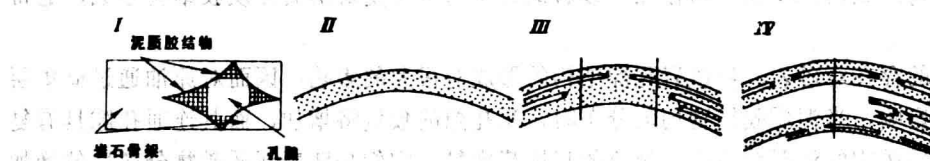


图3 地质非均质性结构水平的划分示意图

的实际解释是对一定的砂岩小层的,即在第二等级水平上。

对基础层系的研究——对谢拉菲莫夫油田 Π_1 层根据200口井的伽玛曲线求出含泥量,这时要利用由A. B. Золотов所求得相对 γ 活性 ΔI_{γ} 与含泥量 C_{rn} 关系曲线。曾确定,对西巴什基尔的泥盆系砂岩,以最好方式相对应于上述关系式,其含泥量可根据岩心的粒度分析求出,而其砂岩参数 ΔI_{γ} 可根据伽玛测井曲线加以确定。

对按油层体积含泥量分布的研究表明,该参数是无系统变化的。但是对谢拉菲莫夫油田 Π_1 层所绘制的含泥量图,按油层厚度所权衡的相对含泥量能很好地表示其非均质的特征程度(图4)。

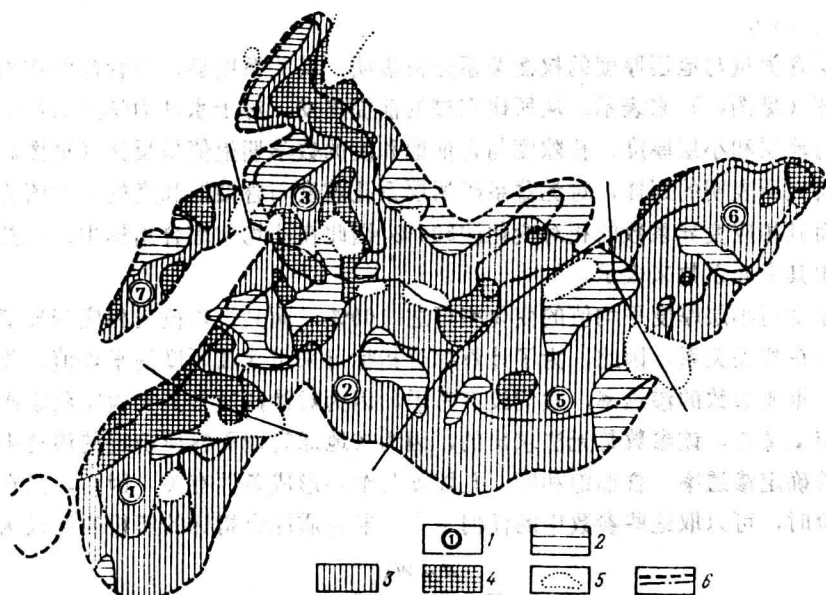


图4 谢拉菲莫夫油田 Π_1 层相对含泥量 C_{rn} 变化示意图

1——计算区编号; 2——非泥质区 $C_{rn} = 0-0.05$; 3——低泥质区 $C_{rn} = 0.05-0.15$; 4——泥质区 $C_{rn} = 0.15-0.5$; 5——储集层缺失区; 6——原始内、外含油边界。

为了研究渗透率和含油饱和度与含泥量的关系,最好是利用相对含泥量

$$C'_{rn} = \frac{C_{rn}(1-m)}{C_{rn}(1-m)+m}, \quad (1)$$

式中 C_{rn} ——含泥量, %; m ——砂岩孔隙度。

Π_1 层的储集性能、孔隙度, 含油饱和度与渗透率与含泥量有着紧密关系, 并可以可靠地用线性关系式来近似, 其相关系数显著, 并分别为 -0.7, -0.76, -0.72。砂岩小层厚度与相对含泥量的关系程度不太大。 C_{rn} 与地层有效厚度 H_{ϕ} 之间的相关系数为 0.55, 而其回归方程为

$$C_{rn} = 0.43 - 0.05 H_{\phi}. \quad (2)$$

因此，均质砂岩厚度约为8米，基本上是泥质含量低，具有很好的储集性能的层。

因此，在（第一级别水平上所确定的）储集层活跃组分（泥质胶结物）与（在第二等级水平上所确定的）油层储集性能之间有着紧密的关系。由于这些关系的存在，就可以根据含泥量 $C_{\text{泥}}$ 与相对含泥量 $C_{\text{泥}}^{\text{相}}$ 求出油层的孔隙度，含油饱和度与渗透率。因此，具体点上砂岩小层的地质非均质可以与其含泥量等量齐观。

第三等级水平——在很多情况下相对应于生产层系的水动力学连通层级。在该级所确定的地质非均质性参数的应用效果评价与开发指标关系很紧密。

水动力学连通地层是由厚度，以及在面积上相互合并、分层与尖灭的砂岩小层的复杂组合（见图3、5）。

对地层含泥量与地层厚度的权衡关系分析表明，其关系明显，而含泥量在面积上的分布最好是用图（见图4）来表示。从所研究过的前提出发，对于水动力学连通层级的非均质综合指标，与地层和小层厚度、孔隙度与含油饱和度的数学期望值呈反比（见图3）。

正如研究所表明的那样，对泥盆系碎屑层系孔隙度与含油饱和度的平均值变化很小，约为10%，而其相应变异系数的相对变化达300%。因此在非均质综合指标中，孔隙度与含油饱和度可以用其变异系数来表示。

含油厚度与小层厚度平均值的变化率可达100%，而其平均值与相应变异值的对比表明，其间并不存在相关关系。因此，为了计算综合指标可采用含油厚度的平均值。作为在水动力学计算中最重要参数的渗透率，我们没有考虑。因为对油藏通常其实实验室测定次数非常有限。对大多数层交叉点，该参数是无法求出的，因为按地球物理资料所确定的渗透率有很大误差。此外，还曾确定渗透率、含油饱和度、孔隙度与油层形成条件有关。因而，当在对地质非均质性作评价时，可以取这些参数中的任何一个。非均质综合指标的解析表达式为：

$$K_{\text{неод}} = \frac{W_m W_{k_n}}{\bar{M}_{h_{\text{эф}}} \bar{M}_{h_{\text{np}}}}, \quad (3)$$

式中 W_m ， W_{k_n} ——分别为孔隙度与含油饱和度的变异系数； $\bar{M}_{h_{\text{эф}}}$ ， $\bar{M}_{h_{\text{np}}}$ ——分别为含油厚度与小层厚度的数学期望值。

进入非均质综合指标的系数，可根据数理统计公式进行计算。

在所推荐的非均质指标里，分子表示储集岩层容积特征的变化，而分母表示地层变化率。该变化率取决于地层的断续性，分层与尖灭，以及层系厚度在广大油水过渡带的减少情况。

因此，地质非均质性综合指标的分子表示第二等级水平的参数特征，而分母为第三等级水平的参数。这两级水平间有着紧密的相互关系。当地质宏观均质（地层连续，并且不分层）时，非均质综合指标将随着分子的变化而变化，其本身就取决于储集层的形成特征。与地层分层，个别小层的置换，由于接近含油边界，特别是在广大油水过渡带地层厚度减少等有关的宏观非均质性增加，通常将导致公式（3）中分子增加。

在非均质综合指标 $K_{\text{неод}}$ 中，小层厚度起着重要作用。小层平均厚度可以取代像地层层分性这样的地质非均质性指标。似乎，表示其地质非均质性特征的地层层分系数，经常成为形式指标。例如，如果地层具有很大的含油厚度，则当其分层性很大时可能更为均质。

当对谢拉菲莫夫油田II层对比其分层性与 $K_{\text{неод}}$ 变化情况时，这一点就更为明显。