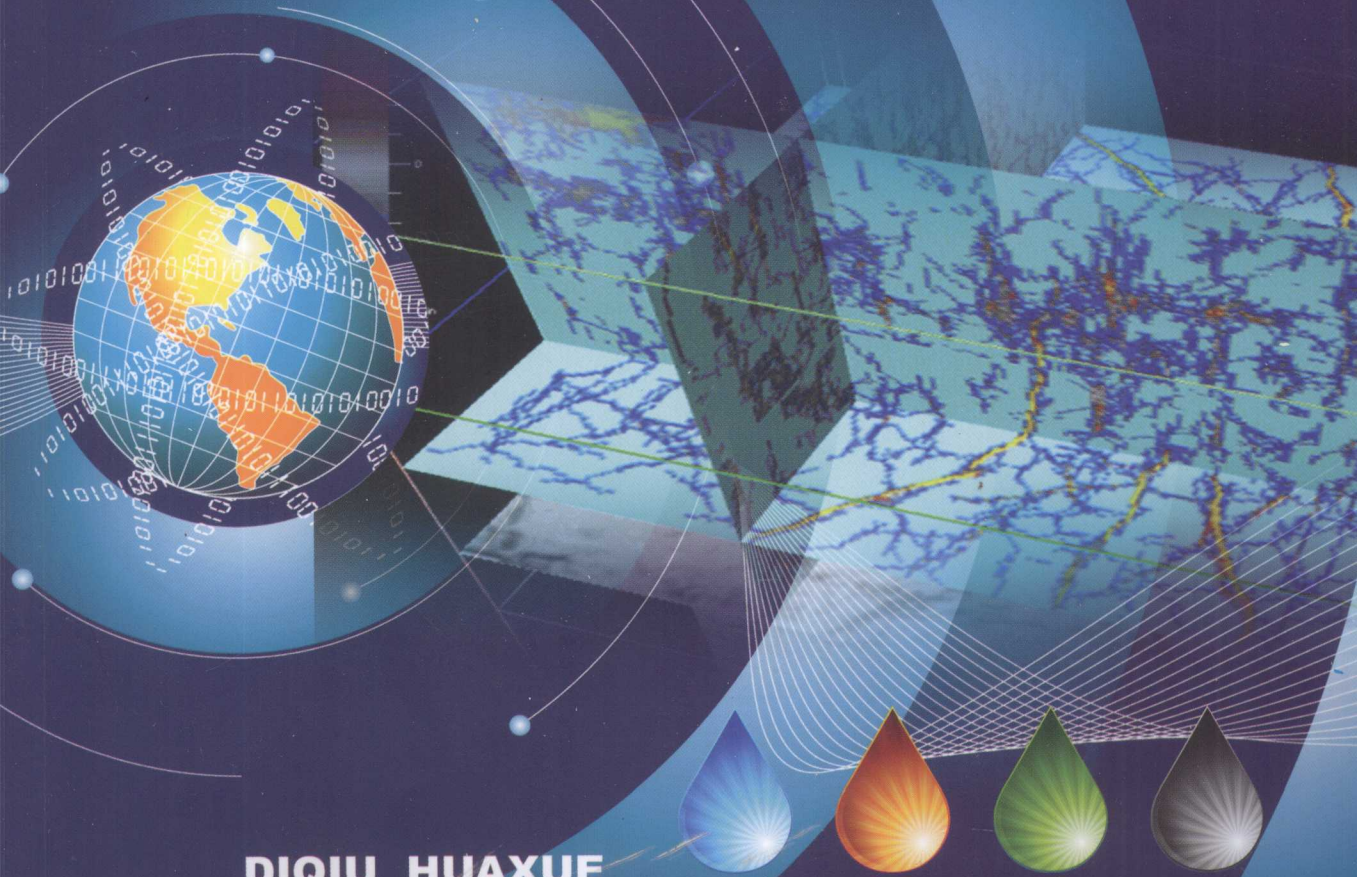


蔡尔范 编

地球化学 在油藏开发中的应用



DIQIU HUAXUE
ZAI YOU CANG KAIFAZHONG DE YINGYONG

石油工业出版社

地球化学在油藏开发中的应用

蔡尔范 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书基于分析地层原油和水的天然物理化学特征及其在开发过程中的变化规律,来解决油田开发中的问题。

本书可供油藏开发工作的各级领导、工程技术人员、科研人员及大专院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

地球化学在油藏开发中的应用/蔡尔范编.

北京:石油工业出版社,2009.4

ISBN 978-7-5021-6780-6

I. 地…

II. 蔡…

III. 地球化学-应用-油田开发

IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 146965 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 330 千字 印数: 1—2000 册

定价: 40.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

油气地球化学研究在油、气田勘查中的作用是众所周知的。不论在区域性普查阶段（为钻初探井准备面积）的初探井钻井和试油过程中，还是在勘探阶段，油气地球化学研究在找出含油气层系、生油岩、油气在各区块或岩石组合中的形成和保存条件；评价油气的潜在资源；预测油气聚集位置，油气藏油气质量和组分；确定油源及其与具体油气层内原油的关系；确定烃类运移以及对油气田地质构造的细化、油气藏类型的识别等方面，都有很大作用。目前在石油成因和含油气性远景评价准则问题研究方面油气地球化学的意义都很大。在解决石油成因问题方面原油和天然气地球化学起着关键作用。油气地球化学第二个重要作用是在勘查方面，油气地球化学是油气勘探的理论基础之一。

近几十年来油气地球化学发展得很快，已成为一门独立的学科。随着油气地球化学学科的发展，其研究领域不仅在油气田勘查方面，而且已涉及油气田的开发监测，并能解决油气田开发中的一些问题。在为油矿地质研究和解决油气藏开发问题方面利用油气地球化学资料已有现实可能。在期刊和专著中曾不只一次地论述了在油藏范围内以及在开发过程中，烃类流体性质变化用于对原油的光学研究对油藏开发进行监测等。本书试图将这方面已有俄文文献资料加以系统化，并在此基础上表明在油矿地质中和在解决油藏开发问题时如何应用地球化学资料。

油田开发工作效率基本上取决于产层容积和渗流特征、地层和油层结构、储集层类型及其非均质性、油气储量、岩石驱油效率等资料的获取情况。由于油气藏的复杂性，这些资料的获取只有用对油层和油井的所有现代测试方法作综合解释才能得到。近年来，与水动力学、岩石物理、地球物理等测试方法一起，还广泛采用油藏地球化学测试方法也被广泛采用。

目前国内在应用油气地球化学资料解决油、气勘查方面已有大量成果和总结，并有专门书刊介绍，这里就不作论述。在应用油气地球化学资料进行油田开发监测，并解决油田开发问题方面的研究工作才开始不久。由于目前大多数科技人员基本上都能看懂英文文献，而俄文文献看的人较少，故本书资料主要取自俄文文献。1984年苏联矿产出版社出版了《油气矿场地球化学》^[10]，《油藏范围内原油性质变化》^[9]。1989年后来又出版了一本苏联高校石油地质专业教科书《地球化学原理和油、气田勘查与开发监测地球化学方法》^[7]。此外，该出版社还曾出版了《在凝析气田开发过程中凝析物性质变化》^[19]（1970），《凝析气的地质地球化学特征》^[40]（1974），《油田开发的光学监测方法》（1979）^[15]，《示踪剂研究油气层方法》（1986）^[39]等书。

油藏开发地球化学是研究油藏范围内的地球化学。因此，本书先论述油气藏范围内原始状态下原油、天然气和凝析物的性质变化，及其在开发过程中的变化，这是油藏开发地球化学的基本问题。论述和举例说明油藏内各种原油分解类型，并分析其分解的原因。论述了油藏内烃类不同初始分解类型情况下油气运移所引起的其性质变化，以及某些物理化学过程的结果。因为只有掌握了矿藏内烃类的原始地球化学特征，才便与确定烃类的以后变化状况，以及对油藏开发进行监测。然后再论述油田开发的地球化学监测方法。

用油藏地球化学资料解决油藏、气藏、凝析气藏开发问题的基础是在矿场范围内及其沿剖面上，以及在开发过程中原油、天然气以及凝析气性质的变化规律。只有掌握了矿藏内烃类的原始地球化学特征，才便于确定烃类的以后变化情况和对油藏进行监测。然后论述了油田开发的地球化学的监测方法以及应用提高原油采收率新方法效果的地球化学准则。

利用油气地球化学资料来搞清断层性质以及油层间相互连通性等问题。

本书论述的地球化学方法是基于利用地层原油和水的天然物理化学特征，以及应用对注入水掺入荧光指示剂的方法。

油藏开发地球化学资料还可用来解决稠油油田开发中的问题。

油气藏开发地球化学监测方法分三方面论述：开发设计阶段，开发过程中和对井的技术状况监测。开发设计阶段讨论了在自然条件下确定岩石基本参数（裂缝孔隙度；裂缝比面、体积密度和岩石平均岩块大小；裂缝层含油饱和度和岩块驱油程度；碎屑岩比面、有效孔隙度、含油饱和度和驱油效率）；对水基泥浆取的岩心含油饱和度核实方法；研究凝析气藏是否有油环存在和预测凝析物含量；对勘探和已开发油藏油层非均质性研究；对油藏开发过程中的地球化学监测方法；讨论了防止石蜡在油层中析出；确定和计算原油沿地层推进方向和速度；监测油水界面；核实油藏驱动类型；对原油采收率作初步评价；总产量对各小层的分配评价；进行开发调整和对采用提高采收率新方法层系研究方法等。

最后论述油气藏水文地球化学。

目 录

第一章 油藏范围内原油、天然气和凝析物的性质变化	(1)
第一节 原油性质变化.....	(1)
第二节 作为热动力不平衡系统的油藏和原油性质在油藏中的变化	(26)
第三节 决定地下原油性质变化的因素	(32)
第四节 气体性质变化	(35)
第五节 凝析物性质变化	(37)
第六节 沿油田剖面油气性质变化	(39)
第二章 开发过程中原油、天然气、凝析物性质变化	(42)
第一节 开发过程中原油性质变化	(42)
第二节 开发过程中溶解气和天然气性质变化	(51)
第三节 枯竭开发过程中凝析物性质变化	(53)
第三章 开发设计阶段地球化学资料的应用	(60)
第一节 细化油田地质结构	(60)
第二节 油藏基本参数的求取(稳定源示踪剂法)	(63)
第三节 在确定岩心含油水饱和度时示踪剂的应用	(81)
第四节 研究凝析气藏是否有油环存在及对凝析物含量预测	(89)
第四章 油田开发过程中地球化学监测方法	(96)
第一节 监测油水界面推进的地球化学方法	(96)
第二节 判断提高原油采收率新方法效果的地球化学准则.....	(112)
第三节 利用油气地球化学资料来解决某些油藏开发问题.....	(115)
第四节 油藏水文地球化学.....	(119)
第五节 油藏油层非均质性研究.....	(125)
第五章 油田开发调整的示踪剂法	(135)
第一节 对油藏渗流和开发调整进行示踪剂测试的方法与原理.....	(135)
第二节 用示踪剂法测试结果监测和调整油田开发过程实例.....	(141)
第六章 对稠油油藏开发的地球化学研究	(170)
第一节 稠油组分综述.....	(170)
第二节 稠油油藏特征和稠油物理化学性质.....	(172)
第三节 稠油性质对油水界面推进的影响.....	(185)
第四节 稠油性质与采收率关系.....	(187)
第五节 采液速度对油藏某些开发指标的影响.....	(190)
第六节 确定呈现原油性质异常区域的位置和大小.....	(193)
参考文献	(198)

第一章 油藏范围内原油、天然气和凝析物的性质变化

第一节 原油性质变化

对原油物理和化学性质与油层埋藏条件之间关系进行研究，具有一定的理论和现实意义。掌握油藏内烃类原始地球化学特征，在很大程度上将有利于很多地质问题的求解，并便于确定烃类的以后变化状况，以及方便油藏开发监测。

一、重力分异对原油密度分布的影响

对国内外属于圈闭构造油田实际资料作一分析，可发现，在绝大多数情况下，油藏内原油性质的变化是按重力分异原理进行的，即由油层高部位向油层低部位原油密度有增加趋势，并且原油其他物理化学性质也有相应的变化。

上述现象说明，在油层中油、气、水按重力分异，在油藏范围内不同组分原油分层：溶解的胶质物和固态烃类（石蜡、地蜡）大部分堆积在油藏的下部，溶解气大部分在油藏上部。并且，含有大量胶质沥青质且同时含有轻组分和溶解气的原油，都明显会受到重力的影响。但是，油藏内原油密度变化梯度的实际值在很多情况下大于计算值。显然，自然界所观察到的重力分异现象复杂得多，并包括某些目前还不知道的因素在内。

根据 A. Φ. 多布良斯基的意见，在原油热催化裂解过程中，产生烷烃时，就会产生胶质物质的凝聚，逐渐沉淀，并集中于油藏的下部，这就会导致油层中原油的重力分异。实验表明，向原油添加由烷烃组成的合烃（即合成汽油），就会导致胶质物沉淀。

A. A. 卡尔采夫认为，在油藏形成过程中原油的重力分异很可能就起着很大作用。

H. A. 叶列緬科认为，造成油藏中油气组分差异的最可能原因是其形成条件。如果油藏是在原油渗流过程中形成的，则在油藏中由于渗流效应造成原油的实质性变化。该效应表现在两个方向：首先，由于原油通过孔隙介质时的速度不同按组分相对分子质量馏分化；其次，原油不同组成部分被泥质颗粒所吸附。原油组分的吸附变化，一方面取决于原油与吸附物质的吸附面积（即岩石的含泥量越大，吸附得就越多）和运移距离，另一方面取决于原油组分。在原油组分中最易被吸附的是沥青质和胶质，其次是芳香烃和环烷烃，吸附最少的是烷烃。因此，在原油沿非均质油层渗流过程中形成油藏时，原油可能被馏分化。

在世界上 70 个具有相应资料的油田中，就有 60 个油田在油藏范围内能观察到随深度增加原油密度增大的情况，只在 10 个油田发现有相反情况或根本没有规律性。并且应考虑到，60 个上述油田具有多层，含有相应差异的若干油藏，所以能观察到该规律的油藏要明显超

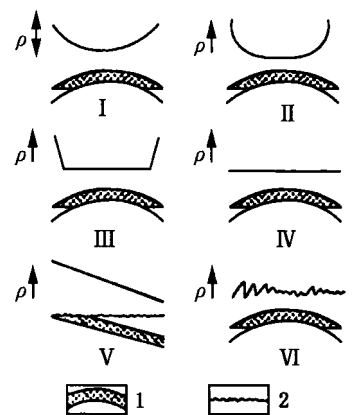


图 1-1 油藏内原油分异类型示意图

1—油藏；2—地层不整合面；图中油藏上部为原油密度按深度分布曲线，可划分出油藏内若干原油分异类型

过60个。

原油在油藏中有重力分异存在，可用下列现象来说明：分异程度与油藏高度的关系；油藏内油水界面附近原油性质变化的不同特征；在含油层复杂外形的情况下沿油藏高程原油分段分异现象等。

在油藏内可划分出几种原油分异类型（图1-1）：

I类（经典的）——沿整个油藏高程或多或少可以发现随着埋藏深度的增加，原油密度均匀增长（图1-2，图1-3）；图1-2为苏拉汉油田东南下降块下基尔马金层油藏剖面示意图。该油藏内原油密度随深度逐渐增长。

II类——在整个油藏埋藏深度范围内，可发现原油密度有明显的增长。在接近油水界面的地区原油密度增长更快。堪萨斯的布什西季“细带状”油藏可作为典型实例。

III类——油藏主要部分原油性质没有明显差异，但在油水界面附近有沥青类似物小层。

IV类——油藏范围内无原油分异。

V类——负地层梯度油藏。在地表有露头的油藏以及在其头部被沥青等堵塞的油藏属于此类。例如比纳加金油田下基尔马金层油藏（图1-4）。

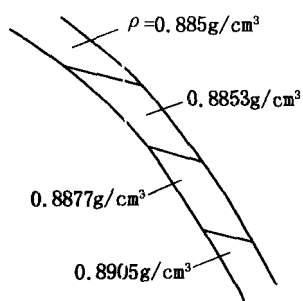


图1-2 苏拉汉油田东南下降块下基尔马金层油藏原油密度变化

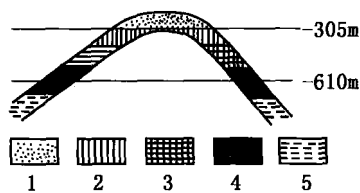


图1-3 格雷阿姆油田约翰逊砂中原油密度分布

1—气体；2—原油密度 $<0.845\text{g}/\text{cm}^3$ ；
3—原油密度 $0.845\sim 0.860\text{g}/\text{cm}^3$ ；
4—原油密度 $>0.860\text{g}/\text{cm}^3$ ；5—水

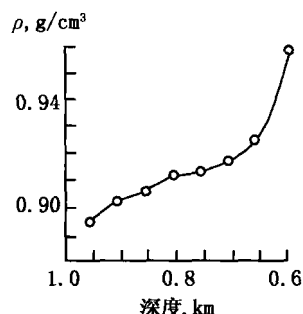


图1-4 比纳加金油田下基尔马金层油藏原油密度沿倾角分布曲线

VI类——原油性质在平面上变化较大，无规律性。某些地台型油田，如罗马什金油田以此类型为特征。

地槽区油田以I、II和V类原油分异为特征，且VI类原油分异情况被认为是异常类型。

Ю. П. 加坚贝尔格尔认为，罗马什金油田（以及某些其他油田）各区原油性质的变化特征可用地下水对原油作用过程的不同影响来解释。

在萨马特洛尔油田的油藏中可发现有类似的原油分异类型。K. X. 加利克耶夫和P. C. 萨希布加列耶夫曾指出，在萨马特洛尔油藏范围内原油性质取决于储集层泥质胶结物的矿物成分，特别是取决于相应泥质矿物吸附能力的差异性。但也有不同的看法。例如，Ю. П. 加坚贝尔格尔和B. П. 季亚科夫认为，原油密度的变化可能取决于其不同的地层温度。

根据Ю. В. 谢佩特金、И. И. 涅斯捷罗夫和A. В. 雷里科夫的资料，萨马特洛尔油田БВ₈层油藏范围内具有不同性质（密度、黏度等）原油分布的成带性是与油藏内存在古油水界面的痕迹有关，该油藏是分若干阶段形成的。上述作者研究表明，低密度原油带（小于 $0.85\text{g}/\text{cm}^3$ ）分布在油藏顶部，下部被密度较大的原油环形带所取代（大于 $0.85\text{g}/\text{cm}^3$ ），其下重新出现密度较小的（ $0.84\sim 0.85\text{g}/\text{cm}^3$ ）原油带。最后，在油藏的最下部，在目前油水

界面附近，为密度大于 $0.85\text{g}/\text{cm}^3$ 的原油。根据原油的其他参数（含硫量、胶质沥青质含量、含蜡量、低沸点馏分含量等）也能追踪出所描述的原油带。他们认为，较大密度的上原油带反映了在古油水界面处（当时只是在圈闭的上部形成油藏）原油与水的地球化学相互作用的影响痕迹，其最下部原油是以后才充填的。

由于重力分异程度与油藏高度呈正比关系，故地槽区油田（其特征为地层倾角大，油藏高度大）油藏内重力分异的条件最为有利。

不管油藏范围内原油分异的类型如何，在大多数情况下，在最靠近油水界面的地方原油密度快速增大，这是由于原油与边水的生物化学相互作用的结果。

原油黏度在油层中的变化很大。例如，巴什基里亚含煤岩系地层中，油藏范围内原油粘度的变化达几倍。黏度和密度一样，从油藏顶部向油水界面，或从油层顶部向底部增大。

表 1-1 为罗马什金油田各区块原油密度资料。由表 1-1 可见，其脱气原油密度各区块平均值由 $0.859\text{g}/\text{cm}^3$ 到 $0.870\text{g}/\text{cm}^3$ ，即变化大于 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ ，个别井密度差异大于 $0.05\text{g}/\text{cm}^3$ 。密度最大和最稠的原油是在北部区块和两个主要无界面区之间——XV，XIV，XIII，XI，X 等，其平均原油密度为 $0.864\sim 0.870\text{g}/\text{cm}^3$ ，原油黏度高于 $3.0\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。位于南部区块原油具有较低密度和低黏度（区块 V，III，II，I），其平均原油密度为 $0.859\sim 0.865\text{g}/\text{cm}^3$ ，其黏度不超过 $2.9\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

表 1-1 罗马什金油田各区块原油密度资料

区块名称 (编号)	平均原油密度, g/cm^3	测试井数
别列佐夫 (XII)	0.863	无资料
北阿利梅季也夫 (IX)	0.859	无资料
阿利梅季也夫 (VIII)	0.860	无资料
明尼巴也夫 (V)	0.861	10
阿布德拉赫马诺夫 (VI)	0.864	17
南罗马什金 (III)	0.861	4
宰卡拉泰 (I)	0.865	5
列宁戈尔 (II)	0.859	15
塔什季亚尔 (XV)	0.868	10
奇什明 (XIV)	0.866	6
阿利凯也夫 (VIII)	0.865	6
东苏列夫 (X)	0.864	13
阿兹纳卡也夫 (XI)	0.870	26
帕夫洛夫 (VII)	0.866	11
泽列诺戈尔 (IV)	0.867	8

伏尔加流域一些油田地层条件下原油性质分布有类似情况，表 1-2 列出几个油藏内原

油黏度变化的资料。乌发石油科学研究所研究了不同地区同一地层的地下原油后指出，从背斜顶部到褶皱翼部地下原油黏度变化达 1 倍或更大（表 1-2）。原油的其他性质——吸光系数、折射指数也同样有剧烈变化。

表 1-2 油藏不同部位原油黏度 (mPa·s)

地下原油			脱气原油		
油田	背斜顶部	油水界面	油田	背斜顶部	油水界面
达依姆尔任	15.4	28.0	达依姆尔任	28.0	200.0
阿布杜林	12.3	34.0	曼恰洛夫	20.0	40.0
克利士诺布良克	13.5	27.6	依格敏道夫	34.0	65.0
			亚尔克也夫	38.0	96.0

油藏内原油性质的变化是由于其成分变化引起的，沥青质和胶质是对密度、黏度、吸光系数影响最大的原油组分。在重力作用下，原油最重成分（沥青质和胶质）富集在地层低部位，这里的原油密度、黏度、吸光系数最高。

乌发石油学院实验室完成的从油藏中央顶部和接近原始内含油边界的井内所取得油样分析表明，沥青质和胶质的含量变化较大（表 1-3）。

表 1-3 油藏内原油沥青质和胶质含量变化

油田、区块	沥青质 (重量), %	胶质 (重量), %	油田、区块	沥青质 (重量), %	胶质 (重量), %
曼恰洛夫	2.0~8.0	13.3~16.6	达依姆尔任	3.0~10.0	15.0~17.2
依格敏道夫	2.5~9.0	13.6~18.9	阿尔兰	2.5~10.0	12.6~17.2
亚尔克也夫	2.6~9.3	13.9~16.9	新哈津	4.0~7.5	15.3~16.6

油藏内原油性质和成分的变化是有规律的。用数学方法整理原油成分的变化资料，可以得出每一个地层的回归方程式，它表示所研究量与距油水界面距离之间的关系。例如巴什基里亚下石炭统油藏，原油中沥青质含量与距油水界面距离的关系用以下方程式描述：

$$A = 100.0015 (a - bh) - 0.11 \quad (1-1)$$

式中 a 和 b ——油藏的常数系数；

h ——到油水界面的距离，m。

	曼恰洛夫	依格敏道夫	亚尔克也夫	达依姆尔任
a	500	600	550	530
b	5.0	10.0	8.0	3.5

在某些油藏中存在密度大、黏度高的高胶质原油区域。这些区域通常位于油水界面附近。在有底水或油水界面面积大的油藏中，含胶质高、不易流动的原油区域特别发育。巴什基里亚奥伦堡州和其他地区的多内昔组的许多块状石灰岩油藏及伊申拜珊瑚礁油藏中，在油水界面附近发现了重质沥青状原油。推断在这些区域内在边水的硫酸盐和微生物作用下，发生了原油氧化，使原油沥青化。

在同一层内原油密度的差值用密度梯度表示。密度梯度为在深度距离为 100m 的原油密度差值 (M. B. 阿布拉莫维奇首次提出并利用该术语的)。应指出，对于层状油藏计算起来

很方便的密度梯度值，如用于块状油藏进行研究将没有什么意义。如果原油密度随深度增加而增大，则其梯度为正值，反之为负值。由表 1-4 可以看到阿普舍龙半岛油田组是以地下正密度梯度为特征的。

表 1-4 阿普舍龙半岛油田地下原油密度数据表

油 田	地层, 层系	密度梯度 g/cm ³ /100m	油 田	地层, 层系	密度梯度 g/cm ³ /100m
巴拉汉萨本奇拉	II	0.006	比比爱巴特	V	0.006
马内	III	0.006		VII	0.004
		0.012		VIII	0.004
苏拉汉	V	0.027		X	0.006
	Va	0.041		XI	0.006
	Vb	0.036		XII	0.006
	VI	0.052		XV	0.026
	VIa	0.001		XVI	0.012
	PK	0.01		XVIII	0.010
					0.002
卡宁	PK	0.01		PK-2	0.005

M. B. 阿布拉莫维奇认为，油层厚度越大，则其密度梯度的绝对值越小，也就是说，其原油组分更为均匀。他对原油分异现象作了很有意思的分析，并认为，当原油呈正密度梯度时可能按密度分异成层，并且密度差异可能取决于胶质悬浮颗粒的不均匀分布。应指出，分异成层，实质上是原油在垂向上近距离分异运移。M. B. 阿布拉莫维奇曾指出，胶质物质浓度越大，则越容易吸附，即重油梯度应比轻油梯度大，但实际并非总是如此。A. Ф. 多布良斯基认为，M. B. 阿布拉莫维奇没有考虑到高分子溶剂的吸附要比低分子溶剂困难。M. B. 阿布拉莫维奇的另一观点更具实质性，这特别是对倾斜地层中原油沿走向运移情况：平缓油层原油自下而上运移的距离越长，则其吸附越明显。但实际上这种情况不能作为准则，因为有相反情况资料。

M. B. 阿布拉莫维奇还研究了一个重要而有意义的问题。因为深埋油层下部的原油密度应比其顶部的大，而随着温度上升，原油密度下降，则所有性质（包括密度在内）相同的原油在地层下部仍然具有较低密度。这对于地槽区油田更为明显，因为其油藏高度大。密度差值会引起力图使其平衡的对流，如果在达到平衡以后地层中原油同一高度应具有相同密度，则显然，对因地热原因所造成的温度差，如果将原油密度换算为相同温度的密度，则地层下部原油将具有较高密度。

M. B. 阿布拉莫维奇曾指出，假设每加深 100m 地层地下平均温度增加 3°C，则由原油膨胀系数可找出其密度的相应增值（每 100m 的梯度）：对密度为 0.740~0.750g/cm³，原油密度增值为 0.0025g/cm³/100m；密度为 0.800~0.810g/cm³，密度增值为 0.0023g/cm³/100m；密度为 0.850~0.860g/cm³，密度增值为 0.0021g/cm³/100m；密度为 0.900~0.910g/cm³，密度增值为 0.0019g/cm³/100m；密度为 0.920~0.930g/cm³，其密度增值为 0.0013g/cm³/100m。

当然，不能只用在不同温度下密度平衡来解释地层不同部分原油密度的差异。但毫无疑问，该现象对密度梯度有影响。

在大多数情况下原油密度梯度实测值要低于基于温度差的计算值，但对于某些油层这些值（计算和实测值）很接近。例如，对于巴拉汉萨本奇拉马宁油田下基尔马金层组分别为 $0.0026\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $0.0019\text{g}/\text{cm}^3$ ，而对苏拉汉油田下基尔马金层组其密度实测值明显要比计算值低。

为了评价油藏沿深度从上向下原油密度和沥青含量的增长梯度，A. H. 列兹尼科夫计算了北高加索油藏的梯度，发现扎曼库利、卡拉布拉克、马尔戈别克和哈扬科尔特等油田原油密度梯度基本上是一样的（哈扬科尔特油田密度梯度为 $0.0045\text{g}/\text{cm}^3/100\text{m}$ ，卡拉布拉克油田密度梯度 $0.005\text{g}/\text{cm}^3/100\text{m}$ ）。因此 A. H. 列兹尼科夫认为，这并不能表明，油层内流体重力分异的主要作用。例如，如果哈扬科尔特和卡拉布拉克油田是以小梯度为其特征（每 100m 增长 $0.095\%\sim 0.102\%$ ），则马尔戈别克和扎曼库利油田的值要高 $3\sim 5$ 倍（每 100m 增长 $0.326\%\sim 0.555\%$ ），这与后两个油田烃类侧向运移的形成条件，以及其较差的保存条件相符。显然，格罗兹年西部地层水的活跃循环，以及在单位油水界面面积上的原油量少，造成了这些原油的某些氧化。

然而，阿恰卢克区由下白垩统沉积物的烃类垂直运移并没有较明显的原油重力分异。因此油藏内沥青质含量与密度的变化很小，分别为每 100m 增长 0.047% 和 $0.0032\text{g}/\text{cm}^3$ 。因此，A. H. 列兹尼科夫认为，由于烃类的再次运移，油藏中流体的原始重力分配被破坏了。这就造成沿油藏高程原油性质的更均匀化，即造成其沥青质含量和密度的梯度变小。

密度梯度不仅有正梯度，也有负梯度。老格罗兹年油田组的油藏可以作为负梯度的例子。

下面研究一下油藏中原油重力分异的一个更有特征的例子。美国得克萨斯州比格莱克油田一口井在井深 2600m 处为奥尔多维克时代石灰岩，采出无色原油的密度为 $0.72\sim 0.75\text{g}/\text{cm}^3$ 。这样的原油采了一年，以后采出的是密度为 $0.815\text{g}/\text{cm}^3$ 的黑色原油。对新井详细地研究了其原油性质的变化，发现它是逐渐变化的：大约有 15m 厚度的层段所含的原油在颜色和密度方面是过渡性的；大约在井深 2700m 处完成过渡，那里的地层温度为 88°C ，地层压力为 28MPa 。透明原油的溶解度为 $900\sim 1900\text{m}^3/\text{m}^3$ ，深色原油的溶解度为 $260\sim 750\text{m}^3/\text{m}^3$ 。层内没有发现原油性质有急剧的变化，并且油层中并没有被对原油是不渗透的小隔层所分割。A. Ф. 多布良斯基认为，由于地层中的高温经受了地下蒸馏，比格莱克油田的轻质油将易挥发馏分送到地层上部。

对于埋藏浅的其他轻质原油油田（其平均温度不超过 $20\sim 25^\circ\text{C}$ ），就不能作类似解释。并且在存在相应的质条件情况下，油田过去历史（在剥蚀以前，在有很厚覆盖层情况下）可能有类似状况。

当油藏含油高度很大时，在其上部可能形成由一些轻馏分所组成的分异物。在罗马尼亚的肯皮纳油田、美国加利福尼亚州的文图拉阿韦纽油田能观察到这种现象。文图拉阿韦纽油田作为原油性质沿剖面异常分布的例子而引人注目，这是典型的正密度梯度油田。不同的学者对这一异常做出不同的解释。D. 巴尔通认为，文图拉阿韦纽油田的所有油藏为一整体，所有油藏之间是连通的，并在该系统内有明显的重力分异。这一观点引起人们的注意。这里应考虑，首先，强烈的地层断层位移（其构造为含油区较少有的“尖背斜”），毫无疑问，伴生有显著的裂缝；其次，泥岩隔层很薄。

很可能，文图拉阿韦纽油田实际上是（造成异常轻质原油的）大规模重力分异现象的少

有情况。但是这一过程，以及所有油藏之间的水动力连通表明，可能在过去某一时刻油藏发生过断裂。个别油藏之间缺乏水动力连通，目前可以用其油水边界的不一致来证实。

美国加利福尼亚州的凯特尔缅希尔斯油田在很多方面与上述油田相类似。D. 巴尔通和F. 拉希认为，在该油田上所观察到的垂向密度正梯度，也是重力分异的结果。F. 拉希还指出，该油田重质原油和轻质原油之间的界面近似于水平面，这样解释是合乎情理的。但是，对其还应注意岩石因素，因为岩石因素在这里起着很大作用。

杜玛兹油田 Π_2 层油藏原油平均密度为 0.852g/cm^3 ，而位于其上的 Π_1 层油藏原油密度为 0.848g/cm^3 。基于这些曾提出，在这两层之间（现在或过去某个时期）应有水动力联系。后来对生产数据资料的分析证实了这一点。瑟兹拉诺扎博罗夫油田含煤层系 B_1 油藏原油平均密度为 0.860g/cm^3 ，含石蜡 2.2%，而位于其稍低处的 B_2 油藏分别为 0.886g/cm^3 和 3.6%。其原油性质沿剖面是在含蜡量同时增长情况下原油密度随深度增长。A. A. 卡尔采夫认为，是由于重力分异，一般原油中含蜡量随密度减小而增长，这是与其化学过程有关，在原油重力分异情况下重烃与胶质一起堆积在油藏下部。如果考虑到泥质隔层厚度不大（约为 10m）和油砂体的复杂形状，该油田在 B_1 和 B_2 油藏之间存在水动力连通是完全可能的。

科威特的特大油田布尔甘开采总厚度为 330m 的三层砂岩（白垩系）。这些砂岩被泥岩和砂质泥岩所分割，但其油水界面是水平的，并对所有砂岩是统一的。这说明，砂岩间是通过裂缝连通的。油田平均原油密度为 0.866g/cm^3 。每一层砂岩中，原油密度随深度而明显变化，每一砂岩层中在同一海拔高度处，其密度接近，并海拔高度每 60m 密度增长 0.0055g/cm^3 ，即其原油密度梯度是很高的。

很多其他国外油田也有油藏范围内原油重力分异现象。例如，美国怀俄明州爱尔克贝辛油田坦斯利普砂岩（宾夕法尼亚纪）的原油密度由构造顶部的 0.867g/cm^3 变化到油层底部的 0.892g/cm^3 。美国科罗拉多州的雷季利油田也有类似情况，其原油密度由构造高部位的 0.849g/cm^3 变化到油层底部的 0.869g/cm^3 。

A. K. 科季娜、3. Л. 迈明研究了地台型油藏原油性质的变化，他们的研究曾得出灰谷、苹果谷油田下部原油密度偏高。萨马尔河湾油田（其油藏内发现有原油重力分异）不同于有大断层错位的典型地台型油田。科季娜和迈明指出，与构造陡部相比，在隆起的平缓翼部原油性质有更明显的变化。他们认为，由于大面积的油水界面使平缓翼部水的作用更加强烈。但是这一结论是与关于上述构造陡翼和平缓翼水的不同特征资料（水文地质资料表明，陡翼水在水力和地球化学方面更为活跃）是矛盾的。

在边缘盆地，特别是块状油藏（如伊希姆拜油田）常能观察到油藏内原油的重力分异，但对含油显著的层状油藏（格雷阿姆油田，见

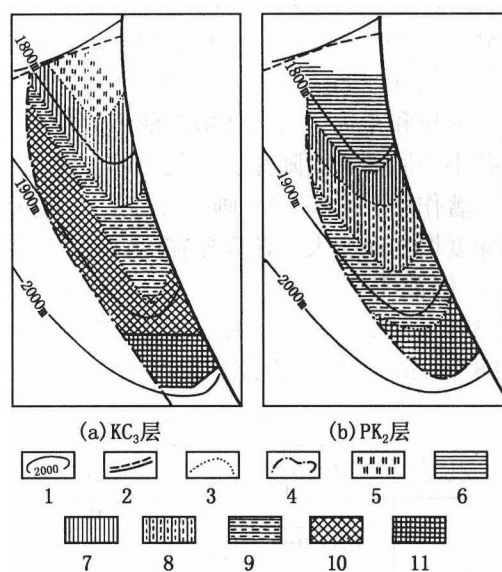


图 1-5 久尔吉扬海油田 KC_3 和 PK_2 层原油密度变化图

1— PK 层顶面等高线；2—断层；3—密度区界；4—含油边界。密度分区：5— $0.870\sim 0.875\text{g/cm}^3$ ；6— $0.875\sim 0.880\text{g/cm}^3$ ；7— $0.880\sim 0.885\text{g/cm}^3$ ；8— $0.885\sim 0.890\text{g/cm}^3$ ；9— $0.890\sim 0.895\text{g/cm}^3$ ；10— $0.895\sim 0.900\text{g/cm}^3$ ；11— $0.900\sim 0.905\text{g/cm}^3$

图 1-3) 也能发现这种现象。

阿塞拜疆油田的实际资料很有意义。这里一般形式的重力分异原理在绝大多数油藏都有体现,但只是在很少情况下(与所有地槽区油田相似)才明显呈现。久尔吉扬海油田范围内有最明显的原油密度重力分异。在 KC_3 和 PK_2 层原油密度等值线图(图 1-5)上可以看到,其最轻馏分是在构造的高部位。在西南和东南方向上,即随褶皱倾伏,该区被越来越重原油带所包围。原油物理化学性质分析资料表明,含油面积最大的 KC_3 层,其密度波动范围也是最大的。最轻质原油是在构造最高部位(深度为 1750~1745m)的 62 井中发现。最重原油是在含油面积的东南部深度为 1917~1910m 的 190 井中获得。由图 1-5 可以看到,其不同原油密度分布区的界线几乎全部与构造等高线平行。并应指出,甚至将等值线间隔取得很小($0.005\text{g}/\text{cm}^3$)的情况下也能观察到明显的原油密度按重力分布的情况。

卡拉油田基尔马金层组一些油藏原油有类似重力分布。所有 KC 层主要含油区位于卡拉褶皱西北倾没闭合端。考虑到其原油定性分布特征相同,以 KC_{7-8} 层为例进行描述。在西北倾没闭合端接近气顶的地方埋藏着密度为 $0.866\sim 0.869\text{g}/\text{cm}^3$ 的较轻原油,然后在其倾没方向上是密度为 $0.870\sim 0.879\text{g}/\text{cm}^3$ 的原油带,最后在油水带为该层最重原油(密度为 $0.880\sim 0.889\text{g}/\text{cm}^3$)。在上述方向上原油中胶质含量由 13.2% 增长至 21.0%,此时汽油含量由 6.8% 减少到 2.1%。并且不同原油密度带平行于该层构造等高线延伸。只是在某些层中,这些带与构造等高线呈较小角度相交。

在南库什哈宁区 $VIII_1$ 和 $VIII_2$ 层油藏范围内能观察到很明显的原油密度分异。例如, $VIII_2$ 层油藏,虽然其高程不大(小于 500m),但能观察到原油密度由顶部的 $0.828\text{g}/\text{cm}^3$ 增加到下倾部分的 $0.858\text{g}/\text{cm}^3$; 胶质含量由 5.1% 增加到 14.1%。

卡拉和布佐夫内马什塔吉油田油藏原油性质随其埋藏深度不同而变化。卡拉油田各层系或各小层原油密度随深度变化总的来说是受构造控制的,因为其断层在原油性质定性方面不起显著作用。取每 50m 画一等高线,卡拉油田生产层系下部各层在大多数情况下原油密度随深度增加而变大。该现象在 KC_{1-2} 、 KC_{11-12} 、 KaC_2 , 特别是 PK 层能明显观察到(表 1-5)。例如 KC_{1-2} 层在深度由 1700~1749m 增至 1900~1949m 时,其原油密度平均由 $0.839\text{g}/\text{cm}^3$ 增至 $0.870\text{g}/\text{cm}^3$ 。 PK 层在深度为 1950~1999m 范围内平均原油密度为 $0.883\text{g}/\text{cm}^3$,而在深度为 2250~2299m 范围内为 $0.900\text{g}/\text{cm}^3$ 。

表 1-5 卡拉油田生产层系下部各层原油密度随深度变化

层位	埋藏深度, m	原油密度, g/cm^3	层位	埋藏深度, m	原油密度, g/cm^3
KC_{1-2}	1700~1749	0.839	PK	1950~1999	0.883
	1750~1799	0.964		2000~2049	0.883
	1800~1849	0.865		2050~2099	0.888
	1850~1899	0.871		2100~2149	0.889
	1900~1949	0.870		2150~2199	0.893
1900~1949	0.877	2200~2249		0.894	
1950~1999	0.879	2250~2299		0.900	
KC_{11-12}	2000~2049	0.886	KaC_2	2300~2349	0.867
	2050~2099	0.866		2350~2399	0.875
	2100~2149	0.888		2400~2449	0.882
	2150~2199	0.885		2450~2499	0.889
	2200~2249	0.889			

布佐夫马什塔吉油田（马什塔吉布佐夫中央主要含油区）VKC层和PK层能明显观察到其原油密度随埋藏深度增大（表1-6）。

表1-6 布佐夫马什塔吉油田VKC和PK层原油密度随深度变化

层位	埋藏深度, m	原油密度, g/cm ³	层位	埋藏深度, m	原油密度, g/cm ³
VKC	<1799	0.910	PK	1800~1849	0.913
	1800~1849	0.913		1850~1899	0.915
	1850~1899	0.913		1900~1949	0.917
	>1900	0.914		1950~1999	0.919

第聂伯罗夫斯克顿涅茨盆地某些油田可以作为油藏范围内原油性质与其埋藏深度关系的例子。例如格林罗兹贝舍夫和拉德琴科夫油田也可观察到由油藏构造顶部向边部其原油密度增长。拉德琴科夫油田位于构造顶部或接近顶部的11, 30, 21, 45等井下石炭统层原油密度平均为0.824g/cm³，而位于构造西北边缘的9和18井原油密度平均为0.834g/cm³。

在第聂伯罗夫斯克顿涅茨盆地拉德琴科夫、扎切皮洛夫、卡恰诺夫等油田由构造顶部向油藏边部原油密度也有类似增长。偏离该规律性的很少。

以恰赫纳格利亚尔和苏卢泰佩油田PK层系为例可明显表明地层型油藏原油性质的分布。恰赫纳格利亚尔油田虽然油藏面积不大，但其原油密度变化范围较大，由0.868g/cm³到0.927g/cm³（平均密度为0.906g/cm³）；沿含油边界延伸着密度为0.915~0.920g/cm³的重油带（图1-6）；沿上倾方向重油区被平行分布的较小密度（0.911~0.915g/cm³）原油所取代，地层最高部位为轻质原油（0.871~0.880g/cm³）。

资料表明，PK层系油藏原油密度梯度很高，在油藏高度为400m情况下原油密度的变化范围很大，由0.871g/cm³到0.920g/cm³。

在卡拉油田KaC₁层地层型油藏范围内不同密度原油带相互间平行延伸，并与构造等高线以较大角度相交。KaC₁层原油密度由油藏尖灭轴部带的0.860g/cm³增加到油水界面区的0.887g/cm³。由尖灭区向边缘原油中胶质含量由20.0%~23.6%增长到32.0%~49.0%，而汽油含量由15.2%~15.5%减少到6.6%。

必须指出，在很多情况下虽然构造被断层所切，但其对原油密度分布没有实质性影响。卡拉油田大部分油藏可作为其例子。虽然构造被横断裂切得很碎，但其II层整个油藏面积为密度0.860~0.869g/cm³的原油。基尔马金层系V层油藏断裂对其按原油密度分布没有明显影响。

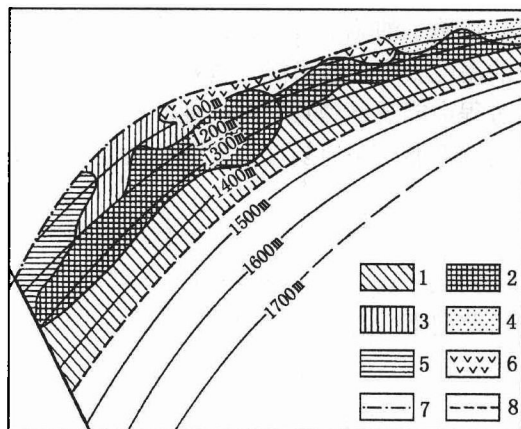


图1-6 恰赫纳格利亚尔油田PK层系原油密度分布图

密度区：1—0.915~0.920g/cm³；2—0.910~0.915g/cm³；3—0.900~0.905g/cm³；4—0.880~0.895g/cm³；5—0.870~0.880g/cm³；6—0.860~0.870g/cm³；7—尖灭线；8—原始含油边界

下列异常现象值得研究。在一个北高加索低温油田曾观察到与总规律不一样的情况，即在构造边缘部分的原油比其顶部的含蜡量更高，密度更小。在对该异常现象产生原因作分析时发现在原油性质与围岩厚度之间有相关关系，发现油层越厚，则原油密度越低，其含蜡量越大。同时原油性质与其质量有的相关关系，这是很自然的，因为在对原油有影响的物质绝对量相同情况下，当原油质量较小时，相对效应将要大得多。

在大多数情况下（特别是对地槽区油田）可以确定在单个油藏范围内的原油重力分异，但对很多油藏不能找到原油性质与其埋藏深度的关系。例如，杜玛兹和东得克萨斯油田，虽然其油藏很大（高度很小），但原油组分相对比较均匀。还可将亚速库班盆地的油田组作为例子，其密度、胶质沥青质含量、汽油馏分等原油性质随其绝对埋藏深度是不变的。卡林油田 KC_{5-8} 和 KaC_1 层也有类似现象。

在单个油藏范围内原油性质与其埋藏深度之间没有明显的关系，这可能是由于其油藏的含油高度较小，也可能是资料太少。应指出，在很多油藏内原油性质分异的类似情况下在开采过程中能观察到其原油密度的（增长）变化。并且原油密度的增加，由于油层的采出程度不高就不能只用地层压力下降原油脱气来解释，类似现象也可能是构造下部较重原油流入所造成的。

现研究一下在油藏形成过程中原油沿地层运移时由于吸附现象所引起的油藏范围内原油性质变化。表 1-7 为东委内瑞拉基里基尔油田三个油样的地球化学测试成果。这是其沿倾向由北向南分布的三口井取出的油样。在总剖面长度接近 3.2km 情况下井间距离约为 2.4km。

表 1-7 东委内瑞拉基里基尔油田原油分析资料

原油特征	248 井	278 井	598 井
	(621~771m)	(799.5~856.5m)	(1165.5~1221m)
相对含蜡量, %	1.02	0.81	0.78
羧基 (C=O) 相对浓度, %	0.27	0.40	0.43
含硫量 (质量), %	0.70	0.78	1.26
卟啉中钒相对浓度, %	10.3	10.9	19.6
C^{13}/C^{12} (‰)	+1.9	+2.1	+2.3

由表 1-7 可以看到，由油藏高部位 248 井采出的原油中烷烃含量很高，含硫和含氧化合物（羧基）浓度较低。相对含蜡量随深度增加，原油中不稳定组分（卟啉，含硫和含氧化合物）含量下降。随深度 C^{13}/C^{12} 比值也下降。

如果在所研究油藏高度 497m 范围内（由过滤器孔平均深度算起）原油性质的类似变化可以认为基本上是原油重力分异的结果，则在对比 248 井和 278 井原油性质时该解释就完全不能用。由表 1-8 可以看到，这些井的原油彼此间差异明显，而其埋藏深度差值并不大，总共只有 132m。在其埋藏深度相差不大，但其间距离较大情况下，其原油性质有这样差异，可能是由于原油沿地层运移时吸附作用的结果。

表 1-8 内列举了伏尔加乌拉尔含油气区原油中结构性组分含量资料。由表 1-8 可看出，原油的结构性组分含量变化范围很大，并且与其岩石年代和地层埋藏深度有关。

根据测试资料，对巴什基里亚、鞑靼和古比雪夫州 72 个泥盆系油藏和 67 个石炭系油藏

绘制了沥青质、胶质和石蜡分布曲线（图 1-7）。

在泥盆系油藏中沥青质含量变化范围为 1%~9%，胶质为 2%~20%，石蜡为 2.5%~11%。含沥青质 3%、胶质 10%、石蜡 4.5% 的油藏数目最多。在下石炭统油藏中沥青质含量为 1%~11%，胶质 2.5%~22.5%，石蜡 2.5%~8.5%。最常见油藏含沥青质 5%，胶质 7.5%，石蜡 3.5%。

这些井不同油藏地下原油中溶解气量是不同的。在卡拉恰耶尔格油田地下原油含气 13.5m³/t，而在什卡波夫油田 Π_{IV} 层的原油中含气达 173m³/t 等。表 1-9 和表 1-10 为巴什基里亚、鞑靼泥盆系和石炭系某些油藏的溶解气组分。溶解气的基本组分是氮、甲烷、乙烷、丙烷、丁烷和少量较重烃类——戊烷和己烷（正构和异构）。在某些油藏溶解气中含有少量硫化氢和二氧化碳。伏尔加乌拉尔含油气区泥盆系和石炭系油藏地下原油中含有溶解的氮气。石炭系原油的特征是含有大量氮，在阿尔兰油田某些区块的溶解气中氮的体积含量达 50%。E. И. 苏汉金曾指出，杜玛兹油田泥盆系中靠近油水界面处地下原油含氮和甲烷的量减少。

所列举资料证实，如图 1-7，在原油中形成结构的组分——沥青质和胶质——含量沿地层走向是变化的，因此，在油藏的不同地区原油性质是非均质的。

表 1-8 原油中结构性组分含量

地区, 油田	地层 层组	沥青质 %	胶质 %	石蜡 %	地区, 油田	地层 层组	沥青质 %	胶质 %	石蜡 %		
泥盆系油藏原油											
巴 什 基 利 亚	杜玛兹油田	Π _{II}	2.5	14.2	5.5	尼古留道夫油田	Π _{IV}	1.0	15.0	6.2	
	杜玛兹油田	Π _I	3.8	8.8	5.3	切霍夫油田	Π _I	0.22	3.4	3.8	
	杜玛兹油田	Π _I	2.9	9.6	5.3	丘伯夫油田	Π _I	18.0	32.0	2.9	
	阿列克山德洛夫	Π _J	3.1	9.5	3.3	苹果谷油田	Π ₀	2.68	8.22	4.9	
	谢拉菲莫夫油田	Π _{IV}	7.0	6.9	5.0	罗马什金油田	巴什层	4.06	12.24	5.1	
	谢拉菲莫夫油田	Π _{III}	3.4	5.2	6.1	新叶尔绍夫油田	巴什层	4.5	10.68	4.08	
	谢拉菲莫夫油田	Π _I	3.5	8.0	5.6	巴夫雷油田	巴什层	3.8	7.25	3.8	
	列奥尼特油田	Π _{IV}	1.8	4.2	5.2	克雷姆莎拉依油田	巴什层	3.0	5.10	4.1	
	列奥尼特油田	Π _{III}	1.7	8.5	4.0	班鸠土油田	巴什层	2.7	5.50	4.5	
	列奥尼特油田	Π _{II}	3.5	10.8	4.1	耶拉布土油田	巴什层	3.9	13.20	4.0	
	列奥尼特油田	Π _I	3.7	7.1	5.2	五一油田	巴什层	5.8	10.00	4.16	
	康斯坦丁诺夫油田	Π _{IV}	2.0	5.9	5.6	努尔拉特油田	肯诺夫层	4.3	10.00	4.1	
	康斯坦丁诺夫油田	Π _{II}	2.8	5.2	4.8	乌里扬诺夫油田	肯诺夫层	5.3	8.12	4.3	
	康斯坦丁诺夫油田	Π _I	3.9	5.1	4.1	苏列也夫塔什里亚	肯诺夫层	5.0	8.7	4.1	
	斯达哈诺夫油田	Π _{IV}	1.0	5.0	5.9	切列姆山油田	巴什层	4.0	10.2	4.2	
	斯达哈诺夫油田	Π _I	5.8	7.4	4.3	苏林油田	巴什层	3.5	10.9	3.8	
	什卡波夫油田	Π _{IV}	0.87	7.43	5.1	苏林油田	吉维奇阶	2.5	7.7	7.4	
	什卡波夫油田	Π _I	4.4	7.9	3.9	马克思油田	肯诺夫层	5.0	9.8	4.1	
	切克玛古什油田	巴什层	6.6	11.7	4.5	谢列诺夫油田	肯诺夫层	4.7	9.5	4.6	
	切克玛古什油田	肯诺夫层	7.9	12.7	3.5	谢列布良纳克留切夫	肯诺夫层	4.6	7.8	3.6	
	奥列巴什油田	下法兰阶	0.7	10.7	5.2	阿沙里钦油田	肯诺夫层	9.4	—	3.0	
	库也金油田	巴什层	4.8	16.5	2.8	马卡洛夫油田	肯诺夫层	4.2	8.7	4.2	
	尤格马塞夫油田	巴什层	5.8	8.3	4.2	伊凡士根油田	肯诺夫层	5.0	10.4	4.3	
	古士古尔油田	下法兰阶	3.9	12.4	2.4	肯亚兹林油田	肯诺夫层	4.2	10.1	4.2	
	乌斯基伊凡诺夫	肯诺夫层	7.1	12.1	3.8	老卡契也夫油田	肯诺夫层	4.0	9.4	4.2	
	努尔斯油田	Π _I	9.4	14.6	3.1	沙拉乌什油田	肯诺夫层	4.0	11.3	4.2	
	古 比 雪 夫 州	巴林诺夫油田	Π _{III}	0.95	2.33	5.9	卡那特油田	穆林层	2.9	—	4.3
		德米特里也夫油田	Π _{II}	2.0	4.6	5.9	契尔卡斯油田	穆林层	3.5	8.0	4.0
日古列夫油田		—	1.75	11.5	3.8	伊里契夫油田	肯诺夫层	5.0	10.0	3.7	
灰谷油田		Π _I	0.54	4.38	4.6	奥切尔油田	肯诺夫层	2.6	11.8	3.8	