

1 石油地质动力学的概念及研究现状

石油地质动力学是法国石油地质学家 Perrodon, A. 1980 年在其专著《石油地质动力学》(Dynamics of oil and gas accumulation) 中首次提出, 并将这一概念应用于石油地质学理论中。石油地质动力学的本质特征是在现代地质理论和地球动力学基础上, 应用数学、物理学、化学和生物学等理论和方法, 借助先进的计算机和实验测试、模拟技术, 定量地研究沉积盆地或某一油气藏中油气生、运、储、聚及保存的机制和过程, 从而指导油气勘探开发工作。

随着石油勘探与开发研究工作的深入, 人们越来越清楚地认识到沉积盆地中油气生成、运移、聚集、保存和储层的演化等五大基本环节存在着密不可分的联系, 这个过程中任何一个环节出了问题都会影响到整个过程的动力学演化(孙永传, 1995)。从学科发展的角度上讲, 石油地质学已经经历了早期宏观、粗略认识阶段和中期各分支学科深入研究阶段, 现今已发展到综合研究的石油地质动力学时期。因此, 人们再也不认为“石油地质动力学”是一种赶时髦的命名了。

美国国家委员会在《固体地球科学与社会》概要和基本论点中明确指出, 研究地球一系列过程的一种新方法就是把地球看作是一个完整的动力系统, 而不是各部分彼此孤立的一种集合体。其中所列五大优先研究领域里有三项与石油地质动力学有关。为了实现油气领域的重大突破, 在 Roger. N. Anderson 领导下, 正在进行一项重大的石油地质基础理论研究——将沉积盆地看作一巨大的低温热化学反应器, 盆地中充填的沉积物(包括有机质)和流体, 在沉积、压实、热动力、构造和化学转化等诸多因素影响下, 达到有机质成熟、油气排出、运移和聚集的动力学过程。

从 20 世纪 80 年代起, 前苏联和俄罗斯石油地质学家就对构造动力在油气形成和聚集中的作用进行了较深入的分析, H·H·索洛维耶夫等(1984)认为, 强烈的构造挤压及其一系列伴生现象强化了生烃和成藏条件。B·A·西多洛夫等(1994)进一步指出, 油气藏的地质形成和分布规律问题, 是与油气勘探方法有关的现代地球动力的综合研究, 它是一个新的科研方向和学科。他进一步预言, 这门学科已经诞生, 它就是勘探地球动力学。

Magoon, L.B. (1992) 提出的含油气系统思想虽然正确地指出了要研究形成油气聚集所必须的地质要素及作用, 但这个“作用”实际上就是油气生成、运移、聚集的动力学过程和结果, 但如何去深入研究动力学过程和作用, 在文献中却缺乏必要的思路和方法。

虽然石油地质动力学已提出十几年了, 但从《石油地质动力学》专著来看, 其内涵比较单调。尽管石油地质学者早就把油气藏看成一个完整的动力系统, 而不是彼此孤立的一种集合体, 但由于数学参数及数学模型极难建立, 且准确性不够, 因此石油地质动力学还没有脱离动力术语和盆地分析相结合的框架。据文献检索, 国内外除有介绍研究思路的文章外, 至今尚无利用石油地质动力学理论研究一个完整油气藏的文章发表, 仅有针对个别过程研究的文章零星出现, 如: Anderson, R.N. 1992 《热化学反应的沉积盆地》, Wood,

D.C.、Hewett.T.A.1985 《流体力和成岩作用在孔隙性储层中的特殊控制作用》，中国地质大学孙永传教授 1995 年结合南海莺-琼盆地撰写的论文《热流体系统的成岩特征及其研究意义》最具代表性。而利用动力学模型进行盆地模拟的国内外文献多达 200 篇以上，其较早的代表作可以认为是 1978 年 Magara.K. 的《压力与流体运移》。

鉴于我国丰富多彩的含油气盆地和多类型油气藏，石油地质动力学在我国有着广阔的发展和前景。应用石油地质动力学系统，将油气藏形成的静态要素（烃源岩、储集层、盖层）和地质作用的动态过程（烃类的生成、运移、聚集、油气藏分布、储集空间的形成机制）及其时空匹配关系等各方面进行全面而系统的研究，认真解剖一典型油气藏，既为应用石油地质动力学理论研究油气藏提供模式，又为勘探和开发此类油气藏服务。

1.1 石油地质动力学体系的划分及研究方法

石油地质动力学体系的划分取决于石油地质本身的内在联系和人们的认识程度。鲍征宇（1994）认为地球科学的各个分支都有其动力学问题，并根据国内外地质过程动力学研究现状，将之归纳为地质流体动力学、地球化学动力学和地质体的弹塑性过程动力学等三大基本分支。作为地球科学一个分支的石油地质动力学体系的划分，目前尚无完整定型的体系，笔者认为目前尚需根据所研究对象和目标划分，在实践中进行发展和完善。

按孙永传（1995）的提法，现代石油地质动力学研究方法可分为盆地动力学——即盆地模拟（包括沉积史、构造发展史、热史等）、石油地质动力学（狭义）和地质作用过程动力学。并进一步按油气赋存的状态空间将石油地质动力学体系划分为三个层次。

第一层次为盆地动力学，包括构造动力学、定量动力地层学和古生物演化动力学，主要是研究沉积盆地的成因、无机-有机物质的性质及时空分布规律，对应含油省（或带）或含油气区，这个层次的研究决定了石油地质动力学研究的战略决策。

第二个层次叫石油地质动力学，主要研究烃源岩的生烃、烃类的运移、储集空间的变化、油气成藏和保存等一系列区域性相互耦合的过程，对应着油气藏的状态空间。

第三层次在石油地质动力学体系研究中最具有最丰富的内容，包括独立的干酪根降解机制，油气运移机制及相态、储集空间大小和非均质性，圈闭形态，要素和油藏保存的物理化学作用以及运聚动态平衡等一系列动力学过程，在生产中往往要落实到含油气层位。

石油地质动力学是运用系统论的方法，从盆地发育的动力学背景、构造、沉积动态演化与油气生成、聚集的动力学系统的角度，探寻油气聚集分布规律。因此，该系统的研究要从以下几个方面进行：

盆地演化的深部过程的动力学背景；

②研究对象的构造、沉积的演化特征和时空展布；

生、储、盖、运、圈、保等成藏条件和应力场、温度场等动力学背景；

进行油源对比追踪确定油气藏与油源层的关系，并综合上述资料分析石油地质动力学系统的成藏条件和成藏过程；

利用盆地模拟技术，恢复构造发育史、沉积史、热史、生烃史、流体压力演化史、排烃史、运聚史、储层形成发育史等。对研究对象的石油地质动力学系统的形成演化和油气的形成及分布规律进行分析，从而指出进一步勘探开发方向。

动力学理论分析、实验模拟和计算机模拟是三种石油地质动力学研究最基本的手段，本书所研究的对象在层次上属狭义的石油地质动力学。这一层次的研究以定性分析为主，定量的模型为辅，综合运用地质、地震、测井以及各种分析测试资料与盆地动态模拟技术相结合的方法，实现一应用石油地质动力学思想研究油气藏的实例。

1.2 变质岩基岩油藏研究概况及问题的提出

Landes 于 1960 年首先提出基岩油藏这一概念，他把不整合于年轻沉积盖层之下的褶皱变质和火成岩侵入的结晶基底称为基岩（Basement rock），把年轻沉积盖层中生成的石油运移至其下基岩中所形成的油藏称为基岩油藏。

沉积盖层的基底具有不同时代，它们可以是前寒武纪的、古生代（加里东期和海西期）的以及中生代的基岩，因此也可以按基岩时代划分为前寒武纪的、古生代的以及中生代的基岩。按 Landes（1960）的观点，基岩油藏的特点是：①石油储存于沉积盖层之下的结晶基岩中；②石油生成于年轻的沉积盖层中。

1980 年潘钟祥教授提出把年轻烃源岩系底部不整合面之下的下古生界和中新元古界碳酸盐岩和其他类型沉积岩中的油藏也算作基岩油藏。由于结合我国任丘油田石油地质情况，此种观点受到了广大石油地质工作者的认可（田在艺，1988）。更有人提出在不整合面之下的岩层，无论变质与否，均当作基岩等等。但是，许多石油地质学家认为还是要区分基岩油藏与沉积盖层中的油藏。陈发景教授 1985 年指出，基岩油藏首先应该强调的是基岩而不是其他条件；若基岩油藏与基底的高断块或隆起形成地貌山，后来被新地层覆盖成潜山，基岩油藏为基岩潜山油藏，储层为结晶基岩且地貌上为潜山或残丘；非潜山基岩油藏储层为结晶基岩但地貌上没有显示。笔者同意并采用这种分类方法，针对本书作为实例的研究对象——辽河盆地大民屯凹陷曹台变质岩地垒型高凝油藏，它应属高凝油变质岩基岩潜山油藏。

由于传统的石油地质学理论依据石油有机成因说，总是将目光盯在由沉积岩形成的圈闭和油气藏上，而没有有目的地去寻找和勘探盆地基底或基岩潜山油气藏，从而使得基岩油气藏或基岩潜山油气藏的发现极具偶然性。目前世界上已寻找到近百个不同岩性的基岩油气藏。单纯从变质基岩油藏来讲，国外比较著名的有委内瑞拉的拉帕斯-马拉（Paz-Mara）油田，美国加利福尼亚州的爱迪生（Edison）油田和惠明顿（Wilmington）油田，以及鲁斯、西利卡、伊夹利等油田，北非摩洛哥西北部有八个基岩油田，还有前苏联的沙依姆油田以及南斯拉夫和匈牙利境内也发现有变质岩作为储层的基岩油气藏。

早在 20 世纪 50 年代末，我国首先在酒泉盆地发现鸭儿峡油田，储层为加里东造山褶皱的志留系裂隙性变质岩，后又在准噶尔盆地克拉玛依-百口泉断裂带的前二叠系和二连盆地的海西褶皱造山变质基岩中，分别见到了油气聚集和油气显示。最著名的是下辽河盆地大民屯凹陷的太古宇变质岩基岩潜山油藏和东营凹陷北带陈家庄潜山带的王庄潜山油藏，在太古宇花岗片麻岩中获得油气高产。上述变质基岩油气藏的出现，开拓了一个寻找高产含油层系的新领域——即在盆地的褶皱基底中寻找高产油气藏。

通过多年的勘探实践，人们对变质岩油气藏有如下认识：

外部油源的存在是形成变质岩基岩油藏的基础。目前所发现的变质岩基岩油藏原油

性质和原油中的孢粉的属种表明，变质岩基岩油藏中的油气来自上覆年轻地层。

②变质岩具有聚集油气的能力。由于变质岩普遍受到风化作用和强烈的构造应力作用，发育次生裂缝和孔洞。

具储集性能的变质岩与四周非渗透性的岩层相匹配形成良好的圈闭；并且变质岩油藏按圈闭分类，可分为构造油藏、潜山油藏和推覆体油藏等三大类型。

变质岩基岩油藏的储层结构极为复杂，非均质性强，多为裂缝性储层，裂缝在纵向上成段，平面上成带分布。在含油范围内可打出干井，在变质岩体的浅部可出现干层而深部又可出现油层。因此，加强裂缝系统研究十分必要。

辽河盆地大民屯凹陷是下辽河拗陷三个主要生油凹陷中最小的一个凹陷，面积仅有 800 km²。早在 1973~1975 年间，在静安堡、曹台、法哈牛、韩三家子等构造上先后有 8 口井钻遇太古宇混合花岗岩，并见到油气显示；曹台潜山上的沈 41 井在花岗岩井段裸眼测试获油流，由于原油为高凝油，未能求得产量，但进一步证实了大民屯凹陷的太古宇混合花岗岩潜山是含油的。1975 年以后，受华北任丘潜山油藏勘探开发的启示，在对该凹陷进行多次覆盖地震技术工作后，于 1983 年在静安堡胜 3 井的太古宇混合花岗岩中测试获日产油 183 t，天然气 9964 m³，揭开了大民屯凹陷太古宇混合花岗岩潜山勘探的序幕。经过 10 多年的勘探，已发现 17 个潜山，有 15 个潜山发现油气显示，10 个潜山获工业油气流这些潜山中，储集岩除静北潜山为灰岩外，其他潜山的储集岩均为太古宇变质岩或浅变质的混合花岗岩。大民屯凹陷自 1983 年实现出油突破以来，已探明地质储量近 2 亿吨，已建成原油年生产能力 300 万吨的下辽河油田新的油气生产基地。

但是，由于大民屯凹陷发现的富含地蜡的高凝油分布和储量均占整个凹陷面积和总储量的一半以上，该种油地蜡含量极高，最高可达 35%，凝固点可达 60 以上。大民屯凹陷内变质岩潜山绝大多数埋藏较浅，油藏温度仅 40℃~50℃，高凝油多呈固态存储于变质岩基岩潜山油藏中，虽经蒸气吞吐及热电缆开采，由于高凝油在潜山油藏中分布的非均质性和裂缝发育及延伸方向不明，造成气窜严重，严重阻碍了此类基岩油藏的开发进展。

多年的勘探和开发实践表明，在没有搞清楚变质岩基岩储层特别是裂缝形成机制、发育部位及发育方向，高凝油在潜山中的富集部位，储集于何种储集空间的情况下，盲目进行开采开发是难以达到理想效果的。

针对上述复杂的变质岩潜山油藏的地质特征，以石油地质动力学为主线，紧密围绕认识变质岩基岩潜山内幕储层形成机制、发育分布以及油气形成及其聚集规律，采用比较成熟有效的模拟技术和新方法，对变质岩基岩潜山油藏烃源岩的油气生成、演化和运移、排烃史、变质岩潜山内幕裂缝系统分布及发育史、潜山圈闭构造发展史进行系统模拟研究，并确定油源、储层和圈闭间的时空匹配，从能量的角度探讨油藏的动力转化，实现变质岩基岩潜山油藏描述与评价的科学化和定量化，并突出其内在的石油地质动力学特征。

2 区域地质概况

下辽河拗陷是我国渤海湾含油气盆地的一个组成部分，该拗陷北、东、西三面环山，南面延入辽东湾水域，陆地部分面积 12400 km²。根据地质构造特点，下辽河拗陷陆上部分又可进一步划分为东部凹陷、西部凹陷、大民屯凹陷、沈北凹陷、东部凸起、中央凸起、西部凸起等次一级构造单元，其中位于下辽河拗陷东北部分的大民屯凹陷是一个“小而肥”的含油气凹陷；老第三系地层分布面积约 800 km²，其形状呈不对称三角形，南宽北窄，三边为断层所限，基底结构为北高南低、西缓东陡的箕状凹陷；沉积岩最大厚度约 7000m；凹陷内已发现太古宇、元古宇、老第三系沙四段、沙三段、沙一段等含油气层；是多种类型油气藏垂向重叠、平面上叠合成片的复式油气富集区。目前该凹陷已发现 17 个潜山，有 15 个潜山发现油气显示，10 个潜山获工业油气流。在这些潜山油藏中，除静北潜山油藏储集岩岩性为灰岩外，其他均为太古宇变质岩或浅变质的混合花岗岩。此外，大民屯凹陷中变质岩潜山油藏富含地蜡的高凝油储量占整个凹陷油气探明储量的一半，成为我国乃至世界上少有的原油品质特殊、储集岩与储集空间特殊、圈闭类型丰富的石油地质研究特区。本书的研究目标选择位于凹陷东北部的曹台高凝油变质岩潜山油藏。

2.1 大民屯凹陷的形成与演化

作为下辽河裂谷盆地的一部分，大民屯凹陷断裂十分发育，共有大小断层 69 条，其中主要断层 11 条，所属性质以早期发育的正断层为主，有逆断层 2 条，构造线方向以北东向为主，北西向次之，并发育少量东西方向。断裂活动是该凹陷的主要构造变动形式，构造演化的结果主要形成了“四隆三洼”的构造格局：从西到东有网户屯斜坡带、前进断背斜构造带、静安堡断鼻构造带、曹台-边台-法哈牛断阶带，从南到北有荣胜堡洼陷、安富屯洼陷及三台子洼陷（见图 2-1）。

大民屯凹陷东、西、南三面为断层所围限，是在太古宇花岗片麻岩、混合花岗岩和中新生元古界碳酸盐岩组成的前中生代基底古隆起背景上发育起来的一个中生代陆相小凹陷。太古宇在整个大民屯地区普遍经受了一次区域性变质作用，将基底原岩转变为变粒岩、片麻岩、片岩等区域性变质岩。在区域性变质岩形成后期，即太古宙晚期及早元古代，上述区域性变质岩遭受了强烈的混合岩化作用，其结果是太古宇基底岩石 85% 以上变为混合岩，而少量原区域性变质岩则呈孤岛状残留于混合岩之中。伴随强烈的断裂活动及岩浆活动，构造缝的切割，构造滑动，颗粒破碎，缝内长英质颗粒和泥质物质的充填，基岩破碎产生碎斑及碎裂结构，使基岩成分上、结构上、构造上都遭到破坏，形成动力变质岩。这些岩石构成了曹台潜山及整个大民屯地区基底岩石。该岩系与营口-丹东地区鞍山群下部通什村组相似，构造位置位于营口-丹东由鞍山群组成的古老隆起带的复式向斜带上。

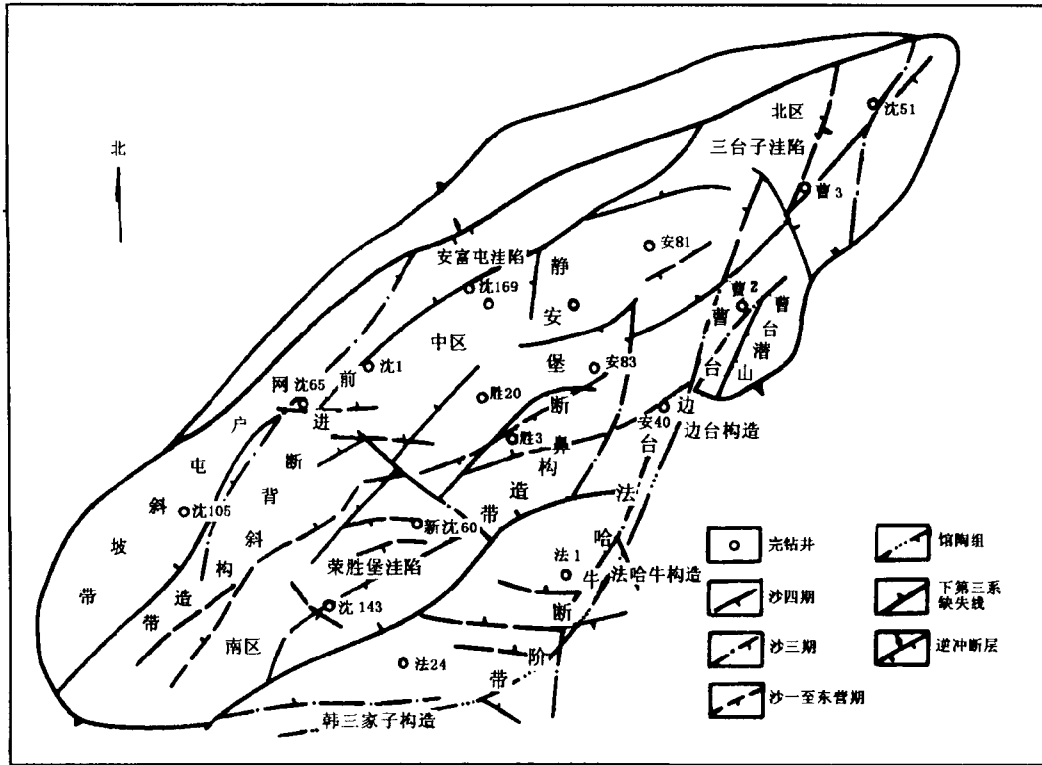


图 2-1 大民屯凹陷构造纲要分区图

经过早元古代剥蚀之后，中晚元古代大民屯地区北部居于华北海，在静北地区沉积一套碎屑物质较多的含碳酸盐岩沉积，元古宙以后直至燕山运动末期新生界沉积之前大民屯地区一直处于上升剥蚀状态，遭受强烈剥蚀。

燕山运动末期，随着上地幔的隆起，大民屯地区进入了拱张期，老边-前当堡及三台子-东胜堡断层开始活动，沿断层堆积了厚度小但变化大的杂色砾岩。

在古新世的沙四初期，大民屯地区继承了中生代构造格局，上述两条北东向断裂继续活动，沿断层喷发大量基性岩浆，使大民屯大部分地区为玄武岩所覆盖，由于基底起伏不平，各地玄武岩厚度相差较大，地势低处玄武岩厚度大，高处则厚度小，过高的地区则没有玄武岩；玄武岩的喷发大致可分为两期，其间喷发间歇期形成砂砾岩、粉砂岩、灰色泥岩及含煤沉积的堆积，岩浆活动之后，又形成紫红色泥岩、凝灰质砾岩沉积。这一时期大民屯地区以拱张作用为主。在此基础上，大民屯地区进入了裂陷体系发育过程。

经过沙四期短暂上升之后，边台-韩三家子断裂开始活动，大民屯地区整体稳定下陷，湖盆开始形成并逐步扩大，湖泊岸线不断向外推移，但因早期地形高差悬殊，除东胜堡胜11井附近地区外，其余地区普遍下降，成一浅湖环境接受沉积。早期湖水宁静，有利于生物生存与繁殖，有机物质丰富，广泛形成一套褐色油页岩、褐灰色泥岩等湖相烃源岩，暗色泥岩一般厚度 500 ~ 700 m，在荣胜堡洼陷厚达千米。

沙四期断层活动十分活跃，主干断层以近于北东向分布为主，断陷较大，且呈带状分

布为裂谷型断裂系，它们奠定了大民屯凹陷构造分布的格局，并形成潜山带，伴随整体下沉，水域逐步扩大，水体逐渐淹没古老的基岩潜山。

渐新世，进入了强烈断陷阶段，早期（沙三期）除上述北东向断裂继续活动外，同时北西向的南界断裂开始活动，使断陷向东南方向加剧；中期（沙一期）由强烈断陷转为开始回升，特别是南部，发展为湖湾沼泽相沉积；晚期（东营期）整个断陷进入衰亡期，除局部地区（如韩三家子地区）下降较强烈外，其他地区上升回返，上部地层受剥蚀，断陷阶段结束，进入晚第三纪河流平原相拗陷沉积时期。

由上述可以得出，大民屯凹陷沉积盖层除西侧断槽及北部三台子局部地区有残存的中生代红色砂砾岩分布外，主要是老第三系沙河街组沙四段、沙三段、沙一段、东营组和新第三系馆陶组及第四系地层。岩性除沙四段上部大部分地区为大段厚层暗色泥岩外，其余层段均以砂砾岩、砂岩、泥岩互层为主，局部地区有玄武岩、炭质页岩及油页岩分布。

2.2 曹台变质岩潜山的地质背景

2.2.1 构造特征

曹台潜山位于大民屯凹陷东北部，东接大民屯凹陷东界断层，西与边台潜山相邻，为一北北东向延伸、四周为断层所封闭的后期受挤压向上抬升的地垒式潜山。潜山南北长 6.3 km，东西最宽处 4 km，面积 6.2 km²（见图 2-2）。储集岩为太古宇变质岩，是典型的基岩潜山油藏。

潜山表现为南高北低，由北向南倾斜，最高点位于南部的曹 22 井附近，潜山面埋深仅 -400 m 左右，往北部有两个高点，北部高点位于曹 2 井附近，潜山面埋深为 -663.5 m 中部高点在沈 47 井附近，潜山面埋深 -685.5 m，潜山面最低位于北部曹 20 井附近，其埋深超过 -1442 m。

潜山由太古宇古老变质岩组成，基岩受断层控制，潜山西侧为一北东向逆断层，断层落差达 500 m，延伸长度超过 6 km；东部为一北东向正断层，落差达 300 m，延伸长度超过 6.5 km，两断层交汇抬升，形成地垒式断块潜山。

曹台潜山断层比较发育，并发育有 12 条断层，其中包括 7 条北北东向延伸的断层、1 条东西向延伸的断层和 4 条南北向延伸的断层（见图 2-3 和断层要素表（表 2-1））。这 12 条断层的倾斜角均在 60°~70°之间，断距和延伸长度差距大。断距最大为潜山西侧边界逆断层，可达 700 m，延伸长度为 6.5 km；潜山东侧边界正断层断距大于 500 m，延伸长度为 6.7 km，断距最小为潜山中部的走向东西向的 F₁₀ 正断层，断距仅 50 m，延伸长度最小的为潜山南部 F₁₂ 正断层，长度仅 0.3 km。

曹台潜山西侧的 F₁ 逆断层和东侧的 F₂ 正断层为 I 级断层，北北东走向呈波状，倾向南东，属挤压型，断距大，延伸长，断裂深，造成曹台潜山整体呈向西倾斜凸起的长条状高垒形态。北北东走向、北西倾向呈弯弓状的 F₃ 正断层、F₄ 逆断层、F₅ 逆断层，均属 II 级断层，挤压型。上述断层均以挤压应力所产生的高倾角逆断层为主，并伴生有高倾角正断层，形态波状弯曲或弯弓形，为典型挤压性断裂特征。此外，其他各断层均属剪切型应

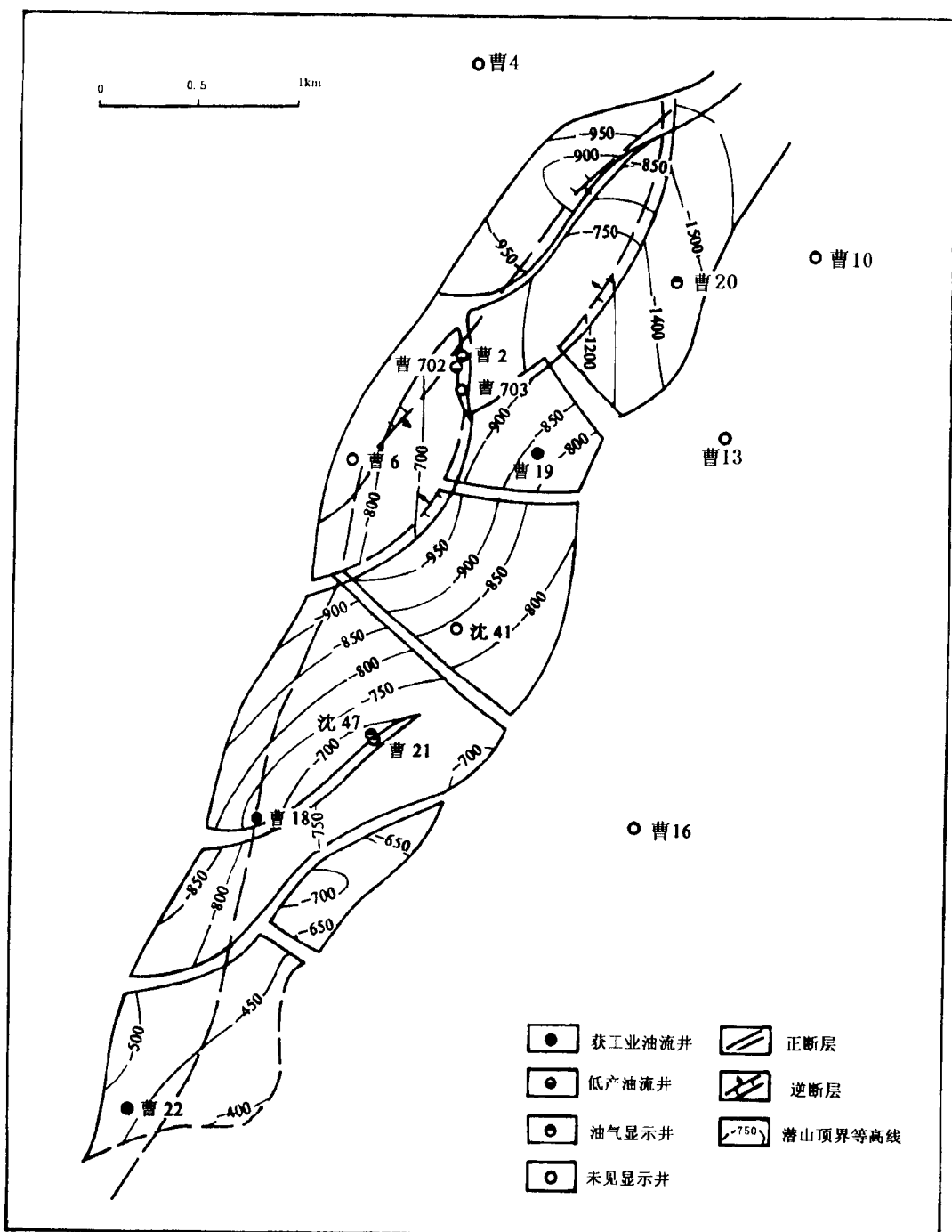


图 2-2 曹台基岩潜山顶面构造图

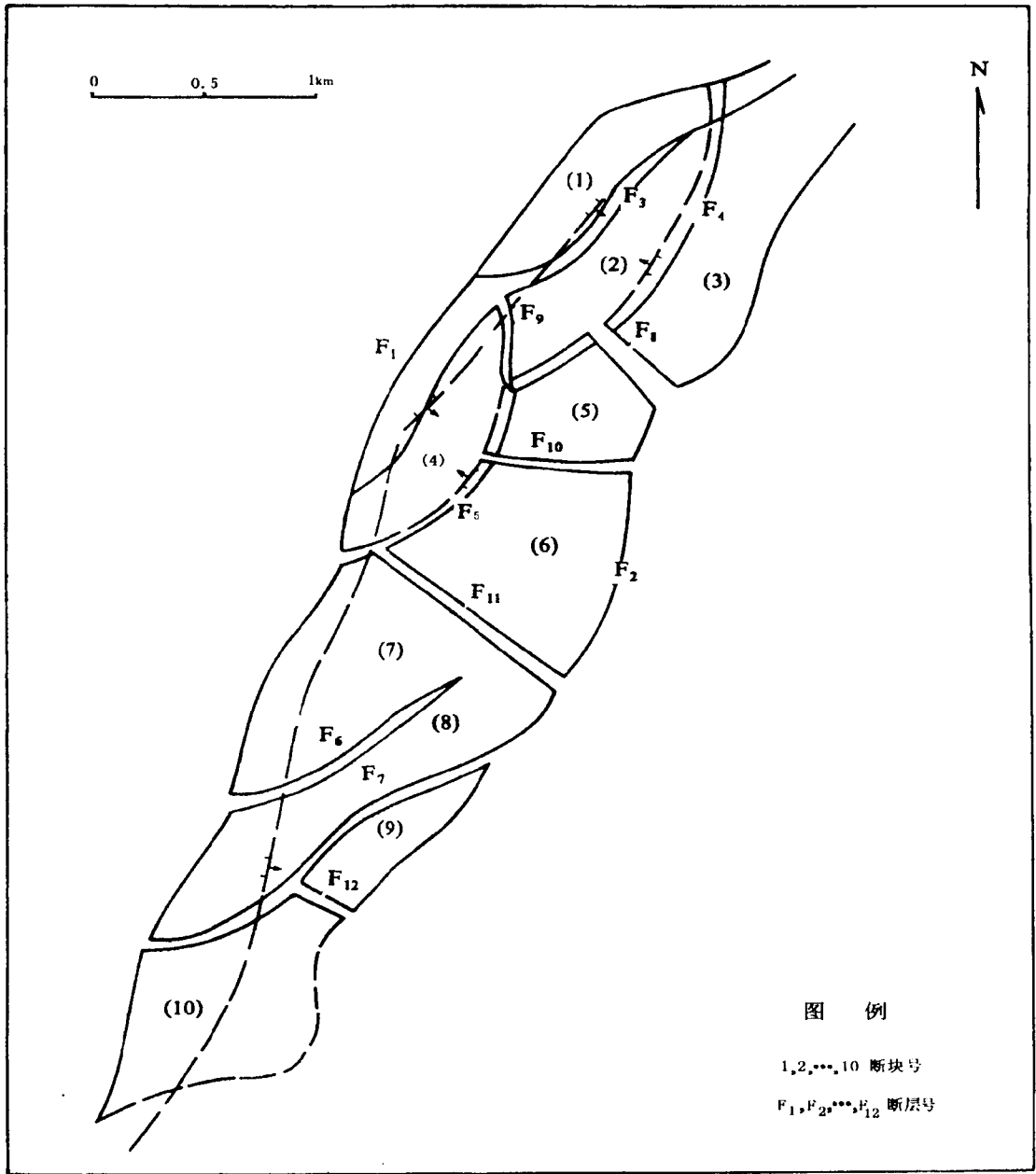


图 2-3 曹台潜山断块及断层位置图
部分图例见图 2-2

力条件下形成的正断层，除 F₈ 外，断层断距都较小，延伸也不大。F₃ ~ F₁₂ 断层发育在潜山内部，把曹台潜山横向上分割成三个山头，即曹 22 山头、曹 21 山头和曹 2 山头，断层相互交割，进一步把潜山分成 10 个断块，造成潜山顶面构造的复杂化。

表 2-1 曹台潜山断层要素表

断层 编号	断层名称	断层产状			断距 m	延伸 长度 km	断层 性质	力学 性质	断层 级别	备 注
		走向	倾向	倾角						
F ₁	曹 6 西断层	NNE	ES	60° ~ 80°	100 ~ 700	6.5	逆	挤压	I	过曹 6 井, 波状
F ₂	曹 19 东断层	NNE	ES	70° ~ 80°	> 500	6.7	正	挤压	I	曹 13 井钻遇 Ar, 无法确 定断距
F ₃	曹 2 北断层	NNE	NW	60° ~ 85°	100 ~ 250	1.8	正	挤压	II	弯弓形
F ₄	曹 703 断层	NNE	NW	75° ~ 85°	100 ~ 550	1.9	逆	挤压	II	弯弓形
F ₅	曹 6 东断层	NNE	NWW	60° ~ 80°	100 ~ 250	1.4	逆	挤压	II	过曹 703 井, 弯弓形
F ₆	曹 18 南断层	NE	SE	65°	80	0.8	正	剪切	II	弯弓形
F ₇	曹 22 北断层	NEE	NNW	80° ~ 85°	50 ~ 150	1.2	正	剪切	II	
F ₈	曹 19 北断层	SE	NE	80° ~ 85°	400 ~ 450	0.5	正	剪切	II	
F ₉	曹 2 断层	NNW	NE	65°	100 ~ 150	0.4	正	剪切	III	过曹 2 井
F ₁₀	曹 19 南断层	EW	S	70°	50	0.7	正	剪切	II	
F ₁₁	沈 41 南断层	NW	NE	70°	100 ~ 500	1.1	正	剪切	II	
F ₁₂	曹 22 北东断层	NW	NE	60°	200	0.3	正	剪切	III	

2.2.2 岩性特征

曹台潜山同大民屯其他基岩潜山的岩性一样, 是由太古宇结晶基底在经历了拉张、挤压等长时期的地质动力作用后, 演变成多种变质岩组成的潜山。

通过岩心、岩屑录井等资料研究, 变质岩潜山的主要岩石类型有: 变质岩类的片麻岩和片岩类, 超变质岩类的混合岩化片麻岩类、条带混合岩、角砾状混合岩、混合花岗岩, 碎裂变质岩类, 岩浆岩类主要是晚期侵入的玄武岩、橄榄玄武岩、辉绿岩及煌斑岩。

(1) 片麻岩、片岩、混合岩化片麻岩类

片麻岩类岩石主要有: 黑云母斜长片麻岩、黑云母二长片麻岩、角闪黑云二长片麻岩, 片岩类主要有黑云母片岩。混合岩化片麻岩类包括: 混合岩化黑云母二长片麻岩、混合岩化二长片麻岩等。

混合岩化片麻岩属超变质岩(区域变质岩)。它是由片麻岩经过混合岩化作用而形成的岩石。其成分和片麻岩几乎一致, 均以长石、石英为主, 另有一定数量的黑云母及少量的白云母、绿帘石、绿泥石、磁铁矿及方解石组成。石英、长石的含量大于 50%, 且长石多于石英。长石中有斜长石和钾长石, 大多蚀变深, 石英具有波形消光, 黑云母绿泥石化, 粒间多呈镶嵌接触。

黑云母片岩为深灰色块状, 成分以黑云母为主, 石英、长石次之, 另见方解石局部充填。黑云母大多绿泥石化, 片岩属区域变质岩, 大多作为混合岩化作用的基体或残留体存在。

曹台变质岩潜山油藏中, 片麻岩主要见于曹 6 井、曹 18 井、曹 20 井、曹 21 井、曹 22 井和曹 702 井的局部井段。片麻岩属区域变质岩, 是曹台变质岩基岩最古老的岩石, 最为常见。混合岩化片麻岩类见于曹 20 井、曹 21 井、曹 6 井、曹 702 井, 而片岩类仅出

现在曹 19 井 1787.0 m 井段附近。

(2) 条带状和角砾状混合岩类

包括条带状二长混合岩、条带状混合岩以及角砾状混合岩，主要矿物成分长石、石英和云母，其次为白云母、绿泥石、方解石和绿帘石。石英具波状消光，长石为斜长石及钾长石，蚀变深或中等，黑云母大多绿泥石化，条带状二长混合岩和条带状混合岩在扫描电镜下可见较多变晶矿物晶间缝和变晶矿物蚀变形成的微孔，角砾状混合岩局部破碎成大小不等的碎屑，碎屑间由细碎屑、泥质和方解石充填。

在曹台变质岩基岩中，条带状混合岩出现在曹 5 井和曹 19 井；角砾状混合岩，仅出现在曹 6 井 1489.7 m 井段附近。

(3) 碎裂（动力）变质岩类

主要岩石类型有：碎裂黑云母斜长片麻岩、碎裂混合化二长片麻岩、碎裂混合化角闪黑云二长片麻岩、碎裂-混合花岗岩、碎斑岩、糜棱岩等。

此类岩石的特点是岩石不同程度地保留了原岩成分的特征，但原岩受动力作用发生碎裂，碎裂的碎屑有的未位移或位移的规模较小，有的经受较强的应力产生较大的位移；碎屑被压成大小不等的碎块或粉末，甚至强烈破碎而成糜棱岩。岩石具有碎裂、碎斑结构和糜棱结构。原岩破碎的碎屑多为石英、长石以及长石和石英的复合体，具不规则的边缘，长石双晶具扭曲变形，双晶面错位变形，石英具波形消光。常见构造缝网状切割颗粒形成错动，局部粉末状，缝内为细碎屑、基质充填，有的为方解石充填，碎斑与碎基之间可见长英质脉体注入。扫描电镜下可见变晶矿物的晶间孔及微缝，孔径 $0.5 \sim 40 \mu\text{m}$ ，缝宽 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 。

在曹台变质岩潜山油藏除曹 19 井外，其他各井均可见到碎裂变质岩类。

(4) 岩浆岩类

在大民屯凹陷，岩浆岩类主要是中生代至早第三纪早期的喷发熔岩和侵入变质岩中的浅成岩和脉岩，在曹台变质岩潜山可见到下列类型。

玄武岩，主要矿物为斜长石、辉石。斜长石为板条状，形成近三角格架，双晶纹发育，辉石大都已绿泥石化、伊利石化或为方解石交代，岩石具间粒结构、块状构造，属基质喷发岩。见于曹 702 井。

②橄榄玄武岩，为深灰、杂褐色，致密块状。全岩蚀变深，斑晶为橄榄石，基质中见斜长石、辉石、磁铁矿及玻璃质。橄榄石已绿泥石化、伊利石化，斜长石已绢云母化，辉石绿泥石化，玻璃质已分解去玻化，见斑状结构。基质具玻晶交织结构，杏仁构造，杏仁孔内充填物由孔壁向外为方解石—绿泥石—方解石。出现于曹 2 井。

煌斑岩，岩石为闪长煌斑岩，其主要矿物成分为黑云母、斜长石、角闪石，另有少量辉石、绿泥石及磁铁矿，全岩蚀变深，有些矿物为方解石交代，辉石、角闪石大部分绿泥石化，斜长石蚀变深，具煌斑结构，块状构造，见于曹 18 井。

辉绿岩，多呈脉体出现，矿物成分由斜长石、蚀变绿泥石及磁铁矿组成。斜长石为基性，自形-半自形晶，其形成的三角形孔中分布暗色矿物及磁铁矿。暗色矿物已转化为绿泥石或被方解石交代，在曹 18 井中累计厚度在 100 m 以上。

2.3 本章小结

大民屯凹陷太古宇结晶基底作为下辽河裂谷盆地基底的一部分，经历了不同的地壳运动，在拉张、挤压、火山岩喷出等地质动力作用下，发生强烈的断块活动，引起基底的差异陷落和抬升，并经历了长期的风化、淋滤和剥蚀，后在老第三系沉积盖层的掩盖下，形成大小不一、为数众多、具有储集性能的变质岩潜山。

据岩心描述，变质岩潜山油藏的岩性主要有：①片麻岩和片岩的变质岩类（混合岩化片麻岩，条带混合岩、角砾状混合岩、混合花岗岩等超变质岩类）；碎裂变质岩类；橄榄玄武岩、煌斑岩、辉绿岩等岩浆岩类。

3 基岩潜山油藏的烃源岩动力学特征

油源是成藏的基础也是石油地质动力学研究的主要内容之一，早在 1964 年 Habicht 在鉴定 Cifhom 海槽的有效源岩时就指出了石油生成的动力学的重要性，并且 Tissot (1969) 和 Lopatin (1971) 分别从干酪根热降解和煤化的镜质体反射率方面分别提出了石油生成的动力学模式。但由于古地温、剥蚀厚度、岩石单元的年龄等的不确定性，人们开始在建立成烃动力学模式中运用了最新的实验和模拟手段，例如，镜质体反射率 (R_0)、磷灰石裂变径迹、黏土矿物等古温标的定量动力学模型的建立及 $TTI-R_0$ 相关拟合模拟源岩成熟度史及成烃史，使得烃源岩的动力学研究从定性分析阶段开始走上半定量、定量阶段 (胡圣标, 1995)。变质岩基岩油藏本身不具生烃能力，是典型的“新生古储”型油气藏。其油源主要来自基岩油藏顶不整合面之上的较新地层或相邻凹陷 (洼陷) 中年轻地层中的烃源岩中因此，在变质岩基岩油藏烃源特征研究中以基岩油藏储层中油的特征研究入手，通过油源对比，追踪源岩，进而利用动力学模型模拟研究其主生油期及成烃史。

3.1 基岩油藏的原油性质及油源

3.1.1 高凝油的性质及成因分析

大民屯凹陷中高凝油分布面积占目前整个凹陷含油面积的 60.4%，储量占已探明储量的 77.6%。过去人们对高凝油的成因、演化、母质来源等争论较大，甚至有人将在大民屯凹陷发现的高凝油和在辽河东、西部凹陷发现的稠油混为一谈。因此，搞清楚高凝油的烃源岩特征具有十分重要的意义。本书采用“生物标志化合物”及各类地化分析资料分析高凝油的成因、演化及母质来源。

(1) 原油性质

从曹台变质岩潜山油藏所获得各井原油的物性分析显示 (表 3-1)，原油含蜡量高达 27.5% ~ 36.17%，平均 30.3%，高于大民屯凹陷原油平均含蜡量 (23.5%)；凝固点高达 41.5℃ ~ 52℃，平均 46.4℃，也高于大民屯凹陷原油平均凝固点 (33℃)。因此，曹台变质岩基岩油藏原油是典型的高含蜡、高凝固点的高凝油，原油密度多在 0.8452 ~ 0.8836 之间变化，仅在沈 47 井处有明显增高，达 0.9251。

族组分特征

通过原油及含油岩心族组分分析 (表 3-2)，显示出原油具有高饱和烃 (53.75% ~ 76.98%，平均 69.22%)，高饱 / 芳比 (2.75 ~ 7.26，平均 5.66)，低沥青质 (0.64 ~ 2.92，平均 1.64) 的组成特征，这与大民屯凹陷其他地区高凝油族组份相似。

饱和烃的色谱特征

高凝油的饱和烃色谱图属于后峰型 (见图 3-1)，其特点是：

表 3-1 曹台基岩油藏原油物理性质

井号	井深 m	密度 g/cm ³	粘度 (100℃) mPa·s	含蜡量 %	凝固点 ℃
沈 41 井	842.1 ~ 1200	0.8836	8.8	36.43	41.5
沈 47 井	687.8 ~ 920.0	0.9251	71.81		32.0
曹 2 井	1420 ~ 1811.29	0.8616	9.73	30.6	47.0
曹 2 井	1736.2 ~ 2120.6	0.8621	9.05	36.17	46.0
曹 6 井	1388 ~ 1400	0.8452	(50℃) 23.31	27.5	45.0
曹 6 井	1411 ~ 1475	0.8521	(50℃) 58.86	34.68	44.0
曹 18 井	1503 ~ 1570	0.8641	(50℃) 86.93	33.11	47.0
曹 18 井	1397 ~ 1448	0.8577	(50℃) 40.81	34.31	46.0
曹 18 井	1817 ~ 1891	0.8577	(50℃) 79.07	32.38	48.0
曹 19 井	1453 ~ 1492	0.8646	(50℃) 111.48	32.96	46.0
曹 19 井	1539 ~ 1603	0.8586	15.26	29.31	45.0
大民屯		0.86 ~ 0.92		25 ~ 56.7	40 ~ 65

(据辽河油田勘探开发研究院, 1994)

表 3-2 曹台基岩油藏岩心油样原油组分特征

井号	深度 m	w (饱和烃) %	w (芳烃) %	w (非烃) %	w (沥青质) %	饱/芳
曹 702	673.6	75.06	12.35	13.75	1.86	6.07
曹 702	1000.2	72.66	12.15	14.72	2.34	5.98
曹 702	1020.95	72.34	11.82	13.43	1.60	6.12
曹 6	1388 ~ 1400	70.76	11.44	10.59	0.64	6.19
曹 6	916.3	76.98	1.74	11.96	0.68	6.56
曹 6	1459	74.58	12.50	13.35	0.64	5.97
曹 6	1500.3	74.95	11.55	13.29	0.65	6.49
曹 18	1397 ~ 1488	68.28	10.57	10.57	1.10	6.46
曹 18	727.9	66.95	12.34	15.69	1.05	5.42
曹 18	1681	72.16	9.94	14.77	1.42	7.26
曹 22	1165	53.75	19.58	25.83	2.92	2.75
曹 22	1211	58.03	17.66	18.12	2.29	3.29
曹 20	1453	70.64	11.34	15.99	2.33	6.23
曹 20	1479.1	67.03	12.53	14.07	2.20	5.35
曹 20	1493.6	67.87	12.34	14.65	1.80	5.50
曹 19	1788.8	65.45	13.35	18.18	2.73	4.90

(据辽河油田勘探开发研究院, 1995)

A. 正构烷烃含量占绝对优势 (>95%)。环烷烃及异构烷烃很少 (见表 3-3), 高碳数烷烃含量相对较多, 主峰碳数均为 nC_{27} , OEP 值在 1.01 ~ 1.12 左右, 显示奇偶优势已不明显; 且其轻重比值较低, nC_{21}^-/nC_{21}^+ 值普遍小于 1 (0.25 ~ 0.56), 这些都说明成油母质中植物蜡占了很大比例。

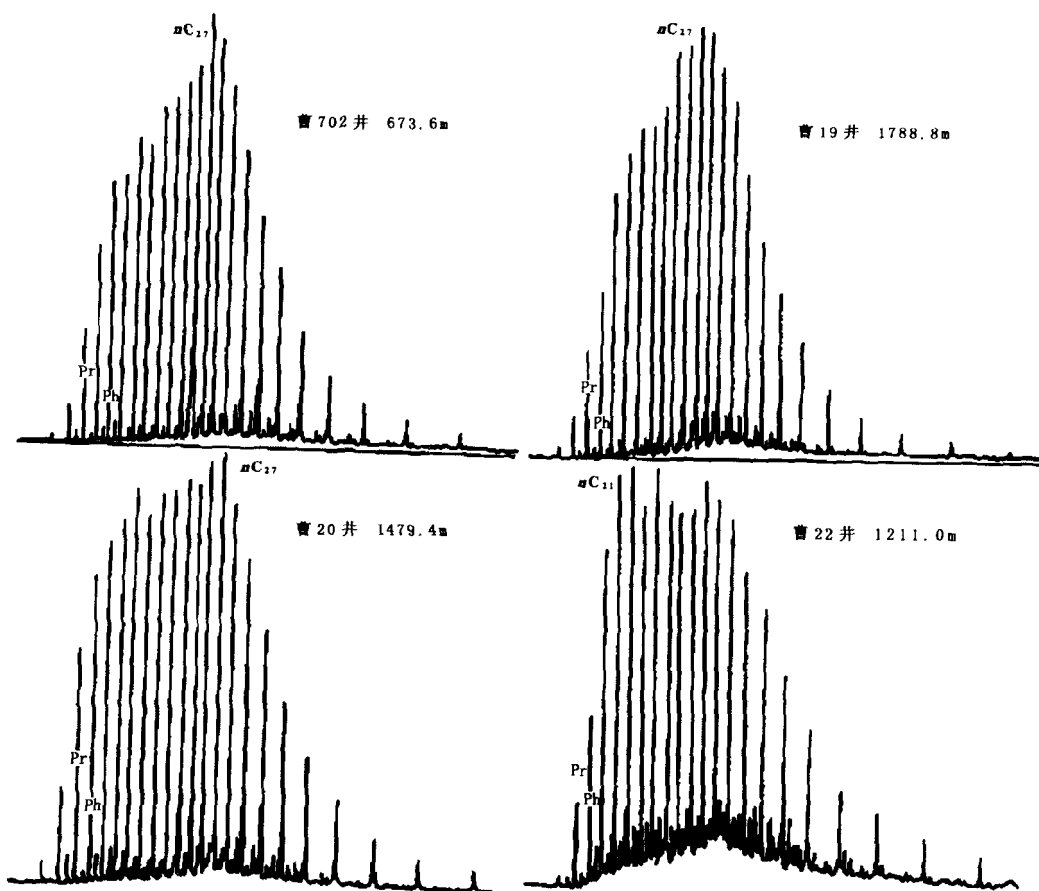


图 3-1 曹台潜山油藏原油饱和烃组成图

表 3-3 曹台基岩油藏及相邻洼陷中的边台基岩油藏原油及抽提物饱和烃组成特征

井号	曹 6	曹 6	曹 18	曹 18	曹 20	曹 702	曹 702	曹 19	曹 22	安 36	安 88
深度/m	916.3	1459	727.9	1681	1479	673.1	1021	1788.8	1211	1819	2684
碳数范围	$nC_{14}-37$	$nC_{14}-37$	$nC_{14}-37$	$nC_{14}-37$	$nC_{15}-37$	$nC_{15}-37$	$nC_{15}-37$	$nC_{15}-37$	$nC_{15}-37$	$nC_{14}-37$	$nC_{14}-37$
主峰碳	C_{27}	C_{27}	C_{27}	C_{27}	C_{28}	C_{27}	C_{27}	C_{27}	C_{21}	C_{27}	C_{27}
nC_{21}/nC_{27}	0.29	0.24	0.25	0.25	0.42	0.31	0.39	0.32	0.46	0.22	0.24
nC_{21+22}/nC_{28+29}	0.76	0.81	0.85	0.91	0.96	0.81	0.89	0.93	1.05	0.77	0.75
OEP	1.10	1.12	1.11	1.11	1.03	1.05	1.07	1.01	1.03	1.02	1.01
P_r/P_h	1.96	1.93	1.56	2.03	1.67	1.43	1.85	1.40	1.44	1.42	1.90
P_r/nC_{17}	0.39	0.4	0.50	0.47	0.48	0.49	0.44	0.36	0.94	0.48	0.73
P_h/nC_{18}	0.14	0.13	0.20	0.13	0.22	0.20	0.18	0.16	0.51	0.17	0.20

注：曹台基岩油藏各井均为高凝油样品，边台基岩油藏各井均为太古宇岩心抽提样。

B. 异戊二烯类烷烃组成中，姥鲛烷占优势，姥 / 植比值在 1.4 ~ 2.42 左右，但异正比值较低，姥 / nC_{17} 和植 / nC_{18} 的值均小于 0.5，显示了原油具有较高成熟度，但也显示姥鲛烷和植烷在热演化过程中稳定性较差。

饱和烃中甾萜类生物标志化合物

原油饱和烃的色谱-质谱分析表明（表 3-4），高凝油的甾烷和萜烷系列化合物的含量是较低的（<1%），其中又以甾类更少，相应萜 / 甾相对含量比值可达 20.49 ~ 97.17，显示了陆源有机质的贡献。

表 3-4 曹台潜山及相邻洼陷中的边台潜山基岩油藏原油及抽提物饱和烃组成特征

井号 项目	曹 6		曹 18		曹 20	曹 702		曹 19	曹 22	安 36	安 88
深度 / m	916.3	1459	727.9	1681	1479	673.1	1021	1788.8	1211	1819	2684
$\frac{C_{30\alpha\beta}}{C_{30\beta}}$	6.06	7.38	5.59	5.79	7.58	7.6	7.05	5.63	6.41	3.43	4.39
$C_{31} \frac{S}{R}$	1.43	1.39	1.48	1.40	1.72	1.8	1.61	1.35	1.53	1.25	1.38
$\frac{T_m}{T_s}$	1.40	1.11	1.40	1.40	1.36	1.19	1.00	1.49	1.29	1.26	1.03
奥利烷 $C_{30\alpha\beta}$	0.076	0.004	0.086	0.084	0.13	0.14	0.08	0.09	0.16	0.05	0.13
伽玛蜡烷 $C_{30\alpha\beta}$	0.055	0.049	0.055	0.079	0.07	0.05	0.05	0.08	0.05	0.15	0.06
甾烷 $\frac{C_{27}}{C_{29}}$	0.74	0.48	0.50	0.45					0.69	0.30	0.66
甾烷 $\frac{C_{28}}{C_{29}}$	0.57	0.52	0.43	0.44					0.55	0.31	0.44
$C_{29} \frac{S}{S+R}$	0.65	0.54	0.56	0.47					0.45	0.52	0.61
$\frac{\beta C_{29}}{\sum C_{29}}$	0.40	0.43	0.37	0.37					0.40	0.29	0.26
萜类 甾类	33.47	35.96	24.35	20.49	75.75	69.43	97.2	56.8	44.07		

注：曹台基岩油藏各井为高凝油样，边台各井为太古宇岩心抽提物。

A. 从萜烷 $m/z191$ 质量色谱图（图 3-2）可看出，反映陆源其他类型的生物特征的化合物三环二萜烷、奥利烷的峰都很明显，伽玛蜡烷仅少量出现，明显有别于其他类型的正常原油。

B. 甾烷特征中（图 3-3），除规则甾烷外，重排甾烷和 4-甲基甾烷含量较丰富，甾烷的先体-甾族化合物主要是甾醇。浮游生物，特别是水生动物常以 C_{27} 为主，而陆生植物则以 C_{29} 为主。曹台高凝油继承了生物先体的特征，在甾烷 $\alpha\alpha\alpha$ -20RC₂₇、 C_{28} 、 C_{29} 相对百分含量三角图上（见图 3-4），高凝油分布在 C_{28} 含量大于 23% 的区间内，其 C_{29} 含量大于 40%， C_{27} 含量却小于 45%，显然它们来源于以陆生植物为主的生物碎屑。

C. 从 R-S 构型转化来看，甾萜类异构化程度较高，在萜烷系列中，R 构型向 S 构型转化较快，其 C_{22} 的 $22S/22(S+R)$ 值都大于 0.55，达到了构型转化的平衡；在甾烷系列

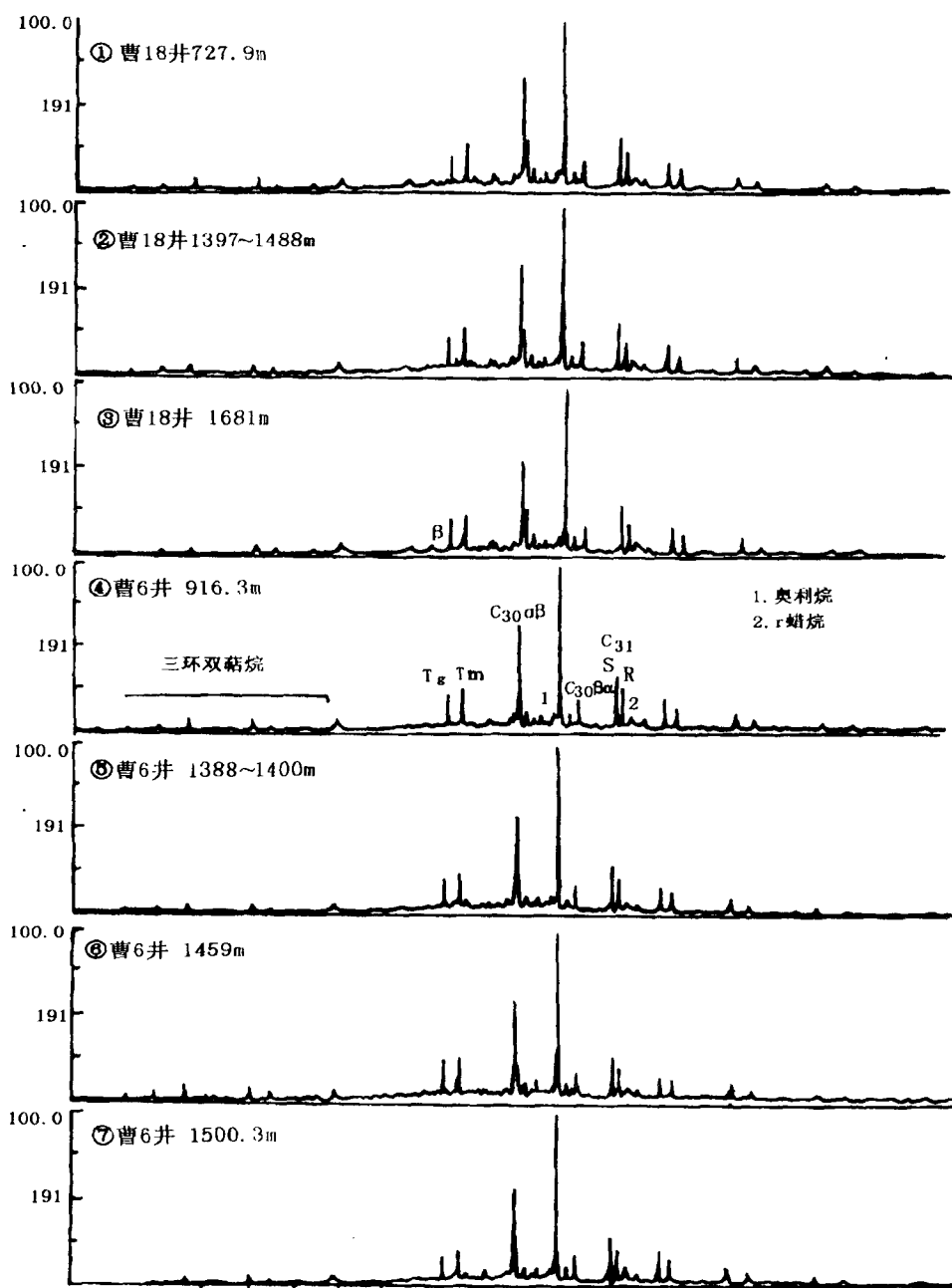


图 3-2 曹台潜山油藏原油萜烷分布 (191 m/z)

中，R 构型向 S 构型转化较慢，其中 ω_{29} 甾烷，29S/29 (S + R) 值已达 0.46 ~ 0.65，平均 0.55，说明其构型转化已接近或达到异构化终点，充分说明原油成熟度较高。

此外，根据许杏娟 (1987) 分析大民屯高凝油中碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 - 25.84‰ ~ - 26.48‰，钒含量甚微，镍含量较高，为 15.9 $\mu\text{g/g}$ ，均显示出陆相成因原油的特点。