

陆相有机质演化和成烃机理

黄第雁 李晋超 周露虹 顾信章 张大江等

石油工业出版社



陆相有机质演化和成烃机理

黄第藩 李晋超 周翥虹 顾信章 张大江 著

S477/06

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是对陆相有机质演化和成烃机理这个陆相生油的核心问题进行论述的专著。它以多种现代化实验分析技术所取得的大量资料为基础,结合模拟实验,从分子及结构的水平上,总结了近几年来我国在有机地球化学上的研究成果。

书中介绍了:有机质类型的多样性,典型的藻腐泥型干酪根,新的干酪根分类图解,陆相有机质成油演化剖面,演化阶段,成烃演化模式,陆相成油母质的来源和构成,来自生物激素的孕甾烷和来自松香酸的完整的三环萜类,重要的主成油门限的概念,成烃机理,生油量计算的选值原则和公式等等。

本书可供科研、教育、生产部门的石油地质、石油地球化学工程技术人员、院校师生阅读。

陆相有机质演化和成烃机理

黄第藩 李晋超 周燾虹 顾信章 张大江 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

地质出版社印刷厂排版

通县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 14³/₄印张 4插页 352千字 印1—2,000

1984年4月北京第1版 1984年4月北京第1次印刷

书号: 15037·2460 精装定价: 2.60元

前 言

目前,我国仍然是一个以陆相油气资源开发为主的国家,并形成了一亿吨的原油年生产能力。在国外,值得注意的陆相油气田,也不乏其例。因此,长期以来陆相石油生成这一重要课题,一直为人们特别是我国石油地质工作者和石油地球化学工作者所关注。近几年来,我国学者应用各种新的技术手段,从石油地球化学的角度进行了大量的相当深入的工作,提供了一系列科学的证据,对陆相生油问题,作出了肯定的结论^[1-12]。当前,对这一课题的研究还在日益深入,如何进一步揭示陆相石油形成的机理和基本规律,定量地确定生油潜力,把油气资源评价建立在更加科学的基础之上,则是我们所面临的重要任务之一。

为了加深对陆相有机质类型、演化机理和成烃模式的认识,我们从我国某些不同类型的第三系含油气盆地中,选择了一批钻井样品,进行了各种地球化学分析。在研究中,我们采取把面上的一般研究与重点井的剖析这种点、面结合的方法,获得了较好的效果。总共研究了10个盆地,30口井,500块样品。而重点研究的井有:

(1) 柴达木盆地旱2井,井深6018米,地层为第四系至中新统,内陆湖相,成油母质属标准腐殖型;

(2) 辽河拗陷马深1井,井深4658米,研究地层为渐新统,近海湖相,成油母质属标准腐泥型。

旱2井的研究结果表明,尽管其有机碳含量低,仅0.2%左右,又属于典型的腐殖型母质,所生成的油气十分有限,但是这个第四系至中新统的盐湖相连续沉积剖面,在短短的2000万年之中,沉积厚达6000余米,沉积环境又相当稳定,在地质上最短的时间内就经历了一个相当完整的演化系列。有机质从沉积到成熟,只经历了1000万年的时间。因此,这是一个难得的研究有机地球化学作用的自然剖面。某些在老地层中难于观察到的现象或业已消失的过程,在这里被查明了。看来,这个剖面在石油生成研究上,其所存在的各种有机地球化学现象,表现出同一演化方向并有着深刻的内在联系,这是有重要意义的。对马深1井,考虑到岩相的稳定性,我们基本上只研究了成熟阶段的样品,但作为另一种好的成油母质,其在各方面所反映出来的共性和差异性,仍然给了我们某些启示。同时,我们在研究中还把它们同我国东部下第三系渐新统生油岩系结合起来,进行了比较性研究,从而加深了对于有机母质类型、成油作用和生油岩评价的认识,讨论并提出了一些生油评价的具体指标,这是有实际意义的。

关于成烃机理的实验模拟,我们是选择抚顺、茂名油页岩和低阶煤样品进行的。它们的不成熟性质和人工熟化作用及其产物的组成特征,进一步揭示了从陆相有机质到石油的某些基本反应机制,为陆相石油的生成提供了有益的实验证据。

有关样品的实验工作,主要是在我院实验中心完成的,由顾信章同志进行了认真地组织和安排。参与实验分析的人员有王荣光、邬立言、安绍宣、姜乃煌、程中第、葛修丽、董爱正、陈丽华、贾凤英、唐琳仙、**李庆瑗**、李一敏、肖廷荣、王立明、芦金定、童育英、万达三、张亚丽、孙雷、连英等。同时,华北油田勘探开发设计研究院实验室、中国科学院地

球化学研究所和化学研究所，以及青海石油管理局实验室也协助完成了部分分析项目（沥青族组成、镜质体反射率，顺磁共振、古生物和岩矿鉴定、孢粉颜色）。早2井样品的采集也是青海石油局的同志们完成的。因此，本书应该看作是我们共同努力的结果。他们的辛勤劳动，为这本专著的产生提供了良好的基础。在此，一并致以谢忱。

我们还感谢田在艺、胡见义、盛志伟、郝石生、芦松年、龙祥符、汪本善、徐濂、张振才、程克明、张绍宏、李亚珍、江显概等许多同志，在工作中给予的支持和鼓励，提出了许多宝贵意见。

最后，我们希望本书的出版，将会有助于陆相生油研究成果的交流，促进那些重要问题的讨论和深入，发展和完善陆相生油理论，以更好地指导油气资源的勘探和开发，满足我国对能源的需求。

目 录

前言

第一章 基本地质背景和沉积相	i
第一节 中国中、新生代的陆相生油期和沉积相概述.....	1
第二节 柴达木盆地早 2 井及晚第三纪古内陆湖泊的沉积特征.....	7
第三节 辽河拗陷马深 1 井及渐新世古近海湖泊的沉积特征.....	11
第二章 有机母质的类型及其演变特征	17
第一节 干酪根的镜下观察.....	23
第二节 热解色谱资料和干酪根类型划分的“X”图解.....	25
第三节 干酪根的元素组成.....	28
第四节 干酪根的红外光谱特征.....	32
第三章 早 2 井有机质的地球化学转化及其阶段性的剖析	35
第一节 地温梯度.....	35
第二节 镜质体反射率.....	37
第三节 热变指数(TAI)——孢粉颜色.....	38
第四节 有机质的热解色谱的演化特征和演化阶段.....	39
第五节 岩石中的分散沥青及其族组成.....	46
第六节 饱和烃的构成及其演化特征.....	50
第七节 芳香烃的红外光谱特征.....	54
第八节 芳香烃的组成(色质分析).....	60
第九节 芳香烃馏分的紫外光谱.....	67
第十节 原油的色谱分析.....	70
小 结.....	71
第四章 不同类型有机质地球化学演化的比较	74
第一节 不同类型干酪根的成熟临界与热解最高峰温的关系.....	74
第二节 标准腐殖型与标准腐泥型演化剖面的比较.....	76
第三节 复杂演化剖面的比较.....	79
第四节 综合比较.....	83
第五节 我国新生代不同类型生油岩的演化途径和演化分类图解.....	85
第五章 烷烃生源构成的分析	88
第一节 几种有关成油生源物质的碳数分布的基本特征.....	89
第二节 烷烃色谱资料的生源分析.....	97
第三节 沉积物中的氨基酸.....	99
第四节 高蜡油的成因分析.....	102
第六章 生物标记烃类的地球化学——甾烷和环状二萜、三萜烷的分布特征	109

第一节 概述.....	109
第二节 抚顺、茂名油页岩中的甾烷和萜烷.....	112
第三节 旱 2 井地层中的甾烷和萜烷.....	121
第四节 甾、萜化合物在油源对比中的应用.....	143
第七章 有机质的成烃机理和成油演化模式.....	151
第一节 碳同位素在热演化上的示踪性质.....	151
第二节 干酪根热解模拟产物的研究.....	153
第三节 油页岩干酪根的热失重分析及其动力学性质.....	165
第四节 腐殖、腐泥型生油岩的成烃演化模式.....	181
第八章 干酪根的产烃率和生油量的计算.....	187
第一节 生油岩中的自由烃和可热解烃的数量.....	189
第二节 热解产率指数及生油量的计算.....	190
第三节 累积生油量的定量计算.....	192
结 束 语.....	196
参考文献.....	197
附录一 实验流程、方法和设备.....	202
附录二 图版和说明.....	204

第一章 基本地质背景和沉积相

笔者曾经指出：“中、新生代陆相石油的生成是地质历史发展和生物演化的必然结果”^[5]。它是随着陆壳增生，湖泊发育，以及生物在其演化历程中完成了对陆地及其水域的征服而出现的。中国大陆从古生代晚期至中生代早期海水相继退出之后，除喜马拉雅海槽之外，基本上再没有遭受过海水的侵漫。因此，中、新生代湖相沉积比世界其他地区更为发育，具有规模大、时间长、类型多、沉积厚且有机质丰富的特点，从而提供了丰富的油气来源。

第一节 中国中、新生代的陆相生油期和沉积相概述

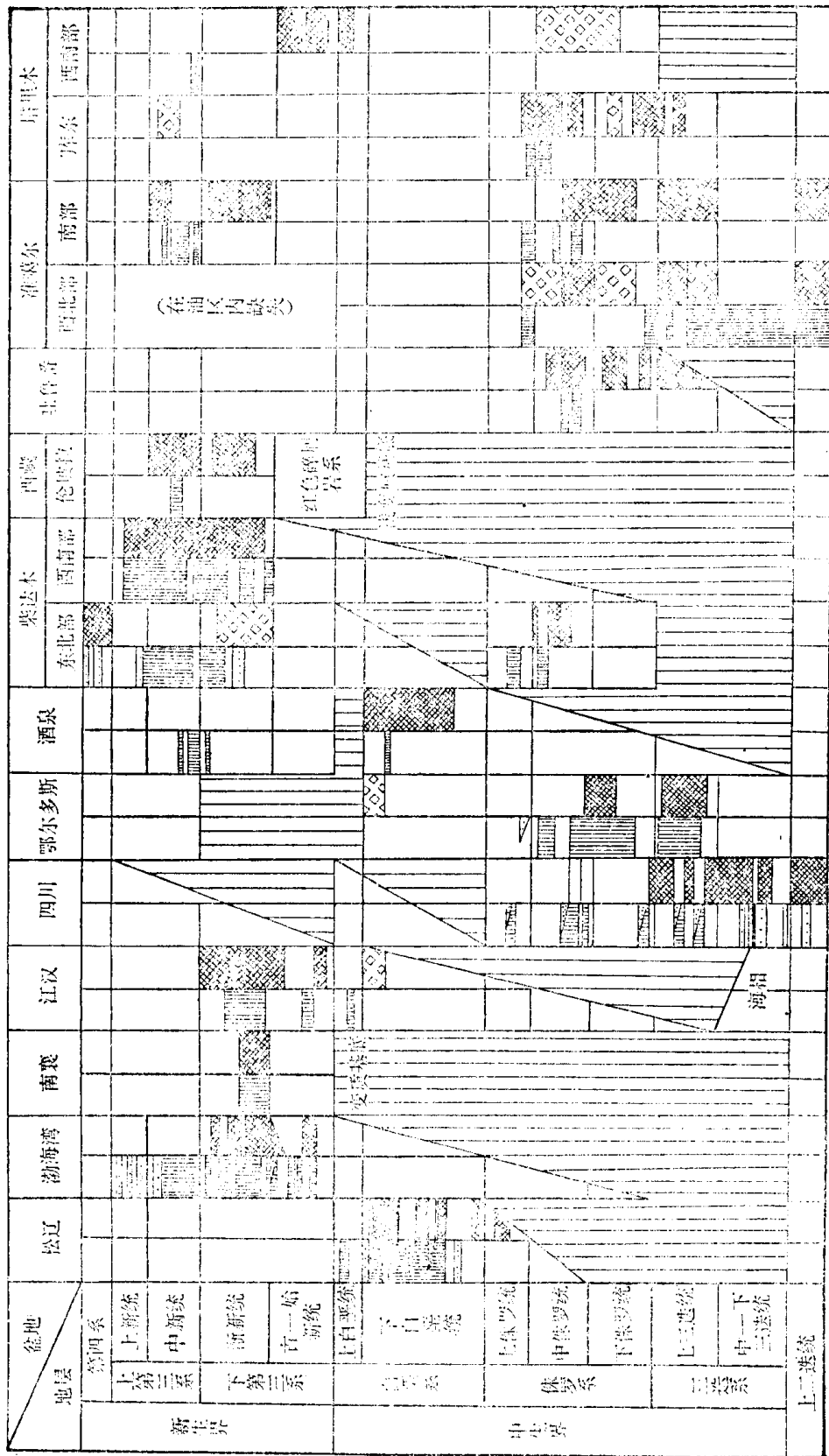
如图 1 所示，在大地构造作用和沉积作用旋回发展的基础上，在我国中、新生代地质历史发展的历程中，产生了五个主要生油期，它们是：晚三叠世、早—中侏罗世、早白垩世、早第三纪和晚第三纪。其中，下第三系生油层分布最广，形成了一些重要的油田；而白垩系生油层则由于大型松辽盆地的出现而占有重要地位。我国中、新生代的构造作用，具有多旋回发展的特点。这种构造上的多旋回性，在沉积上则表现为湖泊从发生、发展到消亡的旋回演化，而生油层的发育则总是与湖盆强烈拗陷（沉积速度达 0.1~0.3 毫米/年）、湖泊生命力最旺盛的时期相一致。

由于各古湖所处大地构造位置不同，特别是由于各地质历史时期大地构造运动和古气候条件的差异，导致了湖盆的形态、水深、水质、生物状况、补给条件以及湖泊演化历史等均有明显的差别。据我们分析，中国陆相成油地层剖面有三种主要类型，其成油期也各有特色，并各有其主要隶属的时代：

（1）半潮湿气候下的淡水—微咸水湖相，主要见于上三叠统和下白垩统，如鄂尔多斯和松辽湖盆等。其主要生油期产生于湖泊发展的全盛时期，如鄂尔多斯延长统第三段和松辽的青山口组及嫩江组。这种湖泊在当时水生生物繁茂，在沉积剖面上没有煤层，也不见盐类沉积，而有大套富含有机质的黑色页岩夹油页岩层，具备良好的生油条件，也是我国的主要含油岩系之一。

（2）潮湿气候下的淡水湖相沉积，主要见于中—下侏罗统，如鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地等。当时陆生植物极为繁茂，沉积补偿比较均衡，因此成煤沼泽发育。煤层、油页岩、黑色页岩往往在剖面上交替出现，而平面上构成相变关系。成油母质主要来源于陆生高等植物的木质素、纤维素等富氧高碳有机质，其含量虽高，而成油转化率很低，并非我国的重要含油岩系。

（3）半干燥气候下的各种淡化或咸化湖相沉积，广泛见于我国的第三系，剖面的特点是有石膏和岩盐层。其主要成油期，在内陆湖泊中是出现在盐类淀积之前的微咸—半咸阶段，如柴达木盆地的渐新统至中新统；在近海湖泊中则多与受海洋潮湿气候影响的淡化期有关。这里，不论哪种情况，都有大套黑页岩夹油页岩沉积，尤以近海湖泊更为有利，有机质



油层
 气层
 生油层
 可能生油层
 缺失

图 1 中、新生代陆相沉积盆地生油层和产油层发育情况对比图

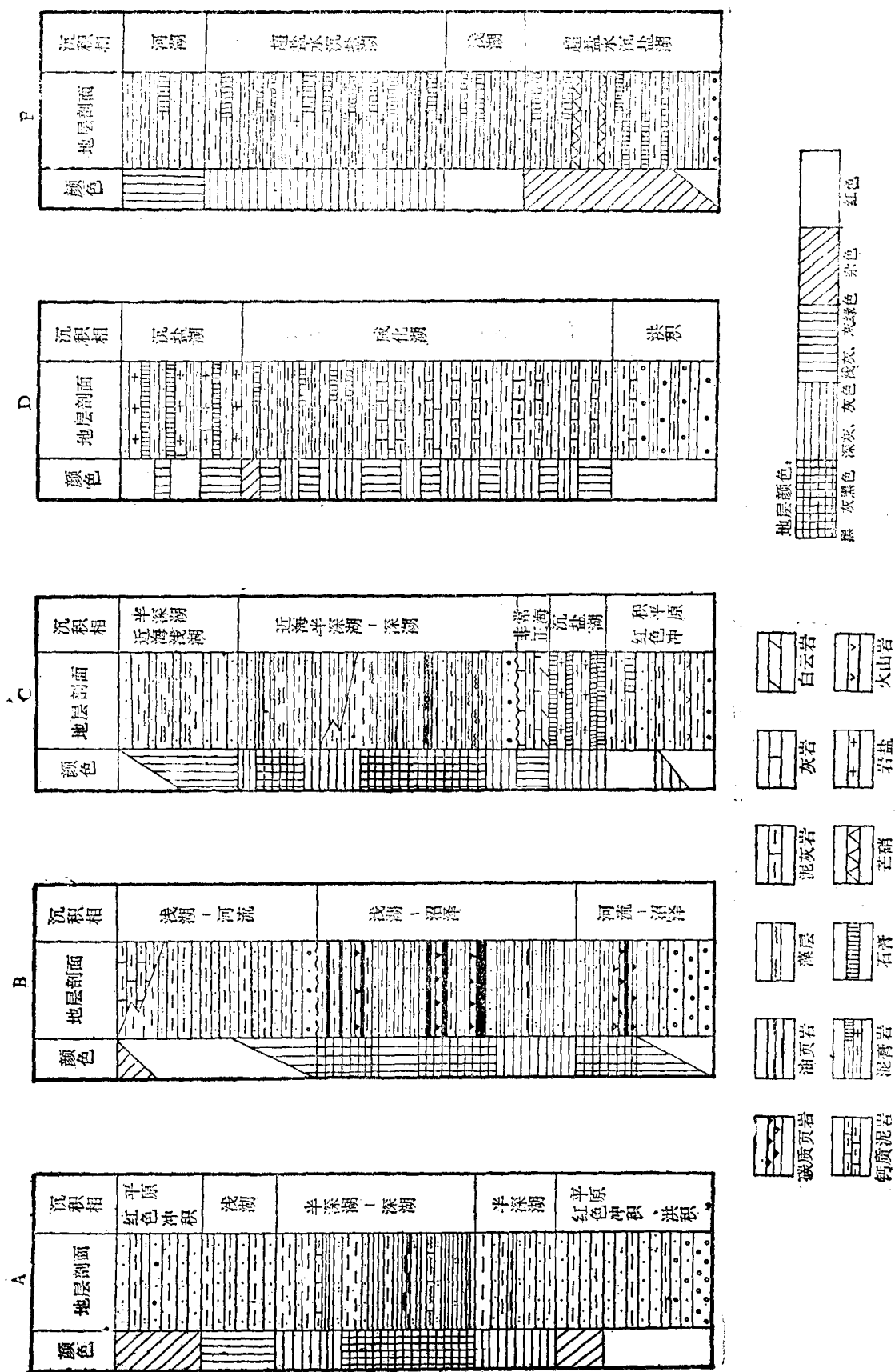


图 2 陆相生油岩沉积剖面的类型
A—半潮湿气候下淡水-微咸水湖泊, B—潮湿气候下淡水湖泊, C—半干燥气候下近海淡水湖泊, D—半干燥气候下内陆咸水湖泊, E—干燥气候下超盐水泥盐湖

丰富，是我国另一个主要生油岩系。此外，作为一种特殊情况，是我国江汉盆地的始新统和渐新统，它是由一套很厚的暗色生油岩与膏盐层间互所组成的剖面，证明在湖盆拗陷的同时，不断有盐水补给(可能与海水有关联)，导致这个干燥气候下的沉盐湖长期(约3千万年)没有干涸。总之，这种半干燥气候的剖面类型，可进一步划分为上述三个亚型。

根据以上所述，兹将陆相生油岩的剖面类型概括于图2中。

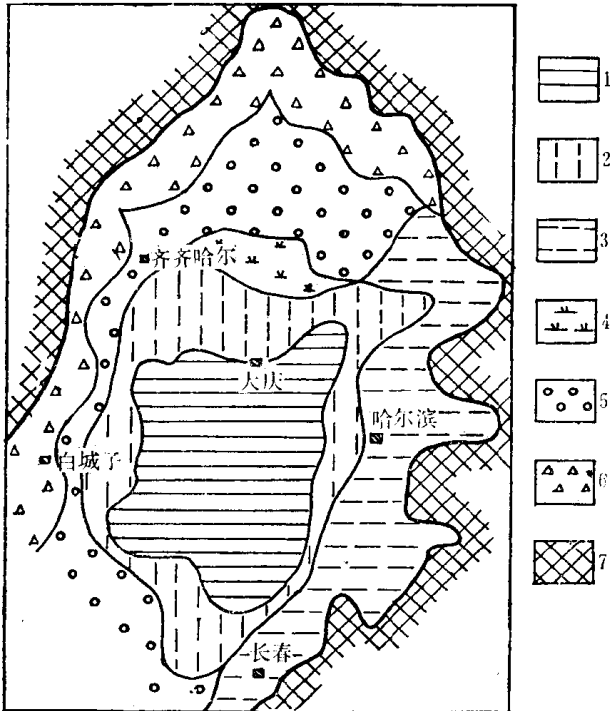


图3 松辽盆地白垩系青山口组沉积相图
(据李永康等1980年资料改编)

1—深水-半深水湖相；2—三角洲前缘相或滨湖、浅湖相；3—淤积平原相；4—滨湖沼泽相；5—冲积平原和三角洲分流平原相；6—洪积相；7—剥蚀区

湖相沉积是陆相石油生成的主要场所。就一个湖盆而言，如图3所示，其沉积相带一般都具有环带状展布的特点，从边缘到中心依次为山麓洪积相、平原河流相、三角洲相、滨湖和浅湖相、半深水和深水湖相。这种相带的分布也同时反映了沉积物中陆源有机质和水生有机质含量比例的变化，并使得有机质的类型和丰度随沉积物粒度的变化，同样出现环带展布的特征(图4)。几乎毫无例外，在半深水和深水湖相中，有机质类型最好，多为腐泥型和混合型；有机质丰度最高，有机碳一般为1~3%，因此生油潜力最大，决定了盆地中油气田分布范围和勘探前景的大小。

半深水-深水湖相的发育，往往与构造上的深拗陷有关。我国东部广泛发育的渐新统生油层系(如

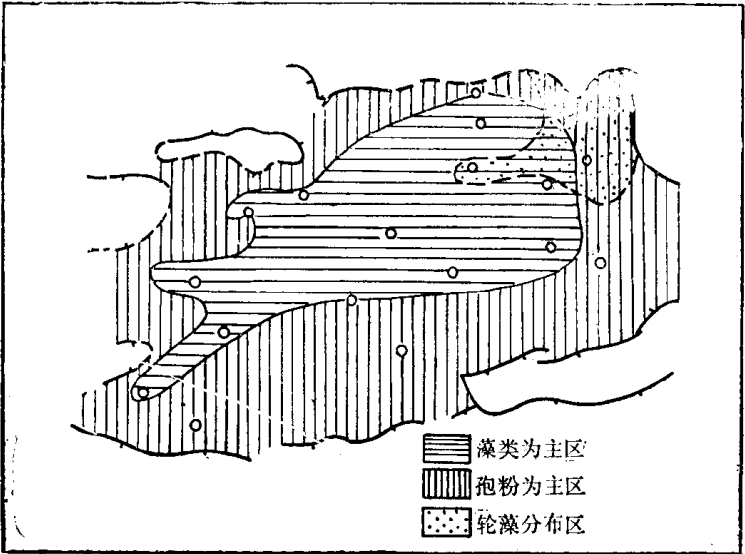


图4 东营凹陷下第三系沙河街组第三段藻类、轮藻和孢粉化石分布图
(据王捷等1980年资料编绘)

图5), 就是在断块活动的基础上受一系列彼此分隔的箕状深拗陷所控制。这种断陷盆地中的半深水-深水湖相沉积, 总是出现在毗邻断裂活动最强、断距最大的一侧, 且面积不大, 一般仅数百至二、三千平方公里, 只占整个盆地面积的三分之一至五分之一, 但却是油源供给的主要场所。松辽盆地和鄂尔多斯盆地半深水-深水湖相的发育则有所不同, 展布广阔, 水域面积可达8~10万平方公里, 如图6、7所示, 其形成是与大型稳定块断盆地有关。

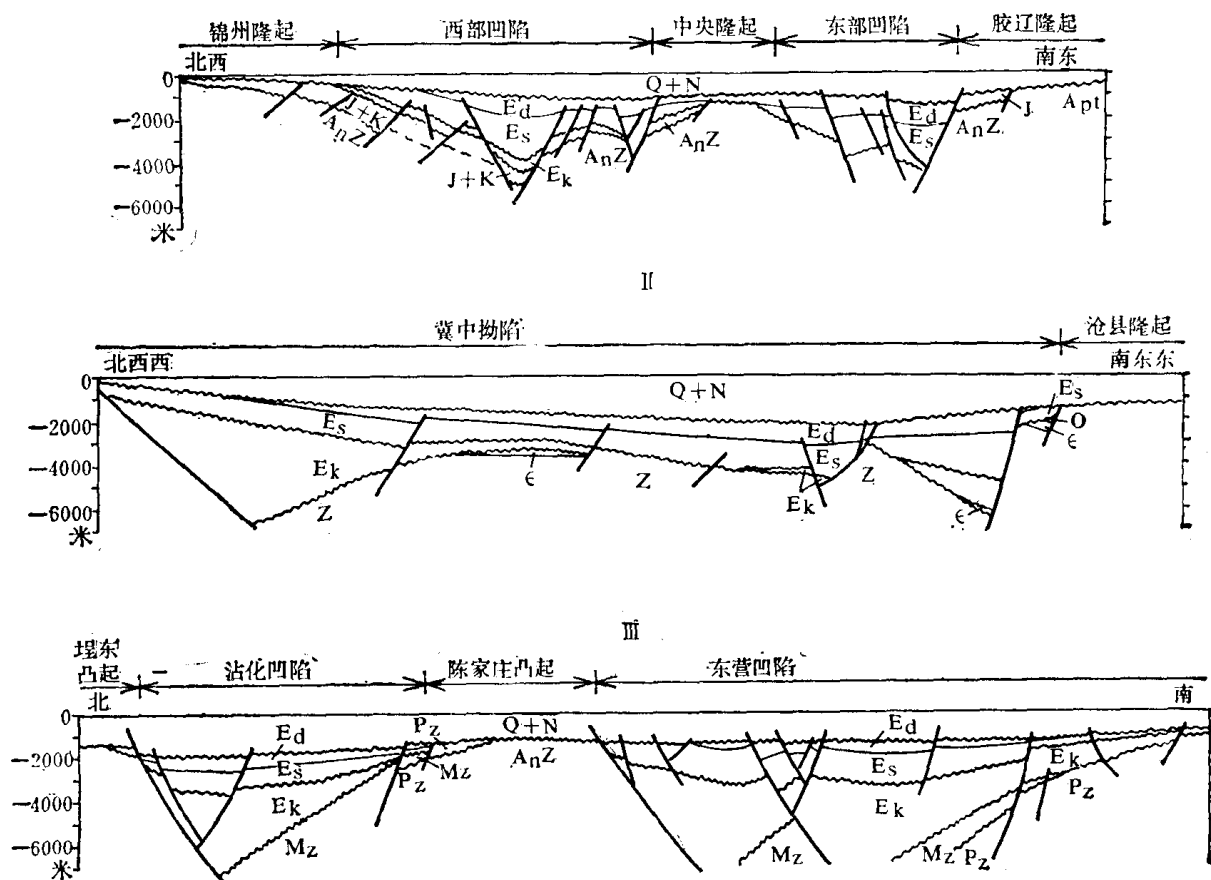


图5 渤海湾盆地构造横剖面图
I—辽河剖面；II—冀中剖面；III—东营剖面

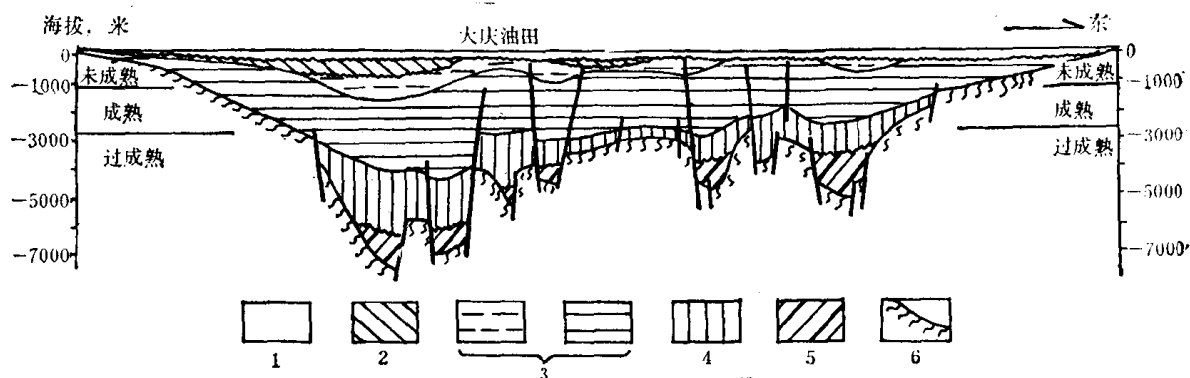


图6 松辽盆地横剖面图 (据杨万里等, 1980年资料简化)

1—新生界；2—上白垩统；3—中、下白垩统 (青山口组+姚家组+嫩江组) 湖相沉积 (生油岩系)；4—下白垩统红色碎屑岩系；5—侏罗系火山碎屑岩；6—基底变质岩系 (海西期)

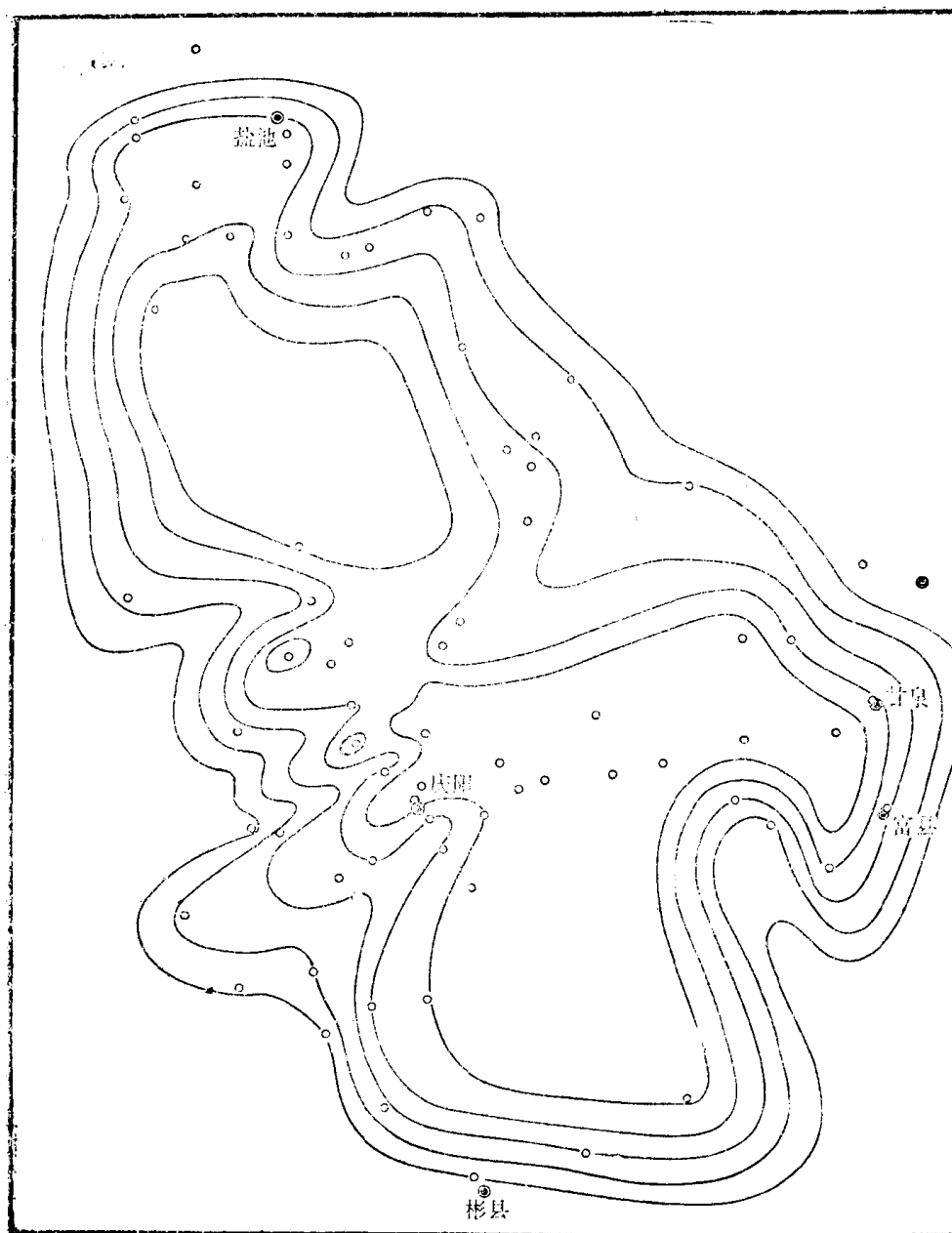


图 7 鄂尔多斯盆地南部延长统 (T_3Y_3) 暗色泥岩等厚图

此外，在其他地区也还有一些在山间或山前盆地中深湖相发育的实例，如酒泉盆地和乌鲁木齐山前盆地。往往在地质历史发展的进程中，这些地区生油层的发育随沉积中心的转移而转移，如乌鲁木齐山前拗陷中生代的生油拗陷偏东、偏南，而第三系的偏西、偏北，并决定了不同时代油藏的分布。

最后，还应该指出的是，在半深水-深水湖相沉积层形成以后，拗陷是否保持其继承性，也是一个至为重要的问题。在那些不能保持其继承性，其上覆没有足够沉积盖层的地区是贫油的，甚至找不到油田。研究表明，对中生界生油沉积，在地质发展历史上曾经埋深达1300~1500米以上，而对于下第三系生油沉积曾埋深达2000~2700米以上。这也是保证生油沉积中有机质在地热作用下成熟，使之演变为真正的、有效的生油岩所必需的条件。

总之,就我国中、新生界陆相石油的生成来说,五个生油期、三大沉积剖面类型、深拗陷中发育的半深水-深水湖相和拗陷的继承性,构成了其基本的地质特征和成油的主要地质条件。

第二节 柴达木盆地早 2 井及晚第三纪 古内陆湖泊的沉积特征

柴达木盆地是一个以第三系为主要沉积旋回的内陆叠合盆地。中生代时期,盆地基底大面积隆起,局部断落成为地堑。而在新生代喜马拉雅构造旋回中,由于南侧印度板块的向北冲撞,喜马拉雅海槽消失,青藏高原逐渐形成,才导致现今规模柴达木盆地的产生。并且,在其后的发展过程中,一直表现出整体大面积快速沉降的特点,平均沉积速度达 0.25 (西部)~0.35 毫米/年 (东部);而中新世以来,为 0.3 毫米/年。同时,由于青藏高原的阻隔,盆地的气候日趋干燥,湖水日益咸化,水生生物的发育受到抑制,沉积物以富含碳酸盐类,反映干燥气候的孢粉占相当比例,后期以膏盐沉积出现和有机碳含量低 (0.2~0.6%) 为特征。据孢粉研究,渐新统下部反映干旱气候的旱生盐沼植物藜、菊、麻黄等植物孢粉,占孢粉总量的 19.9%,渐新统上部占 21.4%,中新统和上新统下部占 22.0% 左右,到上新统中部 (上油砂山组) 高达 34.4%。在沉积上,在西部茫崖拗陷中,于油砂山组晚期出现石膏沉积;上新统晚期 (狮子沟组) 见有 13 个膏盐层,总厚达 20 米;更有 1.5 米的岩盐层出现在上新统末,第四纪则以盐岩的淀积为特征了。现今柴达木尕斯库勒湖湖水的含盐量已达 300~340‰,属世界上最咸的水域之一。总之,随着新生代盆地气候的日趋干旱,盐类矿物的淀积构成了一个完整的序列:泥灰岩 ($E_3 \sim N_1^1$) → 灰岩和白云质灰岩 ($N_1^1 \sim N_2^1$) → 石膏和膏盐 (N_2^1) → 盐岩 (Q); 为确定古湖盐度的演变提供了重要的标志。我们也将看到,这种内陆咸化湖泊的沉积相剖面,在地球化学上是颇为独特的。

在构造上,柴达木盆地可以划分为茫崖、一里坪等次一级拗陷。整个来说,在地质发展历史上,拗陷中心存在自西而东,由南往北转移的现象。但是,就沉积体系而言,各时代往往表现为一个整体。如图 8 所示,在整个上新世湖泊演化中,沉积中心始终位于茫崖拗陷,有深湖相膏盐沉积,而早 2 井所在的一里坪拗陷,却始终处于浅湖相和盐沼相部位。

早 2 井深达 6018 米,地层属第四系至中新统中部。在钻进中,使用低固相优质泥浆,整个过程没有混入过原油或其他油品,避免了岩样的污染。钻井以岩屑录井为主,仅于井深 1953 米至 4875.32 米曾断续取芯 6 次,共计 26.42 米。在钻井过程中,在 3234 米以后常有气测异常出现,所取气样可燃,而异常比较集中且强度较大的井段为:4098~4310 米、4726~4755 米、4823~4830 米、5377~5654 米、5952~5984 米。在 4200 米至 5950 米井段中的粉砂岩,用 CCl_4 浸泡后,大多有较弱的荧光显示。其中,5384~5521.6 米见几层油迹粉砂岩;测井解释了 4 个可能的油层,累厚 15 米。于井深 5500 米左右曾获得一点轻质原油,比重 0.8087 (井口样)。我们将会看到,以上油气显示情况与我们的有机地球化学研究结果是一致的。

早 2 井剖面以富含钙质的细粒碎屑沉积为特征,由粉砂岩、粉砂质泥岩、钙质泥岩和泥灰岩等所组成,其本身构成一个下粗上细的大型沉积旋回。兹由老到新将岩性分层描述如下 (图版 I):

①上干柴沟组 (N_1 未穿) 6018~3950 米 (厚 2068 米)

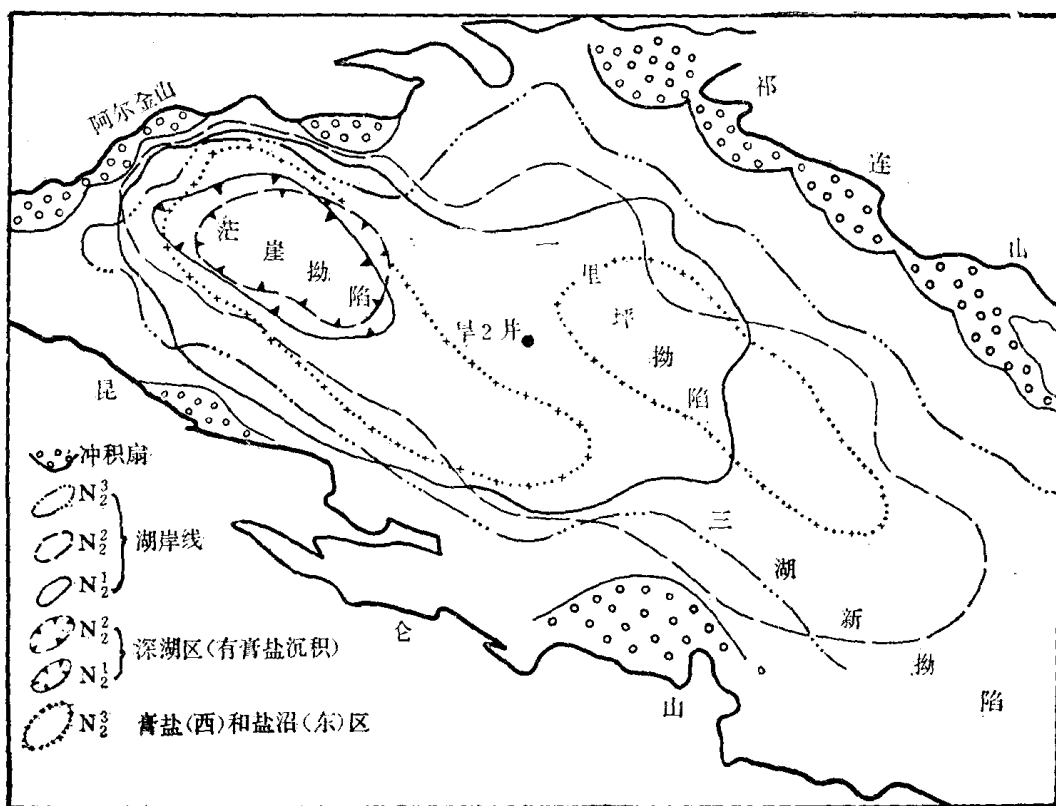


图 8 柴达木盆地上新统各时期湖泊沉积相图

下部(厚1018米):灰色、深灰色、暗紫色粉砂质泥岩和硅质泥岩,夹泥灰岩和泥晶白云岩,偶见鲕状白云岩(图版I, 7)。中段以浅灰色粉砂岩为主,油气显示较好。下段和上段夹有几层砂质灰岩。

地层中所见化石有:

水螺(*Hydrobia* sp.)

介形类:球星介(*Cyclocypris*)和美星介(*Cyprinotus* sp.)

孢粉:松科(*Pinaceae*),云杉粉(*Piceapollenites* sp.),山核桃粉(*Caryapollenites* sp.),蒿(*Artemisia* sp.)和菊粉(*Compositoillenites* sp.)。

根据化石组合特征和地层对比,其时代属中-晚中新世。

值得注意的是,自井深5950米以下,偶见硅质泥岩中有绢云母化现象,甚至见一层板岩(图版I, 8)。其泥质已重结晶为纤维状绢云母,硅质重结晶为隐晶板状结构。这一现象虽不普遍,但却表征着轻度变质的现象已经出现了。这在有机质演化的阶段上,是值得注意的。

上部(厚1050米):灰色、深灰色粉砂岩、粉砂质、硅质或白云质泥岩,夹泥灰岩,偶有灰岩。中、下段以粉砂岩为主,常见弱荧光显示,具暗紫色夹层。上部岩性较细,而粉砂岩中气测异常明显。

② 油砂山组(N_2^1)3950米~2133米(厚1817米)

下部(厚1050米):灰色、深灰色钙质泥岩、粉砂质泥岩、夹泥灰岩和粉砂岩。下段所夹粉砂岩较多,而上段岩性细,泥岩常为巨厚层状,并见有数层灰岩,生油条件相对较好。

上部(厚767米):灰色粉砂质泥岩、棕褐色钙质泥岩夹泥灰岩和粉砂岩。

该组地层中含正星介(*Cyprideis*)和油泉子真星介(*Eucypris youquanziensis*),时代属上新统。

③ 狮子沟组(N_2^3)2133~912.5米(厚1220.5米)

灰色、深灰色钙质泥岩, 粉砂质泥岩夹灰色、灰黄色泥灰岩及少量泥质粉砂岩。

④ 七个泉组(Q)912.5~0米(厚912.5米)

灰色淤泥、钙质粉砂质淤泥夹灰黄色泥质粉砂和泥灰质条带, 顶部有1米杂色盐壳。

为了进一步查明上述剖面的沉积环境和当时湖水的矿化特征, 进行了泥岩氯离子含量和碳酸盐含量的测定, 并将结果汇编在表1和图9中。

表1 柴达木盆地早2井有机碳、碳酸盐和氯离子含量分段统计表

层位	井段 (平均深),米	有机碳 %	碳酸盐 %	氯离子 %
Q ₁₊₂ 912.5	0~400 (200)	0.10	30.5	0.87
	401~800 (600)	0.12	27.9	0.65
	801~1200 (1000)	0.14	33.7	0.80
N ₂ ² 2133	1201~1600 (1400)	0.14	30.4	0.68
	1601~2000 (1800)	0.15	31.3	0.59
	2001~2400 (2200)	0.17	34.2	0.33
N ₂ ¹ 3950	2401~2800 (2600)	0.14	27.3	0.35
	2801~3200 (3000)	0.18	26.4	0.19
	3201~3655 (3428)	0.19	22.0	0.10
上干柴沟组 N ₂ ¹	3656~4110 (3883)	0.23	18.6	0.11
	4111~4565 (4338)	0.13	13.0	0.13
	4566~5020 (4793)	0.17	13.6	0.11
	5021~5260 (5140)	0.17	18.7	—
	5261~5500 (5380)	0.17	20.6	0.12
6018	5501~5750 (5625)	0.16	18.1	0.16
	5751~6018 (5885)	0.17	18.0	0.09

据前人对柴达木盆地渐新统和中新统古湖盐度的研究, 这个时期的平均盐度变化在16‰~22.4‰之间。可见, 上新世湖泊是在前期半咸水湖的基础上演化而来。早2井的分析资料表明, 中新世后期至上新世初期(N₂²~N₂¹下部)沉积岩中氯离子的含量是相当稳定的, 为0.12%, 大致为海相沉积岩氯离子含量的一半。考虑到同等盐度水域的氯度, 湖水低于海水, 因此我们估计早2井这一时期湖水的盐度应在15‰左右。其后, 湖水日益咸化, 沉积中氯离子平均含量由0.34% (N₂¹上段)、0.58% (N₂²)增至0.8% (Q) (偏低, 因样品未成岩有钻井泥浆冲刷的影响), 终值为1.2%, 接着有膏盐层出现了。一般来说, 石膏沉积出现的湖水盐度为60‰。因此, 根据早2井氯离子的分析资料判断, 这一咸化过程在上新世晚期湖水的盐度达到了40‰ (注: 湖泊中部的南翼山这时有石膏层出现, 盐度应为60‰), 至第四纪晚期盐度则已达60‰以上了。在这个阶段以前, 整个早2井剖面均处于碳酸盐淀积阶段。

沉积物中碳酸盐含量与氯离子含量的对应关系良好; 碳酸盐含量随着湖水的咸化和沉积中氯离子含量的增高而增高。除下油砂山组上部偏低(13.1%)以外, 上新世前期的碳酸盐

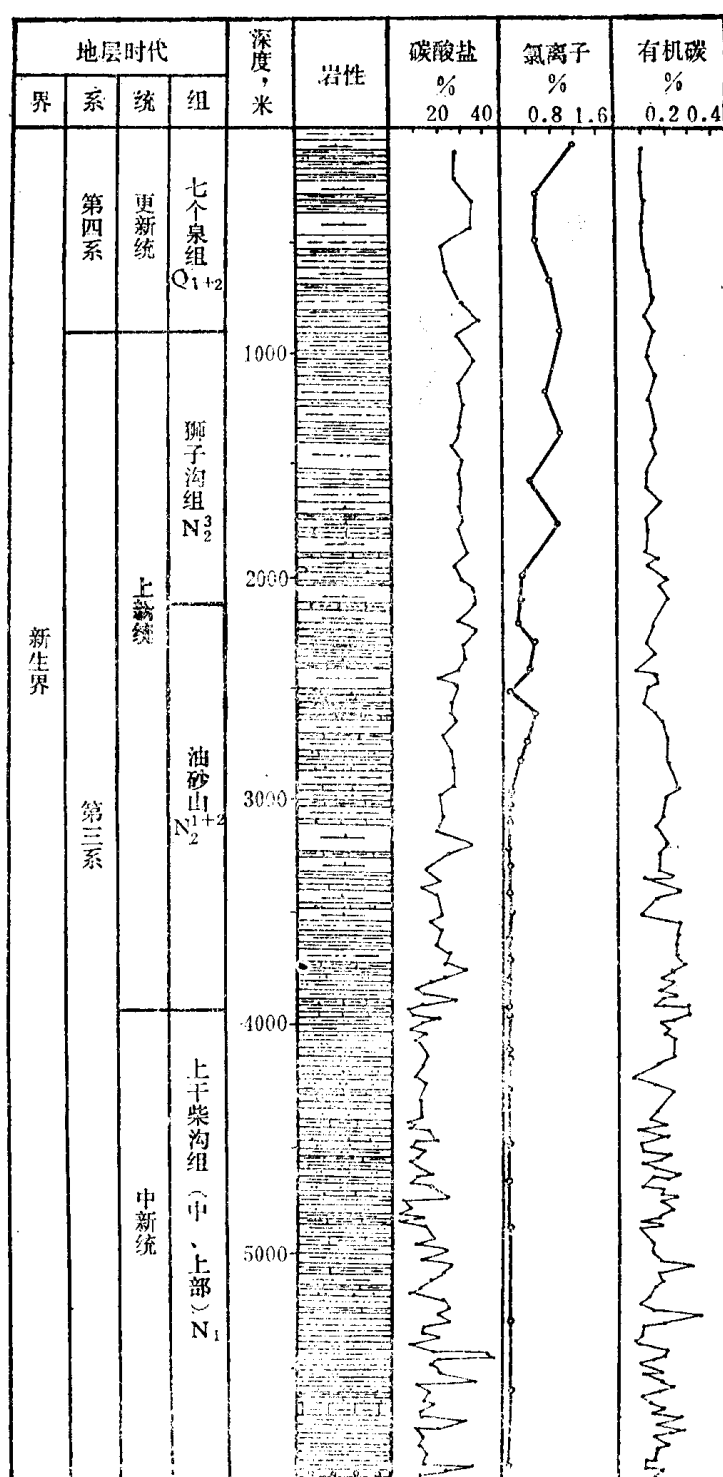


图 9 早 2 井沉积综合柱状剖面

含量为20%左右，但也有某些样品含量较高，达30%~40%，形成锯齿状尖峰（图9），反映夹有泥灰岩层的特点。上新世以来(N_2 上段~ Q)，湖水咸化，沉积中的碳酸盐含量达30%左右。

早 2 井沉积中有机质的丰度很低，有机碳含量变化在0.05~0.38%之间，分层组平均值