

四川省重点学科建设项目（编号：SZD0414）和西南石油大学  
油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

# 油气开发地球化学

陈世加 王绪龙 马力宁 付晓文 编著



四川省重点学科建设项目(编号:SZD0414)和西南石油大学  
油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

# 油气开发地球化学

陈世加 王绪龙 马力宁 付晓文 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

新兴的一门边缘学科——油气开发地球化学(Developing Geochemistry)是以油藏流体(油、气、水)的非均质性为基础,采用先进的地球化学分析技术解决油气田勘探和开发中的问题。

本书以国内油气田为例,系统地介绍了应用开发地球化学方法:用原油色谱指纹技术确定合采油井分层产能及分散油井产能监测的原理,建立了用原油色谱指纹计算合采井产能分配的方法;用油、气、水层地球化学识别的原理,建立了油、气、水层的地球化学识别方法;用原油指纹研究油层连通性及层间窜通的识别,并根据油气性质差异对断层封闭性进行评价等新技术。

本书可供油气勘探与开发专业的研究生及相关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

油气开发地球化学/陈世加等编著.

北京:石油工业出版社,2006.7

ISBN 7-5021-5524-4

I. 油…

II. 陈…

III. ①油田开发-地球化学-研究②气田开发-地球化学-研究

IV. TE3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043076 号

## 油气开发地球化学

陈世加 王绪龙 马力宁 付晓文编著

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.com.cn

总 机:(010)64262233 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

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:7

字数:150 千字 印数:1—600 册

定价:45.00 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

## 序

近 40 年石油和天然气地球化学研究取得了长足的进展。随着各种新的实验分析技术的引进,促使油气地球化学家在分子级的水平上不断加深着对石油和沉积物有机质组成和特征的认识,从有机质演化的角度确定了两者之间的联系,从而在 20 世纪 70 年代创立了科学的石油有机成因理论体系——干酪根热降解成烃学说。由于这一学说客观地反映了油气成藏规律,提出了一系列行之有效的指导油气勘探的指标,如有机质丰度指标、成熟度指标、成烃演化指标和油源对比指标等,使得油气勘探工作者掌握了勘探的主动权,极大地促进了世界石油工业的发展。在此基础上,油气地球化学在其自身发展的同时,不断地开拓着新的应用领域。在 20 世纪 80 年代末,产生了油气藏地球化学学科,它是在密切关注储层油气非均质性的基础上,揭示油藏中油气的充注方向、聚集史和成藏机制,把油气源灶演化史和油气成藏史紧密联系起来,认识油气的成藏规律。20 世纪 90 年代初,油气地球化学进一步向油田开发领域拓展,产生了油气开发地球化学(Developing Geochemistry)学科,这是它与油藏工程和油气田开发相结合,解决油气田开发过程中油、气、水层的识别,油气层的连通性,水线推进状态,多层合采油井分层产能监测和油层污染检测等,为油气田开发工程技术实施提供了有益的信息和依据。

陈世加博士自 1995 年以来,一直结合油气田开发深入现场,从事油气田开发地球化学研究,十年来,他在这一新的领域中进行了许多有益的工作和探索,并在这一油气地球化学前沿领域做出创造性的贡献,受到了油田专家的关注。本书就是他这十年来工作的部分成果,反映了油气地球化学在油气田开发领域中的开拓性和进展。

这本书主要包括以下三方面的内容:

- (1) 多层合采油井及分散油井原油色谱指纹的分层产能监测技术和实践;
- (2) 对非常规油层、凝析气层、气层和水层的地球化学识别技术;
- (3) 油层连通性、断层封闭性与油管破裂的地球化学识别技术。

作者在大量分析实验资料的基础上,结合油田实际,对上述三个方面的内容做了深入的论述,在我国这是一本开创性的著作,值得一读,值得祝贺,并将有益于油气开发地球化学这一新的学科生长点的发展,促使有更多同行的关注和参与这一学科的开拓和研究,推动我国石油工业的发展。

黄第藩

2005 年 12 月 20 日

# 前 言

20 世纪 80 年代中期以前,石油地球化学主要应用在石油勘探领域,如生油岩评价、资源量计算及油—油、油—源对比,所以有些学者也称之为烃源岩地球化学。到 20 世纪 80 年代末,随着分析技术的发展与应用,地球化学的研究领域向油气运移与成藏方向拓展,形成油气藏地球化学(Reservoir Geochemistry England, 1989)这门新兴学科,它主要研究油气充注、聚集历史与成藏机制。在理论上,它与含油气系统、油源灶和油气运移成藏研究接轨。20 世纪 90 年代初地球化学又向油田开发领域延伸,并与开发地质和油藏工程结合形成了一门新兴的边缘学科——开发地球化学(Developing Geochemistry)。它以油藏流体(油、气、水)的非均质性为基础,采用先进的地球化学分析技术解决油田勘探和开发中的问题。例如:(1) 油气层的连通性、断层的开启与封闭性评价(Slent, 1981; Huang, 1994); (2) 油、气、水层的识别(Baskin, 1995); (3) 多层合采油井分层产能监测以及分散油田的产能分配(Production Allocation, Kaufman, 1987, 1990); (4) 油管破裂及层间窜层判识等生产问题; (5) 污染源追踪等。

本书讨论的主要内容如下:

(1) 多层合采油井及分散油井的产能监测与应用。重点以西部青海油田和克拉玛依油田为例,进行不同类型不同比例的原油配方,根据配方原油的指纹变化特征,建立用原油色谱指纹计算分层产能的方法,用于合采油井的产能监测及分散油田的产能计算,为油井的产能监测及油藏的生产管理提供一种经济、简便的新方法。

(2) 油、气、水层的地球化学识别与应用。根据储层烃的化学性质,包括储层烃含量、饱和烃碳数分布、储层显微荧光及储层物性资料,结合油气运移成藏的相态理论,识别油层、凝析气层、气层和水层。该技术可在测试前预测储层流体的性质及试油效果,是低阻油层和薄油层以及其他可疑油气层识别的良好方法。

(3) 油气层连通性、断层封闭性及油管破裂地球化学识别技术。重点介绍用原油指纹研究油层连通性及断层封闭性的评价方法。结合油田实例,介绍如何用地球化学方法研究断层在不同地质时期对油气的封闭性以及油层层间窜层的地球化学识别。

本书作者从 1995 年起进行了大量的文献调研与现场应用研究,先后负责中国石油天然气集团公司(CNPC)中青年科技创新基金项目“建立原油指纹库确定

分层产能”、“用地球化学新方法识别油气水层”及 CNPC 地球化学重点实验室基金项目“混源油藏单个源定量研究”、西南石油学院油气藏地质与开发工程国家重点实验室基金项目“用原油色谱指纹确定分层产能”以及 CNPC 中青年基金“新疆地区古生界油气藏形成机制研究”以及多个油田协作项目。在柴达木盆地、四川盆地、准噶尔盆地及大港油田进行了大量的分析实验及现场应用,在油井的产能监测和油、气、水层识别方面取得良好的效果,为油、气、水层的识别与复查,特别是为低阻油层及薄油层的识别提供一种新方法,也为油藏的生产管理提供一种简便、经济快速的技术。

出版此书的目的是将地球化学在油、气、水层识别及油井产能监测的研究方法及应用介绍给广大石油地质与地球化学工作者,希望能起到抛砖引玉的作用,发挥地球化学在油气勘探与开发中的作用,并通过全国地球化学同仁们的努力,共同促进我国油气藏地球化学的发展及应用水平。

本书是在完成四个 CNPC 中青年创新基金项目和一个国家重点实验基金项目的基础上编写而成的,书的出版还得到了四川省重点学科建设项目(编号 SZD0414)和西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室的资助。本书编写过程中,得到了中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司勘探开发研究院实验中心以及西南油气田分公司研究院实验室的大力支持。我国著名的石油地球化学家黄第藩教授和著名的天然气地球化学专家王廷栋教授为本书的出版提出了很多有价值的建议,李连民和赵鹏研究生做了大量图件处理工作,在此表示深深的感谢。

由于作者水平有限,书中不免会有不足之处,敬请批评、指正。

作者

2005 年 6 月

# 目 录

|                                           |              |
|-------------------------------------------|--------------|
| <b>第一章 原油色谱指纹技术与分层产能确定 .....</b>          | <b>(1)</b>   |
| 第一节 原理与方法 .....                           | (1)          |
| 第二节 高分辨率原油全烃色谱分析 .....                    | (9)          |
| 第三节 实验配方与计算模型建立 .....                     | (13)         |
| 第四节 应用实例 .....                            | (16)         |
| 第五节 分散油田的产能监测 .....                       | (38)         |
| 第六节 分层产能计算软件说明 .....                      | (42)         |
| <b>第二章 油、气、水层地球化学识别 .....</b>             | <b>(45)</b>  |
| 第一节 油、气、水层地球化学识别原理 .....                  | (45)         |
| 第二节 油、气、水层的地球化学识别与应用 .....                | (55)         |
| 第三节 非常规油气层的地球化学识别 .....                   | (63)         |
| 第四节 油气层复查 .....                           | (77)         |
| 第五节 储层原油性质与测试效果预测 .....                   | (82)         |
| 第六节 小结 .....                              | (84)         |
| <b>第三章 油层的连通性与断层封闭性及油管破裂的地球化学识别 .....</b> | <b>(85)</b>  |
| 第一节 油层连通性 .....                           | (85)         |
| 第二节 构造解释模式的修订及断层封闭性评价 .....               | (88)         |
| 第三节 油管破裂及窜层的识别 .....                      | (94)         |
| <b>参考文献 .....</b>                         | <b>(100)</b> |

# 第一章 原油色谱指纹技术与分层产能确定

油田在开发过程中,为了节约成本,通常采用多层射孔合层开采。目前油田通常采用生产测井、分层测试或示踪剂跟踪等方法确定合采油井分层产能,其中生产测井是利用各种井下测试仪器定量解释每个油层的压力、温度、流体密度、体积流量等各种物理参数,来研究油井的产液贡献,了解地下油气运动规律和剩余油的分布。这些方法的缺点是费用高、周期长,有时还需在关井停产条件下进行,并且对发生层间窜通的油井不适用,作业过程中还容易伤害油层。原油指纹技术提供了一种简便实用的确定合采油井分层产能贡献的方法,它是利用单层原油色谱指纹差异及混合原油的指纹变化直接确定分层产能贡献。

原油指纹指的是原油中通过色谱或色质分离的特征化合物,指纹技术是利用分层原油的指纹差异,直接确定合采油井分层产能贡献。它只需在井口定期采集油样,通过室内分析及计算就可了解油层的工作情况,为合采油井分层产能的确定提供一种简便、经济、实用的方法。

Chevron 公司 Kaufman 等人(1987,1993 和 1997)在十多年前就开始用原油色谱指纹技术来计算两层合采油井分层产能贡献。国外已将这项新技术用于油藏的生产管理,并在苏丹、北海、加利福尼亚、印度尼西亚和中东等一些油田的应用中取得良好的效果。Mark A. Mccaffrey(1996)还根据不同油层之间原油生物标志化合物的差异来监测加利福尼亚 Cymric 稠油油藏注水及注蒸汽后的产能变化,评价油田采用的各种生产措施实施的效果。

该技术与其他监测方法相比较,优点是简便、经济、快速,不伤害油层,只需在井口定期采集油样,通过实验室色谱分析和计算,就可了解油层的工作情况以及油藏的非均质性,为油田产能监测、剩余油分布研究及多油层的产量分配计算提供一项新技术。

## 第一节 原理与方法

### 一、基本原理

色谱指纹是指原油中通过色谱或色质分离的特征化合物(一般为全油色谱图上的支链烷烃、环构烷烃和部分芳香烃)。用原油色谱指纹确定分层产能是基于以下原则:

(1)原油混合过程中不发生化学反应,原油从地层到井筒再到井口混合均匀。

假设原油混合过程中不发生化学反应,混合只是个物理过程,即原油中某个化合物与另一种含有这个化合物的原油混合在一起时,只是指纹比值发生变化。

(2)不同流动单元的原油指纹存在差异,同一流动单元的原油色谱指纹具有相似性。

原油的指纹特征受源岩类型、成熟度、油气运移、储层非均质性、水环境以及次生变化(如生物降解和水洗)等诸多因素的影响。即使是同来源的原油,如果储层存在非均质性,那么源岩在“不同时期”生成的原油将进入油藏的不同部位。先期生成的油进入排替压力小、孔隙大、喉道粗的储层中,而晚期生成的油则进入排替压力大、孔隙小、喉道细的储层中。因储层非均质性的作用,进入储层不同部位的油气混合(重力或密度作用)将受到阻碍(图1-1, England, 1990)。又由于油气的生成和运移存在阶段性,不同时间(阶段)生成的油气的地球化学特征不同,因此进入储层不同部位的原油将继承源岩生成时的特征,使不同层的原油指纹存在差异。

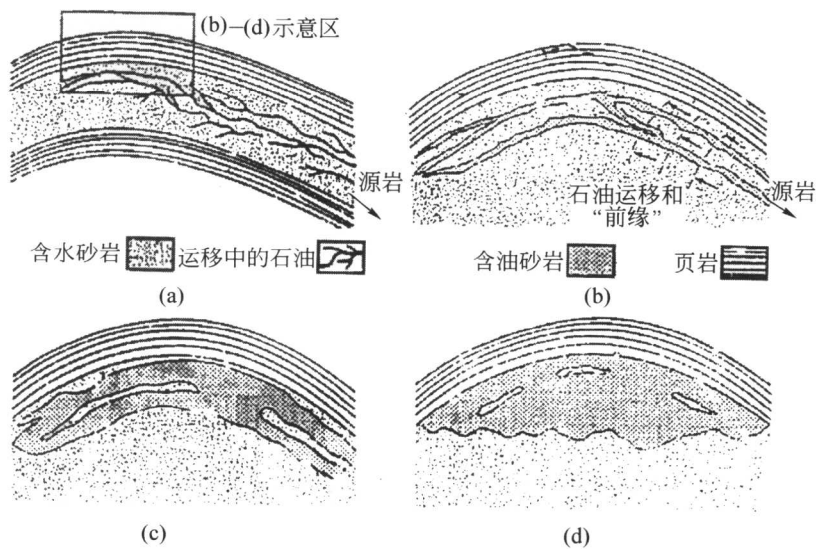


图1-1 原油充注示意图(England, 1990)

另外,原油色谱指纹的变化在成藏过程及成藏后,以及开发过程中都可能发生。但是,对同一油藏区域、同一开采状态下的开发条件引起的这些变化都是相对稳定的,因此可以根据原油色谱指纹的变化规律来确定油层的产能变化。

原油中这些微小差异用常规的分析方法,如原油的密度、粘度及含蜡量,甚至常规的色谱分析方法,均难以区分开来,特别是对于同一源岩生成的原油,因为原油的地球化学特征相似,只有采用高分辨率的色谱分析方法才能将原油中的微小差异区分开来。目前我们开发的高分辨率原油全烃色谱分析技术(见第二节)可

将原油中正构烷烃之间的异构体区分开来,这为不同层原油微小差异的区分奠定了技术条件。

用原油色谱指纹技术确定合采油井分层产能贡献的原理就是根据单层原油和混合原油的指纹差异及混合原油的指纹变化特征,配合室内不同比例的原油配方实验,确定计算模型,求得分层产能贡献,其中单层原油指纹差异的区分与筛选是该技术应用的关键。

因色谱分析进样时,每次分析的进样量不可能完全相同,因此为了消除因进样量不同和仪器波动引起的误差,一般选择相邻或间隔化合物的峰面积(或峰高)比值,即原油指纹(化合物)比值来计算分层产能贡献。

(3) 色谱指纹的可配比性。利用原油指纹对流体动态地球化学监测的技术关键在于单层原油存在差异以及混合后指纹参数发生变化,即单层原油中某个化合物与另一种含有这个化合物的原油混合在一起时,其指纹比值随单层油样在混合油样中的贡献按比例呈规律性变化,这是原油色谱指纹用于油井产能监测的理论依据。

(4) 单层原油指纹的稳定性。油气在运移途径中及进入储层后,烃类与储层岩石之间的相互作用对原油指纹有影响,但影响较大的是一些极性化合物,如芳烃类,而对烷烃类化合物的影响较小。成藏后的生物降解、水洗、相变化等次生作用都可以使原油的指纹发生变化。但是,对同一油藏或油区,在同一开采状态下的开发条件引起的这些变化是相对稳定的。

## 二、原油指纹技术在油田开发中的作用

(1) 用于定期计算油井分层产能,监测油层的产能变化。如对一个油田的某一区块油井进行定期取样(图 1-2),和色谱分析,计算各井层不同时期的产能分配,就可了解油层的工作情况。

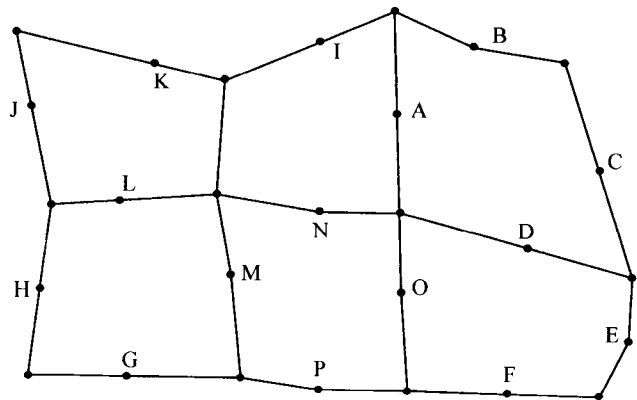


图 1-2 某油田的井位分布图

(2) 监测注水(蒸汽)波及的范围及其对分层产能的影响(图 1-3、图 1-4 和图 1-5), 了解各油层储量动用情况及油层在水平上的非均质性, 为开发方案的制订及调整提供依据。

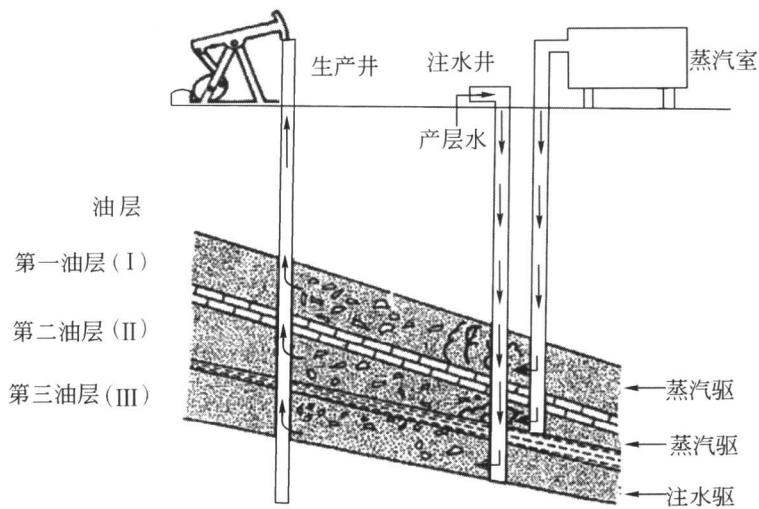


图 1-3 三层合采示意图(Kaufman,1990)

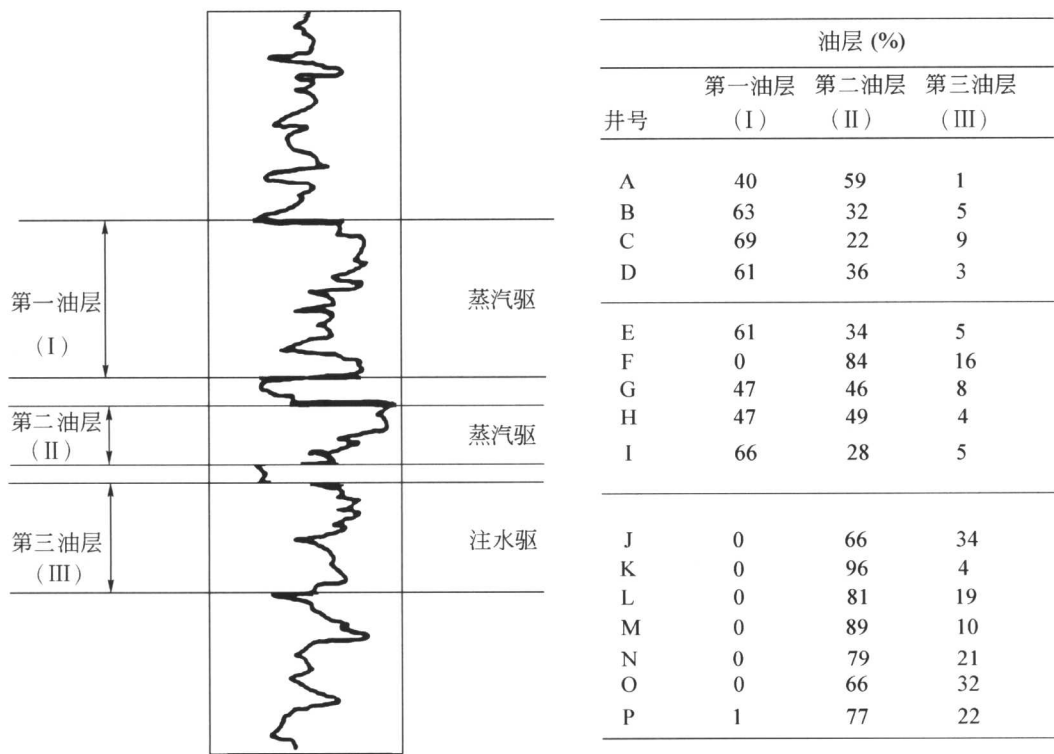


图 1-4 原油指纹计算的各油层的产能分配(Kaufman,1990)

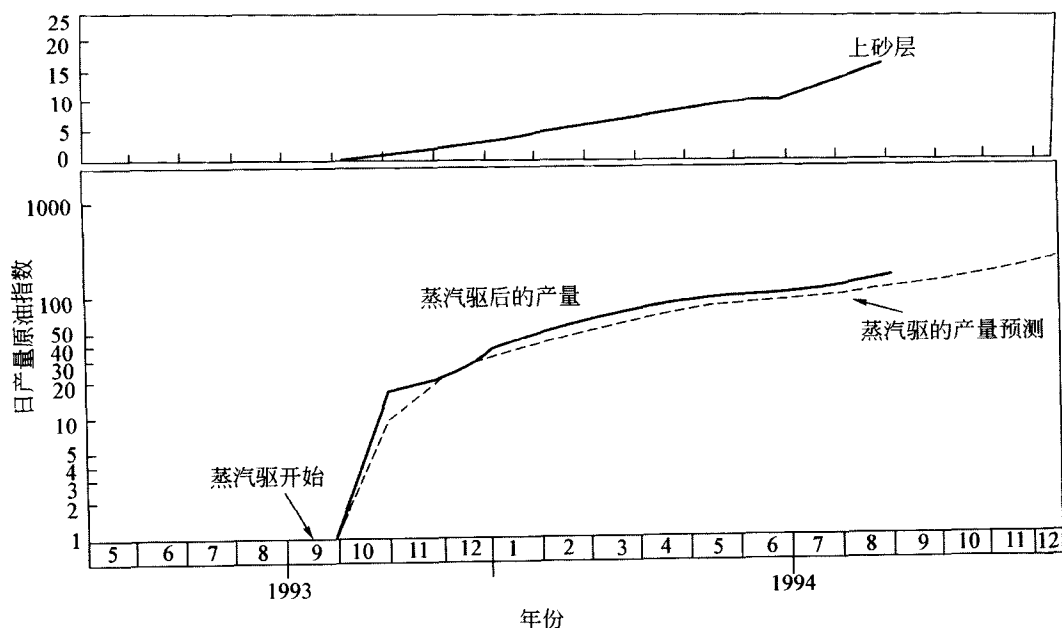


图 1-5 原油指纹计算结果与预测的产能变化对比图 (Kaufman, 1990)

根据原油色谱指纹计算的日产原油指数资料

(3) 油管破裂(腐蚀)引起的合采及层间窜层的识别。为节约成本,许多生产井都是两层或两层以上合采的。随着生产时间的推移,油管可能遭到腐蚀造成油管泄漏而引起合采。根据井口不同时期原油的指纹变化可确定因油管破裂引起合采(层间窜层)的时间,判断油层是否发生层间窜层。

(4) 分散油田产能分配。原油色谱指纹法不仅可用来确定多层合采的产能监测问题,而且还可用来监测多油田,尤其是分散油田的产能监测,计算不同时期各分散油田的产能分配。

(5) 分层产能计算的步骤。首先分析与区分某油田单层原油的色谱指纹(包括生物标志化合物)差异,选择相关化合物(主要是原油全烃色谱图上的支链烷烃和环构烷烃),并以各单体烃指纹的峰高比值来表征色谱峰参数,建立单层原油指纹库,然后根据油田的开发层系确定原油配方方案,再根据配方原油的指纹变化特征,确定计算方法,建立计算模型,编制相应的分层产能计算软件。步骤如下:

① 样品分析。原油样包括单层油样和井口混合油样,最好采用测试油样作为单层原油样品。如没有单层油样,可用储层岩心抽提物。

② 高分辨率原油全烃色谱分析及色谱指纹数据库建立。单层原油指纹分析与区分(图 1-6 和图 1-7),建立单层原油原始色谱指纹库。原油全烃色谱分析方法见实验部分,每次分析的条件尽可能相同,这样有利于色谱峰号的标定与确

认,以避免峰号错位。

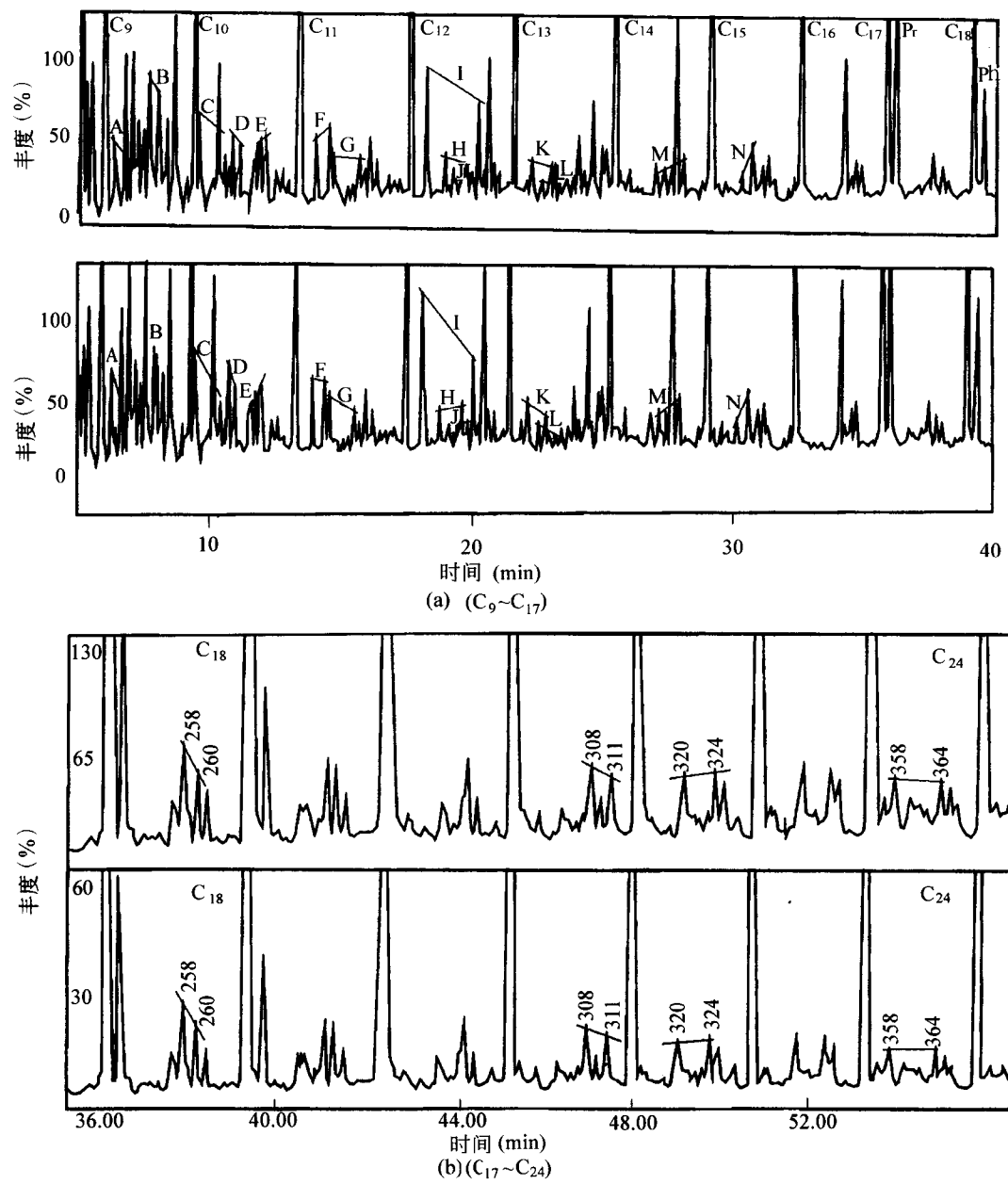


图 1-6 单层原油色谱指纹对比图

图中 Pr 为姥鲛烷, Ph 为植烷

③实验配方,计算方法确定与模型建立。根据油田生产情况,确定配方元次。图 1-8 是两元原油指纹变化图。根据混合原油的指纹变化(图 1-9、图 1-10 和图 1-11)确定计算方法,建立分层产能的计算模型。

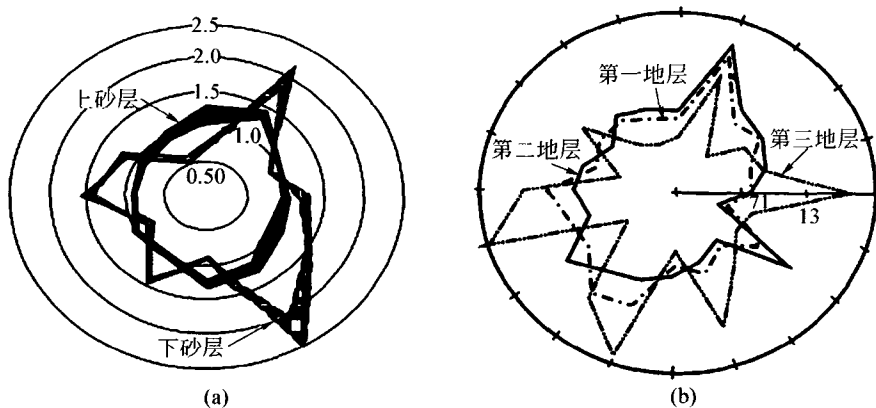
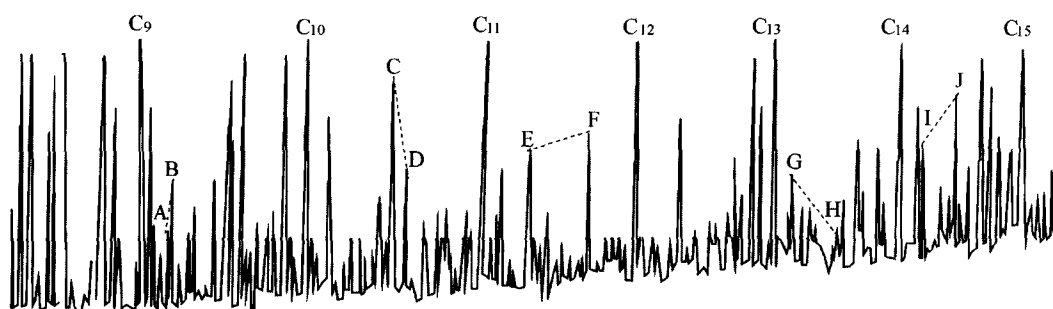
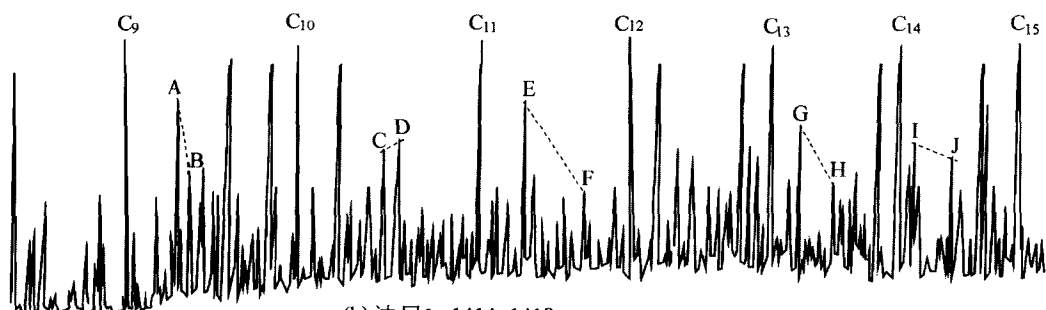


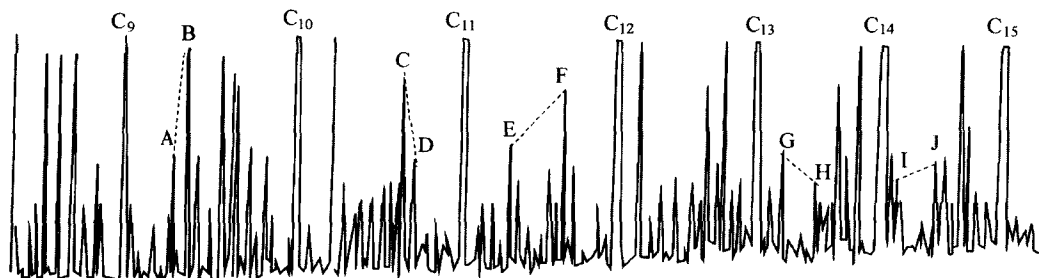
图 1-7 二层和三层原油的指纹对比图



(a) 油层1: 1323~1328 m



(b) 油层2: 1414~1418 m



(c) 混合油层: 油层 1 和油层 2 的混合油样

图 1-8 某井单层原油与混合原油的指纹变化图

图上 A—J 分别表示单个指纹,虚线相连的为差异较明显的指纹对

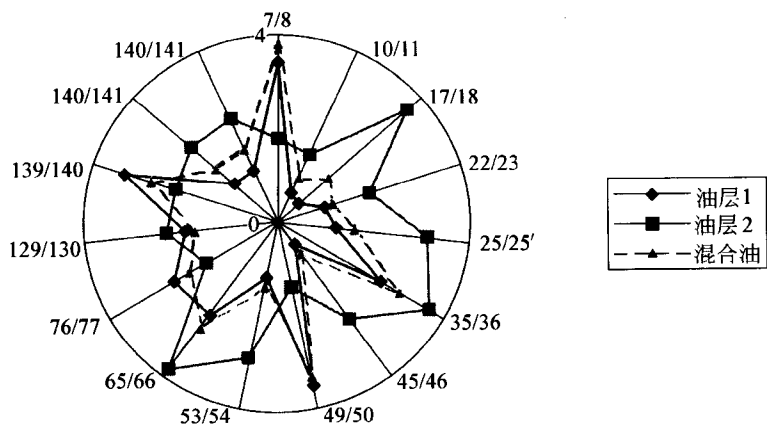


图 1 - 9 某井单层原油与混合原油的指纹对比图

油层 1:1323 ~ 1328m; 油层 2:1414 ~ 1418m

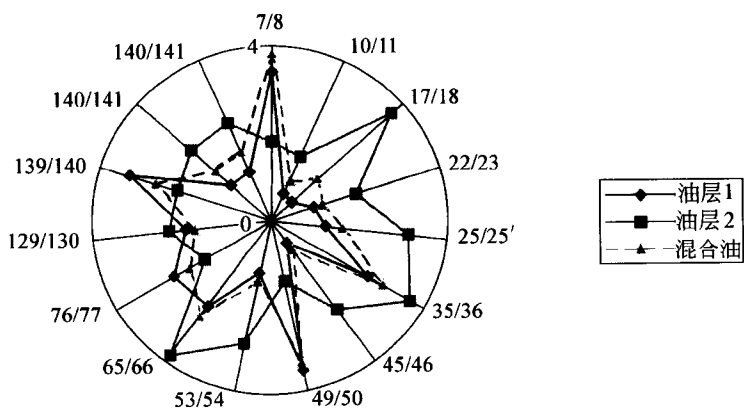


图 1 - 10 某井单层原油与混合原油的指纹对比图

油层 1:2133.5 ~ 2141m; 油层 2:1186 ~ 1192m

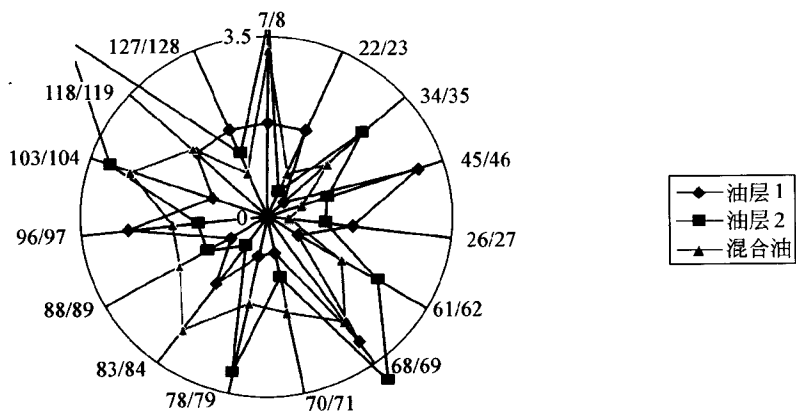


图 1 - 11 某井单层原油与混合原油的指纹对比图

油层 1:Ⅳ - 5 油层; 油层 2:Ⅳ - 4 油层

④特征指纹的区分与筛选。原油全烃色谱图上化合物有几百个,但不是所有的化合物都能表征单层原油的差异,因此要对原油指纹进行筛选。原油指纹筛选包括人工筛选和计算机筛选,原则是选择色谱分离效果好的并能反映单层原油的特征指纹。单层原油指纹差异可用星状图表现出来,见图 1-7。

⑤指纹数据的输入与计算。分析数据的输入一定要对号入座,峰号不能错位。数据输完后存盘,在计算前先检查筛选结果,如发现指纹比值相差大的指纹,应检查原始数据是否输错。详细分析和计算过程见图 1-12,关键技术是色谱分析的精度、单层原油指纹的区分和原油指纹的筛选。

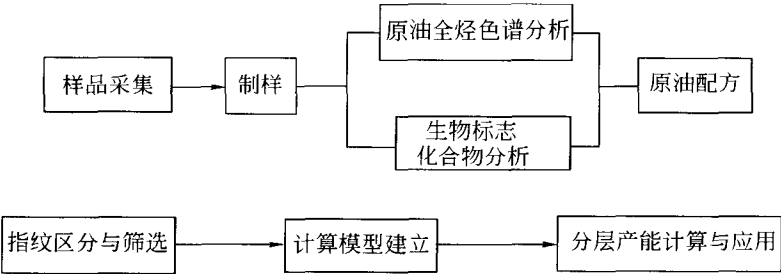


图 1-12 分层产能贡献计算流程图

## 第二节 高分辨率原油全烃色谱分析

原油指纹技术能否用于分层产能计算的先决条件,是不同层的原油指纹存在差异,并能区分开来。因此需开发一种高分辨率原油全烃色谱分析技术,将原油中正构烷烃之间的异构体分离开来,进而将不同层原油的细微差异区分开来。

### 一、分析仪器

色谱仪 HP5890 II 型气相色谱仪;

色谱柱型号:PONA 柱,长 50 ~ 60 m。

### 二、分析条件

程序升温 :50℃  $\xrightarrow{1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}}$  110℃  $\xrightarrow{2^{\circ}\text{C}/\text{min}}$  300℃ ;

载体为氦气,纯度为 99.999%;

进样量  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{L}$ , 正构烷烃达到饱和即可。

### 三、常规的色谱分析与全烃色谱分析的比较

常规的色谱分析只能分离正构烷烃及部分异构体(如 Pr, Ph)(图 1-13), 正构烷烃之间的异构体大多数分离不开, 这样原油中很多重要的信息将被掩盖, 无法将不同小层的原油指纹区别出来。采用高分辨率全烃色谱分析技术可将正构烷烃之间的绝大多数异构体(支链和环状化合物)分离开来(图 1-14), 它给出的信息量大, 单  $\text{C}_8 \sim \text{C}_{25}$  就有 500 多个化合物, 因此高分辨率原油全烃色谱分析技术为不同小层原油指纹差异的区分与对比提供了技术保证。

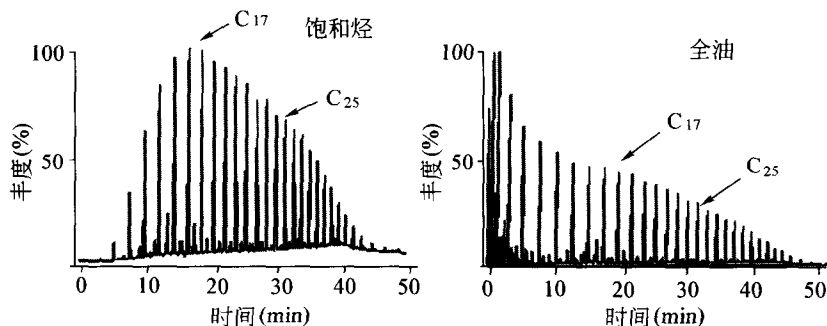


图 1-13 常规饱和烃色谱和全烃色谱图

采用相同分析条件对原油进行全烃色谱分析, 两次分析相同化合物的比值绝对误差在 2% 以内, 个别为 3%(表 1-1 和表 1-2), 说明稳定性好, 可用作不同层原油指纹的区分与对比。

表 1-1 原油全烃色谱分析重复实验数据对比表

| 峰 比 值 | 碳 数 范 围                         | 第一次分析  | 第二次分析  | 绝对误差    |
|-------|---------------------------------|--------|--------|---------|
| 2/3   | $\text{C}_8 \sim \text{C}_9$    | 2.3952 | 2.3590 | 0.0362  |
| 3/4   | $\text{C}_8 \sim \text{C}_9$    | 2.6827 | 2.6495 | 0.0332  |
| 6/7   | $\text{C}_8 \sim \text{C}_9$    | 0.7228 | 0.7143 | 0.0085  |
| 7/8   | $\text{C}_8 \sim \text{C}_9$    | 2.4087 | 2.4097 | -0.0010 |
| 12/13 | $\text{C}_9 \sim \text{C}_{10}$ | 3.7967 | 3.7534 | 0.0433  |
| 14/15 | $\text{C}_9 \sim \text{C}_{10}$ | 0.5712 | 0.5725 | -0.0013 |
| 17/18 | $\text{C}_9 \sim \text{C}_{10}$ | 0.8182 | 0.8261 | -0.0079 |