

H 获“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助
UO XI'AN SHIYOU DAXUE YOUXIU XUESHU ZHUZUO CHUBAN JIJIN ZIZHU

准噶尔盆地西部 典型油气藏成藏 地球化学特征

刘洪军 马 阁◎著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

获“西安石油大学优秀学术著作出版

准噶尔盆地西部典型油气藏 成藏地球化学特征

刘洪军 马 阁◎著

中国石化出版社

内容提要

本书主要以石油地质学和油气地球化学等理论为指导,以准噶尔盆地西部地区典型油气藏为主要研究对象,着重分析了西北缘、盆地腹部和西南部车排子地区三个具有代表性油气聚集带的油气藏地质特征及流体地球化学特征,并在此基础上对三种典型油气藏的油气动态成藏过程进行了综合分析,探讨了油气藏形成的主要控制因素。

本书可供石油地质学、油气地球化学和成藏地质学等相关专业的科研人员以及高等院校相关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

准噶尔盆地西部典型油气藏成藏地球化学特征 / 刘洪军, 马阁著.
—北京: 中国石化出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-5114-4285-7

I. ①准… II. ①刘… ②马… III. ①准噶尔盆地—
油气藏形成—地球化学标志—研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 231163 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

710 × 1000 毫米 16 开本 12 印张 209 千字

2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

定价: 48.00 元

前 言

准噶尔盆地是我国西部地区重要的大型含油气盆地之一，油气资源十分丰富，经过几十年的勘探，已经在该盆地内发现近 30 个大小不等的油气田，成为我国目前几个年产油气当量超过 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 的主要产油气区之一。随着我国东部油气区相继进入勘探开发中后期，西部地区的塔里木盆地、准噶尔盆地就理所当然地成为我国今后重要的战略石油接替区。三次资源评价的结果表明准噶尔盆地还有很大的勘探潜力。那么，如何找到准噶尔盆地未探明的丰富资源量，就成为勘探家面临的艰巨任务。在油气成藏研究方面，不仅要分析油气藏成藏要素之间的静态组合关系，还要从整体着眼，研究生储盖组合关系以及优势输导体系的类型和组合形式，并分析在不同地质历史时期成藏要素组合的动态变化，在这一基础上找到准噶尔盆地不同区域油气成藏的主要控制因素及其形成规律，进一步归纳出各典型油气区的油气藏成藏模式，从而更好地为准噶尔盆地的下一步油气勘探服务。

本书利用石油地质学和油气地球化学方法，首先对油源、油气的运移、油气成藏期、断层对油气运移和聚集的作用以及油气输导体系等油气成藏要素进行较为全面的分析和总结。具体分析了准噶尔盆地西部地区西北缘、盆地腹部和西南部车排子地区三个具有代表性油气聚集带的油气藏地质特征及流体地球化学特征，并在此基础上对三种典型油气藏的油气动态成藏过程进行了综合分析，探讨了油气藏形成

的主要控制因素。

准噶尔盆地西部地区三个典型油气聚集带具有三种不同构造带的油气成藏特征,分别为西北缘的逆冲推覆带、腹部古隆起带及西南部的晚期前陆挤压带。整体上对三个地区生储盖组合特征静态因素及油气运移聚集成藏过程等动态因素进行分析,认为准噶尔盆地西部地区的油气成藏具有复合输导高效性、多期复合叠加性及构造破坏变动性,不同油气聚集带中油气成藏控制因素存在差异。

三个聚集带油气藏的类型复杂多样,主要包括构造、岩性、地层、复合油气藏等。其中,西北缘地区以构造、构造—岩性及背斜油气藏为主,腹部地区以岩性油气藏为主,西南部车排子地区以不整合油气藏及岩性油气藏为主。不同地区油气藏内油气相态类型也存在差异,分布有稠油、重质油、轻质油及天然气等。

三个聚集带的油气成藏过程存在明显差异。西北缘地区存在三期成藏,三叠纪时,西北缘地区发育一些构造圈闭,油气开始聚集成藏,但因盖层不发育,油气容易遭受破坏而散失,部分油气发生生物降解;侏罗纪时,乌尔禾组部分烃源岩处于生烃高峰,油气发生大规模聚集成藏;晚白垩世以来,由于下部油气的调整形成次生油气藏。腹部油气聚集带油气藏聚集从三叠纪开始,在此时期腹部地区沙湾与盆1井西凹陷中下二叠统的风城组与乌尔禾组烃源岩已经进入生油高峰,但由于该区成藏条件较差,主要在腹部的低幅度构造圈闭二叠系与三叠系的储层聚集成藏;白垩纪以后,盆1井西和沙湾凹陷中下二叠统烃源岩已经结束供烃,局部地区具备供气条件;新近纪以来,油气发生进一步的调整,侏罗系八道湾组烃源岩处于生烃高峰,在永进地区聚集成藏,此外,二叠系烃源岩形成的油气沿侏罗系与白垩系不整合面向北运移,在陆梁隆起北部聚集成藏。车排子油气聚集带分布有稠油

和轻质油，通过对该地区原油中不同混源单元的计算，认为稠油为车拐断裂带深部古油藏的调整产物，轻质油主要来源于四棵樹凹陷侏罗系烃源岩。在晚三叠世至早侏罗世的印支运动期间，车拐断裂带古油藏遭到破坏，部分油气沿断裂带向上调整进入车排子地区重新聚集；晚白垩世至古近纪时期，油气在沿车拐断裂带运移过程中遭受降解并发生稠化，在部分储层中发现了少量的具有稠油特征的包裹体，仅有部分原油聚集成藏；新近纪以来，四棵樹凹陷侏罗系烃源岩处于生烃高峰，一部分原油在侏罗系成藏，另一部分原油沿垂向断裂运移至古近系后沿不整合面在新近系储层聚集成藏。

本书的研究成果对于具有相似地质特征油气藏的成藏地球化学过程研究具有一定的借鉴和指导意义。

由于笔者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 相关研究概述	(1)
第二节 准噶尔盆地研究现状及存在问题	(75)
第二章 准噶尔盆地西部地区区域地质特征	(78)
第一节 构造沉积演化特征	(78)
第二节 盆地断裂特征	(83)
第三节 地层分布特征	(84)
第四节 石油地质特征	(89)
第三章 准噶尔盆地西部地区油气分布及聚集规律	(90)
第一节 油气相态及分布规律	(90)
第二节 油气藏类型	(92)
第四章 准噶尔盆地西部地区典型油气藏成藏地球化学特征	(98)
第一节 腹部油气聚集带——以车莫古隆起南北两侧油气田为例	(98)
第二节 西南部油气聚集带——以车排子地区春光油气田为例	(120)
第三节 西北缘油气聚集带——以克百油气田为例	(139)
第五章 准噶尔盆地西部地区油气成藏特征与控制因素	(148)
第一节 油气成藏特征	(148)
第二节 油气成藏控制因素	(155)
参考文献	(169)

第一章 概述

准噶尔盆地是我国西部重要的大型含油气盆地之一,油气资源十分丰富,经过几十年的勘探,目前已经在该盆地内找到近 30 个大小不等的油气田,成为我国当前年产油气当量超过 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 的主要产油气区之一。随着我国东部油气区相继进入勘探开发中后期,我国西部的塔里木盆地、准噶尔盆地就理所当然地成为我国今后重要的战略石油接替区。第三次资源评价结果表明:准噶尔盆地油气总资源量达到 $106.77 \times 10^8 \text{t}$,其中油资源量 $85.87 \times 10^8 \text{t}$,天然气资源量 $2.09 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。截至 2010 年年底,准噶尔盆地石油累计探明储量 $20.9 \times 10^8 \text{t}$,油气资源探明率分别为 24.4% 和 8.5%,根据世界经验推测,准噶尔盆地原油探明储量正处于增长高峰期,天然气勘探前景巨大。三次资源评价的结果说明准噶尔盆地还有很大的勘探潜力。那么,如何找到准噶尔盆地未探明的丰富资源量就成为勘探家面临的艰巨任务。在油气成藏研究方面,不仅要分析油气藏成藏要素之间的静态组合关系,还要从整体着眼,研究生储盖组合关系以及优势输导体系的类型和组合形式,并分析在不同地质历史时期成藏要素组合的动态变化,在这一基础上找到准噶尔盆地不同区域油气成藏的主要控制因素及其形成规律,进一步归纳出各典型油气区的油气藏成藏模式,从而更好地为准噶尔盆地下一步的油气勘探服务。

第一节 相关研究概述

一、原油族群划分及油气源分析

(一)原油族群划分

根据油源条件或运聚成藏过程中的地球化学变化造成的组成差别,可将石油划分为若干个族群与组群。石油的族群(Oil Population)是指具有一套明确的油源岩,其地球化学特征与其他油源的石油具有明显差别的一组石油,也就是说同一族群的石油必须来源于同一套源岩层,但不必具有相同的成熟度、运聚和保存条

件。同一族群的原油在二次运移过程及聚集成藏后，由于油藏温度、压力、孔隙水特征的变化或后期原油及天然气的注入，将发生一系列地球化学变化，导致其组成特征可能存在明显的差异。我们把具有相同油源条件，并且具有相同或相近的地球化学特征的一组石油划为一个石油的组群(Oil Family)。同一族群的石油可能为一个组群，也可能为若干个组群(图 1-1)。

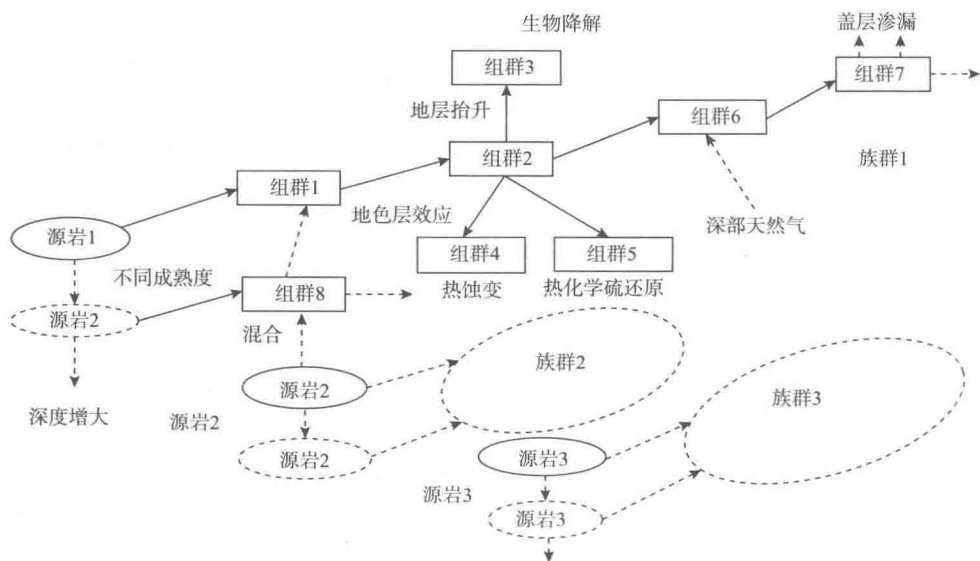


图 1-1 原油族(组)群含义及划分图(据张枝焕等, 2004)

油藏内的石油具有相似性继承的特征，即来源于同一油源的原油其基本组成特征是相似的，只要成藏石油在运移聚集过程中具有相同的地质条件，这种相似性就可以保存下来。而来源于不同油源的石油在组成上具有内在的差异，这种差异也可以在油藏内保留下来，因此源岩条件是决定原油组成特征的重要因素。人们常以此作为油气源分析与对比的主要依据，这种认识在大多数情况下都是正确的。但是，除源岩因素外，还有许多其他的原因可能导致油藏内流体组成存在非均质性现象(张枝焕等, 2003, 2004)。运聚成藏过程和成藏后所经历的地球化学变化也是造成油气组成发生变化的重要原因，在某些情况下比源岩条件的影响更大。归纳起来，造成油藏内流体组成差异的主要因素包括以下几个方面：①反映油田聚集史和多油源的成熟度及源岩的有机相的差异(England 等, 1987; Karlsen 等, 1991; Ruckheim 等, 1989; Hillebrand 等, 1992)；②油藏内原油的生物降解和水解作用(Milner 等, 1997; Palmer, 1984)；③油藏内原油的热蚀变作用(Hwang 等, 1994)；④重力分异作用和焦油席的形成(Hirschberg, 1984; Dahl,

1986); ⑤流体—岩石相互作用和油气运移过程中的分馏作用(Hwang 等, 1994); ⑥储层孔隙度和渗透率以及油藏构造、地层特征的差异(Hillebrand 等, 1992); ⑦原油(生物标志物)浸析作用(William 等, 1997); ⑧热化学硫还原作用(Peters, 2002; Wordan, 1995)等。

由于导致原油组成存在差异的原因十分复杂, 因此在原油组群划分对比时必须充分考虑多种地质与地球化学因素。在对原油组成特征精细剖析的基础上, 根据原油地球化学的差异性划分原油的类型, 分析不同类型原油组成存在差异的成因及控制因素, 明确原油组成的差异是由生源条件的差异造成的, 还是由成藏过程或成藏后的地球化学变化造成的。如果所研究的一组原油的生源条件相同, 且组成特征没有明显的差别, 则可划分为同一个族群, 如果组成特征不同, 则表明为同一族群而不同组群的原油; 如果生源条件不同, 则为不同族群的原油。

在实际运用中, 可以首先选取原油的族组成、气相色谱、同位素资料及其相关的参数, 利用直观图件(三角图、相关性图、指纹分布图等)和数学统计方法(聚类分析、主因子分析等)划分原油的组群, 分析原油的成熟度、运移和保存条件, 探讨不同组群之间原油组成上存在差异的原因。其次根据原油生物标志物和稳定碳同位素组成特征, 分析不同组群原油之间的成因联系, 并在此基础上, 根据反映生源和沉积环境的地球化学参数确定原油的族群。如果原油的生源和沉积环境是一致的, 即油源是一致的, 可当作同一族群的原油(张枝焕等, 2004)。

原油中甾烷系列与萜烷系列生物标志物的组成特征可以反映原油的有机质母源输入条件、沉积环境和热演化程度等, 影响原油中甾烷、萜烷系列化合物的分布特征的关键因素为生源条件, 并且生物标志物在原油中的分布是相对稳定的, 轻度到中等程度的生物降解作用对其没有明显的影响, 运移效应对大部分生物标志物参数也没有明显的影响。因此, 生物标志物参数是划分对比原油族群的最理想的参数, 可以根据其指纹特征的差异对原油进行族群划分对比(张枝焕等, 2004)。在根据生物标志物参数划分原油族群时, 必须考虑以下几个方面的问题: ①生物标志物组合特征除了受生源影响外, 还受到其他诸多因素的影响, 不同的异构化参数所反映的地球化学问题存在差别, 对于未受生物降解作用的原油而言, $\alpha\alpha\alpha(20R)$ - 甾烷 C_{27}/C_{29} 、 $\alpha\alpha\alpha(20R)$ - 甾烷 C_{28}/C_{29} 、藿烷 + 莫烷 C_{29}/C_{30} 主要反映原油的生源母质; 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷、(藿烷 + 莫烷) C_{29}/C_{30} 主要反映沉积环境; C_{31} 藿烷 $22S/(22S + 22R)$ 、 C_{30} 莫烷/藿烷、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 、 $\alpha\alpha\alpha - C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 、 C_{32} 藿烷 S/R 等参数主要反映成熟度参数。②对生源相同

而成熟度存在差异的原油,反映沉积环境和生烃母质的标志化合物是判断两组或多组原油是否来源于同一生源的良好标志。③对生物降解原油,必须首先根据多项原油组成和生物标志物参数综合分析原油的降解程度,再根据不同生物降解程度的原油选择不同的生物标志物分析原油的生源条件。如对于轻微降解的原油,正构烷烃会受到不同程度的改造,但类异戊间二烯烷烃、甾/萜类生物标志物基本上未受影响,因此可用于原油生源分析;严重降解的原油,类异戊间二烯烷烃和甾类化合物也可能受到不同程度的影响,不能客观地反映原油的生源条件,而藿烷、重排甾烷和芳香甾烷没受影响,可作为生源分析的依据。④对黏土矿物吸附作用比较敏感的化合物(如极性化合物)及其相关的参数,在原油组群划分时必须充分考虑运移效应及油藏内黏土矿物作用的影响。⑤对于两期乃至多期混合的原油,在使用原油组成、生物标志物和稳定同位素资料时,必须结合其他地质资料进行综合分析。⑥对于存在多套成熟度差别较大的烃源岩,且储层与烃源岩互层的含油层系,还必须注意浅层烃源岩对来自深部成熟度较高的原油的浸析作用。

(二)油源对比

油源对比包括油气与源岩之间以及不同储层中油气之间的对比两个方面。通过对比研究可以确认含油气盆地中的石油、天然气与源岩之间的成因联系、油气运移的方向和距离以及油气的次生变化。

油源对比研究的三个主要对象是烃源岩中不溶的干酪根、可溶的沥青以及聚集在圈闭中的石油、凝析油和天然气。油—源(油—油)对比的基本原理是同源的油气在化学组成上具有一定的相似性,而非同源的油气其化学组成则会表现出较大的差异。这一现象从宏观特征到单体化合物之间的范围内都存在。我们可以选择适当的参数,识别烃源岩中抽提物组成与石油相似、相同或不同的“指纹”类型,根据其相似或不相似的程度来说明石油与生油岩之间有无亲缘关系(张厚福等,1999)。

值得注意的是,由于油气的形成、运聚直至成藏具有漫长性和复杂性,油气的组分以及很多地球化学参数可能会发生很大的变化。并且油气在成藏以后还可能会受到一些次生改造作用,如生物降解、水洗、氧化、脱沥青、热化学硫酸盐还原作用等,使得油气的组分发生进一步的变化,已经成藏的油气与源岩有机质相比,其地球化学特征可能相差甚远,原始的相似性可能会变得相当模糊,有时进行油气源对比的难度会很大,因此,在作对比时应综合区域地质、构造特征及有机地化分析资料进行研究。

1. 油源对比参数的选择

在进行油源对比时,关键是要选择好对比指标。常用的油气源对比指标有:

①原油物性,如相对密度、黏度等;②V、Ni及S含量,海相原油富含V,而陆相原油富含Ni,同时陆相原油除盐湖相外,具有低S特征,也区别于海相;③族组成;④正构烷烃分布特征;⑤类异戊间二烯烷烃类比值,如Pr/Ph、Pr/C₁₇、Ph/C₁₈以及(Pr+Ph)/(C₁₇+C₁₈)等;⑥稳定碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$);⑦C₂₇⁺环状化合物:多环烷烃、甾/萜类以及芳香烃类生物标志物;⑧流体包裹体成分分析(MCI)等。

一般地,在选择对比参数进行油源对比研究时应注意以下几个方面(曾国寿,1990):①选择在演化、运移和次生变化中比较稳定的特征化合物,尤其是那些能够直接反映原始有机质特征的化合物,作为对比参数。②不同性质的原油采用不同的对比参数。轻质油主要选用汽油系列烃类分布;重质油主要选用C₁₅⁺烃类分布;降解程度较强的原油可采用受其影响较小的特征化合物,如甾类、萜类、芳烃和噻吩化合物。③为避免非成因因素的干扰,尽量少采用有机化合物的绝对浓度,而应采用系列化合物的分布形式及其相对比值。④各种参数的综合对比,单一参数总有其局限性,但是在使用不同实验室提供的生物标志物数据时,必须要十分谨慎。

2. 原油生物标志物特征在油气源对比中的应用

1) 利用正构烷烃分布特征进行油气源对比

对于凝析油或轻油(大于50API),由于缺少C₁₅⁺以上的烃类物质,因而利用生物标志物进行油源对比就比较困难,那么利用轻烃对比参数就可以很好地解决凝析油与烃源岩以及凝析油与稠油之间的对比(Jarvie等,1997;Odden等,1998)。由于这些轻烃化合物在样品采集、保存和测量时容易蒸发,当使用这些参数进行油源对比时,必须给予充分的注意,Nora等(2003)研究了这些轻烃化合物的不同蒸发率,为精确地应用这些轻烃参数提供了有效的方法。

(1) 利用轻烃对比星图进行原油对比。

选择轻烃对比参数时必须满足以下两点:①该类化合物具有较强的抗蚀变能力;②来自相同烃源岩的原油(同一族群不同组群原油)之间的化合物具有一定的稳定性。轻烃对比参数中各种化合物的沸点和溶解度是不同的,对于同一成因的原油(同一族群的原油)C₁到C₇参数的沸点差异可以表示蒸发分馏作用的强度。钟小莉等(1999)利用轻烃对比星图研究了牙哈3井第三系和白垩系储层中的凝析油和侏罗系地层中的稠油。轻烃对比星图中不同层位的凝析油之间对比参数

相似,可能来源于相同的烃源岩。然而,凝析油和稠油之间的相似程度差得多,无可对比性,表征它们的烃源岩母质类型不同,有机地球化学研究表明:该井凝析油为陆相原油,而稠油为海相原油。

(2)利用 C_4 到 C_7 烃类进行原油对比。

William(1974)在鉴定威利斯顿盆地原油和生油岩时,用气相色谱的方法分析了不同储层原油和相应的生油岩抽提物 C_4 到 C_7 馏分的各种烃类组成,作出了分别以正构烷烃、异构烷烃和环烷烃的百分含量为顶点的三角图,把各种数据标在三角图上,从图中研究它们之间的亲缘关系。

(3)利用轻烃比值进行油源对比。

Schaefer 等(1987)应用数理统计学的方法分析了轻烃比值,进行油源对比。首先,根据每个样品的色谱图计算出几个轻烃化合物比值,例如甲基丙烷/丁烷、环戊烷/1-甲基戊烷、2-甲基己烷/2、3-二甲基戊烷、庚烷/2-甲基己烷等。然后,根据这些参数,求出相关系数矩阵。用原油和烃源岩的相关系数与深度的关系作图,以相关系数的相似性极限 0.80 为基础,发现有 3 个层段的岩石与原油十分相似,浅部层段相似性更强。根据岩心和地球化学资料推断:浅部层位并不是烃源岩,而是被运移来的石油浸染过的含油层段,其下部层段才被认为可能是原油的真正烃源岩。

2)利用正构烷烃分布特征进行油气源对比

在原油饱和和馏分中,一般不存在烯烃,主要是饱和直链烷烃即正构烷烃,其通式为 C_nH_{2n+2} 。在色谱图上,正构烷烃显示出一系列近等间距峰分布,由于在非极性色谱柱上姥鲛烷和植烷峰分别跟在 nC_{17} 和 nC_{18} 之后,形成两对特征双峰,在对正构烷烃定性时先找到它们,确定 nC_{17} 和 nC_{18} ,依次算出其他各峰的碳数。正构烷烃广泛分布于细菌、藻类以及高等植物等生物体中,它是原油或烃源岩抽提物中的主要成分,且易于用 GC 检测,因此,自 20 世纪 60 年代以来即被作为生物标志物进行广泛的研究,其可以作为油气的成熟度和有机质来源的指标,也可以作为油源对比的“指纹”化合物(王培荣等,1993)。

正构烷烃的碳数分布范围、主峰碳数,特别是碳数分布形式是十分有用的参数,一般来讲,具有亲缘关系的油气常具有相似的碳数分布曲线。当原油遭受生物降解时,最容易受到破坏的是正构烷烃,如在色谱图上,一个大鼓包上有少量正构烷烃峰分布时就说明该样品可能经历过生物降解。另外,成熟度和油气运移也会影响正构烷烃的分布。总之,有很多影响正构烷烃分布的因素,应用时应该进行综合研究。

3) 利用类异戊间二烯烷烃分布特征进行油气源对比

在油气和烃源岩的抽提物中存在着无环类异戊间二烯烷烃系列, 尽管它们远不及饱和烃含量高, 但是由于结构比较稳定, 能够比正构烷烃更好地抵御微生物降解, 所以是一类重要的对比参数。主要包括 Pr/Ph 、 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 、 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 、 $\text{Ph}/n\text{C}_{18} - \text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 、 $(\text{Pr} + \text{Ph})/(n\text{C}_{17} + n\text{C}_{18})$ 和 $(\text{Pr} + n\text{C}_{17})/(\text{Ph} + n\text{C}_{18})$ 以及 C_{14} 到 C_{20} 无环类异戊间二烯烷烃的分布。 Pr/Ph 在一定范围内可以代表不同的沉积环境, Peters 和 Moldowan 等(1993)提出了 $\text{Pr}/\text{Ph} > 3$ 时可能指示在较氧化条件下的陆源输入; 而 $\text{Pr}/\text{Ph} < 0.6$ 时则指示具还原的环境, 通常是高盐度的环境, 然而 Pr/Ph 在 $0.8 \sim 2.5$ 之间若无其他证据, 则不宜用 Pr/Ph 来确定生油岩的古环境; 随着成熟度的增加, 干酪根降解产生更多的正构烷烃, 因此, $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 、 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 的比值随之降低, 物源和生物降解也会影响比值; $(\text{Pr} + n\text{C}_{17})/(\text{Ph} + n\text{C}_{18})$ 以及 C_{14} 到 C_{20} 无环类异戊间二烯烷烃的分布更多地用于油源对比。王培荣等(1994)提出塔里木盆地海相原油 $\text{Pr}/\text{Ph} < 1.3$, $\text{Ph}/n\text{C}_{18} - \text{Pr}/n\text{C}_{17} > 0.02$, 而陆相原油 $\text{Pr}/\text{Ph} > 1.3$, $\text{Ph}/n\text{C}_{18} - \text{Pr}/n\text{C}_{17} < 0.02$ 。

前面都是小于或等于 20 碳数的无环类异戊间二烯烷烃地球化学参数, 对于高分子量无环类异戊间二烯烷烃来说, 也是一种油源对比的指标。高分子量无环类异戊间二烯烷烃在油源对比时常被忽略, 这是因为 GC/MS 分析它们时, 必须除去具有相同碎片离子并且强度占优势的正构烷烃。其中, 不规则的(头对头连接)类异戊间二烯烷烃化合物是古细菌存在的特征标志物, Petrov(1990)在西伯利亚西北部的轻微生物降解油中, 发现了一系列 C_{28} 到 C_{39} 头对头连接的类异戊间二烯烷烃化合物, 认为是古细菌细胞壁生成的。有丛林藻烷则指示有稍咸或淡水湖泊藻类生源的存在。因为典型湖相原油中甾烷含量低, 甾烷又是常用的油源对比参数, 所以无环类异戊间二烯化合物对于这类原油的对比就显得重要了。Peters 和 Moldowan(1993)研究表明, 苏门答腊的湖相原油几乎不含常用于油源对比的甾烷, 使用无环类异戊间二烯化合物作参数进行对比, 取得了很好的效果。

4) 利用甾类、萜类系列化合物组成特征进行油源对比

甾烷是生物体中甾醇经过复杂的成岩改造作用转化而成的。甾醇类主要来源于真核生物, 包括藻类和高等植物。开阔的海相动物和水生浮游生物富含 C_{27} 甾醇, C_{29} 甾醇次之; 过渡相和湖相有机质兼具 C_{27} 甾醇和 C_{28} 甾醇。因此, 甾烷 C_{29} 含量高表明原始生物组分中陆生植物占优势, C_{27} 甾烷富集则表明生源组合中以水生生物来源为主。萜类化合物是分布广泛、含量较丰富的生物标志物, 常用的有三环二萜类和五环三萜类。其中, 五环三萜中的藿烷是十分重要的生物标志

物,在油气地化研究中具有广泛的应用。藿烷主要反映了原核生物(细菌和蓝绿藻)以及高等植物的输入。藿烷主要一般对于常规的油源对比,运用甾萜类的分布形式和反映源岩有机相的地球化学参数就可进行油源对比,如反映特定沉积环境的生物标志物伽马蜡烷、 β -胡萝卜烷、奥利烷等。

甾类、萜类烷烃的相对含量和立体构型特征主要受有机质母源输入条件、沉积环境和有机质热演化程度的控制,原油中甾烷、萜烷系列化合物和部分其他化学组成特征可以反映原油的有机质母源输入条件、沉积环境和热演化程度等。而且,生物标志物在原油中的分布是相对稳定的,轻度到中等程度的生物降解作用对其没有明显的影响,运移效应对大部分生物标志物参数也没有明显的影响。因此,生物标志物参数是划分对比原油族群的最理想的参数,可以根据其指纹特征的差异对原油进行族群划分对比。对于有亲缘关系的生油岩与原油甾类、萜类烷烃的相对含量、组成特征应该是相似的,因此可以根据甾类、萜类系列化合物的分布规律进行油源对比,其中生物标志物多因素对比、生物标志物系列组分指纹图对比以及生物标志物各参数相关图对比是进行油源对比的最有效的手段(张厚福等,1999)。但在根据生物标志物参数划分原油族群时,必须考虑到生物标志物组合特征除了受生源影响外,还受到其他诸多因素的影响,不同的异构化参数所反映的地球化学问题存在差别,对于未受生物降解作用的原油而言,Pr/Ph(受成熟度影响)、 β -胡萝卜烷分布特征、 $\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷 C_{27}/C_{29} 、 $\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷 C_{28}/C_{29} 、孕甾烷(升孕甾烷)分布特征、甲基甾烷和甲藻甾烷分布特征、三萜烷色谱指纹、升藿烷指数、伽马蜡烷指数、三环二萜烷和四环萜烷、三萜系列化合物组成、稳定碳同位素组成特征等主要反映原油的生源母质和沉积环境;OPE、 C_{31} 藿烷 $22S/(22S+22R)$ 、 C_{30} 莫烷/藿烷、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 、 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 、MPI、TA/(MA+TA)等参数主要反映原油的成熟度;而有些参数既受母岩性质的影响,又受成熟度的影响,如CPI、Pr/ nC_{17} 、Ph/ nC_{18} 、重排甾烷/规则甾烷、Ts/(Ts+Tm)等; C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 受成熟度与运移作用的影响;含氮化合物组成特征主要受运移作用的影响,母岩与成熟度对其也有一定的影响;此外,生物标志物参数还受到生物降解作用的影响,如25-降藿烷的分布特征可以反映原油生物降解作用的强度。因此,生物标志物参数之间的正相关性不一定是样品相关性的必要条件,而负相关性也未必是样品之间缺乏相关性的有力证据。

上述分析表明,在根据甾、萜系列化合物等生物标志物进行原油族群划分与对比时必须考虑以下几种情况:①有些参数明显受控于源岩母质和沉积环境,受

其他因素的影响较小, 这些参数仍不失为良好的油源对比参数。对生源相同而成熟度存在差异的原油, 反映沉积环境和生烃母质的标志化合物是判断两组或多组原油是否来源于同一起源的良好标志。②对生物降解原油, 必须首先根据多项原油组成和生物标志物参数综合分析原油的降解程度, 再根据不同生物降解程度的原油选择不同的生物标志物分析原油的生源条件。如对于轻微降解的原油, 正构烷烃会受到不同程度的改造, 但类异戊间二烯烷烃、甾/萜类生物标志物基本上未受影响, 因此可用于原油生源分析; 严重降解的原油, 类异戊间二烯烷烃和甾类化合物也可能受到了不同程度的影响, 不能客观地反映原油的生源条件, 而藿烷、重排甾烷和芳香甾烷未受影响, 可作为生源分析的依据。③对黏土矿物吸附作用比较敏感的化合物(如极性化合物)及其相关的参数, 在原油族群划分时必须充分考虑运移效应及油藏内黏土矿物作用的影响。④对于两期乃至多期混合的原油, 在使用原油组成、生物标志物和稳定同位素资料时, 必须结合其他地质资料进行综合分析。⑤对于存在多套成熟度差别较大的烃源岩, 且储层与烃源岩互层的含油层系, 还必须注意浅层烃源岩对来自深部成熟度较高的原油的浸析作用。

总之, 成藏石油的地球化学特征除了受到源岩因素的控制外, 还受到其他多种因素的影响, 这些因素主要有生物降解和水洗作用、流体岩石相互作用及地层层作用、油气运移过程中的相控分馏作用、热蚀变作用、不同期次充注的原油的混合作用、浸析作用和热化学硫酸盐还原作用等。成藏过程中的各种地球化学因素对原油族组成、不同系列化合物的相对含量、结构特征及同位素组成等都有影响, 在不同条件下其影响程度不同。因此, 必须充分考虑各种地质/地球化学因素的影响, 在原油族群划分对比的基础上, 开展油气源分析、油源对比研究。

5) 利用芳烃化合物组成特征进行油源对比

随着成熟度的增加, 石油的相似性增强, 特别是饱和烃中正构烷烃、异构烷烃分布逐渐趋于一致, 甾类和萜类化合物含量越来越低。显然, 使用这些参数不能用来对比高成熟度原油。然而, 芳烃作为石油和烃源岩的有机质中普遍存在的组分之一, 它具有较强的抗演化、抗氧化能力, 而且石油和烃源岩中各类芳烃的相对含量与母源性质、沉积环境以及有机成熟度密切相关(程克明等, 1989)。那么, 芳烃化合物适用于演化程度较高、构造变动复杂的油源研究和对比。目前, 芳烃化合物在油源对比研究中常采用芳烃化合物指纹对比, 该方法包括芳烃色谱图及芳烃质量色谱图两种指纹对比。这是因为芳烃色谱图及芳烃质量色谱图的对比真实地反映了原油和烃源岩之间的关系, 图上既有相似的指纹(反映原始生源

信息的稳定分子特征峰), 又有不相似的地方(反映运移分馏效应和其他改造因素影响的不稳定分子峰), 此现象反映了客观事实, 这种既具有相似部分又有不同部分的全面对比正代表了两个既有联系又有差别的物质的对立统一关系。对于相似部分, 可以从中寻找油源对比的指纹, 而对于不稳定部分, 可以探索运移、演化、保存的指标。

20 世纪 80 年代发展起来的一种新的分析技术(三维荧光光谱技术), 可以用于测定含芳烃类的物质, 是测试芳烃类组分分布和浓度的有效手段(Brooks 等, 1984)。三维荧光光谱是以激发波长、发射波长和荧光强度为坐标的三维空间谱图, 即激发波长为一维, 发射波长为一维, 荧光强度为一维, 组成一个三维数组。在激发波长与发射波长的平面上, 荧光强度的等值线生成一个“指纹图”(阮天健等, 1992)。芳烃的环数愈多, 其荧光的发射波长愈长。因此, 可以根据激发波长、发射波长与荧光强度的“指纹图”进行油源分析(李武等, 1996; 赵克斌等, 1997)。

6) 利用非烃生物标志化合物组成特征进行油源对比

非烃生物标志物是指含有氧、硫、氮杂原子的烃类化合物, 往往是沉积有机质在向烃类化合物演化过程中形成的中间产物。换句话说, 在有机可燃矿产和沉积岩抽提物的饱和烃中发现一个生物标志物, 在非烃组分中就有可能发现与其结构相对应的数个至几十个非烃类的生物标志物(王培荣, 2002)。因此, 在数量上有可能呈数量级增长。但通常由于它极性大、含量低、分离困难, 且在一般情况下, 在石油勘探中非烃类生物标志物没有比烃类生物标志物更高的实用价值, 因此, 在研究的投入上远不如烃类化合物。

但是, 对现代生物、现代沉积物有机质的研究, 在非烃生物标志物的检测以及地质应用等方面取得了很大的进步。近年来, 非烃生物标志物的应用得到日益扩展, 在油源对比研究方面也取得了很大进展(Bascimento, 1999)。这里值得一提的是, 吡咯类化合物用于油源对比。一般进行油源对比主要根据具体情况选取适当的对比参数, 这些对比参数一般源于各类烃, 特别是生物标志物和碳同位素, 而杂环化合物用于这方面的研究较少。最近, 李素梅等利用高、低相对分子质量的同系物对低熟油、烃源岩研究后发现, 过去研究中作为油气运移指标的不同类型异构体的配对参数, 在某些情况下并不适用, 而对于某些同类型的异构体, 如同属裸露型异构体的配对参数 2, 4 - DMC/2、5 - DMC 和同属于裸露型异构体的参数 1, 6 - DMC/1、7 - DMC, 有时也可以较好地用于指示油气运移的方向和相对距离, 其应用效果与其他类型参数一致。而且, 由于同种类型因受成熟