含油气盆地远距离成藏模式与主控因素

刘卫民[1)],陶柯宇[1)],高秀伟[2)],王明[2)],阿不都外里·热西提[3)],曹剑[1)]

1）南京大学地球科学与工程学院,南京,210023;

2）中石油新疆油田公司实验检测研究院,新疆克拉玛依,834000;

3）中石油新疆油田公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依,834000

内容提要: 含油气盆地油气远距离(>100 km)运移成藏是一种重要的石油地质现象,改变了关于油气运聚通常需要近源的传统认识,故虽然比较少见、实例不多、研究较少,但对于拓展勘探领域却具有重要意义。因此为给勘探应用和基础理论研究提供参考,总结了这一比较少见且有些特殊油气地质现象的基本特征,重点是成藏模式与主控因素,并评述了有待深化的科学问题。结果表明,主要依据通道,可将成藏模式归纳为输导层—不整合和输导层—断层—不整合成藏两种;成藏主控因素有多个,包括古隆起或斜坡稳定发育作为背景、油气源充足作为基础、输导通道优质作为条件、保存良好作为关键;因此具体到某一含油气盆地,若存在这些有利成藏条件,即便是距离源区较远的圈闭,也不是勘探禁区,可以形成商业性油气藏;下步工作中有待深化的研究内容包括油气源对比与油气远距离运聚的确认、断裂和不整合的作用、原生和次生成藏、运聚动力等。油气的远距离运移成藏值得加以更多的勘探和研究重视。

关键词: 油气运聚;成藏模式;输导体系;油藏地球化学;准噶尔盆地

含油气盆地油气(二次)运移是指油气自烃源层进入储层后的运动和位移,其结果,对于油气藏的形成,一是正面的聚集效应,二是负面的逸散效应,因此研究油气运移对于油气藏的勘探至关重要;此外,油气运移研究还涉及到储层中烃—水—岩体系的复杂有机—无机相互作用(曹剑等,2012a),因而是个兼具基础理论和实际应用研究意义的领域,是当前石油地质地球化学研究的一个热点,长久以来得到了持续关注(李明诚,2004;金之钧等,2005;Karlsen et al., 2006; Ligtenberg et al., 2008; Bjorlykke,2010;曹剑等,2012b)。

研究油气运移,通常要查明其诸多基本特征与要素,如方向、距离、期次、时间、方式等(黎茂稳,2000;Bekele et al.,2002),在这其中,油气的运移距离是一个重要内容,因为这关系到油气运移和勘探可以达到的范围,故凸显重要性(朱光有等,2013)。油气运移的距离理论上包括垂向和平面两方面,其中,垂向运移距离据研究最大可达数千米,相比而言,侧向(平面)运移距离要复杂许多,据胡朝元(2005)统计,可以横跨0~500 km如此大的范围,并通常将>100 km定义为远距离。有鉴于此,油气的平面远距离运移较之垂向的远距离运移得到的研究更多。实际上,在实际勘探和研究中,对于油气的垂向运聚,通常只需刻划清楚盖层分布和断裂发育及活动历史,即可大致确认油气垂向最大运聚距离,因为只有断裂才能大规模、快速、有效突破盖层的封堵,仅靠微裂隙或者油气自身的浮力作用难以突破盖层,形成垂向长距离的运移成藏(霍秋立等,1999;Underdown et al.,2008)。

总之,油气远距离侧向运聚的发现对于油气勘探和地质研究具有重要意义,因为可以拓展勘探领域,即只要条件合适,在距离生烃区上百千米之外依然可以成藏,不是勘探禁区,这改变了传统观点,即认为油气聚集通常围绕烃源区呈近源分布,因此油气勘探要围绕烃源区展开(胡朝元,2005)。综览这一领域目前的勘探和研究现状,多集中在国外的若干超大型盆地中,如加拿大的阿尔伯达盆地、美国的威利斯顿和伊利诺伊盆地等;相比而言,国内因为盆

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号41322017、41472100)的成果。

收稿日期:2014-09-05;改回日期:2015-03-16。责任编辑:黄敏。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.03.015

作者简介:刘卫民,男,1993年生。石油地质学专业。通讯地址:210023,南京大学地球科学与工程学院。Email:liuweimin.nju@gmail.com。通讯作者:曹剑,博士。Email:jcao@nju.edu.cn。

地相对较小,所以尽管也有一些实例发现,但研究程度总体还较低。研究发现,油气远距离运移成藏的基本条件和控制因素非常复杂,目前的认识并不清晰,有学者认为受输导体系固体格架的影响,也有学者认为受含油气流体自身运聚动力的控制(Bethke et al. ,1991)。这限制了对成藏规律的准确把握,或许是迄今发现成功勘探实例不多的一个重要原因,导致在实际勘探工作中,并不能完全把握距生烃中心多远可以部署井位(Bordenave,2008)。可见,对油气运移距离,特别是远距离运移成藏的分析,不仅是当前石油地质地球化学研究的一个热点,更是难点。

有鉴于此,为加深对这种比较少见、具有一定特殊性、但有重要意义油气成藏地质现象的理解与认识,并进一步应用于勘探部署,本文力图评述该领域勘探和研究现状,重点是成藏模式与控制因素。

1 油气远距离运移成藏典型实例与基本特征

油气运移距离的远近目前并未有严格界定,按胡朝元(2005)对全球约 200 个盆地成油系统油气运移距离的统计分析,发现以 10 的幂次方作为界限,可大致将油气运移划分为超短距离(0 ~ 10 km)、短距离(10 ~ 100 km)、长距离(>100 km)(图 1)。

根据这一界定,全球的长距离油气运聚实例并不多,总共不超过 20 个(图 1),比较典型的大型实例主要包括加拿大的阿尔伯达盆地,美国的威利斯顿和伊利诺伊盆地(表 1),以及中国的准噶尔、塔里木、松辽等盆地(表 2)。其中,加拿大阿尔伯达盆地是目前全球已知油气运移最长距离实例,油气在泥盆系碳酸盐岩和白垩系碎屑岩中的运移距离最长可达 500 km(Higley et al. ,2009)。

2 油气远距离运移成藏模式

油气运移成藏模式的建立是总结油气成藏与富集规律,预测油气藏分布的基础,通常需要查明油气源、期次/时间、通道等,再结合地质背景进行综合研究(Abrams,2005)。根据对油气远距离运移成藏典型实例的分析,发现油气源及其生排烃期次/时间差异较大,受控于具体盆地的烃源岩与构造发育背景,相比而言,通道具有一定的普适性(Hao Fang et al. ,2007;史建南等,2009)。据此,依通道(断裂、不整合、输导层)的不同,可将油气的远距离运移成藏模式主要归纳为 2 种:输导层—不整合、输导层—断层—不整合,如下按普遍性与重要性分别简要介绍。

2.1 油气沿输导层—不整合远距离运移成藏模式

输导层—不整合是油气侧向运移的重要途径(何登发,2007),对于油气的远距离运聚更是如此(陈中红等,2006),其中,输导层既可以是碎屑砂体,也可以是含有裂隙的碳酸盐岩,运移方向既受输导层形态的控制,也受不整合面产状的影响

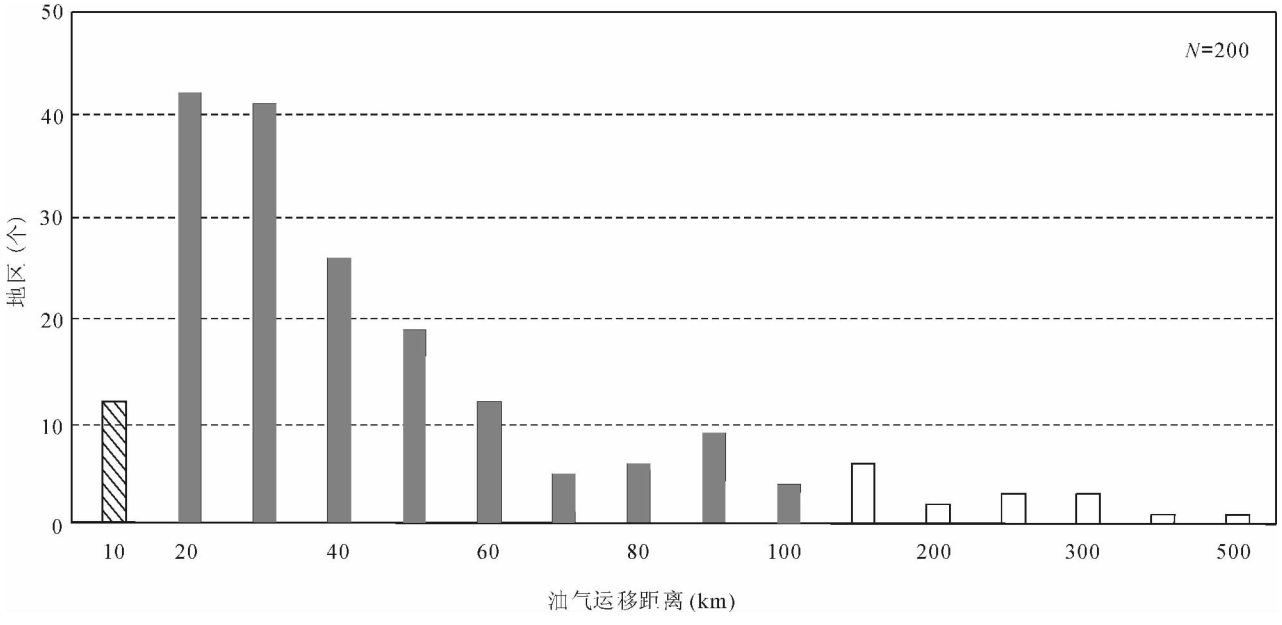

图 1 全球含油气盆地油气(水平)运移距离分布(胡朝元,2005)

Fig. 1 Distance of hydrocarbon migration in world petroliferous basins (Hu Chaoyuan, 2005)

(Bjorlykke,2010)。这类典型实例包括加拿大的阿尔伯达盆地,以及美国的伊利诺斯、威利斯顿盆地等,如下以阿尔伯达盆地为例进行简要介绍(图 2)。

如前所述,加拿大阿尔伯达盆地是目前已知油气运聚距离最远的含油气盆地,根据油源对比结果,油气运移最远可至 500 km。该盆地位于加拿大地盾和落基山脉之间,为落基山造山带东侧的一个前陆盆地,面积约 1.7×10^6 km^2(Green et al.,2005)。盆地位于古老地块和相邻造山带的前缘,地层层序具有"三层式"特征,包括最下部的前寒武系结晶基底、其上的海相被动大陆边缘型台地相地层,以及最上部的海相—陆相前陆盆地型碎屑岩—碳酸盐岩地层,后两个地层层序中发育了有利的生储盖组合(Ehrenberg et al.,2005)。盆地受邻近造山带多期构造演化的影响,表现出多期压扭与张扭作用相互交替,从而造成大量断层、不整合发育(Roure et al.,2005),在油气运聚中发挥了重要作用,如图 2,断层主要起到了垂向输导作用,而不整合和泥盆系的碳酸盐岩则构成了油气长距离侧向运聚的主要通道(Jefferson et al.,2007)。具体而言,上泥盆统 Duvernay 组碳酸盐岩生成的油气在古生代末至中生代侏罗纪,受区域性的高热流驱动,沿高渗透的碳酸盐岩优质输导层和区域性不整合面斜向向北运移,泥盆系泥岩区域盖层在此过程中有效阻止了烃类散失,为油气的远距离运移成藏提供了保存条件(Machel et al.,1996)(图 2)。

2.2　油气沿输导层—断裂—不整合远距离运移成藏模式

相较于油气沿输导层—不整合的远距离运移,叠加上断裂后,运聚通道更为立体(付广等,2001),但需要注意的是,因断裂的活动是随时间演化的,因此,当断层闭合时,仅输导层—不整合起输导作用。这种油气远距离运聚的典型实例包括国内准噶尔盆地的车排子、陆梁地区,以及塔里木盆地的塔西南地区,如下以准噶尔盆地车排子地区为例进行简要介绍(图 3,4)。

准噶尔盆地车排子地区位于盆地西部隆起南端,其西面和北面邻近扎伊尔山,南面为四棵树凹陷,向东以红车断裂带与沙湾凹陷相连,整体呈三角形,主体走向北西—南东(图 3)。该凸起为晚海西期发育形成,先后历经了强烈隆升、缓慢沉降、快速沉降等多期演化,现今表现为一宽缓斜坡(胡宗全,2004)。这一构造背景决定了车排子地区油气运聚立体通道(断裂、不整合、输导层)的发育。在车排子凸起油气成藏过程中,侏罗系提供油气源,白垩系具有沟通不整合和砂体的油源断层,油气沿着断层垂向运移,再沿新近系沙湾组一段的砂岩远距离运移,遇到圈闭成藏,而沙湾组上部的泥岩构成了良好盖层,有效阻止了油气在运移过程中的散失,运移主要依靠浮力提供动力,运移方向由东南到西北(沈扬等,2010)。

3　油气远距离运移成藏基本条件与控制因素

如前所述,影响和控制油气远距离运移成藏的因素很多,也很复杂,通常认为如下四个比较重要。

3.1　古隆起或斜坡稳定发育是背景

在业已报道并经证实的油气远距离运移实例

表 1 国外典型油气远距离运聚基本特征

Table 1 Basic characteristics of typical long-distance hydrocarbon migration cases in foreign countries

实例 / 成藏要素	加拿大阿尔伯达盆地	美国威利斯顿盆地	美国伊利诺斯盆地
距离	~500 km	160~250 km	>150 km
油气源	泥盆系 Duvernay 组碳酸盐岩	泥盆系 Bakken 组页岩	泥盆系新 Albany 群页岩
储层	中泥盆统白云岩	石炭系白云岩	石炭系砂岩
盖层	泥盆系泥岩	白垩系蒸发岩	石炭系粉砂岩
期次/时间	古生代末至中生代侏罗纪	白垩纪	白垩纪
通道	泥盆系碳酸盐岩	泥盆系碳酸盐岩、泥盆系/石炭系不整合面	泥盆系/志留系风化溶蚀面
方向	沿地层上倾方向向北	沿地层上倾向北	自南向北
动力	区域性高热流	源岩埋深加大,超压驱动	水动力和浮力驱动
模式	前陆前期烃源岩生成的油气分别向前陆斜坡带的地层圈闭和前陆冲断带的构造—地层圈闭中运移	页岩生成的油气经过断裂垂向运移,通过高渗透的碳酸盐岩和不整合面侧向运移	页岩所生油气通过水动力驱动和浮力驱动,沿泥盆系/志留系的风化溶蚀面运移
文献	Creaney et al.,1994	Gerhard et al.,1990	Bethke et al.,1991

中,均可发现存在古隆起作为背景。如以国内塔里木盆地为例,该盆地经历多旋回构造演化与变迁(张光亚等,2007),发育不同类型、不同特征的古隆起,按照地理位置可以大致划分出塔北、塔中、塔西南、塔东南四大古隆起(林畅松等,2009)。其中,仅塔东南古隆起在中生代遭受过强烈改造,相比而言,其他三大古隆起均具有长期稳定发育的特征(邬光辉等,2009)。古隆起周边凹陷区烃源岩发育,古隆起和斜坡是油气运移的有利指向区,在隆起和坳陷过渡带,岩性和构造圈闭发育,后期构造稳定,有利于油气的保存。此外,古隆起控制着沉积古地理,其边缘斜坡带可发育台缘礁滩等高能沉积相带,形成重要储层,而构造隆升末期沿古隆起边缘斜坡至坳陷边缘,常发育低位及海侵体系域,也能形成重要的储集体。

3.2 油气源充足是基础

具备充足的油气来源是油气能够长距离运移成藏的物质基础(Jonk et al. ,2005),这是因为油气属于流体矿产,因此理论而言,只要处于运移,就无时不刻在发生着逸散,故要形成规模性的油气藏,油气源必须充足。衡量油气源丰富程度的具体标志很多,如生烃凹陷面积的大小、生油层系的厚度、烃源岩的质量(有机质丰度、类型、成熟度)等。在已知的数个油气远距离运移实例中,油气源无一不是充足的(表3)。

以我国松辽盆地北部西斜坡的油气远距离运移成藏为例,此处原油大多属于成熟原油,来自于大庆长垣西侧的齐家—古龙凹陷,该凹陷面积大于5000 km^2,发育多套成熟的白垩系烃源岩,从下到上主要包括青山口组一段、二段、三段和嫩江组一段,有机质丰度高,TOC约3.14%,母质类型好,多为I型和II_1型干酪根,处于成熟—高成熟演化阶段,镜质体放射率大于1.0%(冯子辉等,2003;孙雨等,2013),充足的油气源为油气的成藏提供了物质基础。

3.3 输导通道优质是条件

油气运移发生在输导通道中,因此,输导条件优质是油气能够远距离运聚的一个重要基本条件与控制因素(Isaksen et al. ,2001),最基本的通道包括三种:输导层、断层、不整合(王震亮等,1999,赵忠新等,2002;Karlsen et al. ,2006)(表4)。

表2 国内典型油气远距离运聚基本特征

Table 2 Basic characteristics of typical long-distance hydrocarbon migration cases in China

实例 / 成藏要素	准噶尔盆地车排子地区	准噶尔盆地陆梁地区	塔里木盆地塔西南地区	松辽盆地北部西斜坡地区
距离	~100 km	~100 km	110~130 km	80~120 km
油气源	侏罗系中下统煤系湖相泥岩	二叠系中统下乌尔禾组泥岩	三叠系煤系湖相泥岩	白垩系上统青山口组一、二、三段和嫩江组一段泥页岩
储层	新近系沙湾组砂岩	侏罗系中统头屯河组和白垩系下统呼图壁河组细砂岩	白垩系巴西改组和舒善河组砂岩	白垩系下统泉头组—嫩江组细砂岩
盖层	新近系泥岩夹粉砂岩	侏罗系和白垩系泥岩	白垩系膏盐岩	白垩系巨厚泥岩
期次/时间	新近纪	晚白垩世、新生代中晚期	新近纪(5~3 Ma)	嫩江组沉积末期(75 Ma)/白垩纪末期的明水组(65 Ma)/古近纪末期的依安组(23 Ma)
通道	白垩系与侏罗系的不整合面,红车断裂,沙湾组一段厚砂岩构成的输导体系	白垩系底面的区域不整合面与中浅层正断层组成的输导体系	通过断裂沟通不整合面以及白垩系巴西改组的砂体	盆缘沟谷体系及其控制下的河道砂岩
方向	从东南到西北	自西南到东北	自北向南	自东向西
动力	浮力	构造运动	烃源岩中的异常孔隙流体压力的驱动	构造挤压应力
模式	侏罗系油源通过不整合断裂厚砂层复式输导体系运移至新近系沙湾组聚集成藏	油气沿油源断层沟通的一系列优质储层或不整合面运移,在岩性、地层、构造等有效圈闭中形成油气富集	油气沿着深大断裂进入不整合面和砂岩输导体,自凹陷向周围运移	复杂的多种成藏模式,包括地层不整合、断层—岩性、断层遮挡、砂岩透镜体
文献	张善文等,2013	陈中红等,2006	张光亚等,2007	周庆华等,2006

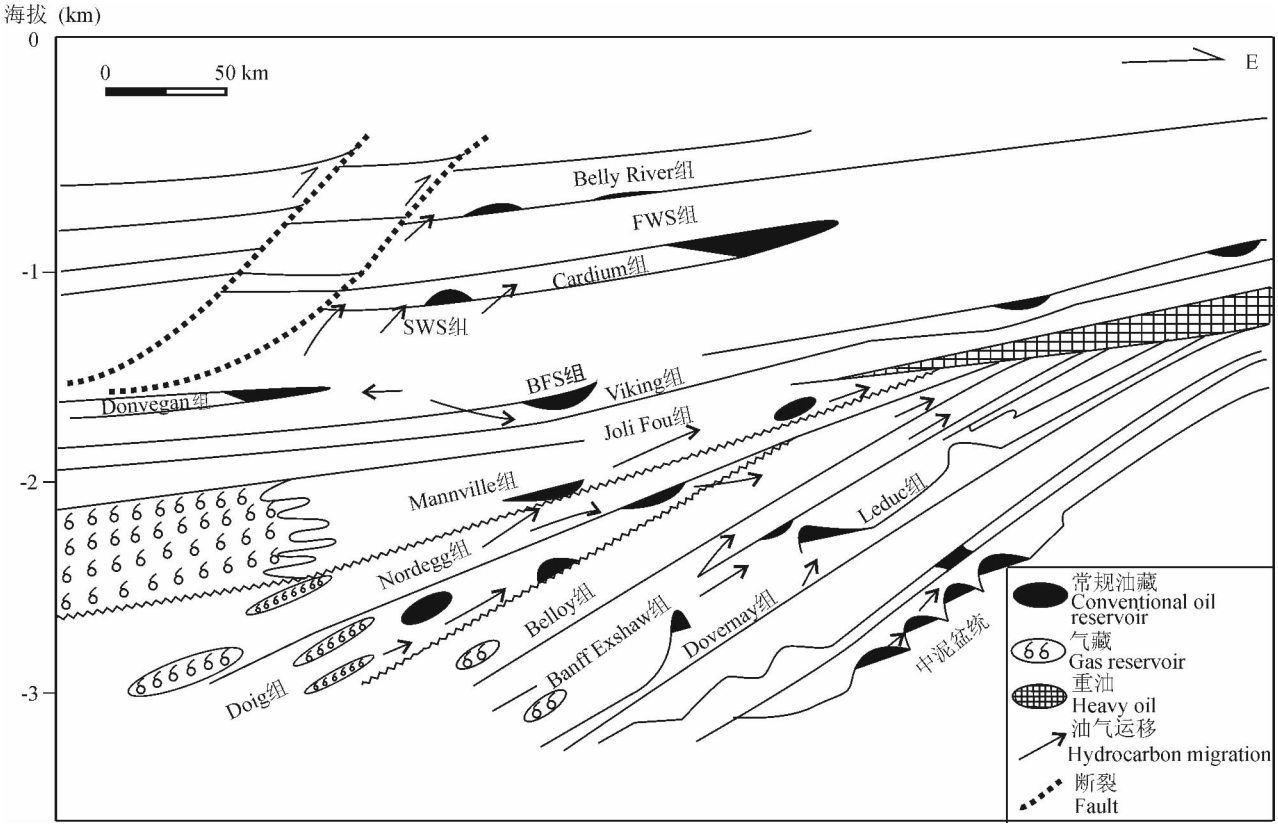

图 2 加拿大阿尔伯达盆地油气远距离运移成藏模式图(Machel et al. ,1996)

Fig. 2 Sketch model showing the long-distance hydrocarbon migration in the Canadian Alberta Basin (Machel et al. ,1996)

以准噶尔盆地车排子地区为例,如图 4,研究表明,车排子凸起新近系远源成藏是“网毯式”体系高效输导的结果(张善文等,2013)。其中,红车断裂是油源断裂,它是油气垂向运移的主要通道(Cao Jian et al. ,2010),而新近系沙湾组一段砂岩与红车断裂对接形成横向输导体,其底块砂厚度为数十到 120 m,单层厚度大,埋深浅,成岩作用弱,孔渗性高—特高,是一套区域上稳定分布的厚砂层。因此,车排子地区新近系的油气远距离成藏表现为典型的网毯式成藏体系特征,凹陷区白垩系/侏罗系等不整合面和凹陷边部的红车断裂构成了油源通道网,凸起区沙湾组一段厚砂层为毯式仓储层,成为油气运聚的集散地,而上覆的岩性体和大量小断层则构成了油气聚集网。油气成藏时,侏罗系油源就通过这些不整合—断裂—厚砂层复式输导体,运移至新近系沙湾组聚集成藏。准噶尔盆地多期构造运动与“砂—泥二元结构”的沉积背景促使网毯式输导体系普遍发育。

表 3 油气远距离运聚实例中典型烃源岩质量指标

Table 3 Indicators of source rock quality in typical long-distance hydrocarbon migration

烃源岩 / 实例	TOC(%)	有机质(干酪根)类型	Ro(%)	文献
加拿大阿尔伯达盆地	~20	I 型和 II 型	0.70 ~ 0.85	Creaney et al. ,1994
美国威利斯顿盆地	6 ~ 20	I 型和 II 型	0.74 ~ 0.97	Dow et al. ,1974
美国伊利诺斯盆地	2.5 ~ 9	II 型	>0.5	Bethke et al. ,1991
车排子	>1	I 型和 II 型	1.2 ~ 2.4	张枝焕等,2007
陆梁	0.2 ~ 1.4	I 型和 II 型	1.29 ~ 1.86	邬光辉等,2009
塔里木盆地	~5	I 型和 II 型	1.6 ~ 3	张光亚等,2007
松辽盆地	~3.14	I 型和 II_1 型	>1.0	张维琴等,2005

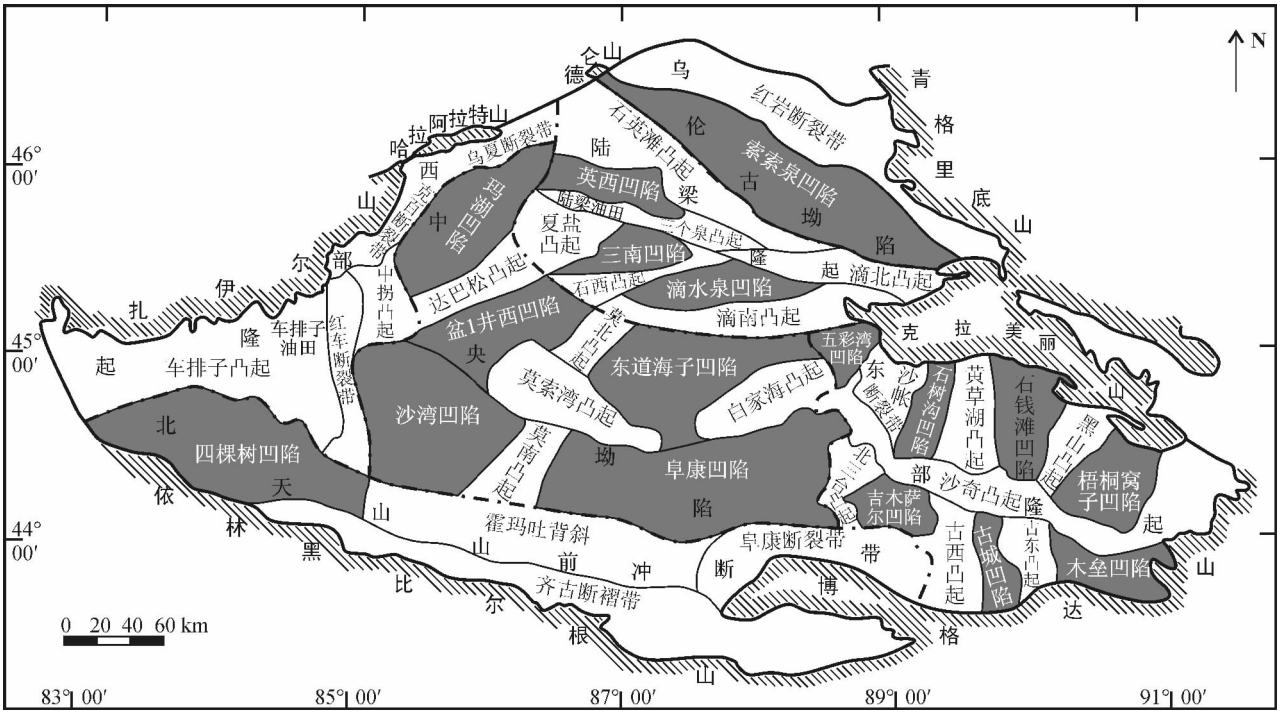

图 3 准噶尔盆地构造单元区划及陆梁和车排子油田示意图

Fig. 3 Sketch map showing the structural units and the Luliang and Chepaizi oilfields of the Junggar Basin

3.4 保存良好是关键

如前所述,油气属于流体矿产,故在运移途中始终在发生着逸散,因此要形成规模性的油气藏,除了油气源充足、输导条件有利、储层优质外,还必须具备良好的保存条件,否则再多的油气源也会散失。实际上,从现今所发现的典型油气远距离运移成藏实例来看,大多以原油为主,天然气很少,这就是因为保存条件,反映了其对油气远距离成藏的重要性(天然气较之原油易于逸散,所以很难形成规模性的远距离成藏)。考虑到地层岩石的非均质性,再加上各种构造活动都会影响油气的保存,所以地下油气的保存其实是各种地质条件综合作用的结果,定性来看,主要包括四个方面:盖层条件、构造演化、断裂活动、火山活动(表 5)。

以准噶尔盆地陆梁地区为例,陆梁隆起属于继承性古隆起,自形成起就一直是油气运聚的有利指向区,区域盖层主要为泥岩和风化粘土层(陈中红等,2006)。在构造演化及断裂方面,三叠纪与早—中侏罗世大地构造环境相对稳定,油气藏的保存条件较好;至晚侏罗世后,燕山运动在隆起区形成许多断裂,并波及斜坡区,使部分原生油气藏遭受破坏,但从另一方面讲,这些断穿区域盖层的断裂为油气

表 4 油气远距离运聚运移通道基本特征

Table 4 Basic characteristics of conduits in typical long-distance hydrocarbon migration

特征 / 基本运移通道	运移途径	质量评价标准
输导层	输导层内部连通孔隙、裂隙	质量好坏取决于其孔渗性,孔渗性越好,油气运移的距离也就越远,而孔渗性主要取决于颗粒粒度、分选、胶结,以及泥质填充等多种复杂因素的影响
断裂	断裂通道	质量好坏主要取决于断裂开启的程度,断裂开启程度越高,其中的裂隙越发育,渗滤空间越大,越有利于油气运移。而断裂的开启程度受到多种复杂因素影响,包括断裂活动程度、断裂性质、断裂填充物的性质,以及后期成岩改造作用等
不整合	孔隙	质量好坏主要取决于不整合面风化壳的孔渗性,其孔渗性越好,越有利于油气的运移,而风化壳孔渗性的好坏,主要受到风化侵蚀的强烈程度以及地表水淋滤洗刷程度等因素的制约

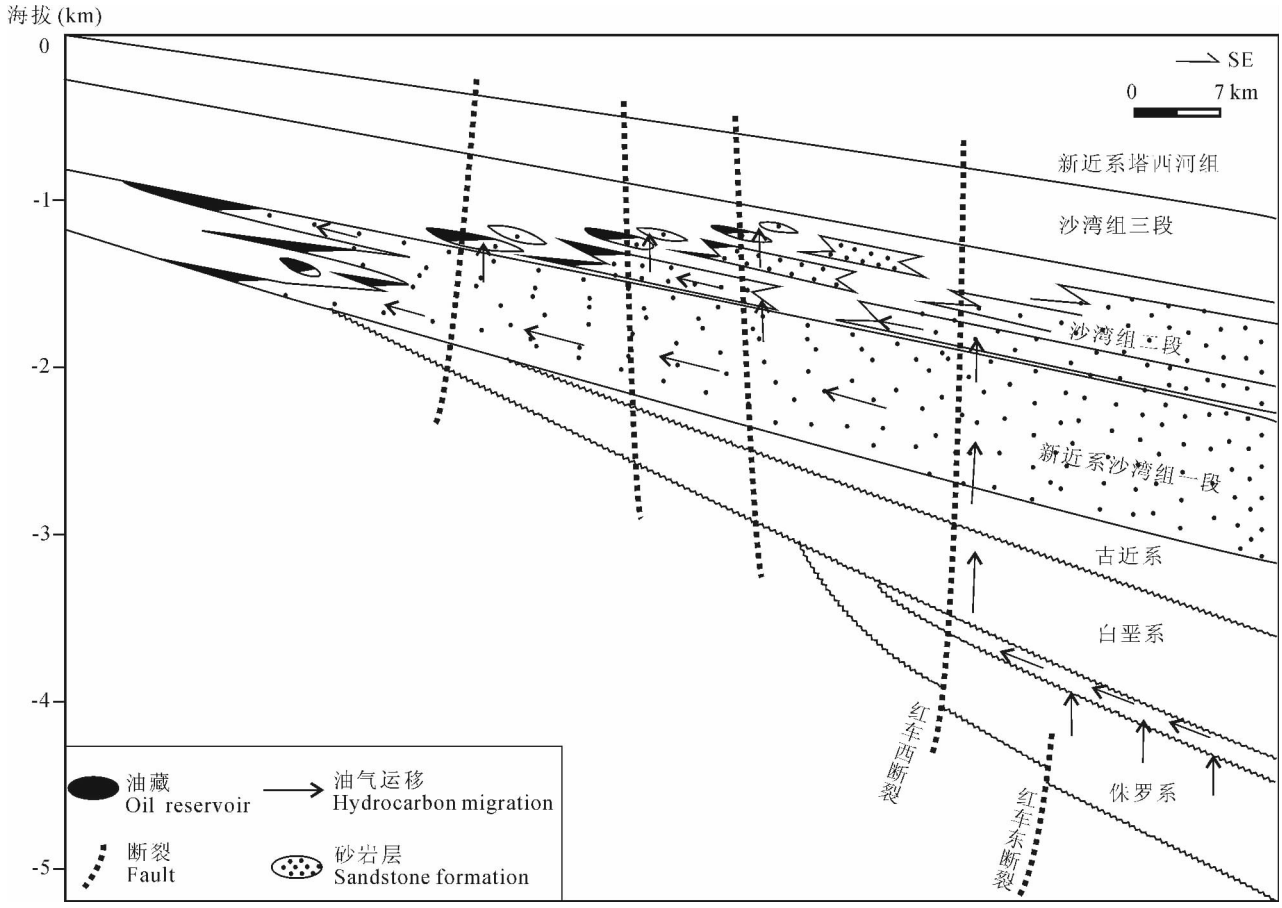

图 4 准噶尔盆地车排子凸起油气远距离运移成藏模式图(沈扬等,2010)

Fig. 4 Sketch model showing the long-distance hydrocarbon migration in the Chepaizi area, Junggar Basin (Shen Yang etal., 2010)

的运移和再分配提供了通道。至于火山活动,晚石炭世该区曾发生大规模火山活动和岩浆侵入,但当时油气并未大量生成,因此对油气保存并无影响。因此,总体来说,准噶尔盆地陆梁地区的油气运聚具备良好的保存条件,这是其油气能够远距离运移成藏的一个关键。

表 5 油气远距离运聚的保存条件及其特征

Table 5 Basic conditions and characteristics of preservation in typical long-distance hydrocarbon migration

保存条件	特征
盖层	盖层是油气能否良好保存的关键,最佳盖层是膏盐岩类盖层,而泥质岩类盖层则最常见
构造演化	地壳抬升与剥蚀会导致早期生成的油气沿古剥蚀面大量散失,而油气的生成和运移也会停滞
断裂活动	断裂活动主要分为断穿上部区域盖层的和在区域盖层之下的,前者是油气散失的通道,而后者可以使油气在区域盖层之下聚集和再分配
火山活动	油气大量生成前火山活动所形成的热量可以促进油气生成,大量油气生成之后,若伴随较大规模的岩浆侵入和火山喷发,会对油气藏产生较大的破坏

4　科学问题与展望

以上从不同角度简要介绍了油气远距离运移成藏的主要特征,如下结合我们最近在国内的工作,特别是在准噶尔盆地陆梁地区和车排子地区的一些认识与体会,分析当前该领域存在的一些问题,提出展望,以深化这一领域的研究,主要包括 4 个方面。

4.1　油气源对比与油气远距离运聚的确认

所谓油气的远距离运移成藏,顾名思义,确定距离的远/近是识别是否存在远距离成藏的首要基础,一旦关

于油气源的认识发生变化,远源成藏就可能会变成近源成藏,而近源成藏也可能变成远源成藏。进行油气源研究的主要手段是油气源对比(卢鸿等,2000)。一个理想的油气源对比指标,应满足3个基本条件:具有明确的生源意义、少受或不受成熟作用影响、少受或不受次生变化影响[1](如油气混合、水洗、生物降解、地质色层效应等)(张水昌等,2002;Chen Jianping et al.,2003)。在这方面,隶属于有机地球化学指标的同位素和生物标志化合物,特别是甾萜类化合物,发挥了巨大作用(王铁冠,1990;Fan Pu et al.,1994;傅加谟等,1995;Peters et al.,2005)。此外,还有研究提出了基于无机地球化学的微量和稀土元素地球化学方法(曹剑等,2012b)。

如以准噶尔盆地陆梁地区为例,陆梁油气田周围的主要生烃凹陷有玛湖凹陷和英西凹陷,另外在东部和南部还有石南和盆1井西两个凹陷(王绪龙,2001;国建英等,2009)(图3)。根据研究区构造演化,以及周缘各生烃凹陷的生排烃情况,结合油源对比分析,确定了盆1井西凹陷是主要的供烃区,因而陆梁地区属于油气的远距离运移成藏。首先,玛湖凹陷不可能,陆梁地区油气的主要聚集于侏罗系和白垩系,因此主成藏时间一定在侏罗纪后,而侏罗纪后整个研究区呈现为自南向北的掀斜,因此从构造演化上看,高部位的玛湖凹陷不会向低部位的陆梁地区形成油气运移。此外,玛湖凹陷的烃源岩主要位于下二叠统风城组,油源对比分析显示陆梁油气田的原油与风城组烃源岩生成的典型原油在众多生标地球化学特征上存在差异,包括 Pr/Ph、Pr/nC_{17}、Ph/nC_{18}、Ts/Tm 和 C_{20}、C_{21} 和 C_{23} 三环萜烷的分布型式等,故从地球化学特征上看,玛湖凹陷也不是陆梁地区油气的主要来源。至于石南和英西凹陷,从地理和构造位置上看,似乎也能是供烃区,若此,陆梁油气田即属于近源成藏,但是这两个凹陷实际上既无二叠系风城组烃源岩沉积,而二叠系下乌尔禾组烃源岩的生排油量也较小,无法与陆梁油田储量相匹配(王绪龙,2001)。反观盆1井西凹陷,二叠系风城组和下乌尔禾组烃源岩进入生油高峰的时间与陆梁油田形成时间匹配,且排油量巨大,陆梁油田也是盆1井西凹陷的有利指向区。另外根据油源对比分析,陆梁油田原油与环盆1井西凹陷的石南油田、石西油田和莫北油田的原油均具有很好的可比性.具有共同的供烃区(伍新和等,2004),故推测陆梁油田烃源岩位于盆1井西凹陷,陆梁油田的油气是远源成藏(王绪龙,2001)。

再以准噶尔盆地车排子地区为例(图4),该地区潜在的烃源岩包括二叠系、侏罗系、白垩系,以及古近系等多套。原油成因分析发现,研究区总体存在两大类原油(张枝焕等,2007),第一类原油具有明显的生物降解现象,稳定碳同位素偏轻,在 −30.5‰ ~ −29.3‰ 之间,Pr/Ph 比较低,一般小于1,与拐字号井原油(源于二叠系)类似,这类原油明显具有后期原油充注特征,推测主要源于沙湾凹陷二叠系,因此该部分原油并非远距离运移成藏所形成。第二类原油是轻质油,未发现生物降解迹象,稳定碳同位素偏重,在 −26.6‰ ~ −27.2‰ 之间,Pr/Ph >2.2,该类原油与车字号、拐字号井源于二叠系原油的生标参数存在比较明显的差别,经油源对比可以发现,这类原油是混源的,主要来源为四棵树凹陷侏罗系烃源岩,白垩系的烃源岩可能也有少量贡献。这些原油主要位于红车断裂带西北端中石化探区的春光、春风油田,而侏罗系烃源岩的沉积中心位于四棵树凹陷南部,故油源与油藏的距离在100 km左右(沈扬等,2010),原油属于远距离运移成藏所形成。可见,关于油气源的认识很重要,一旦发生变化,远源成藏就可能变成近源成藏,而近源成藏也可能会变成远源成藏。

4.2 断裂和不整合在油气远距离运聚中的作用

如表4,油气的远距离运移成藏可以有多种类型的通道,组合形式也复杂多样,其中又以断裂和不整合的作用比较复杂,也有一定争议。首先,对于断裂,通常而言,这是一个带,其孔渗性能远高于围岩,因此对油气的运聚效率显然高于输导体系的其他两个类型不整合和输导层(Fisher et al.,2001),据此,断裂对油气的远距离运聚具有积极效应(Aydin,2000;孙同文等,2013)。然而,反过来讲,也正因为断裂带的输导性能好,因此使得油气在沿断裂的运聚过程中,随距离的增大,油气散失的可能性也越来越高,这对油气的远距离运聚是不利的(Gartrell et al.,2006)。此外,断裂的活动通常是多旋回演化的,即活动期和静止期交替进行,在活动期通常开启,对油气起输导作用(Wall et al.,2006),而在静止期,一般封闭,对油气运聚起阻挡作用(Sorkhabi et al.,2005)。当然,需要注意的是,这种输导—封闭还与油气具体运聚系统的空间结构有关(Boles et al.,2004)。凡此种种,均增加了断裂在油气远距离运聚中作用的复杂性,目前仍无定论(Karlsen et al.,2006;贾焕军等,2013),因此在实际工作中需要具体问题具体分析。

如以松辽盆地的远距离油气运聚为例,由于断裂的影响,按离油源远近大致形成了两类油气藏(闫建萍等,2008)。其中,离油源较近的油气藏是由油气沿断裂垂向运移所形成,这类原油在运聚过程中,遇到处于静止期,且走向近于垂直的北北东向和南北向断裂,断裂起侧向封隔作用,导致原油沿断裂发生了垂向运移。另外一种情况是离油源较远的油气藏,其原油运移发生在白垩纪,此处具有长期稳定发育的断裂,且断裂走向与油气运移方向相同,均为北北东或南北向,因而油气得以沿着断裂发生长距离侧向运移,大约 80 ~ 120 km。由此可见,断裂在油气远距离成藏中有着重要和复杂的影响效应,相同/相似成因的原油因为断裂的影响,可以形成距离油源区远近不同的油气藏。

在国外的油气远距离运聚实例中,断裂作用比较典型的例子是加拿大阿尔伯达盆地。如图 2,盆地西部地层被始于中侏罗世的构造运动改造,形成了很多逆冲断层(Bekele et al. ,2002),但与松辽盆地不同的是,这些断裂在油气大量排出之前就已经闭合,因此在油气侧向运移过程中完全起着遮挡作用,断裂下盘中生成的油气不能通过断层进入上盘,只能沿下盘形成聚集。

不整合在油气远距离运聚过程中亦有着双重作用。传统观点认为,不整合是油气(长距离)运移的良好通道(Creaney et al. ,1994),但后来发现并不是所有不整合发育的地区,其油气运聚都会长距离(曹剑等,2006;何登发,2007;宋国奇等,2010)。精细研究发现,这可能受控于不整合具有复杂结构,其并不是传统认识中的一个面,具体而言,一个完整的不整合垂向上通常发育三个结构层,自上而下依次为不整合面顶板岩石、风化黏土层和半风化林滤层、未风化的原岩(Dickinson et al. ,2002;Jefferson et al. ,2007)。不同岩性岩石组成的结构层其渗透性亦不相同,不整合顶板砂砾岩、砂砾岩渗滤带通常为渗透层,正常沉积泥岩、风化黏土层、泥岩淋滤带、凝灰岩淋滤带等为非渗透层,而砂泥岩互层淋滤带则可看作是渗透层与非渗透层互层(张善文,2013)。不整合这些结构层的组合形式不同,其在油气运聚中扮演的角色也不同。特别是对于中国式的陆相盆地,沉积相带多变,空间上砂、泥岩频繁交互,不整合渗透层及其顶部非渗透层在横向上连续性差,油气虽可产生横向、垂向两种输导方式,但输导范围通常有限,很难作为油气长距离运移的通道。

因此,考虑到陆相盆地不整合横向输导范围局限,使得油气输导很少能单独依靠不整合来完成,更多的情况是与断层、骨架砂体一起共同构成复式输导体系。以准噶尔盆地车排子地区为例,生烃凹陷中的油气常常通过斜坡区的不整合面侧向运移至断阶带,后沿断裂做垂向运移,并在斜坡带圈闭中聚集成藏(沈扬等,2010)(图 4)。其中,J/K 的不整合面是侏罗系烃源岩初次排烃之后最合适的运移通道,钻井揭示了这套不整合的三层明显结构,其中不整合顶板岩石、半风化岩石中均发育渗透层且两者不直接对接,油气在不整合面上、下的渗透层中作横向运移,双重通道物性好,为油气的远距离运聚提供了保证。而在济阳坳陷,根据对 69 个第三系地层油藏油气输导方式的分析,发现约有 70% 地层油藏的油气输导是由断层、骨架砂体和不整合来共同完成的,不整合对油气的输导往往只在局部范围内起作用;而另外 30% 地层油藏的油气输导则是由断层与骨架砂体两者来完成,不整合几乎没有起到输导作用(宋国奇等,2010)。

4.3　油气远距离运聚的原生和次生成藏

油气的原生和次生成藏是油气远距离运聚研究的一个重要内容(Hao Fang et al. ,2008),研究发现,油气的远距离成藏既可能是原生,也可以是次生,如有些近源成藏的油气由于后期作用再次运移,即可能形成远源的次生成藏(Luo Xiaorong,2011)。比较典型的原生油气远距离运聚主要发现在国外,如北美地区,在这类实例中,油气藏形成后大地构造相对稳定,没有断裂发育或区域构造格局大的改变(Harrison et al. ,2002)。以美国伊利诺斯盆地为例,其烃源岩形成于古生代,晚二叠世进入生烃门限,到侏罗纪停止生烃,之后除了盆地整体的抬升和下降外,其他构造运动影响较小,因此形成的油气藏为原生成藏(Lewan et al. ,2002)。

相比而言,油气的远距离次生聚集研究还比较薄弱,主要是难于判识。目前常用的方法是流体历史分析技术(FHA),其基本原理是原油油气藏若发生调整,并形成次生聚集,则储层中的古今流体会出现差异。据此,可以应用储层连续抽提技术,对比流体包裹体和现今储层孔隙游离烃,以及原油的烃类成分(MCI),分析残余油和包裹体油的成分和油气充注历史。利用包裹体定量荧光技术和含油包裹体颗粒指数,识别古今油水界面(OWC)的变迁和古油藏。通过判识古油水界面(POWC),寻找再次运移的石油,确定天然气或凝析气藏早期是否有石油充注事件,识别次生油气藏(陈红汉,2007;平宏伟等,

2009;王飞宇等,2006)。然而,目前对储层包裹体的形成机制还不是非常清楚,可能并不是每次油气充注均会形成包裹体记录,特别是次生油气充注时,因为这还牵涉到储层成岩作用的强弱。此外,在复杂多期油气运聚区,包裹体本身也是多期油气充注的复合,因此可能也并不能精确反映每期油气的面貌。凡此种种,均给原生/次生油气的聚集研究带来了困难。

尽管如此,综合多种地质地球化学证据,仍有一些典型的原生/次生油气远距离运聚实例揭示(Hao Fang et al. ,2007)。如以国内准噶尔盆地陆梁地区为例(王绪龙,2001),其油气成藏总体经历了 3 次关键事件,第一次发生在中晚三叠世,此期形成来自下二叠统风城组的油气藏,这些油气藏在燕山期由于断裂的作用遭到破坏发生再次运移而在侏罗系中形成次生油气藏,规模较小,多沿梁、沿油源断裂聚集(潘建国等,2007);第二次主要发生在白垩纪晚期,以来源于中二叠统下乌尔禾组生成的成熟油气对石炭系圈闭的充注,以及形成侏罗系的成熟油气藏为特征;第三次发生在古近纪晚期,主要是下乌尔禾组生成的高成熟油气对石炭系油藏的再充注,以及侏罗系和白垩系高成熟油气藏的形成(吴晓智等,2012)。后两次形成的油气藏在不同地段之间,可能存在调整与接力运移成藏(王绪龙,2001)。由此可见,经远距离运聚形成的油气藏既可以是原生成藏的,也可以是次生成藏的,但一般来说,原油从古油藏调整,其运移距离似乎是有限的,一般都会在靠近古油藏的圈闭中保存下来。然而,若存在一系列圈闭之间油气藏的运移接力,似乎也可以形成远距离的油气藏聚集(如准噶尔盆地陆梁地区),但这一问题目前研究的还很少。

4.4 油气远距离运聚的动力

油气运移动力是油气远距离运聚研究的一个关键,因为充足的动力是油气远距离运聚的保障❷(Welte et al. ,2000)。当前,关于油气运聚动力的研究很多,甚至还形成了一门相对比较独立的学科——油气成藏动力学(龚再升等,1999;罗晓容等,2012),但关于油气远距离运聚动力的研究目前还较少。

油气远距离运聚的动力与近距离理论上类似,也可分为浮力、水动力、构造运动力等,其基本力学特征也与普通的油气运移类似(罗晓容,2003)。如以美国伊利诺斯盆地为例,油气在其运聚过程中水动力和浮力起到了同等重要的作用,油气运移速度也与普通盆地类似(Lewan et al. ,2002)。但在有些情况下,油气远距离运聚的动力要远大于普通的近距离运移,如以国内松辽盆地西部斜坡带的油气远距离运聚为例,因为盆地油气成藏具有时间集中且范围广泛的特点,所以认为构造挤压应力在油气的远距离运聚过程中起着重要作用(王毅等,2005),粗略测算的最小运移速率为 4.5 km/Ma,而水动力、浮力的影响较小,粗略测算的油气运移速率约 2 km/Ma(向才富等,2006)。具体而言,齐家—古龙凹陷的青山口组烃源岩在中白垩世末期进入生烃门限,在白垩纪末期进入生烃高峰;嫩江组一段烃源岩在白垩纪末期进入生烃门限,在古近纪末期进入生烃高峰;而在古近纪(65 ~ 23.5 Ma),中国东部地区的构造演变受喜马拉雅构造域和环太平洋构造域的联合控制,普遍发生了近东西向的缩短和近南北向伸展的构造变形,构造挤压应力促使早先大量排出的油气自生烃区向西部斜坡带运移。由此可见,油气远距离运聚的动力可能较中短距离油气运聚动力强大。但总体而言,这一问题尚未得到系统深入的研究。

5 结论

(1)油气的远距离(>100 km)运移成藏主要依据通道,可将模式归纳为两种:输导层—不整合和输导层—断层—不整合;基本条件和主控因素复杂,如古隆起或斜坡稳定发育是背景、油源充足是基础、输导通道优质是条件、保存良好是关键等。

(2)油气的远距离运聚尚有很多科学问题有待深入系统研究,如油气源对比与远距离运聚的确认、断裂和不整合的作用、原生和次生成藏、运聚动力等。

(3)油气的远距离运移成藏是一种重要的油气地质现象,目前发现的典型实例并不多,研究程度也较为薄弱。但尽管如此,根据本文的仔细分析,却发现在合适的成藏条件下,仍可以形成商业性的油气藏,这说明在实际油气勘探中,不应将离烃源区较远的有利构造部位视为勘探禁区。当然,这类油气藏的成藏规律的确很复杂,因此为了进行更深入全面的理解,指导油气勘探,需要进一步加强研究。

致谢:感谢编辑老师与审稿专家悉心评审,提出宝贵修改意见,提升了文稿质量。

注 释 / Notes

❶ 黎茂稳, 王培荣, 肖中尧. 1999. 中国西北地区断代生物标志物

剖面及塔里木盆地海相主力油源岩时代研究. 北京:中国石油大学(北京)科研报告.

❷ 陶世振,邹才能,高晓辉,王京红,欧光习. 2011. 不同类型油气运移动力、聚集机理与分布规律. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集: 72 ~ 73.

参 考 文 献 / References

曹剑, 胡文瑄, 张义杰, 姚素平, 王绪龙, 张越迁, 唐勇. 2006. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析. 沉积学报, 24(3): 399 ~ 406.

曹剑, 王绪龙, 胡文瑄, 张越迁, 唐勇, 向宝力. 2012a. 准噶尔盆地油水层无机地球化学响应与识别. 石油学报, 33(3): 361 ~ 366.

曹剑, 吴明, 王绪龙, 胡文瑄, 向宝力, 孙平安, 鲍海娟. 2012b. 油源对比微量元素地球化学研究进展. 地球科学进展, 27(9): 925 ~ 937.

陈红汉. 2007. 油气成藏年代学研究进展. 石油与天然气地质, 28(2): 143 ~ 150.

陈中红, 吴孔友, 查明, 朱筱敏. 2006. 准噶尔盆地陆梁地区断裂—不整合面输导体系与油气运聚. 地球学报, 27(1): 63 ~ 68.

冯子辉, 廖广志, 方伟, 张居和, 宋兰斌. 2003. 松辽盆地北部西斜坡区稠油成因与油源关系. 石油勘探与开发, 30(4): 25 ~ 28.

付广, 薛永超, 付晓飞. 2001. 油气运移输导系统及其对成藏的控制. 新疆石油地质, 22(1): 24 ~ 26.

傅加谟, 盛国英. 1995. 分子有机地球化学研究进展. 自然科学进展, 2: 139 ~ 146.

龚再升, 杨甲明. 1999. 油气成藏动力学及油气运移模型. 中国海上油气 (地质), 13(4): 235 ~ 239.

国建英, 李志明. 2009. 准噶尔盆地石炭系烃源岩特征及气源分析. 石油实验地质, 31(3): 275 ~ 281.

何登发. 2007. 不整合面的结构与油气聚集. 石油勘探与开发, 34(2): 142 ~ 149

胡朝元. 2005. "源控论"适用范围量化分析. 天然气工业, 25(10): 1 ~ 3.

胡宗全. 2004. 准噶尔盆地西北缘车排子地区油气成藏模式. 断块油气田, 11(1): 12 ~ 15.

霍秋立, 冯子辉, 付丽, 刘世妍. 1999. 松辽盆地三肇凹陷扶杨油层石油运移方式. 石油勘探与开发, 26(3): 25 ~ 27.

贾焕军, 陈立国. 2013. 断裂输导油气运移特征及其能力. 大庆石油地质与开发, 32(3): 1 ~ 7.

金之钧, 张发强. 2005. 油气运移研究现状及主要进展. 石油与天然气地质, 26(3): 263 ~ 270.

黎茂稳. 2000. 油气二次运移研究的基本思路和几个应用实例. 石油勘探与开发, 27(4): 11 ~ 19.

李明诚. 2004. 油气运移基础理论与油气勘探. 地球科学, 29(4): 379 ~ 383.

林畅松, 杨海军. 2009. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约. 中国科学(D 辑), 39(3): 306 ~ 316.

卢鸿, 冯小杰. 2000. 油源对比常规方法的使用误区. 西安工程学院学报, 22(2): 56 ~ 59.

罗晓容. 2003. 油气运聚动力学研究进展及存在问题. 天然气地球科学, 14(5): 337 ~ 346.

罗晓容, 张立宽, 雷裕红. 2012. 油气成藏动力学研究方法与应用. 地质科学, 47(4): 1188 ~ 1210.

潘建国, 谭开俊. 2007. 准噶尔盆地侏罗系岩性油气藏成藏条件及控制因素. 石油地质与工程, 21(1): 1 ~ 4.

平宏伟, 陈红汉. 2009. 次生油气藏成藏研究进展. 地球科学进展, 24(9): 990 ~ 1000.

沈扬, 贾东. 2010. 准噶尔盆地西部车排子凸起新近系沙湾组成藏体系与富集规律. 地质通报, 29(4): 581 ~ 588

史建南, 邹华耀. 2009. 准噶尔盆地车排子凸起隐蔽油气藏成藏机理. 西安石油大学学报(自然科学版), 24(2): 26 ~ 30.

宋国奇, 隋风贵, 赵乐强. 2010. 济阳坳陷不整合结构不能作为油气长距离运移的通道. 石油学报, 31(5): 744 ~ 747.

孙同文, 付广, 吕延防, 赵荣. 2013. 断裂输导流体的机制及输导形式探讨. 地质论评, 58(6): 1081 ~ 1090.

孙雨, 陈晨, 马世忠, 丛琳, 赵慧, 于利民. 2013. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层油气运移机制与成藏模式研究. 地质论评, 59(3): 501 ~ 509.

王飞宇, 师玉雷, 曾花森, 刘可禹. 2006. 利用油包裹体丰度识别古油藏和限定成藏方式. 矿物岩石地球化学通报, 25(1): 12 ~ 18.

王铁冠. 1990. 生物标志物地球化学研究. 武汉: 中国地质大学出版社.

王绪龙. 2001. 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷区油气源与成藏研究 . 四川南充:西南石油大学博士学位论文.

王毅, 宋岩. 2005. 构造应力在油气运移成藏过程中的作用. 石油与天然气地质, 26(5): 563 ~ 571.

吴晓智, 何登发. 2012. 准噶尔盆地陆梁隆起构造特征与油气成藏. 地质科学, 47(1): 73 ~ 91.

王震亮, 陈荷立. 1999. 有效运聚通道的提出与确定初探. 石油实验地质, 21(1): 71 ~ 75.

邬光辉, 李启明, 肖中尧, 李洪辉, 张立平, 张现军. 2009. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探. 大地构造与成矿学, 33(1): 124 ~ 130.

伍新和, 伊海生, 王成善. 2004. 准噶尔盆地陆梁油田油气源研究. 沉积与特提斯地质, 23(4): 96 ~ 102.

向才富, 冯志强. 2006. 松辽盆地西部斜坡带油气运聚的动力因素探讨. 沉积学报, 23(4): 719 ~ 725.

闫建萍, 刘池洋. 2008. 松辽盆地扶杨油层油气成藏期次和时限确定. 兰州大学学报(自然科学版), 44(5): 26 ~ 29.

张善文. 2013. 准噶尔盆地盆缘地层不整合油气成藏特征及勘探展望. 石油实验地质, 35(3): 231 ~ 237.

张善文, 林会喜, 沈扬. 2013. 准噶尔盆地车排子凸起新近系"网毯式"成藏机制剖析及其对盆地油气勘探的启示. 地质论评, 59(3): 489 ~ 500.

张维琴, 杨玉峰. 2005. 松辽盆地西部斜坡油气来源与运移研究. 大庆石油地质与开发, 24(1): 17 ~ 19.

赵忠新, 王华. 2002. 油气输导体系的类型及其输导性能在时空上的演化分析. 石油实验地质, 24(6): 527 ~ 532.

周庆华, 吕延防. 2006. 松辽盆地北部西斜坡油气成藏模式和主控因素. 天然气地球科学, 17(6): 765 ~ 769.

朱光有, 杨海军, 张斌, 苏劲, 张超, 张科, 刘永福, 卢玉红. 2013. 油气超长运移距离. 岩石学报, 29(9): 3192 ~ 3212.

张光亚, 赵文智, 王红军, 李洪辉, 刘磊. 2007. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统. 石油与天然气地质, 28(5): 653 ~ 663.

张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 肖中尧, 何忠华. 2009. 分子化石与塔里木盆地油源对比. 科学通报, 47(z1): 16 ~ 23.

张枝焕, 李伟, 孟闲龙, 秦黎明, 张振英, 袁东山. 2007. 准噶尔盆地车排子隆起西南部原油地球化学特征及油源分析. 现代地质, 21(1): 133 ~ 140.

Aydin A. 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. Marine and Petroleum Geology, 17(7): 797 ~

814.

Abrams M A. 2005. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment. Marine and Petroleum Geology, 22(4): 457 ~477.

Bekele E B, Person M A, Rostron, B J and Barnes R. 2002. Modeling secondary oil migration with core-scale data: Viking Formation, Alberta basin . AAPG Bulletin, 86(1), 55 ~74.

Bethke C M, Reed J D and Oltz D F. 1991. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin. AAPG Bulletin, 75(5): 925 ~945.

Bjørlykke K. 2010. Petroleum Geoscience: From sedimentary environments to rock physics. Berlin Heidelberg: Springer – Verlag, 508 pp. Boles J R, Eichhubl P, Garven G and Chen J. 2004. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: Evidence from fault cement. AAPG Bulletin, 88(7): 947 ~ 970.

Bordenave M L. 2008. The origin of the Permo—Triassic gas accumulations in the Iranian Zargos foldbelt and contiguous offshore areas: a review of the Palaeozoic petroleum system. Journal of Petroleum Geology,31(1): 3 ~42.

Cao Jian, Jin Zhijun J, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, Yao Suping, Wang Xulong and Tang Yong. 2010. Improved understanding of petroleum migration history in the Hongche fault zone, northwestern Junggar Basin (northwest China): Constrained by vein-calcite fluid inclusions and trace elements. Marine and Petroleum Geology, 27 (1): 61 ~68.

Chen Jianping, Deng Chunping, Liang Digang, Wang Xulong, Zhong Ningning, Song Fuqing, Shi Xinpu, Jin Tao and Xiang Shuzheng. 2003. Mixed oils derived from multiple source rocks in the Cainan oilfield, Junggar Basin, Northwest China. Part II: artificial mixing experiments on typical crude oils and quantitative oil-source correlation. Organic Geochemistry,34(7): 911 ~930.

Creaney S, Allan J, Cole K S, Fowler M G, Brooks P W, Osadetz K G, Macqueen R W, Snowdon L R, and Riediger C L. 1994. Petroleum generation and migration in the Western Canada Sedimentary Basin. Geological Atlas of the Western Canada Sedimentary Basin: 455 ~ 468.

Dickinson J A, Wallace M W, Holdgate G R, Gallagher S J and Thomas L. 2002. Origin and timing of the Miocene—Pliocene unconformity in southeast Australia. Journal of Sedimentary Research, 72(2): 288 ~303.

Dow W G. 1974. Application of oil-correlation and source-rock data to exploration in Williston Basin. AAPG Bulletin, 58(7): 1253 ~ 1262.

Ehrenberg S N and Nadeau P H. 2005. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity—depth and porosity—permeability relationships. AAPG Bulletin, 89(4): 435 ~445.

Fan Pu, Zhang Baishing and Yu Xinke. 1994. Biomarkers from recent salt-lake sediments. Advances in Earth Science, 9(3): 6 ~17.

Fisher Q J and Knipe R J. 2001. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf. Marine and Petroleum Geology, 18(10): 1063 ~ 1081.

Gerhard L C, Sidney B A and David W F. 1990. Petroleum geology of the Williston Basin: Interior cratonic basins. AAPG Memoir, 51: 507 ~ 559. Green D G, Eric W M. 2005. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west—central Alberta Deep Basin. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 53 (2): 101 ~129.

Gartrell A, Bailey W R and Brincat M. 2006. A new model for assessing trap integrity and oil preservation risks associated with postrift fault reactivation in the Timor Sea. AAPG Bulletin, 90(12): 1921 ~ 1944.

Hao Fang, Zou Huayao, Gong Zaisheng and Deng Yunhua. 2007. Petroleum migration and accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay basin, China: significance of preferential petroleum migration pathways (PPMP) for the formation of large oilfields in lacustrine fault basins. Marine and Petroleum Geology, 24(1): 1 ~ 13.

Hao Fang, Guo Tonglou, Zhu Yangming, Cai Xunyu, Zou Huayao, and Li Ping. 2008. Evidence for multiple stages of oil cracking and thermochemical sulfate reduction in the Puguang gas field, Sichuan Basin, China. AAPG Bulletin, 92(5): 611 ~637.

Harrison R W and Schultz A. 2002. Tectonic framework of the southwestern margin of the Illinois Basin and its influence on neotectonism and seismicity. Seismological Research Letters, 73 (5): 698 ~731.

Higley D K, Lewan M D, Roberts L N, and Henry M. 2009. Timing and petroleum sources for the Lower Cretaceous Mannville Group oil sands of northern Alberta based on 4-D modeling. AAPG Bulletin, 93(2): 203 ~230.

Isaksen G. and Ledje K H I. 2001. Source rock quality and hydrocarbon migration pathways within the greater Utsira High area, Viking Graben, Norwegian North Sea. AAPG Bulletin, 85(5): 861 ~884.

Jefferson C W, Thomas D J, Gandhi S S, Ramaekers P, Delaney G, Brisbin D and Olson R A. 2007. Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Bulletin——Geology Survey of Canada, 588: 23.

Jonk R, Hurst A, Duranti D, Parnell J, Mazzini A and Fallick A E. 2005. Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis in Tertiary reservoirs, south Viking Graben, North Sea. AAPG Bulletin, 89(3): 329 ~357.

Karlsen D A and Skeie J E. 2006. Petroleum migration, faults and overpressure, Part I: calibrating basin modelling using petroleum in traps——a review. Journal of Petroleum Geology, 29(3): 227 ~ 256.

Ligtenberg H and Neves F. 2008. Integrating disciplines for petroleum system analysis——from seismic interpretation to stratigraphic and basin modelling. Petroleum Geoscience, 14(3): 219 ~221.

Lewan M D, Henry M E, Higley D K and Pitman J K. 2002. Material-balance assessment of the New Albany—Chesterian petroleum system of the Illinois basin. AAPG Bulletin, 86(5): 745 ~778.

Luo Xiaorong. 2011. Simulation and characterization of pathway heterogeneity of secondary hydrocarbon migration. AAPG Bulletin 95 (6): 881 ~898.

Machel H G, Cavell P A and Patey K S. 1996. Isotopic evidence for carbonate cementation and recrystallization, and for tectonic expulsion of fluids into the Western Canada Sedimentary Basin. Geological Society of America Bulletin, 108(9): 1108 ~1119.

Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments, 2nd edition. UK: Cambridge University Press, 1155 pp.

Roure F, Swennen R, Schneider F, Faure J L, Ferket H, Guilhaumou N and Vandeginste V. 2005. Incidence and importance of tectonics and natural fluid migration on reservoir evolution in foreland fold-and-thrust belts. Oil & Gas Science and Technology, 60(1): 67 ~

106.
Sorkhabi R and Tsuji Y. 2005. Faults, fluid flow, and petroleum traps. AAPG Memoir, 85:1 ~31.
Underdown R, Jonathan R. 2008. Petroleum generation and migration in the Ghadames Basin, north Africa: A two-dimensional basin-modeling study. AAPG Bulletin, 92(1): 53 ~76.
Wall B R G, Girbacea R, Mesonjesi A and Aydin, A. 2006. Evolution of fracture and fault-controlled fluid pathways in carbonates of the Albanides fold—thrust belt. AAPG Bulletin, 90(8): 1227 ~1249.
Welte D H, Hantschel T, Wygrala B P, Weissenburger K S and Carruthers D. 2000. Aspects of petroleum migration modelling. Journal of Geochemical Exploration, 69: 711 ~714.

Long-Distance Hydrocarbon Migration and Accumulation Models and Key Controls in Petroliferous Basin

LIU Weimin[1)], TAO Keyu[1)], GAO Xiuwei[2)], WANG Ming[2)], Abduwali RIXIT[3)], CAO Jian[1)]
1) *School of Earth Sciences and Engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing*, 210023;
2) *Research Institute of Experiment and Testing*, *PetroChina Xinjiang Oilfield Company*, *Karamay*, *Xinjiang*, 834000
3) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development*, *PetroChina Xinjiang Oilfield Company*, *Karamay*, *Xinjiang*, 834000

Abstract: Long-distance (> 100km) hydrocarbon migration and accumulation is an important type of petroleum geological phenomenon, which has changed the traditional thought that hydrocarbon accumulation is often source-controlled and thus can only be sited near the source areas. It expands the petroleum exploration areas, but such cases are rare, implying the complexity of this phenomenon. To better understand this phenomenon, here we conduct a review on the basic features of this special petroleum geological phenomenon, with the focus on the accumulation model and main controls, and suggest the scientific issues which need to be further studied. The results show that the long-distance hydrocarbon migration and accumulation model can be classified to two main types in terms of conduits, including carrier bed—unconformity and carrier bed—fault—unconformity. The long-distance hydrocarbon migration and accumulation needs several necessary fundamental conditions and is controlled by many factors, e. g. , a steady development of paleo-uplift or slope being the background, a sufficient petroleum source being the foundation, a high-quality migration pathway network being the condition, and a good preservation being the key. If a petroliferous basin has these necessary conditions, long-distance hydrocarbon migration and accumulation can take place, and favorable traps even with relatively long distance from the source kitchens can not be neglected with the possibility of forming commercial accumulations. The scientific issues to be solved include the application of oil-source correlation in verifying the migration distance and the identification of long-distance, the impacts of fault, the primary and secondary hydrocarbon migration and accumulation, and the migration driving force. The long-distance hydrocarbon migration and accumulation deserves enough exploration and research attention.

Keywords: hydrocarbon migration and accumulation; hydrocarbon accumulation model; network of hydrocarbon migration pathways; reservoir geochemistry; Junggar Basin