

doi:10.3799/dqkx.2011.053

根据构造脊和地球化学指标研究油气运移 路径:以东濮凹陷濮卫地区为例

蒋有录¹,刘景东¹,李晓燕^{1,2},徐会永³

1. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东青岛 266555

2. 中国石化胜利油田有限公司地质科学研究院, 山东东营 257015

3. 中国石油大学学报(自然科学版)编辑部, 山东东营 257061

摘要: 以往关于油气运移路径的认识,多是基于微观尺度上的物理模拟实验,或是利用计算机模拟进行的,而对油气运聚单元尺度的油气运移路径的确定研究还相对较少。以东濮凹陷濮卫地区为例,从砂体和断层要素研究出发,分析油气的优势运移通道,结合生烃灶和油气的分布,对优势运移通道的有效性进行评价,进一步结合含氮化合物指标,识别实际发生油气运移的路径。研究表明,构造脊分析与地球化学指标追踪相结合可以较准确地识别油气运移路径,砂体顶面构造脊和断层断面脊是油气运移的优势通道,其能否成为运移路径,以及作为运移路径运载量的多少则取决于生烃灶总烃量。濮卫地区油气沿断面脊纵向运移为主,洼陷内部和濮城构造东翼斜坡带沿砂体顶面构造脊的横向运移次之,含氮化合物指标分析表明该区大多数构造脊均为实际的油气运移路径。

关键词: 构造脊;地球化学;优势运移通道;含氮化合物;油气运移;东濮凹陷。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)03-0521-09

收稿日期: 2010-11-18

Actual Hydrocarbon Migration Paths Based on Ridge-Like Structures Analysis and Geochemical Indicators Tracking: A Case Study of Puwei Area of Dongpu Depression

JIANG You-lu¹, LIU Jing-dong¹, LI Xiao-yan^{1,2}, XU Hui-yong³

1. Faculty of Geo-Resource and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China

2. Geological Scientific Research Institute, SLOF, Dongying 257015, China

3. Editorial Department of the Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), Dongying 257061, China

Abstract: The former understanding about actual hydrocarbon migration paths is mainly based on the micro-scale physical simulation or the computer simulation, and the actual oil and gas migration paths only rely on indirect evidence. This paper takes Puwei area of Dongpu depression as an example, firstly we find out the dominated migration pathways of main sandbodies and faults, then analyze their relationships with hydrocarbon kitchens and reservoirs to evaluate their effectiveness, and lastly identify the paths of hydrocarbon migration by combining the tracking of nitrogen compounds indicators. The results show that ridge-like structures analysis combined with geochemical indicators tracking can identify actual hydrocarbon migration paths accurately. Ridge-like structures of sandbody top and fault plane are the dominated migration pathways, their ability to become actual migration paths, as well as the amount of hydrocarbon carried depend on the oil and gas volume supplied by hydrocarbon kitchens. In Puwei area, oil and gas mainly migrated vertically along ridge-like structures of fault plane, followed by lateral migration along ridge-like structures of sandbody top in Puwei sag and Pucheng right-wing slope. Nitrogen compounds indicators tracking shows that the majority of ridge-like structures in this area are actual oil and gas migration paths.

Key words: ridge-like structures; geochemistry; dominated migration pathways; nitrogen; hydrocarbon migration; Dongpu depression.

0 引言

沉积盆地内的油气二次运移是一个极不均一的过程,导致油气运移仅在有限的空间范围内发生,油气运移空间可能只占据整个输导层的 1%~10% (Catalan *et al.*, 1992; Hindle, 1997; Sylta *et al.*, 1998). 油气在二次运移过程中无外来干扰情况下自然优先流经的通道,即为优势通道,构成油气运移优势通道的可以是断层、不整合面和高孔渗的输导层 (李明诚, 1994, 2004). 运移通道内油气二次运移发生时为油气占据并沿其流动的有限范围即为运移路径 (罗晓容, 2003), 与优势运移通道不同的是,运移路径是真正发生了油气运移的通道,大量的实例 (杨明慧等, 2004; 罗群等, 2005; 姜文利, 2008) 和模拟实验 (Catalan *et al.*, 1992; Thomas and Clouse, 1995) 表明,绝大部分的油气运移路径都属于优势运移通道. 沉积盆地中油气通过优势通道运移的证实及优势运移通道微观和宏观控制因素的研究使油气藏的定位成为可能,从而使油气运移路径三维预测成为降低勘探风险的有效途径 (郝芳等, 2002). 以往关于油气运移路径的认识,多是基于微观尺度上物理模拟实验 (Tokunaga *et al.*, 2000; 曾溅辉和金之钧, 2000; 张发强等, 2004; 姜振学等, 2005), 或是利用计算机模拟 (Hindle, 1997; Bekele *et al.*, 1999), 对油气运聚单元尺度的油气运移路径研究还相对较少. 本文以东濮凹陷濮卫地区为例,从砂体顶面构造形态、断层活动性及断层面几何形态的研究出发,分析油气的优势运移通道,即可能的油气运移路径,结合生烃灶、油气分布,对优势运移通道的有效性进行评价,进一步通过含氮化合物指标,识别实际发生油气运移的路径.

1 区域地质概况

濮卫地区位于渤海湾盆地东濮凹陷中央隆起带北部,北至文明寨地区,南至文留地区,西邻马寨、柳屯洼陷,东邻濮城—前梨园洼陷,主要包括卫城、濮城两个正向构造单元和濮卫洼陷一个负向构造单元,走向近 NNE 向,勘探面积约 150 km² (图 1). 该区主要发育卫东、濮城两组断裂系,构造演化经历了箕状断陷 (沙二沉积前)、双断洼陷 (沙二—东营沉积期) 和区域隆升剥蚀—洼陷定型 (东营抬升期—现今) 三个发育阶段. 钻遇的地层有古近系沙河街组沙四段、沙三段、沙二段、沙一段及东营组,新近系馆陶

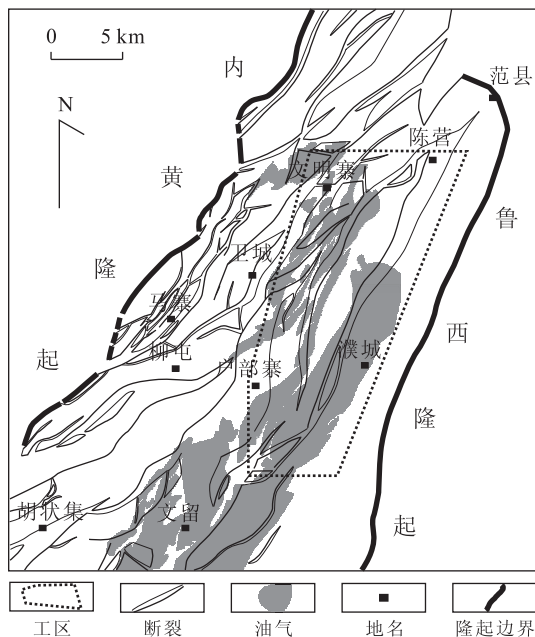


图 1 东濮凹陷北部构造单元与油气分布

Fig. 1 Tectonic units and hydrocarbon distribution in the northern Dongpu depression

组、明化镇组和第四系平原组,其中沙三段可细分为沙三下、沙三中、沙三上三个亚段,地层厚度约 1 500 m. 目前洼陷周边已发现卫城油田、濮城油田、文明寨油田和古云集油田,是东濮凹陷的重要油气富集区.

2 油气来源

根据原油地球化学特征,濮卫地区原油主要分为两种类型:即沙三中型和沙三中、下亚段混合型 (图 2). 沙三中型原油主要分布于卫东断裂下降盘的中部 (卫 42 块、卫 43 块等),该类原油与濮卫洼陷沙三中亚段烃源岩相对应. 沙三中、下亚段混合型原油主要分布于濮城、濮城南、卫东断裂上盘的北部 (卫 317 块、卫 360 块等)、卫城地垒带和古云集—文明寨等地区. 结合地质背景分析认为,濮城断裂下盘原油来源于濮城洼陷沙三中、下亚段烃源岩,濮城断裂上盘原油来源于濮卫洼陷沙三中、下亚段烃源岩,濮城主体原油为濮城断裂两侧原油的混合,濮城南地区原油仅少量来源于濮卫洼陷,大部分来源于其东南部的前梨园洼陷沙三中、下亚段烃源岩. 卫东断裂上盘北部和古云集—文明寨地区的原油主要来源于濮卫洼陷沙三中、下亚段烃源岩,卫城地垒带原油主要源于濮卫洼陷沙三中、下亚段烃源岩,地垒带西翼混有少量成熟度较

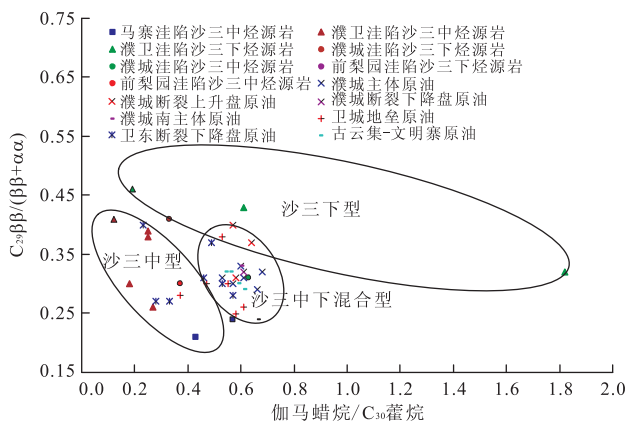


图2 濮卫地区烃源岩与原油伽马蜡烷指数— $C_{29}\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 相关图

Fig. 2 Oil-source rock correlation for Puwei area oils and source rocks based on gammacerane index and maturity parameter

低的马寨洼陷原油。总体来看,濮卫地区原油主要来源于濮卫洼陷,在卫城西翼、濮城东翼还分别混有马寨洼陷和濮城—前梨园洼陷的原油。

3 油气充注期次

流体包裹体分析表明,濮卫地区不同构造带油气充注期次存在一定的差异。濮城和濮城南地区西邻濮卫洼陷,东邻濮城—前梨园洼陷,接受双侧洼陷的供烃,濮卫洼陷和濮城—前梨园洼陷的大量生烃期为东营组沉积末期,同时濮城—前梨园洼陷二次生烃作用明显,造成濮城和濮城南地区发生两次充注,分别为东营组沉积末期和明化镇组沉积期一至今。卫城地区西邻马寨洼陷,东邻濮卫洼陷,同样接受双侧洼陷的供烃,由于马寨洼陷大量生烃作用发生于东营组沉积末期,无二次生烃作用,仅濮卫洼陷存在较弱的二次生烃作用,所以卫城地区主要充注期为东营组沉积末期,仅卫东断层下降盘和古云集地区存在二次充注,即东营组沉积末期和明化镇组沉积期一至今。

4 油气平面运移路径

4.1 砂体顶面构造脊

受古构造控制,濮卫地区沙三段各砂层组的顶面埋深具有明显起伏变化,发育多个顶面构造脊(图3),通过分析砂体顶面构造脊与砂体的耦合关系有

助于研究油气沿砂体运移的路径。沙三中3~4砂组和沙三中6砂组为濮卫地区的主要砂层组,分别位于沙三中盐间和沙三中盐下层系中,在盐岩遮挡下有利于发生横向运移。各砂层组的油气分布特征表明,在砂岩顶面埋深最浅的地区受到一侧二、三级断层的遮挡,易形成构造油气藏,反映了各砂层组顶面埋深较浅部位可能有利于油气的汇聚,并且油气由洼陷向洼陷边缘区沿砂体厚度变大、储层物性变好的方向运移。

沙三中3~4砂组在卫城、古云集、濮城和濮城南地区的斜坡带发育多个构造脊,其中卫城中北部、古云集、濮城和濮城南地区构造脊与砂体分布具有很好的耦合性,这些构造脊都可能是优势运移路径,在构造脊的指向区均聚集了一定数量的油气。而卫城南部地区虽然也发育构造脊,但由于砂体厚度较小甚至尖灭,很难成为油气的运移路径。

沙三中5砂组在卫城、古云集、濮城和濮城南地区的斜坡带同样发育多个构造脊,其中濮城和濮城南地区构造脊与砂体分布具有很好的耦合性,这些构造脊都可能是优势运移路径,在构造脊的指向区均聚集了一定数量的油气。而卫城南部、卫城北部—古云集地区虽然也发育构造脊,且部分构造脊与砂体具有一定的耦合性,但是在生烃洼陷内部缺少与构造脊相对应的砂体,生烃洼陷的油气无法沿构造脊运移至构造脊的指向区,所以假如构造脊下部不存在对应的砂体或砂体孔渗性较差,这些构造脊就很难成为油气运移的路径。

4.2 油气运移路径地球化学追踪

目前,非烃类含氮化合物已成为追踪油气运移路径的有效地球化学指标,非烃化合物中由于含有氮原子杂环化的咪唑类分子而具有较强的极性,在石油运移过程中出现明显的地质色层分馏效应(王铁冠等,2000;杨宪彰等,2005)。

濮卫地区原油分馏效应的参数变化主要表现在4个方面:(1)随着运移距离的增加,原油中含氮化合物的绝对浓度逐渐降低;(2)随着石油运移距离的增加,咪唑系列相对于苯并咪唑系列富集;(3)对于咪唑类分子,随着运移距离的增加,屏蔽型异构体相对富集,裸露型异构体相对减少;(4)随着运移距离的增加,二甲基咪唑中屏蔽型的1,8-二甲基咪唑相对于2,4-二甲基等其他裸露型二甲基咪唑明显富集。

分析结果表明(图4):

(1)古云集—文明寨地区,由洼陷内侧向断阶

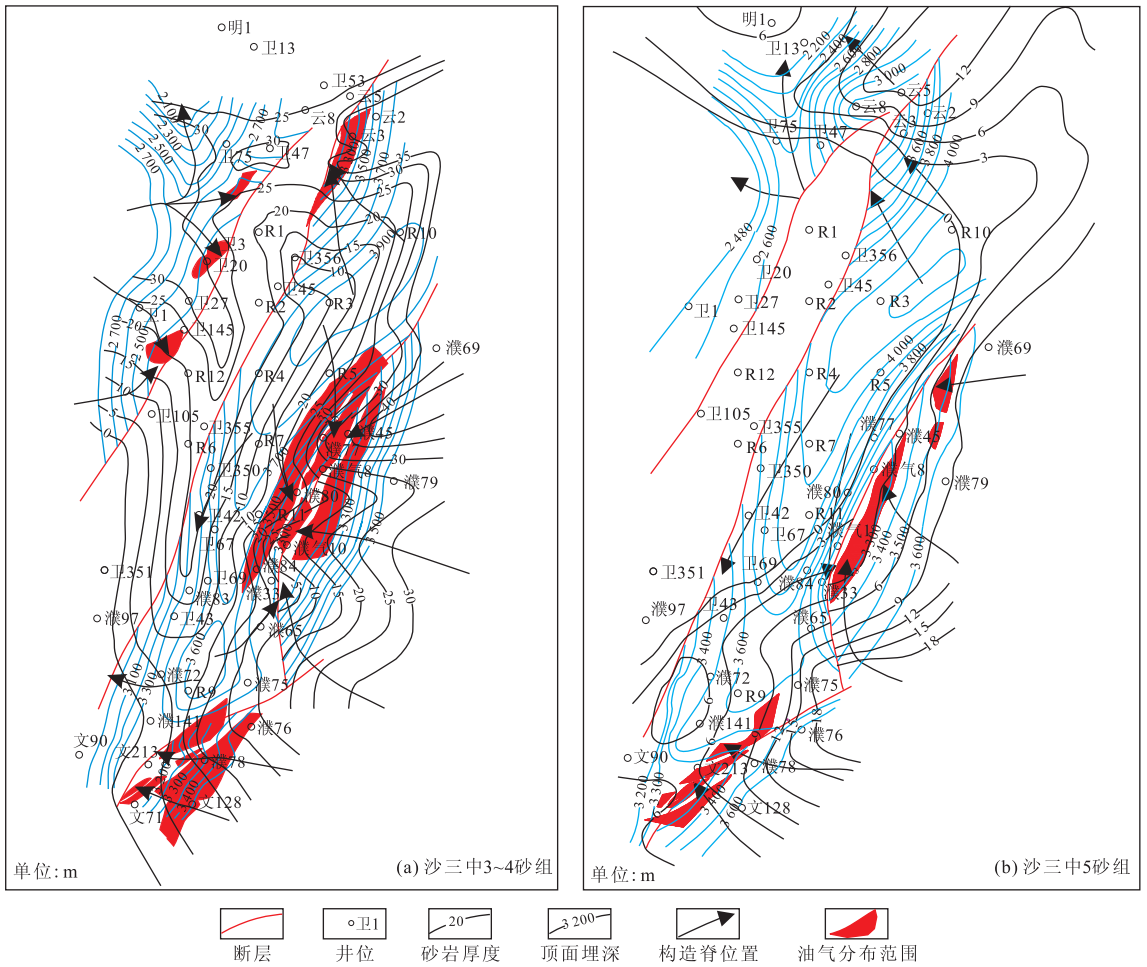


图 3 濮卫地区沙三中 3~4 砂组(a)和 5 砂组(b)顶面构造脊与砂岩厚度叠合图

Fig. 3 Distribution of sand body and its ridge-like structures of $Es_3^{middle3-4}$ (a) and $Es_3^{middle5}$ (b) in Puwei area

带,含氮化合物指标中咪唑/苯并咪唑变大,含氮化合物浓度变小,反映了石油由洼陷向断阶带方向充注;而洼陷内侧云 3 块 1,8-二甲基咪唑/2,6-二甲基咪唑、屏蔽型二甲基咪唑/裸露型二甲基咪唑等 6 项指标远大于断阶带卫 360 块,则表明断阶带上石油除由洼陷区侧向充注之外,还有部分石油由本地烃源岩沿断层短距离垂向运移而来,由于运移距离较短,上述六个指标较小,而洼陷内侧云 3 块石油经历了较长距离的运移,由此也可以看出,由生烃洼陷向洼陷西北缘,油气以侧向运移为主,运移距离较长;由断阶带向卫城地垒,由于马寨洼陷成熟度较低石油的注入,含氮化合物的运移效应不明显,由卫城地垒向文明寨方向,咪唑/苯并咪唑、1,8-二甲基咪唑/2,6-二甲基咪唑等 7 项指标变大,含氮化合物浓度变小。

以上含氮化合物的分析表明,濮卫洼陷沙三中、沙三下型原油向洼陷边缘长距离运移,由卫东断层

下降盘云 3 块注入,继续向断阶带和地垒带运移;与马寨洼陷的油气在卫城地垒混合,并由地垒带继续向文明寨地区运移。

(2)卫城中部地区含氮化合物指标的运移效应较好,由洼陷内侧卫 42-19 井沙三中亚段向断层下盘卫 355-2 井沙三上亚段,原油的咪唑/苯并咪唑、1,8-二甲基咪唑/2,6-二甲基咪唑等 7 项指标变大,含氮化合物浓度变小,表明濮卫洼陷沙三中型油气向卫 42 块充注,并继续向断层下盘和地垒带运移,在地垒带由于马寨洼陷石油的混入,运移效应不明显。

(3)濮城主体区原油中含氮化合物的运移效应也受控于油源的变化。断背斜东翼濮 67 块濮 7-49 井原油的含氮化合物浓度、咪唑/苯并咪唑、1,8-二甲基咪唑/2,6-二甲基咪唑等 8 项指标都明显大于断背斜东翼濮 138 块濮 138-4 井原油,这是由于断背斜东翼油藏距离濮城—前梨园洼陷较远,油气运

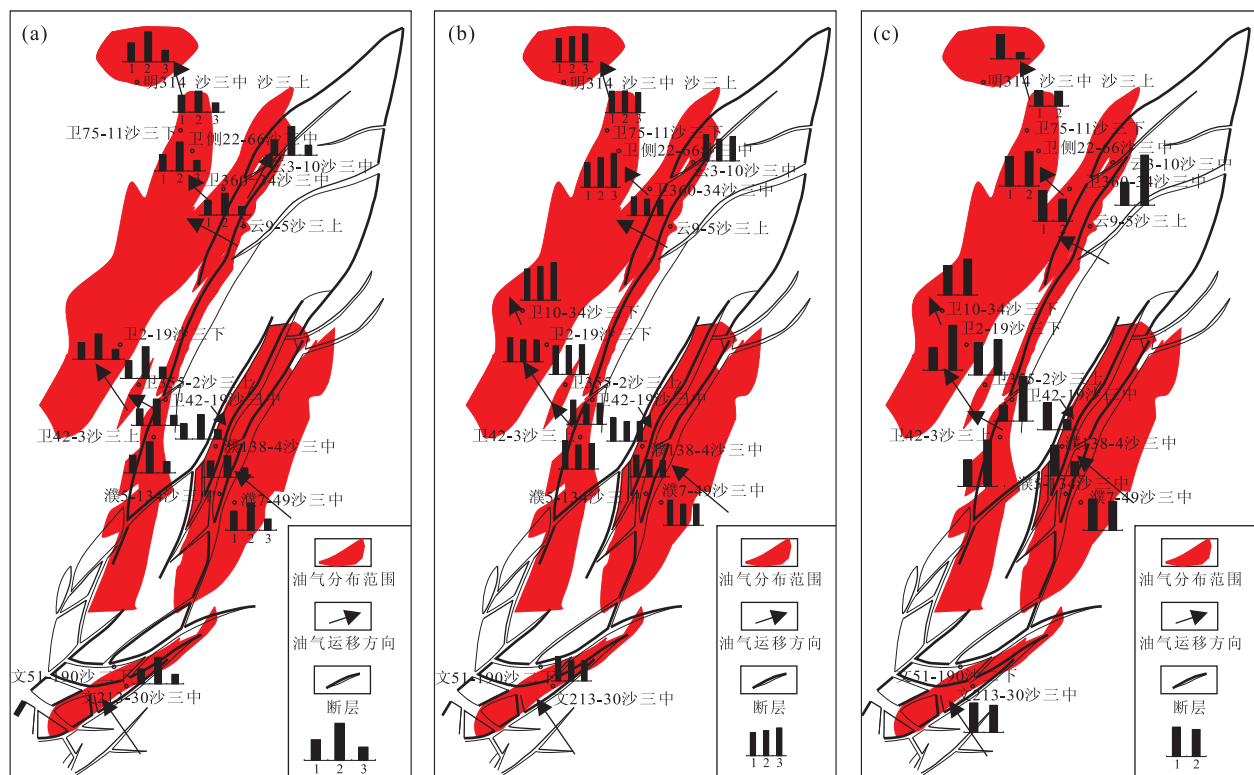


图 4 濮卫地区沙三段原油含氮化合物指标平面变化

Fig. 4 Distribution of pyrrole nitrogen compounds of Es₃ oils in Puwei area

a 图中 1. 屏蔽型/半裸露型(二甲基咪唑), 2. 屏蔽型/裸露型(二甲基咪唑), 3. 屏蔽型/半裸露型+裸露型(二甲基咪唑); b 图中 1-1, 8-/2, 6-二甲基咪唑, 2-1, 8-/2, 4-二甲基咪唑, 3-1, 8-/2, 5-二甲基咪唑; c 图中 1. 咪唑/苯并咪唑, 2. 含氮化合物绝对浓度

移距离较长,而濮 138 块临近深洼,濮卫洼陷油气可直接向其充注,运移距离较短. 断背斜轴部断块上的濮 5-134 井原油的含氮化合物浓度、咪唑/苯并咪唑、屏蔽型/半裸露型-二甲基咪唑、屏蔽型/裸露型-二甲基咪唑、屏蔽型/(裸露型+半裸露型)-二甲基咪唑等指标表现出两侧原油的混合特征,反映了断背斜两翼原油向轴部运移聚集,而 1, 8-/2, 6-二甲基咪唑、1, 8-/2, 4-二甲基咪唑、1, 8-/2, 5-二甲基咪唑等三项指标则远小于两侧原油,说明断背斜轴部油藏除与两侧油藏具有成因关系之外,也有石油直接沿断层短距离垂向运移而来.

(4)濮城南地区含氮化合物咪唑/苯并咪唑、1, 8-二甲基咪唑/2, 6-二甲基咪唑等 7 项指标都较大,含氮化合物浓度较小,表明石油运移距离较长. 根据原油成因类型及源-藏空间对应关系,濮城南地区沙二段原油为濮卫洼陷和前梨园洼陷混合供烃,由此可以推测,濮卫洼陷南翼濮城南断层下降盘深层也分布有濮卫洼陷型油气.

综合分析认为,古云集-文明寨、卫城中部、濮城主体及濮城南地区的油气运移方向,与砂体顶面

构造脊的分布相吻合,证实了实际的油气运移路径,也说明在油气供给充足的情况下,可以通过砂体顶面构造脊来推断油气的运移路径.

5 油气纵向运移路径

5.1 可能作为油气运移路径的断层

断层对油气成藏的控制作用表现在多个方面,其中断层活动性对油气运移起着重要的作用. 不同时期断层的活动性的差异导致不同时期断层对油气输导能力的不均衡性,断层活动时间与大规模油气运移时间是否匹配,决定了断层在油气运移成藏中的贡献,也决定了油气藏的分布特征. 濮卫地区除濮 138 断层外,卫东、濮 31、濮城南等主要断层活动时间与油气运移期具有较好的匹配关系(图 5),可作为油气纵向运移的路径.

5.2 断面脊

断层面沿走向相对凸起的部分称为断面脊,断面脊是油气沿断层纵向运移的优势运移通道,在油气供给充足的情况下,断面脊可以成为油气运移路

断层名称	卫东	文东	文51	陈营	濮67	濮31	濮138	濮城南	油气运移期
Ed	■	■				■		■	■
Es ₁									
Es ₂ ^上	■	■	■	■	■	■			
Es ₂ ^中	■	■	■	■	■	■			
Es ₂ ^下		■	■	■	■	■	■	■	
Es ₃ ^上		■	■	■	■	■	■	■	
Es ₃ ^中		■	■	■	■	■	■	■	
Es ₃ ^下		■	■	■	■	■	■	■	
Es ₄									
断层落差 (m)	380	140	155	525	305	125	200	175	

图 5 濮卫地区主要断层活动时间与油气运移期匹配关系

Fig. 5 Relationship between faults active periods and hydrocarbon migration periods in Puwei area

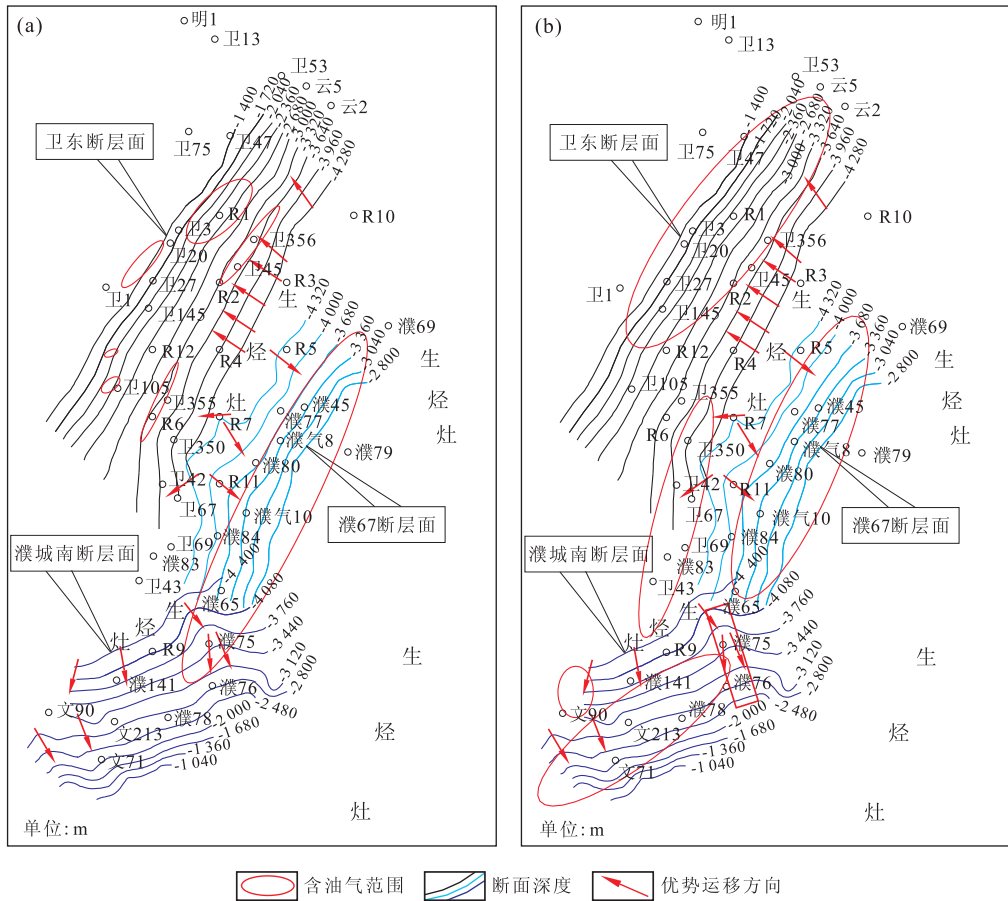


图 6 濮卫地区主要断层断面形态、生烃灶与沙三中(a)和沙三上(b)油气分布关系

Fig. 6 Distribution of faults planes, oil-gas and oil-gas sources in Puwei area

径,断面脊的发育程度控制了不同油气运移路径所能承载的运移量。

卫东、濮 67 和濮城南断层是濮卫地区主要的油源断层,这些断层的活动性与油气大规模运移期相

匹配,是主要的优势运移断层(图 6)。通过研究上述油源断层断面脊与生烃灶、油气分布的对应关系,判断断面脊作为油气运移通道对油气运移聚集的影响(图 7)。

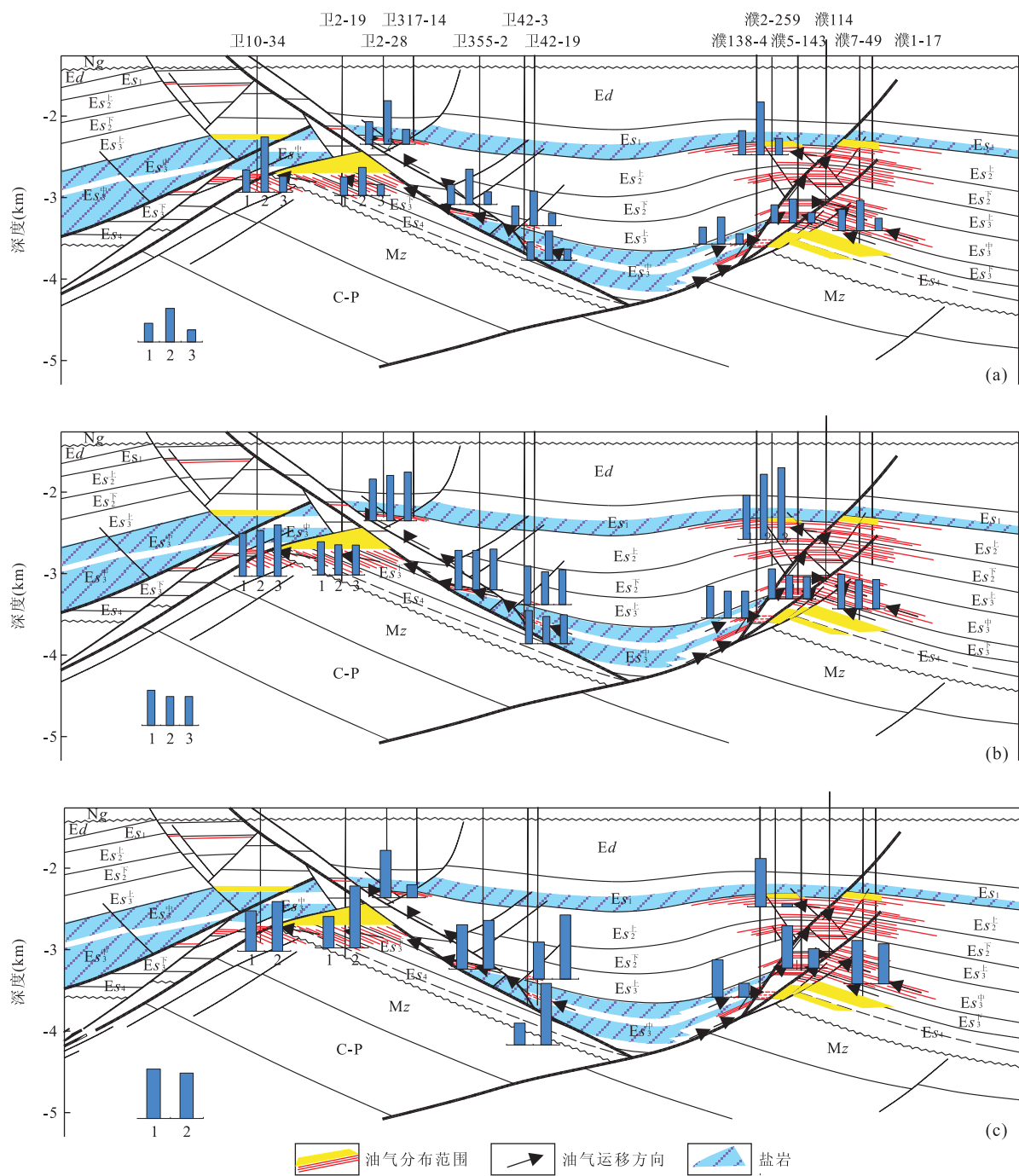


图7 濮卫地区原油含氮化合物指标变化剖面

Fig. 7 Distribution of pyrrole nitrogen compounds on profile in Puwei area

a 图中 1. 屏蔽型/半裸露型(二甲基咪唑), 2. 屏蔽型/裸露型(二甲基咪唑), 3. 屏蔽型/半裸露型+裸露型(二甲基咪唑); b 图中 1-1, 8-/2, 6-二甲基咪唑, 2-1, 8-/2, 4-二甲基咪唑, 3-1, 8-/2, 5-二甲基咪唑; c 图中 1. 咪唑/苯并咪唑, 2. 含氮化合物绝对浓度

(1) 断层面形态与生烃灶、沙三中油气分布的关系. 从濮卫地区主要断层面形态与生烃灶、沙三中油气分布的关系(图6)可以看出, 卫东断层面形态走向上变化相对较小, 仅在中部存在宽缓的幅度较小的优势运移通道带. 卫城油田油气主要源于濮卫洼陷, 其中北部的沙三中油气藏主要分布于中北部断

面优势运移通道上, 油气从洼陷内部沿卫东断层面呈平行式运移. 卫城油田南部的沙三中油气藏位于卫东断层面南部的南西向优势运移通道上, 油气可以呈汇聚式运移.

濮城主体的沙三中油气呈条带状分布, 与濮卫洼陷内部生烃灶展布方向相一致且主要分布于断面

优势运移通道指向区,濮城主体的油气主要由濮卫洼陷、濮城—前梨园洼陷次洼供给,油气源充足。濮 67 断层面发育 2~3 条优势运移通道,对油气的聚集起了较为重要的作用。

濮城南地区油气主要分布于断层面优势运移通道的指向区,其油气主要由濮卫洼陷南部次洼及前梨园洼陷供给,油气源较为充足。濮城南断层面发育有 3~4 条优势运移通道,对该区油气的富集起了至关重要的作用,位于濮城南断层东北部断层面优势运移通道上的圈闭有利于油气聚集。

(2)断层面形态与生烃灶、沙三上油气分布的关系。从濮卫地区主要断层面形态与生烃灶、沙三上油气分布的关系(图 6)可以看出,卫城油田沙三上油气的分布与沙三中具有一定的继承性,主要分布于卫城中北部和南部的断面脊优势运移通道上。

濮城油田沙三上油气呈条带状分布,总体分布范围小于沙三中,油气的分布范围覆盖了濮 67 断层面和濮城南断层面的主要优势运移通道,这些优势运移通道对沙三上油气的聚集起了十分重要的作用。

(3)油气供给量对断面脊作为油气运移路径的影响。断面形态对油气运移的作用,受生烃灶供烃量控制明显,若供烃量很小,断层面不能充当油气运移路径,若供烃量足够大,整个断层面可能成为油气运移路径,但断面脊是最主要的油气运移路径。

距离生烃灶近的断面脊往往能够充分发挥油气运移通道的作用,在生烃灶供烃量不充足的情况下,距离生烃灶较远(包括平面上和纵向上)的断面脊不能起到输导油气的作用,如卫东断层北部的断面脊附近的圈闭,沙三中亚段的圈闭有油气聚集、而沙三上亚段的圈闭无油气聚集,说明该断面脊在沙三中亚段起到通道作用,而在沙三上亚段却未发生油气运移,因此在油气供给不充足的情况下,部分断面脊在整个地质历史时期可能一直不能作为油气运移通道。

另外,卫城地区油气数量明显少于濮城地区,虽然两区均发育油源断裂,且油源断裂断面脊较为发育,但为二者提供油气的生烃灶分布不均衡,卫城地区主要靠濮卫洼陷供烃,而濮城地区则有濮卫洼陷、前梨园洼陷等多洼陷供烃,从而造成濮城地区油气运移聚集量更大。因此生烃灶的供烃量对断面脊能否成为运移路径及其运载量的多少具有重要的控制作用。

5.3 油气运移路径地球化学追踪

从濮卫地区原油含氮化合物指标变化剖面图

(图 7)上可以看出,由卫城地垒沙三段至沙二段,由濮城断背斜轴部断块沙三段至沙二段,原油的咪唑/苯并咪唑、1,8-二甲基咪唑/2,6-二甲基咪唑等 7 项指标变大,含氮化合物浓度变小,反映了油气沿断层由沙三段向沙二段运移的特征。该剖面与前面通过断面脊分析油气运移路径的结果一致,进一步证实了断面脊作为油气的运移路径。

6 结论

(1)首先建立砂体、断层等输导要素的优势运移通道空间格架,然后结合地球化学指标(生物标志化合物、含氮化合物等)追踪油气运移方向和运移路径,是识别油气实际运移通道的重要方法。

(2)在构造脊(包括断面脊)可作为流体通道的情况下,其能否成为实际的油气运移路径,以及作为运移路径运载量的多少取决于生烃灶供烃量。若供烃量很少,所有的构造脊都不可能成为油气运移路径,若供烃量足够大,整个砂层组和断层面都可以做为油气运移路径,但构造脊是最主要的运移路径。

(3)濮卫地区油气纵向运移通道主要为卫东断层、濮 67 断层和濮城南断层,横向运移主要发生于洼陷内部和濮城构造东翼斜坡带;古云集—文明寨、卫城中部、濮城和濮城南地区为主要的油气聚集区,也是砂体顶面构造脊和有效断层断面脊发育区,而且二者在空间上相互交叉叠合,十分有利于油气在不同优势运移通道组成的空间格架中运移,含氮化合物分析表明这些地区的砂体顶面构造脊和断面脊均为实际的油气运移路径。

References

- Bekele, E., Person, M., De Marsily, G., 1999. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model discussion. *AAPG Bulletin*, 83(6): 1015—1019. doi: 10.1306/E4FD2E5B-1732-11D7-8645000102C1865D
- Catalan, L., Fu, X. W., Chatzis, I., et al., 1992. An experimental study of secondary oil migration. *AAPG Bulletin*, 76(5): 638—650. doi: 10.1306/BDFF8894-1718-11D7-8645000102C1865D
- Hao, F., Zou, H. Y., Wang, M. F., et al., 2002. Research advances and frontier areas of mechanisms of petroleum accumulation. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 7—14 (in Chinese with English abstract).

- Hindle, A. D., 1997. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model. *AAPG Bulletin*, 81(9): 1451—1481. doi: 10.1306/3B05BB1E-172A-11D7-8645000102C1865D
- Jiang, W. L., 2008. Predict the dominant migration channels in Binbei area, Songliao basin. *Natural Gas Technology*, 2(4): 23—25, 78 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Zeng, J. H., et al., 2005. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 507—516 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., 1994. Migration of oil and gas (2nd edition). Petroleum Industry Press, Beijing, 113—118 (in Chinese).
- Li, M. C., 2004. Basic principles of migration and hydrocarbon exploration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 379—383 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Q., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., 2005. A new method for effective trace petroleum migration path—concept of fault section dominant migrating channel and its application. *Geological Review*, 51(2): 156—162 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. R., 2003. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics. *Natural Gas Geoscience*, 14(5): 337—346 (in Chinese with English abstract).
- Sylta, Ø., Pedersen, J. I., Hamborg, M., 1998. On the vertical and lateral distribution of hydrocarbon migration velocities during secondary migration. In: Parnell, J., ed., Dating and duration of fluid flow and fluid-rock interaction. *Geological Society, London, Special Publication*, 144: 221—232. doi: 10.1144/GSL.SP.1998.144.01.17
- Thomas, M. M., Clouse, J. A., 1995. Scaled physical model of secondary oil migration. *AAPG Bulletin*, 79(1): 19—29. doi: 10.1306/8D2B149E-171E-11D7-8645000102C1865D
- Tokunaga, T., Mogi, K., Matsubara, O., et al., 2000. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns: an experimental study. *AAPG Bulletin*, 84(1): 65—74. doi: 10.1306/C9EBCD65-1735-11D7-8645000102C1865D
- Wang, T. G., Li, S. M., Zhang, A. Y., et al., 2000. Oil migration analysis with pyrrolic nitrogen compounds. *Journal of the University of Petroleum*, 24(4): 83—86 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., Jin, Z. J., Lü, X. X., et al., 2004. Petroleum accumulation system and effective hydrocarbon migration pathway in the Kuqa fold-thrust belts, Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 440—444 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Z., Xu, Z. M., Zhao, D. Y., 2005. The using of nitrogen compounds in geochemistry. *Natural Gas Geoscience*, 16(6): 809—813 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. H., Jin, Z. J., 2000. Physical simulation for secondary migration and accumulation of oil and gas. Petroleum Industry Press, Beijing, 50—114 (in Chinese).
- Zhang, F. Q., Luo, X. R., Miao, S., et al., 2004. Experiments on oil migrating in a limited pathway and the mechanism analysis. *Chinese Journal of Geology*, 39(2): 159—167 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郝芳, 邹华耀, 王敏芳, 等, 2002. 油气成藏机理研究进展和前沿研究领域. *地质科技情报*, 21(4): 7—14.
- 姜文利, 2008. 松辽盆地滨北地区油气运移优势通道的预测. *天然气技术*, 2(4): 23—25, 78.
- 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等, 2005. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究. *地质前缘*, 12(4): 507—516.
- 李明诚, 1994. 石油与天然气运移(第二版). 北京: 石油工业出版社, 113—118.
- 李明诚, 2004. 油气运移基础理论与油气勘探. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 379—383.
- 罗群, 庞雄奇, 姜振学, 2005. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法——断面优势运移通道的提出及其应用. *地质论评*, 51(2): 156—162.
- 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.
- 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等, 2000. 利用原油含氮化合物研究油气运移. *石油大学学报(自然科学版)*, 24(4): 83—86.
- 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等, 2004. 库车褶皱冲断带天然气成藏体系及有效运移优势通道. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 440—444.
- 杨宪彰, 徐志明, 赵丹阳, 2005. 含氮化合物在油气地球化学中的应用. *天然气地球科学*, 16(6): 809—813.
- 曾溅辉, 金之钧, 2000. 油气二次运移和聚集物理模拟. 北京: 石油工业出版社, 50—114.
- 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等, 2004. 石油二次运移优势路径形成过程实验及机理分析. *地质科学*, 39(2): 159—167.