

文章编号: 0253-2697(2013)04-0692-09 DOI:10.7623/syxb201304009

东营凹陷南斜坡东段沙河街组砂岩输导层连通性量化表征

雷裕红^{1,2} 罗晓容^{1,2} 张立宽^{1,2} 宋成鹏³ 程 明^{1,2}

(1. 中国科学院油气资源研究重点实验室 北京 100029; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029;
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:以东营凹陷南斜坡东段王家岗油田沙河街组二段为重点解剖对象,利用开发动态资料,结合原油全烃气相色谱指纹特征分析,确定了砂岩输导体间的连通性,建立了利用砂地比判定砂体连通性的数学概率模型,并应用该模型量化描述了东营凹陷南斜坡东段沙河街组主要砂岩输导层的连通特征。研究表明,当砂地比低于 20% 时,砂体间基本不连通;当砂地比大于 20% 时,砂体间连通的概率随砂地比增加而逐渐变大;当砂地比大于 80% 时,砂体间完全连通。除王家岗油田、八面河及研究区西南部一带外,沙河街组三段中亚段输导层砂体连通性较差,沙河街组三段上亚段和沙河街组二段输导层砂体间连通性良好。

关键词:砂岩输导体;连通性;量化表征;东营凹陷;沙河街组

中图分类号:TE112.23

文献标识码:A

Quantitative characterization of Shahejie Formation sandstone carrier connectivity of the eastern part of the south slope in Dongying sag

LEI Yuhong^{1,2} LUO Xiaorong^{1,2} ZHANG Likuan^{1,2} SONG Chengpeng³ CHEN Ming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Institute of Geology & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract:Based on analysis of production performance data and gas chromatography fingerprint characteristics of oils from the second member of Shahejie Formation(E_{s2}) in the Wangjiagang oilfield, Dongying sag, connectivity among sand bodies was investigated and a mathematical probability model was established, and with this model, the sandstone carrier connectivity of the Shahejie Formation in the eastern part of the south slope of the Dongying sag was quantitatively described. The results showed that when the net-to-gross ratio is lower than 20%, sand bodies are isolated from each other; while the ratio is greater than 20%, the connectivity probability increases gradually with increase of the net-to-gross ratio; sand bodies are absolutely connected together when the net-to-gross ratio is greater than 80%. In particular, the connectivity probability of E_{s3}^2 sandstone carriers is lower than 20% except for several areas such as the Wangjiagang oilfield, Bamianhe area and the southwest part of the study area. The connectivity of E_{s3}^1 and E_{s2} sandstone carriers is very good, generally greater than 80%.

Key words: sandstone carrier; connectivity; quantitative characterization; Dongying sag; Shahejie Formation

输导体系是油气从“源”运移到“藏”的桥梁和纽带,直接影响到油气的运移方向和聚集部位,控制了油气的富集,因此输导体系是油气成藏动力学研究的核心内容之一^[1-6]。输导体系由输导体构成,基本的输导体包括岩体、断裂及不整合等^[3,7-8]。输导体与储集体有一定的共性,都是具有一定的流体储集空间和渗透能力的地质体;但两者也存在着根本的差别,输导体必须在一定的宏观空间范围内具有连通性,从而实现其输导性能^[3]。在碎屑岩盆地内,砂岩是主要的输导体,

对砂岩输导体连通特征的定量刻画和表征是碎屑岩油气成藏过程研究中重要而现实的研究方向^[1,9-10]。

20 世纪 90 年代以来,在油气田开发领域,国内外学者针对砂岩储层的连通特征已经开展了大量的研究工作,取得了较多的成果和认识^[11-14]。其中砂体通过叠置所形成的连通性与砂岩在地层中所占的比例关系密切^[11-13,15],利用离散型随机模型可进行较好的预测^[11-12,15-17]。King 利用逾渗理论分析了叠置砂岩体间的连通性,认为存在一个砂地比特征门限值(即逾渗阈

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41102078)和国家重大科技专项(2011ZX08005-004)资助。

第一作者及通信作者:雷裕红,男,1978 年 12 月生,2001 年获中国地质大学(武汉)学士学位,2010 年获中国科学院博士学位,现为中国科学院地质与地球物理研究所博士后,主要从事油气运聚成藏动力学和页岩气的研究。Email:granulitelei@163.com

值),当砂地比值低于该门限值时,砂岩体之间基本不连通;随着砂地比值越来越高,砂体之间开始叠置,形成连通砂体集群;而当砂地比值超过某一上限值时,形成大片完全连通的砂岩体^[12]。关于砂岩连通的特征门限值及完全连通上限值,不同研究者给出的值相差较大,存在一定的争议。Allen 认为砂地比门限值小于 50%时,砂体间相互不连通;当砂地比值大于 50%时,砂体则大面积连通^[11]。King 发现,对于一个包含各向同性砂体无限延伸的概念体系,三维逾渗阈值为 0.276,而二维逾渗阈值约为 0.668^[12]。Jackson 等估算薄层状砂泥岩互层综合模型的水平逾渗阈值为 0.280,垂直逾渗阈值约为 0.500^[15]。裘怿楠通过对中国含油气盆地的研究,认为河道砂连通的特征门限值及完全连通上限值分别为 30%和 50%,并指出不同地区需作具体分析^[13]。

笔者以东营凹陷王家岗油田通 61 区块沙河街组二段(简称沙二段)为重点解剖对象,尝试建立表征砂岩输导体间连通性的方法。考虑到研究区沙二段输导层自主要的油气运聚成藏期(明化镇组上段沉积期^[18-19])至今成岩作用较弱、输导层物性特征变化不大的特点^[20],利用油田动态开发资料,结合地球化学手段确定砂岩输导体间流体的连通特征,建立利用砂地比判定砂体连通性的数学概率模型方法,量化表征沙河街组主要砂岩输导层的连通特征。此项研究可为该地区开展油气藏动力学定量研究提供参考和借鉴。

1 地质背景及沙河街组主要输导层

研究区位于东营凹陷南斜坡东段,西临纯化-草桥构造带,东接八面河断裂鼻状构造带及广利南洼陷,北至牛庄洼陷,南抵广饶凸起(图 1),是东营凹陷重要的含油气区带。研究区的构造整体上较为简单,主要表现为缓坡背景下的断阶构造格局,局部地区断裂系统发育^[21-24]。钻井揭示新生界在东营凹陷南斜坡东段自下而上分别为孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组和平原组。沙河街组发育在继承性的缓坡背景上,沉积水体经历了一个由浅变深-变浅-再变深的过程^[25-27]。沙河街组四段(简称沙四段)-沙河街组三段(简称沙三段)下亚段沉积时期,研究区气候由干旱转为湿润,湖盆扩大,为研究区主要烃源岩的发育期;砂体不发育,仅局部有少量浊积砂体和滩坝砂。沙三段中亚段(Es_3^2)沉积时期为湖盆发育最兴盛期,但由于东南广饶凸起和东部青坨子凸起遭受强烈风化剥蚀,物源供应十分充足,东营凹陷南斜坡东段发育一大型的河流三角洲,砂体非常发育。沙三段上亚段(Es_3^1)沉积时期,研究区气候由潮湿变为干旱,湖水变浅,河流-三角洲向湖盆中心延伸扩大,整个研究区几乎全为三角洲沉积。沙二段(Es_2)沉积时期,湖盆进一步萎缩,逐渐由三角洲相过渡到河流相。由于东营凹陷南斜坡东段宽缓的特征, Es_3^2 、 Es_3^1 、 Es_2 砂体具有分布广、规模大、纵向上相互叠置的特点,为研究区油气侧向运移的主要输导层。

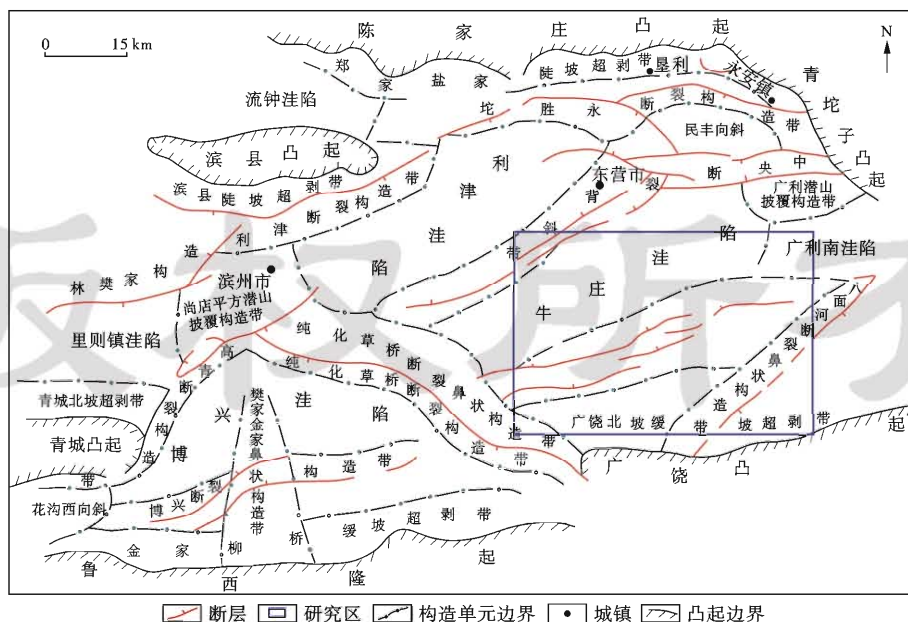


图 1 东营凹陷构造区划及研究区构造位置(据文献[21-22]修改)

Fig. 1 Tectonic division of Dongying sag and location of study area

2 研究方法

为了量化分析研究区主要输导层的连通性特征,笔者选择勘探程度高、各类资料丰富的王家岗油田通61区块沙二段为解剖对象,综合利用动静态资料分析、原油全烃气相色谱指纹特征对比等多种手段,确定各井砂体间的连通性;然后拟合连通性与砂地比之间的相关关系,建立砂体连通性与砂地比之间的数学概率模型。在验证模型可靠的前提下,利用该概率模型,量化表征沙河街组各主要砂岩输导层的连通性特征。具体方法如下:

(1) 在碎屑岩盆地中,砂岩层的分布往往具强非均匀性,纵向上多与泥岩构成互层,侧向的连续性变化不一。因此,首先需要根据通61区块沙二段的勘探程度及砂体本身的发育特征,在确保资料井尽可能多的分布于不同网格单元的前提下,采用以下原则来划分砂体连通性与砂地比关系模型的网格:纵向上以沙二段各砂层组的顶底界进行划分;平面上,以研究区砂体透镜体平均长度作为网格的长度(SN向)、砂体透镜体平均宽度作为网格的宽度(ES向)进行划分。

东营凹陷南斜坡东段砂岩透镜体的长度和宽度的统计结果表明,砂岩透镜体长度多数在400~1200 m,峰值为600~800 m;宽度多数分布在200~600 m。为此,纵向上(即 x 轴)的网格长度取物源方向透镜体长度的一半,横向上(即 y 轴)网格的宽度取透镜体宽度的1/2,深度方向(即 z 轴)以沙二段各砂层组的顶底界为分隔单元,把研究区划分成 20×9 的网格,每个网格单元的大小为 $350 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 。

(2) 充分利用动/静态生产资料,综合连井砂体对比、色谱指纹地球化学分析等手段确定各井之间的砂体连通性。若确定某一单元格内A井与邻近单元格内B井某输导层砂体连通,读取两井间约1/2距离处且与两井均连通的C井输导层砂地比,C井输导层对应的连通性记为“连通”;与此相反,如A井和邻近单元格中E井的输导层在空间上是不连通的,则读取两井间约1/2距离处D井的砂地比,D井输导层对应的连通性标记为“不连通”(图2)。

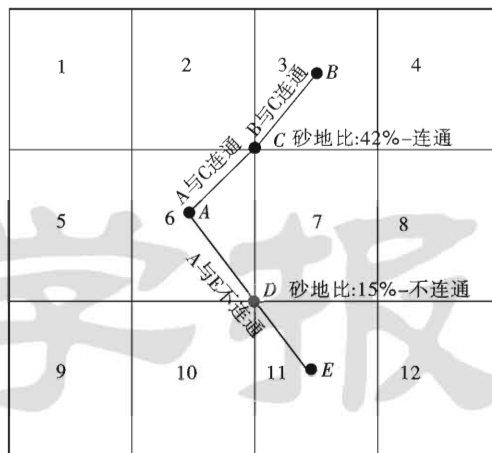
(3) 在King提出的砂岩体空间分布概率模型基础上^[12],通过对研究区砂岩体间相互关系的统计分析,建立以下指数关系来描述输导层内砂岩体之间的连通性模型^[9],并对其可靠性进行检验:

$$P = \begin{cases} 0 & h \leq C_0 \\ 1 - e^{(-h^2/C_0^2)} & h > C_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为砂地比; $b = (C - C_0)/\beta$,为连通指数。

(4) 将上述砂体连通性与砂地比的概率模型应用

于东营凹陷南斜坡东段,量化表征沙河街组主要砂岩输导层的连通性。



注:网格为空间上某一层的网格在平面的投影。

图2 砂体连通性与砂地比统计关系

Fig. 2 Statistical relationship between sand body connectivity and sand content

3 通61区块井间砂岩流体连通性

油田动/静态生产数据是直接体现油藏开发特征的参数,对生产动/静态资料进行分析是研究井间砂体/油藏连通性的有效手段之一,常用的分析方法有油藏压力分析法、流体性质变化趋势分析法、试井分析法、井间产能分析法、井间化学示踪剂监测法等^[28-31]。此外,利用原油全烃气相色谱指纹特征来分析油藏连通性的技术近年来得到了广泛的应用,取得了良好的效果^[32-35],成为研究井间砂体连通性重要手段之一。本次将综合运用上述方法,对王家岗油田通61区块井间砂体的连通性开展研究。

3.1 流体压力

同一油藏中各井属于同一个水动力系统,其各处的原始地层压力之间是平衡的,同一深度的压力应该相等,原始地层压力与深度的相互关系曲线应为一近似直线;在生产过程中,各井压力随时间的变化趋势应大致相似^[29-30]。根据这一特点,利用各井的流体压力资料,就可以分析砂体井间连通性。如通61区块的通61-C162井、通61-XC135井、通61-X184井的 Es_2^7 — Es_2^8 砂层组从2007年10月至2010年2月油藏压力随时间的变化趋势基本一致(图3),据此初步认为这3口井 Es_2^7 — Es_2^8 砂层组的砂体是连通的。

3.2 产能变化

随着生产的推进,处于同一压力系统内各井的产油量、产水量、含水率随时间的变化趋势应该近似一致^[29-30]。根据这种特点,利用各井的产能数据,可初步

分析井间砂体的连通性。如通 61 区块通 61-48 井、通 61-34 井的 $E_{S_3}^7$ 砂层组从 1982 年 11 月至 1985 年 12 月的产液量随时间变化趋势基本一致,而与通 61-46 井的变化趋势差别较大(图 4),据此,可初步认为通 61-48 井、通 61-34 井的 $E_{S_3}^7$ 砂层组的砂体是连通的,通 61-46 井与通 61-48 井、通 61-34 井 $E_{S_3}^7$ 砂层组的砂体可能不连通。

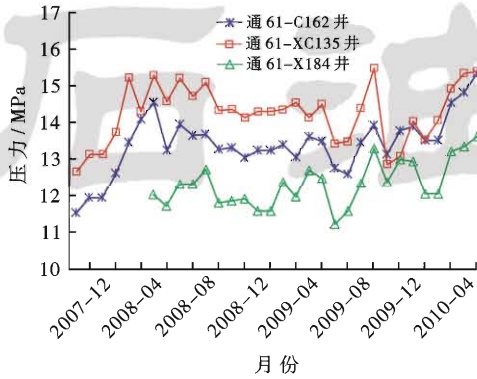


图 3 单井压力随时间变化情况

Fig. 3 Change curves of pressure with time

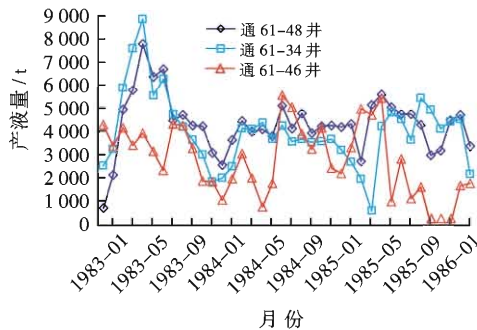


图 4 单井产液量随时间变化情况

Fig. 4 Change curves of fluid production with time

3.3 试井分析

井间干扰试井、脉冲试井和不稳定试井分析是研究井间动态连通性的重要方法之一,其中以井间干扰试井分析较为常用^[31,36]。井间干扰试井是通过一口或多口激动井改变工作制度(新井投产、开关油井、换油嘴、酸压施工等),分析处于同一压力系统中的一口或数口观察井的反应,以此判段井间的连通关系^[31,36]。如通 61 区块通 61-32 井于 1987 年 7 月关井,通 61-25 井 $E_{S_2}^4$ 砂层组的产液量在通 61-32 井关井后显著上升(图 5),由此判断,通 61-25 井和通 61-32 井的 $E_{S_2}^4$ 砂层组的砂体可能连通。

3.4 注水响应

注水井注水量的变化会引起与之连通的油井产液量的波动,处于同一水动力系统中的注水井注水量随时间变化的趋势和油井产量随时间变化的趋势应大致

相似,利用此特征可分析油水井层间连通性^[37-39]。如通 61 区块的通 61-53 井组中,通 61-27 井的 $E_{S_2}^5$ 砂层组从 1986 年 5 月至 1988 年 10 月的月产液量随时间变化趋势与通 61-53 注水井的注水量随时间的变化趋势基本类似,而通 61-47 井的变化趋势与之差别较大;且 1987 年 10 月通 61-53 注水井增加注水量后,通 61-27 井的动液面明显上升,产液量明显加大,而通 61-47 井的产液量不升反降;1988 年 8 月通 61-53 注水井减少注水量后,通 61-27 井的动液面明显下降,产液量降低,而通 61-47 井的产液量没有明显反映(图 6)。以上分析表明,通 61-27 井与通 61-53 井 $E_{S_2}^5$ 砂层组的砂体是连通的,而与通 61-47 井不连通。

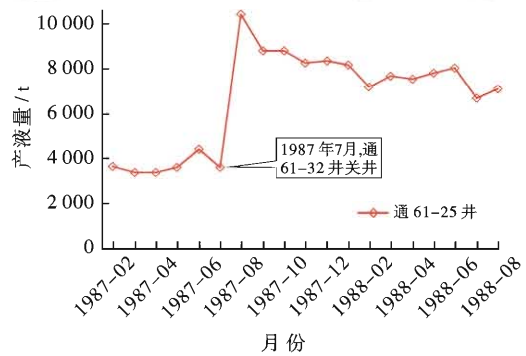


图 5 单井产液量随时间变化情况

Fig. 5 Change curve of fluid production with time

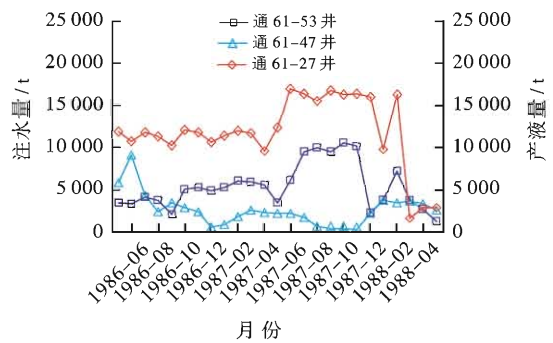


图 6 注水井注水量和产液井产液量随时间变化情况

Fig. 6 Change curves of water injection amount and fluid production with time

3.5 原油全烃气相色谱指纹

不同来源的原油,或者油藏中不同小层的原油,由于断层、非渗透岩层的封隔,其化合物的组成与含量存在一定的差异;即使同一来源、同一小层的原油,如因相变或断层分隔而不属同一连通油藏,由于后期烃类流体与岩石之间的相互作用、生物降解和水洗作用的差异,原油的组成也会存在一定的差异;同一连通油藏中的原油全烃气相色谱指纹特征往往相似^[33]。因此,可通过分析原油全烃气相色谱指纹特征的异同,再结合动态资料等其他分析手段,来确定井间砂体连通性。

如通 61 区块的通 61-74 井、通 61-56 井的 Es_3^7 砂层组的原油色谱指纹特征非常相似(图 7),说明这 2 口井的 Es_3^7 砂层组的砂体可能相互连通。

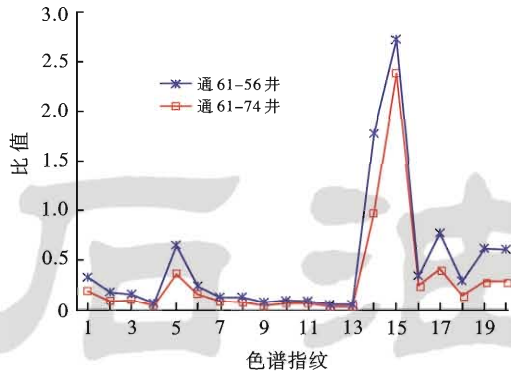


图 7 单井原油色谱指纹特征

Fig. 7 Characteristics of gas chromatography fingerprint of oil

3.6 砂地比与砂岩连通概率模型的建立

通过上述方法确定各井间砂体连通性的基础上,统计分析了砂岩输导层连通性与砂地比的相关关系(统计数据 431 个)。将砂地比从 0% 到 100% 划分为 20 个区间,中间间隔 5%。统计各区间对应的砂体连通的样本在总样本中所占的百分比,获得砂体连通概率与砂地比间的相关关系(图 8),当砂地比小于 15% 时,砂体基本不连通,当砂地比约为 62%,砂体大范围连通。图 8 中的统计结果可利用连通概率数学模型表示为:

$$P = \begin{cases} 0 & h \leq 0.15 \\ 1 - e^{[-13.5808(h-0.15)^2]} & h > 0.15 \end{cases}$$

(2) 式中: h 为砂地比; P 为连通概率。

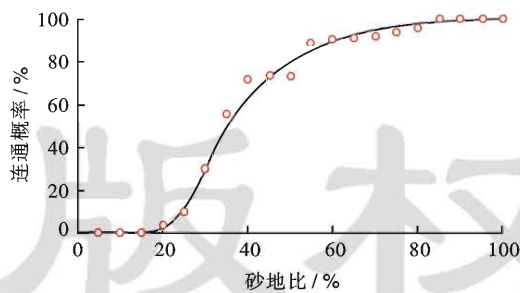


图 8 王家岗油田砂地比与砂体连通概率关系

Fig. 8 Relationship between sand content and sand body connectivity of Wangjiagang oilfield

3.7 连通概率模型的验证

在上述砂岩连通性分析中,事先预留一部分井的数据不参与统计,而是用于检验统计模型。通 61 区块通 61-29 井 Es_2^5 砂层组的砂地比为 43%,利用上述公式计算砂体连通概率为 68%;通 61-98 井 Es_2^5 砂层组的砂地比为 56%,砂体连通概率为 87%;而位于通 61-

29 井和通 61-98 井间的通 61-70 井 Es_2^5 砂层组的砂地比为 54%,砂体连通概率为 85%(表 1)。根据上述砂体连通性概率模型,这 3 口井 Es_2^5 砂层组的砂体连通概率较大。结合通 61-29 井、通 61-98 井、通 61-70 井 Es_2^5 砂层组的油水分布情况,利用测井曲线对这 3 口井 Es_2^5 砂层组的砂体进行了精细对比,显示这 3 口井 Es_2^5 砂层组的砂体是相互连通的;此外,从通 61-29 井注水量随时间变化趋势及和通 61-98 井、通 61-70 井产液量随时间的变化趋势来看,上述 3 口井 Es_2^5 砂层组的砂体也是相互连通的(图 9)。这说明从砂体连通概率模型所获得的结果与实际地质情况基本吻合(表 1),表明砂体连通概率模型是可靠的,可以用来分析研究区内砂体的连通性。

表 1 砂岩连通概率与实际连通情况对比

Table 1 Comparison between calculating probability and actual results of sand body connectivity

井号	层位	砂地比 / %	连通概率 / %	实际连通情况
通 61-29	Es_2^5	43	68	连通
	Es_2^6	10	0	不连通
	Es_2^7	49	80	连通
	Es_2^8	84	100	连通
通 61-70	Es_2^5	54	85	连通
	Es_2^6	19	4	不连通
	Es_2^7	50	81	连通
	Es_2^8	89	100	连通
通 61-98	Es_2^5	56	87	连通
	Es_2^6	16	0	不连通
	Es_2^7	49	80	连通
	Es_2^8	88	100	连通

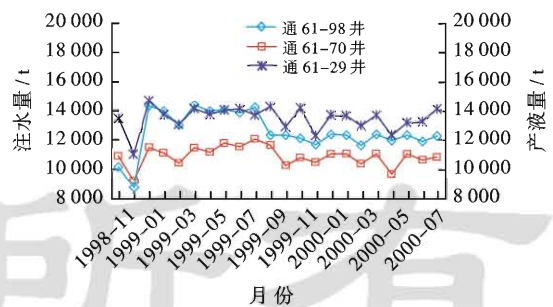


图 9 注水井注水量和产液井产液量随时间变化情况

Fig. 9 Change curves of water injection amount and fluid production with time

4 连通概率模型在东营凹陷南斜坡东段沙河街组的应用

利用上述所建立的砂体连通性判定的概率数学模型,根据沙河街组各段/亚段的砂地比资料,刻画了东营凹陷南斜坡东段沙二段、沙三段上亚段、沙三段中亚段等主要砂岩输导层的连通性特征(图 10、图 11、图 12)。

4.1 沙三段中亚段砂岩输导层连通特征

从沙三段中亚段砂岩输导层的连通性特征看(图 10),除王家岗油田、八面河-草桥和官 127-通古 11-草 25-王 13 井一带外,其他地区沙三段中亚段砂体间连通性较差。尽管牛庄洼陷沙三段中亚段砂岩累计厚度较大,但由于其主要为三角洲前缘斜坡相的浊积砂

体,呈透镜状产出,砂地比低,砂体间的连通性差,连通概率一般低于 20%。王家岗油田、八面河-草桥及官 127-通古 11-草 25-王 13 井一带砂体主要为三角洲平原相、前缘相的分流河道、水下分流河道和河口坝砂体,同时东营三角洲多次在南斜坡前积叠加,使得砂体纵向叠置,因此,砂体连通概率较高,一般大于 60%(图 10)。

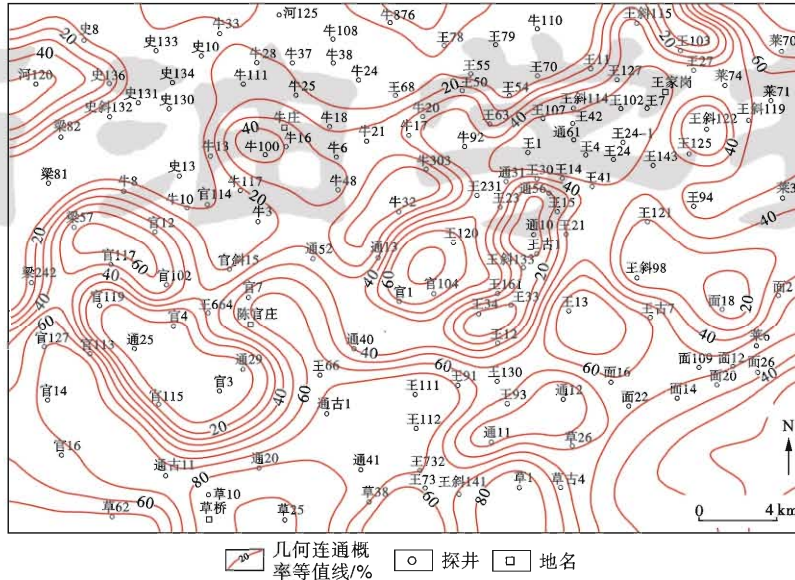


图 10 东营凹陷南斜坡东段沙三段中亚段砂岩输导层连通概率分布特征

Fig. 10 Distribution of sand body connectivity probability of E_{s3}^2 in the eastern section of south slope of Dongying sag

4.2 沙三段上亚段砂岩输导层连通特征

沙三段上亚段沉积时,研究区气候干旱,湖水变浅,河流三角洲沉积遍布整个研究区,分流河道、水下分流河道、河口坝、席状砂体和围绕多期三角洲前缘分

布的滑塌浊积砂体等垂向上相互叠置连片,砂体间基本连通。除王 121-通 12、史 8 井区等少数地区的连通概率稍低外(30%~50%),其他地区的砂体连通概率一般都大于 70%(图 11)。

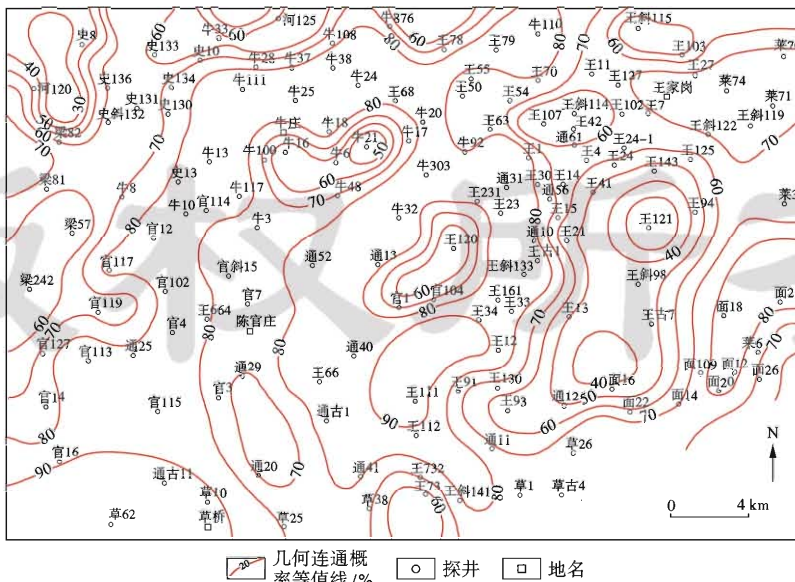


图 11 东营凹陷南斜坡东段沙三段上亚段砂岩输导层连通概率分布特征

Fig. 11 Distribution of sand body connectivity probability of E_{s3}^1 in the eastern section of south slope of Dongying sag

4.3 沙二段砂岩输导层连通特征

由于沙二段多以三角洲平原分流河道砂体、三角洲前缘水下分流河道砂、席状砂、河口坝等叠置连片的中厚层指状砂岩、砾状砂岩、含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩为主,砂体间连通概率总体较高(图 12)。北部牛庄洼

陷一带砂体连通概率相对较低,一般在 40%~60%,局部地区连通概率低于 40%。八面河一带连通概率一般为 60%~70%。研究区中部的王 21-通 40 井区、西南的草桥、陈官庄一带砂体连通概率最高,一般大于 80%(图 12)。

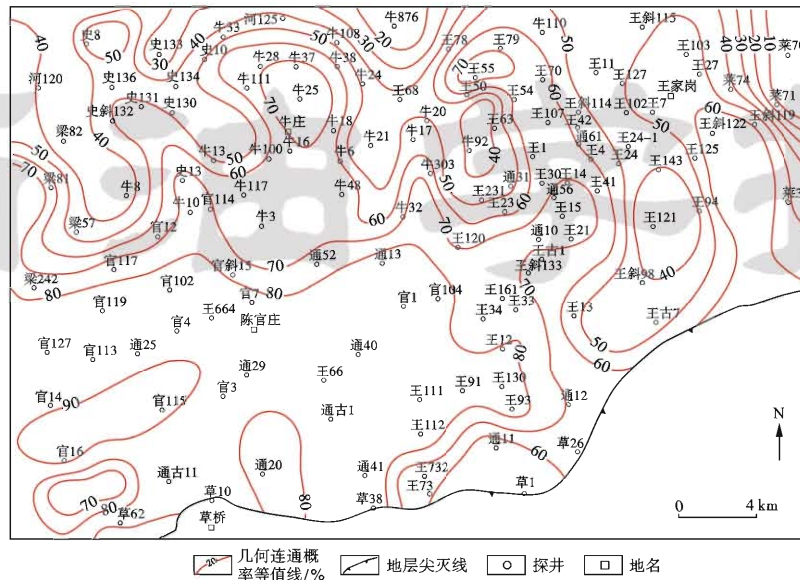


图 12 东营凹陷南斜坡东段沙二段砂岩输导层连通概率分布特征

Fig. 12 Distribution of sand body connectivity probability of Es₂ in the eastern section of south slope of Dongying sag

5 结论与讨论

(1) 综合采用井间砂体对比、原油全烃色谱指纹对比和动态/静态生产资料分析等手段,在确定王家岗油田通 61 块井间砂体连通与否的基础上,建立了利用砂地比判别砂体连通性的数学模型。当砂地比低于 20%时,砂体间基本不连通;当砂地比为 20%~45%时,随着砂地比的逐渐增加,砂体之间开始叠置,形成连通砂体集群,砂体间连通的概率逐渐变大,当砂地比大于 45%时,砂体间基本连通;当砂地比大于 80%时,砂体间完全连通。

(2) 运用砂地比判别砂体连通性的数学模型,对东营凹陷南斜坡东段砂岩输导层的连通性进行了研究。除王家岗油田、八面河及研究区西南部一带外,沙三段中亚段输导层砂体连通性较差;而沙三段上亚段和沙二段输导层砂体在大部分地区具有良好的连通性。

(3) 文中所采用的方法表示的是输导层流体连通特征,并没有完全展现输导层内砂体之间因沉积作用而形成的叠置关系。由于可根据流体物理/化学特征来辨识砂体之间是否连通,因此所获得的认识实际上包含了砂体之间因断裂愈合而形成的隔挡、相互不叠置或低渗层隔开的砂体间因裂隙开启而造成的连通

等。基于研究区的实际地质条件,该方法可以利用砂地比参数来实现对输导层连通性的刻画和认识。

(4) 由于研究区自明化镇组上段沉积以来,成岩作用相对较弱,对明化镇组沉积时期砂岩输导层的输导性能影响较小^[20],故所获得的砂岩输导层连通性方法和认识可直接应用于明化镇组时期的油气运移。但是,将该方法应用于其他地区时,如果在成岩作用的影响下,油气主要充注时期砂岩输导体物性特征和现今相比发生了明显变化,且这种变化明显改变了输导体的输导性能,影响了油气的运移,此时在运用砂地比进行输导层砂体连通性研究时,需要恢复油气充注时原始输导体特征。

参考文献

[1] 郝芳,邹华耀,姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11-21.
Hao Fang, Zou Huayao, Jiang Jianqun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11-21.

[2] 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 337-346.
Luo Xiaorong. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 337-346.

[3] 罗晓容,雷裕红,张立宽,等. 油气运移输导层研究及量化表征方

- 法[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 428-436.
- Luo Xiaorong, Lei Yuhong, Zhang Likuang, et al. Characterization of carrier formation for hydrocarbon migration: concepts and approaches[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 428-436.
- [4] 张文朝, 降栓奇, 陈彦君, 等. 断陷盆地“相-势-导”成藏模式与油气成藏[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 680-687.
- Zhang Wenchao, Jiang Shuanqi, Chen Yanjun, et al. “Facies-potential-transport” reservoir model and formation of reservoirs in fault basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 680-687.
- [5] 雷裕红, 罗晓容, 潘坚, 等. 大庆油田西部地区姚一段油气成藏动力学过程模拟[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 204-210.
- Lei Yuhong, Luo Xiaorong, Pan Jian, et al. Simulation on hydrocarbon migration and accumulation dynamics of the first member of Yaojia Formation in the west of Daqing Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(2): 204-210.
- [6] 赵健, 罗晓容, 张宝收, 等. 塔中地区志留系柯坪塔格组砂岩输导层量化表征及有效性评价[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 949-958.
- Zhao Jian, Luo Xiaorong, Zhang Baoshou, et al. A quantitative characterization and effectiveness evaluation on sandstone carrier beds of the Silurian Kalpintag formation in the Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 949-958.
- [7] 武芳芳, 朱光有, 张水昌, 等. 塔里木盆地油气输导体系及对油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 332-341.
- Wu Fangfang, Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, et al. Types of hydrocarbon migration pathways and its controlling effects on hydrocarbon distribution in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 332-341.
- [8] 宋国奇, 隋风贵, 赵乐强. 济阳拗陷不整合结构不能作为油气长距离运移的通道[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 744-747.
- Song Guoqi, Sui Fenggui, Zhao Leqiang. No unconformity structure in Jiyang Depression as long distance migration pathway of hydrocarbon[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 744-747.
- [9] Bekele E, Person M, de Marsily G. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model; discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(6): 1015-1019.
- [10] Luo Xiaorong. Simulation and characterization of pathway heterogeneity of secondary hydrocarbon migration[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(6): 881-898.
- [11] Allen J R L. Studies in fluvial sedimentation: an exploratory quantitative model for the architecture of avulsion controlled alluvial suites[J]. *Sedimentary Geology*, 1978, 21(2): 129-147.
- [12] King P R. The connectivity and conductivity of overlapping sand bodies[M]//Buller A C, Berg E, Hjelmeland O, Kleppe J, Orsaeter O, Aasen J O. North Sea Oil and Gas Reservoirs II. London: Graham and Trotman, 1990: 353-362.
- [13] 裘传楠. 储层沉积学研究工作流程[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 85-90.
- Qiu Yanan. A proposed flow-diagram for reservoir sedimentological study[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1990, 17(1): 85-90.
- [14] 吕晓光, 田东辉, 李伯虎. 厚油层平面宏观非均质性及其挖潜方法的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(4): 58-63.
- Lu Xiaoguang, Tian Donghui, Li Bohu. Areal macroscopic heterogeneity of thick pay and a discussing on the methods of oil potentials tapping in Daqing Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(4): 58-63.
- [15] Jackson M D, Yoshida S, Muggeridge A H, et al. Three dimensional reservoir characterization and flow simulation of heterolithic tidal sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(4): 507-528.
- [16] Larue D K, Hovadik J. Connectivity of channelized reservoirs: a modeling approach[J]. *Petroleum Geoscience*, 2006, 12(4): 291-308.
- [17] Hovadik J M, Larue D K. Static characterizations of reservoirs: refining the concepts of connectivity and continuity[J]. *Petroleum Geoscience*, 2007, 13(3): 195-211.
- [18] 蒋有录, 刘华, 张乐, 等. 东营凹陷油气成藏期分析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 215-218.
- Jiang Youlu, Liu Hua, Zhang Le, et al. Analysis of petroleum accumulation phase in Dongying sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 215-218.
- [19] 朱光有, 金强, 戴金星, 等. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 209-215.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Dai Jinxin, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 209-215.
- [20] 雷裕红. 牛庄洼陷南斜坡沙河街组输导体系建立及其量化表征[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2010.
- Lei Yuhong. Construction and quantitative characterization of hydrocarbon carrier framework of Shahejie Formation in the south slope of Niu Zhuang subsag[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [21] 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探卷一: 陆相断陷盆地构造演化与构造样式[M]. 北京: 石油工业出版社和地质出版社, 2003.
- Li Pilong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin I: Structural evolution and mode of fault basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press and Geological Publishing House, 2003.
- [22] 郝雪峰. 东营凹陷输导体系及其控藏模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Hao Xuefeng. Conduit systems & reservoir controlled model searching in Dongying depression[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [23] 高侠. 东营凹陷南斜坡下第三系油气输导体系研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007.
- Gao Xia. Study on hydrocarbon passage system of Paleogene in the southern slope of Dongying depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007.
- [24] 旷红伟, 高振中, 邢凤存, 等. 东营凹陷现河油田河道型储层研究方法[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 61-66.
- Kuang Hongwei, Gao Zhenzhong, Xing Fengcun, et al. Description method for characteristics of stream channel reservoir in

- Xianhe Oilfield of Dongying depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 61-66.
- [25] 武法东, 陈建渝, 刘从印, 等. 东营凹陷第三纪层序地层格架及沉积体系类型[J]. *现代地质*, 1998, 12(4): 559-566.
Wu Fadong, Chen Jianyu, Liu Congyin, et al. Tertiary sequence stratigraphic framework and sedimentary system types in Dongying depression[J]. *Geoscience*, 1998, 12(4): 559-566.
- [26] 姜在兴, 杨伟利, 操应长. 东营凹陷沙河街组三段—二段下亚段沉积层序及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(2): 127-129.
Jiang Zaixing, Yang Weili, Cao Yingchang. Origin and sedimentary sequence of Es3-Es2 in Shahejie Formation of Dongying depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(2): 127-129.
- [27] 袁文芳, 陈世悦, 曾昌民. 济阳拗陷古近系沙河街组海侵问题研究[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 40-44.
Yuan Wenfang, Chen Shiyue, Zeng Changmin. Study on marine transgression of Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(4): 40-44.
- [28] 金强, 王伟峰, 刘泽容, 等. 油藏地质模型的建立及其应用[J]. *石油学报*, 1995, 16(1): 32-37.
Jin Qiang, Wang Weifeng, Liu Zerong, et al. Establishment and application of geological reservoir modeling [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(1): 32-37.
- [29] 邓英尔, 刘树根, 麻翠杰. 井间连通性的综合分析方法[J]. *断块油气田*, 2003, 10(5): 50-53.
Deng Yin'er, Liu Shugen, Ma Cuijie. Aggregate analysis method of continuity of formation between wells[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2003, 10(5): 50-53.
- [30] 石广志, 冯国庆, 张烈辉, 等. 应用生产动态数据判断地层连通性方法[J]. *天然气勘探与开发*, 2006, 29(2): 29-31.
Shi Guangzhi, Feng Guoqing, Zhang Liehui, et al. Inferring stratal connectivity from production performance data [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2006, 29(2): 29-31.
- [31] 刘振宇, 曾昭英, 翟云芳, 等. 利用脉冲试井方法研究低渗透油藏的连通性[J]. *石油学报*, 2003, 24(1): 73-77.
Liu Zhenyu, Zeng Zhaoying, Zai Yunfang, et al. Study on connectivity of low-permeability reservoirs with pulse-testing method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(1): 73-77.
- [32] 马亭, 梅博文, 张俊, 等. 轮南油田三叠系油藏连通性的地球化学研究[J]. *石油学报*, 1997, 18(4): 38-42.
Ma Ting, Mei Bowen, Zhang Jun, et al. A study on reservoir continuity of Triassic reservoirs of Lunna Oilfield in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4): 38-42.
- [33] 黄保家, 李旭红, 陈飞雄. 地球化学指纹技术在油气藏连通性及配产研究中的应用——以涠洲 12-1 油田和东方 1-1 气田为例[J]. *中国海上油气(地质)*, 2002, 16(5): 302-308.
Huang Baojia, Li Xuhong, Chen Feixiong. An application of geochemical fingerprint techniques to insight into reservoir communication and production allocation: a case study from WZ12-1 Oil Field and DF1-1 Gas Field [J]. *China offshore Oil and Gas*, 2002, 16(5): 302-308.
- [34] 文志刚, 朱丹, 李玉泉, 等. 应用色谱指纹技术研究孤东油田六区块油层连通性[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(1): 82-83.
Wen Zhigang, Zhu Dan, Li Yuquan, et al. Oil layer connectivity in the sixth block of Gudong Oilfield, the evidence from gas chromatography fingerprint technique [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(1): 82-83.
- [35] 何文祥, 吴胜和, 龚厚琼, 等. 一种定量判别油藏流体连通性的新方法[J]. *石油学报*, 2004, 25(6): 78-82.
He Wenxiang, Wu Shenghe, Gong Houqiong, et al. A new method for quantitative identification of fluid continuity in reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 78-82.
- [36] 朱洪征, 龚晶晶, 段金宝. 类干扰分析方法原理及其应用[J]. *石油化工应用*, 2008, 27(3): 22-24.
Zhu Hongzheng, Gong Jinjin, Duan Jinbao. Similar interference analysis method and its application [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2008, 27(3): 22-24.
- [37] 唐亮, 殷艳玲, 张贵才. 注采系统连通性研究[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(4): 134-136.
Tang Liang, Yin Yanling, Zhang Guicai. Study on connectivity of an injection-production system [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(4): 134-136.
- [38] Liang X. A simple model to infer interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 70(1/2): 35-43.
- [39] 赵辉, 李阳, 高达, 等. 基于系统分析方法的油藏井间动态连通性研究[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 633-636.
Zhao Hui, Li Yang, Gao Da, et al. Research on reservoir interwell dynamic connectivity using systematic analysis method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 633-636.

(收稿日期 2012-11-07 改回日期 2013-01-30 编辑 汪建国)