

车镇凹陷车西洼陷油气倒灌运移成藏特征及机理

王学军¹, 向立宏¹, 郝雪峰¹, 王中蛟², 李晓燕¹, 银燕¹

(1.中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015; 2.桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004)

摘要:针对车镇凹陷车西洼陷是否存在油气倒灌运移成藏这一问题,从基本地质特征分析入手,对油源对比、有效烃源岩展布特征、烃源岩与储层对接关系进行了研究。结果表明,沙三段烃源岩是车西洼陷的有效烃源岩,沙四段上亚段油藏为“上生下储”型,沙三段4 700 m以下有效烃源岩存在油气倒灌成藏现象。源储对接关系分析表明,曹家庄断阶带以北洼陷区沙四段上亚段油藏中的原油来自上部沙三段烃源岩。油气成藏要素剖析结果表明,沙三段与沙四段上亚段“厚泥下砂”的岩性匹配关系、沙三段烃源岩超压、烃源岩与储层之间的压差以及隐蔽输导体系是油气倒灌运移成藏的主控因素;油气倒灌运移距离与烃源岩剩余压力具有正相关关系,烃源岩之下储层的物性条件对其含油性具有控制作用。

关键词:油气倒灌运移 烃源岩超压 隐蔽输导体系 成藏机理 车西洼陷

中图分类号: TE112.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)01-0006-05

油气倒灌运移成藏规律有别于传统的成藏规律,近年来备受关注。松辽盆地三肇凹陷南区扶杨组油藏与上部青一段的烃源岩空间上不对接,前人对其成藏机理开展了大量研究,认为在烃源岩超压和输导体系存在的条件下,烃源岩生成的部分油气也可发生向下倒灌,运移进入烃源岩之下的储层,并聚集成藏^[1-8],但也有学者对此提出了质疑^[9]。

济阳拗陷是位于渤海湾盆地南部的富油拗陷,其成藏模式均为“下生上储”或“自生自储”式。但是,近期勘探实践发现,在没有断层使储层与烃源岩对接的情况下,在烃源岩之下的储层中也见到了油气显示,车西洼陷车25、车253和车254井甚至获得了工业油流。笔者通过油源对比、源储对接关系、储盖配置关系、成藏动力、输导体系等方面的研究,剖析了车西洼陷油气倒灌运移成藏特征及其机理,建立了成藏模式,不仅对深化济阳拗陷油气成藏规律的认识、拓展油气勘探领域具有重要意义,而且对渤海湾盆地其他成熟探区的油气勘探实践也有借鉴意义。

1 区域地质概况

车镇凹陷位于渤海湾盆地南部,是济阳拗陷西北部次级构造单元,车西洼陷位于车镇凹陷西部,

为典型的北断南超的箕状断陷,其北邻埕子口凸起、南邻义和庄一无棣凸起,勘探面积约为1 500 km²,从南向北可划分为南部缓坡带、洼陷带及北部陡坡带^[10-11]。油藏类型以构造-岩性、潜山油藏为主,油气主要分布于南部缓坡带的曹家庄断阶及洼陷带的沙四段(E_{s4})、沙二段(E_{s2})和潜山储层中,沙一段(E_{s1})、东营组(Ed)及新近系(N)均未发现油藏,沙四段油藏为该区主力油藏,油藏埋深为2 300~4 213.5 m。

2 油气倒灌运移成藏特征

2.1 烃源岩有机地球化学特征

车镇凹陷车西洼陷在古近系沉积过程中,经历了多次湖侵,发育了巨厚的暗色泥岩沉积,形成了沙四段上亚段(E_{s4}^上)、沙三段下亚段—沙三段中亚段(E_{s3}^下—E_{s3}^中)和沙一段共3套暗色泥岩^[12]。

车西洼陷3套烃源岩岩心取样分析结果表明,其有机质类型、有机质丰度及生烃潜量特征存在差异。沙四段烃源岩有机质类型为I型和II型,有机碳含量为0.75%~1.28%,生烃潜量为0.61~2.48 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.028 8%~0.235 0%,镜质组反射率(R_o)为0.67%~0.92%;沙三段下亚段—沙三段中亚段烃源岩有机质类型为I型,有机碳含

收稿日期:2012-11-26。

作者简介:王学军,男,教授级高级工程师,从事油气勘探综合研究。联系电话:(0546)8715429,E-mail:wangxuejun977.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”(2011ZX05006)。

量为1.88%~3.10%,生烃潜量为6.17~23.01 mg/g,氯仿沥青“A”含量为0.272 6%~0.471 0%, R_o 值为0.54%~0.64%;沙一段烃源岩有机质类型以I型为主,有机碳含量为2%~6%,氯仿沥青“A”含量为0.15%~0.5%,埋深为1 200~2 500 m,目前仍处于低成熟—未成熟演化阶段。

2.2 有效烃源岩的确定

有效烃源岩是已证实的对油气成藏有直接贡献的烃源岩。油源对比是确定烃源岩下部储层油气来源的重要手段,也是确定是否发生倒灌运移的重要依据。

车西洼陷62块沙三段下亚段—沙三段中亚段、沙四段暗色泥岩及沙四段原油样品的测试结果表明,总体上沙三段下亚段—沙三段中亚段和沙四段烃源岩规则甾烷分布特征表现为 $C_{27}>C_{29}>C_{28}$,反映了以藻类和低等水生生物为主的物源输入,但是2套烃源岩也存在明显差异:沙四段烃源岩有机质OEP平均值为1.09,CPI平均值为1.15, $(C_{21}+C_{22})/$

$(C_{28}+C_{29})$ 值为3.09, $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 值为1.04,Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈值分别为0.71和0.55,重排甾烷不发育,且4-甲基甾烷含量较低,伽马蜡烷指数为0.11~0.20;沙三段下亚段—沙三段中亚段烃源岩有机质OEP平均值为1.26,CPI平均值为1.25, $(C_{21}+C_{22})/$ $(C_{28}+C_{29})$ 值为1.51, $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 值为0.51,Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈值分别为0.82和0.59,重排甾烷、4-甲基甾烷含量较高,伽马蜡烷指数多小于0.10。这些地球化学特征的差异为已发现油藏的油源分析提供了重要依据。

车西洼陷已完钻的车251、车252、车253和车254等4口井在沙四段上亚段的取样分析结果表明,甾烷异构化参数 $C_{29}20S/(20S+20R)$ 值为0.39~0.56,规则甾烷分布以 C_{27} 略占优势的“V”字型分布为主,伽马蜡烷含量较低,伽马蜡烷指数多小于0.10,且重排甾烷与4-甲基甾烷非常发育。油源对比结果(图1)表明,车西洼陷沙四段上亚段油砂样品中的原油与该区沙三段下亚段—沙三段中亚段成熟烃源岩

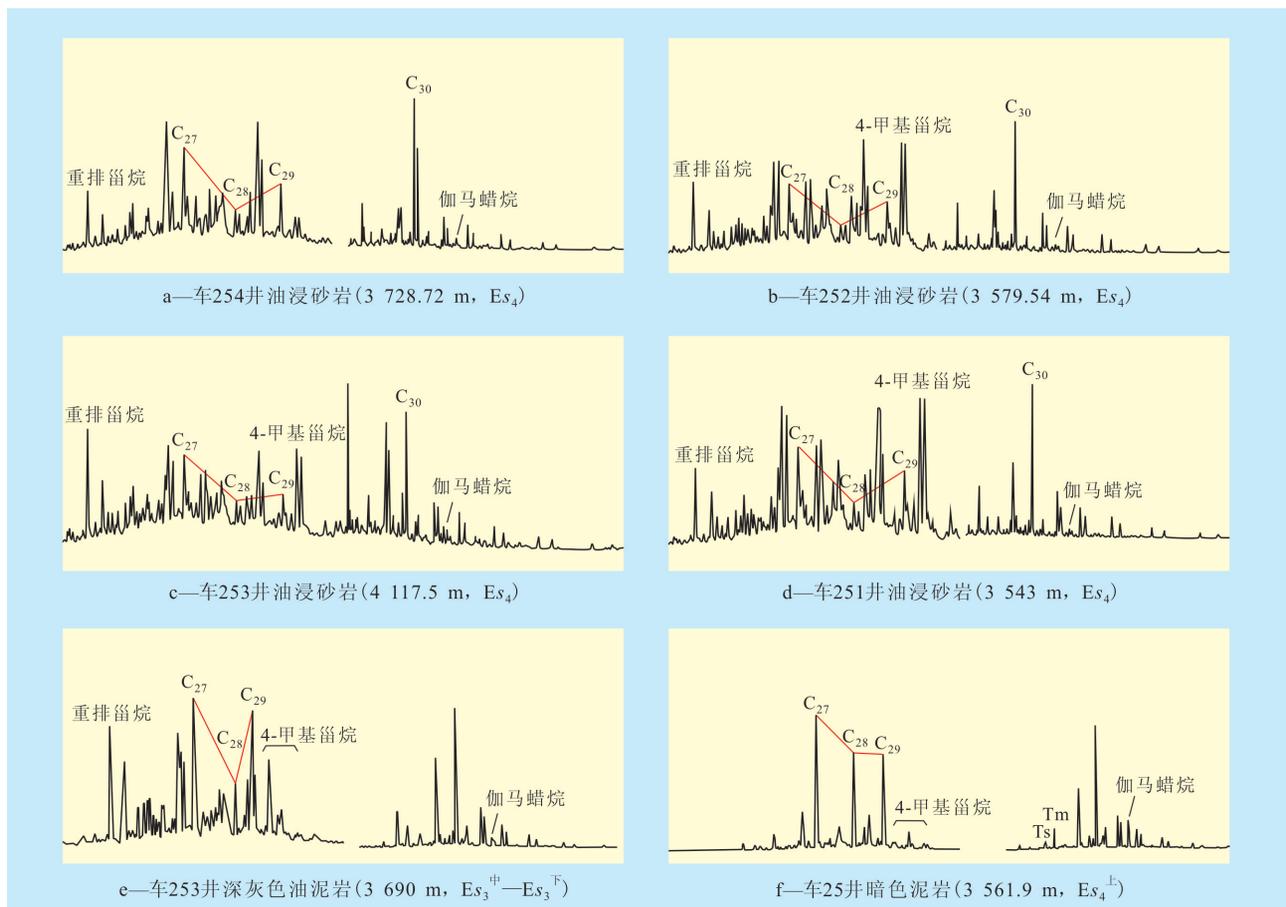


图1 车西洼陷沙三、沙四段烃源岩与沙四段油砂油源对比

具有较好的亲缘关系,而与沙四段上亚段烃源岩存在较大差异。结合该区烃源岩地球化学特征,认为沙三段下亚段—沙三段中亚段为车西洼陷有效烃源岩,沙四段上亚段油藏为“上生下储”型。

2.3 烃源岩与储层对接关系

车西洼陷沙三段下亚段—沙三段中亚段以深湖—半深湖相油泥岩、暗色泥岩和油页岩为主,主要形成于断陷湖盆的深陷扩展阶段,平面上发育

于湖盆中部,横向上烃源岩分布具有不对称性,北部陡坡带烃源岩相带窄,厚度大,南部缓坡带烃源岩相带宽,但厚度薄。

车西洼陷的试油、测井、录井及地震资料统计分析结果表明,沙三段烃源岩顶界埋深约为1 300~3 100 m,底界埋深约为1 400~3 500 m,底界最大埋深约为4 700 m。目前,钻井揭示有3口井在沙三段下亚段—沙三段中亚段有效烃源岩最深底界之下见油气显示,其中车古209井于4 895.6~4 897.5 m井段,车古25井于5 007~5 008 m井段发现1~1.9 m油气显示,车古206井4 729.5~4 795.0 m井段油气显示厚度达65.5 m。3口井储层均未与有效烃源岩对接,且与有效烃源岩底界相距200~300 m。

车西洼陷南部曹家庄断阶带发育一系列北东走向的顺向盆倾断层,断层依次下掉,活动时间较长,切割深,延伸远,落差大,造成该区地层由北向南逐级抬升,形成台阶式的构造格局。断阶带车141断层以北的洼陷带,烃源岩与储层对接的断层不发育,地震剖面显示同相轴连续,地层平行接触,沙三段烃源岩底界与沙四段含油储层并不直接接触,沙三段底界与沙四段顶部第1套砂体被厚度为30~60 m的泥岩所隔,因此,洼陷带沙三段烃源岩生成的油气只能通过连通烃源岩与储层的输导体系倒灌运移进入沙四段储层。

3 油气倒灌运移成藏机理

3.1 烃源岩上部厚层泥岩封盖是油气倒灌运移的基本条件

沙三段沉积时期,车西洼陷处于湖盆发育的断拗期,气候湿热,整个沙三段以深湖、半深湖相沉积为主。在洼陷中心连续沉积了一套分布稳定的厚层泥岩,厚度可达800~1 500 m。而烃源岩下部沙四段上亚段储层则以浅湖相的滩坝砂、三角洲相的砂泥互层沉积为主,纵向上,沙三段与沙四段上亚段形成“厚泥下砂”的岩性配置关系。同时,切穿浅层的大断层不发育,限制了沙三段烃源岩生成的油气向上运移,油气只能向下倒灌运移成藏。

车西洼陷古近系和新近系油气主要分布于沙四段上亚段和沙二段。其中,沙四段上亚段油气从曹家庄断阶带至洼陷带均有分布,沙二段油气主要分布在曹家庄断阶带附近,洼陷带很少发育沙二段油气,说明洼陷带沙三段下亚段—沙三段中亚段泥岩盖层较厚,断层不发育,沙三段烃源岩生成的油

气难以向上运移至烃源岩上部储层,油气倒灌运移至烃源岩下部储层(E_{s4})成藏成为必然。

3.2 烃源岩超压是油气倒灌运移的动力条件

从车西洼陷现今压力场分布特征来看,沙三段的地层压力系数为1.2~2.0,在斜坡带开始出现压力异常,围绕生烃中心呈环带状分布,洼陷带异常压力最大,洼陷边缘和构造高部位地层压力逐渐减少并趋于常压。纵向上,地层压力随埋深的增加而增大,2 600 m处开始出现超压,3 600 m处地层压力增加至最大,向下则出现降低的趋势。由生烃演化史研究结果可见,2 600 m对应于沙三段烃源岩成烃演化的初始深度,该深度向下沙三段烃源岩暗色残余有机碳含量减少,氯仿沥青“A”含量、总烃含量、 C_{29} 甾烷20S/20(S+R)明显增大(图2),说明烃源岩的生烃作用是造成该区沙三段异常超压的主要原因。

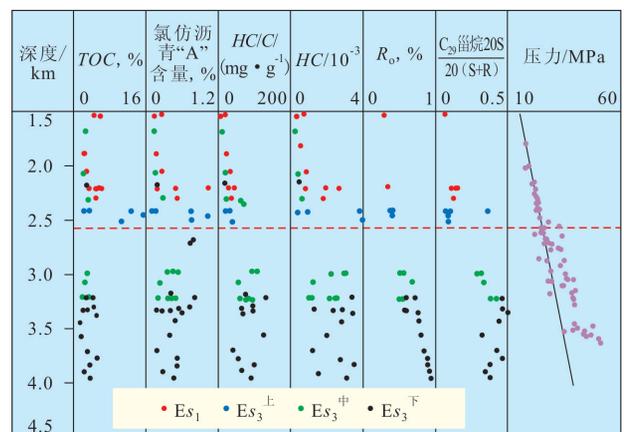


图2 车西洼陷生烃与压力演化对应关系

常压系统下油气运移的动力以浮力为主,在浮力作用下油气不可能发生倒灌运移现象,油气只有在超压作用下才能从烃源岩排出后,通过输导体系向烃源岩下部储层倒灌运移成藏^[13-16]。异常地层压力作为烃类排驱的主要驱动力,控制了盆地内烃类的运移方向^[17-19]。从车西洼陷钻井揭示的烃源岩剩余压力与对应的油气倒灌运移距离关系统计结果(图3)可以看出,烃源岩剩余压力与油气倒灌运移距离具有很好的正相关性。当沙三段烃源岩剩余压力小于5 MPa时,在烃源岩下部地层基本没有油气显示;烃源岩剩余压力为5~10 MPa时,油气倒灌运移距离为50~200 m;烃源岩剩余压力为10~20 MPa时,油气倒灌运移距离为150~250 m,说明烃源岩异常压力为沙三段烃源岩生成的油气向沙四段储层倒灌运移成藏提供了充足的动力,且异常超压控制了油气倒灌运移的距离。

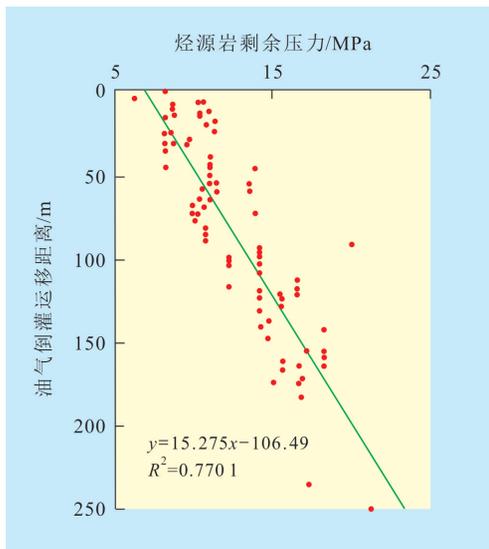


图3 车西洼陷烃源岩剩余压力与油气倒灌运移距离的关系

3.3 源储压差是油气倒灌运移的必要条件

油气在异常压力驱动下从烃源岩排出进入与之相邻的储层,可以分为侧向运移和垂向运移,其中垂向运移又分为向上覆和下伏储层运移,这取决于烃源岩与相邻储层的压差变化趋势,压力梯度大的方向往往是油气运移的有利方向。车西洼陷5口井试油实测压力、声波测井资料对沙三段烃源岩及沙四段储层压力场纵向变化特征分析(图4)表明,车西洼陷沙三段烃源岩的地层压力从上向下逐渐增大,在该段地层底部出现高值,至沙四段地层压力突然降低至一定值后,又逐渐升高,沙三段和下伏沙四段储层的压力梯度的变化大于烃源岩与上覆地层压力梯度的变化,这种现象的产生是由于沙三段烃源岩大量生烃致使地层压力增大,而沙四段由于储层发育,砂体的泄压作用使得压力降低,两者之间产生了压差,促使沙三段烃源岩生成的油气

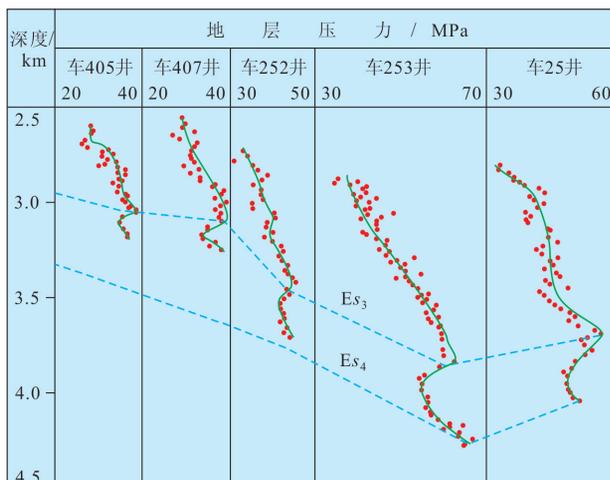


图4 车西洼陷不同单井地层压力与深度的关系

向沙四段储层倒灌运移成藏。

3.4 隐蔽输导体系是油气倒灌运移的主要通道

输导体系作为连接烃源岩与圈闭的桥梁,在油气倒灌成藏过程中起着重要的作用。车西洼陷发育的连通沙三段烃源岩的小断层、微裂缝则成为油气向烃源岩下部沙四段上亚段储层倒灌运移的有利通道。由于这些小断层、微裂缝输导体系在地震剖面上难以识别,称之为隐蔽输导体系。隐蔽输导体系主要有2种:一是与构造活动伴生的低级别断层,二是由流体异常高压造成的岩石破裂而产生的微裂缝^[20-22],后者是构造活动较弱的洼陷区主要的输导体系。洼陷中大量生成的烃类致使地层流体体积增大,压力不断升高,当流体压力超过围岩破裂的下限压力时,岩石沿原有近水平的构造面(如层理、裂隙)产生裂缝,烃源岩内的流体通过裂缝向储层运移^[23]。

车西洼陷沙三段泥岩较纯,粘土矿物以伊/蒙混层为主,岩石脆性较强,只要地层压力达到围岩破裂极限,就可以产生裂缝,形成隐蔽输导体系。运用Eaton法^[24]求得车西洼陷岩层破裂下限的平均压力系数约为1.38。根据车西洼陷压力场特征,所对应的门限深度约为3 000 m,该深度以下洼陷的流体压力系数已大于1.4,达到了岩石破裂下限。

车西洼陷岩心观察也发现隐蔽输导体系的存在。如位于洼陷带的车254井,在沙三段烃源岩下部的沙四段储层中见油斑显示,而地震剖面显示该井未发育断层;该井3 675.4 m处发育5条泥岩裂缝,裂缝最大长度约为10 cm,宽度约为0.3 cm,裂缝中局部充填脉体。裂缝在油气藏的形成过程中起着非常重要的作用,其不仅是油气从烃源岩中排出的通道,也是油气二次运移的输导体系,尤其对于洼陷带油气倒灌运移成藏起到至关重要的作用。

3.5 储层物性对油气倒灌运移成藏的影响

车西洼陷相同源动力条件下的烃源岩下部储层并不都含油,这是由于来自烃源岩的油气沿输导体系向下运移时,只有遇到物性好的储层才可能成藏,反之则不能成藏。

车西洼陷沙四段储层以灰色、灰褐色砂岩、粉砂岩,灰质或白云质砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩为主,储层岩石类型以长石砂岩、岩屑质长石砂岩为主,矿物成分以长石为主,泥质胶结,含灰质,分选性较好。孔隙间主要填隙物为泥质和碳酸盐岩,岩石较致密。砂岩储层孔隙度为5%~20%,平均值为13%,渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为

$30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 总体为低孔、低渗透储层。由该区沙四段储层中 970 个样品物性与含油性的统计结果可知, 随着孔隙度的增大, 含油样品所占比例逐渐增高。当孔隙度小于 5% 时, 测试样品中基本未见油气显示; 当孔隙度为 5% ~ 10% 时, 50% 的测试样品有油气显示; 当孔隙度为 10% ~ 20% 时, 油气显示样品数所占比例为 60%; 当孔隙度大于 20% 时, 油气显示样品数所占比例达 80% 以上。表明物性条件对烃源岩之下储层的含油性具有控制作用, 物性越好, 越易成藏。

4 结论

车西洼陷沙三段下亚段—沙三段中亚段烃源岩为该区有效烃源岩, 最大底界埋深为 4 700 m, 目前发现的沙四段油气均来自于沙三段下亚段—沙三段中亚段烃源岩, 北部陡坡带、曹家庄断阶带以北洼陷区为有利成藏区。

隐蔽输导体系为油气倒灌运移成藏提供了有效的运移通道。沙三段烃源岩与沙四段上亚段储层“厚泥下砂”的源储匹配关系、烃源岩与其下部储层间的压差是油气倒灌运移的必要条件, 烃源岩异常压力为油气倒灌运移成藏提供了充足的动力, 异常高压控制了油气倒灌运移的距离, 物性对烃源岩之下储层的含油性具有控制作用。“烃源岩上部厚泥封盖、烃源岩中部超压下注、烃源岩下部隐蔽输导、优相成藏”是油气倒灌运移的主要成藏机理。

参考文献:

- [1] 迟元林, 萧德铭, 殷进垠. 松辽盆地三肇地区上生下储“注入式”成藏机制[J]. 地质学报, 2000, 74(4): 371-377.
- [2] 付广, 王有功. 三肇凹陷青山口组源岩生成油向下“倒灌”运移层位及其研究意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 355-360.
- [3] 陈昭年, 王永卓, 王小敏. 松辽盆地朝长地区扶杨油层油气运移模式[J]. 断块油气田, 2009, 16(6): 22-24.
- [4] 付晓飞, 平贵东, 范瑞东, 等. 三肇凹陷扶杨油层油气“倒灌”运移成藏规律研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 558-566.
- [5] 刘宗堡, 付晓飞, 吕延防, 等. 大型凹陷向斜区油气倒灌式成藏——以松辽盆地三肇凹陷扶杨油层为例[J]. 地质论评, 2009, 55(5): 685-692.
- [6] 吕延防, 李建民, 付晓飞, 等. 松辽盆地三肇凹陷油气下排的地质条件及找油方向[J]. 地质科学, 2009, 44(2): 525-533.
- [7] 付广, 李晓伟. 源外上生下储成藏主控因素及有利区预测——以松辽盆地尚家地区泉二段为例[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(1): 1-5.
- [8] 史集建, 付广, 李丽丽. 滨北地区青一段油气向下“倒灌”运移距离和层位的定量研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 26-29.
- [9] 张景廉. 油气“倒灌”论质疑[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 122-128.
- [10] 王如良, 宋传春, 冯光铭. 车镇凹陷车西洼陷油气富集规律[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(4): 28-31.
- [11] 张永辉, 夏斌, 万念明, 等. 车西洼陷构造演化对油气成藏的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 593-598.
- [12] 孔祥星, 张林晔, 徐思煌. 济阳拗陷车西洼陷油—源对比及运移规律探讨[J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 189-193.
- [13] 冯莉恒. 基于声波时差的超压源岩上、下排烃分配方法及其应用[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(1): 22-24.
- [14] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2004: 19-26.
- [15] 张厚福, 方朝亮. 盆地油气成藏动力学初探——21世纪油气地质勘探新理论探索[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 7-14.
- [16] 卓勤功. 异常高压对烃源岩成烃机理和油气运聚成藏的影响[J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 169-172.
- [17] 褚庆忠, 张树林. 含油气盆地成藏动力学研究综述[J]. 世界地质, 2002, 21(1): 24-29.
- [18] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [19] Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(8): 1451-1481.
- [20] 向立宏. 济阳拗陷泥岩裂缝主控因素定量分析[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 31-33, 37.
- [21] 张奉东, 马收. 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田地应力及天然裂缝场研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2): 150-153.
- [22] 宋梅远, 张善文, 王永诗, 等. 沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(6): 18-22.
- [23] 张厚福, 方朝亮. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 139-140.
- [24] 陈立官. 油气田地下地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 182-183.

编辑 武云云