

doi:10.3799/dqkx.2017.030

火山岩储层天然气运聚成藏模拟：以徐家围子断陷深层为例

王 民¹, 卢双舫^{1*}, 王文广¹, 陈树民², 张 曦³, 关 莹¹

1. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东青岛 266580

2. 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

3. 新南威尔士大学, 新南威尔士悉尼 2052

摘要:与火山岩有关的油气藏或油气显示已在世界范围内被广泛发现,然而受火山岩储层强非均质性的影响,揭示火山岩油气成藏过程的盆地模拟研究进展十分缓慢,尚未见到关于火山岩储层中油气运聚成藏模拟研究的报道.采用 PetroMod 软件首次成功模拟了火山岩储层天然气运聚成藏过程,系统论述了含油气盆地模拟工作中三维精细地质模型的建立、关键参数的选取,并在统计国内外火山岩物性的基础上提出了不同岩性火山岩孔隙度与深度的关系,结合研究区岩相分布,考察了不同断裂活动期和不同运移算法时深层火山岩天然气运聚过程.结果揭示:徐家围子断陷深层有机质具有接力生气的特征,无主生气期,火山岩气藏主要形成于泉头组—青山口组末期,气藏发育位置受控于断裂分布与活动期、火山岩体和储层孔隙度;活动期次与时间可影响天然气聚集层位,深层气源断裂活动期要早于 94.5 Ma;采用混合法模拟火山岩储层中的油气运聚成藏比较合适.徐家围子断陷深层火山岩天然气的下一步勘探方向为斜坡带、洼陷深部的微幅度构造、火山岩体和岩性尖灭带,同时深层致密砂砾岩储层也应有较大潜力.

关键词:运聚模拟;关键参数;天然气;火山岩;徐家围子断陷;石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)03-0397-13

收稿日期: 2016-10-15

Gas Migration and Accumulation Modelling in Volcanic Reservoirs, Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin

Wang Min¹, Lu Shuangfang^{1*}, Wang Wenguang¹, Chen Shumin², Zhang Xi³, Guan Ying¹

1. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163453, China

3. University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract: Volcanic reservoirs and oil & gas shows have been found worldwide. However, the modelling of volcanic rocks related hydrocarbon accumulation process shows little progress due to strong volcanic reservoir heterogeneity. Using PetroMod software, gas migration and accumulation in the volcanic reservoirs has been successfully modelled for the first time in this study. Three dimensional geological modelling, key parameters or methods selection are described in detail. Based on the statistical porosity of volcanic rocks, the relationship of porosity versus depth for volcanic rocks was established using an exponential model, then the gas migration and accumulation processes under different situations, such as fault activity periods and flow simulation methods, were modelled. The results show that gas generation from organic matter in the study area has a long period in a relay mode without major gas generation period; volcanic gas reservoirs formed mainly during Quantou-Qingshankou Formation end period, and gas reservoir distributions were controlled by fault locations, activity periods, volcanic rock mass and porosities; the fault activity time is before 94.5 Ma indicated by simulation results. It is concluded that the integrated migration

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No.2009CB219306);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(No.BS2014HZ001).

作者简介:王民(1981—),男,教授,主要从事常规和非常规油气地球化学研究. ORCID:0000-0003-4611-2684. E-mail: wangm@upc.edu.cn

*** 通讯作者:**卢双舫, ORCID:0000-0002-0758-4075. E-mail: lushuangfang@upc.edu.cn

引用格式:王民,卢双舫,王文广,等,2017.火山岩储层天然气运聚成藏模拟:以徐家围子断陷深层为例.地球科学,42(3):397-409.

method is the best way for describing gas migration in the volcanic rocks. Slope zone, micro-structures in the sag, lithologic pinchout and volcanic mass are favorable zones for the volcanic gas exploration in the study area, meanwhile, the tight conglomerate or tight sand in the deep formation should also have a great potential for gas exploration.

Key words: migration and accumulation modelling; key parameters; natural gas; volcanic rock; Xujiaweizi fault depression; petroleum geology.

0 引言

人们通过油气勘探实践已在 100 多个国家发现与火山岩有关的油气藏或油气显示,如印度尼西亚的 Jatibarang 玄武岩油气田、澳大利亚的 Scoot Reef 玄武岩油气田、纳米比亚的 Kudu 玄武岩气田、巴西 Parana 盆地二叠系油气藏以及我国的渤海湾盆地中新世火山岩油气藏、松辽盆地徐家围子断陷深层火山岩气藏、二连盆地白垩系火山岩油气藏、准噶尔盆地石炭系火山岩油气藏等(杨辉等,2006;邹才能等,2008;刘嘉麒等,2010;王民等,2010)。目前,与火山岩油气相关的地质方面的研究主要有火山岩储层形成条件与特征描述、岩体与圈闭识别、油气成藏主控因素(刘万洙等,2003;罗静兰等,2003;王璞珺等,2003;王贵文等,2008;赵文智等,2009;冯子辉等,2010;朱红涛等,2014)。尽管以往的研究揭示出火山岩(喷出岩和侵入岩)对于有机质生烃、油气运移和聚集有影响,如促进优质烃源岩的形成以及加速生烃进程(王民等,2010;单玄龙等,2014;Wang *et al.*, 2015)、岩浆冷凝、结晶过程所形成的裂缝为油气运移和聚集提供通道与空间(Jones *et al.*, 2007),然而受火山岩储层强非均质性的影响,揭示火山岩油气成藏过程的盆地模拟研究进展十分缓慢,尚未见到关于火山岩储层中油气运聚成藏模拟研究的报道。同时大型盆地模拟软件中(如 PetroMod, BasinMod, Temis suite)均无火山岩(安山岩、流纹岩、玄武岩等)岩石物性参数或孔-渗关系可供盆地模拟工作采用。

含油气盆地数值模拟结果的精度或可信度取决于三维地质模型的精细程度和模拟参数的可信度。徐家围子断陷勘探面积约 5 350 km²,目前完钻探井 148 口,前人已完成了三维地震资料的全覆盖和三维地震连片工作,前期对断陷深层烃源岩、气藏、储层、断裂、盖层特征等已有清晰认识(付广和石巍,2006;李景坤等,2006;付广和王有功,2008;郭秋麟等,2009;付晓飞等,2010;王民等,2014;Wang and Chen, 2015)。这对建立断陷三维精细地质模型和约束盆地模拟有重要的帮助。基于火山岩储层盆地模拟工作研究的短缺

性、徐家围子断陷资料的丰富性,本次研究以徐家围子断陷深层为例,采用 PetroMod 软件考察火山岩储层中天然气运聚成藏过程。研究目的包括:(1)探索适合火山岩储层的盆地模拟研究所用关键参数,为后期类似工作提供参考;(2)从盆地模拟角度揭示靶区天然气运聚成藏过程;(3)提供靶区火山岩气藏下一步勘探目标并为勘探目标优选提供支撑。

1 工区概况及三维地质模型格架

徐家围子断陷位于黑龙江省大庆市肇东、肇州、肇源三县和安达市境内,构造位置上为松辽盆地深层一级构造单元东南断陷区的二级构造单元,西以徐西断裂与安达-肇州背斜带相接,东以斜坡逐渐向肇州-朝阳沟背斜带过渡,北抵明水斜坡,南至松花江边,总体上呈近南北向展布,南北长约 135 km,东西宽为 15~45 km(中部最宽 65 km),面积为 5 350 km²(图 1)。目前完钻探井 148 口,工业气流井 51 口,开发井 58 口。已在徐家围子断陷营城组火山岩中发现汪家屯气田、升平气田、昌德东气田和徐深大气田等。天然气探明储量 $2\,457.45 \times 10^8$ m³,火山岩探明储量 $2\,198.53 \times 10^8$ m³,约占总储量的 88%;CO₂ 探明储量 196.91×10^8 m³,约占总探明储量 8%(王民等,2014)。断陷发育火石岭组、营一段、营三段三套火山岩储层,烃源岩层有火一段、沙河子组,其中沙河子组是主要烃源岩,盖层为营二段泥岩和登娄库泥岩(图 1)。

在综合考虑地震解释结果、井分层、火山岩气藏分布层位资料的基础上,笔者将营城组顶界选为标准层,通过层位标定、时深转换、深度校正的办法建立精细的标准层埋深图(图 2),其中深度校正时采用了 184 口井的分层数据(考虑清晰度,图 2 仅显示了部分井信息)。如图 2 中所示,所建立的标准层埋深图与地质分层数据吻合程度较高。在 PetroMod 软件中,其他各层的埋深图通过地层厚度数据与标准层叠加或相减的方式获取,同时采用地质分层数据对火山岩层位(营一段、营三段)顶面埋深图进行校正,最终建立精细的三维地质格架。在岩性指定方

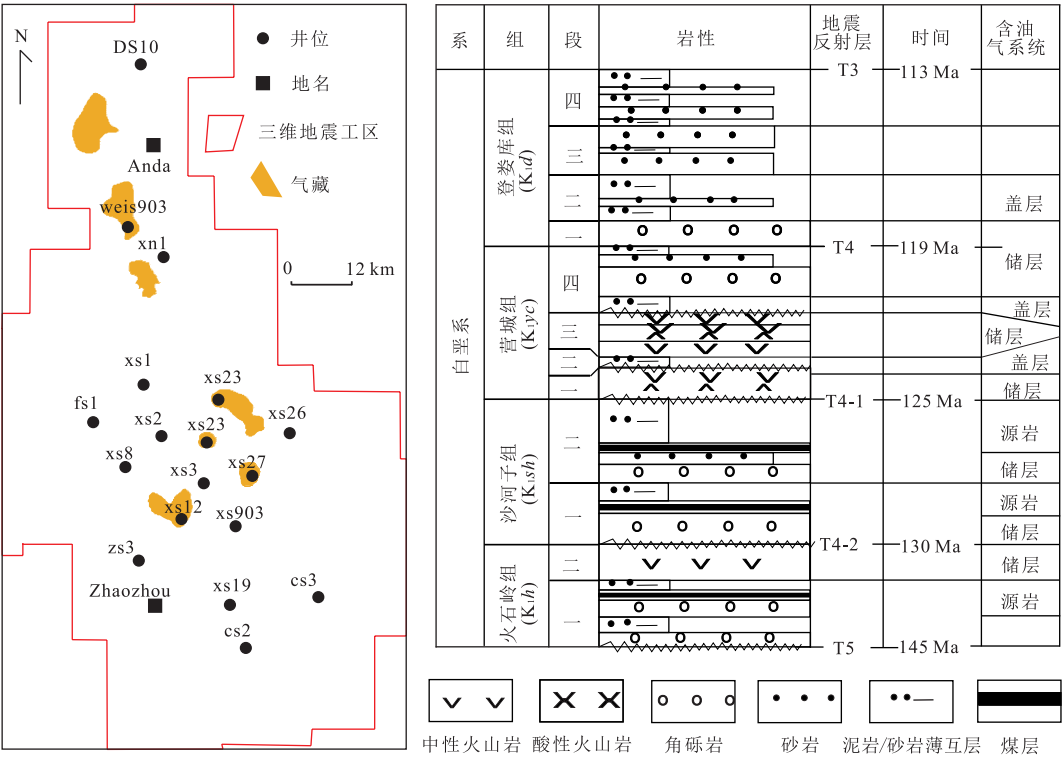


图 1 徐家围子断陷工区简图及模型关键层位岩性柱状图

Fig.1 Sketch of Xujiaweizi fault depression and lithological column of key strata

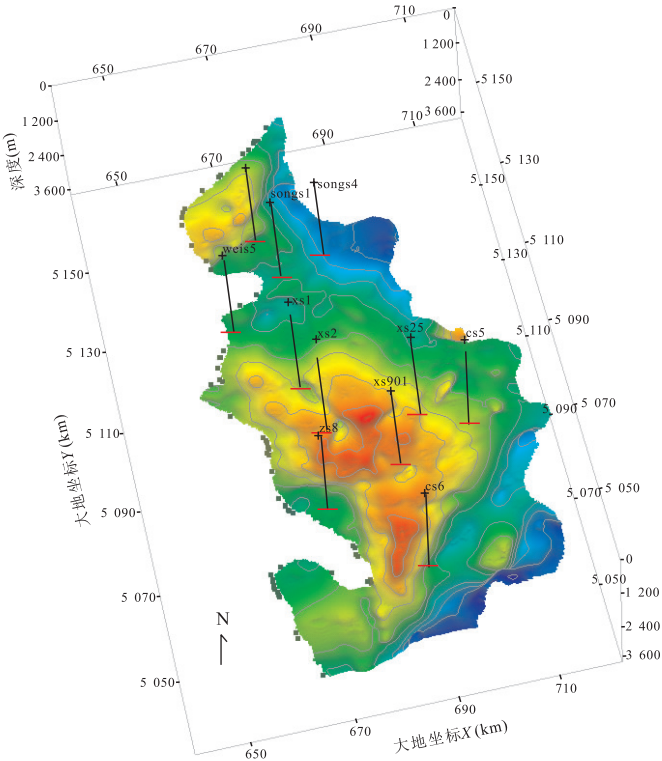


图 2 工区标准层(营城组顶界)埋深

Fig.2 Burial depth of standard formation (top depth of K₁yc), marks in the well track were derived from geologic stratification data
井轨迹上的刻线来自分层数据

面,笔者参考录井数据和盆地模拟需要,将火石岭组地层细分为泥岩段、煤层段和火山岩段;沙河子组地层细分为泥岩段、煤层段和砂砾岩段;营一、三段为火山岩段、营二段为暗色泥岩段,营四段为砂砾岩段;其他各层岩性依据录井资料统计得到。

2 盆地模拟参数

参数选取是影响含油气盆地模拟结果精度的主要因素之一,然而盆地模拟软件中需要指定的参数繁多,主要涉及生、运、储、盖 4 项与成藏要素相关的参数。模拟过程中与生烃史、生烃量相关的参数包括烃源岩的(沙河子组泥岩、煤岩,火石岭组泥岩、煤岩)厚度、原始有机质丰度和生烃潜力数据和烃源岩生烃动力学参数(包括油裂解动力学参数),同时其还受热史—古沉积水界面温度、古热流的影响。上述与烃源岩有关的地质、地球化学参数在前期已有较多积累(王民等,2014),水体深度为 200 m,沉积水界面温度根据徐家围子断陷地理位置(经纬度)采用 PetroMod 软件中的 SWIT-Time 模型自动获取,古热流则采用恢复的三维古热流数据,具体方法如下。

2.1 热史参数

热史恢复是含油气盆地模拟中的一项重要且难度大的基础性工作,对烃源岩生烃史、孔隙流体压力和油气藏相态模拟有重要影响。沉积盆地热流主要有地幔热和沉积岩石放射性元素生热两部分组成(王社教等,1999),多数采用地球热力学与地球化学相结合的方法恢复古热流(反演法),即根据已知的盆地现今热流,反推出该盆地热流史,并采用实测地球化学资料(如 R_0)约束反演结果(Casuscelli *et al.*, 1984; Sweeney and Burnham, 1990; 石广仁, 2000; 唐文旭和曹强, 2014)。本次研究即采用这种方法,首先笔者依据 xs1 井的镜质体反射率(R_0)使用 Easy R_0 % 模型开展单井的古热流恢复,随后将恢复结果作为初始值输入 PetroMod 的热流校正模块(heat flow calibration tool),进一步采用多口井的镜质体反射率、井筒测温数据约束反演。从恢复热史结果来看,不仅 xs1 井镜质体反射率和温度吻合效果好,其他井温标数据吻合效果也很好(图 3a),表明恢复的整个坳陷内热流史数据比较可靠。如图 3b 所示,研究区热史从古到今是逐渐降低的,其中营城组—泉头组时期热流最高,坳陷边部构造高处热流可达 90 mW/m^2 ,现今热流较低,同时洼陷内的热流要低于构造高部位热流。

2.2 其他参数

断裂对徐家围子断陷火山岩气藏分布具有明显的控制作用(付晓飞等, 2010; 胡明等, 2010; 付广等, 2014),具体表现在控制火山岩体的发育进而决定气藏位置,形成断层遮挡型圈闭和沟通源储发挥疏导作用,前 2 个方面的作用、影响在精细三维地质格架(精细构造方面)及储层参数(岩相方面)中笔者已有考虑,故此只需考虑断层的疏导作用。以前的盆地模拟工作中,很少模拟断裂对油气运聚的影响,本次研究首先依据地震解释成果及天然气藏分布范围确定盆地模拟所需的断裂—沟通源储的断裂(气源断裂),并进行时深转换,导出断层三维数据体;之后利用建模软件(如 Petrel)对断棱、断面进行修补,通过编写格式转换软件将断层建模结果直接导入 PetroMod 含油气盆地模拟软件。在靶区断裂活动期次方面,胡明等(2010)认为存在三期:火石岭组沉积时期—营三段沉积时期、泉头组沉积中期及青山口组沉积时期。为了进一步确定、检验断裂活动期次,笔者设计模拟了多种断裂活动期组合模式下的油气运聚,通过模拟的气藏聚集部位和实际勘探气藏分布情况反推靶区断裂活动时期,进一步明确了靶区断裂活动的具体时间。

徐家围子断陷深层存在两套盖层,营一段火山岩顶部盖层(营二段泥岩)和登二段泥岩盖层(高宁等, 2011),其中营一段火山岩顶部盖层排替压力在 xs25 井、fs6 井及 xs3 井附近较大,可达 8 MPa;登二段泥岩盖层是一套区域性盖层,排替压力普遍在 4~9 MPa。存在 3 期剥蚀事件,分别是火石岭组末期(剥蚀量~300 m)、姚家组末期(100 m)、新近系沉积末期(50 m),剥蚀量均不大,对烃源岩生烃的影响较小。

在流体运移算法方面,PetroMod 软件涵盖了达西流法(Darcy)、流线法(flowpath)、逾渗法(IP, invasion percolation)和混合法(hybrid,即 Darcy + flowpath)。其中达西流法考虑了所有的驱动力,如压力和温度,模拟过程中需要较长的时间。流线法(射线法)是基于流线、流管模型的一种降维处理方法(浮力驱动),在计算速度方面有明显优势,因此,三维盆地模拟中一般首先采用流线法初步模拟烃源岩生烃量、油气运移路径的情况;逾渗法是基于多孔介质与逾渗模型的相似性,将逾渗理论应用到多孔介质中流体流动研究的算法,运移的路径主要受控于单个计算网格的毛细管突破压力;混合法是达西流法和流线法的混合,当地层渗透率条件高于设定值(10^{-2} mD)时模型自动采用流线法(浮力驱动),反之则用达西流法。Baur

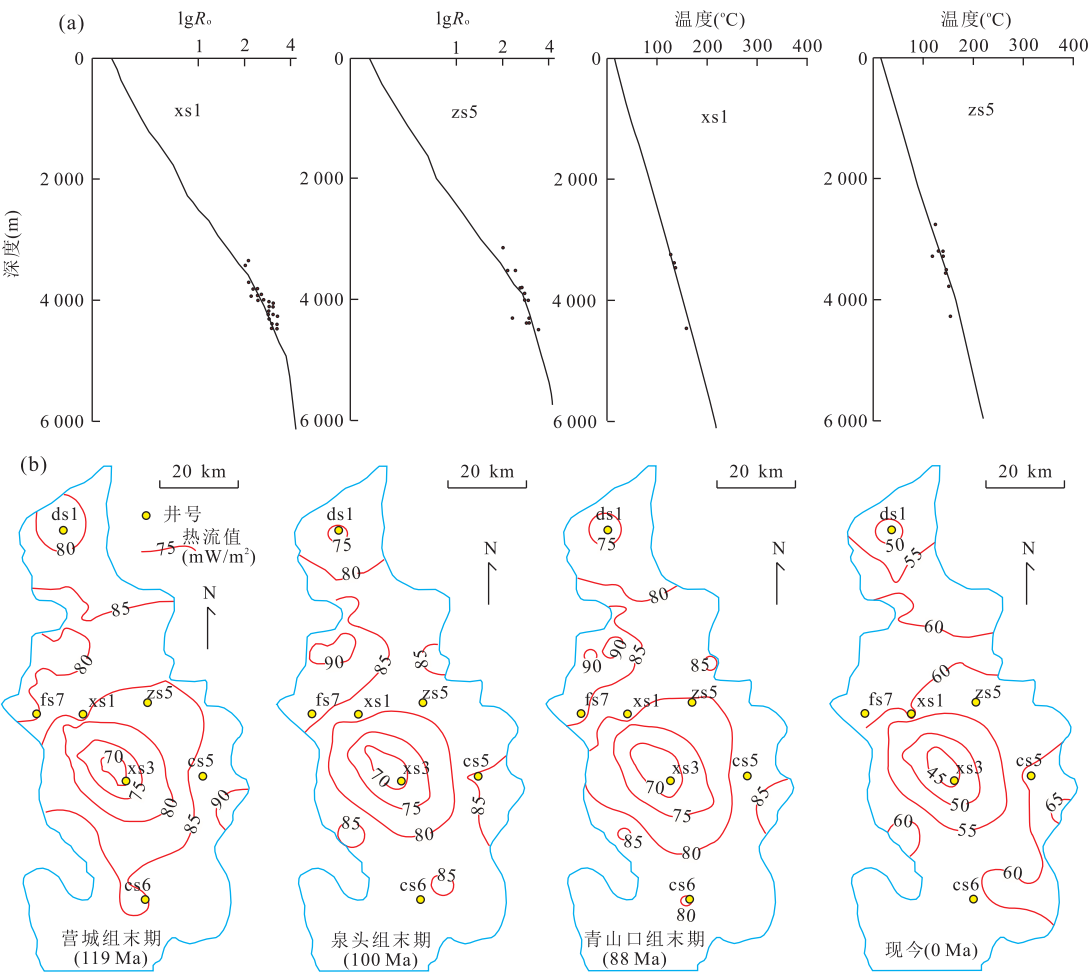


图 3 徐家围子断陷热史模拟结果
Fig.3 Thermal history simulation results of Xujiaweizi fault depression
a.实测温标与模拟值对比图;b.徐家围子断陷热流演化史,图中显示部分井

et al.(2011)对比了上述 4 种方法在砂岩储集层中的油气运聚模拟结果后发现:流线法和混合法得出的结果比较相似,流线法速度快,但是混合法在储层汽油比预测方面更加准确;达西流法模拟结果表现出较大的油气聚集量,超出勘探认识;与混合法相比逾渗法模拟结果更加准确,速度更快,但是预测汽油比方面存在不足.Kuhn *et al.*(2012)通过对美国威利斯顿盆地巴肯页岩层段中页岩油气系统模拟后认为,逾渗法模拟结果与勘探认识的烃类聚集和页岩含烃饱和度比较接近.然而,目前尚无开展火山岩运载体中油气运聚的研究报道.

3 模拟结果及有利区预测

3.1 断裂活动期的影响

断裂对油气具有疏导和遮挡双重作用,在盆地

模拟工作中前人认为断裂活动期间对烃类起疏导作用,而静止期则起封闭作用(付晓飞等,2010;胡明等,2010;付广等,2014),因此,靶区气源断裂的活动期对于气藏的形成历史乃至分布位置都有重要影响.本次研究在已有的断裂活动期认识(胡明等,2010)的基础上,考察断裂活动期早于登娄库沉积(约早于 118 Ma)、泉头组沉积中期(113.5~103 Ma)、青山口沉积时期(100~90 Ma)时天然气运聚过程.其中第一个活动期(早于 118 Ma)时,由于天然气尚未大量生成,对于模拟结果影响不大;第二、三活动期对于天然气聚集成藏影响较大,影响天然气藏分布层位(图 4).当第三期断裂活动晚于 94.5 Ma 时(图 4b 浅蓝色线,断裂第三期活动为 100~90 Ma,模拟过程中也考虑了断裂活动时间早于 94 Ma、93 Ma 的情况,结果与早于 90 Ma 时相似)深部烃源岩生成的天然气在中浅层也有聚集,表明深层气藏的沿断裂发生了天然气渗漏,与实际勘

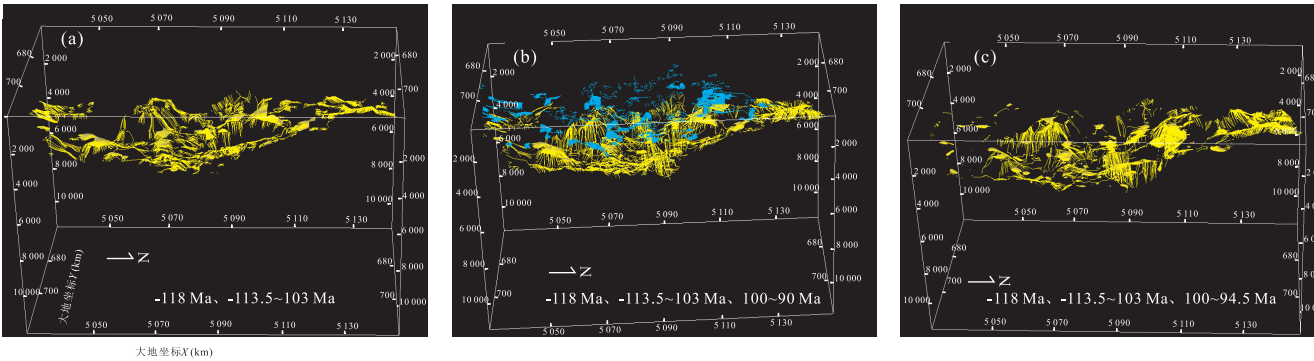


图 4 不同断裂活动期对深层火山岩气藏聚集的影响

Fig.4 Influence of activity times of different faults on the simulated gas accumulation reservoirs at present time
图中底部时间表示断裂活动时期：-118 Ma 表示断裂活动早于 118 Ma；113.5~103.0 Ma 表示断裂活动时期介于 113.5 和 103.0 Ma 之间，显示的聚集情况均为现今状态

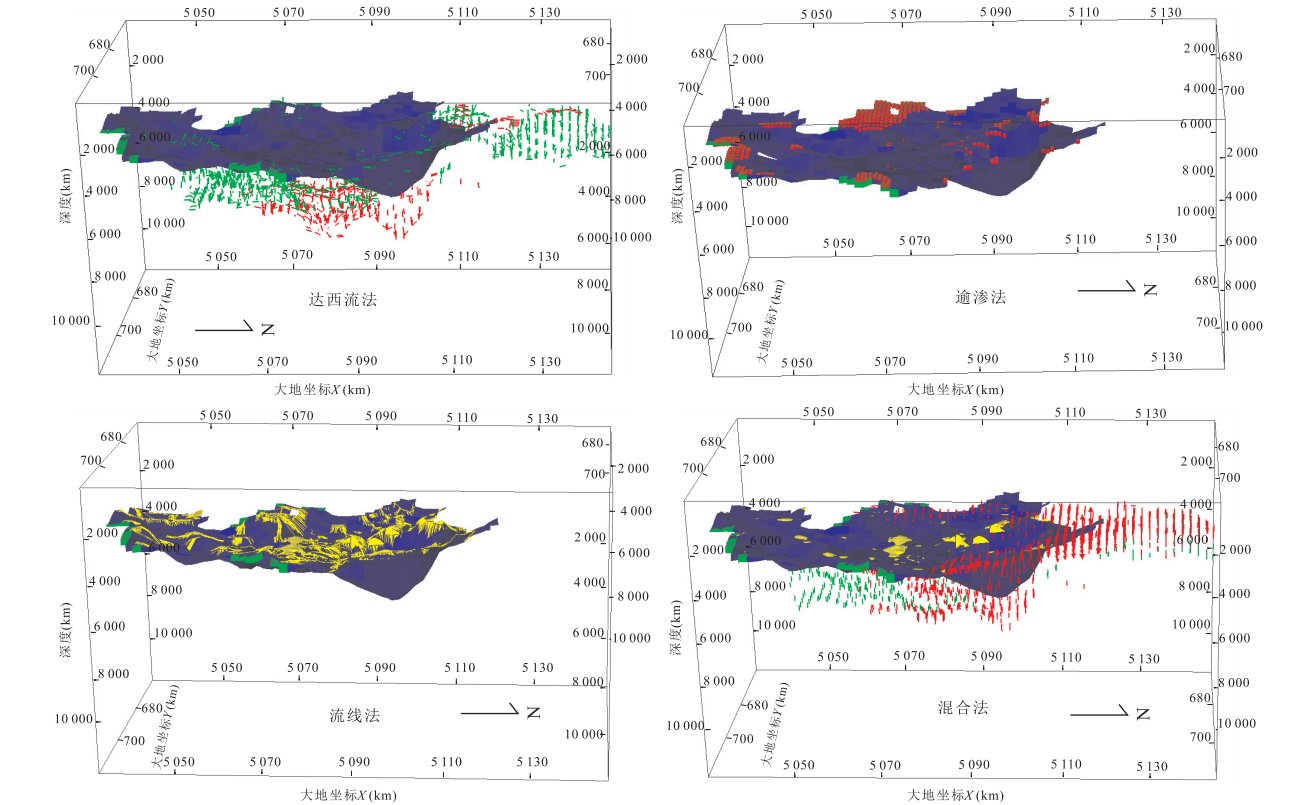


图 5 不同运移算法时深层火山岩气藏聚集情况

Fig.5 Gas accumulation results at present time by using different migrated methods

探结果不符.而当第三期断裂活动早于 94.5 Ma(图 4c)或第三期活动不存在(图 4a)时,天然气在深层聚集,且与勘探认识符合程度较高,据此,笔者推断第三期活动期要至少早于 94.5 Ma.

3.2 不同运移模拟算法的影响

本次开展了上述 4 种(达西流法、流线法、逾渗法和混合法)运移算法的火山岩天然气运聚过程模拟,结果表明(图 5),达西流法模拟结果中烃类聚集

量很少,烃类主要发生侧向运移或沿着模型边界运移;采用逾渗法模拟,在构造部分高部位及凹陷边部(采用的封闭边界模拟)有一定的烃类聚集,且聚集量远少于实际勘探认识.而流线法和混合法模拟结果中的气藏分布比较相似,且与勘探认识接近,其中流线法模拟的气藏规模略大于混合法模拟结果,这一认识与 Baur *et al.*(2011)结论相符.由于靶区烃源岩及储层热演化程度较高,目前均为过成熟阶段,

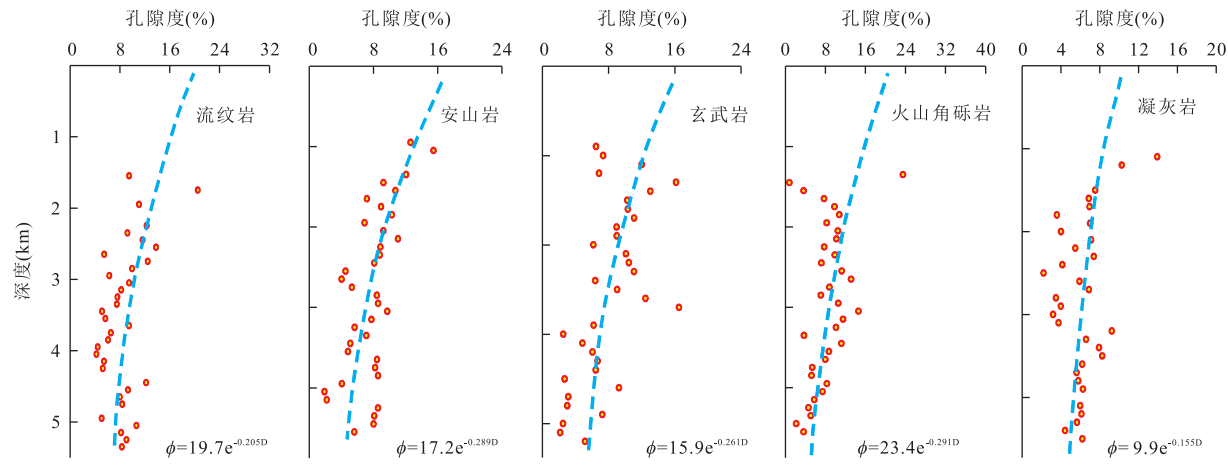


图 6 不同岩性火山岩孔隙度与深度关系

Fig.6 Porosity of volcanic rock with different lithology versus burial depth

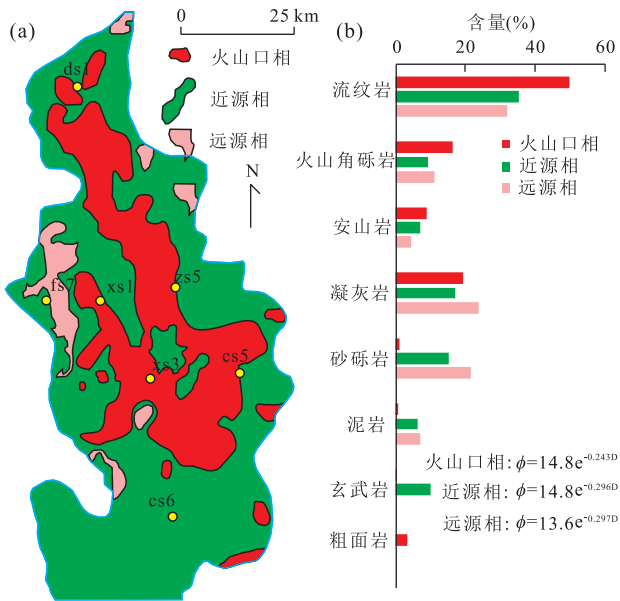


图 7 靶区营城组一段、三段火山岩岩相分布(a)和各岩相内岩性组成(b)

Fig. 7 Diagram of volcanic lithofacies from K₁yc¹ and K₁yc³ (a) and volcanic composition chart for different lithofacies rock (b)

气藏干燥系数较高,无法对比这两种算法的汽油比。可以看出,流线法和混合法适合于火山岩气藏运聚过程模拟计算。基于火山岩储层相对致密、强非均质性和上述算法的原理、模拟结果来看,笔者推荐采用混合法模拟火山岩储层油气运聚过程。

3.3 火山岩孔隙度的影响

储层、运载层参数(孔隙度、渗透率)的选取影响油气的运移路径和油气藏的分布位置的模拟结果,也是三维盆地模拟工作中的一项重要内容。特别是火山

岩储层,其物性受岩体分布、喷发旋回、岩相及次生作用的影响(Feng, 2008; 冯子辉等, 2014; Wang and Chen, 2015),非均质性强,孔隙度与深度关系不明显,盆地模拟软件中没有可用的火山岩物性关系。本次研究收集整理了靶区及公开发表文献中火山岩孔隙度数据 3 220 个,分火山角砾岩、流纹岩、安山岩、凝灰岩、玄武岩 5 种岩性统计数据,编制了不同岩性的火山岩孔隙度与深度关系图(50 或 100 m 深度内取平均值)(图 6)。可以看出火山角砾岩、流纹岩、玄武岩孔隙度相对较大,凝灰岩孔隙度最小。除火山角砾岩、凝灰岩在较浅部(<2.0 km)存在部分异常点外,其他样品孔隙度数值与趋势线(孔隙度—深度关系)吻合较好。靶区火山岩渗透率的模型参考了两方面资料,一方面是 PetroMod 岩性模块中已有与火山岩类似地表孔隙度的砂岩/粉砂岩样品渗透率,另一方面是靶区火山岩样品实测渗透率数据。

火山岩除了垂向上存在非均质性外,侧向上也具有强非均质性,且平面上火山岩物性受控于火山岩相(Feng, 2008)。因此,需要考虑火山岩体及岩相的平面展布,才能更加客观的描述油气运移路径和聚集部位。徐家围子断陷营一段、三段火山岩主要由火山口相、近源相和远源相组成(图 7a),不同相带内各岩性岩石构成比例不同(图 7b)。因此,可依据相带各类岩石组成(图 7b)和不同岩性岩石孔隙度与深度的关系(图 6),采用加权平均的办法计算得到靶区内火山岩储层不同相带的孔隙度与深度关系(图 7b)。

图 8 给出了模拟的营一段火山岩孔隙度与天然气聚集关系图,可以看出天然气优先聚集在孔隙度较高的储层,尤其是储层孔隙度发生明显变化的部位。在 100 Ma(泉头组沉积末期)时天然气大量聚

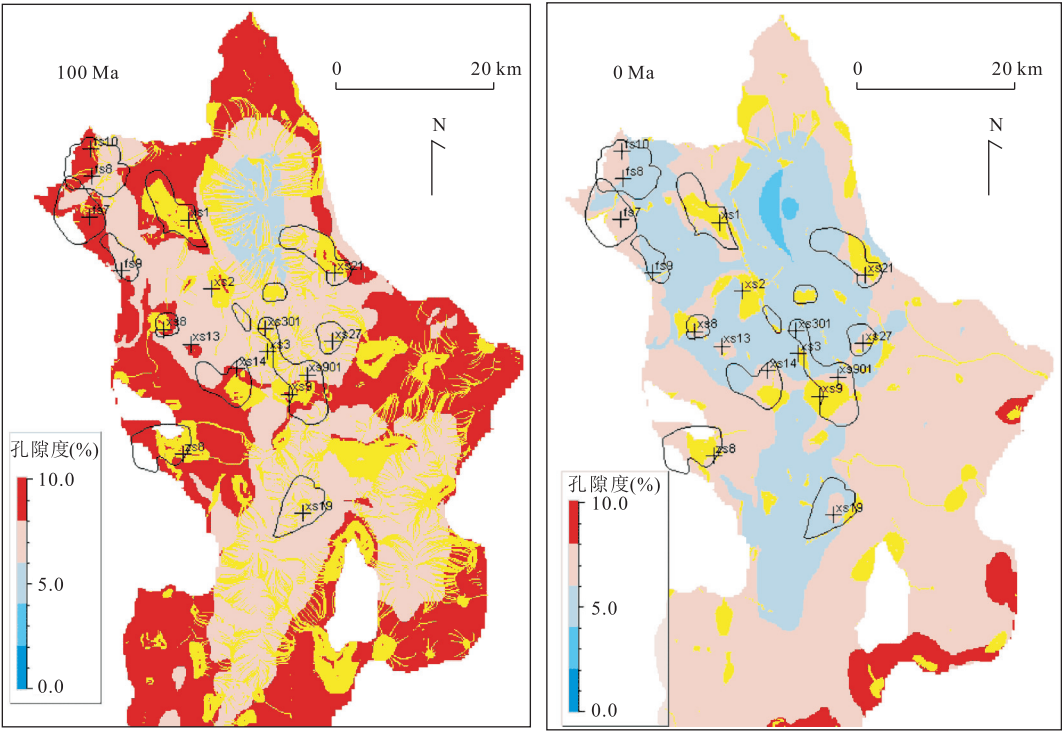


图 8 火山岩孔隙度演化及其与天然气聚集关系

Fig.8 Relationships of porosity and gas accumulation site at different geological times

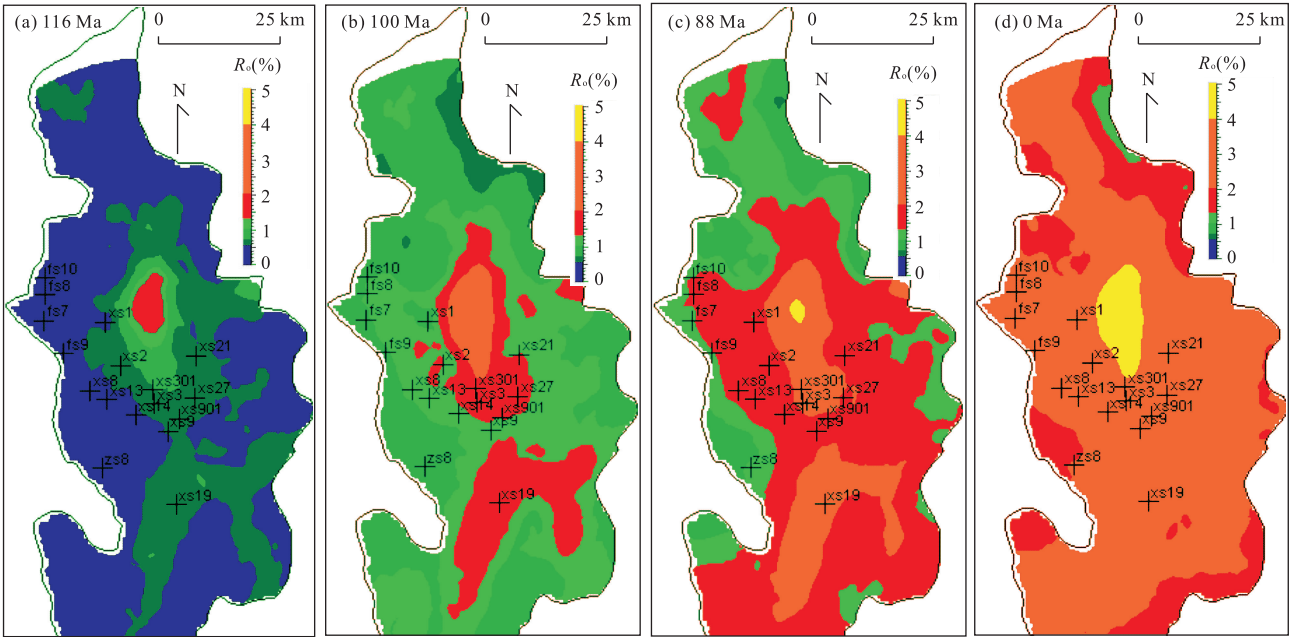


图 9 徐家围子断陷沙河子组烃源岩有机质成熟度演化史

Fig.9 K_1sh source rock maturity charts at different geological times, Xujiaweizi fault depression

集,气藏孔隙度大于 8%,随着埋深加大,储层孔隙度逐渐降低,气藏现今孔隙度大多在 6%~8% 范围内,在断陷东南区存在小部分区域孔隙度大于 8%,模拟显示有部分天然气聚集。

3.4 有机质热演化与生烃史

沙河子组顶部烃源岩热演化史分析表明,洼陷中心部分区块在登娄库组沉积中期(116 Ma)进入成熟阶段,大部分区域在登娄库沉积末期才进入成熟阶

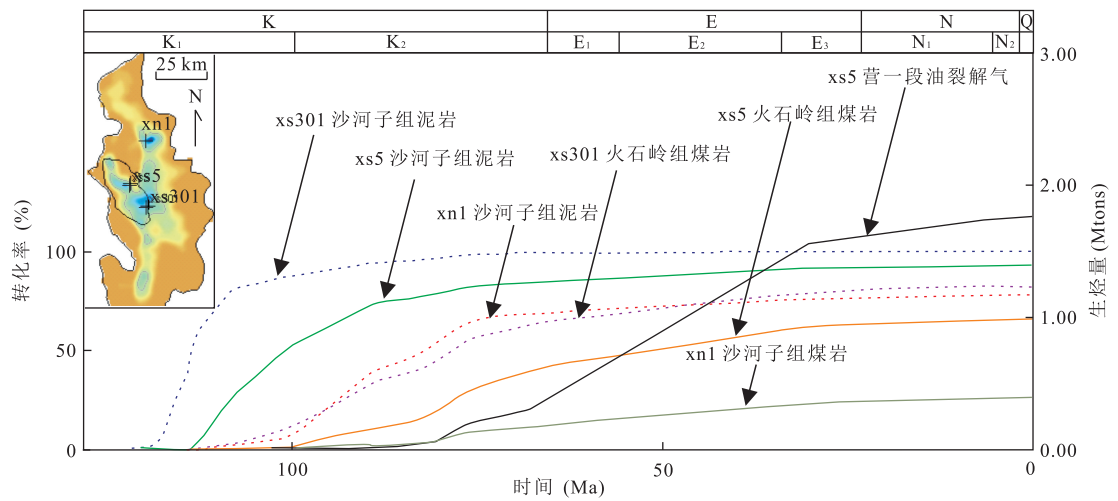


图 10 徐家围子断陷深层有机质生烃史

Fig.10 Hydrocarbon generation history from deep source rocks, Xujiaweizi fault depression

段,于泉头组沉积末期进入生湿气阶段(100 Ma),青山口组沉积末期进入干气阶段(~88 Ma),现今整个断陷内的烃源岩普遍处于干气阶段(图 9),与李景坤等(2006)、王民等(2014)研究认为的 xs1 井区沙河子组泥岩开始明显生气时间为 105~100 Ma 基本一致(李景坤等 2006;王民等,2014)。

单井烃源岩生烃史分析表明,徐家围子断陷深层烃源岩在时间上、空间上具有明显的接力生气特征(与二次生烃不同,研究区接力生气主要是干酪根裂解气和油裂解气在时间上的接力以及不同埋藏深度处有机质生气的接力),从洼陷中心到洼陷边部,从火石岭组到沙河子组烃源岩再到储层油裂解生气时间逐渐变晚,生气期长,位于登娄库组沉积中期至明水组沉积末期之间,并无明显的主生气期(图 10)。

火山岩天然气藏聚集过程分析表明,营城组火山岩储层在登娄库组沉积末期(~113 Ma)开始聚气成藏,但气藏数量和规模有限,位置与现今气藏分布差别很大,说明圈闭尚未定型,且生气量不大;在泉头组末期(~100 Ma)开始大量聚气,气藏数量多、规模大,此阶段天然气强充注成藏;青山口组—姚家组末期(~84 Ma)火山岩气藏基本定型,与现今气藏数量和规模相比,仍然较大,但略少于泉头组末期气藏数量和规模,表明扩散损失或构造调整散失气量要大于此阶段聚气量;随后火山岩气藏散失气量要大于供气量,气藏规模逐渐减小,部分气藏位置略有调整,最终形成现今的气藏分布格局(图 11)。这一结果与冯子辉等(2003)通过营城组储层包裹体均一化温度研究得出的成藏期主要为 100~80 Ma 基本一致(冯子辉等,2003)。

3.5 有利区预测

通过对徐家围子断陷深层火山岩天然气藏基本地质条件研究,结合断裂、岩相对气藏的控制作用,笔者模拟了深层火山岩气藏形成过程,模拟结果显示营城组一段火山岩天然气聚集 395 个,气藏总量 $2\,215\times 10^8\text{ m}^3$,略高于探明储量.如图 12 所示,大部分已提交天然气储量范围内(黑色圈内)均有天然气的聚集(黄色),13 个提交储量区块中有 10 个范围内有天然气聚集,模拟结果与勘探发现吻合率 77%.本次模拟结果与提交储量区块不吻合的部位主要是 fs7、fs8、fs9、fs10 井区,模拟结果显示此区天然气聚集量极少(仅有部分天然气运移经过),原因可能与此区烷烃气中无机成因比例较高(可达 80%以上,倪云燕等,2009)有关.纵向气藏分布层位多,深度范围大;平面上气藏分布在洼陷内或附近,且沿断裂带分布,受源岩、断层和储层三者控制.在上述理论和模拟结果支持下,考虑多因素(聚集条件、圈闭大小、储集条件和运移条件,见表 1),对是否有圈闭形成、是否含气或历史上是否有气经过、是否有良好的储集空间、附近是否存在沟通源储的断裂等多方面进行评价,笔者预测出深层有利火山岩气藏分布区 5 个(图 12).整体上看,徐家围子地区天然气藏多分布在构造高点、斜坡带和洼陷深部,其中预测 1、5 区块属于微幅度构造型气藏;预测 3 和 4 区块属于斜坡带岩性气藏;预测 2 区块属于洼陷深部斜坡带有利火山机构控制的微幅度构造气藏.此外,靶区除了火山岩层系富集天然气外,在模拟过程中还发现沙河子组、营城组砂砾岩层段也有一定天然气的聚集,建议加强徐家围子断陷深层致密砂岩气的勘探工作。

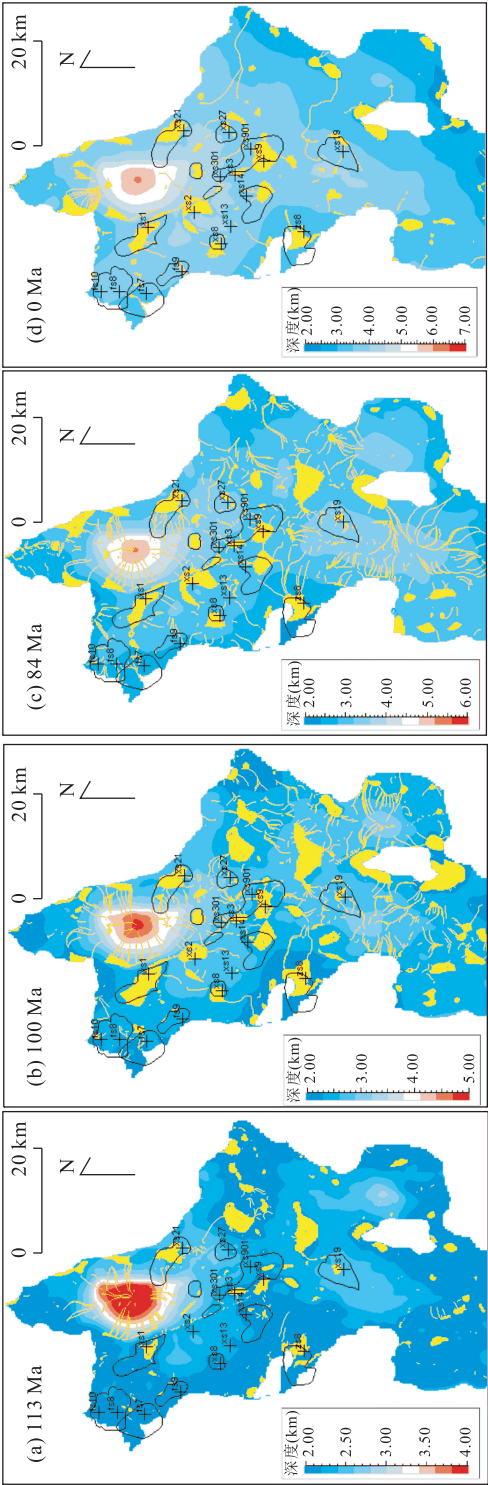


图 11 徐家围子断陷深层火山岩气藏聚集过程
Fig.11 Volcanic gas reservoir forming process, Xujiaweizi fault depression

表 1 靶区深层有利火山岩气藏区块预测评价

Table 1 Estimated parameters of probable gas reservoirs in the deep layers of Xujiaweizi Fault depression

预测 区块	聚集条件				圈闭条件				储集条件			运移条件		综合评价	排序
	距生烃中 心距离(km)	预计产量 (10 ⁴ m ³)	生气强度 (10 ⁸ m ³ /km ³)	营一段顶部 年龄(MPa)	登二段 年龄(MPa)	盖层封闭性	构造 形态	圈闭 大小	风化壳 厚度(m)	裂缝/ 条(m)	孔隙度 (%)	次生孔 隙度(%)	断裂		
预测 1	8.015	3.5~25	3.83	5.72	6.54	微幅度构造	大	大	40	2.28	0.80	0.80	多条走滑调整断裂	聚集、储集、运移条件均好， 圈闭大	1
预测 2	14.280	5~80	52.90	1.55	6.90	洼陷深部斜坡带	小	小	—	0.50	1.11	1.11	徐中断裂	聚集条件较好，运移条件差， 圈闭小，储集条件中等	4
预测 3	32.460	8~12	0.80	6.47	5.16	斜坡带	较大	较大	70	0.81	1.06	1.06	徐西断裂	圈闭较大，储集、运移条件较 好，聚集条件差	2
预测 4	35.560	8~10	1.30	6.26	5.20	斜坡带	中	中	50	0.46	1.01	1.01	徐西断裂	圈闭、储集条件中等，运移、 聚集条件较差	3
预测 5	29.910	8~14	1.40	6.47	7.08	微幅度构造	较小	较小	—	4.97	3.36	3.36	近南北断裂	聚集条件中等，圈闭较小，储 集、运移条件差	5

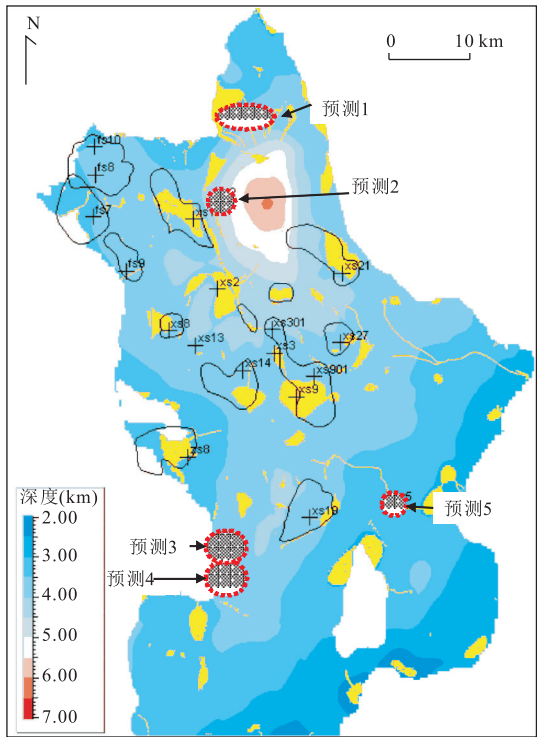


图 12 模拟的火山岩气藏与勘探证实气藏边界叠合图,图中给出了 5 个预测区块位置

Fig.12 Comparison between simulated gas reservoir and proved gas reservoir, and 5 probable gas reservoirs tagged as red ellipses

4 结论

含油气盆地模拟涉及地质、地球化学、地球物理及已有勘探认识等诸多资料,模拟结果可用于勘探后期评价,结果的精度取决于三维地质模型精细程度和模拟参数的选取,尤其是与研究区油气成藏主控因素有关的参数.笔者依据国内外火山岩物性数据首次提出了分岩性的火山岩孔隙度—深度关系,结合火山岩岩相资料植入盆地模拟软件,模拟了火山岩天然气运聚成藏过程.模拟结果表明徐家围子断陷深层有机质具有接力生气的特征,无主生气期,火山岩气藏主要形成于泉头组—青山口组末期,气藏发育位置受控于断裂分布、活动期及火山岩体和储层.不同断裂活动期模拟结果表明,活动期次与时间可影响气藏聚集层位,研究区的深层气源断裂活动期要早于 94.5 Ma.在运移模拟方法上,混合法最适合模拟本区火山岩储层中的油气运聚过程.模拟结果显示徐家围子断陷深层火山岩的下一步勘探方向为斜坡带、洼陷深部的微幅度构造、火山岩体和岩性尖灭带,同时深层致密砂砾岩储层也应有较大潜力.

致谢:本次三维地质模型建立过程中得到了大庆油田有限责任公司勘探开发研究院姜传金、印长海、霍秋立高级工程师,中国石油勘探开发研究院规划所李建忠所长、吴晓智主任,吉林大学单玄龙教授的指导与帮助;盆地模拟软件使用和参数选取方面得到了斯伦贝谢公司许建华、范泓澈技术人员的指导与帮助;论文审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此表示感谢.

References

Baur, F., di Primio, R., Lampe, C., et al., 2011. Mass Balance Calculations for Different Models of Hydrocarbon Migration in the Jeanne D'arc Basin, Offshore Newfoundland. *Journal of Petroleum Geology*, 34(2): 181—198. doi:10.1111/j.1747—5457.2011.00500.x

Casuscelli, S. G., Eimer, G. A., Canepa, A., et al., 1984. Determination of Paleoheat Flux from Vitrinite Reflectance Data. *AAPG Bulletin*, 68 (11): 1704 — 1717. doi: 10.1306/AD461980—16F7—11D7—8645000102C1865D

Feng, Z. H., Ren, Y. G., Wang, C., et al., 2003. Study on Inclusion of Deep Buried Igneous Reservoir and Formation Period of Gas Pool in Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 14(6): 436—442 (in Chinese with English abstract).

Feng, Z. H., Yin, C. H., Liu, J. J., et al., 2014. Formation Mechanism of In-Situ Volcanic Reservoirs in Eastern China: A Case Study from Xushen Gasfield in Songliao Basin. *Science in China (Series D)*, 44(10): 2221—2237 (in Chinese with English abstract).

Feng, Z. H., Yin, C. H., Qi, J. S., et al., 2010. Main Factors Controlling Hydrocarbon Accumulation in Large Volcanic Gas Fields: A Case Study of the Qingshen Gas Field in the Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (1): 21—32 (in Chinese with English abstract).

Feng, Z. Q., 2008. Volcanic Rocks as Prolific Gas Reservoir: A Case Study from the Qingshen Gas Field in the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 25 (4—5): 416—432. doi:10.1016/j.marpetgeo.2008.01.008

Fu, G., Shi, W., 2006. Study on Deep Gas Reservoir Forming Mechanism of Xujiaweizi Area and Prediction of Favorable Exploration Areas. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 25 (3): 23—26 (in Chinese with English abstract).

Fu, G., Wang, Y. G., 2008. Time and Space Matching Relation among Accumulation Essential Factors of Gas Reservoirs in Volcanic Rock and Its Control Ling to Gas Accumulation: A Case Study of Deep Strata of Xujiaweizi Region. *Earth Science*, 33 (3): 342—348 (in Chinese

- with English abstract).
- Fu, G., Wu, W., Li, N., 2014. Control Effect of Three Large Faults on the Gas Pools in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 34(7): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. F., Sha, W., Yu, D., et al., 2010. Lateral Sealing of Faults and Gas Reservoir Formation in Volcanic Rocks in Xujiaweizi Fault Depression. *Geological Review*, 56(1): 60—70 (in Chinese with English abstract).
- Gao, N., Wang, G. Q., He, S. J., et al., 2011. A Method of Forecasting Distribution Regions of Gas Reservoirs with Different Reserve Abundance by Cap Rocks: An Example of Xujiaweizi Depression in Songliao Basin. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 35(3): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Q. L., Xie, H. B., Mi, S. Y., et al., 2009. Fractal Model for Petroleum Resource Distribution and Its Application. *Acta Petrolei Sinica*, 30(3): 379—385 (in Chinese with English abstract).
- Hu, M., Fu, G., Lü, Y. F., et al., 2010. The Fault Activity Period and Its Relationship to Deep Gas Accumulation in the Xujiaweizi Depression, Songliao Basin. *Geological Review*, 56(5): 710—718 (in Chinese with English abstract).
- Jones, S. F., Wielens, H., Williamson, M., et al., 2007. Impact of Magmatism on Petroleum Systems in the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Islands, Nunavut: A Numerical Modelling Study. *Journal of Petroleum Geology*, 30(3): 237—256. doi:10.1111/j.1747—5457.2007.00237.x
- Kuhn, P. P., di Primio, R., Hill, R., et al., 2012. Three-Dimensional Modeling Study of the Low-Permeability Petroleum System of the Bakken Formation. *AAPG Bulletin*, 96(10): 1867—1897. doi:10.1306/03261211063
- Li, J. K., Liu, W., Song, L. B., 2006. A Study of Hydrocarbon Generation Conditions of Deep Source Rocks in Xujiaweizi Fault Depression of the Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 26(6): 21—24 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Q., Meng, F. C., Cui, Y., et al., 2010. Discussion on the Formation Mechanism of Volcanic Oil and Gas Reservoirs. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. Z., Wang, P. J., Men, G. T., 2003. Characteristics of Deep Volcanic Reservoirs in Northern Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(1): 28—31 (in Chinese with English abstract).
- Luo, J. L., Shao, H. M., Zhang, C. L., 2003. Summary of Research Methods and Exploration Technologies for Volcanic Reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 24(1): 31—38 (in Chinese with English abstract).
- Ni, Y. Y., Dai, J. X., Zhou, Q. H., et al., 2009. Geochemical Characteristics of Abiogenic Gas and Its Percentage in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 35—45 (in Chinese with English abstract).
- Shan, X. L., Li, J. Y., Chen, S. M., et al., 2014. Subaquatic Volcanic Eruptions in Continental Facies and Their Influence on High Quality Source Rocks Shown by the Volcanic Rocks of a Faulted Depression in Northeast China. *Science in China (Series D)*, 56: 1926—1933 (in Chinese).
- Shi, G. R., 2000. Numerical Simulation Method of Oil and Gas Basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Sweeney, J. J., Burnham, A. K., 1990. Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1559—1570.
- Tang, W. X., Cao, Q., 2014. Modeling of Hydrocarbon Secondary Migration in the Chaluhe Sag, Yitong Basin. *Earth Science*, 39(6): 741—750 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. W., Hui, S., Fu, G., 2008. Gas Distribution Rules and Main Controlling Factors in Xujiaweizi Rift. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 27(1): 6—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Lu, S. F., Xue, H. T., et al., 2010. The Effects of Magmatic Intrusions on the Maturation of Organic Matter and Its Numerical Simulation. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 177—184 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Lu, S., Chen, S., et al., 2015. Thermal Effect of Intrusive Rock on Hydrocarbon Generation from Organic Matter. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1): 39—56 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., Sun, Y. F., Wang, W. G., et al., 2014. Gas Generation Characteristics and Resource Potential of the Deep Source Rock in Xuejiaweizi Fault Depression, Northern Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25(7): 1011—1018 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. J., Chi, Y. L., Liu, W. Z., et al., 2003. Volcanic Facies of the Songliao Basin: Classification, Characteristics and Reservoir Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 449—456 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Chen, S., 2015. Cretaceous Volcanic Reservoirs and Their Exploration in the Songliao Basin, Northeast China. *AAPG Bulletin*, 99(3): 499—523. doi: 10.1306/09041413095
- Wang, S. J., Hu, S. B., Wang, J. S., 1999. The Geothermal Effect of Radioactive Heat Generation and Its Signifi-

- cance to Hydrocarbon Maturation in Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 26(5): 36—38 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Zhang, Y., Zou, C. N., et al., 2006. Exploration Scheme of Gas in Deep-Seated Volcanic Rocks in Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33(3): 274—281 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Zou, C. N., Li, J. Z., et al., 2009. Comparative Study on Volcanic Hydrocarbon Accumulations in Western and Eastern China and Its Significance. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Liu, Y. M., Wang, Y. L., et al., 2014. Volcanic Eruption Phases and 3-D Characterization of Volcanic Rocks in BZ-34-9 Block of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 39(9): 1309—1316 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, W. Z., Jia, C. Z., et al., 2008. Formation and Distribution of Volcanic Hydrocarbon Reservoirs in Sedimentary Basins of China. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3): 257—271 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 冯子辉, 任广, 王成, 等, 2003. 松辽盆地深层火山岩储层包裹体及天然气成藏期研究. *天然气地球科学*, 14(6): 436—442.
- 冯子辉, 印长海, 刘家军, 等, 2014. 中国东部原位火山岩油气藏的形成机制——以松辽盆地徐深气田为例. *中国科学(D辑)*, 44(10): 2221—2237.
- 冯子辉, 印长海, 齐景顺, 等, 2010. 大型火山岩气田成藏控制因素研究——以松辽盆地庆深气田为例. *岩石学报*, 26(1): 21—32.
- 付广, 石巍, 2006. 徐家围子地区深层天然气成藏机制及有利勘探区预测. *大庆石油地质与开发*, 25(3): 23—26.
- 付广, 王有功, 2008. 火山岩天然气成藏要素时空匹配及对成藏的控制作用: 以徐家围子地区深层为例. *地球科学*, 33(3): 342—348.
- 付广, 吴薇, 历娜, 2014. 松辽盆地徐家围子断陷大型断裂带对天然气成藏的控制作用. *天然气工业*, 34(7): 7—12.
- 付晓飞, 沙威, 于丹, 等, 2010. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩内断层侧向封闭性及与天然气成藏. *地质论评*, 56(1): 60—70.
- 高宁, 王国庆, 何淑娟, 等, 2011. 一种利用盖层预测不同储量丰度气藏分布区的方法——以松辽盆地徐家围子断陷为例. *大庆石油学院学报*, 35(3): 1—6.
- 郭秋麟, 谢红兵, 米石云, 等, 2009. 油气资源分布的分形特征及应用. *石油学报*, 30(3): 379—385.
- 胡明, 付广, 吕延防, 等, 2010. 松辽盆地徐家围子断陷断裂活动时期及其与深层气成藏关系分析. *地质论评*, 56(5): 710—718.
- 李景坤, 刘伟, 宋兰斌, 2006. 徐家围子断陷深层烃源岩生烃条件研究. *天然气工业*, 26(6): 21—24.
- 刘嘉麒, 孟凡超, 崔岩, 等, 2010. 试论火山岩油气藏成藏机理. *岩石学报*, 26(1): 1—13.
- 刘万洙, 王璞珺, 门广田, 等, 2003. 松辽盆地北部深层火山岩储层特征. *石油与天然气地质*, 24(1): 28—31.
- 罗静兰, 邵红梅, 张成立, 2003. 火山岩油气藏研究方法与勘探技术综述. *石油学报*, 24(1): 31—38.
- 倪悦燕, 戴金星, 周庆华, 等, 2009. 徐家围子断陷无机成因气证据及其份额估算. *石油勘探与开发*, 36(1): 35—45.
- 石广仁, 2000. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社.
- 单玄龙, 李吉焱, 陈树民, 等, 2014. 陆相水下火山喷发作用及其对优质烃源岩形成的影响: 以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例. *中国科学(D辑)*, 44(12): 2637—2644.
- 唐文旭, 曹强, 2014. 伊通盆地岔路河断陷油气二次运移模拟. *地球科学*, 39(6): 741—750.
- 王贵文, 惠山, 付广, 2008. 徐家围子断陷天然气分布规律及其主控因素. *大庆石油地质与开发*, 27(1): 6—9.
- 王民, 卢双舫, 薛海涛, 等, 2010. 岩浆侵入体对有机质生烃(成熟)作用的影响及数值模拟. *岩石学报*, 26(1): 177—184.
- 王民, 孙业峰, 王文广, 等, 2014. 松辽盆地北部徐家围子断陷深层烃源岩生气特征及天然气资源潜力. *天然气地球科学*, 25(7): 1011—1018.
- 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等, 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(4): 449—456.
- 王社教, 胡圣标, 汪集斌, 1999. 塔里木盆地沉积层放射性生热的热效应及其意义. *石油勘探与开发*, 26(5): 36—38.
- 杨辉, 张研, 邹才能, 等, 2006. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向. *石油勘探与开发*, 33(3): 274—281.
- 赵文智, 邹才能, 李建忠, 等, 2009. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义. *石油勘探与开发*, 36(1): 1—11.
- 朱红涛, 刘依梦, 王永利, 等, 2014. 渤海湾盆地黄河口凹陷BZ34-9区带火山岩三维刻画及火山喷发期次. *地球科学*, 39(9): 1309—1316.
- 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等, 2008. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布. *石油勘探与开发*, 35(3): 257—271.