

扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的作用和贡献探讨

王晓波^{1,2,3}, 陈践发¹, 李 剑^{2,3}, 李志生^{2,3}, 王东良^{2,3},
柳广弟¹, 谢增业^{2,3}, 刘锐娥^{2,3}, 孙明亮¹, 王义凤^{2,3}

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007; 3. 中国石油天然气集团公司天然气成藏与开发重点实验室, 河北廊坊 065007)

摘要:根据气体在浓度梯度作用下进行自由扩散的原理,开展浓度梯度驱动下的天然气扩散运移物理模拟实验,对扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的作用和贡献、低孔渗致密储层天然气成藏机制进行探讨。结果表明:浓度梯度驱动下的天然气扩散运移模拟实验后低孔渗致密砂岩最大含气饱和度与物性总体呈负相关关系,渗透率 $\leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时最大含气饱和度与孔隙度具有更好的负线性相关性,渗透率 $>0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时最大含气饱和度与渗透率具有更好的负线性相关性;当低孔渗致密砂岩的孔隙度小于 0.6%、空气渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,扩散可能对低孔渗致密砂岩含气饱和度的增加起主要作用和贡献;扩散是低孔渗致密储层天然气成藏的重要机制之一,是中低丰度低孔渗致密储层大面积含气的重要原因之一。

关键词:致密砂岩气藏; 扩散运移模拟实验; 浓度梯度; 定量评价; 成藏机制

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

引用格式:王晓波,陈践发,李剑,等. 扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的作用和贡献探讨[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):58-64.

WANG Xiaobo, CHEN Jianfa, LI Jian, et al. Discussion on role of gas diffusion and its contribution in low porosity-permeability tight sandstone gas reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5):58-64.

Discussion on role of gas diffusion and its contribution in low porosity-permeability tight sandstone gas reservoirs

WANG Xiaobo^{1,2,3}, CHEN Jianfa¹, LI Jian^{2,3}, LI Zhisheng^{2,3}, WANG Dongliang^{2,3},
LIU Guangdi¹, XIE Zengye^{2,3}, LIU Ruie^{2,3}, SUN Mingliang¹, WANG Yifeng^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Langfang Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China;
3. The Key Laboratory of Gas Reservoir Formation and Development, CNPC, Langfang 065007, China)

Abstract: Assuming that gas diffusion is controlled by its concentration gradient, the physical simulation experiments of gas diffusion driven by concentration gradient were conducted, and the role of gas diffusion and its contribution in low porosity-permeability tight sandstone gas reservoirs, as well as forming mechanisms of low porosity-permeability tight gas reservoirs were discussed. The results show that the maximum gas saturation in the simulations has overall negative linear correlation with the gas physical properties: it correlates with the gas porosity when permeability is less than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; and correlates with the gas permeability when permeability is larger than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Gas diffusion may become the main mechanism for gas saturation increment in low porosity-permeability tight sandstone reservoir, when porosity is less than 0.6% and permeability is less than $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. Gas diffusion is one of the important forming mechanisms of low

收稿日期:2015-03-22

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05007-002);国家“973”项目(2007CB209503);国家自然科学基金项目(41102086)

作者简介:王晓波(1982-),男,工程师,博士研究生,研究方向为天然气地质、地球化学、成藏及稀有气体实验技术开发与应用。E-mail:

Wangxb69@petrochina.com.cn。

porosity-permeability tight gas reservoir, and one of the important reasons for low porosity-permeability tight reservoir with large gas bearing area.

Keywords: tight sandstone gas reservoirs; simulation experiment of gas diffusion; concentration gradient; quantitative evaluation; forming mechanism

中国的低孔渗致密砂岩气藏主要分布在鄂尔多斯盆地上古生界和四川盆地上三叠统须家河组,具有普遍低孔渗、大面积含气、储量丰度低、含水饱和度高、气水分异差和局部甜点富气等特点^[1-5]。随着天然气勘探开发的快速发展,低孔渗致密砂岩气逐渐成为我国天然气储量、产量增长的主体,但目前低孔渗致密砂岩气成藏机制尚不完全清楚,部分关键性问题如扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的作用和贡献有待深入探究。国外学者较早开展了天然气扩散作用研究^[6-9]。中国的肖无然等^[10]首次在实验室成功测试了岩石甲烷扩散系数;郝石生等^[11]测定了不同岩性、温度、压力、介质条件下不同天然气组分的扩散系数;黄志龙等^[12]开展了天然气扩散建模;查明等^[13]进行了扩散排烃模拟;李伟等^[14]开展了天然气古有效扩散系数的研究;付广等^[15]对天然气扩散作用、扩散系数及其研究方法等进行了研究;李明诚^[16]从油气运移机制的角度对扩散进行了探讨;李海燕等^[17]对天然气扩散系数实验研究方法进行了系统总结;李剑等^[18]探讨了柴东第四系生物气盖层的封闭机制特殊性及其评价标准;胡国艺等^[19]总结了我国大中型气田盖层分布特征;王晓波等^[20]从盖层分类、封闭机制、定量研究方法及其封闭能力评价等方面综述了天然气盖层研究进展;柳广弟等^[21]对比分析了国内外游离烃浓度法、水溶烃浓度法和时滞法 3 种扩散系数实验方法以及不同扩散浓度含义及影响因素;王晓波等^[22]通过实验探讨了物性、温度、注气平衡压力、围压、饱和和介质等因素对致密气藏岩石扩散系数的影响。大多数研究主要针对扩散对已聚集成藏天然气藏的消极作用和影响^[6-7,9-12,17-24],对于扩散在天然气运聚成藏中的积极作用研究较少^[8,13-14,16],特别是扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的积极作用及贡献目前尚无文献报道。笔者依据气体在浓度梯度作用下进行自由扩散的原理,开展浓度梯度驱动下的天然气扩散运移物理模拟实验,对扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的作用和贡献、低孔渗致密储层天然气成藏机制进行探讨。

1 低孔渗致密砂岩天然气扩散运移模拟实验

1.1 实验样品

低孔渗(致密)砂岩气藏,是指孔隙度一般小于 10%、空气渗透率小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、含气饱和度低于 60%、含水饱和度高于 40% 的砂岩中的天然气^[25-26]。目前国外一般称为“致密气藏”,我国国内称之为“低孔渗气藏”、“致密气藏”、“致密砂岩气藏”等,本文中统称为“低孔渗致密砂岩气藏”。本次研究挑选了 8 块鄂尔多斯盆地苏里格、榆林及四川盆地广安气田的低孔渗致密砂岩样品。为保证所有样品最终测量结果的可比性,样品加工、制样过程遵循扩散系数测定的制样标准,样品长度主要分布在 0.5~0.6 cm,直径约为 2.5 cm。样品孔隙度为 0.9%~14.6%,空气渗透率为 $(0.004\sim 1.12)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (表 1),并且孔隙度和空气渗透率在分布区间呈连续分布,样品挑选兼顾了代表普遍低孔渗背景的相对低孔渗样品(如样品 2 孔隙度为 2.9%,空气渗透率为 $0.038\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)和代表甜点砂岩的相对高渗样品(如样品 5 孔隙度为 14.6%,空气渗透率为 $1.12\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)。

表 1 低孔渗致密砂岩天然气扩散模拟实验样品基本数据
Table 1 Basic parameters of typical low porosity-permeability tight sandstone samples

地区	样品 编号	长度 l/cm	直径 d/cm	空气渗透率 $k/10^{-3}\mu\text{m}^2$	孔隙度 $\varphi/\%$
四川盆地 须家河组	1	0.59	2.55	0.580	8.1
	2	0.62	2.55	0.038	2.9
	3	0.55	2.55	0.004	0.9
	4	0.60	2.55	0.027	6.8
	5	0.54	2.55	1.120	14.6
鄂尔多斯 盆地上古 生界	6	0.53	2.5	1.060	13.2
	7	0.57	2.5	0.177	4.0
	8	0.47	2.5	0.052	6.7

1.2 实验装置

实验装置采用中石油廊坊分院天然气成藏与开发重点实验室 KY/3 型岩石扩散系数测定仪,主要由恒温箱、岩心夹持器、加压泵、样品、左扩散室、右扩散室、CH₄ 和 N₂ 气源、色谱检测仪以及计算机控制系统等组成,辅助设备及材料包括精密电子秤、岩石饱和水装置、真空泵、精密压力表、检漏水、工作记

录本等(图1)。

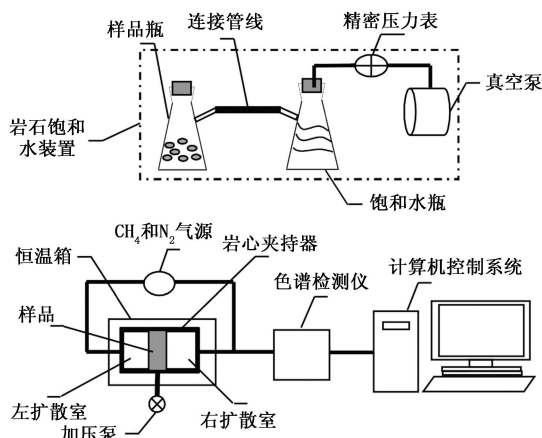


图1 浓度梯度驱动下天然气扩散运移模拟实验装置组成示意图

Fig.1 Simulation experimental equipment of gas diffusion migration driven by concentration gradient

1.3 实验方法及流程

低孔渗致密砂岩天然气扩散运移模拟实验原理和方法:利用岩石饱和水装置及真空泵对低孔渗致密砂岩抽真空并充分饱和水;将饱和水样品放入岩石扩散系数测定仪的岩心夹持器,对样品室两端扩散室分别通相同压力的 CH_4 和 N_2 气源,模拟天然气在低孔渗致密砂岩中进行浓度梯度驱动下的扩散运移;设定相同实验时间,实验停止后测定样品含水饱和度;分析含水饱和度、最大含气饱和度与物性的关系,对实验结果进行分析讨论。实验流程如下:

(1)将低孔渗致密砂岩样品在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 8 h ,称重并记录样品干重 G_d ;

(2)利用真空泵和样品饱和水装置将样品抽真空并饱和水、直至无气泡溢出($4\sim 6\text{ h}$);

(3)取出已经完全饱和水的实验样品,用精密电子秤称样品湿重并记录 G_w ,将样品装入扩散系数测定仪的岩心夹持器并加围压,对管线进行试漏;

(4)当仪器管线及连接无漏气时,向两端扩散室通入相同压力(0.2 MPa)的氮气和甲烷气,模拟低孔渗致密砂岩中天然气仅在浓度梯度的驱动下进行扩散运移;

(5)实验开始后间隔一段时间打开色谱检测仪,检查两扩散室气体扩散运移的变化情况;

(6)经过 48 h 后停止实验,取出样品并称重,记录实验后的样品湿重 G_r ;

(7)剩余样品按(3)~(5)的步骤依次重复进行;

(8)所有实验结束后,整理原始实验记录数据,

计算出含水饱和度和最大含气饱和度,分析其与物性之间关系,并对实验结果进行分析讨论。

1.4 实验结果及讨论

对样品的干重 G_d 、湿重 G_w 以及实验后湿重 G_r 数据进行处理,利用公式计算出样品含水饱和度 $S_w = (G_r - G_d) / (G_w - G_d) \times 100\%$,并转化为最大含气饱和度 $S_g = 100\% - S_w$,最后,分析含水饱和度、最大含气饱和度与样品孔隙度和空气渗透率关系。

低孔渗致密砂岩经过浓度梯度驱动下天然气扩散运移模拟实验后:①随着孔隙度从 0.9% 增加到 14.6% ,样品含水饱和度从 66.7% 增加到 90.9% ,最大含气饱和度从 33.3% 降到 9.1% ;含水饱和度与孔隙度总体具有较好的正线性相关关系,最大含气饱和度与孔隙度总体具有较好的负线性相关关系($R^2=0.70$)(图2、3)。②随着空气渗透率从 $0.004 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 增加到 $1.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,样品含水饱和度逐渐增加到 90.9% 、含气饱和度逐渐减小到 9.1% ;当渗透率 $k > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,含水饱和度与渗透率具有更好的正线性相关关系、最大含气饱和度与渗透率具有更好的负线性相关性($R^2=0.91$);当渗透率 $k \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,二者与渗透率相关性较差(图4、5)。

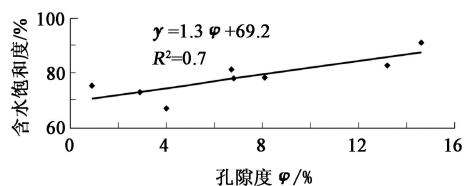


图2 模拟实验后样品含水饱和度与孔隙度关系

Fig.2 Relationship between water saturation and porosity in simulation experiment of gas diffusion driven by concentration gradient

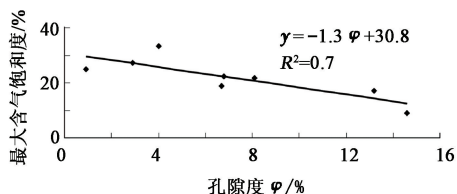


图3 模拟实验后样品最大含气饱和度与孔隙度关系

Fig.3 Relationship between maximum gas saturation and porosity in simulation experiment of gas diffusion driven by concentration gradient

实验结果表明:天然气扩散运移模拟后的低孔渗致密砂岩含水饱和度与物性总体呈正相关关系,最大含气饱和度与物性总体呈负相关关系;当渗透率 $k > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含水饱和度、最大含气饱和度

与渗透率具有更好的线性相关性;当渗透率 $k \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,二者与孔隙度具有更好的线性相关性。随着低孔渗致密砂岩物性条件变差,天然气扩散引起的最大含气饱和度不断增大;随着物性条件变好,天然气扩散引起的最大含气饱和度不断降低。这与受压力梯度控制的常规物性储层中含气饱和度与样品孔隙度、空气渗透率及充注动力均具有较好的正相关关系有所不同。可见,浓度梯度驱动下的天然气扩散运移对低孔渗致密砂岩中天然气含气饱和度的增加起了重要的积极作用。此外地质统计规律研究还发现鄂尔多斯和四川盆地存在一些具有孔隙度很低(约小于4%)、含水饱和度很低、含气饱和度很高,达到工业气层标准的低孔渗致密砂岩储层,很可能是浓度梯度驱动下天然气扩散运移对于含气饱和度增加所起的积极作用的结果,也从另一角度对模拟实验的结果给予了验证。

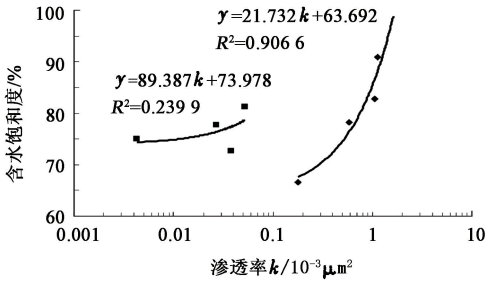


图 4 模拟实验后样品含水饱和度与空气渗透率关系
Fig. 4 Relationship between water saturation and permeability in simulation experiment of gas diffusion driven by concentration gradient

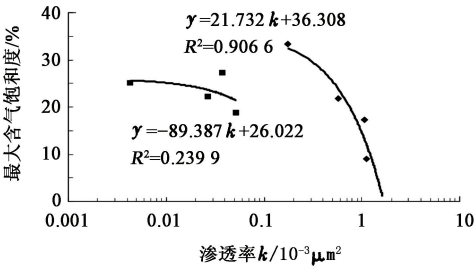


图 5 模拟实验后样品最大含气饱和度与空气渗透率关系
Fig. 5 Relationship between maximum gas saturation and permeability in simulation experiment of gas diffusion driven by concentration gradient

2 扩散对低孔渗致密砂岩气成藏的积极作用与贡献评价

为了进一步探讨扩散在低孔渗致密砂岩气成藏中的积极作用和贡献,对扩散起主要作用时低孔渗致密砂岩的临界物性条件进行了定量评价。首先,

利用本次低孔渗致密砂岩浓度梯度驱动下天然气扩散运移模拟实验得到的最大含气饱和度数据,采用实际地质条件低孔渗致密砂岩的最大含气饱和度 60%,近似计算扩散对低孔渗致密砂岩样品含气饱和度增加的最大贡献值。其次,将低孔渗致密砂岩样品孔隙度和空气渗透率进行回归,得到二者之间回归公式 $y = 0.0064\varphi^2 - 0.0129\varphi + 0.016$ ($R^2 = 0.9021$) (图 6)。由前文研究可知,随着低孔渗致密砂岩物性条件变差,天然气扩散引起的含气饱和度将不断增大,当渗透率 $k \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其与孔隙度具有更好的线性相关性,通过回归可得到扩散对该区间样品含气饱和度最大贡献值与孔隙度之间关系为 $y = -2.0854\varphi + 51.2941$ ($R^2 = 0.6881$)。如果扩散对含气饱和度增加的贡献比例大于 50%,意味着扩散将成为含气饱和度增加的主要机制,可计算得到低孔渗致密砂岩临界孔隙度约为 0.6%,利用低孔渗致密砂岩样品的孔渗关系公式,可进一步计算得到对应临界空气渗透率约为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

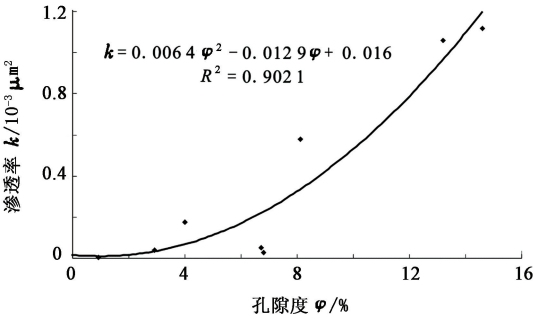


图 6 模拟实验的低孔渗致密砂岩样品孔隙度与空气渗透率关系

Fig. 6 Relationship between porosity and permeability of low porosity-permeability tight sandstone samples in simulation experiment

浓度梯度驱动下天然气扩散对低孔渗致密砂岩含气饱和度增加起了重要的积极作用和贡献:随着低孔渗致密砂岩物性条件降低,扩散对低孔渗致密砂岩含气饱和度增加的贡献不断增大;当低孔渗致密砂岩孔隙度小于 0.6% (空气渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 时,浓度梯度驱动下的天然气扩散将对低孔渗致密砂岩含气饱和度增加起主要作用和贡献。

3 苏里格地区低孔渗致密砂岩天然气扩散充注量及散失量估算

鄂尔多斯盆地是中国第二大含油气盆地,面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,近年来,盆地上古生界发现了苏里格、榆林、乌审旗、子洲等多个千亿立方米大型气

田^[1,2,27]。苏里格气田是目前中国发现的最大气田,主力储层为二叠系下石盒子组盒8段和山西组山1段。上古生界C-P煤系烃源岩盆地内广覆展布、有机质含量高、处于高一过成熟演化阶段,为古生界气藏的形成提供了充足的气源;上石盒子组发育分布稳定的河漫湖相泥质岩,厚度约为60~120 m,构成上古生界气藏的区域盖层,气藏上覆泥岩及上倾方向致密砂岩提供了良好的直接盖层及侧向封堵条件^[27-30],因此苏里格地区上古生界天然气勘探具有十分广阔的前景。

上古生界C-P煤系烃源岩与二叠系盒8、山1段主力储层垂向叠置,有利于烃源岩生成的天然气的近源垂向运聚成藏。一方面下伏C-P煤系烃源岩生成的天然气在源储剩余压力梯度驱动下向上覆二叠系储层进行以达西或非达西渗流为主要机制的运聚成藏或散失;另一方面,由于源岩生烃作用导致源储存在巨大浓度差异,烃源岩生成的天然气在浓度梯度驱动下不断向上覆低孔渗致密砂岩储层进行扩散充注或散失。若苏里格地区面积按43 500 km²计算,生烃高峰及成藏期为晚侏罗—早白垩世距今约125~100 Ma,致密砂岩、泥岩的古扩散系数平均值分别取 9.49×10^{-7} cm²/s和 4.46×10^{-8} cm²/s,通过建立苏里格地区低孔渗致密砂岩天然气扩散充注和散失模型(图7),选用Fick第一定律对苏里格地

区低孔渗致密砂岩成藏期天然气扩散充注量以及成藏至今天然气扩散散失量进行初步估算。计算公式为

$$\frac{dQ}{dt} = -DA \frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

$$Q = \int_0^t DA \frac{dC}{dx} dt. \quad (2)$$

式中, Q 为天然气扩散充注量,m³; D 为天然气的扩散系数,m²/s; A 为天然气的扩散流经面积,m²; t 为天然气的扩散时间,s; $\frac{dC}{dx}$ 为天然气扩散浓度梯度,m³/m³/m。

苏里格地区二叠系盒8、山1段主力储层低孔渗致密砂岩成藏期天然气扩散充注量约为 2.49×10^{12} m³,成藏至现今通过上覆的上石盒子组区域盖层的累计扩散散失量约为 1.96×10^{11} m³。可见,浓度梯度驱动下的天然气扩散对苏里格地区低孔渗致密砂岩气成藏既具有消极影响,也有积极作用和贡献。

4 低孔渗致密储层天然气成藏机制

按照储层物性差异,对不同类型低孔渗致密储层天然气成藏机制进行初步探讨:孔隙度大于10%、空气渗透率大于 1×10^{-3} μm²的常规储层天然气运聚一般遵循达西定理,即在压力梯度作用下进行达西渗流,储层含气饱和度与物性具有良好的正相关关系、天然气渗流流速与压力梯度呈线性相关关系,物性条件极好时可能会出现天然气高速非线性渗流;浓度梯度驱动下天然气扩散对该物性储层含气饱和度增加的贡献与压力梯度相比十分微弱,甚至可以忽略不计;高孔渗砂岩、强烈改造的碳酸盐岩等一般适于天然气的达西线性渗流。孔隙度为1%~10%、渗透率为 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3}$ μm²的低孔渗储层,天然气运聚不完全遵循压力梯度驱动下达西线性渗流,而存在一个启动压力梯度,当外界压力梯度小于启动压力梯度时不发生天然气渗流,当外界压力梯度超过启动压力梯度时天然气流速与压力梯度呈非线性的低速非达西渗流;浓度梯度驱动下天然气扩散对该物性储层含气饱和度增加的贡献相对于压力梯度占较小比例;低孔渗砂岩、碳酸盐岩、次生改造火山岩等一般适于天然气的非线性、低速非达西渗流。孔隙度为0.6%~1%、渗透率为 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3}$ μm²的致密储层,天然气运聚以存在启动压力梯度的低速非达西渗流为主、浓度梯度驱动下天然气扩散为辅;浓度梯度驱动下天然气扩散对该物性储层含气饱和度增加具有显著贡

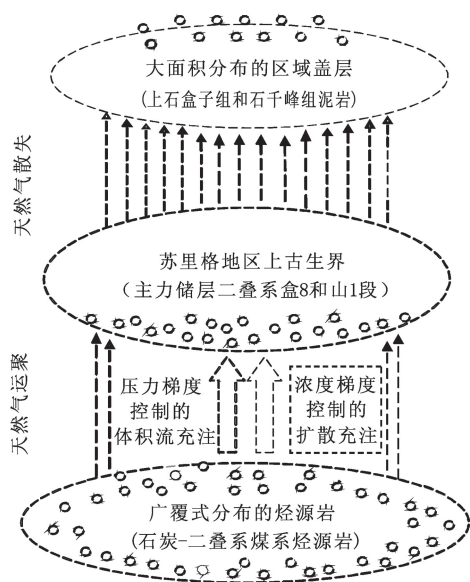


图7 苏里格地区低孔渗致密砂岩天然气扩散充注和散失地质模型

Fig.7 Gas diffusion charging and dissipating geological model of low porosity-permeability tight sandstone gas reservoir in Sulige area

献;致密砂岩、泥岩、火山岩及致密碳酸盐岩等一般以天然气的非达西渗流为主、天然气扩散为辅。孔隙度小于0.6%、渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密—特致密储层,储层的孔隙和喉道十分狭小以至于低速非达西渗流都相对微弱或无法实现,浓度梯度驱动下天然气扩散成为天然气运聚主要机制;扩散对该物性储层含气饱和度增加起主要作用和贡献;页岩、火山岩、特致密砂岩和碳酸盐岩等一般适于天然气扩散运聚。此外,低孔渗致密储层广泛分布、甜点储层局部发育,有利于天然气分子的扩散相和游离相在储层物性条件变化的情况下进行扩散—渗流运聚相互转化,为低孔渗致密储层大面积含气和成藏提供条件。

5 结 论

(1)低孔渗致密砂岩经过浓度梯度驱动下天然气扩散运移模拟后含水饱和度与物性呈正线性相关关系、最大含气饱和度与物性呈负线性相关关系,渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时含水饱和度、最大含气饱和度与渗透率具有更好的线性相关性,渗透率小于等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时二者与孔隙度具有更好的线性相关性。

(2)天然气扩散对低孔渗致密砂岩含气饱和度增加起了重要的积极作用和贡献,当低孔渗致密砂岩孔隙度小于0.60%、空气渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,浓度梯度驱动下天然气扩散将对低孔渗致密砂岩含气饱和度增加起主要作用和贡献。

(3)天然气扩散对于苏里格地区低孔渗致密砂岩气成藏既有消极影响也有积极作用;浓度梯度驱动下的天然气扩散是低孔渗致密储层天然气成藏的重要机制之一,是中低丰度低孔渗致密储层大面积含气的重要原因之一。

参考文献:

- [1] 戴金星,李剑,丁魏伟,等. 中国储量千亿立方米以上气田天然气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2005,32(4):16-23.
DAI Jinxing, LI Jian, DING Weiwei, et al. Geochemical characters of the giant gas accumulations with over one hundred billion cubic meters reserves in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(4):16-23.
- [2] 戴金星,倪云燕,吴小奇,等. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012,39(3):257-264.
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(3):257-264.
- [3] 赵文智,卞从胜,徐兆辉. 苏里格气田与川中须家河组气田成藏共性与差异[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(4):429-438.
ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, XU Zhaohui. Similarities and differences between natural gas accumulations in Sulige gas field in Ordos Basin and Xujiahe gas field in Central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(4):429-438.
- [4] 赵文智,胡素云,王红军,等. 中国中低丰度油气资源大型化成藏与分布[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(1):1-14.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Hongjun, et al. Large-scale accumulation and distribution of medium-low abundance hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):1-14.
- [5] LIU G D, SUN M L, ZHAO Z Y, et al. Characteristics and accumulation mechanism of tight sandstone gas reservoirs in the Upper Paleozoic, northern Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science, 2013,10(4):442-449.
- [6] ANTONOV P L. On the diffusion permeability of some claystones[J]. Sb Geokhi Met Poisk Nefti I Gaza (Gostoptekhizdat, Moscow, in Russian): Trudy NIIG-GR, 1954,2:39-55.
- [7] STKLYANIN Y I, LITVINOVA V N. On the parameters of methane diffusion through a water-saturated core[J]. Geologiya Nefti Gaza, 1971,15(1):19-22.
- [8] LEYTHAEUSER D, SCHAEFER R G, YUKLER A. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons[J]. AAPG Bulletin, 1982,66(4):408-429.
- [9] KROOSS B M, SCHAEFER R G. Experimental measurements of the diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rocks—I: a new experimental procedure[J]. Organic Geochemistry, 1987,11(3):193-199.
- [10] 肖无然,陈伟钧. 天然气藏的研究方法[M]. 北京:地质出版社,1988:1-64.
- [11] 郝石生,黄志龙,高耀斌. 轻烃扩散系数的研究及天然气运聚动态平衡原理[J]. 石油学报, 1991,10(3):17-24.
HAO Shisheng, HUANG Zhilong, GAO Yaobin. Light hydrocarbon diffusion coefficient research and natural gas migration accumulation dynamic balance principle[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991,10(3):17-24.
- [12] 黄志龙,唐为清,郝石生. 天然气扩散模型的建立及其应用[J]. 大庆石油学院学报, 1994,18(3):8-14.
HUANG Zhilong, TANG Weiqing, HAO Shisheng. The establishment and application of the diffusion models of natural gas[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,

- 1994,18(3):8-14.
- [13] 查明,张晓达. 扩散排烃模拟研究及其应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,1994,18(5):14-20.
ZHA Ming, ZHANG Xiaoda. Hydrocarbon diffusion expulsion simulation and its application [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Natural Science edition), 1994,18(5):14-20.
- [14] 李伟. 天然气古有效扩散系数的模拟及其应用[J]. 现代地质,1996,10(1):119-124.
LI Wei. Gas paleo-effective diffusion coefficient Simulation and application[J]. Geosciences,1996,10(1):119-124.
- [15] 付广,吕延防. 天然气扩散作用及其研究方法[M]. 石油工业出版社,1999:1-88.
- [16] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3版. 北京:石油工业出版社,1999:190-225.
- [17] 李海燕,付广,彭仕宓. 天然气扩散系数的实验研究[J]. 石油实验地质,2001,23(1):108-113.
LI Haiyan, FU Guang, PENG Shimi. Experimental research on gas diffusion coefficient[J]. Petroleum Geology & Experiment,2001,23(1):108-113.
- [18] 李剑,严启团,张英,等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气盖层封闭机理的特殊性[J]. 中国科学:D辑,2007,37(增刊II):36-42.
LI Jian, YAN Qituan, ZHANG Ying, et al. The special sealing mechanism of caprock for Quaternary biogenic gas in Sanhu area, Qaidam Basin, China[J]. Science in China (Ser D):2008,51(sup 1):45-52.
- [19] 胡国艺,王晓波,王义凤,等. 中国大中型气田盖层分布特征[J]. 天然气地球科学,2009,20(2):162-166.
HU Guoyi, WANG Xiaobo, WANG Yifeng, et al. Caprock distribution characteristic of large-medium gas fields in China[J]. Natural Gas Geosciences, 2009,20(2):162-166.
- [20] 王晓波,李剑,王东良,等. 天然气盖层研究进展及发展趋势[J]. 新疆石油地质,2010,31(6):664-668.
WANG Xiaobo, LI Jian, WANG Dongliang, et al. Natural gas research advance and its development tendency [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010,31(6):664-668.
- [21] 柳广弟,赵忠英,孙明亮,等. 天然气在岩石中扩散系数新认识[J]. 石油勘探与开发,2012,39(5):559-565.
LIU Guangdi, ZHAO Zhongying, SUN Mingliang, et al. New insights into natural gas diffusion coefficient in rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(5):559-565.
- [22] 王晓波,陈践发,李剑,等. 高温高压致密气藏岩石扩散系数测定及影响因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(3):25-31.
WANG Xiaobo, CHEN Jianfa, LI Jian, et al. Rock diffusion coefficient measuring and its effecting factors of tight gas reservoir under high temperature and high pressure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(3):25-31.
- [23] 吴晓东,张迎春,李安启. 煤层气单井开采数值模拟的研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(2):47-49.
WU Xiaodong, ZHANG Yingchun, LI Anqi. Numerical simulation for coalbed methane production[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000,24(2):47-49.
- [24] 姚军,孙海,樊冬艳,等. 页岩气藏运移机制及数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(1):91-98.
YAO Jun, SUN Hai, FAN Dongyan, et al. Transport mechanisms and numerical simulation of shale gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(1):91-98.
- [25] SURDAM R C, JIAO Z S, HEASLER H P. Anomalous-ly pressured gas compartments in Cretaceous rocks of the Laramide basins of Wyoming: a new class of hydrocarbon accumulation [C]//SURDAM R C. Seals, traps, and the petroleum systems: AAPG Memoir, 1997,67:199-222.
- [26] ZOU C N, ZHU R K, LIU K Y. Tight gas sandstone reservoirs in China: characteristics and recognition criteria[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012(88/89):82-91.
- [27] 杨华,席胜利,魏新善,等. 苏里格地区天然气勘探潜力分析[J]. 天然气工业,2006,26(12):45-48.
YANG Hua, XI Shengli, WEI Xinshan, et al. Analysis on exploration potential in Sulige area of the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry,2006,26(12):45-48.
- [28] 李剑,罗霞,单秀琴,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征[J]. 石油勘探开发,2005,32(4):54-59.
LI Jian, LUO Xia, SHAN Xiuqin, et al. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(4):54-59.
- [29] 付金华,段晓文,席胜利. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征[J]. 天然气工业,2006,20(6):17-19.
FU Jinghua, DUAN Xiaowen, XI Shengli. Characteristics of upper Paleozoic gas reservoirs in Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry,2006,20(6):17-19.
- [30] 康竹林,傅诚德,崔淑芬,等. 中国大中型气田概论[M]. 北京:石油工业出版社,2000.