

doi:10.3799/dqkx.2016.035

连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制

郭迎春^{1,2}, 宋岩^{2,3}, 庞雄奇⁴, 姜振学², 付金华⁵, 杜建军¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 中国石油大学非常规天然气研究院, 北京 102249
3. 中石油勘探开发研究院, 北京 100083
4. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249
5. 中石油长庆油田分公司, 陕西西安 710018

摘要: 致密砂岩气是非常规油气资源的重要组成部分, 是当前技术条件下可动用程度最高的部分. 致密砂岩气可分为连续型致密砂岩气和圈闭型致密砂岩气. 通过系统地对比圈闭型和连续型致密砂岩气在运聚、分布上的地质、地化特征差异, 并使用物理模拟实验揭示了连续型致密砂岩气呈近源累计聚集的动力学成因机制. 研究表明: 圈闭型致密砂岩气是天然气远距离运聚的结果, 在天然气组分和碳同位素上都有很明显的分馏效应, 具有良好的输导体系, 形成了“常规圈闭汇聚、具有边底水、优质盖层封盖”的特征; 连续型致密砂岩气是近源累计聚集的结果, 天然气组分和碳同位素基本不产生分馏效应, 同一地区碳同位素呈现离散性, 表现出“连续分布、近源汇聚、气-水分布复杂或倒置”的特征. 连续型致密砂岩气近源累计聚集是致密砂岩储层中近纳米级孔喉背景下天然气运移动力变化及平衡的结果. 在天然气运移至气-水临界界面之前, 气-水界面将天然气与地层水分成两个系统, 天然气运移的动力是气体异常压力, 浮力作用产生的基本条件不满足, 运移阻力是上覆地层水压力和毛细管压力. 连续型致密砂岩气圈闭可认为是非常规动力圈闭, 其核心可概括为“(近)纳米级孔喉、气体活塞式推进、浮力基本不起作用、动阻力平衡决定气-水界面”.

关键词: 致密砂岩气; 近源聚集; 连续型; 圈闭型; 石油地质.

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2016)03-0433-08

收稿日期: 2015-06-25

Characteristics and Genetic Mechanism of Near-Source Accumulated Accumulation for Continuous-Type Tight-Sand Gas

Guo Yingchun^{1,2}, Song Yan^{2,3}, Pang Xiongqi⁴, Jiang Zhenxue², Fu Jinhua⁵, Du Jianjun¹

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2. Institute of Unconventional Natural Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China
4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
5. Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China

Abstract: Among the unconventional gas supply sources, tight-sand gas constitutes a significant percentage, which is the most available part under current technology. It can be divided into two types, continuous-type and trap-type. Geological and geochemical differences in characteristics on migration, accumulation, and distribution between trap-type and continuous-type tight-sand gas were compared systematically. Through physical simulation experiments, the dynamic genetic mechanism of near-source accumulation of continuous-type tight-sand gas was revealed. Trap-type tight-sand gas is the result of natural gas accumulation for a long migration distance with a good conducting system, causing an obvious fractionation on gas composition and carbon isotope and resulting in the following characteristics—“convergence in conventional traps, with edge and bottom wa-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U1262205); 中国博士后科学基金 (No. 2014M550984); 中国地质调查局地质大调查项目 (No. 12120115003501).

作者简介: 郭迎春 (1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事致密油气成藏研究. E-mail: cugcupgych@163.com

引用格式: 郭迎春, 宋岩, 庞雄奇, 等. 2016. 连续型致密砂岩气近源累计聚集的特征及成因机制. 地球科学, 41(3): 433-440.

ter, high-quality sealing". Continuous-type tight-sand gas is the result of near-source cumulative accumulation. Consequently, the gas composition and carbon isotope fractionation effect is unobvious, and discreteness exists among carbon isotopes in the same area. Different from trap-type, the continuous-type tight-sand gas exhibits the following characteristics such as "continuous distribution, near-source aggregation, complex or inverted gas / water distribution". The near-source accumulation of continuous-type tight-sand gas is consequence of counterbalance between force and resistance when gas migrates in nanoscale pore-throats developed in tight sandstone reservoirs. Before the natural gas migrates to the critical gas-water interface, it is separated into gas system and water system by the inverted gas-water interface. The gas migration force is abnormal gas pressure, while the need to generate buoyancy cannot be met. The gas migration resistances include overburden formation water pressure and capillary pressure. The magic trap of continuous-type tight-sand gas can be considered unconventional dynamic trap which core contents can be summarized as "(almost) nanoscale pore-throat, gas migrate follows the piston principle, buoyancy does not work, balance between force and resistance determines gas-water interface".

Key words: tight-sand gas; near-source accumulation; continuous-type; trap-type; petroleum geology.

致密砂岩气是非常规油气资源的重要组成部分,是当前技术条件下可动用程度最高的部分.近 20 年来,美国的常规天然气产量持续下降,天然气总产量的增加主要是非常规天然气的贡献,其中最早突破的是致密砂岩气(EIA, 2013).目前,美国已在 23 个盆地发现了 900 多个致密气田,可采资源量 $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采储量 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,生产井超过 10 万口,2013 年美国致密气产量达 $3100 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占当年天然气总产量 1/3(EIA, 2013).中国致密砂岩气地质资源量为 $17.4 \times 10^{12} \sim 25.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量为 $8.8 \times 10^{12} \sim 12.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采储量为 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约占全国天然气可采储量的 1/3(贾承造等, 2012).我国致密砂岩气主要分布在鄂尔多斯盆地和四川盆地,其次是塔里木、准噶尔和松辽盆地,至 2010 年底共发现 15 个致密砂岩大气田(戴金星等, 2014).近几年,我国致密气产量年增 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$,呈快速增长态势,2013 年致密气产量为 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气总产量的 1/4 以上.可见,世界范围内致密砂岩气储量巨大,将会是解决能源短缺的重要途径.

致密砂岩气藏可根据其地质特征分为连续型致密砂岩气藏和圈闭型致密砂岩气藏(戴金星等, 2012),连续型致密砂岩气是致密砂岩气最主要的表现形式.前者通常位于构造低部位,圈闭界限模糊,气-水倒置或者分布复杂,源储紧邻或呈一体,如中国鄂尔多斯盆地苏里格气田和皮申斯盆地 Mesaverde 致密砂岩气田;后者位于构造高部位,带有明显圈闭,存在边、底水,如塔里木盆地库车坳陷大北气田和绿河盆地 Pinedale 背斜致密气藏.短距离运聚成藏是致密砂岩气成藏的主要形式(曹峰等, 2011;李军等, 2013),但应强调是连续型致密砂岩气或者致密深盆气(庞雄奇等, 2013).短距离运聚成藏

的原因是“致密储层中气推水活塞式运移”,未发生气水置换而形成连续型气藏,但“活塞式推进”的动力学机制尚未得到充分认识.“先致密后成藏”和“先成藏后致密”中的“致密”不能以“孔隙度为 10% 或 12%,或渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ”来作标准,因为致密储层的划分标准不具有成藏内涵,形成连续型致密砂岩气的临界条件是随成藏条件而变化的(郭迎春等, 2013),如库车坳陷依南 2 致密砂岩气藏的临界物性条件为孔隙度在 7% 左右(王鹏威等, 2014).本文选取中国两个典型的圈闭型致密砂岩气藏和连续型致密砂岩气藏,系统地对比两种致密砂岩气在运聚、分布上的地质、地化特征差异,并通过物理模拟实验揭示连续型致密砂岩气呈近源累计聚集的动力学成因机制,深化对致密砂岩气成藏机理的认识.

1 圈闭型致密砂岩气远距离运聚——以迪那 2 气田为例

迪那 2 气田位于秋里塔格构造带东部迪那一东秋构造区带上,东邻阳霞凹陷,由迪那 1、迪那 2、迪那 3 井区组成,是中国最大的整装凝析气田(截至 2011 年底,探明天然气地质储量为 $1752 \times 10^8 \text{ m}^3$,凝析油为 $1339 \times 10^4 \text{ t}$)(朱光有等, 2012).迪那 2 气田是由 3 个气藏组成的常温超高压、低含凝析油的层状边水凝析气藏(马玉杰等, 2004),同时在圈闭类型上,这 3 个气藏均属于背斜构造气藏(图 1).迪那 2 气田含气层系主要为古近系苏维依组、库姆格列木群,总体上属于致密砂岩储层,孔隙度平均为 3%~9%,渗透率平均为 $0.04 \times 10^{-3} \sim 1.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,喉道以小型为主,平均孔喉半径小于 $0.1 \mu\text{m}$,其中也发育物性条件更好的相对优质储层

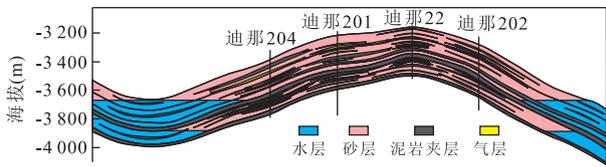


图 1 迪那构造古近系气藏剖面

Fig. 1 Paleogene gas reservoir cross-section of Dina structure

(颜文豪等, 2009). 通过地质特征的解剖, 可将迪那 2 气田定为圈闭型致密砂岩气.

油气源对比分析认为, 迪那 2 气田的油气主要来自于阳霞凹陷侏罗系煤系烃源岩(朱光有等, 2012). 迪那 2 凝析气藏的形成, 受控于古近系吉迪克组巨厚膏盐岩盖层的有效遮挡, 断层为油气运移提供了重要的运移通道, 南北两条大断裂均切穿了白垩系—侏罗系, 将圈闭和烃源岩连通起来, 为油气运移提供了条件(孙冬胜等, 2004; 朱光有等, 2012), 垂向上油气运移距离达 1 km 左右.

迪那 2 气田天然气甲烷碳同位素普遍轻, 为 $-34.40\% \sim -36.90\%$. 利用煤型气甲烷碳同位素与镜质体反射率之间的关系计算出烃源岩的成熟度 R_o . 为 $0.88\% \sim 1.05\%$ (采用戴金星院士建立的关系式: $\delta^{13}C_1 = 14.12 \log R_o - 34.39$), 所反映的烃源岩成熟度明显低于现今烃源岩的成熟度(阳霞凹陷侏罗系烃源岩镜质体反射率在 $1.6\% \sim 2.2\%$), 说明天然气经历了长期的聚气过程和较远的运移距离. 断裂沟通时天然气快速充注, 通常导致分馏较弱, 但经统计发现, 迪那 2 气田天然气组分及同位素在垂向上的变化较为显著, 如甲烷/乙烷、乙烷/丙烷等含量比值由深向浅有规律地增大, CO_2 含量由深到浅明显变少, CO_2 碳同位素逐渐变小, 都说明天然气发生了远距离的运移才导致分馏作用明显(图 2).

2 连续型致密砂岩气近源累计聚集

勘探实践表明: 鄂尔多斯盆地上古生界天然气分布十分广泛, 表现在横向上气层叠合连片分布, 几乎整个盆地都含气, 真正的干井很少; 表现在纵向上从本溪组到下石盒子组各层都发现了广泛的天然气显示, 有些虽达不到工业气层标准, 但普遍为差气层或者含气层. 赵靖舟等(2012)将这种气藏类型定为连续型分布, 主要由非常规岩性圈闭和动力圈闭组成. 鄂尔多斯上古生界天然气气源为本溪组、太原组和山西组的煤系烃源岩, 上古生界致密砂岩气主力产层是盒 8 段、山 1 段、山 2 段, 其孔隙度小于 12% 的占 91.13%, 渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 占 89% (杨华等, 2012a). 广覆式生烃的煤系烃源岩与大面积分布的致密砂岩储集层相互叠置或紧邻, 是天然气近源聚集的基础. 通过地质特征的解剖, 可将鄂尔多斯盆地上古生界气藏定为连续型致密砂岩气.

对鄂尔多斯盆地上古生界连续型致密砂岩气藏 142 口探井 1 508 个主力储层山 1 段、盒 8 下亚段和盒 8 上亚段的测井解释含气饱和度的统计结果表明, 靠近烃源岩的层段含气饱和度较高. 如山 1 段含气饱和度分布的峰值为 $40\% \sim 50\%$, 盒 8 下亚段含气饱和度分布峰值为 $30\% \sim 40\%$, 盒 8 上亚段含气饱和度分布的峰值为 $20\% \sim 30\%$, 显示出近源聚集的特征(图 3).

经统计, 上古生界储层的天然气相对密度、乙烷百分含量、丙烷百分含量以及 iC_4/nC_4 值的纵向分异不明显, 显示出近源聚集的特征(图 4). 越靠近源岩的层位甲烷碳同位素越高, 这主要是由于烃源岩成熟度的增加. 重烃气同位素则更多的受分馏作用的影响, 但重烃气同位素变化却很小, 这些均显示天然气近源聚集的特征(图 5). 由甲烷碳同位素换算

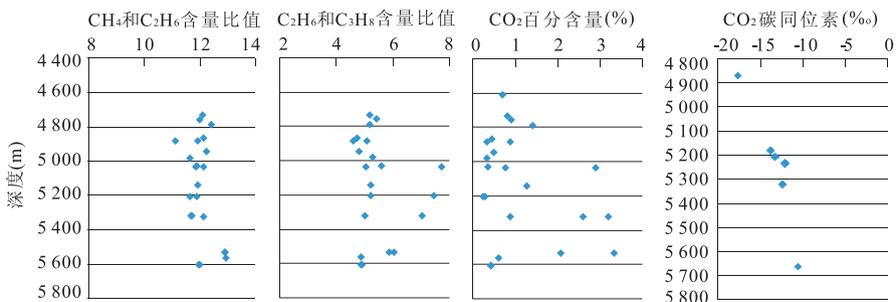


图 2 迪那 2 气田天然气组分和碳同位素在垂向上的分馏效应

Fig. 2 Vertical fractionation of gas composition and carbon isotope from Dina 2 gas field

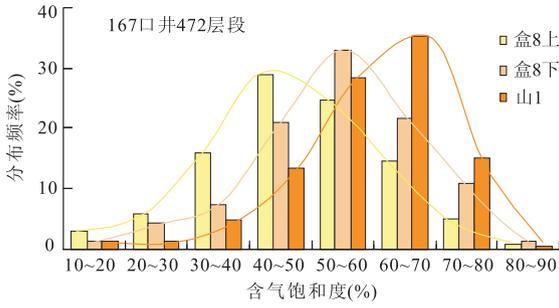


图 3 鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层含气饱和度对比
Fig. 3 Gas saturation comparison of the Upper Paleozoic sandstone reservoirs, Ordos basin

的成熟度与烃源岩成熟度基本一致,也反映了天然气有近距离成藏的性质。

不同成熟阶段排出的天然气在同一地区共存是近源累积聚集的重要标志,表现为同一地区天然气碳同位素的离散性。同一地区镜质体反射率相同,但天然气 C₁ 和 C₂ 碳同位素呈现近 5‰~10‰ 的离散,这种离散性指示了烃源岩在不同成熟阶段生成的天然气的近源聚集(图 6)。如果存在天然气较远距离的运移聚集,在同一地区天然气碳同位素则会近似。

另外,生气动力学和碳同位素动力学的研究也表明近源充注、累积聚气成藏的特征(李贤庆等,2012)。

南北向气藏剖面图显示(图 7),除去分布于烃源岩层系内的气层,其他气层基本上都分布在下石河子组的中下部甚至底部,紧邻烃源岩层。虽然下石河子组上部砂体也很发育,且储集物性较好,但并没有充满天然气,这种分布特征正是天然气近源累计聚集的结果。

3 连续型致密砂岩气呈近源累计聚集的成因机制

前人总结出致密砂岩气成藏条件包括烃源岩大面积分布且广覆式生排烃、致密储层连续型分布且与源邻接、构造稳定、断裂欠发育(杨华等,2012b; 邹才能等,2013),并且认识到由于气柱高度有限和孔隙喉细到呈纳米级,气柱浮力克服不了较大的毛细管压力(宋岩等,2013; 邹才能等,2013)。

Berkenpas(1991)的研究认为 3 种力控制了气驱水的动力学过程和最终达到的静态平衡,分别为

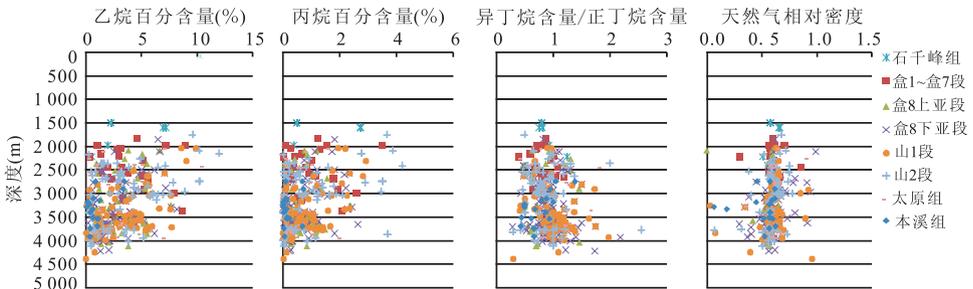


图 4 鄂尔多斯盆地上古生界天然气组分特征
Fig. 4 Characteristics of natural gas component in the Upper Paleozoic of Ordos basin

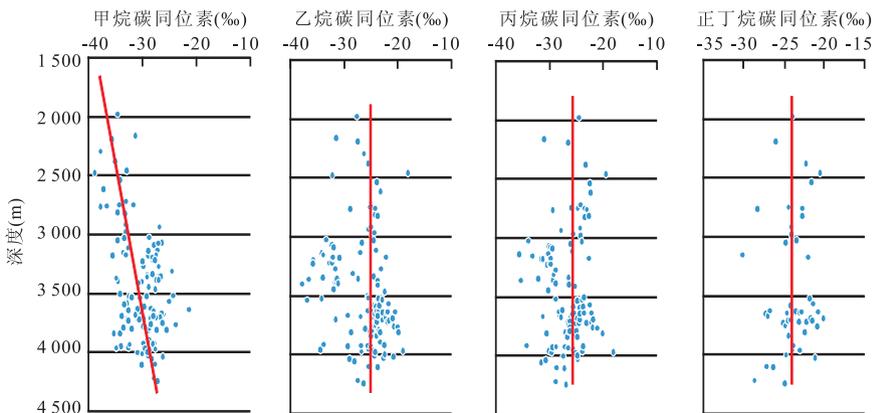


图 5 鄂尔多斯盆地上古生界天然气碳同位素垂向变化特征
Fig. 5 Vertical characteristics of natural gas carbon isotope in the Upper Paleozoic of Ordos basin

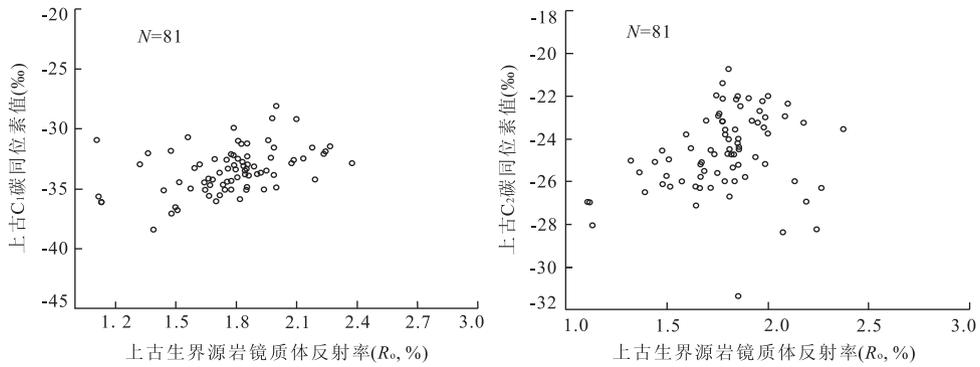


图 6 鄂尔多斯上古生界天然气 C₁ 和 C₂ 碳同位素值和烃源岩原地镜质体反射率相关关系

Fig. 6 Correlations between gas carbon isotope in Upper Paleozoic and vitrinite reflectances in situ

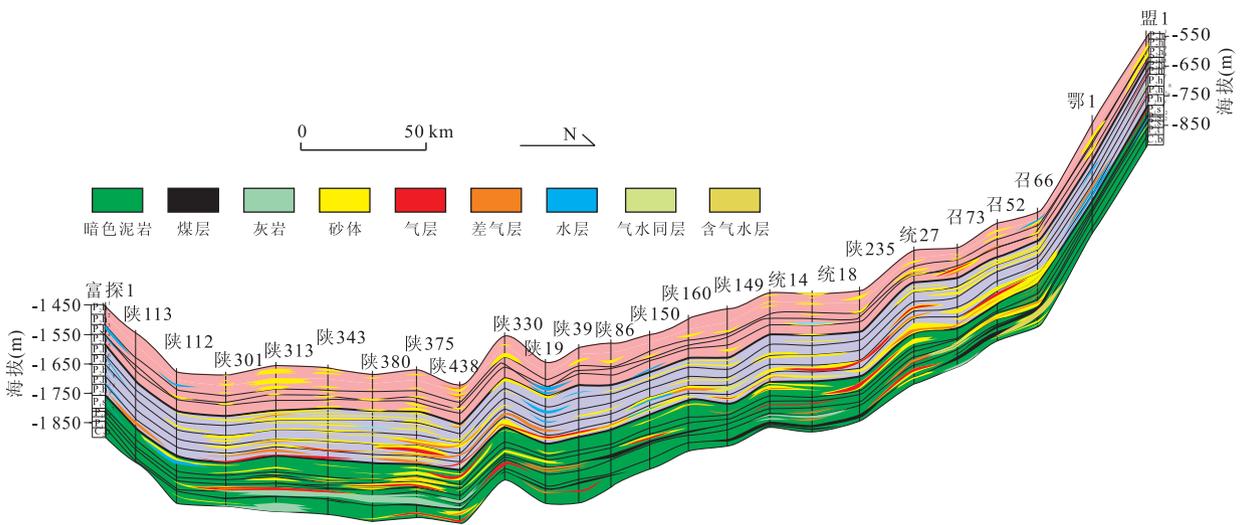


图 7 鄂尔多斯盆地上古生界南北向气藏剖面

Fig. 7 The south-north gas reservoirs section in the Upper Paleozoic of Ordos basin

浮力、毛细管压力(原文中是 the force due to interfacial tension, 作者注)和 气-水压力差. 因为气体流动速率非常慢, 摩擦力(黏滞力)是可以忽略的. 只有存在连续可移动的水浮力才起作用, 束缚水是不能传递压力的.

如图 8, 在最下方的孔隙中, 空气驱走了全部孔隙水, 浮力作用为零; 如果气水压力差小于毛细管压力, 则气体被封闭在该孔隙中. 气体压力不断增大, 直至气水压力差大于毛细管压力时, 气泡脱逃至下一个孔隙.

为揭示气-水倒置界面处的动力学条件, 笔者开展了以下物理模拟实验, 实验在室外常温常压条件下进行. 首先在石英玻璃筒内装满水, 然后依次装入粒径为 0.075、0.125、0.175、0.225、0.275、0.325、0.375 和 0.425 mm 的砂层, 每层厚 10 cm, 使砂层达到水饱和. 将砂层看成圆球体按菱面体排列, 可以计算出砂层孔喉半径从下到上依次为

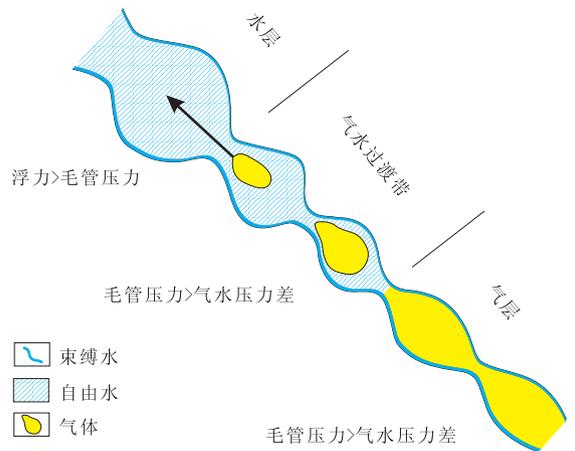


图 8 致密砂岩气藏的封闭机制和理论模型

Fig. 8 Microscopic view of the trapping mechanisms and the theoretical model

15.53、25.89、36.24、46.60、56.95、67.31、77.66 及 88.02 μm. 注水至一定高度后开始充气, 可以看到

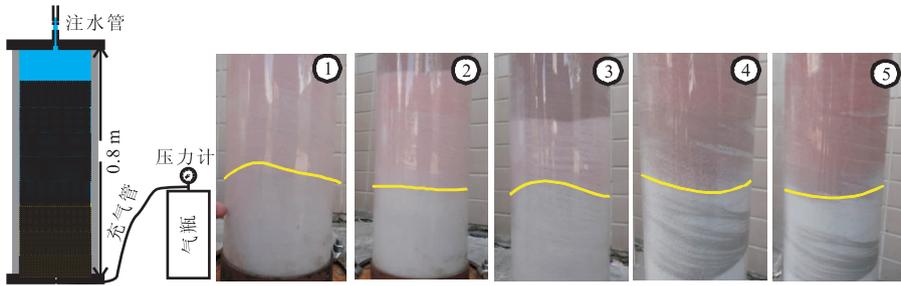


图 9 多层不同粒径砂柱物理模拟实验装置示意图及气-水临界界面

Fig. 9 Schematic diagram of physical simulation experiment and the critical gas-water inverted interfaces

表 1 物理模拟实验中气-水临界界面处的动力与阻力

Table 1 Forces record and conversion of critical gas-water inverted interfaces

编号	水柱高度(m)	水柱压力(MPa)	砂岩粒径(mm)	毛管压力(MPa)	充气气压(MPa)
1	6.5	0.063 7	0.075	0.003 7	0.07
2	13.8	0.135 2	0.125	0.002 2	0.15
3	21.2	0.207 8	0.175	0.001 6	0.22
4	27.5	0.269 5	0.225	0.001 2	0.28
5	35.5	0.347 9	0.275	0.001 0	0.36

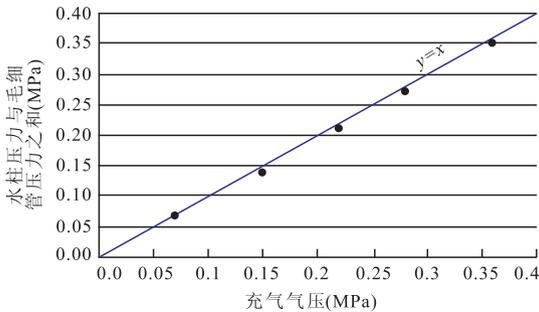


图 10 气-水临界界面处的力学平衡

Fig. 10 The dynamic balance of the critical gas-water inverted interfaces

砂柱内气顶水活塞式运移,微调增大气压到一定压力后,可以看到活塞式运移消失,突然冒气泡(即发生了气水置换),此刻对应的是临界条件,记录下此时的水柱高度,气压大小,临界砂层粒径(图 9,表 1)。重复同样操作,记录下不同注水高度及对应的气压、粒径。

由实验数据可建立气-水临界界面处的动力学平衡方程,即充气气压等于水柱压力与毛细管压力之和(图 10)。在致密砂岩储层中,在天然气运移至气-水临界界面之前,一直推进的气-水界面将天然气与地层水分成两个系统,天然气运移的动力是气体异常压力,浮力作用产生的基本条件不满足。运移的阻力除了毛细管压力之外,更重要的是细小的孔喉使得上覆地层水压力起到了阻力作用。如果天然气突破了气-水临界界面,则发生了气-水置换,

天然气和水成为一个整体的流体系统,上覆地层水压力的阻力作用即消失,天然气异常压力也消失,此后天然气的运移和滞留是天然气浮力和储层毛细管压力二者决定的,在运移至有利圈闭由于优质盖层的封盖而形成常规圈闭气藏。该物理模拟实验还演示气推水活塞式运移的临界条件不是唯一的,说明形成连续型致密砂岩气的临界条件是随成藏条件而变化的。总之,连续型致密砂岩气呈近源聚集的成因机制可以概括为非常规动力圈闭,其核心是“(近)纳米级孔喉、气体活塞式推进、浮力基本不起作用、动阻力平衡决定气-水界面”,这些条件及作用导致了连续型致密砂岩气呈近源累计聚集,基本上未发生分异作用,表现出了上述的地质、地化特征。

4 结论

(1)圈闭型致密砂岩气是天然气远距离运聚的结果,具有良好的输导体系,在天然气组分和碳同位素上都有很明显的分馏效应,形成了“常规圈闭汇聚、具有边底水、优质盖层封盖”的特征;连续型致密砂岩气是近源累计聚集的结果,天然气组分和碳同位素基本不产生分馏效应,同一地区碳同位素呈现离散性,表现出“连续分布、近源汇聚、气-水分布复杂或倒置”的特征。

(2)连续型致密砂岩气近源累计聚集是致密砂岩储层中近纳米级孔喉背景下天然气运移动阻力变

化及平衡的结果。在天然气运移至气—水临界界面之前,气—水界面将天然气与地层水分为两个系统,天然气运移的动力是气体异常压力,浮力作用产生的基本条件不满足,运移阻力上覆地层水压力和毛细管压力,连续型致密砂岩气圈闭可解释为非常规动力圈闭,其核心可概括为“(近)纳米级孔喉、气体活塞式推进、浮力基本不起作用、动阻力平衡决定气—水界面”。

References

- Berkenpas, P. G., 1991. The Milk River Shallow Gas Pool: Role of the Updip Water Trap and Connate Water in Gas Production from the Pool. *SPE*, 22922: 371—380.
- Cao, F., Zou, C. N., Fu, J. H., et al., 2011. Evidence Analysis of Natural Gas Near-source Migration-accumulation Model in the Sulige Large Gas Province, Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 857—866 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Ni, Y. Y., Hu, G. Y., et al., 2014. Stable Carbon and Hydrogen Isotopes of Gases from the Large Tight Gas Fields in China. *Scientia Sinica Terrae*, 44(4): 563—578 (in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., Ni, Y. Y., Wu, X. Q., 2012. Tight Gas in China and Its Significance in Exploration and Exploitation. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 257—264 (in Chinese with English abstract).
- EIA, 2013. Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040.
- Guo, Y. C., Pang, X. Q., Chen, D. X., et al., 2013. Progress of Research on Hydrocarbon Accumulation of Tight Sand Gas and Several Issues for Concerns. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 717—724 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Zheng, M., Zhang, Y. F., 2012. Unconventional Hydrocarbon Resources in China and the Prospect of Exploration and Development. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2): 129—136 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Zhao, J. Z., Fan, Y. F., et al., 2013. Gas Migration Mechanism of Quasi-continuous Accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 34(5): 592—600 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. Q., Feng, S. B., Li, J., et al., 2012. Geochemistry of Natural Gas Accumulation in Sulige Large Gas Field in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 836—846 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. J., Hao, G. X., Zhang, L. J., et al., 2004. The Kind of Dina 2 Gas Field. *Natural Gas Geoscience*, 15(1): 91—94 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., Zhou, X. Y., Dong, Y. X., et al., 2013. Formation Mechanism Classification of Tight Sandstone Hydrocarbon Reservoirs in Petroliferous Basin and Resources Appraisal. *Journal of China University of Petroleum*, 37(5): 28—37 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y., Jiang, L., Ma, X. Z., 2013. Formation and Distribution Characteristics of Unconventional Oil and Gas Reservoirs. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 605—614 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. S., Jin, Z. J., Lv, X. X., et al., 2004. Reservoiring Mechanism and Finalization Period of Dina 2 Gas Field in Kuqa Depression. *Oil & Gas Geology*, 25(5): 559—564 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. W., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., et al., 2014. Critical Physical Conditions for Accumulation of Yi'nan 2 Continuous Tight Sand Gas Reservoir, Kuqa Depression. *Earth Science*, 39(10): 1381—1390 (in Chinese with English abstract).
- Yan, W. H., Li, J. M., Wang, D. M., et al., 2009. Geologic Characteristics and Sedimentary Reservoir of Dina 2 Gas Field in Kuqa Depression. *Natural Gas Geoscience*, 20(1): 86—93 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Fu, J. H., Liu, X. S., et al., 2012a. Accumulation Conditions and Exploration and Development of Tight Gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 295—303 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Fu, J. H., Liu, X. S., et al., 2012b. Formation Conditions and Exploration Technology of Large-scale Tight Sandstone Gas Reservoir in Sulige. *Acta Petrologica Sinica*, 33(S1): 27—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. Z., Fu, J. H., Yao, J. L., et al., 2012. Quasi-continuous Accumulation Model of Large Tight Sandstone Gas Field in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 33(S1): 37—52 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Yang, H. J., Zhang, B., et al., 2012. The Geological Feature and Origin of Dina 2 Large Gas Field in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2479—2492 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Tao, S. Z., Hou, L. H., et al., 2013. Unconventional Oil and Gas Geology (2nd edition). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹峰,邹才能,付金华,等,2011.鄂尔多斯盆地苏里格大气区天然气近源运聚的证据剖析.岩石学报,27(3): 857-866.
- 戴金星,倪云燕,胡国艺,等,2014.中国致密砂岩大气田的稳定碳氢同位素组成特征.中国科学D辑:地球科学,44(4): 563-578.
- 戴金星,倪云燕,吴小奇,2012.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义.石油勘探与开发,39(3): 257-264.
- 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等,2013.致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题.石油与天然气地质,34(6): 717-724.
- 贾承造,郑民,张永峰,2012.中国非常规油气资源与勘探开发前景.石油勘探与开发,39(2): 129-136.
- 李军,赵靖舟,凡元芳,等,2013.鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气运移机制.石油与天然气地质,34(5): 592-600.
- 李贤庆,冯松宝,李剑,等,2012.鄂尔多斯盆地苏里格大气田天然气成藏地球化学研究.岩石学报,28(3): 836-846.
- 马玉杰,郜国玺,张丽娟,等,2004.迪那2气田气藏类型研究.天然气地球科学,15(1): 91-94.
- 庞雄奇,周新源,董月霞,等,2013.含油气盆地致密砂岩类油气藏成因机制与资源潜力.中国石油大学学报(自然科学版),37(5): 28-37.
- 宋岩,姜林,马行陟,2013.非常规油气藏的形成及其分布特征.古地理学报,15(5): 605-614.
- 孙冬胜,金之钧,吕修祥,等,2004.库车前陆盆地迪那2气田成藏机理及成藏年代.石油与天然气地质,25(5): 559-564.
- 王鹏威,庞雄奇,姜振学,等,2014.库车坳陷依南2连续型致密砂岩气藏成藏临界物性条件.地球科学,39(10): 1381-1390.
- 颜冬豪,李建明,王冬梅,等,2009.库车坳陷迪那2气田地质特征与沉积储层研究.天然气地球科学,20(1): 86-93.
- 杨华,付金华,刘新社,等,2012a.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发.石油勘探与开发,39(3): 295-303.
- 杨华,付金华,刘新社,等,2012b.苏里格大型致密砂岩气藏形成条件及勘探技术.石油学报,33(S1): 27-36.
- 赵靖舟,付金华,姚泾利,等,2012.鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式.石油学报,33(S1): 37-52.
- 朱光有,杨海军,张斌,等,2012.塔里木盆地迪那2大型凝析气田的地质特征及其成藏机制.岩石学报,28(8): 2479-2492.
- 邹才能,陶士振,侯连华,等,2013.非常规油气地质(第二版).北京:地质出版社.