

塔里木盆地库车坳陷致密砂岩气藏成因类型

李卓^{1,2}, 姜振学^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 李峰^{1,2}, 张宝收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. 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

3. 新疆塔里木油田勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要: 为深化对库车坳陷致密砂岩气藏成因类型的认识, 采集致密砂岩储层岩样, 开展了油气充注史和孔隙度演化史研究. 通过流体包裹体岩相学和显微测温厘定了油气充注史, 利用沉积—构造—成岩一体化模型恢复了储层孔隙度演化史, 根据两者的先后关系, 划分了致密砂岩气藏的成因类型. 结果表明, 依南2侏罗系气藏存在两期油气充注, 第一期是吉迪克期到康村期(23~12 Ma)的油充注, 第二期是库车期到现今(5~0 Ma)的天然气充注, 储层孔隙度在库车期前(12~8 Ma)降低到12%以下, 形成致密砂岩储层. 迪那2古近系天然气藏存在两期油气充注, 第一期是康村期到库车期(12~5 Ma)的油充注, 第二期是库车期到现今(5~0 Ma)的天然气充注, 储层孔隙度在西域期(2~0 Ma)降低到12%以下, 形成致密砂岩储层. 综合分析认为, 库车坳陷存在两种成因类型的致密砂岩气藏, 依南2侏罗系气藏致密储层形成之后充注天然气, 成因类型为“致密深盆气藏”; 迪那2气藏古近系致密储层形成之前, 天然气已大量充注, 成因类型为“致密常规气藏”. 这对深化库车坳陷致密砂岩气勘探与开发有重要意义.

关键词: 库车坳陷; 致密砂岩气藏; 成因类型; 气藏; 石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2013)01-0156-09

收稿日期: 2012-01-08

Genetic Types of the Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China

LI Zhuo^{1,2}, JIANG Zhen-xue^{1,2}, PANG Xiong-qi^{1,2}, LI Feng^{1,2}, ZHANG Bao-shou³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Institute of Exploration and Exploitation Research, Tarim Oil Field Company, Kurla 841000, China

Abstract: To further understand the genetic types of the tight sandstone gas reservoirs in Kuqa depression, the core from tight sandstone gas reservoirs is sampled to carry out the analysis on hydrocarbon charge history and porosity evolution. The hydrocarbon charge history is investigated by analyzing the fluid inclusion petrography, and microthermometry and the porosity evolution is restored by using the model of deposition-structure-diagenesis. Combining with gas-water relationship and distribution of tight sandstone gas reservoirs. There are two charge events in the YN2 Jurassic tight sandstone reservoir, with the one of oil charge during 23–12 Ma, and the other gas charge during 5–0 Ma. The reservoir porosity dropped to less than 12% and became tight during the period of 12–8 Ma. Two charge events have been recorded in the DN2 Paleogene tight sandstone reservoir; the former is oil charge during 23–12 Ma, and the latter is the gas charge during 5–0 Ma. The reservoir porosity dropped to less than 12% during the period of 2–0 Ma and became tight later. Two genetic types of tight sandstone gas reservoirs have been confirmed. The YN2 Jurassic tight sandstone reservoir is of the genetic type of “tight deep basin gas reservoir” with the accumulation process of gas charge after the reservoir tightened and the DN2 Paleogene tight sandstone reservoir is defined as “tight conventional gas reservoir” with the accumulation process of gas charge before the reservoir tightened. This study is of significance for further exploration and exploitation of tight sandstone gas in Kuqa depression.

Key words: Kuqa depression; tight sandstone gas reservoirs; genetic types; gas reservoir; petroleum geology.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2011CB201100); 国家自然科学基金项目(No. 40972088).

作者简介: 李卓(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事油气成藏机理与油气藏分布预测研究. E-mail: lz830706@yahoo.cn

0 引言

致密砂岩气藏是指赋存于低孔隙度(小于 12%)和低渗透率($1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)砂岩中的非常规天然气藏(关德师等, 1995),其含气饱和度低(小于 60%),含水饱和度高(大于 40%),致密砂岩储层中天然气流动速度较为缓慢,通常以孔隙度小于 12%作为致密砂岩储层的评价标准(关德师等, 1995; 庞雄奇等, 2003; 杨晓宁等, 2005).

致密砂岩气藏根据成因机理可以分为致密深盆气藏和致密常规气藏. 前者是一种特殊机理的非常规天然气藏,前人从地质条件(姜振学等, 2000; 金之钧等, 2003)、水动力(张金川等, 2000)、相对渗透率、动态平衡(McPeck, 1981; Gies, 1984)、压力属性(马新华等, 2002; 张金川等, 2004)、力平衡和物质平衡(庞雄奇等, 2003; 姜福杰等, 2007)等方面探讨了其特殊的成因机理(Masters, 1979; Cant, 1983; Law, 2002),后者在成因机理上与非致密砂岩储层中形成的常规天然气藏一致.

有关致密砂岩气藏成因类型的研究,比较突出的成果是充分考虑烃源岩排气高峰期与致密储层演化史之间的动态关系,提出了“先成型”和“后成型”

致密砂岩气藏成因分类方案(姜振学等, 2006). 但是,确定排气高峰期确定所需的参数多,限制条件多,工作量大,且排气高峰期并不能完全代表天然气进入致密储层的时间. 针对这一问题,本文尝试利用流体包裹体厘定天然气充注史,与储层孔隙度演化史相结合,更准确地划分了致密砂岩气藏成因类型.

库车坳陷广泛发育致密砂岩气藏,但是前人对其成因类型认识不够深入,针对不同成因类型的致密砂岩气藏的成藏条件、成因机理、分布规律的研究比较欠缺. 因此,本文对于全面认识库车坳陷致密砂岩气资源,深化致密砂岩气勘探与开发具有重要意义.

库车坳陷位于塔里木盆地北部,南天山褶皱带南缘,呈北东向线状展布,东西长约 500 km,南北宽 50~100 km,勘探面积 $4.27 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造单元划分为“四带三凹”. “四带”分别是北部单斜带、克拉苏构造带、依奇克里克构造带和秋里塔格构造带,“三凹”分别是阳霞凹陷、拜城凹陷及乌什凹陷(图 1a). 库车坳陷三叠系和侏罗系烃源岩主要分布在拜城凹陷和阳霞凹陷中,致密砂岩储层广泛发育于各构造带的侏罗系、白垩系和古近系,且被上覆的膏岩盐、泥岩和煤系盖层覆盖,具备极好的成藏条件,天然气藏主要分布于克拉苏构造带、依奇克里克构造带和

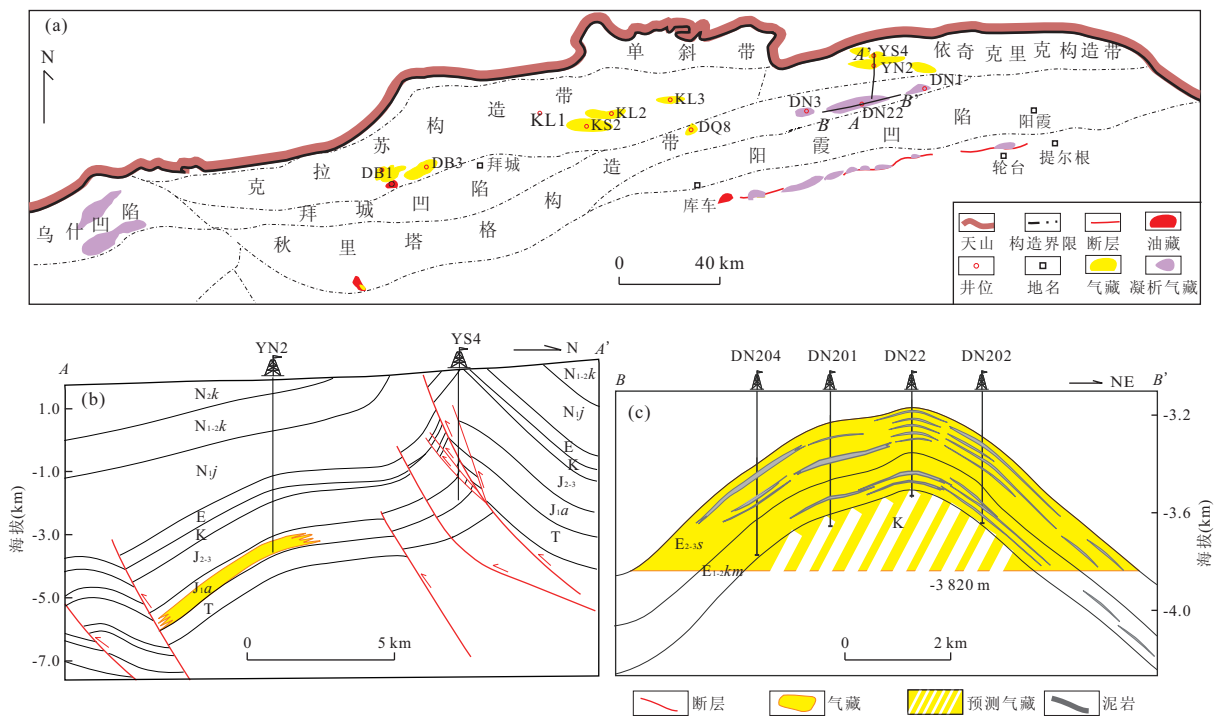


图 1 库车坳陷构造单元与气藏剖面

Fig. 1 Tectonic units and the cross section through gas reservoirs in the Kuqa depression

a. 库车坳陷构造单元图; b. 依南 2 气藏剖面图; c. 迪那 2 气藏剖面图

秋里塔格构造带东段。

1 库车坳陷两种类型致密砂岩气藏差异性

选取库车坳陷典型致密砂岩气藏开展研究,剖析了依南 2 侏罗系气藏和迪那 2 古近系气藏的成藏条件和成藏机理,对比了二者的差异性(表 1、图 1b 和图 1c)。结果表明同为致密砂岩气藏,但是二者在圈闭类型、成藏动力、气水关系、压力梯度方面都存在极大差异,具有两种不同的成因机理。因此,划分两种成因类型的致密砂岩气藏的关键是天然气充注时致密储层是否形成。本文将通过比较天然气充注时间和致密砂岩储层形成时间的方法,划分致密砂岩气藏成因类型。

2 实验与研究方法

2.1 天然气充注史厘定

依南 2 井和迪那 22 井利用流体包裹体研究天然气充注史。采集库车坳陷致密砂岩储层岩心样品,首先进行包裹体岩相学研究,定位包裹体,确定包裹体颜色、相态、宿主矿物、产状,估算气液比、划分期次,进而选择与油气包裹体伴生的盐水包裹体测量

均一化温度和盐度。包裹体测温分析执行标准:沉积岩包裹体均一温度和盐度测定方法:SY/T 6010-1994,测试仪器为 ZEISS Imager A1m 多功能显微镜和 LINKAM MDSG 600 液氮型冷热台,在室温、常压下测定盐水包裹体的均一化温度和盐度,最后结合埋藏史和热史厘定天然气充注史。

2.2 储层孔隙演化史恢复方法

在大量岩石薄片观察分析的基础上,利用沉积—成岩—构造一体化预测模型(张荣虎等,2011)恢复储层孔隙度演化史。该方法利用建立的不同类型储集层岩心孔隙度与埋深关系预测模型(表 2),结合构造、胶结、溶蚀和裂缝等影响孔隙度的因素分析,定量恢复孔隙度演化史。

孔隙度演化史恢复模型如下:

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_3 - \Delta\Phi_4, \quad (1)$$

其中: Φ 为孔隙度预测结果; Φ_0 为孔隙度预测模型; $\Delta\Phi_1$ 为溶蚀增孔量; $\Delta\Phi_2$ 为裂缝增孔量; $\Delta\Phi_3$ 为构造减孔量; $\Delta\Phi_4$ 为胶结减孔量。根据目的层粒度复杂的情况,采用加权平均的方法得到准确的预测模型 Φ_0 :

$$\Phi_0 = (h_{\text{粉砂}} \times \Phi_{\text{粉砂}} + h_{\text{细砂}} \times \Phi_{\text{细砂}} + h_{\text{中砂}} \times \Phi_{\text{中砂}}) / h, \quad (2)$$

其中: $h_{\text{粉砂}}$ 为粉砂岩厚度,m; $\Phi_{\text{粉砂}}$ 为粉砂岩预测模型; $h_{\text{细砂}}$ 为细砂岩厚度,m; $\Phi_{\text{细砂}}$ 为细砂岩预测模型; $h_{\text{中砂}}$ 为中砂岩厚度,m; $\Phi_{\text{中砂}}$ 为中砂岩预测模型。

表 1 库车坳陷两种典型致密砂岩气藏特征对比

Table 1 Comparison of the typical tight sandstone gas reservoirs in the Kuqa depression

	依南 2 气藏	迪那 2 气藏
烃源岩	中—上三叠统煤系烃源岩	中—下侏罗统、中—上三叠统煤系烃源岩
储层	侏罗系阿合组含砾砂岩,气层孔隙度 4%~8%	古近系苏维依组含砾细砂岩,气层孔隙度 4%~7%
盖层	顶部为侏罗系阳霞组煤层,底部为三叠系塔里奇克组煤层	古近系吉迪克组膏泥岩
圈闭	岩性圈闭、成岩圈闭	背斜圈闭
油气运移动力	毛细管力和气体膨胀力	浮力和水动力
压力梯度	气层压力梯度低于同一压力系统内水层压力梯度	气层的压力梯度高于同一压力系统内水层压力梯度
气水关系	气藏边界不受构造等高点控制,含气面积大,无明显气水界面,且水层在上,气层在下	气藏分布在构造高部位,边界受等高点控制,含气面积小,具有底水,气水界面明显
成因机理	天然气充注晚于储层致密,毛细管力为成藏动力	天然气充注早于储层致密,浮力为成藏动力

表 2 库车坳陷不同类型储集层岩心孔隙度与埋深关系预测模型(据张荣虎等,2011 修改)

Table 2 Prediction model for the relationship of the different types core porosity and the burial depth in the Kuqa depression

岩性	预测模型	石英含量(%)	分选	主要约束条件
中—细砂岩	$\Phi_0 = 0.39638e^{-0.0003H}$	50~65	中—好	泥质 1%~5%,胶结物 2%~5%,溶蚀量 0%~2%,构造挤压 30~60 MPa
极细—细砂岩	$\Phi_0 = 0.37643e^{-0.0003H}$		差	泥质 1%~5%,胶结物 2%~5%,溶蚀量 0%~2%,构造挤压 ≤ 30 MPa
中细—细砂岩	$\Phi_0 = 0.40359e^{-0.0002H}$	65~75	中—好	泥质 1%~5%,胶结物 2%~5%,溶蚀量 0%~2%,构造挤压 30~60 MPa

注: Φ_0 为预测模型; H 为埋深(m)。

结合埋藏史研究得到的不同时期埋深和成岩作用研究确定的 $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2, \Delta\Phi_3, \Delta\Phi_4$, 可计算储层在各个地质历史时期的孔隙度。

2.3 成因类型划分

在致密储层孔隙度演化史和天然气充注史研究的基础上, 引入判别关系式:

$$T_x = t_x/t_y, \quad (3)$$

其中: T_x 为致密砂岩气藏成因类型; t_x 为致密储层形成时间; t_y 为天然气充注时间。

通过比较时间先后来判别致密砂岩气藏成因类型。当 $T_x > 1$ 时, 储层致密早于天然气充注, 成因类型为致密深盆气藏; 当 $T_x < 1$ 时, 储层致密化晚于天然气充注, 成因类型为致密常规气藏。

3 结果与讨论

3.1 天然气充注史

库车坳陷的中、上三叠统烃源岩主要是在早新近世末达到生油高峰期, 中、下侏罗统烃源岩则在新近纪时达到生油、生气高峰, 尤其是在进入库车期

(5 Ma)以后, 前陆盆地快速沉降、深埋, 使得中、上三叠统和中、下侏罗统烃源岩快速进入湿气—干气的生成阶段(赵孟军和卢双舫, 2003; 赵孟军等, 2005)。

库车坳陷油气包裹体岩相学研究认为, 依南2侏罗系致密砂岩储层岩性为含砾砂岩, 矿物以石英为主, 裂缝不发育, 样品中油气包裹体不丰富, 主要发育于石英次生加大边内侧。实验室条件下, 油气包裹体主要有蓝—黄色荧光气—液相包裹体、蓝色荧光气—液相包裹体。根据包裹体特征和温度、盐度测试结果判断(表3、图2a、图3a), 依南2气藏侏罗系储层中存在两期油气包裹体, 第一期为蓝—黄色、荧光气—液相包裹体, 主要形成于石英颗粒次生加大边内侧, 同期盐水包裹体温度为 $85 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度为 $0 \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$, 形成于吉迪克期到库车期(23~12 Ma)的油气充注事件, 第二期为蓝色荧光和较大气相的气—液相包裹体, 主要分布在切穿石英加大边的裂缝中, 同期盐水包裹体温度范围为 $115 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $0 \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$, 形成于库车期到现今(5~0 Ma)的天然气充注事件。

迪那2古近系致密储层岩性为含砾细砂岩, 矿

表3 库车坳陷盐水包裹体均一化温度、盐度测试结果

Table 3 Homogenization temperature and salinity of aqueous inclusions in the Kuqa depression

包裹体编号	井号	埋深(m)	层位	宿主矿物	产状	气液比(%)	$T_h(^\circ\text{C})$	$T_m(^\circ\text{C})$
1	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	次生加大边	5	91.3	-3
2	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	次生加大边	8	100.6	-
3	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	-	135.1	0
4	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	-	147.9	-4
5	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	8	124.6	-
6	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	6	105.6	-5
7	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	-	131.1	0
8	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	次生加大边	8	97.6	0
9	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	次生加大边	5	85.7	-2
10	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	次生加大边	6	102.3	-3
11	依南2	4788.5	J _{1a}	石英颗粒	裂缝	6	142.5	-3
1	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	5	103.6	-5
2	迪那22	4992	E _{2-3s}	长石颗粒	裂缝	-	149.3	-
3	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	-	135.1	-8
4	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	7	116.1	-10
5	迪那22	4992	E _{2-3s}	长石颗粒	裂缝	7	136.3	-18
6	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	5	117.9	-20
7	迪那22	4992	E _{2-3s}	长石颗粒	裂缝	8	125.6	-15
8	迪那22	4992	E _{2-3s}	长石颗粒	裂缝	7	142.1	-25
9	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	-	113.7	-20
10	迪那22	4992	E _{2-3s}	长石颗粒	裂缝	7	143.6	-8
11	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	7	142.5	-
12	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	5	106.5	-8
13	迪那22	4992	E _{2-3s}	石英颗粒	裂缝	5	110.4	-7

注:“-”为未测到值。

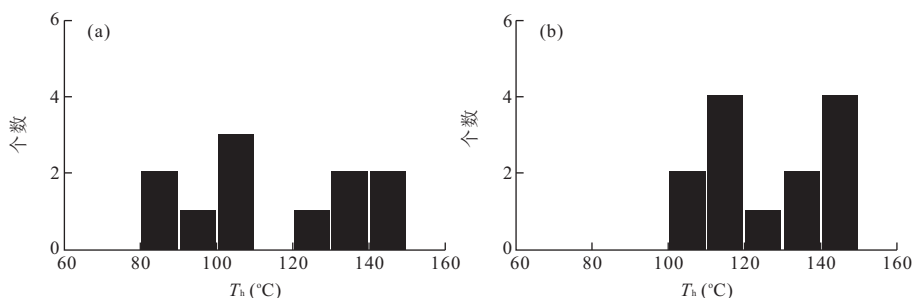
图 2 库车坳陷盐水包裹体均一化温度(T_h)分布

Fig. 2 Homogenization temperature of aqueous inclusions in the Kuqa depression

a. 依南 2 气藏; b. 迪那 2 气藏

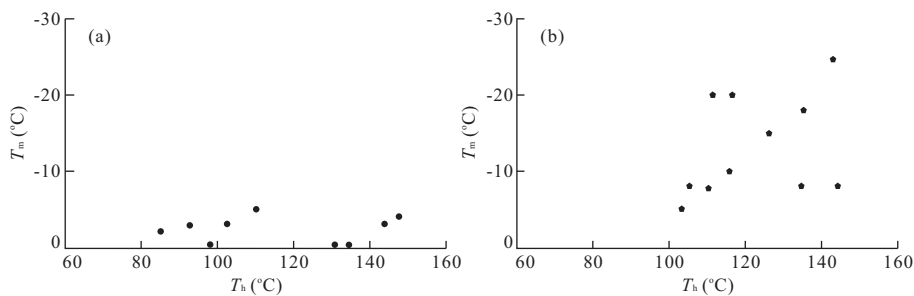


图 3 库车坳陷盐水包裹体均一化温度与盐度关系

Fig. 3 Relationship between homogenization temperature and salinity of aqueous inclusions in the Kuqa depression

a. 依南 2 气藏; b. 迪那 2 气藏

物以石英为主, 裂缝发育, 其中充填方解石胶结物. 样品中油气包裹体丰度不高, 发育于石英次生加大边和后期切穿石英颗粒及其加大边的裂缝中. 实验室条件下, 油气包裹体主要有蓝色荧光气-液相包裹体、蓝-白色荧光气-液相包裹体. 根据包裹体特征和温度、盐度测试结果判断(表 3、图 2b、图 3b), 迪那 2 气藏存在两期油气包裹体, 第一期为蓝色、蓝白色荧光气液两相包裹体, 主要形成于切穿石英次生加大边的裂缝中, 同期盐水包裹体温度为 100~115 °C, 盐度为 -10~-5 °C, 形成于吉迪克期到库车期(23~12 Ma)的油气充注事件, 第二期为蓝色荧光和较大气相的气-液相包裹体, 主要分布在切穿石英颗粒及其加大边的晚期裂隙和方解石脉中, 同期盐水包裹体温度范围为 120~150 °C, 盐度 -25~-5 °C, 形成于库车期到现今(5~0 Ma)的天然气充注事件.

致密砂岩气藏储层盐水包裹体的盐度存在差异(图 3), 结合地质条件分析认为, 迪那 2 气藏受晚期强烈构造挤压环境的影响断裂和裂缝较发育, 沟通了下伏膏泥岩层(张振红等, 2004), 造成储层流体盐度的增加, 在成岩作用过程中被捕获而记录了包裹体的高盐度特征. 而依南 2 气藏储层包裹体的低盐

度则说明储层没有与膏盐层相连通, 结合地质条件分析, 这是由于依南 2 气藏处于相对稳定的构造位置, 断裂和裂缝都不发育, 有利于致密深盆气藏的形成和保存.

3.2 库车坳陷储层孔隙度演化史

为准确获得孔隙度与埋深关系预测模型, 根据研究区多种粒度砂岩共存的实际情况, 采用了厚度加权平均的方法. 依南 2 井阿合组致密砂岩储层以中砂岩的厚度最大, 其次是中-细砂岩, 两者占到 80% 以上. 利用厚度加权平均得到孔隙度与埋深关系预测模型为:

$$\Phi_0 = 0.14194e^{-0.0003H} + 0.21067e^{-0.0002H}, \quad (4)$$

其中, H 为埋深, m; Φ_0 为预测模型.

依南 2 井发育扇三角洲前缘砂体, 埋深超过 6 000 m, 最大古构造应力小于 30 MPa(张仲培等, 2006), 薄片镜下观察发现溶蚀作用、裂缝均不发育, 确定溶蚀增孔量为 2%, 裂缝增孔量为 0.5%, 同时发现颗粒压溶现象明显, 说明构造挤压对孔隙度影响较大, 胶结物含量中等, 确定构造减孔量为 3%~5%, 胶结物含量为 2.5%(表 4). 综合研究认为, 依南 2 气藏阿合组致密砂岩储层埋藏方式属于长期浅

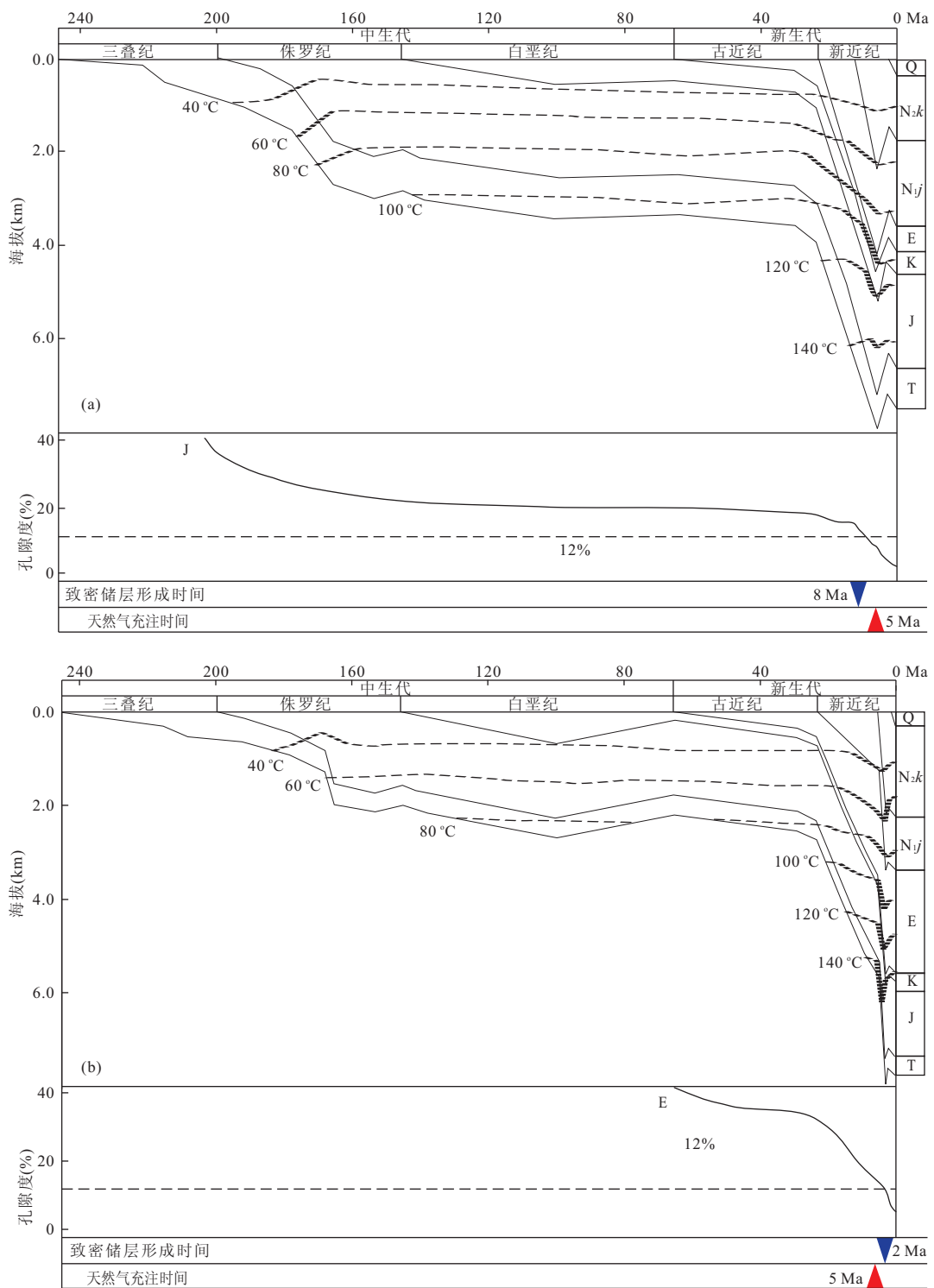


图 4 库车坳陷致密砂岩气藏成因类型划分

Fig. 4 Classification of genetic types of tight sandstone gas reservoirs in the Kuqa depression

a. 依南 2 气藏; b. 迪那 2 气藏

埋—短期深埋型,其孔隙演化也与此埋藏方式相关,自 200 Ma 以来,孔隙度主要受压实作用的影响,下降比较缓慢,23 Ma 时储层受区域构造环境影响,开始快速沉降,受压实作用和构造挤压作用影响,孔隙

度随之快速下降,在 12~8 Ma 时孔隙度下降到 12% 以下,致密砂岩储层形成,孔隙度演化到现今的 4%~8% 左右,与测井解释孔隙度 5.2% 能够较好的吻合,说明致密砂岩储层孔隙度演化结果是可

表 4 库车坳陷致密砂岩储层孔隙度演化结果

Table 4 Result of porosity evolution of tight sandstone reservoirs in the Kuqa depression

井号	层位	Φ_0	最大埋深(m)	成岩作用				$\Phi_{\text{现今}}$	t_x (Ma)
				$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	$\Delta\Phi_3$	$\Delta\Phi_4$		
依南 2	J _{1a}	$\Phi_0 = 0.14194e^{-0.0003H} + 0.21067e^{-0.0002H}$	4 995	2%	0.5%	3%~5%	2.5%	5.2%	12~8
迪那 22	E _{2-3s}	$\Phi_0 = 0.33671e^{-0.0003H} + 0.3778e^{-0.0002H}$	4 926	2%	<1%	0~1%	3%	5.3%	2~0

注： Φ_0 ，孔隙度预测模型； H ，埋深(m)； $\Delta\Phi_1$ ，溶蚀增孔量； $\Delta\Phi_2$ ，裂缝增孔量； $\Delta\Phi_3$ ，构造减孔量； $\Delta\Phi_4$ ，胶结减孔量； $\Phi_{\text{现今}}$ ，现今实测孔隙度； t_x ，致密储层形成时间(Ma)。

靠的。

迪那 22 井古近系苏维依组致密砂岩储层以细砂岩的厚度最大，其次是中—细砂岩，两者占到 75% 以上，利用厚度加权平均得到孔隙度与埋深关系预测模型为：

$$\Phi_0 = 0.33671e^{-0.0003H} + 0.3778e^{-0.0002H}, \quad (5)$$

其中， H 为埋深，m； Φ_0 为预测模型。

迪那 22 井发育扇三角洲前缘砂体(谭秀成等, 2007)，埋深接近 6 000 m，最大古构造应力 60 MPa 左右(张仲培等, 2006)，薄片镜下观察发现溶蚀作用不发育，确定溶蚀增孔量为 2%，裂缝较发育，裂缝增孔量为 1%，储层颗粒以点—线接触为主，说明构造挤压对孔隙度影响较小，确定构造减孔量为 0%~1%，胶结物含量为 3%(表 4)。综合研究认为，迪那 2 气藏苏维依组致密砂岩储层经历了长期浅埋—短期深埋，自 65 Ma 以来，孔隙度主要受到压实作用的影响，下降缓慢；23 Ma 时储层受区域构造环境影响，开始快速沉降，受到强烈的压实作用和构造挤压作用，孔隙度随之快速下降；在 2~0 Ma 时孔隙度下降到 12% 以下，形成致密砂岩储层，孔隙度演化到现今的 4%~7% 左右，与测井解释孔隙度 5.3% 能够较好的吻合，证实致密砂岩储层孔隙度演化结果是可靠的。

3.3 库车坳陷致密砂岩成因类型

在天然气充注史和致密砂岩储层孔隙度演化史研究的基础上，利用判别关系式 $T_x = t_x/t_y$ ，划分库车坳陷致密砂岩气藏的成因类型。

依南 2 侏罗系气藏在康村期(12~8 Ma)时形成致密储层($\Phi < 12\%$)，天然气充注时间为 5~0 Ma， $T_x > 1$ ，因此，依南 2 气藏天然气充注发生在储层致密以后，天然气在毛管力作用下进入侏罗系致密储层中形成大天然气藏，成因类型属于“致密深盆气藏”(图 4a)。

迪那 2 古近系气藏天然气充注时间为 5~0 Ma，致密砂岩储层在西域期(2~0 Ma)形成， $T_x < 1$ ，因此，迪那 2 气藏天然气在致密砂岩储层形

成之前充注，天然气在浮力作用下进入古近系致密砂岩储层中形成天然气藏，之后随着气藏埋深不断加大，形成致密砂岩气藏($\Phi < 12\%$)，成因类型属于“致密常规气藏”(图 4b)。

4 结论

取得如下结论：(1)库车坳陷存在两种成因机理的致密砂岩气藏，可以通过比较天然气充注时间和致密砂岩储层形成时间先后关系的方法来判别；(2)厘定了库车坳陷致密砂岩气藏油气充注史，依南 2 气藏和迪那 2 气藏经历两期油气充注，第一期为 23~12 Ma 的油气充注，第二期为 5~0 Ma 的天然气充注；(3)恢复了库车坳陷致密砂岩储层孔隙度演化史，依南 2 气藏侏罗系阿合组(J_{1a})致密砂岩储层形成于 12~8 Ma，现今岩心孔隙度为 5.2%，迪那 2 气藏古近系苏维依组致密砂岩储层形成于 2~0 Ma，现今岩心孔隙度为 5.3%；(4)划分了库车坳陷致密砂岩气藏的成因类型，依南 2 气藏天然气充注发生在致密砂岩储层形成之后，毛管力为主要成藏动力，成因类型为“致密深盆气藏”，迪那 2 气藏天然气充注发生在致密储层形成之前，浮力为主要成藏动力，成因类型为“致密常规气藏”。

致谢：诚挚感谢塔里木油田公司提供样品，感谢中国石油勘探开发研究院实验中心协助完成实验。

References

- Cant, D. J., 1983. Spirit River Formation: A Stratigraphic-Diagenetic Gas Trap in the Deep Basin of Alberta. *AAPG Bulletin*, 67 (4): 577 - 587. doi: 10.1306/03B5B65F-16D1-11D7-8645000102C1865D
- Gies, R. M., 1984. Case History for a Major Alberta Deep Basin Gas Trap, the Cadomin Formation. In: Masters, J. A., ed., Case Study of a Deep Basin Gas Field. *AAPG Memoir*, 38, 115-140.
- Guan, D. S., Niu J. Y., Guo, L. N., 1995. Unconventional Petroleum Geology in China. Petroleum Industry Press,

- Beijing, 60—85 (in Chinese).
- Jiang, F. J., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., et al., 2007. Physical Simulation Experiment of Gas Charging in Tight Sandstone. *Geological Review*, 53(6): 844—848 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Pang, X. Q., Zhang, J. C., et al., 2000. Summarization of Deep Basin Gas Studies. *Advance in Earth Sciences*, 15(3): 289—292 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Lin, S. G., Pang, X. Q., et al., 2006. The Comparison of Two Types of Tight Sand Gas Reservoir. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(3): 210—214 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhang, J. C., Wang, Z. X., 2003. Some Remarks on Deep Basin Gas Accumulation. *Geological Review*, 49(4): 401—407 (in Chinese with English abstract).
- Law, B. E., 2002. Basin-Centered Gas Systems. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1891—1919. doi: 10.1306/61EEDDB4—173E—11D7—8645000102C1865D
- Ma, X. H., Wang, T., Pang, X. Q., et al., 2002. Pressure Features and Trapping Mechanism of Deep Basin Gas Pool. *Acta Petrolei Sinica*, 23(5): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Masters, J. A., 1979. Deep Basin Gas Trap, Western Canada. *AAPG Bulletin*, 63(2): 152—181. doi: 10.1306/C1EA55CB—16C9—11D7—8645000102C1865D
- McPeck, L. A., 1981. Eastern Green River Basin: A Developing Giant Gas Supply from Deep, Overpressured Upper Cretaceous Sandstones. *AAPG Bulletin*, 65: 1078—098. doi: 10.1306/03B5945E—16D1—11D7—8645000102C1865D
- Pang, X. Q., Jin, Z. J., Jiang, Z. X., et al., 2003. Critical Condition for Gas Accumulation in the Deep Basin Trap and Physical Modeling. *Natural Gas Geoscience*, 14(3): 207—214 (in Chinese with English abstract).
- Tan, X. C., Li, L., Cao, J., et al., 2007. Mechanism and Models for the Lower Tertiary Detrital Reservoir Evolution, Eastern Kuqa Depression of the Tarim Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 99—104 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. N., Zhang, H. L., Zhu, G. H., 2005. Formation Mechanism and Geological Implication of Tight Sandstones: A Case of Well YN-2 in Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 10(1): 31—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. C., Jin, Z. J., Pang, X. Q., 2000. Formation Conditions and Internal Features of Deep Basin Gas Accumulations. *Experimental Petroleum Geology*, 22(3): 210—214 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. C., Liu, L. F., Zhang, J., et al., 2004. Experiments on the Abnormal Pressure of Source-Contacting Gas (Basin-Centered Gas) Accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 31(1): 119—122 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. H., Yao, G. X., Shou, J. F., et al., 2011. An Integration Porosity Forecast Model of Deposition, Diagenesis and Structure. *Petroleum Exploration and Development*, 38(2): 145—151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Lv, X. X., Li, J. J., et al., 2004. Experimental Evidence of Oil and Gas Migration and Accumulation in Dina 2 Structure of Kuqa Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 500—504 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. P., Wang, Q. C., Wang, Y., et al., 2006. Brittle Structure Sequence in the Kuqa Depression and Its Implications to the Tectonic Paleostress. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 306—316 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., Lu, S. F., 2003. Two Periods of Reservoir Forming and Their Significance for Hydrocarbon Distribution in Kuqa Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 24(5): 16—25 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., Wang, Z. M., Zhang, S. C., et al., 2005. Accumulation and Features of Natural Gas in the Kuqa Foreland Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 415—422 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 关德师,牛嘉玉,郭丽娜,1995. 中国非常规油气地质. 北京: 石油工业出版社, 60—85.
- 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等, 2007. 致密砂岩气藏成藏过程的物理模拟实验. *地质论评*, 53(6): 844—848.
- 姜振学, 林世国, 庞雄奇, 等, 2006. 两种类型致密砂岩气藏对比. *石油实验地质*, 28(3): 210—214.
- 姜振学, 庞雄奇, 张金川, 等, 2000. 深盆气研究现状综述. *地球科学进展*, 15(3): 289—292.
- 金之钧, 张金川, 王志欣, 2003. 深盆气成藏关键地质问题. *地质论评*, 49(4): 401—407.
- 马新华, 王涛, 庞雄奇, 等, 2002. 深盆气藏的压力特征及成因机理. *石油学报*, 23(5): 24—27.
- 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等, 2003. 深盆气成藏门限及其物理模拟实验. *天然气地球科学*, 14(3): 207—214.
- 谭秀成, 李凌, 曹剑, 等, 2007. 库车坳陷东部下第三系碎屑岩储层分异成因模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 99—104.

- 杨晓宁,张惠良,朱国华,2005.致密砂岩的形成机制及其地质意义——以塔里木盆地英南 2 井为例.海相油气地质,10(1):31—36.
- 张金川,金之钧,庞雄奇,2000.深盆地成藏条件及其内部特征.石油实验地质,22(3):210—214.
- 张金川,刘丽芳,张杰,等,2004.根缘气(深盆地)成藏异常压力属性实验分析.石油勘探与开发,31(1):119—122.
- 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等,2011.沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型.石油勘探与开发,38(2):145—151.
- 张振红,吕修祥,李建交,等,2004.库车坳陷迪那 2 构造油气运聚模拟实验.地球科学——中国地质大学学报,29(4):500—504.
- 张仲培,王清晨,王毅,等,2006.库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示.地球科学——中国地质大学学报,31(3):309—316.
- 赵孟军,卢双舫,2003.库车坳陷两期成藏及其对油气分布的影响.石油学报,24(5):16—25.
- 赵孟军,王招明,张水昌,等,2005.库车前陆盆地天然气成藏过程及聚集特征.地质学报,79(3):415—422.