

# 库车坳陷依南地区阿合组 致密砂岩气储层特征与有利区带预测

康海亮<sup>1</sup>, 林畅松<sup>2</sup>, 李洪辉<sup>3</sup>, 王开忠<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100083;  
3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 北京科泰锐哲沃斯科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 库车坳陷依南地区下侏罗统阿合组具有形成致密砂岩气的有利地质条件, 并已获勘探证实。通过对岩心、录井、测井资料、普通薄片及铸体薄片的观察鉴定以及扫描电镜、黏土矿物 X 射线衍射分析, 认为研究区致密砂岩储层的成因类型主要为辫状分流河道和水下分流河道; 岩石类型以岩屑砂岩为主, 岩石成分成熟度低, 结构成熟度中等, 裂缝发育, 孔隙度集中分布在 4%~12%, 平均为 7.53%, 渗透率集中在  $(0.1\sim 100)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 平均为  $12.33\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 其中小于  $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  的样品占到 75%, 属于典型的致密砂岩储层。储层形成与沉积背景、成岩作用和构造作用等因素相关。综合有利相带、特征曲线重构反演砂岩厚度、裂缝发育程度, 结合构造背景对有利区进行了综合预测, 指出有利区主要发育在依南 2、依南 5 和吐孜 2 井一线南侧, 其中依南 2 井南侧和西南侧潜力最大, 是下一步勘探的重点。

**关键词:** 致密砂岩储层; 控制因素; 有利区预测; 阿合组; 依南地区; 库车坳陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

## Reservoir characteristics and favorable zone prediction of tight sandstone gas of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

Kang Hailiang<sup>1</sup>, Lin Changsong<sup>2</sup>, Li Honghui<sup>3</sup>, Wang Kaizhong<sup>4</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 4. Beijing Co-Tech Reservoirs Technology Co Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The Lower Jurassic Ahe Formation in Yinan area of the Kuqa Depression has favorable geologic conditions for the formation of tight sandstone gas reservoirs. Core, logging, drilling data, thin section observation, cast thin section identification, scanning electron microscope and the X-ray diffraction analysis of clay minerals showed that the tight sandstone reservoirs in the study area mainly originated from braided distributary channels and underwater distributary channels. Lithic sandstones are dominant with low compositional maturity and medium textural maturity. Fractures were well developed. The porosity is 4%–12%, averages 7.53%. The permeability is  $(0.1\sim 100)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ , average  $12.33\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ . The samples with a permeability less than  $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$  account for 75%, consistent with typical tight sandstone reservoirs. Reservoir formation is related to sedimentation, diagenesis and tectonism. Favorable facies belts and characteristic curves were applied to reconstruct sandstone thickness and fracture distribution, and to predict favorable exploration targets combined with tectonic background. The study showed that the area to the south of wells Yinan2, Yinan5 and Tuzi2 is a potential play for tight sandstone gas exploration, especially the area to the south and southwest of well Yinan2.

**Key words:** tight sandstone reservoir; controlling factor; prediction of favorable zone; Ahe Formation; Yinan area; Kuqa Depression; Tarim Basin

致密砂岩气是指赋存于致密砂岩储层(空气渗透率小于  $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ )中的天然气, 在非常规油气勘探中举足轻重<sup>[1]</sup>。我国四川、鄂尔多斯、塔里

木等盆地致密砂岩气成藏条件优越, 勘探开发效果显著<sup>[2-6]</sup>。此外, 渤海湾、松辽、柴达木及准噶尔等盆地也展现出良好的勘探前景<sup>[7-10]</sup>。据统计近年

来在我国天然气探明总储量和总产量中,致密砂岩气所占比例快速上升,截至2011年底,已分别占到总量的近2/5和1/4<sup>[11]</sup>。研究表明我国非常规天然气中致密砂岩气储量最丰富,开采技术最成熟,所形成的规模效应最大<sup>[6]</sup>,勘探前景最为广阔,也最现实<sup>[11]</sup>。国内众多学者已对致密砂岩气类型、成藏条件、成藏模式,储层特征及控制因素和“甜点”储层预测等进行过研究<sup>[9-13]</sup>。

早在20世纪末,就已在塔里木盆地库车坳陷依南地区下侏罗统发现了致密砂岩气,1998年依南2井在阿合组致密砂岩中获得高产气流,展现出了较大的勘探潜力。受制于资料及地质认识,此后勘探一直未获较大突破。直到2011年底,迪西1井在阿合组钻遇高产油气流,掀起了该区致密砂岩气新一轮的勘探热潮。

目前对依南地区致密砂岩气成藏条件和模式基本取得了一致的认识<sup>[14-15]</sup>,现今制约该区勘探成效的核心问题是优质储层预测困难,“甜点”储层难以确定,而优质储层恰恰是影响致密砂岩气分布和产能的核心因素。造成上述局面的原因一方面是由于研究区只有少量的二维地震测线,且资料品质相对较差,钻井资料有限;另一方面,对研究区的地质认识还不全面,特别是相似地质条件下,钻井结果差异大,其原因尚不清晰。

加强研究区储层特征和控制因素研究,有助于提高研究区储层预测的准确性,尝试在现有资料条件下通过多因素分析预测优质储层发育区,能够有效指导下一步油气勘探。

## 1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,为夹持于南天山褶皱带和塔北隆起之间呈北东向展布的狭长坳

陷,坳陷东西延伸约550 km,南北宽30~80 km,面积约30 000 km<sup>2</sup><sup>[15-16]</sup>。库车坳陷为发育在天山山前的中、新生代再生前陆盆地,主要沉积了一套巨厚的中生界陆相河流、三角洲和湖泊(沼)地层。构造上自山前向盆地方向依次划分为北部单斜带、克—依构造带和吐格尔明构造带、拜城凹陷、秋里塔格构造带、阳霞凹陷、南部平缓背斜带和轮南低凸起(图1)。研究区位于库车坳陷东部,北靠依奇克里克背斜,南邻东秋里塔格构造带,夹持于依南断裂和吐—依断裂之间,包括依南地区和吐孜地区西部(图1)。

钻井及周边露头揭示研究区地层自上而下发育新近系、古近系、中生界白垩系、侏罗系及三叠系。下侏罗统阿合组地层整体上西厚东薄,粒度西粗东细,为一套近源、快速沉降形成的砂砾质辫状河三角洲沉积,由多个辫状分流河道、水下分流河道纵向叠加而成,根据钻井岩性、电性自下而上可划分为:下砂砾岩段、泥岩段、砂砾岩段和砂砾岩夹泥岩段等4个岩性段。岩性以灰色、浅灰、灰白色厚—巨厚层状砂砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、中细砂岩,夹少量深灰色泥岩为特征。

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

根据岩性录井统计,研究区储层岩性粒度粗,砂砾岩、含砾中粗砂岩、粗砂岩和中砂岩累计占80%以上。根据岩石薄片分析,岩石类型主要为岩屑砂岩,少量长石岩屑质石英砂岩,个别为长石岩屑砂岩(图2)。碎屑组分中石英含量为26.5%~52.4%;长石含量为6%~35.34%,主要为钾长石;岩屑含量为32.09%~53.25%,主要为变质岩岩屑,其次为岩浆岩岩屑,少量沉积岩岩屑。岩石分选

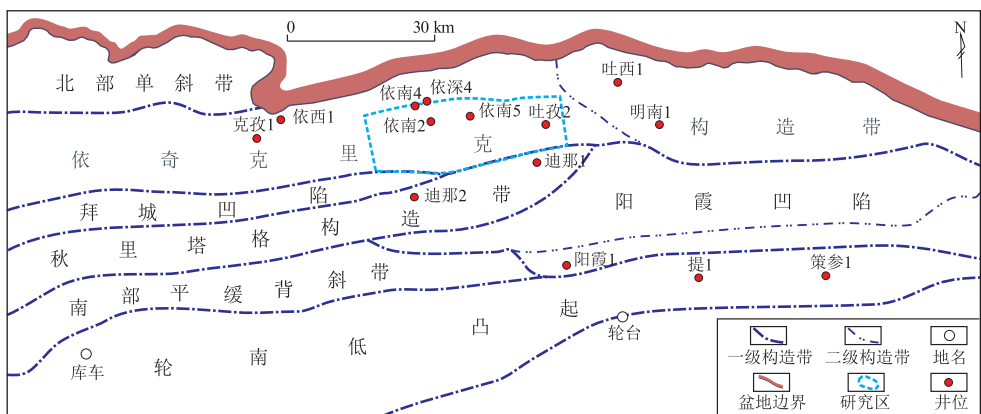


图1 库车坳陷东部构造单元划分及研究区位置

Fig.1 Tectonic units of the eastern Kuqa Depression and location of the study area

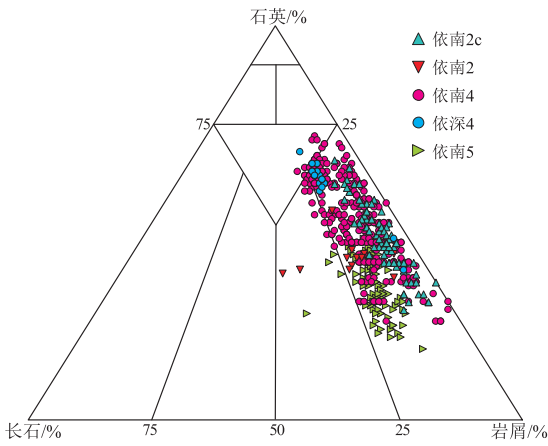


图 2 库车坳陷依南地区阿合组储层矿物成分三角图

Fig.2 Triangulardiagram of mineral composition of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

好—中等,颗粒磨圆多为次棱—次圆。岩石结构成熟度中等,颗粒间以点—线、凹凸—线接触为主,胶结类型主要为孔隙式、其次为加大式、薄膜—孔隙式和压嵌—孔隙式。填隙物平均含量小于 10%,胶结物主要为泥质杂基、硅质(石英次生加大,局部呈镶嵌状分布)、方解石(呈斑块状)、铁方解石、白云石、铁白云石、高岭石,含量低。根据 X-射线衍射分析,黏土矿物中以伊利石为主,其次为绿泥石、伊蒙间层,少量高岭石。

根据铸体薄片鉴定数据分析,储层储集空间主要由孔洞和裂缝组成。孔洞包括微孔隙、粒内溶孔和粒间溶孔(图 3),三者分别占面孔率总值的 64%、24%和 10%左右,粒内溶孔多为钾长石溶孔,少量喷出岩岩屑内溶孔。构造缝发育但分布不均匀,有时形成网状孔隙,镜下可见个别组裂缝较发育(图 3c),延伸远,缝宽一般小于 0.01 mm,个别缝宽达 0.05 mm,构造溶蚀缝缝宽较大,部分可达 0.03~0.20 mm。此外还发育溶蚀缝、解理缝和少量泥质收缩缝。

压汞资料统计表明储层大部分为中小孔,平均孔喉半径多为 0.6~3 μm,歪度绝大部分介于 1.8~3 之间,结构系数主要介于 1~4,分选系数则主要

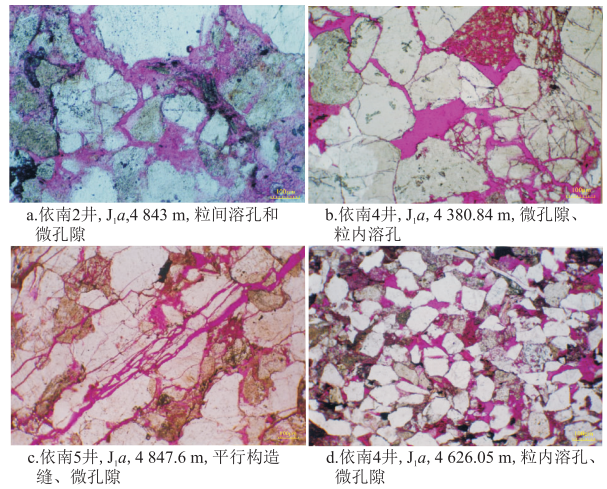


图 3 库车坳陷依南地区阿合组储集空间类型

Fig.3 Reservoir pore types of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

为 0.3~0.5。根据压汞曲线形态,孔隙结构主要分为 2 类,Ⅰ类中孔细喉型,靠近依南断裂分布,物性较好,孔喉分选较好,较粗歪度;Ⅱ类小孔微喉型,孔喉分选差,细歪度,在研究区普遍发育,物性较差。

### 2.2 物性特征

钻井岩心分析物性统计表明:阿合组储层孔隙度范围为 0.3%~15.63%,集中在 4%~12%,平均为 7.53%,其中小于 10%的样品占到总样品的 80%;渗透率范围为  $(0.007 \sim 3\ 290) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,集中在  $(0.1 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $12.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,其中小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占到总样品的 75%(图 4)。根据致密砂岩的孔隙度和渗透率划分标准<sup>[15-16]</sup>,储层为致密砂岩储层。

现有钻井资料揭示阿合组储层自上而下物性总体变差,其中 J<sub>1</sub>a<sup>1</sup>的第 2 砂层组、J<sub>1</sub>a<sup>2</sup>及 J<sub>1</sub>a<sup>4</sup>的 1,2 砂层组物性较好。平面上物性自北向南变差,依南 4 井平均孔隙度为 7.77%,平均渗透率为  $11.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;依深 4 井平均孔隙度为 9.56%,平均渗透率为  $7.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;依南 2 井平均孔隙度为 3.27%,平均渗透率为  $17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。自东向西物性变好,吐孜洛克构造物性较差,吐孜 2 井岩心

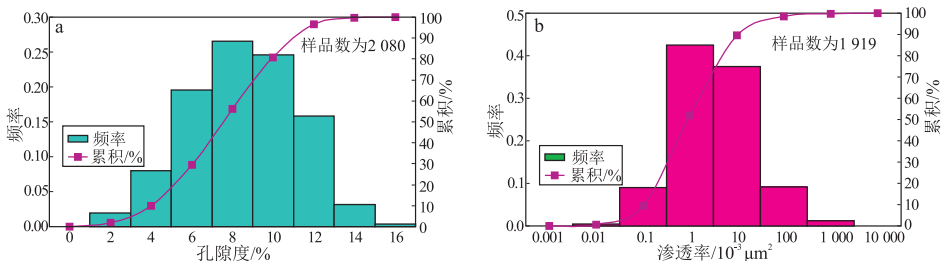
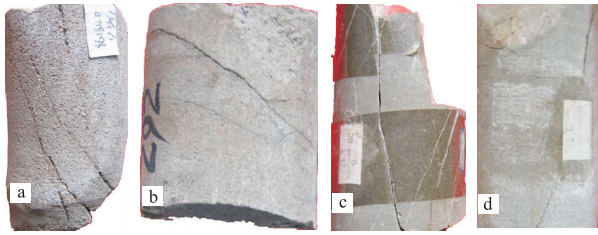


图 4 库车坳陷依南地区阿合组孔渗直方图

Fig.4 Histogram of porosity and permeability of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression



a. 依深4井, 3 572.8 m, 高角度缝; b. 依南5井, 4 845.65 m, 低角度缝;  
c. 依南2井, 4 965.4 m, 垂直缝; d. 依南4井, 3 662.05 m, 高角度缝

图5 库车坳陷依南地区岩心裂缝发育特征

Fig.5 Characteristics of fractures in cores in Yinan area, Kuqa Depression

分析平均孔隙度为 6.05%, 渗透率为  $2.745 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 向西到依南 5 井、依南 2 井物性变好。

### 2.3 裂缝发育特征

岩心观察及铸体薄片分析表明, 研究区储层内裂缝普遍发育, 对储集性能有较大的改善。依深 4 井以高角度斜交缝、直立缝为主, 局部有水平缝, 早期缝见泥质或石英充填, 局部有溶蚀扩大(图 5a); 依南 5 井以水平缝为主, 少量的低角度斜交缝, 局部呈网格状, 缝面见自生矿物(图 5b); 依南 2 井以水平缝、斜交缝为主, 见少量的垂直缝(图 5c); 依南 4 井发育有垂直缝、斜交缝、水平缝, 斜交缝以高角度缝为主, 局部见 2 期, 沿缝面有溶蚀现象(图 5d)。

根据铸体薄片分析, 裂缝主要为构造缝、微构造缝(图 3c), 其次为收缩缝, 少量成岩缝。如依南 4 井见构造微缝和收缩缝、溶蚀缝, 有时呈网状。依南 2C 井见构造微缝, 少量收缩缝、压溶缝、长石解理缝, 局部呈网状, 见溶蚀扩大, 平行层面或垂直层面分布。依南 2 井主要为构造缝, 可见粒内裂缝和收缩裂缝, 部分缝内有少量填充物方解石和泥质。依南 5 井部分井段构造缝发育, 成组分布, 平均缝宽 0.01~0.015 mm。

## 3 储层控制因素

前人研究表明致密砂岩气储层的控制因素主要包括沉积作用、成岩作用和构造作用<sup>[18-20]</sup>。具体而言, 沉积作用是基础。从宏观上看, 沉积作用所形成的不同相带、不同成因砂体类型, 其储层特征存在差异; 从微观上讲, 沉积过程影响了储层的岩石类型, 造成结构组分和成熟度的差异, 也影响了后期各类成岩作用的强弱及成岩相的分布<sup>[18-20]</sup>。成岩作用是致密砂岩储层形成的关键, 其中压实作用影响最大, 一般造成原始孔隙度降低约 20%; 胶结作用造成孔隙度降低的同时还影响了孔隙间的连通性; 溶蚀作用则对改善致密砂岩储集物性有较大帮

助<sup>[8,18-21]</sup>, 根据铸体薄片分析, 研究区溶蚀作用形成的孔隙约占总孔隙的 30%。构造作用形成的裂缝对致密砂岩储层起到“增孔提渗”的作用, 但构造侧向挤压作用又增加了储层的致密程度<sup>[22]</sup>。

### 3.1 沉积作用是基础

沉积作用对储层发育的影响主要表现在对沉积相带、碎屑组分、粒度和泥质含量等要素的影响。沉积时的环境和水动力条件决定了沉积颗粒的分选、磨圆及泥质含量, 决定了储层初始物性的好坏。不同沉积微相组成的储集体类型, 其特征存在差异。研究区发育一套近源砂砾质辫状河三角洲沉积, 其中平原辫状分流河道, 岩性较粗, 主要为砂砾岩、含砾粗砂岩及中、粗砂岩, 单层厚度 5~15 m, 平均孔隙度 7.32%, 平均渗透率  $17.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 其次为前缘水下分流河道, 岩性主要为砾状砂岩、含砾粗砂岩、中砂岩及细砂岩, 单层厚度 3~12 m, 平均孔隙度 7.8%, 平均渗透率  $11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 河口坝岩性最细, 以细砂岩、中砂岩为主, 单层厚度薄, 一般为 2~4 m, 平均孔隙度 6.44%, 平均渗透率  $1.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 物性较差。初始沉积物的碎屑组分重石英及石英质岩屑等刚性颗粒组分含量高的话, 储层物性也相对较好。此外, 储集性能随着沉积物粒度的增大而变好, 随着泥质含量的增高而变差(图 6)。

### 3.2 成岩作用是关键

成岩作用是致密砂岩储层形成的主因, 可分为建设性成岩作用和破坏性成岩作用, 前者主要为溶蚀作用, 后者多为压实作用和胶结作用。研究区成岩作用表现为“一强两弱”的特征, 即强压实、弱胶结和弱溶蚀。

#### 3.2.1 破坏性成岩作用

(1) 埋藏压实作用。它对储层物性影响最大, 是孔隙减少的主要原因, 总体随着深度增加, 储层物性逐渐变差。研究区埋深大, 且砂岩类型多为岩屑砂岩, 泥质杂基含量较高, 抗压能力弱, 导致压实

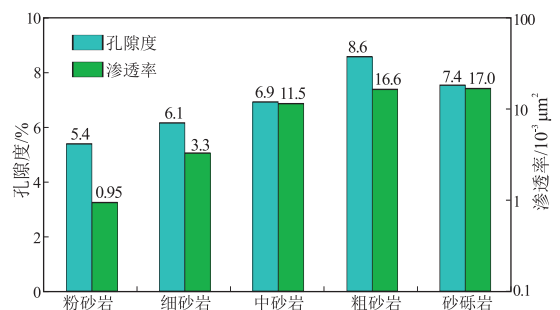


图6 库车坳陷依南地区阿合组粒径与物性关系

Fig.6 Physical properties of different grain sizes of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

表 1 库车坳陷依南地区阿合组岩心物性统计对比分析

Table 1 Physical properties of cores of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

井名	岩心分析孔隙度/%						岩心分析渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$					
	样品(裂缝发育)			样品(无裂缝)			样品(裂缝发育)			样品(无裂缝)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
依南 4	1.17	14.18	9.03	0.97	13.54	7.27	0.022	3 290	98.7	0.007	58	1.943
依深 4	3.15	11.98	8.57	1.52	15.63	8.12	0.1	994	82.4	0.008	97	1.838
依南 2	2.53	14.02	5.78	0.3	16.43	5.67	0.337	380	37.9	0.012	43	1.07
依南 2c	1.46	12.23	7.69	0.96	11.22	5.94	0.239	2 520	161.28	0.007	254	2.64
依南 5	2.27	9.35	5.9	0.74	11.21	5.83	1	2 670	265.2	0.019	481	5.46
吐孜 2	1.11	9.3	6.93	0.72	9.46	5.42	11.8	43.5	21.44	0.039	6.43	0.933
平均		8.15			6.86			130.25			2.36	

作用异常强烈,造成原始孔隙度降低 20%,其镜下特征主要表现为大量的云母被挤压变形,黏土矿物被挤压成假杂基,颗粒接触密实,多呈线—凹凸接触,部分刚性颗粒见压溶现象。

(2)构造挤压压实作用。对储层的影响表现为“加密减孔”,即加强储层致密程度,造成孔隙度减少,孔隙度减少量可以占到整个压实减少量的 2.5%~23.6%<sup>[22]</sup>。铸体薄片可见部分构造裂缝发育方向与岩石颗粒长轴方向保持一致<sup>[23]</sup>,这是研究区构造挤压应力导致压实作用增强的直接证据。

(3)胶结作用。对储层储集性能的影响表现为“添堵减孔”,即黏土杂基及方解石、铁方解石、白云石等充填孔隙,堵塞喉道,破坏了孔隙间的连通性。研究区胶结物平均含量低,大部分含量小于 8%<sup>[23]</sup>,胶结作用较弱,对孔隙度的影响较小。

### 3.2.2 建设性成岩作用

溶蚀作用通常会造成孔隙度增加。在酸性成岩环境下碎屑颗粒、杂基、胶结物等会发生不同程度的溶解,形成粒内和粒间溶孔,如果溶解的物质被带走,孔隙度会增加。构造形成的裂缝被溶蚀,也会造成孔隙度增加。研究区溶蚀作用对储层物性有一定的改善作用,但较常规储层改善作用小。这是由于储层孔渗极低,孔隙内流体流动性差,部分被溶解的物质来不及被带走就又以自生黏土矿物的形式沉淀下来占据了原来的空间。但在断裂带附近,如依南 4、依深 4 井,断层水流动性强,经有机酸溶解物质会被随断层水携带走,导致储层孔隙度和渗透率增大。这也是依南 4、依深 4 井的粒间溶孔和粒内溶孔要比依南 2、依南 5 井发育的原因。

### 3.3 构造作用具有两面性

构造作用大多是对致密储层进行二次改造,这种改造对储层物性有利有弊,总体利大于弊。具体到研究区而言,一方面构造挤压作用导致储层进一步密实,造成孔隙度下降<sup>[22,24]</sup>,对储层物性产生不

利影响。另一方面构造作用会引起致密储层产生破裂,形成构造裂缝,部分构造裂缝在有机酸作用下进一步溶蚀扩大,形成构造溶蚀缝,成为良好的储集空间,有些网状和延伸较远的裂缝会沟通孤立状分布的残存孔隙,使储层的渗透性大大提高。根据现有岩心资料和铸体薄片分析资料统计表明,同样条件下,有裂缝发育的储层平均孔渗明显高于裂缝不发育的储层(表 1)。裂缝对致密砂岩储集物性有较大的改善影响,构造作用形成的裂缝发育区往往是“甜点”储层发育的有利位置。

## 4 有利区带预测

影响致密砂岩气分布和产能的核心因素是有利储层亦或“甜点”储层的分布。对“甜点”储层的预测前人已做过研究<sup>[25]</sup>,这些研究主要从控制储层的某一因素进行分析,而“甜点”储层的形成受多因素控制,具有相控<sup>[26-27]</sup>(包括沉积相和成岩相)特征且受裂缝影响明显,并且不同类型“甜点”储层主控因素不同<sup>[28]</sup>。因此需要综合考虑控制储层的各个因素<sup>[29]</sup>,包括相带展布、裂缝发育情况、储层厚度及构造背景进行预测。

从沉积相带上看(图 7),阿合组主要发育一套低水位时期的辫状河三角洲平原、前缘沉积,以平原辫状分流河道为主,其次为前缘的水下分流河道及少量河口坝,岩性较粗,主要为含砾粗砂岩、砂砾

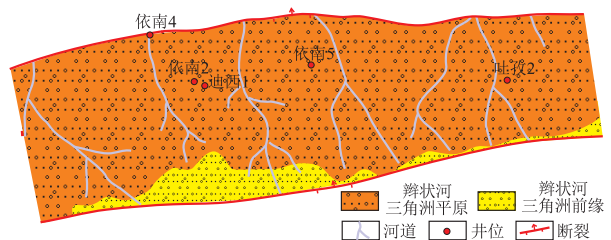


图 7 库车坳陷依南地区阿合组沉积相分布

Fig.7 Distributions of sedimentary facies of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

岩及中砂岩,辫状分流河道和 水下分流河道发育的位置,储层最为有利。

裂缝对“甜点”储层的影响明显,准确预测裂缝发育区,对确定“甜点”储层至关重要。对裂缝的预测主要通过曲率法<sup>[30-31]</sup>或古构造应力场数值模拟法<sup>[32-33]</sup>。通过地层曲率计算,研究区地层曲率多在 0.01~0.21 之间,一般地层曲率大于 0.05,其裂缝发育程度相对较高。局部构造部位对构造裂缝发育程度的影响也比较明显。根据曲率和局部构造预测在断层附近及研究区西部裂缝发育程度高,且连通性比较好。这与利用古构造应力场进行数值模拟得出的结论相似<sup>[33]</sup>。依南 2 井以南及以西地区是“甜点”储层发育的有利区(图 8)。

对储层厚度预测主要是通过对二维地震测线进行特征曲线重构反演结合实钻井的储层厚度,这是由于研究区地层砂泥岩声波时差差异较小,基本重叠,利用声波时差计算得到的波阻抗很难区分砂泥岩。结果表明研究区储层发育稳定,总体厚度介于 220~250 m 之间。区内存在 2 个储层发育相对高值区,即过依南 2 井、依南 5 和吐孜 2 井连线南部及西部储层较其他地区发育(图 9)。

致密砂岩气发育在构造平缓的斜坡部位或盆地凹陷内部<sup>[6,11]</sup>,研究区整体为向南倾斜的大型断鼻,局部断裂发育,根据现有钻井勘探情况及油气

成藏特征<sup>[13-14]</sup>,从构造条件分析,依南 2 井—依南 5 井—一线南部地层发育完整,远离大断裂,仅发育少量小断距的断层,更有利于致密砂岩气的成藏和保存。

综合上述分析,研究区致密砂岩气有利区主要发育在依南 2 井、依南 5 和吐孜 2 井一线南侧(图 9),以依南 2 井南侧及西南侧最为发育,是下一步勘探的重点。

### 5 结论

(1)库车坳陷依南地区阿合组储层主要由辫状分流河道和 水下分流河道砂体组成。岩石类型主要为岩屑砂岩,少量长石岩屑质石英砂岩,岩石成分成熟度低,结构成熟度中等。储层中发育构造裂缝和溶蚀缝,孔隙结构主要有中孔细喉型和小孔微喉型 2 类。储层孔隙度平均为 7.53%,渗透率平均为  $12.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,其中小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的样品占到 75%,属于典型的致密砂岩储层。

(2)沉积作用、成岩作用和构造作用是储层形成的主控因素。沉积作用决定了储层的岩石类型、结构组分,成熟度等特征,造成不同相带成因砂体类型储层间的差异。成岩作用是关键,埋藏压实作用使原始孔隙度平均降低约 20%,胶结作用造成孔隙度降低的同时还影响了孔隙间的连通性,溶蚀作用在一定程度上改善了储集物性。构造作用形成的构造裂缝对致密砂岩储层起到“增孔提渗”的作用,而构造侧向挤压作用又加剧了储层的致密程度。

(3)有利储层的分布受沉积相带、储层厚度、裂缝发育程度等因素影响。辫状分流河道和 水下分流河道为最有利的相带,过依南 2 井、依南 5 和吐孜 2 井连线南部及西部储层最为发育,依南地区西部裂缝发育程度高且连通性较好,依南 2 井南部及西部地区是“甜点”储层发育的有利区,结合致

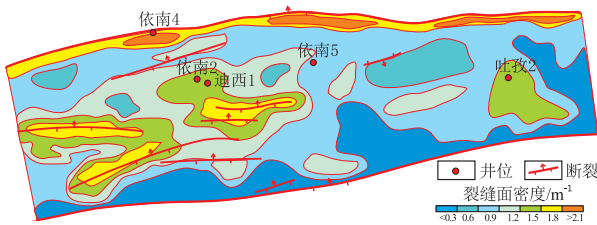


图 8 库车坳陷依南地区阿合组预测裂缝发育区  
Fig.8 Prediction of fractured zones of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

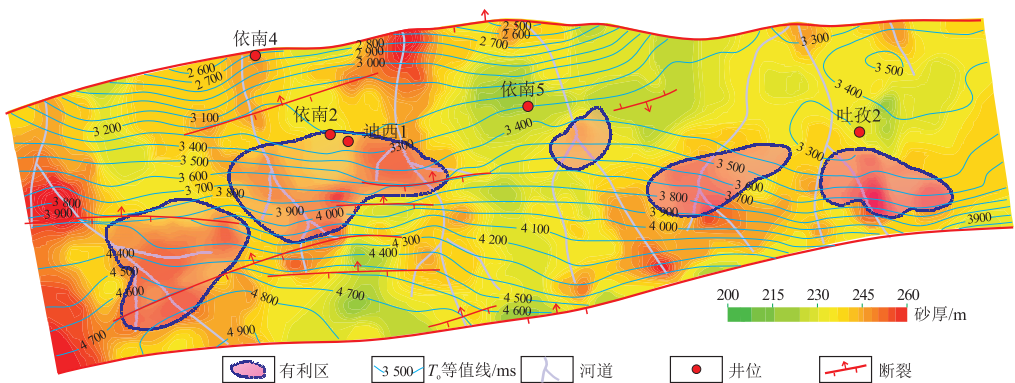


图 9 库车坳陷依南地区阿合组有利区综合预测  
Fig.9 Prediction of favorable areas of the Ahe Formation in Yinan area, Kuqa Depression

密砂岩气发育的有利构造背景,有利区主要发育在依南 2 井、依南 5 和吐孜 2 井一线南侧,依南 2 井南侧和西南侧附近地区潜力最大。

致谢:感谢中国石油勘探开发研究院塔里木分院提供的相关资料,感谢评审专家提出的宝贵意见。

#### 参考文献:

- [1] 童晓光,郭彬程,李建忠,等.中美致密砂岩气成藏分布异同点比较研究与意义[J].中国工程科学,2012,14(6):9-15.  
Tong Xiaoguang,Guo Bincheng,Li Jianzhong,et al.Comparison study on accumulation & distribution of tight sandstone gas between China and the United States and its significance[J].Engineering Science, 2012,14(6):9-15.
- [2] 林小兵,刘莉萍,田景春,等.川西坳陷合兴场—丰谷地区须家河组致密砂岩气藏精细勘探[J].石油与天然气地质,2013,34(1):77-84.  
Lin Xiaobing,Liu Liping,Tian Jingchun,et al.Fine exploration of tight sandstone gas reservoirs in the Xujiahe Formation,Hexingchang-Fenggu area,the western Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology, 2013,34(1):77-84.
- [3] 赵靖舟,付金华,姚泾利,等.鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J].石油学报,2012,33(S1):37-52.  
Zhao Jingzhou,Fu Jinhua,Yao Jingli,et al.Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(S1):37-52.
- [4] 汤华国,王刚,彭斌,等.库车坳陷天然气资源勘探前景[J].天然气地球科学,2003,14(6):459-462.  
Tang Huaguo,Wang Gang,Peng Shi,et al.Exploration prospects for natural gas in Kuqa Depression[J].Natural Gas Geoscience, 2003,14(6):459-462.
- [5] 琚岩,孙雄伟,刘立炜,等.库车坳陷迪北致密砂岩气藏特征[J].新疆石油地质,2014,35(3):264-267.  
Ju Yan,Sun Xiongwei,Liu Liwei,et al.Characteristics of Jurassic tight sandstone gas reservoir in Dibe area of Kuqa Depression,Tarim Basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2014,35(3):264-267.
- [6] 戴金星,倪云燕,吴小奇.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.
- [7] 郭继刚,董月霞,庞雄奇,等.南堡凹陷沙三段致密砂岩气成藏条件[J].石油与天然气地质,2015,36(1):23-34.  
Guo Jigang,Dong Yuexia,Pang Xiongqi,et al.Accumulation conditions of tight sand gas in the 3<sup>rd</sup> member of the Shahejie Formation in Nanpu Sag,Bohai Bay Basin[J].Oil & Gas Geology,2015,36(1):23-34.
- [8] 李易隆,贾爱林,吴朝东.松辽盆地长岭断陷致密砂岩成岩作用及其对储层发育的控制[J].石油实验地质,2014,36(6):698-705.  
Li Yilong,Jia Ailin,Wu Chaodong.Diagenesis of tight sandstones and its controls on reservoirs genesis,Changling Faulted Depression,Songliao Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2014,36(6):698-705.
- [9] 郭泽清,孙平,张春燕,等.柴达木盆地西部地区致密油气形成条件和勘探领域探讨[J].天然气地球科学,2014,25(9):1366-1377.  
Guo Zeqing,Sun Ping,Zhang Chunyan,et al.Formation conditions of tight oil & gas and its exploration fields in the Western Qaidam Basin[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(9):1366-1377.
- [10] 刘传虎.准噶尔盆地隐蔽油气藏类型及有利勘探区带[J].石油实验地质,2014,36(1):25-32.  
Liu Chuanhu.Subtle reservoir type and favorable exploration belts in Junggar Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2014,36(1):25-32.
- [11] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-615.  
Li Jianzhong,Guo Bincheng,Zheng Min,et al.Maintypes,geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J].Natural Gas Geoscience,2012,23(4):607-615.
- [12] 李光云,赖富强,何加成,等.吐哈盆地丘东洼陷下侏罗统致密砂岩储层特征及物性主控因素[J].天然气地球科学,2013,24(2):310-319.  
Li Guangyun,Lai Fuqiang,He Jiacheng,et al.Reservoir characteristic and controlling factors on physical properties of Lower Jurassic tight sandstone in the Qiudong Sub-sag,Turpan-Harmi Basin[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(2):310-319.
- [13] 吴勇,康毅力,季卫华,等.巴喀地区八道湾组致密砂岩储层“甜点”预测[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(6):48-56.  
Wu Yong,Kang Yili,ji Weihua,et al.Tight sandstone reservoir “Sweet Spot” prediction of Badaowan Formation in Baka region[J].Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition,2013,35(6):48-56.
- [14] 李卓,姜振学,庞雄奇,等.塔里木盆地库车坳陷致密砂岩气藏成因类型[J].地球科学:中国地质大学学报,2013,38(1):156-164.  
Li Zhuo,Jiang Zhenxue,Pang Xiongqi,et al.Genetic types of the tight sandstone gas reservoirs in the Kuqa Depression,Tarim Basin,NW China[J].Earth Science:Journal of China University of Geosciences,2013,38(1):156-164.
- [15] 王鹏威,庞雄奇,姜振学,等.库车坳陷依南 2“连续型”致密砂岩气藏成藏临界物性条件[J].地球科学:中国地质大学学报,2014,39(10):1381-1389.  
Wang Pengwei,Pang Xiongqi,Jiang Zhenxue,et al.Critical physical conditions for accumulation of Yinan 2 “continuous” tight sandstone gas reservoir,Kuqa Depression[J].Earth Science:Journal of China University of Geosciences,2014,39(10):1381-1389.
- [16] 吕锡敏,皮学军,任战利,等.库车前陆盆地含油气系统的地质特征[J].天然气地球科学,2004,15(3):214-217.  
Lü Ximin,Pi Xuejun,Ren Zhanli,et al.The geological characteristics of the petroleum system in Kuqa Foreland Basin[J].Natural Gas Geoscience,2004,15(3):214-217.
- [17] 张惠良,寿建峰,陈子料,等.库车坳陷下侏罗统沉积特征及砂体展布[J].古地理学报,2002,4(3):47-58.  
Zhang Huiliang,Shou Jianfeng,Chen Ziliao,et al.Sedimentary

- characteristics and sandstone body distribution of the Lower Jurassic in Kuqa Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(3): 47-58.
- [18] 林小兵, 刘莉萍, 田景春, 等. 川西坳陷中部须家河组五段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 224-230.
- Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 5th member of Xujiahe Formation in the central of Western Sichuan Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 224-230.
- [19] 张晓峰, 侯明才, 陈安清. 鄂尔多斯盆地东北部下石盒子组致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *天然气工业*, 2010, 30(11): 34-38.
- Zhang Xiaofeng, Hou Mingcai, Chen Anqing. Features and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in the Lower Shihezi Formation in the northeastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(11): 34-38.
- [20] 王斌, 赵永强, 王恕一, 等. 塔里木盆地孔雀河斜坡志留系致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(6): 615-620.
- Wang Bin, Zhao Yongqiang, Wang Shuyi, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs in Silurian of Kongquehe Slope, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(6): 615-620.
- [21] 杨仁超, 王秀平, 樊爱萍, 等. 苏里格气田东二区砂岩成岩作用与致密储层成因[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 111-119.
- Yang Renchao, Wang Xiuping, Fan Aiping, et al. Diagenesis of sandstone and genesis of compact reservoirs in the east II part of Sulige Gas Field, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 111-119.
- [22] 寿建峰, 朱国华, 张惠良. 构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用: 以塔里木盆地为例[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 90-95.
- Shou Jianfeng, Zhu Guohua, Zhang Huiliang. Lateral structure compression and its influence on sandstone diagenesis: A case study from the Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 90-95.
- [23] 张妮妮, 刘洛夫, 苏天喜, 等. 库车坳陷东部下侏罗统致密砂岩储层特征及主控因素[J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 160-169.
- Zhang Nini, Liu Luofu, Su Tianxi, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Lower Jurassic tight sandstone in eastern Kuqa Depression [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 33(1): 160-169.
- [24] 杨帆, 邸宏利, 王少依, 等. 塔里木盆地库车坳陷依奇克里克构造带侏罗系储层特征及成因[J]. *古地质量学报*, 2002, 4(2): 46-55.
- Yang Fan, Di Hongli, Wang Shaoyi, et al. Reservoir characteristics and genesis of the Jurassic in Yiqikelike tectonic zone of Kuqa Depression in Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(2): 46-55.
- [25] 宋子齐, 唐长久, 刘晓娟, 等. 利用岩石物理相“甜点”筛选特低渗透储层含油有利区[J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 711-716.
- Song Ziqi, Tang Changjiu, Liu Xiaojuan, et al. Determination of favorable oil-bearing areas with extra low-permeability reservoir by “dessert” of petro-physical facies [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 711-716.
- [26] 甘军, 张迎朝, 邓志勇, 等. 文昌 A 凹陷古近系低渗凝析气藏成藏特征与成藏模式[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(6): 1060-1069.
- Gan Jun, Zhang Yingzhao, Deng Zhiyong, et al. Reservoir-forming characteristic and model of the Palaeogene condensate gas reservoir with low permeability in Wenchang A Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(6): 1060-1069.
- [27] 尤丽, 张迎朝, 李才, 等. 基于沉积成岩—储集相分析确定文昌 9 区低渗储层“甜点”分布[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(5): 1432-1440.
- You Li, Zhang Yingzhao, Li Cai, et al. Based on analysis of sedimentary-diagenetic reservoir facies to determine “sweet spots” distribution in low permeability from Wenchang 9 area [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(5): 1432-1440.
- [28] 杨升宇, 张金川, 黄卫东, 等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 272-282.
- Yang Shengyu, Zhang Jinchuan, Huang Weidong, et al. “Sweet spot” types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 272-282.
- [29] 杨少春, 赵晓东, 张喜, 等. 吐鲁番—哈密盆地吉深 1 区致密砂岩气藏储层“甜点”预测[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 29(5): 1-8.
- Yang Shaochun, Zhao Xiaodong, Zhang Xi, et al. Prediction of “sweet spots” of tight sandstone gas reservoirs in Jishen 1 area, Turpan-Hami Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2014, 29(5): 1-8.
- [30] 王珂, 戴俊生, 商琳, 等. 曲率法在库车坳陷克深气田储层裂缝预测中的应用[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 29(1): 34-45.
- Wang Ke, Dai Junsheng, Shang Lin, et al. Fracture prediction in reservoir with curvature method in Keshen Gas Field of Kuqa Depression [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2014, 29(1): 34-45.
- [31] 李志军, 张瀛, 窦煜, 等. 曲率法致密砂岩储层裂缝预测[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(6): 57-63.
- Li Zhijun, Zhang Ying, Dou Yu, et al. Fracture prediction in tight sandstone reservoir with curvature method [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2013, 35(6): 57-63.
- [32] 詹彦, 侯贵廷, 孙雄伟, 等. 库车坳陷东部侏罗系砂岩构造裂缝定量预测[J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2): 294-302.
- Zhan Yan, Hou Guiting, Sun Xiongwei, et al. Quantitative prediction of tectonic fractures of Jurassic sandstones in the eastern Kuqa Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20(2): 294-302.
- [33] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南—吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 592-602.
- Ju Wei, Hou Guiting, Huang Shaoying, et al. Structural fracture distribution and prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation sandstone in the Yinan-Tuzi area, Kuqa Depression [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 592-602.