2018年6月，第24卷，第3期，412–424页
June 2018，Vol. 24，No.3， pp. 412–424

高 校 地 质 学 报
Geological Journal of China Universities

DOI: 10.16108/j.issn1006–7493.2017112

致密砂岩气藏储渗单元研究方法与应用：以鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组为例

郭建林，贾成业*，闫海军，季丽丹，李易隆，袁 贺

中国石油勘探开发研究院，北京 100083

摘要：精细表征储层特征和储层结构是致密砂岩气藏开发中后期的主要技术需求。基于不同类型砂体的相似孔渗特征将辫状河沉积体系中河道充填和心滩砂体聚类为储渗单元，提出了储渗单元研究概念和研究思路，开展了辫状河沉积体系储渗单元发育模式研究。通过露头观测和测井相标志，识别出辫状河沉积体系中储渗单元发育四种叠置模式，即心滩叠置型、河道充填叠置型、心滩和河道充填叠置型、心滩或河道充填孤立型；基于储渗单元发育模式，提出了河流相致密砂岩气藏开发井型的适应性，指出辫状河沉积体系中河道叠置带是叠置型储渗单元发育的有利部位，是水平井开发的有利目标，辫状河沉积体系中的过渡带和洼地主要发育孤立型储渗单元，适合直井或丛式井组开发。鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组野外露头研究和苏里格气田加密井区井间干扰试验表明，辫状河沉积体系中储渗单元发育规模为顺古水流方向长600 m和垂直水流方向宽400 m左右，证实苏里格气田具备进一步加密到400×600 m的条件，预计可提高采收率15%~20%。

关键词：致密砂岩气藏；辫状河沉积体系；储渗单元；叠置模式；开发井型；采收率
中图分类号：P618.13　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006–7493（2018）03–0412–13

Research Methodology and Application of Reservoir Permeability Units for Tight Sandstone Gas Reservoirs: A Case Study in the Permian Lower Shihezi Formation of the Ordos Basin

GUO Jianlin, JIA Chengye*, YAN Haijun, JI Lidan, LI Yilong, YUAN He

Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

Abstract: Detailed investigation of reservoir characterization and architecture is the main technique requirements for the development of tight sandstone gas reservoir in the middle-to-later stage. Based on the similarities of porosity and permeability for different types of sand bodies, channel-filling and channel bar of braided river sedimentary system were classified into the same reservoir permeability unit. Concept and methodology of such permeability units were put forward and the developmental model in the unit was studied. Through outcrop observation and analysis of logging facies, four superimposed patterns within the unit were identified, including channel bar superposition, channel filling superposition, bar and channel filling superposition, and bar or channel filling isolated types. Based on developmental patterns of the units, well types suitable for the development of tight sandstone gas reservoirs were proposed. Channel superimposed belts in braided river sedimentary system are favorable for the development of superimposed permeability units and horizontal drilling. The transition and depression zones of braided river sedimentary system are favorable for the development of isolated permeability units and vertical or cluster wells. Case studies in the Low Permian Shihezi outcrops of the Ordos Basin and interference well tests in the pilot infill areas of the Sulige gas field show that permeability units of braided river sedimentary system have a length of 600 m along the paleocurrent and width of 400 m perpendicular to the flow direction. This implies that the well pattern

收稿日期：2017–09–29；**修回日期：**2017–12–07
基金项目：国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”（2016ZX05015）资助
作者简介：郭建林，男，1973年生，高级工程师，从事油气田开发评价与管理工作；E-mail: guojianl@petrochina.com.cn
***通讯作者：**贾成业，男，1980年生，高级工程师，从事油气田开发地质研究；E-mail: cyjia@petrochina.com.cn

in the Sulige gas field has the potential to be infilled into inter-well distance at 400 m and well array at 600 m, with an increase of recovery factor by 15% to 20%.

Key words: tight sandstone gas reservoirs; braided-river sedimentary system; reservoir permeability unit; superimposed patterns; types of well production; recovery factor

Corresponding author: JIA Chengye, Senior Engineer; E-mail: cyjia@petrochina.com.cn

致密砂岩气藏是指地层条件下覆压渗透率小于0.1×10^{-3} μm²（不包含裂缝渗透率）的砂岩储集层，一般情况下没有自然产能或自然产能低于工业标准，需要采用增产措施或特殊工艺井才能获得商业气流（国家能源局，2011）。致密砂岩气藏是中国主要的天然气藏类型之一，在天然气产业中占相当大的比重。截至2016年12月，致密砂岩气藏探明储量占全国天然气总探明储量的35%，致密砂岩气藏年产量占国内天然气总年产量的比例为22%。随着苏里格、大牛地、榆林、子洲、神木、米脂等一批致密砂岩大气田投入开发，致密砂岩气探明储量和年产量实现了快速双增长（戴金星等，2012；马新华等，2012）。但上产高峰期之后，主力致密砂岩气田将相继进入开发中后期，开发调整、稳产挖潜和提高采收率是该期致密砂岩气藏开发中面临的主要技术问题。与国外海相—海陆过渡相致密砂岩储层不同，河流相砂体是中国致密砂岩气藏的主要储层类型，进一步精细表征河流相沉积体系特征，开展河流相沉积体系中沉积微相和微相组合精细描述是致密砂岩气藏开发中后期的主要研究方向。

前人对河流相沉积体系的研究表明（Martin, 1993；Collinson, 1996；Miall, 1996），辫状河砂体具有较好的渗透率、孔隙度和较高的净毛比，是品质较好的油气藏储集体。同时，由于辫状河体系内部渗透性差异形成的低渗单元是阻碍流体流动、制约波及系数的主要因素，是储层表征和油气藏开发中面临的主要技术挑战（Bridge and Mackey, 1993; Leclair et al., 1997; Lane, 2006; Lynds and Hajek, 2006; Labourdette, 2011; Lunt et al., 2013）。Hearn 等(1984)提出了流动单元的概念，流动单元研究以一致的岩石学和水动力学特征为基础，将具有不同特征的沉积微相划分为不同级别的流动单元，预测剩余油分布规律。Miall (1996)依据河流沉积层序中的不同级次界面和结构单元建立了储层内部建筑结构，将不同岩性界面划分为五级界面，为表征河流相储层非均质性和河流沉积学研究提供了有益的研究思路。在前人对河流相沉积体系流动单元划分和储层构型研究的基础上，结合多年的研究与实践，笔者提出了储渗单元研究思路，以河流相沉积边界和储层非均质性差异为标志，针对河流相沉积体系中高渗、低渗储层单元开展识别和分析，建立不同渗透性特征的储集体空间分布模式，指导河流相致密砂岩气藏开发实践。储渗单元是指受岩性或物性边界约束的、具有相似储集性能和渗流特征的沉积亚（微）相或亚（微）相组合。由于天然气的流动性远高于原油，通常气藏开发中压降波及范围内的天然气可采储量均可实现商业开发，因此储集体内部储集和渗流特征评价是气藏开发评价的研究重点。与流动单元不同，储渗单元研究以阻流边界（通常为岩性或物性边界）识别为基础，将阻流边界控制范围以内，分布连续、具有相似物性特征的沉积微相和微相组合划分为不同品质的储渗单元。从本质上，流动单元研究是对沉积微相按流动特征的分级分类，而储渗单元研究是将不同类型的沉积微相按渗透性聚类，通过不同沉积微相的叠置关系建立储渗单元内部结构模式。本文通过鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组辫状河沉积体系露头和实钻储层特征分析，识别储渗单元和建立发育模式，以期为致密砂岩气藏开发中后期加密部署和水平井开发提供技术思路。

1　储渗单元特征与发育模式

1.1　储渗单元边界类型

Lynds 和 Hajek（2006）对美国内布拉斯加州奈厄布拉勒河和北卢普河现代河流沉积的研究表明，受水深的控制，同期河道沉积的顶界为泛滥平原或溢岸沉积；随着河道改道作用的影响，河道沿侧向移动，河道对泛滥平原或溢岸沉积的泥岩产生切割，在下一期河道底部形成于泥岩衬里。由于泛滥平原或溢岸沉积是河道滞留沉积的

横向而不是纵向伴生亚相，所以其与河道沉积属同一期河流沉积的侧向沉积物。因此，不同期次河道沉积界限为泛滥平原或溢岸泥岩相，即辫状河储层建筑结构中的四级构型界面（Miall, 1996），多期河道侧向往复改道，形成纵向和横向上多期河道砂体、泛滥平原或溢岸泥岩相互叠置形成复合河道带，鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子气藏即为多期辫状河河道叠置而成的大型复合河道带。

储渗单元研究的首要任务是识别储渗单元内部和外部边界。储渗单元识别的基础是不同储渗单元与内、外部边界的岩性和物性差异。河流相致密砂岩气藏有效储集层成因与岩石组构、成岩作用密切相关。以鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组气藏为例，辫状河沉积体系中心滩和河道充填底部粗砂岩分选差、大粒径矿物颗粒形成岩石骨架结构，石英类刚性矿物含量高、抗压实能力强，有利于原生孔隙的保存和孔隙流体的流动，溶蚀作用相对发育，粒径大于0.5 mm的粗砂岩孔隙度普遍大于5%，渗透率与孔隙度呈正相关关系，整体上粗砂岩平均孔隙度为9.1%、平均覆压渗透率为0.098 mD (何东博等，2004；李易隆等，2013；王国亭等，2013, Jia et al., 2017)，渗流条件好（图1），是有效储层发育的有利岩相；河道充填中、上部的中细砂岩中火山岩屑等塑性颗粒含量高、分选好，呈致密压实相，不利于孔隙流体的流动和溶蚀作用的发生，孔隙度和渗透率均较低，有效储层不发育。同时，废弃河道、泛滥平原、心滩内部不同期次的单元坝间泥岩夹层和落淤层等泥岩相渗透率极低。储渗单元研究中将心滩、河道底部充填等渗透率高、物性条件好的沉积微相或微相组合归为储渗单元，而心滩和河道底部充填受岩性和物性边界的隔档，形成阻流边界。溢岸、心滩侧向加积的坝内粉砂质泥岩夹层和落淤层是储渗单元研究中的内部边界，废弃河道、泛滥平原是储渗单元研究中的外部边界。

泛滥平原和溢岸泥岩（图2），即同期河道复

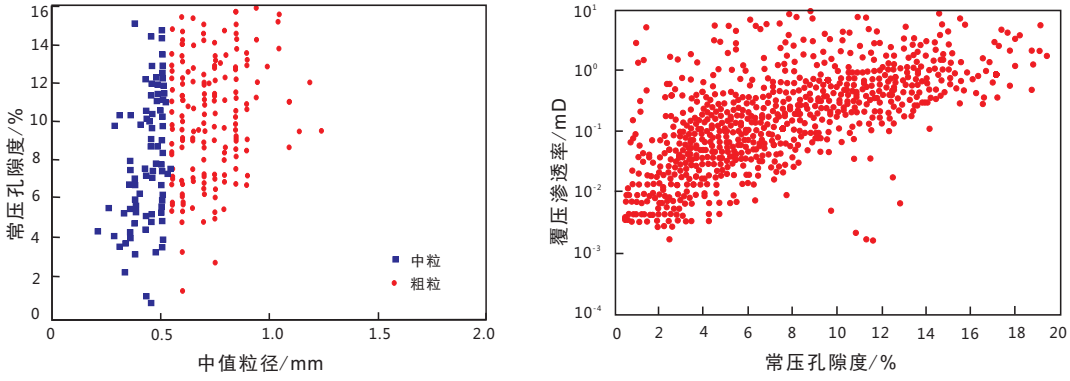

图1 鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组致密砂岩气藏岩石粒径、孔隙度与渗透率间关系图

Fig. 1 Relationship between grain diameter, porosity and permeability of the tight gas sandstone reservoirs in the Permian, Lower shihezi Formation Ordos Basin

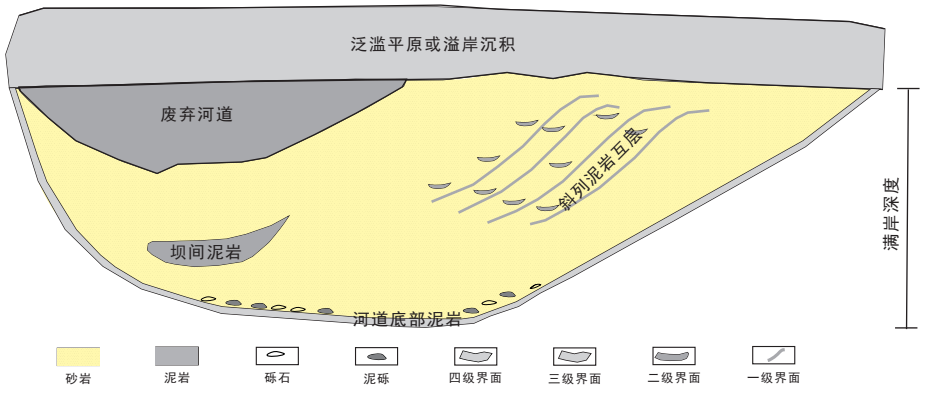

图2 典型辫状河体系沉积微相与界面构成图

Fig. 2 Microfacies and surfaces of typical braided river sedimentary system(modified after Lynds and Hajek, 2006)

合砂体的顶界面，是储渗单元的标志性顶/底界面，也是储渗单元在纵向上的主要识别标志。泛滥平原和溢岸泥岩厚度一般为数十厘米到数米不等，延伸范围较广。废弃河道泥岩位于储渗单元顶面附近，同属于储渗单元的外部边界，是河道水流侧向运动或河流水动力减小形成，一般河流上游部位废弃河道泥岩规模发育较小，河流下游由于水动力减弱废弃河道泥岩发育规模增大，但整体上废弃河道泥岩位于同期河道充填沉积范围以内。河道充填沉积顶部由于水流的沉积分异作用，沉积物分选好，粒径相对较小，通常在细粉砂级别，受压实作用影响大渗透性较差。由于河道顶部充填物性较差，形成储渗单元的外部物性边界。河道充填沉积顶部与底部间的岩性界面是河流相储层建筑结构的三级界面（Bridge and Mackey, 1993; Miall, 1996; Kelly, 2006）。

单元坝是构成心滩的基本单元，河道水流受多个心滩单元坝阻隔发育坝间次级水道，或称串沟，次级水道水动力相对较弱，粉砂质泥岩、泥岩在该区域易沉降，形成坝间泥岩。坝间泥岩为储渗单元内部边界，通常规模相对较小、物性差，一般厚度小于0.5 m，是河流相储层建筑结构的二级界面。

坝内泥岩是心滩侧向加积作用产生的粉砂质、泥质夹层，通常厚度较薄、纹层或夹层级，分选好；落淤层泥岩则形成于季节性洪水期的泥质沉积物，一般侧向延伸宽度有限，发育规模较小。坝内泥岩、落淤层或统称为斜列泥岩互层（图2），同属储渗单元的内部边界，是层系组或单个层系界面，属建筑结构中的一级界面。

1.2　储渗单元发育模式

野外露头观测和致密砂岩气藏开发中密井网区精细解剖可识别不同类型的储渗单元，从而建立储渗单元叠置模式（图3）。笔者采用储渗单元研究思路，对鄂尔多斯盆地南缘柳林地区二叠系下石盒子组露头剖面观测，结合气井钻遇砂体分

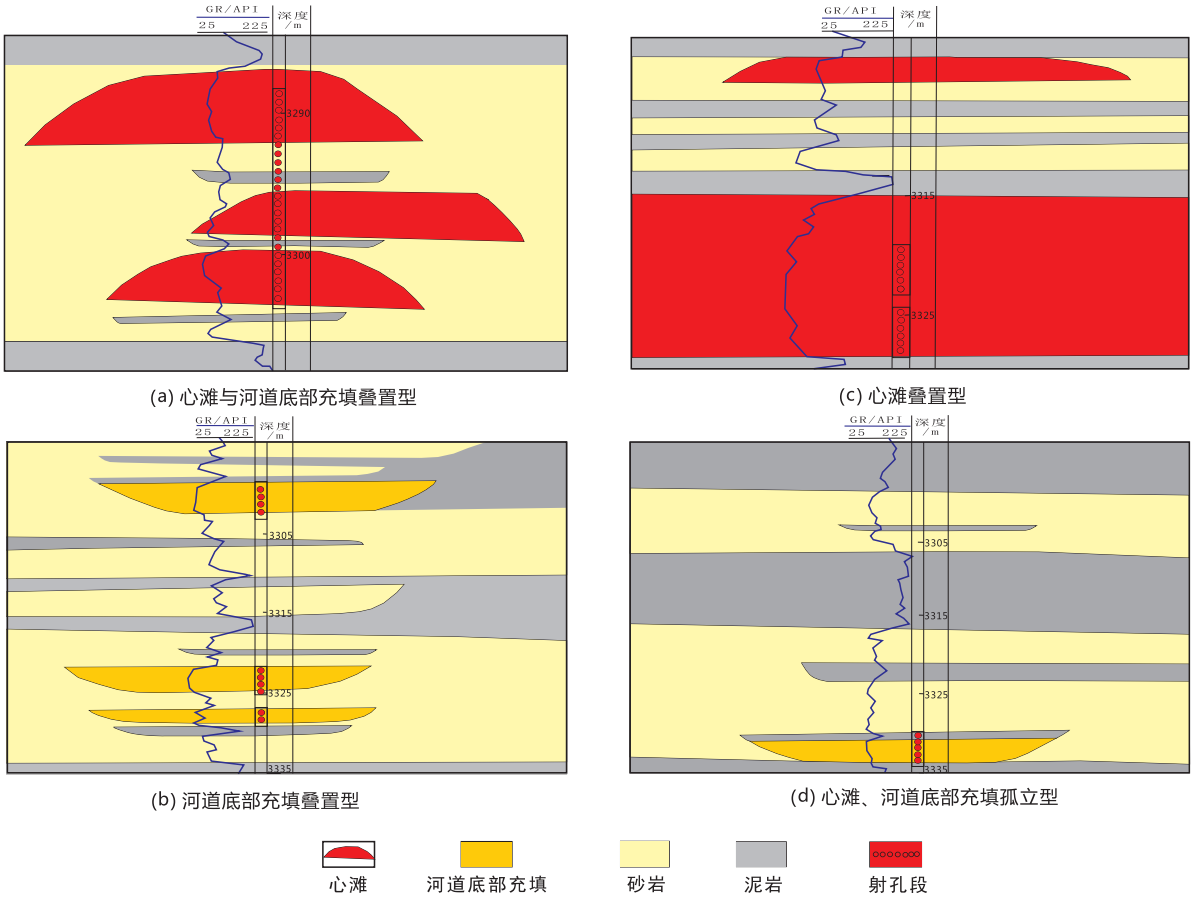

图3　不同类型储渗单元实钻分析图

Fig. 3　Diagram showing practical drilling of different types of reservoir permeability units

析，将储渗单元划分为：心滩与河道底部充填叠置型、河道充填叠置型、心滩叠置型和心滩或河道底部充填孤立型四种发育模式（图3）。

1.2.1 心滩与河道底部充填叠置型

心滩整体上一般为正粒序，底部为砾岩或粗砂岩相，向上过渡为粗、中砂岩相；由于心滩边部水动力作用较弱，通常为斜层状的泥岩或粉砂质泥岩（落淤层），同时侧向加积作用剧烈，形成心滩复合砂体内部夹杂泥岩或粉砂质泥岩夹层，即储渗单元的内部阻流边界。该阻流边界通常规模较小，呈纹层状，从露头剖面和水平井实钻轨迹中可识别出该类型储渗单元内部阻流边界。心滩与河道底部充填型储渗单元内部落淤层阻流边界纵向发育规模较小，一般小于0.5 m（图4），水平井钻井过程中通常沿心滩侧向钻进过程中钻遇薄层状泥质夹层即为落淤层边界。心滩与河道底部充填叠置型储渗单元底部边界为上期河道消亡时沉积的泛滥平原或废弃河道泥岩、粉砂质泥岩，属岩性边界；其上部边界为河道顶部充填沉积形成的中、细砂岩相，分选较好，物性较差，形成物性边界。该类型储渗单元通常为厚层状，纵向上厚度较大，一般在10~15 m。

1.2.2 河道底部充填叠置型

两期或多期河道底部充填呈垂向叠置，河道

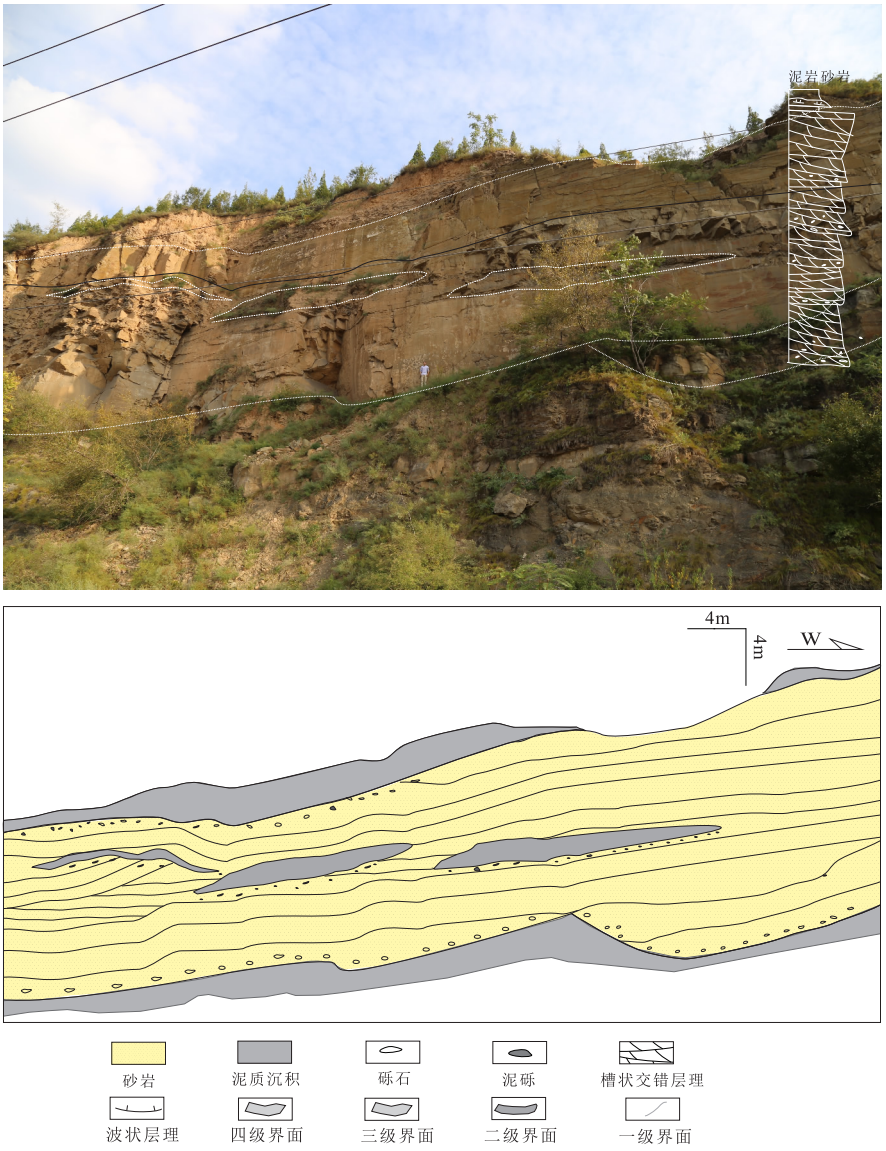

图4 心滩与河道充填叠置型储渗单元露头观测剖面图

Fig. 4 Outcrop investigation of reservoir permeability units in superimposed channel bar and channel filling

带砂体底部发育明显的冲刷界面，一般呈不规则下凹状，底部以含砾粗砂岩、粗砂岩为主，单期河道砂体内部呈正粒序旋回；受河道迁移、改道作用的影响，在不同期次河道充填的顶部形成废弃河道或泛滥平原泥岩、粉砂质泥岩的互层，是该类型储渗单元的内部岩性边界（图5）。由于河道底部充填的冲刷作用，泥岩或粉砂质泥岩互层较薄，通常在0.5~1 m。单个河道带砂体厚度4~7 m，河道底部充填叠置型储渗单元通常由3~5个河道砂体垂向叠置而成。因此，该类型储渗单元厚度较大，约6~10 m。

1.2.3　心滩叠置型

辫状河发育带中两期或多期心滩垂向叠置形成规模较大的储渗单元，该类型储渗单元厚约10~20 m（图6）。不同期次心滩砂体间由于辫状河道的改道作用频繁，通常夹薄层状泛滥平原或废弃河道泥岩，一般厚度在3~5 m左右，形成储渗单元内部岩性边界，整体上该类型储渗单元发育频率较低。心滩砂体一般呈块状，具有纵向上粒度逐渐变细的特征，但心滩砂体内部由于侧向加积作用，内部常见倾斜状泥岩夹层（落淤层）。

1.2.4　心滩或河道充填孤立型

与上述叠置型储渗单元不同，该类型储渗单元由于改道作用的影响，不同期次辫状河道砂体侧向变化距离较大，在辫状河体系过渡带或体系间洼地，心滩或河道充填砂体沉积频率较低，从而纵向上心滩或河道底部充填砂体呈孤立状（图7，8）。心滩砂体顶部偶见侧向加积形成的倾斜状泥岩，呈薄层状，通常在0~0.5 m。河道充填孤立型储渗单元由于河道体系过渡带或河道体系间水动力较弱，储渗单元顶部通常为河道顶部充填砂体，粒度较细，呈中、细砂岩，渗透性较差；同时，随着该期河道的改道或消亡，河道充填顶部向上为废弃河道或泛滥平原沉积泥岩或粉砂质泥岩。单个心滩厚度一般为5~8 m，河道底部充填砂体厚度一般为3~5 m，因此该类型储渗单元与叠置型相比，具有发育规模较小、侧向上连续性和连通性差的特点。

1.3　储渗单元发育规模

1.3.1　储渗单元井间识别

通过密井网井间干扰试验可进一步精细识别和表征井间储渗单元形态和边界类型。以密井网开发试验区早期投产井苏38-16-5和加密井苏6-j21为例，两口井均射开二叠系下石盒子组盒8段砂体，纵向上射孔层段对应一致，因此相应层位连续性和联通性可对比性强。苏

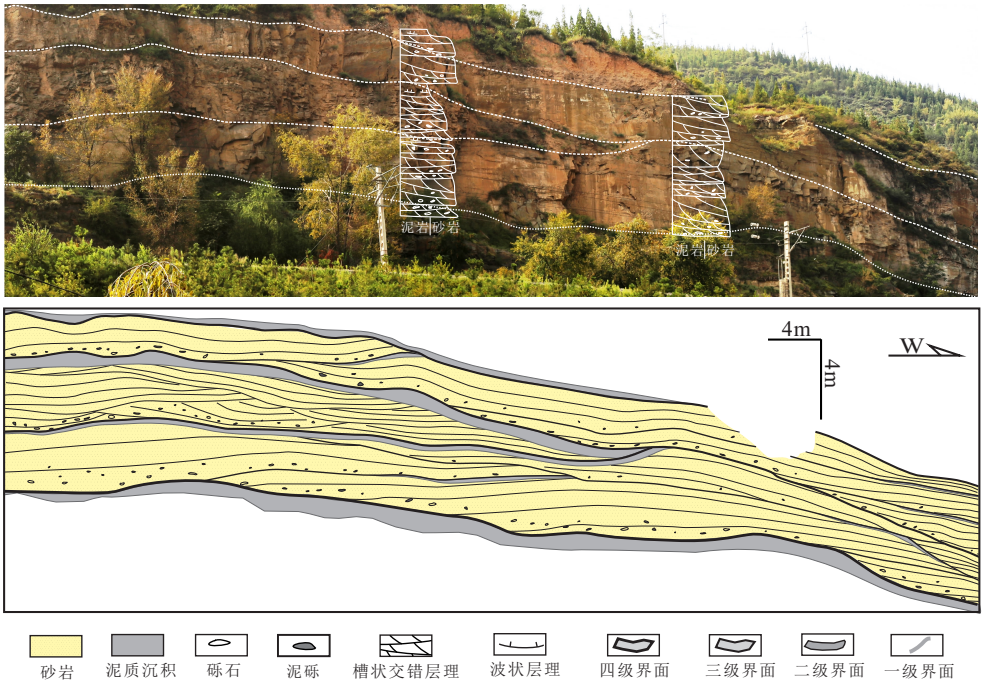

图5　河道充填叠置型储渗单元露头观测剖面图

Fig. 5　Outcrop investigation of reservoir permeability units in superimposed channel filling

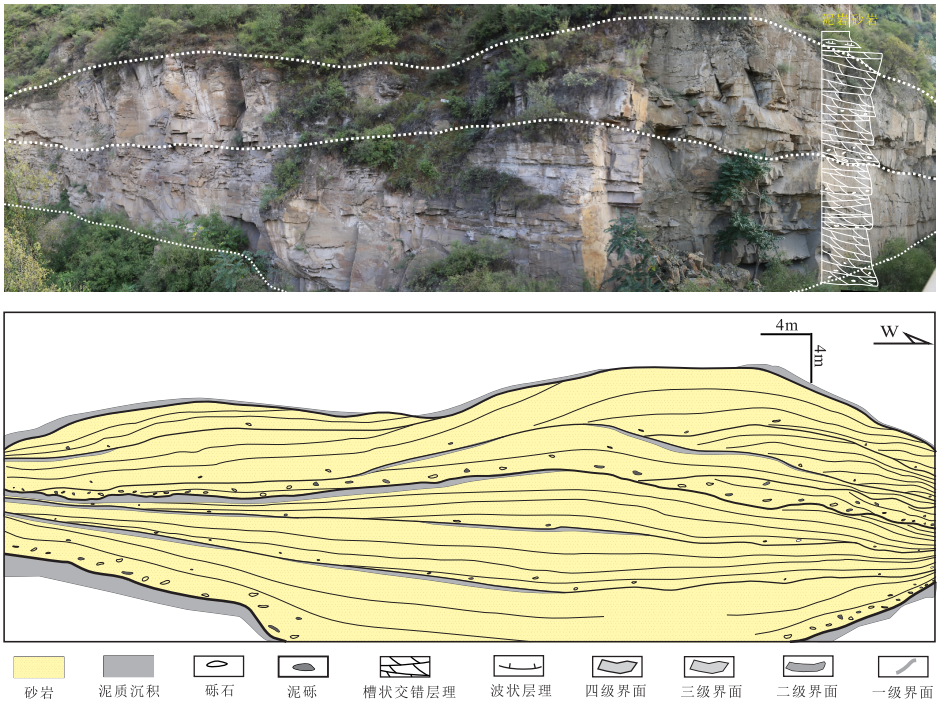

图6 心滩叠置型储渗单元露头观测剖面图

Fig. 6 Outcrop investigation of reservoir permeability units in superimposed channel bar

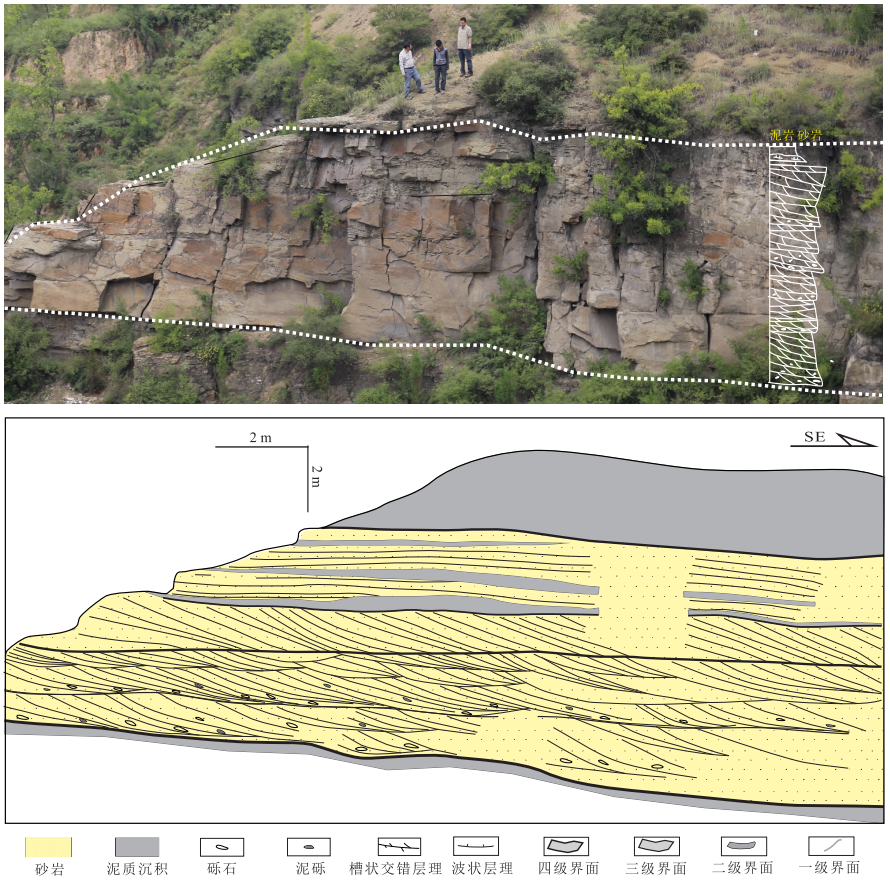

图7 心滩孤立型储渗单元露头观测剖面图

Fig. 7 Outcrop investigation in reservoir permeability units in isolated channel bar

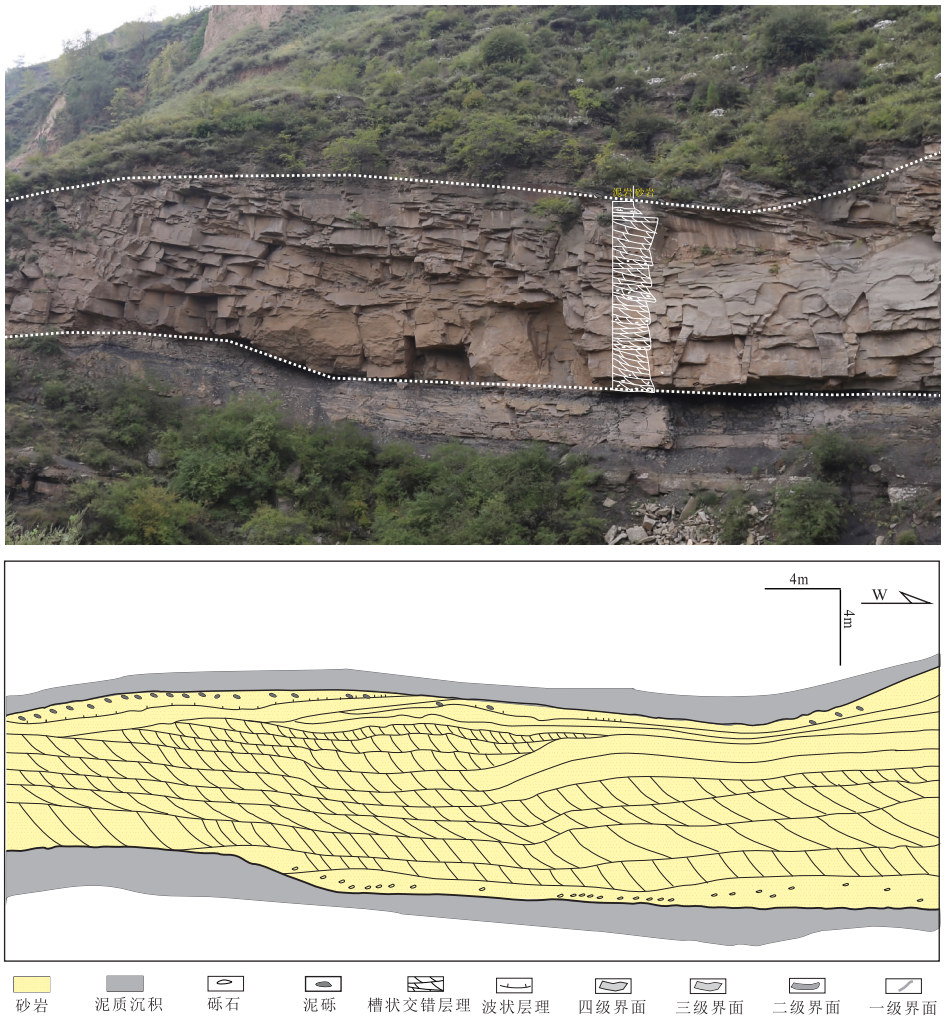

图8　河道充填孤立型储渗单元露头观测剖面图

Fig. 8　Outcrop investigation of reservoir permeability units in isolated channel filling

38-16-5井射孔层段测井曲线形态底部呈齿化箱形、上部呈平滑箱形，储渗单元类型为河道与心滩叠置型；苏6-j21射孔层段测井曲线形态底部为平滑箱型与齿化箱型垂向分布，储渗单元类型为心滩与河道充填叠置型，上部为平滑箱形零星分布，储渗单元类型为心滩孤立型。苏38-16-5井投产于2003年10月，经过6年的生产，到2009年9月地层压力已降至6 MPa，而苏6-j21加密井在2009年9月投产时，地层压力仍高达30.45 MPa，仍维持原始地层压力。结合两口井射孔层段的一致性，可判断出苏38-16-5井泄流范围小于两口井间距即对应层段储渗单元间存在外部边界，根据对应的部位分别为心滩和河道充填砂体，两口井储渗单元边界类型为坝间泥岩相形成的岩性边界（图9）。

1.3.2　储渗单元发育规模

同一期河道充填的满岸深度与储渗单元发育规模呈正相关。沉积序列完整的心滩微相代表了河流的满岸深度。山西柳林地区二叠系下石盒子组露头剖面观测表明，单个心滩厚度为3~6.5 m，据此，苏里格地区辫状河体系的河流满岸深度为3~6.5 m。而河流相沉积的宽厚比通常在40~70(廖保方等，1998；吴胜和，2010)，因此河流相沉积体系中储渗单元宽度范围在200~400 m。不同学者对现代河流沉积砂体的研究表明：高坡降辫状河的心滩坝微相不发育，主要微相单元是河道亚相。低坡降辫状河的心滩微相发育明显；顺物源方向心滩砂体长宽比一般为2~5，长宽比最大可达到10:1（钟建华和马在平，1998；于兴河等，2004；何顺利等，2005；金振奎等，2014；雷卞军等，2015）。据此，苏里格气

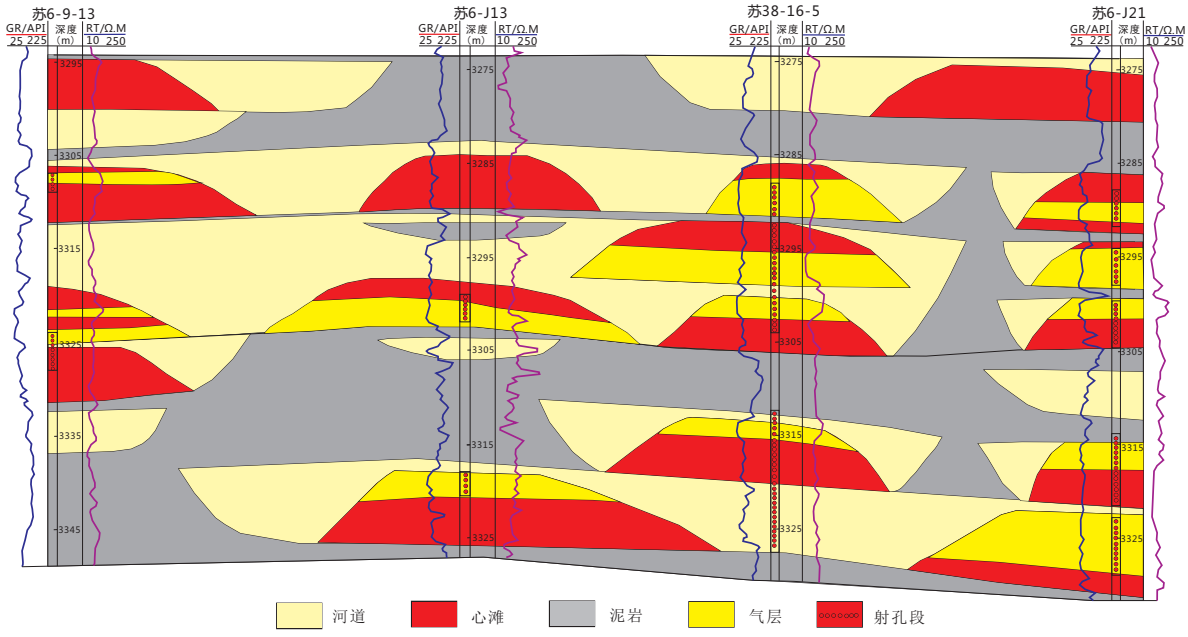

图9 井间储渗单元分布实例分析图

Fig. 9 Practical well cross section showing the distribution of inter-well permeability units

田下石盒子组心滩砂体长度分布范围为400~1500 m左右，由于顺河道水流方向心滩砂体形态通常呈弯曲状，沿南北向心滩砂体长度为400~900 m（何东博等，2012，2013；卢涛等，2015）。

密井网开发试验是井间砂体解剖的最直接方式，同时配合干扰试井分析是判识井间渗透性和砂体连通性的最有效途径。通过大量加密井井间地层压力测试，对比不同批次加密井原始地层压力，若投产前地层压力接近原始地层压力，则表明储渗单元不连通或连通性较差，同时，通过储渗单元测井相分析识别出储渗单元类型，从而建立储渗单元发育规模知识库。

通过对投产时间长的气井井底压力和新投产井原始地层压力的监测，可判断出井间储渗单元发育规模。以苏里格气田苏6加密井区为例，该井区开发层位均为二叠系下石盒子组致密砂岩储层，如图10所示，作为苏里格气田最早的开发试验区该井区在初期一次骨架井网1200×800 m的基础上，通过不断加密部署，逐渐形成井距366~800 m、排距约600 m的加密井网。骨架井网原始地层压力约30 MPa，随着投产时间的不断增加，投产井井底压力不断降低，如图所示，最早投产的苏6井、苏38-16、苏38-16-2、苏38-16-3、苏38-16-4和苏38-16-5井井底压力已分别下降至4.99 MPa、6.02 MPa、9.35 MPa、13.78 MPa、6.03 MPa和9.67 MPa。同一井排上加密井井距分布366~466 m不等，投产前原始地层压力除苏6-j5井外，均呈现较大幅度的压降，而另外两排加密井井距分布范围为417~820 m，新投产井原始地层压力为23.60~30.72 MPa，这些特征表明，当井距低于400 m时，井间已出现明显压力干扰；当井距超过400 m，井间压力干扰的概率大幅度降低，储渗单元井间东西向规模小于400 m。同时，对相邻两排井投产前原始地层压力监测表明，上下两排气井与首批投产井排间排距约600 m，投产前地层压力均未发现压力降低，未受到早期投产气井生产的影响。因此，储渗单元南北向发育规模范围小于600 m。

2 储渗单元研究与开发部署

2.1 储渗单元与气田加密部署

井网加密是大规模致密砂岩气藏开发中后期提高采收率的主要技术手段之一。位于美国德克萨斯州西南部的奥卓拉气田（Ozona）是致密砂岩气藏开发的典型气田。该气田于1960年代投入开发，开发初期一次部署井网面积为1.29 km^2；1995年以后，通过加密部署和井间干扰试验，采用地质统计分析，开展气井泄流面积和井间剩余储量评价，以井间压力干扰为加密部署极限的判识标

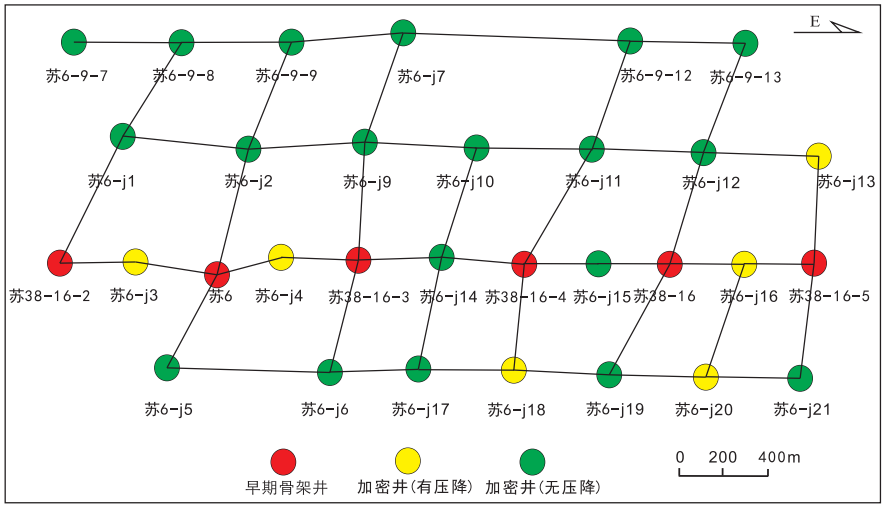

图 10　苏里格气田苏 6 加密井区井位图

Fig.10　Well location map of the Su6 infill development block in the Sulige gas field

准。随着地质认识逐渐加深，砂体规模小于井网密度、井间砂体连续性有限，进一步对储渗单元泄流能力评价，气井泄流面积 0.16~0.32 km^2，平均 0.24 km^2；将单井控制面积逐步加密到 0.65 km^2 和 0.32 km^2，主力开发区单井控制面积 0.16 km^2（占总井数 52%）、井网密度平均 6 口/km^2，最大井网密度可达 12 口/km^2（Cipolla and Mayerhofer, 1996）。

苏里格气田自 2003 年投入开发，规模开发初期开展甜点区预测、富集区优选和地质建模研究，基于辫状河体系主河道带复合砂体长约 1000~1800 m、中值 1200 m，宽约 600~1000 m，在气田中部富集区采用 800×1200 m 骨架井网，气井平均可采储量 2000×10^4 m^3，实现了气田有效开发；到 2009 年，通过井位优化和加密部署在原有一次井网基础上，通过主河道带内单砂体精细刻画和一次井网下剩余储量分布研究，局部加密到 600×800 m，在保障气井可采储量不下降的前提下，进一步扩大气田产能；2010 年以后，气田实现整体开发，通过滚动评价、扩边生产，开发区域逐步扩展到东区、中区和西区，直井开发区块内全面实现 600×800 m 井网，气田开发规模进一步上升，且较一次井网下采收率提高幅度为 10%，成为中国储量和产能规模最大的天然气田（戴金星等，2012；何东博等，2012，2013；马新华等，2012）。通过储渗单元研究，鄂尔多斯盆地辫状河沉积体系中心滩和河道充填砂体形成的储渗单元呈现不同叠置模式，不同类型储渗单元南北向（顺古水流方向）和东西向（垂直古水流方向）发育规模分别为 600 m 和 400 m 以内，表明苏里格气田具备进一步加密的条件，达到 400×600 m 井网，预计提高气田采出程度 15%~20%。

2.2　储渗单元与水平井部署

致密砂岩气藏储渗单元研究以不同类型砂体间叠置关系研究为主体，将具有相似渗流特征的砂体聚类为储渗单元，结合复合砂体的形态和辫状河体系发育特征，辫状河体系主河道叠置带内心滩和河道充填砂体富集，心滩叠置型、心滩与河道叠置型、河道充填叠置型储渗单元发育。整体上辫状河体系砂体发育规模较小，不适合大面积采用水平井开发；但辫状河主河道叠置带河道继承性发育，较强的水动力条件有利于孔渗条件好的粗砂岩形成和富集，砂地比普遍大于 70%，纵向上多期叠置型储渗单元富集，叠置型储渗单元总厚度通常超过 10~15 m，空间分布稳定，侧向上储渗单元连续性好（图 11）。因此，叠置型储渗单元发育带即辫状河体系的主河道叠置带是水平井部署的有利目标区，可优选井位、部署水平井。

对于辫状河体系过渡带和体系间洼地，辫状河体系过渡带虽然发育因洪水期改道短期内形成的河道充填，沉积速率快、粒度粗，形成单层厚度较大的粗砂岩，但整体上砂地比较低，一般在 30%~70%（图 12）；辫状河体系间洼地，砂地比更低一般小于 30%，以泥岩、粉砂质泥岩为主，夹薄层状中细砂岩（图 13）。辫状河体系过渡带和

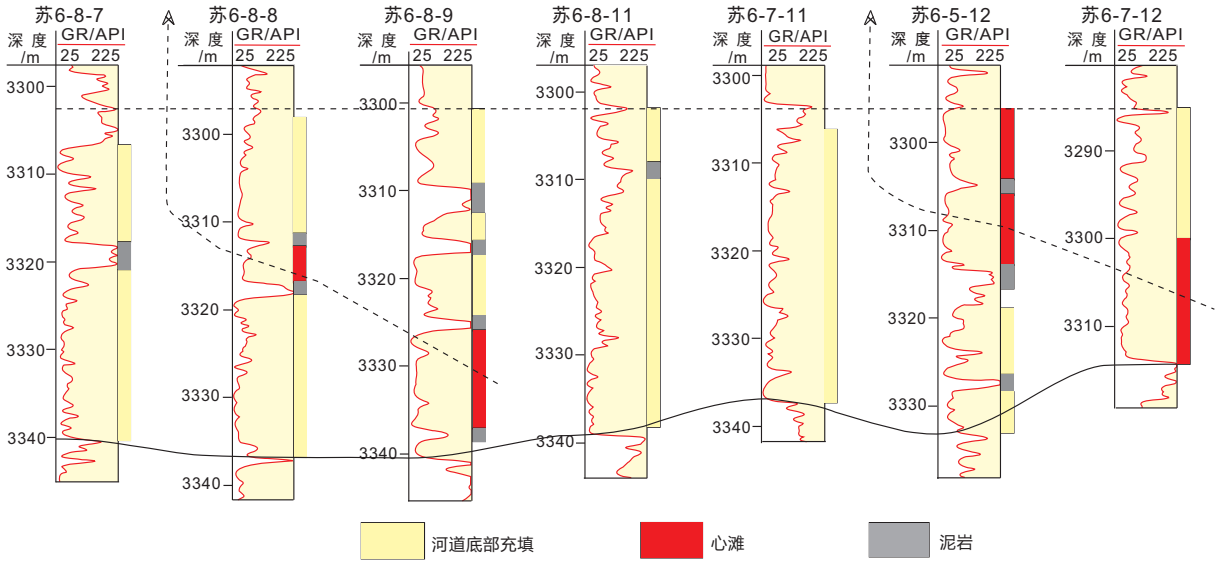

图11 辫状河沉积体系河道叠置带储渗单元发育特征

Fig. 11 Development of reservoir permeability units in superimposed channel belt of braided river sedimentary system

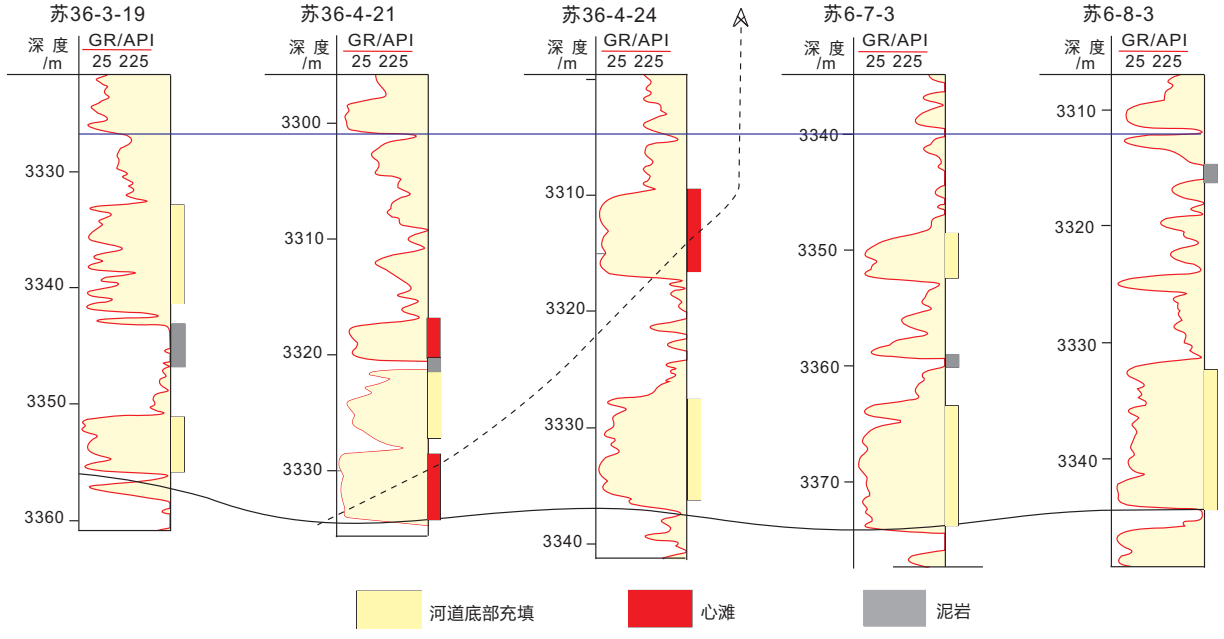

图12 辫状河沉积体系过渡带储渗单元发育特征

Fig. 12 Development of reservoir permeability units in transition zone of braided river sedimentary system

体系间洼地储渗单元类型主要为零星分布的心滩或河道充填孤立型，叠置型储渗单元零星分布，不利于水平井整体部署，宜采用直井或直井丛式井组开发。

3 结论

将具有相似储渗特征的地质体或沉积微相聚类为储渗单元，通过储渗单元发育特征、叠置模式、露头识别研究，建立储渗单元空间分布和发育规模等地质认识，明确不同类型储渗单元分布规律，可有效指导天然气藏开发中井网和井型、井距优选、开发中后期加密部署等关键开发技术政策的制定，为天然气藏高效开发和提高采收率提供技术支撑。

采用储渗单元研究技术思路和方法，根据不同类型砂体的储渗特征，将孔隙度和渗透率高的粗砂岩相砂体聚类为储渗单元，心滩和河道充填砂体是主要的储渗单元类型；溢岸、心滩侧向加

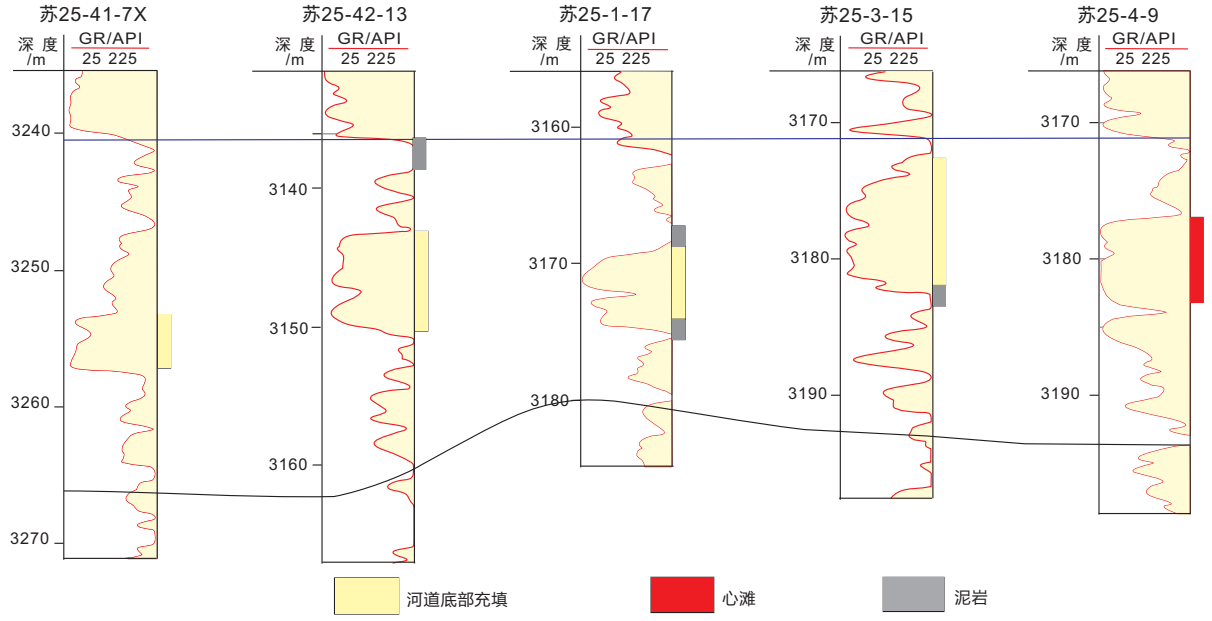

图 13　辫状河沉积体系间洼地储渗单元发育特征

Fig. 13　Development of reservoir permeability units in depression zone of braided river sedimentary system

积的坝内粉砂质泥岩夹层和落淤层是储渗单元研究中的内部边界，废弃河道、泛滥平原形成储渗单元研究中的外部边界。

河流相致密砂岩气藏储渗单元发育四种叠置模式：心滩叠置型、河道充填叠置型、心滩与河道充填叠置型、以及心滩或河道充填孤立型。叠置型储渗单元主要发育在辫状河沉积体系的河道叠置带内，是致密砂岩气藏水平井开发的有利目标；孤立型储渗单元主要发育在辫状河沉积体系过渡带和体系间洼地，适宜采用直井或直井丛式井组开发。通过露头观测和加密井区井间干扰试验，对储渗单元发育规模定量开展表征，储渗单元空间发育规模为顺古水流方向 600 m 和垂直古水流方向 400 m 以内；苏里格气田在当前 600×800 m 井网的基础上，仍具备井网加密的条件，预计进一步加密到 400×600 m 井网可提高采收率 15%~20%。

参考文献(References)：

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[J]. 石油勘探与开发，39(3): 257–264.

国家能源局，2011. 中华人民共和国石油和天然气行业标准（SY/T 6832–2011）: 致密砂岩气地质评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社.

何东博，贾爱林，田昌炳，等. 2004. 苏里格气田储集层成岩作用及有效储集层成因[J]. 石油勘探与开发，31(3): 69–71.

何东博，王丽娟，冀光，等. 2012. 苏里格致密砂岩气田开发井距优化[J]. 石油勘探与开发，39(4): 458–464.

何东博，贾爱林，冀光，等. 2013. 苏里格大型致密砂岩气田开发井型井网技术[J]. 石油勘探与开发，40(1): 79–89.

何顺利，兰朝利，门成全，等. 2005. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式[J]. 石油学报，26(6): 25–29.

金振奎，杨有星，尚建林，等. 2014. 辫状河砂体构型及定量参数研究——以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学，25(3): 311–317.

雷卞军，李跃刚，李浮萍，等. 2015. 鄂尔多斯盆地苏里格中部水平井开发区盒 8 段沉积微相及砂体展布[J]. 古地理学报，17(1): 91–105.

李易隆，贾爱林，何东博，等. 2013. 致密砂岩有效储层形成的控制因素[J]. 石油学报，34(1): 71–82.

廖保方，张为民，李列，等. 1998. 辫状河现代沉积研究与相模式—中国永定河剖析[J] . 沉积学报，1: 34–39.

卢涛，刘艳侠，武力超，等. 2015. 鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩气藏稳产难点与对策[J]. 天然气工业，35(6): 43–52.

马新华，贾爱林，谭健，等. 2012. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践[J]. 石油勘探与开发，39(5): 572–579.

王国亭，何东博，王少飞，等. 2013. 苏里格致密砂岩气田储层岩石孔隙结构及储集性能特征[J]. 石油学报，34(4): 660–666.

吴胜和. 2010. 储层表征与建模[M]. 北京：石油工业出版社.

于兴河，马兴祥，穆龙新，等. 2004. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社.

钟建华，马在平. 1998. 黄河三角洲胜利Ⅰ号心滩的研究[J]. 沉积学报，16(2): 38–42.

Bridge J S and Mackey S D. 1993. A theoretical study of fluvial sandstone body dimensions [G]// Flint S S and Bryant I D et al., Geological modeling of hydrocarbon reservoirs. International Association of Sedimentologists, Special Publication 15, Utrecht, Netherlands: 213–236.

Cipolla C L and Mayerhofer M. 1996. Infill drilling and reserve growth determination in lenticular tight gas sands [C]// SPE Annual Technical Conference & Exhibition, Denver, Colorado: Society of Petroleum Engineers: 533-554.

Collinson J D. 1996. Alluvial sediments [G]// Reading H G. Sedimentary Environments: Processes, facies and stratigraphy. Oxford United Kingdom: Blackwell Science: 37-82.

Hearn C L, Ebanks W J, Tye R S, et al. 1984. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming [J]. Journal of Petroleum Technology, 36(8): 1335-1344.

Jia C Y, Jia A L, Zhao X, et al. 2017. Architecture and quantitative assessment of channeled clastic deposits, Shihezi sandstone (Low Permian), Ordos Basin, China [J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2(1): 11-20.

Kelly S. 2006. Scaling and hierarchy in braided rivers and their deposits: examples and implications for reservoir modeling [G]// Smith G S., Best J, Bristow C et al. Braided rivers: Process, deposits, ecology and management, Blackwell Publishing, London, 75-106.

Labourdette R. 2011. Stratigraphy and static connectivity of braided fluvial deposits of the Lower Escanilla Formation, South Central Pyrenees, Spain [J]. AAPG Bulletin, 95(4): 585-617.

Lane S N. 2006. Approaching the system-scale understanding of braided river behavior [G]// Smith G S, Best J, Bristow C et al. Braided rivers: Process, deposits, ecology and management, Blackwell Publishing, London, 107-135.

Leclair S F, Bridge J S, Wang F, et al. 1997. Preservation of crossstrata due to migration of subaqueous dunes over aggrading and non-aggrading beds: comparison of experimental data with theory [J]. Geoscience Canada, 24(1): 55-66.

Lunt I A, Smith G H, Best J L, et al. 2013. Deposits of the sandy braided South Saskatchewan River implications for the use of modern analogs in reconstructing channel dimensions in reservoir characterization [J]. AAPG Bulletin, 97(4): 553-576.

Lynds R and Hajek E. 2006. Conceptual model for predicting mudstone dimensions in sandy braided-river reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 90 (8): 1273-1288.

Martin J H. 1993. A review of braided fluvial hydrocarbon reservoirs: The petroleum engineer's perspective [G]// Best J L and Bristow C S. Braided rivers, Geological Society (London) Special Publication, 75: 333-368.

Miall A D. 1996. The Geology of Fluvial Deposits [M]. Springer Verlag: New York: 75-178.