

基于连续薄片统计的须二段岩石相组合及沉积旋回分析

王贵华¹, 林小兵^{1,2}, 刘莉萍³, 田景春^{1,2}, 郑宇超¹, 柳远松¹, 余文杰¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都, 610059; 2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”全国重点实验室, 四川 成都, 610059;

3. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都, 610041)

摘要: 目前对川西地区三叠系须家河组二段(须二段)已开展了沉积微相层面研究, 但不同微相背景下岩石相特征与沉积旋回存在差异。为了更加精细刻画岩石相特征并揭示其对有利储层的指示意义, 基于连续岩屑及岩心薄片鉴定的岩石学特征分析, 通过地质学手段及聚类分析技术, 结合测井数据等资料, 建立须二段更精细的物质组成、岩石相类型及沉积微相演化序列。须二段砂体划分为六个岩石相, 并识别出16个水下分流河道-分流间湾、水下分流河道-河口坝沉积旋回。统计显示水下分流河道下部的A1类岩石相、A4类岩石相物性较好, 因此水下分流河道的下部物性通常高于上部, 且普遍优于河口坝。须二段中亚段物性最好, 上亚段次之, 下亚段较差。水下分流河道物性普遍比河口坝好; 物性变化与旋回、岩石相的变化存在一定的相关性; 发育于水下分流河道中下部的A1、A4类岩石相更易形成有利储层。

关键词: 聚类分析; 物质组成; 岩石相组合; 沉积旋回; 须家河组二段; 川西地区

中图分类号: TE132 **文献标志码:** A

Analysis of lithofacies assemblage and sedimentary cycle of the second member of Xujiahe Formation based on continuous thin section statistics

WANG Guihua¹, LIN Xiaobing^{1,2}, LIU Liping³, TIAN Jingchun^{1,2},

ZHENG Yuchao¹, LIU Yuansong¹, YU Wenjie¹

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China)

Abstract: At present, the study of sedimentary microfacies has been carried out on the second member of the Triassic Xujiahe Formation (Xu2 member) in the western Sichuan region, but there are differences in the rock facies characteristics and sedimentary cycles under different microfacies backgrounds. To more accurately characterize the rock facies characteristics, it is indicative significance for favorable reservoirs. Based on the petrological characteristics of continuous cuttings and core thin sections identification, a more precise sequence of material composition, rock facies type, and sedimentary microfacies evolution is established in the Xu2 member using geological methods and cluster analysis techniques, combined with well-logging data and other information. The sand body in the Xu2 member can be divided into 6 rock facies, and 16 sedimentary cycles of underwater distributary channel-inter distributary bay and underwater distributary channel-estuarine bar are identified. Statistics show that the lower part of the underwater distributary channel has better physical properties in rock facies A1 and A4, so the physical properties of the lower part of the underwater distributary channel are usually higher than those of the upper part and are generally better than those of estuary dam. The physical properties of the middle subsegment in the second section are the best, followed by the upper subsegment and the lower subsegment. The physical properties of underwater distributary channels are generally better than those of estuarine dams. A certain correlation exists between the changes in physical properties and cycle and rock facies. A1 and A4 rock facies developed in the middle and lower part of underwater distributary channels are more likely to form favorable reservoirs.

Key words: cluster analysis; material composition; lithofacies combination; sedimentary cycle; the second member of Xujiahe Formation; western Sichuan region

引用格式: 王贵华, 林小兵, 刘莉萍, 等. 基于连续薄片统计的须二段岩石相组合及沉积旋回分析[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(1): 29-37.

WANG Guihua, LIN Xiaobing, LIU Liping, et al. Analysis of lithofacies assemblage and sedimentary cycle of the second member of Xujiahe Formation based on continuous thin section statistics[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 29-37.

收稿日期: 2023-12-02; **改回日期:** 2024-01-10。

第一作者简介: 王贵华(1997—), 女, 在读硕士研究生, 沉积学及地层古生物学专业。E-mail: 992340501@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金“致密砂岩含F成岩流体地球化学演化与硅质碎屑颗粒溶蚀机制”(42172135)。

四川盆地晚三叠世的沉积格局,经历了从海相到陆相的演化过程^[1-3]。随着构造运动的转变,尤其是上三叠统须家河组沉积期龙门山开始缓慢隆升,川西坳陷内的物源供给逐渐呈多源化的趋势^[3]。多物源体系与复杂的沉积环境演化,使得川西地区须家河组沉积相横向快速多变。前人对川西地区须家河组的地层划分、物源供给、沉积相特征、砂体充填方式及展布规律等开展了大量研究^[3-14],如通过着重精细刻画新场地区不同水动力背景下的沉积微相与砂体展布特征,明确新场地区须家河组二段(须二段)内不同时期砂体展布的主控因素,揭示储集砂体分布规律等^[15-18]。

尽管目前针对川西地区须家河组辫状河三角洲沉积相的刻画已经做到了微相尺度。由于物源供给及水动力条件等的差异,同一微相在岩性组合、物性特征等方面亦具有较大变化^[19-20]。这种变化制约着精细的砂体对比及有利区预测,也为下步勘探开发方案的制订增加了难度。因此,基于物质组成的精细分析,进而开展砂体岩性变化及微相组合类型的精细刻画,不仅可以为揭示须家河组沉积环境演化提供基础数据,也可作为优质储层预测提供重要参考。

本文以川西地区新场构造带为重点,通过对213张连续的岩心、岩屑薄片观察及大量数据的统计,运用聚类分析手段结合测井资料将水下分流河道与河口坝数据分别进行细致分类,划分更为精细的岩石相类型,并分段分别研究不同微相岩石相组合特征,根据砂体粒度变化的规律性划分旋回,再结合旋回研究须二段沉积环境的演化特征。

1 区域地质背景

四川盆地位于中国西南部扬子准地台的西北侧,上三叠统一第四系盆地经历了印支运动、燕山运动、喜山运动等一系列复杂的构造运动,形成了复杂多样的构造格局^[6,21-22]。川西坳陷在四川盆地的西部,整体为北东向延伸,内部分为6个构造单元^[23-24]。其中新场构造带位于川西坳陷中部,属于川西坳陷的一个次级构造单元,是一个北东东向的多期形成的古今复合大型隆起带^[25-27]。在晚三叠世,受印支运动与安县运动的影响,盆地经历了从海相—海—陆过渡相—陆相的沉积转变,新场地区刚好处于陆相沉积的三角洲前缘地带,主要发育辫状河三角洲沉积。须二段以青灰色、灰色中—厚块

状细—粗粒岩屑砂岩、长石岩屑砂岩为主,夹深色薄层泥岩及粉砂岩,含薄煤层、煤线或炭质页岩,中部泥页岩段含植物化石^[28]。

新场构造带须二段自上而下划分为3个亚段,包括上亚段、中亚段、下亚段,须二段下亚段中下部岩性为粗砂岩与中砂岩互层,上部岩性为泥岩;中亚段岩性为中粗砂岩;上亚段地层整体为大套泥岩夹不等厚中砂岩。地层整体展布特征为东部地层薄,西部地层厚,岩性为大套砂岩夹中薄层泥岩,经过多期次的构造运动与沉积充填,须二段形成现今复杂多变的地层,使得对须二段的层序地层规律研究较难把握,所以对典型井的连续薄片统计,可以为解决这种复杂、快速的沉积充填变化问题提供参考。

2 须家河组主要岩石类型及矿物组成特征

对须二段典型井进行连续薄片镜下观察,重点进行石英、长石、岩屑等骨架颗粒的含量统计及特征分析,也对杂基、胶结物的含量进行统计。

根据薄片统计的石英(Q)、长石(F)、岩屑(R)含量,以曾允孚等砂岩分类^[29],在三角图上投点后发现,须二段岩石类型以岩屑砂岩和岩屑石英砂岩为主,岩屑长石砂岩次之,有少量的石英砂岩、长石石英砂岩和长石岩屑砂岩(图1),另有少量泥页岩夹层。砂岩中的石英颗粒整体磨圆以次棱角状为主,胶结类型以孔隙式胶结为主。统计结果显示,在不同结构组分中,颗粒含量最高,普遍在80%以上。胶结物含量大部分较低,在10%以下,偶有突增,可达30%左右。杂基含量最低,基本10%以下。

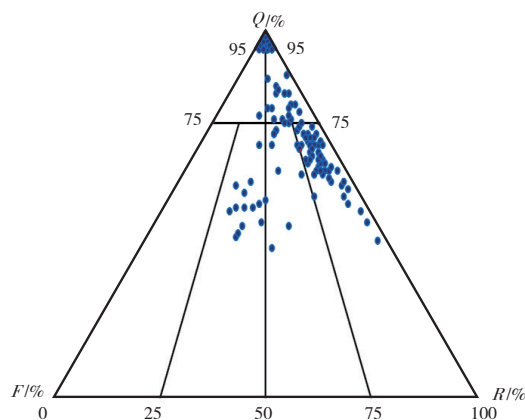


图1 须二段砂岩岩石类型三角图

须二段骨架颗粒特征表现为:从底到顶石英含量整体较高,平均70%以上,呈缓“M”型变化特征。长石含量整体较低,平均8%以下,前期出现突增,

降低后一直维持在较低水平。岩屑的含量呈缓锯齿状型变化特征,整体呈上升趋势,填隙物整体含量较少,变化不大,局部含量有突变特征。岩屑中主要以沉积岩岩屑和变质岩岩屑为主,少量岩浆岩岩屑,其中变质岩岩屑中硅质岩屑含量较多,以燧石和变质石英岩岩屑为主。

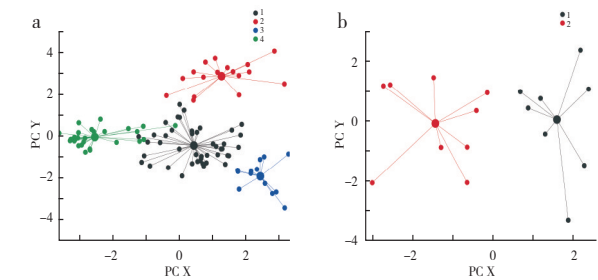
薄片统计到的杂基含量较少,主要以泥质为主。胶结物包括多期次的方解石胶结,也见白云石、硅质胶结物等。另外可见绿泥石环边。其中方解石和白云石含量都是处于较低水平,白云石含量略高于方解石。硅质胶结物主要是石英的次生加大,平均含量6%以下。黏土矿物含量极低,平均2%左右,最高不超过5%。

3 岩石相类型划分及特征

3.1 基于聚类分析法的岩石相划分

本文分别将水下分流河道与河口坝数据用origin软件进行聚类分析处理,首先将数据导入origin软件进行标准化处理,以消除数据间不同单位

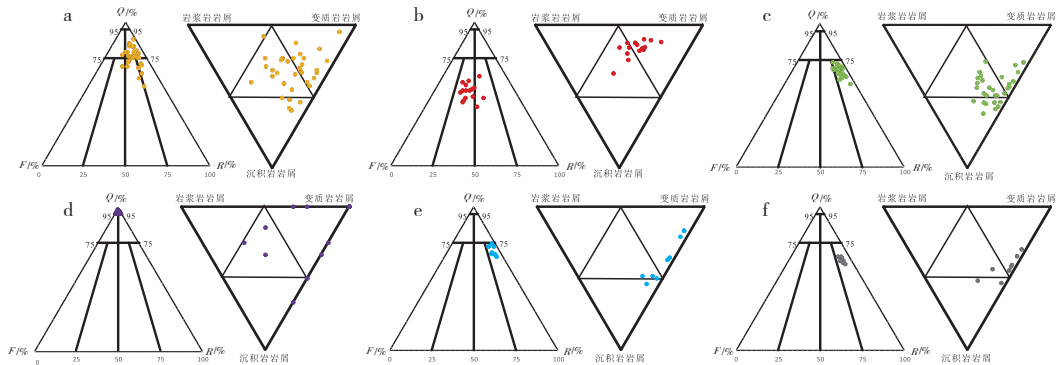
与量纲问题。运用K均值分类法,将分别取自水下分流河道与河口坝的岩屑数据进行分类,得出表示薄片样品间亲疏关系的图(图2),根据数据团簇集中度,共分为6种岩石相类型。其中水下分流河道分为四类(图3a、b、c、d),分别为中粒岩屑石英砂岩相(A1类)、中粒岩屑长石砂岩相(A2类)、细一中粒岩屑砂岩相(A3类)、粗粒石英砂岩相(A4类)。河口坝分为两类(图3e、f),分别为中粒岩屑砂岩相(B1类)、细一中粒岩屑砂岩相(B2类)。



a. 水下分流河道聚类分析分类; b. 河口坝聚类分析分类

图2 聚类分析分类

(注:图中坐标PC表示样本参数距离聚类中心的距离)



a. A1类 中粒岩屑石英砂岩岩石相; b. A2类 中粒岩屑长石砂岩岩石相; c. A3类 细一中粒岩屑砂岩岩石相;
d. A4类 粗粒石英砂岩岩石相; e. B1类 中粒岩屑砂岩岩石相; f. B2类 细一中粒岩屑砂岩岩石相

图3 新场地区须二段不同岩石相砂岩类型及岩屑类型三角图

3.2 岩石相特征

结合在三角图中投点特征(图3),基于聚类分析划分的各类岩石相的特征如下:

A1类:中粒岩屑石英砂岩岩石相,发育于水下分流河道微相中(图4a)。对于新场地区而言,岩屑中沉积岩岩屑较多说明物源来自龙门山物源区,变质岩岩屑较多说明来自米仓山一大巴山物源区。A1类岩石相中,岩屑中沉积岩岩屑与变质岩岩屑含量相当,但含量较低,分别为6.03%、7.78%,可以认为砂岩来自米仓山一大巴山与龙门山两个物源区,且此类岩石相砂岩处于较高能环境,水动力相对

较强。

A2类:中粒岩屑长石砂岩岩石相,发育于水下分流河道微相中(图4b)。岩屑中以变质岩岩屑为主,平均含量10.81%,可以认为A2类岩石相砂岩主要来自米仓山一大巴山物源区,物源区构造活动频繁,且近物源堆积。

A3类:细一中粒岩屑砂岩岩石相,发育于水下分流河道微相中(图4c)。砂岩成熟度不好,且粒度较细。岩屑中沉积岩岩屑与变质岩岩屑含量高且相当,含量分别为12.80%、12.43%,可以认为A3类岩石相砂岩同样来自米仓山一大巴山与龙门山两

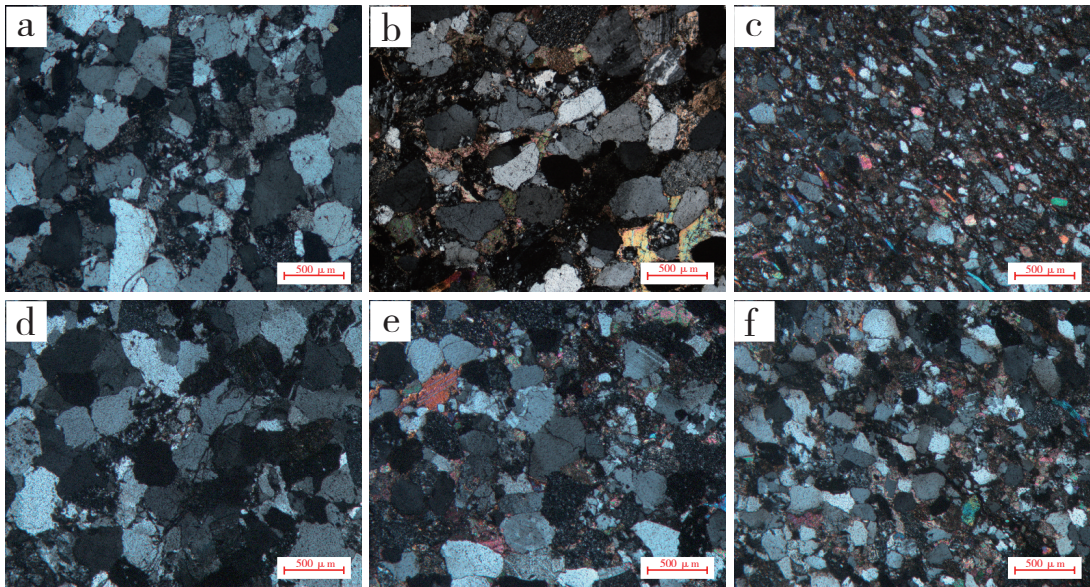
个物源区。

A4类:粗粒石英砂岩岩石相,发育于水下分流河道微相中(图4d)。从各组分含量来看,此类岩石相砂岩成熟度较高,且粒度较粗,可以认为此时中亚段水动力最强,物源区龙门山、大巴山—米仓山地质活动较为稳定。

B1类:中粒岩屑砂岩岩石相,发育于河口坝微相中(图4e)。岩屑中沉积岩岩屑与变质岩岩屑含量相当,但含量较低,分别为10.11%、15.44%,认为该类岩石相砂岩同样来自米仓山—大巴山与龙门山两个物源区,但主要来自米仓山—大巴山。砂岩成熟度一般,粒度以中粒为主,说明此类岩石相砂岩水动力条件一般。

B2类:细—中粒岩屑砂岩岩石相,岩屑中沉积岩岩屑与变质岩岩屑含量相当(图4f),平均含量分别为13.63%、16.63%,来自米仓山—大巴山与龙门山两个物源区,主要是米仓山—大巴山物源区。成熟度一般,且粒度较细,说明此类岩石相砂岩所处环境水动力条件较弱。

从各岩石相结构及成分特征可以看出,其搬运距离由远到近依次为B1—B2—A4—A1—A3—A2,水动力由强至弱依次为A4—B1—A1—A2—B2—A3(表1)。



a.A1类; b.A2类; c.A3类; d.A4类; e.B1类; f.B2类

图4 新场地区须二段不同岩石相砂岩镜下图片

表1 不同岩石相特征差异性统计

岩石相类型	A1	A2	A3	A4	B1	B2
粒度	中粒	中粒	细-中粒	粗粒	中粒	细-中粒
搬运距离	近	最近	较近	远	最远	较远
水动力	强	弱	最弱	最强	较强	较弱

4 基于岩石相组合的沉积旋回划分及特征

4.1 沉积旋回特征

砂岩沉积旋回主要反映砂岩粒度在垂向上的变化,一个沉积旋回表现为一个向上变粗或变细的沉积序列。砂岩粒度变化与沉积环境的水动力强度有关,而且一个完整的沉积旋回可以反映从湖侵

到湖退整个地层沉积的过程^[29-31]。由于不同微相具有不同的岩性变化,因此,岩石相的变化也代表了沉积环境的演化。基于这样的关系,将上述划分岩石相标定在沉积微相柱状图中(图5),可以建立岩石相与微相的关系组合,并揭示不同微相中岩石相的分布规律。A1类在须二段的三个亚段中呈分散分布,中亚段中下部与下亚段发育较多,主要分布于每个水下分流河道沉积旋回的中下部。A2类

在中亚段中下部发育较多,大多分布于水下分流河道中下部。A3类主要发育在水下分流河道沉积旋回的中上部,在须二段中、上亚段密集分布,下亚段较少发育。A4类只分布在中亚段的中上部。B1类、B2类分布在河口坝微相。

根据各类岩石相的岩屑组分特征总结发现,

A1、A4类岩石相代表强水动力沉积条件,A2、B1类岩石相沉积水动力强度次之,A3、B2类岩石相沉积水动力条件相对最弱。基于上述岩石相、砂体的变化特征,结合测井曲线特征,将新场地区须家河组二段划分为16个水下分流河道-分流间湾、水下分流河道-河口坝沉积旋回(图5)。

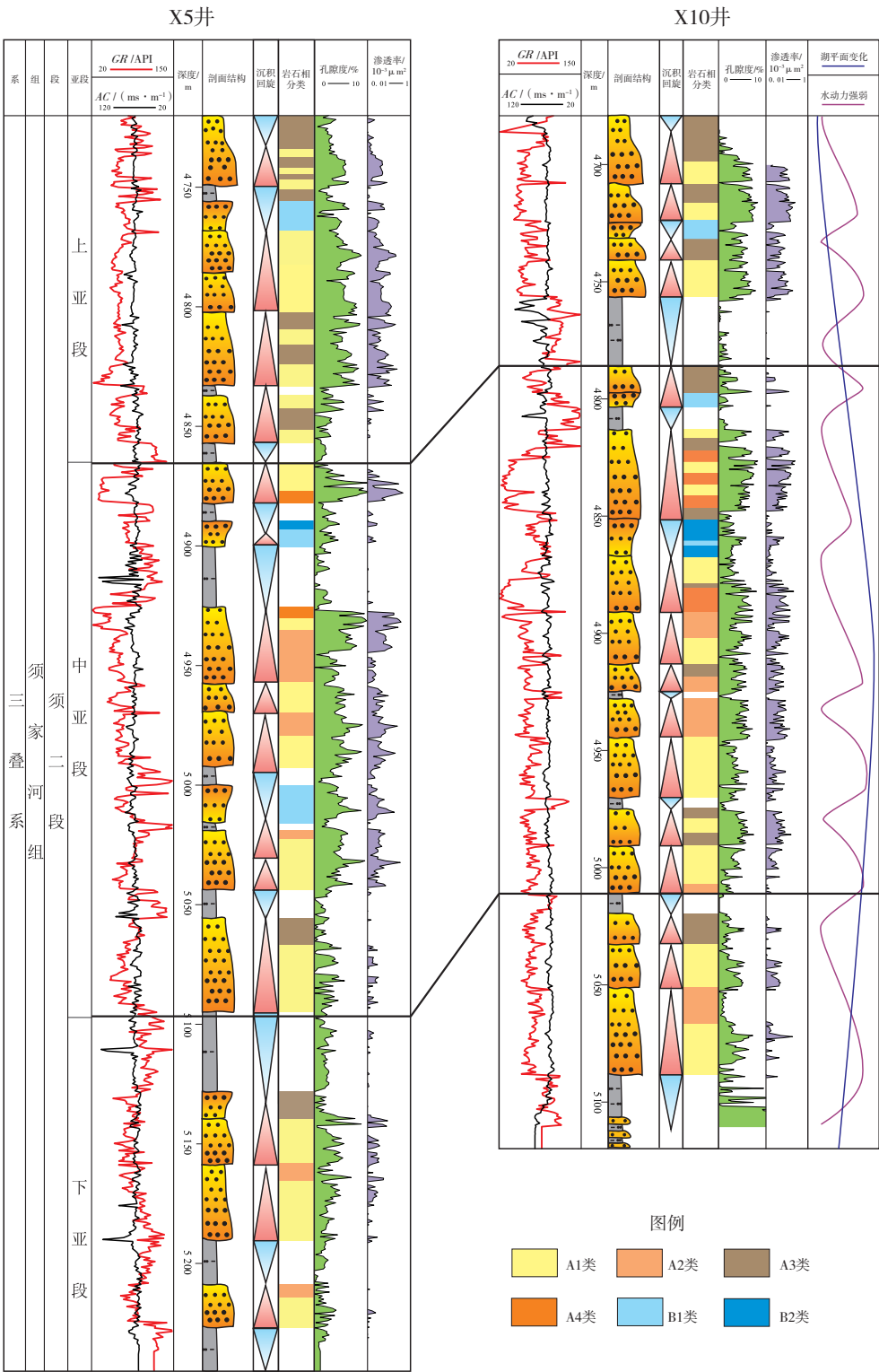


图5 须家河组二段沉积旋回及物性变化

须二段下亚段发育从浅湖-水下分流河道-分流间湾的多个沉积微相类型。其中水下分流河道砂岩岩石相呈A1→A2→A1→A3的类型变化,整体粒度向上逐渐变细,砂体厚度也逐渐变薄,水动力逐渐变弱,共形成4个粒度向上变细的沉积旋回,局部与下部粒度逐渐向上变粗的浅湖泥岩刚好组成一个连续旋回(图5)。

中亚段主要发育水下分流河道、河口坝与分流间湾微相,其中中亚段下部水下分流河道微相的岩石相多为A1→A2→A3的组合,根据岩石相变化,可进一步划分为9个粒度向上变细的沉积旋回,每个旋回下部为A1类岩石相,中上部为A2、A3类岩石相;其中中亚段中上部的部分旋回底部为A4类岩石相,或A1、A4类岩石相交替变化,水动力也达到了最强,物性较好;河口坝微相主要由B2类岩石相组成,中间夹带B1类岩石相,物性较差一些,形成1个逆旋回,与上部粒度向上变细的沉积旋回组成一个完整沉积旋回(图5)。

上亚段发育分流间湾-水下分流河道-河口坝等微相类型。其中水下分流河道和河口坝砂体的岩石相变化,表现为A1→A3→B1→A1→A3→A1→A3,多A1→A3岩石相变化组合,经历了四次粒度向上变细的过程,与一个粒度向上变粗的过程,水动力由强变弱变强再变弱,可划分为四个沉积旋回。每个旋回中下部为A1类岩石相,上部为A3类岩石相,顶部物性较差,中下部物性较好(图5)。

4.2 地质意义

不同岩石相砂岩通常具有明显不同的物性特征。根据各类岩石相物性统计,编制了不同岩石相物性平均值分布(图6)。结合图5表明,A1、A4类岩石相砂岩储层,具有较高的孔隙度-渗透率组合,物性较好,均优于A2、A3类岩石相储层。河口坝孔隙度、渗透率,整体低于水下分流河道砂体物性。不同岩石相碎屑组分含量特征统计表明,A1、A4类岩石相砂岩都有石英含量高或者长石含量高,杂基、碳酸盐岩矿物含量少,硅质胶结物含量高的特征。石英含量高,胶结物少,原生孔隙得以保存,所以形成较好的物性条件。长石含量高,长石溶蚀形成较多孔隙,较有利于储层发育及物性优化(图6)。

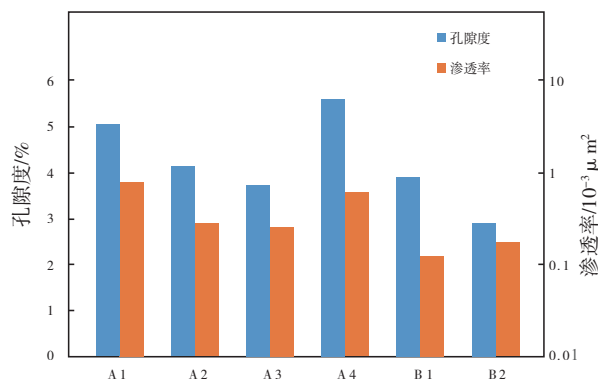


图6 须二段各类岩石相物性直方分布

不同水下分流河道的物性通常具有明显的差异。把沉积微相与岩石相综合起来分析,可以发现,发育A1、A4类岩石相的水下分流河道砂体,物性更好。这两类岩石相主要分布于水下分流河道中下部,可以认为是由于水下分流河道中下部一般水动力较强,粒度较粗,结构成熟度高,具有较多原生孔隙;而水下分流河道上部水动力较弱,粒度细,压实作用强,不利于原生孔隙的保存。所以处于水下分流河道中下部强水动力环境的、粒度相对较粗的A1、A4类岩石相物性最好,最有利于储层的发育。

5 结论

(1)研究区须二段砂岩骨架颗粒存在差异性变化特征,石英含量高,纵向上呈缓“M”型变化,长石含量低,局部突变,岩屑含量呈锯齿状变化。

(2)须二段可划分为六类岩石相(A1、A2、A3、A4、B1、B2),以及16个水下分流河道-分流间湾、水下分流河道-河口坝沉积旋回。

(3)每期水下分流河道中下部由A1、A4类岩石相为主组成的砂岩储层,其物性优于上部的A2、A3类岩石相组合储层,且普遍优于河口坝砂岩储层。须二段物性变化与岩石相组合、沉积旋回存在明显相关性,可为须二段优质储层预测提供参考。

参考文献:

- [1] 李伟.四川盆地晚三叠世咸化环境的形成与沉积体系的演化特征[J].天然气工业,2011,31(9):31-38,134.
LI Wei. Formation of a saline environment and evolution of a sedimentary system in the Late Triassic reservoirs of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 31-38, 134.

- [2] 毛琼,郑荣才,邹光富,等.川东北前陆盆地上三叠统沉积相及沉积演化[J].沉积与特提斯地质,2012,32(1):1-11.
MAO Qiong, ZHENG Rongcai, ZOU Guangfu, et al. Upper Triassic sedimentary facies and sedimentary evolution in the northeastern Sichuan foreland basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(1): 1-11.
- [3] 陈洪德,刘磊,林良彪,等.川西坳陷西部龙门山隆升时期上三叠统须家河组沉积响应[J].石油与天然气地质,2021,42(4):801-815.
CHEN Hongde, LIU Lei, LIN Liangbiao, et al. Depositional responses of Xujiahe Formation to the uplifting of Longmenshan during the Late Triassic, western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 801-815.
- [4] 叶黎明,陈洪德,胡晓强,等.川西前陆盆地须家河期高分辨率层序格架与古地理演化[J].地层学杂志,2006,30(1):87-94,100.
YE Liming, CHEN Hongde, HU Xiaoqiang, et al. The framework of the high-resolution sequence and the paleogeographic evolution of the Xujiahe Formation in the west Sichuan foreland basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(1): 87-94, 100.
- [5] 姜在兴,田继军,陈桂菊,等.川西前陆盆地上三叠统沉积特征[J].古地理学报,2007,9(2):143-154.
JIANG Zaixing, TIAN Jijun, CHEN Guiju, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Triassic in western Sichuan foreland basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(2): 143-154.
- [6] 郑荣才,朱如凯,翟文亮,等.川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J].中国地质,2008,35(2):246-255.
ZHENG Rongcai, ZHU Rukai, ZHAI Wenliang, et al. Tectonic evolution and sequence filling patterns in the western Sichuan foreland-like basin in the Upper Triassic Xujiahean period [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 246-255.
- [7] 曾洪扬,陈洪德,林良彪,等.川西前陆盆地晚三叠世构造层序岩相古地理特征[J].石油实验地质,2009,31(1):46-49,53.
ZENG Hongyang, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Tectonic and sequence-based lithofacies paleogeographic features of Late Triassic in western Sichuan foreland basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31(1): 46-49, 53.
- [8] 叶泰然,李书兵,吕正祥,等.四川盆地须家河组层序地层格架及沉积体系分布规律探讨[J].天然气工业,2011,31(9):51-57,135-136.
YE Tairan, LI Shubing, LYU Zhengxiang, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary system distribution of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 51-57, 135-136.
- [9] 朱如凯,白斌,刘柳红,等.陆相层序地层学标准化研究和层序岩相古地理:以四川盆地上三叠统须家河组为例[J].地学前缘,2011,18(4):131-143.
ZHU Rukai, BAI Bin, LIU Lihong, et al. Research on standardization of continental sequence stratigraphy and palaeogeography: A case study from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 131-143.
- [10] 郑荣才,戴朝成,罗清林,等.四川类前陆盆地上三叠统须家河组沉积体系[J].天然气工业,2011,31(9):16-24,132-133.
ZHENG Rongcai, DAI Chaocheng, LUO Qinglin, et al. Sedimentary system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan forelandoid basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 16-24, 132-133.
- [11] 刘焕,彭军,李丽娟,等.川西坳陷中段上三叠统须家河组砂岩特征及物源分析[J].中国地质,2012,39(5):1271-1279.
LIU Huan, PENG Jun, LI Lijuan, et al. Characteristics and provenance analysis of the Upper Tertiary Xujiahe Formation sandstone in the middle part of West Sichuan depression [J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1271-1279.
- [12] 戴朝成,郑荣才,任军平,等.四川前陆盆地上三叠统须家河组物源区分析及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(4):1085-1096.
DAI Chaocheng, ZHENG Rongcai, REN Junping, et al. Provenance analysis of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan foreland basin and its geology implications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1085-1096.
- [13] 张国坤,张汶,郭维,等.辽东湾海域古近系辫状河三角洲砂体沉积特征[J].复杂油气藏,2023,16(3):241-247.
ZHANG Guokun, ZHANG Wen, GUO Wei, et al. Sedimentary characteristics of sand bodies in the braided river delta of Paleogene in Liaodong Bay [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 241-247.
- [14] 李储华,郑元财,刘志敏,等.高邮凹陷阜三段砂体展布特征及控砂模式[J].复杂油气藏,2022,15(1):17-22.

- LI Chuhua, ZHENG Yuancai, LIU Zhimin, et al. Distribution characteristics and sand control modes of sandbodies in E_1f_3 of Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(1): 17-22.
- [15] 陈辉, 田景春, 蒋裕强, 等. 川中地区上三叠统须二段和须四段储集砂体成因类型及其发育的主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(3): 12-15.
- CHEN Hui, TIAN Jingchun, JIANG Yuqiang, et al. Genetic types and main controlling factors of sandbodies in second and fourth members of Xujiahe Formation, Upper Triassic, central Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(3): 12-15.
- [16] 冯明石. 四川盆地中西部地区上三叠统须家河组沉积体系及层序地层研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- FENG Mingshi. Study on sedimentary system and sequence stratigraphy of the Xujiahe Formation of the Upper Triassic series in central and western Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [17] 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 等. 川西须家河组前陆盆地构造层序及沉积充填响应特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 11-23.
- LIU Junlong, JI Youliang, YANG Keming, et al. Tectono-stratigraphy and sedimentary infill characteristics of Xujiahe Formation in western Sichuan foreland basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 11-23.
- [18] 王兴龙. 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组沉积砂体展布及主控因素[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- WANG Xinglong. Sedimentary sand body distribution and main controlling factors of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [19] 林良彪, 陈洪德, 翟常博, 等. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 511-517.
- LIN Liangbiao, CHEN Hongde, ZHAI Changbo, et al. Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2006, 28(6): 511-517.
- [20] 雷章树, 印森林, 程皇辉, 等. 阜康断裂带中段三叠系克拉玛依组沉积微相及优质储层分布[J]. 地质科学, 2023, 58(4): 1255-1276.
- LEI Zhangshu, YIN Senlin, CHENG Huanghui, et al. Distribution of sedimentary microfacies and high-quality reservoir of Triassic Karamay Formation in the middle part of Fukang fracture zone [J]. Chinese Journal of Geology, 2023, 58(4): 1255-1276.
- [21] 李智武, 刘树根, 林杰, 等. 川西坳陷构造格局及其成因机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 645-653.
- LI Zhiwu, LIU Shugen, LIN Jie, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan depression in China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 645-653.
- [22] 李忠权, 应丹琳, 李洪奎, 等. 川西盆地演化及盆地叠合特征研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2362-2370.
- LI Zhongquan, YING Danlin, LI Hongkui, et al. Evolution of the Western Sichuan Basin and its superimposed characteristics, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2362-2370.
- [23] 关文均, 郭新江, 智慧文. 四川盆地新场气田须家河组二段储层评价[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 98-103.
- GUAN Wenjun, GUO Xinjiang, ZHI Huiwen. Reservoir evaluation of the second member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field, Sichuan Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(4): 98-103.
- [24] 叶素娟, 杨映涛, 张玲. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组三段和五段“甜点”储层特征及分布[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 829-840, 862.
- YE Sujuan, YANG Yingtao, ZHANG Ling. Characteristics and distribution of “sweet spot” reservoirs in the third and fifth members of Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 829-840, 862.
- [25] 汪珊, 张宏达, 孙继朝, 等. 川西含油气拗陷上三叠统含水系统和水文地质期的划分和定位[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 591-596.
- WANG Shan, ZHANG Hongda, SUN Jichao, et al. The division and positioning of Upper Triassic aquifer systems and hydrogeological periods in Western Sichuan petroleum depression [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(6): 591-596.
- [26] 曹烈. 致密砂岩天然气成藏动力学研究——以川西坳陷上三叠统须家河组为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- CAO Lie. Gas accumulation dynamics of tight sandstone reservoir: Example from the Upper Xujiahe Formation in Western Sichuan depression [D]. Chengdu: Chengdu

- University of Technology, 2010.
- [27] 罗龙, 孟万斌, 冯明石, 等. 致密砂岩中硅质胶结物的硅质来源及其对储层的影响——以川西坳陷新场构造带须家河组二段为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 435–443.
- LUO Long, MENG Wanbin, FENG Mingshi, et al. Silica sources of quartz cements and its effects on the reservoir in tight sandstones: A case study on the 2th member of the Xujiahe Formation in Xinchang structural belt, Western Sichuan depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 435–443.
- [28] 章顺利. 四川盆地中西部上三叠统须家河组二段孔隙型致密砂岩储层特征与形成机理[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- ZHANG Shunli. Characteristics and formation mechanism of porous tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation, Upper Triassic, central and western Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [29] 伊海生. 沉积旋回叠置形式的波形分析及旋回层序划分方法[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 855–864.
- YI Haisheng. The waveform graphic analysis of cyclic stacking patterns in sedimentary successions and detection methods of cyclostratigraphic sequences [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 855–864.
- [30] 宋慧波, 黄志伟, 胡斌, 等. 豫西禹州地区太原组旋回沉积与海平面变化特征[J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3790–3802.
- SONG Huibo, HUANG Zhiwei, HU Bin, et al. Characteristics of cyclic deposition and sea level changes of the Taiyuan Formation in Yuzhou city of western Henan province [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3790–3802.
- [31] 孙春燕, 胡明毅, 薛丹. 松辽北肇源地区泉三段、泉四段岩相类型及组合规律[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(2): 10–14.
- SUN Chunyan, HU Mingyi, XUE Dan. Lithofacies types and sedimentary assemblage law: A case of Quan3rd and 4th members in Zhaoyuan area of northern Songliao Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(2): 10–14.

(编辑 刘义梅)

(上接第15页)

- (6): 760–766.
- [3] 王章青, 李华东, 杜二鹏. 苏北盆地海安凹陷现今构造应力场特征及构造样式[J]. 地质力学学报, 2012, 18(1): 22–31.
- WANG Zhangqing, LI Huadong, DU Erpeng. Features of present structural stress field and structural pattern in Haian depression, Jiangsu Oilfield [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(1): 22–31.
- [4] 朱光, 姜芹芹, 朴学峰, 等. 基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用——以苏北盆地南部高邮凹陷为例[J]. 地质学报, 2013, 87(4): 441–452.
- ZHU Guang, JIANG Qinqin, PIAO Xuefeng, et al. Role of basement faults in faulting system development of a rift basin: An example from the Gaoyou Sag in southern Subei Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 441–452.
- [5] 王伟锋, 周维维, 周杰, 等. 金湖凹陷隐性断裂带形成机制及分布[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1395–1405.
- WANG Weifeng, ZHOU Weiwei, ZHOU Jie, et al. Formation mechanism and distribution of buried fault zones in the Jinhu Sag [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1395–1405.
- [6] 朱光, 徐嘉炜, 刘国生, 等. 下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J]. 中国区域地质, 1999(1): 74–80.
- ZHU Guang, XU Jiawei, LIU Guosheng, et al. Tectonic pattern and dynamic mechanism of the foreland deformation in the lower Yangtze region [J]. Regional Geology of China, 1999(1): 74–80.
- [7] 丁卫星, 赵挺, 赵胜, 等. 下扬子前陆盆地北部构造变形特征研究[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(2): 1–6.
- DING Weixing, ZHAO Ting, ZHAO Sheng, et al. Characteristics of structural deformation in the northern part of lower Yangtze foreland basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(2): 1–6.

(编辑 刘义梅)