

昭通示范区五峰组—龙马溪组页岩气 成藏类型与有利区分布

徐政语¹, 梁兴², 鲁慧丽¹, 陈薇¹, 张介辉²,
舒红林², 王高成², 徐云俊¹, 唐协华²

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油浙江油田公司

摘要 依据昭通示范区五峰组—龙马溪组页岩沉积背景与环境、构造改造历程、储层充填特征与记录等,结合页岩成烃演化史,明确页岩气有利区分布主要受沉积期岩相、改造期变形强度及保存期封闭性能3个因素控制,按照现今页岩气保存单元将示范区页岩气藏划分为背斜、向斜与斜坡3种类型。背斜型(太阳、海坝等)以富集原油裂解气为主,主控因素为后期改造强度与保存单元封闭性能,有利区以孤立、继承性背斜为主;向斜型(罗场—建武、罗布等)以富集干酪根热降解气为主,主控因素为沉积相带及保存单元封闭性能,有利区以继承性宽缓复向斜为主,多连片分布;斜坡型(罗场—建武复向斜南翼黄金坝—紫金坝及太阳—海坝背斜之间云山坝过渡区等)以富集混源气(原油裂解气与干酪根热降解气)为特征,有利区多沿背斜、向斜之间的翼部过渡区分布。

关键词 页岩气;成藏类型;保存单元;有利区;昭通示范区

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

0 前言

近年来,随着南方海相页岩气选区评价工作的逐渐深入,以及川南地区页岩气勘探领域的不断拓展与突破^[1-5],围绕昭通示范区五峰组—龙马溪组页岩沉积环境、储层品质、页岩气成藏条件、气层甜点控制因素等方面开展了大量的研究工作^[6-10],形成了“深水陆棚控源储、改造强度控保存、立体封闭控富集”的地质认识,并在中深层及浅层页岩气勘探领域取得了突破与进展,目前已建成 $20\times 10^8\text{ m}^3$ 产能的示范基地,初步形成了“强改造、过成熟、高应力”为特色的山地页岩气选区评价与勘探开发技术系列^[11-12]。

随着昭通示范基地页岩气建产规模的逐步扩大与研究工作的不断深入,探寻页岩气富集区与高产区成为当前勘探的重点,页岩气成因与成藏、富集与高产的控制因素成为备受关注的热点问题^[13-34]。结合近年来昭通示范区页岩气勘探成果与技术经验,本文通过对五峰组—龙马溪组页岩沉积

背景与环境、页岩改造与成烃演化、储层特征与充填记录等的综合分析,从页岩气成藏条件与构造格局出发,探讨川南地区页岩气成藏类型与富集高产控制因素,优选勘探有利区。

1 沉积背景与环境

昭通示范区紧邻川南长宁示范区,在奥陶系五峰组—志留系龙马溪组沉积期处于上扬子区前陆闭塞海湾南缘^[6],岩相古地理格局呈现出带状分布的特点,自北向南由深水陆棚过渡到浅水陆棚再到滨岸相^[6-7](图1)。示范区北部主要发育深水陆棚硅质页岩微相,中部发育深水—半深水陆棚碳质—粉砂质页岩微相,南部发育浅水陆棚灰质—砂质页岩微相及滨岸砂岩微相。富有机质页岩沉积中心位于示范区北部,中部页岩厚度明显减薄,南部页岩品质明显变差(图1),突显五峰组—龙马溪组在页岩沉积期具有前陆盆地边缘成盆背景以及深水—浅水陆棚至滨岸相的过渡型岩相古地理格局。

收稿日期:2021-02-21;改回日期:2021-06-29;网络出版日期:2021-12-05

本文受国家重点研发计划“川南国家级页岩气示范区地震活动性风险评估与对策研究”(编号:2020YFA0710600)项目资助

第一作者:徐政语,构造地质学博士,正高级工程师,主要从事南方海相油气地质综合研究及选区评价工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: xuzy_hz@petrochina.com.cn

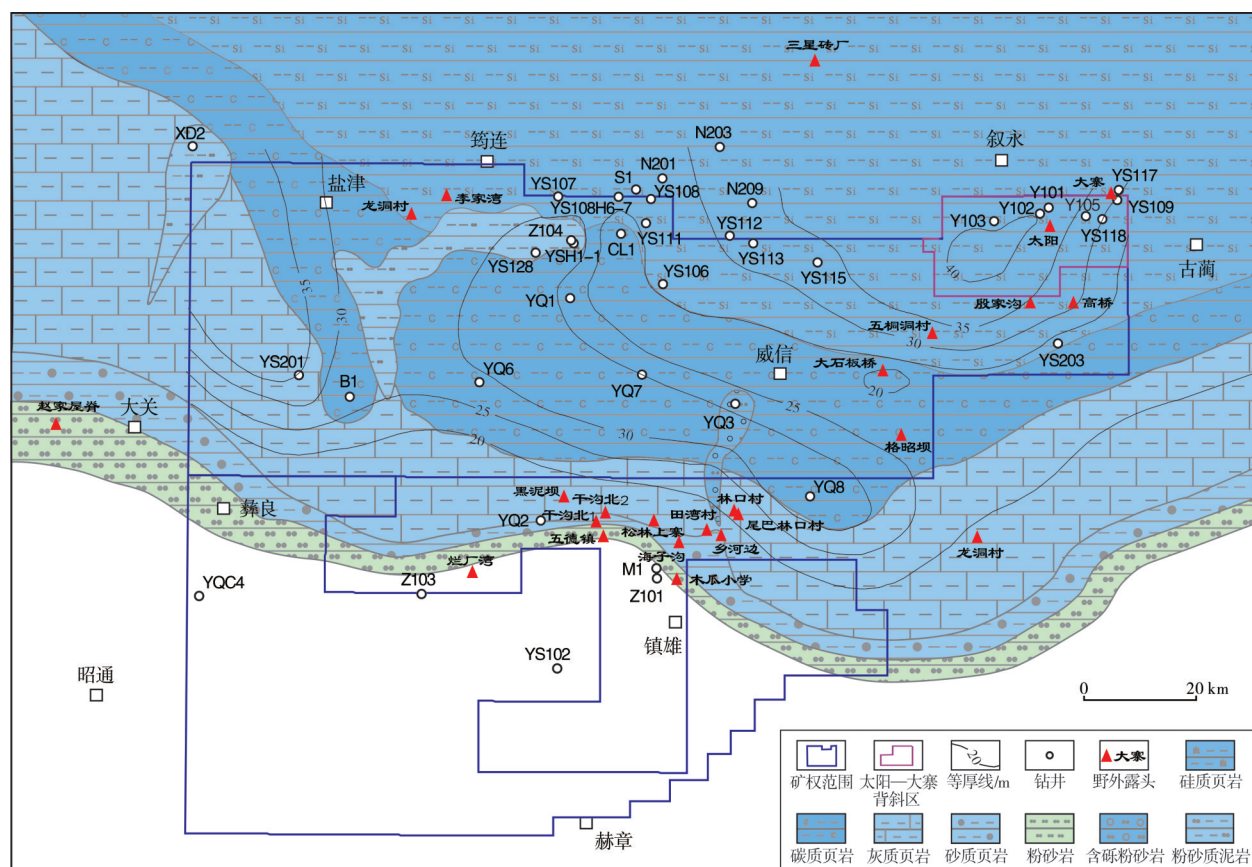


图1 昭通示范区及邻区五峰组—龙马溪组龙一₁亚段沉积期岩相古地理简图

Fig. 1 Lithofacies and paleogeography of Wufeng Formation-Longmaxi Submember 1¹ in Zhaotong Demonstration Area and its periphery

2 页岩改造与成烃演化

昭通示范区地处特提斯与滨太平洋两大构造域叠合部位,区域上处于江南—雪峰与三江造山带前缘冲褶带向四川盆地南缘及西南缘低陡褶皱带过渡的盆山转换区(图2a),经历了多期地质与构造事件,以发育槽档转换褶皱样式为特点^[24]。依据沉积记录及地层接触关系、成矿期、构造形迹交切关系等综合分析^[34-37],示范区自早古生代以来至少经历了4期改造活动。

第Ⅰ期改造活动发生于晚奥陶世—中志留世末广西期。动力来源于扬子板块与华夏陆块间的碰撞造山作用,受其影响示范区南北形成了近东西向的黔中隆起与川中隆起,川南由此形成向北东方向敞开、向南西方向收敛并抬升变浅的海湾型前陆拗陷区,沉积了由黔中向川中逐渐进积的五峰组—龙马溪组富有机质页岩^[31]。处于川南前陆拗陷南缘的昭通示范区页岩以相变快为特点(图1),富有机质页岩主要赋存于示范区北部罗场—建武复向斜区。

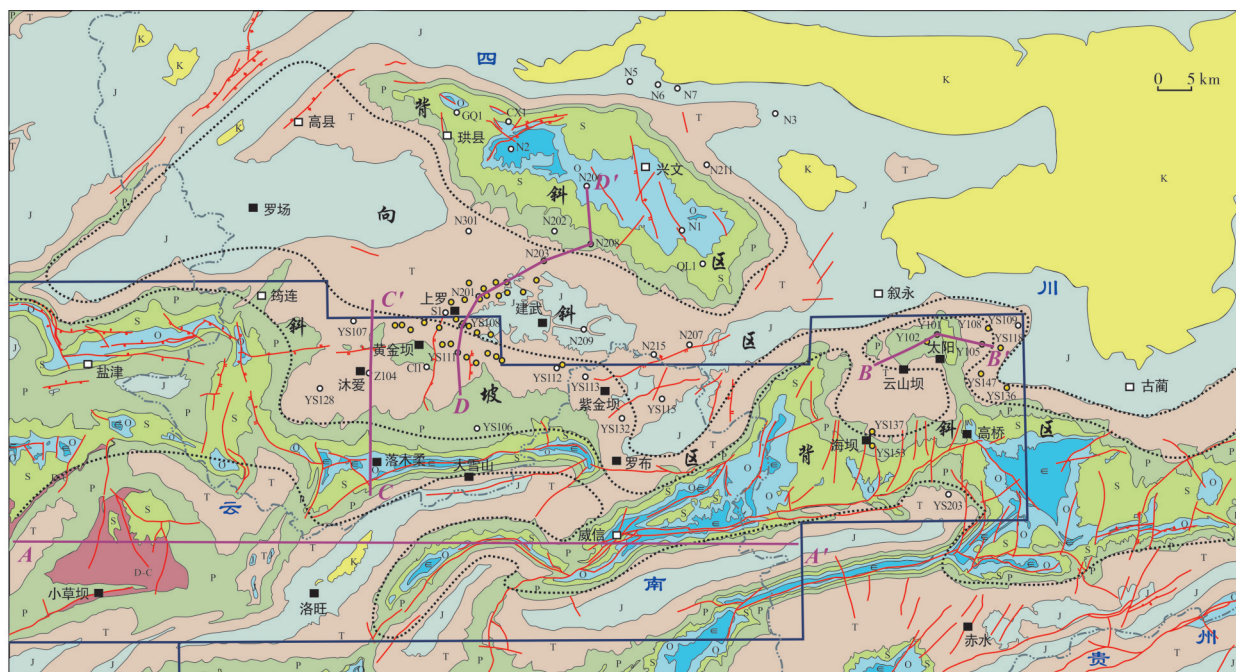
第Ⅱ期改造活动发生于晚二叠世—中三叠世末印支期。受扬子板块与周缘陆块相继碰撞事件的影响,示范区结束海相沉积历史进入海陆交互前陆盆地时代。受西缘三江造山带及东南缘江南—雪峰造山带共同影响^[34-36],示范区地层广泛褶皱,形成系列NNW—NW及NEE—NE向背斜及向斜带,以北部复向斜区页岩变形弱为特点。

第Ⅲ期改造活动发生于侏罗纪—白垩纪的燕山期。受华南与华北、印欧大陆碰撞等事件影响,示范区由此进入强变形与强改造期。早期受东南缘江南—雪峰陆内造山活动影响,发育与形成系列NEE—NE向逆冲推覆的冲断褶皱系(图2b东段);晚期受西缘三江造山带及龙门山造山带活动影响,发育与形成系列NNW—NW向逆冲推覆的冲断褶皱系。示范区地层广泛褶皱冲断与隆升剥蚀,页岩以冲断、褶皱强变形为特点。构造变形在时序上呈现出“南早北晚”的特征,即由示范区南缘黔中隆起往示范区北部主体部位滇黔北拗陷及蜀南拗陷逐渐延迟、变晚,强度上表现出“南强北弱”的特征。

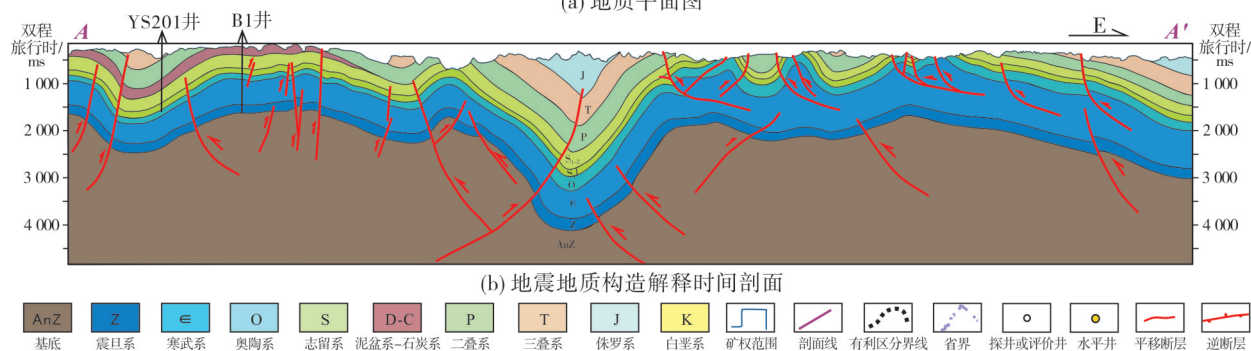
总体上,示范区北部中生界复向斜构造改造晚、变形强度弱。

第Ⅳ期改造活动发生于古近纪喜马拉雅期。受印欧大陆碰撞、青藏高原持续隆升作用以及扬子西缘红河—哀牢山、亚都—紫云—罗甸走滑断裂活动的影响,示范区整体进入快速隆升与剥蚀期。示

范区中西部由此发育NW向、近SN向构造线与走滑压扭断裂系^[34-36](图2b西段),页岩及其上覆地层以隆升剥蚀改造为主,新构造运动在时序及强度上呈现出“西早东晚”、“西强东弱”的特征;示范区东北部太阳复背斜区以深埋晚、隆升晚、改造弱为特点。



(a) 地质平面图



(b) 地震地质构造解释时间剖面



图2 昭通示范区及邻区地质简图与地震地质解释剖面

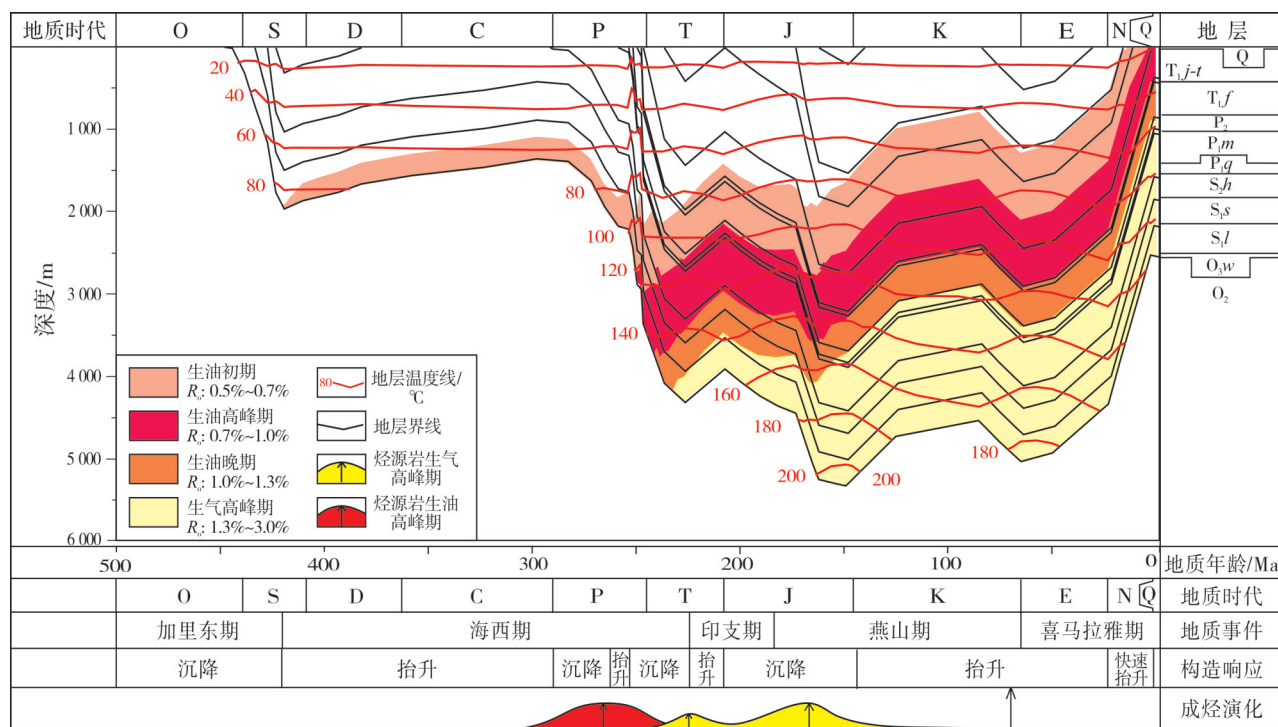
Fig. 2 Geological sketch and seismic geological interpretation profile in Zhaotong Demonstration Area and its periphery

综上所述,昭通示范区经历4期构造事件改造,西北部罗场—建武复向斜区由于处在四川盆地南部拗陷边缘,因而页岩经历了4期埋藏生烃与4期隆升改造过程;而东北部太阳复背斜区由于受盆地东缘喜马拉雅期埋藏与隆升改造时间过晚(约5 Ma)这一因素影响,仅记录了前3期埋藏生烃与隆升改造过程,因而两区页岩生烃演化史表现出明显差异。

北部罗场—建武复向斜YS108井(位置见图2)五峰组—龙马溪组页岩于早志留世晚期进入Ⅰ期埋藏,至中志留世末—石炭纪进入Ⅰ期震荡式隆升阶段,期间页岩长期浅埋、未熟(图3)。早二叠世—早三叠世开始接受沉积与沉降,页岩进入Ⅱ期埋藏阶段,有机质开始大量生烃与排烃,并由此进入第一期的生油高峰阶段(R_o 约为0.7%~1.0%);中三叠世末受印支期事件影响,示范区进入Ⅱ期短暂隆升

阶段,并逐渐结束海相沉积历史进入海陆交互相前陆盆地发育阶段。之后于晚三叠世—中侏罗世进入Ⅲ期埋藏阶段,有机质进入高一过成熟期(R_o 约为1.3%~3.0%),保存于页岩中的各类有机质(包括植物型浮游藻类、凝源类和动物型细菌、笔石及后期成烃演化过程中残留的沥青质)^[14-16]开始大量裂解,进入第二期、第三期的生气高峰阶段,开始大量生气,液态烃也开始裂解;晚侏罗世—早白垩世,受燕山期陆内碰撞造山事件影响,示范区进入Ⅲ期改造

与隆升阶段,页岩再次隆升变浅,生烃供烃随之停止。页岩在经历3期埋藏与3期生烃供烃后,示范区北部复向斜随之进入页岩气保存期:晚白垩世以来受喜马拉雅期青藏高原隆升与川西前陆盆地坳陷作用的影响^[34-36],罗场—建武、罗布等复向斜经历了晚白垩世至古近纪Ⅳ期的浅埋与新近纪以来快速隆升改造,页岩埋深虽然较浅且有小型断层活动,但页岩气的富集与保存条件仍然较好,其资源总量较大、丰度较高。



注: O₃w 五峰组; S₂l 龙马溪组; S₂s 石牛栏组; S₂h 韩家店组; P₂q 栖霞组; P₂m 茅口组; T₁f 飞仙关组; T₁j-t 嘉陵江组—铜街子组。

图3 昭通示范区罗场—建武复向斜带YS108井五峰组—龙马溪组页岩埋藏与生烃事件图

Fig. 3 Shale burial and hydrocarbon generation events of Wufeng Formation–Longmaxi Formation of Well YS108 in Luochang–Jianwu compound syncline zone of Zhaotong Demonstration Area

昭通示范区东北部太阳背斜区Y105井(位置见图2)五峰组—龙马溪组页岩在印支期前的埋藏与生烃史基本与罗场—建武复向斜YS108井一致,于晚三叠世—中侏罗世进入Ⅲ期埋藏与高一过成熟期,并进入第二期的生油、第三期的生气高峰阶段,原油开始裂解,页岩中的有机质开始大量生气(图4)。但是在晚侏罗世—早白垩世,背斜区因受燕山期南北向持续挤压与隆升改造作用活动的影响相对较弱,第三期生气供烃时间相对延长。进入白垩纪以后,随着晚燕山期—早喜马拉雅期的持续挤压走滑作用,背斜区递进变形,进入缓慢

隆升改造期,晚白垩世至古近世该区未经历浅埋生烃过程,页岩生气供烃趋于停止,并于新近纪中新世后进入急速隆升期。因此,背斜区进入隆升改造时间很晚,页岩气保存及封闭条件总体良好^[1]。

综合上述,昭通示范区北部宽缓褶皱区(包括罗场—建武、罗布复向斜及太阳、海坝复背斜)虽经历过多期变形与叠加改造,但活动强度相对较弱,页岩顶底板连续性及完整性均较好^[1],因此页岩气保存与封闭条件良好^[37-38]。示范区整体呈现出北部页岩含气量高(2~6 m³/t)、中南部含气量低

(0.5~2 m³/t), 突出“北高南低、东高西低”的格局(图5)。页岩地层表现为北部超压(压力系数1.2~2.0)、中南部微超压(压力系数1.0~1.2), 即“北高南低”的特点(图6)。这表明示范区北部是最有利

的页岩气赋存区, 中南部受页岩相带变差、后期改造强度大及时间长等因素影响, 页岩气保存条件明显变差, 页岩含气量及地层压力系数均明显降低^[37], 页岩气资源量有限。

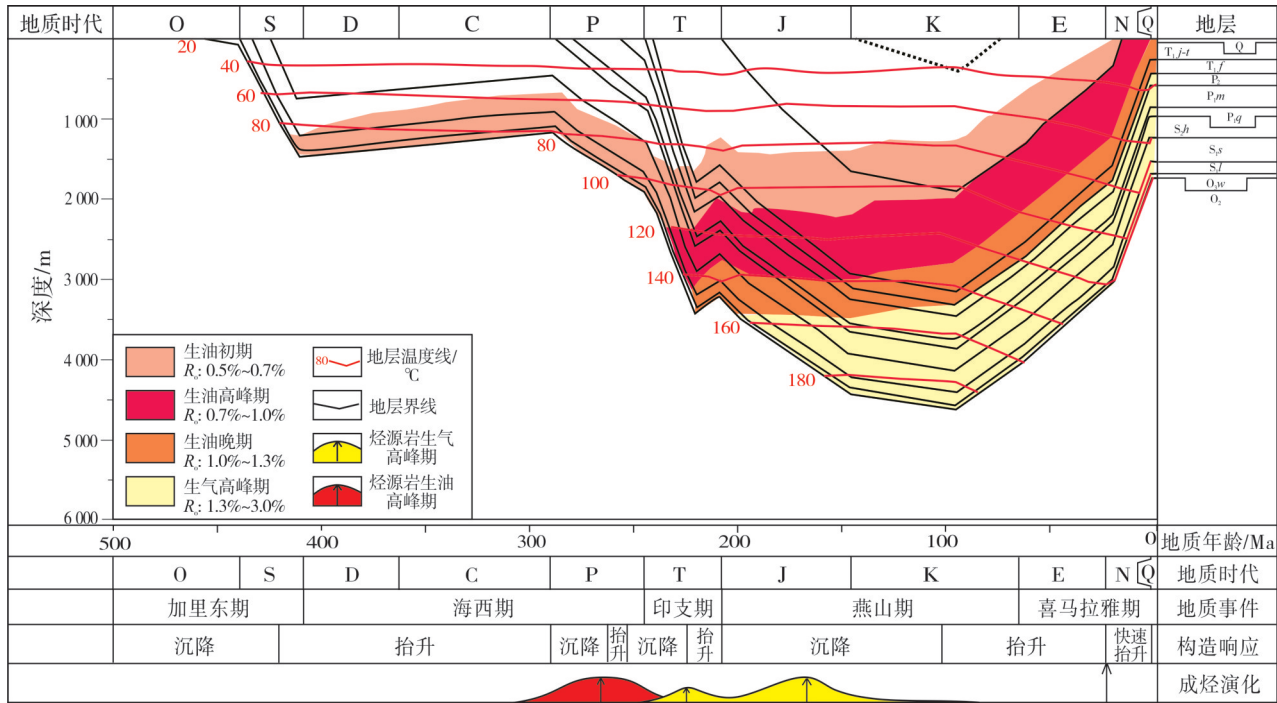
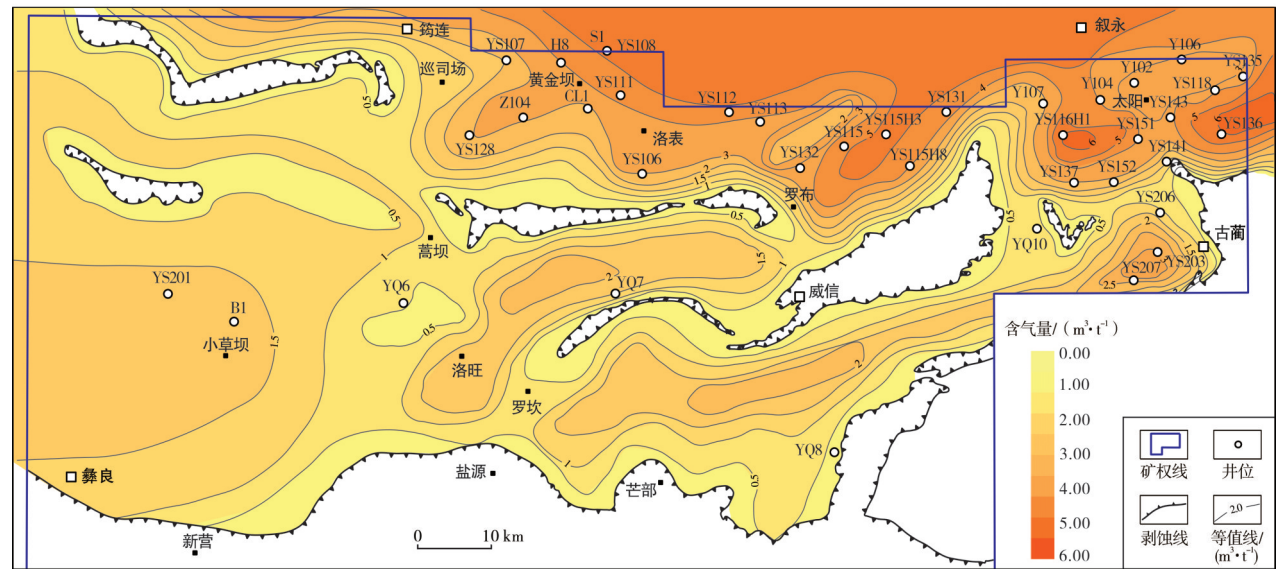
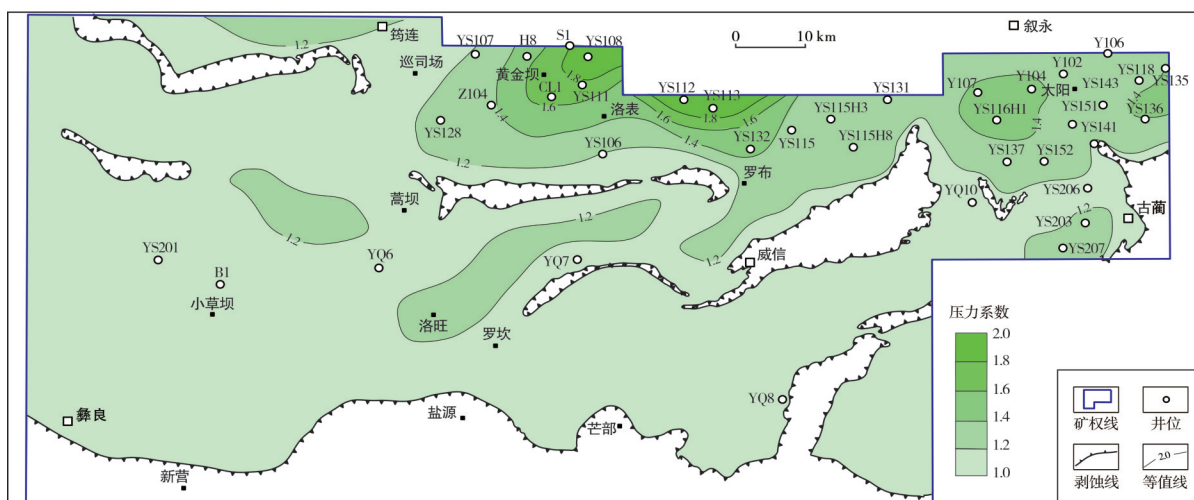


图4 昭通示范区太阳背斜带Y105井五峰组—龙马溪组页岩埋藏与生烃事件图

Fig. 4 Shale burial and hydrocarbon generation events of Wufeng Formation–Longmaxi Formation of Well Y105 in Taiyang anticline zone of Zhaotong Demonstration Area



图6 昭通示范区五峰组—龙马溪组龙一₁亚段页岩地层压力系数平面分布图Fig. 6 Pressure coefficient distribution of Wufeng Formation–Longmaxi Submember 1¹ in Zhaotong Demonstration Area

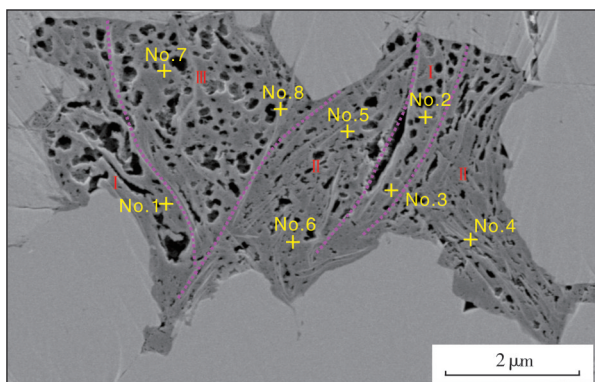
3 页岩储层特征与充填记录

对已有产气井资料进行统计分析,昭通示范区富有机质页岩有机碳含量为0.6%~6.8%,平均值为3.4%,硅质含量为33%~56%,平均值为51%。纵向上以龙一₁¹小层有机碳含量最高(2.9%~6.8%),平均值为5.4%,硅质含量也较高,平均值大于35%;龙一₂²小层有机碳含量其次(1.3%~4.6%),平均值为3.5%,硅质含量为20%~50%;龙一₃³小层有机碳含量为1.5%~2.5%,龙一₄⁴小层有机碳含量为1%左右,两小层硅质含量在20%~45%之间。平面上,有机碳含量在北部高值区达2.0%以上,向南逐渐降至1.0%左右,总体呈现“北高南低”的趋势;硅质含量在东部为44%~56%,西部为33%~46%,呈现“西低东高”的特征。总之,示范区页岩储层在岩性上表

现出“富碳高硅”的特征^[38~39]。

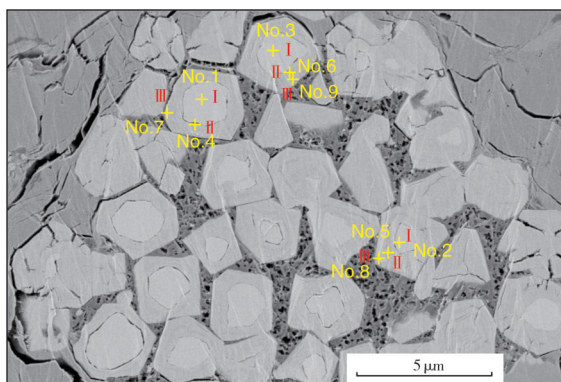
对物性资料进行统计分析,昭通示范区五峰组—龙马溪组龙一₁亚段有效孔隙度介于0.9%~6.1%,平均值为3.5%,相对较低。其中,龙一₁¹小层有效孔隙度最高(2.2%~6.1%),平均值为4.6%;龙一₂²小层其次(1.5%~5.2%),平均值为3.6%;龙一₃³小层为1.8%~5.3%,平均值为3.3%;五峰组为1.1%~5.6%,平均值为3.2%;龙一₄⁴小层最低(0.9%~4.9%),平均值为2.7%。平面上,储层有效孔隙度呈现中南部低(1.0%~3.0%)、北部高(2.5%~3.5%)的特征。有效孔隙度较高的龙一₁¹—龙一₃³小层页岩含气性也较好,总体呈现“北好南差、西好东差”的格局。

对场发射扫描电镜影像特征进行分析(图7),在示范区东北部太阳背斜区高桥剖面(位置见图1)采集的五峰组—龙马溪组页岩样品中充填有多期形成



(a) 沥青质体场发射扫描电镜影像

注:样品采自四川省叙永县高桥剖面。



(b) 黄铁矿及次生加大场发射扫描电镜影像

图7 太阳背斜带龙一₁亚段沥青质体、黄铁矿及次生加大场发射扫描电镜影像及能谱分析测点分布
Fig. 7 Image of field emission scanning electron microscope and measuring points distribution of energy spectrum analysis of asphaltene and pyrite of Longmaxi Submember 1¹ in Taiyang anticline zone

的大量流动状沥青质,并伴生有分散状磷灰石、黄铁矿、黏土等同生矿物。其中,在 2~8 μm 孔径的孔隙中所见流动状态沥青质体至少有 3 期充填记录(图 7a,表 1):Ⅰ期充填沥青质体中的孔隙不规则、大小悬殊,具有面孔率大、呈蜂窝状的特征,呈现出沥青质体充填早、孔隙发育的特点,能谱分析显示沥青质部分高度碳化,碳元素含量高达 84.1%~84.8%(表 1);Ⅱ期充填沥青质体中的孔隙多呈椭圆形、长条状,大小相对均一,面孔率稍低,主要充填于孔隙的中部及边缘,呈现出沥青质热演化程度及转化率稍低、充填时间稍晚的特点,能谱分析显示沥青质部分碳元素含量为 80.6%~81.7%(表 1);Ⅲ期充填沥青质体中的孔隙多呈圆孔状及椭圆形,大小相对均一,主要充填于粒间孔隙的边缘,表明充填的沥青质演化程度及转化率都相对较低、充填时间最晚,能谱分析显示沥青质部分碳元素含量仅为 67.9%~79.1%(表 1)。沥青充填特征表明太阳背斜区五峰组—龙马溪组页岩可能经历了 3 期埋藏生烃与运移充注过程。

表 1 太阳背斜带龙一₁亚段沥青质体场发射扫描电镜-能谱联用仪元素测定结果
Table 1 Element analysis results of asphaltene of Longmaxi Submember 1¹ in Taiyang anticline zone by field emission scanning electron microscope-energy spectrometer

沥青质 充填期	测点 编号	元素含量/%						
		C	O	Si	Al	S	K	Ca
Ⅰ	No.1	84.8	10.3	3.7	0.5	0.3	0.2	0.3
	No.2	84.1	11.3	3.6	0.6	0.3	0.2	-
	No.3	84.1	11.9	3.2	0.5	0.3	-	-
Ⅱ	No.4	81.4	13.4	4.5	0.5	0.2	-	-
	No.5	81.7	12.4	5.0	0.6	0.3	-	-
	No.6	80.6	13.9	4.6	0.6	0.2	0.2	-
Ⅲ	No.7	67.9	23.2	8.6	0.2	-	-	0.2
	No.8	79.1	13.4	7.4	0.2	-	-	-

太阳背斜区页岩中与充填的沥青质体同期伴生的还有多期成因的黄铁矿,其中见有典型的圈层结构与多期次生加大现象(图 7b,表 2)。结合能谱分析,发现黄铁矿核心区(即Ⅰ期生长区)硫元素含量为 33.3%~40.1%(表 2),表现为典型的强还原成岩环境,对应于页岩第Ⅰ埋藏与生烃期;矿物一期次生加大区(即Ⅱ期生长区)硫元素含量为 5.6%~11.4%(表 2),呈现为还原成岩环境,对应页岩第Ⅱ埋藏与生烃期;矿物外围二期次生加大区(即Ⅲ期生长区)硫元素含量为 1.5%~2.1%(表 2),表现为弱还原成岩环境,对应于页岩第Ⅲ埋藏与生烃期。以

上页岩储层中伴生黄铁矿次生加大现象及硫元素含量变化特征表明昭通示范区太阳背斜区页岩可能经历了 3 期埋藏与 3 期成岩演化过程,证实示范区东北部浅层页岩气可能经历过 3 期运移与 3 期集聚过程,具有原油裂解成因特征^[17-18,21,28,40],页岩气有利区分布主要受构造或岩性-构造圈闭控制^[1,17],平面上呈相对孤立的继承性背斜圈闭形态(图 2)。

表 2 太阳背斜带龙一₁亚段黄铁矿及次生加大场发射扫描电镜-能谱联用仪元素测定结果

Table 2 Element analysis results of pyrite of Longmaxi Submember 1¹ in Taiyang anticline zone by field emission scanning electron microscope-energy spectrometer

黄铁矿 生长区	测点 编号	元素含量/%							
		S	O	C	Fe	Si	Mg	Al	Ca
Ⅰ	No.1	33.3	14.4	32.7	19.7	-	-	-	-
	No.2	34.6	19.2	25.7	20.2	0.2	-	-	-
	No.3	40.1	14.2	23.7	21.8	-	-	-	-
Ⅱ	No.4	8.0	39.4	24.6	27.1	0.6	-	-	0.3
	No.5	11.4	41.3	23.7	22.8	0.4	-	-	0.3
	No.6	5.6	40.7	31.1	21.6	0.7	-	-	0.3
Ⅲ	No.7	2.0	53.0	20.3	22.8	0.9	0.4	0.2	0.4
	No.8	1.5	38.8	38.7	19.9	0.6	-	-	0.4
	No.9	2.1	41.3	37.6	18.0	0.7	0.2	-	0.4

处于昭通示范区北部罗场—建武复向斜区的五峰组—龙马溪组富有机质页岩虽经历了 4 期埋藏与 3 期生烃过程,但可能由于复向斜区继承性发育的原因,第一期、第二期生成的液态烃多已运移至邻近的背斜圈闭中,页岩内部滞留甚少,因而页岩储层中未见多期滞留充填的沥青质体以及与其伴生的矿物次生加大现象。据场发射扫描电镜观察,向斜西部 YS108 井及南翼 YS112 井五峰组—龙马溪组页岩储层中仅有少量蜂窝状及半流动状沥青质体,明显有别于太阳背斜区页岩储层多期充填沥青质体的特征,页岩气有干酪根热降解成因特点^[14,17],由此推测其中页岩气可能主要由干酪根热降解生成或由少量第三期生成的液态烃经热裂解而成^[21,28],因此页岩气有利区主要受沉积期富有机质页岩相带及后期保存条件控制,呈连片带状分布(图 2)。

4 页岩气藏类型

受沉积期岩相、改造期变形与改造强度影响,昭通示范区页岩气成藏与赋存总体受构造格局控制^[41],保存单元呈分区、分带展布特征,有利区可划分为背斜、向斜与斜坡 3 种类型(图 8)。

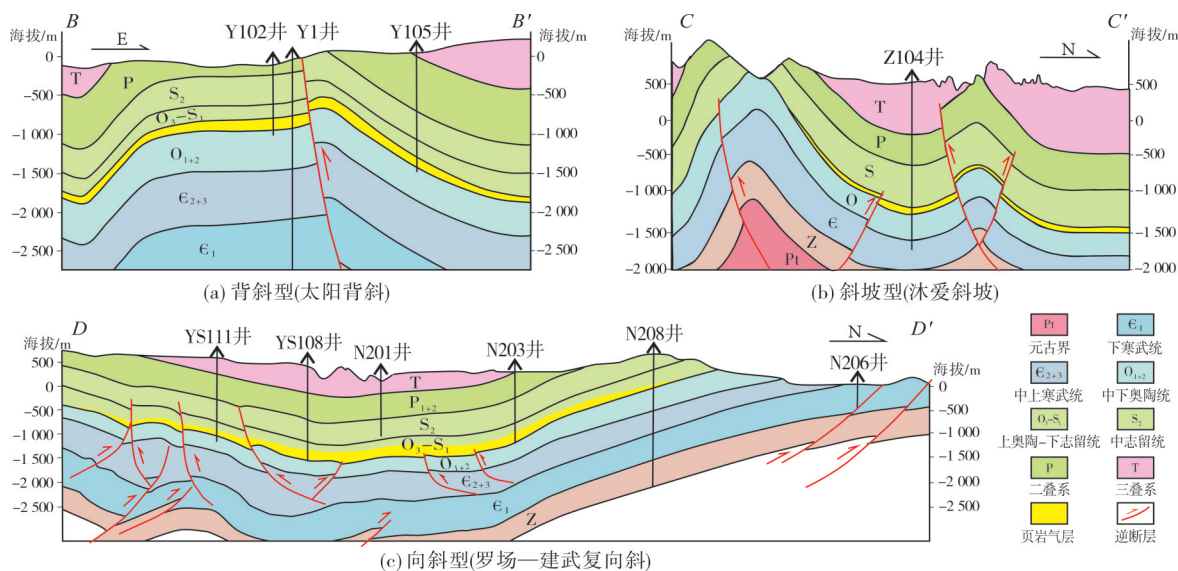


图8 昭通示范区五峰组—龙马溪组页岩气赋存模式(剖面位置见图2)

Fig. 8 Shale gas occurrence types of Wufeng Formation–Longmaxi Formation in Zhaotong Demonstration Area (section position is shown in Fig. 2)

4.1 背斜型

作为典型实例(图8a),太阳背斜地处昭通示范区盐源—威信背斜带东北部向四川盆地南缘川南低陡褶皱带叙永—古蔺向斜的过渡部位(图2),发育震旦系—志留系、二叠系及三叠系,地层累计厚度为4 000~7 000 m,地表以出露三叠系为主,背斜核部出露二叠系和志留系。主要勘探目的层五峰组—龙马溪组受广西期以来区域隆升作用影响,上覆地层沉积较其周缘明显减少、厚度明显减薄,二叠系不整合覆盖于志留系不同层位之上(缺失上志留统一石炭系),表明太阳背斜为一继承性古隆起^[1]。

背斜孕育于加里东期,海西期形成古隆起背斜构造。背斜区五峰组—龙马溪组页岩于早志留世至中志留世末埋藏,中志留世末至石炭纪长期处于隆升状态,页岩长时间浅埋、未熟,于早二叠世末—早三叠世接受沉积,才进入生油与排烃期。中三叠世末,受印支期南北向挤压应力作用,太阳地区形成近东西向背斜,再次短暂隆升,至晚三叠世—中侏罗世页岩进入高一过成熟期,开始二次生烃,原油开始大量裂解,有机质开始大量生气。晚侏罗世—早白垩世以后,随着燕山期南北向持续挤压和喜马拉雅期挤压走滑,复背斜递进变形加剧,页岩再次隆升变浅,生气供烃随之停止(图4),在背斜顶部及两翼形成近东西向逆冲断裂,近南北向压扭性走滑断层对早期近东西向复背斜进行叠加和改造,将复背斜分割成东西两块,同时背斜南、北两翼伴

生南北向小型断层形成北陡、南缓的构造形态,但背斜构造仍保持完整^[1]。页岩气富集成藏主要受保存条件与圈闭封闭性等因素控制。五峰组—龙马溪组页岩虽历经抬升变浅,但切顶的压扭型走滑—逆冲断层封闭性良好,储气背斜形态保存完整^[1],从志留系石牛栏组存在常规天然气和龙马溪组页岩气均处于超压状态来看,太阳背斜区域保存条件良好,存在浅层埋藏页岩气封存箱,预示太阳背斜区具备良好的原油裂解成因页岩气成藏条件,其气源主要为源内近距离多期运聚的原油经高温裂解后形成的天然气,具有与焦石坝页岩气相同的成因^[17,21,40]。

4.2 斜坡型

作为典型实例(图8b),海坝背斜北翼处于四川盆地南缘落木柔—大雪山—威信背斜带向示范区北部罗场—建武复向斜—罗布向斜—云山坝向斜过渡的斜坡部位(图2),主体形成于印支期—晚燕山期,页岩经历多期埋藏与生烃过程,成气因素复杂,既有热降解成因气,也有原油裂解成因气。主要目的层五峰组—龙马溪组含气页岩上覆有中志留统及二叠系—三叠系,气层埋深相对适中(1 500~2 000 m),页岩气富集与保存条件良好,优质页岩含气量介于1.35~2.45 m³/t(Z104井,YS107井),天然气组分中甲烷含量高达95%以上,压力系数为1.10~1.25,处于低超压状态,直井单井产量为1.2×10⁴ m³/d。页岩气有利区分布主要受页岩改造强度控制。处于示范区北部的建武—罗布复向斜南翼及云山坝

向斜北翼,埋深在1 750~2 500 m范围的优质页岩保存条件良好,含气量介于1.01~5.36 m³/t(YS106井,YS111井,YS108H6-7井),天然气组分中甲烷含量高达95%以上,压力系数介于1.0~1.94(YS111井,YS108H6-7井),总体处于常压—超压状态,水平井单井产量在(3.53~4.93)×10⁴ m³/d(YS108 H5-4井,YS108H6-7井),是示范区北部主要产气区。

4.3 向斜型

作为典型实例(图8c),示范区北部罗场—建武复向斜主体处在四川盆地南缘蜀南坳陷,向斜区五峰组—龙马溪组页岩上覆中志留统、二叠系、三叠系及侏罗系,具有长期继承性坳陷发育条件,不仅发育优质的富有机质页岩,而且具有多期埋藏生烃与运移的有利条件(图2,图3),向斜轴部气层埋深适中(2 250~3 000 m),富集与保存条件良好。向斜区页岩气具有热降解成因特征^[21],气源主要为源岩干酪根热降解成因天然气^[14,17,21,28]。因此,此类型页岩气有利区分布主要受页岩源储及保存条件、沉积期页岩相带及后期改造强度控制。钻井揭示向斜区页岩含气量介于2.65~7.20 m³/t(N201井,N203井,YS108井),天然气组分中甲烷含量高达95%以上,压力系数高达1.62~1.96(如YS111井,YS108井),处于超压状态,水平井单井产量在20×10⁴ m³/d左右,是昭通示范区高产井集中分布区。

5 结 论

(1)受东南缘江南—雪峰造山带、西缘三江造山带多期活动及青藏高原隆升等事件影响,昭通示范区五峰组—龙马溪组页岩经历了多期埋藏与多期生烃过程,东北部太阳背斜富气区页岩气表现为原油裂解气特征,西北部罗场—建武复向斜富气区页岩气表现为干酪根热降解气特征,中南部过渡区页岩气具有混源成因。

(2)受沉积期岩相、改造期变形强度与成烃过程、成藏期封闭性等因素影响,示范区东北部(太阳复背斜区)页岩气主控因素为后期改造强度与背斜封闭性能,有利区及集聚单元多为孤立、继承性背斜;北部(罗场—建武复向斜)页岩气主控因素为沉积期岩相及改造期保存条件,有利区及集聚单元多为继承性宽缓复向斜;中南部(即黄金坝南—紫金坝南—云山坝—海坝)有利区及集聚单元多为盆缘过渡区斜坡带。

(3)受强改造、高演化的山地页岩气复杂成藏条件影响,昭通示范区页岩气具有多期—跨期复合成藏特点,气藏分布控制因素复杂,依据现今保存单元中的集聚与赋存状态,将页岩气有利区划分为背斜型(裂解成因,集聚型成藏)、向斜型(热降解成因,弥散型成藏)与斜坡型(混生成因,混合型成藏)3种类型。

参 考 文 献

- [1] 梁兴,徐政语,张朝,等. 昭通太阳背斜区浅层页岩气勘探突破及其资源开发意义[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(1):1-17.
- [2] 杨洪志,赵圣贤,刘勇,等. 泸州区块深层页岩气富集高产主控因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(11):55-63.
- [3] 谢军,赵圣贤,石学文,等. 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J]. 天然气工业, 2017,37(7):1-12.
- [4] 郭旭升,胡东风,段金宝. 中国南方海相油气勘探展望[J]. 石油实验地质, 2020,42(5):675-686.
- [5] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(3):317-326.
- [6] 徐政语,蒋恕,熊绍云,等. 扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式[J]. 沉积学报, 2015,33(1):21-35.
- [7] 王鹏万,李昌,张磊,等. 五峰组—龙马溪组储层特征及甜点层段评价:以昭通页岩气示范区A井为例[J]. 煤炭学报, 2017,42(11):2925-2935.
- [8] 伍坤宇,张廷山,杨洋,等. 昭通示范区黄金坝气田五峰—龙马溪组页岩气储层地质特征[J]. 中国地质, 2016,43(1):275-287.
- [9] 梁兴,张廷山,舒红林,等. 滇黔北昭通示范区龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国地质, 2020,47(1):72-87.
- [10] 张磊夫,董大忠,孙莎莎,等. 三维地质建模在页岩气甜点定量表征中的应用:以扬子地区昭通页岩气示范区为例[J]. 天然气地球科学, 2019,30(9):1332-1340.
- [11] 梁兴,王高成,张介辉,等. 昭通国家级示范区页岩气一体化高效开发模式及实践启示[J]. 中国石油勘探, 2017,22(1):29-37.
- [12] 梁兴,徐政语,张介辉,等. 浅层页岩气高效勘探开发关键技术:以昭通国家级页岩气示范区太阳背斜区为例[J]. 石油学报, 2020,41(9):1033-1048.
- [13] 郭旭升,李宇平,腾格尔,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(1):193-201.
- [14] 腾格尔,申宝剑,俞凌杰,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(1):69-78.
- [15] ZHANG Yuying, HE Zhiliang, LU Shuangfang, et al. Characteristics of microorganisms and origin of organic matter in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin, South China[J]. Marine and petroleum geology, 2020,111:363-374.
- [16] 胥畅. 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组成烃母质类型及对页岩含气性的影响[D]. 南京:南京大学, 2018.
- [17] 姜振学,宋岩,唐相路,等. 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3):617-628.
- [18] 赵文智,李建忠,杨涛,等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4):499-510.

- [19] 潘涛,朱雷,王亚东,等.川南地区龙马溪组有机质特征及其对页岩气富集规律的影响研究[J].高校地质学报,2016,22(2):344-349.
- [20] 亢韦.渝南地区龙马溪组笔石页岩相与页岩气成藏关系探讨[D].北京:中国矿业大学,2015.
- [21] 冯子齐,刘丹,黄士鹏,等.四川盆地长宁地区志留系页岩气碳同位素组成[J].石油勘探与开发,2016,43(5):705-713.
- [22] 徐政语,梁兴,王维旭,等.上扬子区海相页岩气甜点分布控制因素探讨[J].天然气工业,2016,36(9):11-19.
- [23] 胡东风.四川盆地东南缘向斜构造五峰组—龙马溪组常压页岩气富集主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(5):605-615.
- [24] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J].天然气工业,2018,38(12):1-14.
- [25] 郭旭升.南海海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J].地质学报,2014,88(7):1209-1218.
- [26] 朱彤,王烽,俞凌杰,等.四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J].石油与天然气地质,2016,37(3):399-407.
- [27] 刘颀.高—过成熟页岩中天然气地球化学成因模式与应用[D].北京:中国地质大学,2017.
- [28] 汪生秀,焦伟伟,方光建,等.渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气地球化学特征及其成因分析[J].海相油气地质,2017,22(4):77-84.
- [29] 蒲泊伶,董大忠,王凤琴,等.沉积相带对川南龙马溪组页岩气富集的影响[J].中国地质,2020,47(1):111-120.
- [30] 李皎,何登发,梅庆华.四川盆地及邻区奥陶纪构造—沉积环境与原型盆地演化[J].石油学报,2015,36(4):427-445.
- [31] 王玉满,李新景,董大忠,等.上扬子地区五峰组—龙马溪组优质页岩沉积主控因素[J].天然气工业,2017,37(4):9-20.
- [32] 郑宇龙,牟传龙,王秀平.四川盆地南缘五峰组—龙马溪组沉积地球化学及有机质富集模式:以叙永地区田林剖面为例[J].地球科学与环境学报,2019,41(5):541-560.
- [33] 何龙.四川盆地东南缘五峰组—龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2020.
- [34] 刘树根,孙玮,钟勇,等.四川海相克拉通盆地显生宙演化阶段及其特征[J].岩石学报,2017,33(4):1058-1072.
- [35] XU Zhengyu, JIANG Shu, YAO Genshun, et al. Tectonic and depositional setting of the lower Cambrian and lower Silurian marine shales in the Yangtze Platform, South China: implications for shale gas exploration and production [J]. Journal of Asian earth sciences, 2019,170:1-19.
- [36] 刘兵兵.哀牢山构造带及其两侧地区早古生代和早中生代地层碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成:物源示踪及其构造意义[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [37] 徐政语,梁兴,鲁慧丽,等.四川盆地南缘昭通示范区构造变形特征及页岩气保存条件[J].天然气工业,2019,39(10):22-31.
- [38] 吴聿元,张培先,何希鹏,等.渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩岩石相及与页岩气富集关系[J].海相油气地质,2020,25(4):335-343.
- [39] 袁桃,魏祥峰,张汉荣,等.四川盆地及周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩岩相划分[J].石油实验地质,2020,42(3):371-414.
- [40] 高键.渝东地区五峰—龙马溪组页岩裂缝脉体古温压及古流体成因[D].武汉:中国地质大学,2018.
- [41] 胡东风,张汉荣,倪楷,等.四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J].天然气工业,2014,34(6):17-23.

编辑:黄革萍

Shale gas accumulation types and favorable area distribution of Wufeng Formation—Longmaxi Formation in Zhaotong Demonstration Area

XU Zhengyu, LIANG Xing, LU Huili, CHEN Wei, ZHANG Jiehui, SHU Honglin, WANG Gaocheng, XU Yunjun, TANG Xiehua

Abstract: Based on the shale depositional background and environment, structural reformation process, reservoir filling characteristics and records of Wufeng Formation—Longmaxi Formation in Zhaotong Demonstration Area, combined with the analysis of shale hydrocarbon generation history, it is clear that the distribution of shale gas favorable area in the demonstration area is mainly controlled by three factors: sedimentary facies, deformation strength during the reformation period and sealing performance during the preservation period. According to the current shale gas preservation unit, shale gas reservoirs in the demonstration area are divided into three types: anticline, syncline and slope. The anticline type (Taiyang, Haiba, etc.) is mainly enriched in crude oil—cracked gas, and the main controlling factors are the strength of later transformation and the sealing performance of the preservation unit, and the favorable areas are mainly isolated and inherited anticlines. The syncline type (Luochang—Jianwu, Luobu, etc.) is mainly enriched with kerogen pyrolysis gas, and the main controlling factors are sedimentary facies and the sealing performance of preservation units, and the favorable areas are mainly wide and gentle inherited synclines, most of which are continuously distributed. The slope type (Huangjinba—Zijinba zone of the south wing of Luochang—Jianwu compound syncline and Yunshanba transition area between Taiyang and Haiba anticline, etc.) is characterized by enrichment of mixed source gas (crude oil—cracked gas and kerogen pyrolysis gas), and the favorable areas are mostly distributed along the wing transitional zone between anticline and syncline.

Key words: shale gas; reservoir type; preservation unit; favorable area; Zhaotong Demonstration Area

XU Zhengyu, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research on marine petroleum geology in South China. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China.