

川南泸州地区志留系石牛栏组礁滩体发育特征及勘探意义

周刚¹, 钟原¹, 张本健¹, 乔艳萍¹, 戴鑫¹, 张自力¹, 兰才俊¹, 豆霜¹, 徐多²

¹ 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院; ² 成都锐浪石油科技有限公司

摘要 近期泸州地区的勘探发现揭示石牛栏组礁滩体具备一定的勘探潜力。基于钻井、野外剖面和三维地震数据等资料的系统研究,深入探讨石牛栏组礁滩体的发育特征及其勘探意义。结果表明:礁/生屑灰岩主要发育于石一段顶部,厚度介于6~40 m;受川中古隆起影响,石一段发育混积潮坪和台内洼地,在混积潮坪古地貌高带上形成了连片分布的潮缘礁滩,在台内洼地局部高带发育台内礁(生屑)滩。石牛栏组的成藏模式表现为“近源供烃、断裂输导、下生上储、复式聚集”,下伏龙马溪组优质烃源岩-石一段礁滩储层-石二段泥岩及上覆盖层构成了良好的生储盖组合,复杂的网状断裂系统为油气运移提供了条件,油气充注时期与圈闭形成时期(P-K)匹配,为油气大规模聚集成藏奠定了基础。石牛栏组礁滩体是值得关注的重要油气勘探领域。

关键词 礁灰岩;地震响应;岩溶作用;油气成藏;石牛栏组;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

引用:周刚,钟原,张本健,等.川南泸州地区志留系石牛栏组礁滩体发育特征及勘探意义[J].海相油气地质,2025,30(3):255-264.
ZHOU Gang, ZHONG Yuan, ZHANG Benjian, et al. Development characteristics and exploration significance of reef-shoal body of the Silurian Shiniulan Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(3): 255-264.

0 前言

川南泸州地区的志留系具有良好的油气资源潜力,龙马溪组、石牛栏组及韩家店组共同形成有效的生储盖组合。钻探成果表明,石牛栏组油气显示活跃^[1]。对四川盆地东南部石牛栏组生物礁滩及古油藏的研究发现,礁滩体内部被沥青充填,这表明该地区曾经历过油气运移和聚集的过程^[2]。在贵州赤水—重庆綦江地区,石牛栏组具备发育大型台地边缘礁滩储层的条件^[3]。贵州习水吼滩剖面显示,古油藏的主要储层为石牛栏组生物碎屑(简称生屑)灰岩,油气主要分布在生屑颗粒的粒间、粒内溶孔中^[4]。尽管川东南地区部分钻井在石牛栏组礁灰岩中发现油气显示,但受复杂地质条件、特殊地形及整体勘探程度较低等因素影响,迄今尚未取得重大突破^[5]。近年来对四川盆地地质模型与成藏机制的综合研究表明,断裂系统及其演化对油气运移

具有重要影响^[6]。

近期,在泸州地区 Z205H52-3 井钻探过程中,钻至石牛栏组灰岩段时出现气侵和井涌,点火后火焰高度达40~50 m,且放气点火持续超过一个月,表明该区油气潜力巨大。石牛栏组碳酸盐岩具有较强的非均质性,基质灰岩相对致密,礁/生屑灰岩发育良好的孔隙空间。因此,明确石牛栏组生物礁滩储层的分布规律对油气勘探具有重要意义。本文充分利用研究区周缘的野外露头、大量的钻测井及三维地震数据等宏观资料和镜下微观分析测试资料开展综合研究,深入分析石牛栏组古地貌特点、礁灰岩展布特征及断裂体系纵向沟通条件,以期明确石牛栏组礁滩体的勘探潜力,为风险勘探提供地质支撑。

1 地质概况及石牛栏组地层特征

志留纪上扬子前陆盆地发育,川东南地区处于

收稿日期:2024-08-27; 改回日期:2025-02-17

本文受国家自然科学基金“扬子西北缘早古生代海相盆地多幕次构造-沉积转换及其成烃成储响应”(编号:U2344209)、中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(编号:2023ZZ16)共同资助

第一作者:周刚,博士,高级工程师,主要从事四川盆地海相天然气地质综合研究。通信地址:610041 四川省成都市高新区天府大道北段12号; E-mail: zhougang29@petrochina.com.cn。ORCID: 0009-0008-9241-1734

通信作者:钟原,博士,高级工程师,主要从事油气地质综合研究。通信地址:610041 四川省成都市高新区天府大道北段12号; E-mail: zhongyuan2018@petrochina.com.cn。ORCID: 0000-0001-5223-7470

川中古隆起与黔中古隆起之间的坳陷区(图1a),地层发育受到隆起区的影响,而且随着志留期末期川中古隆起的进一步隆升,部分地层遭受剥蚀(图1c),例如H1井下志留统除残留龙马溪组外,石牛栏组、韩家店组均缺失。早志留世川东南地区处于深水陆棚—浅水陆棚,早期沉积了富含有机质的龙马溪组黑色碳质泥页岩^[1];石牛栏组沉积早期发育浅水陆棚相、台地边缘斜坡相,中期转变为混积潮坪相和开阔台地相,发育碳酸盐岩沉积^[7]。中志留世水体开始加深,韩家店组以泥岩、泥质粉砂岩、灰质粉砂岩沉积为主。

研究区下志留统构造特征表现为东北向延展的褶皱体系,从川东的高陡背斜、隔档式褶皱逐渐过渡到川南的低缓构造区,形成独特的扫帚状构造格局^[8-9](图1b)。

川东南地区石牛栏组厚度在200~300 m之间,其岩石组合具有显著的分层特征^[10-11]:下部主要由灰黑色的含碳泥灰岩、含泥灰岩、泥灰岩以及礁灰岩构成;中部和上部逐渐转变为灰色粉砂质灰岩、粉砂质页岩、灰质页岩、灰质粉砂岩,偶见灰绿色泥岩。岩石中保存了腕足类、三叶虫、珊瑚、头足类和几丁虫等丰富的生物化石^[12]。

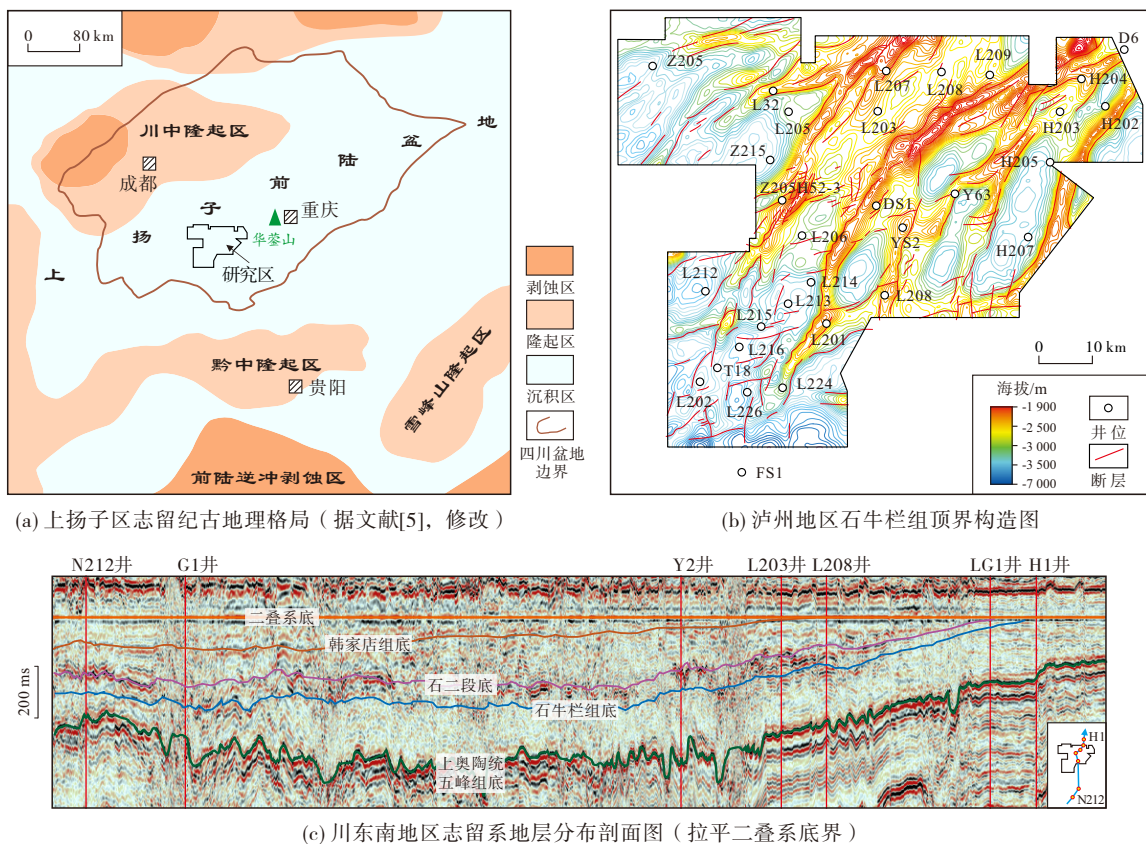


图1 上扬子区志留纪古地理格局及川南泸州地区石牛栏组顶界构造图

Fig. 1 Paleogeographic background of Silurian in the Upper Yangtze region and the structural map of the top boundary of Shiniulan Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin

泸州地区石牛栏组依据岩电特征可细分为两个段(图2a):石牛栏组一段(简称石一段)顶部发育一套可区域对比的灰色—深灰色中厚层至块状礁/生屑灰岩,石二段以粉砂质页岩、灰质页岩、灰质粉砂岩为特征。井-震标定与解释表明,石牛栏组与下伏龙马溪组、上覆韩家店组呈整合接触,对应较连续中振幅波峰(图2b),石一段顶部礁灰岩

呈强振幅反射特征。

2 礁滩体发育特征

泸州地区的礁滩体主要发育在石牛栏组一段的顶部(图2a),厚度在40 m左右。华蓥山剖面石牛栏组局部出露一套礁/生屑灰岩,生物礁体规模在10~30 m之间。

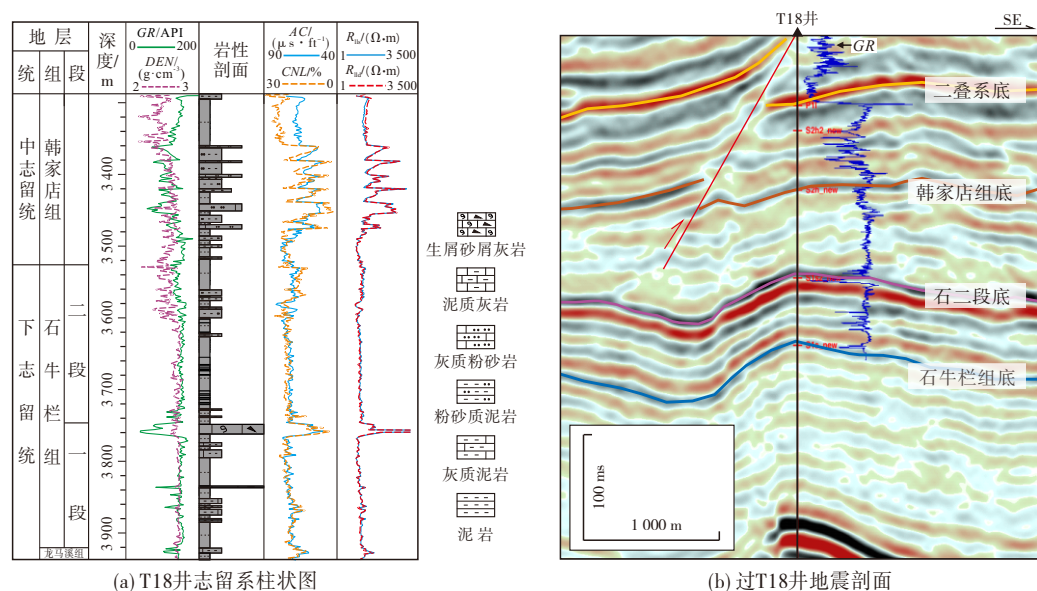


图2 泸州地区T18井石牛栏组岩性综合柱状图及过井地震剖面
Fig. 2 The comprehensive lithologic column of Shiniulan Formation in Well T18 and seismic profile across Well T18 in Luzhou area

2.1 岩石学特征

华蓥山剖面的石牛栏组礁滩体呈层状或低丘状突起,见高角度溶沟(图3a),礁间多由灰泥、砂质和泥质成分组成。造礁生物以珊瑚为主,单个珊瑚虫管长度约为10 cm,直径约为0.5~2 cm,呈集群式大量分布(图3b)。钻井岩心薄片显示,生屑(礁)灰岩中造礁生物含量超过50%,见有丰富的珊瑚、介壳和藻类等化石(图3c—3e)。镜下多见树枝状四射珊瑚,次为杯状珊瑚和板状珊瑚,珊瑚个体大小不一,主要为0.5 cm×2 cm~4 cm×6 cm,固着原地垂

向生长,形成生物格架,夹杂少量的苔藓虫和层孔虫。还可见种类繁多的腕足、海百合、藻类等化石,大小在0.3 cm×0.8 cm~1.0 cm×1.2 cm。格架间充填生物碎屑及灰泥。亮晶生屑灰岩中生屑含量约为75%~80%,磨圆及分选好,粒径为0.1~0.4 mm;生屑类型包括藻类、介壳、有孔虫及珊瑚。

生屑灰岩中多见溶沟、溶孔发育(图3f, 3g)。野外调查和老井复查发现,泸州地区及周边多个剖面显示石一段礁灰岩具有白云石化的特征^[13]。本区Z205井见有白云质灰岩,溶孔、裂缝发育(图3h)。

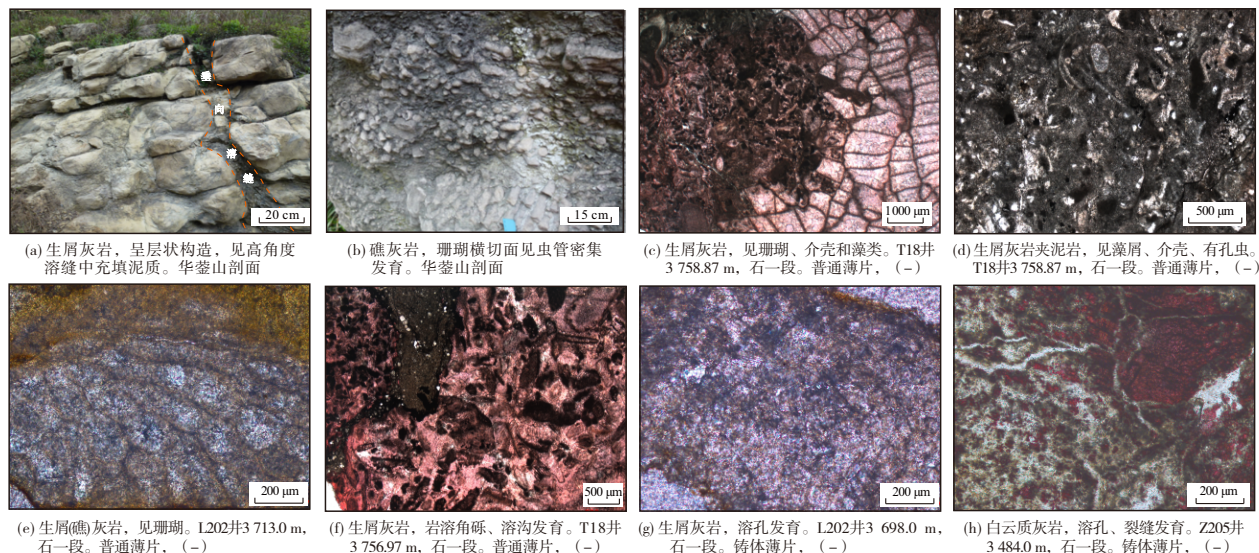


图3 川南地区石牛栏组礁滩体岩性及储集空间特征
Fig. 3 Lithology and reservoir space characteristics of the reef-shoal bodies of Shiniulan Formation in southern Sichuan Basin

2.2 储层特征

加里东运动晚期,受川中古隆起与海平面变化旋回的影响,川东南泸州地区石牛栏组礁灰岩经历了多期强烈的岩溶作用。在T18井取心段中,可见多个向上变浅的沉积旋回;顶部两个旋回的礁滩体岩溶作用显著(图4)。底部旋回1—2位于3 760.02~3 764.09 m井段,以泥岩、粉砂岩为主,夹薄层灰岩,发育水平层理(图4-①②),为滩间沉积;旋回3位于3 758.80~3 760.02 m井段,由泥岩、泥晶灰岩向上转变为生屑灰岩,反映沉积环境由滩间海逐渐向生屑滩过渡,顶部生屑滩岩溶作用强烈,溶沟(洞)内被泥质、粉砂质充填(图4-③);旋回4位于3 756.04~3 758.80 m井段,由泥岩、泥晶灰岩向上转变为巨厚的生屑灰岩,呈现出由滩间海向生屑滩的转变,顶部生屑滩岩溶作用强烈,生屑灰岩中岩溶角砾和溶沟(缝)发育,溶沟(缝)被泥质、粉砂质所填充(图4-④⑤)。

储层物性统计表明:泸州地区石牛栏组孔隙度介于0.08%~4.69%之间,平均值为0.82%,79.4%的样品孔隙度集中在0%~2%,显示出低孔隙度的特征(图5a);渗透率介于 $(0.006\sim0.501)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.047\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,76.4%的样品渗透率分布在 $(0.006\sim0.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图5b),显示出低渗透性的特点。

储层孔隙度与渗透率之间存在明显的正相关(图5c):在礁灰岩中这种规律尤为显著;在生屑灰岩中见到随孔隙度增加,渗透率快速增大的现象,这可归因于裂缝的影响(图5c)。

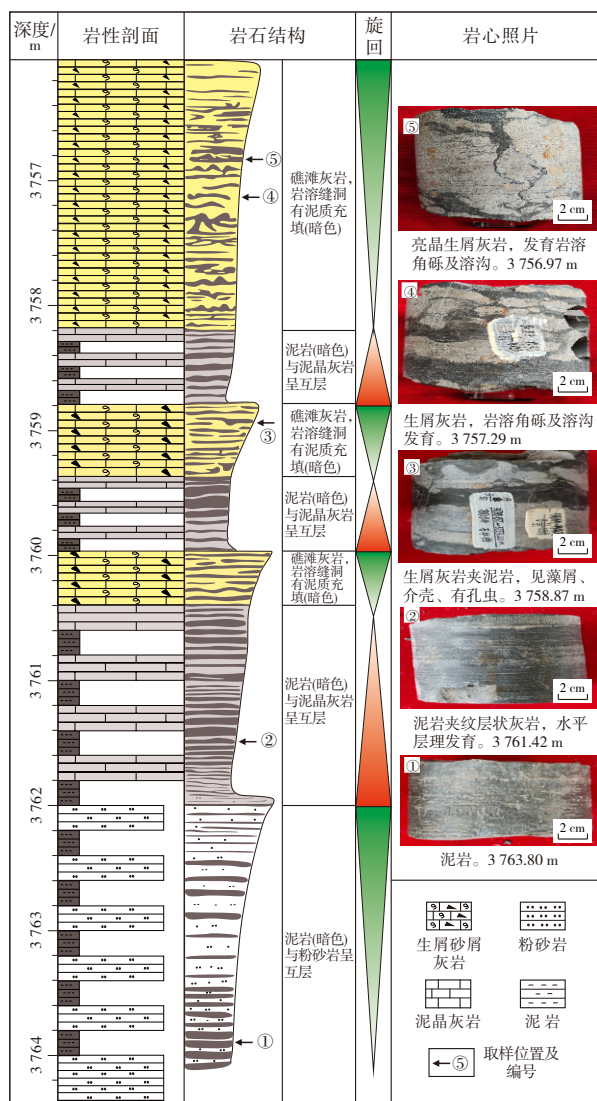


图4 泸州地区T18井石牛栏组一段取心段岩性及旋回特征
Fig. 4 Lithology and cyclicity characteristics of the cored interval of the first member of Shiniulan Formation of Well T18 in Luzhou area

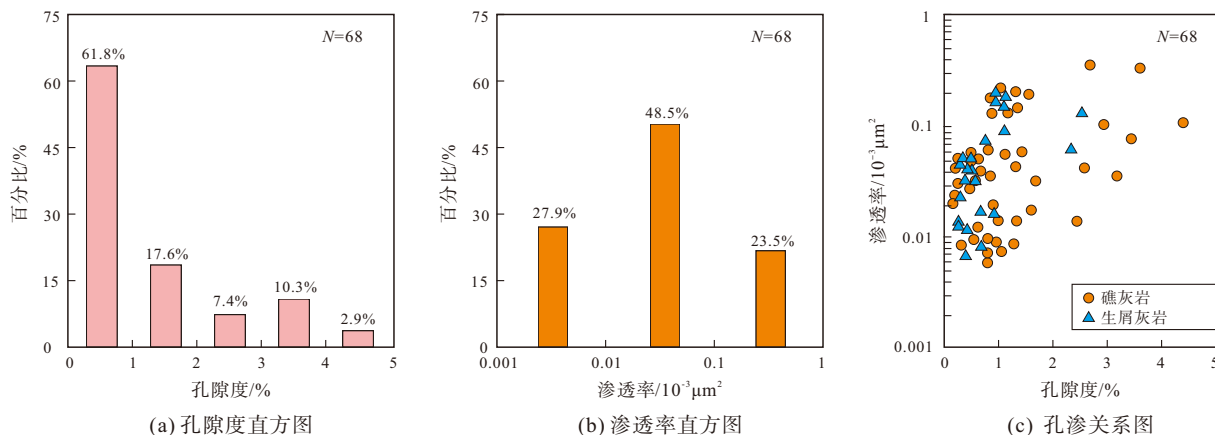


图5 泸州地区石牛栏组储层物性分布直方图及孔渗关系图

Fig. 5 Histograms of reservoir property distribution and porosity-permeability crossplot of the Shiniulan Formation in Luzhou area

2.3 平面展布特征

2.3.1 古地貌特征

区域研究表明：川东南地区龙马溪组—石牛栏组呈现向川中隆起区逐层超覆的特征^[14-15]；受加里东末期构造运动的影响，志留系遭受不同程度剥蚀（图1c）。这表明龙马溪组沉积期川中水下古隆起已经形成，对研究区的沉积作用产生了显著影响。

基于三维地震解释编制的泸州地区石一段厚度图（图6）显示，石一段地层等厚线大致平行于川中古隆起展布，具有中部厚（200~300 m）、南北薄（<200 m）的特点，北部地层要薄于南部。这反映出研究区石一段沉积时期古地貌可分为3个不同区域：环川中隆起的北部高带、中部低洼带以及南部高带。值得注意的是，中部低洼带存在多个相对古地貌高地。

2.3.2 礁滩体空间分布特征

根据南北向的连井沉积相对比分析（图7）可知：泸州地区发育潮缘滩和台内礁（生屑）滩，分带

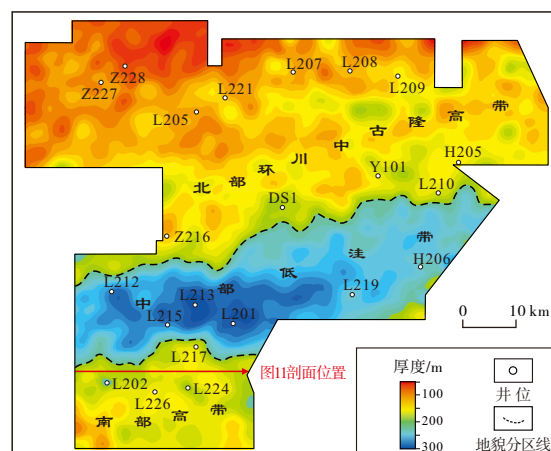
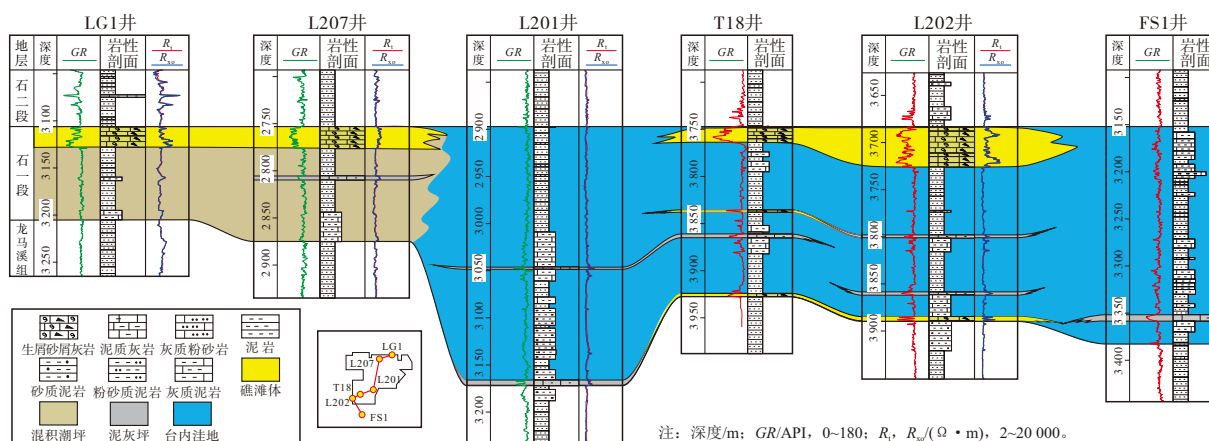


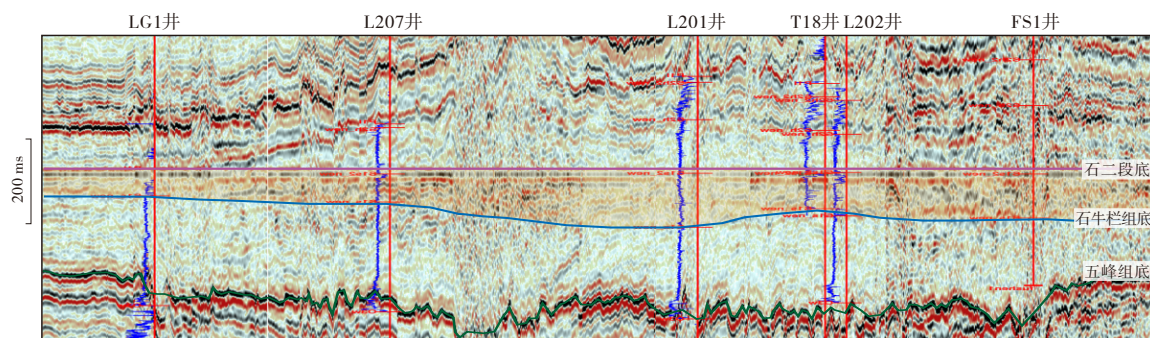
图6 泸州地区石牛栏组一段沉积期古地貌图

Fig. 6 Paleogeomorphic map of the first member of Shiniulan Formation in Luzhou area

特征显著。研究区北部处于环川中古隆起的浅水高地，石一段底部岩性以灰质泥页岩为主，偶见泥晶灰岩、白云质灰岩夹层，属于碎屑岩—石灰岩混合沉积的混积潮坪环境；向上石灰岩含量增加，在石一段顶部发育一套可横向对比的礁（生屑）灰岩，属



(a) 石一段沉积相连井对比图



(b) 石一段地层格架连井地震剖面（沿石二段底界拉平；井轨迹旁为电阻率曲线）

图7 泸州地区石牛栏组一段沉积相连井对比剖面与地震剖面

Fig. 7 Inter-well sedimentary facies comparison section (a) and seismic section (b) of the first member of Shiniulan Formation in Luzhou area

于混积潮坪高带的潮缘礁滩。研究区南部石一段厚度明显增大,底部以中—厚层灰质泥岩为主,见泥质灰岩、泥粉晶灰岩夹层,属台内洼地环境;在局部高地,石一段顶部以生物礁灰岩、生屑灰岩为主,以点礁或台内滩形式发育。

泸州地区石牛栏组礁滩体主要发育在石一段顶部,厚度在40 m左右。这种较小规模的礁滩体在 seismic 剖面上并未呈现出丘状或透镜状等典型响应特征^[16-17],而是表现为石一段顶部的强振幅反射波峰(图2b)。以T18井标定结果为,礁灰岩的顶界对应强振幅波峰、底界对应波谷,时差约11 ms。通过提取泸州三维工区内石一段顶部的均方根振幅,可以预测礁滩体的平面分布(图8)。综合分析图7、图8可知,礁滩体的分布具有明显的分区特征:北部环川中古隆地貌高带混积潮坪发育区,潮缘礁滩体呈现出较为连续的片状形态,与周围的潮坪相灰质泥岩、泥晶灰岩发育区存在明显的突变接触;L212井区—L219井区以南台内洼地的局部高地发育礁滩体,其表现出相对更强的振幅特征(图8),反映出礁灰岩与台内洼地的泥岩、灰质泥岩之间存在更大的阻抗差异。环古隆起潮缘礁滩和台洼局部高带礁滩分布面积达1 688 km²,可作为滩相储层发育的最有利区。

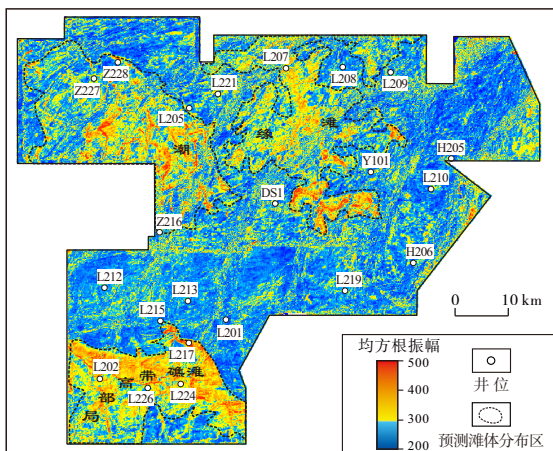


图8 泸州地区石牛栏组一段顶部均方根振幅属性图
Fig. 8 Root mean square amplitude map of the top of first member of the Shiniulan Formation in Luzhou area

3 油气勘探意义

基于烃源岩、生储盖组合及运移条件的研究,认为川南泸州地区石牛栏组一段顶部礁滩体油气成藏条件优越,具有较好的勘探潜力。

3.1 龙马溪组厚层泥质烃源岩供烃条件优越

四川盆地南部龙马溪组烃源岩厚度大,总有机碳含量在2%~6%之间,镜质组反射率在2.8%~3.5%之间,处于干酪根热裂解生干气阶段,供烃条件优越^[18-19]。研究表明,川南地区龙马溪组烃源岩厚度为250~700 m,生烃强度为 $(45\sim270)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

研究区石牛栏组烃源岩以深水陆棚相暗色泥页岩为主,厚度在0~135 m之间。此外,石牛栏组泥灰岩总有机碳含量为0.4%~0.8%,平均为0.63%,具有一定生烃潜力。基于天然气组分与同位素特征分析,石牛栏组天然气具有自身烃源的贡献^[20]。

3.2 断裂系统为有利的油气运移通道

礁灰岩储集空间发育,常具有较高的孔隙度和渗透率,可作为油气勘探的重要目标^[21-22]。烃类在运移和聚集过程中受流体势空间变化的主导,油气自高势能区向低势能区运移,最终在保存条件良好的低势能区储层内聚集成藏^[23]。断裂系统能够显著影响流体势场的空间格局。断裂活动促使岩层裂隙广泛发育,形成流体势能释放的通道,引导高势能区的油气向断裂带汇聚,并沿断裂路径充注至圈闭中^[24-25]。断裂活动的周期性特征成为调控油气空间分布格局的关键因素。

川南地区加里东期—海西期的断裂体系发育,构建了多层次的油气供给网络。依托三维地震资料精细刻画了泸州地区断层网络的分布(图9)。基于石一段顶部曲率属性分析可知,沿该地层界面断裂—裂缝体系密集发育,主要沿NE—SW与NEE两个方向展布,形成错综复杂的输导网络(图9a);NE走向的断裂体系,在剖面上切穿上奥陶统一二叠系,沿断裂带发育密集的裂缝(图9b),断裂—裂缝体系有效沟通了志留系烃源岩,极大地促进了油气运移与富集。

3.3 有利的成藏组合是油气聚集的关键

川南地区石牛栏组的天然气主要源自下伏的龙马溪组富含有机质的泥页岩^[26]。泸州地区石一段礁滩体,紧邻下伏龙马溪组优质烃源岩,上覆的石二段泥页岩与韩家店组的致密碎屑岩形成盖层,成藏条件优越(图10),显示出石一段礁滩体具有较大的勘探潜力^[27-29]。

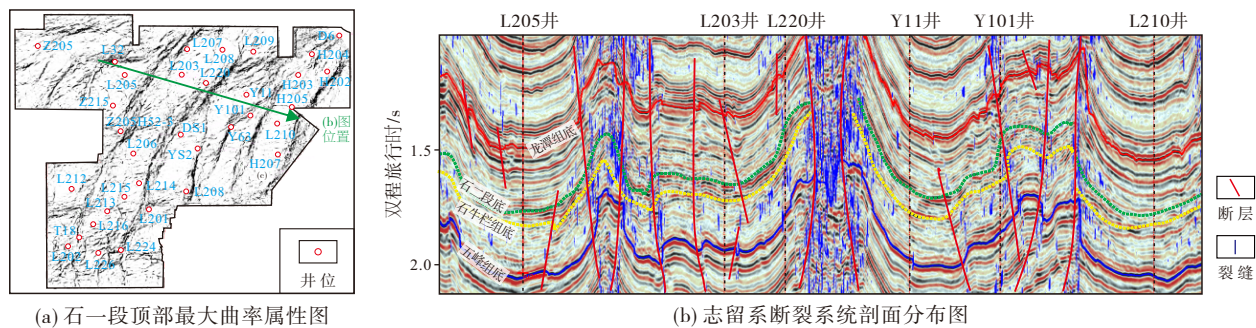


图9 泸州地区古生界断裂系统空间分布图
Fig. 9 Spatial distribution of Paleozoic fault system in Luzhou area

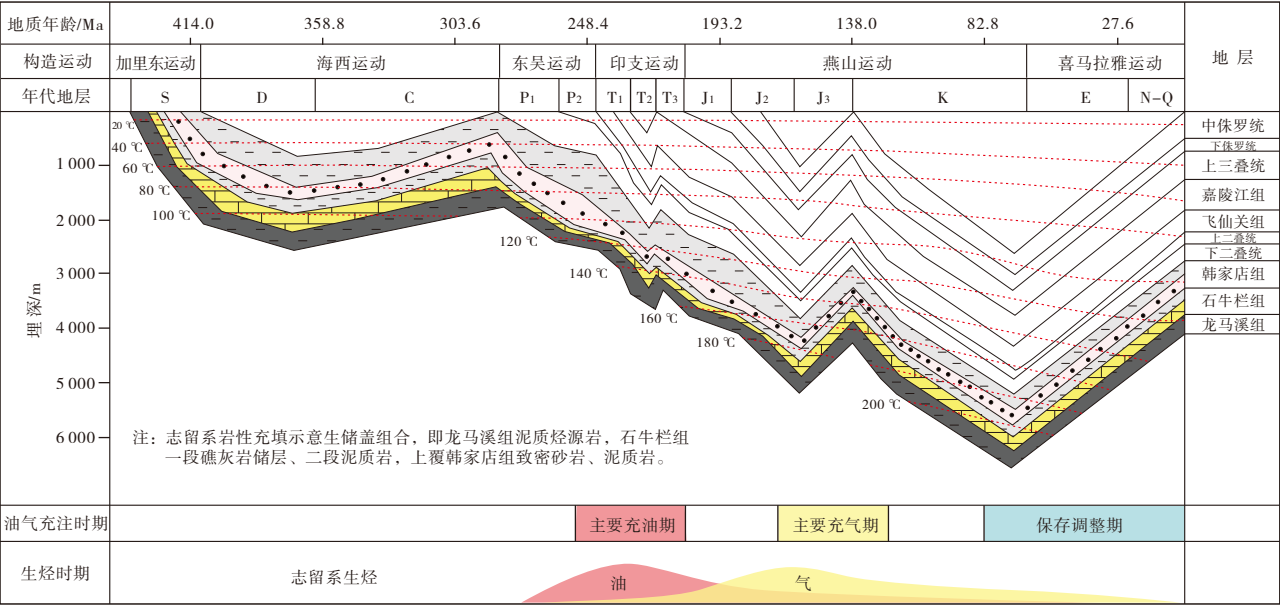


图10 泸州地区沉积埋藏史及志留系烃源岩生烃演化史图
Fig. 10 Burial history and hydrocarbon evolution history of Silurian source rocks in Luzhou area

自中二叠世起,四川盆地经历了广泛的海侵事件^[30-31],地层不断增厚。川南泸州地区龙马溪组烃源岩在晚二叠世至中三叠世期间达到了生油高峰期。随着埋藏深度增加,龙马溪组烃源岩在中侏罗世至早白垩世进入了干酪根裂解气和原油裂解气的高峰期(图10)。东吴运动至燕山运动期,区域构造活动活跃,为圈闭形成期,此时期是石牛栏组油气充注与成藏的关键阶段。研究表明,石牛栏组油气充注时期与圈闭形成期高度吻合,为油气的大规模聚集成藏提供了良好条件,促进了泸州地区石一段的油气富集与保存。

区域性展布的优质烃源岩、近源的优质储集层、巨厚的致密盖层以及继承性的构造隆升等因素综合控制的区域是油气田分布的最有利地区^[32-34]。川南地区龙马溪组富含有机质的泥页岩为一套区

域性展布的优质烃源岩,紧邻该套烃源岩的石一段礁滩体裂缝-孔洞型灰岩发育,石二段泥页岩、韩家店组致密碎屑岩及二叠系形成厚层区域盖层,加里东期—海西期断裂-裂缝体系发育,可以沟通下伏龙马溪组烃源岩与石一段储层,而且圈闭形成期与油气充注期高度吻合,这些地质要素的耦合可有效促进油气的大规模聚集成藏。据此建立了泸州地区石牛栏组“近源供烃、断裂输导、下生上储、复式聚集”油气成藏模式(图11),石一段礁滩体发育区为值得重点关注的勘探目标。平面上,基于研究区地质-地震综合解释成果,环川中古隆起分布的潮缘礁滩区、台内洼地的局部高地礁滩(图8)为有利的勘探区带。总而言之,对泸州地区及整个川南地区而言,石牛栏组礁滩体是值得关注与推进的勘探领域,将为整个区域的油气战略布局提供强有力的支撑。

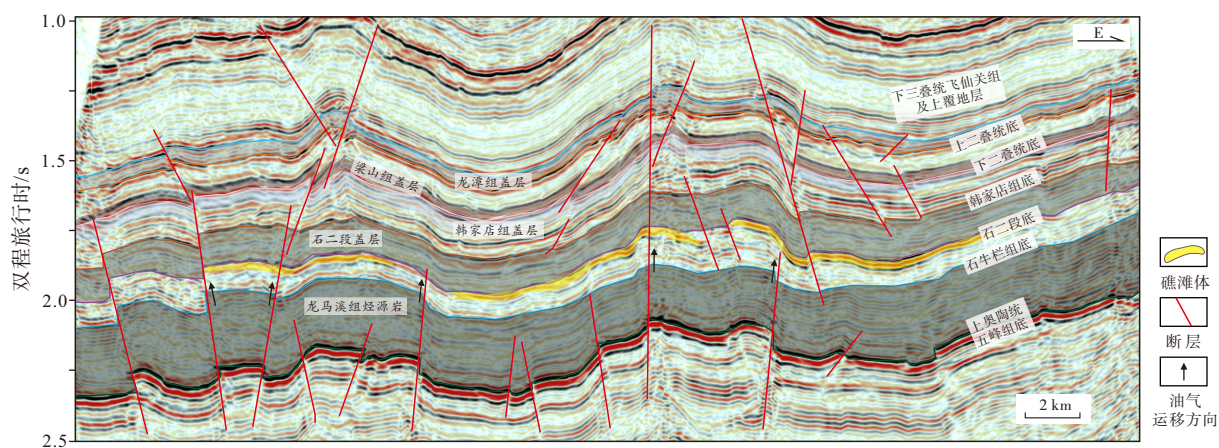


图 11 泸州地区石牛栏组礁滩体成藏模式图(剖面位置见图 6)

Fig. 11 Reef-shoal reservoir formation model of Shiniulan Formation in Luzhou area (location is shown in Fig. 6)

4 结 论

(1) 川南泸州地区石牛栏组一段顶部发育一套可区域对比的礁滩体,集中发育在靠近川中古隆起的混积潮坪高带潮缘礁滩和台内洼地局部高地的礁滩,以灰色—深灰色中厚层至块状礁/生屑灰岩为特征,礁滩体单层厚度在 6~40 m 之间。

(2) 石牛栏组成藏模式表现为“近源供烃、断裂输导、下生上储、复式聚集”。龙马溪组优质烃源岩—石一段礁滩体储层—上覆石二段泥页岩及上覆韩家店组致密碎屑岩盖层共同构成了有利的生储盖组合,NE—SW 和 NEE 向两组断裂—裂缝系统所构成的复杂网络为油气运移提供了通道,油气充注时期与圈闭形成时期(东吴运动至燕山运动期)匹配,为油气大规模聚集成藏奠定了基础。

(3) 川南泸州地区石牛栏组礁滩体是值得关注与推进的勘探领域,将为整个区域的油气战略布局提供强有力的支撑。建议今后依托石牛栏组重点油气藏、典型钻井的系统分析,开展北部潮缘滩、南部台内洼地局部礁滩的成储与成藏条件综合对比,优选有利勘探目标。

参 考 文 献

[1] 王正和,谭钦银,何利,等. 川东南—黔北志留系石牛栏组沉积与层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 499–507.
WANG Zhenghe, TAN Qinyin, HE Li, et al. Deposition and sequence stratigraphy of the Silurian Shiniulan Formation in southeastern Sichuan—northern Guizhou Province [J]. Oil & gas geology, 2013, 34(4): 499–507.

[2] 马文辛,刘树根,黄文明,等. 四川盆地东南缘志留系古油藏特征及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 432–441.
MA Wenxin, LIU Shugen, HUANG Wenming, et al. Characteristics of Silurian paleo-oil reservoirs and their significance for

petroleum exploration on the southeast margin of Sichuan Basin [J]. Oil & gas geology, 2012, 33(3): 432–441.

[3] 梁子锐,张新,李伟松,等. 赤水—綦江地区志留系石牛栏组台缘相带的认识及其油气勘探前景[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(12): 137–138.
LIANG Zirui, ZHANG Xin, LI Weisong, et al. Understanding of the platform margin facies belt of the Silurian Shiniulan Formation in Chishui—Qijiang area and its prospects for oil and gas exploration [J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2011, 31(12): 137–138.

[4] 李双建,周雁,肖开华,等. 四川盆地东南缘水吼滩志留系古油藏特征[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 849–855.
LI Shuangjian, ZHOU Yan, XIAO Kaihua, et al. Characteristics of Silurian destroyed oil reservoir in Houtan section of Xishui area in southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2009, 30(6): 849–855.

[5] 白壮壮,杨威,李堃宇,等. 川东南地区下志留统石牛栏组岩相古地理及生物礁滩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(1): 35–50.
BAI Zhuangzhuang, YANG Wei, LI Kunyu, et al. Lithofacies palaeogeography and development characteristics of reef shoal in Lower Silurian Shiniulan Formation in southeastern Sichuan Basin [J]. Natural gas geoscience, 2023, 34(1): 35–50.

[6] LIU Shugen, YANG Yu, DENG Bin, et al. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. Earth—science reviews, 2021, 213: 103470.

[7] 王海军,孟宪武,梁子锐,等. 川东南志留系石牛栏组生物礁特征与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 33–41.
WANG Haijun, MENG Xianwu, LIANG Zirui, et al. Organic reef characteristics and exploration orientation of Silurian Shiniulan Formation, southeastern Sichuan Basin [J]. China petroleum exploration, 2016, 21(5): 33–41.

[8] 白振瑞. 遵义—綦江地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积特征及页岩气评价参数研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
BAI Zhenrui. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Niutitang Fm shale and evaluation parameters of shale gas in Zunyi—Qijiang area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.

- [9] 邓宾. 四川盆地中—新生代盆-山结构与油气分布[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
DENG Bin. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan Basin and its gas distribution [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [10] 郭英海, 李壮福, 李大华, 等. 四川地区早志留世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 20-29.
GUO Yinghai, LI Zhuangfu, LI Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area[J]. Journal of palaeogeography, 2004, 6(1): 20-29.
- [11] 周大志. 川东南地区石牛栏组层序地层、沉积相及储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
ZHOU Dazhi. Sequence stratigraphy, sedimentary facies and reservoir characteristics of Shiniulan Formation in southeast area of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [12] 万云, 张廷山, 兰光志, 等. 川东南—黔北地区志留纪生物礁与古环境演化[J]. 沉积学报, 1997, 15(增刊1): 106-113.
WAN Yun, ZHANG Tingshan, LAN Guangzhi, et al. Silurian reefs and palaeoenvironment evolution in Chuandongnan-Qianbei, China [J]. Acta sedimentologica sinica, 1997, 15 (S1): 106-113.
- [13] 孙自明, 张荣强, 孙炜, 等. 四川盆地东部海相下组合油气勘探领域与有利勘探方向[J]. 现代地质, 2021, 35(3): 798-806.
SUN Ziming, ZHANG Rongqiang, SUN Wei, et al. Petroleum exploration domains and favorable directions of the lower marine assemblage in eastern Sichuan Basin [J]. Geoscience, 2021, 35(3): 798-806.
- [14] 施振生, 袁渊, 赵群, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积期古地貌及含气页岩特征[J]. 天然气地球科学, 2022, 33 (12): 1969-1985.
SHI Zhensheng, YUAN Yuan, ZHAO Qun, et al. Paleogeomorphology and oil-bearing shale characteristics of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China [J]. Natural gas geoscience, 2022, 33(12): 1969-1985.
- [15] 何利, 谭钦银, 王瑞华, 等. 川东南早志留世石牛栏组沉积相、沉积模式及其演化[J]. 矿物岩石, 2013, 33(4): 96-106.
HE Li, TAN Qinyin, WANG Ruihua, et al. Sedimentary facies, sedimentary model and evolution of the Shiniulan Formation of Early Silurian in the southeast Sichuan [J]. Mineralogy and petrology, 2013, 33(4): 96-106.
- [16] 杨雨, 钟原, 李林娟. 开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系礁滩组合分布与成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 683-690.
YANG Yu, ZHONG Yuan, LI Linjuan. Distribution and genesis of Permian-Triassic reef-shoal combination around Kaijiang-Liangping trough in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2021, 48(6): 683-690.
- [17] 宋昊, 胡明毅, 陈旭, 等. 不同坡度背景下生物礁沉积结构及差异演化特征: 以开江—梁平海槽西侧长兴组为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 788-793, 799.
SONG Hao, HU Mingyi, CHEN Xu, et al. Sedimentary structure and differential evolution characteristics of reefs under different slope backgrounds: a case study of Changxing Formation on the west side of the Kaijiang-Liangping trough [J]. Fault-block oil and gas field, 2022, 29(6): 788-793, 799.
- [18] 王鲲. 川东南地区志留系石牛栏组沉积相与成岩作用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
WANG Kun. Facies and diagenesis of Shiniulan Formation in southeast area of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [19] 张涛, 张佳珍, 陈波, 等. 四川盆地岳池—丰都地区下志留统龙马溪组生烃史研究[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(5): 561-572.
ZHANG Tao, ZHANG Jiazhen, CHEN Bo, et al. Research on the hydrocarbon generation history of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Yuechi-Fengdu area, Sichuan Basin [J]. Advances in geosciences, 2024, 14(5): 561-572.
- [20] 李刚权, 李龙, 吴松, 等. 黔北地区石牛栏组气藏特征分析与开发展望[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(5): 635-645.
LI Gangquan, LI Long, WU Song, et al. Gas reservoir characteristics analysis and development prospects of Shiniulan Formation in northern Guizhou area [J]. Advances in geosciences, 2021, 11(5): 635-645.
- [21] LUO Wei, SHI Zejin, TIAN Yamin, et al. Characteristics and forming processes of reef-shoal reservoir in Changxing Formation of the eastern Sichuan Basin in Dianjiang, China [J]. Arabian journal for science and engineering, 2022, 47(1): 725-737.
- [22] 余义常, 沈博珩, 李知为, 等. 古地貌对生物碎屑灰岩沉积成岩的控制作用[J]. 地质论评, 2023, 69(增刊1): 5-8.
YU Yichang, SHEN Boheng, LI Zhiwei, et al. Controlling effects of paleogeomorphology on sedimentary and diagenetic characteristics of bioclastic limestone [J]. Geological review, 2023, 69(S1): 5-8.
- [23] 付广, 薛永超, 吕延防. 断层对流体势空间分布的影响及研究方法[J]. 断块油气田, 2001, 8(2): 1-5.
FU Guang, XUE Yongchao, LÜ Yanfang. Influence of fractures to spatial distribution of fluid potential and its research methods [J]. Fault-block oil and gas field, 2001, 8(2): 1-5.
- [24] 陈明铭. 高邮凹陷吴堡断裂带与油气成藏关系研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
CHEN Mingming. The relationship between Wubao fault zone in Gaoyou Depression and hydrocarbon accumulation [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [25] HU Xiuquan, LUO Wei, ZANG Dianguang, et al. Key factors affecting hydrocarbon accumulation in ancient dolomite gas reservoirs of Xixiangchi Formation (southern Sichuan Basin, China) [J]. Frontiers in earth science, 2023, 10: 1022911.
- [26] GUO Ruibo, ZHANG Jinchuan, ZHAO Panwang, et al. Accumulation conditions and an analysis of the origins of natural gas in the Lower Silurian Shiniulan Formation from Well Anye 1, northern Guizhou Province [J]. Energies, 2019, 12(21): 4087.
- [27] 肖开华. 中国南方志留系油气地质特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 1-4.
XIAO Kaihua. Geological features and exploration direction of the Silurian hydrocarbon reservoirs in Southern China [J]. Natural gas industry, 2009, 29(11): 1-4.
- [28] 黄福喜, 杨涛, 闫伟鹏, 等. 四川盆地龙岗与元坝地区礁滩

- 成藏对比分析[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 12–20.
- HUANG Fuxi, YANG Tao, YAN Weipeng, et al. Comparison and analysis of reef–bank gas reservoirs in Longgang and Yuanba areas in Sichuan Basin [J]. China petroleum exploration, 2014, 19(3): 12–20.
- [29] 汤济广, 李豫, 汪凯明, 等. 四川盆地东南地区龙马溪组页岩气有效保存区综合评价[J]. 天然气工业, 2015, 35(5): 15–23.
- TANG Jiguang, LI Yu, WANG Kaiming, et al. Comprehensive evaluation of effective preservation zone of Longmaxi Formation shale gas in the southeast Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2015, 35(5): 15–23.
- [30] 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等. 四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1317–1337.
- HUANG Hanyu, HE Dengfa, LI Yingqiang, et al. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian [J]. Acta petrologica sinica, 2017, 33(4): 1317–1337.
- [31] HOU Zhangshuai, FAN Junxuan, HENDERSON C M, et al. Dynamic palaeogeographic reconstructions of the Wuchiapingian stage (Lopingian, Late Permian) for the South China Block [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2020, 546: 109667.
- [32] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 793–802.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China [J]. Acta petrolei sinica, 2009, 30(6): 793–802.
- [33] 关晓东, 郭磊. 深层—超深层油气成藏研究新进展及展望[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 203–209.
- GUAN Xiaodong, GUO Lei. New progress and prospect of oil and gas accumulation research in deep to ultra–deep strata [J]. Petroleum geology and experiment, 2023, 45(2): 203–209.
- [34] 汪泽成, 赵振宇, 黄福喜, 等. 中国中西部含油气盆地超深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. 世界石油工业, 2024, 31(1): 33–48.
- WANG Zecheng, ZHAO Zhenyu, HUANG Fuxi, et al. Ultra–deep hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in sedimentary basins of central–western China [J]. World petroleum industry, 2024, 31(1): 33–48.

编辑:董庸

Development characteristics and exploration significance of reef–shoal body of the Silurian Shiniulan Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin

ZHOU Gang¹, ZHONG Yuan¹, ZHANG Benjian¹, QIAO Yanping¹, DAI Xin¹, ZHANG Zili¹, LAN Caijun¹, DOU Shuang¹, XU Duo²

1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company;

2. Chengdu Ruilang Petroleum Technology Co., Ltd

Abstract: The recent exploration discoveries in Luzhou area indicate that the reef–shoal body of the Silurian Shiniulan Formation has certain potential for reservoir formation. A systematic study based on drilling, outcrop, and 3D seismic data is conducted to explore the development characteristics and exploration significance of the reef–shoal body of Shiniulan Formation. The results indicate that: (1) Reef/bioclastic limestone mainly develops at the top of the first member of Shiniulan Formation, with a thickness ranging from 6 to 40 meters, characterized by moderate–strong amplitude and medium–high frequency seismic reflection character. (2) Affected by the ancient uplift in central Sichuan, the first member of the Shiniulan Formation is developed at mixed tidal flats and intra–platform depressions, forming contiguous tidal edge reefs and shoals on the high terrain of the mixed tidal flats. At some high belts of the intra–platform depressions, intra–platform reefs/bioclastic shoals are developed. (3) The reservoir formation model of Shiniulan Formation is characterized by "near–source hydrocarbon generation, fault–mediated migration, lower–generation and upper–reservoir storage, and composite accumulation". The high–quality hydrocarbon source rocks of the Longmaxi Formation, the reef–shoal reservoir of the first member of Shiniulan Formation, the mudstone of the second member of Shiniulan Formation and the overlying strata form a good source rock–reservoir–caprock combination. The complex network fault system provides conditions for oil and gas migration, and the oil and gas filling period matches the trap formation period (P–K), laying the foundation for large–scale oil and gas accumulation. The Shiniulan Formation reef–shoal body is an important oil and gas exploration field worthy of attention.

Key words: reef limestone; seismic response; karstification; hydrocarbon accumulation; Shiniulan Formation; Sichuan Basin

ZHOU Gang, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research on marine natural gas geology in Sichuan Basin. Add: No. 12 North Section, Tianfu Rd., Chengdu High–tech Zone, Sichuan 610000, China. E–mail: zhougang29@petrochina.com.cn. ORCID: 0009–0008–9241–1734

ZHONG Yuan, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and research. Add: No. 12 North Section, Tianfu Rd., Chengdu High–tech Zone, Sichuan 610000, China. E–mail: zhongyuan2018@petrochina.com.cn. ORCID: 0000–0001–5223–7470