

四川盆地华蓥山断裂西侧低缓构造区石炭系黄龙组成藏条件与勘探潜力

付小东^{1,2}, 董景海³, 李伟⁴, 云建兵³, 谷明峰^{1,2}, 李文正^{1,2}, 应玉双³,
朱茂^{1,2}, 谭万仓³, 和源⁵, 朱可丹^{1,2}, 徐哲航^{1,2}, 朱心健^{1,2}, 熊绍云^{1,2}, 张豪^{1,2}

1 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室; 2 中国石油杭州地质研究院; 3 中国石油大庆油田公司;
4 中国石油勘探开发研究院; 5 中国石油西南油气田公司

摘要 石炭系黄龙组是四川盆地重要的天然气产层,其在华蓥山断裂西侧低缓构造区勘探程度低,面临成藏条件不清,有利勘探区带不落实的问题,制约了天然气规模储量的发现。基于新老探井和二维、三维地震资料,针对华蓥山断裂西侧黄龙组地层分布、岩相古地理与成藏条件开展系统研究。结果表明:①黄龙组残余地层分布较广,面积约13 100 km²,川北一带新落实地层分布区约4 000 km²,厚度主要为10~40 m。②黄龙组潮间带浅滩白云岩广泛发育,主要位于黄二段,分布面积约8 200 km²,在平昌—巴中地区预测新增滩带面积约2 000 km²;浅滩相白云岩储层厚度主要为2~20 m,储层物性条件好,平均孔隙度为3.90%。③川北地区黄龙组成藏烃源条件好,下伏五峰组—龙马溪组烃源岩分布面积约为25 000 km²,烃源岩总厚度为50~150 m,其中优质烃源岩厚10~60 m,可与黄龙组构成下生上储的有利成藏组合。④受古隆起斜坡带、地层尖灭带和大型断裂带控制,黄龙组发育平昌—巴中、广安—渠县两个大型圈闭发育带,圈闭类型多样,以岩性—地层圈闭为主,保存条件好。预测华蓥山断裂西侧低缓构造区存在4个有利勘探区,天然气勘探前景良好。

关键词 地层分布;成藏条件;勘探潜力;黄龙组;华蓥山断裂西侧;低缓构造区;四川盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码**:A

引用: 付小东,董景海,李伟,等. 四川盆地华蓥山断裂西侧低缓构造区石炭系黄龙组成藏条件与勘探潜力[J]. 海相油气地质, 2025, 30(3): 239-254.

FU Xiaodong, DONG Jinghai, LI Wei, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of the Carboniferous Huanglong Formation in low-relief structural zone on the west side of Huayingshan Fault, Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(3): 239-254

0 前言

石炭系黄龙组是四川盆地天然气重要产层。1977年,相18井测试获得85.05×10⁸ m³/d高产气流,发现了相国寺气田,此后,川东地区黄龙组勘探全面展开,历经数十年勘探,目前已发现了五百梯、卧龙河等50余个中小型气藏与含气构造,探明天然气储量约2 500×10⁸ m³[1-7]。黄龙组勘探大致经历了3个阶段:早期发现阶段(1977—1988年),主要以高陡构造带背斜圈闭为勘探对象,以构造控藏认识为指导,发现了相国寺、卧龙河、福成寨等气田[1];规模勘探阶段(1989—2000年),以构造带为单元、复合圈闭为主要勘探对象,建立了高陡构造成藏模式,发现了五百梯、沙坪场等众多气藏[1],提交探明储量

约2 025×10⁸ m³;拓展勘探阶段(2000年以后),在华蓥山断裂西侧以岩性—地层复合圈闭为目标[2-4],多口井见显示,部分井获工业气流,但未提交规模储量,华蓥山断裂东侧高陡构造带则以中小型构造为目标,发现了寨沟湾、西河口等小型气藏。目前已发现气藏除龙会场气藏外均位于华蓥山断裂东侧高陡构造带,以地层—构造、岩性—构造复合圈闭气藏为主[1-3,6-7]。黄龙组气藏储量品质好,资源丰度为(2.0~6.0)×10⁸ m³/km²,最高年产气量超过60×10⁸ m³,占当年全盆地天然气总产量的一半以上[8],曾是四川盆地天然气主力产层。进入21世纪以来,随着高陡构造带勘探程度不断提高,探明储量增长缓慢,储量动用程度增高,现已开发气藏45个,动用储量约2 480×10⁸ m³,累计采出天然气约1 400×10⁸ m³,采

收稿日期:2024-10-21;改回日期:2025-03-05

本文受中国石油重大科技专项所属课题“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(编号:2023ZZ16YJ01)资助

第一作者: 付小东,博士,高级工程师,主要从事油气地质综合研究与勘探部署。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: fuxd_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 徐哲航,博士,工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail: xuzh_hz@petrochina.com.cn

出程度约56%,整体进入了开发中后期,储量和产量接替困难,亟待落实新的储量、产量接替区。

黄龙组在华蓥山断裂东、西两侧勘探程度极不平衡:东侧勘探程度高,已发现探明储量均分布于东侧高陡构造带;西侧低缓构造区勘探程度低,仅发现龙会场一个小气藏(控制储量 $24.3\times 10^8\text{ m}^3$),华西1井等几口井获得低产、微产气,是黄龙组勘探接替区。过去受资料和勘探程度所限,华蓥山断裂西侧低缓构造区黄龙组残余地层分布、岩相古地理格局和成藏条件不清楚,制约了有利勘探区带目标落实,导致天然气勘探久攻未克。针对上述问题,基于已有探井和大量二维、三维地震资料开展综合研究,重新认识华蓥山断裂西侧黄龙组的分布和岩相古地理格局,烃源岩、储层和圈闭等成藏条件,指出新的有利区带,为勘探部署提供认识指导。

1 川东地区黄龙组勘探现状与启示

川东地区黄龙组已发现气藏主要分布在华蓥山断裂东侧高陡构造带(图1),气藏主产层为黄龙组二段(简称黄二段)白云岩,其次为黄三段白云岩(图2)。华蓥山断裂西侧低缓构造区有数口井获得工业气流或见油气显示。针对华蓥山断裂东西两侧黄龙组已发现的典型气田、重点探井进行成藏条件和气藏特点解剖,为下一步黄龙组勘探获得经验启示。

1.1 华蓥山断裂东侧黄龙组勘探启示

对华蓥山断裂东侧高陡构造带五百梯、卧龙河、温泉井—沙罐坪等黄龙组气藏的解剖分析得到4点启示:①对于高陡构造带背斜/断背斜、断块、地

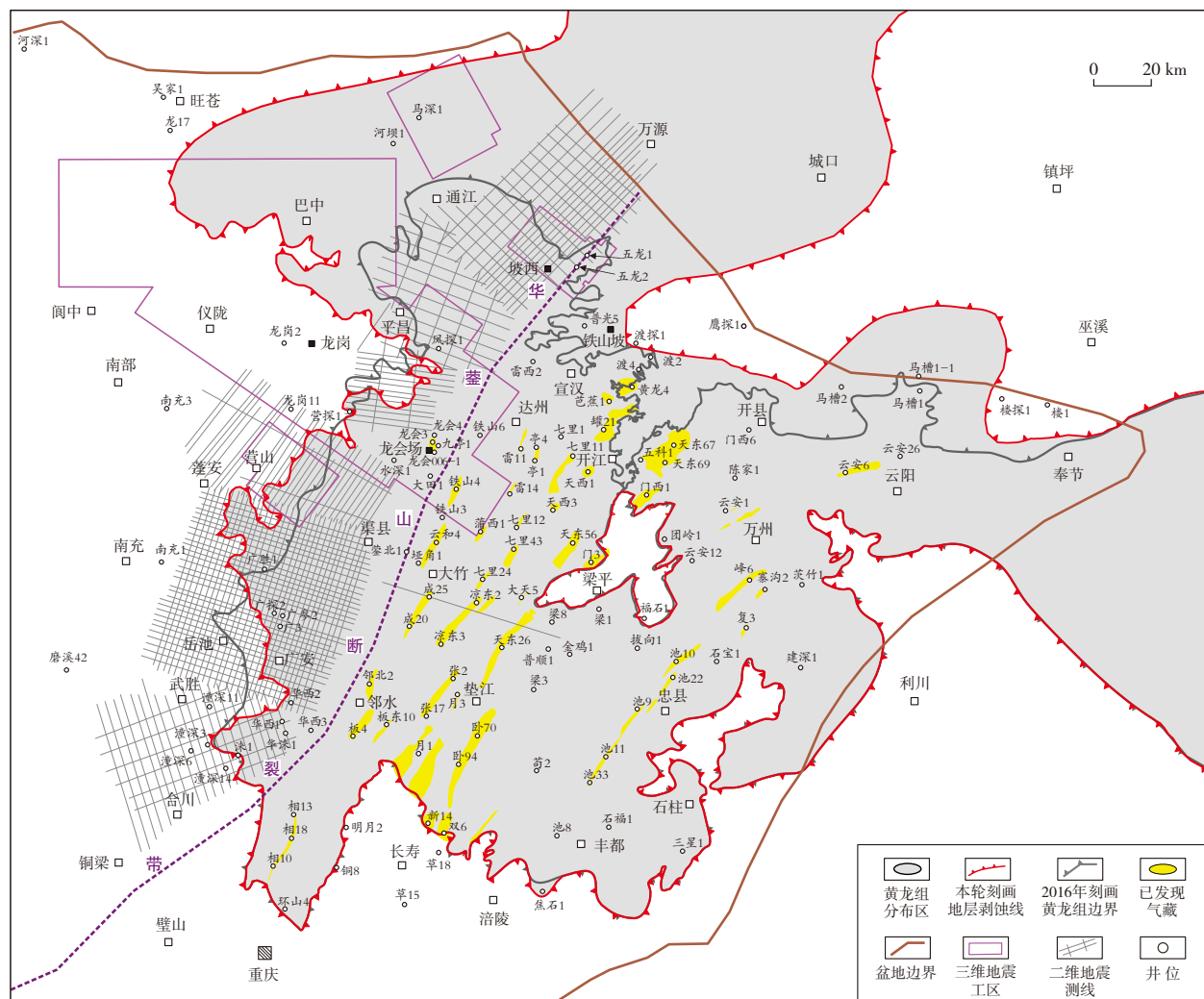


图1 四川盆地东部黄龙组地层及已发现气藏分布图

Fig. 1 Distribution map of Huanglong Formation and the discovered gas reservoirs in the eastern Sichuan Basin

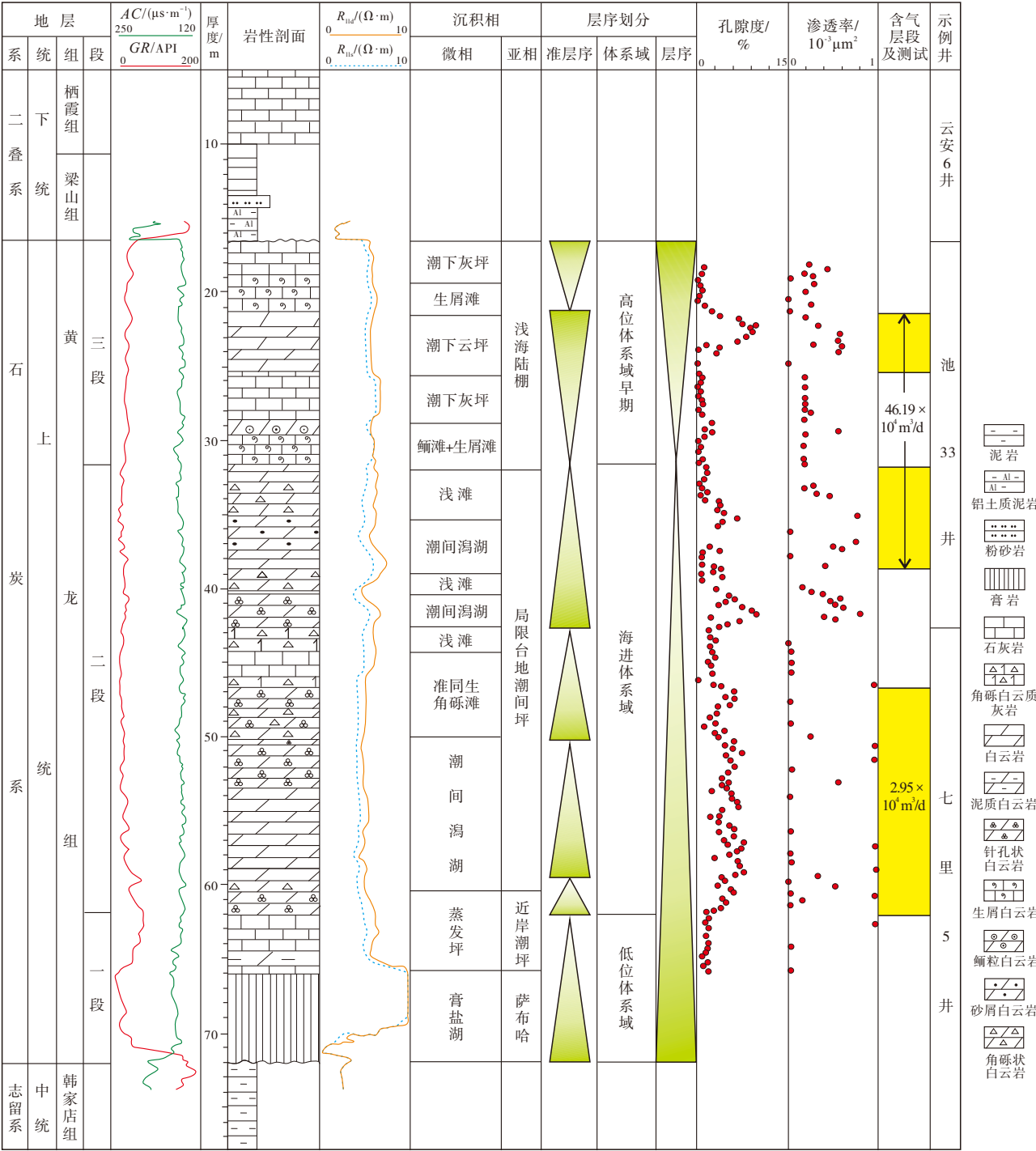


图2 四川盆地东部黄龙组地层综合柱状图(据文献[5]修改)

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Huanglong Formation in the eastern Sichuan Basin (cited from reference [5], modified)

层等不同类型的圈闭,天然气在断层上盘、下盘的圈闭中均可聚集成藏(图3),大气田多发育于较完整的背斜或断背斜构造;②在高陡背斜核部断裂密集发育带,如果断裂未切穿嘉陵江组—雷口坡组膏盐岩(区域性盖层),黄龙组也可有效成藏(图3a,3d);

③黄龙组储层通过断裂与泥岩或致密碳酸盐岩地层侧向对接而形成良好侧向封堵,可以封闭300~2 000 m高的气柱,与断层相关的断鼻、断背斜圈闭即使地层回倾幅度小也可以成藏;④在发现黄龙组工业气田的圈闭区域,嘉陵江组二段膏盐岩(间接

盖层)之下的二叠系一下三叠统通常发育异常高压层,压力系数高达1.4~2.2,多套区域性间接盖层通

过超压系统封闭黄龙组天然气,气柱高度达两千余米^[9]。

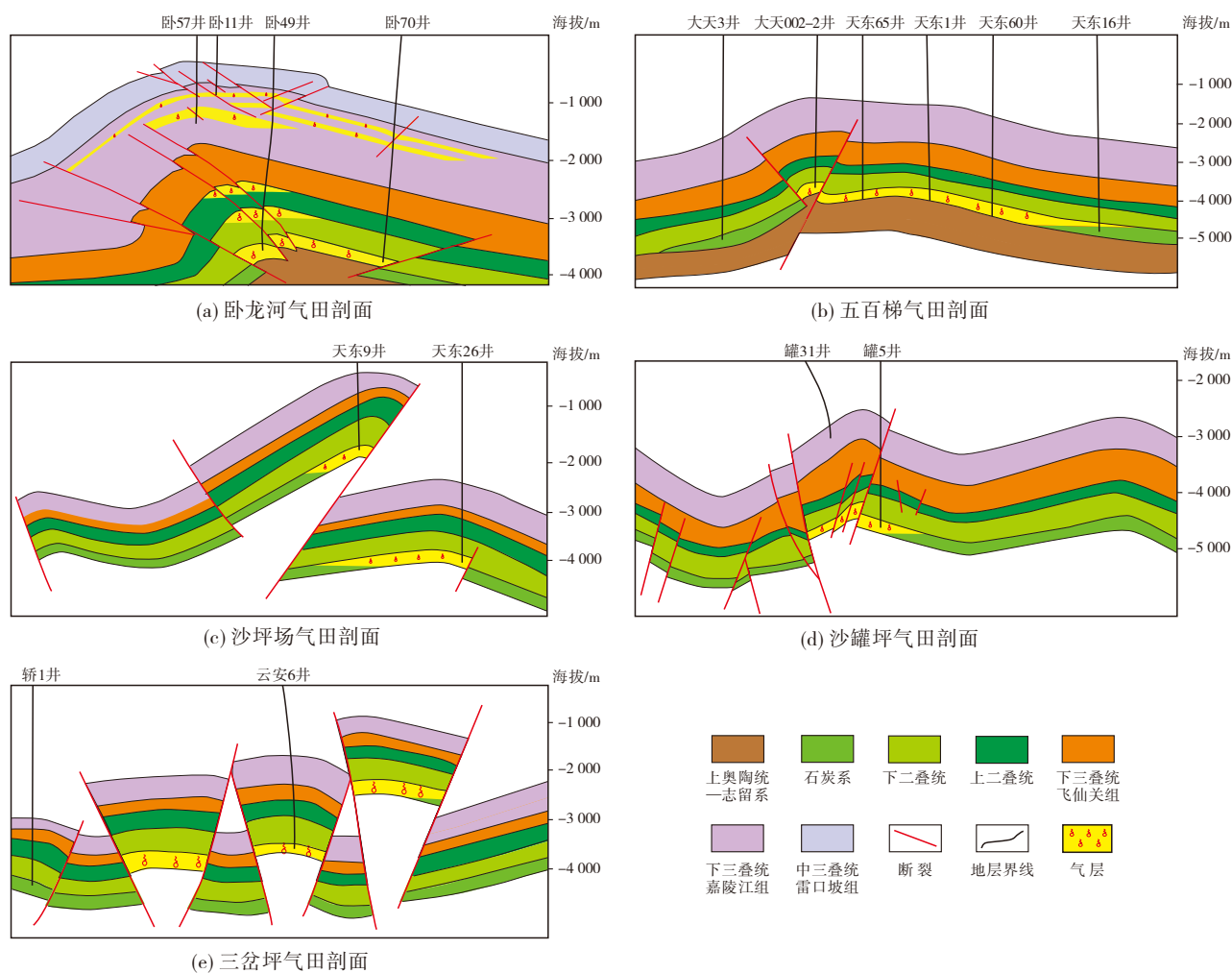


图3 四川盆地华蓥山断裂东侧黄龙组典型气藏剖面图

Fig. 3 Typical gas reservoir profiles of Huanglong Formation on the east side of Huayingshan Fault in Sichuan Basin

1.2 华蓥山断裂西侧黄龙组勘探启示

目前华蓥山断裂西侧低缓构造区钻遇黄龙组地层厚度大于5 m的探井近20口(图1,表1),多数为“过路井”,专层探井少,主要分布于龙会场和广安—华蓥地区。龙会3、龙会006-1、华西1等3口井获工业气流,发现龙会场1个气藏;华西2、华莱1、广参2等6口井产微气,发现华蓥西—涪滩场大型含气构造。探井解剖表明主要存在3类失利井:①气源不足与晚期构造调整导致未获工业气流,以广参2、华涪1、华西2等井为代表,主要位于广安—华蓥西—涪滩场构造。该区处于龙马溪组尖灭带附近,烃源岩厚度薄或缺失,烃源条件一般,导

致古油藏充填度不高,黄龙组储层中既有充填沥青的孔隙,也见大量不含沥青的孔隙;加之后期断层活动破坏了直接盖层和区域性间接盖层,导致保存条件被破坏,使得圈闭失效,天然气调整逸散,圈闭现今产微气或产水。②圈闭失效导致探井失利,该类井以蓥北1、水深1和龙会4等井为代表。上述探井尽管龙马溪组烃源岩较厚,但过于靠近或位于华蓥山断裂,断裂活动破坏了区域盖层,导致圈闭失效、天然气散失,圈闭含水且地层水矿化度低,探井仅获微气或产水。③储层物性差导致失利,以河坝1井、马深1井为代表,主要位于通江—南江地区,黄龙组以陆棚相泥质岩沉积为主,白云岩储层不发育,测试结果为干层。

华蓥山断裂西侧黄龙组已有探井解剖得到以下3点勘探启示：①华蓥山断裂西侧低缓构造区北段黄龙组烃源条件优于南段，勘探效果相对要好，发现了龙会场气藏；②黄龙组总体不缺储层，储层

条件与华蓥山断裂东侧基本相当；③避开切穿嘉陵江组—雷口坡组膏盐岩地层的晚期断裂，断裂不切穿膏盐岩区域盖层，即使在断裂密集发育带黄龙组也可成藏，如龙会场气藏。

表1 华蓥山断裂西侧黄龙组钻探情况统计表
Table 1 Statistics of drilling data of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

井名	地层厚度/m	测试层段/m	储层厚度/m	储层段孔隙度/% (范围值/平均值)	测井解释	测试结果		钻探成效分析
						气产量	水产量	
莹北1	33.6	5 882.00~5 897.25	5.4	2.1~9.8/4.7 (测井)	含气水层	点火燃13次,持续5 min;液氮助排火燃2次,焰高3~4 m,持续5 min,未测试	未测试	圈闭失效,含气性不好,分隔器以下,管柱卡埋,取消酸化试油
华西1	22.87	4 575.2~4 592.7	14.3	3.08~10.96/5.01	气层	中途测试估产(2~3)×10 ⁴ m ³ /d,火焰高5~10 m(酸化)		工业气流井
华西2	26.8	4 659.0~4 664.0	5	3.09~10.56/5.45	气层	酸化测试0.059 9×10 ⁴ m ³ /d	1.14 m ³ /d	烃类充注不足,圈闭失效
华西3	28.8	4 614.7~4 628.7	14	3.08~8.06/4.59	含气层	酸化测试0.102×10 ⁴ m ³ /d		烃类充注不足,圈闭失效
华涑1 (导眼段)	29.9	5 111.0~5 198.0 (水平段)	9.98 (垂厚)	2.01~11.84/4.26	含气层	裸眼酸化,0.203×10 ⁴ m ³ /d		烃类充注不足,圈闭失效
涑1	9.0	4 393.4~4 396.3	2.9	5.0~7.0	气层	酸化,微气	无水	烃类充注不足,储层差
广胜1	26.0		9.8		含气水层	见气侵,气测异常,未测试	未测试	烃类充注不足,圈闭失效
广3	28.0	4 861.0~4 869.0	8	3.41~13.42/8.67	水层	RFT测试,未试气	中途测试产水9L	电阻率低,产水,未测试
广参2	35.2	4 918.0~4 953.2	35	3.15~13.79/5.97	气水同层	替喷测试0.000 35×10 ⁴ m ³ /d	5.74 m ³ /d	烃类充注不足,圈闭失效
广探2	29.4	5 026.2~5 052.3	16.4		水层	未测试	未测试	烃类充注不足,圈闭失效
水深1	26.0	5 740.12~5 742.20	12.5	3.30~11.78/6.80	气层		1.5 m ³ /d	圈闭失效
		5 744.15~5 754.7			水层			
龙会3	38.2	4 764.0~4 782.0	6.5	2.0~8.0/5.1	气层	7.23×10 ⁴ m ³ /d		工业气流井
龙会4	62.57	5 135.0~5 184.0	4.63		气层		4.8 m ³ /d	圈闭失效
龙会006-1	60.2	4 872.0~4 918.0	12.88	2.0~9.0/3.4	气层	26.73×10 ⁴ m ³ /d		工业气流井
九亭1	48.0	5 408.7~5 429.5	12.4	2.0~5.0/3.2 (测井)	含气水层	干层,气举点火燃2次,焰高0.5 m,持续时间20 min	有地层水迹象	圈闭失效,形态不完整
大田1	54.0	4 826.0~4 864.0	34.0	1.5~6.0/3.4	气层、含气层	产微气		储层偏差
河坝1	33.0	6 008.0~6 042.0	0	0.5~2.0	微含气层	干层	0.48 m ³ /d	储层不发育,无白云岩
马深1	32.0		0			未测试	未测试	储层不发育,无白云岩

2 华蓥山断裂西侧黄龙组地层分布与岩相古地理

2.1 黄龙组残余地层分布

四川盆地东部石炭系黄龙组残余厚度一般为10~50 m,最厚约80 m。地层经历海西末期构造抬

升剥蚀,残余厚度较小且变化快,分布预测难度大。华蓥山断裂东侧勘探程度高,地层分布较落实;而西侧地层埋深大,勘探程度低,残余地层分布落实程度低。利用工区内大量二维、三维地震资料对黄龙组连片解释,进一步落实华蓥山断裂西侧黄龙组尖灭带和残余地层分布(图4a)。

钻井揭示华蓥山断裂西侧黄龙组发育以碳酸

盐岩为主和以混积岩为主的两大岩相区。碳酸盐岩岩相区主要表现为白云岩、石灰岩和膏岩组合,地层纵波速度一般介于6 000~6 700 m/s,而上覆二叠系梁山组和下伏志留系韩家店组碎屑岩地层纵波速度一般低于5 000 m/s^[10]。黄龙组与上下围岩之间具有较大的波阻抗差异,地层厚度超过地震可识别分辨率时,其顶界为强波峰反射,底界为强波谷反射;小于地震分辨极限厚度时,顶界对应波峰反射,底界处于波峰至波谷转换的零值点(图4b)。通江—南江一带黄龙组相变为混积岩岩相区,以灰质/白云质泥岩、泥质白云岩等岩性为主(河坝1井),纵波速度与下伏志留系相当,没有明显反射界面,其底界波峰主要为栖霞组底界强波谷旁瓣(图4b: D—D')。

地震正演模拟表明:当黄龙组厚度小于10 m时,顶界几乎没有波峰响应;厚度大于10 m时,顶界

开始出现波峰响应,且波峰振幅与厚度呈正相关,厚度越大波峰振幅越强;厚度约50 m时,顶界和底界分别对应波峰和波谷反射,实现了地震上的可分辨。岩性和相变的正演模拟显示,碳酸盐岩岩相区黄龙组与上下地层存在较大波阻抗差,顶底界的波峰和波谷振幅较强,波峰振幅达到13 500 db,远高于混积岩岩相区的10 030 db^[10]。

依据地震标定及正演模拟结果,利用地震波形和振幅强度的变化,识别了黄龙组的尖灭带和岩性相变带,并建立了振幅强弱与地层厚度关系式^[10]来预测地层厚度。华蓥山断裂西侧黄龙组分布总面积约为13 100 km²,主要存在南段广安—渠县和北段平昌—巴中两个规模发育区(图4a)。与以往认识不同,本文预测在北段平昌—巴中—通江一带黄龙组残余地层仍广泛分布,面积约4 000 km²。结合连井剖面对比分析可知:华蓥山断裂西侧黄龙组厚度

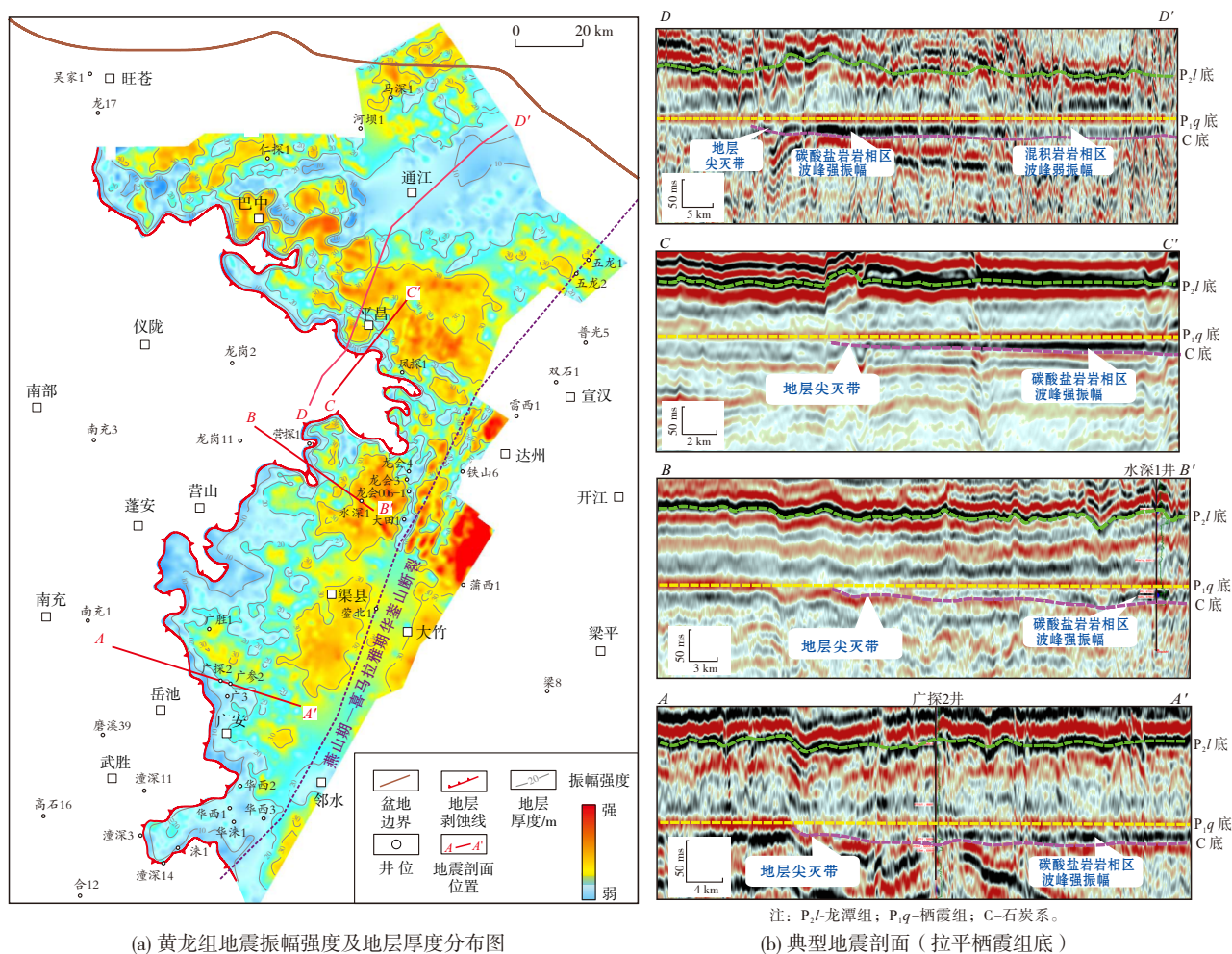


图4 华蓥山断裂西侧黄龙组残余地层分布与地震解释剖面
Fig. 4 Distribution map of residual strata and seismic interpretation profiles of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

主要为10~40 m;广安—渠县地区总体由东向西呈逐渐减薄趋势,至营山—蓬安—岳池一线完全缺失,例如靠近华蓥山断裂的莹北1井、华西3井黄龙组残余厚度分别为33.2 m、32.0 m,而靠近西侧剥蚀线的涑1井、潼深3井黄龙组残余厚度分别仅为8.9 m、2.9 m;平昌—巴中分布区呈现由北向南先增厚再减薄的趋势,位于平昌南地层剥蚀线附近的风探1井钻遇地层厚约12 m,至仪陇北—苍溪北一带完全缺失。工区北部通江一带河坝1井揭示黄龙组残余厚度约32.7 m,根据地震预测地层厚度在20~30 m之间,值得注意的是,因北部相变为混积岩地层,地震振幅与上下地层差异不明显,预测厚度可能与实际厚度存在一定偏差。

2.2 黄龙组岩相古地理格局

川东地区黄龙组是一套由低位体系域(一段)—海进体系域(二段)—高位体系域早期(三段)组成的较完整I型层序^[5,11-13],主要属潮坪沉积体系,前人认为发育云阳东南部与达州西北部两个海侵通道,形成了重庆—万州与达州东南部两个潮坪沉积体系^[5,13]。黄龙组碳酸盐岩和混积岩岩相区在地震剖面上的响应特征差异明显。龙会场及以南地区以碳酸盐岩地层为主,地震剖面上表现为窄而强的波峰反射特征,振幅能量强(图4b: A—A', B—B', C—C');根据振幅属性预测华蓥山断裂西侧黄龙组碳酸盐岩岩相区面积超8 200 km²,20余口井测井解释白云岩厚5~40 m,平均为19.5 m。通江地区混积岩岩相区地震响应为较宽的中—强波峰反射,振幅能量明显降低(图4b: D—D')。早期受地震资料缺乏和品质差的制约,黄龙组两大岩相区变化带的具体位置不清,近年来大面积实施的三维地震资料为准确刻画相变带和岩相古地理格局奠定了基础。根据钻井沉积相连井剖面(图5)、岩石组构特征,结合地震资料,在前人成果基础上进一步厘定了华蓥山断裂西侧黄龙组各段的岩相古地理格局。

黄一段残余地层厚度一般小于10 m,在华蓥山断裂西侧发育白云质泥岩、角砾状灰岩(图6a)、角砾状白云岩(图6b)、微晶白云岩(图6c)、含生屑微晶灰岩,以及膏岩等多种岩性,常见膏模/盐模、叠层石、窗格、鸟眼、示底构造等沉积构造,具有低位体系域沉积特征^[12]。平昌—巴中及以南的广大地区黄一段主体为潮上带蒸发坪,在坡西—通江一带则主要为潮间带灰云坪和潮下带浅水陆棚沉积(图7a);华西2

井见厚约2 m的溶孔砂屑白云岩,为砂屑滩;水口场水深1井、龙会场九亭1井见角砾状灰岩、角砾状白云岩(图5),发育角砾滩;平昌南凤探1井发育角砾状/砂砾屑白云岩(图6b),见陆源碎屑石英,具有一定的磨圆,为滨岸混积滩坝沉积;大田角构造大田1井见厚近6 m的膏岩,为膏盐湖沉积。

黄二段岩性以角砾状白云岩、亮晶砂屑白云岩(图6d,6f)、颗粒白云岩(图6g—6i)、粉晶白云岩为主(图6j),其次还发育微—亮晶凝块白云岩、红藻/绿伞藻白云岩^[14],常见干裂、纹理、叠层石、鸟眼、生物钻孔、交错层理、冲刷面等沉积构造^[5,12],表现为水动力时强时弱且暴露的潮坪内浅滩、潮沟与云(灰)坪交互发育的海进体系特点。川东地区黄二段主要发育潮上带蒸发坪,潮间带局限潟湖、云灰坪、藻云坪、浅滩与潮下带浅海陆棚等沉积微相^[5,13]。连井剖面显示华蓥山断裂西侧黄二段潮间带浅滩(砂屑滩、角砾滩、粒屑滩)在华蓥—广安、渠县—龙会场、平昌—巴中等地区广泛分布,地震振幅属性表现为强振幅(图4a);华西1井、广参2井和水深1井等6口全取心井的岩心统计表明,砂屑白云岩、角砾状白云岩累计厚度主要在2~15 m不等(图5),发育面积近8 200 km²(图7b)。相较于前期认识,潮间带浅滩相沉积北边界由龙会场向北拓展至平昌—巴中一带,新增滩带面积约2 000 km²,风探1井钻遇厚约4 m的藻屑、砂屑滩,证实了该滩带的存在。通江—万源一带黄二段相变为潮下带混积浅水陆棚,河坝1井岩性主要为灰质/白云质泥岩,夹泥质灰岩、生屑灰岩,滩相白云岩不发育,地震振幅表现为弱振幅(图4a)。

黄三段岩性以浅灰色/深灰色石灰岩、白云质灰岩、泥—粉晶白云岩(图6k)、泥质白云岩和白云质泥岩为主,部分井发育薄层藻灰岩、生屑灰岩、角砾状白云岩或角砾状灰岩、生屑/砂屑白云岩(图5)。该段生物门类和数量相较黄二段增多,具有高位体系域早期沉积、水体相对较深的陆棚—盆地边缘沉积的特征,主要发育潮下带浅海陆棚灰坪、生屑滩,潮间带云灰坪、浅滩等沉积微相^[5]。如图7c所示,巴中—平昌及以南地区主要为潮下带浅海陆棚灰坪,其次为潮间带灰云坪,华西1井、华西3井、广参2井、水深1井等井区局部发育薄层藻灰坪、生屑滩或角砾滩;而通江—万源地区相变为潮下带浅水陆棚,发育白云质泥岩(图6l)。总体而言,黄三段滩体分布范围相较于黄二段明显缩小。

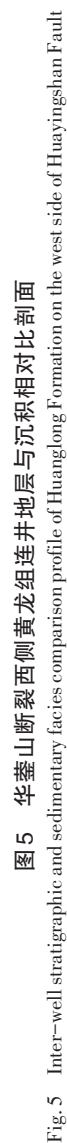


图5 华蓥山断裂西侧黄龙组连井地层与沉积相对比剖面

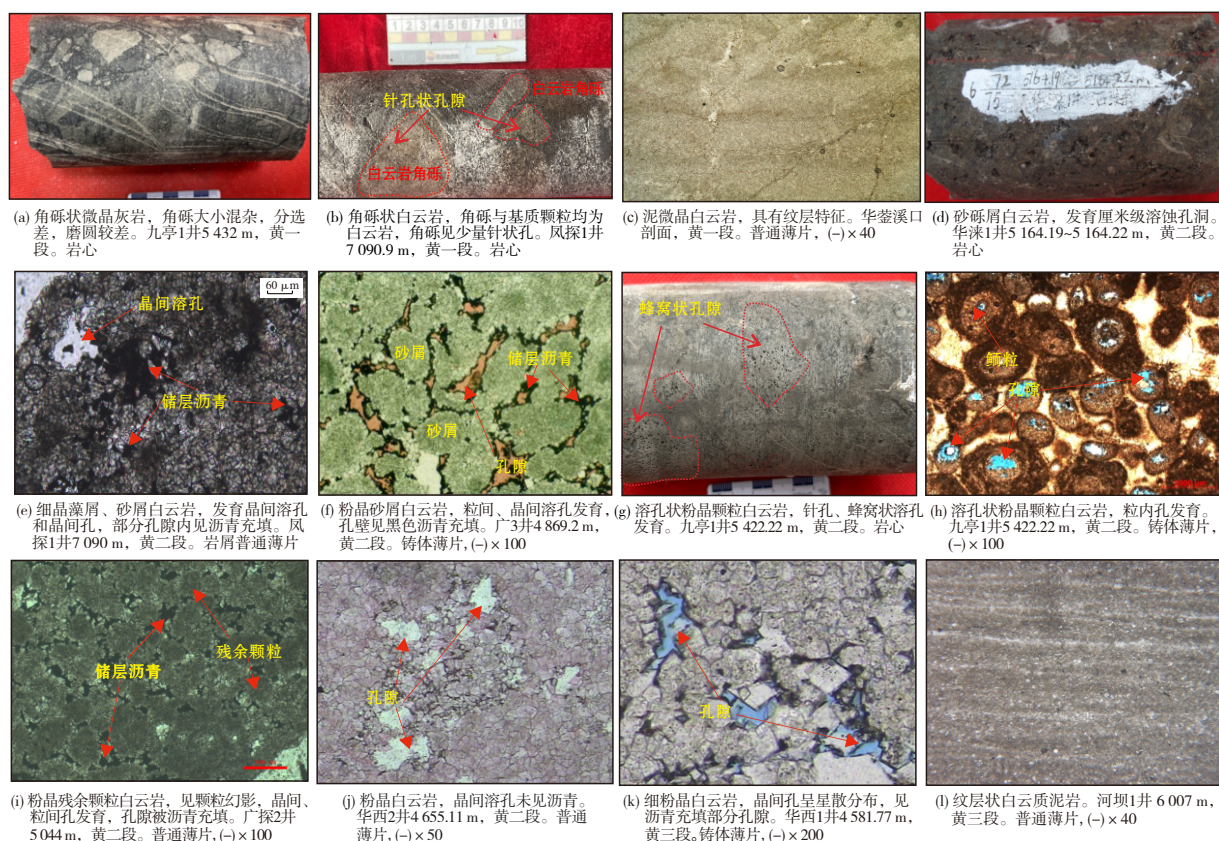


图6 华蓥山断裂西侧黄龙组岩性与储层孔隙发育特征

Fig. 6 Lithology and reservoir pore development characteristics of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

3 华蓥山断裂西侧黄龙组成藏条件

3.1 储层条件

黄龙组储层主要发育于黄二段, 其次为黄三段, 岩性以角砾状白云岩, 颗粒、晶粒白云岩为主, 潮间带高能砂屑滩、角砾滩和粒屑滩等沉积微相与岩溶高地、岩溶斜坡和残丘微地貌单元叠合区储层最为有利^[1,14-15]。孔隙类型包括溶蚀孔洞、晶间孔和晶间溶孔以及裂缝(图6b, 6d, 6f—6k), 根据孔、洞、缝组合形式及含量可划分为孔洞缝型、孔隙型、裂缝型3种储层类型^[1,14]; 孔洞缝型储层主要发育在颗粒/晶粒白云岩中, 孔隙度为0.55%~15.17%, 平均值为4.15%; 孔隙型储层主要发育在岩溶角砾状白云岩、灰质白云岩中, 孔隙度为0.32%~14.94%, 平均值为3.51%; 裂缝型储层主要发育于晶粒灰岩、泥微晶灰岩中, 较强胶结的白云质岩溶角砾岩、生物碎屑白云岩中也有一定程度发育, 孔隙度为0.29%~2.76%, 平均值为1.12%^[14]。

多口探井证实华蓥山断裂西侧黄龙组同样发育高孔渗优质储层, 但各段储层条件差异明显(图

5, 表2, 图8)。黄二段白云岩类储层总体高孔、高渗, 岩心实测孔隙度为0.31%~13.82%, 主要在2%~8%之间, 平均值为3.90%, 广3井平均值高达4.87%; 渗透率变化较大, 分布在 $(0.000\ 001\sim100)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间。黄三段是次要的储层发育段, 实测孔隙度为0.11%~8.89%, 平均值为1.29%, 广3井平均值高达3.44%; 渗透率变化范围较大, 主要在 $(0.000\ 001\sim1)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间。黄一段物性条件整体较差, 孔隙度为0.14%~9.97%, 平均值仅为1.22%, 广参2井平均值最大(2.07%), 绝大多数样品孔隙度低于2%, 为非储层; 渗透率主要在 $(0.000\ 001\sim0.1)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 之间。另外, 龙会场构造龙会3井黄龙组储层段孔隙度为2.0%~8.0%, 平均值为5.1%, 龙会006-1井孔隙度为2.0%~9.0%, 平均值为3.4%; 水口场构造水深1井储层段孔隙度为3.3%~11.8%, 平均值为6.8%; 大田角构造大田1井孔隙度为1.5~6.0%, 平均值为3.4%。上述探井孔隙数据均表明华蓥山断裂西侧黄龙组发育优质储层, 且储层孔隙度与渗透率具有较好的正相关性(图8b), 主要为孔隙型、孔洞型储层, 部分为裂缝-孔隙型储层。

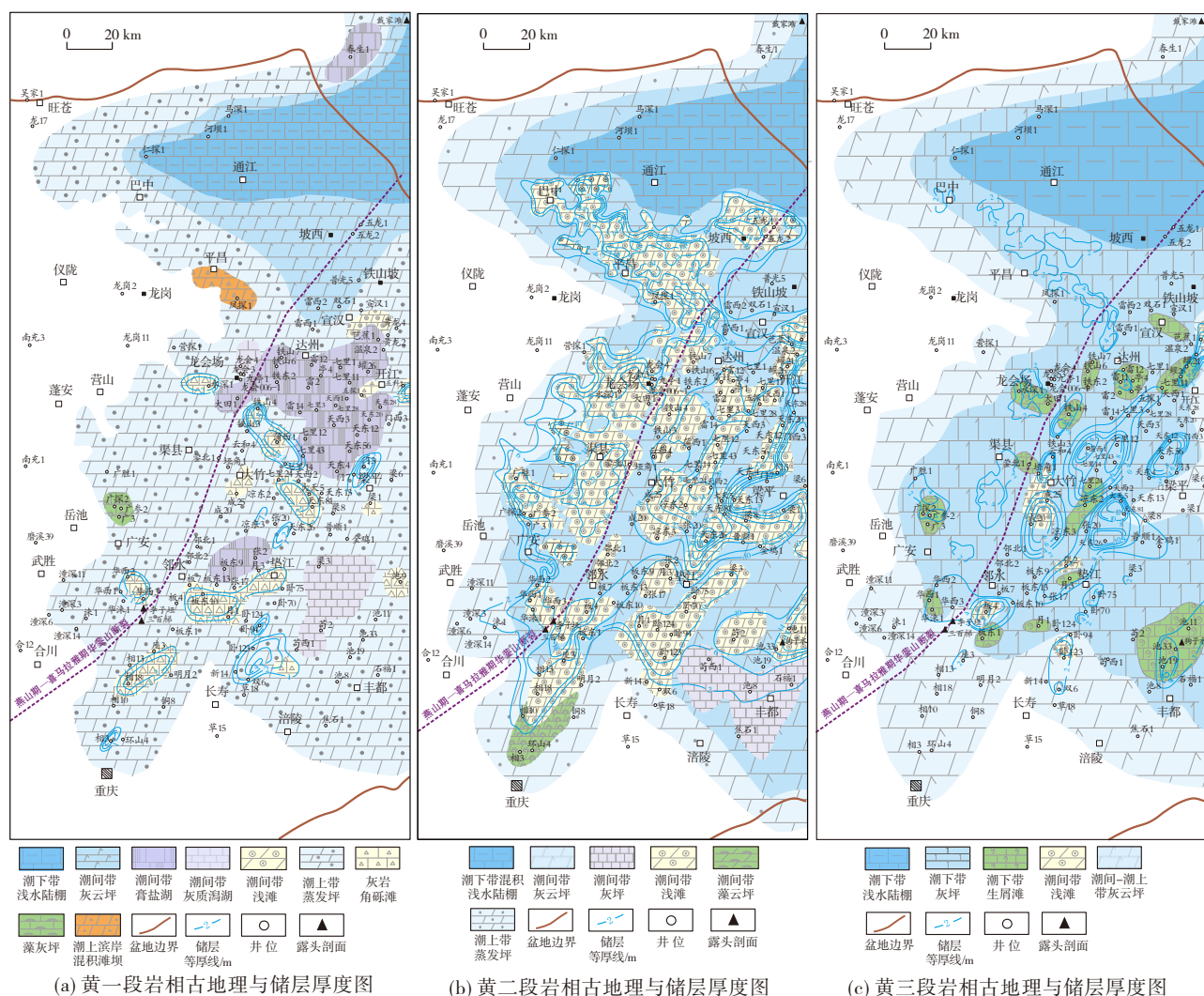


图7 华蓥山断裂西侧黄龙组岩相古地理与储层厚度分布图

Fig. 7 Lithofacies paleogeography and reservoir thickness distribution of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

表2 华蓥山断裂西侧黄龙组储层孔隙度统计表

Table 2 Statistics of the reservoir porosity of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

井名	黄龙组孔隙度/%	黄一段孔隙度/%	黄二段孔隙度/%	黄三段孔隙度/%
华西1	0.11~9.97/2.32(76)	0.14~9.97/1.37(28)	0.34~7.05/3.64(34)	0.11~5.08/1.01(14)
华西2	0.32~10.58/2.69(107)	0.63~1.10/0.92(6)	0.47~10.58/3.96(60)	0.32~5.68/1.07(41)
华西3	0.25~8.10/2.07(108)	0.25~2.66/0.73(11)	0.31~8.10/2.77(72)	0.31~1.36/0.67(25)
广3	0.27~9.85/3.83(61)	0.27~1.08/0.56(13)	0.31~9.85/4.87(43)	1.16~5.79/3.44(5)
广参2	0.80~13.82/4.27(47)	0.89~4.70/2.07(6)	0.80~13.82/4.65(35)	1.01~8.89/2.22(6)
九亭1	0.60~9.00/3.55(96)	0.60~2.22/1.50(21)	1.20~9.00/4.18(74)	1.20(1)

注:最小值~最大值/平均值(样品数)。

华蓥山断裂西侧低缓构造区黄龙组储层分布受沉积微相与岩溶地貌单元的影响,在潮间带高能砂屑滩、角砾滩和粒屑滩等部位优势发育(图7)。研究区黄龙组储层累计厚度主要在5~20 m之间,在广安—渠县、平昌—巴中一带厚度较大,一般在10~20 m之间。具体到各地层段:黄一段储层分布十分

局限,厚度较小,部分钻井揭示储层厚1~4 m(图7a);黄二段白云岩储层分布最广、最稳定,厚度较大,主要在2~20 m之间,其中华蓥—广安、渠县—龙会场、平昌—巴中一带钻井揭示厚度可达10 m以上(图7b);黄三段储层分布比较局限,厚度较小,主要在2~4 m之间(图7c)。

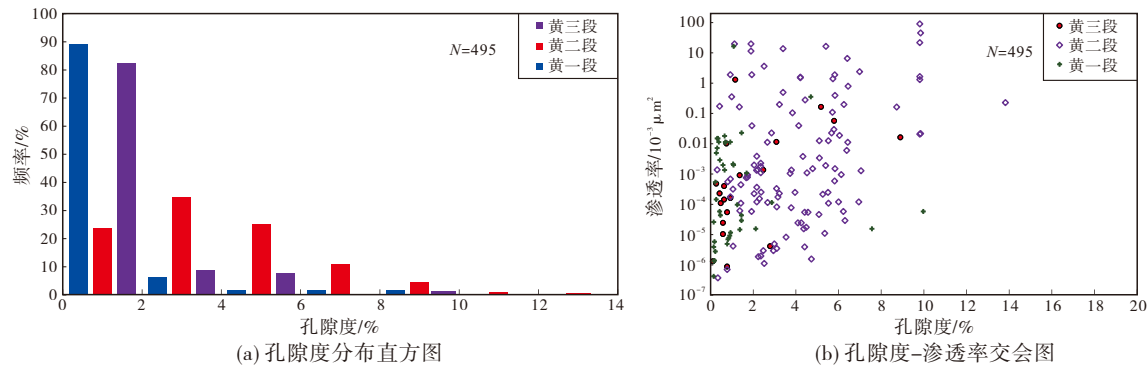


图8 华蓥山断裂西侧黄龙组孔隙度直方图与孔隙度-渗透率交会图
Fig. 8 Porosity histogram (a) and porosity-permeability crossplot (b) of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

3.2 气源条件

五峰组—龙马溪组优质烃源岩是华蓥山断裂东侧高陡构造带黄龙组气藏群的主力气源岩^[17-19]，其发育展布对黄龙组能否成藏至关重要。大量钻井已证实华蓥山断裂东侧龙马溪组优质烃源岩厚度大、分布广，而西侧低缓构造区龙马溪组埋深较大，钻揭的探井少，烃源岩厚度与分布落实程度低，前人曾认为尤其是川北地区五峰组—龙马溪组烃源岩厚度薄或大范围缺失^[20]。近年来华蓥山断裂西侧新实施的蓥北1井、龙探1井、角探1井等多口深井揭示川北地区五峰组—龙马溪组下部普遍发育高TOC黑色页岩，烃源岩总厚度为6~146 m，优质烃源岩厚6~50 m，TOC平均值基本在2.0%以上(表3)。

表3 华蓥山断裂西侧五峰组—龙马溪组烃源岩统计表
Table 3 Statistics of source rocks in Wufeng Formation-Longmaxi Formation on the west side of Huayingshan Fault

井名	地层厚度/m	TOC/% 范围值/平均值	烃源岩厚度/m	
			TOC>0.5%	TOC>2.0%
角探1	29	1.15~5.36/3.60	26	26
川深1	212	0.37~4.30/2.58	105	20
龙探1	306	0.28~3.41/1.69	45	23
马深1	322	0.36~4.22/1.32	146	32
蓥北1	99	0.26~8.95/2.10	59	40
五探1	101	0.28~4.41/2.80	55	50
遂探1 (图幅外)	8	0.35~5.36/3.03	6	6

地震层位解释追踪表明，川北地区五峰组—龙马溪组残余地层分布广，厚度主要为50~300 m，下部的优质烃源岩段具有高伽马(>150 API)、高铀、高时差的测井特征，地震响应表现为宽波谷、低速度、低纵波阻抗(<13 000)特征。基于烃源岩单井岩心岩屑地球化学分析与测井评价标定约束，开展烃源岩厚度二维、三维地震连片反演预测，结果表

明川北地区五峰组—龙马溪组烃源岩总厚度主要介于50~150 m，优质烃源岩厚10~60 m，预测分布面积约为25 000 km²(图9)。

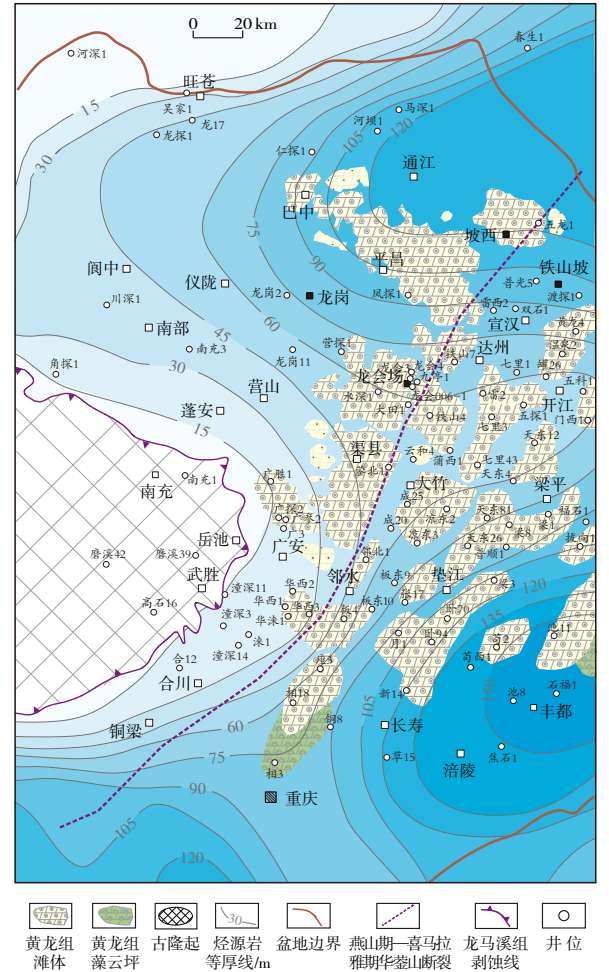


图9 华蓥山断裂西侧五峰组—龙马溪组烃源岩厚度与黄龙组颗粒滩叠合图
Fig. 9 Superposition map of source rock thickness of Wufeng Formation-Longmaxi Formation and grain shoal of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

在华蓥山断裂西侧黄龙组分布区内,五峰组—龙马溪组烃源岩由西向东、从南向北逐渐增厚,北段平昌—巴中、中段渠县一带气源条件优于南部广安—华蓥一带。南段广探2等井靠近龙马溪组剥蚀线,烃源岩厚度小,气源不足可能是黄龙组探井未获高产气流的原因之一。五峰组—龙马溪组优质烃源岩与黄龙组储层通过断裂沟通可构成“下生上储”有利成藏组合。

3.3 圈闭条件

川东地区黄龙组发育多种类型圈闭。华蓥山断裂东侧高陡构造带以发育岩性构造、地层—构造复合圈闭为主^[1,7];西侧低缓构造区利于构造—地层、岩性—地层圈闭发育^[2-4]。受川中古隆起斜坡带、地层剥蚀带和华蓥山大型断裂带联合控制,西侧低缓构造区发育平昌—巴中、广安—渠县两个大型圈闭发育带(图10a)。

3.3.1 平昌—巴中圈闭发育带

川北平昌—巴中地区黄龙组规模分布,构造上位于川中古隆起北斜坡。北东—南西向地质结构剖面(图10b:A—A')显示,黄龙组由东北向西南方

向逐渐抬升变浅,地层厚度则逐渐变薄直至完全尖灭,古隆起斜坡带与地层剥蚀带叠合形成大型地层圈闭,上倾方向地层尖灭实现侧向封堵。北西—南东向剖面(图10b:B—B')显示,向华蓥山断裂方向地层逐渐抬升变浅,挤压背景下局部形成大量背斜/断背斜和鼻状构造,同时发育系列逆断层使黄龙组储层与梁山组、韩家店组泥岩等致密层侧向对接实现封堵。在平昌—巴中圈闭发育带刻画各类圈闭,面积累计约2 430 km²,以岩性—地层圈闭为主(图10a),其中:岩性—地层圈闭单个面积较大,共刻画20个圈闭,面积累计约1 965 km²;刻画断鼻圈闭21个,面积累计约312 km²;背斜/断背斜圈闭数量多,但单个面积很小,34个圈闭面积累计仅为152 km²。

3.3.2 广安—渠县圈闭发育带

广安—渠县一带近南北向地质剖面(图10b:C—C')显示,向南构造逐渐抬升,上倾方向黄龙组地层尖灭侧向封堵形成地层圈闭,向北地层埋深增加,至龙岗东一带黄龙组地层尖灭。近东西向地质剖面(图10b:D—D')显示,地层由东向西逐渐变薄

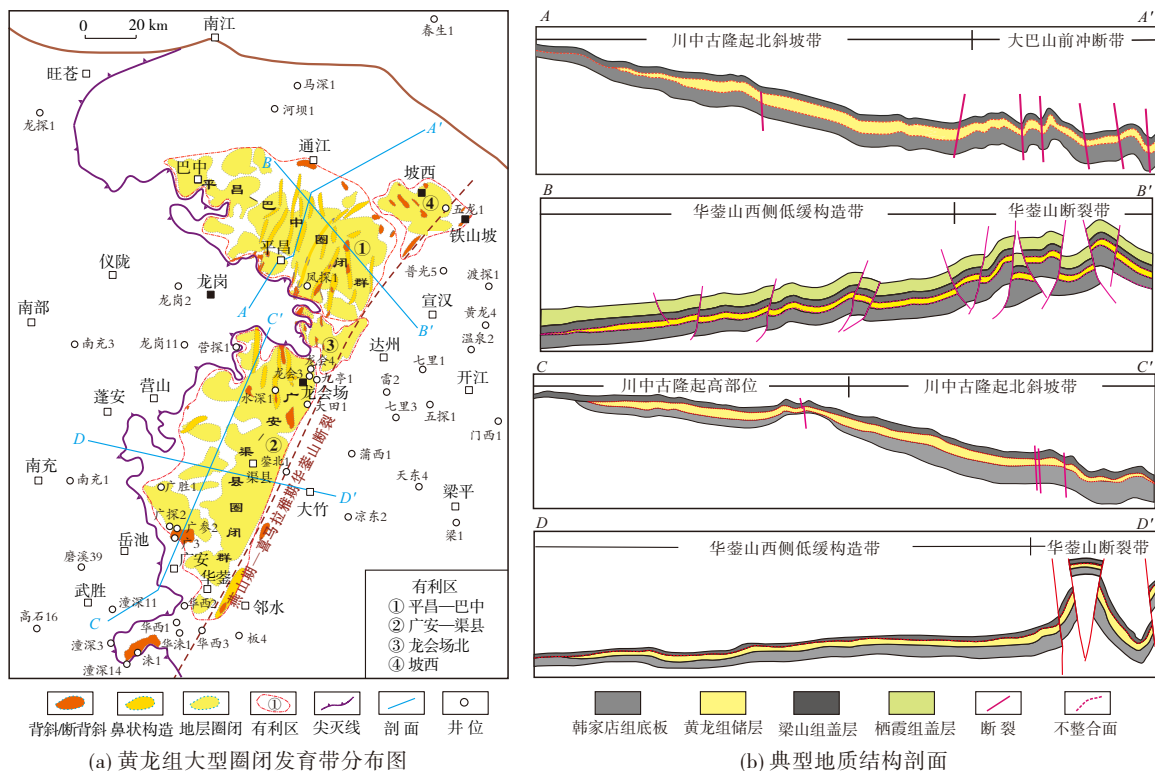


图10 华蓥山断裂西侧黄龙组大型圈闭发育带分布图与地质结构剖面

Fig. 10 Distribution map and geological section of large trap groups of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

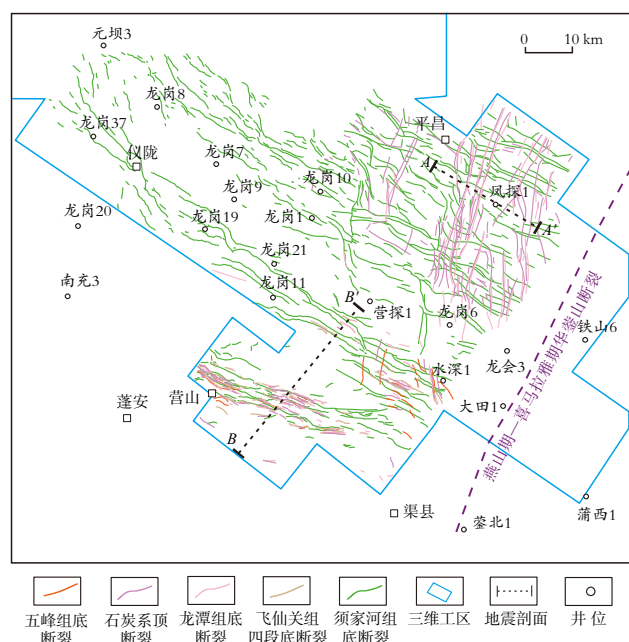
直至尖灭形成大型地层圈闭,向东往华蓥山断裂方向构造逐渐抬升,系列逆断层使黄龙组储层与上覆、下伏泥页岩或致密碳酸盐岩地层侧向对接封堵。在广安—渠县圈闭发育带刻画各类圈闭,面积累计约 3 032 km²,以岩性-地层圈闭为主(图 10a),其中:刻画地层圈闭 8 个,面积累计约 2 630 km²;刻画断鼻圈闭 8 个,面积累计约 233 km²;刻画背斜圈闭 9 个,面积累计约 169 km²。

3.4 保存条件

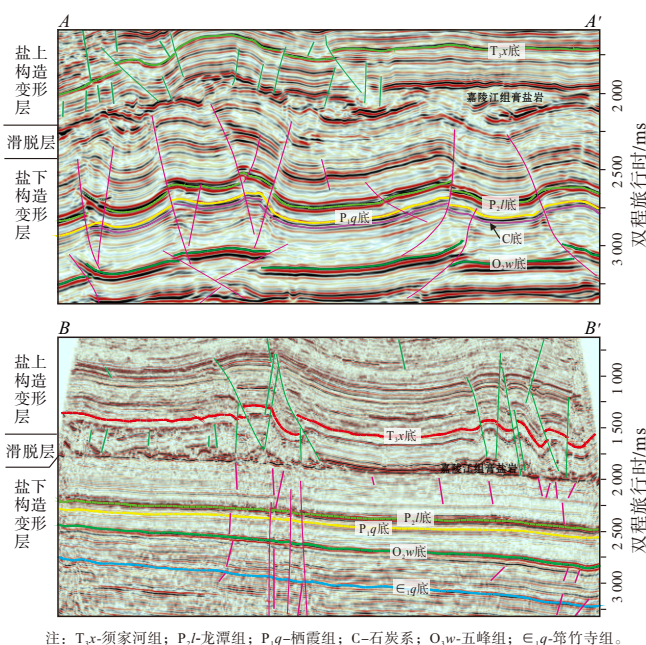
黄龙组上覆与下伏地层分别为梁山组和韩家店组泥质岩,气藏直接盖层梁山组泥页岩厚 5~30 m,底板韩家店组砂质泥岩厚 100~200 m,均为致密层,二者之间难以形成高渗透的不整合面,有利于在黄龙组地层剥蚀带大型地层圈闭上倾方向形成封堵。此外,栖霞组一中三叠统还发育多套区域性间接盖层,栖霞组一段泥质灰岩厚 20~50 m,茅口组一段泥灰岩、泥质灰岩厚 100~150 m,吴家坪组泥页岩、泥质碳酸盐岩厚 100~180 m,雷口坡组—嘉陵江组膏盐岩盖层累计厚 150~250 m。

嘉陵江组—雷口坡组膏盐岩既是区域性盖层,也是区域性的构造滑脱层,其上下为两个构造变形体系。滑脱层之下海相地层主要发育北东向或近

东西向断裂(图 11a),断裂向上多消失于厚层膏盐岩滑脱层(图 11b),该套断裂沟通了源储,有利于龙马溪组生成的油气在黄龙组聚集成藏,但又未破坏这套膏盐岩区域盖层的封闭性。膏盐岩滑脱层之上陆相地层则发育另一套断裂系统,以北西走向逆断层为主(图 11a),向下大多未切穿膏盐岩盖层(图 11b)。由于膏盐岩在高温高压条件下发生塑性变形,在大多数地区上下两套不同的断裂系统未联通,因此膏盐岩盖层封闭性好。这导致其下伏二叠系普遍发育超压系统,压力系数基本在 1.2 以上^[9,21],厚达千余米的二叠系一中三叠统超压地层对黄龙组气藏具有很好的封盖与保护作用^[9]。即使断层切穿了气藏的直接盖层梁山组,只要未破坏中下三叠统膏盐岩盖层,黄龙组仍可成藏,这已被东侧高陡构造带的卧龙河、五百梯等一系列气田所证实——这些气田尽管背斜/断背斜圈闭轴部存在大量断层切穿直接盖层,但未切穿嘉陵江组膏盐岩,天然气仍可在黄龙组聚集成藏(图 3)。计算表明黄龙组气藏的直接盖层梁山组泥岩所能封闭的含气高度大致为 73~236 m,远达不到现今黄龙组气藏的气柱高度,在二叠系一中三叠统多套间接盖层和超压系统压力封闭下,黄龙组气柱高度可达 850~2 300 m^[9],如沙罐坪—温泉井气藏气柱高度达 1 980 m。



(a) 不同层位断裂分布叠合图



(b) 典型地震解释剖面

图 11 华蓥山断裂西侧平昌地区不同层位断裂分布图

Fig. 11 Distribution map of faults in different layers in Pingchang area on the west side of Huayingshan Fault

4 有利区带与勘探潜力

华蓥山断裂西侧低缓构造区有利于地层圈闭、岩性-地层圈闭发育^[2-4],局部发育背斜/断背斜圈闭。广安—华蓥地区多口井黄龙组见油气显示或获低产气流,证实了低缓构造区油气成藏的可能性。基于黄龙组成藏条件系统评价结果,构建了多类型圈闭成藏模式(图12)。主要存在岩性-地层、断鼻/鼻状构造、背斜/断背斜3种类型圈闭:岩性-地层圈闭数量较多,单个气藏面积较大;断鼻/鼻状构造圈闭较多,单个气藏面积较大;背斜/断背斜圈闭数量多,单个气藏面积小。在华蓥山断裂西侧低缓构造区,五峰组—龙马溪组优质烃源岩生成的油气,经通源断裂向上运移至黄二段优质储层中聚集成藏,在梁山组直接盖层和多套区域性盖层及超压系统的共同封盖下持续保存至今。

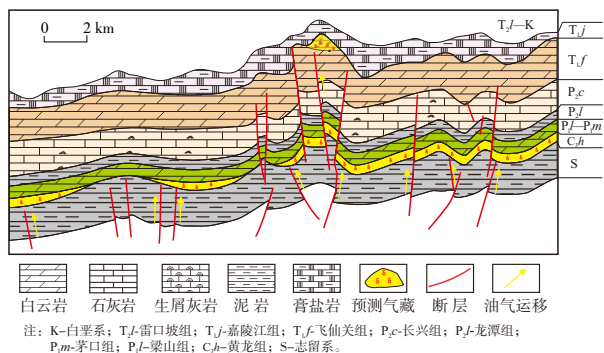


图12 华蓥山断裂西侧低缓构造带黄龙组成藏模式图
(剖面位置见图11a:A—A')

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation model of Huanglong Formation in low-relief structural zone on the west side of Huayingshan Fault (location is shown in Fig. 11a: A—A')

预测华蓥山断裂西侧黄龙组存在平昌—巴中、广安—渠县、龙会场北、坡西等4个有利勘探区带(图10a,表4),有利勘探面积总计约8 260 km²,预估区带资源量为(7 500~10 700)×10⁸ m³。平昌—巴中有利区面积为2 860 km²,位于五峰组—龙马溪组优质源灶之上,黄龙组储层厚度为4~20 m,大型地层圈闭发育,构造相对稳定,保存条件好,是寻找规模储量最有利的区带,预测区带资源量为(4 000~6 000)×10⁸ m³。该区带风探1井黄龙组见气测异常和持续后续显示以及储层沥青,证实经历过成藏过程。广安—渠县区带烃源岩厚度相对较薄。龙会场北、坡西区带靠近华蓥山断裂,大型断裂上盘的圈闭有效性与保存条件是主要勘探风险,下盘保存条件相对较好的岩性-构造圈闭值得探索。

表4 华蓥山断裂西侧黄龙组有利勘探区带统计表
Table 4 Statistics of the favorable exploration zones of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault

有利区带	有利面积/km ²	烃源岩厚度/m	储层厚度/m	圈闭与保存	资源量/10 ⁸ m ³	勘探风险
平昌—巴中	2 860	90~120	4~20	构造较稳定,保存条件好	4 000~6 000	储层规模性
广安—渠县	4 680	15~60	4~25		3 000~4 000	圈闭有效性
龙会场北	308	70~90	4~20	断裂系统复杂	200~300	圈闭有效性
坡西	410	105~120	4~14	构造复杂	300~400	圈闭规模,保存条件

5 结论

基于新老探井和二维、三维地震资料,针对华蓥山断裂西侧石炭系黄龙组地层分布、岩相古地理与成藏条件开展系统评价研究。

(1)黄龙组残余地层分布面积约为13 100 km²,在川北平昌—巴中—通江一带预测新增面积约4 000 km²,地层厚度主要为10~40 m。

(2)黄龙组二段潮间带浅滩白云岩在广安—渠县—龙会场—平昌—巴中一带广泛发育,预测有利分布面积约为8 200 km²,在平昌—巴中地区预测新增滩带面积约为2 000 km²。黄龙组高孔渗白云岩储层主要位于黄二段,孔隙度为2%~8%,累计厚度为2~20 m,分布较稳定,预测平昌—巴中地区存在白云岩储层厚值区。

(3)新落实川北五峰组—龙马溪组源灶面积约为25 000 km²,烃源岩总厚度主要为50~120 m,优质烃源岩厚度为10~60 m,可与黄龙组储层构成下生上储有利成藏组合。川北平昌—巴中地区黄龙组烃源条件优越。

(4)受古隆起斜坡带、地层剥蚀带和大型断裂带联合控制,华蓥山断裂西侧低缓构造区黄龙组发育平昌—巴中、广安—渠县两个大型圈闭发育带,以地层圈闭为主,保存条件好,有利于天然气聚集成藏。综合评价出4个有利勘探区带,其中平昌—巴中区带勘探程度最低,成藏条件好,勘探潜力大。

参考文献

- [1] 沈平,徐人芬,党录瑞,等.中国海相油气田勘探实例之十一:四川盆地五百梯石炭系气田的勘探与发现[J].海相油气地质,2009,14(2):71-78.

- SHEN Ping, XU Renfen, DANG Lurui, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 11): Wubaiti carboniferous gas field in Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2009, 14(2): 71–78.
- [2] 邹才能, 徐春春, 李伟, 等. 川东石炭系大型岩性地层气藏形成条件与勘探方向[J]. *石油学报*, 2010, 31(1): 18–24.
ZOU Caineng, XU Chunchun, LI Wei, et al. The formation conditions and exploration targets of large Carboniferous lithologic and stratigraphic gas pools in the eastern Sichuan Basin [J]. *Acta petrolei sinica*, 2010, 31(1): 18–24.
- [3] 李伟, 张志杰, 汪洋, 等. 川东石炭系尖灭带天然气聚集特征与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(2): 9–17.
LI Wei, ZHANG Zhijie, WANG Yang, et al. Characteristics and exploration potential of natural gas accumulations in Carboniferous pinchout belts in east Sichuan [J]. *China petroleum exploration*, 2015, 20(2): 9–17.
- [4] 李伟, 张志杰, 邹才能, 等. 川东石炭系天然气成藏地质条件再认识及其勘探潜力预测[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 20–24.
LI Wei, ZHANG Zhijie, ZOU Caineng, et al. Restudy of geologic conditions and prediction of exploration potential in the Carboniferous gas reservoirs of the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural gas industry*, 2010, 30(12): 20–24.
- [5] 李伟, 张志杰, 党录瑞. 四川盆地东部上石炭统黄龙组沉积体系及其演化[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 400–408.
LI Wei, ZHANG Zhijie, DANG Lurui. Depositional systems and evolution of the Upper Carboniferous Huanglong Formation in the eastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum exploration and development*, 2011, 38(4): 400–408.
- [6] 陈宗清. 川东石炭系气藏分布规律与深化勘探[J]. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(3): 182–186.
CHEN Zongqing. Occurrence of Carboniferous gas reservoirs and their deepening exploration in the eastern Sichuan Basin [J]. *China offshore oil and gas (geology)*, 2001, 15(3): 182–186.
- [7] 陈宗清. 川东石炭系地层-构造复合圈闭气藏的预测、分类和评价[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 25–30.
CHEN Zongqing. Forecast, classification and assesment for gas reservoirs of Carboniferous stratigraphic structural combination traps in eastern Sichuan [J]. *Acta petrolei sinica*, 2000, 21(3): 25–30.
- [8] 杨威, 李德江, 魏国齐, 等. 四川盆地东部上石炭统黄龙组规模储层形成主控因素与发育模式[J]. *天然气工业*, 2024, 44(2): 40–51.
YANG Wei, LI Dejiang, WEI Guoqi, et al. Formation controlling factors and development patterns of large-scale reservoirs in Carboniferous Huanglong Formation of eastern Sichuan Basin [J]. *Natural gas industry*, 2024, 44(2): 40–51.
- [9] 刘树根, 徐国盛, 梁卫, 等. 川东石炭系气藏的封盖条件研究[J]. *成都理工学院学报*, 1996, 23(3): 69–78.
LIU Shugen, XU Guosheng, LIANG Wei, et al. The seal condition of Carboniferous gas pools in eastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1996, 23(3): 69–78.
- [10] 谷明峰, 董景海, 付小东, 等. 四川盆地华蓥山西侧低缓构造区石炭系黄龙组分布与圈闭条件[J]. *海相油气地质*, 2024, 29(4): 413–422.
- GU Mingfeng, DONG Jinghai, FU Xiaodong, et al. Distribution and trap conditions of the Carboniferous Huanglong Formation in the low and gentle structural area on the western side of Huaying Mountain, Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2024, 29(4): 413–422.
- [11] 郑荣才, 李德敏, 张梢楠. 川东黄龙组天然气储层的层序地层学研究[J]. *沉积学报*, 1995(增刊1): 1–9.
ZHENG Rongcai, LI Demin, ZHANG Shaonan. A study on sequence stratigraphy of the Huanglong Formation, Upper Carboniferous in eastern Sichuan [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 1995(S1): 1–9.
- [12] 钱峥. 川东石炭系碳酸盐岩沉积环境探讨[J]. *天然气工业*, 1999, 19(4): 19–22.
QIAN Zheng. Discussion on the sedimentary environment of Carboniferous carbonate rocks in east Sichuan [J]. *Natural gas industry*, 1999, 19(4): 19–22.
- [13] 王坤, 李伟, 王东坤. 四川盆地东部石炭系黄龙组潮汐沟道发育特征及对优质储层展布的控制作用[J]. *海相油气地质*, 2014, 19(1): 19–26.
WANG Kun, LI Wei, WANG Dongkun. Development and control on reservoir distribution of tidal channels in Carboniferous Huanglong Formation in the east of Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2014, 19(1): 19–26.
- [14] 方少仙, 侯方浩, 李凌, 等. 四川华蓥山以西石炭系黄龙组沉积环境的再认识[J]. *海相油气地质*, 2000, 5(2): 158–166.
FANG Shaoxian, HOU Fanghao, LI Ling, et al. Reunderstanding of the sedimentary environment of the Carboniferous Huanglong Formation in the west of Huaying Mountain, Sichuan [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2000, 5(2): 158–166.
- [15] 文华国, 郑荣才, 沈忠民. 四川盆地东部黄龙组碳酸盐岩储层沉积-成岩系统[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36(1): 111–121.
WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, SHEN Zhongmin. Sedimentary-diagenetic systems of carbonatite reservoirs in the Huanglong Formation, eastern Sichuan Basin [J]. *Earth science (Journal of China University of Geosciences)*, 2011, 36(1): 111–121.
- [16] 张兵, 郑荣才, 王绪本, 等. 四川盆地东部黄龙组古岩溶特征与储集层分布[J]. *石油探与开发*, 2011, 38(3): 257–266.
ZHANG Bing, ZHENG Rongcai, WANG Xuben, et al. Paleokarst and reservoirs of the Huanglong Formation in eastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum exploration and development*, 2011, 38(3): 257–266.
- [17] 王兰生, 陈盛吉, 杨家静, 等. 川东石炭系碳酸盐岩气藏地球化学特征[J]. *海相油气地质*, 2000, 5(1/2): 133–144.
WANG Lansheng, CHEN Shengji, YANG Jiajing, et al. Geochemical characteristics of carbonate rock gas reservoirs in the Carboniferous, eastern Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2000, 5(1/2): 133–144.
- [18] 梁卫, 覃建雄. 川东石炭系天然气成因类型和气源探讨

- [J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(2): 97-102.
- LIANG Wei, QIN Jianxiong. A discussion of the origin and source of the natural gas in Carboniferous, eastern Sichuan Basin [J]. China offshore oil and gas (geology), 1995, 9(2): 97-102.
- [19] 徐国盛, 左友东, 张文虎. 川东石炭系大气田成藏条件分析[J]. 矿物岩石, 2001, 21(4): 59-64.
- XU Guosheng, ZUO Youdong, ZHANG Wenhui. Analysis of formation factors of Carboniferous large scale gas pools in east Sichuan [J]. Journal of mineralogy and petrology, 2001, 21(4): 59-64.
- [20] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布 [J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
- LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (part 1): distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. Marine origin petroleum geology, 2008, 13(2): 1-16.
- [21] 李伟, 谢武仁, 王雪珂. 四川盆地中西部区域性超压特征与天然气大规模聚集的关系[J]. 天然气工业, 2023, 43(12): 1-13.
- LI Wei, XIE Wuren, WANG Xueke. Relationship between regional overpressure characteristics and large-scale natural gas accumulation in the central and western Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2023, 43(12): 1-13.

编辑:董庸

Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of the Carboniferous Huanglong Formation in low-relief structural zone on the west side of Huayingshan Fault, Sichuan Basin

FU Xiaodong^{1,2}, DONG Jinghai³, LI Wei⁴, YUN Jianbing³, GU Mingfeng^{1,2}, LI Wenzheng^{1,2}, YING Yushuang³, ZHU Mao^{1,2}, TAN Wanchang³, HE Yuan⁵, ZHU Kedan^{1,2}, XU Zhehang^{1,2}, ZHU Xinjian^{1,2}, XIONG Shaoyun^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}

1. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC; 2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 3. PetroChina Daqing Oilfield Company; 4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina; 5. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company

Abstract: For the Carboniferous Huanglong Formation, an important natural gas production layer in Sichuan Basin, in low-relief structural zone on the west side of Huayingshan Fault, there are still problems of unclear accumulation conditions and undetermined favorable exploration zones due to low exploration degree. Based on exploration wells, 2D and 3D seismic data, a new round of evaluation is conducted on the distribution of strata, lithofacies paleogeography, and natural gas accumulation conditions of Huanglong Formation on the west side of Huayingshan Fault. The results show that: (1) The residual strata of Huanglong Formation with thickness mainly between 10-40 m are widely distributed (about 13 100 km²), and about 4 000 km² according to the new seismic interpretation is added in the northern Sichuan Basin. (2) The intertidal shoal dolomites are widely developed (about 8 200 km²), mainly in the Huanglong Member 2, followed by the Huanglong Member 3. The newly discovered Pingchang-Bazhong shoal belt covers an area of about 2 000 km². The thickness of dolomite reservoir of the shoal facies in HuangLong Member 2 is mainly 2-20 m. The reservoir has good physical properties, with an average porosity of 3.90%. (3) The source rocks of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in the northern Sichuan Basin are widely developed covering an area of about 25 000 km², and the total thickness is 50-150 m in which the high-quality is 10-60 m. The source rocks of Wufeng Formation-Longmaxi Formation and the reservoirs of Huanglong Formation form favorable reservoir combination of lower generation and upper storage. (4) Controlled by the paleo-uplift slope zone, strata denudation zone, and large fault zone, the Huanglong Formation has developed two large trap groups, i.e., Pingchang-Bazhong, and Guang'an-Quxian, with diverse trap types dominated by lithological-stratigraphic traps and good preservation conditions. Four favorable exploration areas are predicted, indicating a promising prospect for natural gas exploration.

Key words: stratigraphic distribution; hydrocarbon accumulation conditions; exploration potential; Huanglong Formation; west side of Huayingshan Fault; low-relief structural zone; Sichuan Basin

FU Xiaodong, First author: PhD, Senior Engineer, specializing in petroleum geology and exploration planning. Add: No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: fuxd_hz@petrochina.com.cn

XU Zhehang, Corresponding author: PhD, Engineer, specializing in carbonate sedimentology and reservoir geology. Add: No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: xuzh_hz@petrochina.com.cn