

昭通示范区太阳浅层页岩气田的勘探发现与评价探明创新实践认识

梁兴¹, 王鹏万², 罗瑞峰¹, 李兆丰¹, 袁晓俊¹

1 中国石油浙江油田公司; 2 中国石油杭州地质研究院

摘要 基于昭通示范区太阳浅层页岩气田勘探发现与评价的创新实践,系统总结了强改造复杂构造区的山地浅层页岩气田的基本地质特征和富集规律。太阳浅层页岩气田五峰组—龙马溪组龙一₁亚段发育优质页岩,有机碳含量高,生烃潜力好。页岩储集条件优越,有机质纳米孔隙、脆性矿物粒间粒内孔隙与黏土矿物层间缝为页岩气提供大量储集空间。构造改造强度总体较弱,三维封存箱体完整,整体保存条件良好,含气量较高,具有常压至微超压气藏系统。页岩脆性矿物含量高,背斜构造区水平应力差小,易于体积压裂改造。气田具有龙一₁¹—龙一₁²下部 and 龙一₁³小层双靶体,可实施小井距立体错层体积开发。页岩气成藏赋存地质理论的创新认识与一体化地质工程技术的进步,是太阳浅层页岩气田勘探突破与高效评价的关键。太阳浅层页岩气田勘探的成功经验,对于中国南方复杂构造区浅层页岩气勘探具有重要的借鉴示范和指导意义。

关键词 浅层页岩气;三维封存箱体;立体错层体积开发;五峰组;龙马溪组一段1亚段;太阳气田;昭通示范区

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

0 前言

昭通示范区太阳五峰组—龙马溪组页岩气田是我国首个探明的整装浅层页岩气田,勘探过程中遇到山地构造应力强、富集保存机理复杂、地质工程甜点难以识别及钻井压裂施工成本高等理论与技术难题。太阳浅层页岩气田的发现是我国非常规油气勘探的又一重大成果,也是中国海相页岩气勘探理论和实践的重大突破,展示了南方复杂构造区浅层页岩气勘探的巨大潜力。由此形成的海相浅层页岩气勘探理论体系与配套工程技术系列,对于推进南方浅层页岩气勘探具有重大的战略意义。

1 太阳浅层页岩气田概况

太阳浅层页岩气田构造上处于四川盆地川南低陡褶皱带南缘的滇黔北拗陷威信复背斜构造带北东倾伏端,主体隶属泸州市叙永县^[1]。气田主产气区位于

磅礴乌蒙的古生界—三叠系海相碳酸盐岩裸露区,构造主体为太阳背斜、云山坝向斜和海坝背斜,为近南北向的太阳、海坝压扭走滑断层和近东西向的胜利、田坝逆断层4条边界断层所围限^[2](图1)。气田以上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组龙一₁亚段的黑色硅质页岩为主要目的层,龙一₁¹—龙一₁²小层下部为最优的“黄金”靶体,龙一₁³小层为次优的“紫金”靶体,双甜点靶体造就了小井距立体错层体积开发的页岩气地质潜力。气田的含气面积为470 km²,其中页岩储层埋深2 000 m以浅的面积占72%。

2017年,在太阳背斜Y1井和Y2井2口老井的龙马溪组底部页岩压裂试气获浅层页岩气突破,2019年提交探明页岩气储量1 360×10⁸ m³、含气面积215 km²^[3]。而后持续向南滚动评价扩展,突破500 m以浅的海坝超浅层页岩气产能关。2021年新增含气面积255 km²,提交探明储量1 320×10⁸ m³,实现国内首个浅层页岩气田的整体探明发现。截至2021

收稿日期:2022-05-06;改回日期:2022-05-20

本文受中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“浅层常压页岩气开发机理及开采工艺研究”(编号:kt2020-17-03)和“十四五”前瞻性基础性科技项目“昭通浅层页岩气藏储层微观特征及富集机理研究”(编号:2021DJ1903)联合资助

第一作者:梁兴,博士,教授级高级工程师,主要从事页岩气、煤层气、高凝油 and 常规气综合评价及勘探开发管理工作。通信地址:311100 浙江省杭州市余杭区五常街道荆山岭;E-mail:liangx85@petrochina.com.cn

通信作者:王鹏万,硕士,高级工程师,主要从事南方常规与非常规油气地质综合研究。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号;E-mail:wangpw_hz@petrochina.com.cn

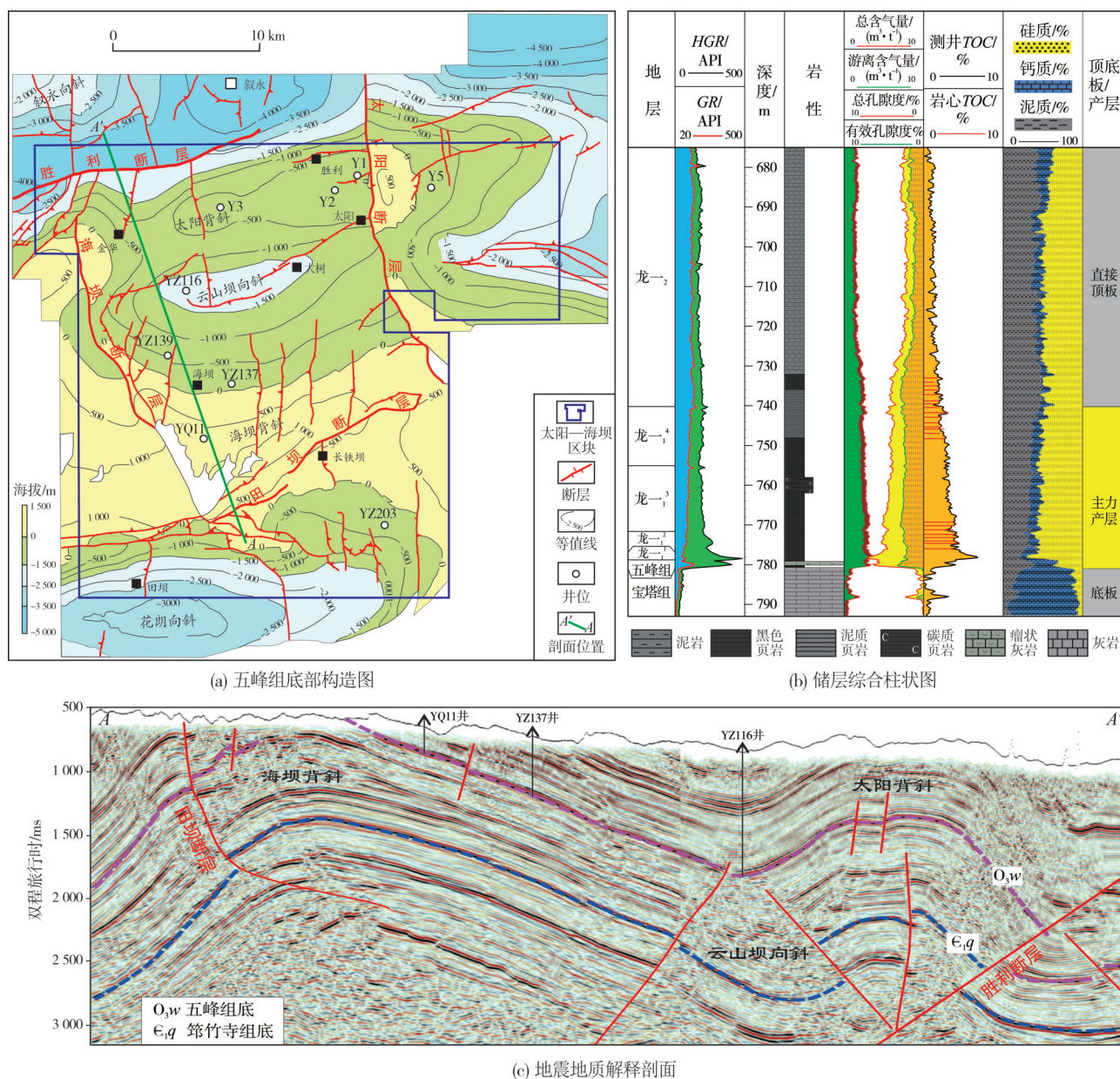


图1 太阳浅层页岩气田构造图、典型井储层综合柱状图与地震地质解释剖面

Fig. 1 Tectonic map, comprehensive column of typical well and seismic geological interpretation section of Taiyang shallow shale gas field

年底,太阳浅层页岩气田已完钻开发井125口,投产井88口,累计产气 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。太阳浅层气田的基本参数归纳于表1。

2 太阳浅层页岩气田勘探发现和评价历程

2009年5月,中国石油浙江油田公司启动滇黔北页岩气野外地质调查与综合评价研究。同年7月获得国内第一个页岩气探矿权;9月部署国内第一口页岩气专打井YQ1井;12月在浅埋藏的五峰组—

龙马溪组获页岩气流^[4]。2012年3月,国家发改委和能源局颁文成立“滇黔北昭通国家级页岩气示范区”^[5]。2014年3月开始黄金坝YZ108井区地质工程一体化的页岩气产能建设,2015年YZ108井区提交探明页岩气储量 $530 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6]。2016年向东进行紫金坝YZ112井区的页岩气产能建设,2017年再向东探索评价太阳浅层页岩气的产能潜力。昭通示范区太阳浅层页岩气田的勘探发现和评价主要经历了4个阶段,分别为地质调查阶段、勘探突破阶段、产能评价阶段及规模开发阶段。

表1 太阳浅层页岩气田基本参数表
Table 1 Key parameters of Taiyang shallow shale gas field

气田名称		太阳浅层页岩气田
地理位置		云贵川三省交界处
区域构造位置		川南低陡褶皱带南缘的滇黔北坳陷东北部,属于威信复背斜构造带东北倾伏端
发现井(发现年份)		Y1井、Y2井(2017)
发现井产量		Y1井测试产量(0.3~0.6)×10 ⁴ m ³ /d Y2井测试产量(0.9~1.1)×10 ⁴ m ³ /d
首次产气时间		2017年
页岩气产能		260×10 ⁴ m ³ /d(2022年3月)
探明地质储量		2 680×10 ⁸ m ³ (截至2021年底)
探明含气面积		470 km ²
技术可采储量		515×10 ⁸ m ³ (截至2021年底)
储量丰度		6.0×10 ⁸ m ³ /km ²
发现依据		太阳背斜区构造改造强度弱,整体保存条件较好,发育优质页岩,连片富含气
气藏特征	构造类型	背斜构造+向斜构造连片含气,地层圈闭气藏
	构造形成时间	始于加里东期,形成于印支期,定型于喜马拉雅期
	含气面积(年份)	大于450 km ² (2021)
	气藏埋深	315~2 000 m
	天然气来源	上奥陶统一下志留统富含有机质页岩,自生自储为主
	天然气类型	过成熟的干气
	天然气成分	CH ₄ 含量: 96.2%~98.1% C ₂ H ₆ 含量: 0.25%~0.62% N ₂ 含量: 1.29%~3.06% CO ₂ 含量: 0.07%~0.23%
	地层压力	4~20 MPa
	压力系数	1.1~1.6
	盖层层位与岩性	下志留统石牛栏组致密石灰岩 龙马溪组二段泥页岩
储层特征	层 位	五峰组—龙马溪组一段
	主要岩性	富有机质硅质页岩、黏土质页岩
	沉积环境	前陆盆地深水陆棚
	总厚度	220~280 m
	纵向有效厚度	含气90~110 m,连续含气53 m
	孔隙类型	有机质孔、粒间孔、溶蚀孔,微裂缝、层理缝
	孔隙度	1.01%~8.37%
	渗透率	(0.000 02~1.146)×10 ⁻³ μm ²
	含气饱和度	约60%

2.1 地质调查阶段(2008—2015年)

2003年至2009年,国内引进北美页岩气勘探理念,经过研究探索与评价实践,确定了四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组为主要目的层^[7-10]。2007年浙江油田公司在中国南方进行页岩气地质调研与

勘探选区评价;2008年8—11月先后向中石油总部、国土资源部提出滇黔北昭通—毕节、江汉盆地西北部的远安—当阳、湘鄂西宜都—麻阳地区的页岩气勘查矿权申请;2009年初启动四川盆地南缘的滇黔北地区页岩气实物工作,先后开展了区域地质调查和地震勘探工作^[3]。

2009年11月,昭通探区内第一口页岩气地质资料井YQ1井在宜宾市筠连县开钻。该井开钻地质层位是龙马溪组顶部地层,全井段取心259.80 m,龙马溪组页岩和五峰组页岩垂直厚度分别为199.87 m和6.93 m^[11]。12月4日岩心水浸试验气泡上涌明显,气体可燃见蓝色火焰,甲烷含量高于70%;现场解吸气含量为 $0.429\text{ m}^3/\text{t}$,总含气量大于 $1.0\text{ m}^3/\text{t}$,首次证明南方复杂构造区海相页岩“有气”,树立了页岩找气的信心。当时认为该区浅层页岩气总体保存条件欠佳,总含气量较低,形成商业开采难度大。

2011年4月和2012年2月,沐爱Z104直井和YZH1-1水平井分别获页岩气流。2012年,勘探转入黄金坝中深层页岩气,2013年8月YZ108井直井获 $1.63\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,拉开了黄金坝中深层页岩气评价建产的序幕。

2011年9月在太阳背斜以震旦系灯影组、寒武系为目的层部署实施常规气风险探井Y1井(完钻深度3 623 m),在志留系石牛栏组中途测试和寒武系清虚洞组完井测试见常规气;2013年3月部署实施Y2井评价清虚洞组含气性。Y1井、Y2井在埋深小于1 000 m的浅层五峰组—龙马溪组页岩中见到强烈的页岩气,评价出页岩气甜点层,但限于当时认识不足与勘探理论的束缚,没有安排压裂试气评价其产能潜力。

2.2 勘探突破阶段(2016年3月—2017年9月)

随着昭通示范区中深层(2 000~3 500 m)山地页岩气勘探不断突破^[12],逐渐认识到页岩埋藏深度不是影响其保存条件的决定因素,应综合考虑页岩储层顶底板封堵性、页岩的自封闭性、断裂的侧向封堵(即三维封闭的封存箱体系)以及“生—储—保”的动态匹配等^[13],浅埋藏页岩气在致密直接盖层封闭保存箱体系下仍可有效保存,具有一定的勘探开发潜力。理论认识的突破,打破了浅层页岩气勘探领域的禁锢。同时,受探区中深层向斜页岩气钻采施工及工厂化作业技术难度增大、工程投资成本不断升高等因素影响,页岩气勘探有向施工难度更小、成本更低的中浅层背斜转移的现实需求。2016

年,浙江油田公司开展老井复查,揭示龙马溪组底部和五峰组优质储层连续性好、厚度大,TOC普遍大于2%,水平应力差小(2~8 MPa),浅层页岩气资源潜力较大,开发难度可能较小^[14]。2017年5月和7月,选定太阳背斜老井Y2井(768.5~778.8 m)和Y1井(976.2~986.0 m)龙马溪组页岩进行直井压裂试气,分别获 1.12×10^4 m³/d和 $(0.9 \sim 1.1) \times 10^4$ m³/d的工业气流,标志着太阳区块浅层页岩气勘探取得历史性突破。理念认识引领老井突破,推动发现国内首个浅层页岩气田^[3]。

2.3 产能评价阶段(2017年10月—2019年9月)

以产能目标引领勘探,快速推进太阳区块浅层页岩气产能评价(主体埋深700~2 000 m)。2017年10月在太阳背斜核部部署实施第一口浅层气水平井Y2H1-1井,水平段长745 m,同年12月对水平井分11段压裂,加砂1.5 t/m,试气产量 6.25×10^4 m³/d,稳定试采配产 3×10^4 m³/d。在太阳背斜顶部取得产能突破后,2018年4月部署实施Y2H1平台等试验井组快速跟进评价,H1平台6口试验井获得 $(4.11 \sim 7.79) \times 10^4$ m³/d的测试产量。同时向背斜东西两端扩展:西端的Y7H1-2井水平段长689 m,I类储层占93.8%,水平段平均TOC为4.1%,孔隙度为4.5%,含气量为3.8 m³/t,试气获 11.4×10^4 m³/d的产量;东端的YZ117H1-6井水平段长1 850 m,I类储层占82.4%,水平段平均TOC为4.0%,孔隙度为4.2%,含气量为5.2 m³/t,试气获 20.1×10^4 m³/d的产量。2018年集中部署评价井17口,井均试气产量 6.3×10^4 m³/d,年底完成太阳一大寨浅层页岩气 8×10^8 m³产能的开发方案编制。2019年9月提交国内首个浅层页岩气探明地质储量1 259.5 $\times 10^8$ m³,含气面积215 km²。

2.4 规模开发阶段(2019年10月至今)

滚动评价与分步开发并行快速推进。2020年底,完成太阳一大寨第一期产建设计,建成国内首个浅层页岩气 8×10^8 m³产能的生产区。2020年向南滚动评价埋深更浅的海坝背斜,开展海坝YZ137井区开发先导试验,在500 m以浅区获得页岩气的勘探突破。YZ153H1平台4口井(埋深245~565 m)试气单井产量达 $(4.5 \sim 6.1) \times 10^4$ m³/d,其中YZ153H1-1井和YZ153H1-5井测试日产气均高达 6×10^4 m³以上^[3]。突破了超浅层页岩气产能关,2021年6月提交新增探明储量1 216.85 $\times 10^8$ m³,同时编制了海坝浅层页岩气

开发方案,积极探索浅层—超浅层页岩气降本增效开发模式,2021年在Y2H11平台以1号层“黄金”靶体、3号层“紫金”靶体为目标开展立体错层小井距(m)体积开发现场试验。H11平台共布设了7口水平井,其中的H11-3井与H11-7井靶体层位为龙一₁³⁻²,其余五口井以龙一₁¹和龙一₁²⁻¹为主,北支井间距为250 m,南支井间距为300 m。通过地质工程一体化论证与实施跟踪,实钻水平段长度为1 200~1 300 m,靶体钻遇率为71%~87%。浅层页岩气井首年日产 3.4×10^4 m³,最终可采储量(EUR)达 0.42×10^8 m³,优于开发方案设计。截至2022年3月底,太阳浅层页岩气田共投产136口井,2022年一季度日均产气 259×10^4 m³、产水267 m³,季度累产气 2.27×10^8 m³;单井平均日产气 1.9×10^4 m³、平均日产水2 m³,单井平均压力为2.5 MPa。

3 太阳山地浅层页岩气地质与气藏工程特征

3.1 优质页岩发育,物质基础好

太阳浅层页岩气田五峰组—龙一₁亚段处于深水陆棚沉积环境,其中五峰组向南厚度增大,龙一₁亚段厚度较为稳定。岩性以黑色硅质和硅泥质页岩、黏土质页岩与生物纹层为主,富含黄铁矿与笔石化石,TOC大于2%的优质页岩厚约30~40 m(图2)。生物纹层主要为生物蓬勃发育造成,亮纹层(生物纹层)主要为放射虫、钙藻和笔石形成的自生石英、方解石、白云石,属于自生的内碎屑或生物成因的有机硅。此外还有与黏土质页岩共生的长英质纹层,主要发育外源搬运沉积的长石、云母,泥质含量高,有机质含量低。页岩有机质显微组分以腐泥组为主,含少量惰质组,TI(类型指数)值介于40~80之间,属II₁型干酪根。有机质成熟度(R_o)介于1.65%~3.11%,平均值为2.54%,处于过成熟干气阶段。整体上,太阳气田优质页岩厚度大,具备形成页岩气的物质基础。

3.2 储集条件优越,吸附气占比高

太阳气田五峰组—龙一₁亚段页岩储集空间类型多样,发育有机质孔(图3a—3c)、脆性矿物粒内孔(图3d)和粒(晶)间孔(图3e—3f)、黏土矿物层间缝以及微裂缝。储集空间以有机质孔为主,总孔隙体积和比表面积分别为0.024~0.037 ml/g和15.5~31.7 m²/g。页岩孔隙度在2.04%~10.06%之间,平均值为5.63%,与TOC呈正相关关系(图4),可为吸附气和游离气提供足够的储集空间^[15-16]。

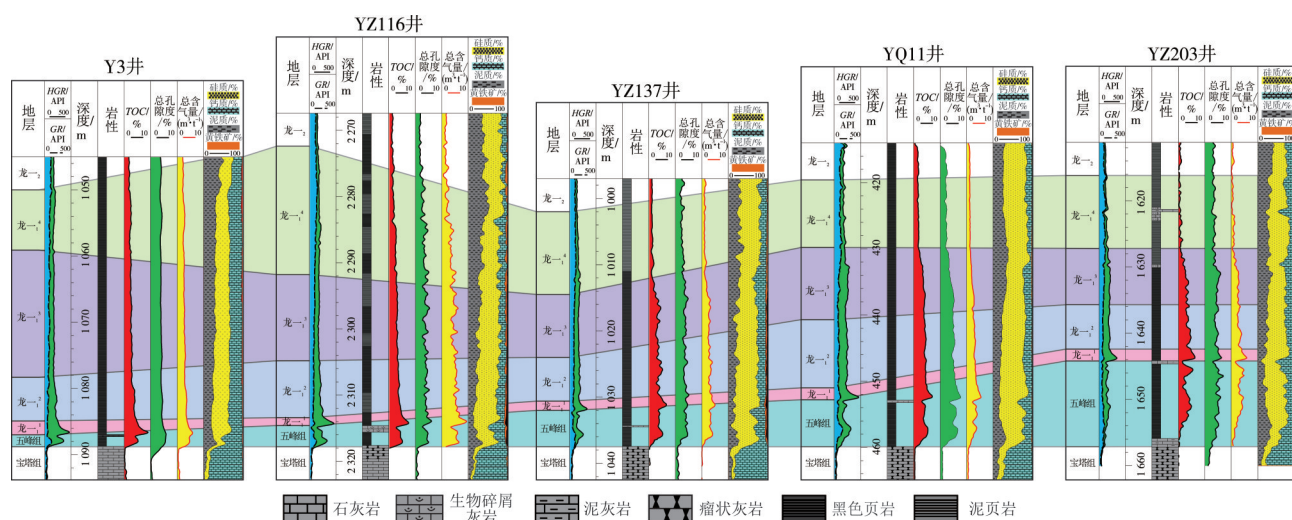


图2 太阳浅层页岩气田储层段连井对比剖面

Fig. 2 Inter-well correlation section of reservoir of Taiyang shallow shale gas field

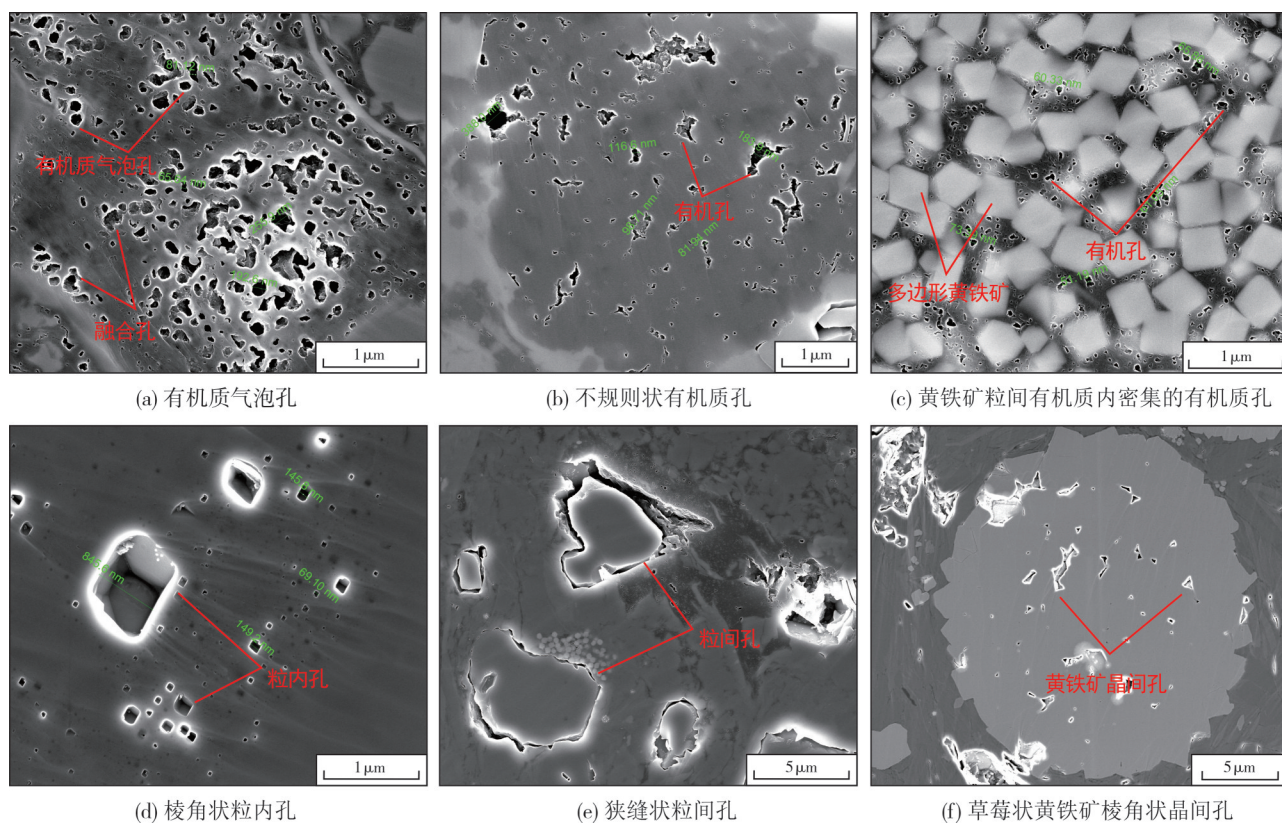


图3 太阳浅层页岩气田Y5井页岩不同类型的纳米级孔隙

Fig. 3 Different types of nanopores of shale in Well Y5 of Taiyang shallow shale gas field

总含气量主要分布在 $1.79 \sim 11.51 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,平均值为 $4.30 \text{ m}^3/\text{t}$ 。纵向上,总含气量总体呈现随深度增加而增大的趋势,与TOC在纵向上的分布趋势一致。其中,龙一₄小层总含气量最低,平均值为 $2.30 \text{ m}^3/\text{t}$;其次是龙一₃小层,平均值为 $3.90 \text{ m}^3/\text{t}$;

龙一₂小层和五峰组总含气量接近,平均值分别为 $4.50 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $4.90 \text{ m}^3/\text{t}$;龙一₁小层总含气量最高,平均值为 $6.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 。甲烷等温吸附实验测得五峰组—龙一段页岩平均吸附气量达 $1.92 \text{ m}^3/\text{t}$,证明了浅层页岩气中的吸附气占比较大(表2)。

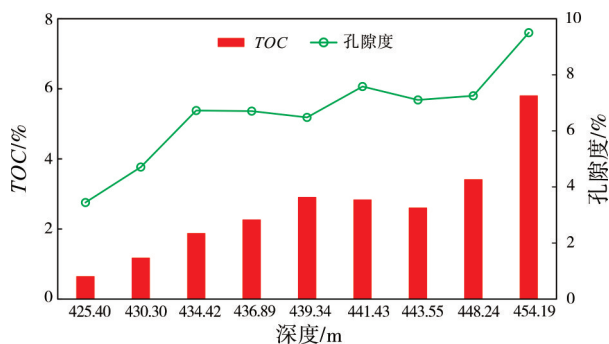


图4 太阳浅层页岩气田Y5井孔隙度与TOC随埋深的变化关系图

Fig. 4 Variation of porosity and TOC with burial depth in Well Y5 of Taiyang shallow shale gas field

表2 太阳浅层页岩气田五峰组—龙一段页岩等温吸附实验结果

Table 2 Isothermal adsorption experimental results of shale of Wufeng Formation—Longmaxi Member 1 in Taiyang shallow shale gas field

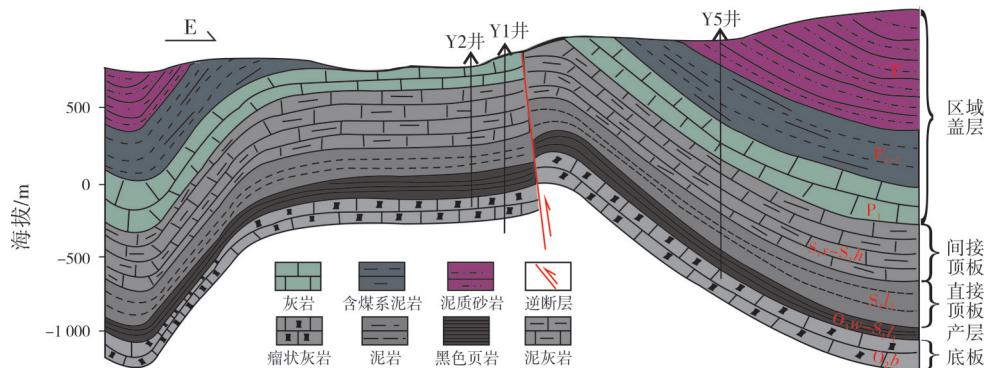
井号	样品数	兰氏体积/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	兰氏压力/ MPa	吸附气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
		平均值/中值	平均值/中值	平均值/中值
Y5井	10	3.30/3.17	2.64/2.79	2.20/2.13
Y3井	10	2.79/2.87	2.77/2.60	1.70/1.75
Y7井	5	3.15/3.08	2.39/2.27	2.02/2.02
YZ138井	4	2.30/2.23	2.67/2.64	1.60/1.53
YZ147井	4	2.38/2.18	1.65/1.72	2.27/2.07
YZ151井	7	2.31/2.42	2.48/2.31	2.08/2.19

3.3 构造改造弱,三维封存箱体完整

太阳构造于加里东末期形成,印支期受南北向挤压形成近东西走向的背斜,燕山期持续性的南北向挤压叠加喜马拉雅期挤压走滑,形成的近南北向压扭性走滑断层将早期近东西向复背斜分割成两块,但未破坏背斜构造形态^[1]。切顶的走滑-逆冲断层仍保持挤压性质,加上断层两侧为页岩与致密石灰岩或龙一₂亚段页岩紧密接触,侧向封闭性良好,三维封存箱体保存良好,页岩层连续富含气。

太阳气田目的层的顶板龙一₂亚段、龙二段及石牛栏组保留完整。其中直接顶板龙一₂亚段页岩孔隙度平均值为2.8%~3.6%,渗透率平均值为 $7.7 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2$,突破压力介于17~31 MPa;底板宝塔组瘤状灰岩与目的层页岩整合接触,孔隙度和渗透率平均值分别为1.6%和 $1.7 \times 10^{-9} \mu\text{m}^2$ ^[17-18]。顶底板的孔隙度和渗透率值较小,突破压力大,均表明顶底板封堵性能良好(图5)。

气田目的层页岩主要发育中孔级别的有机质纳米孔隙并吸附大量页岩气,吸附气占据了部分孔隙空间和喉道空间,相应地降低了孔隙、喉道大小和孔隙连通性,限制了页岩气在纳米级孔隙中的运移,增强了页岩储层的自封闭性。



注: S₃S-S₄h 石牛栏组-韩家店组; S₄L₂ 龙马溪组二段; O₃W-S₄L₁ 五峰组-龙马溪组一段; O₂b 宝塔组。

图5 太阳浅层页岩气田三维封存箱体模式图

Fig. 5 Occurrence pattern of three-dimensional sealed box system of Taiyang shallow shale gas field

综上所述,纵向封堵性能良好的顶底板+侧向封闭性逆断层+页岩自封闭性构建的三维封闭箱体为页岩气的有效保存提供了良好条件,加上太阳背斜区抬升剥蚀的开始时间相对较晚(在32~25 Ma左右),快速抬升剥蚀的开始时间在5 Ma以后,含气层段上覆地层残余厚度大多在500 m左右,页岩气向上快速扩散的时间短,因此仍有大量页岩气得到

有效富集和保存,地层压力保持微超压状态(压力系数为1.1~1.6)。

3.4 可压裂性好,易于人工造缝

太阳浅层气田五峰组—龙一₁亚段页岩硅质矿物含量介于7%~70%,平均值为40.3%,以石英为主,发育少量长石(图6a)。碳酸盐矿物含量平均值为28.8%,以方解石为主。黏土矿物含量平均值为

27.1%,以伊利石(平均占比53.9%)和伊蒙混层(平均占比33.8%)为主,含少量绿泥石(平均占比11.8%),几乎不含高岭石和蒙脱石(图6b)。五峰组一龙一₁亚段脆性矿物含量平均值在60%以上,页岩脆性矿物含量具有向下增大的特征。同时,水平应力差具随埋深增加而增大的特点,背斜构造

造高部位水平应力差较小(4.1~17.6 MPa),杨氏模量和泊松比平均值分别为29.6 GPa和0.164。浅层页岩气储层脆性指数高,两向水平应力差小,而且背斜构造部位的页岩处于挤压背斜构造应力中和面之上,张性网状微裂缝发育,易于被水力体积压裂改造^[3]。

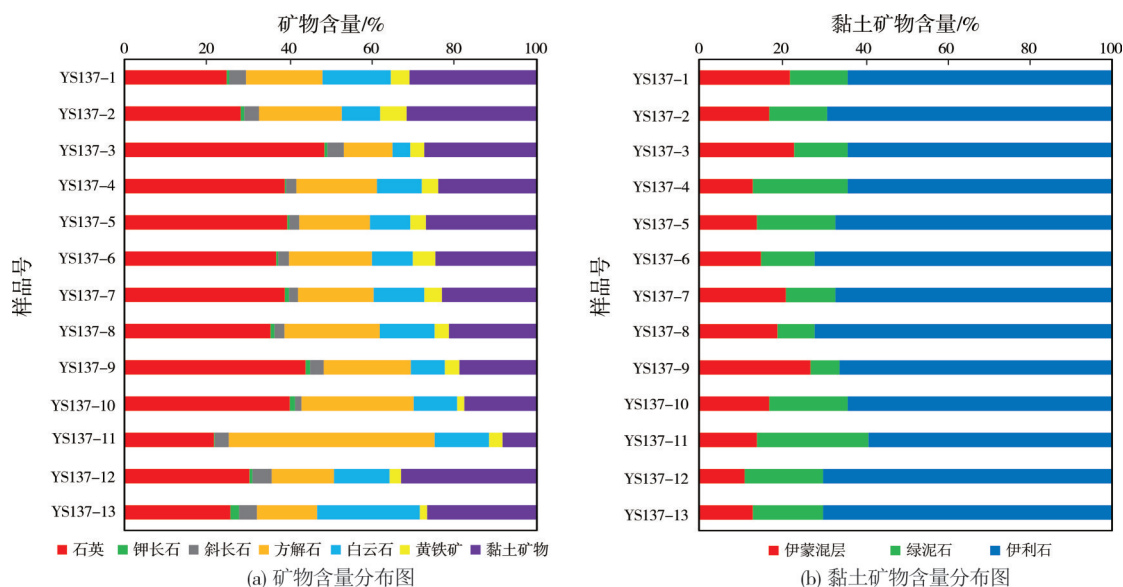


图6 太阳浅层页岩气田 YZ137 井五峰组—龙马溪组页岩矿物含量条形图

Fig. 6 Mineral content bar chart of shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Well YZ137 of Taiyang shallow shale gas field

4 盆外山地浅层页岩气成藏赋存规律认识与勘探开发实践创新

4.1 理论认识创新和勘探思路转变是勘探突破的关键

基于三维封闭箱体系是浅层页岩气成藏富集的关键因素这一地质认识,建立了山地浅层页岩气富集模式(图7):①纵向上顶板和底板致密泥灰岩比非常规页岩目的层更为致密,封盖性、封堵性良好;②页岩生烃作用和成岩演化过程中形成的有机质孔以孔径为2~50 nm的介孔(中孔)为主,毛细凝聚现象表明介孔对甲烷的吸附能力与自封闭能力强,页岩的自封闭性与平面分布的连续性是浅层页岩气赋存和连续含气的核心要素;③长期处于挤压状态以及伴随着喜马拉雅期压扭走滑的压扭性断层两盘由页岩与致密层岩性对接匹配,使得其侧向封闭性好;④喜马拉雅中晚期快速的构造隆升、剥蚀卸压与滑移作用,导致页岩水平纹层缝、水平缝的横向渗透性大大改善,相邻的深拗陷与背斜构造间

的垂深差明显加大,紧邻构造的拗陷深部向斜区的页岩气极易沿层理缝、水平缝短距离渗透运移至背斜部位聚集,从而补充浅层页岩地史过程中已逸散的游离气,从而实现页岩气藏保持相对动态平衡。

研究表明,山地页岩气富集与保存明显受页岩埋深、地层改造变形程度(地层倾角)及剥蚀强度与流体势协同控制,含气量与地层产状、剥蚀量呈负相关关系^[19]。页岩水平渗透率远大于垂直渗透率(4~18倍),水平层理、平行层理越发育,横向渗透率越大。在倾斜的页岩层中,页岩气可沿层理发生短距离渗流并向低势区运移聚集,低势的背斜构造封闭区是页岩气运移聚集的指向区。也就是说,抬升剥蚀晚、正负向构造幅度差大、斜坡倾角大、背斜顶部平缓、低势区持续封闭性和页岩自封闭性,是山地浅层页岩气有效赋存的主要因素,因此临沱的太阳背斜构造有利于页岩气汇聚富集与赋存。上述浅层页岩气富集保存地质理论的创新,打破了研究区浅层页岩气保存条件不佳和页岩气完全型“自生自储”的固有认识束缚,推动了勘探思路的转变,有

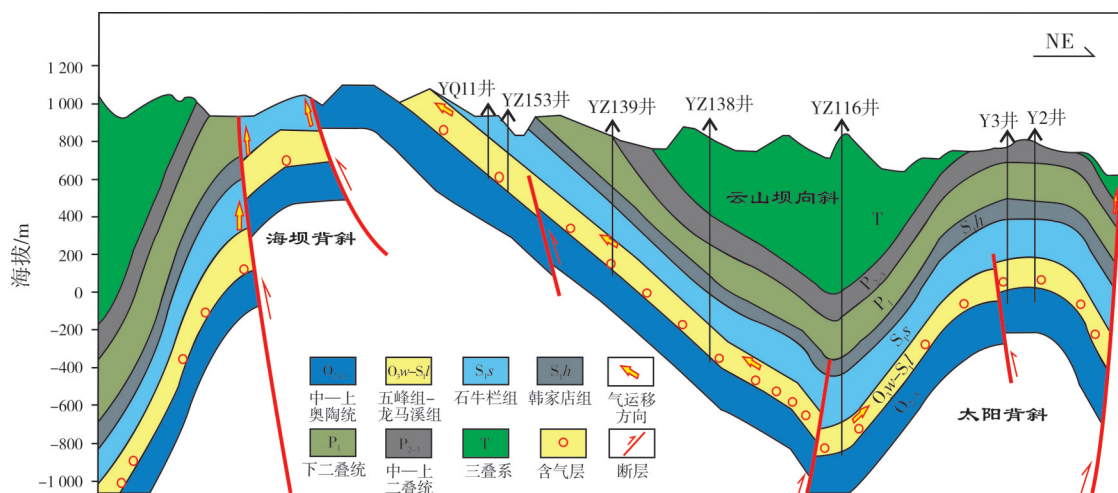


图7 太阳浅层页岩气田三维封存箱体系富集成藏模式

Fig. 7 Accumulation pattern of three-dimensional sealed box system of Taiyang shallow shale gas field

效指导了太阳浅层页岩气的勘探评价。

基于太阳浅层页岩气的勘探实践,系统总结了盆外山地浅层页岩气富集高产规律以及成藏赋存模式,提出了“多元因素耦合作用”富集高产规律认识:①早期沉积环境与深埋生烃作用之间的耦合为页岩气生成提供物质基础。五峰组—龙一₁亚段以局限性滞留深水陆棚沉积为主,强还原环境有利于有机质大量富集,为页岩气的形成提供生烃物质基础^[20-21];深埋使富碳页岩逐渐向过成熟演化,生成大量干酪根降解气和液态烃裂解气。②生烃作用与成岩作用的耦合形成优越的储集条件。生烃过程发育大量有机质孔隙,为游离气和吸附气提供赋存的主要场所^[22-23]。早期的压实作用虽然使得原生粒间孔快速减少,但脆性矿物接触更加紧密,对生烃作用生成的有机质孔隙以及溶蚀作用和矿物转化过程中形成的次生孔隙起到很好的支撑保护作用^[24-25]。③沉积—成岩—构造演化三因素耦合塑造较好的保存条件。沉积环境决定区域上较厚、封堵性能良好的顶底板发育,成岩作用使得目的层页岩具备较好的自封闭性,构造作用使顶板得以保存,并发育侧向封堵性能较好的逆断层控制了太阳背斜区浅层页岩气边界,三者共同塑造的三维封存箱有效地减缓了页岩气散失的速度,为页岩气赋存提供了很好的保存条件。

4.2 一体化地质工程技术创新应用是浅层页岩气高效勘探开发的保障

太阳背斜区浅层页岩气具备低压、低产的“两低”生产特征,为了降低成本实现高效勘探开发,浙

江油田公司创新形成了浅层页岩气勘探开发技术系列^[26-29]。

(1)高密度、高精度、高品质的山地浅层页岩气三维地震节点采集+同源同波场光纤井地联采与井驱“三高”(高保真去噪、高分辨率宽频处理、高精度真地表)各向异性叠前深度域精细处理,提高了对浅层页岩气微构造、微裂缝带和页岩储层属性的识别能力^[5],采集施工日效提升2倍,地震资料主频提升10 Hz以上,频带拓展5~10 Hz,深度偏移误差在0.3%内。

(2)通过建立井震互动约束、迭代更新的以构造地质、储层属性、天然裂缝、地质力学模型成果为基础的页岩甜点/钻井靶体评价,创新形成了以井工程人造气藏最大化和缝储储量最优化为核心的浅层页岩气产能导向高效布井技术^[29],实现了人造页岩气藏有效控制的提产提质提效目的,同时降低了工程实施风险。

(3)以平台为核心的地震地质井驱迭代处理与动态校验解释为基础,创新形成了水平井钻井地震地质导向实时跟踪和靶体目标控制技术。通过动态的钻头拟合地质定位、地震地质靶体逐点引导钻进和工程风险地震预测,克服了复杂山地页岩气区块小断层多、地层倾角变化快和微幅度构造发育等难题,提前预警、规避风险,实时有效处置异常,提高了目的层钻遇率和井筒完整性。

(4)以车载工程钻高效钻—开地质复杂浅表层、跟管导管钻井防表层漏塌、倒装钻具钻高水垂比的超浅层水平井、“强疏水强封堵极压润”超双疏+有机盐两类水基泥浆提速降本保清洁、国产近

钻头高效地质导向工具、漂浮下套管为核心的浅层页岩气高效优快钻井技术,缩短了钻井周期,大幅度提高了钻井效率,有效规避了垮塌、漏失和卡钻等风险,极大地降低了钻井成本和安全环保风险。

(5)创新形成了密闭保压取心工艺和含气量测定技术,不仅可以较为准确地获取游离气含量和吸附气含量,而且能够测试地层条件下页岩孔隙度和含气饱和度等关键参数,对于明确储层特征、深化储层认识以及精确求取储量具有重要意义,有望开辟密度体积法计算页岩气储量的新路子。

(6)以“三品质”一体化评价的“同岩层、性相似”原则分簇定段导向为基础,创新形成以大段多簇+小簇间距密切割+大排量强砂控液+全程滑溜水+低强度的石英砂+暂堵转向压裂为核心的浅层页岩气水平井分段体积压裂技术,增加了人工裂缝改造范围,大幅度降低了长缝压窜和套变风险,既有效提高了浅层页岩气产量又减少了压裂成本^[27]。

(7)针对浅层页岩气井压力低、敏感性强、易吐砂和水淹断气风险大的特殊性,充分利用地层自身能量保障连续稳定生产,实施以守住裂缝闭合压力底线、挺起提高气相渗透率旗帜和提高单位压降产气量、控制压降速率、确保气脉连绵平稳生产为核心的“连续、控压、缓慢”浅层页岩气精细控压排采技术,提高了压裂井段裂缝动用面积,延长了页岩气井产气寿命。

综上所述,经济实用有效的工程技术创新实践降低了勘探开发成本,提高了浅层页岩气开发效益。

5 启示

基于太阳浅层页岩气田探明与评价实践,集成复杂构造区山地浅层页岩气“多元因素耦合作用”富集高产的地质理论和配套的工程技术,深化页岩自封闭性和三维封闭箱体赋存作用的认识,拓展并丰富了页岩气地质勘探理论;突破南方复杂构造区浅层气勘探禁区,建成国内首个浅层页岩气田,创新形成了经济有效的一体化地质工程技术^[28],彰显了浅层页岩气商业化开发示范引领作用。

在四川盆地以外的中国南方复杂构造区,古生界海相浅层页岩气具有较好的资源勘探潜力,是实现海相页岩气勘探突破的现实领域。目前在川南筠连南、贵州习水、重庆黔江、湖北宜昌等复杂构造区,已钻井揭示了2 000 m以浅的页岩气显示和页岩气流^[3],预示南方浅层页岩气勘探大有可为。

参考文献

- [1] 徐政语, 梁兴, 鲁慧丽, 等. 四川盆地南缘昭通页岩气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.
XU Zhengyu, LIANG Xing, LU Huili, et al. Structural deformation characteristics and shale gas preservation conditions in the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area along the southern margin of the Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2019, 39(10): 22-31.
- [2] 常德双, 韩冰, 朱斗星, 等. 燕山运动对页岩气保存条件的控制作用: 以滇黔北地区太阳—海坝区块龙马溪组页岩气为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(增刊1): 45-50.
CHANG Deshuang, HAN Bing, ZHU Douxing, et al. Control of Yanshanian movement on shale gas preservation conditions: a case study on the Longmaxi Formation shale gas in Taiyang-Haiba Block of northern Yunnan and Guizhou[J]. Natural gas industry, 2021, 41(S1): 45-50.
- [3] 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): 11-28.
LIANG Xing, XU Zhengyu, ZHANG Zhao, et al. Breakthrough of shallow shale gas exploration in Taiyang anticline area and its significance for resource development in Zhaotong, Yunnan province, China[J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(1): 11-28.
- [4] 梁兴, 叶熙, 张介辉, 等. 滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 693-699.
LIANG Xing, YE Xi, ZHANG Jiehui, et al. Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin Sag, Dianqianbei Depression[J]. Petroleum exploration and development, 2011, 38(6): 693-699.
- [5] 梁兴, 王高成, 徐政语, 等. 中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术: 以昭通国家级页岩气示范区为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 33-42.
LIANG Xing, WANG Gaocheng, XU Zhengyu, et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: a case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. Natural gas industry, 2016, 36(1): 33-42.
- [6] 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.
WANG Pengwan, LI Chang, ZHANG Lei, et al. Characteristic of the shale gas reservoirs and evaluation of sweet spot in Wufeng-Longmaxi Formation: a case from the A well in Zhaotong shale gas demonstration zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2925-2935.
- [7] 邹才能, 赵群, 董大忠, 等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(12): 1781-1796.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, DONG Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural gas geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [8] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景

- (二)[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(2):166-178.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: characteristics, challenges and prospects (II)[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(2): 166-178.
- [9] 赵文智,贾爱林,位云生,等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探,2020,25(1):31-44.
- ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China petroleum exploration,2020,25(1):31-44.
- [10] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
- NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.
- [11] 梁兴,叶熙,张朝,等. 滇黔北探区YQ1井页岩气的发现及其意义[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(6):1-8.
- LIANG Xing, YE Xi, ZHANG Zhao, et al. Significance of discovery of shale gas from well YQ-1 in northern Yunnan-Guizhou provinces, China[J]. Journal of Southwest Petroleum University(science & technology edition),2014,36(6):1-8.
- [12] 马新华,谢军,雍锐,等. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J]. 石油勘探与开发,2020,47(5):841-855.
- MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development,2020,47(5): 841-855.
- [13] 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.
- BORJIGIN Tenger, SHEN Baojian, YU Lingjie, et al. Mechanisms of shale gas generation and accumulation in the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development,2017,44(1):69-78.
- [14] 梁兴,张介辉,张涵冰,等. 浅层页岩气勘探重大发现与高效开发对策研究:以太阳浅层页岩气田为例[J]. 中国石油勘探,2021,26(6):21-37.
- LIANG Xing, ZHANG Jiehui, ZHANG Hanbing, et al. Major discovery and high-efficiency development strategy of shallow shale gas: a case study of Taiyang shale gas field [J]. China petroleum exploration,2021,26(6):21-37.
- [15] CHEN Fangwen, ZHENG Qiang, DING Xue, et al. Pore size distributions contributed by OM, clay and other minerals in over-mature marine shale: a case study of the Longmaxi shale from Southeast Chongqing, China [J]. Marine and petroleum geology,2020,122:104679.
- [16] WU Chenjun, TUO Jincai, ZHANG Leifu, et al. Pore characteristics differences between clay-rich and clay-poor shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Northern Guizhou area, and insights into shale gas storage mechanisms [J]. International journal of coal geology,2017,178:13-25.
- [17] 梁兴,单长安,张朝,等. 昭通太阳背斜山地浅层页岩气“三维封存体系”富集成藏模式[J]. 地质学报,2021,95(11): 3380-3399.
- LIANG Xing, SHAN Changan, ZHANG Zhao, et al. "Three-dimensional closed system" accumulation model of Taiyang anticline mountain shallow shale gas in the Zhaotong Demonstration Area [J]. Acta geologica sinica,2021,95(11):3380-3399.
- [18] 崔哲,杨威,王乾右,等. 顶底板封闭性对四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组页岩气差异富集的影响[J]. 海相油气地质,2020,25(3):243-252.
- CUI Zhe, YANG Wei, WANG Qianyou, et al. Sealing property of roof and floor of Wufeng Formation-Longmaxi Formation and its influence on shale gas differential enrichment in Sichuan Basin and its surrounding areas [J]. Marine origin petroleum geology,2020,25(3):243-252.
- [19] 徐政语,梁兴,鲁慧丽,等. 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[J]. 海相油气地质,2021,26(4):289-298.
- XU Zhengyu, LIANG Xing, LU Huili, et al. Shale gas accumulation types and favorable area distribution of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Zhaotong Demonstration Area [J]. Marine origin petroleum geology,2021,26(4):289-298.
- [20] NIE Haikuan, JIN Zhijun, SUN Chuanxiang, et al. Organic matter types of the Wufeng and Longmaxi Formations in the Sichuan Basin, South China: implications for the formation of organic matter pores [J]. Energy & fuels,2019,33(9):8076-8100.
- [21] 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.
- PU Boling, DONG Dazhong, WANG Fengqin, et al. The effect of sedimentary facies on Longmaxi shale gas in southern Sichuan Basin [J]. Geology in China,2020,47(1):111-120.
- [22] NIE Haikuan, JIN Zhijun, ZHANG Jinchuan. Characteristics of three organic matter pore types in the Wufeng-Longmaxi shale of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. Scientific reports,2018,8(1):7014.
- [23] ZHOU Shangwen, NING Yang, WANG Hongyan, et al. Investigation of methane adsorption mechanism on Longmaxi shale by combining the micropore filling and monolayer coverage theories [J]. Advances in geo-energy research,2018,2(3):269-281.
- [24] UFFMANN A K, LITKE R, RIPPE D. Mineralogy and geochemistry of Mississippian and Lower Pennsylvanian black shales at the Northern Margin of the Variscan Mountain Belt (Germany and Belgium) [J]. International journal of coal geology,2012,103:92-108.
- [25] 管全中,董大忠,张华玲,等. 富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制:以四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例[J]. 石油勘探与开发,2021,48(4): 700-709.
- GUAN Quanzhong, DONG Dazhong, ZHANG Hualing, et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: a case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development,2021,48(4):700-709.
- [26] 何勇,李林,刘成,等. 盆地山地浅层页岩气经济有效开发对策探索[J]. 天然气工业,2021,41(4):82-90.
- HE Yong, LI Lin, LIU Cheng, et al. Economic and effective development of shale gas in mountainous areas outside the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry,2021,41(4):82-90.
- [27] 梁兴,管彬,李军龙,等. 山地浅层页岩气地质工程一体化高

- 效压裂试气技术:以昭通国家级页岩气示范区太阳气田为例[J].天然气工业,2021,41(增刊1):124-132.
- LIANG Xing, GUAN Bin, LI Junlong, et al. Key technologies of shallow shale gas reservoir in mountainous area: taking Taiyang gas field in Zhaotong national shale gas demonstration area as an example[J]. Natural gas industry, 2021, 41(S1): 124-132.
- [28] 何勇, 黄小青, 王建君, 等. 昭通国家级页岩气示范区太阳区块浅层页岩气的立体开发[J]. 天然气工业, 2021, 41(增刊1): 138-144.
- HE Yong, HUANG Xiaoqing, WANG Jianjun, et al. Stereoscopic development of shallow shale gas in the Taiyang Block of Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area[J]. Natural gas industry, 2021, 41(S1): 138-144.
- [29] 梁兴, 单长安, 蒋佩, 等. 浅层页岩气井全生命周期地质工程一体化应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 1-18.
- LIANG Xing, SHAN Chang'an, JIANG Pei, et al. Geology and engineering integration application in the whole life cycle of shallow shale gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2021, 43(5): 1-18.

编辑: 张润合

Innovative practice and understanding of exploration, discovery and evaluation of Taiyang shallow shale gas field in Zhaotong Demonstration Area

LIANG Xing, WANG Pengwan, LUO Yufeng, LI Zhaofeng, YUAN Xiaojun

Abstract: Based on the innovative practice of exploration, discovery and evaluation of Taiyang shallow shale gas field in Zhaotong Demonstration Area, the basic geological characteristics and enrichment law of mountainous shallow shale gas field in strong reconstruction and complex structural area are systematically summarized. It is pointed out that 30-40 m thick high-quality shale is developed in O_3w (Wufeng Formation) - $S_1l_1^{1-1}$ (first sublayer of Longmaxi Submember 1¹) of Taiyang shallow shale gas field. The geochemical characteristics show that the *TOC* of high-quality shale is generally greater than 2.0%, the type of organic matter is II_1 , and the macerals are mainly sapropelic. The maturity of organic matter (R_o) is among 1.65%-3.11%, with an average of 2.54%, belonging to the dry gas generation stage of over mature, which provides a good material basis for the generation of a large amount of shale gas. The reservoir conditions are superior, and various types of pores are developed, with porosity ranging from 2.04% to 10.06%. The pores dominated by organic matter pores and clay mineral interlayer fractures provide a large amount of reservoir space for shale gas. The gas content of the target layer generally increases with the increase of depth. The average adsorbed gas content of shale in $O_3w-S_1l_1^{1-1}$ measured by methane adsorption experiment is 1.92 m³/t, which proves that the adsorbed gas accounts for a large proportion of shallow shale gas. Moreover, the trace strength of structural transformation is generally weak, which is conducive to the formation of a complete three dimensional sealed box system with the characteristics of roof and floor with good vertical sealing performance, reverse fault with good lateral sealing performance and shale reservoir with strong self-sealing performance. Therefore, the overall preservation conditions of the target layer are good, with high gas content and atmospheric pressure to micro overpressure system. Shale has high content of brittle minerals and small horizontal stress difference in anticline structure area, which is easy to be transformed by volume fracturing. $S_1l_1^{1-1}$ -lower $S_1l_1^{1-2}$ and $S_1l_1^{1-3}$ are double favorable targets, which can be developed in volume of small well spacing and three-dimensional staggered layer. The innovative understanding of the geological theory of shale gas accumulation and occurrence and the economic efficiency progress of geological-engineering integrated technology are the key to the exploration breakthrough and efficient evaluation of Taiyang shallow shale gas field. The successful exploration experience of Taiyang shallow shale gas field has important reference and guiding significance for shallow shale gas exploration in complex structural areas in southern China.

Key words: shallow shale gas; three dimensional sealed box system; volume development of three-dimensional staggered layer; Wufeng Formation; Longmaxi Submember 1¹; Taiyang gas field; Zhaotong Demonstration Area

LIANG Xing, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in the comprehensive evaluation and exploration and development management of oil and gas. Add: PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Jingshanling, Yuhang District, Hangzhou, Zhejiang 311100, China

WANG Pengwan, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research on conventional and unconventional petroleum geology in South China. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023, China