

引用: 何文渊, 何海清, 王玉华, 等. 川东北地区平安 1 井侏罗系凉高山组页岩油重大突破及意义 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 40-49.

He Wenyuan, He Haiqing, Wang Yuhua, et al. Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 40-49.

川东北地区平安 1 井侏罗系凉高山组 页岩油重大突破及意义

何文渊^{1,2} 何海清³ 王玉华³ 崔宝文^{1,2} 蒙启安^{2,4} 郭绪杰³ 白雪峰^{2,4} 王有智^{2,4}

(1 中国石油大庆油田公司; 2 黑龙江省陆相页岩油重点实验室; 3 中国石油勘探与生产分公司; 4 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院)

摘 要: 位于四川盆地东北部 (简称川东北) 古中央凹陷的平安 1 井在侏罗系凉高山组页岩获得百吨高产, 实现了四川盆地凉高山组页岩油气勘探的重大突破。基于平安 1 井的勘探成果, 系统分析了川东北地区凉高山组页岩油藏条件和下一步勘探方向。研究结果表明: 平安 1 井突破层系为凉高山组湖相富含有机质页岩, 其岩石类型为长英质页岩, 孔隙度平均值为 2.06%, 以粒间孔、晶间孔为主, 微裂缝发育; TOC 值为 0.64%~1.35%, 有机质类型以 II 型为主, R_o 为 1.51%~1.66%, 脆性矿物含量为 50.4%~54.8%。综合评价认为川东北地区在前陆盆地背景下, 广泛分布的半深湖相页岩富含有机质, 有利于页岩油气富集成藏。其中凉上段发育 3 套页岩, 生烃能力强, 演化程度高, 整体为一套高质量烃源岩; 保存条件好、地层超压、孔—缝体系发育, 既是有效储层又是高效产层。平安 1 井的突破, 展示了四川盆地侏罗系湖相页岩巨大勘探潜力, 对加快四川盆地页岩油勘探起到了积极的推动作用。

关键词: 四川盆地; 凉高山组; 页岩油气; 重大突破; 平安 1 井

中图分类号: TE112 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.01.004

Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin

He Wenyuan^{1,2}, He Haiqing³, Wang Yuhua³, Cui Baowen^{1,2}, Meng Qi'an^{2,4}, Guo Xujie³, Bai Xuefeng^{2,4}, Wang Youzhi^{2,4}

(1 PetroChina Daqing Oilfield Company; 2 Key Laboratory of Continental Shale Oil of Heilongjiang Province; 3 PetroChina Exploration and Production Company; 4 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Daqing Oilfield Company)

Abstract: Well Ping'an 1, located at the paleo central sag in northeastern Sichuan Basin, achieved a high shale oil production of 100 tons from Lianggaoshan Formation, indicating a major breakthrough of shale oil and gas of Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin. Based on the exploration results in Well Ping'an 1, the main controlling factors for shale oil accumulation and exploration orientation of Lianggaoshan Formation in northeastern Sichuan Basin are systematically analyzed. The results show that the shale oil reservoir in Well Ping'an 1 is lacustrine organic rich shale and the rock type is felsic shale. The average porosity is 2.06%, dominated by intergranular pores and intracrystal pores, with micro fractures developed; TOC ranges from 0.64%-1.35%, and Type II organic matter is dominant. R_o is in the range of 1.51%-1.66%. The content of brittle minerals is 50.4%-54.8%. The comprehensive evaluation indicates that the widely distributed semi deep

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项“松辽盆地北部古龙页岩油成藏条件及甜点分布规律研究”(SC2020ZX05A0023)。

第一作者简介: 何文渊 (1974-), 男, 浙江金华人, 博士, 2001 年毕业于北京大学, 教授级高级工程师, 现主要从事油气发展战略、油气勘探及评价工作。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区中原路 99 号大庆油田有限责任公司, 邮政编码: 163002。E-mail: hewy@cnpc.com.cn

通信作者简介: 白雪峰 (1979-), 男, 在读博士, 高级工程师, 现主要从事油气勘探工作。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西灵路 18 号大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 邮政编码: 163712。E-mail: bxf@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-12-07; 修改日期: 2022-01-05

lacustrine shale is rich in organic matter in foreland basin in northeastern Sichuan Basin, which is conducive to shale oil and gas accumulation. Among them, three layers of shale are developed in the Upper Lianggaoshan Formation, with strong hydrocarbon generation capacity and high degree of thermal evolution, which is a set of high-quality source rock as a whole; In addition, it has good preservation conditions, formation overpressure and well-developed pore-fracture system, which enable to serve as an effective reservoir and a high-efficiency production layer. The breakthrough in Well Ping'an1 shows the great exploration potential of the Jurassic lacustrine shale, and plays a positive role in accelerating shale oil exploration in Sichuan Basin.

Key words: Sichuan Basin, Lianggaoshan Formation, shale oil and gas, major breakthrough, Well Ping'an 1

0 引言

以美国为代表的国家对海相页岩油效益开发取得的成功,掀起了世界范围内非常规油气资源勘探开发的热潮^[1-4]。近年来,中国充分利用海相页岩油的研究和勘探实践经验,开展陆相页岩油地质研究,加大勘探攻关、开发试验和产能建设力度,相继在鄂尔多斯盆地^[5]、准噶尔盆地^[6]、松辽盆地^[7]和渤海湾盆地^[8]实现了页岩油的重大发现及开发,建立了陆相页岩油富集模式^[9-10]、储层评价参数^[11-12],形成了关键的勘探开发技术^[13-19],对支撑中国陆相页岩油“甜点”预测和产能建设具有重要意义。

四川盆地是中国天然气工业的基地,赋存多种类型的天然气资源^[20-22],然而石油勘探开发却步履维艰,近20年来石油产量逐年萎缩。侏罗系作为四川盆地唯一的产油层系,历经两次石油会战,但均未获得工业性突破,主要原因是砂岩和介壳灰岩储层具有特低孔、特低渗特征^[23],常规油气的勘探方向实现商业开发难度大。2020年,借鉴大庆古龙页岩油勘探做法,立足“大战略、大场面、规模发现”的勘探思路,系统开展四川盆地侏罗系凉高山组基础地质研究,重新评价侏罗系页岩油勘探潜力,在仪陇—平昌流转区块侏罗系凉高山组部署风险探井——平安1井,获日产油112.8m³、日产气11.45×10⁴m³,目前试采139天累计产油3206.65m³、累计产气366.39×10⁴m³,具有高产、稳产的特征,实现了侏罗系凉高山组湖相页岩油产量的历史性突破,坚定了四川盆地页岩油气勘探开发的信心,打响了四川盆地侏罗系页岩油勘探“科技战”。本文基于平安1井页岩油气勘探实践,充分分析岩心、薄片、录井、测井及地球化学资料,系统剖析四川盆地凉高山组页岩油气成藏特征及富集规律,明确凉高山组页岩油气勘探开发潜力,为开拓四川盆地页岩油战场提供理论依据和技术支撑。

1 地质概况

川东北地区在中—新生代经历了米仓山和大巴山向盆地方向的逆冲与推覆,在这种构造背景下,形成了米仓山—大巴山前陆盆地^[23]。川东北地区构造走向主要呈北西向,发育挤压性、压扭性逆断层,平面上为“两隆夹一凹”的构造格局(图1)。侏罗系为一套以三角洲—湖泊相为主的典型陆源碎屑岩沉积,厚度为1500~4000m^[24]。底部与上三叠统须家河组、顶部与白垩系呈平行不整合接触。川东北地区侏罗系自下而上发育下侏罗统自流井组、凉高山组,中侏罗统沙溪庙组,上侏罗统遂宁组、蓬莱镇组;白垩系及以上地层缺失^[25-26]。

川东北地区凉高山组主要为一套细粒沉积,厚度为100~260m,从东北至西南方向地层逐渐减薄,通江—万源一带最厚达260m(图2)。根据岩石组合特征和旋回性,将凉高山组划分为凉上段、凉下段,凉上段进一步分为3个亚段(图1)。凉下段沉积时期,湖盆处于广盆浅水氧化环境,沉积中心位于中东部,岩性以紫红色泥岩夹灰绿色粉砂岩为主;凉上段沉积时期,前陆盆地形成且前渊拗陷逐渐扩大,沉积中心自下而上逐步向西北迁移,其中凉上1、凉上2和凉上3亚段发育3套富有机质页岩。

2 平安1井凉高山组地质特征

2.1 岩性特征

平安1井完钻井深为3980m,水平段长817m,整体岩性为泥页岩夹粉砂岩,钻遇暗色泥页岩515m、粉砂质泥岩91m、粉砂岩211m。其中,凉上1亚段厚度为45.4m,凉上2亚段厚度为71.8m,凉上3亚段厚度为44.5m,岩性以页岩、纹层状页岩为主,夹不等厚砂岩,局部发育厚层页岩。页岩厚度一般为1~3m,单层厚度最大为9m;夹层厚度一般为0.1~2m,单层厚度最大为6m。

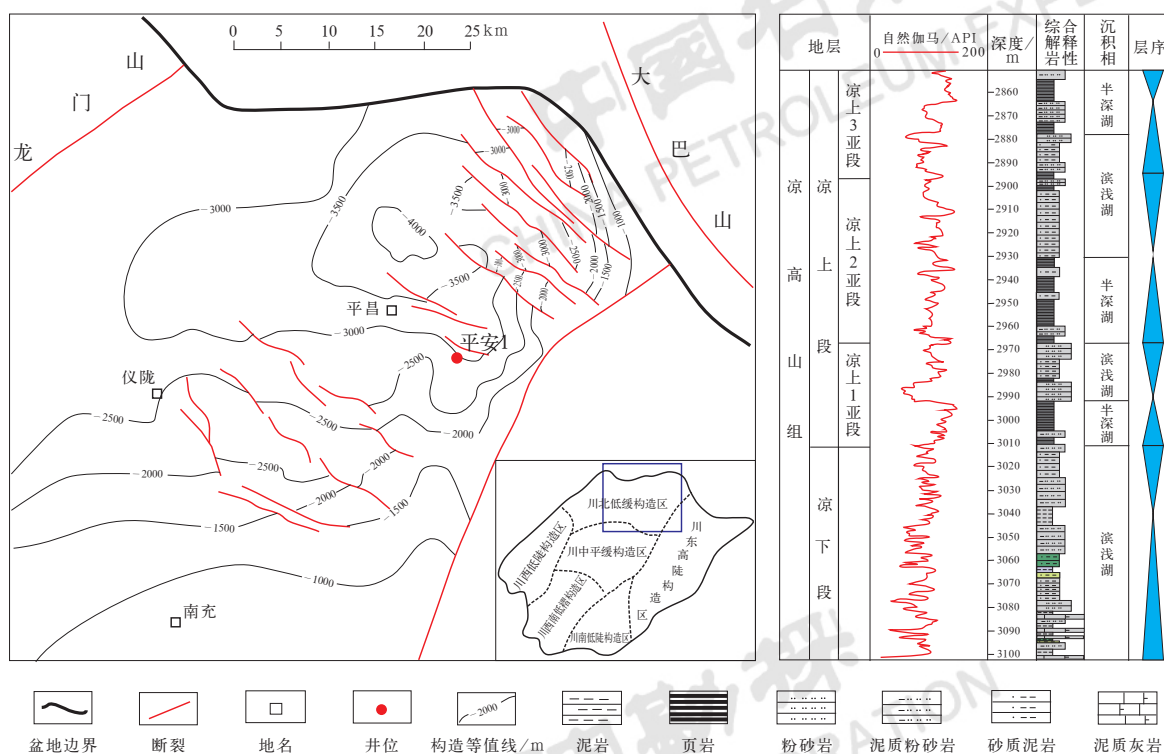


图1 川东北地区构造纲要图(左)及平安1井凉高山组综合柱状图(右)

Fig.1 Structural outline of northeastern Sichuan Basin (left) and comprehensive stratigraphic column of Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 (right)

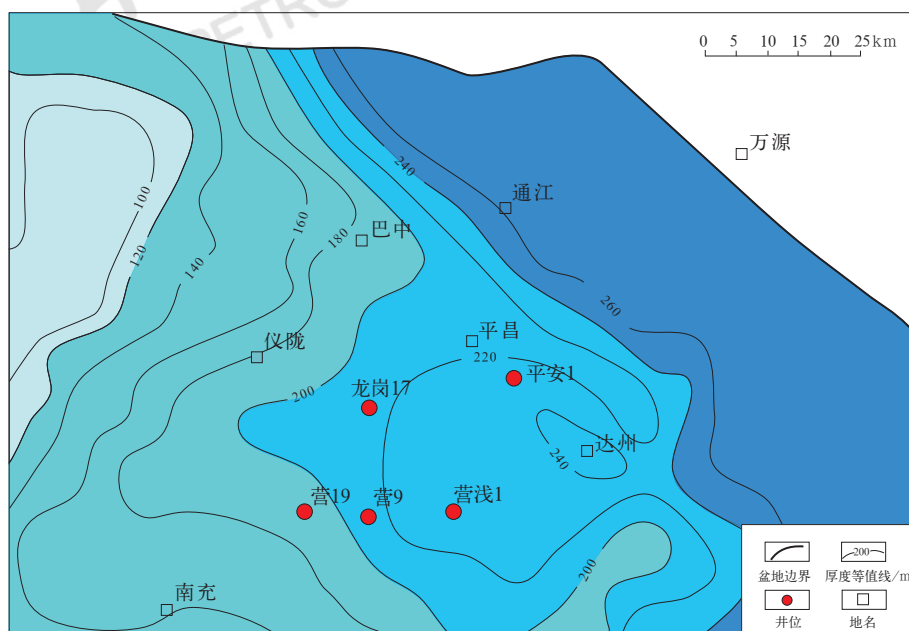


图2 川东北地区凉高山组厚度图

Fig.2 Thickness map of Lianggaoshan Formation in northeastern Sichuan Basin

凉上1亚段页岩黏土矿物平均含量为44.3%、石英含量为46.9%，含少量方解石、黄铁矿(表1)，凉上2亚段页岩黏土矿物平均含量为48.6%、石英含量为45.9%，凉上3亚段页岩黏土矿物平均含量为48.4%、石英含量为46%，整体具有高长英质特征(图3)。

表 1 平安 1 井凉高山组页岩富集层评价参数表

Table 1 Evaluation parameters of shale enrichment layers of Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1

亚段	TOC/%	孔隙度 /%	黏土矿物 /%	石英 /%	脆性矿物 /%	R_o /%
凉上 3	0.68	1.71	48.4	46	50.4	1.51
凉上 2	0.64	1.63	48.6	45.9	51.3	1.55
凉上 1	1.35	2.84	44.3	46.9	54.8	1.66

注：孔隙度样品数量为 16 样次； R_o 样品数量为 8 样次，其他分析样品为 71 样次。

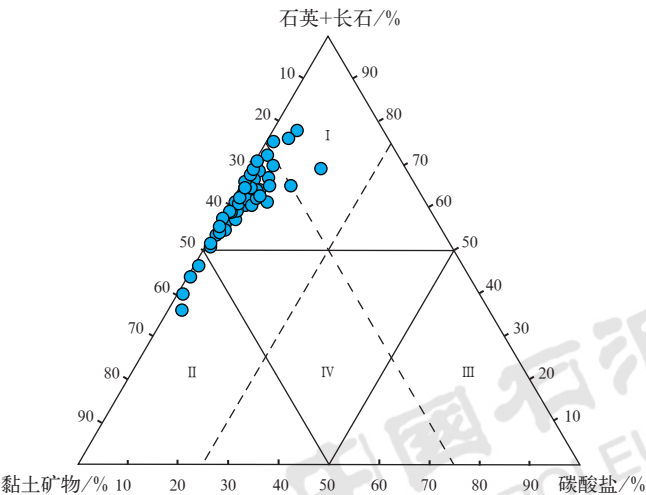


图 3 平安 1 井凉高山组页岩全岩矿物组成特征

Fig.3 Bulk rock mineral composition of Lianggaoshan Formation shale in Well Ping'an 1

I—长英质页岩；II—黏土质页岩；III—钙质页岩；IV—混合页岩。

样品数量为 48 样次

2.2 物性特征

凉上 1 亚段页岩孔隙度为 0.86%~4.66%，平均为 2.84%，凉上 2 亚段页岩孔隙度为 1.26%~1.91%，平均为 1.63%，凉上 3 亚段页岩孔隙度为 1.23%~2.61%，平均为 1.71%。页岩孔隙以粒间孔（图 4a）、黏土矿物晶间孔为主（图 4b），局部发育微裂缝（图 4c）。通过岩心、薄片观察可见平安 1 井凉上段页岩中普遍发育页理缝，页理缝呈连续或断续的平直状或微弱波状平行于层理面分布，在肉眼和显微镜下均可见（图 4d、e），镜下显示页理缝宽 30~300 μ m，页理缝线密度为 500~1000 条 /m。岩心表面可见裂缝呈砖墙缝状，网格直径为 1~9cm，顺层缝与斜交缝交织成网状，裂缝局部呈开启状，裂缝长度为 1~10cm，宽度为 0.1~0.8mm，密度为 400~1000 条 /m（图 4f）。

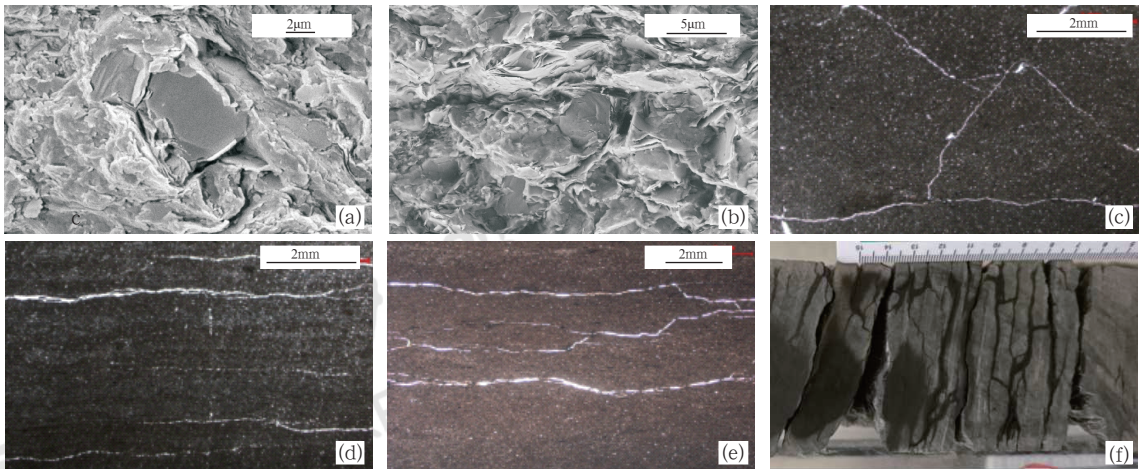


图 4 平安 1 井页岩储层孔隙发育特征

Fig.4 Pore development characteristics of shale reservoir in Well Ping'an 1

(a) 2904.02 m，凉上段，灰黑色页岩发育粒间孔；(b) 3001.38m，凉上段，片状黏土矿物晶间孔发育；(c) 2858.45m，凉上段，不规则网状裂缝；(d) 3001.2m，凉上段，页理缝；(e) 2865.4m，凉上段，交叉微裂缝；(f) 3006.59m，网状裂缝

2.3 地球化学特征

从平安1井页岩取心地球化学分析结果揭示,凉上段3套页岩均具有较好的含油性(图5)。凉上1亚段页岩TOC值为0.57%~2.56%,平均为1.35%,凉上2亚段TOC值为0.5%~1.88%,平均为0.64%,凉上3亚段TOC值为0.50%~0.99%,平均为0.68%;凉上1、凉上2和凉上3亚段镜质组反射率分别为1.66%、1.55%和1.51%,整体演化程度较高(表1)。凉上段页岩有机质类型以Ⅱ₁—Ⅱ₂型为主,其中腐泥组含量为43.33%~86%,镜质组含量为4.67%~18.67%,壳质组含量为2.67%~8.33%,惰质组含量为6.67%~32.67%。

2.4 脆性特征

凉上段页岩具有脆性矿物含量较高的优势,凉上1亚段脆性矿物含量为40.6%~74.7%,平均为54.8%,

凉上2亚段脆性矿物含量为42.5%~70.4%,平均为51.3%,凉上3亚段脆性矿物含量为39.5%~71.3%,平均为50.4%(表1)。黏土矿物以伊利石为主,不含蒙皂石,具有较好的可压裂性。

3 平安1井页岩油富集高产条件

四川盆地侏罗系具有形成页岩油气藏的地质条件^[26]。平安1井的突破证实了凉高山组3套页岩具有高产特性,展现了侏罗系页岩油气广阔的勘探前景。

3.1 前陆盆地背景形成的3期湖盆,为凉高山组广覆式页岩发育奠定了基础

下侏罗统凉高山组沉积时期,川东北地区为大巴山前陆盆地的前渊拗陷区^[27],沉积了一套富有机质页岩。晚侏罗世—早白垩世受大巴山强烈挤压影响,前陆盆地快速沉降,烃源岩埋深大、热演化程度高,大量生成油气。

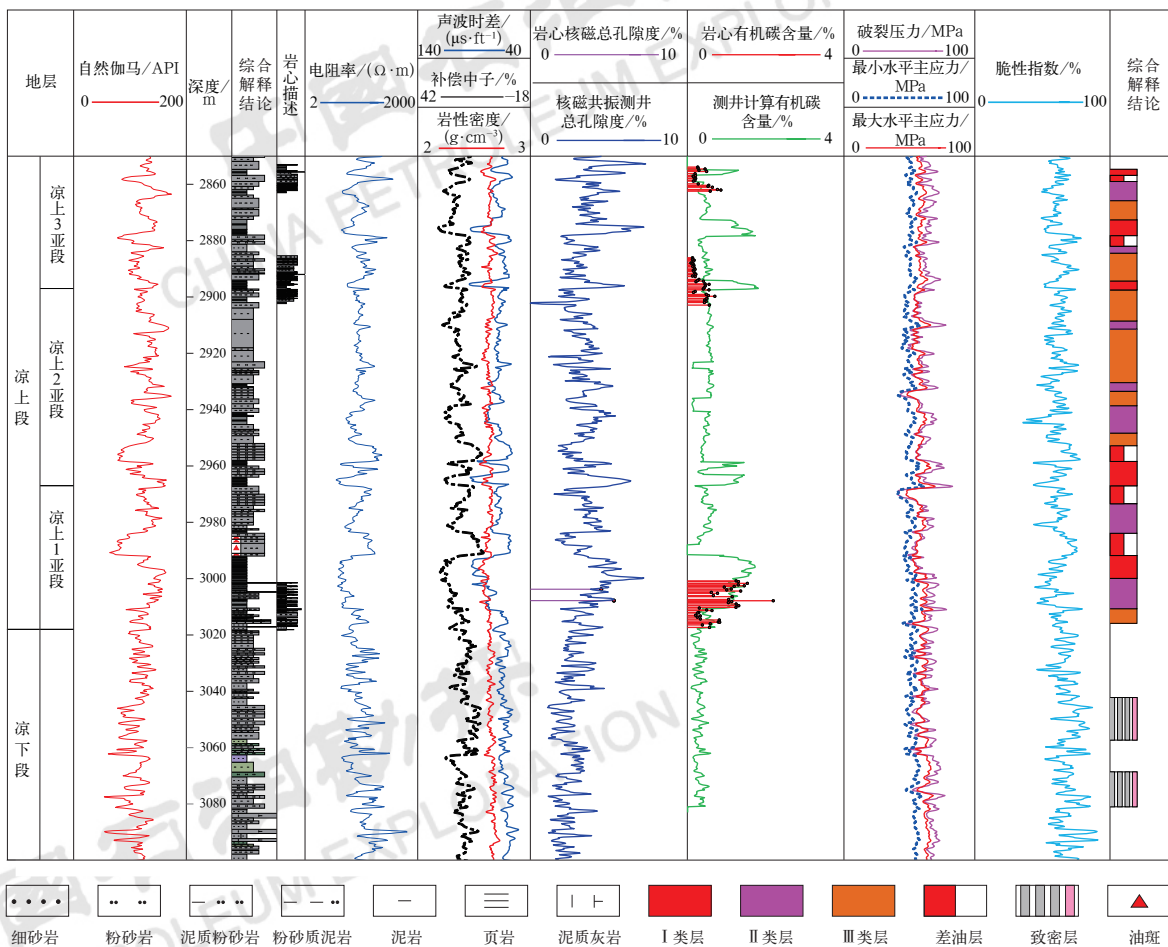


图5 平安1井凉高山组页岩油气综合评价图

Fig.5 Comprehensive evaluation of shale oil and gas of Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1

凉高山组沉积主要受大巴山的控制, 该组沉积期为前陆盆地初始形成期, 具有幕式压降的特征, 凉下段沉积时期为平缓广盆浅水环境, 随着前渊凹陷从东北向西南逐渐扩大, 凉上段沉积时期水体逐渐变深, 表现为深盆深水环境 (图 6), 凉上 1 亚段沉积范围较小, 为浅湖—半深湖沉积; 凉上 2 亚段为三角洲—

浅湖—半深湖沉积, 三角洲主要位于川东地区, 半深湖沉积范围扩大; 凉上 3 亚段为三角洲—滨湖—浅湖—半深湖沉积, 湖盆面积最大 (图 6)。沉积中心具有自东向西迁移特点。3 期较强烈的幕式压降形成了 3 套富含有机质的页岩, 平面上广覆式分布, 为凉高山组页岩油气形成提供了丰富的物质基础。

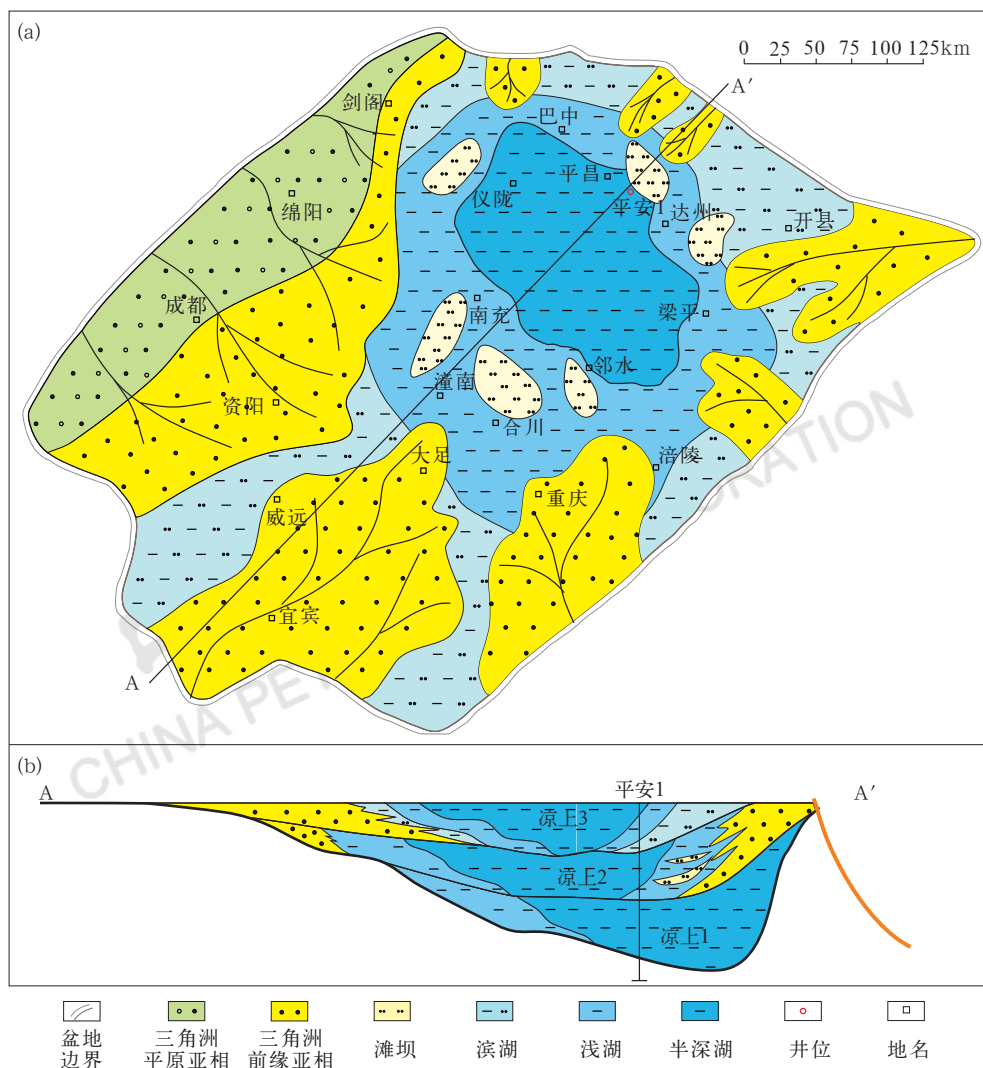


图 6 四川盆地凉高山组凉上段沉积相平面图 (a) 及剖面图 (b)

Fig.6 Sedimentary facies map (a) and section (b) of the Upper Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin

3.2 凉高山组页岩品质好、成熟度高, 是一套有效的烃源岩

富有机质页岩的类型与沉积环境、古水深和古气候密切相关, 而沉积环境直接控制富有机质页岩的分布^[28]。前人研究表明, 随着沉积环境的变迁, 富有机质页岩平面上具有分带性、纵向上具有旋回性的特点。

四川盆地凉高山组沉积期湖盆宽且浅, 半深湖—深湖沉积范围主要分布在川东北靠近大巴山一带, 湖盆水体升降频繁, 导致陆源有机质和湖盆有机质在垂向上频繁叠置。平安 1 井揭示凉高山组发育多个富有机质页岩段, 表现出较好的旋回性, 其中凉上 1 亚段沉积时, 水体相对较深, 沉积的页岩质纯、厚度大, 各项地球化学指标相对较好; 而凉上 2、凉上 3 亚段沉积时, 水体较为动荡, 页岩中夹大量薄层粉

砂,陆源碎屑生产力较强,陆源母质比例逐渐升高,这两套页岩品质稍差。综合前人研究^[24]和钻井资料,平安1井所处的川东北地区整体演化程度较高, R_o 普遍大于1.5%,处于生油高峰阶段,具有较好的生烃能力。

3.3 凉高山组页岩孔隙结构好、裂缝发育,是一套有效的储层

川东北地区现今构造格局受米仓山、大巴山、华蓥山等多期次非同步、异方位的逆冲推覆交替活动控制,盆内各拗陷带的盆—山耦合过程具有强烈的阶段性和迁移性。北东走向的华蓥山在晚三叠世—

白垩纪北西向大巴山的挤压作用影响下^[29-30],于华蓥山断裂带西侧形成一系列北西向的褶皱带,受不同方向挤压作用,形成了现今复杂的孔—缝体系,这些复杂的网状裂缝,极大地改善凉高山组页岩的储集能力和渗流能力,是凉高山组页岩油气高产的关键因素。

结合钻井和露头现象,认为川东北地区发育多尺度孔—缝体系,为页岩油气的储集提供了丰富的储集空间。平安1井岩心分析表明,页岩储层孔隙度为0.86%~4.66%,储集空间以微纳米级无机孔缝为主,占比为78%;大孔和介孔占99%,孔径平均为10.29nm,孔隙结构较好(图7)。

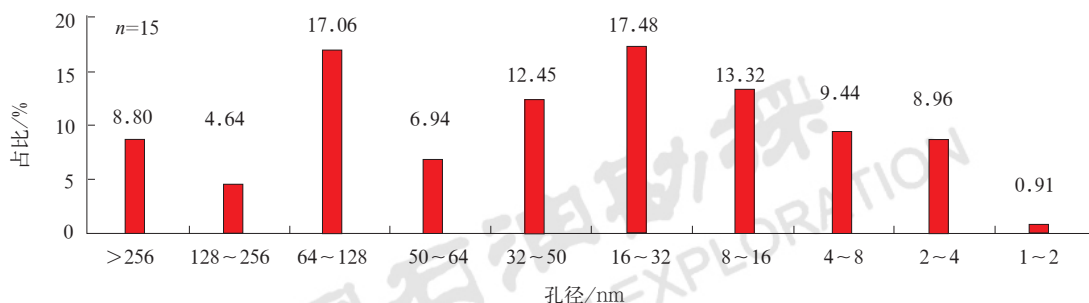


图7 平昌地区平安1井凉上段页岩孔径分布图

Fig.7 Pore size distribution histogram of the Upper Lianggaoshan Formation shale in Well Ping'an 1 in Pingchang area

3.4 凉高山组原油品质好、地层压力系数大,是一套高效的产层

平安1井揭示凉高山组原油品质较好。平安1井原油密度为0.7698~0.8367g/cm³,气油比为590~1097m³/m³,显示原油具有较好的流动性。 $\Sigma C_{21-}/\Sigma C_{22+}$ 烷烃含量为4.06,反映油质较轻,与大庆古龙页岩油相似。

微观含油性研究表明,网状缝发育处见明显原油富集分布(图8a),以轻质组分为主,基质部分也见原油呈零散状分布,含油量为0.73%~2.13%(含油量为单位视域岩石样品中原油体积与岩石体积的比值)。凉上1亚段页岩及粉砂岩含有原油轻重组分,页岩含油性优于粉砂岩,页岩平均含油量为2.27%,粉砂岩平均含油量为1.33%;原油呈零散状分布于基质或页理缝中,少部分呈团簇状富集(图8b—d)。凉高山组压力系数高,为1.30~1.88,具有超压特征。从油气流动性质到可压裂性,均证实凉高山组页岩具有较好的改造基础和产出能力。

在精细评价的基础上,基于烃源岩演化程度,首次将川东北地区划分稀油区、轻质油区和凝析油气区。稀油区主要分布在营山构造以西,营浅1井已证实凉高山组凉上段页岩储层产油效果好,预测有利面积2032km²;轻质油区主要分布在龙岗至大巴山前大部分地区,平安1井钻探证实凉高山组3套页岩储层发育且产出能力好,预测有利面积7570km²;凝析油气区主要分布在元坝—通江一带,预测有利面积3380km²。初步估算川东北地区页岩油资源量为26.75×10⁸t、页岩气资源量为1.72×10¹²m³(图9),展示了四川盆地侏罗系湖相页岩油气的巨大勘探潜力,有望成为页岩油气增储上产的新基地。

4 结论

(1) 平安1井首次在凉高山组获日产油112.8m³、日产气11.45×10⁴m³的高产突破,证实了川东北地区页岩油气的巨大勘探潜力,这是大庆古龙页岩油的观点、技术和工艺在四川盆地陆相页岩油的具体实践

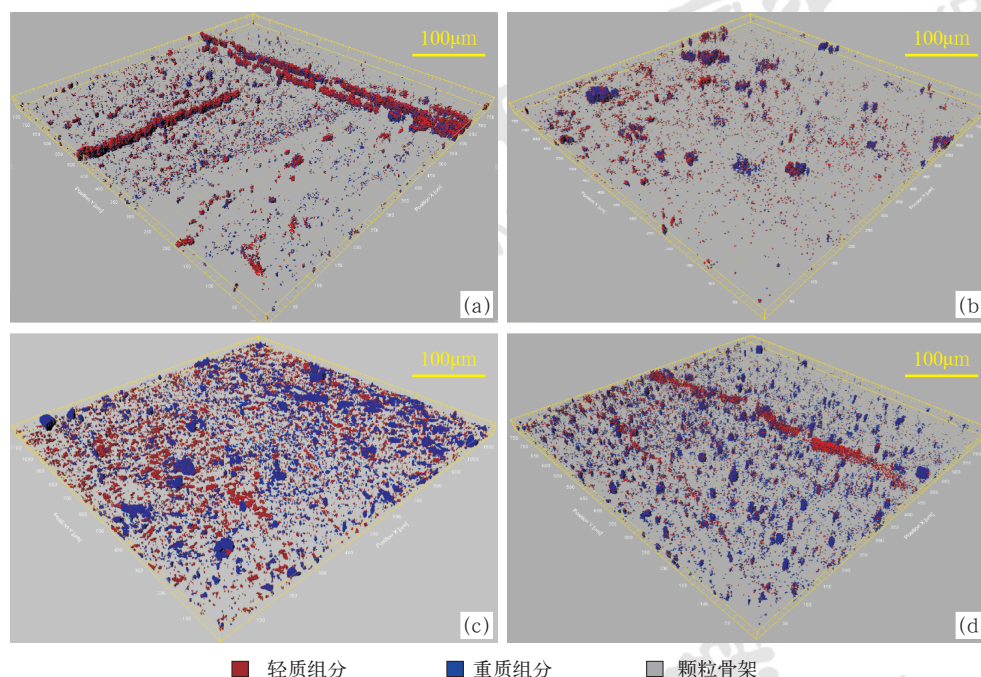


图 8 平安 1 井油气组分分布特征图

Fig.8 Distribution characteristics of oil and gas components in Well Ping'an 1

(a) 2858.1m, 轻质组分 1.36%, 重质组分 0.77%, 总含油量为 2.13%; (b) 2866.1m, 总含油量为 0.91%, 原油呈零散状富集分布于基质中; (c) 3002.9m, 总含油量为 3.16%, 轻质组分呈零散状分布于基质中, 重质组分呈团簇状富集; (d) 3005.6m, 总含油量为 1.37%, 轻质组分在页理缝和基质均有富集

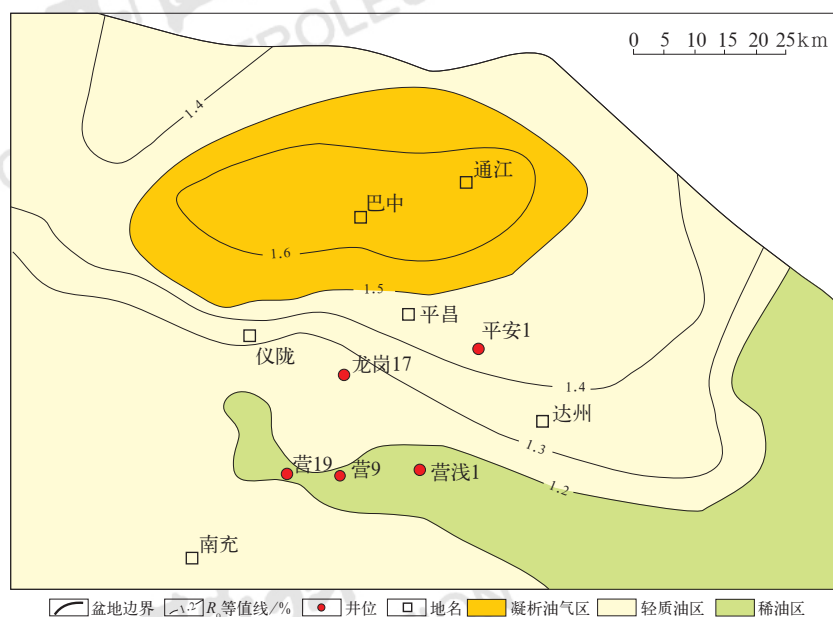


图 9 川东北地区页岩油气类型分布图

Fig.9 Distribution of shale oil and gas in northeastern Sichuan Basin

和成功复制。

(2) 平安 1 井钻探证实凉高山组凉上段发育 3 套优质页岩。凉高山组页岩富含有机质、成熟度高、转化率高, 是一套有效的烃源岩; 凉高山组页岩孔隙结构好, 裂缝发育, 是一套有效的储层; 凉高山组原油

品质好、气油比高、压力系数大, 是一套高效的产层。

(3) 综合评价川东北地区凉高山组页岩有利面积近 13000km², 估算页岩油资源量为 26.75 × 10⁸t、页岩气资源量为 1.72 × 10¹²m³, 资源前景广阔, 是今后页岩油气高质量发展的现实领域。

参考文献

- [1] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020,41(1):1-12.
Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, *et al.* Shale oil and gas revolution and its impact[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1):1-12.
- [2] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(6):1-12.
Jin Zhijun, Zhu Rukai, Liang Xinping, *et al.* Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021,48(6):1-12.
- [3] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, *et al.* Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,33(2):173-187.
- [4] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):1-13.
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues in the unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):1-13.
- [5] 付锁堂, 付金华, 牛小兵, 等. 庆城油田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2020,41(7):777-795.
Fu Suotang, Fu Jinhua, Niu Xiaobing, *et al.* Accumulation conditions and key exploration and development technologies in Qingcheng Oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020,41(7):777-795.
- [6] 许琳, 常秋生, 冯玲丽, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):649-660.
Xu Lin, Chang Qiusheng, Feng Lingli, *et al.* The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):649-660.
- [7] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3):20-34.
Wang Yuhua, Liang Jiangping, Zhang Jinyou, *et al.* Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020,39(3):20-34.
- [8] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2020,47(5):1059-1066.
Zhou Lihong, Zhao Xianzheng, Chai Gongquan, *et al.* Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: a case study of member 2 of paleogene Kongdian formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(5):1059-1066.
- [9] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆地相页岩油富集理论、勘探技术
- 术及前景: 以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2):143-162.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(2):143-162.
- [10] 聂海宽, 张培先, 边瑞康, 等. 中国陆相页岩油富集特征[J]. 地学前缘, 2016,23(2):55-62.
Nie Haikuan, Zhang Peixian, Bian Ruikang, *et al.* Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,23(2):55-62.
- [11] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. 石油学报, 2021,42(1):1-14.
Kuang Lichun, Hou Lianhua, Yang Zhi, *et al.* Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021,42(1):1-14.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [13] 刘合, 匡立春, 李国欣, 等. 中国陆相页岩油完井方式优选的思考与建议[J]. 石油学报, 2020,41(4):489-496.
Liu He, Kuang Lichun, Li Guoxin, *et al.* Considerations and suggestions on optimizing completion methods of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020,41(4):489-496.
- [14] 石林, 张鲲鹏, 慕立俊. 页岩油储层压裂改造技术问题的讨论[J]. 石油科学通报, 2020,5(4):496-511.
Shi Lin, Zhang Kunpeng, Mu Lijun. Discussion of hydraulic fracturing technical issues in shale oil reservoirs[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020,5(4):496-511.
- [15] 门相勇, 王陆新, 王越, 等. 新时代我国油气勘探开发战略格局与2035年展望[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):1-8.
Men Xiangyong, Wang Luxin, Wang Yue, *et al.* Strategic pattern of China's oil and gas exploration and development in the new era and prospects for 2035[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(3):1-8.
- [16] 蔡勋育, 刘金连, 张宇, 等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):31-42.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhang Yu, *et al.* Sinopec: Progress in Oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan period and prospects for the 14th Five-Year Plan period[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(1):31-42.
- [17] 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.
- [18] 蔡勋育, 刘金连, 赵培荣, 等. 中国石化油气勘探进展与上游业务发展战略[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):11-19.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhao Peirong, *et al.* Oil and gas

- exploration progress and upstream development strategy of Sinopec[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(1):11-19.
- [19] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J]. *石油科技论坛*, 2021,40(3):72-79.
- Zou Caineng, Zhao Qun, Wang Hongyan, *et al.* Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps China increase oil and gas reserves and production[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021, 40(3):72-79.
- [20] 朱彤, 包书景, 王峰. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. *天然气工业*, 2012,32(9):16-21,126-127.
- Zhu Tong, Bao Shujing, Wang Feng. Pooling conditions of non-marine shale gas in the Sichuan Basin and its exploration and development prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 2012,32(9):16-21,126-127.
- [21] 邹才能, 杨智, 王红岩, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. *地质学报*, 2019,93(7):1551-1562.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, *et al.* “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019,93(7):1551-1562.
- [22] 张道伟. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. *天然气工业*, 2021,41(8):34-45.
- Zhang Daowei. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade[J]. *Nature Gas Industry*, 2021,41(8):34-45.
- [23] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 四川盆地拔山寺向斜泰页1井页岩油气重大突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(2):21-32.
- Hu Dongfeng, Wei Zhihong, Liu Ruobing, *et al.* Major breakthrough of shale oil and gas in Well Taiye 1 in Bashansi syncline in the Sichuan Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(2):21-32.
- [24] 郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考: 以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2):18-28.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, *et al.* Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: a case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016,23(2):18-28.
- [25] 陈世加, 高兴军, 王力, 等. 川中地区侏罗系凉高山组致密砂岩含油性控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2014,41(4):421-427.
- Chen Shijia, Gao Xingjun, Wang Li, *et al.* Factors controlling oiliness of Jurassic Lianggaoshan tight sands in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(4):421-427.
- [26] 杨智, 侯连华, 陶士振, 等. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价[J]. *石油勘探与开发*, 2015,42(5):555-565.
- Yang Zhi, Hou Lianhua, Tao Shizhen, *et al.* Formation conditions and “sweet spot” evaluation of tight oil and shale oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015,42(5): 555-565.
- [27] 吉利明, 吴远东, 贺聪, 等. 富有机质泥页岩高压生烃模拟与孔隙演化特征[J]. *石油学报*, 2016,37(2):172-181.
- Ji Liming, Wu Yuandong, He Cong, *et al.* High-pressure hydrocarbon-generation simulation and pore evolution characteristics of organic-rich mudstone and shale[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(2):172-181.
- [28] 张士诚, 李四海, 邹雨时, 等. 页岩油水平井多段压裂裂缝高度扩展试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021,45(1):77-86.
- Zhang Shicheng, Li Sihai, Zou Yushi, *et al.* Experimental study on fracture height propagation during multi-stage fracturing of horizontal wells in shale oil reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021,45(1):77-86.
- [29] 魏永波, 李俊乾, 卢双舫, 等. 湖相页岩油甜点综合评价方法及应用: 以饶阳凹陷沙一下亚段页岩油为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(5):813-824.
- Wei Yongbo, Li Junqian, Lu Shuangfang, *et al.* Comprehensive evaluation method of sweet spot zone in lacustrine shale oil reservoir and its application: a case study of shale oil in Lower 1st member of the Shahejie Formation in the Raoyang Sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(5):813-824.
- [30] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. *石油学报*, 2016,37(10):1309-1322.
- Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Min, *et al.* Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(10):1309-1322.