

四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气 形成地质条件及勘探方向

杨跃明¹ 黄东² 杨光² 李育聪² 戴鸿鸣³ 白蓉²

1. 中国石油西南油气田分公司 2. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院 3. 西南石油大学地球科学与技术学院

摘要 随着认识的不断深入和工程技术的进步,页岩油气已经正式进入我国储量序列,正在有序开发。通过岩心、露头、钻井、测井以及大量的分析化验资料,对四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气的形成地质条件和资源潜力进行系统分析和评价。研究表明:①大安寨段湖相页岩主要发育在大一三亚段浅湖、半深湖泥,有机碳含量平均为1.15%,有机质类型均以II型干酪根为主,镜质体反射率介于0.8%~1.4%,处于成熟—高成熟阶段,页岩厚度大,生烃能力强,具备形成页岩油气的物质基础。②大安寨段页岩以黑色、灰黑色页岩与生物介壳灰岩不等厚互层为主,脆性矿物平均含量为63.4%含量较高;页岩孔隙度平均为5.92%,储集条件好,储层发育微米—纳米级孔隙,具备储集页岩油气的储集空间,有利于页岩储层的改造。③大安寨段湖相页岩油气具有埋藏浅、保存条件好、压力系数高等优越条件,按照有机碳含量大于1.5%的范围,计算页岩油资源量为 70×10^8 t,页岩气的资源量为 3.5×10^{12} m³,结合大安寨段页岩油气评价指标,优选出射洪—遂宁—南充—蓬安—仪陇—南部页岩油气勘探有利区近 1×10^4 km²,并建议在公山庙、龙岗地区开展先导试验工作。

关键词 四川盆地 早侏罗世—大安寨期 湖相 页岩油气 地质条件 资源量 有利区 先导试验

DOI: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.02.001

Geological conditions to form lacustrine facies shale oil and gas of Jurassic Daanzhai Member in Sichuan Basin and exploration directions

Yang Yueming¹, Huang Dong¹, Yang Guang¹, Li Yucong², Dai Hongming² and Bai Rong¹

(1. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: With continuous deepening understandings and advancing engineering technologies, shale oil and gas formally comes into the domain of China's reserves and has been developed in good order. Some geological conditions to form lacustrine facies shale oil and gas of Jurassic Daanzhai Member, Sichuan Basin, and resource potential were analyzed and evaluated systematically based on core, outcrop, drilling, and well-logging data. Results show that (1) this lacustrine-facies shale of Daanzhai Member is mainly developed in the shallow and semi-deep lake mud of $J_1dn_3^1$, with the TOC of 1.15% on average, the main type II kerogen, and the R_o of 0.8%-1.4%, indicating that it is in the stage of mature-high maturity with thick shale and strong hydrocarbon-generating capacity, also providing the material base to form shale oil and gas; (2) the shale of Daanzhai Member is mainly composed of black and grayish black shale interbedded with biological shell limestone in different thickness. Its content of fragile minerals is higher, averaging 63.4%. Its porosity averages 5.92%. Its reservoir conditions are good with developed micro- and nano-scale pores to act as reservoir space, which is favorable for the stimulation; and (3) this lacustrine facies shale oil and gas is superior with shallower burial depth, better preservation conditions, and higher pressure coefficient. In view that the TOC is lower than 1.5%, the calculated shale oil and gas resources achieve 70×10^8 t and 3.5×10^{12} m³, individually. Combined with some evaluation indexes, one favorable belt with about 10000 km², Shehong-Suining-Nanchong-Peng'an-Yilong-Nanbu area, is selected for shale-oil and shale-gas exploration. What's more, it is recommended to carry out pilot tests in two areas of Gongshanmiao and Longgang.

Keywords: Sichuan Basin; Early Jurassic Da'anzhai Period; Da'anzhai Member; Lacustrine facies; Shale oil and gas; Geological condition; Resource; Favorable area; Pilot test

0 引言

页岩油气作为一种非常规资源是目前国内外勘探开发的现实对象之一^[1-4]。近年来,中石油、中石化、壳牌等国际能源大公司,相继在四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩中探索性地开展油气勘探工作,见到一定成效。中石化在四川盆地西北部的元坝、东部的涪陵、兴隆场等地区大安寨段获得工业页岩油气流,中石油在四川盆地中西部的金华地区以及川中北部的龙岗地区钻获了页岩油气流,进一步展现出湖相大安寨段页岩油气广阔的勘探开发前景。目前已有学者对四川盆地侏罗系页岩油气开展初步探讨^[5-10],但总体处于起步阶段,对湖相页岩油气形成的地质条件、资源潜力认识还不够清晰。按照页岩油气研究方法^[11-13],系统开展湖相页岩地化特征、储层特征、资源评价等方面的研究,以期对湖相页岩油气的形成条件、资源潜力及勘探方向等深入分析奠定基础,从而有效指导四川盆地侏罗系湖相页岩油气的勘探开发工作。

1 地质背景

晚三叠世以后,四川盆地进入侏罗纪红色盆地演化阶段。此时四川盆地周缘被龙门山古陆、大巴山古陆、康滇古陆所包围,在此古构造—沉积背景下,早侏罗世大安寨时期主要发育内陆淡水湖相沉积。该时期是盆地侏罗系自流井组三次湖侵中规模最大、范围最广的一次。该时期在湖盆四周主要为一套紫红色、灰绿色泥岩夹粉砂岩或泥灰岩的滨湖相沉积地层,在盆地的西北和东北缘,由于紧邻古陆剥蚀区,陆源碎屑丰富,主要为一套含介壳粉砂岩、砂岩的河流相沉积地层。在湖盆中部主要沉积一套褐灰色—黑灰色介屑灰岩和深灰—黑色泥页岩的浅—半深水湖相沉积地层,由于该沉积相带远离物源区,水体环境较为安静,发育大量淡水介壳类生物,平面上大范围分布成层稳定的介屑灰岩与黑色泥页岩^[4-8]。根据地层岩性特征、电性特征、旋回特征可进一步将大安寨段自上而下划分为三个段,分别为大一亚段、大一三亚段和大三亚段,其中大三亚段为湖盆水进扩展期,大一三亚段为最大水进期,大一亚段为湖盆水退萎缩期(图1),纵向各个亚段呈现较为明显的非均质性;由于湖水水体的变化和湖盆的频繁振荡,空间上导致介壳灰岩、页岩频繁互层或侧向包裹接触,为页岩油气的生储组合

创造得天独厚的条件。

2 湖相页岩油气形成地质条件

2.1 页岩地球化学特征

1) 页岩有机碳含量

一般采用有机碳含量(*TOC*)定量评价烃源岩优劣,国内外大多数学者较为认可的泥质烃源岩有机碳含量下限为0.4%~0.6%^[14],而对于页岩气资源,由于其特殊的“自生自储”成藏机理,通常其有机碳含量下限要求更高。美国从事页岩气勘探开发的石油公司一般将有效页岩有机碳含量下限值确定为2.0%,四川下古生界页岩气的有效页岩有机碳含量下限值确定为1.5%^[11, 15-19]。

有机碳含量(*TOC*)越高,页岩生烃潜力越大,吸附油气含量也越高,因此有机碳含量(*TOC*)也是页岩油气重要的评价指标之一。根据盆地大安寨段618个岩心、野外样品岩石热解分析,有机碳含量分布在0.1%~4.27%,平均为1.15%。91.41%的样品有机碳含量分布在小于2%的范围内,大于2%的样品仅占9.59%,其中65.96%的样品分布在0.5%~1.5%之间;26%的样品有机碳含量高于1.5%,平均有机碳含量为2.6%(图2)。

总体上,四川盆地大安寨段页岩有机碳含量具有呈环带状围绕湖盆沉积中心分布的特征,其中湖盆中心主要分布在射洪—蓬溪—南充—蓬安—仪陇—南部—盐亭一带,有机碳含量普遍大于1.8%^[20](图3)。从页岩岩心实测结果分析可见,川中大安寨段湖相页岩烃源岩有机碳含量较高,为形成页岩油气提供良好的物质基础。

2) 页岩有机质类型

有机质类型是评价烃源岩生烃潜力的重要参数之一,评价干酪根母质类型有两种方法:有机地球化学与有机岩石学方法。样品分析表明,大安寨段烃源岩有机质以壳质组为主,含量介于60%~80%,并以腐殖无定形体为主;其次是腐泥组和镜质组,含量一般在20%左右;惰质组含量相对较低,一般不到10%。通过类型指数计算,有机质类型主要为II₂型和II₁型,极少量III型有机质。从岩石热解参数T_{max}—HI关系图版上分析,干酪根总体为II型,以II₁以及II₂型为主,从H/C—O/C的范氏图分析,干酪根类型与岩石热解参数得出的结论一致。此外,随着有机碳含量的增高,有机质类型逐渐变好,由II₂型向II₁型过渡(图4)。

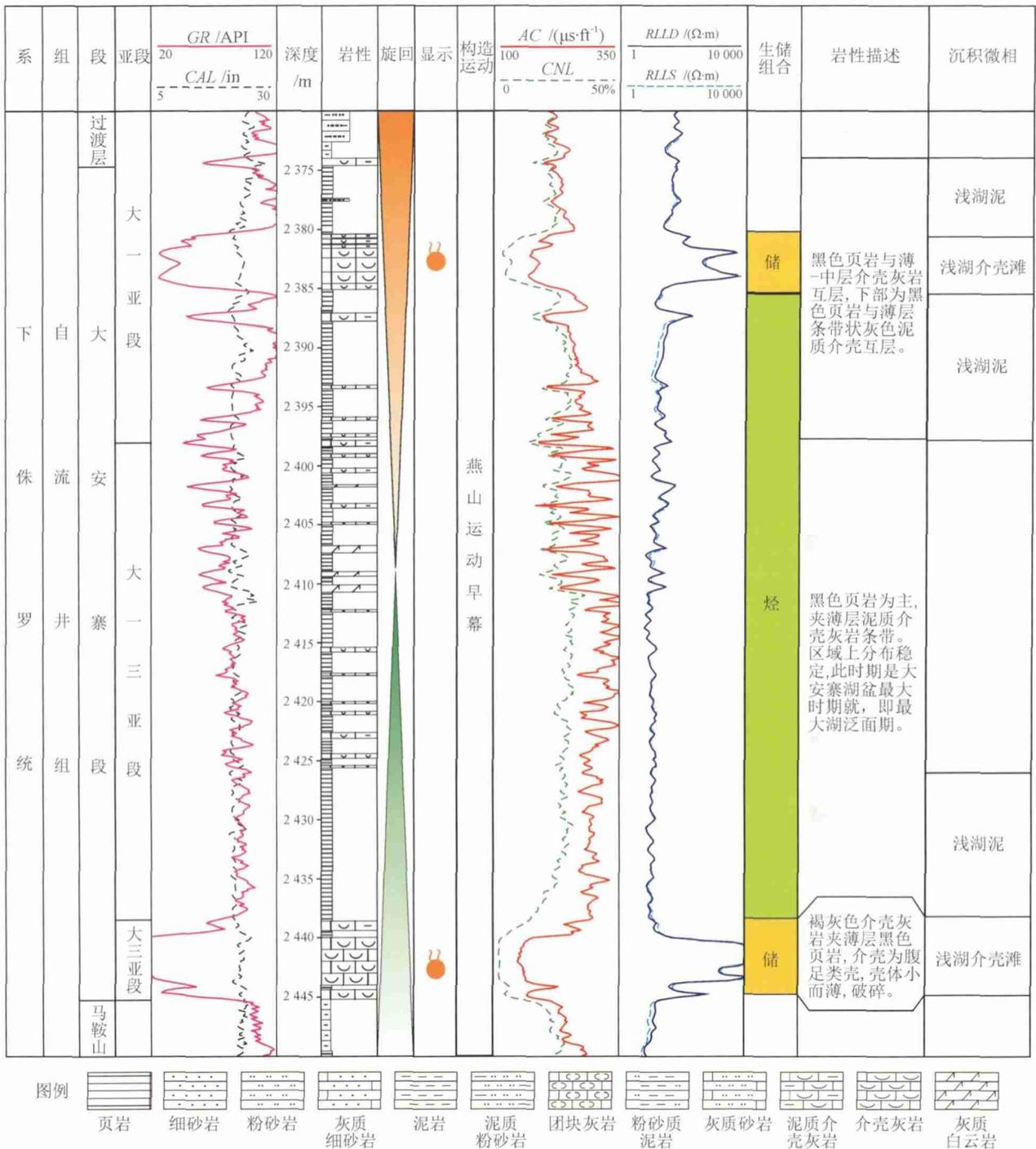


图 1 四川盆地侏罗系大安寨段综合柱状图

(注: 1 in=25.4 mm, 1 ft=0.304 8 m, 下同)

3) 页岩有机质成熟度

有机质成熟度是衡量有机质向烃类转化程度的参数, 烃源岩的有机质成熟度直接关系到烃源岩的实际生烃能力, 是评价某个地区或某一烃源岩系生烃量及资源前景的重要依据, 是判断有效油气源岩的基本参数之一。根据北美页岩油勘探经验, 一般认为页岩有机质成熟度范围在 0.7% ~ 1.1% 的具有较好的页岩油勘探开发潜力, 大于 1.3% 具有较好

的页岩气勘探开发潜力。总体看来盆地大安寨段页岩有机质成熟度主要分布在 0.9% ~ 1.5% 之间 (图 5), 自南往北随着埋藏深度的增加大安寨段页岩有机质成熟度不断增加, 绝大部分地区处于生油高峰期, 为页岩油的形成创造了条件; 川北地区大巴山前缘的仪陇—达州—通江一带有机质成熟度一般大于 1.3%, 有机质热演化程度较高, 处于生气阶段, 有利于页岩气的形成。

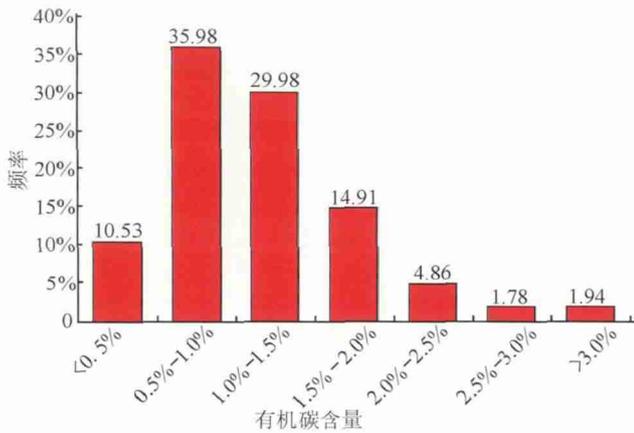


图2 四川盆地侏罗系大安寨段有机碳含量频率直方图

2.2 页岩储集性能

1) 页岩岩石类型特征

一般认为页岩为“细粒碎屑沉积”，其矿物组成主要为黏土、石英和有机质等，虽然为细粒碎屑沉积岩，但它在矿物组成、页岩结构及构造上却存在多样性。美国产气量最大的福特沃斯盆地的Barnett组页岩与其他几大页岩有所差别，它是一个复合体，主要有由硅质页岩、石灰岩和少量白云岩组成。硅质含量占体积的35%~50%，含量相对较多，而黏土矿物含量较少（一般小于35%）。美国其他主要页岩中的硅质含量相对较少，黏土矿物含

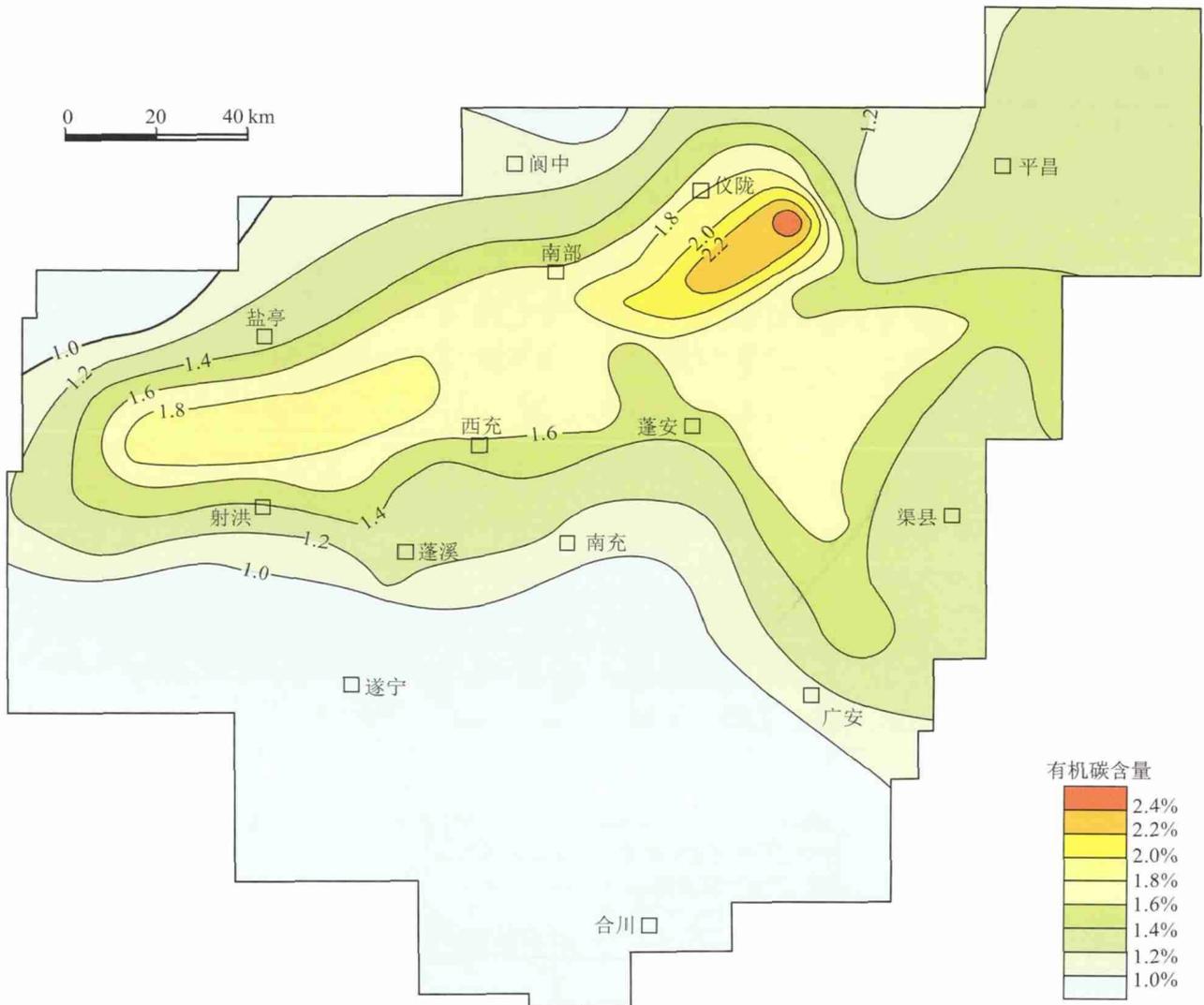


图3 四川盆地川中地区侏罗系大安寨段有机碳含量平面分布图

量较多。

四川盆地侏罗系大安寨段页岩以黑色、灰黑色页岩与生物介壳灰岩不等厚互层为主，普遍含丰富的瓣鳃、介形虫、叶肢介等水生生物化石及陆源高

等植物化石碎片，黄铁矿呈分散状分布。页岩颜色有黑色、灰色、绿色、紫红色和杂色等，其中黑色页岩在显微镜下为显微鳞片结构，微层构造，主要矿物为黏土、石英，少量方解石、氧化铁、炭屑和

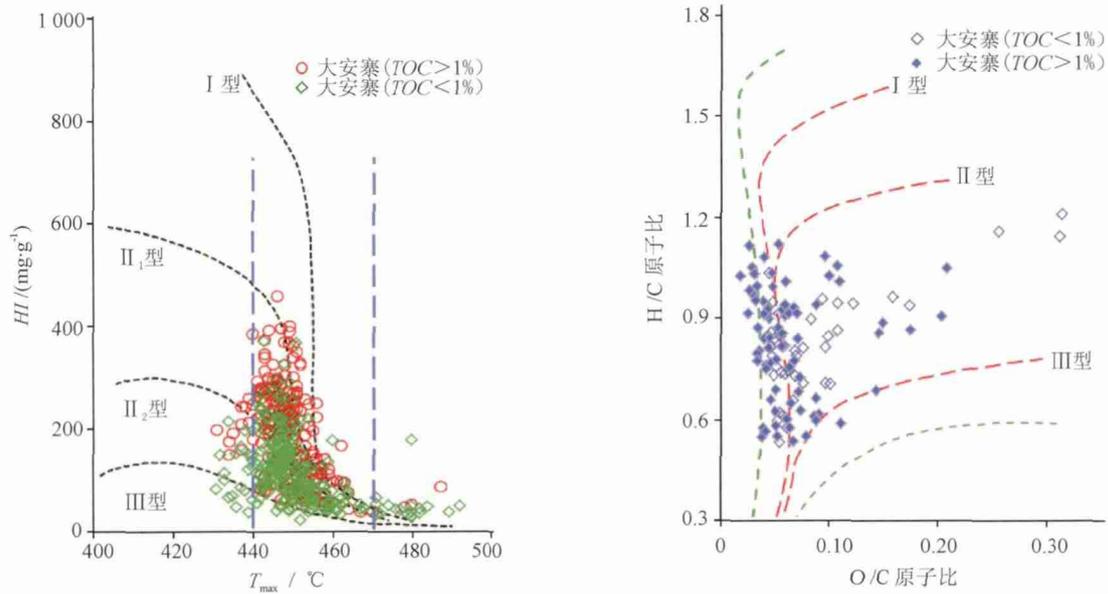


图 4 四川盆地侏罗系大安寨段页岩有机质类型判识图

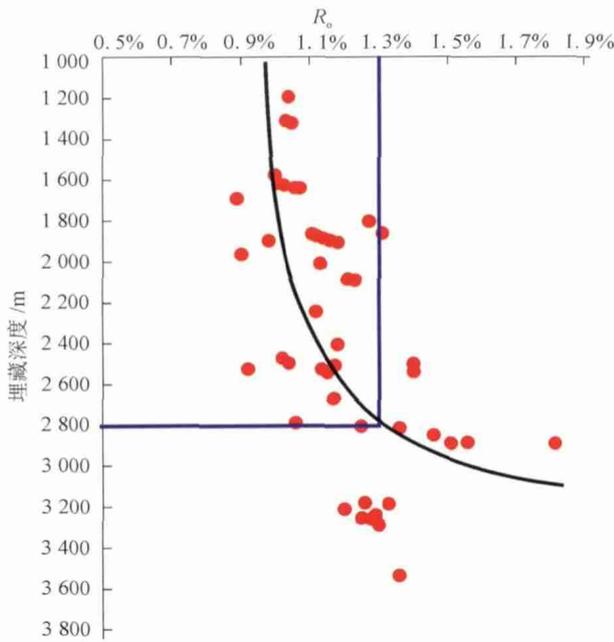


图 5 四川盆地侏罗系大安寨段页岩有机质热演化程度与埋深关系图

黄铁矿。黏土大部分水云母化，水云母呈鳞片状，定向分布具微层状构造，陆源碎屑石英和长石呈星点分布。在野外剖面常见到页岩呈片状分布，岩心搁置一段时间后页岩呈千层饼状（图 6）。平面上，总体具有由南向北页岩颜色不断加深、厚度增大，有机碳含量增加的特征。

2) 页岩岩石矿物学特征

页岩中矿物组分大类可分为三类：黏土矿物、碳酸盐岩类、其他矿物，其中黏土矿物主要为伊利石、绿泥石、蒙脱石、伊蒙混层等；碳酸盐岩类矿

物主要为方解石、白云石；其他矿物为石英、正长石、斜长石、黄铁矿等。各种矿物组分对页岩气藏的形成、储层物性、开采性具有重要的影响，其中硅质含量（包括石英、长石类）影响页岩的脆性及裂缝发育，对页岩气层的识别和商业化开采十分重要，而黏土矿物对页岩气具有良好的吸附能力，进而影响页岩的含气量，同时黏土矿物表面含有水分子，对页岩含水饱和度也有影响。长石易于形成溶蚀孔，是页岩中储集空间的一种重要形式。

根据 18 口井及 5 条野外剖面 141 个样品，X 衍射全岩分析表明，黏土含量平均为 36.6%，石英平均含量为 38.6%，方解石平均含量为 16.7%，斜长石平均含量为 4.2%，白云石平均含量为 2.1%，黄铁矿平均含量为 0.9%，菱铁矿平均含量为 0.7%，赤铁矿平均含量为 0.1%，正长石平均含量为 0.1%（图 7）。黏土矿物含量介于 10.77%~62.40%；脆性矿物含量介于 37.60%~89.17%，平均值为 63.40%。

3) 页岩物性特征

孔隙度是评价储层物性的重要参数之一。四川盆地侏罗系大安寨段半个多世纪的勘探开发对象主要为介壳灰岩，前人普遍认为介壳灰岩是主要的储集岩，对页岩的研究和认识程度较低。页岩储层要满足一定的物性条件，美国页岩储层孔隙度一般在 3%~5%，高者介于 10%~15%，长宁地区孔隙度一般在 1.55%~10.27% 之间。

从新取心井南充 7、南充 8 井，页岩样品物性分析（图 8），酒精法孔隙度最大值 8.12%，最小值 1.22%；氦气法孔隙度最大值 6.10%，最小值 1.36%，



图6 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩岩心照片



图7 四川盆地侏罗系页岩全岩矿物分析直方图

渗透率最大值 0.494 mD, 最小值 0.000 292 mD。

根据 108 个页岩物性分析, 酒精孔隙度介于 0.35 ~ 13.65%, 平均孔隙度为 5.8%, 孔隙度主要集中在 4 ~ 9% 之间。39 个页岩氦气孔隙度介于 0.64 ~ 7.32%, 平均孔隙度为 3.8%, 孔隙度主要集中在 3 ~ 6% 之间 (图 9)。与北美商业开采的页岩气孔隙度和渗透率相比, 区内大安寨段页岩物性总体较好, 是目前已发现大安寨段物性最好的储层, 页岩中发育的页理、裂缝及后期人工压裂

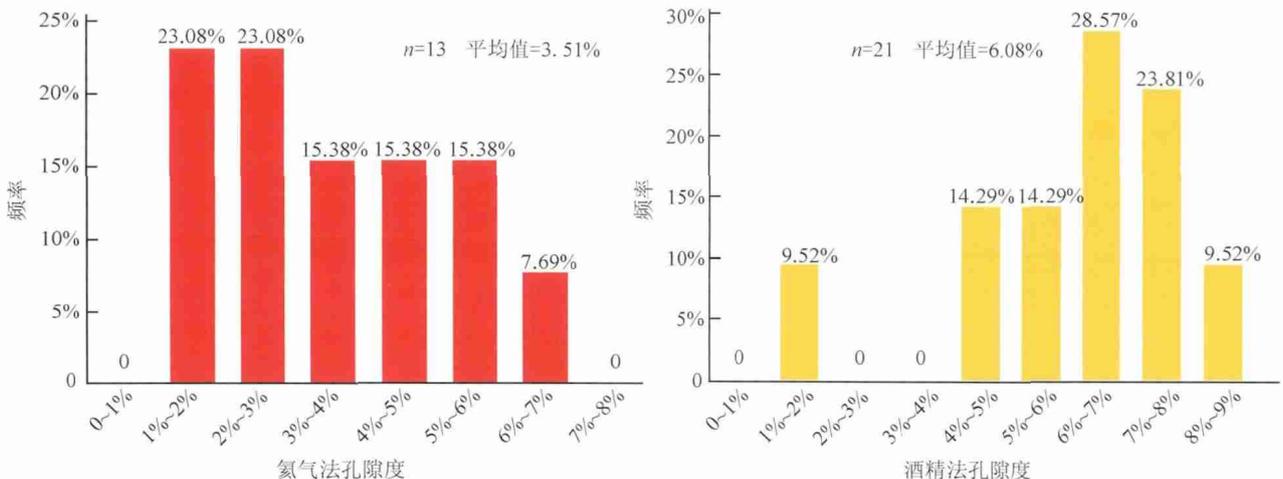


图8 南充7、南充8井大安寨段页岩岩心孔隙度分布直方图

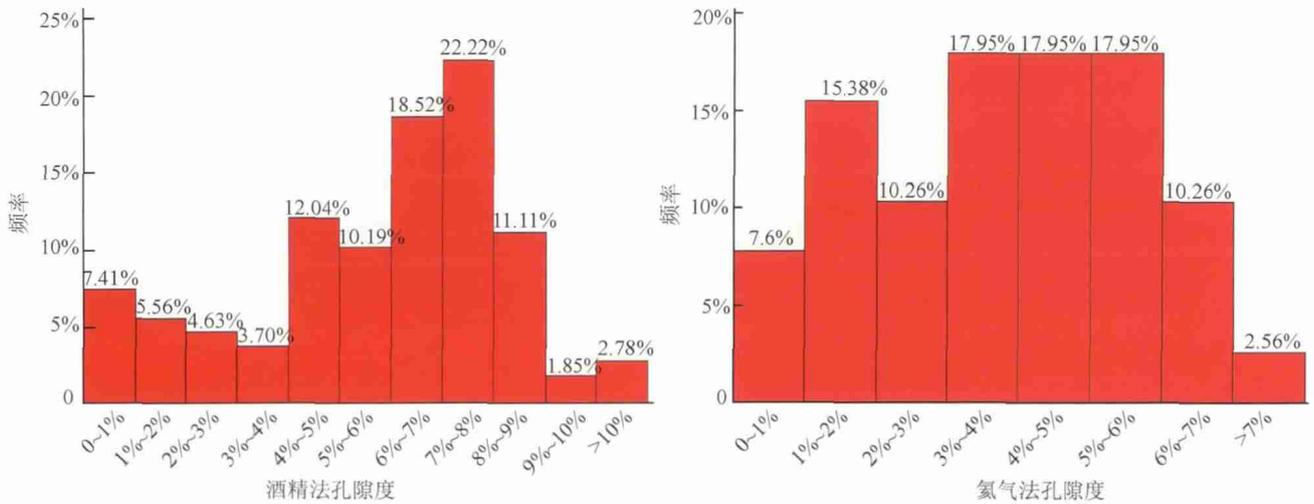


图 9 四川盆地侏罗系大安寨段页岩岩心物性直方图

造缝可大幅改善页岩储集层的物性，使其具备开采价值。

4) 储集空间类型

页岩作为储集层，具有多种储集空间类型。根据岩心、野外观察以及镜下薄片、场发射、扫描电镜等手段综合分析，大安寨段页岩微米级以上的原生孔隙大部分已消失。宏观储集空间，主要以裂缝为主，含少量溶蚀孔、洞；微观储集空间尺度较小，主要为微米—纳米级孔隙。从岩心扫描电镜分析结果可以看出，四川盆地中部地区大安寨段泥页岩微孔隙发育，按成因可将基质孔隙区分为有机质孔、次生溶蚀孔、晶间孔、矿物铸模孔以及黏土矿物间微孔等类型，总体看来无机孔的发育程度要高于有机孔（表 1），这可能与区内大安寨段页岩的有机质热演化程度低有关。

2.3 页岩地层压力特征

异常高压有利于页岩油气的产出。海相页岩气勘探开发实践揭示，页岩气产量与地层压力呈正相关关系，地层压力系数越高，页岩气产量越高。根据区内钻井资料分析，盆地大安寨段地层压力系数具有由南向北增高的趋势，地层压力系数高值区主要分布在川中北部的盐亭—西充—蓬安以北的浅湖和半深湖地区，地层压力系数普遍大于 1.2（图 10），异常高压有助于天然气和原油的流动，有利于油气的产出，为油气的稳产提供条件。

2.4 页岩埋藏深度及保存条件

页岩油气埋藏过深，开采成本过高，使页岩油气开采失去经济价值。目前页岩气单井产量和年产量较高的 Barrett 页岩普遍埋藏深度为 1 891 ~

2 591 m；加拿大核心页岩气开采区深度一般在 1 220 ~ 5 000 m 之间。总体而言，美国商业性开采的页岩气主要产自 7 个盆地中的 9 套页岩层，约三分之二在 800 ~ 3 200 m 之间。目前我国页岩气已经成功实现 3 500m 以浅的商业化勘探与开发，埋深在 3 500 ~ 4 500 m 的页岩气正在攻关突破阶段。

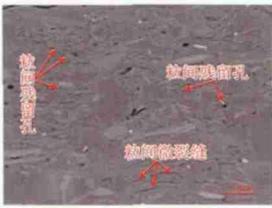
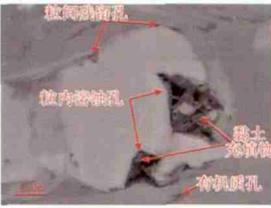
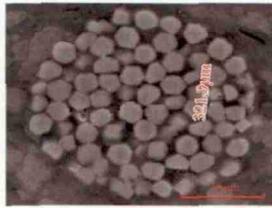
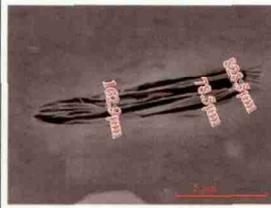
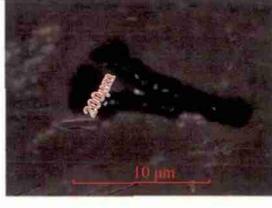
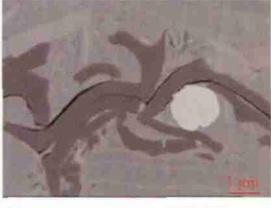
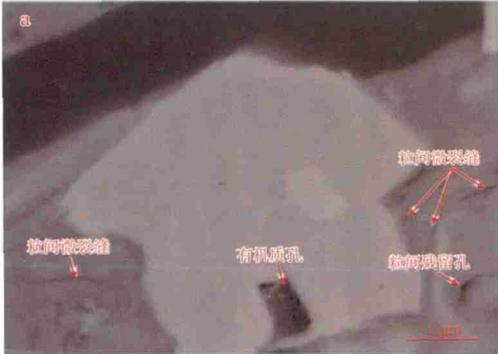
虽然埋藏深度不是发育页岩油气的决定因素，但埋藏深度直接决定页岩油气的勘探开发成本，从而决定油气藏的商业价值。与海相页岩气相比，川中地区侏罗系大安寨段页岩埋藏深度较浅，大安寨段页岩埋藏深度具有南浅北深的特征，总体看来大安寨段湖相页岩埋藏深度浅于 4 000 m，普遍在 1 500 ~ 2 500 m 之间，不超过 3 000 m（图 11），因此勘探开发成本较低，为商业开发奠定了基础。

虽然埋藏深度浅，但是大安寨段页岩保存条件好，一方面从目前的钻井揭示，大安寨段普遍具有异常高压特征，此外由于介壳灰岩致密化程度高，很好地将页岩进行夹持（图 12），能有效形成顶、底板，为大安寨段页岩油气的保存创造了天然屏障。

3 湖相页岩油气资源评价

前人对四川盆地侏罗系湖相页岩油气的资源量进行了估算，据韩克猷等（2015）研究表明，大安寨段泥页岩有机碳含量大于 1.5% 的分布面积为 26 000 km²，采用容积法估算页岩油地质资源量为 84 × 10⁸ t，技术可采资源量为 4.2 × 10⁸ t；李延钧

表1 四川盆地侏罗系大安寨段页岩储集空间特征表

| 储集空间类型 | 粒间残留孔 | 粒内溶孔 | 黄铁矿晶间孔 | 生物体腔粒内溶孔 |
|--------|--|---|---|---|
| 镜下照片 |  |  |  |  |
| 发育程度 | 高 | 高 | 低 | 低 |
| 储集空间类型 | 有机质纳米孔 | 有机质收缩缝 | 微裂缝 | 页理缝 |
| 镜下照片 |  |  |  |  |
| 发育程度 | 较高 | 较高 | 较高 | 高 |
| 储集空间类型 | 各类孔隙组合特征 | | 各类孔隙组合特征 | |
| 镜下照片 |  | |  | |

(2013)^[21-24] 利用容积法计算四川盆地自流井组湖相页岩气资源量介于 $3.8 \times 10^{12} \sim 8.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

在国内页岩油气资源评价方法调研的基础上, 结合近年来盆地侏罗系大安寨段湖相页岩的资料现状, 采用氯仿沥青“A”分析结果、页岩岩石热解资料、页岩热模拟资料和现场含气量测定等资料, 系统开展湖相页岩油气资源量的计算。此次计算范围结合前期试油结果确定, 对有效页岩为有机碳含量大于 1.5% 的范围进行计算, 其中页岩油采用生烃模拟法、热解法 (S1)、氯仿沥青“A”进行计算; 页岩气采用生烃模拟法、含气量法进行计算 (表 2)。计算结果表明, 页岩油资源量三种方法计算结果在 $32.03 \sim 97.65 \times 10^8 \text{ t}$ 之间, 平均为 $70 \times 10^8 \text{ t}$, 页岩气资源量两种方法计算结果在 $1.99 \sim 4.95 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 之间, 平均为 $3.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

4 湖相页岩油气勘探有利区

在国内外页岩油气有利区评价指标调研分析的基础上, 结合盆地侏罗系大安寨段湖相页岩的地质特征, 选取有机碳含量 (TOC) > 1.5%, 厚度 > 10 m, 页岩热解参数 (S1) > 2 mg/g, 热演化程度 (R_o) > 1.1%, 地层压力系数 > 1.1, 埋藏深度介于 1 800 m ~ 3 000 m 之间, 且位于浅湖、半深湖沉积相带, 优选出射洪—遂宁—南充—蓬安—仪陇—南部的页岩油气勘探有利区近 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中包含公山庙、龙岗、莲池、八角场、营山、金华等有利构造。

根据热演化程度差异, 大安寨段湖相页岩勘探开发对象可划分为页岩油、页岩油气、页岩气三大类。其中第一类为页岩油, 可将其与介壳灰岩致密油一起考虑, 进行整体勘探部署, 平面上主要分布在遂宁—南充地区, 该区页岩有机质碳含量普遍大于 1.5%, 有机质热演化程度介于在 0.8% ~ 1.1% ;

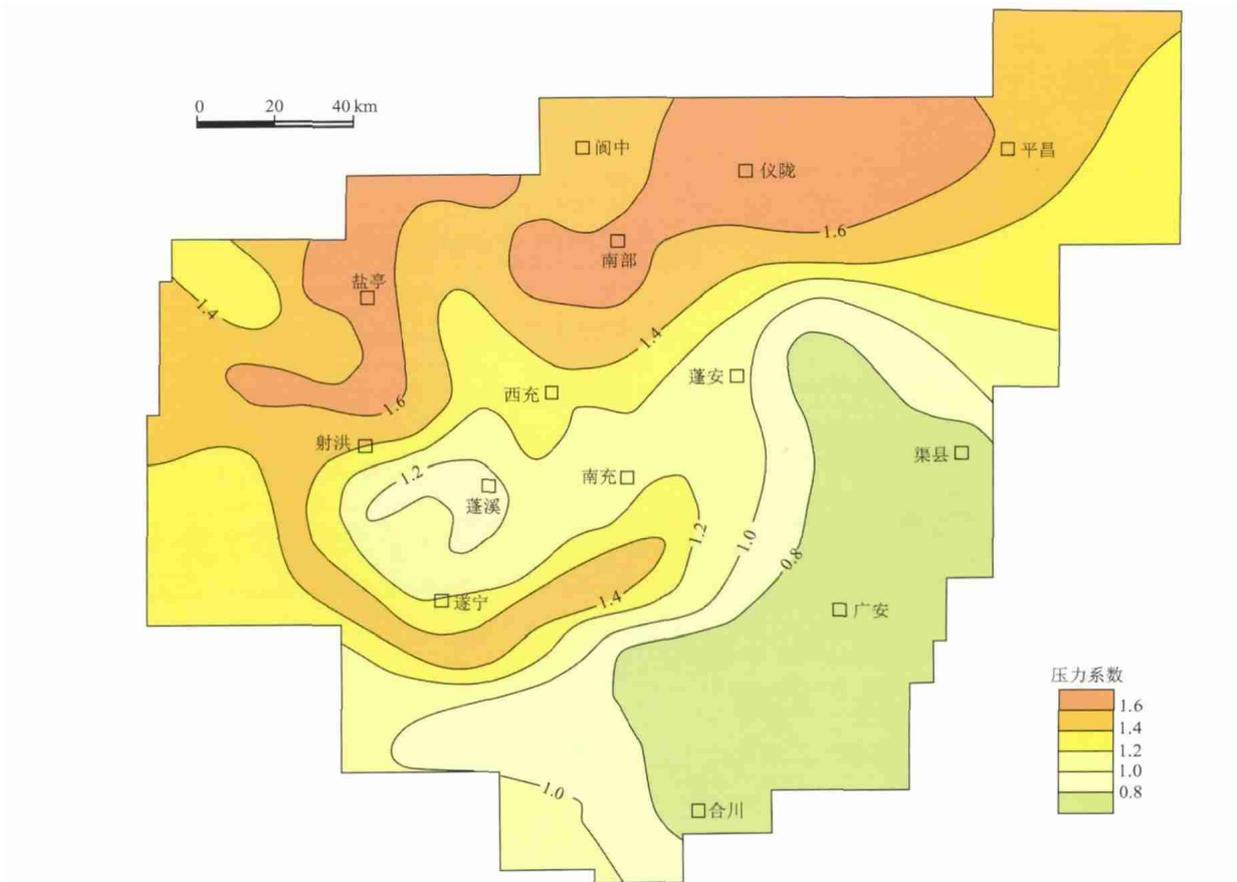


图 10 四川盆地川中地区侏罗系大安寨段地层压力系数分布图

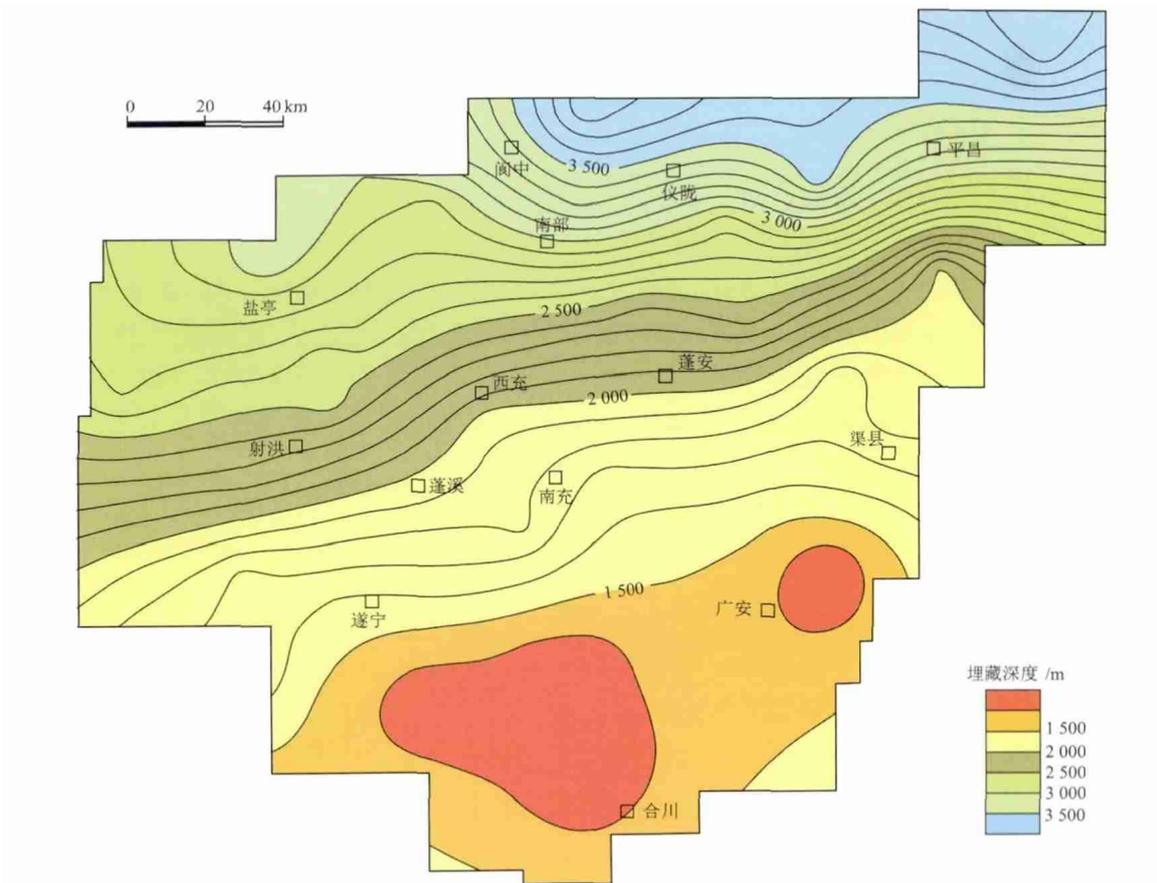


图 11 四川盆地川中地区侏罗系大安寨段顶界埋藏深度图

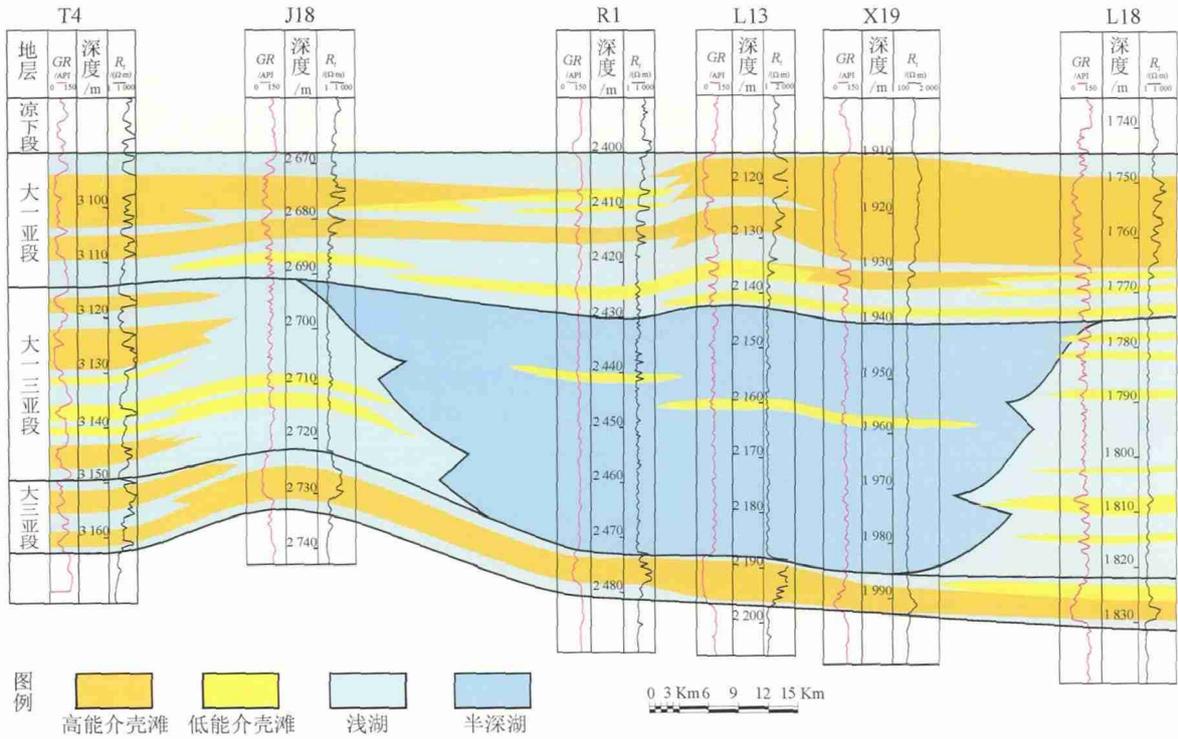


图 12 四川盆地川中地区大安寨段沉积相剖面图

表 2 四川盆地川中地区大安寨段湖相页岩油气资源量统计表

| 计算方法 | 页岩油 /10 ⁸ t | 页岩气 /10 ¹² m ³ |
|----------|------------------------|--------------------------------------|
| 生烃热模拟法 | 32.03 ~ 64.07 | 1.99 ~ 3.99 |
| 热解法 | 68.83 | |
| 氯仿沥青“A”法 | 97.65 | |
| 现场含气量法 | | 3.95 ~ 4.95 |
| 均值 | 70 | 3.5 |

第二类为页岩油气，平面上主要分布在南充—仪陇地区，该区有机碳含量普遍大于 1.5%，有机质热演化程度介于 1.1 ~ 1.3%，处于生油气高峰期；第三类为页岩气，平面上主要分布在仪陇—平昌地区，

该区有机碳含量普遍大于 1.5%，有机质热演化程度大于 1.3%，处于生气高峰期（图 13）。根据湖相页岩油气地质条件分析，结合目前钻井、测井、三维地震资料情况，建议在公山庙、龙岗地区开辟湖相页岩油气先导试验区，为湖相页岩油气规模效益开发奠定基础。

5 结论

1) 大安寨段湖相页岩主要发育在大一三亚段浅湖、半深湖泥，有机碳含量平均为 1.15%，有机质类型均以 II 型为主，镜质体反射率介于 0.8% ~ 1.4%，处于成熟—高成熟阶段，页岩生烃能力强，

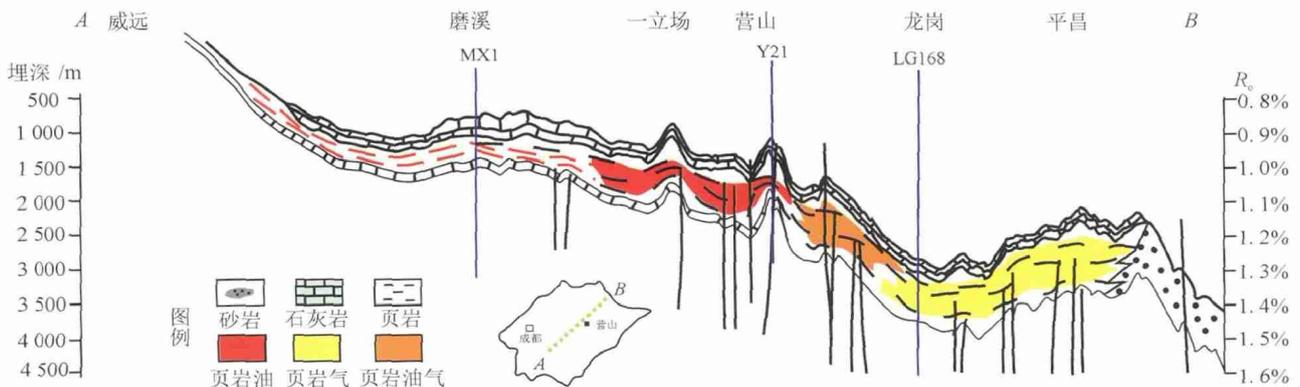


图 13 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气分布模式及有利区示意图

具备形成页岩油气的物质基础。

2) 大安寨段页岩以黑色、灰黑色页岩与生物介壳灰岩不等厚互层为主,脆性矿物平均含量为63.4%,含量较高;页岩孔隙度平均为5.92%,储集条件好,储层发育微米—纳米级孔隙,具备储集页岩油气的储集空间,有利于页岩储层的改造。

3) 大安寨段湖相页岩油气具有埋藏浅、保存条件好、地层压力系数高等优越条件,按照有机碳含量大于1.5%的范围,计算页岩油资源量为 70×10^8 t,页岩气的资源量为 3.5×10^{12} m³。结合大安寨段页岩油气评价指标,优选出射洪—遂宁—南充—蓬安—仪陇—南部页岩油气勘探有利区近 1×10^4 km²,建议在公山庙、龙岗地区开展先导试验工作。

参 考 文 献

- [1] 黄东,杨光,韦腾强,等. 川中桂花油田大安寨段致密油高产稳产再认识[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 23-32.
Huang Dong, Yang Guang, Wei Tengqiang, et al. Recognition of high yield and stable yield factors of Daanzhai tight oil, Guihua oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(5): 23-32.
- [2] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 8-17.
Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and unconventional oils in the central-northern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8-17.
- [3] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 324-331.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 324-331.
- [4] 汪少勇,李建忠,李登华,等. 川中地区公山庙油田侏罗系大安寨段致密油资源潜力分析[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 477-486.
Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Li Denghua, et al. The potential of tight oil resource in Jurassic Da'anzhai Formation of the Gongshanmiao oil field, central Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 477-486.
- [5] 蒋裕强,漆麟,邓海波,等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 22-26.
Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 22-26.
- [6] 杜敏,陈盛吉,万茂霞,等. 四川盆地侏罗系源岩分布及地化特征研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(2): 15-17.
Du Min, Chen Shengji, Wan Maoxia, et al. Study on distribution and geo-chemical features of Jurassic source rocks in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2005, 28(2): 15-17.
- [7] 李军,王世谦. 四川盆地平昌—阆中地区侏罗系油气成藏主控因素与勘探对策[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 16-21.
Li Jun & Wang Shiqian. The main factors controlling hydrocarbon accumulation in the Jurassic of Pingchang—Langzhong area in the Sichuan Basin and its exploration strategies[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 16-21.
- [8] 王世谦,胡素云,董大忠. 川东侏罗系——四川盆地亟待重视的一个致密油气新领域[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 22-29.
Wang Shiqian, Hu Suyun & Dong Dazhong. Jurassic tight oil & gas resources in East Sichuan Basin: A new exploration target[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 22-29.
- [9] 柳妮,林良彪,陈洪德,等. 四川盆地川西北地区侏罗系自流井组大安寨段页岩气聚集条件[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1664-1672.
Liu Ni, Lin Liangbiao, Chen Hongde, et al. Shale gas accumulation conditions in Daanzhai Member of lower Jurassic Ziliujing Formation in the northwest of Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1664-1672.
- [10] 李延钧,冯媛媛,刘欢,等. 四川盆地湖相页岩气地质特征与资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 423-428.
Li Yanjun, Feng Yuanyuan, Liu Huan, et al. Geological characteristics and resource potential of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 423-428.
- [11] 卢双舫,黄文彪,陈方文,等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [12] 黄东,杨跃明,杨光,等. 四川盆地侏罗系致密油勘探开发进展与对策[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 304-310.
Huang Dong, Yang Yueming, Yang Guang, et al. Countermeasure and progress of exploration and development of Jurassic tight oil in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(3): 304-310.
- [13] 邹才能,张国生,杨智,等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.
Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399.
- [14] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-

350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.
- [15] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min & Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129-136.
- [16] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 13-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 13-26.
- [17] 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.
- [18] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究 [J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(2): 67-76.
Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Wu Xiaozhi, et al. Method for assessment of tight oil resources[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(2): 67-76.
- [19] 邱振, 邹才能, 李建忠, 等. 非常规油气资源评价进展与未来展望 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 238-246.
Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: progress and future prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 238-246.
- [20] 黄东, 段勇, 李育聪, 等. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究——以四川盆地侏罗系大安寨段为例 [J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(6): 38-45.
Huang Dong, Duan Yong, Li Yucong, et al. Study on the TOC lower limit of shale oil and gas of freshwater lake facies: a case study on the Jurassic Da'anzhai member in the Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(6): 38-45.
- [21] 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.
- [22] 岳鹏升, 石乔, 岳来群, 等. 中国页岩气近期勘探开发进展 [J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(3): 38-44.
Yue Pengsheng, Shi Qiao, Yue Laiqun, et al. The latest progress of shale gas exploration and development in China[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(3): 38-44.
- [23] 张木辰, 冯辉, 瓮纪昌, 等. 河南海陆过渡相页岩储集特征及含气性初探 [J]. *天然气勘探与开发*, 2018, 41(2): 37-46.
Zhang Muchen, Feng Hui, Weng Jichang, et al. Reservoir characteristics and gas-bearing potential of transitional-facies shale, Henan Province[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(2): 37-46.
- [24] 肖继林, 魏祥峰, 李海军. 涪陵海相页岩气和元坝—兴隆场湖相页岩气富集条件差异性分析 [J]. *天然气勘探与开发*, 2018, 41(4): 8-17.
Xiao Jilin, Wei Xiangfeng & Li Haijun. Difference of accumulation conditions between Fuling marine shale gas and Yuanba-Xinglongchang lacustrine shale gas[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2018, 41(4): 8-17.

(修改回稿日期 2019-05-21 编辑 张闻林)



作者简介: 杨跃明, 1963年生, 教授级高级工程师, 博士; 主要从事油气勘探开发研究及技术管理工作。地址: (610051) 四川省成都市成华区府青路一段3号。E-mail: yangym@petrochina.com.cn