

四川盆地中部侏罗系大安寨段 含有机质泥质介壳灰岩储层的认识及其意义

倪超¹, 郝毅¹, 厚刚福¹, 谷明峰¹, 张力涛²

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油大学(北京))

摘要 四川盆地中部下侏罗统大安寨段可划分为三个亚段,主要由暗色泥页岩、结晶介壳灰岩、泥质介壳灰岩三种岩性构成。暗色泥页岩形成于深湖—半深湖相环境,是主要的烃源岩,滨浅湖高能滩相结晶介壳灰岩一向被认为是主要储层,其储集空间以裂缝为主。露头地质调查、岩心和薄片观察、物性资料及试油资料的分析表明,浅湖—半深湖较低能滩相含有机质泥质介壳灰岩是主要的储集层和产层,单层厚度薄,但累积厚度较大,分布面积广,常夹于暗色泥页岩中,源储一体,更有利于成藏。这类泥质介壳灰岩的壳间孔构成了主要的储集空间,壳间孔平行于壳体的长轴方向排列,并常见黑色有机质充填。认为四川盆地大安寨段的油气勘探方向可由结晶介壳灰岩向含有机质的泥质介壳灰岩拓展,浅湖—半深湖较低能滩沉积相带可成为新的勘探领域。初步预测大安寨段上部的一亚段新增有利勘探面积 6 100 km²,中部的一三亚段新增有利勘探面积 6 600 km²。

关键词 四川盆地中部; 下侏罗统; 大安寨段; 介壳灰岩; 碳酸盐岩储集层; 储层特征

中图分类号: TE112.23 **文献标识码**: A

1 概述

四川盆地中部地区,中—下侏罗统分布面积约 18×10⁴ km²,是主要的石油勘探区,自 1958 年以来经历了 50 多年的石油勘探历史。该区中—下侏罗统自下而上可分为自流井组、凉高山组和沙溪庙组,共发现 5 套含油气层组(图 1)。中—下侏罗统主要发育砂岩和石灰岩两类储层,储层普遍具特低孔渗性的特征。砂岩储层主要发育于凉高山组及沙溪庙组一段,孔隙度普遍小于 5%,渗透率小于 (0.1~1)×10⁻³ μm²; 石灰岩储层主要发育于自流井组大安寨段,孔隙度普遍小于 1%,渗透率小于 0.1×10⁻³ μm²。油气层大面积分布,具有非常规的连续型分布特征。地层水不活跃,油藏未发现边、底水。截至 2010 年底,大安寨段共试油井 933 口,获工业油气井 541 口(其中低产油气井 191 口),探井成功率 58%。目前,大安寨段年产原油 8.16×10⁴ t,占各层段年产油总量的 74%,是川中地区石油开发的主产层。

由于自流井组大安寨段灰岩储层的岩石类型、

有效性、特征和成因不清,制约了对有效储层分布规律的认识和勘探的持续推进。本文通过露头地质调查、岩心和薄片观察、物性资料分析,尤其是试油资料的分析,认为常常含有一定的浅湖—半深湖较低能滩相的含黑色有机质泥质或含泥介壳灰岩,是主要的储集层和产层,而并非是原先认为的结晶介壳灰岩。这一认识对拓展四川盆地大安寨段的油气勘探有重要的意义。

2 含有机质泥质介壳灰岩的发现

大安寨段自下而上可划分为三个亚段,即三亚段、一三亚段和一亚段,构成湖水向上变浅的旋回(图 2)。由于取心资料少,以前见到的岩石类型主要由暗色泥页岩、结晶介壳灰岩组成,夹少量含泥或泥质介壳灰岩。暗色泥页岩形成于深湖—半深湖环境,是本区主要的烃源岩,在三个亚段均有发育,以大石 13 井和小 8 井为代表。结晶介壳灰岩发育于滨浅湖区,代表高能滩相沉积,以角 107 井和文 10 井为代表,主要发育于一亚段和一三亚段,是主要的储集层^[1]。

收稿日期: 2011-10-27; 改回日期: 2012-03-22

倪超: 1976 年生, 硕士, 工程师。2000 年毕业于中国石油大学(华东), 现主要从事石油地质、层序地层学以及油气成藏方面的研究。
通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路 920 号; 电话: (0571)85224999

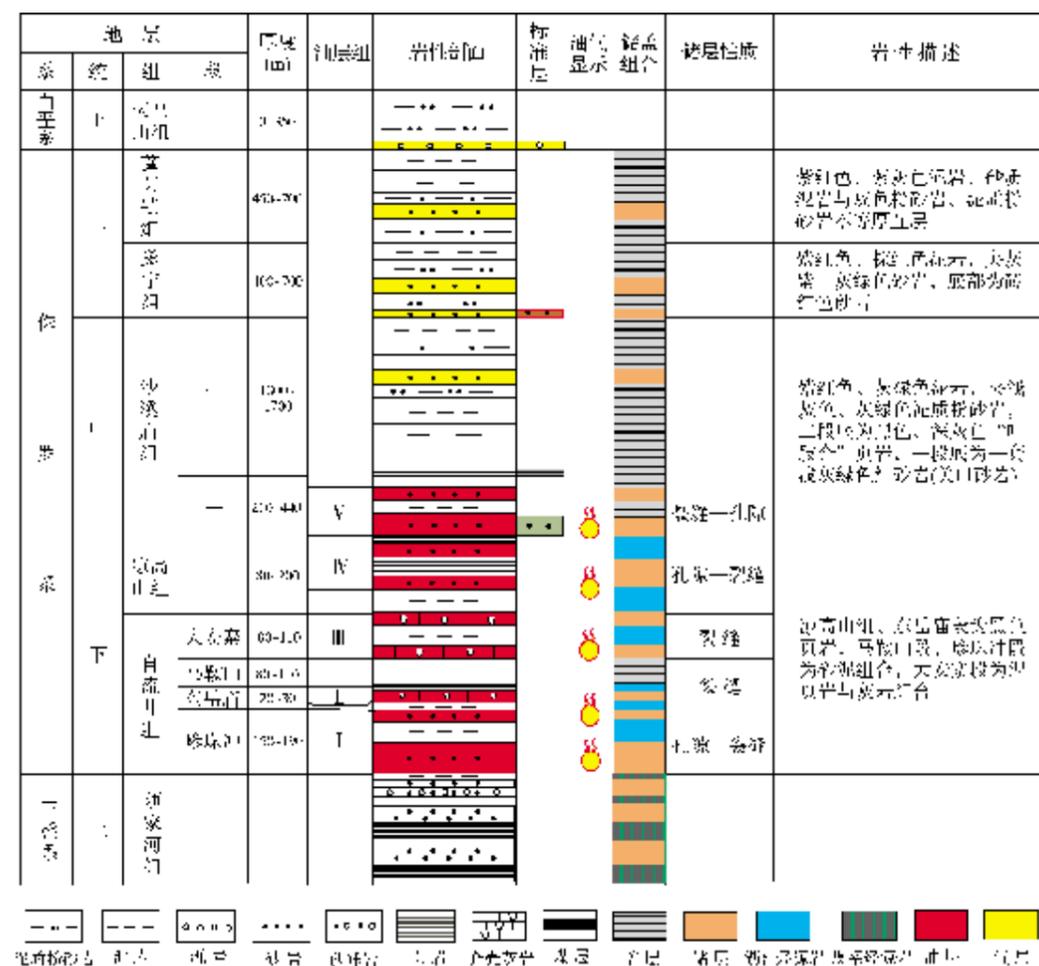


图1 四川盆地中部中一下侏罗统地层及生储盖组合综合柱状图

2.1 结晶介壳灰岩特征

储层特征研究揭示, 结晶介壳灰岩岩性致密, 块状为主, 孔隙度一般小于2%, 平均1.04%; 渗透率一般 $(0.01\sim 2.0)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 平均 $0.53\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 储集空间以裂缝为主, 有少量沿缝发育的溶孔(图3a, 3b), 属特低孔隙度和特低渗透率的裂缝型储层。原始介壳组构经溶解、胶结或晚期重结晶作用, 其壳体结构被破坏, 介壳边界模糊, 仅见层状构造的遗迹(图3c, 3d)。方解石质壳体表面可见到少量分布不均的微米(μm)—纳米(nm)级的溶蚀孔隙, 壳间多被方解石胶结^[2], 或充填泥微晶方解石, 见少量晶间微孔, 孔隙不发育(图3e, 3f)。但大安寨段油层累计产油量最大达 $398\times 10^4\text{t}$ (占川中石油总产量的

83%)(以川中桂花油田为典型代表, 多数井虽然低产, 但稳产时间可达二三十年以上), 这与裂缝性储层的认识是相矛盾的。

2.2 含有机质泥质介壳灰岩与结晶介壳灰岩的特征区别

为了搞清楚大安寨段灰岩储层的岩石类型、有效性、特征以及成因, 笔者在宣汉七里峡等地开展了野外地质调查, 以弥补岩心资料的不足。通过露头地质考察, 笔者在大安寨段较低能相带的暗色泥页岩中发现了大量薄层或条带状的含泥或泥质介壳灰岩(图4, 图2)。这类介壳灰岩具有欠压实特征, 岩石疏松, 孔隙相对发育, 为相对优质的储层。

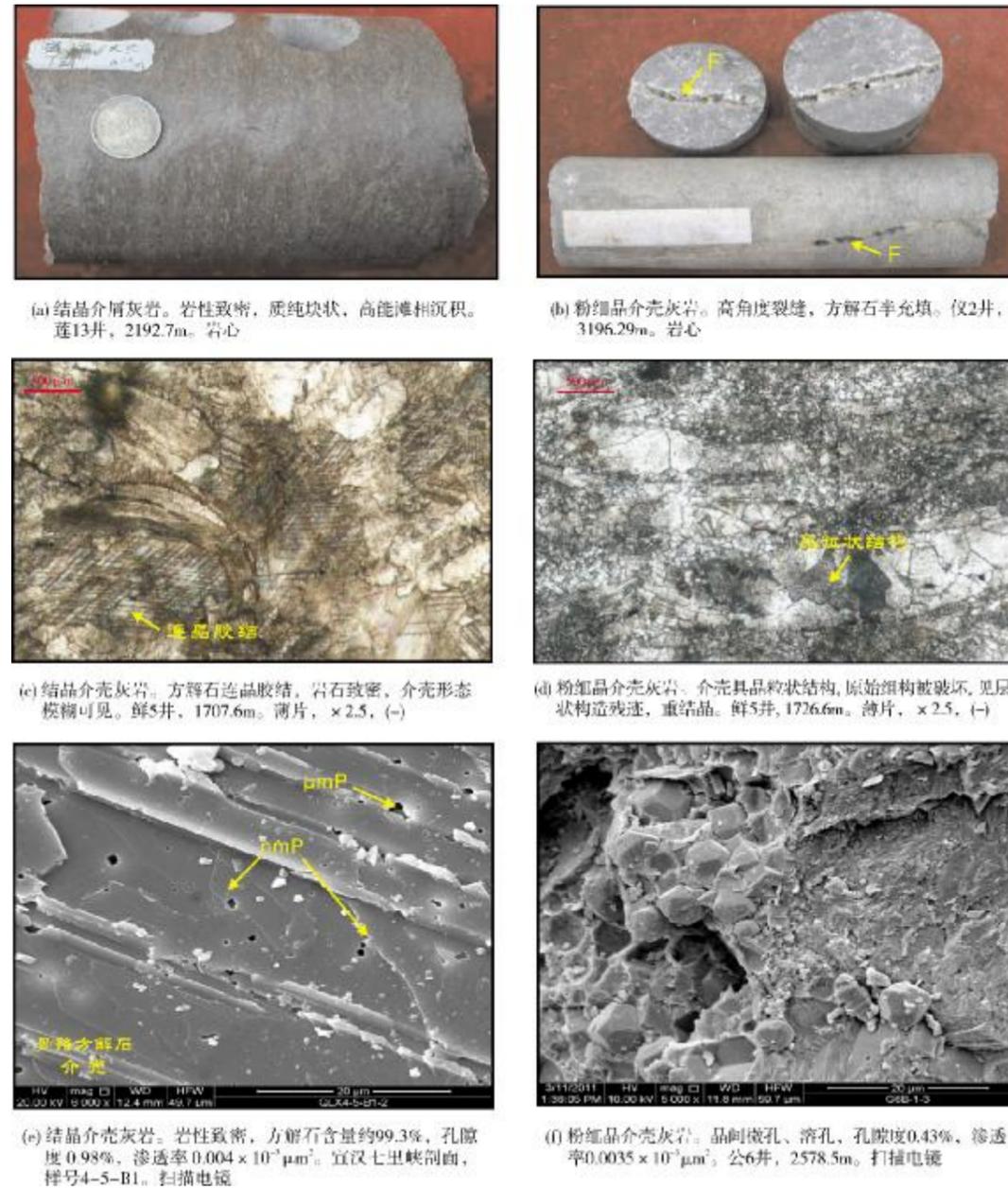


图3 四川盆地中部大安寨段结晶介壳灰岩储层特征

F 裂缝；P 孔隙； μmP 微米级孔隙； nmP 纳米级孔隙

或少见方解石胶结，壳体之间的孔缝主要被有机质充填(图4d, 4e)。

在露头观察的基础上，再对岩心进行重新观察，在半深湖—深湖相对较低能滩环境的井(如大石13井、小8井、聚1井)中同样发现了这套含有机质泥质介壳

灰岩，而在滨浅湖高能滩相带的井(如文10井和角107井)中则以结晶介壳灰岩为主，夹少量的泥质介壳灰岩。

综上所述，大安寨段由暗色泥页岩、结晶介壳灰岩、含有机质泥质介壳灰岩这三种岩性构成，其侧向

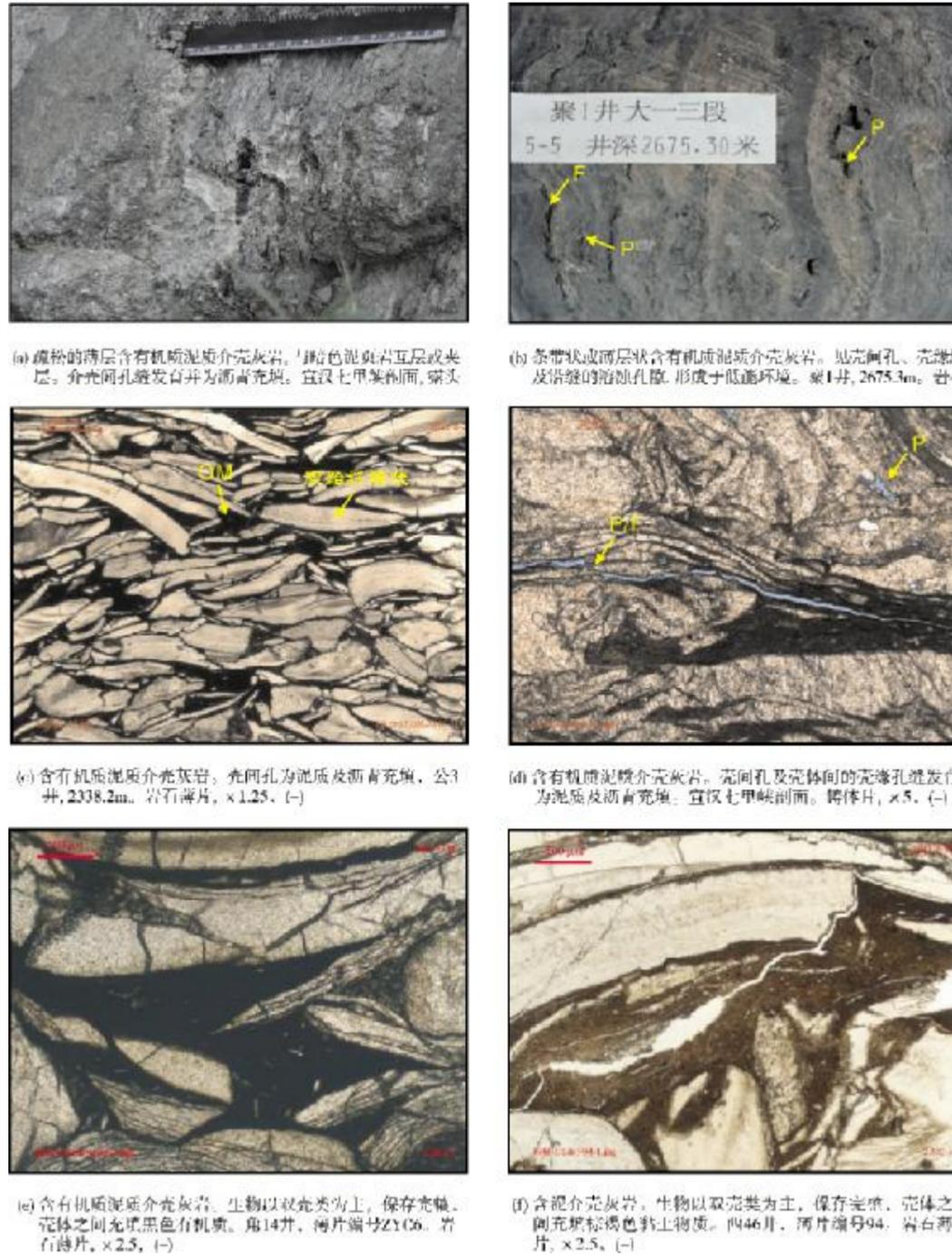


图4 四川盆地中部大安寨段泥质介壳灰岩储层特征

P 孔隙; F 裂缝; OM 有机质

及垂向的岩相变化关系见图5。在浅湖区,以结晶介壳灰岩和含有机质泥质介壳灰岩组合为特征,两者

的间互层代表了湖平面的变化。在半深湖区,以暗色泥页岩、含有机质泥质介壳灰岩组合为特征,两者的

间互层同样代表了湖平面的变化,而且可以与滨浅湖区的湖平面升降旋回作很好的对比。在深湖区,以暗色泥页岩为主,夹少量的含有机质泥质介壳灰岩薄层。

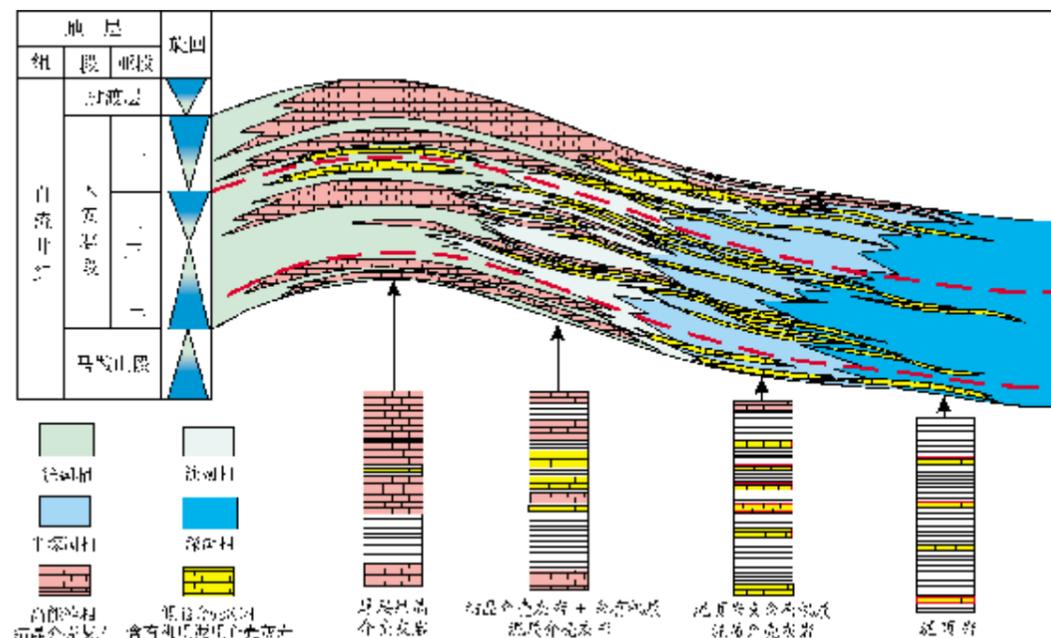


图5 四川盆地中部下侏罗统大安寨段湖相沉积不同相带岩性组合模式图

3 含有机质泥质介壳灰岩储层特征

含有机质泥质介壳灰岩的储集空间主要表现为沿壳层间发育有壳间或层间孔隙以及溶蚀孔隙(图4b)。另外由于介壳多顺层分布,从而易于形成各种层理缝、壳缘缝等,特别是钻井取心过程中,由于压力的骤降,易使介壳层顺层理张裂形成水平缝。由于含有机质泥质介壳灰岩多发育在欠压实的半深湖泥岩区,其压实程度不强,受构造作用易形成疏松状层间缝和水平缝(图6a)。在七里峡露头剖面,大安寨一三亚段暗色泥页岩所夹的薄层含有机质泥质介壳灰岩中见到顺层分布的孔缝,并为沥青充填(图4a),这进一步揭示了这类孔缝是有效的储集空间。

镜下观察揭示,这种含有机质泥质介壳灰岩的壳间孔隙和壳缘缝非常发育,壳体间常常充填黑色有机质或黏土,基本未见亮晶胶结物,并且沿壳体间的原生孔隙和壳缘缝可见壳体的溶蚀现象(图4d),是一种重要且有效的储集空间。

含有机质泥质介壳灰岩储层具有明显的特殊性,利用扫描电镜和CT扫描技术对这类储层的微观结构进行分析,发现孔隙主要在破碎的介壳之间发

育和分布,而且这种壳体间的孔隙具有定向展布的特征,其方向性与介壳的排列方式有关(图6b)。另外,通过实测和CT扫描计算,顺壳体展布方向的壳间孔隙和连通孔隙的喉道同属于微米级,即孔隙半径平均为 $5.813\ \mu\text{m}$ (最小 $0.775\ \mu\text{m}$,最大为 $34.14\ \mu\text{m}$),而相对应的喉道半径平均为 $4.501\ \mu\text{m}$ (最小 $0.736\ \mu\text{m}$,最大为 $26.74\ \mu\text{m}$)。并且,孔喉整体上呈明显的“层状”结构特征,水平方向上孔隙/微孔连通性好,均质性强,计算的CT水平渗透率为 $2 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,孔隙度为5.7%,与实测值近似;而垂直于介壳层面方向上,因受壳体阻挡,连通性不好(图6c)。这种介壳之间的呈水平排列的壳间孔隙构成了含有机质泥质介壳灰岩的主要储集空间。

含有机质泥质介壳灰岩单层厚度通常小于1m,常在同一个薄片中同时见到有机质和泥质充填于介壳间的孔隙中,或主要以泥质为主,壳体也是以文石质为主,介壳之间充填物有机质含量较低,电子探针能谱揭示,充填物主要为铝硅酸盐类黏土矿物(图6d,6e),在普通光学镜下其特征也很明显,往往呈棕褐色(图4f),宏观上主要表现为含泥或泥质介壳灰岩。

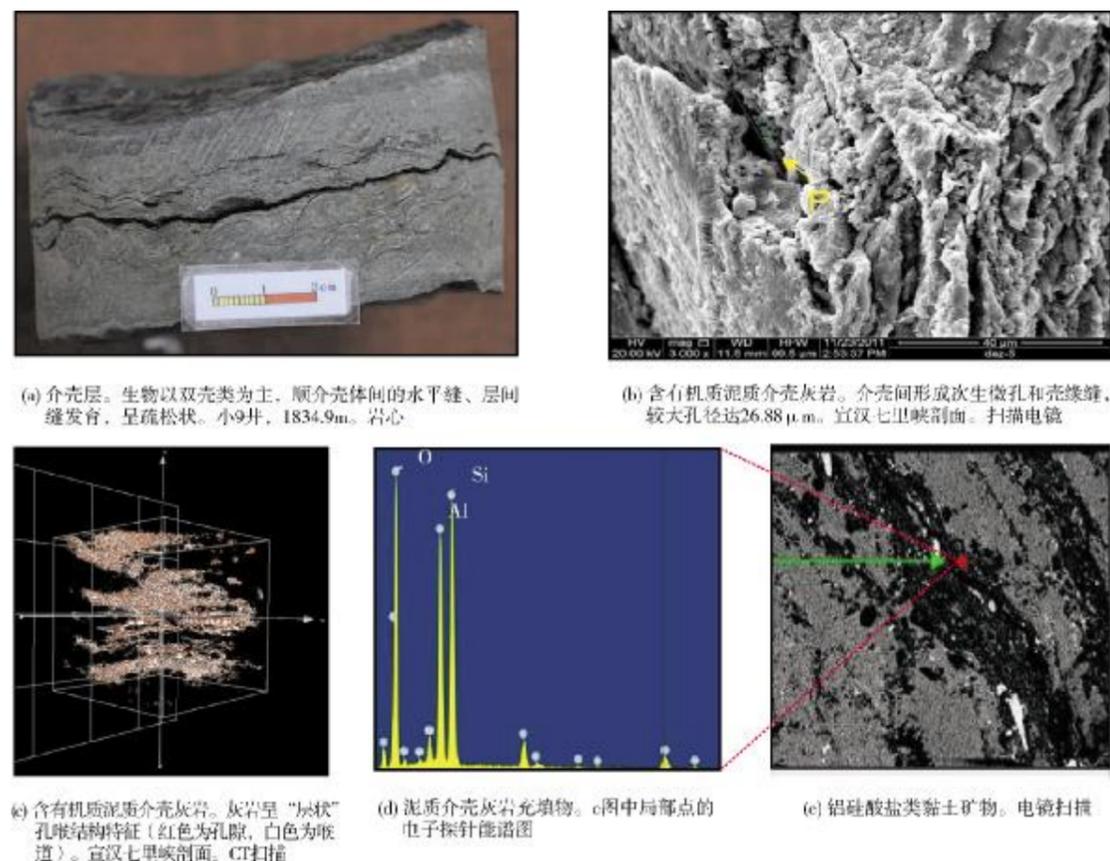


图6 四川盆地中部下侏罗统大安寨段含有机质泥质介壳灰岩储层特征

4 含有机质泥质介壳灰岩储层成因

含有机质泥质介壳灰岩储层主要发育在浅湖—半深湖的暗色泥岩相区,在浅湖相向湖一侧的低能带也有少量分布,但以含泥(泥质)介壳灰岩储层为主。其成因可以归纳为以下三个方面。

(1)事件沉积为浅湖—半深湖相含有机质泥质介壳灰岩储层的发育奠定了物质基础。众所周知,双壳类生物主要在滨浅湖区大量繁殖,可形成高能介壳滩,半深湖—深湖区的介壳灰岩(尤其是成层出现时)一般都是从滨浅湖区受风暴等事件的作用整体搬运而来的,属事件沉积层。露头地质剖面及大石13井—小8井—文10井—角107井剖面(图7)均揭示,随着由滨浅湖相向半深湖—深湖相发展,含有机质泥质介壳灰岩储层的层数减少、厚度减薄,这也证实了这一点。滨浅湖区介壳层大多为亮晶方解石胶结,而半深湖—深湖区介壳层(事件沉积层)大多为有机质及泥

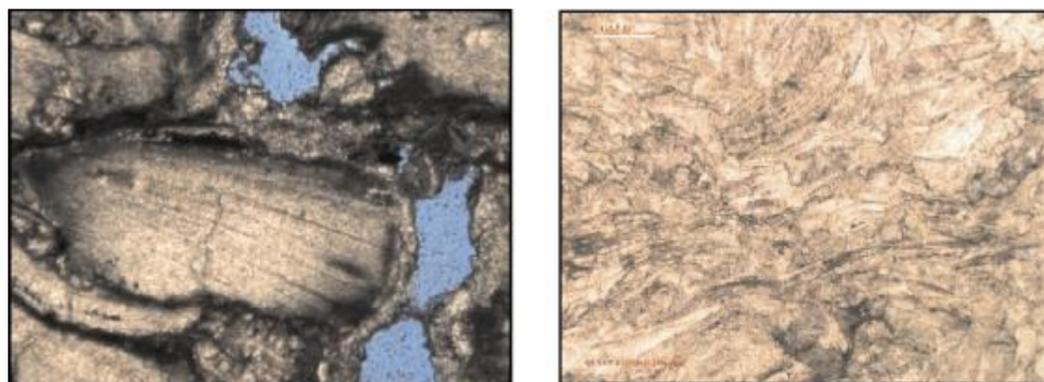
质充填,这与滨浅湖区碳酸钙胶结物的产率远高于半深湖—深湖区以及整体搬运和快速沉积有关。

(2)欠压实是导致含有机质泥质介壳灰岩储层疏松、孔缝发育的关键。由于在中—晚侏罗世盆地快速沉降,中—上侏罗统快速沉积^[5]导致下伏大安寨段大套暗色泥页岩排水不畅,尤其是一三段厚层暗色泥页岩中产生了明显的欠压实现象^[6],从而使得与泥页岩互层的含有机质泥质介壳灰岩保留了大量的原始层间孔缝。上覆中厚层结晶介壳灰岩的抗压实作用及暗色泥岩的压实缓冲作用,也是导致下伏含有机质泥质介壳灰岩处于欠压实状态的主要原因。比如西50井大安寨—三亚段就具明显的泥岩欠压实特征。

(3)泥岩的分隔作用,使得介壳层很少受成岩流体影响,溶解及交代程度均较低,导致大量原生孔隙的保存,同时,埋藏成岩流体对文石的溶蚀作用以形成溶孔。岩心及薄片观察揭示,与高能介壳滩的结晶

介壳灰岩不同,含有机质泥质介壳灰岩的壳体较小,且保存了含量较高的原始的文石质壳体成分(图8),表明其壳体交代程度低,成岩流体较少或成岩作用较弱^[7-8];另一方面,根据碳、氧同位素的分析数据可知,含有机质泥质介壳灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 普遍偏正, $\delta^{18}\text{O}$

明显偏负(图9),表明其受大气淡水影响较小^[9-10],受埋藏成岩环境影响强烈。由于湖平面的频繁升降,双壳类生物死亡后未经氧化即被快速搬运至异地堆积,并且多发育在浅湖—半深湖低能相带,与暗色泥页岩呈不等厚互层。



(a) 含有机质泥质介壳灰岩。生物壳体原始成分及结构完整,文石含量最高(>20%),埋藏成岩流体对文石质介壳溶解形成溶孔。宜汉七里峡剖面。铸体片,薄片, $\times 5$, (-)

(b) 结晶介壳灰岩。生物壳体破碎,重结晶强烈,方解石含量高(>99%),溶孔不发育。宜汉七里峡剖面。薄片, $\times 5$, (-)

图8 四川盆地中部大安寨段含有机质泥质介壳灰岩成分及孔缝特征

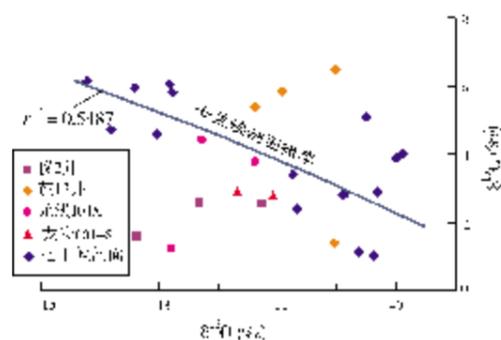


图9 四川盆地中部大安寨段含有机质泥质介壳灰岩碳—氧同位素关系图

图示受埋藏成岩环境影响强烈,受大气淡水影响很弱,反映岩石在浅湖—半深湖区快速沉积和埋藏

5 含有机质泥质介壳灰岩是主要勘探目的层

5.1 含有机质泥质介壳灰岩的识别

含有机质泥质介壳灰岩在剖面上常有两种分布形式。一是夹在中厚层暗色泥页岩(油源岩)之间,呈几厘米至几十厘米厚度不等的条带状薄层与

暗色泥页岩频繁互层,多发育在大安寨一三亚段,油气显示丰富。二是以薄层含泥(泥质)介壳灰岩的形式与高能滩相的块状结晶介壳灰岩间互,通常单层厚度小于1m,多发育在大安寨一亚段的下部或底部,含有机质泥质介壳灰岩单层薄,但累计厚度较可观。

结晶介壳灰岩具低伽马值、低声波时差和高电阻率的特征,而含有机质泥质介壳灰岩具中伽马值、中等声波时差、中等电阻率的特征。产状上,结晶介壳灰岩往往呈中厚层状,夹含泥(泥质)介壳灰岩薄层,而含有机质泥质介壳灰岩往往呈薄层状夹于大套厚层暗色泥页岩中。分布上,结晶介壳灰岩主要见于滨浅湖区,而含有机质泥质介壳灰岩主要分布于浅湖—半深湖区。据此,可以利用井资料对结晶介壳灰岩和含有机质泥质介壳灰岩进行识别(图10)。

5.2 含有机质泥质介壳灰岩储层的有效性

大安寨段含有机质泥质介壳灰岩储层的物性明显好于结晶介壳灰岩储层(图11)。七里峡剖面大安寨段孔隙度最大为6.91%,最小为0.59%,文石含量高的介壳层物性明显好于不含文石的介壳灰岩。

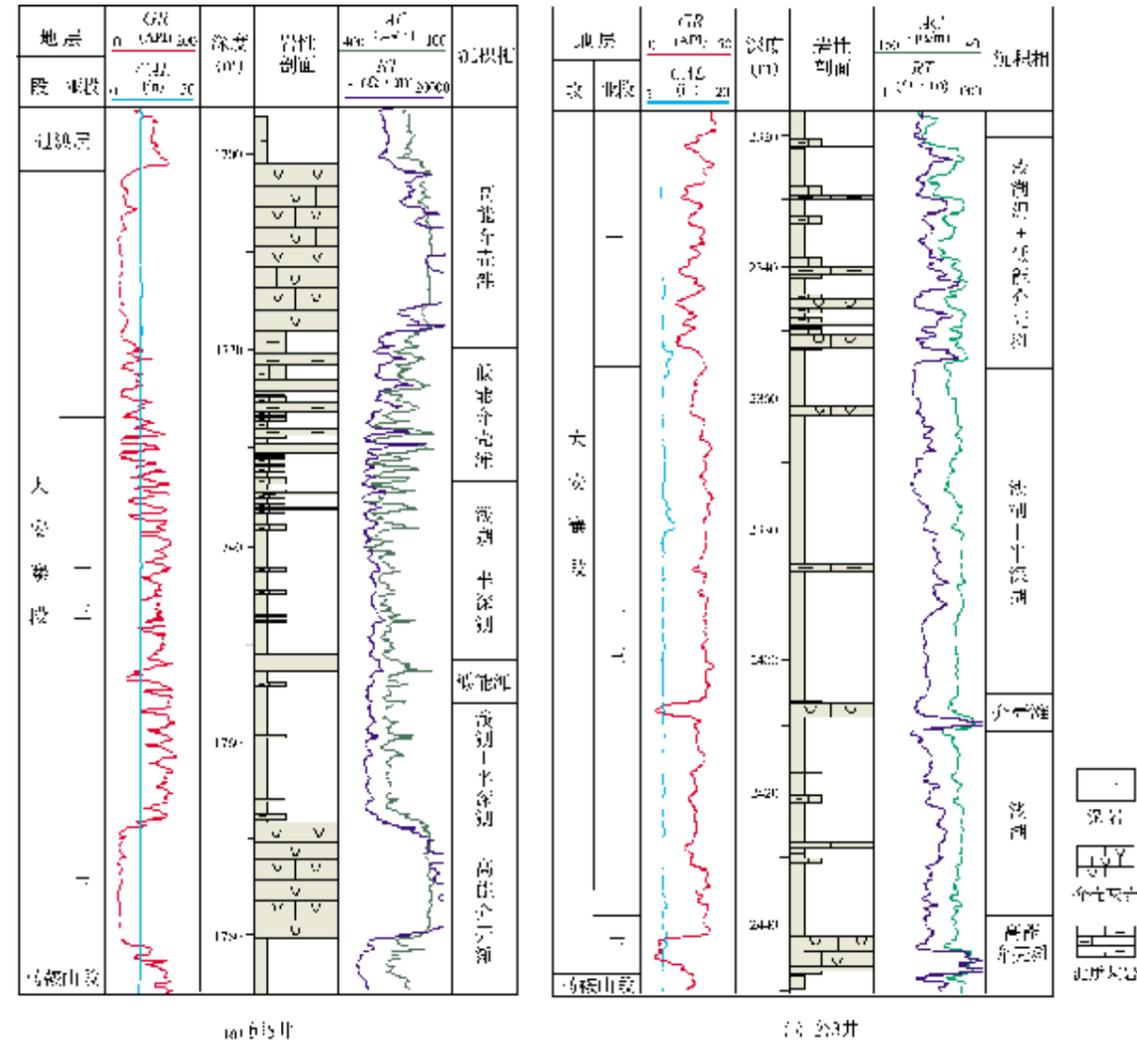


图 10 四川盆地中部大安寨段含有机质泥质介壳灰岩和结晶介壳灰岩的测井识别标志

(a) 鲜 5 井大安寨段一亚段和三亚段以结晶介壳灰岩为主,一三亚段以含有机质泥质介壳灰岩为主;
 (b) 公 3 井大安寨段以含有机质泥质介壳灰岩为主

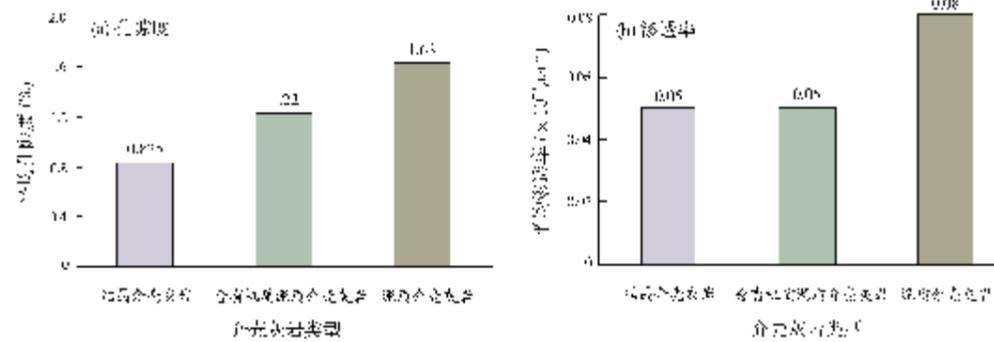


图 11 四川盆地中部大安寨段三种介壳灰岩的孔隙度和渗透率对比

5.3 含有机质泥质介壳灰岩是主要的产层

前已述及,大安寨段发育两种类型的灰岩储层,一是结晶介壳灰岩储层,储集空间以裂缝为主;二是含有机质泥质介壳灰岩储层,储集空间以壳间缝、层间缝及溶孔为主。结晶介壳灰岩岩性致密,与目前的产量不甚匹配,故而本文推测大安寨段的油气主要产层应该为含有机质泥质介壳灰岩储层。

虽然很多测试资料都为大面积的合试数据,难以判断油气到底是来自结晶介壳灰岩还是含有机质泥质介壳灰岩,但大石 13 井—小 8 井—文 10 井—角 107 井油层对比剖面(图 7)及以下测试数据足以说明,大安寨段的油气主要来自孔隙型含有机质泥质介壳灰岩储层,其次才是裂缝型结晶介壳灰岩储层。

大石 13 井为王牌井,测试层位为大安寨段一三亚段含有机质泥质介壳灰岩薄层,射孔酸化测试,日产油 23.8 t,至今已累积产油 75 246 t,产气 $1\ 589 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于好的产层。

小 8 井测试层位为大安寨段含有机质泥质介壳灰岩薄层,射孔酸化测试,日产油 2.7 t,日产气 $2\ 350 \text{ m}^3$,至今累积产油 2 675 t,产气 $7.68 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于好的产层。

文 10 井测试层既有结晶介壳灰岩,又有含有机质泥质介壳灰岩薄层,射孔酸化测试,日产油 5.1 t,

日产气 $1\ 484 \text{ m}^3$,累积产油 7 867 t,产气 $209 \times 10^4 \text{ m}^3$,也属好的产层。

角 107 井测试层位为大安寨段中厚层结晶介壳灰岩,射孔酸化测试,日产油 0.3 t,产微气,至今累积产油 97 t,产气 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于差的产层。

由文 10 井和角 107 井的油层对比分析可知,油气主要来自含有机质泥质介壳灰岩薄层。所以,孔隙型含有机质泥质介壳灰岩储层才是大安寨段的主要产层,裂缝型结晶介壳灰岩储层只是大安寨段的次要产层。

6 勘探领域分析

6.1 含有机质泥质介壳灰岩平面分布

含有机质泥质介壳灰岩多发育在浅湖—半深湖较低能相带,不但从井上可以识别,从地震响应特征看也很明显,它以较连续、中弱振幅为特征。基于露头、井和地震资料的综合分析,笔者编制了含有机质泥质介壳灰岩的分布范围(图 12)。

大安寨一亚段含有机质泥质介壳灰岩主要分布在射洪—遂宁—南充、公山庙—营山以及龙岗地区,分布面积广(图 12a);而大安寨一三亚段含有机质泥质介壳灰岩分布面积更广,川中地区除了部分高能滩相外,全区大面积分布(图 12b)。

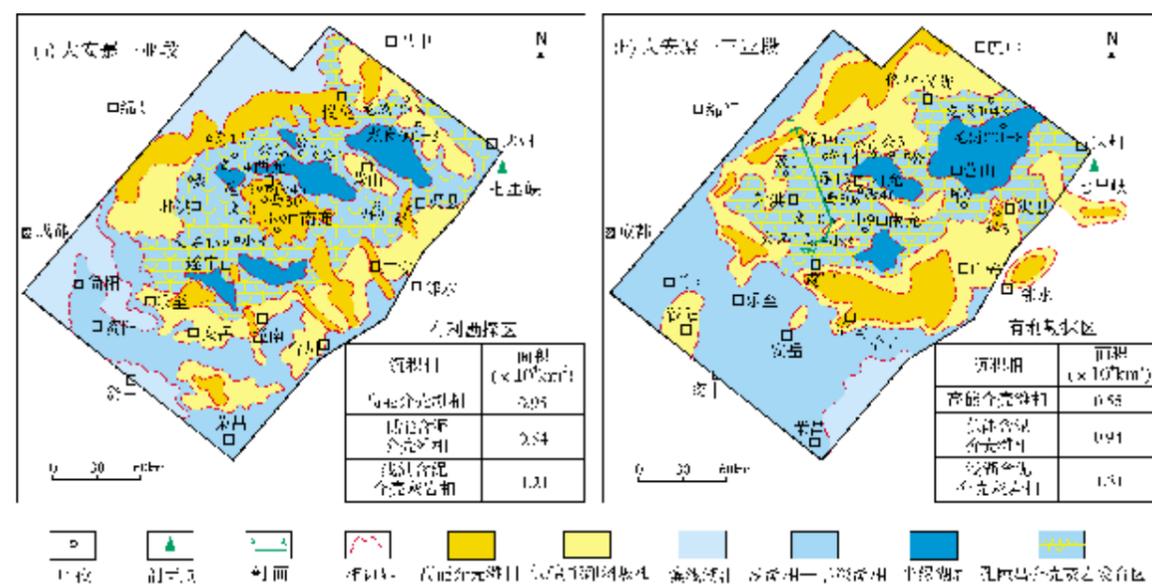


图 12 四川盆地中部大安寨段含有机质泥质介壳灰岩分布特征

A—A' 剖面见图 7

6.2 含有机质泥质介壳灰岩储层的勘探方向

以往大安寨段灰岩储层的勘探主要是寻找高能介壳滩相裂缝型结晶介壳灰岩,从而勘探目标局限于滨浅湖区。本研究对大安寨段灰岩储层主力产层的认识变化改变了勘探思路,拓展了勘探领域。浅湖—半深湖相含有机质泥质介壳灰岩也是非常重要的勘探领域与勘探对象,照此测算,大安寨—亚段将新增有利勘探面积 6100km²,一—三亚段将新增有利勘探面积 6600km²。浅湖—半深湖相含有机质泥质介壳灰岩虽然单层厚度薄,但累计厚度较大,分布面积广,常与泥质介壳灰岩共生,夹于暗色泥页岩中,源储一体,更有利于成藏。

7 结论

(1)四川盆地中部侏罗系大安寨段含有机质泥质介壳灰岩储层,该储层主要分布于浅湖—半深湖相区,单层厚度薄,但累积厚度大,大面积分布,在测井和地震资料上可以识别。

(2)大安寨段含有机质泥质介壳灰岩储层的储集空间以壳间缝、层间缝及溶孔为主,属孔隙型储层。大安寨段结晶介壳灰岩储层的储集空间以裂缝为主,属裂缝型储层。含有机质泥质介壳灰岩储层的物性明显好于结晶介壳灰岩储层。

(3)试油资料及油层对比揭示,大安寨段灰岩储层的主力产层为含有机质泥质介壳灰岩储层,其次为结晶介壳灰岩储层。

(4)以往大安寨段灰岩储层的勘探主要是寻找高能介壳滩相裂缝型结晶介壳灰岩,局限于滨浅湖相区。本次研究认为浅湖—半深湖相含有机质泥质介壳灰岩也是非常重要的勘探领域与勘探对象。

致谢:本论文在撰写的过程中得到中国石油杭州地质研究院沈安江与邹伟宏两位专家教授细致耐心的指导,在此表示诚挚的感谢!

参考文献

- [1] 何冰,胡明,罗玉宏,等.川中李渡—白庙地区大安寨段湖相碳酸盐岩油藏裂缝发育特征分析[J].复杂油气藏,2010,3(1):23-27.
- [2] 许化政,王传刚,刘春燕,等.海相碳酸盐岩成岩作用与排烃特征[J].海相油气地质,2010,15(1):51-54.
- [3] 黄恒铨.川北大安寨段成岩作用与储集性能的关系[J].石油实验地质,1989,11(1):62-75.
- [4] 强子同,杨植江,王建民,等.大安寨石灰岩的成岩作用与成岩圈闭[J].地球化学,1981,(3):233-241.
- [5] 沈传波,梅廉夫,徐振平,等.四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J].大地构造与成矿学,2007,31(3):288-299.
- [6] 杨晓萍,邹才能,陶士振,等.四川盆地上三叠统—侏罗系含油气系统特征及油气富集规律[J].中国石油勘探,2005,15(2):15-22.
- [7] 陈荣林,李宪翔.川北侏罗系大安寨段介壳灰岩成岩作用与流体包裹体研究[J].石油实验地质,1991,13(2):158-163.
- [8] 张河清.川中侏罗系大安寨组中保存的骨骼文石[J].天然气工业,1984,4(1):22-26.
- [9] 李玉成,徐永昌,沈平.淡水软体动物壳化石碳氧同位素组成及其在恢复古气候环境中的应用[J].沉积学报,1990,8(2):105-111.
- [10] 刘传联,赵泉鸿,汪品先.湖相碳酸盐岩同位素的相关性与生油古湖泊类型[J].地球化学,2010,30(4):363-367.

编辑:赵国宪

Cognition and Significance of Lower Jurassic Daanzhai Organic Muddy Shell Limestone Reservoir in Central Sichuan Basin

Ni Chao, Hao Yi, Hou Gangfu, Gu Mingfeng, Zhang Litao

Abstract: The Lower Jurassic Daanzhai Member in Sichuan Basin can be divided into Dayi, Dayisan and Dasan Submembers from top to bottom, which is constituted by dark clay shale, crystalline shell limestone and muddy shell limestone. The dark clay shale that formed in deep to semideep lacustrine environment is the main source rock. The crystalline shell limestones (CSL) that formed in high-energy beach to shallow lacustrine environment has been deemed to be the major hydrocarbon reservoir for fractures are dominant in it. Through the geological survey of outcrops, the observation of cores and thin sections, the analysis of physical parameters and formation tests, it is indicated that the shallow to semideep lacustrine organic muddy shell limestones (OMSL) that formed in lower-energy beach are the main reservoirs or payzones. They are of thin single layers but large accumulative thickness with a wide range of distribution. These limestones are usually intercalated within the dark clay shales which comprise the integrative source/reservoir rocks to be beneficial to hydrocarbon accumulation. In this type of muddy shell limestone, intershell pores make up the main reservoir space and the intershell pores are commonly filled with dark organic matter. It is suggested that the exploration target may be extended from the CSL to the OMSL in Daanzhai Member. If the OMSL formed in lower-energy beach zone becomes a new prospecting domain, a preliminary prediction shows that the favorable exploration area will increase 6100km² and 6600 km² respectively in Dayi and Daysan Submembers.

Key words: Lower Jurassic; Daanzhai Member; Shell limestone; Carbonate reservoir; Reservoir characteristics; Central part of Sichuan Basin

Ni Chao; male, Master, Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China