

川东北下侏罗统大安寨段岩相特征及页岩油源储评价 ——以铁山金窝及梁平福禄镇剖面为例

祝海华¹, 朱光仪¹, 章海燕², 王明磊³, 张本健⁴, 洪海涛⁴, 张芮⁴, 秦春雨⁴, 李育聪⁴, 李咏洲²

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 中国石油西南油气田分公司川东北气矿, 四川达州 635000

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 成都 610041

摘要 【目的】为了解四川盆地大安寨段介壳灰岩—页岩混积层系的沉积特征及对页岩油有利层段的影响, 【方法】以川东北达州铁山金窝及梁平福禄镇野外剖面为研究对象, 开展岩石薄片、全岩 X 射线衍射分析、有机地化等分析测试, 详细评价了大安寨段页岩层系的岩相类型及序列、源储品质和有利层段。【结果】结果表明: 1) 大安寨段为一套以灰岩—页岩为主的混积层系, 不同岩相有序叠置形成多种向上变浅的岩相序列, 从浅湖到半深湖—深湖环境中共识别出 6 种向上变浅的分米—米级的岩相序列: ①页岩—含介壳/介壳质页岩、②页岩—纹层/薄层介壳灰岩、③页岩—中层介壳灰岩、④页岩—瘤状泥晶灰岩、⑤薄层页岩—介壳灰岩—结晶灰岩、⑥介壳灰岩—粉砂岩/细砂岩。2) 不同序列的源储品质差异较大, 序列①~③的黑色页岩最为发育, 烃源品质最好, 单期序列内黑色页岩的有机碳含量具有下高上低的趋势, 有机碳 (TOC) 随介壳含量增加逐渐减少。不同岩性物性差异大, 页岩孔隙度高于灰岩和粉砂岩, 但黏土含量高、孔径小, 渗流能力差。灰岩易发育节理缝, 节理密度随灰岩厚度增加呈指数下降。因此发育中层、薄层灰岩的序列 2~4 储集性能更好。3) 大安寨段页岩油具有源储分离、优质储层薄的特征。野外油苗主要分布于中薄层介壳灰岩的节理附近, 有利储集段主要受控于沉积条件、微裂缝以及源储配置的影响。【结论】6 种序列中以序列②和③的源储配置条件最好, 为页岩油的有利层段。

关键词 川东北地区; 四川盆地; 大安寨段; 侏罗系; 页岩层系; 沉积相; 页岩油; 有利层段

第一作者简介 祝海华, 1987 年出生, 博士, 储层地质学, 页岩油气地质评价, E-mail: zhhswp@163.com

中图分类号 P618.13 文献标志码 A

0 引言

页岩油是指赋存于富有机质页岩层系中的石油, 一般无自然产能或低于工业石油产量下限, 需采用特殊工艺和技术措施才能获得工业石油产量^[1-3]。四川盆地地下侏罗统主要发育

收稿日期: 2023-04-23; 收修改稿日期: 2023-08-02

基金项目: 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目 (2020CX050103); 国家自然科学基金项目 (42202176) [Foundation: Science and Technology Cooperation Project of CNPC-SWPU Innovation Consortium, No. 2020CX050103; National Natural Science Foundation of China, No. 42202176]

东岳庙段、大安寨段和凉高山组二段（凉二段）3套黑色页岩^[4]。其中大安寨段黑色页岩最为发育，是侏罗系页岩油勘探目的层之一。大安寨段油气勘探始于1958年，目的层段为介壳灰岩段（图1b），以寻找裂缝—孔隙型油藏为目标，先后发现了公山庙、莲花、金华、中台山与莲池5个油田，累计产油 $432.58 \times 10^4 \text{ t}^{[6]}$ 。2019年以来，开始针对大安寨段中部黑色页岩进行页岩油勘探，但多口井测试产量均较低，有利层段不落实。

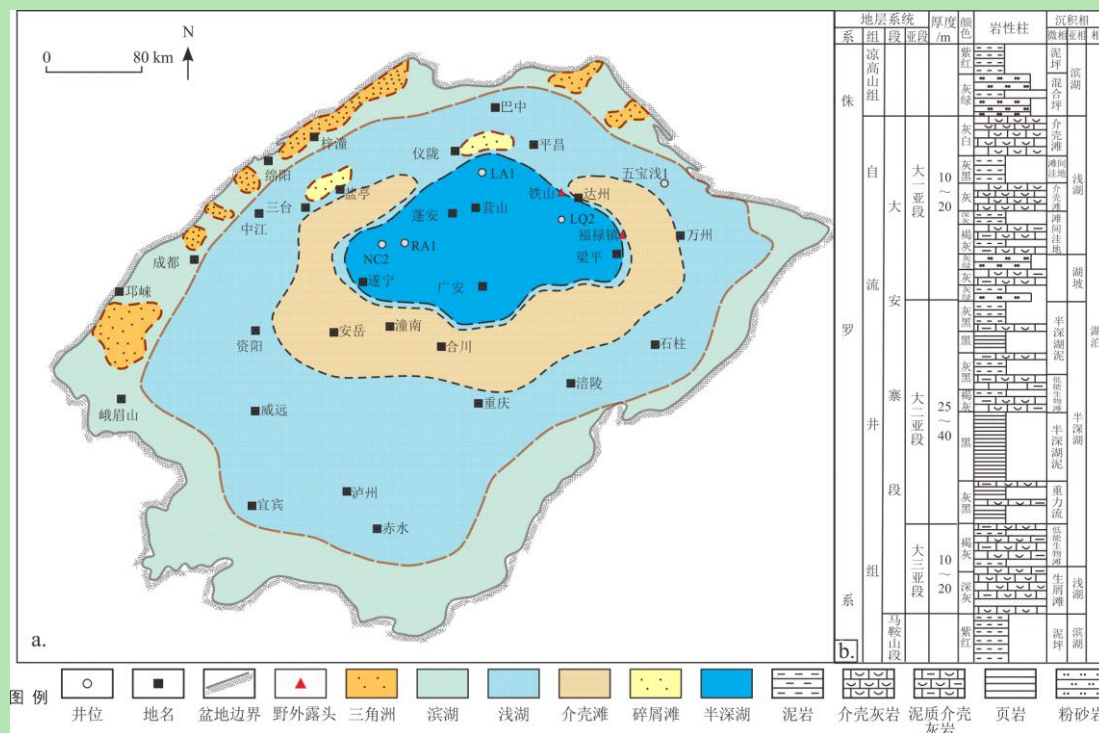


图1 四川盆地大安寨段地层柱状图及沉积相展布图（据杨跃明等^[5]修改）

Fig.1 Stratigraphic histogram and sedimentary facies distribution map of the Da'anzhai member in Sichuan Basin (modified from Yang *et al.*^[5])

早侏罗世四川盆地为典型的陆内坳陷湖盆^[7]，大安寨段沉积于淡水碳酸盐湖泊环境，缺乏陆源粗粒碎屑的注入，发育泥页岩与介壳生物灰岩混积沉积^[8-9]。前人对大安寨段岩石类型、沉积相^[10-11]及致密油储层特征^[12-15]等方面开展了大量相关研究，这些研究关注的重点是作为致密油储层的介壳灰岩，对半深湖—深湖区页岩层系中各类岩性的垂向序列、互层规律及页岩油的源储品质关注较少。目前，大安寨段页岩油储层岩相组合的划分方案虽然较多，但一般都以各类互层岩性的厚度作为参考标准^[16-18]，未考虑沉积特征及源储配置关系。

本文选取川东北地区达州铁山金窝（107.3741558° E，31.2299147° N）、重庆梁平福祿镇（107.9100464° E，30.6284299° N）大安寨段野外露头为研究对象（图1a），开展薄片、XRD全岩、有机地化等测试，划分页岩层系的岩相类型，总结不同岩相垂向序列，基于岩相序列开展页岩油源储配置分析，结合首次发现的页岩油油苗产出特点，为大安寨段页岩

油有利层段的优选提供参考依据。

1 区域地质背景

研究区位于四川盆地东北部，其构造位置属于川东高陡断褶带，发育了一系列东北—西南向延伸和隔挡式分布的大型复背斜和复向斜，构成了现今川东地区“隔挡式”的构造格局。

晚三叠世，在印支运动的影响下，四川盆地演化逐渐为陆相盆地，盆地四周为龙门山古陆、大巴山古陆、康滇古陆及雪峰山古陆所包围^[19-21]。早侏罗世为稳定的淡水湖泊沉积，发育自流井组和白田坝组，二者为同期异相关系。自流井组由下至上可分为珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段及大安寨段。其中珍珠冲段及马鞍山段发育泥岩夹细砂岩、粉砂岩，东岳庙段和大安寨段主要发育介壳灰岩和泥页岩。

大安寨段沉积期盆地周缘构造活动减弱，缺乏陆源碎屑供给，造成盆地坳陷速率大于沉积速率，最终导致四川盆地侏罗系最大湖盆的形成^[19]。平面上川中—川东一带广泛发育半深湖—深湖亚相，介壳滩呈环状围绕半深湖分布^[8-9]（图 1a）。大安寨段地层厚度一般 60~110 m，根据岩性特征，可进一步划分为大一、大二和大三 3 个亚段（图 1b）。大安寨段沉积期湖盆经历了一个完整的湖侵—湖退旋回，其中大二亚段为最大水进期，黑色页岩最为发育。

2 岩相类型

基于达州铁山金窝剖面、重庆梁平福禄镇剖面大安寨段野外及薄片资料，考虑成分、粒度将该地区大安寨段页岩层系岩相类型划分为灰岩、泥页岩和粉砂岩—砂岩 3 类。其中灰岩根据结构和组分，泥页岩根据颜色和成分做进一步细分，共划分出介壳灰岩等 6 亚类及若干小类，各类岩相特征如下。

2.1 介壳灰岩

根据颗粒和灰泥含量可细分为介壳灰岩、泥晶介壳灰岩和含泥/泥质介壳灰岩（图 2a, b）。介壳灰岩颗粒含量 90%以上，以双壳类壳体为主，壳厚 0.2~0.8 mm，壳长 2~10 mm，偶见少量腹足类、介形类和轮藻，生物种群具有分异度低，丰度高特征。介壳平行叠置排列，形态完整，玻纤结构，为安静环境下介壳原地或近原地自然分解堆积而成。介壳间泥晶方解石含量大于 10%时形成泥晶介壳灰岩，也可以充填泥质（>5%）形成含泥或泥质介壳灰岩。其中泥质介壳灰岩多以薄层或纹层出现，多见于相对低能的滩翼沉积。

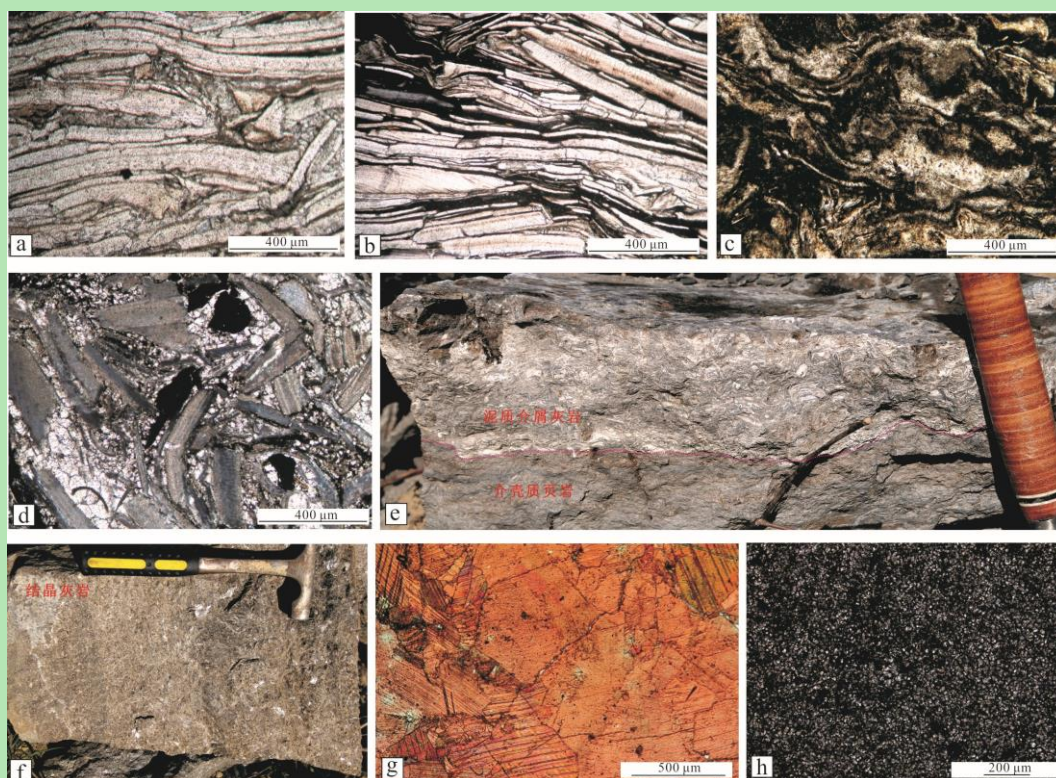


图2 川东北地区大安寨段灰岩典型野外及镜下照片

(a) 介壳灰岩, 介壳较完整, 水平排列, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段, 单偏光; (b) 泥质介壳灰岩, 介壳完整, 介壳间黏土充填, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段, 单偏光; (c) 泥质介壳灰岩, 介壳破碎, 杂乱排列, 泥质充填, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段, 单偏光; (d) 介壳灰岩, 介壳间主要充填亮晶方解石胶结物, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段, 单偏光; (e) 介壳质页岩与泥质介壳灰岩, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段; (f) 褐色结晶灰岩, 粗晶方解石, 铁山金窝剖面, 大三亚段; (g) 结晶灰岩, 晶粒结构, 铁山金窝剖面, 大三亚段, 单偏光; (h) 泥晶灰岩, 晶粒结构, 梁平福禄镇剖面, 大二亚段, 单偏光

Fig.2 Typical field outcrop and microscopic photos of limestone in the Da'anzhai member, northeast Sichuan

2.2 介壳灰岩

介壳灰岩中的颗粒仍以双壳类为主, 但壳体保存不完整, 破碎或杂乱排列, 分选差。介壳间泥晶方解石和泥质含量更高 (图 2c~e)。介壳灰岩厚度一般数厘米且横向不稳定, 与下伏地层突变接触。破碎介壳、排列杂乱、碎屑间含量较高的泥晶方解石或泥质反应了介壳被改造或搬运作用, 突然卸载以及缺乏淘洗的沉积过程, 多为重力流产物^[8-9]。

2.3 结晶灰岩

常见于大一、三亚段, 多由介壳灰岩或介壳灰岩强烈重结晶形成, 手标本呈褐色 (图 2f), 镜下方解石晶体直径 0.1 mm~2 cm, 强烈的重结晶使得介壳形态模糊不清 (图 2g)。泥质含量极低, 说明为持续淘洗的高能环境产物, 一般形成于滩核, 厚度数厘米至数米, 变化较大 (图 2f, g)。

2.4 泥晶灰岩

泥晶灰岩类中的灰泥含量大于 50%, 介壳及泥质含量低 (图 2h)。根据介壳含量, 将

该类岩相分为含介壳泥晶灰岩、介壳质泥晶灰岩和泥晶灰岩 3 种类型。颗粒主要为双壳类或介形类，其中介形虫壳小且薄，双壳壳体一般杂乱分布，壳体多不完整，晶粒结构，层厚一般 10~20cm。

2.5 泥页岩

泥页岩是大安寨段主要岩石类型之一，根据颜色、介壳及粉砂质含量，可划分为灰黑色页岩、灰黑色含介壳/介壳质页岩，紫红色泥岩和灰绿色粉砂质泥岩。

黑色页岩：多见于大二亚段、大一亚段下部，质纯，基质中介壳含量低，但常夹介壳纹层或方解石充填的裂缝（小于 1 cm，图 3a），矿物类型以黏土为主，其次为石英，钙质含量极低，滴酸不起泡，有机质含量一般 0.7%~2.0%，厚度 0.1~1.5 m，黑色页岩多形成于半深湖—深湖相的安静低能还原环境。

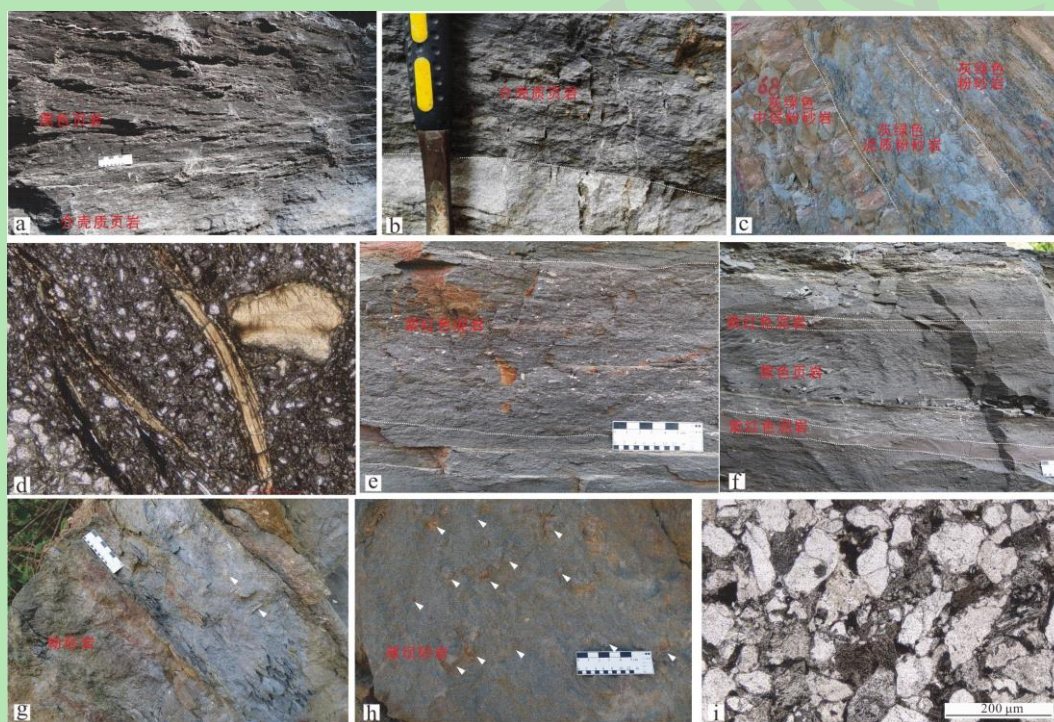


图 3 川东北地区大安寨段泥页岩、粉砂岩—砂岩典型野外及镜下照片

(a) 黑色页岩，介壳含量低，发育方解石充填缝，铁山金窝剖面，大二亚段；(b) 介壳质页岩，与下伏介壳灰岩突变接触，梁平福祿镇剖面，大二亚段；(c) 灰绿色中层粉砂岩、灰绿色泥质粉砂岩及灰绿色粉砂岩质泥岩，铁山金窝剖面，大二亚段；(d) 粉砂质泥岩，含少量介壳，铁山金窝剖面，大一亚段，单偏光；(e) 紫红色含介壳泥岩，介壳破碎，梁平福祿镇剖面，大一亚段；(f) 黑色页岩夹薄层紫红色泥岩，突变接触，铁山金窝剖面，大一亚段；(g) 粉砂岩，重力流沉积，含杂乱排列的介壳（白色箭头），铁山金窝剖面，大一亚段；(h) 滩坝砂岩，含大量的生物扰动构造（白色箭头），铁山金窝剖面，大一亚段；(i) 细砂岩，滩坝成因，铁山金窝剖面，大一亚段，单偏光

Fig.3 Typical field outcrop and microscopic photos of shale and siltstone-sandstone in the Da'anzhai member, northeast Sichuan

灰黑色含介壳/介壳质页岩：纵向上常分布于灰黑色页岩和介壳灰岩之间（图 3b），介壳含量较高，一般大于 10%，介壳个体保存完整，多为双壳类壳体。单层厚度变化较大，

一般几厘米至几十厘米，厚者可达 1.1 m，有机质含量较灰黑色页岩低，一般 0.5%~1.0%，形成于安静、低能环境，水体略浅于前者，多为介壳滩与半深湖过渡区沉积。

粉砂质泥岩：多见于大三底部或大一上部，粉砂质含量较高，灰色或灰绿色（图 3c），含少量介壳，介壳破碎不完整（图 3d）。形成于靠岸的浅湖区，水浅且富氧，水动力条件强于灰黑色页岩。

紫红色泥岩：多以薄层（小于 10 cm）形式出现于灰黑色页岩、灰黑色含介壳/介壳质页岩中（图 3e, f），质纯且无粒序变化，与上下突变接触。另外在薄层介屑灰岩层界面附近也观察到 1 cm 左右的紫红色泥岩。页岩颜色一般与碳含量以及铁的氧化有关，随 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值增加，页岩颜色由绿灰色过渡为紫色再到红色^[22]。这类薄层紫红色泥岩可能为浅水氧化区泥质沉积物在重力流作用下搬运至深水区卸载沉积形成，也可能泥岩与底层氧化水长时接触形成。

2.6 粉砂岩—砂岩

粉砂岩—砂岩主要分布于大一亚段，厚度一般小于 1 m，可识别出重力流砂岩和浅湖滩砂。前者杂色、灰绿色，铁山剖面发育厚度 60 cm，与下伏地层突变接触，含杂乱排列的介壳碎屑（图 3g），碎屑粒径多为粉砂—细砂级，分选较差，杂基含量高，甚至超过 15%。浅湖滩砂多为薄层—中层灰绿色细砂岩（图 3h, i），层状分布，分选较好，可见生物扰动构造，一般出现于大一亚段上部。

3 岩相组合类型

在海相沉积中，由于碳酸盐沉积物的堆积速率快，因此其沉积物往往反复多次地达到并超过海平面，形成多个向上变浅的岩相序列。这种厚几十厘米至几米的向上变浅序列被认为是高频率海平面变化旋回的产物，又叫“米级旋回”^[23-25]。Goodwin *et al.*^[24]于 1985 年提出用间断加积旋回（Punctuated Aggradational Cycles）机制（简称 PAC 旋回）来解释地层堆积模式。PAC 旋回是一种在地层记录中普遍存在的单一过程所代表的周期性发生的事件的产物。野外剖面及岩心观察显示，大安寨段湖相页岩—介壳灰岩混积层系中同样发育类似的向上变浅的岩相序列，本次研究在浅湖、半深湖—深湖环境中共识别出 6 种向上变浅的分米级—米级的岩相序列（图 4, 5）。

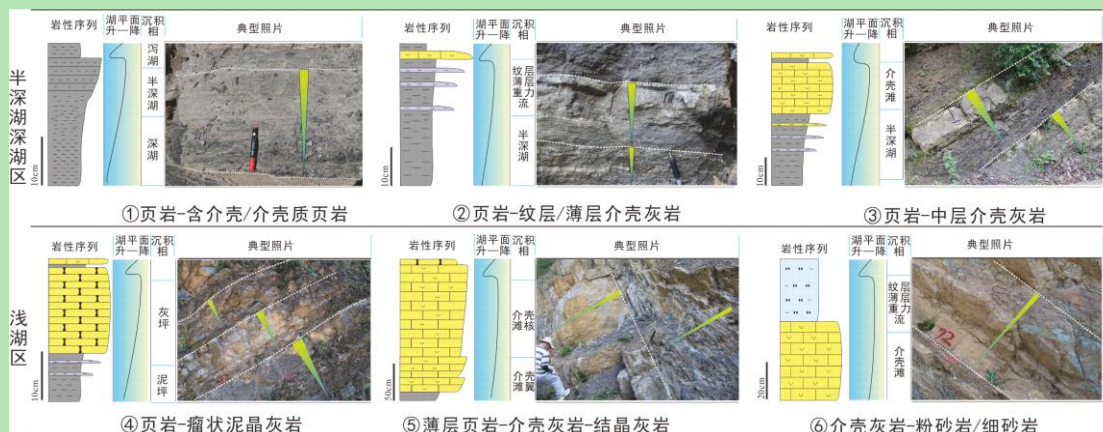


图 4 川东北地区大安寨段 6 种向上变浅的岩相序列

Fig.4 Six types of upward shallowing lithofacies sequences from the Da'anzhai member in northeast Sichuan

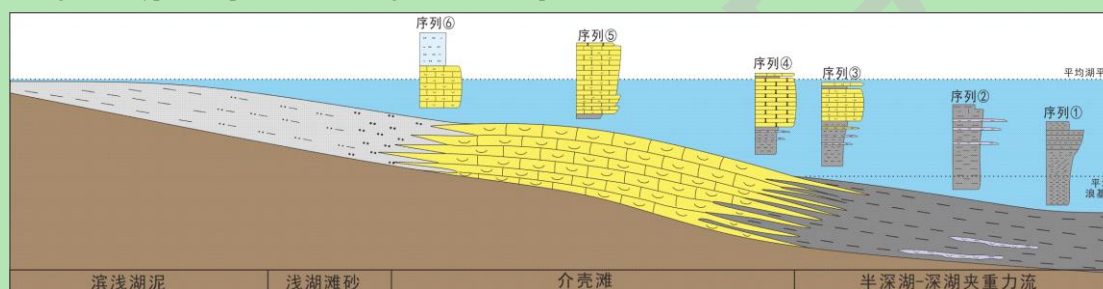


图 5 大安寨段沉积模式及不同岩相序列分布特征

Fig.5 Sedimentary patterns and distribution of different lithofacies sequences in the Da'anzhai member

3.1 页岩—含介壳/介壳质页岩

主要分布于大二亚段的中部，下部为黑色页岩，含少量纹层状（单层厚度小于 0.5 cm）不连续的介壳灰岩，向上渐变为灰黑色介壳质页岩，介壳分散分布。该序列沉积于半深湖—深湖环境（图 5），早期缺氧环境，沉积黑色页岩，介壳含量低，后期湖平面下降，水体变浅且氧含量增加，底栖双壳类生物逐渐增多。

3.2 页岩—纹层/薄层介壳灰岩

该序列常见于大二亚段，下部中厚层黑色页岩向上过渡为黑色页岩与纹层、薄层状介壳灰岩互层。介壳灰岩泥质含量高，与页岩突变接触，介壳壳体大小混杂，杂乱—半平行排列，横向厚度不稳定，具有重力流沉积特征。该序列一般形成于半深湖环境，且靠近介壳滩区域，浅湖相介壳滩为重力流提供物质来源。

3.3 页岩—中层介壳灰岩

常见于大一亚段下部和大三亚段上部，由下部黑色页岩、黑色页岩夹纹层或薄层状泥质介壳灰岩，向上变为中层介壳灰岩。该序列下部黑色页岩形成于半深湖缺氧环境，少见介壳。上部中层介壳灰岩为薄层介壳滩成因，其顶底泥质含量较中部重，具有复合粒序特征。

3.4 页岩—瘤状泥晶灰岩

见于大一亚段中部，发育程度低。下部页岩呈灰色，深灰色；上部灰色薄层泥晶灰岩、瘤状泥晶灰岩，含少量介壳，厚 10~40 cm，夹 2~3 层 1~3 cm 薄层泥岩。该序列为低能浅水灰坪—浅湖泥岩沉积，瘤状灰岩可能为干旱炎热环境产物。

3.5 薄层页岩—介壳灰岩—结晶灰岩

一般见于大一和大三亚段。下部偶见薄层页岩，中部薄层—中层灰色介壳灰岩，泥晶胶结，泥质含量低，但介壳未重结晶，上部为厚层褐色块状结晶灰岩。该序列形成于浅湖相介壳滩沉积，反应介壳滩的滩翼逐渐演化为高能滩核。

3.6 介壳灰岩—粉砂岩/细砂岩

序列下部为泥质介壳灰岩或泥晶介壳灰岩，厚 10~50 cm，向上过渡为灰绿色的粉砂岩、粉砂质细砂岩，杂基含量高，含介壳碎屑。该序列形成于浅湖相，介壳滩向陆一侧区域。随着水深变浅，浅湖介壳滩逐渐演化为滨浅湖相粉砂岩/细砂岩。

4 不同岩相序列源储特征

4.1 烃源条件

在岩相序列划分基础上，对大安寨段页岩油的源储品质进行评价（图 6）。梁平福禄镇剖面黑色页岩有机碳测试显示。

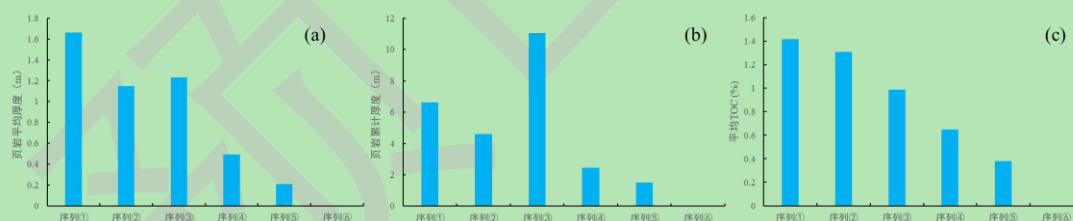


图 6 福禄镇剖面大安寨段 6 种岩相序列黑色页岩厚度及有机碳含量统计

Fig.6 Statistics of shale thickness and total organic carbon (TOC) of six lithofacies sequences from the Da'anzhai member in the Fuluzhen section

(1) 单个序列中序列①~③的黑色页岩最厚，平均厚度分别为 1.66 m，1.15 m 和 1.23 m，而序列④、⑤只有 0.49 m 和 0.21 m，序列⑥不发育黑色页岩（图 6a）。

(2) 累计厚度：序列③黑色页岩的累计厚度最大，如福禄镇剖面共发育 26.42 m 黑色页岩，其中序列③黑色页岩的累计厚度 11.06 m，占 42%，其次为序列①，厚 6.62 m，占 25%，序列 2 为 4.59 m，占 17%，序列 4、5 分别为 2.45 m 和 1.52 m，占比 9%和 6%（图 6b）。

(3) 有机碳含量及纵向变化：黑色页岩较为发育的序列①~③，平均 TOC 含量分别为

1.42%，1.31%和 0.99%，而序列④、⑤为 0.65%和 0.38%（图 6c）。纵向上，单期序列内部黑色页岩的有机碳含量具有下高上低的趋势，TOC 随介壳含量的增加逐渐减少（图 7）。

（4）有机质类型：热解数据显示，大安寨段有机质类型以 II、III 型为主，含少量 I 型。I 型和 II 型有机质分布于序列①~③中，序列④、⑤以 II、III 型为主。

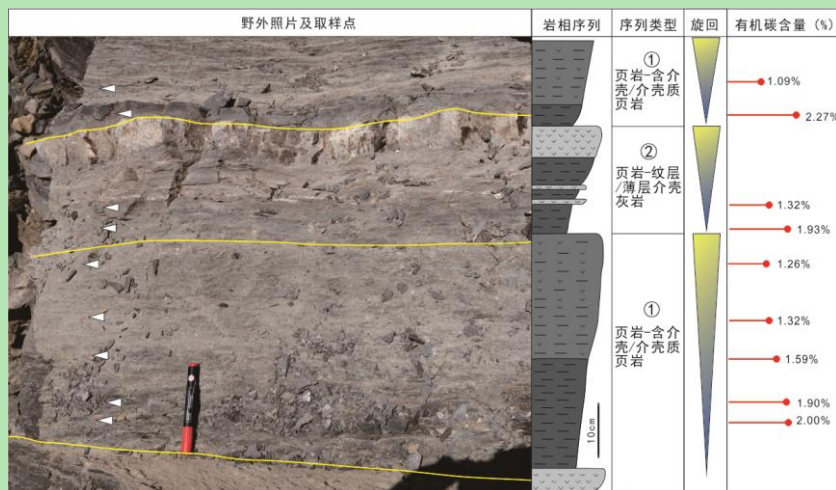


图 7 大安寨段单期序列中有机碳含量变化

Fig.7 Vertical variation of organic carbon content within single lithofacies sequences of the Da'anzhai member

4.2 储集条件

本次研究结合前人成果，对 6 种岩相序列页岩油的储集性能进行了评价。新鲜岩心孔隙度测试显示，大安寨段页岩孔隙度最高，平均 5.69%，介壳灰岩平均 3.27%^[14]，随介壳含量增加，孔隙度逐渐降低。本次补充了野外剖面介壳灰岩、泥晶灰岩、结晶灰岩以及粉砂岩的孔隙度分析。结果显示，介壳灰岩孔隙 2.5%~4.21%，平均 3.87%，泥晶灰岩孔隙度 1.22%~3.21%，平均 1.98%，结晶灰岩 2.1%~3.59%，平均 2.91%，粉砂岩 0.69%~2.94%，平均 1.32%，测试结果略高于岩心样品，但趋势一致（图 8）。

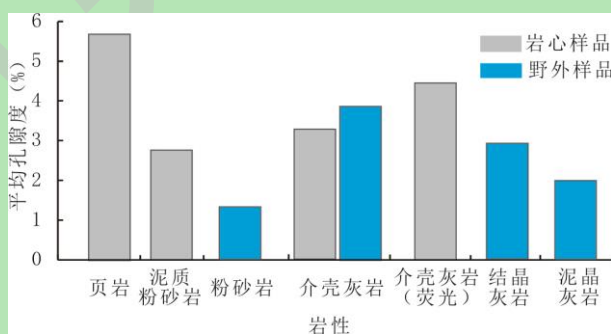


图 8 大安寨段岩石类型的孔隙度分布图（岩心数据源自祝海华等^[14]）

Fig.8 Porosity distribution map of rock types in the Da'anzhai member (core data from Zhu *et al.*^[14])

野外及岩心的孔隙度测试显示页岩孔隙度高于灰岩和粉砂岩。但针对大安寨段页岩段的水平井压裂测试并不理想，黑色页岩孔径小、纹层不发育、渗透率低，页岩油的流动性差是重要原因。因此寻找储集条件较好的灰岩夹层或裂缝层，是后期关注的重点。

野外观察发现介壳灰岩发育不同密度的节理缝。节理类型以剪节理为主，产状稳定延伸远，节理面平直光滑，时有擦痕，多为未充填/半充填，常组成共轭 X 型节理系。节理一般分布于介壳灰岩中，部分延伸至相邻的介壳质泥岩或泥质介壳灰岩中，延伸距离短。

野外露头大量统计显示节理密度与介壳灰岩厚度呈反比（图 9），薄层介壳灰岩节理往往密集发育，最大可达 0.46 条/cm。随厚度增加，节理密度呈指数快速下降，大于 20 cm 之后，节理发育程度低（ ≤ 0.05 条/cm）。因此可以认为薄层及部分中层（10~20 cm）的介壳灰岩储集性能更好。

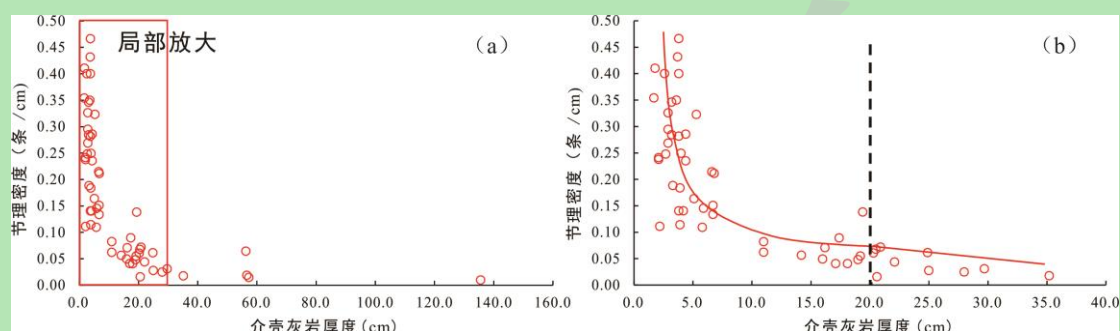


图 9 (a) 野外露头介壳灰岩厚度与节理密度散点图 (b) 介壳灰岩厚度与节理密度散点图 (局部放大)

Fig.9 (a) Scatter plot of shell limestone thickness and joint density in outcrop (b) the image is partially enlarged

5 讨论

5.1 岩石组分对页岩储集性能的影响

大安寨段岩心及本次野外样品的物性测试均显示页岩孔隙度好于介壳灰岩。已有数据统计显示孔隙度与黏土含量呈正相关，与碳酸盐含量呈负相关，与有机质基本不相关^[14]，主要原因是黏土晶间孔虽然孔径小但密集发育（图 10a），贡献了主要的储集空间，介壳灰岩中方解石晶间孔形成于埋藏成岩过程中的重结晶作用，特征是孔径大但是数量少（图 10b），占孔隙体积比例小^[14]，因此随碳酸盐含量增加，孔隙度减小。干酪根处于高成熟生油阶段（ R_o 小于 1.2%），尚未进入大量有机孔发育阶段，加之有机质的吸附和溶胀作用^[26]，有机孔发育程度低，同时大安寨段黑色页岩有机质含量偏低（一般 1%~2%），因此有机质含量与孔隙度几乎没有相关性。

由于大安段黑色页岩富含黏土，缺少纹层导致其渗流能力差，压裂测试效果不理想，并不是良好的页岩油储层。主要原因与页岩沉积环境有关：大安寨段沉积期湖盆为淡水、半咸水环境^[10]，不利于结晶方解石纹层的形成，导致纹理缝等高渗通道缺乏。缺乏陆源砂质供应，生屑滩持续发育，半深湖、深湖区多以富黏土页岩为特征，页岩黏土含量普遍高于 45%，不利于压裂，因此黑色页岩主要作为优质烃源岩供烃。

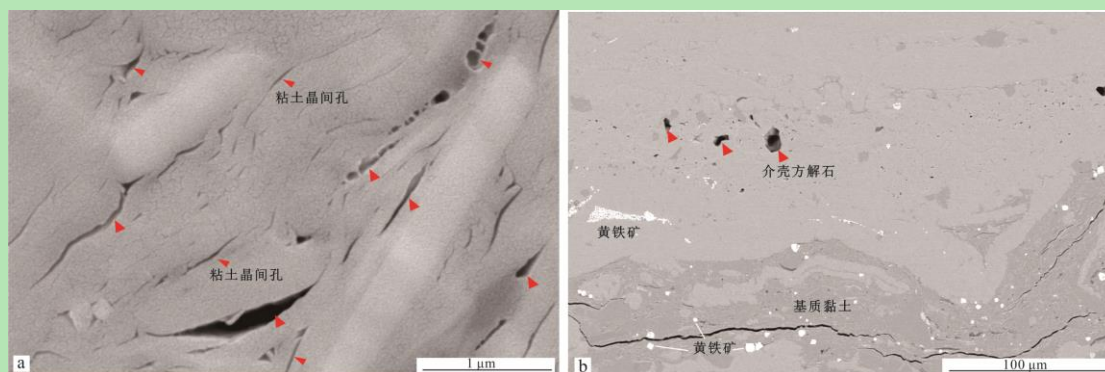


图 10 大安寨段黏土晶间孔和介壳方解石晶间孔电镜照片

(a) 黏土晶间孔，黑色页岩，LA1 井，3 515.2 m；(b) 方解石晶间孔，泥质介壳灰岩，梁平福祿镇剖面，大一亚段

Fig.10 Scanning electron microscope (SEM) images of clay intergranular pores and shell calcite intergranular pores from the Da'anzhai member

5.2 微裂缝对优质储集段的影响

大安寨段的灰岩类型主要为介壳灰岩，介壳是主要结构组分，介壳方解石晶间孔隙连通性较差，微裂缝的沟通对改善储渗能力至关重要^[14,27-28]。

密集的节理可作为高效的储渗空间，共轭节理相互连通形成网状缝网，节理缝宽度多为微米级—毫米级，渗流能力强。节理一般垂直层面，在上覆地层压力下，容易保持开启状态，有效性好。节理也可作为黑色页岩与介壳灰岩的沟通通道，为埋藏期有机酸溶蚀提供通道。

手标本及荧光扫描资料显示，对于节理不发育的介壳灰岩，荧光较强区域主要分布于介壳灰岩—页岩界面附近（图 11），介壳灰岩内部缺乏荧光显示，说明油气在介壳灰岩内的纵向运移是困难的，节理缝及两侧是野外油苗的主要赋存位置（图 12）。对于单个介壳而言，前人利用荧光图像与单偏光融合技术^[14]，也显示荧光较强区域主要分布于介壳边缘以及介壳内部微裂缝如解理缝或破裂缝附近。因此裂缝对页岩油储层储渗能力的改善至关重要。

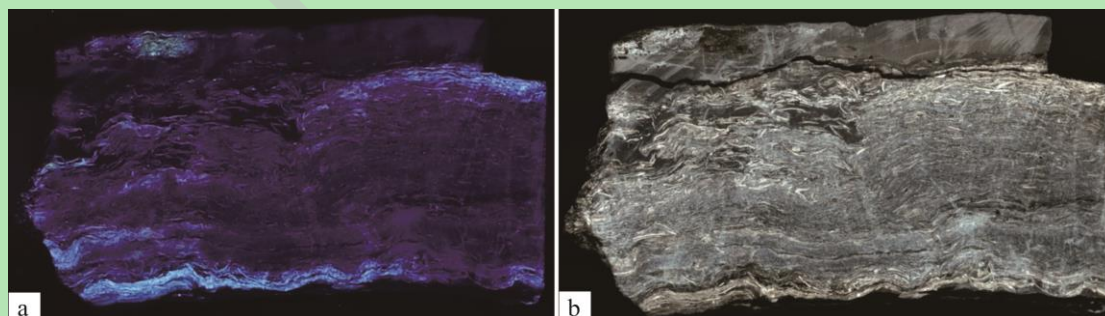


图 11 (a) 大安寨段泥质介壳灰岩荧光扫描照片 (b) 大安寨段泥质介壳灰岩白光扫描照片

Fig.11 (a) Fluorescence scanning photos of argillaceous shell limestone in the Da'anzhai member (b) white light scanning photos of argillaceous shell limestone in the Da'anzhai member

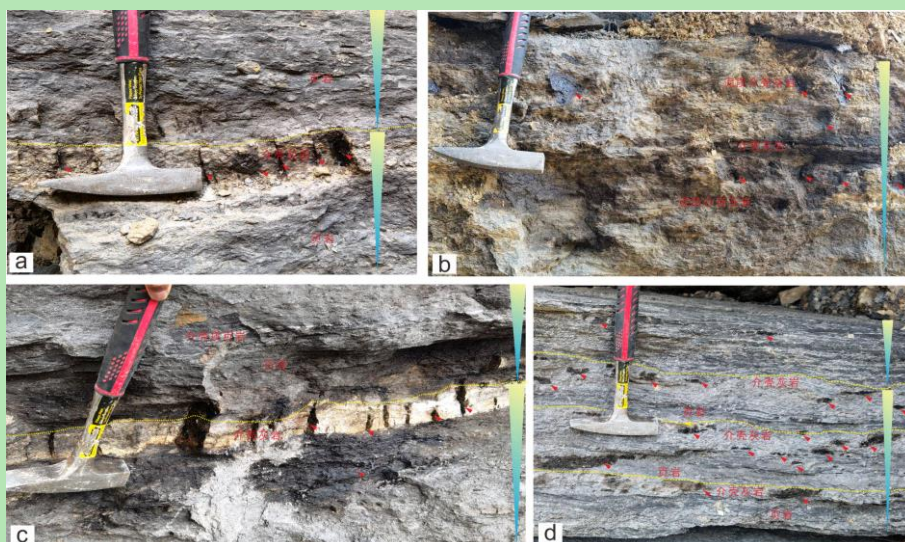


图 12 达州铁山剖面大安寨段页岩油油苗分布特征

(a) 介壳灰岩薄层, 节理发育, 含油, 纯页岩段未见油显示; (b) 泥质介壳灰岩, 节理缝中含油; (c) 介壳灰岩薄层, 节理发育, 油侵显示; (d) 泥页岩夹薄层介壳灰岩, 页理缝发育, 见油斑

Fig.12 Shale oil seepages distribution feature of the Da'anzhai member in the Tieshan section, Dazhou

沉积岩节理发育密度主要受控于岩性和地层厚度^[29-31]。厚层介壳灰岩节理密度小, 薄层介壳灰岩节理则往往密集发育, 有利于优质储集段的发育。

5.3 优质源储与油苗分布关系

综上所述, 大安寨段页岩油的优质烃源和优质储层是分离的, 不同岩相序列源储差异较大。6 种岩相序列中序列①虽然发育黑色页岩, 但缺乏介壳灰岩, 微裂缝不发育, 储渗能力较差; 序列②、序列③的既发育黑色页岩, 也发育介壳灰岩, 且灰岩厚度较薄, 节理发育, 是有利的源储组合 (图 13); 序列④~⑥发育介壳灰岩, 但缺乏相邻的优质黑色页岩, 这类岩相序列中的介壳灰岩若要富集油气, 往往需要断裂沟通下部烃源以及天然气驱动石油运聚^[32]。

上述认识与野外油苗分布特征一致。本次研究在新鲜垮塌的大安寨段大二亚段露头中, 发现了大量的页岩油油苗 (图 12), 特征如下。

(1) 纵向上油苗分布于大二亚段。主要出现于薄层、中层的介壳灰岩、泥质介壳灰岩中, 属于 2、3 类岩相序列, 而黑色页岩、含介壳页岩未见油苗。

(2) 野外页岩油苗多呈斑块状平行分布, 出现于介壳灰岩节理面以及节理沟通的溶孔洞附近, 有时可不规则侵染至相邻的介壳质页岩中, 证明节理微裂缝的重要作用。

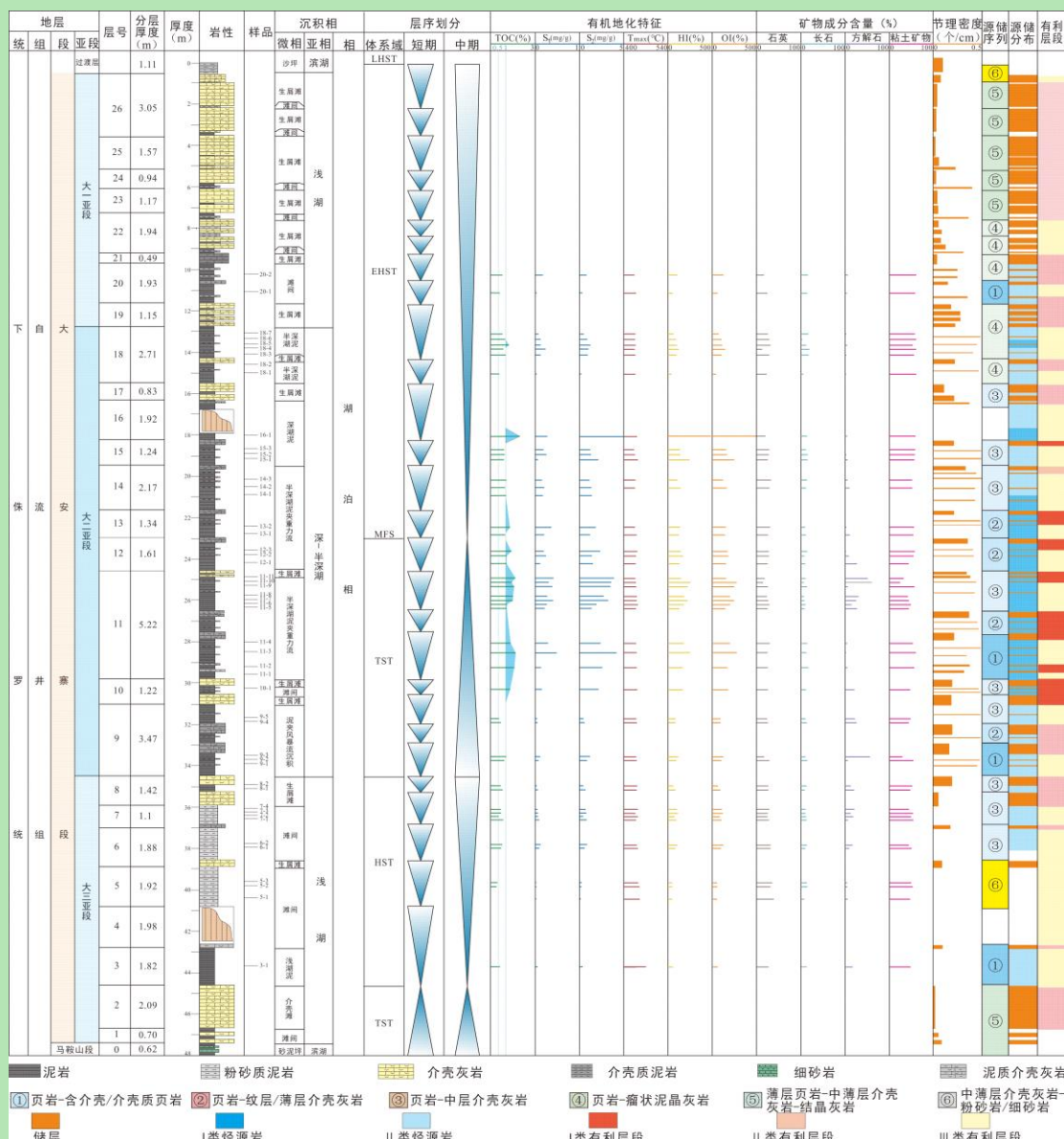


图 13 福禄镇侏罗系大安寨段页岩油地层—沉积—储层综合柱状图

Fig.13 Stratigraphy-sedimental-reservoir integrated histogram of shale oil in the Jurassic Da'anzhai member, Fuluzhen

6 结论

(1) 大安寨段为一套灰岩—页岩混积层系，夹少量粉砂岩、砂岩，不同岩相叠置形成 6 种向上变浅的分米级—米级的岩相序列：①页岩—含介壳/介壳质页岩、②页岩—纹层/薄层介壳灰岩、③页岩—中层介壳灰岩、④页岩—瘤状泥晶灰岩、⑤薄层页岩—介壳灰岩—结晶灰岩、⑥介壳灰岩—粉砂岩/细砂岩。

(2) 大安寨段页岩油源储分离，不同岩相序列的源储品质差异较大，序列①~③黑色页岩最为发育，品质最好，纵向上，单期序列内部黑色页岩的有机碳含量具有下高上低的趋势，TOC 随介壳含量的增加逐渐减少。

(3) 页岩孔隙度高于灰岩和粉砂岩, 但黏土含量高、孔径小, 渗流能力差。灰岩易发育节理缝, 节理密度随厚度增加呈指数下降。因此发育中层、薄层灰岩的序列②~④储集性能更好。

(4) 沉积于淡水、半咸水环境, 陆源砂质长期供应不足, 导致半深湖—深湖区黑色页岩多以富黏土、少石英为特征, 并不是良好页岩油储集层, 主要作为优质烃源岩供烃。页岩中的介壳灰岩隔夹层是页岩油气富集的主要场所。

(5) 微裂缝尤其是节理缝, 是高效的储渗空间, 一般垂直层面, 在上覆地层压力下, 容易保持开启状态, 有效性好。节理还可以作为黑色页岩与介壳灰岩的沟通通道, 为埋藏期有机酸溶蚀提供通道, 因此可以有效改善大安寨段介壳灰岩的储集性能。综合评价认为岩相序列②和③的源储配置条件最好, 是页岩油的有利层段。

致谢 感谢评审专家及编辑部老师的建设性意见。

参考文献 (References)

- [1] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35 (1): 184-196. [Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.]
- [2] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47 (1): 1-10. [Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.]
- [3] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34 (1): 3-17. [Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 3-17.]
- [4] 郭旭升, 魏志红, 魏祥峰, 等. 四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44 (1): 14-27. [Guo Xusheng, Wei Zhihong, Wei Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 14-27.]
- [5] 杨跃明, 文龙, 王兴志, 等. 四川盆地侏罗统大安寨段页岩油气地质特征及勘探有利区优选[J]. 天然气工业, 2023, 43 (4): 32-42. [Yang Yueming, Wen Long, Wang Xingzhi, et al. Geological characteristics and favorable exploration area selection of shale oil and gas of the Lower Jurassic Da'anzhai member in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 32-42.]
- [6] 黄东, 段勇, 杨光, 等. 淡水湖相沉积区源储配置模式对致密油富集的控制作用: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 石油学报, 2018, 39 (5): 518-527. [Huang Dong, Duan Yong, Yang Guang, et al. Controlling effect of source-reservoir configuration model on tight oil enrichment in freshwater lacustrine sedimentary area: A case study of the Jurassic Da'anzhai member in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 518-527.]
- [7] 汪泽成, 邹才能, 陶士振, 等. 大巴山前陆盆地形成及演化与油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 2004, 25 (6): 23-28. [Wang Zecheng, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan foreland Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 23-28.]
- [8] 郑荣才. 四川盆地侏罗统大安寨段高分辨率层序地层学[J]. 沉积学报, 1998, 16 (2): 42-49. [Zheng Rongcai. High-resolution sequence stratigraphy of Da'anzhai Formation, Lower Jurassic in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(2): 42-49.]
- [9] 陈超, 杨雪飞, 王兴志, 等. 四川盆地东北部下侏罗统自流井组大安寨段湖相碳酸盐岩沉积相分析[J]. 地质论评, 2020, 66

- (4): 836-852. [Chen Chao, Yang Xuefei, Wang Xingzhi, et al. Sedimentary facies analysis of Lacustrine carbonate in the Da'anzhai member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in northeastern Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 2020, 66(4): 836-852.]
- [10] 施开兰, 陈芳文, 段卓, 等. 重庆北碚和平水库剖面下侏罗统大安寨段湖相碳酸盐岩岩石类型及沉积环境[J]. *古地理学报*, 2015, 17(2): 198-212. [Shi Kailan, Chen Fangwen, Duan Zhuo, et al. Lacustrine carbonate rock types and sedimentary environments of the Lower Jurassic Da'anzhai member of Heping Reservoir section in Beibei area, Chongqing[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(2): 198-212.]
- [11] 冯荣昌, 吴因业, 杨光, 等. 川中大安寨段风暴沉积特征及分布模式[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 909-918. [Feng Rongchang, Wu Yinye, Yang Guang, et al. Storm deposition of the Da'anzhai member (Jurassic) in central Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 909-918.]
- [12] 谢林, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地文井—明月地区大安寨段储层研究[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1393-1398. [Xie Lin, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. A study of the reservoir of Da'anzhai member in Wenjing-Mingyue area of Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1393-1398.]
- [13] 卢炳雄, 郑荣才, 梁西文, 等. 川东地区侏罗系自流井组大安寨段页岩气(油)储层评价[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 488-496. [Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Liang Xiwen, et al. Evaluation of reservoirs in the Da'anzhai member of the Jurassic Ziliujing Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 488-496.]
- [14] 祝海华, 陈琳, 曹正林, 等. 川中地区侏罗系自流井组大安寨段黑色页岩孔隙微观特征及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1115-1126. [Zhu Haihua, Chen Lin, Cao Zhenglin, et al. Microscopic pore characteristics and controlling factors of black shale in the Da'anzhai member of Jurassic Ziliujing Formation, central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1115-1126.]
- [15] 王拥军, 童敏, 孙圆辉, 等. 四川盆地大安寨段介壳灰岩致密油储层特征[J]. *石油学报*, 2019, 40(1): 42-55. [Wang Yongjun, Tong Min, Sun Yuanhui, et al. Reservoir characteristics of Da'anzhai shell limestone tight oil in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(1): 42-55.]
- [16] 孙莎莎, 董大忠, 李育聪, 等. 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段陆相页岩油气地质特征及成藏控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 124-135. [Sun Shasha, Dong Dazhong, Li Yucong, et al. Geological characteristics and controlling factors of hydrocarbon accumulation in terrestrial shale in the Da'anzhai member of the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 124-135.]
- [17] 雷文智, 陈冬霞, 张芮, 等. 川中地区下侏罗统自流井组大二亚段陆相页岩层系岩性组合类型及其特征[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3657-3672. [Lei Wenzhi, Chen Dongxia, Zhang Rui, et al. Lithological Combination Types and Characteristics of Continental Shale Strata in the Second sub-member of Da'anzhai in Central Sichuan[J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3657-3672.]
- [18] 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 等. 四川盆地陆相页岩油成藏地质特征与重大发现[J]. *石油学报*, 2022, 43(7): 885-898. [He Wenyuan, Bai Xuefeng, Meng Qi'an, et al. Accumulation geological characteristics and major discoveries of lacustrine shale oil in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 885-898.]
- [19] 李英强, 何登发. 四川盆地及邻区早侏罗世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 219-232. [Li Yingqiang, He Dengfa. Evolution of tectonic-depositional environment and prototype basins of the Early Jurassic in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 219-232.]
- [20] 王永标, 徐海军. 四川盆地侏罗纪至早白垩世沉积旋回与构造隆升的关系[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2001, 26(3): 241-246. [Wang Yongbiao, Xu Haijun. Relations between evolution of sedimentary cycles and tectonic uplift around Sichuan Basin from Jurassic to early Cretaceous[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 241-246.]
- [21] 吴因业, 张天舒, 陶士振, 等. 深水湖盆沉积砂体的层序地层分析: 以四川侏罗系为例[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 798-806. [Wu Yinye, Zhang Tianshu, Tao Shizhen, et al. Sequence stratigraphy of depositional sandbodies in the deep-water lake basin: A case from Jurassic Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 798-806.]
- [22] Potter P E, Maynard J B, Pryor W A. *Sedimentology of shale*[M]. New York: Springer-Verlag, 1980: 306.
- [23] Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the

- hierarchy of stratigraphic forcing: Examples from Alpine Triassic platform carbonates[J]. *GSA Bulletin*, 1990, 102(5): 535-562.
- [24] Goodwin P W, Anderson E J. Punctuated aggradational cycles: A general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation[J]. *Journal of Geology*, 1985, 71(5): 515-533.
- [25] Osleger D, Read J F. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, U.S.A.[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(7): 1225-1252.
- [26] 王茂林, 程鹏, 田辉, 等. 页岩油储层评价指标体系[J]. *地球化学*, 2017, 46 (2): 178-190. [Wang Maolin, Cheng Peng, Tian Hui, et al. Evaluation index system of shale oil reservoirs[J]. *Geochimica*, 2017, 46(2): 178-190.]
- [27] 田泽普, 宋新民, 王拥军, 等. 考虑基质孔缝特征的湖相致密灰岩类型划分: 以四川盆地中部侏罗系自流井组大安寨段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44 (2): 213-224. [Tian Zepu, Song Xinmin, Wang Yongjun, et al. Classification of lacustrine tight limestone considering matrix pores or fractures: A case study of Da'anzhai member of Jurassic Ziliujing Formation in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(2): 213-224.]
- [28] 杨光, 黄东, 黄平辉, 等. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油高产稳产主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44 (5): 817-826. [Yang Guang, Huang Dong, Huang Pinghui, et al. Control factors of high and stable production of Jurassic Da'anzhai member tight oil in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 817-826.]
- [29] McQuillan H. Small-scale fracture density in Asmari Formation of southwest Iran and its relation to bed thickness and structural setting[J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(12): 2367-2385.
- [30] Ladeira F L, Price N J. Relationship between fracture spacing and bed thickness[J]. *Journal of Structural Geology*, 1981, 3(2): 179-183.
- [31] Eyssautier-Chuine S, Odonne F, Massonnat G. Control of bioclast abundance on natural joint density in carbonate rocks: Data from Oman, Provence and Languedoc (France)[J]. *Terra Nova*, 2002, 14(3): 198-204.
- [32] 陈世加, 张焕旭, 路俊刚, 等. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42 (2): 186-193. [Chen Shijia, Zhang Huanxu, Lu Jungang, et al. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 186-193.]

Lithofacies Characteristics and Shale Oil Source and Reservoir Evaluation of Lower Jurassic Da'anzhai Member in the Northeast Sichuan Basin: Case study from Tieshan Jinwo and Liangping Fuluzhen

ZHU HaiHua¹, ZHU GuangYi¹, ZHANG HaiYan², WANG MingLei³, ZHANG BenJian⁴, HONG HaiTao⁴, ZHANG Rui⁴, QIN ChunYu⁴, LI YuCong⁴, LI YongZhou²

1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Northeast Sichuan Gas Mine, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Dazhou, Sichuan 635000, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

4. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China

Abstract: [Objective] To understand the sedimentary characteristics of shell limestone-shale mixed strata in the Da'anzhai member of Sichuan Basin and its influence on favorable shale oil horizon, field profiles in Dazhou Tieshan Jinwo and Liangping Fuluzhen of the northeast Sichuan Basin were studied. [Methods] The lithology and

sequence, source and reservoir quality, and favorable strata of the Da'anzhai member were evaluated in detail by using rock thin sections, X-ray diffraction (XRD) whole rock and organic geochemical analyses. **[Results]** The results show that: 1) The Da'anzhai member is a set of limestone-shale mixed strata, and different lithologies are superimposed in an orderly way to form a variety of upward shallower sequences. From shallow lake to semi-deep lake-deep lake, six kinds of upward shallower decimeter to meter lithofacies sequences are identified: ①shale-shell shale, ②shale-thin shell limestone, ③shale-medium shell limestone, ④shale-nodular micrite, ⑤thin shale-shell limestone-crystalline limestone, and ⑥shell limestone-siltstone/fine sandstone. 2) The quality of source and reservoir varies greatly among different lithologic sequences. Black shales in sequence ①–③ are developed with the best source quality. The organic carbon content of black shales in a single sequence shows a trend of higher and lower organic carbon content, and total organic carbon (TOC) gradually decreases with the increase of shell limestone. Different lithologic properties vary greatly. The porosity of shale is higher than that of limestone and siltstone, but the clay content is high, the pore size is small, and the seepage capacity is poor. Limestone easily develops joint fractures, and the density of joints decreases exponentially with the increase of limestone thickness. Therefore, Sequence ②–④ developed middle and thin layer limestone has better reservoir performance. 3) The field oil seedling shows that the shale oil reservoir of the Da'anzhai member is characterized by the separation of source and reservoir and thin high-quality reservoir. The shale oil seepages in the field are mainly distributed near the joints of the medium–thin layer shell limestone. The favorable reservoir is primarily controlled by the sedimentary conditions, micro-fractures, and configuration of source and reservoir. **[Conclusions]** Sequences ② and ③ have the best source and reservoir configuration conditions, which are favorable intervals for shale oil.

Key words: northeast Sichuan; Sichuan Basin; Da'anzhai member; Jurassic; shale layer; sedimentary facies; shale oil; favorable intervals