

文章编号:1000-0550(2025)04-1507-15

致密砂岩岩相组合约束下成岩作用差异及成因 ——志靖—安塞地区延长组长8油层组

赵慧¹, 蒯克来¹, 操应长¹, 辛红刚^{2,3}, 淡卫东^{2,3}, 李弛^{2,3}

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710018

3. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 西安 710018

摘要 【目的】储层成岩作用的差异性,是影响储层非均质性特征的重要因素之一,制约着致密砂岩油气的分布预测。【方法】以志靖—安塞地区长8致密砂岩为研究对象,综合运用铸体薄片阴极发光(CL)、扫描电子显微镜(SEM)、碳氧同位素、激光剥蚀等一系列分析技术手段,明确储层在岩相组合约束下成岩作用的差异性及其成因。【结果】志靖—安塞地区长8致密砂岩储层可以分为三种岩相组合类型。Ⅰ型粉砂岩—细砂岩相夹泥质岩相组合与Ⅲ型细砂岩—粉砂岩—泥质岩相组合中,粉砂岩相粒度细,云母含量高,压实作用强烈,方解石胶结物在靠近泥质岩相的位置处大量发育,形成时间早,孔隙水受压实作用从泥岩向临近砂体排出,为方解石胶结物的形成提供物质来源;Ⅱ型细砂岩—中砂岩相组合中厚层砂体内部发育的方解石胶结物形成时间晚,主要与有机质演化有关;Ⅰ型和Ⅱ型岩相组合内部常见石英胶结物的发育,主要由长石溶蚀和黏土矿物转化提供硅质来源;溶蚀作用发育在岩石粒度较粗,塑性颗粒含量低的位置,该位置具有良好的流体运移通道。【结论】明确了研究区成岩作用的差异性及其成因,为储层非均质性成因的进一步研究提供重要依据。

关键词 长8段致密砂岩;岩相组合;成岩作用差异及成因;志靖—安塞地区

第一作者简介 赵慧,女,1999年出生,硕士研究生,油气储层地质学,E-mail: 1356309153@qq.com

通信作者 蒯克来,男,教授,常规与非常规油气储层地质学,E-mail: xikelai@upc.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.096

CSTR: 32268.14/j.ejxb.62-1038.2023.096

0 引言

近年来,鄂尔多斯盆地三叠系延长组油气勘探取得重大突破,长8油层组是主要的产油层段之一,勘探前景广阔^[1-2],但整体上为低孔—低渗致密储层。致密砂岩油气储层往往表现出强烈的非均质性特征,包括沉积非均质性、成岩非均质性以及构造非均质性等方面^[3-4]。目前,鄂尔多斯盆地致密砂岩油气储层关于沉积非均质性的研究较为成熟,并且作为大型坳陷湖盆,构造作用强度相对较弱,构造非均质性对致密砂岩油气储层影响作用相对有限。相比较而言,成岩非均质性在鄂尔多斯盆地致密砂岩储层中的研究显得尤为重要。成岩非均质性主要受到沉积环境、沉积物的组分和结构以及不同时期流体改

造等因素的综合影响^[5-7],是物理和化学成岩过程共同作用的结果。不同岩相及岩相组合控制下的储层成岩作用特征也不相同。有学者认为不同层序单元和岩相组合下的成岩作用存在着明显的差异性^[8-10],如单一厚层砂体边缘的碳酸盐胶结壳及厚层砂体中部的强烈溶蚀带等^[11]。在相同埋藏深度下,储层成岩作用强度的差异与距离砂泥岩界面的远近有关^[12]。在砂岩夹泥岩的情况下,砂泥岩界面附近发育的胶结作用多强于内部^[13],在砂岩透镜体与钙质泥岩的接触带内,会形成致密的钙质胶结壳^[14],从而导致储层形成强烈的非均质性。致密砂岩储层往往经历了复杂而强烈的成岩作用改造^[15-17],是储层致密化的决定因素,也是沉积物形成之后储层非均质性形成的主导因素,因此研究储层成岩作用

收稿日期:2023-06-02;修回日期:2023-09-13;录用日期:2023-10-23;网络出版日期:2023-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42072161)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42072161]

的差异性特征可以进一步明确储层的非均质性成因,进而为后续勘探开发工作提供重要依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地地处华北地台中西部地区,总面积达 $37\times 10^4\text{ km}^2$,是我国第二大中、新生代沉积盆地^[18]。鄂尔多斯盆地是华北克拉通的组成部分,结构简单,构造起伏小,断裂较少出现,呈现明显的二元结构,总体上表现为整体抬升、持续沉降、接触整合的形态。根据盆地现今的构造以及演化史,可以将其划分为以下构造单元(图1):北部的伊盟隆起,西部的西缘冲断构造带、天环坳陷,中部的陕北斜坡,东部的晋西挠褶带以及南部的渭北隆起^[19-20]。鄂尔多斯盆地三叠系延长组经历了一次完整的内陆湖盆演化,记录了一个湖泊的发生发展、剧烈拗陷、萎缩衰亡过程^[21]。鄂尔多斯盆地在三叠系延长期主要发育三角洲沉积,整个地层可以被分成10个油层组,从下往上依次是长10至长1。晚三叠世长8期,湖盆构造稳定,湖底开阔宽缓,水体较浅,总体上沉积呈现出西厚东薄、南厚北薄的形态^[22-23]。

志靖—安塞地区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡构造带内,该区在晚三叠世由于受印支运动的影响,在其南部出现大型的湖泊^[24]。延长组长8段由上下两套河道砂体和河道间泥岩组成,层理构造发育,浅灰

色细砂岩、灰绿色粉砂岩、泥质粉砂岩韵律互层,中间夹薄层暗色泥岩,是一套在内陆湖泊三角洲沉积体系上发育的重要油气储集层。沉积相以三角洲平原亚相和三角洲前缘亚相为主,是陕北地区的主力勘探目的层之一,也是研究区主要的含油层系^[24]。

2 岩石学和岩相组合特征

志靖—安塞地区长8储层整体岩石类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主(图2a),岩屑类型(图2b)主要为变质岩岩屑,沉积岩岩屑发育相对较少。分选主要为中等,分选好次之,磨圆呈次棱角状(图2c,d)。

岩相是成岩作用对储层产生影响的物质基础,不同的岩相类型以及相同岩相不同岩相组合类型的储层,具有一定的差异性^[12]。基于岩心观察与薄片分析,可以发现志靖—安塞地区长8储层岩相类型主要为中砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相(表1)以及泥质岩相,粒度整体较细。中砂岩相粒度以中砂为主,石英长石含量较高,分选中等—好,磨圆呈次棱角状—次圆状,发育块状构造;细砂岩相是研究区最常见的岩相,石英长石含量次之,岩石粒度以细砂为主,包括一些极细砂,分选中等,磨圆以次棱角状—次圆状为主,发育块状构造、交错层理、平行层理等;粉砂岩相粒度整体较细,分选中等—差,磨圆以次棱角状为

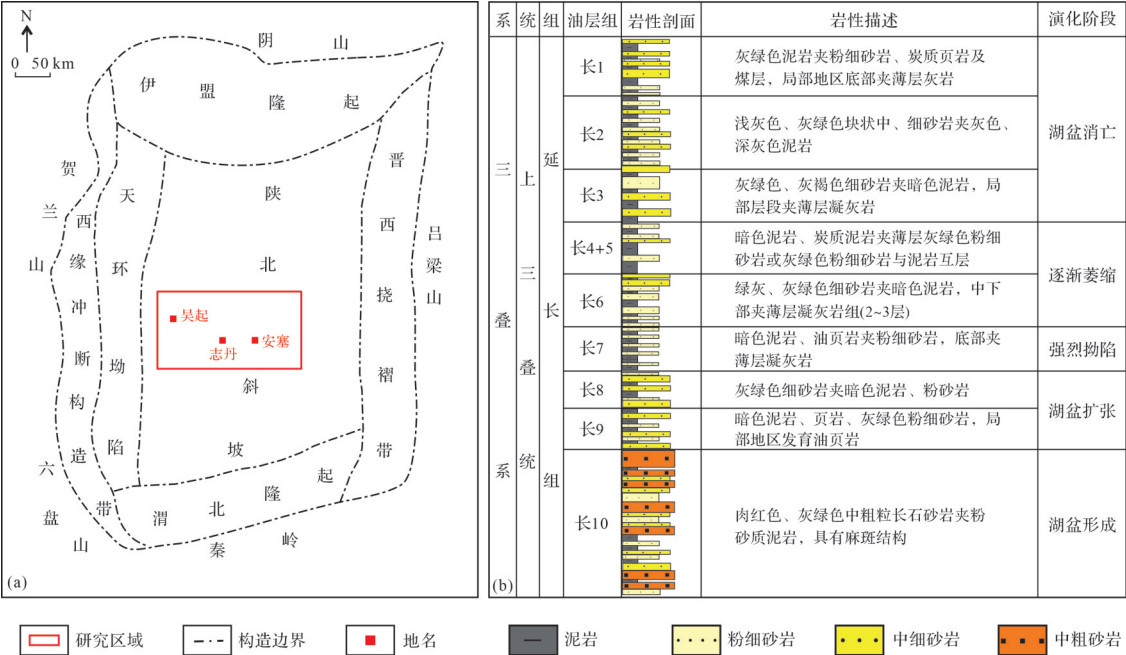


图1 (a)志靖—安塞地区区域位置及(b)延长组地层划分图(据长庆油田)

Fig.1 (a) Regional location of Zhijing-Ansai area; (b) stratigraphic divisions of Yanchang Formation (after Changqing Oilfield)

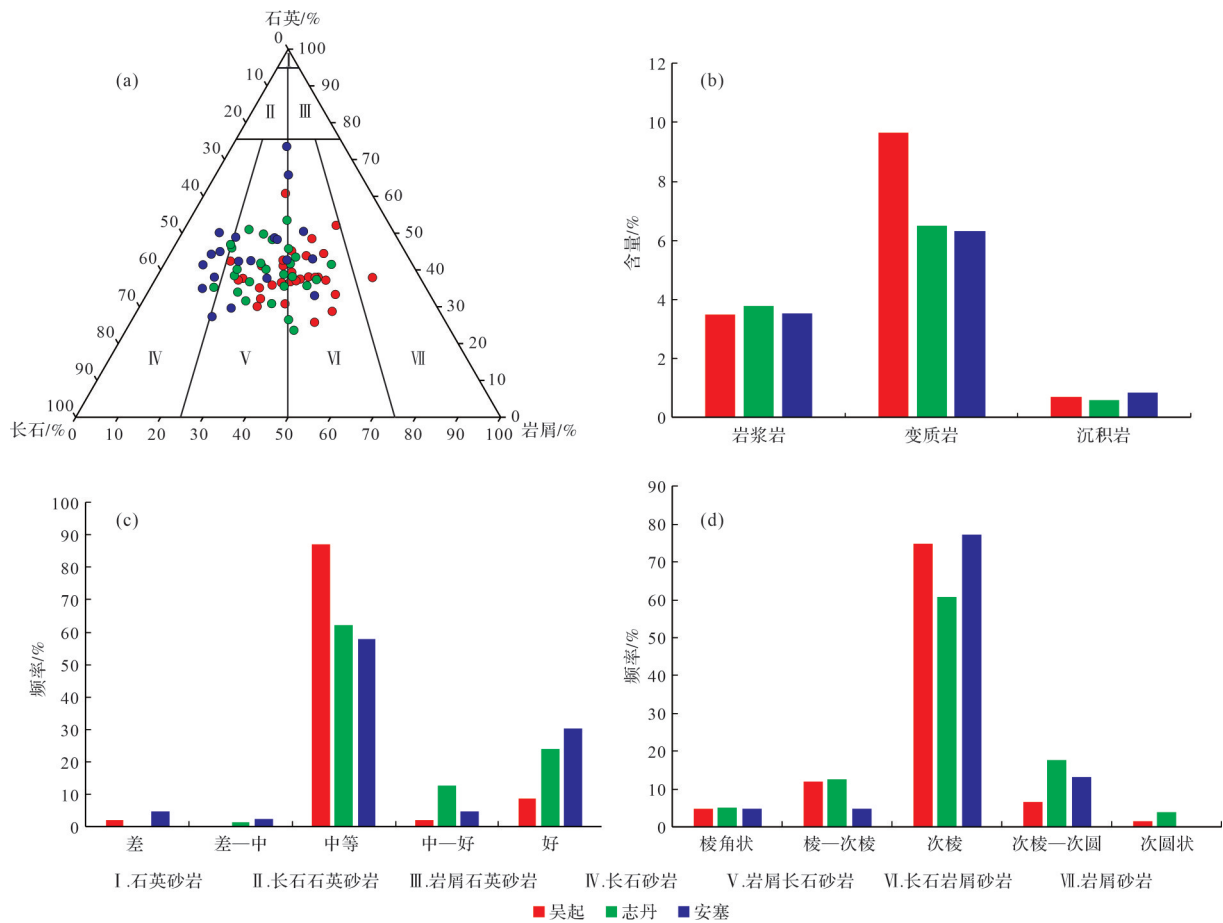


图2 研究区岩石学特征
(a)岩石类型;(b)岩屑类型及含量;(c)分选特征;(d)磨圆特征
Fig.2 Petrologies in the study area
(a) rock types; (b) types and content of rock debris; (c) sorting characteristics; (d) sounding characteristics

表1 不同岩相类型岩石组构特征

岩相类型	石英/%	长石/%	岩浆岩岩屑/%	变质岩岩屑/%	沉积岩岩屑/%	云母/%	分选	磨圆	沉积构造
中砂岩相	最大值45	最大值55	最大值12	最大值17.5	最大值4	最大值12.7	中等—好	次棱角状—次圆状	块状构造
	最小值16.7	最小值23	最小值2	最小值5	最小值0	最小值1			
	平均值34.95	平均值33.46	平均值4.00	平均值8.88	平均值0.71	平均值4.48			
细砂岩相	最大值46	最大值61	最大值9	最大值12	最大值1	最大值9.5	中等	次棱角状—次圆状	块状构造
	最小值15	最小值23	最小值2	最小值4	最小值0	最小值0.5			平行层理
	平均值32.37	平均值34.67	平均值4.07	平均值7.96	平均值0.15	平均值4.39			交错层理
粉砂岩相	最大值45	最大值54	最大值6	最大值14.2	最大值5	最大值12	中等—差	次棱角状	块状构造
	最小值13	最小值21	最小值1.5	最小值2	最小值0	最小值2			浪成砂
	平均值31.88	平均值31.25	平均值3.38	平均值8.81	平均值1.08	平均值7.61			纹层理

主,石英长石等含量较低,云母含量高,发育浪成砂纹层理;泥质岩相以泥质颗粒为主,多呈现深灰色、黑色,整体为块状构造。

通过对地层进行纵向分析,根据岩相类型以及不同岩相之间的组合关系,研究区延长组长8油层组

大致可以分出三种岩相组合类型(图3):(1) I 型岩相组合为粉砂岩相—细砂岩相夹泥质岩相,该组合特征是底部为细砂岩相,向上叠置粉砂岩相,粒度变细,多发育交错层理,具有下粗上细的粒度正韵律,多个正韵律砂体中夹泥质岩相,厚度不等,该岩相组

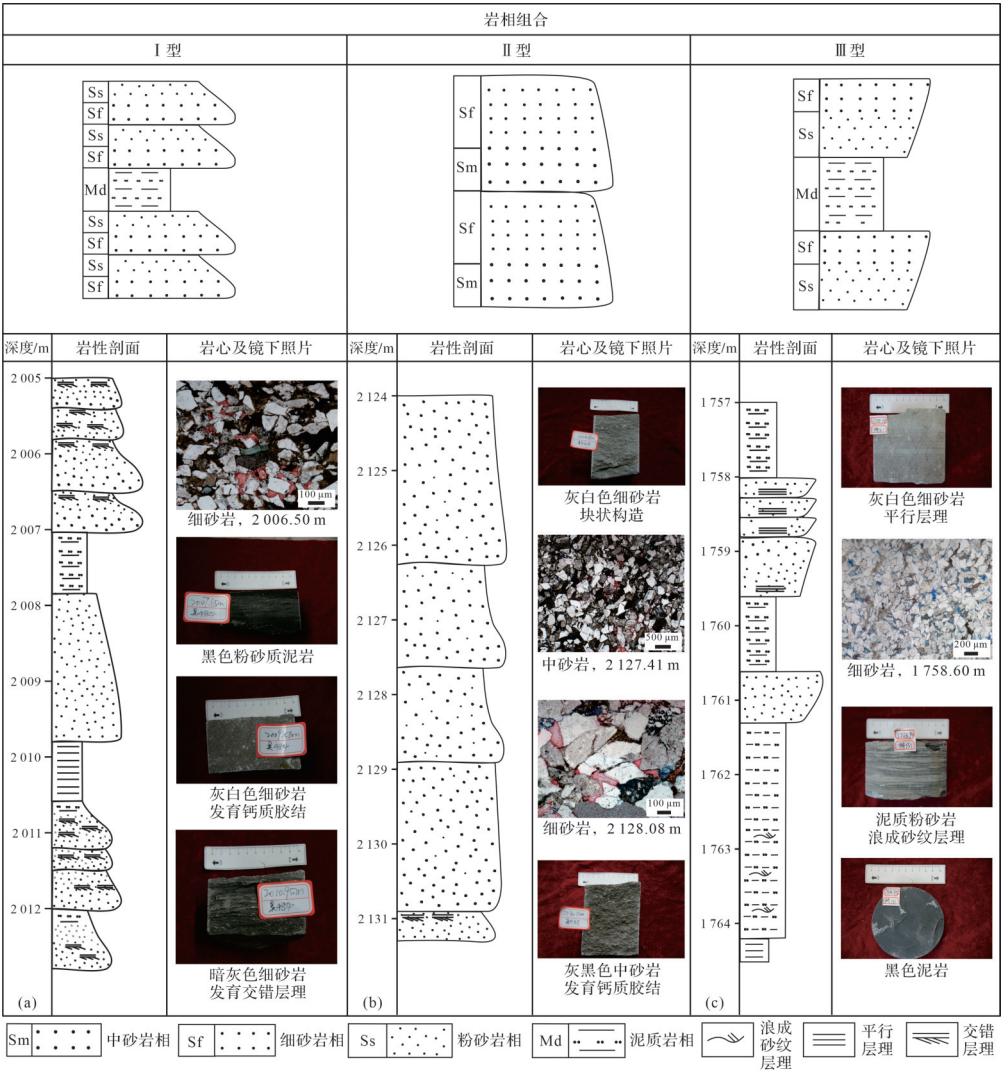


图3 研究区岩相及岩相组合类型
(a)吴484井;(b)新318井;(c)桥131井

Fig.3 Lithofacies and types of lithofacies assemblages in the study area
(a) well Wu 484; (b) well Xin 318; (c) well Qiao 131

合类型在研究区较为常见,主要发育在三角洲平原分流河道沉积微相与三角洲前缘沉积亚相水下分流河道与水下天然堤沉积微相中;(2)Ⅱ型岩相组合为细砂岩相—中砂岩相,该组合岩石粒度整体较粗,纵向上表现为厚层砂体叠置,石英、长石等刚性颗粒含量高,层理构造较少发育,多为块状构造,主要发育在三角洲前缘水下分流河道、分流间湾沉积微相中;(3)Ⅲ型岩相组合为细砂岩相—粉砂岩相—泥质岩相,该组合特征为下细上粗的反韵律组合,粒度较细,多以粉砂岩相为主,可见平行层理,浪成砂纹层理较为发育,主要发育在三角洲前缘沉积亚相的分支河口砂坝微相中。

3 成岩作用类型及特征

3.1 压实作用

压实作用是志靖—安塞地区普遍发育的一种成岩作用,是导致鄂尔多斯盆地延长组长8段砂岩储层致密的主要成岩作用之一^[25]。研究区长8致密砂岩储层压实程度普遍较高,颗粒之间多为线到凹凸接触,云母发生弯曲变形(图4a),部分薄片中可以观察到大量云母等塑性颗粒定向排列。但是岩石中未见颗粒之间明显的缝合线接触,化学压实作用较少发育。在部分井段压实作用相对较弱,表现为颗粒之间点到线接触,原生孔隙含量较高(图4h)。中砂岩相压实减孔量小于粉砂岩相与细砂岩

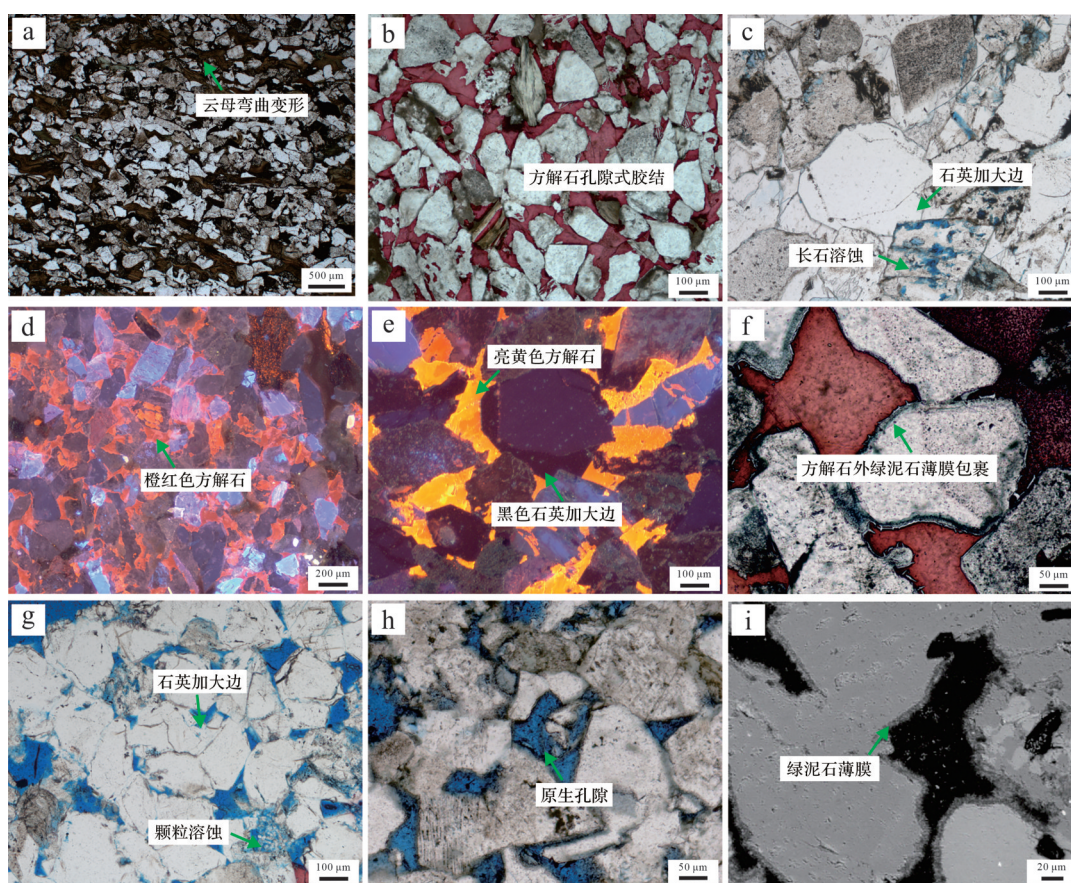


图4 研究区长8致密砂岩成岩作用特征

(a)压实作用强,云母发生弯曲变形,丹190井,1 336.20 m,单偏光,染色薄片;(b)方解石孔隙式胶结,吴484井,2 009.40 m,单偏光,染色薄片;(c)石英加大边及颗粒溶蚀现象,新318井,2 125.48 m,单偏光,染色薄片;(d)阴极发光下橙红色的方解石,新410井,1 995.15 m;(e)阴极发光下亮黄色的方解石以及不发光的石英加大边,新318井,2 125.48 m;(f)方解石胶结物外有绿泥石薄膜的包裹,沿19井,1 169.8 m,单偏光,染色薄片;(g)长石颗粒溶蚀,新318井,2 125.48 m,单偏光,染色薄片;(h)原生孔隙发育,沿19井,1 177.35 m,单偏光,染色薄片;(i)扫描电镜下的绿泥石胶结物,丹181井,1 250.50 m

Fig.4 Diagenetic characteristics of Chang 8 tight sandstone in the study area

(a) strong compaction, bending deformation of mica, well D190, 1 336.20 m, plane-polarized light (PPL), stained thin sections; (b) calcite pore cementation, well Wu 484, 2 009.40 m, PPL, stained thin sections; (c) quartz overgrowth and particle dissolution phenomenon, well Xin 318, 2 125.48 m, PPL, stained thin sections; (d) CL image showing orange red calcite, well Xin 410, 1 995.15 m; (e) CL image showing bright yellow calcite and non-luminous quartz overgrowth, well Xin 318, 2 125.48 m; (f) calcite cements wrapped in chlorite film, well Yan 19, 1 169.8 m, PPL, stained thin sections; (g) feldspar particle dissolution, well Xin 318, 2 125.48 m, PPL, stained thin sections; (h) developed primary pores, well Yan 19, 1 177.35 m, PPL, stained thin sections; (i) SEM image of chlorite cements, well Dan 181, 1 250.50 m

相(图5a),云母含量较高的粉砂岩相压实作用最为强烈。

3.2 胶结作用

3.2.1 碳酸盐胶结物

碳酸盐胶结物是导致研究区延长组长8段砂岩储层致密的重要成岩矿物,发育有方解石、铁方解石、铁白云石和白云石,以方解石胶结物为主,可以见到孔隙式胶结的方解石(图4b),部分薄片甚至呈基底式胶结,颗粒呈悬浮状分布于方解石胶结物之间。方解石胶结物在阴极发光下主要呈现出橙红色(图4d)和亮黄色(图4e)两种颜色,亮度差异明显。在部分薄片中可以观察到方解石胶结物外有绿泥石

膜的包裹(图4f),该类方解石胶结物的阴极发光颜色主要以亮黄色为主,形成时间较晚。方解石胶结物发育普遍,在三大类岩相中均有发育。据方解石胶结物碳氧同位素分析显示(图5b),研究区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值主要位于低负值到低正值之间,分布范围介于 -6.65‰ ~ 1.84‰ ,主要集中于 -2‰ ~ 0 , $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 位于高负值区域,分布范围介于 -20.53‰ ~ -12.28‰ ,主要集中于 -20‰ ~ -15‰ 。经过计算,研究区古盐度大都在120以下(图5c),推测水介质为陆相淡水来源^[26]。由于在电子显微镜下能够找到的方解石胶结物中的包裹体数量有限,且测温结果存在较大偏差,为保证结果准确性,结合前人研究,利用氧同位素数据结果来

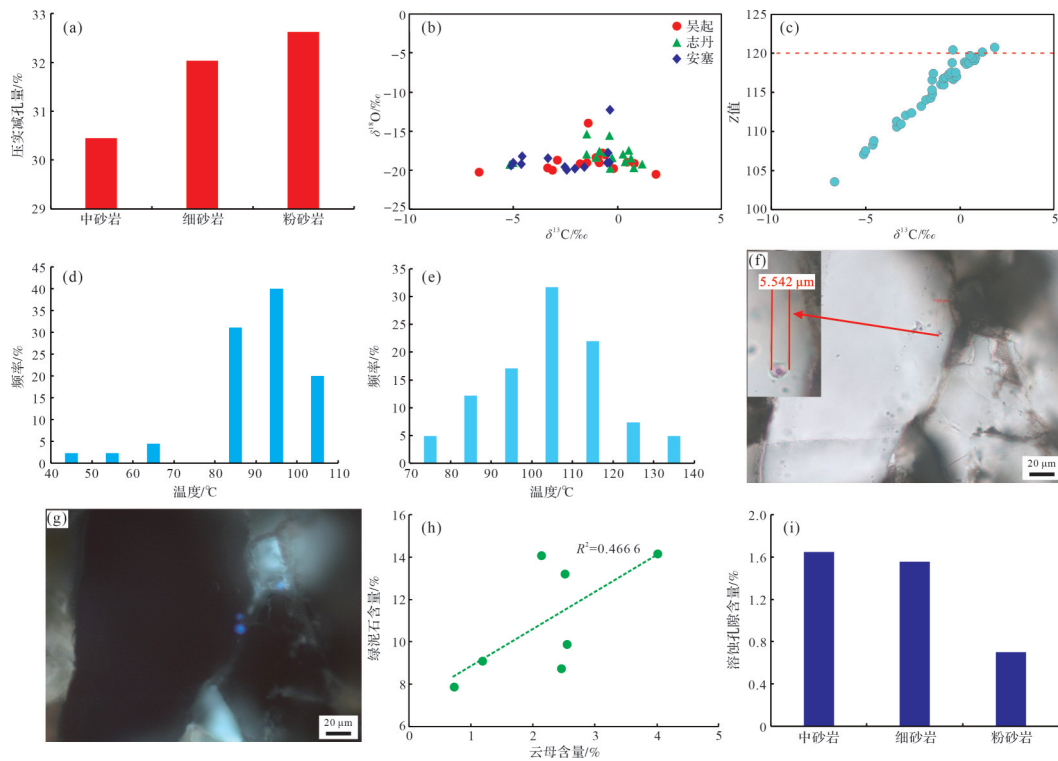


图5 研究区胶结物特征

(a)不同岩相压实减孔量特征;(b)方解石胶结物碳氧同位素特征;(c)方解石胶结物古盐度特征;(d)方解石形成温度特征;(e)石英包裹体温度特征;(f)单偏光下石英加大边中的流体包裹体,谷6井,2 001.75 m;(g)荧光下石英加大边中的盐水包裹体不发荧光,谷6井,2 001.75 m;(h)绿泥石含量与云母含量的关系;(i)不同岩相溶蚀孔隙含量

Fig.5 Characteristics of cements in the study area

(a) pore reduction during compaction of different lithofacies; (b) carbon and oxygen isotopes of calcite cements; (c) paleosalinity of calcite cement; (d) calcite formation temperatures; (e) quartz inclusion temperatures; (f) enlarged PPL image of fluid inclusions at quartz edges, well Gu 6, 2 001.75 m; (g) enlarged fluorescence image showing non-fluorescent salt-water inclusions at the edge of quartz, well Gu 6, 2 001.75 m; (h) chlorite group content related to mica content; (i) dissolution pore content in different lithofacies

恢复方解石胶结物的形成温度,利用如下公式来计算^[27-28]:

$$1000\ln\alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6/T^2 - 2.89 \quad (1)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_{\text{方解石}}$ 为实测的碳酸盐样品的值, $\delta^{18}\text{O}$ 采用SMOW标准, T 为方解石胶结物形成温度。研究区整体方解石胶结物温度介于40℃~110℃,其中主要温度分布在80℃~110℃(图5d)。

3.2.2 硅质胶结物

石英胶结物是研究区主要的硅质胶结物类型,多数以石英加大边的形式存在,因为存在“尘线”,易与碎屑石英颗粒区分(图4c),孔隙充填式的石英胶结物较少见。对于无“尘线”存在的自生石英,主要依靠阴极发光下自生石英胶结物不发光,在镜下显示为黑色(图4e)的特征与石英碎屑颗粒区分开来。研究区发育的石英加大边宽度较窄,含量多在1%以下,阴极发光下的自生石英颜色均匀,无明显的分带现象。储层中自生矿物的流体包裹体能够记录在成

岩过程中自生矿物的形成时间与沉淀温度等地质信息^[29]。在志靖—安塞地区长8段致密砂岩储层发育的石英胶结物中,可以观察到流体包裹体的存在。本次研究中所测得的流体包裹体的类型及均一温度如图5所示,在镜下观察到的流体包裹体大部分为两相包裹体,包括盐水包裹体和烃类包裹体,在室温下能看到气泡的存在。大部分流体包裹体在紫外荧光下不发光,为盐水包裹体,形态主要以椭圆形为主,大小介于3~6 μm,少数可达10 μm。对石英胶结物中盐水包裹体均一温度进行了测定,结果显示均一温度介于70℃~140℃,主要集中于90℃~120℃。

3.2.3 黏土矿物胶结物

志靖—安塞地区长8段砂岩储层中发育的黏土矿物多样,可见伊利石、绿泥石、高岭石等,其中绿泥石和伊利石发育居多。伊利石主要呈纤维状,分布在原生孔隙或者粒间溶蚀孔中。绿泥石含量较高,主要有两类存在形式,一类是孔隙衬里的方式,以绿

泥石薄膜的形式存在(图4i),另一类是孔隙充填式,多存在于原生粒间孔隙中,呈书页状。绿泥石膜厚度均匀,近于相等,通常与颗粒表面垂直,朝着孔隙内部发育,部分绿泥石膜外孔隙中充填着方解石(图4f)。在绿泥石薄膜存在的地方,压实作用较弱,颗粒之间点到线接触,很好地保护了原生孔(图4h)。研究区范围内安塞地区云母含量高,绿泥石胶结物较为发育,且黑云母的含量与绿泥石胶结物的发育具有一定的相关性(图5h)。绿泥石是一种含水的层状铝硅酸盐矿物,富含铁镁离子^[30],研究表明岩屑经过蚀变可以产生大量的铁镁离子^[31-32],为绿泥石的形成提供物质条件。

3.3 溶蚀作用

志靖—安塞地区延长组长8段致密砂岩中溶蚀作用相较于压实作用和胶结作用而言发育程度较低,溶蚀对象以长石颗粒为主(图4c,g),可见岩屑溶蚀。长石溶蚀形态多样,大部分长石颗粒沿解理缝发生溶蚀,形成粒内溶蚀孔,部分沿长石边缘溶蚀,呈现港湾状形态,少部分长石溶蚀强烈,呈现镂空状颗粒残余形态。在极少部分井中可以观察到溶蚀作用十分强烈的现象,该部分砂岩粒间溶蚀孔较发育,岩屑颗粒溶蚀常见,溶孔内可见溶蚀残余石英颗粒和高岭石。粉砂岩相岩石粒度较细,压实作用较强,溶蚀孔隙较中砂岩相与细砂岩相发育少,溶蚀作用弱(图5i)。

4 岩相组合约束下成岩作用的差异性及其成因

4.1 压实作用的差异性

志靖—安塞地区长8致密砂岩储层整体上压实作用较强,在三种岩相组合的约束下,I型粉砂岩—细砂岩相夹泥质岩相组合与Ⅲ型细砂岩—粉砂岩—泥质岩相组合的压实作用要强于Ⅱ型细砂岩—中砂岩相组合。在I型和Ⅲ型岩相组合发育的粉砂岩相中,云母多发生弯曲变形,塑性颗粒出现定向排列等现象(图6i),压实作用发育强烈。

通常压实作用的影响因素为作用在岩石上的有效应力,但是在相同的有效应力作用下,刚性颗粒和塑性颗粒具有不同的压实强度,所以岩石的组分也是影响压实作用的重要因素之一。在一定的物源条件下,水动力强度控制着储层砂体的碎屑成分,在岩

屑含量较高的储层中,尤其以塑性岩屑为主的砂体中,容易形成因压实而导致的致密储层^[33]。岩屑和云母在储层后期成岩作用改造过程中,是重要的组成部分,影响储层成岩作用的发育^[25]。通过统计发现,塑性岩屑含量与砂岩的抗压实能力呈反比,岩石组分中塑性颗粒占比越大,砂岩抗压实能力就相对越弱,经历的压实作用相对较强。而云母含量高的砂岩抗压能力同样较弱,经历压实作用后容易发生变形弯曲(图7a,b)。另外,粒度对于压实作用也有一定的影响,一方面由于粒度较小时,在上覆载荷作用下颗粒易于滑动和重新排列,从而使得颗粒之间的支撑力减小;另一方面岩石的粒度小,就会阻碍流体运移,不利于成岩流体的交换,抑制胶结作用和溶蚀作用,从而该部分岩石主要以压实作用为主^[34]。通过统计粒度与压实减孔率的关系可以看出,粒径细的岩石整体上经历的压实作用要强于粒径粗的(图7c)。

4.2 胶结作用的差异性

在各类岩相组合中,方解石胶结物的发育是比较普遍的,但是分布不均,在I型和Ⅱ型岩相组合的正序叠置砂体底部,方解石胶结物含量较高,可以观察到呈孔隙式胶结的方解石(图6h)。I型和Ⅲ型岩相组合中靠近泥质岩相发育的方解石,阴极发光的颜色偏向橙红色,亮度较低(图6c),碳同位素普遍较重(图8a),形成时间早,且随着与泥岩距离的增加,方解石胶结物的含量总体上是在减少的,方解石胶结物的分布与距离砂泥岩界面的远近有一定的关系。上覆和下伏的泥岩层会通过压实作用向临近砂岩排出矿化水,泥质和黏土质沉积物释放的孔隙流体会对临近砂岩储层的成岩作用产生影响。泥岩中富含高浓度钙离子和重碳酸根离子的孔隙水,在埋深较大的情况下,受压实驱动流体和地层超压幕式流体作用进入砂岩储层,靠近泥岩发育的砂体中由于大量高浓度钙离子和碳酸根离子的注入,导致碳酸钙过饱和,从而在砂泥岩界面处形成致密的碳酸盐胶结^[35]。

通过激光剥蚀对方解石中的元素进行分析(图8b),可以发现靠近泥岩的砂体中发育的方解石,其Li、Mg、K、Al、Fe等离子含量要高于砂体内部的。且XRF测试结果表明,泥岩中富含Ca、C、Mg、Al、K、Fe等元素,靠近泥岩的方解石对于泥岩中的元素有很好的继承性(图9)。

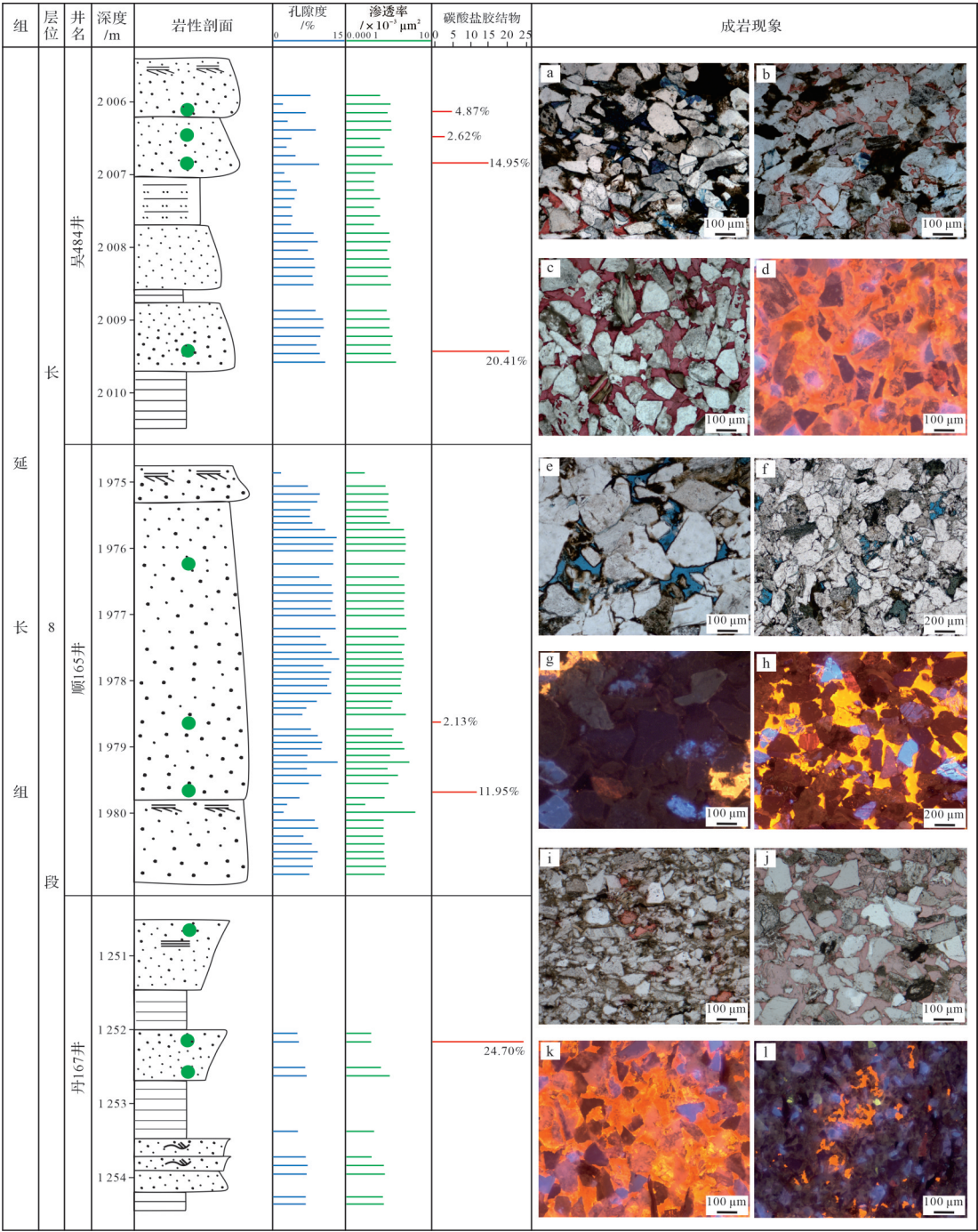


图6 岩相组合约束下的成岩作用特征

(a)方解石胶结物,吴484井,2 006.50 m,单偏光,染色薄片;(b)方解石胶结物含量高,吴484井,2 006.70 m,单偏光,染色薄片;(c)方解石孔隙式胶结,吴484井,2 009.40 m,单偏光,染色薄片;(d)方解石孔隙式胶结,吴484井,2 009.40 m,阴极发光;(e)原生孔隙发育,顺165井,1 976.30 m,单偏光,染色薄片;(f)颗粒溶蚀发育,顺165井,1 978.80 m,单偏光,染色薄片;(g)石英胶结物发育,顺165井,1 978.80 m,阴极发光;(h)阴极下亮黄色方解石,顺165井,1 979.85 m;(i)压实作用强烈,丹167井,1 250.70 m,单偏光,染色薄片;(j)方解石孔隙式胶结,丹167井,1 252.10 m,单偏光,染色薄片;(k)阴极下橙红色方解石,丹167井,1 252.10 m;(l)阴极下橙红色方解石,丹167井,1 252.70 m

Fig.6 Diagenetic characteristics constrained by lithofacies assemblages

(a) calcite cementation, well Wu 484, 2 006.50 m, PPL, stained thin sections; (b) high content of calcite cements, well Wu 484, 2 006.70 m, PPL, stained thin sections; (c) calcite pore cementation, well Wu 484, 2 009.40 m, PPL, stained thin sections; (d) calcite pore cementation, well Wu 484, 2 009.40 m, CL; (e) developed primary pores, well Shun 165, 1 976.30 m, PPL, stained thin sections; (f) particle dissolution, well Shun 165, 1 978.80 m, PPL, stained thin sections; (g) quartz cements, well Shun 165, 1 978.80 m, CL; (h) CL image showing bright yellow calcite, well Shun 165, 1 979.85 m; (i) strong compaction, well Dan 167, 1 250.70 m, PPL, stained thin sections; (j) calcite pore cementation, well Dan 167, 1 252.10 m, PPL, stained thin sections; (k) CL image showing orange red calcite, well Dan 167, 1 252.10 m; (l) CL image showing orange red calcite, well Dan 167, 1 252.70 m

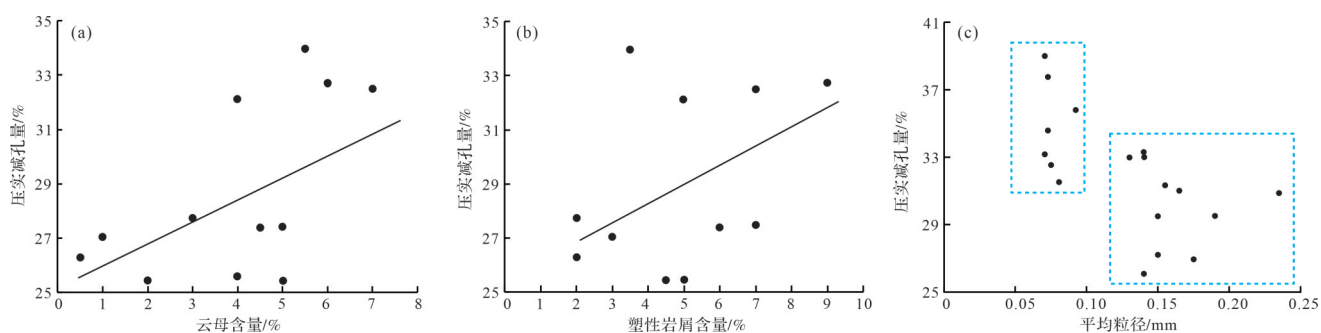


图7 压实减孔量与岩石组构的关系

(a)压实减孔量与云母含量的关系;(b)压实减孔量与塑性岩屑含量的关系;(c)压实减孔量与岩石平均粒径的关系

Fig.7 Relationship between compaction porosity reduction and rock fabric

(a) mica content; (b) plastic rock debris content; (c) average rock particle size

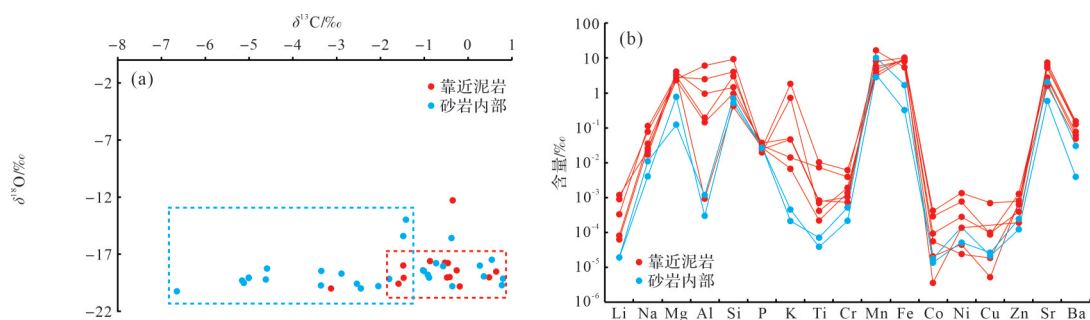


图8 方解石胶结物特征

(a)靠近泥岩与砂体内部发育的方解石胶结物碳氧同位素特征;(b)靠近泥岩与砂体内部发育的方解石胶结物元素特征

Fig.8 Calcite cements in mudstone and sand bodies

(a) C and O isotopes in the cements; (b) elements in the cements

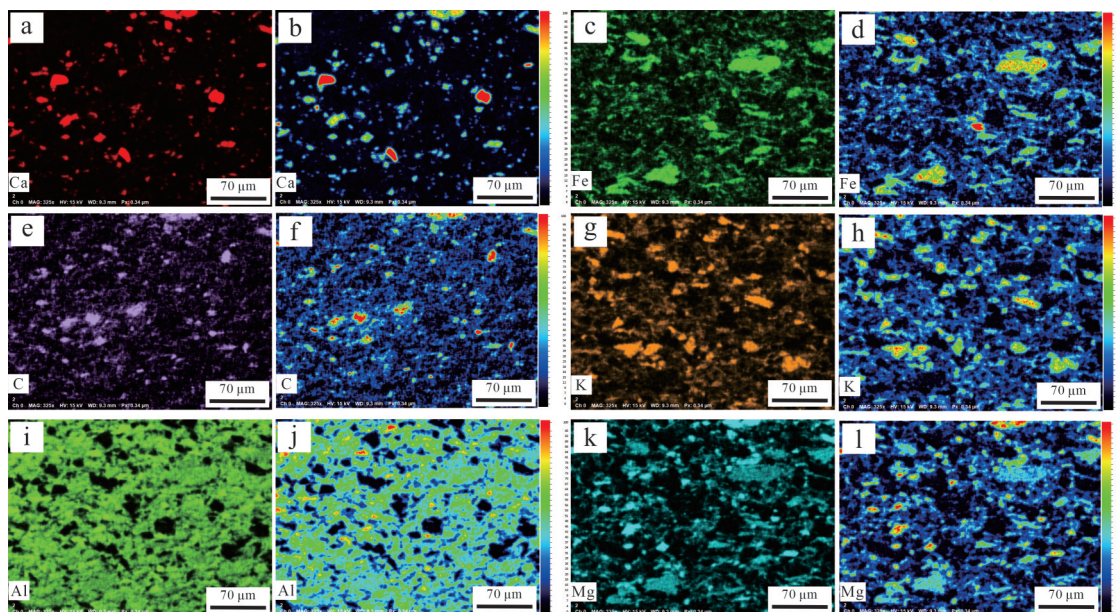


图9 泥岩XRF元素特征(丹130井,1 674.35 m)

(a)Ca元素分布特征;(b)Ca元素相对含量面分布;(c)Fe元素分布特征;(d)Fe元素相对含量面分布;(e)C元素分布特征;(f)C元素相对含量面分布;(g)K元素分布特征;(h)K元素相对含量面分布;(i)Al元素分布特征;(j)Al元素相对含量面分布;(k)Mg元素分布特征;(l)Mg元素相对含量面分布

Fig.9 XRF images of element characteristics in mudstone (well Dan 130, 1 674.35 m)

(a, b) distribution and relative Ca content; (c, d) distribution and relative Fe content; (e, f) distribution and relative C content; (g, h) distribution and relative K content; (i, j) distribution and relative Al content; (k, l) distribution and relative Mg content

Ⅱ型细砂岩—中砂岩相组合中,远离泥质岩相,方解石胶结物的阴极发光颜色偏向亮黄色,其外面可见有绿泥石薄膜的发育(图4f),说明其形成时间较晚,该部分方解石所含的Li、Mg、K、Al、Fe等离子含量低,且Fe/Mn值小于1。这是由于Ⅱ型岩相组合岩石粒度整体较粗,为胶结物的沉淀提供了一定的空间,当晶体增大到一定程度时,晶体的结晶速度就会减慢,此时方解石内部随着 Mn^{2+} 含量的相对增高,Fe $^{2+}$ 含量并没有呈现明显的增高趋势,这与Mn元素在方解石晶体中的分配系数增大有关^[36]。厚层砂体中发育的方解石胶结物碳同位素较轻,形成时间晚于靠近泥岩发育的方解石,主要与后期有机质演化有关。受到烃源岩中有机质脱羧形成的CO $_2$ 的影响,烃源岩中黏土矿物转化以及烃源岩孔隙水中的Ca $^{2+}$,随着成岩流体进入储层,多沿高渗带发生侧向的平流传输^[14],为厚层砂岩中发育的方解石提供物质来源。Ⅱ型岩相组合发育的中砂岩相粒度粗,抗压能力强,与上部细砂岩相相比具有更高的渗透性,形成流体运移优势通道,成岩流体优先进入该部分储层,

导致方解石胶结物容易在叠置砂体的底部沉淀,形成碳酸盐胶结层^[37]。

石英胶结物在Ⅰ型、Ⅱ型岩相组合中均有发育,但在Ⅲ型岩相组合中少见。在石英胶结物发育的位置常见长石颗粒溶蚀(图6f,g),经过统计长石溶蚀与石英胶结物的含量具有一定的相关性(图10a)。长石具有较高的Si/Al值,例如碱性长石(K-Na系列)Si/Al值接近3,在地层水的参与下,长石发生溶蚀向高岭石或伊利石进行转化,可以释放出一定量的硅元素^[35]。通过AMICS扫描图像可以清晰地看出(图10b),长石溶蚀处可见伊利石和高岭石的存在,因而长石溶蚀可能是研究区石英胶结物重要的物质来源。但是部分薄片观察到长石溶蚀含量较低,而石英胶结物较发育,说明长石溶蚀并不是石英胶结物的唯一物质来源。利用激光剥蚀对石英加大边和石英颗粒内部的主量元素进行分析,石英加大边中的Mg元素含量介于 $6.60 \times 10^{-7} \sim 5.80 \times 10^{-4}$,Fe元素含量介于 $3.13 \times 10^{-6} \sim 2.40 \times 10^{-3}$,Al元素含量介于 $6.89 \times 10^{-5} \sim 1.99 \times 10^{-3}$,石英颗粒中的Mg元素含量介于

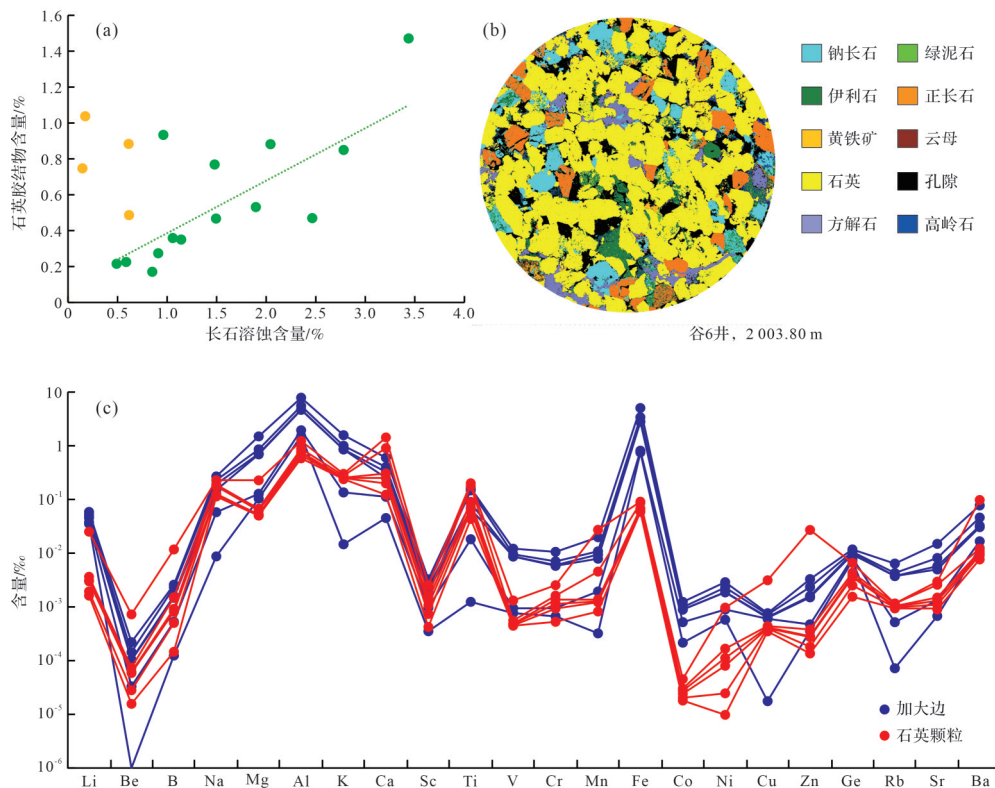


图10 石英胶结物特征

(a)石英胶结物含量与长石溶蚀含量的关系;(b)谷6井,AMICS扫描矿物特征;(c)激光剥蚀分析石英加大边与石英颗粒的元素特征

Fig.10 Characteristics of quartz cements

(a) quartz cement content vs dissolution content of feldspar; (b) automated mineralogy system for SEM (AMICS) scan image of minerals, well Gu 6; (c) laser ablation analysis of quartz overgrowth and quartz particles

$1.40 \times 10^{-7} \sim 1.56 \times 10^{-4}$, Fe 元素含量介于 $1.10 \times 10^{-6} \sim 5.60 \times 10^{-4}$, Al 元素含量介于 $5.52 \times 10^{-5} \sim 1.40 \times 10^{-4}$ 。通过比较可以发现,石英加大边中除了铝元素之外,镁、铁元素的含量也明显高于石英颗粒(图 10c)。前人研究表明,砂岩或泥岩中的蒙脱石在温度逐渐升高时会向伊利石转变,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右转化为伊蒙混层,当温度大于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时形成伊利石。在转化过程中会伴随着 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 等阳离子的析出,为石英胶结物的形成提供物质来源^[38],此外石英加大边中的 Li 元素含量增加,表明黏土矿物转化作用的增强^[35],所以研究区石英胶结物的形成主要与长石溶蚀以及黏土矿物转化有关。

4.3 溶蚀作用的差异性

志靖—安塞地区长 8 段致密砂岩储层发育的溶蚀作用多见于 I 型和 II 型岩相组合中,溶蚀类型以颗粒溶蚀为主,主要见长石溶蚀。不同岩相组合中溶蚀作用的差异性原因主要在于岩相类型的不同,粉砂岩岩相溶蚀作用较少发育(图 5i)。在 I 型岩相组合下,部分井段中可以观察到在靠近泥质岩相位置的细砂岩相中,碳酸盐胶结物发育少的位置,岩

石发生强烈的溶蚀作用,溶蚀类型以粒间溶蚀为主,发育伊利石等黏土矿物,碳酸盐胶结作用弱,石英胶结物较为发育(图 4g)。II 型岩相组合中溶蚀现象较为普遍,石英、长石等刚性颗粒含量高,多发育粒内溶蚀(图 6f)。结合镜下观察可以发现,溶蚀作用普遍发育在岩石粒径较大的位置,岩石粒度对溶蚀作用具有一定的影响,溶蚀含量与岩石粒径呈正相关(图 11a)。这是由于粒度较粗的岩石,酸性流体易于进入储层,溶蚀作用明显,而粒度细,杂基含量高的岩石,由于压实作用大多强烈发育,导致流体很难进入发生溶蚀作用^[39];且优势运移通道是控制酸性流体流动的主要因素,酸性流体会优先作用于物性较好的砂岩^[40]。此外,通过统计也可以发现,颗粒溶蚀与长石含量呈正相关,与塑性岩屑以及云母的含量呈负相关(图 11b~d)。溶蚀作用形成的核心是要具备充足的可溶物质和通畅的成岩流体流动条件,岩石中颗粒的性质影响着压实作用的强度,塑性颗粒抗压能力弱,一定程度上增强了储层在压实过程中的致密程度,从而不利于后期溶蚀流体的运移^[41]。

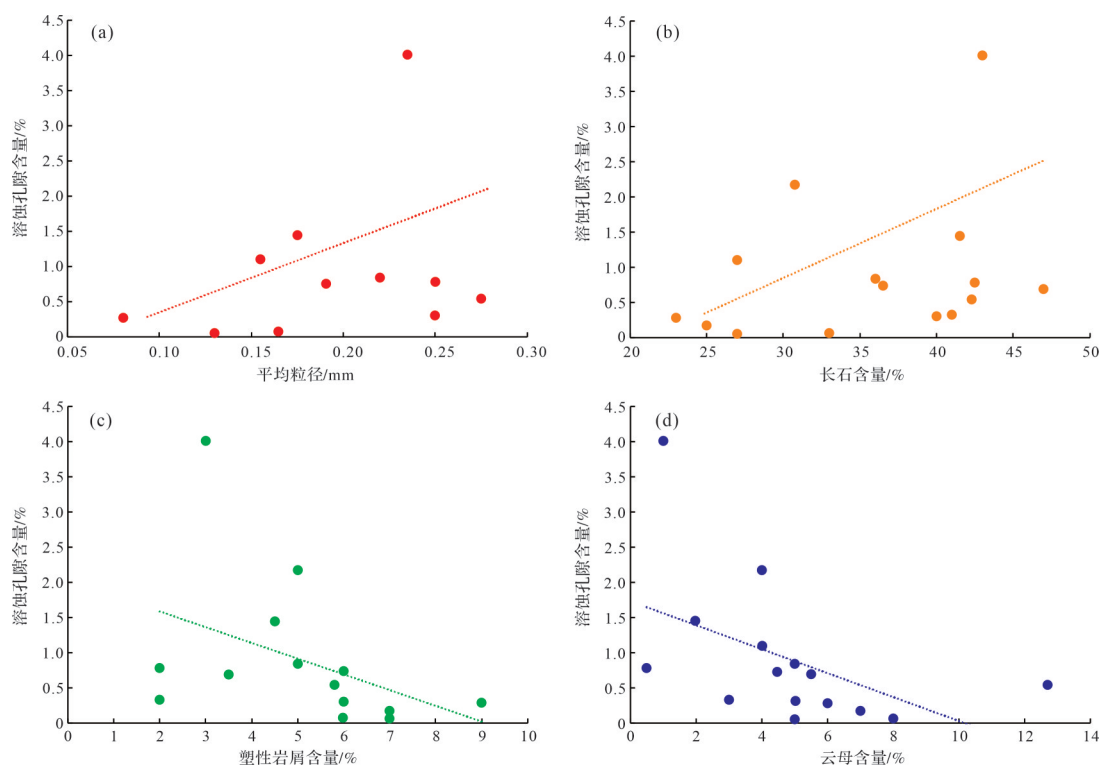


图 11 溶蚀作用特征

(a) 溶蚀孔隙含量与平均粒径的关系; (b) 溶蚀孔隙含量与长石含量的关系; (c) 溶蚀孔隙含量与塑性岩屑含量的关系; (d) 溶蚀孔隙含量与云母含量的关系

Fig.11 Dissolution characteristics

(a) dissolved pore content vs average particle size; (b) dissolved pore content vs feldspar content; (c) dissolved pore content vs plastic rock debris; (d) dissolved pore content vs mica content

5 结论

(1) 研究区长8致密砂岩储层可以分为三种岩相组合类型, I型粉砂岩相—细砂岩相夹泥质岩相组合, 自下而上是由粗变细的正韵律, 整体以细砂岩相为主, 主要发育在三角洲平原分流河道沉积微相与三角洲前缘沉积亚相水下分流河道与水下天然堤沉积微相中; II型细砂岩相—中砂岩相组合, 粒度整体较粗, 多为块状构造, 纵向上呈现出厚层砂体叠置的正韵律, 主要发育在三角洲前缘水下分流河道、分流间湾沉积微相中; III型细砂岩相—粉砂岩相—泥质岩相组合, 粒度整体较细, 以粉砂岩相为主, 自下而上由细变粗, 为反韵律组合, 主要发育在三角洲前缘分支河口沙坝沉积微相中。

(2) 不同岩相组合成岩作用特征有所差异, I型和II型岩相组合的正序叠置砂体底部以及III型岩相组合的顶部, 碳酸盐胶结物含量高, 可以观察到孔隙式胶结的方解石。靠近泥质岩相发育的方解石胶结物形成时间早, 泥岩中的流体在压实作用下向临近砂岩排出, 为胶结物的沉淀提供物质来源。而砂体内部的方解石胶结物形成时间晚, 主要受后期有机质热演化的影响。石英胶结物多发育在正序叠置砂体内部, 其形成主要与长石溶蚀以及黏土矿物转化有关。I型与III型岩相组合的粉砂岩相中粒度较细, 塑性组分多, 压实作用发育强烈, 储层发生的致密化程度高。溶蚀作用在I型和II型岩相组合中常见, 较高的刚性颗粒含量以及较粗的粒径有利于抗压实, 降低岩石的致密程度, 为溶蚀流体的运移提供良好的通道。

致谢 衷心感谢三位审稿专家提出的宝贵意见, 对文章质量的提升颇有帮助。

参考文献(References)

- [1] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40. [Fu Jinhua, Dong Guodong, Zhou Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.]
- [2] 邵晓州, 王苗苗, 齐亚林, 等. 鄂尔多斯盆地平凉北地区长8油藏特征及成藏主控因素[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(6): 59-69. [Shao Xiaozhou, Wang Miaomiao, Qi Yalin, et al. Characteristics and main controlling factors of Chang 8 reservoir in northern Pingliang area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 59-69.]
- [3] 曹江骏, 陈朝兵, 程皇辉, 等. 成岩作用对深水致密砂岩储层微观非均质性的影响: 以鄂尔多斯盆地合水地区长7油层组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 1031-1046. [Cao Jiangjun, Chen Chaobing, Cheng Huanghui, et al. Effect of diagenesis on micro-heterogeneity of deepwater tight sandstone Reservoirs: A case study from the Triassic Chang 7 oil-bearing formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 1030-1046.]
- [4] 李忠, 张丽娟, 寿建峰, 等. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性: 以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2320-2330. [Li Zhong, Zhang Lijuan, Shou Jianfeng, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: A case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2320-2330.]
- [5] 公繁浩, 鲍志东, 季汉成, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统长6段储层成岩非均质性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 639-646. [Gong Fanhao, Bao Zhidong, Ji Hancheng, et al. Study on the reservoir diagenesis heterogeneity of Chang 6 Member of Upper Triassic in Jiyuan area of Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(3): 639-646.]
- [6] 周鸿璞, 黄文辉, 姜在兴, 等. 利津洼陷沙四上亚段砂岩透镜体成岩作用非均质性成因[J]. 东北石油大学学报, 2015, 39(5): 52-62. [Zhou Hongpu, Huang Wenhui, Jiang Zaixing, et al. Origin of diagenesis heterogeneity of lenticular sandbodies in the upper Es₄, Lijin sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(5): 52-62.]
- [7] Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: Implications for mass transfer in sedimentary basins[J]. Sedimentology, 2000, 47(S1): 95-120.
- [8] Morad S, Al-Ramadan K, Ketzer J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1267-1309.
- [9] Kordi M, Turner B, Salem A M K. Linking diagenesis to sequence stratigraphy in fluvial and shallow marine sandstones: Evidence from the Cambrian Ordovician lower sandstone unit in southwestern Sinai, Egypt[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(8): 1554-1571.
- [10] 田景春, 李明瑞, 张世平, 等. 箕状断陷湖盆陡坡带层序地层格架内成岩相特征: 以东营凹陷北陡坡带古近系沙河街组为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(3): 225-230. [Tian Jingchun, Li Mingrui, Zhang Shiping, et al. Diagenetic facies character in sequence stratigraphic frameworks of the steep slope zone in an half fault lake basin-taking Paleogene Shahejie Formation of the north steep slope zone of Dongying depression as example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(3): 225-230.]

- [11] Xi K L, Cao Y C, Jähren J, et al. Diagenesis and reservoir quality of the Lower Cretaceous Quantou Formation tight sandstones in the southern Songliao Basin, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 330: 90-107.
- [12] 马奔奔, 操应长, 王艳忠, 等. 东营凹陷盐家地区沙四上亚段砂砾岩储层岩相与物性关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(2): 495-506. [Ma Benben, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Relationship between lithofacies and physical properties of sandy conglomerate reservoirs of Es_{4s} in Yanjia area, Dongying Depression[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2): 495-506.]
- [13] 蕙克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长₇亚段砂—泥协同成岩作用[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6): 1-11. [Xi Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, et al. Synergistic diagenesis of sandstone and mudstone in Chang 7₃ sub-member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(6): 1-11.]
- [14] 林救若. 民丰洼陷北带沙四段多期石油充注对碳酸盐胶结作用影响机理[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019. [Lin Miruo. Influence mechanism of multistage oil emplacements on carbonate cementation in the fourth Member of the Shahejie Formation in the north of Minfeng Sag[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.]
- [15] 蕙克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1495-1507. [Xi Kelai, Cao Yingchang, Zhu Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1495-1507.]
- [16] 刘金库, 彭军, 石岩, 等. 致密砂岩储层石英溶蚀成因及对孔隙发育的影响: 以川中—川南过渡带须家河组为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1090-1097. [Liu Jinku, Peng Jun, Shi Yan, et al. The genesis of quartz dissolution in tight sand reservoirs and its impact on pore development: A case study of Xujiache Formation in the transitional zone of central-southern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1090-1097.]
- [17] Milliken K L, Olson T. Silica diagenesis, porosity evolution, and mechanical behavior in siliceous mudstones, Mowry shale (Cretaceous), Rocky Mountains, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 87(4): 366-387.
- [18] 王琪, 马东旭, 余芳, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组不同粒级砂岩成岩演化及孔隙定量研究[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 163-172. [Wang Qi, Ma Dongxu, Yu Fang, et al. The diagenetic evolution and quantitative research of porosity in different grain size sandstones of the Lower Shihezi Formation in Linxing area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 163-172.]
- [19] 傅强, 孙喜天, 刘永斗. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(11): 1537-1540. [Fu Qiang, Sun Xitian, Liu Yongdou. Geologic significance and re-establishment of basin character in Late Triassic of Ordos Basin[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(11): 1537-1540.]
- [20] 李明瑞, 侯云超, 谢先奎, 等. 鄂尔多斯盆地平凉—演武地区三叠系延长组油气成藏模式及勘探前景[J]. *石油学报*, 2023, 44(3): 433-446. [Li Mingrui, Hou Yunchao, Xie Xiankui, et al. Hydrocarbon accumulation mode and exploration prospect of Triassic Yanchang Formation in Pingliang-Yanwu area, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(3): 433-446.]
- [21] 朱筱敏, 刘芬, 朱世发, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组物源区构造属性研究[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(3): 416-425. [Zhu Xiaomin, Liu Fen, Zhu Shifa, et al. On the tectonic property of the provenance area of the Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(3): 416-425.]
- [22] 王西强, 舒成龙, 高雪, 等. 对鄂尔多斯盆地三叠系延长组传统地层划分方案的反思: 以姬塬油田罗38区、罗211区为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(6): 21-30. [Wang Xiqiang, Shu Chenglong, Gao Xue, et al. Reflection on the traditional stratigraphic division program for Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin: A case of block Luo-38 and Luo-211 of Jiyuan oilfield[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(6): 21-30.]
- [23] 李渊, 丁熊, 王兴志, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长8段浅水三角洲砂体结构特征[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(1): 57-72. [Li Yuan, Ding Xiong, Wang Xingzhi, et al. Structural characteristics of sand bodies in shallow-water deltas in the Chang 8 member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(1): 57-72.]
- [24] 何晓波. 陕北吴起—志丹地区延长组长8油层组成藏主控因素研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017. [He Xiaobo. Research on the main controlling factors of reservoir forming of Yanchang Formation 8 in the Wuqi-Zhidan area, northern Shaanxi[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.]
- [25] 钟大康, 祝海华, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 61-68. [Zhong Dakang, Zhu Haihua, Sun Haitao, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstones in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 61-68.]
- [26] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6): 943-950. [Yao Jingli, Wang Qi, Zhang Rui, et al. Origin and spatial distribution of carbonate cements in Yanchang Fm. (Triassic) sandstones within the lacustrine center of Ordos Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(6): 943-950.]
- [27] Friedman I, O'Neil J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[R]. Reston: USGS, 1977: 440-450.
- [28] 蕙克来. 松辽盆地南部白垩系泉头组四段致密砂岩油气成储

- 机制[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2016. [Xi Kelai. Genetic mechanism of tight sandstone oil and gas reservoir of the Cretaceous Quantou Formation fourth member in the southern Songliao Basin, China[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.]
- [29] Makowitz A, Lander R H, Milliken K L. Diagenetic modeling to assess the relative timing of quartz cementation and brittle grain processes during compaction[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6): 873-885.
- [30] 丁晓琪,韩玫梅,刘岩,等. 鄂尔多斯盆地延长组物源与成岩耦合关系研究[J]. 地质与勘探,2013,49(2):384-392. [Ding Xiaoqi, Han Meimei, Liu Yan, et al. Coupling relation between provenance and diagenesis of siliciclastic reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(2): 384-392.]
- [31] 万友利,张峭楠,丁晓琪,等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组成岩作用与优质储层关系研究[J]. 新疆地质,2013,31(2):207-212. [Wan Youli, Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, et al. The study of relationship between the diagenesis and the quality reservoir of Yanchang Formation in Fuxian area of Ordos Basin, China[J]. Xin Jiang Geology, 2013, 31(2): 207-212.]
- [32] 张金亮,司学强,梁杰,等. 陕甘宁盆地庆阳地区长8油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. 沉积学报,2004,22(2):225-233. [Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Liang Jie, et al. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 225-233.]
- [33] 徐小童,张立宽,冷明泽,等. 深层砂岩储层成岩作用差异性及其与储层质量的关系:以准噶尔盆地中部征沙村地区侏罗系为例[J]. 天然气地球科学,2021,32(7):1022-1036. [Xu Xiaotong, Zhang Likuan, Ye Mingze, et al. Different diagenesis of deep sandstone reservoir and its relationship with reservoir property: Case study of Jurassic in Zhengshacun area, central Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(7): 1022-1036.]
- [34] 王明培,夏东领,伍岳,等. 鄂尔多斯盆地红河油田长8致密砂岩储层成岩特征[J]. 石油实验地质,2018,40(6):786-792,835. [Wang Mingpei, Xia Dongling, Wu Yue, et al. Diagenesis features of Chang 8 tight sandstone reservoir in Honghe oil field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 786-792, 835.]
- [35] 杨田. 东营凹陷沙三段深水重力流砂岩与泥岩协同成岩演化及优质储层成因[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2017. [Yang Tian. Synergistic diagenetic evolution of deep-water gravity flow sandstones-mudstones and genesis of high quality reservoirs in the third member of the Shahejie Formation, Dongying Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.]
- [36] 李文茂,张天操,钟玉梅,等. 川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物形成机制:来自微量元素的证据[J]. 海相油气地质,2022,27(2):175-184. [Li Wenmao, Zhang Tiancao, Zhong Yumei, et al. Formation mechanism of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression: Evidence from trace elements[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2022, 27(2): 175-184.]
- [37] Xi K L, Cao Y C, Liu K Y, et al. Geochemical constraints on the origins of calcite cements and their impacts on reservoir heterogeneities: A case study on tight oil sandstones of the Upper Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(10):2447-2485.
- [38] 杨尚锋. 致密砂岩储层特征及成岩致密化机理:以鄂尔多斯盆地盐池地区长6油层组为例[D]. 北京:中国石油大学(北京),2021. [Yang Shangfeng. Characteristics of tight sandstone reservoir and its genetic mechanism of diagenetic densification: A case study of the Chang 6 oil group in Yanchi area, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.]
- [39] 张琴,朱筱敏,钟大康,等. 山东东营凹陷古近系碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 古地理学报,2004,6(4):493-502. [Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, et al. Clastic reservoir properties and their controlling factors of the Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(4): 493-502.]
- [40] 窦文超. 鄂尔多斯盆地西南部长6—长7段砂岩致密成因及非均质性研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2018. [Dou Wenchao. Origin of tightness and reservoir heterogeneity of Chang 6-Chang 7 sandstones, southwest Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.]
- [41] 雷涛,王桥,任广磊,等. 鄂尔多斯盆地山西组致密砂岩成分特征及其对储层的制约:以大牛地气田A区为例[J]. 天然气地球科学,2023,34(3):418-430. [Lei Tao, Wang Qiao, Ren Guanglei, et al. Component characteristics of Shanxi Formation tight sandstone and their implications for the reservoirs in Ordos Basin: Taking the A block of Daniudi gas field as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 418-430.]

Diagenesis Differences and Genesis Constrained by Lithofacies Combinations in Tight Sandstone: Case study of Chang 8 member of the Yanchang Formation in Zhijing-Ansai area

ZHAO Hui¹, XI KeLai¹, CAO YingChang¹, XIN HongGang^{2,3}, DAN WeiDong^{2,3}, LI Chi^{2,3}

1. College of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an 710018, China

Abstract: [Objective] Different reservoir diagenesis has a significant effect on reservoir heterogeneity, and limits the ability to predict the presence of oil and gas in tight sandstone reservoirs. [Methods] In the study area, the constraints of lithofacies combinations causing differences in diagenesis in Chang 8 tight sandstone in the Zhijing-Ansai area were clarified by observation and identification from thin sections, cathodoluminescence (CL), scanning electron microscopy (SEM), C and O isotope analysis, and laser ablation. [Results] The reservoir sandstone comprises three lithofacies combinations: type I is siltstone or fine sandstone interbedded with argillaceous rock; type II is fine-to-medium sandstone; and type III is fine sandstone/siltstone/argillaceous rock. The fine particles of the siltstone facies have high mica content, and the rock is strongly compacted. The reservoir contains a large amount of near-argillaceous calcite cement that was developed early. The mudstone is rich in pore water with high concentrations of calcium ions and bicarbonate ions. When the mudstone overlying and underlying the reservoir sandstone is deeply buried, overcompaction causes the muddy and clayey sediments to discharge mineralized water into the sandstone, affecting its diagenesis. The supersaturated calcium carbonate thus forms a dense carbonate cement at the sandstone-mudstone interface. The calcite cement developed in the type II sandstone facies combination was formed later; this is mainly due to the later evolution of organic matter influenced by the decarboxylation of organic matter in the source rocks. The conversion of clay minerals in source rocks occurs when the pore water containing calcium ions undergoes lateral advection along highly permeable pathways, entering the reservoir and providing a material source for the development of calcite in the thick sandstone. Quartz cement is usually developed within the type I lithofacies and is mainly provided by the dissolution of feldspars and the transformation of clay minerals which are the source of silica. The dissolution process usually develops in regions of the rock with relatively coarse particle size and low plastic particle content, thus providing good fluid migration channels. [Conclusions] The differences and origin of diagenesis in the study area are clarified, providing an important basis for further research on the origin of reservoir heterogeneity.

Key words: Chang 8 tight sandstone; lithofacies combinations; difference and genesis of diagenesis; Zhijing-Ansai area