文章编号:1673-5005(2013)03-0001-07

东营凹陷古近系沙四上亚段近岸水下扇砂体 碳酸盐胶结物的分布特征

张立强¹,罗晓容²,穆洋洋¹,高永明¹,张 曼¹,罗红梅²

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院,山东 青岛 266580; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要: 依据岩心、薄片、测井等资料对东营凹陷北部陡坡带永安地区古近系沙河街组沙四上亚段近岸水下扇砂体中碳酸盐胶结物的分布特征进行研究。结果表明: 碳酸盐胶结物(体积分数)含量高(>15%)的砂岩在近岸水下扇外扇及滑塌浊积扇等薄层粉细砂岩中分布普遍 碳酸盐胶结物含量低(<10%)的砂岩往往出现在近岸水下扇中扇沟道微相的厚层砂岩中;外扇胶结层的横向连续性好,中扇的碳酸盐胶结带仅位于沟道砂岩的顶底部、横向延伸小、铁白云石普遍; 中扇、外扇的胶结层单层厚度通常小,内扇的胶结层单层厚度较大,砾岩中灰岩砾石及钙质杂基含量较高、压实强;砂体中的长石能缓冲酸性地层水,方解石在砂体边缘附近区域富集形成胶结层,胶结层往往对应于斜长石溶蚀而现今斜长石含量较低的层段;碳酸盐胶结层造成近岸水下扇储层非均质性强发育内扇物性遮挡的岩性油气藏。 关键词:碳酸盐胶结物;储层;近岸水下扇;古近系;东营凹陷 中图分类号: TE 122.2 文献标志码: A

Distribution characteristics of carbonate cement of nearshore subaqueous fans in Upper Es₄ of paleogene of Dongying depression

ZHANG Li-qiang¹, LUO Xiao-rong², MU Yang-yang¹, GAO Yong-ming¹, ZHANG Man¹, LUO Hong-mei²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Institute of Geology and Geophysics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Distribution characteristics of carbonate cement were studied by the analysis of cores , thin-section , well logging et al in sand bodies of nearshore subaqueous fan of Upper Es_4 of Paleogene Shahejie formation in Yongan area of the northerm steep slope belt in Dongying depression. The results show that high carbonate cement sandstones (>15%) are common in the thin fine sandstones of the outer fan of nearshore subaqueous fan and the slump turbidite fan. The low carbonate cement sandstones (<10%) are common in the thick sandstones of the mid-fan channel of nearshore subaqueous fan. Cement layers of the outer fan are of well continuity , while those of middle fan only distribute on the top and bottom of the channel sandstones with weak continuity and rich ankerite. The cement layers in middle fan and outer fan are generally thin , but those in inner fan are thick. The content of the limestone gravel and calcareous heterobase in conglomerate is high , and the compaction is strong. Feldspar in sand-bodies can buffer the acid formation water , while calcite cement layers are formed in the edge of the sand body and nearby regions. Cement layers usually correspond with the layer sections where plagioclase is dissolved and the current content of plagioclase is low. The strong heterogeneity of reservoirs of nearshore subaqueous fan is caused by calcite cementation layers and physically blocked lithologic reservoirs are formed.

Key words: carbonate cement; reservoir; nearshore subaqueous fan; Paleogene; Dongying depression

碳酸盐胶结物会降低砂岩储层的孔隙度和渗透 率 增强储层的非均质性 影响生产过程中流体的流 动^[1]。对碳酸盐胶结物的分布特征及其影响因素

的研究表明 在不同沉积相带中 胶结物的分布特征 差异较大 如深水块状浊积砂岩中的方解石胶结带 常以层控结核的形式出现^[14];胶结带在浊积扇朵叶

作者简介: 张立强(1970 –) 男 教授 博士 主要从事储层地质学及层序地层学方面的教学和研究工作。E – mai: liqiangzhangwxm@163.com。

收稿日期: 2012-09-12

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05008-004);国家"973"项目(2011CB201105)

或边缘相的分布比河道相更丰富、横向上更加连续^[2,4];块状河道砂岩中的碳酸盐胶结带呈分散状、 横向延伸小^[2]。三角洲相砂岩中,砂体顶部、高渗 透率岩相中的胶结物含量高,通常以透镜体方式分 布^[5]。河流相砂岩中,钙质砾岩的分布与古水流方 向有关^[6]。针对湖相近岸水下扇砂体的研究较 少^[7],而近岸水下扇相的砂砾岩发育、成分成熟度 和结构成熟度都较差,碳酸盐胶结物分布对储层影 响更复杂。因此,笔者依据岩心、薄片、测井等资料 对东营凹陷北部陡坡带沙四段近岸水下扇砂体碳酸 盐胶结物的分布特征及其对储层性质的影响进行研 究。

1 研究区地质背景

研究区位于东营凹陷北部陡坡带东部的盐家和 永安地区(图1),古近系沙河街组发育冲积扇、扇三 角洲、近岸水下扇等近源粗碎屑砂砾岩扇体沉 积^[8,941]。其中,沙四段纵向上呈水进、岩性正旋回、 退积式充填的特征,沙四上亚段自下而上分为 S1、 S2、S3、S4 和 S5 等 5 个砂层组^[11],下部的 S1 以砾岩 为主、上部的 S4 和 S5 以暗色泥岩夹薄层粉细砂岩为 主。沙四上亚段主要发育近岸水下扇和扇三角洲等 砂体类型^[841]。近岸水下扇相的砾岩、含砾砂岩等成 分复杂、结构成熟度低,依据沉积特征的差异,近岸水 下扇分为内扇、中扇和外扇 3 个亚相^[9,12]。





2 碳酸盐胶结物的识别及其特征

2.1 沙四上亚段近岸水下扇砂砾体的岩石学特征 沙四上亚段近岸水下扇相砂岩和砂砾岩的颗粒 平均粒径变化大,一般为0.1~2 mm。碎屑中,石英 的含量(体积分数)为20%~55%,岩屑含量为15% ~40%,长石略高于岩屑。依照碎屑组分分类,属于 长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩或长石砂岩。其中,西 侧的 N224、N222 等井石英含量低(平均为 15% ~ 16.7%) 岩屑含量高(平均为 40% ~48%)。东部的 Y933 等井长石和岩屑含量较高(石英 30% ~45%,长 石 35% ~45%,岩屑 15% ~35%) 岩屑类型以变质 岩岩屑为主。中部的 Y928、Y930 等井长石和石英含 量较高(石英 32.9% ~45%,长石 35% ~65%) 岩屑 含量较低(15% ~32%),含有较多的鲕粒灰岩、晶粒 白云石等碳酸盐岩屑。南部 F8、FS10 地区,砂岩粒度 较细 粒径一般为 0.05 ~0.15 mm,分选中等到较好; 碎屑中的石英、长石含量较高,石英平均含量 39.5%、 长石为 53.83%、岩屑为 5.66%^[11]。胶结和交代物以 碳酸盐为主(图 2),含量为 0~30%,平均为 7%。

纵向上,沙四上亚段下部(S1、S2砂组)砂砾岩 发育,成分及结构成熟度低、砾石中的灰岩砾石含量 高,上部S4、S5砂组粒度较细,成分及结构成熟度相 对较高。

2.2 碳酸盐胶结物的类型及识别特征

碳酸盐胶结物的识别是依据岩心、薄片和测井 资料的综合分析。碳酸盐胶结层的颜色较浅,滴盐 酸起泡。茜素红S和铁氧化钾混合染色薄片中的方 解石胶结物在单偏光下呈红色、铁方解石呈紫红色、 铁白云石呈蓝色、白云石不染色。对无取芯井,结合 孔渗分析数据(胶结层具有低孔渗性),由声波时 差、密度、电阻率和自然伽马等测井响应特征来确定 胶结层。

通过薄片分析,沙四上亚段碳酸盐胶结物类型 主要有铁方解石和铁白云石,含少量方解石和白云 石。铁方解石分布于粒间孔、溶蚀孔隙或交代碎屑 颗粒,常见以下3种类型:① 连晶状铁方解石胶结、 交代(图2(a)、(b)),胶结物局部富集,部分样品颗 粒呈漂浮状;② 粒状含铁方解石胶结、充填孔隙,或 呈淀杂基的形式充填于孔隙中;③ 残余连晶状胶 结 粒间溶孔发育,颗粒边缘见溶蚀残余方解石,往 往与铁白云石共生(图2(b))。另外在部分内扇亚 相的砾岩及含砾砂岩中,方解石胶结与灰岩砾石共 存、压实作用强烈(图2(c))。

铁白云石多呈环边或分散状分布于长石和石英 颗粒周围,或充填粒间孔隙中。分散状单晶粒径20 ~50 μm,晶形好,呈半自形、自形粒状,含量一般小 于10%(图2(b)、(d)),少量样品为栉壳式或粒状 胶结。白云石主要见于砾岩粒间孔隙,呈粒状或栉 壳状充填孔隙(图2(e))。

铁白云石胶结物环绕铁方解石、铁白云石交代铁

方解石、方解石,铁方解石、铁白云石胶结、交代石英加大边,铁白云石无被交代和溶蚀现象,含砾砂岩铁方解石和铁白云石胶结物的 δ^{18} O_{PDB}值较低,一般为-10%~-16‰,代表与有机物的脱羧反应有关的晚期胶结。上述现象表明铁白云石晚于铁方解石和

方解石胶结 碳酸盐胶结物晚于石英加大的现象。成 岩演化序列为: 压实作用→方解石和白云石胶结→长 石及岩屑溶解/石英次生加大→铁方解石等胶结/石 英溶蚀→碳酸盐和长石的晚期溶蚀→铁白云石胶结。



(a) 连晶状铁方解石胶结、交代, Y552井, 3.08182 km(-)



(c)砾岩,含灰岩砾石及方解石胶结、 压实强, Y930井,3.86565 km(-)



(d) 铁白云石胶结, Y928井, 3.7583km (-)



(e) 粒状白云石多期胶结,N224井, 4.3259km(-)



Fig. 2 Main kinds of carbonate cement in sandstone of nearshore subaqueous fan

图 3 为 Y921 井沙四上亚段碳酸盐胶结层分布 及其测井曲线特征 在 Y921 井 2.797 ~ 2.815 km 井 段,解释为 8 层,平均 0.5 层/m。碳酸盐胶结层具 有声波时差低(*AC* 为 50 ~ 90 µs/m)、密度和电阻率 较高、自然伽马值较高(*GR* 一般大于 80 API)、中子 孔隙度较低的特征^[13]。碳酸盐胶结层往往对应着 物性低的井段。

3 沙四上亚段碳酸盐胶结物分布特征

3.1 纵向分布特征

剖面上,近岸水下扇的不同相带具有不同的碳酸盐胶结特征:

(1)外扇亚相,岩石类型以泥岩为主,夹砂岩、 粉砂岩或含砾砂岩,砂层的厚度对其中碳酸盐胶结 作用的影响比较重要。一般薄层砂岩的碳酸盐胶结 比厚层强;碳酸盐胶结在薄层外扇末梢砂岩中普遍 较强,在外扇深切水道砂岩中较弱(图3)。图3中 的5个碳酸盐胶结层段,单层厚度一般小于0.3m, 中厚层砂岩中碳酸盐胶结层一般小于砂层厚度的 10%,这一特征说明砂岩中碳酸盐胶结物的形成可 能与泥岩中析出的 CaCO₃ 有关。

(b) 铁方解石及铁白云石胶结,

(2) 中扇亚相 砂砾岩单层厚度较大,纵向上具 有多期河道叠复冲刷的特征,胶结层出现在厚层砂 岩体的底部,砂层的中部碳酸盐胶结作用明显比边 部弱。图4中,Y930井3.752、3.756km井段发育 的两个胶结层均对应于底冲刷砂砾岩段,单个胶结 层厚度不大。

(3) 内扇亚相 岩性以杂基支撑砾岩为主,期次 划分不明显。碳酸盐胶结层段的灰岩砾石往往含量 较高,压实强(图4),钙质层上、下含油气性明显变 好、具有溶蚀现象、含少量铁白云石胶结,测井曲线 对应于较高 *GR* 值。

纵向上,沙四上亚段不同层段碳酸盐胶结物发育特征不同。对研究区150个岩石薄片按层位进行定量统计,碳酸盐胶结物平均含量为7.12%,但不同层位碳酸盐胶结物的含量呈现明显的非均质性。 S1和 S5砂层组含量较高,分别为8.06%和 10.67%; S3砂层组含量最低,平均值为2.9%。上部(S3、S4、S5砂层组)随深度增加碳酸盐胶结物含 量减小,而呈现下部(S1、S2砂层组)随深度增加碳

酸盐胶结物含量增加的趋势。



图 3 碳酸盐胶结层在 Y921 井外扇亚相中的分布及其测井响应特征 Fig. 3 Distribution and log response characteristics of carbonate cementation layers of nearshore subaqueous fans in well Y921

3.2 剖面及平面分布特征

图 5 为平行于砂体延伸方向的剖面对比图。由 图 5 可见,外扇碳酸盐胶结带的侧向延伸广泛、呈薄 层状,单层厚度一般小于1 m,但侧向延伸达十几千 米。它们一般发育在湖泛面之下,在较大湖泛面之 下发育得更好。其声波时差、密度等电性特征明显, 井间连续性好。由于单砂层的厚度较薄,胶结层在 单砂层中的比例较高。在中扇、内扇亚相,碳酸盐胶 结层连续性较差,胶结层在砂体中的百分比较低。 在中扇亚相,主要限定在沟道的下部、砂砾岩中的粗 粒部分,他们的形状、几何形态受砂体的岩性非均质 性控制。沟道中的碳酸盐胶结层被弱胶结、无胶结 的砂岩分隔成近透镜状延伸的碳酸盐胶结体。

结合沉积相研究,分别对研究区沙四上亚段五 个砂层组的内扇、中扇、外扇砂砾岩碳酸盐胶结物的 百分含量进行了统计,图6为沙四上亚段 S4 砂层组 碳酸盐胶结物分布。碳酸盐胶结物在外扇亚相相对 富集,含量可超过20%,中扇亚相含量相对较低,一 般为0~5%。而内扇的钙质含量(包括钙质颗粒、 杂基和胶结物)总体较高,但变化较大。内扇砂砾 岩中的钙质砾石含量差异较大,与不同物源影响^[23] 及距物源区距离有关,远离物源区,钙质砾石或岩屑 的含量少。内扇钙质砾石及杂基溶蚀形成的包含碳 酸盐的孔隙流体成为中扇砂砾岩碳酸盐胶结的重要 钙质来源。Y930、Y929等井内扇砾岩中的灰岩砾 石的含量较高,其对应的中扇砂砾岩铁方解石胶结 物含量相对较高;西部 N22 井及其北部内扇砾岩中 的灰岩砾石含量较低,其相邻的中扇砂岩中的铁方 解石胶结物含量相对较低。

4 近岸水下扇砂砾岩体碳酸盐胶结物 的分布模式

根据胶结物在单井、剖面以及平面中的分布特征,总结出近岸水下扇砂砾岩体的碳酸盐胶结的分 布模式如下:

(1) 外扇的薄层末梢或浊积砂岩易形成层状碳

酸盐胶结带、横向分布广,纵向差异小、胶结物分布 均匀;对于分选相对较好的外扇砂岩或含砾砂岩,随 粒度变细、单层变薄,碳酸盐胶结物含量呈现增大的 趋势。

(2) 中扇主要发育沟道砂砾岩,单层厚度较大, 整体上胶结物含量较低(一般小于10%),砂砾岩层 底部往往发育较薄、横向呈透镜状分布的碳酸盐胶 结层;此外,中扇沟道砂砾岩中的后期溶蚀作用和晚 期铁白云石胶结普遍发育。

(3)分选差、杂基支撑的内扇砾岩或砂砾岩,碳酸盐砾石、灰质杂基含量高、压实作用强烈,砾岩中的碳酸盐胶结物呈多期性。



图 4 碳酸盐胶结层在 Y930 井沙四上亚段中扇及内扇亚相中的分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of carbonate cementation layers of nearshore subaqueous fans in well Y930

上述碳酸盐胶结物的差异性分布模式与沉积速 率及中扇和内扇砂砾岩的纵横向连通性及渗透性差 异有关。外扇被包围在烃源岩之中,沉积物的供给 速率及沉积速率较低,导致了胶结作用增加、胶结物 含量高,而胶结层的延伸较远可能和湖盆中湖泛的 一致性有关。而中扇沟道砂砾岩的渗透性较好,造 成了后期溶蚀和铁白云石胶结、交代作用较强。砂 砾岩中斜长石含量与碳酸盐含量具有很好的负相关 的关系(图4),意味着在胶结的同时可能发生了较 强的斜长石溶蚀作用。这一现象说明,富含碳酸盐 的溶液向砂砾岩搬运过程中,砂砾岩体中的长石缓 冲酸性地层水,导致方解石等碳酸盐胶结物在砂砾 岩体中渗透性较好的沟道砂砾岩底部优先沉淀。此 外,碳酸盐胶结的差异性分布也造成了近岸水下扇 砂砾岩体在垂向和横向的储层非均质性加强。碳酸 盐胶结物的含量与砂砾岩孔隙度和渗透率有着非常 显著的负相关关系,当碳酸盐胶结物的含量小于 10%时,孔隙度较高(10%~25%);碳酸盐胶结物 含量高于 10% 时,孔隙度一般小于 10%,胶结弱的 层段及区块发育有利储层。另外,外扇虽然分布广 泛的碳酸盐胶结层,但裂缝发育,与胶结较弱的水道 砂岩成为良好的油气输导通道;内扇致密压实和胶 结带起到侧向遮挡物的作用。如果内扇胶结带和中 扇弱胶结层配置好,则形成物性遮挡的岩性油气藏。 纵向上胶结层频繁,也造成了纵向上油、水、干层间 互的特征。







图 6 沙四上亚段 S4 砂层组碳酸盐胶结物分布 Fig. 6 Distribution of carbonate cementation in S4 sand sets

5 结 论

(1)东营凹陷北部陡坡带古近系沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩体中,胶结物含量高(>0.15)的砂

岩多出现在薄层的外扇及滑塌浊积扇砂岩中,胶结 物含量低(<0.1)的砂岩多出现在中扇沟道微相的 厚层砂岩中。中扇、外扇的胶结层单层较薄,外扇胶 结层的横向连续性好。

(2)中扇的碳酸盐胶结带仅位于沟道砂岩的顶底部、横向延伸小、晚期铁白云石胶结、交代普遍。 砂砾岩中的斜长石有效地中和了大部分流入砂砾岩 的酸性地层水,导致方解石在砂砾岩体的边缘沉淀, 而胶结层往往对应于斜长石溶蚀、而现今斜长石含 量较低的层段。

(3)内扇砾岩或砂砾岩分选差、胶结层段单层 厚度较大。砾岩及砂砾岩的碳酸盐含量随粒度变粗 呈现增大的趋势。钙质砾石及杂基含量高导致内扇 砾岩的压实较强、物性差。砂砾岩的纵横向连通性 及渗透性差别大,造成了内扇和中扇的碳酸盐胶结 物分布差异大。

(4) 铁方解石和铁白云石胶结物主要形成于深

埋、晚期 碳酸钙来源多样,部分来源于碳酸盐岩岩 屑的溶解,也有受有机质演化有关的酸性流体影响、 来自富含有机质的泥页岩中的钙质。碳酸盐胶结的 发育造成储层的垂向、横向非均质性较强,形成内扇 物性遮挡岩性油气藏,纵向上油水间互。

参考文献:

- [1] MCBRIDE E F, MILLIKEN K L, CAVAZZA W, et al. Heterogeneous distribution of calcite cement at the outcrop scale in Tertiary sandstones, northern Apennines, Italy
 [J]. AAPG Bulletin, 1995 79(9): 1044–1063.
- [2] MORAES M A S , SURDAM R C. Diagenetic heterogeneity and reservoir quality: fluvial , deltaic , and turbiditic sandstone reservoirs , Potiguar and Reconcavo rift basins , Brazil [J]. AAPG Bulletin , 1993 ,77(10) : 1142–158.
- [3] STEWART R N T , HASZELDINE R S , FALLICK A E , et al. Regional distribution of diagenetic carbonate cement in Palaeocene deepwater sandstones: North Sea [J]. Clay Minerals , 2000 35(1):119–133.
- [4] ANJOS S M C , de ROS L F , SOUZA R S , et al. Depositional and diagenetic controls on the reservoir quality of Lower Cretaceous Pende[^]ncia sandstones , Potiguar rift basin , Brazil [J]. AAPG Bulletin , 2000 ,84 (12) : 1719– 1742.
- [5] DUTTON S P , WHITE C D , WILLIS B J , et al. Calcite cement distribution and its effect on fluid flow in a deltaic sandstone , Frontier formation ,Wyoming [J]. AAPG Bulletin , 2002 86(17): 2007-2011.
- [6] SCHMID S , WORDEN R H , FISHER Q J. The origin and regional distribution of dolomite cement in sandstones from a Triassic dry river system , Corrib Field , offshore west of Ireland [J]. Journal of Geochemical Exploration , 2003 ,78/79:475-479.
- [7] 张永旺,曾溅辉,高霞,等.东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J].吉林大学学报:地球科学版 2009,39(1):17-21. ZHANG Yong-wang, ZENG Jian-hui, GAO Xia, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of carbonate cements in the paleogene reservoirs in Dongying depression[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition) 2009, 39(1):17-21.
- [8] 操应长 陈林,王艳忠,等.东营凹陷民丰北带古近系 沙三段成岩演化及其对储层物性的影响[J].中国石 油大学学报:自然科学版 2011 35(5):6-13 CAO Ying-chang, CHEN Lin, WANG Yan-zhong, et al.

Diagenetic evolution of Es_3 reservoir and its influence on

property in the northern Minfeng sub-sag of Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science) 2011 35(5):6-13.

[9] 鄢继华 陈世悦 姜在兴.东营凹陷北部陡坡带近岸水 下扇沉积特征[J].石油大学学报:自然科学版 2005, 29(1):12-16.

YAN Ji-hua , CHEN Shi-yue , JIANG Zai-xing. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans in steep slope of Dongying depression [J]. Journal of the University of Petroleum , China (Edition of Natural Science) , 2005 29(1):12-16.

[10] 杨剑萍 石德文.东营凹陷北部永 921 地区渐新世沙 三段和沙四段扇三角洲沉积[J].石油大学学报:自 然科学版,2000 24(1):10-17.

YANG Jian-ping , SHI De-wen. Fan delta deposits of Sha3 and Sha4 members at Oligocene Shahejie formation at Yong 921 area in the north of Dongying depression [J]. Journal of the University of Petroleum , China(Edition of Natural Science) 2000 24(1):10-17.

[11] 张立强 杨晚.东营凹陷北带古冲沟古近系多物源沉 积模式[J].中南大学学报:自然科学版,2012,84 (8):3159-3165.

ZHANG Li-qiang , YANG Wan. Multi-provenance depositional model of paleo gully in north steep slope of Dongying depression of upper Es_4 in Paleogene [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) , 2012 &4(8): 3159–3165.

- [12] 苗长盛,刘招君,方石,等.塔南凹陷南屯组近岸水下扇沉积特征及有利含油相带分析[J].中国石油大学学报:自然科学版 2011 35(1):34-39.
 MIAO Chang-sheng,LIU Zhao-jun,FANG Shi, et al. Sedimentary characteristics and favorable oil-bearing facies belts analysis of near-shore subaqueous fan of Nantun formation in Tanan depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011 35(1):34-39.
- [13] 张立强. 准噶尔盆地古近系超高压带砂岩铁方解石 胶结物的分布及形成机制[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版 2011 38(6):625-632.

ZHANG Li-qiang. Distribution and origin of ferrocalcite cements in Paleogene overpressure sandstones on the soutj margin of Junggar Basin , Xinjiang , China [J]. Jouranal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition) 2011 38(6):625-632.

(编辑 徐会永)