文章编号:1673-5005(2018)01-0011-10

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.002

松辽盆地南部泉四段致密砂岩成岩作用及 微—纳米储集空间演化

黄文彪',卢双舫',邓守伟2,王 民',逯瑞敬3,杨 亮2,郝桂宪4,石 瑾4

(1. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院,山东青岛 266580; 2. 中国石油吉林油田公司勘探开发研究院,

吉林松原 138001; 3. 中国石油大庆油田公司第四采油厂,黑龙江大庆 163511;

4. 中国石油大港油田石油工程研究院, 天津 300280)

摘要:基于薄片/扫描电镜观察以及恒速压汞实验结果,分析松辽盆地南部泉四段成岩作用对储层中微—纳米储集 空间演化以及油气赋存和分布的影响。结果表明:研究区泉四段经历了碱性—酸性—碱性的成岩环境,不同成岩环 境下形成的自生矿物在胶结/充填微米级储集空间时,也形成了大量的纳米级晶间孔;储集空间的纳米化使得致密 砂岩的储集性能和渗流能力降低,油气充注所需的驱动力增强,在恒速压汞表现为随着孔渗的降低,喉道的进汞量 逐渐增多以及突破压力逐渐增大;致密油气的运聚是力学动态平衡的结果,当油气运移距离相对较长时,致密油勘 探应注重以微米级储集空间占主导的致密砂岩,当储层紧邻源岩或油气运移通道时,以纳米级储集空间为主的致密 砂岩也应成为油气勘探的重要目标。

关键词:致密砂岩;成岩作用;储集空间演化;松辽盆地南部

中图分类号: P 512.2 文献标志码: A

引用格式:黄文彪,卢双舫,邓守伟,等. 松辽盆地南部泉四段致密砂岩成岩作用及微一纳米储集空间演化[J]. 中国 石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):11-20.

HUANG Wenbiao, LU Shuangfang, DENG Shouwei, et al. Diagenesis and micro-and nano-scale reservoir spaces evolution of tight sandstones in Quantou4 member of southern Songliao Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2018, 42(1):11-20.

Diagenesis and micro-and nano-scale reservoir spaces evolution of tight sandstones in Quantou4 member of southern Songliao Basin

HUANG Wenbiao¹, LU Shuangfang¹, DENG Shouwei², WANG Min¹, LU Ruijing³, YANG Liang², HAO Guixian⁴, SHI Jin⁴

(1. Research Institute of Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

Research Institute of Exploration & Development, CNPC Jilin Oilfield Company, Songyuan 138001, China;
 3. 4th Oil Production Plant, CNPC Daqing Oilfield Company, Daqing 163511, China;

4. Research Institute of Petroleum Engineering, CNPC Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: Based on data of thin section and SEM as well as the observations of rate-controlled mercury injection, the influence of diagenesis on the micro-and nano-scale reservoir spatial evolution, as well as the occurrence and distribution of tight oil and gas were analyzed in Quantou4 member of southern Songliao Basin. The results show that the diagenetic environment experienced a transition from alkalinity through acidity to alkalinity. During the formation of authigenic minerals in different diagenetic environments, a large number of nano-scale intercrystalline pores were also formed when the minerals cemented and/or filled

基金项目:国家自然科学基金项目(41402109,41330313,41172134,41472105);中国石油大学(华东)自主科技创新专项(17CX05012) 作者简介:黄文彪(1980-),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为非常规油气勘探与储层评价。E-mail:huangwb@upc.edu.cn。 通讯作者:卢双舫(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为常规/非常规油气勘探及油气地球化学。E-mail:lushuangfang@qq.com。

收稿日期:2017-06-15

the micro-scale reservoir spaces. Because of the transformation of reservoir spaces from micro-scale to nano-scale, the storage capacity and percolation ability of tight sandstones are reduced, and the driving force is enhanced in the process of tight oil and gas charging, which led to the mercury saturation of throat and the breakthrough pressure increase gradually with the decrease of porosity and permeability in rate-controlled mercury injection experiments. The migration and accumulation of tight oil and gas is the result of dynamic mechanical equilibrium. Therefore, the exploration and development of tight oil and gas in areas far away from source rocks should be pivoted around the sandstones dominated by the micro-scale spaces, whereas the exploration of near-source tight oil and gas should be expanded to the sandstones dominated by the nano-scale spaces. Keywords: tight sandstone: diagenesis: reservoir space evolution: southern Songliao Basin

储层品质在时空上的演变受到沉积物的原始沉 积、机械压实、胶结作用以及构造活动等诸多因素的 影响^[1-3]。在沉积成岩过程中,流体与岩石的相互作 用致使储层的微观结构发生重大改变,从而成为影 响致密油气富集和高效产出的关键因素^[4]。致密 储层发育大量微--纳米级储集空间,空间的类型、尺 寸及结构随着不同成岩事件时刻发生着变化,从而 使储层的储集性能和渗流能力在空间上呈现较强的 非均质性[5]。储集空间类型及尺寸的演变,对致密 油气的分布和富集有着显著的影响,开展相关研究 对指导致密油气的勘探开发有着重要的意义。泉四 段是松辽盆地南部坳陷结构中重要的含油气层位之 一,是构造型油气藏勘探时期的主力层位。在凹陷 和斜坡带,泉四段储层以低渗透的河道砂岩为主,油 气来源于上覆地层的青山口组湖相泥岩,形成上生 下储的生储盖组合^[6]。恒速压汞实验发现,该地区 较多的致密砂岩样品中喉道的进汞饱和度远大于孔 隙的进汞饱和度,从而引发了对孔隙和喉道进汞饱 和度有贡献的储集空间类型以及这些空间演化机制 的思考。笔者通过大量的薄片和扫描电镜观察,并 结合恒速压汞实验特征及结果,剖析研究区不同成 岩环境下的成岩事件,以及这些成岩事件对储层储 集空间类型及尺寸的影响,探讨致密油气在不同尺 寸储集空间的赋存和分布特征。

成岩环境及演化特征 1

受细菌活动、有机质演化、流体-矿物反应等影 响,地层中的流体酸碱性总是在不断地变化。特定 矿物的沉淀或溶解,是区分地层水酸碱性的典型标 志。如碳酸盐/长石溶解、高岭石的形成、石英加大 等是酸性环境下典型的成岩事件:而石英的溶解、长 石加大、铁方解石和铁白云石等矿物的沉淀、以及黏 土矿物中绿泥石、伊利石的形成标志着碱性成岩环 境^[7]。

薄片观察发现,松辽盆地南部泉四段致密砂岩

成岩环境呈现从碱性到酸性再到碱性的演变。绿泥 石包壳的形成(图1(a)、(b))和基底式碳酸盐胶结 (图1(c))是原始碱性沉积环境的具体体现。地层 水中丰富 Fe²⁺、Mg²⁺是绿泥石形成的关键因素,其来 源有河流带入[8]、火成岩岩屑水[9]、泥岩压实脱 水^[10]以及外部流体渗入^[11]等。松辽盆地南部泉四 段为炎热干旱或半干旱的碱性沉积环境[12],在河流 入湖/海处,因电解质发生絮凝沉淀,在地层中形成 富含 Fe²⁺、Mg²⁺的碱性流体^[13]。在沉积初期压实作 用较弱的情况下,绿泥石可围绕颗粒呈薄膜式生长。

包壳绿泥石包裹颗粒生长后,硅质胶结物充填 于粒间孔(图1(b)),标志着地层流体由碱性向酸 性转变。长石的溶蚀作用(图1(d))、片钠铝石交 代长石(图1(e))以及石英次生加大(图1(f))等成 岩作用也随之发生。幔源的 CO, 是该地区泉四段 地层环境由碱性转变为酸性的重要原因。王国栋 等[14]在松辽盆地青山口组二+三段所发现的震积岩 便是火山-构造活动引发地震在深水环境中的记 录。幔源岩浆中的 CO, 从底部向上运移, 受到青山 口组大套泥岩的阻隔,大量 CO2 聚集于泉四段地层 中并长时间保持高 CO, 分压状态[15], 从而引发长石 等不稳定矿物的溶解,并释放大量的 Na⁺、Al³⁺。这 些离子和重碳酸根的络合,使得片钠铝石充填于粒 间孔或交代长石碎屑颗粒(图1(e))。

随着成岩蚀变反应对酸性流体的消耗,地层水 中碱性阳离子增多,孔隙流体逐渐由酸性向碱性转 变。诸多研究业已证实,地层流体的 pH 值随着埋 藏和成岩演化而逐渐升高^[16]。在晚期碱性环境中, 研究区典型成岩作用表现为长石的次生加大(图1 (g))、碳酸盐交代长石(图1(h))、碳酸盐充填压裂 缝(图1(i))以及铁方解石、铁白云石的胶结/交代 作用(图1(j)~(l))等。从结构关系上判定,这些 成岩矿物的形成时期明显晚于强烈的机械压实(图 1(i))、长石溶蚀(图1(g)、(h)、(k)、(l))以及石英 加大(图1(i)、(j))等酸性环境下的成岩作用。



图1 不同成岩演化下的镜下照片

Fig. 1 Photomicrographs showing different diagenetic alterations

2 黏土矿物演化及生长特征

2.1 黏土矿物类型演化

黏土矿物是致密砂岩中重要的填隙物,其类型 和演化特征对储层物性有着显著的影响^[17]。研究 区泉四段自生黏土矿物含量在0.57%~26%,均值 为7.9%,主要为伊利石(I)、伊蒙混层(I/S)、高岭 石(K)和绿泥石(C),存在I+L/S、I+I/S+K、I+I/S+K +C和I+I/S+C这4种组合方式。其中伊/蒙混层和 伊利石含量较高,其次为绿泥石,3种黏土矿物的高 含量深度段出现在1000m以下(图2);高岭石含量 随着埋深的增大逐渐降低,在埋深小于500m时具 有较高的含量(图2)。

黏土矿物的形成及演化受到温压、时间和地层水 酸碱性的影响^[18-19],故此不同类型的黏土矿物在一定 程度上可反映形成时的水介质条件和成岩环境。扫 描电镜观察发现,伊/蒙混层和伊利石普遍共存(图 3 (a)),这是在富 Al³⁺和 K⁺的碱性环境下蒙脱石向伊 利石转化的直观证据。Berger 等^[19]通过动力学模拟 证明了高岭石向伊利石转化的可能性,但只有当孔隙 流体中的 K⁺活度超过钾长石沉淀的临界值该反应才 会进行。在研究区的早期碱性环境中,由于地层埋藏 较浅,地层流体通畅,硅铝酸盐溶解提供的 K*被迅速 带走,难以使得高岭石向绿泥石转化。在晚期的碱性 环境中,由于地层逐渐致密且之前经历了酸性环境下 钾长石的溶蚀,K*的带出受限,为高岭石向伊利石转 化提供条件。镜下观察也可发现高岭石与伊利石共 生现象(图3(b)),此外伊利石和高岭石含量在垂向 上也呈现互补的趋势(图2)。

绿泥石是富 Fe²⁺、Mg²⁺的碱性环境下产物,也是 研究区常见的一种黏土矿物。包膜或孔衬型绿泥石 形成于较早的成岩阶段,往往以叶片状赋存于矿物 表面(图3(c)),主要产于三角洲前缘环境^[20]。以 单矿物充填粒间孔的绿泥石可由蒙脱石、伊利石、高 岭石以及钾长石等在富 Fe²⁺、Mg²⁺的碱性环境中转 化而成^[21],多以叠层状、绒球状向孔隙中心生长(图 3(d))。蒙脱石向伊利石转化过程中生成大量的 Fe²⁺、Mg²⁺,使得蒙脱石向绿泥石转化成为可能。此 外,高岭石在碱性环境下不稳定,高岭石的溶解可导 致晚期绿泥石、伊利石以及石英的沉淀。可以观察 到,随着埋深的增大高岭石的含量急剧减小,而绿泥 石和伊利石含量逐渐增大(图2)。



图 2 松辽盆地南部泉四段黏土矿物垂向演化特征

Fig. 2 Vertical evolution characteristics of clay minerals in Quantou4 member of southern Songliao Basin

酸性环境下蒙脱石易向高岭石转换,长石等硅 铝酸盐在酸性环境下脱去碱性离子富集硅、铝而形 成高岭石,伴生的 SiO₂ 成为硅质胶结的物质基础。 由扫描电镜可观察到,蒙脱石与高岭石共生于粒间 孔隙中(图3(e));此外,在溶蚀的长石附近,也伴 生着蠕虫状的高岭石(图3(f))。



(d) 粒间叠层状绿泥石兑填扎隙, 查25井,2388.7 m

(e) 粒间蒙脱石与高岭石共生, 孤7井,1556.0 m

(f) 长石溶蚀孔内伴生蠕虫状高岭石, 海16井,1829.0 m

图 3 扫描电镜照片 Fig. 3 SEM photographs

由于地层水的酸碱性演化,黏土矿物中包膜绿 泥石最早形成,并在此阶段蒙脱石经伊/蒙混层逐渐 向伊利石转化;在随后的酸性环境下,高岭石大量形 成,同时伴生着石英加大等其他成岩作用。随着成 岩环境再次演变为碱性环境,伊利石、绿泥石的含量 急剧增多,且继续向孔隙中心生长;高岭石向伊利 石、绿泥石转化,含量逐渐降低。

2.2 黏土矿物生长形态演化

Neasham^[22]将黏土矿物划分为离散型、孔衬型 和孔桥型。离散型黏土矿物以随机序列充填于孔隙 内,如高岭石晶体;孔衬型黏土矿物垂直附着在孔壁 表面,通常表现为富含微孔的连续黏土层;孔桥型黏 土附着在孔隙表面,且向孔隙内延伸生长,甚至可以 贯穿整个孔隙成搭桥作用。绿泥石、伊/蒙混层以及 伊利石等在粒间孔内均可呈孔衬或孔桥形态生长。

在成岩早期,研究区泉四段主要为碱性环境,黏 土矿物也主要为包膜绿泥石(图4(a))以及孔衬型 生长的伊/蒙混层和伊利石(图4(b))。当成岩环 境演变呈酸性,高岭石晶体大量形成并充填孔隙 (图4(c))。从图4(d)中可以看出,离散状高岭石



(a) 粒表针叶状绿泥石包膜, 让58井,2039.5 m



(b)伊利石和伊/蒙混层以孔衬型生长在 孔隙内壁表面,查10井,2281.0 m



紧邻绿泥石包膜生长,这是高岭石的形成时期晚于

绿泥石包膜的佐证。晚期的碱性环境是伊/蒙混层、

伊利石、绿泥石等黏土矿物主要的形成时期,随着含

量的增大,黏土矿物从孔衬型逐渐向孔桥型转变,粒

间孔逐渐被黏土矿物所充填(图4(e)、(f))。

(c) 蠕虫状高岭石充填粒间孔, 乾227井,1748.7 m



(d) 粒间蠕虫状高岭石、丝状伊利石与 自生石英晶体充填孔隙,粒表针叶状 绿泥石,乾224井,1712.1 m



(e) 自生石英和绿泥石充填粒间孔, 让53-2井, 2169.2 m



(f) 粒间伊/蒙混层和丝状伊利石以孔桥型 充填孔隙, 乾198井, 2261.2 m



3 储集空间特征及成岩作用的影响

3.1 致密砂岩储集空间特征

恒速压汞能很好地区分孔隙和喉道而被广泛应 用于孔喉结构的定量表征,并根据毛管压力曲线的 变化特征来区分孔隙和喉道。汞每当突破喉道进入 尺寸较大的微米级孔时,均会表现为压力骤降,孔隙 的尺寸即是根据压力下降至再次回升至下降前压力 期间所充注的汞量来计算;当汞进入类似晶间孔的 纳米级孔隙时,由于其尺寸与喉道相当,甚至更小, 压力曲线一般不会产生明显的压降^[23]。所以,恒速 压汞中的喉道进汞饱和度不仅仅由连通粒间孔的喉 道贡献,还由诸如自生矿物晶间孔、粒内蜂窝状溶蚀 孔等纳米级孔隙所贡献。

30 块样品的恒速压汞实验结果揭示,致密砂岩 中孔隙和喉道的进汞饱和度呈现 3 种关系:①类型 I,孔隙进汞饱和度远大于喉道进汞饱和度(图 5 (a));②类型II,孔隙和喉道的进汞饱和度相当(图 5(b)):③类型Ⅲ,喉道的进汞饱和度远超过孔隙的 进汞饱和度(图5(c))。整体上,随着致密砂岩孔 隙度和渗透率的降低,样品的孔隙进汞饱和度逐渐 降低(图5(d)、(e)),喉道的进汞饱和度逐渐升高 (图5(f)、(g))。其中,类型 I 样品通常具有较高的 孔渗、较高的孔隙进汞饱和度以及较低的喉道进汞 饱和度,类型Ⅲ样品反之,类型Ⅱ样品介于二者之间 (图 5(d) ~ (g))。孔隙和喉道进汞饱和度的变化 体现了储集空间的尺寸随着物性的变差逐渐由微米 级向纳米级演变,这种演变受控于成岩演化,制约着 致密砂岩的储集和渗流能力。虽然机械压实对储层 物性的消极影响贯穿于整个成岩阶段,是微米级储 集空间减少的成因之一,但并非是纳米级储集空间 增多的根源。从镜下观察来看,不稳定矿物的溶蚀、 硅质/钙质的重结晶以及黏土矿物的生长等是纳米 级储集空间的主要来源。长石被溶蚀后,不仅增大 了微米级储集空间,同时还形成大量蜂窝状溶蚀孔 (图6(a))。石英、长石等矿物重结晶也是大量纳

米级晶间孔形成的主要原因(图6(b)~(e))。更 重要的,黏土矿物的广泛发育是致密砂岩纳米级空 间增多的重要机制(图6(f))。





3.2 成岩作用对储集空间的影响

在早期的碱性成岩环境下,包膜绿泥石以及由 蒙脱石转化的伊/蒙混层、伊利石以孔衬型生长于孔 隙内壁(图4(a)、(b))。此阶段的黏土矿物对砂岩 的储集性能具有双重作用,既缩小了孔隙半径,又一 定程度上增强了岩石的抗压性^[20]。由于此阶段自 生矿物的数量较为有限,溶蚀作用也不甚发育,故此 纳米级储集空间也较为有限,依然以微米级粒间孔 为主,在恒速压汞实验中表现为孔隙的进汞饱和度 远超过喉道(图5(a))。随着地层环境从碱性转化 为酸性,在酸性流体的侵蚀下,不稳定矿物的溶蚀延 缓了砂岩孔隙度降低的趋势。如长石的溶蚀,虽然 可以形成大量高岭石,但由于物质守恒以及长石与 高岭石密度的差异,使得长石转变为高岭石依然可 以增孔被溶长石体积的12.5%,岩石的总孔隙度有 所增加^[24]。需要注意的是,形成的高岭石以离散型

占据微米级粒间孔(图3(f)),且自生高岭石晶间孔 也促进了纳米级储集空间的增多(图4(c)、(d))。 此外,蒙脱石、长石向高岭石转化过程中释放出 SiO,,使得次生石英晶体在此阶段广泛发育。次生 石英在占据微米级的粒间孔的同时,也提供了部分 纳米级的晶间孔(图6(b))。因此,这个过程总体 上依然是储层致密化的过程,是将"宏孔"转化为 "微孔"以及"微孔"纳米化的过程。由于该阶段岩 石中微米级的粒间孔逐渐减少,纳米级晶间孔、蜂窝 状溶蚀孔逐渐增多,在恒速压汞实验中表现为孔隙 和喉道的进汞量相当(图5(b))。在晚期的碱性环 境下,由于压实、胶结作用的进一步增强,大量的粒 间孔/溶蚀孔被胶结或被自生矿物充填(如铁方解 石、铁白云石、次生长石、黏土矿物等),残留的粒间 孔体积急剧降低。同时,这些自生矿物的大规模生 长,促使纳米级储集空间显著增多(图6(c)~(f)),

在恒速压汞中表现为喉道的进汞量远超过孔隙的进 汞量(图5(c))。





(d) 石盐晶体充填孔隙, 让53-2井, 2169.2 m ^{20 µm} (e) 粒间被黄铁矿充填, 黑160井, 2 523.1 m



(f)石英次生加大、绿泥石和伊利石 充填粒间孔,让53-2井,2169.2 m

图 6 纳米级孔类型及发育特征

Fig. 6 Nano-pore type and development characteristics

除了自生矿物含量引起储集空间特征的改变外, 自生矿物的生长形态的差异,也会使得流体的储集性 能和渗流能力发生改变。Neasham^[22]提出随着自生 矿物的生长形态从离散型、孔衬型到孔桥型的转变, 砂岩的孔隙度和渗透率逐渐降低。离散型自生矿物 以分散质点形式充填于孔隙中,主要是通过细小颗粒 迁移堵塞喉道来影响岩石的渗透性,如高岭石(图4 (d))。随着高岭石含量的增加储层渗透率呈减小的 趋势(图7(a));然而孔隙度随高岭石含量的增加却 呈增大的趋势(图7(b)),这可能是长石的高岭石化 引起增孔所致。孔衬型黏土矿物虽然对岩石的抗压 性起到积极的作用,但同样侵占了大量的粒间孔,且 缩小了孔喉半径,诸如孔衬型的绿泥石和伊/蒙混层 (图4(a)、(b))。随着绿泥石和伊/蒙混层含量的增 加,虽然渗透率变化趋势不明显(图7(c)、(e)),但孔 隙度呈典型的减小趋势(图7(d)、(f))。对储层物性 影响最大的为孔桥型自生矿物(如丝状或纤维状的伊 利石,图4(f)),这类自生矿物基本充填整个粒间孔 隙,纵横交错分布,将粒间孔/溶蚀孔分割成诸多更加 细小的微孔,使渗流通道更加曲折,渗流能力降低(图 7(g))。由于孔桥型伊利石主要使微孔纳米化,因此 对于总孔隙度大小影响并不明显(图7(h))。此外, 由于黏土矿物较大的比表面以及较强的吸水能力会 使致密储层内具有较好的束缚水饱和度,也大幅度降 低储层的储集性能。

由此可见,自生矿物的重结晶、转化及其生长形 态是储集空间从微米级向纳米级演变的关键,也是 制约致密砂岩储集性能和渗流能力的重要因素。致 密油气的运聚成藏是油气驱动力(超压)和储层毛 管阻力间的动态平衡,而储集空间尺寸的纳米化,大 幅增加了储层的毛管阻力,油气充注的能力下降,储 集空间的有效性随之降低。多尺度储集空间的非均 质性以及烃类流体驱动力的差异,造成不同区域/层 段致密储层含油性有所不同。烃类流体的驱动力达 到致密砂岩的进入压力后,油气先充注微米级孔喉 系统。随着微米级的(缩小)粒间孔逐渐充满油气, 流体压力逐渐回升,开始充注诸如黏土矿物晶间孔 等纳米级储集系统。松辽盆地南部泉四段致密油藏 主要以青一段超压为驱动力沿断层下排倒灌、然后 沿砂体侧向运移而致。统计与青一段嫩江组末期超 压相当(18~20 MPa)但与断层距离不同的井含油 饱和度与储层渗透率的关系。结果表明,储层的含 油饱和度为 35.8%~55.7%,均值为 46.4%,但单 井与断层距离超过500 m的储层渗透率要明显大于 与断层距离小于500 m的储层(图8)。在油气驱动 力较大时(油气运移距离较短),即使是孔渗较差、 以纳米级储集空间为主的致密砂岩也依然能够具有 相对较高的含油饱和度。但当油气运移距离相对较



级储集空间为主的致密储层中。



图7 不同类型黏土矿物含量与孔隙度、渗透率之间关系





4 结 论

(1)松辽盆地南部泉四段经历了碱性--酸性--

碱性的成岩环境。包膜绿泥石、基底式碳酸盐胶结 以及部分伊/蒙混层、伊利石是早期碱性环境下的产 物;长石溶蚀、自生高岭石的形成、石英次生加大是 酸性环境下的主要成岩事件;晚期的碱性环境中,高 岭石逐渐转变成伊利石和绿泥石,同时随着蒙脱石 向伊/蒙混层和伊利石转化的持续,伊/蒙混层、伊利 石以及绿泥石含量快速增加,生长形态从孔衬型向 孔桥型转变。此外,长石次生加大、铁方解石/铁白 云石的胶结交代也是晚期碱性环境下的成岩事件。

(2)恒速压汞实验揭示随着孔隙度和渗透率的 降低,致密砂岩中微米级孔隙的含量逐渐减少,而纳 米级孔的含量逐渐增多。微一纳米储集空间的演变 是不同环境下成岩作用的结果。除了机械压实外, 胶结作用以及自生矿物的充填是微米级储集空间减 少的主要原因;而粒内蜂窝状溶蚀孔、自生矿物的晶间孔构成了纳米级储集空间的主体,是溶蚀、黏土矿物转化以及其他自生矿物重结晶的结果。

(3)致密砂岩中微一纳米储集空间的演变不仅 影响这储层的孔渗,更对致密油气的赋存和分布有 着重要的影响。纳米级储集空间的增多使得油气的 充注需要更大的驱动力,致使致密油气在远源地区 往往富集在微米级孔占主导的砂岩中。但在近源地 区,以往不具开发效益的、纳米级储集空间占主导的 致密砂岩,由于具有充足的油气驱动力,也将成为致 密油气勘探的范畴。

参考文献:

[1] 黄思静,侯中健.地下孔隙率和渗透率在空间和时间 上的变化及影响因素[J].沉积学报,2001,19(2):224-232.

> HUANG Sijing, HOU Zhongjian. Spatio-temporal variation of subsurface porosity and permeability and its influential factors [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001,19 (2):224-232.

- HIGGS K E, ZWINGMANN H, REYES A G, et al. Diagenesis, porosity evolution and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77 (12):1003-1025.
- [3] 张少敏,操应长,王艳忠,等.牛庄洼陷西南部沙三中 亚段浊积岩储层成岩作用与物性演化[J].中国石油 大学学报(自然科学版),2017,41(2):1-11.

ZHANF Shaomin, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Diagenesis and physical properties evolution of turbidite reservoirs in $\mathrm{Es_3}^z$ of Niuzhuang sag, Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2017,41(2):1-11.

- [4] SHANLEY K W, CLUFF R M, ROBINSON J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis [J]. AAPG Bulletin, 2004,88(8):1083-1121.
- [5] SLATT R M, O'BRIEN N R. Pore types in the Barnett and Woodford gasshales: contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011,95(12):2017-2030.
- [6] 宋立忠,李本才,王芳. 松辽盆地南部扶余油层低渗透 油藏形成机制[J]. 岩性油气藏,2007,19(2):57-61. SONG Lizhong, LI Bencai, WANG Fang. Reservoirforming mechanism of low-permeability reservoir of Fuyu Formation in southern Songliao Basin[J]. Lithologic Res-

ervoirs, 2007, 19(2): 57-61.

 [7] 徐国盛,徐芳艮,袁海锋,等.西湖凹陷中央反转构造带花港组致密砂岩储层成岩环境演变与孔隙演化
 [J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(4): 385-395.

XU Guosheng, XU Fanggen, YUAN Haifeng, et al. Evolution of pore and diagenetic environment for the tight sandstone reservoir of Paleogene Huagang Formation on the central reversal structural belt in Xihu sag, East China Sea [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43 (4): 385-395.

- [8] BLOCH S, LANDER R H, BONNELL L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability [J]. AAPG Bulletin, 2002,86(2):301-328.
- [9] REMY R R. Porosity reduction and major controls on diagenesis of Cretaceous-Paleocene volcaniclastic and arkosic sandstone, Middle Park Basin, Colorado [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994,64(4):797-806.
- [10] 孙治雷,黄思静,张玉修,等.四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化[J]. 沉积学报,2008,26(3):459-468.
 SUN Zhilei, HUANG Sijing, ZHANG Yuxiu, et al. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe formation, Sichuan Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008,26(3): 459-468.
- [11] HILLIER S, FALLICK A E, MATTER A. Origin of pore-lining chlorite in the Aeolian Rotliegend of Northern Germany [J]. Clay Minerals, 1996,31:153-171.
- [12] 潘树新,卫平生,王天奇,等.大型坳陷湖盆"洪水-河 漫湖"沉积:以干旱背景下的松南泉四段为例[J].地 质论评,2010,58(1):41-52.
 PAN Shuxin, WEI Pingsheng, WANG Tianqi, et al. Sedimentary characteristics of flood-overlake in large depression basin: taking the 4th Member, Quantou Formation, Lower Cretaceous, in Southern Songliao Basin as an example [J]. Geological Review, 2010,58(1):41-52.
- [13] 陈宝赟,李荣西,梁积伟,等. 自生绿泥石及其对储层物性影响研究:以鄂尔多斯盆地西南缘延长组为例
 [J]. 矿物岩石地球化学通报,2014,33(3):389-394.
 CHEN Baoyun, LI Rongxi, LIANG Jiwei, et al. Authigenic chlorite and its impaction on reservoir physical properties: an example from the Yanchang Formation of the Southwest Ordos Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014,33(3):389-394.

[14] 王国栋,程日辉,王璞珺,等. 松辽盆地青山口组震积 岩的特征、成因及其构造-火山事件[J]. 岩石学报, 2010,26(1):121-129.

> WANG Guodong, CHENG Rihui, WANG Pujun, et al. Coniacianseismites: structure, sequence and volcanogenic origin of Qingshankou Formation in the Cretaceous Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (1):121-129.

[15] 刘立,侯启军,刘娜,等.松辽盆地南部幔源 CO₂ 与油 气充注时序:来自含片钠铝石砂岩的证据[J].石油 与天然气地质,2011,32(6):873-881.

LIU Li, HOU Qijun, LIU Na, et al. Charging time sequence of mantle CO_2 and hydrocarbon in southern Songliao Basin: an evidence from dawsonite-bearing sandstones [J]. Oil & Gas Geology, 2011,32(6):873-881.

- [16] 刘宝珺,张锦泉.沉积成岩作用[M].北京:科学出版 社,1992:12,138.
- [17] PERRY E A, HOWER J. Late stage dehydration in deeply buried politic sediments [J]. AAPG Bulletin, 1972,64: 414-430.
- [18] EBERL D, HOWER J. Kinetics of illite formation [J].
 Geological Society of America Bulletin, 1976,87:1326-1330.
- [19] BERGER G, LACHARPAGNE J C, VEDLE B, et al. Kinetic constraints on illitization reactions and the effects

of organic diagenesis in sandstone/shale sequence [J]. Applied Geochemistry, 1997,12:23-35.

- [20] 朱平,黄思静,李德敏,等. 黏土矿物绿泥石对碎屑储 集岩孔隙的保护[J]. 成都理工大学学报(自然科学 版),2004,31(2):153-156.
 ZHU Ping, HUANG Sijing, LI Demin, et al. Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks [J].
 Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004,31(2):153-156.
- [21] LEE J H, PEACOR D R, LEWIS D D, et al. Chloriteillite/muscovite interlayered and interstratified crystals: a TEM/STEM study [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984,88(4):372-385.
- [22] NEASHAM J W. The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties [R]. SPE 6858,1997:1-8.
- [23] HUANG Wenbiao, LU Shuangfang, OSMAN Salad Hersi, et al. Reservoir spaces in tight sandstones: classification, fractal characters, and heterogeneity [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017,46: 80-92.
- [24] 蔡春芳,梅博文,马亭.塔里木盆地流体-岩石相互作 用研究[M].北京:地质出版社,1997:66.

(编辑 徐会永)