

·油气地质·

渤南洼陷沙四段上亚段成岩演化规律特殊性分析

刘鹏

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:为揭示渤南洼陷沙四段上亚段咸化湖盆储集体成岩演化规律的特殊性,综合应用铸体薄片、扫描电镜、粘土矿物X衍射分析等资料对研究区沙四段上亚段成岩环境及演化规律进行研究。结果表明:渤南洼陷沙四段上亚段沉积时期主要发育碎屑岩、碳酸盐岩和膏盐岩等;在早期和中后期成岩过程中,分别受膏盐岩产生的碱卤水和有机酸注入的影响,研究区沙四段上亚段储集体经历了先碱后酸、碱酸交替的成岩环境;早期碱性成岩作用的强弱程度对后期酸性成岩作用发生的时间会产生影响,早期成岩过程中的强胶结作用会造成后期成岩过程中有机酸与可溶矿物的接触面积变小,发生大量溶蚀的时间滞后,具有中碱晚溶、弱碱早溶的成岩演化规律。咸化湖盆碱酸交替的成岩环境导致特殊的成岩演化规律,致使次生孔隙发育时间较晚、埋深较大,使深部优质储层形成时间与晚期油气成藏期形成较好匹配。

关键词:成岩演化 咸化湖盆 成岩环境 地质意义 渤南洼陷

中图分类号:TE112.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)03-0001-07

Particularity in diagenetic evolution law in the upper part of 4th member of Shahejie Formation of Bonan subsag

Liu Peng

(Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: In order to analyze the particularity of diagenetic evolution law of the upper part of 4th member of Shahejie Formation in saline lacustrine basin of Bonan subsag, detailed research on diagenetic environment and evolution law has been carried out with comprehensive application of casting, scan electron microscope and X-ray diffraction data of clay minerals. The result shows that clastic rock, carbonate rock and gypsum salt beds were mainly developed in the upper part of 4th member of Shahejie Formation of Bonan sag. Under the influence of alkali fluid from gypsum and organic acid during early and middle-late stage of diagenetic period, the reservoirs in the study area experienced alkali and acid diagenetic environment in turn. The intensity of early-stage alkali diagenesis affected the occurrence time of acid diagenesis during middle-late stage. The early-stage strong cementation often caused small contact area between organic acid and diffuent mineral in late stage when organic acid entered into reservoir in the middle-late stage. Therefore, the beginning time of extensive dissolution would be delayed. Because of that, the reservoir follows the diagenetic evolution law that reservoirs in middle-alkali diagenetic environment at early stage would be dissolved later at middle-late stage; and if they were in weak alkali diagenetic environment at early stage, they would be dissolved earlier at middle-late stage. The alkali-acid alternation of diagenetic environment in saline lacustrine basin caused the particularity in reservoir diagenetic evolution. Under the controlling of this special diagenetic evolution law, the secondary pore developed with large depth in the late time, resulting in a good match between the timing of high quality reservoir formation in deep layers and late hydrocarbon reservoiring.

Key words: diagenesis evolution; saline lacustrine basin; diagenesis environment; geological implications; Bonan subsag

收稿日期:2016-03-11。

作者简介:刘鹏(1986—),男,河南濮阳人,工程师,博士,从事沉积学与储层地质学研究。联系电话:15263809135, E-mail:liupeng119.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地精细勘探关键技术”子课题“济阳坳陷油气富集机制与增储领域”(2011ZX05006-003),中国石化科技攻关项目“渤南孤北地区沙四段多储集类型油藏富集规律”(P11078)。

在中国众多的含油气盆地中广泛分布着咸化湖盆^[1-3],而咸化湖盆的成因问题一直是人们研究的热点^[4-5]。近年来对咸化湖盆中烃源岩具有更好的生烃能力以及存在多类型沉积体的认识已得到广大学者的认同^[2,6],但对于咸化湖盆储层具有的特殊的成岩演化规律还未引起足够重视。渤南海陷在沙四段上亚段沉积时期为咸化湖盆^[6],其沉积物中的石膏在向硬石膏转化过程中会产生大量碱性流体^[7-8],碱性流体的存在会对储层的成岩演化产生影响,进而控制次生孔隙的发育。此外,由于渤南海陷沙四段上亚段埋深普遍大于3 000 m,其储层的主要储集空间为次生孔隙^[9-10],因此受大量碱性流体控制的成岩演化研究对于研究区深部优质储层的预测至关重要。为此,笔者针对渤南海陷沙四段上亚段咸化湖盆,从成岩环境研究入手,分析其储层孔隙演化规律,明确成岩演化规律的特殊性,进而阐述其对研究区沙四段上亚段油气勘探的地质意义,以期对咸化湖盆有利储层预测提供指导。

1 区域地质概况

渤南海陷为济阳拗陷沾化凹陷的三级负向构造单元,其北邻埕东凸起,南邻陈家庄凸起,西邻义和庄凸起,东为孤岛凸起,发育北东、北东东向以及一系列近东西向断裂(图1)。洼陷内沉积古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组以及第四系平原组。主要研究目的层沙四段上亚段是一套完整的三级层序,其内部发育的各次级层序由于沉积时期水体和物源供应等条件的差异,形成不同类型的沉积体^[6]。

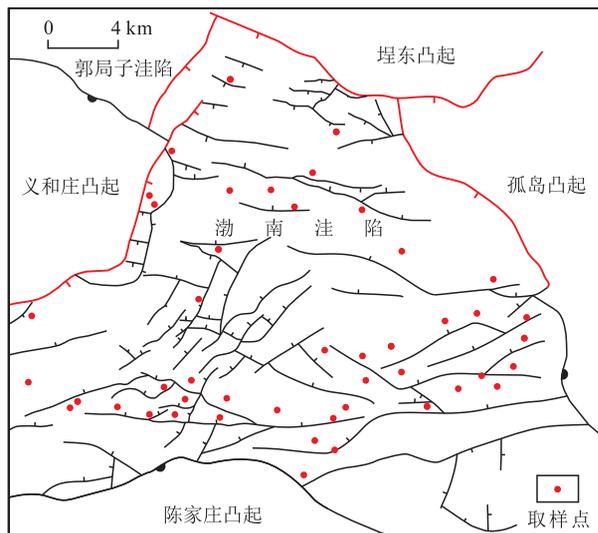


图1 渤南海陷区域构造位置

Fig.1 Regional structural location of Bonan subsag

2 储层岩石学特征

渤南海陷沙四段上亚段主要发育碎屑岩、碳酸盐岩以及咸化湖盆特有的膏盐岩。其中,碎屑岩以岩屑长石砂岩为主,石英、长石和岩屑的体积分数范围较广,石英体积分数为1%~70%,长石为2%~45%,岩屑为17%~99%。石英主要由单晶石英组成,常具次生加大边;长石类型多为斜长石或钾长石,长石颗粒常被溶蚀形成粒内溶孔或铸模孔;岩屑成分一般以流纹岩、安山岩、石英岩和泥质岩屑为主;填隙物包括杂基和胶结物,粘土矿物是杂基的重要组成部分,粘土矿物X衍射分析结果表明,粘土矿物的体积分数为1%~44%,胶结物主要以方解石为主,并可见少量铁白云石和黄铁矿。碳酸盐岩主要由化学成因灰岩、白云岩和生物灰岩组成,包括灰岩滩坝、砂质灰岩滩坝和生物礁等沉积类型。膏盐岩的主要岩石类型包括石膏岩、盐岩、泥膏岩、石膏质泥岩、石膏质白云岩、石膏质灰岩、石膏质砂岩和含膏泥岩等,以石膏质泥岩和含膏泥岩为主,其次为石膏岩和泥膏岩,其他则相对较少。

3 成岩环境分析

成岩环境分析是成岩演化规律研究的基础^[11-12]。对于成岩环境的形成机制,前人普遍认为烃源岩生烃作用产生的有机酸是形成酸性成岩环境的主因^[11-13];而对于碱性成岩环境,咸化湖盆中膏盐岩产生的碱卤水可导致碱性成岩环境的认识也得到了广泛认可^[7-8]。因此,渤南海陷沙四段上亚段沉积的膏盐岩产生的碱卤水会形成碱性流体,烃源岩演化过程会产生有机酸,从而使研究区储集体经历先碱后酸、碱酸交替的成岩环境。为了方便表述及定性区分成岩环境的酸碱程度,根据储集体与膏盐岩、烃源岩的关系以及不同的成岩演化阶段,将成岩环境从碱性到酸性划分为5个等级,分别为中碱性、弱碱性、弱酸性、中酸性和强酸性成岩环境。

3.1 早期碱性成岩环境

渤南海陷沙四段上亚段沉积于湖盆快速扩张直至湖平面位于高位时期,该时期由于水体深度增大而产生卤水分层^[6],且水体深度的增大使深层卤水温度较低,硫酸盐岩的溶解度也随温度降低而逐渐变小,当水温为25℃时,硫酸盐岩的溶解度约为100 mg/L^[14],随着水体深度继续增大,分层卤水的底部开始沉积膏盐岩。渤南海陷沙四段上亚段膏盐

岩主要分布于埋深为2 600~4 000 m地层中,因此该埋深范围的储集体在早期成岩过程中受膏盐岩产生的碱卤水影响较大,中碱性成岩环境在早期成岩过程中起主导作用,受重力以及水体对流和扩散作用的影响,碱卤水可进入到膏盐岩上、下部地层,导致膏盐岩上、下部地层在早期成岩过程中处于弱碱性成岩环境。

原始胶结率可反映早期碱性成岩环境的强弱程度,因此可以通过求取原始胶结率来恢复早期碱性成岩环境。在偏光显微镜下对研究区所有样品薄片的残留胶结物和胶结物溶蚀面孔率进行统计分析,将残留胶结物所占的比例与胶结物溶蚀比例

相加即为原始胶结物所占比例,由此求得原始胶结率,并以每400 m深度段为单元统计研究区原始胶结率大于0.5的样品占总样品的比例。研究结果表明,膏盐岩上、下部地层的原始胶结率明显小于膏盐岩沉积层段的原始胶结率,表明膏盐岩沉积层段处于较强碱性成岩环境。此外,成岩现象也可以证实早期碱性成岩环境的存在,渤南洼陷沙四段上亚段普遍可见碳酸盐岩胶结(图2),平均原始胶结率为0.46,埋深为2 800~3 800 m膏盐岩主要发育层段内储集体的胶结作用尤为明显,平均原始胶结率为0.58,表明膏盐岩的发育对早期碱性成岩环境的形成具有主导作用。

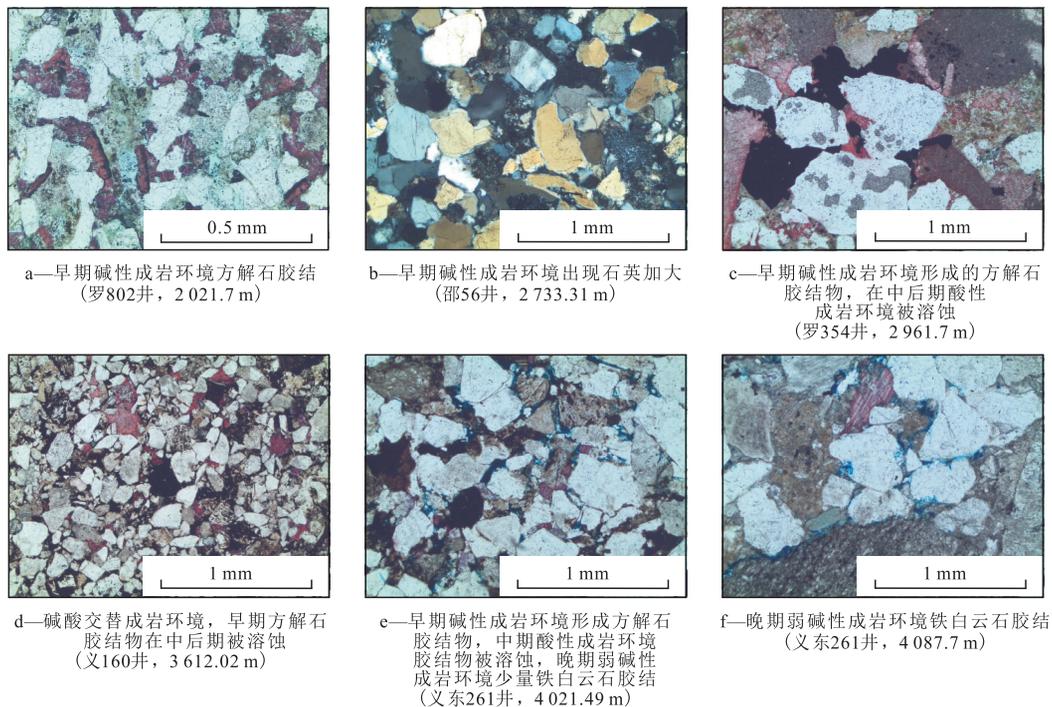


图2 渤南洼陷沙四段上亚段成岩现象

Fig.2 Diagenesis of the upper part of 4th member of Shahejie Formation in Bonan subsag

3.2 中后期酸性成岩环境

沉积物在经历早期碱性成岩环境后,形成大量碳酸盐岩胶结物;但随着埋深的不断增大,烃源岩中的有机质趋于成熟。当烃源岩埋深超过2 800 m时,其镜质组反射率(R_o)达0.5%(图3),此时烃源岩开始生排烃,发生第1次油气成藏。渤南洼陷沙四段上亚段第1次油气成藏期为东营组沉积末期,且油气成藏过程伴有大量有机酸排出。有机酸在高压驱动下向上覆地层运移,在埋深小于2 000 m地层中普遍可见溶蚀现象,且埋深越大溶蚀作用越强(图2a,2b),在埋深为2 000~2 800 m地层中形成弱酸性成岩环境(图3)。因此,渤南洼陷沙四段上亚

段由早期碱性成岩环境到酸性成岩环境的转变是由于第1次排烃过程中有机酸的注入,在排烃之前为早期碱性成岩环境,而排烃之后则逐渐进入中后期酸性成岩环境。

研究区埋深为2 800~3 300 m的膏盐岩主要发育段虽在排烃之前受到碱性流体作用的强烈影响,但在中后期成岩过程中受多期排烃影响,烃源岩排出的大量有机酸已完全中和早期成岩过程中产生的碱性流体,形成中酸性成岩环境。在酸性流体进入后,碳酸盐岩胶结物首先开始溶蚀,长石少量溶蚀(图2c),因此高岭石的体积分数较低,但依然为中酸性成岩环境;若仅根据高岭石体积分数来判断

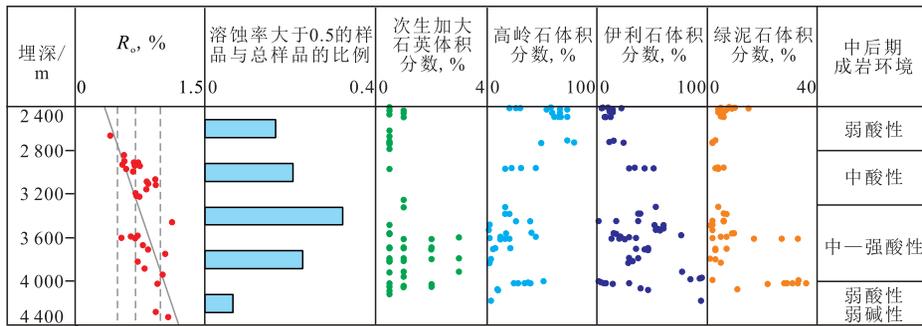


图3 渤南洼陷沙四段上亚段中后期酸性成岩环境及其表征因素

Fig.3 Acidic diagenetic environment and its characterization factors of the upper part of 4th member of Shahejie Formation in Bonan subsag at middle-late stage

成岩环境,则易误认为碱性成岩环境。研究区埋深超过2 800 m基本无膏盐岩沉积,储层在油气成藏期之前的弱碱性成岩环境控制下,胶结作用较弱,第1次大量排烃过程中伴随排出的有机酸快速溶蚀碳酸盐岩胶结物,并使大量长石发生溶蚀,因此研究区沙四段上亚段埋深小于2 800 m地层具有较高的高岭石体积分数(图3)。

当埋深大于3 300 m时,研究区沙四段上亚段的镜质组反射率普遍大于0.7%,进入大量生油气阶段。对于该阶段是否产生有机酸,不同学者具有不同的看法。Surdam等认为有机酸主要产生于有机质初始排烃阶段^[15],但经过大量学者的实验证明^[16],在整个烃类生成的过程中都产生有机酸;因此在干酪根成熟过程中,一直存在有机酸的生成。渤南洼陷沙四段上亚段埋深超过3 300 m且镜质组反射率大于0.7%时,有机质热演化程度增强,仍有有机酸生成;但此时地温升高至120℃以上,有机酸脱羧而转变成烃类和二氧化碳;虽然溶液中有有机酸的浓度降低,但二氧化碳溶于水可形成碳酸,因此溶液的pH值仍在5以下^[15]。随着渤南洼陷多期油气成藏过程中^[17]有机酸幕式注入储层,完全中和早期成岩过程中产生的碱性流体且剩余酸性流体富集,致使研究区沙四段上亚段埋深大于3 300 m且镜质组反射率大于0.7%的地层在初次油气成藏期之后的成岩过程中经历了中强酸性成岩环境(图3),其早期成岩过程中形成的碳酸盐岩胶结物及长石普遍被溶蚀(图2d);当埋深达4 000 m且镜质组反射率大于1.0%时,进入生凝析气、湿气阶段,地温普遍高于160℃,有机酸基本全部转化为二氧化碳^[15],二氧化碳溶于水形成碳酸;埋深超过4 000 m地层仅受碳酸影响,且随埋深的增大,不再产生有机酸,碳酸也随之消失,使成岩环境逐渐演变为弱酸性甚至是碱性(图4),早期方解石胶结物停止溶

蚀(图2e),并有少量铁白云石胶结物出现(图2f)。

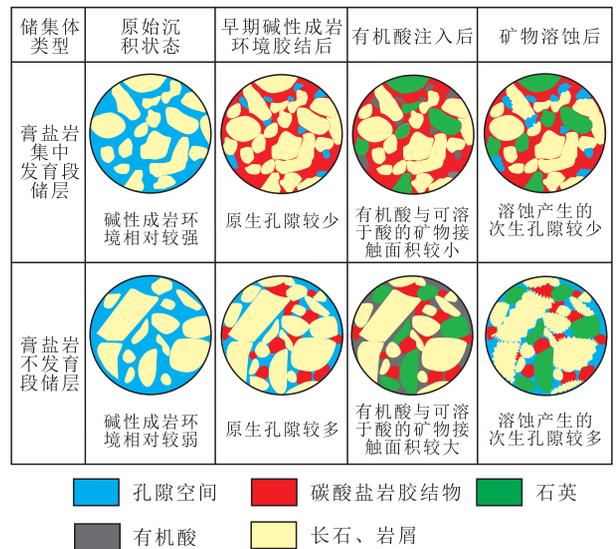


图4 渤南洼陷沙四段上亚段储集体成岩演化的差异性
Fig.4 Differentiated diagenetic evolution of the upper part of 4th member of Shahejie Formation in Bonan subsag

4 成岩演化规律的特殊性

4.1 碱酸交替的成岩环境

基于成岩环境分析,认为渤南洼陷沙四段上亚段沉积时期较高的水体盐度影响早期碱性成岩作用,有机酸的幕式注入又形成中后期酸性成岩环境,且早期碱性成岩作用的强弱程度影响着中后期酸性成岩作用发生的时间。究其原因,在早期中碱性成岩环境下,膏盐岩集中发育段会产生大量碳酸盐岩胶结物,原生孔隙被充填,孔隙空间急剧减少,在油气成藏期酸性流体进入后没有足够的孔隙空间容纳有机酸,且有机酸与可溶于酸的矿物接触面积很小,因此在有机酸进入初期由溶蚀作用产生的次生孔隙较少,但随着时间推移,在多期油气成藏过程中有机酸幕式注入,溶蚀作用逐渐增强,形成的溶蚀孔隙逐渐增大,可容纳有机酸的空间也相

应增大,后期成岩过程中在埋深较大的地层中产生大量溶蚀孔隙,具有中碱晚溶的成岩演化规律(图4)。而对于膏盐岩发育较少或不发育段,早期弱碱性成岩环境下只有少量碳酸盐岩胶结物产生,虽然由于压实作用导致部分孔隙减少,但原生孔隙仍相当发育,在初期油气成藏过程中有机酸的注入即会充满大量的孔隙空间,并与可溶矿物接触发生较强的溶蚀作用;随着多期油气成藏的相继发生,次生溶蚀孔隙进一步增多,具有弱碱早溶的成岩演化机制,但较早出现的溶蚀孔隙会随着埋深的增大而被压实,导致深部储层更加致密。对中后期成岩过程中碳酸盐岩胶结物晚溶和早溶起决定作用的是早期碱性成岩环境的强弱程度。若早期成岩过程中为中碱性成岩环境,则在有机酸注入后的中后期成岩过程中发生溶蚀作用的时间较晚,且发生溶蚀作用的埋深较大;若早期成岩过程中为弱碱性成岩环境,则在中后期成岩过程中发生溶蚀的时间较早,且发生溶蚀作用的埋深较小。总体上,研究区沙四段上亚段具有中碱晚溶、弱碱早溶,碱酸成岩环境交替控制的成岩演化规律。

对于渤南洼陷沙四段上亚段储集体而言,膏盐岩的发育程度决定了中后期成岩过程中碳酸盐岩胶结物早溶或晚溶的成岩演化规律。因此,在研究

区埋深为2 800~3 800 m的膏盐岩集中发育段,由于早期成岩过程中存在的中碱性流体导致胶结作用非常强烈,在中碱晚溶成岩演化规律的控制下,有机酸进入初期,储集体并未发生大规模溶蚀作用,但在有机酸持续进入后才开始发生较明显的溶蚀作用。

4.2 不同成岩环境的成岩演化差异

渤南洼陷沙四段上亚段储集体在早期和中后期成岩过程中受到碱酸成岩环境的交替控制,这种交替的成岩环境对孔隙演化的控制作用与其他地区单一的酸性和碱性成岩环境相比,其成岩演化规律具有特殊性。

首先,纯酸性成岩环境下的储集体在早期成岩过程中基本无胶结作用,孔隙仅在压实作用下缓慢减少,当有机酸注入时仍保留大量原生孔隙;因此,有机酸进入后迅速与可溶矿物长石、岩屑接触,在有机酸可以波及的地层中广泛发育溶蚀孔隙。但随着埋深的增大,次生溶蚀孔隙逐渐被压实,导致埋深较大的储层变得更为致密^[18](图5)。

其次,纯碱性成岩环境下的储集体在早期成岩过程中发生强烈的胶结作用,原生孔隙被大量碳酸盐岩胶结物充填,孔隙急剧减少,但当碱性流体的pH值进一步增大时,石英开始发生溶蚀形成第1个

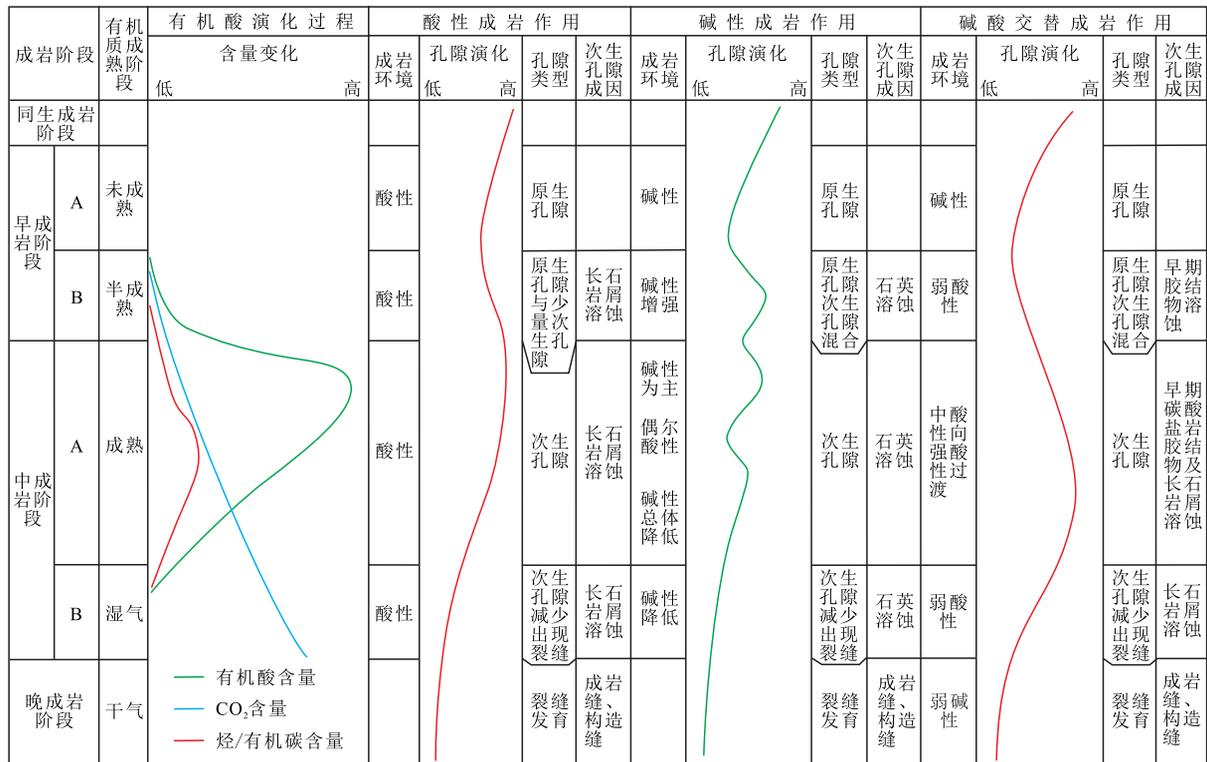


图5 渤南洼陷沙四段上亚段不同成岩环境下孔隙演化模式

Fig.5 Pore evolution model under different diagenetic environments of the upper part of 4th member of Shahejie Formation in Bonan subsag

次生孔隙带。随着烃源岩热演化程度的不断升高,有机酸随着油气运移的幕式注入,导致碱性流体的浓度发生变化,但不会改变碱性成岩环境;因此,石英溶蚀现象会随着有机酸的幕式注入而发生有规律的变化,并形成多个次生孔隙带(图5)。值得注意的是,在该过程中发生的溶蚀作用均为碱性成岩环境下的石英溶蚀,而酸性流体的注入只能降低碱性溶蚀作用的强度,并未发生酸性溶蚀^[18],与碱酸交替成岩环境下的成岩演化具有本质的区别。

最后,在碱酸交替的成岩环境下,早期成岩过程中胶结作用较强,原生孔隙迅速减少;中后期成岩过程中幕式注入的有机酸与早期成岩过程中的碱性流体中和,成岩环境逐渐演变为酸性。受中碱晚溶成岩演化规律控制,在储层中不会立刻产生大量的酸性溶蚀孔隙,而是随着时间的推移、埋深的增大,在中、深部地层中才开始发育大量的次生孔隙,进而在深部地层中形成次生孔隙发育带(图5)。实际上,碱酸交替成岩环境下,早期成岩过程中发生的碱性胶结作用致使原生孔隙未被压实,对原生孔隙具有保护作用;当中后期成岩过程中有机酸进入后,最终发生酸性溶蚀作用,不同于纯酸性及纯碱性成岩环境下的成岩演化规律(图5)。

5 特殊成岩演化规律对油气勘探的地质意义

渤海湾盆地沙四段上亚段储集体特殊的中碱晚溶、弱碱早溶、碱酸成岩环境交替的成岩演化规律对其油气勘探具有重要的地质意义。一方面,形成次生孔隙的时间相对较晚,一般在第2次油气成藏期后才开始发育大量次生孔隙,对于具有多期成藏、晚期为主的油气成藏特点的渤海湾盆地的众多次级洼陷来说,次生孔隙的形成时间距晚期油气成藏时间较近,形成的次生孔隙还未被强烈压实,油气得以顺利进入次生孔隙并聚集成藏,优质储层的形成时间与晚期油气成藏期匹配较好。另一方面,发育次生孔隙的优质储层埋深较大,深部优质储层距有效烃源岩更近,有利于油气运聚成藏。

以渤海湾盆地沙四段上亚段义176块油藏为例。该油藏具有典型的3期成藏、晚期为主的特征,其现今埋深为3 500~4 000 m,为膏盐岩集中发育段。在早期成岩过程中受碱性流体的强烈影响,在初次油气成藏期(东营组沉积末期)之前为中碱性成岩环境,根据沉积埋藏史推断初次油气成藏期储层的埋深为2 000~2 500 m,由于中碱性成岩环境下大量

碳酸盐岩胶结物填充粒间孔隙,有机酸的初次注入主要与碱性流体中和,并未形成大量次生孔隙;但随着残余有机酸与可溶矿物接触时间的增加,有少量溶蚀孔隙产生,为有机酸的再次注入产生大量溶蚀孔隙奠定了基础。随着烃源岩热演化程度的不断升高,在馆陶组沉积末期发生第2次油气成藏,该时期储层埋深为2 700~3 200 m,二次注入的有机酸在初次注入有机酸形成少量溶蚀孔隙的基础上与可溶矿物的接触面积增大,且随着接触时间的增加,溶蚀孔隙逐渐增多;当储层埋深为3 300~3 800 m时,在主要油气成藏期(明化镇组沉积末期),由于馆陶组沉积末期才开始形成次生溶蚀孔隙,因此发育的次生溶蚀孔隙还未被压实即发生油气注入。孔隙演化分析数据显示,在明化镇组沉积末期义176块平均孔隙度近15%,显示出良好的储集性能,有利于晚期油气聚集成藏,且该块已上报探明石油地质储量3 000多万吨。

6 结论

渤海湾盆地沙四段上亚段沉积时期为咸化湖盆,主要发育碎屑岩、碳酸盐岩以及膏盐岩等。其储集体在早期成岩过程中受膏盐岩产生的碱卤水影响,形成碱性成岩环境;在中后期成岩过程中,受有机酸注入影响,形成酸性成岩环境。研究区沙四段上亚段咸化湖盆储集体受先碱后酸、碱酸交替成岩环境的控制,具有中碱晚溶、弱碱早溶成岩演化规律,在深层储集体中形成次生孔隙带,与纯酸性或纯碱性成岩环境下的成岩演化规律相对比,具有特殊性。受其特殊成岩演化规律的控制,一方面使研究区优质储层发育的时间较晚,有利于晚期油气注入;另一方面优质储层形成时埋深较大,深部优质储层距有效烃源岩更近,有利于油气运聚成藏。对渤海湾盆地沙四段上亚段成岩演化规律的研究成果不但丰富了多重成岩环境下的成岩演化分析,而且可以为咸化湖盆深部优质储层探寻提供指导。

参考文献:

- [1] 黄成刚,袁剑英,曹正林,等.咸化湖盆碎屑岩储层中铁白云石的溶蚀作用模拟实验研究[J].石油实验地质,2014,36(5):650-655.
Huang Chenggang, Yuan Jianying, Cao Zhenglin, et al. Simulation experiment for ankerite dissolution in clastic reservoir of saline lacustrine basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5):650-655.
- [2] 刘雅利.渤海湾盆地沙四上亚段成岩机制研究[J].特种油气藏,

- 2015, 22(2): 35-39.
- Liu Yali. Research on diagenetic mechanism in Sha-4 upper member, southern Bohai Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(2): 35-39.
- [3] 陈世悦, 王玲, 李聪, 等. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 40-47.
- Chen Shiyue, Wang Ling, Li Cong, et al. The saline genesis of lacustrine basin in the lower section of the first member of Shahejie Formation in Qikou Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 40-47.
- [4] 高红灿, 陈发亮, 刘光蕊, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因研究的进展、问题与展望[J]. *古地理学报*, 2009, 11(3): 251-264.
- Gao Hongcan, Chen Faliang, Liu Guangrui, et al. Advances, problems and prospect in studies of origin of salt rocks of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(3): 251-264.
- [5] 朱德燕, 王勇, 银燕, 等. 断陷湖盆咸化环境沉积与页岩油气关系——以东营凹陷、渤南地区为例[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(6): 7-13.
- Zhu Deyan, Wang Yong, Yin Yan, et al. Study on the relationship between saline environmental deposition and shale oil-gas in faulted basin: A case study of areas of Dongying sag and Bonan subsag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6): 7-13.
- [6] 刘鹏, 宋国奇, 刘雅利, 等. 渤南洼陷沙四上亚段多类型沉积体系形成机制[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(9): 3 234-3 243.
- Liu Peng, Song Guoqi, Liu Yali, et al. Mechanism of depositional system in upper fourth member of Shahejie Formation in Bonan sag [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2014, 45(9): 3 234-3 243.
- [7] 邱隆伟, 赵伟, 刘魁元. 碱性成岩作用及其在济阳拗陷的应用展望[J]. *油气地质与采收率*, 2007, 14(2): 10-16.
- Qiu Longwei, Zhao Wei, Liu Kuiyuan. Alkali diagenesis and its application in Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(2): 10-16.
- [8] 李易隆, 贾爱林, 吴朝东. 松辽盆地长岭断陷致密砂岩成岩作用及其对储层发育的控制[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(6): 698-705.
- Li Yilong, Jia Ailin, Wu Chaodong. Diagenesis of tight sandstones and its controls on reservoirs genesis, Changling Faulted Depression, Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(6): 698-705.
- [9] 钱一雄, 余腾孝, 周凌方, 等. 麦盖提斜坡东部构造带奥陶系岩相、成岩作用带与储层成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 870-882.
- Qian Yixiong, Yu Tengxiao, Zhou Linfang, et al. Lithofacies, diagenesis zone and reservoir origin of the Ordovician in eastern tectonic belt of the Maigaiti slope [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 870-882.
- [10] 葛善良, 鲁新便, 盛海波, 等. 塔中顺9井区柯下段致密砂岩储层特征及成岩演化[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 42-45.
- Ge Shanliang, Lu Xinbian, Sheng Haibo, et al. Reservoir characteristics and diagenesis evolution of tight sandstone reservoir of Shun9 well block in Tazhong area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 42-45.
- [11] 韦东晓, 沈安江, 王莹, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填方解石的阴极发光特征及对成岩环境的指示意义[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 54-58.
- Wei Dongxiao, Shen Anjiang, Wang Ying, et al. Cathodoluminescence features of the calcite filling in the Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir and its significance to instructions of diagenetic environment in Northern Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 54-58.
- [12] 牛栓文, 李继岩. 东营凹陷东段始新统红层储层多重成岩环境及演化模式[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 661-669.
- Niu Shuanwen, Li Jiyan. Multiple diagenetic environments and evolutionary patterns of the Eocene red beds in the eastern Dongying Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 661-669.
- [13] 盛贤才, 郭战峰, 冯畅, 等. 鄂西渝东地区下寒武统石龙洞组成岩作用特征[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 4-7.
- Sheng Xiancai, Guo Zhanfeng, Feng Chang, et al. Diagenesis features of Lower Cambrian Shilongdong Fm in the western Hubei and eastern Chongqing region [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(4): 4-7.
- [14] 张凤娥, 卢耀如. 硫酸盐岩溶蚀机理实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 5(1): 12-16.
- Zhang Feng'e, Lu Yaoru. Experimental study on the mechanism of sulphate corrosion [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 5(1): 12-16.
- [15] Surdam R C, Crossey L J, Svenhagan E, et al. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [16] 曾澍辉, 朱志强, 吴琼, 等. 烃源岩的有机酸生成及其影响因素的模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 847-851.
- Zeng Jianhui, Zhu Zhiqiang, Wu Qiong, et al. Experimental study on the generation of organic acids from source rocks and its effect factors [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 847-851.
- [17] 徐兴友, 徐国盛, 秦润森. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(2): 113-120.
- Xu Xingyou, Xu Guosheng, Qin Runsen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of Member 4 of Shahejie Formation in Bonan sag, Zhanhua depression, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2008, 35(2): 113-120.
- [18] 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2001, 31(9): 752-759.
- Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on reservoir in Miyang depression [J]. *Science in China: Series D Earth Science*, 2001, 31(9): 752-759.

