

苏北盆地金湖凹陷戴南组 成岩阶段划分及其油气地质意义

张琴¹,朱筱敏¹,董国栋¹,毛凌¹,杨立干²,陈青云¹

(1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)),北京 102249;

2. 中国石化江苏油田分公司地质科学研究院,江苏扬州 225009)

摘要:应用显微薄片、扫描电镜、X-衍射、包裹体测温等分析化验资料,根据镜质体反射率、埋藏史曲线、粘土矿物变化特征以及各种成岩现象和标志,综合划分和确定了金湖凹陷戴南组碎屑岩储层的成岩阶段。戴南组大部分处于中成岩A阶段,少量为早成岩B和中成岩B阶段。与成岩阶段相对应,戴南组储层孔隙类型也经历了从原生到次生的演化阶段,目前戴南组大部分以次生孔隙为主,保存少量原生孔隙。根据成岩阶段和孔隙演化进一步预测新庄1井区和天X77井、关X2井等井区为有利储层发育带。另外,根据成岩阶段的划分结果,反过来预测大部分地区下伏阜宁组有机质处于成熟阶段,是戴南组有利的油气来源,并推断秦X2、天X75、天X92等井区戴南组早期经历了大的构造抬升运动和较强的剥蚀作用。

关键词:成岩阶段划分;镜质体反射率;埋藏史曲线;孔隙演化;戴南组;金湖凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Diagenesis stage division and petroleum geologic significances of Dainan Formation in Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

Zhang Qin¹, Zhu Xiaomin¹, Dong Guodong¹, Mao Ling¹, Yang Ligan², Chen Qingyun¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

2. Geological Research Institute, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Based on the analysis and testing data of microscopic slice, scanning electron microscope (SEMP), X-ray diffraction and fluid inclusion microthermometry, the diagenesis stage of clastic reservoirs of the Dainan Formation in the Jinhu Sag has been divided and confined according to vitrinite reflectance, buried history curve, and the variation of clay mineral as well as various diagenesis phenomena and marks. Most of the Dainan Formation is in A phase of the middle diagenesis stage, and less in B phase of the early diagenesis stage and B phase of the late diagenesis stage. Corresponding to diagenesis stage, pore types in the Dainan Formation also evolve from primary to secondary ones. At present, secondary pores account for a large amount in the Dainan Formation while primary pores are seldom found. It is predicted that the areas around wells Xin Zhuang 1, Tian X77 and Guan X2 are favorable for reservoir formation. Based on the division of diagenesis stage, the organism in the underlying Funing Formation in most of the study area is predicted matured as the main hydrocarbon source rocks of the Dainan Formation. And it is inferred that the Dainan Formation in the areas around wells Qin X2, Tian X75 and Tian X92 has encountered strong structural uplift and erosion during the early buried stage.

Key words: division of diagenesis stage; vitrinite reflectance; buried history curve; pore evolution; Dainan Formation; Jinhu Sag; Northern Jiangsu Basin

金湖凹陷位于苏北盆地盐阜拗陷西南缘,北起建湖隆起,南至天长凸起、菱塘桥低凸起,西接张八岭隆起,东临柳堡低凸起,地跨江苏、安徽两省,面积约5 000 km²,是一个南断北超、南陡北缓的箕状

凹陷(图1)^[1-2]。凹陷内古近系和上白垩统泰州组最大充填累计厚度达5 000 m,其中戴南组(E₂d)最大厚度达1 000 m。

近年来随着金湖凹陷戴南组油气的不断发现,

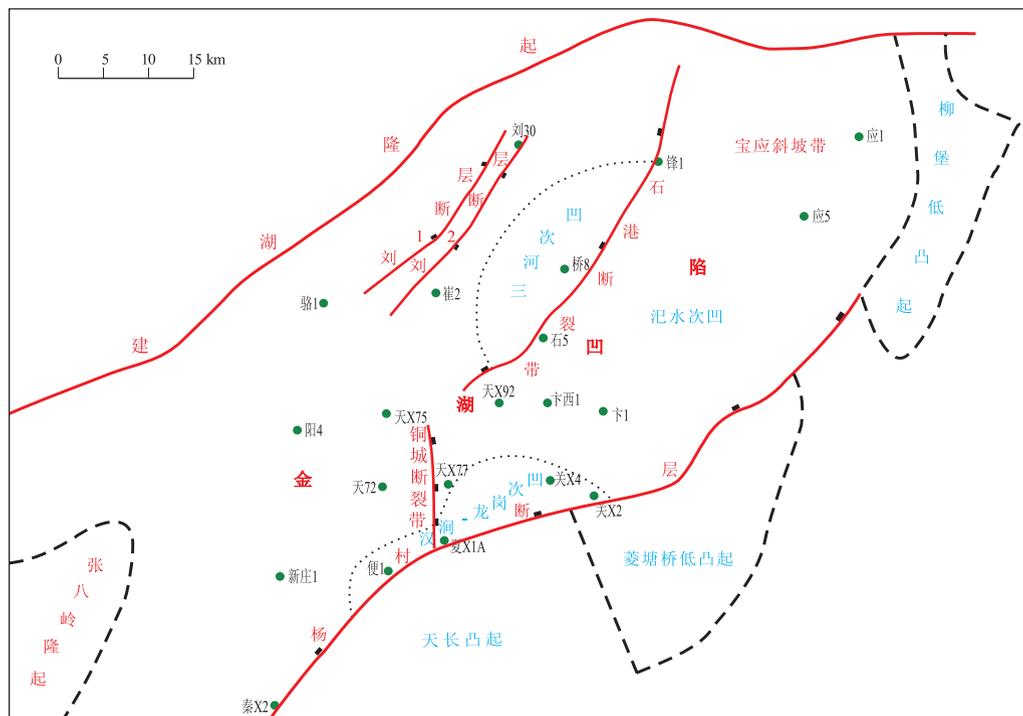


图1 苏北盆地金湖凹陷构造单元划分

据吴东胜^[6],2005,有修改。

Fig.1 Tectonic division of Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

前人对戴南组的沉积相^[2-3]及成藏条件分析^[4-6]也越来越多,成岩作用和储层研究也越来越受重视。本文主要通过普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、X-射线衍射分析等资料,分析戴南组成岩作用的类型,根据各种成岩标志判断目前所处的成岩阶段及其划分,对于预测有机质演化程度、推断孔隙类型及演化规律、分析成岩类型和成岩序列及还原埋藏演化历史、预测有利储层的纵横向分布都具有一定的科学和实践意义。

1 成岩阶段划分方法及依据

碎屑岩成岩阶段是指碎屑沉积物沉积后经各种成岩作用改造直至变质作用之前所经历的不同地质史演化阶段^[7]。由于深层成岩作用在异常高温高压影响下有所延缓,所以碎屑岩成岩阶段划分主要分为浅层成岩阶段(埋深浅于3 500 m)和深层成岩阶段(埋深大于3 500 m)。成岩阶段的划分主要根据镜质体反射率、埋藏史曲线、粘土矿物混层比的变化以及显微镜及扫描电镜下各种成岩现象及自生矿物的观察、分析综合划分成岩阶段。本区戴南组大部分储层埋深小于3 500 m,依据浅层成岩阶段划分标准^[8],成岩阶段主要分为同生成岩阶段、早成岩阶段(A、B两期)、中成岩阶段(A、B两期)、晚成岩阶段、表生成岩阶段。本文用

到的成岩阶段划分标志主要包括镜质体反射率、埋藏史曲线及古地温特征、伊蒙混层中的蒙皂石含量、各种成岩现象。

2 戴南组成岩阶段划分

2.1 根据镜质体反射率划分成岩阶段

金湖凹陷烃源岩镜质体反射率(R_0)主要为戴南组之下阜宁组的数据,因为两者整合接触,所以可以作为参考数据。随深度变化 R_0 曲线明显分为两段(图2),深度2 200 m附近趋势线出现明显转折。上段相对于下段具有明显的“浅”熟特征,主要分布在隆起带或外斜坡部位;下段变化趋势基本正常,主要分布在深凹或内斜坡部位。龚永杰等^[9]认为隆起和外斜坡地区的镜质体反射率随深度变化趋势与深凹带和内斜坡地区的趋势相比,具有“平行变浅”的关系,即存在“不等深等熟”现象^[10-11],与三垛运动导致的抬升有关。陈安定以苏北盆地部分断陷中存在的“不等深等温”、“不等深等熟”、成熟度指标与埋深关系的“平行变浅”分布等资料为依据,提出了“浅熟”现象源于“古大于今”的埋藏史这一特殊地质背景^[10-11]。

根据镜质体反射率与现今的埋藏深度变化关系,依据上段具有明显“浅”熟特征的趋势线,在约1 000 m即进入早成岩B阶段,约1 500 m进入中成

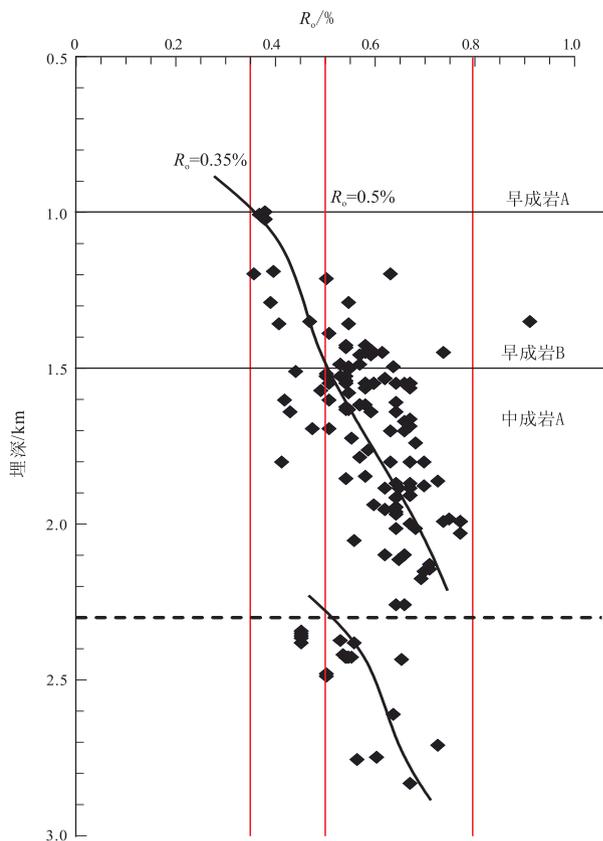


图2 苏北盆地金湖凹陷根据镜质体反射率 R_o 划分的成岩阶段

Fig. 2 Division of diagenesis stage according to vitrinite reflectance in Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

岩 A 阶段。根据下段基本正常趋势线,大约在 2 300 m 左右才进入中成岩 A 阶段。

龚永杰等^[9]通过三垛组剥蚀量恢复和古今地温对比两个方面,对金湖凹陷隆起区和外斜坡区烃源岩“浅熟”特征的成因进行了分析。根据其研究成果,苏北盆地共发育 3 期构造抬升,分别为阜宁组沉积末—戴南组沉积前的吴堡事件、戴南组沉积末—三垛组沉积前的真武事件和渐新世期间的三垛事件,其中以真武事件、三垛事件较为强烈。通过剥蚀量恢复计算,三垛事件绝对剥蚀量最大,其他可以忽略,最后计算关 X4、唐 8、应 3、闵 17 井的三垛组地层剥蚀量恢复结果分别为 800, 1 089, 1 300, 1 022 m。金湖凹陷在不同次凹、隆起带和外斜坡,三垛组地层剥蚀量变化大,以最小剥蚀量 800 m 计算,如果不存在地壳的抬升,恢复正常的埋藏作用,对上段浅熟特征的趋势线进行简单剥蚀厚度恢复,进入早成岩 B 和中成岩 A 的埋藏深度应分别为 1 800 m 左右和 2 300 m 左右,与下段正常的演化趋势线基本一致。

2.2 根据埋藏史曲线特征分析成岩阶段

在恢复某口井的埋藏史曲线时,古剥蚀厚

度^[12-13]和古地温场恢复^[14]都是非常重要的参数。根据龚永杰等^[9]研究资料,金湖凹陷不同构造部位在三垛组的埋藏史存在较大区别,三垛组地层剥蚀量在 800 ~ 1 300 m 之间。

鲁东升等^[15]通过 R_o 数据及生油岩热演化分析,求出了金湖凹陷不同时期的古地温梯度,即现今地温梯度为 3.5 °C/hm; 11, 20, 22 Ma 时的地温梯度分别为 4.7, 5.9, 5.8 °C/hm, 该古地温梯度的变化比较符合客观实际。据王良书等^[16]研究,苏北盆地古热流值在距今 75 ~ 38 Ma 期间呈线性增加,金湖凹陷从泰州组至盐城组沉积期间,火山活动强烈,三垛—盐城期尤为强烈,必然会形成较高的地温异常^[17-18]。

在确定古地温梯度和剥蚀厚度的基础上,对金湖凹陷不同井的埋藏史曲线进行了制作(图 3)。综合分析认为,各井现今埋深和所经历的剥蚀厚度存在差别,所经历的埋藏史曲线和成岩阶段也存在差别(图 4)。大部分井戴南组所经历的最大古地温在 85 ~ 140 °C,进入了中成岩 A 阶段,只有少数井(如泰 X2 井)部分戴一段少量所经历的最大古地温为 140 ~ 160 °C,进入了中成岩 B 阶段;新庄 1 井戴二段上部处于早成岩 B 阶段。

2.3 根据蒙皂石含量划分成岩阶段

伊蒙混层矿物(I/S)的蒙皂石含量在金湖凹陷戴南组的数据较少,但可以作为参考。根据蒙皂石含量随深度的变化(图 5),大约在 1 000 m 进入早成岩 B 阶段(数据少),1 500 m 左右进入中成岩 A 阶段,与根据镜质体反射率分析结果一致。但在 1 300 ~ 1 500 m 之间出现异常数据点,其含量处于 10% ~ 50% 之间,所以也存在“浅熟”现象,部分井点进入中成岩 B 阶段,与前述埋藏史曲线分析结果一致。

2.4 根据各种成岩现象判断成岩阶段

本区的成岩作用现象非常复杂,压实作用、各种胶结作用、交代作用和溶解作用都非常明显。各种成岩作用也表现出了较强的成岩作用现象,表明岩石已进入较晚的成岩作用阶段^[19-21],主要表现如下:

(1) 压实作用主要为中等压实—强压实。碎屑颗粒接触类型主要为线接触—凹凸接触,少量点接触,并且塑性颗粒表现出了强烈的弯曲变形(图版 a)和脆性颗粒发生破碎(图版 b)的现象,说明发生了较强的压实作用^[22-23]。

(2) 砂岩固结程度较高,碳酸盐胶结物发育。砂岩中除了发育早期的方解石胶结物(图版 c)和

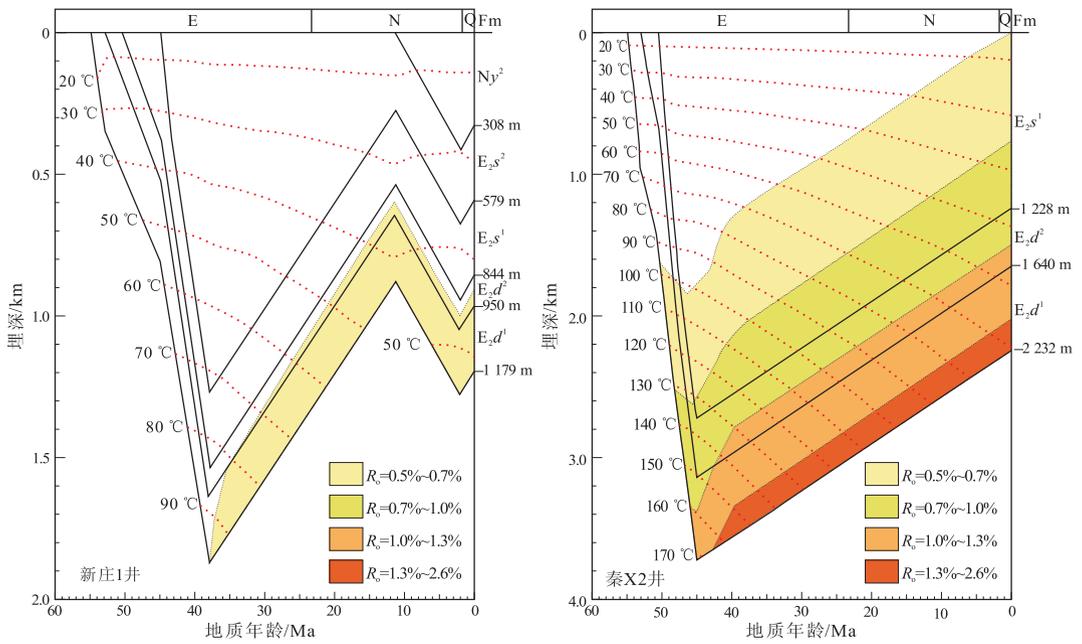


图 3 苏北盆地金湖凹陷戴南组埋藏史曲线特征

Fig. 3 Characteristics of buried history curves of Dainan Formation in Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

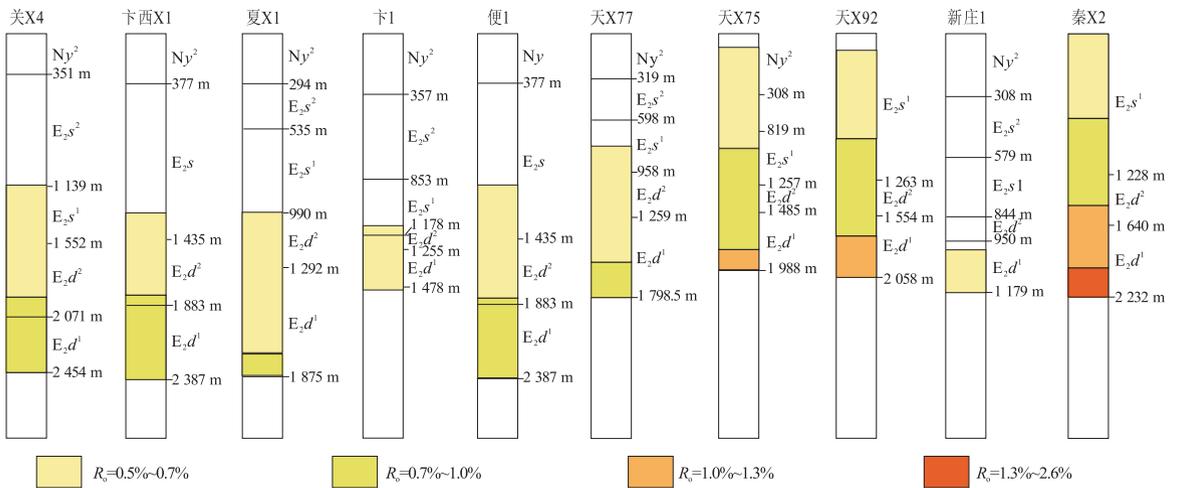


图 4 苏北盆地金湖凹陷不同井成岩阶段划分对比

Fig. 4 Contrast of division of diagenesis stage among different wells of Dainan Formation in Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

白云石胶结物外(大部分被溶解)(图版 d),还发育二期的方解石、白云石胶结(图版 d)及晚期的含铁方解石(图版 e)和铁白云石胶结物(图版 f),也代表进入了中成岩阶段^[24]。

(3)石英次生加大和长石次生加大较发育。石英次生加大和长石次生加大多为 II-III 级(图版 g,h),如新庄 1 井(1 123.56 m)石英加大 III 级、长石加大 II 级,关 1-1 井(1 321.56 m)石英加大 II 级(图版 g),夏 X1 井(1 437.96 m)石英、长石加大 III 级(图版 h),说明虽然现今埋藏较浅,但都已经进入中成岩 A-B 阶段。

(4)粘土矿物中几乎没有蒙皂石。根据 X-衍

射分析化验资料,粘土矿物以伊蒙混层、伊利石、绿泥石和高岭石为主,长石溶解转化为高岭石的含量也较高。伊蒙混层中蒙皂石含量大都小于 50%,说明粘土矿物的转化程度高,进入较晚成岩作用阶段。

(5)次生孔隙相对发育。在部分井如天 X77 井(1 375.56 m)、夏 X1 井(1 437.78 m)、吴 X2 井(1 540.19 m)就已经发育大量的早期方解石被溶解而形成的次生孔隙(图版 i),而且出现二期方解石和白云石胶结的现象,如成 X1 井(1 928.65 m)(图版 d)。部分井中如果早期方解石不发育而白云石胶结物发育的话,如关 1-1 井(1 321.51 m)、天 X77 井(1 428.94 m)、成 X1 井(1 928.65 m)和关 X5 井(2 779.58 m)等也出现

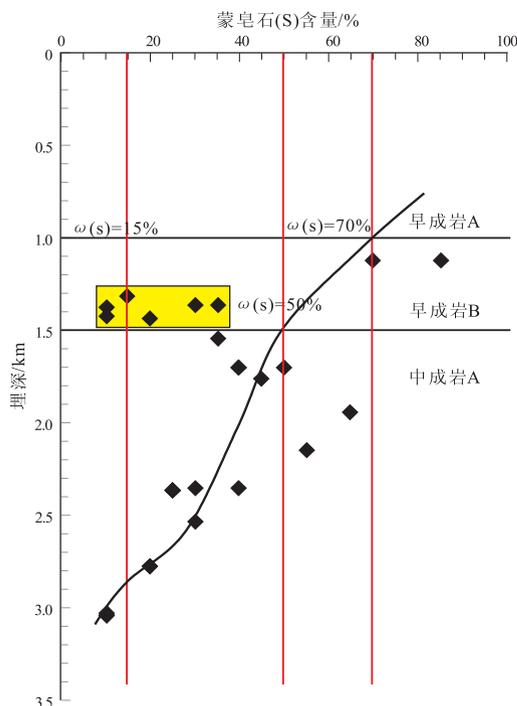


图5 苏北盆地金湖凹陷根据戴南组伊蒙混层矿物中的蒙皂石含量划分成岩阶段

Fig. 5 Division of diagenesis stage according to smectite content in illite-montmorillonite mixed-layer of Dainan Formation in Jinhu Sag, Northern Jiangsu Basin

了早期白云石胶结物被溶解的现象(图版 d, j)。这些都说明了有大量有机酸进入储集层而溶蚀早期碳酸盐胶结物的现象,应判断进入了中成岩阶段。

2.5 戴南组成岩阶段划分

综合上述各种成岩现象、埋藏史曲线、镜质体反射率数据及粘土矿物数据,结合显微镜及扫描电镜观察到的多种成岩现象,确定本区戴南组储层大部分处于中成岩阶段 A 期,少量为早成岩 B 期和中成岩阶段 B 期,并建立了成岩演化序列与孔隙类型及其发育之间的关系。本区 1 000 m 为早成岩 A 和 B 的分界,1 500 m 进入中成岩阶段 A 期,3 000 m 进入中成岩阶段 B 期。与成岩阶段相对应,孔隙演化也经历了从原生到次生的演化阶段,目前戴南组大部分井处于中成岩阶段 A 期,所以孔隙类型以次生孔隙发育为主,保存少量原生孔隙。

3 成岩阶段划分的油气意义

3.1 预测油气富集程度

有机质演化程度与岩石所处的成岩阶段关系密切。根据碎屑岩成岩阶段划分标准^[8],在中成岩阶段 A 期,有机质低成熟—成熟, R_o 为 0.5% ~ 1.3%。前已述及,本区戴南组缺乏 R_o 数据,主要根据下伏阜宁组 R_o 数据。前人研究认为戴南组的油气主要来自于

阜宁组,本区大部分井阜宁组 R_o 处于 0.7% ~ 1.0%,少数井小于 0.5% 和大于 1.3%,所以大部分地区有机质处于成熟阶段。戴南组紧邻阜宁组,加之戴南组储层非常发育,且有比较发育的活动断裂与阜宁组连通,使得戴南组具有良好的油气来源。钻探和试油结果显示,戴南组具有良好的油气显示和充足的油气来源,主要来自于下部阜宁组成熟烃源岩。

3.2 预测有利储层发育带

根据成岩演化序列,特别是压实作用和碳酸盐胶结及溶解作用发生的成岩阶段,可以推断孔隙类型,预测次生孔隙的发育。一般在早成岩阶段 A 期,储层主要经历压实作用和早期的方解石胶结作用,孔隙类型以原生孔隙为主。到了早成岩阶段 B 期,有机质开始演化成熟,释放少量的有机酸,对早期的方解石胶结物进行溶解,所以开始发育少量的次生孔隙。到了中成岩阶段 A 期,有机质大量成熟,释放大量的有机酸,对早期的方解石和白云石胶结物和易溶岩屑都进行溶蚀,形成大量的次生孔隙,因此孔隙类型以次生孔隙发育为主。本区成岩阶段大部分地区处于中成岩阶段 A 期,所以孔隙类型以次生孔隙为主。根据孔隙度随深度的分布发现,研究区戴南组在纵向上发育 3 个次生孔隙发育带,如具有工业性油流的天 X77 井、关 X2 井等的戴南组。少部分井处于早成岩 B 期,以原生孔隙为主,发育少量次生孔隙,如新庄 1 井戴南组。另有少部分井处于中成岩阶段 B 期,如秦 X2 井,原生和次生孔隙都将减少,并可能出现裂缝。所以,进一步根据成岩阶段划分的结果,可预测原生和次生孔隙发育带。如新庄 1 井区处于早成岩 B 期,预测为原生孔隙发育区;而天 X77 井、关 X2 井等井区处于中成岩阶段 A 期,结合所处的断裂构造背景,预测为次生孔隙发育区,从而进一步预测 2 个井区为有利储层发育带。

3.3 还原埋藏演化历史

根据成岩阶段划分结果,可以反过来分析储层的埋藏演化历史,特别是构造抬升和剥蚀明显的地区。如秦 X2、天 X75、天 X92 等井区,虽然现今埋深只有近 2 000 m,如果未发生强烈的构造运动,应处于中成岩阶段 A 早期,但其所经历的最大古地温为 140 ~ 160 °C,已经进入了中成岩 B 阶段,可以反过来推测早期经历了大的构造抬升运动和较强的剥蚀作用,造成现今较浅的埋藏深度。

4 结论

金湖凹陷戴南组储层大部分处于中成岩阶段

A 期,少量为早成岩 B 期和中成岩阶段 B 期;大部分地区有机质处于成熟阶段,戴南组具有良好的油气显示和充足的油气来源,主要来自于下部阜宁组成熟烃源岩。戴南组储层以次生孔隙发育为主,保存少量原生孔隙。秦 X2、天 X75、天 X92 等井区戴南组沉积早期经历了大的构造抬升运动和较强的剥蚀作用,造成现今较浅的埋藏深度,但储层已经处于中成岩阶段 B 期。预测新庄 1 井区和天 X77 井、关 X2 井等井区为有利储层发育带。

参考文献:

[1] 邱旭明. 苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 371-374.

[2] 张喜林, 朱筱敏. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及其对隐蔽油气藏的控制[J]. 古地理学报, 2005, 7(2): 207-218.

[3] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 苏北盆地上白垩系—第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.

[4] 刘世丽, 徐焕友, 李翔. 金湖凹陷戴南组成藏主控因素及成藏模式研究[J]. 小型油气藏, 2009, 12(3): 1-5.

[5] 杨立干. 金湖凹陷古近系戴一段成藏条件和成藏模式研究[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3): 34-38.

[6] 吴东胜. 金湖凹陷戴南组隐蔽油气藏研究[J]. 西南石油大学学报, 2005, 27(4): 16-19.

[7] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4 版. 北京: 石油工业出版社, 2010.

[8] 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. SY/T5477-2003 中华人民共和国石油天然气行业标准 碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

[9] 龚永杰, 何胜, 鲁雪松. 金湖凹陷烃源岩“浅熟”原因探讨[J]. 特种油气藏, 2008, 15(1): 36-39.

[10] 陈安定. 苏北下第三系源岩“浅”熟的构造背景[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(4): 6-10.

[11] 陈安定. 苏北第三系成熟演化指标与深度关系的 3 种模式[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 58-63.

[12] 牟中海, 陈志勇. 柴达木盆地北缘中生界剥蚀厚度恢复[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 35-37.

[13] 刘小平, 杨立干, 徐健. 苏北盆地高邮凹陷始新统剥蚀厚度恢复[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 128-130.

[14] 姚合法, 侯建国, 林承焰, 等. 多旋回沉积盆地地温场与烃源岩演化: 以苏北盆地为例[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(2): 195-199.

[15] 鲁东升, 薛建华. 苏北金湖凹陷生油岩热演化研究[J]. 石油实验地质, 1999, 21(2): 180-183.

[16] 王良书. 油气盆地地热研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989.

[17] Tobin R C. Diagenesis, thermal maturation and burial history of the Upper Cambrian Bonnetterre dolomite, southeastern Missouri; an interpretation of thermal history from petrographic and fluid inclusion evidence[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17(2): 143-151.

[18] Tseng H Y, Pottorf R J. The application of fluid inclusion PVT analysis to studies of petroleum migration and reservoirs[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78-79: 433-436.

[19] 王果寿, 邱岐, 张欣国, 等. 松辽盆地梨树断陷十屋油田区营城组、沙河子组储层成岩作用分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(5): 474-480.

[20] Kim G Y, Yoo D G, Lee H Y, et al. The relationship between silica diagenesis and physical properties in the East/Japan Sea: ODP Legs 127/128[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30(3-4): 448-456.

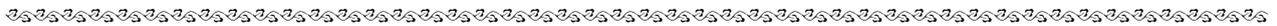
[21] Karim A, Pe-Piper G, Piper D J W. Controls on diagenesis of Lower Cretaceous reservoir sandstones in the western Sable Sub-basin, offshore Nova Scotia[J]. Sedimentary Geology, 2010, 224(1-4): 65-83.

[22] Umar M, Friis H, Khan A S, et al. The effects of diagenesis on the reservoir characters in sandstones of the Late Cretaceous Pab Formation, Kirthar Fold Belt, southern Pakistan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(2): 622-635.

[23] 张琴, 朱筱敏, 陈祥, 等. 南华北盆地谭庄凹陷下白垩统成岩相分布及优质储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 472-480.

[24] 赵欣, 陈强路, 孙渊, 等. 塔里木盆地东北部中上奥陶统致密砂岩储集性能与成因[J]. 石油实验地质, 2012, 34(5): 466-473.

(编辑 徐文明)



(上接第 52 页)

[14] Curiale J A, Covington G H, Shamsuddin A H M, et al. Origin of petroleum in Bangladesh[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(4): 625-652.

[15] 方念乔. Riviere 粒度资料解释法在孟加拉深水扇积物流体动力分析中的应用[J]. 地质论评, 1992(7): 344-351.

[16] Normark W R. Fan valleys channels and depositional lobes on modern submarine fan; characters for recognition of sandy turbidities environments[J]. AAPG Bulletin, 1979, 62: 812-931.

[17] 孙辉, 范国章, 吕福亮, 等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡

水道复合体沉积特征[J]. 沉积学报, 2010, 22(2): 69-73.

[18] Stahl W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration[J]. Chemical Geology, 1977, 20(2): 121-149.

[19] Stahl W J. Carbon isotope fractionation in natural gases[J]. Nature, 1974, 251(5471): 134-135.

[20] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. Geochemical et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5): 649-661.

(编辑 徐文明)

图 版

