

文章编号:1009-2722(2015)04-0021-07

下扬子黄桥地区龙潭组 高 CO₂ 油藏成藏模式

俞 昊

(中石化华东分公司石油勘探开发研究院,南京 210036)

摘 要:二叠系油藏的发现具有重要的理论与实际意义。不仅突破了下扬子古生界的油气发现,而且完善了下扬子区上组合的晚期生烃、晚期成藏理论,使下扬子古生界油气勘探工作得以重启。黄桥地区龙潭组顶部致密砂岩油藏具有与 CO₂ 气伴产的特性。通过大量最新地震钻井勘探发现的资料,岩石薄片鉴定、物性和测井资料解释以及油气流体包裹体的资料,综合分析了该区上古生界油藏的成藏模式与油藏类型的特征,提出了针对储量评估与有效开发制约因素的对策。

关键词:成藏模式;苏北黄桥地区;二叠系龙潭组;油藏;高含 CO₂

中图分类号:P618.130.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.04004

自 1958 年以来,下扬子地区经历了近 60 年的油气勘探。其中,黄桥地区作为所受应力相对较弱的构造相对稳定区,勘探程度相对较高。已有钻遇古生界的钻井 30 余口。其中,各井龙潭组普遍有油气显示。但因其自身储层物性较差,早期测试未获突破。其后于 1983 年,在黄桥地区二叠系栖霞组灰岩溶蚀孔缝洞储层发现大型 CO₂ 气田。

近期,随着下扬子上组合地层晚期生烃、晚期成藏理论的确立,针对黄桥龙潭组油藏的探索重新展开。借助新的测试技术,龙潭组致密砂岩油藏测试于 2009 年获得突破。老井 HT3 井龙潭组压裂复试获日产油 1.8 t;新井 XP1 井龙潭组压裂测试获日产油 5.1 t;新井 X3 井常规测试获日产油 2.1 t。此 3 井产油的同时均伴有高产 CO₂,以 X3 井为例,日产 CO₂ 超 5 万方。因此,探索其成藏模式,确立油藏类型是下一步进行储量计算

与产能建设的先决条件。

1 资料和方法

本文主要利用了苏北盆地黄桥地区的二维和三维地震资料和 X1、X2 和 X3 总计 3 口钻井的取心资料,并利用油层物理、沉积岩石学、矿物学鉴定分析的方法,开展了铸体薄片、扫描电镜、流体包裹体与生烃史分析;完成了针对二叠系龙潭组钻井岩心薄片矿物鉴定和系统的物性测试;观察了砂岩薄片的特征;特别是对于富含 CO₂ 气体包裹体完成了激光拉曼测试分析。

2 龙潭组油藏的储集物性

黄桥地区龙潭组含油层主要为其顶部砂岩,厚度约 10 m。因岩心资料限制,选择 X1、X2 井的龙潭组储层岩石薄片进行鉴定,显示龙潭组储层碎屑成分以石英、长石和岩屑为主,岩性以岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩为主,且以中、细粒砂岩为主,砂岩粒度范围在 0.03~0.5 mm 之间,一般

收稿日期:2014-12-17

基金项目:中国地质调查局项目(GZH201200510);国家重点基础发展研究计划(973 计划)(2012CB956004)

作者简介:俞 昊(1984—),男,工程师,主要从事油气地质勘探工作. E-mail: yuhow_cmx@sohu.com

为 0.1~0.3 mm。砂岩分选中等—好,以次圆、次棱角为主,支撑方式为颗粒支撑,接触方式主要为线—凹凸接触,岩石胶结类型以接触式胶结为

主,孔隙式胶结次之。胶结物主要为碳酸盐,硅质和黏土杂基含量较低,岩石结构普遍表现为成分成熟度偏低、结构成熟度中等的特点(图 1)。

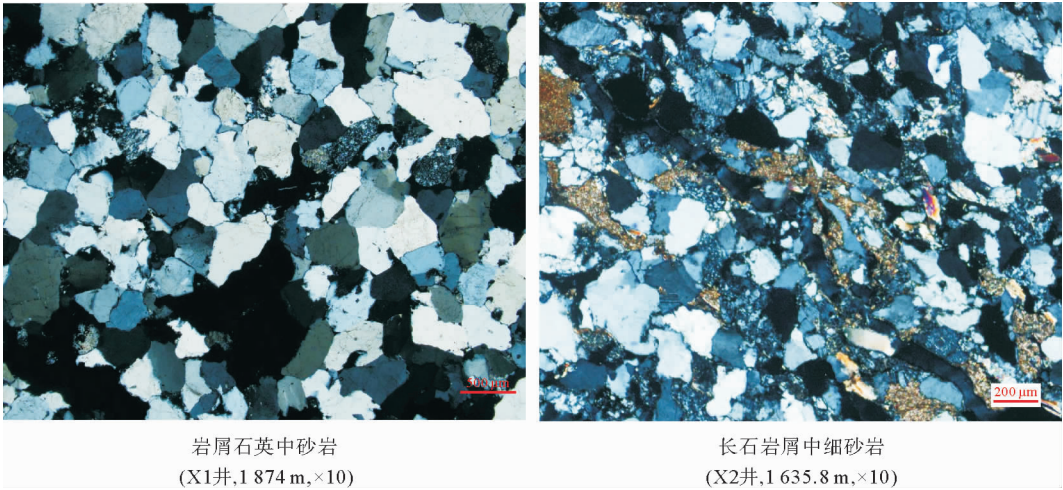


图 1 黄桥地区龙潭组储层岩石成分特征

Fig. 1 Lithological composition of the reservoir of Longtan Formation, Huangqiao region

黄桥地区龙潭组油藏的 X1 井物性测试成果数据表以及 X2 井测井解释成果表显示该井周边储层属特低孔—低孔、特低渗储层(表 1、2)。但 X3 井等井测井解释成果则显示该井周边储层属低孔—低渗至中孔—低渗储层,显示该区龙潭组顶部砂岩储层具有非均质性强的特征。该种特征于水平井 XP1 井中表现最为明显(表 3)。

研究区主要为具煤系环境背景下的砂岩沉

积,主要为酸性水介质^[1-4]。根据砂岩薄片、铸体薄片和扫描电镜观察,本区龙潭组储层砂岩中碳酸盐以泥晶方解石和亮晶方解石为主;石英一部分呈次生加大胶结,其中有的石英颗粒边缘呈Ⅲ级次生加大,一部分呈自形晶体充填孔隙;自生黏土矿物以伊/蒙混层和伊利石为主,其次为高岭石,少量绿泥石,绿泥石主要为孔隙充填,几乎未见蒙脱石。镜下观察可见伊利石主要呈针状或发

表 1 黄桥地区 X1 井龙潭组物性测试成果数据

Table 1 The test results of physical properties in Longtan Formation from well X1, Huangqiao region

岩性	深度/m	单向气测渗透率 /($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	有效孔隙度/%
灰褐色油迹细砂岩	1 867.64	0.071	5.11
灰褐色油迹细砂岩	1 868.04	0.065	5.04
灰黑色油斑细砂岩	1 871.06	0.049	4.42
灰色油迹—油斑细砂岩	1 872.06	0.049	6.22
灰色油迹、局部油斑细砂岩	1 877.11	0.132	4.53
灰色油迹、局部油斑细砂岩	1 877.21	0.066	4.22
灰色油迹、局部油斑细砂岩	1 877.61	0.041	3.44
灰色油迹、局部油斑细砂岩	1 878.11	0.117	4.68
灰色油迹、局部油斑细砂岩	1 879.11	0.05	4.61
灰色细砂岩	1 844.99~1 845.86	7.335	5.32

表 2 X2 井测井解释成果

Table 2 The results of logging interpretation from well X2

深度/m	泥质含量/%	孔隙度/%	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1 574.1~1 548.6	35.7	6.8	0.3
1 550.5~1 553.2	25.5	8.9	0.8
1 593.0~1 594.8	25.9	7.4	0.3
1 626.1~1 628.5	15.7	6.1	0.1
1 634.0~1 635.9	13.1	6.1	0.1
1 635.9~1 638.0	24.4	4.5	
1 677.0~1 678.2	36.9	12.2	

表 3 XP1 井测井解释成果

Table 3 The results of logging interpretation from well XP1

深度/m	泥质含量/%	孔隙度/%	渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1 848.5~1 852.9	15.7	6.6	0.3
1 876.6~1 900.4	9.5	5.4	0.1
1 900.4~1 910.3	7.5	12.2	3.6
1 910.3~1 912.8	5.6	5.2	0.1
1 912.8~1 917.3	4.6	11.1	2.2
1 917.3~1 923.6	4.8	4.8	0.1
1 923.6~1 927.7	6.8	10.0	1.7
1 927.7~1 935.9	5.4	6.7	0.5
1 974.9~1 976.3	8.5	10.5	2.1
1 976.3~1 977.6	8.7	5.9	0.1
1 986.6~1 990.0	6.8	11.7	3.2

丝状,伊/蒙混层的混层比为 15~18,高岭石较为缺失,主要呈书页状或蠕虫状充填于孔隙中;该特征反映了中成岩作用中晚期特征。砂岩所涉及的溶蚀成分主要为长石、岩屑和石英颗粒及杂基,溶

蚀的顺序表现为长石和岩屑的早期溶蚀,石英的后期溶蚀,该现象说明了早期的酸性水介质向后期的碱性水介质转变的特征。且石英的溶蚀与后期的方解石和菱铁矿胶结作用共同反映了中成岩作用阶段的中、晚期特征。碎屑颗粒之间以线—凹凸接触为主,点接触少见;以上颗粒接触关系表现为成岩中期的致密压实特征。另外,黄桥地区 X1、X2 井龙潭组储层的流体包裹体测温显示,该研究储层的均一温度范围大致集中于 110~160 ℃,主体介于 136.4~145 ℃。综上所述,本区龙潭组储集层主要处于中成岩 B 期阶段,虽然此阶段砂岩致密压实,但这一时期储集层易形成溶蚀型次生孔隙,对物性条件起一定改善作用^[5-7]。

本区龙潭组储层孔隙以次生孔隙为主,其次为原生孔隙,在次生孔隙中又以粒内溶孔和粒间溶孔较为常见,溶孔主要是由于疏松岩屑、次为长石颗粒溶蚀而成。本区龙潭组储层孔喉结构不均一性较为明显。喉道以片状、弯片状喉道为主,喉道宽度很窄,以细喉为主,孔隙发育处连通性一般。

受后期构造运动影响,结合龙潭组致密砂岩脆性特征,本区龙潭组储层裂缝体系较为发育。岩心观察中即见大量高角度裂缝(图 2),镜下观察亦见构造裂缝发育(图 3、4)。

3 成藏期次分析

黄桥地区龙潭组全区包裹体均一温度主要存在 3 个温度集中段(图 5),分别为 89~93 ℃、115.4~126.3 ℃和 135~147.6 ℃。推测黄桥地区龙潭组主要经历了 3 期油气充注。



充填油(X1井,1 871.9 m)



树枝状裂缝(X2井,1 556.5 m,2.5×)

图 2 高角度裂缝

Fig. 2 High angle fracture

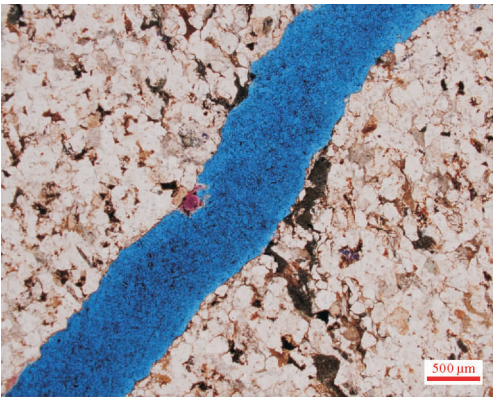


图 3 构造裂缝(X1 井, 1 879 m, 2.5×)
Fig. 3 Structural fracture

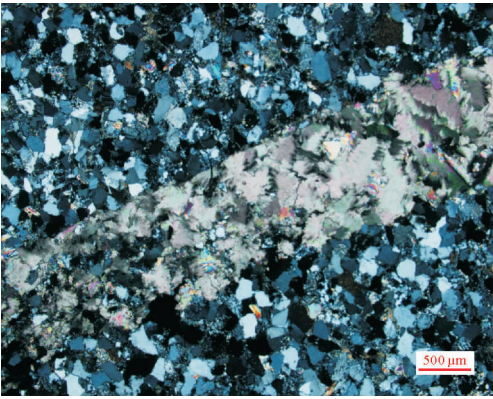


图 4 砂岩固结成岩后发育的构造裂缝充填方解石
(X2 井, 1 556.5 m, 2.5×)

Fig. 4 Structural fractures filled with calcisparite

由下扬子黄桥地区构造演化可见,地层抬升主要是由于燕山、喜山期的构造运动所导致,从而在地层抬升阶段地层遭受错断、走滑、褶曲和侵蚀等,形成大量断层,故地层抬升阶段难有油气充

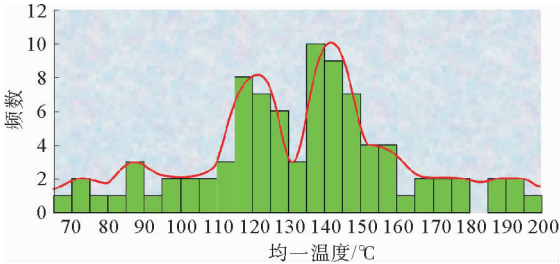


图 5 黄桥地区龙潭组全区流体包裹体均一温度直方图
Fig. 5 The uniform temperature histogram of fluid inclusions in Longtan Formation, Huangqiao region

注^[8,9]。地层下降阶段,构造环境稳定,利于油气充注。将黄桥地区龙潭组 X1 井 3 期油气充注的温度范围投影到埋藏史—热史图上,可以得到黄桥地区油气成藏(图 6)第 1 期的深度、时期分别为 1 300~1 410 m、185~179 Ma,或 1 800~1 890 m、73~70 Ma;第 2 期分别为 2 420~2 610 m、58~52 Ma;第 3 期分别为 2 990~3 300 m、45~38 Ma。其中,结合热史研究,可确定第 1 期的深度、时期分别为 1 800~1 890 m、73~70 Ma。

4 CO₂ 气成因及对龙潭组油藏的影响方式

现代油气成因理论认为,油气形成演化过程划分为 4 个逐步过渡的阶段:①生物化学生气阶段;②热催化生油气阶段;③热裂解生凝析气阶段;④深部高温生气阶段。其中,生物化学生气阶段主要因细菌的降解作用生成以甲烷为主的天然气,热催化生油气阶段主要由黏土矿物的催化作

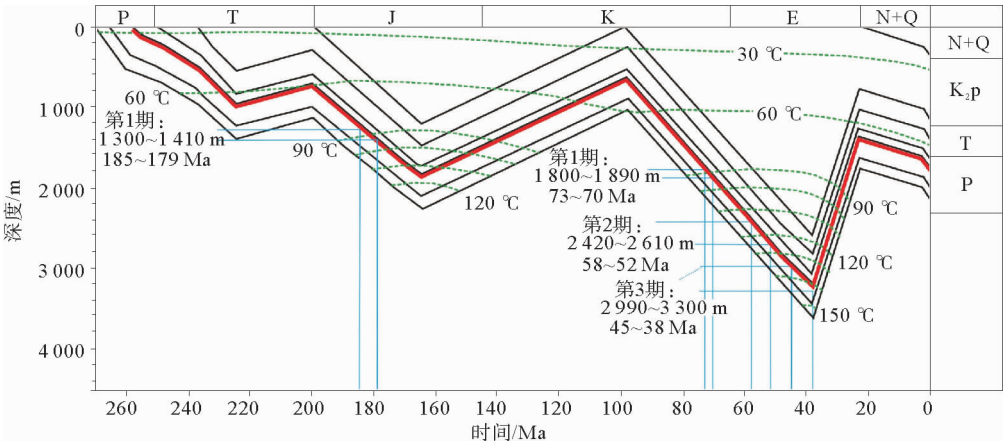


图 6 黄桥地区龙潭组 X1 井油气充注深度及时代

Fig. 6 The depth and age of the oil and gas filling from well X1 in Longtan Formation, Huangqiao region

用生成大量烃,生成少量 CO₂、水、氨、硫化物等挥发性物质,热裂解生凝析气阶段主要是大量 C—C 链断裂,生成大量凝析气、凝析油和少量水、CO₂ 和氮等,深部高温生气阶段形成甲烷、碳沥青或次石墨等,故可看出一般在油气演化各阶段生成的

天然气以 CH₄ 为主,CO₂ 极少。若生成大量 CO₂,则需要大量的氧。而通过薄片观察,研究区可常见海绿石(图 7),表明研究区二叠系地层为还原环境,故黄桥地区 CO₂ 气田是有机成因的可能性不大,与前人研究成果相符^[10-14]。

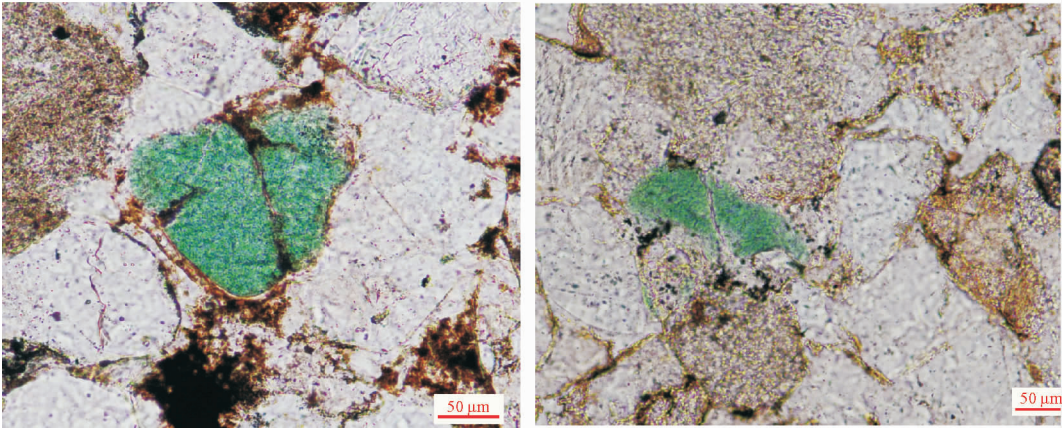


图 7 海绿石(X1 井,1 879 m;X2 井,1 634 m)
Fig. 7 Glauconite

通过流体包裹体分析与生烃史分析认为,黄桥龙潭组油藏的成藏期次包含 2 期,分别位于侏罗纪与白垩纪,属晚期成藏。而 CO₂ 包裹体资料显示,大多数为原生包裹体,气液比相对较大,均一温度较高,普遍高于油气包裹体均一温度,最高可达 205 ℃,一方面反映了 CO₂ 晚于油气成藏,另一方面 CO₂ 气体是相对较高温度下快速成藏的。激光拉曼测试富含 CO₂ 气体的包裹体主要沿切穿石英颗粒的微裂隙成带分布(图 8),产状

显示也晚于油气成藏。综合以上资料认为,在古近纪后期一新近纪时期的火山岩浆活动作用下,幔源 CO₂ 沿深大断裂侵入,首先驱替储集条件较好的各储层中的原油,如目前的 CO₂ 主产层二叠系栖霞组灰岩溶蚀孔缝洞储层。这个过程晚于黄桥地区上古生界各层油气成藏时期。而目前黄桥龙潭组产油各井中,X3 井钻探中录井时于龙潭组地层未见 CO₂ 显示,而完钻后 2 天进行测井时发现目的层已有 CO₂ 活跃显示,XP1 井亦如此;因

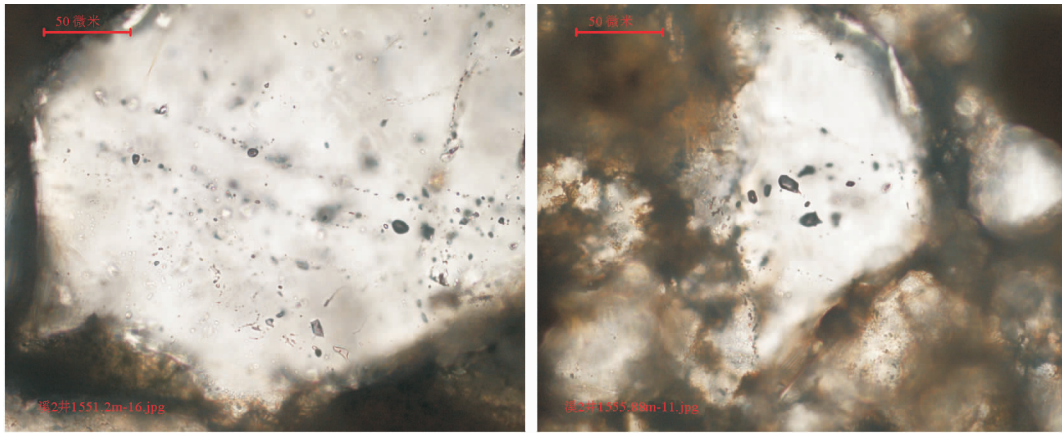


图 8 CO₂ 包裹体分布特征(X2 井,1 551. 2 m;X2 井,1 555. 88 m)
Fig. 8 Distribution characteristics of CO₂ inclusions

物性条件差无油产出各井中亦无 CO₂ 产出;且龙潭组产油各井伴产 CO₂ 产量之大,已远超龙潭组砂岩储集能力;同时,黄桥各井龙潭组砂岩虽然致密,但无论岩心资料还是测井资料均显示其内部裂缝发育。因此我们认为,在古近纪—新近纪黄桥地区发生的幔源 CO₂ 侵入过程中,CO₂ 通过裂缝体系与龙潭组致密砂岩储层发生沟通,但由于龙潭组致密砂岩的储层横向非均质性强,顶部封盖条件好,其原有石油储集与后期通过裂缝沟通试图将其驱替的 CO₂ 气藏直接的压力差不足以将石油从其内部驱替出来。而现今钻井之后,随着油气试采,使地层压力得到释放,获得了足够的压力差使 CO₂ 气体得以通过龙潭组致密砂岩储层向地表排放,从而出现现今表现的由大量 CO₂ 气产出同时携带储层中原有原油的特殊的伴生关系。

5 成藏模式

综上所述,我们认为黄桥地区溪桥构造龙潭组油藏于喜山期沉降后进入生烃门限,至白垩纪末—古近纪早期基本完成成藏。其后幔源 CO₂ 于古近纪后期—新近纪时期沿断裂进入古生界各

地层,并将原有储集条件较好储层内的油气驱替,占据此类储层。如栖霞组灰岩溶蚀孔缝洞储层。但因龙潭组顶部砂岩储层自身封闭条件好,CO₂ 不足以形成驱替原生原油所需压差,其仍为致密砂岩油藏。后期钻井作业、试采油气后打破了龙潭组致密砂岩的独立压力系统。在压力差的作用下,下部地层 CO₂ 通过龙潭组致密砂岩内部发达的裂缝体系沟通至其内部孔隙喉道,进而沟通至储层,最终连通至钻井,排放至地表,形成天然 CO₂ 驱洗致密砂岩油藏的独特现状(图 9)。

6 讨论与结论

二叠系龙潭组油气发现是下扬子区苏北盆地最古老工业油气发现,曾被誉为中石化年度十大发现之一,但因其自身的储层致密性造成开采困难,是否还存在更为有利的储层发育区是下一步值得探索之处。

(1)黄桥地区龙潭组储层碎屑成分以石英、长石和岩屑为主,其顶部砂岩储层非均质性强,且储集层主要处于中成岩 B 期阶段,孔隙以次生孔隙为主,裂缝体系较为发育。

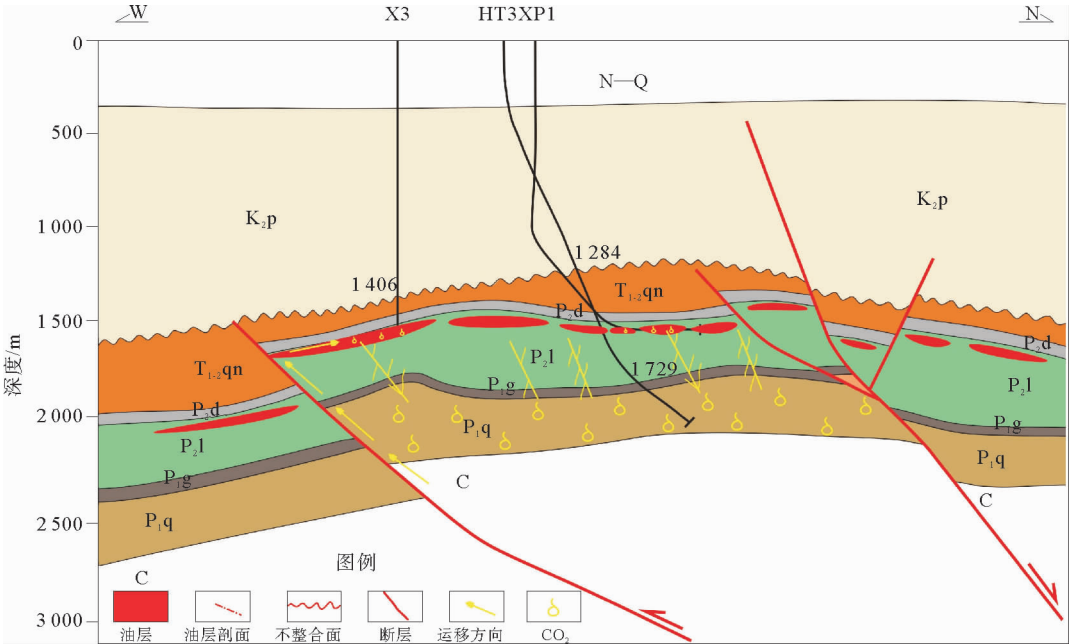


图 9 黄桥溪桥构造高带成藏模式

Fig. 9 The accumulation model of Xiqiao high structural belt in Huangqiao region

(2)黄桥地区龙潭组主要经历了 3 期油气充注,由于受燕山、喜山期的构造运动所影响,地层抬升阶段,地层遭受错断、走滑、褶曲和侵蚀等,形成大量断层,难有油气充注;而地层下降阶段,构造环境稳定,利于油气充注。

(3)黄桥地区 CO₂ 的成藏期次晚于油藏,于古近纪—新近纪与龙潭组致密砂岩储层沟通,但由于该套储层物性极差,无法驱替原油油藏。现今通过钻井使该套储层与地表沟通,形成足够压差使 CO₂ 得以通过此层向地表排放,从而表现为有大量 CO₂ 气产出同时携带储层中原有原油的特殊的伴生关系。

(4)黄桥地区溪桥构造龙潭组油藏于喜山期沉降后进入生烃门限,至白垩纪末—古近纪早期基本完成成藏,其后幔源 CO₂ 于古近纪后期—新近纪时期沿断裂进入古生界各地层,并将原有储集条件较好储层内油气驱替,占据此类储层。后期作业打破原有压力体系,形成天然 CO₂ 驱的独特现象。

参考文献:

- [1] 冯增昭,等. 中国南方二叠纪岩相古地理[M]. 北京:石油大学出版社,1998.
- [2] 刘宝君,许效松. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京:科学出版社,1994:1-188.

- [3] 林春明,黄志城,刘家润,等. 安徽巢湖凤凰山石炭系微相和层序地层特征[J]. 岩石学报, 2002,18(3):424-433.
- [4] 林春明,张霞,姚玉来,等. 中国东南部海相地层沉积与层序地层学研究[R]. 南京:中国石油化工股份有限公司,2011.
- [5] Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous clastic depositional systems[M]. New York: Springer-Verlag,1983.
- [6] Salem A M, Morad S, Mato L F, et al. Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Biopoba Member, Reconcavo Basin, Northeastern Brazil[J]. AAPG Bulltin, 2000,84(7):1 015-1 040.
- [7] 刘林玉,陈刚,柳益群,等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析[J]. 沉积学报, 1998,16(2): 97-101.
- [8] Roedder E. Fluid inclusion[C]// Reviews in mineralogy 12 Mineralogical Society of America, 1984: 644.
- [9] 刘德汉,宫色,刘东鹰,等. 江苏句容—黄桥地区有机包裹体形成期次和捕获温度、压力的 PVTsim 模拟计算[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1 435-1 448.
- [10] 任以发. 黄桥二氧化碳气田成藏特征与进一步勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2005,16(5): 622-625.
- [11] 陶士振. 包裹体应用于油气地质研究的前提条件和关键问题[J]. 地质科学, 2004,39(1): 77-91.
- [12] 曾治平,王敏芳,倪建华,等. 油气成藏期次研究中有有机包裹体方法存在问题探讨[J]. 天然气地球科学, 2002,13(3): 55-59.
- [13] 霍明远. 江苏黄桥无机油气的地球化学演化模式与富集规律[J]. 高校地质学报, 2002,8(4): 482-488.
- [14] 杨方之,周荔青,郭念发,等. 江苏黄桥二氧化碳气田[M]. 北京:石油工业出版社,2001.

A PRELIMINARY STUDY OF ACCUMULATION MODEL FOR HIGH CO₂ OILFIELD IN LONGTAN FORMATION, HUANGQIAO REGION, LOWER YANGTZE BASIN

YU Hao

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, East China Company, SINOPEC, Nanjing 210036, China)

Abstract: The discovery of Permian hydrocarbon reservoir is of theoretical and practical significance for oil exploration in the Lower Yangtze region. It is not only the first discovery in the Palaeozoic in the region, but also a valuable case for the study of hydrocarbon accumulation model and reservoir-forming mechanisms in the upper group in later stage. The tight sand reservoir found at the top of the Longtan Group of Huangqiao block contains a substantial amount of CO₂. Based on the newly acquired seismic and well drilling data, plus the investigation of petrographic sections, physical properties, logging data and hydrocarbon fluid inclusions, we made an integrated study on the characteristics of the Neopaleozoic hydrocarbon reservoir and an accumulation model is proposed.

Key words: reservoir-forming model; Subei Huangqiao region; Permian Longtan Formation; reservoir; high CO₂ content