

韩学雨,李玉海,楼达,等.黄骅坳陷孔西斜坡区奥陶系原生油气藏成藏过程及模式.吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):356-372. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220076.

Han Xueyu, Li Yuhai, Lou Da, et al. Accumulation Process and Model of the Primary Ordovician Oil and Gas Reservoirs in Kongxi Slope Area, Huanghua Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 356-372. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese. 20220076.

黄骅坳陷孔西斜坡区奥陶系原生油气藏 成藏过程及模式

韩学雨¹,李玉海²,楼 达³,王文庆²,王铸坤¹,孙沛沛¹,郑 直¹,远光辉¹

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

2. 中国石油东方地球物理公司研究院大港分院, 天津 300280

3. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300450

摘要:黄骅坳陷孔西斜坡区经历了多期构造运动,上古生界煤系烃源岩多次生排烃,奥陶系储层发生两期油气充注。该斜坡区具有较大的油气资源潜力。针对该地区成藏过程与成藏模式认识不清的问题,通过三维地震解释、测录井资料分析、岩心观察、薄片鉴定、流体包裹体测温、气相色谱分析等方法,结合埋藏史-生烃史模拟,以孔西斜坡区构造演化过程为基础,开展了下古生界奥陶系碳酸盐岩油气藏储层特征、成藏过程及模式的综合研究。结果表明:储集空间分为孔隙型和裂缝型两类,其中多期次半充填裂缝是最主要的储集空间类型。加里东运动导致华北地区大规模抬升,奥陶系长期差异性剥蚀形成岩溶储层,早、中三叠世三叠世孔西斜坡区广覆式生烃,油气向下进入奥陶系的岩溶储层,古油藏形成;早中侏罗世晚期孔西斜坡区在构造应力作用下形成西高东低的逆冲带,古油气藏向构造高部位调整,原油被水洗、氧化等破坏;古近纪早期孔西地区普遍接受沉积,至始新世地势发生反转,逆冲带深埋,深洼区煤系烃源岩二次生烃,油气通过逆断层及裂缝进入奥陶系储层;逆冲带奥陶系油气藏顶部和侧部地层以泥岩为主,具有良好的封堵条件,使油气聚集成藏,盖层及侧向封堵层不利的斜坡区高部位和凸起区,油气难以保存,形成了低部位产油产气、高部位产水的局面。

关键词:黄骅坳陷;奥陶系;碳酸盐岩;储集空间;成藏过程;成藏模式

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220076

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Accumulation Process and Model of the Primary Ordovician Oil and Gas Reservoirs in Kongxi Slope Area, Huanghua Depression

Han Xueyu¹, Li Yuhai², Lou Da³, Wang Wenqing², Wang Zhukun¹,
Sun Peipei¹, Zheng Zhi¹, Yuan Guanghui¹

收稿日期:2022-03-23

作者简介:韩学雨(1998—),女,硕士研究生,主要从事油气储层地质学方面的研究,E-mail:2031561618@qq.com

通信作者:远光辉(1986—),男,教授,博士,主要从事油气储层地质学方面的研究,E-mail:yuan.guanghui@upc.edu.cn

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-007);国家自然科学基金项目(41821002)

Supported by the Major National Science and Technology Projects (2016ZX05006-007) and the National Natural Science Foundation of China (41821002)

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China
2. Dagang Branch, Research Institute of PetroChina Oriental Geophysical Company, Tianjin 300280, China
3. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300450, China

Abstract: The Kongxi slope area in the Huanghua depression has experienced multi-stage tectonic movements, the Upper Paleozoic coal measure source rocks have generated and discharged hydrocarbons several times, and the Ordovician reservoir has been charged with oil and gas for two stages, which has great potential of oil and gas resources. Aiming at the problem of unclear understanding of accumulation process and model in this area through three-dimensional seismic interpretation, logging data analysis, core observation, thin section identification, fluid inclusion thermometry, gas chromatography analysis and other methods, combined with the burial history-hydrocarbon generation history simulation, based on the tectonic evolution process in Kongxi slope area, the reservoir characteristics, accumulation process and model of the Ordovician carbonate reservoir in Lower Paleozoic are studied comprehensively. The results show that: The reservoir space is divided into porosity type and fracture type, of which multi-stage semi-filled fractures are the main type of reservoir space. The Caledonian movement led to the large-scale uplift of North China, and the Ordovician karst reservoirs were formed by long-term differential denudation. Hydrocarbon generation was widespread in Kongxi slope area in the Early-Middle Triassic, and the oil and gas entered the Ordovician karst reservoirs downward, and the ancient oil and gas reservoirs were formed. The thrusting belt with high west and low east was formed under the action of tectonic stress in the Late Early-Middle Jurassic. The ancient oil reservoirs were adjusted to the higher part of structure, and the crude oil was destroyed by water washing and oxidation, etc. In the Early Paleogene, Kongxi area generally received sediment, and the terrain reversed in the Eocene. The thrust belt was deeply buried, and the coal measure source rock in the deep depression area generated secondary hydrocarbon, and oil and gas entered the Ordovician reservoirs through thrust faults and fractures. The top and side strata of the Ordovician reservoir in the thrust belt are mainly mudstone, which has good sealing conditions for oil and gas to gather into the reservoir. In the high part and raised areas of the slope area where the cap layer and the lateral sealing layer are unfavorable, oil and gas are difficult to be preserved, resulting in oil and gas gathering in the lower part and water gathering in the higher part.

Key words: Huanghua depression; Ordovician; carbonate rock; reservoir space; accumulation process; accumulation model

0 引言

碳酸盐岩潜山油气藏是重要的油气藏类型,也是我国油气勘探的重要领域^[1]。黄骅坳陷大港探区孔西潜山有多口探井钻遇奥陶系碳酸盐岩,获得了油气重要发现^[2]。前人对奥陶系孔古 3 井和孔古 7 井原油成藏期和油气来源进行了研究^[3-4],认为奥陶系烃源岩具有重要贡献,但在进行地球化学指标对比时,选用的奥陶系潜在烃源岩中仍残留有较多的原油,这些残留在岩心中的原油与采出的原油本身就具有可能相同的来源,从而干扰了油源对比结果的分析。奥陶系潜在烃源岩的有机碳(TOC)含量低,生烃能力相对有限,而孔西斜坡区奥陶系之上上覆

石炭系—二叠系煤系烃源岩厚度大、有机碳含量高,经历了多期生烃过程,潜在的生烃潜力未受到足够重视。

近年来在黄骅坳陷多个潜山(如歧北潜山、乌马营潜山)发现石炭系—二叠系煤系烃源岩为主要油气来源的古生-古储型油气藏,表明该套煤系烃源岩具有很大的生烃潜力^[2,5]。由于黄骅坳陷孔西斜坡区不同部位构造演化存在差异,因此煤系烃源岩生烃过程不同,进而导致不同部位成藏条件的差异性,油气成藏过程的复杂性阻碍了原生气藏的精细勘探。近几年孔西地区部署了新的探井,获得了更多地质资料,通过与黄骅坳陷南部石炭系—二叠系煤系源岩的油样对比,明确了孔古 3 井和孔古 7 井原

油与石炭系—二叠系煤系烃源岩存在的成因联系。立足于勘探实践,结合构造演化史、生烃史、油气充注史,对孔西斜坡区奥陶系油藏的成藏过程进行了研究,建立了多期构造升降、多期油气充注背景下的成藏模式,以期指导研究区奥陶系的下步勘探,同时对黄骅坳陷其他碳酸盐岩潜山油气藏的研究提供借鉴。

1 地质背景

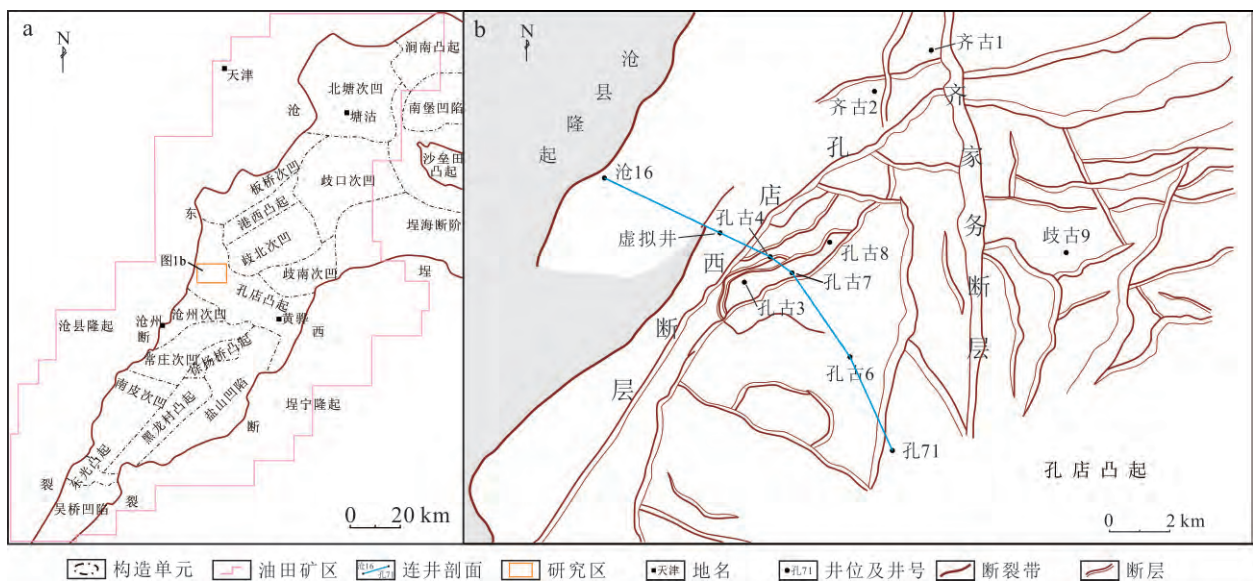
黄骅坳陷位于渤海湾盆地中部,是一个新生代时期发育起来的富油气坳陷。整体呈北东—南西走向,东、西两侧分别以埕西断裂和沧东断裂为界,与埕宁隆起和沧县隆起相接^[6]。黄骅坳陷经历了地台结晶基底的形成、稳定地台盖层的发育、地台的解体 and 陆相盆地盖层的发育 4 个构造演化阶段,发育有太行基底、燕辽基底和鲁西基底 3 种不同类型的结晶基底^[7]。

孔西斜坡区位于黄骅坳陷中部、孔店凸起西斜坡,深埋于沧东凹陷之下,为一呈北东方向展布并被数条逆冲断层所夹持的狭长线状断块山。该斜坡区由寒武奥陶系和石炭系—二叠系构成,南北长 16 km,东西宽 1~3 km,南陡北缓,呈楔状产出,总面积 24 km²^[8-9](图 1)。

孔西斜坡区的构造演化过程分为 3 个阶段^[11]:古生代华北地台构造运动较为平稳,中奥陶系沉积之后,加里东运动使得华北地区地壳大规模缓慢抬

升,奥陶系长期露出地表遭受不同程度的淋滤、风化和剥蚀^[12];中侏罗世晚期为燕山运动强烈造山期,在近东西向应力作用下,黄骅坳陷形成了多条北东向逆冲断层^[13-15],在孔西斜坡区表现为由数条逆冲断层组成的逆冲带,逆冲带为应力集中区域,地层抬升剥蚀量可超过 1 000 m,远离逆冲带的现今斜坡区和凸起区,剥蚀厚度减小,且由高角度不整合过渡为近平行不整合;新生代喜山运动期,孔西斜坡区西高东低的地势发生反转,逆冲带深埋于古近系深洼陷中,斜坡区自西向东逐渐抬起,该过程一直持续到沙一段沉积期(图 2)。

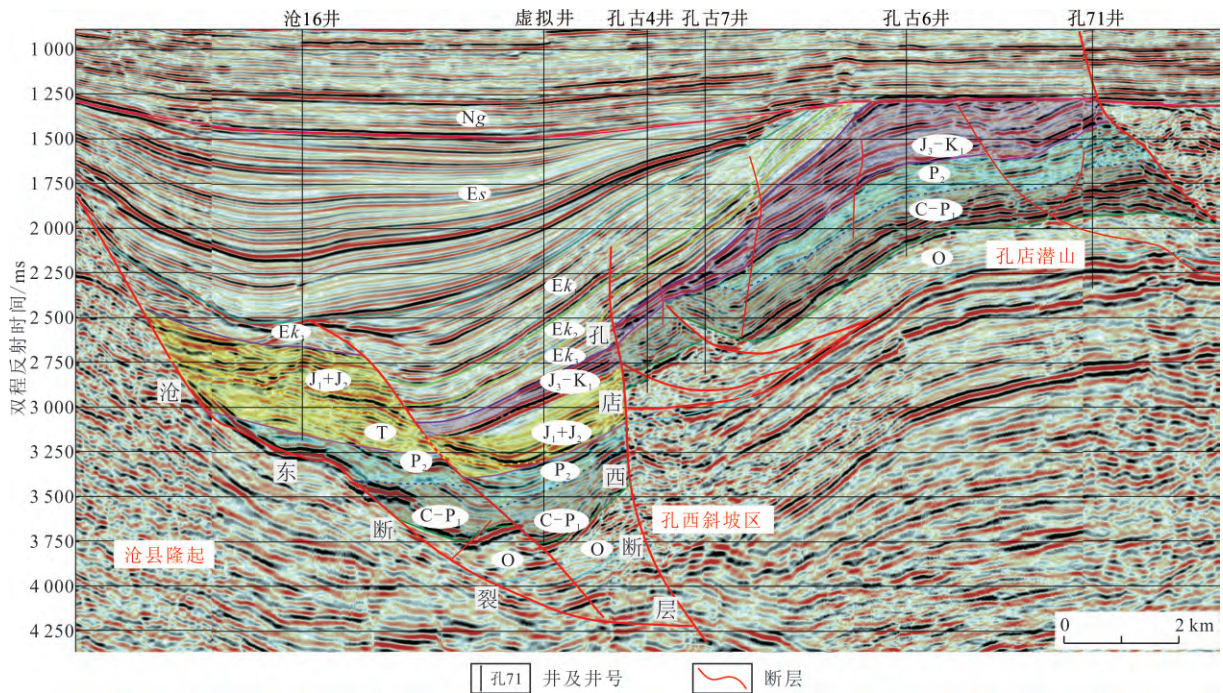
古生界沉积之后,多期构造运动发生多次抬升剥蚀,导致古生界发育不全,其残余地层包括下古生界的寒武系、奥陶系和上古生界的石炭系—二叠系。其中寒武系和奥陶系以海相碳酸盐岩沉积为主,上覆石炭系是海陆过渡相沉积,以煤层、暗色泥岩为主,两套地层呈角度不整合接触^[11]。研究目的层下奥陶统厚度为 400~900 m,自下而上发育冶里组、亮甲山组、下马沟组、上马沟组与峰峰组。其中:冶里组以灰色石灰岩为主,下部为石灰岩夹泥质灰岩;亮甲山组上部为白云岩,下部为石灰岩夹泥质灰岩;下马沟组上部为灰褐色石灰岩,中部为白云岩,底部为白云岩夹泥灰岩;上马沟组上部为灰褐色石灰岩夹泥质灰岩,底部为白云岩夹泥灰岩;峰峰组为灰色石灰岩和泥灰岩,含石膏层^[16-18]。奥陶系之上部分区域覆盖了石炭系—二叠系煤系地层,石炭系—二



a. 黄骅坳陷构造分区图; b. 研究区孔西斜坡区构造特征及关键井分布。据文献^[10]修改。

图 1 孔西斜坡区构造及井位图

Fig.1 Structure and well location map of Kongxi slope area



O. 奥陶系;C. 石炭系;P₁. 下二叠统;P₂. 上二叠统;T. 三叠系;J₁. 下侏罗统;J₂. 中侏罗统;J₃. 上侏罗统;K₁. 下白垩统;Ek₃. 孔店组三段;Ek₂. 孔店组二段;Ek₁. 孔店组一段;Es. 沙河街组;Ng. 馆陶组。

图 2 孔西斜坡区地震剖面特征

Fig.2 Characteristics of seismic profile in Kongxi slope area

叠系山西组和太原组煤系地层是该区优质的烃源岩层和区域性盖层,太原组整体好于山西组。其中煤岩在全区广泛分布,是主力的烃源岩^[6]。

2 现今油藏特征

2.1 储层储集空间

孔西斜坡区奥陶系储层经历了复杂的构造演化过程,储集空间类型多样。通过对岩心和铸体薄片进行的系统观察,储集空间分为孔隙型和裂缝型两大类(图 3)。孔隙型储集空间又分为原生孔隙和次生溶孔。原生孔隙现今基本不可见,推断颗粒间原生孔隙被方解石胶结物致密胶结。

半充填裂缝是孔西斜坡区奥陶系储层最主要的储集空间类型,岩心观察可见大量宏观裂缝(图 3a)。根据裂缝产状和切割关系等判断,研究区内裂缝是多期次形成的(图 3b),按成因又可分为构造裂缝和溶蚀扩大裂缝。现存裂缝多被沥青、亮晶方解石等充填或半充填(图 3c—e),多期次半充填裂缝是油气运移和保存的主要空间。

研究区次生溶孔广泛发育于泥晶白云岩和裂缝充填物中,在铸体薄片上呈现圆形、椭圆形或不规则形状,多沿裂缝发育,孔径在 0.05~0.10 mm 之间

(图 3f)。岩心资料显示碳酸盐岩溶洞大部分呈串珠状分布,多个溶洞被裂缝连通,也有少数孤立分布的溶洞,形状不规则。后期沿溶洞周围生长方解石、石英等,被半充填的溶洞,是有效的油气运移和储集空间。

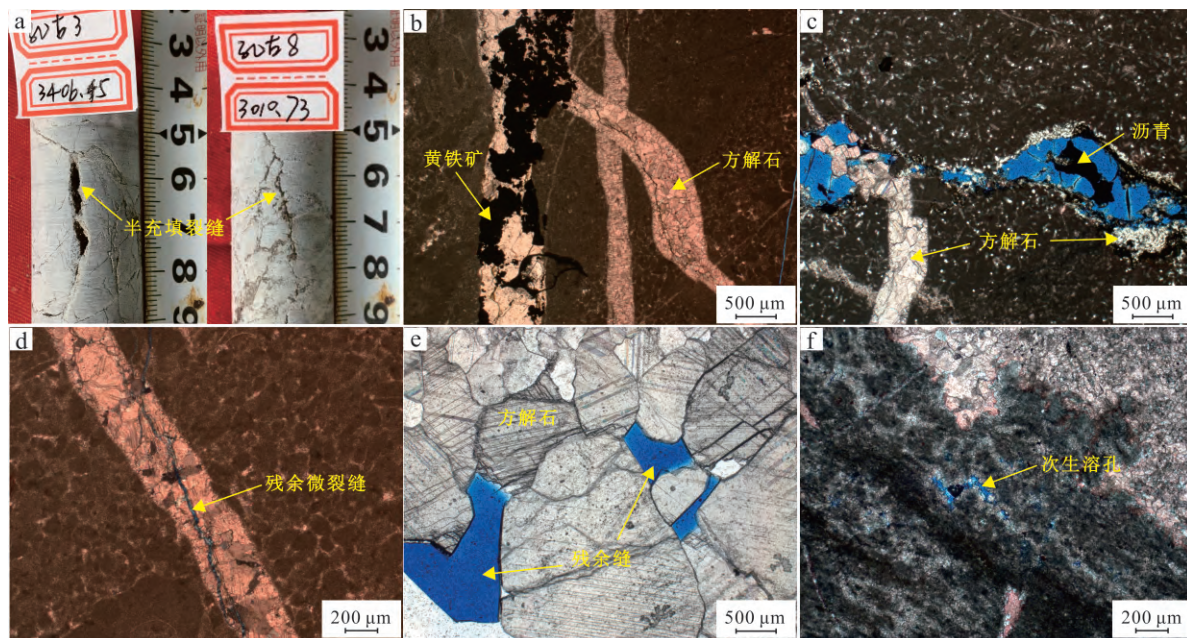
铸体薄片统计数据表明,奥陶系储层次生溶孔的面孔率主要集中在 0~5%,最大可以达到 20%,次生面孔率大于 5%的储层占比不超过 15.00%(图 4)。

2.2 原油和沥青特征

2.2.1 原油特征

孔西斜坡区孔古 4 井和牛古 1X1 井原油为黑褐色,其中:孔古 4 井原油相对密度为 0.78,50 °C 条件下黏度为 1.15 mPa·s;牛古 1X1 井第一层(3 128~3 135 m)和第二层(3 104~3 110 m)原油相对密度均为 0.87,50 °C 条件下第一层原油黏度为 5.42 mPa·s,第二层原油黏度为 6.35 mPa·s。

取孔古 4 井白垩系原油、营古 2 井二叠系原油、营 101 井二叠系原油、牛古 1X1 井奥陶系第一层和第二层原油开展色谱-质谱对比分析。其中:孔古 4 井、营古 2 井和营 101 井原油全油气相色谱结果表现出低碳烷烃富集、高碳烷烃较少、同时相对低碳的单环或双环芳烃也较多的特征(图 5a—c)。



a. 孔古 3 井和孔古 8 井岩心尺度裂缝(—); b. 孔古 3 井, 3 411. 21 m, 多期裂缝完全充填(—); c. 孔古 6 井, 2 720. 30 m, 少量方解石胶结的构造裂缝, 裂缝有溶扩现象(—); d. 孔古 3 井, 3 411. 21 m, 未完全充填微裂缝(—); e. 孔古 6 井, 2 999. 93 m, 未完全充填残余缝(—); f. 孔古 1 井, 3 272. 1 m, 次生溶孔(—)。

图 3 孔西斜坡区碳酸盐岩储层岩心和薄片典型裂缝和溶孔

Fig.3 Typical fractures and solution pores in cores and thin sections of carbonate reservoir in Kongxi slope area

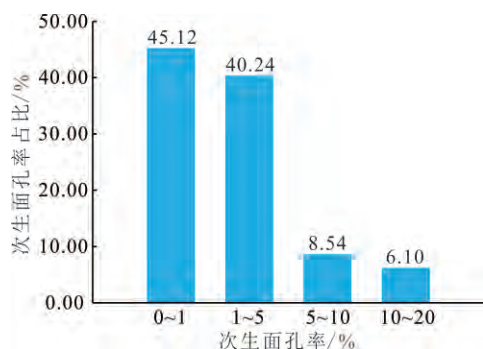


图 4 孔西斜坡区奥陶系碳酸盐岩次生面孔率分布

Fig.4 Distribution of secondary face pore ratio of Ordovician carbonate rocks in Kongxi slope area

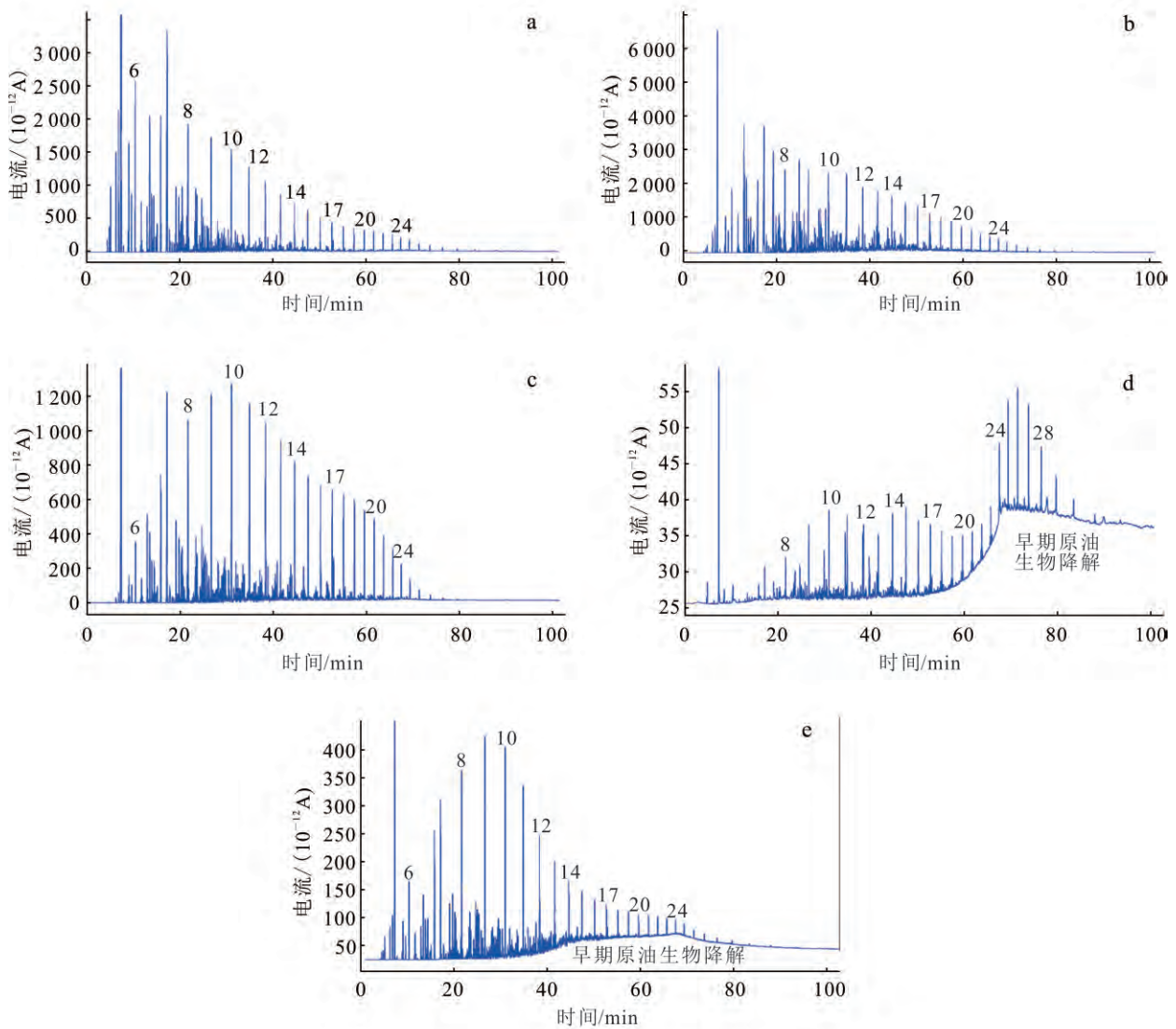
牛古 1X1 井两层原油的全油气相色谱图有很大的差异, 第一层原油呈现出高碳数为主的特征, 并且呈现出强烈的早期原油生物降解的特征(图 5d); 而第二层原油一方面在高碳区域呈现出较明显的原油生物降解特征, 另一方面又整体呈现为以低碳数烷烃为主的特征, 同时低碳的单环或双环芳烃也较多(图 5e)^[19-21]。牛古 1X1 井两层原油的不同特征表明, 第一层原油以早期低熟油气充注为主, 第二层原油则是早期低熟油气和强烈的晚期凝析油两期充注, 且第二期原油与营古 2 井、营 101 井和孔古 4 井等原油同源,

都是石炭系—二叠系煤系烃源岩高演化阶段的产物。

分别在单偏光和紫外光下进行岩石薄片鉴定, 发现半充填裂缝中普遍有原油残留。紫外光下原油主要发出两种荧光: 蓝色和暗黄色。孔古 3 井(图 6a, b)和孔古 7 井(图 6c, d)半充填裂缝中有大量蓝色荧光和少量暗黄色荧光, 而孔古 6 井(图 6e, f)半充填裂缝中发暗黄色荧光较多, 还有少量蓝白色荧光。由于荧光颜色可以指示原油成熟度, 一般认为具蓝色或蓝白色荧光的原油成熟度高, 而具黄色荧光的原油成熟度较低, 因此孔古 3 井和孔古 7 井残留原油成熟度高于孔古 6 井。油包裹体(图 6c, d)在单偏光下呈黑褐色, 形状不规则, 大小不均匀。包裹体丰度较高, 在碳酸盐岩矿物中带状或群状分布, 也可见孤立分布。其荧光颜色与半充填裂缝中原油荧光颜色相似。

2.2.2 沥青特征

通过岩心观察, 发现半充填裂缝中普遍残留有黑褐色沥青(图 7a—d)。在单偏光下沥青包裹体与油包裹体形态相似, 颜色较深且不具有荧光(图 7e, f)。沥青包裹体发育较少, 一般在碳酸盐岩矿物中孤立分布。紫外光下半充填裂缝中蓝色荧光的原油周围可见少量黑色沥青, 推测其为早期原油在热演化过程中成熟度增加和部分沥青化的结果。



a. 孔古 4 井白垩系; b. 营古 2 井二叠系; c. 营 101 井二叠系; d. 牛古 1X1 井奥陶系第一层; e. 牛古 1X1 井奥陶系第二层。

图 5 孔西斜坡区原油气相色谱图

Fig.5 Gas chromatogram of the crude oil from Kongxi slope area

对孔古 4 井与牛古 1X1 井第一层原油族组分分离提取出的沥青质进行激光拉曼测试, 获取激光拉曼谱图(图 8a—d)。根据 $1\ 580\sim 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ 处对应的 G 峰拉曼位移与 $1\ 350\sim 1\ 380\ \text{cm}^{-1}$ 处对应的 D 峰拉曼位移的差值以及 D 峰拉曼强度与 G 峰拉曼强度比值的的关系, 表示出沥青质的成熟度^[22]。结果(图 8e)表明, 研究区样品沥青质成熟度较高, 均为过成熟, 可以推测出孔西地区油气热演化程度比较高。

3 油气藏成藏过程与模式

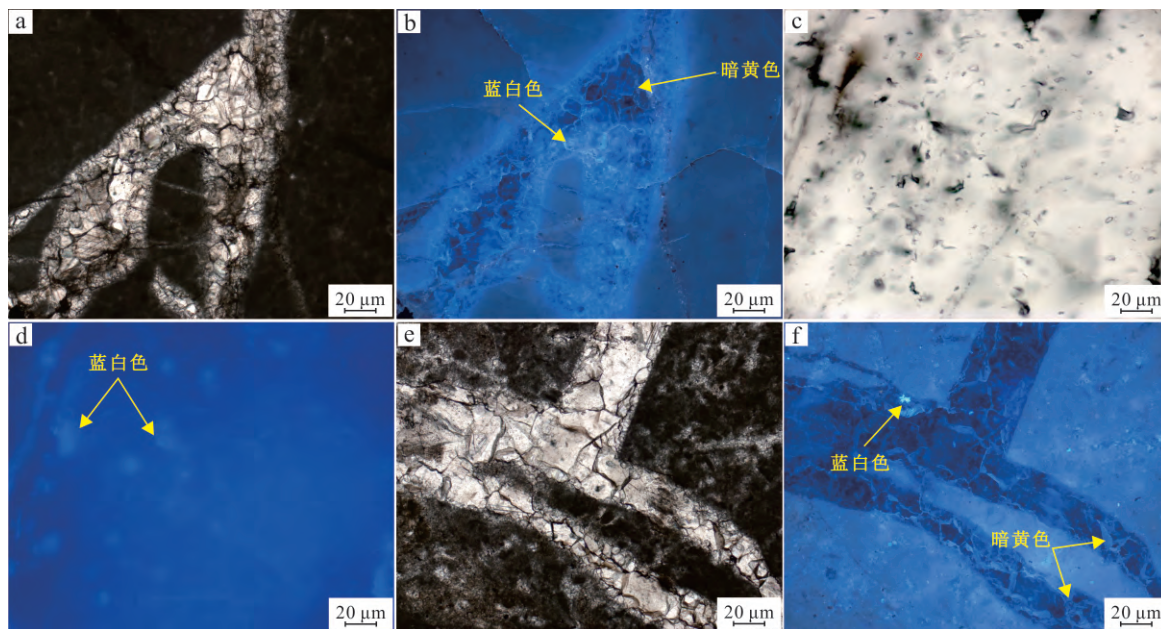
在构造史、生烃史及成藏史分析的基础上, 明确了古油藏形成与破坏、现今油藏形成的主控因素。

以构造演化过程为约束, 建立了孔西斜坡奥陶系油藏的动态成藏过程。

3.1 古油藏形成

3.1.1 奥陶系顶部普遍发育风化壳岩溶储层

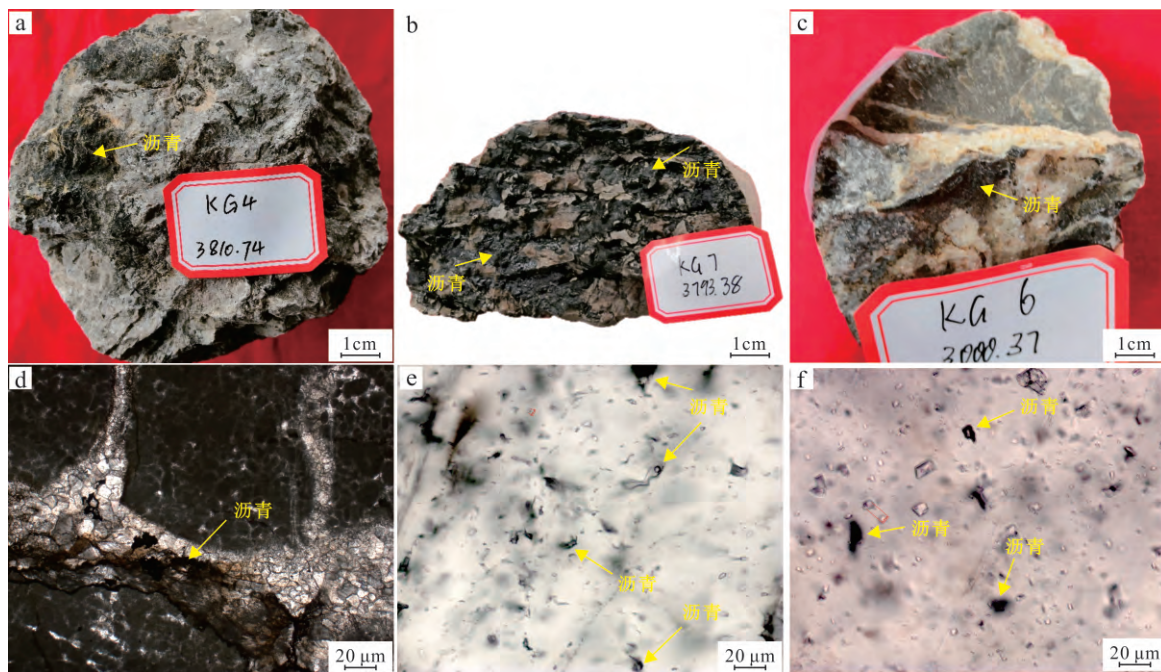
加里东抬升运动使奥陶系侵蚀面之下不同程度地发育岩溶储层^[12]。韩品龙等^[16]对大港探区奥陶系峰峰组地层进行了细分和对比, 结果表明, 大港探区峰峰组顶面小层的出露特征在平面上不尽相同, 自孔店以南至北大港以北地区, 剥蚀程度整体上呈现由弱变强的规律(图 9)。钻井资料显示, 该层钻进过程中发生钻具放空和钻井液漏失的情况, 证实奥陶系顶部发育溶蚀孔洞和裂缝, 储集性能较好^[1]。



a. 孔古 3 井, 3 411. 21 m, 裂缝中残留烃类(—); b. 视域同 a, 烃类发蓝白色、暗黄色荧光(UV); c. 孔古 7 井, 3 949. 60 m, 裂缝充填方解石中烃类包裹体(—); d. 视域同 c, 蓝白色荧光包裹体为主(UV); e. 孔古 6 井, 2 999. 93 m, 裂缝中残留烃类(—); f. 视域同 e, 烃类发暗黄色荧光为主(UV)。

图 6 孔西斜坡区奥陶系储层原油和包裹体荧光特征

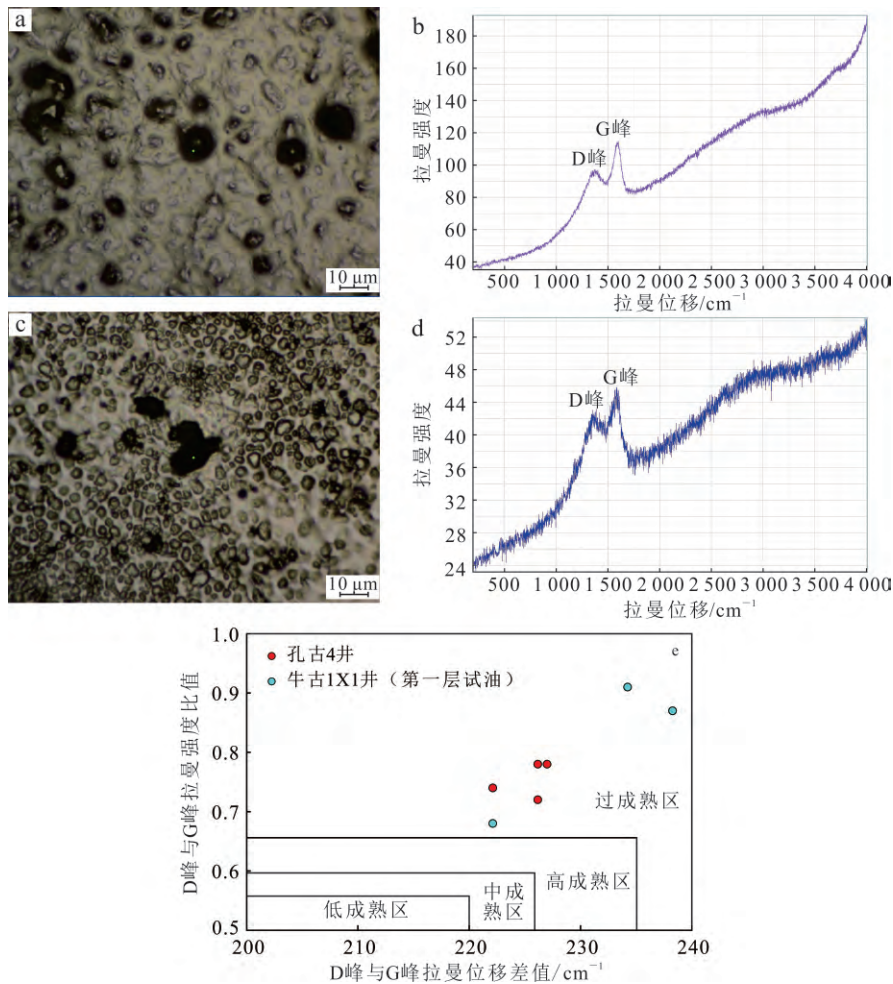
Fig.6 Fluorescence characteristics of the crude oil inclusions in Ordovician reservoirs in Kongxi slope area



a. 逆冲带孔古 4 井, 3 810.74 m, 裂缝中黑褐色沥青; b. 孔古 7 井, 3 793.38 m, 黑褐色沥青浸染; c. 孔古 6 井, 3 000.37 m, 裂缝中黑褐色沥青; d. 孔古 3 井, 3 406.45 m, 裂缝中充填方解石胶结物之间残留黑色沥青(—); e. 孔古 7 井, 3 949.60 m, 包裹体中发育固态沥青(—); f. 孔古 8 井, 3 012.50 m, 沥青包裹体(—)。

图 7 孔西斜坡区奥陶系储层裂缝及包裹体内沥青赋存特征

Fig.7 Occurrence characteristics of bitumen in fractures and inclusions of Ordovician reservoir in Kongxi slope area



a. 孔古 4 井沥青质显微镜下特征;b. 孔古 4 井沥青质激光拉曼图;c. 牛古 1X1 井(第一层试油)沥青质显微镜下特征;d. 牛古 1X1 井(第一层试油)沥青质激光拉曼图;e. 孔古 4 井和牛古 1X1 井(第一层试油)沥青质成熟度分布图。据文献[22]修改。

图 8 孔西斜坡区沥青质激光拉曼强度及成熟度

Fig.8 Asphaltene Laser Raman intensity and maturity in Kongxi slope area

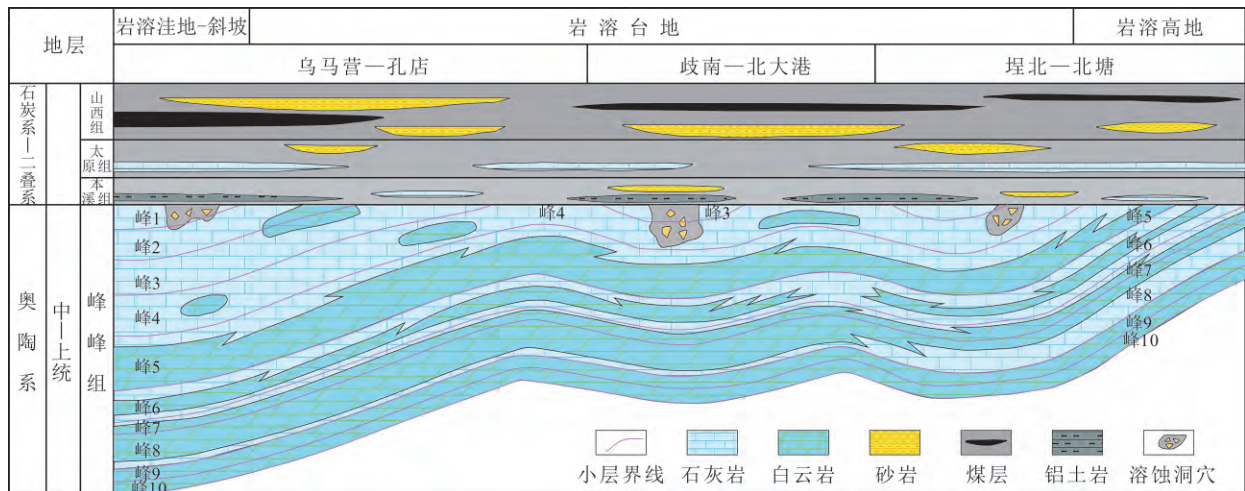
通过对孔西斜坡区孔古 1、孔古 3 和孔古 6 井等多口井奥陶系碳酸盐岩岩心观察,发现特征岩溶角砾发育,角砾间泥质充填明显^[23];岩心上可见宏观尺度的高角度裂缝发育,且镜下薄片鉴定表明裂缝多被方解石充填或半充填,未完全充填的裂缝中可观察到残余沥青(图 7d)。因此在加里东运动抬升期,奥陶系经历长时间的风化剥蚀,形成了大量构造、溶蚀裂缝,奥陶系顶部普遍发育风化壳岩溶储层(图 10)。

3.1.2 中三叠世晚期上古生界煤系烃源岩广覆式生烃

自中石炭世始,华北地区再次沉降,形成了中、晚石炭世和早二叠世时期的海陆交互相沉积,具有形成煤系烃源岩的沉积背景,大港探区石炭系—二叠系煤系烃源岩分布面积近 10 000 km²^[5]。通过资料分析,推测出孔西地区煤层分布厚度较大,煤系

优质烃源岩集中在山西组中下部和太原组中上部,烃源岩厚度由西向东、由南向北逐渐减薄。孔古 7 井和孔 71 井是孔西地区优质煤岩主要发育地区,其中孔古 7 井发育 14 层煤岩,累积厚度为 40.50 m,孔 71 井发育 16 层煤岩,累积厚度为 53.50 m(图 11)。

对深洼区虚拟井、逆冲带孔古 4 井和凸起区孔 71 井上古生界埋藏史—热史—生烃史进行模拟(图 12),发现煤系烃源岩镜质体反射率 R_o 达到 0.5% 甚至超过 0.7%,已经达到生烃门限,烃源岩生成低熟油气。因此,中三叠世晚期,孔西斜坡区发生广覆式生烃作用,奥陶系储层裂缝和包裹体中均赋存有沥青(图 7),也指示了上古生界煤系烃源岩生成的油气向下运移,进入奥陶系顶部的岩溶储层,岩溶系统的发育程度控制了古油藏发育规模。



峰 1—峰 10.自上而下依次为大港探区奥陶系峰峰组峰 1—峰 10 段的层号。据文献[16]修改。

图 9 大港探区奥陶系峰峰组与上覆煤系地层接触关系模式

Fig.9 Contact relationship model between Ordovician Fengfeng Formation and overlying coal measure strata in Dagang exploration area

3.1.3 古油藏保存条件优越

晚三叠世的印支运动导致奥陶系再次抬升,由埋藏史图(图 12)可以看出,古油藏未出露地表接受大气淡水的破坏。残留上古生界厚度仍可达 1 000 m,古油藏可以得到保存。此外,通过统计孔西斜坡区不同构造位置上古生界的砂地比(表 1),发现研究区砂地比很低,以泥岩为主,且砂岩与泥岩为互层沉积。中、下三叠统岩石粒度细,以紫红色泥岩、砂质泥岩与浅灰紫色、浅紫红色、灰色砂岩互层为主。因此古油藏盖层条件也十分优越,使油藏形成后不易散失。

3.2 古油藏调整与现今油藏形成

3.2.1 中侏罗世逆冲使油藏连通地表

中侏罗世构造抬升对油藏发育的影响具有多面性:首先,中侏罗世平坦的地形被改变,形成了西高东低的地势,古油藏向构造高部位调整至连通地表,接受大气淡水的改造;其次,强烈的挤压逆冲作用使奥陶系碳酸盐岩发生脆性破裂,形成大规模构造裂缝,成为二次成藏的有利储集空间;最后,孔店西断层形成,在中生代时期表现为逆断层,在新生代沧东断裂的断陷活动中发生构造性质的改变,成为走滑断层,是现今油藏的主要油源断层。随着距逆冲带越远,逆冲强度越弱,裂缝发育程度应越差。

已有钻井资料揭示,逆冲带(图 7a)与斜坡区(图 7b,c)储层的裂缝内普遍有沥青残留,且前者沥青含量明显高于后者,这反映了逆冲带内古油藏遭受了更强烈的破坏。通过薄片观察发现,半充填的

裂缝中普遍发育黑色沥青(图 7d),方解石脉体中发育固态沥青包裹体(图 7e,f)。值得注意的是,部分包裹体腔中半充填沥青主要吸附在包裹体内壁,且包裹体形状不规则,反映了古油藏遭受到破坏,包裹体打开,沥青经历烃类水洗和氧化。

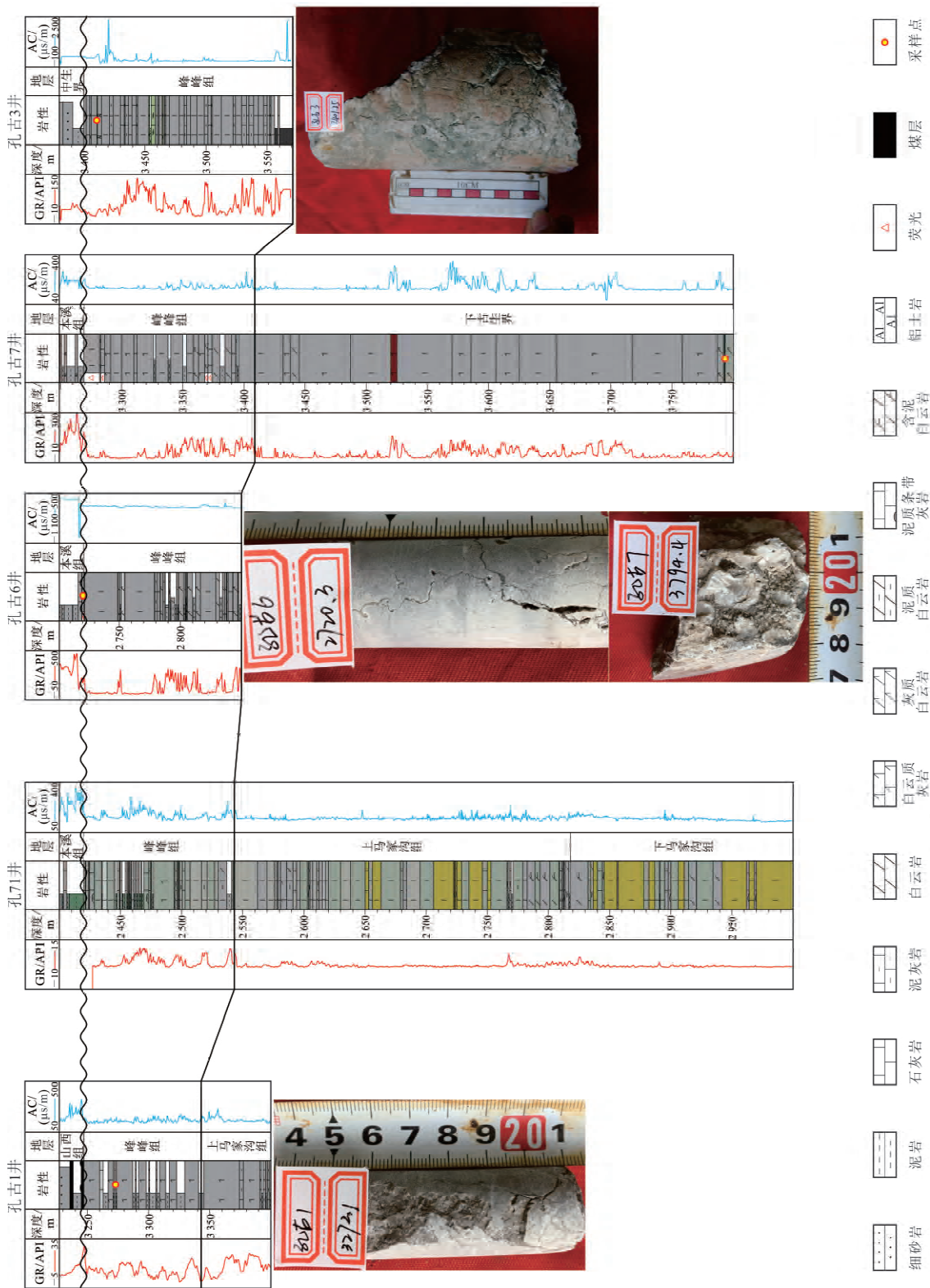
3.2.2 深洼区与逆冲带上古生界煤系烃源岩生烃强度大

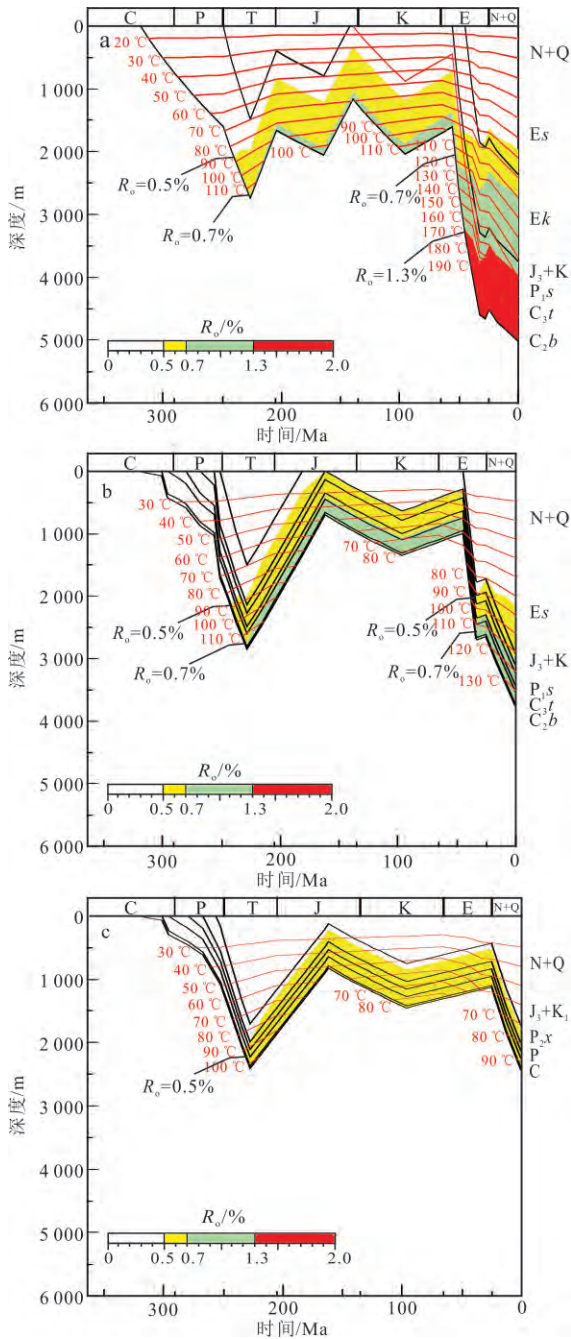
通过对孔店西断层西侧深洼区和逆冲带上古生界烃源岩生烃史模拟(图 12)可知,逆冲带孔古 4 井石炭系一二叠系煤系烃源岩的底部温度现今已经超过 130 °C, R_o 约 1.0%,进入有机质演化的成熟阶段,生成大量油气。深洼区煤系烃源岩底部温度超过 190 °C, R_o 超过 1.3%,达到了有机质演化的高成熟阶段,以生凝析气为主。

3.2.3 深洼区与逆冲带烃类通过孔店西断层-裂缝系统进入潜山

前人^[6]研究认为,黄骅坳陷发育源储分离、源储侧接和源储叠置型油气藏,前者以北大港潜山和王官屯潜山较典型,后者以乌马营潜山和孔西潜山较典型,源储叠置型油藏的特征为石炭系一二叠系烃源岩与古生界储层上下叠置,油气通过储层裂缝、孔隙等通道往下充注,源储压差为油气充注动力。

裂缝中除了残留沥青外,还发育黄色和蓝白色的烃类(图 6a,b,e,f),此外在充填的方解石中还发育黄色和蓝白色荧光的包裹体(图 6c,d)。烃类包裹体以蓝白色荧光为主,黄色荧光的低熟烃类包裹体较少。包裹体的荧光颜色反映了烃类的成熟度,





a. 深洼区虚拟井; b. 逆冲带孔古 4 井; c. 孔店凸起孔 71 井。

图 12 孔西斜坡区上古生界埋藏史-热史-生烃史

Fig.12 Burial history, heat history and hydrocarbon generation history of Upper Paleozoic in Kongxi slope area

因此储层中 2 种荧光的包裹体说明,储层经历 2 期油气充注,早期为低熟油气,随着埋深增加,成熟—高熟油气开始充注。

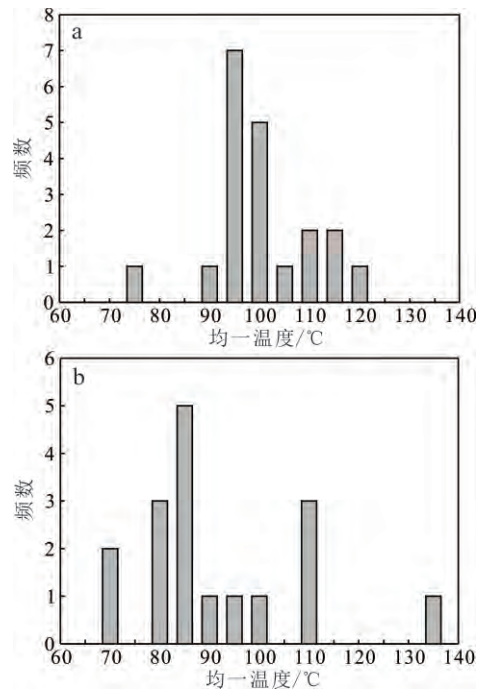
通过对流体包裹体进行均一温度的测定,也可以在一定程度上解释油气充注过程。我们选取孔古

1 井和孔古 6 井岩石薄片... 边界清晰、气泡明显的盐水包裹体作为测试对象,共测得温度数据 37 个,将其分别投点在盐水包裹体均一温度柱状图(图 13)上,可以清楚看出包裹体均一温度分布均存在 2 个峰值:孔古 1 井盐水包裹体第一个峰值在 95~100 °C,频数较多,第二个峰值在 110~115 °C;孔古 6 井盐水包裹体的温度变化范围较大,第一个峰值在 80~85 °C,第二个峰值在 110 °C 左右,进一步说明储层经历了 2 期油气充注[24]。

表 1 孔西斜坡区上古生界砂地比

Table 1 Statistics of sand-stratum ratio of the Upper Paleozoic in Kongxi slope area

构造部位	地层厚度/m	平均砂地比
逆冲带	305~867	0.13
斜坡区	792	0.23
凸起区	812	0.21



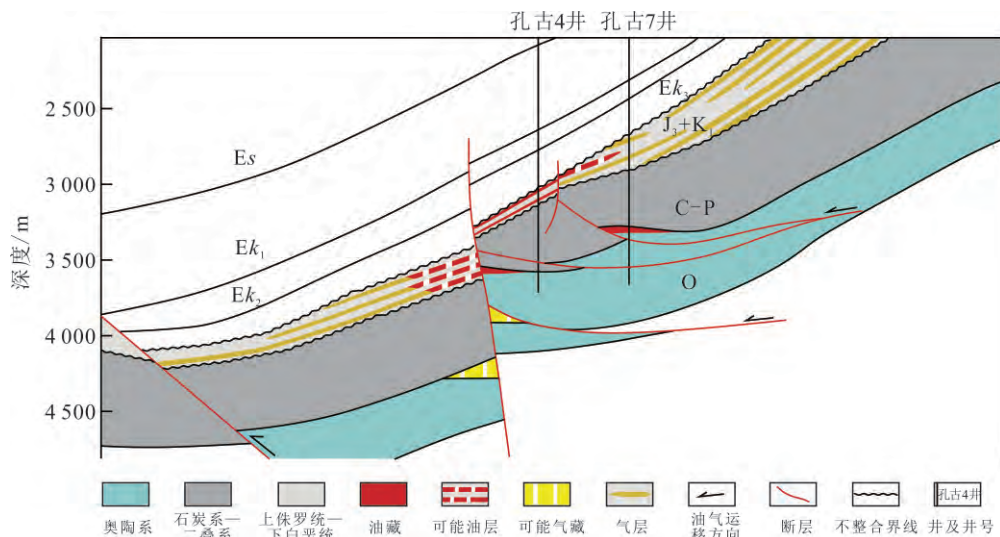
a. 孔古 1 井,3 272.10 m; b. 孔古 6 井,2 720.30 m。

图 13 孔西斜坡区方解石中盐水包裹体均一温度分布直方图

Fig.13 Histogram of uniform temperature distribution of brine inclusions in calcite in Kongxi slope area

3.2.4 油藏保存条件

由现今油藏剖面(图 14)分析可知,孔西斜坡区油气集中在逆冲带附近。孔古 4 井和孔古 7 井油藏



据文献[25]修改。

图 14 孔西斜坡区过孔古 4 井、孔古 7 井 SE 向油藏剖面

Fig.14 SE-trending reservoir profiles across Well Konggu 4 and Well Konggu 7 in Kongxi slope area

的顶部和侧部为上古生界和中生界。由表 1 上古生界砂地比统计可知,地层以泥岩为主,可作为有利盖层。孔古 4 井和孔古 7 井上古生界和中生界岩性特征为泥岩、砂岩互层频繁,泥岩累积厚度大,此外还发育少量火成岩,因此显示奥陶系油藏具有有利的封盖条件。

3.3 油气成藏模式

以试油结果为基础,结合孔西斜坡区成藏各主控因素,建立了奥陶系油藏的成藏模式。

3.3.1 古油藏形成阶段

加里东运动时期,奥陶系顶部形成风化岩溶系统,为油气充注提供了有利储集空间。上古生界山西组—太原组发育了煤系地层,以煤层及炭质泥岩作为主要烃源岩。随着上古生界和中、下三叠统的沉积,在中三叠世晚期烃源岩底部埋深超过 2 500 m, R_o 超过 0.5%, 此时发生低熟油气的充注。在源储压差的驱动下,油气倒灌进入奥陶系顶部储层,也可以向上运移至二叠系砂岩中成藏。该期生烃过程时间很短暂,随着晚三叠世时期地层的抬升,温度降低,生烃作用停止。

3.3.2 古油藏破坏、调整阶段

中侏罗世晚期,黄骀坳陷构造应力由近南北向变为近东西向或北东向,地层发生挤压、抬升,形成多个逆冲推覆带。孔西斜坡区发生了西高东低的地势变化,古油藏向构造高部位调整。在构造抬升过程中,大气淡水沿逆断层和伴生的裂缝系统向下渗

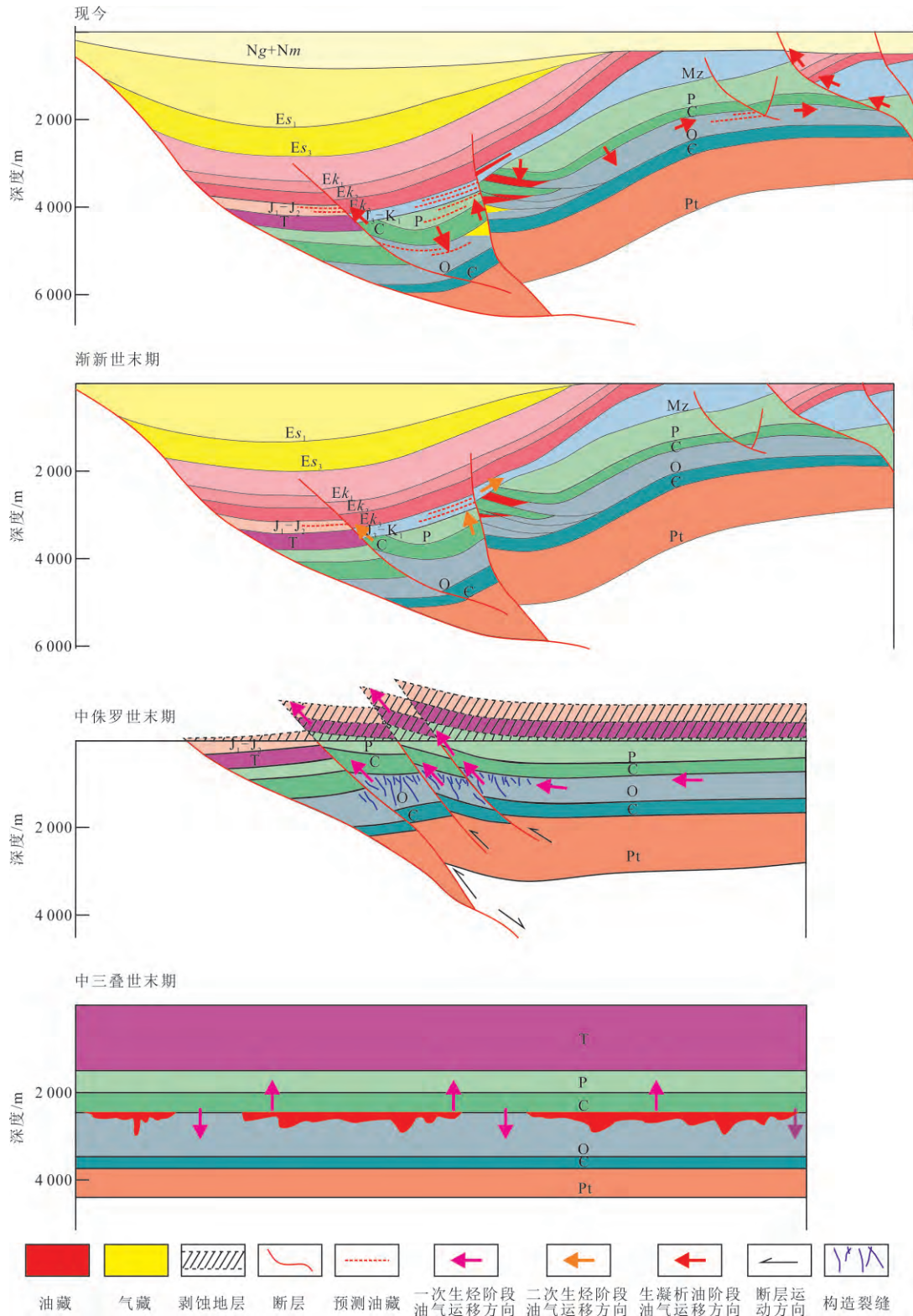
入油藏,原油发生氧化、水洗等破坏,原油黏度变大,甚至沥青化。同时,大气淡水沿裂缝发生溶解作用,形成了斜坡区奥陶系储层的主要储集空间,为晚期油气充注奠定了基础。

3.3.3 现今油藏定型阶段

古近纪早期,即孔店组一段、孔店组二段沉积时期,斜坡区和凸起区普遍接受沉积,空间上地层厚度相差不大。从孔店组三段沉积开始,在沧东断层的正断作用控制下,孔西斜坡区发生构造反转,中生代处于高部位的西侧发生深埋藏,而中生代的低部位发生抬起,形成了凸起。此时,孔店西断层西侧的深洼区烃源岩进入二次生烃门限,油气沿孔店西断层—裂缝系统进入奥陶系储层,斜坡区烃源岩不生烃。此阶段,构造活动趋于稳定,油藏发生定型。

3.3.4 油气大规模充注阶段

随着新近纪和第四纪的披覆性沉积,孔西斜坡区构造样式未发生改变。深洼区烃源岩持续埋藏,进入生凝析气阶段,油气沿孔店西断层和裂缝带进入奥陶系储层,在上古生界和中生界盖层的封堵下成藏。斜坡区上古生界烃源岩也进入二次生烃阶段,在盖层、侧向封堵层良好的部位,油气可进入奥陶系成藏,在盖层及侧向封堵层不利的斜坡区高部位和凸起区,油气难以保存。油气沿不整合面持续向凸起运移,沿齐家务断层和孔店西断层进入浅层。最终形成了低部位产油产气(图 15)、高部位产水的局面^[26]。



Pt. 元古宇; €. 寒武系; O. 奥陶系; S. 志流系; P. 二叠系; T. 三叠系; Es₁. 沙河街组一段; Es₃. 沙河街组三段; Mz. 中生界。

图 15 孔西斜坡区奥陶系成藏模式

Fig.15 Ordovician accumulation model in Kongxi slope area

4 结论

1) 黄骅坳陷孔西潜山奥陶系碳酸盐岩储层经历了多期构造运动的改造,基本不可见原生孔隙。有效储集空间类型分为孔隙型和裂缝型两大类,其中多期次半充填裂缝是油气运移和保存的主要空间。牛古 1X1 井第一层原油以早期低熟油气充注为主,第二层原油则是早期低熟油气和强烈的晚期凝析油两期充注的结果。半充填裂缝中普遍有原油和沥青残留,孔古 3 井和孔古 7 井残留原油成熟度较高,高于孔古 6 井。残留沥青普遍为过成熟,反映孔西地区油气热演化程度较高。

2) 建立了多期构造升降、多期油气充注背景下的成藏模式。孔西斜坡区石炭系—二叠系煤系烃源岩发育,煤岩在全区广泛分布,是主力的烃源岩。中三叠世晚期煤系烃源岩开始生烃,生成的油气向下进入奥陶系顶部的岩溶储层。晚三叠世印支运动抬升并未使奥陶系油藏暴露地表遭受破坏,此外盖层条件也十分优越,使油藏形成后可以良好保存。中侏罗世抬升运动使孔西地区形成多条北东向逆冲断层,古油藏被破坏。奥陶系碳酸盐岩发育大规模构造裂缝,成为二次成藏的有利储集空间,古近纪以来,孔西斜坡区逆冲带煤系烃源岩二次生烃,油气通过逆断层和构造裂缝运移到奥陶系储集层,良好的盖层使油气保存下来不易散失。

参考文献 (References):

- [1] 崔宇,李宏军,付立新,等. 歧口凹陷北大港构造带奥陶系潜山储层特征、主控因素及发育模式[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1241 - 1252.
Cui Yu, Li Hongjun, Fu Lixin, et al. Characteristics, Main Controlling Factors and Development Model of Ordovician Buried-Hill Reservoir in Beidagang Structural Belt, Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1241 - 1252.
- [2] 赵贤正,蒲秀刚,姜文亚,等. 黄骅坳陷古生界含油气系统勘探突破及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 621 - 632.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Jiang Wenya, et al. An Exploration Breakthrough in Paleozoic Petroleum System of Huanghua Depression in Dagang Oilfield and Its Significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 621 - 632.
- [3] 程克明,熊英,张晓宝. 孔西潜山奥陶系原油成藏时期探讨[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 16 - 20.
Cheng Keming, Xiong Ying, Zhang Xiaobao. An Approach to the Timing Formation for Primary Oil Pools of Ordovician System in Kongxi Buried Hill[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 16 - 20.
- [4] 王兆云,程克明,杨池银. 黄骅坳陷孔西潜山下古生界原油[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 1 - 4, 96.
Wang Zhaoyun, Cheng Keming, Yang Chiyin. Lower Paleozoic Crude Oil of Kongxi Buried-Hill in the Huanghua Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(3): 1 - 4, 96.
- [5] 杨池银,于学敏,刘岩,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷中南部煤系发育区煤成气形成条件及勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 23 - 32.
Yang Chiyin, Yu Xuemin, Liu Yan, et al. Geological Conditions of Coal-Derived Gas Accumulation and Exploitation Prospect in the Carboniferous-Permian Covered Area from South Central of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 23 - 32.
- [6] 吕雪莹,蒋有录,姜文亚,等. 黄骅坳陷中—古生界原油成因类型与来源[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1290 - 1300.
Lü Xueying, Jiang Youlu, Jiang Wenya, et al. Genetic Types and Source of Meso-Paleozoic Crude Oil in the Huanghua Sub-Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1290 - 1300.
- [7] 卢刚臣. 渤海湾盆地黄骅坳陷潜山演化历程及展布规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
Lu Gangchen. The Evolutionary History and Distributional Regularities of Huanghua Depression Buried Hills in Bohai Bay Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [8] 张晓宝,徐永昌,孙明良,等. 黄骅坳陷含油储层包裹体中幔源氦的发现及其地质意义[J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2003, 33(7): 673 - 678.
Zhang Xiaobao, Xu Yongchang, Sun Mingliang, et al. Discovery of Mantle-Derived Helium in Oil-Bearing Reservoir Inclusions in Huanghua Depression and Its Geological Significance[J]. Science China: Series D: Earth Science, 2003, 33(7): 673 - 678.
- [9] 王铁冠,王飞宇,卢鸿,等. 黄骅坳陷孔西潜山带奥陶系油藏的油源与成藏期次[J]. 海相油气地质, 2000, 5(增刊 1): 47 - 54.
Wang Tieguan, Wang Feixu, Lu Hong, et al. Oil Source and Accumulation Stages in Ordovician

- Reservoirs of Kongxi Buried-Hill Belt in Huanghua Depression[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2000,5(Sup.1):47-54.
- [10] 张津宁,周建生,王建柱,等. 黄骅坳陷中生界内幕不整合构造的时空差异及其构造地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2020,44(5):831-844.
Zhang Jinning, Zhou Jiansheng, Wang Jianzhu, et al. Temporal and Spatial Evolution of the Mesozoic Unconformity Structure in Huanghua Depression and Its Tectonic Geological Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020,44(5):831-844.
- [11] 刘康幸. 黄骅坳陷孔西构造带构造变形及油气成藏[D]. 石家庄:河北地质大学, 2021.
Liu Kangxing. Structural Deformation and Hydrocarbon Accumulation in Kongxi Structural Belt, Huanghua Depression[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2021.
- [12] 陈光汉. 华北加里东侵蚀面与油气富集[J]. *石油实验地质*, 1992,14(1):46-51.
Chen Guanghan. Caledonian Erosion Surface and Hydrocarbon Accumulation in North China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1992,14(1):46-51.
- [13] 付立新,楼达,李宏军,等. 印支-燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用[J]. *石油学报*, 2016,37(增刊2):19-30.
Fu Lixin, Lou Da, Li Hongjun, et al. Control Effect of Indosinian-Yanshan Movement on the Formation of Buried Hill in Dagang Exploration Area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(Sup.2):19-30.
- [14] 张飞鹏,吴智平,李伟,等. 黄骅坳陷印支-燕山期构造特征及其演化过程[J]. *中国矿业大学学报*, 2019,48(4):842-857.
Zhang Feipeng, Wu Zhiping, Li Wei, et al. Structural Characteristics and Its Tectonic Evolution of Huanghua Depression During the Indosinian-Yanshanian[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019,48(4):842-857.
- [15] 张津宁,周建生,肖敦清,等. 黄骅坳陷中生代构造运动对上古生界煤系烃源岩生烃演化的控制[J]. *天然气工业*, 2019,39(9):1-10.
Zhang Jinning, Zhou Jiansheng, Xiao Dunqing, et al. Control of the Mesozoic Tectonic Movement on the Hydrocarbon Generation and Evolution of Upper Paleozoic Coal-Measure Source Rocks in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019,39(9):1-10.
- [16] 韩品龙,肖敦清,王居峰. 渤海湾盆地大港探区加里东期不整合面特征再认识[J]. *石油与天然气地质*, 2021,42(2):430-442.
Han Pinlong, Xiao Dunqing, Wang Jufeng. A New Perspective on the Features of the Caledonian Unconformity in Dagang Exploration Area, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(2):430-442.
- [17] 李永新. 黄骅坳陷下古生界碳酸盐岩有机质中单体炔碳、氢同位素组成特征及应用[D]. 广州:广州地球化学研究所, 2007.
Li Yongxin. Characteristics and Applications of Carbon and Hydrogen Isotopic Compositions of Individual N-Alkanes in Lower Palaeozoic Carbonate Rocks in the Huanghua Depression[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, 2007.
- [18] 孙维凤,林玉祥,迟小燕,等. 大港油田奥陶系岩相古地理及储层特征[J]. *海洋地质前沿*, 2011,27(5):47-52.
Sun Weifeng, Lin Yuxiang, Chi Xiaoyan, et al. Ordovician Lithofacies Paleogeography and Reservoir Characteristics of the Dagang Oilfield [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011,27(5):47-52.
- [19] 吴永平,肖敦清,于俊利. 黄骅坳陷孔西潜山特殊油气藏的发现[J]. *特种油气藏*, 1998,5(1):1-5,9.
Wu Yongping, Xiao Dunqing, Yu Junli. Discovery of Special Reservoir of Kongxi Buried Hill in Huanghua Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 1998,5(1):1-5,9.
- [20] 石彦民,于俊利,廖前进,等. 黄骅坳陷孔西地区油气的地球化学特征及油源初探[J]. *石油学报*, 1998,19(2):16-22,4.
Shi Yanmin, Yu Junli, Liao Qianjin, et al. Geochemical Characteristics and Origin of Oil and Gas of Kongxi Area in the Huanghua Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998,19(2):16-22,4.
- [21] 付丽. 大杨树盆地南部坳陷九峰山组烃源岩地球化学特征及油源研究[J/OL]. *吉林大学学报(地球科学版)*. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220104>.
Fu Li. Geochemical Characteristics of Jiufengshan Formation Source Rocks and Oil Origins in Southern Depression of Dayangshu Basin [J/OL]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220104>.
- [22] 张翥,王招明,鞠凤萍,等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩中的储层沥青[J]. *石油学报*, 2013,34(2):225-231.

- Zhang Nai, Wang Zhaoming, Ju Fengping, et al. Diagenetic Bitumen in Ordovician Carbonate Reservoirs of the Northern Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 225 - 231.
- [23] 程鑫,周立宏,操应长,等. 黄骅坳陷大港探区下古生界碳酸盐岩潜山差异演化及优质储层成因[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 673 - 689.
- Cheng Xin, Zhou Lihong, Cao Yingchang, et al. Differential Evolution and Origin of High-Quality Reservoirs in the Lower Paleozoic Carbonate Buried Hills in Dagang Prospecting Area, Huanghua Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 673 - 689.
- [24] 庞绪成,赵少攀,杨剧文,等. 河南洛宁龙门店银矿成矿阶段划分及流体包裹体测温意义[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(5): 828 - 837.
- Pang Xucheng, Zhao Shaopan, Yang Juwen, et al. Metallogenic Stages and the Homogenization Temperature of Fluid Inclusions from the Longmendian Silver Deposit in Luoning City, Henan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(5): 828 - 837.
- [25] 王文庆,李岳桐,卢刚臣,等. 黄骅坳陷中部潜山地质特征及油气勘探方向[J]. *断块油气田*, 2017, 24(5): 613 - 617.
- Wang Wenqing, Li Yuetong, Lu Gangchen, et al. Geological Characteristics and Hydrocarbon Exploration Direction in Buried-Hill, Central Huanghua Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(5): 613 - 617.
- [26] 孟元林,王粤川,罗宪婴,等. 渤海湾盆地孔西潜山构造带碳酸盐岩的成藏史数值模拟[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(1): 11 - 18.
- Meng Yuanlin, Wang Yuechuan, Luo Xianying, et al. Numerical Simulation of Carbonate Reservoir Forming History of Kongxi Buried-Hill Structural Belt in the Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(1): 11 - 18.