

济阳坳陷浅层次生气藏与稠油油藏的关系

王兴谋¹,刘士忠¹,张云银¹,汪卫东²,张明振¹,李红梅¹,冯德永¹

(1.中国石化胜利油田分公司物探研究院,山东东营 257022;

2.中国石化胜利油田分公司工程技术研究院,山东东营 257000)

摘要:济阳坳陷浅层次生气藏及稠油油藏主要分布于生油洼陷的周缘、凸起带及中央隆起带。以济阳坳陷地质、地球化学研究为基础,从浅层次生气藏来源、浅层油气成因、稠油稠化原因、天然气运聚动平衡、浅层次生气藏与稠油油藏分布规律等方面,探讨济阳坳陷浅层次生气藏与稠油油藏的关系。研究表明,浅层次生气藏与稠油油藏为伴生关系,且浅层次生气主要来源于稠油油藏的生物降解及油溶释放气;浅层次生气藏与稠油油藏在空间分布上具有明显的规律性,主要表现为次生气藏下方或下倾方向均发育稠油油藏、稠油油藏上方或上倾方向不一定发育次生气藏以及常规油藏上方或上倾方向未发育次生气藏。浅层次生气藏和稠油油藏共同构成一个相对独立的油气生、运、聚系统。

关键词:次生气藏 稠油油藏 原油降解 天然气运聚动平衡 济阳坳陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0036-05

Discussion on the relationship between shallow secondary gas reservoir and heavy oil reservoir in Jiyang depression

Wang Xingmou¹, Liu Shizhong¹, Zhang Yunyin¹, Wang Weidong², Zhang Mingzhen¹, Li Hongmei¹, Feng Deyong¹

(1. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257022, China;

2. Research Institute of Petroleum Engineering, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: Shallow secondary gas reservoir and heavy oil reservoir mostly distribute in the periphery of source sub-sag, uplift belt and central uplift belt of in Jiyang depression. Based on the study of geology and geochemistry study in Jiyang depression, the relationship between the shallow gas reservoir and heavy oil reservoir were discussed through gas sources and genesis, thickening mechanism of heavy oil, dynamic balance between natural gas migration and accumulation and distribution pattern of shallow secondary gas reservoir and heavy oil reservoir. The results show that the shallow secondary gas reservoir is associated with the heavy oil reservoir, and the petroleum biodegradation and dissolved gas in the heavy oil reservoir provide its gas source. There are three evident distribution patterns: ① Heavy oil reservoirs often develop below or along the downdip direction of shallow secondary gas reservoirs; ② Shallow secondary gas reservoirs may not exist above or along the updip direction of heavy oil reservoirs; ③ No shallow secondary gas reservoirs exist above or along the updip direction of conventional oil reservoirs. The shallow gas reservoir and heavy oil reservoir formed a relatively independent system of hydrocarbon generation, migration and accumulation.

Key words: secondary gas reservoir; heavy oil reservoir; oil degradation; natural gas; dynamic balance between natural gas migration and accumulation; Jiyang depression

济阳坳陷是渤海湾复式含油气盆地的重要组成部分,在其主要生油凹陷的周缘、凸起带以及中

央隆起带已发现丰富的浅层次生气藏和稠油油藏;二者在平面上相邻分布,纵向呈上下分布。前人针

收稿日期:2015-09-11。

作者简介:王兴谋(1965—),男,山东定陶人,教授级高级工程师,博士,从事油气勘探、地震及地质方面的研究。联系电话:(0546)8553505, E-mail: wangxingmou.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“盆缘稠油与浅层气生成关系及勘探方法”。

对浅层油气的地质成因、地震预测以及稠油油藏的形成等开展了大量研究,并取得了丰富的成果^[1-6]。研究表明,浅层次生气藏与稠油油藏具有亲缘关系,二者在空间分布上存在伴生现象,但关于浅层次生气藏与稠油油藏成因机制及分布规律的研究却较少。为此,笔者通过分析济阳拗陷浅层次生气藏与稠油油藏的分布规律、浅层油气成因等,结合地球化学等特征,研究二者的成因联系及空间分布特征,以期对济阳拗陷下步的浅层油气勘探提供指导。

1 浅层次生气藏来源

天然气藏主要来源于石油伴生气(从油藏脱出后称为油溶释放气)、高温裂解气、煤成气、原生生物气、原油降解气以及深部的二氧化碳等。济阳拗陷浅层次生气藏的来源主要为油溶释放气(包括运移过程中和成藏后脱出气)和原油降解气^[1,3-4,6]。

1.1 油溶释放气

济阳拗陷主要洼陷带的油藏地层压力与饱和压力的差值一般为15~30 MPa^[7-9],天然气呈溶解状态赋存于油藏之中。实际勘探资料证实,济阳拗陷的油藏原始油气比为30~60 m³/t。位于洼陷带至斜坡带之间的构造断裂带的油藏地层压力与饱和压力的差值减少为1.5~2.0 MPa,致使溶解气在油藏内脱气,并占据圈闭顶部形成气顶气藏;斜坡带和边缘凸起带的油藏地层压力与饱和压力的差值为0或负值,原油已严重脱气,油藏原始油气比仅约为5~10 m³/t,而脱出的游离气则向盆地边缘更高的构造部位运移,在斜坡带和凸起带形成浅层次生气藏。

1.2 原油降解气

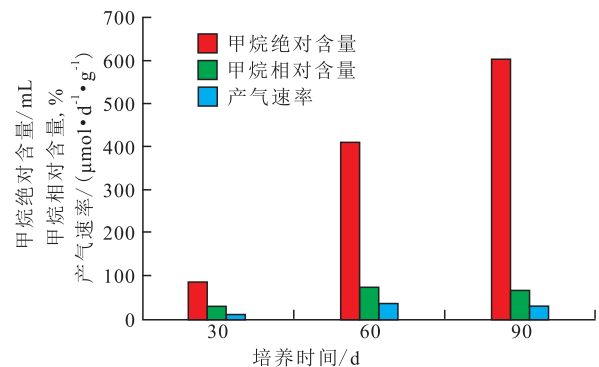
原油降解气是指原油在喜氧微生物和厌氧微生物降解过程中形成的一种次生型生物气,研究表明,原油降解气主要通过二氧化碳还原生成甲烷^[10-13]。济阳拗陷主要产气区的埋藏较浅,其下伏原油多已发生生物降解作用,在油藏形成之后,由于较强的边、底水交替作用,致使油藏菌解作用增强、厌氧细菌活跃,原油经降解生成天然气。以孤岛油田馆陶组油藏为例,其馆陶组地面原油密度平均为0.96 g/cm³,以稠油为主。稠油的形成主要是由于原油发生生物降解作用,导致烃类组分损失,非烃类和沥青质等重质组分增加所致。胜利油区遭受明显改造和未遭受明显改造的2个油样的厌氧降解实验结果表明,原油在厌氧降解过程中产生的气

体主要为甲烷、二氧化碳和氮;随着原油降解时间的增加,气体的组分发生变化,甲烷相对含量增加,二氧化碳和氮的相对含量减少,表明原油在厌氧降解过程中,一部分二氧化碳被还原成甲烷,原油通过生物降解作用,形成以甲烷为主的次生气藏。

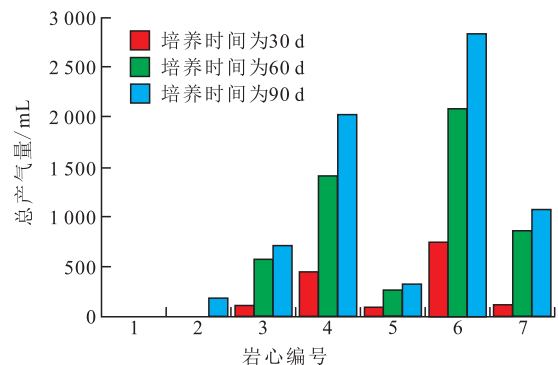
济阳拗陷油藏微生物群落结构和原油生物气化的研究表明,其原油中甲烷产生的速率超过100 μmol/(d·g),折算为原油年产甲烷量超过750 m³/t。胜利油区罗801区块原油微生物气物理模拟实验表明(图1),该区块原油经生物降解,甲烷产生速率超过20 μmol/(d·g),折算为原油年产甲烷量超过150 m³/t。辽河油田稠油厌氧微生物降解实验结果表明,其原油年生成天然气量为226.03~264.75 m³/t,其中甲烷约占70%,如按重量计算,其原油重量的四分之一可以转化为天然气。

利用16S rDNA克隆测序技术,研究胜利油区10个水驱油藏的内源微生物种群及分布规律,结果表明,济阳拗陷油气藏古菌共计14个属,整体涵盖原油降解、产生物表面活性物质、产甲烷等多种原油降解微生物;其中,原油降解菌Achromobacter和Arcobacter几乎分布于所有油藏,为济阳拗陷原油降解生成天然气的直接证据。

综上所述,济阳拗陷油溶释放气量仅为25~50



a—甲烷含量及产气速率随时间的变化



b—不同样品总产气量随时间的变化

图1 胜利油区罗801区块原油微生物气物理模拟实验

Fig.1 Physical simulation experiment of oil-biodegradation gas in Luo801 block, Shengli oilfield

m^3/t ,不足以形成具有一定规模的天然气藏。而济阳拗陷主要天然气藏均伴有原油降解作用,且实验数据证明原油降解时生气量巨大,因此浅层次生气藏应主要来源于相关油藏成藏后的原油降解作用。

2 浅层次生气藏气源对比

原油微生物降解生成的原油降解气与油溶释放气的地化指标存在明显差异。其组分中的甲烷含量增加,具有相对较高的 C_2/C_3 和 $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ 值;且随着生物降解程度的增加, C_2/C_3 和 $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$ 值逐渐升高。丙烷和正丁烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及丙烷的 δD 值偏重,亦随着生物降解程度的增加而升高。在生化指标上,表现为明显的碳同位素倒转特征,主要为丙烷碳同位素倒转或丙烷和丁烷碳同位素倒转,即 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 且 $\delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$,或 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2$ 且 $\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$,该特征为识别原油降解气的重要标志。

通过对济阳拗陷浅层天然气碳同位素分析发现,孤岛、单家寺、陈家庄和高青油田的天然气出现明显的丙烷碳同位素倒转^[14],丙烷碳同位素值高于丁烷碳同位素值近5‰,表明其浅层次生气主要为原油降解气或已经历生物降解过程。

根据原油和生油岩的甾、萜烷分析结果认为,济阳拗陷沙三段—馆陶组原油主要来源于下伏沙四段和沙三段生油岩。利用轻烃配对成分对比法分析^[15],认为研究区浅层天然气与馆陶组稠油应为同源,浅层天然气主要来源于下伏或下倾方向的原油降解,而与沙三段原油及天然气的差异较大。

3 稠油稠化原因分析

稠油的成因类型可以分为原生型和次生型,浅层稠油的成因主要以次生型为主^[1,3-4,6]。济阳拗陷浅层原油多分布于埋深为800~2000 m的地层,其边、底水活跃,导致原油稠化的主要为生物降解和水洗作用等。原油在厌氧微生物的降解过程中,消耗了原油中的烃类,低碳数烃类部分或全部损失,含氮、硫、氧的非烃类及沥青质组分增加,从而使原油的密度和粘度增加。东营凹陷单家寺油田单6井区的油藏埋深为1090~1160 m,地面原油密度为0.974~0.993 g/cm^3 ,粘度为9200~70200 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,为典型的稠油油藏。研究表明,单6井区原油受到较严重的生物降解作用,正构烷烃和类异戊二烯烃等主要的烃类均被细菌降解,在饱和烃色谱图中

仅出现以甾烷、藿烷系列为主的环状化合物,且甾烷也受到明显的生物降解作用,规则甾烷已部分降解,耐降解的重排甾烷含量相对较多,表明研究区原油明显遭受生物降解和水洗等次生改造作用。由原油降解生成的降解气向上运移扩散,遇到有利圈闭即可聚集,但由于单6井区上部缺少有效的泥岩盖层,因此并未形成工业价值的天然气藏。

4 天然气运聚动平衡分析

与石油相比,天然气分子的直径要小得多,因此,天然气的扩散系数要比石油大得多。天然气的扩散作用对气藏的破坏具有重要作用。天然气藏的储量由其累积供气量和累积扩散量决定,气藏形成后,没有天然气继续补充至圈闭,由于扩散作用,经过漫长的地质时期可使原来已形成的天然气藏遭到破坏或部分散失。因此,只有当聚集量大于散失量时,气藏才能形成和保存,且晚期成藏对气藏的保存至关重要。如崖13-1气田在距今2.8 Ma的扩散速率为 $6.79 \times 10^8 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$,扩散量为 $282 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{Ma}$,供气量为 $535.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{Ma}$ 。根据天然气运聚动平衡观点,认为该气藏仍处于储量递增期,动态保存条件很好^[16]。而川西平落坝地区须二段气藏在距今17 Ma的储量达到最高值,随后逐渐降低,是由于气体不断向上扩散损失,聚集量小于扩散量所致。

在馆陶组—明化镇组沉积时期,伴随着拗陷的整体下沉,济阳拗陷沙四段上部和沙三段下部的烃源岩埋深增大,并相继进入生油门限。烃源岩主要生排烃史、油藏饱和压力、成岩矿物流体包裹体等资料的分析结果表明,研究区油气成藏期主要分为2期,分别为渐新世末期和中新世末期—上新世;大规模的油气聚集发生于中新世末期—上新世,尤以上新世明化镇组沉积中—晚期为主^[17-18]。在油藏形成之后,由于油溶释放气及原油生物降解作用产生的天然气在浅层聚集,形成浅层次生气藏。济阳拗陷浅层次生气藏的面积小、储层厚度薄,储量一般小于 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$;且其馆陶组和明化镇组泥岩盖层的埋藏浅、成岩作用弱,封盖能力有限。程有义等^[19]利用Cross的泥岩盖层扩散量模型和计算公式,得出东营凹陷平方王地区沙四段气藏储量扩散一半所需时间为7.5 Ma,而东营凹陷花沟地区由于浅层馆陶组和明化镇组泥岩盖层固结程度低,泥岩排替压力小、封盖能力差,馆陶组天然气藏储量扩散一半所需时间仅为0.02 Ma。由于浅层气藏的天然气扩

散速度快,因此成藏早期聚集的天然气部分或全部逸散,现今浅层成藏的天然气应主要来源于原油的生物降解;但要形成具有一定规模的天然气藏,仍须有活气源(稠油油藏)的不断补充。

5 浅层次生气藏与稠油油藏分布规律

统计结果表明,济阳拗陷已探明的浅层次生气藏与稠油油藏往往共生或伴生分布,二者在空间分布上具有明显的规律性,主要表现为:①次生气藏下方或下倾方向均发育稠油油藏。在目前已发现的浅层次生气藏与稠油油藏中,孤岛、孤东、埕东、东辛和三合村等油田浅层次生气藏下伏地层多发育稠油油藏,单家寺、林樊家和王庄等油田下倾方向多发育稠油油藏,胜坨和临盘油田浅层发育少量次生气藏,其下方以发育正常油藏为主,部分为稠油油藏。②稠油油藏上方或上倾方向不一定发育次生气藏。济阳拗陷孤岛、孤东、埕东、单家寺、林樊家和王庄等油田稠油油藏的上方或上倾方向发育次生气藏,但金家油田稠油油藏上方或上倾方向未发现次生气藏;分析其原因可能为存在未发现的次生气藏,或是由于金家油田位于东营凹陷南坡,其浅层的盖层埋藏浅、封盖能力差,导致次生气逸散而未聚集成藏。③常规油藏上方或上倾方向未发育次生气藏。济阳拗陷车镇凹陷以发育正常油藏为主,稠油油藏较少,在其两侧的义和庄凸起中西段和埕子口凸起中段仍未发现浅层次生气藏;在东营、沾化和临盘凹陷的洼陷带已发现众多正常油藏,但未发现与这些油藏伴生的浅层次生气藏。

分析济阳拗陷浅层次生气藏、稠油油藏及常规油气藏的分布规律,发现浅层次生气藏与构造较低部位的稠油油藏伴生分布,其原因为浅层次生气藏主要来源于浅层原油的生物降解及油溶释放气,而浅层原油由于生物降解及天然气脱出等原因进而形成稠油油藏。

6 结束语

济阳拗陷浅层次生气藏主要来源于稠油油藏的生物降解及部分油溶释放气,生物降解气及油溶释放气沿断层、砂体及不整合面向上运移,遇到有利圈闭即可聚集成藏。研究区浅层气藏在地震剖面上多表现为亮点特征,可以利用地震亮点技术寻找浅层次生气藏;若发现浅层次生气藏,则可进一

步寻找伴生的稠油油藏。将浅层次生气藏与稠油油藏作为统一的油气系统,研究浅层稠油及天然气的成藏机理和分布特征,确定浅层次生气藏与稠油油藏的联合勘探技术及方法,是下步济阳拗陷浅层油气勘探的主要方向。此外,今后仍须进一步深化原油降解稠化作用的生气量与油溶释放气量的对比分析,以明确稠油油藏与浅层次生气藏储量的对应关系。

致谢:在论文撰写和修改过程中,中国石油大学高长海同志提出了许多宝贵的意见和建议,特此感谢!

参考文献:

- [1] 陈建渝,李水福,田波,等.垦西-罗家油区稠油成因[J].石油与天然气地质,1998,19(3):248-253.
Chen Jianyu, Li Shuifu, Tian Bo, et al. Origin of heavy oils in Kenxi-Luojia oil region [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 248-253.
- [2] 王秀红,张守春,李政,等.沾化凹陷三合村地区油气来源及运移方向[J].油气地质与采收率,2015,22(1):47-51.
Wang Xiuhong, Zhang Shouchun, Li Zheng, et al. Study on hydrocarbon sources and migration pathways in Sanhecun area of Zhanhua sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 47-51.
- [3] 霍志鹏,庞雄奇,范凯,等.济阳拗陷典型岩性油气藏相-势耦合控藏作用解剖及应用[J].石油实验地质,2014,36(5):574-582.
Huo Zhipeng, Pang Xiongqi, Fan Kai, et al. Anatomy and application of facies-potential coupling on hydrocarbon accumulation in typical lithologic reservoirs in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 574-582.
- [4] 王兴谋,张云银,张明振,等.关于济阳拗陷浅层气藏与稠油油藏联合勘探的思考[J].油气地质与采收率,2014,21(5):14-17.
Wang Xingmou, Zhang Yunyin, Zhang Mingzhen, et al. An approach of exploring shallow gas and heavy oil in Jiyang depression based on their paragenetic relationship [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 14-17.
- [5] 王振奇,于赤灵,张林晔,等.济阳拗陷郑家-王庄油田稠油生物降解程度及影响因素研究[J].断块油气田,2005,12(1):4-7.
Wang Zhenqi, Yu Chiling, Zhang Linye, et al. Biodegradation level of heavy oil and geological control factors in Zhengjia-Wangzhuang oilfields, Jiyang depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2005, 12(1): 4-7.
- [6] 李春梅,李素梅,李雪,等.山东东营凹陷八面河油田稠油成因分析[J].现代地质,2005,19(2):279-286.
Li Chunmei, Li Sumei, Li Xue, et al. Origin of the heavy oils from the Bamianhe oil field, Dongying Depression [J]. Geoscience, 2005, 19(2): 279-286.

- [7] 宋国奇,郝雪峰,刘克奇.箕状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律——以济阳拗陷为例[J].石油与天然气地质,2014,35(3):303-310.
Song Guoqi, Hao Xuefeng, Liu Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 303-310.
- [8] 程付启,王永诗,宋国奇,等.断陷盆地压力系统及其成藏特征——以沾化凹陷孤南洼陷古近系为例[J].油气地质与采收率,2015,22(1):20-25.
Cheng Fuqi, Wang Yongshi, Song Guoqi, et al. Pressure systems and their hydrocarbon accumulation characteristics in faulted basins: a case study of the Palaeogene in Gunan subsag of Zhanhua sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 20-25.
- [9] 邱贻博.东营凹陷压力系统与油气成藏[J].特种油气藏,2015,22(3):58-61.
Qiu Yibo. Pressure system and oil/gas reservoir forming in Dongying Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3): 58-61.
- [10] 张渠,宋晓莹,张志荣,等.塔河油田原油生物标志物定量特征研究[J].石油实验地质,2014,36(2):206-210.
Zhang Qu, Song Xiaoying, Zhang Zhirong, et al. Quantitative characteristics of biomarkers of crude oils of Tahe Oil Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 206-210.
- [11] 汤玉平,高俊阳,赵克斌,等.典型油气藏上方甲烷氧化菌群的分子生物学解析[J].石油实验地质,2014,36(5):605-611.
Tang Yuping, Gao Junyang, Zhao Kebin, et al. Molecular biological analysis of methanotrophic bacterial community above typical oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 605-611.
- [12] 王政军,朱光有,王政国,等.原油降解气的形成条件及其特征[J].天然气工业,2008,28(11):29-33.
Wang Zhengjun, Zhu Guangyou, Wang Zhengguo, et al. Characteristics of oil-biodegradation gas and their discriminant index system[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(11): 29-33.
- [13] 林小云,高甘霖,徐莹,等.生物成因气生成演化模式探讨[J].特种油气藏,2015,22(1):1-7.
Lin Xiaoyun, Gao Ganlin, Xu Ying, et al. Discussion on generation and evolution mode of biogenetic gas[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(1): 1-7.
- [14] 高阳,金强,帅燕华,等.渤海湾盆地生物气成因类型与成藏条件[J].天然气地球科学,2011,22(3):407-414.
Gao Yang, Jin Qiang, Shuai Yanhua, et al. Genetic types and accumulation conditions of biogas in Bohaiwan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 407-414.
- [15] 张林晔,李学田.济阳拗陷滨海地区浅层天然气成因[J].石油勘探与开发,1990,17(1):1-7.
Zhang Linye, Li Xuetian. The origin of nature gas in the shallow reservoir in Binhai area in Jiyang Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1990, 17(1): 1-7.
- [16] 郝石生,黄志龙,杨家琦.天然气运聚动平衡及其应用[M].北京:石油工业出版社,1994.
Hao Shisheng, Huang Zhilong, Yang Jiaqi. Dynamic balance between migration and accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [17] 蒋有录,刘华,张乐,等.东营凹陷油气成藏期分析[J].石油与天然气地质,2003,24(3):215-218.
Jiang Youlu, Liu Hua, Zhang Yue, et al. Analysis of petroleum accumulation phase in Dongying sag[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 215-218.
- [18] 朱光有,金强,戴金星,等.东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究[J].石油与天然气地质,2004,25(2):209-215.
Zhu Guangyou, Jin Qiang, Dai Jinxing, et al. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 209-215.
- [19] 程有义,宋来亮,郭瑾,等.济阳拗陷浅层天然气富集有利条件[J].石油勘探与开发,1995,22(6):16-19.
Cheng Youyi, Song Lailiang, Guo Jin, et al. Favorable conditions for shallow (Neogene) gas accumulation in Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(6): 16-19.

编辑 邹澍滢