

文章编号:1673-5005(2017)03-0042-07

doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2017. 03. 005

东濮凹陷北部地区古近系油型气成因类型及分布特征

蒋有录¹, 胡洪瑾¹, 谈玉明², 刘景东¹, 赵利杰¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001)

摘要:以热压模拟实验模拟东濮凹陷干酪根热裂解和原油热裂解过程, 分析干酪根热裂解气和原油裂解气组分特征的差异, 以此建立干酪根热裂解成因气和原油裂解成因气的判识方法; 结合东濮凹陷北部地区天然气碳同位素及天然气组分数据, 对研究区油型气进行划分, 进而探讨干酪根热裂解气与原油裂解气的分布特征。结果表明, 研究区古近系油型气分为干酪根热裂解气与原油裂解气, 干酪根热裂解气具有相对较高的 C_1/C_2 值和较低的 C_2/C_3 值特征, 而原油裂解气则与之相反。干酪根热裂解气和原油裂解气的分布存在明显差异: 前者分布范围更广, 后者更近于洼陷中心分布, 两者分布的差异性与其生成及成藏条件差异有关。根据干酪根热裂解气与原油裂解气分布特点, 推测在邻近洼陷中心区具有良好的干酪根裂解成气及原油裂解成气的条件和油型气勘探前景。

关键词: 天然气; 成因类型; 干酪根热解气; 干酪根裂解气; 原油裂解气; 古近系; 东濮凹陷

中图分类号: TE 122. 1 **文献标志码:** A

引用格式: 蒋有录, 胡洪瑾, 谈玉明, 等. 东濮凹陷北部地区古近系油型气成因类型及分布特征 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 42-48.

JIANG Youlu, HU Hongjin, TAN Yuming, et al. Genesis and distribution of Paleogene oil type gases in the northern Dongpu Depression [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 42-48.

Genesis and distribution of Paleogene oil type gases in the northern Dongpu Depression

JIANG Youlu¹, HU Hongjin¹, TAN Yuming², LIU Jingdong¹, ZHAO Lijie¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Exploration & Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang 457001, China)

Abstract: Based on pressure-thermal experiments of kerogen degrading/cracking and oil cracking with source rocks and oil samples of Dongpu Depression, the componential differences between kerogen-degraded/cracked gas and oil-cracked gas were identified, and a genesis identification chart to distinguish the two different types of gas was generated. Using this chart, and combining the data of natural gas component and carbon isotope in the northern Dongpu Depression, the genesis of the oil-type gas in the study area was studied, and the distribution characteristics of these two types were discussed. The oil type gas found in Paleogene of the northern Dongpu Depression can be clearly identified with two origins, kerogen-degraded/cracked origin and oil-cracked origin. The kerogen-degraded/cracked gas has relative high value of C_1/C_2 and low value of C_2/C_3 ; while the oil-cracked gas has relative low value of C_1/C_2 but high value of C_2/C_3 . There are significant differences in the distribution of the two types of gas in the northern Dongpu Depression, the kerogen-degraded/cracked gas occur more widely than oil-cracked gases in depression, while the latter is found near sag center. The distribution differences between kerogen-degraded/cracked gas and oil-cracked gas are related to their generation and accumulation condition differences. In terms of the oil type gas identification and their distribution, a conclusion is made that there are favorable formation conditions for the gas types in deep and central sag area, suggesting that there are good oil type gas potentials for exploration in the deep and

收稿日期:2016-11-23

基金项目:国家油气重大专项课题(2011ZX05006-004)

作者简介:蒋有录(1959-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为油气藏形成机理与分布规律。E-mail:jiangyl@upc.edu.cn。

central sag in the northern Dongpu Depression.

Keywords: natural gas; genetic type; kerogen-degraded gas; kerogen-cracked gas; oil-cracked gas; Paleogene; Dongpu Depression

在含油气盆地中,干酪根热裂解成气和原油裂解成气是油型气的两种主要形成机制。一般认为原油裂解气包括早期形成的油藏中的原油随埋深增大温度升高而再次裂解成的气体,以及烃源岩中残留的可溶有机质再次裂解形成的气体^[1-3]。对于干酪根成气,按演化阶段和成气机制的差异,可分为两个阶段^[4]:在成熟和高成熟阶段,有机质经热催化作用降解而形成天然气(热解气或降解气),以干酪根脱侧链为主;而在过成熟阶段,干酪根高温裂解成气(裂解气),以干酪根本身碳链断裂为主,辅以少量脱侧链作用。在未成熟—低成熟干酪根热压模拟实验中,通常所称的干酪根裂解气,实际上包括地质演化中的热解气和裂解气,故亦可将其称为热裂解气。不同成因机制的油型天然气特征存在一定差异,国内外学者对其开展了大量的研究工作,如通过干酪根和原油热模拟实验,确定出干酪根热裂解气和原油裂解气的差异,并根据天然气组分、碳同位素等方面差异,确定干酪根热裂解气和原油裂解气的鉴别方法^[5-9],结合沥青观察、活化能计算与热演化史分析等^[10-11],为含油气盆地中天然气的动态成藏过程研究提供了有效佐证。油型天然气作为东濮凹陷北部地区古近系的重要天然气类型^[12-14],其成因是由干酪根热裂解直接生气,还是早期形成的油藏中的原油因后期埋深加大、地温升高而进一步裂解成气,一直困扰着油气地质研究及勘探工作者,并影响了对其成藏过程的认识。笔者以干酪根热裂解成气和原油裂解成气模拟实验为基础,确定该区区分干酪根热裂解气和原油裂解气的判识方法,获得判识图版,再结合研究区天然气组分和天然气同位素数据,对研究区古近系天然气的成因进行判识,并总结其分布特征,为深化该区深层天然气勘探提供理论依据。

1 天然气成藏地质背景

东濮凹陷北部地区古近系具有良好的天然气成藏条件。该区古近系泥质烃源岩发育,以沙三下和沙三中亚段为主力烃源岩层系,干酪根类型以Ⅱ₁型为主^[12,15],具有埋深大、热演化程度高等特点。古近纪末期沙三段烃源岩主体进入大量生排烃阶段,局部地区达到高—过成熟演化阶段,现今镜质体

反射率 R_o 普遍介于 1.3% ~ 2.0%, 沟陷中心区 R_o 大于 2.0%, 具有生成大量油型天然气的地质条件^[12]。部分地区沙三段实测地层温度高达 150 ~ 180 ℃, 已达到原油裂解温度^[12,16], 为原油裂解气的生成聚集提供了条件。

东濮凹陷古近系发育多套盐岩, 累计厚度可达上千米, 为天然气的富集和保存提供了优越的盖层条件^[12-16], 也使得油气主要富集于古近系沙河街组, 而新近系油气储量很少^[17]。古近系沙三段烃源岩系普遍发育异常高压, 不仅抑制了有机质热演化, 使得生气窗向下延伸, 而且有效地保护了中深部储层的孔隙, 使异常高孔隙带得以发育并保存^[14]。因此, 得益于“气源充足、盖层优越、储层发育良好”的成藏背景, 东濮凹陷成为了渤海湾盆地最富天然气的凹陷, 尤其是该凹陷北部地区古近系天然气资源十分丰富, 且分布较为广泛。

2 油型气判识

前人对济阳坳陷泥岩热模拟实验发现^[18], 原油裂解成气的活化能高于干酪根直接热裂解成气的活化能, 因此原油裂解成气需要相对更高的温度, 从而导致原油裂解气的热演化程度要高于干酪根热裂解气; 另外, 不同生烃阶段生成的干酪根热裂解气热演化程度也有一定差异, 二次生烃产物的热演化程度亦明显大于初次生烃。国内外其他学者也通过热模拟实验, 对干酪根裂解气与原油裂解气的地球化学特征进行了研究^[1,6,9], 发现不同成因的油型气地球化学特征具有明显差异, 从而为鉴别干酪根裂解气与原油裂解气提供了客观依据^[20]。本文中借助东濮凹陷北部地区的烃源岩与原油样品的热压模拟实验和天然气样品的分析测试数据, 综合前人对渤海湾盆地其他地区干酪根热裂解气与原油裂解气模拟实验结果, 建立研究区古近系干酪根热裂解气与原油裂解气的天然气组分判识图版。

2.1 干酪根热裂解与原油裂解模拟实验及结果

2.1.1 模拟实验方法

干酪根热裂解成气模拟实验步骤为: 将有代表性的未熟—低熟样品粉碎至粒径低于 0.2 mm, 称取一定量的样品, 加入一定量的水, 混合均匀, 放入反应釜内。反应釜以软金属密封圈以加压方式密封。

将釜内抽真空后,开始加热,温度到达设定温度后,恒温24小时,打开阀门收集生成气体,进行气相色谱分析。

原油裂解成气模拟实验方法为:选取典型油藏原油样品。称取一定量的碳酸钙、黏土、石英颗粒和长石颗粒,按照3:7:15:15的比例混合均匀,以便模拟地下矿物介质条件下的原油裂解反应。并称取一定量的原油样品与混合物混匀,装入反应釜,将反应釜抽真空。反应釜快速升温至指定温度,在指

定温度下恒温一定时间,然后打开取样阀门,收集取出气体,计量并送气相色谱分析测试。取气结束后,关闭取气阀门,继续快速升温至下一个设定温度点,恒温一定时间后,取出生成气体,计量测试。重复快速升温→恒温特定时间→取气过程,直到完成最后一个温度点实验。

干酪根热裂解和原油裂解模拟实验所选样品为东濮凹陷典型性特征样品,样品信息如表1所示。

表1 热压模拟实验样品信息

Table 1 Information of samples for thermal pressing simulation experiment

序号	井号	层位	深度/m	岩性	TOC/%	$S_1/(mg \cdot g^{-1})$	$S_2/(mg \cdot g^{-1})$	样品类别
1	胡48	沙三下	1618.07	灰色页岩	2.74	0.19	16.56	源岩
2	文10-1	沙三中	2414.09	灰色页岩	3.77	1.94	28.23	源岩
3	胡39-平2	沙三下	3376.40	常规原油	—	—	—	原油

2.1.2 干酪根热裂解气与原油裂解气组分特征

东濮凹陷干酪根成气模拟和原油裂解成气模拟实验结果表明,无论是干酪根热裂解生气还是原油裂解生气,其生成的天然气中甲烷与乙烷含量的比值(C_1/C_2)、乙烷与丙烷含量的比值(C_2/C_3)均随演化程度增大而增加。但干酪根裂解气的 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 分别分布在1.6~3.7和0.2~0.8,而原油裂解气的 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 分别分布在1.7~2.5和0.4~1.7;两者 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 相关关系的斜率明显不同(图1),原油裂解气的变化斜率明显大于干酪根裂解气的变化斜率。因此在 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 关系图上可以清楚辨别出干酪根热裂解气和原油裂解气的差异。

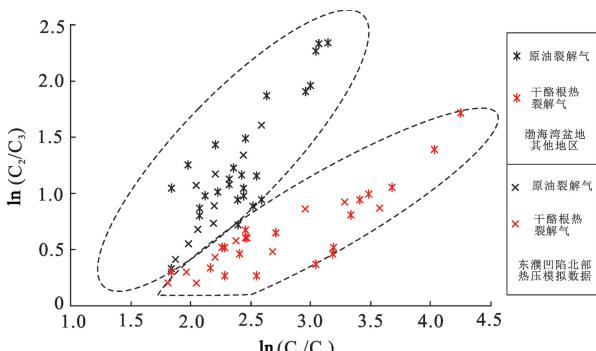


图1 东濮凹陷北部地区干酪根热裂解气与原油裂解气组分判识图版

Fig.1 Components identification plate of kerogen pyrolysis gas and oil cracking gas in the northern Dongpu Depression

整理前人对渤海湾盆地干酪根热裂解及原油裂解模拟实验数据发现,本次研究结果的 $\ln(C_1/C_2)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ 相关关系与前人数据具有相似的规律性。

为能够更客观地鉴别油型气是原油裂解成因还是干酪根热裂解成因,综合渤海湾盆地其他地区模拟实验结果,建立了油型气类型组分判识图版(图1)。

2.2 天然气成因类型判识

为识别天然气是干酪根热裂解成因还是原油裂解成因,需要对天然气成因类型进行初步判识(区分出煤型气、油型气或混合气)。本文中采用天然气组分碳同位素对其成因类型进行判识。不同成因类型天然气具有不同的轻烃碳同位素特征,利用戴金星^[19]建立的 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 鉴别图版,可将东濮凹陷北部地区天然气划分为油型气、煤型气和混合气3大类(图2),油型气分布范围较广,以濮卫、文留和桥白地区沙三中亚段为主;煤型气分布较为局限,主要集中在沙三下亚段和沙四段的深部层系中,浅层仅在白庙的沙二段发育少量煤型气;混合气在各层系均有分布。

将研究区利用碳同位素鉴定为典型油型气的天然气组分分析数据投到干酪根热裂解气与原油裂解气组分判识图版上,可以看出,这些油型气在组分图版中明显处于两个区间(图3),如白庙沙三上亚段主要为干酪根热裂解气,濮城、刘庄沙二段及研究区沙三中、下亚段主要为原油裂解气。

理论上,无论是原油裂解气还是干酪根热裂解气,在其运移、聚集及后期保存过程中都可能发生组分分异及碳同位素分馏等作用。而实际上,东濮凹陷古近系油气主要为渐新世末期成藏,第四纪在主力生烃洼陷区具有二次成烃及成藏过程,油气成藏期晚,加之生烃洼陷较小,致使天然气运移距离短,天然气组分分异作用及同位素分馏作用较弱。因此

天然气组分的判识图版(图 2、3)适用于东濮凹陷的

实际地质情况。

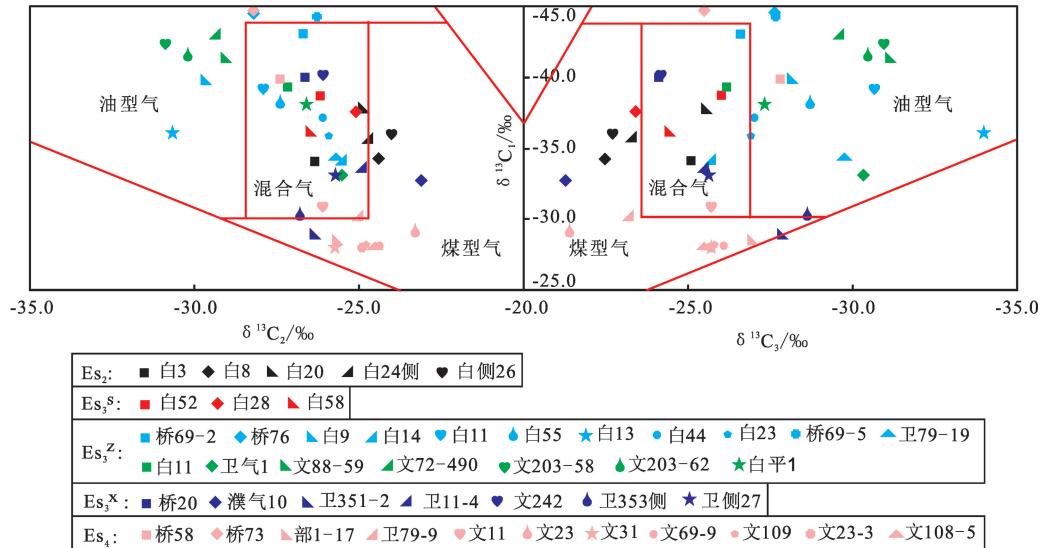


图 2 东濮凹陷北部地区古近系天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 散点关系

Fig. 2 Relationship between $\delta^{13}\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}_2$, $\delta^{13}\text{C}_3$ scatter of Paleogene natural gas in the northern Dongpu Depression

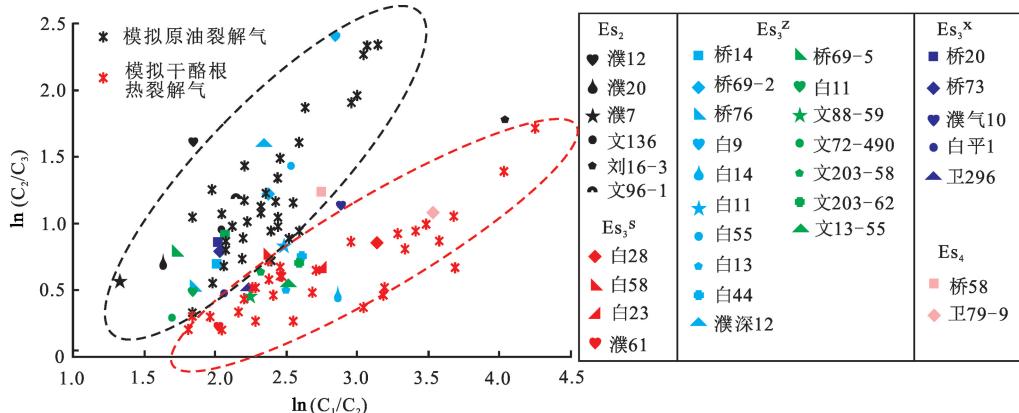


图 3 东濮凹陷北部地区各层系天然气 $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$ 与 $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$ 散点关系

Fig. 3 Relationship between $\ln(\text{C}_1/\text{C}_2)$ and $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$ scatter of natural gas in each layer of the northern Dongpu Depression

3 干酪根热裂解气与原油裂解气分布特征

干酪根热裂解气和原油裂解气判识结果表明(图 3),研究区油型天然气为干酪根热裂解气和原油裂解气并存,不同类型天然气的分布有一定的规律性(图 4)。已发现原油裂解气多分布在近洼斜坡带或埋深较大的范围内,如前梨园洼陷斜坡带的濮深 12 和文 72-490 沙三中亚段天然气为原油裂解气区;埋深较大的桥白地区的桥 69-5、白 11 沙三中亚段天然气也属于原油裂解气区。深部储层中发现了不发荧光的固体沥青,为轻质组分受热分解溢散而致使不发荧光的固体沥青残留^[21-22],可以证明确实

存在原油裂解过程。经上述判识图版判别的原油裂解气区,均发现了沥青,如刘庄地区的刘 25 井沙三上亚段 4 140.5 m、桥白地区的桥 59 井沙三下亚段 4 556.8 m(图 5)。

晚期干酪根裂解气主要分布于生烃中心附近,如文 203-62 井沙三中亚段天然气。干酪根裂解气为研究区天然气演化的重要类型,与濮卫、前梨园和海通集洼陷古近系烃源岩热演化程度高且存在二次生烃具有紧密联系,多为晚期成藏^[23-24]。此类天然气与生烃洼陷新近纪以来的再次沉降深埋有关,新近纪末期,洼陷区沉积补偿厚度超过先期剥蚀厚度,成熟度增大,烃源岩发生二次生烃并大多处于湿气—干气阶段,由于二次生烃期以来构造活动弱,这

些晚期生成的天然气以近距离运移、深层环洼部位聚集为特征^[25-26]。另外,由于研究区盐岩发育,盖层条件好,中央隆起带地区也发育早期生成的干酪根热解气,如文13-55井沙三中亚段天然气为早期干酪根热解气。

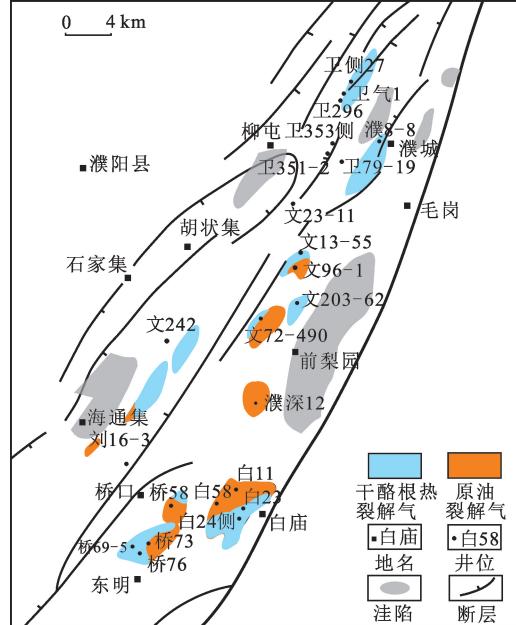
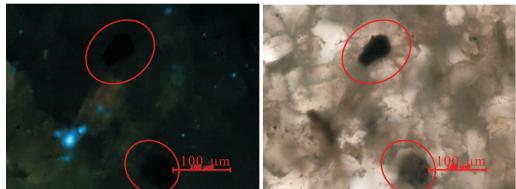


图4 东濮凹陷北部地区古近系干酪根热裂解气与原油裂解气分布

Fig.4 Distribution of Paleogene kerogen pyrolysis gas and oil cracking gas in the northern Dongpu Depression



刘25(4 140.5 m, 沙三上)储层沥青(左反射光, 右透射光)



桥59井(4 556.8 m, 沙三下)储层沥青(左荧光, 右透射光)

图5 东濮凹陷北部地区深层沥青照片
Fig.5 Photographs of asphalt from deep layers in the northern Dongpu Depression

从东濮凹陷不同成因油型气的分布特点来看,已经发现干酪根热裂解成因气分布范围较广,而以距离洼陷中心较远部位居多,而原油裂解成因气分布相对更接近于生烃洼陷中心,干酪根热裂解气与原油裂解气分布差异性与两者形成的时间差异性有关:干酪根热裂解成因气形成于烃源岩生烃开始至

生烃枯竭的整个过程,成气时间间隔长,早期形成的热解成因气成藏时间更长,能运移的距离也更远,因此在凹陷内分布范围更广;而原油裂解气需要较高的地温或较长的演化时间,其开始形成的时间较晚,形成的深度较深,成藏期较短,因此原油裂解气分布也更接近于洼陷中心。距离洼陷中心最近的文203-62井为干酪根裂解成因,也说明洼陷深部带仍具有良好的干酪根裂解成气条件。结合干酪根裂解气和原油裂解气条件,推测向洼陷中心地带,具有良好的高—过成熟干酪根晚期裂解成气和原油裂解成气条件。

4 结论

(1) 在热压模拟实验、天然气组分及同位素分析的基础上,可以建立东濮凹陷不同成因类型油型的天然气组分判识图版,将油型天然气细分为干酪根热裂解气与原油裂解气。与原油裂解气相比,干酪根热裂解气具有较高 C1/C2 值、低 C2/C3 值。

(2) 东濮凹陷北部地区古近系干酪根热裂解气和原油裂解气并存,但其分布存在明显差异性,这种差异与两者成藏条件差异有关:干酪根热裂解成气时间间隔长,成藏时间跨度大,最大侧向运移距离较远,分布广泛;原油裂解气所需温度较高,其成气及成藏时间较晚,多分布于洼陷中心地区。

(3) 根据研究区已发现的原油裂解气环洼陷中心分布、干酪根热裂解气分布广泛的特点,推测洼陷中心地区存在较好的高—过成熟干酪根晚期裂解成气及原油裂解成气条件,在洼陷中心区储盖条件发育较好的区带,具有较大的油型气勘探潜力。

致谢 中国石油大学(北京)张枝焕教授和胜利油田勘探开发研究院包友书高级工程师对本文提出了宝贵修改意见,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] BEHAR F. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. Organic Geochemistry, 1991, 19(1/2/3): 173-189.
- [2] 王云鹏,田静. 原油裂解气的形成、鉴别与运移研究综述[J]. 天然气地球科学,2007,18(2):235-244.
WANG Yunpeng, TIAN Jing. Review of oil cracked gas formation, identificationand migration [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2):235-244.
- [3] 赵文智,王兆云,张水昌,等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2):1-7.

- ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, ZHANG Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2):1-7.
- [4] 宋岩,徐永昌.天然气成因类型及其鉴别[J].石油勘探与开发,2005,32(4):24-29.
- SONG Yan, XU Yongchang. Origin and identification of natural gases [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4):24-29.
- [5] 李君,吴晓东,王东良,等.裂解气成因特征及成藏模式探讨[J].天然气地球科学,2013,24(3):520-528.
- LI Jun, WU Xiaodong, WANG Dongliang, et al. The genetic feature and reservoir forming model of cracked gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3):520-528.
- [6] PRINZHOFER A A, HUC A Y. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases [J]. Chem Geol, 1995, 126:281-290.
- [7] 黄光辉,张敏,胡国艺,等.原油裂解气和干酪根裂解气的地球化学研究(Ⅱ):原油裂解气和干酪根裂解气的区分方法[J].中国科学:D辑(增刊Ⅱ),2008,38:9-16.
- HUANG Guanghui, ZHANG Min, HU Guoyi, et al. Geochemical study on oil-cracked gases and kerogen-cracked gases (Ⅱ): experimental simulation and products analysis [J]. Science in China: Series D(sup Ⅱ), 2008, 38: 9-16.
- [8] 郭建军,陈践发,段文标,等.塔中 I 号构造带奥陶系天然气成因[J].天然气地球科学,2007,18(6):793-797.
- GUO Jianjun, CHEN Jianfa, DUAN Wenbiao, et al. Origin of Ordovician natural gases in No. 1 structural belt of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6):793-797.
- [9] 郭利果,肖贤明,田辉.原油裂解气与干酪根裂解气差异实验研究[J].石油实验地质,2011,33(4):428-436.
- GUO Liguo, XIAO Xianming, TIAN Hui. Laboratory studies of differences between oil-derived and kerogen maturation gases [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4):428-436.
- [10] 谢增业,田世澄,魏国齐,等.川东北飞仙关组储层沥青与古油藏研究[J].天然气地球科学,2005,16(3):283-288.
- XIE Zengye, TIAN Shicheng, WEI Guoqi, et al. The study on bitumen and foregone pool of Feixianguan oolitic in northeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3):283-288.
- [11] 张水昌,赵文智,王飞宇,等.塔里木盆地东部地区古生界原油裂解气成藏历史分析;以英南 2 气藏为例[J].天然气地球科学,2004,15(5):441-451.
- ZHANG Shuichang, ZHAO Wenzhi, WANG Feiyu, et al. Paleozoic oil cracking gas accumulation history from eastern part of the Tarim Basin;a case study of the YN2 gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15 (5):441-451.
- [12] 蒋有录,常振恒,鲁雪松,等.东濮凹陷古近系凝析气藏成因类型及其分布特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(5):28-34.
- JIANG Youlu, CHANG Zhenheng, LU Xuesong, et al. Genetic types and distribution of paleogene condensate gas pools in Dongpu depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(5):28-34.
- [13] 苏惠,曲丽萍,张金川,等.渤海湾盆地东濮凹陷天然气成藏条件与富集规律[J].石油实验地质,2006,28(2):123-128.
- SU Hui, QU Liping, ZHANG Jinchuan, et al. The reservoir forming condition and enrichment rule of the natural gas in the Dongpu Depression, the Bohaiwan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 123-128.
- [14] 李继东,武晓玲,李素贞,等.东濮凹陷深层气藏成藏规律[J].新疆石油地质,2007,28(3):304-311.
- LI Jidong, WU Xiaoling, LI Suzhen, et al. Formation of deep gas pool in Dongpu sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3):304-311.
- [15] 蒋有录,鲁雪松,谈玉明,等.东濮凹陷凝析气成藏主控因素与成藏模式[J].天然气工业,2009,29(4):18-20.
- JIANG Youlu, LU Xuesong, TAN Yuming, et al. Main controlling factors and models of condensate gas pooling in the Dongppu sag [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4):18-20.
- [16] 焦大庆,王德仁,武晓玲.东濮凹陷天然气成藏及富集规律[J].石油与天然气地质,2006,27(6):794-803.
- JIAO Daqing, WANG Deren, WU Xiaoling. Patterns of natural gas accumulation and enrichment in Dongpu depression [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27 (6): 794-803.
- [17] 蒋有录,刘培,刘华,等.渤海湾盆地不同凹陷新近系油气成藏条件差异性及聚集模式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(1):14-21.
- JIANG Youlu, LIU Pei, LIU Hua, et al. Difference of reservoir forming conditions of different depressions and accumulation models of Neogene hydrocarbon in Bohai

- Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(1):14-21.
- [18] 张守春,张林晔,王宇蓉,等.开放、封闭两种体系对比模拟确定深层烃源岩成烃机制:以东营凹陷沙四段烃源岩为例[J].天然气工业,2010,30(9):15-18.
ZHANG Shouchun, ZHANG Linye, WANG Yurong, et al. A study of hydrocarbon generation mechanism of deep source rocks based on the comparison of experimental simulations in open and closed systems: a case study from the Es₄ member in the Dongying Sag[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(9):15-18.
- [19] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].中国科学:B辑,1992,2:185-193.
DAI Jinxing. Identification of various gas alkyl hydrocarbon[J]. Science in China; Series B, 1992, 2:185-193.
- [20] 赵孟军,曾凡刚,秦胜飞,等.塔里木发现和证实两种裂解气[J].天然气工业,2001,21(1):35-38.
ZHAO Mengjun, ZENG Fangang, QIN Shengfei, et al. Two pyrolytic gases found and proved in Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1):35-38.
- [21] 刘德汉,肖贤明,田辉,等.含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义[J].石油与天然气地质,2008,29(4):491-501.
LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Fluid inclusion types and their geological significance in petrolierous basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 491-501.
- [22] 刘德汉,肖贤明,田辉,等.应用流体包裹体和沥青特征判别天然气的成因[J].石油勘探与开发,2009,36(3):375-382.
LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Identification of natural gas origin using the characteristics of bitumen and fluid inclusions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3):375-382.
- [23] 蒋有录,房磊,谈玉明,等.渤海湾盆地东濮凹陷不同区带油气成藏期差异性及主控因素[J].地质论评,2015,61(6):1321-1331.
JIANG Youlu, FANG Lei, TAN Yuming, et al. Differences and main controlling factors of accumulation periods in Dongpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Geological Review, 2015, 61(6):1321-1331.
- [24] 蒋有录,卓勤功,谈玉明,等.富油凹陷不同洼陷烃源岩的热演化及生烃特征差异性[J].石油实验地质,2009,31(5):500-505.
JIANG Youlu, ZHUO Qingong, TAN Yuming, et al. Diversity in the thermal evolution and hydrocarbon generation of source rocks in different sub-depressions of rich oil depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5):500-505.
- [25] 段红梅,高平,王兴武,等.东濮凹陷下第三系烃源岩二次生烃作用[J].石油天然气学报,2008,30(1):206-209.
DUAN Hongmei, GAO Ping, WANG Xingwu, et al. Secondary hydrocarbon generation of lower Tertiary hydrocarbon source rocks in Dongpu Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(1):206-209.
- [26] 谈玉明,蒋有录,赵利杰,等.东濮凹陷北部地区油气相态演化主控因素及充注模式[J].石油实验地质,2015,37(1):28-34.
TAN Yuming, JIANG Youlu, ZHAO Lijie, et al. Main controlling factors of phase evolution and charging pattern of hydrocarbons in northern Dongpu Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1):28-34.

(编辑 徐会永)