

油气藏上方地层中不同赋存态 微渗漏轻烃特征初步模拟实验研究

王国建¹, 唐俊红², 汤玉平¹, 李兴强¹, 李吉鹏¹, 杨俊¹, 黄欣¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

(2. 杭州电子科技大学 材料科学与环境工程学院, 杭州 310018)

摘要: 油气藏的微渗漏烃类在岩石和土壤中的赋存状态, 现阶段都已经建立起相应的分析方法, 包括酸解烃、热释烃、顶空气轻烃、游离烃等, 但各方法分析的静态数据尚不能准确描述微渗漏烃类在上覆地层和土壤介质中的赋存状态及特征。以往对于微渗漏轻烃赋存机理大多数研究限于理论层面, 一直缺乏可靠的模拟实验结果支持, 导致化探工作者对上述各类轻烃指标在应用上存在不同认识, 以及对指标具有独立性存在质疑, 从而影响了方法的合理应用和化探异常的解释。针对上述问题, 以烃类微渗漏的简化理论模型为基础, 开展烃类通过盖层及上覆地层垂向微渗漏模拟实验, 对实验后的模拟柱体进行解剖, 根据不同类别样品(气、岩)的分析测试结果, 对游离烃、顶空气轻烃、热释烃、酸解烃在地层中的赋存机理进行了初步研究。结果表明, 游离烃指标最能反映烃类垂向微渗漏的现今面貌, 酸解烃指标短期内不受气体运移的影响, 热释烃指标短期内受到气体运移的影响, 顶空气轻烃指标受气体运移影响最显著。不同相态的烃类在岩石和土壤中赋存机理不同, 受到影响因素不同, 能从不同侧面反映油气微渗漏特征。上述实验结果有助于加深对油气化探不同类型轻烃指标的认识, 更好地解释地球化学异常的地质意义。

关键词: 微渗漏轻烃; 赋存机理; 模拟实验; 气体运移; 油气化探

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Simulation of microseepage of light hydrocarbon of different occurrence states in strata above reservoirs

Wang Guojian¹, Tang Junhong², Tang Yuping¹, Li Xingqiang¹, Li Jipeng¹, Yang Jun¹, Huang Xin¹

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. College of Environmental Engineering and Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: Several geochemical methods to analyze light hydrocarbons in subsurface rock and soil microseeping from hydrocarbon reservoirs were set up. The hydrocarbons included adsorbed and thermally-released hydrocarbon, head space gas, and free gas, etc., but the static data analyzed through these methods could not accurately describe the occurrence states and features of microseeping hydrocarbons in the overlying strata and soil. Most past studies on the occurrence mechanism of microseeping hydrocarbons were limited to a theoretical level, and lacked the support of reliable simulation, resulting in different understandings of the application of the light hydrocarbon indexes and the independence among them, which affected the interpretation of geochemical anomalies and proper application of the methods. An experiment was conducted to simulate hydrocarbon vertical microseepage through cap rocks and overlying strata based on a simplified theoretical model of hydrocarbon microseepage. The cylinder was dissected to recover subsamples after the experiment. According to the test results of gas and rock samples, the occurrence mechanisms of free gas, head space gas, thermally-released hydrocarbon, and adsorbed hydrocarbon in the strata overlying a reservoir were studied. The results showed that the free gas indicators were best in reflecting the present features of vertical microseepage, and the adsorbed hydrocarbon indicators were not affected by gas vertical migration in the short term, whereas the thermally-released hydrocarbon indicators and the head space gas indicators were affected by gas micro-migration, with the latter being most significantly affected. Because the occurrence mechanisms and the influence factors of these hydrocarbons in rock and soil are different, the characteristics of hydrocarbon microseepage can be reflected by using these light hydrocarbon indicators from different aspects. These experiment results can help

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2017-02-15。

作者简介: 王国建(1972—), 男, 高级工程师, 从事油气地球化学勘探与石油实验地质研究。E-mail: wanggj.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373121, 41072099); 中国石化科技部项目(P10017)联合资助。

geochemical explorers deepen the understanding of different types of light hydrocarbon indicators, and to explain the geological significance of geochemical anomalies better.

Key words: microseeping light hydrocarbons; occurrence mechanism; simulation experiment; gas migration; geochemical prospecting for oil and gas

地下油气藏中的烃类能够微渗漏到地表是客观存在的事实,在该过程中,轻烃主要以吸附态(包括物理吸附和化学吸附)、游离态、水溶态存在,到达地表后还有一部分被氧化成为衍生物^[1-4]。地表油气化探所寻找的,是可以利用化学方法识别的地表或近地表的油气微渗漏烃类以及由这些烃类产生的变化,它们都是下伏油气藏分布的线索。针对油气藏的微渗漏烃类在岩石和土壤中的赋存状态,现阶段都已经建立起相应的分析方法^[5]。酸解烃是能被盐酸和水的质量比为 1:6 的混合溶液分解的土样、岩屑(心)中释放出来的 C_1-C_7 的烃类物质,被认为主要是碳酸盐矿物晶格中化学吸附态的烃类^[6-9]。热释烃是被沉积物颗粒吸附或包裹、能在 100~220 °C(根据不同地区前期试验确定)和真空条件下释放出来的烃类物质(通常为 C_1-C_5),被认为主要是硅酸盐矿物笼状结构中化学吸附态的烃类^[10-11]。顶空气轻烃是密封容器中液(固)体上方空间 C_1-C_4 气态烃及 C_5-C_7 在顶空间有显著蒸气压的分子摩尔质量较轻的烃类,被认为是介质颗粒表面物理吸附态的烃类和少部分介质孔隙中的游离态烃类^[12-13]。游离烃是以游离态形式存在于土介质或岩屑空隙中的烃类物质(通常为 C_1-C_5),是介质颗粒空隙中的游离态烃类。溶解烃是溶解在各种水中的、经真空和 (60 ± 2) °C 恒温加热可释放出来的烃类物质(通常为 C_1-C_5),被认为是地层介质颗粒空隙水中的溶解态烃类。上述各种赋存状态的烃类的分析方法虽已建立,但分析的静态数据不能准确描述微渗漏烃类在上覆地层和土壤介质中的赋存状态及特征。除了游离态和溶解烃类外,沉积岩和土壤对烃类的吸附实质上是固体对气体的吸附^[6]。对于轻烃吸附机理虽然有相关研究^[6,14-16],取得了一些认识,但是仅仅限于理论层面,一直缺乏可靠的模拟实验结果支持,导致化探工作者对上述各类轻烃指标在应用上存在不同认识,以及对指标具有独立性存在质疑,从而影响了方法的合理应用和化探异常的解释。

针对上述问题,以烃类微渗漏的简化理论模型为基础,开展烃类通过盖层及上覆地层垂向微渗漏模拟实验,对实验后的模拟柱体进行解剖,根据不同类别样品(气、岩)的分析测试结果,对游离烃、

顶空气、热释烃、酸解烃方法的烃类在地层中的赋存或吸附机理进行了初步研究。

1 实验方法

1.1 物理模型

研究主要考虑地层中的烃类微渗漏及其赋存状态,所以将烃类垂向微渗漏理论模型^[17-19]简化为只考虑油气藏、上覆地层、在温压条件下的烃类微渗漏过程。根据简化的理论模型(图 1),建立了相应的物理模型(图 2),这是一个长 50 cm、宽 50 cm、高 60 m 的箱状模型,地层介质用水泥和石英砂按照一定的比例混合浇筑,物性接近于地质条件下天然气 V 类盖层^[20];底部和四周均密封,顶部开放;底部为温控,可以模拟温度场;供水系统类似于油气藏底水;底部设有一个点气源,天然气由此注入,模拟油气藏烃类微渗漏,气源组分和组分含量参照我国主要含油气盆地的气藏的湿气成分^[21]配制, CH_4 89%, C_2H_6 4.4%, C_3H_8 2.3%, $i-C_4H_{10}$ 0.66%, $n-C_4H_{10}$ 1.04%, N_2 2.4%;气源上方有 5 列检测点,实验过程中可以检测其中的微渗漏烃类气体浓度。

1.2 实验条件

模拟实验室内温度控制在 22 °C,底部控温 40 °C,相当于 1 000 m 左右的地温,以模拟地层自下往上的温度梯度;气源压力类似于油气藏所受的总驱动力,根据不超过模拟地层突破压力的原则,设定为 0.2 MPa;底部水压控制为 0.2 MPa。共进行了 120 d 的气体充注实验,直至烃类气体浓度达

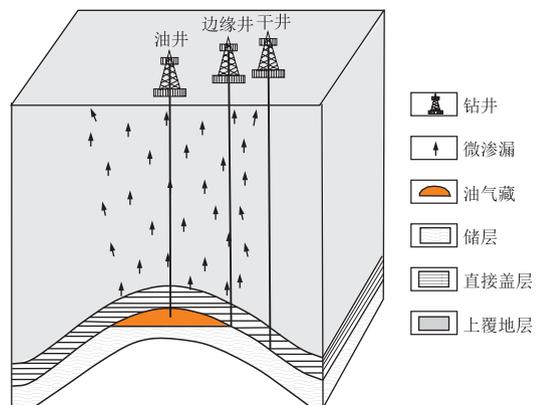


图 1 简化的烃类垂向微渗漏理论模型

Fig.1 A simplified theoretical model of vertical hydrocarbon microseepage

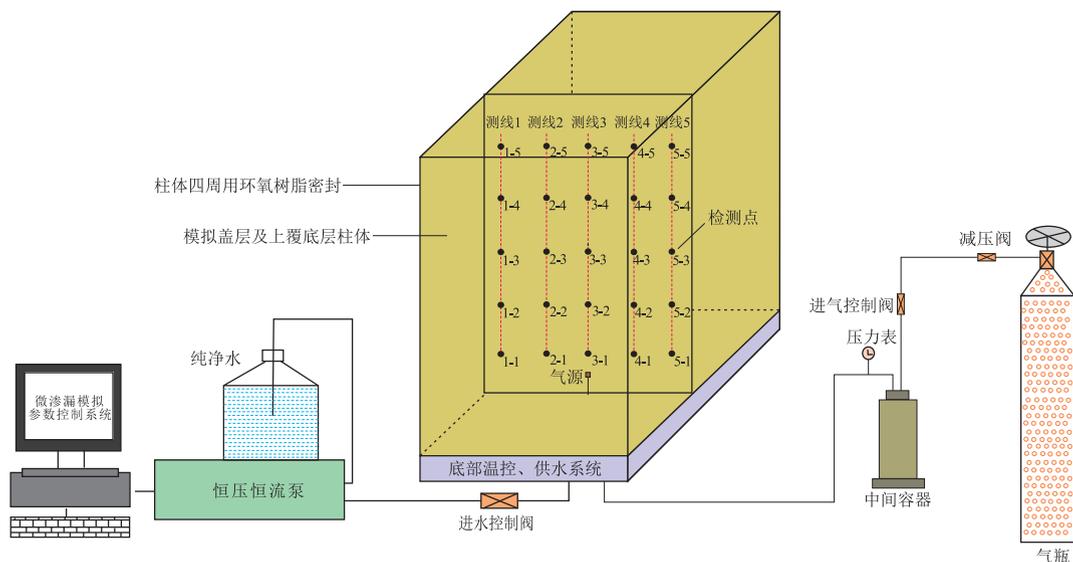


图 2 建立的烃类垂向微渗漏物理模型

Fig.2 An experimental physical model of vertical hydrocarbon micro seepage

到平衡。用色谱进针从 25 个检测点的取样口(检测点与取样口之间由毛细管线连结)抽取 80 μL 气体进色谱分析。微渗漏气体分析依据国家标准“GB/T 29173—2012 油气地球化学勘探试样测定方法”第九部分^[5],使用 PE-AutoSystemXL(FID/TCD)气相色谱仪测定模拟实验微渗漏烃类气体。色谱柱使用长 50 m、内径 0.53 mm 的 Al₂O₃ 色谱柱。标准气从大连特种气体公司购买。使用氢火焰离子化检测器检测甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷和不饱和烃。

2 实验结果及讨论

2.1 模拟地层中垂向测线游离烃特征

模拟地层中 5 条垂向测线、25 个样点的分布情况(图 2)。图 3 为 5 条垂向测线甲烷浓度垂向分布特征。自上而下,可以看到 2 号、3 号、4 号垂向测线甲烷浓度呈明显正向梯度特征;远离气源的 1 号、5 号线,则无明显规律。依据相似性原理(图 1,2),气源类似于油气藏,气源上覆为物性接近于 IV-V 类天然气盖层^[17]的模拟地层介质,模拟地层中

的 5 条垂向测线类似于地质条件下的 5 口钻井,其中正中间的 3 号线为气源正上方,类似于油气井,两侧的 2 号、4 号线类似于边缘井,边部的 1 号、5 号线类似于干井。实验后期垂向 5 条测线游离烃甲烷浓度自上而下,其中 3 号、2 号、4 号线甲烷浓度逐渐呈现明显的正向梯度特征,这 3 条垂向测线烃类运移具有类似于地质条件下油气藏上方和油水界面钻井地层中烃类地球化学特征;而边部 1 号、5 号线远离气源,类似于地质条件下干井地层中烃类的特征,含量相对较低,不存在正向梯度。模拟实验结果与地质条件下的微渗漏特征较为吻合^[22-25]。

微渗漏甲烷相对于乙烷分子半径小,运移速率相对较快,另外,沉积地层对乙烷具有较强的吸附能力,因此代表轻重分异指标甲烷/乙烷(C₁/C₂)通常用来表征烃类垂向微渗漏的色层效应。图 4 是模拟实验后期模拟地层中 5 条垂向测线微渗漏游离烃甲烷/乙烷的特征,可以看到,气源正上方的 3 号测线,自下而上,呈明显的增大趋势,显示了较好的色层效应现象。气源正上方测线附近的 2 号和 4 号测线,C₁/C₂也呈明显的增大趋势,但有个别

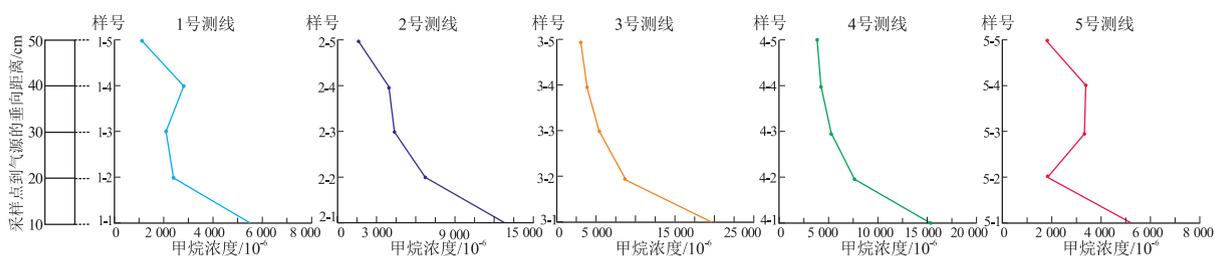


图 3 模拟地层中 5 条垂向测线微渗漏甲烷浓度垂向分布特征

Fig.3 Vertical variation of methane concentrations on five vertical detection lines in simulated rock strata

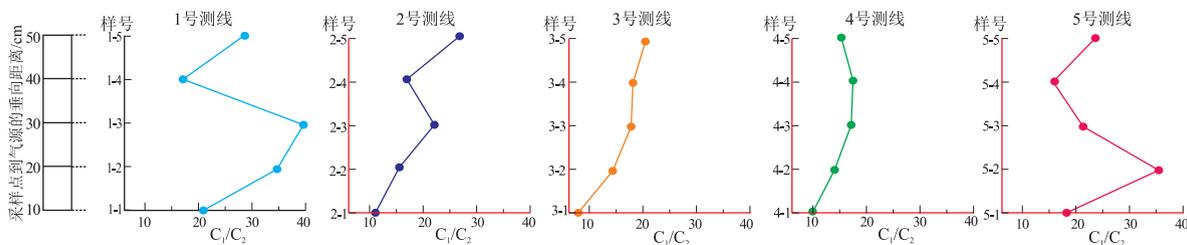


图 4 模拟地层中 5 条垂向测线微渗漏甲烷/乙烷垂向分布特征

Fig.4 Vertical variation of the ratio of C_1/C_2 on five vertical detection lines in simulated rock strata

点稍有偏离。而远离气源正上方的 1 号和 5 号测线, C_1/C_2 值既有增大又有减小, 无明显规律, 说明远离气源的垂向测线的烃类无法形成明显色层效应现象。前已述及, 5 条测线类似于地质条件下的 5 口钻井, 3 号线类似于油气井, 2 号和 4 号线类似于边缘井, 1 号和 5 号线类似于干井。模拟实验取得的认识是具有实际应用意义的, 即在现场钻井过程中, 利用 C_1/C_2 在地层剖面上的特征可提前预测下伏油气藏的存在, 为钻井取心提供依据或者用来评价探井的含油气性。

2.2 模拟地层热释烃、酸解烃、顶空轻烃特征

美国地质学家 Matthews M D 在 1994 年加拿大温哥华召开的 Hedberg 研讨会上曾这样说: “运移就象爱因斯坦的手表, 可以进行有关它的观测, 但打开这个系统是不允许的, 只能将它的假设和观测结果相统一”^[26]。为了研究天然气运移对不同赋存态轻烃指标的影响, 在模拟实验完成后, 打开“模拟系统”, 对其模拟柱体进行解剖取样。气源正上方的 3 号测线和远离气源的 5 号测线各钻取了 5 个样品(图 5)。

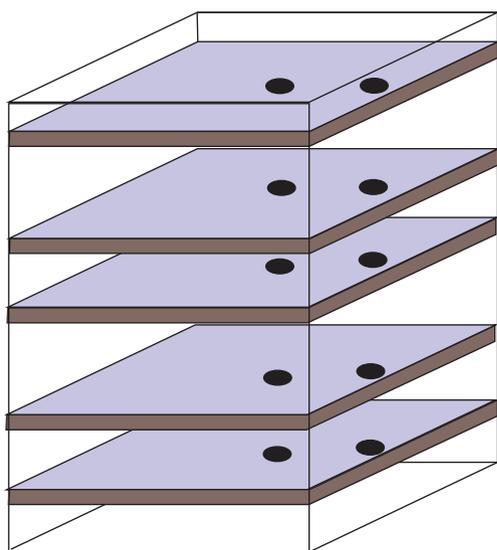


图 5 模拟实验结束后模拟柱钻孔取样位置

Fig.5 Borehole sampling sites in simulated rock strata after experiment

在模拟实验开始前, 测定了所用模拟柱材料背景热释烃, 甲烷为 $8.01 \mu\text{L}/\text{kg}$, 有少量乙烷和丙烷 (C_2H_6 $0.12 \mu\text{L}/\text{kg}$, C_3H_8 $0.09 \mu\text{L}/\text{kg}$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 和 $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ 未检出)。模拟实验结束后, 所钻取的气源正上方的 3 号测线样品热释烃分析结果(表 1)显示, 甲烷有少量增加, 乙烷以上烃类增幅较大, 并且组分也增加了, 有丁烷存在, 而丁烷在模拟柱材料背景中是没有检测出来的, 说明热释烃指标短期内受气体运移的影响。而远离气源的 5 号测线同样受到天然气运移的影响, 只不过增幅比 3 号测线小。中部垂向测线热释烃乙烷以上组分浓度明显大于边部, 说明烃类运移以垂向为主。

同样在模拟实验未开始时, 测定了所用模拟柱材料的背景酸解烃, 甲烷为 $69.47 \mu\text{L}/\text{kg}$, 有少量乙烷—丁烷 (C_2H_6 $5.98 \mu\text{L}/\text{kg}$, C_3H_8 $3.72 \mu\text{L}/\text{kg}$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ $0.66 \mu\text{L}/\text{kg}$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ $1.52 \mu\text{L}/\text{kg}$)。模拟实验结束后, 所钻取的气源正上方的 3 号测线酸解烃分析结果(表 2)显示, 样品的甲烷平均含量反而略有减少, 这可能是由于背景样和模拟实验样浇铸时的搅动方式不同造成的, 一个是手动搅拌, 一个是搅拌机搅拌, 造成样品不均匀。乙烷以上烃类含量也略低于或接近于模拟柱材料背景酸解烃。边部垂向的 3 号测线样品也体现了同样的特征。但总的说来, 钻取的模拟实验后的样品酸解烃不受气体运移的影响。酸解烃指标处于稳定的化学吸附态, 短期的气体运移对其不构成影响, 也就是说, 酸解烃需

表 1 通气实验结束后模拟柱解剖样品热释烃含量 $\mu\text{L}/\text{kg}$

Table 1 Contents of thermally-released hydrocarbon in simulated rock strata after gas injection

组分	取样部位	
	中部垂向	边部垂向
CH_4	7.46~14.31/10.92	3.26~6.65/5.61
C_2H_6	0.31~2.27/0.84	0.16~0.28/0.21
C_3H_8	0.25~3.15/1.50	0.18~7.15/2.89
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.10~0.97/0.48	0.03~0.09/0.06
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.18~0.59/0.33	0.04~0.53/0.19

注:表中分式含义为:最小值~最大值/平均值,下同。

表2 通气实验结束后模拟柱
解剖样品酸解烃含量 $\mu\text{L}/\text{kg}$

Table 2 Contents of adsorbed hydrocarbon
of simulated rock strata after gas injection

组分	取样部位	
	中部垂向	边部垂向
CH ₄	18.3~74.3/44.0	44.8~69.4/53.9
C ₂ H ₆	1.31~7.00/3.82	3.54~5.77/4.35
C ₃ H ₈	0.71~3.23/1.94	1.80~2.59/2.23
i-C ₄ H ₁₀	0.10~1.06/0.41	0.20~0.36/0.27
n-C ₄ H ₁₀	0~1.11/0.41	0.59~1.15/0.94

表3 模拟柱材料样品背景顶空轻烃含量 10^{-6}

Table 3 Contents of background head space
gas in simulated rock strata

样号	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀
DK1	4.37	0.11	-	-	-
DK2	13.32	0.50	0.31	-	-

表4 通气实验结束后模拟柱
解剖样品顶空轻烃含量 10^{-6}

Table 4 Contents of head space gas of simulated
rock strata after gas injection

组分	取样部位	
	中部垂向	边部垂向
CH ₄	63.82~849.42/376.80	19.04~330.13/129.24
C ₂ H ₆	3.08~34.99/15.80	3.03~18.50/8.27
C ₃ H ₈	1.31~11.84/5.92	1.43~9.34/4.71
i-C ₄ H ₁₀	0.4~2.58/1.16	0~2.20/1.20
n-C ₄ H ₁₀	0~5.12/1.85	0~5.12/2.28

要经过漫长的地质时间才能形成,是反映古微渗漏的“化石”指标。

模拟实验未开始时,测定了所用模拟柱材料2个样品背景顶空轻烃(表3),甲烷浓度最高为 13.32×10^{-6} ,有少量乙烷和丙烷,浓度均小于 1×10^{-6} 。模拟实验结束后,所钻取的气源正上方的3号测线顶空轻烃分析结果(表4)显示,通气实验结束后,模拟柱体样品顶空轻烃组分较全(C₁—C₄),且含量显著增大,远大于通气实验前同种样品的顶空气轻烃浓度,说明顶空气指标受气体运移影响显著,为介质的物理吸附所致。因烃类侧向运移的边界效应,边部垂向5号测线烃类含量相对于模拟柱材料背景烃也有较明显的升高。

3 结论

(1)通过模拟实验证实了在油气藏上方垂向上游离烃浓度具有正向梯度特征,C₁/C₂具有反向梯度特征(色层效应),而远离油气藏的位置则反

之。在钻井过程中,利用这些指标特征可提前预测下伏油气藏的存在。

(2)地表化探的热释烃方法在机理上尚不完全清楚,是化石指标还是活跃指标一直存在争议。首次通过模拟实验发现,热释烃指标短期内受烃类运移叠加作用的影响,处于化学—物理吸附态,因此应划入反映活跃烃类微渗漏的指标范围,在方法上需要进一步改进。

(3)模拟实验验证了热释烃、顶空气指标在短时间内受气体运移的影响,为反映现代补偿性活跃微渗漏方法,而酸解烃指标则处于稳定的化学吸附态,短期的气体运移对其不构成影响,是反映古微渗漏的“化石”指标。不同相态的烃类因为赋存机理不同,以及受到影响因素不同,对于反映油气微渗漏具有相对独立的地质意义。实验结果有助于加深对油气化探不同类型轻烃指标的认识,更好地解释地球化学异常的地质意义。

参考文献:

[1] 王国建,汤玉平,陈伟钧,等.一种物理吸附烃解吸密封罐及其化探应用效果[J].天然气地球科学,2013,24(4):768-773.
Wang Guojian, Tang Yuping, Chen Weijun, et al. A seal jar for desorbing physical-adsorption hydrocarbons and its application effect[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 768-773.

[2] 黄臣军,王国建,卢丽,等.烃气在泥岩和砂岩中的微渗漏特征及油气勘探意义[J].石油实验地质,2013,35(4):445-448.
Huang Chenjun, Wang Guojian, Lu Li, et al. Micro-seepage of hydrocarbon gas in mudstone and sandstone and its significance for oil and gas exploration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 445-448.

[3] 程同锦,李广之,陈银节.吸附烃提取新技术及其在地表油气化探中的应用[J].石油实验地质,2007,29(2):116-119.
Cheng Tongjin, Li Guangzhi, Chen Yinjie. New extraction technique of adsorption hydrocarbon gas and its role in surface oil and gas geochemical exploration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 116-119.

[4] 李广之,程同锦,汤玉平,等.地表土壤中物理吸附轻烃的石油地质意义[J].石油与天然气地质,2006,27(5):689-695.
Li Guangzhi, Cheng Tongjin, Tang Yuping, et al. Petroleum geological significance of physical adsorption of hydrocarbon in surface soil[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 689-695.

[5] 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所.GB/T 29173-2012 油气地球化学勘探试样测定方法[S].北京:中国标准出版社,2013:4-10.
Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC. GB/T 29173-2012 Determination method for samples of geochemical exploration for oil and gas[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2013: 4-10.

[6] 李广之,胡斌,袁子艳,等.轻烃的吸附与解吸模型[J].天然气地球科学,2006,17(4):552-558.

- Li Guangzhi, Hu Bin, Yuan Ziyang, et al. The model of light hydrocarbons adsorption & desorption [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2006, 17(4): 552-558.
- [7] 缪九军, 荣发准, 李广之, 等. 酸解烃技术在油气在油气勘探中的应用[J]. *物探与化探*, 2005, 29(3): 209-212.
- Miao Jiujun, Rong Fazhun, Li Guangzhi, et al. The application of hydrocarbon acidolysis technique to oil and gas exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(3): 209-212.
- [8] 杨振鸿, 鲍征宇, 李方林. 若尔盖地区酸解烃与热释烃影响因素研究[J]. *物探与化探计算技术*, 2007, 29(1): 48-53.
- Yang Zhenhong, Bao Zhengyu, Li Fanglin. Study of influence factors between acidolysis hydrocarbon and pyrolysis-desorbed hydrocarbon in Ruergai area [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 29(1): 48-53.
- [9] 杨俊, 沈忠民, 王国建, 等. 井中岩屑碳酸盐含量与酸解烃关系新认识[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 92-96.
- Yang Jun, Shen Zhongmin, Wang Guojian, et al. A new viewpoint about the relationship between carbonate content and acidolysis hydrocarbon [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(1): 92-96.
- [10] 王周秀, 徐成法, 姚秀斌. 化探热释烃方法机理及影响因素[J]. *物探与化探*, 2003, 27(1): 63-68.
- Wang Zhouxiu, Xu Chengfa, Yao Xiubin. The mechanism of the geochemical thermally-released hydrocarbon method and its affecting factors [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(1): 63-68.
- [11] 冯晓双, 李贵友. 热释烃技术在油气化探中的应用[J]. *石油实验地质*, 1999, 21(1): 91-94.
- Feng Xiaoshuang, Li Guiyou. Application of the pyrolysis desorbed hydrocarbon technology to the geochemical exploration of gas and oil [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1992, 21(1): 91-94.
- [12] 缪九军, 李广之, 吴向华, 等. 静态顶空气分析技术在油气化探中的应用[J]. *物探与化探*, 2003, 27(4): 255-258.
- Miao Jiujun, Li Guangzhi, Wu Xianghua, et al. The application of the static head space gas analytical technique to oil-gas geochemical exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(4): 255-258.
- [13] 李广之, 袁子艳, 胡斌. 顶空气技术在天然气化探中的应用[J]. *中国石油勘探*, 2007, 12(6): 47-50.
- Li Guangzhi, Yuan Ziyang, Hu Bin. Application of head space gas technology to geochemical exploration [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 12(6): 47-50.
- [14] 李广之. 轻烃地球化学场的形成和特征[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 66-69.
- Li Guangzhi. Formation and characteristics of light hydrocarbon geochemical fields [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(1): 66-69.
- [15] 杜建芬, 李士伦, 尹永飞, 等. 烃类气体在多孔介质中的吸附研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(9): 111-112.
- Du Jianfen, Li Shilun, Yin Yongfei, et al. Study on adsorption of gas hydrocarbon in porous media [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 111-112.
- [16] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(6): 842-849.
- Jiang Qigui, Li Maowen, Qian Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 842-849.
- [17] 程同锦, 王国建, 范明, 等. 油气藏烃类垂向微渗漏的实验模拟[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 522-527.
- Cheng Tongjin, Wang Guojian, Fan Ming, et al. Experimental simulation of the vertical migration of hydrocarbons from the underlying reservoir [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(5): 522-527.
- [18] Wang Guojian, Cheng Tongjin, Fan Ming, et al. Laboratory simulation of vertical hydrocarbon microseepage [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2011, 85(1): 223-232.
- [19] 程同锦, 王者顺, 吴学明, 等. 烃类运移的近地表显示与地球化学勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 82-121.
- Cheng Tongjin, Wang Zheshun, Wu Xueming, et al. Surface expression of hydrocarbon migration and geochemical exploration [M]. Beijing: Oil Industry Press, 1999: 101-121.
- [20] 游秀玲. 天然气盖层评价方法探讨[J]. *石油与天然气地质*, 1991, 12(3): 261-275.
- You Xiuling. Study on assessment method of caprocks in natural gas pools [J]. *Oil & Gas Geology*, 1991, 12(3): 261-275.
- [21] 周兴熙. 库车油气系统油气藏相态分布及其控制因素 [J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(3): 205-213.
- Zhou Xingxi. The distribution and control factors of phase state of oil and gas pools in Kuqa petroleum system [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(3): 205-213.
- [22] 汤玉平, 刘运黎, 赵跃伟, 等. 四川盆地烃类垂向微运移及其地球化学效应 [J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 508-511.
- Tang Yuping, Liu Yunli, Zhao Yaowei, et al. Hydrocarbon vertical micro-migration and its geochemical effects in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(5): 508-511.
- [23] 束青林, 郭迎春, 孙志刚, 等. 丛国林特低渗透油藏渗流机理研究及应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(5): 58-64.
- Shu Qinglin, Guo Yingchun, Sun Zhigang, et al. Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability oil reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 58-64.
- [24] 封钦亚, 许艺博, 张欣, 等. 页岩气藏三重介质模型压力动态分析及其应用 [J]. *断块油气田*, 2015, 22(5): 600-605.
- Feng Qinya, Xu Yibo, Zhang Xin, et al. Pressure dynamic analysis and application of triple medium model for shale gas reservoir [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(5): 600-605.
- [25] Klusman RW. Rate of transport from the reservoir to the surface [M]//Klusman R W, ed. *Soil gas and related methods for natural resource exploration*. Chichester: Wiley, 1993: 18-21.
- [26] Matthews M D. Migration: A view from the top [M]//Schumacher D, Abrams M A, eds. *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. Tulsa, OK: AAPG, 1996: 139-155.