

油气微渗漏中的随水迁移机制

王国建¹, 唐俊红², 范明¹, 卢丽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 214151; 2. 杭州电子科技大学 环境工程与环境科学研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 油气藏中的烃类垂向微渗漏机制一直是油气化探基础理论研究中的焦点, 对近地表油气化探异常主要成因机制不同的学者提出不同的观点, 存在很大争议。通过自行设计模拟实验装置测量常温高压的水渗透人造岩芯速率, 根据实验结果以及前人的数值模拟结果、水化学方法勘探实例, 认为除非地下具有很好的通道(大的裂隙、断层), 否则微渗漏异常不可能通过盆地深部压实水和天然补给水穿过油气藏垂向流动而产生, 即随水迁移机制不是油气化探异常的主要成因机制, 为油气化探异常成因机制的研究提供了一个实验证据。

关键词: 油气微渗漏; 随水迁移机制; 模拟实验; 数值模拟; 水化学勘探

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2010)03-0294-04

油气藏中的烃类经过几千米的地层垂向微渗漏到地表是一个复杂的地质—地球化学(物理)过程, 其中烃类上升至地表的迁移机制, 从油气化探创立至今一直是研究和争论的焦点之一。因为这一问题太复杂, 甚至有人提出, 认识机制并不重要, 关键是有烃类运移至地表。不过, 多数学者包括提出者本人后来也认为, 弄清上升机制不但使人更加相信地表化探, 而且能提高它的应用效果^[1]。烃类微渗漏的机制目前文献的提法多种多样, 分类也各不相同^[2-8], 可以归纳为以下几种形式: 扩散、渗逸、随水对流、渗透、胶体气泡浮升、连续气相流动。对地表化探异常的形成, 不同的学者强调不同的机制, 尚存在争议。其中溶解于水中的轻烃随水垂向运移也被认为是烃类垂向微渗漏的一种可能机制^[7-9]。以俄罗斯学者涅斯捷洛夫为代表的学者, 认为盖层不能阻挡水、烷烃、苯、环烷及具杂环结构的化合物的微观运移^[10]。烃类在水中的溶解度随温度升高(或深度增大)而增高。烃类溶于水呈水溶液状态运移, 早在1903年G. I. Admas就指出, 它最大优越性是流动的水只存在水分子之间的内摩擦力而不存在毛细管阻力^[11]。因此, 有学者认为当驱动力存在时, 水溶液可以沿细小的孔隙喉道运移, 这对于游离烃相来说是很难办到的。辛忠斌等在分析了烃类运移的分子相态、胶束状态和油气乳液相态后认为, 上述诸相态是油气微运移的非主要相态, 含油气水

相是油气发生微运移最普遍和优先起作用的相态, 提出了“含油气水相运移机制”^[12]; Toth等人建立的石油运移聚集的区域地下水运动模式, 为近地表化探异常的形成提供了水文地质方面的依据, 他是把地下水的运动看成重力穿层来对待的(即不存隔水层问题)^[7]。

上述观点尚属推论, 如果水溶相烃类能够通过盖层岩石的孔隙垂向运移, 对地表化探异常有贡献的话, 那么它的速率是多少, 是否为形成近地表化探异常的主要成因机制尚存争议。笔者通过模拟水渗透盖层介质的速率实验, 结合数值模拟和勘探实例对烃类随水沿孔隙迁移的机制做了初步探讨。

1 水渗透模拟盖层介质实验

1.1 模拟实验过程

为了解常温高压下水渗透盖层介质的速率, 估算随水迁移机制的作用, 自行配制一个人造岩芯作为模拟的盖层介质, 经测试其孔隙率为21.37%, 空气渗透率 $0.175 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具高孔、低渗特征。对其进行微孔结构分析, 结果为: 比表面积— $7.02 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔隙流体能— 0.49 J/g , 突破压力— 2.15 MPa , 突破时间— 0.81 a/m , 中值半径— 28.933 nm , 孔隙集中范围— $(1 \sim 63) \text{ nm}$, 孔隙集中含量— 83.34% , 气柱高度— 208.84 m , 遮盖系数— 417.68% 。在盖层评价中, 了解盖层岩石微孔结构是评价岩石封闭能

力的先决条件。根据游秀玲等结合孔隙度提出的我国含气盆地泥岩盖层评价表^[13],本实验所用的人造岩芯属 V 类盖层范围。

实验步骤:将人造岩芯抽真空饱和水后,用千分卡尺测定其直径为 2.53 cm,长度为 1.71 cm,计算截面积为 5.02 cm²。

设计组装测量常温高压下水渗透模拟盖层介质速率的实验装置如图 1 所示,将人造岩芯夹于岩芯夹持器中,图中压力泵的作用是以 10 MPa 的高压将水注入人造岩芯前,作为岩芯前压力,岩芯后压力则为大气压。压力表的作用是读取岩芯前的水压;样品夹持器的作用是固定人造岩芯样品;岩芯后为一管线通入装有少量水和煤油的量筒,用以测量随时间推移水渗透过人造岩芯的量,其中煤油的作用是防止渗透过岩芯的水进入量筒后蒸发。

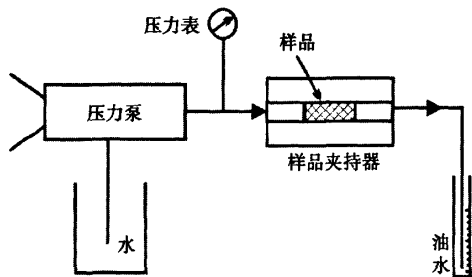


图 1 水渗透模拟盖层介质速率实验装置示意

相隔一定时间读数并记录(表 1),计算求得通过人造岩芯水量的平均值;再用达西定律公式,算得水渗透过人造岩芯的达西流速为 $Q \approx 3.47 \times 10^{-6}$ cm³/s,则水渗透人造岩芯的平均线速度 $V_w = Q/A = (3.47 \times 10^{-6})/5.02 \approx 6.91 \times 10^{-7}$ cm/s ≈ 0.0597 cm/d ≈ 21.79 cm/a。

表 1 水渗透人造岩芯实验数据记录

序号	1	2	3	4	5
日期	2007.2.5	2007.2.5	2007.2.6	2007.2.6	2007.2.7
时间	08:10	14:20	08:10	14:20	08:10
量筒水量/ml	1.7	1.9	2.1	2.2	2.3

1.2 模拟实验结果讨论

通过上述模拟实验可以看出,岩芯前水压力为高压 10 MPa,相当于地下 1 000 m 左右的地层压力,水在 10 MPa 的压力差下,在本次所采用的人造岩芯(模拟盖层)介质中一年仅能垂向渗流 21.79 cm,而实际地下油气藏的大多数泥岩盖层的物性参数要远小于本次实验的人造岩芯(V 类盖层水平),所以水通过泥岩盖层的垂向渗流时间几乎以地质时间计,那么溶解于水中的烃类随水迁移同样要经历地质时间。这与油气藏开采后数月内因压力快速下降、化

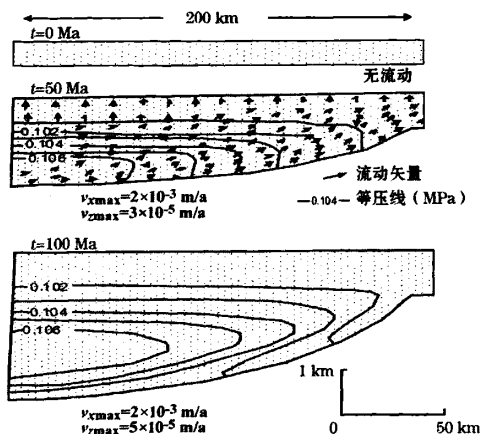
探异常由显著到消失,当应用注水方法重新加压之后,异常强度又有所增加的实测结果^[14]相违背,即异常快速形成和消失与环晕异常的事实由随水迁移方式难以很好解释。

付广、薛永超等研究了油气通过泥岩盖层渗滤散失的机理。根据泥岩盖层较高的排替压力和特定条件下具有异常孔隙流体压力,论证了油气不能通过泥岩盖层的孔隙发生渗滤散失,油气只能通过泥岩盖层的薄弱处——断层或裂缝而发生渗滤散失^[15]。虽然 Paul, H. Jones 认为深层水的排泄是石油和天然气垂向运移的一种有效机制,并以墨西哥湾北部盆地为例建立了流体运移模式^[9],但是同时认为,呈液态溶液存在的烃,在温度、压力等因素的控制下,以水为载体沿断层和裂隙发生上升流动,形成近地表化探异常;烃类在水中的溶解度随温度升高而迅速增大,为深部水溶解较多的烃类创造了条件,当温度、压力及盐度等外界条件在垂向上发生变化或由于化学势的驱动,深层水或溶解于水中的烃类沿断裂、裂隙和孔隙网络向上垂向迁移。这两个学者都强调了必须有优势运移通道(裂缝、断层等)。孔隙网络则主要指砂岩输导层,如果对于泥岩盖层而言,通过本次模拟实验可以看出,地下水沿泥岩盖层孔隙网络的运移即使可以发生,速度也是极其缓慢的(到达地表将以地质时间计),且难以在地表检测出其携带烃类的有效量。

2 数值模拟

对于油气藏中的烃类随水向地表迁移,国外学者也进行了数值模拟研究。与上述模拟实验结果具有一定的吻合性。

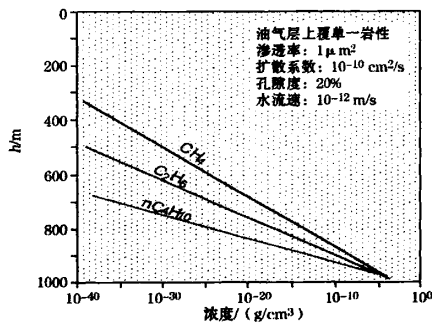
图 2 是 Toth 转引自 Bethke 的关于在一个沉降盆地中的水流方向,认为深部水流在缺少断层的情况下,由于可渗透地层与不易渗透地层的互层,水流主要是侧向的。当垂向与侧向的渗透率比值大于垂向与侧向的距离比时,则垂向流变为重要了^[7]。可以注意到重要的一点是,图中显示的水平速率最大值为 2×10^{-3} m/a,而水的垂向速率最大值为 5×10^{-5} m/a。这些低的流速揭示了由于水的向上运移,地温梯度不会增加,另一方面可以看到地下水的水平流速是相当缓慢的,不会对烃类垂向微渗漏形成的化探异常造成多大偏移,异常主体不会脱离油气藏范围。Saeed 在前人数值模拟研究的基础上考虑上覆岩层的孔隙度和渗透率重新修改了数学模型^[7],上覆岩层可以是单一岩性,也可以是不同物性的多层岩性。



水流速 v_x 、 v_z 与沉降地层介质有关(据美国地球物理联合会)

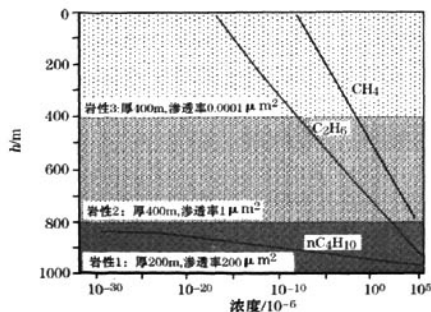
图2 模拟计算的盆地中穿层的压实驱动水流

图3是数值模拟深度1 000 m油气层的甲烷、乙烷、正丁烷经过1 Ma从深部随水向地表运移的浓度变化,可以看到在短时期内,可检测出的轻烃气体不会到达地表。将数学模型中水的流速增加到 10^{-9} m/s,时间为50 Ma,上覆地层为三层不同厚度和渗透率的岩性,仍然不能导致可观浓度的烃类到达地表(图4)。



(据 Saeed, 1991)

图3 数值模拟水溶相烃类运移1 Ma 浓度变化



扩散系数 10^{-10} cm^2/s ,孔隙度20%,水流速 10^{-9} m/s(据 Saeed, 1991)

图4 数值模拟水溶相烃类运移50 Ma 浓度变化

3 水化学方法勘探实例

以山东东明地区水化学测量为例,测区位于东明凹陷东南隅。东明凹陷是华北坳陷南部的新生代断陷盆地,面积约4 000 km^2 ,凹陷内部又可分为东部次凹带、西部次凹带、和中央隆起带3个次级单元。水化学测量工区位于东部次凹带内。采集样品总数188个,平均5 km^2 一个样品,分析项目:总矿化度、 U^{6+} 、溶解烃气、酚。

这4项指标的综合异常图示于图5,从图中可以明显看出,异常主要呈北东向分3排沿断裂分布,说明断裂将地下的油气信息带至地表。这种油气信息可能来源于两方面:一方面是油田水沿断裂上升流动,另一方面是由于油气藏中的烃类以气相沿断裂微渗漏,因为油气藏上方或其附近地下水的矿化度比深部水低得多,有利于溶解地下运移上来的烃气。水化学测量完成十多年后,在I1、I3、II2三个综合异常区内发现工业油流,得到了验证^[16]。近地表潜水的水化学异常与断裂的相关性已经在油气化探研究中得到广泛确认^[14,17-19]。

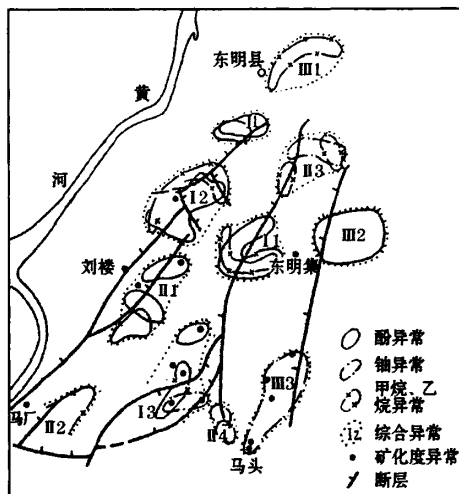


图5 东明地区水化学综合异常示意

4 结语

(1)通过常温高压的水渗透人造岩芯速率的模拟实验研究,结合数值模拟结果与勘探实例,认为烃类微渗漏异常不可能通过盆地深部压实水和补给天然水穿过油气藏垂向流动而产生,即随水垂向迁移不是地表化探异常的主要成因机制。但盆地深部压实水沿盆地中的断裂和裂隙发生明显的上升流动是没有问题的,正是在这种水中呈溶液存在的烃造成了地表异常。然而这些异常对油气藏的指示作用有

时不是直接的,要结合深部石油地质条件进行分析。

(2) 烃类随水迁移机制缺少明显的垂向运移分量,在油气藏上方难以形成明显异常,因此对于以寻找具体的或局部的油气藏为目标的油气化探普、详查来说,地下潜水可能是烃类(以气相为主)垂向微渗漏异常的捕集器,从而使得“水化学法”在勘探阶段得以成功运用。

(3) 通过模拟实验研究烃类垂向微渗漏机制,是油气化探基础理论研究的有效手段和方向。

参考文献:

- [1] 阮天健,费琪.石油天然气地球化学勘探[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
- [2] Price L C. A critical review and proposed working model of surface geochemical exploration[C]//Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas IV. Dallas: Southern Methodist University Press, 1986:245.
- [3] MacElvain R. Mechanics of gaseous ascension through a sedimentary column[C]//Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas. Dallas: Southern Methodist University Press, 1969:15.
- [4] Brown A. Evaluation of possible gas micro-seepage mechanisms[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1775.
- [5] Trost P B. Surficial geochemical expression due to molecular hydrocarbon migration[C]//The AAPG Hedberg Research Conference Vancouver. Columbia, 1993:24.
- [6] Ronald W, Klusman. Microseepage of Light Hydrocarbons as Applied to Surface Geochemistry-Theoretical Aspects[EB/OL]. <http://www.geotech.org>, 2005.
- [7] Klusman, Ronald W. Rate of transport from the reservoir to the surface, Soil gas and related methods for natural resource exploration[M]. Chichester Wiley, 1993:18.
- [8] 汤玉平,龚维琪,邓树立,等.油气化探异常类型及成因机理研究[C]//第四届全国油气化探学术会议论文集.武汉:中国地质大学出版社,1995,23.
- [9] 刘崇禧,赵克斌,余刘应,等.中国油气化探40年[M].北京:地质出版社,2001:7.
- [10] 姜洪训,刘生福,李英武,等.综合地质物化探多参数直接找油理论与方法效果[M].西安:陕西科学技术出版社,1995:16.
- [11] 汤玉平,龚维琪,邓树立,等.油气化探异常类型及成因机理研究[R].中国新星石油公司化探中心,1997.
- [12] 辛忠斌,张交东,丁丽荣,等.油气微运移的烃类相态[J].河南石油,2002,16(4):8.
- [13] 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.
- [14] 杨育斌,张金来,吴学明,等.油气地球化学勘查[M].武汉:中国地质大学出版社,1995.
- [15] 付广,薛永超,朱春玲.油气通过泥岩盖层渗滤散失机制分析[J].海相油气地质,2000,5(3-4):113.
- [16] 阮天健,费琪.石油天然气地球化学勘探[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.
- [17] 张金来,伍大俊.农安构造水化学异常及其找油意义[J].石油与天然气地质,1985,6(4):402.
- [18] 刘崇禧,孙世雄.水文地球化学找油理论与方法[M].北京:地质出版社,1988.
- [19] 李伟,赵克斌,刘崇禧.含油气盆地水文地质研究[M].北京:地质出版社,2008.

THE MECHANISM OF OIL AND GAS MIGRATION WITH WATER DURING OIL AND GAS MICROPERCOLATION

WANG Guo-jian¹, TANG Jun-hong², FAN Ming¹, LU Li¹, HUANG Xin¹

(1. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Academy of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Wuxi 214151, China; 2. Environmental Engineering and Environmental Scientific Research Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The mechanism of hydrocarbon vertical micropercolation in oil and gas accumulation has been a point at issue in the basic theoretical study of oil and gas geochemical exploration. There exists much controversy concerning the genetic mechanism of the near-surface oil and gas geochemical anomalies. Based on the measurement of water-percolating artificial core rate by the self-designed modeling experiment device under the condition of normal temperature and high pressure together with digital simulation results available as well as case studies of hydrochemical exploration, the authors hold that it is impossible to form oil and gas micropercolating anomalies via vertical migrating through deep compaction water of the basin and meteoric water and penetrating oil and gas accumulation unless there exist ideal channels such as large fissures and faults at the depth. This is to say that the mechanism of migration with water is not the major genetic mechanism of the oil and gas anomalies. The results obtained by the authors provide experimental evidence for the study of the genetic mechanism of oil and gas anomalies.

Key words: oil and gas micropercolation; mechanism of migration with water; modeling test; digital simulation; hydrochemical exploration

作者简介: 王国建(1972-),男,高级工程师,博士。1996年大学毕业于成都理工学院石油地质专业,主要从事油气地球化学及石油地质研究工作。