

烃类垂向微运移的 地球化学效应及其机理讨论

汤玉平, 刘运黎

(中国石化 石油勘探开发研究院 合肥化探研究所 安徽 合肥 230022)

摘要: 烃类垂向微运移(盖层及其上部)形成近地表烃类异常是油气化探的理论基础和应用前提。烃类垂向微运移的客观存在表明地表化探异常为“有源之水”。油气藏不同部位微运移的差异性揭示了油气化探的有效性。文中依据地表和井中地球化学成果,根据油气井中普遍存在的烃类向上趋轻的结构梯度和各指标正向运移梯度及晕源对比,揭示了烃类垂向微运移的客观存在,强调了微裂缝网络系统的重要性,对微运移机理进行了讨论,较好地解释了地表化探异常的成因机理。

关键词: 机理; 地球化学效应; 微运移; 烃类

中图分类号: TE122. 1

文献标识码: A

烃类垂向微运移(盖层及上部)形成近地表化探异常是油气运移成藏系统中的一个组成部分,是油气散失的一种表现形式,是解释油气聚集体或油气藏上方矿化蚀变和烃类化探异常的一种机理^[1-4]。

垂向微运移与聚集成藏的宏观油气运移(显运移)有所差别,也不同于通过断层向上宏渗漏并在地表形成油气苗、沥青、油气泡等的显运移。显运移是一种肉眼可见的存在形式。微运移是一种 10^{-6} ~ 10^{-12} 级的以分子或胶体微粒方式通过盖层上方微裂缝(μm)网络系统的微量至超微量级的微观运移。通常情况下,微运移是肉眼不可见的,量很微小,用现代高精度仪器才能检测出来。

烃类垂向微运移不会导致短时间内油气聚集体的破坏。但烃类垂向微运移可以形成足以检测到的与背景显著差异的可分辨化探异常。

岩石中存在网络状微裂缝系统是烃类垂向微运移的关键性因素之一。盖层对独立油相具有阻挡作用,但对于分子和胶体粒径的微运移只要适当的条件是可以畅通的。

1 烃类垂向微运移的直接证据

海区油气藏上方海面上常常见到气泡和油纹、水柱中的气缕^[5],油气层露头或深部油气沿断裂泄

漏的油气苗、沥青是显(宏观)渗漏运移的表现,可以称之为显观油气苗。油气化探检测可达超微量级(10^{-9} ~ 10^{-12})精度,这种依据油气藏上方微运移烃晕异常,可以称之为微观油气苗,也是烃类垂向微运移的证据。

地下储气库、地下煤气发生站的实验观测表明,在储气或煤气蒸馏之后,短期内即可观察到地表烃类浓度增高^[5]。如前苏联的一个地下储气库,在储气以后仅 3 个月,就发现顶部 300m 处的含水砂岩层中含气量比原先增加了 10 倍,氧化烃类的细菌浓度也明显增加。短期内地表烃浓度增高是地下烃源运移上来的表现。即地下有烃源地表有异常。

对油储层加压实验,烃含量随压力增加而增加。如美国得克萨斯州的 Hilbig 油田为了二次回收而增压后,地表烃类异常的强度就增加了。美国得克萨斯州的黑斯廷油田在开采 22 年后,压力降低,同时异常消失。

塔北吉迪克组之上均为红色地层,不具备生油能力,上部高值化探异常只能是深部烃源叠加的结果。川西地区侏罗系以上地层不具备生油能力,因此,其中高值化探异常只能是地下烃源的叠加。

油气藏上方烃类异常普遍存在,这种良好的对应关系表明了异常与油气藏的相关性。以上表明,烃类垂向微运移是客观存在的,并在地表形成可检

测到的化探异常。

2 烃类垂向运移的地球化学效应

2.1 近地表与地下油气成分的相似性

2.1.1 C₁—C₇ 组分对比

雅克拉地区土壤吸附气、游离气色谱图中 C₁—C₇ 成分、结构与本区油气藏中(S2 井)天然气 C₁—C₇ 相似(图 1),与沙 4 井泥浆气及岩屑吸附烃气结构都非常相似,具有可比性,表明是同源的。在派克斯勒图解和 Jones 结构参数概率图上都证明了近地表土壤、岩屑、油气藏天然气从结构上三者是共源的并显示了凝析油气范围,这就肯定了油气藏上部的岩屑和上方土壤烃气源于深部的油气藏。表明了烃类垂向运移的存在。

2.1.2 甲烷碳同位素

甲烷碳同位素资料(表 1)表明,从深部到地表烃气甲烷碳同位素一般在-31‰~-42‰之间,均为热解成因气,属油田伴生气至凝析气范畴,这与塔北地区天然气甲烷碳同位素资料(-33.81‰~-41.89‰)基本相符,说明烃类气体是来源于下伏油气藏。证明了烃类垂向运移的存在。

2.1.3 吸附丝(K-V 指纹)变化特征

沙 2 井储层原油与其上方土壤样吸附丝图谱基本相似(图 2),说明二者同源。C₆⁺ 异常在近地表生

物作用下很难生成,只能是地下烃类运移结果。表明垂向运移的存在。而且垂向运移的不但有轻烃(C₁—C₅),还有液态烃(C₆⁺),即液态烃也能运移至近地表并形成可检测到的异常。

2.2 钻井剖面烃类变化特征及运移效应

2.2.1 钻井剖面烃类变化特征

钻井剖面上酸解烃重烃、甲烷、湿度系数和荧光光谱强度、荧光比值(F360nm/320nm)均有随浓度增加而渐升高的趋势,即正向变化浓度梯度和运移效应的存在是烃类垂向微运移的有力证据(图 3)。同时也说明了分子量、分子半径小的轻烃(C₁)比分子量、分子半径大的重烃(C₂⁺)更易于向上微运

表 1 塔北地区钻井岩屑酸解烃甲烷碳同位素特征(δ¹³C₁/‰, PDB)

Table 1 Carbon isotopic characteristics of methane in the acidolysed hydrocarbon of debris from drilled well in North Tarim area (δ¹³C₁/‰, PDB)

地层	沙 37 井	沙 32 井	沙 18 井	沙 15 井	沙 5 井
Q	-38.23	-34.58	-37.51	—	-31.47
N ₂ k	-42.74	-37.34	-39.98	—	-32.37
N ₁ k	-47.02	—	-41.04	-39.99	-32.10
N ₁ j	-44.30	-38.14	—	-40.12	-36.47
N ₁ s	-27.73	—	-42.02	—	-36.60
E-K ₂	-50.01	-35.37	—	-41.95	-33.64
K ₁ kp	-43.12	—	-41.54	-41.45	-35.80
J	-37.99	-41.34	—	—	—
T ₃ h	-49.21	-46.98	—	-52.81	—
T ₂ a	-30.77	—	-55.58	—	—
T ₁ k	—	—	—	—	—
C	—	-41.50	-41.13	—	-44.43
O	—	—	—	-47.24	—

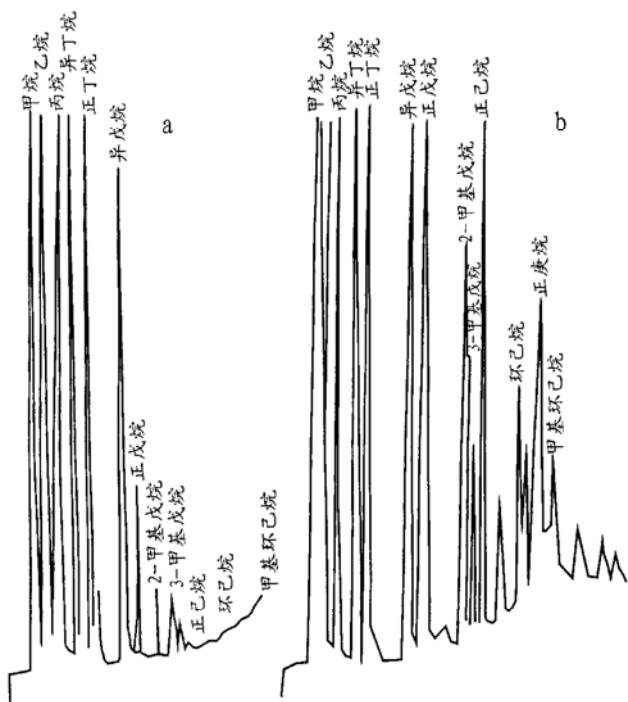


图 1 塔北土壤烃气与天然气色谱对比图

a. 土壤吸附气; b. 沙 2 井天然气

Fig. 1 GC correlation of ground gas hydrocarbon and natural gas in North Tarim area

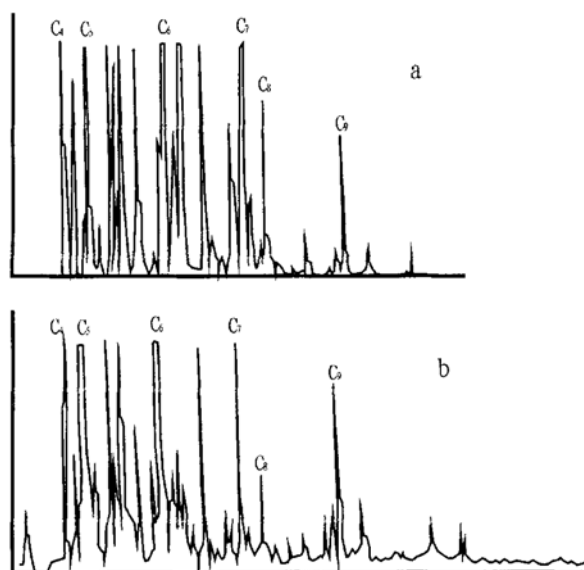


图 2 轻烃图谱特征

a. S2 油井; b. 雅克拉剖面 6 号异常点

Fig. 2 Characteristics of light hydrocarbon patterns

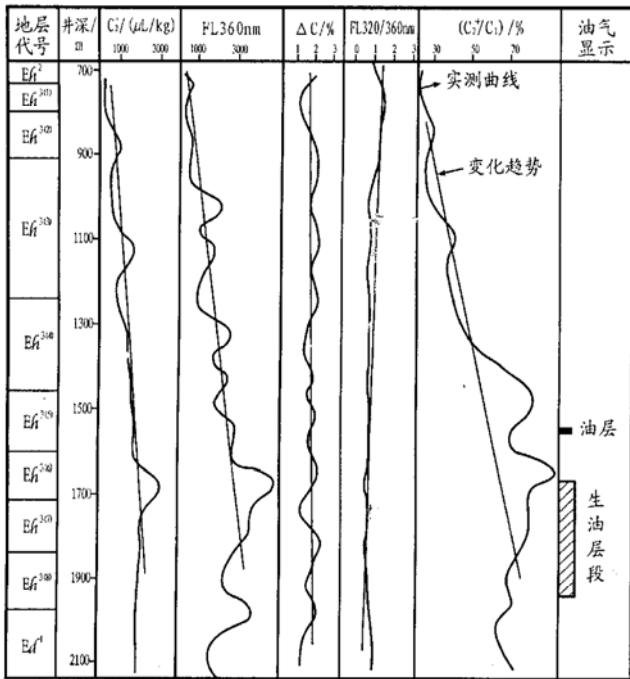


图 3 油气井岩屑化探参数垂直剖面图

Fig. 3 Vertical profile showing the geochemical exploration parameters of debris from oil and gas wells

移。这种轻烃组分优先运移、重烃组分相对滞后并在深层相对富集, 显示了烃类垂向运移的色层柱的层析效应和被差异吸附效应。

为了探索运移形迹, 进行了油井与外围干井(图 4)的井中剖面地化特征对比分析, 干井中全井未见油气显示。但具有十分良好的储层条件, 认为该井的油源被断层隔阻而运移不到该井。参数值很低, 是背景丰度的反映, 同时各指标没有油气井中普遍存在的正向变化梯度, 即可分辨的运移迹象。佐证油气井中烃类垂向运移的存在, 还表明了油气藏上方不同部位微运移存在显著差异性。

2.2.2 通过膏盐层的运移

对川中某地区巨厚膏盐层(210m 厚, 系石炭系储层的上覆盖层)的顶、底板岩屑样的轻烃指纹分析表明, 膏盐层顶、底板轻烃图谱相似, 具有可比性。三维荧光图谱(图 5)也具有相似性, 反映了二者同源, 即巨厚膏盐层并未阻止烃类微量渗漏。

依据直链烃与同碳数环烃(环烷烃与芳烃)之比值进行轻烃配对分子研究, 共选取了 6 个比值参数作为横坐标、比值大小为纵坐标做二维轻烃配对分子对比图, 发现膏盐层底板与顶板配对分子曲线极为相似, 说明了同源性即烃类可以通过巨厚膏盐层向上运移。

酸解烃甲烷碳同位素(盐上)为 -38.2‰ (PDB) 即热解成因, 表明可能与下部烃类同成因。

2.2.3 浅层烃类运移效应

为了讨论烃类运移在近地表处的效应, 进行了

不同深度烃类浓度特征的对比分析。1978 年原 101 队在东明地区进行面积性的土壤酸解烃测量, 采样深度在 25m 左右, 共采样 333 个。1991 年在同一地区进行化探详查, 采样深度 1.5m, 共选取了 358 个能基本与 1978 年点位相对应的点作对比分析。

对近地表(1.5m)和地下(25m)烃类作相关分析见表 2, 由表可见, 地下与近地表相关关系基本一致, 其相关关系的顺序大小完全相同, 表明二者同源。

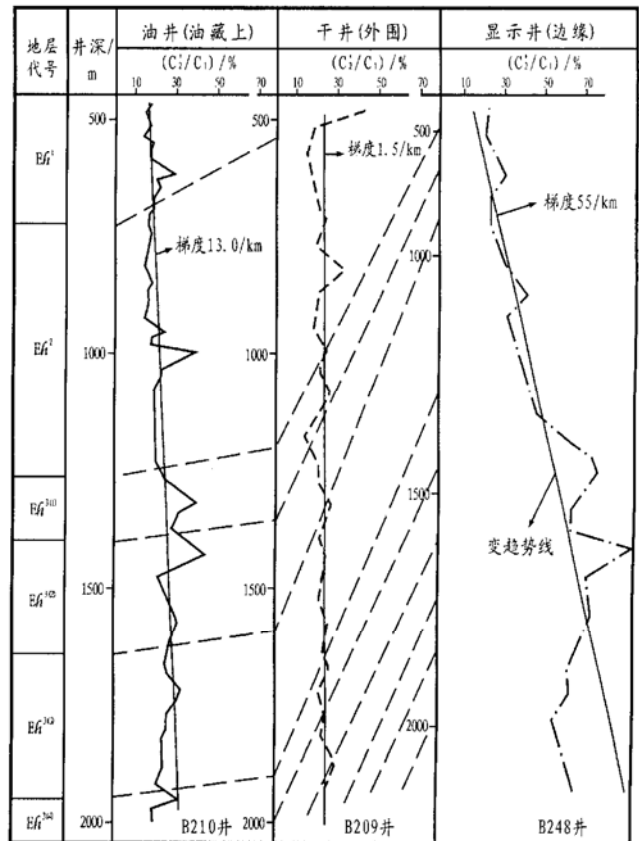


图 4 某油田油井、边缘井和干井 C_2^+ / C_1 曲线对比图

Fig. 4 Correlation of C_2^+ / C_1 curves for an oil well, a marginal producer and a dry hole in a certain oilfield

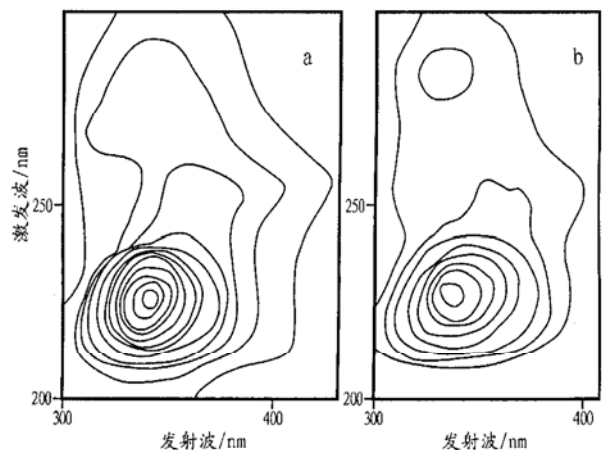


图 5 巨厚膏盐层顶、底板三维荧光对比图

a. C36(盐上); b. C51(盐下)

Fig. 5 3-D fluorescence correlation of roof and footwall for a giant-thick gypsum strata

表 2 东明地区近地表(1.5m)与地下(25m)烃类指标相关矩阵

Table 2 Correlation matrix of near-surface (1.5m) and underground (2.5m) hydrocarbon indexes in Dongming area

	C ₁	C ₂	C ₃	nC ₄
C ₁		0.87	0.87	0.74
C ₂	0.618		0.95	0.88 ^①
C ₃	0.504	0.934		0.93 ^②
nC ₄	0.483	0.7805 ^③	0.804 ^④	

注:上三角为 25m 深度相关矩阵,下三角为 1.5m 深度相关矩阵,①~④为相关系数大小序号。

由表 3 可见 C₁—C₄ 的百分组成近地表与地下基本相似,是同源反映。但浓度值地下是近地表的 2~4 倍,反映烃来自于下部。变异系数地下一般大于 0.3,近地表一般小于 0.25,即变异性是地下大于近地表。

由相关关系和百分组成看,地下与近地表同源。因地下浓度远高于近地表,表明烃源在地下,即近地表烃异常是地下烃源不断叠加、累积的结果。

近地表与地下烃类的同源性和浓度差,表明在近地表处烃类垂向运移不但存在而且有与井下深处相似的正向浓度梯度。

2.3 烃类运移的矿化蚀变

烃类在向上运移途中形成一些新的矿物,如在近地表形成蚀变碳酸盐(ΔC),从而达到矿物相平衡。

据刘庆生等(1995)^[6]研究发现,在塔北、江汉、鄂尔多斯等地区油气藏上方土壤中发现与烃类运移有关的穆铁矿,在钻井岩屑中发现有特殊成因意义的球粒状磁铁矿及显著的磁铁矿化、菱铁矿化和黄铁矿,并与干井区显著区别。表明油气藏上方具有显著的矿化蚀变现象。矿化蚀变强烈区往往与油气藏区对应。

这些矿化蚀变是烃类垂向微运移的证据。

3 烃类垂向微运移的机理讨论

烃类垂向微运移是地表油气化探的理论基础,这种运移又受运移途中所处物理化学环境所制约和

影响。烃类浓度(烃源)、压力梯度、水动力、温度梯度、孔隙度及微裂缝系统的综合配置是烃类垂向微运移强度、速度、规模的首要控制因素或造成运移的重要条件。

地表及井中地球化学、矿物学及相关成果表明,油气垂向运移是客观存在并具有规律性变化特征。具有较高毛细管排替压力的盖层对宏观油相或油气泡具有阻挡效能,但对于微量水溶态轻烃的混相运移,可以通过微裂缝网络向上运移至近地表形成化探异常。现就烃类微运移的介质、动力、方式、通道、模式等进行初步讨论。

3.1 运移介质条件

油气藏边缘井烃类最高浓度及强的运移梯度(图 4)^[2],反映了在油水边界附近的环状柱体带为烃渗溢带,它对应于边水区。油层水(边水)具有高矿化度、高烃浓度及强活动性以及水溶烃易于上渗和运移阻力大大小于油气相(表面能大)的特点,决定了水作为烃类垂向运移的最理想载体,它是烃类运移的主要介质。

3.2 运移动力

打破相平衡使烃类向上运移需要相当的动力源。垂向压力梯度为水平压力梯度的 100 倍,是烃类垂直向上运移的主要动力并形成化探异常;水头压力(水动力)也是重要的动力源;边水中溶有高浓度烃类产生了与近地表的浓度差,由高浓度向低浓度球状扩散运移并形成地化场背景;烃类气体密度小于水,即动力差产生烃类向上运移的浮力;温度差主要提高烃在水中溶解度并产生热能,也可作为间接动力源(如体积膨胀等)。即压力差、温差、浓度差、水动力和浮力是烃类向上运移的动力源,并认为压力差、水动力等为烃类向上运移形成化探异常的主要动力。

3.3 运移方式

现在比较公认的运移方式主要为渗透、扩散和上浮(重力分异)。

渗透作用是指因压力差而造成烃类通过连通微

表 3 东明地区近地表与地下指标参数表

Table 3 Near-surface and underground index parameters of the Dongming area

	25m		1.5m		A/B	变异系数	
	均值 A	百分比	均值 B	百分比		25m	1.5m
C ₁	948.1	91.0	252.10	90.3	3.76	0.31	0.22
C ₂	60.6	5.08	17.06	6.40	3.39	0.37	0.23
C ₃	10.9	1.83	7.09	2.54	2.66	0.37	0.25
nC ₄	4.2	0.41	2.01	0.41	2.08	0.40	0.25
C ₁ ⁺	93.1		30.75		3.03		
C ₂ ⁺	1031.7		273.96		3.69		

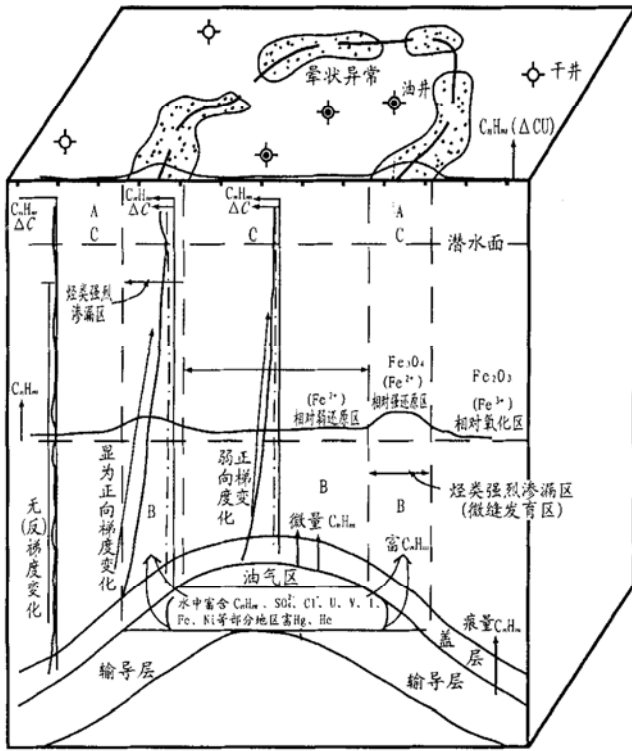


图 6 油气化探基本异常(环)形成机理示意图

- A. 近地表蚀变碳酸盐形成区: $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
 $CaAl_2Si_6O_{16} + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 6SiO_2 + Al_2O_3$
- B. 黄铁矿、磁铁矿、菱铁矿化区:
 $2CH_2O$ (厌氧细菌) + $SO_4^{2-} \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$
 $Fe_2O_3 + 2H_2S \rightarrow FeS_2 + FeO + 2H_2O$
 $Fe_2O_3 + C_nH_m \rightarrow Fe_3O_4 + FeO + CO_2 + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + FeCO_3$
- C. 近表矿化蚀变区: $Fe_2O_3 + C_nH_m \rightarrow Fe_3SO_4 + FeCO_3 + H_2O$
 $Fe(OH)_3 + C_nH_m \rightarrow Fe_3O_4 + FeCO_3 + 2H_2O$

Fig. 6 Schematic diagrams showing the forming mechanism of basic anomalies (rings) for the geochemical exploration of hydrocarbon

裂缝或孔隙等通道呈连续流方式产生的运移作用。它又分为渗漏(通过微裂缝)和渗逸(通过孔隙)。是形成化探异常的主要机制。

扩散作用是由烃类浓度差引起的自高浓度区向低浓度区转移以达到浓度平衡的作用过程。

它不是形成化探异常的主要机制,只是形成地化场背景。

水动力作用是指溶解与水中的烃类随地下水一起通过孔隙或微裂缝向上运移的作用。烃类在水中的溶解度很低,对油气的初级及二次运移的意义不大,甚至无足轻重。但是对于三次运移来说意义重大,因为对于油气化探 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 级的高灵敏度仪器来检测这些“微量”烃类,却具有可辩的异常显示,具有足够的量值。它也是形成化探异常的重要机制。

3.4 运移通道

油气藏上方不同岩性、不同深度均广泛发育微裂缝系统,而且以油水边缘附近区段最为发育。它是垂向运移的主要通道。单纯通过盖层的微裂缝的

扩散和渗滤是很缓慢的,难以很好解释异常快速消失和形成,以及 C_6^+ 浓度。因此,推论微裂缝系统为形成异常的主要通道。

3.5 概念模式(图 6)

地表化探异常出现和消失的快速及地表发现 C_6^+ 的烃类浓度,用扩散机制和通过孔隙的渗逸机制难以解释,只有用渗漏机制解释。此时渗漏的通道是否存在成为关键问题。通过大量研究成果表明,不同深度不同岩性岩层中均大量存在微裂缝,而且具有继承性、连通性好。微裂缝高密度带一般位于圈闭边缘或翼部,较好地解释了普遍存在的油气藏上置环状异常。化探异常高值带一般与油水边界对应较好,以及水的较小表面能和高的活动性,使之成为最理想的运移介质。

微运移机理的主要观点为:以水为主要介质,在压力和温度梯度及浮力作用下,以水溶液及胶体呈混相以渗透方式为主,沿网状裂缝系统向上间隙式微运移。

4 结论

a) 通过盖层及其上部地层的烃类垂向微运移是普遍存在的。

b) 油气藏上方不同部位微运移存在显著差异性(油井—边缘井—外围干井)。

c) 微运移机理为以水为主要介质,在压力和温度梯度及浮力作用下,以水溶液及胶体呈混相以渗透方式为主,沿网状裂缝系统向上间隙式微运移。

参考文献:

- [1] 汤玉平, 蒋涛, 刘运黎. 油气藏不同部位 ΔC 差异性分析[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 76-77.
- [2] 汤玉平, 龚维琪, 邓树立. 油气化探异常类型及成因机理研究[A]. 第四届全国油气化探学术会议论文集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998. 19-25.
- [3] 吴传璧. 上置晕与物质的“类气相”垂向迁移[J]. 地学前缘, 1998, 5(1): 185-192.
- [4] 汤玉平, 丁相玉, 龚维琪. 油气藏上置化探异常形态类型及其成因讨论[J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 75-79.
- [5] 吴传璧. 油气化探发展脉络的思考[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [6] 刘庆生. 综合磁学、地球化学与矿物学方法直接寻找油气藏的基本原理与应用[A]. 第四届全国油气化探学术会议论文集[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [7] 贾中相. 生成量、聚集规模与区域地球化学背景场的关系[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 196.
- [8] 刘文汇. 试论成烃的地球化学场[J]. 石油实验地质, 2000, 22(1): 3.

- [9] 钱志浩. 新疆塔里木盆地北部原油运移地球化学效应[J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 186.
- [10] 黄海平. 油气运移聚集过程中的地球化学作用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 278.

STUDY ON THE GEOCHEMICAL EFFECTS OF VERTICAL HYDROCARBON MICROMIGRATION AND THEIR MECHANISM

TANG Yurping, LIU Yur-li

(*Hefei Research Institute of Geochemical Exploration, SINOPEC, Hefei, Anhui 230022, China*)

Abstract: Vertical hydrocarbon micromigration (caprock and above) resulting in near-surface hydrocarbon anomalies is the theoretical basis and applied premise of geochemical hydrocarbon exploration. The objective existence of vertical hydrocarbon micromigration showed that surface geochemical exploration anomalies were like “a river with sources”. The differences of micromigration in the different parts of oil and gas pools revealed the effectiveness of geochemical hydrocarbon exploration. Based on the geochemical fruits of surface and drilled wells and according to the positive migration gradient of various indexes, the correlation of halo sources and the structural gradient that hydrocarbon is getting lighter upwards, which is widespread in oil and gas wells, the objective existence of vertical hydrocarbon micromigration was revealed. The importance of microfracture network systems was emphasized, the mechanism of micromigration was discussed, and the genetic mechanism of surface geochemical exploration anomalies was well interpreted in this paper.

Key words: mechanism; geochemical effect; micromigration; hydrocarbon