

油气地球化学勘探的理论与实践

石毓理^① 王恩芳

(天津市建筑学院)

提 要

本文提出将油气扩散原理与干酪根热降解生油理论结合起来研究,以解决油气地球化学勘探的理论问题。文中除了对 Fick 第一定律进行数学推导外,还指出这种方法的不足,还要考虑油气生成年龄和开始向地表运移至今的时间。这个时间等于或超过烃气从油气藏扩散到达地表所需要的时间,说明烃气扩散流已经到达地表,在该面积上进行化探可获得良好的结果。

根据文中计算公式,对大庆和胜利等油田进行了计算,大庆油田的白垩系生油层的干酪根为 I 型,生油层年龄约 110 百万年。采用 $D = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 计算,烃气扩散到达地表所需的时间为 39.45 百万年,生油层沉降到生油门限深度所需时间为 6.65 百万年,计算烃气开始扩散至今的时间为 103.35 百万年。说明大庆油田白垩系生油层的烃气已经扩散到达地表,在该区进行化探可获得较好结果。又如胜利油田,老第三系生油层的干酪根为 II 型,计算结果说明胜利油田老第三系的烃气尚未扩散到达地表,只在断裂带处有扩散烃气。根据本文的原理预测克拉玛依和南阳等油田,进行化探可获得较好结果。此外还例举了我国东北和西北两个油田的化探成果实例。

前 言

当前,国内外油气田勘探面临深层、非背斜、边远新区和海洋等复杂条件和勘探困难的挑战,勘探费用昂贵,成本增加。石油地质界开始寻求新的、经济的和有成效的勘探法,因此,油气化学勘探(简称化探)法受到了人们的重视。

油气化探的理论基础曾被国外地球化学家如 Антонов. П. А(1934, 1954), Соколов. В. А(1956, 1959), Карцев. А. А(1954, 1979), Stogena. L(1962), Староженец. И. С, Martin. J. Davidson(1985年)研究过。在他们研究的基础上,本文结合最新的干酪根热裂解生油理论和烃气扩散原理进行理论计算,论证油气化探理论的科学性和勘探的可行性。

一、油气化探理论的概述

油气化探的理论基于油气藏中的石油和天然气由于各种不同动力向地表运移,在地表形成微油气苗。通过仪器分析、检测这些微油气苗及其产物,从而获得地下蕴藏油气田的信息。

油气藏产生的真油气苗必须包括两个方面含意,即一方面生油层沉降到热裂解的深度

① 原为北京石油学院勘探系化探研究队负责人。

并产生了油和气；另一方面这些油或气通过各种方式运移到达地表。这种模式最终还要用数学方程表达出来。

目前，人们公认的烃气向地表运移的方式有三种：(1) 烃气的渗滤；(2) 烃气的扩散；(3) 烃气在地下水中的上浮。各种运移类型的运移强度是极不相同的，运移强度最大的是渗滤，而最小的是扩散。

烃气扩散作用具有特殊重要的意义，因为在其它运移形式不存在时，它将决定着油气向地表运移的最小强度。

关于各种岩石的扩散系数值，索柯洛夫^①曾经做过大量工作。沉积岩的一般扩散系数值(D)介于 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 之间，个别达 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ ，这样的数值，使烃气在地质年代中能有很大的流量。索柯洛夫认为 $D = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ ，烃气扩散逸失量仍然是十分大的。随着埋深增加岩性变致密其D值逐渐变小，当D值低于 $10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ ，则扩散强度大大减小，或几乎不能扩散。

但应指出，油气藏上方仅存在扩散烃气流的情况是非常少见的。在不同的构造带，或多或少的节理和裂隙是普遍存在的，这就大大增加了烃气透过的程度，缩短了烃气运移到达地表的时间。

二、烃气向地表的扩散和渗滤

1. 烃气往地表的不稳定扩散方程的建立 烃气扩散服从 Fick 第一定律。根据 Fourier 定理，将 Fick 第一定律推导出如下的级数方程^(1,2)

$$C = C_0 \left[\frac{z}{H} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \sin \left(\frac{n\pi z}{H} \right) \cdot e^{-\frac{n^2\pi^2}{H^2}Dt} \right] \quad (1)$$

当 t 很大时，级数方程很快收敛，一般写第一项就可以了，故将 (1) 式写成

$$C = C_0 \left[\frac{z}{H} - \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi z}{H} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{H^2}Dt} \right] \quad (2)$$

式中 C ——距地表深度 z 处的烃气浓度； C_0 ——油气藏顶部烃气的原始浓度；

H ——油气埋藏深度；

D ——烃气扩散系数；

t ——扩散作用开始后的时间。

当烃气扩散到达地表时，则 z/H 值很小， $\sin \frac{\pi z}{H}$ 可以趋近于 $\frac{\pi z}{H}$ ；(2) 式可写成

$$C = C_0 \frac{z}{H} \left(1 - 2e^{-\frac{\pi^2}{H^2}Dt} \right) \quad (3)$$

当 $z \rightarrow 0$ ， $C = 0$ 时，式 (3) 可写成

$$1 - 2e^{-\frac{\pi^2}{H^2}Dt} = 0 \quad (4)$$

① 北京石油学院，油气田地球化学勘探，1964年。

2. 烃气的扩散速度 将 (2) 式改写成

$$\frac{C}{C_0} = \frac{z}{H} - \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi z}{H} \cdot e^{-\frac{\pi^2 D t}{H^2}}$$

$$\frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi z}{H} \cdot e^{-\frac{\pi^2 D t}{H^2}} = \frac{z}{H} - \frac{C}{C_0}$$

$$e^{-\frac{\pi^2 D t}{H^2}} = \frac{\pi}{2 \sin \frac{\pi z}{H}} \left(\frac{z}{H} - \frac{C}{C_0} \right)$$

简化上式的推导过程, 最后可以导出

$$t = -\frac{H^2}{\pi^2 D} \ln \left[\left(\frac{z}{H} - \frac{C}{C_0} \right) \cdot \frac{\pi}{2 \sin \frac{\pi z}{H}} \right] \quad (5)$$

当 $z \rightarrow 0$ 或 $z = 2 \rightarrow 10$ 米时取样, $\sin \frac{\pi z}{H} \rightarrow \frac{\pi z}{H}$, $\frac{C}{C_0} \rightarrow 0$, 则 (5) 式可简化为

$$t = -\frac{H^2}{\pi^2 D} \ln \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$\text{即} \quad t = 0.0702 \times \frac{H^2}{D} \quad (6)$$

根据式(6) 计算出不同 D 值时, 油气藏不同埋深的烃气达到地表所需的时间(表1)。

表 1 油气田不同埋藏深度与不同扩散系数的烃气流到达地表的时间

H(m) t (Ma) D (cm ² /s)	油 气 藏 埋 深(m)					
	300	500	1000	1300	2200	3000
10 ⁻⁶	2.01	5.57	22.3	37.64	107.8	200.4
10 ⁻⁵	0.20	0.58	2.23	3.76	10.78	20.04
10 ⁻⁴	0.02	0.058	0.23	0.376	1.078	2.004
10 ⁻³	0.002	0.006	0.023	0.038	0.108	0.200
10 ⁻²	0.0002	0.0006	0.0023	0.0038	0.011	0.020

烃气扩散前缘的浓度为 0, 这样, 把 $C = 0$ 代入 (2) 式, 可得到 (7) 式

$$\frac{z}{H} - \frac{2}{\pi} \sin \left(\frac{\pi z}{H} \right) \cdot e^{-\frac{\pi^2 D t}{H^2}} = 0 \quad (7)$$

(7) 式两边对 t 求导, 可获烃气运移速度方程式

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\pi^2 D}{H - z \pi \operatorname{ctg} \frac{z\pi}{H} + 2H \ln \left(\frac{2H}{\pi z} \sin \frac{\pi z}{H} \right)} \quad (8)$$

当 $z \rightarrow 0$, 则

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\pi^2 D}{2H \ln 2} \quad (9)$$

根据公式(8)和(9)可计算出不同深度的扩散速度,列于表2

表2 烃气的扩散速度($D = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$)

埋深(m) 取样深度(m)	300	500	1000	1300	2200	3000
Z=0, 扩散速度m/a	7.48×10^{-5}	4.49×10^{-5}	2.25×10^{-5}	1.73×10^{-5}	1.02×10^{-5}	0.748×10^{-5}
Z=10, 扩散速度m/a	7.10×10^{-5}	4.48×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.73×10^{-5}	1.02×10^{-5}	0.748×10^{-5}

式(6)为计算扩散时间的近似公式,式(5)与式(6)误差很小。一般情况下,可应用式(6)计算运移时间,当烃气流浓度较大或取样深度很大时,则不能应用(6)式,必须用(5)式。式(9)是 $z=0$ 时扩散速度计算公式,式(8)是 $z \neq 0$ 时的速度计算公式。

3. 确定有效生油岩中油气开始扩散的时间 根据干酪根生油理论,不同类型干酪根其生油温度不同,从地温梯度考虑其生油深度不同,即使同一时代的生油层因干酪根类型不同,生油深度也不同。有效生油岩所产生的油气开始扩散时间要根据实际情况计算。

例如: I类干酪根(大庆)生油门限温度约为70℃,实际生油深度为1330m^[3]; II类干酪根(东营)生油门限温度约为94℃,实际生油深度为2200m^[4]; III类干酪根(陕甘宁)生油门限温度为105℃,实际生油深度超过3000m。假设,生油层平均沉降速度为0.2mm/a,则生油层中不同类型干酪根沉降到生油门限深度所需要的时间分别为6.67、11和15Ma(百万年)。

上述生油层平均沉降速度的取值只是宏观性的,旨在说明问题。但在实际计算时要参考具体盆地各地层的沉积史或参照各盆地的TTI图表,方才准确。

当已知生油层的年龄,并计算出生油层沉降到生油门限深度的时间之后,便可计算出地下油、气开始扩散至今的时间。例如中新世生油层底部至今的年龄为25Ma,含II类干酪根生油层的生油门限深度为2200m,该生油层从地表沉降到生油深度所需要时间为11Ma,故油气从开始运移至今的时间为25-11=14Ma。至于14Ma的时间,仅以扩散形式是否能运移到达地表,还要进行下面的计算。

4. 确定油气藏烃气是否扩散到达地表 如果确定油气藏中的烃气可以扩散到达地表,即使没有其它运移形式存在,烃气的地球化学异常也是很明显的。所以确定油气藏中的烃气是否扩散到达地表,是油气地球化学勘探可靠性的保证。

确定烃气是否扩散到达地表的方法为:首先确定剖面岩层平均扩散系数(如果没有实测资料,可取 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ 的经验值),查表1找到不同类型干酪根真实生油深度,和从该深度扩散到达地表所需时间(t_1)。然后计算生油层的油气从开始至今扩散时间(t_2)。

如果 $t_2 > t_1$,烃气可扩散到达地表,具备烃气扩散流地球化学场。

如果 $t_2 < t_1$,烃气不可能扩散到达地表,不具备烃气扩散流,可能存在烃气渗滤流。

表 3 列出我国东部油田的干酪根热裂解生油条件^(3,4,5)、生油层年龄、扩散延续时间,由这些数据可以查出某坳陷或盆地是否存在扩散气流。

表 3 油气田生油条件及扩散运移数据表*

坳陷或盆地 名称	门 限 值			烃气扩散至地 表所需时间 (Ma)	沉降到实际深 度所需时间 (Ma)	烃气扩散时间 (Ma)
	现在温度(℃)	实际深度(m)	地层年龄(Ma)			
东营坳陷	93	2200	35	107.93	11	24
黄骅坳陷	95	2200	35	107.93	11	24
潜江坳陷	90	2200	35	107.93	11	24
辽河坳陷	81	1700	50	64.45	8.5	41.5
松辽盆地(1)	70	1330	110	39.45	6.65	103.35
松辽盆地(2)	65	1230	100	33.74	6.15	93.85
松辽盆地(3)	81	1180	90	31.05	5.9	84.1

* 取烃气扩散系数D为 $10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$; 平均沉积速度为 $0.2\text{mm}/\text{a}$ 。

例如松辽盆地生油层中干酪根为 I 型,生油门限温度为 70°C ,生油门限深度为 1330m ,生油层年龄约 110Ma ,烃气扩散到达地表的时间(取 $10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$)为 39.45Ma ,生油层沉降到生油深度所需时间为 6.65Ma ,烃气扩散延续时间为 103.35Ma 。 $t_2 > t_1$ 说明松辽盆地白垩系生油层的油、气可以扩散到达地表。

5. 构造裂隙控制烃气渗滤流 实际上,在油田上方不仅存在扩散气流,而且还存在渗滤和气体在水中的上浮。不同运移类型的运移强度是极不相同的,运移强度最大的是渗滤作用,例如 1m^2 面积的致密岩石,其中仅有一条宽 0.1mm 的节理,通过这一节理而渗滤的气体总量要比通过这一面积的其余所有部分而扩散的气体量大千倍以上。

问题是在油田上方是否存在渗滤气流,其答案是肯定的。

仅以我国东部含油气盆地为例^(6,7,8)。东部含油气盆地,北至松辽,中为渤海湾地区,南到苏北属大陆裂谷带⁽⁸⁾,为板内或陆缘的断陷—坳陷盆地,从地震剖面和钻探剖面上均可发现此裂谷带由数百条正断层组成的张性断陷,同时岩层中普遍发育着节理和微裂隙,这就增加了烃气透过的程度。地处裂谷带也是新构造运动的活动地带,不断地制造或封闭油气渗滤的通道。

济阳坳陷和黄骅坳陷的构造复杂断裂分布普遍,构造横剖面表示多具同生断层与滚动背斜构造,这种构造无疑对烃气的渗滤起了积极作用。最近地矿部航测大队在济阳坳陷某区所做的 ΔC 测量^①,在构造断裂处有明显 ΔC 高异常,证明断裂是烃气运移的主要通道。

三、油气化探的可行性

1. 烃气扩散量 计算公式为

$$Q = GFt = D \frac{\partial C}{\partial z} Ft \quad (10)$$

① 第二届全国油气化探会议上的报告,1987年。

式中的 Q 系时间为 t 内通过面积为 F 的扩散气体量。其计算方程的推导如下
由式 (2) 求偏导

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{C_o}{H} \left(1 - 2 \cos \frac{\pi z}{H} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{H^2} D t} \right) F t \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10), 则得

$$Q = \frac{D C_o}{H} \left(1 - 2 \cos \frac{\pi z}{H} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{H^2} D t} \right) F t \quad (12)$$

当扩散气流达到稳定时, $t \rightarrow \infty$, 则

$$Q = \frac{D C_o}{H} F \cdot t$$

设 60°C , 10MPa 时, 纯甲烷浓度 $C_o = 0.652 \cdot 10^{-1} \text{g/cm}^3$, 为简化计算, $t = 1$ (年), $F = 1 \text{km}^2$, 计算甲烷气稳定流的每年扩散量, 其计算结果列于表 4

表 4 烃气稳定流每年通过 1 平方公里面积的扩散量 ($D = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$)

埋深(m) Q	300	500	1000	1300	2200	3000
kg/km ² ·a	7.12	4.27	2.14	1.64	0.97	0.712
m ³ /km ² ·a	10.5	6.30	3.15	2.42	1.43	1.05

由表 4 可以计算出: 埋藏地下 1300m 的油气藏, 烃气扩散量每小时为 $0.187 \text{g/km}^2 \cdot \text{h}$ ($D = 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$); 埋藏地下 2200m 的油气藏, 烃气扩散量为 $0.11 \text{g/km}^2 \cdot \text{h}$, 如此计算下来, 油气田上方烃气每年的扩散量也是相当可观的。这种量级的烃气流用灵敏度为 10^{-5} 的检测仪器, 完全可以检测出来 (气体法); 检查烃气的反应产物, 其实质是扩大烃气流的量级, 其效果将更好 (AC 法、水化学法等)。

上述的计算是仅以扩散方式进行的, 如果再加上渗滤其逸散量将更大, 作为油气化探的重要指标—烃气将获得更好的结果。目前使用累积法和吸附法都是扩大烃气量级的好方法。

2. 油气化探的效果 油气化探在我国试验研究有 30 多年的历史, 但对其效果也曾有过争议。通过争议肯定了这种方法的研究价值。经过几十年的研究, 国外油气化探已经再度兴起, 并在勘探困难的地区取得了实效。于是, 引起国外石油勘探界的兴趣。最近几年, 油气化探在我国也取得了较好的成果如南阳油田等处。据地矿部石油局 101 队公布^① 在我国东北地区使用水化学法、气测法和汞蒸气法予测油气田的成功率达 42%。在华北地区使用水化学法和气测法预测油气田的成功率达 55%。与苏美法等国相比处于相当水平。

下面的三幅油气化探图, 图 1 是我国东北地区发现的一个油田未开发前进行的化探图; 图 2 和图 3 是我国西北地区发现的油田的化探实测图。从图上可以看出油气化探的结

① 第二届全国油气化探会议报告, 1987年。

果与油田的实际含油情况是符合的。

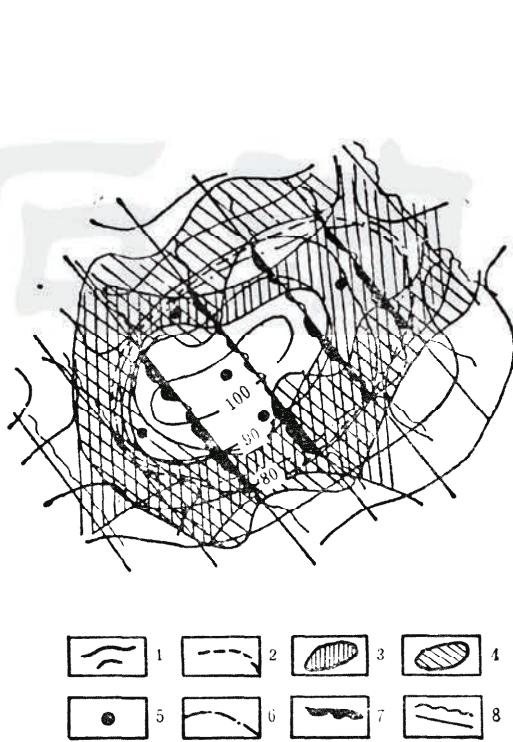


图 1 我国某油田地球化学勘探成果综合图
 1—构造等高线；2—放射性异常界；3—沥青异常；
 4—氧化丙烷菌异常；5—产油井；6—含油范围；
 7—放射性低值；8—放射性高值

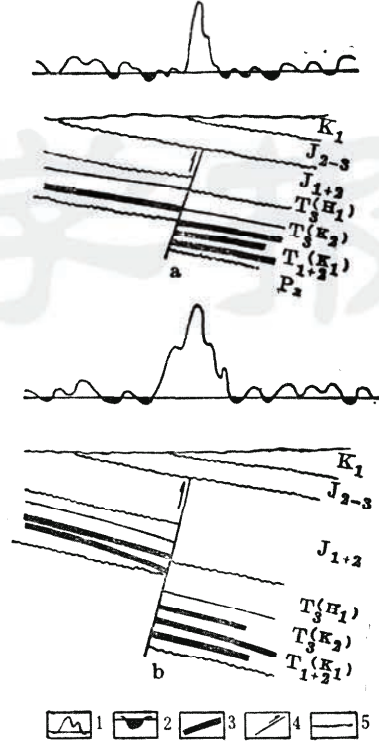


图 2 我国西北某油田放射性测量剖面图
 1—放射性高值；2—放射性低值；3—含油气层；4—断层；5—不整合面

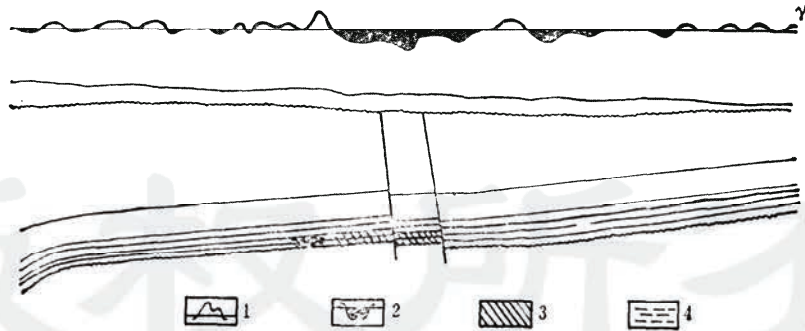


图 3 西北某油田放射性强度与断层的关系
 1—放射性高值；2—放射性低值；3—含油气层；4—油田边水

结 语

1. 油气化探的理论建立在生油层干酪根热裂解与烃气往地表运移的基础上。生油沉积从地表沉降到干酪根热裂解的深度，产生油和气，开始聚集也同时开始向地表运移，在

地表检测这些微油气显示,发现油气藏的信息做为化探的标志。

2. 当仅考虑烃气扩散方式的条件下,根据生油层的年龄、干酪根类型、生油气深度以及上覆岩层的扩散系数,可以计算出,油气藏的烃气扩散到达地表的时间。

3. 在油田上方不仅存在扩散运移而且存在渗滤和水中烃气上浮。油气化探的效果往往决定于油气田上方的裂隙、孔隙和节理发育的程度。位于大陆裂谷带、板内断陷—坳陷地区和板块边缘区的油气田可获得较好的油气化探异常。

4. 油气藏形成较早或油气藏埋藏较浅或生油干酪根为 I 型以及盆地沉降速度较快的地区或面积,是油气化探能获得最佳成果的地质条件。

5. 鉴于油气化探即将列入油气勘探的程序。建议油气化探要建立各个勘探阶段的工作规范和确立油气指标系列;同时要建立培养高级油气化探专家的基地等。

(本文收到日期1987年8月5日)

参 考 文 献

- [1] 章熙民等,传热学,中国建筑出版社,1985
- [2] 梁昆淼,数学物理方法,人民教育出版社,第二版,1978
- [3] 李永康,松辽盆地陆相生油特征,石油学报,1981,2卷,1期
- [4] 傅家谟,关于当前石油有机地球化学研究的几个问题,石油学报,1981,2卷,1期
- [5] 田克勤,曹延,黄骅坳陷油气生成与初次运移的探讨,石油学报,1981,2卷,1期
- [6] 金性春,板块构造学基础,上海科技出版社,1984
- [7] 李德生,滚动背斜油气田,石油实验地质,1980, No. 2
- [8] 李黎明,关于华北板块构造的几个问题,天津地质学会志,1983, No. 2

THEORY AND PRACTICE OF GEOCHEMICAL PROSPECTING OF OIL AND GAS

Shi Yucheng Wang Enfang

(Tianjin Urban Construction Institute)

Abstract

On the basis of the author's practice for gas research, a comprehensive theory of gas diffusion and oil genesis had been offered to solve the problems about geochemical hydrocarbon prospecting. In addition to the derivation of Fick first law equation, it is pointed out that the using of the equation is not enough to solve the problems about the theory of geochemical petroleum exploration. The age of oil and gas generation and the time from the start of HC gas diffusion to the earth surface must be considered. If the time from the start of diffusion to present days is equal to or larger than the time needed from the start of HC gas diffusion to the surface, HC gas wight

reach the surface, and good result of geochemical exploration in this area can be expected. This paper has calculated the cases in several oil and gas fields, such as Daqing and Shengli oil fields. It is demonstrated that good results may be expected in Daqing Area, while poorer results may be exhibited in Shengli Area. On the basis of the theory in this paper, it is predicted prospecting in Kuramay and Nanyang oil fields may be good. Two practical examples are given, one is in northeast-China, the other in northwest.

石油学报

版权所有