

天然气资源成藏模型评价系统的建立*

王 川

(地质矿产部石油地质研究所, 北京 100083)

黄 铮

(北京工业大学, 北京 100022)

樊民星 李树森

(地质矿产部石油地质研究所, 北京 100083)

天然气资源评价专家系统中成藏模型评价子系统的建立, 使复杂的定量计算模型和定性评价模型结合在一起, 从而使系统进入能够描述复杂推理的更高层次。这一系统的关键之一是从天然气成藏各过程的数学及物理机制出发, 建立天然气成藏过程中的数学和物理计算模型; 关键之二是建立能够合理连接定量和定性评价模型的新的知识逻辑关系。在此基础上, 建立气藏成藏评价模型 (以碎屑岩气藏为例), 并讨论 6 种知识逻辑关系的含义及其推理算法模型。

关键词 专家系统 成藏模型 评价系统 天然气

第一作者简介 王川 男 33 岁 工程师 石油地质 人工智能

油气资源评价专家系统理论技术发展到今天, 已经取得了巨大的进步。如何进一步提高油气资源评价专家系统的理论技术水平, 除了计算机技术方面外, 另一重要方面就是如何建立更高层次的地质模型。这种地质模型应该使系统除了对油气藏的生、储、成藏、保存等基本条件作出定性评价外, 还能从油气成藏的数学及物理机制出发, 对油气成藏的各个过程作出更为细致的定量化评价, 从而使系统进入能够描述复杂推理的更高层次。

作者曾就天然气资源评价专家系统建立的总体思路作过详细的论述^[1], 其中提出建立成藏模型评价子系统的问题, 本文拟就碎屑岩气藏成藏模型评价子系统的建立作进一步的论述。

1 技术思路

从天然气生成量 (包括生物气、煤成气及热裂解气) 的计算, 判断天然气生成的丰富程度; 从天然气扩散气量的计算, 以及总生气量与总扩散气量的比较, 判断天然气的扩散散失情况; 从天然气运移中各种相态气量, 即水溶气量、水溶脱气量、油溶气量、油溶脱气量、游离气量的计算, 判断天然气运移的主要相态, 从而掌握其成藏的主要机理; 从地层的后期抬升幅度, 判断评价区水溶脱气成藏的有利部位, 找出水溶脱气成藏的有利圈闭; 根据流体势的分析计算, 判断评价区流体势的高势及低势区, 从而判断游离相天然气的运移方向及有利的聚集地带, 确定游离气成藏的有利圈闭。在此基础上, 根据各圈闭气柱高度、气水过渡带高度、假盖层高度及圈闭闭合高度的计算, 并对这 4 个要素进行综合分析, 进一步阐明圈闭的控气能力。最后, 作出评价区有利圈闭分布图 (图 1)。

* 国家科技攻关项目 (85-102-01-05-01)

收稿日期: 1995-07-03 改回日期: 1996-02-02

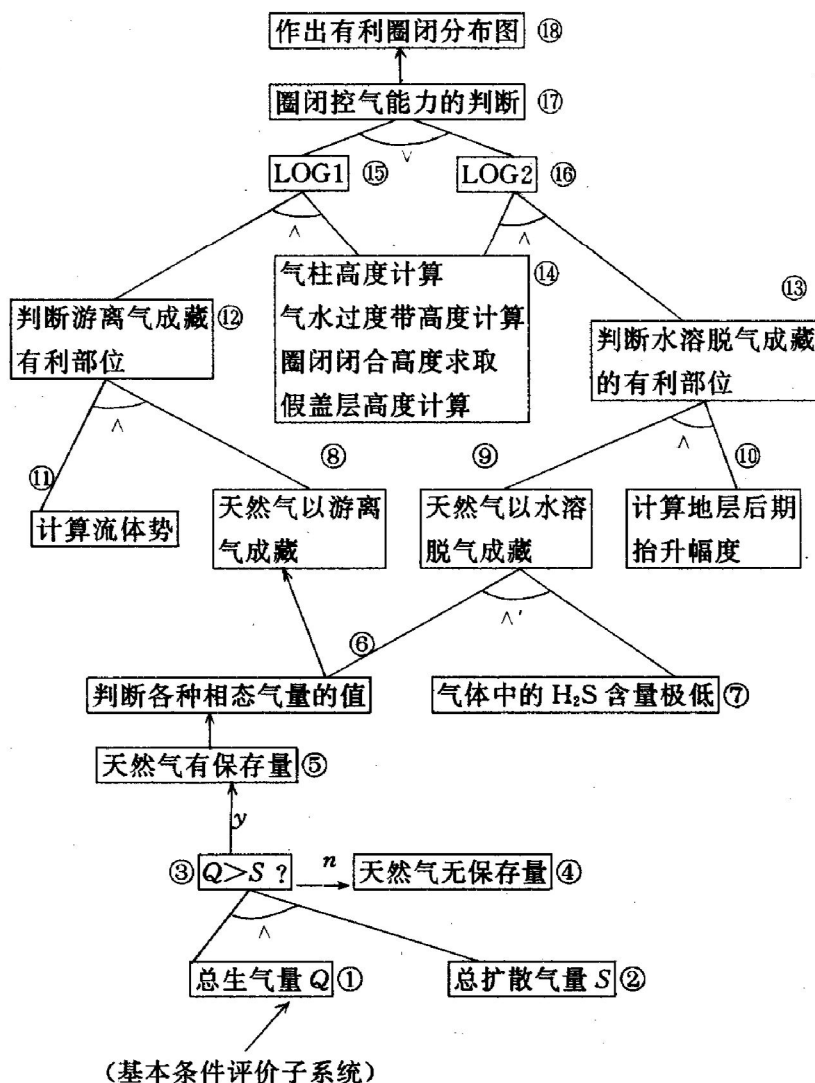


图1 天然气资源评价专家系统成藏模型评价子系统框图(片段)

2 过程的主要地质及数学模型

2.1 总生气量的计算模型(节点1)

总生气量包括生物气量、煤层气量及热裂解气量。

2.1.1 生物气量的计算模型

$$Q_{\text{生}} = 1400 S_1 H_1 D_1 C R_a$$

式中 $Q_{\text{生}}$ 为生物气量, m^3 ; S_1 为泥岩层的面积, m^2 ; H_1 为泥岩层的厚度, m ; D_1 为泥岩的密度, t/m^3 ; C 为有机碳含量, %; R_a 为累积生油气量与有机碳的重量比, 对 I 型干酪根 R_a 取 9.91%, 对 II 型干酪根 R_a 取 4.84%, 对 III 型干酪根 R_a 取 4.70%。

2.1.2 煤层生气量的计算模型

$$Q_c = S_c H_c D_c R_c (1 - W_f - A_f)$$

式中 Q_c 为煤层气量, m^3 ; R_c 为煤的烃气发生率, 小数; W_f 为煤的分析基水分含量, 小数; A_f 为煤的分析基灰分含量, 小数; S_c 为煤层面积, m^2 ; H_c 为煤层厚度, m ; D_c 为煤层密度, t/m^3 。

2.1.3 热裂解气量的计算模型

$$Q_h = 0.01 S_1 H_1 C D_1 R_s$$

式中 Q_h 为热裂解天然气量, m^3 ; R_s 为不同类型干酪根各演化阶段天然气(烃气)发生率, m^3/t 。

2.2 总扩散气量的计算模型(节点 2)

2.2.1 盖层为非烃源岩时单位面积的扩散气量(Q_{sg})

$$Q_{sg} = \left[\frac{C_0 D_k (3.1 \times 10^{13} t)}{H_k} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(2H_k C_0)}{n^2 \pi^2} \right]$$

式中 C_0 为盖层内初始气浓度, m^3/m^3 ; D_k 为盖层扩散系数, m^2/s ; t 为扩散时间, Ma; H_k 为盖层厚度, m。

2.2.2 盖层为烃源岩时单位面积的扩散气量(Q_{sg})

$$Q_{sg} = \left[\frac{C_0 D_k (3.1 \times 10^{13} t)}{H_k} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2R_k H_k [1 - (-1)^n] (3.1 \times 10^{13} t)}{n^2 \pi^2} \right\} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2R_k (H_k)^3 [1 - (-1)^n]}{n^4 \pi^4} \right\} - \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2H_k [C_1 - C_0 - C_1 (-1)^n]}{n^2 \pi^2} \right\}$$

式中 R_k 为盖层的产烃率, 小数; $C_1 = Q_k/H_k$, Q_k 为盖层单位面积的生气量, m^3/m^2 。

2.3 判断评价层中天然气有无保存量(节点 3)

在节点 1 和节点 2 都成立的前提下, 进入节点 3 的判断。节点 1 和节点 2 取“与”的逻辑关系。

若总生气量大于总扩散气量, 则评价层仍保存有剩余的天然气量, 则可进入下一步的评价; 反之, 则评价层中无剩余的天然气量, 评价到此结束。

2.4 判断评价层中各种相态气量的值(节点 6)

天然气在运移中有两种主要相态, 即游离气相态和水溶气相态。这两种相态气藏的成藏机理有根本的不同, 应有不同的评价方法。事先对其运移的相态进行判断, 则极为重要, 判断的主要依据是游离气和水溶气量的值, 这两个值的计算相互关联。评价层中生成的总生气量, 除散失掉的以外, 将以几种形式存在于地层中, 即一是被地层吸附, 二是溶解于地层水中, 三是以游离态存在于储层中。

地层的吸附包括煤层的吸附和砂泥岩层的吸附。煤层吸附的量采用如下计算模型**:

$$Q_{cs} = \left(\frac{85\% S_c H_c D_c}{A_c} \right) X_c$$

式中 Q_{cs} 为煤层的吸附气量, m^3 ; A_c 为成煤率, 小数; X_c 为煤的吸附值, m^3/t 。砂泥岩层吸附的量采用如下计算模型:

$$Q_{sls} = S_1 H_1 D_1 X_1 + S_s H_s D_s X_s$$

式中 Q_{sls} 为砂泥岩层吸附的气量, m^3 ; X_1 为泥岩的吸附值, 1 t 岩石可吸附的气量取 0.1068 m^3 ; S_s 为砂岩层的面积, m^2 ; H_s 为砂岩层的厚度, m; D_s 为砂岩的密度, t/m^3 ; X_s 为砂质岩的吸附值, 1t 为岩石可吸附的气量取 0.024 m^3 。

* 郝石生. 天然气运聚平衡. 1992

** 演怀玉. 四川盆地上三叠统天然气形成作用与煤化作用的关系. 地质矿产部西南石油地质局, 1985

地层水中溶解气的量,采用如下计算模型:^{*}

$$S_g = 3.1670 \times 10^{-10} T^2 M + 1.1997 \times 10^{-8} T M + 1.0635 \times 10^{-10} P^2 M \\ - 9.7764 \times 10^{-8} P M + 2.9745 \times 10^{-10} T P M + 1.6230 \times 10^{-4} T^{-2} \\ - 2.7879 \times 10^{-2} T - 2.0587 \times 10^{-5} P^2 + 1.7323 \times 10^{-2} P + 9.5233 \times 10^{-6} T P \\ + 1.1937$$

式中 S_g 为水的气溶解度, m^3/m^3 ; T 为水的温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为水的压力, 10^5 Pa ; M 为水的矿化度, mg/l 。

地层中游离气量的计算模型为:

游离气量 = 总生气量 - 总扩散气量 - 总吸附气量 - 总溶解气量

若地层后期有抬升,则有水溶脱气量出现,其计算模型为:

水溶脱气量 = 处于深部时地层中的水溶气量 - 处于浅部时地层中的水溶气量

有了游离气量的值,则可推得“天然气以游离气成藏(节点8)”,有了水溶脱气量的值,则可推得“天然气以水溶脱气成藏(节点9)”。若节点7“气体中 H_2S 含量极低”同时成立,则节点6和节点7在“新与”的关系下,可大大增加节点9成立的信度。

2.5 判断游离气成藏有利部位(节点12)

要推断节点12,则要先判断节点11。

游离气的成藏,主要受控于地层中流体的势能。游离气从地层水的高势区流向低势区,并在低势区聚集成藏。

地层中流体势的计算模型^[2]如下:

$$\Phi_w = P - \rho_w g z_1 \\ \Phi_g = P - \rho_g g z_1 + \frac{2\sigma_{gw}}{r}$$

式中 Φ_w , Φ_g 为水势、气势, MPa ; ρ_w , ρ_g 为地层水及地下天然气的密度, g/cm^3 ; P 为地层流体压力, MPa ; z_1 为评价层中部埋深, m ; r 为储集层岩石孔喉半径, μm ; σ_{gw} 为烃水界面张力, mN/m

在节点11和节点8同时成立的情况下,进行节点12的判断。在作出评价层水势平面分布图,找出水势的高势区及低势区,即可判断游离气成藏的有利部位,从而判断出游离气成藏有利的圈闭。

2.6 判断水溶脱气成藏的有利部位(节点13)

水溶脱气的成藏主要受控于地层的后期抬升幅度,抬升幅度越大,则从地层水中脱出的气越多;地层抬升越高的部位,则富集的气越丰富。节点10用以计算地层后期抬升幅度。

节点13作出评价层后期抬升幅度的平面分布图,找出地层抬升的高部位,处于高部位的圈闭,即是水溶脱气成藏的有利圈闭。

2.7 圈闭控气能力的判断(节点17)

节点15和节点16有一个相同的“与”关系兄弟节点,即节点14。要继续往上推理,则要先进行节点14中各过程模型的计算。

* 郝石生. 天然气运聚动平衡. 1992

2.7.1 气水状态下突破压力的计算模型^[3]

$$P_{c_{gw}} = \frac{\sigma_{gw} \cos \theta_{gw}}{\sigma_{Hg} \cos \theta_{Hg}} P_{cma}$$

式中 $P_{c_{gw}}$ 为气水状态下的突破压力, MPa; P_{cma} 为实测的盖层突破压力, MPa; σ_{gw} 为气水界面张力, mN/m; σ_{Hg} 为汞界面张力, mN/m; θ_{gw} 为气水接触角, 令 $\cos \theta_{gw}$ 取值为 1; θ_{Hg} 为汞的接触角, 令 $\cos \theta_{Hg}$ 取值 0.776。

2.7.2 静水条件下封闭气柱高度的计算模型^[4]

$$H_b = \frac{P_{c_{gw}} - P_{d_{gw}}}{0.433 (\rho_w - \rho_g)}$$

式中 H_b 为静水条件下封闭的气柱高度, m; ρ_w, ρ_g 为分别表示地下水、天然气密度, g/cm³; $P_{d_{gw}}$ 为气水状态下储层排驱压力, MPa。

2.7.3 动水条件下封闭气柱高度的计算模型

$$Z = H_b \pm H_b W$$

式中 W 为水动力对圈闭封闭能力的影响系数。

当水动力与浮力方向一致时, 公式中取负值; 当水动力与浮力方向相反时, 公式中取正值。

2.7.4 气水过渡带高度的计算模型

$$Z_1 = \frac{P_{d_{gw}}}{0.433 (\rho_w - \rho_g)}$$

式中 Z_1 为气水过渡带高度, m。

2.7.5 圈闭闭合高度的求取

圈闭的闭合高度可由构造图求取。

2.7.6 假盖层的计算模型

对于假盖层的识别, 通常是通过综合测井曲线, 采用判别函数 (D_r) 加以判断:

$$D_r = a\rho_K + b\Delta d + clr + d\ln r + e$$

式中 ρ_K 为视电阻率, Ωm ; Δd 为井径增量, m; lr 为自然伽马射线放射性活度, Bq; $\ln r$ 为中子伽马射线强度相对变化值; a, b, c, d, e 为系数, 因地区而异。

若 $D_r > 0$, 则为天然气盖层; 反之, 若 $D_r < 0$, 则为天然气假盖层。

节点 14 的过程模型计算完后, 往上通过逻辑节点 15 和(或)逻辑节点 16 进入节点 17 的判断。

节点 17 的功能为, 在圈闭闭合高度(H)、假盖层厚度(L)、气水过渡带高度(Z)及气柱高度(X_1)计算的基础上, 进行圈闭控气能力的判断。

若 $H > L$, 则圈闭具有实际的闭合高度(H_0), $H_0 = H - L$; 若 $H_0 > Z$, 则圈闭具有产气的气柱高度, 其 $H_0 - Z =$ 圈闭所能封闭的最大气柱高度(X_{max}); 若 $X_1 > X_{max}$, 则圈闭封闭的实际气柱高度 $X_0 = X_{max}$; 若 $X_1 < X_{max}$, 则 $X_0 = X_1$ 。

2.8 作出有利圈闭分布图(节点 18)

经过上述的推断, 对各圈闭的控气能力(即 X_1 是否大于 0, 及 X_1 值的大小)有了充分细致的掌握, 作出具有控气能力圈闭的分布图, 则完成了评价工作。

通过上述各个模型的综合分析计算, 我们对评价区天然气地质的特性就有了充分细致的

掌握。该系统共使用数学及地质模型 60 余个。

3 系统的推理算法

该系统的知识逻辑关系除一般的与($\wedge$)、或($\vee$)、加权(W)三种逻辑关系外,根据上述知识的特点,我们还新建立了异或($\vee'$)、新与($\wedge'$)及独立三种新的知识逻辑关系,从而使知识之间的关系达到完全合理的相互配置*。

3.1 与($\wedge$)关系

只有当具有与关系的全体前提都成立时,结论才成立。若具有与关系的一批前提信度不同,结论信度以前提信度中最小的一个为准。如图 1 中的节点 1 和节点 2 的关系。其推理算法为:设 H 是结论, $E_1, E_2, \dots, E_n$ 是前提, $cf_i(H)$ 表示由单一前提 E_i 所求的 H 的信度, $i=1, 2, \dots, n$, 则 H 的最终信度 $cf(H)$ 计算方法如下:

$$cf(H) = \min \sum_{i=1}^n cf(i)$$

3.2 或($\vee$)关系

一批前提节点若是具有或关系,则其中的一个节点成立便可保证结论的成立。也就是说,结论信度以前提信度中最大的一个为准。如图 1 中的节点 15 和节点 16 的关系。其推理算法为:

$$cf(H) = \max \sum_{i=1}^n cf(i)$$

3.3 异或($\vee'$)关系

作用与或关系相同;但是,若一批前提节点具有异或关系,则它们之中必有一个且只有一个成立(与此不同,一批具有或关系的前提中可以有多于一个成立,也可以都不成立)。设置异或关系的目的是:(1)提高效率;(2)查找矛盾。其推理算法为若诸 E_i 之间的关系为“异或”,则诸 E_i 中必定只有且恰有一个满足 $cf(E_i) \geq t > 0$ (t 是阈值),因此,可令:

$$cf(H) = cf_i(H)$$

3.4 加权(W)关系

一批前提节点若有此关系,则每个前提对结论有着不同的作用即“权重”。其推理算法为:

$$cf(H) \geq \sum_{i=1}^n \omega_i cf(i)$$

诸 ω_i 是权值。在特殊情形下,规定 $cf(H) \gg \sum \omega_i cf(i)$, 以表示“突变”关系。

3.5 “独立”关系

指不具有逻辑或加权关系的一批前提。当各前提互相独立时,结论的成立与否要通过对每个前提逐个考察再作出答复。独立关系与或关系的区别是:一批成或关系的前提中只要有一个成立,便支持结论的成立性,而不必顾及是否还有反对结论的前提;而一批互相独立的前提对结论的支持程度,要依每个前提对结论的支持或反对程度逐个考察而定。独立关系与以上四种关系的区别是:一个结论连同具有以前四种关系的一批前提构成一个“规则”,例如:

$$\text{IF}(E_1 \wedge E_2) \text{ THEN } H,$$

* 王川,李树森,黄铮. 天然气资源评价专家系统的研究与建立(85-102-01-05-01). 地质矿产部石油地质研究所研究报告,1994

而互相独立的每个前提与结论单独形成一个规则而不能合并。例如,若 E_1, E_2 都是 H 的前提而 E_1 与 E_2 独立,则表示为两条规则:

IF E_1 THEN H , IF E_2 THEN H

其推理算法为:先设 $n=2$,则令:

$$cf(H) = \begin{cases} cf_1(H) + cf_2(H) - cf_1(H)cf_2(H), & \text{若 } cf_1(H), cf_2(H) \geq 0 \\ cf_1(H) + cf_2(H) + cf_1(H)cf_2(H), & \text{若 } cf_1(H), cf_2(H) < 0 \\ cf_1(H) + cf_2(H), & \text{若 } cf_1(H), cf_2(H) \text{ 异号。} \end{cases}$$

当 $n > 2$ 时,先将同号的诸 $cf_i(H)$ 分别按上式合并,再求其代数和得到 $cf(H)$ 。

3.6 新与($\wedge'$)关系

当一批前提具有此关系时,总是有一个(或多个)起决定性作用的前提,当它成立时,就可基本肯定(或否定)结论,而若其它非决定性的前提成立,则对结论的肯(否)定程度将产生一个“飞跃”,如图1中的节点6和节点7的关系,节点6对节点9是起决定性作用的前提,节点6的成立,就基本肯定了节点9的成立,而若节点7也成立,就大大提高了节点9成立的信度。其推理算法为:若 E_1 为主要节点(起决定性作用),则令:

$$cf(H) = \begin{cases} cf_1(H) & cf_2(H) \quad cf_3(H), \dots, cf_n(H) \text{ 皆为 } 0 \\ cf_1(H)(1+0.3) + \sum_{i=2}^n cf_i(H) & \text{此式的绝对值} \leq 1 \\ 1 & cf_1(H)(1+0.3) + \sum_{i=2}^n cf_i(H) > 1 \\ -1 & cf_1(H) \times (1+0.3) + \sum_{i=2}^n cf_i(H) < -1 \end{cases}$$

4 结束语

天然气资源评价专家系统成藏模型评价子系统的建立,使复杂的定量计算模型与定性评价模型在一般的和特有的知识逻辑关系的连接下,结合为一个有机的整体,使专家系统走出一一般化的境地,进入能够描述复杂推理的更高层次。

参 考 文 献

- 1 李树森,王川,樊民星. 对圈闭油气资源评价专家系统的认识. 石油与天然气地质,1994,15(3):187~192
- 2 戴尔勃格 E C. 石油勘探实用水动力学. 王学礼译. 北京:石油工业出版社,1992. 6~9
- 3 罗蛰潭. 油层物理. 北京:地质出版社,1985. 158~159
- 4 Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. AAPG Bull, 1979, 63:723~760

ESTABLISHMENT OF ACCUMULATION MODEL EVALUATION SYSTEM IN GAS RESOURCES

Wang Chuan

(Institute of Petroleum Geology, MGMR, Beijing)

Huang Zheng

(Beijing University of Industry, Beijing)

Fan Mingxing Li Shusen

(Institute of Petroleum Geology, MGMR, Beijing)

Abstract

The establishment of accumulation model evaluation system is a subsystem of natural gas resources assessment export system (GRAES). It has integrated complicated quantitative calculation model with the qualitative evaluation model, therefore the system could reach a higher stage of processing sophisticated logical inference. One of the key technique of the system is to establish mathematical and physical calculation models according to gas accumulation mechanism. The other key technique is to found some new knowledge logical relations that could combine quantitative calculation model with qualitative inference model properly. On this base, the gas accumulation model is established with clastic rocks as the example, and the concepts and inference calculating models of six knowledge logical relations are discussed in this paper.