

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：研究)

(報告題名：石油系統盆地分析)

服務機關：中國石油股份有限公司
台灣油礦探勘總處

姓名：張 森 吉

出國地區：美 國

出國期間：八十九年八月一日
至十一月十七日

報告日期：民國九十年三月二日

目 次

內 容	頁 數
摘 要	i
前 言	1
『盆地分析』之主題沿革與進展大綱	2
『盆地分析』要素	4
結 論	17
研習心得與建議	19
PROBAS 軟體應用程式操作要點	
附錄："PROBAS"盆地模擬資料輸入手冊	

『石油系統盆地分析』研習報告

摘 要

熱力裂解為有機物生成油氣主要機制，此機制可視為由三個互相關係之盆地分析主題：①盆地地層之埋藏史；②熱力變化史及③油氣之生成、移棲、聚集等。這些主題之研究方法漸漸演變作電腦軟體模擬，因此數學公式逐漸成為主要工具之一。模型的過程中，熱及液體流、地層壓密作用。油氣之生成及驅逐及第二次移棲等為盆地模擬考慮之因素，利用數學公式計算其地質年代中之歷史，進而評估模擬之盆地地層中是否是有機物成熟之要件以及油氣儲存之目標。

『石油系統盆地分析』電腦應用軟體著重於考慮因素使其達到較高的準確度。其方法在於利用現今所得之地質剖面資料轉為過去地質年代中盆地由初始至現今的一切埋藏史、熱力流動史，以及油氣生成之模擬。"PROBAS"為此次研習中，所應用之『盆地分析』電腦軟體，它可應用於平原區及麓山區之油氣探勘，並以圖型或表格資料呈現其結果，進而可模擬油氣儲存量及可能儲存位置，進而有助油氣之探勘。

『石油系統盆地分析』研習報告

一、前言：

本出國研習主題為『石油系統盆地分析』，大致上有關此主題可分為原理理論與實際電腦軟體操作。本主題研習之主要目的在幫助瞭解一個油氣探勘區域生油岩、儲油岩與油氣蓋層三者在一個沈積盆地內，所經過時間之各種變化，並利用數學模式及電腦軟體，以廓繪出對該地區油氣之探勘潛能及風險評估。本公司因應未來油氣探勘愈形困難處境，針對上述三種岩體在空間與時間之分佈，在選擇鑽井井位時先行透徹瞭解，因而對此問題甚為重視。故於八十九年度之研究計劃指派筆者赴美國柏克萊大學研習本主題。在此除感謝上級主管之指派外，並提出此次出國研習報告，期望對本主題有較深入之瞭解外，並對油氣探勘有直接之幫助。

本研習係以修課以及單獨面對面討論等方式計對本主題之研習，研習地點為美國柏克萊大學地球及行星科學系 (Dept. of Earth and Planetary Sciences)，此系前身為地質及地球物理科學系，本系內設有『石油系統』小組 (petroleum system project)，其領導人為 Dr. Wang 及 Dr. Berry，筆者研習之期

間恰為秋季學期之開始，故在此期間修了兩門課程：工程數學及石油地質，完整地修完這兩門課程，工程數學課程由 Dr. Wang 指導，主要課程包括偏微分方程及向量分析等。此二主題係針對油氣石油系統數學模擬所必須之課程。具備工程數學之基礎，對於數學模擬較容易吸收。另一門課程"石油地質"由 Dr. Berry 指導，此課程主要教授內容包括油氣之化學成份，油氣之生成步驟，油氣之探勘方法，最後綜合主題為『油氣石油系統』等，作有系統之瞭解。單獨面對討論研習方式，則與 Dr. Wang 單獨討論石油系統盆地分析之理論內容及電腦模擬之操作與應用。筆者在此研習利用上述二種方法，甚感收穫不少，尤其對於數學方程式在模擬中之物理意義獲得較佳之瞭解。

本報告內容包括『石油系統盆地』分析基本原理與須考慮之內容外，並作有系統之描述，並對於未來一盆地之分析有所幫助。最後並附有研習過程中，電腦應用軟體所須輸入之基本資料。

二、『盆地分析』之主題沿革與進展大綱

盆地分析之主要學派(main school)：

1、德國學派(German school)

Welte and Yukler(1981)強調 3-D 模式之整合，針對液體流動壓密作用以及熱傳輸正確地預測沈積盆地之油氣生成。Welte(1983,1988)將水力傳導係數(hydraulic conductivity)加入流體方程式，但滲透力(permeability)並沒有列入其方程式。文章諸如 Yalcin et al(1987)、Wygrala(1988)及 Yalcin(1991)，數學方程式利用 Eulerian frame，對孔隙率與應力之變化加以描述。

2、法國學派(French school)

注重 2-D 數值油氣生成及移棲之模擬，主要代表為 Institut Francais du Petrole (IEP) - Durand et al.(1984)、Tissot et al.(1987)、Ungerer et al.(1990)、Burns and Audebett(1990)、此學派利用 Lagrangian coordinate system,且將滲率力、流體密度、黏度列入方程式，而求其流體之特性。著重於孔隙率之減少計值與實測值對有效應力之關係。

3、伊利若學派(Illinois school)

Bethke(1955)發表熱流與流體經過壓密沈積盆地之模式，其資料來自 Exxon Oil Co。其後之研究強調水流，超壓力之關係，且著重於次生礦物對油氣生成之影響。Sharp(1983)亦為此學派之一員。

4、南卡羅來納學派(The South Carolina school)

Lerche and Glezen(1984) , 以 Gulf Oil Co 之資料模擬盆地。利用 Lagrangian coordinate system 為基礎 , 強調孔隙比例(void ratio)與有效應力之數學關係。孔隙率與深度之關係模式 , 並建立應用方程式。

5、柏克來學派(Univ. of cal, Berkeley)

此學派為筆者於本次研習所赴之小組 , 其主要研究重點為整合盆地之模擬 , 利用有限元素數學方程式 , 並建立軟體名為 PROBAS , 對熱流(heat flow)、流體、脫水作用、碳氫化合物之成熟度 , 流體之傳輸等利用數學方程式描述其特性。這些控制因素於構造 , 如岩石破裂面、斷層 , 這些依據資料再作出與時間變化 , 模擬並回覆過去一羈一羈之變化歷史。筆者並於研習期間於 Dr. Wang 指導下 , 利用此軟體演練盆地分析模擬 , 所利用之軟體應用者手冊將列於後頁。

除了上述較重要之外 , 尚有其它之模擬方式 , 在此不另一一述之。

三、盆地分析要素

有機物在盆地內經過地質時間受熱裂解作用 , 產生碳氫化合物 , 為油氣生成之主要機制 , 此機制包括三個主要因素 :

①埋藏史(burial history); ②受熱史(thermal history)及③油氣生成、移棲及儲存史。此三要素並非獨立無關,而是互相相關,其要點如下:

A、利用埋藏史之資料作為盆地之評估

埋藏史之計算資料可提供"石油地質師"下列資料,如盆地之地史對孔隙率之預料,以及地史對熱傳導率(thermal conductivity),這些資料依深度及岩性而變。再加上由地殼下沉或不整合之處理,可預測有機物裂解成油氣之時間及溫度,此時間即所謂關鍵時間(critical time)。另外提供熱流量或成熟度之指數。所需資料包括地層頂面之深度,地層之岩性,地層孔隙與深度之關係,井孔底部之溫度或地層溫度;油母質含量,以及鏡煤素反射率等與深度變化之資料。資料來源可能來自井下電測,地質報告或震測剖面等。建立地史之因數(parameters)包括可能生油岩之成熟度時間與深度之關係、生油岩熱量分佈、沈積速率與盆地下沉速率對時間之關係、壓密導致下沉之量、沈積物負載之大地平衡(isostatic response to sediment load)及脫離地殼下沉量(backstripped crustal subsidence),此即為總下沉量減去壓密以大地平衡之反應

量。這些因素最後利用電腦程式計算，並用圖表示其結果。時間間隔之古構造圖油氣隨時間之移棲路線圖，以及生油岩因時間變化之熱力成熟度均可利用圖示表示之。利用構造地層圖、地質圖或震測剖面圖，以表示油氣生成之時間與油氣移棲可能路徑，最後關鍵點即為儲存之位置。

地層埋藏史係由震測剖面，地質剖面或由井下地層資料所建立之地層埋藏深度與時間之變化。若不考慮壓密效應(compaction effects)，所有地層界限之上升速率最上層為相同，在目前最上層界限在地表，則由地層厚度可知其它地層界限之深度，利用反撥法(backstripping process)可建立"地層埋藏史"。但這只是模式，真正實際必須考慮地層之深度可能因孔隙率之變化而有不同。目前建立的只是壓密後的深度，沈積時壓密程度輕小，故地層厚度較壓密後為大，故必須考慮去壓密作用(decompaction effects)，所得之沈積地層厚度以推算埋藏深度才較合真實。Hinte(1978)說明若 R：沈積物堆積速率；A：經過時間；T：目前地層厚度，且孔隙率為 ϕ ； ϕ_0 ：沈積時孔隙率，則 $R=T(1 - \phi)/A-(1 - \phi_0)$ ，此式表示地層

之厚度為時間之函數，亦即為深度之函數。Sclater and Christie(1980)建立孔隙率之經驗公式 $\phi = \phi_0 e^{-cz}$ ， ϕ ：孔隙率在深度為 z ， ϕ_0 ：孔隙率在地表 $z = 0$ 時， $C =$ 常數(依不同岩性而變)。

另一種模式由 Falrey and Middleton (1981)提出，他們的模式孔隙率遞減除了因深度外，另考慮載負效應 (loading effects)，其基本公式為 $d\phi/\phi = -kedL$ ；而 $e = \phi/1-\phi$ 且 $dL=(1-\phi)/dz$ ； dz 代表負載所影響深度之變化， k ：岩性常數。則上式之解為 $1/\phi = 1/\phi_0 + kz$ ； ϕ_0 ：初始孔隙率， z ：深度。此式依岩性之不同，有不同之經驗公式，如：

$$\text{頁 岩} : 1/\phi = 1/0.7 + 2.43z$$

$$\text{砂 岩} : 1/\phi = 1/0.4 + 1.20z$$

$$\text{粉砂岩} : 1/\phi = 1/0.53 + 2.18z$$

壓密效應修正利用 $\phi = \phi_0 e^{-cz}$ ， $d\phi/\phi = -kedL$ ，則總厚度於沈積物為 h_s ，其深度為 z_1 為 z_2 ，則

$$h_s = [1 - \phi(z)]dz$$

$$h_s = (z_2 - z_1) - (\phi_0/c)(e^{-cz_1} - e^{-cz_2})$$

$$(z_2 - z_1) - (1/k)$$

進一步推論：

$$z_4 - z_3 = hs + (1/k)\ln[(1/\phi(s))/(1/\phi_0 + kz_3)]$$

如果已知下列壓密係數、鑽井深度、年代及古水深，則利用上列方程式，可繪出埋藏史。

另外與孔隙率有重要之因素為不整合之模擬，有下列三種方式可模擬不整合：

- 1、沈積間斷(depositional hiatus)
- 2、沈積或侵蝕在剖面之厚度及年代由地區性地質決定(如鏡煤素反射率之間斷或電測等)。
- 3、利用估計法計算侵蝕厚度

$$AGE_E = (R_1 \times AGE_1 + R_2 \times AGE_2) / (R_1 + R_2)$$

$$\text{侵蝕厚度} = R_1 \times (AGE_E - AGE_1)$$

AGE_E ：開始侵蝕之年代、 AGE_1 、 AGE_2 ：不整合上下之年代， R_1 及 R_2 為不整合面上下沈積物之沈積速率。

經過上述之修正後，各層之厚度及深度為時間之函數，再依岩性及密度，即可估算地殼因負載而沈之量度，下列公式可作為下沈量之估算(Steckler and

Watts,1978)：

$$Y = S[(P_m - P_s)/(P_m - P_w)] + W_d - \rho_{SL}[P_m/(P_m - P_w)] ,$$

P_m ：平均地函密度、 P_w ：平均水密度、 P_s ：平均沈積物密度、 ρ_{SL} ：平均海水面之上下、 Y ：無沈積物或水負載岩盤之深度， Y ：亦代表大地構造力影響之地殼下沉量， W_d 及 ρ_{SL} 由古沈積環境估算。

B、碳氣化合物之生成及熱量史

建立地層埋藏史主要目的之一在於預測生油岩之成熟度及潛能之程度，主要在於評估沈積盆地油氣產量是否是儲存至開關經濟價值。下列諸點必須知悉：(1)在盆地任何位置，其每立方公里可產油氣之量；(2)油氣形成時間、蓋層建構時間，以及構造形成時間而封閉；(3)多少量之油氣已遠移離生成岩，剩下多少殘有於生油岩；(4)評估油氣最後儲存之位置。

上述必須以定量方法才能作到，數學模式有有助於上述問題之達成。Tissot and Welte(1978)應用現象模式預測碳氫化合物含量對時間與溫度之變化。第一級化學反應動能假設全部消耗於油母質之裂解如下公式：

$$dx_i/dt = k_i x_i ; k_i = A_i e^{-E_i/k_B T(t)}$$

x_i : 第 i 種化合物之密度、 k_i : 反應速率、 k_B : 波茲曼常數、 A_i : 反應速率(在溫度上限)、 E_i : 活化能、 $T(t)$: x_i 化合物時間為溫度之函數。一般認為油母質有三種類型(type 、 、) , 每種可視為有 6 個不同之化學鍵 , 其活化能之範圍約 10 - 80Kcal/mole , 所以有機物 X_i 第 i 個反應之總反應熱為 $E_1 + E_2 + \dots + E_6$, 利用有不同之油母質對 i 反應有不同之 E_i 、 A_i 及 X_i 值。這些數值為定量計算油氣生成量所需之變數 , 且必須決定時間對溫度之方程式。Tissot and Welte(1978)利用固定地溫梯度於此模式 , 且把熱流量(heat flux)視為隨時間變化 , 可改善此模式。散熱方程式 :

$$\tau / \tau_t = (\tilde{n}c)^{-1} \cdot (k - T) + (\tilde{n}c)^{-1} Q(t) \delta(z -$$

$z_{\text{besement}})$, 其中 c : 比熱、 \tilde{n} : 密度、 k : 熱傳導率 $\delta(z)$: Dirac function、 $Q(t)$: 熱流量為時間之函數。

在 3-5km 深處 , 此散熱方程式之解為 :

$T(t) = T_t(t) + Q(t)D(t)/k(t,z)$ ，其中 $T_t(t)$ ：每層頂部之溫度為時間之函數， $D(t)$ ：該層之厚度亦為時間之函數、 $k(t,z)$ ：為平均熱傳導為時間及深度函數。欲預測盆度之成熟度，必須知道 $Q(t)$ 、 $D(t)$ 及 $k(t,z)$ ，而 $k(t,z)$ 及 $D(t)$ 可由埋藏史及岩性得知，但 $Q(t)$ 較難估算。欲估算古地溫，須知熱傳導係數與時間之關係，但很難由外插法求得，只應用於砂岩，而砂岩只限於侷部空間與時間，頁岩與石灰岩則由實驗方法求得。熱傳導係數主要受制於孔隙率。在無資料可應用之處，吾人可假設 $k_s = k_r(k_w/k_r)^\phi$ ， k_r 、 k_w 及 k_s 分別為岩基(rock matrix)、水及沈積物之熱傳導係數， ϕ 為孔隙率。

依 Friedinger(1988)，熱傳導係數可寫為：

$$k_n = k_f^\phi k_s^{(1-\phi)}$$

熱傳導係數一般隨溫度增加而下降，在油氣溫度窗中，其溫度之效應更為明顯。而任何古熱流量之模式必須符合現今之熱流量，此由井底地層溫度、地表溫度及熱傳導係數可估算總熱

流量。

C、盆地回撥下沈(back stripped subsidence)及熱流史(heat flow history)

回撥下沈(Y)可利用地質模式預測之，對特一地質模式比較回撥下沈及預測下沈(predicted subsidence)；其目的為經由兩者下沈之差異：(1)可評估該地質模式之可靠性；(2)利用此地質模式預測熱流史；(3)可用來修正地質模式對鏡煤素反射率之差異及(4)預測潛能生成岩之成熟度與時間之關係，其離井位之下沈量，可用震測剖面解釋之。

地質模式可提供熱流變化與時間之重要來源，熱源之估算對一模式可能增加，而對另一模式可能減少。大致上有四種模式應用於地殼之下沈：

(1)Mckenzie 岩石圈延展模式；(2)火成岩脈入侵模式；(3)熱力膨脹模式及(4)深部地殼變質模式。各種模式所估算地殼高度隨時間、溫度變化之估算公式，各有差異不在此詳述。

D、依鏡煤素反射率估算熱流

各種地質模式所算出之熱流均有差異，由鏡煤

素反射率估算熱流為一較佳之方法，熱流利用此方法估算之誤差可能來自埋藏史之評估以及輸入之資料。其它方法尚有黏土礦物之轉變、孔隙率對深度與溫度之變化、油氣中碳元素之對稱性、油氣中分子之重量分佈。同位素之變化、礦物之退火性質地磁歷史、液體包、花粉之透明度、生物指標等，可作為估算熱流之方法。此熱流之估算進而可預測盆地各深度地層之成熟度。

一般"盆地分析"之模擬輸出之資料可分為三種：埋藏史、熱力成熟度以及相關資料。埋藏史資料包括各地層對時間之深度變化圖、地殼下降與時間圖、壓縮下沈圖、地平衡及負載下沈圖、沈積物沈積速率圖、基般下沈與時間之關係圖、海平面對時間之關係圖。熱力成熟度計算圖包括目前時間溫度相積(TTI)對深度圖，目前鏡煤素反射率對時間圖、鏡煤素反射率對 TTI 圖，每一層每一種油母質產生油氣之百分比與時間之變化圖。至少有七種情況，其熱流對時間變化可被模擬，如：具有固定之溫度梯度，目前之熱流假設固定且可由井底或地層之溫度及岩性決

定，利用 Makenzie 模式，其它模式決定其熱流。

結合熱力成熟度資料及埋藏史計算，可作出熱力成熟度之影響結果，如計算油母質裂解成油氣量與地質年代之變化，此為"盆地分析"主要目的之一。

E、油氣生成及驅逐模擬

"盆地模擬" 目前為油氣探勘普遍工具之一，未來亦將如此，而盆地模擬亦盆地分析首要之事，至於它是否有用呢？至於是否有必要去作呢？回答此問題，須先知油氣形成之活化能及其驅逐之方式。本次研習對此問題之大綱整理出較重要之幾點。

1、為何要作動力學模擬？

數學模式指出溫度與地質年代影響因素？

一般而言，動力控制之化學反應具有時間與溫度互相補償之特性，但因古溫度無法確定，故時間溫度只能定性。動力模式包括活化能、反應速率，初始及次生反應等問題。

Lopatin - Waples method 係假設化學反應速率每溫度增 10 ，其加速為兩倍，此粗略估計尚可，若要精確計算，則誤差很大。而且時間亦有

時會高估，例如當地層有受侵蝕時，地溫下降 20
，此時成熟度可能停止增加。除時間與溫度
外，尚有其它因素可影響碳氫化合物之生成？很
明顯對某一有機物之種類，壓力亦會影響其裂解
速率。一般而言，壓力低於 200bar，其影響較大，
200-200bar 影響不大，且高壓可使之缺乏不飽和
碳氫化合物。然而壓力一般在"盆地分析"不列入
考慮之因素。

同樣地，含水量亦不確定之因素。硫分量可
能加速成熟度，其效應在熱裂過程中，伴演降低
黏度。氧元素之存在亦可加速有機物之裂解。黏
土礦物可能不如預測之重要。

2、何種動力模式較重要？

一般模式均利用第一級為其反應速率，此反
應只考慮動力之裂解，通當並不考慮第二級反
應，此反應可能因成熟度之增加而使油氣進一步
分解。一般而言，活化能並非完全消耗於化學鍵
之破壞，在熱裂分析若利用封閉系統，可得較佳
之結果。並且利用區段溫度分佈熱裂比連續溫度

較佳。

其它問題如：如何得到動力模擬參數，以降低其不準確度？鏡煤素模擬之特性？何種模式可用來描述油氣驅逐？

其次問題如盆地模擬、地化資料拌演之角色，如由地化資料決定其成熟度或地化資料決定其氣驅逐模式等。最後如可否預測化學成份或盆地中之液氣相狀態，均為"盆地分析"之主題

F、熱力模擬

決定熱力分佈之歷史之因素為目前之測量溫度(地面及井下溫度)，目前之測量成熟度地質資料(構造史、熱流史、氣候變化、沈積環境、侵蝕史等)，其它如物理性質(有機物組成熱傳係數、孔隙率、孔隙填充物等)。模擬之方法一般利用電腦軟體，孔隙率可用公式模擬。熱傳導係數可根據孔隙率及氣候模擬，熱流根據構造運動及目前之地溫修正之。成熟度可用 TTI 觀念依鏡煤素反射率計算，碳氫化合物計算依據第一級反應方程式，地溫資料取自電測或 DST 溫度，並作井底溫度之修正。

不正常熱流可能來自特有之地質現象(如冰川效應、盆地近代下沉、高壓帶及孔隙液體及流動之變化),近年之不確定等因素。高壓帶扮演重要之角色,其產生原因為不滲透層、快速沈積、厚層積物等。

四、結論：

『石油系統分地分析』係一門相當繁複之工作,且為目前石油探勘重要的工具之一,尤其在對一處女地之探勘,由少量現有之資料,對一盆地作歷史性之描述,由每一時間間隔所作的描繪,即為此分析之主要工作。主要工作為:①盆地埋藏史之模擬;②熱力之模擬;③碳氫化合物之生成與驅逐之模擬;④孔隙率、液相流以及油氣移棲之模擬等,這些問題均涉及艱深之數學公式運算,故均以電腦軟體運算。

在探勘應用上,有許多種電腦軟體針對盆地分析之模擬作特定性之用途。如:筆者本次研習中,所用之軟體 PROBAS,可應用於平原區及麓山區,且可依需要精確度,作較細之時間分割,得到較正確及詳細之模擬。本次研習之主要目的除了理論與原理之探討外,並利用 PROBAS(如附件)電腦軟體應用於地質或震測剖面,作上述各種主要之模擬。研習之報告除以書陳述外,並附上 PROBAS 應用程式之資料

手冊，以利未來應用此程式之先前準備，並將應用於未來油氣探勘上

此次研習筆者感覺數學是現代科技電腦軟體之重要工具，過去均認為數學之艱難，但此次之研習中，將數學作生活化之講解，因此感覺並非想像中之艱難，此為研習中意外之收穫。

五、研習心得與建議

『石油系統盆地分析』為探勘界累積百年來之知識，對石油之探勘在一盆地之地層作整合性之研究，亦為目前對一探勘區域之整合性評估。我們知道，一個盆地經過地質年代之時間，經歷了自然界之作用包括物理、化學以及生物等，盆地內地層經過這些變動，再加上熱力與流動之過程，最後之結局為現今我所看到的事實。這些事實是過去長久時間累積的結果，而『石油系統盆地分析』主要之工作在於對過去某一斷地質年代利用模擬，回後過去之歷史，這些歷史該我們能掌握未知之地下地層對油氣儲存數量及位置。這些工作是繁複且艱辛的，但對油氣探勘而言，它們是先前的工作，其主要目的在於預知油氣的移棲路徑，以及最後的儲存位置。

『石油系統盆地分析』在應用方面，已知甚多種類之軟體，應用於模擬應用軟體程式之設計工程數學大為重要。培養程式設計人員，將有助於模擬應用程式之改進，建議本公司應加強電腦軟體程式設計工作。