

2008  
專題報導

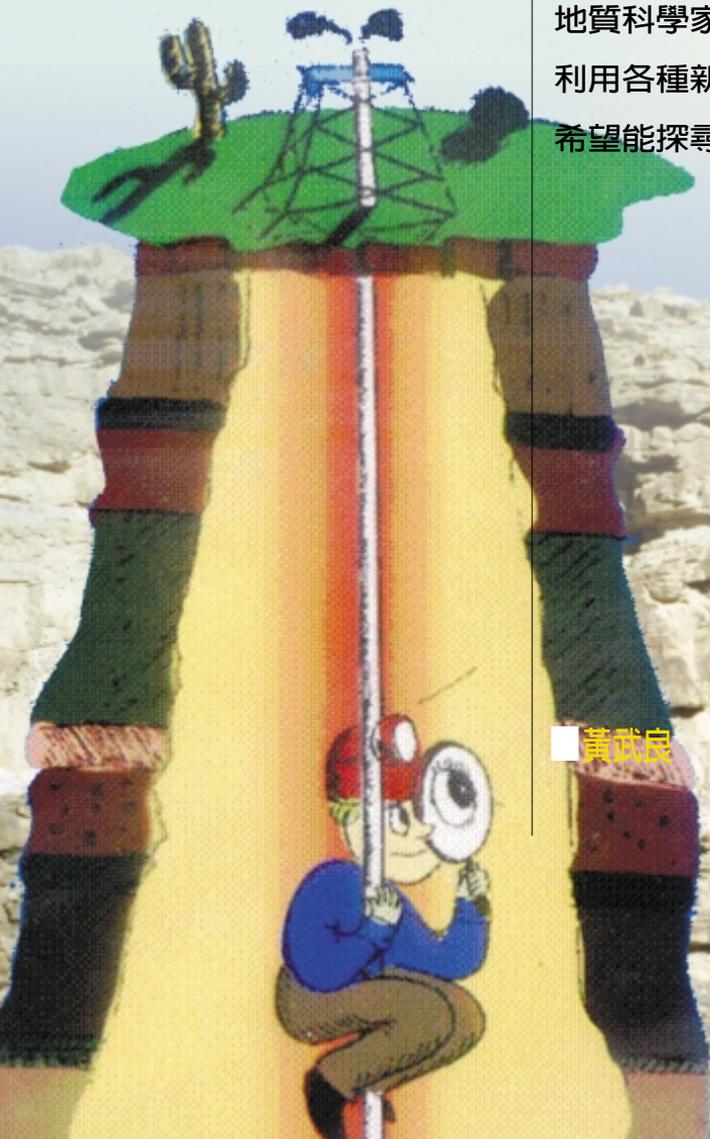
黑黝黝的液體黃金

# 黑金傳奇

## 石油的 來龍去脈

地球即將面臨石油的枯竭，  
地質科學家們正竭盡所能  
利用各種新科技去了解地下石油的來龍去脈，  
希望能探尋更多的油氣，延續人類對石油依賴的時限。

黃武良



## 五百億元的一口乾井

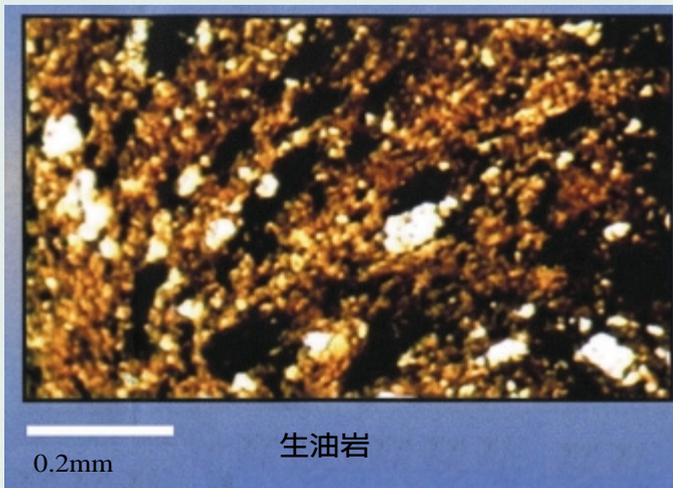
一九八三年，在美國阿拉斯加北極圈附近，人類有史以來最昂貴的一口石油探勘井，鑽穿了預定的目標地層後，卻發現只有少量的殘油，在無數人的期望落空下功敗垂成。在開鑽之前，這個莫克洛克井位，曾經過詳細的地球物理和地質技術的評估，認定地下有一個可儲存十五至一百億桶原油的地層構造。為了能順利鑽探，以Sohio石油公司為首的石油探勘群，花了近兩億美金在水深 50 英尺的哈里遜灣建造一座人工島，加上鑽井和礦權總花費高達十五億美金（約相當於新台幣五百億元）以上。

許多人會問：地層中為什麼沒有油？油到哪裡去了？是否地下油藏有個大漏洞？或是沈積盆地根本就沒有足夠的有機物質？或是這些有機物還不夠成熟未能產生石油？解析這一連串問題的科技，就是本文要介紹的沈積盆地的石油系統。

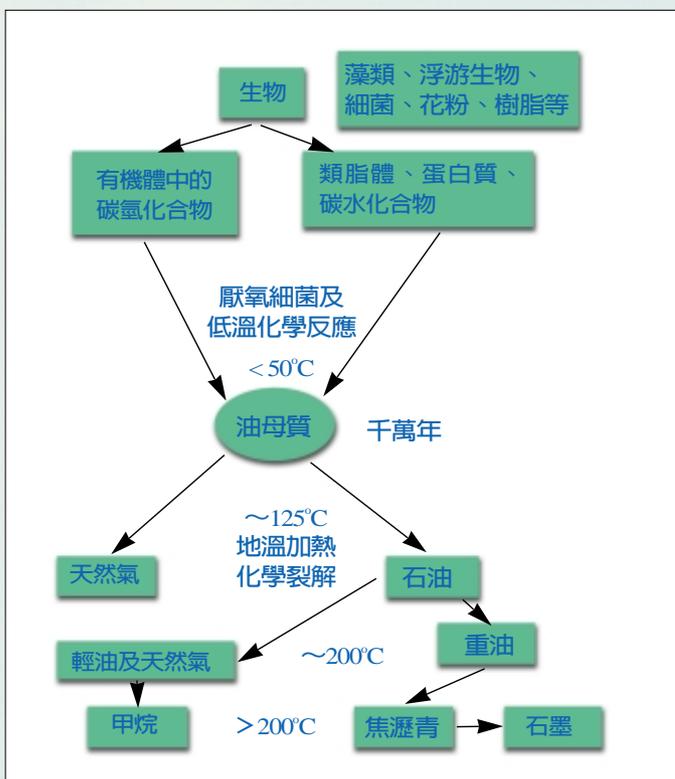
## 與黑金失之交臂

人類經由無數鑽探的失敗，終於了解地下的儲油構造並不一定代表有經濟價值的油藏。油藏中油氣含量的多寡得視該探勘區的石油系統的體質：包括生油岩層的分布、潛能和成熟度、油氣移棲的途徑、蓋層的封閉能力和油藏的品質，以及油氣生成和油藏封閉形成的時間等。

上述莫克洛克井，經追根究柢後發現大量的石油曾流經該地下油藏，但如今已不存在，這可能是在漫長的地質年代中漏掉，或油藏尚未完全封閉前石油就已經移棲而過。這些石油可能往上移棲而漏出地表被氧化，或往南移棲匯集成其他油藏。



美國懷俄明州Green River地層中的生油岩。影像是該生油岩的薄片，利用偏光顯微鏡所照。白色是石英顆粒，棕色是其他礦物或黏土顆粒，暗黑色是油母質。



石油及天然氣的生成過程

Hunt, 1996

## 慎終追遠話黑金

過去二十年來在地質學和地球化學的研究下，對於石油成因的了解已經大有進展，石油的生物成因說已近不爭的事實。雖然無機(非生物)成因的油氣也可能存在，但屬少量。生物成因說的重要證據是生物指標，也就是石油中殘留的生物分子仍具有生物體的分子構造或特性，是生物體中原有不易分解的化合物，在石油形成過程中殘留下來，一般可用來判別石油前身的生物種類、年代和沈積時的環境。

此外，從碳的穩定同位素分析也不利於無機成因說的可能性，因為油氣和生物相似，含有比無機碳較少的碳-13同位素( $C^{13}$ )。地球上的石油絕大多數產在含有生物有機物的盆地中，也支持生物成因說。如今我們已經能夠利用生物成因說的準則，成功地預測石油的產量和分布。石油成因的研究不僅是學理上的研究，也有實際上的功用。

## 黑金的誕生

石油是古代生物遺骸經由很複雜的生物和

化學作用轉化而成的，據估計大約只有千分之一或更少的生物體，有機會經過很快的掩埋與氧隔絕避免腐爛，並轉化成石油的前身油母質。油母質是一種大分子的有機地質聚合物，以固態存在於頁岩或碳酸岩的顆粒間，它的成分很複雜，含碳、氫和少量的氮、硫、氧。油母質的形成一般認為是由生物聚合物例如蛋白質等先分解成單分子體，再重新聚合成油母質。

湖裡沈積物中的油母質多數來自藻類、細菌孢子花粉或樹脂等，以產生液態石蜡系的碳氫化合物石油為主。海裡沈積物中的油母質多數來自浮游生物、藻類、細菌和少量陸上植物，以產生液態石油為主，天然氣為輔。陸上沈積物中的油母質多數來自高等植物的木質素，以產生天然氣為主。因此了解生油岩中油母質的來源，可以預測所產出石油的成分和油與氣的比例。

油母質的形成多數在沈積掩埋的早期，當時的地溫多不超過攝氏50度。大約經歷幾千萬年，沈積物越埋越深，地溫越高(約攝氏100~150度)，油母質的成熟度達到一定範圍(油窗)就轉化成液態石油或天然氣。

石油的生成是受化學動力控制的不可逆反應，就像我們煮食物一樣，溫度高所需時間短，溫度低得慢慢熬。油母質轉化成石油一般認為符合反應速率的準則。石油地球化學家以實驗模擬，把油母質在壓力鍋中加熱觀察石油的產生並測量其反應速率和參數，再從地層中已知生油岩掩埋的深度或其相當的地層溫度和地層掩埋的時間(約千萬年)，去估計石油生成的量。

台灣大學地質科學研究所石油系統實驗室，利用鑽石砧熱解新技術，在顯微鏡下觀測石油及天然氣生成的過程，全程以CCD數位攝影機即時錄影。



埋藏在深處的石油分子經過長期地熱的煎熬（約攝氏150~200度），逐漸裂解成天然氣和焦瀝青，終究有機會以氣態再度移棲到淺處成為天然氣藏，或以固態的天然氣水合物隱藏在深海底，或逸出地表。石油裂解過程如同石油的生成一樣是不可逆反應，甲烷和石墨為其最終產物。

## 黑金的流浪生涯

石油從油母質產生後，起初多被殘留的油母質所吸收，當石油的量超過油母質所能吸收的最大量時，就進入生油岩地層的孔隙間。當石油越生越多，地層內壓力升高將油氣由生油岩排出到周圍孔隙度高的地層中，有時生油岩地層壓力高過岩層的強度則發生破裂，因而加速油氣從生油岩中排出（初次移棲）。

當油氣進入高孔隙的地層中，由於孔隙大，毛細阻力小，油氣可藉由浮力快速沿著此運載地層往淺處移動，這是二次移棲。當油氣在移棲途徑中遇到不透油的地層（封阻）受阻而停留下來，慢慢由上而下匯集在此封閉地層中，封閉內的石油越聚越多，就形成所謂的油藏。

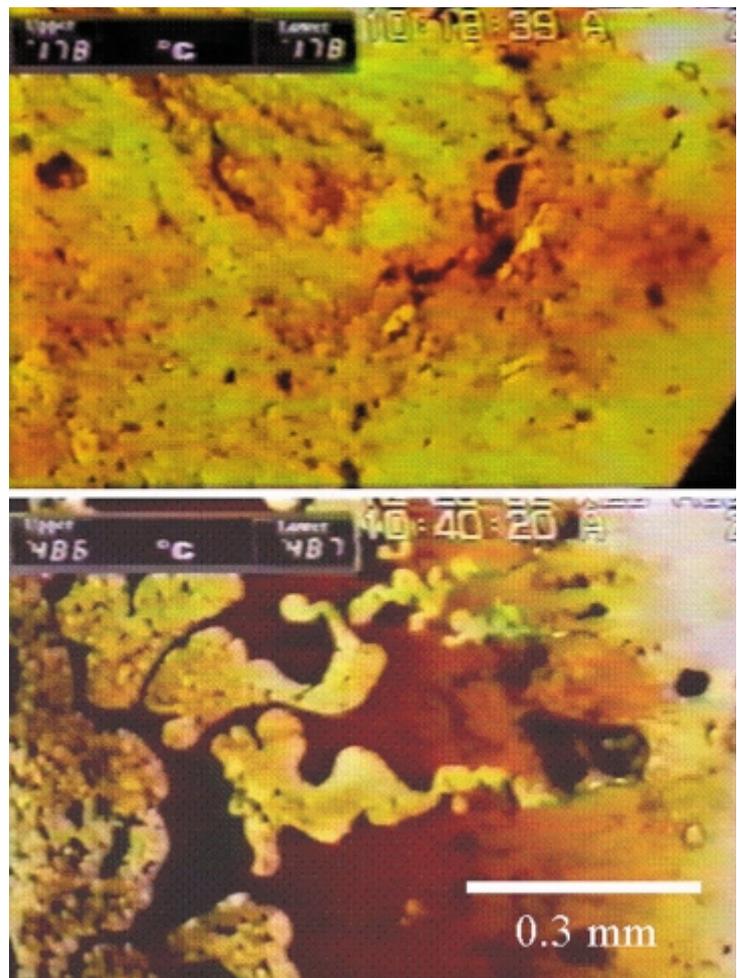
倘若油的來源不斷，繼續匯集，一直到此封閉地層被油氣所填滿，若有油氣再補充進入，則由下方溢口溢出，經由其他途徑再向淺處移棲。除了少量油氣有朝一日為人類服務，多數殘留在地層內的油氣終究難逃被細菌吞噬的命運，因細菌生化作用大大改變石油的成分和性質，使其變重而多硫，並不為人類所喜歡。

## 萬里追蹤黑金

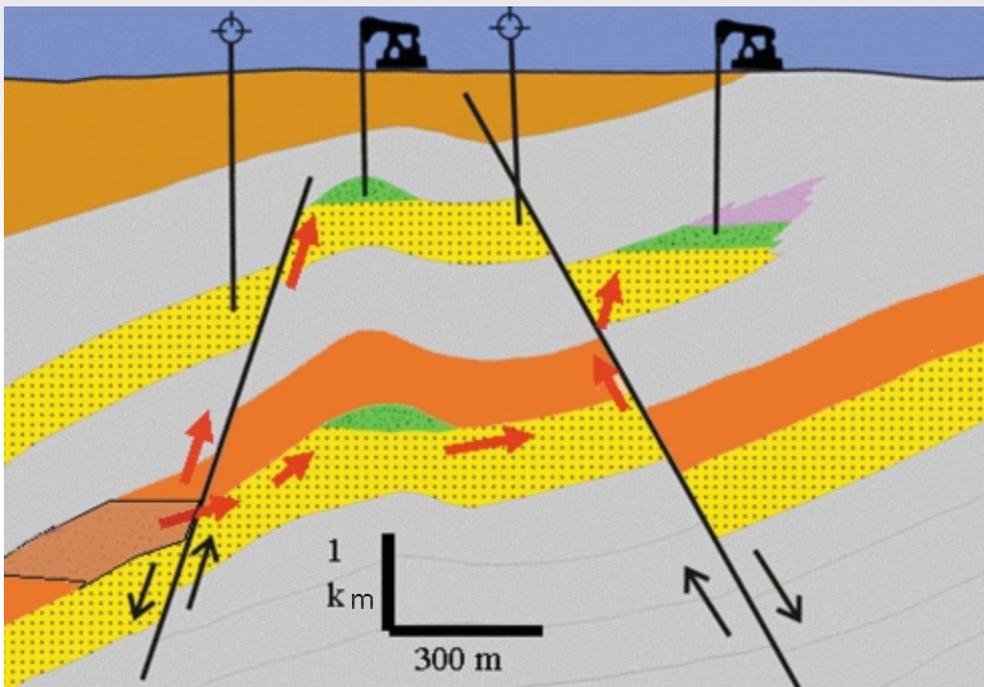
石油探勘者若能準確地定出石油移棲的途徑和方向，就可在沿途按圖索驥探尋可能存在的油藏。我們如何知道石油移棲的途徑和方向

呢？石油地質學的研究告訴我們，石油二次移棲的途徑和方向與地下地質斷層構造和運載地層的特性或連續性有密切關係。地球物理學家利用震波探測技術和地質學家研究地層的變化與構造，提供我們詳細的地下地質輪廓，讓我們了解油氣最可能移棲的地層或斷層，以及能夠封阻油氣的蓋層和封閉。

地球化學家從石油中的生物指標或碳和氫同位素，告訴我們油藏中的石油是從哪個生油岩地層來的，並追蹤生油地層和石油移棲的方向，就如同刑事警探利用指紋和DNA追蹤罪犯一樣。有些生物指標的特性和含量可告訴我們油母質是否已成熟，石油是否已生成。此外，因為石油中的



上圖是從 Green River 生油岩所分離出的油母質，在鑽石砧顯微鏡下的影像。下圖是該油母質加熱產生油氣的影像。白色氣泡是油母質或石油（棕色液體）裂解產生的天然氣。



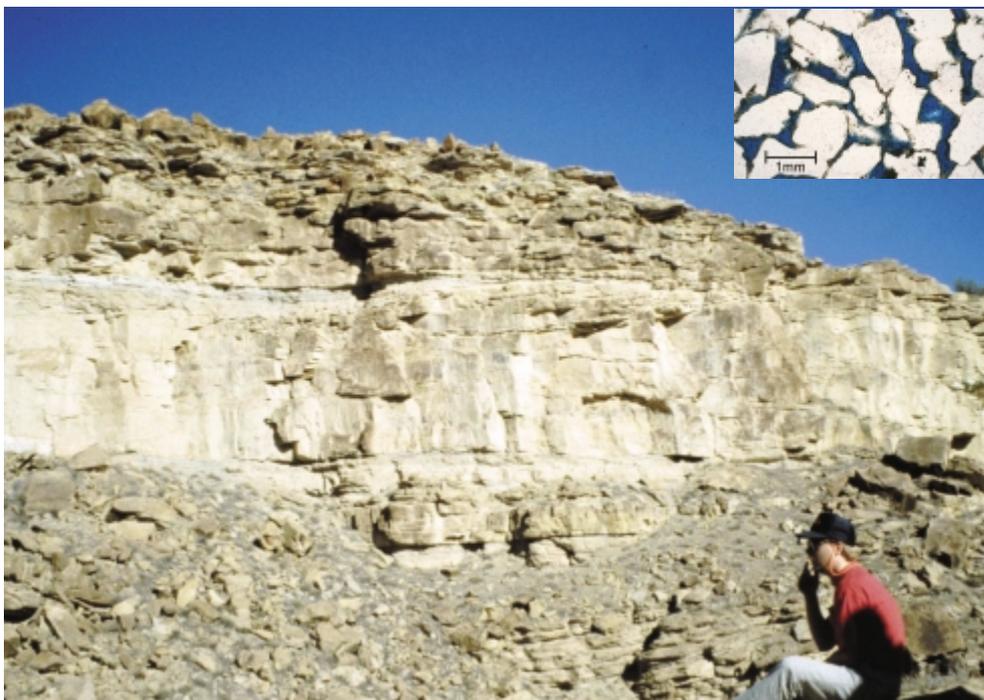
**石油系統示意圖** 黃色地層是砂岩，是良好的儲油層，灰色地層是頁岩，是良好的蓋層，黑色斜線是斷層，黑色箭頭是斷層方向。橘色地層是生油頁岩，而深棕色是已成熟的生油岩，石油從成熟生油岩生成後往上移棲（紅色箭頭指示移棲方向），遇到蓋層受阻而匯集到油藏（綠色是油藏，紫色是天然氣藏）。

極性有機分子在移棲途中易被地層中黏土礦物吸附，所以它的含量隨移棲距離增加而減少，也因此可告訴我們石油移棲的遠近。

## 黑金的歸宿

石油在地下匯集到油藏封閉，就如同河水在地表匯集到湖泊、池塘、水庫或海洋一般。不同的是石油的流動（移棲）是由下往上升，倘若地下移棲通道順暢，石油終究要漏出地表而消散。所幸地下經常存在著滲油性很低的地層，如顆粒很細的泥岩、頁岩，或很緻密含石膏鹽類的蒸發鹽岩等。這些岩層受擠壓而形成背狀或帽型的構造（背斜），成為良好蓋層，倘若蓋層下的岩層是孔隙大的岩石如砂岩、碳酸岩等，則這些地層中的岩石孔隙就成為容納石油的空間。

在儲油層中，氣、油、水由於比重不同，是成層狀存在的，天然氣層在上面，其次是油層，最下面是水層，但有時候天然氣與油可以單獨與水共存。



美國科羅拉多州Book Cliff的厚砂岩（中間白色是砂岩地層，其上下是砂頁岩地層），是河道及沙洲的環境所沈積。這類地層在地下尚未抬升前是標準的儲油地層。照片中的小插圖是顯微鏡下所觀測到的該砂岩薄片影像，白色是含石英及長石礦物的砂粒，藍色部分是顆粒間的孔隙，石油在地層中就儲存在這類孔隙中，這是優良的儲油砂岩。

一個儲油層能儲集多少的油，除了有多少油匯入外，和該儲油層的大小、岩層孔隙的大小與多寡（孔隙度）、以及蓋層本身封阻石油的能力都有關係。一般而言，油藏中石油柱體的高度越高，油藏頂部的浮力越大，越易衝破蓋層而漏油。因此該油藏可容納多高的油柱，取決於蓋層的封阻能力。地質學家和油藏工程師利用對蓋層的滲油性（滲透率）的研究，可推測地下油藏含油柱的高度，進而準確評估石油的儲量。

儲油層的品質除關係石油的儲量外，對於石油的採收率也具有決定性的影響。儲油岩在深埋過程中被壓實和被次生礦物膠結的程度，會影響其孔隙度和滲透率，因而決定儲量和生產過程中石油在油藏中流動的難易。所謂「油氣探勘」

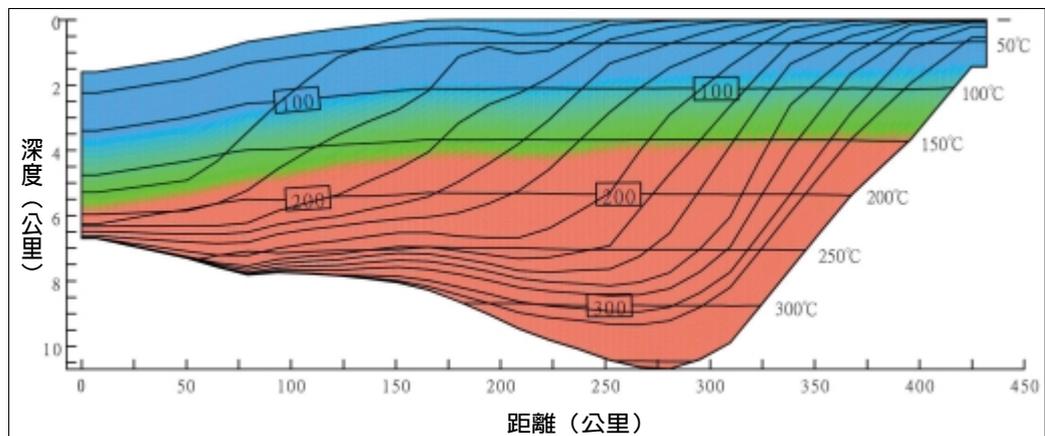
就是尋找具有經濟價值的油藏，而預知儲油層的品質是油田探勘和生產開發計畫所需的資訊。

### 面臨嚴重的黑金短缺

幾年前世界權威性的科學雜誌，《科學美國人》（*Scientific American*，一九九八年）及《科學》（*Science*，一九九八年）陸續發表幾個重要的能源研究機構，對於未來世界石油供需問題的研究結果。多數都不約而同地預測嚴重的石油短缺，快則10年，慢則30年內即將來臨。除非新的主要能源及時出現，人類在不久的將來再度面臨能源危機是不可避免的。

人類從十九世紀大量使用石油至今，短短兩百年間，就將大自然在千萬年的地質年代中所孕育的原油消耗殆盡。科學家們正竭盡所能利用各種新科技去了解地下石油的來龍去脈，希望能探尋更多的油氣，延續人類對石油依賴的時限。

沈積盆地地下的石油系統，過去20年來在地質學家和地球化學家的研究下，已有較清楚的輪廓。在新實驗技術和高速電腦的協



西非奈及利亞共和國的Niger Delta 盆地的地下地質剖面，該盆地長450公里，深10公里。這剖面是用14口井的地質資料，經由盆地分析軟體（Basin2）所模擬的。圖中彎曲線是各地質年代所沈積的地層界線（最底曲線為最老五千五百萬年的地層），而近水平的曲線是地下的等溫度線。白色區是盆地的變質岩基盤，沒有沈積物。圖中的顏色表示生油岩在不同深度的成熟度：藍色部分表示未成熟深度，綠色部分表示成熟深度（油窗），生油岩若沈降到此深度，則開始生成石油，紅色是過成熟區，生油岩或石油在此深度產生天然氣。

助下，科學家已能模擬石油的生成和含油沈積盆地的形成和演化，並能準確地算出生油岩層在地質年代所掩埋的深度和溫度，以及有機物的成熟度，最後推測該生油岩的產油氣量，甚至所產石油的成分等。目前石油系統的研究，正朝向準確預測變化莫測的油氣移棲的過程。在不久的未來，科學家將能抽絲剝繭地掌握地下石油的來龍去脈，無論大小油藏都將無所遁形。 □

黃武良  
台灣大學地質科學系