

石油哪裡來？

科學家在石油中發現許多與生物相關的訊息，「石油源自生物」的理論成為主流。探勘專家則從石油中殘留的生物分子，尋找石油的來龍去脈！

撰文／黃武良

今年9月，英國石油公司宣佈在美國墨西哥灣深海發現超級大油田，其蘊藏量估計比三年前同一地區探得30億桶之大油田還多，可比擬2007年底在巴西外海發現蘊藏量50~80億桶的超大油田，單此三處油田總量就足夠台灣使用65年有餘。一定有人納悶，為何台灣附近沒那麼幸運可以找到大油田？為何油田大多集中於某些地區呢？石油在地球上是如何分佈？要回答這一串問題，就得從石油是怎麼生成談起。

有機與無機生成

石油的成因早期有兩種學說：無機成因說及生物成因說，前者主要由前蘇聯科學家提出，到20世紀中葉仍為許多人所接受；而後者一直到1950年代分子生物學及有機地球化學開始進展之後，研究發現許多石油與生物間相關的證據，確認石油是古代生物的遺骸經由深埋、受高溫高壓的作用而成，才成為主流的理論。

然而，1980年代美國康乃爾大學教授高德（Thomas Gold）從天文化學的研究認為，地球內部物質理應含少量的碳，這些碳與地殼（約5-35公里厚）底下地函中含二價鐵的橄欖石（鎂鐵矽酸鹽）加

水反應產生的氫氣作用後，會形成甲烷（ CH_4 ，天然氣的主要成份），因而推測地殼底下可能有大量的甲烷存在。地殼下的甲烷若經由深部斷層向上移棲，並在礦物的催化作用下，可能聚合成石油，而被封存於地表附近的地層中。因此，石油的無機成因學說又廣泛受到討論。

為了驗證此假說，石油及天然氣資源貧乏的瑞典於1986~1992年花費約6000萬美元在瑞典中部、歐洲最大隕石坑形成的西利楊湖（Lake Siljan）鑽探兩口深達6.7公里的井。隕石坑下方有許多隕石猛烈撞擊造成的斷層群，深達7-8公里，是地殼下的甲烷可能漏至地表附近的地區。但此深鑽並未發現油氣，無機成因說因而停擺。研究顯示，目前全球生產的油氣中，無機成因的比例極微（小於0.00001%），但不表示無機成因的油氣不存在，或許存於地殼深部，只是未發現而已。

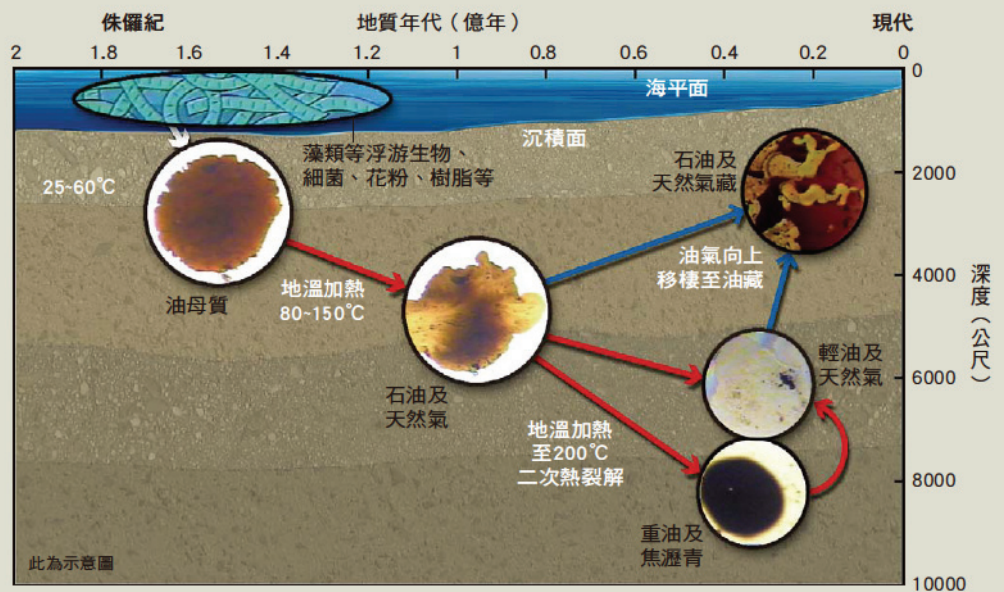
那麼生物成因說的證據為何？石油是由許多不同的碳氫化合物組成，其中有些分子具有類似只存在於生物體的分子構造或特性，因而推測其前身為生物體殘留之不易分解的化合物，我們稱之為生物指標。生物指標如同化石可用來判別石油前身的生物種類、年代和沉積時的環境。

重點提要

- 石油成因有兩種學說，無機生成說認為是甲烷聚合而成，有機生成說則認為是古代生物遺骸在地底經過高溫高壓與微生物作用而成。
- 目前探勘所得的石油，幾乎都是有機成份，源自油母質，存在於富含有機物質的泥岩、頁岩與碳酸鹽地層中。
- 利用人工產生的地震波穿透地底，從反射回來的影像可以得知地層構造，進而尋找儲油層的位置，鑽取油氣。

油氣生成過程

右圖是假想侏羅紀的海洋生物遺骸掩埋後，經過數千萬年下沉到幾千公尺深，逐漸轉化為油母質，再深埋加溫而熱裂解為石油及天然氣的過程。右圖內嵌的影像是從生油岩中分離出油母質，置於鑽石砧高溫高壓儀器中加熱後，產生石油及天然氣，並即時在顯微鏡下觀測或錄影所得。自然界中，石油生成的溫度約80-150°C，需時千百萬年，而實驗室中以高溫（400-480°C）在短時間內（20-60分鐘）即可產生石油及天然氣。



還有其他的證據可支持生物成因說，首先是油氣分子中的碳13與碳12的相對含量與生物分子相似，但碳13含量比非生物來源的含量少，因為碳12在生物進行光合作用時比較容易進入生物體；此外，地球上絕大多數的石油產在含有生物及有機物質的沉積盆地，表示石油與有機物間有密切的關聯。最後一項證據是將沉積岩中的有機物質「油母質」以人工加熱，可產生類似石油的油質。

石油工業界利用生物成因說的準則，已能成功預測石油的成份、產量和分佈。因此，石油成因的探討不僅有學理上的研究，也具有實用價值。

大自然的恩賜

石油是大自然孕育千萬年而成的地球資源，主要源自古代生物遺骸，包括藻類等浮游生物、細菌、花粉、樹脂等，沉積後在缺氧環境下經由複雜的微生物及化學作用，首先轉化成油母質。油母質是一種自然形成的高分子固態聚合物，一般存在於顆粒很細而且富含有機物質的泥岩、頁岩或碳酸鹽地層中。

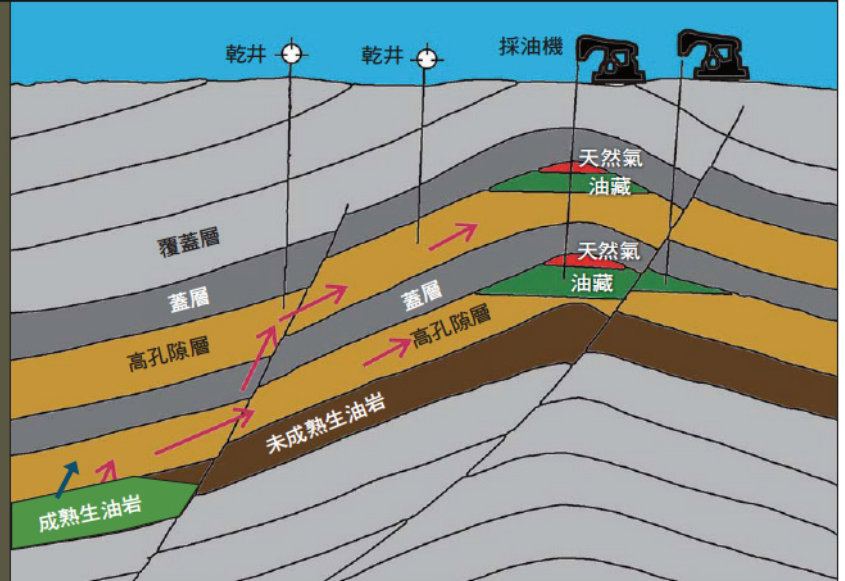
油母質進一步深埋至4000-8000公尺的地底後，由於溫度逐漸升高（約80-150°C）達到一定的成熟度（在石油探勘技術中稱為油窗），即開始裂解為較小分子的液態石油或天然氣（見上方〈油氣生成過程〉）。石油從油母質產生，隨即進入生油岩地層的孔隙間，當油氣越來越多、使地層內壓力逐漸升高，油氣便從生油岩排至周圍孔隙度較高的含水地層中（例如砂岩、碳酸岩）。由於砂岩孔隙大，毛細阻力小，油氣可藉由浮力快速沿著傾斜的運載地層或斷層往淺處移棲，一直遇到不透油氣的蓋層（例如厚層頁岩、鹽岩等）受封阻而停留下來，並慢慢由上而下匯集在此封閉的地質構造中（見58頁〈沉積盆地的地下石油地質系統〉）。

儲藏油氣的封閉地質，一般是砂岩或碳酸岩地層經由褶皺而成的倒碗形背斜構造，上方覆蓋著不透油氣的蓋層。當封閉構造內的石油越聚越多，就形成儲油層或油藏。可見形成油田的地質條件，除了地層中須富含有機物或油母質的成熟生油岩，還要有足夠大的高孔隙地層構造可供儲油，同時上方也必須有良好的蓋層。

石油生成後，進入生油岩地層的孔隙間，逐漸累積後，排至孔隙較大的地層中，遇到不透油氣的蓋層則停止移動，形成封閉的儲油層。

沉積盆地的地下石油地質系統

油氣從成熟的生油岩中產生後移棲（如藍色箭頭所示）至高孔隙層（砂岩或碳酸岩）中，並經過浮力的驅動，沿著該地層或斷層往上移棲（如紅色箭頭所示）至拱型或倒碗型的背斜構造（封閉或儲油層），其上因覆蓋著不易透油氣的蓋層（頁岩或蒸發岩）而匯聚成油藏（綠色）及天然氣藏（紅色）。鑽探井若打在背斜構造外圍，就可能是乾井，而若打在背斜構造但沒油氣移棲過來之處，也是乾井。



中東地區何其幸運同時具備這三個條件，它們豐富的油氣資源與沙漠無關，而應歸功於2億多年前大陸漂移初期，盤古大陸裂開後，形成北面的勞亞古陸與南面的岡瓦納古陸，中間於赤道附近造成一東西向的特提斯海道（Tethys Seaway），這個淺而狹長的海域（即今日的中東地區）極適合海洋生物生長，特別是藻類，這些浮游植物大量繁殖，殘骸也保存了下來，因此於2億年前（侏羅紀）至1億3000萬年前（白堊紀）沉積大量的生油岩。同時由於海水面的上升及下降，生油岩間穿插著珊瑚礁形成的碳酸岩層，可供儲油，其上又沉積寬闊的蒸發岩或鹽岩，做為極佳的蓋層，形成好幾套「生」、「儲」、「蓋」組合。

反觀台灣西部及海域附近的盆地，雖擁有厚達5000多公尺以上的地層，也不乏有可供儲油的高孔隙砂岩地層，與可做為良好蓋層的頁岩，又配合適當的地層溫度足夠讓油母質成熟產油氣，然而唯獨欠缺產油的海相生油岩。台灣西部由於處於歐亞板塊邊緣，過去數千萬年來沉積的有機物質，大多數為陸上沖刷下來的植物殘骸轉化而成，有機質含量低，這種陸相有機

物主要產氣及凝結油，僅能產少量原油。

此外，台灣附近地殼活動頻繁以致斷層遍佈，形成的可儲油氣構造小，並且油氣易逸漏，加以構造複雜、探勘不易等，因此未發現大油田，但西北部幾個油氣田，例如出磺坑（見65頁〈苗栗出磺坑背斜構造〉）、鐵砧山、青草湖等，過去數十年也曾生產數量不少的天然氣及石油。

油氣探勘的新挑戰

了解地下石油的來龍去脈後，即可進行油氣探勘、尋找有經濟價值的油藏。探勘者通常會先判斷一個地區是否有成熟生油岩存在，再探尋附近地下可儲油的構造。

如何透視地下地層的構造是油氣探勘最大的挑戰。多年來，地球物理學及地質學的研發和應用，已能由人工產生的地震波穿透地下地層，利用反射回來的影像獲得地層構造的輪廓，再經過複雜的資料處理、精確的修正及地質解釋，以最新的影像分析技術呈現三維的地層構造，過程類似醫學上利用超音波透視人體內臟。震測技術能確認油氣最可能移棲的地層或斷層，並尋找油藏封閉和能夠封阻油氣的蓋層，甚至可判別地層的岩性及孔隙度等。

關於作者



黃武良為台灣大學地質科學系教授，美國芝加哥大學地球物理科學博士，曾經於美國航空暨太空總署以及艾克森美孚石油公司從事研究20年。研究領域及興趣在於石油地質系統分析、油氣資源評估、天然氣水合物合成、二氧化碳地質封存、奈米礦物材料合成及應用，以及核廢料處理。

苗栗出磺坑背斜構造

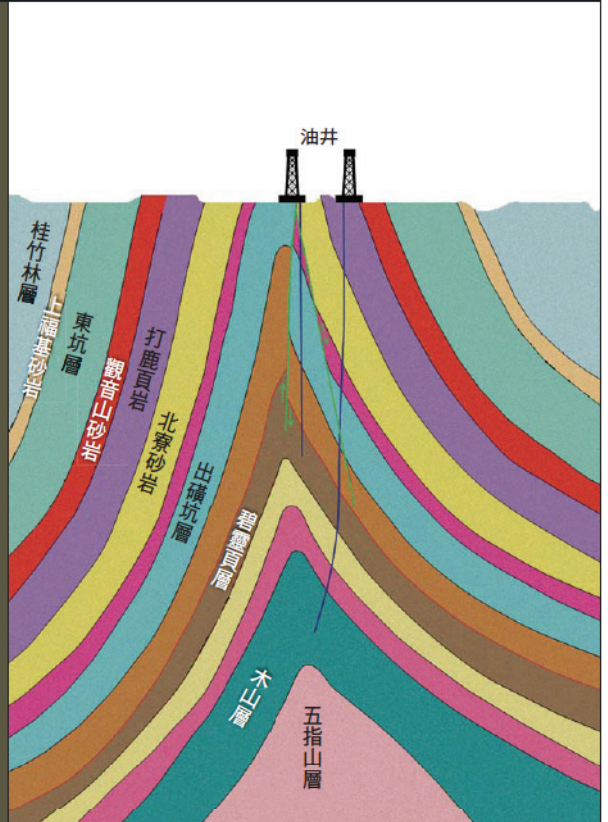
然而，具有可儲油的封閉構造不一定代表具有經濟價值的油藏，最有名的例子是美國的石油公司在阿拉斯加北極圈附近，花費高達15億美元鑽探一口乾井。鑽探前，他們經過震測和地質技術的評估，認定地下有一個可儲存15~100億桶原油的地質構造，但因為油氣生成量不夠、油氣封閉後又多逸漏出，評估後發現不具經濟價值。目前專家正在研發新一代的震測技術，期望能由震波的屬性，或縱波與橫波的差異，直接研判地層中是否含有油氣。在新技術尚未完全成功之際，評估油藏中油氣含量的多寡，仍得依賴對該區石油系統的體質檢驗，包括生油岩層的分佈、潛能和成熟度、油氣移棲的途徑、蓋層的封閉能力、油藏的品質，以及油氣生成和油藏封閉形成的相對時間等。

石油探勘者若能準確定出石油移棲的途徑和方向，就可按圖索驥探尋更多可能存在的油藏。有機地球化學家從石油中的生物指標或碳氫同位素，可以告訴我們油藏中的石油是從哪個生油岩地層而來，並藉此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。在新實驗技術和高速電腦的協助下，科學家已能模擬石油的生成與沉積盆地的形成和演化，並能精確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，最後推測出該生油岩的產油量，甚至所產石油的成份等。

當油藏及鑽井工程師努力在已知油田中榨出更多的油氣時，地球科學家更抽絲剝繭進行研究，欲使無論大小油藏都無所遁形，以期能探尋更多的新油氣田，在人類未找到主要替代能源前，延續人類對石油依賴的時限。

近幾十年來，油氣探勘的區域也不斷更新，由陸上而海上，由淺海而深海，由溫帶而極區。深海是今日之寶，近年來類似墨西哥灣之深海油田，例如西非、南美洲巴西、秘魯之外海等地一再地被發現，使

台灣最早的油氣礦區「出磺坑」位於苗栗，於1861年開採，只比美國賓州世界最早的油井晚兩年，目前仍在生產中，是世界最老、持續最久的油礦區之一。地質上座落在一個適合油氣封閉的構造高區，此構造地層中央高、兩側及前後低，多數油氣存在於500~3500公尺深的地層（藍線所指為其中兩口井，綠線為斷層），目前共約有15個儲油氣藏，是理想的油氣封閉背斜構造。



得全球探勘事業再度回春。極地則是明日之星，最近北極區油氣資源已成為附近國家爭相宣示擁有之資產，而南極四周的大陸棚則是未來探勘目標；根據美國地質調查所評估，儲存於極區的石油及天然氣約佔全球總蘊藏量的24%。

此外，前蘇聯解體使得西方各石油公司得以參與探勘開發前所未及的油氣田，其中以中亞裏海附近的油氣田最具前景，僅哈薩克的卡沙根油田的可採蘊藏量就高達40~130億桶，而西伯利亞及庫頁島的油氣田也是極具潛力的拓荒區。

全球化的趨勢使得過去主張保護主義的產油國，例如巴西、委內瑞拉等，紛紛施行開放合作開發的政策。在亞太地區，富藏油氣的東南亞、中國沿海、西澳外海等沉積盆地，將是未來探勘活躍區。這些新拓荒區的出現，加上鑽探、生產及開發技術的突飛猛進，未來二、三十年間，石油探勘與生產工業將邁向另一個高峰。 SA



苗栗出磺坑：台灣中油公司於2009年開鑽的145號井。