

頁岩油氣礦區評估與應用

王志文¹、曾繼忠¹、傅式齊¹、陳大麟²、胡興台¹、潘時瑜¹
呂明達¹、劉馨賢¹、黃乙倫¹、莫慧偵¹、伍允豪¹、田志明¹
林孝維¹、張光宇²、陳達村²、王文烈¹、吳柏裕¹

台灣中油公司探採研究所¹

台灣中油公司探採事業部²

摘要

本研究根據國外文獻並整合中油公司目前既有的評估技術與軟體，建立頁岩油氣礦區評估工作流程，實際進行案例分析時，將根據資料蒐集之豐富度修正評估流程，最後提出頁岩油氣礦區建模與模擬評估流程及區域生產資料類比評估兩種方法，提供未來進行頁岩油氣礦區評估之參考。

本研究以North Dakota的White Earth礦區，進行頁岩油氣礦區建模評估案例分析，並以Middle Bakken為鑽探目標層，完成目標礦區地質參數評估與最佳鑽探位置評估，進行水平井液裂數值模擬模式建立，可用於未來數值模擬與經濟評估之用。另外，以Colorado (科羅拉多州)的PCP礦區評估案，進行區域生產資料類比評估案例分析，經目標區與類比區參數比對，選定Codell層進行生產剖面預測與經濟評估，惟該案評估結果因未達本公司投資門檻。

關鍵詞：非傳統、頁岩油氣、建模評估、類比法、遞降分析

一、背景說明

由於傳統油氣資源逐漸耗竭，且非傳統油氣資源具有分佈範圍廣泛以及油氣資源規模大的性質，因此非傳統油氣資源已逐漸成為目前油氣開採的新趨勢。假若石油公司要進入頁岩油氣礦區，就必須先了解頁岩油氣礦區的地質與生產特性等，才能在分布廣泛的範圍中，找到有利於鑽井生產的位置，增加單井可採量及提高礦區蘊藏量。本研究根據國外文獻並參考實務工作經驗，提出頁岩油氣建模與模擬評估流程及區域生產資料類比評估兩種方法，並將此技術應用於國外頁岩油氣礦區，驗證此評估技術的成果，提供給相關技術與決策人員做為是否投入該礦區之參考。

二、技術建立

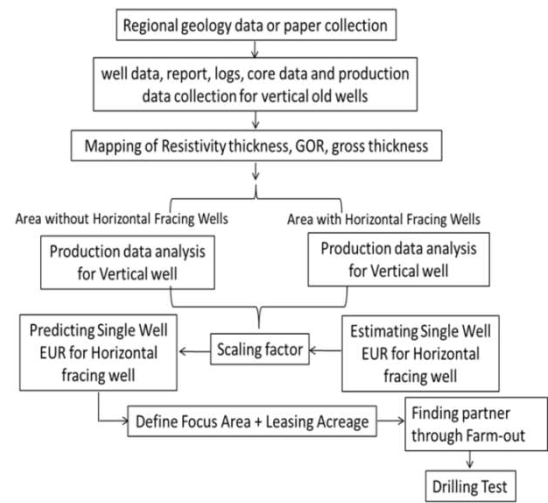
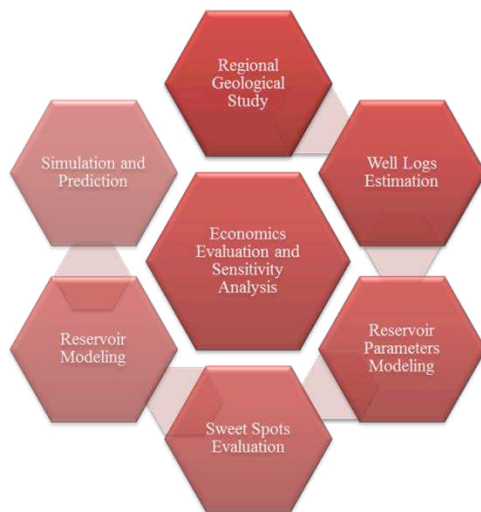
本研究根據礦區資料蒐集之豐富度修正評估流程，目前擬定的評估流程包含：頁岩油氣礦區建模與模擬評估流程及區域生產資料類比評估兩種，評估流程說明如下：

(一)頁岩油氣礦區建模與模擬評估

對於礦區資料較為充足且有足夠的時間進行詳細評估時，本研究會進行建模與模擬評估，評估流程(圖一)包含：(1)區域地質資料蒐集與評估；(2)井下電測估算；(3)目標礦區地質參數建立；(4)最佳地質鑽探位置評估；(5)數值模式建立與模擬；(6)目標區生產曲線預測與經濟分析。

(二)區域生產資料類比評估

對於礦區資料較不足或是需要進行快速評估時，可利用區域生產資料類比評估法進行評估，其評估流程(圖二)包含：(1)目標礦區資料蒐集；(2)鄰近礦區資料蒐集；(3)目標礦區與鄰近礦區資料類比；(4)類比區典型井生產曲線推估；(5)目標區生產曲線預測與經濟分析。



圖一、頁岩油氣礦區建模與模擬評估流程圖。 圖二、區域生產資料類比評估流程圖。

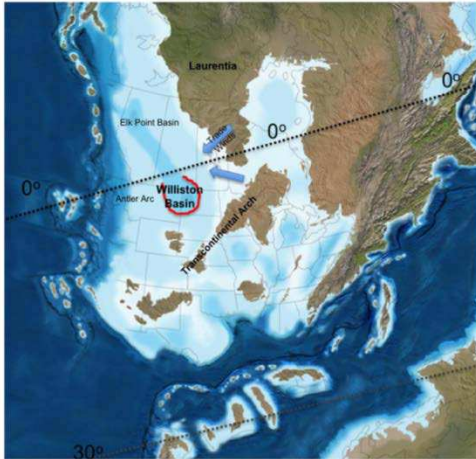
三、研究成果

(一)頁岩油氣建模評估案例分析

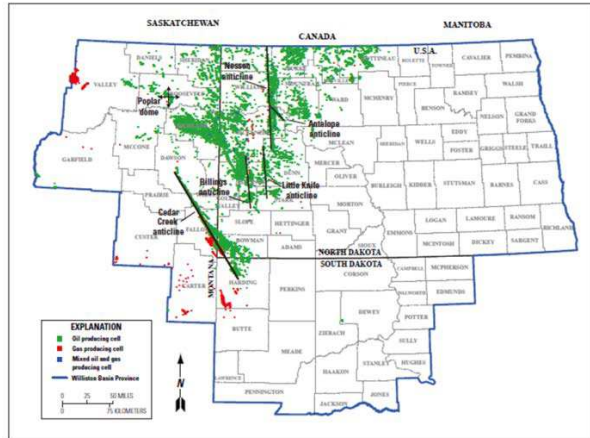
本計畫選定位於美國Bakken頁岩的White Earth礦區(White Earth Project)作為評估區域。White Earth礦區位於North Dakota州Mountrail郡內的西南方。該礦區目前仍在PLS(Petroleum Listing Service)礦區買賣服務公司上銷售。

1.區域地質資料蒐集與評估

Bakken頁岩地層屬於Williston盆地的深部沉積地層，沉積於360百萬年前的Devonian晚期~Mississippian早期，在此期間，大部分的美西地區都是一個寬而淺的陸緣海，Williston盆地位於此陸緣海的中央，為半封閉的海路環境(圖三)。盆地內構造單元單純，主要為三個南北走向的背斜(Nesson、Little Knife、Billings anticline)、二個西北-東南走向的背斜(Cedar Creek、Antelope anticline)、以及一個芎隆構造(Poplar dome)，油氣發現與此盆地內主要的背斜構造息息相關(圖四)。Bakken 石油系統包含了Devonian的Three Forks Fm.頂部、Bakken Fm.、及Mississippian時期的Lodgepole Fm.。USGS評估Bakken石油系統的主要生油岩來自Bakken層上段和下段頁岩(Jarvie, 2010)。



圖三、晚泥盆紀時期北美的古海洋環境(Johnson, 2013)。



圖四、Williston 盆地中油氣地發現與主要的構造單元關係圖 (Pollastro et al., 2013)。

2. 井下電測評估算

本研究目標礦區內蒐集到 25 口井的電測資料(圖五)，選取電測測量深度達到 Bakken 頁岩層的 11 口井來繪製連井圖(圖六)。由連井圖可判別 Bakken 頁岩層的地層分層(圖七)，圖中每口井的左邊為珈瑪(GR)電測曲線，上色後可清楚看到深褐色珈瑪值較高的兩塊，分別為 Top Bakken 和 Bottom Bakken，中間所夾著的 Middle Bakken 就是目標礦區的鑽探層位。

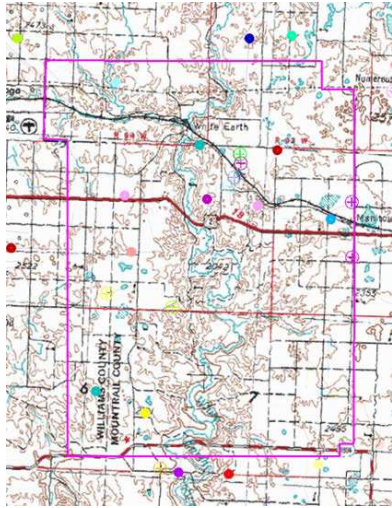
3. 目標礦區地質參數建立

本研究利用地質統計方法繪製目標礦區 Middle Bakken 頂部及底部深度圖。由 Middle Bakken 頂部深度圖顯示 Bakken 頁岩層由東北向西南逐漸變深，最深達到 8,500 英尺(圖八)。將頂部與底部深度相減後可得到 Middle Bakken 地層垂向厚度分佈圖(圖九)，圖中紅色框線內為目標礦區的地層厚度，其值介於 60 到 75 英尺之間，以礦區北方厚度較厚。

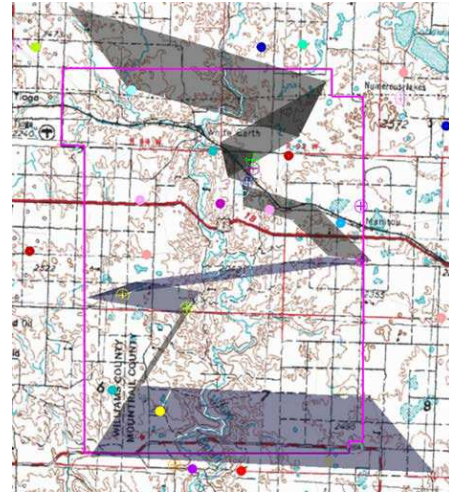
此外，透過各井的電測解釋和岩心資料的分析結果，繪製出 Middle Bakken 中子孔隙率分佈圖，顯示目標礦區的孔隙率介於 0.1% 到 8% 之間，以礦區北方的孔隙率值較高(圖十)；頁岩含量分佈圖，顯示標礦區的頁岩含量百分比介於 22% 到 32% 之間(圖十一)和 TOC 含量分佈圖，顯示目標礦區的 TOC 含量介於 4.5 到 5 之間(圖十二)。

4. 最佳地質鑽探位置評估

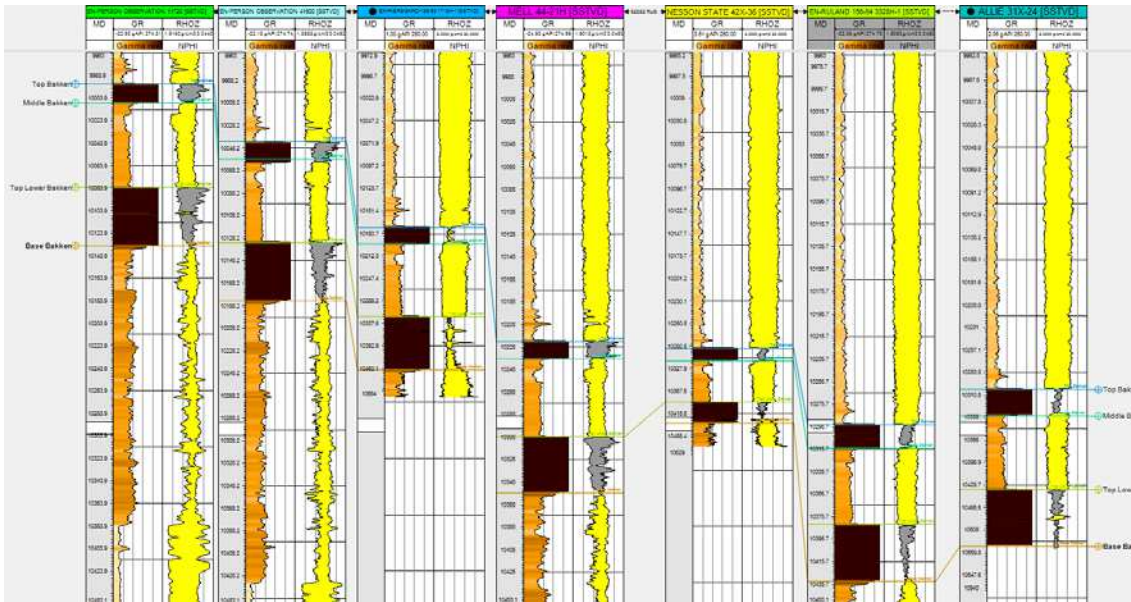
本研究先將目標礦區的垂向厚度(TVT)、TOC、孔隙率和頁岩含量四種參數，設定各參數的線性或非線性轉換函數，以獲得上述四個參數的成功機率分佈圖，再將四種參數成功機率相乘後，可得最佳地質鑽探位置評估圖(Chance of Success, COS)(圖十三)，圖中礦區北方綠色區域為最佳鑽探區域。將此最佳地質鑽探位置評估圖與實際的地表礦區位置套疊在一起，可得最佳礦區位置圖(圖十四)，圖中綠色區塊為最佳的礦區位置。



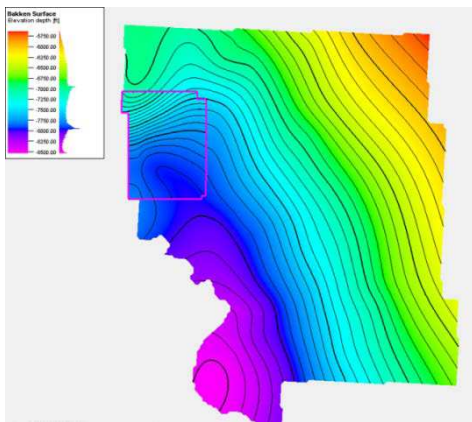
圖五、目標礦區區域地理圖。



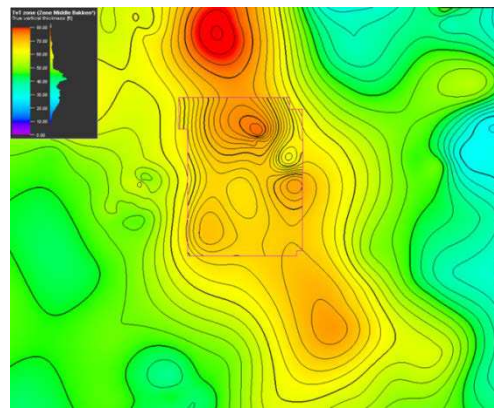
圖六、目標礦區連井線位置分布圖。



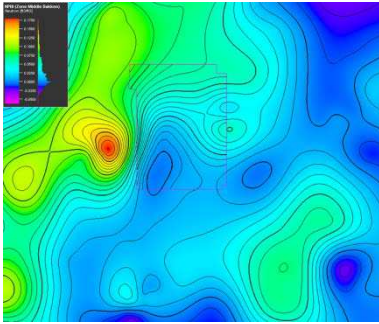
圖七、目標礦區地層層位連井圖。



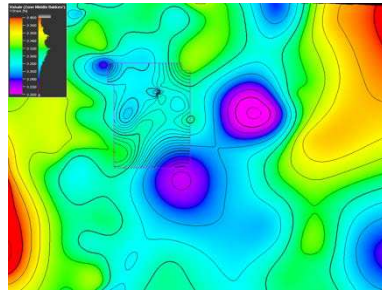
圖八、目標礦區 Middle Bakken 頂部深度圖。



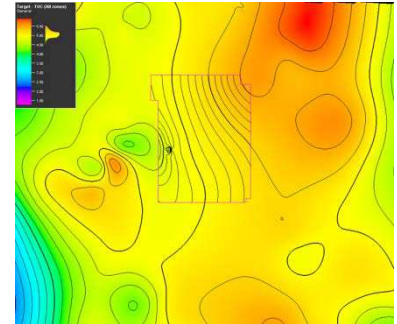
圖九、目標礦區 Middle Bakken 垂向厚度分佈圖(TVT)。



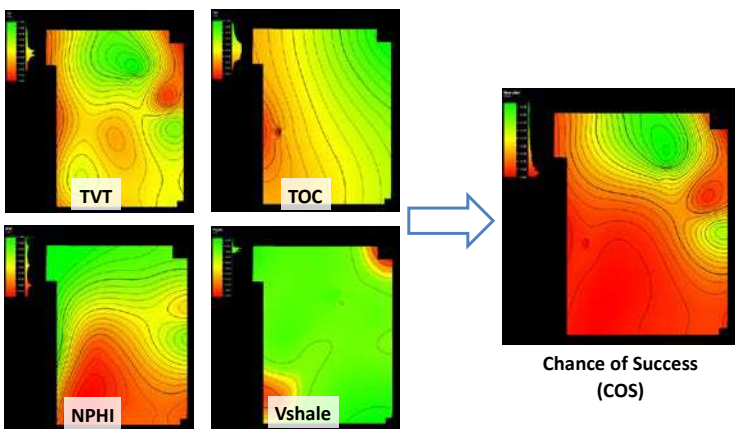
圖十、Middle Bakken 中子孔隙率分佈圖。



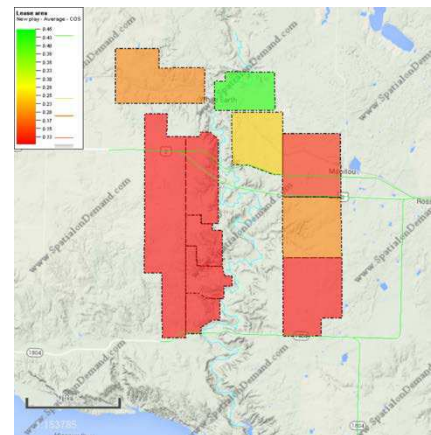
圖十一、Middle Bakken 頁岩含量分佈圖。



圖十二、Middle Bakken TOC 含量分佈圖。



圖十三、最佳地質鑽探位置評估圖。



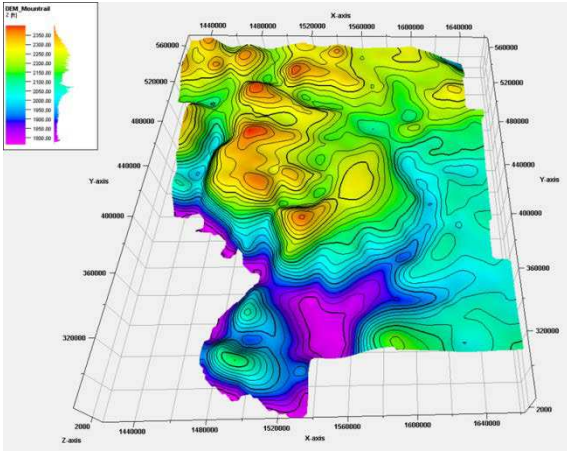
圖十四、最佳礦區位置圖。

5. 數值模式建立

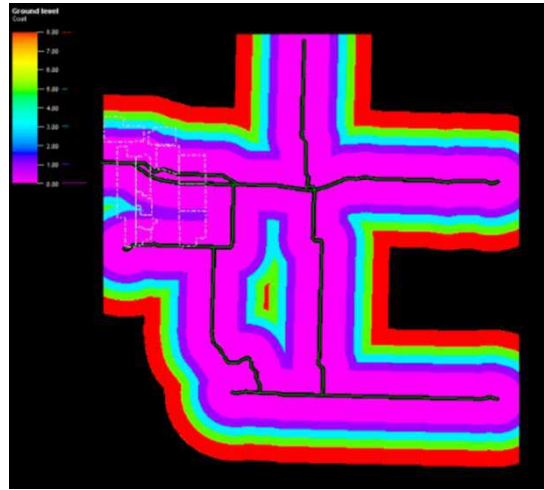
依據蒐集的地表地形圖(圖十五)和最佳礦區位置圖進行鑽井規劃。由最佳礦區位置圖(圖十四)可知 Mountrail 郡內的主要道路(綠色線)，假設距離主要道路愈近所花費的修路費用愈低，即可計算目標礦區的道路花費圖(圖十六)。再利用地表地形圖評估地表的起伏程度，假設起伏程度愈低所花費的開井坪費用愈低，即可估算出目標礦區開井花費圖(圖十七)。

本研究假設在一個井坪上，朝北方鑽鑿四口水平井，水平井長約7,000 英尺，每口水平井的間距為 500 英尺，將鑽井設計和花費評估同時考量，可規劃出目標礦區井位配置圖(圖十八)，由圖中評估結果可確認最小的礦區租地面積以及井坪位置。

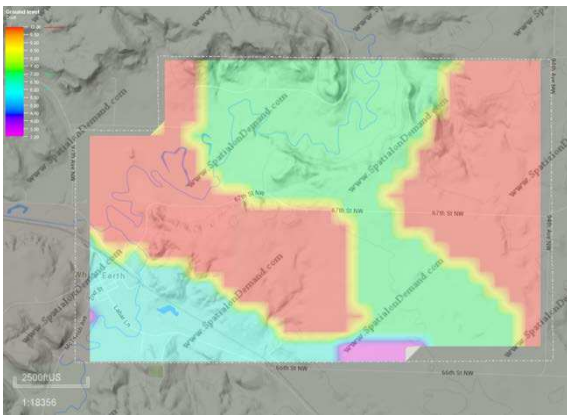
接著進行目標礦區地層數值模式的建立，利用電測解釋後的地層頂部深度圖以及地層厚度圖建立 Middle Bakken 地層數值模式(圖十九)，模式顯示 Mountrail 郡內整個 Middle Bakken 地層大致由東北向西南方向傾斜，最深達到海拔下 8,500 英尺。將 Middle Bakken 地層數值模式與地表井位規劃配置(圖二十)進行確認，顯示整個地層數值模式範圍相較目標礦區大許多，為了提高模擬的效率，簡化模擬的網格區域到目標礦區區域內(圖二一)。



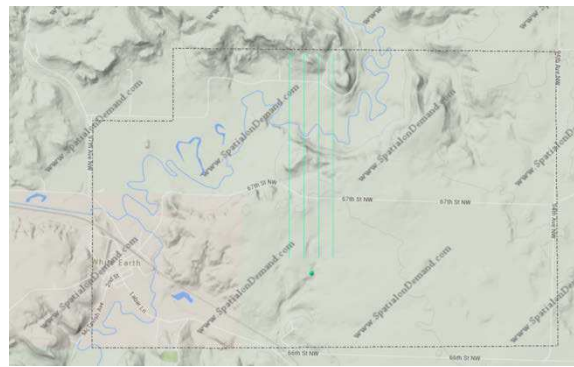
圖十五、Mountrail 郡地表地形圖。



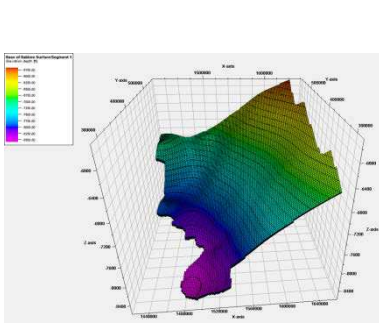
圖十六、目標礦區道路花費圖。



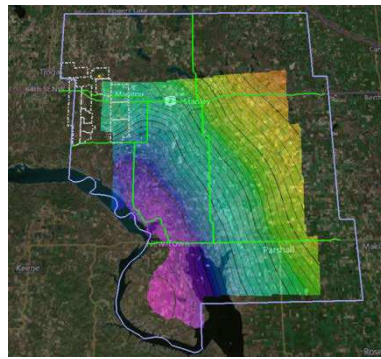
圖十七、目標礦區開井花費圖。



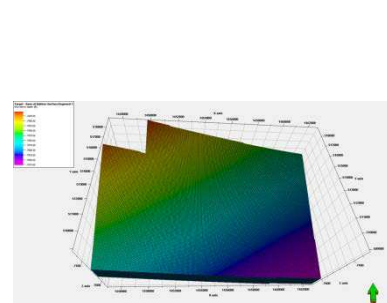
圖十八、目標礦區井位配置圖。



圖十九、Middle Bakken 地層數值模式。

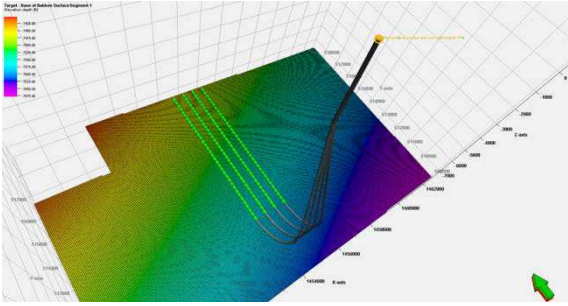


圖二十、地層數值模式與井位規劃圖。

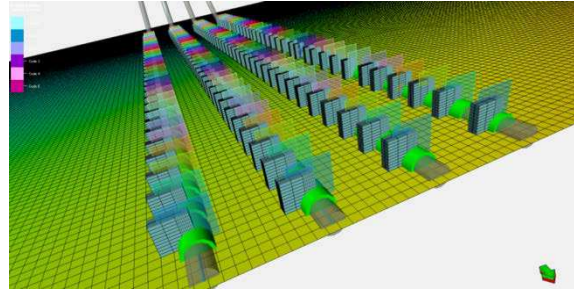


圖二一、簡化後的 Middle Bakken 地層數值模式。

完成地層數值模式的建立後，進一步進行水平井液裂網格建立，本研究假設每口水平井在水平段上平均設置 35 段液裂數，每段液裂間距為 200 英尺，鑽井規劃是在 Middle Bakken 底部進行鑽井並向上液裂(圖二二)。利用 Petrel 的水力液裂模組建立液裂網格，假設每個液裂面垂直於井口並向上開裂高度為 80 英尺，向下開裂深度為 10 英尺，寬度為 100 英尺，裂縫內的滲透率為 5 md，孔隙率為 5%，所建立出的數值模式(圖二三)可用於之後的數值模擬。



圖二二、水平井液裂設計。



圖二三、液裂數值模式。

本研究現階段完成頁岩油氣建模與水平液裂數值模擬技術建立，有關生產模擬、生產預測及經濟分析，在未來實際礦區評估中可進行。

(二)區域生產資料類比評估案例分析

本次案例礦區是由中油公司 KC 礦區(102 年完成之案例)之合作經營人(M 能源公司)於 104 年 3 月所提供，位於 Colorado (科羅拉多州)的評估案(Prairie Center Project，簡稱 PCP 礦區)。

1.礦區位置與區域地質介紹

Prairie Center Project (PCP) 礦區位於科羅拉多州、丹佛市東北方、Adam 郡(T1S, R66W; Sec.16、17、20、21)，面積 2560 英畝(圖二四)。礦區位於 Denver Basin 西側、Wattenberg 氣田東南端，該氣田在盆地西側沉積中心，成熟氣主要產層由深往淺為 J Sand、Codell Sand 及 Niobrara 白堊層。東側產層較淺之氣田，則自 Niobrara 白堊層產出生物氣，PCP 礦區位於 Wattenberg 氣田之東南端(圖二五)。

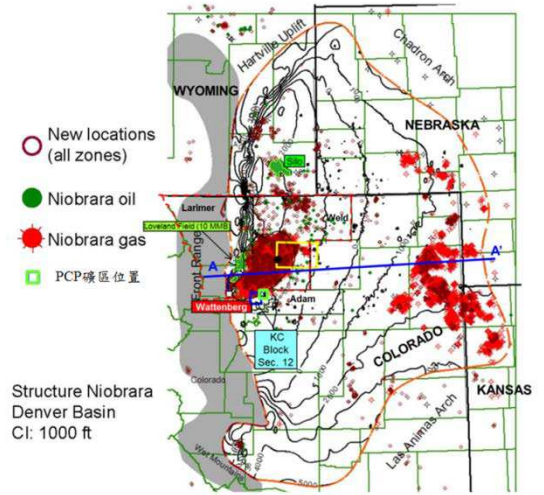
2.PCP 礦區地質及生產資料蒐集及分析

由科羅拉多州油氣資料保存委員會(COGCC)網站顯示 PCP 礦區中共有 8 口垂直井，實際僅 5 口井有資料可以整理，其中 3 口井具有井下電測資料可供地質分析，同時也整理初步生產資料、鑽井與完井資料。

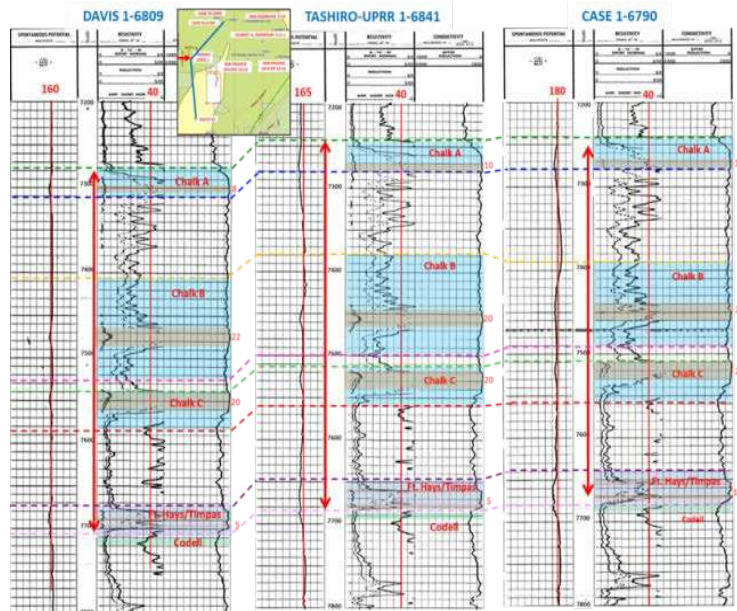
根據 Niobrara 的典型井電測分層及所蒐集到 3 口井的電測資料，進行礦區內地層分層對比與地層參數估算，首先利用岩性電測 GR Ray 進行地層分層，並參考典型井依序將地層分為 Niobrara Chalk A、Chalk B 及 Chalk C，同時也將 Niobrara 層下方的 Ft. Hays 及 Codell 地層對比出來。再利用上述 3 口井電測資料繪製礦區內由南至北的連井線圖(圖二六)。完成地層分層後可估算各層位的地層厚度，再根據區域的電阻經驗值(大於 $40\Omega\cdot m$ 可能含有油氣)估算含油氣潛能的厚度，並利用孔隙率電測紀錄各地層孔隙率值(表一)，可供後續生產剖面與潛能推估之參考。



圖二四、PCP 礦區位置圖。



圖二五、PCP 礦區位於 Wattenberg 大氣田之東南端 (Sonnenberg, 2012)。



圖二六、礦區內由南至北的連井線圖。

表一、PCP 礦區內地質評估資料表。

1S66W Sec 17 & 20 porosity and thickness									
Location	Well name	Codell Density Porosity (%)	Niobrara Total Thickness (ft)	Chalk B			Chalk C		
				Density Porosity (%)	Total Thickness (ft)	Thickness (ft) >40 ohm-m	Density Porosity (%)	Total Thickness (ft)	Thickness (ft) >40 ohm-m
Sec. 17, 1S 66W	CASE 1-6790	12%-16% (5 ft)	430	>12% (0 ft)	100	20 (20%)	>12% (0 ft)	50	20 (40%)
	TASHIRO-UPRR 1-6841	12%-15% (2 ft)	436	>12% (0 ft)	120	20 (16.7%)	>12% (0 ft)	42	20 (47.6%)
Sec. 20, 1S 66W	DAVIS 1-6809	12%-15% (2 ft)	430	>12% (0 ft)	120	22 (18.3%)	>12% (0 ft)	42	20 (47.6%)

3.類比礦區地質資料蒐集及分析

由科羅拉多州油氣資料保存委員會(COGCC)網站顯示類比礦區中共有 23 口垂直井,其中 4 口井具有井下電測資料可供地質分析同時也整理初步生產資料、鑽井與完井資料。

根據 Niobrara 的典型井電測分層及所蒐集到 4 口井的電測資料,進行礦區內地層分層對比與地層參數估算,首先利用岩性電測 GR Ray 進行地層分層,並參考典型井依序將地層分為 Niobrara Chalk A、Chalk B 及 Chalk C,同時也將 Niobrara 層下方的 Ft. Hays 及 Codell 地層對比出來。完成地層分層後可估算各層位的地層厚度,再根據區域的電阻經驗值(大於 40Ω-m 可能含有油氣)估算含油氣潛能的厚度,並利用孔隙率電測紀錄各地層的孔隙率值(表二),可供後續生產剖面與潛能推估之參考。

表二、類比礦區內地質評估資料表。

Analogue area: North West of Prairie Center									
Location	Well name	Codell Density Porosity (%)	Niobrara Total Thickness (ft)	Chalk B			Chalk C		
				Density Porosity (%)	Total Thickness (ft)	Thickness (ft) >40 ohm- m	Density Porosity (%)	Total Thickness (ft)	Thickness (ft) >40 ohm- m
Sec. 34, 1N 67W	SELIZEER #33-34	12-16% (12 ft)	415	>12% (6 ft)	92	32 (35%)	>12% (1 ft)	34	2 (6%)
	SELIZEER #44-34J	12-16% (15 ft)	447	12-16% (20 ft)	130	26 (20%)	12-16% (9 ft)	38	9 (24%)
Sec. 34, 1N 67W	SELIZEER #14-34	12-16% (12 ft)	373	>12% (0 ft)	105	15 (14%)	>12% (2 ft)	40	20 (50%)
	Grenemeyer Wagner #12- 34	14-16% (14 ft)	403	>12% (0 ft)	132	35 (26%)	>12% (10 ft)	40	32 (80%)

整體而言,PCP 礦區在 Niobrara 地層的高電阻區厚度約為 40 英尺,但其地層孔隙率皆不大於 12%,地層參數條件遠比類比區差,油氣含量多寡的風險太高,評估後不建議參加 Niobrara 地層的鑽探案,後續僅針對 Codell 地層進行生產評估。

4.類比礦區生產資料蒐集及分析

在水平液裂井鑽井、完井與生產資料蒐集及分析中,類比礦區共蒐集到 34 口水平液裂井的資料,這些井的完井日期約在 102 年底至 103 年初,進行類比礦區評估時的生產期間大約 7 至 9 個月,水平井長介於 3,000 至 9,000 英尺間,液裂段數介於 30 至 40,第一天的石油生產量介於 28 至 406 桶、天然氣生產量介於 34 至 878Mcf。

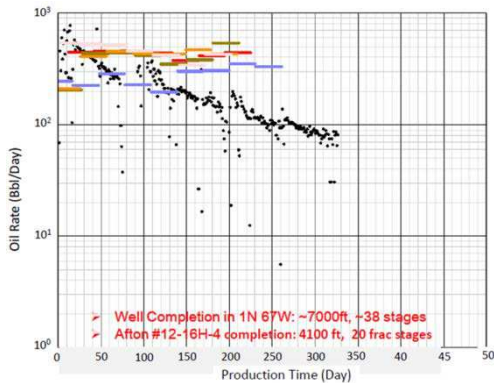
(1)KC 礦區生產井資料分析

KC 礦區生產的水平井長約 4,100 英尺,共施作 20 個液裂段,在進行生產資料分析時,本計畫利用 KAPPA 公司的 Citrine 生產資料分析軟體進行分析,分別採用 Exponential、Modified Hyperbolic、Power-law Exponential、Stretched Exponential 及 Logistic Growth 五種模式進行評估,並假設每天生產

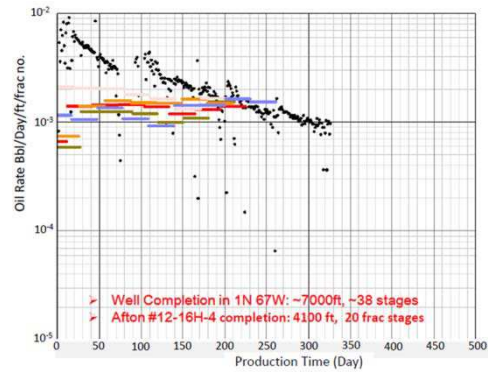
5 桶或 10 桶石油兩種經濟極限產率，可得分析結果為單井石油 EUR 介於 7.1 至 9.5 萬桶。

(2) Codell 生產層生產資料分析

Codell 生產層資料分析是利用 Sec. 34 中的 4 口井及 Sec. 27 中的 1 口井資料，再配合公司 KC 礦區生產井(Codell 層)一同分析。此類比區的水平井長度介於 7,000 至 8,000 英尺，液裂段數約 38 段。從石油生產量隨時間變化圖可知 KC 生產井從生產初期即開始遞降，其他生產井在 5 個月後並沒有遞降趨勢(圖二七)，顯示類比區生產井的生產量優於 KC 礦區生產井，若將每一口水平井的生產資料做正規化處理，這時類比區的生產井期生產量前期明顯比 KC 礦區生產井差，但後期尚未遞降而不確定(圖二八)。



圖二七、類比區 Codell 層石油生產量隨時間變化圖。



圖二八、正規化類比區 Codell 層石油生產量隨時間變化圖。

若僅假設生產量與液裂段數量有高度關聯，可發現類比區的生產井生產量在前 5 個月雖比 KC 礦區生產井差，但因尚未達到遞降趨勢，未來有可能較佳(圖二九)。再由前六個月石油累積生產量隨液裂段數變化圖可以發現，類比區的累積石油生產量與液裂段數成正比的關聯性較高，顯示類比區的 Codell 地質異質性較低，生產剖面類比時的不確定性也比較低(圖三十)。

5.PCP 礦區與類比區地質參數對比

比較 PCP 礦區與類比區地質參數，可得以下結果(表一和表二)：PCP 礦區在 Codell 地層密度孔隙率介於 12% 至 16% 間，孔隙率大於 12% 的厚度介於 2 至 5 英尺，類比礦區在 Codell 地層密度孔隙率介於 12% 至 16% 間，孔隙率大於 12% 的厚度介於 12 至 15 英尺。因 PCP 礦區在 Codell 地層有高孔隙率區，建議進行生產預測及經濟評估，以決定是否建議公司參加 Codell 地層的鑽探案。

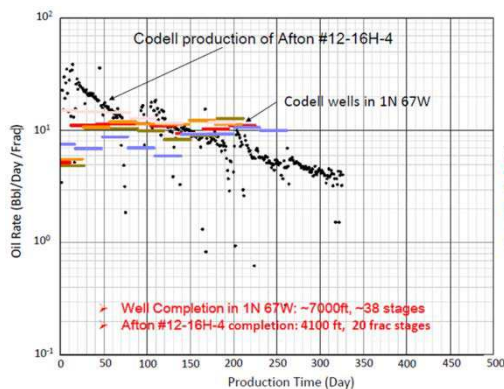
利用類比法推估 PCP 礦區的生產剖面時，要先決定從類比區推估過來權重因子(Scaling factor)，本計畫設計權重因子計算式如下：

$$\text{Scaling factor} = \frac{\text{目標礦區之}(h * \phi * \text{水平井長} * \text{液裂段數})}{\text{類比礦區之}(h * \phi * \text{水平井長} * \text{液裂段數})}$$

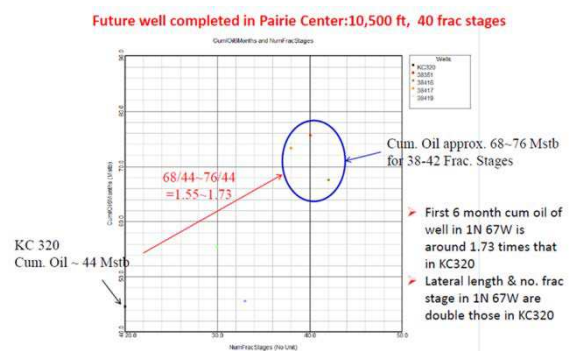
將相關參數代入後可得權重因子為 1.75，由於 KC 礦區生產井之單井石油 EUR 介於 7.1 至 9.5 萬桶，可推估 PCP 礦區生產井的單井石油 EUR 介於 12.4 至 16.6 萬桶間。

6.PCP 礦區經濟評估

本案係假設 OAI 讓入 100 萬美金以取得 50% 的工作權益，預計鑽著 12 口水平井，並蒐集與本案有關的經濟評估參數(表三)。由於前項工作評估 PCP 礦區的單井石油 EUR 介於 12.4 至 16.6 萬桶，因此，先以單井石油 EUR12 萬桶作為基本的生產剖面，並假設固定 GOR=7,000 mscf/stb 以獲得天然氣生產剖面(圖三一)。經過經濟分析後可知：公司投資本案在目前的經濟條件下，需要在 7 年後才可以回本(圖三二)。在單井 EUR 與油價敏感度分析中，本案必須待油價回到 70 美元/桶或是單井 EUR 達到 16 萬桶才有機會達到公司投資門檻；在單井鑽井費用與油價敏感度分析中，本案的鑽井費用必須降到每口井 4.5 百萬美元或是油價回到 60 至 70 美元/桶才有機會達到公司投資門檻。從經濟評估結果可知，本案因投資金額較小，投資風險受到油價與單井石油 EUR 高低的影響極大，建議暫不參加本案。



圖二九、正規化液裂段數類比區 Codella 層石油生產量隨時間變化圖。

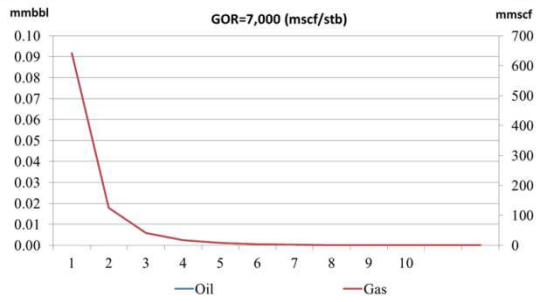


圖三十、前六個月石油累積生產量隨液裂段數變化圖。

表三、PCP 礦區經濟評估參數表。

Discount Rate	Discount Rate	10%
Price	Oil Price (\$/bbl)	42
	Gas Price (\$/mmbtu)	4
Royalty & Tax	Royalty	20%
	State Tax	9%
	Income Tax	35%
Capex	Well Cost(mm\$/well)	5.4
Opex	Fixed Opex (mm\$/yr)	0.06
	Variable Opex (mm\$/well/yr)	0.03
Drilling	No. of Wells	12

	Oil (mmbbl)	Gas (mmscf)
Peak Rate	0.09	642.40
Total Production	0.12	840.00



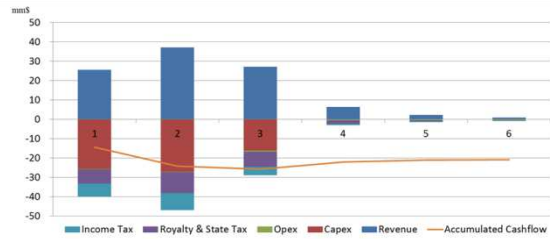
圖三一、PCP 礦區單井 EUR 生產剖面。

	Capex	Opex	NPV@10% (mm\$)	IRR
Full Project	68.8	4.44	-12.98	-
OPIC (WI 50%)	35.4 ¹	2.22	-7.49	-

備註:

1. OPIC carries 1 mm\$ Lease.

2. The net cash flow become negative in the 7th year, so this project only produced 6 years.



圖三二、PCP 礦區現金流量趨勢圖。