查德 BCO-III 礦區注水工程研究

梁閎森、王騏瑋、黃啟倫、林震宇、黃德坤、吳偉智

台灣中油股份有限公司探採研究所

摘要

注水工程是使生產井高產及穩產的一項重要技術，也是提高原油採收率的二級採油方法，主要是利用注水設備把滿足一定水質標準的清水或污水由注水井注入油藏，藉以補充油藏能量。在油田開發初期，儲集層含水率低且生產效益佳，水處理成本問題較易被忽略，而到油田開發中後期，開發策略往往需要提高產液量和注採比，導致注水量需增加，水處理與注水費用也大幅攀升，合理地制定適合油藏特性之注水水質將有利於成本控管。

油田常採用伴產水回注，伴產水在採出或處理的過程中常攜帶大量懸浮物(包括固相顆粒、油滴、細菌等)；另外，經由處理後的注入水也可能導致油藏黏土礦物剝離，而運移至較小孔喉處堵塞形成地層傷害，上述因素將導致油藏在注水工程上面臨許多需要克服的難題。本研究針對油田伴產水回注時，可能發生的地層傷害情況於實驗室進行試驗，探討注水水質及油層-流體配伍性等各方面影響下，對礦區注水增產之經濟效益，期能建立本公司油藏注水之水質標準評估方法，並降低礦區注水工程瓶頸。

關鍵詞：油田開發、注水增產、油藏水處理、注水採收效率

一、前言

油藏注水導致儲集岩地層傷害的機制相當複雜，主要是因為外加流體(如注入非原儲集層地層水或化學藥劑)進入油氣層後，與儲集層岩石及流體因產生物理或化學變化導致孔隙結構發生改變，形成各種形式的堵塞，降低儲集岩滲透率，進而損傷儲集層。注水生產過程可能造成的儲集層損壞原因相當多，更具有加成性，深入瞭解各種損壞儲集層之可能因素，可有效預防或減低注水導致的地層傷害，更可進一步制定合理的注水開發方案並保護油氣層。早在 1994 年，中國大陸便針對油田生產經驗，根據不同滲透率岩石提出如表 1 之水質控制指標(SY/T5329-94, 1994)。不合適的注水水質，是引起儲集層損壞的主要因素。所謂不合適的注水水質主要表現在兩大類，(1)注入水與地層岩石不配伍(相容)；及(2)注入水與地層流體不配伍。第一類不合適的注水水質將導致，(1)造成黏土礦物水化、膨脹、剝落及轉移，(2)雜質粒徑或濃度高於門檻值，堵塞孔喉；第二類不合適的注水水質將導致，(1)注入水與地層水不配伍，導致沉澱及結垢；(2)注入水與原油反應，導致有機結垢或毛細現象。由上可知，地層岩石與流體主要為地層損害的潛在因素，為客觀存在；注入水水質則是誘發地層損害的外部因素，可透過合理的處理設備加以控制。

二、研究方法

(一)注水水質地層傷害試驗

1.懸浮物與乳化油滴混和溶液之模擬與製造

因缺乏查德礦區實際生產階段之伴產水資料與樣本，本研究首先以氧化鋁粉模擬伴產水的懸浮粒子，考慮水處理單元裡粗濾及細濾過濾程序之50μm 與 0.5μm 處理極限，本研究以 44.5μm 與 0.5μm 兩種為中位粒徑而分布之氧化鋁粉，作為配製懸浮物溶液之懸浮固體來源。另外在乳化油滴方面，本研究以不同柴油與地層水之比例下，加入界面活性劑(Tween80)調配乳化油滴溶液。乳化油滴製造方法可利用固定比例之柴油、地層水及界面活性劑進行混合震盪，以模擬生產過程中，原油與伴產水因高壓及擾流產生的混合現象，震盪完成之乳化油滴油珠大小可由光學顯微鏡進行量測。地層水配方則如表 2 所示，其中地層水 A 配方是根據 Mouroumar 構造地層測試時，所採集地層水樣本之礦化度進行配製；B 則是複製 A 之離子強度但去除 2 價正電荷之鈣鎂離子地層水配方。B 配方之考量主要是在研究室發現去除鈣鎂離子之地層水，具有降低殘餘油飽和度之增產潛能，在未來可能考慮離子調配之水處理程序下，本研究將使用 B 配方於油層流體配伍性試驗，測試是否在離子強度不變但去除高價陽離子後，會導致地層傷害情形發生。

2.正交試驗設計

所謂正交試驗，指的是影響試驗結果因素眾多，意即須要施作之試驗數量相當大，在減少試驗數量以減輕負擔，但所施作之試驗又必須具代表性之前提下，可利用正交試驗進行試驗設計，圖 1 左側即為 3 變數 3 級數之正交試驗設計示意圖。但該試驗存在某些疑慮，便是最大化的影響可能不會發生在不同因素搭配下的試驗結果中，故必須透過正交試驗迴歸方法，找出不同變數與變數等級搭配下之影響。正交試驗需考慮因素個數及各因素級別數，確定完上述兩項變數後便可完成正交表如方程式(1)之制定。

$$L_n\ (j^i) \tag{1}$$

其中 L 為正交表代號；n 為正交表列數；j 為正交表級別數；i 為正交表行數(因素個數)。透過正交試驗表所排列試驗結果，可利用正交迴歸方程式瞭解各項因素對地層損害的加成效果。以 3 因素個數為例，方程式(2)為正交試驗迴歸方程：

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \tag{2}$$

其中 x_1、x_2、x_3 表示 3 個因素 x_1x_2、x_1x_3、x_2x_3 表示交互作用；a、b_i、b_{ij} 為迴歸係數。懸浮物與乳化油滴之混合溶液配製完成後，便可針對查德礦區代表性岩心制定懸浮流體粒徑、乳化油滴濃度及岩心滲透率，共 3 因

數 3 級別之正交試驗，正交試驗結果可由方程式(2)瞭解各種地層傷害因子在不同級別下，對地層之傷害程度，最後更可由數值模擬進行水質優化之經濟評估。考慮查德礦區之滲透率級別主要落在 300、500 及大於 1,000 mD 之範圍，本研究正交試驗設計結果如圖 1 右側所示，其中中位粒徑 6μm 之混合懸浮顆粒將在試驗結果章節解釋；10、30 及 50 ppm 濃度之乳化油滴，則是參考表 1 中 600 mD 滲透率等級所能接受之乳化油滴範圍所制定。

3.地層傷害試驗

地層傷害試驗是利用美國 DCI 公司之岩心沖排試驗系統進行，構成岩心沖排試驗系統之模組有圍壓模組、注入系統模組、油水兩相擠注幫浦模組、岩心反應系統模組、壓力與溫度模組、背壓模組、油水計量模組及電腦計算模組。造成滲透率之損害可由方程式(3)進行評估。

$$K_{d,t} = \frac{K_{max} - K_{min,t}}{K_{max}} \quad (3)$$

其中 $K_{d,t}$ 為地層損害程度隨時間變化，Friction；K_{max} 為初始水相滲透率，mD；$K_{min,t}$ 為水相滲透率隨時間變化情形，mD；本項在試驗前後將分別以核磁共振系統(NMR)，進行岩心內之孔隙分布分析，藉以證實孔隙被懸浮粒子佔據而導致滲透率下降。完成試驗後之地層傷害程度，可由表 3 進行評估。

(二)油層流體配伍性之試驗與分析

油層流體配伍性試驗通常包含水敏、鹽敏、速敏、酸敏及鹼敏等五敏之試驗，本研究將以岩石-流體敏感度試驗(Rock-fluid Sensitivity)及臨界流速試驗(Critical Velocity)，測試查德礦區岩心之水敏、鹽敏及速敏特性，在試驗前後分別以 X 光繞射分析(X-ray Diffraction, XRD)進行岩心內之礦物族群分析。

1.礦物分析

XRD 樣品分析方式為採用 NcCrone 研磨機，將樣品研磨至細砂(150μm)等級，再將樣品平鋪於載玻片上之樣品溝槽內，檢測儀器品牌為 Rigaku 之 Utima III 或 Bruker D8 Advanced X 光繞射儀，使用 Cu K-alpha 靶材進行繞射角 2 至 66 度區間分析(全範圍為 0~90 度)，再經由 Jade 軟體分析解釋分析結果，Jade 軟體主要有辨識礦物種類的功能，包含自動波峰對照功能與 Rietveld 法(窄化波峰寬)功能，可提高辨識速度與減少誤判，主要為半定量岩石中的礦物成分與黏土礦物，藉此判定影響岩石膨脹量的黏土含量，而主要觀察的黏土礦物為蒙脫土及其共生礦物。

2.臨界流速試驗

首先以配製地層水注入飽和岩心中，以獲得水相滲透率 K_{max}，接續利用預計將來作為注入水之鹽水以流速 0.5 mL/min 倍數增加至 4 mL/min，

再以倍數減低至 0.5 mL/min，觀察壓差變化及滲透率變化。若注入流量 Q_{i-1} 所對應滲透率 K_{i-1}，與流量 Q_i 所對應的滲透率 K_i 滿足方程式(4)，則可證實發生速敏損害，此時 Q_{i-1} 為臨界流速。速敏所造成之地層傷害評估指標請見表 3。

$$\frac{|K_{i-1}-K_i|}{K_i} \times 100\% > 5\% \quad (4)$$

3.岩石-流體敏感度試驗

首先以配製地層水注入飽和岩心中，藉以獲得水相滲透率 Kmax，接續利用預計將來作為注入水之鹽水樣本，以低於臨界流速條件下進行注入，並觀察壓差變化及滲透率變化，以確定注入水鹽度變化是否引起岩心中黏土礦物水化膨脹及造成損害的程度。水敏損害指標及水敏傷害程度使用公式，請見表 3 及方程式(5)。

$$K_{d,t} = \frac{K_{max}-K_{min,t}}{K_{max}} \quad (5)$$

其中 $K_{d,t}$ 為地層損害程度隨時間變化，Friction；K_{max} 為岩心含殘餘油時之水相滲透率，mD；$K_{min,t}$ 為水相滲透率隨時間變化情形，mD。

三、注水水質地層傷害試驗與油層流體配伍性試驗結果

(一)注水水質地層傷害試驗結果

圖 3 為根據正交試驗設計(圖 1)所完成之地層傷害試驗結果，圖中藍色點為使用地層水配方 A 進行 10 倍孔隙體積注入之滲透率變化情形，由試驗結果可知雖然岩心前後端壓差跳動大，主要是注水系統設計為定流量(2 ml/min)注入，在注水幫浦感應到前端壓力降低時會隨即補上。但平均來說，於前期地層水注入期間皆無地層傷害發生；後續橘色點則為地層水 A 結合正交試驗設計中不同懸浮物顆粒與乳化油滴條件下之 40 倍孔隙體積注入結果。由圖可知當懸浮顆粒中位粒徑為 0.5 時，整體地層傷害根據表 2 可知為弱地層傷害，即使搭配高乳化油滴及低滲透率岩心(CDI)，地層傷害也只到 44%；若搭配低乳化油滴濃度及高滲透率岩心(CFG)，則地層傷害更只有 21%。若懸浮顆粒中位粒徑來到 6 μm 時，整體地層傷害將提高至 70%左右之高地層傷害值，由於本研究使用 6 μm 代表水處理只有完成粗濾而省略細濾之處理步驟，故根據試驗結果可知省去細濾步驟將導致相當高的地層傷害結果，應該避免。最後，當中位粒徑來到更高的 44.5 μm 時，可發現地層傷害值相較 6 μm 中位粒徑之傷害結果低，推測主要原因是懸浮顆粒中的大顆粒比例增加，較大的顆粒粒徑可能大於岩心最大孔喉而無法進入岩心造成地層傷害，該類顆粒最終將在井底套管或油管形成堆積，最終也將導致注入率不佳，也應避免。

最後，為瞭解注水水質於沒有發生在正交試驗表所列條件下之地層傷害結果，本研究利用正交試驗非線性迴歸方法，利用方程式(2)進行試驗結果的

迴歸，迴歸結果如圖 4 所示。由圖可知試驗結果與迴歸結果幾乎可成斜率為 1 的直線，迴歸結果顯示方程式的預估相當吻合試驗結果，該方程式可接續用來預測不同懸浮物中位粒徑搭配不同濃度乳化油滴，及不同查德礦區滲透率岩心下的地層傷害結果。本研究接續將該方程式進行蒙地卡羅模擬，模擬結果如圖 5 所示，當模擬達 2,489 次時可獲得地層傷害之常態分布，該分布所歸納之龍捲風圖顯示影響因子由大至小分別為岩石滲透率、乳化油滴及懸浮物顆粒。由蒙地卡羅分析結果可知，M 礦區油藏注水成功關鍵因素主要在於滲透率，若可找到滲透率較大之岩石分布區域進行注水井設立，將有助於降低水處理不善所導致地層傷害的問題。

(二)油層流體配伍性試驗結果

針對查德礦區進行注水工程時的油層流體配伍性，本研究篩選 4 顆代表性岩心進行油層流體配伍性試驗(本摘要因篇幅關係，只擷取 Mouroumar 構造岩心試驗結果)，包含臨界流速試驗(Critical Velocity)及岩石-流體敏感度試驗(Rock-fluid Sensitivity)，藉以瞭解未來注水井之注水限制，及注入水成份對油層岩石之影響。本試驗所使用注入水為地層水樣本 B，即去除鈣鎂離子之地層水，藉以探討去除鈣鎂離子之注入水是否進一步破壞地層滲透率。所有岩心在進行試驗前必須進行 X 光繞射(XRD)礦物分析，藉以瞭解礦物組成；接續將進行臨界流速試驗及岩石-流體敏感度試驗，藉以瞭解不同流速或不同注入水鹽度，對於礦區岩心所造成地層傷害的程度；最後將再次進行礦物分析，藉以瞭解上述試驗過程對何種礦物產生影響，導致岩心堵塞。

Mouroumar 構造代表性岩心 I 孔隙率及滲透率分別為 12.8%及 817 mD，該岩心將用來進行臨界流速試驗；代表性岩心 II 孔隙率及滲透率分別為 12.2%及 298 mD，該岩心將用來進行岩石-流體敏感度試驗。兩岩心試驗前後之 XRD 礦物成分分析如表 4 所示，由表可知，Mouroumar 構造岩石主要礦物是由石英及長石(鉀長石及斜長石)組成，黏土礦物約只佔岩心整體礦物 3%至 5%之比例，而黏土礦物主要成分為高嶺土及綠泥石，各約佔黏土礦物裡的 33%及 50%。由 XRD 分析可知，Mouroumar 構造因黏土礦物比例低，故推測注入水鹽度或流速變化將導致較低之地層傷害程度。另外，由表 4 可知 Mouroumar 構造也含有相當微量的白雲石、鐵白雲石及黃鐵礦。由表 4 油層流體配伍性試驗完成後的礦物分析可知，臨界流速試驗及岩石-流體敏感度試驗將導致大部分的黏土礦物流失，非黏土礦物之比例已由原始 95%至 98%，提升至 98%至 99%；主要流失之岩石礦物為鉀長石(速敏影響較多)，黏土礦物則主要流失為高嶺土及些微綠泥石。對於易受水敏、鹽敏及速敏傷害的高嶺土而言，所幸其含量不高，約只佔總黏土礦物比例約 33 %至 34 %間，故可預期有較低之地層傷害影響。

岩心樣本 I 之臨界流速試驗結果如圖 6 左側所示，其中藍色曲線為試驗壓差之紀錄，紅色線為試驗設定之定流量，根據圖 6 所記錄之壓差及設定流速，可計算滲透率如圖 6 右側結果。由試驗結果可知每個設定流速下，皆達

10 倍以上孔隙體積之注入量，足夠捕捉對注水流速變化產生的影響。岩心樣本 I 之臨界流速由試驗結果可知為 2 mL/min，因流速超過 2 mL/min 所導致之地層傷害約為 17.7 %，即岩心仍保有 82.3 % (>70 %)之滲透率，屬於對臨界流速不敏感的岩心。

岩心樣本 II 之岩石-流體敏感度試驗結果如圖 7 所示，本試驗所使用之流量為 2 mL/min，以避免產生流速過高導致速敏型礦物溶出，而錯估岩心之鹽敏及水敏特性。試驗首先由地層水 A 進行飽和與 20 倍孔隙體積之注入，接續使用地層水 B 進行 40 倍孔隙體積之注入，該注入孔隙體積之考量主要是考量油層模擬工作時，模擬網格在生產期間會發生之平均滲流水量。由試驗結果可知，使用原始地層水配方不會造成任何地層傷害發生，但使用去除鈣鎂離子之配製地層水 B，則會有些許地層傷害發生，但其滲透率尚可保有 88%以上原始滲透率。對於如此低的地層傷害程度，推估除了岩心具有較低的黏土礦物 (<10%)外，注入水去除的初始鈣鎂離子濃度也相對較低，意即總體注入水的離子強度變化不大，也為主因之一。由臨界流速試驗及岩石-流體敏感度試驗結果可知，Mouroumar 構造之油層流體配伍性呈現相當良好的結果，合理控制注水速度及注水離子強度，油藏岩石便不會有黏土礦物游離堵塞的情況發生。

四、Mouroumar 構造之注水持壓模擬案例

查德礦區為台灣中油公司近年來致力於探勘開發之含油礦區，對於未來一級採油所需面臨注水持壓之生產工程，需要進行初步評估。對於礦區內最大之 Mouroumar 構造經歷多年研究，已完成地質模型解釋、孔滲關係性分析、油層流體 PVT 特性分析、相對滲透率與毛細壓力分析等，對於初步原油埋藏量與蘊藏量已有初步掌握，基於有限篇幅，本研究不在此多加討論上述各項數據以及 Benoy 構造部分，只利用注水水質所形成之地層傷害結果，探討 Mouroumar 構造若發生地層傷害時，將帶來何種生產需面臨之決策。

(一)注水持壓一級採油之生產最佳化

Mouroumar 構造整個模擬模式網格系統為 143 × 106 × 170，單一網格大小約 50 × 50 m，油層區域厚度 0.1~1.0 m，水層區域厚度 0.1~6.5 m；岩相主要可區分為好砂、壞砂及頁岩，進行油層模擬時只保留好砂及壞砂，並各別使用實驗室所量測之平均相對滲透率參數，模擬模式初始化後之含油飽和度分布如圖 8 所示。該模擬模式接續進行兩口探勘井地層測試資料之歷史調諧，並針對油層各項參數，如含水層大小、生產井井數井型、井距、注水井數進行敏感度分析，完成敏感度分析後，便可進行最佳化生產分析。

最佳化生產評估顯示在生產井井型方面，Mouroumar 構造具有底水容易水侵，但因無單一厚油層(10m 以上)，而是上下連續多層薄油層組成，在垂向油層連通性尚不明確的情況下，建議先鑽垂直井生產，在構造高區油層較厚區域，可分段穿孔生產，由下而上出水後下封隔器堵水再上返生產，在構

造低區油層較薄區域，可 1 次穿孔生產，後續視地質條件與工程情況，再考量是否佐以水平井生產。此外，由於 Mouroumar 構造產油層具高生產力指數，定向井與垂直生產井所提供之產能差異不大，因此考量地層滲透率、單井生產力指數、油層厚度與分布狀況及現地鑽井機具等因素，最終生產井井型採垂直井。此外，根據前述生產井井數及注水井敏感度分析結果，除了於油層配置 10 口垂直生產井外，邊界水層區域也配置 4 口垂直注水井，以利維持油層壓力，提高採收率。

圖 9 為 Mouroumar 構造經多次生產預測模擬及優化調整後之最佳化生產方案，及其生產方案但不加入注水持壓之比較。由圖可知在 23 年生產期限內，最佳化生產方案(藍色實線為原油生產剖面，藍色虛線為累計產油剖面)與不注水持壓之生產方案(綠色實線為原油生產剖面，綠色虛線為累計產油剖面)之差距可達 1,300 萬桶，該結果顯示若採用注水工法，可比不注水方案約再多獲得 1 倍體積以上之原油可採量，在原油可採最大化的考量下，現場必須採用注水工法。但圖 9 之模擬尚未考量地層傷害與水處理之影響。在考量不同水處理目標，導致不同程度地層傷害影響下，注水井或幫浦條件是否可維持最佳方案的結果，則必須把地層傷害加入模擬共同考量。

(二)考慮地層傷害下之原油生產

考慮水處理可達懸浮顆粒中位粒徑 0.5 μm、乳化油滴 10 ppm 及油層平均滲透率為 800 mD 時，由方程式(2)可知地層傷害約 38%，屬於弱至中等之地層傷害值；若中位粒徑 15 μm、乳化油滴 30 ppm 及油層平均滲透率為 800 mD 時，地層傷害將上升至 71%，屬於高地層傷害值。本研究採用 Eclipse 模擬器的 Losal 方程組，利用注入水與地層水鹽度的變化來調整滲透率的下降程度。圖 10 為使用高地層傷害參數注水達 10 年後，模擬模式在第 50 層及其下方網格之滲透率變化情形，藍色代表滲透率已下降至原來的 39%，紅色代表保有網格原始滲透率。由圖 10 可知，即使地層達到高地層傷害，注入水依舊可往生產井流動，造成此現象主要原因為生產方案之注採比為 95%，注水之液體體積尚不及採油之液體體積，導致生產井附近始終扮演低壓端，注入水若不會發生完全堵塞情況下，將可持續往低壓端流動。

圖 11 為考慮注入水不會造成地層傷害、造成低地層傷害及高地層傷害之油層注水持壓結果，由圖可知注入水若形成低地層傷害，油層壓力仍可維持與無地層傷害發生時接近；但若發生高地層傷害時，油層壓力將低於最佳生產狀態下的油層持壓條件，可想像生產井將易於因地層壓力不足而關井。此外，由圖 12 之 Mouroumar 構造注水井井口所需注入壓力也可知，若注入造成高地層傷害之水質，將在注水前 6 至 7 年使用較高的注水壓力(最高須達 135 psi)，該情況下須額外考量購買或是租借井口注水幫浦，進一步造成額外成本的負擔。

由上述 Mouroumar 構造注水案例之結果，使用水質處理達懸浮顆粒中位粒徑 0.5 μm 及乳化油滴 10 ppm 時，整體原油採收最接近最佳生產結果，

且並不需要額外承租井口注水幫浦，該水質可作為 M 油藏之注入水水質處理標準。

五、結論

(一)本研究於實驗室建立懸浮物與乳化油滴混合溶液進行查德礦區岩心之地層傷害試驗，該試驗使用正交試驗規劃針對不同懸浮物中位粒徑、乳化油滴濃度及岩心滲透率進行試驗組合。正交試驗結果更進一步可由非線性迴歸方法進行試驗結果擬合，該非線性方程可作為地層傷害程度之預測。

(二)利用地層傷害非線性方程進行蒙地卡羅模擬，發現 Mouroumar 構造注水成功關鍵在於尋找高滲透率之區域進行注水井設置。

(三)本研究利用 Mouroumar 構造岩心進行臨界流速試驗及岩石-流體敏感度試驗，試驗發現因 Mouroumar 構造黏土礦物含量低，可忽略因注水流速或鹽度發生變化而導致的地層傷害。

(四)本研究結合 Mouroumar 構造之生產最佳化油層模擬結果，討論低/高地層傷害條件下之生產操作條件，發現低地層傷害條件下，M 油藏之生產剖面與操作條件與最佳化生產策略相同；但若發生高地層傷害時，油層持壓能力將下降，且須額外井口幫浦輔助注水，成本將大幅攀升。本研究建議 Mouroumar 構造適合的水處理標準是懸浮顆粒中位粒徑 0.5 μm 及乳化油滴 10 ppm。

(五)本研究建議未來油田注水工程之研究方面，皆須進行注水水質試驗及油層流體敏感度試驗，並將結果應用至油層模擬，探討水質處理後對於生產剖面及生產操作的改變，藉以輔助制定水質處理標準。

表 1、SY/T5329-94 推薦之水質控制主要指標

氣體滲透率, mD		< 100			100 ~ 600			> 600		
分級		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
控制指標	懸浮物含量, mg/L	≦ 1.0	≦ 2.0	≦ 3.0	≦ 3.0	≦ 4.0	≦ 5.0	≦ 5.0	≦ 7.0	≦ 10
	平均懸浮物粒徑,μm	≦ 1.0	≦ 1.5	≦ 2.0	≦ 2.0	≦ 2.5	≦ 3.0	≦ 3.0	≦ 3.5	≦ 4.0
	含油量, mg/L	≦ 5	≦ 6	≦ 8	≦ 8	≦ 10	≦ 15	≦ 15	≦ 20	≦ 30
	平均腐蝕率, mm/a	< 0.076								
	點腐蝕	A1,B1,C1：試片各面皆無腐蝕								
		A2,B2,C2：試片有輕微腐蝕								
		A3,B3,C3：試片有明顯腐蝕								
	硫酸鹽還原菌	0	< 10	< 25	0	< 10	< 25	0	< 10	< 25
	嗜鐵菌	$N \times 10^2$			$N \times 10^3$			$N \times 10^4$		
	菌落數	$N \times 10^2$			$N \times 10^3$			$N \times 10^4$		

表 2、注水水質與油層流體配伍性試驗所使用之地層水配方

Chemical		Concentration	
Name	Formula	g/L	
		Synthetic brine A	Synthetic brine B
Potassium Chloride	KCl	0.019	0.028
Sodium Chloride	NaCl	0.265	0.487
Magnesium Chloride Hexahydrate	$MgCl_2*6H_2O$	0.001	NA
Calcium Chloride Dihydrate	$CaCl_2*2H_2O$	0.061	NA
Sodium Bicarbonate	$NaHCO_3$	0.368	0.482
Sodium Sulfate	Na_2SO_4	0.181	0.271
Sodium Nitrate	$NaNO_3$	0.015	NA
	TDS, mg/L	**873**	**1,259**

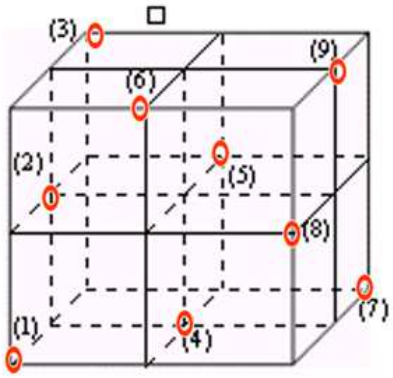
表 3、地層損害程度評估指標

損害程度	< 30%	30% ~ 70%	> 70%
敏感程度	弱	中等	強

表 4、Mouroumar 構造代表性岩心之 XRD 礦物成分分析

WHOLE ROCK MINERALOGY																					
SAMPLE ID	WELL	Status	QUARTZ	K-FELDSPAR	PLAGIOCLASE	CALCITE	SIDERITE	ANKERITE/ FE-DOLOMITE	DOLOMITE	PYRITE	FLUORAPATITE	BARITE	MAGNETITE	**TOTAL NON-CLAY**	SMECTITE	ILLITE/SMECTITE (I/S)	ILLITE+MICA	KAOLINITE	CHLORITE	**TOTAL CLAY**		EXPANDABLE CLAY
I	M-2	Pre XRD	39	26	28	0	0	0	2	1	0	0	0	**95**	0	0	2	0	2	**5**	**100**	0
II	M-2	Pre XRD	37	29	28	0	0	2	1	0	0	0	1	**98**	0	0	1	0	1	**3**	**100**	0
I	M-2	Post XRD	49	18	30	1	0	1	0	0	0	0	0	**99**	0	0	0	0	1	**1**	**100**	0
II	M-2	Post XRD	45	22	30	0	0	0	0	1	0	0	0	**98**	0	0	0	0	2	**2**	**100**	0

CLAY MINERALOGY								
Relative Clay Abundance (<4 Microns)								
SAMPLE ID	DEPTH (m)	**% I/S EXPANDABILITY**	SMECTITE	ILLITE/SMECTITE (I/S)	ILLITE	KAOLINITE	CHLORITE	**TOTAL CLAY**
I-Pre	2,234.28	*10*	0	7	9	34	50	**100**
II-Pre	2,235.30	*10*	0	4	13	33	50	**100**
I-Post	2,234.28	*10*	0	6	12	26	57	**100**
II-Post	2,235.30	*10*	0	11	20	22	48	**100**



Level \ variable	SS particle size (μm)	Oil emulsion concentration (ppm)	Permeability (mD)
1	A (44.5)	D (50)	G (>1,000)
2	B (6)	E (30)	H (~500)
3	C (0.5)	F (10)	I (~300)

Card List

	Card ID	SS	OE	Perm
1	1	C	F	G
2	2	A	E	I
3	3	C	D	I
4	4	A	F	H
5	5	B	F	I
6	6	C	E	H
7	7	B	E	G
8	8	B	D	H
9	9	A	D	G

圖 1、3 變數 3 級數之正交試驗設計圖(左)及本研究正交試驗表設計結果

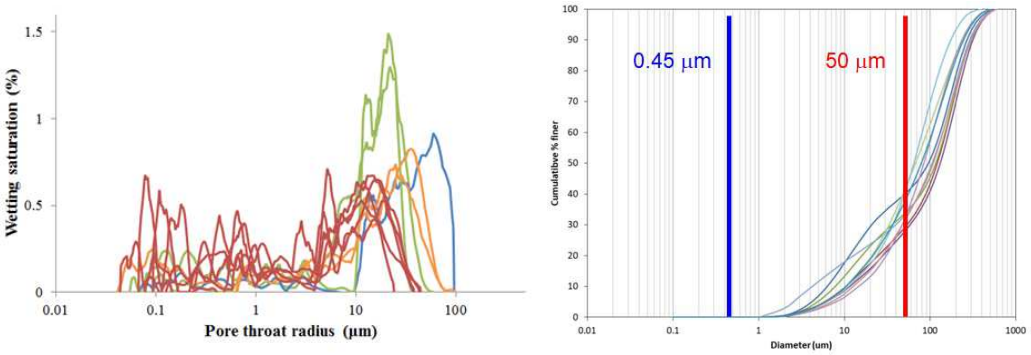


圖 2、查德礦區岩石代表性岩心之孔喉分布(左)與粒徑分布(右)圖

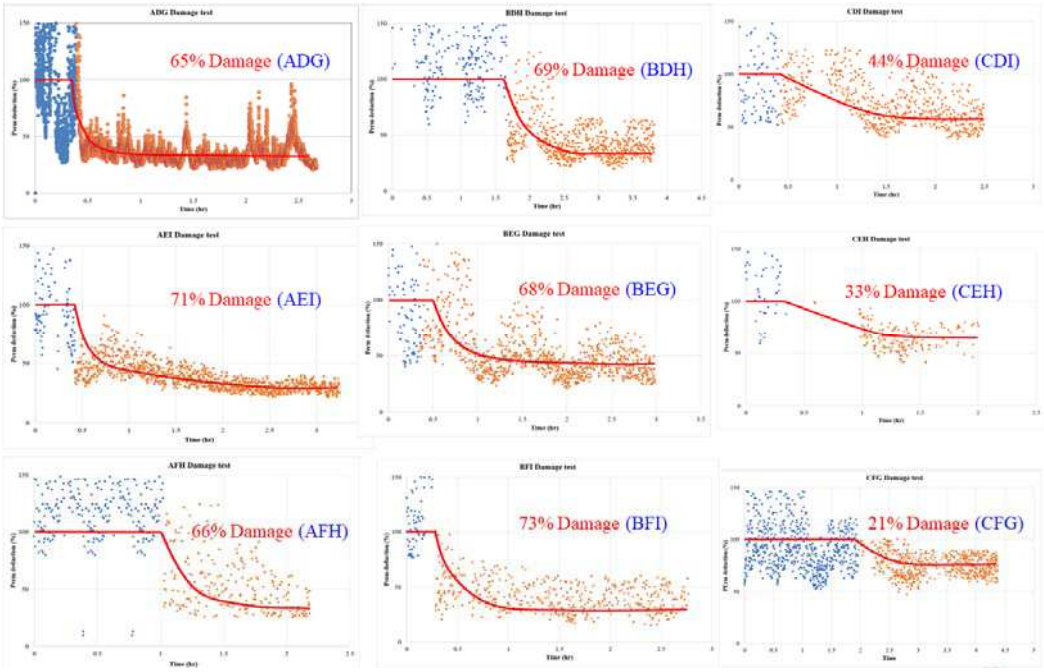


圖 3、注水水質地層傷害正交試驗之結果

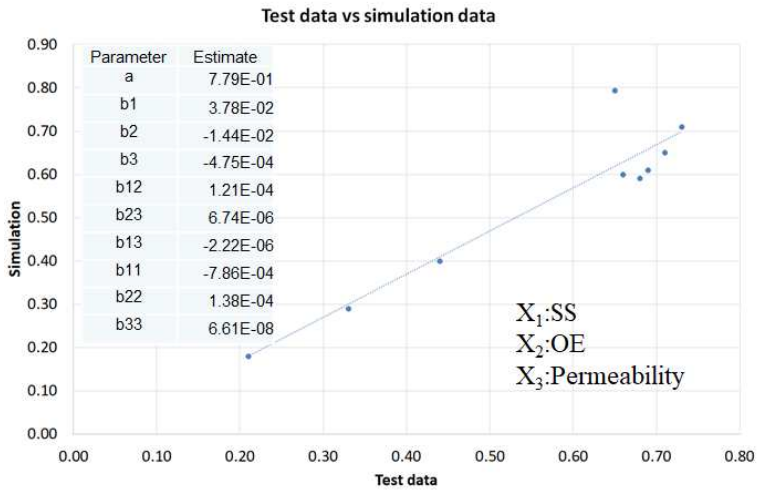


圖 4、正交試驗非線性迴歸地層傷害試驗之結果

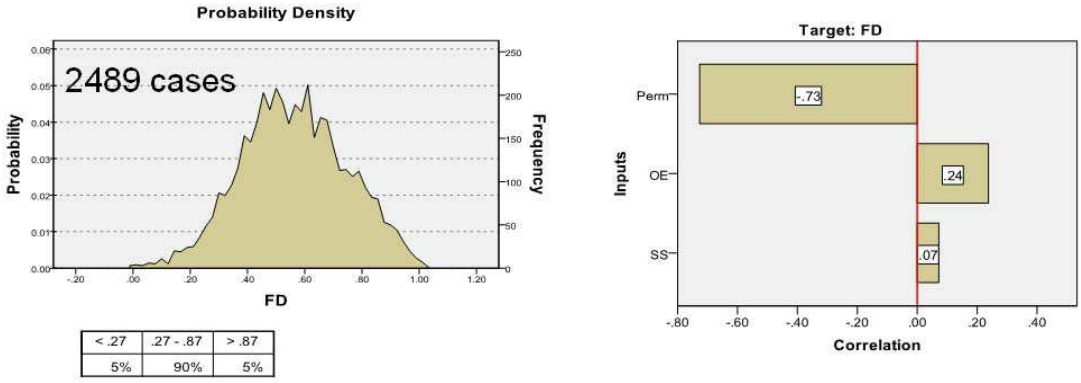
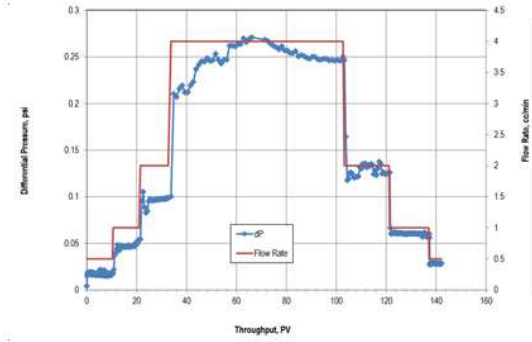


圖 5、查德礦區注水水質地層傷害迴歸式之蒙地卡羅分析



Flow rate (cc/min)	Interstitial Velocity (ft/day)	Cumulative PV Injected (-)	Brine Permeability (mD)	Permeability / Initial Permeability (%)
0.5	15.8	10.3	631	100
1.0	31.6	20.9	631	100
2.0	63.1	32.7	631	100
4.0	126	103	520	82.3
2.0	63.1	121	520	82.3
1.0	31.6	137	520	82.3
0.5	15.8	142	520	82.3

圖 6、岩心樣本 I 之臨界流速試驗結果

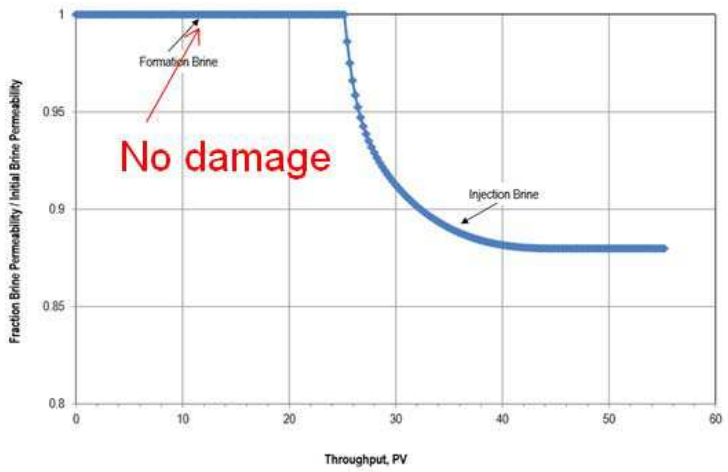


圖 7、岩心樣本 II 之岩石-流體敏感度試驗結果

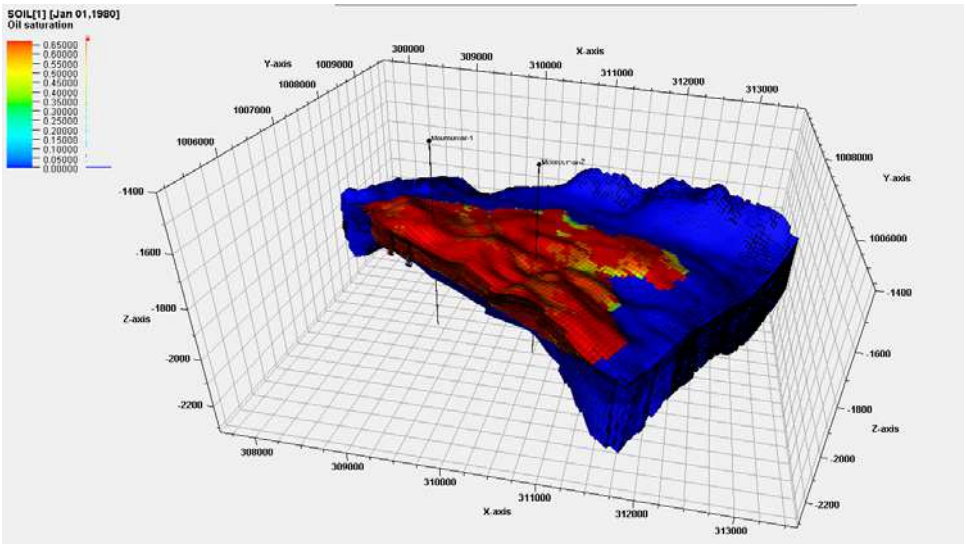


圖 8、Mouroumar 構造初始化後之含油飽和度分布

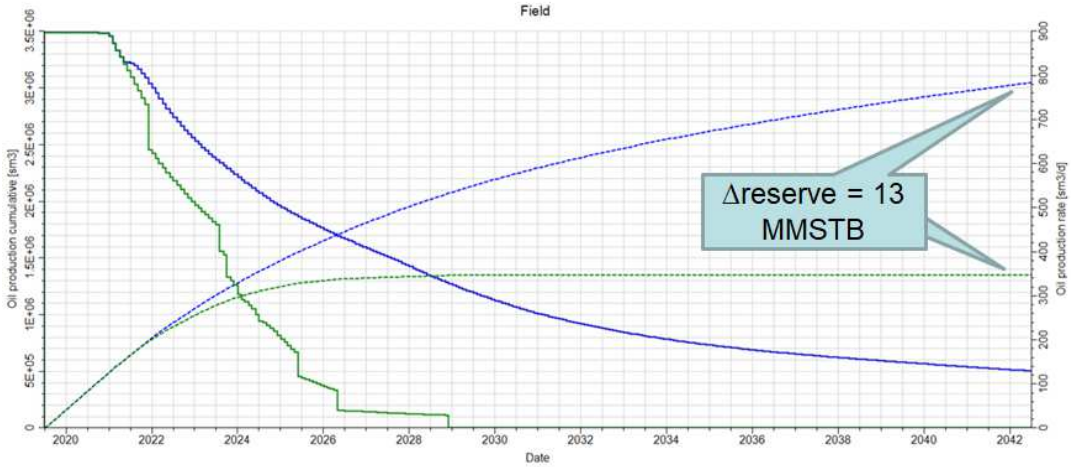


圖 9、Mouroumar 構造最佳化生產方案與不注水生產方案之比較

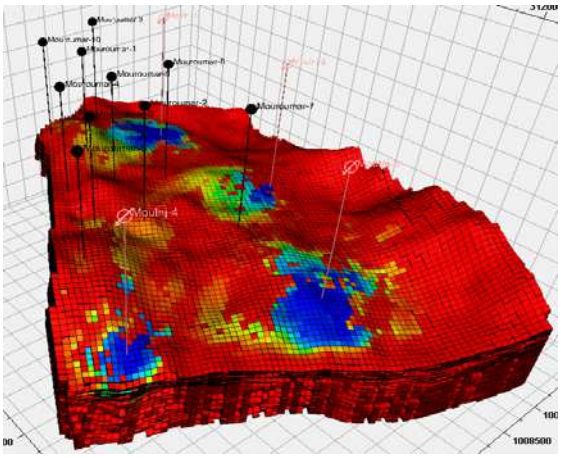


圖 10、Mouroumar 構造考慮高地層傷害注水 10 年後之滲透率變化情形(模擬模式第 50 層及下方網格)

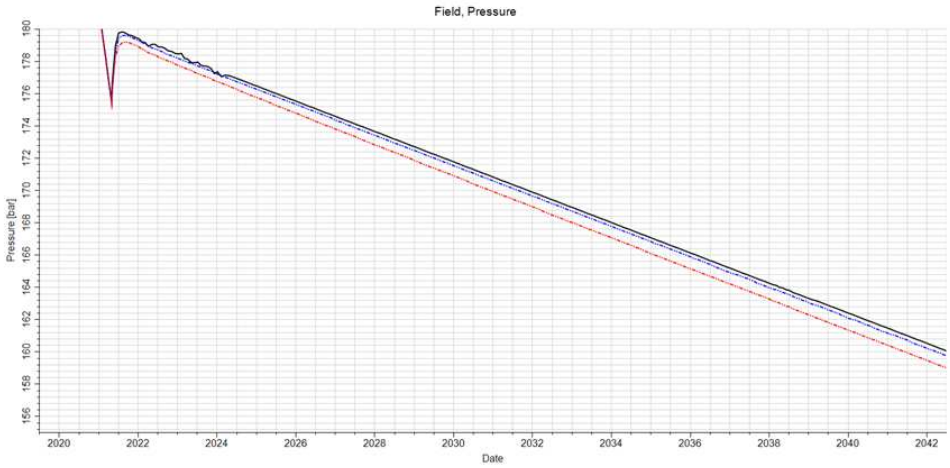


圖 11、Mouroumar 構造考慮無地層傷害(黑)、低地層傷害(藍)及高地層傷害(紅)條件下之油層注水持壓效率

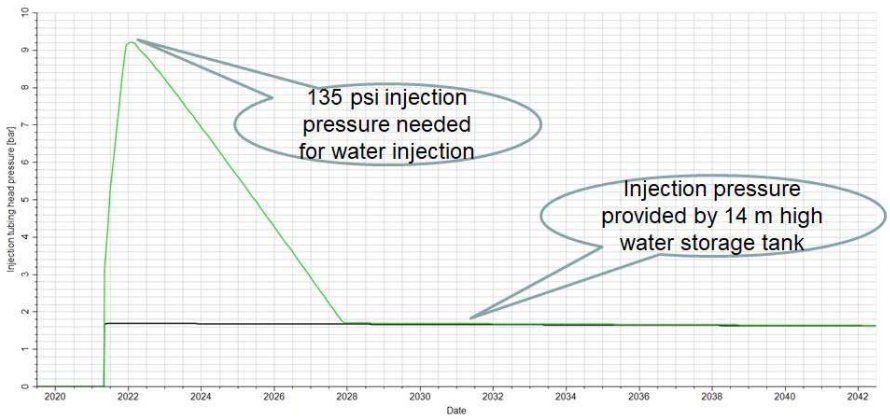


圖 12、Mouroumar 構造注水井考慮無地層傷害(黑)及高地層傷害(綠)條件下之井口所需注入壓力