

澳洲西北海域 Roebuck 盆地中生代沉積環境研究

李政益、賴光胤、林章凱、洪作緒、謝秉融

台灣中油股份有限公司探採研究所

摘要

本研究使用 12 口探井之井下資料，重建澳洲西北海域 Roebuck 盆地中生代沉積環境。結合地層對比及微體古生物數據，本研究認為在三疊紀早至中期，此盆地內圍(Bedout 次盆地)主要堆積非海相至邊緣海相沉積物，外圍(Rowley 次盆地)可能經歷火成活動。三疊紀晚期，內圍以非海相堆積物為主；外圍局部區域除可能接受來自內圍沉積物外，大部為近濱相至遠濱相沉積環境。侏羅紀早至中期，全盆地大致處於非海相至邊緣海相環境。侏羅紀晚期，區域大地構造使全盆地出露故缺失該時期的地層，僅局部區域於局部時期有沉積物堆積。白堊紀以來，全盆地進入被動大陸邊緣，屬於近濱相至遠濱相環境。

一、背景說明

澳洲西北海域為澳洲主要的油氣產區(圖 1)，亦為台灣中油公司(以下簡稱本公司)國外油氣探勘之核心地區。過去十多年來，本公司對於西北海域數個盆地的油氣潛能皆有相關研究，本公司也已參與此區域中部分礦區之探勘與開發活動。

近年來在澳洲西北海域仍持續有新的發現，例如 2014~2019 年在 Roebuck 盆地西南部三個區域(Phoenix South、Roc 及 Dorado)的探井即屢有重要油氣發現(圖 2)。此外，在 2022 年 3 月亦於 Pavo 1 有新的發現。根據這些發現，推斷此盆地之石油系統年代當屬於早至中三疊紀。相較於其他鄰近盆地，此石油系統之年代較為特殊。然而，由於過去五十年來在 Roebuck 盆地的探勘活動相對稀少，因此對於此石油系統的發育及演化之瞭解並不深。此外，由於鄰近盆地亦存有中生代其他時期(如晚三疊紀，早-中侏羅紀及早白堊紀)之石油系統，雖至今尚未在 Roebuck 盆地發現可與之對應之石油系統，但考量此盆地探勘活動之稀缺，因此在目標盆地中這些石油系統的潛力並未被恰當評估。由於本公司長期關注澳洲西北海域礦區的讓入機會，為深入瞭解 Roebuck 盆地的探勘潛力，並配合政府的新南向政策，本研究針對此盆地中生代石油系統之生成環境及生、儲、蓋岩之可能成因進行研究。

有鑑於此，本研究蒐集 Roebuck 盆地的探勘資料，進行目標盆地地層分析及對比，以及中生代沉積環境重建工作。藉由這些研究所獲致之成果可增進對目標盆地已知或推測石油系統要素，尤其是生、儲、蓋岩之發育及演化的瞭解。此研究成果可應用於目標盆地或鄰近區域，預測成因相似之生、儲、蓋層的可能發育位置，進而提升本公司對目標盆地或相鄰地區油氣探勘潛力評估的準確程度。本研究可做為公司礦區評估業務之先期工作，不僅可為後續相關研究，如盆地反

剝工作及盆地油氣模擬研究提供厚實的參考基礎，也可做為本公司未來進入 Roebuck 盆地相關礦區投標或讓入之評判依據。

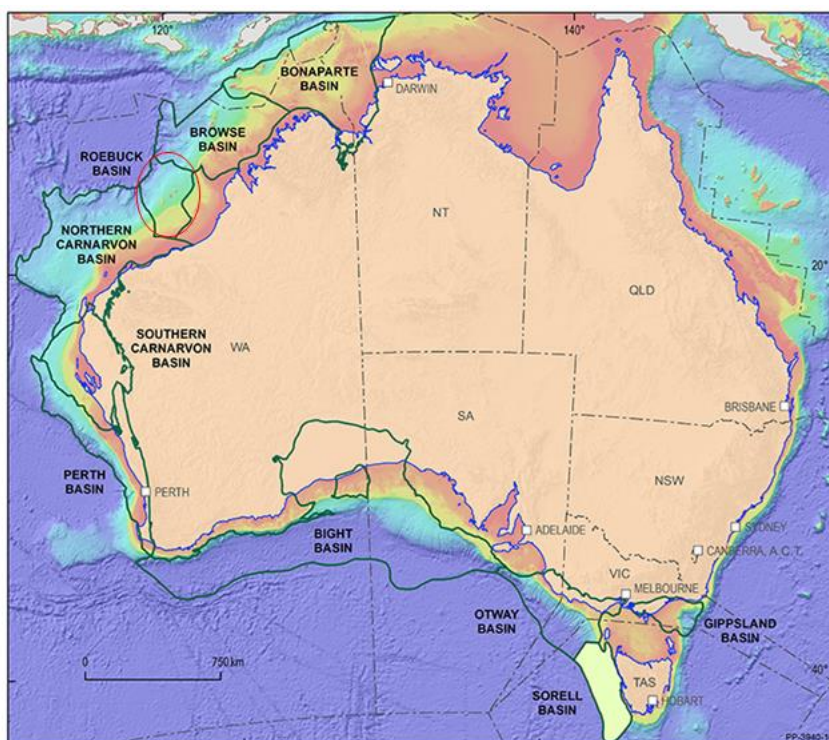
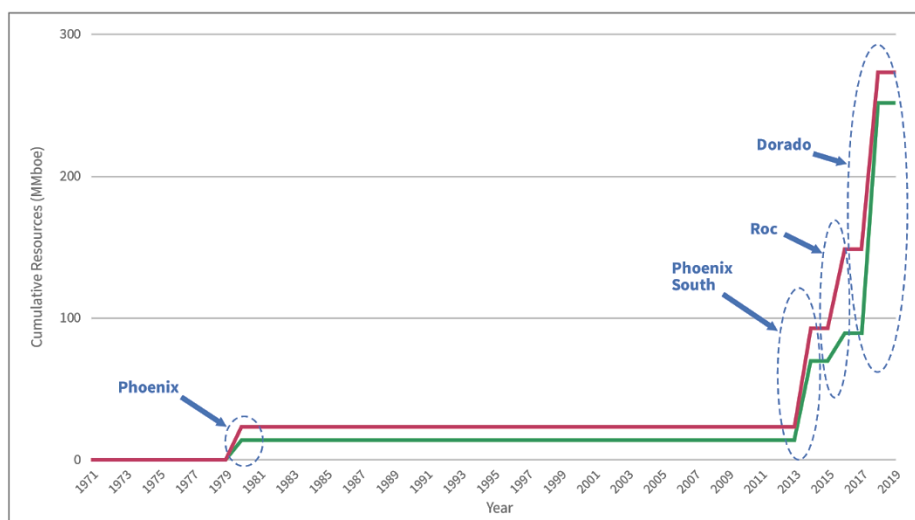


圖 1、西澳超盆地及研究區域 Roebuck 盆地相關位置圖(Grahame et al., 2017)。西澳超盆地由 Northern Carnarvon、Roebuck(紅圈處)、Browse 及 Bonaparte 四大盆地共同組成



IHS Markit

— Gas (MMboe) — Liquids (MMbbl)

圖 2、Roebuck 盆地油氣預估累積蘊藏量(Hulbert et al., 2019)。顯示自 1971 年以來在 Roebuck 盆地所鑽遇油氣之預估累積蘊藏量。在 2014~2019 年於 Phoenix South、Roc 及 Dorado 三個區域發現油氣之後，此盆地的潛力被重新評估

二、研究技術說明

(一)、資料蒐集

本研究由各種可資利用之途徑，如 Science Direct，探勘專業期刊，澳洲政府機關與探勘公司已發表之文獻與探勘資料，以及本公司所購置之澳洲西北海域資料庫。資料來源也包括 IHS Markit 及 Wood Mackenzie。本研究蒐集之文獻範圍包含區域地質、大地構造演化、盆地架構、地層、沉積相分析與古環境演變等；蒐集之探勘資料則包括井測數據、岩性描述及生物地層。

(二)、井下地層分析與對比

本研究根據生物地層年代資料，輔之以岩性描述及井測資料等特徵，進行 East Mermaid 1 號井、Steel Dragon 1 號井、Anhalt 1 號井、Hannover South 1 號井、Whitetail 1 號井、Phoenix South 1 號井共 6 口井(圖 3)之中生代地層分析工作。

地層對比一共使用 12 口井，包括今年所分析的 6 口井，以及在 110 年度石油基金計畫中已分析完成的 6 口井(位於 Bedout 高區附近的 Bedout 1 號井及 Lagrange 1 號井，位於 Bedout 次盆地的 Minality 1 號井、Keraudren 1 號井及 Phoenix 1 號井，以及位於 Rowley 次盆地的 Huntsman 1 號井)。本研究綜合 12 口井之地層劃分結果，進行 Rowley 次盆地，Bedout 次盆地至 Bedout 高區，以及 Rowley 次盆地至 Bedout 次盆地共三條剖面的地層對比(圖 3)。

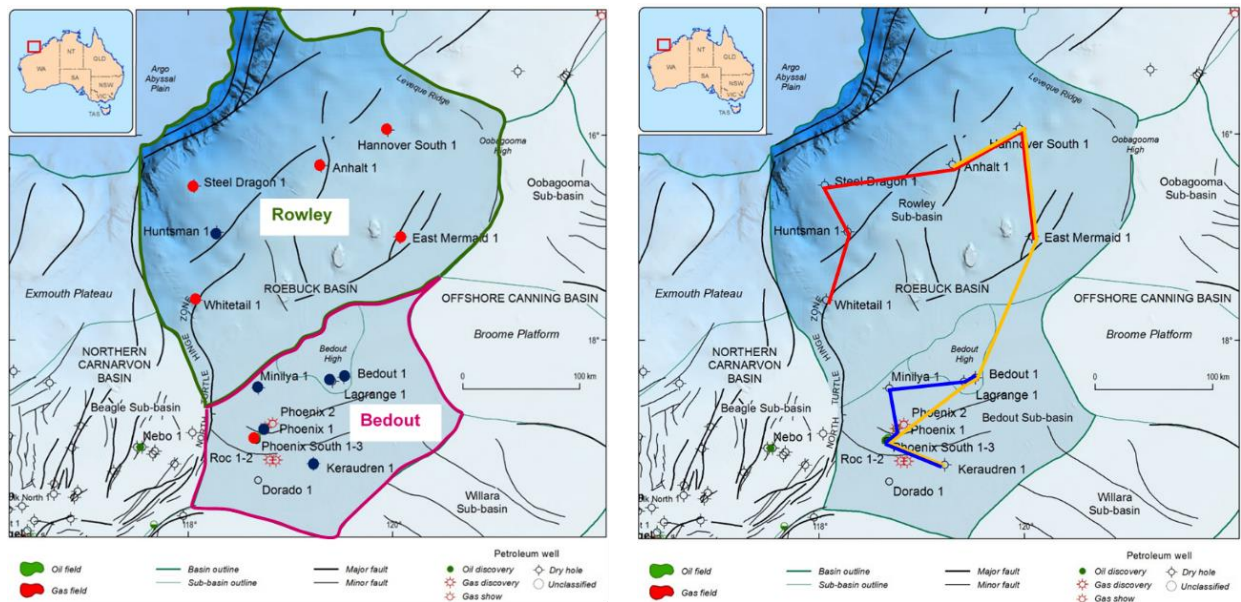


圖 3、Roebuck 盆地鑽井位置圖。(Grosjean et al, 2019) 顯示本研究所分析的 6 口探井位置(紅色圓圈)及 110 年度石油基金計畫所分析之 6 口探井位置(藍色圓圈)，並進行地層對比之 3 條剖面位置(剖面 A：紅色線、剖面 B：藍色線、剖面 C：橘色線)

(三)、單井沉積環境解釋與多井聯繫

本研究根據岩屑及井壁岩心中所含之雙鞭毛藻(Dinoflagellate)及疑源類(Acrotarchs)的相對豐度，進行中生代沉積環境之解釋(Quadrant Energy, 2016)。據此以定義的沉積環境包括非海相(non-marine)，邊緣海相(marginal marine)，近濱相(nearshore marine)及遠濱相(offshore marine)。其中，遠濱相代表水深 20 至 200 公尺的沉積環境，特徵為雙鞭毛藻豐度高於 67%。近濱相沉積環境的水深介於 0 至 20 公尺之間，其雙鞭毛藻含量介於 5%至 66%。當雙鞭毛藻豐度小於 4%，而疑源類豐度>0%時，可歸類為邊緣海相。相關沉積環如濱海地區(coastal area)、潮間帶、瀉湖及河口等。當雙鞭毛藻及疑源類的含量皆為 0%，則可歸類為非海相環境，如河流氾濫平原及淡水湖泊等。

三、研究成果

(一)、井下地層對比

1.剖面 A：Rowley 次盆地

在 Rowley 次盆地中用以進行地層對比之井包括 Whitetail 1 號井、Huntsman 1 號井、Steel Dragon 1 號井、Anhalt 1 號井、Hannover South 1 號井及 East Mermaid 1 號井。剖面走向大致呈東西向，顯示 Rowley 次盆地的地層對比結果(圖 4)。

在這 6 口井中所鑽遇之年代最老的地層為 Upper Keraudren Formation。在 Steel Dargon 1 號井的 Upper Keraudren Formation 以砂岩為主，而在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井中，此地層皆是由上段的碳酸鹽岩及下段的火成岩所構成。

比較 Bedout Formation 的晚三疊紀部分，可見在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井中仍是以碳酸鹽岩為主要岩性，此與其下覆之 Upper Keraudren Formation 岩性相仿。在 Steel Dragon 1 號井中的 Bedout Formation 表現為多色黏土岩。早侏羅紀，Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井中開始出現大量砂岩並少量多色黏土岩。此段地層在 Huntsman 1 號井及 East Mermaid 1 號井中則表現為砂岩、粉砂岩及多色黏土岩。

在 East Mermaid 1 號井中的 Depuch Formation 岩性以砂岩為主。往外圍區域(北方)，層厚減少，且地層中也出現大量黏土岩。在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井中。在 Steel Dragon 1 號井中的 Depuch Formation 上段出現碳酸鹽岩，而較厚層砂岩則出現在地層中段。在 Huntsman 1 號井中，Depuch Formation 岩性包括以砂岩為主的上段，以及以黏土岩為主的下段。

在大部分井中普遍缺失晚侏羅紀地層，並在侏羅系頂部形成一區域不整合面。然在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井中保有晚侏羅紀早期(Oxfordian)的地層，即 Eliassen Formation/Calypso Formation。

在 East Mermaid 1 號井中，白堊紀第一套地層(Mermaid Formation)岩性主要為黏土岩及粉砂岩。往西北方向(即 Hannover South 1 號井及 Anhalt 1 號井)，

此地層不僅厚度減少，岩性也轉為以黏土岩為主。到 Rowley 次盆地西部，此地層厚度更形減少(如 Steel Dragon 1 號井的 77 公尺)，並似乎往 Huntsman 1 號井(層厚 54 公尺)及 Whitetail 1 號井方向逐漸尖滅。其岩性組成也轉變為泥質石灰岩。

與 Mermiad Formation 相仿，最厚層之 Nelson Rocks Formation 也出現在 East Mermaid 1 號井(532 公尺)，並往北方及西北方向減薄。在 East Mermaid 1 號井及 Hannover South 1 號井中，此地層之岩性仍為黏土岩及鈣質黏土岩；至其他井中，此地層表現為泥質石灰岩。

下一套地層 Toolonga Calcilutite Formation 僅在 3 口井中可獲得岩性描述，分別為 Whitetail 1 號井及 Huntsman 1 號井的泥質石灰岩，以及在 East Mermaid 1 號井中的鈣質黏土岩。以地層厚度而論，較厚層之 Toolonga Calcilutite Formation 出現在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井處，並往其他井的方向減薄。

Miria Marl Formation 亦僅在上述 3 口井中有岩性描述，分別為 Whitetail 1 號井及 Huntsman 1 號井的泥質石灰岩，以及在 East Mermaid 1 號井中的鈣質黏土岩。以層厚而論，較厚層之 Miria Marl Formation 仍出現在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井，並往其他井的方向減薄。

2.剖面 B：Bedout 次盆地至 Bedout 高區

在此剖面上用以進行地層對比之井包括 Keraudren 1 號井、Phoenix South 1 號井、Phoenix 1 號井、Minilya 1 號井、Lagrange 1 號井及 Bedout 1 號井，剖面方向大致為東北至西南向，顯示從 Bedout 次盆地至 Bedout 高區的地層對比結果(圖 5)。

Keraudren 1 號井及 Phoenix South 1 號井之 Lower Keruadren Formation 皆有較厚層砂岩；相比之下，Phoenix 1 號井則僅含薄砂層，其岩性組成大部為黏土岩。

在 Keraudren 1 號井中，Cossigny Limestone 之岩性組成除泥質石灰岩外，還包括黏土岩及砂岩；相比之下，另外 2 口井的 Cossigny Limestone 皆是以泥質石灰岩為主。

各井中的 Upper Keruadren Formation 皆以砂岩為主，代表此時 Bedout 次盆地的沉積環境為一廣泛河流三角洲系統主導。

在 Keraudren 1 號井及 Lagrange 1 號井內，Bedout Formation 主要為多色黏土岩；然在其他 3 口井中則可見較多的砂岩層，尤其是 Phoenix 1 號井及 Phoenix South 1 號井。

不論是在 Bedout 次盆地或 Bedout 高區皆堆積了相當厚層的 Depuch Formation，且岩性皆以砂岩為主。在 Depuch Formation 之上經常缺失晚侏羅紀地層，形成一代表侏羅系頂部的不整合面。然在 Keruadren 1 號井的 Depuch

Formation 之上可見到一層代表晚侏羅紀(Tithonian)的 Egret 黏土岩層，此黏土岩層亦可見於 Phoenix South 1 號井及 Minilya 1 號井中。

一般而言，Mermaid Formation 岩性以黏土岩為主，然於地層中段經常出現厚層砂岩，名為 Broome Sandstone。除 Minilya 1 號井外，其他各井皆可見此一砂岩層。

在 Mermaid Formation 之上為 Nelson Rocks Formation。除 Phoenix South 1 號井無岩屑取樣可供岩性描述外，在其他 5 口井中，Nelson Rocks Formation 皆主要為鈣質黏土岩。

緊接 Nelson Rocks Formation 之上的地層為 Toolonga Calcilutite Formation。除 Phoenix South 1 號井缺少岩性描述，以及在 Lagrange 1 號井中表現為鈣質黏土岩外，其餘 4 口井之 Toolonga Calcilutite Formation 岩性皆為泥質石灰岩。

白堊紀最後一套地層為 Miria Marl Formation。在 Bedout 1 號井中，Miria Marl Formation 岩性包括上段的粉砂質黏土岩及下段的鈣質黏土岩。Lagrange 1 號井之 Miria Marl Formation 岩性包含上段之粉砂質石灰岩及下段之黏土岩。在 Phoenix 1 號井，此地層以粉砂質黏土岩為主要岩性，也包括上段較薄層之泥質石灰岩。在 Minilya 1 號井中，此地層含有上段的黏土岩及下段的砂岩。在 Keraudren 1 號井的 Miria Marl Formation 岩性主要為粉砂岩。

3.剖面 C：Rowley 次盆地至 Bedout 次盆地

在此剖面上用以進行地層對比之井包括 Hannover South 1 號井、Anhalt 1 號井、East Mermaid 1 號井、Bedout 1 號井、Lagrange 1 號井、Phoenix South 1 號井、Phoenix 1 號井及 Keraudren 1 號井。剖面方向大致為東北至西南向，顯示跨越三個地理區的地層對比結果(圖 6)。

在盆地內圍的 Upper Keraudren Formation 大致表現為砂岩和泥岩互層。至 Bedout 高區，此地層急遽減薄並以砂岩為主。在盆地外圍則堆積相當厚層的 Upper Keraudren Formation 且其沉積物主要是碳酸鹽岩。由上述觀察可推測當時(中至晚三疊紀)的沉積物分布範圍或許受到高區(如 Bedout 高區及 Oobagooma 高區)的影響，因此源自盆地東南方(即澳洲陸域)的沉積物無法越過這些地形高區而進入盆地外圍。這或許也讓外圍區域成為適合發育厚層碳酸鹽岩的環境。

盆地整體架構至 Bedout Formation 堆積期間似乎並未產生太大變化。在外圍區域的 Bedout Formation 晚三疊紀部分仍為碳酸鹽岩，說明碎屑物供應仍受到高區阻擋而無法進入盆地外圍。

盆地架構變化的時間可能發生在早至中侏羅紀。在 Depuch Formation 堆積期間，可以見到內圍區及 Bedout 高區以砂岩堆積為主。這些砂岩甚至可供應至位於外圍區的內緣(如 East Mermaid 1 號井)。此一觀察或建議至侏羅紀早至中期，高區對碎屑物輸送及分布的影響逐漸降低，源自盆地東南方的沉積物得以經由盆地內圍區域越過高區而進入外圍區域。

Depuch Formation 形成之後，整個盆地皆發生晚侏羅紀的地層缺失事件，形成侏羅系頂部的區域不整合面。

進入白堊紀後，Roebuck 盆地普遍堆積一層以黏土岩為主的 Mermaid Formation。此套黏土岩的厚度於 Bedout 高區及 East Mermaid 1 號井處較厚，並往盆地內圍及外圍減薄。此觀察或許說明 Bedout 高區於此時轉變為相對低區(靠近沉積中心)。然而，在盆地內圍及 Bedout 高區的 Mermaid Formation 內尚可見一砂岩層(Broome Sandstone)，在盆地外圍區則無此砂岩層。此差異或許說明在一段期間內曾有較大量的砂質沉積物供應至盆地內圍區域及 Bedout 高區處，然此供應無法到達盆地外圍。

Mermaid Formation 之後各地層之沉積物以黏土岩及碳酸鹽岩為主(形成 Nelson Rocks Formation，Toolonga Calcilutite Formation 及 Miria Marl Formation 等地層)，總沉積厚度亦大致相仿。此觀察建議 Roebuck 盆地的整體架構進入被動大陸邊緣系統。

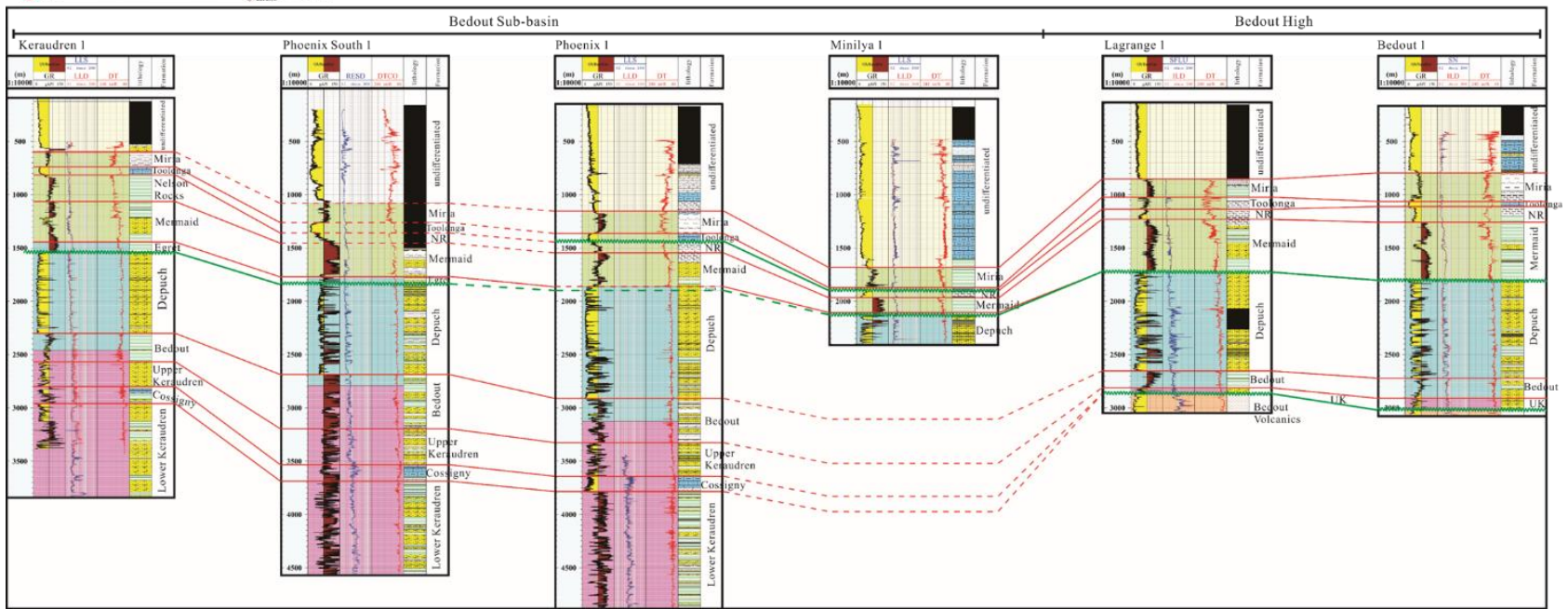
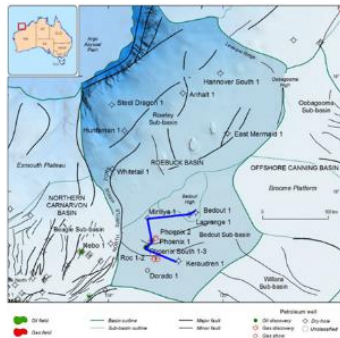


圖 5、剖面 B 之 6 口井地層對比(紅色實線代表確定之地層界面，紅色虛線代表推測之地層界面，綠色線代表不整合面)。各井分布位置如圖 3 所示

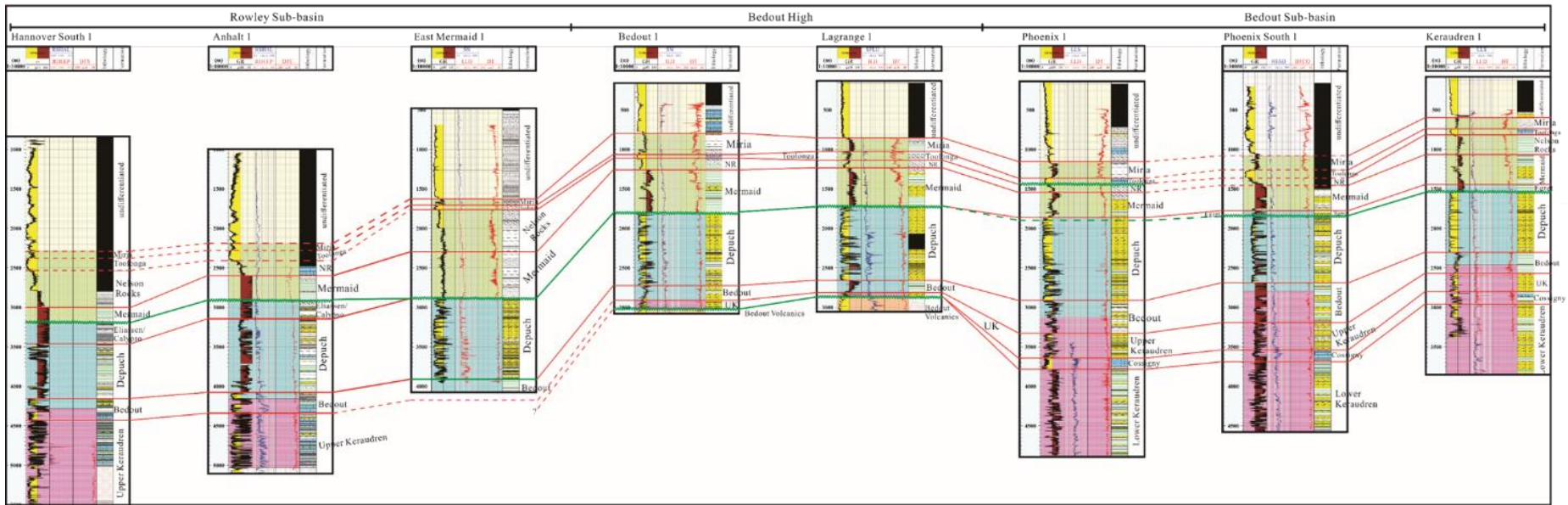
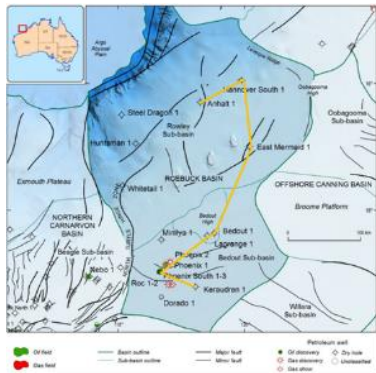


圖 6、剖面 C 之 8 口井地層對比(紅色實線代表確定之地層界面，紅色虛線代表推測之地層界面，綠色線代表不整合面)。各井分布位置如圖 3 所示

(二)、中生代沉積環境

1. Rowley 次盆地

比較 Rowley 次盆地 6 口井，可發現大致在晚侏羅紀以前，這個次盆地的沉積環境主要為非海相至邊緣海相(圖 7)。局部可見到近濱相，且集中於 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井的晚三疊紀及晚侏羅紀的地層中。這兩口井的晚三疊紀地層主要是由碳酸鹽岩所構成，說明一適合碳酸鹽岩發育的淺水陸棚環境。此後，從早侏羅紀開始，沉積環境轉為邊緣海相至非海相。其他井也顯示類似的沉積環境。至晚侏羅紀，大部井都出現地層中斷的現象，僅晚侏羅紀最早階段還可在 Anhalt 1 號井及 Hannover South 1 號井附近觀察到邊緣海相至近濱相沉積物。

越過晚侏羅紀沉積間斷後，Rowley 次盆地演化成以遠濱相為主的沉積環境，僅在相對較淺水的地方(如 East Mermaid 1 號井處)可見到近濱相環境。

2. Bedout 次盆地及 Bedout 高區

在三疊紀及侏羅紀，Bedout 次盆地大致為非海相至邊緣海相的沉積環境。然而，位於 Bedout 高區的 Lagrange 1 號井呈現出較顯著的非海相堆積，此外在 Phoenix 1 號井及 Phoenix 1 號井的晚三疊紀也有較多的非海相沉積物。

Bedout 次盆地的晚侏羅紀為一無堆積/侵蝕階段，僅在沉積中心處的四口井(Keraudren 1 號井、Phoenix South 1 號井、Phoenix 1 號井及 Minilya 1 號井)可見到屬於 Tithonian 的近濱相至遠濱相沉積物。

晚侏羅紀沉積間斷之後，Bedout 次盆地大致呈現早白堊紀的近濱相沉積環境，以及晚白堊紀的遠濱相環境。

比較兩個次盆地的沉積環境，可發現在白堊紀以前，兩次盆地大致為非海相至邊緣海相環境。然由於 Bedout 次盆地較近澳洲陸塊，因此出現較多的非海相沉積環境。在此期間內，較深水(近濱相)環境可能出現在 Rowley 次盆地北方。

白堊紀以來，Bedout 次盆地經歷由近濱相至遠濱相的沉積環境變化；然在 Rowley 次盆地內除 East Mermaid 1 號井外，其他區域似乎自早白堊紀即處於較深水環境(遠濱相)。

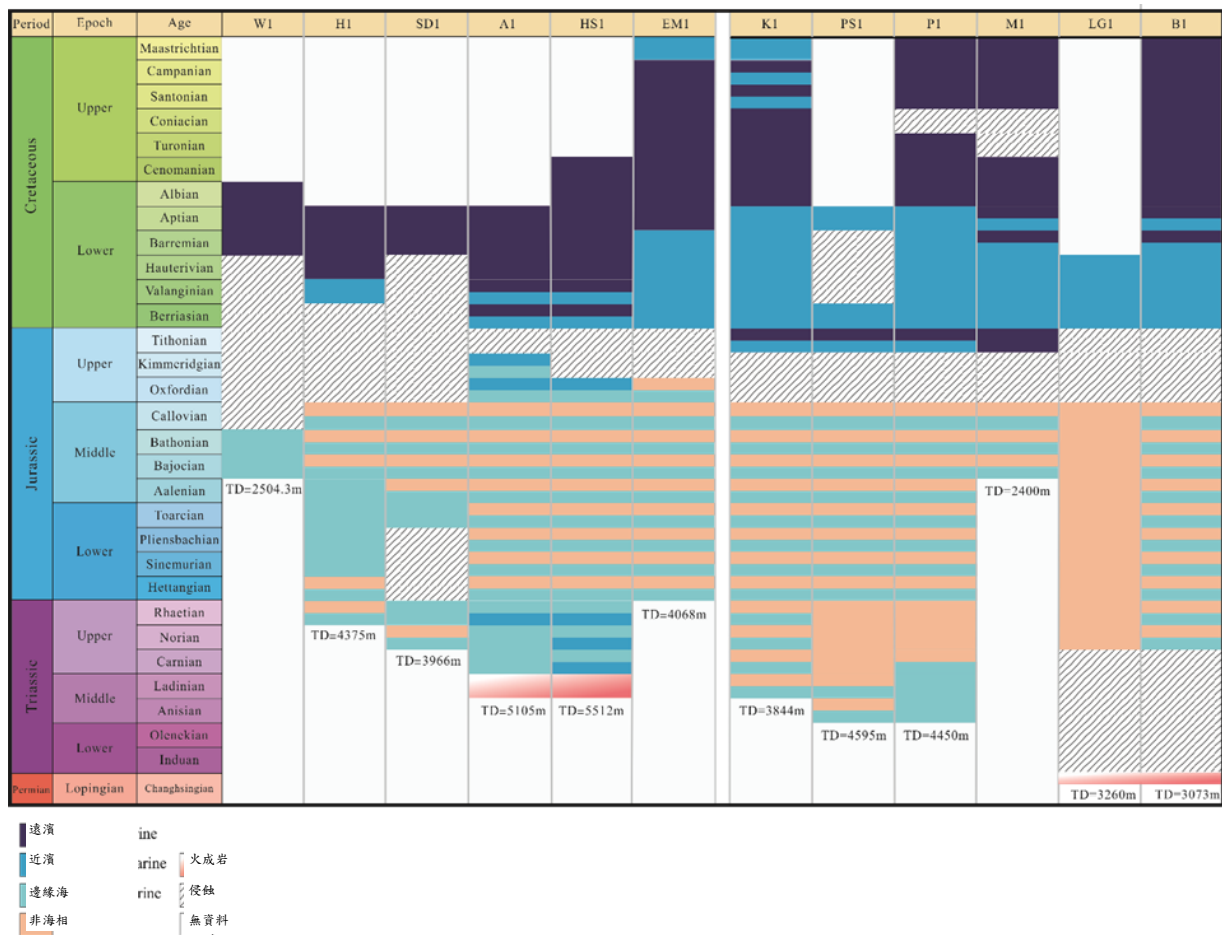


圖 7、多井沉積環境聯繫圖。W1: Whitetail 1 號井，H1: Huntsman 1 號井，SD1: Steel Dragon 1 號井，A1: Anhalt 1 號井，HS1: Hannover South 1 號井，EM1: East Mermaid 1 號井，K1: Keraudren 1 號井，PS1: Phoenix South 1 號井，P1: Phoenix 1 號井，M1: Minilya 1 號井，LG1: Lagrange 1 號井，B1: Bedout 1 號井

四、參考文獻

- Grahame, J., Cairns, E., and Roy, S. (2017) Triassic paleogeography and petroleum systems of the North West Shelf, Australia: key insights from a new regional study, *The APPEA Journal* 57, p. 744.
- Grosjean, E., Edwards, D.S., Hong, Z., Jinadasa, N., and Buckler, T. (2019) TOC and rock-eval pyrolysis data from the well ROC 2, Roebuck Basin, Australia. *Record* 2019/12. Geoscience Australia, Canberra. <http://dx.doi.org/10.11636/Record.2019.012>
- Hulbert, F., Chambers, R., and Plampton, W. (2019) The Roebuck Basin – Over 40 years of patience, IHS Markit.
- Quadrant Energy (2016) Phoenix South-1, ST1 & ST2, WA-435-P, Well Completion Report.