



行政院及所屬各機關出國報告
(出國類別：實習)

海域資源甲烷水合物調查

服務機關：經濟部中央地質調查所
出國人職稱：科長
姓名：林偉雄
出國地區：美國
出國期間：90.7.1.—90.7.29
報告日期：90年8月15日

I3/
C09004007

系統識別號:C09004007

公 務 出 國 報 告 提 要

頁數: 45 含附件: 否

報告名稱:

海域資源甲烷水合物調查

主辦機關:

經濟部中央地質調查所

聯絡人/電話

塗明寬/29462793-302

出國人員:

林偉雄 經濟部中央地質調查所 礦岩組 科長

出國類別: 實習

出國地區: 美國

出國期間 民國 90 年 07 月 01 日 -民國 90 年 07 月 29 日

報告日期: 民國 90 年 08 月 20 日

分類號/目: I3/地質學 I3/地質學

關鍵詞: 甲烷水合物

內容摘要: 台灣的自產能源無法自給自足，替代能源的探勘研究因此是國家安全及經濟發展的基礎，目前甲烷水合物已被列為未來能源的代替品，而台灣附近海域甲烷水合物的賦存，提供我們一個能源自主的機會，所以台灣附近海域甲烷水合物的探勘調查是政府能源政策不可或缺的一環。未來台灣週遭海域探勘應以四個重點來規畫：（一）確認甲烷水合物的賦存、（二）掌握甲烷水合物的分佈及儲量、（三）研究甲烷水合物的產能和（四）探討甲烷水合物對環境的影響。此外，已知甲烷的使用將會對全球氣候暖化有影響，及甲烷水合物氣化導致海底山崩，因此探勘期間亦應同時評估其對環境衝擊，及適時公布研究結果取信於民，避免重蹈核能開發使用過程未獲大家認同，最後整個能源政策被迫轉向。

本文電子檔已上傳至出國報告資訊網

摘要

台灣的自產能源無法自給自足，目前煤炭、石油、天然氣和核能等能源有96.79%需靠進口來補足。替代能源的探勘研究因此是國家安全及經濟發展的基礎，目前甲烷水合物已被列為未來能源的替代品，而台灣附近海域甲烷水合物的賦存，提供我們一個能源自主的機會，所以台灣附近海域甲烷水合物的探勘調查是政府能源政策不可或缺的一環。回顧甲烷水合物的研究，現在以日本、加拿大、美國、德國、韓國和印度等國最為積極，站在國家長遠的能源需求和戰略考量，政府則必需責無旁貸積極尋求替代能源方案，以免能源危機問題來臨束手無措。

台灣海域的甲烷水合物調查可以分成三個方面來發展：（一）汲取國外經驗，（二）台灣週遭海域探勘、和（三）台灣陸地相同構造環境調查。近年來加拿大和日本相繼成功的完成開鑿甲烷水合物試驗井計畫，因此藉由國際交流，汲取他們的經驗，可以事半功倍減短我們探勘研究的時程，特別是日本在地緣及構造環境均與台灣相近，因此發展與日本合作研究關係，就近取得他們最新成果，在未來的探勘調查可以節省許多經費與時間。

未來台灣週遭海域探勘應以四個重點來規畫：（一）確認甲烷水合物的賦存、（二）掌握甲烷水合物的分佈及儲量、（三）研究甲烷水合物的產能和（四）探討甲烷水合物對環境的影響。規畫時則以化學、物理和地質三個角度來著手：由化學觀點來看甲烷水合物，則水－冰－氣－水合物相圖提供其形成的溫度壓力穩定範圍，因此藉由相圖可以進一步關聯其與地質現象的對比，所以富含甲烷水合物岩層的化學物理性質是最先首需掌握的資料。由物理觀點則海域富含甲烷水合物岩層的物理性質和地熱梯度可用來標明可能的探勘目標區。此外，由地質觀點則沉積物所含有機物重量百分比、沉積率、沉積盆地地熱史、孔隙率、滲透率等因素的評估，可以瞭解甲烷水合物形成歷程及其可能蘊藏。藉由上述化學、物理和地質因素的考量評估後，確定分佈範圍、儲量和產能，再決定是否需要選井開鑿研究以為未來開發做前導。此外，已知甲烷的使用將會對全球氣候暖化有影響，及甲烷水合物氣化導致海底山崩，因此探勘期間亦應同時評估其對環境衝擊，及適時公布研究結果取信於民，避免重蹈核能開發使用過程未獲大家認同，最後整個能源政策被迫轉向。

最後，台灣陸地相同構造環境調查是全面性考慮在一個板塊聚合邊界，除了甲烷水合物的產出，仍有許多金屬或非金屬礦的伴生，因此整合型的地質資源探勘，將為未來台灣能源與資源找出活水源，而這些成果也可運用於海域地球物理探勘資料解釋，為甲烷水合物的探勘研究打下堅實的基礎。

海域資源甲烷水合物調查

目 錄

目的	1
過程	1
甲烷水合物的研究發展	4
甲烷水合物的發現	4
甲烷水合物研究近況	5
野外地質研習	7
美西地區	7
美中地區	8
美東地區	9
心得	9
建議	10
參考文獻	11
照片	17

目的

台灣的自產能源無法自給自足，經濟部能源委員會（2000）所出刊的台灣能源統計年報顯示，目前煤炭、石油、天然氣和核能等能源有 96.79%需靠進口來補足。因此爲了國家經濟發展，找尋替代能源便成不可或缺的政策。目前甲烷水合物的研究（鐘三雄和張碩芳，2001），認爲其在全球的賦存量可能可以做爲天然氣的替代品，而台灣西南外海也經震波探勘發現有甲烷水合物賦存跡象（Chi *et al.*, 1998）。此外，加拿大、日本、美國和德國已合作完成在加拿大鑽鑿一口試驗井瞭解甲烷水合物產狀、物性和試產情況（Dallimore *et al.*, 1999）；另一方面，日本則在去年完成試驗井的鑽鑿計畫（Uchida *et al.*, 2000），而韓國、印度等國也陸續提出相關研究計畫。因此這個出國計畫即著眼於此，希望藉由與美國方面專家如美國地質調查所和大學的研究人員等晤談，以便規劃和擬定我國未來調查研究方向。

過程

自九十年七月一日起至七月二十九日止，筆者經本所遴派出國研習，受訓計劃名稱爲『海域資源甲烷水合物調查』，經費由經濟部國際合作處聯合技術協助訓練計畫項下支付，受訓計劃目的在於瞭解美國甲烷水合物研究發展情形，並爲台灣未來在此方面的研究做評估與規劃。計劃執行方式分爲兩個部分：（一）針對甲烷水合物的研究發展現況與美方研究人員晤談討論；（二）野外實地勘察地質。行程如下：

- 7/1 （日） 啓程：台北至美國加州聖荷西市
- 7/2 （一） 參訪史丹佛大學地球物理研究所
 - 1) 訪談 Amos M. Nur 教授及 Jack Dvorkin 教授瞭解如何利用地球物理方法來進行甲烷水合物研究工作
 - 2) 訪談博士班研究生 Kaj Johnson 瞭解其研究成果
- 7/3 （二） 參訪美國地質調查所（美西分所）
 - 1) 訪談 Daniel J. Ponti 研究員瞭解美國地質調查所運作方式
 - 2) 訪談 John W. Hillhouse 博士瞭解美國地質圖測製事宜
 - 3) 訪談 Rufus Catching 博士瞭解其研究成果
 - 4) 訪談 Michael J. Rymer 研究員瞭解其工作近況
- 7/4 （三） 地質調查野外工作

- 加州聖荷西州立大學 Donald L. Reed 教授、台灣大學海洋研究所劉家瑄教授和柏克萊大學博士班研究生戚務正陪同，赴舊金山灣區附近地區瞭解 San Andreas Fault 及 Franciscan Complex
- 7/5 (四) 參訪 Monterey Bay Aquanum Research Institute
- 1) 訪談 Peter G. Brewer 和 Edward T. Peltzer III 博士有關深海甲烷和二氧化碳水合物合成實驗成果
 - 2) 參觀該所深海潛艇的相關設施
- 7/6 (五) 參訪美國地質調查所甲烷水合物研究小組
- 1) 訪談 Keith A. Kvenvolden 和 Alan K. Cooper 研究員有關台灣甲烷水合物未來研究方向，及瞭解美國地質調查所甲烷水合物研究計劃進展
 - 2) 訪談 Karl Westworth 有關加州第四紀地層地質調查事宜
- 7/7 (六) 離開加州聖荷西市至科羅拉多州丹佛市
普渡大學地質系 Arvid M. Johnson 教授與科州地質師 Dale M. Cochran 陪同開車轉往猶他州進行七天 (7/7-7/13) 野外工作。
- 7/8 (日) 地質調查野外工作
赴 Arches National Park、Castle Creek 和 Onion Creek 調查該處構造及地層
- 7/9 (一) 地質調查野外工作
赴 Arches National Park 調查 Moab Fault，及至 Goblin Valleys State Park 的 Mollik Castle 區域調查 deformation band 的種種構造型態
- 7/10 (二) 地質調查野外工作
赴 Herry Mountain 地區的 Saw Tooth Ridge、Mt. Hillers 和 Mt. Ellens 調查火成侵入體構造
- 7/11 (三) 地質調查野外工作
赴 Cedar Mt. 調查該區火成侵入體構造
- 7/12 (四) 地質調查野外工作
赴 San Rafael Swell 調查其地層層序和變形構造
- 7/13 (五) 地質調查野外工作
調查 Copper Mt. 附近的變質岩地質，結束野外工作返回科羅拉多州丹佛市，
- 7/14 (六) 赴 Colorado School of Mine 與 Marco Jager 晤談周三訪問行程及安排演講事宜
- 7/15 (日) 準備赴 Colorado School of Mine 甲烷水合物研究中心演講稿子，題目是

- “Stratigic Planning in the Researches on Gas Hydrate, Taiwan”
- 7/16 (一) 參訪美國地質調查所(美中分所)
- 1) 訪談 Kelvin C. McKinney 研究員瞭解其古生物研究工作
 - 2) 訪談 R. Randall Schumann 研究員瞭解美國地質圖測製計劃
 - 3) 訪談 John C. Reed 研究員瞭解區域地質圖測製事宜
- 7/17 (二) 參訪美國地質調查所(美中分所)
- 1) 訪談 Michael N. Machette 研究員瞭解其西半球活動斷層分布資料庫建置成果
 - 2) 訪談 Anthony J. Crone 博士瞭解其所負責的地質災害工作
 - 3) 訪談 Rex Baun 研究員瞭解其所負責的山崩調查計劃
 - 4) 訪談 Thomas S. Ahlbrandt 和 Peter J. McCabe 有關美國對世界油氣產能之評估
- 7/18 (三) 參訪 Colorado School of Mine 的甲烷水合物研究中心
- 1) 職報告台灣甲烷水合物研究發展策略
 - 2) 訪談甲烷水合物研究中心研究員的工作成果
- 訪談美國地質調查所 Randall W. Jibson 研究員有關地震誘發山崩研究事宜
- 7/19 (四) 參訪美國地質調查所(美中分所)
- 1) 訪談 William H. Langer 研究員有關美國砂石調查事宜
 - 2) 訪談 Robert B. Scott 研究員有關 Appalachian 地質及變質岩調查實務問題
 - 3) Kelvin C. McKinney 研究員陪同參觀美國地質調查所化石標本收集
- 7/20 (五) 參訪科羅拉多州立地質調查所
- 訪談 Vince Matthews 博士有關地質圖測製事宜
- 7/21 (六) 離開科羅拉多州丹佛市至麻州波士頓市
- 7/22 (日) 野外觀察波士頓附近地區變質岩地質
- 7/23 (一) 參訪美國地質調查所(美東分所)
- 訪談 William Dillon 和 William Winters 博士有關美國甲烷水合物研究進展和加拿大甲烷水合物試驗井相關事宜
- 參訪 Boston College 的 Weston Observatory
- 訪談 James Skehan 教授 Appalachian 地質及安排次日野外調查行程
- 7/24 (二) 地質調查野外工作
- James Skehan 教授陪同赴 Rhode Island 的 Newport 地區調查變質岩的構造型態

- 7/25 (三) 離開麻州波士頓市至維吉尼亞州阿靈頓市
- 7/26 (四) 地質調查野外工作
地震監測研究中心 Yu-Long Kung 研究員陪同參訪維吉尼亞州 Luray 石灰岩洞
- 7/27 (五) 訪談地震監測研究中心 Yu-Long Kung 研究員
研習 Unix 作業系統下程式設計
- 7/28 (六) 返程：離開阿靈頓回台北
- 7/29 (日) 抵達桃園中正機場

甲烷水合物的研究發展

甲烷水合物的發現

氣水合物

1811 年 Humphry Davy 證明水是氫晶體 $\text{Cl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 中的一種成份，此後以 X 光研究冰晶狀的鹵水化合物的結晶時，發現其立方體結晶格子一邊是 12.0 \AA ，而另一邊是 17.0 \AA ，氫鍵存在水分子中，使得水分子形成晶體後其間出現空隙，外來分子可以被包在裏面而形成結晶。1886 年 Mylius 研究對苯二酚和揮發性化合物結合時，發現他們之間並沒有普通的化學反應發生，但在結晶時這些對苯二酚分子卻用某種方式將揮發物拘束住。Palm 和 Powell 在 1947 年也證實上述事實，並發現對苯二酚分子是用氫鍵形成一個無限大的三角對稱立體晶格，而把第二種組成分子給包含在此巨分子中。雖然兩種成份接合在一起，但是彼此間並無強吸引力，而是用一種機制由一個包著另一個。此種機制要求分子的籠孔大小及其鍵連型式，分子的空間必需圍繞包裹著插入分子，而被包裹的插入分子也必需在籠孔關閉前調整位態使其自身整合進入晶格。

氣水合物包含兩個或兩個以上的組成分子，它與化合物的區別在其組成並不以化學鍵來接合，而是由一種組成份子形成結晶後，把另外一種組成份子完全包裹於其內晶格。一般情況是一種化合物的結晶架構中含有孔洞，使得另一種化合物能填入，而且整個系統需有壓力來強迫外來分子進入宿主晶格。舉例而言，水能形成如冰晶的氫鍵結構，但此結構中有許多洞穴呈有規律排列，以甲烷水合物為例便有兩種情況：一種是冰晶的體中心的晶格 (body centered cubic lattices) 內含 46 個水分子，而其中容許 8 個外來小於 5 \AA 分子的構造；另一種是冰晶的面中心的晶格 (face centered lattices) 含 136 個水分子，而其中容許 8 個外來小於 6.7 \AA 分子的構造。因此氣水合物中所填入的分子須有適當大小與形狀，而與其價電子結構無關。氣水合物的製備僅要求插入分子在籠罩分子的溶媒中結晶即

可，而所形成的晶體在一般狀況下是穩定，除了加熱至熔點、或溶於水中或在研鉢中研磨才會分解。氣水合物的應用方面如利用其選擇性來分離稀有氣體和光異構物。

甲烷水合物

1930 和 1940 年代在天然氣的管線中常有甲烷水合物的結晶阻礙傳輸，1964 年在西伯利亞凍原區首次發現自然的甲烷水合物，而 1977 年在大西洋的震測探勘也發現深海的富含甲烷水合物的岩層。因為天然氣組成以甲烷為主，且甲烷屬可燃性的能源，一單位體積的水可與 70 至 160 倍體積的甲烷合成甲烷水合物，因此甲烷水合物便可視為另一替代能源。

沉積岩層中甲烷水合物的形成需考慮甲烷來源、移棲富集和其穩定的溫度壓力條件。甲烷來源可分生物作用和地質作用兩種：生物作用指的是有機物的崩解產品，因此以供應環境而言，湖海低等植物或陸源高等動植物均是可能的供應源，所以近陸的內大陸棚區，特別是大河出口的三角洲有豐富的植生及動物群聚，可當重要的有機物供應源區。此外，火成活動、變質作用及沉積物因深埋成岩作用將其中所含甲烷釋出，也是可能的來源。

至於移棲富集方面：沉積物的粒度也會影響所能吸附的有機物的量，一般細顆粒的黏土可含超過 2% 的有機物，而以石油為例要達到經濟效益的產量，源岩至少要含有 0.8 至 2.0% 的有機碳。此外，沉積速率快慢也影響有機物的賦存，快速沉積可保障有機物免於氧化破壞，而低溫及減少繼續生物崩解作用的環境，才能使有機物溶入水中並與沉積物一塊堆積深埋。一旦有機物和水一塊埋入沉積物中，熱能就開始其作用使有機物轉變為天然氣。當埋入深度進入「氣坪」(gas floor) 生產區時，也就是溫度達 50°C 至 65°C 時，天然氣就生成，而溫度達 135°C 時，石油也開始形成，不過當溫度超過「氣坪」190°C 至 250°C 時，則環境較適合二氧化碳的產出。一般而言，甲烷產出的最適環境在 100°C，不過若壓力大的話溫度還可以高一些。當甲烷生成後，藉由沉積物中孔隙向上移棲，直至進入水合物穩定區域 (Hydrate Stability Zone; HSZ) — 400 公尺水深其位置接近海底表面，它與水的冰晶結合形成氣水天然氣水合物，而此天然氣水合物隨其上沉積物的深埋而離開水合物穩定區域，此時再度氣化往上移棲至新的穩定區固化結晶，而水合物穩定區域作用類似封頂蓋保障甲烷不致逸失，此過程可持續直至富集大量氣水天然氣水合物，除非地質條件變動使其逸出海底沉積物 and 水的界面，例如海底地形 pockmarks 記錄了天然氣逸出的現象，否則此作用不會中斷。

甲烷水合物研究近況

甲烷水合物的研究近況主要可分為地球物理探勘、地球化學性質研究和地質環境的探討三方面來檢討，根據所參訪單位包括美國地質調查所、Monterey

Bay Aquarium Research Institute、史丹佛大學地球物理系和科羅拉多工礦大學甲烷水合物研究中心等，整理他們所提供的意見如下：。

地球物理探勘除了以震測海底擬合反射訊號 (bottom simulating reflection：縮寫 BSR) 及地熱梯度和水深來衡量甲烷水合物的穩定溫度壓力區，以便評估甲烷水合物賦存情形 (Miles, 1995；Dillon, *et al*, 1996；Shyu, *et al.*, 1998；Rao, 1999)。此外，還應探討甲烷水合物賦存量及未來開採所需瞭解的產能問題，因此甲烷水合物和其賦存的沉積物物理特性的研究 (Lee, *et al*, 1993；Nur, 1996；Helgerud, *et al.*, 1999；Dvorkin, *et al*, 1999；Ecker, *et al.*, 2000；Lee and Collet, 2001)，便提供孔隙率 (porosity)、賦存比率 (concentration) 和滲透率 (permeability) 等訊息來評估儲量和產能。

地球化學性質研究主要提供甲烷水合物的穩定溫度壓力區域性質，以便估計震測海底擬合反射訊號是否反應甲烷水合物存在的溫壓條件 (Miles, 1995；Rao, 1999)。此方面基礎研究還包括野外和室內合成實驗 (Brewer, *et al*, 1997；Sloan, 1998；Subramanian *et al*, 2000a and 2000b)，以便精確瞭解甲烷水合物和其賦存沉積物間關係 (Handa and Stupin, 1992；Clarke, *et al.*, 1999；Uchida, *et al.*, 1999；Seshadri, *et al.*, 2001)。目前已知粗顆粒沉積物間孔隙提供甲烷水合物形成的很好界面，而細粒沉積物則以裂隙充填來提供甲烷水合物形成的管道。另一方面，藉由甲烷水合物的組成同位素研究 (Hinrichs, *et al.*, 1999) 可以推判其可能來源是生物作用 (biogenic origin) 或深埋熱力作用 (thermogenic origin)，目前看法是甲烷水合物主要由海底淺層沉積物中生物作用所富集成 (Dillon, 2001)，因此利用此種需在還原環境條件下的生物作用特性，硫酸鹽的還原深度也會被用來估計甲烷水合物的賦存最淺位置。

地質環境的研究主要在瞭解甲烷水合物的產狀和成因，以便做為探勘和開發方面的依據 (Kvenvolden, 1988；Kleinberg and Brewer, 2001)。探勘重點在於瞭解甲烷水合物賦存的沉積物特性，甲烷的來源，海底地形形貌，及其上海洋本身基本動態物理化學資料，這些研究主要依賴前述地球物理與地球化學方面的研究來輔助，因此不再重覆贅述。此外，甲烷水合物的研究指出甲烷氧化作用將導至二氧化碳的產出，進而造成溫室效應，但是比較石油燃燒反應所產生二氧化碳和其他硫化物，甲烷僅有二氧化碳和水，因此反而是比較乾淨的能源。此外，二氧化碳的深海棄置研究也因水合物的研究而有新的進展，Brewer (2000) 的海底實驗顯示二氧化碳水合物棄置作業並不會對海洋生物造成影響，重點在於二氧化碳水合物的表面張力很大，因此並不會溶於海水，因此形成不能相混合的現象。另外，近來許多研究發現甲烷水合物因地質環境變遷導至其釋出，進而引發海底山崩，因此甲烷水合物對環境的衝擊也是目前大家關注的焦點 (Henriet and Mienert, 1998；Haq, 1998)。

整個訪談過程中顯示，除了直接面對研究員諮商討論，對其研究近況的瞭解，也順便報告台灣目前已有成果，並詢問未來工作方向建議，其中最中肯的是未來我們做研究發展時，文獻的閱讀回顧也很重要，避免重複已有工作，並且走

出新思維新作法，以突破目前研究所面對的僵局。

野外地質研習

地層岩性記錄其形成的大地構造環境(陸緣台地、前陸盆地、島弧或大洋)，而其中變形構造則反應板塊張裂、隱沒、和聚合碰撞等演化過程，因此實地觀察研究國外與台灣的地質異同，有助於釐清台灣地質調查所面臨的問題，並找出解決的方案。

甲烷水合物的產出環境受其溫度壓力的穩定範圍控制，目前已知主要產出環境有兩種：一為大陸凍源區，一為大洋深海區(Kvenvolden and Lorenson, 2001)。台灣目前已知在西南外海高屏斜坡至澎湖峽谷之間可能有甲烷水合物賦存(Chi, 1995)，此範圍南緣即是馬尼拉海溝和呂宋火山島弧，屬於呂宋隱沒碰撞系統

(Reed, *et al.*, 1992; Liu, *et al.*, 1998; Yu and Song, 2000)。比較台灣與國外的甲烷水合物產出環境，台灣屬於大洋深海區，日本的甲烷水合物產出環境也與我們類似，目前日本在 Nankai Trough 完成實驗井鑽鑿計畫，其地質環境也是板塊聚合邊界(Taira, *et al.*, 1992: Chap 9)。此外，美國東側海域 Carolina Trough 岩鹽上拱所致穹窿構造的拱頂發現甲烷水合物(Taylor, *et al.*, 2000)，而台灣在甲烷水合物的分佈範圍則發現許多泥岩上拱所致穹窿構造，此種泥岩貫入構造可以向陸延伸至台南和高雄，且在地表形成泥火山及天然氣的逸放。

為了實地瞭解台灣甲烷水合物形成的構造環境，板塊隱沒碰撞的造山帶，及其常伴生的穹窿構造，因此野外工作地點配合訪問行程，選定美國西岸的 Cordilleran 造山帶、東岸的 Appalachian 造山帶和中部地區科羅拉多地台所出露的火成侵入和岩鹽貫入所致的穹窿構造等三區做實務調查研習。

美西地區

美國西部屬於北美洲陸塊 Cordilleran 造山帶的一部份，此造山帶北起阿拉斯加，經加拿大和美國，南延可接南美洲安地斯山脈。Cordilleran 造山帶中加州海岸山脈所出露的岩層為隱沒和轉形斷層作用所造成的剪動破碎帶(Wakabayashi, 1996)，此破碎帶的岩層被稱為 Franciscan Complex (Bailey, *et al.*, 1964; Hsu and Ohrbom, 1969; Berkland, *et al.*, 1972; Raymond, 1984)，其中的地質特徵包括：(一) 混同層、(二) 蛇綠岩系和(三) 高壓低溫變質作用。

野外觀察主要是在舊金山灣區附近兩處：金門大橋南北岸和 Tiburon Peninsula 的 Ring Mountain 區域。金門大橋南岸主要為以蛇紋岩質為主的細粒岩層，其中混雜外來不同岩性的岩塊(輝長岩、玄武岩、燧石和沉積岩)，整個構造呈剪動脆性和塑性變形，岩層結構均被破壞，此種地質景觀與台灣台東利吉和屏東墾丁所出露受剪動破壞岩層類似(Page, 1978; Page and Suppe, 1981; Page and

Lan, 1983), 而其中蛇紋岩的產出, 也反應 Franciscan Complex 曾經歷隱沒的構造環境 (O'Hanley, 1996)。金門大橋北岸則由下而上岩層分別為玄武岩岩流、燧石和沉積岩依序疊置, 這套層序相當於蛇綠岩系的最頂部及其上沉積, 岩層結構並未受變形作用影響而崩移分解成塊, 只有燧石岩層受壓縮呈緊密褶皺, 至於玄武岩流和沉積岩在露頭中視尺度觀察, 只有岩層傾斜現象並無明顯變形特徵。蛇綠岩系代表海洋板塊的層序, 反應其因隱沒作用而逆衝上陸, 台灣東部亦有同樣岩組 (Liou, *et al.*, 1977)。此外, 中央山脈的超基性岩和蛇紋岩產出, 也顯示這些岩石可能源岩為蛇綠岩系 (Yui, *et al.*, 1990)。Tiburon Peninsula 的 Ring Mountain 則是有高壓低溫的藍閃石片岩相的外來岩塊, 其中葉理非常發達並呈褶曲現象, 這些外來岩塊分佈在平緩山坡上, 形成獨特的地形, 一如台東富源附近虎頭山、石頭山及屏東墾丁附近大小尖山的景觀。

美中地區

美國中部科羅拉多地台, 在猶他州東南地區所出露的地層, 由下而上為石炭紀的 Paradox Formation 和 Honaker Formation, 二疊紀的 Cutlor Group, 三疊紀的 Moenkopi Formation 和 Chinle Formation, 侏羅紀的 Wingate Sandstone、Kayenta Formation、Navajo Sandstone、Camel Formation、Entrada Sandstone 和 Morrison Formation, 白堊紀的 Cedar Mountain Formation、Dakoda Sandstone 和 Mancos Shale。此區主要構造為火成侵入及岩鹽上拱所致穹窿構造, 以及所伴生破裂與斷層構造 (Hintze, 1980; Doelling, 1985)。

各個地層岩性簡述如下: Paradox Formation 岩性主要是薄層砂頁岩互層夾石膏; Honaker Formation 則是砂岩和石灰岩互層; Cutlor Group 為紅至紅棕色砂岩偶夾礫質泥岩; Moenkopi Formation 是巧克力至棕色粉砂岩和頁岩薄層; Chinle Formation 則是紅棕色砂頁岩互層; Wingate Sandstone 為紅棕色厚砂岩; Kayenta Formation 為紅棕色砂岩; Navajo Sandstone 為白至淡紅色塊狀砂岩; Camel Formation 是紅色砂頁岩互層; Entrada Sandstone 分兩段, 下段為紅棕色砂岩, 上部為白灰色砂岩; Morrison Formation 可分三段, 下段為紅色粉砂質泥岩, 中段為黃灰色砂岩, 上段為綠色泥岩; Cedar Mountain Formation 為多種顏色泥岩; Dakoda Sandstone 為淡灰色砂岩; Mancos Shale 為灰色泥岩。

野外勘察區域與地質調查目的: (一) Moab 附近地區: 追蹤調查 Moab Fault 在 Arches National Park 的延展, 及其與上下盤岩層關係; 研究 Castle Creek 和 Onion Creek 所出露岩鹽所致穹窿構造核心, 及其所致上覆岩層變形行為, (二) Hanksville 附近: 調查 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle 所出露 deformation band, (三) Herry Mountains 附近地區: 研究 Saw Tooth Ridge、Mt. Hillers 和 Mt. Ellens 等處火成侵入構造, (四) Cedar Mt 附近地區: 瞭解火成侵入構造, (五) San Rafael Swell 附近地區: 研究當地岩層變形型態, 以瞭解穹窿構造成因和 (六) 科羅拉多州 Copper Mt. 附近地區: 調查片麻岩及其內火成侵入體的構造關係

(Tweto, 1979)。

美東地區

美東地區阿帕拉契山脈為四次造山作用結果：(一) 前寒武紀 Avalonian 造山作用、(二) 奧陶紀 Taconic 造山作用、(三) 泥盆紀 Acadian 造山作用和 (四) 石炭紀至二疊紀 Alleghanian 造山作用 (Rodgers, 1982)。此次參訪地點靠近波士頓，因此野外工作經與 Boston College 的 Skehan 教授討論後，決定以 Avalonian Terrane 中的傾瀉層構造為觀察重點 (Bailey, et al., 1989)。

野外勘察主要在 Rhode Island 的 Newport 地區，並由 Skehan 教授依其所寫野外地質導覽手冊詳為說明指導 (Rast and Skehan, 1991a)，此區地層屬於前寒武紀的岩層，由老而新分別為的 Newport Formation、Price's Neck Formation 和 Newport Granite。Newport Formation 中以岩性不同又可分為下面四個單位，由下而上為：(一) Castle Hill member 岩性主要是 30 至 150 公分厚混濁砂岩和頁岩互層，(二) Brenton Point member 岩性主要是薄層粉砂岩和酸性細粒凝灰岩互層，(三) Grave Point member 岩性主要是細粒沉積如粉砂岩、泥岩和火成碎屑岩，和 (四) Fort Adams member 岩性主要是外來大岩塊夾於細粒泥質基，其中大岩塊有石英岩、碳酸岩和濁流岩等，層序往上則火成碎屑岩逐漸增加。Fort Adams member 的產狀被認為是海底傾瀉作用的堆積 (Rast and Skehan, 1991b)，Newport Formation 已經受強烈變形作用，葉理非常發達呈片岩組構。

Price's Neck Formation 由下而上也可細分成三段：(一) 下段集塊岩及凝灰岩，其中有未固結岩層變形構造，(二) 薄層凝灰岩和沉積岩，偶夾流紋岩流，(三) 級層凝灰岩。Price's Neck Formation 相較於 Newport Formation 則並無明顯葉理發育，因此判斷葉理應屬 Avalon 造山運動所致，Price's Neck Formation 則在造山運動後的火成活動中堆積。此外，Newport Granite 又稱 Cliffwalk Granite，其與前述兩個地層接觸帶成角頁岩化作用，因此被認為是此區最年輕的岩層。

心得

甲烷水合物的研究發展現況經由與美方研究人員晤談討論後，瞭解美國地質調查所經由評估，認為在未來三十年內油氣能源不虞匱乏 (U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000)，因此未來的油氣價格變動，並不至於出現大規模波動，所以私人企業的公司並不會投資做這方面無立即明顯報酬的研究工作。但是站在國家長遠的能源需求和戰略考量，政府則必需責無旁貸積極尋求替代能源方案，以免能源危機問題來臨束手無措，因此美國能源部提出這方面的多年長期研究計畫的規畫 (U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy,

Federal Energy Technology Center, 1999)，但是計畫推展所需預算仍待國會的支持；此外，美國地質調查所在這方面的研究進展(U. S. Geological Survey, 2001)，對於我們未來的策略目標也值得借鏡。以台灣而言，是否需要投入資金做這方面研究，主要面臨考慮地質情況、國家安全、和經濟效益三方面。

地質情況所需考慮者是台灣附近海域是否有甲烷水合物賦存，根據震測資料(Chi, *et al*, 1998)顯示台灣西南外海有甲烷水合物存在的反射訊號。此次與美方研究員商談結果，此反射訊號與其他各國所得結果類似，但是基於甲烷水合物存在與否受其穩定溫度與壓力條件所控制，因此未來工作應先計算震測資料中海底擬合反射訊號(BSR)是否與甲烷水合物的相圖穩定區域深度吻合，以便進一步確認甲烷水合物賦存的可能性。此外，利用既有的震測資料，探討甲烷水合物分佈區域的範圍體積(Lee, *et al*, 1993; Nur, 1996)、特性(Dvorkin, *et al*, 1999; Ecker, *et al*, 2000)以及其對環境的衝擊(Henriet and Mienert, 1998; Dillon and Max, 2001; Dillon, *et al*, 2001)。因此未來台灣甲烷水合物研究計畫中應以四個重點來規畫：(一)確認甲烷水合物的賦存、(二)掌握甲烷水合物的分佈及儲量、(三)研究甲烷水合物的產能和(四)探討甲烷水合物對環境的影響。

至於國家安全和經濟效益方面則需考慮目前台灣能源完全依賴進口，經濟命脈無法自主則國家主權毫無保障，因此探勘替代性能源是很急迫，雖然未來三十年內油氣價格變化不大，但是早一日發現新能源及取得新的探採技術，也可以將其轉換成利基，亦即以投資研究換取商業利潤。

甲烷水合物的形成與其產出地質環境息息相關，台灣位於菲律賓海板塊與東亞板塊聚合區域，因此隱沒碰撞作用控制周遭地質現象，藉由地表地質的調查，可以幫助海洋探勘地球物理資料解釋，因此這方面的陸地研究也應視為重點持續加強，台東利吉地區和屏東墾丁地區的混同層均是相同環境產物(Byrne, 1998)，而中央山脈變質基性和超基性岩及蛇紋岩的分佈，同樣反應類似的構造環境(Mitchell and Garson, 1981; Sawkins, 1984)。所以對比國內和國外類似地質的異同，進而全面的考慮台灣及週遭海域整體地質，除了甲烷水合物的發現，其它地質資源也會隨著調查研究而逐步展露出來。

建議

替代能源的探勘研究是國家安全及經濟發展的基礎，因為甲烷水合物已被列為未來能源的替代品，而台灣附近海域甲烷水合物的賦存提供我們一個能源自己自足的機會，所以甲烷水合物的探勘調查是政府能源政策不可或缺的一環。台灣海域的甲烷水合物調查可以分成三個方面來發展：(一)汲取國外經驗，(二)台灣週遭海域探勘、和(三)台灣陸地相同構造環境調查。近年來加拿大和日本相繼開鑿甲烷水合物試驗井，因此藉由國際交流，汲取他們的經驗，可以事半功

倍減短我們探勘研究的時程，特別是日本在地緣及構造環境均與台灣相近，因此發展與日本合作研究關係，就近取得他們最新成果，在未來的探勘調查可以節省許多經費與時間。

台灣週遭海域探勘調查可以三個角度來探討：化學、地質和物理。由化學觀點來看甲烷水合物，則水－冰－氣－水合物相圖提供其形成的溫度壓力穩定範圍，因此藉由相圖可以進一步關聯其與地質現象的對比，也就是海域地熱梯度、地熱流、及水合物穩定區的關係圖來標明可能的目標區，此外沉積物所含有機物重量百分比、沉積率、沉積盆地地熱史、孔隙率、滲透率等地質因素的考量，以便評估富含甲烷水合物岩層的形成歷程及其可能蘊藏。此外，利用地球物理探勘方法來驗證先前評估的位置、分佈範圍、儲量和產能。最後，直接選井位開鑿研究以為未來開發做前導。以上為整個探勘調查的構想，至於如何達成此目標則需人力、物力和經費的配合。人力和物力方面需以擁有海洋研究船的單位來考量，這包括海軍海洋測量局、台灣大學、中山大學和海洋大學，因此未來甲烷水合物的探勘調查需整合這些資源。此外，最重要的是預算的配合，如何爭取立法院的支持亦應是未來努力的目標。

台灣陸地相同構造環境調查是全面性考慮在一個板塊聚合邊界，除了甲烷水合物的產出，仍有許多金屬或非金屬礦的伴生，因此整合型的地質資源探勘，將為未來台灣能源與資源找出活水源，而這些成果也可運用於海域地球物理探勘資料解釋，為甲烷水合物的研究打下堅實的基礎。

參考文獻

- 經濟部能源委員會，2000，*中華民國八十九年台灣能源統計年報*，330 頁。
- 鐘三雄、張碩芳，2001，甲烷氣水包合物的研究調查回顧與展望，經濟部中央地質調查所彙刊，第十四號，(印刷中)。
- Bailey, E. H., Irwin, W. P., and Jones, D. L., 1964, *Franciscan and related rocks, and their significance in geology of western California*, California Division of Mines and Geology Bulletin 183, 177p.
- Bailey, R. H., Skehan, J. W., Dreier, R. B. and Webster, M. J., 1989, Olistostromes of the Avalonian terrane of southern New England, in Horton, J. W. and Rast, N., *Melanges and Olistostromes of the U. S. Appalachians*, Geological Society of America, Special Paper 228, 93-112.
- Berkland, J. O., Raymond, L. A., Kramer, J. C., Moores, E. M., and O'day, M., 1972, What is Franciscan? *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 56 (12), 1348-1367.
- Brewer, P. G., Orr, F. M. Jr., Friederich, G., Kvenvolden, K. A., Orange, D. L.,

- McFarlane, J. and Kirkwood, W., 1998, Deep ocean field test of methane hydrate formation, *Geology*, 25, 407-410.
- Brewer, P. G., 2000, Contemplating action: storing carbon dioxide in the ocean, *Oceanography*, 13, 84-92.
- Byrne, T., 1998, Pre-collision kinematics and a possible modern analog for the Lichi and Kenting melanges, Taiwan, *Journal of the Geological Society of China*, 41 (4), 535-550.
- Chi, W. C., 1995, Distribution of the bottom-simulating reflector in the offshore Taiwan collision zone: implications for fluid migration, *Master Thesis, San Jose State University*, 46p.
- Chi, W. C., Reed, D. L., Liu, C. S. and Lundberg, N., 1998, Distribution of the bottom-simulating reflector in the offshore Taiwan collision zone, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9 (4), 779-794.
- Clarke, M. A., Pooladi-Darvish, M. and Bishnoi, P. R., 1999, A method to predict equilibrium conditions of gas hydrate formation in porous media, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 38, 2485-2490.
- Dallimore, S. R., Uchida, T. and Collett, T. S (eds.), 1999, Scientific results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, *Geological Survey of Canada Bulletin*, 544.
- Dillon, W. P., Hutchison, D. R. and Drury, R. M., 1996, seismic reflection profiles on the Black Ridge near sites 994, 995 and 997, in Paull, C. K., matsumoto, R., Wallace, P. J., et. al., (eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 164, 47-56.
- Dillon, W. P., Max, M. D., 2001, Gas hydrate in seafloor sediments: impact on future resources and drilling safety, *Offshore Technology Conference*, (preprint).
- Dillon, W. P., Nealon, J. W., Taylor, M. H., Lee, M. W. Drury, R. M. and Anton, C. H., 2001, Seafloor collapse and methane venting associated with gas hydrate on the Black Ridge – causes and implications to seafloor stability and methane release, in Paull, C. and Dillon, W. (eds.) *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*, American Geophysical Union Monograph 124, 211-233.
- Doelling, H. H., 1985, *Geologic Map of Arches National Park and Vicinity, Grand County, Utah, State of Utah*, Map 74, Scale 1:50,000, Department of Natural Resources, Utah Geological and Mineral Survey.
- Dvorkin, J., Mavko, G. and Nur, A. , 1999, Overpressure detection from compressional- and shear- wave data, *Geophysical Research Letters*, 26 (22), 3417-3420.
- Ecker, C., Dvorkin, J. and Nur, A. M., 2000, Estimating the amount of gas hydrate

- and free gas from marine seismic data, *Geophysics*, 65 (2), 565-573.
- Haq, B. U., 1998, Gas hydrates: greenhouse nightmare? Energy panacea or pipe dream? *GSA Today*, 8 (11), 1-6.
- Handa, Y. P. and Stupin, D., 1992, Thermodynamic properties and dissociation characteristics of methane and propane hydrate in 70-Å-radius silica gel pores, *Journal Physical Chemistry*, 96 (21), 3599-3603.
- Helgerud, M. B., Dvorkin, J., Nur, A., Sakai, A. and Collett, T., 1999, Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling, *Geophysical Research Letters*, 26 (13), 2021-2024.
- Henriet, J. P. and Mienert, J. (eds.), 1998, *Gas Hydrates: Relevance to World margin Stability and Climate Change*, Geological Society, London, Special Publications 137, 338p.
- Hinrichs, K. U., Hayes, J. M., Sylva, S. P., Brewer, P. G. and DeLong, E. F., 1999, Methane-consuming archaea? Molecular-isotope and phylogenetic evidence, *Nature*, 398, 802-805.
- Hintze, L. F., 1980, *Geologic Map of Utah*, scale 1: 500,000, Utah Geological and Mineral Survey.
- Hsu, K. J. and Ohrbom, R., 1969, Melanges of San Francisco Peninsula – geologic reinterpretation of type Franciscan, *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 53 (7), 1348-1367.
- Kleinberg, R. L. and Brewer, P. G., 2001, Probing gas hydrate deposits, *American Scientist*, 89, 244-251.
- Kvenvolden, K. A., 1988, methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere, *Chemical Geology*, 71, 41-51.
- Kvenvolden, K. A., 1999, Potential effects of gas hydrate on human welfare, *Proceeding of National Academic Sciences, USA*, 96, 3420-3426.
- Kvenvolden, A. K. and Lorenson, T. D., 2001, The global occurrence of natural gas hydrate, in Paull, C. and Dillon, W. (eds.) *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection*, American Geophysical Union Monograph 124, 3-18.
- Lee, M. W. and Collett, T. S., 2001, Elastic properties of gas hydrate – bearing sediments, *Geophysics*, 66 (3), 763-771.
- Lee, M. W., Hutchinson, D. R., Dillon, W. P., Miller, J. J., Agena, W. F. and Swift, B. A., 1993, Method of estimating the amount of in situ gas hydrates in deep marine sediments, *Marine and Petroleum Geology*, 10, 493-506.
- Liou, J. G., Lan, C. Y., Suppe, J. and Ernst, W. G., 1977, *The East Taiwan Ophiolite: Its Occurrence, Petrology, Metamorphism and Tectonic Setting*, Mining Research and Service Organization Special Report 1, Industrial Technology

- Research Institute, 212p.
- Liu, C. S., Liu, S. Y., Lallemand, S. E., Lungberg, N. and Reed, D. L., 1998, Digital elevation model offshore Taiwan and its tectonic implications, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9 (4), 705-738.
- Miles, P. R., 1995, Potential distribution of methane hydrate beneath the European continental margins, *Geophysical research Letters*, 22 (23), 3179-3182.
- Mitchell, A. H. G. and Garson, M. S., 1981, *Mineral Deposits and Global Tectonic Setting*, Academic Press, London, 405p.
- Nur, A., 1996, BSR and methane hydrates: new challenges for geophysics and rock physics, *Offshore Technology Conference*, 429-435.
- O'Hanley, D. S., 1996, serpentinites: Records of Tectonic and Petrological History, Oxford University Press, New York, 277p.
- Page, B. M., 1978, Franciscan melanges compared with olistostromes of Taiwan and Italy, *Tectonophysics*, 47 (3/4), 223-246.
- Page, B. M. and Suppe, J., 1981, The Pliocene Lichi melange of Taiwan, its plate tectonic and olistostromal origin, *American Journal of Science*, 281 (3), 193-227.
- Page, B. M. and Lan, C. Y., 1983, The Kenting melange and its record of tectonic events, *Memoir of the Geological Society of China*, 5, 227-248.
- Rao, Y. H., 1999, C-program for the calculation of gas hydrate stability zone thickness, *Computers & Geosciences*, 25, 705-707.
- Rast, N. and Skehan, J. W., 1981a, The geology of Precambrian rocks of Newport and Middletown, Rhode Island, in Boothroyd, J. C. and Hermes, O. D., eds., *Guidebook to geological Field Studies in Rhode Island and Adjacent Areas*, Department of Geology, University of Rhode Island, 67-92.
- Rast, N. and Skehan, J. W., 1981b, Possible correlation of Precambrian rocks of Newport, Rhode Island, with those of Anglesey, Wales, *Geology*, 9, 596-601.
- Raymond, L. A., 1984, Classification of melanges, in Raymond, L. A., ed., *Melanges: Their Nature, Origin, and Significance*, Geological Society of America, Special Paper 198, 7-20.
- Reed, D. L., Lundberg, N., Liu, C. S. and Kuo, B.Y., 1992, Structural relations along the margins of the offshore Taiwan accretionary wedge: implications for accretion and crustal kinematics, *Acta Geologica Taiwanica, Science Reports of the National Taiwan University*, 30, 105-122.
- Rodgers, J., 1982, The life history of a mountain range – The Appalachians, in Hsu, K. J., ed., *Mountain Building Processes*, Academic Press, London, 229-241.
- Sawkins, F. J., 1984, *Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics*, Springer-Verlag, Berlin, 325p.

- Seshadri, K., Wilder, J. W. and Smith, D. H., 2001, Measurements of equilibrium pressures and temperatures for propane hydrate in silica gels with different pore-size distributions, *Journal Physical Chemistry*, B, 105, 2627-2631.
- Shyu, C. T., Hsu, S. K. and Liu, C. S., 1998, Heat flows off southwest Taiwan: measurements over mud diapirs and estimated from bottom simulating reflectors, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 9 (4), 795-812.
- Skehan, J. W. and Rast, N., 1995, Late Proterozoic to Cambrian evolution of the Boston Avalon Tectonic Belt, in Hibbard, J. P., van Staal, C. R. and Cawood, P. A., eds., *Current Perspectives in the Appalachian-Caledonian Orogen*, Geological Association of Canada, Special Paper, 41, 207-225.
- Sloan, E. D., Jr., 1998, *Clathrate hydrates of natural gases*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 705p.
- Subramanian, S., Kim, R. A., Dec, S. F., Sloan, E. D., Jr., 2000a, Evidence of structure II hydrate formation from methane + ethane mixtures, *Chemical Engineering Science*, 55, 1981-1999
- Subramanian, S., Ballard, A. L., Kim, R. A., Dec, S. F., Sloan, E. D., Jr., 2000b, Structural transitions in methane + ethane gas hydrates – Part I: upper transition point and application, *Chemical Engineering Science*, 55, 5763-5771.
- Taira, A., Byrne, T. and Ashi, J., Photographic Atlas of an Accretionary Prism: Geologic Structures of the Shimanto Belt, Japan, Springer-Verlag, Berlin, 124p.
- Tweto, O., 1979, *Geologic Map of Colorado*, scale 1:500,000, U. S. Geological Survey.
- Taylor, M. H., Dillon, W. P. and Pecher, I. A., 2000, Trapping and migration of methane associated with the gas hydrate stability zone at the Black Ridge Diapire: new insights from seismic data, *Marine Geology*, 164, 79-89.
- Uchida, T., Ebinuma, T. and Ishizaki, T., 1999, Dissociation condition measurements of methane hydrate in confined small pores of porous glass, *Journal Physical Chemistry*, B, 103, 3659-3662.
- Uchida, T., Hailong, H., Tomaru, H., Dallimore, S. R., Matsumoto, R., Oda, H., Delwiche, M. and Okada, S., 2000, Japan's efforts to explore marine gas hydrates off Tokai at the Nankai Trough and their occurrences: geological overview, *2000 Western Pacific Geophysics Meeting*, p59.
- U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, Federal Energy Technology Center, 1999, *National Methane Hydrate Multi-Year R&D Program Plan*, 34p.
- U. S. Geological Survey, 1998, *Geology for a Changing World: A Science Strategy*

- for the Geologic Division of the U.S. Geological Survey, 2000-2010*, U. S. Geological Survey Circular 1172, 59p.
- U. S. Geological Survey, 2001, **Gas Hydrate Research Program**, <http://walrus.wr.usgs.gov/globalhydrate>.
- U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000, U.S. *Geological Survey World Petroleum Assessment 2000 – Description and Results*, USGS Digital Data Series DDS-60, Multi Disc Set Version 1.1.
- Wakabayashi, J., 1996, Tectono-metamorphic impact of a subduction transform transition and implications for interpretation of orogenic belts, *International Geology Review*, 38, 979-994
- Williams, H. and Hatcher, R. D. Jr., 1983, Appalachian suspect terranes, in Hatcher, R. D., Williams, H. and Zietz, I., eds., *Contribution to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*, Memoir of the Geological Society of American, 158, 33-53
- Yu, H. S. and Song, G. S., 2000, Submarine physiographic features in Taiwan region and their geological significance, *Journal of the Geological Society of China*, 43 (2), 267-286.
- Yui, T. F., Yeh, H. W., Wang Lee, C., 1990, A stable isotope study of serpentinization in the Fengtien Ophiolite, Taiwan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (5), 1417-1426.



照片一：右二為 Donald L. Reed 教授，左二為劉家瑄教授。此為野外工作前 Reed 教授的講解實況（攝於舊金山金門大橋南岸）。



照片二：舊金山金門大橋南岸 Franciscan Complex 露頭（攝於舊金山金門大橋南岸）。



照片三：綠色岩塊為蛇紋岩，其上黑色岩塊為玄武岩質（攝於舊金山金門大橋南岸）。



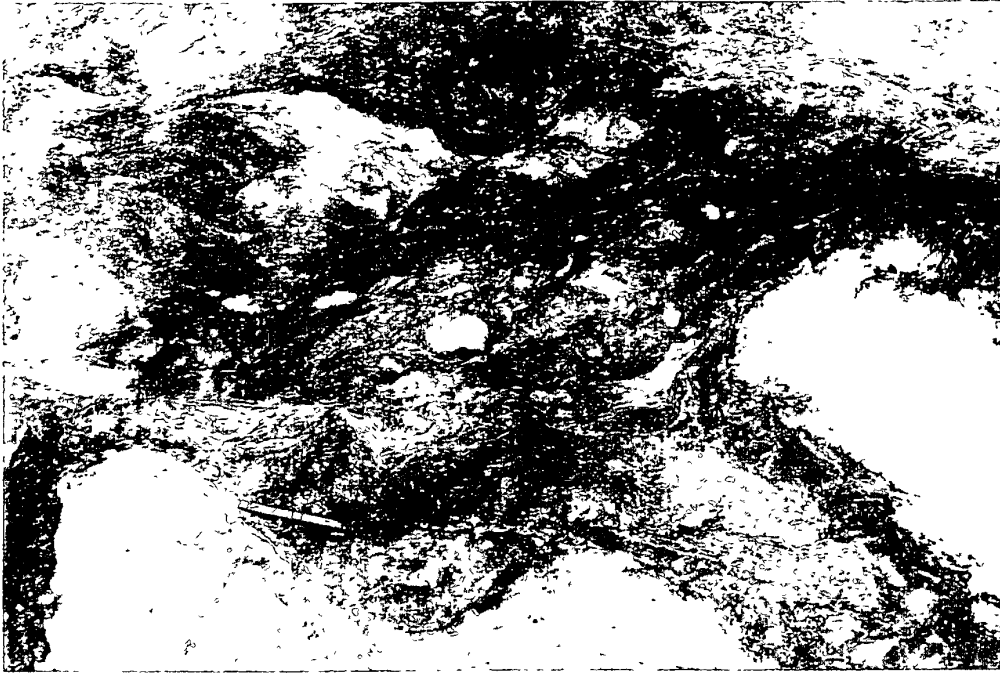
照片四：黑色細粒剪動玄武岩基質夾有褶皺破碎的沉積岩塊（攝於舊金山金門大橋南岸）。



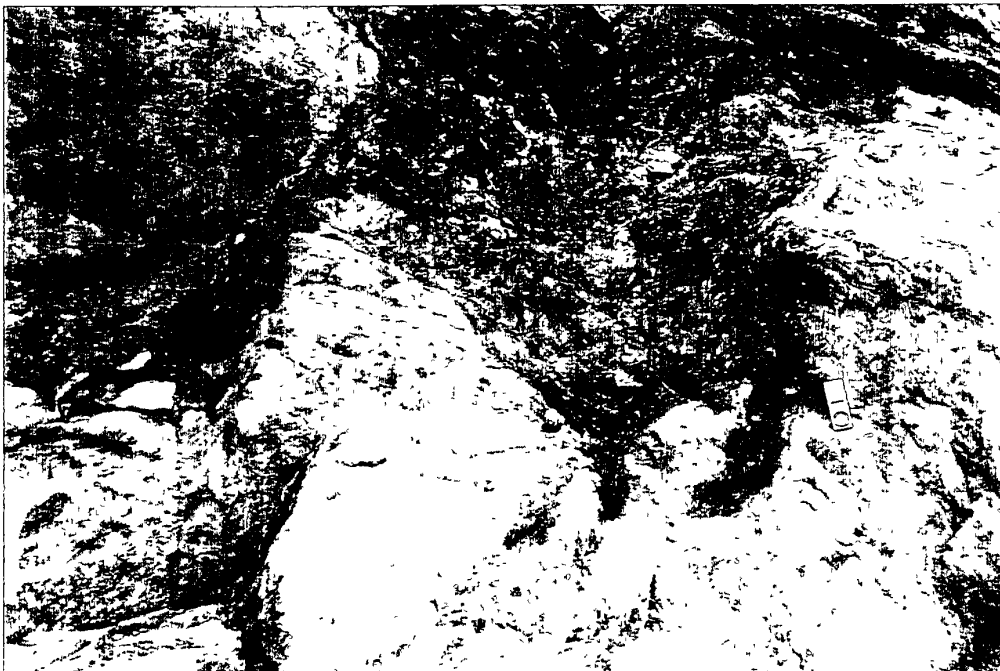
照片五：玄武岩塊內裂隙為石英充填（攝於舊金山金門大橋南岸）。



照片六：薄層燧石已受剪動變形（攝於舊金山金門大橋南岸）。



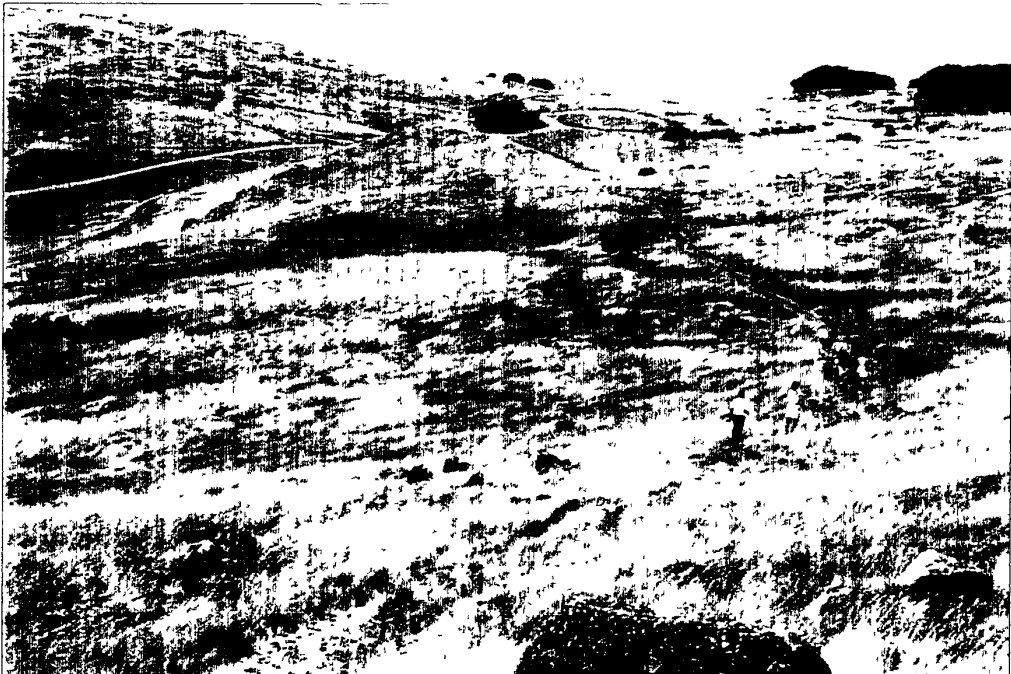
照片七：蛇紋岩與玄武岩受剪動呈角礫岩狀（攝於舊金山金門大橋南岸）。



照片八：黑色玄武岩受剪動呈塑性流動穿插於綠色蛇紋岩邊界（攝於舊金山金門大橋南岸）。



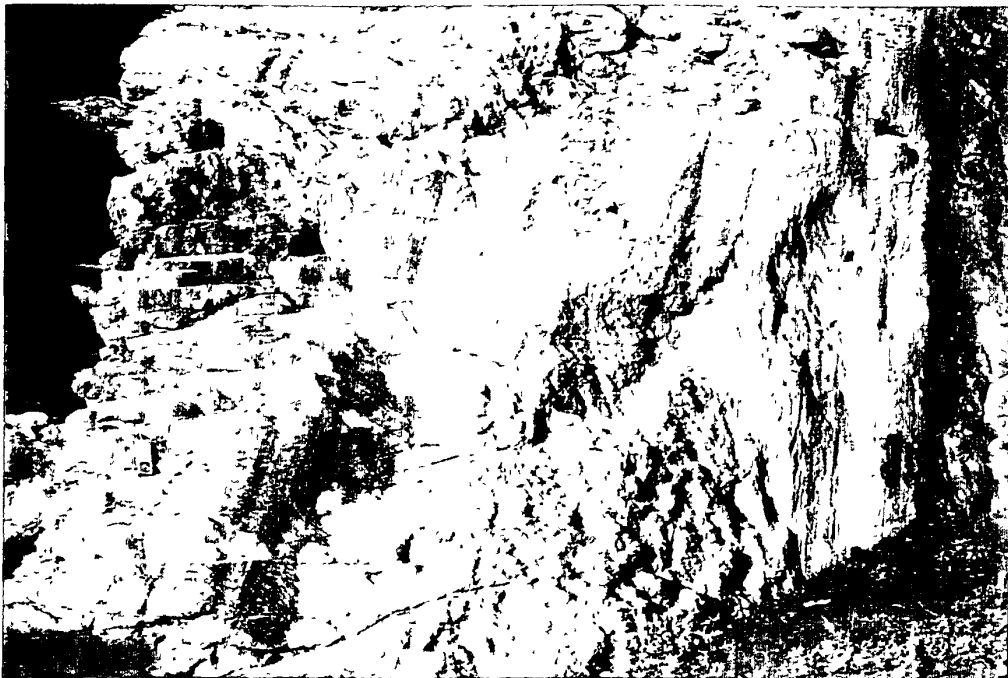
照片九：褶皺的薄層燧石（攝於舊金山金門大橋北岸）。



照片十：Franciscan Complex 分佈地區地型呈平緩山坡，其中許多外來岩塊為藍閃石片岩相礦物（攝於舊金山灣區 Tiburon Peninsula 的 Ring Mountain）。



照片十一：Moab Fault 露頭（攝於猶他州 Arches National Park）。



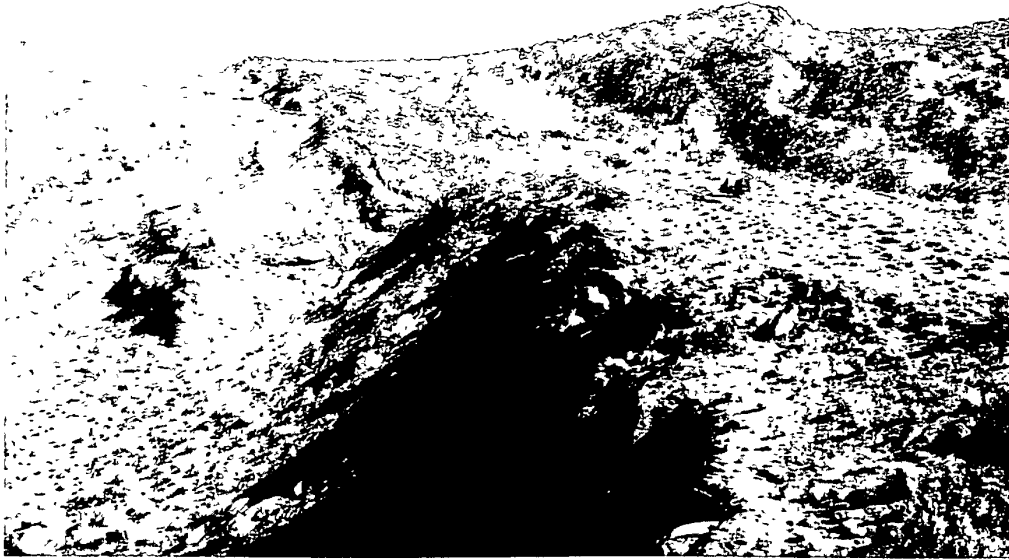
照片十二：Moab Fault 露頭上擦痕顯示其為高角度正斷層（攝於 Arches National Park）。



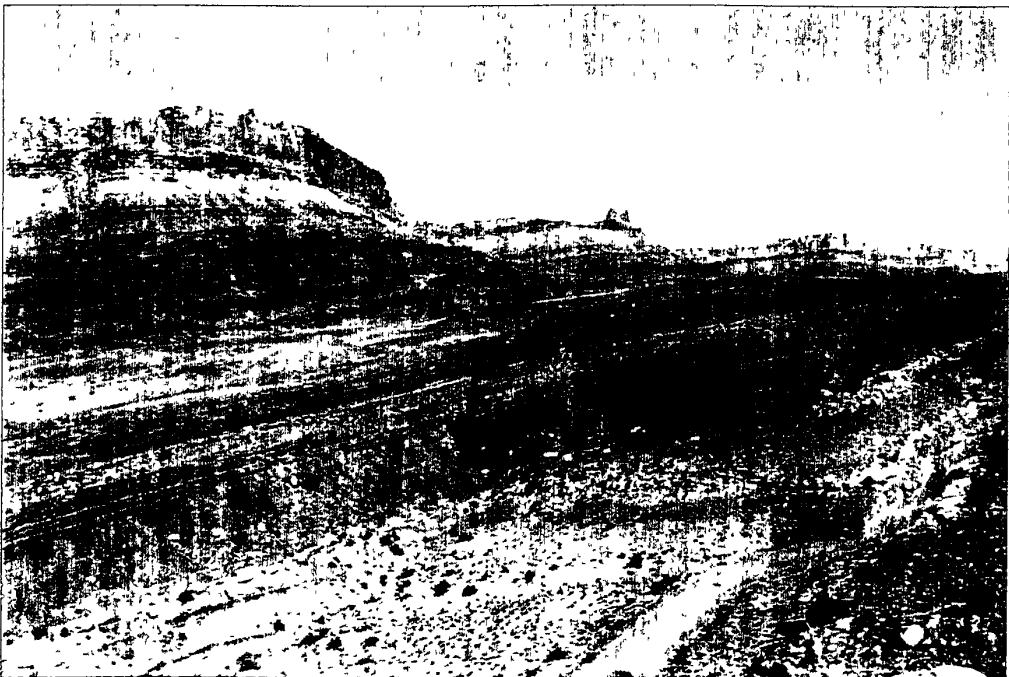
照片十三：Moab Fault 旁地層受張裂作用影響形成一系列巨視構造的正斷層（攝於 Arches National Park）。



照片十四：Moab Fault 旁地層受張裂作用影響形成一系列中視構造的正斷層（攝於 Arches National Park）。



照片十五：Moab Fault 上盤岩層呈向斜構造（攝於 Arches National Park）。



照片十六：Moab Fault 下盤岩層由上而下分別為 Wingate Sandstone、Chinle Formation、Moenkopi Formation 和 Cutler Group。



照片十七：變形帶的抗蝕性較周遭岩石強，因差異侵蝕而呈現孤立突出景象（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



照片十八：變形帶近照（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



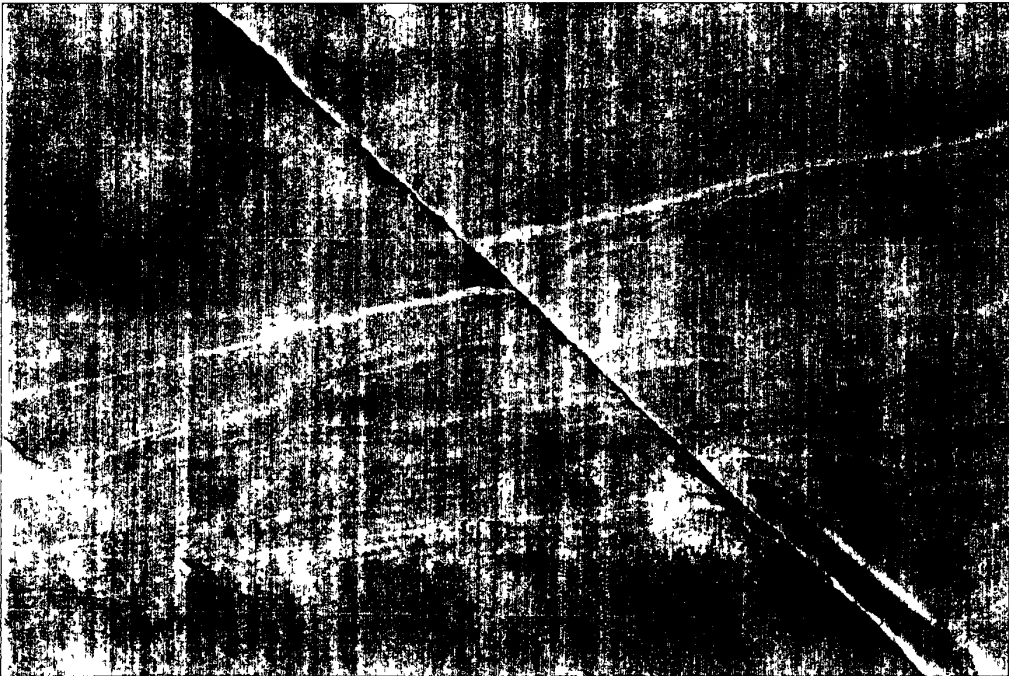
照片十九：兩期變形帶，縱向變形帶為橫向變形帶所截切(攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle)。



照片二十：變形帶表面有擦痕(攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle)。



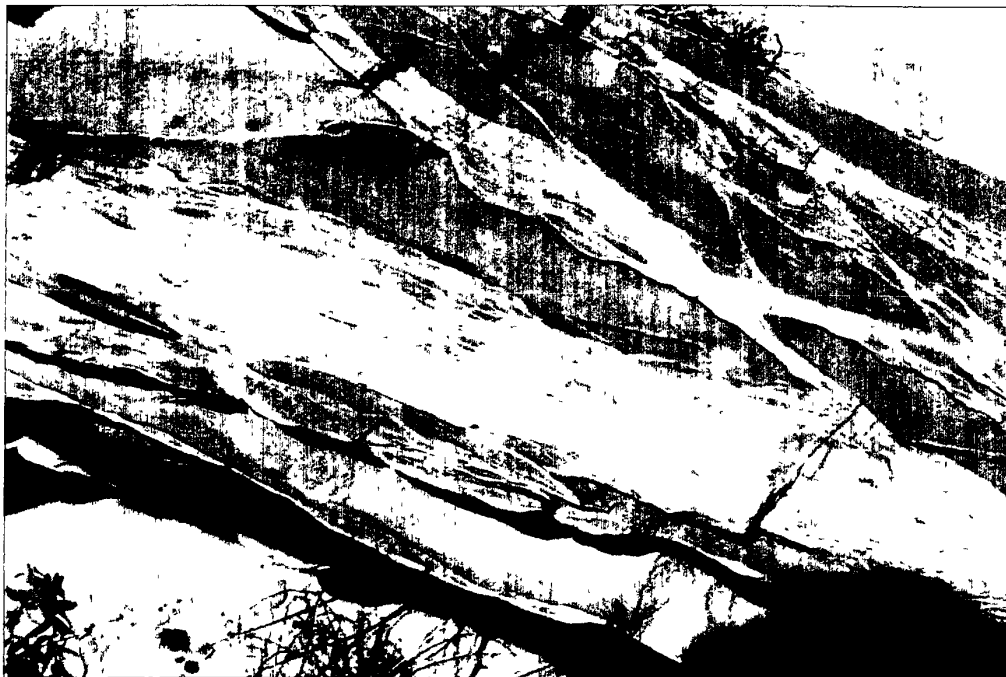
照片二十一：變形帶與其圍岩因差異侵蝕造成變形帶明顯突出地表（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



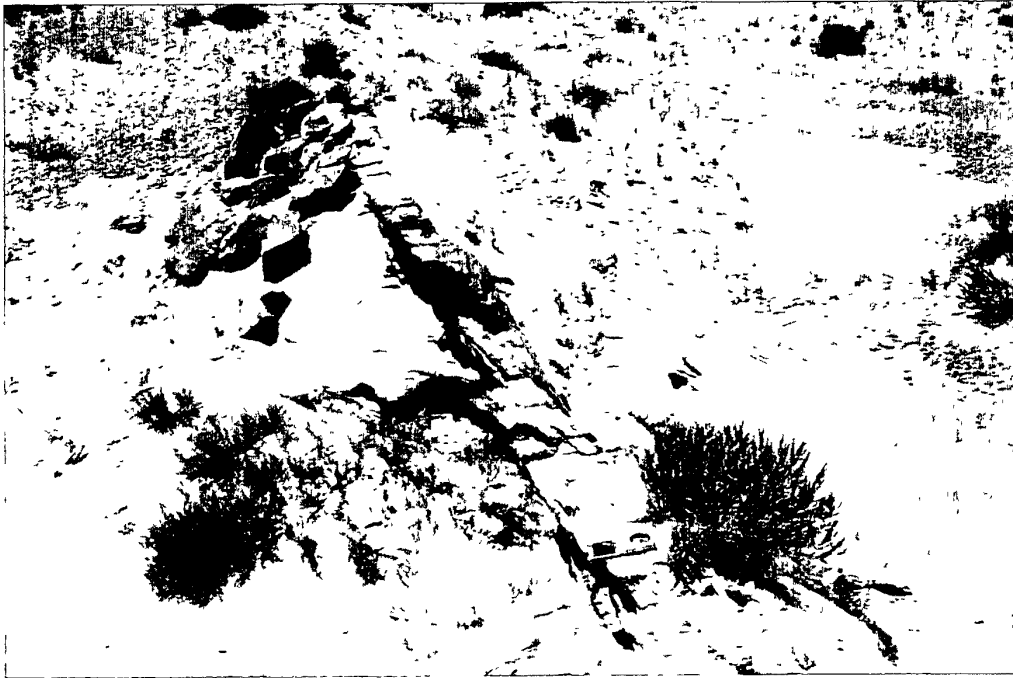
照片二十二：變形帶錯移原生層狀構造（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



照片二十三：變形帶叢聚（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



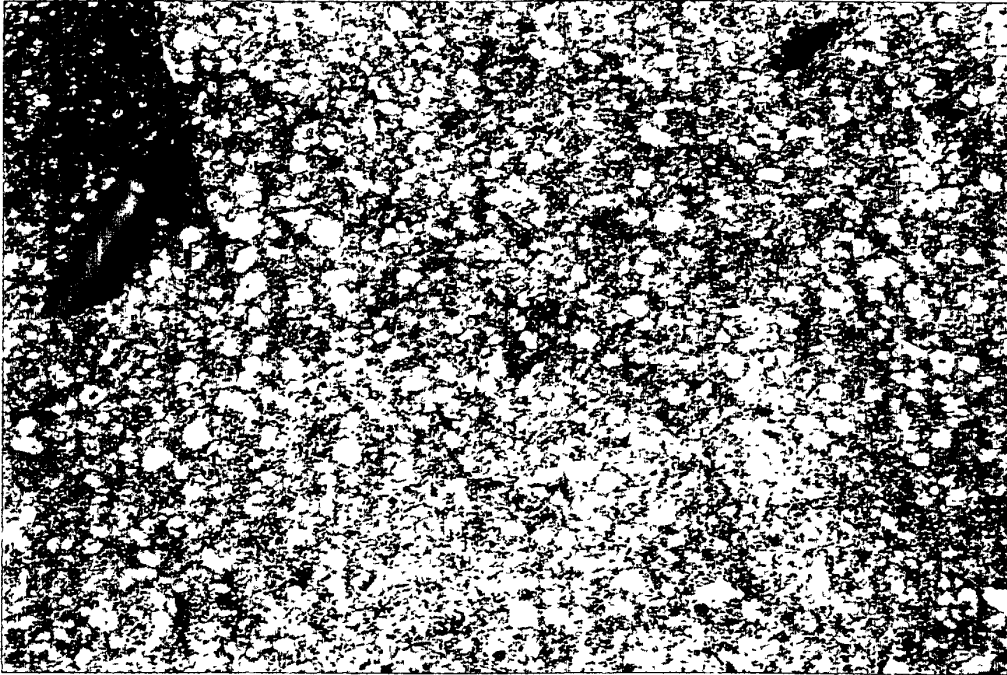
照片二十四：變形帶叢聚成群（攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



照片二十五：變形帶叢聚成群且抗蝕性強（俯視角度攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



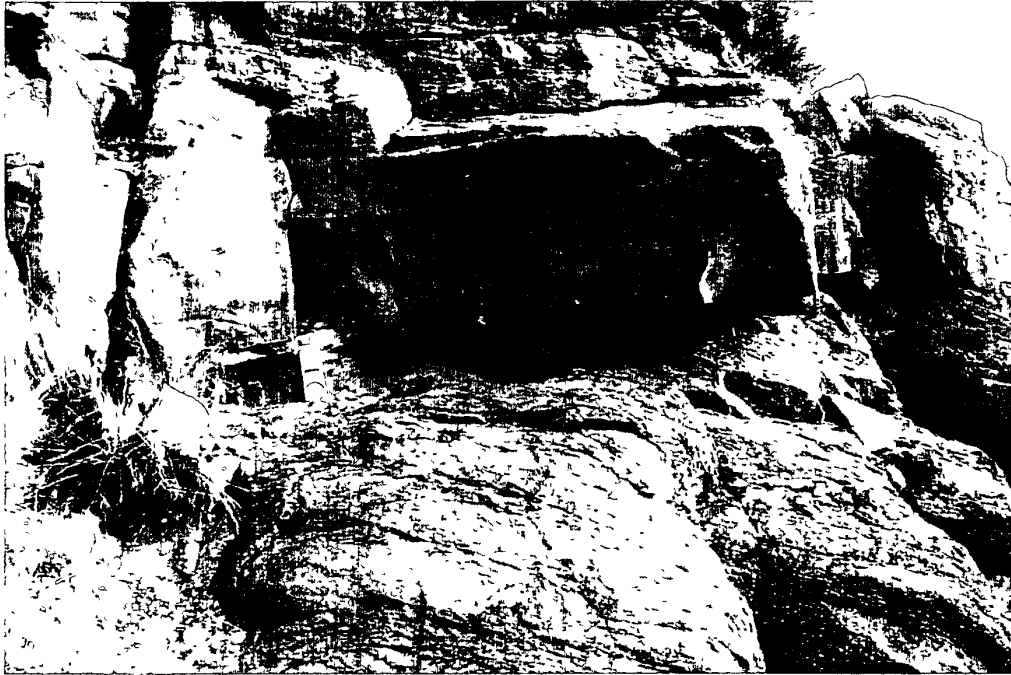
照片二十六：變形帶叢聚成群且抗蝕性強（側視角度攝於 Goblin Valley State Park 的 Mollik Castle）。



照片二十七：閃長岩質斑岩（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



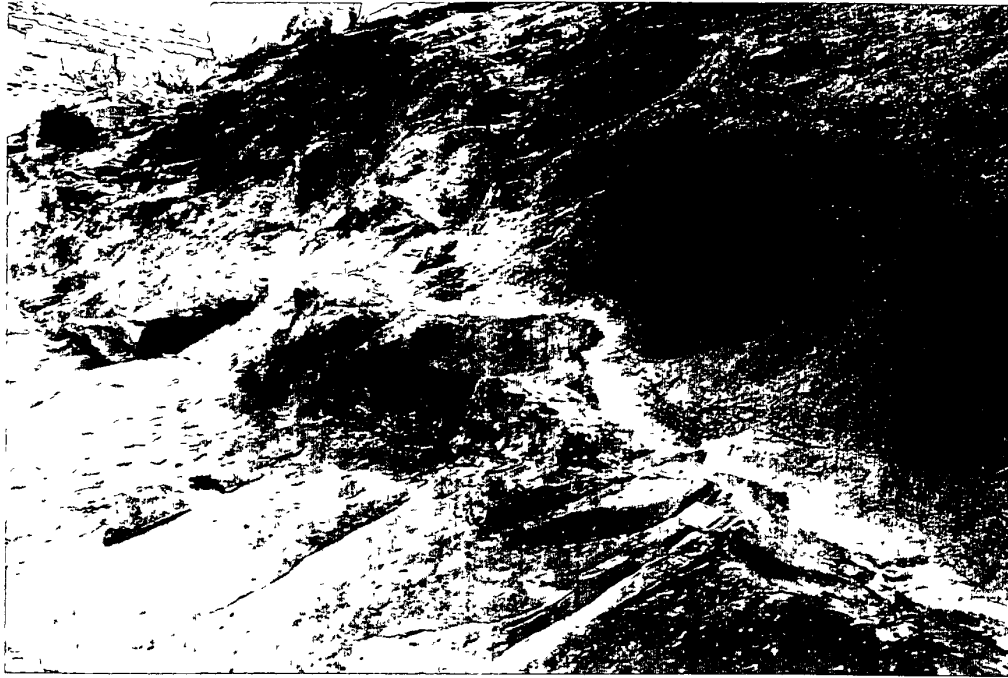
照片二十八：舌狀閃長岩質斑岩岩床，立者為普度大學 Arvid M. Johnson 教授（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



照片二十九：黑灰色閃長岩質斑岩岩床與其上沉積岩接觸帶並無明顯的急速冷卻的退火現象（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



照片三十：火成侵入造成其上泥岩塑性流動上擠，並進而破使泥岩上覆砂岩以脆性破壞因應體積改變（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



照片三十一：右上為火成侵入體與左下沉積岩接觸帶呈不規則形貌（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



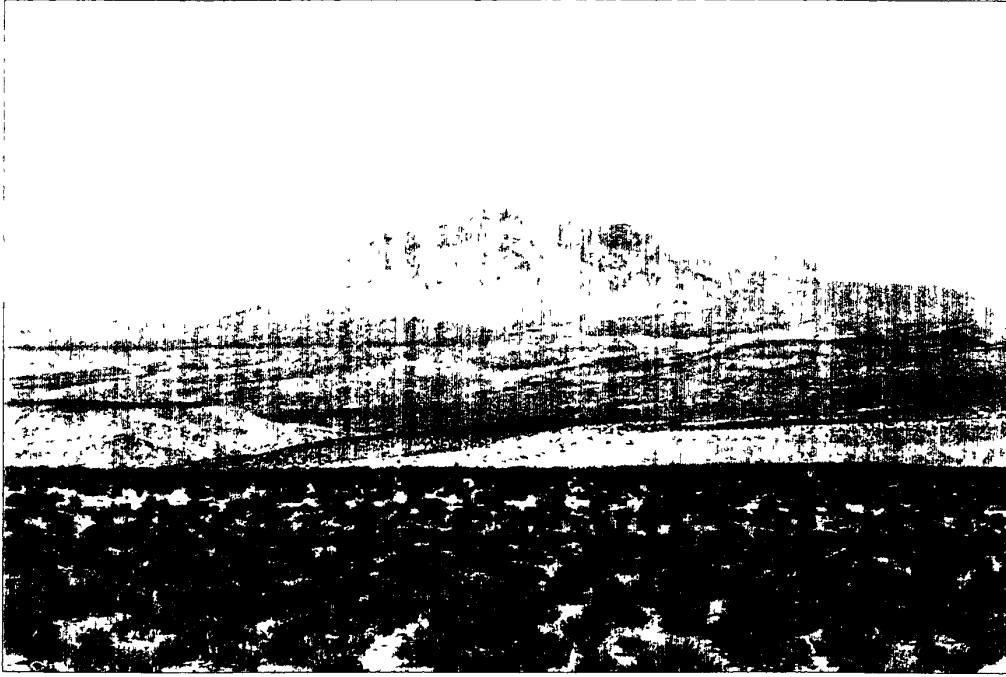
照片三十二：火成侵入體附近沉積岩受變形產生鉛筆狀剝蝕（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



照片三十三：黑灰色閃長岩岩床夾於紅色沉積岩（攝於猶他州東南 Henry Mts. 地區的 Saw Tooth Ridge）。



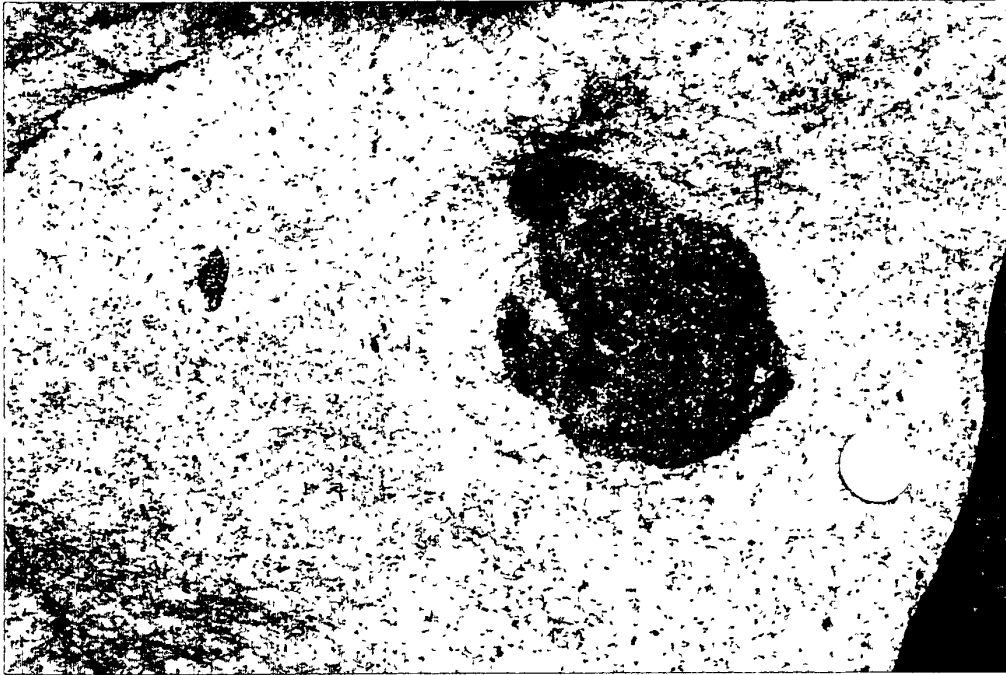
照片三十四：沉積岩褶皺構造（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



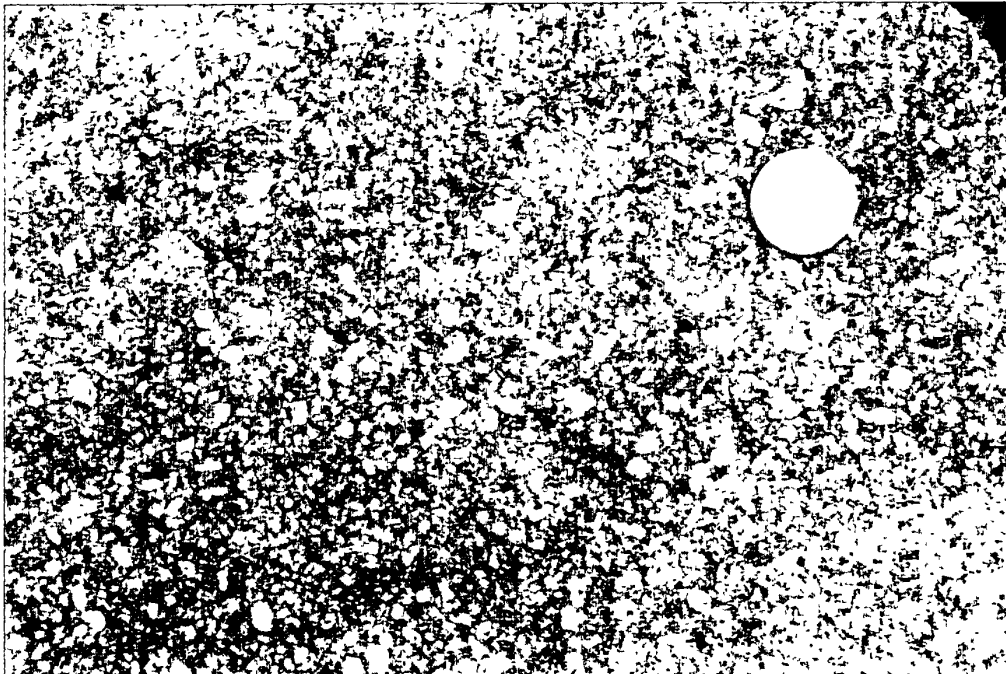
照片三十五：閃長岩質斑岩侵入造成沉積岩圍岩壟昇形成地表穹隆構造（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Saw Tooth Ridge）。



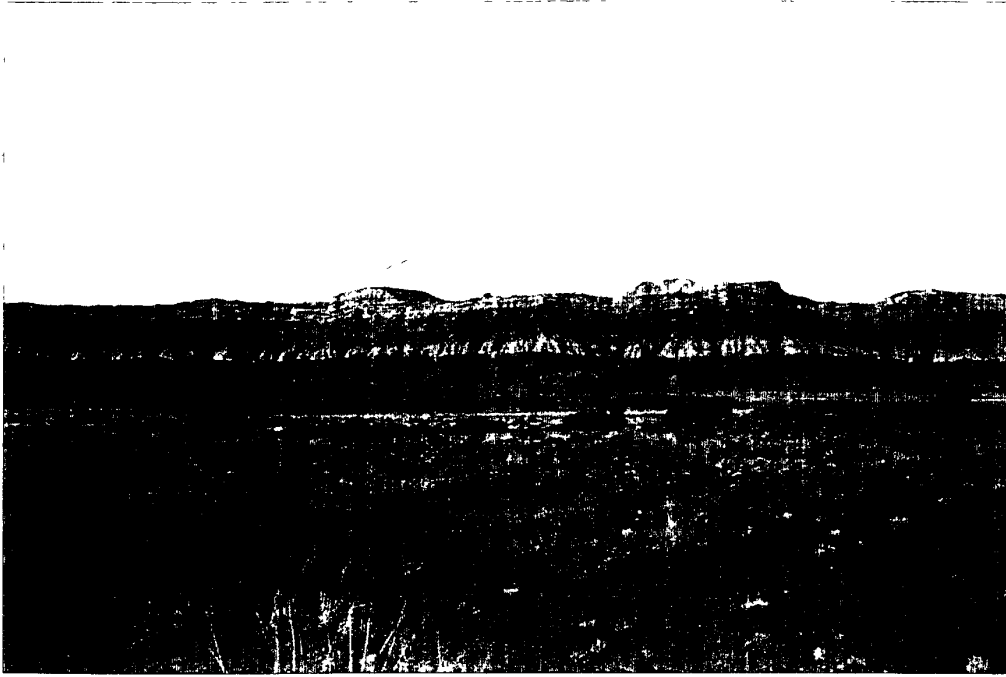
照片三十六：黑灰色火成侵入體造成接近岩床的紅灰色沉積岩圍岩壟昇傾斜（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Mt. Hillers）。



照片三十七：白灰色閃長岩質斑岩夾有黑色基性擄獲岩塊（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Mt. Ellens）。



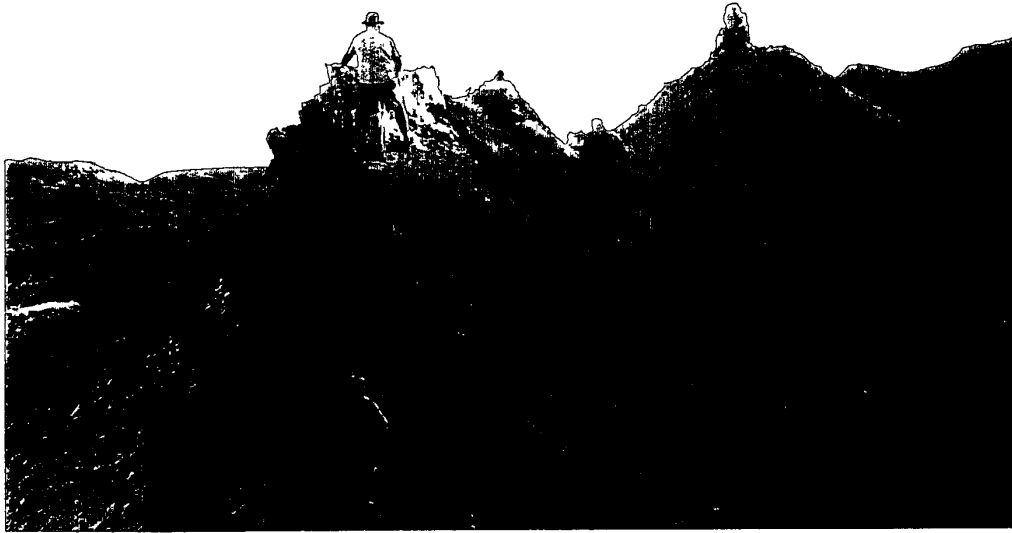
照片三十八：閃長岩質斑岩（攝於猶他州東南 Henry Mts.地區的 Mt. Ellens）。



照片四十：Cedar Mountain Formation 岩性為多重顏色的泥岩組合（攝於 Cedar Mountains）。



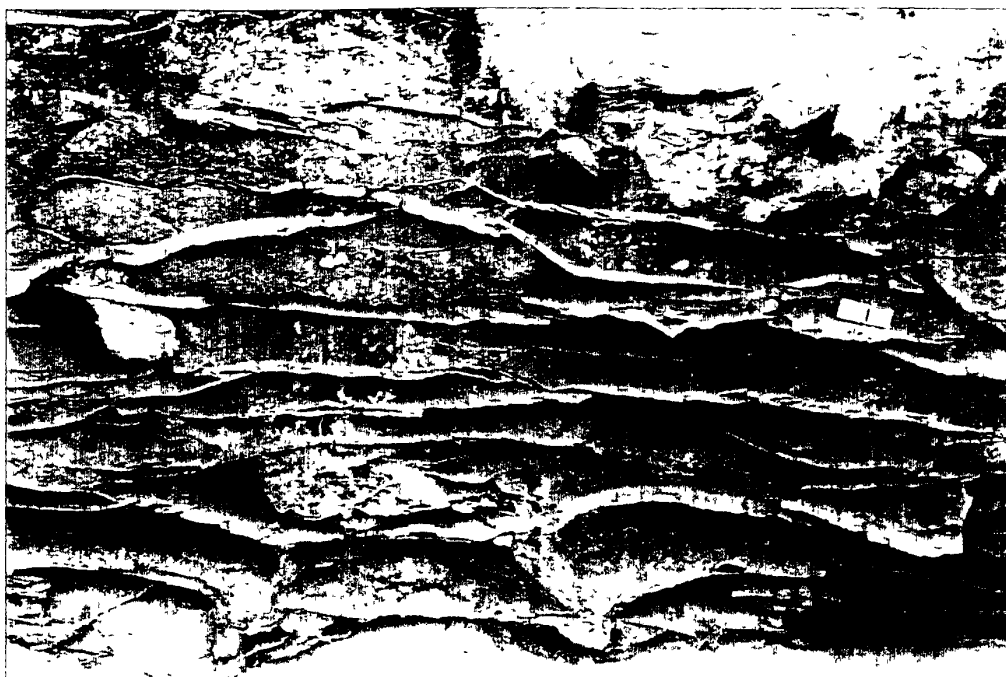
照片三十九：砂頁岩薄互層中逆斷層（攝於 Cedar Mountains）。



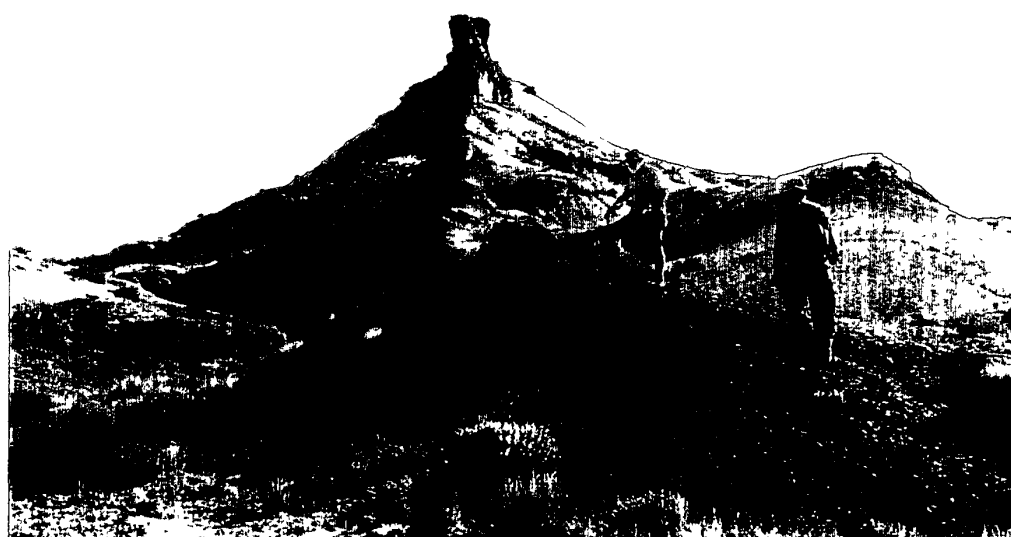
照片四十一：玄武岩質岩脈（攝於 Cedar Mountains）。



照片四十二：灰綠色火成侵入岩床夾於紅棕色沉積岩中（攝於 Cedar Mountains）。



照片四十三：泥岩間夾薄層白色石膏（攝於 Cedar Mountains）。



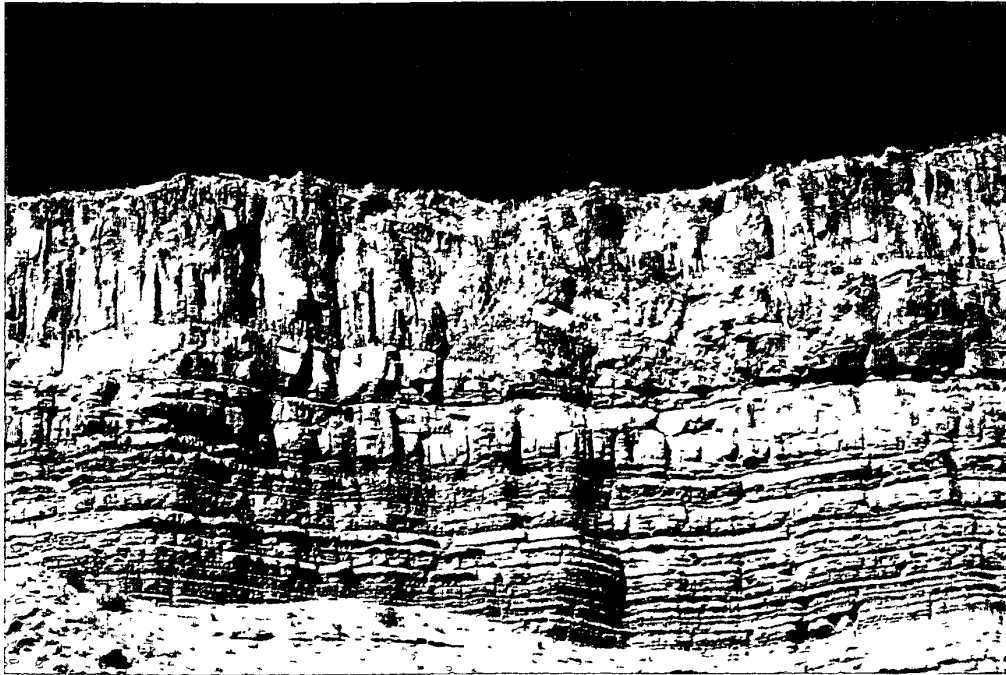
照片四十四：玄武岩質岩脈（攝於 Cedar Mountains）。



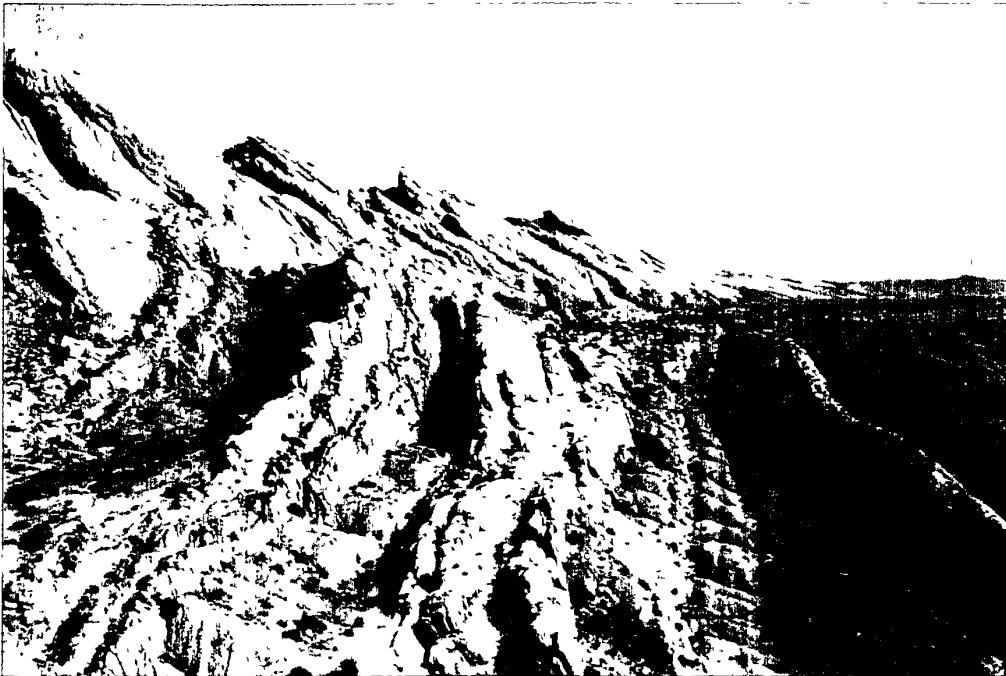
照片四十五：黑色玄武岩質岩脈分支沿沉積岩層面侵入形成岩床（攝於 Cedar Mountains）。



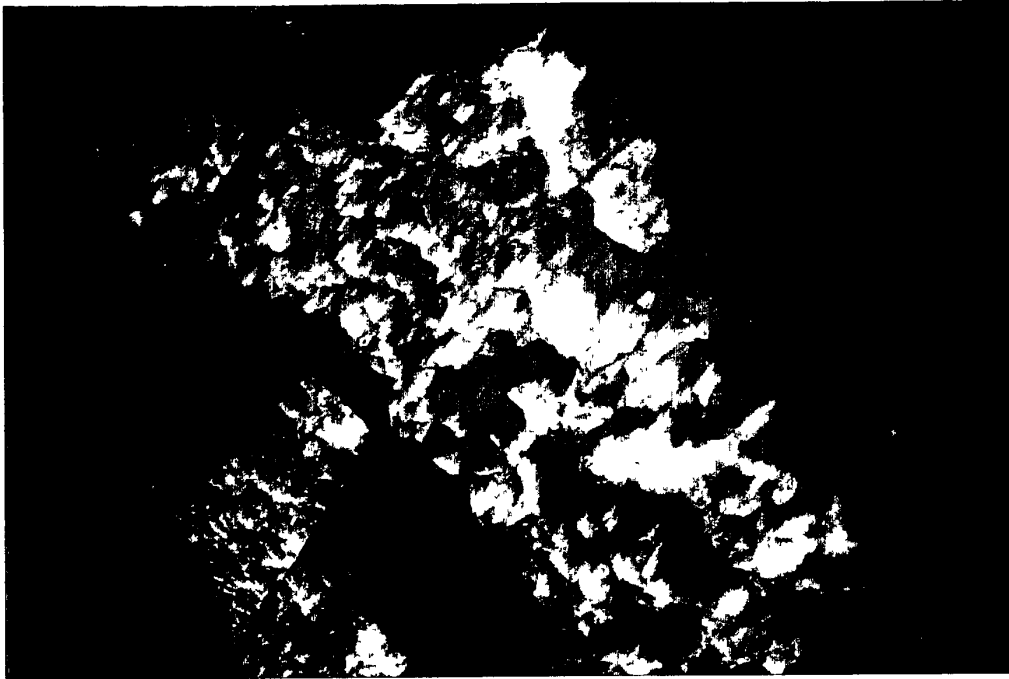
照片四十六：玄武岩質侵入並擄獲沉積岩圍岩（攝於 Cedar Mountains）。



照片四十七：黑灰色玄武岩質岩床夾於淡色砂岩中（攝於 Cedar Mountains）。



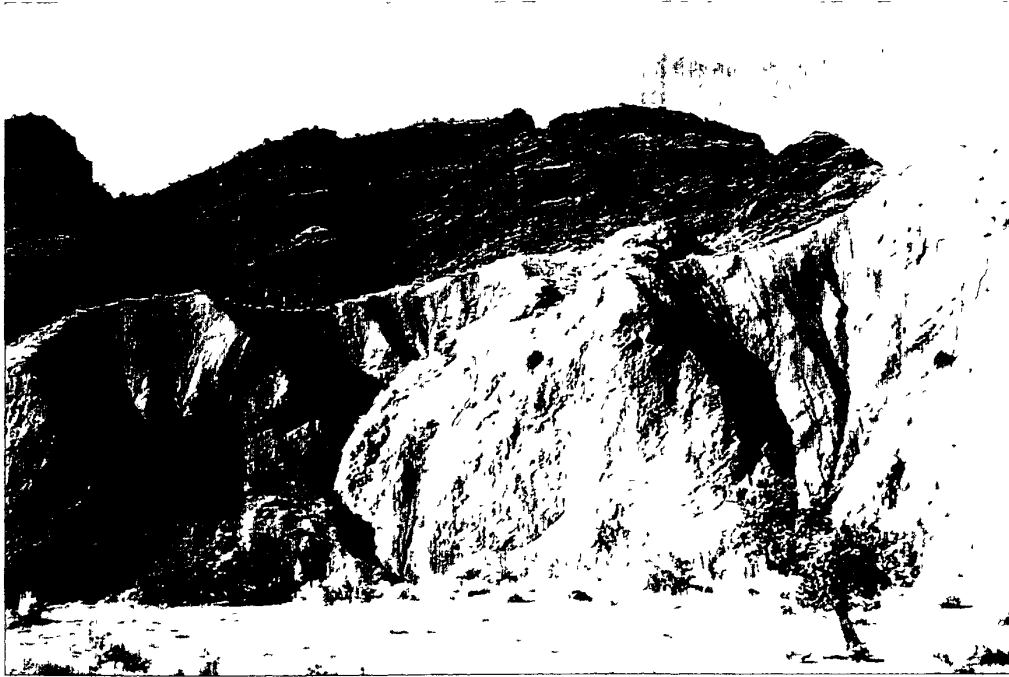
照片四十八：San Rafael Swell 東翼傾斜的中生代侏羅紀地層（攝於 San Rafael Swell）。



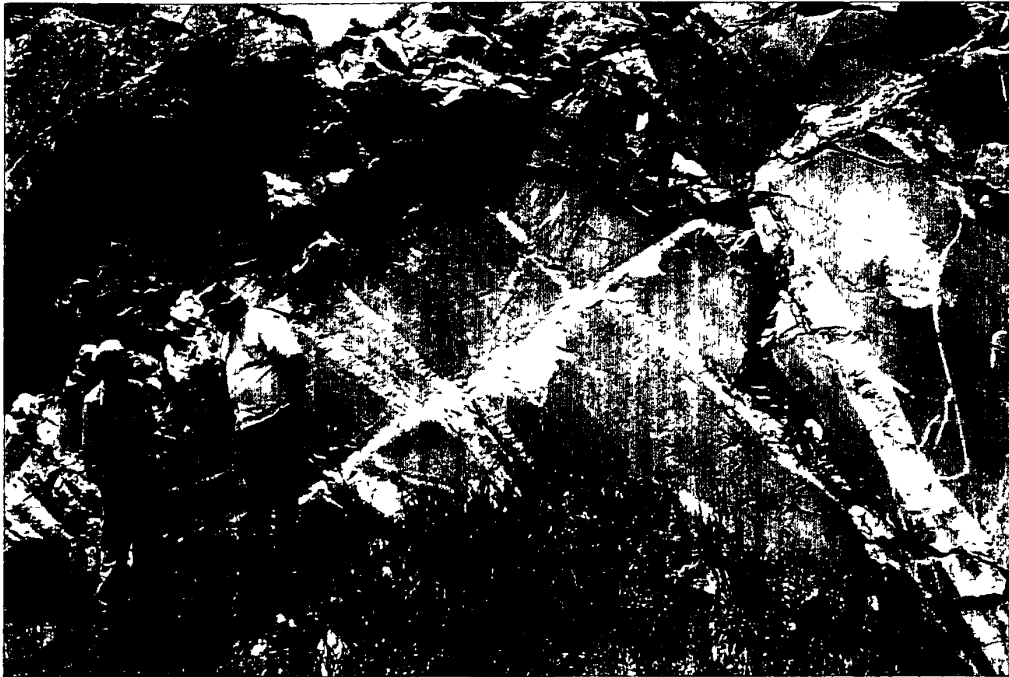
照片四十九：沿層面滑移的擦痕（攝於 San Rafael Swell）。



照片五十：石灰岩受壓所產生壓溶現象的縫合線構造（攝於 San Rafael Swell）。



照片五十一：受岩鹽上拱造成灰色泥岩的 Paradox Formation 呈剪動破壞構造（攝於 Moab 地區 Onion Creek）。



照片五十二：白色偉晶花崗岩侵入片麻岩（攝於科州 Copper Mt.）。



照片五十三：黑色角閃岩與白灰色片麻岩（攝於科州 Copper Mt.）。



照片五十四：中生代侏羅紀 Morrison Formation 中砂頁互層中所發現孔龍腳印
（攝於科州丹佛附近 North Dinosaur Open Space Park）。



照片五十五：Avalonian Terrane 所出露前寒武紀的片岩（攝於羅德島 Newport）。



照片五十六：Avalonian Terrane 所出露前寒武紀的片岩及其中所夾外來岩塊，立者為 Boston College 的 James Skehan 教授（攝於羅德島

Newport)。



照片五十七：Avalonian Terrane 所出露前寒武紀的凝灰岩（攝於羅德島 Newport）。



照片五十八：Avalonian Terrane 所出露前寒武紀的綠色與黑色片岩（攝於羅德島 Newport）。