

利用土壤逸氣調查掩覆斷層及破裂帶之可能分佈：以潮州斷層為例

Recognition of buried fault and/or fracture by soil gas investigations:
A case study on the Chao-chou Fault

傅慶州¹ 楊燦堯¹ 陳正宏¹

Ching-Chou Fu¹, Tsanyao F. Yang¹, Cheng-Hong Chen¹

ABSTRACT

Taiwan is located on the boundary between Eurasia plate and Philippine Sea plate. The on-going collision between these two plates makes Taiwan densely faulted. So far most of the researches for the active faults in Taiwan are based on geophysical techniques, trench studies and structure geology, and geochemical methods are rarely used. In this work, the soil-gas compositions are measured and synthesized to compare with the geological, geophysical and geomorphological information along the Chao-chou Fault, which is considered as an active fault in southern Taiwan.

The geochemical method using soil gases is based on the principle that faults and/or fractures are conduits which may provide high permeability pathways for deep source gases migrating upward to the surface, and that deep crust or mantle can produce anomalously high deep source signatures for some gases that are distinctive from those already existed in the overlying soils. Through this method, data can be collected rapidly with low cost. Preliminary results show that helium and carbon dioxide concentrations in the soil gas reveal anomalous values for specific positions along each of the transverses to the Chao-chou Fault. It indicates that the N-S trending, geochemically anomalous lineation corresponds to the reported trend and pattern of the Chao-chou Fault. Besides, several N-S trending fractural structures distributed in this area are also suggested.

1. 國立台灣大學地質科學研究所 (Institute of Geosciences, National Taiwan University)

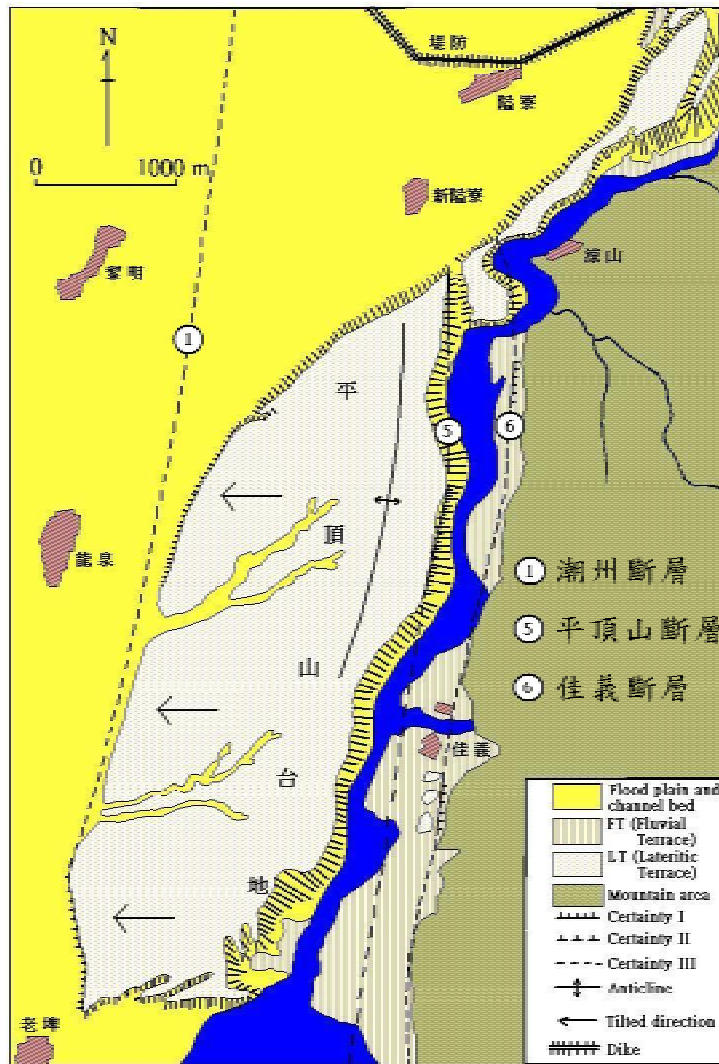
前言

台灣位處於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的交界上，兩個板塊不斷的擠壓、碰撞，使得台灣島上斷層密佈。因此，確定斷層的分佈位置，對於學術研究與民生防災上，皆是十分重要的意義。過去台灣研究斷層的方法大多是以地球物理、槽溝開挖或是以構造的觀點等來進行模擬、確認；鮮少利用地球化學探勘的方法來進行。而對於土壤氣的研究，國外早已行之有年，不過大多與資源的探勘有關，如石油、鈾礦、地熱等等，而應用在斷層的研究也有不少成功的案例（Gregory and Durrance, 1985; Etiopie and Lombardi, 1995; Guerra and Lombardi, 2000; Baubron *et al.*, 2001）。台灣早期亦曾有利用此法探勘斷層分佈的嘗試（翁寶山，1988；黃明哲，1989），然當時限於分析技術無法大規模有系統採樣，實際效果並未令人滿意，而未被廣泛採用。現今的分析儀器已大幅改善其精準度，並可以攜帶至野外即時分析土壤氣體成份，而大幅增加採樣點密度，可以更準確地判斷出異常分佈區域；若進一步配合其它地球物理探勘與地質調查資料，則能夠更準確地判斷出斷層或破裂帶的分佈位置。

地質概況

本研究選擇屏東地區的潮州斷層作為本方法測試的地區，一方面本地區受到人為開發的情形較小；另一方面則是地表有明顯的特徵顯示可能的斷層位置。調查區域以現代沖積層分布最廣之岩層，主要由未膠結之砂、泥、礫石、卵石等所組成。而最主要的地質構造則為呈南北走向的潮州斷層，根據中央地質調查所目前公布的潮州斷層位置大致與屏東平原與中央山脈交界一致（相當於圖一的佳義斷層）（石再添等，1983），為一相當顯著的構造分界線。林朝榮（1957）認為此斷層具有直線狀的山麓線、保存尚完整的三角切面和棚階狀崖面而屬於階段斷層。Bonilla (1975)由航照判釋的結果指出，階地的變位，顯示潮州斷層近期曾經活動，並形成和主斷層平行的副斷層，其崖面向東，為一反斜斷層崖，該副斷層通過更新世的紅土階地及全新世尚未紅土化的沖積河階。Wang (1976)由衛星影像判釋潮州線性與潮州斷層一致。石再添等（1983, 1986）經由地形學的研究（如圖一所示），也認為潮州斷層呈現明顯的南北向直線狀山麓線且以帶狀形式分佈，其間有許多小的斷層錯斷階地及崩積層，因而推論潮州斷層為一活動斷

層。張慧中(1986)由槽溝及野外調查認為因地表被階地堆積層所覆蓋，潮州斷層的位置應更往西移(如圖二)。

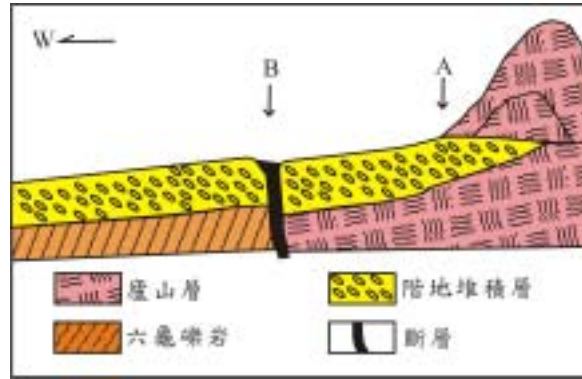


圖一 潮州斷層帶的斷層與地形面分佈圖(修改自石再添, 1984)

Fig.1 Distribution of faults and geomorphic surface around Chao-chou Fault zone (modified from Shih, 1984).

Hsieh(1970)由重力異常的資料發現，潮州斷層的重力異常分佈也是呈現南北走向。而由屏東平原的重力低值往中央山脈陡升為重力高值區，顯示著斷層兩側的物質密度有相當程度的差異，進而推測有一向東傾斜75度到80度的高角度

逆斷層。Chiang (1971) 由震測及鑽井的資料指出，潮州斷層東南方約七公里處的潮州背斜西翼為萬隆斷層所切斷，斷層面向東傾斜50度，但經由震測剖面卻無法測得潮州斷層。Yu *et al.* (1983) 利用頻繁的微震活動與重力資料推算出潮州斷層的傾角約為70度至80度左右。

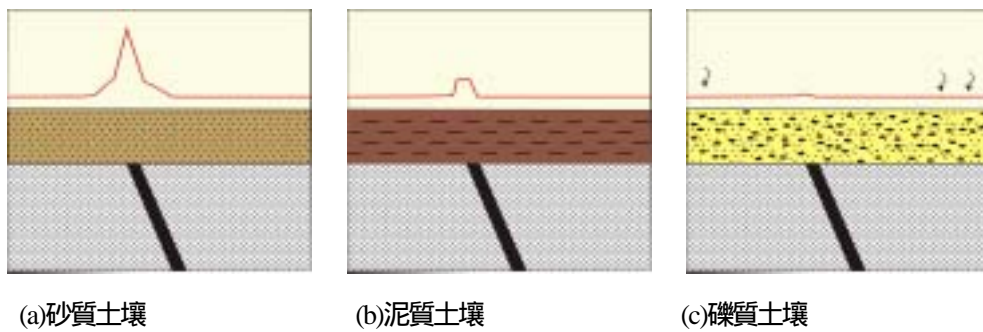


圖二 潮州斷層北段於沙漠村之剖面示意圖 (修改自張慧中, 1986)

Fig.2 Sketch profile of north segment of the Chao-chou Fault (modified from Chang, 1986).

土壤氣探勘的原理

一般說來，空氣成份與源自於地殼深處的氣體成份截然不同，而地殼深部氣體會藉由擴散作用逸散至地表，與土壤中之空氣成份達成平衡，致使土壤氣體與空氣組成有些微差異；若是地表底下有深的斷層抑或是破裂帶，可成為一個通道，使地底深處之氣體可從地殼或地函處沿著此路徑向上遷移，而使得地表土壤氣體產生異常的濃度變化。唯氣體成份異常的程度與斷層上覆土壤的孔隙度有關，孔隙度較大的砂質土壤(圖三-a)之氣體濃度異常程度往往比泥質土壤者(圖三-b)為大，而礫質土壤卻因為有過大的孔隙度，使得地表的空氣反而容易滲入土壤層，大幅地稀釋了原有的異常氣體濃度(圖三-c)。所以若是土壤氣體有異常值出現，便代表地底下可能有斷層或破地帶。利用此原理針對盲斷層或是因人為活動而消失斷層跡的斷層，假設其上覆著相似孔隙度與厚度的土壤層，藉著氣體在斷層帶兩側逸氣量不同，偵檢地表各氣體的濃度分布來判定斷層的走向和位置。據此，吾人便可以判斷該處有斷層抑或破裂帶通過該處，此法便成為一簡易有效的地球化學探勘方法。



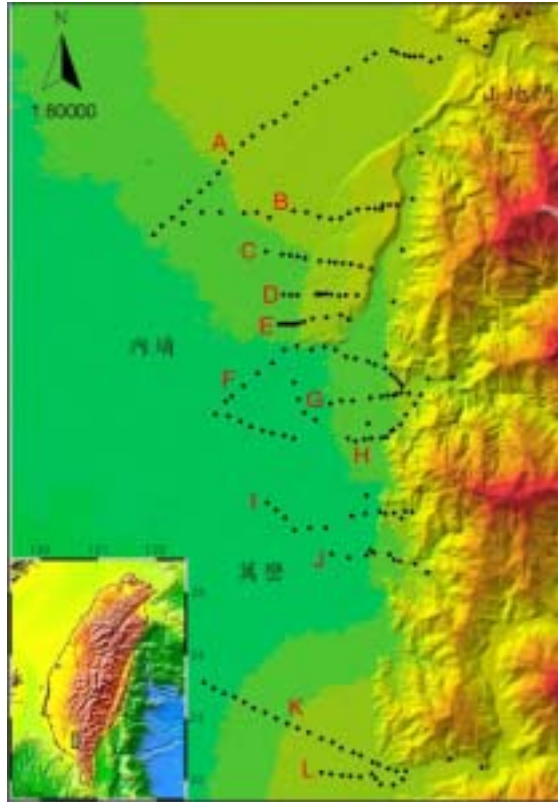
圖三 不同的土壤覆蓋層對於斷層帶上土壤氣成份影響示意圖。紅線代表橫跨斷層帶的地表土壤氣體濃度變化情形。(a)斷層上覆蓋著孔隙度較大的砂質土壤層，而有較明顯的土壤異常值；(b)覆蓋著孔隙度較小的泥質土壤層，土壤異常值較不明顯；(c)上覆礫質土壤層，因為孔隙度過大，地表之空氣容易滲入土壤層，而大幅稀釋了異常值。

Fig.3 Sketch of anomalous gas distribution of soil gases for different types of soils. (a) sandy soils with higher porosity, usually show clear anomaly; (b) smaller anomaly for muddy soils with lower porosity; (c) very small anomaly might be found for soils with gravels due to the air contamination and dilution.

研究方法與分析

本研究方法利用二萬五千分之一的地形圖以及已發表之地質圖，將可能有斷層分布的地區進行有系統的採樣，而每個採樣點的間距約100~350公尺，視不同的區域而做適當的調整。本研究於2003年的七月至十月，間共採集了超過200個以上的土壤氣樣本，其採樣點分佈如圖四所示。

採樣方法是將一枝長約130公分半徑約3公分中空的不鏽鋼管，其前端插入一尖錐鋼頭(為了能較順利鑽進土壤中並避免土壤進入不鏽鋼管之中)，利用鐵鎚將鋼管敲入土壤中約1公尺左右，接著用一根較細的實心鋼條插入此中空的鋼管中將其最前端的尖錐物使其脫離，以利土壤中的氣體順利進入不鏽鋼管之中(圖五)。再將鋼管套入已設計好的管線利用手動幫浦讓管線經過土壤氣樣的沖刷，儘可能的降低空氣的混染；倘若土壤氣量過小，則先將管線抽氣呈真空狀態之後，再等待土壤氣充滿整個管線，再進行採樣的工作(管線中有裝置兩個過濾器，一為過濾塵土；另一則是為了擋住水氣的進入)。最後，用手動幫浦將土壤氣樣抽入採樣袋中即完成採樣工作。



圖四 研究區域位於台灣西南部屏東地區，藍點代表每個採樣的位置，共計有由北至南 A-L 等 12 個剖面。

Fig.4 Sample locations of this study. Blue dot indicates the sample site for soil gas collection. Totally 12 transverses from profiles A to L were carried out in this study.

將採集的氣樣分別使用攜帶式氣相層析儀(Gas Chromatography)與氦氣偵測儀(Helium detector)進行分析，分別分析土壤氣體中He、CO₂、CH₄、N₂、Ar、O₂等各含量，並討論其彼此間的相互關係。一般來說，上述各項氣體的濃度在大氣中皆有固定含量，因此在採樣時必須同時採集當地地表的空氣(背景值)與所採集土壤氣體樣品比較，以判斷樣品中氣體濃度是否有異常值。



圖五 (A) 土壤氣體採樣示意圖；(B) 野外採樣土壤氣體的實際情形。

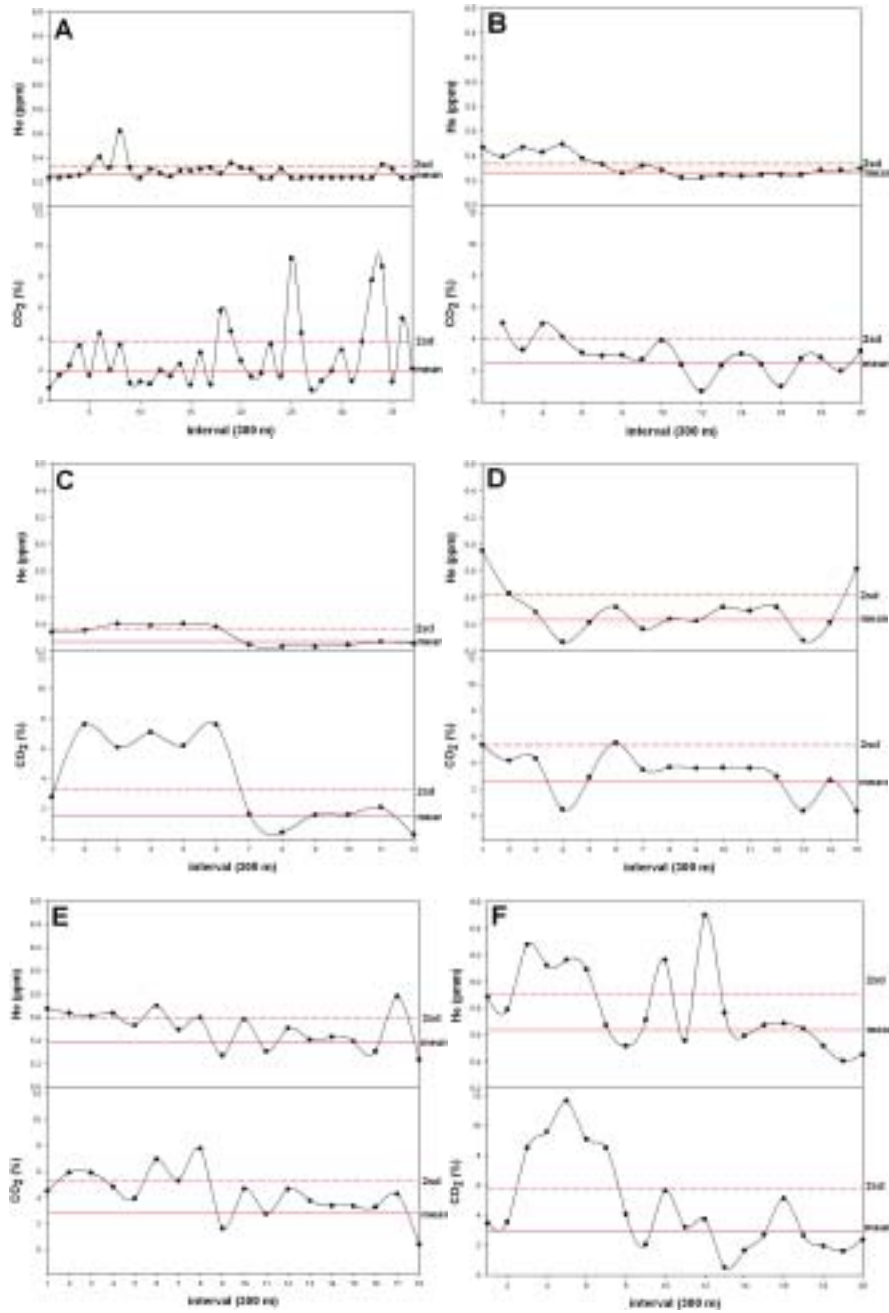
Fig.5 (A) Sketch of the device for soil gas sampling; (B) Soil gas sampling in the field.

結果與討論

初步分析結果顯示，氫氣、氧氣與氮氣其濃度並無明確的變化，無法成為尋找斷層的指標氣體；不過，將這幾種氣體與空氣背景值相比較，可作為檢驗採樣成功與否的一種方法。另外，在此研究地區並未發現甲烷氣的存在，因此在此不做進一步的討論。

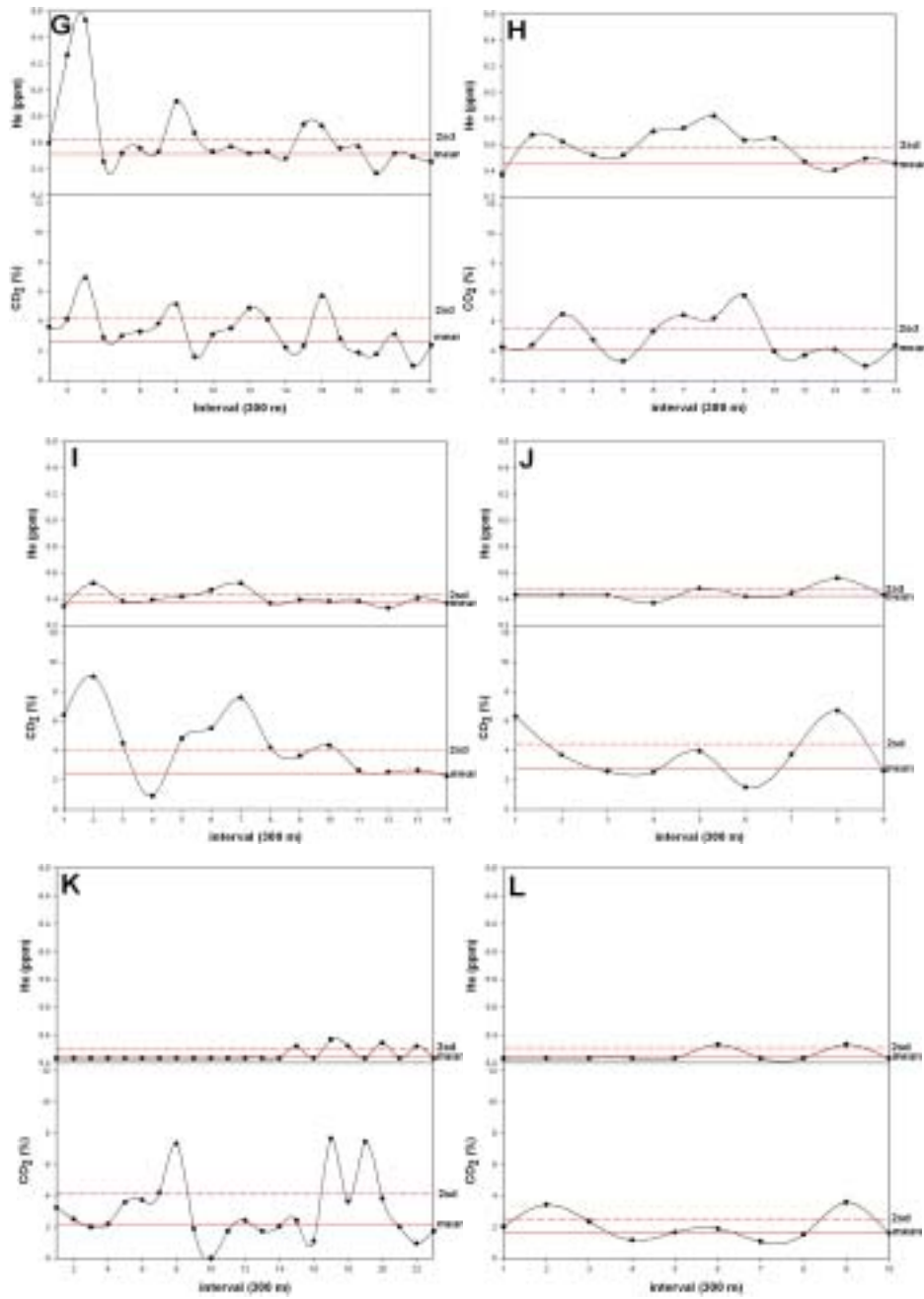
本研究將每個剖面之氣體濃度異常值門檻定義為：去除濃度明顯過高的分析值後，將所有分析結果取平均值加上兩倍標準偏差(達95%的可信度)，當分析值高於此門檻者，可視為異常值。分析結果顯示，本研究所採集之土壤氣中所含之氮氣與二氧化碳濃度，在每條剖面特定的位置處，皆有異常值出現(圖六)。

本研究所涉及的12條剖面(A-L)當中，F剖面含有之氮氣濃度最高，顯示其地下逸氣系統十分通暢且土壤性質也為孔隙略高的砂質土壤，這跟我們所推測的土壤逸氣行為是符合的。A、K、L剖面是在2003年九月初杜鵑颱風之後兩個星期所進行的，而從氣體濃度很明顯的發現整體的逸氣系統似乎有很大的變化，整個調查區的逸氣通道好像都被阻塞似的，使得濃度的變化情形並不大，意味著氣候因素對於土壤的逸氣過程有一定程度的影響。



圖六 A-F：剖面 A~F 的土壤氣中氦氣與二氧化碳分析結果。虛線代表著各剖面異常值的門檻值（平均值加上兩個標準偏差）。

Fig.6 A-F : Variations of He and CO₂ concentrations of soil gases for the profiles A-F. Dash line indicates the threshold of the anomalous concentration of the profile.



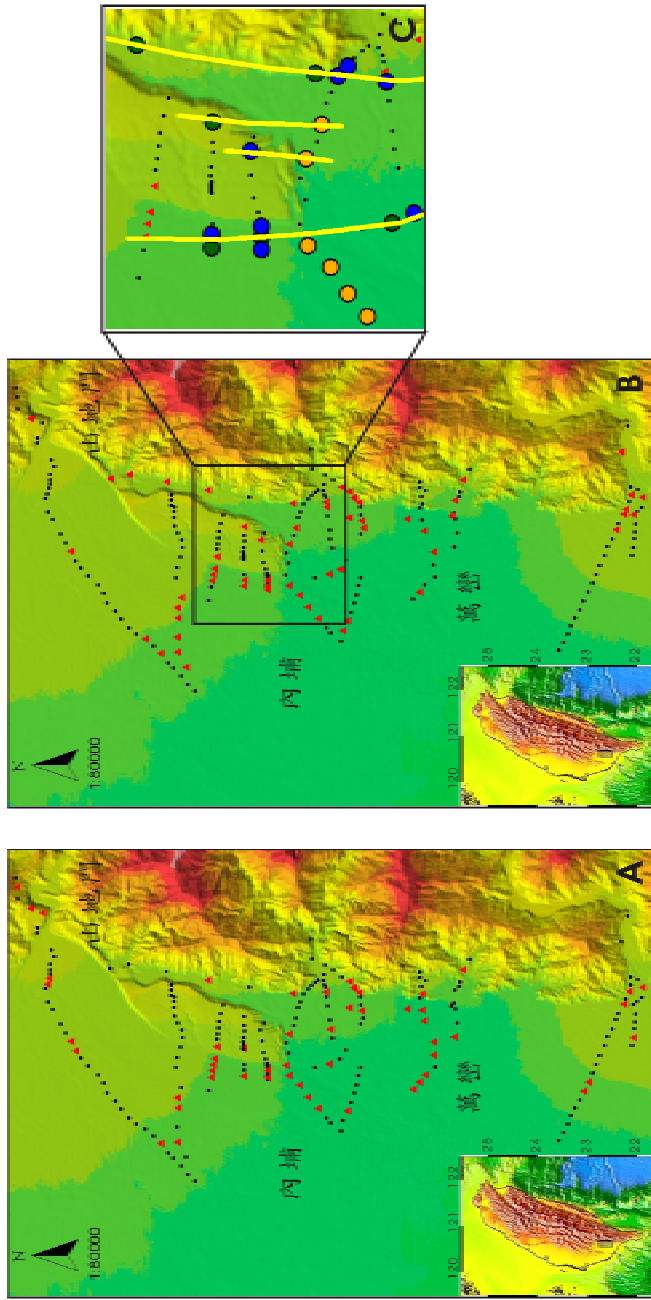
圖六 G-L：剖面 G~L 的土壤氣中氦氣與二氧化碳分析結果。虛線代表著各剖面異常值的門檻值（平均值加上兩個標準偏差）。

Fig.6 G-L : Variations of He and CO₂ concentrations of soil gases for the profiles G-L. Dash line indicates the threshold of the anomalous concentration of the profile.

將所有分析結果投影在圖七中，可顯示出異常土壤氣體成份的分佈情形。首先將濃度較高的幾個位置挑出，配合地形資料（圖一），我們可以初步判斷出本地區主要的斷層與破裂帶分佈應為南北走向（如圖七-C所示）。可是由圖六之分析剖面結果顯示，本地區的土壤氣體異常值分佈，顯然無法由圖三所示地底下僅有一個主要斷層或破地帶所造成，本地區地底下需要有多條破裂帶（圖八），才能解釋本研究分析出來的土壤氣體異常分佈情形。

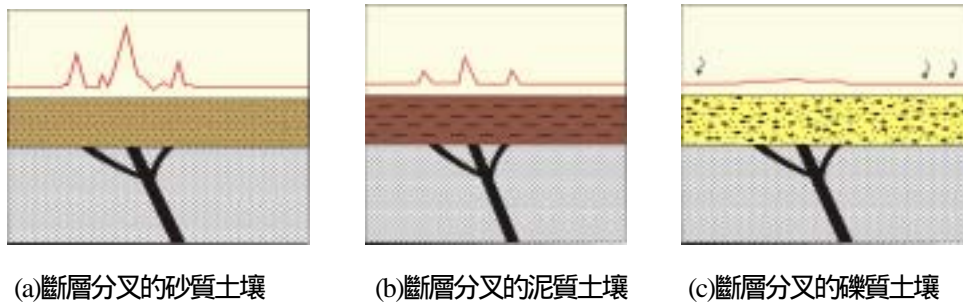
一般而言，目前各界對於潮州斷層的性質看法尚一致，不過有關地表延伸的位置並未有一致的結論。經由本研究土壤氣體中氫氣和二氧化碳分析的結果，推測出斷層或破裂帶的可能分佈情形如圖九所示，顯示有數條構造線分佈於此。配合地形學的資料，發現圖九的標示的a和d線段、b和e線段、c和f線段分別與石再添等（1983）所定義的潮州斷層、平頂山斷層及佳義斷層大致相同（如圖一所示）。唯這與中央地質調查所公布的潮州斷層位置有所出入，過去大都認為潮州斷層位於中央山脈與屏東平原的交界上，亦即地形變化最明顯之處（如圖二A所示）；然而張慧中（1986）認為由於地表被階地堆積層所覆蓋，因此潮州斷層的位置應往西側移（如圖二之B處）。由本研究之氣體分析資料顯示，在地形交界上也確有異常值出現，可是卻非所有剖面中最高異常值的分佈處，這暗示著此一異常值分佈帶（圖九之c與f段），可能為潮州斷層逆衝到地表時所產生的另一個斷層帶（如圖一所指的佳義斷層）。

將氫氣與二氧化碳所推測的構造線相比較，發現兩者構造線的位置大致一致，皆為南北走向且重疊度頗高，因此在研究區域內，氫氣與二氧化碳成為非常有效的指標氣體。雖然在局部區域此兩線段有些許的出入，不過可確定的是在氫氣有異常的位置其地底下肯定有構造出現，而二氧化碳的異常除了可能源自於深部來源之外，常受控土壤中其它來源的影響；因此，本研究以氫氣為首選指標性氣體。微量氣體（如氫氣、氦氣）除了依靠本身的擴散速率之外，一般常會藉著其它氣體帶到地表中，我們稱這種氣體為『攜行氣體』（Carried gas）（Etiope and Martinelli, 2002; Yang *et al.*, 2003）。由圖十顯示，本研究區域的土壤氣體除了地表之空氣成分以外，還可以辨識出兩個端成分成份，一為來自深斷裂的氣體，其所含之氫氣由二氧化碳攜帶至地表，故而氫氣異常程度隨著二氧化碳含量增高而增加；另一群則源於淺破裂的氣體，其所含之氫氣濃度並未隨著二氧化碳含量升高而有明顯變化，顯示其為淺處二氧化碳的來源。未來藉由同位素的分析，將可進一步確認本地區氣體的來源。



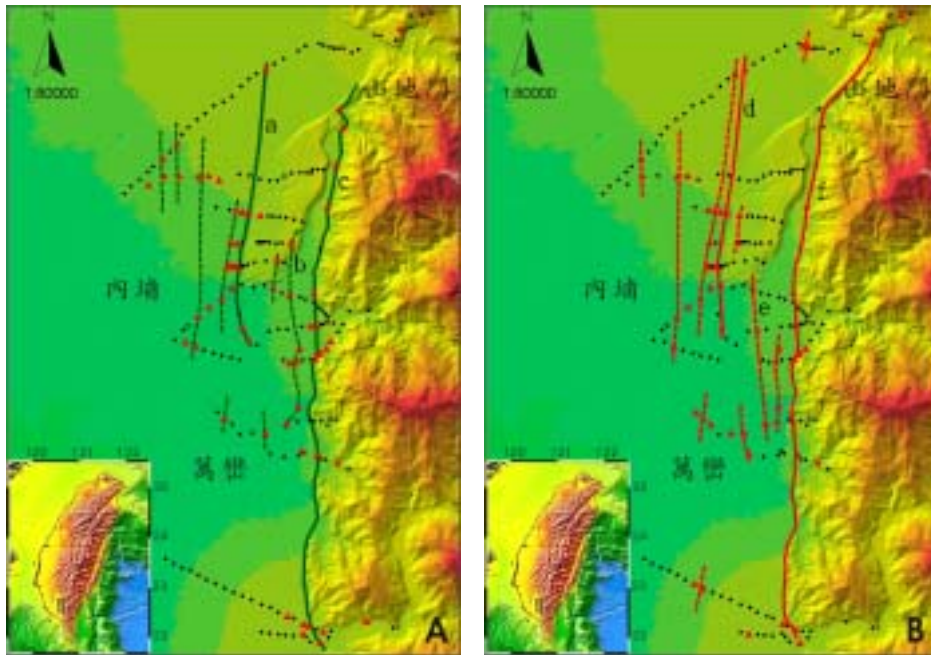
圖七 土壤氣體濃度異常分佈圖：(A)：二氧化碳；(B) 氦氣；(C) 為經由濃度較高的異常氦氣分佈所推測出的斷層分佈圖。橘點為氦氣濃度大於 6.0 ppm 以上；綠點介於 5.8~6.0ppm；藍點介於 5.6~5.8ppm；紅色三角形為大於平均值加上兩個標準偏差。

Fig.7 Distribution of anomalous soil gas composition: (A) CO₂ and (B) He. (C) Possible distribution of faults and/or fractures according to He anomalies. Orange dot indicates the helium concentrations higher than 6.0 ppm; green dot: 5.8-6.0 ppm; blue dot: 5.6 and 5.8 ppm. Red dot indicates He concentration high than mean value plus two sigma standard deviation, but lower than 5.6 ppm.



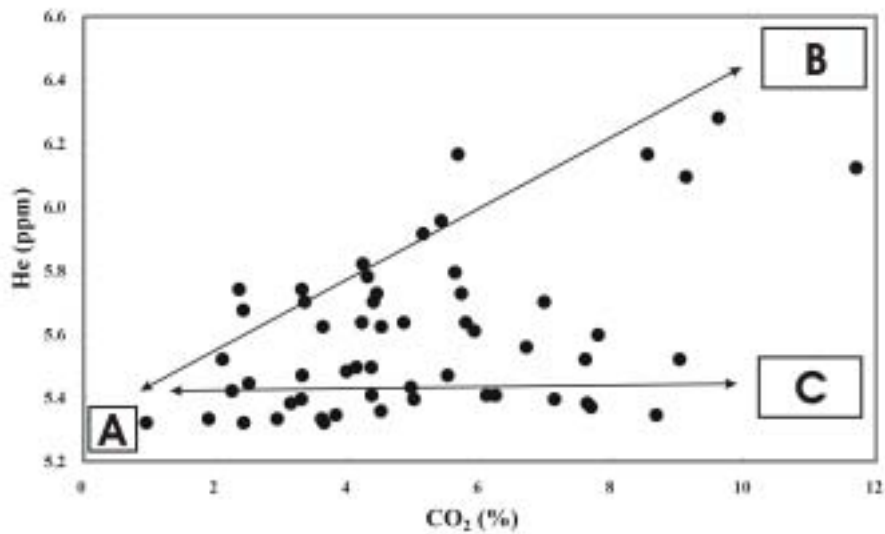
圖八 多條斷層帶上覆不同的土壤層，對於地表土壤氣成份影響示意圖。紅線代表橫跨斷層帶的地表土壤氣體濃度變化情形。(a)斷層上覆蓋孔隙度較大的砂質土壤層，而有較明顯而多組的土壤異常值出現；(b)覆蓋著孔隙度較小的泥質土壤層，土壤異常值較不明顯；(c)上覆礫質土壤層，因為孔隙度過大，地表之空氣容易滲入土壤層，而大幅稀釋了異常值。

Fig.8 Sketch of anomalous distribution of soil gases for different types of soils overlain on many fault zones. (a) sandy soils; (b) muddy soils; (c) soils with gravels.



圖九 綜合所有資料所推測的斷層或破裂帶分佈圖。(A)為氦氣所得；(B)為二氧化碳所得。

Fig.9 Distribution of fault and/or fracture patterns recognized in studied area by (A) helium data; (B) carbon dioxide data.



圖十 土壤氣體中氦氣與二氧化碳含量之投圖，由圖中可以區分出至少三個端元成份：(A) 空氣端成份，具有低氦氣與低二氧化碳組成；(B) 深源氣體端成份，具有高氦氣與高二氧化碳組成；(C) 淺源氣體端成份，具有高二氧化碳低氦氣組成。

Fig.10 Variation diagram of He versus CO₂ compositions of soil gas. Three end components can be identified: (A) air component with low He and CO₂; (B) deep source component with high He and CO₂; (C) shallow source component with high CO₂ but low He concentrations.

本研究結果顯示，在台灣西南部地區利用土壤氣體的方法來探測盲斷層或是因人為活動而消失斷層跡的斷層是一種非常有效的工具，未來更可沿用此項技術應用在其它地區並期望仍有不錯的成果。

誌謝

承吳國維、洪瑋立、李曉芬、蕭敦仁、王振丞、藍德芳、Vivek Walia、吳佳瑜等諸位先生小姐協助樣品樣集與分析；國立屏東科技大學周昌弘校長與杜娟娟教授給予行政支援協助，使本研究得以順利完成。台灣大學陳文山、胡植慶、吳逸民、陳于高等教授、陳勇全先生對本研究提供寶貴建議；羅清華教授與林啟文組長對本文初稿詳細審查並提供寶貴意見，使本文錯誤減至最少、更具可讀性。本研究蒙國科會補助研究經費，在此一併致謝。

參考文獻

- 石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三、許民陽 (1983) 台灣西部與南部活斷層的地形學研究。國立台灣師範大學地理學研究報告, 第十期, 第49-94頁。
- 石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三 (1986) 台灣活斷層的地形學研究。國立台灣師範大學地理研究所研究報告, 第12期, 第1-44頁。
- 林朝榮 (1957) 台灣地形。台灣省文獻委員會, 共424頁。
- 翁寶山 (1988) 利用土壤中放射性氬氣含量變化對金山斷層之調查與研究。行政院國家科學委員會防災科技報告77-14號。
- 張慧中 (1986) 台灣南部潮州斷層北段之新期構造研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文, 共60頁。
- 黃明哲 (1986) 桃園新竹地區活動斷層調查(一)。行政院國家科學委員會防災科技報告74-39號。
- Baubron, J.C., Rigo, A. and Toutain, J.P. (2001) Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196, 69-81.
- Bonilla, M.G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan. U.S. Geological Survey Open-File Report, 75-41, 58.
- Chaing, S.C. (1971) Seismic study of the Chaochou structure, Pingtung, Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 8, 281-294.
- Etioppe, G. and Lombardi, S. (1995) Soil gases as fault tracers in clay basin: a case history in the Siena basin (Central Italy). *Gas Geochemistry: Science Reviews*, Northwood, 19-29.
- Etioppe, G., Martinelli, G. (2002) Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129, 185-204.
- Gregory, R.G. and Durrance, E.M. (1985) Helium, carbon dioxide and oxygen soil gases: small-scale variation over fractured ground. *Jour. Geochem. Explor.*, 24, 29-49.
- Guerra, M. and Lombardi, S. (2000) Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins: the Pisticci field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339, 511-522.
- Hsieh, S. H. (1970) Geology and gravity anomalies of the Pingtung plain, Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 13, 76-89.
- Wang, S. (1976) ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 13, 37-57.
- Yang, T.F., Chou, C.Y., Chen, C-H., Chyi, L.L., Jiang, J.H. (2003) Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 36, 425-429.
- Yu, S.B., Yeh, Y.T., Tsai, Y.B. (1983) Microearthquake activity in southwestern Taiwan. *Bull. Inst. Earth Sci. Academia Sinica*, 3, 71-85.