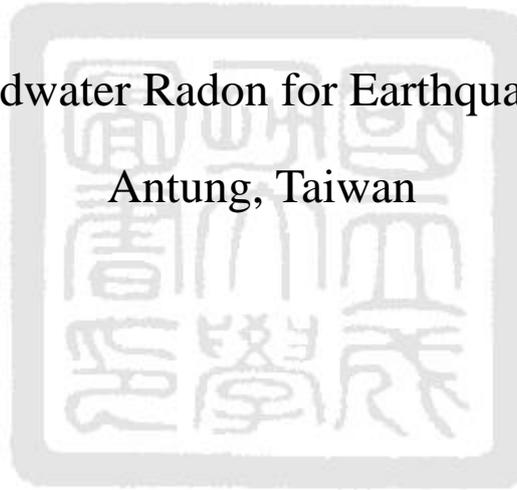


國立成功大學
資源工程研究所
碩士論文

安通溫泉地下水水氡觀測及地震前兆之研究

Monitoring Groundwater Radon for Earthquake Precursors near
Antung, Taiwan



研究生：許逸惠

指導教授：郭明錦

中華民國一百零二年六月

國立成功大學

碩士論文

安通溫泉地下水水氡觀測及地震前兆之研究
Monitoring Groundwater Radon for Earthquake
Precursors near Antung, Taiwan

研究生：許逸惠

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員 郭鎧紋

范愷軍 郭明錦

指導教授：郭明錦

系主任：黃啓原

中華民國 一百零二年 五月 三十一 日

摘要

本研究在安通溫泉區內吉祥溫泉農莊(D1 井)及安通溫泉飯店(A 井)，觀測地下水水氬異常下降之地震前兆。在 2011 年 7 月 12 日 M_w 5.0 奇美地震前，吉祥 D1 井觀測到地下水水氬濃度從背景值 752 ± 24 pCi/L 降至最低濃度 447 ± 18 pCi/L。然而安通 A 井未觀測到地下水水氬濃度異常下降之變化。

吉祥 D1 井自 2003 年 7 月起監測至今，以地下水水氬最低濃度異常的門檻值(503 pCi/L)可清楚辨別出四次 $M_w \geq 5.0$ 之地震前兆(2003 年 M_w 6.8 成功、2006 年 M_w 6.0 台東、2008 年 M_w 5.2 安通及 2011 年 M_w 5.0 奇美地震)。當 $M_w < 5.0$ 時，地下水水氬異常下降信號易受背景濃度雜訊干擾。應用物理機制分析 2011 年 M_w 5.0 奇美地震後地下水水氬濃度異常下降數據，進一步能辨別出四次 $M_L \geq 4.7$ 之地震前兆。以上發生在池上斷層八次地震前兆的觀測數據顯示地下水水氬濃度異常下降大小與地震規模正相關。

關鍵字：地震前兆、氬-222、地下水、池上斷層

Abstract

We monitored groundwater-dissolved radon at both well D1 and well A in the Antung hot spring to catch earthquake precursors. Prior to the 2011 M_W 5.0 Chimei earthquake, the groundwater's radon concentration at well D1 decreased from a background level of 752 ± 24 pCi/L to a minimum of 447 ± 18 pCi/L. No precursory changes in the groundwater's radon concentration were observed at well A precursory to the 2011 M_W 5.0 Chimei earthquake.

Recurrent anomalous declines in groundwater radon were observed at the Antung D1 monitoring well prior to the four major earthquakes – (1) 2003 M_W = 6.8 Chengkung, (2) 2006 M_W = 6.1 Taitung, (3) 2008 M_W = 5.4 Antung, and (4) 2011 M_W = 5.4 Chimei. Post the 2011 Chimei earthquake, additional recurrent anomalous declines in groundwater radon were observed at well D1 prior to four local earthquakes with $M_L \geq 4.7$. For earthquakes occurring on the Longitudinal Valley Fault in eastern Taiwan, the observed radon minima decrease as the earthquake magnitude increases.

Keywords : earthquake precursors ; radon-222 ; groundwater ; the Chihshang fault

致謝

非常感謝在研究所兩年來恩師 郭明錦教授的指導與教誨，不僅引領我在研究方面的學習，更教導了許多待人處世的態度，僅致以最誠摯的感謝與敬意。

感謝中央氣象局地震測報中心郭鎧紋主任及成功大學資源工程所范愷軍博士在百忙之中撥空指導並給予寶貴的意見，讓這本論文能更加完整。

感謝許多幫忙照顧我的學長姐們，共患難的逸群、傳承很多經驗給我的純玉、大家長小范、嘴巴壞有時候人又很好的建元、很照顧我的巧克力、胚尼、阿奔...等，很開心能有這麼優秀的學長姐指導，從你們身上學到很多。也謝謝一起走過這兩年的活動人羊屁以及繼續拼博士的王文良，也一起默默的經歷了許多研究生活。

還要感謝資源女籃群及小嚕與漢婕社團裡熱愛籃球的大家，有太多的你們豐富了我整個大學生活，謝謝你們願意任我亂開菜單、玩莫名其妙的籃球遊戲，很喜歡大家一起在球場歡笑揮灑汗水的日子，我一定會超級想念這裡的；謝謝Hot girls的大家跟我的麻吉小宗，不管提出怎樣瘋狂跟無厘頭的點子總會有人支持或潑冷水表示意見，但在最緊急的時候還願意跳出來聽我一整晚的口試練習、給我意見、聽我碎碎唸；謝

謝天台、台表漢軒老師和小新老師、面劇團的大家及台南人劇團的老師們，開啟了我對戲劇的夢，「人，一輩子能做好一件事情就功德圓滿了」，也謝謝國修老師及屏風對面劇團的幫忙和支持，這句話真的對我有很大的意義，雖然很不捨，但您的精神一定可以傳承給大家的；謝謝飲品社的學弟們，讓我在社團盡情的做烘焙試驗，也熱情的教了我好多有趣的調酒配方，真的是很不錯的經驗。

最後最感謝的是一路支持我的家人們，放心讓我在台南讀書，讓我自由的學習及嘗試各種新事物，也好好照顧著自己讓我不必操心，謝謝媽咪願意支持我學習，妹妹願意聽我發牢騷順便糗我一番，謝謝阿公阿媽們雖然不知道我在學什麼但就是以我為榮，你們真是太可愛的家人，我愛你們！

目錄

第一章 前言	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 研究目的.....	6
1-3 研究流程.....	7
第二章 文獻回顧	8
2-1 地球化學流體於地震前兆之應用.....	8
2-2 地球化學流體於地震前兆之監測實例.....	11
2-3 地下水水氬於地震前兆之應用.....	17
2-4 研究區域地質背景.....	23
2-4-1 花東縱谷與池上斷層.....	23
2-4-2 安通溫泉區地質背景.....	25
2-5 研究區域地震背景.....	30
2-6 安通溫泉地下水水氬濃度異常變化之地震前兆.....	35
第三章 研究方法	40
3-1 地下水水氬採樣方法.....	41
3-2 地下水水氬分析原理.....	43
3-3 實驗室監測地下水水氬品保品管.....	46

第四章 結果與討論	49
4-1 吉祥 D1 井及安通 A1 井監測結果與環境因子之比較.....	49
4-2 吉祥 D1 井和安通 A1 井監測結果之比較.....	52
4-3 吉祥 D1 井地下水水氣濃度三階段序列發展.....	54
4-4 標準化地下水水氣濃度下降值及前兆時間與地震規模之相關性.....	60
第五章 結論與建議	67
5-1 結論.....	67
5-2 建議.....	69
參考文獻	70
附錄 A	78



圖目錄

圖 1-1	台灣板塊構造立體示意圖.....	3
圖 1-2	台灣活動斷層分布圖.....	4
圖 1-3	吉祥 D1 井成功捕捉到三次地震前地下水水氦濃度異常下降變化.....	5
圖 1-4	研究流程圖.....	7
圖 2-1	體積膨脹模式.....	10
圖 2-2	監測站與 1984 年和 1995 年發生地震的相對位置.....	13
圖 2-3	1984 年及 1995 年地震前觀測到地下水溶解氣體濃度比異常下降 (a)1984 年 M 6.8 (b)1995 年 M 7.2.....	14
圖 2-4	2004 年 12 月 26 日印尼蘇門答臘島 M_w 9.1 地震前，(a) 水氦 (b) He/CH_4 皆出現異常上升的現象.....	15
圖 2-5	2008 年 M_w 5.4 安通地震來臨前，地下水水氦及甲烷濃度異常下降之現象.....	16
圖 2-6	Rn-222 自 U-238 的衰變鏈.....	20
圖 2-7	1991 年 10 月 20 日印度烏達嘎沙 M 7.0 地震前，土壤氣氦及地下水水氦濃度異常上升.....	21
圖 2-8	1978 年 1 月 14 日日本伊豆 M 7.0 地震來臨前，地下水水氦濃度	

明顯異常下降的現象.....	22
圖 2-9 (a)池上區域地質圖 (b)池上斷層剖面 AA' 示意圖.....	24
圖 2-10 安通溫泉地區四家溫泉旅館所擁有之溫泉井相對位置圖.....	27
圖 2-11 安通溫泉地下水水氬濃度觀測井位於海岸山脈附近之地質構造 圖及剖面圖.....	29
圖 2-12 1951 年地震震央分布圖 (a)台灣大地構造框架圖 (b)花東縱谷斷 層區域圖.....	32
圖 2-13 安通溫泉吉祥水氬濃度監測站與 2003 年 M_w 6.8、2006 年 M_w 6.1 及 2008 年 M_w 5.4 地震震央之相對位置分佈圖.....	33
圖 2-14 池上斷層地表斷層從 1986 年至 2004 年位移量測之位移速率演 化曲線.....	34
圖 2-15 吉祥 D1 井在 M_w 6.8 的成功地震來臨前觀測到地下水水氬異常 下降.....	37
圖 2-16 吉祥 D1 井地下水水氬異常下降示意圖 (a)2003 年成功地震 (b)2006 年台東地震 (c)2008 年安通地震.....	38
圖 3-1 地下水溶解氣體之標準採樣步驟.....	42
圖 3-2 地下水水氬之實驗流程圖.....	45
圖 3-3 水氬標準溶液液態閃爍計數之典型圖譜.....	47
圖 3-4 水氬分析實驗室品保品管歷線圖.....	48

圖 4-1	吉祥 D1 井之地下水水氬濃度與環境因子比較.....	50
圖 4-2	安通 A 井之地下水水氬濃度與環境因子比較.....	51
圖 4-3	吉祥 D1 井和安通 A 井地下水水氬濃度比較.....	53
圖 4-4	吉祥 D1 井之地下水水氬濃度監測紀錄(2003/7/1 ~ 2013/3/31)...	56
圖 4-5	吉祥 D1 井之地下水水氬濃度監測紀錄(2011/1/1 ~ 2013/3/31)...	57
圖 4-6	本研究監測期間四個地震前兆三階段序列.....	58
圖 4-7	標準化地下水水氬濃度下降值與地震矩規模之關係圖.....	62
圖 4-8	前兆時間與地震矩規模之關係圖.....	63
圖 4-9	加入本研究監測結果之標準化地下水水氬濃度下降值與地震規模之關係圖.....	65
圖 4-10	加入本研究監測結果之前兆時間與地震規模之關係圖.....	66
圖 A-1	監測期間疑似地下水水氬濃度下降現象(α 及 β).....	79
圖 A-2	α 及 β 期間地下水水氬濃度無明顯第二階段序列發生.....	80

表目錄

表 2-1 安通溫泉區四家溫泉旅館溫泉井水質分析(濃度 ppm).....	28
表 2-2 2003 成功地震、2006 台東地震、2008 年安通地震吉祥 D1 井地 下水水氬濃度之比較.....	39
表 4-1 地震前兆三階段序列統整資料.....	59
表 4-2 各地震之地下水水氬濃度及地震規模.....	64



第一章 前言

1-1 研究動機

地震主要發生在板塊交接處，而依照世界地震的分佈，可知全世界主要分三個地震帶，分別為環太平洋地震帶、歐亞地震帶和中洋脊地震帶，其中以環太平洋地震帶之地震發生最為頻繁。而台灣位於環太平洋地震帶上，為歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊聚合處(圖 1-1)，常有斷層引發地震，因此地震活動頻繁。圖 1-2 為台灣斷層分佈圖，顯示台灣斷層之分佈，斷層活動對台灣影響甚鉅，也因為此不穩定因素，台灣很有機會再次面臨災害性的地震，因此地震前兆預測對台灣更顯得重要。

世界各地近年來災害性地震頻傳，造成許多的人員傷亡，財物損失更不計其數。2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 的日本大地震、2010 年 1 月 12 日 M_w 7.0 的海地大地震、2010 年 2 月 27 日 M_w 8.8 的智利大地震、2008 年 5 月 12 日 M_w 7.9 的中國四川大地震及 1999 年 9 月 21 日 M_L 7.3 台灣集集大地震等等，對世界各地造成嚴重的傷害及威脅。

地震發生的主要原因是由於地層受大地應力作用而產生變形，當累積能量到地層無法承受時，地層產生裂隙，累積能量瞬間釋放進而造成地震。為了使人們在地震發生前就可得知地震將要來臨的訊息而有所準備，以降低危害，國內外近四十年來持續有許多和地震前兆相關的研究。

其中地震前兆研究方法可歸類為(顏宏元, 2005):(1) 統計分析方法: 針對過去某時期在某地區所發生之地震資料作統計分析, 以估計將來可能發生於該地區之地震;(2) 地球物理方法: 利用儀器監測地殼應力增加時, 所衍生的地球物理異常現象, 如地震波速、重力、磁力、地電監測;(3) 地球化學方法: 如土壤與地下水含氦量、地下水位、地下水溫、地下水混濁度;(4) 動物行為異常。然而地震前兆研究實際觀測時發現地層容易受其他雜訊干擾, 顯現出的徵兆變化相當微量, 各地地質結構與特性不同更增加了分析的複雜性, 使地震預測不易有所突破。因此, 目前尚未有方法可以準確的預測出地震發生的時間、地點及強度, 大多數是地震後尋找地震前兆及動因, 並整理與歸納研判。

成功大學郭明錦研究團隊在台灣東部花蓮安通溫泉區吉祥D1井成功利用地下水水氦監測到2003年 M_w 6.8 成功地震、2006年 M_w 6.1 台東地震及2008年 M_w 5.4 安通地震來臨前之地下水水氦濃度的異常下降變化, 如圖 1-3 (Kuo et al., 2010a)。

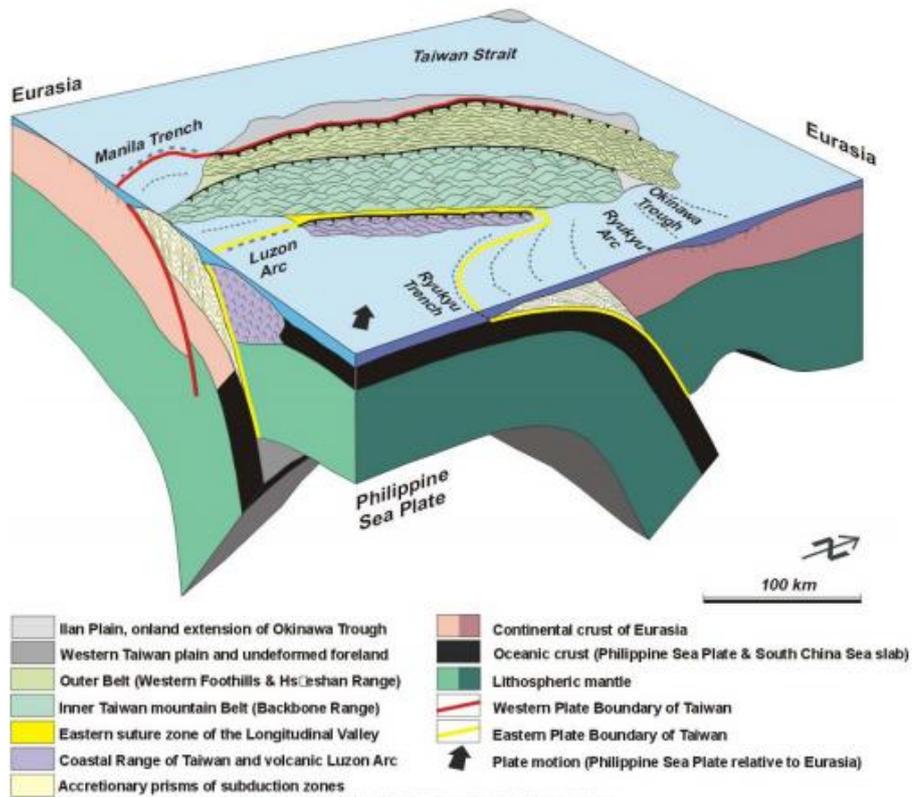


圖 1-1 台灣板塊構造立體示意圖(Angelier et al., 1986)

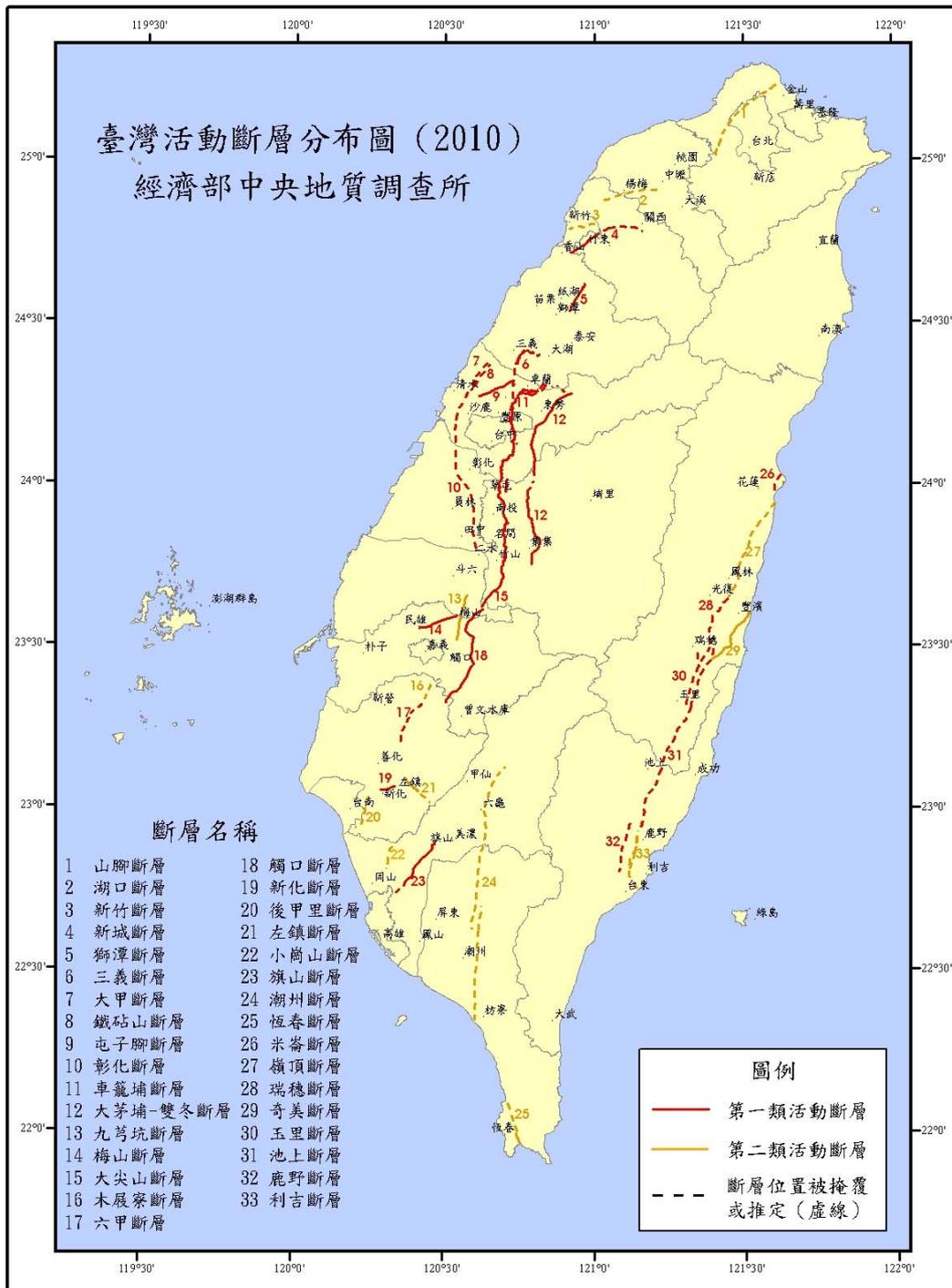


圖 1-2 台灣活動斷層分布圖(中央地質調查所，2010)

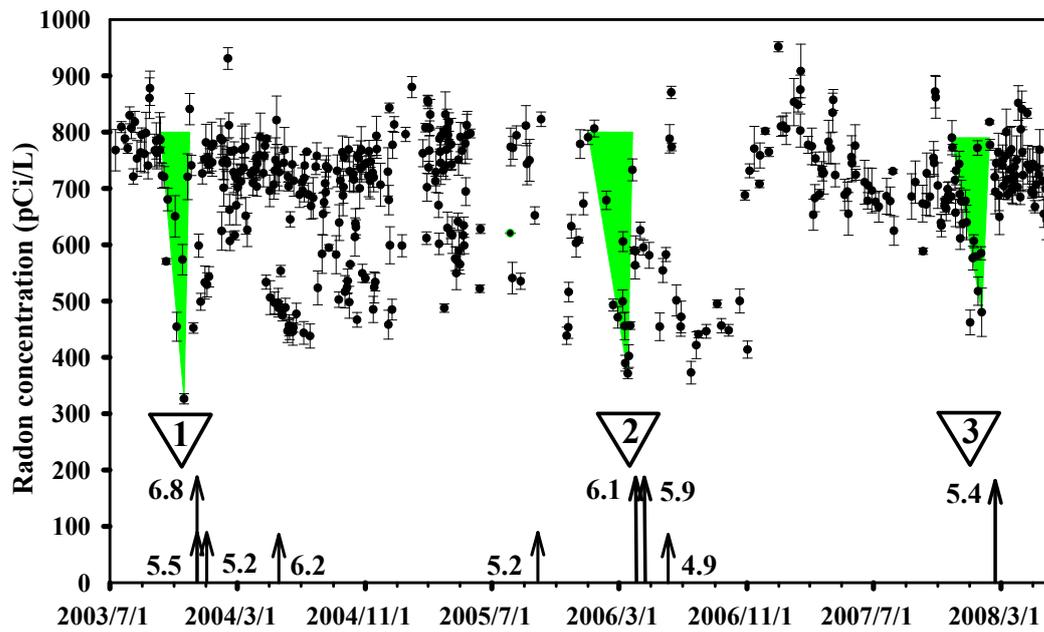


圖 1-3 吉祥 D1 井成功捕捉到三次地震前地下水水氡濃度異常下降變化

(Kuo et al., 2010a)

(綠色倒三角形：氡異常下降；長箭頭：主震；短箭頭：餘震；地震規模 M_w 表示在箭頭旁邊)

1-2 研究目的

台灣東部花蓮安通溫泉區之地質構造是由含有破碎裂隙的安山岩及砂岩組成，外層包圍著具延展性的泥岩，在此地質條件下，很有機會捕捉到地下水水氬濃度異常下降之地震前兆。本研究以成功大學郭明錦研究團隊在台灣東部花蓮安通溫泉區成功再現性的捕捉到地震前兆案例為基礎，將在相同地質構造上，選擇安通溫泉區內吉祥溫泉農莊(吉祥 D1 井)及安通溫泉飯店(安通 A 井)兩口井，觀測地下水水氬濃度在地震來臨前異常下降之變化。進一步探討地下水水氬濃度異常下降變化和安通溫泉附近地震前兆相互之關聯性。



1-3 研究流程

本研究屬於地震前兆地球化學流體研究，研究流程如下：

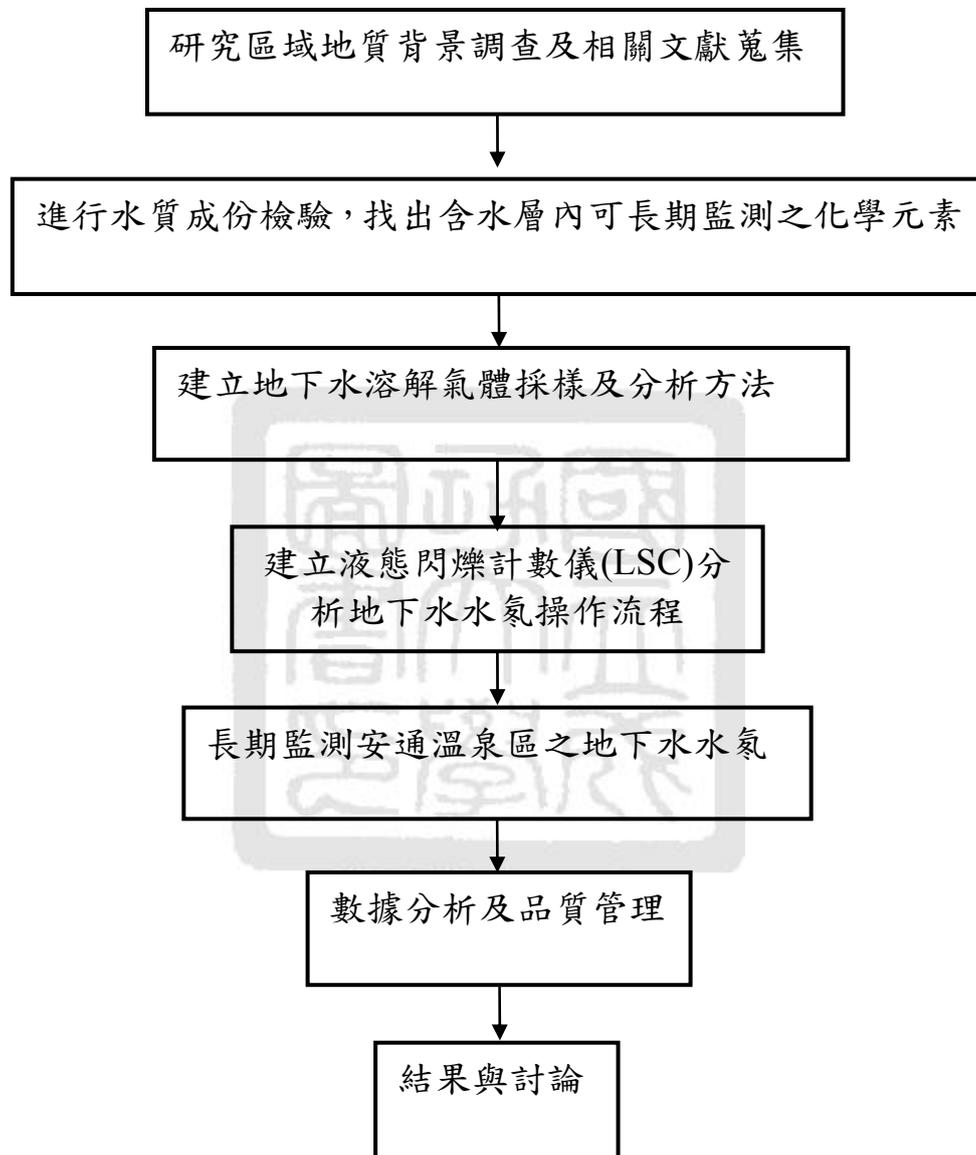


圖 1-4 研究流程圖

第二章 文獻回顧

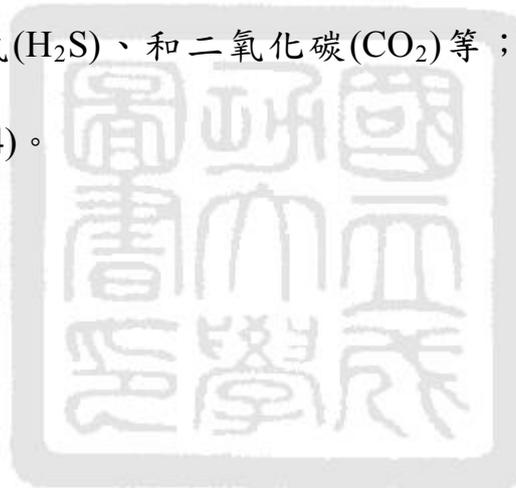
2-1 地球化學流體於地震前兆之應用

根據 Scholz et al. (1973) 體積膨脹模式，如圖 2-1，地震發生過程分為五階段：(1) 板塊擠壓，地殼累積彈性應變；(2) 地層發生膨脹及發展微裂隙；(3) 斷層帶上有流體侵入或變形；(4) 發生地震；(5) 餘震後地殼應力驟降。前三階段發生的同時，皆會伴隨著徵兆的發生，這些徵兆分為地球物理的前震和地形變及地球化學流體的變化。地震前兆為捕捉地震前三階段產生之微量變化。

以往國內對地質災害之監測或預測的研究大部分都利用地球物理的方法(如全台地震網的設立)，較少利用地球化學流體(水與氣)的方法(楊燦堯等人，2004)。在過去幾十年間地震前兆有重大的發現，地球物理和地球化學的變化有可能發生在中型或大型的地震之前。台灣島本身就具有從事此研究的有利條件，如：地震與活動斷層多，存在溫泉、自噴地下水井、受壓含水層、泥火山等。

在監測及預測地震活動方法中，地球化學變化常可提供有用的前兆訊息。這些流體成分異常(大部分與熱水作用相關)，一般歸之於斷層活動過程造成的地下流體(水與氣)循環系統的改變而導致這些流體的混合作用(楊燦堯等人，2002)。

因地質特性、距離震央遠近等許多複雜因素，異常變化的趨勢及發生的時間各有不同，濃度可能異常上升或下降；異常時間則可能持續數天到數月不等，甚至永久被改變(Nisith et al., 2005)。可能發生的異常情況包括物理性質異常：溫度(T)和地下水位等；流體成份異常：鈉離子(Na^+)、鉀離子(K^+)、鎂離子(Mg^{2+})、鈣離子(Ca^{2+})、二氧化矽(SiO_2)、氟離子(F^-)、氯(Cl^-)、碳酸氫離子(HCO_3^-)、碳酸離子(CO_3^{2-})及硫酸離子(SO_4^{2-})等；氣體成分異常有：氫(H_2)、氦(He)、氮(N_2)、氧(O_2)、氬(Ar)、汞(Hg)、氡(Rn)、甲烷(CH_4)、硫化氫(H_2S)、和二氧化碳(CO_2)等；流體同位素的異常 (Barsukov et al., 1984)。



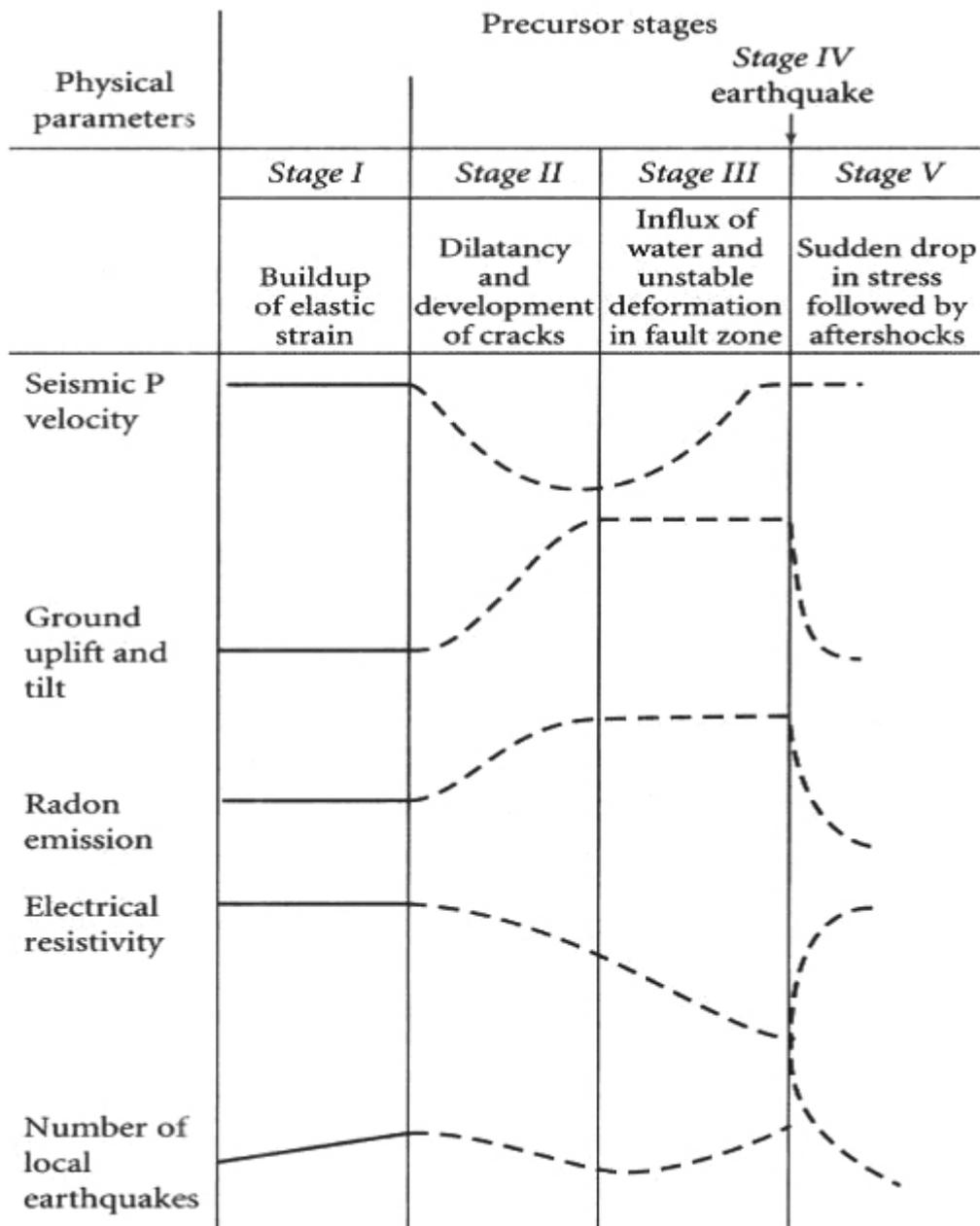


圖 2-1 體積膨脹模式(Scholz et al., 1973)

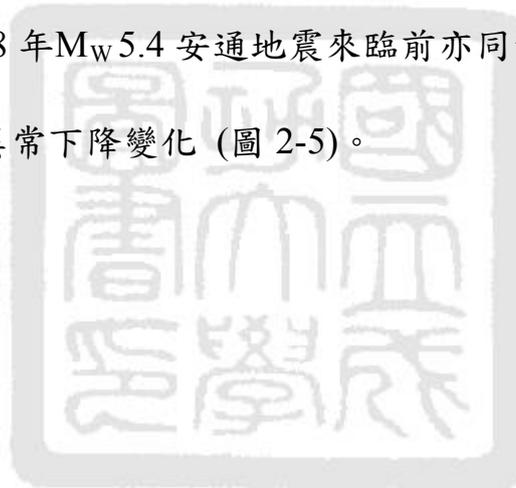
2-2 地球化學流體於地震前兆之監測實例

一般應用在地震前兆的地下水溶解氣體包括氡(Rn)、氦(He)、氮(N₂)、氬(Ar)、甲烷(CH₄)、二氧化碳(CO₂)、氫(H₂)及氦同位素(³He/⁴He)，地球化學地震前兆的研究始於 1950 年代，1953 年Hatuda於日本對活動斷裂帶進行觀測，之後陸續有學者對活動斷層進行氣體的研究，以下就一些研究案例作探討。

Sugisaki et al. (1996) 強調地下流體、氣體觀測多樣性的重要，於 1979 年開始監測Byakko溫泉中氣體成分。1984 年Nagano西北方發生了M 6.8 地震，距離震央 50 公里的Byakko測站，如圖 2-2，觀測到He/Ar、N₂/Ar、CH₄/Ar從同年三月開始增加，在七月突然下降，八月上旬達最低值 40 天後地震發生；在 1995 年 1 月 17 日M 7.2 阪神大地震發生前，Sugisaki 等人再次觀測到He/Ar、N₂/Ar、CH₄/Ar在地震前 110 天有異常變化，如圖 2-3，其震央距離監測站約 220 公里，Sugisaki等人推測造成 1995 年的濃度變化不如 1984 年明顯的原因為震央與測站之距離。

Nisith et al. (2005) 在Bakreswar監測站觀測到 2004 年 12 月 26 日印尼蘇門答臘島M_w 9.1 地震前，氬及He/CH₄出現異常上升的現象，兩者有一致的趨勢，故此異常變化非常有可能為地震的前兆現象，如圖 2-4 (a)、(b) 所示。

成功大學郭明錦研究團隊執行地下水水氣監測台灣東部地震前兆及斷層活動，成功在 2003 年 12 月 10 日 M_w 6.8 成功地震來臨前捕捉到震前地下水水氣濃度異常下降之地震前兆。同時又在 2006 年 4 月 1 日及 2008 年 2 月 17 日發生 M_w 6.1 台東及 M_w 5.4 安通地震前，皆有觀測到地下水水氣濃度異常下降之地震前兆，為國內外首度在同一監測點觀測到地震前兆水氣濃度異常之再現性(Kuo et al., 2006a; 2006b; 2009; 2010a; 2010b; 2010c; 2011; 2013)。成功大學郭明錦研究團隊於 2008 年起增加溫泉水中甲烷之監測，在 2008 年 M_w 5.4 安通地震來臨前亦同步監測到地下水水氣與甲烷氣體濃度的異常下降變化 (圖 2-5)。



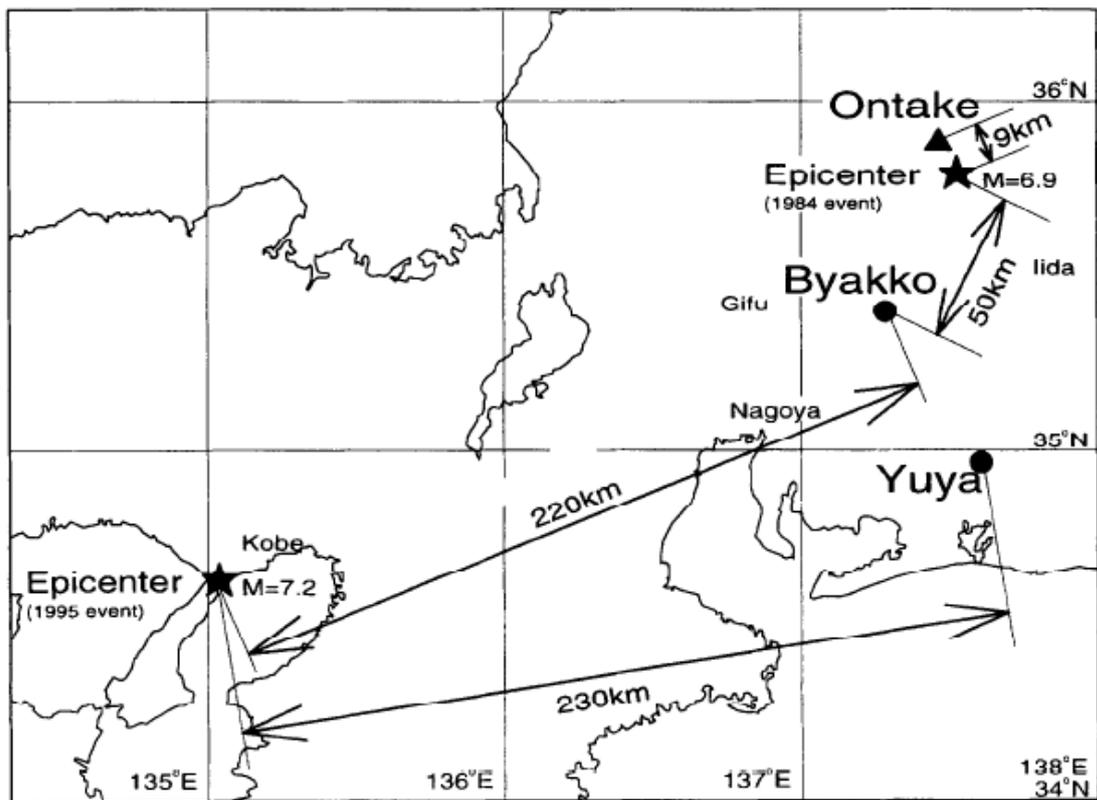


圖 2-2 監測站與 1984 年和 1995 年發生地震的相對位置(Sugisaki et al., 1996)

(★：兩次地震之震央，●、▲：監測站位置)

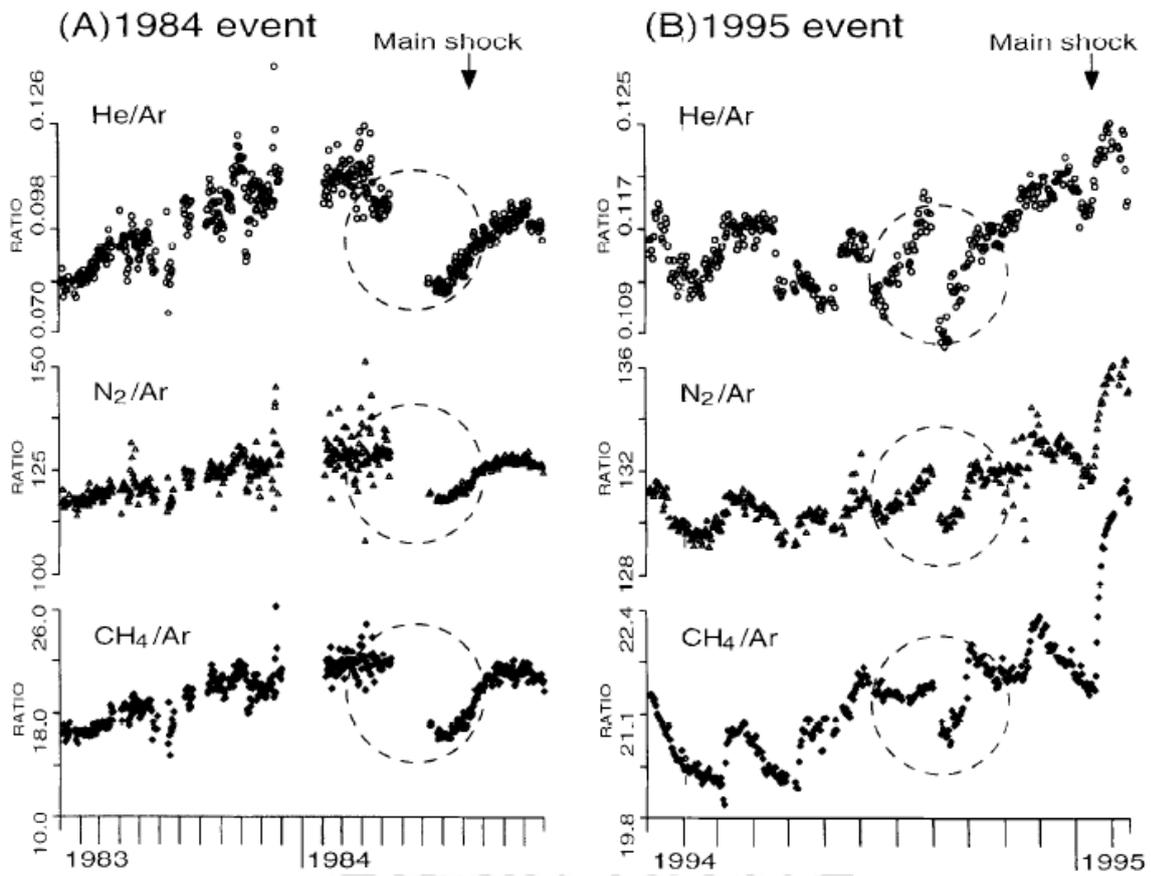
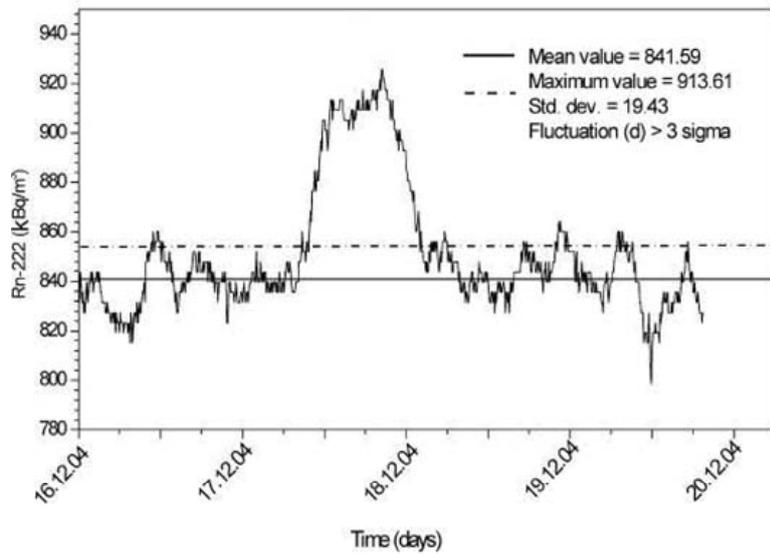


圖 2-3 1984 年及 1995 年地震前觀測到地下水溶解氣體濃度比異常下降

(a)1984 年 M 6.8 (b)1995 年 M 7.2 (Sugisaki et al., 1996)

(a)



(b)

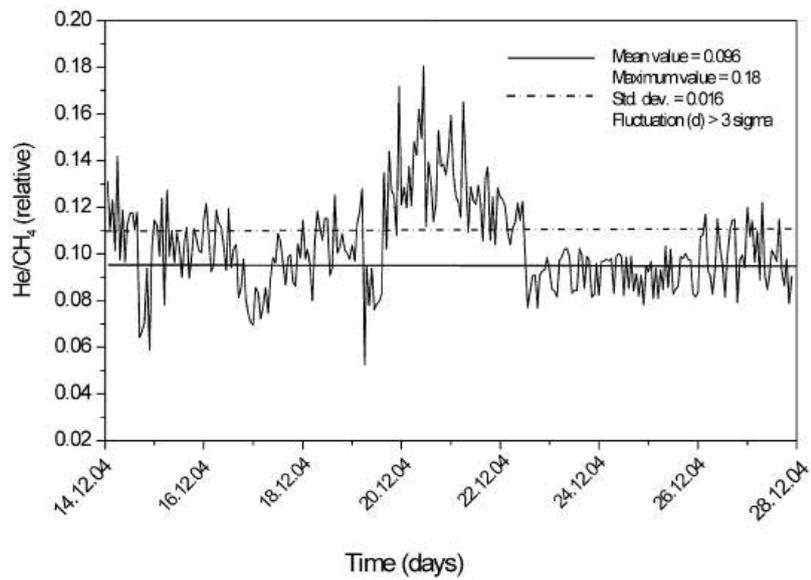


圖 2-4 2004 年 12 月 26 日印尼蘇門答臘島 M_w 9.1 地震前，(a) 水氡 (b)

He/CH₄ 皆出現異常上升的現象 (Nisith et al., 2005)

(地下水水氡在 12 月 17 日至 18 日期間上升至最大值 913.61 KBq/m；

He/CH₄在 12 月 20 日至 22 日期間上升至 0.18)

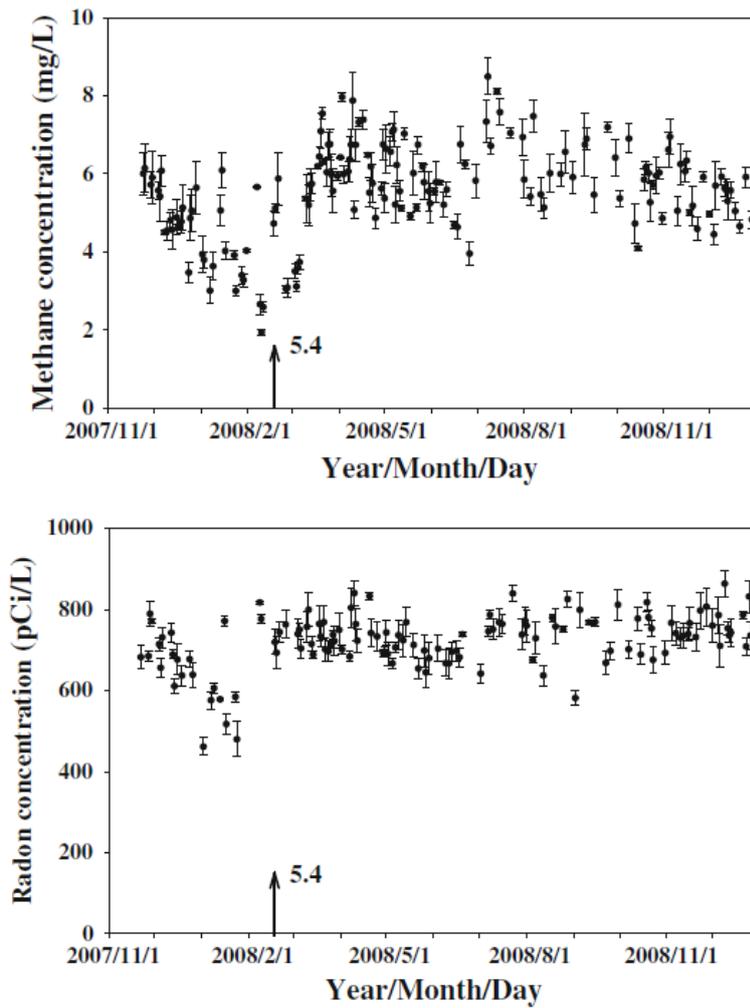


圖 2-5 2008 年 M_w 5.4 安通地震來臨前，地下水水氬及甲烷濃度異常下降之現象(Kuo et al., 2010b)

2-3 地下水水氡於地震前兆之應用

氡是無色、無味具放射性的惰性氣體，其主要來自自然界三大原始放射性系列，這三大系列分別是鈾系（U-238）、釷系（Th-232）及錒系（U-235），它們均會不斷地衰變而衍生多種放射性核種。其中鈾系為 Rn-222、釷系為 Rn-220、錒系為 Rn-219，不過釷系及錒系產生之氡，因其半衰期太短（分別為 55 秒及 4 秒），一般所謂的氡係專指 Rn-222 而言，本研究中地下水水氡濃度監測主要以 Rn-222 為主。

Rn-222 是由 U-238 將由四個阿伐(α)及兩個貝他(β)衰變後產生的氣態核種，其半衰期為 3.824 天，如圖 2-6。地下水水氡的產生是由鄰近含水層中含有鈾系礦物的岩塊衰變而成，因此，地下水中水氡濃度也和岩體表面積有重要關聯，其之異常現象是最常被用來作為地震前兆的地球化學方法之一。近年來已有相當多研究顯示出地下水水氡濃度異常變化可做為捕捉地震前兆示蹤劑，地下水水氡濃度異常變化監測可用來做為地震前兆預測方法(Hauksson, 1981; Igaraghi et al., 1995; Liu et al., 1985; Silver and Wakita, 1996; Teng et al., 1980; Wakita et al., 1991)。

氡的噴氣作用和發生地震的關係可追溯到 1956 年，最先發現地震可以經由地球化學前兆預報的是 1966 年蘇聯 M 5.3 的塔什干地震，之後中國和蘇聯廣泛的使用地球化學方法進行地震前兆監測，並成功地預報了

若干強烈的地震。1970 至 1980 年代，美國、前蘇聯、中國大陸及冰島等國家，也有國家型的計劃從事氦的地震監測計畫(楊燦堯等人，2002；郭明錦，2003)。

Hauksson (1981) 研究指出，在監測地下水水氦濃度異常變化的過程中，大部分研究觀測到的現象為地震來臨前地下水水氦含量異常上升，即地下水水氦濃度增高；相反地，很少有研究指出地下水水氦濃度異常變化是呈下降的趨勢。1991 年 10 月 20 日印度烏達嘎沙發生 M 7.0 的地震，在距離震央 293 公里的監測站觀測到土壤氦氣及地下水水氦在地震來臨前，濃度上升超過平均值兩個標準差的異常現象，如圖 2-7 (Vivek et al., 2006)。Igarashi et al. (1995) 提出地下水水氦濃度的上升的原因是由於地震發生前區域應力增加，地層中岩體產生微裂隙導致岩體的表面積增加，溶解到地下水的氦氣增加。

台灣最早利用地下水水氦濃度變化來監測地震前兆開始於 1980 年，由中央研究院於 1980 至 1984 年期間每週定期採取水樣，觀察地下水水氦濃度變化來監測地震前兆，進而進行相關之研究(Liu et al., 1984, 1985)。

Brace et al. (1966) 及 Scholz et al. (1973) 指出在地震來臨前，岩體膨脹產生破裂的速度快於孔隙水補注到孔隙體積的速度。Kuo et al. (2006b) 認為在地震前，岩體處於擴張狀態，因地殼應力增加導致地下岩體產生新微裂隙，且因安通溫泉區之地質構造是由含破碎安山岩及砂岩所組

成，同時外層包圍易延展之泥岩，岩體破裂的速度比地下水補注的速度還快，使地層氣體飽和度增加，原本溶於地下水中的氬會逸散至氣相，導致地下水水氬濃度的下降。

圖 2-8 為 1978 年 1 月 14 日在日本伊豆(Izu-Oshima-kinkai)地震規模 7.0 地震來臨前在距離震央 25 公里的監測站(SKE-1)所觀測到地下水水氬濃度異常下降現象(Tsunomori and Kuo, 2010)，探討後發現日本伊豆與台灣安通溫泉區地質背景相似，兩者之地質構造皆為脆性火山岩，屬於裂隙含水層，故地震前地下水水氬濃度異常下降之機制相同。



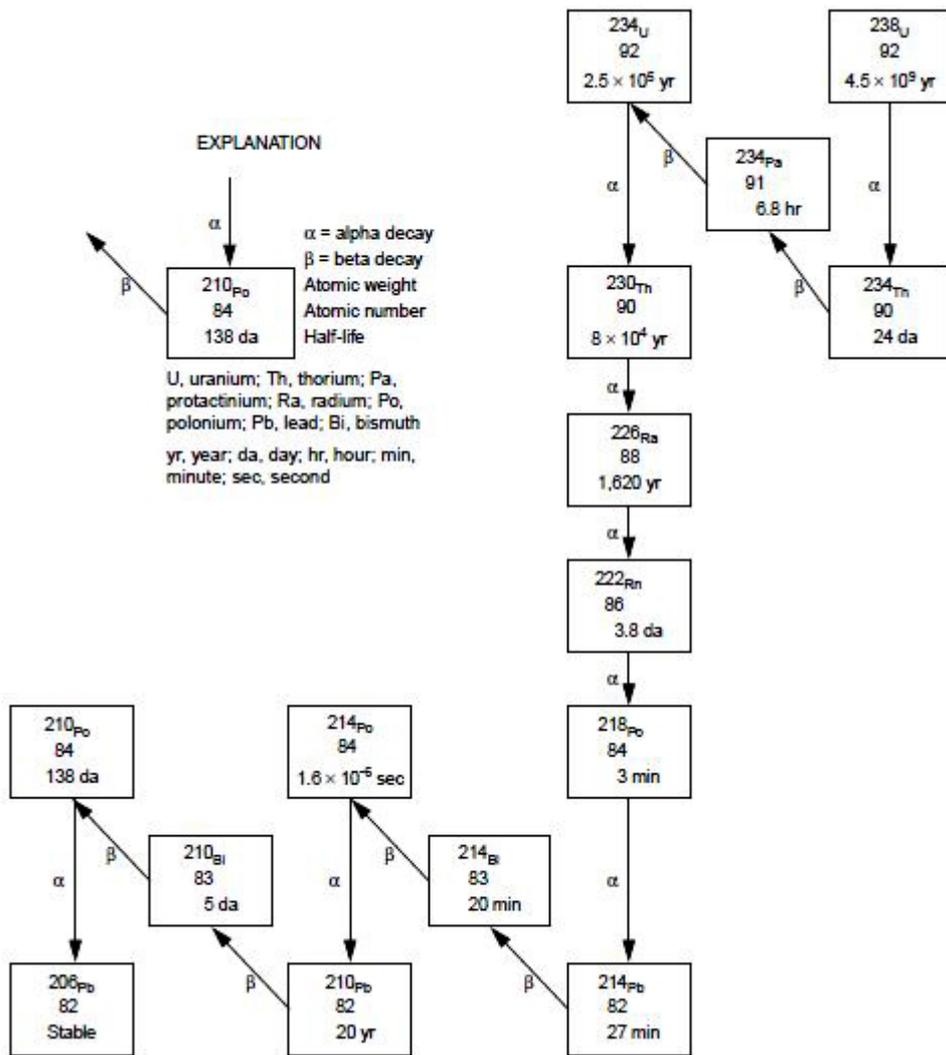


圖 2-6 Rn-222 自 U-238 的衰變鏈(Senior, 1998)

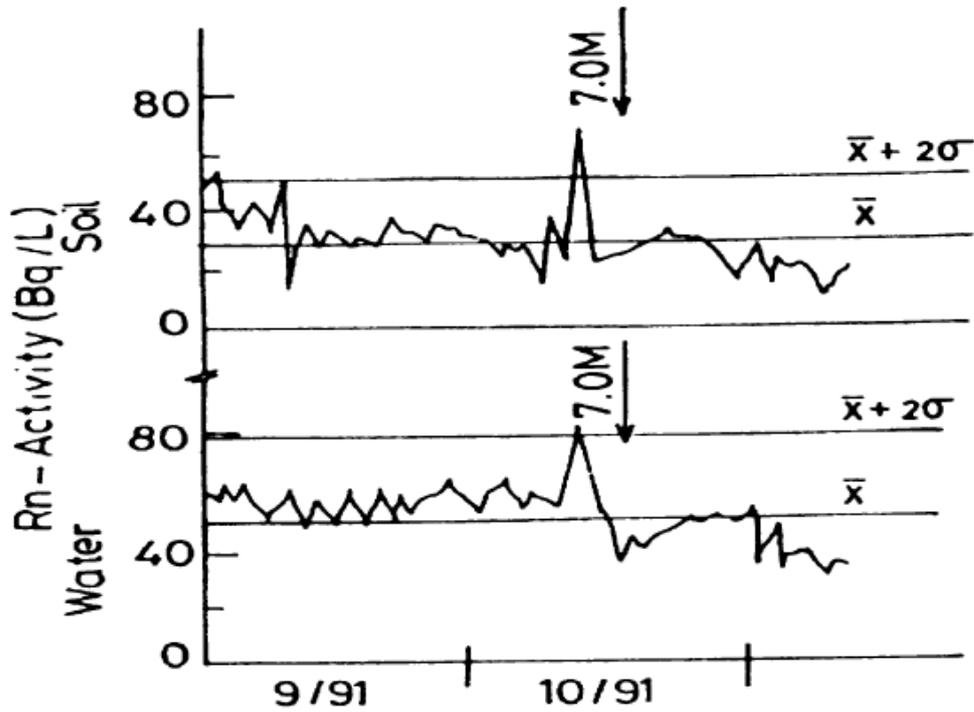


圖 2-7 1991 年 10 月 20 日印度烏達嘎沙 M 7.0 地震前，土壤氣氡及地下水水氡濃度異常上升(Vivek et al., 2006)

(1991 年 10 月 15 日土壤氣氡及地下水水氡異常上升至最高值，超過平均值兩個標準差。土壤氣氡平均值：27.55 Bq/L，標準差：11.49 Bq/L；地下水水氡平均值：48.86 Bq/L，標準差：14.89 Bq/L)

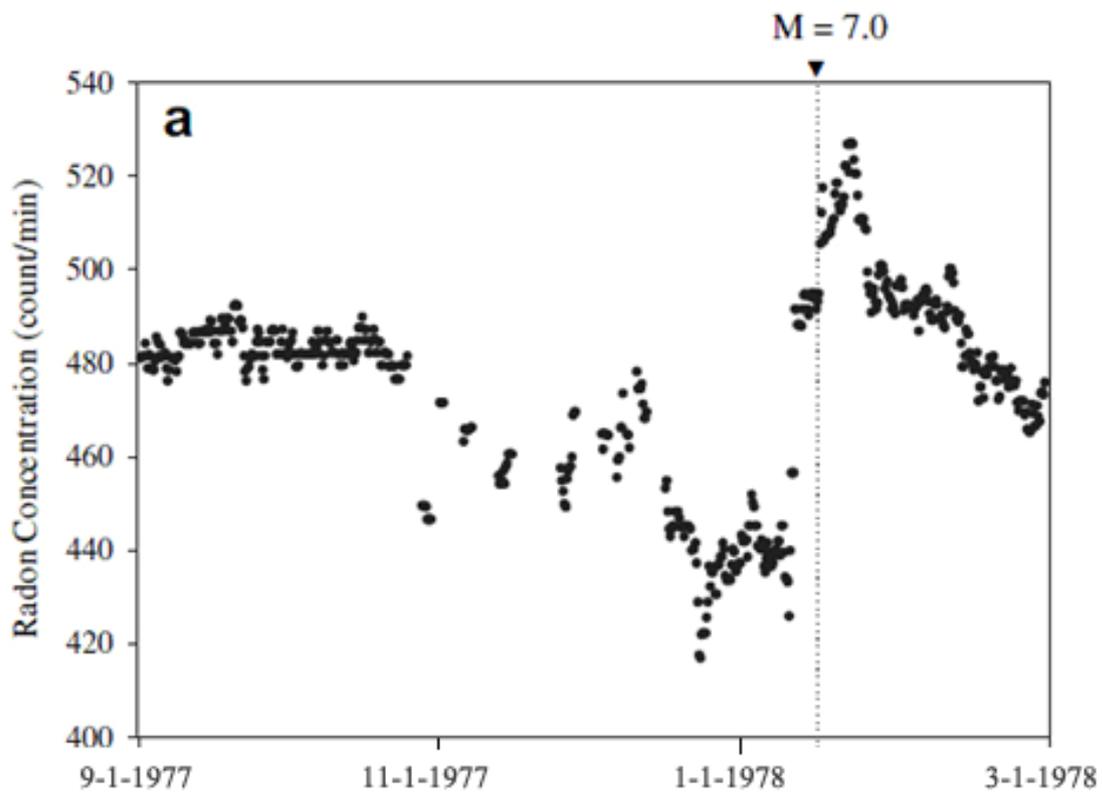


圖 2-8 1978 年 1 月 14 日日本伊豆 M 7.0 地震來臨前，地下水水氡濃度明顯異常下降的現象(Tsunomori and Kuo, 2010)

2-4 研究區域地質背景

2-4-1 花東縱谷與池上斷層

本研究選擇台灣東部花蓮縣玉里鎮安通溫泉區作為研究區域，位於花東縱谷池上斷層東南方約三公里處。池上斷層屬於花東縱谷斷層帶之一。

花東縱谷斷層位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊聚合邊界處，縱谷斷層是主要的邊界斷層。池上斷層為斷層中最活躍的一部分，位於花東縱谷斷層帶之南段，為海岸山脈(菲律賓海板塊上呂宋孤島系統)向西逆衝至縱谷及中央山脈(歐亞大陸地殼及大陸邊緣沉積物)的板塊縫合帶上的主要斷層之一，為東北東走向之左移斷層(游明聖，1997)，上盤為海岸山脈之利吉層，下盤為縱谷之第四紀及現代沖積層，如圖 2-9 所示；斷層面於地表約傾斜 60 度，全長約 47 公里(林啟文，2000)。

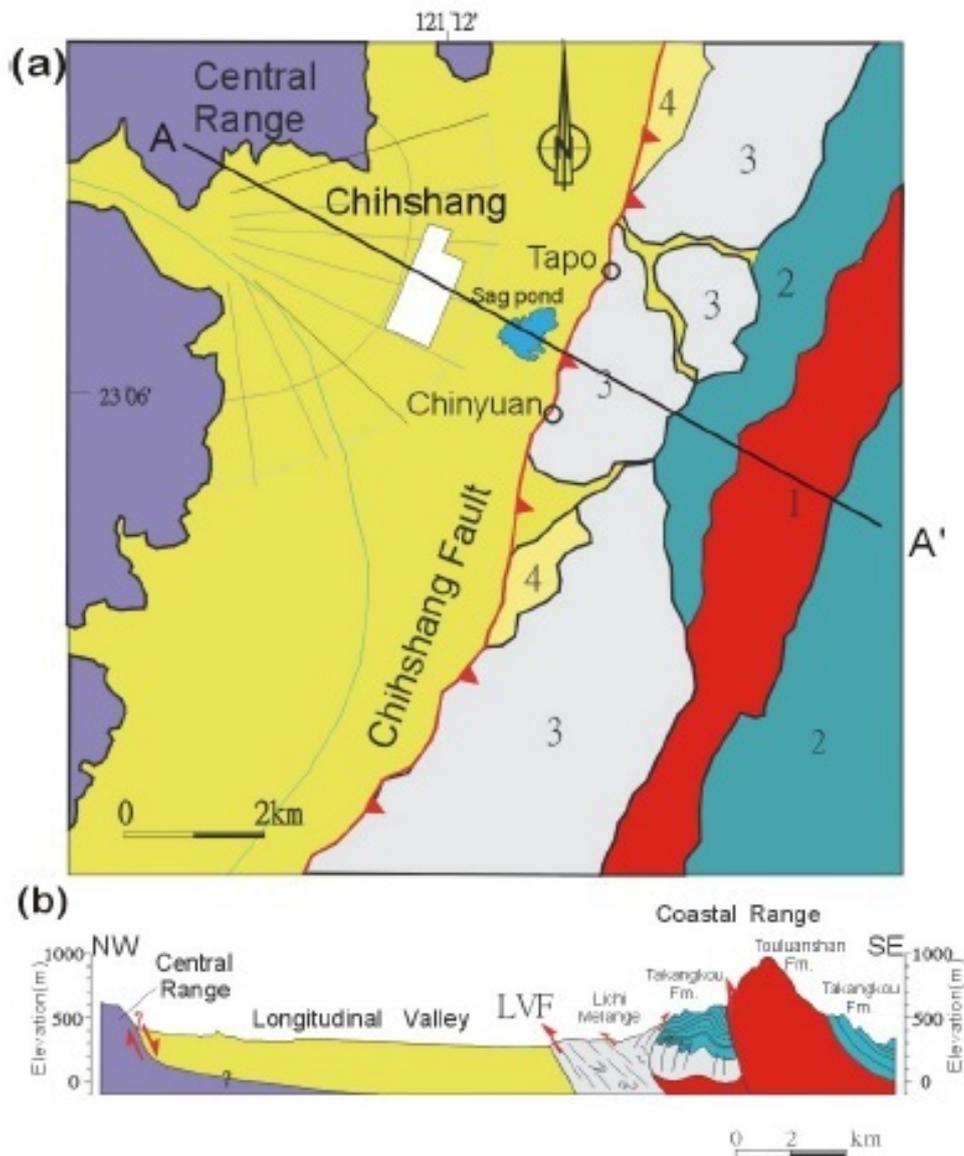


圖 2-9 (a)池上區域地質圖 (b)池上斷層剖面 AA'示意圖(Lee et al., 2005)

(紅色鋸齒狀為池上斷層，位於海岸山脈西緣。池上斷層附近的地質單位：

1. 都鑾山層， 2. 大港口層， 3. 利吉混合層， 4. 第四紀階地。池上斷層為高角度的逆衝斷層，上盤為利吉層，下盤為第四季沖積層)

2-4-2 安通溫泉區地質背景

安通溫泉位於花蓮縣玉里鎮，此處目前有四家溫泉業者，擁有溫泉井數共九口，郭明錦團隊於 2003 年開始在吉祥溫泉農莊之吉祥A井(吉祥D1 井)作為安通溫泉吉祥水氣濃度觀測井，其介於玉里鎮安通部落與海岸山脈西側安通溪畔間。圖 2-10 為安通溫泉區四家溫泉旅館所擁有溫泉井之相對位置，吉祥B井為郭明錦團隊在此地區設的地下水位觀測井。此溫泉區溫泉分布在安通溪中游，溫泉水大致沿著永豐斷層上升至地表淺處，再經凝灰岩岩塊的裂隙至地表(Chen and Wang, 1996)。其湧出處主要在構造線附近，深部熱水沿斷層破碎帶上升至地表，因此本區溫泉之形成受斷層構造線所控制。泉水湧出處有白色碳酸鈣沉澱物。泉質無色透明，稍帶硫磺味。泉溫 40 ~ 63 °C，pH 為 8 ~ 9，表 2-1 為安通溫泉地區四家溫泉旅館所擁有之溫泉井水質分析結果，為本研究室自行送樣分析。

圖 2-11 為吉祥 D1 井附近之地質構造圖及剖面圖。以監測站為中心，附近地層由西邊花東縱谷斷層至東邊到海岸山脈太平洋邊緣依次為：全新世沖積層(Holocene deposits)、沖積層上的花東縱谷斷層(池上斷層，Chihshang Fault)、利吉層(Lichi mélange)、永豐斷層(Yongfeng Fault)、都鑾山層(Thluanshan Formation)、蕃薯寮層(Fanshuliao Formation)、八里灣層(Paliwan Formation)、安通向斜、八里灣層、花東山斷層、都鑾山背斜、八里灣層、沖積層到達海岸山脈和太平洋交界。

都鑾山層為以安山岩質礫岩為主的岩層，大部分由火山集結塊、凝灰岩及凝灰質沉積物組成。蕃薯寮層為以砂岩及頁岩互層，並夾雜安山岩塊為主。八里灣層為砂岩及泥岩互層，並夾雜安山岩塊。利吉層特徵是由泥質填充物夾著許多外來岩塊組成(徐鐵良，1976)，可在露頭明顯見到透入性的葉理層面。

1992年經濟部中央地質調查所出版台灣地質圖說明書，圖幅第48號闡述，現勘結果顯示安通溫泉區，地質構造為安山岩及砂岩所組成之外來岩塊。在岩塊裡常見到發育良好的微小錯動及節理，顯示此地層易碎原因是經強烈變形活動，此破裂帶可能成因是反映著縱谷斷層及永豐斷層的變形及分裂活動，以地質構造圖為基礎推測，此區岩塊，在易延展變形的泥岩層中，展現出的易碎變形現象及發育。吉祥D1井靠近永豐斷層，約只距數十米，生產之地熱水是來自斷層帶然後沿著微裂隙擴散進入岩塊(王源等人，1992)。



圖 2-10 安通溫泉地區四家溫泉旅館所擁有之溫泉井相對位置圖

(林意琪，2010)

表 2-1 安通溫泉區四家溫泉旅館溫泉井水質分析(濃度 ppm) (范愷軍，2009)

井	採樣日期	井深 m	馬達深 m	水溫 °C	Rn-222 (pCi/L)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
安通溫泉飯店 (安通 A 井)	2009/3/25	500	自噴井	63	101	3.35	493	65.7	<0.2	28.6	ND	699	360
安 1	2008/1/5	100	自噴井	63	157	4.84	559	93.4	0.041	6.1	70.8	904	483
安 2	2008/1/5	40	自噴井	63	52	4.48	561	77.2	0.028	7.3	62.4	910	493
安 3	2008/1/5	275	150	55	634	2.72	364	31.8	0.84	305	ND	389	362
安 4	2008/1/5	245	150	42	320	1.69	312	1.78	0.02	945	144	118	360
吉祥 A(吉祥 D1 井)	2008/1/5	187	144	61	899	3.88	346	26.6	0.363	259	ND	343	356
吉祥 B	2008/1/5	234	156	55	845	3.24	401	31.2	0.198	178	14.4	530	323
紐澳華	2008/1/5	310	180	40	57	4.66	554	63.3	0.112	122	16.8	870	392
玉溫泉	2008/1/5	300	120-150	57	295	2.99	487	28.8	1.67	805	26.4	491	515
分析方法						IC 法	IC 法	IC 法	IC 法	NIEA W449.00B	NIEA W449.00B	NIEA W415.52B	NIEA W415.52B

NA：未檢測

ND：低於方法偵測極

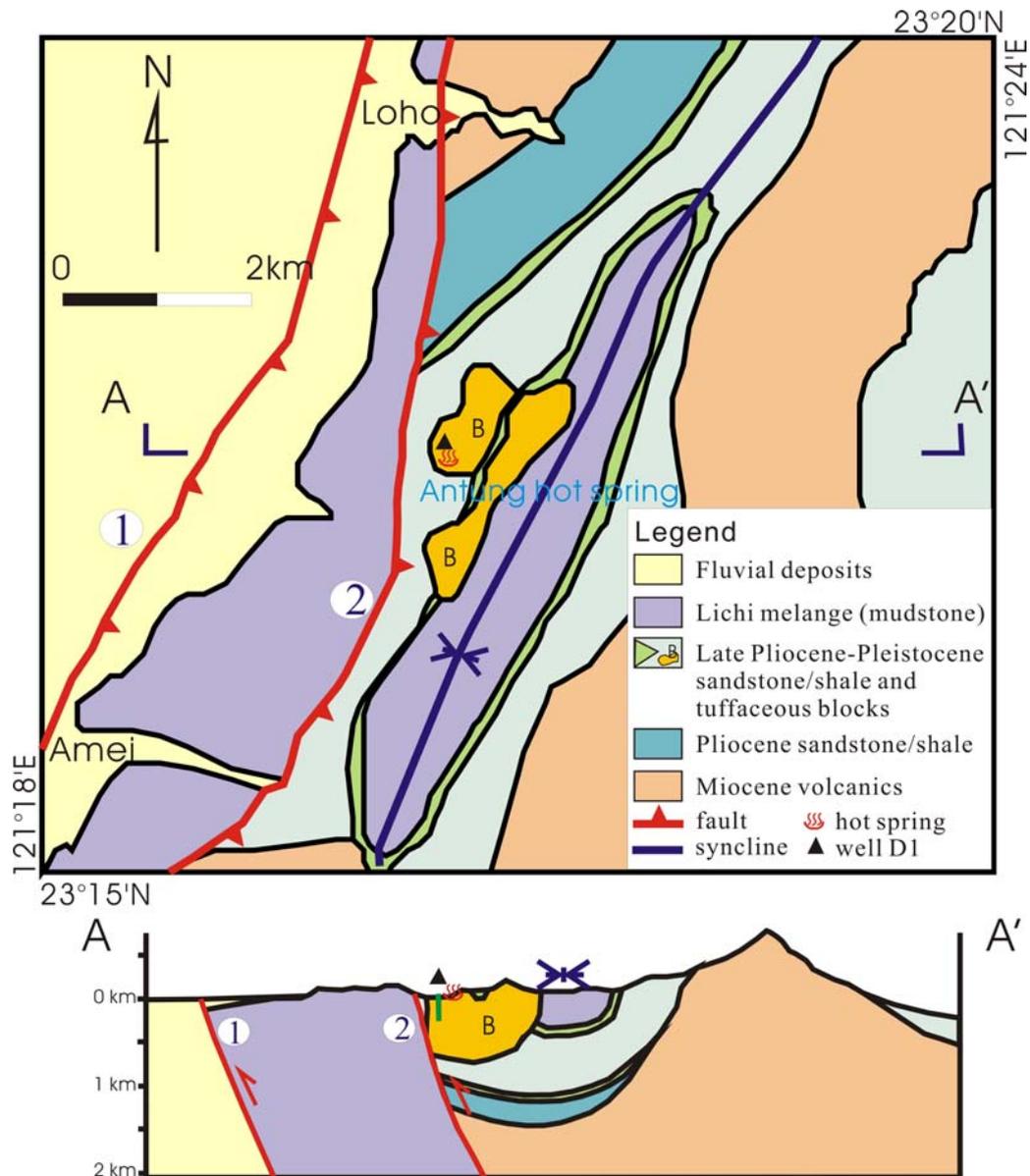


圖 2-11 安通溫泉地下水水氣濃度觀測井位於海岸山脈附近之地質構造圖及剖面圖(Kuo et al., 2012)

(B : Tuffaceous andesitic blocks 凝灰質安山岩層，D1 : 安通地下水水氣濃度觀測井，① : 池上斷層或縱谷斷層，② : 永豐斷層)

2-5 研究區域地震背景

池上斷層曾在 1951 年期間發生數個地震規模 6.0 以上的強烈地震，為縱谷斷層中最活躍的一部分。1951 年 11 月 25 日發生分別為 M 6.2 的池上地震，震央位於池上東方(23.10 N, 121.25 E)，及 M 7.0 的玉里地震，震央位於玉里附近(23.25 N, 121.25 E)，如圖 2-12 所示，因為地震發生時間為清晨時段，所以造成巨大傷害(Kuo et al., 2006)。

繼 1951 年後，2003 年 12 月 10 日、2006 年 4 月 1 日及 2008 年 2 月 17 日在池上斷層上又分別發生 M_w 6.8 的成功地震、 M_w 6.1 的台東地震及 M_w 5.4 的安通地震，其中以 2003 年 M_w 6.8 的成功地震規模最大，造成的災害最為嚴重，圖 2-13 為各地震的震央分布圖(Kuo et al., 2012)。

圖 2-14 為 1986 年至 2004 年池上斷層滑移量記錄(Lee et al., 2005)，1986 年至 1991 年之平均潛變速率為 27 mm/year，而 1992 年至 1997 年之平均潛變速率降為 22 mm/year。在 2003 年成功地震發生前 5.5 年，潛變量更顯著的減慢，2000 年至 2003 年期間潛變速度甚至減慢到 14 mm/year，此變化顯示沿著池上斷層附近區域的地震危險性有增加的趨勢。

研究指出 2003 年成功地震很有可能就是反映出池上斷層在過去十年來能量釋放減少，使斷層快速累積能量及應變，當應變累積超過斷層負荷，就產生斷層滑動、造成地震。將成功地震發生的同震位移及震後

位移累積起來，如圖 2-14 之震後曲線，逐漸回歸至 27 mm/year 的位移速率曲線，故當潛移斷層位移速率變慢時，即是該斷層不正常累積能量的開始，而潛在性地震的大小規模應該與累積的應變大小有關(李建成等人，2004)。



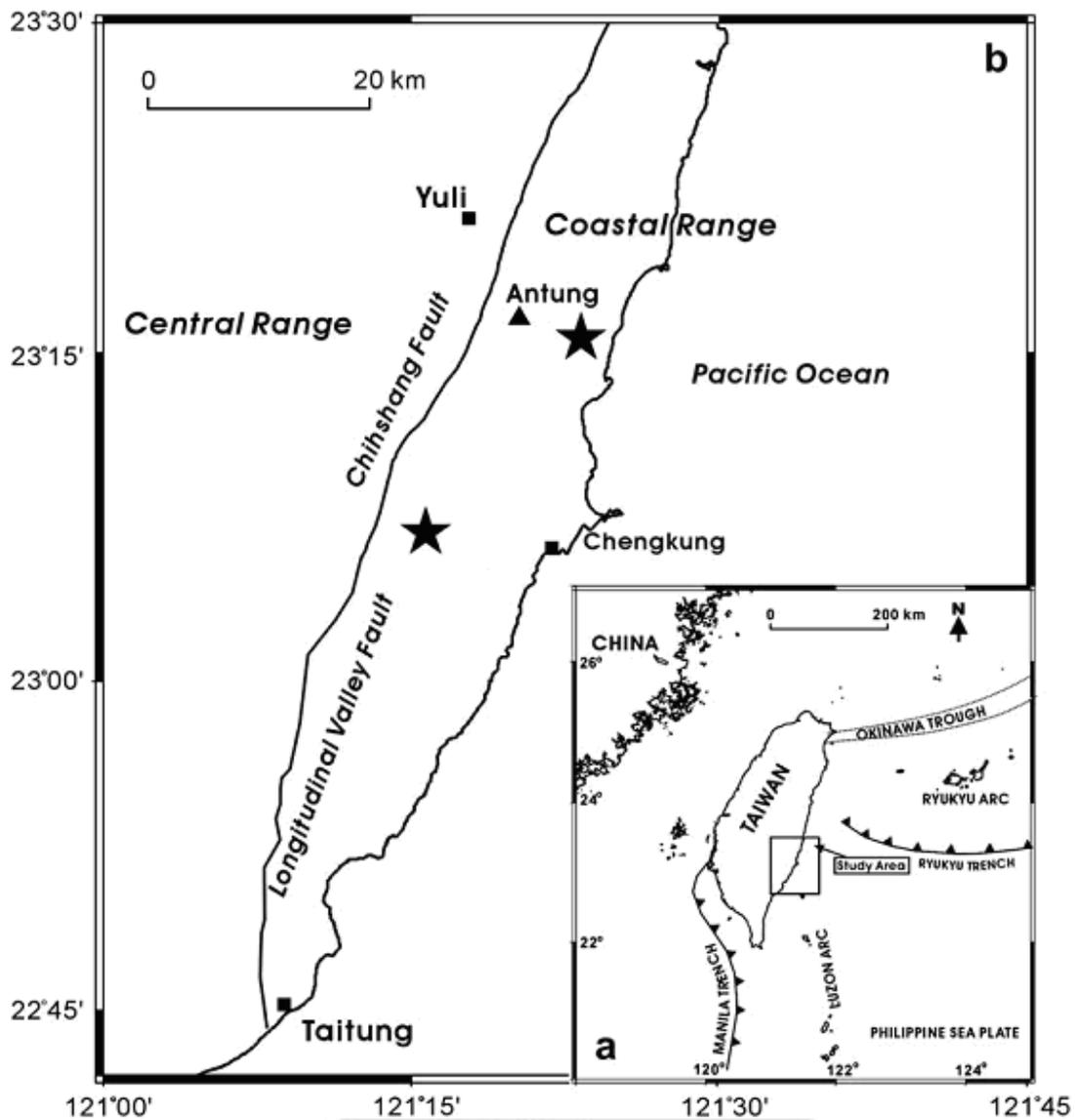


圖 2-12 1951 年地震震央分布圖 (a)台灣大地構造框架圖 (b)花東縱谷斷層區域圖 (Kuo et al., 2006)

(實心星號：1951 年主震位置，實心三角形：安通地下水水氬濃度監測站)

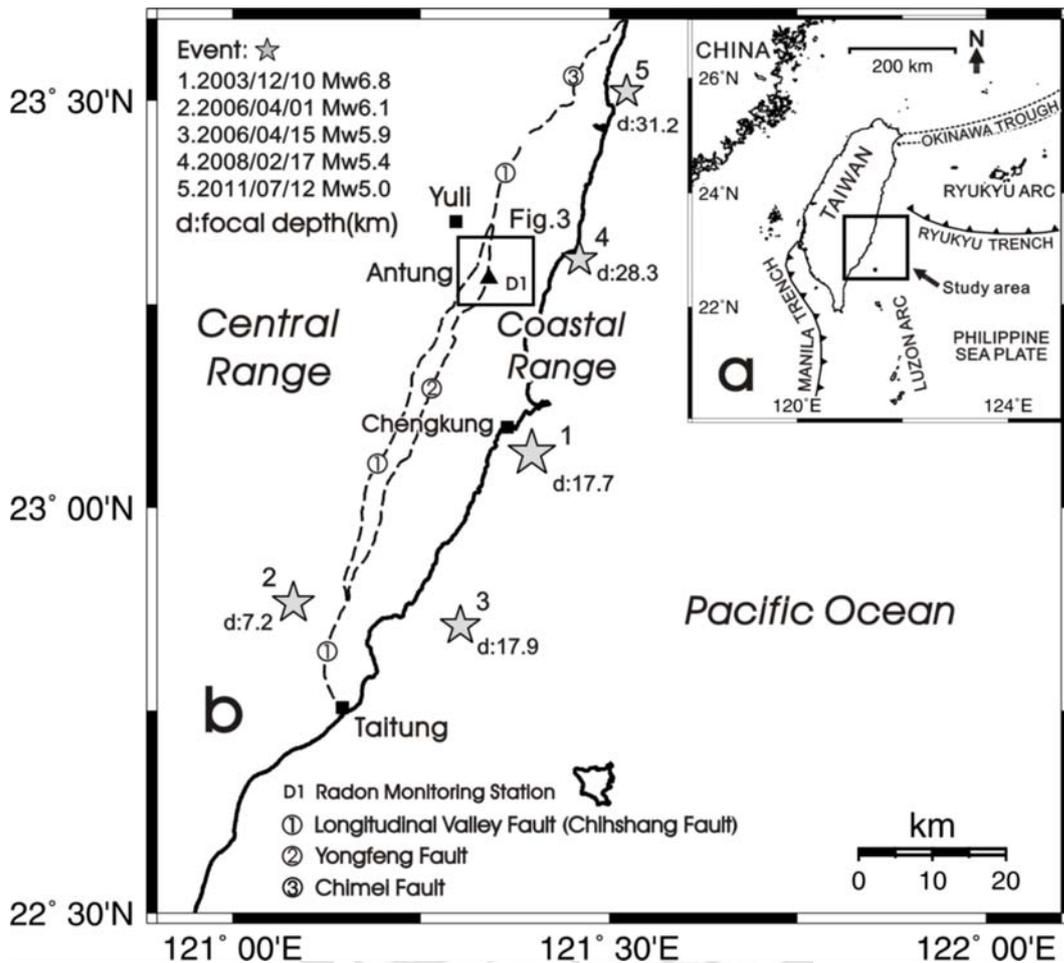


圖 2-13 安通溫泉吉祥水氡濃度監測站與 2003 年 M_w 6.8、2006 年 M_w 6.1 及 2008 年 M_w 5.4 地震震央之相對位置分佈圖(Kuo et al., 2012)

(實心星號：主震位置，實心三角形：安通地下水水氡濃度監測站，①：池上斷層或縱谷斷層，②：永豐斷層)

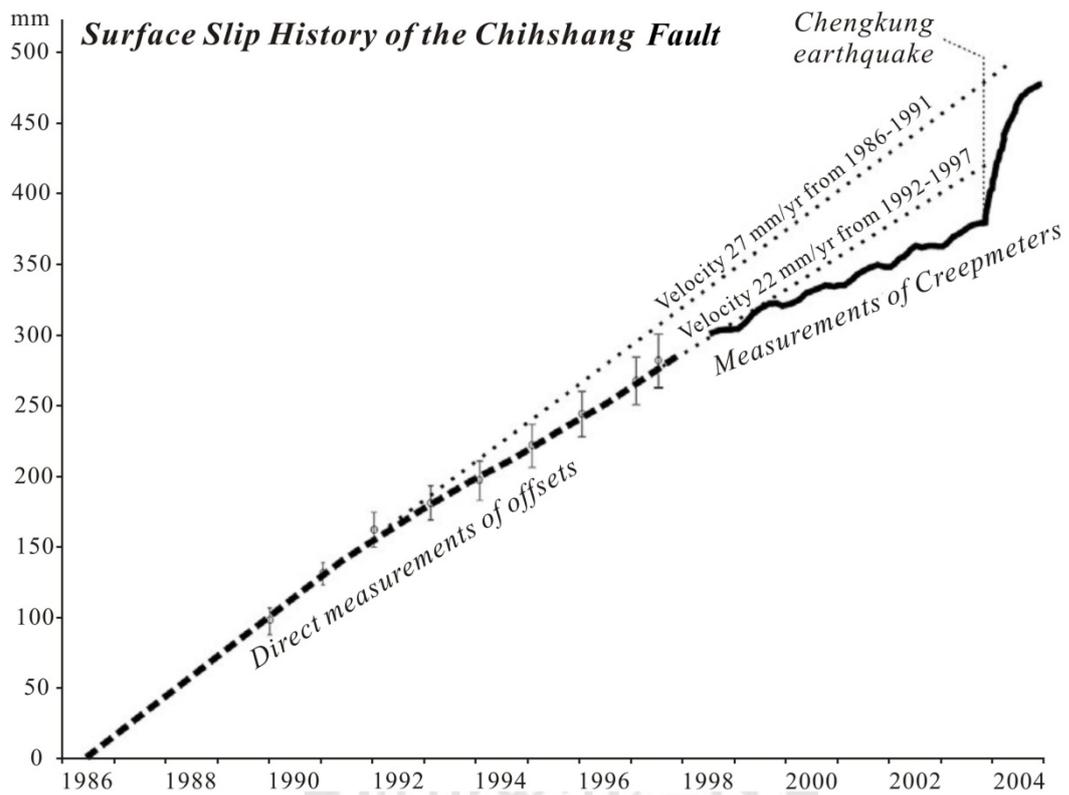


圖 2-14 池上斷層地表斷層從 1986 年至 2004 年位移量測之位移速率演化曲線(Lee et al., 2005)

2-6 安通溫泉地下水水氫濃度異常變化之地震前兆

成功大學郭明錦研究團隊在安通吉祥D1 井監測到 2003 年 12 月 10 日 M_w 6.8 的成功地震來臨前地下水水氫異常下降的地震前兆，並提出氫濃度異常下降之機制。其研究指出在地震前，岩體處於擴張狀態，因地殼應力增加導致地下岩體產生新微裂隙，因安通溫泉區之地質構造是由含破碎裂隙安山岩及砂岩所組成，同時外層包圍易延展之泥岩，岩體破裂的速度比地下水補注的速度還快，使地層氣體飽和度增加，原本溶於地下水中的氫會逸散至氣相，導致地下水水氫濃度的下降(Kuo et al., 2006a; 2006b)。

圖 2-15 為吉祥D1 井在 M_w 6.8 的成功地震來臨前觀測到地下水水氫異常下降。在第一階段時，地殼產生彈性應變，地下水水氫濃度之背景平均值為 780 pCi/L，呈現穩定狀態。在第二階段時，應力增加造成岩體中微裂隙發展，使氣體飽和度增加，地下水水氫因此逸散至氣相，導致地下水水氫濃度降低，於地震前 65 天地下水水氫濃度開始下降，下降速率每天約 10 pCi/L，該下降趨勢維持 45 天。在第三階段時，地下水逐漸補注，使氣體飽和度減少，氣相的氫因此進入水相，導致地下水水氫濃度回升，在地震前 20 天，地下水水氫濃度急遽開始回升至背景值，上升速率每天約 40 pCi/L，在地震前 6 天地下水水氫濃度回復至平均值。

繼 2003 年 12 月 10 日 M_w 6.8 的成功地震後，成功大學郭明錦研究

團隊再次於 2006 年 4 月 1 日 M_w 6.1 的台東地震及 2008 年 2 月 17 日 M_w 5.4 的安通地震來臨前，在安通溫泉吉祥D1 井觀察到震前地下水水氬濃度異常下降之現象。三個地震的背景值分別由 791 ± 46 pCi/L、 762 ± 57 pCi/L和 735 ± 48 pCi/L降至最低值 326 ± 9 pCi/L、 371 ± 9 pCi/L和 480 ± 43 pCi/L (圖 2-16 及表 2-2)。



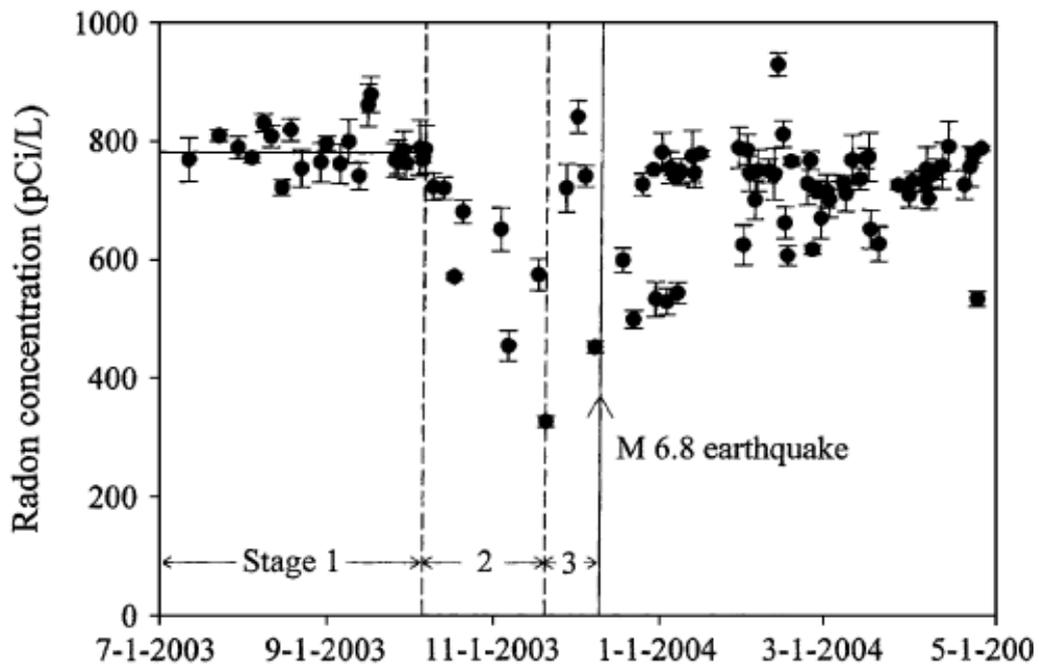


圖 2-15 吉祥D1 井在 M_w 6.8 的成功地震來臨前觀測到地下水水氣異常下降(Kuo et al., 2006b)

(Stage1 為累積彈性應變，Stage2 為發展微裂隙，Stage3 為地下水補注)

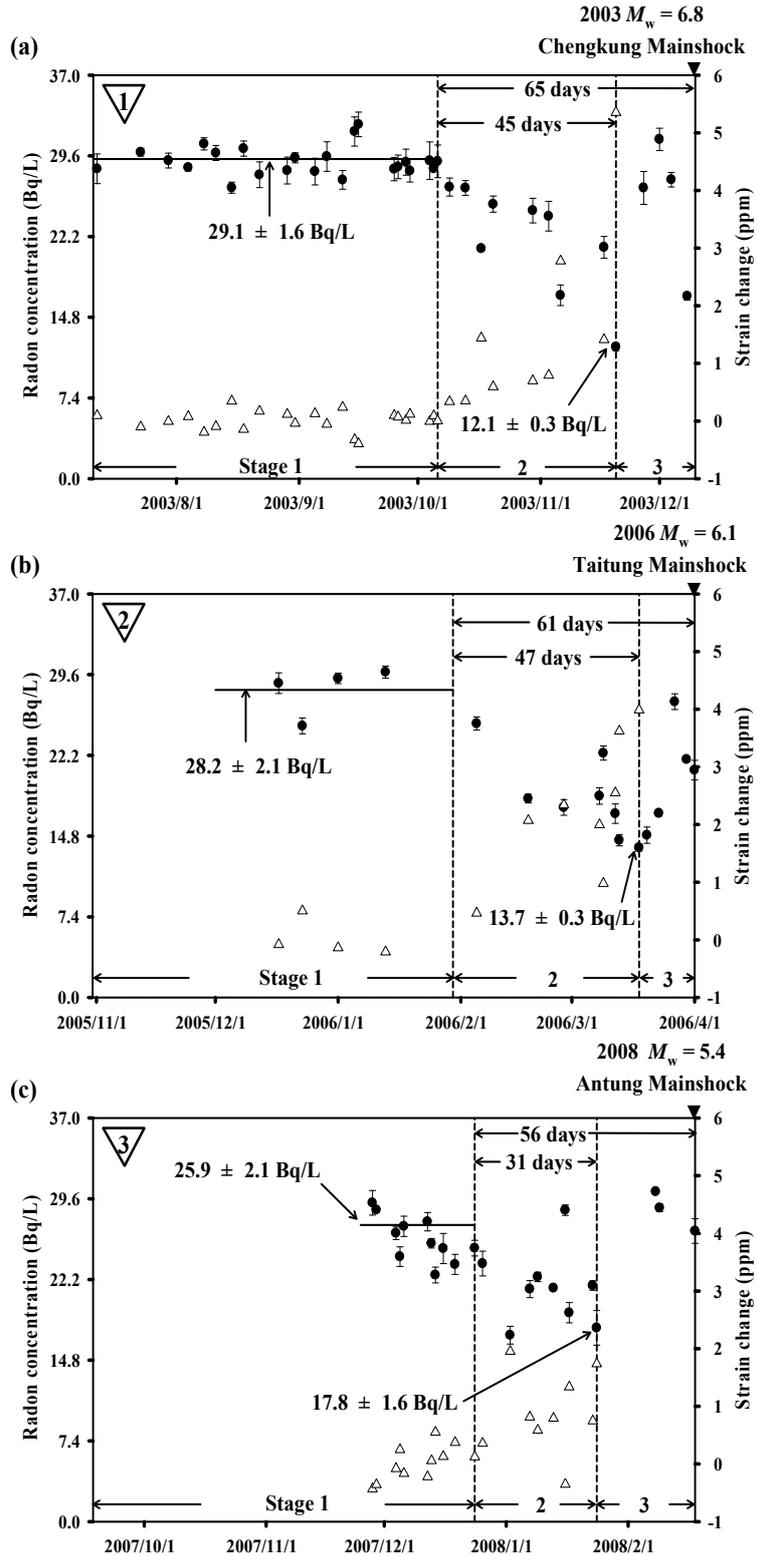


圖 2-16 吉祥 D1 井地下水水氡異常下降示意圖 (a)2003 年成功地震 (b)2006 年台東地震 (c)2008 年安通地震 (Kuo et al., 2013)

表 2-2 2003 成功地震、2006 台東地震、2008 年安通地震吉祥 D1 井地下水水氬濃度之比較

	時間	規模 (M _w)	地下水水氬背景值 (pCi/L)	地下水水氬最低值 (pCi/L)	觀測井與震央距離 (Km)
成功地震	2003/12/10	6.8	791 ± 46	326 ± 9	20
台東地震	2006/4/1	6.1	762 ± 57	371 ± 9	55
安通地震	2008/2/17	5.4	735 ± 48	480 ± 43	11

第三章 研究方法

本研究主要利用地下水水氬之濃度變化來監測安通溫泉區鄰近池上斷層之地震前兆，於安通溫泉區吉祥 D1 井及安通 A 井，每週採集水樣兩到三次，以宅急便低溫配送至研究室由液態閃爍計數儀(Liquid Scintillation Counter, LSC)進行分析。經由長期監測之結果，進一步探討地下水水氬濃度異常下降變化和安通溫泉附近地震活動之相互關聯性。



3-1 地下水水氦採樣方法

本研究以花蓮安通溫泉區為監測地點，觀測井為吉祥溫泉農莊之地下水水氦觀測井(吉祥 D1 井)，井深為 187 米，井水生產位置在井下 167 米至 187 米處；抽水馬達為半潛式馬達，設置在井下 157 米處；另一為安通溫泉飯店之地下水水氦觀測井(安通 A 井)，深為 500 米(原為工研院 500 米探勘井)，為一口自噴井。

Freyer et al. (1997) 指出抽水速度對地下水氦濃度沒有影響，地下水溶解氣體採樣的決定性關鍵在於採樣時需要將井中滯留水洗淨，且抽出水量須達到井中水體積五倍以上，以免所採水樣為井中滯留水或滯留水及地層中地下水的混合物干擾，導致濃度之誤差。吉祥 D1 井是利用半潛式馬達抽水，平均流量為 200 L/min，每次採樣前，抽水時間至少一小時，且為避免溶解氣體在採樣過程中逸散，造成分析濃度偏低的誤差，應遵照標準採樣流程進行採樣，如圖 3-1；為減少地下水溶解氣體產生變化，完成採樣後樣本以低溫冷藏(4 °C)運送回實驗室；為避免地下水水氦在分析前衰變，樣本必須在 3.8 天內分析完成。

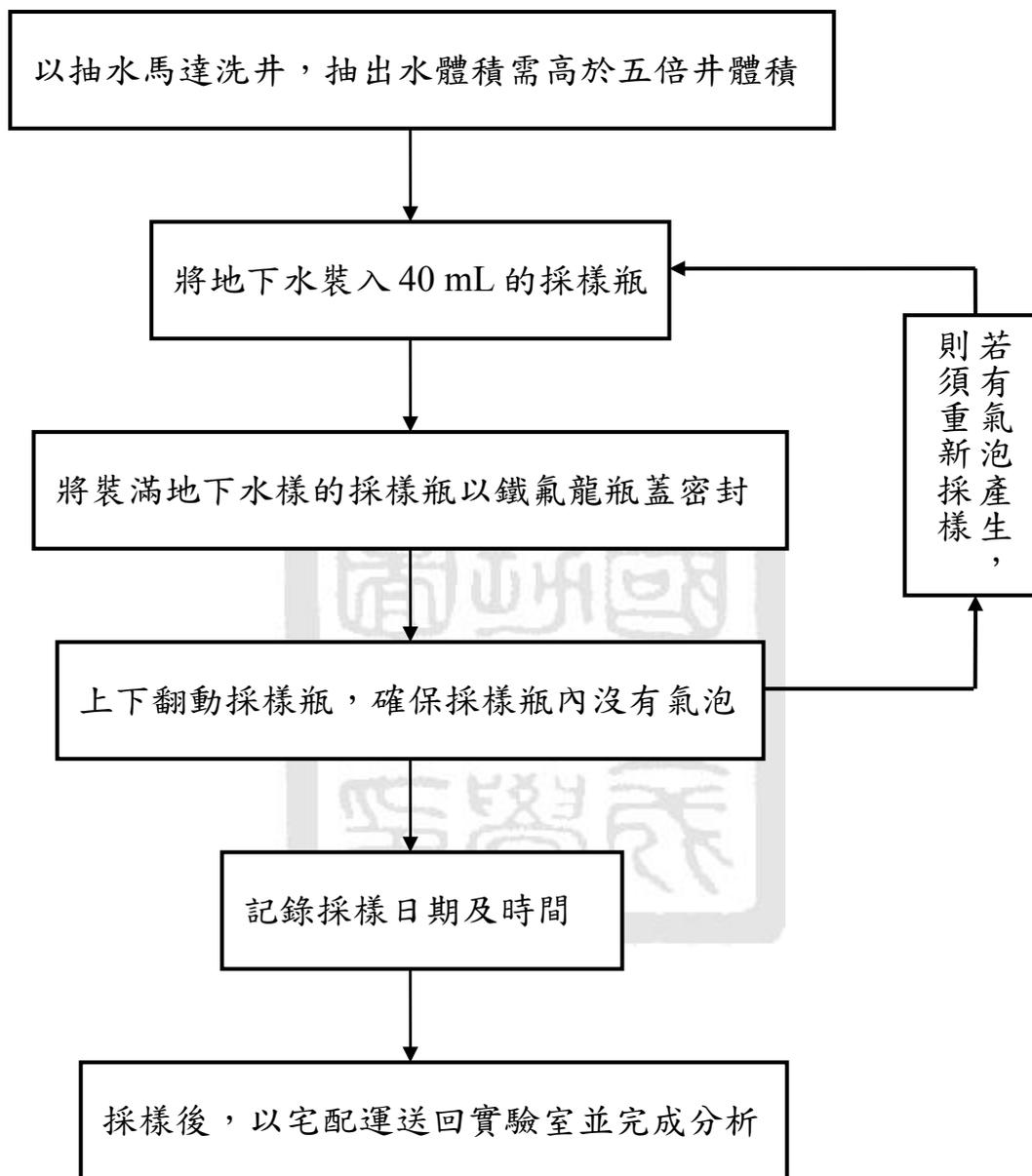


圖 3-1 地下水溶解氣體之標準採樣步驟

3-2 地下水水氫分析原理

氫具有親油性，利用礦物油不溶於水的特性，將礦物油和水樣混合使得水中的氫分配到礦物油中。研究檢測方法是取一 25 mL 計數瓶，加入 5 mL 礦物油，再加入 15 mL 水樣(Prichard et al., 1992)，經過淬取步驟後，置於液態閃爍計數儀中靜置一個小時，計數時間 50 分鐘，最後利用校正因子，即可推算出地下水水氫濃度(圖 3-2)。

液態閃爍計數儀(Liquid Scintillation Counter, LSC)的原理是利用液體的化學介質將核子放射性的動能，轉變為光子的分析技術。當放射性粒子或高頻率光子撞擊閃爍物(Scintillators)時，一束螢光立即閃出。若將此閃光導至光電倍增管(Photomultiplier Tubes, PMT)之陰極面上，則每一粒子或光子的撞擊，在液態閃爍計數器上可記錄得一道脈衝。

在進行液態閃爍計數法之前必須先配置一組標準溶液及背景值，用以做為選定最佳操作方法的依據，依背景及水氫標準溶液之計數率(cpm, count/minute)來選定液態閃爍計數器最佳操作視窗，本研究室所選定最佳操作條件的原則為

- (1) 在最適操作視窗下，水氫背景計數率(cpm)須小於 6 cpm
- (2) 達長期平衡的水氫標準溶液及水氫背景計數率(cpm)依下式求得的校正因子(CF, cpm/pCi)須大於等於 6 cpm/pCi

$$CF = \frac{S - B}{C \times V}$$

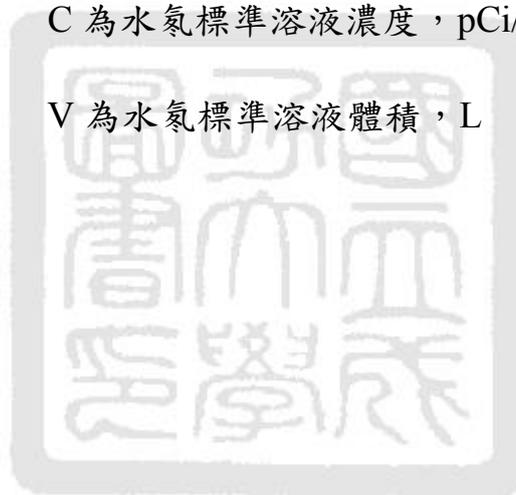
其中：CF 為校正因子，cpm/pCi

S 為標準品計數率，cpm

B 為水氫背景計數率，cpm

C 為水氫標準溶液濃度，pCi/L

V 為水氫標準溶液體積，L



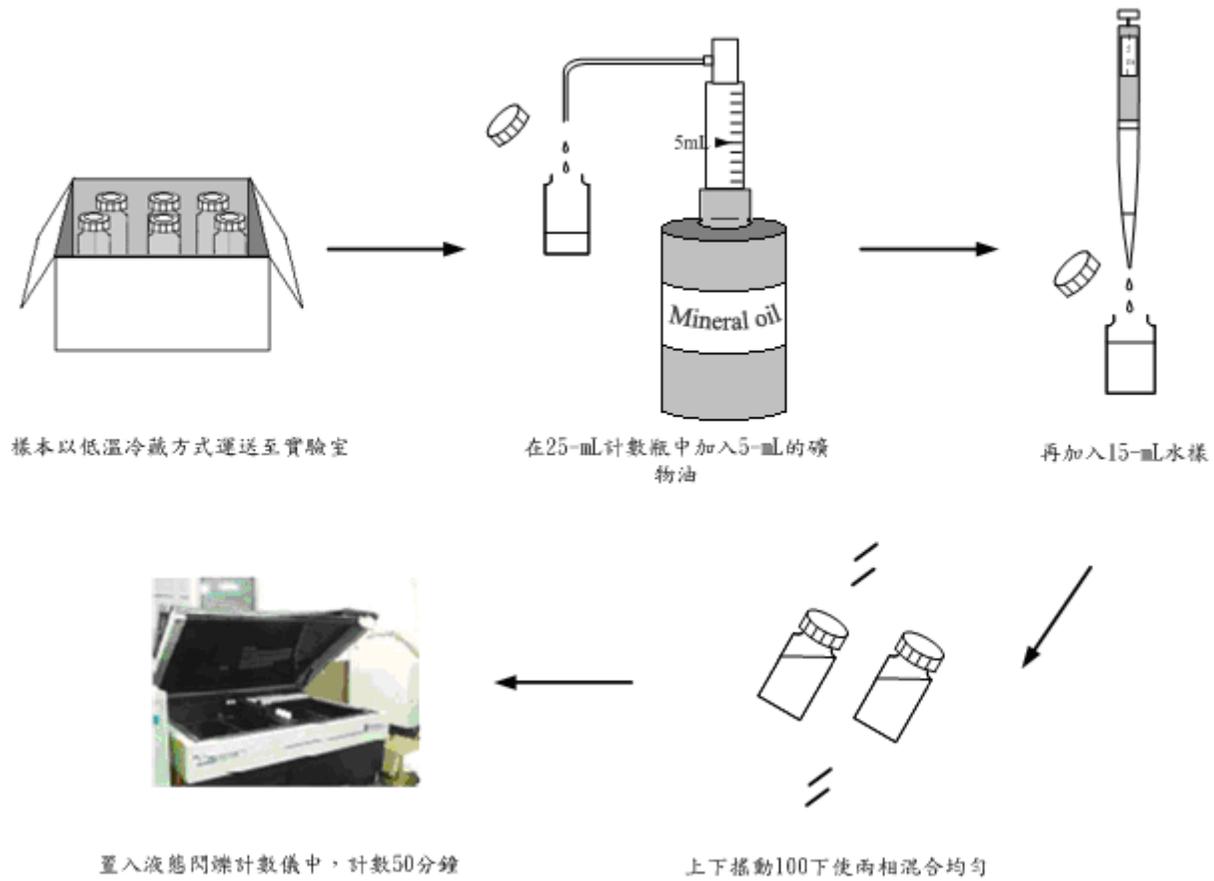


圖 3-2 地下水水氫之實驗流程圖

3-3 實驗室監測地下水水氫品保品管

圖 3-3 為實驗室配製之水氫標準溶液於液態閃爍計數器中計數得到之水氫標準溶液典型圖譜。本研究室氫含量分析技術已達到美國環保署規範之品質保證及品質管制，水氫背景計數率小於 6 cpm，校正因子(CF)大於等於 6 cpm/pCi。每一次進行氫分析計數時，必須同時計數水氫背景及水氫標準溶液各兩瓶，將其計數率取平均值，並計算校正因子，做為該批水樣分析結果是否落在實驗室建立的品質保證及品質管制指標內。若計數出之水氫背景計數率及校正因子不在規定範圍內，則該批水樣之分析結果為無效。

圖 3-4 為實驗室水氫背景計數率及校正因子自 2011 年 1 月 1 日至 2013 年 3 月 31 日之品保品管歷線圖，所使用的儀器為本研究室所擁有之 Liquid Scintillation Counter 2900。歷線圖顯示實驗室水樣的分析皆符合美國環保署規範之品質保證及品質管制。

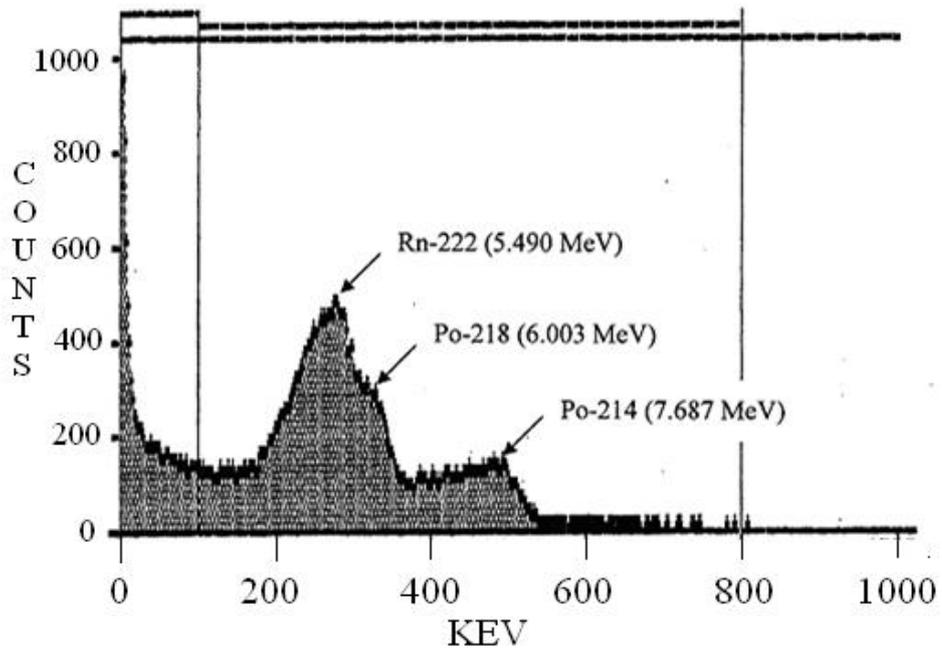


圖 3-3 水氫標準溶液液態閃爍計數之典型圖譜

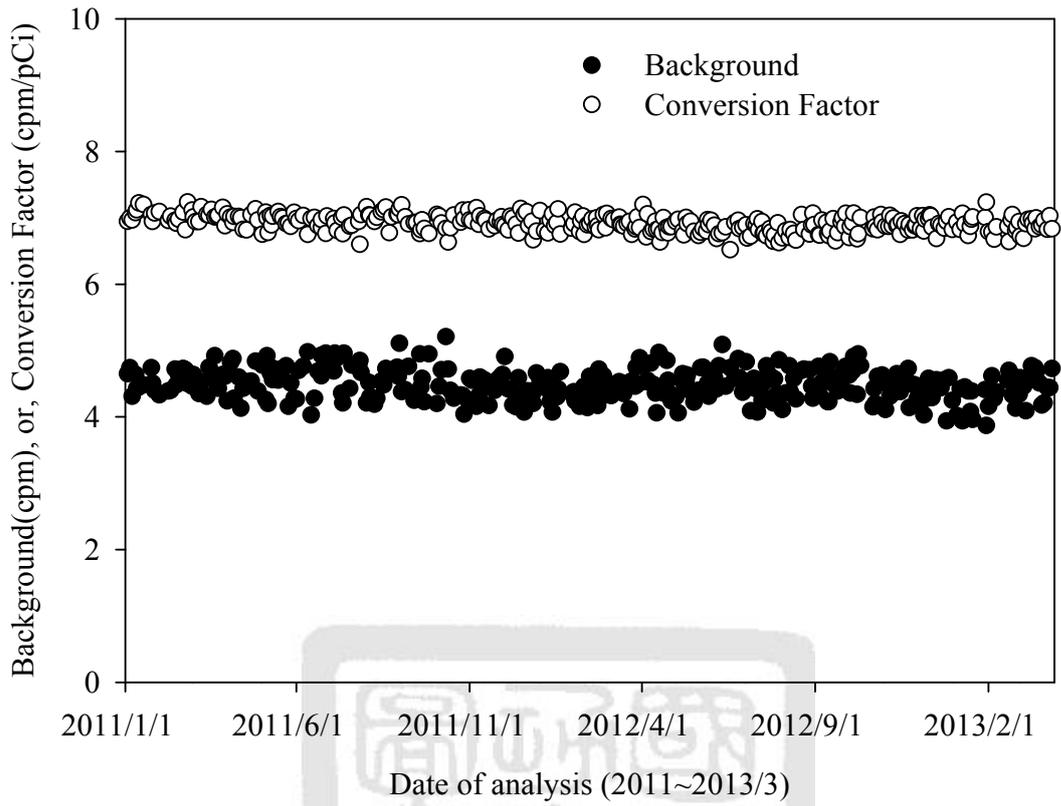


圖 3-4 水氬分析實驗室品保品管歷線圖(背景值及校正因子)

第四章 結果與討論

本研究自 2011 年 1 月 1 日開始至 2013 年 3 月 31 日於安通溫泉地區進行水樣採集，每週採樣 2~3 次進行地下水水氣濃度分析研究，對安通溫泉區地下水水氣濃度變化進行監測。

4-1 吉祥 D1 井及安通 A 井監測結果與環境因子之比較

圖 4-1 及圖 4-2 分別為吉祥 D1 井及安通 A 井於監測期間之地下水水氣濃度監測數據與各項環境因子之關係圖。環境因子為監測期間收集自中央氣象局測站紀錄之安通溫泉地區氣象資料。由圖 4-1 及圖 4-2 個別比較同時間之大氣壓力、大氣溫度及雨量紀錄資料，可知兩口觀測井的地下水水氣濃度變化和環境因子無明顯關係。

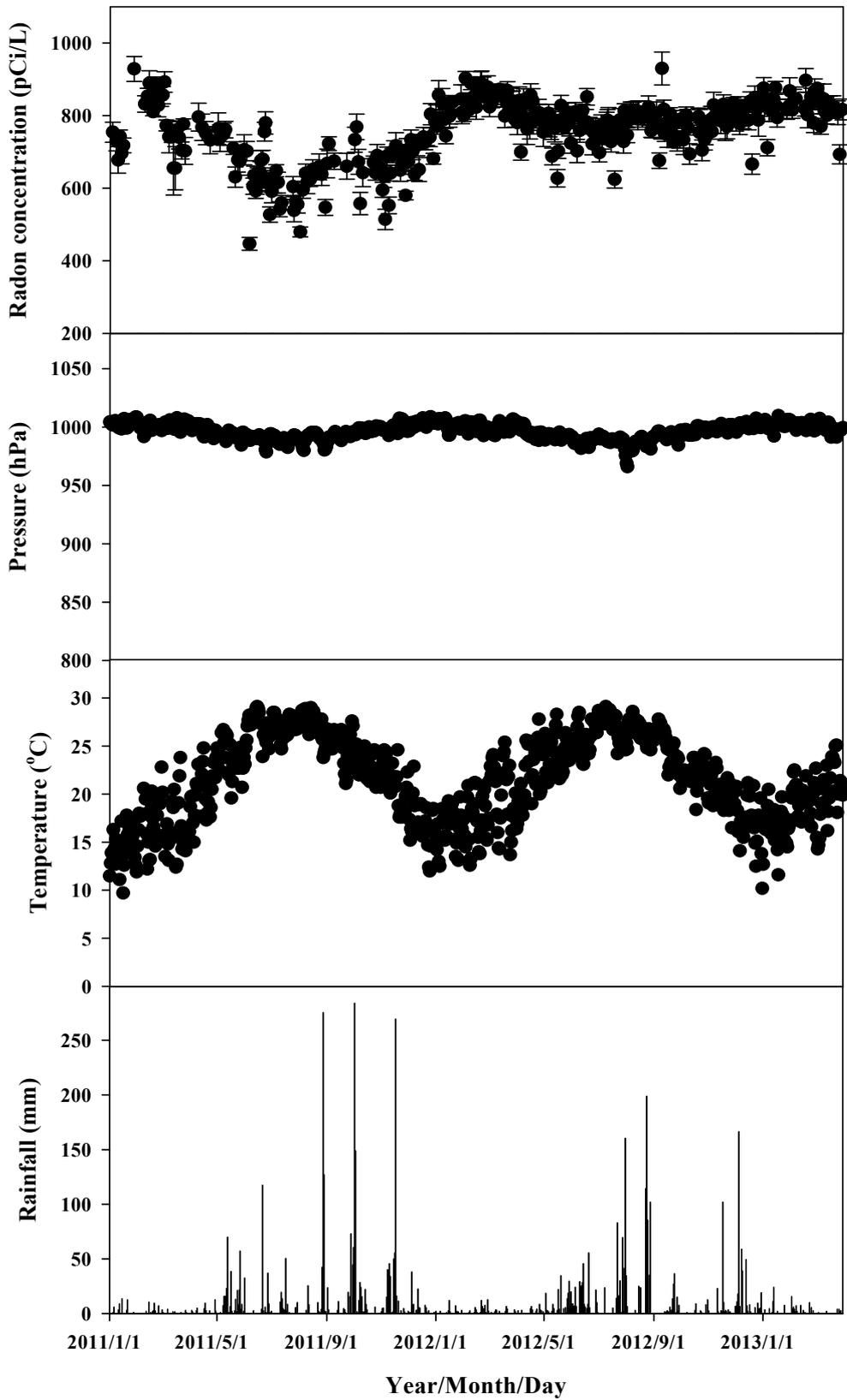


圖 4-1 吉祥 D1 井之地下水水氣濃度與環境因子關係圖

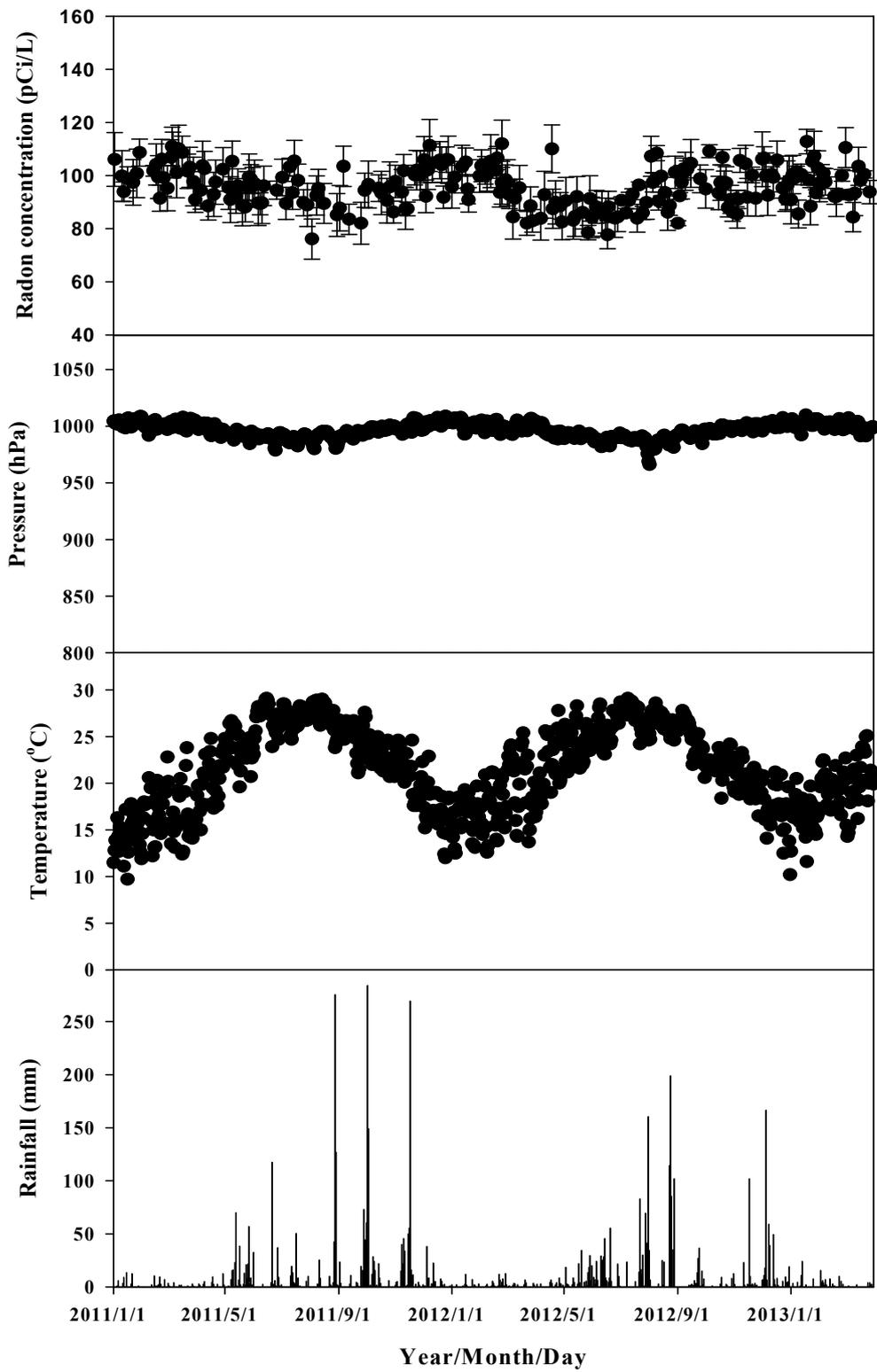


圖 4-2 安通 A 井之地下水水氣濃度與環境因子關係圖

4-2 吉祥 D1 井和安通 A 井監測結果之比較

由長期以來的監測可知吉祥D1 井地下水水氡背景濃度比安通A井高許多(圖 4-3a)，地下水水氡濃度變化也較安通A井明顯，尤其在 2011 年 7 月 12 日 M_w 5.0 奇美地震來臨前，可看出兩口觀測井對地震前兆敏感度之顯著差異(圖 4-3b)：吉祥D1 井地下水水氡濃度於 2011 年 5 月 19 日開始從背景值 752 ± 24 pCi/L 降至 2011 年 6 月 6 日最低濃度 447 ± 18 pCi/L，之後地下水水氡濃度開始回升至 2011 年 7 月 12 日地震發生，而此期間安通A井之地下水水氡濃度維持在 95 ± 5 pCi/L 之間，且地下水水氡濃度並無顯著之三階段序列現象。

由於 Rn-222 是地殼中所含天然放射性物質 U-238 在衰變過程中所產生，故推測是因為觀測井深度不同，地下水所接觸之岩石種類不同，造成溶解到地下水中的氡含量有所差異，進而影響此兩口觀測井之地下水水氡背景濃度及監測結果。

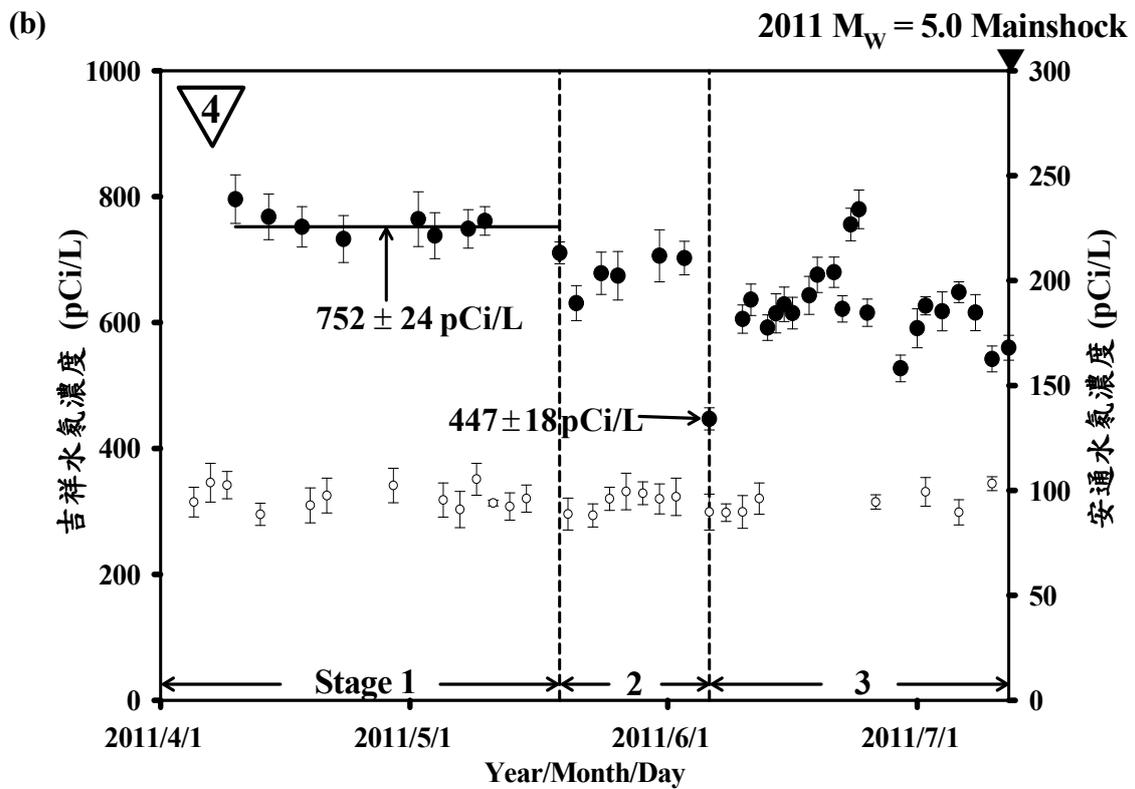
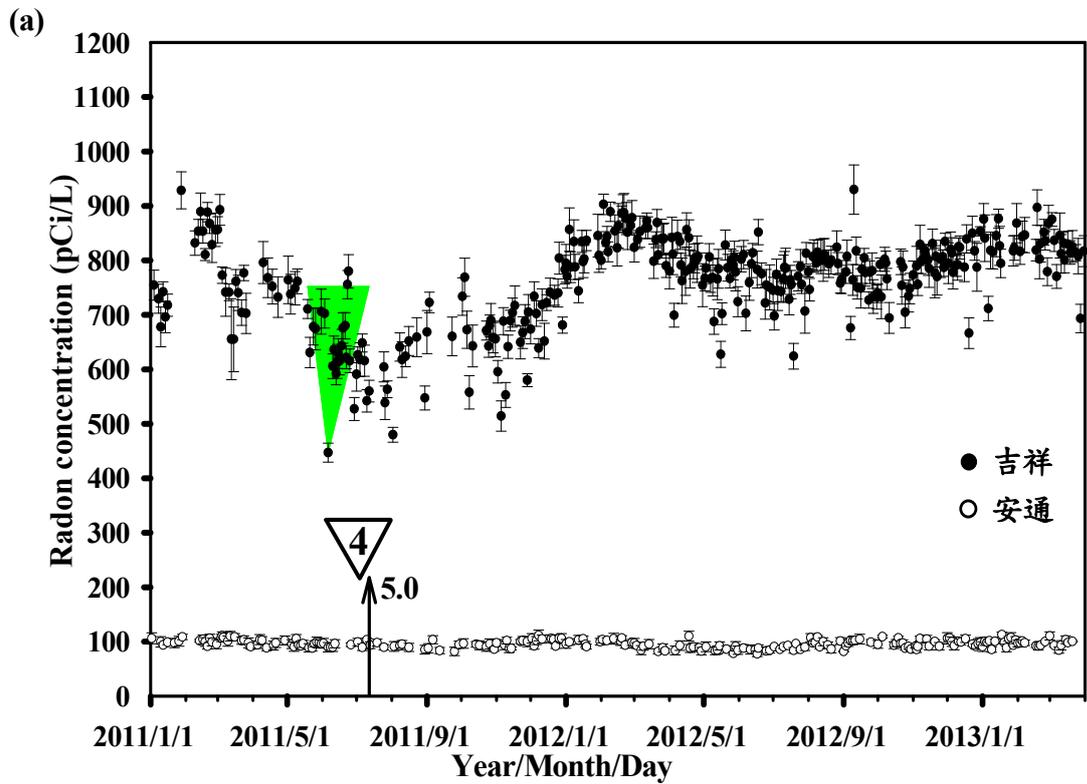


圖 4-3 吉祥 D1 井和安通 A 井地下水水氬濃度比較

4-3 吉祥 D1 井地下水水氬濃度三階段序列發展

成功大學郭明錦研究團隊於 2003 年起在安通溫泉地區進行地下水水氬濃度異常變化之長期監測，監測結果如圖 4-4 所示，右邊標示了盒鬚圖，盒子中間為中位數 (Q2, 770 pCi/L)，盒子底端為第一四分位數(Q1, 702 pCi/L)，頂端則為第三四分位數(Q3, 834 pCi/L)。盒鬚圖的鬚線為自盒子的上下邊界延伸 1.5 倍四分位距的距離(Interquartile range, IQR, 分別為 503 pCi/L及 982 pCi/L)，鬚線涵蓋區域表示為地下水水氬濃度之正常數據範圍。根據盒鬚圖(圖 4-4)，在吉祥D1 井地下水水氬最低濃度異常的門檻值評估為 503 pCi/L。2008 M_w 5.4 安通地震及 2011 M_w 5.0 奇美地震前紀錄到的地下水水氬濃度最低值接近門檻值，因此很容易被背景雜訊干擾。另一方面，2003 M_w 6.8 成功地震和 2006 M_w 6.1 台東地震前紀錄到的地下水水氬濃度最低值夠低，可以很清楚與背景雜訊分辨出來。

本研究監測期間為 2011 年 1 月 1 日至 2013 年 3 月 31 日，在此監測期間內，於 2011 年 12 月 2 日 M_L 4.8、2012 年 5 月 30 日 M_L 4.7、2012 年 8 月 18 日 M_w 4.65 及 2012 年 9 月 25 日 M_L 4.7 地震發生前皆有觀測到地下水水氬濃度異常下降之現象(圖 4-5)，地下水水氬濃度分別從背景值 671 ± 20 pCi/L、 808 ± 29 pCi/L、 773 ± 36 pCi/L及 805 ± 10 pCi/L降至最低濃度 514 ± 28 pCi/L、 627 ± 24 pCi/L、 624 ± 24 pCi/L及 676 ± 21 pCi/L，且地下水水氬濃度變化皆呈現三階段之序列發展(圖 4-6 及表 4-1)。第一階

段：地殼中的應力平穩增加並緩慢地累積能量，此時地下水水氫濃度平穩；第二階段：應力達到臨界地殼發展微裂隙使得地下水水氫從液相逸散至氣相，地下水水氫濃度下降；第三階段：地震發生後能量釋放地層恢復平穩狀態，此時裂隙中含水飽和度上升，地下水水氫濃度回升到平穩狀態時的背景值。

由圖 4-4、圖 4-5 及圖 4-6 可知，本研究以四分位法分析得到之地下水水氫最低濃度異常的門檻值為 503 pCi/L。當地下水水氫濃度小於門檻值 503 pCi/L 時，可辨別到地震矩規模大於等於 5.0 之地下水水氫異常下降地震前兆。當地下水水氫濃度大於門檻值 503 pCi/L 時，地下水水氫濃度很容易受背景雜訊干擾，本研究進一步將地下水水氫濃度展開並以三階段序列發展之機制判斷後，本研究可辨別地震前兆的解析度範圍為地震矩規模小於 5.0 到芮氏規模大於等於 4.7 間之地震。

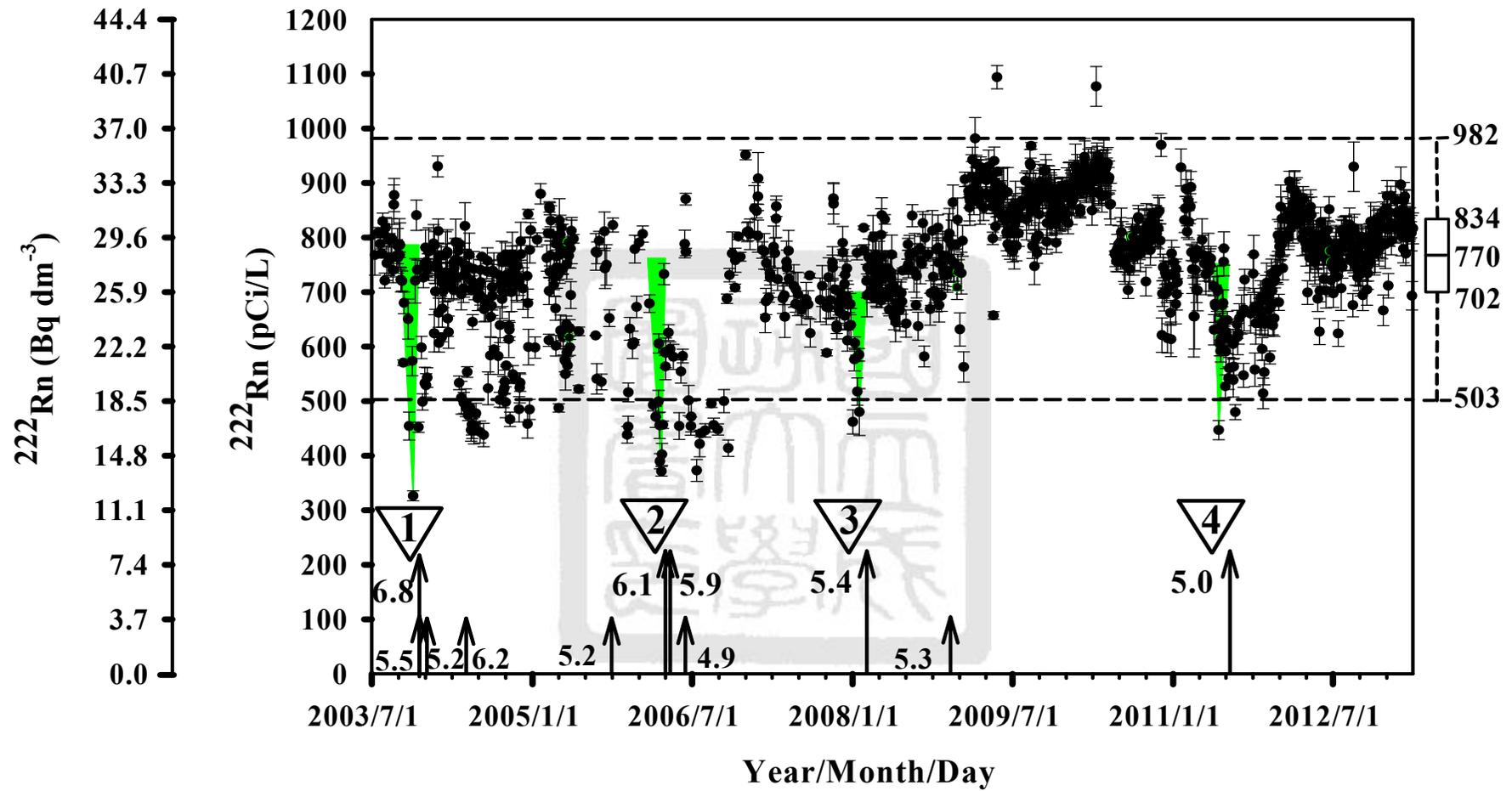


圖 4-4 吉祥 D1 井之地下水水氡濃度監測紀錄 (2003/7/1 ~ 2013/3/31)

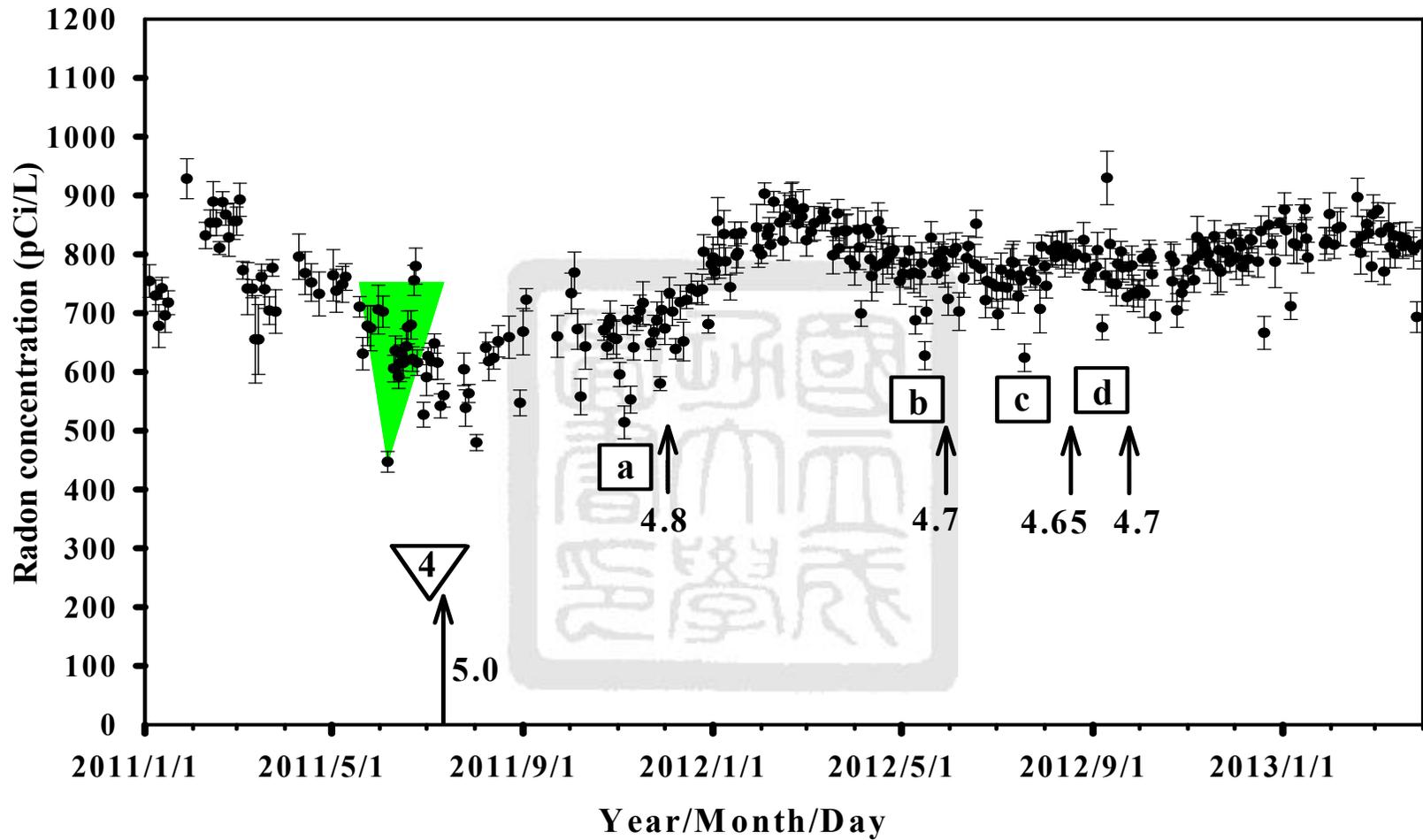


圖 4-5 吉祥 D1 井之地下水水氡濃度監測紀錄 (2011/1/1 ~ 2013/3/31)

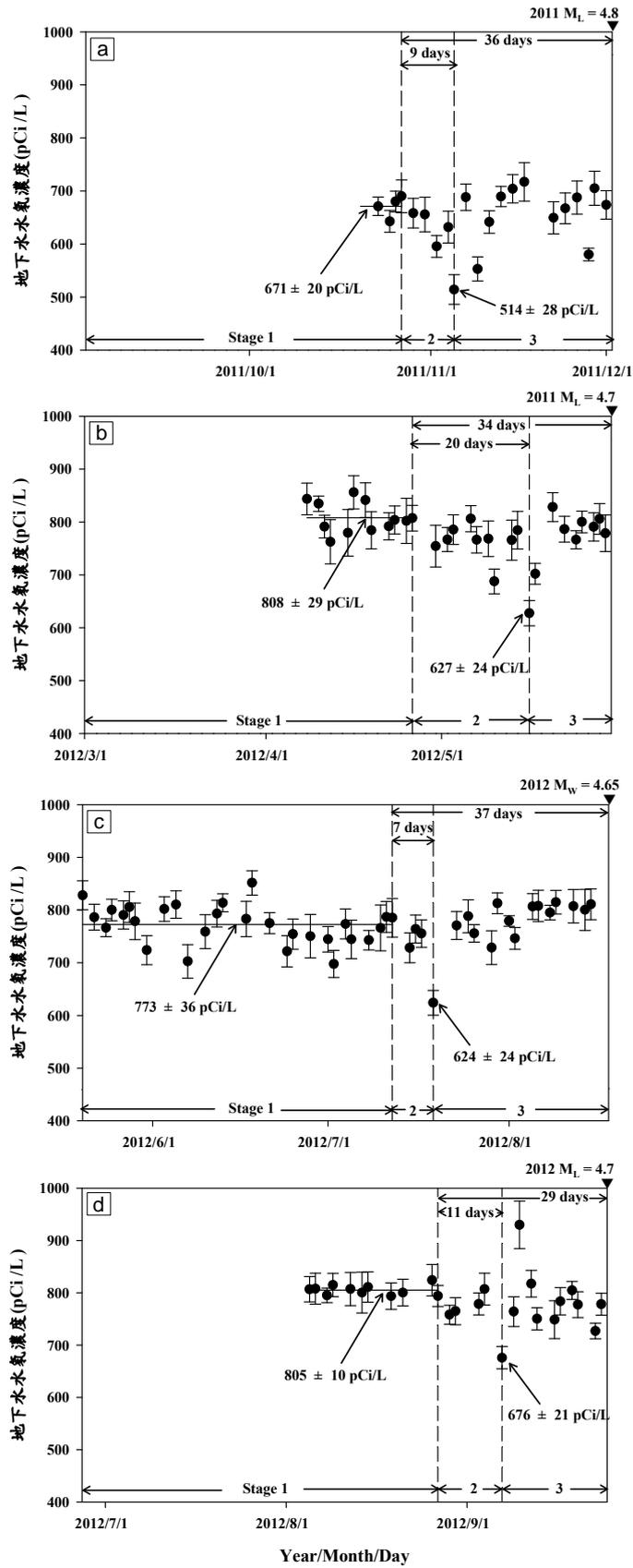


圖 4-6 本研究監測期間四個地震前兆三階段序列

表 4-1 地震前兆三階段序列統整資料

NO.	Earthquake	M_W or M_L	Duration (days)			Precursory Time (days)
			Stage 1	Stage 2	Stage 3	
1	2003 Chengkung	M_W 6.8	85	45	20	65
2	2006 Taitung	M_W 6.1	44	47	14	61
3	2008 Antung	M_W 5.4	26	31	25	56
4	2011 Chimei	M_W 5.0	39	18	36	54
a	2011/12/2	M_L 4.8	7	9	27	36
b	2012/5/30	M_L 4.7	18	20	14	34
c	2012/8/18	M_W 4.65	53	7	30	37
d	2012/9/25	M_L 4.7	22	11	18	29

註：前兆時間(Precursory Time)定義為由第二階段地下水水氣濃度開始下降至地震發生的時間。

4-4 標準化地下水水氡濃度下降值及前兆時間與地震規模之相關性

2003 年起成功大學郭明錦研究團隊在安通溫泉區共監測到四次 $M_w \geq 5.0$ 地震前兆：2003 年 M_w 6.8 成功、2006 年 M_w 6.0 台東、2008 年 M_w 5.4 安通及 2011 年 M_w 5.0 奇美地震。Kuo et al. (2011) 進一步指出標準化地下水水氡濃度下降值(normalized radon decline)及前兆時間(Precursory Time) 與地震矩規模具有關聯性，並提出標準化地下水水氡濃度下降值與地震矩規模經驗關係式(圖 4-7)及前兆時間與地震矩規模經驗關係式(圖 4-8)。

本研究以此基礎，加入本研究監測期間(2011/1/1 ~ 2013/3/31)監測到的四次地震前兆，其三階段序列發展之標準化地下水水氡濃度下降值及前兆時間與地震規模相關資料整理如表 4-2，並將上述之經驗關係式做延伸(圖 4-9 及圖 4-10)。

由圖 4-9 可發現，當標準化地下水水氡濃度下降值 $\frac{C_o}{C_w} - 1$ 增加時，則地震矩規模(M_w)或芮氏規模(M_L)會隨之增加，標準化地下水水氡濃度下降值與地震規模可用以下經驗關係式(1)表示之。

$$Y = 0.5381X - 2.256 \dots\dots\dots(1)$$

其中：Y 為標準化地下水水氡濃度下降值 $\frac{C_o}{C_w} - 1$ ，無因次

X為地震矩規模(M_w)或芮氏規模(M_L)

C_0 為地下水水氬濃度之背景值，pCi/L

C_w 為地下水水氬濃度異常下降之最低值，pCi/L

另外，當地震矩規模(M_w)或芮氏規模(M_L)增加時，則地震前兆時間(T)會隨之增長(表 4-1 及圖 4-10)。前兆時間與地震規模可用以下經驗關係式表示(2)之。

$$Y = 0.1420X - 0.9013 \dots\dots\dots(2)$$

其中：Y為前兆時間($\log_{10}T$)，days

X為地震矩規模(M_w)或芮氏規模(M_L)

由監測期間吉祥D1 井捕捉到的四次地震前兆加入Kuo et al. (2011) 針對 2003 年 M_w 6.8 成功、2006 年 M_w 6.0 台東、2008 年 M_w 5.4 安通及 2011 年 M_w 5.0 奇美地震前兆之標準化地下水水氬濃度下降值及前兆時間與地震規模所建立之經驗關係式，本研究延伸並修正標準化地下水水氬濃度下降值及前兆時間與地震規模之經驗關係式，使此關係式之地震規模靈敏度降低至 M_L 4.7，此經驗關係式可適用於震央鄰近池上斷層、規模大於等於 M_L 4.7 之地震。

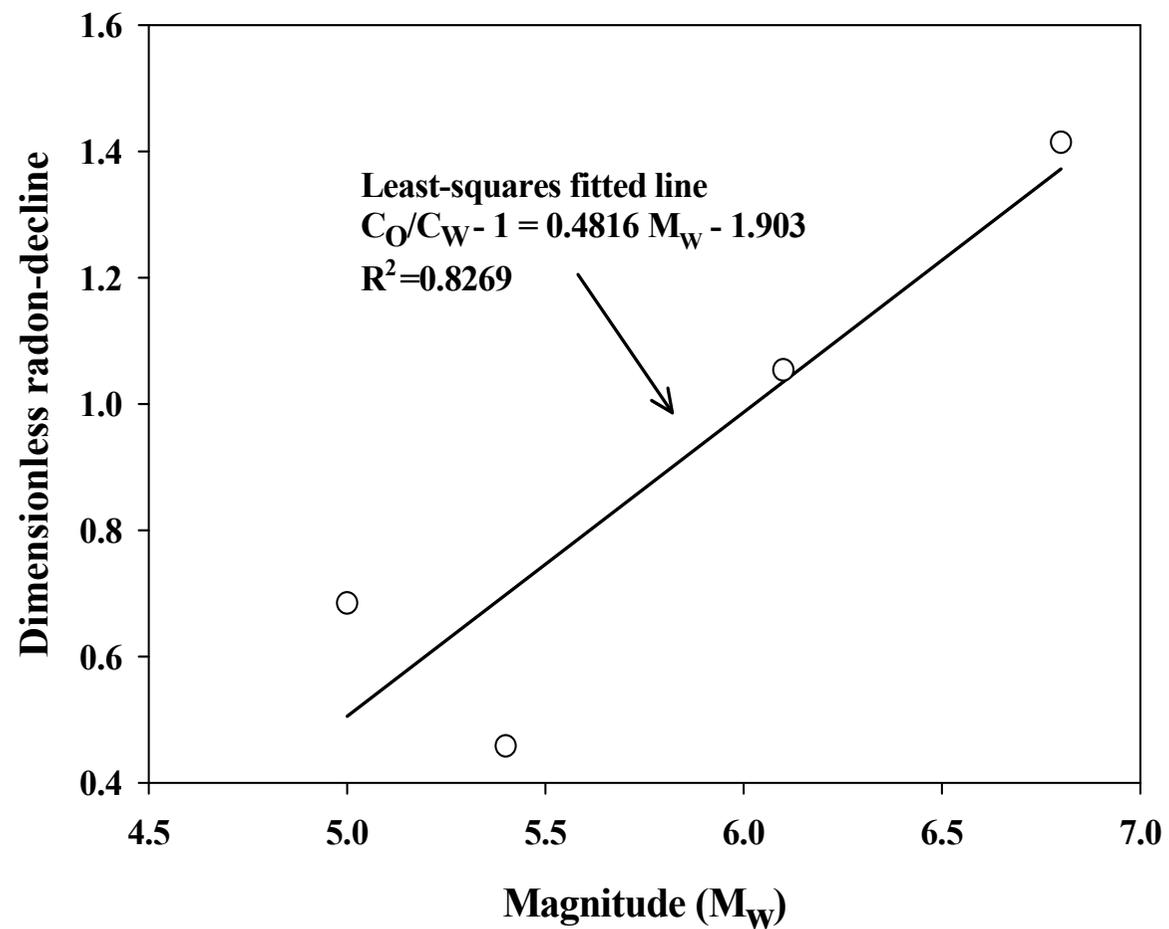


圖 4-7 標準化地下水水氣濃度下降值與地震矩規模之關係圖(Kuo et al., 2011)

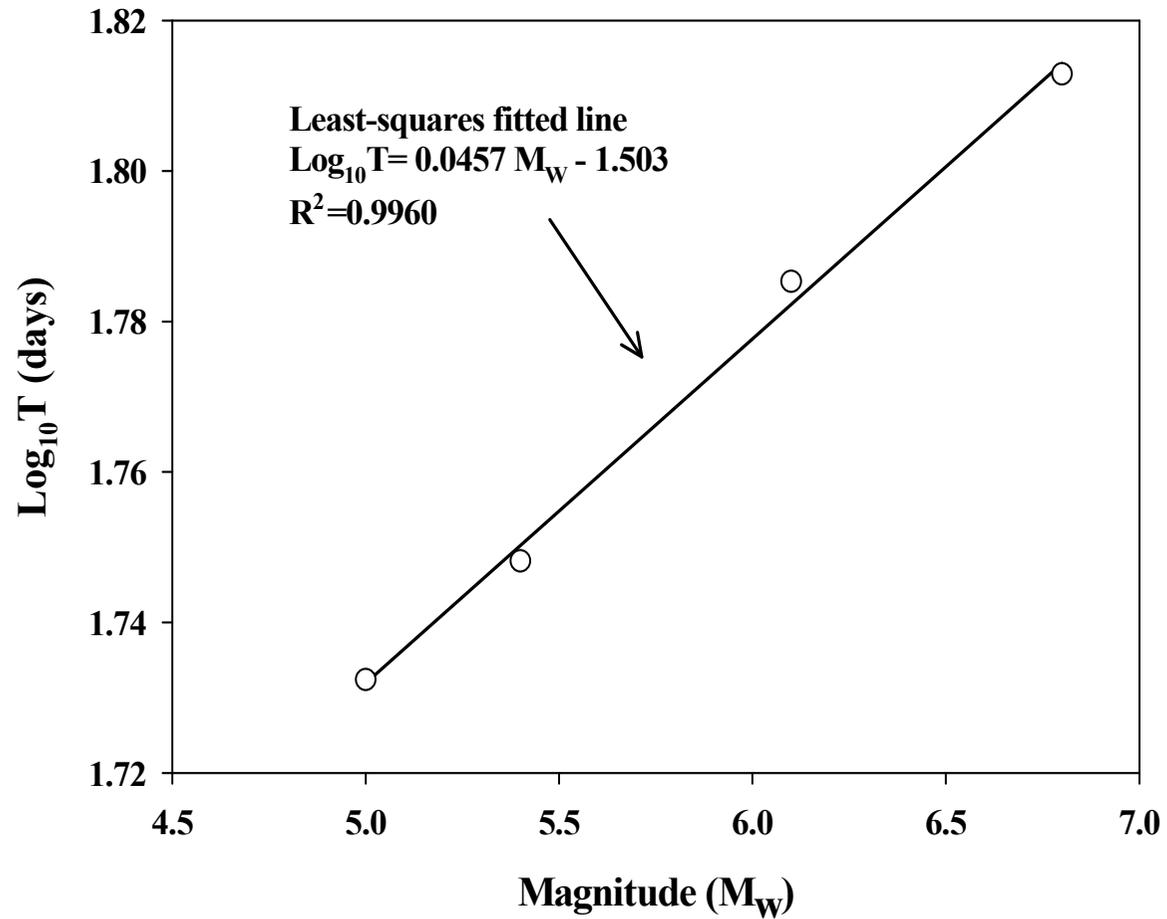


圖 4-8 前兆時間與地震矩規模之關係圖(Kuo et al., 2011)

表 4-2 各地震之地下水水氬濃度及地震規模

NO.	地震日期	C_o (pCi/L)	C_w (pCi/L)	$\frac{C_o}{C_w} - 1$	M_w or M_L
1	2003/12/10	787	326	1.41	M_w 6.8
2	2006/4/1	762	371	1.05	M_w 6.1
3	2008/2/18	700	480	0.46	M_w 5.4
4	2011/7/12	752	447	0.68	M_w 5.0
a	2011/12/2	671	514	0.31	M_L 4.8
b	2012/5/30	808	627	0.29	M_L 4.7
c	2012/8/18	773	624	0.24	M_w 4.65
d	2012/9/25	805	676	0.19	M_L 4.7

註： C_o 為地下水水氬背景濃度值(pCi/L)； C_w 為地下水水氬下降之最

低濃度值(pCi/L)； $\frac{C_o}{C_w} - 1$ 為標準化地下水水氬濃度下降值(無因

次)。

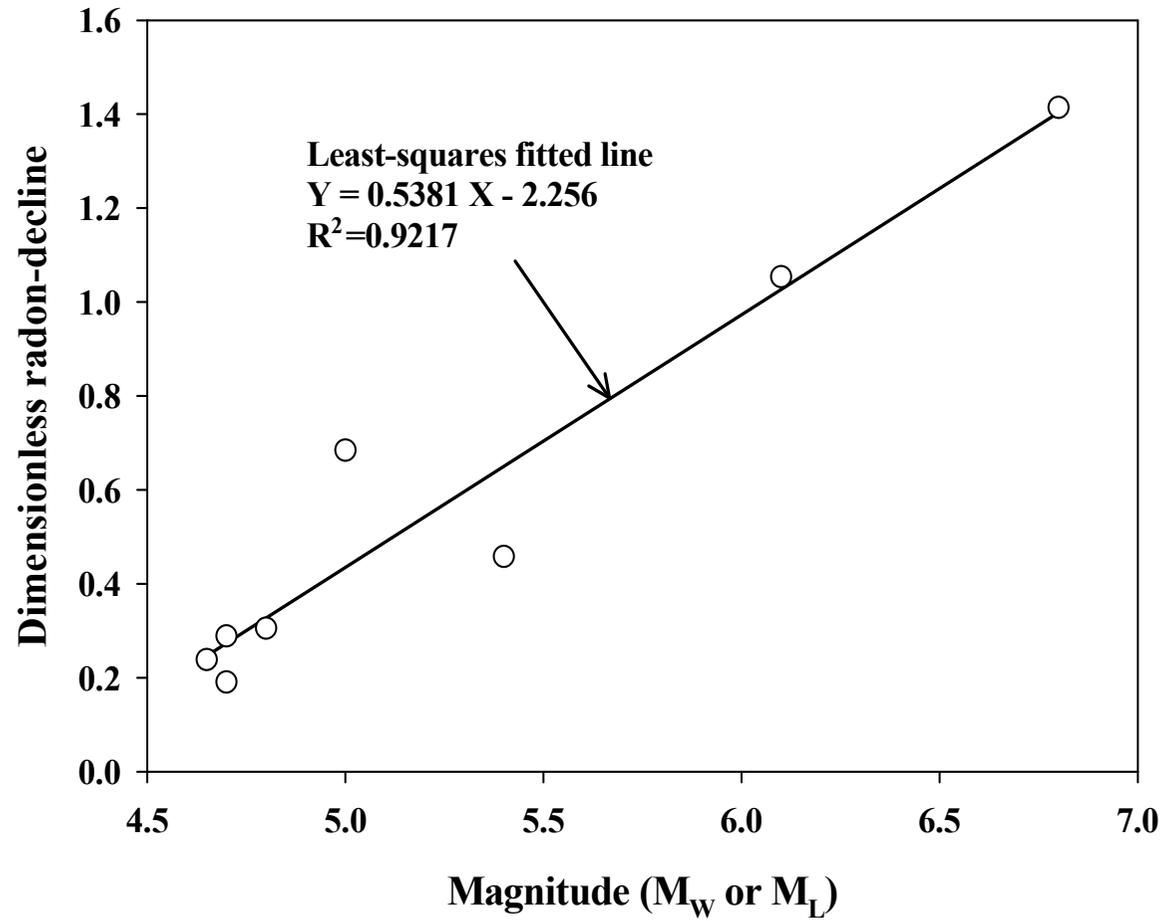


圖 4-9 加入本研究監測結果之標準化地下水水氣濃度下降值與地震規模之關係圖

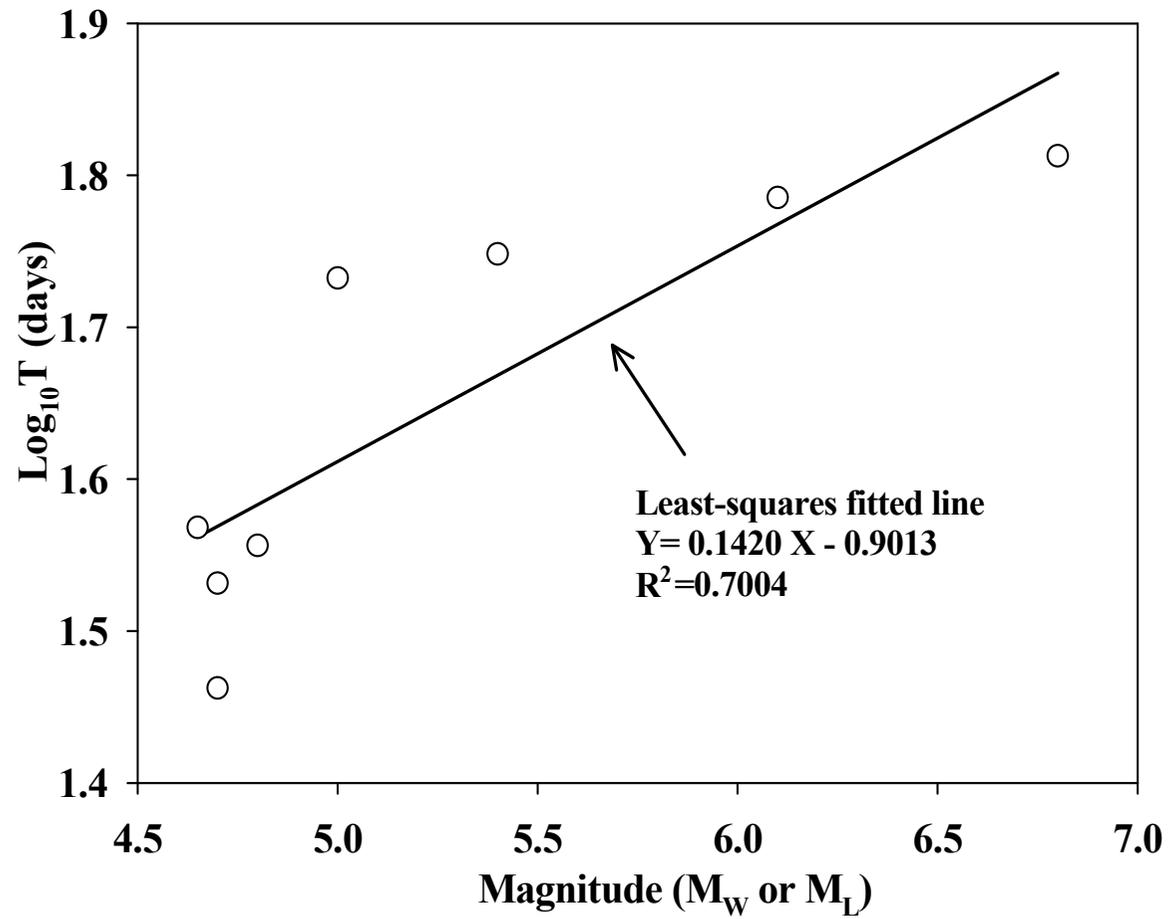


圖 4-10 加入本研究監測結果之前兆時間與地震規模之關係圖

第五章 結論與建議

5-1 結論

地震前兆之研究主要是為了降低地震對於人類的衝擊，地層深處的岩石受到累積大地應力而造成破裂之地層作用造成地下水水氬濃度改變對地震前兆之研究有其重要性。本研究對安通溫泉區地下水水氬進行長時間之監測，進一步探討地下水水氬濃度異常下降變化和安通溫泉附近地震前兆相互之關聯性，以下為本研究之結論：

1. 由安通溫泉地區觀測井之監測結果可知，若選擇類似安通溫泉之地質條件，即地質構造為脆性火山岩，屬於裂隙含水層，地下水水氬可作為地殼運動及地震形成時應力改變之敏感性示蹤劑。
2. 本研究於 2011/1/1 ~ 2013/3/31 監測期間，在奇美地震後共捕捉到四次地下水水氬濃度異常下降三階段序列發展之地震前兆。四次地震分別為 2011 年 12 月 2 日 M_L 4.8、2012 年 5 月 30 日 M_L 4.7、2012 年 8 月 18 日 M_W 4.65 及 2012 年 9 月 25 日 M_L 4.7。
3. 由吉祥D1 井與安通A井之地下水水氬濃度比較結果可知，吉祥D1 井地下水水氬背景濃度比安通A井高許多，變化也較安通A井明顯，尤其以 2011 年 7 月 12 日 M_W 5.0 奇美地震可發現兩口觀測井對監測地震前兆敏感度之顯著差異，推測是因為觀測井深度不同(吉祥D1 井：187

米；安通A井：500 米)，地下水所接觸之岩石種類不同，造成溶解到地下水中的氡含量有所差異，進而影響此兩口觀測井之地下水水氡背景濃度及監測結果。

4. 當地下水水氡有三階段序列發展時，以四分位法分析得到之最低門檻值 503 pCi/L 為標準，地下水水氡濃度小於門檻值時，可辨別到地震矩規模大於等於 5.0 之地震前兆；地下水水氡濃度大於門檻值時，可辨別到地震矩規模小於 5.0 到芮氏規模大於等於 4.7 間之地震前兆。以此為本研究判斷分析地震前兆之地震規模解析度。
5. 本研究成功延伸並修正標準化地下水水氡濃度下降值及前兆時間與地震規模之經驗關係式，使此經驗關係式之地震規模靈敏度降低至 M_L 4.7，此經驗關係式可適用於震央鄰近池上斷層、規模大於等於 M_L 4.7 之地震。

5-2 建議

本研究建議未來持續觀察監測地震前兆地下水水氫濃度異常下降變化，由物理及化學機制探討地下水水氫濃度異常下降變化和地殼應變之關係，驗證地下水水氫濃度異常變化和地震前兆之相關性。建議未來延續本研究之工作包括：

1. 由監測結果可發現地下水水氫濃度變化和環境因子無關，且在地震來臨前，地下水水氫濃度會有異常下降現象及呈現三階段序列發展，建議持續在安通溫泉區進行採樣分析，以捕捉地震前兆。
2. 建議持續捕捉安通溫泉區之地下水氫濃度異常下降之三階段序列地震前兆，進一步對標準化地下水水氫濃度下降值及前兆時間與地震規模之經驗關係式進行改善。
3. 建議增加地下水水位觀測項目，研究地下水水位地震前兆的現象。

參考文獻

1. 王源、楊昭男、陳文山，經濟部中央地質調查所出版台灣地質圖說明書圖幅第四十八號，1992。
2. 何春蓀，台灣地體構造的演變，中華民國經濟部，1982。
3. 李建成、朱傲祖、安朔葉、胡植慶，台灣東部縱谷斷層的快速潛移特性及地震災害，2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會論文集，11-18，中華民國九十三年十月，國立成功大學，2004。
4. 吳先琪、張美玲，氣體色層分析，實用儀器分析，2003。
5. 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，台灣活動斷層概論第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第十三號，共 122 頁，2000。
6. 林意琪，應用地下水水氫及甲烷觀測地震前兆之研究：海岸山脈南段，中華民國九十九年六月，國立成功大學，2010。
7. 林雨璇，應用地下水水氫、甲烷及乙烷觀測池上斷層地震前兆，中華民國 101 年六月，國立成功大學，2012。
8. 林純玉，安通溫泉地下水水氫異常下降地震前兆再現性強震之應用研究，中華民國一百年 10 月，國立成功大學，2011。
9. 范愷軍，地下水水氫濃度異常下降及地震前兆機制之研究：東台灣 2003M_w 6.8 成功地震，中華民國九十三年十月，國立成功大學，2009。

10. 徐鐵良，台灣海岸山脈的利吉混同層，台灣省地質調查所彙刊，第二十五號，87-96，1976。
11. 游明聖，斷層活動所造成之災害-以民國四十年花蓮、台東地震為例，台灣博物，第十五卷，第二期，16-25，中華民國八十五年，1996。
12. 黃盈穎，應用地下水水氣及甲烷觀測池上斷層地震前兆：2011/1/1 - 2011/5/31，中華民國 100 年六月，國立成功大學，2011。
13. 楊燦堯、宋聖榮、傅慶州、蘇春旭、劉聰桂、陳正宏，活動斷層地球化學監測現況與成果，2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會論文集，120-137，中華民國九十三年十月，國立成功大學，2004。
14. 楊燦堯、宋聖榮、陳正宏、劉聰桂，地震前兆之化學性監測。經濟部中央地質調查所，台灣之活斷層與地震災害研討會論文集，89-106 頁，2002。
15. 鄭文菁，地震前兆地下水溶解氣現地揮發機制佐證 -2008 年 M_w 5.4 安通地震氣與甲烷濃度異常下降，中華民國 100 年一月，國立成功大學，2011。
16. 顏宏元，地震前兆研究，2005 年臺灣活動斷層與地震災害研討會論文集，23-36，2005。
17. Angelier, J., Chu, H.T. and Lee, J.C., Shear concentration in a collision zone: kinematics of the active Chihshang Fault, Longitudinal Valley,

- eastern Taiwan. *Tectonophysics*, 274, 117-144 (1997).
18. Angelier, J., Chu, H.T. and Lee, J.C., Hu, J.C., Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang Fault, Taiwan. *Journal of Geodynamics*, 29, 151-185 (2000).
 19. Brace, W.F., Paulding Jr.B.W. and Scholz, C., Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 71, no. 16, 3939–3953 (1966).
 20. Chen, K.H., Toda, S., and Rau, R.-J., A leaping triggered sequence along a segmented fault: The 1951 M_L 7.3 Hualien-Taitung earthquake sequence in eastern Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-19 (2008).
 21. Clever, H. L., Krypton, Xenon and Radon - Gas Solubilities, Solubility Data Series 2, Pergamon Press, Oxford, UK (1979).
 22. Freyer, K., Treutler, H.C., Dehnert, J. and Nestler, W., Sampling and measurement of Randon-222 in water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 37, 3, 327-337 (1997).
 23. Fountain, J.C. and Jacobi, R.D., Detection of buried faults and fractures using soil gas analysis. *Environmental and Engineering Geoscience*, 6, 201-208 (2000).
 24. Han, Y.L., Kuo, M.C.T., Fan, K.C., Chiang, C.J. and Lee, Y.P., Radon Distribution in Groundwater of Taiwan. *Hydrogeology*, 14, 173-179

- (2006).
25. Hauksson, E., Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10, 9397-9410 (1981).
 26. Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y., Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science*, 269, 5220, 60-61 (1995).
 27. Katz, D. L., *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw Hill, New York (1959).
 28. Kuo, M.C.T., Fan, K., Kuochen, H. and Chen, W., A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake. *Ground Water*, 44, 5, 642-647 (2006a).
 29. Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y., Chu, H. and Lee, Y., Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M 6.8 Chengkung Earthquake. *Journal of Environmental Radioactivity*, 88, no. 1, 101-106 (2006b).
 30. Kuo, T., Lin, C., Chang, G., Fan, K., Cheng, W. and Lewis, C., Estimation of aseismic crustal-strain using radon repetitive radon precursors of the 2003 M 6.8, 2006 M 6.1, and 2008 M 5.0 earthquakes in eastern Taiwan. *Nat Hazards*, 53, 219-228 (2010a).
 31. Kuo, M.C.T., Cheng, W., Lin, C., Fan, K., Chang, G. and Yang, T.,

- Simultaneous declines in radon and methane precursory to 2008 M_w 5.0 Antung earthquake: corroboration of in-situ volatilization. *Nat Hazards*, 54, 367-372 (2010b).
32. Kuo, T., Lin, C., Su, C., Liu, C., Lin C. H., Chang C and Chiang , C., Correlating recurrent radon precursors with local earthquake magnitude and crust strain near the Chihshang fault of eastern Taiwan. *Nat Hazards* (2011) 59:861–869 (2011).
33. Kuo, T., Application of recurrent radon precursor for forecasting local large and moderate earthquake. *Earthquake Research and Analysis-Statistical Study, Observation and Planning*, 161-178 (2012).
34. Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C. and Jeng, F.S., Monitoring active fault creep as a tool in seismic hazard mitigation: insights from creepmeter study at Chihshang, Taiwan. *Geoscience*, 337, 13, 1200-1207 (2005).
35. Liu, K.K., Yui, T.F., Yeh, Y.H., Tsai, Y.B. and Teng, T., Variations of radon content in ground waters and possible correlation with seismic activities in northern Taiwan. *Pure and Applied Geophysics*, 122, 231-244 (1985).
36. Nisith, K.D., Rakesh, K.B., Debasis, G., Prasanta, S. and Bikash, S., Anomalous fluctuation of radon, gamma dose and helium emanating from a thermal spring prior to an earthquake. *Science*, 89, 8, 1399-1404 (2005).

37. Prichard, H.M., Venso, E.A. and Dodson, C.L., Liquid-scintillation analysis of ^{222}Rn in water by alpha-beta discrimination. *Radioactivity and Radiochemistry*, 3, 1, 28-36 (1992).
38. Scholz, C.H., Sykes, L.R. and Aggarwal, Y.P., Earthquake prediction: A physical basis. *Science* 181, no.4102, 803-810 (1973).
39. Senior, L.A. Radon-222 in the ground water of chester county, Pennsylvania. U.S.Department of the Interior, U.S Geological survey, water-resource investigations report, 1-79 (1998).
40. Silver, P.G. and Wakita, H., A search for earthquake precursors. *Science* 273, 5271, 77-78 (1996).
41. Sugisaki, R., Ito, T., Nagamine, K. and Kawabe, I., Gas geochemical changes at mineral springs associated with the 1995 southern Hyogo earthquake ($M = 7.2$), Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 139, 239-249 (1996).
42. Tedesco, D. and Scarsi, P., Chemical He, H_2 , CH_4 , Ne, Ar, N_2 and isotopic He, Ne, Ar, C variations at the Solfatara crater southern Italy : mixing of different sources in relation to seismic activity. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, 465-480 (1999).
43. Teng, T., Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake Precursor. *Journal of Geophysical Research*, 85, 3089-3099 (1980).

44. T. Kuo, C. Liu, C. Su, C. Chang, W. Chen, Y. Chen, C. Lin, H. Kuochen, Y. Hsu, Y.Lin, Y.Huang, H.Lin, Concurrent concentration declines in groundwater-dissolved radon, methane and ethane precursory to 2011 M_w 5.0 Chimei earthquake. Radiation Measurements, <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.04.006> (2013).
45. Torgersen, T., Benoit, J. and Mackie, D., Controls on groundwater Rn-222 concentrations in fractured rock. Geophysic Research Letters, 17, 6, 845-848 (1990).
46. Tsunogai, U. and Wakita, H., Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan. Science, 269, 61-63 (1995).
47. Tsunomori, F. and Kuo, T., A mechanism for radon decline prior to the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake in Japan. Radiation Measurements, 45, 139-142 (2010).
48. Verma, M., Bansal, B.K., Review earthquake precursory studies in India: Scenario and future perspectives. Journal of Asian Earth Sciences, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.04.003> (2012).
49. Vivek Walia, Virk, H.S., Bajwa B.S., Radon precursory signals for some earthquake of magnitude >5 occurred in N-W Himalaya: an overview. Pure and Applied Geophysics, 163, 711-721, 2006.
50. Wakita, H., Igarashi, G. and Notsu, K., An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M 6.0 earthquake: A possible precursor?.

Geophysic Research Letters, 18, 4, 629-632 (1991).

51. Yu, S. B. and Kuo, L. C., Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333, 199-217 (2001).



附錄 A

本研究判斷地下水水氬濃度異常之原則為地下水水氬濃度是否有完整三階段序列發展之發生，即三階段地下水水氬濃度之地震前兆物理機制：第一階段：地殼中的應力平穩增加並緩慢地累積能量，此時地下水水氬濃度平穩；第二階段：應力達到臨界地殼發展微裂隙使得地下水水氬從液相逸散至氣相，地下水水氬濃度下降；第三階段：地震發生後能量釋放地層恢復平穩狀態，此時裂隙中含水飽和度上升，地下水水氬濃度回升到平穩狀態時的背景值。雖然於監測期間可觀察出 α 及 β 兩段疑似地下水水氬濃度下降現象(圖 A-1)，但於此期間地下水水氬濃度並無明顯之第二階段序列發生(圖 A-2)。根據地下水水氬濃度之物理機制作為判斷地震前兆的主要原則，因此 α 及 β 此兩段期間之地下水水氬濃度下降現象並非地震前兆之現象。

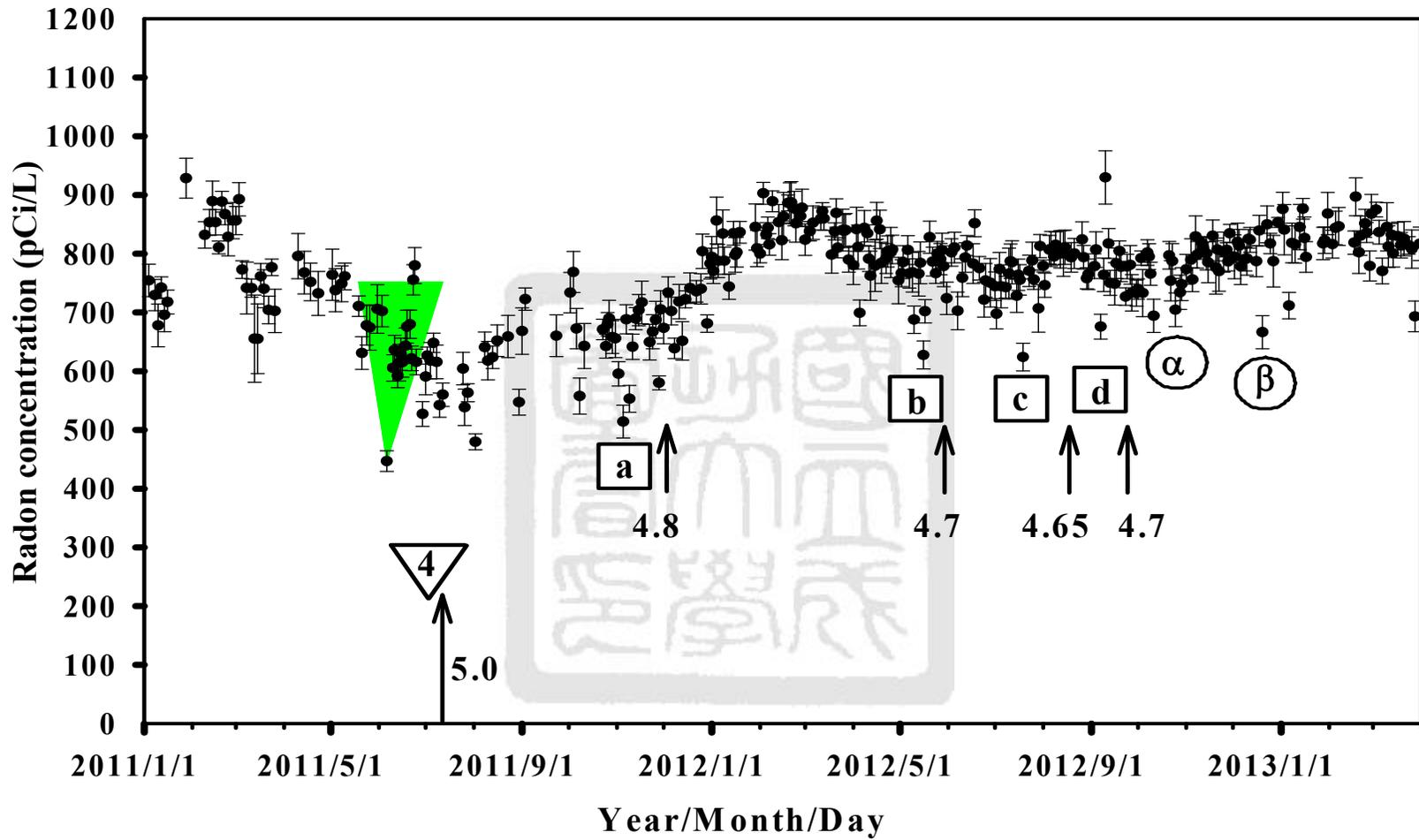


圖 A-1 監測期間疑似地下水水氡濃度下降現象(α 及 β)

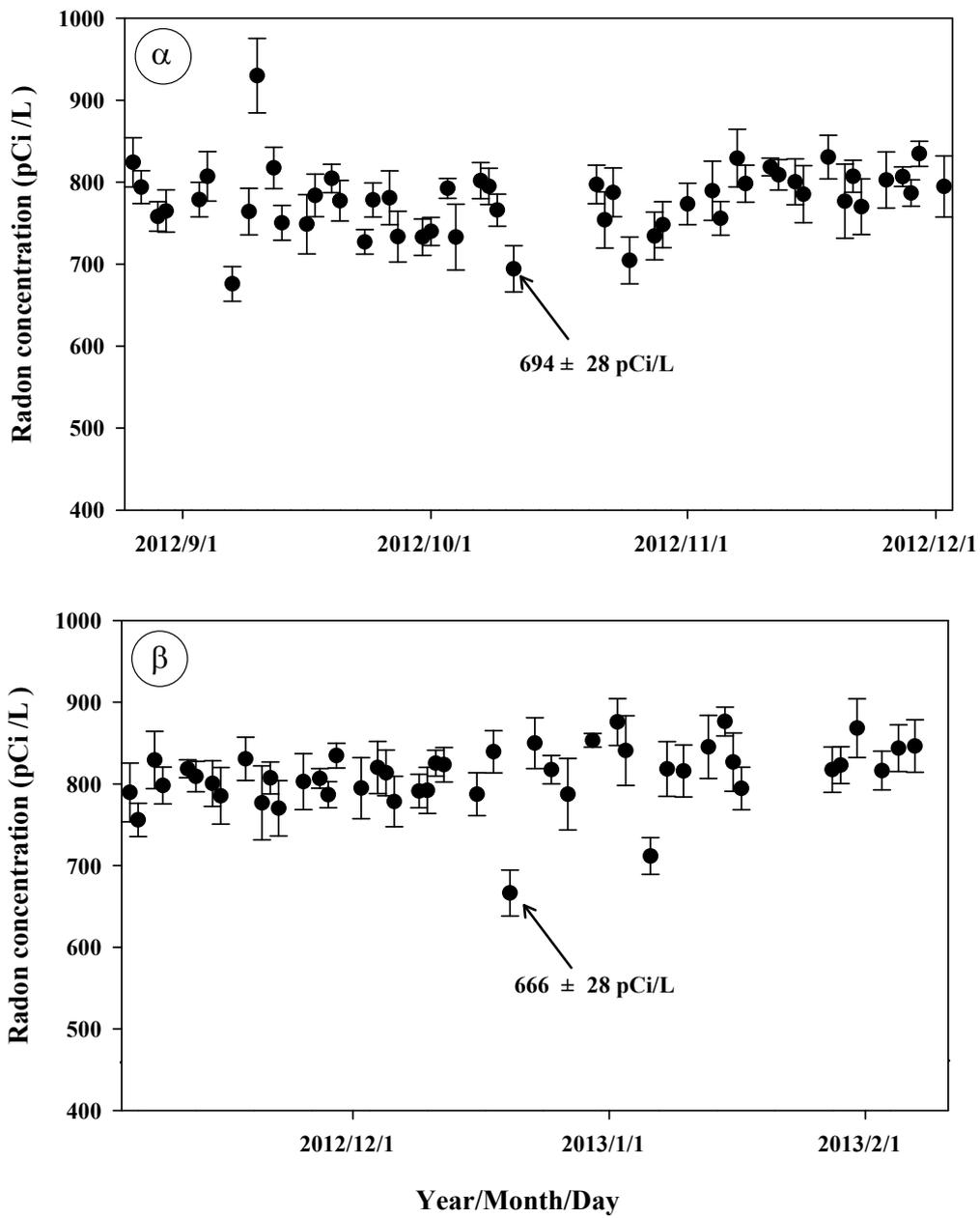


圖 A-2 α 及 β 期間地下水水氣濃度無明顯第二階段序列發生