

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

集集地震前後中部地區地下水成分的變化

Groundwater Chemical Variations before and after the Chi-Chi

Earthquake in Central Taiwan

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學地質科學系

中 華 民 國 90 年 10 月 31 日

集集地震前後中部地區地下水成分的變化

Groundwater Chemical Variations before and after the Chi-Chi Earthquake in Central Taiwan

計畫編號：NSC 89-2116-M-002-016

執行期限：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：宋聖榮 國立臺灣大學地質學系

一、中文摘要

1999 年 9 月 21 日台灣中部發生了芮氏規模 7.3 的地震，震央深度約為 7.5 公里。地震發生後我們收集來自埔里的礦泉水，包括了震前約一年內，以及震後持續至 2001 年 5 月的水樣本，分析礦泉水中的氯離子、氟離子、硝酸根離子和硫酸根離子等。

分析結果顯示硝酸根離子和硫酸根離子的濃度，在 1999 年 3 月以後穩定的增加，6 月和 7 月以後則呈現快速的下降，地震發生後到達最低的濃度，以後則呈現穩定的變化。此種水中離子的變化，我們歸因於地震來臨前的應力變化。當地震來臨前的應力累積，造成儲水層中沉積物孔隙的塌陷，將溶解在孔隙內較高濃度的硝酸根離子和硫酸根離子排出，造成地下水中離子濃度的增加，其後因應力累積而造成岩層的破裂，濃度較低的地下水層或表面水進入抽取的地下水層與之混合，使得離子濃度快速的下降，造成現在所觀察到的現象。這證明地下水化學成分，可能可以用來監測地震的活動性。

關鍵詞：集集大地震、地下水、水化學、應力、孔隙塌陷

Abstract

A large earthquake ($M = 7.3$ and 7.5 km focal depth), called Chi-Chi, occurred on September 21, 1999 in the central Taiwan resulting in the death totally over 2300. After the earthquake we collected commercialized bottled water (namely Chingjing water), pumped from wells at Puli of the central Taiwan, about 10 km northeast of the epicenter within the aftershock region. The anions, e.g., Cl^- , F^- , SO_4^{2-} and NO_3^- , of the bottled water prepared from the last December to after the shocks were analyzed.

The analytical data display that the concentrations of both sulfate and nitrate have increased steadily after March, as compared to the constant level since last December, and reached an excess of 10% in June, then quickly dropped in July and decreased to about 10% and 20% below the

constant values respectively till immediately before the earthquake. These precursory chemical changes are attributed to pre-seismic stress and strain changes. Firstly, prior to the earthquake an increasing of stress might cause the collapses of rock pores to expel the pore fluids with high concentration of sulfate and nitrate into the circulating groundwater system so as to increase their concentrations. Then, strain changes induced mixing of different aquifers with low concentrations of sulfate and nitrate. This result confirms that groundwater chemistry is promising for monitoring earthquakes.

Keywords: Chi-Chi earthquake, Groundwater, Water chemistry, Stress, Pore collapse

二、緣由與目的

地震是目前人類已知的自然災害中，破壞性最大、影響範圍最廣、最無法預測和掌握的災害。翻開過去人類所遭遇過的地震災害，如東京大地震、舊金山大地震、唐山大地震、墨西哥大地震、以及最近的神戶大地震和土耳其大地震，所造成人類的生命和財產的損失，是其他自然災害所無法相比的。台灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交接處，由於兩板塊的相互作用，使得台灣地區的地殼活動特別活躍，斷層活動所引發的地震也特別多。同樣翻開台灣過去地震所造成的災害，以及去年的集集大地震，都造成人民生命和財產極大的損失，令人談震色變。地震雖是破壞性極大的地質災害，對人類的生命和財產常造成重大損失，但是若能在地震發生之前，準確地預測，並預警防範，將可以把災害減到最輕。以往國內對此一地質災害之監測與預測的研究，大都利用地球物理的方法(如全台灣地震網的設立)，甚少利用流體(水和氣)地球化學的方法。通常地震在即將發生前，都可能會有一些物理或化學的前兆，若我們能結合地球物理和地球化學的方法，同時來監測這種地質災害的前兆，必能收集到更為可靠的資料，作為可能發生災害的預警。

在地震、斷層活動的前後，由於地殼的應力作用，會導致地下流體(水與氣)循環系統的改變，

而造成這些流體的相互混合，其成分於地震前後會產生異常的變化，因而可以被廣為用來作為有效的地震前兆。依據 Dobrovolsky et al., (1979) 之研究，在大地的應力作用下，即將發生地震的震源區會形成一個震前岩石變形破裂帶。假設此變形帶為一個以震央為中心的圓，其半徑(ρ ，應變半徑)與地震規模的關係為：

$$\rho = 10^{0.43M} \text{ Km}$$

由此估算，一個規模 $M=5$ 的地震，其應變半徑可達約 140 公里； $M=6$ 的地震，其應變半徑約為 380 公里； $M=7$ 的地震，更可達約 630 公里以上。因此適當地選擇有較深循環的地下水，常有機會反應出地震前兆。而地震前兆出現的時間，一般與測站距震源的距離成反比關係。

從國外的研究結果，顯示在地震發生前後，地震發生地區地下水或自然湧出的溫泉水中的陰離子，如氟離子(F^-)、氯離子(Cl^-)、溴離子(Br^-)、硝酸根離子(NO_3^-)、硫酸根離子(SO_4^{2-})、和磷酸根離子(PO_4^{3-})等，常有異常變化，可供作監測地震的指示因子。國外監測成功的例子有：1975 年中國大陸海城地震($M=7.3$)和 1976 年唐山大地震($M=7.8$)(Li et al., 1985)。1976 年中國大陸 Ninghe 地震($M=6.9$)，(Li et al., 1985)。1979 年前蘇聯的 Priissyk-Kul 地震(Barsukov et al., 1979)。1978 年前蘇聯的 Sultanabad 地震($M=7.3$)前，(Barsukov et al., 1979)。日本 1990 年的 Izu-Oshima-Kinkai 地震($M=6.5$)和 Kanagawa - seibu 地震($M=5.2$)(Igarashi and Wakita, 1995)。1995 年日本阪神發生芮氏規模 7.2 的大地震後，Tsunogai and Wakita (1995, 1996)。1996 年發生在法國芮氏規模 5.2 的 Pyrenean 地震(Toutain et al., 1997)等。

同樣地，美國、日本、法國、義大利、俄羅斯和中國大陸等國，也同樣地偵測到，地震來臨之前，地下水成分確實有異常現象發生 (Barsukov et al., 1985；Huixin and Zuhuang, 1986；King, 1984, 1986；King et al., 1981；Koizumi et al., 1985；Martinelli and Ferrari, 1991；Areshidze et al., 1991；Narasimhan and Palen, 1981；Sugisaki and Sugiura, 1985, 1986；Thomas, 1988；Wakita et al., 1988)。

由許多國外研究成功的案例顯示，於地震發生前幾天至幾個月前，監測站的地下水或泉水成分經常有異常的變化，確實可作為斷層與地震活動的有效前兆之一。而台灣島上又具有從事這些研究的良好條件，如：地震與活動斷層多，溫泉、自噴地下水井、受壓含水層、泥火山多等，若能選擇適當地點，從事長期連續的成分監測，可能可以發現有效的地震前兆，並加以預警和防範，將可以降低地震災害可能帶來的人員傷亡與財產損失。

集集大地震後，筆者和研究生即立刻收集震央地區，以及車籠埔斷層附近的地下水或泉水，進行

水中陰、陽離子的分析，探討地震對地下水水質的可能影響，以嘗試找出斷層和地震活動之前可能的前兆現象。從礦泉水分析結果顯示，在四月時，礦泉水中的硝酸根離子(NO_3^-)和硫酸根離子(SO_4^{2-})已開始有異常出現，離子濃度上升。但到了六月中，離子濃度則呈明顯的下降，到地震發生時離子濃度最低。

從前人的研究顯示(Thomas, 1988)，地震來臨之前會造成地下流體濃度改變的可能機制有：超音速震盪模式(ultrasonic vibration model)、壓力敏感的溶解度模式(pressure sensitive solubility model)、孔隙塌陷模式(pore collapse model)、增加反應面積模式(increased reactive surface area model)和流體混合模式(aquifer breaching/fluid mixing model)等。其中以流體混合模式被廣泛地用來解釋地震造成地下流體異常的原因。

921 集集大地震造成埔里地區地下水中硝酸根離子(NO_3^-)和硫酸根離子(SO_4^{2-})先上升、後下降的可能原因為：地震來臨之前的應力擠壓，先造成孔隙塌陷，孔隙中的水被排出後，因其含較高的離子濃度，所以造成地下水中離子濃度的上升，且因其不是被穩定的排出，所以離子濃度有上下震盪的變化。但隨著應力擠壓的增強，岩層中開始有微裂隙的產生，使不同儲存層的地下水相混合。由於礦泉水中的離子濃度在六月以後明顯地降低，可能是由較低濃度的地下水層，進入目前抽取的地下水層混合，而使得離子濃度降低，造成異常的原因。因不知埔里地區地下水成分長期的背景值，故是否是地震造成的影響，則有待更進一步的研究。

所以，本研究計劃的主要目的，是繼續追蹤研究中部地區地下水和泉水中地震後陰、陽離子成分隨時間的變化，建立其基準值(background)，以及兩季受天水稀釋和季節抽水的變化範圍，以確立因地殼活動所造成的異常變化大小。然後深入探討造成水質異常現象的機制，期望從中能找到中部地區大地震來臨之前的地下水水質變化的前兆。

三、採樣及分析方法

本研究主要的方法是用離子分析儀(IC)分析礦泉水中的氟離子(F^-)、氯離子(Cl^-)、硫酸根離子(SO_4^{2-})和硝酸根離子(NO_3^-)等陰離子。

因地震前的地下水已不可得，故以埔里地區礦泉水公司，取自地下水以製成礦泉水的水樣，來分析其離子成分。在 921 集集地震前至去年十月，礦泉水的樣本約有 120 個樣本，地震當天(九月二十一日)至十月三日，因地震毀壞停工無樣本，從十月四日復工後，採集每星期的地下水原水和礦泉水樣本。

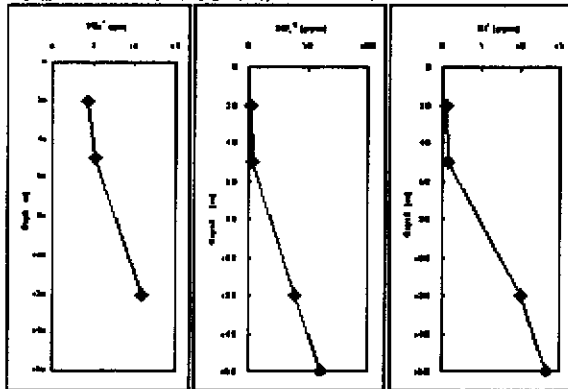
礦泉水公司製造礦泉水的流程為：抽取地下水

後，先用純的石英砂過濾，然後用氯氣殺菌，再用0.2 微米的過濾器過濾，最後封瓶之前再用臭氧殺菌。因擔心處理後會影響水中離子的變化，故首先分析地震過後地下水原水和礦泉水的成分，比較兩者之間的變化，發現原水和礦泉水中的硫酸根離子和硝酸根離子，在處理前後改變不大，可當作追蹤地震前地下水異常的徵兆。

四、結果與討論

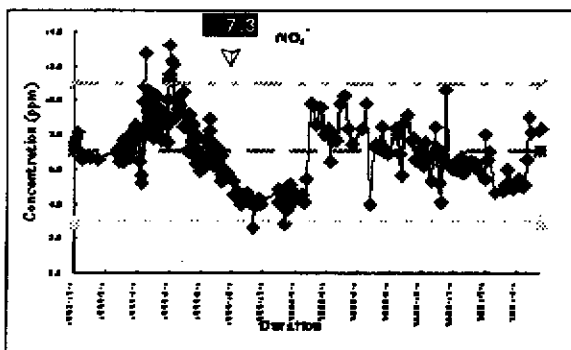
1、離子隨時間的變化情形

圖一是採自埔里地區不同地下水層，硫酸根和硝酸根等陰離子的分析結果，顯示這些陰離子濃度隨著地下水層深度的增加而上升。



圖一：離子濃度隨地下水井深度的變化

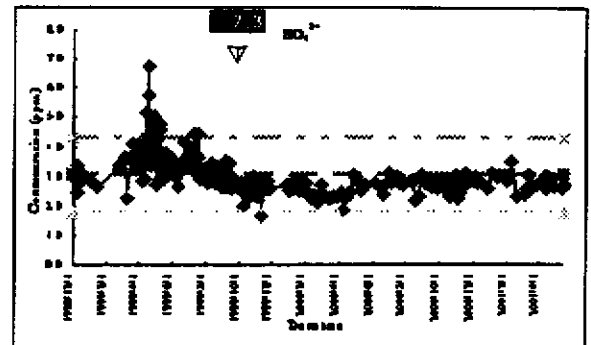
從礦泉水分析結果(圖二和圖三)顯示，在三月時，礦泉水中的硫酸根離子和硝酸根離子已開始有異常出現，離子濃度上升。但到了六月中，離子濃度則呈明顯的下降，到地震發生時離子濃度最低。會影響地下水層水化學的變化，主要與天雨補充有關，圖四是埔里地區過去兩年降雨的變化，相比較後發現地下水中離子的變化和降雨無關。



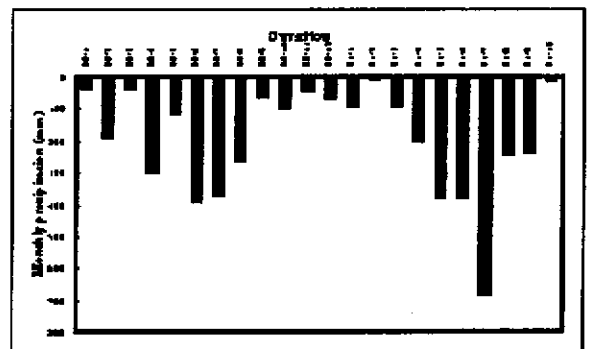
圖二：硝酸根離子濃度隨時間的變化

從前人的研究顯示(Thomas, 1988)，地震來臨之前會造成地下流體濃度改變的可能機制有：超音速震盪模式(ultrasonic vibration model)、壓力敏感的溶解度模式(pressure sensitive solubility model)、孔隙塌陷模式(pore collapse model)、增加反應面積模式

(increased reactive surface area model)和流體混合模式(aquifer breaching/fluid mixing model)等。其中以流體混合模式被廣泛的用來解釋地震造成地下流體異常的原因。



圖三：硫酸根離子濃度隨時間的變化



圖四：埔里地區降雨隨時間的變化

921 集集大地震造成埔里地區地下水先上升、後下降的可能原因為：地震來臨之前的應力擠壓，先造成孔隙塌陷，孔隙中的水被排出，因其含較高的離子濃度，所以造成地下水中離子濃度的上升，且因其不是被穩定的排出，所以離子濃度有上下震盪的變化。但隨著應力擠壓的增強，岩層中開始有微裂隙的產生，使不同儲存層的地下水相混合。由於礦泉水中的離子濃度在六月以後明顯地降低，可能是由淺層、較低濃度的地下水層，進入目前抽取的地下水層混合，而使得離子濃度降低，造成異常的原因。

五、參考文獻

- Areshidze, G., Bellia, F., Biagi, P.F., Caputo, M., Chkuaseli, V., Della Monica, G., Ermini, A., Mandjigladze, P., Melikadze, G., Sgrigna, V., Slavina, L., and Zilpimiani, D. (1991) Anomalies in Geophysical and Geochemical Parameters Revealed on the Occasion of the Paravani(M=5.6)

- and Spitak(M=6.9) Earthquake(Caucasus): Tectonophysics, 202, 23-41.
- Barsukov, V.L., Varshal, G.M. and Zamokina, N.S. (1985) Recent results of hydrogeochemical studies for earthquake prediction in the USSR: PAGEOPH, 122, 143-156.
- Huixin, S. and Zuhuang, C. (1986) Geochemical Characteristics of Underground Fluids in Some Active Fault Zones in China: J. Geophy. Res. 91, 12282-12290.
- King, C.Y. (1984) Earthquake Prediction: Evaluating Hydrological and Geochemical Anomalies: Nature, 312, 501.
- King, C.Y. (1986) Gas Geochemical Applied to Earthquake Prediction: An Overview: J. Geophy. Res., 91, 12269-12281.
- King, C.Y., Evans, W.C., Presser, T. and Husk, R.H. (1981) Anomalies Chemical Changes in Well Waters and Possible Relation to Earthquakes: Geophy. Res. Lett., 8, 425-428.
- Koizumi, N., Yoshioka, R. and Kishimoto, Y. (1985) Earthquake Prediction by means of Change of Chemical Composition in Mineral Spring Water: Geophy. Res. Lett. 12, 510-513.
- Martinelli, G. and Ferrari, G. (1991) Earthquake Forerunners in a Selected Area of Northern Italy: Recent Development in Automatic Geochemical Monitoring: Tectonophysics, 193, 397-410.
- Narasimhan, T.N. and Palen, W.A. (1981) Interpretation of a Hydraulic Fracturing Experiment, Monticello, South Carolina: Geophy. Res. Lett., 8, 481-484.
- Sugisaki, R. and Sugiura, T. (1985) Geochemical Indicator of Tectonic Stress Resulting in an Earthquake in Central Japan, 1984: Science, 229, 1261-1262.
- Sugisaki, R. and Sugiura, T. (1986) Gas Anomalies at Three Mineral Springs and a Fumarole Before an Inland Earthquake, Central Japan: J. Geophy. Res., 91, 12296-12304.
- Thomas, D. (1988) Geochemical Precursors to Seismic Activity: PAGEOPH, vol. 126, 241-266.
- Toutain, J.P., Munoz, M., Poitrasson, F. and Lienard, A.C. (1997) Springwater chloride ion anomaly prior to a ML=5.2 Pyrenean earthquake: Earth and Planet. Sci. Lett., 149, 113-119.
- Tsunogai, U. and Wakita H. (1995) Precursory Chemical Changes in Ground Water: Kobe Earthquake, Japan; Science, 269, 61-63.
- Tsunogai, U. and Wakita, H. (1996) Anomalous Change in Groundwater Chemistry – Possible Precursors of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan: J. Phy. Earth, 44, 381-390.
- Wakita, H., Nakamura, Y. and Sano, Y. (1988) Short-term and Intermediate-term Geochemical Precursors: PAGEOPH, vol. 126, 267-278.