

## 921 集集地震斷層的特性

陳文山

國立台灣大學地質科學系

### 1. 前言

1999年9月21日凌晨1時47分，台灣發生了二十世紀以來規模最大的地震，也是台灣近半世紀以來唯一地震規模大於7的地震（芮氏規模7.3）。這是百年以來第二慘重的地震災害，根據統計有2,539人死亡與失蹤，受傷人數約有12,000人，房屋全毀51,753戶，半倒54,406戶。

九二一集集地震所釋放的能量非常之大，相當於46顆日本廣島原子彈同時引爆所釋放的能量。21日凌晨主震發生之後數月之內陸續發生一萬多次的大小餘震，其中約有四百多次的有感地震，有5次餘震的規模大於6，其中最大的餘震是在一個月之後10月22日發生在嘉義（嘉義地震），規模達6.8，也造成嚴重的災情。

九二一集集地震造成地表變動的規模與改變是有史以來少見的現象，也讓地質學家感到驚訝不宜，長達100公里的地表斷裂是極為少見的現象，而在台中縣石岡鄉地區的地表隆起高度達10公尺，水平壓縮量達數十公尺，更是讓全世界的地質學家僅見的地質現象。地表的破裂經過了中部地區許多的鄉鎮，由北至南有卓蘭、石崗、豐原、太平、大里、霧峰、草屯、中興新村、名間、竹山等；但鄰近斷層與震央的人口集中鄉鎮有台中市、彰化市、員林市、集集鎮、東勢鎮等，同樣慘遭強大地震的摧毀，甚至遠至200公里之遙的台北市也造成嚴重的災情。

以今日的科技而言，科學家對於颱風、洪水與火山爆發都已經可以預測，但是唯有地震災害還是人類不可預測的「天災」。台灣島是目前世界上少數幾個處在板塊碰撞的環境，因此地殼不斷的受到擠壓，而地震也不斷的產生，這是台灣島數百萬年以來的宿命，沒有板塊擠壓就沒有今日的台灣島。100年來台灣人民曾經歷了1906年梅山地震、1909年台北地震、1935年新竹-台中地震、1941年嘉義中埔地震、1946年台南新化地震、1951年花東地震。這些地震的規模都大於7，也都造成重大傷亡。從百年來的地震更可以清楚地了解到台灣地區大地震的發生率是如此的頻繁，假如再從台灣島的人口密度來看（台灣人口密度為全球第二位，

每平方公里約 650 人)，台灣更是屬於全球地震災害最危險的區域之一。

從科學與歷史紀錄來看，只要板塊擠壓力量持續的作用，大地震還會再度的造訪我們。雖然，地震是居住在台灣島上人民的宿命，如果能藉此讓全國民眾了解我們是居住在一個活躍的地球板塊之上，應該積極認識台灣的地質環境，體會大自然力量的可畏，才能與這塊土地和平相處，共同成長。

## 2. 集集地震特性

九二一集集地震造成地表長約 80 公里的地表破裂，以及在卓蘭—石岡地區形成寬約 20 公里的地表褶皺變形帶（圖 1）。陳等人（2001）依照地表破裂的形態與地質特性將地震斷層帶劃分為 4 個斷層區段（segment），由南至北為竹山段、草屯段、石岡段與卓蘭段（圖一）。這些區段大都以一條右移的平移斷層為分界。上述斷層區段都可以對比至斷層，竹山段為大尖山斷層，草屯段為車籠埔斷層，石岡段為石岡斷層（陳等人，2000）。從地震斷層的構造特性來看，竹山段（大尖山斷層）為右移為主的平移斷層。草屯段（車籠埔斷層）的移動方向為北偏西  $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，傾角約  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$  向東，屬於正衝的逆斷層。石岡段（石岡斷層）為北偏西  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，傾角約  $30^{\circ}$  向東，屬於左向斜移逆斷層；卓蘭段以褶皺為主，形成一主要的背斜構造，由背斜軸向來看主應力方向約為北偏西  $40^{\circ}$ （陳等人，2000，2001）。卓蘭—石岡段與草屯段的破裂型態有很大的差異，草屯段（車籠埔斷層）呈現向西逆衝的作用，石岡斷層朝西北逆衝的左向斜移逆斷層（圖一）。

從強地動震波模擬結果，顯示地表的破裂形式，地震初動前 16 秒的地表破裂主要從南側開始，是沿著車籠埔斷層與大尖山斷層破裂。之後，地表破裂才延伸至北側，即卓蘭—石岡段的地表變形（圖二）。高與陳（Kao and Chen，2000）分析主震時將主震分為 5 個地震序列（earthquake subevent），地震序列依次順時針方向由南向北發生；顯示地震活動的序列似乎是由南向北。初動前 16 秒的地表破裂主要沿著草屯—竹山段（車籠埔—大尖山斷層）活動，斷層位移大致朝正西移動，模擬結果與地震斷層量測結果相似（圖一）。16 秒之後，地震震央移至北側發生造成卓蘭—石岡段（石岡斷層）的地表破裂，上盤地塊朝向西北移動與地表量測結果相似為北偏西  $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ （圖一）。另外，由地震之後 GPS 量測結果（土地測量局，2000），顯示南段的位移方位與斷層破裂或強地動的震波模擬結果有所差異，GPS 結果為北偏西  $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，與斷層帶上所量測為北偏西  $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，相差約  $10^{\circ}$ 。

~30°。本文認為從地表破裂的時序，可以解釋為何草屯段破裂帶量測的斷層位移向量與 GPS 量測結果不同。地震發生初期（約 16 秒之內）草屯段朝西逆衝，因此斷層帶量測結果大致為朝正西的移動。16 秒之後，地震活動移至北側（卓蘭—石岡段），上盤地塊向西北逆衝，造成草屯段被拖移朝向西北移動，而使原本朝西的移動向量再加上朝西北移動向量，造成震後 GPS 量測結果為北偏西 60°~70°。

地震斷層是否為兩條不同斷層，從遠震逆推模擬結果顯示，南北兩側斷層面之上所形成凸起體（asperity）的特性極為不同，南側形成小區域的凸起體，北側在斷層面上則形成一個大面積的凸起體（Lee and Ma, 2000），分界大致位於車籠埔斷層與石岡斷層的交接處。從上述分析主震各種特性來看，顯示南北兩側斷層的活動與斷層面性質似乎有極大的不同。

西部麓山帶屬於薄皮逆衝斷層（thin-skinned thrust）作用形成的構造帶，是經多次逆衝斷層作用形成覆瓦狀的褶皺山脈（Suppe, 1981）。震測剖面發現在車籠埔斷層以東地區，形成一向東傾斜約 30°~40°的斷坡構造（Suppe, 1986）。逆衝斷層的斷坡是較陡的斷層面，因而在擠壓過程中欲使斷層移動時必須產生較大的正應力才能克服斷坡上的摩擦力（剪應力）。地震發生之前（inter-seismic），斷坡面會造成應力在凸起體的區域。因而褶皺逆衝帶的斷坡面可能都是引發較大規模地震的位置（Shaw and Suppe, 1994；Chen et al., 2001）。集集地震形成凸起體的區域，就位在車籠埔斷層與三義斷層的斷坡。

逆衝斷層的斷坡—斷坪構造可以由地殼的抬升速率解析出地下的構造形貌，斷層活動時斷坡上地塊除向前移位外還沿著斷坡向上抬升，其抬升量會大於斷坪（脫底斷層）上的地塊。從集集地震的同震變形就明顯看出車籠埔斷層的斷坡與脫底斷層的位置，上盤呈現寬約 5~20 公里的抬升區，抬升最大區域位在接近地震斷層的前緣，愈向東抬升量愈小，抬升的區域表示位在斷坡之上；抬升區東側的雪山山脈呈現沈降，下陷區即位在脫底斷層之上（Chen et al., 2001；圖三）。從阿爾卑斯山（Jouanne et al., 1995）與喜馬拉雅山（Jackson and Biham, 1994）地區大地測量結果來看，也顯示在逆衝斷層斷坡之上地塊的隆起速率較大，而脫底斷層之上地塊則呈現下陷；因此地下構造形貌可以由同震變形以及長期的震間變形來估算。

九二一主震中由第五個地震序列所構成，S1 與 S2 地震序列發生在草屯段（車籠埔斷層），S3 與 S4 地震序列發生在石岡段（石岡斷層），S5 地震序列位在雪山

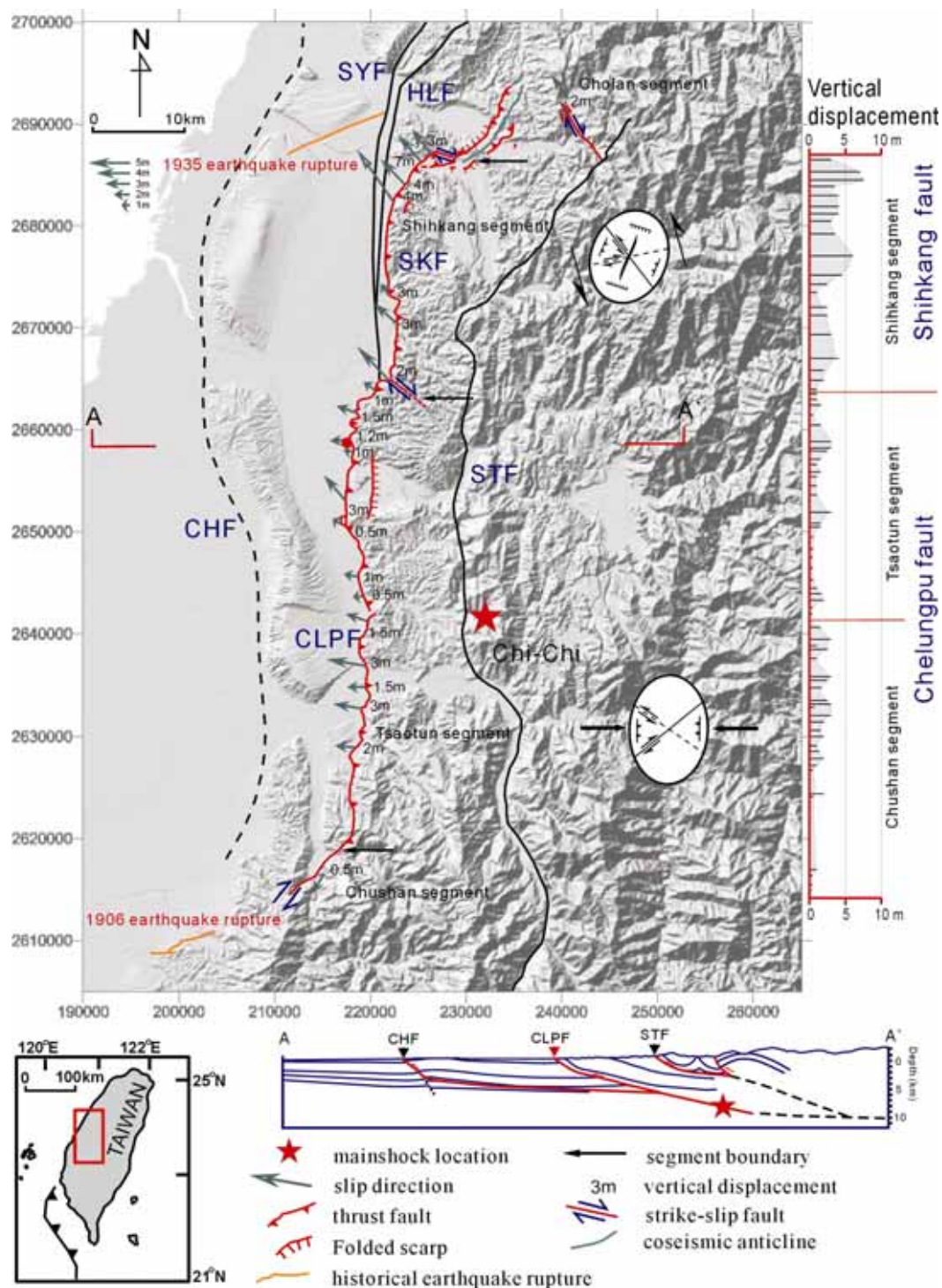
山脈，震源機制屬於正斷層（Kao and Chen, 2000）。從地震序列來看，S1-S4 是與兩條前緣逆衝斷層的活動有關，而 S5 地震序列則可能是斷坪地塊快速向前移動時造成後側斷坪地塊形成張裂作用（Chen et al., 2001）。長期以來中央山脈區域的地震機制有許多屬於正斷層的作用（Kao et al., 1998）；從地形來看，同震的沈陷區呈現數個山間盆地計有埔里、魚池、日月潭、頭社與統櫃等盆地，印證此地區長期以來呈現張裂的作用（圖三）。這些正斷層的作用是否與麓山帶的逆衝斷層作用有關，或與造山帶的均衡作用（isostatic）所產生的正斷層作用有關是值得深入探討的問題。另外，由河階分布亦顯示位在斷層尖端上盤區域呈現多重河階地形，表示斷坡快速的抬升（圖四；陳等人，2000b；Chen et al., 2002；Chen et al., 2003）。

## 參考文獻

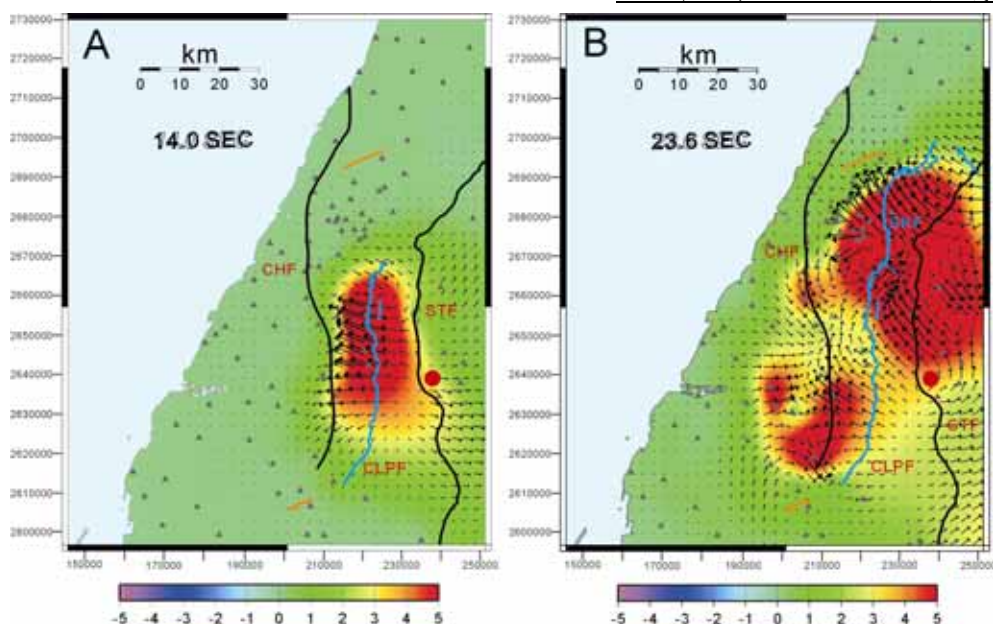
- 土地測量局（2000）土地測量局網站。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2000）921 集集大地震的地震斷層特性與構造意義：經濟部中央地質調查所特刊，12，139-154。
- 陳文山、楊志成、黃柏壽、陳于高、石瑞銓、李元希、張徽正、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2001）從台灣中部地區西部麓山帶的地質構造來看集集地震斷層的特性。地質，21，1，19-36。
- Chen, W.S., Huang, B.S., Chen, Y.G., Lee, Y.H., Yang, C.N., Lo, C.H., Chang, H.C., Sung, Q.C., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H., and Lee, K.J. (2001) Chi-Chi Earthquake, 1999 September 21: A case study on the role of thrust-ramp structures for generating earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 91, 5.
- Chen, W. S., Y.G. Chen, Shih, R.C., Liu, T.K., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H., Lee, K.J. (2003) A modern Analog of the Out-of-sequence Thrust System in Relation With the Chi-Chi Earthquake Ruptures in the Western Foothills, Central Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 473-480.
- Chen, Y.G., Chen, W.S., Wang, Y., Lo, P.W., Lee, J.C., and Liu, T.K. (2002) Geomorphic evidence for prior earthquakes: Lesson from the 1999 Chichi earthquake in central Taiwan. *Geology*, 30, 2, 171-174.
- Jackson, M., and Biham, R. (1994) Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet. *Jour. Geophys. Res.*, 99, 13897-13912.
- Jouanne, F., Menard, G., and Darmendrail, X. (1995) Present-day vertical displacements in the north-western Alps and southern Jura Mountains: Data leveling comparisons. *Tectonics*, 14, 3, 606-616.
- Lee, S.J., and Ma, K.F. (2000) Rupture Process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake from the Inversion of Teleseismic Data. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 11, 3, 591-608.
- Kao, H., Shen, S. J., and Ma, K. F. (1998) Transition from oblique subduction to collision: Earthquakes in the southernmost Ryukyu arc-Taiwan region. *Jour. Geophys. Res.*, 103, 7211-7229.
- Kao, H., and Chen, W.P. (2000) The Chi-Chi Earthquake sequence: Active, Out-of-Sequence Thrust Faulting in Taiwan. *Sciences*, 288, 2, 346-2,349.

Shaw, J.H., and Suppe, J. (1994) Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 106, 607-626.

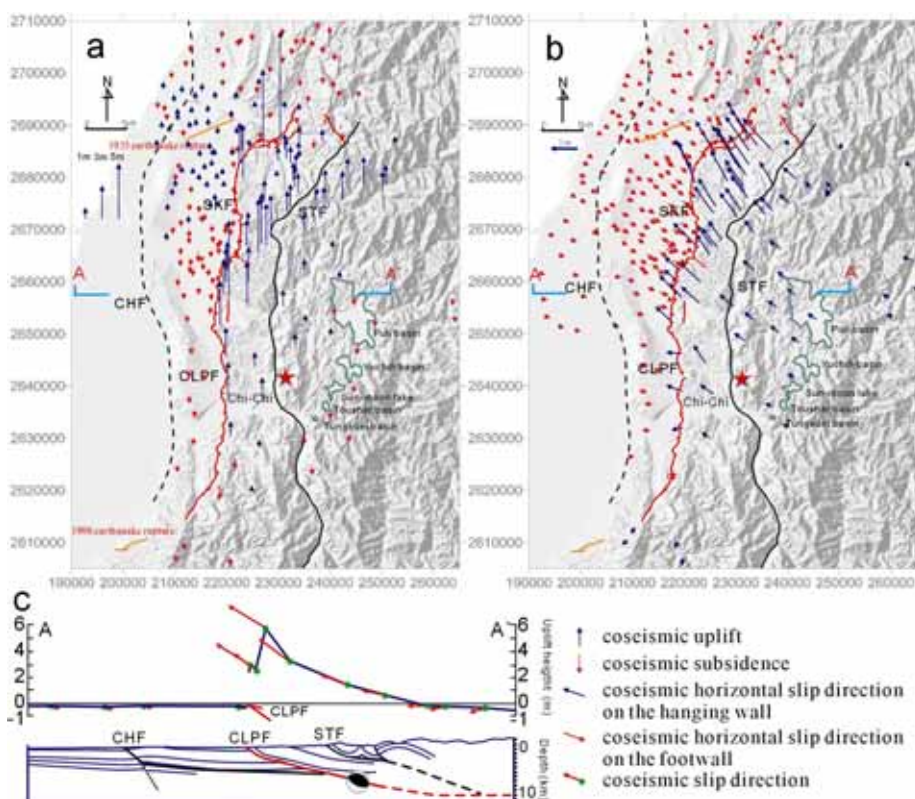
Suppe, J. (1981) Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 4, 67-89.



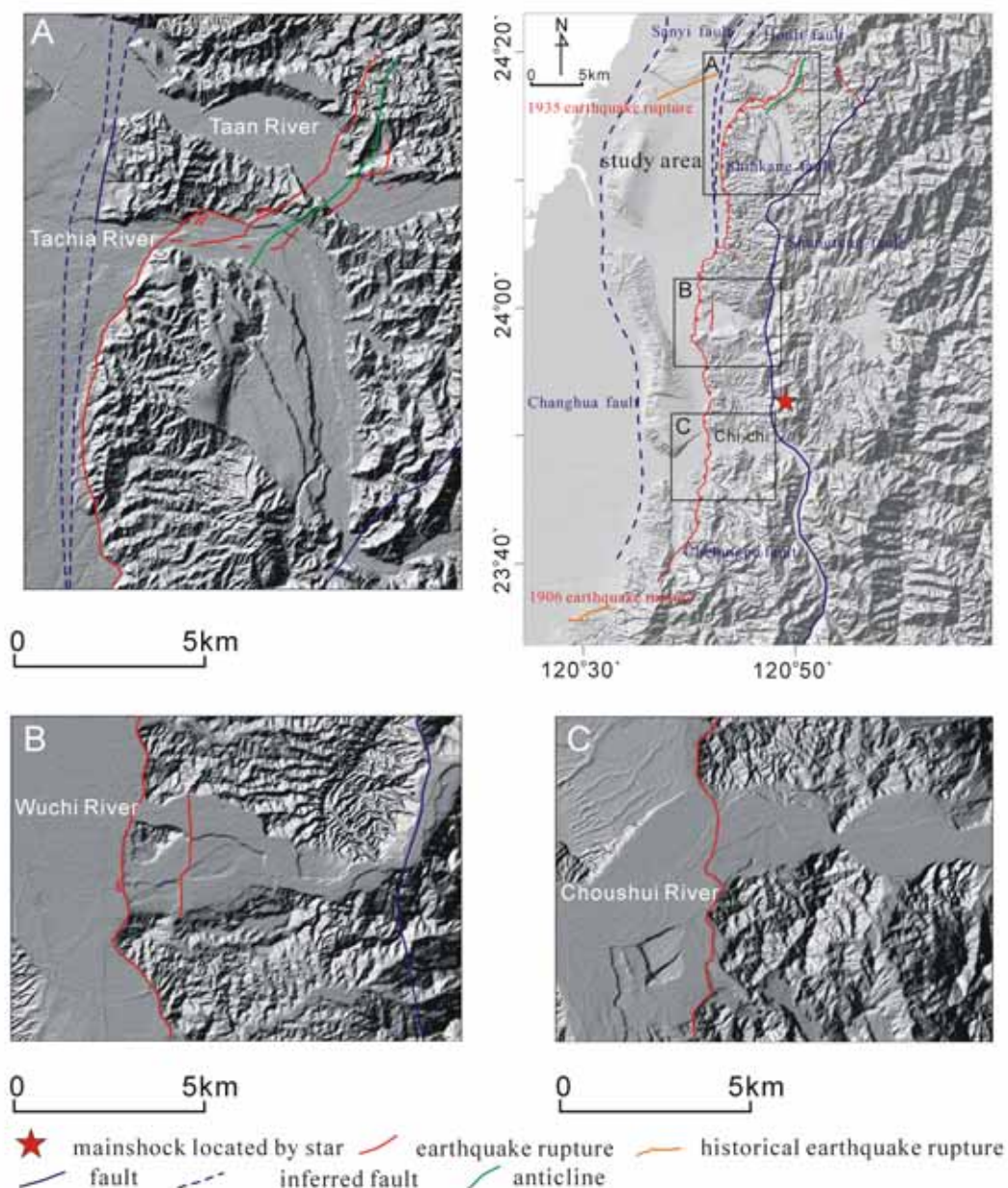
圖一、九二一地震地表破裂位置，斷層分為四個區段為卓蘭段、石岡段、草屯段與竹山段 (Chen et al., 2001)。



圖二、(A)強地動震波模擬結果表示 14 秒時地表變形位在南段（車籠埔斷層）。(B)23.6 秒（16 秒之後）地表變形轉移到北段（石岡斷層）（陳等人，2001）。



圖三、紅色為下陷,藍色為抬升,埔里盆地與日月潭地區的同震變形呈現下陷,此區域可能位在車籠埔斷層的脫底斷層之上（Chen et al., 2001）。



圖四、(A)大甲溪的新社階地群，(B)烏溪的草屯階地群，(C)濁水溪的竹山階地群。全新世階地主要分布在九二一地震斷層上盤（紅線為九二一地震斷層）。