

# 1991年3月佳里地震序列的研究

辛在勤 張建興 江嘉豪  
中央氣象局地震測報中心

## 摘要

臺南地區自1964年白河地震後一直未有明顯的地震能量釋放，因此1991年3月的佳里地震序列雖只造成輕微的震害，而其後在1993年8月又再發生一次規模較小的地震序列，這兩次地震序列都發生在未曾發生過災害性地震的區域內，他們的地震特性確實值得深入探討。

佳里地震序列就空間分布而言在1975年曾文溪口群震的北方，如依其發生的時間分析，此序列的空間分布與該群震有相同的走向。分析1991年後的兩個地震序列，有類似的斷層面解，顯示佳里地震序列主要是東西方向的壓力造成向東北傾斜約 $60^{\circ}$ 的左向平移錯動。

利用佳里地震序列的地震分析震源模式，由地震矩和規模、截角頻率的關係中，發現規模小於3.5的地震有較大的地震矩及較小的截角頻率。

## 一、前言

追溯臺南地區地震活動，從1900年起至今可發現93年的時間期內共有15個地震造成地震災害（表1），其中前14個災害性地震，皆發生在以梅山斷層、觸口斷層和新化斷層為範圍的區域內，這個區域就是大家熟悉的臺南震區。而這些地震的發生與這些斷層的活動有著非常密切的關係。從1989年起地震學家分析此地區自1964年白河地震後，一直未有明顯的地震能量釋放，粗估其間所累積的能量應相當可觀（辛和呂，1990）。有鑑於此，該地震區的地震活動即為台灣地區的地震學者密切注意的事情。

圖1a為1900年至1993年間在臺南地區所發生規模大於5.5的地震分布圖，圖中實心圓點表地震發生的位置及大小，分布成網格狀是因為歷史地震位置的準確度只到0.1度，圖中之線段上標有阿

拉伯數字是依據Hsu and Chang (1979) 所定義之第四紀斷層，其各自之名稱則列於圖右。值得注意的是佳里地震（箭頭所指）在其方圓20公里內並未曾發生過其他規模大於5.5的地震。圖1b和圖1c分別為圖1a地震在時間上發生的序列和地震能量釋放累積曲線圖。綜合此二圖，從能量觀點而言，1906、1930及1941年有較大的能量釋放，雖然在1964年有10個規模大於5.5的地震發生，但與之前之地震能量釋放顯然並不顯著。從圖1c曲線的走勢非常難界定其能量釋放的上下限，但如以1906、1930及1941年的能量釋放為邊界，則此地區在1970年開始已進入了能量釋放期，至今估計已累積了足以發生規模7.0以上的地震。如仔細分析1941年以後的曲線，則50年來亦累積了相當大的地震潛能。

當地震觀測的焦點放在這個地區的時候，台南縣佳里鎮西北方約15公里處的外海，在1991年

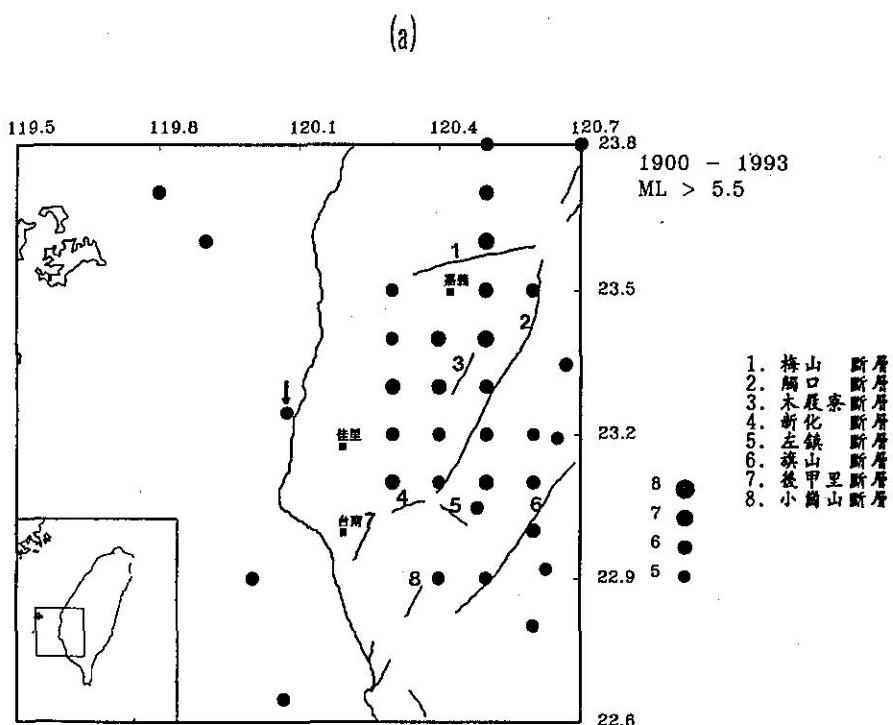
3月12日發生了規模5.7的地震，其後在10日內接連發生百次以上的餘震，而形成一個完整的地震序列。很明顯的這個地震並不是地震學者所談論及等待的地震。就位置而言，它發生在嘉南震區的西方，在過去並沒有災害地震發生過，甚至於在1991年3月以前是一個地震活動度非常低的地方，而在地表上也看不出有任何斷層走向與其相關。而在該次地震後，這個小區域（佳里西北方）的地震活動較之以前有很明顯的增加（每月平均5—10次的地震），甚至於1993年8月16日深夜發生規模4.7的地震，在此地震之前的兩小時內有6次的前震，之後的一天內有24次的餘震。綜合上述的地震觀測，此一小區域似乎形成了一新的震區。就地緣觀點而言，此一震區在嘉南震區的西緣，1975年曾文溪口群震區（許麗文和何美儀）的北方。

本研究利用中央氣象局地震觀測網所蒐集的地震資料，從地震活動度、地震分布特性以及震源特性等方面來探討佳里地震序列的地震特性。

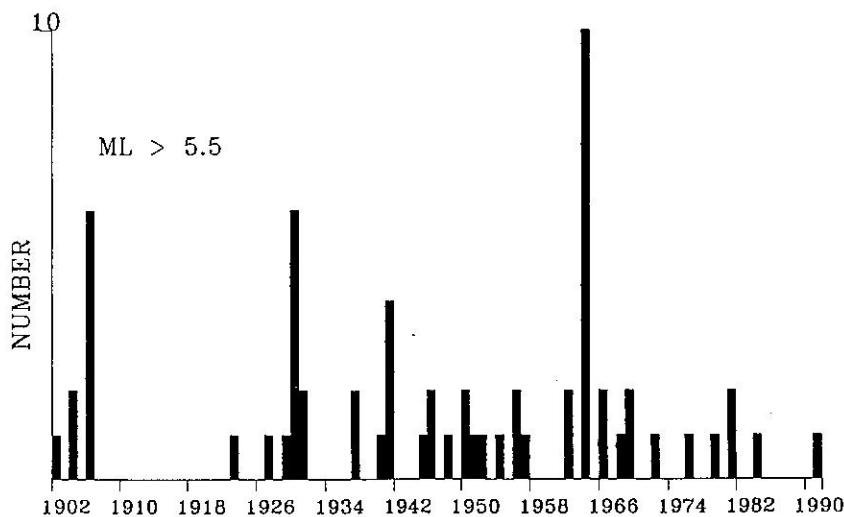
## 二、佳里地震的巨觀描述

佳里地震發生於1991年3月12日14時4分6.15秒，地震規模5.7，地震位置為北緯 $23.25^{\circ}$ ，東經 $120.08^{\circ}$ ，地震深度為11.85公里。此地震在台南縣佳里鎮西北的北門鄉和將軍鄉造成了輕微的震害，圖2為地理上的相關位置圖及相關之災害照片，圖中以點線圍成的圓形區為主要震害區，北門鄉一所民宅的磚牆倒塌，舊埕村一間三樓透天厝之牆壁多處龜裂，將軍鄉青山漁港防波堤多處裂開，馬沙溝鹽興橋橋頭兩邊塌陷，路面多處龜裂，長平國小之圍牆倒塌，將軍國小之禮堂屋頂塌陷，而且在將軍鄉有多人耳聞如音爆似的地鳴。

根據中央氣象局和中正大學所蒐集的強地動資料，圖3為佳里地震的等震度圖，圖中實心圓為地震位置，實心方形為有強震資料之站址（站址之位置資料見表2），阿拉伯數字則為震度級（中央氣象局震度級），有感範圍北至新竹，南至高雄，東到阿里山，有感面積（陸地上）約在1萬兩千平方公里左右。表2 同時列出各觀測站在三方向之最大加速度值(PGA)。



(b)



(c)

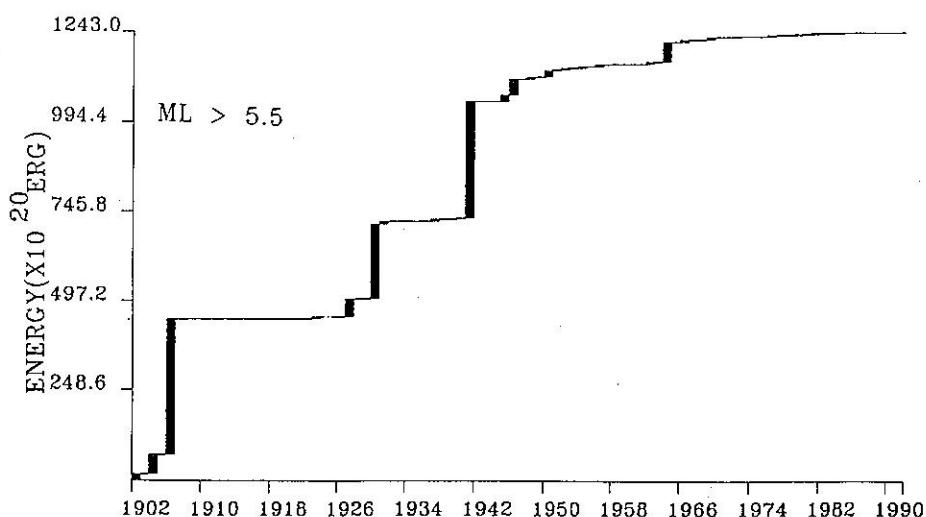


圖1. 1900-1993年嘉南地區地震規模大於5.5之特性分析,(a)空間上之分布，箭頭所指為1991年佳里地震位置，圖中阿拉伯數字標明第四紀斷層位置，(b)時間上之分布圖，(c)地震能量釋放之累積圖。

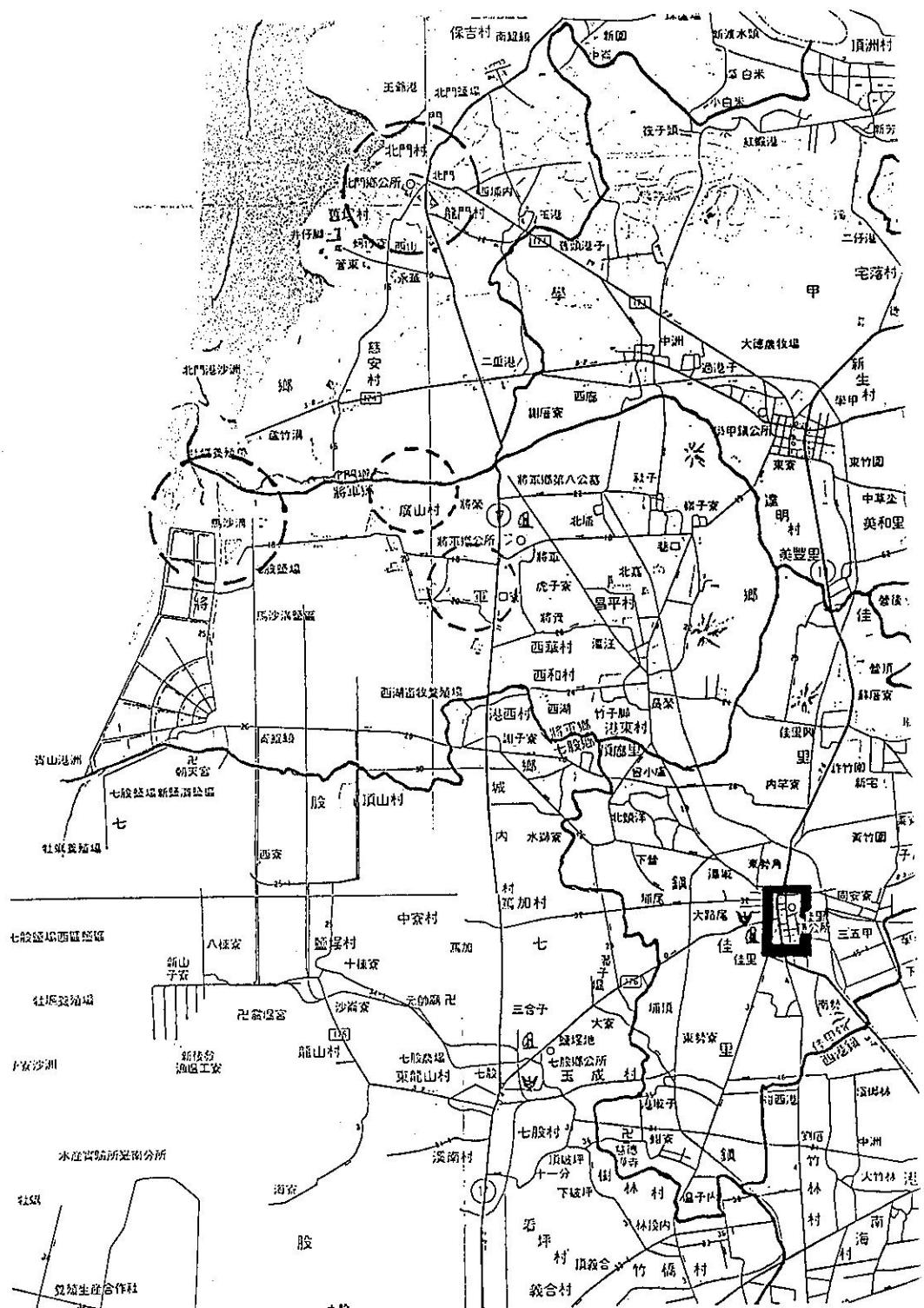
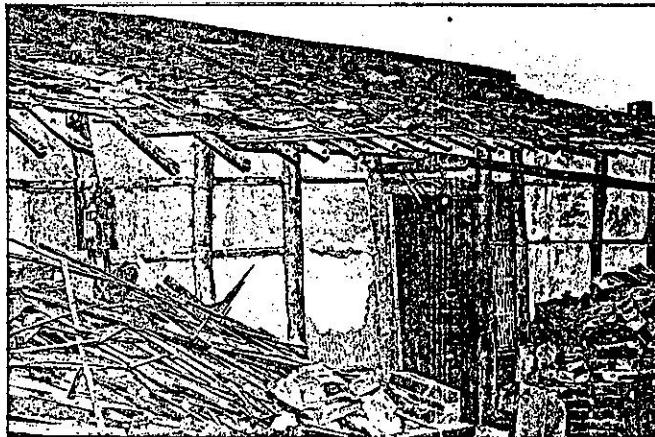
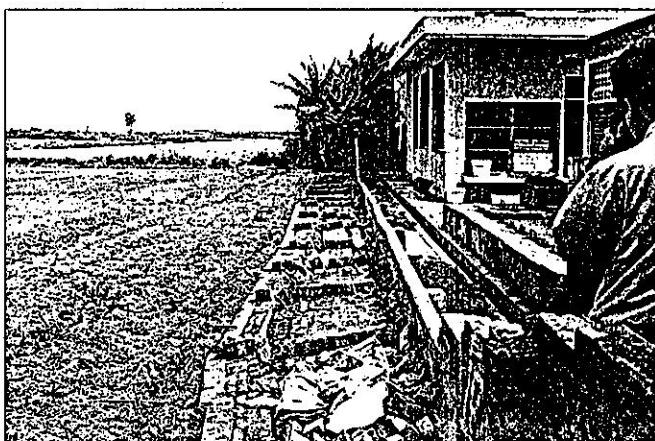


圖2. 1991年佳里地震震害區地理圖，點線圓表主要震害區。

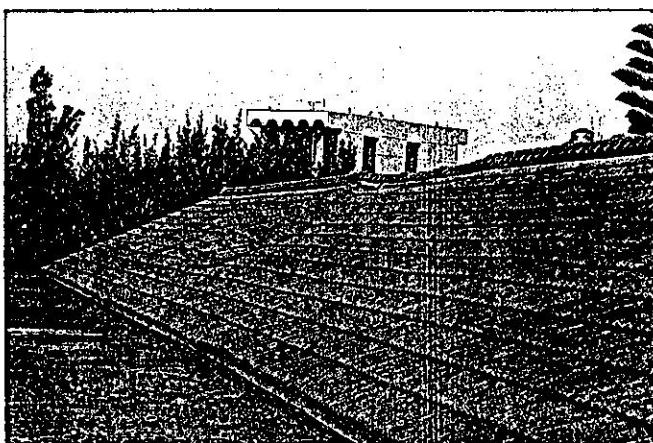
1991年佳里地震震害照片。



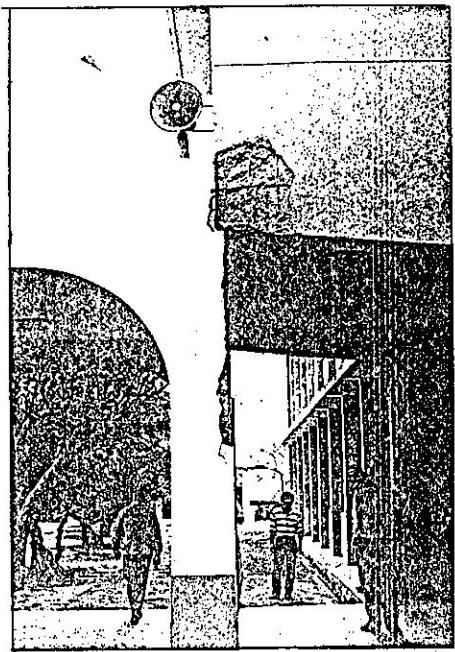
北門鄉民宅損壞



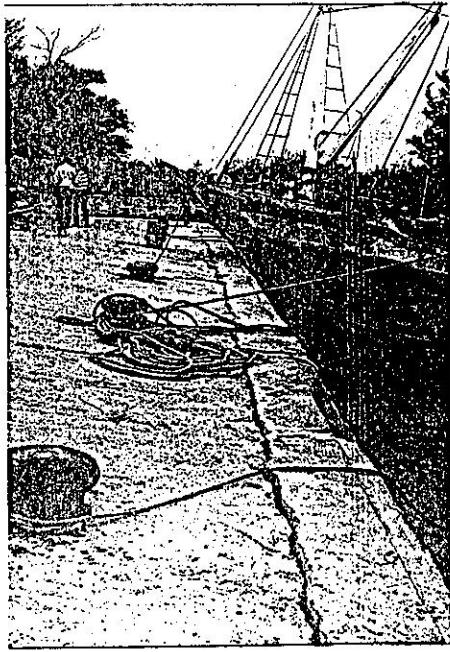
長平國小圍牆倒塌



將軍國小禮堂屋頂塌陷



將軍國小建築錯動



將軍鄉青山漁港波堤裂開



將軍鄉鹽興橋兩邊倒塌



赤崁樓文昌廟後屋頂柱下垂



舊埕村三樓房屋多處龜裂

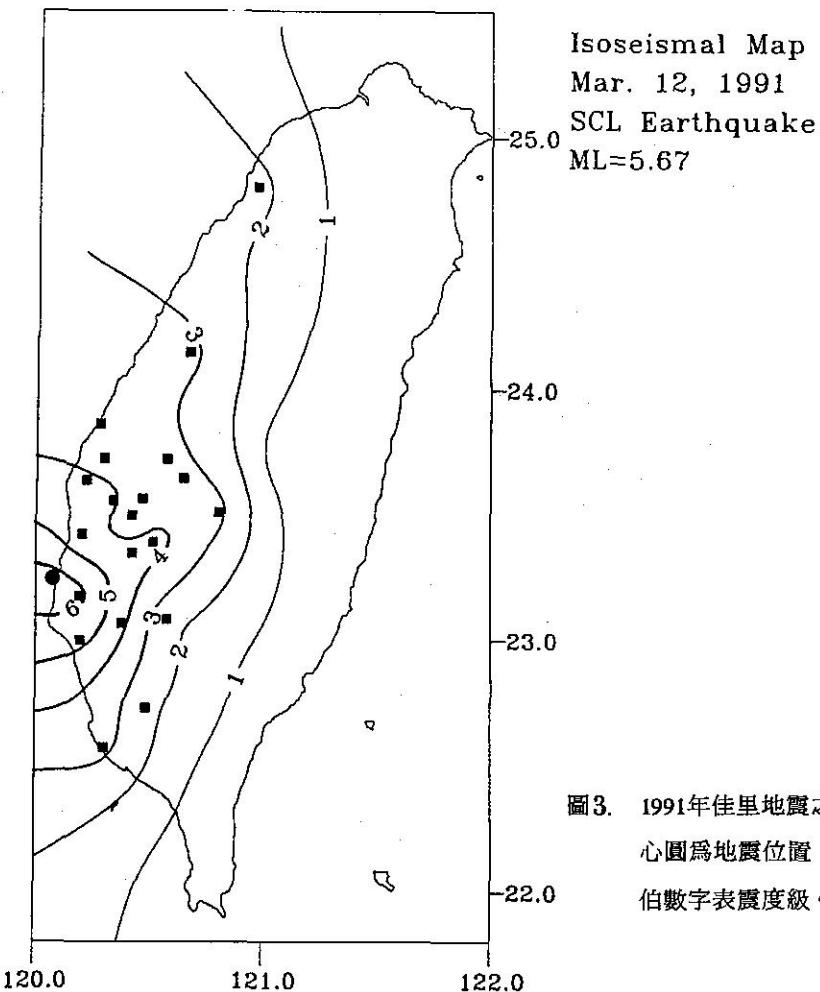
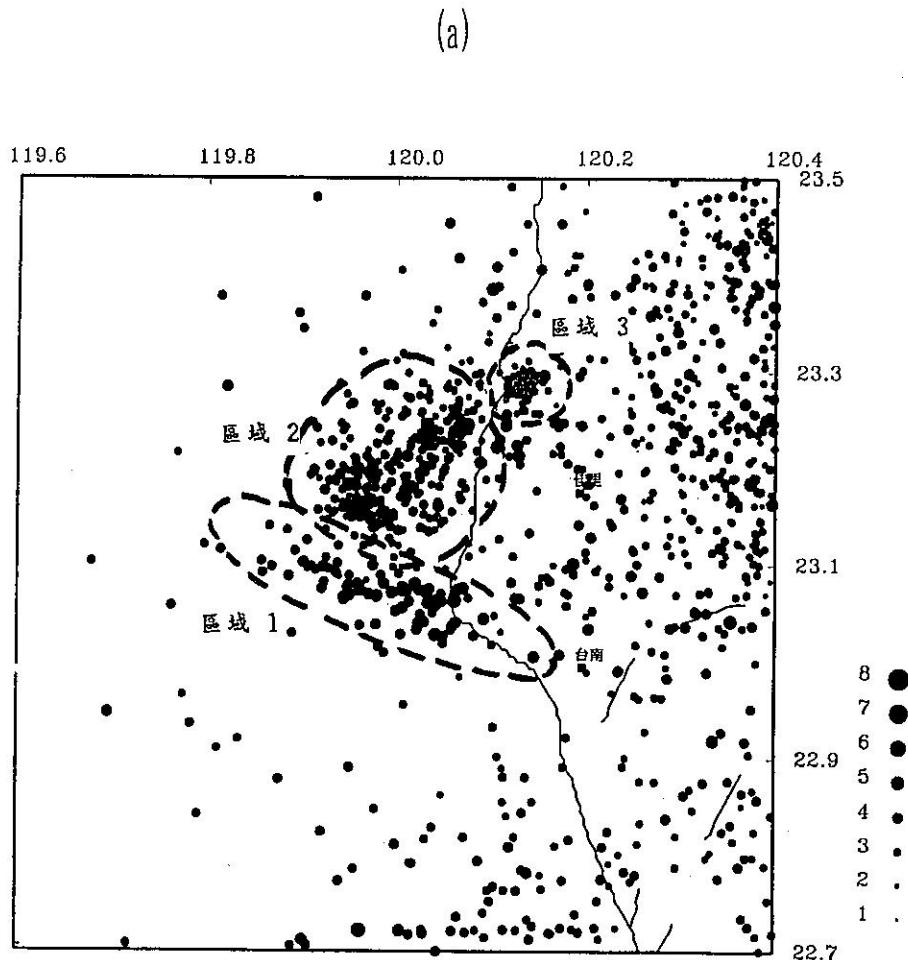


圖3. 1991年佳里地震之等震度圖，圖中實心圓為地震位置，等震度線上之阿拉伯數字表震度級。

### 三、地震活動分析

圖4各圖為嘉南地區自1973至1993年8月的地震活動圖(1973年是中央研究院地球科學研究所台灣遙測地震網開始運作的時間，自此台灣地區始有較完整的地震觀測)，圖4a是全部地震的空間分布圖，圖4b為在時間上的分布圖。從空間分布來看，最明顯的地震群是在佳里西方，而此地震群又可細分為三個區如圖所示。如依時間上來看，區域1屬於1975年7月曾文溪口的群震區，該群震

區以東南—西北方向的斜線分布為主，區域2則是1991年3月的佳里地震序列區，佳里地震序似乎又可細分為兩群，其走向仍約略有如1975年群震分布的特性，區域3較小，發生於1993年8月，此地震序列則甚為集中。從圖4b地震的時間序列，可發現自1991年起地震活動趨於頻繁，是否因1991年中央氣象局地震網正式運作，提高偵測功能的結果？則需進一步探討。圖4c為嘉南地區21年來地震再現迴歸分析及規模統計圖， $\log N=5.9-0.93$  ML適用於規模2.8至5.6之間。



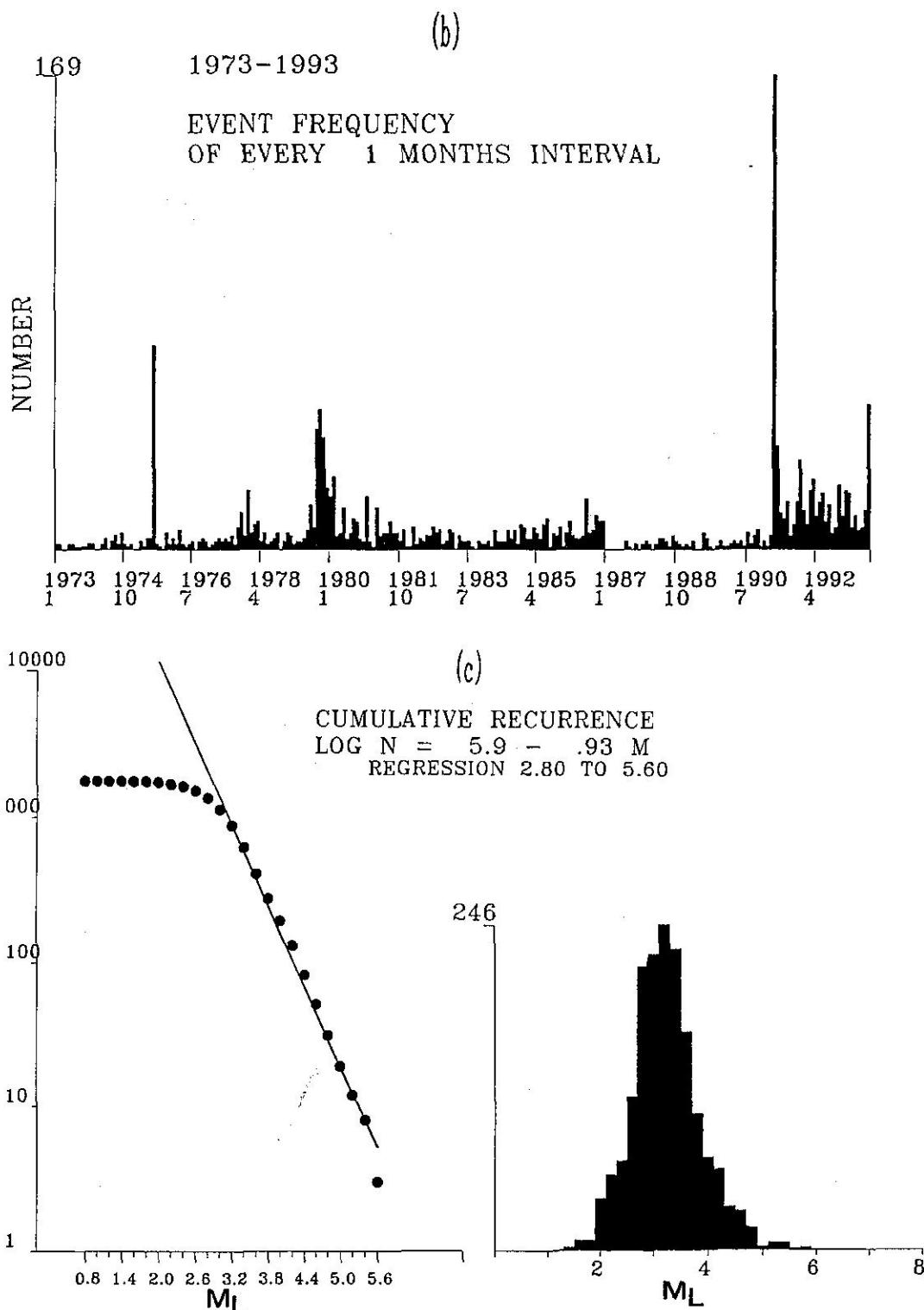
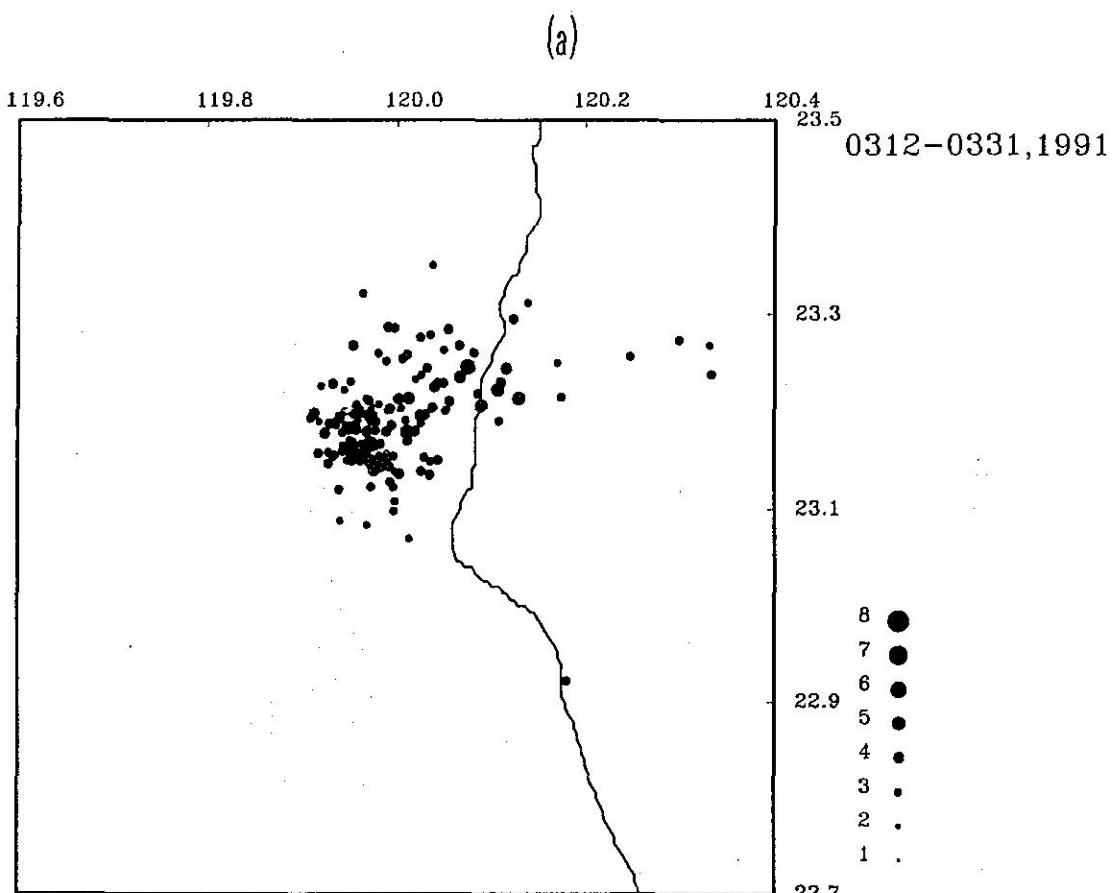


圖4. 1973-1993年嘉南地區地震活動圖(a)空間分布，大致上可有三群較集中之地震分布見圖所示，  
(b)時間上分布，(c)地震再現迴歸分析及規模統計圖。

#### 四、1991年佳里地震序列的破裂探討

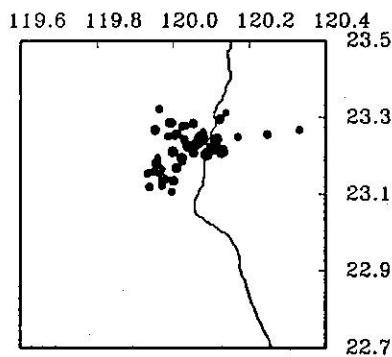
深入分析1991年3月佳里地震的分布(圖5a)，可分為兩群，第一群含主震呈明顯的東南西北走向，地震個數稍少，第二群略為零散，地震個數多，但仍可看出相同走向的分布，如依主震後不同時段看地震在空間上的分布(圖5b，各分圖上方表示不同時段之日期)，3月12日地震次數最多，東南-西北走向之分布非常明顯，這一群的地震在3月12日以後即明顯銳減，亦即地震向南方移動，形成下面的一群，而且有相似走向的分布，為了比較地震分布的特性，取佳里地震序列主震後12小時內的地震、1975年群震和1993年8月之地震序列描繪於一起(圖5c)則佳里地震序列主震群的分布和1975年群震的分布幾乎有相同的走向。

在主震群中挑選了14個地震，每一個地震皆有15個測站數以上之地震記錄，進行聯合震源定位(JHD)分析，將主震視為標準地震，圖6為此項分析之結果，左圖為JHD以前和以後之地震分布比較，空心圓為JHD以前之地震位置，實心圓則為JHD以後之地震位置，相同的地震以直線連接，JHD以後地震更集中，東南-西北走向的分布更清楚。如從縱剖面上來看，取平行和垂直於走向的兩條剖面A和B，如左圖的表示方式，B剖面不僅在平面上成線型分布，在深度上亦呈現一條傾角約 $60^\circ$ 的地震分布，利用傳統求斷層面解的技巧，圖7是主震配合剖面分析所求得之斷層面機制解，圖中空心圓表下動，實心圓表上動，相對地震圖上的箭頭則為P波讀取的位置，傾角 $60^\circ$ ，走向 $315^\circ$ ，滑動 $-5^\circ$ ，顯示主震為一左向平移的

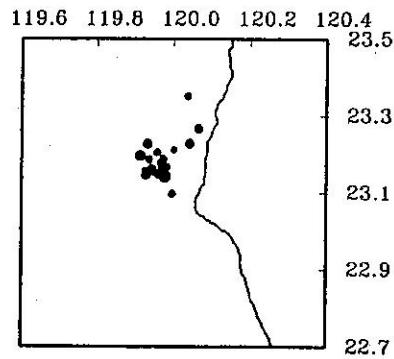


(b)

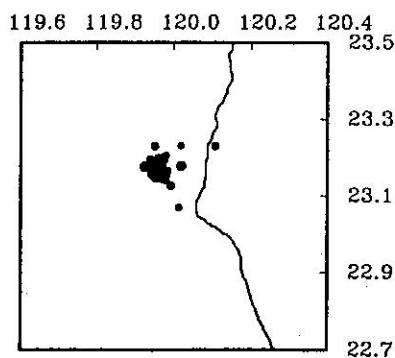
3月12日



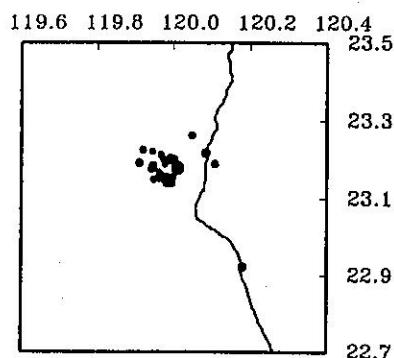
3月13日



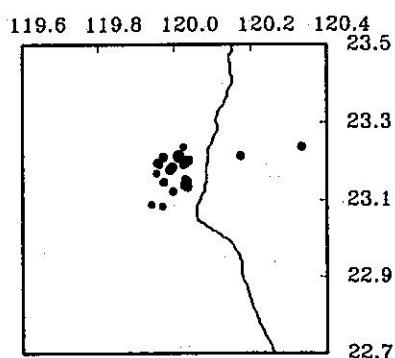
3月14日-3月15日



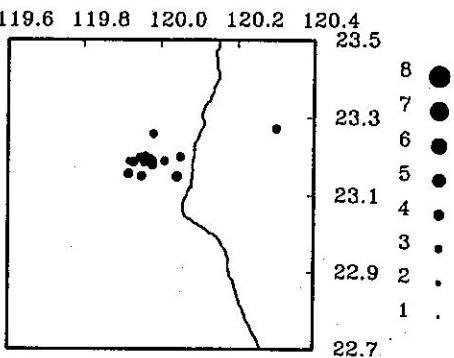
3月16日-3月20日



3月21日-3月25日



3月26日-3月31日



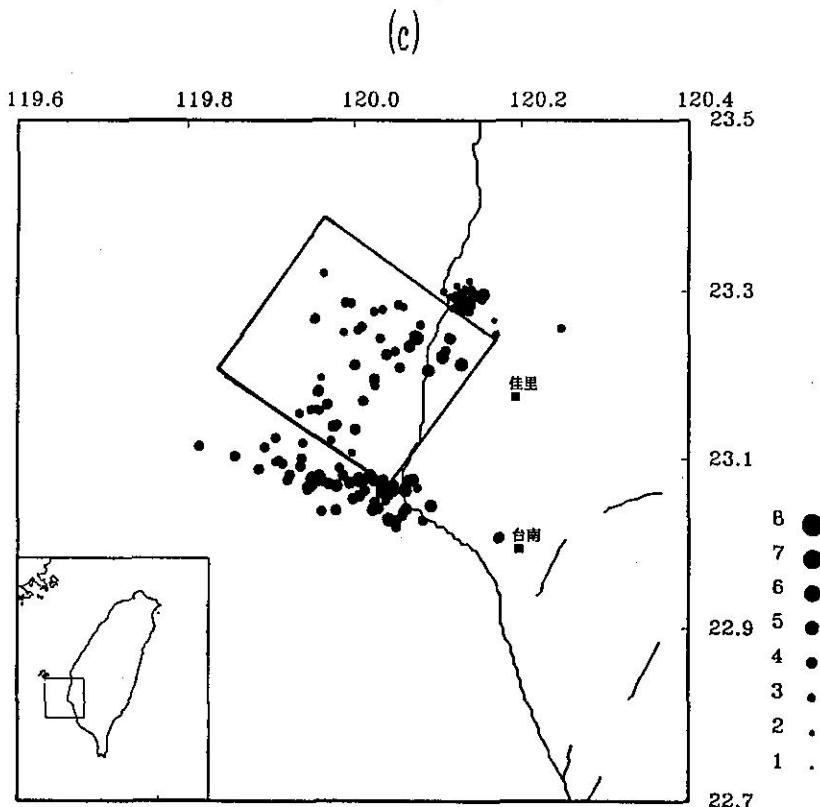


圖5. 1991年佳里地震分布分析

(a)3月12日至3月31日之所有地震分布，(b)各時段之地震分布，(c)主震後12小時餘震分布與1975年群震，1993年地震序列之分布比較。各時段之地震分布範圍如圖4，圖中正方形範圍為餘震分布，其上方為1993年地震序列之分布，其下則為1975年餘震之分布。

斷層面所引起，此結果與PDE上的分析結果（傾角 $80^\circ$ ，走向 $307^\circ$ ，滑動-4°）甚為吻合。如單從球形剖面上的資料而言，由於缺乏遠地的地震資料，及完整測站之方位分布，上述之解應有約 $10^\circ$ 的誤差範圍，如此並不影響其主要的機制。如果考慮主震的斷層面解及容許的誤差（以每 $5^\circ$ 為間隔），圖8為其他14個地震的組合斷層面解（Composite fault plane solutions），左右兩圖分別為JHD前和後的情形，綜合而言主要震群為一向東北傾斜的左向平移斷層錯動造成的。

利用組合斷層面解分析第二群的地震機制和1993年8月地震序列的地震機制於圖9a和圖9b，發

現類似於主震機制的解，說明了佳里震區主要是由東西走向的應力所主導。

## 五、1991年佳里地震序列的震源模式探討

為了探討佳里地震區震源模式之特性，利用Shin (1985) 和張等(1993)之方式分析Lg波震源頻譜，求取各地震之地震矩和截角頻率。圖10a是地震矩與地震規模之關係圖，圖中實心圓得自佳里地震序列，實線為此組地震資料的線性迴歸可表為 $\log M_0 = 0.973ML + 14.44$ ，空心圓為張等(1993)分析台灣地區372個地震之資料，忽略佳里地震序列內的較小規模之地震資料（如果可被用來計算地

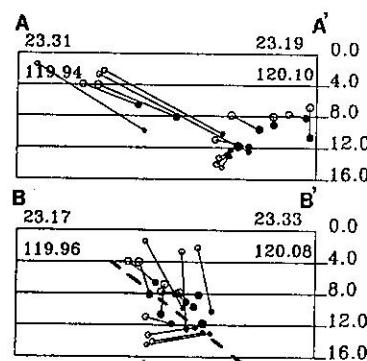
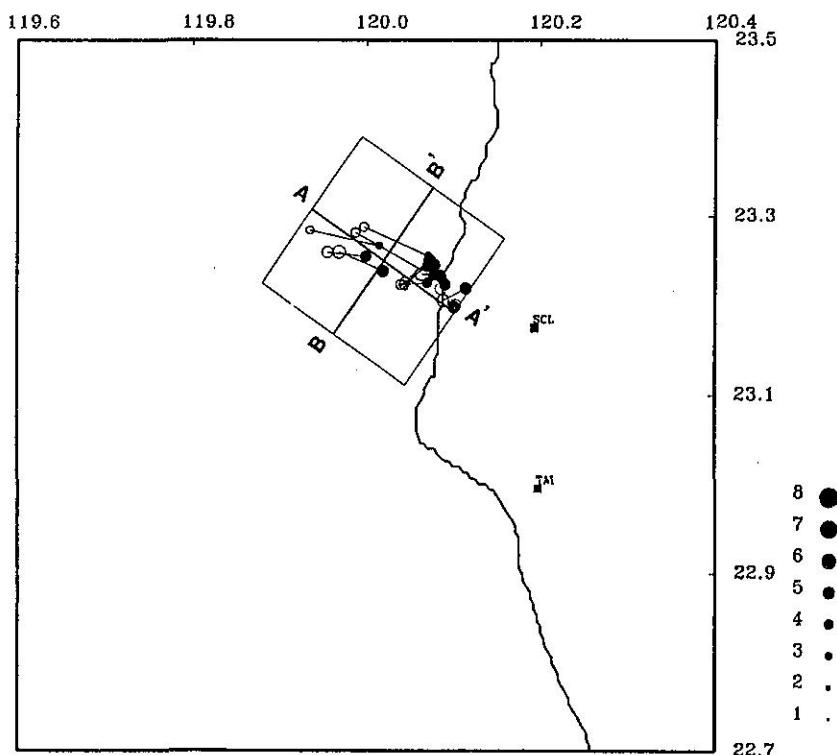


圖6. 1991年佳里地震主震後12小時內14個餘震之地震資料的JHD分析，空心和實心圓分別表示JHD之前和後之地震位置，圖右兩圖分別為A-A'和B-B'之剖面分析。B-B'剖面之斜段線為傾角 $60^{\circ}$ 。

UT : 1991 3 12 6: 4: 6.15  
 Location : 23.25° N 120.08° E 11.65 (KM)  
 Magnitude: 5.7 (ML)

DIP : 60.0°  
 STRK: 315.0°  
 RAKE: -5.0°

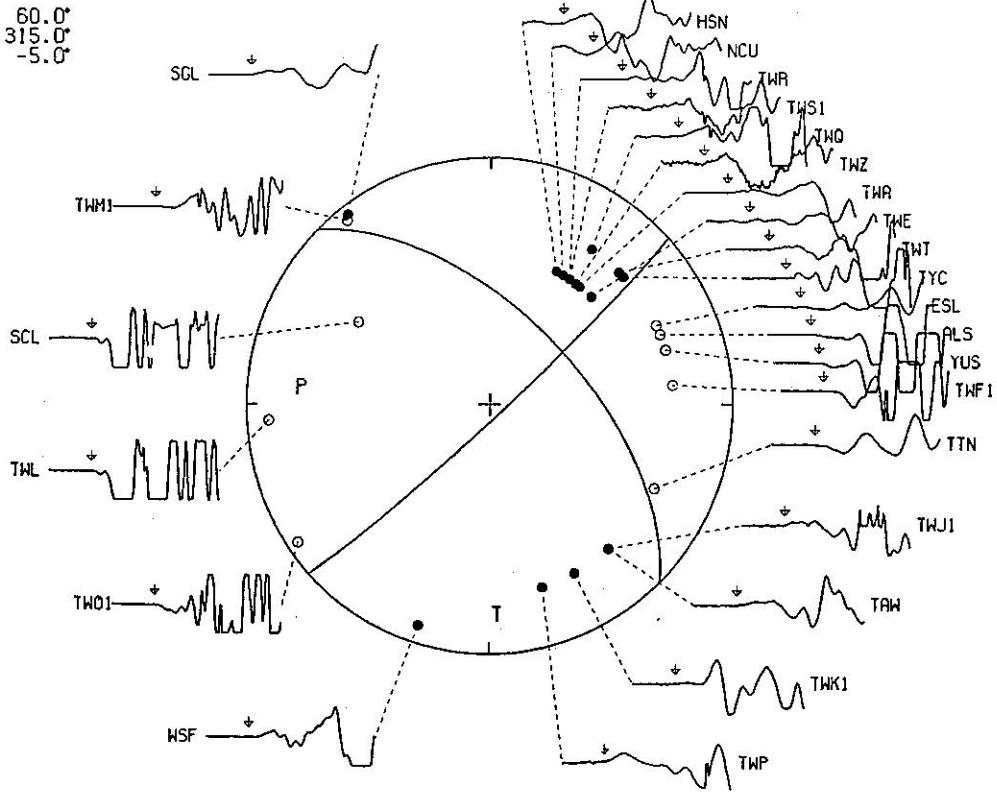


圖7. 1991年佳里地震主震之震源機制解，圖中記錄上之箭頭標示P波之位置。

震矩測站數不足3個)，佳里地震序列之地震規模範圍較小，但仍可看出規模小於3.5地震的地震矩較之張等(1993)之結果有偏大的趨勢，顯示有較大的滑動量或破裂面積( $\mu$  AD,  $\mu$  剪力係數, A平均滑動量, D破裂面積)。在規模大於3.5的資料則有重合的趨勢，圖10b是地震矩和截角頻率的關係圖，代表佳里地震序列的實心圓在規模2.5至5.2之間變化不大，其關係式為 $\log M_0 = -17.78 \log f_c$

+26.11，顯示小規模地震有相對於張等(1993)台灣地區之平均值有較大的破裂面積，同時也說明了為什麼小規模地震有相對較大的地震矩。圖10c是地震矩與破裂面積的關係圖，圖中四條直線分別代表1000Bar、100Bar、10Bar和1Bar等應力降線，由圖10各圖可知，佳里震區內小規模地震的震源特性似與台灣其他地區不同。

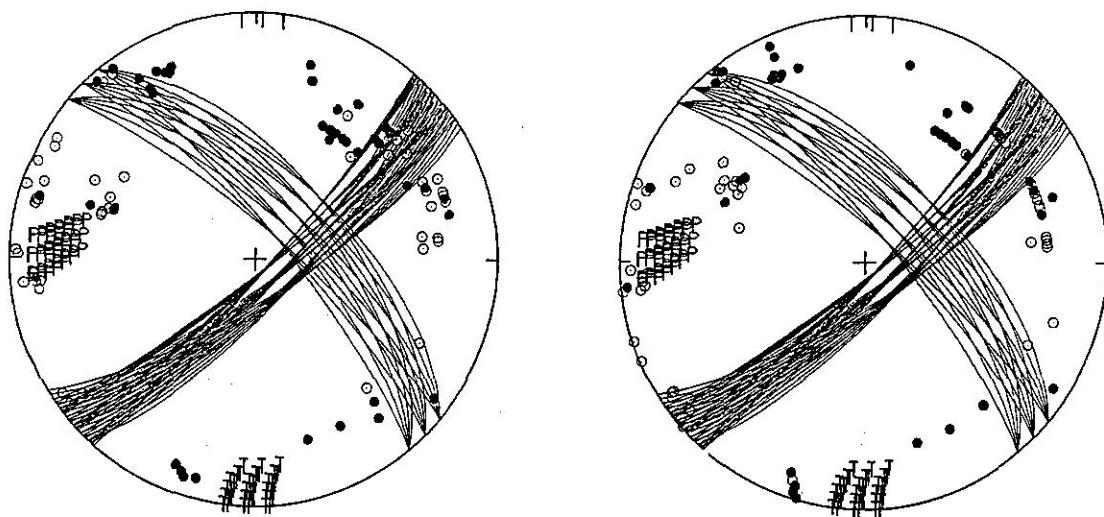


圖8. 14個經JHD分析地震之組合斷層面解，左圖和右圖分別為JHD前和後之分析結果。

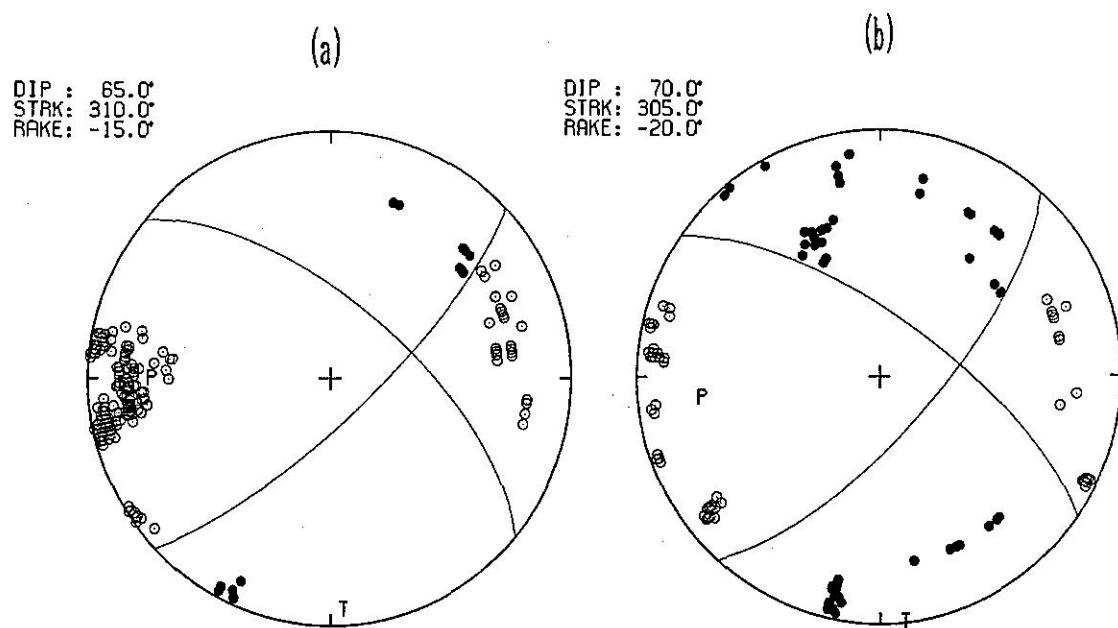


圖9. 地震之組合斷層面解(a)佳里地震主震12小時後之地震(b)1993年8月地震序列。以圖7和圖8為參考解。

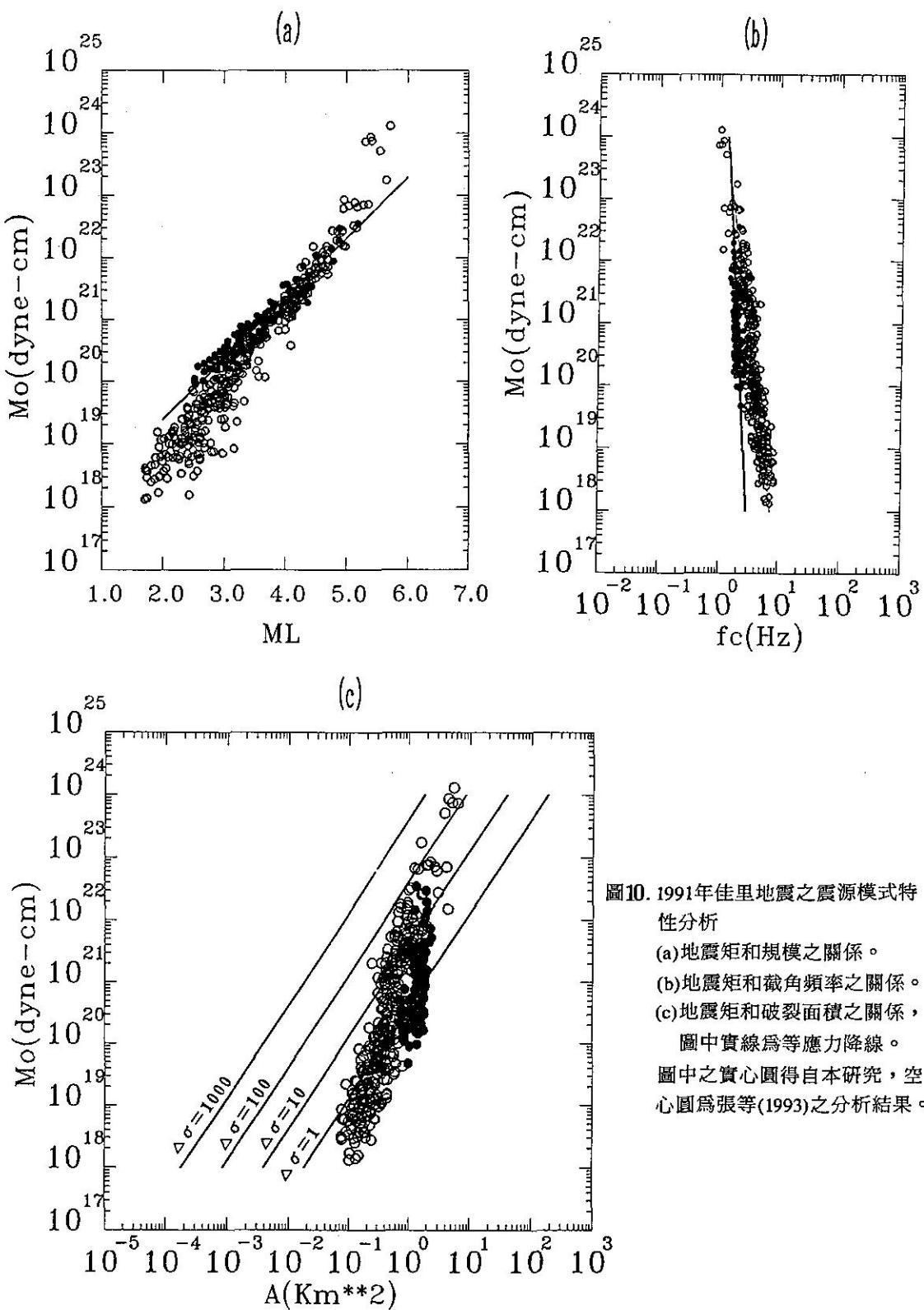


圖10. 1991年佳里地震之震源模式特性分析

(a) 地震矩和規模之關係。  
 (b) 地震矩和截角頻率之關係。  
 (c) 地震矩和破裂面積之關係，  
 圖中實線為等應力降線。  
 圖中之實心圓得自本研究，空心圓為張等(1993)之分析結果。

表 1 嘉南地區災害地震資料

地 震 時 間					位 置	深 度	規 模	災 害				
					北 緯 東 經			人 房 屋				
年	月	日	時	分	度 分	度 分	公 里	M L	死	傷	全倒	損 壞
1904	4	24	14	39	23-30.00	120-30.00	.00	6.30	3	10	66	840
1904	11	6	4	25	23-30.00	120-18.00	.00	6.50	145	158	661	3179
1906	3	17	6	42	23-36.00	120-30.00	.00	7.10	1258	2358	6769	14218
1906	4	7	12	52	23-24.00	120-24.00	.00	5.80	1	6	63	263
1906	4	14	3	18	23-24.00	120-24.00	20.00	6.70	15	84	1794	10037
1923	5	4	18	41	23-18.00	120-18.00	.00	6.00			1	-
1927	8	25	2	9	23-18.00	120-18.00	.00	6.60	11	63	214	1209
1930	12	8	16	1	23-18.00	120-24.00	.00	6.60	4	25	49	614
1930	12	22	8	8	23-18.00	120-24.00	.00	6.60		14	121	2719
1931	1	24	23	2	23-24.00	120-24.00	.00	5.90				698
1941	12	16	19	19	23-24.00	120-30.00	10.00	7.10	358	733	4520	11086
1946	12	4	22	47	23-06.00	120-18.00	.00	6.50	74	482	1954	2084
1964	1	18	12	4	23-06.00	120-30.00	33.00	6.50	106	650	10502	25818
1964	2	17	5	50	23-06.00	120-36.00	33.00	5.70		3	422	4223
1991	3	12	14	4	23-14.74	120-04.47	12.26	5.67				2

註：1. 地震時間為台北時間

2. -表少許

表 2 佳里地震強震資料

站名	位 置		PGA (cm/sec/sec)		
	北緯	東經	Z	NS	EW
SCL	23-10.51	120-11.62	75.0	311.0	160.0
KLI	23-25.26	120-12.34	57.0	67.0	56.0
TAI	22-59.71	120-11.82	27.0	100.0	78.0
TCH	23-03.97	120-22.87	30.0	47.0	39.0
BIH	23-20.78	120-25.79	11.0	49.0	42.0
CHY	23-29.86	120-25.47	8.6	13.0	21.0
WSF	23-38.28	120-13.30	11.0	26.0	63.0
SHK	23-33.36	120-20.56	15.0	49.0	58.0
USH	23-23.02	120-31.32	14.0	30.0	40.0
SGS	23-24.00	120-24.00	2.9	6.2	5.3
CCU	23-33.91	120-28.14	12.0	22.0	16.0
BCH	23-43.48	120-17.97	10.0	11.0	13.0
WTC	23-51.81	120-16.87	11.0	20.0	19.0
SGL	22-43.51	120-29.45	6.2	6.2	6.7
KAU	22-34.07	120-18.48	5.7	9.1	9.6
TUT	23-38.84	120-38.92	3.2	8.1	13.0
SKL	23-43.44	120-34.65	5.9	16.0	21.0
ALS	23-30.62	120-48.31	5.3	13.0	14.0
TCU	24-08.85	120-40.56	2.4	4.8	8.1
HSN	24-48.13	120-58.17	1.9	3.3	3.8

## 六、討論與結論

從時間、空間與震源特性等角度探討1991年3月佳里地震序列，發現許多具有意義的結論及須進一步求證的問題分述於下：

- 1.就災害地震而言，佳里地震所造成的災害甚小，但其地理位置卻非地震學家注意過的地方，地表上亦未有任何可能的斷層與其有關連，而在之後地震活動頻繁，儼然是一個新的震區模式，如果此推論屬實，則後續是否有可能發生更大的地震，則有待進一步的資料佐證。
- 2.就地震分佈而言，佳里地震序列（主震規模5.67）發生在佳里西北方，1975年曾文溪口群震的北方，在主震發生後12小時內之餘震，形成一條東南—西北走向的分佈，與1975年群震有相同的分布走向，在之後的餘震則移向稍南，介於主震群與1975年群震之間，亦可約略看出相同的分布走向。而1993年8月的地震序列有明顯的前震，偏向佳里地區的東邊而發生於陸上，主震規模較小只有4.7，此地震序列在空間上的分布較集中而圍成團狀。
- 3.地震深度大都介於7公里至15公里間，佳里地震序列與1993年8月的地震序列皆有類似的斷層面解：傾角 $60^\circ$ ；走向 $315^\circ$ ；滑動 $-5^\circ$ 。由於缺少遠地資料，此解應有 $\pm 10^\circ$ 的誤差，但基本

上是一個由東西向壓力主導的左向平移的破裂機制，這個方向的應力分布似乎與台灣地區東邊板塊碰撞、南邊板塊隱沒及其北方北港重力高區皆有關連。

- 4.分析佳里地震序列的地震震源模式特性，發現規模小於3.5的地震有較大的地震矩及較小的截角頻率，似乎顯示這些地震可能有較大的破裂面積。至於較大地震（規模小於5.2）則與台灣地區的平均值相似。

## 參考文獻

- Hsu, T. L. and H. C. Chang (1979). Quaternary faulting in Taiwan, Mem. Geo l. Soc. China, 3, 155-165.
- 辛在勤(1989)。台灣地區Lg波的特性分析，氣象學報，35, 3, 171-184。
- 許麗文和何美儀(1992)台灣地區餘震在時間和空間分布上之分析與探討，中央氣象局研究報告第EW82-1A-06。
- 辛在勤和呂佩玲(1990)。台灣地區地震發生潛能的探討，氣象學報，36, 2, 129-136。
- 張建興、呂佩玲和江嘉豪(1992)。台灣地區近震規模(ML)與地震矩(Mo)關係之研究，中央氣象局研究報告第EW82-1A-07。

## **THE MARCH 1991 CHIA-LI EARTHQUAKE SEQUENCE**

**Tzay-Chyn Shin, Chin-Hsin Chang, and Chia-Hao Ching**

Central Weather Bureau

### **ABSTRACT**

A moderate magnitude earthquake occurred on March 12, 1991 in the Chia-nan area where no damaged earthquake occurred from 1964. The earthquake was located at the westnorth of Chia-li and caused minor damage near the coast area. The occurrence of the earthquake has significance in several folds especially for the Chia-nan seismic zone.

From the spatial point of view, the location of Chia-li earthquake is at the western part of the Chia-nan seismic zone. It is in the area where no damaged earthquake occurred in the historical record. Also, very low seismicity is found in that area before 1991. After that, the area became active compared to the Chia-nan seismic zone. On the other hand, the distribution of Chia-li earthquake sequence is similar to the distribution of swarm in 1975. Using the data collected by the Central Weather Bureau Seismic Network ( CWBSN ), the focal mechanism of Chia-li earthquake is dominant in a left lateral rupture with west-east direction. The dipping angle of ruptural plane is about 60 degrees eastnortherly.

The source scaling model is investigated for the Chia-li seismic zone by using data of Chia-li earthquake sequence. The relationship of seismic moment with magnitude and corner frequency reveals that a relative large seismic moment and small corner frequency is found in the study compared to those obtained for the Taiwan area.