

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 地球與行星科學科

第二名

051912

以粒子濾波法計算 b 值於地震預測之應用

學校名稱： 國立嘉義女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 許雅若	陳盈霖
高二 陳品融	

關鍵詞： 地震、粒子濾波法、b 值

## 摘要

近年來台灣西南部地震頻繁，本研究即探討台灣西南部地震活動，除了驗證該區地震芮氏規模與頻率符合古騰堡-芮克特定律 (Gutenberg-Ritcher Law)，也探討定律中  $b$  值變化與大地震之關聯。研究對象以台灣西南部區域內 1973.01.01~2025.01.31 之地震數據，採用最大概似法及粒子濾波器 (Particle Filter) 處理時間序列，計算各區  $b$  值，並推估各區芮氏規模 ( $M_L$ )  $> 4.5$  之地震發生機率 ( $P$  值)，結合斷層分布與地質特性，分析地震風險。結果顯示，大規模地震前  $b$  值呈下降趨勢，震後則逐步回升，顯示  $b$  值變化趨勢與樣態具有作為地震前兆的參考價值；透過  $b$  值計算出的芮氏規模 ( $M_L$ )  $> 4.5$  之地震發生機率，亦可捕捉地震活動趨勢。本研究發現  $b$  值及其所計算的  $P$  值可作為短期地震風險指標，未來可進一步應用於地震預警與防災評估。

## 壹、前言

### 一、研究動機

近來台灣地震活躍，2024 年發生的 0403 花蓮強震芮氏規模達 7.2，台灣西南部也頻繁發生地震，如嘉義布袋地區雖無明顯斷層，卻無預兆地發生芮氏規模達 4.9 的地震。地震無法被準確預報，目前氣象署發布的地震潛勢圖為對台灣未來數十年間的預測，而評估短期內地震風險的相關指標仍有待研究。根據古騰堡－芮克特定律 (Gutenberg-Ritcher Law，簡稱 GR 定律)，定律中的  $b$  值可反映小地震與大地震的比例，因此  $b$  值隨時間的連續變化可用於分析地震發生趨勢。

因此，我們想藉由地震大數據分析，了解台灣西南部地區之地震時空分布特性，分析  $b$  值與地震規模隨時間的變化趨勢與樣態，進而評估台灣西南部之地震風險。

### 二、研究目的

- (一) 驗證台灣西南部地震規模、頻率與古騰堡－芮克特定律之關聯。
- (二) 利用台灣西南部  $b$  值空間分布圖探討地震發生之頻率。
- (三) 探討台灣西南部  $b$  值的變化趨勢與大地震之關聯。
- (四) 探討台灣西南部  $M_L > 4.5$  的地震發生機率 ( $P$ )。

### 三、文獻回顧

- (一) 台灣西南部區域概述

本研究選取的範圍為台灣西南部 (北緯：22.9-23.9，東經：120.0-120.8)，此範圍涵蓋彰化南部、雲林、嘉義、南投、台南、高雄北部，地體構造上橫跨濱海、平原、丘陵與麓山帶。受到歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的碰撞擠壓作用，西部麓山帶由一連串緊密不對稱的褶皺和逆衝斷層所組成，多為南北走向。此範圍包含東西走向的梅山斷層、新化斷層，以及南北走向的車籠埔斷層、觸口斷層等多個斷層 (中央氣象署，2009)。

本研究區域屬西部地震帶，易發生極淺層地震 (震源深度在 0-30 公里之間)，由於人口密集，大地震易造成災情。本區域於 1973-2025 年間，共發生 18 起規模大於 5.5 的地震，將災害較嚴重之地震列舉如下表一：

表一、歷年災害性地震

日期	震央位置	規模	震源深度	災情
1993/12/16	嘉義	5.70	12.60 公里	民房龜裂，地基碎裂
1998/07/17	嘉義	6.20	2.80 公里	5 人死亡及 18 棟房屋全毀
1999/10/22	嘉義	6.40	16.60 公里	230 人受傷，7 棟房屋全毀
2009/11/05	南投	6.15	24.10 公里	1 人受傷
2010/03/04	高雄	6.40	22.60 公里	96 人受傷
2016/02/06	高雄	6.60	14.64 公里	117 人死亡
2025/01/21	台南	6.44	15.77 公里	造成 1,621 戶停水、34,721 戶停電

(研究小組整理自中央氣象署地震測報中心網站)

## (二) 古騰堡-芮克特定律 (Gutenberg-Richter Law):

古騰堡-芮克特定律用於表示某地震規模與該規模以上地震頻率的關係，可研究區域地震活動特性 (Gutenberg & Richter, 1944)，此定律的數學表達式如下：

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

$N$ ：芮氏規模  $M$  以上的累積地震數目

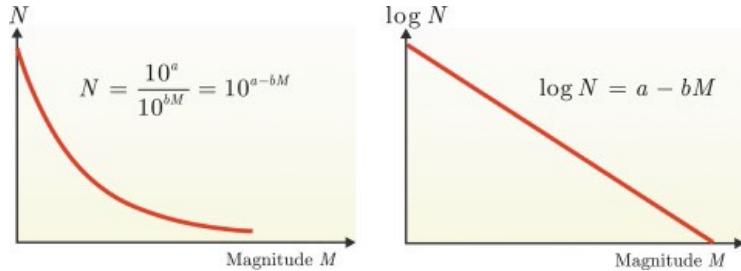
$a$ ：地震發生的頻率

$b$ ：小規模與大規模地震的相對比例

計算所得的  $a$  值和  $b$  值則可用於分析地區地震活動特性。 $a$  值在地震頻繁發生的地區會較大； $b$  值較大，代表該區域中發生的地震中小規模地震佔有較高比例，反之，該區中發生的地震中大規模地震佔有較高比例。

由於  $b$  值可反映一地區是否發生較多大地震，後續學者發現，長期觀測特定

區域之  $b$  值變化，在大地震發生之前常有  $b$  值下降的現象，將其視為地震前兆參考指標之一 (Nakaya, 2006; Chan et al., 2012; Nanjo et al., 2012)。至於  $b$  值下降的意義，有學者提出  $b$  值下降為地震事件前應力增加的結果 (Scholz, 1968)，以及  $b$  值下降幅度與板塊耦合 (Plate Coupling) 程度相關 (Cao & Gao, 2002)。



圖一、GR 定律 (取自 Žalohar, 2018)

### (三) 使用狀態空間模型與粒子濾波器計算 $b$ 值

在  $b$  值的時間序列分析中，傳統計算方法需在大視窗與小視窗之間選擇適當的視窗寬度。若視窗寬度過大， $b$  值無法捕捉到細微的地震前兆，過小則地震樣本數不足以計算  $b$  值 (Chen & Zhu, 2020)。此外，由於地震活動週期會隨時間變化，最佳視窗寬度亦應動態調整 (Ermshaus et al., 2022)，但傳統方法難以達成。

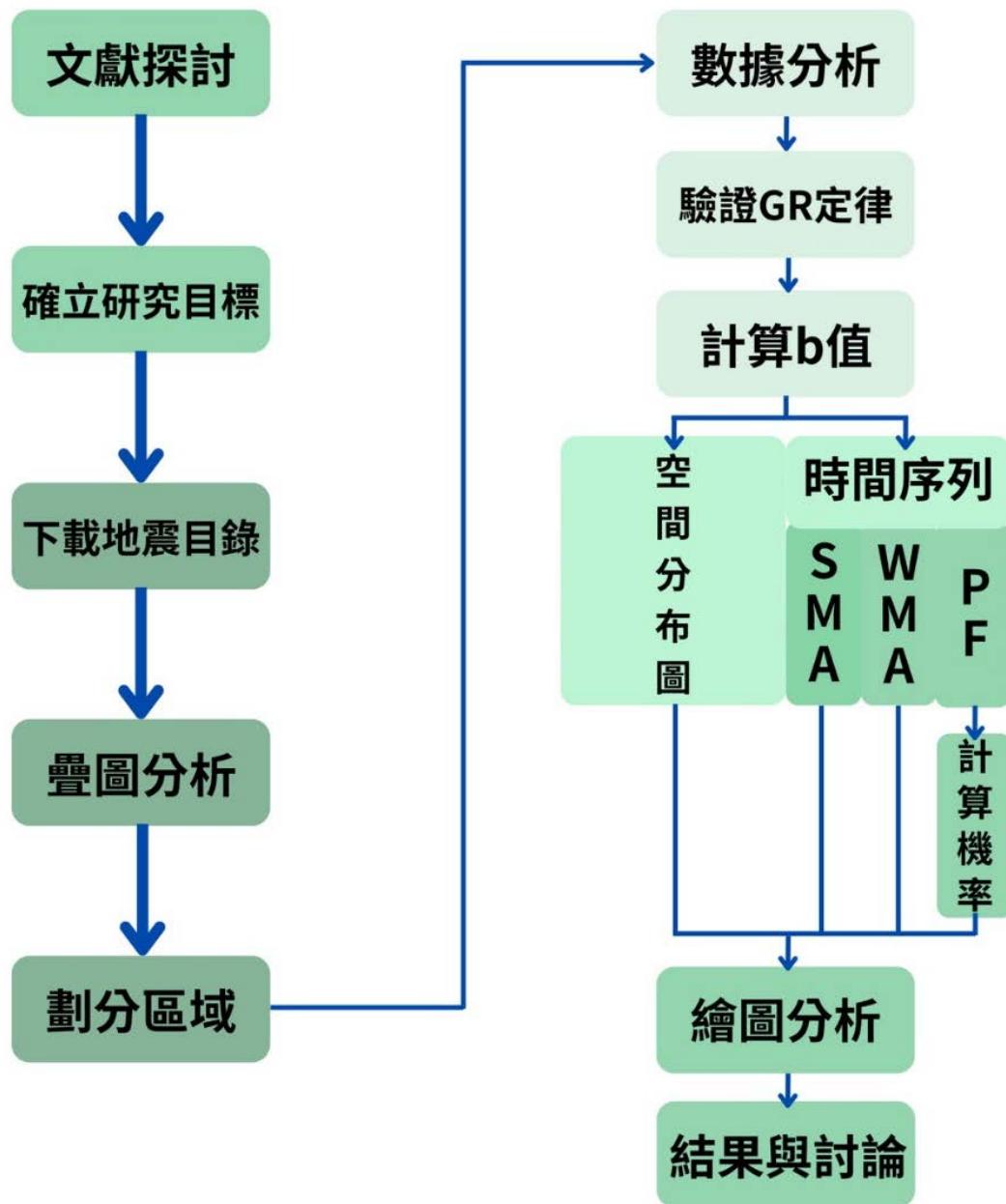
為解決此問題，Iwata 與 Nanjo (2024)以日本東北與熊本地區為例，採用狀態空間模型 (State-Space Model, SSM) 與粒子濾波器 (Particle Filter, PF)，作為時間序列分析框架來計算  $b$  值。研究結果顯示，該方法在追蹤  $b$  值變化及地震規模預測方面，較傳統方法更具優勢。此外，研究發現，東北地區的大地震風險未必如傳統研究預測的高，而熊本地區則可能存在較高的地震風險，因此需加強監測與警戒 (Iwata & Nanjo, 2024)。

## 貳、研究設備與器材

- 一、筆記型電腦
- 二、台灣地震與地球物理資料管理系統 (GDMS) 地震目錄
- 三、Python 3.9
- 四、Spyder 6.01
- 五、Microsoft Excel

## 參、研究過程與方法

### 一、研究過程



圖二、研究流程圖 (研究小組自製)

### 二、研究方法

#### (一) 下載地震目錄

從台灣地震與地球物理資料管理系統 (GDMS) 中的地震目錄，設定區域範圍 (北緯 22.9~23.9，東經 120~120.8)，下載 1973.01.01~2025.01.31 的地震序列，共取得 89142 筆數據，經篩選  $M_L \geq 2$  之地震數據後，共有 27099 筆數據。

台灣地質資料庫

地震目錄

可依條件搜尋地震目錄

必填

開始日期\* 1975-01-01 起始時間 (UTC)\* 000000 結束日期\* 2025-03-02 結束時間 (UTC)\* 000000

查詢方式 方框 View 標籤工具

最小經度 120.36	最大經度 120.8	最小緯度 23.33	最大緯度 23.8
min $M_L$ * 5	Max $M_L$ * 10	最小深度 0	最大深度 5000

點選以下搜尋項可下載地震目錄 Help

資料總數: 26

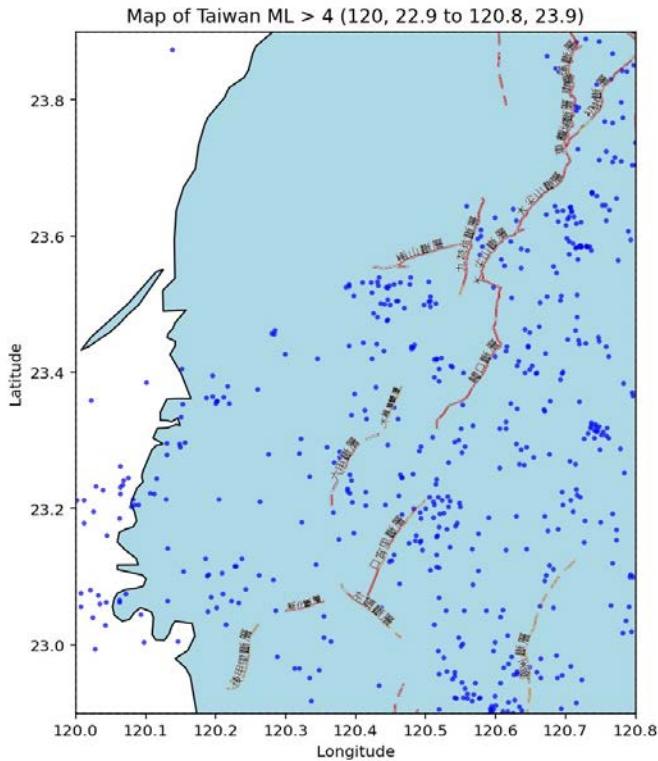
Show 10 rows JSON CSV Text

date	time	lat	lon	tz	depth	ML	mag	dmag	gap	trend	ER	ERZ	feed	mag	quality
1975-04-14	140046.8	23.3463	120.6685	7.67	5.47	20	21.00	90	0.43	1.70	1.80	N	20	C	
1980-09-25	105651.06	23.3577	120.7197	15.00	5.28	18	27.00	124	0.27	1.80	1.60	N	21	B	
1986-01-28	061921.21	23.3705	120.4290	11.99	5.06	23	14.00	224	0.28	1.70	1.60	N	18	C	

圖三、台灣地震與地球物理資料管理系統網頁畫面 (取自 <https://gdms.cwa.gov.tw/>)

## (二) 疊圖分析

使用 Python 撰寫程式，以疊合台灣西南部地圖與斷層、 $M_L \geq 4$  地震分布圖。



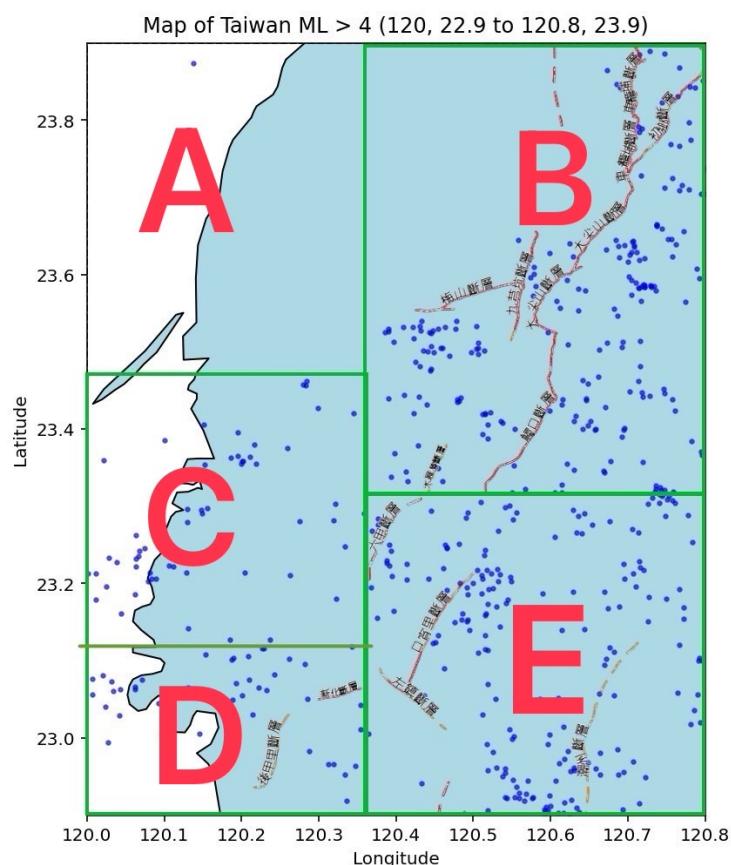
圖四、台灣西南部地圖及斷層、 $M_L \geq 4$  地震分布疊圖 (研究小組自製)

### (三) 劃分區域

若研究區域過大，可能會掩蓋一些關於  $b$  值變化細微的前兆 (Chen & Zhu, 2020)，因此根據地震分布以及斷層分布，將研究範圍劃分成 A、B、C、D、E 五區 (見表二、圖五)：

表二、本研究地震分區(研究小組自製)

區域	經緯度範圍	主要斷層分布 (中央氣象署, 2009)	規模大於 2.0 的地震資料筆數
A 區	北緯 23.472-23.900 東經 120.000-120.360	無明顯斷層，此區屬北港高區無震帶	326
B 區	北緯 23.317-23.900 東經 120.360-120.800	車籠埔斷層、梅山斷層、觸口斷層等七處斷層	11402
C 區	北緯 23.120-23.472 東經 120.000-120.360	無明顯斷層	3254
D 區	北緯 22.900-23.120 東經 120.000-120.360	後甲里斷層、新化斷層	1727
E 區	北緯 22.900-23.317 東經 120.360-120.800	六甲斷層、口宵里斷層、左鎮斷層、潮州斷層	10390



圖五、台灣西南部區域劃分圖 (研究小組自製)

#### (四) $b$ 值的計算:

##### 1、傳統方法

使用最大概似法 (Maximum Likelihood Estimation) , 數學表示法如下:

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - \left( M_c - \frac{1}{2} M_{bin} \right)} \quad (2)$$

$M_{bin}$  : 規模完整度 (本研究設為 0.01)

$M_c$  : 為最小完整性規模 (本研究設為 2.0)

$\bar{M}$  : 為地震芮氏規模  $M_L$  平均值

若使用時間序列分析 , 可再分為以下二種算法 :

##### (1) 簡單移動平均(Simple moving average , 以下簡稱 SMA)

$$\bar{M}_t = \frac{(M_t + M_{t-1} + \dots + M_{t-s+1})}{s} \quad (3)$$

其中 ,  $s$  為固定的窗口寬度(一次計算的樣本數 , 本研究設為 200 筆) , 計算該窗口內  $M_L$  的算術平均數 , 接著移動窗口位置 , 即捨棄最舊的數據並納入最新數據進行下一個  $M_L$  的算術平均數的計算。

##### (2) 加權移動平均(Weighted moving average , 以下簡稱 WMA)

$$\bar{M}_t = \frac{(s \cdot M_t + (s-1) \cdot M_{t-1} + \dots + 1 \cdot M_{t-s+1})}{s + (s-1) + \dots + 1} \quad (4)$$

其中 ,  $s$  為固定的窗口寬度(一次計算的樣本數 , 本研究設為 200 筆) , 計算該窗口內  $M_L$  的加權平均數 , 賦予最近的樣本較大的權重 , 賦予較久以前的樣本較低的權重 , 接著移動窗口位置 , 即捨棄最舊的數據並納入最新數據進行下一個  $M_L$  的加權平均數的計算。

##### 2、粒子濾波法(Particle Filter)

##### (1) 狀態變量與狀態方程式

狀態變量  $x(t)$  : 本研究將  $x(t)$  定義為  $b$  值的對數 , 即 (5)

$$x(t) = \log b(t) \quad (5)$$

狀態方程式 :  $b$  值隨時間的變化被建模為隨機游走 , 即 (6)

$$x(t) = x(t-1) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma \log b) \quad (6)$$

表示  $b$  值的對數在每一時間步上都受到一個高斯雜訊(Gaussian Noise)影響。

## (2) 觀測變量與觀測方程式

觀測變量  $y(t)$ ：本研究中， $y(t)$  就是觀測到的地震規模  $M(t)$ 。

觀測方程式：採用截斷型 GR 定律，其公式為：

$$P(y(t)) = \frac{\beta(t) \exp(-\beta(t)(y(t) - M_0))}{1 - \exp(-\beta(t)(M_U - M_0))} \quad (7)$$

其中參數  $\beta(t) = b(t) \log_e(10) = \exp(x(t)) \log_e(10)$ ， $M_0$  與  $M_U$  分別是地震規模的下限 (本研究設為 2.0) 和上限 (本研究設為 8.0)。

## (3) 粒子濾波器演算法

粒子濾波是一種根據貝氏定理(Bayes' theorem)的序列估計方法，其目標是藉由一組隨機樣本 (稱為粒子) 來估計狀態變量的後驗分布。其基本原理包括以下幾個步驟：

### A. 初始化(Initialization)

為系統的初始狀態，生成大量粒子 (本研究粒子數設為 100,000 個)，每個粒子代表可能的狀態值，並賦予相同的初始權重。

### B. 傳播(Propagation)

根據系統的狀態轉移模型，將每個粒子從  $t-1$  演化到  $t$ 。在這一過程中，會加入符合高斯分布的雜訊來模擬系統的不確定性，即式(5)中的  $\epsilon$ ，這個雜訊賦予粒子在狀態空間中有一定的擴散性，使得整個模型能夠捕捉到系統的隨機變化。

### C. 加權與校正 (Weighting/Correction)

當有新的觀測數據  $y(t)$  加入時，根據觀測模型計算每個粒子與觀測值匹配的可能性 (概似值)，並用該值來更新粒子的權重。這一步確保了粒子濾波器能夠根據實際觀測數據調整狀態估計。

### D. 重新取樣 (Resampling)

為避免「粒子退化」問題 (即大部分粒子的權重非常低，而只有少數粒子占據主要權重)，會進行重新取樣：根據粒子的權重抽取新的粒子集，使得高權重粒子被重複選中，而低權重粒子被淘汰，以確保粒子集能持續有效地代表系統狀態的後驗分布。

## (五) 機率計算

### 1. GR 定律：

$$N(M) = 10^{(a-bM)} \quad (8)$$

此為式 (1) 的另一種表達方式，表示地震規模與發生頻率符合指數分布律，描述規模大於  $M_L$  的累積地震數量。

### 2. 機率密度函數 (Probability Density Function, PDF)：

$$p(M) = b \log_e(10) \cdot 10^{-bM} \quad (9)$$

此為由式 (8) 微分求導數而得，採用截斷型的 GR 定律時，規模的機率密度函數被修正為只適用於  $M_0 \leq M \leq M_U$ ，即式 (7)。

### 3. 累積分布函數 (Cumulative Distribution Function, CDF)

$$F(M) = \frac{1 - \exp(-\beta(M - M_0))}{1 - \exp(-\beta(M_U - M_0))}, \quad M_0 \leq M \leq M_U \quad (10)$$

此為將式 (7) 從  $M_0$  積分到  $M$  的公式，令  $F(M_q) = q$ ，其中  $M_q$  是可設定的地震規模閾值，所計算出的  $q$ ，代表有  $q$  比例的地震之地震規模在  $M_q$  以上，可知有  $(1-q)$  比例的地震規模大於  $M_q$ 。本研究將  $M_q$  設為 4.5，所得出的  $(1-q)$  值為即為地震規模大於 4.5 的機率，將此機率 (probability) 表示為  $P$  值。

## (六) 繪圖分析

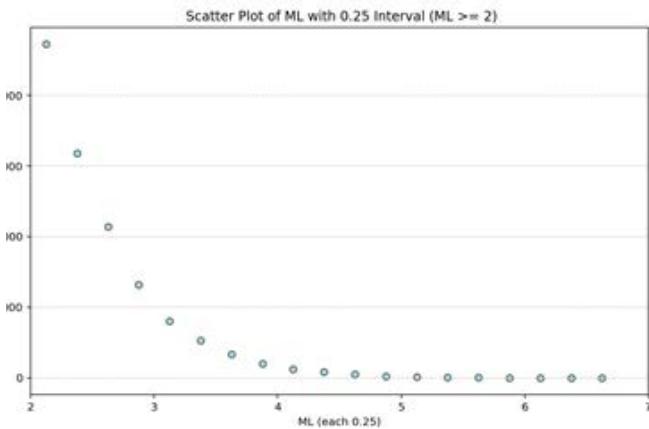
使用 Python 撰寫程式進行疊圖分析、 $b$  值計算、機率計算，將結果輸出為圖片，程式碼詳如附錄。

# 肆、研究結果

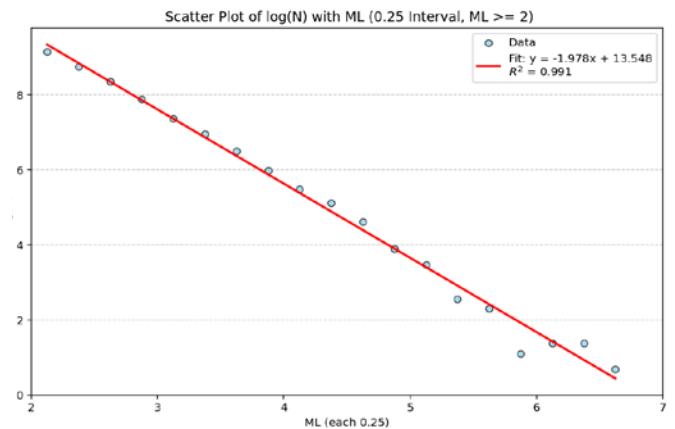
## 一、驗證台灣西南部地震規模、頻率與古騰堡－芮克特定律之關聯

以地震規模  $M_L$  每 0.25 為一間隔，統計 A 至 E 區各區間內規模 2.0 以上的地震頻率  $N$ ，分別繪製  $N$  與  $M_L$  散布圖(如圖六、八、十、十二、十四、十六)。此外，也將  $N$  取對數，繪製出  $\log N$  與  $M_L$  的散布圖，並加上線性回歸線(如圖七、九、十一、十三、十五、十七)，以決定係數( $R^2$ )的大小判定全區及各分區的地震是否符合 GR 定律。

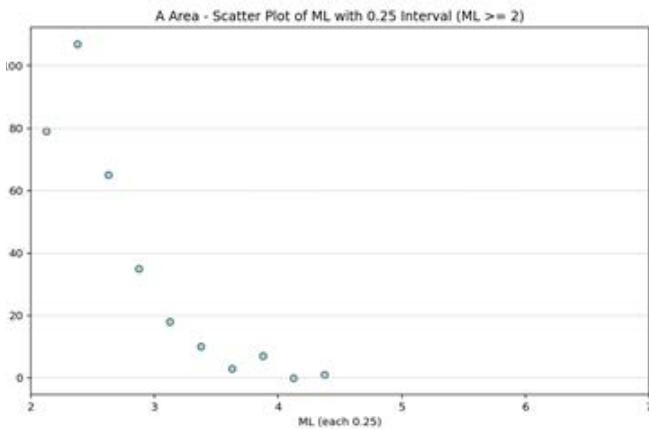
由圖六、八、十、十二、十四、十六，可看出地震發生頻率與地震規模呈現指數分布。由圖七、九、十一、十三、十五、十七，可看出台灣西南部各區之地震數據高度符合古騰堡－芮克特定律，決定係數 ( $R^2$ ) 介於 0.911 到 0.991。其中，全區的決定係數為最高，達 0.991，而 A 區為最低，但仍然高達 0.911。



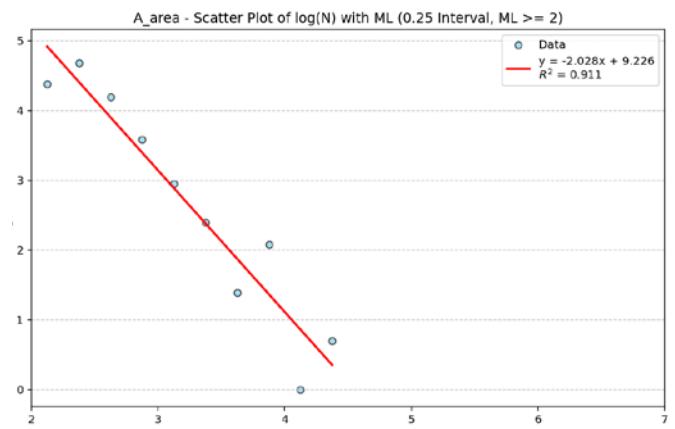
圖六、全區 N 與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



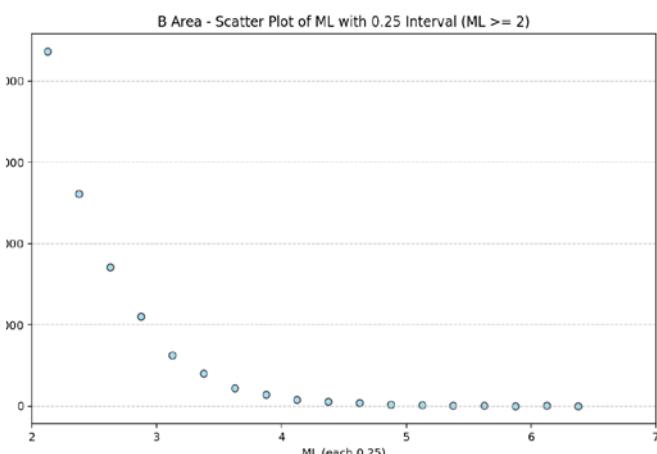
圖七、全區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



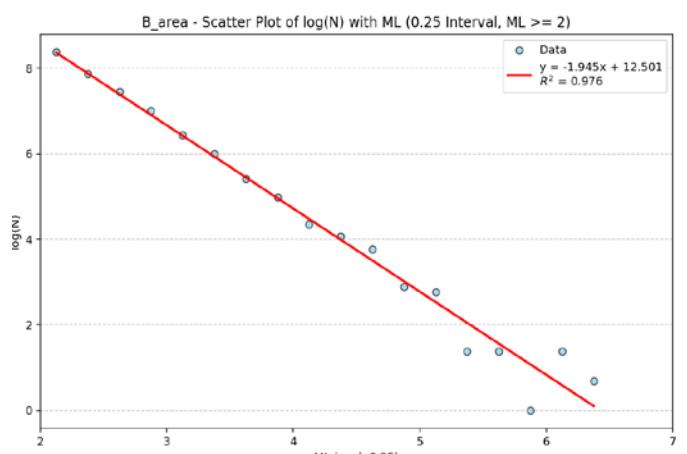
圖八、A 區 N 與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



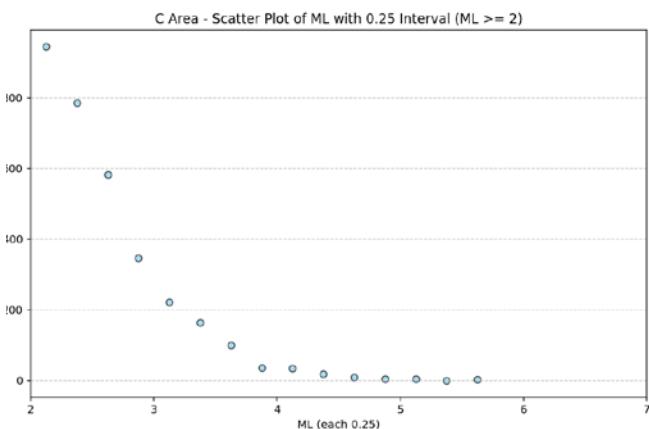
圖九、A 區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



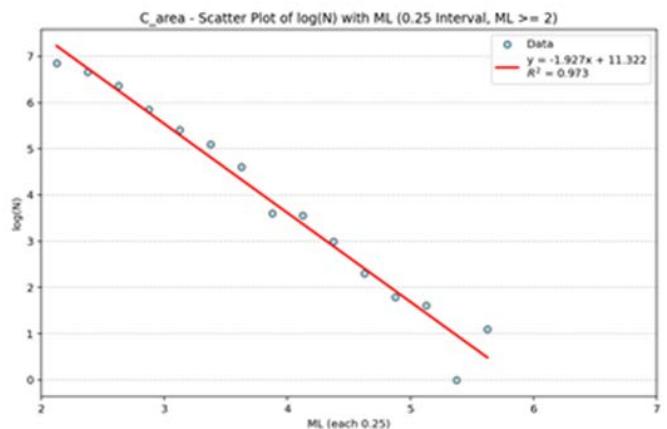
圖十、B 區 N 與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



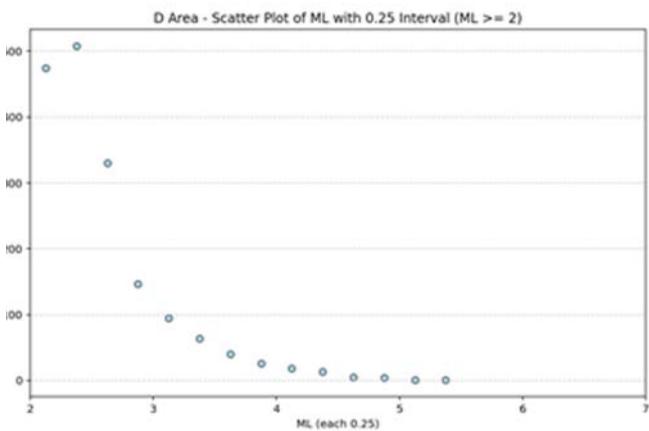
圖十一、B 區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



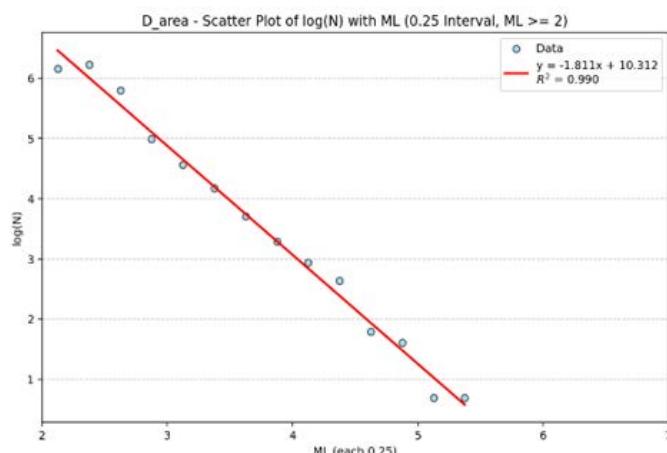
圖十二、C 區  $N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



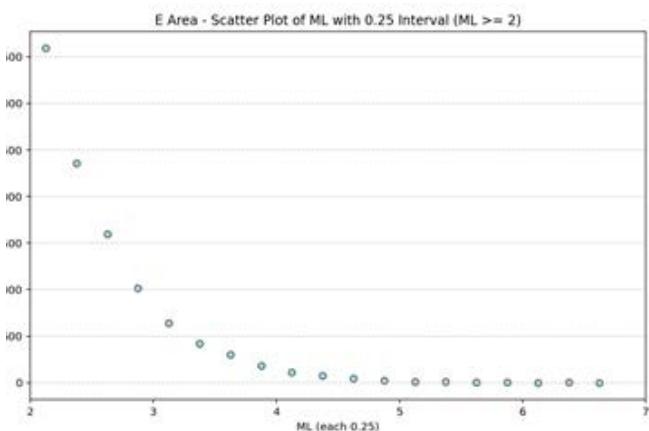
圖十三、C 區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



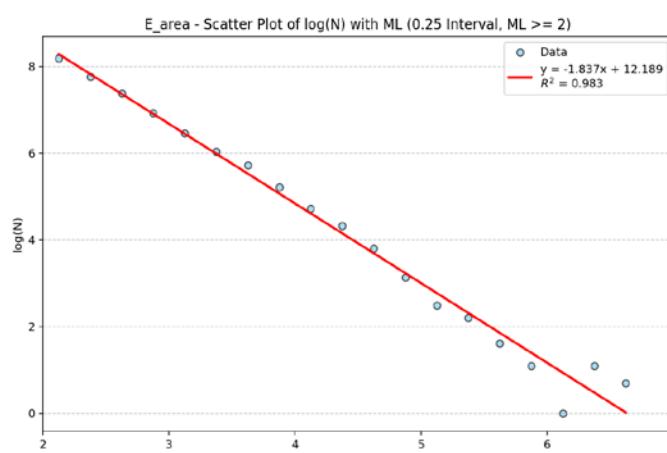
圖十四、D 區  $N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



圖十五、D 區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



圖十六、E 區  $N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)



圖十七、E 區  $\log N$  與  $M_L$  散布圖 (研究小組自製)

## 二、利用 $b$ 值的空間分布圖探討地震發生之頻率

我們將研究區域細分為經緯度更小的網格 ( $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ )，利用地震目錄資料，在每個網格單元計算自 1973.01.01 至 2025.01.31 的平均  $b$  值，並以該網格單元中心點作為代表點，進行內插法，繪製出  $b$  值分佈圖 (如圖十八)，若地震樣本數不足以計算該網格單元之  $b$  值則呈現空白。同時，也將各區之  $b$  值整理於表三。

根據圖十八及表三，可看出台灣西南部的  $b$  值介在 0.52~0.93 之間， $b$  值差異大，且斷層附近的  $b$  值相對較高，其中也可看出不同分區的  $b$  值分布情形：

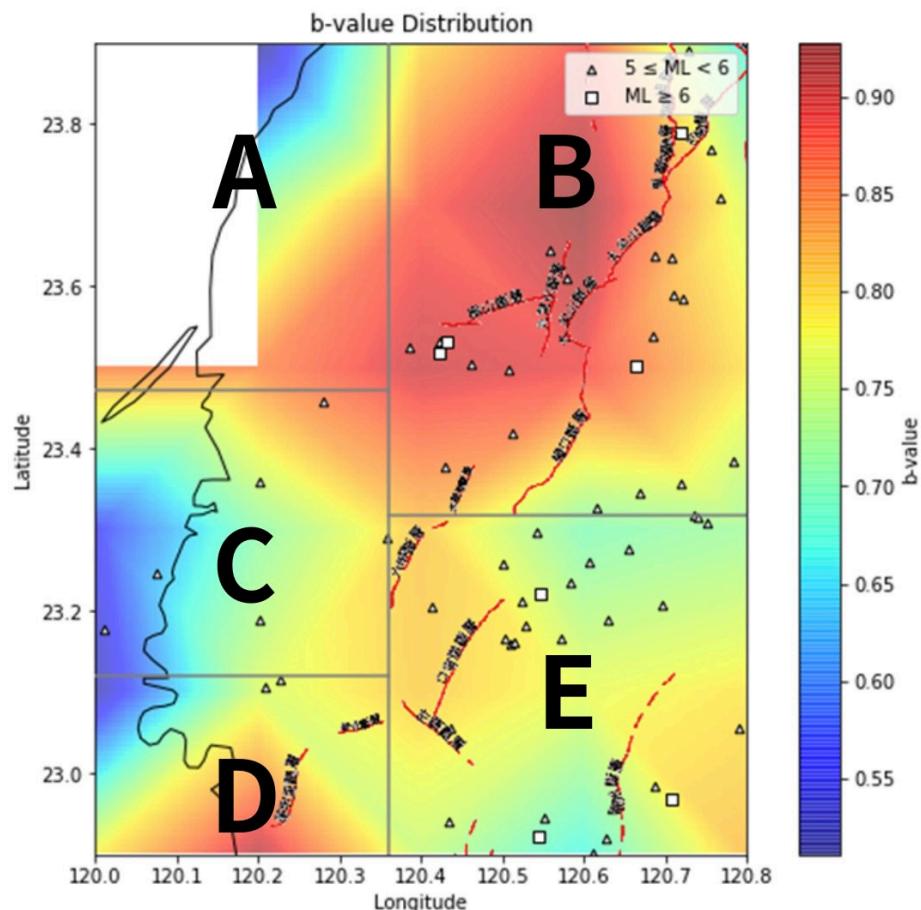
A 區：此區地震頻率低，地震樣本數不足以計算該區內所有範圍的  $b$  值，因此圖十八中 A 區左上角呈現空白。

B 區：此區是台灣西南部  $b$  值平均值最高的區域，達 0.84。從圖十八可看出，規模大於 5 的地震多集中在此區，且  $b$  值的分布較為均勻。此外，斷層附近的  $b$  值也相對較高。

C 區：此區  $b$  值的分布大約從東往西遞減，且此區  $b$  值平均最小。

D 區：此區  $b$  值範圍最大，且  $b$  值的最小值落在此區。

E 區：此區  $b$  值的分布於斷層附近較高。

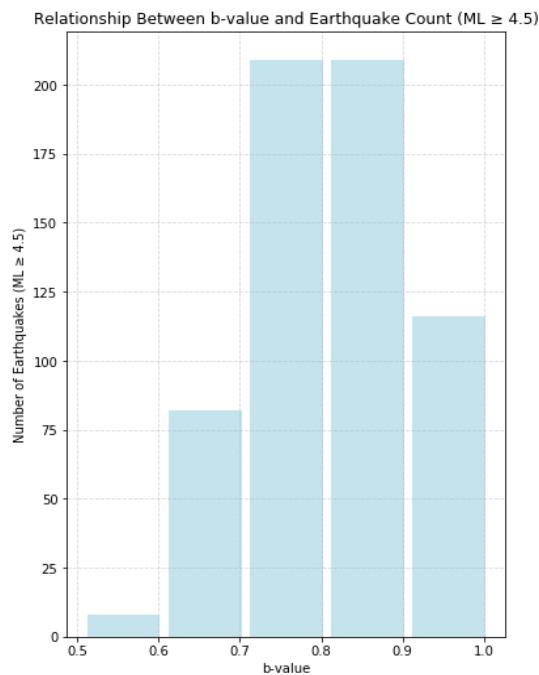


圖十八、台灣西南部  $b$  值空間分布圖 (研究小組自製)

表三、台灣西南部  $b$  值範圍及平均值(研究小組自製)

區域	$b$ 值最小值	$b$ 值最大值	$b$ 值平均值
A	0.72	0.85	0.81
B	0.88	0.93	0.84
C	0.56	0.71	0.73
D	0.52	0.91	0.76
E	0.67	0.81	0.76
全區	0.52	0.93	0.78

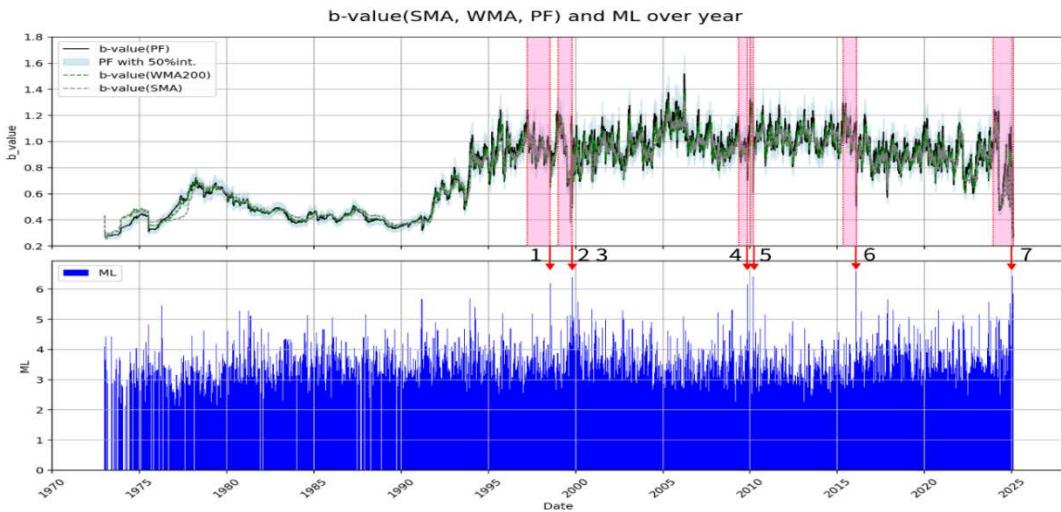
進一步分析  $b$  值區間與累積地震頻率的關聯，將  $b$  值以 0.1 作為間隔，統計各  $b$  值間累積地震頻率，結果如圖十九所示。由圖十九可看出， $b$  值在 0.7-0.9 之間時， $M_L \geq 4.5$  之地震頻率最高，而非  $b$  值越小地震頻率越高。



圖十九、不同  $b$  值區間之地震頻率 ( $M_L \geq 4.5$ ) (研究小組自製)

### 三、探討台灣西南部 $b$ 值的變化趨勢與大地震之關聯

分別使用移動平均法(SMA, WMA)以及粒子濾波法 (PF) 處理  $M_L$  時間序列，以計算出  $b$  值時間序列，分析全區及各分區的  $b$  值變化與大地震之關聯。



圖二十、全區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

上圖黑色實線為 PF 方法計算之  $b$  值，藍色區間為 50% 信心區間，綠色虛線、灰色虛線分別為使用 WMA、SMA 計算之  $b$  值，後續圖之圖例亦同。粉色色塊為  $b$  值下降區間，紅色箭頭與數字標號為  $b$  值下降後發生的大規模地震，所對應之地震事件資料列於表四。

表四、 $b$  值下降後發生的大地震 (研究小組自製)

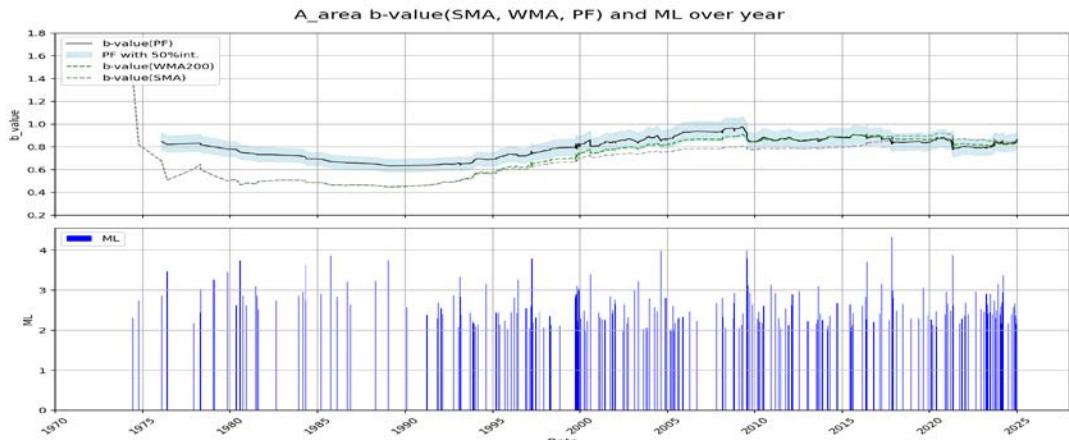
地震事件	1	2	3	4	5	6	7
發生時間	1998/7/17	1999/10/22	1999/10/22	2009/11/5	2010/3/4	2016/2/6	2025/1/21
發生區域	B	B	B	B	E	E	E
規模	6.20	6.40	6.00	6.15	6.42	6.42	6.44

如圖二十所示，觀察到全區在部分  $M_L > 6$  的地震發生之前， $b$  值有下降的趨勢，且在大規模地震發生之後  $b$  值有回升的趨勢，如表中標示的地震事件。如圖二十，在 1994 年以前，地震數據量較少，全區及各分區的  $b$  值皆偏低， $b$  值震盪不明顯。而隨著地震監測技術的進步，地震數據量增加，約自 1995 年之後， $b$  值較有明顯的上下震盪，且由 PF 方法計算的  $b$  值，震盪幅度最大，WMA 的震盪幅度比 SMA 稍大。

根據圖二十一到二十五，在 A、B、C、D、E 各分區中，更能觀察到 PF 方法計算的  $b$  值，波動幅度明顯大於傳統方法 SMA 和 WMA，較能捕捉到地震隨時間的動態變

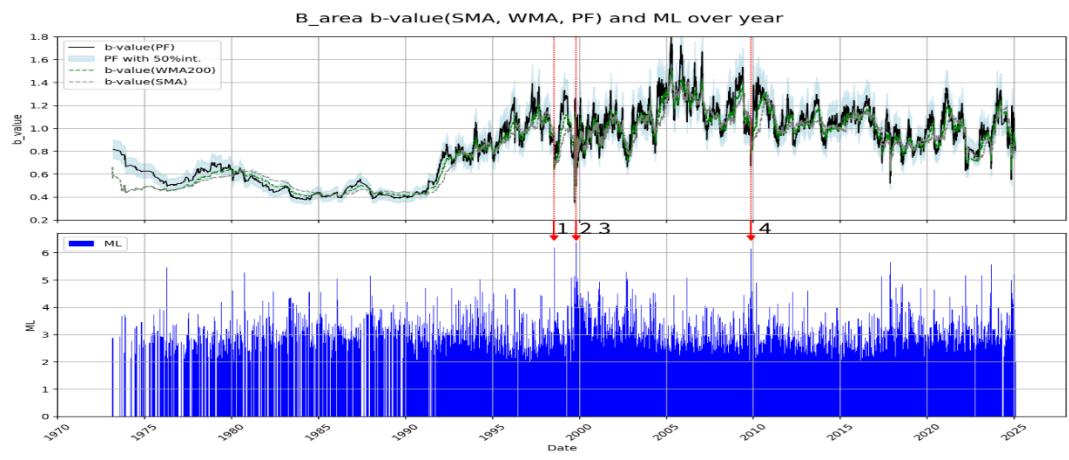
化，呈現短期內的震盪。各分區在 1995 年後，以 PF 計算的  $b$  值隨時間的變化結果如下：

A 區：如圖二十一，此區  $b$  值約於 0.7-1.0 間呈現小幅度的震盪，未發生規模大於 5 的地震， $b$  值與大規模地震的關聯較不明顯。



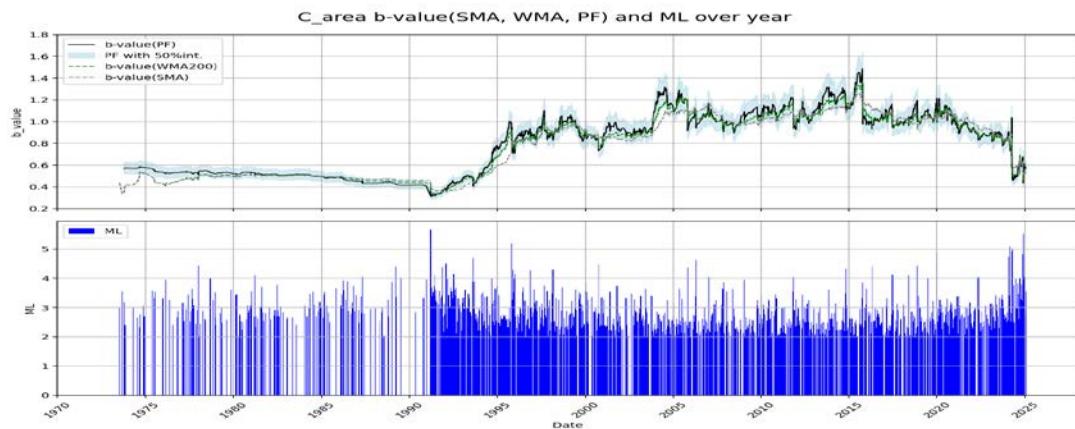
圖二十一、A 區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

B 區：如圖二十二，此區  $b$  值約於 0.4-1.8 之間震盪，震盪幅度大。由表四，3 起規模大於 6 的地震發生於此區，震後  $b$  值緩緩回升，接著在下次規模大於 6 的地震發生前， $b$  值呈下降趨勢。



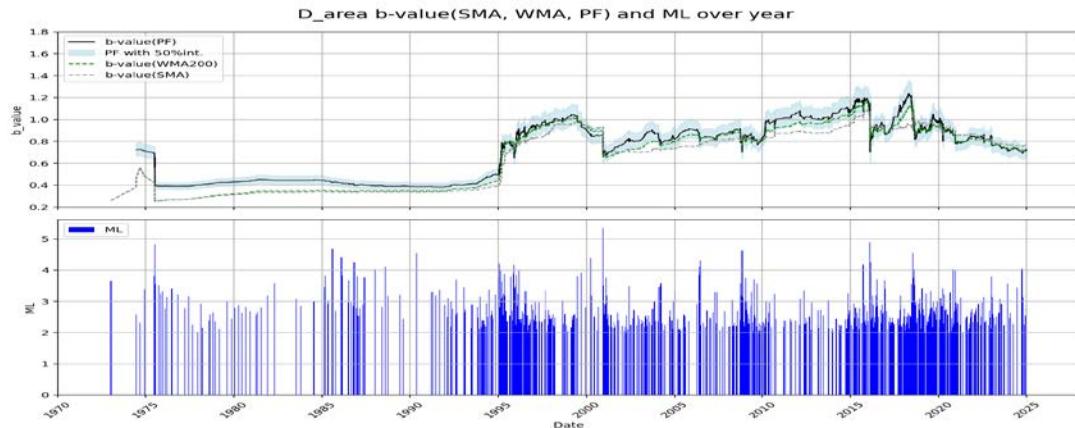
圖二十二、B 區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

C 區：如圖二十三，此區  $b$  值約在 0.4-1.4 之間震盪，未發生規模大於 6 的地震， $b$  值與大規模地震的關聯較不明顯。



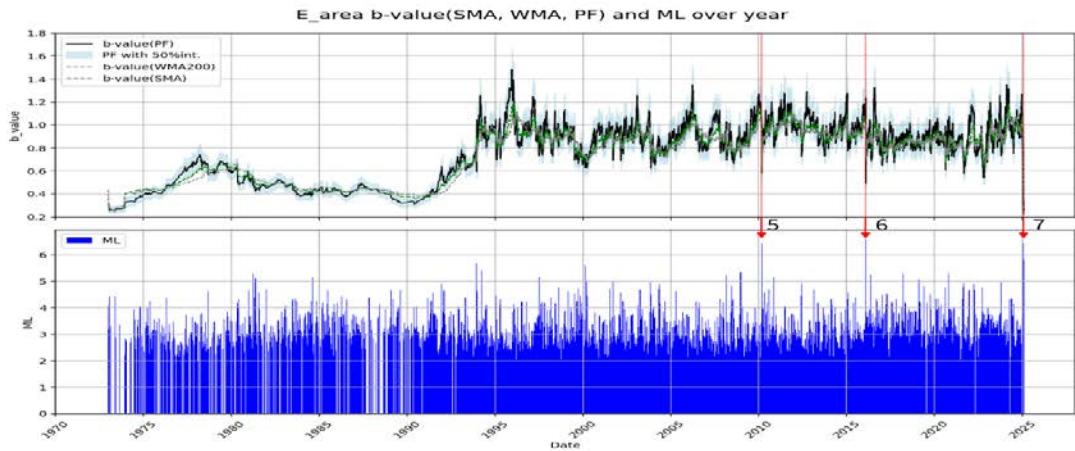
圖二十三、C 區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

D 區：如圖二十四，此區  $b$  值約在 0.4-1.2 之間震盪，未發生規模大於 6 的地震， $b$  值與大規模地震的關聯較不明顯。



圖二十四、D 區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

E 區：如圖二十五，此區  $b$  值約在 0.2-1.5 之間震盪，震盪幅度較大。而根據表四，4 起規模大於 6 的地震發生於此區，對應到  $b$  值的低點。

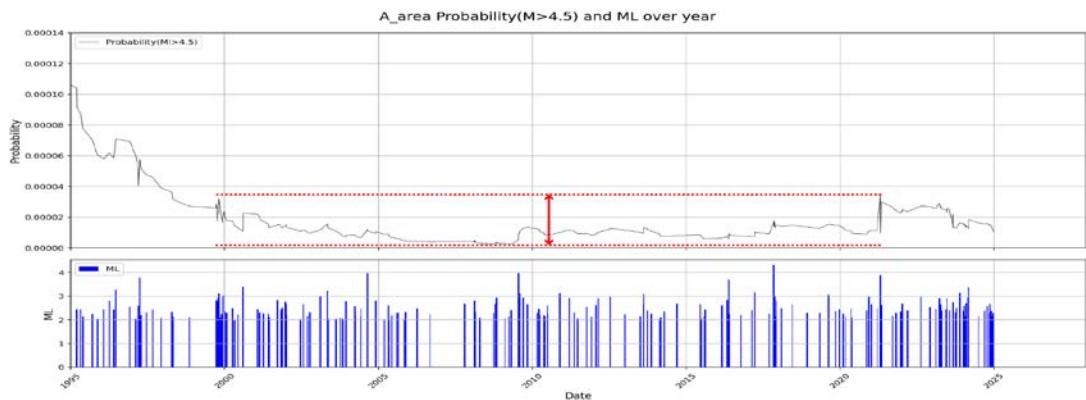


圖二十五、E 區  $b$  值與地震規模 (研究小組自製)

#### 四、探討台灣西南部 $M_L > 4.5$ 的地震發生機率 ( $P$ )

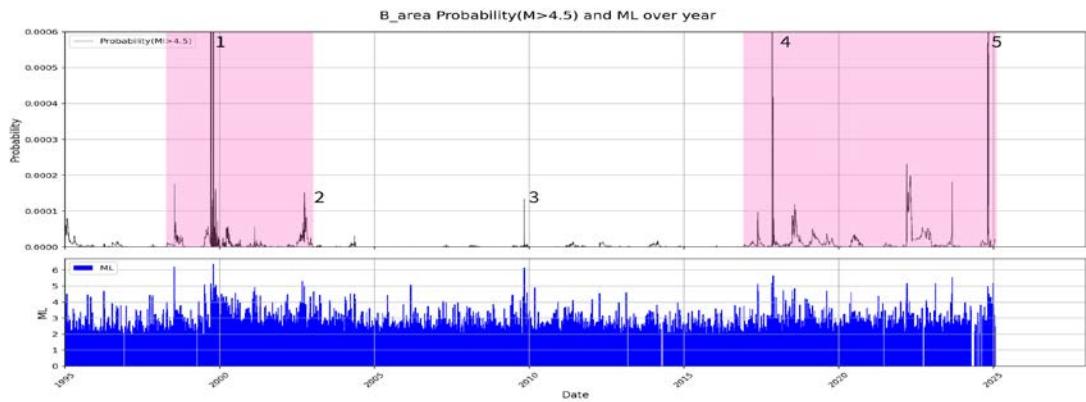
承結果三，因現代化觀測且連續式紀錄階段 (1994-2008) 的地震觀測數目較之前一階段大幅增加 (中央氣象署，2009)，於 1995 年後地震數據較多， $b$  值震盪較明顯，因此由  $b$  值推算的機率 ( $P$ ) 由 1995 年後開始分析，結果如圖二十六到三十所示。

A 區：根據圖二十六，此區  $P$  值於 0.00000-0.00004 小區間內震盪，發生  $M_L > 4.5$  地震的機率低。



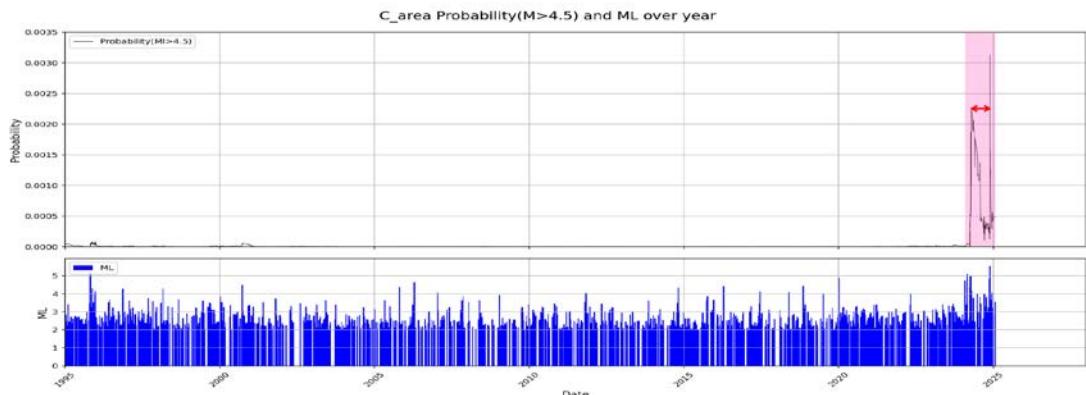
圖二十六、A 區與  $P$  值地震規模 (研究小組自製)

B 區：根據圖二十七，此區可觀察到  $P$  值有先出現一個小波峰再出現一個較大波峰的現象 (如波峰 1、4、5 之前半年至前一年間有較小的波峰)。2005-2017 年間  $P$  值較小且無明顯波動，就無觀察到此現象 (如波峰 2、3 後續並無接連一個較大的波峰)。



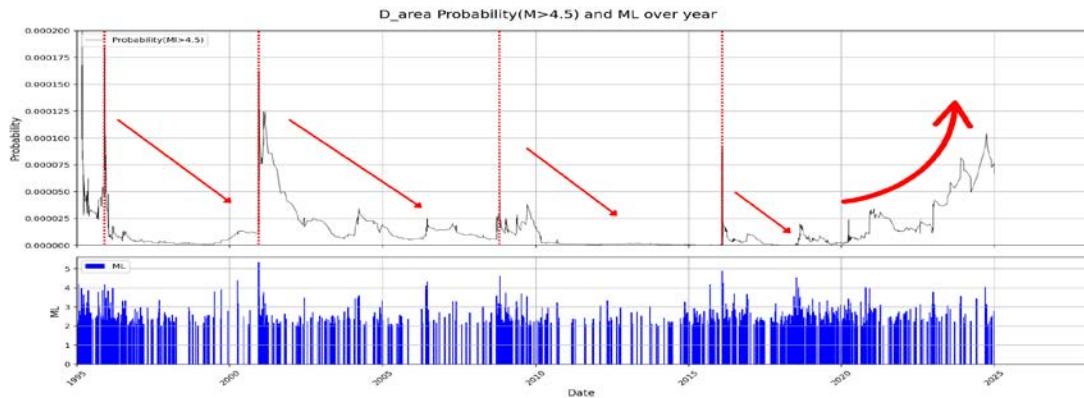
圖二十七、B 區  $P$  值與地震規模 (研究小組自製)

C 區：根據圖二十八，於發生在 2024/2/29 日規模達 5.09 及發生在 2024/11/22 規模達 5.53 的兩起較大規模地震中，發現兩個  $P$  值的波峰，先小再大，與 B 區觀察到的現象類似。其餘時間  $P$  值較小且無明顯波動。



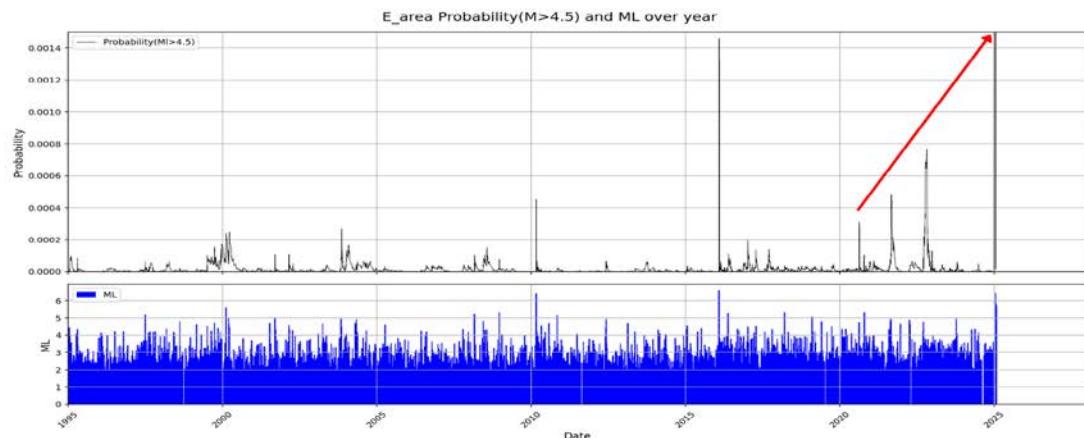
圖二十八、C 區  $P$  值與地震規模 (研究小組自製)

D 區：根據圖二十九，於 1995-2020 年間，可觀察到較大規模地震發生時， $P$  值突然上升，再緩慢下降的現象。於 2020 年之後， $P$  值呈現緩慢上升的趨勢。



圖二十九、D 區  $P$  值與地震規模 (研究小組自製)

E 區：根據圖三十，此區  $P$  值隨著大規模地震的發生而有峰值。於 2020 年之後， $P$  值波峰的峰值呈現上升的趨勢，與 D 區類似。



圖三十、E 區  $P$  值與地震規模 (研究小組自製)

## 伍、討論

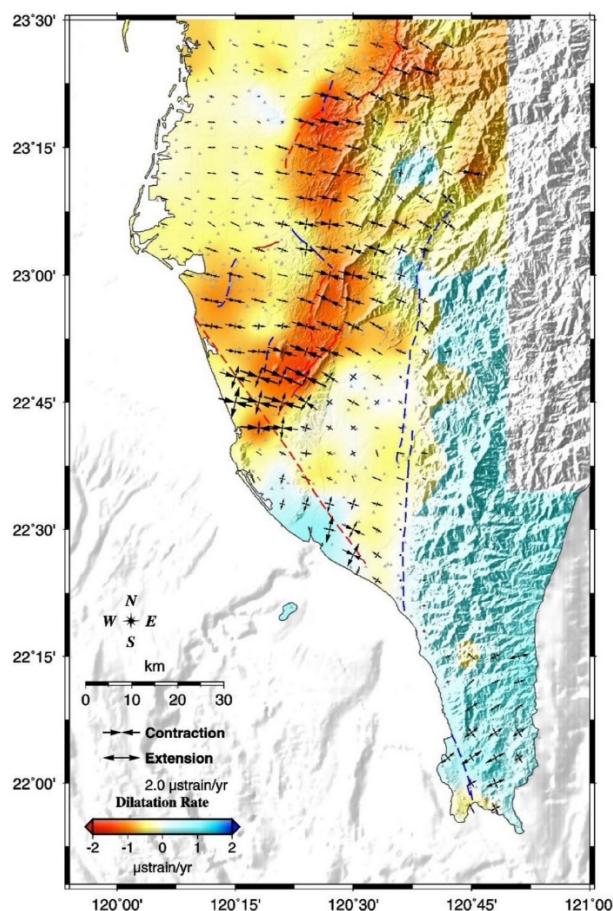
### 一、驗證台灣西南部地震規模、頻率與古騰堡－芮克特定律之關聯

根據圖七、九、十一、十三、十五、十七中可知台灣西南部的地震活動狀況符合古騰堡－芮克特定律式。而 A 區是所有區域中數據量最少的，決定係數 ( $R^2$ ) 最低；全

區數據量最多，決定係數 ( $R^2$ ) 最高。因此可推論當地震樣本數大時，地震規模與頻率的關係更符合古騰堡－芮克特定律。

## 二、利用 $b$ 值的空間分布圖探討地震發生之頻率

本研究計算出台灣西南部的  $b$  值為 0.52~0.93 之間，相較全台灣平均  $b$  值為 0.7~1.3 左右(中央氣象署，2009)，台灣西南部的  $b$  值偏低，推測是因為此區西北部有北港高區為堅硬岩盤台地，可阻擋板塊往西北的作用力，使此區西部麓山帶長期累積應力所致(梁勝雄，2007)。以  $b$  值的空間分布圖(圖十八)與水平應變場圖(圖三十一)比較，可發現斷層附近  $b$  值相對較高(0.78~0.93)之區域(圖十八)，其地表壓縮變形速率(圖三十一)也較高，驗證  $b$  值與應力分布有關。



圖三十一、2002-2015 南部水平應變場圖(取自經濟部中央地質調查所，2016)

根據圖十九可看出，地震規模 4.5 以上發生最多的位置之  $b$  值大約介在 0.7~0.9 之間，並非長期  $b$  值平均愈小，大地震就愈多。因為  $b$  值代表的是小地震與大地震的相對比例，而地震活躍之處可能不只發生大地震頻率較高，小地震頻率也較高。因此，若要判定區域中是否會有大地震的發生，可能還需要將其他因素，如地層應力釋放、地

震活動度  $a$  值等，納入參考，難以單由長時間內  $b$  值平均值的大小來斷定，而是應該要注重  $b$  值短期內的變化趨勢。

### 三、探討台灣西南部 $b$ 值的變化趨勢與大地震之關聯

前人研究  $b$  值變化是否與地震規模有一定的規律，以及能否作為大規模地震的前兆上未有共識 (Gulia & Wiemer, 2019; Kagan & Jackson, 1991; Gadkari & Mukherjee, 2022; Lacidogna, Borla, & De Marchi, 2023)。根據我們的研究結果， $b$  值在大規模地震前的確會有下降的趨勢，且在地震發生後會逐步回升。 $b$  值大小不僅僅能反映大小地震之間的比例關係，也在一定程度上受地溫和應力形式等條件的影響 (蔣小羽，2017)，所以，此  $b$  值隨時間變化的應可做為大規模地震是否發生的一個參考指標。同時在分析  $b$  值與大規模地震的關聯中，傳統方法 SMA 和 WMA 的曲線較 PF 曲線平滑，本研究小組推測是由於大規地震模發生的週期並不固定，而傳統方法 SMA 和 WMA 在計算移動平均時，是使用固定時間窗口 (計算  $b$  值時的資料筆數) 計算，無法靈敏地捕捉短期內的變化，使  $b$  值曲線上下波動不大，較為平滑。而 PF 並無固定時間窗口大小限制，能夠因應數據進行調整，找出最適合的  $b$  值進行估算，因此更能貼合規模的短期變化，較適合用以評估地區的大規模地震和  $b$  值的關聯。

此外，在分區中 PF 曲線相較 SMA 和 WMA 曲線，波動範圍比較大，研究小組推測是因為，在計算全區的  $b$  值時選取的資料範圍內包含了多處不一樣的斷層，但由於各個斷層擁有個別的區域特性，因此在計算  $b$  值時會互相影響，導致使用全區的 PF 無法準確分析區域的特性。而在分區時範圍內的斷層數量比較少，較不會互相干擾，粒子濾波法較能捕捉到各個斷層的特性，展現優勢，使 PF 曲線與 SMA 和 WMA 間的差異較大。

### 四、探討台灣西南部 $M_L >4.5$ 的地震發生機率 ( $P$ )

如前文所述，研究者於部分大地震發生之前，觀察到  $b$  值下降的趨勢。但大地震的樣本數稀少，屬於 GR 定律指數分布中的尾部行為， $b$  值下降的趨勢有時無法明顯觀察到。而本研究所計算規模 4.5 以上地震機率是由機率密度函數積分而來，較能用以評估大地震發生的風險。

#### (一) A 區：地震發生機率較低，構造穩定

本研究發現，A 區規模 4.5 以上地震的發生機率較低， $P$  值在小區間內震盪。此結果驗證了因此區屬於北港高區，地質為堅硬岩盤台地結構，構造相對穩定，

因此地震頻率較低，屬於較安全的區域。

## (二) B 區： $P$ 值變化明顯，未來可能進入下一個平靜期

B 區於 2000 年及 2017-2025 年間，規模 4.5 以上地震的發生機率顯著升高，而 2004-2016 年間則相對較低。雖然 2004-2016 年期間內仍有數起  $M_L \geq 4.5$  的地震發生，但由  $b$  值計算出的  $P$  值並不高，顯示該時段內斷層活動較不頻繁，可能處於地震的平靜期。因此， $P$  值的變化可幫助我們更清楚理解斷層活動的變化趨勢。

此區包含車籠埔斷層，如圖二十七顯示，波峰 5 的  $P$  值與 1999 年 10 月 22 日 1022 嘉義大地震時的  $P$  值 (波峰 1) 相近，皆處於高峰期 ( $P > 0.0006$ )。觀察該區地震頻率變化，1022 嘉義大地震後地震活動趨緩，推測經過 2017-2025 年的能量釋放後， $P$  值波峰若達到區間內的最大值，之後斷層活動可能趨緩，進入下一個平靜期。

## (三) C 區：2024-2025 年 $P$ 值達高峰，可能受到 D 區及 E 區影響

C 區僅於 2024-2025 年的大地震中觀察到  $P$  值顯著升高，而在 1995-2023 年間，地震活動較不活躍，僅發生過一起規模大於 5 的地震。由於該區距離西部麓山帶較遠，因此地震較不頻繁，推測 1995-2023 年期間可能處於應力累積階段。

2024-2025 年間，C 區  $P$  值出現高峰，推測與鄰近 D 區及 E 區於 2020-2025 年斷層活躍期有關，可能受到其應力推擠影響，導致地震活動增加，使  $P$  值上升。

## (四) D 區： $P$ 值呈現異於其他區域的變化，地震風險可能增加

本研究發現，在 D 區數起  $M_L > 4.5$  地震發生前後， $P$  值出現顯著波峰，隨後緩緩下降，直到下個  $M_L > 4.5$  的地震發生，符合彈性回跳理論 (Reid, 1910)。這種  $P$  值變化模式與其他分區不同，推測與該區地質特性有關。D 區內主要斷層為東西走向的新化斷層，其運動以右移為主，而全區中，除 B 區的梅山斷層外，其他區域斷層皆為南北走向。因此 D 區的斷層運動方向與鄰近 C、E 區不同。此區亦處於台灣西部褶皺-逆衝斷層帶的變形前緣 (梁勝雄, 2007)，推測因此導致  $P$  值變化趨勢異於其他區域。

此外，2020-2025 年間，D 區  $P$  值呈現異常上升趨勢，可能代表地震能量正在累積，顯示未來發生地震的機率可能增加，應密切關注該區的地震風險。

## (五) E 區：2025 年 1 月發生多起大地震， $P$ 值顯示出前兆特徵

E 區自 2025 年 1 月 21 日至 1 月 30 日，共發生 8 起規模 5 以上的地震，而上一場規模 5 以上地震發生於 2020 年 10 月 17 日。於 2020-2025 年間，單從地震規模的時間序列無法明確辨識大地震的前兆。然而，由  $P$  值時間序列顯示 3 個明顯波峰，且峰值逐漸升高，最終於 2025 年 1 月 21 日發生  $M_L 6.44$  地震時， $P$  值達到最大值。2020-2025 年間， $P$  值高峰逐步上升，可能代表地震能量正在累積，未來仍需密切關注，以評估是否會發生更大規模的地震。

本研究  $P$  值計算之數據截止自 2025 年 1 月 31 日為止， $P$  值高峰呈上升趨勢，顯示  $M_L > 4.5$  之地震發生機率高。於研究結束後，研究小組持續關注台灣西南部之地震活動，此區發生多起  $M_L > 4.5$  之地震（見表五），與本研究之推論相符，後續仍需持續注意此區地震風險。

表五、E 區後續地震（研究小組自製）

日期	規模	經度	緯度
2025/02/08	5.30	120.59	23.28
2025/03/05	5.25	120.50	23.15
2025/03/21	4.52	120.47	23.04
2025/04/03	4.98	120.38	23.20
2025/05/14	4.50	120.55	23.31

## 二、未來展望

本研究透過粒子濾波法計算  $b$  值，進一步推算  $P$  值，以觀察地震發生頻率的變化趨勢。這種方法能夠將原本的  $M_L$  時間序列轉換為機率圖像，使我們得以找出地震序列變化的特徵，並應用於大地震發生機率的推論，進而提升防範地震風險的能力。

此外，透過不同區域  $P$  值曲線的對比分析，我們能夠辨識各區域的地震活動特性，有助於進一步製作防災地圖，提供更具體的防災參考，減少地震災害的潛在影響。

## 三、結論

本研究根據台灣西南部 1973 年至 2025 年的地震數據，驗證該區地震規模與頻率符合古騰堡—芮克特定律（GR 定律），分析  $b$  值的空間分布，並利用最大概似法及粒子濾波技術動態估計  $b$  值，進而推導出  $M_L > 4.5$  地震的發生機率。主要結論如下：

### 1. GR 定律適用性的驗證：

台灣西南部區域內的地震活動在不同分區均高度符合 GR 定律，且隨著地震樣本數增加，該定律的適用性愈發明顯。

### 2. *b* 值空間分布與地震頻率關聯：

本研究計算出台灣西南部的 *b* 值為 0.52~0.93 之間，低於全台平均 *b* 值，顯示此區應力作用較為強烈。空間分布分析顯示，各分區 (A 至 E 區) 的 *b* 值區間不同，斷層附近 *b* 值相對較高，介於 0.78~0.93 之間，而 *b* 值在 0.7~0.9 之間時， $M_L$  4.5 以上之地震頻率較高。

### 3. *b* 值動態變化與大地震關聯：

利用簡單移動平均 (SMA、WMA) 與粒子濾波法 (PF) 所建立的 *b* 值時間序列顯示，在大規模地震發生之前，*b* 值普遍呈現顯著下降趨勢，而震後則逐步回升。特別是粒子濾波方法能夠捕捉到較為細微且動態的波動。此趨勢反映出斷層應力的積累與釋放機制，可做為短期地震風險預警之指標。

### 4. 台灣西南部各區規模 4.5 以上地震機率 (*P*) 變化不同：

A 區最穩定；B 區地震頻繁但可能逐漸平靜；C 區近期受鄰區應力影響而活動增加；D、E 區近年 *P* 值逐步上升，未來地震風險較高。以粒子濾波法估算之 *P* 值可有效觀察地震趨勢，提供防災預警參考。

## 柒、參考文獻

### 一、中文文獻：

1. 中央氣象署 (n.d.)。地震百問。取自 <https://bit.ly/3YIHAXo>
2. 中央氣象署 (n.d.)。臺灣地震與地球物理資料管理系統。取自 <https://gdms.cwa.gov.tw/>
3. 中央氣象署 (2009)。中央氣象署地震測報中心成立 20 周年研討會論文集專刊。取自 <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/page/twenty>
4. 米泓生 (2021)。固體地球的結構與組成。普通型高級中學地球科學 (頁 26-57)。龍騰文化。
5. 李品儒、林佳慧 (2018)。台灣地震規模與頻率之研究。第 50 屆中小學科學展覽會作品說明書。取自 <https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/040507.pdf>

6. 陳伯源（2022）。台灣地震規模頻率分布於地震前後之時序變化：以 2012 到 2019  $M_L \geq 6.0$  地震為例（碩士論文，國立臺灣大學）。華藝線上圖書館。取自 <https://doi.org/10.6342/NTU202202429>
7. 梁勝雄（2007）。台灣西南部前陸地區演育與古應力分析（碩士論文，國立中央大學）。台灣博碩士論文知識加值系統。<https://hdl.handle.net/11296/9agqxu>
8. 經濟部中央地質調查所（2007）。經濟部中央地質調查所特刊第十七號。取自 <https://fault.gsmma.gov.tw/About/FaultMore/1dd6cbac6e614bffa6d81cedf2cb7cc9>
9. 經濟部中央地質調查所（2016）。20160206 地震地質調查報告。取自 <https://www.taiwanwatch.org.tw/sites/default/files/epapers/20160206earthquakereport.pdf#page21>
10. 蔡季樺（2003）。台灣強震寧靜之探討（碩士論文，國立中央大學）。取自 <https://www.stat.ncu.edu.tw/teacher/YIChen/teacher-papers/90225006.pdf>
11. 蔣小羽（2017）。台灣地區孕震深度及  $b$  值的研究（碩士論文，國立臺灣大學）。台灣博碩士論文知識加值系統。取自 <https://doi.org/10.6342/NTU201703409>
12. 臺灣地質知識服務網（n.d.）。臺灣地質知識服務網。取自 <https://twgeoref.gsmma.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/mp?mp=6>
13. 廖冠至（2024）。臺灣造山帶西部前緣在震間期的變形與應變累積（碩士論文，國立臺灣大學）。台灣博碩士論文知識加值系統。取自 <https://doi.org/10.6342/NTU202403926>

## 二、英文文獻

1. Cao, A., & Gao, S. S. (2002). Temporal variation of seismic  $b$ -values beneath northeastern Japan island arc. *Geophysical Research Letters*, 29(9), 1252. <https://doi.org/10.1029/2001GL013775>
2. Chan, C. H., Wu, Y. M., Tseng, T. L., Lin, T. L., & Chen, C. C. (2012). Spatial and temporal evolution of  $b$ -values before large earthquakes in Taiwan. *Tectonophysics*, 532-535, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.004>
3. Chen, J., & Zhu, S. (2020). Spatial and temporal  $b$ -value precursors preceding the 2008 Wenchuan, China, earthquake ( $M_w = 7.9$ ): Implications for earthquake prediction.

*Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1196–1211.

<https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1784297>

4. Ermshaus, A., Schäfer, P., & Leser, U. (2022). Window size selection in unsupervised time series analytics: A review and benchmark. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 13414, pp. 91–106). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24378-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24378-3_6)
5. Gadkari, D., & Mukherjee, S. (2022). Assessment of efficacy of “b” value as a seismic precursor for select major seismic events. In S. Mukherjee, S. Dasgupta, C. Majumdar, S. Mandal, & T. Dasgupta (Eds.), *Tectonics and structural geology: Indian context* (Chapter 22). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119679998.ch22>
6. Gulia, L., & Wiemer, S. (2019). Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, 574(7777), 193–199. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1606-4>
7. Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34, 185–188.
8. Iwata, D., & Nanjo, K. Z. (2024). Adaptive estimation of the Gutenberg–Richter b value using a state space model and particle filtering. *Scientific Reports*, 14, 4630. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54576-x>
9. Kagan, Y. Y., & Jackson, D. D. (1991). Long-term earthquake clustering. *Geophysical Journal International*, 104(1), 117–133. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb02498.x>
10. Lacidogna, G., Borla, O., & De Marchi, V. (2023). Statistical seismic analysis by b-value and occurrence time of the latest earthquakes in Italy. *Remote Sensing*, 15(21), 5236. <https://doi.org/10.3390/rs15215236>
11. Nakaya, S. (2006). Spatiotemporal variation in b value within the subducting slab prior to the 2003 Tokachi-oki earthquake (M 8.0), Japan. *Journal of Geophysical Research*, 111(B3), 1–13.
12. Nanjo, K. Z., Hirata, N., Obara, K., & Kasahara, K. (2012). Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes. *Geophysical Research Letters*, 39(20), 3–6.
13. Popandopoulos, G. A. (2018). Detailed study of time variations in the Gutenberg–Richter b-value based on highly accurate seismic observations at the Garm prognostic site, Tajikistan. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54, 612–631. <https://doi.org/10.1134/S1069351318040092>

14. Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake. In *The California earthquake of April 18, 1906, report of the State Investigation Commission* (Vol. 2). Carnegie Institution of Washington.
15. Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399–415.
16. Žalohar, J. (2018). Gutenberg-Richter's law. In *Developments in Structural Geology and Tectonics* (Vol. 2, pp. 173-178). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814580-7.00014-9>

## 附錄

繪製 b 值相關圖形之 Python 主程式碼節錄：

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
from scipy.stats import linregress
# 參數設定
dM = 0.01
Mc = 2.0 # 最小地震規模
i = 200 # 移動平均數的筆數
log_e = np.log10(np.e) # 計算 log(e) ≈ 0.4343
# 匯入 Excel 文件
excel_file = 'GDMScatalog 1973-2025.csv'
worksheet = 'all_data'
# 讀取 Excel 資料
df = pd.read_excel(excel_file, sheet_name=worksheet)
df['date'] = pd.to_datetime(df['date'])
df = df.sort_values(by='date').reset_index(drop=True)
# 只保留 ML >= Mc 的資料
df_drop = df[df['ML'] >= Mc].copy()
# 計算每個地震的能量
df_drop['E'] = 10 ** (1.5 * df_drop['ML'] + 4.8)
# 計算 200 筆移動平均數 (ML 欄位)
df_drop['ML_average'] = df_drop['ML'].rolling(window=i, min_periods=1).mean()
# 設定加權移動平均的權重與計算加權移動平均
weights = np.arange(1, i + 1) # 產生 1 到 200 的數列
df_drop['ML_weight_200'] = df_drop['ML'].rolling(window=i, min_periods=1).apply(lambda x: np.sum(x * weights[-len(x):]) / np.sum(weights[-len(x):]), raw=True)
# 計算 b-value
denominator = df_drop['ML_average'] - (Mc - dM / 2)
df_drop['b_value'] = log_e / denominator
df_drop['b_value_SMA200'] = df_drop['b_value'].rolling(window=i, min_periods=1).mean()
w_denominator = df_drop['ML_weight_200'] - (Mc - dM / 2)
df_drop['b_value_w200'] = log_e / w_denominator
# 計算 E 的移動平均數
# df_drop['logE23']=np.log(df_drop['E'] ** (2/3))
# df_drop['logE23_SMA200']=df_drop['logE23'].rolling(window=i, min_periods=1).mean()
# 合併所有需要的欄位到 df_b
df_b = df_drop[['date', 'ML', 'E', 'ML_average', 'ML_weight_200', 'b_value',
                 'b_value_SMA200', 'b_value_w200', 'b ql', 'b med', 'b qu']] # 'logE23', 'logE23_SMA200',
# df_b = df_b.iloc[200:].reset_index(drop=True)
fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True, gridspec_kw={'height_ratios': [1, 1]})
# b-value(SMA200) 圖
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b_value_w200'], color='red', label='b-value(WMA200)')
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b_value'], color='blue', label='b-value(SMA)')
axes[0].fill_between(df_b['date'], df_b['b ql'], df_b['b qu'], color='lightblue', alpha=0.5, label='PF Range')
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b med'], color='black', linewidth=1, label='b med')
axes[0].set_ylabel('b_value')
```

```

axes[0].legend()
axes[0].grid()
# ML_average 長條圖
axes[1].bar(df_b['date'], df_b['ML'], color='b', label='ML')#, width=1.0)
axes[1].set_ylabel('ML')
axes[1].set_xlabel('Date')
axes[1].legend()
axes[1].grid()
# 設定 X 軸每 5 年畫一條主格線
axes[1].xaxis.set_major_locator(mdates.YearLocator(5))
axes[1].xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%Y'))
# 優化 X 軸顯示
plt.title('')
plt.xticks(rotation=45)
# 優化顯示
plt.tight_layout()
plt.show()
fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True, gridspec_kw={'height_ratios': [1, 1]})
# b-value(SMA200) 圖
axes[0].fill_between(df_b['date'], df_b['b ql'], df_b['b qu'], color='lightblue', alpha=0.5, label='PF Range')
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b med'], color='black', linewidth=1, label='b med')
axes[0].set_ylabel('b_value')
axes[0].legend()
axes[0].grid()
# ML_average 長條圖
axes[1].bar(df_b['date'], df_b['ML'], color='b', label='ML')
axes[1].set_ylabel('ML')
axes[1].set_xlabel('Date')
axes[1].legend()
axes[1].grid()
# 設定 X 軸每 5 年畫一條主格線
axes[1].xaxis.set_major_locator(mdates.YearLocator(5))
axes[1].xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%Y'))
# 優化 X 軸顯示
plt.title('')
plt.xticks(rotation=45)
# 優化顯示
plt.tight_layout()
plt.show()
fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True, gridspec_kw={'height_ratios': [1, 1]})
# b-value(SMA200) 圖
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b_value'], color='blue', label='b-value(SMA)')
axes[0].set_ylabel('b_value')
axes[0].legend()
axes[0].grid()
# ML_average 長條圖
axes[1].bar(df_b['date'], df_b['ML'], color='b', label='ML')#, width=1.0)
axes[1].set_ylabel('ML')
axes[1].set_xlabel('Date')
axes[1].legend()
axes[1].grid()
# 設定 X 軸每 5 年畫一條主格線
axes[1].xaxis.set_major_locator(mdates.YearLocator(5))

```

```

axes[1].xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%Y'))
# 優化 X 軸顯示
plt.title('')
plt.xticks(rotation=45)
# 優化顯示
plt.tight_layout()
plt.show()
fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 8), sharex=True, gridspec_kw={'height_ratios': [1, 1]})
# b-value(SMA200) 圖
axes[0].plot(df_b['date'], df_b['b_value_w200'], color='red', label='b-value(WMA200)')
axes[0].set_ylabel('b_value')
axes[0].legend()
axes[0].grid()
# ML_average 長條圖
axes[1].bar(df_b['date'], df_b['ML'], color='b', label='ML')#, width=1.0)
axes[1].set_ylabel('ML')
axes[1].set_xlabel('Date')
axes[1].legend()
axes[1].grid()
# 設定 X 軸每 5 年畫一條主格線
axes[1].xaxis.set_major_locator(mdates.YearLocator(5))
axes[1].xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%Y'))
# 優化 X 軸顯示
plt.title('')
plt.xticks(rotation=45)
# 優化顯示
plt.tight_layout()
plt.show()

```

## 【評語】051912

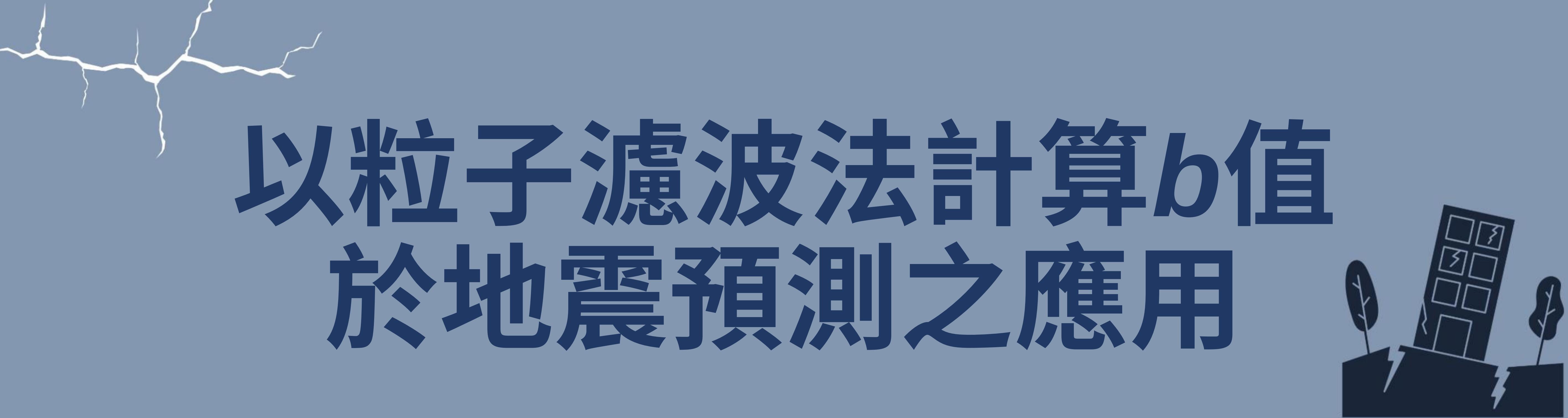
近年來台灣西南部地震頻繁，本研究即探討台灣西南部地震活動，除了驗證該區地震芮氏規模與頻率符合古騰堡-芮克特定律 (Gutenberg-Ritcher Law)，也探討定律中  $b$  值變化與大地震之關聯。研究對象以台灣西南部區域內 1973.01.01~2025.01.31 之地震數據，採用最大概似法及粒子濾波器 (Particle Filter) 處理時間序列，計算各區  $b$  值，並推估各區芮氏規模 ( $MMLL$ )  $> 4.5$  之地震發生機率 (P 值)，結合斷層分布與地質特性，分析地震風險。結果顯示，大規模地震前  $b$  值呈下降趨勢，震後則逐步回升，顯示  $b$  值變化趨勢與樣態具有作為地震前兆的參考價值；透過  $b$  值計算出的芮氏規模 ( $MMLL$ )  $> 4.5$  之地震發生機率，亦可捕捉地震活動趨勢。研究發現  $b$  值及其所計算的 P 值可作為短期地震風險指標，未來可進一步應用於地震預警與防災評估。

1. 本研究嘗試運用粒子濾波法 (PF) 分析  $b$  值隨時間的變化趨勢，為地震預兆特徵的偵測提供更動態與即時的估測方式，相較於單純的滑動平均法 (SMA/WMA)，更具有前瞻性。

2. 從中央氣象署 GDMS 系統下載數據，明確的標示經緯度與時間範圍，符合科學資料處理規範。從文獻探討、目錄下載、區域劃分、b 值與機率估算，整體流程圖(第 4 頁)結構嚴謹，而且具可重複性，有助於呈現研究分析架構。
3. 粒子濾波法(PF)為本研究一大特色，應該詳細說明其建模原理、狀態轉移機制或參數(如粒子數量、觀察模型)設定依據。若能補充 PF 與其他方法之差異與優劣點，將有助於凸顯研究創新性與科學的嚴謹度。
4. 本研究多次指出 b 值下降與地震發生有關聯，如果能夠進行統計檢定(如 K-S 檢定、ANOVA 或假設檢定等)，以量化分析來檢核變異是否具有顯著性，將可避免單靠視覺趨勢或圖形判斷而導致過度的詮釋。
5. 本研究可以補充說明地震資料的潛在誤差來源，如地震定位精度、儀器網布設不均、歷年資料格式變化等對分析結果的影響，也可以強化未討論選擇時間視窗與空間劃分可能帶來的偏差。

作品海報

# 以粒子濾波法計算 $b$ 值 於地震預測之應用



# 摘要

本研究探討台灣西南部地震活動，驗證該區地震規模與頻率符合古騰堡-芮克特定律 (Gutenberg-Richter Law)，並分析定律中  $b$  值變化與大地震關聯。以台灣西南部 1973.01.01~2025.01.31 之地震時間序列，使用最大概似法與粒子濾波器 (Particle Filter) 計算各區  $b$  值，進而推算  $ML > 4.5$  之地震發生機率 ( $P$  值)，並結合斷層分布與地質特性評估地震風險。結果顯示，大地震前  $b$  值下降，震後則逐漸回升，反映  $b$  值變化趨勢與樣態具有作為地震前兆的參考價值； $P$  值亦能捕捉地震活動趨勢。本研究發現  $b$  值與  $P$  值可作為短期地震風險指標，未來可進一步應用於地震預警與防災評估。

## 壹、前言

### 一、研究動機

近來台灣地震活動頻繁，2024年0403花蓮強震達芮氏規模7.2，台灣西南部亦頻繁發生地震，如嘉義布袋地區無明顯斷層，卻出現規模4.9的地震。目前地震難以準確預測，短期風險評估指標仍待研究。根據古騰堡 - 芮克特定律 (Gutenberg-Richter Law, GR定律)， $b$  值可反映小地震與大地震的比例，具有作為地震風險指標的潛力。因此，本研究利用GR定律與地震大數據，分析台灣西南部地震的時空分布，探討  $b$  值與地震規模隨時間變化的趨勢，進一步評估該區地震風險。

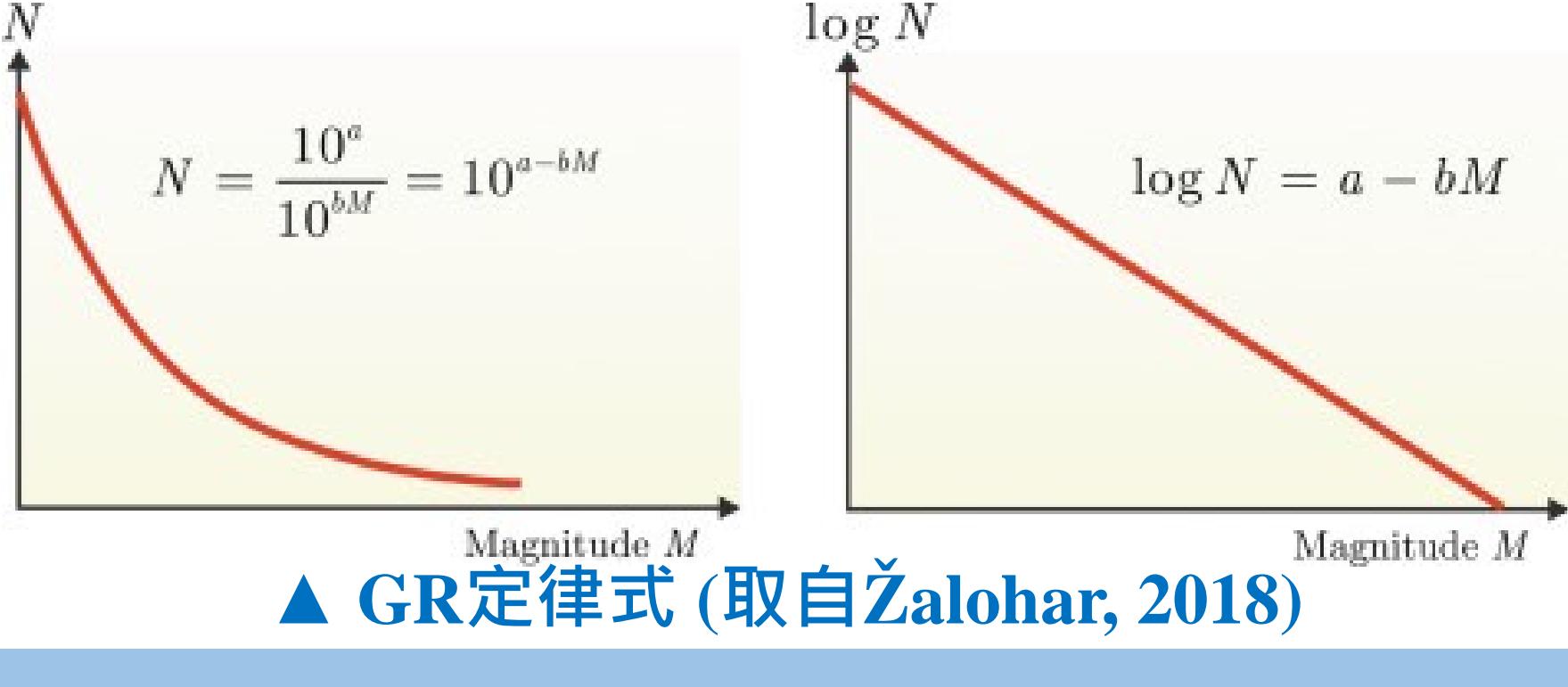
### 二、研究目的

- (一) 驗證台灣西南部地震規模、頻率與GR定律之關聯  
(二) 利用台灣西南部  $b$  值空間分布圖探討地震發生之頻率

- (三) 探討台灣西南部  $b$  值的變化趨勢與大地震之關聯  
(四) 探討台灣西南部  $ML > 4.5$  的地震發生機率 ( $P$  值)

### 三、文獻探討

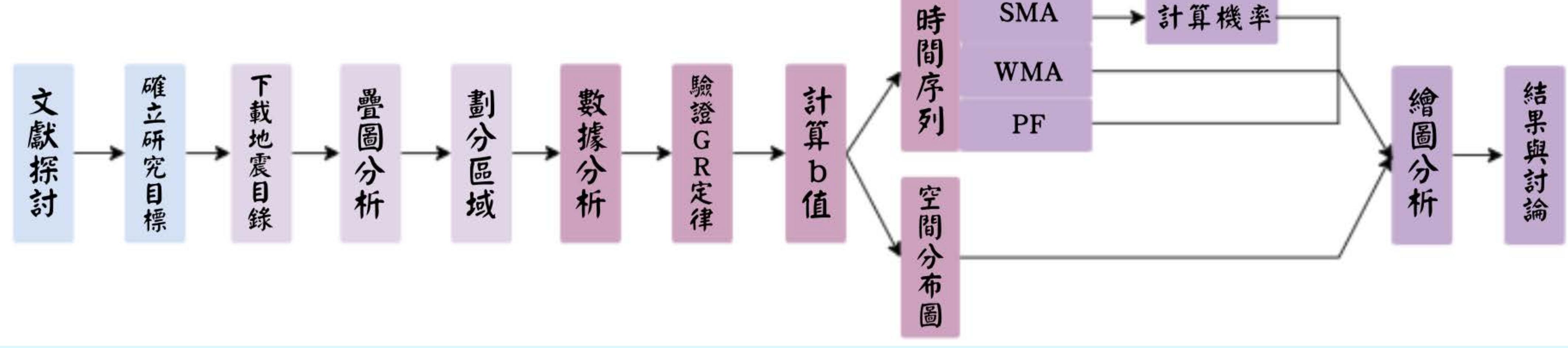
古騰堡-芮克特定律表示地震規模與頻率的關係，其中  $a$  值反映地震活動度， $b$  值反映小地震與大地震發生比例。此外，大地震發生前之  $b$  值下降現象可能與應力增加、板塊耦合程度有關。近期研究以狀態空間模型與粒子濾波器進行  $b$  值時間序列分析，可提高地震規模預測之準確性。



▲ GR定律式 (取自 Žalohar, 2018)

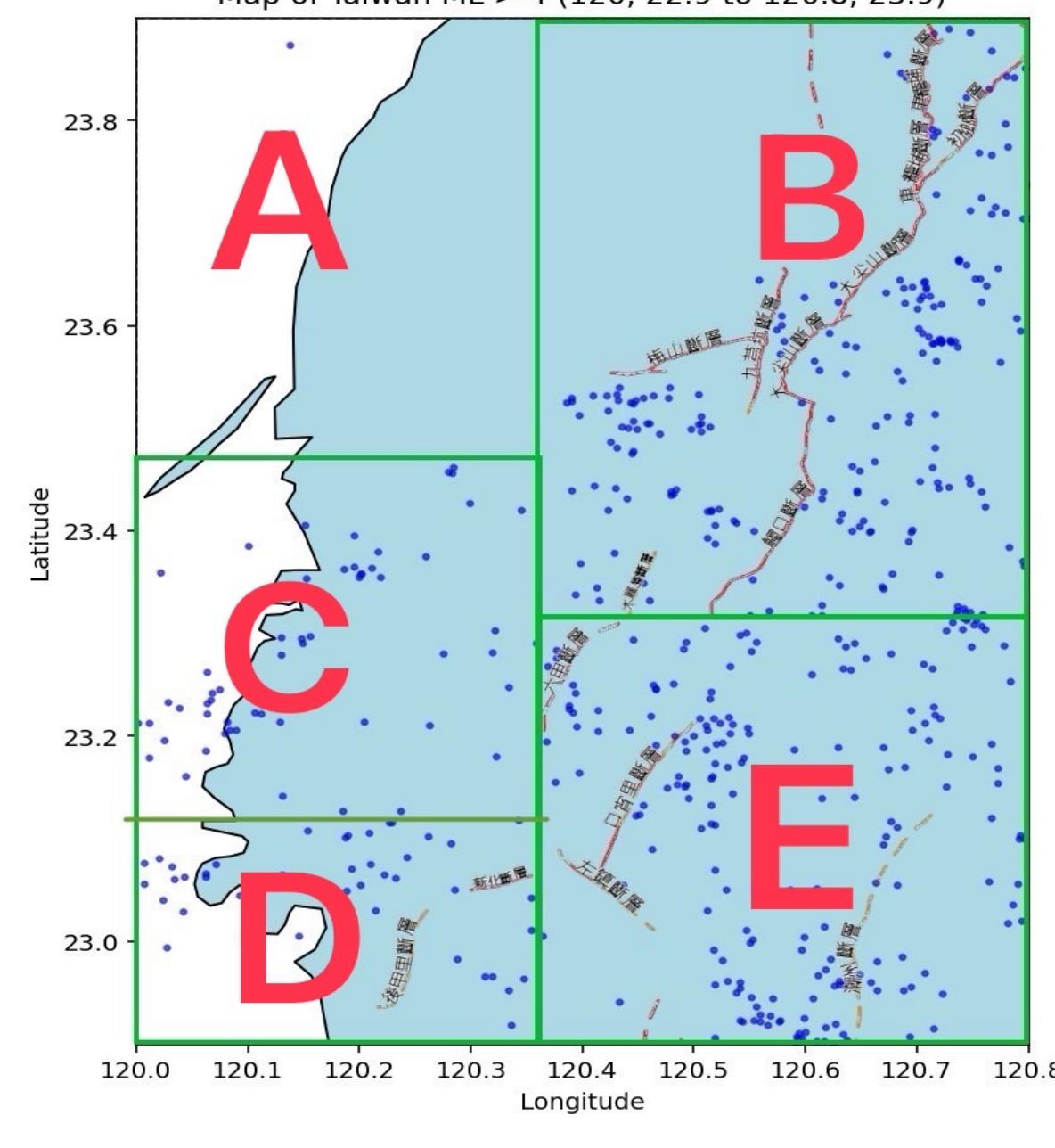
## 貳、研究過程與方法

### 一、研究流程



### 二、研究方法

#### (一) 研究區域劃分



從GDMS 地震目錄中，篩選出 1973.01.01~2025.01.31 之  $ML \geq 2$  地震數據。再根據地震分布及斷層分布，將研究區域劃分為 5 個分區。

區域	主要斷層分布 (中央氣象署, 2009)	規模大於 2.0 的 地震資料筆數
A 區	無明顯斷層，此區屬北港高區無震帶	326
B 區	車籠埔斷層、梅山斷層、觸口斷層等七處斷層	11402
C 區	無明顯斷層	3254
D 區	後甲里斷層、新化斷層	1727
E 區	六甲斷層、口宵里斷層、左鎮斷層、潮州斷層	10390

#### (二) $b$ 值計算

##### 1. 傳統方法：最大概似法

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_c - \frac{1}{2} M_{bin})}$$

$b$  值的時間序列可再分為：  
簡單移動平均 (SMA)、  
加權移動平均 (WMA)。

##### 2. 粒子濾波法 (Particle Filter, PF)

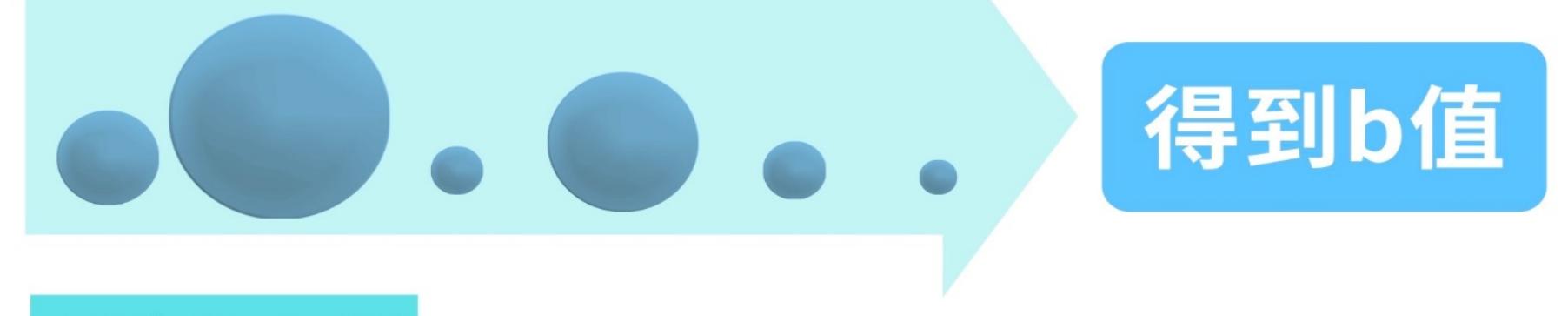
###### 初始化

狀態變量： $x_t = \log b_t$   
隨機生成大量粒子，每個粒子代表一個  $x_t$  的可能值。



###### 加權/校正

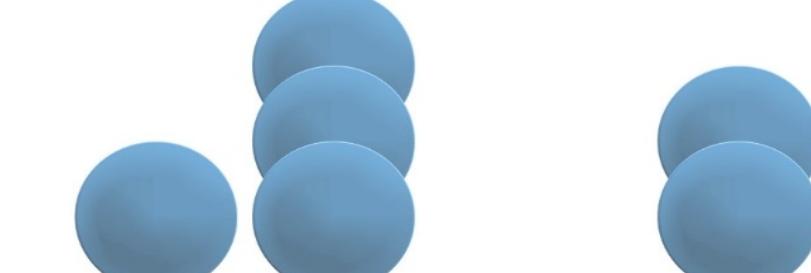
觀測變量： $y_t = M_t$   
權重： $w_t^{(i)} \propto P(M_t | \beta_t^{(i)})$   
接收觀測變量，將粒子代入觀測方程式，算出權重。



得到  $b$  值

###### 重新取樣

根據權重，保留機率高的粒子，淘汰機率低的粒子。



###### 傳播/預測

狀態方程式：  
 $x_{t+1} = x_t + \epsilon_{t+1}$   
每個粒子加入隨機擾動，模擬狀態隨時間的改變。

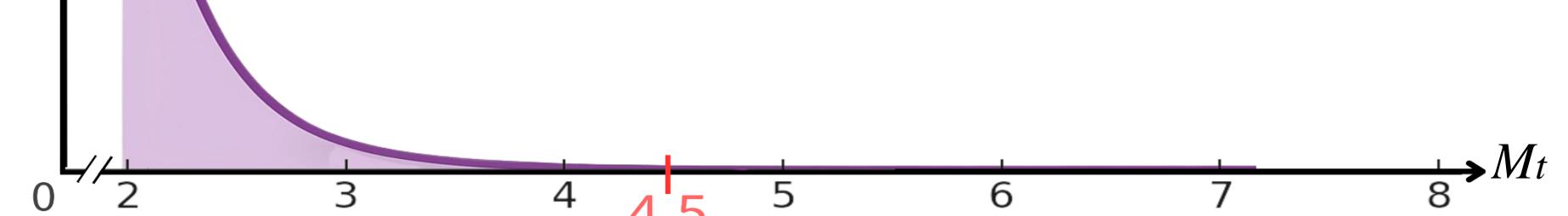


###### (三) 機率 ( $P$ 值) 計算

● 機率密度函數： $P(M_t) = \frac{\beta(t) \cdot \exp[-\beta(t) \cdot (M_t - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(t) \cdot (M_U - M_0)]}$

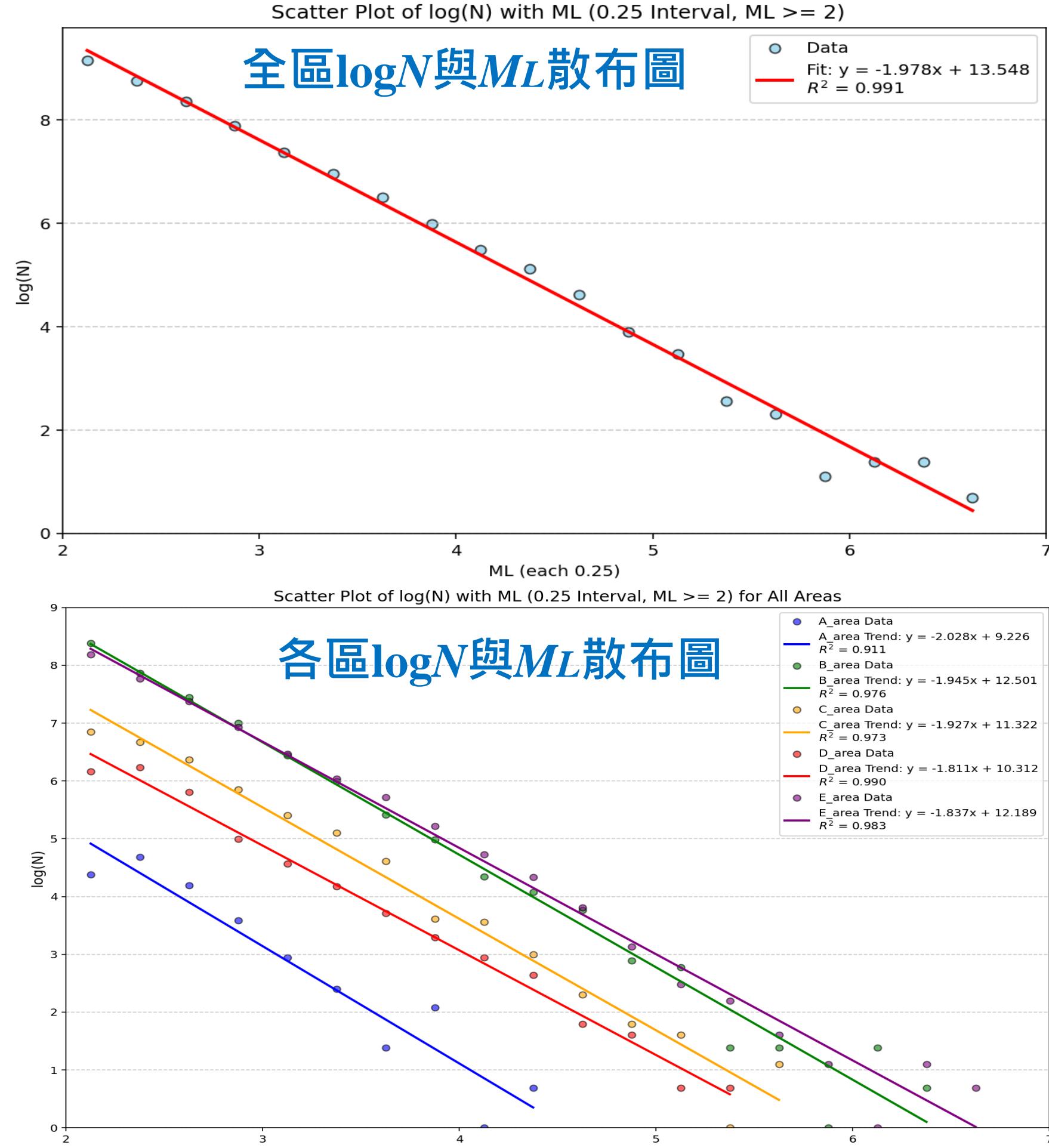
● 累積分布函數： $F(M_q) = q$

令  $M_q = 4.5$ ，則  $1-q$  即為  $ML > 4.5$  的地震發生機率。



# 參、研究結果

## 一、驗證台灣西南部地震規模、頻率與GR定律之關聯



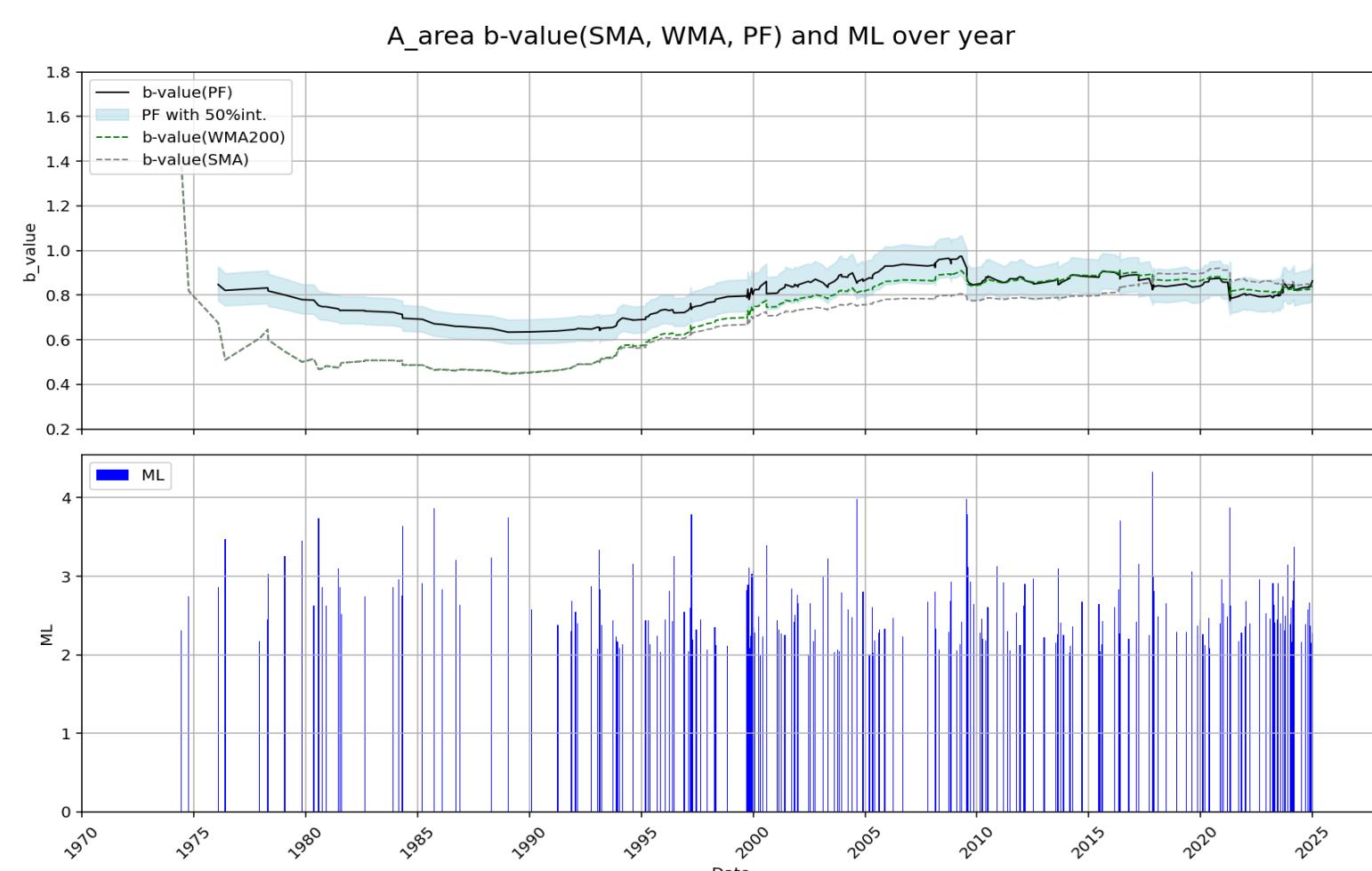
台灣西南部各區地震數據高度符合GR定律，決定係數( $R^2$ )介於0.911~0.991。

## 三、探討台灣西南部**b**值的變化趨勢與大地震之關聯

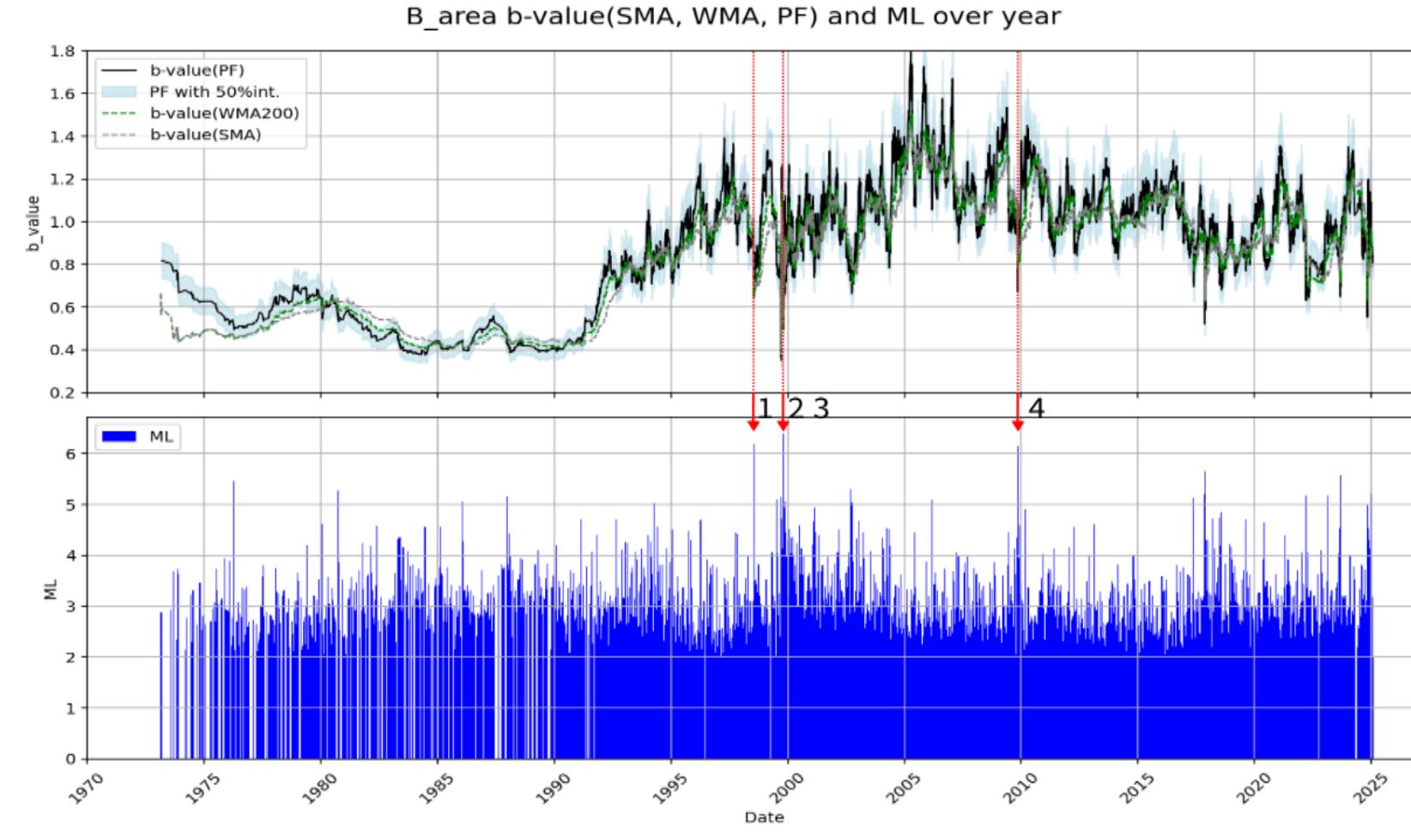
全區在部分 $ML > 6$ 的地震發生前，**b**值呈現下降趨勢，震後則有回升的趨勢，如表中標示的地震事件。

1994年以前，地震數據較少，全區及各分區的**b**值皆偏低，**b**值震盪不明顯。隨著地震監測技術的進步，地震數據量增加，約自1995年之後，**b**值較有明顯的上下震盪，且由粒子濾波法計算的**b**值，震盪幅度最大，WMA震盪幅度比SMA稍大。

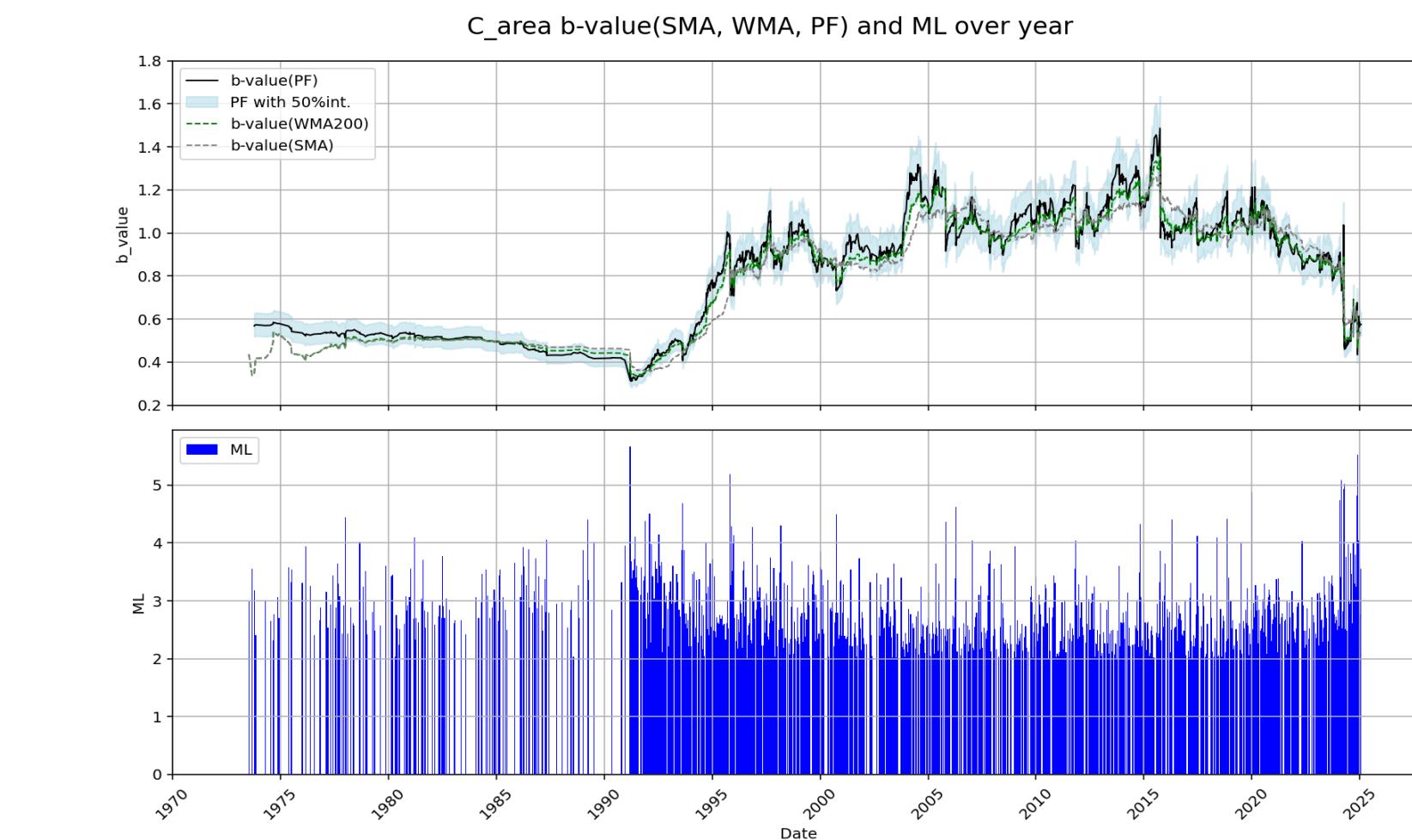
b值下降後發生的大地震						
地震事件	1	2	3	4	5	6
發生時間	1998/7/17	1999/10/22	1999/10/22	2009/11/5	2010/3/4	2016/2/6
發生區域	B	B	B	B	E	E
規模	6.20	6.40	6.00	6.15	6.42	6.42



▲A區**b**值與地震規模



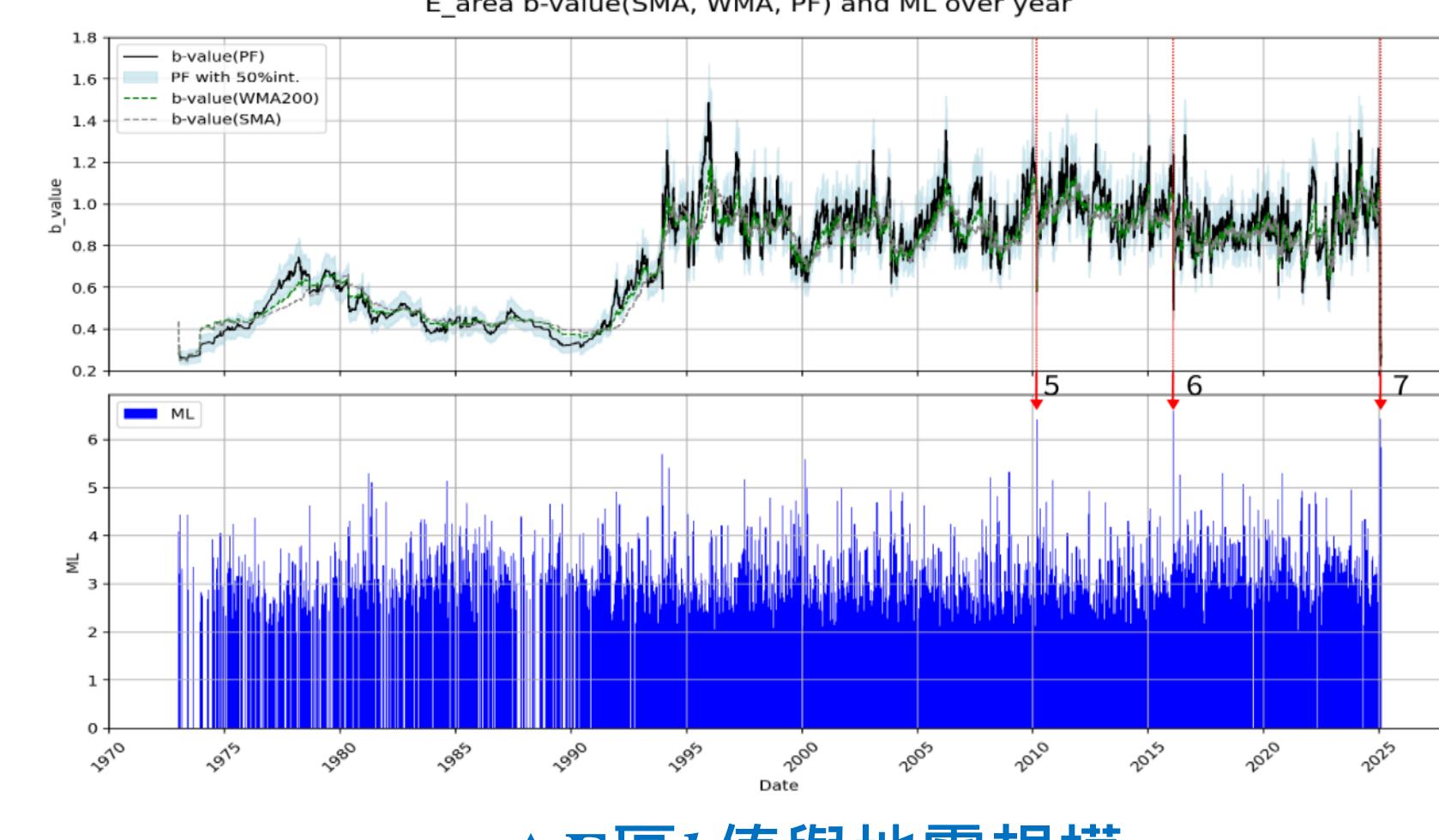
▲B區**b**值與地震規模



▲C區**b**值與地震規模

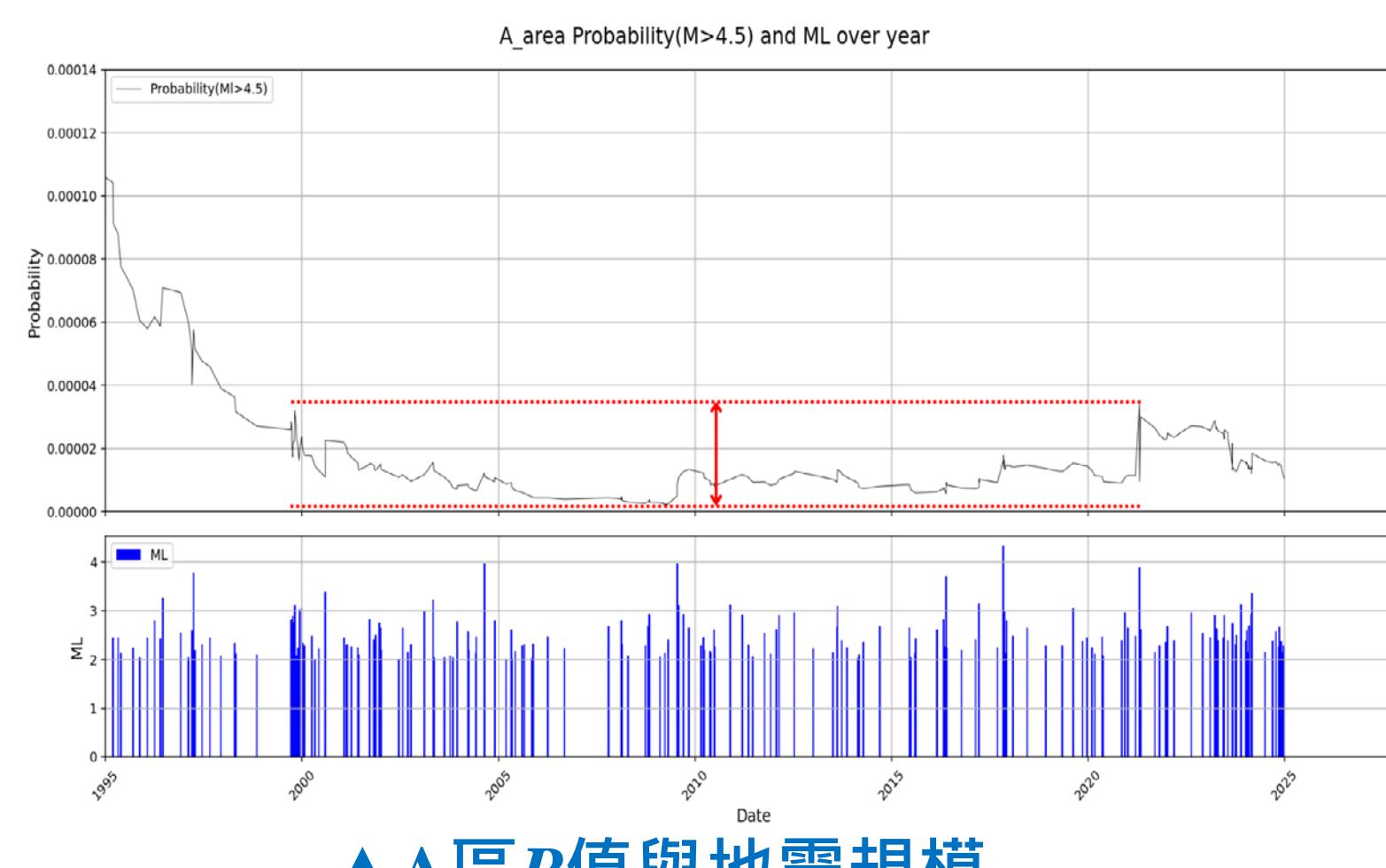


▲D區**b**值與地震規模

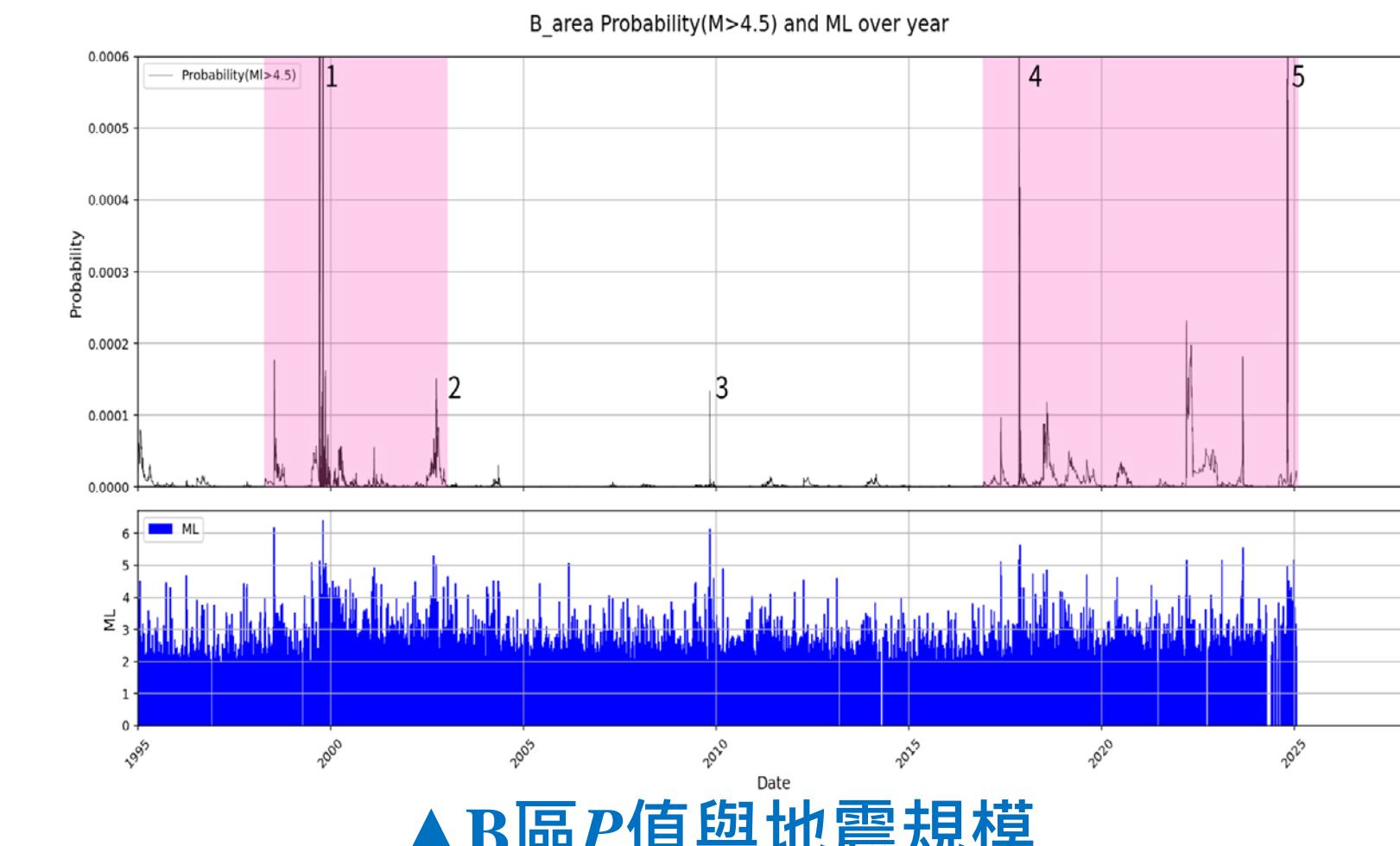


▲E區**b**值與地震規模

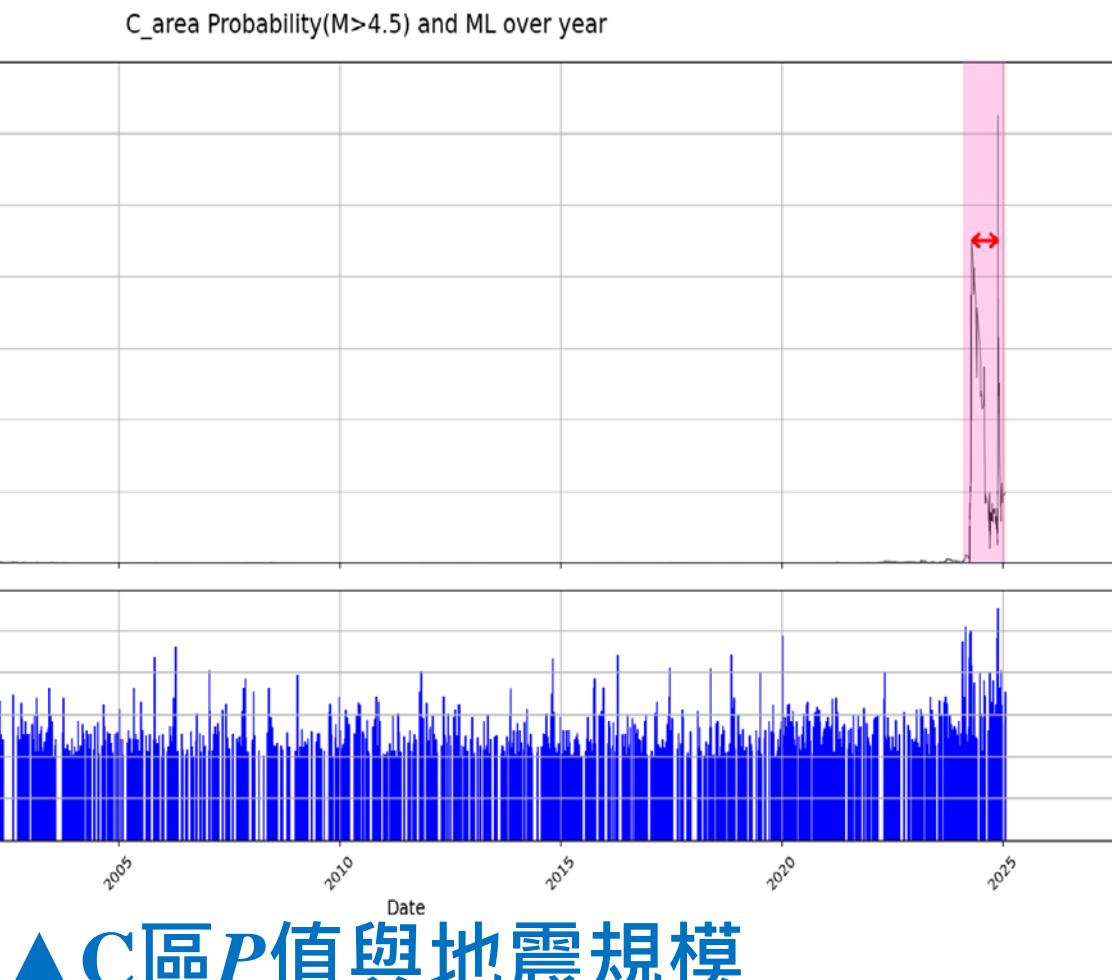
## 四、探討台灣西南部 $ML > 4.5$ 的地震發生機率( $P$ 值)



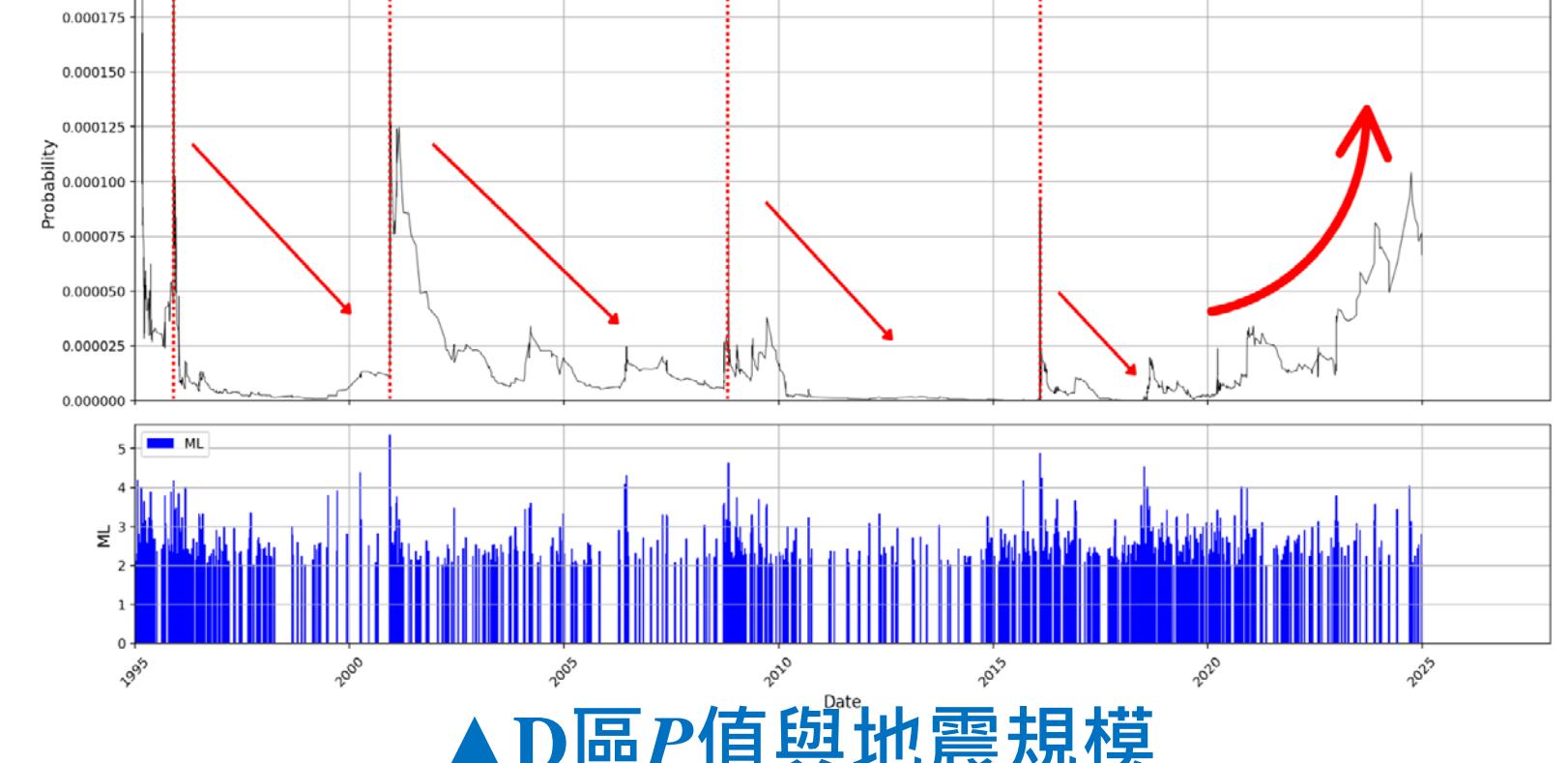
▲A區**P**值與地震規模



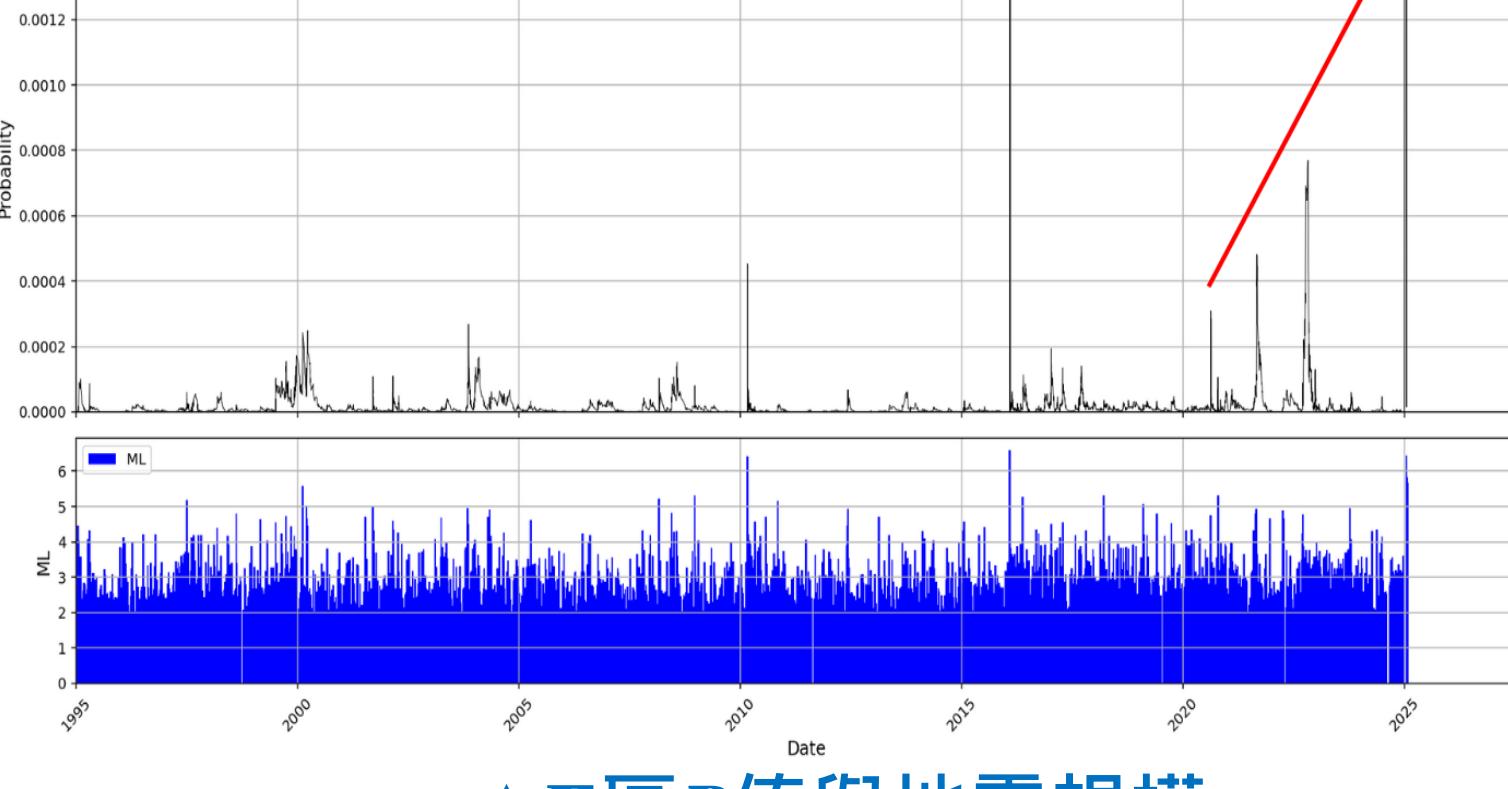
▲B區**P**值與地震規模



▲C區**P**值與地震規模



▲D區**P**值與地震規模



▲E區**P**值與地震規模

A區： $P$ 值於0.00000-0.00004小區間內震盪，發生 $ML > 4.5$ 地震的機率低。

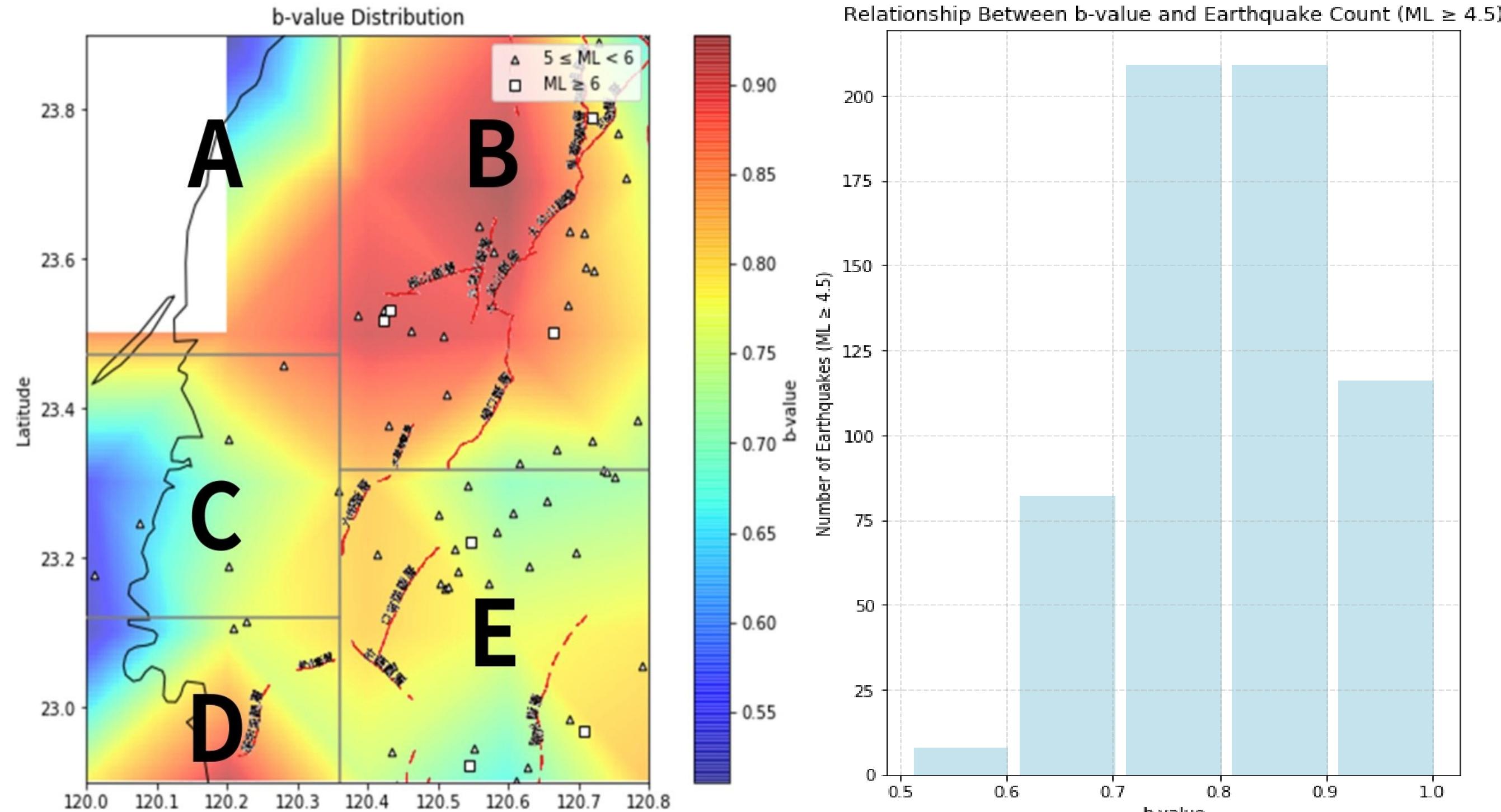
B區： $P$ 值有先出現一個小波峰再出現一個較大波峰的現象，2005-2017年間 $P$ 值較小且無明顯波動，則無觀察到此現象。

C區：於2024/2/29及2024/11/22兩起較大規模地震中，觀察到兩個波峰，先小再大，與B區類似。其餘時間 $P$ 值較小且無明顯波動。

D區：於1995-2020年間，於較大規模地震發生時， $P$ 值突然上升，再緩慢下降。2020年之後， $P$ 值呈現緩慢上升趨勢。

E區： $P$ 值在發生大規模地震時有峰值。2020年之後， $P$ 值波峰的峰值呈現上升的趨勢，與D區類似。

## 二、利用**b**值的空間分布圖探討地震發生頻率

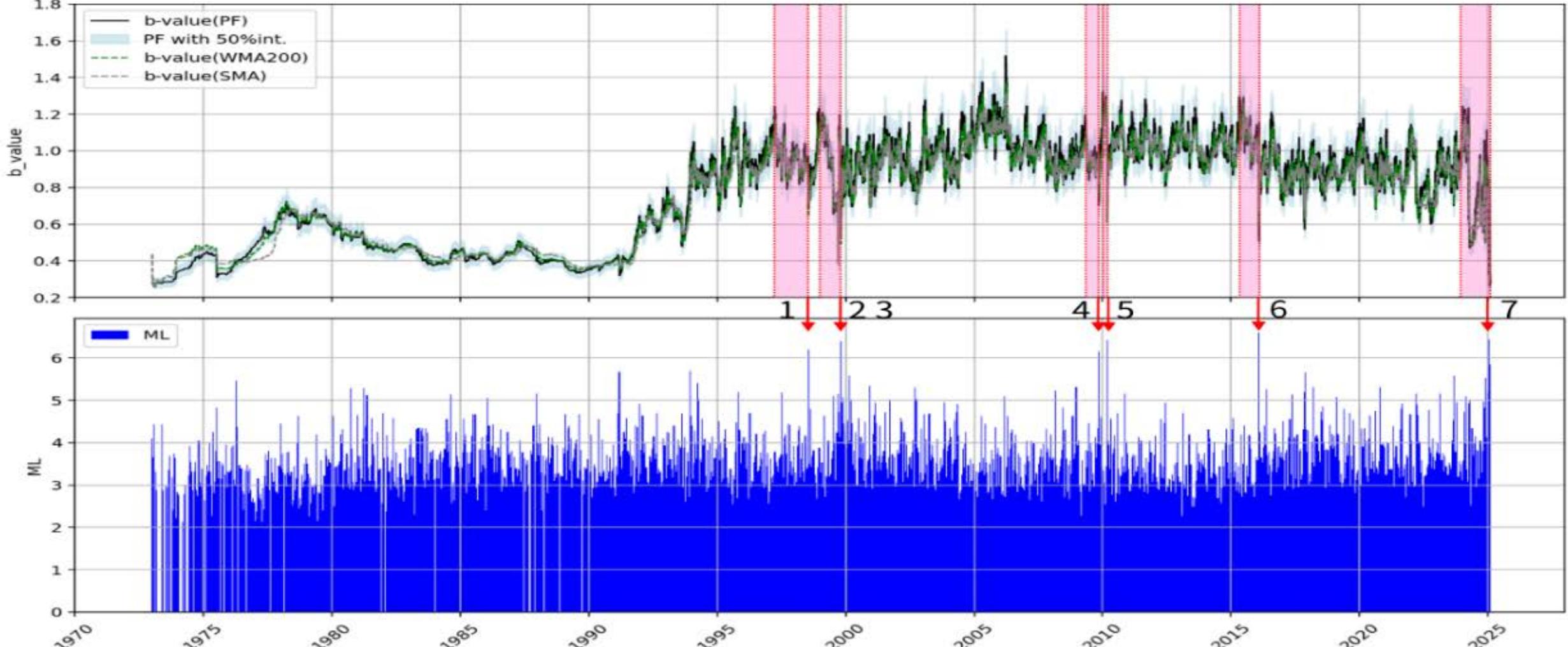


▲台灣西南部**b**值空間分布圖

台灣西南部的**b**值介在0.52到0.93之間，**b**值差異大，且斷層附近的**b**值相對較高。

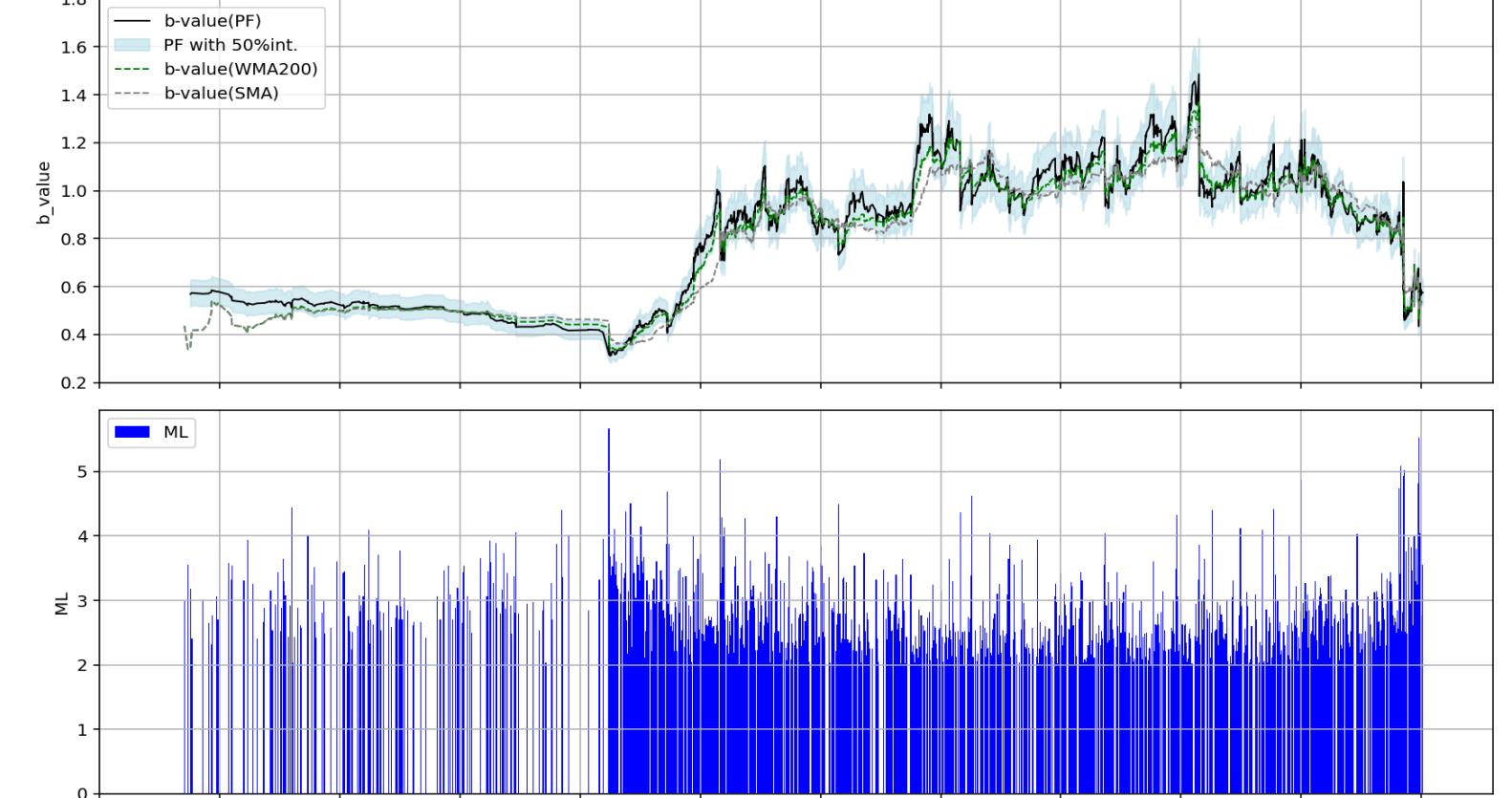
**b**值介於0.7-0.9時， $ML \geq 4.5$ 之地震頻率最高，而非**b**值越小地震頻率越高。

b-value(SMA, WMA, PF) and ML over year

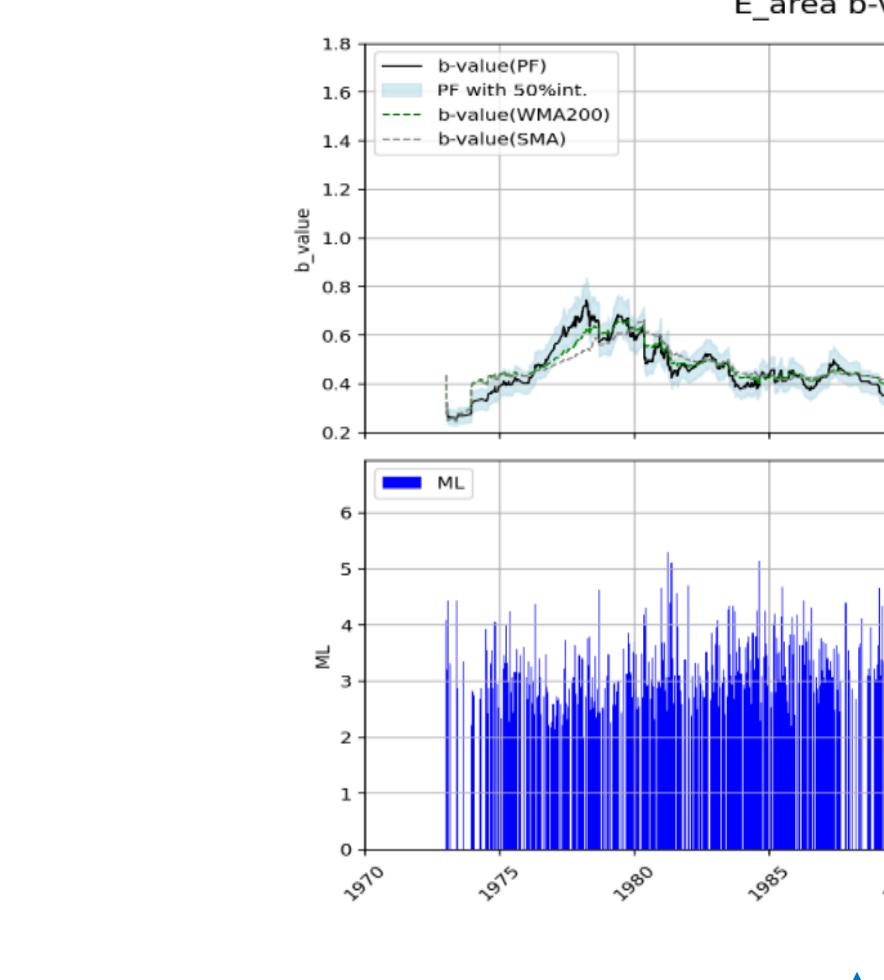


▲全區**b**值與地震規模

C\_area b-value(SMA, WMA, PF) and ML over year

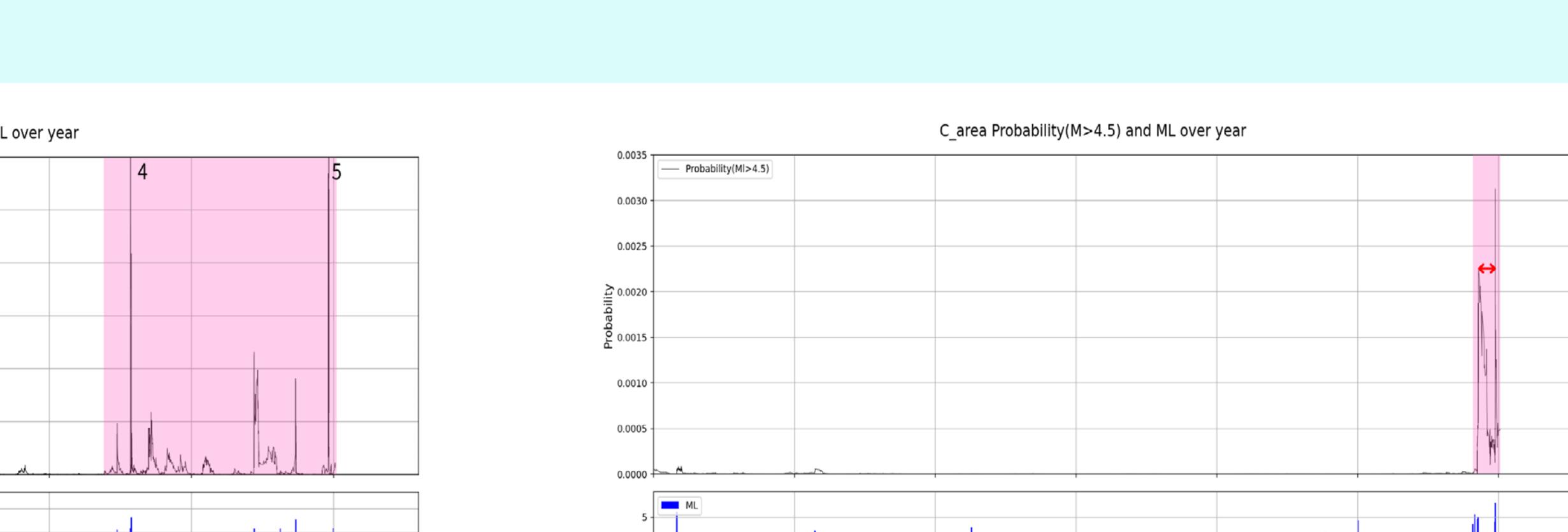


▲C區**b**值與地震規模



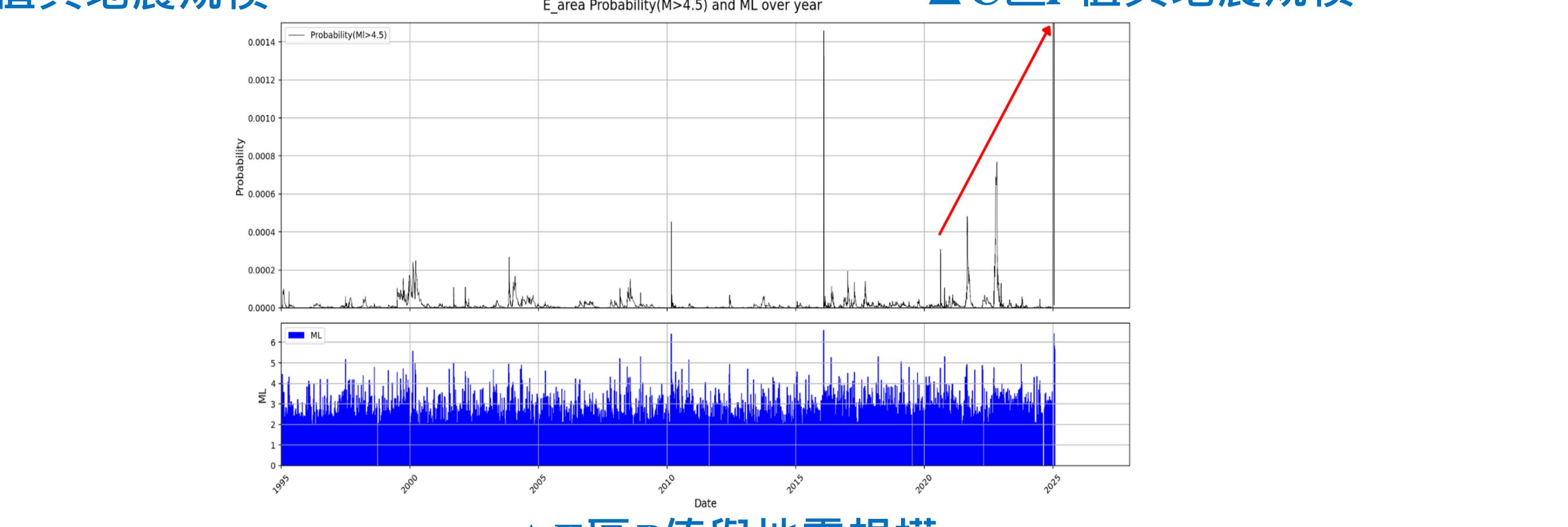
▲B區**b**值與地震規模

E\_area b-value(SMA, WMA, PF) and ML over year



▲E區**b**值與地震規模

D\_area b-value(SMA, WMA, PF) and ML over year



▲D區**b**值與地震規模

# 肆、研究討論

## 一、驗證台灣西南部地震規模與頻率之GR定律

台灣西南部的地震活動狀況符合古騰堡GR定律式。A區地震樣本數最少且決定係數 ( $R^2$ ) 最低，全區地震樣本數最多且決定係數 ( $R^2$ ) 最高。因此，當地震樣本數越多，越符合GR定律式。

## 二、利用 $b$ 值的空間分布圖探討地震發生之頻率

- 台灣西南部  $b$  值為 0.52~0.93，小於文獻中的全台  $b$  值平均值 (0.7~1.3)

→因北港高區地質堅硬，可阻擋板塊推力，使西部麓山帶累積應力所致

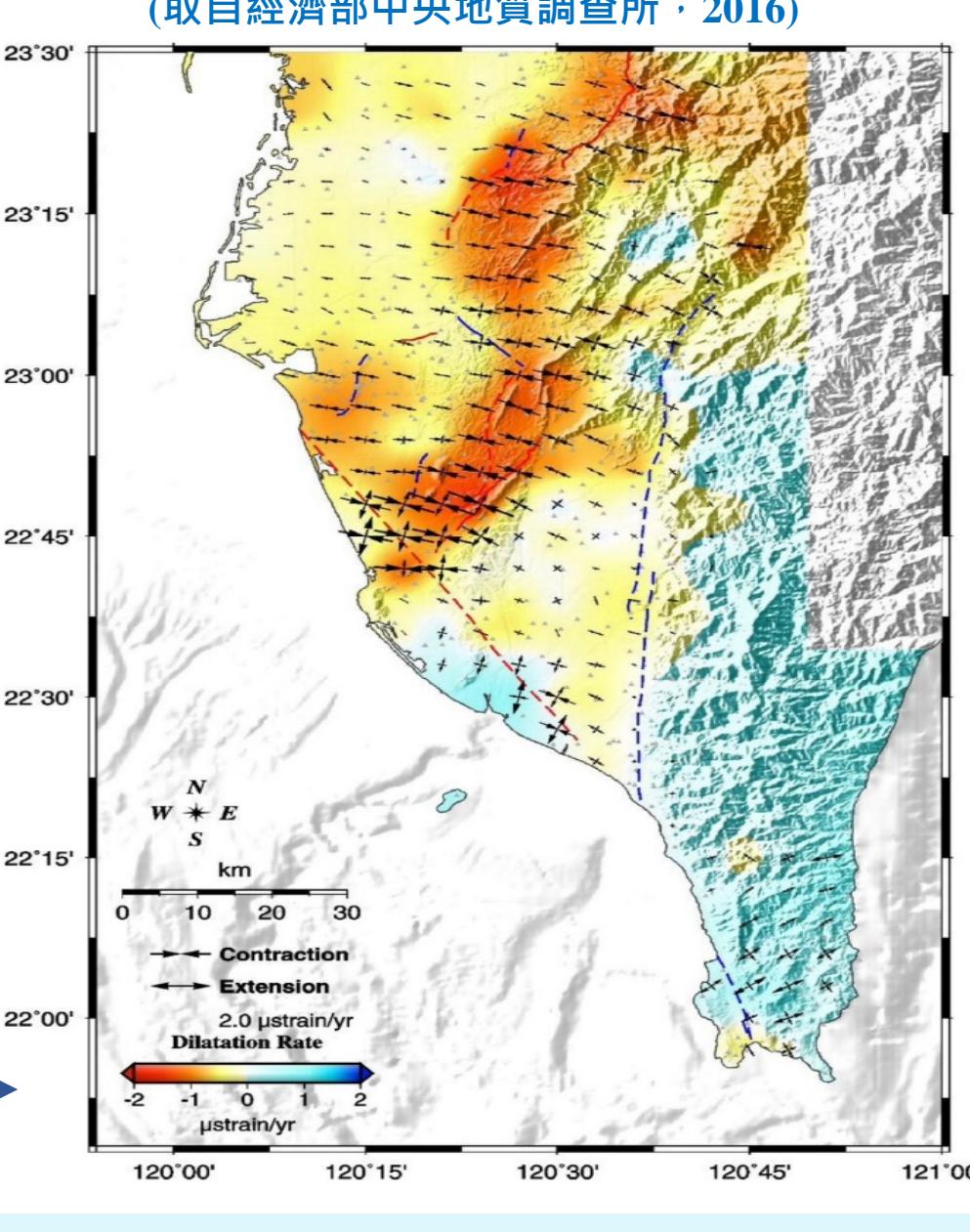
- $b$  值較高的斷層附近 (0.78~0.93)，其地表壓縮變形速率也較高

→ $b$  值與應力分布有關

- $M_L > 4.5$  的地震多發生於  $b$  值 0.7~0.9 區域，而非  $b$  值最小之區域

→評估地震風險應關注  $b$  值短期內趨勢變化，非僅憑  $b$  值長期內平均值判斷

2002-2015南部水平應變場圖 ▶



## 三、探討台灣西南部 $b$ 值的變化趨勢與大地震之關聯

- $b$  值在部分大地震發生前會下降，震後逐步回升

→ $b$  值隨時間變化具潛在預警價值

- 粒子濾波法計算的  $b$  值能更敏感地捕捉地震前的短期變化，傳統 SMA 與 WMA 曲線較為平滑、反應較慢

→因粒子濾波法不使用固定時間窗口進行平均，較不會抹除突發性的震前變化訊號

- 分區中 PF 曲線的波動幅度大於全區

→因分區內斷層較少，較不會互相影響，粒子濾波法計算之  $b$  值能更清楚反映各斷層行為

## 四、探討台灣西南部規模4.5以上地震發生機率

### A區：地震發生機率較低，構造穩定

$P$  值在小區間內震盪，反映北港高區地質穩定，因此地震頻率低，屬於較安全的區域。

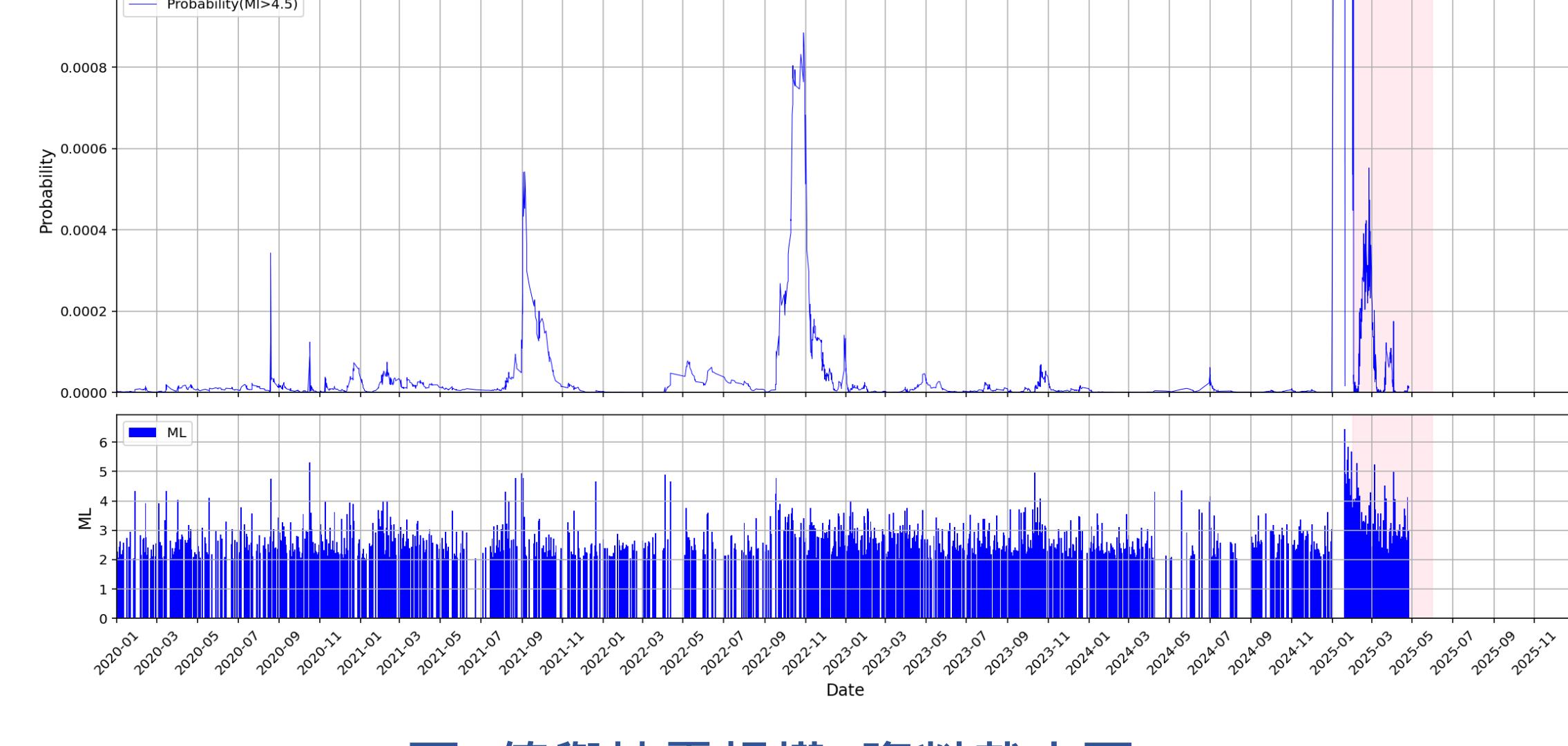
### B區： $P$ 值變化明顯，未來可能進入下一個平靜期

$P$  值波峰高峰經過 2017-2025 年的能量釋放後，可能已達到區間內的最大值，之後進入下一個平靜期。

### 後續地震活動追蹤

▼全區後續  $M_L \geq 4.5$  之地震 (資料截止至2025/05/31)

日期	規模	經度	緯度
2025/02/08	5.30	120.59	23.28
2025/03/05	5.25	120.50	23.15
2025/03/21	4.52	120.47	23.04
2025/04/03	4.98	120.38	23.20
2025/05/14	4.50	120.55	23.31



▲E區 $P$ 值與地震規模 (資料截止至2025/05/31)

# 伍、研究結論

- 台灣西南部地震活動符合GR定律式。區域中地震樣本數愈多愈符合GR定律式。
- 台灣西南部地  $b$  值介於 0.52~0.93 之間，於斷層附近處相對較高 (0.78~0.93)。且  $b$  值在 0.7~0.9 間， $M_L \geq 4.5$  之地震發生頻率較高。
- $b$  值的時間序列分析顯示，在大規模地震前  $b$  值呈現下降趨勢，在震後則逐步回升。而粒子濾波法能夠捕捉較細微的動態變化，波動幅度在分區中較全區明顯，其時間序列變化較適合作為短期地震風險預警指標。
- 各區  $M_L > 4.5$  之地震機率變化不同：A區最穩定；B區地震頻繁但未來幾年可能趨於平靜；C區近期受鄰近區域影響而活動增加；D、E區近年發生機率 ( $P$ 值) 逐步上升，發生大規模地震風險較高。以粒子濾波法估算之  $P$  值可有效觀察地震趨勢，提供防災預警參考。

# 陸、參考文獻

中央氣象署 (n.d.)。臺灣地震與地球物理資料管理系統。取自 <https://gdms.cwa.gov.tw/>

中央氣象署 (2009)。中央氣象署地震測報中心成立20周年研討會論文集專刊。取自 <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/page/twenty>

米泓生 (2021)。固體地球的結構與組成。普通型高級中學地球科學 (頁 26~57)。龍騰文化。

Ikawa, D., & Nanjo, K. Z. (2024). Adaptive estimation of the Gutenberg-Richter  $b$  value using a state space model and particle filtering. *Scientific Reports*, 14, 4630. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54576-x>

Scholz, C. H. (1968). The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), 399~415.

圖片來源 GR定律式 : Žalohar, J. (2018). Gutenberg-Richter's law. In *Developments in Structural Geology and Tectonics* (Vol. 2, pp. 173~178). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814580-7.00014-9>

2002-2015 南部水平應變場圖：經濟部中央地質調查所 (2016)。20160206地震地質調查報告。(本研究其餘圖表皆為研究者自行製作)