

The background of the slide features a composite image. At the top right, a drone is shown in flight against a blue sky. Below it, a 3D topographic map of a mountain range is displayed in shades of red and yellow. The overall scene is set against a backdrop of white clouds and a clear blue sky. The RTDT logo is prominently displayed in the upper center.

**RTDT**

技術研究發展小組  
Research and Technology Development Team

# 坡地降雨致災熱區警戒模式初探

水土保持局  
副總工程司 陳振宇

2018/09/12



# *Outline*

---

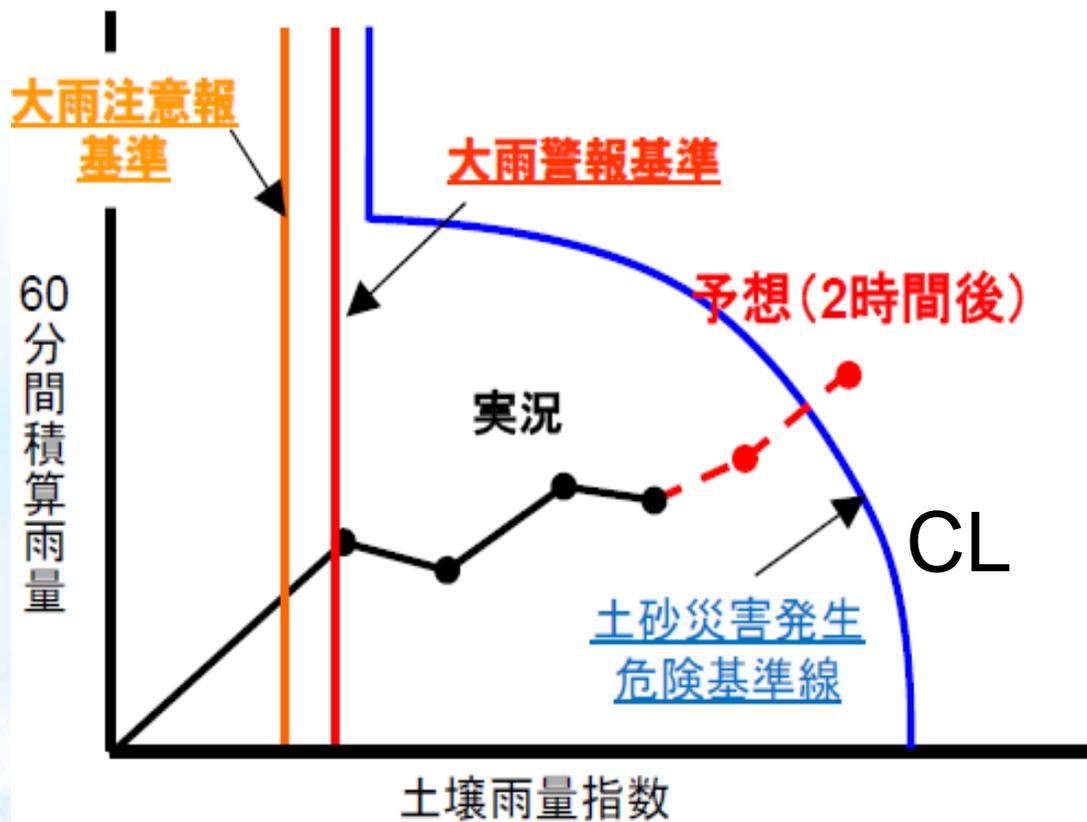
- 1. Introduction*
- 2. Materials and methods*
- 3. Results and discussions*
- 4. Conclusions*



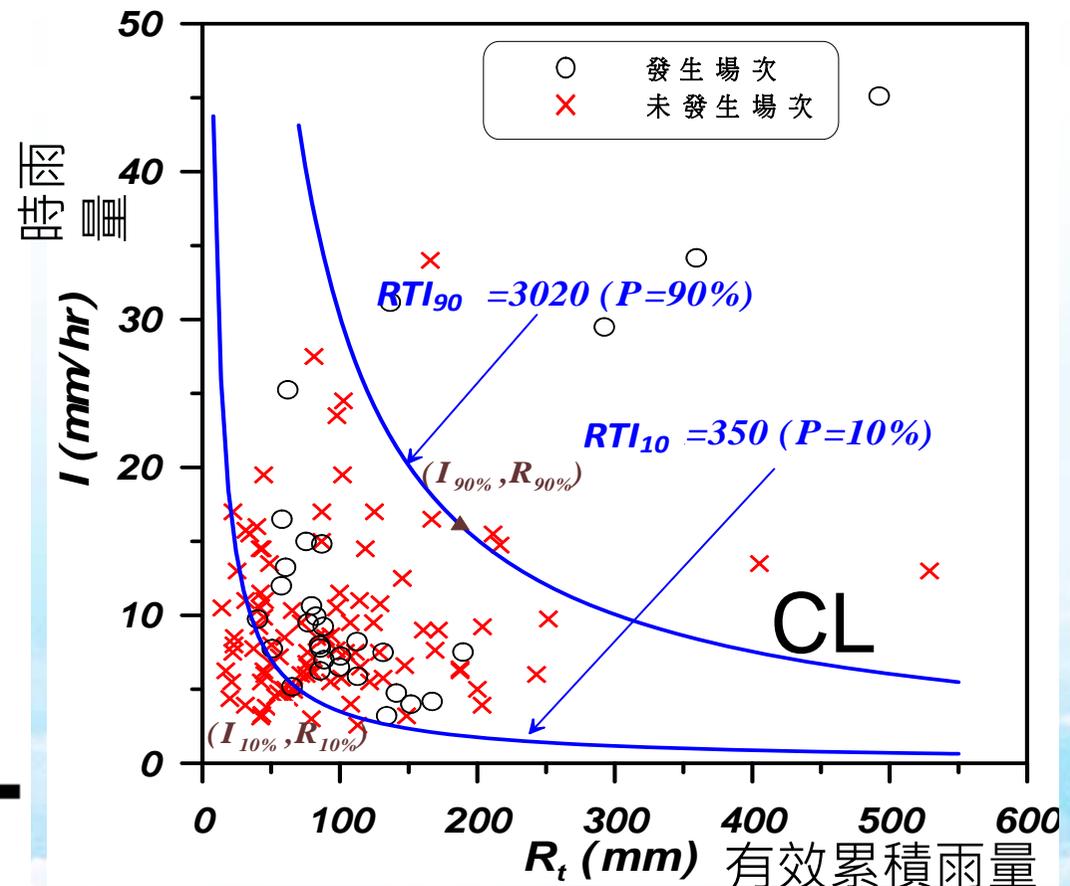
# 1. *Introduction*

# Introduction

- ✓ 台日已建立以雨量為基礎的土砂災害警戒系統逾10年經驗
- ✓ 蒐集某地區多年雨場資料及災害資料，劃出該區之CL(Critical Line)
- ✓ 圖上每一點(○或×)均代表一個雨場



■ RBFN model in Japan since 2005

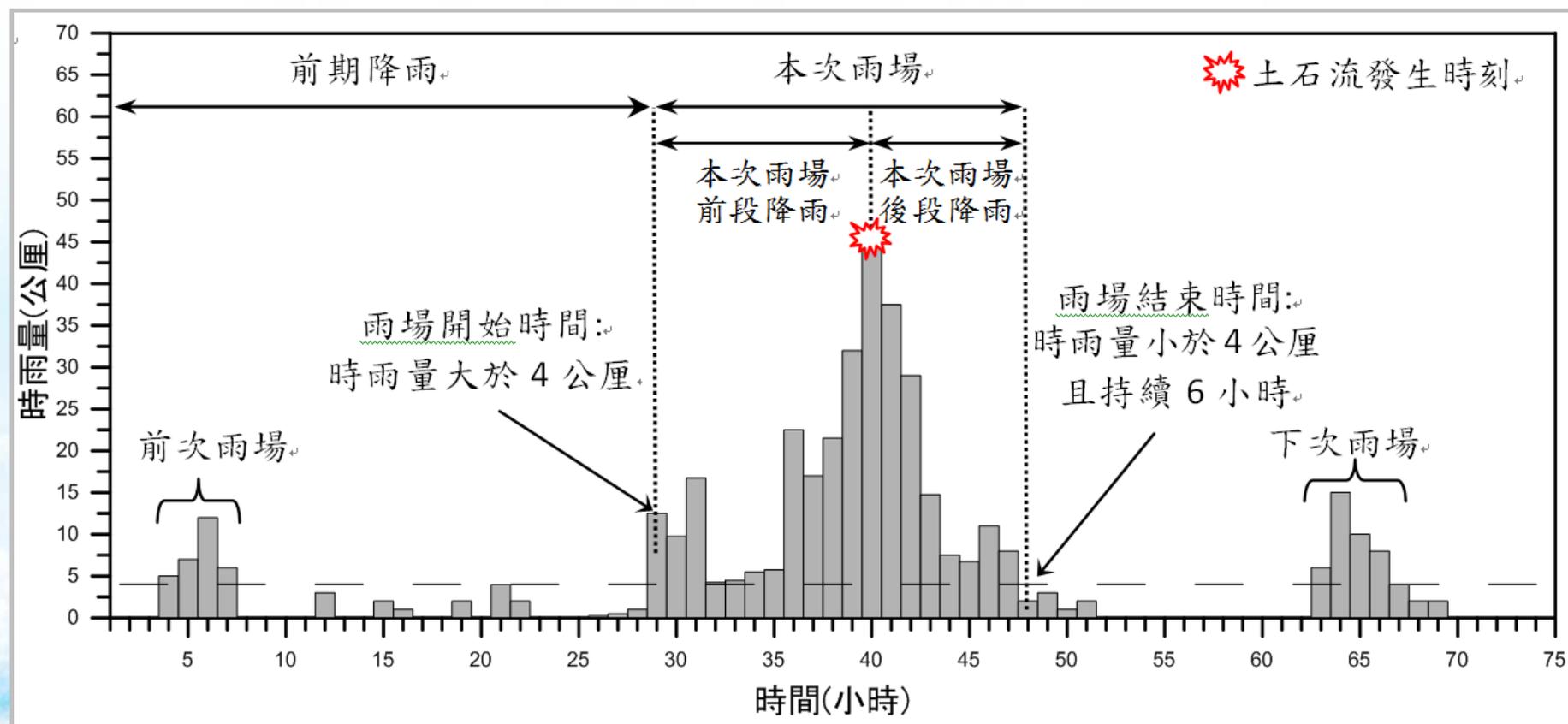


■ RTI model in Taiwan since 2005



# Introduction

- 不同的雨場分割法，分割出的雨場數目差異甚大
- 為便於分析，每個雨場多採某個特徵時刻的雨量指標為代表，例如
  - 最大時雨量發生時之時雨量及土壤雨量指數(SWI)(日本)
  - 最大時雨量發生時之時雨量及有效累積雨量( $R_t$ )(台灣)



# 台灣土石流警戒基準值訂定方式(RTI模式)

- 降雨驅動指標 ( *Rainfall Triggering Index* )  
= 降雨強度 × 有效累積雨量

$$RTI = I \times R_t$$

$$\text{有效累積雨量} : R_t = R_0 + \sum_{i=1}^7 0.7^i \times R_i$$

本次降雨量 + 前7天有效累積雨量

降雨強度 :

土石流發生 : 發生時之降雨強度

土石流未發生 : 峰值降雨強度

降雨驅動指標

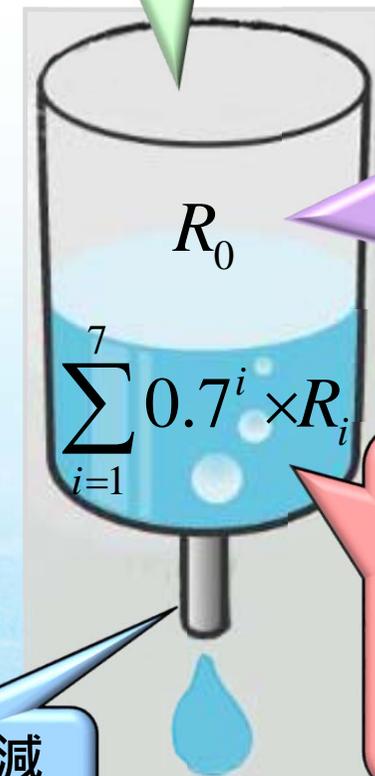
降雨日衰減  
係數  $\alpha$

$$\alpha = 0.7$$

桶子的總容量  
可視為土石流  
警戒值

剩餘容  
量則為  
後續可  
承受之  
降雨量

前期降雨  
則為降雨  
發生前就  
已存在桶  
子內的水



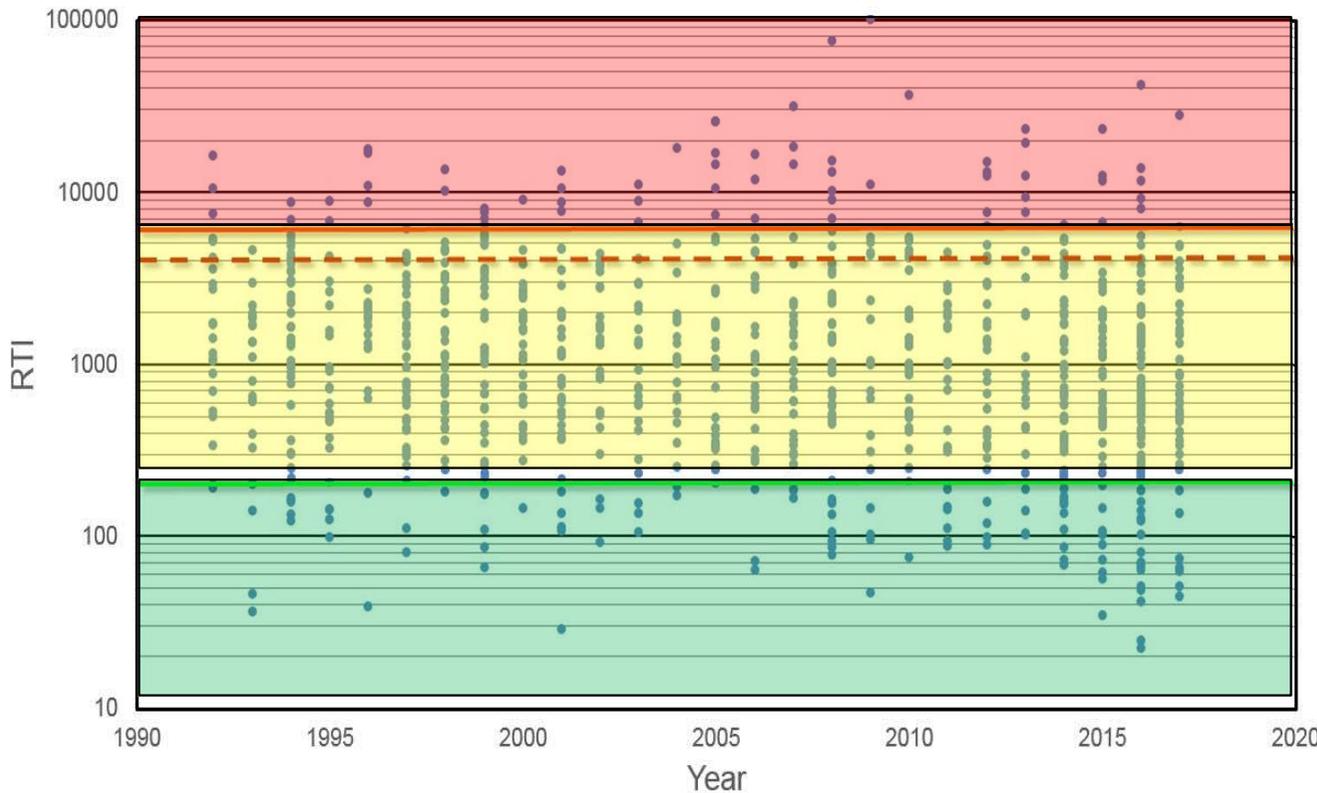
# 台灣土石流警戒基準值訂定方式

- ✓ 將歷年雨場之  $RTI$  值依照大小排列，並以韋伯法計算出  $RTI_{10}$  及  $RTI_{90}$ ，其中  $RTI_{90}$  表示該雨場比其他 90% 雨場大
- ✓ 以線性內插求得  $RTI_{50}$ 、 $RTI_{70}$  等

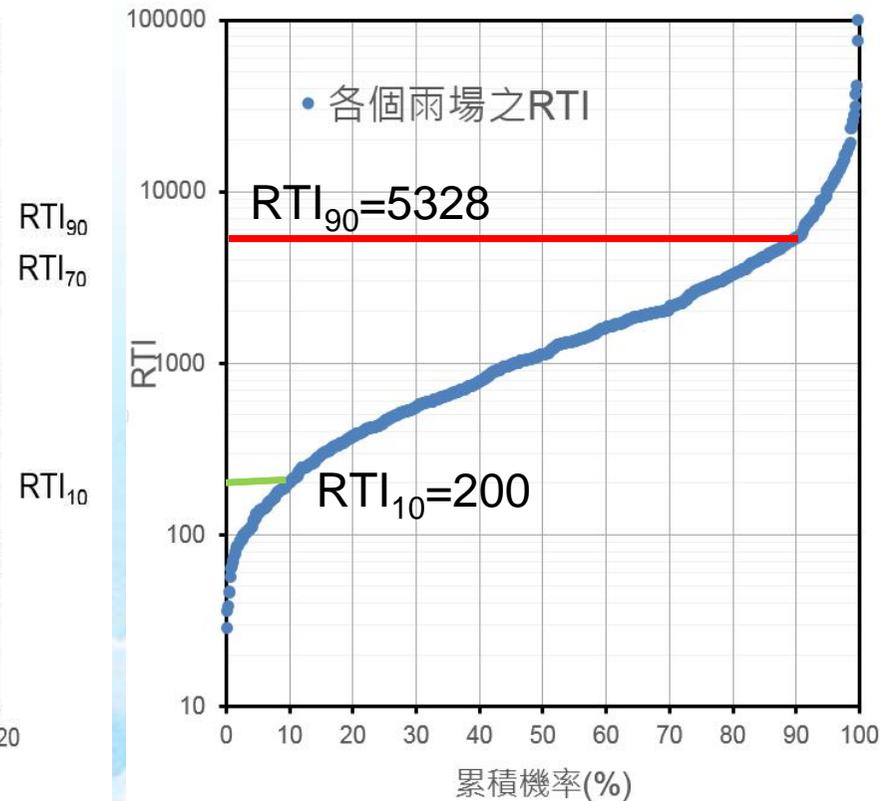
$$RTI_M = RTI_{10} + \left( \frac{M - 10}{80} \right) (RTI_{90} - RTI_{10})$$

$$RTI_{70} = 200 + (60/80)(5328 - 200) = 4046$$

Rainfall Triggering Index ( $RTI = R_t * I_{max}$ )



以C0V250甲仙雨量站為例





# 台灣土石流警戒基準值訂定方式

$$RTI = R_t \times I$$

$$\text{有效累積雨量} : R_t = R_0 + \sum_{i=1}^7 0.7^i \times R_i$$

本次降雨量+前7天有效累積雨量

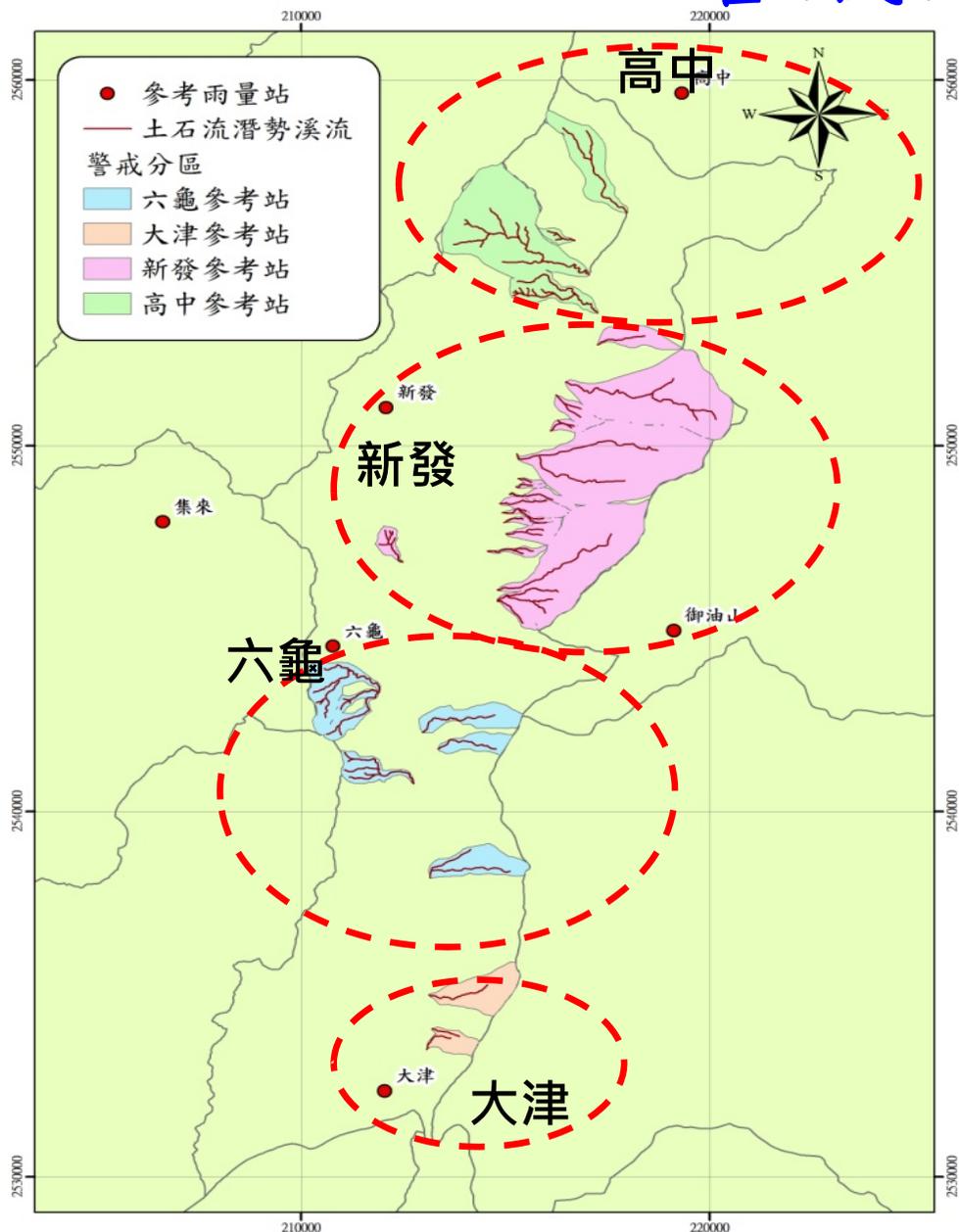
- ✓ 依據各地區歷史災例決定以  $RTI_{70}$  或  $RTI_{50}$  作為土石流警戒基準
- ✓ 為利理解及實務操作，將  $RTI$  轉換為以有效累積雨量為概念的土石流警戒基準值  $R_c$  (例如取  $R_c = RTI_{70} / 10$ )
- ✓ 以 **50mm** 為1級距，設定土石流警戒基準值範圍以 **200mm** 為下限、**600mm** 為上限(共9個級距)。



年度	2005	2006	2007~2008	2009	2010~2011	2012-2018
$R_c$ (mm)	200~350	200~450	250~550	250~600	200~600	250~600



# ■ 土石流警戒分區與參考雨量站



□ 每一鄉鎮劃分為數個警戒分區

✓ 集水區

✓ 行政區(村里)

✓ 土石流潛勢溪流分布

✓ 雨量站位置

□ 全台**1719**條土石流潛勢溪流分布於**17**縣市**159**鄉鎮**685**村里

✓ 分成**457**個警戒分區

✓ 採用**450**個雨量站



## 107年土石流警戒基準值明細表

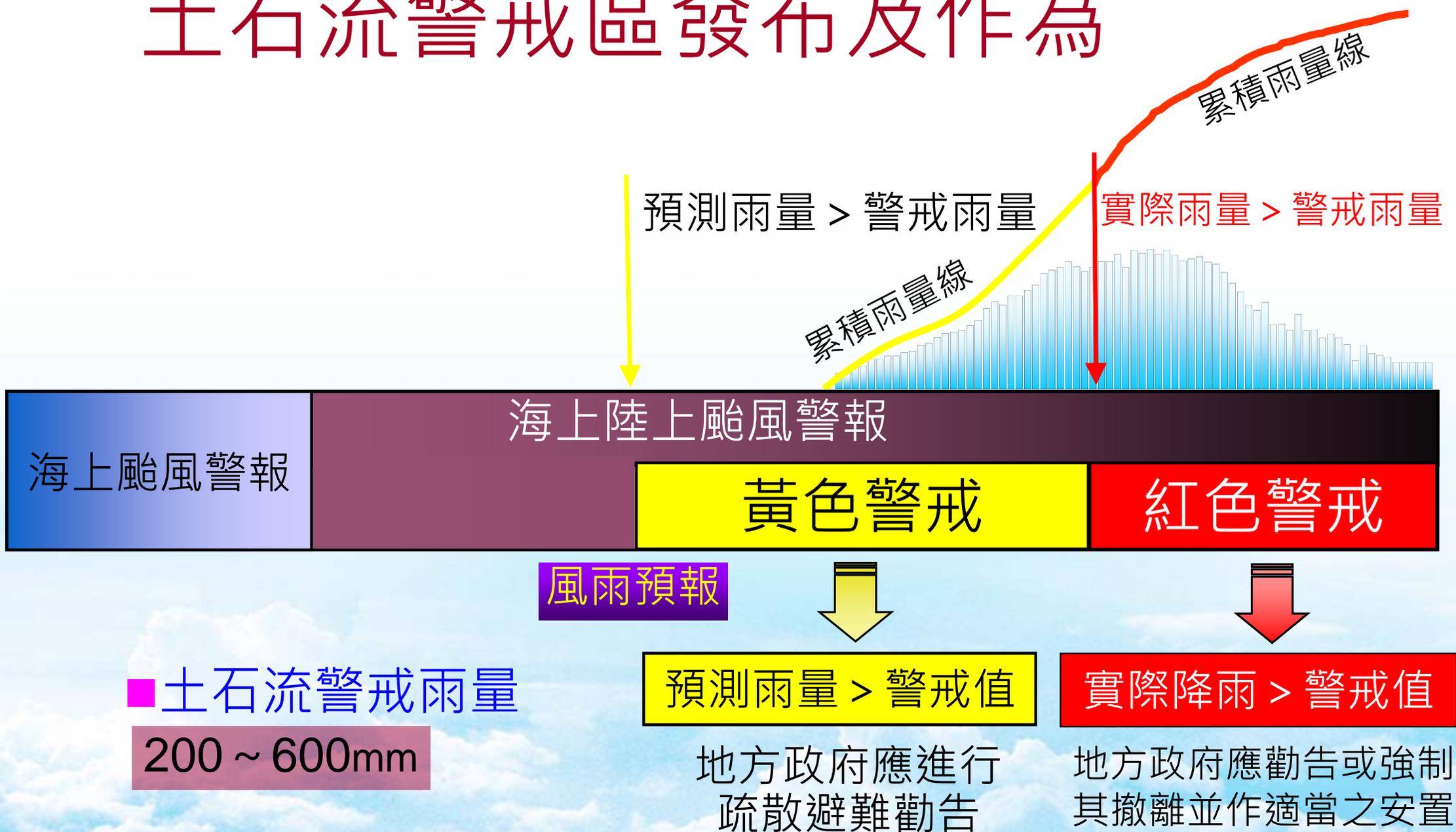
107.1修訂

縣市	鄉鎮	警戒區範圍		土石流警戒基準值 (mm)	參考雨量站	
		警戒區座落村里 (土石流潛勢溪流總數)	土石流潛勢溪流數(條)		代表站1	代表站2
高雄市	杉林區	木梓里(1)、集來里(3)	4	450	集來 <sup>s</sup>	甲仙
	那瑪夏區	達卡努瓦里(6)	6	300	達卡努瓦	那瑪夏國 <sup>s</sup>
		南沙魯里(2)、瑪雅里(6)	8		那瑪夏國 <sup>s</sup>	民權 <sup>w</sup>
	內門區	永吉里(1)、永富里(1)、金竹里(1)	3	500*	內門	月眉
	六龜區	大津里(3)	3	350	大津	六龜
		文武里(4)、中興里(3)	7		六龜	大津
		新發里(13)、興龍里(3)、六龜里(1)	17		新發	六龜
		寶來里(3)、荖濃里(1)	4		建山國小 <sup>s</sup>	新發
	田寮區	新興里(1)	1	600	尖山	阿公店
	甲仙區	大田里(3)、小林里(3)、和安里(2)、東安里(3)、關山里(4)、西安里(2)	17	400	甲仙	甲仙(2) <sup>w</sup>
	岡山區	華崗里(1)	1	600	阿公店	岡山
	美濃區	獅山里(1)	1	400*	吉東	美濃
		中圳里(3)、福安里(4)、廣林里(1)	8		美濃	美濃(2) <sup>w</sup>
	茂林區	多納里(1)	1	400	多納(1) <sup>w</sup>	萬山
		茂林里(1)	1		大津	萬山
萬山里(1)		1	萬山		多納(1) <sup>w</sup>	
桃源區	梅山里(1)、拉芙蘭里(5)	6	300	梅山	復興	
	建山里(2)、高中里(1)	3		建山國小 <sup>s</sup>	高中(2) <sup>w</sup>	

✓ 土石流防災資訊網 (<http://246.swcb.gov.tw>)



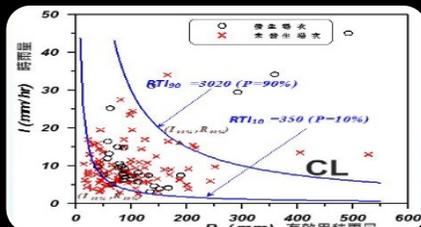
# 土石流警戒區發布及作為



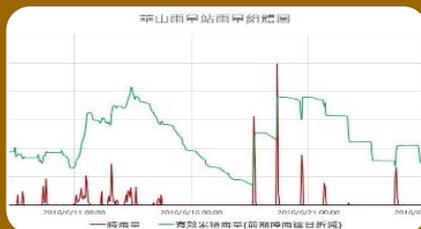


# 面臨問題

## CL訂定不易



- 不同的雨場分割方式，將造成雨場數目及降雨指標代表值差異甚大
- 歷史災例蒐集不易，且CL缺少客觀且具一致性之劃法
- 藉由調整警戒雨量以因應地區差異，尚無明確方式納入各地區地文脆弱度



## 現行有效累積雨量計算方式之盲點

- 僅折減前七日降雨，未考量長延時降雨情境
- 間歇性降雨造成有效累積雨量階梯式下降，且消散過慢
- 警戒解除時機判讀易生困擾



## 地面雨量站空間密度不足

- 雨量站所在地距離土石流潛勢溪太遠
- 雨量站電力或通訊中斷時即失去作用
- 牽就於雨量站密度，警戒分區範圍過大

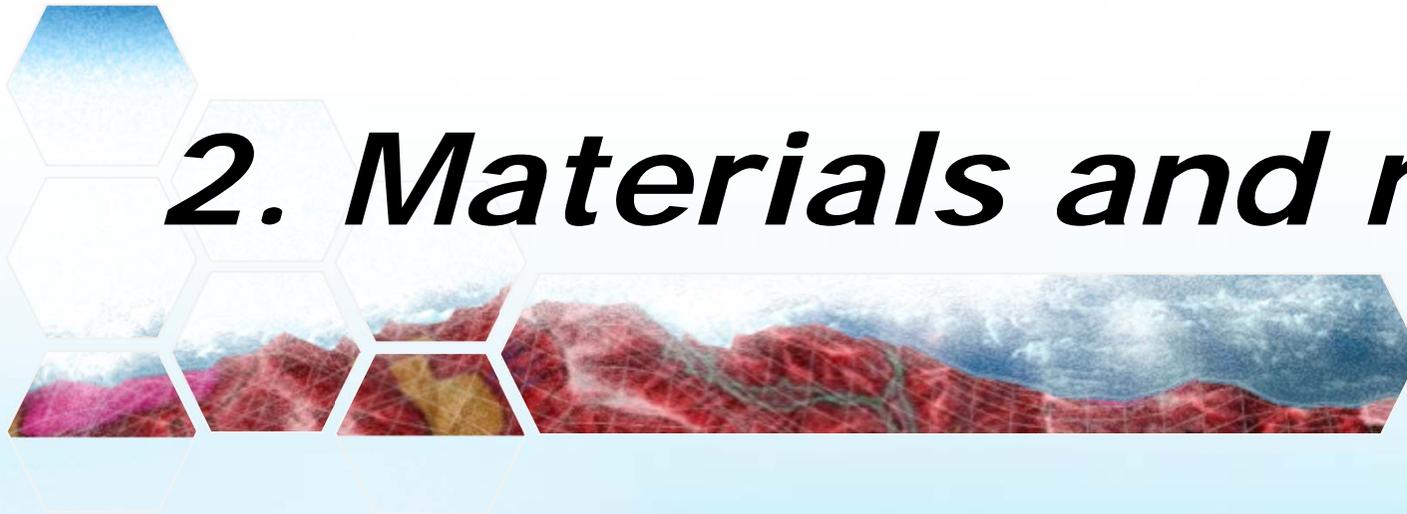


## 未整體考量坡地災害

- 僅針對土石流潛勢溪流發布警戒
- 未納入範圍更廣、更常發生之崩塌災害
- 缺乏視覺化與整體性致災熱區評估機制

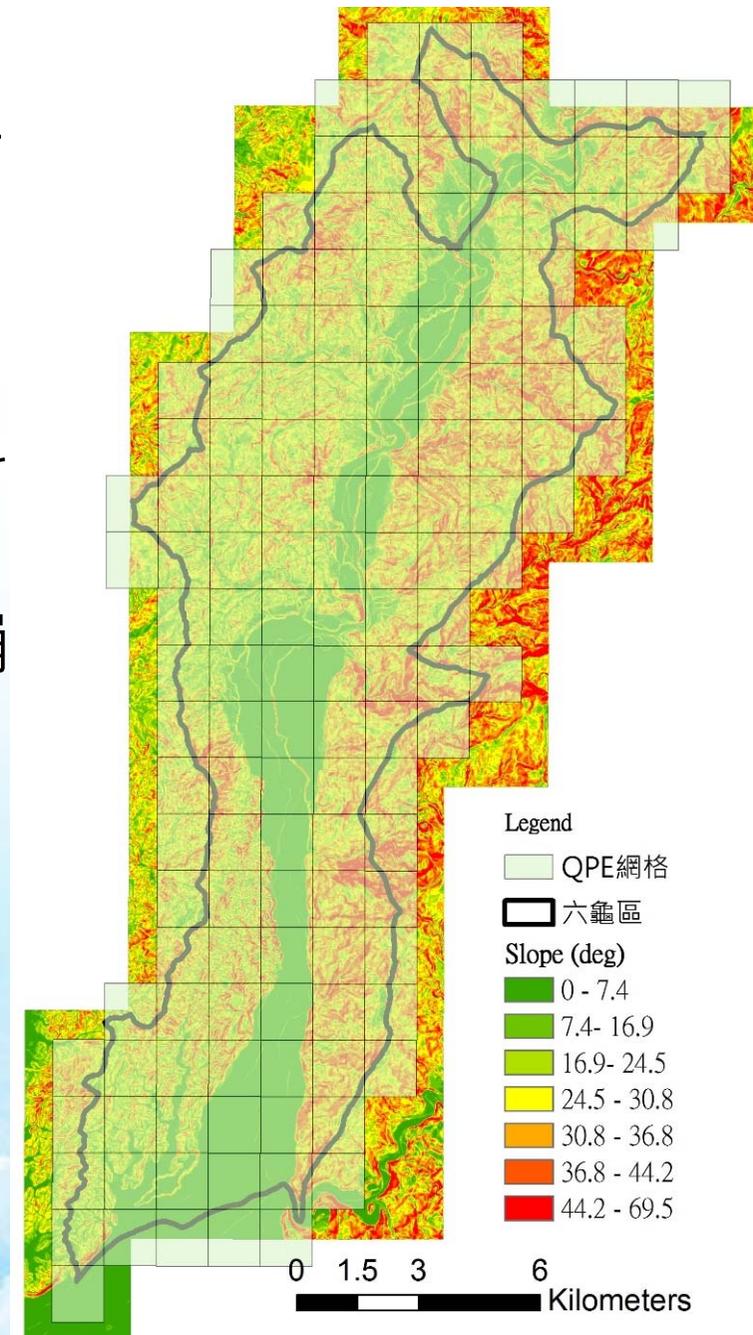


## *2. Materials and methods*



## 2.1 研究區基本資料

- 高雄市六龜區：194.2KM<sup>2</sup>，13,010人，土石流潛溪流31條
- 雨量資料：
  - ✓ 轄區QPE網格數共147格
  - ✓ 2005/07/01~2017/07/31 QPE雨量資料
- 崩塌位置：
  - ✓ 2004~2016林務局年度衛星判釋全島崩塌圖層
- 重大土石災害事件：
  - ✓ 2006~2016年水保局重大土石災例報告，計有35件
  - ✓ 2009年莫拉克颱風造成崩塌最為顯著

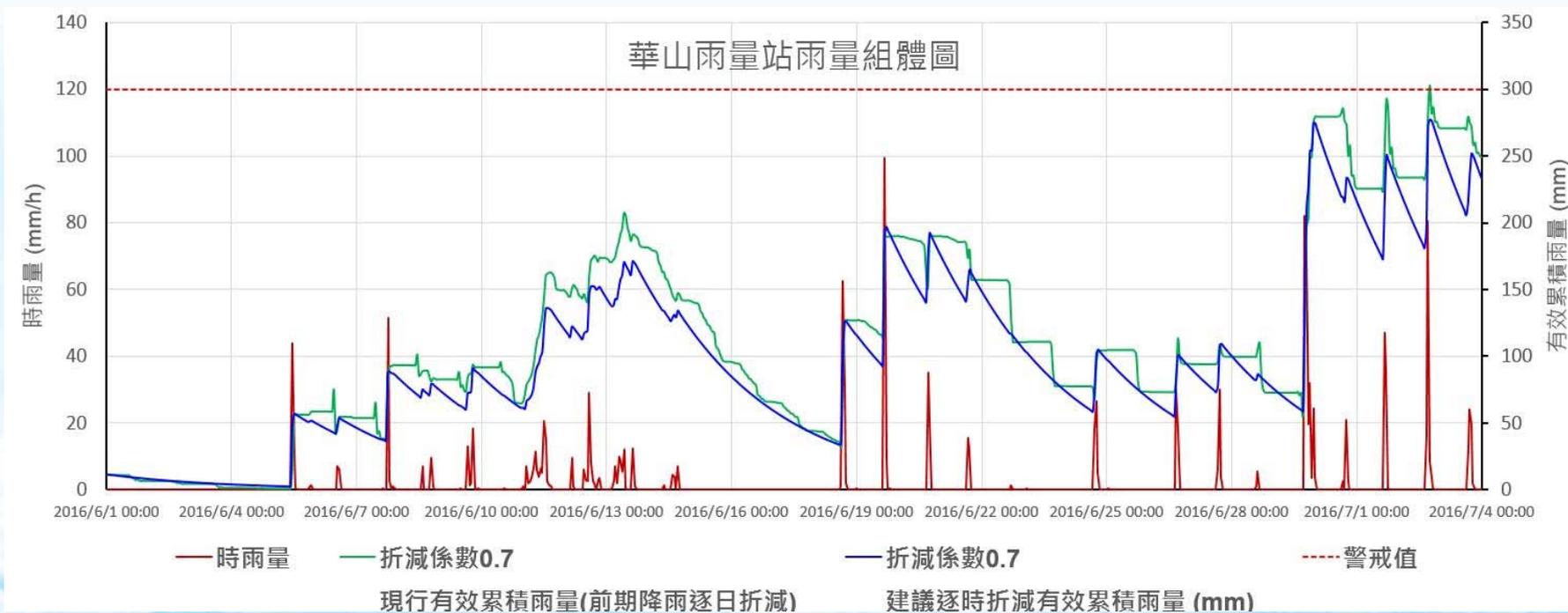


## 2.2 降雨危害度指標( $H_R$ )

- 本研究僅針對降雨引致之崩塌進行致災熱區評估
- 採用逐時折減之有效累積雨量公式(Effective accumulated rainfall, EAR), 折減係數0.7同RTI法, 半衰期維持24小時
  - ✓ 可逐時反應土壤含水量變化
  - ✓ 不必考慮前期雨量需採用多少天才合理
  - ✓ 雨停後有效累積雨量下降速度相對合理
  - ✓ 計算快速, 適合大量網格運算

$$EAR_t = I_t + EAR_{t-1} \times (0.7)^{\frac{1}{24}}$$

$I_t$  為目前的時雨量,  $EAR_{t-1}$  為1小時前的有效累積雨量, 半衰期T=24h



## 2.2 降雨危害度指標( $H_R$ )

### ■ 基本假設

- ✓ 取每月最大EAR值作為該月雨場代表值，免除雨場分割問題，本研究區每個QPE網格均有145個雨場(2005/07~2017/07)。
- ✓ 定義大於150mm之雨場方為具危害度之雨場，以QPE編號110025網格為例，具危害度之雨場為43場(平均3.6場/年)
- ✓ 對同一地區而言，降雨是否致災，雨量相對值比絕對值重要

### ■ 降雨危害度指標(Rainfall-hazard index, $H_R$ )

- ✓ 各網格先剔除小於150mm之雨場，再參照RTI模式算出 $RTI_{10}$ 、 $RTI_{90}$ 及 $RTI_{95}$ ，並以 $RTI_{10}$ 與 $RTI_{90}$ 作線性內插求出 $RTI_{20} \sim RTI_{80}$
- ✓ 定義降雨危害度指標 $H_R$ 如表1

表1 降雨危害度指標 $H_R$ 之定義

危害度等級	1	2	3	4	5
意義	低	中	中高	高	極高
指標 $H_R$	$<EAR_{30}$	$EAR_{30}$   $EAR_{60}$	$EAR_{60}$   $EAR_{90}$	$EAR_{90}$   $EAR_{95}$	$>EAR_{95}$

表2 QPE編號110025網格降雨危害指標值HR對應值(單位mm)

$EAR_{10}$	$EAR_{30}$	$EAR_{60}$	$EAR_{90}$	$EAR_{95}$	$EAR_{max}$
171	313	525	738	815	1,266

註： $EAR_{max}$ 發生於2009年莫拉克颱風

## 2.3 地文脆弱度指標( $F_p$ )

### ■ 基本假設

- ✓ 採用**新生崩塌頻率**及**規模**代表該QPE網格範圍內之地文脆弱度
- ✓ 使用2004~2016年全島崩塌圖層，建立2005~2016年間每一個QPE網格範圍內之每年新生崩塌面積(註：崩塌圖層係使用當年度1~7月衛星影像判識)
- ✓ 小於0.1公頃之新生崩塌地視為無新生崩塌
- ✓ 以2005~2014年資料建立地文脆弱度指標，2015~2016年資料作驗證
- ✓ 其中2005~2014十年內均未有新生崩塌之網格計有40格，而每年均有新生崩塌者有1格，位於寶來里之QPE編號110025網格

表3 各QPE網格範圍內之每年新生崩塌地面積及相關統計(摘錄)

QPE編號	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	$N_n$	$A_a$
101641	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
102962	0	1,685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,685
106935	0	0	0	0	0	6,366	4,833	0	0	0	0	0	2	5,599
109585	2,209	18,898	0	0	0	144,656	18,866	1,609	9,446	0	0	0	6	32,614
110025	6,471	99,080	8,183	8,758	32,481	130,574	2,882	5,981	6,124	1,338	1,717	2,125	10	30,187
108261	24,127	16,881	0	3,454	5,029	274,572	60,048	0	4,893	0	0	0	7	55,572

$N_n$ ：2005-2014年新生崩塌頻率(次數)

$A_a$ ：2005-2014年平均新生崩塌面積( $m^2$ )

## 2.3 地文脆弱度指標( $F_p$ )

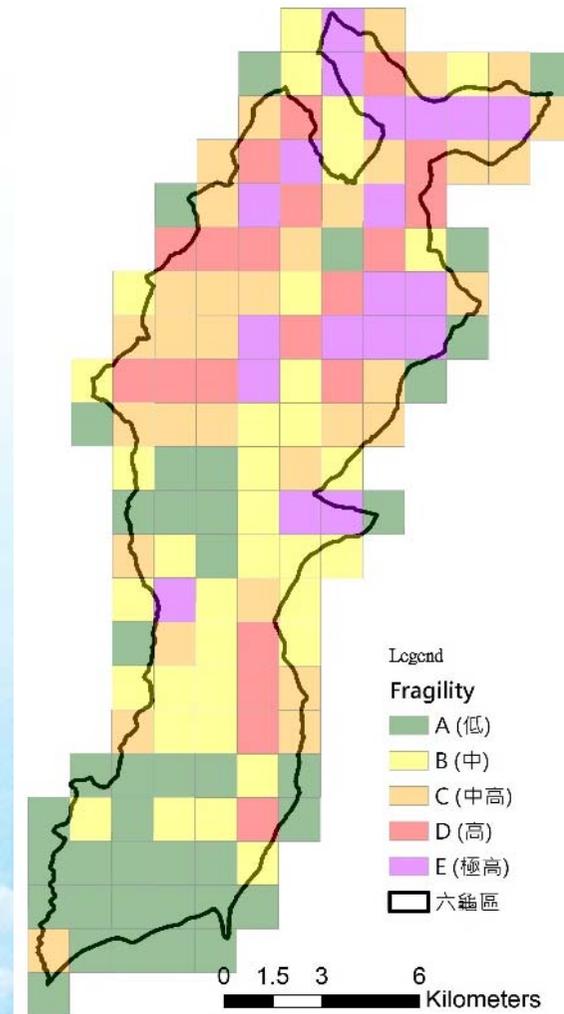
### ■ 地文脆弱度指標(Physiographic fragility index, $F_p$ )

- ✓ 為便於後續與降雨危害度指標整合，本研究將**新生崩塌頻率( $N_n$ )**與**平均新生崩塌面積( $A_a$ )**整併為單一指標，並定義為地文脆弱度指標(Physiographic fragility index,  $F_p$ )

$$F_p = \begin{cases} N_n \times \log A_a & \text{if } N_n > 0 \\ 0 & \text{if } N_n = 0 \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

表4 研究區內地文脆弱度指標 $F_p$ 分布特徵與分級

$F_p$ 值	網格數	特徵	脆弱度	意義
0	40	10年內無新生崩塌	A	低
0~10	35	崩塌1~2次，面積0.1~4.0公頃	B	中
10~15	18	崩塌3~4次，面積0.3~7.9公頃	C	中高
15~20	15	崩塌4~5次，面積0.6~3.5公頃		
20~25	13	崩塌5~6次，面積1.2~4.7公頃	D	高
25~30	7	崩塌6次，面積1.7~6.3公頃		
30~35	8	崩塌7~8次，面積0.6~5.5公頃	E	極高
>35	11	崩塌8~10次，面積1.0~4.7公頃		



## 2.4 降雨致災風險等級指標

### 基本假設

- ✓ 崩塌發生係為誘因(降雨)與基因(地質與地形等)交互作用
- ✓ 採用矩陣法定義「降雨致災風險等級指標」(Risk index of rainfall-induced hazard,  $R_h$ )
- ✓ **考量極端降雨**，如 **EAR > 1000mm**，自動調升一個致災風險等級
- ✓ 如 **EAR < 150mm**，強制降為低致災風險等級

降雨危害度指標

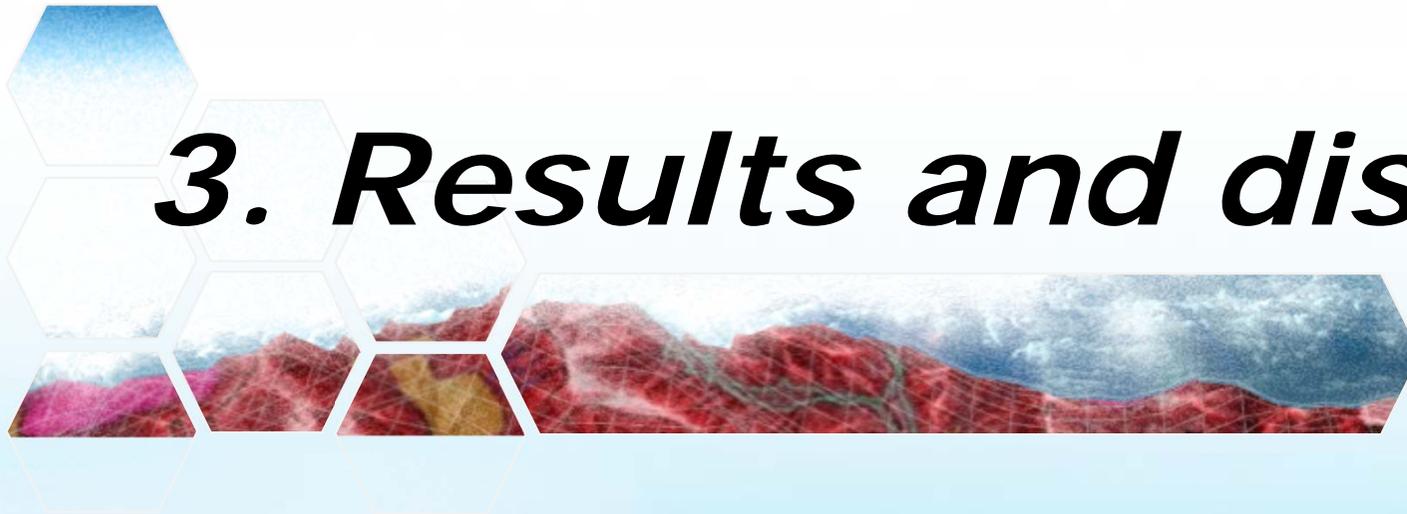
	5	高	極高	極高	極高	極高
	4	中高	高	高	高	極高
	3	中	中高	高	高	高
	2	低	中	中	中高	高
	1	低	低	低	中 低	中高 低
		A	B	C	D	E

地文脆弱度指標

圖4 以矩陣法定義之降雨致災風險等級指標( $R_h$ )



# ***3. Results and discussions***



### 3.1 地文脆弱度指標驗證

- 地文脆弱度指標(Physiographic fragility index,  $F_p$ )
  - ✓ 為評估式(5)及表4所設定之地文脆弱度指標是否合宜，本研究以2015及2016年之新生崩塌網格所在位置作為驗證
  - ✓ 以2015年為例，該年度14個新生崩塌網格中，位於地文脆弱度指標等級為**極高**及**高**之網格約8成

表4 研究區內地文脆弱度指標  $F_p$  分級

$F_p$ 值	脆弱度	意義
0	A	低
0~10	B	中
10~15	C	中高
15~20		中高
20~25	D	高
25~30		高
30~35	E	極高
>35		極高

$$F_p = \begin{cases} N_n \times \log A_a & \text{if } N_n > 0 \\ 0 & \text{if } N_n = 0 \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

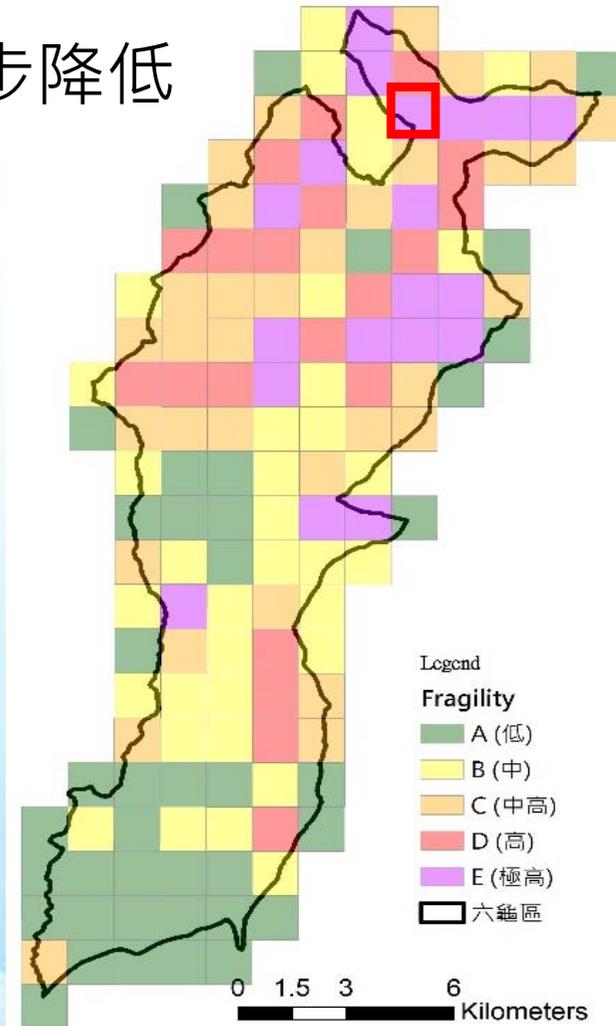
表5 地文脆弱度指標驗證結果

年度	新生崩塌網格總數	位於不同地文脆弱度等級網格數				
		極高 (E)	高 (D)	中高 (C)	中 (B)	低 (A)
2015	14	7	4	1	2	0
2016	6	4	1	1	0	0

## 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(1/5)

- **極高脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)
  - ✓ 致災風險等級達到**極高**時，均發生新生崩塌
  - ✓ 致災風險等級降低，新生崩塌發生機率亦同步降低

QPE編號110025 (極高脆弱度)	雨場數	新生崩塌 雨場數	新生崩塌 發生率 (%)
降雨致災風險等級( $R_h$ )			
極高 ( $EAR > EAR_{90}$ )	4	4	100.0
高 ( $EAR_{30} < EAR < EAR_{90}$ )	15	8	53.3
中高 ( $150\text{mm} < EAR < EAR_{30}$ )	20	0	0.0
中 (Undefined)	-	-	-
低 ( $EAR < 150\text{mm}$ )	106	0	0.0



$EAR_{30}=313\text{mm}$   $EAR_{60}=525\text{mm}$   $EAR_{90}=738\text{mm}$   $EAR_{95}=815\text{mm}$

各網格之地文脆弱度指標

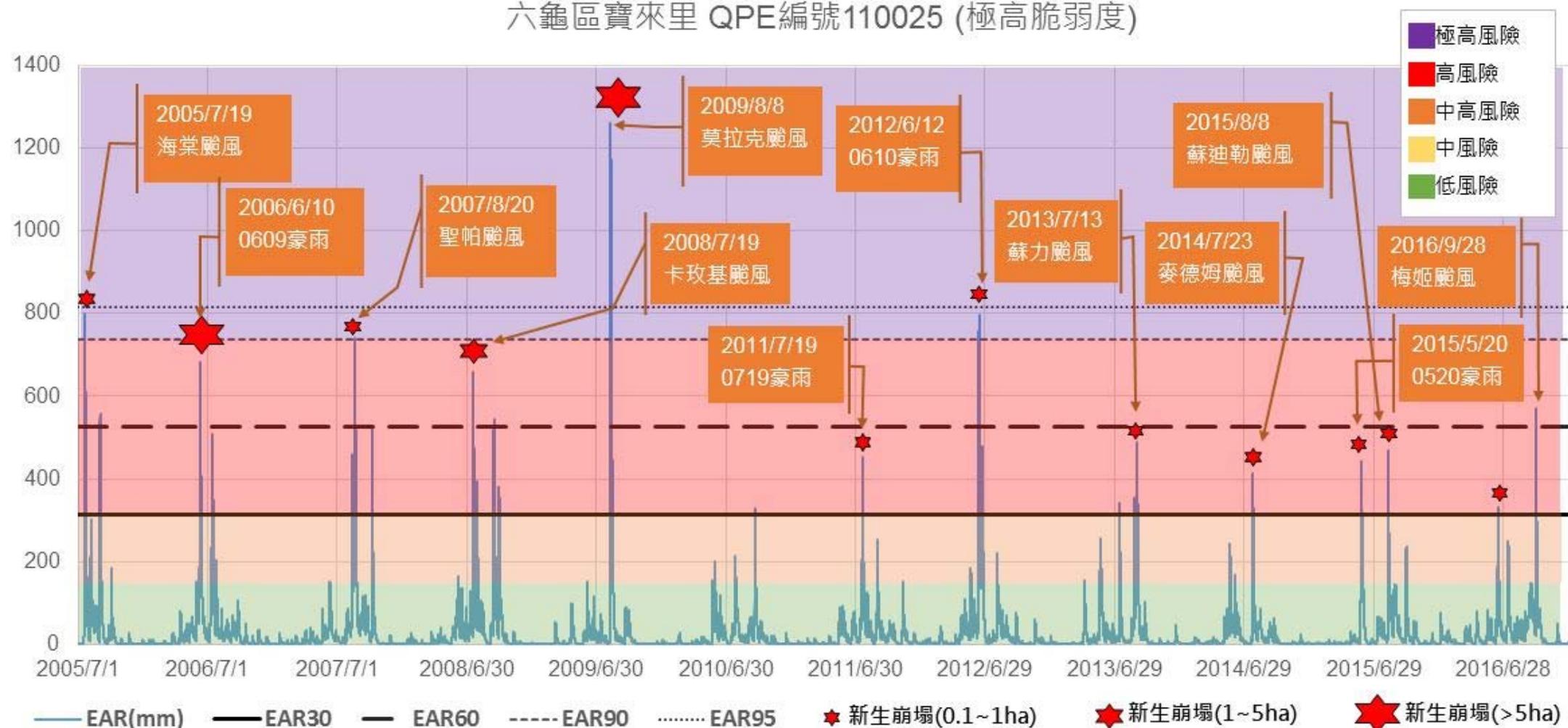


# 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(1/5)

## ■ 極高脆弱度代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)

歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖

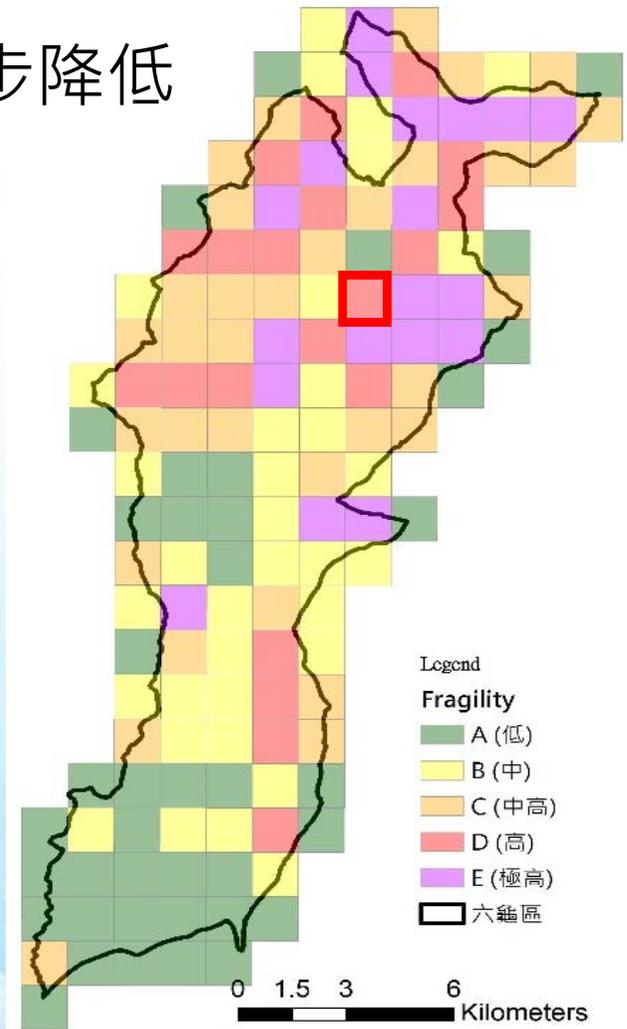
六龜區寶來里 QPE編號110025 (極高脆弱度)



# 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(2/5)

- **高脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)
  - ✓ 致災風險等級達到**極高**時，均發生新生崩塌
  - ✓ 致災風險等級降低，新生崩塌發生機率亦同步降低

QPE編號108260 (高脆弱度)	雨場數	新生崩塌 雨場數	新生崩塌 發生率 (%)
降雨致災風險等級( $R_h$ )			
極高 ( $EAR > EAR_{95}$ )	2	2	100.0
高 ( $EAR_{60} < EAR < EAR_{95}$ )	11	3	27.3
中高 ( $EAR_{30} < EAR < EAR_{60}$ )	8	2	25.0
中 ( $150mm < EAR < EAR_{30}$ )	20	0	0.0
低 ( $EAR < 150mm$ )	104	0	0.0



$EAR_{30}=289mm$   $EAR_{60}=477mm$   $EAR_{90}=665mm$   $EAR_{95}=894mm$

各網格之地文脆弱度指標

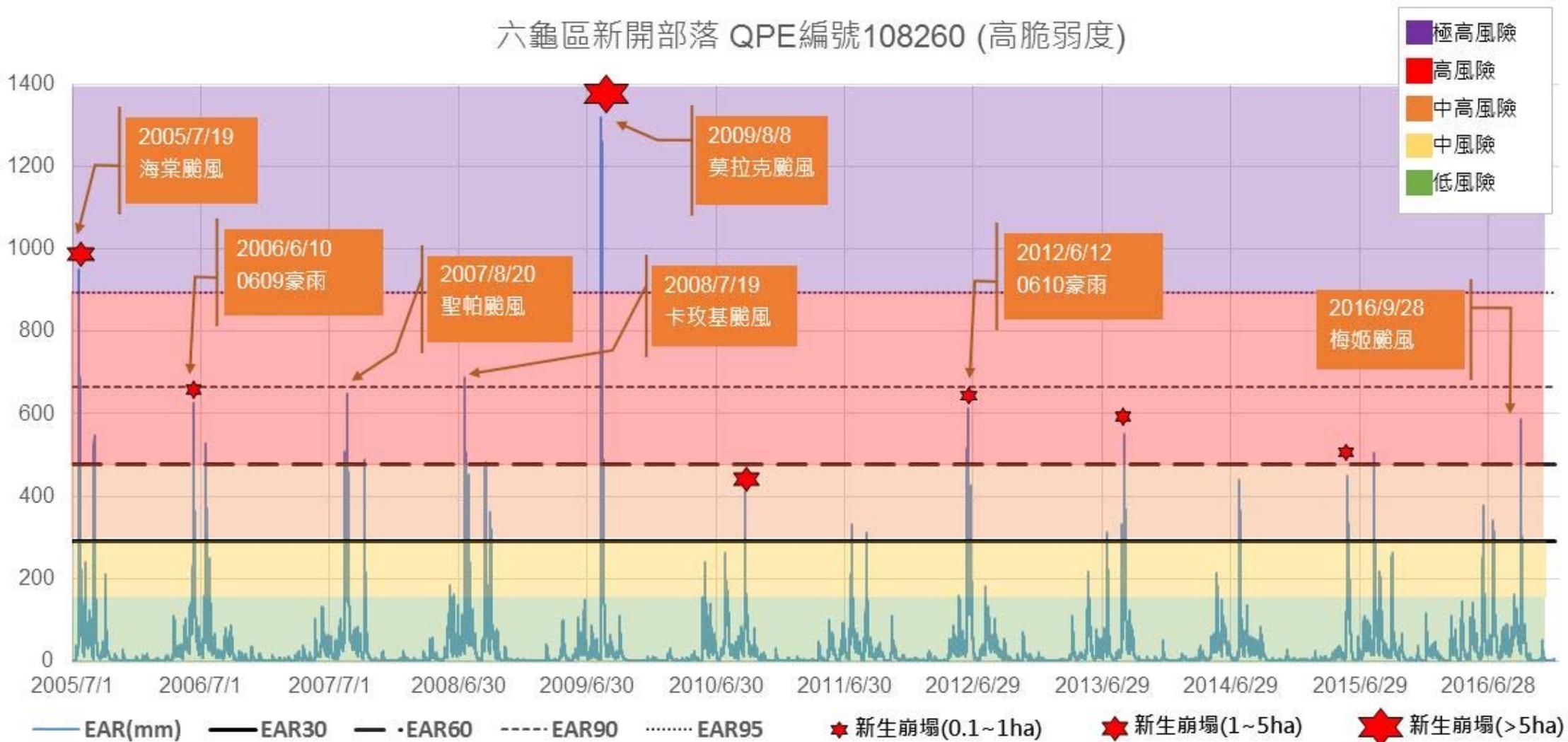


# 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(2/5)

■ **高脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)

歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖

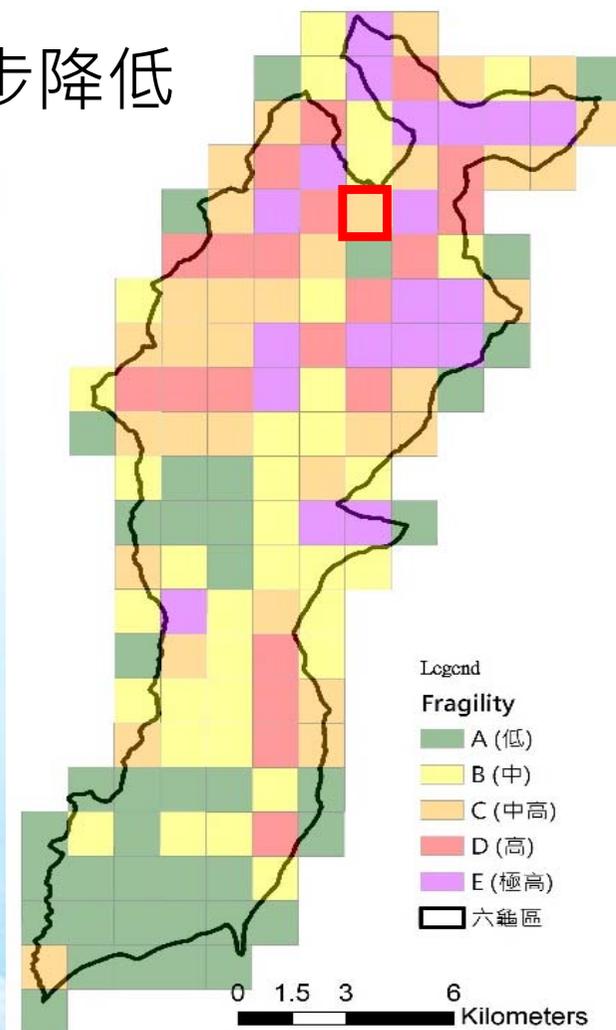
六龜區新開部落 QPE編號108260 (高脆弱度)



## 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(3/5)

- **中高脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)
  - ✓ 致災風險等級達到**極高**時，均發生新生崩塌
  - ✓ 致災風險等級降低，新生崩塌發生機率亦同步降低

QPE編號109142 (中高脆弱度)	雨場數	新生崩塌 雨場數	新生崩塌 發生率 (%)
降雨致災風險等級( $R_h$ )			
極高 ( $EAR > 1000\text{mm}$ )	1	1	100.0
高 ( $EAR > EAR_{90}$ )	2	2	100.0
中高 ( $EAR_{60} < EAR < EAR_{90}$ )	6	2	33.3
中 ( $EAR_{30} < EAR < EAR_{60}$ )	11	0	9.1
低 ( $EAR < EAR_{30}$ )	125	0	0.0



$EAR_{30}=321\text{mm}$   $EAR_{60}=529\text{mm}$   $EAR_{90}=738\text{mm}$   $EAR_{95}=880\text{mm}$

各網格之地文脆弱度指標

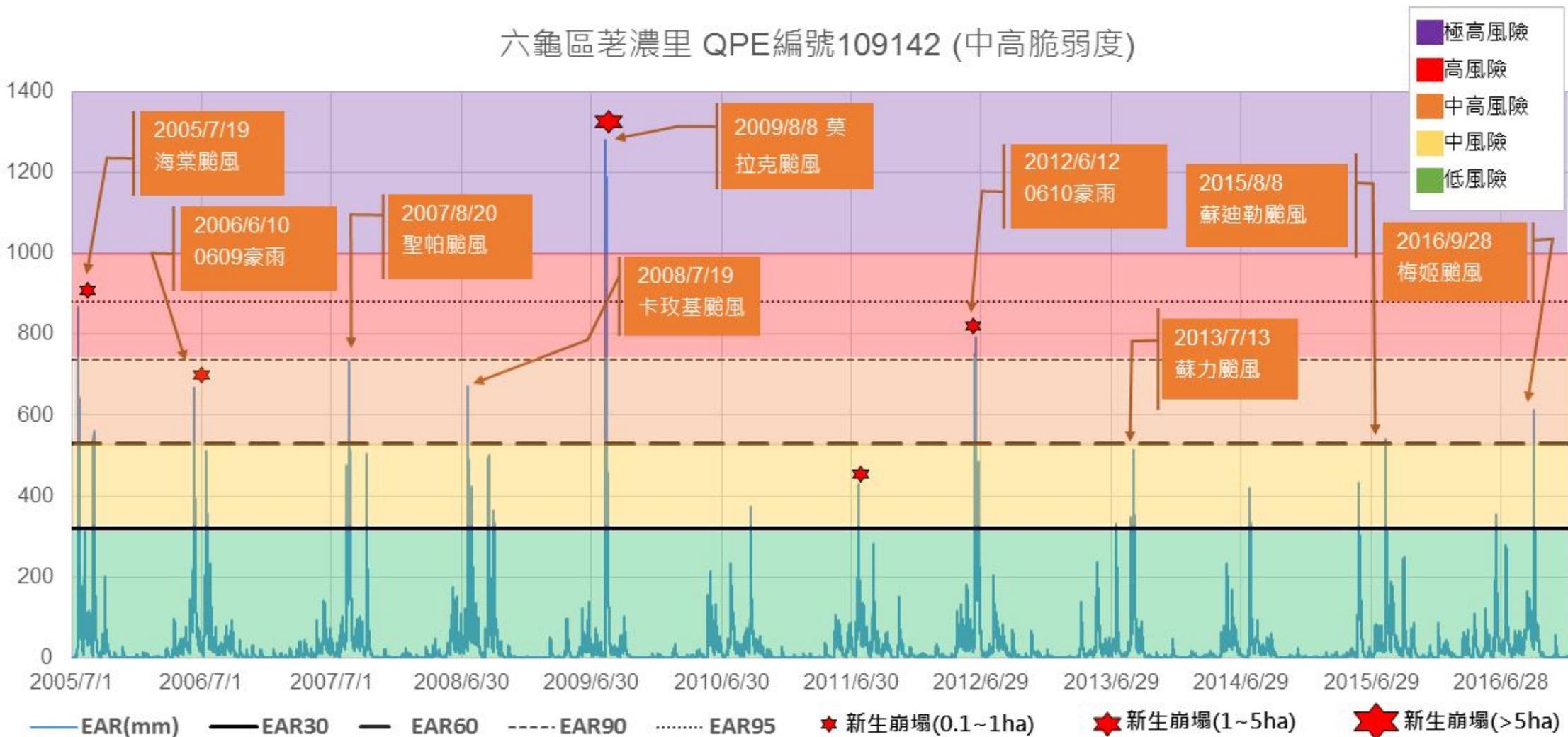


# 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(3/5)

## ■ 中高脆弱度代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)

歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖

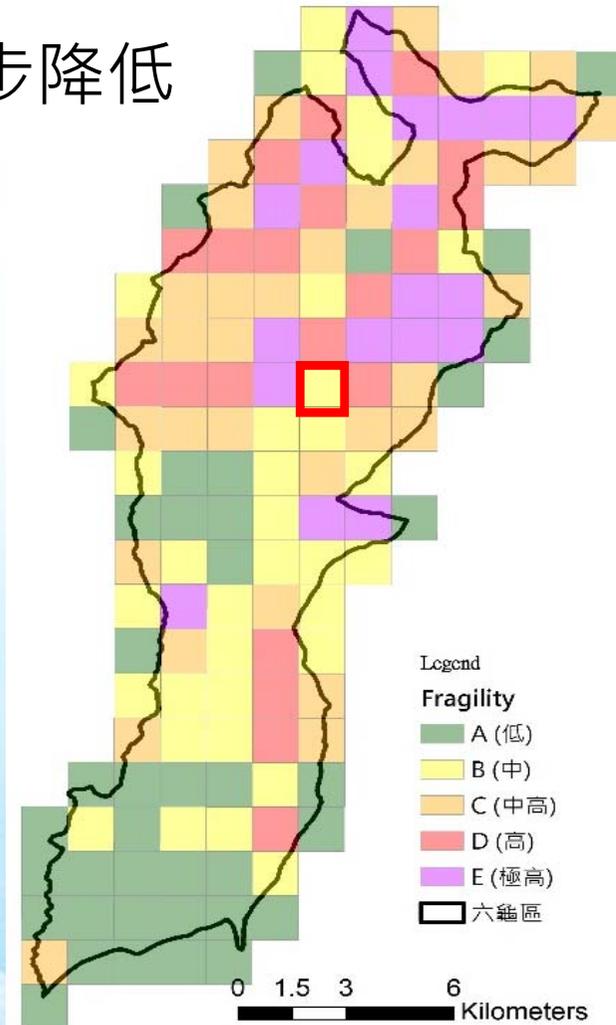
六龜區荖濃里 QPE編號109142 (中高脆弱度)



## 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(4/5)

- **中脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)
  - ✓ 致災風險等級達到**極高**時，均發生新生崩塌
  - ✓ 致災風險等級降低，新生崩塌發生機率亦同步降低

QPE編號107377 (中脆弱度)	雨場數	新生崩塌 雨場數	新生崩塌 發生率 (%)
降雨致災風險等級( $R_h$ )			
極高 ( $EAR > 1000\text{mm}$ )	1	1	100.0
高 ( $EAR > EAR_{95}$ )	1	0	0.0
中高 ( $EAR_{90} < EAR < EAR_{95}$ )	1	1	6.3
中 ( $EAR_{30} < EAR < EAR_{90}$ )	16	0	0.0
低 ( $EAR < EAR_{30}$ )	126	0	0.0



$EAR_{30}=315\text{mm}$   $EAR_{60}=532\text{mm}$   $EAR_{90}=748\text{mm}$   $EAR_{95}=904\text{mm}$

各網格之地文脆弱度指標

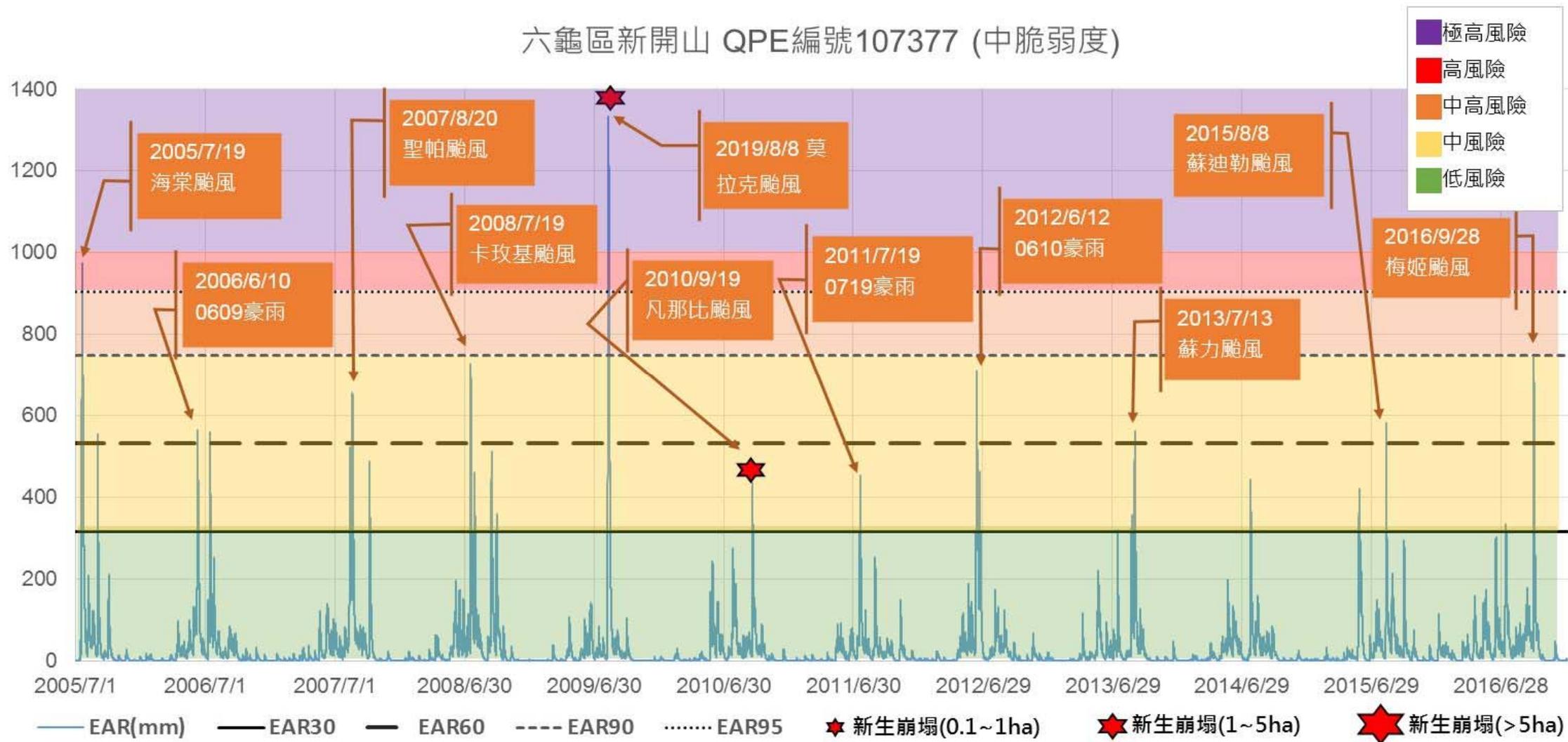


# 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(4/5)

■ 中脆弱度代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)

歷年降雨事件期間之降雨致災風險等級變化情形與新生崩塌事件之時間序列圖

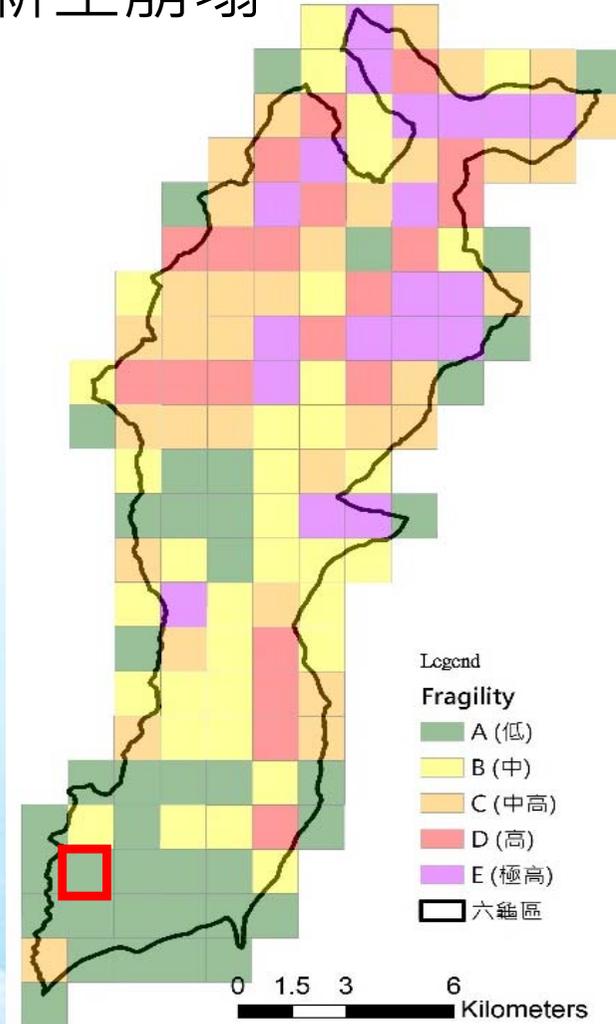
六龜區新開山 QPE編號107377 (中脆弱度)



## 3.2 降雨致災風險等級指標驗證(5/5)

- **低脆弱度**代表網格驗證結果(2005/7~2017/7 共145個雨場)
  - ✓ 145個雨場僅2個達到中高致災風險等級且無新生崩塌

QPE編號102521(低脆弱度)	雨場數	新生崩塌 雨場數	新生崩塌 發生率 (%)
降雨致災風險等級( $R_h$ )			
極高 (Undefined)	-	-	-
高 ( $EAR > 1000\text{mm}$ )	0	0	0.0
中高 ( $EAR > EAR_{95}$ )	2	0	0.0
中 ( $EAR_{90} < EAR < EAR_{95}$ )	3	0	0.0
低 ( $EAR < EAR_{90}$ )	140	0	0.0

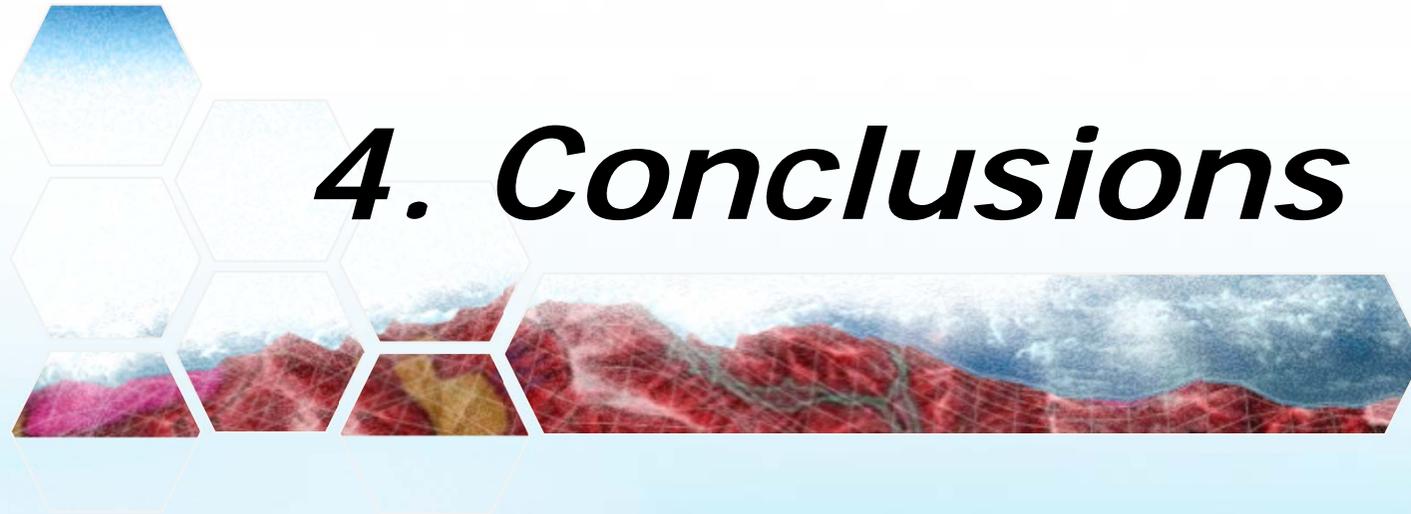


$EAR_{30}=253\text{mm}$   $EAR_{60}=392\text{mm}$   $EAR_{90}=531\text{mm}$   $EAR_{95}=844\text{mm}$

各網格之地文脆弱度指標

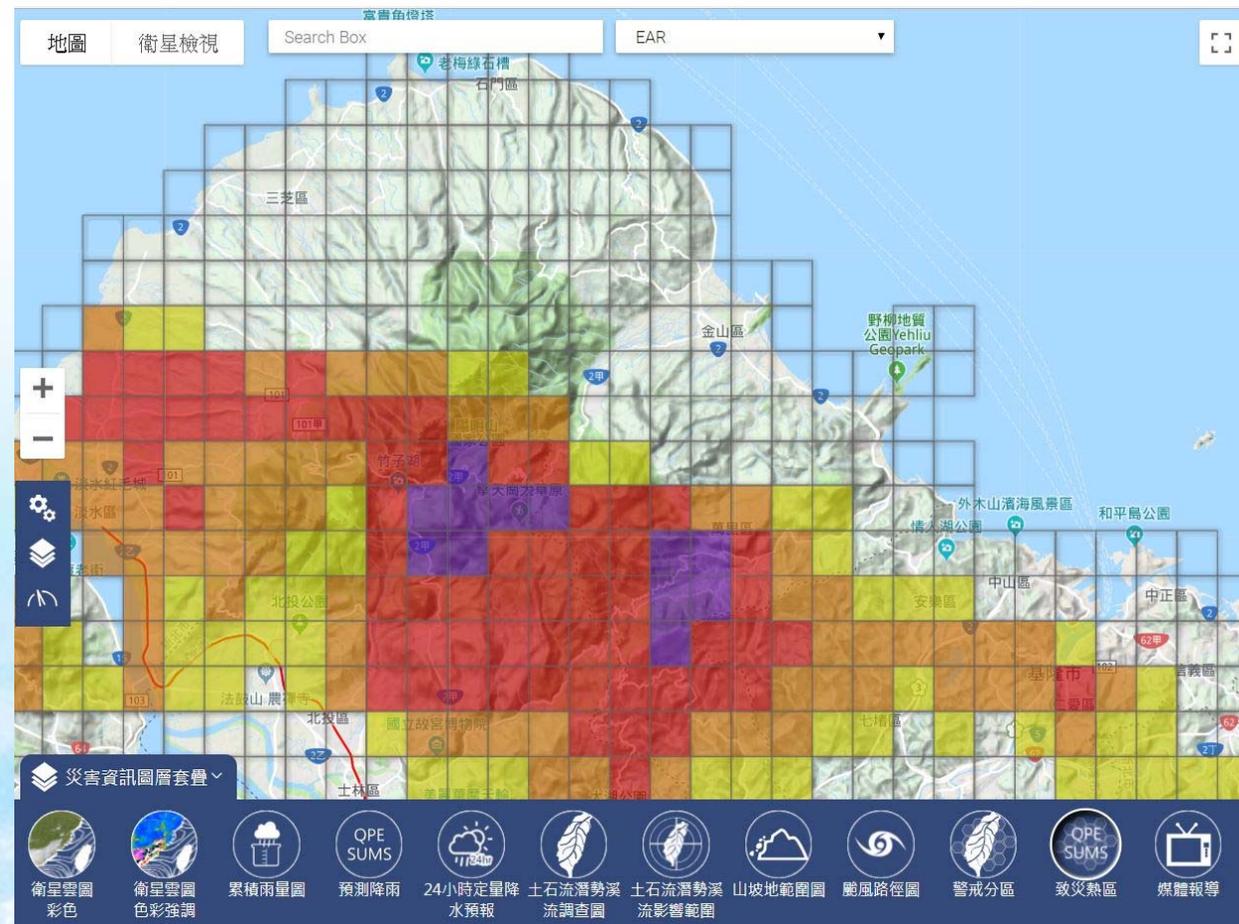


# 4. *Conclusions*



# 結論

- 現行警戒模式僅採雨量指標，未納入地文條件，致誤報率往往偏高
- 本研究以降雨危害度及地文脆弱度雙指標建立降雨致災風險等級，並以視覺化方式掌握整體災害可能發生趨勢
- 對同一地區而言，雨量相對值比絕對值重要，即便QPE於山區可能會低估，只要趨勢一致，影響不大
- 經2005~2017年降雨事件驗證結果，降雨致災熱區警戒模式可有效預測崩塌可能發生之時間及空間分布，後續可發展為廣域型複合型土石災害警戒模式





# RTDT

## 技術研究發展小組

Research and Technology Development Team

*Thank you for your attention*

陳振宇 [cychen59@gmail.com](mailto:cychen59@gmail.com)