

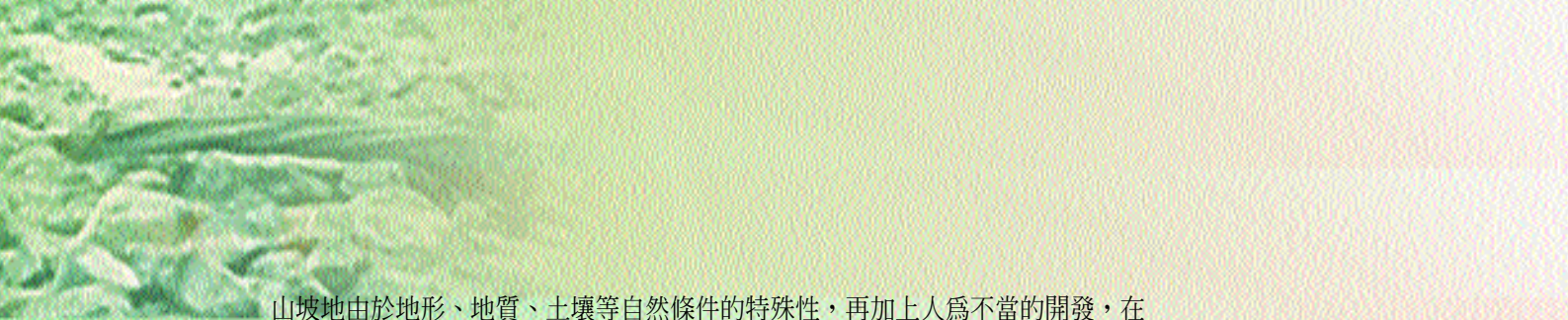
專題報導

洪水與土石流

豪雨造成的 土石流

出現在電視畫面上滾滾而來的土石，
所到之處屋毀人亡，家園瞬間蕩然無存，
這麼可怕的土石流，是如何形成的？

■ 詹錢登



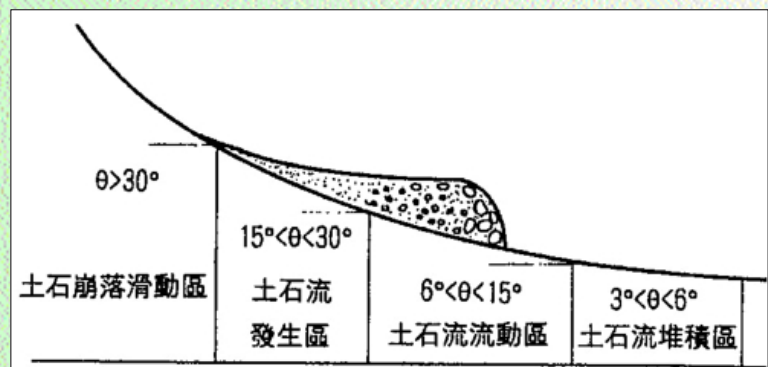
山坡地由於地形、地質、土壤等自然條件的特殊性，再加上人為不當的開發，在颱風、暴雨及地震時，極易發生嚴重土壤沖蝕、崩塌、地滑、土石流等土體運動現象。這種現象，一般稱為山崩或崩山，依照土體的運動形式，山崩可分為墜落、傾翻、滑動、側滑與流動等五種類型，或簡單地區分為崩落、地滑及流動等三種類型。

土體墜落是體積大小不一的岩塊或土塊以自由落體的運動方式向下掉落，大多發生在陡峭邊坡或懸崖；土體傾翻是岩塊向下坡方向傾斜，然後發生滾落，常發生在路邊邊坡及河道邊坡；土體流動則是指土體像流體似地以流動的方式移動。土體流動速率差異很大，有的每年只有數公分，有的每秒幾公尺甚至數十公尺。土體流動非常慢的叫潛移，流動很快的在台灣及日本稱為「土石流」，在中國大陸稱為「泥石流」，英文則稱為「debris flow」。土石流雖然在陸地表面、湖底或海底均可能發生，但一般所指的土石流是指豪雨期間，大量鬆散的土體與水的混合體，在重力作用下，沿自然坡面或溝渠由高處往低處流動的現象。

土石流的運動特性介於流體與固體之間，它的外觀有如預拌混凝土，因此土石流又常被比喻為「天然預拌混凝土的流動」。土石流中的土體種類繁多，其顆粒大小的分布範圍，有的較窄、粒徑較均勻，而有的粒徑分布很寬，從黏土、砂、礫石甚至巨石都有。含砂水體的流動如果按照泥砂體積含量來區分，可區分為挾砂水流、高含砂水流、土石流及地滑等四類，其中土石流體的含砂體積濃度介於挾砂水流和滑動土體之間，高濃度的高含砂水流常被視為土石流，而地滑也常被當成是土石流。

土石流是土體由不穩定狀態轉向穩定狀態的自然過程，它的主要特徵是發生突然、流動速率快、泥砂含量高、沖蝕力強、衝擊力大。一場土石流的過程包含發生區、流動區及堆積區：土石流發生區的坡度大約在 15 ~ 30 度之間，流動區的坡度大約在 6 ~ 15 度之間，堆積區的坡度大約在 3 ~ 6 度之間；土石流常在溪谷出口處（坡度緩、寬度大的地點）形成扇狀堆積地。

土石流往往對其活動區（包括發生區、流動區、堆積區）內的各種設施、人民生



含砂水體的四種運動形態

泥砂含量 (%)	比重	運動形態
0 ~ 3	1.0 ~ 1.05	挾砂水流
3 ~ 27	1.05 ~ 1.45	高含砂水流
27 ~ 75	1.45 ~ 2.24	土石流
75 ~ 100	2.24 ~ 2.65	地滑

土石流過程 包含發生區、流動區及堆積區， θ 表示坡度。



命財產及生態環境造成直接破壞和傷害，同時，大量土砂進入或堵塞河流，還會給河流上、下游地區帶來巨大危害及難以估計的損失。由於土石流的規模、性質、地形條件和受害對象的不同，危害也有所不同，常見的土石流危害方式有淤埋、沖刷、撞擊、磨蝕、堵塞、漫流改道、彎道超高、擠壓主河道等。

土石流雖然是一種自然現象，但是在土石流的運動過程中，常造成各項建設不同程度的損害，甚至人員的傷亡，因此「土石流」三個字又成爲「災害」的代名詞，常令人聞「土石流」而色變。

土石流的分類

土石流體的組成物質主要是水、泥、砂、

礫石甚至巨石，但是它們彼此間含量比例的變化卻很大，因此土石流按照其物質組成，可分爲泥流型土石流、礫石型土石流及一般型土石流。

泥流型土石流（又稱泥流），是指土石流中泥砂含量大而礫石含量少，其泥砂含量占50%以上；礫石型土石流（又稱水石流）是指土石流中礫石含量大而泥砂含量少，其泥砂含量占10%以下；一般型土石流是指土石流中土體物質的顆粒大小分布很廣，由黏土、粉土、砂、礫石甚至巨石等各種粒徑顆粒所組成，其泥砂部分的含量約在10%~50%之間。

土石流的類型主要是與當地集水區內鬆散土體的特性有關，在台灣地區，這三類土石流均曾發生過，例如花蓮縣銅門村及南投縣豐丘

雲南省蔣家溝泥流型土石流正在流動的情形。



土石流的類型與物質組成特徵

類別	物質組成特徵
泥流型土石流	土石流固體物質中泥砂含量大而礫石含量少，其泥砂含量占50%以上。
礫石型土石流	土石流固體物質中礫石含量大而泥砂含量少，其泥砂含量占10%以下。
一般型土石流	土石流中固態顆粒分布很廣，含有黏土、粉土、砂、礫石甚至巨石，其固體物質中泥砂含量約在10~50%之間。

兩地曾發生礫石型土石流，台東縣豐濱鄉新社村及南投縣同富村曾發生泥流型土石流，而南投縣郡坑橋及神木村曾發生一般型土石流。台灣地區近年來所發生的土石流中，泥流型土石流大約占50%，礫石型土石流大約占20%，而一般型土石流大約占30%。將土石流在類別上加以區分，除有助於研究工作的進行外，更有助於規劃及執行適當的防治對策。

土石流的特性

土石流具有爆發突然、來勢兇猛、組成複雜的四大特性

土石流特性	土石流特性說明
爆發突然	土石流爆發突然，很難預知其發生的準確時間與地點，目前僅對土石流發生與降雨特性的關係有初步了解而已。
來勢兇猛	土石流泥位陡漲暴落，歷時較短，一場土石流過程可從幾十分鐘延長到幾小時，但是其流速每秒可達幾公尺甚至幾十公尺，其洪峰流量最高可達上游水流流量的五到十倍。
組成複雜	土石流的組成物質複雜，包括水、泥、砂、礫石甚至巨石，而且彼此間的含量比例變化很大，不易分析其流動特性。
破壞性大	土石流含砂濃度很高，前端呈波浪狀而且巨石集中，流動速率快，對障礙物產生猛烈的衝擊，破壞力極高。

雜及破壞性大等特性。豐富的鬆散土石、陡峭的坡度及充足的水分是發生土石流的基本要件。然而土石流往往爆發突然，很難準確地預知其發生時間與發生地點。理論上，土石流的發生與該區域內崩積物厚度、地質成分、地形特性及水文特性等因子有關。

土石流歷時較短，一次土石流過程一般從幾分鐘至幾小時；它的流速每秒可達幾公尺甚至幾十公尺，而且它的表面流速明顯高於其底部流速。土石流體組成粒徑非常不均勻，它的流動不穩定，有陣流現象，當前端受阻而停止時，其後續部分會因慣性而壅塞疊高，致使壓力增加而迫



南投縣神木村一般型土石流堆積物，含有豐富的黏土、砂、礫石及巨石。



南投縣豐丘礫石型土石流堆積物，含有極豐富的礫石及巨石。

使前端再次流動。土石流前端呈波浪狀並有巨石集中現象，而其後續部分礫石的大小及濃度均較小。由土石流的橫斷面觀之，在前端部分其中央呈隆起的形狀，而其後續部分中央則呈凹陷的形狀。

土石流的流動有明顯的直進性，遇到障礙物或通過彎道時不易繞流或變向，因而產生猛烈的衝擊作用或爬高現象。土石流在完全發展的情況下，它的洪峰流量最大可高達上游水流流量的五到十倍；換言之，在充分鬆散土砂的情況下，一分的水可能引發五到十倍的土石流。

土石流發生途徑

土石流發生的主要途徑，大致可分為下列幾種：沖刷溪床造成土石流、沖刷溪流邊坡造

成土石流、壩體崩塌造成土石流、地下水位升高形成土石流及其他途徑造成的土石流。

沖刷溪流底床造成的土石流，是指溪床上原來就有相當厚度的土石堆積，洪水期間由於溪床表面沖蝕及地下水位上升，產生局部沖刷破壞，並逐漸擴大造成溪床整體破壞，而形成土石流。沖刷溪流邊坡造成的土石流，則是指溪床邊坡不穩定而產生大量崩塌，這些不斷崩塌的大量土石，與溪溝洪水混合後形成土石流沿著溪流流動。而壩體崩塌造成的土石流，是指溪流邊坡不穩定，以致產生大量崩塌，這些崩塌土石阻塞河道，形成一個小水壩，如堰塞湖，阻擋水流使溪水水位上升，當水位到達破壞水位，或高到超過土石堆時，造成土石堆崩塌而形成土石流。致於地下水位升高形成的土石流，則是指地表下岩層細縫中的地下水，受



土石流——陣流運動 土石流體組成粒徑非常不均勻，它的流動不穩定，有陣流現象，當前端受阻而停止時，其後續部分會因慣性而壅塞疊高，致使壓力增加而迫使前端再次流動。

到他處高水位壓力作用，產生極大的孔隙壓力，造成局部土體的破壞或土壤液化而形成土石流。

其他途徑造成的土石流，是指除了前面四種土石流的發生途徑外，因其他原因所造成的土石流，台灣地區曾經在下列三種情況下發生過土石流。第一種情況是因山坡上游泳池崩塌而造成土石流：民國八十六年八月十八日溫妮颱風襲台，台北市天母德行東路338巷內的民宅，其後山上別墅的游泳池突然崩裂，大量水流沿著山坡流下，並急遽沖刷沿途坡面的表土層，而形成土石流，並淹沒一間三合院民宅，造成一家六死一傷的慘劇。

第二種情況是因山坡上棄土場崩塌而造成土石流：民國八十七年十月十八日瑞伯颱風襲台，台北縣五股鄉登林路「台聯工程木業裝潢公司」廠房後山上灰渣場，因排水不良大量積水，造成灰渣場土堤潰決，形成土石流沿著山坡沖流而下，沖毀數間民房造成人員傷亡。

第三種情況是因橋孔淤滿積水潰決而形成土石流：南投縣神木村神木國小前的霍薩溪橋，在民國八十五年賀伯颱風之前，其橋孔淨空約有十餘公尺，但在賀伯颱風之後，由於土石流的淤積，其淨空剩下不到兩公尺，賀伯颱風之後，數度小規模的土石流及河道輸沙使土石繼續淤積在橋孔下，終致橋孔完全被土石堵

塞。民國八十七年五月九日，在一場小雨之後，由於橋孔淤滿溪水無法宣洩，致使霍薩溪橋上游溪面積水形成水塘，當水位逐漸升高到橋面時，橋面承受不了水的側向壓力，發生崩塌而形成土石流。這些土石流或許可歸類於壩體崩塌型土石流。



土石流衝擊 橋梁高度不足被土石撞擊，使得橋面下的水泥崩落，鋼筋裸露。



土石流穿堂入室 土石流無堅不摧，大量土方湧入廳堂。

土石流發生的基本條件

形成土石流的基本要件包括豐富的鬆散土石、充足的水分及足夠大的坡度，此三條件缺一不可。豐富的鬆散土石，提供形成土石流所需的固態物質；充足的水分潤滑土石流內固態物質，並降低固態物質間的摩擦力與凝聚力，

促使固態物質液化以助於流動；足夠大的坡度，提供土石流流動動力，使土石流克服其內部的摩擦力與凝聚力後，繼續向低處流動，並在流動過程中促使泥石與水高度混合增加其流動性。

自然土石流的鬆散土石來源，主要取決於流域地質特徵。在地質構造複雜、斷裂皺褶發達、地震多、山坡穩定性差、岩層破碎或山崩地滑多的地區，能為土石流的形成提供豐富的鬆散土石。人為土石流的鬆散土石來源，除取決於流域地質特徵外，主要由人類活動所造成。例如，山坡地不當利用與開發、森林被亂砍濫伐、山坡地的道路開發、工程棄土及礦區棄渣的處理不當等，均能為土石流的形成提供大量鬆散土石。

鬆散土石的堆積，一般需要較長的時間，但土石流的發生卻是突然爆發、歷時較短且來

勢兇猛。發生大地震地區，由於地殼震動，將地表土層做水平及垂直方向的劇烈搖動，使得地表土層變得非常鬆散，甚至形成堰塞湖，因此是發生土石流的高危險區。

水不僅是土石流的組成成分，更是激發土石流的直接條件。水的來源大致上有三種：降雨、融雪及潰壩。降雨是台灣地區水的主要來源，每逢颱風或豪雨，各地即常發生土石流。例如，一九九六年賀伯颱風經過台灣本島帶來大量降雨，除了造成台北市社子島及台北縣板橋市的嚴重淹水外，更造成南部地區土石流災害，導致嘉義縣阿里山、南投縣陳有蘭溪附近村落及屏東縣好茶村居民及財物的慘重損失。引發土石流所需要的水量，各地不一，主要取決於地形坡度、鬆散土體性質及降雨特性。若土體顆粒細、疏鬆、含水量高、且具有較陡的地形，僅需少量的水即能引起土石流；反之，



土石流淤埋房舍 大量的土石流瞬間即將房舍掩埋，造成人民生命財產的損失。

則需要較多的水量方能引起土石流。

坡度是提供土石流發生及流動的動力，坡度陡的地區較容易發生土石流。當土石流流經坡度較陡的地方時，由於其強大的侵蝕力，會侵蝕渠岸及渠床物質，使土石流規模逐漸增大；反之，當土石流流經坡度較緩的地方時，由於動力減小，部分泥石開始沈積，泥石與水相繼分離，使土石流規模逐漸減小，甚至停止流動。

一場土石流過程包含發生階段、流動階段及停止階段。理論上，水流流經溪床時，如果溪床上有豐富的泥、砂或石頭，而且在流速、流量足以激發土石流的情況下，最容易引發礫石型土石流，其溪床坡度範圍大約是15~30度之間，而引發泥流型土石流發生的溪床，坡度範圍大約是6~12度之間。斜坡面或溝床上堆積層的物質成分及植生情形，也是影響土石流是否會發生的重要因素。許多現場調查資料顯示，在不同地區，因為地質、地形、植生及水源特性等條件不一，發生土石流的條件也不盡相同。

土石流和降雨的關係

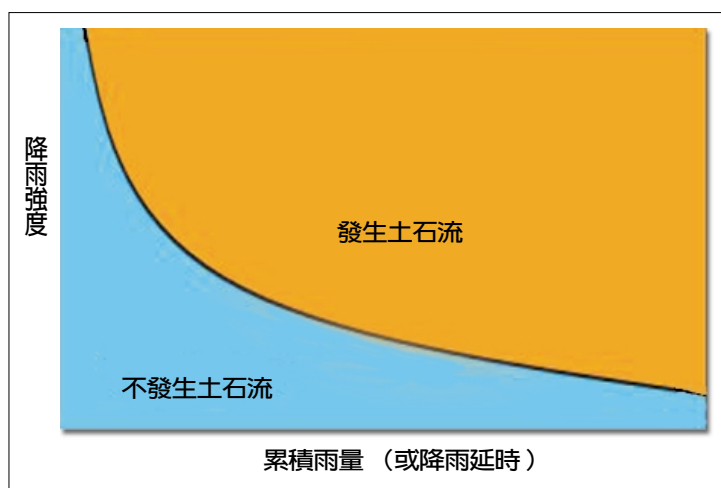
在形成土石流的基本要件中，水不僅是土石流體的重要成分，更是激發土石流的直接條件。在同一條土石流溝中，其流域內的物質條件與溝床地形條件，在正常情況下的一定時期內，可視為相對穩定，變化不大，但是流域內的降雨條件，隨時間的變化卻非常大。

在亞熱帶地區，形成暴雨土石流的激發條件是降雨，台灣地區的許多土石流，也多是由於不同降雨條件所造成的。由此可知某一特定流域內，土石流的發生與規模大小，決定於流域內的降雨條件。因此若能釐清土石流流域內，降雨條件、物質條件及溝床條件在形成土石流過程中的關係，分析出流域內降雨條件的

變化規律與發展趨勢，就可能利用降雨特性，進行土石流發生的預報工作。

然而，需要多大的降雨量（或降雨強度）才能激發土石流？依據過去的經驗，激發土石流所需要的降雨量與該流域內的土壤成分、結構、含水量及水的入滲強度等有密切的關係。降雨特性影響土壤含水量及入滲情形，也影響土石流發生的時間及土石流規模的大小。常用來分析土石流發生的降雨特性參數，包括降雨強度、降雨延時、累積雨量及前期降雨量。描述降雨特性與土石流發生關係的方式大致可區分為兩類，一是敘述式的土石流發生降雨條件，二是方程式化的土石流發生臨界降雨線。

敘述式的土石流發生降雨條件，是依據經驗敘述降雨強度、降雨延時及累積雨量，在何種條件下會形成土石流。例如，日本學者川上浩，研究日本宇原川土石流與降雨特性的關



發生土石流的臨界降雨曲線 當降雨強度落在曲線上方的橘色區域時，表示很可能會發生土石流。

係，認為發生土石流的降雨條件有三種：降雨強度 30~40 毫米/小時以上的雨，持續下 3~6 小時，即會發生土石流；降雨強度雖小於 30~40 毫米/小時，但持續下 3~6 小時後，累積雨量達 150~200 毫米以上，即會發生土石流；及累積雨量達 400 毫米以上，一定會發生土石流。

成大防災研究中心謝正倫教授等人，曾經分析花東地區土石流發生與降雨關係，結果顯示降雨強度大於 27 毫米／小時 而且累積雨量超過 360 毫米時，即有誘發土石流的可能。

方程式化的土石流發生臨界降雨線，係依據經驗或半經驗，建立降雨強度與降雨延時或累積雨量的關係式及關係曲線圖。當降雨強度落在關係曲線的上方時，表示會發生土石流；反之，當降雨強度落在關係曲線的下方時，則表示不會發生土石流。這樣的關係式或關係曲線，稱之為土石流發生臨界降雨關係式或臨界降雨線。臨界關係式顯示發生土石流所需的降雨強度與累積雨量（或降雨延時）成反比關係，也就是說，如果累積雨量（或降雨延時）很大，很小的降雨強度也可能激發土石流。

當場降雨量是土石流的激發動力，而前期降雨量則是土石流形成的潛在因素。前期降雨

量的多寡，影響堆積物質的含水狀況，進而影響激發土石流所需降雨量的多寡，因此前期降雨量的多寡應予以適當考量。另外，前面所討論的激發土石流所需的降雨強度，均為小時降雨強度，但是許多資料顯示，短延時（例如十分鐘）降雨強度的峰值與土石流發生的時間，較日或小時降雨強度的峰值，來得吻合。

吳積善由雲南蔣家溝土石流發生的觀測資料中也發現，短延時（如十分鐘）降雨強度是激發土石流的主要因素，並以十分鐘降雨量及前期降雨量兩個降雨參數，建立土石流發生臨界雨量線及受災雨量線，在臨界雨量線以下為安全區（土石流不發生區），在受災雨量線以上，不但會形成土石流，而且會有土石流災害發生；臨界雨量線與受災雨量線之間為過渡區，在過渡區內很可能會發生土石流，但規模小不會有顯著災情。此臨界雨量線及受災雨量



土石流淹沒廟宇 土石流發生時，即便是神明也自身難保，所以平日的防患與預警，實為保全性命財物的不二法門。

線曾經被實際運用到雲南蔣家溝土石流預警系統，做為發布土石流災害預警的依據。

地震的影響

民國八十八年九月二十一日，台灣中部地區發生芮氏規模 7.3 的強烈地震。地震後，山崩地滑情形非常嚴重，山坡上大量崩塌的鬆散土石，在豪雨來臨時，非常容易發生土石流。依據地震後雲林縣、彰化縣、南投縣及台中縣等地土石流發生的降雨資料顯示，地震後土石流發生的當日雨量大約在 17 ~ 116 毫米之間，這遠小於地震前發生土石流的 115 ~ 546 毫米當日雨量。地震後各土石流發生地區的降雨強度為 1.42 ~ 9.27 毫米/小時，降雨延時為 7.5 ~ 42.5 小時，而地震前土石流發生地區的降雨強度為 4.69 ~ 20.8 毫米/小時，降雨延時為 9 ~ 86 小時。這些資料均顯示，地震後，激發土石流的降雨條件明顯改變，所需的臨界降雨量明顯下降，也就是說只要較低的降雨條件就可能激發土石流。

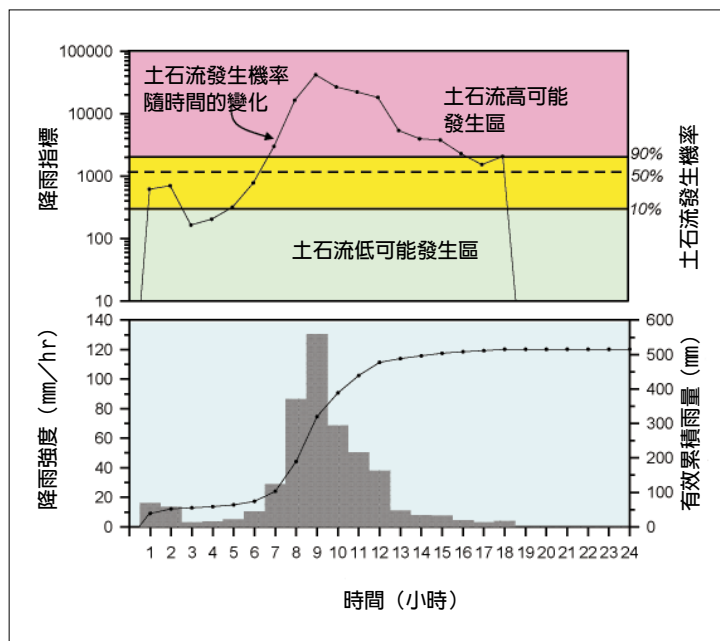
土石流預警

土石流形成的三個基本條件是豐富的鬆散土石、充足的水分（降雨）及足夠大的坡度，而且三種條件缺一不可，因此僅以雨量特性做為判定土石流發生與否的預警基準，當然是不夠的，在目前我們對土石流發生機制的了解很有限的情況下，要預期有很高的準確度也是不可能的。然而，即或如此的不夠精確，雨量基準仍然是最為方便且可行的判定土石流發生與否的方法，因為雨量資料的取得相對而言較方便，而且雨量資料所涵蓋的範圍較廣泛。

目前發生土石流的降雨臨界關係式，是屬於定律性降雨臨界關係式，也就是說，關係式中所採用的參數均是確定的數值（一般採用平均值），以二分法將臨界降雨關係曲線區分為土

石流發生區及土石流不發生區。然而此種區分方式常與實際狀況不盡相符，不相符的原因是源自於影響土石流發生的水文及地文各項因素本身具有很高的不確定性，往往無法明確地定出某一個定值，因此未來有必要採用機率觀點來分析土石流發生的可能性，建立不同發生機率下的土石流發生降雨臨界曲線，進行土石流發生機率的預報。

土石流的形成原因及其流動特性非常複雜，在土石流的防災方面，不能完全依賴土石流發生預警及預報系統，也不能過度期望土



流防治工程，能夠完全抑制土石流的發生或攔擋土石流的流動。人們必須要有風險的觀念，了解土石流的發生與流動具有很高的不確定性。雨量大時，土石流潛在地區（尤其地震災區）發生土石流的機會就會比較高，當地的居民與政府就要有高度的危機意識，隨時參考雨量預報所提供的警訊，充分做好防災減災的準備與行動，以降低土石流災害。 □

土石流發生預警
以降雨強度和有效累積雨量的乘積作為降雨指標，然後利用降雨指標的變化，評估降雨期間土石流發生的機率。

詹錢登

成功大學水利及海洋工程學系