

SCIENTIFIC  
AMERICAN

中文版

NO. 19  
2003年9月號

科學人



【特別報導】p.60  
宇宙是個全像圖？  
從黑洞到資訊革命

sa.ylib.com



本刊榮獲92年  
新雜誌金鼎獎



美國國家雜誌獎

# 下一次地震

從地震應力的傳遞與斷層活動  
科學家要找出大地震之間的關聯

## 在哪裡？

穿梭在科學與文學間的  
古希臘女祭司 p.70

消除數位落差，  
只送電腦是不夠的！ p.80

基因糾察隊：  
神秘的RNAi p.48

ISSN 1682-2811



定價NT220元



文杜拉

西米谷

1994年  
規模6.0地震

1994年  
規模6.7地震

伯班克

好萊塢

洛杉

聖塔摩尼卡

康普敦

長堤

居住在美國洛杉磯或附近地區的1300萬人口，其實是生活在有地震傾向的複雜斷層網絡上（白線），包括聖安地列斯斷層。科學家目前認為，自1850年代即撼動此區域的每一起大地震，皆可能影響後續地震發生的地點與時間。

## 【封面故事】

# 預測地震

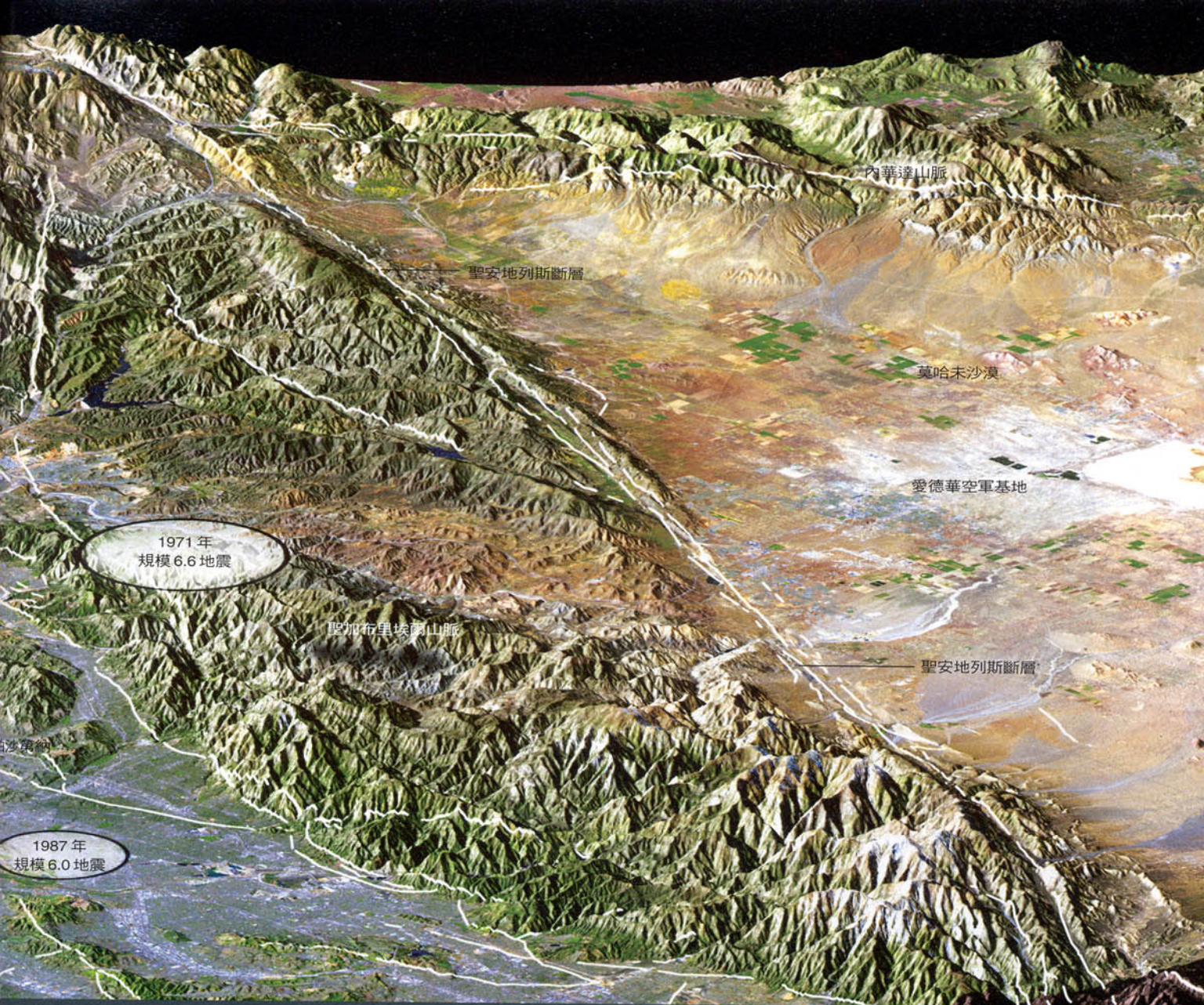
預測地震何時、何地會發生，是個夢想嗎？

透過計算斷層活動所引發的應力，科學家發現，

大地震之間是會互相影響的。這個令人興奮的發現，讓預測地震成為可能……

撰文／史坦（Ross S. Stein） 翻譯／王季蘭

審訂／陳于高、馬國鳳



**數**十年來，地震學家夢想著，有朝一日能夠預測這世界下一次災難性地震的發生時間和地點，但1990年代初期，容易發生地震的斷層展現出的行徑已證實極為複雜，使專家被迫做出這樣的結論：地球最大的震動是獨立、隨機且完全無法預測。現在大多數的地震學家假設，一旦一個大地震及其預期發生的餘震確實造成損害，這個斷層會暫時沉寂，直到有時間讓地殼裡的應力（stress）繼續累積為止，一般而言需要超過幾百到幾千年。然而，最近的一個發現正開始顛覆這個假設：地震會以無法想像的方式互相影響。

這個洞見證實了一種概念：在某些地區，主震會釋放應力，因此有第二主震發生的可能性。但這

也暗示，沿著這斷層或鄰近斷層的某處接連發生地震的可能性，實際上可能會增強到原來的三倍之多。對於那些必須隨時迅速提供急救服務，或是為保險費訂定價格的人而言，這些細微的預測對於判定哪一種委託人最容易受傷時，極具關鍵性。

這個所謂的應力誘發假說（stress triggering hypothesis）的核心是：斷層對其鄰近斷層移動或震動傳遞而來的輕微應力，會無預警地反應。利用過去的地震記錄與斷層行為計算新的結果，我和同事已認識到地震釋放的應力不只是「消散」這麼單純，而是會沿著斷層轉移，集中在鄰近的地點，這樣的應力轉移引發了接踵而來的震動。的確，自1992年起，我們對24個左右的斷層

做觀測，研究結果讓我們相信，即使應力只膨脹到灌飽一個車胎所需壓力的八分之一，都可能足以誘發地震。

從過去到現在，在大規模的地震裡，如此輕微的因果關係被視為是不存在的，而且在地震預測上從未被注意。因此，許多科學家曾經對依此為據的新預測方法提出懷疑是可以理解的。然而，透過解釋美國加州、日本和土耳其幾個破壞性地震的餘震發生地點與頻率，應力誘發假說已陸續獲得確信。我們努力不懈地對這些意想不到的「地震對話」尋求解釋，其背後的動力主要還是希望能對這樣的災難提供更準確的預測。

### 被忽略的餘震

要反駁「主震是隨機發生的」這個近乎眾所周知的理論，從一開始就頗富挑戰性，尤其是幾百位科學家花了30年以上的時間尋找可預測的全球地震活動模式，結果還是徒勞無功。有些研究者找尋小型地震隨時間的變化率，或用靈敏的儀器測量肉眼無法辨識的地殼傾斜、伸張或位移距離，還有些人會記錄地底氣體、液體和電磁能的活動，或監測岩石中細微的裂隙來了解大地震前這些裂縫是張開還是閉合。然而，不管研究人員怎麼測試，他們只能從一些主震之間找到些微的符合。

儘管有這些差異，但歷史記錄證實，在全球的地震活動中，其中三分之一（也就是所謂餘震的部份）會在時間或空間上有所群集。過去認為，所有真正餘震的發生部位，是沿著主震滑移的部份斷層。根據日本地震學家大森房吉於1894年做的首次觀測，餘震發生的時間點會依循一個固定的模式，因此發展了一個基本原理，即大森定律（Omori's law）。定律說明了，在一次主震之

### 如何預知地震？

- 科學家過去認為，某個大地震不會對下一個大地震的時間或地點產生顯著影響，但一個令人驚訝的新發現正在挑戰這個觀點。
- 經證實，有地震傾向的斷層，若其附近斷層發生震動，該斷層會對接收到微幅的應力產生出人意料的反應。
- 假設其他條件都相同，地殼裡應力增長的區域，將會是下次地震發生的地點，即使增長的量微乎其微。
- 倘若這個假設正確，它所隱含的意義可大幅改進國家、城市 and 個人評估地震災害的能力。

後，緊接而來的餘震是最密集且頻繁的，10天後，餘震發生率會滑落至最初的10%，100天後更掉到1%，依此類推。在地震學上，這種可預測的跳躍式衰退意味著：最初的地震改變了地殼的應力狀態，因而提高了餘震發生率，此現象與一般認為地震是隨機發生的觀點相牴觸。但因為餘震的規模通常比科學家想預測的、最具破壞力的主震要小，所以長久以來，這些餘震都被忽略，其實它們是解開地震秘密的鑰匙。

一旦撇開餘震不談，其餘的地震起碼在第一眼看來，的確是隨機發生的。但是，為何要忽略最容易預測的地震來證明其他地震是缺乏規律的呢？我和同事決定反過來追尋讓餘震如此規律的原因。我們從全世界地震最活躍的區域著手：綿亙美國加州的聖安地列斯斷層系統。從當地的地震和餘震記錄來看，在100公里範圍內，我們知道在規模7.3的地震後，發生其他大地震的機率為67%，是平常的兩萬倍。然而似乎有某個與第一次地震有關的東西，會驟然提高後續發生地震的機率，但這東西到底是什麼？

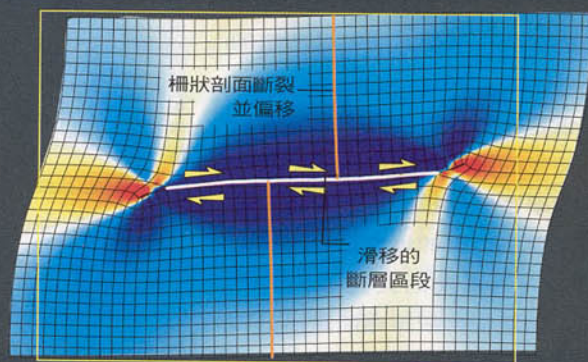
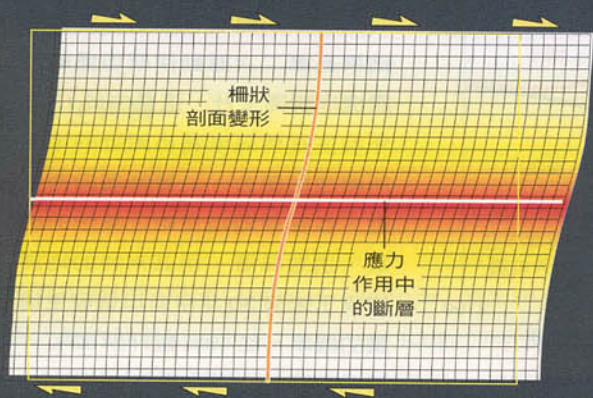
發生率的激增，解釋了為何沒有人會對1992年6月的地震現象感到驚訝：美國南加州大熊鎮發生規模6.5的地震，距離前一起規模7.3、40公里遠的藍德斯城大地震只有三小時的時間（幸運的是，這兩起地震都發生在人煙稀少的沙漠，並未對洛杉磯造成損傷）。大熊鎮的地震距離藍德斯大地震時引發的斷層滑動很遠，在時間上雖符合餘震發生的條件，但在地點上卻無法令人信服，這和以往的認知相互矛盾，令人費解。我們懷疑，這個神秘的地震可能暗藏我們正在尋找的線索。

### 預測一：南加州

藉由在地圖上標出藍德斯、大熊鎮和其他幾百個加州地震的發生地點，我和同事開始注意到，除了真正的餘震外，其他在主震後幾天、幾星期、甚至幾年後才發生的小規模地震，其分佈模式也值得注意。就像謎樣的大熊鎮地震，大多數的後續震動傾向於集中在離斷層滑動很遠的地區，因此離發生餘震的區域也有好長一段距離（參見第38頁〈地震群集〉）。因此我們推論，假若能確定是什麼因素控制了這樣的模式，同樣的特性或許也可套用在主震本身，而且如果證明屬實，我們對地震預測

# 傳遞應力，誘發地震

應力傳遞就像接力賽，在地球板塊間相互運動時，會慢慢累積及釋放，造就了大地震週而復始的發生。沿著土耳其北安那托利安斷層（白線）的北方陸塊，相對於南方而言是向東移動的（黃色箭頭），但斷層沿線區域停滯不動，當應力終於戰勝摩擦力時，斷層兩側的陸塊才會猛烈地相互滑動。1999年8月17日，這種現象釀出災難，一個規模7.4的地震奪走了土耳其伊茲米特市及其鄰近地區的2萬5000條人命。計算伊茲米特市地震前後的應力（下圖），發現在地震後，沿著斷層滑移區段的庫侖應力驟降，卻在其他地方增長。



庫侖應力變化 (巴)  
減弱 | -3 | 0 | 3 | 增長

## 地震前

北安那托利安斷層在靠近伊茲米特市的區段，自上次應力釋放的大地震後，200年來累積了明顯的應力（紅區）。壓在地形圖上的假想柵狀剖面 and 格線因強大應力作用而變形。沿著斷層的黑線方塊被拉伸成平行四邊形（經放大1萬5000倍），最靠近斷層處應力最大，形狀最扭曲。

## 地震後

地震釋放的應力（藍區）沿著斷層滑移區段釋放，先前變形的柵狀剖面已經斷裂並沿斷層位移好幾公尺，靠近斷層的格線也回復到原來的形狀。強大的應力現在已經集中在斷層破裂區段的兩端，那裡的格線形狀比地震前扭曲得更嚴重。

所發展的新策略，很可能漸漸步上坦途。

我們從觀察大地震之後的地殼變化著手，這些大地震釋放了一些應力，是地球板塊在漂移過程中互相摩擦所慢慢累積的。舉例來說，沿著聖安地列斯斷層，承載著北美洲的板塊，相對於太平洋板塊向南移動，當斷層兩邊以相反方向運動時，剪應力（shear stress）便會平行作用在斷層面上；且當斷層兩邊的岩石互相擠壓，它們會在垂直於斷層面的方向上施以第二種應力。一旦斷層上的剪應力超過了摩擦力，或是擠壓斷層兩側的應力減緩了，斷層兩側的岩石便會瞬間滑動，並以地震的型式

釋放出巨大能量，屆時，兩種應力（相加在一起時稱做庫侖應力，Coulomb stress）會沿著斷層滑動的部份漸漸削弱。但因為應力不會憑空消失，我們知道它必定會沿著同一個斷層重新分佈到其他地點，或是傳遞到鄰近的斷層上。不只如此，我們還懷疑庫侖應力的增長可能足以在那些新的地點引發地震。

地球物理學家對庫侖應力的研究行之有年，但從未把它應用在解釋地震上，理由很簡單：他們推論應力的變化太細微而不足以造成差異。的確，轉移的應力基本上十分微弱，小於3.0巴（bar），或最多等於斷層在地震

# 機率法則

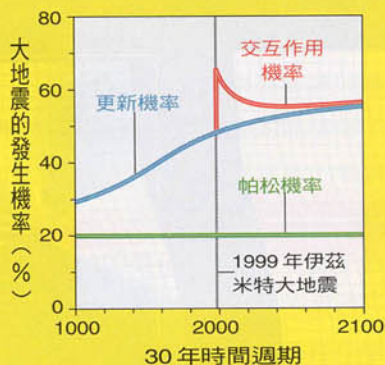
2060年後，土耳其將有一場地震……

人們如何能意識到在他所處的世界地震帶給他的威脅，大部份取決於呈現在眼前的警訊。今日大多數的地震預測都假設地震間毫無關連，每個斷層區地震間的平均時間週期會因地震規模而異，例如地震越大，週期就越長，但是發生地震的確切時間仍是隨機的。這個方法正是所謂的帕松機率（Poisson probability）特色是在不知道前一次大地震何時發生的情況下即能預測地震。地震學家只能根據以往沿著斷層區段發生地震的地質記錄，推斷兩次大地震間的典型週期，但是，用這種傳統策略所算出的機率，並不會隨時間變化。

相較之下，一種稱做更新機率（renewal probability）的精細預測，則預估前一次地震發生後，下一次災害地震發生的機率會隨著時間增長而爬升，這是依據大地震後，沿著斷層的應力會逐漸增長的假設來推論。我和同事則根據第二種傳統技術，把鄰近地震產生的效應一併考慮進去，來計算與地震相互影響有關的機率。在土耳其伊斯坦堡附近的北安那托利安斷層發生強震後的瞬間，我們比較這三種預測方法，算出的結果有顯著的差異。

1999年8月，土耳其發生了慘烈的伊茲米特地震。之前的幾年醞釀期，伊斯坦堡方圓50公里內的四個斷層，自100~500年前受到大地震搖撼之後，發生規模7以上大地震的更新機率已緩慢提

升。根據這一型預測方法，8月的地震在伊茲米特市附近造成第二次大地震的機率驟降，我們認為是因為斷層的應力已經釋放的緣故。然而，這地震並未改變西方100公里處的伊斯坦堡，在未來



伊斯坦堡方圓50公里內的地震機率預測，可能會有迥然不同的差異。傳統方法預測的機率不是維持定值，就是隨時間緩慢增大（綠線和藍線），但若把1999年伊茲米特地震傳遞的應力列入考慮，機率將大幅竄升（紅線）。



土耳其杜賽市大地震在1999年11月發生，造成建築傾圮一片。科學家懷疑，這起災難是由先前發生在伊茲米特市附近的地震所引起。

30年發生嚴重地震48%的機率。無論在伊斯坦堡附近是否會發生其他地震，那些機率會隨時間緩慢提升，而不像帕松機率只維持在20%。

當我的研究團隊將應力誘發假說加入更新機率的計算後，所有的情況都改變了。最引人注目的結果是第二次撼動伊斯坦堡的地震機率瞬間上升，這是由於1999年發生在伊茲米特市附近的地震所釋放的應力，沿著斷層向西移動，並在伊斯坦堡附近集中的緣故，這意味著，伊茲米特的地震提高了未來30年伊斯坦堡發生地震的機率，從48%竄升到62%。這個所謂的交互作用機率（interaction probability）接下來將隨時間減小，而更新機率會隨時間增大，2060年兩者將交會在54%的位置，這暗示了下一起大地震會在2060年之後發生。

活動中所遭受應力變化的十分之一。我也曾經懷疑這樣的應力大小是否足以引發斷層破裂，但當巴黎地球物理研究院的金（Geoffrey King）、麻省理工學院伍茲赫爾海洋研究所的林間（Jian Lin）與我在計算了南加州幾個在大地震之後應力增強的地區後，我們驚訝地發現，儘管增長的應力十分微小，但它的位置顯然與後續地震的聚集區域相吻合。這個相關性的含意非常明瞭：應力增長的區域將成為隨後大小地震的落腳處。我們也開始見識到另一個同樣令人震驚的發現：應力的小幅削減可能會抑制未來地震的發生。從〈地震群集〉中的地圖上可看到，地震活動在所謂的「應力陰影區」有銳減的趨勢。

## 預測二：土耳其

庫侖應力分析清楚解釋了過去某些地震發生的地點，然而更重要的試驗是，我們能否利用這個新技術有效預測未來地震發生的地點。六年前，我加入美國地質調查所的地質學家狄特瑞奇（James H. Dieterich）與土耳其伊斯坦堡大學的地質學家巴卡（Aykut A. Barka）的行列，一起為土耳其的北安那托利安斷層進行評估，這斷層位在世界最密集的斷層帶。根據我們的計算，那些因為過去地震活動而使庫侖應力增長的地區，預估在1997~2027年間，鄰近伊茲米特市的斷層區會有12%的機會發生規模7甚至更大的地震。這個機率看起來頗低，但這綿延1000公里長斷層的其他區段發生地震的機率只有1~2%，相較之下伊茲米特區段的機率算高。

要印證這項預測，我們無需久候。1999年8月，規模7.4的地震蹂躪了伊茲米特市，奪走2萬5000人的性命，價值65億美元的財產毀於一旦。1939年以來，北安那托利安斷層已發生一連串的地震，而這次只是其中的第12次。在格外殘酷的五年間，四次西進的致命大地震迫使斷層700公里的部份（全長1000公里）產生滑動。我們推論，應力轉移的範圍會超越每次斷層破裂的末端，引發下一次地震，伊茲米特市的地震正是一例。

1999年11月，第13片骨牌應聲倒下。從鄰近伊茲米特市的斷層地帶轉移過來的庫侖應力，再次在杜賽市附近引發了一個規模7.1的地震，約在伊茲米特市的東方100公里處。幸運的是，卡巴曾經計算出伊茲米特地震導致的應力增長，並在地震發生前兩個月前將結果發表

在《科學》上。儘管學校當局懇求說，關閉建築會使學生沒有地方上課，但卡巴的預知使專家勇於關閉杜賽市各學校在第一次地震時遭些微破壞的建築，其中有些後來在11月的地震中夷為平地。

如果美國地質調查所的巴森斯、日本活斷層研究中心的遠田晉次、巴卡、狄特瑞奇和我隨後所做的計算正確，那次的地震並非伊茲米特地震最後一次的餘波。那次地震轉移的應力，提高了鄰近首都伊斯坦堡發生強震的可能性，我們預估今年發生地震的機率是1.9~4.2%，未來30年為62%，但若假設地震是隨機發生的，機率就只有20%（參見左頁〈機率法則〉）。

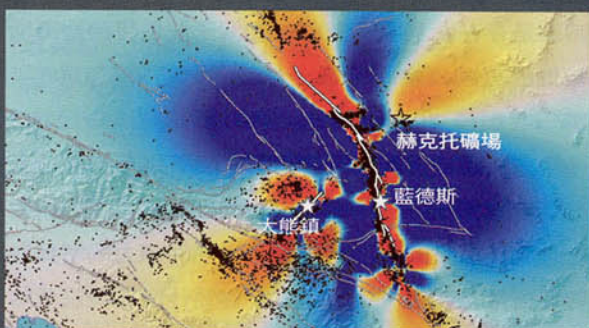
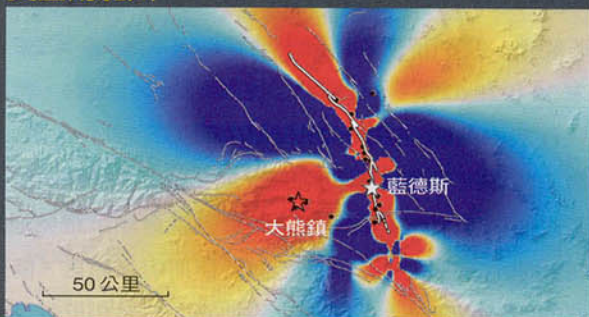
應力誘發假說在陰鬱與厄運的邊緣提供了些許安慰。當某些地區對地震提高警戒時，災害就會無可避免地降臨在其他地區。在土耳其，相對於伊斯坦堡而言，降低警戒的區域剛好是人口較稀少的地區，但是相反的情況有時還是存在，其中最戲劇化的例子便是目前地震活動度較低的美國舊金山灣區。舊金山灣區曾在1906年經歷了一次規模7.9的大地震，現在的居住人口已達500萬。我在美國地質調查所的同事哈瑞斯和辛普森於1998年分析的結果顯示，1906年地震的陰影區座落在灣區聖安地列斯斷層的幾處平行海濱，然而應力的增長在南方與北方較為明顯。這便可以解釋為什麼在灣區危險地震的發生度與1906年之前的75年相比，降低了一個數量級。由計算結果得知，當應力在斷層區重新累積時，灣區的地震活動會慢慢從陰影區中浮現；1989年洛馬普雷塔（Loma Prieta）地震造成的高速公路坍塌與其他破壞，可能是這地牛復甦的前兆。

史坦是一位地球物理學家、美國地質調查所在加州門洛帕克地震災害小組的一員。他在1980年於史丹佛大學取得博士學位，1981年加入美國地質調查所，並同時在哥倫比亞大學擔任博士後研究員。史坦的研究經費來自一些政府機構，像是美國國外災害救助處，以及私人企業，如歐洲保險公司「瑞士再保公司」，讓史坦能發揮所長，增進科學家評估地震災害的能力。在這篇文章裡所概述的研究工作，為史坦贏得了2000年美國地質調查所的舒梅克傑出成就獎，也在2001年美國地球物理聯合會年度會議裡的地球物理新領域講座中發表這項研究結果。史坦曾數次出現在電視螢光幕上，包括2001年在學習頻道播出的「土耳其大地震」節目。

## 地震群集

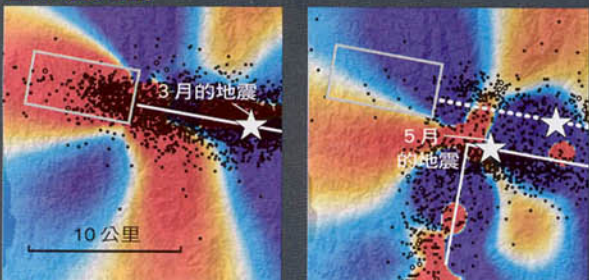
大地震（實心白星）之後應力驟增的地區（紅色），無論規模是大（空心黑星）是小（黑點），都容易成為後續地震發生的地點。相反地，地震也會發生在應力驟降的區域（藍色），而與鄰近斷層的地點無關。

### 美國南加州



1992年，南加州藍德斯附近發生規模7.3的地震，提高了其西南方地區發生地震的可能性，三個小時後，大熊鎮果然就發生了規模6.5的地震（上圖）。藍德斯和大熊鎮所釋放的應力加起來，剛好可以說明接下來七年發生的頻繁地震，1999年赫克托礦場規模7.1的地震終於為這一連串地震劃下休止符（下圖）。

### 日本鹿兒島



雙生地震會使同一地區地震發生的頻率上下震盪。1997年3月，一起規模6.5的地震增強了破裂斷層西側的應力和地震活動（左圖），48天後，另一起規模6.3的地震發生在其南方三公里處，應力與地震活動也跟著緩和下來（右圖）。

### 應力增長區，地震機率大

土耳其和南加州地震的檢驗結果支持了我們的斷言，即使是微弱的應力變化都可能產生重大的效應，不論是平安無事或災難。但儘管我們得到再多例證支持這個想法，仍有個很難解釋的關鍵點：在我們檢驗的地震中約有四分之一發生在應力減弱的區域。對其他較多疑的同事而言，要辯證陰影區不該發生地震這個論點是很容易的，因為主震多少會釋放一些應力，並順著破裂傳送至遠端。現在我們有了一個答案：地震活動不會到了陰影區就完全停止，也不會一到應力誘發區就完全打開，而是在某一地區的地震活動率（單位時間的地震次數）與之前相較，會在陰影區下降，或在應力誘發區提升。

我們把這應力誘發的延伸解釋歸功於狄特瑞奇在1994年提出的理論，這理論被稱為「速率／狀態摩擦力」（rate/state friction），揚棄了大家熟悉的摩擦力觀念，亦即把它看做一個只能在兩個值中間變化的特性——當物體不動時，摩擦力大，當物體滑動時，摩擦力小。相反地，當移動速率沿著斷層而改變，以及運動史（即狀態）逐步形成時，斷層可能變得更黏或更滑。這些結論來自狄特瑞奇團隊所做的實驗，他們在國民車大小的花崗岩塊鋸開成迷你斷層，誘發迷你地震。

將摩擦力當變數而不是固定的值來計算地震行為時，我們可以清楚發現，大森定律的基本原理就不只適用於餘震，而是所有的地震。大森定律預測地震活動率一開始會先增加，然後隨著時間遞減，這可解釋為何一個地區的地震活動率不會因為應力的增長而一直保持高張狀態，但這只說對了一半。狄特瑞奇的理論告訴我們一個大森定律完全忽略的地震活動特性：在一個主震釋放出應力的區域，地震活動率會驟然下降，但會以可預測的方式慢慢回復到地震前的狀態。地震的時間點似乎難以捉摸，但速率／狀態摩擦力讓我們能首次預測地震活動率如何隨時間升高或下降；單獨計算庫倫應力，我們可以找出新地震發生的粗略區位，但卻無法預知時間點。

我們同時得出「應力誘發地震的地點和時間」的想法，在去年初一項全球性的研究獲得進一步證實。帕森斯思忖了過去25年內在全世界發生的超過100起規模大於或等於7的地震，分析每一樁地震事件250公里範圍內規模5的後續地震。在超過2000筆資料中，有61%



發生在前次地震導致應力增長的區域，即使增長的幅度有限。只有少數地震的發生地點接近主震，可視為餘震。而這些地震的發生率隨著時間降低，與利用速率／狀態摩擦力與大森定律預測的地震發生率相一致。

現在我們把速率／狀態摩擦力的概念加入地震分析中，並開始揭露更多地震相互作用的複雜例子，單用庫侖應力分析無法闡明。但目前為止我們只解釋了比較簡單的情況，例如發生在南加州和土耳其的大地震，兩者皆刺激了其他地區的地震，同時另一些地區的地震活動趨緩。我們知道，要解釋應力誘發假說，若能舉出在同一地點引發小規模連續地震，其地震頻率時高時低（就像觸控電燈明滅的開關）的例證，將更令人信服。

遠田晉次與我發現了此現象的一個引人注目的例子，姑且稱之為觸發地震（*toggling seismicity*）。去年初，我們開始分析發生在1997年日本鹿兒島的兩起規模6.5的奇特地震，就在3月的第一個地震發生沒多久，又一起地震在斷層破裂帶西端的遠處、一個25平方公里大的區域驟然爆發。當我們計算第一個地震把應力轉移到哪裡時，發現此地震就落在預測的地震活躍區內，同時我們還發現該區域地震活動率立刻開始降低，與速率／狀態摩擦力所預估的結果相同。然而，僅七個星期後，又一起地震於南方三公里處發生，使原來地震活躍的區域，頓時減緩了85%。在這個例子裡，第一起地震的誘發區已經落在第二起地震的陰影區中；換句話說，第一起地震促使地震再度活躍，第二起地震卻使地震和緩下來。

偷聽地震間的對話後，如無意外，我們相信地震活動是會高度互相影響的。儘管應力轉移之外的現象可能影響這些相互作用，我和同事依然相信有足夠證據可徹底

檢驗傳統的地震預測機率。估計應力的微幅增長或減弱，來不斷修正危險地震的機率預測，這些新的預估值將可幫助政府、保險業和大部份民眾更精確地評估他們在地震中面臨的危機。因前車之鑑，傳統的對策已做了某種程度的防範，某些城市或地區會優先為大樓加強防固與執行防範措施，然而我們的分析顯示，若把應力誘發列入考慮，列入高度警戒名單的前幾名斷層可能會不同，比單用傳統方法更為精確；同樣的道理，以傳統方法判定的危險斷層，事實上可能根本沒那麼危險。

值得警惕的是，任何一種地震預測方法都很難證明其正確性，也幾乎不可能證明它是錯的。不管我們考慮的因素是什麼，「機率」在是否有大地震發生這個疑問中扮演了極重要的角色，就像某種特別的天氣型態會不會造成暴風雨的問題一樣。相較於地震學家，氣象學家的優勢在於他們能獲得上百萬的重要數據，來幫助他們改良天氣預測，畢竟天氣型態比地底下的應力來得容易測量，而暴風雨的發生也比地震頻繁得多。

儘管耗時費力，改善地震預測仍得依循相同的道路，這就是為什麼我們的研究小組在地震極有可能發生的城市如伊斯坦堡、藍德斯、舊金山和日本神戶附近，為預測大地震建立勘測藍圖而努力。我們也準備好為洛杉磯和東京預估地震活動，因為一個大地震就足以在這兩個城市造成上兆美元的損失。美國阿拉斯加的迪納利斷層在去年秋天發生了兩次強震，分別是在10月23日的規模6.7和11月3日的規模7.9地震，這顯然是另一連串的應力誘發地震。根據我們的計算，第一起地震在10天內提高地震再度發生的可能性高達100倍。目前我們正藉著預測較小規模、不具威脅的地震，來測試我們的理論，這些小地震不僅量多，也較容易預測。

最後，任何機率預測可保護民眾安全與財產到什麼程度，仍是未知數，但科學家有上百種理由繼續追逐這個夢想，因全世界有幾億人口居住或工作在最危險的活斷層帶上。一旦意識到這樣的危機，應力誘發或是其他有潛力提高災害地震機率預測的現象，都不該被忽略。

（本文出自 SA 2003.01）

SA

王季蘭 中央大學應用地質研究所碩士

陳于高 台灣大學地質科學系副教授

馬國鳳 中央大學地球科學系暨地球物理研究所教授兼系主任

## 延伸閱讀

1. **Earthquakes Cannot Be Predicted.** Robert J. Geller, David D. Jackson, Yan Y. Kagan and Francesco Mulargia in *Science*, Vol. 275, page 1616; March 14, 1997. <http://scec.ess.ucla.edu/~ykagan/perspective.html>
2. **Heightened Odds of Large Earthquakes Near Istanbul: An Interaction-Based Probability Calculation.** Tom Parsons, Shinji Toda, Ross S. Stein, Aykut Barka and James H. Dieterich in *Science*, Vol. 288, pages 661–665, April 28, 2000.
3. 欲觀看地震的模擬並下載 Coulomb 2.2 軟體，請瀏覽以下網址：  
<http://quake.usgs.gov/~ross>

◎華人觀點◎

# 集集大地震 誘發哪些斷層？

撰文／馬國鳳

台灣活動斷層分佈密集，飽受震災威脅。

中央大學地球科學系主任馬國鳳專程負笈美國，與美國地質調查所合作，得出集集大地震及其餘震可能誘發的行為，並探討地震預測之可能性。——編輯部

**地**震預測一直是眾人對地震學家的期許。但是在數十年的努力中，科學家深感地震的發生是難以捉摸的，於是漸漸放棄了地震預測的念頭，轉而在地震減災的方向上努力，發展了及時地震定位、及時振動評估等。台灣這一方面的研究，在921集集大地震時發揮了功能，而且深受世界地震學家的認同。

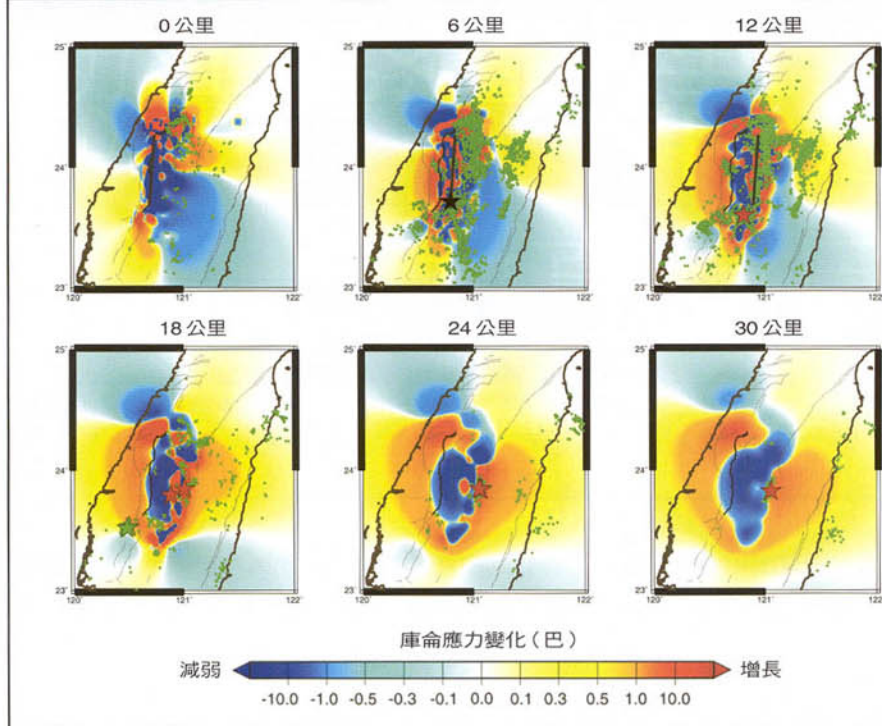
在發展及時地震研究和防震減災的同時，另一群地震學家仍未放棄對地震預測的期望。在若干的文獻及報導中，常有與地震預測現象相關的論述，但是有些現象常常無法以科學方法來佐證，而且這些現象在各地震發生時並無強烈相關性，使得在地震預測的發展過程中，添加許多變數，而無一相關的準則做為依據。

1992年，這樣的困境在美國及其他世界地震學家的研究發展之下，有了新的突破。如〈預測地震〉文中所述，地震學家發現，大地震間的發生有可能是相關的，它們彼此間互相聯繫傳遞，尤其是地震發生時，應力的轉移將可能導致其他區域加重應力的聚集而釋放能量，造成另一地震。其成因，除了

本身板塊運動的推擠造成應力累積而釋放能量外，由地震發生後轉移的應力，亦會加速或降低另一地區產生地震的機率。針對美國加州、日本及土耳其近年來大地震的研究分析，似乎可明顯反映上述現象。土耳其在1999年8月伊茲米特大地震後，地震學家巴卡進而評估由此地震所轉移的應力，將有可能使其東方區域加重應力累積，而引發另一地震，果然在同年11月，另一場大地震在預期區域內發生。

有鑒於此，我們當然好奇：台灣地區的地震，是否亦有上述的現象呢？台灣地區活斷層分佈密集，而與加州、日本及土耳其不同的地方是，由於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的擠壓，使得台灣的斷層活動為一逆斷層構造，即岩盤沿著斷層線，在擠壓狀態下，斷層一邊往上逆衝的型態。因此，集集大地震時，我們可以清楚看到車籠埔斷層沿線，斷層右邊明顯抬升了2~9公尺。這種逆斷層型態的地震，所造成的應力轉移較前述的加州及日本區域走向斷層複雜，因為垂直走向斷層因大地震發生所造成的應力轉移，並不會隨深度而改變，但以台灣的

## 應力隨深度變化



台灣特有的低角度逆衝斷層所造成的應力轉移，會隨著深度而改變。以集集大地震為例，左圖顯示出其在不同深度所造成的庫侖應力變化。其中，藍色區域表示因此地震造成應力釋放的區域，而黃至橘紅區域表示庫侖應力增加之區域，應力改變大小以顏色尺度表示。

其中在各相關深度上下三公里的餘震（主震後六個月內），以綠點表示，其已經過重新地震定位處理。集集大地震發生後一週內的六個規模大於6.0的餘震，以紅色星形表示。一個月後在嘉義地區發生兩起規模6.0以上的地震，則以綠色星形表示。集集大地震之震源深度為八公里，在此以黑色星號表現在深度六公里的圖中。圖中台灣之活斷層以細線表示，中黑線為集集大地震造成地表破裂的車籠埔斷層，粗黑線為車籠埔斷層在不同深度的投影。

低角度（ $30^\circ$  向東）逆衝斷層所造成的應力轉移，則會隨著深度而改變。因此，欲了解921集集大地震造成的應力轉移及其可能誘發後續地震的關係，須以三維的尺度來看。

### 大型餘震位置有可能預測

我的博士班學生詹忠翰及本人在與美國地質調查所的史坦（Ross Stein）討論後，利用其發展的Coulomb 2.2.2軟體，針對我與其他學者得出的集集大地震斷層面上的錯動量分佈，分析了其隨不同深度所造成的庫侖應力變化（如上圖所示）。其中藍色區域表示因此地震造成應力釋放的區域，而黃至橘紅區域表示庫侖應力增加之區域。其中各相關深度的餘震（主震後六個月內），經重新地震定位處理後，亦同時表現在圖中。集集大地震發生後一週內，又陸續發生了六起規模大於6.0的餘震，並於一個月後在嘉義地區發生兩起規模6.0的以上地震，其位置及深度亦一併標示。

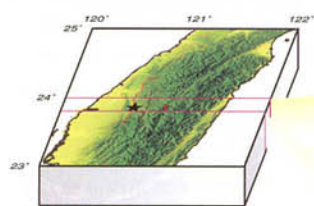
圖中清楚表現出在集集大地震後造成的應力轉移，隨深度及區域有明顯的變化。沿著車籠埔斷層帶，並無明

顯的餘震分佈，此現象與一般認為「餘震多位於主斷層破裂面上」有明顯的衝突。但若以應力轉移的觀點來看，此現象是可清楚理解的，因為集集大地震已釋放出沿車籠埔的應力達數十巴，形成應力陰影區，因此無餘震發生。反觀，沿斷層較遠處的東方、西方及南方，其應力明顯增加，因此餘震大都發生於這些區域。若我們針對六起規模大於6.0的餘震做觀察，似乎它們大都發生於庫侖應力增加之區域，而同年10月22日兩起規模大於6.0的嘉義地震，其震源位置亦發生於庫侖應力增加的區域（如上圖深度18公里之圖示）。

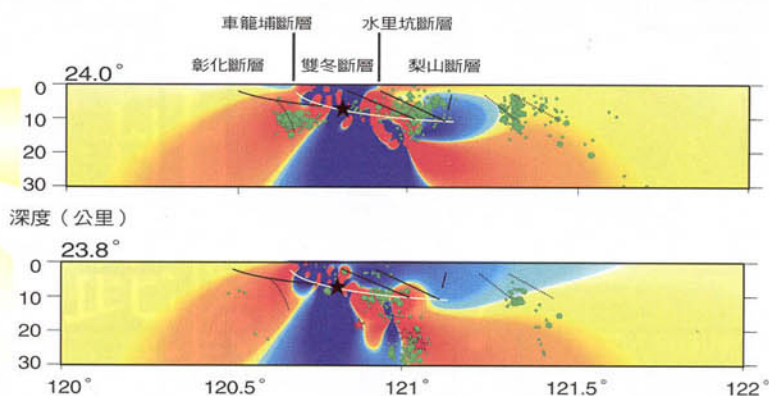
有趣的是，這些大餘震及10月的兩起嘉義地震，大都發生於應力轉移增加及減少的邊界。若與主震發生時斷層面的錯動量分佈比較，此六起大餘震發生的位置，在主震發生時並無明顯錯動，暗示此區域在主震時並無釋放任何能量。因此，此六起大型餘震的發生可能暗示，其本身的應力累積在主震發生時已達某臨界狀態，而主震發生後所轉移而來的應力，誘發了這些大餘震。

此現象似乎暗示：大型餘震的位置可能是可預測的。在中央氣象局一分鐘地震定位的前提下，快速得出斷層

## 應力隨緯度而異



庫侖應力變化沿緯度 23.8° 及 24.0° 的剖面，應力改變的大小以顏色尺度表示。其剖面位置標示於台灣地形圖中。集集大地震之震央及六起規模大於 6.0 的大型餘震分別以黑色及紅色星號表示。主震後六個月內之餘震，以綠點表示，其已經過重新地震定位處理。沿剖面的活斷層分別標示於剖面圖中。



沿線的錯動量分佈，進而得出其伴隨的庫侖應力變化，我們可以針對大型餘震發生的可能位置做評估，以降低大地震後另一大型餘震再加諸的災害。

### 雙冬、水里坑斷層已遭誘發

另外，我們針對集集大地震斷層沿線做庫侖應力變化剖面，以緯度 23.8° 以及 24.0° 的剖面為例（如上圖）。在 23.8° 的剖面上明顯表示，規模大於 6.0 的大型餘震（紅色星號）位於庫侖應力增加之區域，應力釋放區域幾乎沒有餘震發生。而且值得注意的地方是位於與車籠埔斷層平行的斷層帶，如其附近的雙冬及水里坑斷層，在 24.0° 的剖面上，有集集的餘震分佈，顯示此兩斷層在集集大地震後有被誘發而活動的特性。我們要特別留意，車籠埔斷層的前緣有另一個逆斷層（彰化斷層），庫侖應力變化計算顯示，在此斷層位置深處有明顯的應力增加，但除了斷層底部有些餘震分佈外，其深部並無餘震分佈，表示此應力增加於地殼內，尚未超越其地殼本身摩擦力，因此並無任何地震發生。這也暗示，此地應力包括由板塊擠壓所造成的應力，再加上主震所轉移而來的應力，可能加速應力的累積。

以目前的研究成果，尚無法準確判斷何時會發生地震及其發生的準確位置，因為發震的物理機制仍未被清楚地明瞭，因而地質構造、斷層力學與斷層上的物理、化學行為，仍是掌控地震發生機制的重要因子。上述以地

震應力轉移的研究結果來判斷未來可能產生大地震的區域，尚屬直觀加上統計分析的結果，若再加入地震發生的物理力學及摩擦行為做更深入的分析，才能真正落實地震預測的目標。

但在地震發震的物理機制其斷層行為仍無法明瞭時，以加州、日本及土耳其的經驗，由應力轉移的計算似乎可評估其餘震及另一較大地震發生位置的可能性。而針對集集大地震分析，雖然我們尚未加入時間項的考慮，結果亦顯示餘震分佈與應力轉移有明確的相關性。目前研究成果認為，控制地震發生的主要機制為板塊運動的應力累積，當其壓力累積超越地殼所能承受的程度時，將釋放能量產生地震。而其產生地震後的應力轉移，會加諸於其他區域，使得鄰近區域的應力相對增加或減少。應力增加的區域，相對增加了其發生另一地震的機率，而應力減少的區域則相對降低了地震的風險。

由大地應力加諸於地殼內的應力，及其何時釋放造成地震的過程，目前仍無法明確控制，但大地震發生後，其所造成的應力轉移，可以被明確地計算出來，以評估餘震的可能分佈及其他區域的相對地震風險。地震預測的路仍然相當漫長，但在地震及地質學家不灰心的努力下，我們對地震的發生機制及行為加以抽絲剝繭，期待為地震預測領域打開另一道窗。

SA

馬國鳳 美國加州理工學院地球與行星科學博士，中央大學地球科學系暨地球物理研究所教授兼系主任。

影像來源：馬國鳳