

## 細胞自動機的介紹及其在土石流災害模擬的初步應用

陳建元<sup>[1]</sup> 游繁結<sup>[2]</sup> 羅俊雄<sup>[3]</sup> 陳天健<sup>[4]</sup> 李文正<sup>[5]</sup>

**摘 要** 本文介紹細胞自動機的發展歷史、基本組成單元與理論架構及其種類，及其目前發展應用中的研究範疇。並藉由南投縣信義鄉出水溪土石流災害複雜現象的介紹與細胞自動機的災害境況模擬，顯示細胞自動機可延伸應用的領域。本文內容除強調細胞自動機在複雜自然現象的模擬能力外，並建議細胞自動機在應用上可與其他相關領域如地理資訊系統相結合，以擴展其應用性。此外，利用細胞自動機研究其他複雜自然現象，可經由文中介紹的基本建構步驟，建立欲探討現象的細胞自動機模擬模式。

**關鍵詞：**細胞自動機、土石流、天然災害、地理資訊系統。

## An Introduction of Cellular Automata Theory and Its Preliminary Application on Debris Flow Hazard Simulation

Chien-Yuan Chen<sup>[1]</sup> Fan-Chieh Yu<sup>[2]</sup> Chin-Hsiung Loh<sup>[3]</sup> Tien-Chien Chen<sup>[4]</sup> Wen-Cheng Lee<sup>[5]</sup>

**ABSTRACT** An introduction of cellular automata for its developing history, theory, and applicability fields were presented in the paper. A preliminary simulation of Chushui stream debris flow hazard in Nantou county, Taiwan, by cellular automata methodology was presented for revealing the capacity of cellular automata on simulation of complex natural phenomena. The framework to set up a cellular automata simulation was suggested for a beginner to study natural phenomena. The combination of cellular automata with available fields, for example, geography information system, for further applications was suggested.

**Key Words:** cellular automata, debris flow, natural hazards, GIS.

### 一、前 言

細胞自動機(Cellular Automata, 簡稱 CA)的發展歷史雖僅約 60 年，然在歐洲如義大利、法國等國家在 1990 年代末期已普遍應用於複雜自然現象的模

擬。其模擬發展的基礎係將微觀的複雜自然現象轉為簡單的行為規則，並藉由這些簡單的修正規則來模擬整體的自然現象。由於台灣對此模式的理論發展及可應用領域仍處於認識階段，因此特別介紹其基本理論架構及在土石流災害上的模擬應用。期能提供在天然

- 
- [1] 國家災害防救科技中心副研究員  
Associate Research Fellow, National Science & Technology Center for Disaster Reduction, Taipei 106, Taiwan, R.O.C.  
(Corresponding Author)  
E-mail:chienyu@ncdr.nat.gov.tw
- [2] 國立中興大學水土保持學系教授  
Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.
- [3] 國立台灣大學土木工程學系教授  
Professor, Department of Civil Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan, R.O.C.
- [4] 國立屏東科技大學水土保持學系助理教授  
Assistant Professor, Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science & Technology, Pingtung 912, Taiwan, R.O.C.
- [5] 國家災害防救科技中心副研究員  
Associate Research Fellow, National Science & Technology Center for Disaster Reduction, Taipei 106, Taiwan, R.O.C.

災害模擬上的另類思考模式與方法。

## 二、細胞自動機的發展歷史

細胞自動機(或稱元胞自動機等，Cellular Automata)，係由計算機之父 vane Neumann 與 Ulam 於 1948 年首先建立一具 5 個鄰域、29 個狀態，能自我複製的初等細胞自動機(Elementary CA)。60 年代當 Conway 提出生命遊戲(the Game of Life)(Gardner, 1970)才引起物理、數學及計算機等領域專家等廣泛興趣。80 年代 Wolfram 則從動力學領域對細胞自動機進行理論上的探討(Wolfram, 1986)。而在 90 年代，不同的修正細胞自動機則被提出並應用於不同領域的現象模擬，並在 Wolfram(2002) 的新書“A New Kind of Science”發表後，掀起了研究與應用熱潮。

## 三、細胞自動機的基本組成單元

細胞自動機的初始發展理念源於“以最簡單的邏輯架構模擬複雜的自然現象”(Hasslacher, 1987)。基於上述理論，細胞自動機不具明確的方程形式，而是包含一系列模型構造規則，凡滿足這些規則的模型皆可稱之為細胞自動機模型(周成虎、孫戰利，2001)。

細胞自動機在格子狀網格(L)空間下，以有限的細胞狀態集(Q)、有限的鄰域數目(N)、及局部的轉換函數(a local transition function)  $\delta$  等基本單元組成下，可以式(1)表示之(Worsch, 1997)：

$$A = (L_d, Q, N, \delta) \tag{1}$$

其中： $d$  = 維度數

$$N = (s_1, s_2, \dots, s_n; n = \text{鄰域數目})$$

細胞自動機的細胞(cell)係在時間、空間皆離散，在一定規則變化下具有有限的離散狀態。其基本組成單元包括網格(lattice)，細胞狀態(cell states)，鄰域(neighbor)，轉換規則(transition rules)及時間(time)等五大部分，茲分別說明如下：

### 1. 網格(lattice)

網格的組成包括網格的數目及大小、網格結構(structure)及其邊界條件(boundary conditions)。網格的數目視電腦記憶體的大小容量而定。網格大小以能代表所模擬現象為原則。網格的結構常用的有規則的方形、六角形及三角形等，如圖 1 所示。細胞自動機常用的邊界條件包括用來模擬無限空間的週期型(periodic boundary)，固定型(fixed)，絕緣型

(adiabatic)及反射型(reflection)，如圖 2 所示。

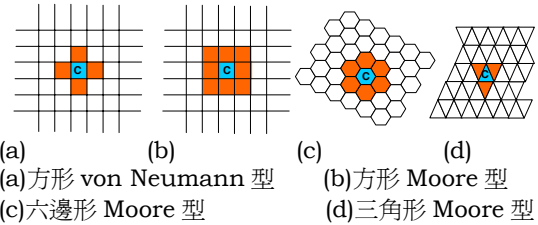


圖 1 常用 CA 網格形狀及鄰域定義(摘自 Talia, 1999)

Fig.1 Types of CA lattice and their neighborhood (after Talia, 1999)

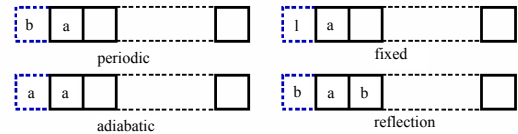


圖 2 CA 邊界條件形式(摘自 Leong, 2002)

Fig.2 Types of CA boundary conditions (after Leong, 2002)

### 2. 細胞狀態(cell states)

細胞狀態顯示細胞的屬性(attribute)，在細胞自動機的模擬中，細胞的狀態種類可為任意的有限數目。在 von Neumann 的細胞自動機中，細胞則有 29 種狀態。

### 3. 鄰域(neighborhood)

鄰域細胞指受核心(central)細胞影響之鄰近細胞數目。鄰域的大小可以用半徑來表示，半徑大小及鄰域種類的選擇視模擬的現象而定，常用細胞自動機的鄰域種類包括：

- (1) von Neumann 型(圖 1(a))
- (2) Moore 型(圖 1(b、c、d)，半徑 = 1)
- (3) 擴展 Moore 型(半徑 > 1)
- (4) Margolus 型(圖 3)
- (5) 其他特殊形式

在 von Neumann 型的鄰域中，核心細胞的上下左右四個細胞為其鄰域細胞。Moore 型鄰域中，核心細胞是以半徑為 1 的 8 個細胞為其鄰域細胞，半徑大於 1 者則稱為擴展的 Moore 型鄰域。Margolus 型鄰域其鄰域細胞則呈 2x2 的區塊型，如圖 3 所示。

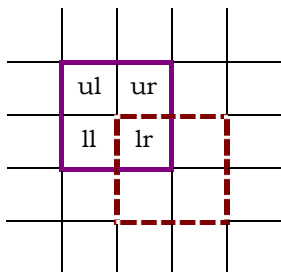


圖 3 Margolus 型鄰域(摘自 Leong, 2002)

Fig.3 Definition of Margolus neighborhood (after Leong, 2002)

### 4. 轉換規則(transition rules)

細胞自動機的細胞狀態係經由轉換規則(或函數)而轉換至另一狀態。轉換規則的功用係以建立規則的模擬過程取代傳統模擬中的數學函數(Batty, 1997)。轉換規則的建立一般由微觀(micro)的性質與現象建立局部(local)的狀態轉換規則,亦可從巨觀(macro)的行為建立細胞狀態的整體(global)轉換規則。最後則需修正局部與整體轉換規則所造成模擬行為的差異。在思考邏輯上,轉換規則的建立可分直接型(forward problems),即從局部(local)的現象考慮到整體(global)的行為;以及從整體向局部的逆向思考型(inverse problems)。圖 4 為一維細胞自動機的轉換規則建立案例,轉換規則在程式語法上可由 if-then 的條件模式建立。

### 5. 時間(time)

在 CA 的模擬分析中,時間是離散成等間隔或不等間隔時段。在細胞狀態(cell states)的更新上則可同時(步)更新(synchronously)或在不同的時段更新(asynchronous)。需注意的是 CA 的模擬時間並非等同於實際的模擬時間,因此在模擬前須先建立數值模擬時間與實際時間之對應關係。

## 四、細胞自動機的種類

細胞自動機的種類可分為標準細胞自動機(standard or elementary CA)及廣義或修正的細胞自動機(generalized or modified CA)。標準細胞自動機係由前述 5 個基本單元(採局部轉換規則, local rules)所組成。廣義細胞自動機如使用 Margolus 型鄰域的 Partitioning CA, 非同步更新細胞狀態的 Asynchronous CA, 轉換規則採機率模式的

Probabilistic CA, 及網格、鄰域定義及局部轉換函數不均質的 Inhomogeneous CA 等。

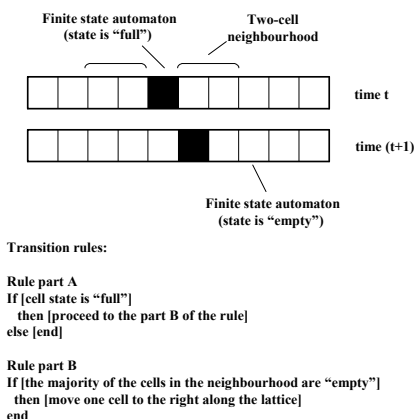


圖 4 一維 CA 轉換規則建立案例(摘自 Torrents, 2000)

Fig.4 Example of 1-D transition rules (after Torrents, 2000)

有限自動機(finite automata, FA)是狀態集有限,輸入符號及轉換函數有限的自動機,以與無限自動機(infinite automata)區別。在數學定義上,有限自動機可以式(2)的五個集合元素表示之(周成虎、孫戰利, 2001):

$$FA = \{Q, S, \delta, q_0, F\} \tag{2}$$

其中,  $Q$  是有限狀態集合,  $S$  是輸入符號的有限集合,  $\delta$  是狀態轉換函數從  $Q \times S$  到  $Q$  的映射,  $q_0$  是初始狀態,  $F$  是終止狀態集。若  $\delta$  是一對一映射,則稱為為定性有限自動機(determine finite automata, DFA),若  $\delta$  是多值映射,則稱為非定性有限自動機(non-determine finite automata, NDFA)。

Wolfram(1986, 2001)則依細胞自動機的動力行為將細胞自動機分為四大類:

- (1) 平穩型(Homogeneous, class I),
- (2) 週期型(Simple structures, possibly periodic, class II),
- (3) 混沌型(Chaotic, class III),
- (4) 複雜型(Complex, class IV).

平穩型 CA 其細胞演化後具穩定性質,週期型則呈現週期性循環現象,混沌及複雜型 CA 其細胞狀態演化後則仍呈無規則的混沌或複雜現象。

## 五、細胞自動機的應用範疇

細胞自動機的發展源於模擬及預測複雜的自然現象。早期主要應用領域包括計算機圖形學、生物學、複雜的物理、化學、地理、經濟社會等的現象模擬。近年來細胞自動機已逐漸進入理論的延伸發展及應用階段，並已嘗試與其他相關領域結合，結合應用領域包括：

- (1) 地理資訊系統(GIS)
- (2) 類神經網路(Neural Network)
- (3) 模糊理論(Fuzzy)
- (4) 人工生命(Artificial Life, 如基因演算 (Genetic Algorithms))

細胞自動機延伸應用的案例與領域則包括：

- (1) 傳染病疫情控制模擬分析(Fu, 2003)
- (2) 土地利用模擬(Lay, 2000)
- (3) 生態模擬(Lett *et al.*, 1999)
- (4) 土壤沖蝕模擬(D'Ambrosio *et al.*, 2001; Crave & Davy, 2001; Nunes *et al.*, 2003)
- (5) 污染源土壤入滲過程模擬(Spezzano & Talia, 1998)
- (6) 森林火災蔓延模擬(Rothermel, 1972; 1983)
- (7) 城市發展擴張模擬(Batty *et al.*, 1990)
- (8) 結晶過程模擬(Basanta, 2003)
- (9) 流體流動模擬(Raed, 2003)

## 六、細胞自動機在土石流災害模擬上的應用

由於目前學術界對坡地崩塌後之流動土石影響範圍尚無有效的模擬模式，CA 的特性恰提供此複雜災害現象的另一模擬思考方法。本節主要介紹義大利 U. of Calabria 發展的 CA 模擬模式 *SCIDDICA-S<sub>3-hex</sub>* (D'Ambrosio *et al.*, 2003)。此模式從微觀的角度模擬坡地崩塌後土石流動至堆積的過程。此有限自動機 (finite automata) 模擬模式的精神在於初始土石狀態設定後，土石在離散的時間下經由狀態轉換函數同步的改變土石流動的狀態。由於此有限自動機僅模擬局部範圍(或考慮分析範圍)內的細胞轉換狀態，邊界條件並不考慮，因此模擬的範圍應大於可能的影響範圍。

*SCIDDICA-S<sub>3-hex</sub>* 模擬模式的理論可以方程式(3)表示之：

$$SCIDDICA\ S_{3-hex} = \langle R, X, Q, P, \sigma \rangle \quad (3)$$

其中

$R$  = 細胞網格空間定義

$X$  = 鄰域的定義

$Q$  = 細胞狀態集合

$P$  = 整體參數集合(global (physical and empirical) parameters)

$\sigma$  = 定性的(deterministic)細胞狀態轉換函數

在此分析模式中其網格空間的定義為：

$$R = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 \mid -l_x \leq x \leq l_x, -l_y \leq y \leq l_y\} \quad (4)$$

其中  $\mathbb{Z}$  = 整數

此網格為一六邊形(hexagonal)網格，鄰域的定義為 Moore 型，與核心細胞接觸的 6 個細胞為其鄰域細胞，可以式(5)及圖 5 表示之。

$$X = \{(0, 0), (1, 0), (0, 1), (0, -1), (-1, 0), (-1, 1), (1, -1)\} \quad (5)$$



圖 5 六角形細胞網格及鄰域定義(摘自 D'Ambrosio *et al.*, 2003)

Fig.5 Definition of hexagonal CA lattice and neighborhood (after D'Ambrosio *et al.*, 2003)

細胞狀態集的定義可以卡式乘積(Cartesian product)表示為：

$$Q = Q_a \times Q_{th} \times Q_e \times Q_d \times Q_o \quad (6)$$

其中

$Q_a$  = 細胞高程(岩盤高程加土層厚度)

$Q_{th}$  = 崩塌堆積土層厚度

$Q_e$  = 土石崩塌的能量

$Q_d$  = 可沖刷土層厚度

$Q_o$  = 土石由核心細胞向鄰域細胞流動

初始細胞狀態的定義為：

$$q = q_a \times q_{th} \times q_e \times q_d \times q_o \quad (7)$$

細胞狀態轉換規則的建立分整體參數(global parameters)及狀態轉換函數兩部分。整體參數考慮土壤凝聚力、摩擦角等因子的影響。所使用整體參數的定義如表 1 所示。

表 1 SCIDDICA-S<sub>3-hex</sub> 所使用整體參數 (摘自 D'Ambrosio *et al.*, 2003)

Table 1 Global parameters used in SCIDDICA-S<sub>3-hex</sub> (after D'Ambrosio *et al.*, 2003)

Parameters	Meaning
$P_a$	Apothem of the cell
$P_t$	Time correspondence of a CA step
$P_{adh}$	Adhesion (i.e. unmovable amount of landslide debris)
$P_f$	Height threshold (related to friction angle) for debris outflows
$P_r$	Relaxation rate for debris outflows
$P_{rl}$	Run-up loss (at each step), due to frictional effects
$P_{mt}$	Activation threshold for mobilisation of the soil cover
$P_{er}$	Parameter of progressive erosion of the soil cover

轉換規則依土石狀態分內部轉換 (internal transformation) 及局部互制 (local interaction), 並依土石流的發生過程分為四個狀態 (階段) (D'Ambrosio *et al.* 2003):

- (1) 土體不穩定狀態啟動臨界值 (mobilization triggering) 與其影響 (內部轉換,  $S_1$ )
- (2) 土石外流 (outflow) 階段 (局部互制,  $S_2$ )
- (3) 崩塌土層厚度更新及能量更新 (局部互制,  $S_3$ )
- (4) 能量損失 (run-up loss) (內部轉換,  $S_4$ )

發生運動臨界狀態與影響 ( $S_1$ ) 定義為:

$$S_1: Q_a \times Q_e \times Q_{th} \times Q_d \times p_{er} \times p_{mt} \rightarrow Q_a \times Q_e \times Q_{th} \times Q_d \quad (8)$$

土石流動 ( $S_2$ ) 的臨界狀態定義為:

$$S_2: Q_a^7 \times Q_{th} \times Q_e \times p_{adh} \times p_r \times p_f \rightarrow Q_e^6 \quad (9)$$

更新堆積土層厚度及能量 ( $S_3$ ) 的臨界狀態定義為:

$$S_3: (Q_{th} \times Q_e \times Q_e^6)^7 \rightarrow Q_{th} \times Q_e \quad (10)$$

能量損失狀態 ( $S_4$ ) 定義為:

$$S_4: Q_e \times Q_{th} \times p_{rl} \rightarrow Q_e \quad (11)$$

上式中  $S$  為狀態轉換函數, 上標 6 表示相鄰的 6 個鄰域細胞, 上標 7 表示狀態轉移中的細胞。土石的外流 (outflow) 係以最小化演算法 (minimization algorithm, Di Gregorio & Serra, 1999) 將可流動土層由中央細胞傳遞至相鄰細胞。最小化演算法將流動土石分為堆積不可移動部分 (unmovable),  $u(0)$ , 及繼續外流移動部分 (movable),  $m$ 。可移動土石量可以式(12)表示為:

$$m = \sum_{i=0}^6 q_o(0, i) \quad (12)$$

其中  $q_o(0, 0)$  為堆積不可移動的土石。

鄰域細胞在接受移動分配的土石後, 可以式(13)表示之:

$$c(i) = u(i) + q_o(0, i) \quad (i = 0, 1, \dots, 6) \quad (13)$$

若  $c_{min}$  為  $c(i)$  的最小值, 則外流的土石必須滿足

下式的最小值,

$$\sum_{i=0}^6 (c(i) - c_{min}) \quad (14)$$

藉由土石外流臨界高度 (height threshold for debris outflow) 的設定, 土石可具一定動能而能越過 (run-up) 一定高程的相鄰細胞。圖 6 所示為依上述所建立的轉換規則, 崩塌流動土層厚度由中央細胞向鄰域細胞越過堆積過程。

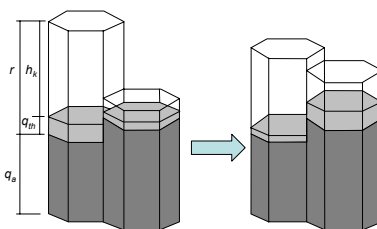


圖 6 細胞狀態轉換情形 (摘自 D'Ambrosio *et al.*, 2003)

Fig.6 Definition of cell state transformation (after D'Ambrosio *et al.*, 2003)

此模式模擬分析所需的資料圖層包括:

- (1) 數值地形高程: 災害發生前的地形高程。
- (2) 地形圖: 災害發生前的地形圖。
- (3) 崩塌影響範圍圖: 從主崩崖至堆積區整個崩塌地區的影響範圍邊界。
- (4) 土砂來源圖: 畫出引發土石流的土石來源崩塌區的面積。
- (5) 可沖刷土層厚度圖 (regolith map)。
- (6) 其他輔助圖檔: 如災後地形高程、航照立體對相片基本圖、地質圖等。

茲以 SCIDDICA S<sub>3-hex</sub> 細胞自動機模擬模式對賀伯颱風期間南投縣信義鄉出水溪崩塌引發土石流案例進行模擬分析。在此模擬模式中, 首需確定分析範圍以擷取範圍內災害發生前的數值高程, 由於本模式採有限自動機 (finite automata) 模式, 並未考慮邊界條件, 因此需確定災害影響區域位於分析的範圍內。

程式開始首需給定土砂來源的區域 (即主要發生崩

場區位)，並設定各崩塌區發生崩塌的順序。在崩塌順序的設定上，可假設土石流依上游源頭崩塌位置開始崩塌，並依土石流動至下游的位置引發其他主要或次要的崩塌。崩塌順序的控制可依數值運算的次數(steps)或預設一臨界線(threshold line)，當土石流動通過此臨界線時即觸發邊坡引起土石崩塌。圖 7 所示為出水溪賀伯颱風期間崩塌土石來源與臨界線位置的設定。圖中編號-1 者為主動崩塌區，並於數值模擬開始時即同時發生崩塌，其他則為次崩塌區，待土石通過臨界線時土石即發生崩塌而移動。由航照圖判讀的崩塌影響範圍(水保局提供)亦顯示於圖中。圖 8 為依等高線位置假設可沖刷最大土層厚度，在實際應用上則應以現地量測為主。當流動土層厚度小於  $1e-3$  公尺時即視為土石不再流動，程式即終止模擬。圖 9 為出水溪於賀伯颱風期間 SCIDDICA  $S_{3-hex}$  細胞自動機土石流災害模擬分析結果，與圖 7 之航照圖實際影響範圍判釋結果比較顯示，模擬結果在上游之崩塌影響範圍一致。在下游影響地區，由於模式尚未考慮水流流動性(rheology)及受地形高程誤差影響，模擬結果影響範圍差異較顯著。

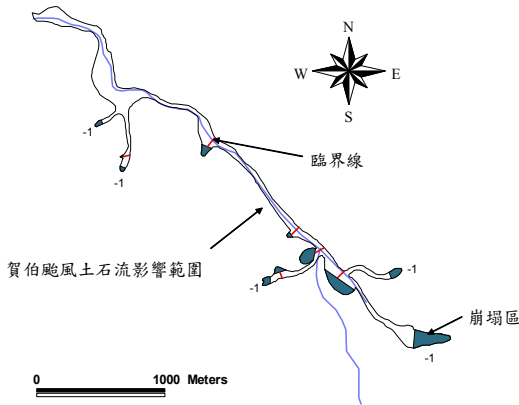


圖 7 出水溪崩塌土石來源位置圖與臨界線的位置  
**Fig.7 Positions of landslide scarps and threshold line to initiation landslide**

SCIDDICA 自動機模擬模式在坡地崩塌所引起的土石流(或曰坡地型土石流)模擬上能有效反應地形特性而得到良好影響範圍模擬。但在土石流溪流的影响範圍模擬上由於欠缺考慮土石的流變性質(rheology)，因此在溪床上的沖刷堆積區模擬上並不理想。此外此模式的模擬所需時間從數分鐘至數十分鐘不等，視所模擬的範圍大小而定。然參數的選定卻甚

耗時，目前已採基因演算法(genetic algorithm) 配合 16 台平行計算電腦(parallel machine)求取區域性的最佳化參數(D'Ambrosio et al. 2004)。

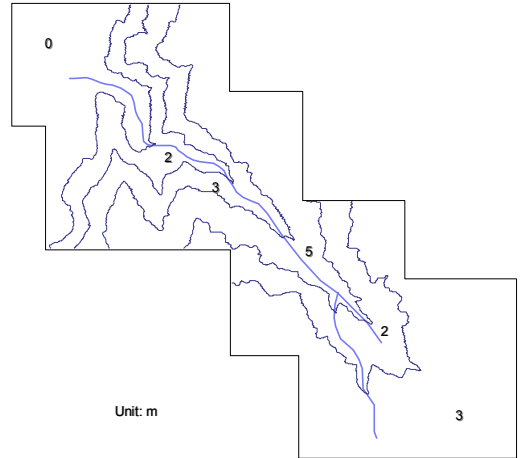


圖 8 出水溪地區假設最大可沖刷土層厚度  
**Fig.8 Maximum erodable regolith in Chushui watershed**

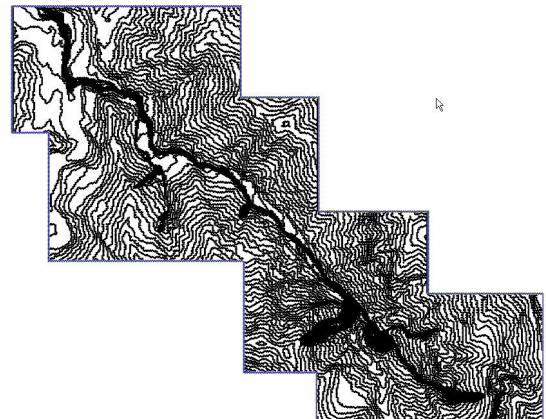


圖 9 SCIDDICA  $S_{3-hex}$  出水溪初步土石流模擬結果  
**Fig.9 Preliminary inundation area simulation in Chushui stream by SCIDDICA  $S_{3-hex}$**

## 七、細胞自動機模擬模式的建立

為自行建立 CA 模擬分析模式，首需瞭解 CA 的特點與其在應用上的限制。CA 模擬係針對於無正確或尚無法建立明確控制方程式的複雜現象。在 CA 的實際應用上，首需瞭解 CA 本質與模擬現象本質的差異，此外模擬時間間隔及其長短與所取得資料的時間限制

對模擬結果皆有影響。在獲得初步成果後，尚須考慮網格大小、結構，鄰域大小之影響及資料結構屬性之影響(賴進貴，2000)。在瞭解 CA 的特性與應用上限制後，細胞自動機模擬模式建立的步驟則包括：

1. 劃分分析空間為網格狀
2. 初始細胞狀態及可能細胞狀態集(set)的設定
3. 鄰域的定義
4. 轉換規則的建立
5. 細胞狀態演化結果與歷史資料的驗證(最佳參數的求取)
6. 模擬現象的預測

CA 在實際模擬的程式化上可採任何常用的語言如 C++，Fortran，VB，JAVA，Mathematica 及 GIS 內建語法(如 macro for ArcInfo，avenue for ArcView 等)。此外一些共享軟體如 Cell-DEVS，CAMEL(Cannataro *et al.*, 1995)，JCSim(Freiwald and Weimar, 2000)，SpaSim(Moreno *et al.*, 2003)，Cellang 等皆提供很好的 CA 模式架構與內建語法，可供使用者建立自己的 CA 模擬模式。

## 八、結 語

隨著細胞自動機理論的逐漸發展，CA 在複雜現象的模擬與研究應用也日趨廣泛。然在複雜現象的模擬上，除瞭解 CA 模式建立的步驟外，首需釐清所模擬現象的本質與 CA 本質的差異。對於複雜的災害現象如坡地崩塌及土石流等，由於欠缺完整的整體現象描述的方程式，將坡地崩塌的微觀互制現象轉為局部轉換規則的建立，可有效模擬可能的影響範圍。未來在與 GIS 的結合下，CA 的災害境況模擬與可能潛勢區的劃定對於災損的評估及災害的防治將有顯著的效益。此外 CA 為一研究發展中的模擬模式架構，使用者不應拘泥於 CA 的規則或模式中，應利用 CA 的特性與優點與現有的資源相結合，才能不受限於其模式框架中，而能真正發揮其特性與優點。

## 誌 謝

感謝義大利 U. of Calabria 授權予國家災害防救科技中心坡地組使用 SCIDDICA-S<sub>3hex</sub> 軟體，並感謝 Prof. Di Gregorio，Prof. Iovine，Prof. Spataro 及 Dr. Tonato 提供 SCIDDICA-S<sub>3hex</sub> 土石流模擬模式的教育訓練。此外並感謝國科會編號 NSC92-2811-Z-002-007 的補助讓本文得以順利完成。

## 參考文獻

1. 周成虎、孫戰利(2001)，「地球信息科學基叢書，地理元胞自動機研究」，科學出版社。
2. 賴進貴(2000)，「細胞自動機與地理資訊系統結合之初探研究」，中國地理學會會刊 28:109-126。
3. Basanta D., P. J. Bentley, M. A. Miodownik, and E. A. Holm (2003), "Evolving Cellular Automata to Grow Microstructures," In *Proc of 6th European Conference on Genetic Programming*: 14-16.
4. Batty M. (1997), "Cellular automata and urban form: A primer," *Journal of the American Planning Association*, 63(2): 266-274.
5. Batty M., Y. Xie, and Z. Sun (1999), "Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata," *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 205-233.
6. Cannataro M., S. Di Gregorio, R. Rongo, W. Spataro, G. Spezzano, and D. Talia (1995), "A parallel cellular automata environment on multicomputers for computational science," *Parallel Computing*, 21: 803-823.
7. Cell-DEVS (Cell based Discrete-Event Simulation): <http://www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/celldevs/homepage.html>.
8. Cellang <http://staff.vbi.vt.edu/dana/ca/cellular.shtml>.
9. Crave A. and P. Davy (2001), "A stochastic "precipiton" model for simulating erosion/sedimentation dynamics," *Copmputers and Geosciences*, 27: 815-827.
10. D'Ambrosio D., S. Di Gregorio, S. Gabriele and R., Gaudio (2001), "A cellular automata model for soil erosion by water," *Physical and Chemical of the Earth (B)*, 26(1): 33-39.
11. D'Ambrosio D., S. Di Gregorio, and G. Iovine (2003), "Simulating debris flow through a hexagonal cellular automata model: SCIDDICA S<sub>3-hex</sub>," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 545-559.
12. D'Ambrosio D., W. Spataro, and G. Iovine (2004), "Parallel genetic algorithms for optimising cellular automata models of natural complex phenomena: an application

- to debris-flows,” *Computers and Geosciences* (in press).
13. Di Gregorio S. and R. Serra (1999), “An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata,” *Future Generation Computer Systems*, 16:259-271.
  14. Freiwald U. and Weimar J. R. (2000), “JCASim – a Java system for simulating cellular automata.” *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata* (ACRI 2000), Springer Verlag, London: 47-54.
  15. Fu S. H. (2003), Modelling Epidemic Spread using Cellular Automata, University of Western Australia PhD thesis, <http://www.csse.uwa.edu.au/~scfu/papersdir/>.
  16. Gardner M. (1970), “Wheels, Life and Other Mathematical Amusements,” *Scientific American*, 223(4): 120-123.
  17. Hasslacher B. (1987), “Discrete Fluids,” *Los Alamos Science*, Special Issue 15: 175-200 and 211-217.
  18. Lay J.-G.. (2000), “A land use change study using cellular automata,” *Asian Conference on Remote Sensing*, ACRS.
  19. Leong B. (2002), A Dummies Guide: Cellular Automata and Self-Organized Criticality, Astrophysics Group Cavendish Laboratory: <http://www.mrao.cam.ac.uk/~cwbl2/celltalk.pdf>.
  20. Lett C., C. Silber and N. Barret (1999), “Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics,” *Ecological Modelling*, 121: 277-293.
  21. Moreno N., M. Ablan1, G. Tonella1 (2002), “SpaSim: A software to simulate cellular automata models,” *iEMSs - Online Proceedings*, 3: 348-353.
  22. Nunes J. P., J. Seixas, and G. Vieira. (2003), “MEFIDIS-A process-based hydrological and soil erosion model,” *Geophysical Research Abstracts*, 5, paper no. 12732.
  23. Raed B. (2003), Cellular Automata Methods in Fluid Flow. Decision Sciences and Engineering Systems Computational Intelligence Final Report, <http://raed.freewebsite.org/ca.pdf>.
  24. Rothermel R. (1972), “A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels,” *Technical Report USDA Forest Service Research paper INT-115*.
  25. Rothermel R. (1983), *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*, Gen. Tech. Rep. INT-143, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
  26. Spezzano G. and Talia, D. (1998), “Designing parallel models of soil contamination by the CARPET language,” *Future Generation Computer Systems*, 13: 291-302.
  27. Talia D. (1999), Parallel Cellular Environments to Enable Scientists to Solve Complex Problems: <http://www.cs.cf.ac.uk/euresco99/presentations/Talia.ppt>.
  28. Torrens P. M. (2000), *How cellular models of urban systems work I, Theory*, CASA Working Paper 28, University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.
  29. Wolfram S. (1986), *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific, Singapore.
  30. Wolfram S. (2002), *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc.
  31. Worsch T. (1997), Programming environments for cellular automata, <http://liinwww.ira.uka.de/~worsch>.

---

2004年10月4日 收稿

2004年11月22日 修正

2005年3月2日 接受

(本文開放討論至2006年3月31日)