# 基于元胞自动机的黄土坡面细沟侵蚀模型研究*

原立峰[1,2,5†]　吴淑芳[3,5]　刘星飞[1]　张青峰[4,5]　霍云云[3]

(1 南京邮电大学地理与生物信息学院,南京　210003)
(2 中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京　210008)
(3 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌　712100)
(4　西北农林科技大学资环学院,陕西杨凌　712100)
(5 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌　712100)

# STUDY ON LOESS HILLSLOPE RILL ERSION MODEL BASED ON CELLULAR AUTOMATA

Yuan Lifeng[1, 2, 5†]　Wu Shufang[3,5]　Liu Xingfei[1]　Zhang Qingfeng[4,5]　Huo Yunyun[3]

(1 *College of Geography & Biological Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing　210003, China*)
(2 *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing　210008, China*)
(3 *Water and Architecture College, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi　712100, China*)
(4 *College of Resources and Environment Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi　712100, China*)
(5 *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi　712100, China*)

**关键词**　黄土坡面;细沟侵蚀;元胞自动机;三维激光扫描;数值模拟
**中图分类号**　S157　　**文献标识码**　A

在黄土高原,细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的70%左右[1]。细沟侵蚀作为坡面侵蚀的主要形式,是坡面水蚀物理过程的重要组成部分[2]。长期以来,尽管国内外学者针对细沟侵蚀已经进行了大量的研究工作[3-11],但人们还未充分理解和掌握细沟侵蚀的形成和演化机理。现有研究大都将动态复杂的细沟发育过程简化为静态简单的过程[12-13],或者假设坡面侵蚀发生时,坡面上已经有细沟存在;且细沟形态在整个降雨过程中不会发生变化[14]。近年来,国内外已经有许多学者尝试将 CA 方法引入到坡面水蚀过程模拟研究中。例如:Favis-Mortlock[15]采用自组织动态系统方法开发了一个模拟细沟系统形成和发展过程的"RillGrow"模型,描述了在一小块裸露坡面上细沟网络的形成和发展,执行简单的规则来控制微地貌、径流路径和土壤流失之间的迭代交互作用。Valette 和 Prevost[16]利用 CA 开发了一个受降雨影响的微观尺度下 3D 土壤表面退化模型,并实现了过程的可视化模拟。倪晋仁等[2]基于自组织理论建立了坡面细沟形成的三维机理模型,模型能够定量地预测坡面细沟的发育过程。马廷等[17-18]利用 CA 模拟了不同植物篱坡面的土壤侵蚀过程,其后又开发了定量 CA 模型模拟了次降雨作用下的坡面径流和侵蚀过程。原立峰和常春平[19]基于 CA 方法建立了坡面细沟侵蚀时空演化过程模型 CA-Rill,对坡面细沟发育过程进行了计算机虚拟实验,生动地模拟了坡面细沟自组织形成过程。上述研究对于推进 CA 在坡面水蚀过程的模拟具有重要意义,但是在模拟结果的生动性和定

* 国家自然科学基金项目(NO. 40801015, 41101255)、中国博士后基金项目(NO. 20090461148)、教育部高校博士点专项基金项目(20100204120017)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(10501－206、10501－283)和虚拟地理环境教育部重点实验室开放基金项目(No. 2010VGE05)联合资助

† 通讯作者,E-mail:yuanlifeng7833@126. com
作者简介:原立峰(1978—),男,山西太原人,博士,副教授,中国地理学会会员。主要从事地表过程分析与模拟、遥感和 GIS 应用方面的教学和研究工作。E-mail:yuanlifeng7833@126. com

收稿日期:2011－11－08;收到修改稿日期:2012－05－06

量化方面都存在不足。

本文以黄土坡面细沟侵蚀过程为研究对象,将 CA 理论与方法引入坡面水蚀过程模拟中,建立坡面细沟发育过程的 CA 模型,并利用三维激光扫描仪支持下的人工模拟降雨实验对模型模拟结果进行了验证和评价。

# 1 坡面细沟侵蚀 CA 模型的建立

## 1.1 CA 模型基本结构

坡面细沟侵蚀 CA 模型的基本结构表示如下:

$$CA = \{L, S, N, R\} \tag{1}$$

式中,$L$ 表示元胞空间,定义为整个实验坡面;组成元胞空间的基本单元为元胞,定义为实验坡面的一个正方形规则区域,综合考虑雨滴大小、计算机存储容量与耗时、坡面 DEM 分辨率以及模拟精度等方面因素确定元胞边长为 6 mm;假设元胞内部为一个均质整体,即泥沙和水流在元胞内部空间分布均匀,并以此作为模型计算单元。

$S$ 表示元胞状态集合,决定了元胞上的水流、侵蚀和沉积,对于任意一个元胞 $z$,将状态变量定义在一个连续实数空间上,定义其状态变量集合 $S_z$ 为:

$$S_z = S_k \times S_a \times S_o \tag{2}$$

式中,$S_k$ 表示核心变量,如水深、高程、侵蚀量、泥沙量和沉积量;$S_a$ 表示辅助变量,如土壤临界剪切力、土壤可蚀性系数、径流输沙能力、流速、是否边界元胞等;$S_o$ 表示全局变量,包括元胞大小、雨强、时间步长和平均坡度等。

$N$ 表示元胞邻居,选用 Moore 型邻居构型。

$R$ 表示邻居规则,CA 模型中空间元胞只与其周围相邻的元胞发生水、沙交互作用,具体规则定义见本文 1.2 节所述。

此外,CA 模型采用定值型边界,最上方的边界元胞无水、沙汇入,最下方边界元胞流出的水流和泥沙被看作是整个坡面的产流量和产沙量,两侧边界元胞上的水流流向定为朝向边界方向。

## 1.2 CA 模型规则定义

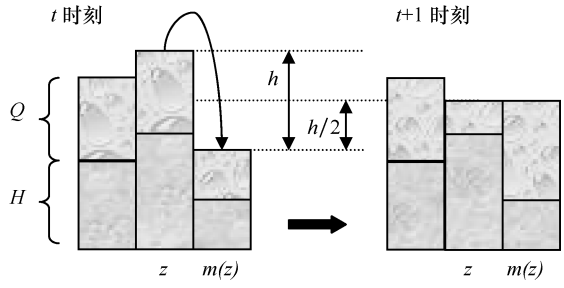
(1) 下渗规则:不考虑土壤水分损失,如果降雨强度小于土壤稳渗率,则下渗率等于降雨强度;如果降雨强度大于土壤稳渗率,则下渗率等于土壤稳渗率。公式表示如下:

$$i = \begin{cases} r & if\ r < K \\ K & if\ r > K \end{cases} \tag{3}$$

式中,$r$ 为降雨强度;$K$ 为土壤稳渗率。

(2) 水流和泥沙运移方向的确定:结合水力学原理,在模型一个迭代时间步长内,水流和泥沙的运动方向是由邻居元胞之间的位置水头关系决定,水流携带泥沙总是由一个元胞流向邻居元胞中具有最小位置水头的元胞,当存在两个或两个以上具有相同最小位置水头的邻居元胞时,则随机选择流向。当存在洼地,则作判断:如果水流挟带的泥沙足以填充洼地,则水流和填充洼地后剩余的泥沙继续移向下游新的元胞;如果水流挟带的泥沙量刚好填充洼地,则泥沙全部沉积,而水流继续向下游元胞流动;如果水流和泥沙均不足以填充洼地,则泥沙沉积,水流停止。随流入洼地的水和泥沙的增加,当洼地元胞的位置水头超出周围最低的元胞邻居的位置水头时,则发生决口,水流继续向下游元胞流动,且水流在流出洼地时遵循侵蚀、泥沙输移与沉积规则,重新计算洼地中的高程和水深。

(3) 元胞上水量分配规则,参照文献[16]:中心元胞 $m(z)$ 水流向 8 个邻居中位置水头最小的那个元胞 $m(z)$,如图 1 所示(二维表示):




注: $z$: 中心元胞; $m(z)$: 邻居元胞; $H$: 地形高度; $Q$: 元胞上水的高度

图 1 元胞上水量分配规则

元胞间水的交换量 $\Delta q(z)$ 依下式决定:

$$\Delta q(z) = \min\left(Q_z, \frac{(H_z + Q_z) - (H_{m(z)} + Q_{m(z)})}{2}\right) \tag{4}$$

式中,$H_z$ 表示中心元胞高程,mm;$Q_z$ 表示中心元胞的水深,mm;$H_{m(z)}$ 表示位置水头最小的邻居元胞高程,mm;$Q_{m(z)}$ 表示位置水头最小的邻居元胞的水深,mm。

$t+1$ 时刻中心元胞 $z$ 和位置水头最小邻居元胞 $m(z)$ 上的水深可表示为:

$$\begin{aligned} Q_z^{t+1} &= Q_z^t - \Delta q(z) \\ Q_{m(z)}^{t+1} &= Q_{m(z)}^t + \Delta q(z) \end{aligned} \tag{5}$$

(4) $t$ 时刻当前元胞上的水量拟采用水量连续平衡方程来求算:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_i - Q_o \tag{6}$$

式中,$Q$ 为当前元胞上的水量;$t$ 为时间;$Q_i$ 为进入当前元胞的水量;$Q_o$ 为流出当前元胞的水量。其中,$Q_i$ 包括降雨量和从相邻元胞流入当前元胞的水量之和,$Q_o$ 包括土壤下渗量和流入位置水头最小的邻居元胞的水量。

(5) 每个元胞的侵蚀、泥沙输移与沉积规则:当元胞上径流输沙能力大于径流含沙量,且水流剪切应力大于土壤临界切应力时,发生侵蚀;当元胞上径流输沙能力大于径流含沙量,但水流剪切应力小于土壤临界切应力时,泥沙输移;当元胞径流输沙能力小于径流含沙量时,发生沉积。

细沟侵蚀量采用如下公式计算[20]:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c)\left[1 - \frac{qc}{T_c}\right] \tag{7}$$

式中,$D_r$ 为细沟侵蚀量,单位为 kg $m^{-2}s^{-1}$;$K_r$ 为与土壤性质有关的比例系数,单位为 kg $N^{-1}s^{-1}$;$\tau$ 为作用在单位土壤面积上的水流剪切应力,单位为 N $m^{-2}$;$\tau_c$ 为侵蚀发生的临界切应力,单位为N $m^{-2}$;$q$ 为单宽流量,单位为 $m^3$ $s^{-1}m^{-1}$;c 为泥沙含量,单位为 kg $m^{-3}$;$T_c$为水流的输沙能力,单位为 kg $m^{-1}s^{-1}$。

水流剪切应力 $\tau$ 的求解为[21]:

$$\tau = \rho g R S \tag{8}$$

式中,$\rho$ 为水的容重,单位为 g $cm^{-3}$;$g$ 为重力加速度,单位为 m $s^{-2}$;$R$ 为水力半径,可以用每个元胞上的水深来近似表示;$S$ 为水力坡度,取坡度的正弦。我国学者对公式(7)、(8)在我国黄土高原的应用做了大量研究[21-27],实践证明上述公式在黄土高原地区具有一定适用性,因此,为 CA 模型所采用。

径流的含沙量采用张科利等[22]的实验研究结果:

$$c = 11.89 Q^{0.1029} J^{1.137} \tag{9}$$

式中,$c$ 为径流含沙量(kg $m^{-3}$),$Q$ 为径流量(ml $s^{-1}$),$J$ 为坡度。

径流的输移能力 $T_c$的计算采用 Nearing 等[9]的研究成果,可以用下面的公式来表示:

$$\log T_c = \frac{\alpha + \beta e^{\gamma + \delta \log \omega}}{1 + e^{\gamma + \delta \log \omega}} \tag{10}$$

式中,$\alpha$、$\beta$、$\gamma$、$\delta$ 为经验常数,$\omega$ 为细流力(stream power),单位为 kg $s^{-3}$,其计算式为:

$$\omega = \rho g q S \tag{11}$$

式中,$\rho$ 为水的容重,单位为 g $cm^{-3}$;$g$ 为重力加速度,单位为 m $s^{-2}$;$S$ 为水力坡度,取坡度的正弦;$q$ 为单宽流量,单位为 $m^2$ $s^{-1}$。

(6) $t$ 时刻当前元胞上的泥沙量采用泥沙连续平衡方程来求算:泥沙汇集过程是随水流的运动过程,与水流类似,元胞上的泥沙量满足:

$$\frac{dW}{dt} = W_i - W_o \tag{12}$$

式中,$W$ 为当前元胞泥沙量,$t$ 为时间,$W_i$为汇入元胞的泥沙量;$W_o$为流出元胞的泥沙量。

## 2　CA 模型的模拟与验证

### 2.1　实验设计与数据处理

本实验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统[23],喷头高度 16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴终速的 98%,降雨均匀度大于 90%。每场降雨的降雨强度均为 90 mm $h^{-1}$。实验土槽设计规格:长 2.0 m、宽 1.0 m、高 0.5 m,坡度 15°;供试土壤选黄绵土,它是在自然的侵蚀与堆积以及人为作用下形成的土壤,其母质为风积黄土,土层深厚,质地均一,块状结构,黄棕色,疏松多孔,垂直节理,成土时间短,没有明显的发育层次;土壤密度为 1.2 g $cm^{-3}$,初始土壤含水率为 8%左右。初始坡面处理为平整裸坡。降雨径流产生后每隔2 min 取一次样,取样时间 30s,并用秒表记录时间,用烘干法求得瞬时径流量、径流含沙量。

参照文献[24]用徕卡 HDS6100 型三维激光扫描仪对降雨前和降雨后地表进行扫描,获取 DEM(扫描精度为 1 mm)。降雨前用徕卡 HDS6100 型三维激光扫描仪对地表进行初始扫描,获取的 DEM 记作 A0。随后进行第 1 次人工模拟降雨,降雨结束后静置土槽表面无积水,再次扫描地表所得 DEM 数据记为 A1。A1 扫描结束后,在 A1 的基础上可进行第 2 次降雨,降雨后再次扫描地表所得 DEM 数据记作 A2。以此类推,第 3 次降雨、第 4 次降雨,直至土槽产生细沟沟网,每次降雨后对地表进行扫描获得 DEM 数据,并分别记作 A3、A4…A7。本研究根据实际坡面细沟侵蚀情况,共进行了 7 次降雨,降雨过程、降雨历时及降雨强度如图 2 所示。每场降雨历时不等,降雨历时均以地表形态变化而定,当地表形态发生细沟代表性特征变化(如小跌水、下切沟头、断续细沟、连续细沟等)则停止降雨对地表进行扫描。

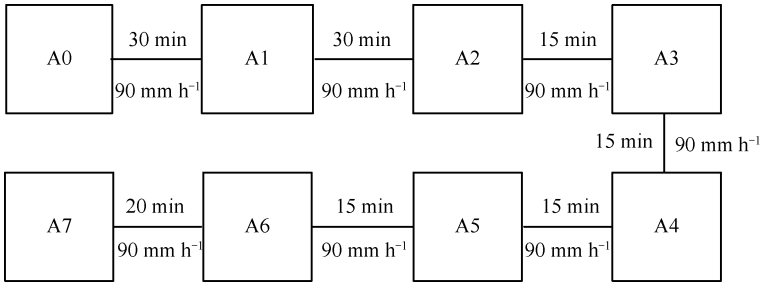



图 2 实验流程简图

采用 Cyclone 软件将三维激光扫描仪扫描土槽获得的 DEM 数据进行去噪、拼接等处理,得到同一坐标系下的坡面 DEM,重采样至 6 mm 精度。取细沟侵蚀的临界沟深 10 mm 为确定细沟的标准,参照文献[24]利用 ArcGIS 软件提取细沟沟网,参照文献[25]利用 Hydrolog 水文模块分析坡面 DEM,计算细沟侵蚀参数。

## 2.2 CA 模型模拟结果与分析

**2.2.1** 模型初始化 模型假设每一滴雨能够铺满整个元胞,并减去下渗量转化为当前元胞的蓄水量。由于无法确切知道每一个点侵蚀发生的临界切应力 $\tau_c$,所以取整个坡面的平均值。在模拟实验中,设置坡长 2.0 m,坡宽 1.0 m 的一个长方形区域作为细沟侵蚀形成区域,元胞大小取 6 mm,时间步长为 12s。其他参数设置见表 1。模型中经验系数取值来自研究者在黄土高原地区所做科学实验取得的成果。

**表 1 模拟参数取值**

| 参数 | 数值 | 数据来源 |
|---|---|---|
| 降雨强度 $S_{ri}$(mm h$^{-1}$) | 90 | 试验设定 |
| 平均坡度 $S_s$(°) | 15 | 试验设定 |
| 地表粗糙度 $S_r$ | 0.5 | 根据 DEM 计算得到 |
| 土壤稳渗率 K(mm min$^{-1}$) | 0.44 | 试验测定 |
| 土壤可蚀性 $S_k$(kg N$^{-1}$m$^{-1}$) | 0.325 | 参照文献[27] |
| 土壤临界剪切力 $\tau_c$(N m$^{-2}$) | 4.082 | 参照文献[27] |
| 水容重 $\rho$(g m$^{-3}$) | 1.0 | |
| 重力加速度 $g$(m s$^{-2}$) | 9.8 | |
| 土壤容重(g cm$^{-3}$) | 1.2 | 试验测定 |
| 经验系数 $\alpha$ | -31.47 | 参照文献[25] |
| 经验系数 $\beta$ | 38.61 | 参照文献[25] |
| 经验系数 $\gamma$ | 0.845 | 参照文献[25] |
| 经验系数 $\delta$ | 0.412 | 参照文献[25] |

**2.2.2** 模拟结果与分析 研究对人工模拟降雨实验所得细沟形态发育过程和 CA 模型模拟结果进行对比分析。由于文章篇幅所限,仅列出部分细沟形态模拟结果。图 3 中 A1-A4 分别显示了人工模拟降雨实验监测第 2 场、第 4 场、第 6 场和第 7 场降雨后坡面细沟侵蚀形态各阶段演变的结果,CA1-CA4 显示的是对应时段 CA 模型的模拟结果,图中蓝色代表细沟。

(1) 坡面细沟发育形态分析

由图 3 分析可知,CA 模型展示了细沟形成的主要阶段:下切沟头、断续细沟、连续细沟和细沟沟网。细沟在发育形态上和实验中三维激光扫描仪获得的细沟形态相似。第 2 场降雨结束时,从图 A1 可以看出,坡面底部产生下切沟头,在坡面中部开始出现细沟,而 CA1 在坡面底部和中部都开始出现细沟。第 4 场降雨结束后,图 A2 坡面上出现断续细沟,下切沟头向上溯源发展;同时,图 CA2 中出现了大量的细沟,细沟溯源向上发展。第 6 场和第 7 场降雨期间,实验扫描结果和 CA 模型运行结果都显示了细沟稳定发育,由断续沟网逐渐形成连续沟网,从图 A3、A4、CA3、CA4 上可以看出细沟在深度和宽度上都发育明显;但是模型细沟数量多于实验坡面上出现的细沟数量,每条细沟的宽度小于实验中细沟的宽度。这是因为 CA 模型没有考虑细沟侧向侵蚀,且采用八邻居搜索法确定水流流向和泥沙输移方向,所以细沟发育方向主要受到初始地表高程差分布的影响。此外,人工降雨实验中采用人工填土,土槽内的黄土夯实不够,在坡底汇聚较大流量股流,又因坡度较大,使得坡底出现小跌坎儿,小跌坎儿侧向侵蚀明显。自然界的细沟发育在强降雨条件下形成,细沟主要受到坡面流沿沟道的冲刷侵蚀,细沟侧向侵蚀也不明显。因此,CA 模型展示了细沟发育的各个阶段,模拟细沟的动态发育过程和真实细沟的发育过程十分接近。

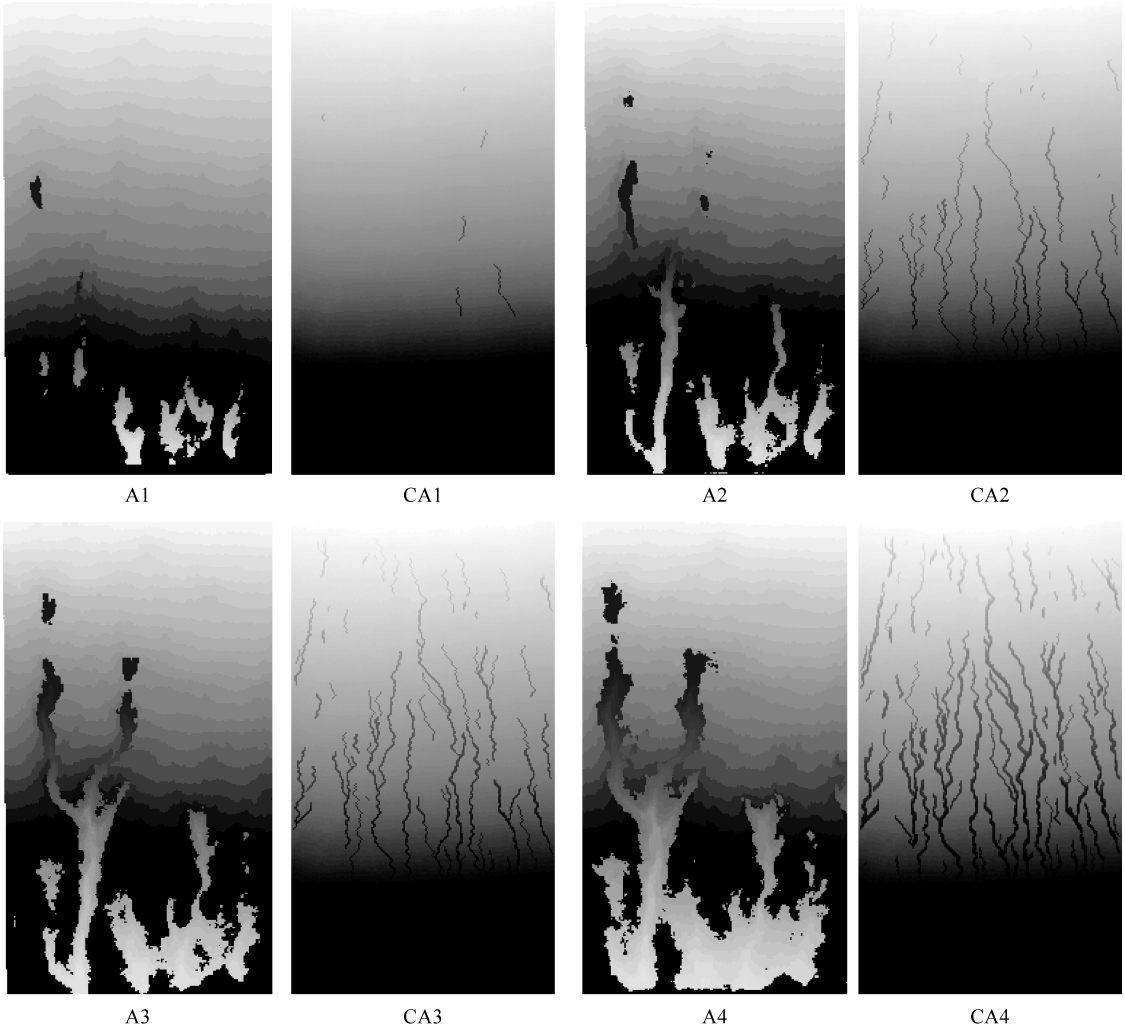



图 3　细沟形态发育过程实验值与模拟值对比

(2) 坡面径流与侵蚀规律分析

CA 模型不仅可以在形态上动态模拟出细沟发育的过程,而且还可以定量计算累积径流量和累积侵蚀量,图 4 显示了累积径流量和累积侵蚀量上实验值和模型值两者间的关系。

由图 4 分析可知,累积径流量和侵蚀量无论是实验值还是模型值在降雨期间都是逐渐增加,增加趋势明显,模型累积径流量与实验值比较接近,累积侵蚀量均较实验值偏小。第 1 场和第 2 场降雨都是历时 30 min,在前两场降雨期间,模型累积径流量

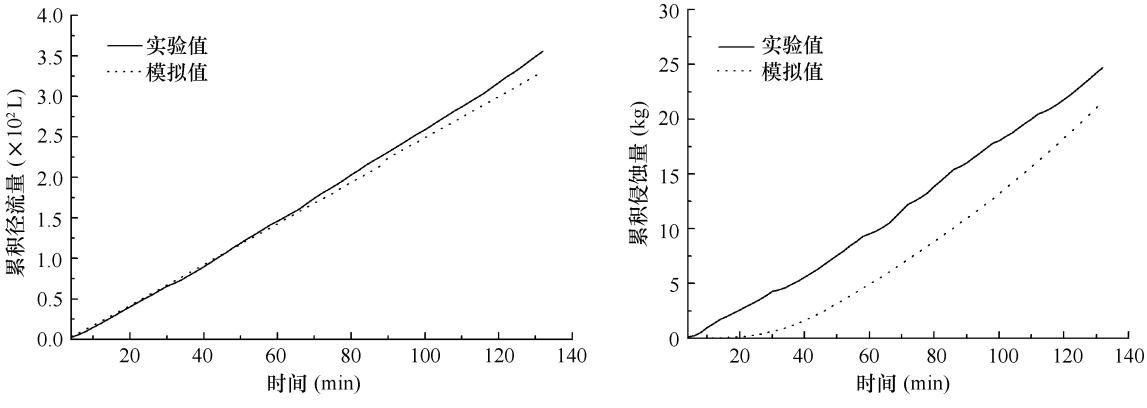



图 4　细沟发育过程累积径流量和侵蚀量实验值和模型值对比

都大于实验测量值,第 3 场降雨之后,模型模拟值逐渐小于实验测量值。因为在降雨初期,土壤前期含水量低,水分入渗较快,径流量比较小,而模型中考虑的下垫面比较简单,下渗很快达到饱和,径流率较快趋于稳定,累积径流量呈线性增加,所以模型在降雨初期径流量大于实验测量值。由于雨滴对土壤表面的击打,土壤表面形成临时性结皮,土壤孔隙被封闭,降雨入渗能力降低,径流量增大,模型没有考虑土壤临时性结皮对下渗的影响,使得模型累积径流量逐渐小于实验测量值。另外模型没有考虑雨滴击溅侵蚀,因此在模型累积侵蚀量均小于实验测量值,Mayer 和 Foster[5] 的研究结果表明:消除雨滴打击能量后,细沟侵蚀量减少。随着径流量增大,径流冲刷能力也相应增强,侵蚀量增大,细沟进入稳定发展阶段。

## 3 讨论与结论

由于人工模拟降雨实验过程中,饱和土壤由于重力作用会产生微小量的整体沉陷,而利用 GIS 处理三维激光仪扫描结果时无法去除整体沉陷产生的误差,致使实验结果的细沟面积提取中会产生面积偏大现象,实验结果本身存在一定的误差。

在模型中,雨滴降落在坡面上的位置是由随机算法来确定的,坡面各元胞上的侵蚀深度是由雨滴下落元胞以及随后所形成的径流决定,因此细沟在坡面产生的位置是随机的,这与自然界实际情况基本一致。

由于细沟侵蚀机理的复杂性、发生过程的随机性和持续时间的短暂性,以及人们认识水平和研究方法的局限性,对于细沟发育过程时空动态模拟方面的研究很少且不够深入。本文将 CA 原理和方法引入到黄土坡面细沟侵蚀时空动态模拟研究中,构建了坡面细沟侵蚀 CA 数值模型,丰富了细沟侵蚀建模研究。研究表明:(1)CA 模型可以有效地模拟次降雨作用下坡面细沟的形成、发展及演化过程,借助元胞间简单规则的相互作用从整体上“涌现”出坡面细沟形态;(2)与其他坡面侵蚀模型相比,该模型不需要进行复杂的数值求解,既能从空间形态上对细沟发育过程做出定量模拟和预测;同时,可以对细沟发育过程的动态性、随机性和时空变异性等复杂性特征做出解答;(3)模型模拟精度需要进一步提高,尤其是需要在模型中加入反映细沟沟道侧蚀和归并的算法,从而更真实地模拟坡面细沟的拓宽过程。

## 参 考 文 献


[1] 朱显谟. 黄土高原流水侵蚀的主要类型及有关因素. 水土保持通报,1981,1(3/4):1—9

[2] 倪晋仁,张剑,韩鹏. 基于自组织理论的黄土坡面细沟形成机理模型. 水利学报,2001,32(12):1—8

[3] 张新和. 黄土坡面片蚀-细沟侵蚀-切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究. 陕西杨凌:中国科学院水土保持研究所, 2007

[4] 郑粉莉,江忠善,高学田. 水蚀过程与预报模型. 北京:科学出版社, 2008

[5] Foster G R, Meyer L D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics//Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, proceedings of the sediment yield workshop. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS2S240, 1975

[6] Savat J. The hydraulies of sheet fiow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. Earth Surface Processes and Landforms, 1977,2(3):125—140

[7] Young R A, Onsted C A, Bosch D D. Agricultural nonpoint source pollution model for evaluation agriculture watersheds . Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2):168—173

[8] Gerard G, Gimenez R, et al. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modeling and field observations. Earth-Science Reviews, 2007, 84:87—102

[9] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A. et al. Hydraulic sand erosion in eroding rills. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865—876

[10] 郑粉莉. 黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究. 土壤学报,1998,35(1):95—103

[11] 蔡强国,朱远达,王石英. 几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素. 水科学进展,2004,15(1):12—18

[12] Bryan R B. Processes and significance of rill development. Catena Supplement, 1987, 8:1—15

[13] Govers G Poesen J. Assessment of the inter-rill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. Geomorphology, 1988, 1: 343—354

[14] Parsons A J, Wainwright J, Abrahams A D, et al. Distributed dynamic modeling of inter-rill overland flow. Hydrological Processes, 1997, 11:1 833—1 859

[15] David F M. A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes. Geocomputation, 1998, 24(4):353—372

[16] Valette G, Prevost S. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. Computers & Graphics, 2006, 30: 494—506

[17] 马廷, 周成虎, 蔡强国. 不同植物篱坡面的土壤侵蚀过程 CA 模拟. 地理研究,2006, 25(6):959—966

[18] Ma T, Zhou C H,Cai Q G. Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approach. Pedosphere, 2009, 19(6):711—718

[19] 原立峰,常春平. 坡面细沟自组织形成过程的 CA 模拟. 水土

保持研究, 2008, 15(3):7—10

[20] Flanagan D C, Nearing M A. USDA-Water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10S\USDA-ARS Nation soil erosion research laboratory, West Lafayette, In. 47901. 1995

[21] 张科利,秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):41—46

[22] 张科利,张竹梅. 黄土陡坡细沟侵蚀及其产沙特征的实验研究. 自然科学进展,2000,10(12):1 136—1 139

[23] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置. 水土保持通报,2000,20(4):28—30

[24] 霍云云,吴淑芳,冯浩,等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究. 中国水土保持科学,2011,9(2):32—37

[25] 赵龙山,张青峰,宋向阳, 等. 基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究. 土壤学报,2012,49(1):179—183

[26] 赵龙山,张青峰,梁心蓝,等. 基于 Moran's I 指标的黄土坡耕地填洼量的空间自相关性研究. 土壤 2011,43(3):446—452

[27] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法. 中国科学院研究生院学报,2004,21(4):468—475