

# 考虑重力侵蚀影响的分布式土壤侵蚀模型

金 鑫<sup>1,2</sup>, 郝振纯<sup>1</sup>, 张金良<sup>3</sup>, 王加虎<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;  
3. 黄河水利委员会防汛办公室, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 黄土高原地区的土壤侵蚀具有水力侵蚀和重力侵蚀相伴发生的特点, 在大多数针对黄土高原的侵蚀模型研究中未考虑重力侵蚀的影响, 使得模型的模拟精度较差。针对黄土高原的侵蚀特点, 采用量化影响重力侵蚀发生的主要因素, 确定重力侵蚀发生的具体沟道栅格单元的方法, 从而考虑了重力侵蚀对产输沙过程的影响。所建立的分布式土壤侵蚀模型以逐网格汇流的水文模型为基础, 采用逐网格侵蚀输沙的模拟方式, 能够模拟上方来水来沙对侵蚀输沙的影响。经小理河流域实测资料验证, 模型具有一定的计算精度。

**关键词:** 土壤侵蚀; 分布式模型; 重力侵蚀; 逐网格汇流; 输沙

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2008)02-0257-07

土壤侵蚀产输沙过程模拟的研究, 一直都是国内外学者研究的热点, 也是目前土壤侵蚀研究的前沿课题。我国的土壤侵蚀模拟研究很多是针对黄土高原, 特别是黄河中游多沙粗沙区的土壤侵蚀开展的<sup>[1]</sup>。但在这些研究中, 由于未考虑重力侵蚀的模拟, 造成了侵蚀模拟预测的结果不能令人满意<sup>[2]</sup>。而一些学者对黄土高原的重力侵蚀进行的研究表明, 重力侵蚀是黄土高原侵蚀产沙的重要方式之一, 也是在造成沟坡扩展、沟道变宽的重要原因。蒋德麒<sup>[3]</sup>对黄土高原小流域的重力侵蚀产沙作了分析, 认为重力侵蚀产沙在丘陵沟壑区占流域的 20%~25%, 在高原沟壑区占 58%。曹银真<sup>[4]</sup>研究认为, 黄土地区最主要的侵蚀方式是流水侵蚀和重力侵蚀。朱同新、陈永宗<sup>[5]</sup>计算出晋西地区重力侵蚀量约占总侵蚀量的 35%~46%。黄河水利委员会的研究<sup>[6]</sup>认为, 重力侵蚀发生在沟壑内, 在时间上和空间上一般不是连续出现, 而是在某些部位、某些时间出现。但每产生一处, 则侵蚀量很大, 一般几十、几百、几千立方米, 有的几万、几十万立方米, 个别的达几千万立方米, 成为小流域泥沙的主要来源。王德甫等<sup>[7]</sup>利用遥感影像技术, 对黄土高原的重力侵蚀进行调查, 认为土壤侵蚀中, 重力侵蚀与水力侵蚀是两个主要的而又是相互影响的两个侵蚀类型。

因此, 在进行黄土高原土壤侵蚀模拟的研究时, 考虑重力侵蚀对流域产输沙的影响, 符合黄土高原重力侵蚀与水力侵蚀相伴发生这一特点, 也是提高模型模拟精度的有效途径。

## 1 建模基本思路

由于水力侵蚀的外营力来自于降雨, 对侵蚀过程的模拟也应从降雨引起的产流、汇流着手, 即完整的侵蚀产输沙过程模拟必须包括产汇流和产输沙过程模拟的水沙模型。只有在首先构建符合产汇流规律的水文模型的基础上, 根据土壤侵蚀的机理建立起来的产输沙模型才能更合理地模拟整个的土壤侵蚀过程。

目前, 大部分分布式水文模型的汇流采用直接计算每个单元与流域出口单元之间的滞时, 把计算区域所有

收稿日期: 2007-04-19

基金项目: 国家科技攻关资助项目 (2004BA6102A-03-04)

作者简介: 金 鑫(1967-), 男, 北京人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究工作。

E-mail: jinxin1390@163.com

单元的产流在出口单元叠加形成流量过程, 坦化计算后得到流域的汇流结果<sup>[8]</sup>。该汇流方法假定水流过程符合线性叠加原则, 且过境水流不对沿途水流产生任何影响。基于这种假定的产汇流模型在与分布式土壤侵蚀模型相结合进行产输沙计算时, 由于泥沙的产生和汇集过程是一个侵蚀- 输移- 沉积- 再侵蚀的过程, 不能将各个单元的产沙量在出口单元简单叠加, 必须建立能够进行逐网格汇流计算的水文模型, 才能实现逐网格的泥沙侵蚀输移计算。

对于重力侵蚀而言, 其模拟研究一直是黄土高原地区侵蚀研究的薄弱环节, 由于没有系统的观测资料, 涉及重力侵蚀发生的物理机理的研究也十分薄弱, 要通过建立具有明确物理意义的模型进行模拟, 目前还无法实现。最现实的方法仍然是通过流域出口的泥沙输出进行模型率定, 考虑重力侵蚀对流域产输沙的影响, 这对于提高模型模拟的精度具有现实意义。

## 2 模型结构

在黄土高原地区, 降雨经林冠截留落到地表, 雨滴对地表的打击作用将土壤分散, 产生降雨溅蚀, 并发生“结皮”现象<sup>[9]</sup>, 使下渗能力减小, 随着降雨的继续, 当降雨强度超过土壤下渗能力时, 产生地表径流, 地表径流在沿水流路径汇集并流向流域出口的过程中, 水流所具有的侵蚀力对坡面及沟道土壤产生径流侵蚀, 并将降雨溅蚀及径流侵蚀所产生的泥沙输送到流域出口。在次降雨产流过程中, 蒸发蒸腾量很小, 可以忽略不计, 降雨损失为林冠截留和土壤入渗; 在整个侵蚀过程中, 流域从分水岭开始沿水流方向依次产生降雨溅蚀、坡面径流侵蚀、沟道径流侵蚀、沟道边坡重力侵蚀。

### 2.1 基于 DEM 的流域信息提取

本文选择黄河中游的小理河流域为研究区。小理河是无定河水系大理河的主要支流, 位于东经  $109^{\circ}16' \sim 109^{\circ}51'$ 、北纬  $37^{\circ}36' \sim 37^{\circ}49'$ , 属山溪性河流, 流域面积  $807 \text{ km}^2$ , 河长  $63.7 \text{ km}$ 。李家河水文站为小理河流域的出口控制站。

流域特征提取以  $100 \text{ m}$  栅格型 DEM 为数据源, 流向判断采用 D8 法<sup>[11]</sup>, 洼地采用传统的填平法处理<sup>[12]</sup>; 确定研究区域内各栅格的上游累积网格数, 当某栅格的上游累积网格数达到一定的水平——集水面积阈值时, 就认为该栅格为河道栅格; 坡度的提取根据网格顶点及其相邻 4 个点的高程, 用最小二乘法作空间平面拟合, 平面的法线与水平面法线之间的夹角定义为单元坡度。

### 2.2 水文模块

(1) 降雨插值 对目前较为常用的反距离权重法、样条函数法、趋势面法、普通克里金法等插值方法<sup>[12]</sup>, 应用交叉验证法<sup>[13]</sup>对小理河流域内分布的 7 个雨量站 1967–1996 年共 30 年的日降雨资料进行插值效果的验证分析, 最后确定用反距离权重法进行研究区的降雨空间插值。

(2) 林冠截留计算 林冠截留的模拟计算方法主要是通过寻找影响截留的主要因素与截流量(截留强度)之间的关系, 经过一定的概化后, 建立截流量(截留强度)与主要影响因素之间的函数关系进行模拟计算。

试验证明<sup>[14]</sup>, 冠层截留比随着降雨量的增大而减小, 对于森林这一关系可表示为

$$\frac{dI}{dp} = e^{-k'p} \quad (1)$$

式中  $I$  为冠层截留量,  $\text{mm}$ ;  $p$  为降雨量,  $\text{mm}$ ; 对于单位计算时段来说,  $p$  的大小代表了该时段的降雨强度;  $k'$  为树林种类与林冠密度有关的参数。

通过上式可以得到与降雨量  $p$  对应的截留能力  $I_p$ :

$$I_p = \int_0^p e^{-k'p} dp = \frac{1}{k'}(1 - e^{-k'p}) \quad (2)$$

(3) 超渗产流计算 在产流计算中, 首先要确定降雨过程中的实际下渗能力, 以便与降雨强度进行比较。

目前,最常用的下渗计算公式有霍顿公式和菲利浦公式等。根据研究<sup>[15]</sup>,菲利浦公式对起始土壤含水量较小的次洪拟合精度较差,而霍顿下渗公式比较符合黄土高原的超渗产流机制。因此采用霍顿公式进行下渗计算:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (3)$$

式中  $f_0$  为初始下渗率;  $f_c$  为稳定下渗率;  $k$  是下渗系数。

如果净雨  $P > 0$ , 可根据下渗能力与土壤含水量的关系通过积分求得实际下渗量, 并进而求得产流量和时段末土壤含水量。

初始土壤含水量由前期雨量计算, 其计算公式为

$$\theta_{a,t} = K_a P_{t-1} + K_a^2 P_{t-2} + K_a^3 P_{t-3} + \dots + K_a^{15} P_{t-15} \quad (4)$$

式中  $\theta_{a,t}$  为  $t$  日开始时的土壤含水量;  $P_{t-1}$  为前 1 d 的日雨量;  $P_{t-2}$  为前 2 d 的日雨量;  $P_{t-15}$  为前 15 d 的日雨量;  $K_a$  为常数, 雨量形成土壤含水量的日折减系数 ( $< 1$ )。

(4) 汇流计算 由于进行产输沙计算的需要, 在汇流计算中必须采用逐网格汇流的计算方式, 才能提供每个网格单元在计算时段内的平均流量、流速等信息。以圣维南方程组及其简化形式进行坡面汇流和河道汇流的计算, 能更细致准确地描述径流的运动规律, 能够满足本文的产输沙计算的需要。

对于平原区的汇流由于坡度较小, 需要用二维模型来描述和模拟<sup>[16]</sup>。而对于山区性流域, 一维圣维南方程组就能够满足模拟精度的需要。本文的研究区属山区性流域, 其汇流过程可用一维圣维南方程组来描述。

对于宽度为  $B$ 、长度为  $L$ 、净雨强为  $I_e(x, t)$  的矩形坡面, 用运动波来描述洪水波, 用曼宁公式计算流速, 圣维南方程组中的连续方程可写为如下形式:

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{By}{n} R^{2/3} \sqrt{S_0} \right] = I_e(x, t) \quad (5)$$

对于有旁侧入流的河道单元, 圣维南方程组中的连续方程可写为如下形式:

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{By}{n} R^{2/3} \sqrt{S_0} \right] = q \quad (6)$$

由于坡面上的水流属宽浅水流, 可用水深  $h$  近似替代水力半径  $R$ , 而河道水力半径也可根据河道形状及汇流宽度表示为水深的函数, 因此, 连续方程就成为关于水深的偏微分方程, 利用 Preissmann 差分格式对圣维南连续方程进行离散, 根据初始及边界条件, 可得到一组关于水深的一元非线性方程, 利用二分法及迭代计算可依次求得不同时刻各空间节点上的水深, 由曼宁公式求得各节点上的流量、流速, 得到坡面及河道单元的流出过程<sup>[17]</sup>。

### 2.3 侵蚀模块

(1) 降雨溅蚀计算 对于土壤性质基本一致的流域, 影响降雨溅蚀的主要因素为降雨动能、地表坡度。据此, 本文在众多降雨溅蚀计算模型中, 以适合于黄土地区, 且综合考虑降雨特性及坡度影响的模型——吴普特模型<sup>[18]</sup>为蓝本, 综合考虑植被覆盖对降雨动能的影响, 将吴普特公式改写为以下形式进行降雨溅蚀的计算:

$$D_s = 0.038 P^{0.554} I^{0.702} (1 - 0.64 C_v)^{0.554} (s \alpha)^{0.471} \quad (7)$$

式中  $D_s$  为降雨溅蚀量,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $I$  为雨强,  $\text{mm}/\text{min}$ ;  $P$  为降雨量,  $\text{mm}$ ;  $C_v$  为植被覆盖度, %;  $s$  为坡度校正系数;  $\alpha$  为栅格单元地表坡度, ( $^\circ$ )。

(2) 径流侵蚀计算 Foster 等<sup>[19]</sup>根据泥沙输移连续方程, 将泥沙分离速率与径流分离能力、挟沙力、实际输沙率之间建立关系:

$$D_v = K' (1 - T_v / X_v) \quad (8)$$

式中  $D_v$  为泥沙分离率;  $K'$  为径流分离能力;  $T_v$  为输沙率;  $X_v$  为径流挟沙力。在特定土壤和水动力条件下, 径流分离能力和径流挟沙力可视为常数。

假定可供径流搬运的泥沙充足时, 径流挟沙力全部用来搬运泥沙, 而可供搬运的泥沙量小于径流挟沙力时, 泥沙全部由径流搬运, 则式(8)变形后, 有:

$$D = K'(X - T) \quad (9)$$

式中  $D$  为计算时段内坡面或沟道的径流侵蚀量, kg;  $K'$  为坡面或沟道的径流侵蚀系数(径流分离能力), 可通过率定获得;  $T$  为计算时段内的初始可供沙量输沙量(对于坡面, 为单元本身的降雨溅蚀量与其他坡面单元输入本单元的泥沙量的和; 对于沟道, 为上游坡面和沟道单元输入本单元的泥沙量的和);  $X$  为计算时段内的径流挟沙力, kg。当  $T$  大于等于  $X$  时, 不发生径流侵蚀。

坡面的单位流量水流挟沙能力采用 Govers<sup>[20]</sup> 提出的坡面径流挟沙能力公式:

$$X_r = \frac{1}{22.284} \left[ \frac{\tau_1 - \tau_0}{d^{0.33}} \right]^{2.457} \quad (10)$$

式中  $X_r$  为坡面径流挟沙能力,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau_1$  为坡面水流切应力,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $\tau_0$  为坡面泥沙的临界启动切应力,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $d$  为泥沙粒径, mm。

姚文艺等<sup>[21]</sup>、白清俊<sup>[22]</sup> 等学者在各自关于黄土地区的侵蚀模拟研究中应用式(10)进行坡面水流挟沙力的计算, 取得了较好的模拟效果。

临界启动切应力计算采用姚文艺等<sup>[21]</sup> 根据泥沙颗粒在坡面上的受力情况推导的公式, 且成功应用于岔巴沟的土壤侵蚀模拟的公式。公式为

$$\tau_0 = \frac{1}{77.44} \left[ 3.61(\gamma_s - \gamma) d \cos \alpha + \frac{C}{d} \right] \quad (11)$$

式中  $C$  是具有量纲的系数,  $C = 0.00029 \text{ g/cm}$ 。

坡面水流切应力:

$$\tau_1 = \gamma h J \quad (12)$$

式中  $\gamma$  为水容重,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h$  为水力半径, 用坡面水深代替, m;  $J$  为能坡, 用坡面比降代替,  $\text{tg} \alpha$ 。

根据段红东等<sup>[23]</sup> 对张红武的河流水流挟沙力公式<sup>[24]</sup> 的验证结果, 该挟沙力公式在很大的含沙量范围内, 计算结果与实际都比较符合, 特别是对于高含沙水流挟沙力的计算, 明显优于其它公式。因此, 本文的沟道单位流量水流挟沙力计算采用张红武公式:

$$X^* = 2.5 \left[ \frac{(0.0022 + S_v) U^3 \gamma_m \ln \left( \frac{h}{6d_{50}} \right)}{\kappa(\gamma_s - \gamma_m) g h \omega} \right]^{0.62} \quad (13)$$

式中  $U$  为平均流速, m/s;  $g$  为重力加速度;  $\omega$  为床沙平均沉速, m/s;  $S_v$  为距河床为  $z$  的流层中以体积百分数表示的时均含沙量;  $\kappa$  为卡门常数;  $h$  为沟道水深, m;  $\gamma_s$  为泥沙容重,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma_m$  为浑水容重,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $d_{50}$  为泥沙中值粒径。

(3) 沟坡重力侵蚀 重力侵蚀的发生有很大的随机性, 时空变化很大, 直接预测崩塌、滑塌等的发生目前还做不到, 但是对于流域来说, 每次降雨时, 重力侵蚀产沙也有相应的规律可循<sup>[2]</sup>。蔡强国研究认为, 降雨产生的径流是重力侵蚀产沙的主要动力。土壤含水量、沟谷长度、沟坡坡度和沟谷深度对重力侵蚀有着重要影响。黄土高原土壤大部分颗粒组成是粉沙粒径, 质地均细, 组织疏松, 缺乏团粒结构, 土粒间主要靠碳酸盐胶结, 极易在水中崩解与分散, 土壤含水量愈大, 土粒之间的固结力愈弱, 土体更易受重力侵蚀; 而沟坡坡度愈大, 则土体向下的重力分力就愈大, 在相同外营力的作用下, 更易触发重力产沙。沟道水流对沟槽边坡的侵蚀造成沟坡土体的悬空, 加速了重力侵蚀。

本文对重力侵蚀的模拟采用以下方法:

① 将影响重力侵蚀的内部因子和外部因子(该因子只用于各单元之间比较)进行量化, 计算出各沟道单元重力侵蚀总的内部影响因子和外部影响因子, 将所有沟道单元按照影响因子大小排队, 排序在前的单元发生重力侵蚀的可能性较大;

② 根据流域出口的实测输沙过程, 以沙峰误差最小为原则, 通过模型率定出重力侵蚀发生的平均单元数量, 将此作为每次洪水过程中发生重力侵蚀的沟道单元总数, 认为序号小于等于重力侵蚀发生单元总数的沟道

单元在计算时段内会发生重力侵蚀;

③对于发生重力侵蚀的沟道单元, 不再进行时段内的沟道径流侵蚀计算, 只计算径流最大可挟沙量, 认为重力侵蚀量将大于径流最大可挟沙量, 并将径流最大可挟沙量作为输出沟道单元的泥沙量。

•重力侵蚀发生的主要内部诱因 对于所要模拟的固定流域而言, 土壤性质是不变因素, 在实际模拟中可以不考虑。因此, 影响重力侵蚀的内部因素就只有土壤含水量、沟坡坡度。

重力侵蚀主要是由于土体沿坡向向下的重力分力大于土壤粘结力和土体所受到的支撑力的合力所致。

沟坡土体本身的重力为  $G$ , 沟坡坡度为  $\beta$ , 则土体沿沟坡方向的重力分力为

$$G'_i = G \sin\beta \quad (14)$$

从上式可知, 沟坡土体的沿沟坡方向的重力分力是随着沟坡坡度的增加而增大的; 而沟坡土壤的含水量增加时, 也使土体的重量增加, 加大了土体沿沟坡方向的重力分力, 这是影响重力侵蚀的内部因素引发重力侵蚀发生的主要原因。同时, 土壤的含水量的增加也降低了土壤颗粒间的粘结力, 变相增加了沿坡向的重力分力。

对于任一土体单元, 其沿坡向的重力分力可表示为:

$$G'_i = \left[ W + \frac{\gamma W}{\gamma} \theta \right] \sin\beta \quad (15)$$

式中  $W$  为土体单元的干重;  $\gamma$  为土体的干密度, 取为  $1.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $\gamma$  为水的密度;  $\theta$  为土壤含水量, 为占土体体积的百分比。

因此, 可将土壤含水量和沟坡坡度的正弦作为影响重力侵蚀的内部因子。

•重力侵蚀内因权重确定 权重分析的目的是为了确定土壤含水量和沟坡坡度正弦对重力侵蚀的贡献大小, 便于计算内部影响因子。由于没有土壤粘结力随土壤含水量的变化率的具体量值, 无法计算出含水量对土壤粘结力的影响, 在内部因子的计算中主要考虑沿坡向的重力分力的作用。土壤含水量和沟坡坡度正弦对沿坡向重力分力的影响权重确定后, 通过适当调整两者之间的权重比例, 尽可能反映土壤含水量对土壤粘结力的影响。

权重确定用线性回归分析法<sup>[25]</sup>, 计算不同土壤含水量和沟坡坡度正弦情况下土体单元沿坡向的重力分力, 以土体沿坡向的重力分力偏差最小化为原则进行线性回归计算, 得到权重系数为沟坡坡度正弦 1.148, 土壤含水量 0.333;

沟道栅格单元土壤含水量和沟坡坡度正弦与各自的权重系数相乘后求和, 并除以其中的最大值, 得到各沟道单元影响重力侵蚀的内部因子, 此为一个小于等于 1 的正数, 所反映的是各单元发生重力侵蚀的可能性的最大, 其数值越大, 发生重力侵蚀的可能性越大。

•重力侵蚀的外部因子 统计前一个计算时段各沟道单元的径流侵蚀量, 除以其中的最大值, 得到一个小于等于 1 的数, 将其作为本计算时段重力侵蚀的外部因子。沟道单元的径流侵蚀量越大, 其外部因子就越大。

•重力侵蚀的判断 假定导致重力侵蚀的内部因子和外部因子对于重力侵蚀的贡献相同, 则可将各沟道单元影响重力侵蚀的内部因子和外部因子相加作为该单元的重力侵蚀的判断因子, 以确定发生重力侵蚀的单元。

当沟坡某一部位有重力侵蚀发生时, 沟坡坡面表层含水量较高的土壤滑落到沟道中, 下层土壤的含水量会相对较低, 由于无法通过水文模型的计算确定出发生重力侵蚀后沟坡土壤的确切含水量, 在实际模拟中, 对发生重力侵蚀的沟道单元, 假定其下层土壤的含水量为降雨初期的初始土壤含水量, 从下一个时段起, 结合降雨量, 利用水文模型单独对该沟道单元的土壤含水量进行计算, 用重新计算出的土壤含水量进行该单元重力侵蚀内部因子的计算。

在实际降雨侵蚀的过程中, 降雨初期的沟坡土壤含水量较低, 重力侵蚀发生的单元数应小于降雨中后期发生重力侵蚀的单元数。对于这一点, 可以通过模型率定, 确定一条重力侵蚀单元数随土壤含水量的增高而增加的线性曲线来确定。

## 2.4 泥沙输移计算

对于坡面和没有重力侵蚀发生的沟道单元, 当初始可供沙量大于或等于径流挟沙力时, 单元不发生径流侵蚀, 泥沙输出量等于径流挟沙力; 当初始可供沙量小于径流挟沙力时, 单元产生径流侵蚀, 泥沙输出量等于初始可供沙量与径流侵蚀量的和; 对于有重力侵蚀发生的沟道单元, 输出沟道单元的泥沙量等于径流挟沙力。

## 3 模型模拟结果

以 30 min 为时间步长, 选取小理河流域 1967–1996 年 14 场洪水中的前 10 场洪水, 即 670717、670826、670829、670831、700827、820708、850614、850619、920804、920828 洪水进行模型率定, 用率定后的模型对后 4 场洪水, 即 940804、950605、950902、960616 洪水进行验证, 实测与模拟的输沙结果见表 1。

表 1 产输沙模型验证结果

Table 1 Results of validated soil erosion model

洪号	实测沙峰 $t/(t \cdot s^{-1})$	计算沙峰 $t/(t \cdot s^{-1})$	相对误差 /%	峰现时差 /h	相关系数	实测沙量 $t/(万 t \cdot s^{-1})$	计算沙量 $t/(万 t \cdot s^{-1})$	相对误差 /%
940804	309.1	444.2	43.7	0.5	0.730	692.2	1025.6	48.2
950605	65.6	61.3	-6.6	0.5	0.717	103.7	73.5	-29.1
950902	395.7	345.2	-12.8	-0.5	0.831	338.6	338.7	0.04
960616	132.1	122.9	-6.9	-0.5	0.878	144.9	189.6	30.9

从验证的结果来看, 模型所模拟的 4 场洪水的沙峰与实测沙峰的峰现时间都有 0.5 h 的时差, 峰值最大误差 43.7%, 最小误差 -6.6%, 平均绝对误差为 17.5%; 4 场洪水的计算输沙量与实测输沙量相比, 除 950605 外均大于实测输沙量, 最大误差为 48.2%, 最小误差为 0.04%, 平均绝对误差为 27.1%, 输沙量的平均模拟精度低于沙峰的平均模拟精度。

## 4 结 论

本文所建立的土壤侵蚀模型以能够进行逐网格汇流计算的产汇流模型为基础, 使得考虑上方来水对单元侵蚀的影响成为可能, 在输沙计算中也采用了逐网格计算的方法, 考虑了上方来沙对侵蚀过程的影响。在侵蚀模拟中考虑了重力侵蚀对产输沙过程的影响, 使模型更符合黄土高原的侵蚀特性。另外, 由于本模型在实际应用时, 通过多场洪水的率定, 可以确定出重力侵蚀相对容易发生的具体位置, 在制定水土保持规划方面较其他不考虑重力侵蚀的模型有一定优势。

本模型存在的主要缺点, 一是没有考虑地表径流的再入渗, 在降雨时空分布极不均匀时, 会使计算的径流大于实际情况, 从而影响模拟精度; 二是由于 DEM 分辨率的影响, 使提取的单元沟道特征与实际特征存在一定差异; 三是在重力侵蚀的模拟中, 无法量化土壤含水量的变化对土壤粘结力的影响, 使得在重力侵蚀内部因子的计算中, 只能通过人为增加土壤含水量的权重比例来考虑土壤含水量对土壤粘结力的影响。在今后的研究中, 如能针对以上缺点对模型进行进一步的改进, 将有助于模型计算精度的提高。

### 参考文献:

- [1] 唐政洪, 蔡强国. 我国主要土壤侵蚀产沙模型研究评述[J]. 山地学报, 2002, 20(4): 466–475.
- [2] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 136–138.
- [3] 蒋德麟. 黄河中游小流域泥砂来源初步分析[J]. 地理学报, 1966(2): 6–10.
- [4] 曹银真. 黄土地区重力侵蚀的机理及预报[J]. 中国水土保持, 1984(4): 19–22.
- [5] 朱同新, 陈永宗. 晋西黄土地区重力侵蚀产沙分区的模糊聚类分析[J]. 水土保持通报, 1989, 9(2): 27–34.
- [6] 郑书彦. 滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2002.
- [7] 王德甫. 黄土重力侵蚀及其遥感调查[J]. 中国水土保持, 1993(12): 25–28.

- [ 8] 王加虎. 分布式水文模型原理与方法研究[ D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [ 9] 程琴娟, 蔡强国, 李家永. 表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[ J]. 地球科学进展, 2005, 24( 4): 115– 122.
- [ 10] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[ J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323– 344.
- [ 11] Jenson S K, Domingue J O. Extraction topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[ J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54( 11): 1593– 1600.
- [ 12] 魏林宏. 时空尺度对洪水模拟的影响研究[ D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [ 13] 朱芮芮, 李 兰, 王 浩, 等. 降水量的空间变异性和空间插值方法的比较研究[ J]. 中国农村水利水电, 2004( 7): 25– 28.
- [ 14] 雷孝章, 王金锡, 赵文谦. 森林对降雨径流的调蓄转换规律研究[ J]. 四川林业科技, 2000, 21( 2): 7– 12.
- [ 15] 赵人俊, 王佩兰. 霍顿与菲利浦下渗公式对子洲径流站资料的拟合[ J]. 人民黄河, 1982( 1): 1– 8.
- [ 16] Giammarco P D, Todini E, Lamberti P. A conservative finite elements approach to overland flow: the control volume finite element formulation [ J]. Journal of Hydrology, 1996, 175: 267– 291.
- [ 17] 李 丽. 分布式水文模型的汇流演算研究[ D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [ 18] 吴普特. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响[ J]. 水土保持通报, 1991, 11( 3): 8– 13, 28.
- [ 19] Foster GR, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I velocity relationship[ J]. Trans of ASAE, 1984, 27( 3): 790– 796.
- [ 20] Govers Gerard. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow[ M]. London: UCL press limited, 1992. 243– 273.
- [ 21] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[ M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 224– 245.
- [ 22] 白清俊. 黄土坡面细沟侵蚀带产流产沙模型研究[ D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2006.
- [ 23] 段红东, 何松华, 朱辰华. 河流输沙力学[ M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [ 24] 张红武, 张 清. 黄河水流挟沙力的计算公式[ J]. 人民黄河, 1992( 11): 7– 10.
- [ 25] 彭瑞霞, 赵庆刚. 以回归分析法构建教师信息素养评价体系[ J]. 清华大学教育研究, 2006, 27( 3): 114– 118.

## Distributed soil erosion model with the effect of gravitational erosion

JIN Xin<sup>1,2</sup>, HAO Zheir chun<sup>1</sup>, ZHANG Jir liang<sup>3</sup>, WANG Jia hu<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Hydrology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Institute of Hydraulic Research of YRCC, Zhengzhou 450003, China;

3 The Flood Control Office of YRCC, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** It is a characteristic that water power erosion and gravitational erosion are instantaneous on Loess Plateau. Most of the soil erosion models about Loess Plateau don't simulate gravitational erosion, which is one of causations that simulated results aren't satisfactory. Base on the characteristic of the soil erosion on Loess Plateau, in this article, the method quantifying the influence factors of the gravitational erosion is adopted, thus the grids of gully producing the gravitational erosion can be determined, and the effect of the gravitational erosion in the process of sediment yield and transport can be calculated. Based on the distributed hydrological model of grid to grid conflux, this article sets up a distributed soil erosion model of grid to grid sediment transport. With the calculation method of grid to grid conflux and sediment transport adopted in this article, the soil erosion model can simulate the effects of runoff and sediment from upslope on downslope erosion process. According to the calculated result with observed data of Xiaolihe gauge station, the simulated result of the soil erosion model is better.

**Key words:** soil erosion; distributed model; gravitational erosion; grid to grid conflux; sediment transport