

# 小流域水文及土壤侵蚀过程模拟方法研究

高佩玲<sup>1,2</sup>, 雷廷武<sup>2,3</sup>

(1. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 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; 3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 流域土壤侵蚀动态模拟, 需要采用合适的方法对坡面—沟道耦合问题及初始和边界条件进行正确的处理。将流域划分为坡面侵蚀与沟道侵蚀, 采用时间空间耦合处理方法, 实现了小流域坡—沟侵蚀过程中水流与泥沙输送的面—线耦合及沟道间的线—线连接。给出了模拟流域土壤侵蚀过程的控制微分方程、初始条件、边界条件及坡面向沟道汇水输沙的动态模拟处理方法。得到了较为符合实际的流域土壤侵蚀动态模拟模型。模拟结果与室内实验测量结果的比较表明, 模拟精度达到 80% 以上, 说明了动态模拟方法的可行性。

**关键词:** 小流域; 土壤侵蚀模型; 动态模拟; 有限单元法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0158-04

中图分类号: S157.1, P334

## Dynamic Simulation Method for Catchment Hydrologic and Soil Erosion Processes

GAO Pei ling<sup>1</sup>, LEI Ting-wu<sup>2,3</sup>

(1. College of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Dynamic modeling of hydrologic and soil erosion processes in catchment needs appropriate simulation methods to handle the water and sediment transfer on hillslope and in channel, as well as the initial and boundary conditions. Soil erosion in watershed, as a spatially and temporally coupled process, is divided into soil erosion in channels and soil erosion on hillslope. Soil erosion in watershed is partitioned into a surface-line system to deal with the hillslope-channel relation and a line-line connection for soil erosion in channel. The governing differential equation with initial and boundary conditions was outlined for watershed erosion modeling. The comparison of laboratory experimental results with model outputs indicates that the simulation accuracy is above 80%, which demonstrates the feasibility of the method. The simulation method presented in this study may supply a basis and reference for the simulation of soil erosion in watershed.

**Keywords:** watershed; soil erosion model; dynamic simulation; finite element method

流域由坡面和沟道组成。降雨条件下流域侵蚀经历了降雨产流—径流侵蚀产沙的过程。降雨侵蚀期间, 流域与外界进行动态水、沙交换, 内部各组成部分之间也通过一定的时、空关系相互作用, 形成流域侵蚀的动态变化过程。正确处理流域模型中坡—沟间、主沟—支沟间水—沙耦合关系的动态耦合、边界条件、初始条件的确定以及流域与外界水—沙关系是流域动态模拟模型的关键。著名的土壤侵蚀预报机

理模型 WEPP(water erosion prediction project)<sup>[1-4]</sup> 将流域划分地块, 将地块的土壤侵蚀预报结果累加得到流域土壤侵蚀。欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM(european soil erosion model)<sup>[5-8]</sup> 是一个流域次降雨土壤侵蚀过程模型。该模型将流域划分为坡面和沟道, 在处理坡面—沟道及主沟—支沟间水—沙耦合关系时采用点—线耦合方式, 而在地形变化较为剧烈的地区, 此种耦合方法不能很好地反映自然状况。

收稿日期: 2009-12-09

修回日期: 2010-10-31

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“黄土区多尺度小流域水蚀动态过程模拟研究”(40635027); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-231); 山东省高等学校优秀青年教师国内访问学者项目

作者简介: 高佩玲(1973—), 女(汉族), 河南省禹州市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀模型及侵蚀过程的计算机模拟研究。E-mail: gaoplxj@163.com。

通信作者: 雷廷武(1958—), 男(汉族), 湖北省洪湖市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土环境工程及土壤科学研究。E-mail: ddragon@public3.bta.net.cn。

本研究针对现有流域侵蚀模型研究中存在的问题,解决以下问题:(1)以面—线、点—线及线—线耦合相结合的方式,在流域模型中实现坡面—沟道间水—沙耦合关系、主—支沟水—沙耦合关系的动态模拟;(2)对边界条件、初始条件及坡面向沟道汇水输沙进行动态模拟;(3)通过对以上动态模拟方法的应用,分析其在流域侵蚀动态过程模拟中的可行性。

## 1 流域水沙动态关系分析

流域侵蚀过程是一个动态变化的过程,相应的侵蚀模型也是一个动态模型,侵蚀过程中的水位  $h(x, t)$ 、流速  $u(x, t)$ 、泥沙含量  $c(x, t)$  既是空间变量  $x$  的函数,也是时间  $t$  的函数。流域地表产流及侵蚀产沙量在空间、时间上的动态模拟问题是建立流域动态模型的核心。

坡面、沟道是构成流域的基本组成单元,若干坡面、沟道通过一定的空间关系构成流域,各组成部分间关系见图 1,虚线部分表明沟道系统由支沟道和主沟道通过一定的空间关系构成。系统对外所表现的特征并不是构成系统的所有简单单元特征的简单相加,而是在单元间相互作用后的一个整体表现。因而研究流域的侵蚀过程,必须在分别研究坡面、沟道侵蚀特征的同时,建立坡面—沟道的耦合关系、主沟道—子沟道间的耦合关系,实现坡面—沟道、沟道—沟道间的侵蚀量变化的动态模拟,从而实现流域的侵蚀过程动态模拟。

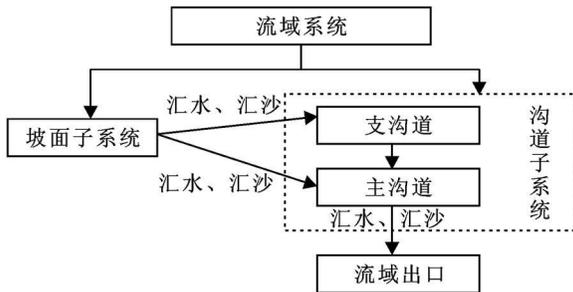


图 1 流域各组成部分间关系图

## 2 坡面与沟道水—沙耦合关系动态模型与数值模拟方法

降雨条件下,汇水区内坡面径流依据流域自然地貌,由坡面流线方向汇集入相应的沟道。同时,作为土壤侵蚀的动力及泥沙运输的载体,坡面径流也将坡面侵蚀泥沙输入沟道。解决坡面—沟道间的水沙过程耦合,须分析坡面水—沙汇入沟道的具体途径,并用数学手段解决其在不同时间、空点的动态耦合关系。

### 2.1 坡面与沟道径流模型

坡面径流的计算采用 Meyer 和 Wischmeier 所描述的土壤流失模型<sup>[9-11]</sup>的简化形式。模型中的击溅分散动能和地表径流量采用以下公式计算:

$$E = P(11.9 + 8.7lg i) \quad (1)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2s)^2}{P + 0.8s} \quad (2)$$

式中:  $E$ ——降雨的动能( $J/m^2$ );  $P$ ——降雨量(mm);  $i$ ——侵蚀雨强标准值(mm/h);  $Q$ ——地表径流量(mm);  $s$ ——水土保持措施对减少径流作用的参数。

地表径流的估算采用修正的美国农业部水保局曲线数法。

沟道中水流的水位、流速、泥沙含量的计算方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = \frac{q}{w} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{g \partial h}{\partial x} + \frac{uq}{wh} = g \left( \frac{S_x}{\sqrt{1 + S_x^2}} - S_{fx} \right) \quad (4)$$

$$h \frac{\partial c}{\partial t} + hu \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (hD_H \frac{\partial c}{\partial x}) + (D_r + D_l - c \frac{q}{w}) \quad (5)$$

$$q = q_s + Iw \quad (6)$$

式中:  $x$ ——笛卡儿坐标(m);  $t$ ——时间(s);  $h(x, t)$ ——垂直度量的水流深度(m);  $u(x, t)$ ——关于深度与宽度平均的水流在  $x$  方向上的流速(m/s);  $w$ ——沟道宽度(m);  $q(x, t)$ ——水流沿沟长分布的流量(侧向补给量,  $m^3/s$ );  $I$ ——降雨强度;  $q_s$ ——坡面侧向汇入沟道的流量( $m^3/s$ );  $g$ ——重力加速度( $m/s^2$ );  $S_x(x, t)$ ——沟道的坡度;  $c(x, t)$ ——泥沙含量( $kg/m^3$ );  $D_r$ ——径流的剥蚀率;  $D_l$ ——坡面泥沙汇入率;  $c(Iw + q_s)$ ——沟道中侵蚀量 [ $kg/(m^2 \cdot s)$ ];  $D_H$ ——泥沙在水中动力弥散系数( $m^2/s$ )。

分析以上坡面、沟道水流及泥沙输移方程,坡面上的径流是沟道水流来源,即  $Q$  是  $q_s$  的供给源。模拟计算降雨条件下坡面径流在时、空上对沟道的侧向汇流,就是要计算坡面径流对沟道空间点在不同降雨时段内的水流补给。将沟道在空间离散,由流域地形 DEM 分析,不同的沟道点对应不同的汇水坡面,由坡面汇入沟道汇水量受降雨量和汇水坡面坡长的影响。因此,找出沟道各点对应的汇水坡长,就可以计算得到坡面径流汇入沟道的流量。

依据流域 DEM 地形图,可建立坡长—沟道函数关系:

$$SL_i = f(x)$$

式中:  $SL_i$ ——坡面坡长;  $x$ ——沿沟道度量的曲线坐标点。

由此坡面汇入沟道的水量为:

$$q_{sj} = k \cdot I_j \cdot SL_i \quad (7)$$

式中:  $k$ ——汇水系数, 由沟道空间点位置决定;  
 $I_j$ ——不同时刻的降雨强度。

由以上的计算公式, 可计算出坡面水流通过沟道不同点汇集入沟道的动态变化过程。

## 2.2 坡面与沟道泥沙输移模型

坡面径流是坡面侵蚀产沙的动力和泥沙输送的载体, 坡面径流汇集入沟道的过程也是坡面侵蚀泥沙汇入沟道的过程。坡面侵蚀主要为击溅侵蚀, 计算方法为<sup>[9-11]</sup>:

$$\text{坡面击溅剥离(分散)率: } F = KE^b \times 10^{-3}$$

$$\text{坡面径流输沙(分散)率: } G = cQ^d (\sin S) \times 10^{-3}$$

式中:  $F$ ——击溅分散量( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $K$ ——土壤可蚀性参数( $G/J$ );  $G$ ——径流输沙量( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $c$ ——作物覆盖管理因子;  $S$ ——坡面的坡度(度);  $b, d$ ——经验值。

坡面击溅侵蚀量大部分会被坡面径流输运进入沟道, 计算中比较两者的大小, 较小者为坡面侵蚀泥沙量。

沟道中泥沙输移采用(5)式。DI 为坡面泥沙汇入率, 即坡面径流挟带的泥沙为沟道中泥沙的一个汇入源。由于不同沟道点有不同的汇水坡面, 不同的汇水坡面坡度和长度各不相同, 会产生不同的侵蚀量, 即坡面侵蚀量部分受坡度的影响。因此确定沟道各点汇水坡长就确定了坡面侵蚀向沟道汇入的泥沙量。

依据流域地形 DEM, 建立坡面坡度—沟道间数值关系:

$$SS_i = f(x)$$

式中:  $SS_i$ ——坡面坡度。

坡面汇入沟道的泥沙量为:

$$DI_{ij} = \min [F_{ij} (I_j), G_{ij} (I_j, SS_i)] \quad (8)$$

用以上公式可以不同时刻坡面侵蚀泥沙量汇集入沟道的动态变化过程。

## 3 沟道水沙模型

流域内水流及所挟泥沙由坡面汇集进入沟道后, 由支沟汇入上一级沟道, 汇同沟道中的水、沙进一步向上一级沟道汇集直至流出流域出口。水流汇集将引起沟道中水流水位、流速、泥沙含量的变化。建立各级沟道水、沙汇集关系, 是流域水沙运移模拟的关键。

### 3.1 各级沟道水流汇集模型

水流在沟道连接处汇入上级沟道, 影响只存在汇入沟道段。在汇水沟道段, 汇水量可当作坡面向沟道汇入一样处理, 即:

$$q'_{sij} = f(u_{ij}, h_{ij}) \quad (9)$$

$$q_{sij} = q''_{sij} + q'_{sij} \quad (10)$$

式中:  $q'_{sij}$ ——坡面水流汇入量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $q''_{sij}$ ——支沟向上一级沟道的汇水流量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $i$ ——沟道汇入点;  
 $q_{sij}$ ——沟道接收的总汇入量( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $u_{ij}$ ——水流速度( $\text{m}/\text{s}$ );  $h_{ij}$ ——水流深度( $\text{m}$ )。

### 3.2 各级沟道泥沙输移模型

泥沙向沟道的汇入可当作坡面泥沙向沟道汇入量一部分, 即:

$$DI'_{ij} = f(C_{ij}, u_{ij}) \quad (11)$$

$$DI_{ij} = DI''_{ij} + DI'_{ij} \quad (12)$$

式中:  $DI'_{ij}$ ——坡面泥沙汇入量 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  
 $DI''_{ij}$ ——沟道泥沙向上一级汇入量 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  
 $DI_{ij}$ ——沟道泥沙总汇入量 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  $C_{ij}$ ——泥沙含量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $u_{ij}$ ——水流速度( $\text{m}/\text{s}$ )。

以上模型实现了沟道中的水沙在不同时间段向上一级沟道汇入模拟, 进而实现了降雨条件下水流及侵蚀泥沙量由坡面进入沟道直至流域出口处的整个侵蚀动态过程模拟。

## 4 初始条件、边界条件以及流域与外界补排关系模型

### 4.1 初始条件

为实现数值模拟, 水流的起始流速  $u$ , 泥沙含量  $c$  及水位  $h$  必须给定, 即:

$$\begin{cases} h(x, 0) = H(t_0) \\ u(x, 0) = U(t_0) \\ c(x, 0) = C(t_0) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $t_0$ ——模型计算的侵蚀初始时刻;  $H, U, C$ ——由设定的模拟起始时刻决定。由于  $h$  要参与计算

$SK_{f \times j} = \frac{u_{ij}^2 n^2}{h_{ij}^2}$ , 故不能设为 0。

### 4.2 边界条件

流域外边界为不透水边界, 附近无无穷供给源, 故处理为二类零流量边界。坡面与沟道交汇处, 对于沟道, 在模拟降雨过程中, 水流不断由坡面汇入沟道, 将此点作为内边界处理, 由于降雨过程中汇入流量随产流时间、退流时间及降雨强度的变化而变化, 故处理为二类变流量边界。内边界处:

$$q|_{\iota=0} = 0 \quad (14)$$

由于受流域产流过程、退流过程及降雨强度的影响, 内边界条件将随之发生变化, 在整个流域侵蚀过程模拟中, 不同时刻依据此处控制的汇流区面积及降雨强度大小变化过程将边界流量、泥沙含量加以调整, 可实现其动态模拟。

### 4.3 外界补给量

降雨强度的大小变化直接影响着流域侵蚀量的变化,流域降雨侵蚀过程中,降雨强度的动态变化作为已知条件给定。降雨强度随时间变化关系为:

$$i = i(t) \quad (15)$$

### 4.4 排泄量

以流域降雨侵蚀产流、产沙过程为研究对象,流域下垫面的入渗过程为其水流的排泄过程。入渗量的动态变化过程将直接影响着流域超渗产流的过程,入渗量计算参照雷廷武等的研究成果<sup>[12]</sup>。

## 5 动态模拟方法的应用分析

采用流域土壤侵蚀动态模拟模型对室内模型流域 50 mm/h 降雨强度, 5 min 降雨历时条件下流域模型典型点处侵蚀产流、产沙过程中,径流流量、流速、径流含沙量的动态变化过程进行模拟。从模拟结果与测量结果比较分析可以看出,各沟道出口处径流流量相关系数( $r$ )分别为: 0.92, 0.90, 0.95, 0.92; 径流含沙量相关系数( $r$ )分别为: 0.92, 0.92, 0.96, 0.91, 模拟精度均高于 90%; 各沟道流速模拟结果的精度也高于 80%, 结果表明该流域侵蚀动态模拟模型及其计算方法是正确的,对流域内典型点处侵蚀产流产沙过程的模拟结果是合理的。

## 6 结论

在对流域侵蚀过程分析基础上,给出了流域侵蚀动态过程数值模拟中的模型,用于模拟;坡面与沟道间的水沙动态过程;沟道间水沙动态关系。给出了模型求解所需的初始及边界条件、流域边界补排量模型。应用以上动态模拟方法对室内模型流域土壤侵蚀过程进行模拟,模拟精度达到 80% 以上,表明以上模拟方法是可行的。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Ascough II, J C, Baffaut C, Nearing M A, et al. The WEPP watershed model: I. hydrology and erosion [ J ]

Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 1997, 40(4): 921-933.

- [ 2 ] Flanagan D C, Nearing M A. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model [ J ]. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 2000, 43(3): 573-583.
- [ 3 ] Laflen J M, Flanagan D C, Engel B A. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP [ J ]. Journal of A W R A, 2004, 40(2): 289-297.
- [ 4 ] Lei T W, Zhang Q W, Pan Y H, et al. Theoretical analysis and experimental verification of soil detachment rate equation of rill erosion in WEPP [ C ] // USA, Las Vegas, Nevada: ASAE Annual International Meeting, Riviera Hotel and Convention Center, 2003: 27-30.
- [ 5 ] Folly A, Quinton J N, Smith R E. Evaluation of the EUROSEM model for the Catsop watershed, The Netherlands [ J ]. Catena, 1999, 37: 507-519.
- [ 6 ] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. Reply to discussion on The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [ J ]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 567-568.
- [ 7 ] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A process-based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [ J ]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 527-544.
- [ 8 ] Smith R E, Goodrich D A, Quinton J N. Dynamic distributed simulation of watershed erosion: KINEROS II and EUROSEM [ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50: 517-520.
- [ 9 ] Meyer L D. Evaluation of the universal soil loss equation [ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39: 99-104.
- [ 10 ] Meyer L D, Foster G R. Effect of flow rate and canopy on rill erosion [ J ]. Trans of the ASAE, 1975, 18: 905-911.
- [ 11 ] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [ J ]. Transaction of American Geophysical Union, 1958, 39(3): 285-291.
- [ 12 ] 雷廷武, 毛丽丽, 李鑫, 等. 土壤入渗性能的线源入流测量方法研究 [ J ]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 1-5.