文章编号:1001 - 5485(2009)12 - 0017 - 05

复杂侵蚀环境下分布式土壤流失水动力学模型
——以黄河多沙粗沙区为研究实例

姚文艺,高 航,王玲玲,李 勉
(黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室,郑州 450003)

摘要:以黄河多沙粗沙区为研究对象,基于实体模型试验对黄土坡面-沟道系统侵蚀产沙机理的认识,根据侵蚀动力学、水文学、泥沙运动力学的基本理论,以地理信息系统为平台,研发了复杂侵蚀环境下的分布式土壤流失水动力学模型;揭示了植被作用下坡面-沟道系统侵蚀产沙耦合规律;认识到坡沟产沙之间具有内在的自调控关系;提出了当量糙率的概念;建立了基于GIS的分布式土壤流失水动力学模型;构建了基于ArcGIS平台的支持系统,实现了GIS与土壤流失模型、产汇流模型与产输沙模型的紧密耦合。通过实例验证了模型对于中尺度流域土壤流失的模拟亦有较满意的精度。

关 键 词:侵蚀环境; 坡面-沟道系统; 紧密耦合技术; 分布式土壤流失模型; 黄土高原
中图分类号:S157 **文献标识码**:A

黄河多沙粗沙区位于黄土高原干旱半干旱地区,即河口镇至龙门区间及北洛河、泾河上游等,其土壤侵蚀类型区属于黄土丘陵沟壑区,地形破碎,坡陡沟深,侵蚀环境十分复杂。虽然该区面积仅为7.86万 km^2,只占黄河中游流域面积的23%,而由这里进入黄河的泥沙量却占整个中游地区输沙量的70%,是黄河泥沙尤其是粗泥沙的主要来源区,也是世界上水土流失极为严重的地区之一。因此,以黄河多沙粗沙区为研究实例,构建土壤流失评价预测模型不仅对黄土高原尤其是多沙粗沙区治理规划、设计与管理具有重要的科技支撑作用,也可以为黄土高原土壤流失数学模拟理论及技术提供一个侵蚀环境极为复杂的研究实例,具有很大的科学意义。本文首先通过野外人工降雨与室内径流实体动床模型试验的方法,揭示了草被在坡面不同空间分布下,坡面-沟道系统侵蚀产沙耦合关系,提出了当量糙率概念;基于对侵蚀产沙规律的认识和以往的研究基础[1],建立了可以反映植被、工程措施对产汇流影响且分坡面、沟坡、沟床等复杂地貌单元计算产流产沙的分布式模拟方法;实现了专业模型与GIS紧密耦合的技术。利用岔巴沟流域定位观测资料率定模型,并对杏子河流域的暴雨产流产沙进行模拟验证。

1 坡面-沟道系统侵蚀产沙耦合关系

1.1 试验设计

坡沟系统耦合侵蚀产沙关系野外降雨试验在安塞试验站进行。按照黄土丘陵沟壑区梁峁坡面与沟坡紧密相连所构成的坡沟系统设计模型。模型宽3 m,水平投影长12 m,梁峁坡坡度5°~20°,沟坡坡度35°;试验用土为安塞黄绵土,裸坡。表层和耕作层土壤密度分别控制在1.05 g/cm^3 和1.4 g/cm^3 左右;试验雨强为60,90,130 mm/s,降雨时间固定为60 min。

草被作用下坡沟系统侵蚀产沙关系径流试验利用室内实体模型进行。坡面坡度为20°,沟坡为50°。模型坡面长5 m,沟坡长3 m。试验选择3.2 L/min 和5.2 L/min 两个流量级,大致相当于野外暴雨雨强1.0 mm/min 和1.6 mm/min。坡面草被覆盖度分为5种:0,30%,50%,70% 和90%,草被在坡面的空间配置分为坡上部、坡中部和坡下部3种,90% 覆盖面积比不再有空间配置;沟坡全为裸坡。每场次试验至少重复一次。试验用草为野牛草(Buchloe dactyloides)。试验用土为郑州邙山地表层黄土。

1.2 坡沟系统耦合侵蚀产沙关系

试验表明,在不同降雨强度下,坡沟系统输沙率过程的变化是不同的。高强度降雨下的输沙率峰值出现在降雨过程的前期,若降雨强度较小,输沙率峰值出现在降雨过程的后期。在不同降雨强度下,坡沟系统的侵蚀产沙总量大于坡面、沟道相互独立时的侵蚀产沙量。不同草被覆盖度及空间配置下,坡沟系统侵蚀产沙的阶段性变化不如坡面那样明显,

收稿日期:2009-09-10
基金项目:"十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAB06B01);水利部公益性行业科研专项(200701035)
作者简介:姚文艺(1957-),男,河南周口人,博士,教授级高级工程师,主要从事土壤侵蚀模拟、河床演变与河道整治研究,(电话)13607668911(电子信箱)wyyao@yrihr.com.cn。

且坡面与坡沟系统间的侵蚀产沙特征及规律差异很大,后者要比前者复杂得多。因而,应将坡面、沟道作为一个完整系统模拟。

在试验降雨强度和坡度范围内,单位能量越大,径流输沙率越大;在能量一定的情况下,径流输沙率随着降雨强度的增大而增大(图 1)。也就是说,侵蚀产沙与水流能量之间存在函数关系,可以用能量的观点建立坡沟系统的侵蚀产沙模式。

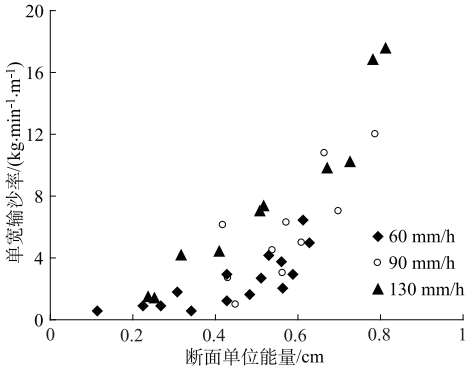

图 1 单位能量与单宽输沙率关系

Fig. 1 Relationship between the unit energy and sediment transport rates per unit width

草被对坡沟系统侵蚀产沙影响的试验表明,无论是大流量还是小流量,随着覆盖度的增加,其阻力系数均呈指数增加。在有草被作用下,小流量时草被覆盖下的径流 Darcy-Weishach 阻力系数普遍大于 28,约为裸坡的 5 ~ 60 倍;对于大流量,约为裸坡的1.5 ~ 4.0倍,且所有草被覆盖下的径流阻力系数相差不大。草被对侵蚀产沙的作用与其空间布置有关,布置坡上方的草被作用小于坡中部的,坡中部的又小于坡下方的(图 2)。同时,在坡沟系统侵蚀产沙过程中,存在着以坡面侵蚀产沙为主或以沟坡侵蚀产沙为主的现象,其决定因素主要为径流量及坡面草被覆盖度。例如,对小流量而言,由坡面产沙为主向沟坡产沙为主的转折点是坡面草被覆盖度达到 80%,小于此覆盖度,则以坡面产沙为主;对大流量而言,发生这一转折的坡面草被覆盖度大约为 60%。进一步分析表明,草被作用下坡沟系统产沙比与坡面被覆度之间符合指数关系。这些认识为建立复杂侵蚀环境下的土壤流失模型奠定了理论基础。

2 模型的建立

建立的分布式土壤流失数学模型包括产汇流模型和产输沙模型,两者是紧密耦合的。产汇流模型包括蒸散发模块、超渗产流模块和汇流模块;产输沙

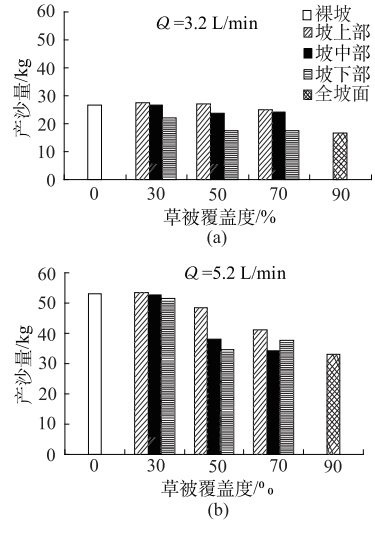

图 2 草被空间配置对坡沟侵蚀产沙的影响

Fig. 2 Effect of spatial distribution of grass on the erosion and sediment yield in the hillslope-gully side erosion system

模型包括雨滴溅蚀模块、梁峁坡侵蚀模块、沟坡侵蚀模块、沟槽侵蚀模块和输沙模块。

2.1 植被截流计算

植被截流方程为

$$P_i = P_c + (P_0 - P_c)\mathrm{e}^{-at}。 \quad (1)$$

式中:P_c为最终截留强度(mm/h);P_0 为初始截留强度(mm/h);α 为林冠特性系数,即衰减系数。

2.2 蒸散发计算

蒸散发在垂向上分为两层,一是植被及根系截留层蒸散发,二是土壤非饱和层蒸散发。植被及根系截留层蒸散发方程为

$$E_{ai}(t) = E_{pi}(t)\left\{1 - \frac{SR_i(t)}{SR_{\max_i}}\right\}。 \quad (2)$$

式中:$E_{ai}(t)$ 为单元栅格 i 上 t 时段的植被及根系截留层实际蒸散发量;$E_{pi}(t)$ 为单元栅格 i 上 t 时段的蒸散发能力,由蒸发站实测资料获得;$SR_i(t)$ 为单元栅格 i 上 t 时段内的植被及根系截留层缺水量;$SR_{\max_i}$为单元栅格 i 上的植被及根系截留层最大截流量。

土壤非饱和层蒸散发方程为

$$E_{bi}(t) = E_{pi}(t)\left\{1 - \left(\frac{SR_{uzi}(t)}{SR_{uzi}(t) + D_i(t)}\right)^{\beta}\right\}。 \quad (3)$$

式中:$E_{bi}(t)$为单元栅格 i 上 t 时段的非饱和层实际蒸散发量;SR_{uzi}为单元栅格 i 上 t 时段的非饱和层蓄水量;$D_i(t)$为单元栅格 i 上 t 时段的非饱和层缺水量;β 为土壤非饱和层蒸散发控制指数;$E_{pi}(t)$意义同上。

2.3　超渗产流计算

超渗产流计算模式为

$$RS = \begin{cases} 0 & (P \leqslant F)\ , \\ P - F & (P > F)\ 。 \end{cases} \tag{4}$$

式中:RS 为时段地面径流量;P 为在忽略雨期蒸发量的时段降雨量; F 是时段下渗量,均以 mm/s 计。根据土壤非饱和水流运动理论,水流的垂向运动可由一维水动力方程描述,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} D\left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) + \frac{\partial K}{\partial Z}\ 。 \tag{5}$$

式中:θ 为土壤含水率;K 为非饱和土壤水力传导度;D 为土壤的水力扩散度;Z 为固定基面以上的高程。

下渗能力采用 Horton 下渗方程

$$F = F_c + (F_0 - F_c)\mathrm{e}^{-kt}\ , \tag{6}$$

式中: F 为下渗能力;F_c 为稳定下渗能力;F_0 为最大下渗能力;k 为随土质而变的指数;t 为时间。

2.4　汇流计算

黄土地区坡面很陡,使得洪水波的传播速度快,沿程坦化小,具有运动波的传播特征。根据文献[2]的研究,可以利用圣维南运动波方程描述坡面流,将其与达西定律和曼宁公式联解,得一阶拟线性坡面流偏微分方程为

$$\frac{\partial q}{\partial x} + K_s^{-\frac{1}{\alpha}} \frac{1}{\alpha} q^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \frac{\partial q}{\partial t} = r_e(t)。 \tag{7}$$

式中: q 为单宽流量;x 为流程;t 为时间;h 为坡面流水深;$r_e(t)$为净雨过程即产流过程;α 为指数,取为 5/3;n 为糙率系数。为反映水土保持工程措施对径流泥沙运动的影响,建立当量糙率系数的概念。所谓当量糙率系数,是指淤地坝等工程措施对洪水的阻滞作用相当于增加了边界阻力,从而引起水力参数相应发生改变的一个糙率比拟值。根据综合分析,确定的淤地坝、梯田的当量糙率系数分别为0.40和0.10。

2.5　雨滴溅蚀计算

在雨滴下落角度为 φ 时,单位面积单位时间内一次降雨的溅蚀量 D_R 为

$$D_R = K_\mathrm{d}\, \rho d_{50}^4\, V_{m50}^2 \cos^2\varphi f(y)\ 。 \tag{8}$$

其中,径流深 y 的函数 $f(y)$ 应满足如下边界条件,

$$f(y) = \begin{cases} 1 & (y = 0)\ , \\ \dfrac{d_{50}^2}{y^2} \mathrm{e}^{-\frac{3d_{50}^2}{8y^2}} & (0 < y < 3d_{50})\ , \\ 0 & (y \geqslant 3d_{50})\ 。 \end{cases}$$

雨滴终速采用姚文艺公式[3]:

$$V_{\mathrm{m}50} = \begin{cases} \sqrt{(38.9\dfrac{v}{d_{50}})^2 + 2\,400 g d_{50}} - 38.9\dfrac{v}{d_{50}} \\ \qquad (d_{50} \leqslant 3\ \mathrm{mm})\ , \\ \dfrac{d_{50}}{0.113 + 0.0845 d_{50}} \\ \qquad (3\ \mathrm{mm} < d_{50} \leqslant 6\ \mathrm{mm})\ 。 \end{cases} \tag{9}$$

式中:g 为重力加速度;v 为空气运动粘滞系数;K_d 为土壤分散系数;d_{50}为雨滴中值粒径。

2.6　梁峁坡径流侵蚀量

梁峁坡径流侵蚀率为

$$e_r = A_r \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m}(\tau_0 - \tau_c) V\ 。 \tag{10}$$

式中: e_r 为梁峁坡单宽土壤侵蚀率;γ_s,γ_m分别为泥沙密实干密度和浑水密度;τ_0 为水流切应力;τ_c 为梁峁坡上泥沙的起动切应力;V 为水流平均速度;A_r 为系数,由实测资料适线率定。

2.7　沟坡侵蚀量

设用于沟坡土壤侵蚀的能量系数为 e_2,τ_c'为沟坡泥沙起动流速,则沟坡单宽土壤侵蚀率为

$$e_g = e_2 A_r \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m}(\tau_0 - \tau_c')V\ 。 \tag{11}$$

2.8　沟槽侵蚀量

设 e_c 为沟槽单宽侵蚀率,则沟槽侵蚀率为

$$e_c = \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \frac{Ce_3}{\kappa\omega} \gamma_m h_3 J_3 U_* V \tag{12}$$

式中: U_* 为摩阻流速,$U_* = \sqrt{g h_3 J_3}$;h_3 为沟槽水深;J_3 为沟槽比降;κ 为卡门常数;e_3 沟槽发生冲刷的能量系数;C 为系数;ω 是泥沙颗粒群体沉速; V 为沟槽水流平均流速。

考虑到坡沟系统侵蚀产沙的耦合关系,引入前述提及的草被作用下坡沟系统侵蚀产沙自调控关系

$$E_p = ae^{cX}。 \tag{13}$$

式中:E_p 为沟-坡产沙比;a 和 c 为系数;X 为坡面植被覆盖度(%)。由式(13)对计算的梁峁坡、沟道(包括沟坡、沟槽)的侵蚀量进行自检验和校核,使计算结果更符合坡沟系统的侵蚀产沙规律。

2.9　泥沙输移计算

利用泥沙输移比的概念模拟泥沙输移。龚时旸等研究认为[4],在黄土高原丘陵沟壑区,泥沙输移比接近于 1;牟金泽和孟庆枚分析了无定河支流大理河的泥沙输移特点,认为该流域各次洪水的冲泻质泥沙约占总输沙量的 95% 以上,也证明了泥沙输移比接近于 1[5]。因此,取泥沙输移比为1.0。流域

出口断面的产沙量可由单元土壤侵蚀量错开若干个传播时段迭加求得。

3 模型支持系统

模型支持系统的总体功能包括基础数据组织、时空数据插值与离散、基于流域地形数据的相关空间分析、基础水文分析、模型运算、数据管理和查询。支持系统采用 ARCMAP 的 VBA 环境作为开发平台。以 Windows2000/XP 作为操作系统,以 ARCGIS Dexktop 9.0作为 GIS 平台,以 Microsoft office2003 作为支持软件。

利用 VBA + ArcObiects 实现开发模型所需要的各种功能模块,自动完成土壤流失模拟过程中的各种分析计算,对模拟结果进行反演,对计算结果(包括中间结果)进行统一管理与可视化并集成,最终形成一套完整的流域土壤流失模拟系统。支持系统功能模块主要包括工程管理、基础数据计算、数据成果管理、模型运算与反演 4 个部分。

为使模型运算与 GIS 系统紧密集成,以 ArcGIS Personal Geodatabase 数据模型为主进行数据的存储与管理,借助于 ArcObjects 进行相应基础运算与空间分析,基于 ArcObjects 自行开发实现模型运算和数据成果管理功能。另外,选取 ArcGIS8. x 后组件系统,其每一功能都提供了相应的接口,通过接口与 ArcGIS 进行全方位通信,实现数据模型所需的数据管理、分析计算和显示等功能,同时,在开发方式上,采用 ArcGIS 提供的开发工具进行开发,从而可以完全实现 ArcGIS 的所有功能。另外,将系统的界面、数据库统一在 ArcGIS 系统中。

4 模型应用

4.1 模拟流域概况

以无定河的二级支流岔巴沟作为模型率定的代表流域。该流域属黄土丘陵沟壑区第一副区,流域面积 205 km^2,沟道长26.2 km,河道平均比降7.57‰。流域内设有曹坪水文站,集水面积 187 km^2。岔巴沟流域上游以梁地沟谷为主,下游以峁地沟谷为主,中游两者皆有。沟坡坡度一般大于 60°;峁梁坡、梁顶部坡度平缓,约在 5° ~10°以内;梁的两侧和峁腰上部较陡,下部较缓,变化范围在 15° ~30°之间。根据水文观测资料统计,岔巴沟流域多年平均降水量约为 450 mm,实测最大雨强达到3.5 mm/min,年径流深平均为 54.0 mm,平均年侵蚀模数为 15 780 t/km^2,实测最大含沙量为 1 050 kg/m^3。

以杏子河流域作为模拟应用对象。杏子河为延河的一级支流,全长102.8 km。杏河水文站控制区总面积470.65 km^2。流域自然地理区划和岔巴沟流域一致,都属于黄土丘陵沟壑区第一副区,沟壑密度大,地形起伏较大,水土流失强烈。选取产流量和产沙量最大的 4 个场次洪水作为应用模拟初始条件(表 1)。

表 1 杏子河流域代表性洪水资料

Table 1 Hydrologic data of the experimental area in Xingzihe watershed

序号	降雨开始时间(年-月-日 时:分)	降雨结束时间(年-月-日 时:分)	降雨量/mm	洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	沙峰含沙量/($kg \cdot m^{-3}$)
1	1982-07-28 08:00	1982-07-31 14:00	95.2	75.0	923
2	1982-08-06 08:00	1982-08-08 02:00	24.2	43.5	902
3	1985-05-11 17:30	1985-05-13 20:00	26.3	278.0	1 010
4	1985-07-13 20:00	1985-07-16 14:00	45.5	214.0	1 120

4.2 模型率定

利用 GLUE 方法,根据岔巴沟流域 9 场洪水的率定结果见表 2。另外,率定计算结果表明,模拟的洪峰流量与实测洪峰流量的误差在 -27.1% ~37.4%之间;洪现时间不重合的仅有两次,相差 0.5 h;确定性系数在0.67 ~0.93之间,平均为0.74。计算产沙量误差在 -26.4% ~39.1%之间,平均为 21.6%;计算沙峰输沙率与实测的相比,误差在 -37.2% ~45.2%之间。

4.3 模型应用

由杏子河流域 4 场洪水模拟结果知,洪水径流深的模拟误差为 -34.6% ~ -24.21%,洪峰流量模拟误差介于 -3.08% ~4.29%,确定性系数不小于 0.533,最大为0.857。峰现时间误差最大为 1 h。产沙量误差最大为34.5%,平均为27.5%;沙峰含沙量误差为 -37.1% ~43.2%,平均为12.15%;确定性系数平均为0.66。由此可以看出,所研制的模型对于中尺度流域土壤流失模拟结果是可以接受的(表 3)。

表 2 模型主要参数率定结果

Table 2 Rating results of main parameters in the model

初始下渗能力 f_0/((mm·s^{-1})·min)	稳定下渗能力 f_c/((mm·s^{-1})·min)	随土质而变的指数 k/((mm·s^{-1})·min)	产流参数 W_t	综合系数 B_c	江流计算权重系数 θ
8 ~9	1.6 ~1.7	0.243	15 ~30	0.2	0.6 ~1.0

表 3　杏子河流域洪水模拟误差及确定性系数

Table 3　Simulated errors and certainty coefficients of floods in Xingzihe watershed

洪水场次编号	径流模拟结果				泥沙模拟结果		
	径流深误差/%	洪峰误差/%	峰现延迟/h	确定性系数	产沙量误差/%	沙峰误差/%	确定性系数
19820729	-34.6	1.55	0	0.765	24.6	43.2	0.65
19820806	-30.22	2.18	0	0.533	21.2	8.2	0.71
19850511	-24.21	4.29	1	0.857	29.8	34.3	0.62
19850712	-30.57	-3.08	1	0.766	34.5	-37.1	0.65

5　结　语

揭示了草被空间分布对侵蚀产沙的影响机理，建立了当量糙率的概念，用以反映各类水土保持工程措施对产汇流的影响，从而实现了模型可以对不同方案下水土保持治理效益进行评价预测的功能；以侵蚀动力学、水文学、泥沙运动力学的理论为指导，以地理信息系统为平台，构建了黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型；开发了基于 COMGIS 的分布式土壤流失模拟系统，实现了土壤流失模型与 GIS 的紧密耦合，达到了分布式土壤流失模型时空概念的表达与 GIS 中的时空概念表达的兼容，在参数提取过程中做到了土壤流失数学模型与 GIS 的信息双向交换与修改。

参考文献：

[1]　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，2001：168－207.

[2]　KIRKBY M J. Hillslope Hydrology[M]. UK: John Wiley & Sons Ltd，1978.

[3]　姚文艺，陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式[J]. 河海大学学报，1993，(3)：21－27.

[4]　龚时旸，熊贵枢. 黄河泥沙的来源和输移[C]//第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京：光华出版社，1998.

[5]　牟金泽，孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[R]. 郑州：黄河水利科学研究所，1980.

（编辑：周晓雁）

Distributed Hydrodynamic Model for Complex Erosion Environments

——A Case Study in the Rich and Coarse Sediment Area of Yellow River Basin

YAO Wen-yi, GAO Hang, WANG Ling-ling, LI Mian

(Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Sediment Research of Yellow River of Ministry of Water Resources, Zhengzhou Henan　450003, China)

Abstract: On the basis of the analysis of the erosion and sediment yield mechanism of hill slope-gully surface erosion system by physical model experiments, the basic theories of erosion dynamics, hydrology and sediment transport mechanics, the distributed soil loss model and support system for complex erosion environments were developed by GIS in the rich and coarse sediment area of the Yellow River basin. The coupling relation of erosion and sediment yield of hill slope-gully side erosion system under vegetation effects was disclosed. The conception of "equivalent roughness" was put forwarded. The distributed hydrodynamic model for soil erosion based on GIS was established, which close couples the GIS, soil loss model, runoff produced model, sediment yield and transport model. Also, the support system based on ArcGIS was developed. By two illustrations, the simulated results obtained using this model for larger water bain soil loss were examined.

Key words: erosion environment; hill slope-gully side erosion system; close coupling technique; distributed soil loss model; loess plateau