

分布式小流域侵蚀模型及应用

叶爱中¹, 夏 军², 乔云峰², 王纲胜²

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 针对黄土高原水土流失严重问题, 基于分布式水文模型的基础上, 建立了小流域侵蚀产沙输沙模型. 产沙模型采用 USLE 模型, 并结合黄土高原侵蚀的特色进行改进, 考虑了降雨、土壤、植被、水保等因素对侵蚀的影响. 输沙模型结合分布式水文模型的河网汇流, 制定了一套简单的输沙方案. 岔巴沟流域的实测资料验证该模型简单可行. 能够模拟出流域的实际侵蚀图, 为流域侵蚀的预报及水保工程的规划提供科学依据.

关键词: 侵蚀; 输沙; 流域; 岔巴沟

通用土壤流失方程^[1] (universal soil loss equation, USLE) 早在 20 世纪 60 年代提出, 仍是目前预测土壤侵蚀最为广泛使用的方法. 该方程采取 6 个影响因子连乘的形式:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中, A 为土壤流失量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 、 S 为坡长和坡度因子; C 为耕作和管理因子; P 为水土保持措施因子. 特点是计算简单, 所需参数基本能在实际流域中找到. 后来很多学者对该方程进行了改进, 对每个影响因子均做过大量的分析与实验研究. 如 Renard 等^[2] 提出的 RUSLE 则将径流因子考虑了进去. 蔡崇法等^[3] 将该方程结合 IDRISI 地理信息系统建立了预测小流域土壤侵蚀量的模型, 并在王家桥小流域进行了预测, 分析出土壤侵蚀量分布图, 可以有效地指导水保工程的实施. 在 SWAT 分布式水文模型中就采用了改进的通用土壤流失方程 (modified universal soil loss equation, MUSLE). SWAT 的理论手册中详细地给出了各个影响因子的计算方法、经验公式以及实验得到的参数. 张雪松等^[4] 曾将 SWAT 应用于黄河下游小花间 (小浪底-花园口) 区域洛河卢氏水文站以上流域区, 结果表明 SWAT 模型在研究区对流域长期连续径流和泥沙负荷模拟具有较好的适用性, 具有一定的推广意义.

另外, ANSWERS2000 是一个用于流域土壤侵蚀过程模拟的分散型物理模型^[5-6]. 模型引入地表入渗和蒸散发模拟模块, 使模型可以模拟连续的降雨侵蚀过程. 其中径流和入渗模块以 Green-Ampt 入渗方程计算; 泥沙模块中, 产沙计算采用了土壤可蚀性指标以及单位水流功率理论和临界剪切力原理. 输沙过程计算把 Foster 和 Meyer 方法引入 Yalin 公式, 并以此建立了泥沙输移模块. 牛志明等^[7] 将此模型运用于三峡库区小流域侵蚀产沙、

收稿日期: 2006-07-26; 修订日期: 2007-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50239050), 高等学校博士点基金项目 (20040486038)

作者简介: 叶爱中 (1978—), 男, 讲师, E-mail: azye@bnu.edu.cn

地表径流以及不同土地利用类型水沙分布状况的模拟中. 通过两个不同小流域模拟结果的对比, 结果表明, 模型在应用于我国三峡库区小流域土壤侵蚀模拟时, 其模拟结果与实测结果具有较高的吻合度, 模拟结果基本可信. 但是, 对于一些陡坡、林地等特殊地类, 模型的模拟误差较大, 其模拟精度还有待于进一步提高.

蔡强国等^[8]以陕西省岔巴沟流域及其支流实测降雨水文资料为基础, 系统地分析了流域的降雨、径流、地貌因子在流域产沙中的作用, 进而将影响产沙的因素概括为径流深、洪峰流量、流域面积、流域沟道密度, 并作为产沙预报的指标, 建立了岔巴沟流域次暴雨产沙的统计模型. 经检验, 该预报公式具有一定的精度. 刘高焕等^[9]将地理信息系统(GIS)与土壤侵蚀模型结合, 建立了基于地块汇流网络的小流域水沙运移模拟方法. 通过实测资料建立了崩顶地块径流深、侵蚀产沙模数与降雨动能、最大30分雨强、前9天影响雨量、坡度、坡长的侵蚀产沙关系式; 并以植被覆盖度修正系数、农业管理措施修正系数对侵蚀产沙加以修正. 通过GIS确定每个单元的流向, 建立汇流模型计算水沙的全流域运移过程. 弥补了传统上的侵蚀产沙经验关系式的不足; 实现了侵蚀产沙模型与GIS的深层次耦合, 使各子模型内部的接口更加紧密, 为模型更有效地利用外部数据提供了可能. 采用地块为模型的计算单元, 更符合流域实际的土地利用状况, 同时避免了在引入GIS进行模拟研究时, 采用栅格划分方法对小流域自然地貌单元的破坏以及栅格法计算时所产生的累计偏差. 许炯心^[10]通过回归分析在无定河流域建立了年产沙模数与各影响因子的关系.

$$Y_s = 1.6086C_r^{1.2911} P_1^{1.0919} P_{30}^{1.1887} P_h^{0.3182} A_c^{-0.1909} A_{fg}^{-0.08878} \quad (2)$$

式中, Y_s 为全年沙产沙模数; C_r 为径流系数; P_1 为最大一日雨量; P_{30} 为最大30日累积雨量; P_h 为汛期降雨量; A_c 为坝地面积; A_{fg} 为梯田、种草、林地面积. 该关系能够很好地解释水保工程对流域侵蚀的影响.

上述多种计算流域侵蚀产沙模型, 在一定程度上取得了很好的模拟效果, 但也存在很多问题, 主要问题有: (1) 大部分工作是基于某个流域经验统计的结果, 虽然统计模型的结果很好, 但很难拓展到其它流域; (2) 现有泥沙模型的时间尺度大都是月或年, 主要是从宏观尺度上研究整个流域的产沙量, 对流域面源污染做得并不是很多, 尤其在计算洪水产沙过程时很难达到合理的含沙量值.

针对以上问题, 在分布式水文模型的基础上, 建立分布式侵蚀输沙模型. 该模型既具有明确的物理机制, 又结合了现有的大量统计规律. 模型主要解决的问题有: (1) 采用了分布式时变增益模型进行流域的产流计算, 比传统统计产沙模型中产流计算的产流量要准确; (2) 坡面产沙采用了USLE模型, 并结合黄土高原的特色对其进行了改进; (3) 结合分布式水文模型河网汇流与水流的挟沙力, 能够得到每段沟道的侵蚀或沉积量, 还能计算出其输沙量; (4) 此处建立的分布式产沙输沙模型时间尺度可以到分钟, 比传统的统计模型有了很大拓展.

将此模型应用于黄河流域的岔巴沟流域, 取得了很好的模拟效果.

1 分布式侵蚀模型整体结构

分布式侵蚀产沙模型是嵌套在分布式时变增益水文模型中计算的^[11-13]. 首先由分布式水文模型将流域划分成多个水文单元(网格或者子流域), 提取各个水文单元的信息

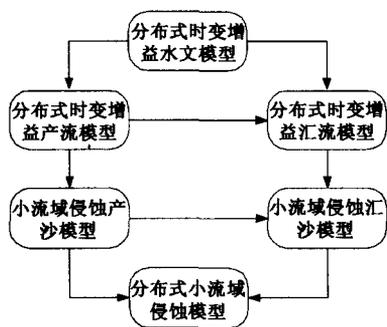


图1 分布式小流域侵蚀模型整体图

Fig. 1 The whole frame of distributed soil erosion model on the small watershed

(包含降雨、蒸发、覆被、土壤、土地利用等); 然后在每个单元上进行产流计算, 产流计算结果同单元的地表及土壤信息代入产沙模型中即可得到每个单元的侵蚀量, 同产水量相除就得到单元的含沙量; 最后在单元间进行汇流计算, 汇流计算可以得到每个单元间河道的进出流量^[14], 与此同时计算汇沙模型, 能够得到进出水体的含沙量. 从上游向下游依次计算到流域出口即可得出整个流域的产沙与汇沙过程及产沙量.

2 分布式时变增益水文模型简介

DTVGM 产流模型是一水量平衡模型^[13]. 实际计算中通过迭代计算出蒸散发、土壤水含量、地表径流、壤中流与基流. 其产流计算公式如下:

$$P_i + AW_i = AW_{i+1} + g_1 \left(\frac{AW_u}{WM_u \cdot C_j} \right)^{g_2} P_i + AW_u \cdot K_r + Ep_i \cdot K_e + AW_{g_i} \cdot K_g \quad (3)$$

式中, P 为降水; AW 为子流域土壤湿度 (mm); AW_u 为子流域上层土壤湿度 (mm); AW_g 为子流域下层土壤湿度 (mm); WM_u 为上层土壤饱和含水量 (mm); u 为英文 up 简写, 表示表层土壤; g_1 与 g_2 是时变增益因子的有关参数 ($0 < g_1 < 1, 1 < g_2$), 其中 g_1 为土壤饱和后径流系数, g_2 为土壤水影响系数; C 为覆被影响参数; K_r 为土壤水出流系数; K_g 为地下水出流系数; K_e 为蒸散发系数, i 为时段数, j 为子流域单元号, Ep 为潜在蒸散发.

汇流计算结合动力网络理论, 将河网建立成无尺度网络. 将网络分成坡面与河道两部分来进行汇流计算. 在每个节点 (产流单元) 内用运动波计算, 节点间通过网络连接汇流计算. 该法完全模拟实际的流域汇流路径与模式, 理论合理^[14], 计算简单.

3 单元坡面侵蚀产沙模型

此处的坡面指的是广义的坡面, 在黄土高原上被称为坡沟系统, 由坡面和沟道两大单元组成, 坡面又可分为沟间地和沟谷地两个单元, 以及沟间地的崮顶 (坡度 $0^\circ - 5^\circ$)、崮坡上部 ($5^\circ - 20^\circ$)、梁崮坡下部 ($20^\circ - 30^\circ$) 等部分^[16]. 后文提到的沟道侵蚀中的沟道主要指干流的河道与大支流的河道.

对坡面侵蚀产生影响的因素有: 气候、地形地貌、土壤、植被、土地利用等多种因素. USLE 模型基本都考虑到了这些因素的影响, 也是现在最通用的侵蚀产沙模型. 此处产沙模型采用 USLE 模型的改进版本 MUSLE, 并结合我国黄土高原的特色进行了局部的改进.

MUSLE 的形式如下^[1]:

$$sed = 11.8 (Rs \cdot q \cdot area)^{0.56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (4)$$

式中, sed 为产沙量 (t); Rs 为地表径流深 (mm); q 为时段内洪峰流量 (m^3/s); $area$ 为单元

面积(m^2); K 为土壤可蚀性因子; C 为覆被与管理因子; P 为水土保持因子; LS 为地形因子; $CFRG$ 为颗粒大小影响因子。

MUSLE 模型中考虑到了地表径流深(净雨)、时段内的洪峰流量,这些可以由水文模型来提供。土壤可蚀性因子反映了流域的土壤属性,可以通过多年实际监测资料或者根据土壤属性进行计算得到。同时该模型详细地考虑了水土保持的影响。地形的影响可以由高分辨率的 DEM 得到,本文中采取的是 $50m \times 50m$ 的 DEM。

由于式(4)需要一个时段内的洪峰流量与时段净雨,这个时段不应该太短,所以式(4)主要针对日及以上时段进行产沙模拟,此处希望做的是实时的对降雨径流产沙进行模拟,所以将其改进为:

$$sed = \alpha \cdot (Rs \cdot I \cdot area)^\beta \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CFRG \quad (5)$$

式中, sed 为产沙量(t); Rs 为地表径流深(mm); I 为雨强; $area$ 为单元面积(m^2); K 为土壤可蚀性因子; C 为覆被与管理因子; P 为水土保持因子; LS 为地形因子; $CFRG$ 为颗粒大小影响因子; α, β 为产沙参数。

式(4)是一个经验的侵蚀产沙公式,参数 11.8 与 0.56 也是经验得来,改进后显然不能再用,所以参数 α, β 需要用实测资料优化确定。改进后的模型直接考虑了实时雨强、净雨的影响,这样就可以实时的计算产沙量,也就可以得到相应的水流含沙量,水量可以由分布式时变增益水文模型提供。如 Rs, I 由分布式水文模型得来, $area, K, C, P, LS, CFRG$ 由流域实际情况得到。下面将逐个讨论这些参数的计算。

3.1 土壤可蚀性因子 K

土壤属性是影响水土流失的一个重要因素。影响侵蚀的主要土壤属性有土壤的类型、土壤颗粒的大小以及土壤中的有机质含量等。定性的分析可知:土壤中有机的存在是防止土壤侵蚀的,如草根可以固土;土壤结构越好,每个结构的尺寸越大,土壤越容易受到侵蚀,因为结构间的间隙大导致侵蚀加剧;土壤的下渗率能够反应土壤的疏松程度,下渗率大说明土壤疏松,自然容易受到侵蚀。

SWAT 中给出了通过试验得到的经验公式:

$$K = \frac{0.00021M^{1.14}(12 - 1.72Orgc) + 3.25(c_s - 2) + 2.5(c_p - 3)}{100} \quad (6)$$

$$M = (m_s + m_v) \cdot (100 - m_c) \quad (7)$$

式中, K 为土壤可蚀性因子; M 为颗粒尺寸参数; M_s 为 0.002—0.05mm 颗粒含量(%); M_v 为 0.05—0.1mm 颗粒含量(%); M_c 为 <0.002mm 颗粒含量(%); $Orgc$ 为有机质含量(%); C_s 为土壤结构代码(1—5); C_p 为土壤渗透性分类(1—6)。

自然界的土壤结构多种多样,一般按结构的形状和大小进行分类。常见的有块状和核状、柱状和棱柱状、片状和板状以及团粒状等结构体类型。核状、柱状、棱柱状等结构主要出现于粘重而缺乏有机质的底土层中。块状和团粒状结构经常出现在表土层中。

通过不同的土壤结构与结构尺寸大小可以给出相应的土壤结构代码^[15](表 1)。

表1 土壤结构代码值 C_s 表Table 1 Size classes of soil structure and C_s

大小\结构	片状、板状	柱状、棱柱状	块状、核状	团粒状	C_s
细粘粒/mm	<1	<10	<5	<1	1
细粉粒/mm	1—2	10—20	5—10	1—2	2
细纱粒/mm	2—5	20—50	10—20	2—5	3
粗沙粒/mm	5—10	50—100	20—50	5—10	4
粗粒/mm	>10	>100	>50	>10	5

土壤的下渗率也是反应土壤类型的一种指标. 土壤稳定下渗率越大的土壤, 显然越容易受到侵蚀. 表2 给出的是不同土壤稳定下渗率对应的 C_p 值.

表2 土壤渗透性分类表

Table 2 The lowest saturated hydraulic conductivity in the profile

C_p	1	2	3	4	5	6
下渗率	快	中到快	中	慢到中	慢	非常慢
/mm/h	>150	50—150	15—50	5—15	1—5	<1

土壤可蚀性因子的计算经验公式还有很多, 国内外很多的专家、学者也提出过很多的方法, 此处不再赘述.

3.2 耕作与管理因子 C

耕作与管理因子 C 难以确定, 因为耕作和管理方式很多. 对干净的、直行休闲地以及顺坡耕作, C 的基数值为 1, 其它 C 值在 0 到 1 之间.

SWAT 模型中考虑了地表植被与残渣的重量, 显然在地表作物越多, 其重量越重的情况下, 侵蚀就越小, 也就是 C 值越小. SWAT 给出的公式为:

$$C = \exp\left[\left(\ln \frac{0.8}{C_m}\right) \cdot \exp(-11.5rsd) + \ln C_m\right] \quad (8)$$

式中, rsd 为 0 时, C 为 0.8, 不是很合理, 所以此处给出了对 SWAT 模型中的 C 值的改进计算公式:

$$C = \frac{C_m}{C_m^{\exp(-11.5rsd)}} \quad rsd = 0 \text{ 时 } C = 1 \quad (9)$$

$$C_m = 1.463 \ln C_a + 0.1034 \quad (10)$$

式中, C_m 为最小耕作与管理系数; C_a 为年均耕作与管理系数; rsd 为地表植被与残渣重量 (kg/m^2).

3.3 水土保持措施因子 P

坡面在山区农业生产中占有重要地位, 斜坡又是泥沙和径流的策源地, 水土保持措施是坡沟兼治, 而坡面治理是基础. 现在在我国黄土高原上的主要水土保持措施是种草、造林、修建梯田、鱼鳞坑、淤地坝等. 此处重点讨论草地、林地与梯田对侵蚀的影响.

许炯心^[16]对无定河水保工程对侵蚀产沙过程影响进行了分析, 发现产沙模数与梯田、坝地、造林和种草面积的关系, 均表现出明显的负相关. Mills 等^[17]应用美国南部山区 19 年系列资料中的 11 场暴雨资料研究表明, 采用水保耕作技术比传统的耕作技术大大

地减少了土壤的侵蚀量^[17].

表3 水土保持措施系数 P 值表
Table 3 P factor values (SWAT)

坡度 %	林地		草地		梯田			
	中密度	高密度	中密度	低密度	块状	带状	沟道排水	地下排水
<2	0.06	0.3	0.4	0.6	0.6	0.3	0.12	0.05
2—5	0.05	0.25	0.38	0.5	0.5	0.25	0.1	0.05
5—8	0.05	0.25	0.38	0.5	0.5	0.25	0.1	0.05
8—12	0.06	0.3	0.45	0.6	0.6	0.3	0.12	0.05
12—16	0.07	0.35	0.52	0.7	0.7	0.35	0.14	0.05
16—20	0.08	0.4	0.6	0.8	0.8	0.4	0.16	0.06
20—25	0.09	0.45	0.68	0.9	0.9	0.45	0.18	0.06
25 以上	0.1	0.5	0.8	1.0	1.0	0.6	0.2	0.1

地表坡度的大小也直接影响水土保持工程的作用. 研究表明在坡度 3%—8% 时水土保持工程的作用最好. 随着坡度的增高, 水土保持工程的作用减小, 尤其在 30 度以上的陡坡上, 水土保持工程很难实施.

3.4 地形因子 LS

地形对侵蚀的影响主要是单元中的坡度与坡长. 随着坡度的增大、坡长加长, 侵蚀越强, LS 值越大.

由于黄土高原的坡度大都非常大, 国外的一些经验公式很难实用, 此处采用了刘宝元^[21]编著书中所给的不同坡度坡长对应参数值.

3.5 颗粒大小影响因子 $CFRG$

颗粒大小影响因子反映表层土壤中含有石块对侵蚀的影响. 显然随着土壤中石块的增加, 侵蚀强度是减小的. 式(11)是计算 $CFRG$ 的经验公式.

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \quad (11)$$

式中, $rock$ 为坡面上表层土壤中石块的含量(%), 石块占总土壤的体积比.

4 沟道侵蚀与输沙模型

4.1 沟道侵蚀计算

在黄土高原地区, 沟道(主河道与支流)的侵蚀不容忽视, 此处建立一简单易算的沟道侵蚀模型.

对于沟道的侵蚀, 首先要考虑水流的含沙量与挟沙力. 当水流中悬移质中的床沙质含沙量超过水流的挟沙力时, 水流处于超饱和状态, 河床将发生淤积. 反之, 当小于水流的挟沙力时, 水流处于次饱和状态, 水流将向床面层寻求补给, 河床发生冲刷. 水流的挟沙力受水流平均流速、过水断面面积、水力半径、水流的比降等诸多因素的影响. 由于计算水流挟沙力过于复杂, 对于固定的河段, 此处假设水流的挟沙力同实际的含沙量线性相关, 采取经验公式进行计算.

$$S = w \cdot S_0 = f(Q) = k \ln Q + a \quad (12)$$

式中, S 为水流挟沙力(t/m^3); Q 为沟道水流量(m^3/s); S_0 为含沙量; k, a, w 为参数.

水流经过某段河段前后的含沙量是变化的. 此处给出含沙量变化关系:

$$Ch'_{i,j} = Ch'_{i,j-1} + \gamma \cdot (S - Ch'_{i,j-1}) \quad (13)$$

式中, Ch' 为沟道水流含沙量 (t/m^3); S 为水流挟沙力 (t/m^3); γ 为变化系数 (0—1); i 计算沟道编号; j 计算的时段.

γ 是一个参数, 其由坡面、河床、沟道的属性决定, 如坡面侵蚀量大, 而沟道结构稳定, 不容易受到侵蚀与冲刷, 则 γ 值较小接近 0, 反之坡面侵蚀小, 而河床是松软的泥沙, 极易被冲刷, 则 γ 值较大, 接近于 1.

4.2 沟道输沙计算

产沙模型计算出了每个水文单元点的产沙量与径流的含沙量. 这些泥沙将伴随着水流在流域中运动. 整个输沙过程是一个泥沙不断沉淀、冲刷的动态过程. 每个单元水流的含沙量都不尽相同的, 从上游到下游, 单元间的水流通过相互混合后再流到下一个单元, 流域出口单元的沟道水流的含沙量既是整个流域产流含沙量, 其产沙量也就是整个流域的产沙量.

具体计算过程如下:

经过分布式水文模型计算能够得到当前时段的水文单元的流量 Q , 通过计算可以得到产水量 W .

$$W_{i,j} = Q_{i,j} \cdot dt \quad (14)$$

式中, W 为单元产水量 (m^3); Q 为单元产流量 (m^3/s); dt 为计算时段长 (s); i 为计算水文单元编号; j 为计算的时段.

经过产沙模型的计算得到当前时段的水文单元的产沙量, 可以得到含沙量:

$$Ch_{i,j} = \frac{sed_{i,j}}{W_{i,j}} \quad (15)$$

式中, sed 为单元的产沙量 (t); W 为单元产水量 (m^3); Ch 为含沙量 (t/m^3).

此处假设: 每个水文单元中发生坡面侵蚀过程, 每个水文单元间通过沟道连接在一起. 坡面侵蚀产沙发生在水文单元中, 在每个单元间的沟道中含沙水流发生混合, 并在沟道中产生冲刷与沉淀.

输沙过程是包含在分布式水文模型汇流模型^[14]中同步运行的, 所以输沙计算也是按照河网汇流过程, 依次从上游向下游计算. 每个河段中输入是上游的出流量、输沙量、当前河段的产流量、产沙量以及上个时段当前河段的水量与含沙量, 通过中和计算就可以得到当前时段该河段的含沙量, 也就得到当前时段该河段出流的含沙量.

当前时段河段的泥沙量为 $sed_{i,j} + \sum Ch_{k,j} \cdot Q_{k,j} \cdot dt + Ch'_{i,j-1} \cdot W_{i,j-1}$, 其中, $sed_{i,j}$ 为产沙量, $\sum Ch_{k,j} \cdot Q_{k,j} \cdot dt$ 为上游汇入沙量, $Ch'_{i,j-1} \cdot W_{i,j-1}$ 为沟道中水的含沙量. 当前时段河段中的水量为 $R_{i,j} \cdot A_i + \sum Q_{k,j} \cdot dt + W_{i,j-1}$, 其中, $R_{i,j} \cdot A_i$ 为当前水文单元、时段的产水量, $\sum Q_{k,j} \cdot dt$ 为上游的汇入水量, $W_{i,j-1}$ 为沟道中水量, 则可得到当前时段河段的含沙量为:

$$Ch'_{i,j} = \frac{sed_{i,j} + \sum Ch_{k,j} \cdot Q_{k,j} \cdot dt + Ch'_{i,j-1} \cdot W_{i,j-1}}{R_{i,j} \cdot A_i + \sum Q_{k,j} \cdot dt + W_{i,j-1}} \quad (16)$$

式中, Ch' 为沟道水流含沙量 (t/m^3); sed 为单元的产沙量 (t); W 为河段蓄水量 (m^3); Ch 为单元含沙量 (t/m^3); Q 为河段出流量 (m^3/s); dt 为计算时段长 (s); A 为单元面积 (m^2); R 为单元净雨量 (mm); i, k 为计算水文单元编号; j 为计算的时段。

显然当前时段河段的出流含沙量也就是该河段的含沙量. 由分布式水文模型可以计算出出流量为 $Q_{i,j}$, 则可知河段中剩余水量为:

$$W_{i,j} = R_{i,j} \cdot A_i + \sum Q_{k,j} \cdot dt + W_{i,j-1} - Q_{i,j} \cdot dt \quad (17)$$

输沙计算流程示意图如下:

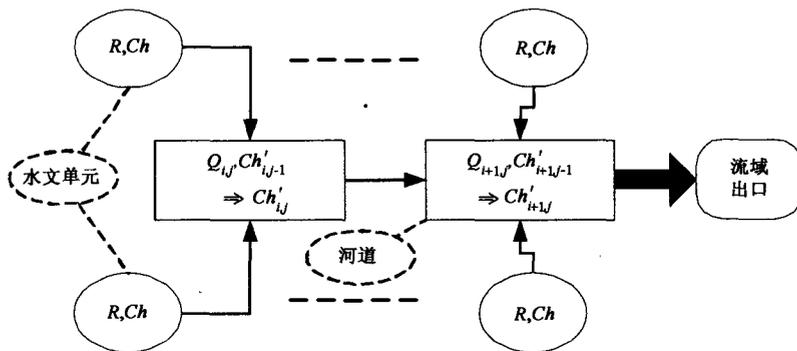


图2 河网输沙示意图

Fig. 2 Sediment routing in river net

5 模型在岔巴沟流域的应用

黄河中游多沙粗沙区(河口镇—龙门区间及马莲河、北洛河上游吴旗一带)面积 $7.86 \times 10^4 km^2$, 仅占黄河中游区面积的 23%, 占全黄河流域面积的 14.8%, 年平均来水量占全河总水量的 15%, 可产生的泥沙达到 $11.82 \times 10^8 t$ (1954—1969 年), 占黄河中游输沙量的 69.2%; 年平均来沙量占全黄河总沙量的 56%. 产生的粗泥沙(粒径 $\geq 0.05mm$) 量达 $3.19 \times 10^8 t$, 占黄河中游总粗沙输沙量的 77.2% [18-20].

岔巴沟流域就处在黄河中游的粗沙区内, 流域面积 $205 km^2$. 选取了岔巴沟流域 1960—2000 年降雨-流量-含沙量资料进行了分析, 并代入上面产汇沙模型进行模拟. 在实际计算时根据 $50m \times 50m$ 的 DEM 将流域划分成 322 个水文单元, 最子小流域面积 $0.25 km^2$.

岔巴沟流域土壤主要是马兰黄土, 黄土层厚度大, 并且疏松, 极易发生侵蚀. 年降雨仅在 400mm 左右, 并且集中在 7—8 月, 流域的植被覆盖差, 所以降雨产流后的水流含沙量非常大.

图 3 是用 1960—2000 年岔巴沟流域曹坪水文站测得的流量含沙量关系图. 从图 3 中可以看出, 含沙量与流量明显的成对数关系.

实测流量 Q 与含沙量 S_0 的关系为:

$$S_0 = 113.79 \ln Q + 215.25 \quad (18)$$

$$S = w \cdot S_0 \quad (19)$$

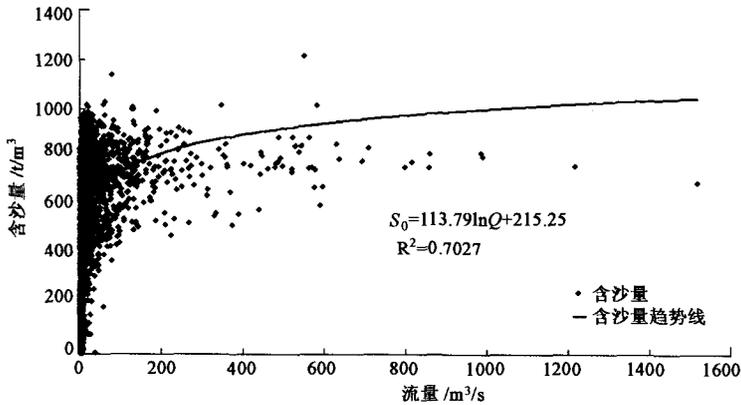


图3 1960—2000年岔巴沟流量与含沙量关系图

Fig. 3 The relation of sediment concentration and discharge in Chabagou in 1960—2000

式中, S 为水流挟沙力 (t/m^3); Q 为河段出流量 (m^3/s); w 为参数.

相同的流量, 在洪水的起涨阶段的含沙量明显小于退水阶段的含沙量 (图4).

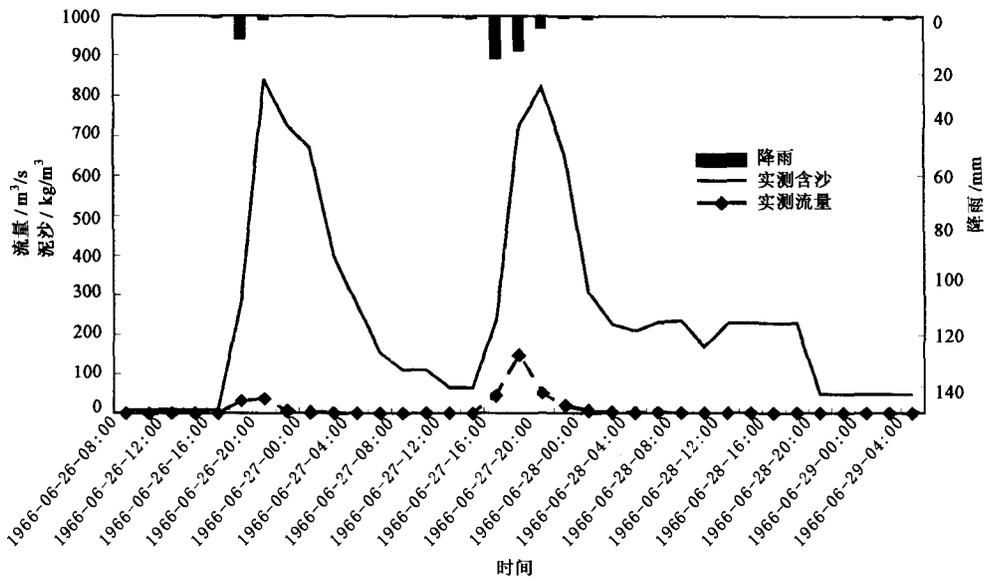


图4 1966年岔巴沟流量与含沙量关系图

Fig. 4 The relation of sediment concentration and discharge in Chabagou in 1966

模型的参数部分是根据流域中实际的观测资料或已有的一些研究确定, 如土壤可蚀性因子参数, 参考了徐建华等^[18,20]在黄土高原上的工作. 部分参数通过系统识别的方法, 根据1960—1966年的观测数据拟定得到. 由于人类活动与气候变化, 黄土高原的水保工程大量修建, 所以本文重点建模进行模拟分析.

表4 模拟结果表

Table 4 The result of simulation

	1960年	1961年	1962年	1963年	1964年	1965年	1966年	
径流	效率系数	0.73	0.72	0.62	0.82	0.53	0.6	0.92
	相关系数	0.85	0.85	0.79	0.91	0.75	0.78	0.96
	水量平衡	0.92	1.07	1.04	1.14	1.04	1.06	0.94
泥沙	效率系数	0.6	0.65	0.6	0.83	0.5	0.68	0.78
	相关系数	0.81	0.83	0.8	0.92	0.72	0.83	0.91
	泥沙平衡	1.04	1.01	0.95	1.04	1	1.01	1

平衡系数 = 模拟径流总量 / 实测径流总量; 相关系数 = $\frac{\sum (Q_c - \bar{Q}_c)(Q_o - \bar{Q}_o)}{\sqrt{\sum (Q_c - \bar{Q}_c)^2 \sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2}}$; 模型效率系数

$$R = \left[1 - \frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \right] \times 100\%; Q_o, Q_c, \bar{Q}_c, \bar{Q}_o \text{ 为实测、模拟流量和实测流量均值.}$$

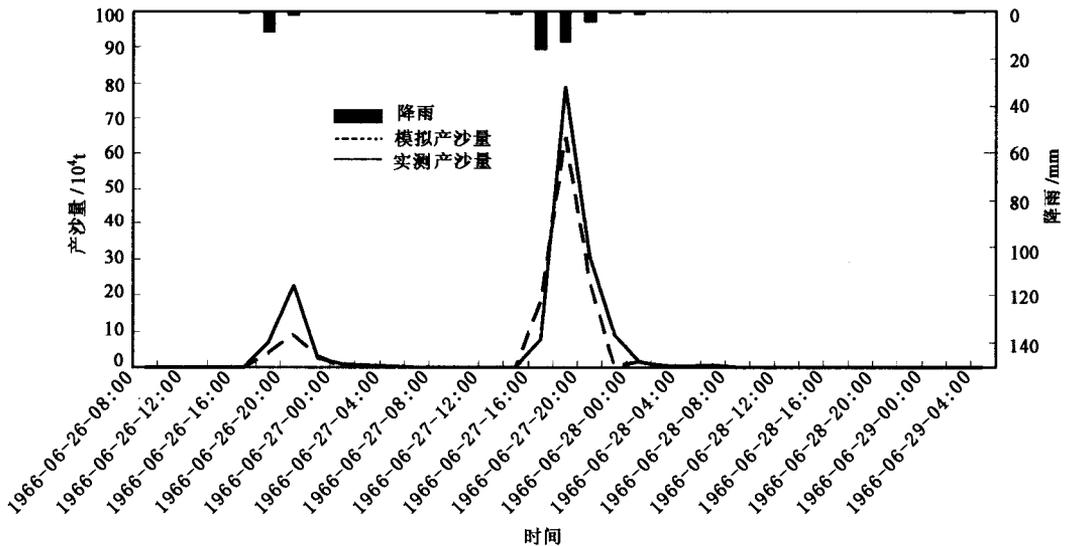


图5 1966年降雨-产沙量过程图

Fig. 5 Rain-Sediment in 1966

通过模型模拟1966年岔巴沟流域总产沙量为 $997 \times 10^4 \text{t}$, 实测产沙量 $1007 \times 10^4 \text{t}$. 模拟得到的坡面侵蚀产沙总量为 $790 \times 10^4 \text{t}$, 沟道侵蚀量为 $207 \times 10^4 \text{t}$. 坡面侵蚀量占总侵蚀量的78%, 通过岔巴沟流域的实地调查结果表明, 岔巴沟流域的主河道近几十年来没有太大变化, 这一点正好与模型模拟一致, 说明1966年的岔巴沟流域泥沙主要来源于坡面侵蚀与坡面下的细沟中沟道侵蚀而来, 主河道侵蚀产沙量很小.

坡面侵蚀是受降雨、地形等多种因素影响的结果, 图6是1966年坡面侵蚀总量的空间分布图. 通过图6可以很清楚地看出流域中何处容易侵蚀, 何处侵蚀量小, 为流域的综合管理规划提供参考.

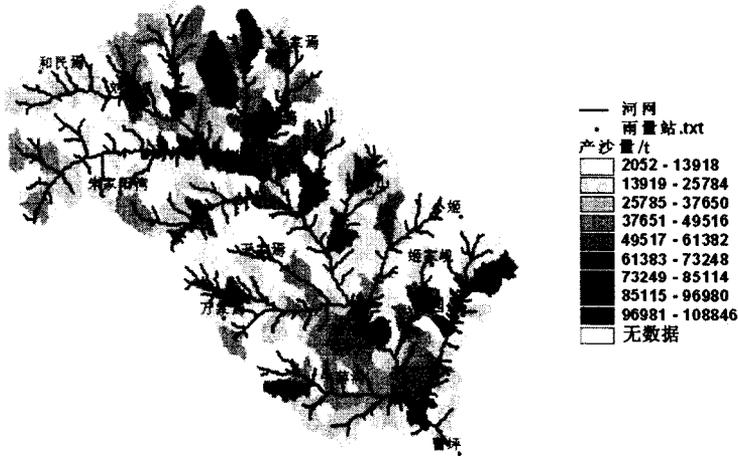


图6 1966年坡面侵蚀产沙分布图

Fig. 6 The distribution of erosion in 1966

6 结论

对于一个流域的侵蚀研究表明:泥沙的来源有坡面侵蚀与沟道侵蚀.坡面侵蚀受坡面上植被、土壤属性、水保等诸多因素的影响.基于USLE模型,并参考了SWAT模型中的侵蚀产沙模型,结合黄土高原的特色,建立了坡面产沙侵蚀模型.黄土高原中的部分侵蚀来源于沟道,所以此处结合水流挟沙力建立了一简单的沟道侵蚀模型,该模型考虑了坡面侵蚀与上游流入水流的含沙量,计算出沟道侵蚀产生的水流含沙量的变化量,最后得到该河段(沟道)的出流的水流含沙量.在分布式水文模型河网汇流的基础上,设计了河网输沙模型,该模型从上游向下游依次计算.

将该模型应用于岔巴沟流域,模拟结果较好,说明模型是切实可行的.

应用结果表明:岔巴沟流域洪水发生的坡面侵蚀是侵蚀的主要部分.沟道的侵蚀受坡面侵蚀影响,当坡面侵蚀大,流入沟道的水流含沙量大,对沟道的侵蚀就小,当流速下降时还有部分的沉淀;当坡面侵蚀小,流到沟道的水流含沙量小,则会对沟道产生冲刷侵蚀.

致谢:黄河水利委员会张学成总工、金双彦博士等人为本文提供数据,也感谢尹雄锐、占车生、万东辉、李浩、刘星为本文做了数据录入工作.

参考文献

- [1] Arnold J G, Williams J R. Model theory of SWAT[M]. USA, Agricultural Research Service Grassland, 1997
- [2] Renard G R, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE revised universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 30-331
- [3] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24
Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24
- [4] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于SWAT模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38-42

- Zhang Xuesong, Hao Fanghua, Yang Zhifeng, et al. Runoff and sediment yield modeling in meso-scale watershed based on SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4):38-42
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses [M]. U. S. Dept. of Agriculture, *Agricultural Handbook* No. 537, 1978:30-66
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky mountains [M]. *Agriculture Handbook*, 282. USDA-ARS. 1965
- [7] 牛志明, 解明曙, 孙 阁, 等. ANSWER2000 在小流域土壤侵蚀过程模拟中的应用研究 [M]. *水土保持学报*, 2001, 15(3):56-60
- Niu Zhiming, Xie Mingshu, Sun Ge, et al. Applying ANSWERS2000 to simulate soil erosion process on two watersheds of three gorges area [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(3):56-60
- [8] 蔡强国, 刘纪根, 刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型 [J]. *地理研究*, 2004, 23(4):433-439
- Cai Qiangguo, Liu Jigeng, Liu Qianjing. Research of sediment yield statistical model for single rainstorm in Chabagou drainage basin [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(4):433-439
- [9] 刘高焕, 蔡强国, 朱会议, 等. 基于地块汇流网络的小流域水沙运移模拟方法研究 [J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1):71-78
- Liu Gaohuan, Cai Qiangguo, Zhu Huiyi, et al. Simulation of runoff and sediment flow in a catchment based on land unit flow networks [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(1):71-78
- [10] 许炯心. 无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的响应 [J]. *地理学报*, 2004, 59(6):972-981
- Xu Jiongxin. Response of erosion and sediment producing processes to soil and water conservation measures in the wudinghe river basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6):972-981
- [11] 夏 军, 叶爱中, 王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型 (I)—模型的原理与结构 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(6):10-15
- Xia Jun, Ye Aizhong, Wang Gangsheng. A distributed time-variant gain model applied to the Yellow River (I): Model theories and structures [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(6):10-15
- [12] 夏 军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟 [J]. *地理学报*, 2003, 58(5):789-796
- Xia Jun, Wang Gangsheng, Lv Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, (5):789-796
- [13] Xia Jun, Wang Gangsheng, Tan Ge, et al. Development of distributed time-variant gain model for nonlinear hydrological systems [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(6):713-723
- [14] 叶爱中, 夏 军, 王纲胜. 基于动力网络的分布式运动波汇流模型 [J]. *人民黄河*, 2006, 2(4):26-28
- Ye Aizhong, Xia Jun, Wang Gangsheng. A distributed kinematic routing model based on dynamical networks [J]. *Yellow River*, 2006, 2:26-28
- [15] 王礼先. *水土保持学* [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995
- Wang Lixian. *Water and soil conservation* [M]. Beijing: Chinese Forest Press, 1995
- [16] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面——沟道系统中的高含沙水流 (I)—地貌因素与重力侵蚀的影响 [J]. *自然灾害学报*, 2004, 13(1):55-60
- Xu Jiongxin. Sediment-heavily containing flows in slope-channel systems of gullied hilly area in the loess plateau (I): Influences of landforms and gravitational erosion [J]. *Journal Of Natural Disasters*, 2004, 13(1):55-60
- [17] Mills W C, Thomas A W, Langdale G W. Seasonal and crop effects on soil loss and rainfall retention probabilities: An example from the U. S. Southern Piedmont [J]. *Soil Technology*, 1992, 5(1):67-79
- [18] 徐建华, 吕光圻, 张胜利, 等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000
- Xu Jianhua, Lv Guangxi, Zhang Shengli, et al. Definition on source area of centralized coarse sediment in middle yellow river and sediment and transport rule research [M]. Zhenzhou: Yellow River Conservancy Press, 2000
- [19] 赵文林. *黄河泥沙* [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996

- Zhao Wenling. Yellow river sediment[M]. Zhenzhou: Yellow River Conservancy Press, 1996
- [20] 徐建华. 水利水保工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000
- Xu Jianhua. The impact of flow and sediment by the support practice project in the coarse sediment region in Middle Yellow River[M]. Zhenzhou: Yellow River Conservancy Press, 2000
- [21] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京: 中国科技出版社, 2001
- Liu Baoyuan, Xie Yun, Zhang Keli. Soil loss prediction model[M]. Beijing: Chinese Science and Technique Press, 2001

A Distributed Soil Erosion Model on the Small Watershed

YE Aizhong¹, XIA Jun^{1,2}, QIAO Yunfeng², WANG Gangsheng²

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Lab. of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract

In view of the loess plateau serious soil erosion problem, a distributed soil erosion model on the small watershed was developed base on distributed hydrology model. Erosion caused by rainfall and runoff was computed with the Universal Soil Loss Equation (USLE), and we modified USLE with loess plateau data. The Equation thinks about the rainfall, the soil, the vegetation, the support practice factor and so on. Sediment transport in the channel network was a function of two processes, deposition and degradation, operating simultaneously in the reach. A simple sediment channel routing method was developed with distributed hydrology model. A case of Chabagou catchments indicated that this model was simple and practical.

Keywords: soil erosion model; sediment; small watershed; Chabagou