

# 基于 GIS 的区域土壤侵蚀模型设计

崔琰<sup>1,2,3</sup>, 李锐<sup>1</sup>, 杨勤科<sup>1</sup>, 姚志宏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 西安文理学院, 710065, 西安;  
3. 中国科学院研究生院, 100039, 北京)

**摘要** 区域土壤侵蚀模型是国家和区域土壤侵蚀调查、水土保持宏观规划的支持工具。借鉴国外区域土壤侵蚀模型,以 DEM 栅格为空间单元,对区域土壤侵蚀的单元模型进行定量表达,包括降雨、植被截留、入渗、微地形填洼等,并利用 GIS 功能完成径流传递和汇集部分的计算,建立了区域土壤侵蚀模型。所建立模型在延河流域的试运算,结果接近现实,能反映土壤侵蚀时空分布趋势。模型的建立可为水土保持的宏观决策提供支持。

**关键词** 区域土壤侵蚀模型; 算法设计; 参数提取

## Design of the regional soil erosion model based on GIS

Cui Yan<sup>1,2,3</sup>, Li Rui<sup>1</sup>, Yang Qinke<sup>1</sup>, Yao Zhihong<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi;  
2. Xi'an College of Arts & Science, 710065, Xi'an; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing, China)

**Abstract** Regional soil erosion model is a effective tool for regional soil erosion survey and policy-making of water and soil conservation. This thesis attempts to develop regional soil erosion model, according to the oversea regional soil erosion model, the study region was divided into regular cells based on DEM. The sub-process of interception, infiltration, surface storage were quantitatively described. Transportation and Accumulation of runoff among units was calculated by means of spatial analytic function of GIS. According to using the concrete data of the Yanhe drainage basin to calculate, the result reflects the tense and spatial tendency and difference of soil erosion. It will support macro-decisions of soil and water conservation.

**Key words** regional soil erosion model; algorithm design; parameter extraction

土壤侵蚀模型因所服务对象的尺度不同而有所区别,对于坡面尺度而言,模型可以预测不同土地利用方式下土壤侵蚀的空间分布和坡面侵蚀量,为水土保持措施布设及水土保持规划提供依据。对于小流域尺度而言,模型预测结果对流域治理规划以及水利工程设计有指导作用<sup>[1]</sup>。区域土壤侵蚀模型的研究可为区域土壤侵蚀调查和宏观决策提供方法和实用工具,对于区域性的水土保持规划和土地资源的合理利用有着重要意义。

目前,国内外关于土壤侵蚀问题的研究,在坡面尺度和小流域尺度的成果相对较多,对区域土壤侵

蚀的研究还很薄弱;但由于区域性土壤侵蚀的加剧、土壤侵蚀学科自身的发展以及水土保持宏观决策的需要,近年来,国内外对区域尺度土壤侵蚀研究给予了高度的重视<sup>[2-3]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,由于众多国际性研究组织和研究计划的推动和促进,欧洲等国家和地区的学者,对区域土壤侵蚀模型进行了比较有成果的研究,初步提出了一些区域土壤侵蚀模型<sup>[4]</sup>。

通过对国外有关土壤侵蚀模型的分析,可得出以下几点认识:土壤侵蚀具有多尺度特征,可以在多种空间尺度上开发具有物理基础的土壤侵蚀模型;

收稿日期: 2007 - 05 - 18 修回日期: 2008 - 12 - 08

项目名称: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国水土流失现状趋势与对策研究”(KZCX3 - SW - 448)

第一作者简介: 崔琰(1977 - )男,讲师,博士。主要研究方向:资源环境与区域水土保持。E-mail: cyan2000@163.com

土壤侵蚀的空间尺度效应,给多尺度上通用的土壤侵蚀预测评价模型的建立,带来了极大的困难。在土壤侵蚀定量评价中,由于土壤侵蚀的空间尺度效应,使得小尺度上观测到的大量数据,无法得到有效的利用,从而导致卓有成效的前期工作难以再上新台阶<sup>[5-6]</sup>。“3S”技术在土壤侵蚀研究中的应用以及分布式区域土壤侵蚀模型的开发,是区域土壤侵蚀定量评价研究的基本趋势<sup>[7-8]</sup>。

目前,在区域土壤侵蚀研究方面存在的主要问题是:对区域尺度土壤侵蚀过程及其与微观尺度之间的联系,缺乏深刻理解和认识,致使区域土壤侵蚀模型开发缺少强有力的理论支持;坡面土壤侵蚀模型与 GIS 技术结合进行区域土壤侵蚀评价,基本上还是基于对坡面尺度土壤侵蚀机制的认识,对土壤侵蚀尺度效应的认识未能取得突破;基于区域土壤侵蚀过程的模型,代表了区域土壤侵蚀模型的发展方向,但对土壤侵蚀过程的描述比较简单,也不很全面;从软件工程角度看,采用什么样的策略进行系统开发,还有待讨论,也还没有一个成功的案例可供借鉴;因此,笔者通过分析区域土壤侵蚀过程,基于 GIS 空间数据管理功能和空间分析功能,将研究区域离散成一些不相互重叠的空间单元,在每个单元内部和单元之间定量描述土壤侵蚀过程,再采用基于 GIS 的编程技术,初步建立区域土壤侵蚀模型。

## 1 区域土壤侵蚀模型开发的基本思路与步骤

借鉴国外区域土壤侵蚀模型和大尺度水文模型研究成果,在前期研究<sup>[9]</sup>基础上,以 DEM 栅格为空间单元,以月为时间单元,对区域土壤侵蚀的单元模型,即对降水、渗透、植被截留、微地形填洼、地表径流、携沙能力和径流剥蚀能力等定量表述算法进行

程序代码表达,在“C#”和“.net”框架下采用面向对象的开发方式进行模型开发,同时利用 GIS 功能独立开发完成径流和泥沙物质的汇集和传递部分的计算,建立区域尺度上土壤侵蚀模型,然后选择典型研究区域对模型进行敏感性分析和参数率定,最后将模型应用于实际,进行验证。

区域土壤侵蚀模型的开发步骤为:算法设计—代码编写—试运行—敏感性分析—率定—验证。采取总体设计,分步开发的实现方法,即对模型进行一次总体设计,完成模型的所有功能设计,而模型的开发则分为 2 个步骤进行:第 1 阶段主要是依赖于 ARC/INFO 平台实现算法设计、代码编写和试运行;第 2 阶段进行敏感性分析、参数率定和验证,并且形成产品,具有自主的知识产权,脱离 ARC/INFO 平台,同时也是开放的,能接收/输出标准的数据格式,完成“实现算法—软件产品”的过程。

## 2 模型基本结构与径流的算法设计

### 2.1 模型的基本结构与基本参数

模型的开发在空间尺度上是以中低分辨率 DEM 的栅格为基础,将流域划分为若干单元,各单元下垫面状况视为均一,并以此作为基本计算单元。在时间尺度上则是将每月的降水作为一场降雨来考虑,将各月降雨过程分段加以描述(时间尺度上相当于天)。利用 GIS 空间分析功能,从降水、植被截留、入渗、微地形填洼、地表径流等方面进行定量计算,计算每个单元格、每计算时段末的径流和剥蚀总量,然后借助 GIS 的基本功能,实现径流和剥蚀总量的汇集计算,用汇流结果计算径流模数和侵蚀模数。模型所需基本参数如表 1 所示,模型设计流程如图 1 所示。

表 1 输入模型的基本参数  
Tab. 1 Basic parameters of model

编号	名称	栅格尺寸/m	来源	用途
1	数字高程模型	100	由 1:25 万地形图在专业化 DEM 插值软件 ANUDEM 下插值生成 DEM	确定空间单元,计算坡度和水文分析等参数
2	月降雨量表面	100	延河流域各水文观测站点 1995—1997 年 7 月实测数据通过插值获得	计算月降雨强度
3	土地利用类型	30	基于 30 m 分辨率 TM 遥感影像,经计算机自动分类而获得	计算叶面积指数、曼宁系数等
4	叶面积指数	100	实测基础上由遥感影像图计算获得	计算植被截流量
5	土壤稳定入渗速率	100	野外试验测得,并在 GIS 支持下,经过插值建立研究区土壤参数表面模型	计算土壤入渗量和净雨量
6	土壤抗冲系数	100		计算径流量和剥蚀量

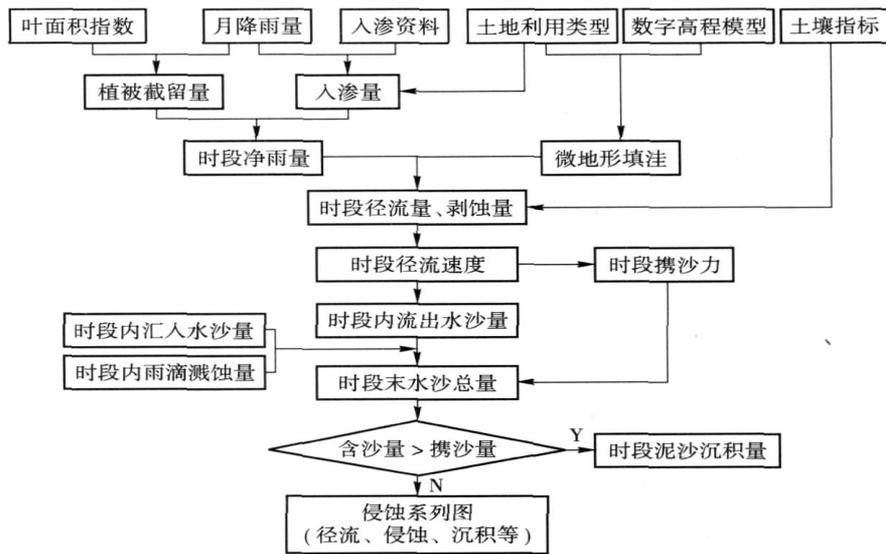


图 1 模型设计流程图

Fig. 1 Calculation process of regional soil erosion model

## 2.2 径流计算方法

2.2.1 单元径流量计算 对单元产流过程要从降雨过程和地表径流产生过程考虑。降雨过程考虑时段降雨强度的计算,这时把降雨总历时划分为若干时段,根据典型月次降雨过程统计得到。地表径流产生过程可理解为大气降雨的一部分落于植被冠层被其截留储存,剩下部分成为净雨,净雨一方面通过入渗成为土壤水,部分成为地表积水并在微地形存储。其中土壤入渗是一个复杂的过程,其取决于土壤和初始条件,也就是说,每一时刻入渗的量不是一个常数,随着时间的增加,土壤的入渗量会逐渐减少,最终达到饱和状态,此时所有的降雨都会成为净雨,因此,在利用程序模拟这个过程的时候,要考虑到不同时刻的入渗过程,记录每一个时间段内土壤的入渗程度,累计叠加得到总的入渗量,限于资料基础和区域土壤物理特征等因素,模型是采用 Kostakov 法划分时段计算入渗速率的,计算公式为

$$f_t = f_c + kt^{-1} \quad (1)$$

式中:  $f_t$  为  $t$  时刻入渗速率,  $\text{mm}/\text{min}$ ;  $f_c$  为稳渗速率,  $\text{mm}/\text{min}$ , 用稳渗速率表面代入;  $t$  为入渗时间,  $\text{min}$ ;  $k$  为常数, 取决于土壤和初始条件, 可用实测入渗资料求得<sup>[10]</sup>。

经过入渗,降雨其余部分成为地表积水并在微地形存储,微地形填洼参照 LISEM 模型中使用的方法<sup>[11]</sup>,求取最大拦蓄水量:

$$M_{DS} = 0.243 R_R + 0.010 R_R^2 + 0.012 R_R S \quad (2)$$

式中:  $M_{DS}$  为最大洼地拦蓄水量,  $\text{cm}$ ;  $R_R$  为栅格内相

对高程的标准差,  $\text{cm}$ , 在田间用  $1 \text{ m}^2$  范围测定;  $S$  为地面坡度, %。

当地表微小洼地被填满后,所有洼地将连通为一个整体,进而地面径流开始产生,净雨量剩余的雨量将转化为径流。

2.2.2 径流汇流产生过程及模型实现 地表径流的计算是基于水量平衡原理,即任一时段内,对于每个单元格来说,其中的径流量应包括上一时段末滞留的径流量、本时段降雨产生的径流量、从相邻单元格流入的径流量,减去该单元格向它的下级相邻单元格流出的一部分径流量。由初始径流深与单元格面积的乘积得到单元降雨产流量,即单元格在时段内产生雨量的体积。单元格流出量指在时段内流出本单元格进入下一相邻单元格的径流量,其中第 1 个时段认为没有足够的径流量流向下一个单元格,所以认为流出量为零。每个单元格时段内汇入的径流量就是它上一级单元格流出的径流量。为此,先确定水沙汇集流向(根据 DEM 填洼后提取流向),根据流向确定时段内汇入单元格的径流量。

利用程序对栅格格网进行遍历运算。基于水量平衡原理,时段内任一单元格内滞留的径流量由下式计算:

$$W = W_j - W_{j-1} = aA_j - aA_{j-1} \quad (3)$$

式中:  $W_j$ ,  $W_{j-1}$  分别为当前时段末和上一时段末单元格中的径流量,  $\text{m}^3$ ;  $A_j$ ,  $A_{j-1}$  分别为当前时段末和上一时段末单元格径流的横断面积,  $\text{m}^2$ ;  $a$  为单元格尺寸,  $\text{m}$ 。  $W$  为时段内进入单元格的径流量减去从

该单元格流出的径流量。时段末径流深指的是在一个时段汇流结束后单元格的径流深,而得到每一时段末的径流深就可以用来计算下一时段单元格的流出量,最后计算水流速度。循环运行程序直至程序结束,整个径流汇流过程完成。

### 3 研究实例

#### 3.1 研究区概况

研究区延河流域是黄河右岸、中游区上段的河口镇至龙门段的一级支流, E 108°45' ~ 110°28', N 36°23' ~ 37°17'。延河干流全长 284 km, 河道平均比降 3.29%, 流域面积 7 687 km<sup>2</sup>。流域属于暖温带半干旱气候条件, 年平均气温 9.3℃, 无霜期约 180 d。延河多年平均降雨量为 511 mm, 流域多年平均径流模数 3.74 万 m<sup>3</sup> / (km<sup>2</sup> · a), 流域多年平均输沙模数 8 107.90 t / (km<sup>2</sup> · a)。地表径流随降雨而形成, 基本与降雨同步。降雨年内分布集中在 6—9 月, 尤其集中在 7、8 月。地表径流比降雨集中, 92.40% 集中在 6—9 月, 其中 73.20% 发生在 7、8 月。输沙的集中程度更甚于径流, 6—9 月的输沙量占全年输沙量的 98.80%, 其中 7、8 月输沙量占平均年输沙量的 86.00%, 其余各月基本不产沙不产流。延河流域水土流失面积 7 127.20 km<sup>2</sup>, 占流域面积的 92.72%, 水土流失治理面积为 2 533.80 km<sup>2</sup>, 治理度 35.60%。

#### 3.2 模型所需要参数的采集

1) 水文气候数据库建设: 收集研究区各种降雨观测资料(日降雨过程、月降雨总量)、把口站观测资料和附近水文站的水文观测数据, 采用延河流域各水文观测站点的 1995 年实测数据处理而成的逐月降雨总量表面(栅格 100 m)。利用 ClGen 模型求取日降雨量和降雨历时<sup>[12]</sup>, 用以获得降雨强度及其衰减特征(技术衰减系数计算结果为 0.4)。

2) DEM 建立: 利用专业化 DEM 插值软件 ANU-DEM, 对 15 万(局部地区 11 万)矢量化地形图插值, 建立水文地貌关系正确 DEM, 作为进行地形因子提取和模型驱动的数据基础。

3) 土壤抗冲系列参数及入渗测试: 利用蒋定生<sup>[7]</sup>方法, 完成土壤抗冲系列参数(包括土壤抗冲系数、土壤渗透系数、土壤抗剪切系数和土壤崩解系数)和相关参数(土壤水分、地面随机糙度)的野外现场测试; 实测土壤入渗过程和稳定入渗速率, 并在 GIS 支持下插值得到稳定入渗速率表面, 分辨率 100 m, 同时根据文献<sup>[10]</sup>对数据进行修正。

4) 典型集水区地面坡度野外测量: 选择 1~2 km<sup>2</sup>、能代表研究区地貌特征的小集水区, 利用高精度 GPS, 以 5 m 间距采样密度进行野外坡度测量。

5) 典型植被和作物类型叶面积指数、光谱测量: 利用叶面积仪和光谱仪, 在野外测量自然植被叶面积指数、植被盖度和光谱特征, 为水土保持措施遥感信息提取提供参数。

6) 项目区面雨量观测及其过程、把口站观测: 在研究区内的重点区域, 布设雨量站(每 25 km<sup>2</sup> 布设 1 个雨量站; 每 100 km<sup>2</sup> 布设 1 个自记雨量站), 实现对研究区面雨量的观测和降雨过程的控制。

7) 土地利用和植被信息: 基于 30 m 分辨率的 TM 遥感影像, 经计算机自动分类获得土地利用图(1:10 万)。利用遥感影像图提取近红外光( $N_{IR}$ ) 和红光( $R_{ED}$ ) 的比率  $S_R$ , 根据不同土地利用类型的叶面积指数  $L_{AI}$  与  $S_R$  的关系  $L_{AI} = f(S_R)$  得到研究区域叶面积指数表面。

### 4 结果与讨论

区域土壤侵蚀模型输出数据有初始段降雨径流深、时段末降雨径流深、微地形填洼、时段末降雨总径流深、时段末降雨速度、时段末携沙能力、时段末泥沙总量、径流汇流结果、泥沙汇流结果以及侵蚀模数等数据。以延河流域 1995 年 7 月(月降雨量 151 mm, 年降雨量 360 mm, 占全年降雨总量的 42%) 为例, 在 DEM 基础上, 将流域离散化为一系列规则的单元格(100 m × 100 m), 将各月降雨过程分时段(100 min) 进行模拟计算, 模拟得到 1995 年 7 月份径流和侵蚀的动态过程。其中流域平均径流深为 40.60 mm, 径流系数为 0.1127, 流域出口径流量为 2.99 亿 m<sup>3</sup>, 流域出口输沙量为 0.20 亿 t, 流域平均侵蚀模数为 4 402 t / (km<sup>2</sup> · 月), 计算结果见图 2。水利部 2000 年发布的《中国河流泥沙公报》资料显示: 延河流域甘谷驿站多年平均径流量为 2.14 亿 m<sup>3</sup>, 多年平均输沙量为 0.4656 亿 t, 可见, 模拟结果基本符合实际。

区域土壤侵蚀模型设计时忽略地形和土壤的一些细节, 强调与岩石、气候和植被有关的宏观特征。研究结果表明, 模型可以大体反映流域侵蚀特征, 输出图形空间格局和结构符合实际情况, 宏观上主要受土地利用和气候特征影响, 微观上主要受地形微起伏影响。

研究基于坡面土壤侵蚀机制对区域土壤侵蚀过

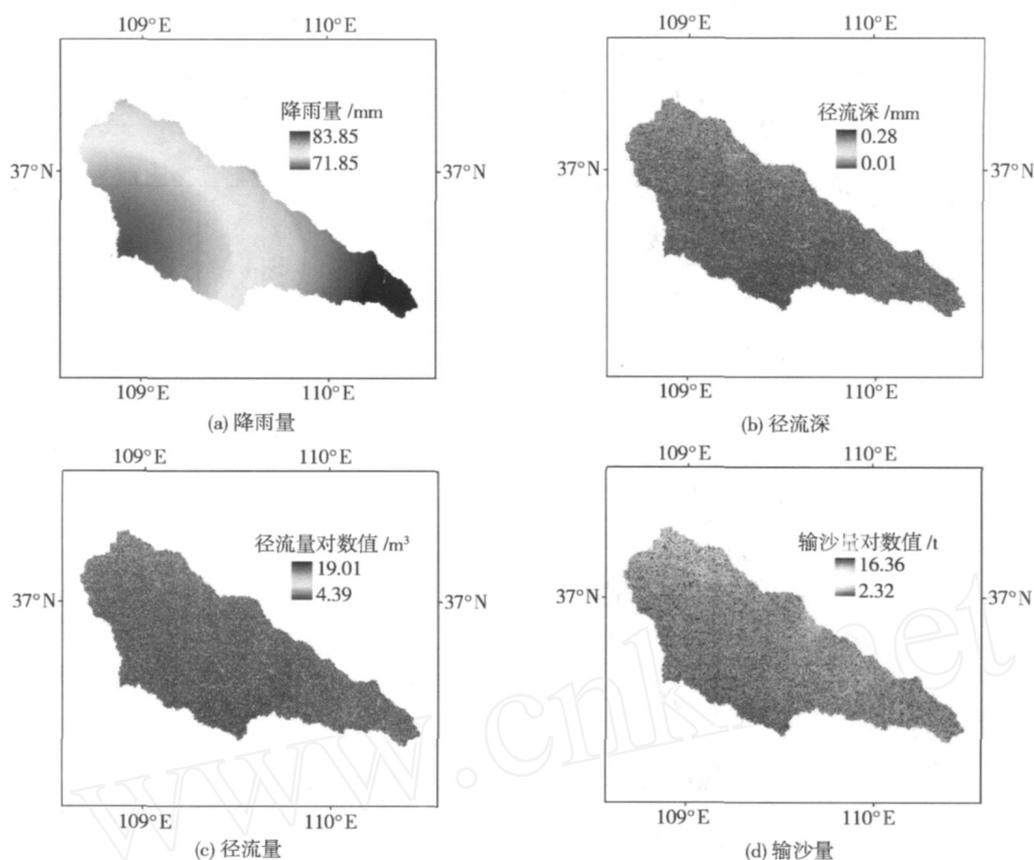


图 2 延河流域 1995 年 7 月模型计算结果图

Fig. 2 Calculation results of model for Yanhe river basin in July, 1995

程进行了分析,设计了径流的算法,对模型所需参数提取方法及模型结构进行了说明。利用 GIS 的功能,可以动态地反应区域尺度的径流过程,对径流汇集的计算进行了新的尝试,有效地完成了区域土壤侵蚀径流过程的估算。模型应用于延河流域,模拟结果基本可以反映延河流域土壤侵蚀过程的时空分布趋势,由此证实,模型所采用的运算方法和实现手段是可行的,验证了基于 GIS 技术开发区域尺度土壤侵蚀模型是可能的。目前,初步开发的区域土壤侵蚀模型需进一步地完善,如进行敏感性分析、参数率定等工作,模型算法需要进行优化和改进,而且模型需应用于其他大尺度流域,以验证其适用性。

## 5 参考文献

- [1] 杨勤科,李锐. 中国水土流失和水土保持定量评价研究进展. 水土保持通报,1998,18(5):13-18
- [2] 张爱国,张平仓,杨勤科. 区域水土流失土壤因子研究. 北京:地质出版社,2003
- [3] 汪东川,卢玉东. 国外土壤侵蚀模型发展概述. 中国水

土保持科学,2004,2(2):35-40

- [4] 周正朝,上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述. 中国水土保持科学,2004,2(1):52-56
- [5] 江忠善,郑粉莉,武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究. 泥沙研究,2005(4):1-6
- [6] 胡良军,杨勤科. 基于 RS 和 GIS 的区域水土流失快速定量评价方法. 中国水土保持,2002(1):39-40
- [7] 蒋定生. 黄土抗蚀性的研究. 土壤通报,1978(4):20-23
- [8] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究. 土壤学报,2001,38(2):36-43
- [9] 徐涛. 基于 GIS 的区域水土流失模型研究[D]. 陕西杨陵:中国科学院水利部水土保持研究所,2005
- [10] 吴发启,赵西宁,崔卫芳. 坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究. 水土保持通报,2003,23(3):39-41
- [11] Jetten V. LISEM Limburg Soil Erosion Model Windows version 2. x. Netherlands: Utrecht University, 2002
- [12] 李志,刘文兆,张勳昌,等. CLIGEN 降水要素在黄土塬区的适应性评估. 中国水土保持科学,2006,4(6):31-36

(责任编辑:宋如华)