

# 基于动态产流机制的分布式土壤侵蚀模型研究

刘瑞娟<sup>1,2,3</sup>, 张万昌<sup>1,4</sup>

[1. 中国科学院 大气物理研究所 东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555; 4. 南京大学 水科学研究中心, 江苏 南京 210093]

**摘要:** 区域尺度的土壤侵蚀模型研究的流域面积较大, 研究区往往涉及到多种气候类型。现有的区域尺度的土壤侵蚀模型多采用单一的产流类型, 并不能真实准确地反映区域尺度的产流过程。因此, 以 DEM 栅格单元为基本模拟单元, 以日为时间模拟单元, 构建了基于动态产流机制的区域尺度分布式土壤侵蚀模型。该模型采用动态产流方案, 即根据降雨特征和下垫面特征之间的动态对比关系动态选取产流方式, 并详细描述了降水、渗透、植被截留、填洼、降雪融水、蒸散发等过程, 从而更加准确地描述了区域尺度的产流过程。采用 RUSLE 模型计算泥沙剥蚀量, 并采用月均植被覆盖度计算 C 因子, 使得长时间序列模拟中, C 因子是动态变化的, 从而使得模型能够更加真实地反映土壤侵蚀的状况。最后, 以临沂流域为研究区, 对模型进行了验证和应用。模拟结果表明, 该模型在临沂流域适用。研究结果说明临沂流域的泥沙主要来源于上游和中游, 海拔高度是土壤侵蚀的重要影响因子, 临沂流域的土壤侵蚀主要分布在 200~500 m 的海拔高度带上。

**关键词:** 区域尺度; 土壤侵蚀; 动态产流方案

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0139-06

中图分类号: S157, TV14

## A Distributed Model of Soil Erosion Based on Dynamic Runoff Mechanisms

LIU Rui-juan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wan-chang<sup>1,4</sup>

(1. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China; 2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperature East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. Center for Hydro-Sciences Research, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract:** The area for soil erosion modeling at watershed scale is large, usually dealing with more than one types of climate. Single type of runoff mechanism can not describe runoff generation exactly. A long term soil erosion model at watershed scale is built by taking a grid of DEM as simulating unit and a day as time interval. Dynamic runoff mechanisms are used in the model, which consider runoff as a dynamic process depending on weather and subsurface conditions. The sub-processes of precipitation, infiltration, surface storage, flow velocity, snow melt, and evaporation are incorporated in the regional soil erosion model. RUSLE model is used to calculate soil detachment. Monthly vegetation coverage is used to calculate C factor, so that the C factor is dynamic in the long term simulation and may describe the hydrologic process more exactly. The model is then applied to Linyi watershed for simulation and validation. Results show that the model is applicable in the watershed. Elevation is found to be the main factor to soil erosion. Sediment from the watershed mostly comes from the upstream and midstream and is distributed in the zone of 200~500 m elevation. Therefore, the zone is the main region for the prevention of soil erosion.

**Keywords:** watershed scale; soil erosion; dynamic runoff mechanism

我国是水土流失较为严重的国家, 土壤侵蚀模型是评价水土流失的重要工具。目前, 我国对水土流失模型的研究主要集中在小区、坡面、小流域尺度<sup>[1-3]</sup>, 多数模型是基于次暴雨的小流域侵蚀产沙模型, 而对

收稿日期: 2010-05-24

修回日期: 2010-06-04

资助项目: 国家重点基础研究(973)发展规划项目“北方干旱化与人类适应”(2006CB400502); 气象行业专项“面向 TIGGE 的集合预报关键应用技术研究”(GYHY 200706001)

作者简介: 刘瑞娟(1976—), 女(汉族), 山东省鄄城县人, 博士研究生, 讲师, 主要从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail: liu761011@126.com.

于中尺度或者区域尺度的、时间上长期连续的土壤侵蚀模型研究较少,大部分研究成果仅限于基于统计方法的初步探索。

区域尺度一般是认为大于几千平方公里的流域。区域尺度土壤侵蚀过程空间分异明显,存在侵蚀—输移—产沙的复杂组合。1994年,包为民<sup>[4]</sup>提出中大流域水沙耦合模拟物理概念模型。模型采用分单元模拟的方法,将下垫面分成各种因素相对均匀的单元,分单元模拟,单元结果之和即为大流域产沙。模型分产流、汇流、产沙和汇沙4大部分。地面径流采用超渗产流机制计算,地面以下径流用流域蓄水容量曲线结构来模拟,并考虑了雪的累积和融化。产沙考虑了坡面产沙、沟蚀产沙和融雪径流沟蚀产沙。姚志宏<sup>[5]</sup>基于DEM将区域划分为规则格网,将月降水等作1次降雨事件,并划分若干时段进行迭代计算,用于区域月降雨产流产沙预报。崔琰<sup>[6]</sup>以DEM栅格单元为模拟单元,以月为时间单元,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,用GIS基本功能实现径流和泥沙汇聚的计算。

从以上研究中可以看出,目前区域尺度土壤侵蚀模型多以DEM栅格单元为模拟单元,以月为时间单元进行次降雨的模拟。以日为时间模拟单元,进行长时期连续模拟的区域尺度土壤侵蚀模型较少研究。而且,目前土壤侵蚀过程中所涉及到的产流过程多采用某种单一的产流类型,区域尺度的土壤侵蚀模型研究流域面积较大,涉及的气候类型较多,因此单一的产流类型不能准确描述产流过程。地表产流过程是一个时空动态变化的过程,单一的产流类型只能反映某一特定气候条件下的产流的空间特征,不能反映产流过程的时间变化。基于以上分析,在分布式水文模型ESSI<sup>[7]</sup>的基础上,拟构建一个基于动态产流方案的,在时间上长期连续的土壤侵蚀模型。

## 1 研究方法

借鉴国外区域尺度土壤侵蚀研究成果<sup>[8-12]</sup>,以DEM栅格单元为基本模拟单元,对研究区流域进行模拟。以日为时间单元,对每个区域土壤侵蚀单元即DEM栅格单元的径流和侵蚀产沙过程各个环节进行计算。其产流过程包括降水、渗透、植被截留、填洼、降雪融水、蒸散发等。采用动态产流方案计算产流,

即根据降雨特征和下垫面特征之间的动态对比关系动态选取产流方式(图1)。将降雨引起的土壤侵蚀分成两个过程:泥沙剥离和泥沙输移过程。在区域尺度上,区域水土流失模型重在反映宏观特征,所以忽略雨滴溅蚀,只考虑径流剥蚀,因此采用修正的土壤侵蚀方程RUSLE计算每个栅格单元的坡面产沙。遵循Meyer和Wischmeier提出的理论,即土壤侵蚀的输出量等于输入量与降雨径流泥沙剥蚀量之和,而且,输出总量不得超过降雨径流的输移能力。模型分为产流、汇流和产沙、汇沙4大部分,分别采用滞时演算法和马斯京根法进行汇流和汇沙的计算,整个模型框架见图2。在“.NET”框架下,采用面向对象的方式对模型进行开发,以C#为模型主要算法的开发工具,利用MapObects 2.0组件对矢量数据进行显示、分析和处理,建立区域尺度上土壤侵蚀模型,并选取典型研究区流域对模型进行参数率定和验证。

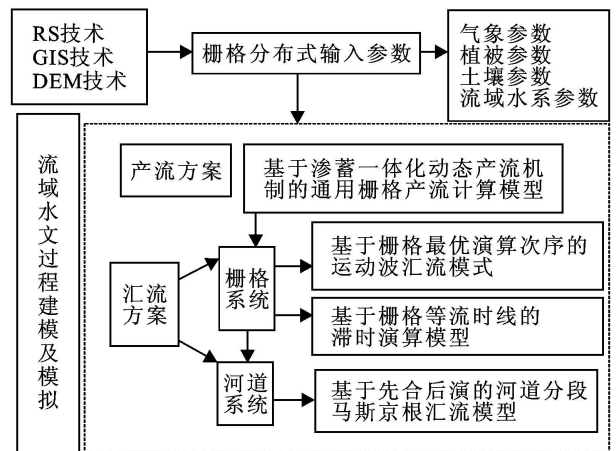


图1 分布式水文模型 ESSI 水文过程模拟框架<sup>[7]</sup>

## 2 计算过程

### 2.1 产流过程和径流计算

整个产流过程包括降水、冠层截留、潜在蒸散发、实际蒸散发、下渗、土壤水再分配、产流等。林冠截留量采用改进的概念性 Aston 指数模型来模拟,计算公式为:

$$I_{int} = C_m (1 - e^{-kPC_m}) + e_w \cdot T \quad (1)$$

式中:  $I_{int}$ ——冠层截留量;  $C_m$ ——冠层截留能力;  $k$ ——降雨截留系数;  $P$ ——降雨量(mm);  $T$ ——降雨历时(h);  $e_w$ ——林冠蒸发率。

潜在蒸散发可以由实测数据得到,也可以由 Penman—Monteith (PM) 法计算获得,计算公式为

$$E_p = \frac{\Delta(Q_n - G) + 8.64 \times 10^4 \cdot \gamma \cdot (0.622 \cdot \lambda \cdot \rho_{ar} / P) \cdot (e_s^0 - e_a) / \gamma_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \gamma_c / \gamma_a)} \quad (2)$$

式中:  $E_p$ ——潜在蒸散发 (mm/d);  $Q_n$ ——冠层表面净辐射 [(MJ/(m<sup>2</sup> · d))];  $G$ ——土壤热通量 [(MJ/(m<sup>2</sup> · d))], 在长时段模拟时取为 0;  $\rho_{air}$ ——空气密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $P$ ——大气压 (kPa);  $e$ ——高度  $z$  处的实际水汽压 (kPa), 由相对湿度计算得到;  $\Delta$ ——水汽压曲线斜率 (kPa/°C);  $\gamma$ ——湿度计算常量 (kPa/°C)。实际蒸散发采用 Bouchet 提出的互补相关方程:

$$E_a + E_p = 2E_{p0} \quad (3)$$

式中:  $E_a$ ——实际蒸散发;  $E_p$ ——潜在蒸散发;  $E_{p0}$ ——区域地表均一而且充分湿润时的蒸散发, 这时潜在蒸散发和实际蒸散发相等。

地下水下渗采用霍顿模型, 其计算公式为

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (4)$$

式中:  $f$ ——时段下渗率 (mm/h);  $f_0$ ——起始下渗率 (mm/h);  $f_c$ ——稳渗率 (mm/h);  $k$ ——下渗曲线系数;  $t$ ——时间。

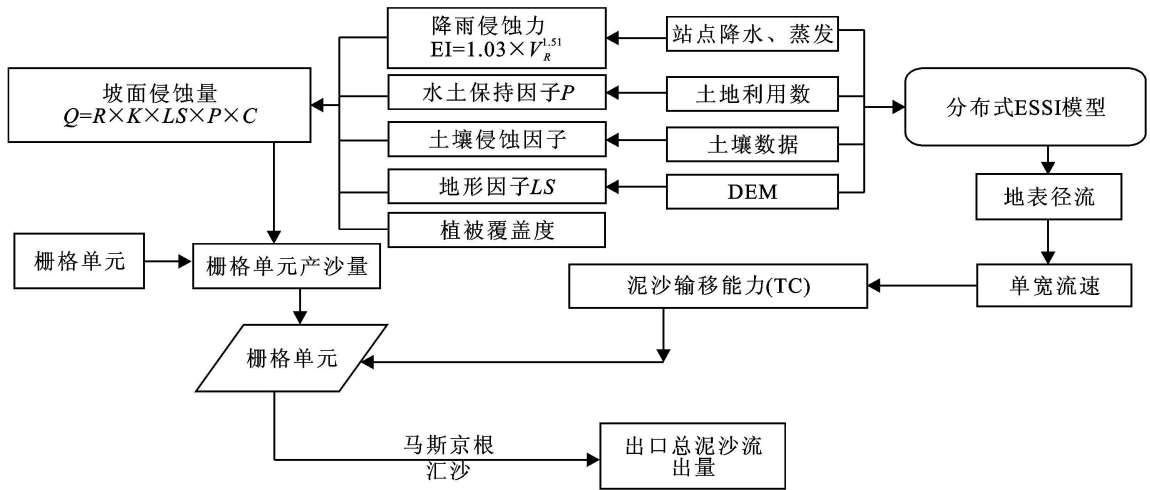


图 2 泥沙沉积模块框架

地表水下渗到土壤中后, 根据土壤分层参数, 动态计算每一土壤分层对入渗水的调节状态, 从而完成土壤水的再分配过程。经过降水、冠层截留、潜在蒸散发、实际蒸散发、下渗、土壤水再分配等过程, 栅格单元完成了水量在垂直方向上的输入和输出。

降雨特征和下垫面特征的对比, 最终可以分解为降雨量和土壤包气带含水量或土壤含水量变化的对比以及降雨强度与土壤下渗率的对比。因此, 可以根据降雨量和土壤包气带含水量或土壤含水量变化的对比, 以及降雨强度与下渗率的对比, 动态选取每个栅格单元的产流方式<sup>[7]</sup>。

### 2.2 单宽流速计算

单宽流速是指水流通过单位宽度横断面的流速 (m<sup>2</sup>/min)。单宽流速的计算主要是为侵蚀产沙计算提供参数。对于规则的栅格单元来说, 其单宽流速可用公式(5)计算。

$$q = V \times h \quad (5)$$

式中:  $q$ ——单宽流速 (m<sup>2</sup>/s);  $V$ ——地表径流流速 (m/a);  $h$ ——每个元胞上的水深 (m)。采用曼宁公式计算地表径流流速:

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $n$ ——曼宁糙率系数;  $S$ ——坡度比降;  $h$ ——栅格单元上的水深, 即每个栅格单元上的流量除以元胞面积。

### 2.3 泥沙输移过程和计算

2.3.1 地表侵蚀产沙计算 本模型中, 不再区分雨滴击溅剥蚀和径流剥蚀, 直接用改进的土壤流失模型 RUSLE 计算每个栅格单元的泥沙剥蚀量。RUSLE 模型的基本形式如下:

$$A = R \times K \times C \times LS \times P \quad (7)$$

式中:  $A$ ——土壤流失量 (t/hm<sup>2</sup>);  $R$ ——降雨侵蚀力因子 (MJ · mm/(hm<sup>2</sup> · h));  $K$ ——土壤可蚀性因子 (t · hm<sup>3</sup> · h/(hm<sup>2</sup> · MJ · mm));  $LS$ ——坡度坡长因子, 无量纲;  $C$ ——植被与经营管理因子, 无量纲;  $P$ ——水土保持措施因子, 无量纲。其中, 采用 CREAMS 模型<sup>[13]</sup> 中 EI 指数与日降雨量之间的关系计算降雨侵蚀力因子  $R$ ; 根据 Wischmeier 提出的方程<sup>[14]</sup> 从 DEM 中提取  $L$  和  $S$  因子; 土壤可蚀性因子利用数字化的土壤类型图, 采用 Williams 等<sup>[15]</sup> 在 EPIC 模型中发展的土壤可蚀性因子计算方法进行计算; 采用蔡崇法计算  $C$  因子的计算公式<sup>[16]</sup>, 即根据植被覆盖度计算  $C$  因子, 蔡崇法的计算方法中植被覆盖度可为年均植被覆盖度、月均植被覆盖度或者季均

植被覆盖度,本研究使用月均植被覆盖度,这使得在长时间段模拟中,其  $C$  因子值是动态变化的。 $P$  因子取值反映采用特定水土保持措施下的土壤流失量与采用顺坡种植时土壤流失量的比值,根据土地利用类型,并参照有关文献<sup>[17-19]</sup>获取地类  $P$  因子赋值(各因子的计算公式略)。

2.3.2 泥沙输移能力计算 土壤侵蚀过程可以分为泥沙剥蚀和泥沙输移过程,泥沙输移能力的大小直接限制了泥沙输移量。本研究泥沙输移能力采用 Beasley<sup>[20]</sup> 推导出的公式计算:

$$T_{RF} = 1.61S q^{0.05} \quad q \leq 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (8)$$

$$T_{RF} = 16.320S q^2 \quad q > 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (9)$$

式中:  $T_{RF}$  ——泥沙输移能力;  $S$  ——坡度比降;  $q$  ——单宽流速。

2.3.3 泥沙输移过程描述 被水流剥蚀的泥沙颗粒随水流向下游输移,其输移量的多少取决于泥沙输移能力和栅格单元上可供沙量的比较。对于每个栅格单元,其当前栅格可供沙量等于 RUSLE 计算的泥沙剥蚀量加上上游栅格单元的来沙量。如果可供沙量大于泥沙输移能力,则泥沙输移能力成为限制因子,那么该栅格单元向下游栅格单元输出的泥沙量就等于泥沙输移能力;如果可供沙量小于泥沙输移能力,可供沙量成为限制因子,那么该栅格单元向下游输出泥沙量等于可供沙量。每个栅格单元的泥沙量满足物质平衡方程,即满足以下公式<sup>[21]</sup>:

$$\frac{dw}{dt} = W_i - W_o \quad (10)$$

式中:  $dw$  ——当前栅格单元的产沙量;  $t$  ——时间;  $W_i$  ——流入栅格单元的泥沙量;  $W_o$  ——流出栅格单元的泥沙量。

## 3 模型实例应用

### 3.1 研究区概况

临沂流域是沂沭河流域的一部分,集水面积为 10 040 km<sup>2</sup> (为 DEM 提取流域边界所得流域面积)。该流域属于半湿润半干旱地区,植被很少,土层较薄,有部分陡峭的山区。全年平均气温 14.1 °C,极端最高气温 36.5 °C,最低气温 -11.1 °C,年降水量 849 mm。流域内水库较多,大小水库 90 座,库容量 3.40 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>,受人类活动干扰较强。

### 3.2 数据来源及处理

模型需要的主要数据有:(1)土壤数据来自于 1:100 万的中国土壤数据库,该数据库的源数据是《1:100 万中华人民共和国土壤图》和《中国土种志》,采用了传统的“土壤发生分类系统”,该数据库由中国

科学院南京土壤研究所完成。(2)土地利用数据采用来自 USGS 分辨率为 1 km 的亚洲土地利用/覆盖图,并重采样到 240 m。(3)DEM 数据采用来自 USGS 分辨率为 1 km 的 DEM 数据,并重采样到 240 m。(4)2001 年气象数据,即日最高温度、日最低温度、相对湿度、日降雨量和日平均风速等由研究区内及周围 6 个气象站点的实测数据得到。(5)2001 年 1—12 月分辨率为 1 km 归一化植被指数 (NDVI) 数据来自于 USGS,并重采样到 240 m,并由植被指数转换模型<sup>[22]</sup> (公式 9) 得到 2001 年 1—12 月植被覆盖度。

$$f_{ndvi} = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (11)$$

式中:  $f_{ndvi}$  ——为植被覆盖度;  $NDVI_{min}$ ,  $NDVI_{max}$  ——最小最大归一化植被指数。本研究  $NDVI_{min}$  和  $NDVI_{max}$  采用李苗苗<sup>[23]</sup>, Gutman<sup>[24]</sup> 提出的估算  $NDVI_{min}$  和  $NDVI_{max}$  的方法,即根据整幅影像上灰度的分布,以 5% 的置信度截取 NDVI,其上下限阈值分别代表  $NDVI_{min}$  和  $NDVI_{max}$ 。

### 3.3 结果与分析

首先对模型水文模块进行参数率定,选用 2001 年日径流实测数据对水文模块进行率定,采用 Nash—Sutcliffe 效率系数 (NSE) 和线性回归系数来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。模型率定结果见图 3。经率定模型 NASH 系数为 0.62,线性回归系数为 0.63。研究区流域环境受到人为影响很大,流域内水库众多,农业发达。从农作耕作引起地表覆盖和土壤特性的变化到修缮河道和建坝截流,都给该地区水文过程和径流模拟和预测带来困难。气象观测站点分布不均,这些因素都会影响模拟结果。综合考虑以上产生误差的因素,模拟结果基本合理。

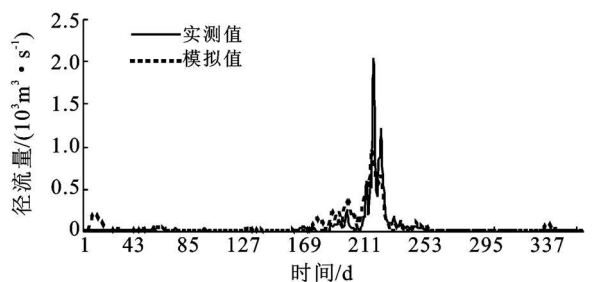


图 3 2001 年临沂流域日径流实测值与模拟值比较

在水文模块参数率定的基础上,对临沂流域泥沙输出进行模拟,模拟结果见图 4。因为缺乏临沂流域逐日泥沙输出量观测资料,无法对模型进行产沙率定和验证。根据中华人民共和国水利部 2001 年发布的《中国河流泥沙公报》显示,1957—2000 年,多年平均输沙量为 1.74 × 10<sup>6</sup> t。根据模拟的逐日泥沙输出量

计算 2001 年年输沙量, 约为  $1.31 \times 10^6$  t, 模拟结果较为满意。

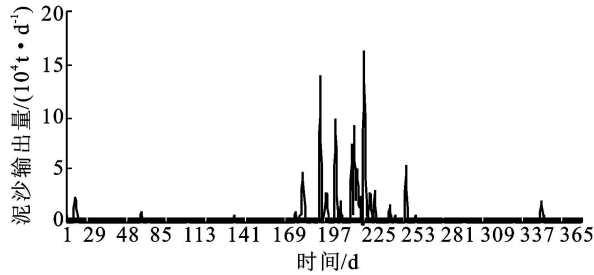


图 4 2001 年临沂流域逐日泥沙输出量模拟

利用该模型得到临沂流域 2001 年土壤侵蚀产沙空间分布图可知, 临沂流域的产沙量主要来源于上游和中游, 上游和中游的土壤侵蚀较为严重, 而下游的土壤侵蚀较为轻微。将土地利用现状图、坡度图和海拔高度图分别与土壤侵蚀分布图叠加, 利用 ArcGIS 软件进行叠加分析, 得到不同土地利用类型下、不同坡度下和不同海拔高度下的土壤侵蚀产沙状况 (表 1—3)。由结果可以看出, 土地利用类型对土壤侵蚀的影响比较大, 其中, 未利用地土壤侵蚀最为严重, 临沂流域不同土地利用类型下的土壤侵蚀程度大小依次为 (表 1): 未利用地 > 居民地 > 耕地 > 草地 > 水域 > 林地。

由 DEM 得到临沂流域坡度图, 可以看出, 临沂流域地势较为平坦, 坡度为  $0 \sim 6^\circ$  的区域占了总面积的 79%, 因此土壤侵蚀与坡度的相关性不是很大 (表 2), 整体表现出随着坡度的增加侵蚀加强的趋势。

利用 ArcGIS 软件和 DEM 得到临沂流域海拔高度分布图, 与土壤侵蚀分布图叠加, 得到不同海拔高度下土壤侵蚀的分布 (表 3), 可以看出随着海拔高度增加, 土壤侵蚀显著增强, 海拔高度大于 500 m 的区域土壤侵蚀最强烈, 200 ~ 500 m 的海拔高度带上, 土壤侵蚀量最大, 占总侵蚀量的 65%。分析海拔高度图和土壤侵蚀分布图可以看出, 土壤侵蚀与海拔高度具有很强的空间相关性, 土壤侵蚀的分布与海拔高度的分布基本一致, 土壤侵蚀主要分布在 200 ~ 500 m 的高度带上。

表 1 不同土地利用类型下的土壤侵蚀量

地类	面积/km <sup>2</sup>	平均侵蚀量/(t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
耕地	5 773.94	19 934.0
林地	1 449.04	5 065.9
草地	1 839.57	17 217.8
水域	343.64	8 487.5
居民点	792.23	32 410.4
未利用地	37.79	39 094.3

表 2 不同坡度下的土壤侵蚀量

坡度/(°)	面积/km <sup>2</sup>	平均侵蚀量/(t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
0~6	8 080.88	21 558.9
6~12	1 221.75	35 612.7
12~20	664.36	37 366.3
>20	169.57	36 529.2

表 3 不同海拔高度下土壤侵蚀量

海拔高度/m	面积/km <sup>2</sup>	平均侵蚀量/(t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
0~100	8 17.17	8 815.6
100~200	4 032.92	14 625.0
200~500	4 960.00	33 079.0
>500	426.13	46 911.6

## 4 结论

(1) 采用动态产流机制, 可以根据降雨特征和下垫面特征之间的动态对比关系动态选取产流方式。

(2) 该模型较为详细地描述了水文过程。对降水、渗透、植被截留、填洼、降雪融水、蒸散发等各个环节进行了计算和描述。

(3) 能够以日为时间单元进行长时期连续模拟。采用植被覆盖度计算 C 因子, 植被覆盖度使用月均植被覆盖度, 即在长时期连续模拟中, 植被覆盖度是随着时间而变化的, 这使得 C 因子也随之变化。

(4) 采用改进的土壤流失方程 RUSLE 计算泥沙剥蚀量, 使得模型可以进行土壤侵蚀产沙的空间分布分析, 从而确定土壤侵蚀关键区。

(5) 通过对临沂流域的侵蚀产沙模拟, 可以看出临沂流域泥沙主要来源于上游和中游, 影响临沂流域侵蚀产沙的主要因子是海拔高度和土地利用方式。其中, 海拔高度对临沂流域的土壤侵蚀影响最大, 土壤侵蚀主要分布在 200 ~ 500 m 的海拔高度带上, 因此这一海拔高度带是土壤侵蚀的重点防治地带。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 符素华, 张卫国, 刘宝元, 等. 北京山区小流域土壤侵蚀模型[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 114-120.
- [2] 祁伟, 曹文洪, 郭庆超, 等. 小流域侵蚀产沙分布式数学模型的研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 16-21.
- [3] 李云开, 杨培岭, 田英杰, 等. 强烈侵蚀产沙区小流域土壤侵蚀强度的支持向量机预报模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 93-98.
- [4] 包为民, 陈耀庭. 中大流域水沙耦合模拟物理概念模型[J]. 水科学进展, 1994, 5(4): 287-292.
- [5] 姚志宏, 杨勤科, 崔琰, 等. 区域尺度侵蚀产沙估算方法研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 13-17.

- [ 6 ] 崔琰, 李锐, 杨勤科, 等. 基于 GIS 的区域土壤侵蚀模型设计[ J ]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 32-36.
- [ 7 ] 张东, 张万昌. 基于渗蓄一体化动态产流机制的分布式水文模型研究[ D ]. 南京: 南京大学, 2006.
- [ 8 ] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large-area hydrologic modeling and assessment(part I): Model development[ J ]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [ 9 ] Cronshey R G, Theurer F D. Proceedings first federal interagency hydrologic modeling[ C ] // AnnAGNPS-non point pollutant loading model 1998: 19-23.
- [ 10 ] Bouraoui F, Dillaha T A. Answers-2000: Runoff and sediment transport model[ J ]. Journal of Environmental Engineering, 1996, 122(6): 493-502.
- [ 11 ] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. Gleams: Groundwater loading effects of agricultural management systems[ J ]. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers) 1987, 30(5): 1403-1418.
- [ 12 ] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(2): 171-183.
- [ 13 ] Knisel W G. Creams: A field scale model for chemicals runoff, and erosions from agricultural management systems [ R ]. USDA Conservation Research Report, 1980.
- [ 14 ] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses[ M ] // Washington D. C: USDA, United States Department of Agriculture(USDA). Agricultural handbook, 1978.
- [ 15 ] Wischmeier W H. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites[ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26: 189-193.
- [ 16 ] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤流失量的研究[ J ]. 水土保持学报, 2002, 14(2): 19-24.
- [ 17 ] 傅世锋, 查轩. 基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[ J ]. 地球信息科学, 2008, 10(3): 390-395.
- [ 18 ] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[ J ]. 北京林业大学学报, 2008, 28(4): 67-71.
- [ 19 ] 赵琰鑫, 张万顺, 王艳, 等. 基于 3S 技术和 USLE 的深圳市茜坑水库流域土壤侵蚀强度预测研究[ J ]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(3): 23-28.
- [ 20 ] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Answers: A model for watershed planning [ J ]. Transaction of the ASCE, 1981, 23(4): 938-944.
- [ 21 ] 原立峰, 常春平, 张青峰. 基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙模型研究[ J ]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 85-89.
- [ 22 ] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [ 23 ] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[ D ]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [ 24 ] Gutman G. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects [ J ]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2): 121-136.

(上接第 138 页)

- [ 17 ] 覃光华, 丁晶, 刘国东. 自适应 BP 算法及其在河道洪水预报上的应用[ J ]. 水科学进展, 2002, 13(1): 37-41.
- [ 18 ] 黄胜. 相空间神经网络耦合模型在水文预测中的应用[ J ]. 人民长江, 2008, 39(11): 10-11.
- [ 19 ] 刘星才, 许有鹏, 唐郑亮. 改进的人工神经网络模型在水文序列预测中的应用研究[ J ]. 南京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 85-90.
- [ 20 ] 孔凡哲, 李莉莉. 数字高程模型在新安江模型中的应用研究[ J ]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 393-396.
- [ 21 ] 周买春, Jayawardena A W. 利用双抛物线型土壤蓄水容量曲线对新安江产流模型的改进[ J ]. 水利学报, 2002(12): 38-43.
- [ 22 ] 李致家, 姚成, 汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用[ J ]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 131-134.
- [ 23 ] Song X M, Kong F Z. Application of genetic algorithm and GIS in Xinanjiang model[ EB/OL ]. (2008-11-11) [ 2009-10-16 ]. Sciencepaper Online of China, <http://www.paper.edu.cn/en>.
- [ 24 ] 包为民. 水文预报[ M ]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 321-322.