

小流域土壤侵蚀模型(SWEM)

符素华¹, 刘宝元^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学珠海校区文理学院, 广东 珠海 510987)

摘要: [目的] 小流域土壤侵蚀模型是小流域水土保持规划和水土保持效益评价的技术工具。[方法] 针对小流域侵蚀输沙特点以及生产需求, 利用 Visual Studio 2017 研发了小流域土壤侵蚀模型。[结果] 该模型是一个次降雨分布式模型, 产流用径流曲线数模型计算, 坡面汇流采用美国土壤保持局单位线, 沟道汇流采用马斯京根法或非线性马斯京根-康吉法计算。坡面侵蚀计算采用中国土壤流失方程, 利用泥沙连续方程进行汇沙计算, 其中的水流挟沙力分坡面和沟道采用相应的适宜计算公式。同时考虑沟道谷坊和淤地坝等工程措施对汇流及汇沙的影响。利用黄土高原延安安塞杏树窑子沟小流域及东北黑土区嫩江鹤北农场 8 号小流域的降雨径流泥沙观测数据对模型进行了验证, 该模型对径流深、洪峰流量、流域出口输沙量的模拟均取得满意的效果, 且模型能得到流域的径流深、洪峰流量、坡面侵蚀及泥沙输移量的空间分布。[结论] 该模型能为小流域水土保持设计提供技术工具, 支撑数字孪生流域建设和水土保持智慧化建设。

关键词: 小流域; 土壤侵蚀; 输沙; 分布式模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0159-07

Small Watershed Erosion Model (SWEM)

FU Suhua¹, LIU Baoyuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction, Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Arts and Sciences,

Beijing Normal University at Zhuhai, Zhuhai, Guangdong 510987, China)

Abstract: [Objective] The small watershed soil erosion model is a technical tool for soil and water conservation planning and evaluation of soil and water conservation benefits in small watersheds. [Methods] Based on the characteristics of erosion and sediment transport as well as production requirements in small watersheds, a small watershed soil erosion model was developed using Visual Studio 2017. [Results] The model was an event-based rainfall distributed model. Runoff yield was calculated using the runoff curve number method. Slope inflow was simulated using the unit hydrograph from the US Soil Conservation Service, and channel inflow was calculated using the Muskingum method or the nonlinear Muskingum-Cunge method. Slope soil erosion was calculated using the Chinese Soil Loss Equation, and sediment concentration was calculated using the sediment continuity equation, with the sediment transport capacity of water flow calculated using appropriate formulas for slopes and channels, respectively. Additionally, the model considered the impact of engineering measures such as check dams and warping dams on inflow and sediment concentration. The model was validated using rainfall-runoff-sediment observation data from the Xingshuyaozi Gully small watershed in Ansai, Yan'an, Loess Plateau, and the No. 8 small watershed in Hebei Farm, Nenjiang, Northeast Black Soil Region. The model demonstrated satisfactory performance in simulating runoff depth, peak discharge, and sediment transport at the watershed outlet. Moreover, it provided spatial distribution of runoff depth, peak discharge, slope erosion, and sediment transport within the watershed. [Conclusion] The model

收稿日期: 2025-08-13

修回日期: 2025-09-13

录用日期: 2025-09-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-12-02

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500700)

第一作者: 符素华 (1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

通信作者: 刘宝元 (1958—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀机理与监测技术研究。E-mail: baoyuan@bnu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

can provide a technical tool for soil and water conservation design in small watersheds and support the construction of digital twin watersheds and the development of intelligent soil and water conservation.

Keywords: small watershed; soil erosion; sediment transport; distributed model

Received: 2025-08-13

Revised: 2025-09-13

Accepted: 2025-09-22

Online(www.cnki.net): 2025-12-02

水土保持是生态文明建设的重要组成部分,也是提升生态系统质量和稳定性的重要手段。随着信息技术与计算机技术的飞速发展,水土保持的数字化与智慧化建设已成为时代发展的必然要求。在此背景下,小流域侵蚀模型作为水土保持领域的重要技术工具,对于水土保持措施的规划及水土保持效益的评价具有关键意义。构建小流域土壤侵蚀模型,正是《水土保持“十四五”实施方案》中明确提出的重要任务之一。

国外对小流域土壤侵蚀模型研究较早,自 20 世纪 80 年代以来,美国先后研发了农业非点源污染模型 AGNPS (agricultural non-point-source pollution model)^[1],新一代水蚀预报模型 WEPP (water erosion prediction project)^[2]和区域水土资源评价工具 SWAT (soil and water assessment tool)^[3]等,欧洲建立了欧洲土壤侵蚀模型 EUROSEM (European soil erosion model)^[4]和 LISEM (Limburg soil erosion model)^[5]等。国内小流域土壤侵蚀模型研发较晚,符素华等^[6]构建了北京山区小流域土壤侵蚀模型;金鑫等^[7]构建了逐网格汇沙的土壤侵蚀模型;王光谦等^[8]构建了适用于黄河流域的分布式物理机理模型——黄河数字流域模型;姚文艺等^[9]以地理信息系统为平台,研发了黄河多沙粗沙区小流域分布式土壤流失数学模型支持系统;李文杰等^[10]构建了基于物理过程的分布式流域水沙模型;高翔等^[11]建立了喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型;包为民等^[12]建立了流域水沙耦合物理概念模型。

尽管已建立了较多的小流域土壤侵蚀模型,但由于我国沟道工程类型较为复杂,国外的 AGNPS^[1]和 WEPP^[2]等模型不能用于模拟我国淤地坝和谷坊等工程措施的减水减沙效益,也不适用于坡度较陡的复杂地形。国内的小流域侵蚀模型也没有考虑沟道工程措施对汇流和汇沙的影响,不能解释谷坊和淤地坝等工程措施的减水减沙效益。

由于坡面和沟道水流特性不同,在进行泥沙输移模拟时 also 需用不同的水流挟沙力公式区别对待。因此,为了解决这些问题,本文基于流域的产汇流过程和侵蚀输沙过程,同时考虑沟道工程对侵蚀输沙的影响,研发了小流域土壤侵蚀模型 SWEM,旨在为小流域水土保持规划和水土保持效益评价提供技术工具。

1 模型结构与组成

1.1 模型原理

小流域是我国水土流失治理的重要单元。为此,水利部专门制定了小流域划分及编码规范^[13]。在此规范中,小流域是指汇水面积在 50 km² 以下的流域。美国小流域是指 1 000 km² 以下的流域。本研究研发的小流域土壤侵蚀模型 (small watershed erosion model, SWEM) 是基于次降雨预报的模型,一般实用于 1 000 km² 以下的流域。该模型包括产流-汇流及侵蚀-输沙模块,同时也考虑谷坊和淤地坝等沟道工程对汇流与汇沙的影响。在进行模型构建时,综合国内外的最新研究成果,选择适合我国下垫面情况的计算公式。

1.1.1 径流计算 本模型采用径流曲线数法^[14]进行径流计算,其计算公式为:

$$RO = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P > 0.2S \quad (1)$$

$$RO = 0 \quad P \leq 0.2S \quad (2)$$

式中:RO 为径流深,mm;P 为降雨量,mm;S 为最大储水能力。

$$S = 25\,400/CN - 254 \quad (3)$$

式中:CN 为径流曲线数,与地表覆盖、水文土壤组和土壤前期含水量等因素有关,取值为 0~100。

如果考虑汇流对径流计算的影响,径流深计算公式为:

$$RO = \frac{\left(P + \sum_{i=1}^n RO_i - 0.2S\right)^2}{P + \sum_{i=1}^n RO_i + 0.8S} \quad P + \sum_{i=1}^n RO_i - 0.2S \geq 0 \quad (4)$$

式中:RO_i 为第 i 个来流方向的径流深,mm。

1.1.2 洪峰流量 根据流域平均坡度分别采用 2 个不同的洪峰流量计算公式。

1) 流域平均坡度 $\geq 10^\circ$ 时^[15],

$$q_p = 6.69\varphi \left(a_{out}/10^6\right)^{0.59} RO_{avout}^{1.15} \left(a_{out}/10^6\right)^{0.06} P_{out}^{-0.72} \quad (5)$$

式中: q_p 为洪峰流量,m³/s; a_{out} 为汇流面积,m²;RO_{avout} 为汇水面积平均径流深,mm; P_{out} 为流域平均降雨深,mm; φ 为洪峰流量修正系数。

2) 流域平均坡度 $< 10^\circ$ 时^[16],

$$q_p = 3.79\varphi(a_{out}/10^6)^{0.7} \left(\frac{RO_{avout}}{25.4}\right)^{0.9(a_{out}/10^6)^{0.02}} CS^{0.16} \left(\frac{L_{cell}}{a_{out}}\right)^{-0.19} \quad (6)$$

式中:CS为沟道平均比降,m/m; L_{cell} 为沟道长度,m; φ 为洪峰流量修正系数。

1.1.3 汇流计算 坡面汇流采用的公式为:

$$q = \begin{cases} 0.3t_1 q_p & t_1 < 0.1 \\ 1.4919 q_p t_1^{1.6945} & 0.1 \leq t_1 < 0.5 \\ q_p(at_1^2 + bt_1 + c) & 0.5 \leq t_1 < 5.0 \\ 0 & t_1 \geq 5.0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: q 为流量, m^3/s ; q_p 为洪峰流量, m^3/s ; $t_1 = t/T_{pout}$, T_{pout} 为峰现历时, s ; t 为时间, s 。 a 、 b 和 c 的取值见表1。

表1 基于美国SCS单位线的汇流计算公式中 a 、 b 、 c 参数取值

Table 1 Parameter values of a , b , and c in equation				
序号	a	b	c	适用条件
1	-2.321 4	4.553 6	-1.230 0	$1.0 \leq t_1 < 1.5$
2	-0.946 4	1.708 9	0.243 6	$1.5 \leq t_1 < 2.0$
3	0.189 3	-1.161 6	1.845 9	$2.0 \leq t_1 < 2.8$
4	0.048 2	-0.378 6	0.758 3	$2.8 \leq t_1 < 3.8$
5	0.004 1	-0.004 9	0.139 5	$3.8 \leq t_1 < 5.0$

沟道和河道汇流采用马斯京根法或非线性马斯京根-康吉法计算。汇流计算公式为:

$$q_{outj+1} = C_0 q_{inj+1} + C_1 q_{inj} + C_2 q_{outj} \quad (8)$$

式中: q_{outj} 、 q_{outj+1} 为栅格出口计算时段 j 及 $j+1$ 时段末的流量, m^3/s ; q_{inj} 、 q_{inj+1} 为栅格入口计算时段 j 及 $j+1$ 时段末的流量, m^3/s 。

当采用马斯京根方法时, C_0 、 C_1 和 C_2 计算公式为:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2K_r X}{2K_r(1-X) + \Delta t} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2K_r X}{2K_r(1-X) + \Delta t} \quad (10)$$

$$C_3 = \frac{2K_r(1-X) - \Delta t}{2K_r(1-X) + \Delta t} \quad (11)$$

$$2K_r X < \Delta t < 2K_r(1-X) \quad (12)$$

当采用非线性马斯京根-康吉法计算时, C_0 、 C_1 和 C_2 计算公式为:

$$C_0 = \frac{C_k - 1}{C_k + 1} \quad (13)$$

$$C_1 = 1 \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{1 - C_k}{C_k + 1} \quad (15)$$

$$C_k = \frac{5}{3} v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (16)$$

式中: Δx 为单元格内流路长度,m; v 为流速, m/s 。

1.1.4 坡面侵蚀 坡面侵蚀采用中国土壤流失方程CSLE^[17]进行计算。

$$A = 100RKLSBET \quad (17)$$

式中: A 为土壤侵蚀模数, t/km^2 ; R 为降雨侵蚀力, $(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$; K 为土壤可蚀性, $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(MJ \cdot mm \cdot hm^2)$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为覆盖与生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。

1.1.5 泥沙输移 在汇流计算的基础上,进行泥沙输移计算。本模型的泥沙连续方程为:

$$q_s(x) = q_s(in) + q_{sl} + D(x) \quad (18)$$

式中: $q_s(x)$ 为流出的输沙率, kg/s ; $q_s(in)$ 为上游流入的输沙率, kg/s ; q_{sl} 为侧向流入的输沙率, kg/s ; $D(x)$ 为泥沙沉积量或冲刷量, kg/s ,当输沙率大于水流挟沙力时,泥沙沉积,采用公式(19)计算,当输沙率小于水流挟沙力时,出现冲刷,采用公式(20)计算。

$$D(x) = \eta \frac{\Delta x V_{ss}}{q_{in} + q_{out}} (W_{in} + W_{out})(q_{stku} - T_{cout}) \quad (19)$$

$$D(x) = K_r(1 - C_c)(T_{cout} - q_{stku}) \frac{W_{in} + W_{out}}{2} \quad (20)$$

式中: η 为泥沙沉积系数; Δx 为沟道长度,m; V_{ss} 为泥沙沉速, m/s ; W_{in} 和 W_{out} 分别为水流入口和出口的沟道宽度,m; q_{in} 和 q_{out} 分别为水流入口和出口的为单宽流量, m^2/s ; q_{stku} 为单宽输沙率, $kg/(m \cdot s)$; T_{cout} 为水流挟沙力, $kg/(m \cdot s)$; K_r 为沟道可蚀性; C_c 为沟道地表盖度。

水流挟沙力计算根据坡面、沟道和河道选择不同的公式计算。坡面水流挟沙力公式可采用SCHOKLITSCH^[18]、GOVERS^[19]、ZHANG等^[20]和MU等^[21]公式;沟道水流挟沙力公式可采用SCHOKLITSCH^[18]与费祥俊等^[22]公式;河道水流挟沙力公式可采用SCHOKLITSCH^[18]、YALIN^[23]和SENG^[24]公式。

1.1.6 沟道工程 谷坊和淤地坝等沟道工程有效拦截了径流和泥沙。为模拟沟道工程的减水减沙效益,本模型根据沟道工程措施的类型对其水沙进行模拟。根据工程措施的实际情况按4种情况分别进行组合计算:1)仅有坝体;2)坝体与溢洪道;3)坝体与放水建筑物;4)坝体、溢洪道与放水建筑物。分别用于模拟不同类型坝体(淤地坝、拦水坝或谷坊),以及不同组合情况下的出流。单一沟道工程措施部件的流量计算见公式(21)~公式(23)。

1) 淤地坝放水建筑物出流量计算公式为:

$$q_{outj+1}=0.62A_in_p\sqrt{2\times 9.8}\left(\frac{\sqrt{h_{gj+1}-\left(L_f+\sqrt{A_f}\right)}+\sqrt{h_{gj+1}-2\left(L_f+\sqrt{A_f}\right)}+\cdots +\sqrt{h_{gj+1}-N_f\left(L_f+\sqrt{A_f}\right)}}{\sqrt{h_{gj+1}-N_f\left(L_f+\sqrt{A_f}\right)}}\right)\quad (21)$$

其中 $h_{gj+1}-N_f(L_f+\sqrt{A_f})\geqslant 0$ 。

式中: q_{outj+1} 为沟道工程出口流量, m^3/s ; L_f 为放水建筑物沿垂直高度布设放水孔的间距, m ; n_p 为每排放水孔的个数; A_f 为每个放水孔的排水面积, m^2 ; h_{gj+1} 为水深, m 。

2) 淤地坝溢洪道出流量计算:

$$q_{outj+1}=B_y(h_{gj+1}-H_{nj})\left(\frac{1}{n_f}(h_{gj+1}-H_{nj})^{\frac{2}{3}}J_y^{0.5}\right)\quad (22)$$

式中: n_f 为溢洪道曼宁系数; B_y 为溢洪道宽度, m ; J_y 为溢洪道沟道比降, m/m 。

3) 仅有坝体时出流量计算公式为:

$$q_{outj+1}=K_lB_g h_{gj+1}^{1.5}/l\quad (23)$$

式中: B_g 为谷坊宽度; K_l 为渗漏系数; l 为谷坊厚度, m 。

1.2 运行环境

系统使用 Visual Studio 2017 软件开发, 开发语言为 C++17。界面框架为 QT。编译工具为 Cmake, 以便于后续跨平台(如 Linux)模型使用需求。运行环境为 Windows 10、11、64 位系统。

2 模型输入与输出

模型需要流域边界、土壤等基础数据, 具体见表 2。模型输出包括产流、坡面侵蚀、汇流汇沙及统计结果 4 个文件夹, 前 3 个文件夹基于次降雨输出每个计算变量及中间变量的空间分布, 统计结果文件夹中包括每次降雨流域出口的流量过程及输沙率过程线, 以及各次降雨流域出口的径流深、洪峰流量、土壤侵蚀模数、输沙量和沉积量。

表 2 模型基本输入图层
Table 2 Basic input layer of model

序号	图层名称	用途	文件格式
1	流域边界	确定计算空间范围	Shp 面文件, 用户在 ArcMap 中准备
2	雨量站	确定降雨量空间分布	excel 文件
3	雨量	侵蚀触发	excel 文件
4	DEM	确定坡度、坡长、沟道、子流域等	*.tif、*.aux 或 *.img 格式, 用户在 ArcMap 中准备
5	土壤	确定土壤体积质量、质地、土壤可蚀性和水文土壤组等参数	Shp 面文件, 用户在 ArcMap 中准备
6	土壤侵蚀地块	确定土地利用、工程措施、耕作措施, 用于进行生物措施、工程措施、耕作措施因子及曼宁系数等参数的赋值	Shp 面文件, 用户在 ArcMap 中准备
7	沟道	确定沟道形状、曼宁系数等参数	Shp 线文件, 利用地形因子计算工具生成, 并在 ArcMap 中修改
8	沟道工程	确定谷坊、淤地坝等的位置	Shp 点文件, 用户在 ArcMap 中准备
9	道路	当现有地形图不能反映其真实水流方向时需要该文件, 用以修改水流方向	Shp 线文件, 用户在 ArcMap 中准备

3 模型验证与应用

3.1 模型验证

采用黄土高原延安市安塞区杏树窑子沟小流域及东北黑土区嫩江鹤北农场 8 号小流域的降雨径流泥沙观测数据对模型进行验证, 取得较为满意的效

果(图 1)。其中模型计算径流深、洪峰流量和流域出口输沙量的 Nash 模型有效系数分别为 0.75、0.74 和 0.79。径流深、洪峰流量和流域出口输沙量计算值与观测值之间有显著相关关系, 相关系数分别为 0.87、0.86 和 0.91。

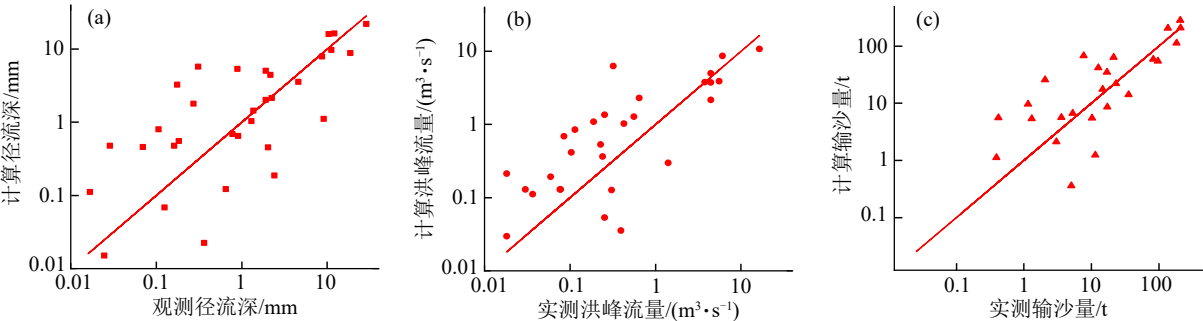


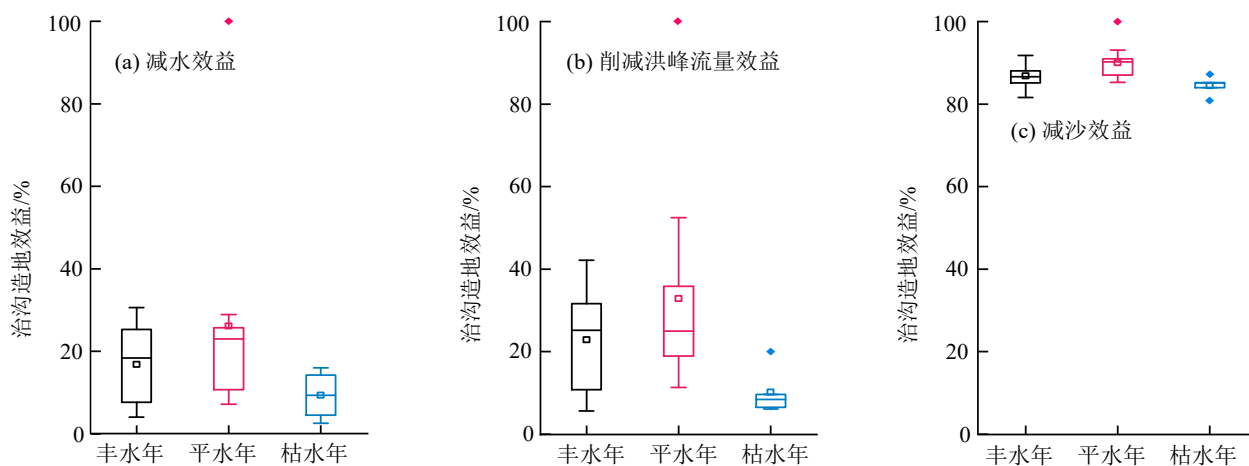
图 1 模型计算值与实测值比较
Fig.1 Comparison between modeled and measured values
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

3.2 模型应用

黄土高原是我国的生态脆弱区之一,1999年实施的退耕还林还草及治沟造地工程都对地表覆盖造成巨大影响,从而影响水文及土壤侵蚀过程。东北黑土区是我国的粮仓,土壤侵蚀所带来的黑土变薄、变瘦和变硬问题也日渐突出。因此,这2个区域的土壤侵蚀引起政府部门与国内外学者^[25-28]的广泛关注。由此本研究在黄土高原和东北黑土区各选择1个典型小流域作为应用案例。

3.2.1 治沟造地的减水减沙效益 黄土高原延安市安塞区杏树窑子沟小流域面积为3.72 km²,2015—2018年流域内治沟造地面积为38.5 hm²,占流域面积的10.36%。治沟造地前流域内有林地、果园、灌木林

地和旱地的面积占比分别为51.9%、13.2%、13.0%和8.0%,治沟造地后,相应的面积占比分别为52.0%、13.2%、10.8%和9.5%。治沟造地前后的流域平均坡度分别为26.2°和25.3°。治沟造地会改变流域内的坡度和土地利用结构,从而对流域水沙产生影响。SWEM模型被用于评价次降雨和不同水文年下治沟造地对流域水沙的影响。基于丰水年、平水年、枯水年3个代表年下各次降雨的径流和泥沙计算结果发现,不同水文年下治沟造地减水减沙效益明显(图2)。丰、平、枯水年的平均减水效益分别为16.8%、26.1%和9.3%,平均削减洪峰流量效益分别为22.9%、32.9%和10.1%,平均减沙效益分别为86.8%、90.0%和84.5%。



注:图中箱体表示75%和25%的四分位数;上下须线表示最大值和最小值;箱体中实线表示中位数;方块表示平均值。下同。

图2 治沟造地减水减沙效益

Fig.2 Benefits of gully land consolidation for runoff and sediment reduction

3.2.2 侵蚀风险区识别及措施效益评价 黑龙江九三实验站鹤北农场8号小流域(48°59'58"~49°00'48"N, 125°18'52"~125°20'41"E,)面积为2.3 km²,属于典型的漫川漫岗地形。流域内2013年主要土地利用类型有旱地、灌木林地、有林地和其他草地,面积占比分别为79.9%、10.06%、7.62%和2.42%。流域内98.9%的区域坡度<5°。

2020年流域东部的耕地地块(编号2、6、13、20)由以前的顺坡耕作改为横坡耕作,耕地面积为0.06 km²,占流域面积的27.7%。SWEM模型被用于识别该流域内侵蚀严重区域及顺坡耕作改为横坡耕作后对流域水沙的影响。用2013年的实测数据进行参数率定。

SWEM模型计算结果表明(以2013年8月12日降雨为例),模型能较好地模拟流量过程与输沙率过程(图3和图4),且流域东侧(地块2、6、13和20)及北侧(地块21和22)的旱地净侵蚀量较大(图5a),属于

流域内侵蚀较为严重的区域,而流域内的林草地则主要以泥沙沉积为主。因此,对流域东侧地块进行耕作方式的改变是合理的。改为等高耕作后,地块的侵蚀量明显降低(图5b)。

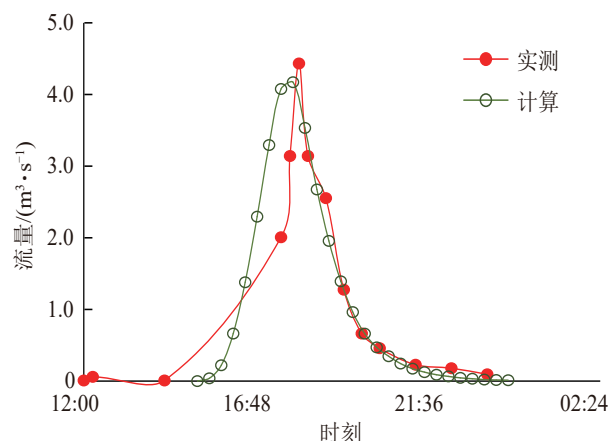


图3 模型计算与实测流量线过程比较

Fig.3 Comparison of modeled and measured discharge hydrographs

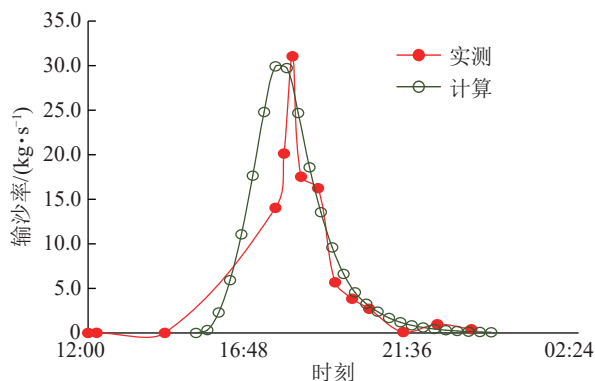


图 4 模型计算与实测输沙率过程线比较

Fig.4 Comparison of modeled and measured sediment transport rate hydrographs

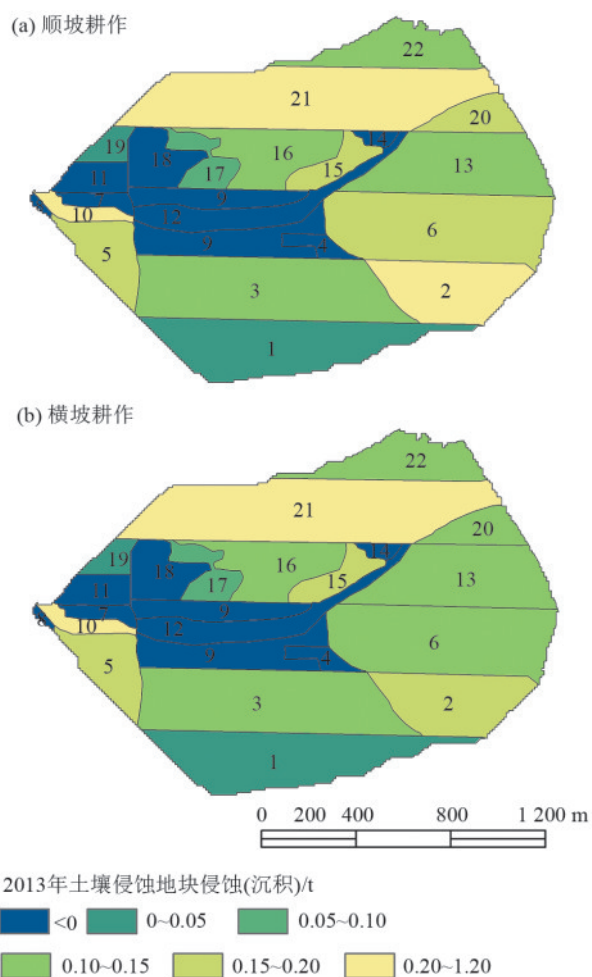


图 5 鹤北农场 8 号小流域 2013 年 8 月 12 日降雨净侵蚀/沉积分布

Fig.5 Net erosion/deposition distribution during rainfall event on August 12, 2013 for small watershed No. 8 at Hebei Farm

4 结论

小流域土壤侵蚀模型的研发是水土保持数字化建设与智慧化建设的需求,本文介绍了 SWEM 模型的主要原理、开发环境及应用环境。该模型的特点为:

1) 基于次降雨的分布式土壤侵蚀输沙模型,可以连续模拟;

2) 区分坡面和沟道水流挟沙力,各自采用适宜的水流挟沙力公式进行泥沙输移过程模拟;

3) 考虑我国常见沟道工程对汇流汇沙的影响。

在黄土高原地区和东北黑土区的应用结果表明,该模型有一定的应用精度,能用于小流域水土保持效益评价和水土保持规划。但是模型中的部分公式(如坡面汇流的单位线等)和参数取值(如沟道可蚀性、坡面曼宁系数等)仍有待进一步深入研究,以提高模型的计算精度。

参考文献:

- [1] YOUNG R A, ONSTAD C A, BOSCH D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [2] NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [3] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: Model development[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [4] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527-544.
- [5] DE ROO A P J, WESSELING C G, RITSEMA C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. i: Theory, input and output[J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1107-1117.
- [6] 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.
- [7] FU S H, ZHANG W G, LIU B Y, et al. Beijing mountains area soil erosion model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8(4): 114-120.
- [8] 金鑫, 郝振纯, 张金良, 等. 黄河中游分布式水沙耦合模型研究[J]. 水利水电技术, 2006, 37(12): 11-15.
- [9] JIN X, HAO Z C, ZHANG J L, et al. Study on distributed runoff-sediment coupled model for middle reaches of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(12): 11-15.
- [10] 王光谦, 李铁键. 黄河数字流域模型[J]. 中国科技论文

- 在线,2007,2(7):492-499.
- WANG G Q, LI T J. Digital Yellow River model[J]. Sciencepaper Online,2007,2(7):492-499.
- [9] 姚文艺,陈界仁,秦奋.黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J].水土保持学报,2008,22(4):21-26.
- YAO W Y, CHEN J R, QIN F. Study on the distributed forecast model of soil loss in sandy areas of Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4):21-26.
- [10] 李文杰,王兴奎,李丹勋,等.基于物理过程的分布式流域水沙预报模型[J].水利学报,2012,43(3):264-274.
- LI W J, WANG X K, LI D X, et al. A physically-based distributed watershed water erosion prediction model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3):264-274.
- [11] 高翔,蔡雄飞,王济,等.喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型[J].山地学报,2013,31(5):542-547.
- GAO X, CAI X F, WANG J, et al. Distributed soil erosion estimation model for small watershed in karst area [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(5):542-547.
- [12] 包为民,侯露,沈丹丹,等.黄土高原大理河流域水沙耦合模型应用研究[J].湖泊科学,2019,31(4):1120-1131.
- BAO W M, HOU L, SHEN D D, et al. Application of flow-sedimentation coupled model in Dali River basin of Loess Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 1120-1131.
- [13] 中华人民共和国水利部.小流域划分及编码规范 SL 653—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Classification and coding standards for small watersheds SL 653—2013 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013.
- [14] Soil Conservation Service. National engineering handbook [M].Section 4: Hydrology. Washington D C: SCS, US Department of Agriculture, 1956.
- [15] FU S H, WEI X, ZHANG G H. Estimation of peak flows from small watersheds on the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22 (21) : 4233-4238.
- [16] KNISEL W G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management system[J]. USDA Conservation Research Report, 1980,26(1):36-64.
- [17] LIU B Y, XIE Y, LI Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(4):430-439.
- [18] SCHOKLITSCH A. Schiffshebeanlagen [M]// Handbuch des Wasserbaues. Vienna: Springer Vienna, 1962:1021-1054.
- [19] GOVERS G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow [J]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1990, 189:45-63.
- [20] ZHANG G H, WANG L L, TANG K M, et al. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes [J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56 (7):1289-1299.
- [21] MU H L, FU S H, YU B F, et al. Predicting the sediment transport capacity from flow condition and particle size in the presence of vegetation cover[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(3):1237-1249.
- [22] 费祥俊,邵学军.泥沙源区沟道输沙能力的计算方法[J].泥沙研究,2004,29(1):1-8.
- FEI X J, SHAO X J. Sediment transport capacity of gullies in small watersheds [J]. Journal of Sediment Research, 2004, 29(1):1-8.
- [23] YALIN M S. An expression for bed-load transportation [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1963, 89 (3) : 221-250.
- [24] SENG LOW H. Effect of sediment density on bed-load transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115 (1):124-138.
- [25] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.
- [26] GUPTA H V, KLING H, YILMAZ K K, et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 80-91.
- [27] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3):885-900.
- [28] BEDNÁŘ M, MARTON D. Developing a lumped rainfall-runoff model in daily timestep for the Central European regions: A case study of the Czech Republic [J]. Environmental Modelling and Software, 2024, 179: e106092.