

北京山区小流域土壤侵蚀模型

符素华¹, 张卫国¹, 刘宝元¹, 朱启疆¹, 吴敬东², 段淑怀³, 李永贵³

(1 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875; 2 北京市水利科学研究所, 北京 100044;

3 北京市水土保持工作站, 北京 100073)

摘 要: 北京山区土壤侵蚀模型是一个流域尺度的、以次暴雨为基础的与 GIS 相结合的分布式模型。在栅格单元的基础上, 模型可以计算每一栅格单元的径流量和坡面侵蚀量。由于考虑了汇流汇沙过程, 模型也可以模拟每一单元格的洪峰流量、淤积量和产沙量。模型应用结果表明, 该模型具有一定的计算精度。该模型可以模拟流域内土壤侵蚀的空间分布和评价不同土地利用、水土保持措施等对水土流失的影响。该土壤侵蚀模型的建立, 可为北京山区的土壤侵蚀灾害评价和水土保持规划和设计提供依据。

关键词: 北京山区; 小流域; 土壤侵蚀; 模型; GIS

中图分类号: S 157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)04-0114-07

Beijing Mountain Area Soil Erosion Model

FU Su-hua¹, ZHANG Wei-guo¹, LIU Bao-yuan¹, ZHU Qi-jiang¹,

WU Jing-dong², DUAN Shu-huai³, LI Yong-gui³

(1 Resources and Environment Department of Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Beijing Institute of Water Science, Beijing 100044, China; 3 The General Station of Soil and Water Conservation of Beijing, Beijing 100073, China)

Abstract: The Beijing mountain area soil erosion model was developed on the basis of the new technology and new research considered soil erosion on steep slope. The BESEM is a computer program which uses distributed parameters and is event oriented. The model was developed to predict erosion from support practices and to accommodate spatial variability in topographies, soil properties, and land use conditions within small watersheds. The model contains three primary components: hillslope, channel and impounds such as check dam. Each component calculates rainfall excess by a Green-Ampt Min-Larson infiltration equation or SCS curve number method, according to the data of continuous record of rainfall; peak flow rate by simplified regression equation; soil erosion by CSLE; and deposition soil as a function of sediment detachment, sediment transport capacity, and existing sediment load in the flow. The test results show that the model can precisely assess the runoff, peak flow rate and sediment yield. The model can also predict the distribution of runoff and soil loss. So the model can be used to evaluate the effect of variation of land use and support practice on runoff, peak flow rates and soil loss. The model can also be served as the soil and loss evaluation, management and the design of the support practice.

Key words: Beijing mountain areas; small watershed; soil erosion; model; GIS

1 引 言

土壤侵蚀是一个全球性的灾害问题, 越来越受到人们的关注。严重的土壤侵蚀不仅导致侵蚀区土

壤退化、土地资源遭到破坏, 而且还会通过淤积河道、污染水质等过程来破坏下游地区的生态环境, 进

而加剧干旱、洪水以及盐碱化等灾害的危害程度。有效地控制水土流失, 恢复和保护环境是社会经济可持续发展的需要。小流域综合治理是解决和协调资源开发- 经济发展- 环境保护关系的重要措施。为此, 北京市委、市政府先后制定了“山区十年(1991~2000 年)致富工作纲要”和“四四攻坚计划”(1994~1997 四年使边远山区 40 万人民脱贫进入小康)计划, 以加速小流域综合治理的步伐, 使山区人民脱离

贫穷而步入小康生活。在北京山区, 搞好小流域综合治理与研究开发, 已提高到保护首都生态环境和维护生态平衡, 促进山区社会经济与平原同步发展的高度。同时, 由于北京山区地理位置的特殊性, 治理和控制水土流失又具有其特殊的意义。而土壤侵蚀模型是进行水土资源管理、定量评价水土保持措施和进行土壤侵蚀灾害评价的有效工具。因此建立北京山区小流域土壤侵蚀模型十分必要。

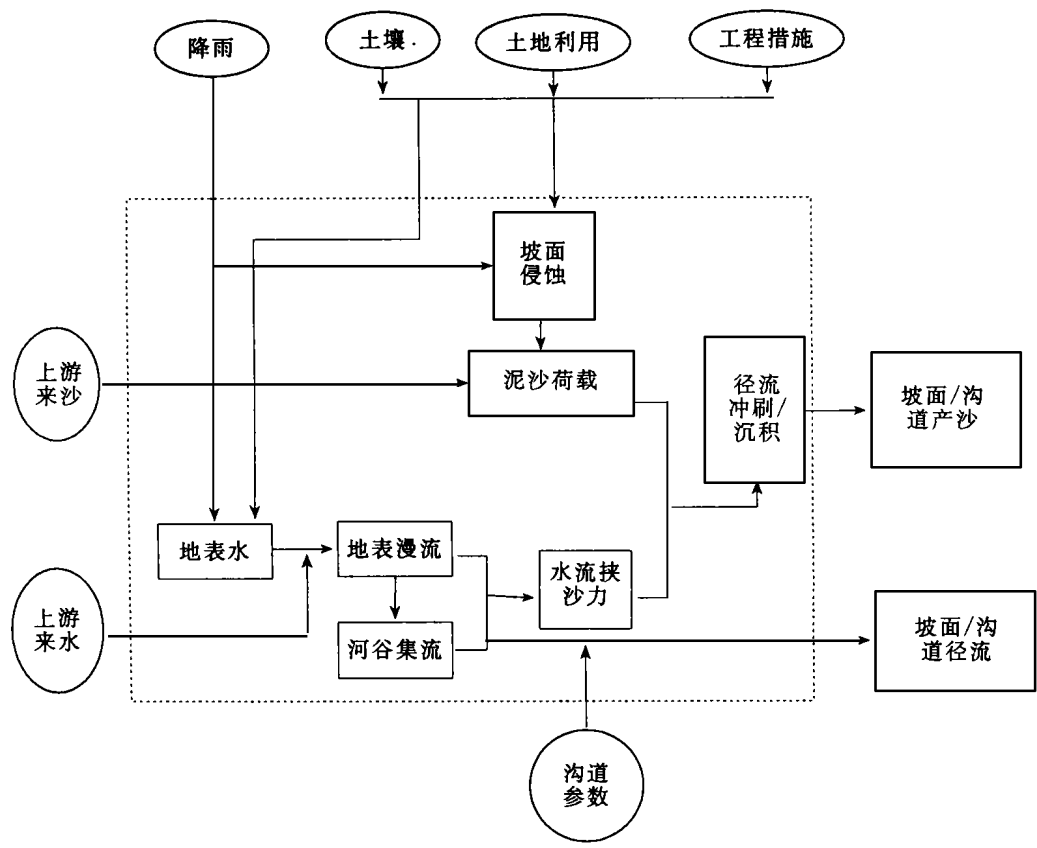


图1 北京山区小流域土壤侵蚀模型基本结构

国外已建立了许多的土壤侵蚀模型。如 Wischmeier 和 D. Smith^[1] 提出的通用土壤流失方程 USLE 较为全面地考虑了影响土壤侵蚀的自然因素, 所依据的资料丰富, 涉及区域广泛, 因而具有较强的实用性, 在世界范围内得到了广泛的推广。1972 年美国国会颁布了联邦水污染控制修正案, 即 92 - 500 号公法^[2]。该法规号召要保护和改善国家的水资源质量, 实施最优管理方案, 控制非点源污染。在这一指导思想之下, 美国先后建立了以 ANSWERS^[3], CREAMS^[2] 和 AGNPS^[4] 为代表的土壤侵蚀模型。1985 年在美国农业部农业研究局、林业局、水保局及内政部国家土地管理局的组织下, 又开始了新一代水蚀预报模型 WEPP 模型^[5] 的研究工作, 该模型研究于 1995 年基本完成。欧洲国家土壤侵蚀的加剧, 使得欧洲政府急欲寻求一个评价土壤

侵蚀灾害以及不同土壤保持措施效益的工具。为此, 建立了土壤侵蚀模型 EUROSEM^[6] 和 LISEM^[7] 模型。这些土壤侵蚀模型的建立, 对我国土壤侵蚀机理的研究以及我国土壤侵蚀模型研究的深入进行, 都有非常好的借鉴作用。但由于国外大多数耕作是基于缓坡, 其基本侵蚀公式都是在缓坡的基础上建立的。而我国的土壤侵蚀大多数发生在陡坡耕地上。另外, 我国的土地利用方式与国外也不尽相同, 因此不能将国外土壤侵蚀模型直接应用于我国的土壤侵蚀预报和侵蚀灾害评价和规划。我国对土壤侵蚀模型也有所研究^[8~13], 但所建侵蚀模型中的公式多结合了具体流域, 还很难应用于其它流域。本文根据国内外的研究现状, 结合北京山区土壤侵蚀发生的特点, 对现有的土壤侵蚀模型加以补充和完善, 建立起政府可作为决策依据的, 可用于评价土壤侵蚀灾害和

评估土壤保持措施影响的小流域土壤侵蚀模型。

2 模型结构

北京山区小流域土壤侵蚀模型是一个流域尺度的、以次暴雨为基础的分布式模型。该模型与 GIS 采用全集成的连接方式,将土壤侵蚀模型完全嵌入到 GIS 中,使模型的数据准备、输入、计算、图形输出均在土壤侵蚀系统内进行。该模型可以用于评价不同土地利用、水土保持措施等对水土流失的影响,并且可反应因土地利用、土壤特性、地貌等在空间上分布不同而引起的水土流失空间变化。在次侵蚀降雨事件中,降雨截留、地表填洼和水分蒸发仅占了降雨总量的很小一部分,而本模型是次降雨土壤侵蚀模型,因此忽略了它们对产流产沙的影响。该模型主要包括坡面、沟道和积水区三大部分的水沙计算。在坡面部分和沟道部分用美国农业部土壤保持局曲线数(SCS Curve Number)法^[14]或 GAML 入渗曲线法^[15]计算降雨径流量;用经验公式计算洪峰流量;用 USLE 方程计算坡面侵蚀量;用水流连续方程进行水流汇流演算;用泥沙连续方程考虑泥沙在坡面和沟道中的冲刷和淤积,由此计算出流域出口断面的产沙量(侵蚀模型流程见图 1)。在泥沙汇沙演算中,考虑了泥沙不同粒径对水流挟沙力的影响,将泥沙分成黏粒、粉粒、砂粒、小团聚体和大团聚体 5 大类。根据泥沙颗粒级配组成来分别进行泥沙冲淤演算,流域出口总沙量为各粒径流出沙量之和。积水区部分主要考虑了谷坊这类工程措施对水土流失的影响,计算了流出积水区的流量和沙量。

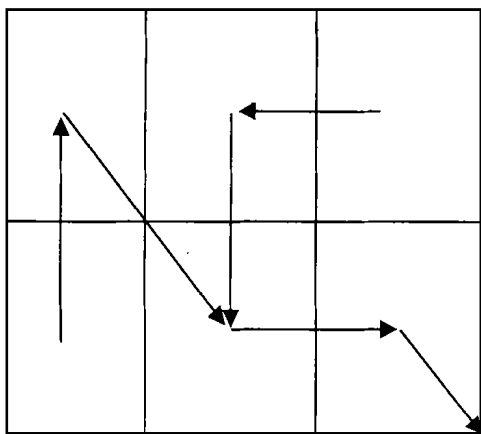


图2 概化流域

根据流域内的地表状况,小流域被划分成若干地表状况一致的小栅格单元(如图2),在此基础上,进行每一单元格的坡面径流量、坡面侵蚀量以及汇

流汇沙计算。模型主要以图层的形式进行参数的输入和计算结果的输出。

3 模型基本原理

3.1 坡面径流

降雨径流计算是土壤侵蚀计算的基础。本模型径流计算采用了两种方法。当有降雨过程资料时,径流计算采用 Chu 修正的 Green-Ampt Mein-Larson (GAML)^[15]入渗曲线:

$$f = \frac{dF}{dt} = K(1 + SM/F) \quad (1)$$

式中: f —— 下渗能力(mm/min); K —— 土壤饱和导水率(mm/min); S —— 土壤水吸力(mm); M —— 湿润锋前后土壤含水率之差; F —— 累积下渗量(mm)。

若无降雨过程资料而只有降雨总量资料时,采用美国土壤保持局提出的 SCS 径流曲线数法^[14]进行径流计算。SCS 径流曲线数法是美国土壤保持局在本世纪 50 年代初研制的产流计算方法。该计算方法中只有一个反映流域特征的一个综合参数 CN,它与流域土壤类型、土地利用现状等有关。该产流算法具有结构简单、计算方便的特点,同时能考虑土地利用变化对产流的影响。因此,它在美国及其它一些国家已得到广泛应用。美国许多土壤侵蚀模型如 EPIC^[16]、CREAMS^[2]、AGNPS^[4]等模型中都运用该法进行产流量的计算。其计算公式为:

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

式中: Q —— 径流量(mm); P —— 降雨量(mm); S —— 吸水参数,

$$S = 25400 / CN - 254 \quad (3)$$

其中: CN 为曲线数,与植被覆盖、水文土壤组以及前期影响雨量等因素有关,取值范围为 0 ~ 100。

3.2 坡面侵蚀量

在美国通用土壤流失方程 USLE^[1,17,18]的基础上,刘宝元等根据美国通用土壤流失方程(USLE)的建模思路,利用国内可得到的资料,建立了中国坡面土壤流失预报方程 CSLE,其计算公式为:

$$Q_{sl} = R \times K \times LS \times B \times E \times T \quad (4)$$

式中: Q_{sl} —— 坡面侵蚀量(t/hm^2); R —— 降雨侵蚀力($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$); K —— 土壤可蚀性因子($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); LS —— 坡度坡长因子,无因次; B —— 生物措施因子,无因次; E —— 工程措施因子,无因次; T —— 耕作措施因子,无因次。各因子计算公式如下:

(1)R 因子。根据降雨过程资料的可得性, 分别采用不同的算法计算了降雨侵蚀力。如果有降雨过程资料, 本模型降雨侵蚀力用 EI_{30} 来表示, 并采用 $RUSLE^{[18]}$ 中的计算公式:

$$R=EI_{30} \tag{5}$$

式中: R——次降雨侵蚀力($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$); EI_{30} ——次降雨最大 30 min 降雨强度(mm/h); E——次降雨总动能($MJ/(hm^2 \cdot h)$), 将次降雨过程分为降雨强度均匀的若干小段, 则次降雨总动能计算公式为:

$$E=\sum_{j=1}^n(e_i \cdot P_j) \tag{6}$$

式中: e_i ——第 j 时段的单位降雨动能($MJ/(hm^2 \cdot mm)$); P_j ——第 j 时段的降雨量(mm); n——次降雨的总降雨时段。

$$e=0.29[1-0.72\exp(-0.05i)] \tag{7}$$

式中: e——单位降雨动能($MJ \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$); i——时段雨强(mm/h)。

无降雨过程资料时, 采用 $CREAMS$ 模型^[2] 中 EI 指数与日降雨量(V_R) 之间的指数函数关系, 其计算公式为:

$$EI=1.03V_R^{1.51} \tag{8}$$

式中: EI ——降雨侵蚀力($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h)$); V_R ——次/日降雨总量(mm)。

用北京山区的次降雨过程资料对式(8)的验证结果表明: 该公式计算结果比较稳定, 区域差异不显著。因此在无降雨过程资料地区采用式(8)进行降雨侵蚀力计算。

(2)K 因子。为了得到北京山区的土壤可蚀性 K 值, 特选择了北京山区的主要土壤类型- 褐土(占全市土壤面积的 64.65%) 中的两大类普通褐土和淋溶褐土作为研究土壤, 分别在怀柔东台沟和密云石匣布设了标准小区。这些小区都按照同一标准建立: 15 坡度、20 m 坡长、5 m 坡宽的裸露休闲小区。小区每年春天翻耕 15 ~ 20 cm 深, 并按传统方法准备成苗床, 保证没有明显的杂草生长(覆盖度不超过 5%)。每个观测点都建立两个对照小区, 进行对比研究。连续两年对其进行了观测, 并根据土壤可蚀性因子的定义计算出 K 值。根据上述计算方法, 利用怀柔东台沟和密云石匣观测资料, 得到普通褐土和淋溶褐土的土壤可蚀性因子分别为 0.012 和 0.124。

(3)L 因子。刘宝元^[19] 用黄土高原坡面径流试验小区对 $USLE$ 以及 $RUSLE$ 中的坡长因子进行了验证, 其研究结果表明: 在陡坡上 $USLE$ 中的坡长

指数 $m=0.5$ 比 $RUSLE$ 中的坡长指数更为合适。因此本模型采用 $USLE$ 中的坡长指数, 其坡长计算公式为:

$$L=\left(\frac{K}{72.6}\right)^m \tag{9}$$

式中: L——坡长指数; K——坡长; m——坡长指数。其取值范围如下:

$$m=0.2 \quad H \leq 1\% \tag{10}$$

$$m=0.3 \quad 1\% < H \leq 3\% \tag{11}$$

$$m=0.4 \quad 3\% < H \leq 5\% \tag{12}$$

$$m=0.5 \quad H > 5\% \tag{13}$$

式中 H 为坡度(%)。

(4)S 因子。本模型用分段的方法来考虑坡对土壤侵蚀的影响。缓坡上选用 McCool 等^[20] (1987 年)研究的坡度公式, 见式(14)和式(15); 陡坡上采用刘宝元^[21] 的坡度公式, 见式(16)。

$$S=10.8\sin H-0.03 \quad H \leq 5^\circ \tag{14}$$

$$S=16.8\sin H-0.5 \quad 5^\circ < H \leq 10^\circ \tag{15}$$

$$S=21.91\sin H-0.96 \quad H > 10^\circ \tag{16}$$

式中: S 为坡度因子; H 为坡度(度)。

(5)B、E、T 因子。根据我国的农业历史及传统习惯, 水土保持措施可分为三大类: 水土保持生物措施、水土保持耕作措施和水土保持工程措施。水土保持生物措施是指在水土流失区为增加地表覆盖、有效拦蓄径流, 涵养水源, 调节河川、湖泊和水库的水文状况, 防止土壤侵蚀、改良土壤, 改善生态环境而采取的植树造林种草措施。水土保持耕作措施是以保水保土保肥为主要目的, 以提高农业生产为宗旨, 以犁、锄、耙等为耕(整)地农具所采取的措施。水土保持工程措施是水土保持综合治理措施的重要组成部分, 指通过改变小地形(如坡改梯、引水拉沙等), 拦蓄地表径流, 增加土壤降雨入渗, 改善农业生产条件, 充分利用光、热条件和水土资源, 建立良性生态环境, 减少或防止土壤侵蚀, 合理开发、利用水土资源而采取的措施。不同类型的水保措施不仅保土保水效果有异, 适宜的地区和地形部位也有很大的区别。刘宝元等根据这种分类方法, 综合了国内可得到的径流小区试验资料, 得到了一些水土保持生物措施因子值, 水土保持耕作措施因子值和水土保持工程措施因子值。

3.3 流域汇流计算

本模型中流域由坡面、沟道和积水区三大部分构成。水流按最大坡降流入下游单元成为下游单元的来流, 所有来流总量为本单元的入口径流总量, 本单元流出流量为出口流量。依次类推, 逐渐汇集到沟

道、沟道中水流向流域出口的过程中,可能被谷坊等蓄水设施所拦截,超出量继续流动直到出口。坡面有以下两种来流方式:上游坡面流入或坡面水流侧向流入。对任何一段沟道或积水区,都存在以下三种来流方式:1)坡面水流侧向流入沟道或积水区;2)由上游坡面或积水区流入沟道;3)由上游沟道流入。本模型在汇流总量计算中没有区分坡面汇流和沟道汇流。但是在坡面汇流和沟道汇流中,水力基本参数的计算却存在差异。坡面汇流中以假想的“U”型断面沟道进行水力参数的计算;沟道汇流中沟道断面用“U”型或“V”型断面来进行相应的水力参数的计算。

3.3.1 单元格总径流量计算 任一单元格入口的总径流量可用(17)式表示。

$$R_{Ov} = R_{Oi} + R_{\alpha} \quad (17)$$

式中: R_{Ov} ——单元格入口的总径流量(m^3); R_{α} ——来自于坡面或积水区的侧向入流量(m^3); R_{Oi} ——来自于沟道上游坡面、沟道或积水区的入流量(m^3)。若将 R_{Ov} 转化为径流深,则单元格出口的总径流量其转换公式为:

$$R_{Ovx} = R_{Ov} + R_{Owithin} \quad (18)$$

式中: R_{Ovx} ——单元格出口的总径流量(m^3); $R_{Owithin}$ ——单元格内部产生的径流量(m^3),为单元径流深与单元格面积的乘积。

3.3.2 单元格入口、出口洪峰流量的计算 本模型入口洪峰流量的计算思路来自于 WEPP 模型^[5]。单元格入口洪峰流量依赖于该单元格上游坡面、沟道以及积水区的洪峰流量。如果只有其中的一个(例如只有坡面)流入沟道,则该坡面出口的洪峰流量就为沟道入口的洪峰流量。类似地,当只有沟道或积水区来流时,沟道入口的洪峰流量就等于沟道或积水区出口的洪峰流量。若这三种来流情况有两种或两种以上同时发生,以最大的洪峰流量作为沟道入口洪峰流量的计算基础,以该时刻各种来流流量之和作为沟道入口的洪峰流量。所需的时间流量关系曲线用美国农业部水土保持局的 SCS 三角形综合单位线法求出。

单元格出口的洪峰流量为:

$$Q_p = 18.66A^{0.7}CS^{0.16}(Ro/25.4)^{(0.903A^{0.017})}(\frac{L}{W})^{0.19} \quad (19)$$

式中: Q_p ——洪峰流量(m^3/s); A ——流域面积(km^2); CS ——主沟比降(m/km); Ro ——径流深(mm); L ——主沟长度(km); W ——沟道宽度(km)。

3.4 流域汇沙计算

在汇流计算的基础上,进行汇沙演算。泥沙连续方程为:

$$Q_s(x) = Q_s(in) + Q_{sl} - D(x) \quad (20)$$

式中: $Q_s(x)$ ——单元格出口流出的泥沙量(t/s); $Q_s(in)$ ——上坡来沙量(t/s); Q_{sl} ——侧向来沙量(t/s); 上坡来沙量和侧向来沙量之和组成了水流可携带的泥沙总量。 $D(x)$ ——泥沙淤积量或冲刷量(t/s),其表达式为:

$$D(x) = \int_0^x \frac{V_{ss}W}{q(x)}(q_s - T_c)dx \quad (21)$$

式中: x ——单元格内的沟道长度(m); V_{ss} ——泥沙沉速(m/s); $q(x)$ ——单宽流量(m^2/s); q_s ——单宽输沙率($t/(m \cdot s)$); w ——水流宽度(m); T_c ——单宽水流挟沙力($t/(m \cdot s)$),其计算式为:

$$T_c = Gk \frac{Sv^2}{V_{ss}} \quad (22)$$

式中: G ——有效输沙因子; k ——输沙能力因子; S ——水流剪切力(pa); v ——流速(m/s)。其中:

$$G = 0.72 \left[\frac{92903 \cdot S}{(G - C) \cdot D} \right]^{-1.98} \quad (23)$$

式中: S ——水流剪切力(Pa); G ——泥沙容重(kg/m^3); C ——水容重(kg/m^3); D ——泥沙粒径(mm)。

3.5 积水区水沙计算

淤地坝、谷坊和塘堰等是水土流失沟道治理的重要措施。由于这些工程措施的拦水拦沙作用,在工程措施的上游构成了一个小的积水区域。如何有效地考虑其拦水拦沙作用,是土壤侵蚀模型合理预报土壤侵蚀的关键问题之一。本模型根据北京山区治理的实际情况,拟评价沟道治理措施对流域出口水沙的影响,而谷坊工程是北京山区最常见的沟道治理措施。因此本模型积水区水沙计算中主要考虑了谷坊的拦水拦沙计算。

积水区入口的入流量与来沙量与沟道入口计算方法相同。由于工程措施的拦水拦沙作用,积水区出口的水量沙量计算方法如下。

3.5.1 积水区出口水量 当谷坊为浆砌谷坊时,谷坊的出流方式有不出流和淹没出流两种。若谷坊断面为非浆砌断面,而是由碎石堆砌而成,则谷坊存在三种出流方式,即不出流、从碎石断面渗流或淹没出流与断面渗流相结合。根据现有研究资料的研究成果以及资料的可得到性,本模型中仅考虑了浆砌谷坊的情况。

当谷坊为浆砌断面时,若积水区水深小于谷坊高度,其出流量为 0;若积水区水深大于谷坊高度,

则洪峰流量计算公式为:

$$Q_p = 18.66A^{0.7}CS^{0.16}(RO/25.4)^{(0.903A^{0.017})}LW^{-0.19}$$
(24)

式中: Q_p ——谷坊出口的洪峰流量(m^3/s); A ——集水面积(km^2); CS ——主沟比降(m/km); RO ——径流深(mm); L ——主沟长度(km); W ——沟道宽度(km)。

其中径流深 RO 为:

$$RO = \frac{R_{ov} + R_{within} \cdot A_{im} \cdot H_{im}}{A_{imabove}}$$
(25)

式中: R_{ov} ——积水区的总入流量(m^3); R_{within} ——积水区内产生的径流深(m); A_{im} ——积水区面积(m^2); H_{im} ——谷坊高度(m); $A_{imabove}$ ——积水区汇

流面积(不包括积水区面积)(m^2)。

由积水区流出的径流总量为:

$$R_{ovo} = (H - H_{im}) \cdot A_{im} \quad H > H_{im} \quad (26)$$

$$H = \frac{R_{ov} + R_{within} \cdot A_{im}}{A_{im}} \quad (27)$$

式中: R_{ovo} ——流出积水区的径流总量(m^3)。

3.5.2 流出积水区的泥沙量 流出积水区的沙量为:

$$S = Q_0 C_0 \quad (28)$$

式中: Q_0 ——流出积水区的径流总量流量(m^3); C_0 ——积水区出口的泥沙浓度(t/m^3)(假定流出积水区的泥沙浓度等于积水区内的平均泥沙浓度)。

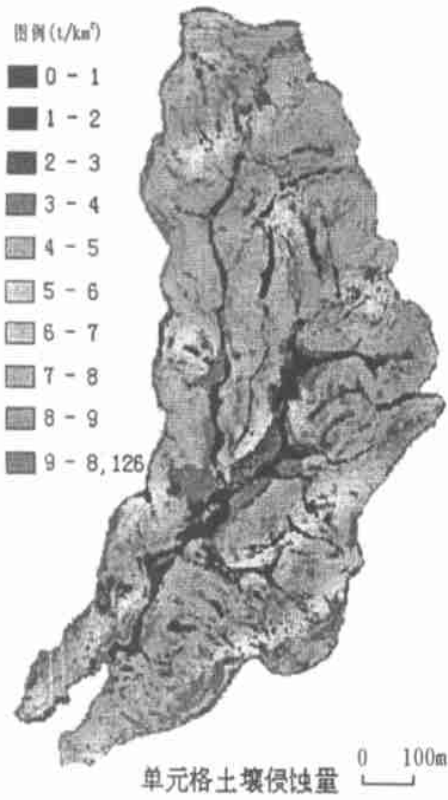


图 3 北京山区小流域土壤侵蚀模型在东台沟流域的应用结果

4 模型应用

为了对北京山区小流域土壤侵蚀模型进行检验,将模型在东台沟流域进行了应用。东台沟流域位于北京市怀柔县北部山区的汤河口镇。地理坐标为东经 116 28 ~ 116 42, 北纬 40 30 ~ 40 57。流域面积 0.63 km^2 。地带性土壤主要为褐土,大部分地区土层较薄。该流域属温带半干旱大陆性季风气候,全年无霜期 160 d,年蒸发量 1 200 mm,多年平均降水量为 511 mm。年内降水分布极不均匀,多集中在 6、

7、8、9 四个月,占全年降雨量的 81.2%,且降雨多以暴雨形式出现。东台沟流域于 1986 年开始进行沟口断面径流泥沙观测,于 1986 年 6 月 26 日取得径流泥沙观测资料一次。其基本降雨情况如表 1。

表 1 1986 年 6 月 26 日降雨基本资料

雨量 /mm	历时 /h	平均雨强 /(mm·h ⁻¹)	径流量 /m ³	洪峰流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	侵蚀总量 /t
46.9	4	11.73	365	0.073	0.56

北京山区小流域土壤侵蚀模型计算基本结果如表 2。根据模型算出的东台沟流域土壤侵蚀、淤积量如图 3。从表 2 可知,北京山区土壤侵蚀模型有较好

的计算精度, 计算结果与实测相差不大。

表 2 北京山区土壤侵蚀模型计算结果与实测结果比较

	径流量/ m ³	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	侵蚀总量/ t
观测值	365	0.073	0.560
计算值	389.5	0.118	0.301

5 结 论

北京山区小流域土壤侵蚀模型是与 GIS 相结合的分布式次降雨小流域模型。该模型考虑了陡坡土壤侵蚀的特点, 包括坡面、沟道和积水区三大部分

的水沙计算。模型设计考虑了无降雨过程资料地区的水沙计算。该模型可以计算得到流域的坡面侵蚀量, 流域出口的总径流量和总产沙量, 同时由于该模型是在栅格单元的基础上进行计算的, 因此也可根据计算结果, 查找流域内任一栅格单元的径流、坡面侵蚀量、淤积量和参沙量。从模型应用结果来看, 该模型计算结果有一定的计算精度, 并且可分析土地利用和水土保持措施变化对流域出口水沙的影响。因此, 该模型可用于无降雨过程资料地区的水土资源评价和规划, 可为水土保持设计和规划提供依据。

参考文献:

[1] Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. Agric. Handbook[S]. Washington, D. C: USDA, 1965. 282.

[2] Knisel W G (Ed), CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosions from Agricultural Management Systems[R]. USDA Conservation Research Report 1980. 26.

[3] Beasley D B et al. ANSWERS: A Model for Watershed Planning[J]. Transactions of the ASAE. 1980, 23: 938~944.

[4] Young R A, Onsdad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Soil and Water Conservation Society. 1989, 44(2): 168~173.

[5] Ascough II J C et al. The WEPP water model: I. Hydrology and erosion[J]. Transactions of the ASAE. 1997, 40(4): 921~933.

[6] Morgan R P C 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): 527~544.

[7] A P J De Roo, Wesseling C G. LISEM- Limburg Soil Erosion Model: A user guide[S]. 1995

[8] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1996, 2(1): 1~9.

[9] 牟金泽, 孟庆枚. 陕北中小流域年产沙量计算[A]. 黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编[C], 陕西杨凌: 中国科学院西北水土保持研究所, 1981. 251~255.

[10] 汤立群. 流域产沙模型的研究[J]. 水科学进展, 1996, 7(1): 47~53.

[11] 王孟楼, 张仁. 陕北岔巴沟流域次暴雨产沙模型的研究[J]. 水土保持学报, 1990(2): 11~18.

[12] 王星宇. 黄土地区流域产沙的数学模型[J]. 泥沙研究, 1987(3): 55~60.

[13] 谢树楠, 王孟楼、张仁. 黄河中游黄土沟壑区暴雨产沙模型的研究[R]. 北京: 清华大学, 1990.

[14] U. S. Soil Conservation Service, National engineering handbook[S], Hydrology Section 4, 1985.

[15] Shu Tung Chu. Infiltration During an Unsteady Rain[J]. Water Resource Research. 1978, 14(3): 461~466.

[16] Williams J R. EPIC, The erosion- productivity impact calculator, model documentation[Z]. Agricultural Research Service, : Washington, D. C. . U. S. D. A. 1983, 1.

[17] Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. Predicting Rainfall Erosion Losses- A Guide to Conservation Planning[S]. Agric. Handbook. Washington, D. C. : USDA, 1978, 537.

[18] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, and Yoder D C. Predicting soil Erosion By Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [S]. National Technical Information Service, United States Department of Agriculture (USDA). 1997.

[19] Liu, B Y et al. Division S- 6- Soil & Water Management & Conservation- Slope Length Effects on Soil Loss for Steep Slopes[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 2000, 64(5): 1759~1763.

[20] McCool D K, Brown L C, Foster G R, Mutchler C K and Meyer L D. Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the ASAE. 1987, 30(5): 1387~1396.

[21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope Gradient Effects on Soil Loss for Slopes[J]. Transactions of the ASAE. 1994, 37(6): 1835~1840.