

国内坡面土壤侵蚀预报模型述评

贾媛媛<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>2</sup>, 王占礼<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;  
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 坡面侵蚀预报模型的研究可加深对土壤侵蚀过程及其机理的认识, 为坡面水土保持措施配置提供科学支持。我国坡面侵蚀预报模型研究大体可分为三个阶段: (1) 利用主要水蚀区径流小区观测资料, 基于美国通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 建立坡面侵蚀预报统计模型研究; (2) 结合黄土高原侵蚀特点, 考虑陡坡地浅沟侵蚀, 建立坡面侵蚀预报经验模型研究; (3) 基于物理成因的坡面侵蚀预报模型研究。根据我国坡面侵蚀产沙的特殊性及地形的复杂性, 提出建立我国坡面侵蚀预报模型应加强的研究领域, 即浅沟侵蚀过程及机理、坡面薄层水流、细沟水流以及浅沟水流的水流剥离方程、坡面水沙汇集传递关系和陡坡地侵蚀过程模拟等研究。  
**关键词:** 坡面; 侵蚀预报模型; 经验统计模型; 物理过程模型  
中图分类号: S 157.1      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2004) 04-0109-04

Review on Hillslope Erosion Prediction Models in China

JIA Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, YANG Qin-ke<sup>2</sup>, WANG Zhan-li<sup>1,2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** By the research of hillslope erosion prediction model, the knowledge about the process and the mechanism of soil erosion were strengthened, and the arrangement of soil and water conservation practice on hillslope were supported. The quantificational evaluation and the research of prediction model about hillslope erosion were divided into three stages in China: (1) Hillslope erosion statistical model based on USLE (Universal Soil Loss Equation); (2) Steep hillslope soil erosion prediction model; (3) Physically based hillslope erosion prediction model. Finally, considering special erosion sediment and the complex terrain in our country, some intensified aspects on the establishment of hillslope erosion prediction model were advanced, which were the research on the process and the mechanism of ephemeral gully erosion, the equation of interrill flow, rill flow, ephemeral gully flow, modeling of steep hillslope.  
**Key words:** hillslope; erosion prediction model; empirical model; physically-based model

从 20 世纪 70 年代以来, 国际上坡面侵蚀预报模型研究取得了重要进展。随着美国通用土壤流失方程 (USLE) 的诞生, 坡面土壤侵蚀定量研究进入新的里程, 世界各国借鉴 USLE 的成功经验相继开展了坡面侵蚀预报模型研究, 最具代表性的成果有 RUSLE、WEPP 坡面版等。在我国, 坡面土壤侵蚀预报模型研究一直是土壤侵蚀学科研究的前沿领域。我国坡面侵蚀定量评价和预报模型研究始于 20 世纪 50 年代, 从 80 年代开始, 土壤流失预报模型研究进入系统研发阶段, 在 USLE 的推动下, 建立了各具特色的坡面侵蚀预报模型。但至今尚未建立一个较为完备、适用于全国范围的预报

模型, 致使坡面水土保持措施配置缺乏科学支撑。本文拟通过我国坡面侵蚀预报模型研究进展的分析, 探讨建立我国坡面侵蚀预报模型应加强的研究领域。

1 基于 USLE 建立坡面侵蚀预报统计模型研究

自 20 世纪 60 年代通用土壤流失方程问世以来, 我国学者以 USLE 为蓝本, 利用水蚀区径流小区观测资料, 根据研究区实际情况, 对各因子指标及其求算方法进行修正, 分别建立了适用于东北漫岗丘陵区、黄土高原区、长江三峡库区、闽东南地区、广东地区、滇东北山区的坡面侵蚀预报模型 (见

① 收稿日期: 2004-07-10  
基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目 (KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金项目 (40335050)  
作者简介: 贾媛媛 (1979-), 女 (汉族), 河南人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀过程与预报。

表 1)<sup>[2~9]</sup>, 其中尤以中国土壤流失预报方程 CSLE (China Soil Loss Equation)<sup>[10]</sup> 最为典型。

表 1 基于 USLE 建立的坡面侵蚀预报统计模型对比<sup>[2~9]</sup>

模型结构及因子算法						
地区	研究者	降雨因子 ( <i>R</i> )	土壤可蚀性因子( <i>K</i> )	坡长坡度因子 ( <i>LS</i> )	作物覆盖与管理因子( <i>C</i> )	水土保持措施因子( <i>P</i> )
东北漫岗丘陵区	张宪奎	$E_{60}I_{30}$	实测法、诺谟图法、经验公式法	$LS = 0.07197L^{0.18}S^{1.3}$	$A = RKLS\overline{C\overline{P}}$ 5 种作物划分 4 个生育期, 求出各时期 <i>C</i> 值, 乘以对应时期 <i>R</i> 值权重, 将 4 个时期求和即为农作物 <i>C</i> 值; 草原、森林 <i>C</i> 值计算直接借用国外数据	对草原、灌木、乔灌木和森林分 6 级覆盖度分别取值; 水平梯田、地埂、等高垄作和生物防冲带据实测值计算
	林素兰	$EI_{30}$	美国水土保持局算法, 值为 0.37	以 6 坡、20 m 坡长空白试验区为标准小区, 非标准坡长坡度因子: $L = (L/20)^{0.5}$ $S = 0.05 + 3.601gS + 51.601gS^2$	$A = 12.66RLSCP$ 6 ° 10 ° 15 坡 <i>C</i> 值分别为 0.53, 0.52 和 0.47	$P = 0.45S + 0.121$
黄土高原区	牟金泽	$EI_{30}$	中壤土: 0.24 轻黏土: 0.17	$LS = 0.067L^{0.25}S^{1.3}$	$A = RKLS\overline{C\overline{P}}$ 农家制 0.08, 农家制加草带 0.35, 改良制 0.26, 草田轮作制 0.24	梯田 0.05, 造林 0.19, 种草 0.18
	金争平	$EI_{30}$	小区测定法	$L = 0.41\lambda^{0.3}$ $S = 0.074S^{1.45}$	$A = RKLS\overline{C\overline{P}}$ 小区测定法, 其值采用列表或关系式查算	小区测定法, 采用列表查算
三峡库区	杨艳生	魏斯迈取 验公式	$K = 0.0075D - 0.05$	与地面平均坡度、相对高度有关	查表获取	$P = 18982.63C^{-2.3}$
闽东南区	周伏建	与月降雨量有关	经验公式法	$LS = (S/10)^{0.78}(L/20)^{0.41}$	无	无
广东地区	陈法扬	$EI_{30}$ 法、通用指数法、 $KE > 25$ 法	诺谟图法	马斯格雷夫指数方程, 纯桉林 2.094, 光板地 3.116	实测资料计算	1
滇东北山区	杨子生	$E_{60}I_{30}$	修正诺谟公式	$LS = (L/20)^{0.24}(S/5)^{1.32}$	$A = RKLS\overline{C\overline{P}}$ 某作物在各个生育期的 <i>C</i> 值与该作物同一生育期内的降雨侵蚀力值占全年 <i>R</i> 值的百分数之乘积的总和	实测确定等高带状耕作、地埂、水平梯田等不同水土保持措施因子 <i>P</i> 值

CSLE 是刘宝元等<sup>[10]</sup>建立的适用于全国范围的坡面土壤侵蚀预报模型, 它以黄土高原丘陵沟壑区安塞、子洲、离石、延安、绥德等径流小区实测资料为数据基础, 考虑我国陡坡土壤侵蚀特征以及长期形成的系统化防治措施, 其结构形式为:

$$A = RKSLBET \tag{1}$$

式中: *A* —— 年平均土壤流失量( $t \cdot hm^2$ ); *R* —— 降雨侵蚀力( $MJ \cdot mm/h \cdot hm^2 \cdot a$ ); *K* —— 土壤可蚀性( $t \cdot hm^2 \cdot h/hm^2 \cdot MJ \cdot mm \cdot a$ ); *S* —— 坡度因子(无量纲); *L* —— 坡长因子(无量纲); *B*、*E*、*T* 分别为水土保持生物措施因子、工程措施因子以及耕作措施因子(无量纲)。

为使我国不同地区研究资料具可比性, 模型易于推广应用, 刘宝元等在建立 CLSE 的同时, 通过分析已有大量观测小区规格, 提出了我国标准小区规范: 15 坡度, 20 m 水平投影坡长, 5 m 宽连续休闲小区。根据我国标准小区的定义, 模

型对 USLE 中各因子的测算都进行了修正。模型中降雨侵蚀力用降雨量和最大 10 min 雨强计算(也可以使用日降雨量数据估算); 以标准小区为基础确定不同土壤类型的 *K* 值(无土壤可蚀性观测资料地区, 根据土壤特性资料, 通过土壤可蚀性诺谟图查算); 生物措施 *B*、工程措施 *E*、耕作措施 *T* 因子的确定, 据我国水土保持措施试验资料查表计算; 使用 USLE 中的算法计算坡长因子 *L*; 坡度因子 *S* 在缓坡情况下使用 McCool 等(1987)的方法计算, 陡坡地情况下通过坡面观测数据回归分析建立方程获得。该方程用于预报农田坡面在不同水土保持措施下年土壤侵蚀量, 最大优点是根据我国水土保持措施的实际情况, 将 USLE 中的作物和水土保持措施两大因子变为三大措施因子, 即生物(*B*)、工程(*E*)和水土保持耕作措施(*T*)因子; 同时模型建立了陡坡情况下坡度因子的求取算法。

## 2 陡坡地坡面土壤侵蚀经验模型研究

江忠善等<sup>[1]</sup>在分析陕北黄土丘陵区安塞县纸坊沟流域 1985 ~ 1991 年径流小区观测资料的基础上, 结合黄土高原侵蚀特点, 考虑陡坡地浅沟侵蚀, 建立了坡面土壤侵蚀预报模型。同时, 应用地理信息系统软件 ARC/INFO 建立空间信息数据库系统, 结合土壤侵蚀模型, 对坡面次降雨土壤侵蚀空间变化进行了定量计算。其模型表达式为:

$$M_s = 5.097P^{0.999}I_{30}^{2.637}S^{0.880}L^{0.286}HC\eta \quad (2)$$

$$H = 1 + \left(\frac{S-15}{30-15}\right)[1.003(P I_{30})^{0.103} - 1] \quad (3)$$

式中:  $M_s$ ——侵蚀模数 ( $t/km^2$ );  $P$ ——次降雨量 (mm);  $I_{30}$ ——次降雨最大 30 min 雨强 (mm/min);  $S$ ——坡度 (°);  $L$ ——坡长 (m);  $H$ ——浅沟侵蚀影响系数 (15 为浅沟侵蚀发生的临界坡度);  $C$ ——植被影响系数;  $\eta$ ——水土保持措施影响系数。

该陡坡地侵蚀预报模型, 以沟间地裸露地基准状态坡面土壤侵蚀多元统计模型为基础, 将浅沟侵蚀、植被影响、水保措施影响以修正系数方式处理, 从而确定任一计算单元侵蚀量。模型中  $C$  值按人工草地、林地和农作物 3 种类型确定。当植被覆盖度小于或等于 5% 时, 草地和林地的流失系数取为 1.0; 当植被覆盖度大于 5% 时, 草地、林地土壤流失系数同植被覆盖度均成指数相关, 并对观测数据进行统计分析, 分别建立了草地和林地的土壤流失系数求取算法; 同时, 根据实际观测资料对比分析, 建立农作物地土壤流失系数月变化表, 通过查表获得农作物地  $C$  值。模型  $\eta$  值由多年来单项措施减沙效益试验研究结果比值换算得到。同以往模型相比, 该模型结构简单合理, 考虑因素比较全面, 符合黄土丘陵区地貌特点; 考虑了植被和浅沟侵蚀的影响, 可用于实际侵蚀量的计算, 这是对坡面侵蚀建模的重要改进。

## 3 坡面水蚀物理过程模型研究

随着 GIS 技术的发展及对侵蚀机理研究的深入, 我国学者开展了基于物理成因的坡面侵蚀预报模型研究。1996 年蔡强国等<sup>[12]</sup>以晋西羊沟道小流域为对象, 以水流侵蚀力为主线, 基于坡面侵蚀产沙分带性规律, 结合 GIS 技术, 建立了具有一定物理成因的坡面侵蚀预报模型。该模型考虑了地表结皮、坡度、植被覆盖等因素, 根据土壤侵蚀基本原理, 将坡面降雨径流分为无细沟发生和有细沟发生两种情况, 根据供沙量与水流输沙能力的对比关系确定坡面实际土壤流失量; 同时, 模型还分析了影响坡面侵蚀产沙三种侵蚀力的作用以及各自侵蚀过程, 提出了坡面溅蚀分散量 ( $D_b$ )、细沟侵蚀量 ( $D_r$ ) 以及水流输移能力 ( $T_c$ ) 方程, 它们的数学表达式分别为:

$$D_b = 0.015J(E_k/\lambda)e^{(2.68\sin\theta - 0.48Cv)} \quad (4)$$

$$D_r = 1.776 \times 10^{-7}E_r^{4.8}\lambda^{0.5} \quad (5)$$

$$T_c = 0.0081E_w^{1.55} \quad (6)$$

式中:  $D_b$ ——坡面溅蚀分散量 ( $kg/m^2$ );  $D_r$ ——细沟侵蚀模数 ( $kg/m^2$ );  $T_c$ ——水流输移能力 ( $kg/m^2$ );  $J$ ——前期表土

结皮因子;  $E_k$ ——降雨动能 ( $J/m^2$ );  $\lambda$ ——以标准锥体贯入测量得到的土壤抗剪切强度 (kPa);  $\theta$ ——坡度 (°);  $C_v$ ——植被覆盖度 (%);  $E_r$ ——细沟水流侵蚀力 ( $N/m^2$ );  $E_w$ ——坡面径流侵蚀力 (N)。

该模型利用 GIS 空间分析功能对坡面侵蚀产沙过程进行定量化研究, 涉及坡面溅蚀分散、细沟水流分散和细沟水流输沙能力等物理过程, 考虑因素更为全面。

## 4 问题与讨论

我国土壤侵蚀预报模型的研究和开发已经走过了近 50 年的发展历程, 特别是近 20 年来, 成功研制和开发了一批富有中国特色的坡面侵蚀预报模型。但由于土壤侵蚀过程本身的复杂性、影响因素间的相互作用以及进行理论分析、实际观测和室内试验存在诸多困难, 我国坡面土壤侵蚀预报模型研究仍然滞后于生产实践的需要, 模型开发存在诸多问题:

(1) 经验统计模型研发。我国坡面侵蚀预报经验模型主要是基于 USLE 建立的, 这类模型具有结构简单、考虑因素较为全面、在试验样区内具有较高计算精度的特点。但由于 USLE 是建立在试验样区内大量数据基础上, 主要用于预报农耕地土壤流失量, 而我国坡地大多以陡坡地 (> 10°) 为主, 基于 USLE 建立的侵蚀预报模型在我国应用受到极大限制。另一方面, 我国基于 USLE 建立的坡面侵蚀预报模型大多预报的仅是坡面总产沙量, 没有产沙部位信息, 无法指导水土保持措施配置; 而且各因子测算方法缺乏统一标准, 使得各地区因子值没有可比性。但 USLE 关于参数选择、参数类型、标准小区等研究思路可供我们学习和借鉴。

(2) 物理过程模型研究。我国坡面物理过程研究尚处于起步阶段, 研究力量薄弱。从模型自身特点看, 模型需要大量参数, 而这些参数难于获得, 且现有研究大多限于特定地区数据资料, 使得模型在实用性及通用性方面遇到挑战; 从侵蚀过程研究来看, 目前我国缺乏坡面侵蚀动力学研究, 模型中存在大量经验统计因子, 侵蚀过程定量描述有待改进; 从侵蚀产沙来源看, 浅沟侵蚀对坡面土壤侵蚀具有较大贡献, 已建立的物理过程模型没有考虑浅沟侵蚀这一重要侵蚀产沙方式, 严重影响了预报模型的精度。

物理过程模型能够反映侵蚀产沙机制, 描述水沙传递过程, 是未来坡面侵蚀预报模型研究的重点。基于此, 考虑到我国地貌类型的复杂性, 在建立坡面侵蚀模型过程中应注意以下几点: (1) 在有类开垦的陡坡地形区, 浅沟侵蚀是坡面侵蚀的主要方式之一, 其侵蚀产沙量在梁峁坡面侵蚀产沙中占有较大比重, 在坡面侵蚀预报模型中应充分反映浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙过程的影响; (2) 坡面薄层水流、细沟股流以及浅沟股流的水流剥离和搬运方程是当今土壤侵蚀研究的难点, 也是计算坡面侵蚀产沙的关键问题之一, 应加强这方面的研究; (3) 沿水流流线方向, 坡面侵蚀方式具有垂直分带性规律, 各侵蚀带不仅侵蚀规律各异, 而且上方侵蚀带对下方侵蚀带侵蚀产沙过程具有显著影响, 因此应强化水沙传递关系的研究, 进而模拟坡面侵蚀方式及侵蚀产沙的演变过程。

## 参考文献:

- [ 1 ] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning [ S ]. USDA Agricultural Handbook, No. 537, 1978.
- [ 2 ] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[ J ]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1- 9.
- [ 3 ] 林素兰, 黄毅, 聂振刚, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立[ J ]. 土壤通报, 1997, 28(6): 251- 253.
- [ 4 ] 牟金泽, 孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失预报方程的初步研究[ J ]. 中国水土保持, 1983, (6): 23- 27.
- [ 5 ] 金争平, 史培军, 侯福昌, 等. 皇甫川流域小流域地块土壤侵蚀预报模型及应用[ A ]. 见: 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[ M ]. 北京: 海洋出版社, 1992. 60- 84.
- [ 6 ] 杨艳生, 史德明, 吕喜玺. 长江三峡区的坡面土壤流失量和入江泥沙量计算[ J ]. 水土保持学报, 1991, 5( 3): 22- 27.
- [ 7 ] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省土壤流失预报研究[ J ]. 水土保持学报, 1995, 9( 1): 25- 30.
- [ 8 ] 陈法扬, 王志明. 通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[ J ]. 水土保持通报, 1992, 12(1): 23- 41.
- [ 9 ] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究[ J ]. 水土保持通报, 1999, 19( 1): 1- 9.
- [ 10 ] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[ A ]. In: Process of soil erosion and its environment effect volume II 12th ISCO[ C ]. Beijing: Tsinghua Press, 2002. 21- 25.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[ M ]. 北京: 科学出版社, 1998. 190- 196.

( 上接第 65 页)

- [ 10 ] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview[ J ]. J. Environmental Quality., 1998, 27: 251- 257.
- [ 11 ] Foy R H, Withers P J A. The contribution of agricultural Phosphorus to eutrophication[ J ]. Proc. Fert. Soc. , 1995, 365: 1- 32.
- [ 12 ] Carpenter S R, Caraco N E, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface water with phosphorus and nitrogen[ J ]. Ecol. Applic., 1998, 8: 559- 568.
- [ 13 ] Parry R. Agricultural phosphorus and water quality: A US Environmental Protection Agency Perspective[ J ]. J. Environ. Qual., 1998, 27: 258- 261.
- [ 14 ] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls phosphorus loss from upland agricultural watersheds[ J ]. J. Environ. Qual., 1998, 27( 2): 267- 277.
- [ 15 ] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, et al. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index[ J ]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 130- 144.
- [ 16 ] Walter M T, Walter M F, Brooks E S, et al. Hydrologically sensitive areas: variable source area hydrology implications for water quality risk assessment[ J ]. J. of Soil and Water Conservation., 2000, 35(3): 277- 284.
- [ 17 ] Beasley D B, Huggins L F. ANSWERS User's Manual[ S ]. West Layette: Dept. of Agric. Eng., Purdue University. 1982.
- [ 18 ] Knisel W G, et al. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agriculture management system [ R ]. Washington, D. C.: Cons. Res. Rep. USDA, 1980, 20.
- [ 19 ] Knisel W G, et al. CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management System[ R ]. Cons. Res. Rep. No. 26, Washington, D. C.: Science and Education Administration, USDA, 1983.
- [ 20 ] Young, R A. AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watershed[ J ]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168- 173.
- [ 21 ] <http://www.sedlab.olemiss.edu/agnps.html> [ EB/ OL ].
- [ 22 ] Daniel, T C, A N Sharpley, D R Edwards, et al Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management[ J ]. J. Soil and Water Conservation, 1994, 49: 30- 38.
- [ 23 ] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J L, et al. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[ J ]. J. Soil and Water Conservation, 1996, 51(2): 160- 166.
- [ 24 ] Sharpley A N, Chapa S C, Wedepahl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface water: Issues and Options[ J ]. J. Environ. Quality, 1994, 23: 437- 451.
- [ 25 ] Sharpley A N, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st Century[ J ]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 176- 181.