

# 国外水蚀预报模型述评

贾媛媛<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>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 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 除对中国学者已熟悉的 USLE、RUSLE、WEPP、EROSEM、LISEM、GeoWEPP 模型进行述评外, 还介绍了近年来新研发的区域侵蚀预报模型 (SEMMED)、细沟侵蚀预报模型 (RILLGROW)、浅沟侵蚀预报模型 (EGEM) 以及切沟侵蚀预报模型 (GULTEM、DIMGUL、STABGUL), 讨论了这些水蚀预报模型在我国推广应用面临的问题。

**关键词:** 水蚀预报模型; 区域模型; 细沟模型; 浅沟模型; 切沟模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2003)05-0082-06

**中图分类号:** S157.1

## Review on Abroad Water Erosion Prediction Models

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

(1. 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 712100, Shaanxi Province, China;  
2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Well-known water erosion prediction models, such as USLE, RUSLE, WEPP, EROSEM, LISEM and GeoWEPP are outlined. The recently developed regional water erosion model (SEMMED), rill erosion model (RILLGROW), shallow gully erosion model (EGEM), and gully erosion model are introduced in detail. The challenges in employing these erosion models in China are discussed.

**Keyword:** water erosion prediction model; regional model; rill model; shallow gully model; gully model

土壤侵蚀预报模型是进行土壤侵蚀定量评价及动态监测的支撑工具,也是土壤侵蚀研究成果直接指导生产实践的具体体现。从 20 世纪 50 年代开始,基于对水蚀过程和机理的认识,世界各国陆续开展了水蚀预报模型的研发工作,并建立了各具特色的水蚀预报模型。本文除对国外较成熟的水蚀预报模型进行述评外,还介绍了近年来新研发的区域侵蚀预报模型和细沟、浅沟、切沟侵蚀预报模型,指出了这些水蚀预报模型在我国应用过程中存在的问题,以期为最终建立适用于我国的水蚀预报模型提供参考。

## 1 经验统计模型

经验统计模型是通过试验资料和统计技术,确定影响土壤侵蚀的因素,得出计算土壤流失量的方程式。该模型具有结构简单、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,但模型外延性差,受到较强的应用地域性限制。

### 1.1 通用土壤流失方程 (USLE)

最早建立且较为成熟的侵蚀预报模型是美国 W. H. Wischmeier 等 1965 年提出的通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation)<sup>[1]</sup>,它以美国国家水土流失中心收集的径流小区观测资料为基础,预报坡面或田间尺度平均年侵蚀,忽略了沉积量。方程基本形式是降雨侵蚀力 ( $R$ )、土壤可蚀性 ( $K$ )、坡长坡度 ( $LS$ )、作物覆盖与管理 ( $C$ ) 以及水土保持措施 ( $P$ ) 因子的简单相乘,但每个因子都能用复杂的公式计算<sup>[2]</sup>。USLE 考虑因子全面,所用资料范围较广,在世界范围内得到了广泛的应用与推广。但它计算的是年均土壤侵蚀量,很难反映次降雨过程土壤流失状况;在理论上,该方程对某些因子的相互作用重复计算,如  $R$  与  $C$ ,  $L$  与  $P$ ,而忽略了因子之间的交互作用,如  $R$  与  $S$  的相互作用;而且该方程是建立在缓坡条件下,在我国复杂地形区的应用受到极大的挑战。

收稿日期:2003-06-14

修回日期:2003-07-24

资助项目:中国科学院知识创新重要方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422);国家自然科学基金项目“黄土坡面侵蚀—搬运过程研究”(40071058);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(B10501-101)

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。E-mail: yyuanjia@163.com。

## 1.2 修正的通用土壤流失方程(RUSLE)

随着人工降雨试验技术的研制成功和对土壤侵蚀机理认识的不断深入,USLE 的缺陷逐渐显露出来。1992 年,Rernard 等集合 USLE 及 Meyer 和 Foster 建立的侵蚀概念模型提出了修正方程 RUSLE<sup>[17]</sup>,

1997 年开发出基于 Windows 的 RUSLE 模型。RUSLE 比 USLE 在内部算法的细化和预测精度上都有所提高,它采用计算机模拟,数据源更加广泛,并且方程中各因子的测算方法也有了改进(表 1)。但它并未摆脱 USLE 的影响,仍需不断完善。

表 1 USLE 与 RUSLE 的比较

因子名称	USLE	RUSLE
R	降雨动能与最大 30 min 降雨强度的乘积,用长时段降雨资料计算。	东部地区同 USLE,西部利用更多气象数据订正,同时考虑了缓坡积水地对雨滴击溅的缓冲作用。
K	用土壤质地、有机质含量、可渗透性及其它内在土壤性质计算,以年为基本时间尺度,其值无年内变化。	算法同 USLE,但考虑了冻融作用、土壤水分、土壤固结等,同时计算年内季节变化。
LS	用地块坡长、坡度计算,未考虑土地利用。	增加了细沟/细沟间侵蚀率,可以处理复杂坡型。
C	考虑作物季相、表层覆盖、糙度在 1 a 中 6 个生长季节的变化,根据作物和耕作表得到。	用前期土地利用、盖度、表面覆盖、糙度、土壤水分等计算,每 15 d 为一个计算步长。可以反映侵蚀年变化,特别是地表、近地表与气候、生物分解作用相关的变化。
P	根据已布设削弱径流、阻滞土壤移动的水保措施,随坡度微小起伏而变。	由水文、土壤类型、坡度、冬播程度、垄高和 10 a 一遇侵蚀指数值等确定

## 2 物理过程模型

物理过程模型运用大量过程知识,并使用普遍规律(如质量守恒、牛顿第二运动定律以及热力学第一定律等)<sup>[4]</sup>,使得模型基本上可在其它地区推广应用。它是惟一一类能帮我们较好地理解侵蚀过程的模型,可以提供一些与侵蚀时空分布相关的附加信息<sup>[5]</sup>;同时,模型中如果正确使用物理过程,将提高管理措施和土地利用变化对土壤侵蚀影响方面预报的可靠性<sup>[6]</sup>。但对于过程模型而言,如果对侵蚀过程的定量表述不正确,将影响模型结构的设计和预报精度;而且随着模型复杂性的增加,模型输入的不确定性将增加<sup>[6]</sup>,误差传递也显得更加重要<sup>[7]</sup>。

### 2.1 水蚀预报模型(WEPP)

新一代水蚀预报模型 WEPP(Water Erosion Prediction Project)<sup>[11]</sup>是至今最为复杂的描述土壤水蚀相关物理过程的侵蚀模型,是一个基于过程的连续模拟模型。该模型具备 3 个版本:坡面版(用于坡面和田间尺度侵蚀预报)、流域版(用于小流域侵蚀预报)和网格版(用于大集水区和区域侵蚀预报),目前坡面版已研制成功,流域版处于尝试阶段,而网格版仍是一空白。WEPP 将整个流域划分为 3 部分:坡面(hillslop)、沟道(channel)和蓄水池(impoundment),可模拟气候、冬天过程(包括土壤冻融、积雪和融雪)、灌溉系统、水平衡、植物生长、残茬分解、土壤参数、沟道水文、拦蓄沉积等过程。在 WEPP 中,将地表径流分成细沟流和细沟间径流,预先确定细沟密度,并假定所有细沟流量相同,使用 Green-Ampt 方程模拟

入渗,用 Yalin 方程计算泥沙输移。WEPP 流域版作为坡面版的扩展,可用于预报流域任一时刻的土壤流失量,同时还可以评价流域内地形、土壤特征、土地利用和农业管理措施对土壤侵蚀的影响。WEPP 模型能较好地反映侵蚀产沙的时空分布,外延性好。但由于它是连续模型,需要很多参数(如土地管理、土壤特性季节变化等),提高了模型的运行成本;而且模型中侵蚀产沙的基础方程是稳态的,与实际瞬态侵蚀过程不符;模型只能预报细沟和细沟间侵蚀过程,不能用于预报切沟侵蚀和河道侵蚀,一些侵蚀机制问题需要进一步研究。

### 2.2 欧洲土壤侵蚀模型(EROSEM)

欧盟开发的欧洲土壤侵蚀模型 EROSEM(European Soil Erosion Model)<sup>[11-12]</sup>,是基于物理过程的次暴雨分布式侵蚀模型,用于描述和预报田间及流域土壤流失、评价土壤保护措施。它从侵蚀产沙的过程入手,考虑植被截留、土壤表面状况、径流产生、剥蚀及径流搬运能力等方面对侵蚀过程的影响。径流产生以 KINEROS(KINematic Runoff and EROsion model)<sup>[13]</sup>为基础,以 1 min 为时间步长,可生成降雨过程中的水文和泥沙曲线图,预报侵蚀和沉积部位,模拟与侵蚀、沉积相对应的微地形起伏变化。模型可模拟细沟侵蚀,但必须预先指定细沟位置。细沟输移能力用 Govers<sup>[11]</sup>提出的输移方程,细沟间径流用 Everaert<sup>[15]</sup>输移方程,目前还不能很好地模拟切沟侵蚀。尽管模型能够较好地模拟土壤侵蚀状况,但对于 25 m × 35 m 的地块,当侵蚀量小于 60 kg 时预报出现明显错误。该模型是针对欧洲平原地区的地貌及侵蚀

特点开发而成的,适用于缓坡为主的小流域,在我国应用受到一定的限制。

### 3 基于地理信息系统(GIS)的水蚀预报模型

地理信息系统(GIS)是土壤侵蚀预报的一种全新技术手段,它能获取 RS、GPS 提供的时间和空间信息,实时、动态模拟侵蚀发生、发展及演化过程,反映侵蚀时空变化,精确、定量估算流域土壤侵蚀量,为动态模拟土壤侵蚀时空变化提供了可能。近年来由于计算机技术和 GIS 技术的快速发展,使水蚀预报模型的发展得到有力的支持,土壤侵蚀模型与 GIS 技术集成的预报模型的研发已引起越来越多研究者的兴趣。

#### 3.1 LISEM 模型

荷兰土壤侵蚀预报模型 LISEM(Limburg Soil Erosion Model)<sup>[16]</sup> 是根据 ANSWERS 模型和 De Roo 等 1989 年提出的对土壤侵蚀过程的描述,结合遥感和 GIS 技术,基于荷兰南部黄土区实验观测资料,于 1996 年开发的模型。它模拟小流域上单次降雨事件的水文和土壤侵蚀过程,考虑降雨、截留、填洼、渗透、水分垂直运动、表层水流、沟道水流、土壤分散及泥沙输移等过程。模型较详细地考虑了土壤侵蚀产沙的各个环节,能够较好地模拟土壤侵蚀发生过程,是第一个与 GIS 完全集成并直接利用遥感数据的土壤侵蚀预报模型,可用来计算流域各点径流和侵蚀量。模型较多地应用了基于物理过程的数学模型,可以不断吸收新发展的模型和新数据。LISEM 与 GIS 的集成,以 PCRaster GIS 软件为基础,模型的程序代码完全用 GIS 命令构成。这种设计便于用其分析流域的空间变化,可以直接应用遥感数据和其它格式的 GIS 数据,方便了模型参数的输入和管理。但模型中的许多参数不易获取,必须通过一系列野外观测才能获得,提高了模型的运行费用;同时,模型中保留了一部分统计模型,而且个别过程未考虑,有待进一步研究完善。

#### 3.2 GeoWEPP

美国科学家除了对 WEPP 坡面和小流域版的用户界面进行不断改进之外,还进一步将 WEPP 模型与 GIS 相结合,开发研制了 GeoWEPP(Geo-spatial interface for WEPP)<sup>[18]</sup> 模型,其界面是基于 ArcView 开发而成的。该模型研制开发的目的是给具有不同层次 GIS 知识的用户提供系列界面,应用多种数据,实现全国资料的免费共享。模型与 GIS 有机结合,可直接利用数字化数据对侵蚀量进行估算;同时,

模型允许直接输入各种地理数据(数字高程模型、地形图),以便于评价流域水土保持规划的可行性;不同地区的模型参数易于确定,从而使 WEPP 的应用更加广泛。

### 4 新研发的区域侵蚀预报模型和细沟、浅沟、切沟侵蚀预报模型

#### 4.1 区域土壤侵蚀模型(SEMMED)

荷兰学者 De Jong 等提出了用于地中海区域土壤侵蚀预报的模型 SEMMED(Soil Erosion Model for MEDiterranean regions)<sup>[20]</sup>,它是一个半经验的分布式区域侵蚀预报模型,通过比较雨水的击溅分离和径流输移能力估算年土壤流失。模型由水相和泥沙相组成,包括一些描述侵蚀过程的组分,如土壤颗粒分离、上层土壤水分存贮以及表面径流土壤颗粒输移。SEMMED 综合使用多时相陆地卫星 TM 影像、GIS 中的数字地形模型(DTM)、数字土壤图以及有限数量的土壤物理性质数据。多时相陆地卫星 TM 影像用来反映植被特征,利用植被光谱指数一个像元接一个像元地估算植被特征,使用多时相方法估定一个生长期中植被覆盖的变化;利用 GIS 软件从 DTM 中提取地势起伏参数和径流流向,表现地形特征并用来估算地表径流输移能力;数字土壤图用于评价土壤特性空间分布。SEMMED 的主要优点是它能模拟区域尺度上的侵蚀过程,使用各种可利用的数据资源,如遥感影像、数字高程模型(DEM)和(数字化)土壤数据库,这些数据通常不能用于较小的流域面积。同时,使用 SEMMED 可以生成区域侵蚀评价图,对于土地利用规划和土地管理来说,它比小地块试验简单外推法更加具有指导意义。模型的基本缺点是不考虑地表径流产生的土壤颗粒分离和地表结皮,对起始土壤水分存贮能力和土壤可分离指数十分敏感。该模型建立在 MMF(Morgan, Morgan and Finney)<sup>[21]</sup>方法的物理基础上,使用考虑土壤学、降雨、高程和植被的分布式数据集运行,而 MMF 方法是一个集总式模型,用于预测田块或坡面年流失,不适于估算非常高或非常低情况时的侵蚀。因此,SEMMED 模型不能用于特大暴雨的土壤流失估算。

#### 4.2 细沟侵蚀模型(RILLGROW)

Favis-Mortlock 等<sup>[22]</sup>提出了模拟细沟系统形成和发展的 RILLGROW 模型。模型运用自组织动态系统方法,描述一小块裸露坡面上细沟网络的形成和发展,使用简单的规则控制微地形、径流路径和土壤流失之间的迭代交互作用。该模型使用基于河流应力的方程计算侵蚀,输入详细的微地形数据,在模型运

行中,根据计算的侵蚀量改变微地形。模型适用于小面积区域,由于数据需求量和计算量太大而不可能用于流域甚至田块尺度。RILLGROW 包括 2 个版本,RILLGROW 1<sup>[23]</sup>是第一个版本,模型结构简单,使用初始微地形数据生成实际细沟模式,没有明确区分细沟和细沟间过程。在后来的模型验证研究<sup>[24]</sup>中,采用数字摄影测量技术生成降雨前后野外小地块的微地形 DEM,然后使用模型与所测结果进行对比。该版本不能在实际时间域中运行,细沟形成的水力学机理过于概化,而且忽略了许多重要过程的描述,如入渗、沉积。新版模型(RillGrow 2)<sup>[25]</sup>正在开发,它使用 C++ 语言,在 PC 机上的 Windows 下运行,用地理信息系统软件 IDRISI 实现输出可视化。该模型可以在实际的时间域上运行,可以模拟沉积和击溅再分布过程,但它仍然不能模拟击溅侵蚀、入渗等过程。

#### 4.3 浅沟侵蚀模型(EGEM)

浅沟侵蚀模型 EGEM(Ephemeral Gully Erosion Model)<sup>[26]</sup>是专门用于模拟浅沟侵蚀的模型,它由水文和侵蚀 2 个模块组成,以一种非常简单的方式模拟浅沟的复杂时空变化,可估算单条浅沟的年平均土壤流失量。水文模块是基于径流曲线数的一个物理过程模型;为了计算浅沟的最终宽度和深度,侵蚀模块使用水文模型输出的结果,以解决经验关系和物理过程方程的结合。在模型中,假设一有径流就出现峰值流量,峰值流量和径流总量决定侵蚀;同时,假定沿沟长方向沟深是固定的,并假定沟将垂直向下侵蚀直至达到可蚀性较差的犁底层。由于深度大于 46 cm 的沟被认为是传统切沟而不是浅沟,因此,浅沟的最大容许深度是 46 cm。当达到最大深度时沟将加宽。模型在模拟前必须确定估算深度和最终沟长。Nachtergaele 等<sup>[27]</sup>在地中海环境下对模型进行了测试,评价地中海环境中 EGEM 预报浅沟侵蚀量的适宜性。他们在西班牙东南部(Guadalentin 研究区)和葡萄牙东南部(Alentejo 研究区)收集了 86 条浅沟的 EGEM 输入数据系列,在使用 EGEM 输入参数估算的同时,还通过野外测量确定了每条浅沟的实际侵蚀量。他们发现由于浅沟长度是输入参数,预报浅沟体积和量测浅沟体积之间有很好的相关性( $R^2 = 0.88$ )。回归分析表明在浅沟长度和浅沟体积之间存在一种较高的相关性( $R^2 = 0.91$ ),因此浅沟长度的精确预报对于估算浅沟侵蚀率是至关重要的。最后得出结论,EGEM 不能预报地中海地区的浅沟侵蚀,浅沟长度是决定浅沟体积的关键参数。

#### 4.4 切沟侵蚀模型

Sidorchuk Aleksey 和 Anna Sidorchuk<sup>[28]</sup>建立

了模拟切沟发育第一阶段的三维水力学 GULTEM 模型。该模型输出的是沟深、沟宽和沟的体积(gully depth, width and volume),但最终的沟长必须提前指定,而且不能模拟沟头溯源侵蚀。1999 年, Sidorchuk<sup>[29]</sup>又提出了动态切沟模型 DIMGUL(Dynamic gully model)和静态切沟模型 STABGUL(Static gully model)。他认为切沟发育包括 2 个阶段:第一阶段占切沟生命的 5%,是在降雨后,随着物质迁移,出现沟口(产生一个梯形沟横断面),切沟形态特征(长、深、宽、面积和体积)很不稳定,沟道快速形成的过程,系统在这一阶段迅速发展;第二阶段是切沟发育的稳定阶段,占切沟生命的大部分,这一阶段沿沟床侵蚀和沉积很微弱,沟底和沟壁形态稳定。DIMGUL 是模拟切沟发展第一时期、切沟形态快速变化的动态模型,它基于物质守恒和沟床形变方程的方法,其中直坡稳定性方程用于预报沟壁倾斜。STABGUL 是计算最终稳定切沟形态参数的静态模型,它基于切沟最终形态平衡的设想,高程和沟底宽度多年平均不变。STABGUL 中认为这种稳定性与沟底的侵蚀和沉积之间以一种微弱的比率相联系,这就意味着径流速度低于侵蚀初期的开始值,但大于流水冲刷搬运泥沙的临界速度。该模型的关键是确定正在形成的沟道的流量。

## 5 结 论

半个多世纪以来,国外学者在土壤侵蚀预报模型研发领域取得了相当大的进展,形成了比较完备的体系,但这些模型在我国的应用还存在一定局限性。

(1) 坡面侵蚀预报。典型的坡面侵蚀预报模型 USLE 是建立在试验样区内大量数据基础上的,只能对研究思路提供借鉴,不能直接应用于我国的大部分地区。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) 小流域水蚀预报。较成熟的侵蚀预报模型对侵蚀过程的描述和量化原理进行了研究,为我国土壤侵蚀预报模型的建立奠定了基础。但对侵蚀物理过程描述相对简单,对坡沟水沙传递关系、沟蚀和重力侵蚀考虑不足,而且缺乏我国观测数据的验证,因此不能直接应用于我国的大部分地区。尤其在我国黄土高原和长江上游地区,这里广泛分布着大量的永久性切沟。因此,如何借鉴国外的成功经验,并结合我国土壤侵蚀特点,建立适用于我国的小流域水蚀预报模型还需要做大量工作。

(3) 区域土壤侵蚀预报。国外对区域土壤侵蚀定量评价给予了较高重视,并对其中一些关键技术问题

(如尺度转换)提出了处理方法,最具代表性的研究成果是荷兰学者在地中海地区开发的 SEMMED 模型。然而,由于区域侵蚀环境条件(包括气候、地貌、植被等)的巨大差异,并且国外已有区域土壤侵蚀预报模型是在平原区开发的,其研究思路仍沿用坡面侵蚀预报模型的研究思路和方法,没有考虑土壤侵蚀时空相关特征,使模型在我国的推广应用受到限制。加强对区域水土流失评价因子分析及其提取方面的研究,开发 GIS 支撑下、能估算较大范围地形复杂区土壤流失量的区域土壤侵蚀预报模型,是进行我国区域水土保持动态监测的关键。

(4) 沟蚀预报。沟蚀作为世界上普遍存在的一种侵蚀现象,已引起了越来越多的重视,但至今为止,仍没有一个模型能精确模拟沟蚀。国外新提出的一些土壤侵蚀模型可计算沟蚀,然而必须提前指定细沟和切沟发生的位置;而且这些模型都不能模拟沟壁物质迁移、沟头溯源侵蚀等。在我国大部分水蚀地区沟蚀十分发育,这就迫切地需要沟蚀与侵蚀模拟相结合,尽管国外的模型还存在一定问题,但为我国沟蚀预报模型的建立提供了重要参考。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning[Z]. US DA Agricultural Handbook, 1978, 537.
- [2] Haan C T, Barfield B J, Hayes J C. Design hydrology and sedimentology for small catchments [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [3] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Coordinators. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [Z]. USDA Agricultural Handbook, 1997, 703.
- [4] Doe W W, Harmon R S. Introduction to soil erosion and landscape evolution modeling [M]. Ch 1 in: Harmon R S and W W Doe (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modelling. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001, 1-11.
- [5] Morgan R P C, Quinton J N. Erosion modeling [M]. Ch 6 in: Harmon R. S. and W. W. Doe (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modelling. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001, 117-113.
- [6] Brazier R E, Beven K J, Freer J, Rowan J S. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion model: Application of the GLUE methodology to WEPP - The water erosion prediction project for sites in the UK and USA [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(8): 825-845.
- [7] Favis - Mortlock D, Boardman J, MacMillan V. The limits of erosion modelling; Why we should proceed with care [M]. In: Harmon R S, W W Doe (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modelling. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001, 477-516.
- [8] Flanagan D C, Ascough J C, Nearing M A, et al. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model [M]. In: Harmon R S, W W Doe (Eds.), Landscape Erosion and Evolution Modelling. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2001, 145-199.
- [9] 刘宝元, 史培军. WEPP 水蚀预报流域模型 [J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 6-11.
- [10] Savabi M R, Flanagan D C, et al. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(5): 477-483.
- [11] 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.
- [12] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide, version 3. 6 [Z]. Silsoe College, Cranfield University, 1998.
- [13] Woolhiser D A, Smith R E, Goodrich D C. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model; documentation and user manual. USDA - Agricultural Research Service, 1990, ARS-77: 130.
- [14] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow [M]. IAHS publication, 1990, 189, 45-63.
- [15] Everaert W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 513-532.
- [16] De Roo A P J, Jetten V G. Calibrating and validating the LISEM Model for two data sets from the Netherlands and South Africa [J]. Catena, 1999, 37(3-4): 477-493.
- [17] De Roo A P J, Wesseling C G and 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): 1107-1118.
- [18] 杨勤科, 李锐. LISEM 一个基于 GIS 的流域土壤流失预报模型 [J]. 水土保持通报, 1998, 18(3): 82-89.
- [19] Renschler C S, Flanagan D C, et al. GeoWEPP-The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project [C]. ASAE Conference Paper, 2002.

- [20] De Jong S M, Paracchini M L, Bertolo F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data[J]. *Catena*, 1999, 37(3-4):291-308.
- [21] Morgan R P C, Morgan D D V, Finney H J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk [J]. *Agricultural Engineering Research*, 1984, 30: 245-253.
- [22] Favis-Mortlock D, Guerra T, Boardman J. A self-organizing systems approach to hillslop rill initiation and growth: model development and validation[M]. IAHS publication, 1998, 249: 53-61.
- [23] Favis-Mortlock D T. An evolutionary approach to the simulation of rill initiation and development[C]. In: Abraham R J(ed.), *Proceedings of the First International Conference on GeoComputation (Volume 1)*, School of Geography, University of Leeds, 1996. 248-281.
- [24] Favis-Mortlock D T. A self organising dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes[J]. *Computers and Geosciences*, 1998, 21(4):353-372.
- [25] Favis-Mortlock D T, Boardman J, Parsons A J et al. Emergence and erosion: a model for rill initiation and development [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14 (11-12):2173-2205.
- [26] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion [J]. *Catena*, 1999, 37(3-4):393-399.
- [27] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerckhove L, et al. Testing the Ephemeral Gully Erosion Model (EGEM) for two Mediterranean environments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(1):17-30.
- [28] Sidorchuk Aleksey, Sidorchuk Anna. Model for estimating gully morphology [M]. IAHS publication, 1998, 249: 333-343.
- [29] Sidorchuk A. Dynamic and static models of gully erosion[J]. *Catena*, 1999, 37(3-4):401-414.

(上接第 73 页)

水土保持生态修复是一项系统工程,需要水保部门牵头、政府组织、全社会参与、各部门积极配合,各种措施一齐上。一定要正确全面地理解水土保持生态修复工程的丰富内涵,对生态修复工程定位要准确,实施范围必须具备必要的条件,它的用武之地应该是预防保护区和已初步治理的小流域,对重点流失区的治理从实践经验来看仍应以工程措施为主。

4.2.2 进一步树立人与自然和谐的理念,开展山水田林路园电气综合治理 进一步树立保持水土就是保护和发展生产力,就是保护人类自己的观念。在生态修复工程中,采取一切有利于生态环境的措施,走综合治理的路子,切忌搞单打一,生态环境建设本身是一个漫长而复杂的恢复过程,在这个过程中需要我们不断地采取各种措施,创造适宜恢复的各种有利条件,需要我们一步一个脚印扎扎实实地去干去做,没有捷径可走,任何急功近利的做法,其结果只能是走劳民伤财的弯路。

4.2.3 加强监测科研工作 生态修复工程试点建设

是一项探索性的工作,目的是为大面积推广提供经验和模式,加快水土流失防治步伐。因此,在工程建设的同时,开展一些生态修复的监测和科研,认真总结试点建设中的成功经验十分必要。开展生态修复工程的监测与科研,一定要根据当地的特点、财力、物力和人力,针对生态修复工程的发展需要,有重点地选择监测项目和科研课题,不可贪大求全。在监测和科研方法与手段上,既要利用新技术、新方法,又要注重“土、洋”结合,监测试验场的建设要符合有关规范的规定和要求。水土保持部门既要加强与大专院校的技术联姻、引进人才,加强技术培训与指导,同时派自己的技术人员参与到监测和科研工作中,达到出成果、出经验、出人才的目的。

4.2.4 加大投融资力度 进一步制定优惠政策,引进一切有利于生态环境的项目,加大投融资力度,充分发挥企业、集体、个人以及机关事业单位从事生态环境建设的积极性。另外要加强预防监督执法、成果管护和新技术推广应用等方面的工作。