

# 土壤侵蚀预报模型研究进展

郑粉莉, 刘峰, 杨勤科, 江忠善

(中国科学院 水利部 水土保持研究所 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 介绍了国内外土壤侵蚀预报模型的主要研究成果。所介绍的国外土壤侵蚀预报模型除众所周知的 USLE/RUSLE, WEPP, LISEM 和 EUROSEM 外, 还有浅沟侵蚀预报模型 (EGEM) 和切沟侵蚀预报模型。国内的侵蚀预报模型主要有在 GIS 支持下的陡坡地包括浅沟侵蚀的坡面侵蚀预报模型、有一定物理成因的坡面侵蚀预报模型和流域预报模型。在总结和评价国内外土壤侵蚀预报模型的基础上, 提出了中国今后土壤侵蚀预报模型研究的设想。

**关键词:** 侵蚀预报; 模型; 研究进展; 设想

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)06-0016-03

中图分类号: S157.1

## Review of Research Progress in Soil Erosion Prediction Model

ZHENG Fen-li, LIU Feng, YANG Qin-ke, JIANG Zhong-shan

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, PRC)

**Abstract** Main research achievements in soil erosion prediction models in the world are summarized. Besides well-known erosion models, such as USLE/RUSLE, WEPP, LISEM and EUROSEM, ephemeral gully erosion model, gully erosion prediction model are also introduced. Steep hill slope erosion prediction model including shallow gully erosion supported by GIS, the process based hillslope erosion prediction model, and watershed erosion prediction model in China are outlined. Based on summary and assessment on soil erosion prediction model in the world and China, the tentative plan on soil erosion prediction model in China is proposed.

**Keywords** erosion prediction; model; research progresses; tentative plan

土壤侵蚀模型研究是世界土壤侵蚀学科的前沿领域和土壤侵蚀过程定量研究的有效手段。近 30 年来, 世界各国在集中人力和物力开发侵蚀预报模型的同时, 尤其注重土壤侵蚀物理过程和概念模型的研究, 并取得了大量创新性的成果, 先后开发了 USLE/RUSLE<sup>[1-2]</sup>, WEPP<sup>[3-5]</sup>, LISEM 等模型。自 20 世纪 50 年代以来, 我国学者开始尝试开发土壤侵蚀模型, 并取得了一定进展<sup>[8-22]</sup>。但由于中国土壤侵蚀的特殊性、自然环境的复杂性及人为活动影响的深刻性, 加之基础数据零散、研究协作不得力等原因, 至今仍未建立适用于中国自然具体条件的土壤侵蚀预报模型和宏观区域水土流失预测预报模型。

### 1 国际土壤侵蚀预报研究进展

国际上土壤侵蚀预报模型研究以美国为代表, 20 世纪 70 年代以前, 基于大量小区观测资料和人工模拟降雨试验资料建立了著名的通用土壤流失方程

(USLE—Universal Soil Loss Equation)<sup>[1]</sup>。该模型形式简单, 使用方便, 但该模型所使用的数据主要来自美国洛基山脉以东地区, 仅适用于平缓坡地, 使其推广应用受到限制。另外, 由于该模型只是一个经验模型, 缺乏对侵蚀过程及其机理的深入剖析, 如仅考虑了降雨侵蚀力因子, 而不考虑与侵蚀密切相关的径流因子、坡长与降雨、坡度与降雨等有关因子交互作用也被忽略等。

基于上述原因, 70 年代以后, 美国应用现代化的试验测试手段和计算机模拟技术, 根据细沟间侵蚀和细沟侵蚀的原理及泥沙输移的动力机制, 建立了修正的通用土壤流失预报方程, 即 RUSLE—Reversed Universal Soil Loss Equation 模型<sup>[2]</sup>。在此基础上, 从 1985 年开始, 美国农业部投入大量的人力物力进行水蚀预报模型的研究 (WEPP)<sup>[3-5]</sup>。WEPP 模型是新一代水蚀预报技术开发的计算机土壤侵蚀预报模型, 是迄今为止描述水蚀相关物理过程参数最多的模型。

收稿日期: 2001-08-18

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“黄土坡面水蚀动力过程机制与预报模型”(49671051); “黄土坡面侵蚀—搬运过程研究”(40071058)

作者简介: 郑粉莉 (1960-), 女 (汉族), 陕西省兰田县人, 博士后, 博士生导师, 研究员。主要从事土壤侵蚀和侵蚀环境效应评价研究。电话 (029) 7011787, E-mail flzl@ms.iswc.ac.cn

WEPP模型是以随机气象过程生成模型、入渗理论、水文学、土壤物理学、作物科学、残茬分解模型、水力学和侵蚀动力学为基础开发的,有坡面版、流域版和网格版 3个版本,目前开发较为成功的为坡面版和流域版。WEPP模型的坡面版和流域版比现有侵蚀预报模型有明显的优越性,主要是 WEPP模型是过程模型,可以估算土壤侵蚀的时空分布,即全坡面或坡面任一点的净侵蚀量及其随时间的变化。近期 WEPP模型在完善流域版的同时,开发了在 GIS技术支撑下的流域水蚀预报模型。

在完善开发 WEPP模型同时,美国农业部农业研究局和自然资源保护局共同研究开发了浅沟侵蚀预报模型(EGEM—ephemeral gully erosion model)<sup>[6]</sup>。浅沟侵蚀预报模型可用于预报单条浅沟年平均土壤侵蚀量。

在美国进行水蚀预报模型研究的同时,英国、荷兰和澳大利亚等国也在开发适应其本国或本地区的土壤侵蚀预报模型。英国 Morgan等人根据欧洲土壤侵蚀的研究成果,开发了用于描述和预报田间和流域的土壤侵蚀预报模型(EUROSEM—European Soil Erosion Model)。荷兰科学家结合本国的实际和研究成果,开发了 LISEM(Limberg Soil Erosion Model)土壤侵蚀模型。LISEM模型同 WEPP模型相比,对土壤侵蚀过程的描述不像 WEPP模型那样深入和全面。其它国家,如澳大利亚也在开发自己的土壤侵蚀预报模型(Rose model)。

比利时科学家基于切沟发展阶段,开发了切沟侵蚀预报模型,即动态预报模型和静态预报模型<sup>[7]</sup>。动态预报模型用于估算切沟发育初期(活跃期)的切沟侵蚀量。建立动态模型的理论基础是质量守恒定律和沟床演变,其模型参数主要考虑沟头溯源侵蚀和沟谷扩展。静态模型用于估算切沟发育后期(相对稳定期)的切沟侵蚀量。

## 2 中国土壤侵蚀预报模型研究进展

### 2.1 坡面土壤流失预报模型

我国土壤侵蚀预报模型的研究主要是根据径流小区观测资料,建立估算次降雨土壤侵蚀量的统计模型。20世纪 80年代,以美国通用土壤流失预报方程 USLE为蓝本,根据各地研究区的实际情况,进行修正,建立了若干个地区性的土壤侵蚀预报模型。这里主要介绍几个有推广价值的侵蚀预报模型。

2.1.1 陡坡地土壤流失预报模型 江忠善等<sup>[8]</sup>以沟间地裸露地基准状态坡面土壤侵蚀模型为基础,将浅沟侵蚀影响以修正系数的方式进行处理,建立了计算

沟间地的次降雨侵蚀产沙量。

$$A = aKP^{0.999}I_{30}^{2.637}S^{0.880}L^{0.286}GVC$$

式中:  $A$ ——次降雨侵蚀量;  $a$ ——系数,无量纲;  $K$ ——土壤因子系数;  $P$ ——降雨量;  $I_{30}$ ——一次降雨过程 30 min最大降雨强度;  $S$ ——坡度;  $L$ ——坡长;  $G$ ——浅沟侵蚀影响系数,当坡面无浅沟侵蚀时,  $G = 1$ ;  $V$ ——植被影响系数;  $C$ ——水土保持措施影响系数。对于裸露坡面,  $V$ 和  $C$ 皆为 1。

该模型同以往模型相比,一是模型结构符合黄土丘陵区地貌特点,考虑了黄土坡面特有的浅沟侵蚀类型,二是应用地理信息系统软件建立空间水土流失数据库,实现了侵蚀预报模型与 GIS相结合。

2.1.2 具有一定物理成因的坡面土壤流失预报模型 蔡强国等<sup>[9]</sup>基于坡面侵蚀产沙分带性规律,利用 GIS技术,建立了坡面土壤流失预报模型。该模型最大优点是考虑了坡面溅蚀分散、坡面水流分散和细沟水流分散、细沟水流的输沙能力等物理过程。但该模型没有考虑陡坡地特有的浅沟侵蚀类型。

2.1.3 区域水土流失评价模型 李锐等人利用汛期降雨量(气候  $P$ )、沟壑密度(地形  $G$ )、大于 0.25 mm 风干土水稳性团粒含量(土壤  $S$ )、植被盖度(植被  $C$ )、坡耕地面积比(人为影响  $M$ )等为评价因子,建立了在 GIS支持下的区域土壤流失评价模型<sup>[10]</sup>。

$$L = 0.4735P^{0.9282}S^{-0.08855}G^{2.2666}M^{0.07254}e^{-0.00047C}$$

该模型最大特点是模型的结构相对简单,便于推广应用。但该模型对于影响水土流失的主要因子(降雨、地形、土壤、植被、人类活动影响)表述过于简单。

2.1.4 以 USLE为蓝本建立的坡面土壤流失预报模型 刘宝元等借鉴美国 USLE的成功经验,建立了中国土壤流失预报方程,即

$$A = RKLSEBT$$

式中:  $A$ ——多年平均土壤流失量;  $R$ ——降雨侵蚀力,  $R = EI_{30}$ ;  $K$ ——土壤可蚀性;  $S$ ——坡度;  $L$ ——坡长;  $B$ ——水土保持生物措施;  $E$ ——水土保持工程措施;  $T$ ——水土保持耕作措施。

该模型的最大优点是根据我国水土保持措施的实际状况,将 USLE中的作物和水土保持措施两大因子变为水土保持三大措施因子,即生物( $B$ )、工程( $E$ )和水土保持耕作措施( $T$ )因子;二是模型的结构相对简单,便于推广应用。但该模型没有考虑陡坡地特有的浅沟侵蚀类型。

### 2.2 流域土壤侵蚀预报模型

流域土壤侵蚀预报模型的研究同坡面侵蚀预报相比,起步较低晚。20世纪 80年代初期江忠善和宋文经(1980)<sup>[11]</sup>根据陕北、晋西、陇东南小流域水文泥

沙观测资料建立估算次降雨流域产沙量统计模型;牟金泽和熊贵枢(1980)<sup>[12]</sup>根据陕北子洲岔巴沟流域的观测资料,建立了估算小流域次洪水和全年的产沙量预报经验公式。次后,伊国康和陈钦峦(1989)<sup>[13]</sup>根据陕西黄土高原等地区的小流域观测资料,建立了以径流模数和流域下垫面综合特征指标为参数的小流域年产沙量预报公式。20世纪80年代中期,以侵蚀产沙物理过程为基础的概念型模型也得到了很快发展。王星宇等(1987)<sup>[14]</sup>针对黄土高原丘陵区小流域侵蚀地貌的特点,对梁坡和沟坡两大单元进行概论,并从动力学的角度出发,利用推移质和悬移质输沙公式,建立了估算小流域产沙量的数学模型。汤立群等(1990)<sup>[15]</sup>和谢树楠等(1996)<sup>[16]</sup>根据流域径流形成和侵蚀产沙机理,利用水文学和泥沙运动学的基本理论,构建了物理成因较强的小流域产沙动力学模型。近几年以来,开发的流域土壤侵蚀预报模型在反映流域侵蚀产沙发生的空间分布方面取得了新的进展。江忠善等(1996)<sup>[8]</sup>利用黄土高原丘陵沟壑区安塞站径流小区和纸坊沟流域的观测资料,建立了由沟间地单元地块子模型和沟谷地单元地块子模型两部分组成的小流域次降雨地块侵蚀预报模型。该模型利用RS和GIS技术建立地形数据库,并在模型中首次考虑了沟间地的浅沟侵蚀因素系数。

### 3 中国土壤侵蚀预报模型研究的设想

#### 3.1 土壤侵蚀预报模型研究的紧迫性和重要性

综上所述,我国土壤侵蚀预报模型的研究和开发已经走过了近50a的发展历程,特别是近20a来,成功地研制和开发了一批适应中国具体情况的坡面和流域侵蚀预报模型。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,土壤侵蚀模型研究滞后于生产实践的需要。因此,迫切需要开发研制我国的土壤侵蚀预报模型。这是因为:(1)水土保持规划、决策需要。侵蚀预报的研究与开发,将为水土保持规划和土地利用规划提供强有力的技术支持,同时也为国家生态环境建设和水土保持宏观决策的制定提供有力的支持;(2)水土保持执法要求。土壤侵蚀定量评价必将促进水土保持执法的科学化、准确化和动态化,用法律手段加速和促进水土保持事业发展;(3)水土保持科学研究要求:土壤侵蚀预报模型的研究,必将极大地促进土壤侵蚀和水土保持学科的发展,并培养大批土壤侵蚀与水土保持学科的高级研究人才和管理人才,促进我国水土保持科学事业的发展。

#### 3.2 中国土壤侵蚀预报模型研究的设想

根据国外土壤侵蚀预报模型发展的趋势和开发研制的成功经验,国内土壤侵蚀物理过程研究成就和侵蚀预报模型的发展现状及国家需求,我国土壤侵蚀预报模型应以开发过程模型为主,建议目前集中研究水蚀预报模型。模型开发过程中,应将开发坡面侵蚀预报模型、流域侵蚀预报模型和区域土壤侵蚀评价和预测相结合,采用RS和GIS技术,建立全国水土流失数据库,开发水土保持决策支持系统。

3.2.1 坡面土壤侵蚀预报模型开发 以现有开发的陡坡地土壤侵蚀模型为基础,利用GIS技术建立全国水土流失标准化数据库,开发比较实用的中国坡面水土流失预报模型,为田间的土地利用和水土保持规划提供支持工具。

3.2.2 小流域土壤侵蚀预报模型开发 在现有地块预报模型的基础上,对坡面—沟道水沙汇集传递关系进行研究,建立物理概念模型,开发在GIS支持下的估算流域侵蚀产沙时空分布的侵蚀预报模型。

土壤侵蚀预报模型的研究和开发是一个庞大的科学研究系统工程,涉及土壤侵蚀与水土保持学,水文学,水力学,泥沙运动学,土壤学,农学,GIS,计算机科学等多门学科。美国土壤侵蚀预报模型开发研制成功经验中的重要一条就是由农业部牵头,动员科研、教学、生产单位联合攻关。因此,建议由水土保持主管部门水利部牵头,组织多学科、多部门协同攻关,并组建精干队伍,力争在4~5a的时间内开发出坡面土壤侵蚀预报模型,并以此为基础,利用5~8a的时间开发研制流域土壤侵蚀预报模型。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation. J of Soil and Water Conservation [J]. 1984, 39: 99-104.
- [2] Renard K G, Foster G R, Weesies G A et al. Prediction rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [Z]. USDA Agricultural Handbook No. 703, 1997.
- [3] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, Finkner S C. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology [J]. Trans. ASAE 1989. 32: 1587-1593.
- [4] USDA-Water Erosion Prediction Project. NSERL No. 2. National Soil Erosion Research Laboratory [Z]. USDA-ARS. West Lafayette, 47907.

(下转第32页)

### 3 结 论

影响豆科植物结瘤固氮的生态因素是十分复杂的,而产生固氮功能是由根瘤菌和寄主植物两方面的遗传因素所决定。根瘤菌-豆科植物共生固氮是一个耗能过程。固定 1 kg 氮化合物要消耗 10 kg 碳水化合物,豆科植物光合作用获得能量约有 5%~10% 用于固氮,在自然条件下,土壤水分、营养元素、光合作用的差异对植物生长有影响,从而同一植物在不同地点和海拔高度,固氮酶活性也不相同。

豆科植物共生固氮可提供豆科植物本身的氮素和增肥地力,是维持土壤持久生长力的一个重要生态反映,是非栽培地区输入土壤系统氮素的主要来源。白龙江流域这些豆科植物经过长期的自然选择,逐步适应了该区的生态环境,可以被根瘤菌侵染且具有固氮酶活性,这无疑是良好的自然资源。深入研究和开发利用这些自然资源将会使豆科植物在该地区的改良土壤、防止水土流失、涵养下游水源等方面发挥更大作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 尹祚栋,赫卓峰. 白龙江、洮河林区综合考察报告 [C]. 见尹祚栋,赫卓峰主编,白龙江、洮河林区综合考察论文集. 上海科学技术出版社, 1991, 1-9.
- [2] 中国科学院上海植物生理研究所固氮室. 共生固氮研究中乙炔还原简易峰高比法 [J]. 植物学报, 1977, 16: 382-384.
- [3] Vincent J. H. A manual for the practical study of root-nodule bacteria [M]. Blackwell Scientific Publication. London Oxford of Edinburgh, 1970. 128-214.
- [4] Allen O N, Allen E K. The leguminosae, A source book of characteristic, uses and nodulation [M]. Wisconsin The Unit of Wisconsin Press. 1981. 71.
- [5] 关桂兰,王卫卫,杨玉锁. 新疆干旱地区固氮生物资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 29-43.
- [6] Wenxin CHEN, Entao WANG, Suying WANG. Characteristics of *Rhizobium tianshanense* sp. nov., a Moderately and Slowly Growing Root Nodule Bacterium Isolated from an Arid Saline Environment in Xinjiang. [J]. Int. J. Sys. Bacteriology. 1995, 45(1): 153-159.
- (上接第 18 页)
- [5] Flanagan D. C. WEPP CD-ROM. 2001 Vision [Z].
- [6] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. Special Issue Soil Erosion Modeling at the Catchment Scale [J]. Catena. 1999, 37(3-4). 393-399.
- [7] Sdorochuk A. Dynamic and static models of gully erosion. Special Issue Soil Erosion Modeling at the Catchment Scale [J]. Catena. 1999, 37(3-4). 401-414.
- [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): 1-10.
- [9] 蔡强国,陆兆熊,王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型 [J]. 地理学报, 1996(2): 108-116.
- [10] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究 [C]. 全国区域水土流失快速调查与管理信息系统学术研讨会论文集. 1999. 42-45.
- [11] 江忠善,宋文经. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算 [C]. 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集, 北京: 光华出版社. 1980. 63-72.
- [12] 牟金泽,熊贵枢. 陕北小流域产沙量预报及水土保持措施拦沙计算 [C]. 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集. 北京: 光华出版社, 1980. 63-72.
- [13] 尹国康,陈钦彦. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式 [J]. 地理学报, 1989, 44(1): 31-45.
- [14] 王星宇. 黄土地区流域产沙数学模型 [J]. 泥沙研究, 1987(3): 41-46.
- [15] 汤立群,陈国祥,蔡名扬. 黄土丘陵区小流域产沙数学模型 [J]. 河海大学学报, 1990, 18(6): 10-16.
- [16] 陈国祥,谢树楠,汤立群. 黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究 [J]. 见: 黄土高原水土保持. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 213-229.
- [17] 牟金泽,孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失方程的初步研究 [J]. 中国水土保持, 1983(6): 25-27.
- [18] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤侵蚀方程的研究 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9.
- [19] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省土壤流失预报研究 [J]. 水土保持通报, 1995, 15(1): 25-30, 36.
- [20] 林素兰,黄毅,捏振刚,等. 辽北低山丘陵坡耕地土壤流失方程的建立 [J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 251-253.
- [21] 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.
- [22] 江忠善. 黄土高原土壤侵蚀流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1998, 第 7 集. 40-45.