

水蚀预报模型研究

郑粉莉^{1,2}, 杨勤科², 王占礼^{1,2}

(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. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 土壤侵蚀模型研究是土壤侵蚀学科的前沿领域和水土保持规划的有效手段。概述国外水蚀预报模型的研究进展, 并详细述评了国外水蚀预报的经验模型、物理过程模型、基于地理信息系统的水蚀预报模型、细沟侵蚀模型、浅沟侵蚀模型、切沟侵蚀模型和区域侵蚀预报模型。介绍了中国在坡面预报模型和流域侵蚀产沙模型和全国水土流失宏观趋势预测的研究进展, 提出了中国水蚀预报模型研究面临的挑战与任务。

关键词: 水蚀预报模型; 进展; 挑战与任务

中图分类号: S 157. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2004) 04-0013-12

Water Erosion Prediction Model

ZHENG Fen-li^{1,2}, YANG Qin-ke², WANG Zhan-li^{1,2}

(1. *The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
2. *Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Research on soil erosion model is the front issue of soil erosion science, and the effective approaches for soil and water conservation planning. The author outlined research progress in water erosion prediction model at oversea countries, detailed reviewed empirical models, erosion models based- process, water erosion prediction model supported by GIS, rill erosion model, ephemeral erosion gully model, gully erosion model, and erosion prediction model at regional scale. It also introduced research progresses in water erosion prediction models at different scales of hillslope, watershed and region. Meanwhile, it proposed challenges and tasks for developing water erosion prediction models in China.

Key words: water erosion prediction model; progresses; challenge and tasks

土壤侵蚀模型研究是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。土壤侵蚀预报模型的研究, 可以带动土壤侵蚀过程及其机理、土壤侵蚀防治及侵蚀环境效应评价的研究, 从而促进水土保持管理工作的科学化和定量化。因此, 近 30 年来, 世界各国在集中人力和物力开发侵蚀预报经验模型的同时, 注重土壤侵蚀物理过程及其物理模型的研究, 并取得了大批创新性的研究成果, 先后开发了通用土壤流失方程 (USLE) 和修正的通用土壤流失方程 (RUSLE)^[1~4]、水蚀预报模型 (WEPP)^[5~7]、荷兰模型 (LISEM)^[8,9]、欧洲水蚀预报模型 (EROSEM)^[10]等。

1 国外水蚀预报模型研究进展

国际上水蚀预报模型研发大体上经过了四个阶段, 即试验观测数据, 建立土壤侵蚀基础数据库, 结合统计分析和对

土壤侵蚀影响因子的概化, 建立估算土壤流失统计模型; 基于水蚀过程的研究成果, 结合泥沙连续方程和数理方法, 开发物理模型; 基于物理模型成果并与 GIS 结合, 开发分布式水蚀预报模型; 基于坡面和小流域水蚀预报模型的研究成果及遥感和地理信息系统的应用, 开发区域土壤侵蚀模型。

1. 1 经验模型

1. 1. 1 通用土壤流失方程

1917 年, 美国学者 M. F. Miller 及其同事们在密苏里农业实验站 (Missouri Agricultural Experiment station) 布设小区开展农作物及轮作对侵蚀和径流的影响研究。20 世纪 20 年代, 美国农业部 (USDA) 土壤调查专家贝纳特 (Bennett) 等建立土壤侵蚀试验站, 并将 Miller 的径流、侵蚀研究方法进行推广应用。基于大量的试验观测, Bennett 于 1939 年出版了经典名著《土壤保持》。20 世纪 30 年代大面积

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“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422); 国家自然科学基金重点项目“黄土高原小流域分布式水蚀预报模型研究”(40335050); 农业部 948 项目(2003-Z57)

作者简介: 郑粉莉(1960-), 女, 陕西蓝田人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报和土壤侵蚀环境效应评价研究。

高强度沙尘暴的发生,使美国政府和公众深刻认识到大面积垦殖导致的严重后果,并采取行动投入大量人力、物力开展土壤侵蚀试验观测、预报和防治研究,于 1954 年在美国中西部印第安纳州西老佛爷市(West Lafayette City, Indiana)建立了国家径流泥沙数据中心,即美国国家土壤侵蚀研究实验室的前身),组织力量汇总了全美的径流泥沙观测资料。基于当时对土壤侵蚀过程及其机理的认识和对大量的径流泥沙观测数据的统计分析, W. H. Wischmeier^[1]组织全美有关政府部门和科研、教学和生产单位联合攻关,于 1965 年建立了著名的通用土壤流失方程(USLE—Universal Soil Loss Equation)。

通用土壤流失方程(USLE)的结构形式为:

$$A = RKLSCP$$

式中: A ——单位面积上的土壤流失量($\text{t}/\text{acre}\cdot\text{yr}$); R ——降雨侵蚀力因子($100\text{ ft}\cdot\text{tons}\cdot\text{inch}/\text{acre}\cdot\text{hr}\cdot\text{yr}$); K ——土壤可蚀性因子($\text{Tons}\cdot\text{hr}/100\text{ft}\cdot\text{tons}/\text{inch}$); L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——作物覆盖和管理因子; P ——水土保持措施因子。

USLE 的主要优点表现为: (1) 拟定了标准小区,即规定坡度为 9%,坡长为 22.13 m,连续保持清耕裸露休闲状态,且实行顺坡耕作的小区为标准小区。标准小区的拟定,为对不同条件下土壤流失量的比较提供了可能。(2) 充分考虑了影响土壤侵蚀的主要因子;(3) 各评价因子完全独立,且可进行实际测试;(4) 降雨侵蚀力指标为各地提供了更准确的降雨侵蚀势;(5) 土壤可蚀性指数直接用土壤性状进行评价,并对大部分土壤提供了计算土壤可蚀性的方法;(6) 将作物覆盖与田间管理综合考虑,更符合实际情况。

通用土壤流失方程式是美国水土保持规划的主要工具,用来预测耕地土壤流失量,确定土地利用方案,引导农民做出土地利用方式或水土保持措施的布设或选择,使土壤流失量达到允许土壤流失量或农民的期望值。通用方程式的设计思路、因子确定原则和模型结构简单明了等,均对世界范围内土壤侵蚀模型的开发提供了典范,对其它国家的土壤侵蚀预报、水土保持规划也产生了重要影响。许多国家和地区以此为蓝本,结合本国本地区实际情况,研发适用于本国本地区的侵蚀预报模型。同样,USLE 的研发对中国土壤侵蚀模型的研究起到了重要的推动作用。但该模型所使用的数据主要来自美国落基山脉以东地区,仅适用于缓坡地形;再者该模型只是一个经验模型,因此模型的外推应用受到限制。

1.1.2 修正通用土壤流失方程

修正通用土壤流失方程式(Revised Universal Soil Loss Equation—RUSLE)由美国农业部自然资源保护局(USDA—ARS)开发研制于 1993 年首次颁布,主要用于预报长时期平均的土壤流失量^[4]。按照模型开发研制的先后顺序,RUSLE 具有不同的版本:在 DOS 界面下操作的版本有:RUSLE1.05 模型主要用于农地和荒草地年土壤流失量(细沟间侵蚀和细沟侵蚀);RUSLE 1.06 除预报农地和荒草

地年土壤流失量外,还可预报矿区、建筑工地和开垦地的土壤流失量。在 WINDOWS 界面操作下的版本有:RUSLE2,也是最新版本,是对早期版本的修正和完善,于 2000 年颁布。目前美国农业部泥沙研究实验室的科学家正在对该版本进行修正与完善,预计 2004 年底完成。该模型可以预报不同农田生态系统的农地、矿区、建筑工地和林地的土壤流失量。

同 USLE 相比,RUSLE 的数据源更广,并在各侵蚀因子的测算方法也有了改进。 R 值考虑到了表层水流对降雨击溅的缓冲作用,尤其是对高强度暴雨区的降雨侵蚀力等值线图进行了修正。此外,该方程在对美国西北部的农田和牧场农作物区 R 值的计算中,考虑到了多年冻土和部分消融土壤产生的径流。在 K 值研究中考虑了冻融循环使土壤变得松散以及生长期时由于土壤水分的消耗而使土壤重新固结的影响。 LS 值的测算则扩展了原有 < 9 的适用范围,并对坡长的测算提出了新的算法,使得坡度、坡长因子的适用性更广。 C 因子在 RUSLE 模型中被分为若干个次因子,包括前期土壤管理状况、作物郁闭度、地表覆盖、地表糙度、土壤前期含水量,从而使 C 值对保土耕作措施、轮作措施等的估算更加精确。 P 值对等高耕作、带状耕作对泥沙输移的影响进行了考虑。

1.2 物理过程模型

物理过程模型运用了大量土壤侵蚀过程研究的结果,并且使用普遍规律(如质量守恒、牛顿第二运动定律以及热力学第一定律)^[4],使得模型基本上可在其它地区推广应用。过程模型,可以提供侵蚀时空分布信息^[5];同时,模型中如果正确使用了物理过程,它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^[6]。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^[6,7],误差传递也会随之增加^[8]。

1.2.1 水蚀预报模型(WEPP)

为了克服 USLE 的一些缺点,1985 年美国农业部开始新一代水蚀预报模型的研究(Water Erosion Prediction Project—WEPP)^[5,6]。该项目计划利用 20 年左右的时间完成坡面版(Hillslope version)、流域版(Watershed version)和网格版(Grid version)的研发。该项目由美国国家土壤侵蚀研究实验室(USDA—ARS National Soil Erosion Research Laboratory, Indiana)组织全美有关科研、教学、生产单位共同攻关,于 1987 年完成了用户需求报告,规定了 WEPP 的基本框架,并于 1995 年发布了第一个官方正式版本 WEPP-95。随后又相继于 1998 年、2000 年和 2001 年分别颁布了不同版本。WEPP(v2001.300)为最新版本,是对早期版本的修正与完善。目前开发研制成功的主要是坡面版本和流域版本,网格版仍是一空白。

WEPP 模型中,土壤侵蚀过程包括侵蚀、搬运和沉积三大过程。暴雨所产生的径流及其挟带的侵蚀泥沙在从坡面向沟道汇集并最后从流域出口输入到较大一级的流域过程中,

侵蚀、沉积、搬运连续发生。坡面侵蚀包括细沟侵蚀 (rill) 和细沟间侵蚀(interrill)。WEPP 模型的基本理论为: 1) 细沟间侵蚀以降雨侵蚀为主, 而细沟侵蚀以径流侵蚀为主; 2) 侵蚀量(E)是搬运能力(T_c)和输沙量(q_s)的函数; 即, $E = (\sigma T_c - q_s)$ 或 $E/D + q_s/T_c = 1$ 。也就是说, 当输沙量小于泥沙搬运能力时, 侵蚀状态以侵蚀—搬运过程为主, 相反, 则以侵蚀—沉积过程为主。

WEPP 模型参数包括气候(降雨、温度、太阳辐射和风)、冬季因素(冻融、降雪量、融雪量)、灌溉、水文(入渗、填洼和径流)、水量平衡、土壤、作物生长、残渣管理与分解、耕作对入渗和土壤可蚀性的影响、侵蚀(片蚀、细沟侵蚀)、沉积、泥沙搬运、颗粒分选与富集等。WEPP 模型是一个基于侵蚀过程的模型, 模型具有以下三个特点: (1) 模型能很好地反映侵蚀产沙的时空分布; (2) 模型的外延性好, 易于在其他区域应用; (3) 模型能较好地模拟出泥沙的输移过程, 包括某一特定点的侵蚀产沙信息。

WEPP 模型的坡面版本将直接代替 USLE 外, 但比 USLE 的功能更强。流域版可以评价和指导资源管理系统, 以保证流域侵蚀速率小于允许侵蚀速率, 维持土地生产力。流域模型只能用于田块尺寸范围内, 不能用于切沟和河道侵蚀, 它只能用于排水沟和草皮水路和农田浅沟侵蚀预报。对于草地和林地来说, 渠道的最大规模必须是小于农田里传统的切沟, 即宽度 1~2 m, 深度 1 m。

WEPP 模型是一个过程模型, 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。该模型在 WINDOWS 界面支持下可以预报坡面的土壤流失量(片蚀和细沟侵蚀), 也可以预报小流域的土壤流失量。该模型的最大特点是实现了侵蚀预报模型与 GIS 相结合。但模型中仍存在一些局限性: (1) 对侵蚀过程的描述比较简单, 只考虑细沟间侵蚀和细沟侵蚀, 而没有涉及沟蚀及重力侵蚀, 因而模型不能预报沟蚀量; (2) 流域版本适用的范围较小(农地最大范围约 260 hm², 林地能用 800 hm²), 且局限于较末级集水区, 多级流域的组合尚未涉及; (3) 模型中子模型和参数较多, 因而模型的实用性受到限制; (4) 缺乏对坡沟水沙传递关系的研究, 制约了流域版的开发。另外同中国相比, 美国的水土保持措施相对简单, 中国的水土保持措施远较 WEPP 中涉及的水土保持措施较复杂得多。因此, 如何根据我国土壤侵蚀特点, 借鉴 WEPP 模型的研究思路, 建立适用我国侵蚀环境的水蚀预报过程模型是我国土壤侵蚀研究迫切需要解决的重要课题。

1.2.2 欧洲土壤侵蚀模型(EROSEM)

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 (EROSEM—European Soil Erosion Model)^[10]。其模型的建立主要是根据欧洲平原地区的侵蚀特点, 尤其是考虑到壤中流在欧洲自然景观中所起的重要作用, 并根据区域降雨特征采用与 RUSLE 不同的计算方法计算降雨侵蚀力。

EUROSEM 模型是一个以缓坡为主的小流域模型, 以预报次暴雨造成的土壤流失量为目标的过程模型。目前欧盟开发研制 EUROSEM 模型在暴雨条件下对侵蚀过程的模拟, 以增强该模型对大强度暴雨侵蚀的预报精度。

EROSEM^[10, 11]是基于物理过程的次暴雨分布式侵蚀模型, 模型以侵蚀产沙过程为切入点, 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)^[12]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, 模拟与侵蚀和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^[13]提出的输移方程模拟, 细沟间径流用 Everaert^[14]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侵蚀, 但对于 25 m × 35 m 的地块, 当侵蚀量小于 686 kg/hm² 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。

1.3 基于地理信息系统的水蚀预报模型

地理信息系统(GIS)是土壤侵蚀预报的一种全新技术手段, 它能获取遥感、全球定位系统(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, 较能准确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。近年来计算机技术和 GIS 技术的快速发展, 为水蚀预报模型的研发提供了强大的支持工具。土壤侵蚀模型与地理信息系统(GIS)技术集成的预报模型的研发已引起越来越多研究者的重视。

1.3.1 LISEM 模型

荷兰土壤侵蚀预报模型 LISEM (Limburg Soil Erosion Model)^[8, 9, 15~17]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。LISEM 模型较详细地考虑了侵蚀产沙的各个过程, 包括降雨、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; 同时也考虑了拖拉机轮子压痕和田间小路对水文和侵蚀过程的影响; 并对上述各种过程分别建立了子模型。

LISEM 模型被设计用于模拟一个从 1 hm² 到 100 hm² 的农业流域次降雨所产生的径流量和侵蚀量, 但不能应用于多个子流域组合的大流域的侵蚀产沙预报。LISEM 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, 并限制了模型的推广应用; 同时, 由于缺乏侵蚀过程定量描述的研究, LISEM 模型对分子模型的表述仍应用统计学的方法, 也

限制了模型的推广应用。

1.3.2 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)模型,其界面是基于 ArcView 开发而成的。该模型研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,如数字高程模型、地形图等,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。

1.4 细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀预报模型

1.4.1 细沟侵蚀模型(RILLGROW)

Favis-Mortlock 等^[18]提出了模拟细沟系统形成和发展过程的 RILLGROW 模型。模型使用自组织动态系统的方法,描述了在一小块裸露的坡面上细沟网络的形成和发展过程,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。该模型仅需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。该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 包括两个版本,RILLGROW^[19,20]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的细沟模式,没有明确的区分细沟和细沟间过程。在后来的模型验证研究中,采用数字的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。该版本不能在实际的时间域中运行,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。目前正在使用 C++ 语言开发在 Windows 界面下运行的新版模型 RillGrow 2,应用地理信息系统软件 IDRISI 实现输出的可视化。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和入渗等过程。

1.4.2 浅沟侵蚀模型(EGEM)

浅沟侵蚀模型或临时性切沟侵蚀模型 EGEM(The Ephemeral Gully Erosion Model)^[21,22]是专门用于模拟浅沟侵蚀的模型,它由水文和侵蚀两个模块组成,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(Curve Number)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,假设一旦有径流发生,就出现峰值流量;然后根据峰值流量和径流总量决定侵蚀量。同时,假定沿沟长方向沟深是固定的,并假定浅沟将垂直向下侵蚀直至达到可蚀性较差的犁底层。由于通常认为深度>46 cm 的沟是切沟而不是浅沟,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^[23]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(Guadaleñ 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,估算浅沟侵蚀量。同时,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。测试的结果表明 EGEM 不能预报地中海地区的浅沟侵蚀。

1.4.3 切沟侵蚀模型

Sidorchuk^[24]建立了模拟切沟发展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,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^[25]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)。切沟发展包括两个阶段:第一阶段切沟发展时间占切沟整个发育阶段的 5%,此阶段切沟形态特征(长、深、宽、面积和体积)很不稳定,沟道快速形成,切沟系统在这一阶段迅速发展;第二阶段是切沟发展的稳定阶段,占切沟整个发育阶段的大部分,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的切沟形态快速变化的动态模型,它基于物质守恒和沟床形态变化的方法,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。

1.5 区域侵蚀预报模型

荷兰学者 De Jong 等提出了用于地中海区域土壤侵蚀预报模型 SEMMED(Soil Erosion Model for MEDITerranean regions)^[26],它是一个半经验的分布式区域侵蚀预报模型。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)、数字土壤图以及数量有限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内植被覆盖的变化;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。模型的不足是没有考虑地表径流产生的土壤颗粒分离及地表结皮,对起始土壤水分分贮能力和土壤可分离指数十分敏感。该模型建立在 M MF(Morgan, Morgan and Finney)^[27]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 M MF 方法是一个集总式模型,最初发展用于预测田块或坡面年流失量,不适用于估算非常高或非常低的情况时的侵

蚀。因此, SEMMED 模型不能用于特大暴雨的土壤流失估算。

1.6 国外水蚀预报模型述评

研发 USLE 模型的数据源主要来自缓坡地区(坡度 < 10°), 随着坡度的增加, 模型的预报精度大大降低。因此, 该模型不能直接应用于我国的大部分地区。但 USLE 关于参数选取、参数的测试方法及标准小区等研究思路可供我们学习和借鉴。

物理过程模型(WEPP, LISEM, EUROSEM) 由于对侵蚀物理过程描述相对简单, 也由于缺乏中国观测数据的验证, 同样不能直接应用于我国的大部分地区。如 WEPP 模型在侵蚀过程定量描述中, 只考虑细沟间侵蚀和细沟侵蚀, 而没有涉及沟蚀及重力侵蚀, 因而模型不能预报沟蚀和河道侵蚀; 再者 WEPP 模型的流域版本适用的范围较小(农地最大范围约 260 hm², 林地能用 800 hm²), 且局限于较末级集水区, 多级流域的组合尚未涉及, 因而模型的实用性受到限制。另外同中国相比, 美国的水土保持措施相对简单, 中国的水土保持措施远较 WEPP 中涉及的水土保持措施较复杂得多。再如 LISEM 模型被设计用于模拟一个从 1 hm² 到 100 hm² 的农业流域次降雨所产生的径流量和侵蚀量, 但不能应用于多个子流域组合的大流域的侵蚀产沙预报。但国外水蚀过程预报模型中对于侵蚀过程描述和量化原理的思路和方法值得我们借鉴。

2 国内水蚀预报模型研究进展

2.1 坡面土壤流失预报模型

我国坡面土壤流失预报模型的研究始于 20 世纪 50 年代, 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 年代以来, 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。进入 20 世纪 90 年代, 基于土壤侵蚀过程的研究成果, 尝试物理模型的建立。

2.1.1 陡坡地包括预报浅沟侵蚀的土壤流失预报模型

江忠善等^[28,29]以沟间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, 建立了计算沟间地次降雨的土壤流失模型。其表达式为

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

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(mm); I_{30} ——一次降雨过程次 30 min 最大降雨强度; S ——坡度(°); L ——坡长(m); G_s ——浅沟侵蚀影响系数, 当坡面无浅沟侵蚀时, $G_s = 1$; 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。

该模型特点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; 应用 ARC/INFO 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^[30,31]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。模型结构形式为:

(1) 次降雨坡面溅蚀分散量方程

$$D_b = 0.015J(E_R/\lambda)e^{(2.68\sin\theta - 0.48C_v)}$$

式中: D_b ——坡面溅蚀分散量(kg/m²); J ——前期表土结皮因子, 当前期无表土结皮时为 1; E_R ——降雨动能(J/m²), 可依据 $E_R = 28.83 + 13.5\log I$ 计算; I ——降雨强度(mm/min); λ ——土壤抗剪切强度(kPa), $\lambda = \alpha e^{-bM_c}$, α 、 b ——经验系数, 由地表土壤容重而定; M_c ——土壤含水量(%); θ ——坡度; C_v ——植被覆盖度(%)。

(2) 坡面细沟侵蚀估算方程

$$D_r = 1.766 \times 10^{-7} E_r^{4.8} \lambda^{-0.5}$$

式中: D_r ——细沟侵蚀模数(kg/m²); E_r ——细沟水流侵蚀力(N/m³), $E_r = 0.01\rho gHA\sin\theta$, 其中 ρ 为水的密度(1 000 kg/m³); g ——重力加速度(9.8 m/s²); H ——平均径流深(mm); A ——单宽汇流面积(m²); θ ——坡度(°), λ 意义同前。

该模型最大特点是考虑了坡面溅蚀分散和细沟水流的输沙能力等物理过程。

2.1.3 以 USLE 为蓝本建立的坡面土壤流失预报模型

20 世纪 80 年代以来, 我国学者以美国通用土壤流失预报方程 USLE 为蓝本, 根据各研究区的实际情况, 进行修正, 对我国主要水蚀区的黄土高原^[32]、东北漫岗丘陵^[33,34]、红壤丘陵^[35]、滇东北山区^[36]、闽东南^[37,38]、黄河多沙粗沙区^[39,40]、长江三峡库区^[41]、华南地区(广东省)^[42]等坡面侵蚀预报模型进行了探索, 取得了一批研究成果。这里主要介绍刘宝元等建立的坡面土壤流失预报模型。

刘宝元^{①②}等借鉴美国 USLE 的成功经验, 根据实测资料建立了坡面土壤流失预报方程, 即

$$A = RKLSBET$$

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 ——水土保持生物措施因子; E ——水土保持工程措施因子; T ——水土保持耕作措施因子。

该模型的最大特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, 但该模型与 USLE 类似, 仅适用于不包含浅沟或切沟侵蚀的坡面。

①刘宝元, 中国土壤流失方程, 国际土壤侵蚀管理学术研讨会, 2001 年 4 月于中国太原。

②刘宝元等, 中国土壤侵蚀预报研究, 第 12 届水土保持大会, 2002 年 5 月于中国北京。

2.2 流域产沙模型

流域侵蚀产沙模型的研究同坡面土壤流失预报模型相比,起步较晚。20 世纪 80 年代初期江忠善和宋文经^[43]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^[44]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产沙量预报经验公式。次后,尹国康和陈钦峦^[45]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。范瑞瑜^[46]根据陕北、晋西、陇东不同地区 1954~1982 年 16 个小流域(0.18~187 km²)的实测资料,选用降雨影响因子、土壤可蚀性指标、流域平均坡度、植被影响侵蚀系数和工程影响土壤侵蚀系数作为定量指标,通过多元回归分析,建立小流域年产沙模型。20 世纪 80 年代中期,以侵蚀产沙过程为基础的预报模型得到了很快发展。王星宇等^[47]针对黄土高原丘陵区小流点,对梁坡和沟坡两大单元进行概化,利用河流推移质和悬移质输沙公式,建立了估算小流域侵蚀地貌的特域产沙量的数学模型。汤立群等^[48]和谢树楠等^[49]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力学的基本理论,构建了小流域产沙动力学模型。近几年以来,开发的流域侵蚀产沙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^[28,29]利用黄土高原丘陵沟壑区安塞站径流小区的观测资料,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次降雨小流域地块侵蚀预报模型。蔡强国等^[30,31]以晋西羊沟道小流域为对象,将小流域侵蚀产沙分为坡面、沟坡、和沟道三个基本单元,分别建立了各单元的次暴雨土壤侵蚀产沙预报模型。

2.2.1 经验模型

江忠善、宋文经^[43]根据陕北绥德、子洲、延安、晋西离石、陇东南天水等地的黄土丘陵沟壑区 10 条典型沟道小流域(0.18~187 km²) 1954~1970 年间的 406 场次洪水径流泥沙实测资料,通过多元回归分析,得出未治理小流域次暴雨洪水产沙量预报公式。模型表达式为:

$$M_s=0.37M^{1.15}JKP$$

式中: M_s ——一次暴雨的流域产沙模数(t/km²); M ——一次暴雨的洪量模数(m³/km²); J ——流域平均坡度,以比值计; K ——土壤可蚀性因子,以黄土中沙粒和粉粒占总量比例表示可蚀性指标,以小数计; P ——与流域植被度有关的植被作用系数。

模型中各参数的计算如下:

(1) 一次暴雨洪水径流总量的确定

$$W=0.054(L/J_0^{1/3})^{0.58}Q^{0.86}$$

式中: W ——一次暴雨洪水径流总量(10⁴ m³); Q ——洪峰流量(m³/s); L ——流域长度(km); J_0 ——流域主沟道平均比降(以比值计)。不同频率下设计的洪峰流量模数和洪峰流量的计算式如下:

不同频率下设计洪峰流量模数的计算公式为:

$$q_p=C\frac{J_0^{0.37}A^{0.22}}{L^{1.1}}$$

不同频率下设计洪峰流量的计算公式为:

$$Q_p=C\frac{J_0^{0.37}A^{1.22}}{L^{1.1}}$$

以上两式中: q_p ——设计洪峰流量模数(m³/s·km²); Q_p ——设计洪峰流量(m³/s); A ——流域面积(km²); L ——流域平均宽度(km); C ——与重现期 N 有关的参数, $N=10$ 年, $C=220$; $N=20$ 年, $C=290$; $N=50$ 年, $C=420$ 。

(2) 流域平均坡度 J : 用地形图量测数据进行计算

$$J=\frac{\Delta H(0.5L_0+L_1+L_2+\dots+L_{n-1}+0.5L_n)}{A}$$

式中: ΔH ——相邻两等高线间等高距(m); $L_0, L_1, L_2, \dots, L_n$ ——各条等高线长度(km); J, A 意义同上。

(3) 植被作用系数 P : 植被作用系数是指有植被覆盖与裸露对照径流小区侵蚀量的比值,通过查表获取。

该模型结构较为合理,考虑的因素较全面,能反映小流域侵蚀动力、地形、土壤、植被等因素对流域产沙的综合影响,适用于黄土丘陵沟壑区没有或很少开展水土保持工作的面积小于 200 km² 小流域产沙量的计算。

牟金泽、熊贵枢^[44]根据黄土丘陵沟壑区第一副区陕北子洲岔巴沟流域六个断面 8~11 年 246 次实测资料,选取洪量模数、洪峰模数、年径流模数、主沟道平均比降、流域长度为指标,经回归分析得出小流域一次洪水和全年的产沙量预报模型。模型表达式

一次洪水产沙量计算公式:

$$M_s=0.25(M+q_p)^{1.07}J_0^{0.2}L^{0.4}$$

年产沙量计算公式: $M_{so}=0.095M_0^{2.0}J_0^{0.28}L^{0.25}$

式中: M_s ——一次洪水流域产沙模数(t/km²); M ——一次洪水洪量模数(m³/km²); q_p ——洪峰模数[m³/(s·km²)]; J_0 ——流域主沟道平均比降(%); L ——流域长度(km); M_{so} ——年产沙量; M_0 ——年径流模数(10⁴ m³/km²)。

模型中参数的确定如下:

(1) 设计洪峰模数 q_p

$$q_p=C\frac{J_0^{1/3}A^{0.18}}{L}$$

式中: J_0, L 意义同上; A ——流域面积(km²); C ——与重现期 N 有关的参数, $N=10$ 年, $C=179\times10^3$; $N=20$ 年, $C=262\times10^3$; $N=50$ 年, $C=375\times10^3$ 。

(2) 设计洪量模数 M :

$$M=0.26q_p(\frac{L}{v^3})^{0.54}$$

(3) 流域长度 L : $L=1.58A^{0.5}$

(4) 主沟道平均比降 J_0 : $J_0=0.61A^{-0.42}$

该模型经用研究区以外的实测资料进行验证,基本上满足实用精度要求。

尹国康和陈钦峦^[45]根据晋、陕、甘黄土覆盖区 58 个小流域(0.193~329 km²) 1954~1982 年观测和调查资料,通过对 21 个变量进行筛选,以径流模数、流域长度、流域沟壑

密度、流域高差比、地面沟壑切割深度、流域植被度与治理度、地面岩土抗蚀性因素等作为影响流域产沙的主要指标,通过回归分析得出小流域年产沙模型。模型表达式

$$M_{sa}/M_{wa}=31.83I^{0.83}$$

式中: M_{sa} ——年产沙模数(t/km^2); M_{wa} ——年径流模数(m^3/km^2); I ——流域地表综合特性指标。

模型参数 I 的确定

$$I=R_h^{0.6}D_h^{0.2}R_p^{-0.8}R_s^{-3.5}$$

式中: R_h ——流域高差比(%); D_h ——地面崎岖度, $D_h=Dh$, D ——沟壑密度(km/km^2), h ——沟壑切割深度(m); R_p ——流域治理度,即有效治理面积与流域总面积之比(%); R_s ——地面组成物质的抗蚀性因素,查表获得。

该模型是在对较多变量进行筛选分析后建立的,考虑因素较全面,并且考虑到了治理措施。

范瑞瑜^[46]根据陕北、晋西、陇东不同地区 1954~1982 年 16 个小流域($0.18\sim187\text{ km}^2$)的实测资料,参照美国 USLE 模型结构,选用降雨影响因子、土壤可蚀性指标、流域平均坡度、植被影响侵蚀系数和工程影响土壤侵蚀系数作为定量指标,通过多元回归分析,建立小流域年产沙模型。其模型表达式为

$$M_s=6.49R^{1.573}K^{1.235}J^{1.328}C^{1.491}P^{1.588}$$

式中: M_s ——年产沙模数($10^4\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$); R ——降雨影响侵蚀因子; K ——土壤可蚀性指标; J ——流域平均坡度; A ——植被影响侵蚀系数; P ——工程措施影响侵蚀系数。

模型中参数的确定如下:

(1) 降雨因子 R : $R=10^{-3}(E_n+P_c^{0.88})$

式中: E_n ——年暴雨总能量之和(J/m^2); P_c ——汛期降雨量(mm)。

(2) 土壤可蚀性因子 K : 采用大于 0.05 mm 的径流含量与易溶盐百分含量之和(用小数表示)。

(3) 地形因子 J : 根据流域地形图,按下式计算:

$$J=\frac{\Delta H(0.5L_0+L_1+L_2+\dots+0.5L_n)}{A}$$

对地形起伏,山高坡陡的流域采用:

$$J=\frac{\Delta H\cdot\sum L}{A}$$

式中: L_0 、 L_1 …… L_n ——流域内各等高线的长度(km); ΔH ——相邻两等高线间的高差(km); L ——流域内等高线长度的总和(m); A ——流域面积(km^2)。

(4) 作物因子 C : $C=a_0e^{-5.1724x}$

式中: x ——流域汛期(6~9月)平均植被度(用小数表示); a_0 ——系数,取值 1.0。

(5) 水保措施因子 P : $P=1-\frac{a_1^{1.35}+a_2+a_3+a_4+a_5}{1500A}$

式中: a_1 ——流域内淤堤坝可淤面积; a_2 ——水平梯田面积; a_3 ——塬平地面积; a_4 ——水地面积; a_5 ——滩地面积; A ——流域总面积。

该模型对影响小流域土壤流失量的因子考虑的较全面,

能反映小流域降雨、地形、土质、生物与工程措施对流域产沙的综合影响,预报精度可以满足一般工程设计、流域总体水土保持规划和综合治理减沙效益计算的需要,适用于 200 km^2 以内自然地理特征类似的流域。

2.2.2 小流域地块水蚀预报模型

江忠善等^[28,29]根据黄土丘陵区小流域侵蚀产沙的基本特征及沟蚀严重的特点,将小流域的沟间地和沟谷地两个地貌单元区别对待,依据安塞站 1985~1991 年及子洲团山沟 1961~1969 年实际观测小区资料分析建立的经验关系,利用 RS 和 GIS 技术建立地形数据库,考虑了沟间地浅沟侵蚀的作用,分别建立了以计算沟间地和沟谷地单元地块土壤侵蚀为基础来推算小流域次降雨产沙量的计算模型。该模型被称之小流域分布式侵蚀产沙模型。模型表达式为:

(1) 沟间地土壤侵蚀模型

详见坡面侵蚀模型。

(2) 沟谷地土壤侵蚀模型

$$M_g=(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nM_{si}GC_gK)$$

式中: M_g ——某一个计算单元的沟坡网格单元侵蚀模数(t/km^2); M_{si} ——该计算单元的沟间地第 i 个网格的侵蚀模数(t/km^2),由沟间地土壤侵蚀模型计算得到; G ——沟蚀系数,无量纲; C_g ——沟坡植被影响修正系数,天然荒坡为 1,而对于人工林地和封育草地则参照沟间地林草地的计算方法和扣除荒坡植被现状覆盖度基数的影响加以确定; K 为土质类型修正系数,无量纲,对于黄土为 1; n 为该计算单元的沟间地网格地块总个数。

(3) 沟谷地土壤侵蚀模型沟蚀系数 G 的确定方法

$$G=1+\alpha[1.137(P/I_{30})^{0.140}-1]$$

式中: α ——坡度修正系数; P ——次降雨量; I_{30} ——一次降雨过程中最大 30 min 降雨强度。

该模型分别建立了沟间地土壤侵蚀统计模型和沟谷地侵蚀概化模型,模型结构简单合理,考虑因素比较全面,其中以径流小区资料为基础建立的包括植被和浅沟侵蚀影响的沟间地侵蚀模型,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。模型结合 GIS 能反映侵蚀的空间变化,属于分布式模型,可用于流域泥沙来源评价及水土保持规划等。

2.2.3 具有一定物理成因的预报模型

蔡强国等以晋西羊沟道小流域为对象,将小流域侵蚀产沙分为坡面、沟坡、和沟道三个基本单元,分别建立了各单元的次暴雨土壤侵蚀产沙预报模型^[30,31]。模型表达式为:

(1) 坡面子模型

详见坡面侵蚀模型。

(2) 沟坡子模型

①沟坡坡面侵蚀预报模型

$$S_d=511.07Q_d^{0.865}S_c^{0.114}$$

式中: S_d ——次降雨沟坡侵蚀产沙模数(t/km^2); S_c ——上部坡面来沙量(t/km^2); Q_d ——沟坡径流深(mm),可依据下式

计算:

$$Q_d=0.502\times10^{-3}I_{30}^{0.323}E_K^{0.871}Q_c^{0.331}$$

式中: I_{30} ——一次降雨过程中 30 min 最大降雨强度(mm/h); E_K ——降雨能量(J/m² · mm); Q_c ——上坡来水量(mm)。

②三趾马红土沟坡上的泻溜侵蚀预报模型

$$S_g=349.324P_a^{-0.631}I_{30}^{0.367}Q_g^{1.054}$$

式中: S_g ——红土沟坡侵蚀模数(t/km²); P_a ——前 9 天累积降雨量(mm); Q_g ——红土沟坡径流深(mm),

$$Q_g=1.07\times10^{-4}E^{1.14}I_{30}^{1.04}P_a^{0.14}$$

式中: E ——降雨能量, I_{30} ——30 min 最大雨强。

③重力侵蚀预报模型

$$S_h=2284.7Q_h^{0.811}$$

式中: S_h ——重力侵蚀产沙模数(t/km²); Q_h ——径流深(mm)

$$Q_h=0.86\times10^{-6}I_{30}^{0.854}E^{-1.638}$$

④洞穴侵蚀预报模型

按洞穴发生的位置, 用沟头自然侵蚀量代表洞穴侵蚀量, 方程如下:

$$S_f=386.33Q_f^{1.04}$$

式中: S_f ——沟头自然实验小区侵蚀产沙模数(t/km²); Q_f ——沟头部分的径流量(mm);

$$Q_f=1.72\times10^{-4}I_{30}^{2.343}E^{0.783}$$

⑤沟坡侵蚀模数计算

通过对某时刻沟坡坡面、泻溜侵蚀、重力侵蚀和洞穴侵蚀的计算, 并进行加权平均, 获得预报流域某时刻沟坡的土壤侵蚀模数。

(3) 沟道子模型

沟道的侵蚀可用泥沙输移比表示。这里泥沙输移比是指流域内流域输沙量与土壤侵蚀量之比, 用 SDR 表示, 若 $SDR < 1$, 则发生堆积, $SDR = 1$, 则侵蚀与堆积处于平衡状态。

经逐步多元回归分析得:

$$SDR=0.0277R^{-0.29}C^{0.19}S_m^{0.59}(E_d/E)^{0.44}$$

式中: R ——降雨量(mm); C ——径流系数(%); S_m ——最大水流含沙量(kg/m³); E_d/E ——大于 0.15mm/min 雨强的降雨动能与次降雨动能的比值。当无法获取 S_m 及 C 时, 采用下式计算:

$$SDR=0.738P_a^{0.065}T^{-0.225}I^{0.66}(E_d/E)^{0.091}$$

式中: P_a ——前期影响降雨量(mm); T ——降雨历时(min); I ——平均雨强(mm/min); E_d/E 的意义同上式。

(4) 流域内的侵蚀总量 S 的计算

$$S=Y/SDR$$

式中: Y ——流域出口输沙量。

除上述流域侵蚀产沙模型外, 还有其它形式的流域侵蚀产沙模型。如汤立群等^[48]在建立小流域产沙模型中, 将流域划分为 3 个侵蚀产沙区, 即梁峁坡侵蚀产沙区; 沟谷坡侵蚀产沙区; 沟槽侵蚀产沙区。所建模型由径流模型和侵蚀产沙

模型两部分组成。其中侵蚀产沙模型在梁峁坡、沟谷坡及沟槽侵蚀产沙区用不同的土壤侵蚀率公式进行计算, 并根据流域地貌特点和概化方法, 计算全流域出口的输沙率。该模型中包含 14 个参数, 需根据降雨、流量和含沙量等洪水实测资料进行调试确定。该模型的结构与参数物理概念清楚, 且参数少而稳定, 可用于有实测资料小流域的水沙预报。但该模型在计算梁峁坡侵蚀产沙时, 忽略细沟侵蚀和浅沟侵蚀, 在计算沟谷侵蚀产沙时, 忽略了切沟和重力侵蚀。另一方面, 该模型中的许多参数在应用时需根据实测资料来调试确定, 推广实用价值有限。

谢树楠等^[49]在建立小流域产沙模型中, 将计算流域按自然水系划分为若干个子流域, 再将各个子流域按地貌的微观结构分成若干个基本计算单元。同时将流域内的所有雨量站按泰森多边形法划分成不同的控制区域, 该雨量站的降雨即代表控制区域内的所有计算单元的降雨。该模型由产流模型与产沙模型两部分组成。对于产沙模型, 假定暴雨产生的径流为坡面一维流动, 压强按静水压强分布, 流动中的动量系数为常数, 不考虑泥沙的黏性, 沟道泥沙输移比为 1。根据水流连续方程、运动方程、泥沙连续方程和挟沙力公式联立求解, 求得流域侵蚀产沙量计算公式。该模型由坡面产沙计算式、沟道产沙计算式、时段产沙量公式和单元面积次暴雨总产沙量公式等组成, 利用坡面产沙量、沟道产沙量、时段暴雨产沙量、次暴雨总产沙量、地表裸露率、侵蚀因子、土壤中值粒径、单元坡面长度、坡面平均比降、沟道平均比降、某一土壤类型坡面所占比例、某一土壤类型沟道所占比例、计算时段长、单元面积、径流系数、降雨强度等参数计算。该模型为大、中流域暴雨产沙模型, 模型考虑了侵蚀产沙的动力条件, 又包含有地面物质条件、地面形态结构因素以及多年实测产沙模型均值, 物理图形清晰, 降雨、径流、产沙过程的力学关系清楚, 是一种反映产沙因素较全面的流域暴雨产沙模型。

2.3 全国水土流失趋势观测

我国区域水土流失定量评价起于 20 世纪 80 年代, 周佩华等^[50]将全国分为 7 个类型区, 根据降雨变化和水土保持进展对 1990 年和 2000 年的水土流失趋势进行了预测。全国 7 个类型区(即东北漫岗丘陵区、黄土高原区、青藏高原区、北方山地丘陵区、云贵高原及四川盆地区、江南丘陵区、华南丘陵区) 代表河流输沙量变化趋势的预测方程如表 1 所示:

表 1 全国水土流失预报预测方程^[50]

类型区	代表河流输沙量预测方程
东北漫岗丘陵区	$SD=0.266M^{-0.2}Q^{1.368}$
黄土高原区	$SD=0.075M^{2.3}Q^{-0.027}\times1.57^{(1-C_d)}$
青藏高原区	$SD=0.3357M^{-0.268}Q^{1.919}C_A^{-0.394}$
北方山地丘陵区	$SD=76100M^{0.705}Q^{0.988}C_A^{-2.4774}$
云贵高原及四川盆地区	$SD=7.65\times10^{-4}M^{0.409}Q^{1.131}C_A^{-0.629}$
江南丘陵区	$SD=66.09M^{0.988}Q^{0.178}C_A^{-0.151}$
华南丘陵区	$SD=0.127M^{0.076}Q^{1.698}$

根据输沙量预测方程, 预测 1990 年和 2000 年各类型区代表河流输沙量变化的趋势, 其结果如表 2 所示。

表 2 代表河流年输沙量变化趋势计算结果

类型区	代表河流的年输沙量					
	1980 年		1990 年		2000 年	
	量	比例	量	比例	量	比例
	/ 万 t	/ %	/ 万 t	/ %	/ 万 t	/ %
东北漫岗丘陵区	710	100	691	97. 3	672	94. 7
黄土高原区	61560	100	56600	91. 8	54200	88. 1
青藏高原区	1870	100	1523	81. 4	1362	72. 8
北方山地丘陵区	874	100	842	96. 3	778	89. 2
云贵高原及四川盆地区	53800	100	51100	95. 0	48200	89. 6
江南丘陵区	1350	100	1342	99. 3	1312	97. 2
华南丘陵区	5850	100	5750	98. 3	5690	92. 2

根据各类型区的面积和输沙模数, 进行加权平均, 求出全国水土流失的变化趋势, 即以 1988 年输沙模数为基础, 1990 年全国水土流失模数减少 9. 15%, 2000 年全国水土流失模数减少 13. 89%。

20 世纪 80 年代预测全国 1990 年和 2000 年水土流失趋势减少的主要原因一是假定水土流失治理进度加快, 二是认为 2000 前降雨基本上处于少雨期。

2. 4 区域水土流失定量评价

李锐等以地理信息系统(GIS)和遥感(RS)为基础, 对区域土壤定量评价的模型结构及参数提取方法进行了研究^[51, 52]。90 年代后期, 周佩华等结合西部环境演变的研究, 对黄土高原和长江上游未来 2010 年、2030 年和 2050 年的水土流失趋势进行了预测^[53]。李锐、杨勤科^[51, 52]等提出了黄土高原水土流失定量评价模型为:

$$L=0.4735P^{0.9282}S^{-0.0885}G^{2.2666}M^{0.07254}e^{-0.00047C}$$

式中: P ——汛期降雨量; G ——沟壑密度; S ——大于 0. 25 mm 风干土水稳性团粒含量; C ——植被盖度; 植被; M ——坡耕地面积比。

3 土壤侵蚀趋势预测——以黄河中游为例

20 世纪 90 年代景可和李矩章等^[54, 55]根据黄河中游侵蚀产沙的实际情况和土壤侵蚀因子的复杂性、各因子组合权重的可变性特点, 研发了一个模糊的宏观的变权区域水土流失趋势预测模型, 并以黄土高原为例, 对区域水土流失趋势进行了分析。

在进行 21 世纪中叶黄河中游入黄泥沙量分析时, 采用了四种方案。即第一方案是指未来黄河中游的粮食需求立足自力更生。未来由于人口增加, 许多地区为了得到最低限度的粮食供求, 还必须种一部分> 15 的坡耕地; 但是规划中的治沟骨干工程数量能按计划完成。第二方案是指耕种> 15°的坡耕地, 但治沟骨干工程只完成规划的 60% 任务。第三方案是指不耕种> 15 的坡地, 又能完成治沟骨干工程任务。第四方案是指不耕种> 15 的坡耕地, 但治沟骨干工程只完成规划任务的 60%。

利用第一种方案预测到 21 世纪中叶, 共同河中游入黄泥沙量是 8. 503 亿 t; 利用第二种方案预测的结果为 9. 903 亿 t; 利用第三种方案预测的结果为 6. 527 亿 t; 利用第四种

方案预测的结果为 7. 927 亿 t(表 3)。

表 3 不同条件下的入黄泥沙量^[54, 55] 亿 t/a

方案	预测侵蚀量 W_d	预测拦沙量 W_a	预测引沙量 W_f	预测入黄泥沙量 $W_d-(W_a+W_f)$
1	12. 286	3. 5	0. 283	8. 503
2	12. 286	2. 1	0. 283	9. 903
3	10. 381	3. 5	0. 283	6. 527
4	10. 381	2. 1	0. 283	7. 927

由表 3 所见, 到 21 世纪中叶黄河中游四个方案的入黄泥沙量比现在多年平均量分别减少 6. 097, 4. 697, 8. 073, 6. 673 亿 t, 即减少 41. 7%, 32. 2%, 55. 3% 和 44. 3%。必须再次说明一点, 表中四个方案的入黄泥沙量是指中游, 即河口镇至三门峡区间内流域输入黄河的泥沙总量。若要预测 21 世纪中叶输入黄河下游的泥沙量, 还必须考虑到下世纪中叶河口镇以上的来沙量。如果河口镇在未来几十年内能同中游相类似的减沙比例, 那么河口镇的来沙 0. 8~0. 9 亿 t。如果这个量可靠的话, 那么将表 3 中的入黄泥沙量加上河口镇的来沙量, 就是输入下游的泥沙量(表 4)。

表 4 输入黄河下游的泥沙 亿 t/a

方案	预测侵蚀量 W_d	预测拦沙量 W_a	预测引沙量 W_f	预测河口镇来沙量 W_1	预测入黄泥沙量 $W_d-(W_a+W_f)$
1	12. 286	3. 5	0. 283	0. 85	9. 353
2	12. 286	2. 1	0. 283	0. 85	10. 753
3	10. 381	3. 5	0. 283	0. 85	7. 377
4	10. 381	2. 1	0. 283	0. 85	8. 777

由表 4 所示, 输入黄河下游的泥沙量(出三门峡)分别比多年平均泥沙量 16 亿 t/a 减少 6. 647, 5. 247, 8. 623, 7. 223 亿/a。

综上所述下世纪中叶黄河中游侵蚀量和入黄泥沙量的变化完全取决于耕种> 15 坡耕地的数量和治沟骨干工程的进度。由于人、地矛盾和重点产沙区的脆弱自然环境难以改变, 在今后一个相当的时间内减少侵蚀量和入黄泥沙量仍是一个繁重的任务。

4 中国水蚀预报模型研究面临的挑战与任务

4. 1 我国水蚀预报模型研究面临的机遇和挑战

20 世纪 90 年代以来, 随着我国经济实力的增强, 党和政府提出从根本上解决历史上遗留下来的恶劣生态环境问题, 再造祖国秀美山川的战略决策。国家计委制定了《全国生态环境建设规划》。目前以水土保持为主要内容的生态环境建设正以前所未有的规模和速度扎扎实实地开展和实施。与此同时, 《中华人民共和国水土保持法》等法规中已明确要求水行政主管部门(水利部)对全国的水土流失与治理状况进行预报和定期公告。随着社会公众环境意识的加强, 全国水土流失与治理的基本状况将更加受到多方面得关注。同时, 近年来, 水土保持环境效应评价受到党和政府及公众的高度重视, 大型工程项目中水土保持方案的编制及水土保持

有效监督等,都为我国水蚀预报模型的研究带来了难得的机遇,同时也带来了严峻的挑战。

研发水蚀预报模型需要具备两个先决条件,一是通过对水蚀过程的深入研究和认识,揭示水蚀过程的动力机制,建立水蚀过程定量表达式,二是对影响水蚀过程的自然因素和人为因子进行系统观测和积累,而我国在这两个方面都还有一定差距,还难以满足水蚀预报研究的实际需要。

我国是世界上水土流失最严重的国家之一,并且由于我国地形复杂,受各种人类活动的深刻影响,使我国的水土流失独具特色。国外土壤侵蚀预报研究成果,还不能完全反映我国复杂的水土流失问题。另外,我国地域辽阔,各地自然与人文背景差距巨大,水土流失特征各异,更增加了研究工作的难度。但是,也正是这些为我们针对中国水土流失特点创造性开展侵蚀预报模型研究工作并取得突破性进展提供了很好的条件。

我国从 20 世纪 40 年代就已开始对水土流失进行监测,到目前为止,已布设了不少各类监测网、站、点,并取得了一定的监测资料。然而,由于我国固有的国情,以往对该项工作并没有给以高度重视,经费投入严重不足,设备简陋,缺乏统一组织与规划,从而导致各地、各时期、各部门大多是根据自己的研究目的设置有关监测,不仅监测标准不统一,方法不一致,内容不相同,使得监测资料不具可比性,而且监测的空间布局不合理,没有代表性,有些地区还是空白,不能反映出区域土壤侵蚀的特征与规律。这给我国侵蚀预报模型的研究带来了严峻的挑战。

当前,在机遇与挑战并存的情况下,如何迎接挑战,如何既满足生产实际的迫切需求,又能开展水蚀预报模型的前沿研究,是摆在我们面前首先需要解决的战略问题。

4.2 我国水蚀预报模型研究的战略

根据国外水蚀预报模型发展的趋势与开发研制的成功经验、国内水蚀预报模型研究的现状及国家需求,建议目前集中研究水蚀预报模型。模型开发过程中,应将开发坡面土壤侵蚀预报模型、流域水蚀预报模型和区域水土流失评价模型相结合,结合应用 RS 和 GIS 技术,建立标准化的全国水土流失数据库,为水土流失定量评价提供技术工具,为水土保持决策提供科学依据。

(1) 瞄准国家目标和学科发展前沿,制定近期目标和长期目标。我国水蚀预报模型研发既要考虑我国水土保持和生态环境建设对土壤侵蚀预报模型的要求,又要充分考虑土壤侵蚀学科领域发展的最新国际动态,同时还要考虑水土保持执法和高层决策的需求,制定我国水蚀预报模型研发的近期目标和长期目标。

(2) 总体设计,分期实施。由于中国水土流失面积大、分布范围广、治理任务重,各地区之间具有较大的差异。在不同的经济发展阶段,水土保持的基本思路也将具有差异。所以,作为土壤侵蚀防治、水土保持措施布设和规划设计的支持工具,必须基于土壤侵蚀研究的最新成果,在较高的层次上做

出统一的、先进的和符合国情的总体顶层设计,然后分阶段甚至分地区组织实施模型的开发。只有这样,才能使土壤侵蚀预报和调查成果具有时间上、空间上的可比性,才能使研究成果工作具有连续性和继承性。

(3) 研发适用于不同目标的侵蚀模型。在我国水土保持事业和水土保持实践对土壤侵蚀预报模型的需要是多方面、多层次的。从水土保持实践而言,包括对于田间规划支撑工具的需求,大、中流域水土保持规划的要求,国家水土保持和生态环境建设宏观决策的需求等。从科学研究而言,包括研究揭示不同空间尺度(坡面、小流域、区域)的土壤侵蚀规律、阐明土壤侵蚀和水土保持与区域和全球环境变化的响应关系。特别是我国土壤侵蚀环境,土壤侵蚀类型表现出多种尺度、十分复杂的区域组合和分异规律。因此,研发我国水蚀预报模型,必须根据我国侵蚀环境特征,开发研制适用于不同目标不同尺度的水蚀预报模型。只有这样,才能使侵蚀预报模型为水土保持和生态环境建设规划、水土保持效益评价和水土保持执法提供支撑。

(4) 统一指导、分工协作。我国水蚀预报模型研发是一个庞大的系统工程,所以必须建立统一协调和组织机制,调动全国各地区、各部门研究力量和积极性,分工协作共同完成。也可以动员参加研究开发的机构包括水土保持行业机构(水土保持试验观测机构及其技术人员、地方水土保持主管部门、流域管理机构、各级水土保持监测机构)、水文气象观测站网、高等院校(农林、地理等院系)、研究所(国家研究所和地方研究所)等。国外土壤侵蚀预报模型的开发成功经验之一就是统一指导、分工协作。

4.3 我国水蚀预报模型研究的目标与任务

4.3.1 总体目标

立足于国家和区域水土保持和生态环境建设规划、决策和水土保持行政执法的需求,瞄准学科前沿,借鉴和吸收国际上水蚀预报模型研究的成功经验和教训,系统总结我国水蚀预报模型研究的成果,借助 GIS 等技术,建立中国水蚀预报模型。

4.3.2 近期目标

充分考虑我国侵蚀环境的复杂性及研发水蚀预报模型的难度,收集全国不同水蚀类型区土壤侵蚀试验观测、水文泥沙观测和土壤侵蚀研究等方面的数据,建立标准化的国家土壤侵蚀数据库。结合观测资料分析和水蚀过程的研究成果,提出我国水蚀预报模型的基本结构,并对模型参数表述及其标准化进行系统研究。选择我国主要水蚀区研究开发不同空间尺度的水蚀预报模型,为田间水土保持规划、流域管理、区域和国家水土保持与生态环境建设提供技术支撑,实现对全国水土流失定期公告,预测大型工程建设对区域环境的影响。

4.3.3 水蚀预报模型研发的任务

(1) 坡面土壤流失预报模型开发:以陡坡地已有的土壤流失预报模型为基础,结合 USLE 在我国推广应用及坡面土壤侵蚀过程的研究成果,借助 GIS 技术建立全国水土流失标准化数据库,开发坡面土壤流失预报模型,为田间土地

利用和水土保持规划提供支持工具。

(2) 小流域土壤侵蚀预报模型开发: 以小流域地块预报模型和过程预报模型为基础, 基于对小流域水蚀过程, 特别是沟蚀过程和重力侵蚀的研究, 建立小流域水蚀过程定量表达式; 基于对坡面、坡面与沟道水沙汇集传递关系的研究, 提出水沙汇集传递关系分析的技术和方法, 开发在 GIS 支持下的估算小流域侵蚀产沙时空分布的侵蚀预报模型, 为小流域水土保持措施配置、坝库工程设计、流域管理和健康诊断等提供支持工具。

(3) 区域水土流失评价模型: 以区域水土流失评价模型为基础, 基于对区域土壤侵蚀时空相关特征的和尺度转换的研究, 充分利用全国水文站观测资料, 建立区域水土流失评价模型, 为水土保持生态环境效应评价、大型工程建设对区域环境的影响评价、水土保持执法和国家宏观决策提供科学支持。

参考文献:

[1] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm planning. Trans. 7th International Cong[J] . Soil Sci, 1960, I: 418– 425.

[2] Wischmeier W H. Use and misused of the universal soil loss equation[J] . J Soil and Water Cons, 1976, 31(1) : 5– 9.

[3] Meyer L D. Evolution of the Universal Soil Loss Equation[J] . J. Soil and Water Cons, 1984, 32(2) : 99– 104.

[4] Renard K D, Forste G D, Weesies G A. Prediction rainfall erosion by water: a guild to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)[S] . USDA Agricultural Handbook No. 703, 1997.

[5] 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] . Trans. ASAE, 1989. 32: 1587– 1593.

[6] USDA – Water Erosion Prediction Project. NSERL No. 2. National Soil Erosion Research Laboratory[R] . USDA – ARS. West Lafayette.

[7] Flanagan D C. WEPP CD– ROM[M / CD] . 2001 Vision.

[8] Dept. of Physical Geography, Univ. of Utrecht. LISEM . A User Mannual[S] . 1995.

[9] 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. II: sensitivity analysis, validation and application[J] . Hydrological Processes, 1996, 10: 1107– 1118.

[10] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM) : documentation and user guide[S] . Silsoe College, Cranfield University, 1998.

[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] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow[M] . IAHS publication, 1990. No. 189. 45 – 63.

[13] Everaert W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow[J] . Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 513– 532.

[14] 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.

[15] 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– 1118.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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, 24(4) : 353– 372.

[19] Favis – Mortlock D T, Boardman J, Parsons A J, et al. Emergence and erosion: a model for rill initiation and

我国水蚀预报模型的研究和开发是一个庞大科学研究系统工程, 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、林学、社会学、GIS、计算机科学等多学科。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, 并组建研究队伍, 集中研究解决预报模型研制开发过程中的科学问题。力争在 4 ~ 5 年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 ~ 8 年的时间开发研制分布式流域水蚀预报模型。另外, 水利部最近制定了全国统一的《水土流失统一监测规程》, 侵蚀预报模型的研发应与该项监测工作密切合作。同时, 还应抽出一定力量进行与水蚀预报模型有关的土壤侵蚀机理方面问题的探讨, 但一定要有统一规划, 分工合作, 互相配合。

development[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(6) : 2173– 2205.

- [20] Groundwater, P. The influence of model resolution on rill development: A numerical modelling study[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(6) : 2173– 2205.
- [21] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion[J]. Catena, 1999, 37(2) : 393– 399.
- [22] 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.
- [23] Sidorchuk Aleksey, Sidorchuk Anna. Model for estimating gully morphology[M]. IAHS publication, No. 249, 1998. 333 – 343.
- [24] Sidorchuk A. Dynamic and static models of gully erosion[J]. Catena, 1999, 37(3– 4) : 401– 414.
- [25] Woolhiser D A, Smith R E, Goodrich D C. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual[S]. USDA– Agricultural Research Service, 1990, ARS– 77: 130.
- [26] 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.
- [27] 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, No. 249, 1998. 53– 61.
- [28] 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.
- [29] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[A]. 见: 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 207– 275.
- [30] 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拟[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108– 116.
- [31] 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.
- [32] 吴礼福. 黄土高原土壤侵蚀模型及其应用[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 29– 35.
- [33] 张宪奎, 许靖华, 邓育江, 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.
- [34] 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) : 261– 253.
- [35] 杨武德, 陈宝林, 徐锴. 红壤坡地不同利用方式土壤侵蚀模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 52– 58.
- [36] 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.
- [37] 黄炎和, 卢程隆, 付勤, 等. 闽东南土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4): 13– 18.
- [38] 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, 9(1): 25– 30.
- [39] 金争平, 赵焕勋, 和泰, 等. 皇甫川小流域土壤侵蚀量预报模型方程研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 8– 18.
- [40] 金争平, 高志明, 王正文, 等. 皇甫川流域小流域地块土壤侵蚀预报模型及其应用[A]. 见: 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[C]. 北京: 海洋出版社, 1992. 60– 84.
- [41] 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研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 22– 27.
- [42] 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.
- [43] 江忠善, 宋文径. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[A]. 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 光华出版社, 1980. A3– 1– A3– 10.
- [44] 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[A]. 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集[A]. 北京: 光华出版社, 1980. A4– 1– A4– 10.
- [45] 尹国康, 陈钦峦. 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) : 32– 45.
- [46] 范瑞瑜. 黄河中游地区小流域土壤流失量计算方程的研究[J]. 中国水土保持, 1985, (2): 12– 18.
- [47] 王星宇. 黄土地区流域产沙数学模型[J]. 泥沙研究, 1987, (3): 55– 60.
- [48] 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.
- [49] 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[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [50] 周佩华, 李银锄, 黄义端, 等. 2000 年中国水土流失趋势预测及其防治对策[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 第 7 集: 57– 71.
- [51] 胡良军, 李锐, 杨勤科, 等. 基于 GIS 的区域水土流失评价模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1) : 1– 8.
- [52] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 169– 174.
- [53] 周佩华, 柴宗新, 刘万钊, 等. 黄土高原与长江上游地区水土流失变化趋势预测[A]. 见: 丁一汇. 中国西部环境演变评估[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 114– 139.
- [54] 李矩章, 景可, 李凤新. 黄土高原多沙区侵蚀模型探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 46– 53.
- [55] 景可, 李矩章, 李凤新, 等. 黄河中游侵蚀量及趋势预测[J]. 地理学报, 1998, 53(增刊) : 107– 115.