

黄土区小流域土壤侵蚀模型系统解析

李清河¹, 李昌哲¹, 齐实², 孙立达²

(1. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 针对黄土高原小流域土壤侵蚀的特点, 对建造土壤侵蚀量模型系统进行了分析。首先对土壤侵蚀量模型过程进行了描述; 其次对土壤侵蚀量模型的发展和两种模型类型进行了比较, 并对分布型参数模型进行了时间和空间上的全分布型结构设计分析; 最后指出建造分布型参数的土壤侵蚀量模型系统所具有的很多优点, 它反映了当前土壤侵蚀研究的发展趋势。

关键词: 黄土高原 小流域 土壤侵蚀模型

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X (2000)01-0028-04 **中图分类号:** S157.1

Soil Erosion Model System of Small Watershed in Loess Area

LI Qing-he¹, LI Chang-zhe¹, QI Shi², SUN Li-da²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, PRC;

2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, PRC)

Abstract In accordance with the characteristics of soil erosion of small watershed in the loess plateau, the problem on building the soil erosion model system was analyzed. Firstly, the processes of the soil erosion model were described. Secondly, the development of the soil erosion model was discussed, the two model types were compared, and the structure of the distributed parameter model spatially and temporally were designed and analyzed. Lastly, many merits of the distributed parameter model system were indicated, which reflected the development trend of the present soil erosion research.

Keywords loess area; small watershed; soil erosion model

土壤侵蚀量的定量评估与预测一直是水土保持学界在近 50 a 来不断探索研究的重点。土壤侵蚀是一个复杂的物理过程, 对其机理的研究有助于寻求更为合理、实用的土壤侵蚀预测模型。土壤侵蚀量预测能为水土保持规划提供基值, 为评价土壤侵蚀的速度和强度提供指标, 为制定、发展和实施水土保持法规条令提供参考。

1 小流域土壤侵蚀模型系统及其运作

土壤侵蚀是发生在地表的一个相当复杂的过程, 伴随着的是能量和物质的转移。水土流失是由于系统物质、能量过剩引起的, 物质过剩是水土流失的基础, 能量过剩是水土流失的根源。如果从系统论的观点看, 它实际上是系统内各因子相互作用相互影响导致系统总功能(侵蚀)的体现。侵蚀是引起地表物质迁移的外因, 也是塑造地形的主要因素。通过侵蚀作用, 才能引起土壤(表土)和基岩(岩石圈)的破坏。因此, 它是流域系统物质侵蚀、搬运和沉积过程的主要环节, 也就是说, 只有有了侵蚀, 才会有流域系统的产沙、输

沙和滞沙过程。比如, 一个小流域, 地表土层在降雨、重力等营力作用下发生侵蚀、搬运和堆积, 构成了一个完整的流域侵蚀系统^[1]。

水土流失是一个世界性的普遍环境问题, 而中国的黄土高原素以侵蚀模数高而著称于世。严重的水土流失给该地区农业生产造成严重破坏和威胁, 给人民群众生存生活环境造成巨大损害^[8]。黄土高原的流域地貌复杂, 地形变化大, 构成土壤侵蚀的外在动力; 而水是构成土壤侵蚀的内在动力。这样内外动力造成黄土区流域往往发生强烈的土壤侵蚀。

土壤侵蚀是指由水或风所引起的土地表面物质的移动。在我国黄土高原地区的小流域, 土壤侵蚀主要为水蚀, 其土壤侵蚀过程的复杂性可被表示成一个开放的动态系统, 该系统的功能由水和泥沙的运动来确定。沟道和坡面侵蚀是该系统的主要因素。但是不论沟道侵蚀还是坡面侵蚀, 由降雨引起的土壤流失大致可以分成两个过程: 一是土粒从土体中被分离; 二是分离出的土粒被冲走。雨滴降落到地表, 引起土壤

击溅分离,一部分雨水渗入地下,另一部分形成地表径流

根据我们在黄土高原小流域土壤侵蚀的实验及观测结果,可以得出这样的结论:水土流失过程中的泥沙大部分来源于雨滴击溅从土体中分离出来的土粒,输运是由径流来完成的,而径流挟带泥沙的紊动能主要靠雨滴击溅来供给。

为此我们在黄土高原地区土壤侵蚀量模型构造时,考虑了雨滴和地表径流两种作用力。因此流域土壤侵蚀是由地表径流和泥沙运动确定的。因此土壤侵蚀模型,应该包括水文模型和泥沙模型。泥沙模型的结构是土壤流失模型描述,它的降雨击溅动能和地表径流量是由水文模型提供的;而泥沙模型分为两个组成成分:分离和输移,而分离又包括雨滴击溅分离和地表径流分离。上述每种组成成分的动力性可用基本的水力学、水文学、气象学和其它物理关系加上描述影响侵蚀的土壤特性的参数进行描述,其土壤侵蚀模型系统如图 1 所示。从整体上来看,以这种方式构模,就能模拟整个侵蚀系统中的积极响应^[5]。

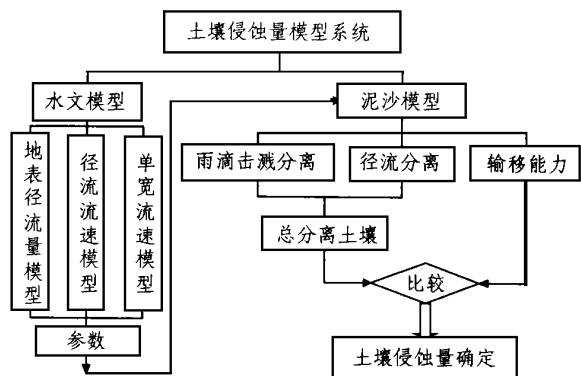


图 1 流域土壤侵蚀模型系统

2 流域土壤侵蚀量的概念及模型分类

在土壤侵蚀理论中,土壤侵蚀量、土壤流失量和产沙量是一组概念完全不同的术语^[2,3]。土壤侵蚀量是指在雨滴分离或径流冲刷作用下,土壤移动的总量;土壤流失量是指土壤离开某一特定坡面或田间的数量;产沙量是指迁移到预测点的土壤流失量。

作为对土壤侵蚀过程的深入理解,土壤侵蚀量预报技术已经提出多年了,并且不断地进行了深入的侵蚀研究,提出了许多土壤侵蚀模型。模型经常被定义为一种事物或过程的微型表示。因此环境规划模型可被定义为一个规则集,通常是数学关系式,它试图定

量描述环境变量集的行为和相互作用。在土壤侵蚀建模上,现已出现了从计算单一坡面的土壤侵蚀模型,例如 USLE(Wischmeier and Smith, 1978),向估算流域内的土壤侵蚀和沉积模型转移,从经验性模型向分析性、确定性模型的转移。因此我们把土壤侵蚀模型可划分为经验性模型和确定性模型。经验性模型是基于侵蚀过程的重要因子的统计分析,一般不考虑侵蚀过程,只产生大概可能的结果;而确定性模型用物理数学关系描述侵蚀过程,在理论上较之经验模型更为精确^[4]。

确定性模型又可分为集总型参数模型和分布型参数模型。它们之间的区别在于对侵蚀过程的不同描述。集总型参数模型描述流域的总体或平均行为,试图通过计算整个流域的有效值评价空间变化参数的影响。常见的方法是面积加权平均。模型构造者试图把所有的空间非一致性影响集总或浓缩进数学上的等面积点的系数值。而分布型参数模型反映的是土壤侵蚀的时空变化过程,它还能兼容小区试验研究出的关系。它试图把参数变化的流域分布数据和计算算法进行合并以评价这种在模拟行为上的分布的影响。因为在现实世界中的变化可以是无限尺度的,因此所有的分布型参数模型在估计空间变量时在一定程度上可以进行参数集总。总之,集总型参数模型试图通过在允许精度范围内采用有效的参数值估计空间影响以减少土壤侵蚀模拟的计算需求量。另一方面,分布型参数模型试图通过保持和利用有关并入模型的所有空间非一致性过程的流域分布信息来增加侵蚀模拟的精度。鉴于以上特点,分布型模型更能正确反映自然小流域的行为。它能同时模拟流域内所有点的条件,预报流域范围内水文条件的空间结构以及简单的出流和泥沙储存量。在近些年来,随着地理信息系统的引入和现代计算机的内存大小和速度的不断提高,分布型参数模型才变得具有实用性^[4,6]。

3 流域土壤侵蚀模型系统的结构分析

我们在设计流域土壤侵蚀系统模拟时,就其专业模型——流域土壤侵蚀量模型而言,主要采用分布型参数模型,因为分布型参数模型具有以上优点,并且该模型若要和地理信息系统进行松散耦合,可以使其发挥模型特长。另外从整个侵蚀系统模拟来说,主要解决流域空间范围内的土壤侵蚀状况,并反映流域土壤侵蚀的时间分布,力争使系统全面反映流域的土壤侵蚀时空分布^[5]。整个流域土壤侵蚀量模型系统的结构设计如图 2 所示。

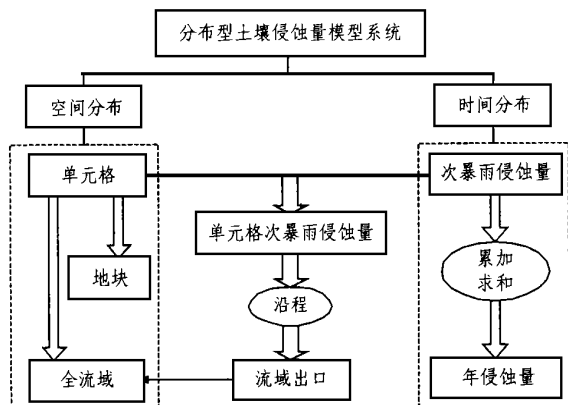


图 2 流域土壤侵蚀量模型系统结构

3.1 流域土壤侵蚀量的时间分布模型系统

流域产沙是一个十分复杂的过程,它的影响因素很多,主要有降雨、地形、土壤性质、植被等。而在我国黄土高原地区,黄土土质松软,抗蚀性低,一旦有降雨出现,大量的泥沙随径流进入沟道。降雨尤其是暴雨则是该地区产沙的主要影响因子。有关学者做过大量的研究表明:该区 1a 内的侵蚀产沙量常由几次大的暴雨洪水造成,一场暴雨的侵蚀产沙量常常占到全年产沙量的 40%~60%。因此,定量地研究该地区次暴雨的土壤侵蚀量,建立适合于该地区的土壤流失量预报方程式,可为该地区的产沙预报、水土保持流域综合治理提供理论依据。因此我们在侵蚀系统模拟的时间分布上以次暴雨引起的土壤侵蚀作为基准,这样即可满足流域综合治理规划的需求。在综合考虑其他水文产流数学模型的基础上,考虑到侵蚀系统模拟的要求,在产沙模型的基础——产流模型的选择上,不采用连续性方程,而采用了较简单的 SCS 产流模型,因为我们不需要模拟整个降雨过程中的水沙变化情况,没必要用连续性方程而增加参数及计算难度。因而侵蚀系统模拟的时间分布也不是以整个降雨过程的每个时间段作为模型模拟的基准。当然,若想实时监控水文及土壤侵蚀泥沙的发生发展过程,在此可以采用连续性方程,然后选取一定的时间段进行模拟。

另外在水土保持的流域综合治理工作中,很有必要知道流域的年土壤侵蚀量,而且在现实生活中,人类的农业生产、林牧等流域子系统的活动多以 1a 为一个周期,而这些活动及其变化与整个流域的土壤侵蚀状况密切相关,因此有必要知道流域年土壤侵蚀量,了解土壤侵蚀量的年际变化。那么如何计算流域的年土壤侵蚀量,美国的通用水土流失方程式 (USLE— Universal Soil Loss Equation) 就是估算年土壤流失量的。我国学者在过去也经常用 USLE 来估

算流域年土壤流失量。但根据我国黄土高原土壤侵蚀的特点,土壤侵蚀主要集中在降雨期发生的暴雨。因此我们在进行年土壤侵蚀量计算时,用次暴雨土壤侵蚀量模型逐场暴雨计算,然后把全年各场暴雨的土壤侵蚀量累加起来,就得到年土壤侵蚀量。这种方法不仅考虑了大暴雨,而且还考虑了中小暴雨,特大暴雨的土壤侵蚀量是非常可观的,有时占全年侵蚀量的 50% 以上。单场中小暴雨虽然没有特大暴雨产生的泥沙多,但中小暴雨出现的频率很高,其产沙也不少,另外用次暴雨土壤侵蚀量模型计算流域的年土壤侵蚀量,也是对该模型的一种验证。

因此我们在设计土壤侵蚀量的时间分布侵蚀系统模拟时,考虑了其次暴雨和年土壤侵蚀量两种时间分布,这已基本满足了流域综合治理规划的需要,足以为进一步构建的流域综合治理开发信息系统的其余子系统提供基础数据。

3.2 流域土壤侵蚀量的空间分布模型系统

为了深入进行土壤侵蚀的发生、侵蚀土壤的迁移转化和侵蚀的影响等过程的规律以及对水质的影响等方面的研究,充分吸取国外小流域治理的先进经验和技术,拓宽我国小流域治理的内容和思想。我们把土壤侵蚀作为一种非点源污染进行考虑。这就有必要了解土壤侵蚀在流域范围内的空间分布,以确定侵蚀泥沙在流域内的具体来源以及流域内的重点侵蚀与产沙区,对水土保持流域综合治理规划等方面都有重要的实际意义。

为此我们在设计流域土壤侵蚀量的空间分布时,采用栅格构造模型系统的基本思路。首先以每个栅格的土壤侵蚀量反映流域空间内某个点的土壤侵蚀状况,其侵蚀量方程采用含反映栅格尺寸及栅格内的侵蚀因子的分布型参数方程。然后借助 DEM 分析部分所提供的水流方向水文计算顺序把它沿程推算到流域出口,这样便得出整个流域的产沙量。另外在我们的流域治理规划中,通常需要知道流域内每个地块的土壤侵蚀量。地块是流域规划治理的最小单位图斑。为了计算地块的土壤侵蚀量,我们拟采用面积加权的方法,因为栅格在本套侵蚀系统模拟中是计算的基础,将流域地块图栅格化以后,统计每个地块内有多少个栅格,然后根据面积权重得出每个地块的土壤侵蚀量。因此在对土壤侵蚀量模型做空间分布设计时,以栅格为计算基准,可沿程到流域出口得出全流域产沙量,另外可以栅格为基础进行面积加权求和,以得出地块的土壤侵蚀量。采用这种三级空间分布模拟土壤侵蚀,可提供大流域尺度的重要的空间细节。

采用离散化的栅格方法只是为了模拟流域空间内某个具体位置的土壤侵蚀状况,当然流域内土壤侵蚀因子属性的自然变化很少整齐地降落在栅格内,但在流域的地块划分上包括了同类单元的不规则形状,它基本反映了流域内属性的自然变化,因此作为流域治理规划的最小单位,地块的不规则性在地表水流泥沙从一个单元到另一个单元的沿程路径中通常不被采用^[7]。因此本项研究开发的这种流域水文、侵蚀建模的方法,既具有栅格化单元格的空间可变性,又充分体现了流域不规则地块侵蚀状况的空间变化,并且还保留了沿途路径的空间可变性。所以这种水文侵蚀建模的方法,充分反映了侵蚀状况的空间分布,构造了一个侵蚀量模型的空间分布模型系统

4 流域土壤侵蚀量模型建立的意义

土壤侵蚀量是流域内被侵蚀土壤的数量表示。对此我们可以通过野外调查获得,也可通过数学模型计算求得。但是通过野外调查来测量土壤侵蚀过程和评价土壤侵蚀的影响是一项困难且需耗费大量人力物力的工作。这是因为:(1)在整个流域内土壤侵蚀的来源是巨大的,且流域范围小至小块农田,大至大型流域集水区,因而要定量评价土壤侵蚀程度和数量是困难的;(2)土壤侵蚀是多因素综合作用的结果,包括各种自然因素和社会经济人为因素,难以全面考察土壤侵蚀的影响因素;(3)从一个地方得出的土壤侵蚀量关系难以外推到其他无测站的流域,开发和评价所有潜在侵蚀控制的方法是不可行的。

自从 20 世纪 60—70 年代,数学模型已在水文学和流域管理中广泛应用。同样在土壤侵蚀研究中运用数学模型模拟流域内的土壤侵蚀过程是一项有意义的工作。同时计算机技术也不断提高,更使数学模拟模型变得可行。它有助于克服野外调查方法的上述困难。数学模拟模型的优点主要可概括为如下:(1)模型是自然系统的抽象。许多不容易测量的过程可用有一定假设的数学算法进行描述。因此,它们有助于提高对真实系统的理解;(2)模型可用于把个别过程放大到大比例,因此它们是进行数据综合和研究整个系统(如流域等)在多重时间尺度上对多重压力(如土地利用变化、气候变化等)的响应的有效工具;(3)模型有益于绝对预测,有助于对自然和人文影响分析;模型也可重复运行以模拟不同情况下的相对响应;(4)模型可能是高成本,甚至是对培训模型构造者是

耗费财力的,但数学模型被认为是规划任何水土保持措施的影响、规划水资源、设计水质和水文系统的最有效工具。

综上所述,构造数学模型模拟土壤侵蚀过程,计算土壤侵蚀量具有比野外调查更多的优点,而且它恰好也便于与计算机技术相结合,发挥计算机运算速度快的特长,以解决数学模型的计算问题。另外也便于和其它计算机软件,如地理信息系统相连,完成更复杂的工作,因此其意义是重大的。

定量估算径流量和土壤侵蚀量,不仅在科技界,而且各地政府也是十分感兴趣的。在对黄土区流域进行综合治理规划时,以往的作法都是估算整个流域的土壤侵蚀量,而并不清楚侵蚀土壤在空间的分布,即流域空间内具体位置的土壤侵蚀量,这样的土地规划很不全面。现在对于土地利用规划者来说,最好需要知道侵蚀控制措施的类型和最终地理位置。因此在规划土壤侵蚀的控制措施时应该使用的一个最有效工具是一个精确的综合性侵蚀模型。它能精确地计算流域空间内某个位置的土壤侵蚀状况并可进行查询,实现计算机化的土壤侵蚀及流域治理监测,以便为生产单位服务,为黄土区综合治理及总体规划、水利水电工程与生物工程的配置设计提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] Walling D E, Davies T R, Hasholt B(ed). *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions* [M]. International Association of Hydrological Sciences, Publication No. 209.
- [2] 宋桂琴. 谈水土流失、土壤侵蚀两概念的区别与联系 [J]. 中国水土保持, 1997(2): 49—49.
- [3] [英] M. J. 柯克比, R. P. C. 摩根著, 王礼先, 吴斌, 洪惜英译. 土壤侵蚀 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [4] 陈一兵. 土壤侵蚀建模中 ANSWERS 及地理信息系统 ARC/INFO 的应用研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 1—13.
- [5] 李清河. 黄土区小流域土壤侵蚀系统模拟的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 1998. 61—67.
- [6] 李纪人. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用 [J]. 水文, 1997(3): 8—12.
- [7] Whittaker A D, Wilfe M L, etc. Object-Oriented Modeling of Hydrologic Processes [J]. AI Applications, 1991, 5(4): 49—58.
- [8] 田守岗, 于立芬. 山丘区小流域降雨侵蚀及产沙模型研究 [J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 18—22.