

土壤侵蚀模型研究进展

刘 光

(北京大学城市与环境科学系, 北京 100871)

摘 要: 国内外土壤侵蚀模型的发展过程, 可以大致划分为经验统计模型、物理过程模型与分布式模型三个阶段。就这三个阶段, 介绍了国内外土壤侵蚀模型的研究成果。并将地理信息系统(GIS)在土壤侵蚀模型中的应用分为三类, 一是以 GIS 为工具, 利用 GIS 提取模型所需因子, 然后按照模型要求利用 GIS 的图形运算和地图代数运算, 最后得到计算结果。二是将 GIS 与土壤侵蚀模型作为两个不同的系统, 考虑结合方法的问题。三是利用 GIS 开发新的模型或改善已有模型。

关键词: 土壤侵蚀; 侵蚀模型; 地理信息系统; 研究进展

中图分类号: S157.1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)03-0073-04

A Review of the Soil Erosion Model

L U Guang

(Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The development of the soil erosion model can be divided into empirical model, physical process model and distributed model period. The researchers' development on the three periods was discussed. And more, according to the function of geographical information system (GIS) in soil erosion model, the application of GIS was divided into three categories. The first category uses GIS as tool to extract factors of the models, and then uses map algebra of GIS to compute the soil erosion. The second category views GIS and soil erosion model as two divided system and makes attempts to integrate them. The last category develops new soil erosion models or improves original models using GIS.

Key words: soil erosion; erosion model; geographical information system; research review

土壤侵蚀模型研究是世界上土壤侵蚀学科的前沿领域与土壤侵蚀过程定量研究的有效手段。国内外土壤侵蚀模型的发展过程, 可以大致划分为经验统计模型、物理过程模型与分布式模型三个阶段。这三个阶段并没有严格的时间上的区别。自从 1877 年德国土壤学家 Ewald Wollny 量化研究土壤侵蚀开始^[1], 到 20 世纪 60 年代美国通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 的建立, 这一阶段的研究基本上是经验性的。60 年代以后, 随着侵蚀机理的发展, 逐步建立了一些有物理成因基础、能模拟侵蚀物理过程的数学模型。但是, 由于土壤侵蚀问题涉及面广, 侵蚀基本规律中有许多问题仍然不清楚, 物理模型中仍然具有深刻的经验统计的烙印, 基本上都是将整个流域视为一个整体进行研究的集总式模型^[2]。90 年代以后, 地理信息系统和遥感科学的发展及其在土壤侵蚀模型中的广泛应用, 不仅可以使土壤侵蚀模型与 GIS 集成起来, 方便预测预报土壤侵蚀, 更为重要的

是将土壤侵蚀模型由传统的集总式发展到分布式高度。

1 经验统计模型

土壤侵蚀经验统计模型的发展过程可分为四个阶段, 第一阶段是从 1887 年开始到 USLE 出现之前, 属于单因子模型阶段, 第二阶段是从 1965 年 USLE 问世到 80 年代初期, 在这一阶段, USLE 占据主导地位, 深刻影响了世界各地土壤侵蚀模型研究的方法和思路。第三阶段是从 80 年代初期到 RUSLE 的完成。第四阶段主要是将经验统计模型与 GIS 结合。

美国通用土壤侵蚀模型 USLE 是土壤侵蚀研究过程中的一个伟大的里程碑, 它是 W. Wischmeier 与 D. Smith^[3]在对美国东部地区 30 个州 10 000 多个径流小区近 30 年的观测资料进行系统分析基础上得出的, 方程如下:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

收稿日期: 2003-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于 GIS 的现代黄土地貌演化过程动态仿真研究”(40071064)。

作者简介: 刘光(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向为地理信息系统、地质灾害等。

式中: A —— 年土壤流失量。该方程比较全面的反映了影响坡面土壤侵蚀的主要自然与人为因素; 其中 R —— 降雨侵蚀力因子; K —— 土壤可蚀性因子; LS —— 坡度与坡长因子, C —— 作物覆盖与管理因子; P —— 水土保持措施因子。

由于 USLE 考虑因素全面, 因子具有物理意义、形式简单, 所用资料广泛, 统一了土壤侵蚀模型形式, 因此不仅在美国而且在全世界得到了广泛应用。但是该模型使用数据主要来自美国洛基山脉以东地区, 仅适用平缓坡地, 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, 缺乏对侵蚀及其机理的深入剖析。因此 1985 年美国农业部决定组织科学家对 USLE 进行修改, 到 1997 年正式完成, 建立了 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)^[4]。RUSLE 与 USLE 的结构相同, 但对各因子的含义与算法做了修改, 例如, 扩大了作物管理因子的内涵; 地形因子考虑细沟侵蚀与细沟间侵蚀比率等^[4,5]。

在 20 世纪 80 年代以前, 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, 在土壤侵蚀类型及其分布、单因子对土壤侵蚀的定量影响、土壤侵蚀相关概念进行了大量的研究, 建立估算次降雨土壤侵蚀量的统计模型。80 年代以后, 以美国通用土壤流失方程 USLE 为蓝本, 根据其基本思想与各研究区的实际情况, 计算各因子值, 建立了许多地区性的土壤侵蚀预报模型。在各侵蚀因子的定量研究中, 目前比较成熟的是对降雨因子和地形(坡度、坡长)因子的研究, 植被与水保措施因子研究较弱^[6]。

刘宝元等根据 USLE 的建模思路, 以及我国水土保持措施的实际情况, 提出中国土壤流失预报方程, 将 USLE 中的作物与水土保持措施两大因子, 变为水土保持生物措施、工程措施与耕作措施三个因子, 公式如下:

$$A = R \times K \times LS \times B \times E \times T$$

前几个因子的意义与 USLE 中对应因子的意义相同, 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。

江忠善等^[7]将沟间地与沟谷地区别对待, 分别建立侵蚀模型。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、植被与水土保持措施的影响以修正系数的方式进行处理。该模型最大的优点在于考虑了黄土坡面特有的浅沟侵蚀类型。

吴礼福^[8]综合考虑气候、水文、地貌、土壤、植被及土地利用等因素, 以 DTM 上的最小沟谷单元为侵蚀的基本单元, 并把坡面侵蚀与沟谷侵蚀分别处理, 提出一种新的定量模型来计算黄土高原地区的土壤侵蚀。

2 物理过程模型

经验统计模型主要用于估算某一区域、一定时期内的平均侵蚀量。随着研究的深入和人们对流域泥沙自然机制认识水平的不断提高, 这类研究的不足越来越清晰地显露出来^[3]。物理过程模型从产沙、水流汇流及泥沙输移的物理概念出发, 利用各种数学方法, 结合相关学科的基本原理, 根据降雨、径流条件, 以数学的形式总结出土壤侵蚀过程, 预报在

给定时段内土壤侵蚀量。

为解决 USLE 中存在的不足与限制, 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项目 (WEPP: Water Erosion Prediction Project) 的研究。WEPP 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。WEPP 是以随机天气生成模型、入渗理论、水文学、土壤物理、作物科学、水力学和侵蚀力学为基础开发的, 包含坡面、流域与网络三个版本。WEPP 可以预报每天或单次由于降雨、融雪以及灌溉所引起的土壤流失与沉积, 还可以计算月、年平均径流与泥沙运移情况。它由 9 个部分组成: 气候产生(用气候发生器模拟日降雨量、降雨历时等气候要素)、冬天过程、灌溉、水文、土壤、植物生长、残茬分解、地表水流、侵蚀与沉积。地表水文模型使用动力波公式计算地表径流与洪峰流量。WEPP 模型将整个流域划分为坡面、渠道与拦蓄设施 3 部分。坡面侵蚀包括细沟侵蚀与细沟间侵蚀, 从细沟间到细沟的泥沙通过如下的方程计算^[9]:

$$D_i = K_i \times I_e^2 \times G_e \times S_f$$

式中: D_i —— 从细沟间剥蚀的泥沙量; K_i —— 细沟间土壤可蚀性; I_e —— 有效的降雨强度; G_e —— 林冠覆盖调整因子; S_f —— 坡度调整因子。可以通过如下表达式来计算 S_f :

$$S_f = 1.05 - 0.85 \times e^{-4 \sin \alpha}$$

式中: α —— 地面坡度。

我国土壤侵蚀物理过程模型的研究起源于 20 世纪 80 年代。1981 年, 牟金泽、孟庆枚^[10]根据黄土丘陵沟壑区观测资料, 建立了黄土丘陵区流域土壤侵蚀模型。

汤立群和陈国祥^[11]分析了坡面土壤颗粒的受力情况, 认为坡面土壤颗粒的运动与其所受的有效切应力有关, 并根据黄土地区存在的特有的地形地貌和明显的侵蚀垂直分带性, 推导出坡面土壤侵蚀量公式, 建立了流域产沙模型。戚隆溪与黄兴发^[12]利用水力学原理建立了坡面降雨径流和土壤侵蚀模型, 分别采用特征线法和有限差分法对径流量和土壤侵蚀量进行了求解, 并针对具体降雨事件进行了模拟计算。段建南等^[13]建立了坡耕地土壤侵蚀过程数学模型 SLEM-SEP。在该模型中, 将土壤侵蚀过程划分为水相与泥沙相。

运行过程中, 先将预报的击溅分散量与地表径流搬运量进行比较后, 取土壤流失量等于两者中较低的值, 并表明限制因子是击溅分散还是径流搬运。

3 分布式模型

近年来, 为了处理降雨和下垫面条件的不均匀性, 加强对水文过程描述的物理基础, 在传统的集总式概念模型与物理过程模型的基础上, 向分布式模型发展。分布式模型将流域划分成一个个网格, 每个网格单元中的土壤、植被覆盖均匀分布, 在每个网格上进行参数的输入, 然后依据一定的数学表达式来计算, 并将计算结果推算到流域出口, 得到流域土壤侵蚀总量。典型分布式模型的例子是 SHE (Système Hydrologique Européen) 模型与 IHDM (Institute of Hydrology Distributed Model) 模型。但是分布式模型对资料的要求很

高, 需要评价许多参数, 同时也很复杂, 因此当前大量使用半分布式模型, 其中 TOPMODEL 是半分布式模型的典型例子。

SHE^[14]模型是研究水流及泥沙运动空间分布情况的模型, 可应用于河流流域。模拟土壤侵蚀和泥沙输移的方程包括雨滴击溅侵蚀、面蚀、面蚀中的二维负荷对流以及河床侵蚀等。模型中使用的基本方程如下:

$$D_n = K_r \times F_w \times (1 - C_g) \times [(1 - C_c) \times (M_r + M_d)]$$

式中: D_n ——单位面积上的剥蚀量; K_r ——雨滴击溅土壤侵蚀力指数; F_w ——雨滴击溅分配给土壤的能量; C_g ——地面覆盖对地表保护比例; C_c ——林冠覆盖对地表的保护比例; M_r ——雨滴直接落到地面的动能; M_d ——击溅雨滴动能。面蚀计算公式如下:

$$D_f = K_f (\tau/\tau_c - 1)$$

式中: D_f ——单位面积剥蚀量; K_f ——面流侵蚀力指数; τ ——水能剪切力; τ_c ——泥沙运动的垂直剪切力。

TOPMODEL (Topography based hydrological Model)^[15]是一个以地形为基础的半分布式小流域模型, 模拟了径流产生的变动产流面积概念。其主要特征是数字高程模型 (DEM) 的广泛适用性以及水文模型与 GIS 的结合应用。模型结构简单, 优选参数少, 充分利用了容易获取的地形资料, 而且与观测的物理水文过程有密切联系。模型已被应用到各个研究方面, 并不断发展、改进, 反映了降雨径流模拟的最新思想。TOPMODEL 以地形空间变化为主要结构, 用地形信息 (以地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 或土壤—地形指数 $\ln(\alpha/T_0 \tan\beta)$ 形式) 描述水流趋势和由于重力排水作用径流沿坡向的运动。它的基本方程如下:

$$S_x = S + m \times [\lambda - \ln(\alpha/\tan\beta)_x]$$

式中: S_x —— x 处饱和缺水量; S ——流域平均饱和缺水量; α ——通过等高线—单位长度的累计产流面积; β ——坡度; λ —— $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 的流域分布平均值。上式表明流域内任何点 x 的饱和缺水量由流域平均饱和缺水量与 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 之差确定。 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 值较大的面积容易达到饱和, 产生饱和坡面流。这些面积上地形辐合, 坡面平缓, 水平方向透水性差, 这些局部面积即为产流面积。

4 GIS 在土壤侵蚀中的应用

GIS 在土壤侵蚀模型中的应用按照应用方法可分 3 类。一是以 GIS 为工具, 利用 GIS 提取模型所需因子, 然后按照模型要求利用 GIS 的图形运算和地图代数运算, 最后得到计算结果。二是将 GIS 与土壤侵蚀模型作为两个不同的系统, 考虑结合方法的问题。三是利用 GIS 开发新的模型或改善已有模型, 一些分布式模型的开发就属于该类应用。

蔡崇法等^[16]依据实地调查资料, 建立了典型小流域地理数据库, 并在地理信息系统 DRISI 支持下, 根据 USLE 土壤侵蚀预测模型对数据库实施运算操作, 预测了小流域土壤侵蚀量。这属于第一类应用。

GIS 已从最初的数据管理、专题制图发展为科学研究与

决策过程的建模与可视化工具。在过去的十多年中, 许多学者在 GIS 与土壤侵蚀模型结合方法做了大量的工作。将流域侵蚀过程模型与 GIS 结合, 研究流域径流、侵蚀、产沙的时空变化规律, 是土壤侵蚀模型发展的一个趋势。

GIS 与土壤侵蚀模型结合主要有松散、紧密与完全集成三种形式, 如图 1 所示^[17]。

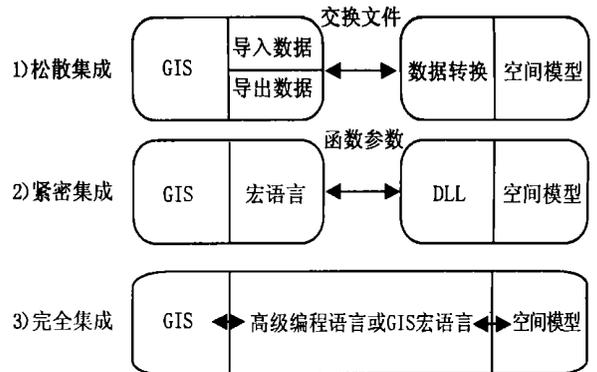


图 1 GIS 与空间模型的集成方式

松散集成主要是指模型与 GIS 独立开发, 完全不相关, 它们之间仅仅通过传输文件连接起来。优点是不需要增加多少额外的程序编码, 但是结合效率非常低, 用户需要承担界面的角色, 进行大量的文件导入导出工作。在 GIS 与土壤侵蚀模型结合的初期阶段多以该方式进行, 在 1993 年第一届国际 HydroGIS 会议上提交的文章中有 80 多篇就应用了该结合方式。Hession 与 Shanholtz 将 Tomlin 开发的 Map Analysis Package (MAP) 与 USLE 进行了结合。Chairal 与 Delleur 将 TOPMODEL 与 GRASS 进行了松散集成。我国陈一兵将 ANSWERS 与 Arc/Info 进行了松散集成。

在紧密集成中, 虽然 GIS 与土壤侵蚀模型的数据模型仍然不同, 但是可以通过一个标准的界面自动双向访问数据, 从而提高 GIS 与模型之间数据交换的效率。但是需要通过高级语言或 GIS 提供的宏语言开发该用户界面。用户仍然承担集成数据的任务。这是当前 GIS 与土壤侵蚀模型结合使用最多的一种形式。Stuart 与 Stocks^[18]利用 SPANS 的建模语言 (SML) 将 TOPMODEL 与 SPANS 集成。Bo Huang 与 Bin Jiang^[19]利用 ArcView 的宏语言 Avenue 将 TOPMODEL 与 ArcView 进行了集成。David Pullar 与 Darren Springer^[20]利用 Avenue 将 AGNPS 与 ArcView 进行了集成。

完全集成将简单的 GIS 嵌入到复杂的模型系统中以提供结果显示和交互控制处理功能, 或用 GIS 函数命令重写模型, 使模型与 GIS 集成在一个系统中, 共享一个数据库。数据访问是基于同一数据模型与同一数据库管理系统, 两个子系统间的交互非常简单有效。但是开发的花费非常大。LISEM^[20]模型是一个完全集成的典型实例, 它是用 PCRaster 的空间动态模型语言实现的。

参考文献:

- [1] Meyer L D. Evaluation of the universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, 39: 99-104
- [2] 白清俊. 流域土壤侵蚀预报模型的回顾与展望[J]. 人民黄河, 1999, 21(4): 18-21.
- [3] Wischmeier D, Smith P. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains [M]. USDA Agriculture Handbook, 1965: 282
- [4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation [M]. USDA Handbook, 1997.
- [5] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE- Revised universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 30-33
- [6] 李锐, 杨勤科, 赵永安. 水土流失动态监测与评价研究现状与问题[J]. 中国水土保持, 1999, 11: 31-33
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Laflen J M, Elliot W J, Smanton J R, et al. WEPP soil erodibility experiments for rangeland and cropped soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 39-44
- [10] 牟金泽, 孟庆枚. 陕北中小流域年产沙量计算[A]. 黄土高原水土流失综合治理科学讨论会资料汇编[C]. 陕西: 中国科学院西北水土保持研究所, 1981: 251-255
- [11] 汤立群, 陈国祥. 坡面土壤侵蚀公式的建立及其在流域产沙计算中的应用[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 104-110
- [12] 戚隆溪, 黄兴发. 坡面降雨径流和土壤侵蚀的数值模拟[J]. 力学学报, 1997, 29(3): 343-348
- [13] 段建南, 李保国, 石元春, 等. 应用于土壤变化的坡面侵蚀过程模拟[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 47-53
- [14] Abbott M B, Bathurst J C, O'Connell P E, et al. An Introduction of the European Hydrological System -Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically based, distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87: 61-77.
- [15] Beven, K J, Kirkby, M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrology Science Bulletin, 1979, 24(1): 43-69
- [16] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用USLE模型与地理信息系统DRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24
- [17] Bo Huang, Bin Jiang. AVTOP: a full integration of TOPMODEL into GIS [J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17: 261-268
- [18] David Pullar, Darren Springer. Towards integrating GIS and catchment models [J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15: 451-459
- [19] Stuart, N., Stocks, C. Hydrological modeling within GIS: an integrated approach [A]. Kovar, K., Nachtnebel, H. P. HydroGIS 93: Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources [M]. IAHS Publication, 1993: 319-329
- [20] De Roo, A P J, C G Wesseling, et al. LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment: Theory and implementation[C]. IAHS Publication (Proceedings of the Canberra Conference), 1994: 439-448

(上接第 32 页)

- [3] 能源部水利部西北勘测设计院. 黄河黑山峡河段开发方式规划报告[R]. 1991: 11
- [4] 水利部天津水利水电勘测设计研究院勘察院. 黄河大柳树水利枢纽坝址左岸固结灌浆试验报告[R]. 1998: 12
- [5] 水利部天津水利水电勘测设计研究院勘察院. 黄河大柳树水利枢纽坝址水文地质勘察报告[R]. 2000: 5
- [6] 谯文武. 黄河黑山峡大柳树坝址松动岩体中断层泥的工程地质研究[D]. 兰州大学, 1992: 5
- [7] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990
- [8] 仵彦卿, 张倬元. 岩体力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995
- [9] 李茂芳, 孙钊. 大坝基础灌浆[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
- [10] (苏)B. . 涅特里加, 顾慰慈. 水工建筑物设计手册[S]. 滕庭熊译. 北京: 水利电力出版社, 1992
- [11] 南京水利科学研究所. 中华人民共和国行业标准土工试验规程(SL 237-1999). 北京: 中国水利水电出版社, 1999