

LISEM 模型及其应用

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

摘 要: LISEM 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, 可用来计算流域内各点径流和侵蚀量。在简要介绍 LISEM 模型研发背景的基础上, 系统剖析了该模型的基本理论框架, 详细介绍了模型涉及的各种物理过程, 并对模型运行所需输入的数据和运行输出的结果作了归纳。通过 LISEM 应用结果分析, 认为只有采用空间分布式数据才能取得较好的预报结果。根据我国黄土高原侵蚀环境特点, 采用一系列措施对 LISEM 修正后, 可用于该区土壤侵蚀过程模拟。

关键词: LISEM; 分布式; 物理过程; GIS

中图分类号: S 157. 1; T P79 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 04-0091-03

LISEM Model and Its Application

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

(1. *The 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, Shaanxi 712100, China;*  
2. *Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract:** LISEM model is the first example of a physically-based soil erosion prediction model that is completely incorporated in a Geographical Information System (GIS) and can use the data from remote sense directly. The model can be used to calculate flow discharge and sediment yield. Based on introducing LISEM development background, theoretical frameworks were analyzed. The physical processes were introduced in detail, and input and output of the model were summarized. It could be concluded from LISEM application that the better results can be obtained only by using spatial distributed data. Based on erosion environmental characters on the Loess Plateau, LISEM could be applied to simulate soil erosion process by being revised its parameters.

**Key words:** LISEM; distributed; physical process; GIS

1 LISEM 模型研发背景<sup>[1]</sup>

在丘陵区, 精耕细作的农业土地利用方式总是伴随着土壤侵蚀和地表径流问题的发生, 同时由于土壤特性、地形等因素影响, 可能使这一问题日益加剧。在荷兰南部地区覆盖有薄层黄土, 主要土壤为淋溶土和侵蚀淋溶土, 土质疏松, 地形表现为波状缓坡丘陵, 土地利用以农业为主, 由于作物覆盖较低而降雨强度较大, 特别易于形成地表径流, 从而促使土壤侵蚀的发生。

1991 年在荷兰农业部和地方政府的资助下, 在荷兰南部黄土区三个小流域开展了土壤侵蚀研究项目, 对土壤流失和径流进行定量评价, 用以指导水土保持宏观决策和规划的制定。该项目由 Utrecht 大学、Amsterdam 综合大学和 Winand Staring 水土研究中心合作完成, 研究开发了一种全

新的基于物理过程的水文和土壤侵蚀模型——LISEM (Limburg Soil Erosion Model)。

2 模型结构及其基本原理<sup>[2-7]</sup>

荷兰土壤侵蚀预报模型 LISEM 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 RS 和 GIS 技术, 利用荷兰南部黄土区实验观测资料开发而成, 属于次降雨分布式过程模型。LISEM 以 PCRaster GIS 软件为基础, 程序代码完全由 GIS 命令构成, 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。模型充分考虑了土壤侵蚀产沙的各个环节, 其基本过程包括降雨、截留、填洼、入渗、土壤水分垂直运动、表层水流、沟道水流、土壤分散、泥沙输移等, 同时还考虑了紧实土、道路和表面结皮的影响。模型最新版本还包括车痕、侵蚀和沉积泥沙

<sup>1</sup> 收稿日期: 2004-07-10  
基金项目: 国家自然科学基金项目(40335050); 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX3-SW-422)  
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。

分级、径流中养分流失以及浅沟模拟。

LISEM 模型以 PCRaster 系统为基础, 将流域在空间离散化为一系列大小相等的栅格单元, 对降雨侵蚀过程等时间间隔分割, 按照时间步长分时段模拟侵蚀过程。对每个栅格, 在降雨和植被截留计算后, 减去入渗和表面存储得到网状径流。然后, 使用流体力学原理计算击溅和径流侵蚀和沉积, 并且, 用运动波方程模拟径流和泥沙汇集到出水口的过程。模型基本结构如图 1 所示。在流域出口和子流域出口处, 模型每一步计算的径流量和泥沙量结果以时间序列文件格式, 用动态输出语句进行输出。流域各象元的侵蚀量和沉积量以 PCRaster 的图层文件格式输出, 用于表达流域侵蚀和沉积的空间分布情况。

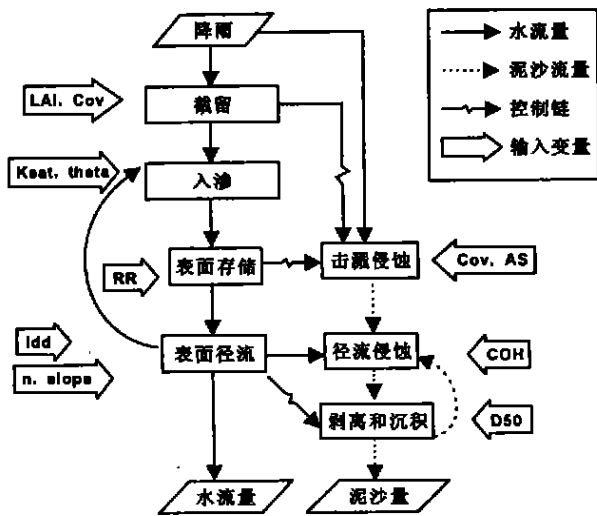


图 1 LISEM 基本结构图

## 2.1 降雨

将来自多个雨量器的降雨数据输入时间序列 ASCII 数据文件, 作为 LISEM 模型的输入数据。基于雨量器空间分布图, 运用泰森多边形或其它地学分析方法进行内差以确定流域内各点降雨量空间分布状况。

## 2.2 截留

将林冠看作一种简单存储, 通过计算最大存储力模拟作物和植被截留。使用 Aston 提出的算法模拟降雨事件中的累积截留量:

$$S = c_p \times S_{\max} \times [1 - e^{-\frac{P_{\text{cum}}}{S_{\max}}}] \quad (1)$$

使用 Von Hoyningen-Huene 建立的方程估算林冠最大存储力:

$$S_{\max} = 0.935 + 0.498LAI - 0.00575(LAI)^2 \quad (2)$$

式中:  $S$ ——累积截留 (mm),  $P_{\text{cum}}$ ——累积降雨 (mm),  $k$ ——植被密度纠正因子 (等于  $0.046 \times LAI$ ), 决定了  $S_{\max}$  到达的比率,  $c_p$ ——植被覆盖比例,  $S_{\max}$ ——从  $LAI(m^2/m^2)$  估算的最大林冠存储力 (mm)。

## 2.3 入渗

LISEM 提供的可用的入渗模型有 SWATRE (Richards 方程有限差分逼近法)、Holtan、Green-Ampt、Morel-Seytoux 以及饱和导水率减法, 可根据数据情况和用户经验选用不同模型模拟入渗。通常使用众所周知的 SWATRE 模型采用的 Richards 方程模拟土壤中入渗和土壤水传输; 对

于没有详细土壤物理信息的区域, 使用 Holtan 和 Green-Ampt 方法; Morel-Seytoux 和 Verdin 算法仍未完成; 饱和导水率减法是从网状降雨中扣除饱和导水率, 以简单方式模拟瞬时饱和状态, 这种方法用于检验和快速粗略评估。

## 2.4 微地形存储

LISEM 按照 Moore 和 Larson 研究结果模拟地表微地形存储, 在径流形成过程中分 3 个阶段: 填洼存储无径流阶段、填洼存储有径流阶段、径流阶段, 采用面积比法加以判断。模型中引入随机糙度概念量测地表微地形起伏, 最初采用 Onstad 的工作成果模拟, 最新版本中则选用 Kamphorst 等建立的方程:

$$RETMAX = 0.243RR + 0.010(RR)^2 - 0.01244(RR)^5 \quad (3)$$

式中:  $RETMAX$ ——最大微地形存储 (cm);  $RR$ ——随机糙度 (cm);  $S$ ——表面坡度 (%)。

## 2.5 地表径流和沟道流

根据表面入渗特征变化, 计算不同土地利用方式下的土壤入渗量。然后计算每个栅格单元平均水深, 产生平均水力半径, 用以计算流速。各栅格单元流量用下式计算:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (4)$$

$$\alpha = (n / \overline{S} \times P)^{2/3} \beta \quad (5)$$

式中:  $A$ ——横截面面积 ( $m^2$ );  $Q$ ——流量 ( $m^3/s$ );  $n$ ——曼宁系数 (无量纲);  $S$ ——坡度的正弦 (比例);  $P$ ——湿周 (m);  $\beta$  取 0.6。

对于分布式地表径流和沟道流, 使用 D8 算法提取径流路径, 运用与曼宁方程结合的运动波四点差分法进行模拟。其运动波方程如下:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i \quad (6)$$

式中:  $A$ ——横截面面积 ( $m^2$ );  $Q$ ——流量 ( $m^3/s$ );  $q$ 、 $i$ ——外部进出的流量 (如降雨和入渗)。

## 2.6 击溅分离

击溅分离用土壤团粒稳定性、降雨动能和表面水深度的函数模拟。这一模型通过田间试验率定, 随降雨动能、降雨量和径流而增加。

$$D_s = (2.82 / A_s K_e \exp(-1.48h) + 2.96) P A \quad (7)$$

式中:  $D_s$ ——击溅分离量 ( $g/s$ );  $A_s$ ——土壤团粒稳定性,  $K_e$ ——降雨动能 ( $J/m^2$ );  $h$ ——表面水深 (mm);  $P$ ——时间步长内植物林冠降雨量 (mm);  $A$ ——击溅发生表面 ( $m^2$ )。

## 2.7 径流分离和沉积

径流分离和沉积量用 EUROSEM<sup>[8]</sup> 中的算法来模拟, 其计算方程为:

$$D = y w v_s (T_c - C) \quad (8)$$

式中:  $y$ ——无量纲影响因子;  $w$ ——径流宽 (m);  $v_s$ ——泥沙沉降速度 ( $m/s$ );  $T_c$ ——径流输移压力 ( $kg/m^3$ );  $C$ ——径流含沙量 ( $kg/m^3$ )。

地表径流输移力被作为单位剪切力的函数:

$$T_c = d_s c (\omega - \omega_c)^d \quad (9)$$

式中:  $T_c$ ——径流输移力 ( $kg/m^3$ );  $d_s$ ——物质密度 ( $2650 kg/m^3$ );  $\omega$ ——剪切力;  $\omega_c$ ——Govers (1990) 定义的临界剪切力, 通常物质大约是  $0.4 cm/s$ ,  $c$  和  $d$ ——依赖于土壤中数直径 ( $d_{50}$ ) 的经验系数。

2.8 道路、轮痕和沟道

由于小于一个单元, 所以用其宽度数据模拟。土壤水沿轮痕的移动用特定的土壤物理性质表另行模拟计算。这些性质由于土壤紧实度的不同而明显不同。用曼宁糙度系数  $n$ 、沟底比降、沟形、沟宽、沟床黏结力等计算沟道中的水沙, 计算方式同地表径流。

3 模型基本输入和输出<sup>[2,3]</sup>

LISEM 模型全部采用 PCRaster 空间动态模型语言进行表达, 实现了模型与 GIS 完全集成。动态输入输出语句在动态模拟的每一步计算过程中, 从 PCRaster 数据库中读取时间序列文件的数据, 赋给各象元对应的新数值, 并将模型结果存入 PCRaster 数据库。

模型运行需要大量表、图以及文件, 其输入包括: (1) 降雨文件: 将来自多个雨量计的数据文件与雨量计分布图结合, 确定每个像元的雨量值, 对次降雨过程按时间步长生成降雨强度时空分布图。今后模型将可能允许直接读取雨强时空变化的雷达数据作为降雨输入文件。(2) 土壤水分表: 通过用户将土壤剖面分为若干层并分层计算, 模拟土壤水分垂直运动。对每一层, 实测的土壤水分特征曲线数据从土层特征表中读入模型。(3) 地形、土壤、土地利用类型系列图: 这是一系列 PCRaster 栅格图, 包括流域地貌特征系列图(如流域边界、坡度、地表糙度、沟道形态、道路位置和宽度、轮痕位置和宽度等)、土壤水分特征系列图(如土壤剖面类型、土壤导水率、轮痕、结皮、土壤初始基质势等)、土地利用特征系列图(如叶面指数、植被盖度、作物高度、土壤糙度、团粒稳定性、土壤黏结力等)。(4) 批处理文件: 当运行模型时, 提示用户进行流域、雨次、参数及输出文件等的选择, 这些工作由一个批处理文件完成。

LISEM 模型输出结果包括: (1) 总的文本文件(总降雨量、总流量、峰值流量、总土壤流失等); (2) 用于绘制水文和泥沙图的 ASCII 数据文件; (3) 由于次暴雨事件引发的土壤侵蚀和沉积的 PCRaster 图; (4) 在次降雨过程中指定时间间隔的地表径流 PCRaster 图等。

4 模型应用与评价

4.1 LISEM 模型空间预报能力评估

Takken 等<sup>[9]</sup>利用比利时观测资料, 对 LISEM 模型空间预报能力进行了评估。试验区选在比利时壤土带的一个农业小流域, 该流域非常靠近并且流域各特征类似于荷兰南部 Limburg。在一次暴雨后, 通过测量细沟和浅沟体积以及沉积泥沙的厚度绘制侵蚀沉积空间分布图, 并估算细沟间侵蚀量, 利用这些数据计算侵蚀沉积量。然后使用 LISEM 模拟该事件, 模型所需参数通过野外试验获得, 对于不能从野外获取的参数, 参照 LISEM 建立所采用的各参数值。通过变化入渗参数, 利用总侵蚀量校正模型。模拟结果表明模型对总的泥沙输移比具有较好的预报结果(大约 60%), 能较好的预报河流谷底线内沉积位置。但 LISEM 不能很好预报不同作物类型土壤侵蚀率的变化, 对有大量植被覆盖的地块预报侵蚀率过高。分析原因认为主要在于对植被覆盖影响的处理方式、径流不区分漫流和股流、基于地形学计算流域排水。研究

表明只有使用空间分布式数据评价空间分布式模型, 才能支持该模型空间预报行为。考虑到模型的复杂性, 单独使用流域出口数据, 可能掩盖流域内重要的时空变化信息, 不可能评价空间分布式侵蚀模型的性能。

4.2 LISEM 在我国黄土高原地区的应用

Rudi Hessel 等<sup>[10,11]</sup>对 LISEM 模型在我国黄土高原地区的应用做了研究。他们选取我国陕北黄土丘陵沟壑区大南沟小流域为研究区, 通过大量试验研究提出一系列 LISEM 模型改进措施, 包括地表径流计算中的坡度修正、采用坡度有关的曼宁系数、引入与泥沙含量相关的沉积速度、引进疏松物质分布图、在运移方程中使用正弦代替正切。利用改进后的 LISEM 模型对次降雨事件进行模拟, 然后根据小流域出口的水文图和泥沙图来评价改进效果。研究表明, 改进措施不同, 对 LISEM 模型预测值的影响也不同。经校准发现, LISEM 模型原则上可以应用于中国黄土高原地区小流域的土壤侵蚀模拟, 但是对高强降雨和低强度降雨事件需要分别单独校准, 甚至可能对每次降雨事件都需要重新校准。这表明 LISEM 不能用于黄土丘陵区未来降雨事件的径流和侵蚀预报, 但可模拟不同土地利用方案在同一次观测降雨事件中的水土流失效应。通过对整个小流域的土壤侵蚀总量和侵蚀空间分布模拟结果的评价表明, 大南沟小流域这种环境条件, 严重地限制了 LISEM 模型的应用。尤其在对侵蚀空间分布格局和未来降雨事件进行模拟和预测时, LISEM 模型的局限性更为显著。要进一步提高 LISEM 模型的模拟精度, 还需要进一步深入研究。

马修军等<sup>[12]</sup>用 PCRaster 系统和 LISEM 模型对黄土高原小流域次降雨过程进行了动态模拟, 将实验结果分析认为, 模型计算的总径流量和总土壤流失量具有较高的精度, 模拟的径流过程线符合黄土高原小流域超渗产流的实际情况。傅伯杰等<sup>[13]</sup>在 Rudi Hessel 等对 LISEM 校正的基础上, 模拟了陕北黄土丘陵沟壑区大南沟小流域不同土地利用方案的水土流失效应, 就土地利用变化对流域出口水土流失的影响进行了研究。

5 结 论

LISEM 是模拟小流域尺度上单次降雨事件中的水文和土壤侵蚀过程的强有力工具。使用 LISEM 可以计算土地利用变化的影响, 规划和评估密集耕作区控制污染的不同策略, 探索土壤保护方案。同时, 通过再现已发生暴雨事件, 生成土壤侵蚀和地表径流详图, 指导水土保持规划方案的设计, 为减少径流及土壤侵蚀量提供有价值的参考。LISEM 模型的优点是较多地应用了基于物理过程的数学模型, 可以不断吸收新的模型和数据, 为模型的进一步完善创造了条件; 以 PCRaster GIS 软件为基础, 程序代码完全由 GIS 命令构成, 这种设计不仅便于分析流域的空间变化, 而且可直接应用遥感数据和其它格式的 GIS 数据, 方便了参数的输入和管理。但许多参数不易获取, 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, 个别过程未考虑, 有待进一步研究完善; 而且所使用的 GIS 软件平台不是一个真正意义上的 GIS 软件, 数据处理能力不够强大。

态防护效益,但其累积生长量上限值较低,故刺槐在黄土丘陵区宜作为生态防护林或农用小径材用材林培育。

刺槐林地土壤水分状况与刺槐的生长状况互为因果。在刺槐生长量较低的前期,生长量较低,林木耗水相对较少,林地土壤水分状况与裸地区别不太明显。在刺槐生长的速生期,由于其耗水量增大,其对林地土壤水分利用的深度与强度都加大,导致林地土壤水分状况逐渐恶化。恶化了的林地土壤水分状况长期制约着刺槐的生长,而刺槐长期较低的生

长量又使林地土壤水分状况得到部分改善,这种改善后的土壤水分状况又有利于刺槐的生长,最终刺槐生长与林地水分状况达到动态平衡,有利于其作为生态防护林而长期存在,并能为其后续演替提供基础条件。同时如果将刺槐林作为农用小径材用材林培育,在其生长中后期应进行人工抚育管理,实行疏伐,调节密度,改善林地土壤水分状况,则林木生长量还有可能获得一定程度提高。

参考文献:

[ 1] 穆兴民,徐学选,王文龙,等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 210– 216.

[ 2] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 91– 101.

[ 3] 杨文治, 韩仕峰. 黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, 第 2 集: 18– 27.

[ 4] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[ J]. 自然资源学报, 2001, 16( 5): 433– 438.

[ 5] 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土高原生物利用型干层的水文生态效应研究[ J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 113– 116.

[ 6] 田均良, 梁一民, 刘普灵. 黄土高原丘陵区中尺度生态农业建设探索[ M]. 郑州: 黄河水利出版社. 2003. 147– 185.

[ 7] 北京林学院. 造林学[ M]. 北京: 中国林业出版社, 1981. 255– 260.

[ 8] 彭鸿, Reinhard M osandl. 立地 and 人为干扰对渭北黄土高原刺槐人工林个体生长过程的影响[ J]. 山东农业大学学报( 自然科学版), 2003, 34( 1): 44– 49.

[ 9] 杨红旗, 李广宇, 郭占胜, 等. 矿区废弃地刺槐人工林生长规律研究[ J]. 河南林业科技, 2002, 22(4): 3– 5.

[ 10] 朗奎健, 唐守正. IBMPC 系列程序集[ M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.

( 上接第 93 页)

参考文献:

[ 1] De Roo A P J. The LISEM Project: An Introduction[ J]. Hydrological Processes, 1996, 10( 8): 1021– 1025.

[ 2] Jetten V. LISEM: Limburg Soil Erosion Model Windows version 2. USER MANUAL[ S]. Utrecht University, 2002.

[ 3] De Roo A P J, Wesseling C G and Ritsema C J. LISEM: A single- event physically based hydrological and soil erosion model for erainage basins. I: theory, Input and output[ J]. Hydrological Processes, 1996, 10( 8): 1107– 1118.

[ 4] De Roo A P J, Offermans R J E, Cremers N H D T. LISEM: A single- event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. : Sensitivity analysis, validation and application [ J]. Hydrological Processes, 1996, 10(8): 1119– 1126.

[ 5] De Roo A P J, Wesseling C G, Cremers N H D T, 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, 224: 439– 448.

[ 6] De Roo A P J and Jetten V G. Calibrating and validating the LISEM Model for two data sets from the Netherlands and South Africa [ J]. Catena, 1999, 37: 477– 493.

[ 7] 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.

[ 8] Morgan R P C, Quinton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model ( EUROSEM ): documentation and user guide, version3. 6[ Z]. Silsoe College, Cranfield University, 1998.

[ 9] Takken I, Beuselinck L, Nachtergaele J, et al. Spatial evaluation of a physically based distributed erosion model ( LISEM) [ J]. Catena, 1999, 37: 431– 447.

[ 10] Hessel R, Jetten V, Liu B, et al. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment[ J]. Catena, 2003, 54: 235– 254.

[ 11] Hessel R. Modelling soil erosion in a small catchment on the Chinese Loess Plateau: applying LISEM to extreme conditions[ D]. the Netherlands: Faculty of Geographical Sciences, Utrencht University, 2002.

[ 12] 马修军, 谢昆青. GIS 环境下流域降雨侵蚀动态模拟研究—以 PCRaster 系统和 LISEM 模型为例[ J]. 环境科学进展, 1998, 7(5): 137– 143.

[ 13] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[ J]. 地理学报, 2002, 57( 6): 717– 722.