

LISEM: 一个基于 GIS 的流域 土壤流失预报模型

杨勤科 李 锐

中国科学院
(水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水利部

摘 要 90 年代初,荷兰学者以荷兰南部黄土区土壤侵蚀和水土保持规划研究为基地,开发了基于土壤侵蚀物理过程和 GIS 的土壤侵蚀预报模型——LISEM (Limburg Soil Erosion Model),为水土保持规划提供了一个支持工具。该模型考虑了土壤侵蚀发生的主要过程,可以与栅格 GIS 集成,并可直接利用遥感动态数据。由于对土壤侵蚀和水文学过程的认识以及土壤水分时空变异性的描述方法还不尽成熟,所以 LISEM 模型仍需要进一步改进。 中图分类号: S157.1

关键词: 土壤侵蚀 侵蚀预报 侵蚀模拟 地理信息系统 流域管理

LISEM: A Single-event and Physically Based Soil Erosion and Hydrological Model for Drainage Basin

Yang Qinke Li Rui

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of
Water Resources, Yangling District, Shaanxi Province, 712100, PRC)

Abstract A new physically based soil erosion model LISEM, has been developed by the scientists of Netherlands, which can be used to predict soil and runoff and to make soil conservation and landuse plan in small catchment. The varied processes of erosion is incorporated in the model. LISEM is one of the first examples of physically based models that is completely incorporated in a raster GIS and digital remotely sensed data and can be easily applied in larger catchments. Although the model has several advantages over other models, it is far from perfect, so more attention should be paid to the spatial and temporal variability of soil properties and description of soil erosion processes.

Keywords: soil erosion; erosion prediction models; erosion simulation; GIS; catchment management

在水土流失区,土壤流失率和各种治理措施效益的定量信息是水保规划和决策的必要前提。对土壤流失状况进行定位监测,建立定量分析模型,定量模拟分析土壤流失过程,包括地表径流、土壤流失及水土保持措施的效益等是非常必要的。本文根据有关资料,将荷兰学者提出的基于 GIS 的次降雨土壤流失过程预报模型 LISEM 予以介绍,以期促进我国土壤流失和

水土保持的定量评价研究。

1 LISEM 开发的背景

1.1 侵蚀环境背景^[1,2]

LISEM 的开发是在荷兰南部黄土区进行的。荷兰黄土区是欧洲黄土带的一部分, 面积大约 500 km²。黄土地区的地形基础是一系列更新世冰缘活动的残留干沟, 由第四纪河流堆积、第三纪沙层和白垩纪粘土层组成, 其上覆盖了厚 2~ 20 m 黄土层。这里地表海拔 42~ 321 m, 地形表现为波状缓坡丘陵。气候为温带海洋性气候, 年均降水量 750 mm, 降水年内分配均匀。4~ 10 月份降雨强度较大, 多年平均最大 30 min 雨强 24 mm/h。主要土壤为淋溶土和侵蚀淋溶土, 土质疏松。土壤颗粒以粉沙为主, 0.002~ 0.5 mm 约占 75%。数百年以来, 土地利用以农业为主, 现在耕地占 83%~ 94%, 草地占 6%~ 14%。4~ 6 月份由于作物覆盖较低而降雨强度较大, 所以侵蚀危险较大。

径流系数冬季高于夏季, 径流的形成在冬季主要受排水条件和土壤水饱和程度的控制, 夏季受土壤入渗速率的控制, 并分别受到降雨总量、土壤持水力、作物生长期和地表条件的影响。据测定土壤稳定入渗率为 15~ 50 mm/h。

表 1 荷兰黄土区侵蚀概况^[1,2]

流域	面积 (km ²)	主要坡度 (°)	径流系数(%)		侵蚀强度(t/km ²)	
			夏季	冬季	年均	次降雨
No1	0.00577	3~ 6	0~ 25	1~ 60	45.3	18.3
No2	0.0480	3~ 9	< 5	2~ 80	695	582
No3	0.0940	1~ 6	0~ 3.0	0	-	11.4

No1- Catsop; No2- St Gillistraat; No3- Etzenvade

1.2 研究背景^[3,4]

1991 年在荷兰农业部和地方政府的资助下, 设立了一个土壤侵蚀研究项目, 研究开发土壤流失和径流的定量评价模型, 用以支持制定土壤保持宏观决策和规划。设立项目的主要原因是: (1) 黄土丘陵区易于发生土壤侵蚀; (2) 洪水径流和土壤流失对公共设施和私有财产构成了多种危害, 如表土(包括种子)冲刷流失、作物减产、化肥农药(包括杀虫剂)污染水体等。(3) 国家需要制定土壤保持的政策, 用以指导地方发展农村经济、保持土壤和治理洪水灾害。该项目由乌德勒支大学(Utrecht university)、阿姆斯特丹大学和韦南得斯大林水土研究中心(SC-DLO)合作完成, 在该项目研究过程中开发了 LISEM 模型。

用于土壤侵蚀评价预报的定量模型大致有两类, 即统计模型和物理模型。统计模型如著名的 USLE^[3,4] 及其修正版 RUSEL^[5]。物理模型主要有 CREAMS, ANSWERS, AGNPS, KINEROS, EUROSEM 和 WEPP 等^[6], 简述如下:

CREAMS(Chemical runoff and erosion from agricultural management systems——农业耕作制度下化学径流和侵蚀评价模型, 1980): 是一个用来评价田间尺度多种耕作措施下侵蚀和水质状况的模型。通常用于 < 0.4 km² 流域, 最大不超过 4 km²。在流域内认为土壤、地质、土地利用等方面的特性相对均一, 并以此进行流域土壤侵蚀的预报。CREAMS 不能用于较大尺度的流域, 也不能提供降雨过程的信息, 模拟过程的功能十分有限。

ANSWERS(Areal nonpoint source watershed environment response simulation——流域环境

非点源响应模型, 1980): 该模型是一个模拟分析农业地区雨后及降雨期间流域水文特征的分布式模型。其特色在于它可以计算径流传输条件下的土壤流失, 可与栅格 GIS 连接并利用遥感数据。其不足之处是所用渗透方程(Holtan)是统计模型, 土壤侵蚀预报以 USLE 为基础。

AGNPS(agricultural nonpoint source——农业径流非点源泥沙模型, 1989): 也是一个分布式模型, 对每个网格(像元)采集模型参数, 模拟次暴雨径流和侵蚀产沙过程。径流用土壤保持局径流曲线方法预测, 产沙量用 USLE 直接预测, AGNPS 模型也可模拟土壤养分运动。

KINEROS(kinematic erosion simulation model——动力侵蚀模型, 1981): 该模型用 Smith-panlange 渗透模型和动力波理论模拟地表径流和土壤侵蚀过程。较之以前的物理模型(如 ANSWERS 等)对物质分散、转输等方面、特别是透渗过程的描述更加强调物理过程。其主要问题是, 对较大且复杂流域的表示和描述必须划分为一系列坡地和沟道单元, 当这种单元超过 60 个时, 对流域的表示将比较复杂且输入数据也需要更多的时间。

EUROSEM(european soil erosion model——欧洲土壤侵蚀模型, 1994): 是一个用欧洲土壤侵蚀研究多种成果描述和预报田间及流域土壤流失的模型。该模型在欧洲取代了 USLE 形式的统计方程, 但流域的表现方式则与 KINEROS 相同。

WEPP(water erosion prediction project——水力侵蚀预报模型, 1991~ 1994): 是美国农业部开发的新一代土壤侵蚀模型。它可以连续地模拟次降雨过程, 并将逐渐取代 USLE。上述模型的共同问题:

(1) 对侵蚀过程的描述有待改进。应在试验研究和统计分析的基础上, 利用理论分析和试验的方法, 研究土壤侵蚀的过程, 以土壤的内在理化性质为指标用数学方法进行定量描述, 以增加模型的通用性。

(2) 空间分析能力有限。模型的目的是对土壤保持和管理提供支持, 必须在流域尺度上而不仅仅在坡面尺度上研究和分析土壤侵蚀和水文过程及其空间变异。为此将模型与 GIS 集成, 以便精确的描述土壤侵蚀在流域内的空间变化。

(3) 不能直接利用遥感数据。数据是模型的关键, 而遥感数据具有动态化和综合性等特点, 对较大面积的现状调查和动态监测都是十分有用的, 所以现代土壤流失模型必须能直接利用遥感数据。

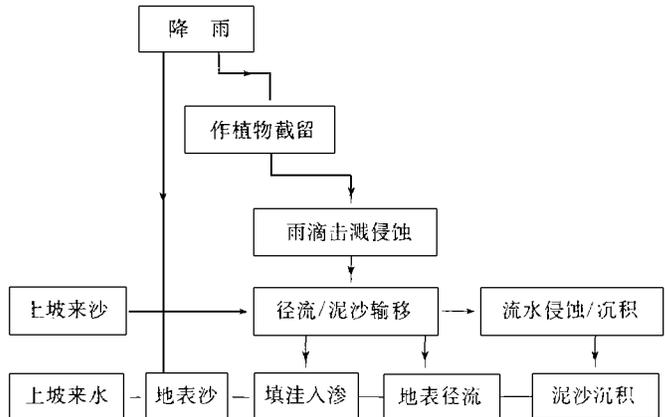
2 LISEM 的科学基础

LISEM 的科学基础主要体现在对各种侵蚀过程的描述和对其间关系的处理。这里从模型的基本逻辑结构和子模型两个方面介绍。

2.1 LISEM 的基本逻辑结构^[6]

LISEM 的设计结构基于应用 ANSWERS 的经验^[7], 但过程的描述则有所不同。LISEM 是一个在 GIS 环境下开发, 能与栅

格 GIS 完全集成的物理模型。LISEM 中考虑的过程有: 降雨、截留、填注、渗透、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,其逻辑结构如图 1。

2.2 LISEM 的主要子模型

LISEM 中对上述各种过程分别建立了模型,包括降雨过程、截留过程、填洼过程、渗透过程、水分垂直运动过程、表层水流过程、沟道水流过程、土壤分散过程、泥沙输移过程等。

2.2.1 降雨过程 雨量筒观测取得数据,用标有雨量筒编号的地图来确定各雨量筒可以代表的空间单元,表现降雨过程中雨量和雨强的时空变化。将来还可以应用雷达测雨技术模拟暴雨中心在流域的移动。

2.2.2 截留过程 通过计算降雨过程中作物和自然植被的蓄水量来模拟对雨量的截留,最大截留量用 Hoyninge-Huene(1981) 方程计算

$$S_{\max} = 0.935 + 0.498 \times L_a - 0.00575 L_a^2 \quad (1)$$

式中: S_{\max} ——最大截留量(mm); L_a ——叶面积指数。

降雨累计截留量用 Aston 方程计算,用以模拟 S_{\max} 前的特性。

$$C_a = S_{\max} [1 - e^{-(1-P)P_a S_{\max}}] \quad (2)$$

式中: C_a ——累计截留量; P_{\max} ——累计雨量; P ——修改参数因子, $P = (1 - 0.046 \times L_a)$

2.2.3 渗透与水分运移过程 渗透与水分运移用 Richards 方程模拟,这一方程由达西方程和连续方程集成而来

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \quad \text{管理} \quad (3)$$

式中: k ——土壤导水率(m/s); h ——基质势(m); θ ——土壤含水量(m^3/m^3); z ——重力势(基准面以上的高度); t ——时间。

2.2.4 地表微地形填洼 Onstad(1984)和 Linden(1988)提出了计算地表微地形填洼的方程。方程中引入了随机糙度概念量测地表微起伏,方程为:

$$R_{\max} = 0.112 R_r + 0.031 R_r^2 - 0.012 R_r \cdot \alpha \quad (4)$$

式中: R_{\max} ——填洼量(cm); R_r ——糙度(cm); α ——坡度($^\circ$)。

用来填洼的净雨量(降雨量+表层流-截留-渗透)用下式计算:

$$R_n = 0.329 R_r + 0.073 R_r^2 - 0.018 R_r \cdot \alpha \quad (5)$$

Moore 和 Larson(1979)的研究表明在径流形成过程中分 3 个阶段:(1)填洼无流阶段;(2)填洼径流阶段;(3)径流阶段。为了决定第一阶段向第二阶段的转换,用如下方程计算产流所需雨量

$$D = R_n [0.0527 R_r - 0.0049 \alpha] \quad (6)$$

式中: D ——产流所需雨量,用(7)式可求得实际填洼量。

覆盖水地表最大比例可用下式计算:

$$F_{\max} = 0.152 R_r - 0.08 R_r^2 - 0.08 R_r \cdot \alpha \quad (7)$$

式中: F_{\max} ——覆盖水地表最大比例,其余符号同上。

实际覆盖水地表比例用下式计算

$$F = F_{\max} [R_d / R_{\max}]^{0.6} \quad (8)$$

2.2.5 溅蚀分散 溅蚀分散是土壤团聚力、降水动能和土壤水深度的函数,用 9 式模拟。这一子模型是通过田间试验率定的,随降雨动能、降雨量和径流而增加。

$$D_d = [(2.82/a \cdot E \cdot \exp^{-1.48d} + 2.96](P - I)[dx^2/dt] \quad (9)$$

式中: D_d —— 溅蚀分散量 (g/s); a —— 土壤团粒稳定性; E —— 降雨动能 (J/m^2); d —— 土壤稳定水流厚度; P —— 降雨量; I —— 截留量; dx —— 象元大小; t —— 时间增量。

2.2.6 输沙力 地表径流输沙力, 被作为单位水流能量的函数来计算

$$\tau_c = C_1 [\alpha \cdot V^{-0.4}]^{D_1} \quad (10)$$

式中: τ_c —— 输沙力 (cm^3/cm^3); α —— 坡度 (m/m); V —— 平均流速; C_1, D_1 为随机待定参数, 其值与表层土壤中值粒径有关 (D_{50})。LISEM 中的 D_1, C_1 用命令文件输入, 以便必要时予以率定。

2.2.7 细沟、细沟间侵蚀 径流分散和沉积量用 EUROSEM (Morgan, 1994) 中的一个模型来模拟, 无论输沙力小于溅蚀含沙量 (来自上坡或来自前一时段) 与否, 沉积率均用下式计算

$$D_c = \omega \cdot U \cdot (\tau_c - C) \quad (11)$$

式中: D_c —— 沉积率 (kg/m^3); ω —— 水流宽度; v_s —— 起沙速度 (m/s); τ_c —— 输沙力; C —— 含沙量。

如果输沙力超过泥沙含量, 径流分散力用下式计算

$$D_f = y w v_s (\tau_c - C) \quad (12)$$

式中: D_f —— 径流分散量, y —— 待定系数, 用下式计算

$$y = \mu / \mu_c = 1 / (0.089 + 0.56 C_h) \quad (13)$$

式中: μ —— 临界剪切速度; μ_c —— 细沟侵蚀临界剪切速度; C_h —— 为饱和土壤粘结力 (kPa)。

2.2.8 道路、轮痕和沟道 因为小于一个像元, 所以用其宽度数据来计算。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。用漫宁糙度系数 n 、沟底比降、沟形、沟宽、沟床粘结力等计算。

3 LISEM 与 GIS 的集成

GIS 是分析和管理空间数据的技术和方法。经过数 10 a 的发展已在地学领域内得到十分广泛的应用, 也发展成为一门独立的学科^[8]。近 10 a 来在土壤侵蚀和水土保持研究中也得到了广泛的应用^[6, 7, 9-11]。

3.1 LISEM 与 GIS 集成的必要性

根据 LISEM 开发者^[6]和有关研究^[7, 9-11], 在土壤侵蚀模拟计算中运用 GIS, 主要由于:

3.1.1 径流与侵蚀过程是一空间过程 径流与侵蚀过程在水平方向和垂直方向上是不断变化的, 这一过程及其相关的物质与能量 (水、沙) 的传递过程在空间上是连续发生的, 也就是说, 土壤侵蚀和水文过程是在三维空间上发生的。

3.1.2 描述空间过程需要大量空间数据 这种在三维空间变化过程的描述, 首先要求将流域划分为一系列格网 (或多边形)。一个 10 km^2 的小流域, 采和 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的格网, 将有 4×10^6 个数据单元, 如此巨大的数据量的输入用手工方式是无法实现的, 必须借助于 GIS 时空间数据的输入与管理功能。

3.1.3 模型参数的空间内插 在模型的运算中将要用到的一系列田间采样和测定工作, 一般是有限的。要用有限的参数研究流域面上的土壤侵蚀和水文特征, 则必须在 GIS 的支持下, 经

过空间内插将有限的样点推广到流域。

3.1.4 清晰明了的显示 土壤侵蚀模型研究的目的是为土地利用和水土保持提供信息和规划方案方面的支持,这种特定目的要求必须将分析的阶段成果或最终结果以图形、表格等清晰明了方式显示或输出。

3.1.5 技术推广 小区观测数据和科学研究结论应用到流域;定位研究成果和数据应用到较大的区域,用以推进区域的宏观研究;小流域治理经验推广到更大的区域,用以指导生产和制定宏观决策。这些问题都需要借助于 GIS 手段在不同的空间尺度上进行比例尺的转换。

GIS 及其相关的遥感技术,为上述问题的解决提供了有力工具。在 GIS 支持下开发和应用土壤侵蚀模型,成为现代土壤侵蚀定量评价研究的基本内容之一^[11]。

3.2 LISEM 与 GIS 的集成

土壤侵蚀模型与 GIS 的集成一般分为 3 种方式^[8],即分离式、半分离式和全集成式。LISEM 与 GIS 的集成方式相当于第 3 种,这种集成方式要求 GIS 软件具备强大的编程功能。

LISEM 与 GIS 的集成以 PCRaster GIS 软件^[13-15]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。

对每一个过程的描述用一个 GIS 命令来表示,与 PCRaster 的语法结构完全一致。采用这种方式,LISEM 模型由不足 200 条可执行的 GIS 命令组成,中间过程产生的冗余数据被自动删除,保证了模型运行的高效性。这种方式还简化了模型的修改、维护和重复使用。

3.3 数据的输入和输出^[6,14,15]

LISEM 在 GIS 环境下运行,数据输入/输出主要形式为表、图、文件等。

3.3.1 雨量文件和雨量筒分布图 输入一个或数个雨量筒观测数据文件。同时,输入一个雨量筒分布图,用以确定各像元的雨量值,进行雨量的时空分析。

3.3.2 土壤水分表 引用了一个修正的 SWATRE 模型来模拟土壤的垂直运动。土壤剖面可以被用户分为若干层并分层计算。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。

3.3.3 土地类型/土地覆盖系列图 下列专题系列地图要求以 PCRaster 格式输入。(1)地貌特征图。主要表示流域边界、雨量空间分布型式、沟口位置、沟道坡向、坡度、地表、糙度(n)、主沟坡度、沟道糙度、沟道形态、道路位置和宽度、轮痕位置和宽度等。(2)土壤水分特征图:主要表示土壤剖面类型、土壤导水率、轮痕、结皮、土壤初始基质势、Holtan 渗透参数、Green-Ampt 渗透参数等。(3)土地利用特征图。主要表示叶面指数、植被盖度、作物高度、土壤糙度、团粒稳定性、土壤粘结力、沟道粘结力等专题信息。

运行 LISEM 时,用户将被提示要求进行流域、雨次、参数及输出文件等的选择,而这些工作可用一个批处理文件来完成。(1)路径设置:包括对地形、土壤和土地利用图形库等文件路径的设置,以便选择流域;设置土壤水分表文件路径,选择土壤水分模型参数。选择或设置输出文件路径;设置降水文件路径以选择降水雨次;选择和设置模拟的起始时间与步长;选择精度因子;选择一些参数和系数,如土壤起始速度输移比;用于分散量、输沙量及产沙量计算;选择输出文件,如水文文件,多期主沟口和一些次沟口的径流量、径流图、侵蚀图及最终文件。(2)输出数据设置:LISEM 模型可以输出下列数据,包括总量文件、降水量、径流总量、最大径流总量、侵蚀流失总量、沉积总量等表格和专题图。

4 模型的分析评价

4.1 模型的优点和不足

LISEM 的开发者认为,较之国际上现有的土壤侵蚀评价预报模型,LISEM 具有以下优点^[14]:(1)较多地应用了基于物理过程的数学关系。尽管有一些子模型仍然使用了统计的方法和统计模型,但改进了对过程的描述,如溅蚀和沟蚀分散量、填洼等。(2)所有的输入参数都可以在野外或实验室测定,如团粒微定性、土壤剪切力、叶面积指数等,而没有包括难以确定的参数。(3)模型程序原码的编写方式允许新的关系式被直接采用。(4)模型与栅格 GIS 完全集成,使多种有用的地块属性数据用分布式数据库管理,使土地利用变化方案和新的水保措施的评价和引进十分方便,使分析结果以地图形式详尽地显示或输出,如土壤侵蚀图、地表径流量。

然而,LISEM 远不是一个完美的模型,存在以下问题尚待改进。(1)对数据需求量巨大。以 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 像元,模拟一个 0.45 km^2 的集水区,要求对 4 500 个像元各取 30 多个参数。这些参数对地形特征似乎并无多大问题,但对于另一些参数,如团粒及其移动特征、土壤导水参数等,要取得一个流域面上的数据则是困难的。(2)保留了一部分统计模型。尽管模型建立的基础是物理过程,但仍有一部分随机统计关系被应用,如输沙力方程。这些方程可以发展物理化的模型,但所需数据将急剧增加。(3)个别过程未考虑。如土壤水的侧向流动、细沟网络、水流在坡地下部的重新入渗、轮痕中的水流对沟道发生的影响等。在模拟过程中(一场降雨过程中),一系列的参数将不断发生变化,但这种变化尚未考虑。(4)LISEM 模型的计算机程序基本上是基于 DOS 环境,其操作和驱动基本上还是命令方式,用户界面还不很尽如人意。

4.2 模拟计算效果^[14]

在 3 个主沟口,6 个次级沟口监测了流量和含沙量的实测结果和模拟结果均表明:冬季和夏季的水沙关系明显不同。平均而言对冬季降水具有较好的模拟效果。

土壤输沙模型的试验表明:一维(垂直方面)水流公式对模拟次降雨过程是有效的,因为降雨期间的侧向水流十分有限。但在模拟不同次降雨的变化过程时,侧向水流的作用则是较大的,也应考虑同时蒸发。

对最大流量的模拟约有 40% 与观测值具有较大差异。这种差异的主要原因有二。首先是土壤导水特征和土壤水的时空变异,这种时空变异在研究流域耕作土壤上极大,用 3 个或 6 个点的推广到全流域是困难的。第二,我们目前对土壤侵蚀与水文学过程理论的理解还比较肤浅。

5 结 语

LISEM 是一个功能强大的模型,可以用于因耕作等导致土壤流失的地区。应用 LISEM 通过对土壤流失与径流量的计算模拟,对一系列的水土保持措施及其定位方法进行评价比较,在多种可选方案中确定最佳实施方案,并以详尽的地图形式予以显示。LISEM 的主要优点在于:(1)与栅格 GIS 的集成,极大地方便了模型参数的输入与管理,使土壤流失和径流过程空间变异以及水土保持措施的精确空间定位成为可能。(2)更多地运用了基于物理过程的数学关系式,可以不断吸收新发展的数学关系和新的数据,使自身不断趋于完善。(3)可以兼容多种数据格式。

然而, 现有的 LISEM 远不是一个完美的模型, 个别过程的描述仍然基于统计方法, 个别过程尚未考虑在模型之中, 预报结果与实测值之间还有一定的差距。模型的程序也有待于进一步完善。

参 考 文 献

- 1 A P J De Roo. The LISEM Project: An Introduction Hydrological Processes, 1996, 10: 1021~ 1026
- 2 P M Van Dijk, F J P M Kwaad Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils. Hydrological Processes, 1996, 10: 1049~ 1059
- 3 L J Lane, K G Renard, G R Foster, M Laflen. Development and Application of Modern Soil Erosion Prediction Technology - The USDA Experience. Aust. J. Soil Res. 1992(30) : 893~ 912
- 4 W H Wischmier, D D Smith, Predicting rainfall erosion losses. A Guide to Conservation Planning. USDA Handbook No. 537. 1978
- 5 K G Renard et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Equation(RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703. 1997
- 6 A P J De Roo, C G Wesseling, C J Ritsema. LISEM: A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins. I: Theory. Input and Output. Hydrological Processes, 10: 1107~ 1118
- 7 De Roo, A P J, L H Hazelhoff, P A Burrough. Soil Erosion Modelling Using ANSWERS and Geographical Information System. Earth Surf Proc and Landf, 1989, 14: 517~ 532
- 8 Cheng Shupeng. Basic Research on Geographic Information System_Informatics. Proc of IEAS' 97 AND I-WGIS' 97 Aug 18~ 22, 1997, Beijing, China
- 9 Udaya S Tim, Robert Jolly. Evaluating Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrated Geographical Information Systems and Hydrologic/Water Quality Model. J Environ. Qual. 1994, 23: 25~ 35
- 10 M R Savabi, D C Flanagan, B Hebel, B A Engel. Application of WEPP and GIS GRASS to a small watershed in Indiana. J Soil and Water Cons. 1995, 50(5): 477~ 483
- 11 K T Mellerowicz, H W Rees, T L Chow, I Ghanem. Soil conservation Planning at the watershed using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies: A case study J Soil and Water Cons. 1994, 49(2): 194~ 200
- 12 M A Nearing, L J Lane, E E Alberts, J M Laflen. Prediction Technology for Soil Erosion by Water : Status and Research Needs. Soil Sci. Soc. Am. J. 1990, 54: 1702~ 1711
- 13 Dept. of Physical Geography. Univ. of Utrecht LISEM A User Manual. 1995
- 14 A P J De Roo, C G Wesseling, C J Ritsema. LISEM : A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins. II : Sensitivity Analysis, Validation and Application. Hydrological Processes, 10: 1107~ 1118
- 15 Faculty of Geographical Sciences , Utrecht university. the Netherlands, PCRaster Environmental Software, The Netherlands, 1997, PCRaster manual version 2