

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 5 - 542 - 06

喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型

高翔 蔡雄飞 王济* 胡国锋

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 为了准确估算喀斯特小流域土壤侵蚀量, 根据喀斯特山区小流域复杂地貌特征、径流与侵蚀产沙在垂直方向上的差异性, 以栅格 DEM 为基础, 建立了由水文模块和侵蚀模块组成的喀斯特小流域分布式土壤侵蚀模型。其中水文模块选取了改进的喀斯特流域 SCS 产流模型进行产流量计算, 改进的喀斯特流域 DHSVM 汇流模型进行小裂隙渗流、大裂隙以及管道(地下暗河)流汇流计算。侵蚀模块考虑侵蚀产沙在垂直方向上侵蚀特征的差异性, 在典型区域野外调查的基础上, 设计室内模拟试验, 并对试验数据进行多元线性回归、逐步回归和多元非线性回归分析, 建立不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因子模型(非线性回归模型达到极显著或非常显著水平 $0.692 < R^2 < 0.988$) 进行产沙量计算, 并运用泥沙物质平衡原理完成泥沙输移计算。该模型与 GIS 结合可实现对土壤侵蚀的时空分布过程进行模拟, 为加深对该区域土壤侵蚀过程及模型研究提供参考。

关键词: 土壤侵蚀模型; GIS; 小流域; 喀斯特山区

中图分类号: P931.5 X826

文献标志码: A

小流域是进行水土流失治理比较合适的空间尺度, 因为它具有完整的水文和侵蚀过程。近年来小流域土壤侵蚀模型研究是水土保持工作者及石漠化研究者关注的焦点之一, 处于土壤侵蚀研究的前沿领域^[1]。分布式模型发展于统计模型与物理模型基础之上, 该模型将流域按照一定原则转为栅格, 每个栅格中的土壤侵蚀因子均匀分布, 依据研发的土壤侵蚀模型借助 GIS 计算每个栅格单元的侵蚀量, 并运用 GIS 的建模模块建立的汇沙模型将结果推演到流域出口, 得到侵蚀总量^[2]。这种模型可对土壤流失时空分布过程进行模拟, 目前已在国内外得到较快发展^[3]。在国外比较有代表性的主要有 SHE^[4]、AGNPS^[5]、ANSWERS^[6]、EUROSEM^[7] 等。符素华等^[8]、祁伟等^[9] 建立了基于次暴雨的小流域分布式水土流失模型, 姚文艺等^[10] 建立了黄河多沙

粗沙区分布式土壤流失模型。

在我国西南喀斯特山区, 土壤侵蚀模型研究主要集中在对 USLE、RUSLE 等模型的修正和针对土壤侵蚀因子的一些回归模型^[11-18]。喀斯特山区分布式模型研究以水文模型较为成熟, 然而分布式土壤侵蚀模型研究报道甚少。喀斯特流域地表地下二元结构水循环特征、地貌多重性和复杂性, 导致其产流、汇流及产沙、汇沙过程难以用经验模型来模拟。分布式土壤侵蚀模型可反映水土流失的时空变化过程, 可对流域各栅格单元进行产汇流、产输沙模拟。相对于经验模型, 其运行结果可信度、通用性更高; 此类模型不乏物理基础, 数据易获取。因此, 本文立足我国喀斯特山区侵蚀特征, 在对典型的喀斯特山区小流域调查的基础上, 通过对实验数据进行回归分析, 建立了不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因

收稿日期(Received date): 2013 - 01 - 14; 改回日期(Accepted): 2013 - 02 - 28。

基金项目(Foundation item): 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD05B06); 贵州省优秀青年科技人才培养对象专项资金[黔科合人字(2011)14号]; 贵州师范大学博士科研启动基金联合资助; 2012年度贵州师范大学自然科学类学生科研重点项目。[Supported by National "Twelfth Five-Year" Plan for Science & Technology of China (Project NO. 2012BAD05B06), the outstanding Young Scientists Special Fund Program of Guizhou Province (Guizhou S & T Talent Contract 2011-14).]

作者简介(Biography): 高翔(1987-), 男, 陕西大荔人, 硕士研究生, 研究方向: 环境遥感与信息系统。[Gao Xiang(1987-), male, postgraduate, major in Environmental remote sensing and information system.]E-mail: 604768994@qq.com

* 通信作者(Corresponding author): 王济(1975-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 教授, 研究方向: 土壤侵蚀、土壤重金属污染及生态修复。[Wang Ji(1975-), male, doctor, professor, major in soil erosion, soil heavy metal pollution and ecological restoration.]E-mail: wangji@gznu.edu.cn

子模型,在此基础上,结合已有研究成果,整合了适宜于喀斯特山区的小流域的分布式侵蚀估算模型。本文创新之处:基于喀斯特山区侵蚀特征在垂直方向上的差异性建立了产沙模块,并以数据易获取和最大适宜性为原则,从众多模型中优选出水文模块和泥沙输移模块。本文研究可加深对该区域土壤侵蚀过程及分布式土壤侵蚀模型研究提供参考。

1 建立模型的基本思路

喀斯特小流域分布式水蚀预报模型在空间尺度上以栅格数字高程模型(DEM) 为基础,将流域划分为若干栅格单元,假设每个栅格中的土壤侵蚀因子均匀分布,并以单个栅格为侵蚀产沙基本计算单元。在时间尺度上将某个降雨过程分成相等时段,对每个栅格以单位时间分别进行模拟,在此基础上优化选用张志才、原立峰等^[19-21]建立的相关模型进行汇流计算,并通过模拟试验建立的产沙模型,最终得到不同降雨时段各栅格及小流域产流产沙量。模型运行借助 GIS 软件平台,坡度、坡向、水沙汇流路径、流域边界等特征参数可从 DEM 中提取,通过 GIS 的建模模块集成整个模型算法来模拟喀斯特小流域产流产沙过程,以图表形式对结果进行可视化表达。

2 模型结构

喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型根据小流域复杂地形和在垂直方向上侵蚀特征差异性,采用室内模拟的不同坡度下的土壤侵蚀模型对喀斯特小流域土壤侵蚀过程进行模拟计算。喀斯特山区一般侵蚀过程:雨滴经植被截留落到地表,通过撞击地表将土壤分散,使得地表结皮,土壤孔隙堵塞,形成超渗流;当雨强超过土壤入渗能力时,就会形成地表径流或小裂隙渗流,大裂隙、管道或地下暗河。其流路由裂隙和管道走向而定,而蒸发蒸腾、入渗损失等决定流量大小。对于降雨时间短、降雨量大的降雨过程,蒸发蒸腾可忽略不计。地表径流形成后水流沿地表、裂隙、管道或地下暗河走向汇集到流域出口。喀斯特山区土壤侵蚀主要发生在地表。受降水打击与坡面水蚀的作用,土壤侵蚀以微距离搬运为主,是一种选择性的侵蚀过程,其侵蚀强度的地势差异显著^[22]。模型包括水文模块和侵蚀产沙模块两部分,考虑了一次降雨过程中侵蚀产沙全过程,如图

1 所示。

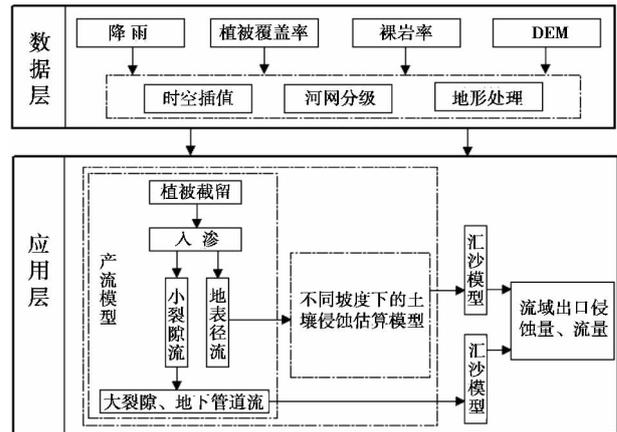


图 1 喀斯特小流域分布式土壤侵蚀估算模型结构

Fig. 1 Structure of distributed soil erosion estimation model for small watershed in karst area

2.1 水文模块

2.1.1 降雨量计算

测量或搜集小流域内的降雨数据,利用 ARC-GIS 中自带的泰森多边形分析方法生成栅格格式的降雨量空间分布图,利用各多边形内雨强变化曲线,根据由用户自行选定的单位时间步长生成不同时间段的雨强图,然后与其他图层进行叠加分析^[1]。

2.1.2 产流计算

喀斯特山区不同地貌类型下地形坡度、土层厚度、地层岩性、基岩裂隙的发育程度等方面均存在很大差别,这必然导致流域不同地貌类型下的初损和入渗量的不同,因此 λ 值(λ 表示初损与流域潜在入渗量的比率)必然与地貌类型有着密切的关系。本文选用考虑喀斯特地貌类型及地形指数的喀斯特流域 SCS 产流模型^[23]模型计算公式为

$$R = \begin{cases} 0 & P < \lambda_j S \\ \frac{(P - \lambda_j S)^2}{P + (1 - \lambda_j) S} & P \geq \lambda_j S \end{cases} \quad (1)$$

式中 R 为地表径流量 (mm); P 为降雨量 (mm); S 为流域潜在入渗量 (mm); $\lambda_j S$ 为初损 (mm) (包括地面洼地蓄水、植物截留、蒸发和入渗)。

S 值的变化幅度很大,模型通过一个无因次的参数 CN 来推求 S

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

CN 是反映土地利用、土壤类型、前期土壤含水量和地形指数的一个综合指标, CN 值可从西南喀

斯特区 CN 值查算表得到^[24]。 λ_j 为第 j 种地貌类型所对应的 λ 值, 该值可从喀斯特山区不同地貌类型 λ 值表得到^[23]。

2.1.3 汇流计算

喀斯特山区地表、地下裂隙发育, 表层径流和汇沙受细小裂隙控制, 影响水流流向、流速, 从而使汇沙路径及汇沙量发生变化。为此, 本文汇流计算选用张志才等^[19-20]对 DHSVM 改进的喀斯特流域汇流模型。当水流饱和时, 小裂隙会影响水流的汇集, 该模型考虑到了这一点。栅格内小裂隙特征参数可由岩石裸露率及风化程度来确定, 小裂隙渗流过程采用裂隙渗流立方定律模拟计算。栅格内的渗流量流入大裂隙、管道或地下暗河, 最终流出流域出口。根据 DEM 按地表水系生成大裂隙、管道汇流系统。公式如下:

该模型认为栅格单元存在多孔介质与细小裂隙, 则 t 时刻水从栅格 (u, v) 流向相邻较低梯度栅格的速率的公式为

$$q(t)_{uvl} = W_{uvl} B_{uvl} T(t)_{uv} \quad (3)$$

式中 $q(t)_{uvl}$ 指在 l 方向上流出栅格 (u, v) 的径流速率, W_{uvl} 和 B_{uvl} 分别指在 l 方向上流出栅格 (u, v) 的径流宽度及水力梯度 (可用地形坡度近似); $T(t)_{uv}$ 为栅格 (u, v) 的导水率 (由土壤多孔介质与细小裂隙介质确定)。

当水流在多孔介质中运动时

$$T(t)_{uv} = \frac{K_{uv}}{f_{uv}} (e^{-f_{uv}z_{uv}} - e^{-f_{uv}D_{uv}}) \quad (4)$$

式中 K_{uv} 为栅格 (u, v) 的多孔介质饱和和渗透系数; f_{uv} 为土壤垂向渗透能力衰减系数; D_{uv} 为土壤厚度; z_{uv} 为地下水埋深。

当水流在细小裂隙中运动时

$$T(t)_{uv} = ni \frac{\rho g b_{uv}^3}{12H} \quad (5)$$

式中 n 指栅格内裂隙数量; i 指与裂隙宽度、粗糙度相关的系数; b_{uv} 指单裂隙宽度; g 指重力加速度; ρ 指水流密度; H 指动力粘滞系数。

假设栅格内由 m 条细小裂隙汇流到该栅格下一级较大裂隙, 则该汇水通道流量 Q_{out} 为 m 条裂隙渗流量之和, 即

$$Q_{out} = mq(t)_{uvl} h \quad (Q_{in} + V_a^t) > cV \text{ 时} \quad (6)$$

$$Q_{out} = 0 \quad (Q_{in} + V_a^t) \leq cV \text{ 时} \quad (7)$$

$$V_a^{t+1} = Q_{in} + V_a^t - Q_{out} \quad (8)$$

式中 Q_{out} 、 Q_{in} 分别指时段内汇水通道出流量与上

一级汇水通道入流量和侧向入流量; V_a^t 、 V_a^{t+1} 分别指时段初始与时段末汇水通道蓄水量; V 指某栅格内汇水通道容积; p 、 c 分别指单条裂隙深度及比例系数; m 指栅格内所含细小裂隙数。

采用线性槽蓄法计算模拟栅格附近较大裂隙、管道或地下暗河组成的快速汇流过程, 每个栅格内汇水通道的宽度为常数, 槽蓄量与出流量 Q_{out} 成线性关系, 计算公式^[25]

$$Q_{out} = Q_{in} - \frac{(V_a^{t+1} + V_a^t)}{\Delta t} \quad (9)$$

$$V_c^{t+1} = \frac{Q_{in}}{s} + (V_a^t - \frac{Q_{in}}{s}) \exp(-s\Delta t) \quad (10)$$

$$s = \frac{R^{2/3} \sqrt{S_1}}{e\Delta L} \quad (11)$$

式中 s 、 R 分别指汇水通道的存贮系数及参考水深下的水力半径; Δt 为计算时段; S_1 指河道坡降; ΔL 与 e 分别指河道长度与河床糙率。

2.1.4 地表汇流计算

水流方向使用 D8 算法模拟计算。利用水量连续平衡方程来计算每个栅格上的径流量, 即每个栅格在 t 时刻的径流量可以表示为^[21]

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (12)$$

式中 Q 指当前栅格内水量; Q_{in} 和 Q_{out} 分别指进入及流出当前栅格的水量; t 为时间; 其中 Q_{in} 包括降雨量 Q_r 和邻居栅格水量 Q_u 流入当前栅格的水量之和, 表示为

$$Q_{in} = Q_r + \sum_{n=1}^k Q_u \quad (13)$$

2.1.5 单宽流速计算

单宽流速是指水流通过单位宽度横断面的流速 (m^2/min)。单宽流速参数主要是为侵蚀汇沙模型服务的。对于规则的栅格单元来说, 单宽流速计算公式为^[21]

$$V = V_b \times W \quad (14)$$

式中 V 指单宽流速 (m^2/min); V_b 指地表径流流速 (m/s); W 指每个栅格水深 (m)。其中, 采用曼宁公式计算地表径流流速

$$V_b = \frac{1}{m} W^{2/3} S^{1/2} \quad (15)$$

式中 m 指曼宁糙率系数 (根据流域下垫面和土地利用类型选取相应的值); S 指坡度比降; W 为栅格水深, 即每个栅格单元上的流量除以栅格单元面积。

2.2 产沙汇沙模块

2.2.1 产沙模型的建立

西南喀斯特山区,山高、坡陡、谷深,为土壤侵蚀的发生与发展创造了必备条件,坡度对该区域土壤侵蚀有重要影响。罗为群等^[26]通过实地监测认为,不同地貌部位(从洼地到峰顶与缓坡、斜坡、陡坡及急坡相对应)的土壤侵蚀强度、侵蚀方式亦存在不同;郑永春等^[22]认为,侵蚀强度的地势差异显著。所以在不同的坡度范围内土壤侵蚀强度、侵蚀方式不同。然而针对喀斯特地区不同坡度下的土壤侵蚀模型研究甚少。

基于以上理论,通过对典型喀斯特地区土壤侵蚀状况实地调查,收集相关资料,分析主要土壤侵蚀影响因子,以区域内广布的黄壤作为试验土样,进行室内人工降雨模拟试验,模拟不同坡度条件下土壤侵蚀模数与雨强、植被覆盖度、裸岩率之间的关系。试验在 4 个坡度(6°、16°、26°、36°)条件下,将雨强(27 mm/h、40 mm/h、60 mm/h、114 mm/h)、植被覆盖度(0%、40%、70%)及裸岩率(0%、30%、60%)三因子进行交叉试验。参考已有的多因子土壤侵蚀经验模型结构形式,采用 SPASS 软件,应用多元线性回归、逐步回归和多元非线性回归分析,研究不同坡度的各侵蚀因子与土壤侵蚀模数的关系,建立了不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因子方程,然后筛选出了不同坡度下复相关系数较高的回归模型,即表 1 中的多元非线性回归模型,并对多元非线性回归模型进行 Nash-Sutcliffe 系数分析

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{si} - M_{yi})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{si} - M_i)^2} \quad (16)$$

式中 E_{ns} 为效率系数; M_{si} 为第 i 次事件实测值; M_{yi} 为第 i 次事件预测值; M_{sp} 为实测值的平均数。

通过公式(16)计算 Nash-Sutcliffe 模拟系数分别为 0.86、0.681、0.901、0.692,系数值均较大,说明多元非线性回归模型预测较准。

2.2.2 泥沙输移能力计算

输移能力主要是指水流将泥沙向下游输送的能力。泥沙输移能力的计算主要是为了泥沙输移演算。本文泥沙输移能力采用 Beasley 等人^[6]推导出的公式计算

$$T_{RF} = 161SV^{0.05} \quad V \leq 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (17)$$

$$T_{RF} = 16320SV^2 \quad V \leq 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \quad (18)$$

式中 T_{RF} 为泥沙输移能力; S 为坡度比降; V 为单宽流速。

表 1 不同坡度下土壤侵蚀估算模型

Table 1 Soil erosion model under different slope

回归方法 Regression method	坡度 Slope	回归模型 Regression model	R ²
多元线性	6°	$Y = 0.015X_1 - 0.008X_2 - 0.02X_3 + 0.904$	0.634
回归	16°	$Y = 0.041X_1 - 0.022X_2 - 0.038X_3 + 1.298$	0.634
Linear	26°	$Y = 0.044X_1 - 0.022X_2 - 0.041X_3 + 1.601$	0.631
regression	36°	$Y = 0.057X_1 - 0.031X_2 - 0.059X_3 + 1.857$	0.569
多元线性逐	6°	$Y = 0.015X_1 - 0.02X_3 + 0.669$	0.594
步回归	16°	$Y = 0.041X_1 - 0.022X_2 - 0.038X_3 + 1.298$	0.634
Stepwise	26°	$Y = 0.044X_1 - 0.022X_2 - 0.041X_3 + 1.601$	0.631
regression	36°	$Y = 0.057X_1 - 0.059X_3$	0.523
多元非线	6°	$Y = 0.051X_1^{1.543} \cdot X_2^{-0.251} \cdot X_3^{-0.93}$	0.832
性回归	16°	$Y = 0.028X_1^{1.276} \cdot X_2^{-1.921E-8} \cdot X_3^{-0.562}$	0.988
Nonlinear	26°	$Y = 0.05X_1^{1.537} \cdot X_2^{-3.794E-8} \cdot X_3^{-0.936}$	0.993
regression	36°	$Y = 0.389X_1^{1.619} \cdot X_2^{-0.464} \cdot X_3^{-1.13}$	0.692

式中: Y —侵蚀模数 [$g/(m^2 \cdot min)$]; X_1 —雨强 (mm/h); X_2 —裸岩率 (%) ; X_3 —植被覆盖率 (%)。

Note: Y —Erosion modulus [$g/(m^2 \cdot min)$]; X_1 —Rainfall intensity (mm/h); X_2 —Bare rock rate(%); X_3 —Vegetation coverage(%)。

2.2.3 泥沙输移演算

在喀斯特山区,并不是所有的侵蚀土壤颗粒经由坡面、裂隙、沟道、管道或地下暗河、支流、干流汇集到流域出口断面构成流域产沙总量,在汇集过程中,由于裂隙、地下通道、坡脚、沟谷和洼地等地形阻挡,部分土壤颗粒会沉积在拐角处或低洼处,从而使到达出口的产沙量小于流域总侵蚀量。其中泥沙输移能力和栅格单元上可供沙量决定了水流输移量。流域中的每个栅格,当前栅格可供沙量等于笔者建立的侵蚀模型计算的侵蚀量加上上游栅格单元的来沙量。如果当前栅格可供沙量小于该栅格的泥沙输移能力,那么可供沙量就等于该栅格向下游栅格输出的泥沙量;如果当前栅格泥沙输移能力小于该栅格可供沙量,那么泥沙输移能力等于该栅格单元向下游输出泥沙量。泥沙汇集过程类似于水流汇集过程,所以各栅格上泥沙量满足物质平衡方程^[21]

$$\frac{dW}{dt} = W_i - W_o \quad (19)$$

式中 W 为当前栅格产沙量; t 为时间; W_i 为流入栅格的泥沙量; W_o 为流出栅格的泥沙量。

3 结论

本文基于喀斯特山区小流域径流与侵蚀产沙在

垂直方向上的差异性,以栅格 DEM 为基础,提出了喀斯特小流域分布式土壤侵蚀模型。其中水文模块包括降雨、地表径流过程模型,结合喀斯特小流域地形地貌特征,选用改进的喀斯特流域 SCS 产流模型进行产流量计算,选取改进的喀斯特流域汇流模型对小裂隙渗流、大裂隙以及管道(地下暗河)流进行汇流演算。侵蚀模块考虑侵蚀产沙在垂直方向上侵蚀特征的差异性,建立不同坡度条件下土壤侵蚀模数的多因子模型进行产沙量计算,并运用泥沙物质平衡原理完成泥沙输移计算。该模型除裂隙和管道汇流子模型外,其余模型的结构、模拟规则简单,动力机制明晰,所需参数比较少等优点。本文目前只是对喀斯特小流域土壤侵蚀过程建模进行了探索性研究,下一步的工作将包括:1. 对不同坡度下的土壤侵蚀估算模型进一步完善,将考虑土壤初始含水量因子及流量因子对土壤侵蚀的影响。2. 验证分布式模型。3. 基于 Visual studio 2010 和 ArcGIS Engine 开发平台,开发喀斯特山区小流域分布式土壤侵蚀过程模拟系统。

参考文献(References)

- [1] Jia Yuanyuan, Zheng Fenli, Yang Qinke. Distributed soil erosion model for small watershed in loess plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 328 - 332 [贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型[J]. 水力学报, 2005, 36(3): 328 - 332]
- [2] Jiao Fenghong, Yu Xianwei. The distributional soil erosion model study outlines the [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2005, 17(2): 32 - 39 [焦凤红, 于显威. 分布式土壤侵蚀模型研究概述[J]. 亚热带水土保持, 2005, 17(2): 32 - 39]
- [3] Yao Wenyi, Qin Fen, Wang Lingling, et al. Study on the distributed forecast model of soil loss in sandy areas of Yellow River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 1 - 5 [姚文艺, 秦奋, 王玲玲, 等. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型支持系统[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 1 - 5]
- [4] L Feyen, R F Vazquez, K Christiaens, et al. Application of a distributed physically based hydrological model to a medium sized catchment [G]//Jurgen Schmidt (Edited). Soil erosion: application of physically based models. Spinger - Verlag Berlin Heidelberg, 2000: 745 - 751
- [5] Young R A. AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(2): 168 - 173
- [6] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. Transaction of the ASCE, 1981, 23(4): 938 - 944
- [7] Folly J N Quinton, R E. Smith. Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, the Netherlands [J]. Catena, 1999, 37: 507 - 519
- [8] Fu Suhua, Weiguo Zhang, Liu Baoyuan, et al. Beijing mountain area soil erosion model in China [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2001, 8(4): 114 - 120 [符素华, 张卫国, 刘宝元, 等. 北京山区小流域土壤侵蚀模型[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 114 - 120]
- [9] Qi Wei, Cao Wenhong, Guo Qingchao, et al. Study on a distributed model for soil erosion and sediment yield in small watersheds [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 16 - 21 [祁伟, 曹文洪, 郭庆超, 等. 小流域侵蚀产沙分布式数学模型的研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 16 - 21]
- [10] Yao Wenyi, Chen Jieren, Qin Fen. Yellow River multi-sand thick desert region distributional soil erosion model study [J]. Journal of Water and Soil Conservation, 2008, 22(4): 21 - 26 [姚文艺, 陈界仁, 秦奋. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 21 - 26]
- [11] Long Mingzhong. Water, soil conservation effect and soil erosion models during the ecosystem rehabilitation of karst valleys [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2006. [龙明忠. 喀斯特峡谷区生态治理的水土保持效应与土壤侵蚀模型[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.]
- [12] Zeng Lingyun. Study on soil erosion in karst area based on RUSLE Model [D]. Beijing: Peking University, 2008. [曾凌云. 基于 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究——以贵州红枫湖流域为例[D]. 北京: 北京大学, 2008.]
- [13] Yang Qin, Zhou Zhongfa, Xiong Kangning. Quantitative assessment of soil erosion in karst area based on RUSLE and GIS [G]//Guizhou Provincial Science and Technology Association. Modern geographic sciences and social economy, 2009. [杨琴, 周忠发, 熊康宁. 基于 RUSLE 与 GIS 的喀斯特地区土壤侵蚀定量评价——以贵州省毕节市鸭池示范区为例[G]//贵州省科学技术协会. 现代地理科学与贵州社会经济, 2009.]
- [14] Yang Qin. Study on soil erosion quantitative monitoring based on USLE in karst region [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2008. [杨琴. 基于 USLE 的喀斯特地区水土流失定量监测研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2008.]
- [15] Yuan Keqin. Estimation of soil erosion in small washed of karst upland based on GIS [D]. Chongqing: Southwest University, 2009. [袁克勤. 基于 GIS 岩溶山地小流域土壤侵蚀量计算——以重庆市南川区木渡河小流域为例[D]. 重庆: 西南大学, 2009.]
- [16] Ni Jiupai, Yuan Dauxian, Xie Deti, et al. Estimates soil erosion in small watershed of karst valley area using GIS [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(2): 217 - 225 [倪九派, 袁道先, 谢德体, 等. 基于 GIS 的岩溶槽谷区小流域土壤侵蚀量估算[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2): 217 - 225]
- [17] Zhao Haibing, An Yulun, Xia Pinhua, et al. Estimate of soil erosion modulus of the watershed in karst region GIS - based——a case study of Maixi River basin in Guiyang [J]. Research of Water and Soil Conservation, 2011(5): 99 - 103 [赵海兵, 安裕伦, 夏品华, 等. 基于 GIS 的喀斯特流域土壤侵蚀模数估算——以贵阳麦西河流域为例[J]. 水土保持研究, 2011(5): 99 - 103]
- [18] Wang Yao. Simulation study on soil erosion in karst area [D]. Bei-

- jing: Peking University, 2011. [王尧. 喀斯特地区土壤侵蚀模拟研究——以贵州省乌江流域为例[D]. 北京: 北京大学, 2011.]
- [19] Zhang Zhicai, Chen Xi, Yuchao, et al. Study on distributed hydrological model in karst basin [G]//Sixth Session of Chinese Water Forum Collection, 2008: 785–788 [张志才, 陈喜, 余超, 等. 喀斯特流域分布式水文模型研究[G]//第六届中国水论坛论文集, 2008: 785–788]
- [20] Zhang Zhicai, Chen Xi, Shi Peng, et al. Distributed hydrological model and eco-hydrological effect of vegetation in Karst watershed [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 806–811 [张志才, 陈喜, 石朋, 等. 喀斯特流域分布式水文模型及植被生态水文效应[J]. *水科学进展*, 2009, 20(6): 806–811]
- [21] Yuanlifeng, Chang Chungping, Zhang Qingfeng. Soil erosion and sediment yield model in a small watershed based on Cellular Automata [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 85–89 [原立峰, 常春平, 张青峰. 基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙模型研究[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(2): 85–89]
- [22] Zheng Yongchun, Wang Shijie. Geological cause of calcareous soil erosion and land Rocky desertification in Karst Area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(5): 461–465 [郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(5): 461–465]
- [23] Zheng Changtong, Liang Hong, Shu Dongcai, et al. Study of basin SCS runoff model based on GIS and RS [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(1): 185–194 [郑长统, 梁虹, 舒栋才, 等. 基于GIS和RS的喀斯特流域SCS产流模型应用[J]. *地理研究*, 2011, 30(1): 185–194]
- [24] Jia Xiaoqing, Du Xin, Zhao Xufeng, et al. Improved SCS runoff model and its application in simulation of runoff in karst areas [J]. *Yangtze River*, 2008, 39(11): 25–30 [贾晓青, 杜欣, 赵旭峰, 等. 改进SCS产流模型在岩溶地区径流模拟中的应用[J]. *人民长江*, 2008, 39(11): 25–30]
- [25] Wigmosta M S, Perkins W A. Simulating the effects of forest roads on watershed hydrology [G]//Wigmosta M S, Burges S J. Influence of urban and forest land use on the hydrologic geomorphic responses of watersheds [G]//AGU Water Science and Applications Series, 2001: 2
- [26] Luo Weiqun, Jiang Zhongcheng, Han Qingyan, et al. Peak-cluster depression different landform spot soil distribution and characteristics [J]. *China Water and Soil Conservation*, 2008(12): 46–49 [罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 等. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. *中国水土保持*, 2008(12): 46–49]

Distributed Soil Erosion Estimation Model for Small Watershed in Karst Area

GAO Xiang, CAI Xiongfei, WANG Ji, HU Guofeng

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to accurately estimate amount of soil erosion for small watershed in karst area, according to complex terrain, runoff, differences of soil erosion characteristic in vertical direction and based on the grid DEM, a distributed soil erosion prediction model for small watershed in karst area is established. The model is composed of hydrological component and erosion component. In the hydrological component, the processes of rainfall and overland flow are taken into account, the implementation of runoff calculation is carried out on the basis of the improved SCS runoff model for small watershed, and the implementation of small crevasse, big crevasse, channel flow or underground river confluence calculation is carried out on the basis of the improved DHSVM model for small watershed in karst area. Based on geography trip, difference of soil erosion characteristic in vertical direction is taken into account in the erosion component, established soil erosion model by using Multiple Linear Regression, Stepwise Regression and Nonlinear Regression method (nonlinear regression models show extremely significant level, $0.692 < R^2 < 0.988$). The calculation of erosion modulus is realized according to erosion model under different slope based on artificial simulation of rainfall, and the calculation of sediment yield is realized according to the principle of dynamic balance of mass. Combined with GIS, the model can simulate process of spatial-temporal distribution of soil erosion, provides references for deeply understanding soil erosion processes and model research.

Key words: soil erosion model; GIS; small watershed; karst mountainous area