

黄土丘陵沟壑区小流域不同地类的侵蚀产沙模型

唐政洪¹, 蔡强国², 陈 宁², 刘高焕², 冯九梁³

(1. 华中农业大学 农业部亚热带土壤资源与环境重点开放实验室, 湖北 武汉 430070)

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 山西省水利厅水土保持局, 山西 太原 030000)

摘 要: 根据黄土丘陵沟壑区的侵蚀产沙规律, 通过对晋西王家沟小流域 1955~1980 年的多年观测资料及多次人工模拟降雨资料分析, 建立了不同地类侵蚀产沙关系式, 包括坡面侵蚀产沙、黄土沟坡侵蚀产沙、红土沟坡侵蚀产沙、发育沟壁侵蚀产沙、洞穴侵蚀产沙等黄土丘陵沟壑区丰富的侵蚀产沙类型。利用 GIS 强大的空间分析功能, 从 DEM 数据中提取出小流域水沙汇流网络, 将水沙运移引入到侵蚀产沙模型的计算之中; 模型对羊道沟 22 次降雨的计算结果表明: 坡耕地是坡面的主要泥沙来源, 陡坡地在全流域侵蚀产沙中占有重要地位, 水沙汇流作用对下坡的侵蚀产沙具有重要影响。同时, 选用了晋西汾河上游的阳湾小流域进行了模型的推广应用, 取得了较好的预测效果。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 侵蚀产沙模型; 地理信息系统(GIS); 汇流网络; 地类

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

目前, 小流域侵蚀产沙经验模型的研究, 已从单因子分析向综合因子分析方向发展, 新的数理分析方法以及计算机模拟分析方法, 越来越多地应用到土壤侵蚀预测研究, 并建立了适合于不同地区的经验模型。由于地理信息系统(GIS)具有空间分析和多要素综合分析和动态预测的能力, 能产生高层的地理信息; 实现对复杂的地理系统进行快速、精确、综合的空间定位和动态分析, GIS 技术已在资源管理、灾害预测等领域获得广泛的应用^[1]。GIS 技术与土壤侵蚀的结合, 实现 GIS 与侵蚀模型的耦合, 本项研究能反映侵蚀空间分布的 GIS 模型, 代表了土壤侵蚀模型研究的方向。

1 小流域水沙运移的 GIS 模拟

1.1 小流域系统数据库

建立的小流域数据库包括空间数据库、属性数据库、模型数据库三个部分。空间数据库主要是小流域图像数据库, 包括小流域数字高程模型(DEM)、土地利用图、土壤类型图、植被覆盖图、耕作措施图、汇流网络图、汇流系数图等。小流域属性数据库是指与小流域空间数据库相联结的属性数据, 它包括小流域各种有关的属性数据。小流域模型数据库是

指模型运算所必需的各类侵蚀产沙关系式、子模型等。对于小流域空间图像的处理, 首先使用 ARC/INFO 软件进行编辑、修改和建立拓扑关系与属性文件, 然后转入基于 WINDOWS 平台的 IDRISI 软件, 建立 ACCESS 格式的小流域空间数据库, 并通过地块的属性编码与小流域属性数据库和空间数据库有机结合。

1.2 GIS 在小流域水沙运移的模拟研究

近年来, 分布型的侵蚀产沙模型是研究侵蚀产沙的新动向^[2]。对于小流域水沙运移的模拟, 主要是利用 GIS 对数字高程模型(DEM)进行分析, 从而确定水流流路和汇流系数^[3]。由于 DEM 数据的本身只是一个个离散的高程数据的空间集合, 这些高程数据并不能完全反映出地表的实际状况; 但对于小流域这样一个封闭的集水单元而言, 这些离散的 DEM 数据组成一个高程矩阵, 通过对高程矩阵的分析和计算, 可以产生水流流路, 产生径流的方向, 并根据水流流路判定相邻栅格区域对某一个 DEM 栅格区域的汇流状况, 通过汇流方向和汇流状况来计算出汇流数, 根据径流汇集的方向和汇流数, 依据 DEM 高程自上而下计算到流域的出口^[4]。根据闫国年等学者(1997)针对黄土丘陵区复杂地形提出的算法^[5], 我们采用 C 语言编程, 从 DEM 中提取流

收稿日期: 2000-07-25; 改回日期: 2000-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目和加拿大国际发展总署(CIDA)资助中国—加拿大合作项目。

作者简介: 唐政洪(1974-), 男, 湖南东安人, 土壤学硕士, 现在中国科学院地理科学与资源研究所攻读博士学位, 主要从事流域侵蚀产沙模拟、流域管理信息系统方面的工作。

域侵蚀产沙过程的重要参数,计算出整个小流域的水沙运移方向和汇流网络。

1.2.1 水沙运移方向的确定

DEM单水流方向的计算包括以下几个步骤:第一步,对于DEM的边界数据或研究栅格区域的边界,把每一个边界单元的流向定为朝向边界的方向;第二步,对于其他格网单元,计算出相邻八个栅格单元的坡降;第三步,确定最大的坡降单元,并根据坡降的大小对水流流路进行判别,具体的判定方法则通过编程来确定算法。

1.2.2 入流单元数量计算

为了对DEM的每个栅格的入流量进行计算,首先需要计算出有多少个栅格单元的出流汇入到该单元,逐个计算各栅格单元的八个相邻的入流单元数目,直到将所有汇入某区域的栅格单元都计算完毕,通过编程确定递归计算,可得出每一个栅格单元的汇流数,这是模拟侵蚀产沙空间过程的重要一步,可以得到重要的次生数据以反映小流域侵蚀产沙的空间分布规律。

1.2.3 小流域汇流网络的计算

由于水沙在小流域的运移过程十分复杂,目前的侵蚀产沙模型大都采用“灰箱”模式,即不考虑水沙运移的中间过程。这种处理方式不能很好地反映小流域侵蚀产沙的空间分布。在本研究模型中,首先从DEM图像计算出均质小流域栅格间的水沙运移线路和汇流系数,再与小流域地块单元图叠加分析,找出各地块之间的最大汇流数及汇流方向,确定地块之间的主流路,从而生成基于地块的水沙运移网络图。小流域汇流网络可以较好地说明水沙在小流域的汇流过程及规律,使整个小流域成为一个有机联系的产流产沙系统。

2 小流域侵蚀产沙模型

羊道沟小流域是晋西离石王家沟的一条支沟,面积为0.203 km²,海拔1 008 m,年平均降雨约500 mm。由于小流域沟沿线和沟脚线是黄土丘陵沟壑区的重要地貌特征线,可将小流域划分为坡面、沟坡、沟道三个部分;小流域的侵蚀产沙模型主要包括坡面子模型、沟坡子模型和沟道子模型三个部分。

2.1 坡面侵蚀产沙子模型

坡面是指黄土丘陵沟壑区的沟缘线以上的部位,坡面主要是峁顶地、峁梁地等地面坡度<30°的地块,其主要的土地利用类型为坡耕地以及少量的

荒坡地,坡度相对较缓,土壤类型主要是离石黄土。通过对王家沟综合径流场1963~1968年的长年试验资料分析,建立了以降雨动能($E, J^{\circ}m^2/mm$)、最大30分钟($I_{30}, mm/min$)、坡度($S, ^{\circ}$)、坡长(L, m)与坡面坡耕地侵蚀产沙模数($M_1, t/km^2$);在148场天然降雨中,有 $I_{30}<0.25 mm/min$ 的降雨34场,其径流量、产沙量分别只占148场降雨的5.59%、3.14%;由于 $I_{30}<0.25 mm/min$ 的次降雨对侵蚀模数(t/km^2)的贡献不大,故在建模时只选取 $I_{30}\geq 0.25 mm/min$ 的降雨数据,得到以下次降雨坡面坡耕地侵蚀产沙模型

$$M_1=0.00637(EI_{30})^{1.1578}L^{0.4690}S^{1.6265}$$
 (样本数 $n=110$ 相关系数 $r=0.8104^{**}$)

在坡面次降雨的侵蚀产沙子模型中,对于不同地类,可以依据坡耕地侵蚀产沙关系式,用植被覆盖度(η)、耕作措施(Γ)、前期雨量(Q)修正系数进行修正,确定不同地类的侵蚀产沙模数。因此,将坡面侵蚀产沙模型的基本形式确定为

$$M_2=M_1\eta\Gamma Q$$

2.1.1 草地侵蚀产沙系数关系式

当草地覆盖度 $V\leq 5\%$ 时,草地侵蚀产沙系数 $\eta=1$
当草地覆盖度 $V>5\%$ 时,草地侵蚀产沙系数 $\eta=0.929e^{-0.04035(v-5)}$ (样本数 $n=8$, 相关系数 $r=-0.9375^{**}$)

2.1.2 林灌地的侵蚀产沙关系式^[9]

当林灌地覆盖度 $V\leq 5\%$ 时, $\eta=1.0$
当林灌地覆盖度 $V>5\%$ 时, $\eta=e^{-0.0085(v-5)^{1.5}}$ (样本数 $n=9$, 相关系数 $r=-0.965^{**}$)

2.1.3 农作物季节性覆盖度的侵蚀产沙系数

根据山西省水土保持研究所对玉米、高粱、大豆等当地主要农作物季节性覆盖度的调查,我们确定农作物的季节性覆盖度的侵蚀产沙系数修正(表1)。

表1 农作物季节性覆盖度的侵蚀产沙系数
Table 1 The seasonal coefficient of soil erosion and sediment yield of crops

月份	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	全年
侵蚀产沙系数 η	1.00	0.88	0.67	0.60	0.58	0.62	0.76	0.61

2.1.4 耕作措施侵蚀产沙系数

根据1985~1987年王家沟小流域的人工模拟

降雨资料,通过分析 25°顺坡耕种与不同耕作方式的比较,得到不同耕种措施下的侵蚀产沙经验系数(Γ)(表 2)。

表 2 耕作措施侵蚀产沙系数

Table 2 the coefficient of soil erosion and sediment yield of tillage practices

耕作措施	侵蚀产沙系数	耕作措施	侵蚀产沙系数
等高耕作(<5°)	0.3	草田带状间作(5°~10°)	0.2
等高耕作(5°~10°)	0.5	水平梯田(0°~2°)	0.05
等高耕作(10°~25°)	0.6	川坝地(<5°)	0.1

2.1.5 土壤前期含水量的修正

根据王家沟小流域的日降雨观测记录以及王治华等确定的前期降雨量的校正系数^[7],以每次降雨前9 d降雨量进行土壤前期含水量系数(Q)修正

$$Q=\begin{cases} 2.2956 & \text{(前期多雨量降雨)} \\ 0.2242 & \text{(前期久无雨降雨)} \\ 1.0 & \text{(其他类型的降雨)} \end{cases}$$

2.2 沟坡侵蚀产沙子模型

小流域的径流过程不仅受到降雨特征的影响,还要受到小流域地表状况的影响。在王家沟沟坡试验小区资料分析表明^[8],在沟坡部分的陡坡情况下,当径流量增加时,其对坡面的侵蚀量和夹沙能力均明显增加,其侵蚀强度远大于坡面部分;因此在计算全流域的侵蚀产沙量时,考虑上部侵蚀产沙量和上部来水来沙的作用。根据晋西黄土丘陵沟壑区沟坡侵蚀产沙的复杂性和多样性,在对沟坡自然小区的观测资料分析的基础上,建立了不同侵蚀部位和不同侵蚀方式的沟坡侵蚀产沙关系式,主要包括黄土沟坡侵蚀产沙关系式、红土沟坡侵蚀产沙关系式、发育沟壁侵蚀产沙关系式、洞穴侵蚀产沙关系式。

2.2.1 黄土沟坡侵蚀产沙模型

黄土沟坡侵蚀产沙模数(M_3 , t/km²)与坡面来沙(M_2 , t/km²)、沟坡径流深(H_3 , mm)有很好的相关性;由降雨动能(E , J°m²/mm)、最大30 min雨强(I_{30} , mm)计算黄土沟坡径流深地块径流(H_3 , mm);并以植被覆盖度修正系数(η)和耕作措施修正系数(Γ)对侵蚀产沙进行修正

$$M_3=49.545M_2^{0.865}H_3^{30.114} \quad (\text{样本数 } n=22, \text{ 相关系数 } r=0.943^{**})$$

$$H_3=0.0502(EI_{30})^{0.875}\eta\Gamma \quad (\text{样本数 } n=13, \text{ 相关系数 } r=0.954^{**})$$

2.2.2 红土沟坡侵蚀产沙模型

红土沟坡容易发生泻溜侵蚀的侵蚀产沙特点不同于黄土沟坡,因此,在侵蚀产沙模型中,考虑到了前期雨量对红土泻溜的影响;并建立了红土沟坡次降雨的侵蚀产沙模数(M_4 , t/km²)与红土沟坡径流深(H_4 , mm)、红土沟坡前9 d累积降雨量(Q , mm)以及最大30min雨强(I_{30} , mm/min)的关系式;由降雨动能(E , J°m²/mm)、最大30 min雨强(I_{30} , mm)计算红土沟坡径流深地块径流(H_4 , mm);并以植被覆盖度修正系数(η)、耕作措施修正系数(Γ)对侵蚀产沙进行修正

$$M_4=29.512Q^{-0.0480}M_2^{0.3323}H_4^{0.8857} \quad (\text{样本数 } n=19, \text{ 相关系数 } r=0.979^{**})$$

$$H_4=0.7639(EI_{30})^{0.4788}\eta\Gamma \quad (\text{样本数 } n=11, \text{ 相关系数 } r=0.747^{**})$$

2.2.3 发育沟壁区侵蚀产沙模型

发育沟壁区主要分布于沟头部分,坡度45°~75°,是重力侵蚀发生的重点地区;发育沟壁的径流深(H_5 , mm)是影响发育沟壁区侵蚀产沙模数(M_5 , t/km²)的主要动力;由降雨动能(E , J°m²/mm)、最大30min雨强(I_{30} , mm)计算发育沟壁区的径流深(H_5 , mm)

$$M_5=1405.8079H_5^{1.2064} \quad (\text{样本数 } n=22, \text{ 相关系数 } r=0.8826^{**})$$

$$H_5=0.1694(EI_{30})^{0.7118} \quad (\text{样本数 } n=20, \text{ 相关系数 } r=0.8079^{**})$$

2.2.4 洞穴侵蚀产沙模型

根据朱同新等人对洞穴侵蚀产沙规律的研究^[9],对290场次的侵蚀性暴雨,通过对径流深、坡长等9个因素进行逐步回归分析,建立了径流深(H_5 , mm)、洞穴系统入口至出口的落差(F , m)和洞穴之间的直线距离(D , m)与洞穴侵蚀产沙模数(M_6 , t/km²)的侵蚀产沙关系式

$$M_6=e^{5.130}H_5^{1.040}F^{0.071}D^{0.130} \quad (\text{相关系数 } r=0.938^{**})$$

2.3 沟道泥沙输移子模型

对于小流域而言,侵蚀产沙过程主要发生在坡面的沟坡部分,而沟道只是泥沙输移的通道;由于影响泥沙输移的因素错综复杂,加之晋西黄土沟壑区次降雨、年降雨变异大的特点,要确定某一特定流域的次降雨泥沙输移规律相当困难;目前主要采用泥沙输移比表示坡面和沟坡侵蚀到沟底的泥沙输移到沟口的能力。我们主要采用泥沙输移比与汇流网络相结合的方法,推算出每次侵蚀性降雨后输移到沟

口的泥沙量。

根据 19633~1968 年 40 次侵蚀性降雨后不同地貌部位的侵蚀产沙量观测值,用前期雨量(Q , mm)、降雨历时(T , min)、平均雨强(I , mm/min)和无量纲雨型因子(E_a/E ;其中 E_a 为 >0.15 mm/min雨强的降雨动能, E 为每次降雨的动能之和)表征泥沙输移比(S_7)^[8]

$$S_7=0.738Q^{0.065}T^{-0.025}I^{0.660}(E_a/E)^{0.091}$$

通过汇流网络图实现坡面子模型和沟坡子模型的结合,并计算出每次降雨侵蚀下沟的泥沙量;再根据泥沙输移比(S_7),可以计算出每次降雨的泥沙输移到沟口的泥沙总量。

3 结果与讨论

表 3 次天然降雨条件下羊道沟不同地类的侵蚀产沙模数(t/km²)

Table 3 the modulus of soil erosion and sediment yield under single natural storm in the different land types of the Yandaogou small basin (t/km²)

时间	降雨量(mm)	缓坡疏林地	缓坡耕地	中度坡耕地	黄土沟坡	红土沟坡	发育沟壁	洞穴
1963—05—23	62.3	1360.04	1496.97	4598.38	6723.14	7894.19	21459.15	1154.71
1963—07—23	28.0	1244.95	1251.72	4894.33	5319.40	6038.73	13605.21	627.19
1964—07—16	13.9	722.53	639.62	1672.68	3733.39	3230.33	8054.97	310.92

3.2 模型的推广应用

我们在山西汾河上游岚县阳湾小流域进行模型的推广应用。阳湾小流域属于黄土丘陵沟壑区和梁状半山区,梁峁坡面积较大;全流域面积为 16.24 km²,土质黄土质淡褐性土,流域内治理状况较好。为了使模型能在黄土丘陵沟壑区其他小流域应用,我们选用降雨量(P , mm)、降雨历时(T , min)和平均雨强(I , mm/min)来替代坡面和沟坡子模型中的 EI_{30} 因子以及泥沙输移比中的无量纲雨型因子(E_a/E)使模型有更广泛的应用价值。

$EI_{30}=51.025(PI)^{0.8755}$ (样本数 $n=18$, 相关系数 $r=0.886$)

$S_7=0.243Q^{0.065}T^{-0.025}I^{0.660}P^{0.671}$ (样本数 $n=11$, 相关系数 $r=0.853^{**}$)

由于阳湾小流域内没有红土沟坡侵蚀产沙、洞穴侵蚀和发育沟壁侵蚀产沙,采用坡面侵蚀产沙子模型和沟坡侵蚀产沙子模型中的黄土沟坡侵蚀产沙关系式,用 EI_{30} 与 S_7 的替代公式,对阳湾小流域 1992~1997 年的侵蚀产沙进行计算,经小流域淤泥坝实测资料的验证,模型的年侵蚀产沙预报精度在 73.4%以上,表明模型有较好的推广价值。

3.1 不同地类的侵蚀产沙比较

为了比较不同次降雨条件下不同地类侵蚀产沙的差异,我们对羊道沟 1963~1968 年的 22 次的天然降雨进行了计算,模型的计算结果能很好地反映小流域不同地貌部位、不同土地利用方式侵蚀产沙的差异性;为了进一步说明不同地类在小流域侵蚀产沙中的贡献程度,现将其中的 3 次降雨结果进行列表分析(表 3)。结果表明:在坡面部分, 15°~25°的中度坡耕地(以及更大坡度的陡坡耕种)是坡面侵蚀产沙的主要来源;沟坡部分的计算结果表明了陡坡产沙在黄土丘陵区全流域侵蚀产沙中的重要地位。此外,模型的计算结果充分反映了水沙汇流作用在小流域侵蚀产沙中的重要作用,随着坡度增大以及水沙汇流作用的增强,下坡的侵蚀模数明显增大。

表 3 次天然降雨条件下羊道沟不同地类的侵蚀产沙模数(t/km²)

Table 3 the modulus of soil erosion and sediment yield under single natural storm in the different land types of the Yandaogou small basin (t/km²)

时间	降雨量(mm)	缓坡疏林地	缓坡耕地	中度坡耕地	黄土沟坡	红土沟坡	发育沟壁	洞穴
1963—05—23	62.3	1360.04	1496.97	4598.38	6723.14	7894.19	21459.15	1154.71
1963—07—23	28.0	1244.95	1251.72	4894.33	5319.40	6038.73	13605.21	627.19
1964—07—16	13.9	722.53	639.62	1672.68	3733.39	3230.33	8054.97	310.92

3.3 结果讨论

本研究是对黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型的简化和修正^[8],旨在提高模型的实用性和可移植性;主要体现在以下两个方面:

第一,在模型整体结构设计上,深化了对流域空间数据的 GIS 分析,生成了能反映流域水沙运移的汇流网络图;实现了侵蚀产沙模型与 GIS 的部分耦合,使各子模型内部的接口更加紧密,也为模型更有效地利用外部数据提供了可能。

第二,对坡面子模型进行了大的简化,从侵蚀因子角度建立了坡面子模型,从而使所需参数得以减化,为模型的应用提供了必要准备;在沟坡子模型和沟道子模型中,考虑到了上坡来水来沙与下坡侵蚀产沙的关系。计算表明由次降雨计算年降雨的方法,完全符合黄土丘陵区的侵蚀产沙特性。

由于晋西黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙规律的复杂性,因此在简化侵蚀产沙模型的同时,对侵蚀产沙过程机理缺乏考虑:侵蚀性暴雨与土壤抗蚀性之间的相互关系对坡耕地侵蚀产沙的影响;沟坡重力侵蚀发生的临界以及洞穴侵蚀对小流域水沙运移的影响;模型与外部数据的有机结合以提高模型运行效益等。这些方面都需要深入的研究。

参考文献:

- [1] 沈芳, 黄润秋, 苗放, 等. 区域地质环境评价与灾害预测的GIS技术[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 338~342.
- [2] Daniel Yoder and Joel Lown. The future of Resule: Inside the new-revised Universal soil loss equation[J]. *Journal of soil and Water conservation*, 1995, 50(5): 484~489.
- [3] Marks D, Dozier J. Automated Basin delineation from digital elevation data[J]. *Geoprocessing*, 1994, 2: 299~311.
- [4] Johnson, L. E. Maphy, d. A. digital map based hydrologic modelling system, Photogram[J]. *Eng. Remot. Scense*, 1989, 55: 911~913.
- [5] 阎国年, 钱亚东, 陈钟明. 黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(2): 131~137.
- [6] 江忠善, 王志强, 刘志, 等. 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, 1(2): 1~9.
- [7] 王治华, 杜明亮, 姚宁, 等. 降雨与流域产沙——黄土高原产沙模型研究之一, 黄土高原(重点产沙区)信息系统研究[M]. 北京: 测绘出版社, 1993. 116~124.
- [8] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 188~199.
- [9] 朱同新, 蔡强国. 黄土丘陵沟壑区洞穴侵蚀产流产沙规律初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 40~47.

Soil Erosion and Sediment Yield Models of Different Land Types in Small Basins in the Hilly Loss Region

TANG Zheng-hong¹, CAI Qiang-guo², ZHANG Guang-yuan¹, CHEN Ning², LIU Gao-huan² and FENG Jiu-liang³

(1. *The Key Laboratory of Soil Resource and Environment Agricultural Ministry in Subtropic, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070 PRC;*

2. *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research Chinese Academy of Sciences Beijing 100101 PRC;*

3. *Shanxi Department of Water Resources, Taiyuan 030000 PRC)*

Abstract: On the basis of rules of the soil erosion and sediment yield of the hilly Loess region, and through analyses of the data of field observation from 1955 to 1980 and the data of many artificial rainfalls, we built soil erosion and sediment yield equations of different land types, which had abundant types of soil erosion including hillslope, loess, red-soil and cave, then developed the hillslope submodel, the valley slope submodel and the channel submodel. This research made full use of the powerful function of spatial analysis of geographical information system (GIS), and constructed the database of the small basin. We revised the arithmetic according to the complex physiognomy conditions of the Hilly Loess region and abstracted the drainage networks from digital elevation model (DEM). After the models calculation of the image through the interface between the models and the image, we drew following conclusions: slope farming was the primary sources of sediment, and gully slope played the important role in the whole small basin, and the conflux process of water and soil influenced deeply the lower-slope. At the same time, we have finished testing in Yandaogou small basin, and made extension and application in Yanwang small basin.

Key words: the hilly Loess region; soil erosion and sediment yield model; geographical information system (GIS); drainage networks; land type