

金沙江干热河谷坡面水土流失系统动力学仿真模拟

王静, 田波

(西南林学院 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224)

摘要: 运用水土保持原理和系统动力学的理论和方法, 以金沙江干热河谷元谋区的 3 个径流小区(自然坡面、人工禁闭坡面和水平台整地坡面) 为研究对象, 建立坡面水土流失系统动力学模型, 把小区观测数据输入模型利用 VENPLE 软件模拟运行得到次降雨过程中的地表产流量过程和坡面土壤流失过程。模拟得出的产流量和土壤流失量与实测值比较, 相对误差在 6.9%~17% 之间, 说明所建模型基本可靠。

关键词: 金沙江; 干热河谷; 坡面水土流失; 系统动力学; 模拟。

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)01-0095-04

中图分类号: S157, TM743

System Dynamics Simulation for Soil and Water Loss on Slope Surface in the Dry-hot Valley of Jinsha River

WANG Jing, TIAN Bo

(Department of Environment Sciences and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: The purpose of the study was to construct a system dynamics model of soil and water loss on slope surface on the basis of system dynamics principles through the analyses of soil and water loss processes and its influencing factors. Experiment was conducted on three runoff plots (natural slope, forbidden slope, and level terrace) in Yuanmou County, Yunnan Province located in the dry-hot valley of Jinsha River. Data observed from the runoff plots were input to model and the VENPLE software was used to find the processes of runoff and soil loss. Data of runoff and soil loss obtained from the simulation model were then compared with observed data. Relative error was found to be between 6.9% and 17%. This illustrates that the system dynamics model is an ideal model.

Keywords: Jingsha River; dry-hot river valley; soil and water loss on slope surface; system dynamics; simulation.

金沙江干热河谷是我国西南地区特殊的地理环境, 由于气候干热, 蒸发量大, 干湿季分明等特殊的气候, 植被稀少, 水土流失严重, 使得该地区成为长江上游生态环境最为脆弱的地区之一^[1]。为此, 探讨金沙江干热河谷坡面水土流失规律和建立预测预报模型尤为重要。水土流失除受人为活动影响外, 还受地表植物、地形、土壤和地质等因素的影响。水土流失与这些影响因素间的关系比较复杂, 而这些影响因素间又相互影响, 从而使水土流失系统成为一个复杂的系统, 以往的研究多在探讨单个因素对水土流失的影响方面, 应用系统动力学可以把所有的影响因素关联起来研究。

本研究在野外实验和大量实测数据基础上, 综合分析每一个因子的影响程度以及所有因素对土壤流失系统的影响, 从而建立系统动力学模型。

研究区选择在具有干热河谷气候特征的典型地段云南省元谋县。该县地处于金沙江下游南岸地区, 位于北纬 25°25′—26°07′ 与东经 101°35′—102°05′ 之间, 属金沙江支流龙川江下游的河谷地段, 气候干热, 最热月温度 42.3℃, 最冷月温度 -0.6℃, 年均温度 22℃。旱季为 3—5 月, 气温较高, 雨量少, 蒸发量大, 空气湿度低。多年平均降水量 550~614 mm。该区自然植被主要为南亚热带中山峡谷稀树灌丛和灌草丛。

收稿日期: 2007-07-27 修回日期: 2007-10-30

资助项目: 国家自然科学基金(30660037)

作者简介: 王静(1981—), 女(汉族), 云南省玉溪市人, 硕士生, 主要从事恢复生态方面的学习和研究。E-mail: wangjing151699@163.com。

1 系统动力学仿真原理

系统动力学是以系统为研究对象,运用系统概念和系统思路把所研究的系统问题构造成系统动力学模型,借助于计算机模拟技术进行定量研究。在自然科学方面,系统动力学模型被称为实际系统的实验室,通过模型模拟剖析系统,可获取相关的规律,因此,它是研究自然科学的一种好的工具^[2]。

对于简单系统,系统行为与其内部结构关系,凭借直观感觉可做出较为正确的判断;但对于复杂系统,其行为随时间变化的特性与其内部结构关系的分析,就必须借助于定量模型和计算机技术。系统动力学之所以能为复杂系统研究提出可行方法论,原因在于它能够通过建立规范的数学模型,对所研究系统进行动态结构模拟和随之而变化的功能模拟^[3-4]。

系统动力学系统一般包括若干个子系统。通过处理系统信息,分析其内部反馈机制,用 DYNAMO 语言建立规范的数学模型。在 DYNAMO 语言中,用不同类型变量描述系统,如状态变量、速率变量和辅助变量等。

系统状态用状态方程来描述,一般形式为 $L \cdot K = L \cdot J + DT \times (R1 \cdot JK)$ 。式中 L 为状态方程标识符; JK 为时间 J 到时间 K 的时间间隔; DT 为步长; R 为决策变量名。

由此可见系统动力学模型的本质是一组离散化的微分方程,通过用 DYNAMO 语言进行系统的仿真模拟,其过程实质是一个求特解过程^[5-9]。

2 实验方法

降雨量测定采用 DSJ2 型虹吸式自记雨量计观测记录。径流量与土壤流失量观测采用径流小区和微型小区法,径流小区为处理后的水平阶、人工封禁坡面和未经过任何处理的自然坡面 3 种类型,垂直投影面积为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,泥沙量的测定方法为体积置换法^[10],产流过程采用 SW-40 型自记水位计测量。径流小区基本概况和土壤物理状况分别见表 1。微型小区面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,坡度分别为 5° , 15° , 25° 。土壤物理性质通过在每个径流小区旁采集土壤样品,取样深度 0—60 cm,按 20 cm 分 3 层各层取样,用烘干法测定土壤含水量。

表 1 径流小区基本概况

小区号	植被类型	坡度/ (°)	草被盖度/ %
水平台	银合欢+ 车桑子	7	80
人工封禁	车桑子+ 扭黄毛	7	70
自然坡面	车桑子+ 扭黄毛	7	60

土壤入渗采用双环法观测。观测结果见表 2。抗冲性的衡量指标采用冲刷强度 K_w ^[11],其表达式为

$$K_w = W/AH \quad (3)$$

式中: A ——径流小区面积; H ——次降雨径流深; W ——次降雨产生的土壤侵蚀。

表 2 不同小区土壤入渗性能

小区号	稳渗率/ (mm· min ⁻¹)	达到稳 渗时间/ min	不同时刻入渗率/(mm·min ⁻¹)			
			30 min	60 min	90 min	120 min
水平阶	1.21	104	2.14	1.27	1.22	1.21
人工封禁	1.79	98	2.60	1.83	1.79	1.79
自然坡面	1.79	98	2.60	1.83	1.79	1.79

通过对系统水土流失系统的影响因素分析并结合研究区特征,得出模型状态变量为下渗量、产流量、土壤流失量;决策变量为下渗率、产流率、土壤流失率。对决策变量影响的参数为稳渗率、初渗速率、降雨量、降雨强度、坡度、植被覆盖率、初始含水量等,具体的模型流程图见图 1。

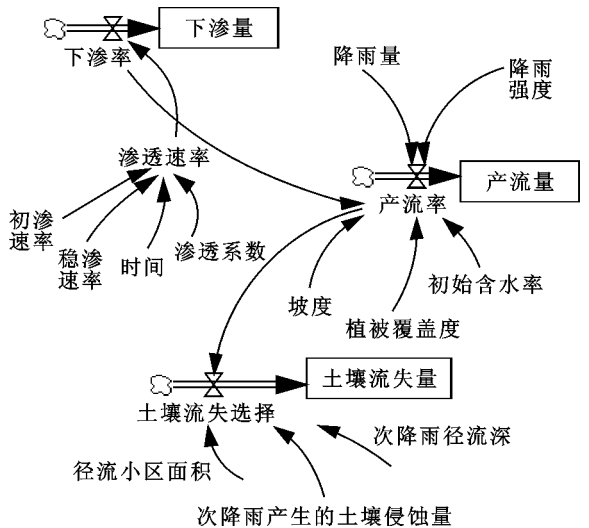


图 1 模型流程图

3 模型调试及决策方程选择

3.1 坡度对水土流失的影响

3.1.1 实际观测结果分析 对 3 个不同坡度微型小区 10 d 的坡面径流量和侵蚀量统计分析,得出 5° 的径流总量为 1 377 ml, 15° 的为 2 698.5 ml; 25° 的为 13 226.5 ml,土壤流失量也是 25° 最高,达到了 11.24 t/km^2 ,分别是 5° 和 15° 微型小区侵蚀量的 6.6 倍和 2.5 倍。以上 3 个小区的径流量和土壤流失量都随坡度的增加而增加。这说明在相似地表条件下,产流

量和土壤流失量与地面坡度呈正相关关系。数据还显示,从 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 径流量和土壤流失量的增幅都不大,但从 15° 到 25° 增幅较大,还说明缓坡的径流量和土壤流失量变化趋势较平缓,而陡坡较为剧烈^[12]。

3.1.2 比选决策方程 由以上的观测结果作基础,可知坡度与产流产沙是正相关的,所以决策变量产流率与坡度的决策方程是成正比的。

依据上述实测结果来比选决策方程,如果采用的决策方程对模型模拟结果与实际观测结果较吻合就被选定。

若采用 $F(\text{产流率}) = b \times (\text{坡度})$ 的函数关系,其中 b 为系数。 5° , 15° , 25° 的 3 个不同坡度微型小区产流量的模拟结果为 5° 的产流量为 33 ml, 15° 的为 110 ml, 25° 为 200 ml。而实测结果, 5° 的微型小区的产流量为 35 ml, 15° 的为 44 ml, 25° 的为 152 ml。 15° 和 25° 的观测结果与模拟结果相差较大。

若函数关系为 $F(\text{产流率}) = (1 - \text{坡度}/\text{CONST})^{[15]}$, 其中, CONST 等于在高透水层中的土壤容重含水量 (Q_s) 与地表至弱透水层的厚度 (H_A) 的乘积。本文的 Q_s 取 $20 \text{ g}/\text{m}^3$, H_A 取 60 mm。模拟 5° , 15° , 25° 的 3 个不同坡产流量为 47, 53, 154 ml。而实测结果, 5° 的微型小区的产流量为 35 ml, 15° 的为 44 ml, 25° 的为 152 ml。由此看出用后一种函数关系模拟模型,精度较高。

由此选定产流率与坡度的函数关系定为

$$F(\text{产流率}) = b \times (1 - \text{坡度}/\text{CONST})$$

3.2 植被覆盖度及植被类型对水土流失的影响

3.2.1 实际观测结果 对不同植被覆盖度为 0.6 的草地, 0.7 的灌木林地, 0.8 的乔木林地的 10 次微型小区产流产沙量统计分析得出乔木林地的径流总量为 2 098 ml, 灌木林地 31 369 ml, 最大的是草地达到了 60 500 ml。土壤流失量也是草地最高, 为 5 579 t/km^2 , 灌木林地和乔木林地次之, 分别为 4 330.6 t/km^2 和 27.1 t/km^2 。这充分说明了植被覆盖度越高, 水土流失越少。

3.2.2 决策方程的选择 由以上所得结果可知覆盖度越大, 产流量越小, 但具体影响程度的函数关系式的建立是在结合前人研究与实际观测结果的基础上, 把所建立的方程输入模型模拟, 得出植被覆盖度对决策变量产流率的决策方程为

$$F(\text{产流率}) = b \times \text{SQRT}(\text{覆盖度}/100 + 0.1)$$

3.3 降雨因素及初始含水率对产流率的影响

把降雨量与降雨强度对产流量的影响利用 SPSS 软件统计分析, 得出线性回归方程, 见表 3。

表 3 降雨量对产流量线性回归方程

不同处理坡面	相关系数 R	回归方程
自然坡面	0.692	$Y = 4.188 + 1.326X$
人工封闭	0.917	$Y = 9.636 + 2.431X$
水平阶	0.749	$Y = 5.326 + 5.555X$

把回归方程代入函数式 $F(\text{产流率}) = b \times [C_1 + (C_2 \times \text{降雨量})]$, 其中, C_1 , C_2 为上表中拟合方程的系数; 模拟结果与实测结果很吻合, 所以该函数关系式被选定。降雨强度和初始含水量对产流率的影响也是照此方法比选。对雨强与产流量进行统计分析, 得出 10 min 雨强 (I_{10}) 和 30 min 雨强 (I_{30}) 呈现较好的相关关系, 故选择 I_{10} , I_{30} 为雨强对产流量的影响。

3.4 DYNAMO 语言

通过对 3 个决策方程的比选得出 3 个决策变量的 DYNAMO 语言如下。

R 下渗率. KL= 稳渗率. K+ (初渗率- 稳渗率) $\exp[-(\text{渗透系数} \times \text{入渗时间})]$. K

R 产流率. KL= $[C_1 + (C_2 \times \text{降雨量})]$. K \times 降雨强度. K \times (1- 坡度/CONST). K \times SQRT(覆盖度/100+0.1). K \times 初始含水率. K

R 土壤流失速率. KL= 次降雨产生的土壤侵蚀量 $\times [1/(\text{径流小区面积} \times \text{次降雨径流深})]$. K。

4 模拟结果及讨论

4.1 模拟结果与分析

(1) 本文选用 2005 年 10 月 7 日降雨过程作为导致土壤流失的外营力, 把自然坡面、人工禁闭、水平阶整地 3 个径流小区的基本参数如坡度、植被覆盖度等参数(见表 1, 2, 4), 土壤初始含水量为 30.91%, 31.81%, 30.91%, I_{10} (3.5 mm/min), I_{30} (7.7 mm/min), 输入所建立的模型, 然后利用 VENPLE 软件进行模拟, 模拟该场降雨下的产流量、土壤流失过程等系统状态。模拟结果如图 2—3 所示。

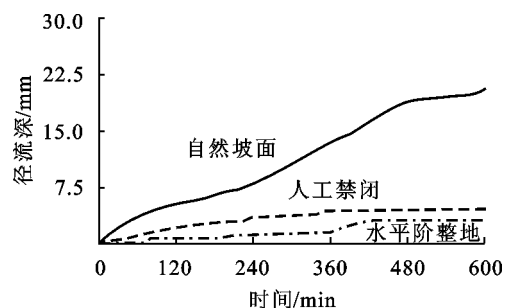


图 2 10 月 7 日 3 个不同径流小区产流过程

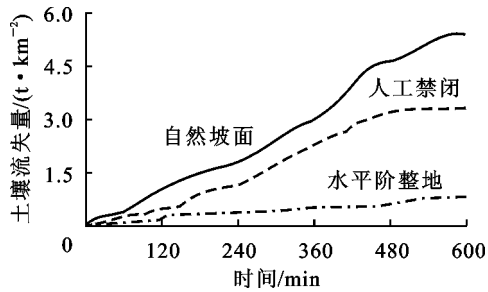


图 3 10 月 7 日 3 个不同径流小区土壤流失过程

从图 2—3 可知,自然坡面的径流量和土壤流失量分别为 20 mm 和 4.5 t/km²;人工禁闭的径流量和土壤流失量分别为 4 mm 和 3.1 t/km²;水平阶整

地的径流量和土壤流失量分别为 1.9 mm 和 0.7 t/km²。实测值见表 4。将模拟所得的量与实测量进行比较列入表 5。

可以看出,模拟值与实测值比较接近,绝对误差最大为 0.46 mm,最小为 0.1 mm 相对误差变化范围 6.9%~17%,可见模拟结果较为理想。

(2) 3 种坡面处理措施中,无论从产流量方面,还是从土壤流失量方面来看,都是自然坡面>人工封禁坡面>水平阶坡面,水平阶坡面的产流和土壤流失过程变化比较平稳,这与实际观测结果也是较为吻合的。

表 4 2005 年 10 月 7 日次降雨径流—泥沙实测值

降雨量/ mm	降雨历时/ min	自然坡面		人工封禁		水平阶	
		径流深/ mm	流失量/ (t·km ⁻²)	径流深/ mm	流失量/ (t·km ⁻²)	径流深/ mm	流失量/ (t·km ⁻²)
23.40	430	22.16	4.20	3.74	2.64	1.64	0.6

表 5 模拟值与实测值误差

小区名称	径流量绝对误差/mm	径流量相对误差/%	土壤流失量绝对误差/mm	土壤流失量绝对误差/%
自然坡面	2.16	9.74	0.30	7.1
人工禁闭	0.26	6.90	0.46	17.0
水平阶	0.26	15.80	0.10	16.0

4.2 讨论

仿真模型的模拟精度主要受控于真实系统结构的数学描述和其准确程度的高低,本文对此做的工作为在下渗子过程中,把影响下渗速率这个决策变量的因素综合为初渗率,稳渗率等霍尔顿下渗参数,不用再考虑土壤性质和降雨强度对它的复杂多变的影响而使得模型简单化;在产流子过程中针对主要影响因素为降雨因素、地表因素,在前人研究的基础上结合实测数据进行调试模拟,得出相应的数学函数式来描述影响程度。调试出来的模型精度基本理想,相对误差在 6.9%~17% 之间,若要使精度更高,还需要更多的数据支持来不断调试完善。

本文只针对实验区域基于实测结果的基础上建立模型,没有对在其它区域和不同地质条件下的适用性做过探究,如果模型的精度高和适用区域广泛,则能够较准确的预测预报土壤流失,为此,还需要进一步深入的研究。

[参 考 文 献]

[1] 王克勤,陈奇伯.金沙江干热河谷人工生态林的林分环境分析[J].中国水土保持科学,2003,1(1):74-79.
[2] 张洪江,王礼先.坡面林地水土流失系统动力学模型研

究[J].北京林业大学学报,1996,10(4):43-49.

[3] 彭清娥.坡面产流产沙神经网络模型与流域产沙系统动力学模型研究[D].四川大学博士论文,2001.
[4] 俞金康.系统动力学原理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1993.
[5] 张洪江,王礼先.长江三峡花岗岩坡面土壤流失特性及其动力学仿真[M].北京:中国林业出版,1997.
[6] 福雷肆特.系统原理[M].王洪斌译.北京:清华大学出版社,1986.
[7] 徐建华,艾南山.水土流失因素定量分析的数学模型[J].水土保持学报,1988,2(2):12-15.
[8] (日)秋山穰著,高烈夫译.系统工程[M].北京:机械工业出版社,1983.
[9] Houdson N H. 著,窦保章译.土壤侵蚀[M].北京:科学出版社,1975.
[10] 向治安.水文测验[M].北京:水利电力出版社,1985.
[11] 刘震.水土保持监测技术[M].北京:中国大地出版社,2004.
[12] 栗清树.试论不同坡度、坡长、植被与水土流失的关系[J].中国水土保持,1982(2):30-32.