

蒋家沟流域土壤湿度变化模拟

汤家法

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 土壤水分状况是形成泥石流的关键性水文因素之一, 了解土壤水分的变化状况, 对于泥石流的形成机理以及预报预测研究都有重要的科学意义。以云南东川蒋家沟为研究对象, 基于水分的物理循环过程并与分布式水文分布模型 TOPMODEL相结合, 建立起土壤湿度逐日变化模拟模型。从蒋家沟流域 2001年的模拟结果来看, 基本上能够反映出观测点的表层土壤湿度的取值范围及其基本变化趋势, 所构造的模型能够比较好地模拟出流域内土壤湿度逐日变化情况。

关键词: 泥石流; 土壤湿度; 模拟模型; TOPMODEL

中图分类号: P642.23, S152.7

文献标识码: A

泥石流灾害的发生与流域降水条件密切相关, 对一次泥石流而言, 影响其形成的降水主要包括前期降水和即时降水。前期降水的有效部分以土壤水的形式积累在土壤中, 即时降水除了继续转化土壤水外, 还可能有一部分转化为地表径流。因此, 流域的土壤水分状况, 是形成泥石流的关键性水文因素之一, 了解土壤水分的变化状况, 对于泥石流的形成机理以及预报预测研究都有重要的科学意义。

蒋家沟是长江上游金沙江一级支流小江右岸的一条支沟, 也是小江流域内泥石流活动频率最高的一条泥石流沟, 位置介于 $103^{\circ}06' \sim 103^{\circ}13'E$ 、北纬 $23^{\circ}13' \sim 23^{\circ}17'N$ 之间, 自东向西汇入小江, 主沟长 13.9 km, 流域面积 48.52 km^2 , 主要支沟有门前沟、多照沟、大凹子沟、查箐沟、老蒋家沟等。流域内岩层破碎、地形陡峻、植被稀疏。流域面积虽不大, 但却涵盖了三个气候带(干热河谷区、中山半湿润区、亚高山湿润区); 灾害形式多样, 滑坡崩塌活动强烈, 泥石流暴发频繁^[1]。根据对蒋家沟泥石流形成区的考察和观测, 其形成原因主要是坡地上浅表层

土体吸收水分, 湿度增加, 土体力学性质发生改变, 引起坡面物质坍塌流动, 在形成滑动后转化成流动而形成泥石流^[2]。为了评估该流域内土壤湿度的逐日变化状况, 国内已经有一些学者开展了相应的研究, 崔鹏等在蒋家沟通过测量降水与土壤湿度的变化, 确定了蒸发作用而导致的土壤湿度日衰减系数^[3]; 韦方强等在蒋家沟流域通过更长时间序列的测量, 通过该流域的土壤湿度变化规律拟合出前期有效降水的计算方法^[4]; 王裕宜利用蒋家沟中的土体样本, 在试验中采用土工常规实验规范, 通过不同孔隙率渗透系数的测定, 以及与始发雨强的观测分析来探讨渗透过程对土壤水分含量的影响^[5]; 陈宁生等在蒋家沟采用人工降雨的方法, 建立泥石流源区砾石土的渗透方程, 用来分析泥石流源区激发雨量过程的渗透规律^[6]。本文以蒋家沟土壤湿度变化为研究对象, 利用水分循环的基本物理过程, 在 TOPMODEL 模型基础上, 开发了一个包含多影响因子的泥石流沟流域水文分析模型, 模拟流域内土壤湿度对降水的响应过程。

收稿日期 (Received date): 2008- 10- 16; 改回日期 (Accepted): 2009- 01- 16.

基金项目 (Foundation item): 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金研究项目; 国家自然科学基金“泥石流形成区汇流机理研究” (40501008)。[This research is supported by the Science Foundation of the Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, CAS and the National Science Foundation Project (40501008)]

作者简介 (Biography): 汤家法, 男, (1971-), 安徽庐江人, 博士, 副教授, 主要从事泥石流防灾减灾研究及 GIS 技术应用研究。[Tang Jiafa (1974-), male, born in Lujiang, Anhui, P. H. D., majoring on the debris flow research and the application of GIS.] E-mail: tjjav@home.swjtu.edu.cn

1 基本模型

流域水文条件变化是一个复杂的过程,降水通

常是整个过程的开始,经过截留、渗透、蒸发等若干环节,最终改变了下垫面的土壤湿度状况,形成地表和地下径流,因此在构造模型时,要充分考虑到水分运动的各个环节,模型结构如图 1 所示。

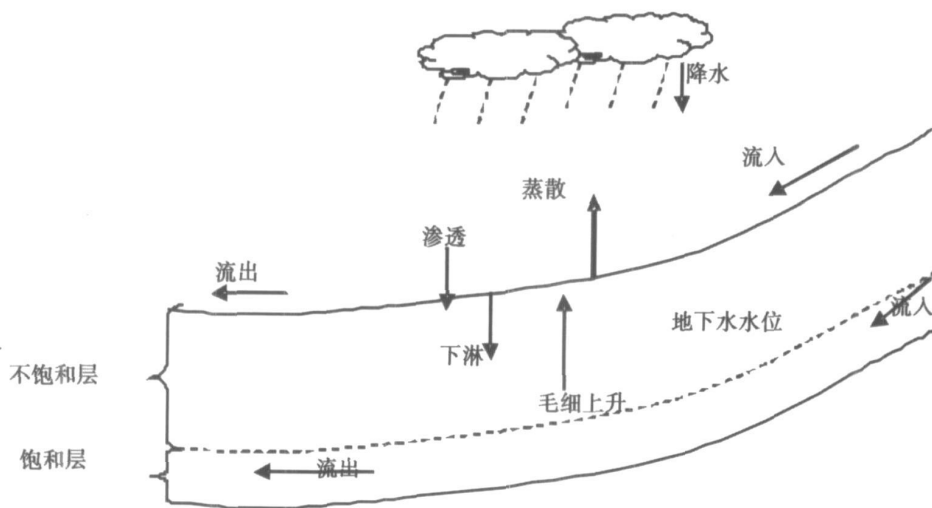


图 1 模型结构图

Fig. 1 The model structure

根据图 1,分别采用 Penman-Monteith 方程、一维 Richards 方程和 TOPMODEL 模型中的相关规则分别对蒸散量、不饱和层土壤水分运动和饱和层土壤水分运动做出恰当的模拟和计算。

1.1 蒸散量的计算

在蒋家沟流域景观中,草地、裸地、耕地和林地是流域的 4 大景观类型,其中草地景观面积最大 (31.24%),数量最多且组成最复杂,是流域的基质景观^[1]。因受到资料的限制,在进行蒸散量的计算时将流域植被层简化为稀疏草地层,采用 FAO 给出的 Penman-Monteith 方程计算

$$ET = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中 R_n 为植被冠层上方的净辐射通量, G 为土壤热通量, u_2 为地表以上 2 m 处的风速, T_a 为 2 m 处的气温, Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率, e_s 分别为实际水汽压和饱和水汽压, γ 为干湿球温度常数。

1.2 不饱和层土壤水分运动

土壤水分运动包括重力传导作用和毛细传导作用,采用一维 Richards 方程^[7]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta) + K(\theta) \frac{\partial \phi(\theta)}{\partial z}]$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} [K(\theta) + D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z}] \quad (2)$$

式中 θ 土壤湿度, $K(\theta)$ 土壤水传导系数, $\phi(\theta)$ 土壤水势, $D(\theta)$ 土壤液态水扩散系数。对方程求其差分分解为

$$\frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z_i} [D(\theta_i^2) \frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{0.5(\Delta z_{i-1} + \Delta z_i)} + K(\theta_i^1) - D(\theta_{i+1}^2) + \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{0.5(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})} - K(\theta_{i+1}^1)] \quad (3)$$

1.3 饱和层水分运动^[8,9]

饱和层水分运动采用 TOPMODEL 中的基本运动规则。整个流域的 DEM 被划分为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的单元网格,每个单元格与周边的单元格都有水分交换。对于任意给定的单元格 (i, j) ,使用一个 3×3 的移动窗口,将移动窗口的中心与该单元格重合,计算其与周边 8 邻域的水分交换情况。它与周边单元格的水分交换取决于其坡度 (β_{ijk})、水分传导系数 (T_{ij}) 以及有效距离 (w_{ijk}) 等因素

$$Q_{ij} = T_{ij} \beta_{ijk} w_{ijk} \quad \beta_{ijk} < 0 \\ 0 \quad \beta_{ijk} \geq 0 \quad (4)$$

式中 T_{ij} 定义为 $T_{ij} = K_{j,sat}(z_j) [\exp(-f_{ij} z_j) - \exp(-f_{ij} D_{ij})] f_{ij} K_{sat}(z)$ 为饱和传导系数, z_j 地下水位,

D_{ij} 土壤深度, f_{ij} 土壤特征参数。所以, 对于每一单元格而言, 其流入与流出的地下水水量分别为

$$Q_{out\ i\ j} = T_{ij} \sum_{k=1}^8 |\beta_{ijk}| w_{ijk}, \quad \beta_{ijk} < 0 \quad (5)$$

$$Q_{in\ i\ j} = T_{ij} \sum_{k=1}^8 |\beta_{ijk}| w_{ijk}, \quad \beta_{ijk} \geq 0 \quad (6)$$

1.4 各层土壤水分平衡方程

整个土壤层被划分为 5 层, 其中, 不饱和层 4 饱和层 1 层。各层之间的水分流动情况如图 2 所示。所以对于各层而言, 水分平衡方程分别如下:

$$\text{第 1 层: } \Delta W_1 = \text{Infiltration} - G_1 + C_1 - ET \quad (7)$$

$$\text{第 2 层: } \Delta W_2 = G_1 + C_2 - G_2 - C_1 \quad (8)$$

$$\text{第 3 层: } \Delta W_3 = G_2 + C_3 - G_3 - C_2 \quad (9)$$

$$\text{第 4 层: } \Delta W_4 = G_3 + C_4 - G_4 - C_3 \quad (10)$$

$$\text{饱和层: } \Delta W_1 = G_4 + \text{Inflow} - C_3 - \text{Outflow} \quad (11)$$

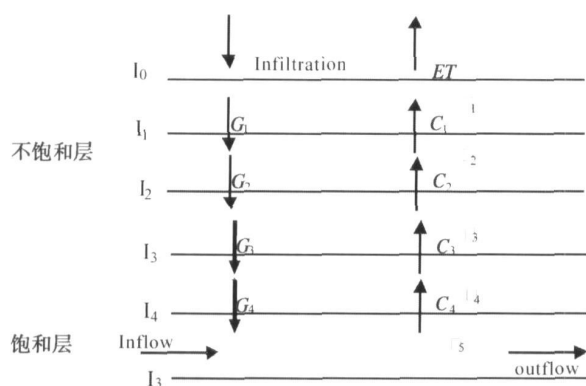


图 2 土壤层之间的水分运动状况

Fig 2 The water movement in the different soil layers

2 数据准备与模型初始化

模型中所使用的基本数据主要包括各类微气象、土壤、地形、植被数据等。式 (1) 计算中的微气象数据包括逐日的降水、气温、湿度、辐射、风速等数据, 这些由东川泥石流观测站观测所得, 土壤热通量 (G) 假定为净辐射通量的线性函数关系, 即: 地形数据由 1:10 万地形图得到, 并由此生成 DEM (50 m × 50 m) 和坡度、坡向等相关图层。

蒋家沟坡地的土层与坡地的成因和类型有关。整个流域发育的地带性土壤从下游往上游依次有燥红土、红壤、棕壤和紫色土 (图 3), 其性质分别是沙-壤-粘、沙-粘、沙-壤和粘-壤性质, 主要分布在分水岭及其毗邻的山地剥蚀面上, 一般发育厚度较大。而在急陡的谷坡上却缺乏地带性风化壳和土壤, 流域内广泛分布的是风化壳底层的岩屑碎石土。

所以相关土壤性质参数与其成熟的地带性土壤有一定的差异, 在模型中主要体现在土层的孔隙度取值和土壤饱和渗透系数的取值上。蒋家沟流域广泛分布的是宽级配的砾石土, 土层的孔隙度差异极大, 饱和渗透特性亦随之而变。根据文献^[10], 对于裸露土、坡耕地、草地土和林地土, 其孔隙度分别取值为 48.9%、46%、39.7% 和 49.7%。流域内的土地利用分布见图 4^[11]。根据王裕宜的研究^[5], 砾石土的饱和渗透系数 (K_s) 与土壤孔隙度 (φ) 之间存在由式 $K_s = 0.0126 \times \varphi + 0.0032$ 描述的统计关系, 由此式我们可以分别计算得到不同植被景观类型的土壤饱和渗透系数。

根据野外观测, 蒋家沟流域的大部分泥石流是浅层土体在降水作用下饱和后而形成, 一般在 20~30 cm 深左右, 且根据崔鹏、韦方强^[3,4]等对蒋家沟泥石流的研究和观测数据, 一般的降水对 40 cm 以上的土壤含水量变化影响较大, 40 cm 以下的土壤湿度保持相对稳定, 所以将不饱和层的每层厚度设定为 30 cm, 饱和层为地下水水位至基岩层。

雨季来临之前, 地下水水位和土壤层的湿度根据 TOPMODEL 的基本规则得到。对于 DEM 中的每个单元格, 湿度指数 (W_{ij}) 由下式得到

$$W_{ij} = \ln\left(\frac{A_{ij}}{\tan\beta_{ij}}\right)$$

式中 A_{ij} 为该单元格的汇水面积, β 为坡度。每个单元格地下水水位 ($Z_{t\ ij}$) 和湿度指数线性相关

$$Z_{t\ ij} = \bar{z}_t + m(W_{ij} - \bar{W})$$

式中 \bar{z}_t 为平均地下水深度, 取值为 0.8 m, \bar{W} 为平均湿度指数, m 为系数, 取 0.7。在汛期开始时, 不饱和层的表层土壤湿度赋值为该类型土壤的凋萎点, 其他层湿度赋值为该类型土壤的田间含水量的 70%。为了保证模拟的准确性, 模型采用模拟年份前 1 a 的数据对模型进行预热处理, 将其最后的模拟状态作为模拟年份的初始状态。

3 结果分析

崔鹏等人于 2001-06-20 开始在蒋家沟采用烘干法对含水率进行了连续 18 d 的观测, 观测地点为东川泥石流观测站对面的草质坡地, 其观测数据见文献[3]。烘干法所测得的是其质量含水量, 为计算方便, 本文将其转化为体积含水量, 转换方法为

$$\theta_v = \theta_m \times \rho_s$$

式中 ρ_s 取值为 2.0 g/cm³。



图3 蒋家沟流域土壤分布图

Fig.3 The soil map of Jiangjia Ravine

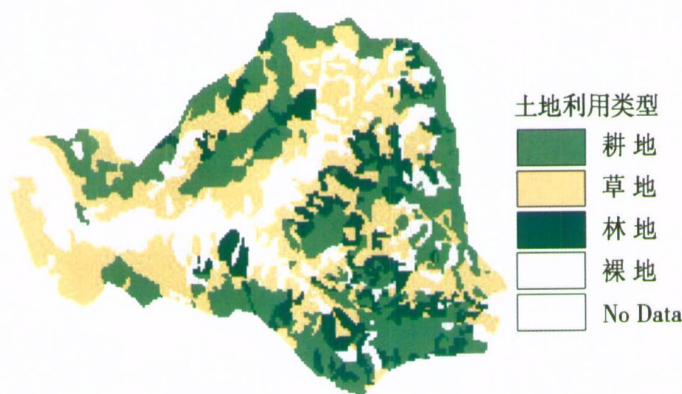


图4 蒋家沟流域土地利用图

Fig.4 The landuse of Jiangjia Ravine

3.1 观测点数据分析

图5为2001年蒋家沟流域的逐日降水与土壤湿度模拟图。从图中看出,观测值与模拟数据在观测时间段内变化趋势一致,数值上稍低,尤其在前6 d较为明显。出现这种现象可能与以下因素有关:(1)含水量数据转换误差。图中观测值的含水量是由质量含水量乘以容重得到的,转换时容重采用的是单一值,而实际上土壤的容重随土壤含水量不同有一定的差异;(2)降水数据误差。比较本文采用的降水数据与文献[3]中的数据,在观测时间段内共有5 d的降水数据出现差异,其中最大的一天达16 mm之多。因此,可以有理由推断降水数据在统计上有一定的误差。(3)土壤相关参数的误差。蒋家沟流域广泛分布的砾石土在土壤孔隙度、渗透特性等物理性质方面差异较大,而本文在模拟时采用的概化的参数值。总的来说,模拟结果基本上能够反映出观测点的表层土壤湿度的取值范围及其基本变化趋势,因此,此模拟结果具有一定的可信度。

从模拟结果看,表层土壤湿度变化对降水相当敏感。观测点的表层土壤湿度在旱季时,保持相当干燥的状态,湿度值基本上无变化,进入雨季后,土壤湿度值迅速增加,土壤湿度值随降水的多少有比较剧烈的波动,连续多日的降水后,会使土壤湿度值维持在较高的水平,连续多日的晴天后,土壤湿度值维持在较低的水平,大强度的降水会使土壤湿度急剧上升。

3.2 整个流域的土壤湿度空间分布

使用该模型还可以得到整个流域的逐日土壤湿度空间分布图。图6为第180 d(6月29日)的整个流域土壤湿度模拟图,该日有8.4 mm的降水。从图中看出,土壤质地因素是影响流域内土壤湿度空间分布的重要因素,呈现以下规律:(1)地面覆被类型不同,其土壤湿度有明显差异,耕地、林地土壤湿度最高,草地最低,裸露土地居中。值得注意的是,此处因地面覆被类型不同而导致的土壤湿度值的差异,并不是其蒸散量的不同所带来的湿度差异,而仍

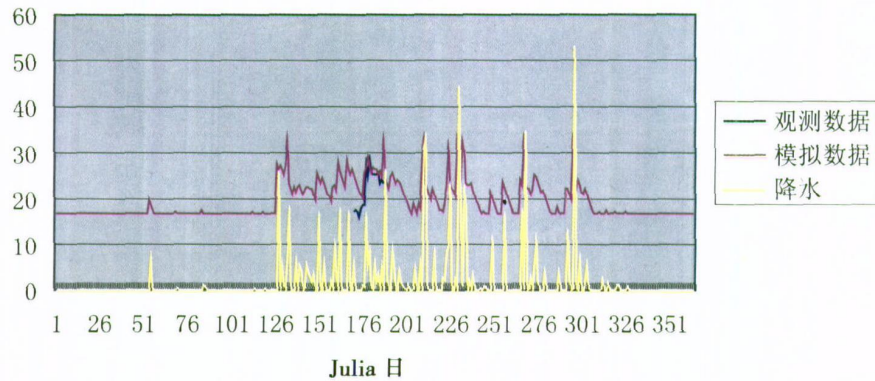


图 5 2001 年观测点表层土壤湿度逐日变化图

Fig. 5 The soil moisture of the field point and its simulation result in 2001

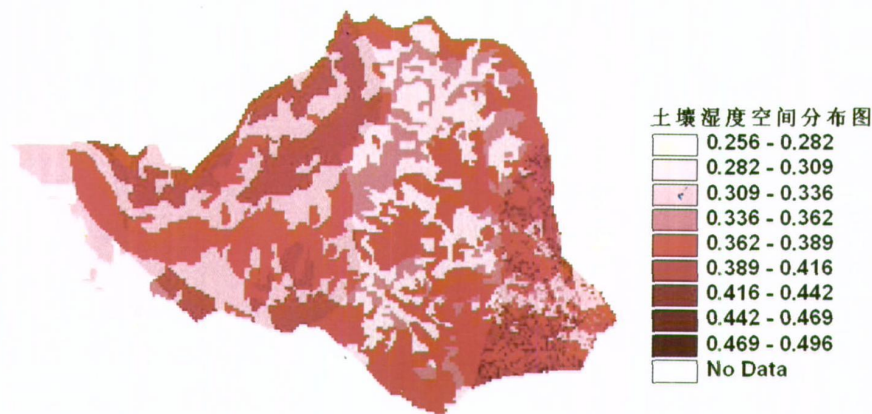


图 6 蒋家沟流域内土壤湿度空间分布图

Fig. 6 The spatial distribution of the soil moisture in Jiangjia Ravine

然是其土壤性质参数的(孔隙度和渗透特性)差异的结果;(2)同样的地面覆被类型,在不同地带性土壤带中,其土壤湿度值不同,紫色土带最高,其次是红壤带,再次到棕壤带,最后为燥红土带。流域内的土壤湿度空间分布情况尚缺乏实测的数据加以验证。

4 讨论

本文基于水分的物理循环过程并与半分布式水文分布模型 TOPMODEL 相结合,建立起土壤湿度逐日变化模拟模型。从蒋家沟流域 2001 年的模拟结果来看,本文所构造的模型能够比较好地模拟出流域内土壤湿度逐日变化情况。为了更精确地模拟出地面湿度变化的情况,还可以存在以下改进方面:

1. 微气象数据的改进。蒋家沟流域面积虽不大,但却涵盖了三个气候带(干热河谷区、中山半湿

润区、亚高山湿润区),三个带的各类微气象元素有很大的差异,下游属干热河谷区,降水量较少,蒸发量大,多数的暴雨中心位于流域的海拔 2 000~3 000 m 处,蒸发量也相对较小。本文使用的是位于流域下游的观测站的气象资料,对于流域上游的情况模拟可能有一定的差异。所以,获取不同高度带的各类微气象元素值,可有助进一步提高模拟精度。

2. 蒸散量计算的改进。受微气象资料和植被资料的影响,本文所使用的蒸散模型在计算时使用的是 Penman-Monteith 方程一种简化方式。如果能够获取比较高精度的微气象资料,可以采用 Penman-Monteith 方程复杂形势,根据地面植被覆被类型的不同,分别计算其蒸散量,真正体现出植被蒸散量的差异所带来的土壤湿度空间分布的差异,提高模拟精度。

3. 土壤质地参数的改进。蒋家沟广泛分布的

是宽级配砾石土,其物理特性有极大的差异。本文所使用的特征参数比较的概化。如能够获取精度较高的土壤特征参数,对于提高模拟精度也会有较大的帮助。

致谢: 本文所使用的气象资料来自于东川泥石流观测站。在资料收集和野外考察中得到了中国科学院成都山地所刘洪江博士和东川泥石流观测站张金山博士的大力帮助,特此致谢。

参考文献 (References)

- [1] Lin Yongming. Study on Interactions of Landscape Change and Soil erosion in the Typical Watershed of Jinsha River [D]. Ph. D Dissertation of Chinese Academy of Sciences, Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment (MHE), Chinese Academy of Sciences, 2008 [林勇明. 金沙江小流域景观格局变化与土壤侵蚀的耦合作用 [D]. 成都: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 2008]
- [2] Wu Jishan, Tian Lianquan, Kang Zhicheng. Debris Flow and Its Comprehensive Mitigation [M]. Beijing: Science Press, 1993: 20~89 [吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 20~89]
- [3] Cui P., Kun Y., Jie C. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation taking the Jiangjia Gully as an Example [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1): 11~14 [崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献 [J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11~14]

- [4] Wei Fangqiang, Hu Kaheng, Chen Jie. Determination of effective antecedent rainfall for debris flow forecast [J]. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(4): 453~457 [韦方强, 胡凯衡, 陈杰. 泥石流预报中前期有效降水量的确定 [J]. 山地学报, 2005, 23(4): 453~457]
- [5] Wang Yuyi, Zou Renyuan. Interrelated research of relationship between debris flows trigger and permeation coefficient [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(4): 76~82 [王裕宜, 邹仁元. 泥石流启动与渗透系数的相关研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 76~82]
- [6] Chen Ningsheng, Zhang Jun. The research of permeability on loose gravelly soil in debris flow original area [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(1): 169~171 [陈宁生, 张军. 泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律 [J]. 山地学报, 2001, 19(1): 169~171]
- [7] Liu Shuhua. Environmental Physics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 128~140 [刘树华, 环境物理学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 128~140]
- [8] Jing M., Chen Xiaoyong, Chen *et al.* Distributed hydrological for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 305: 15~19
- [9] Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology [M]. Colorado Water Resources Publications, 1995.
- [10] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, *et al.* Debris Flow Observation and Research in Jiangjia Ravine [M]. Beijing: Science Press, 1990: 20~26 [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 20~26]

The Simulation of the Variation of the Soil Moisture in the Jiangjia Ravine, Yunnan

TANG Jiafa

(College of Civil Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Soil moisture is one of the key hydro factors which caused the debris flow. To know the variation of the soil moisture is very important to the research of the initiation and the prediction of the debris flow. In this paper, a simulation model based on the physical process of hydro cycle and the distributed hydrology model TOPMODEL, is built to simulate the soil moisture variation in Jiangjia ravine of Yunnan in 2001. The simulation result is validated with the field surveying data which is got from 20 June to 7 July. It shows that the simulation result is little higher than the field data but has the same variation trend with it. So it can be said that the simulation model built in this paper can be used to simulate the variation of the soil moisture in Jiangjia Ravine.

Key words debris flow; soil moisture; simulation model; TOPMODEL