

流域水文模型在川中丘陵区小流域水沙过程研究中的应用

董先勇¹, 樊明兰², 缪 韧³, 刘刚才⁴

(1. 三峡水利枢纽梯调通信中心, 宜昌 443133; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计院, 成都 610072;
3 四川大学, 成都 610015; 4 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 流域水文模型对定量评价水沙的输出响应具有重要的作用。探讨了新安江流域水文模型在川中丘陵区小流域水沙过程研究中的应用, 结果表明该模型对水沙过程的模拟效果良好, 确定性系数达到 0.8 以上。为川中丘陵区小流域水沙输出的定量评估提供了一种有效的方法和思路。

关键词: 水文模型; 土壤侵蚀; 紫色土; 产沙模型

中图分类号: P338.4; P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0300-03

Study of Watershed Hydrological Model Application to Prediction of Runoff and Sediment Export Processes in a Catchments of Central hilly area, Sichuan Basin

DONG Xian-yong¹, FAN Ming-lan², MIU Ren³, LIU Gang-cai⁴

(1. Three Gorges Cascade Dispatching & Communication Center, Yichang, 443133, China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu, 610072;

3. Sichuan University, Chengdu 610015; 4. Institute of Mountain Hazard and

Environment, Chinese Academy of Science & Water Resources Ministry, Chengdu 610041, China)

Abstract: Watershed hydrological model is important to quantified evaluation of water and sediment export response. The watershed hydrological model of Xinanjiang was applied to predict the runoff and sediment output processes of a watershed in central hilly area of Sichuan Basin. The model was showed a well performance and the deterministic coefficient is over 0.8. Therefore, this model is an effective means for quantitative evaluation of water and sediment export response in the studied area.

Key words: hydrological model; soil erosion; purple soil; sediment model

流域水文模型属于数学模型, 它在水旱灾害防治和水资源开发利用中有广泛应用, 也是研究流域产沙过程和污染物在水中输移过程的必要前提^[1]。流域水文模型是水文学发展到一定阶段的产物, 它丰富了水文学的研究体系和研究手段, 并随着水文学、计算机科学的发展而发展, 促进了水文学的总体发展。随着计算机技术和数字技术的发展, 目前, 分布式流域水文模型(属于物理模型)是水文学的研究热点之一^[2,3,4,5,6,7], 因为它能较准确地描述水文过程的机理, 能有效利用地理信息系统和遥感技术提供的信息。但是, 分布式流域水文模型由于需要大量的数据信息, 应用难度还较大。

概念性流域水文模型, 它与物理模型相比, 具有它的许多优点, 受到水文学家和水文工作者的普遍重视。创建于上个世纪 70 年代的新安江模型^[2] 经过将近半个世纪不断修改完善, 已经成为一个十分成熟的水文模型。它在湿润地区与半湿润地区的湿润季节的应用中取得巨大成功。但是, 该模型在四川丘陵区的应用研究还不多见。

四川盆地丘陵区总土地面积 15.8 万 km², 主要为紫色土, 其水土流失程度, 仅次于我国北方的黄土。土壤侵蚀强

度达 5 000 t/(km²·a) 左右, 水土流失面积达 7.71 万 km², 占区内总土地面积的 48.8%, 年流失表土 3.77 亿 t, 占全省土壤侵蚀量的 36.7%^[8]。紫色土的水土流失已成为进一步发展四川农业生产的主要障碍。

关于紫色土坡面的水土流失过程已有一些研究^[9,10], 但是就流域的水沙过程研究相对较少。因此, 本研究的目标是: 探索新安江水文模型在紫色土丘陵区小流域水沙输出过程中的应用效果, 为该地区小流域水沙输出的预测预报提供一定的科学依据。

1 流域产流产沙模型的建立

流域产流产沙是流域内径流和侵蚀物质运动、输送的结果, 受多种因素的影响, 机理极为复杂, 亟待深入研究。只有掌握水流泥沙的产生、输送等过程, 揭示其规律性, 才有可能用数学表达式加以描述求解。

1.1 模型结构

本文建立的模型名称为: 小流域产流产沙模型, 其主要由流域产流模型和流域产沙模型组成。其模型结构见图 1。

流域产流模型主要应用三水源新安江模型, 共有四个子

* 收稿日期: 2006-06-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“长江上游环境变化与水产产沙作用机制”(编号: 2003CB415202-6) 资助; 国家自然科学基金青年基金项目“紫色土土壤允许侵蚀量的原态定位研究”(编号: 40201029)

作者简介: 董先勇(1977-), 男, 山东泰安人, 从事水文预报及水库调度工作; 通讯作者: 刘刚才。

模型组成。其产流子模型采用蓄满产流模式; 蒸发模型采用三层蒸发模型; 三水源划分模型将径流总量区分为地表径流, 壤中流和地下径流三个部分; 坡面汇流子模型分为三个部分, 地表径流采用经验单位线汇流, 壤中流和地下径流用基于蓄满产流理论的线性水库演算法计算。由于该实验区面积较小, 河道汇流阶段省略。直接将坡面汇流演算到各自流域的出口断面。

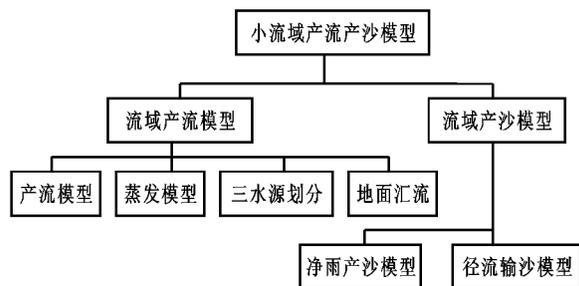
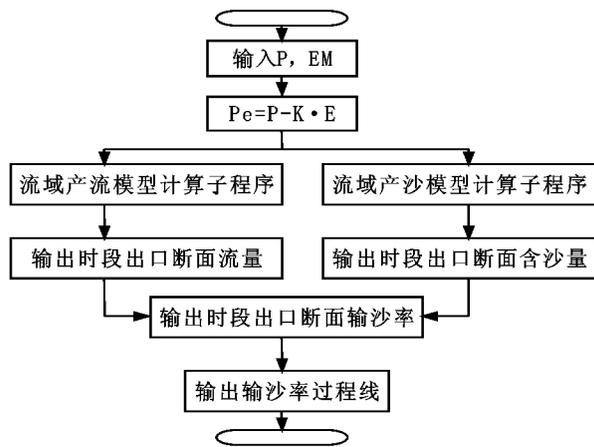


图 1 小流域产流产沙模型结构图

流域产沙模型由净雨产沙模型和径流输沙模型两个子模型组成。净雨产沙模型是根据美国 USLE 模型, 结合中国北方黄土地区的经验模型取长补短修正而成的。径流输沙模型是采用以含沙量经验单位线^[1]为基础构成的模型。

1.2 模型计算

本文建立小流域产流产沙模型的主要目的是能够定量确定降雨过程中出口断面悬移质输沙率(Q_{sa})的多少, 为川中丘陵区水土流失研究提供一种的可靠途径。本模型的输入为降雨和蒸发, 输出为断面出口输沙率。其计算流程如图 2 所示。



图中: P- 指的时段降雨量(mm); Pe- 时段净雨(mm)。

图 2 小流域产流产沙模型计算流程示意图

2 流域产流产沙模型的应用

2.1 流域概况

研究小流域位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(简称盐亭站, 东经 $105^{\circ} 28'$, 北纬 $31^{\circ} 16'$) 所在的小流域——四川盆地中北部的盐亭县林山乡西沟。小流域面积为 0.35 km^2 , 海拔高程为 $365.0 \sim 576.5 \text{ m}$ 。该流域自然植被类型为桉木和柏木混交林, 散生乔木及黄茅草等。土壤类型以钙质紫色土为主, 质地为中壤至重壤, 部分为砂质土。气候类型为中亚热带气候带。

小流域内年平均气温 17.3°C , 最高月平均气温(7月) 27.2°C , 最低月平均气温(1月) 6.2°C , 极端最低气温 $-2.0 \sim -3.0^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 $38.6 \sim 41.2^{\circ}\text{C}$, 大于 0°C 的积温为

$300 \sim 5700^{\circ}\text{C}$, 平均年降雨量 825.5 mm , 无霜期 294 d , 瞬时最大风速 37 m/s , 最大日暴雨量达 200 mm 。区内溪沟属于雨源型侵蚀冲沟, 河水暴涨暴落, 旱季(冬季)近乎断流。

2.2 模型参数确定

本模型需要参与率定的参数, 分新安江模型参数和产沙模型参数两类。因为产流产沙是两个相对独立的过程, 这样就使得在进行参数确定的时候比较方便, 能够针对其产流和产沙两个独立的过程进行各自参数选择。最后各自过程对应时段内的流量与含沙量之积即为输沙率。

新安江模型参数主要有蒸发折算系数(K)、蓄水容量分布曲线指数(B)、深层散发系数(C)、张力水容量(WM)、上层张力水容量(WUM)、下层张力水容量(WLM)、不透水面积比例(IM)、自由水容量(SM)、自由水容量分布曲线指数(EX)、地下水出流系数(KG)、壤中流出流系数(KI)、地下水消退系数(CG)、壤中流消退系数(CI)。

另外, 模型参数初始值还包括上、中、下层初始土壤含水量, 即分别用 WU_0, WL_0, WD_0 表示, 产流面积初值为 FR_0 , 自由水蓄水深度初值为 S_0 , 壤中流及地下径流初始值分别为 QI_0, QG_0 。其中, 上、中、下层土壤含水量之和即为初始土壤含水量 W_0 。

产沙模型的参数主要有综合因子参数 α 、指数参数 β 两个。

2.2.1 产流模型参数确定

首先对新安江模型的参数进行优选与综合。参数优选是模型制作的一个最重要的环节, 在多参数的一次性优选中, 不但存在着观测资料不完整而给成果真实性带来的影响, 而且还存在着参数之间的互相作用, 即参数间的互相补偿使成果出现虚假问题, 既有人为因素, 又有客观原因。因此, 对新安江模型的 9 个敏感参数采用分段组合优选的方法, 各段采用不同的目标函数、不同的优化方法。分段迭代优选, 直至迭代前后参数的差值满足所给精度。对各年优选出的参数进行合理性分析, 检查是否符合其物理意义, 是否符合其地区分布规律, 是否与其它年份的误差较大等, 最后对各年的参数值进行综合, 得到最优的模型参数。本次共应用研究小流域的 4 次次洪水过程进行模型参数率定, 两次用来检验。其参数结果见表 1。

表 1 新安江模型参数表

序号	参数意义	参数	参数值
1	蒸发折算系数	K	0.8
2	蓄水容量分布曲线指数	B	0.08
3	深层散发系数	C	0.15
4	张力水容量(mm)	WM	100
5	上层张力水容量(mm)	WUM	20
6	下层张力水容量(mm)	WLM	60
7	不透水面积比例	IMP	0
8	自由水容量(mm)	SM	70
9	自由水容量分布曲线指数	EX	1.5
10	地下水出流系数	KG	0.3
11	壤中流出流系数	KI	0.4
12	地下水消退系数	CG	0.981
13	壤中流消退系数	CI	0.82

2.2.2 产沙模型参数确定

产沙模型的参数只有两个。本文用科林法来确定该地区的经验单位线, 配合产沙模型参数 α, β , 经过反复调整, 综合分析得出该流域的经验单位线。本次共应用研究小流域三次洪水过程进行模型参数率定, 一次洪水过程应用于检验。各次洪水产沙模型参数见表 2。含沙量经验单位线见表 3。

表 2 小流域产沙模型模拟过程统计表

洪水号	起涨时间	降雨总量 /mm	参数		确定性 系数
			α	β	
040801	8月01日 17:15	37.9	0.055	2.0	0.84
040804	8月04日 16:30	23.5	0.08	2.0	0.87
040813	8月13日 12:00	24.1	0.1	2.0	0.92
040823	8月23日 12:45	35.7	0.05	2.0	0.93

表 3 小流域含沙量经验单位线

时段序列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
单位线纵坐标	0	8	75	110	157	159	123	96	74	64	
时段序列	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
单位线纵坐标	53	48	43	37	32	27	22	16	11	6	0

2.3 模拟效果分析

在可以查阅的资料当中, 往往都是计算一段时间内(如: 一年, 一月, 一日, 一次洪水过程) 产沙总量的多少。而本次

产沙过程模拟是从输沙率预报的角度入手, 建立降雨和流域出口断面泥沙含量的关系, 因此模拟的重点是输沙率过程线的拟合程度。使用 Nash-Suttcliffe 系数^[11]来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度。本研究选择小流域 2004 年 8 月份的三次洪水过程进行分析, 两次洪水进行参数率定, 用 040813 洪水进行检验。各次洪水过程的模拟结果如表 4 所示。其模拟过程分别见图 3、4 和 5。(注: 图中黑点表示含沙量过程实测点, 落洪阶段由于泥沙含量较低, 未能有效测出。)

表 4 小流域输沙率过程模拟统计表

洪水号	起涨时间	降雨总量 /mm	参数		确定性 系数
			α	β	
040801	8月01日 17:15	37.9	0.055	2.0	0.90
040804	8月04日 16:30	23.5	0.08	2.0	0.93
040813	8月13日 12:00	24.1	0.1	2.0	0.82

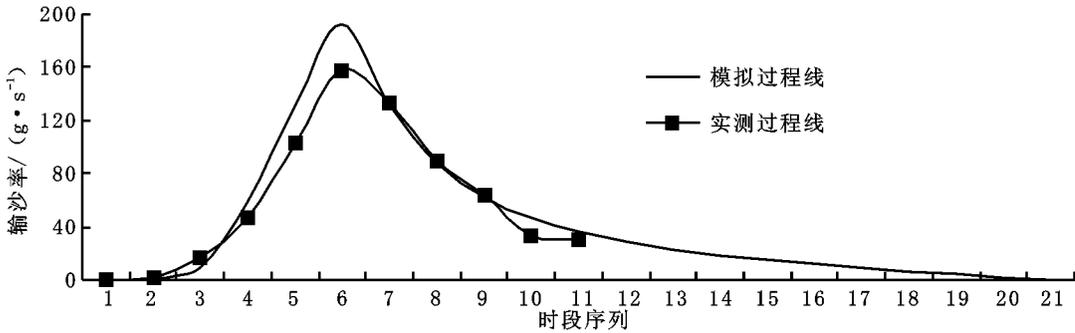


图 3 040801 洪水小流域输沙率模拟过程线

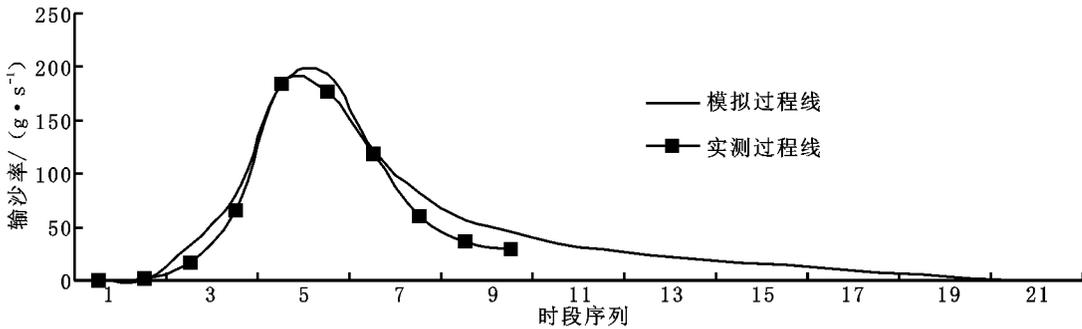


图 4 040804 洪水小流域输沙率模拟过程线

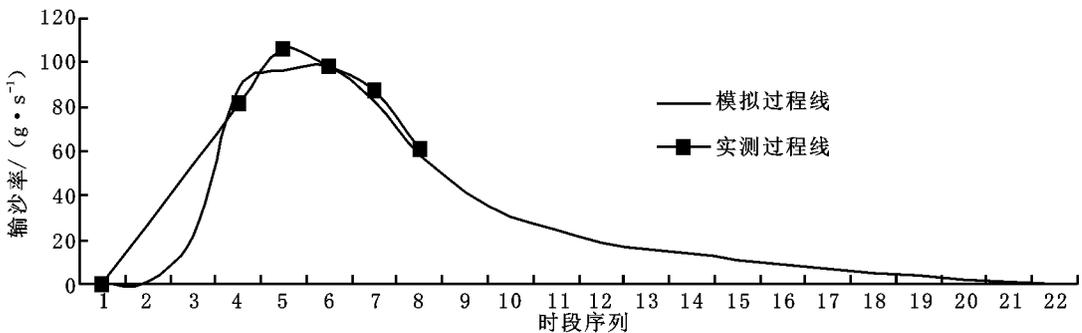


图 5 040813 洪水小流域输沙率模拟过程线

3 结论

(1) 新安江模型在川中丘陵区首次应用, 取得良好的效果, 并确定了适合川中丘陵区小流域的一组模型参数及经验单位线。从洪水拟合成果可以看出, 本文所做的处理方法和思路是较为合理的, 其模拟精度也满足要求, 是处理雨量站

点少, 小流域水文预报问题的有效途径。

(2) 流域水文模型结合流域产沙模型耦合, 应用在小流域水沙过程研究中, 不仅使其洪峰及水量得到了很好的控制, 而且能把流域输沙过程进行有效模拟, 对小流域泥沙预报提供了一定的借鉴作用。

(下转第 305 页)

干渠位于柳东水厂对岸, 其混合区宽度为 190~ 220 m;

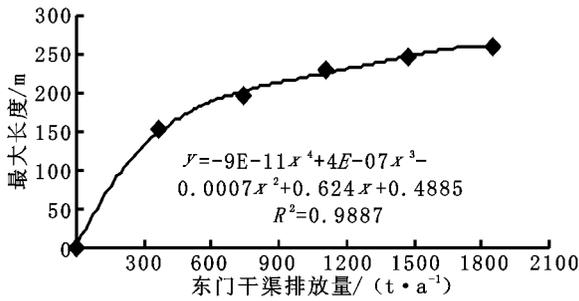


图 5 东门干渠排污与混合带宽度关联图

3 水源地保护对策

3.1 削减入河污染物量

要保证柳南、柳东水厂水质达标, 必须对上述 3 个排污口的排放量加以限制。根据现状排污状况、上述建立的关系曲线以及混合区的限制范围^[6], 计算得这 3 个排污口排污控制量见表 1。

表 1 各主要影响污染源的排污控制量

水源地	主要影响污染源	排污控制量(t/a)
柳南水厂	竹鹅溪	4000
	华丰湾	800
柳东水厂	东门干渠	300

(1) 削减排放量。主要是要加大对柳州市工业和生产污染源的治理, 尤其是要控制竹鹅溪、华丰湾和东门干渠等的入河污染物量。

(2) 兴建截污工程。修建污水截流管道, 截走重要影响

参考文献:

[1] 谭维炎, 胡四一. 二维浅水流动的一种普适的高性能格式—有限体积 Osher 格式[J]. 水科学进展, 1991, 2(3): 154- 161.
 [2] 赵棣华. 平面二维水流—水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 368- 373.
 [3] Spekijse S P. Multigrid solution of steady Euler equations[M]. Amsterdam: CW I Y race 46, 1988. 10- 60.
 [4] 龚若愚, 周源岗. 柳州柳江段水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2001, (1): 31- 32.
 [5] 逢勇, 赵棣华, 等. 长江江苏段区域供水水源地水质可达性研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 184- 188.
 [6] 孙卫红, 姚国金, 等. 基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J]. 水资源保护, 2001, (2), 24- 26.

(上接第 302 页)

参考文献:

[1] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. 水科学进展, 1997, 8(1): 94- 98.
 [2] 李道峰, 吴悦颖, 刘昌明. 分布式流域水文模型水量过程模拟——以黄河河源区为例[J]. 地理科学, 2005, 25(3): 299- 304.
 [3] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143- 154.
 [4] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 495- 500.
 [5] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 517- 520.
 [6] 王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟——模型的原理与结构[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 501- 505.
 [7] 郑红星, 王中根, 刘昌明, 赵为民. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟——模型的校验与应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 506- 510.
 [8] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 1- 3.
 [9] 刘刚才, 林三益, 刘淑珍. 四川丘陵区常规耕作制下紫色土径流发生特征及其表面径流数值模拟[J]. 水利学报, 2002, (12): 101- 108.
 [10] 刘刚才, 高美荣, 林三益, 等. 紫色土两种耕作制的产流产沙过程与水土流失观测准确性分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 108- 111.
 [11] 董先勇. 水文流域模型在水沙过程研究中的应用[D]. 成都: 四川大学水电学院, 2005. 41- 46.

污染源的污水, 由污水处理厂(图 6)处理后从下游排出, 以减少排入该河段的污染物质, 保证水源地水质达标。



图 6 规划水源地及污水处理厂位置图

3.2 另设取水口

柳州市是广西的工业中心, 近年经济发展迅猛, 各行业需水量增加的同时, 污水排放量也在增加。削减入江污染物量可以减轻水源地水质污染状况, 但城中、柳南和柳东水厂取水口位于城区河段, 水源水质危机性依然隐存。

《柳州市城市总体规划, 2004- 2020》中提出: 逐步取消这 3 个水厂, 仅保留水源位于城市上游的柳西水厂和柳北水厂。但是柳北水厂存在众多不利因素, 因而对现状柳北水厂进行土地置换, 水厂另择新址建设。柳西水厂厂区内布置较拥挤, 周围用地已占满, 扩建不可行。故保留柳西水厂, 在柳江河左、右岸分别新建水厂即柳北新水厂和柳西新水厂(图 6)。

从上述研究可以证明该规划提出的方案是合理可行的。