

三峡库区森林小流域森林理水调洪功能模拟研究

齐 实¹ 王云琦¹ 孙 阁² 朱金兆¹ 肖玉保¹ 杨海龙¹ Steve McNulty²

(1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 2 美国农业部林业局南方全球变化研究中心)

摘要:为给三峡库区理水调洪型植被建设提供方法和依据, 该文以四面山响水溪森林小流域为研究对象, 采用美国地质调查局(USGS)主持开发的 MMS(模块化模型系统), 构建适合于三峡库区的分布式暴雨水文模型 PRMS-Stom, 模拟暴雨产流过程. 结果表明: ① PRMS-Stom 用来模拟响水溪森林流域暴雨产流过程满足国家乙级洪水预报标准, 可用来发布洪水预报; ②综合不同森林群落水文功能评价结果, 提出流域 3 种森林群落配置情景: 针阔混交林型(情景 1)、阔叶混交林型(情景 2)、综合配置型(针阔混交林、常绿阔叶林和灌木林)(情景 3); ③对各森林群落配置情景的模拟表明, 各配置情景都可使地表径流减少 20% 以上, 壤中流增加 16% 以上; 与流域植被现状相比, 各配置情景, 分别可削减洪峰 20.8%、9.6% 和 18.9%; 最大降雨峰值 > 0.8 mm/min 的降雨过程削减洪峰的作用非常明显, 尤其对短时降雨洪峰的削减作用更明显; 针阔混交林型理水调洪作用最优, 是最优的理水调洪配置情景, 其次是综合配置型, 阔叶混交林型较差. 但是, 从所研究的响水溪流域实际情况出发, 综合配置更符合实际, 是最佳理水调洪型群落配置.

关键词:三峡库区, 理水调洪, PRMS-Stom 模型, 森林流域, 水文模拟

中图分类号:S715 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2006)05-0042-10

QI Shi¹; WANG Yun-qi¹; SUN Ge²; ZHU Jin-zhao¹; XIAO Yu-bao¹; YANG Hai-long¹; Steve McNulty².

Modeling the effects of reforestation on peakflow rates of a small watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Beijing Forestry University* (2006) 28(5) 42-51 [Ch, 24 ref.]

¹ Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P.R. China;

² Southern Global Change Program, USDA Forest Service, Raleigh, NC27606, USA.

For vegetation construction with hydrological function in the Three Gorges Reservoir Area, the storm event distributed hydrological model PRMS-Stom was built based on MMS (Modeling Module System) developed by the US Geological Survey, and was employed to study the effects of forests on peak flows in the Xiangshuixi Forest Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. The results showed that: 1) this simulation study suggested that PRMS-Stom can meet the second level national flood prediction standards for simulating storm events of small forest watersheds, and can issue flood forecasting; 2) hydrological functions of different vegetation communities were evaluated, and three simulation scenarios were arranged, they were mixed conifer-broadleaved forests (scenario 1), broadleaved forests (scenario 2) and general forests arrangement (scenario 3); 3) the well-arranged forest scenarios can reduce over 20% of surface runoff and result in an increase of over 16% in subsurface flow, and can decrease peak flow by 20.8%, 9.6% and 18.9%. The reduction of peak flow rates was significant when rainfall peak was set higher than 0.8 mm/min, especially for short term rainfall events. In general, we found that scenario 1 and scenario 3 were preferable for reducing peak flow rates and volumes in the reforestation practices in the study region, and scenario 1 was better than scenario 3, so the mixed conifer-broadleaved forests had the best hydrological function in theory. However, in practice, considering the natural conditions of watershed, general forests arrangement (scenario 3) should be the best.

收稿日期: 2005-11-14

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571486)、“十五”国家科技攻关项目(2001BA510B02-01)、国家留学基金项目(CSC)(21327026).

第一作者: 齐实, 博士, 副教授. 主要研究方向: 流域管理. 电话: 010-62338040 Email: qishi@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京林业大学水土保持学院.

Key words Three Gorges Reservoir Area, hydrological effects, PRMS-Stom model, forest watershed, hydrologic modeling

森林植被对洪水的影响,长期以来一直是人们争论的话题^[1].森林能够影响流域的水量平衡及径流量的时空分布,并主要反映在水资源的总量和径流量及其季节变化频率和洪峰径流量等要素上.

国内外已有研究表明,森林对洪水的影响随外界条件的变化而变化,随暴雨增加而减弱,对小流域的作用大于大流域^[2-3];与降雨和流域的蓄存作用相比,对于大的洪水,森林植被的作用是次要的^[4],森林植被对径流的季节分布及频度变化有直接影响^[5],森林覆盖率大小与洪峰流量成反比,与枯水期流量成正比^[6-7].Chang^[8]系统地总结了森林对洪水的影响,其主要结论是:森林的减少会增加产水量和洪峰流量;对小流域(5~10 km²)而言,其洪水过程主要由坡面过程控制;对大流域(>1 000 km²),主要由地形因素和河网控制;总体来说,森林植被对洪水的作用不大,原因是在大暴雨时,森林对降雨的截留、入渗,以及森林土壤的储水量有限.但DeWalle^[9]指出,虽然过去一直认为森林植被对洪水的影响很小,但近年来发生在中国、印度、巴基斯坦的上游森林破坏造成的洪水现象,需要我们重新认识这一问题.

总的来看,森林削减洪峰的作用是有条件的,受多种因素影响.但是,森林植被究竟在多大程度上对洪水有影响依然没有明确答案,通过建立分布式水文模型、采用计算机模拟是解决和回答这一问题的最有效途径^[10].

分布式水文模型已广泛用于模拟和预测流域水文效应,并被认为是开展此类研究的有效途径,目前大多数分布式水文模型都适用于研究较长时间尺度的流域水资源管理^[11-15],对于暴雨洪水预报的应用受到限制.美国地质调查局开发的模块化模型系统(Module Modeling System,简称MMS),不仅可用来评价降水、气候和土地利用等综合因素对流域产流、产沙及流域水文的影响,研究水资源平衡,而且能够模拟流域水文对极端降雨和融雪的响应,研究洪水过程、洪峰及洪水流量、土壤水分变化、流域产沙量及地下水补给.MMS在美国流域水文模拟中应用较为广泛^[16-19],而在我国的应用较少.

本研究目的是利用美国地质调查局主持开发的MMS,根据三峡库区自然条件和理水调洪植被建设目的,选择其中合适模块,构建研究区的分布式暴雨水文模型PRMS-Stom(The Precipitation Runoff Modeling System),对流域暴雨产流过程进行模拟和预测.同时,研究和评价不同森林群落类型的理水调洪功能,通过情景模拟,筛选最优群落配置情景,突

破国内研究主要集中探讨森林植被覆盖率变化与流域径流量变化的关系上^[20-22],为三峡库区植被建设提供方法和依据.

1 研究区概况

选取三峡库区尾端重庆四面山和缙云山作为研究基地.四面山地理位置为E106°17'~106°31'、N28°31'~28°46',缙云山地理位置E106°17'~106°24',N29°41'~29°52'.四面山和缙云山同为四川盆地川东褶皱带与贵州高原大娄山脉的过渡地段,属于北半球亚热带季风性湿润气候区,水平地带为典型的中亚热带常绿阔叶林生物气候带.年均气温13.7℃,主要土壤类型为黄壤,主要优势树种为马尾松、杉木、香樟、丝栗、华山松(*Pinus armandii*)、大头茶和山矾(*Symplocos setchuanensis*)等.竹林作为亚热带常绿阔叶林的一种特殊种群分布较为广泛.四面山地势南高北低,海拔高度在1 000~1 550 m之间,多年平均降雨量1 127 mm,年最大降雨量为1 550 mm.缙云山最高处海拔951.5 m,相对高差600 m.年平均降水量1 611.8 mm.

四面山响水河流域主要森林群落组成见表1.在四面山响水河流域(见图1和图2)内布设有大(1号站,控制流域面积7.98 km²)、中(2号站,控制流域面积7.02 km²)、小(3号站,控制流域面积0.95 km²)3个相互嵌套的小流域,进行流域出口水位观测.

在缙云山自然保护区内选取4个主要的森林群落类型(针阔叶混交林、常绿阔叶林、楠竹林和灌木林),布设标准径流小区(5 m×20 m),进行林内降雨、地表径流和地下径流观测.

2 研究内容和方法

2.1 分布式暴雨水文模型构建

根据本研究的目标——模拟暴雨条件下洪水过程及洪水径流成分,同时考虑三峡库区的自然条件,依据系统工程原理,按照模型结构示意图(见图3),从MMS平台中选取了包括降雨、温度、蒸发、截留、下渗、地表径流、亚表层径流、地下水在内的19个水文模块.土壤水分入渗采用Green-Ampt模型、坡面径流采用运动波方法、亚表层径流根据土壤水分平衡进行计算.这些模块概化了森林小流域的水文功能,并采用数学方法对各单元的输入和输出变量及状态变量进行描述,再根据产流和汇流的物理联系过程进行组织,构成一个逻辑严密、时空上可以递推的分布式暴雨水文模型PRMS-Stom.

表1 主要群落类型树种组成

TABLE 1 Composition of main forest communities

群落类型	主要树种组成	主要下木种
针叶纯林	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> 柳杉 <i>Cryptomeria fortunei</i>	荚蒾 <i>Viburnum</i> 绒毛红果 <i>Strawaesia tomentosa</i> 苏铁 <i>Cycas revoluta</i>
阔叶纯林	香樟 <i>Cinnamomun camphora</i> 檫木 <i>Sassafras tsumu</i> 板栗 <i>Castanea mollissima</i> 丝栗 <i>Castanopsis fargesii</i> 石栎 <i>Lithocarpus polystachyus</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 卫矛 <i>Euonymus alatus</i> 蕨类 <i>Pteridiaceae</i> 枫香 <i>Liquidambar formsana</i>
针阔混交林	杉木 马尾松 阔叶林	杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i> 胡枝子 蕨类 柃木
阔叶混交林	木荷 <i>Schima superba</i> 元江栲 <i>Castanopsis orthacantha</i> 福建柏 <i>Fokienia hodginsii</i> 大头茶 <i>Gordonia axillaris</i> 白毛新木姜子 <i>Neolitsea aurata</i> 杨桐 <i>Adinandra bockiana</i> 香樟 石栎	小叶栲 <i>Castanopsis carlesii</i> 贵州鼠李 <i>Rhamnus esquirolii</i> 四川山矾 <i>Symplocos setchuensis</i> 柃木 悬钩子 <i>Rubus</i> 芒草 <i>Aristida brevissima</i> 蕨类马银花 <i>Rhododendron ovatum</i> 枫香
楠竹林	楠竹 <i>Phyllostachys pubescens</i>	杜茎山 <i>Maesa japonica</i> 菝葜 <i>Smilax china</i> 地瓜藤 <i>Ficus virens</i>
灌木林	杉木 柃木 <i>Eurya japonica</i> 日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i> 润楠 <i>Machilus nanmu</i> 尖尾茶 <i>Camellia japonica</i>	
荒草地		

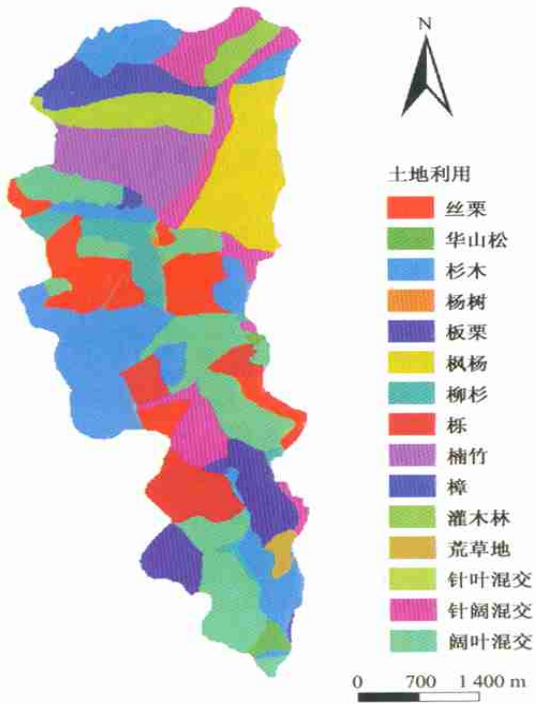


图1 四面山响水溪流域土地利用
FIGURE 1 Land use of Xiangshuixi Watershed in the Simian Mountain

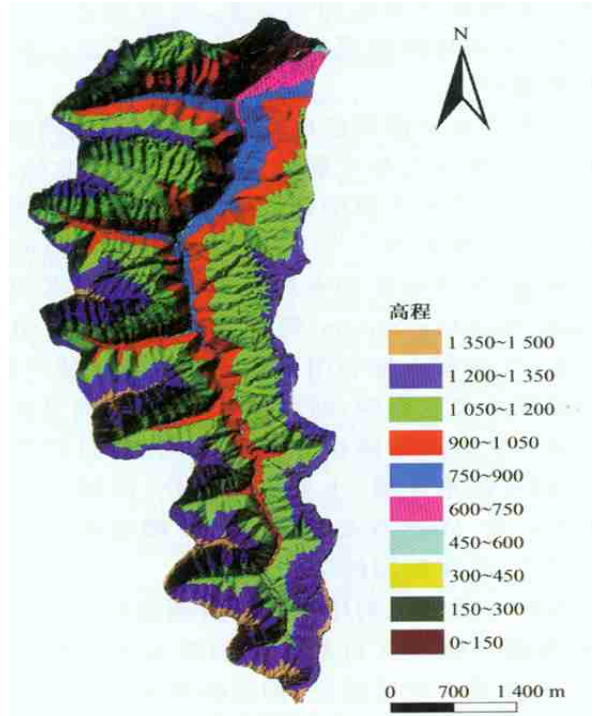


图2 四面山响水溪流域地形图
FIGURE 2 Topography of Xiangshuixi Watershed in the Simian Mountain

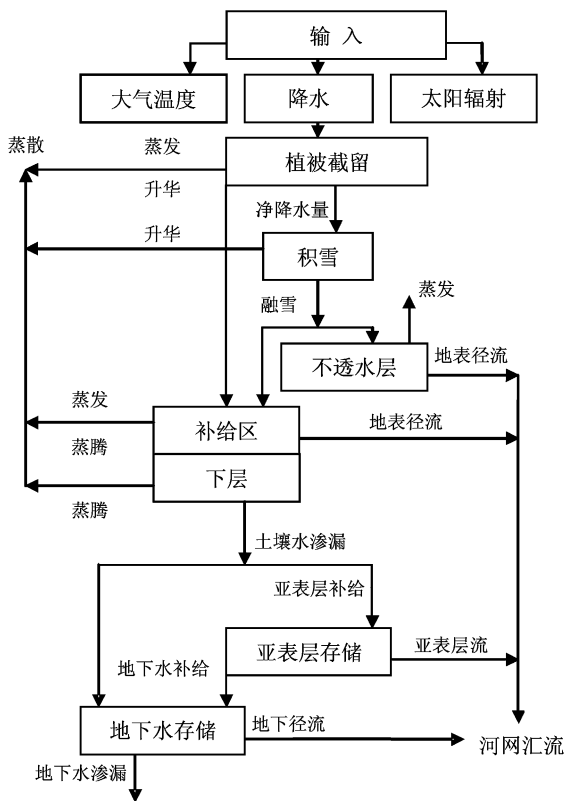


图 3 PRMS-Storm 模型结构示意图

FIGURE 3 Schematic representation of different components of PRMS Storm model

2.2 水文响应单元划分

采用地理信息系统软件 ArcGIS 进行水文响应单元(HRU)的划分.根据 1:10 000 的响水河流域地形图提取了数字高程(DEM)(图 2),生成水文网图,然后与土地利用图叠加将四面山响水河流域(流域面积为 7.98 km²)划分为 28 个不同水文单元(图 4).

2.3 数据获取和整理

模型所需的气象和洪水数据均为实测数据.响水河流域产流量采用 WGZ-1 水位记自动记录流域产流水位变化(每变化 1 mm,记录 1 次).在林外布设全自动气象站,观测内容包括降雨、风、蒸发量、空气温湿度和土壤温湿度等,其中记录降雨的仪器为 B-432-Z 型 100 d 自计雨量计,记录步长为 5 min.

在缙云山坡面实验小区,在林外布设全自动气象站,记录各气象要素(记录步长为 5 min).林内布设 CR2 型自计雨量计,记录林内降雨过程(记录步长为 1 min).在坡面径流小区内,采用 LT9801A 数据记录仪自动记录不同小区的坡面径流与地下径流的变化过程(记录时间步长为 10 min).

自记雨量数据需要转换为模型调用的标准数据格式,时间步长为 15 min.径流数据根据水位-流量对应关系,可将水位数据转化成与暴雨数据一一对应的流量数据,时间步长为 15 min.

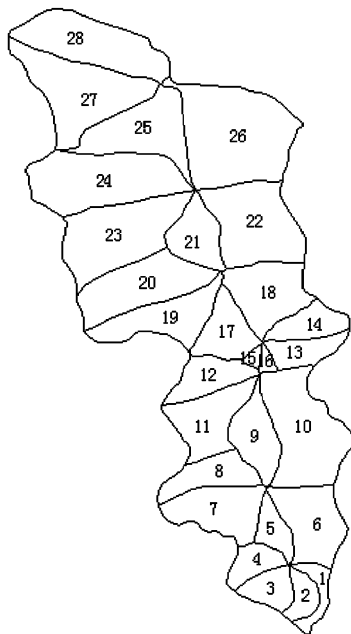


图 4 四面山响水河流域水文响应单元

FIGURE 4 Generalized boundaries of delineated hydrologic response units for Xiangshuixi Watershed in Simian Mountain

2.4 模型参数获取

2.4.1 地形参数

利用 ArcGIS 的空间分析模块由 DEM 生成和计算模型所需的地形参数,主要包括每个 HRU 的平均高程、平均坡度、平均坡长、沟道比降和长度.

2.4.2 土壤、植被参数

土壤参数中的土壤类型和土壤厚度采用土壤剖面调查获取,土壤层持水量和土壤渗透速度采用试验烘干法和双环入渗法获取,枯落物持水量采用浸水实验来确定.

植被参数主要包括覆盖类型、覆盖度和林冠截留率.植被覆盖类型和覆盖度采用代表性标准地调查来确定,林冠截留率采用林内降雨定位观测来确定.

2.5 模型检验

模型检验是对模型仿真结果与现实观测结果之间的差异进行比较分析,以评价模型的有效性.采用 Nash 模型提供的确定性系数 E 对模型模拟效果进行检验^[23],同时采用相关系数 R 进行统计检验.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2} \quad (1)$$

式中, E 为 Nash 模型确定性系数, Q_{oi} 为日/月径流实测值, Q_{si} 为日/月径流模拟值, Q_o 为日/月平均实测径流值, n 为模拟时段数.

根据水利部《水文情报预报规范 SL250-2000》规定:洪峰预报许可误差值在降雨径流预报中以实测洪峰流量的 20% 作为许可误差;峰现时间预报许可

误差值通常以 3 h 作为许可误差;径流深以实测值的 20% 作为许可误差;洪水预报精度可根据确定性系数 E 和洪水预报合格率(合格预报次数占预报总次数的百分比)(见表 2)。经精度评定,洪水预报方案精度达到甲、乙两个等级者,可用于发布正式预报。

表 2 洪水预报精度等级表

精度等级	甲	乙	丙
合格率 QR	$\geq 85\%$	$85\% > QR \geq 70\%$	$70\% > QR \geq 60\%$
确定性系数 E	> 0.9	$0.9 \geq E \geq 0.7$	$0.7 > E \geq 0.5$

2.6 森林群落理水调洪功能评价

动态评价:通过缙云山各森林群落坡面尺度实测地表径流和地下径流数据作为动态指标,对坡面产流特征进行动态评价。

静态评价:以四面山响水流域典型森林群落的林冠层、枯落物层和土壤层水文特征值作为静态指标,采用层次分析法(AHP法)获得指标权重 W_j ,然后采用综合评分法对森林群落理水调洪功能进行评价。综合评分法数学表达式如下:

表 3 各森林群落类主要土壤、植被参数值

群落类型	林冠层		灌草层	枯落物层	土层厚度/cm	土壤层				
	最大截留量/mm	郁闭度	盖度/%	最大持水量/mm		水力传导度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	初始贮水量/mm	最大贮水量/mm	补给区初始贮水量/mm	补给区最大贮水量/mm
针叶纯林	0.6	0.8	0.4	3.2	95	7.0	52.4	97.8	8.4	9.8
阔叶纯林	0.2	0.9	0.7	4.4	90	7.0	42.7	55.5	13.6	18.0
针阔混交林	0.4	0.85	0.5	4.7	121	7.6	78.6	97.8	12.7	39.2
阔叶混交林	0.2	0.8	0.6	4.3	99	7.6	92.1	97.1	15.4	47.4
楠竹林	0.8	0.8	0.9	3.3	90	7.4	60.7	77.9	13.0	37.3
灌木林	1.9	0.9	0.3	8.1	103	8.5	142.4	145.8	22.6	69.6
荒草地	0.0	0.0	0.9		65	5.9	9.4	34.9	6.9	8.0

3.1.2 研究地区暴雨特征

按照气象部门对降雨强度等级的划分标准(日降雨量 50.1~100 mm/d 为暴雨),计算出每场降雨

$$Z_i = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad (2)$$

式中, Z_i 为方案的加权总分 ($i=1, 2, \dots, m$), W_j 为第 j 项评价指标的权重 ($j=1, 2, \dots, n$), P_j 为第 j 项评价指标的得分值, n 为评价指标的数量, m 为方案的数量。

2.7 流域森林群落优化配置情景及其理水调洪功能

根据不同森林群落理水调洪功能评价结果,提出四面山响水流域森林群落分布格局的优化配置情景,利用构建好的 PRMS-Storm 模拟各配置情景的洪水过程,并进行理水调洪功能评价。

3 结果与分析

3.1 模型拟合和验证

3.1.1 各森林群落主要土壤、植被参数

PRMS-Storm 所需各典型森林群落的主要土壤、植被参数见表 3,主要有林冠层的截留量、郁闭度,灌草层的覆盖度,枯落物层持水能力,土壤层的入渗以及贮水能力。这些参数反映了森林群落的水文特征。

的平均雨强(mm/h),然后将其雨强单位换算为 mm/d 。共观测到了 2003—2004 年的 6 场暴雨数据,主要特征见表 4。

表 4 降雨特征值表

编号	降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/h	15 min 雨峰/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	平均雨强/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1#	2003-04-13-04-15	46.17	18.75	0.493	0.041
2#	2003-07-03-07-05	92.98	27.50	1.413	0.056
3#	2003-07-18-07-20	84.37	24.25	1.320	0.056
4#	2004-04-06-04-09	85.16	30.75	1.707	0.046
5#	2004-04-23-04-25	81.28	12.00	0.847	0.113
6#	2004-05-29-06-02	84.96	27.25	0.373	0.051

由表4可知,本地区暴雨多为大于12h的长历时降雨,暴雨量多在80mm以上,连续降雨量最大可达93mm,降雨峰值 $>0.373\text{ mm/min}$,最大可达 1.707 mm/min ,平均雨强在 0.041 mm/min 以上,最大可达 0.113 mm/min .

3.1.3 PRMS-Storm 拟合和验证

采用1#降雨洪水数据进行模型拟合,同时采

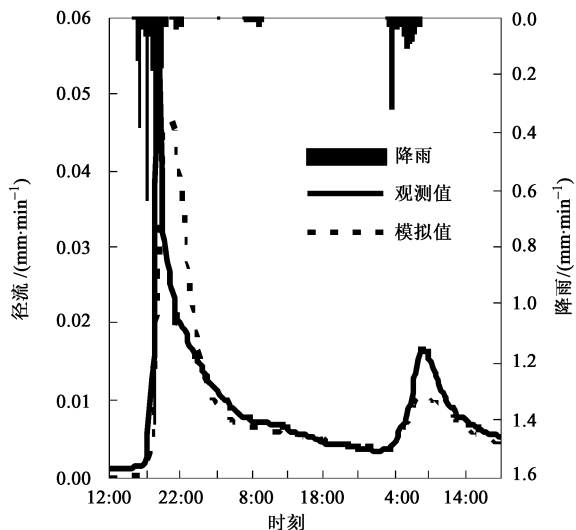


图5 2#降雨产流过程模拟

FIGURE 5 2# simulated precipitation runoff curve

用Rosenbrock^[24]方法使绝对误差最小来对模型的土壤参数进行优化,以提高模拟精度.采用其余5场暴雨数据进行模型验证,采用确定性系数E和相关系数R对模拟效果进行检验.模拟和验证结果见表5.图5和图6分别为2#和3#暴雨洪水过程模拟效果图.

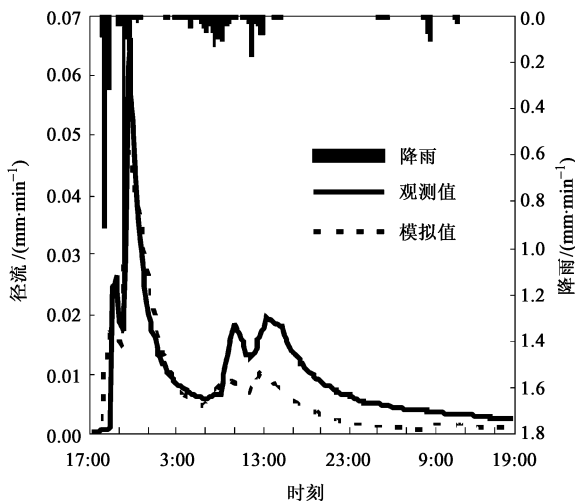


图6 3#降雨产流过程模拟

FIGURE 6 3# simulated precipitation runoff curve

表5 PRMS-Storm 拟合和验证

TABLE 5 PRMS-Storm model for calibration and validation

编号	观测值		模拟值		确定系数 <i>E</i>	相关系数 <i>R</i>	流量误差/ %	峰值误差/ %	峰现时差/ min
	流量/ mm	峰值/ (mm·min ⁻¹)	流量/ mm	峰值/ (mm·min ⁻¹)					
1# (用于拟合)	14.141	0.014	13.787	0.013	0.827	0.917	2.5	10.1	165
2#	32.328	0.053	32.245	0.046	0.631	0.829	0.3	13.2	90
3#	30.072	0.056	24.544	0.048	0.744	0.900	18.4	14.3	0
4#	51.333	0.081	43.223	0.060	0.720	0.937	15.8	25.9(不合格)	15
5#	28.688	0.052	31.310	0.046	0.516	0.745	-9.1	11.5	15
6#	39.643	0.025	46.876	0.025	0.753	0.942	-18.2	0.0	15
合格率/%							100	80	100

由表5可知,各次洪水预报精度在0.5~0.8之间,平均洪水预报精度为0.7,实测值与模拟值相关系数达到0.88,流量误差和峰现时差都可达到国家预报标准,洪峰预报合格率达到80%.由表2可知,PRMS-Storm对四面山响水流域的洪水预报精度可以达到国家乙级预报标准,可以用于发布正式洪水预报.

3.2 各森林群落理水调洪功能评价

3.2.1 动态评价

选取重庆缙云山坡面研究区2002—2004年实测的11场暴雨(日降雨量 $>50\text{ mm}$),平均降雨量为 76.19 mm ,平均雨强为 0.66 mm/min ,平均降雨历时达16h(见表6).根据实测11场暴雨条件下的坡面径流和地下径流过程,以平均径流特征值作为动态

指标(见表6),对各森林群落的理水调洪功能进行动态评价.

由表6可知,在相同暴雨条件下,阔叶林坡面径流深最小,为 4.79 mm ,楠竹林坡面径流深最大,为 27.15 mm ,阔叶林具有明显的拦蓄降雨减少径流的作用,楠竹林减缓洪水能力最差.混交林和阔叶林的地下径流深,比其他土地利用类型大1个数量级,说明混交林和阔叶林调蓄洪水能力最强,能有效地将地表水转为地下水,补给枯水期流量和河川基流.楠竹林坡面径流峰值约为混交林和灌木林的2倍,为阔叶林的3倍,说明楠竹林削减洪峰作用最差,而阔叶林对洪峰削减作用最强.因此,阔叶林的理水调洪作用最优,楠竹林最差.

表6 不同森林群落 11 场降雨的坡面平均径流特征值

TABLE 6 Simulated average stormflow characteristics of 11 rain events under four forest community conditions

群落类型	坡面径流			地下径流			总径流径流深/mm
	径流深/mm	径流历时/h	最大峰值/(mm·min ⁻¹)	径流深/mm	径流历时/h	最大峰值/(mm·min ⁻¹)	
针阔混交林	10.14	19.77	0.093	44.96	74.7	0.131	55.1
常绿阔叶林	4.79	16.71	0.065	48.78	65.9	0.170	53.57
楠竹林	27.15	17.44	0.184	5.43	22.78	0.009	32.58
灌木林	7.48	16.8	0.08	4.91	11.48	0.039	12.39

3.2.2 静态评价

以四面山各森林群落林冠层、枯落物层和土壤层的水文特征值作为静态指标,通过建立层次结构

模型获取各指标权重,采用综合评分法计算响水溪流流域森林群落各项指标测定值及得分值(见表7)。

表7 响水溪流流域森林植被群落水文特征

TABLE 7 Hydrology-related characteristics of different forest communities in Xiangshuixi Watershed

主要林分	林冠最大截留量/mm	郁闭度/%	灌草层盖度/%	枯落物厚度/cm	枯落物最大持水量/mm	土壤贮水力/mm	土壤稳渗率/(mm·min ⁻¹)	土壤孔隙度/%	得分
荒草地	0.0	70	98	0.6	0.0	45.4	1.1	48.0	1.1
柳杉、楠竹	0.8	76	52	3.0	4.1	46.6	5.8	68.5	4.6
杉木	0.6	75	40	2.6	3.2	97.9	2.3	70.6	4.2
板栗	0.2	90	70	2.8	5.8	57.7	1.1	69.0	3.7
柳杉	0.9	76	30	4.0	3.4	34.9	3.5	40.1	2.6
石栎	0.2	79	55	3.5	6.0	97.1	4	72.2	5.4
杉木、马尾松、阔叶林	0.2	86	75	4.0	4.3	76.5	5.4	71.3	5.9
马尾松、阔叶林	0.2	85	75	3.0	4.3	52.7	4.6	65.2	4.4
尖杉	0.3	85	30	4.2	2.5	43.3	4.1	66.5	4.0
尖杉、马尾松、阔叶林	0.4	90	40	3.5	4.8	56.9	4.7	73.9	5.3
香樟	0.1	90	90	2.8	4.9	76.3	2.1	74.7	4.6
檫木	0.2	76	55	4.0	4.4	58.0	1.7	63.2	3.1
各指标权重	0.046	0.105	0.031	0.089	0.038	0.296	0.252	0.143	

在考虑各森林群落海拔分布情况下,其理水调洪功能表现为:杉木、马尾松、阔叶混交林>石栎林>尖杉、马尾松、阔叶林混交林>马尾松阔叶混交林>杉木林>尖杉林>柳杉林(海拔1000 m以上的范围内);杉木、马尾松、阔叶混交林>板栗林>檫木林>荒草地(海拔1000 m以下范围内)。即杉木、马尾松阔叶混交林理水调洪功能最优。

综合动态评价与静态评价结果,筛选出常绿阔叶林和针阔混交林为高效理水调洪森林群落。

3.3 流域森林群落优化配置情景及其理水调洪功能

3.3.1 流域森林群落优化配置情景

根据四面山响水溪流流域的坡度、海拔,结合现有植被分布,将筛选出的高效理水调洪森林群落进行了流域空间配置,提出3种森林群落的优化配置情景,配置情景1为针阔混交林型,配置情景2为阔叶混交林型,配置情景3为综合配置型(见表8、9)。

配置情景1将非针阔混交林群落全部配置为马尾松、杉木和阔叶树的针阔混交林;配置情景2将原非阔叶混交林群落全部配置为常绿阔叶混交林;配置情景3考虑坡度和海拔条件,将荒草地改造为灌木林,将原针叶纯林配置为针阔混交林,原阔叶纯林

和楠竹林配置为阔叶混交林。

表8 四面山流域森林群落配置变化

TABLE 8 Forest community changes under different scenarios in the Simian Mountain

现状	情景1 (针阔混交型)	情景2 (阔叶混交型)	情景3 (综合配置型)
针叶纯林	针阔混交林	阔叶混交林	针阔混交林
阔叶纯林	针阔混交林	阔叶混交林	阔叶混交林
针阔混交林	针阔混交林	阔叶混交林	针阔混交林
阔叶混交林	针阔混交林	阔叶混交林	阔叶混交林
楠竹林	针阔混交林	阔叶混交林	阔叶混交林
灌木林	针阔混交林	阔叶混交林	灌木林
荒草地	针阔混交林	阔叶混交林	灌木林

3.3.2 各配置情景理水调洪功能评价

采用构建好的 PRMS-Storm,对响水溪流流域3种优化森林群落配置情景进行暴雨产流过程预测,6场暴雨条件下的预测径流特征值见表10、11。

由表3、10可知,从洪峰削减作用来看,各配置情景对于最大降雨峰值<0.5 mm/min的降雨过程的洪峰削减作用不明显,而对于>0.8 mm/min的降雨过程削减洪峰作用明显,即相比流域植被现状,除1#和6#暴雨径流过程外,各配置情景对洪峰都有明显的削减作用,情景1可削减9%~31%,情景2

削减3%~25%,情景3削减9%~31%。各配置情景对于短历时降雨洪峰削减作用明显,以5#暴雨产流过程为例(见图7),其雨峰只有0.847 mm/min,但降雨历时较短只有12 h,平均雨强较大,在这场暴雨条件下,相比流域植被现状,对于径流第1峰值,情景1可削减原洪峰的30%、情景2削减18%、情

景3削减28%,并且各配置情景下,第1峰值出现时间滞后了3 h 15min;对于第2峰值,情景1可削减原洪峰的22%,情景2削减3%,情景3削减19%。第2峰值出现时间滞后了30 min,即各配置情景都有较强的理水调洪功能,而情景1和情景3要好于情景2。

表9 四面山流域森林群落配置情形

TABLE 9 Scenarios of forest community arrangement patterns in the Simian Mountain

坡度/(°)	海拔/m	情景1 (针阔混交型)	情景2 (阔叶混交型)	情景3 (综合配置型)
30~40	1 000~1 100			针阔混交林
	1 100~1 200			阔叶混交林
	1 200~1 400			阔叶混交林
	1 000~1 100			针阔混交林
40~45	1 100~1 200	针阔混交林	阔叶混交林	针阔混交林
	1 200~1 400			阔叶混交林
	1 000~1 100			灌木林
45~50	1 100~1 200			灌木林
	1 200~1 400			灌木林

从各配置情景下的径流成分变化可以看出(见表11),在各暴雨条件下,相比现有植被情况,情景1使地表径流降低2%~38%,壤中流增加12%~41%;情景2使地表径流减少5%~41%,壤中流增加57%~685%;情景3可使地表径流减少3%~39%,壤中流增加20%~106%;各配置情景下基流基本不变。因此,各配置情景都对缓解洪水有积极作用。以5#暴雨条件下的情景1为例(见图8),相比现有植被状况,地表径流比例由原来的51%降低到37%,壤中流由原来的44%增加到58%,基流基本没有变化,同时地表径流峰值降低了45%,即说明

配置情景1可以有效地将地表径流转化为壤中流,并减少地表径流峰值,这对于缓解洪水非常有利。

从总产流量来看,各暴雨条件下,相比现有植被情况,情景1除1#和6#暴雨条件下的总产流量略有增加,其余暴雨条件下,总产流量减少3%~18%;在情景2下,洪水总量增加9%~70%,但是,由径流成分分析可知,增加的洪水总量主要来自于壤中流量;在情景3下,1#和6#暴雨条件下,总产流量增加22%和11%,其余暴雨条件下,总产流量减少3%~8%。说明对于雨峰越大的暴雨,削减洪水总量作用越明显。

表10 3种配置情景下的流域洪峰

TABLE 10 Peak flows under different scenarios in Xiangshuixi Watershed

编号	洪峰/(mm·min ⁻¹)				洪峰削减比例/%		
	现状	情景1	情景2	情景3	情景1	情景2	情景3
1#	0.013	0.012	0.017	0.014	8.5	-25.8	-3.1
2#	0.046	0.042	0.045	0.042	9.0	2.6	9.2
3#	0.048	0.033	0.036	0.033	30.5	24.7	31.3
4#	0.060	0.044	0.050	0.045	26.3	16.9	24.9
5#	0.046	0.032	0.038	0.033	30.1	18.0	27.6
6#	0.025	0.025	0.030	0.026	-0.1	-20.6	-5.1

表11 3种配置情景下的产流特征值

TABLE 11 Evaluation on runoff under different scenarios in Xiangshuixi Watershed

	平均径流量/mm				径流成分分割比例			平均径流峰值/ (mm·min ⁻¹)	削减比例/%	
	地表径流	壤中流	基流	产流量	地表径流	壤中流	基流		峰值	产流量
现状	15.88	12.80	3.31	32.00	0.50	0.40	0.10	0.040		
情景1	12.57	14.85	3.11	30.54	0.41	0.49	0.10	0.031	20.80	4.60
情景2	12.13	24.10	3.72	39.95	0.30	0.60	0.10	0.036	9.60	-24.80
情景3	12.38	16.69	3.43	32.51	0.38	0.51	0.11	0.032	18.90	-1.60

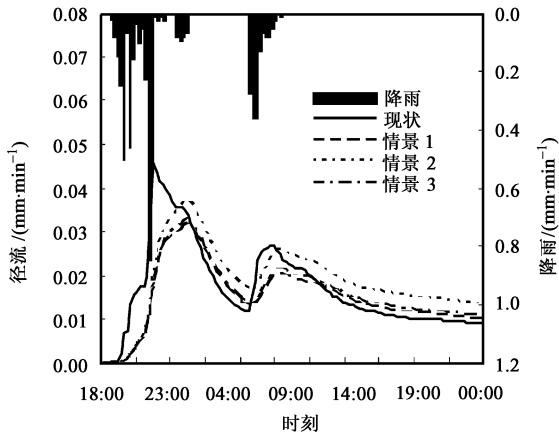


图7 5#降雨不同森林群落产流过程

FIGURE 7 5# peak flow curve under different scenarios

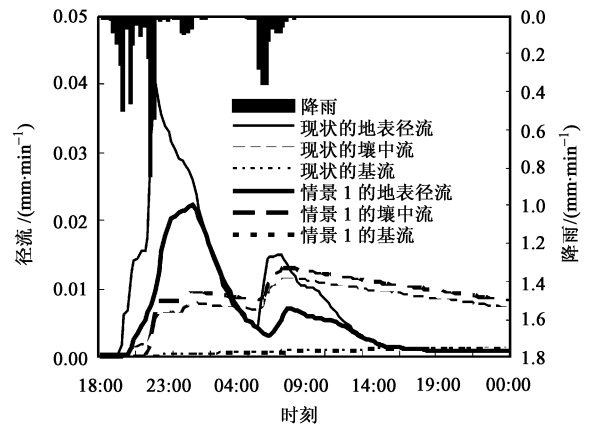


图8 5#降雨径流成分分割

FIGURE 8 5# runoff components under different scenarios

综合表 10、11 可知,在各配置情景下,地表径流量可减少 20% 以上,壤中流可增加 16%、88% 和 30%,基流变化不大;常绿阔叶林型(情景 2)使总的产流量增加了 25%;情景 1 和情景 3 变化不大.从径流分割比例上来说,各情景配置都增强了森林的理水调洪性能,使地表径流由 50% 减少到 30%~40%,壤中流比例增加 10%~20%,基流比例基本没有变化.从消减洪水总量来说,针阔混交林型(情景 1)效果最好,阔叶混交林型(情景 2)较差.从削减洪峰作用来说,针阔混交林型(情景 1)预测洪峰相比原径流平均削减 20.8%;阔叶混交林型(情景 2)平均削减 9.6%;综合配置型(情景 3)平均削减 18.9%.

因此,针阔混交林型的理水调洪作用最优,其次是综合配置型,阔叶混交林型较差.针阔混交林型是最优的群落配置类型.

4 结论与讨论

1)基于 MMS 平台所构建的三峡库区流域分布式暴雨水文模型 PRMS-Storm 用来模拟森林流域暴雨产流过程具有较高的精度要求,确定性系数 E 和相关系数 R 分别为 0.698 和 0.878,能满足国家乙级洪水预报标准,可用来发布洪水预报.

2)根据森林群落水文功能评价结果,提出了森林流域 3 种群落配置情景:针阔混交林型(情景 1),阔叶混交林型(情景 2),针阔混交林、常绿阔叶林和灌木林综合配置型(情景 3).

3)利用构建的 PRMS-Storm 对各配置情景下的流域产流过程预测表明,对于最大降雨峰值 $<0.5 \text{ mm/min}$ 的降雨过程洪峰削减作用不明显,而对于 $>0.8 \text{ mm/min}$ 的降雨过程削减洪峰作用明显,尤其是对于短历时降雨洪峰削减作用更明显.

4)各配置情景的理水调洪作用突出表现在对径流成分分割和对洪峰的削减上,3 种配置情景可使地表径流量分别减少 21%、23% 和 22%,壤中流增加 16%、88% 和 30%.针阔混交林型是预测洪峰值相比流域现状平均可削减 20.8%,阔叶混交林型平均可削减 9.6%,综合配置平均削减 18.9%.从洪水总量来说,阔叶林混交林型(情景 2)使总的产流量增加了 25%,针阔混交林型和综合配置型基本无变化.

因此,针阔混交林型理水调洪作用最优,其次是综合配置型,阔叶混交林型较差.即,针阔混交林型最优的理水调洪配置情景,但是,从所研究的响水河流域实际情况出发,综合配置更符合实际,是最佳理水调洪型群落配置.这为三峡库区理水调洪型植被建设提供一定的参考依据,在进行植被建设中优先考虑营造针阔混交林型,根据流域实际情况对针阔混交林、阔叶混交林和灌木林进行综合配置,发挥森林的理水调洪作用.

参考文献

- [1] ANDREASSIAN V. Water and forests: From historical controversy to scientific debate[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1-2): 1-27.
- [2] LULL H W, REINHART K G. Forests and floods in the Eastern United States Res. Pap., NE-226 [R]. Upper Darby, PA: Northeast Forest Experiment Station, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, 1972: 94.
- [3] ZIEMER R R. The role of vegetation in the stability of forested slopes: proceedings of the International Forestry Research Organizations, XVII World Congress. Volume 1 [C]. Kyoto: International Forestry Research Organization, 1981: 297-308.
- [4] HEWLETT J D. *Principles of forest hydrology* [M]. Athens: The University of Georgia Press, 1982.
- [5] VERTESSY R A, DYE P G. Effects of forest cover on catchment water balances and runoff dynamics; XXI IUFRO World Congress:

- Forests and society: The role of research [C]. Kuala Lumpur: IUFRO, 2000.
- [6] 李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾和展望[J]. 自然资源学报, 2001, 11(5): 390-406.
LI W H, HE Y T, YANG L W. A summary and perspective of forest vegetation impacts on water yield [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 11(5): 390-406.
- [7] 中野秀章. 森林水文学[M]. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1983.
NAKANO H. *Forest hydrology* [M]. LI Y S, Tran. Beijing: China Forestry Publishing House, 1983.
- [8] CHANG M. *Forest hydrology: An introduction to water and forest* [M]. New York: CRC Press, 2002.
- [9] DEWALLE D R. Forest hydrology revisited [J]. *Hydrology Processing*, 2003, 17: 1 255-1 256.
- [10] BEVEN K J. *Rainfall-runoff modelling: The primer* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- [11] LEGESS D, COULOMB C, GASSE F. Hydrological response of a catchment to climate and land use change in tropical Africa: Case study of South Central Ethiopia [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 275(1-2): 67-85.
- [12] ANDERSEN J, REFGARRD J C, JENSEN K H. Distributed hydrological modeling of the Senegal River Basin-model construction and validation [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(3-4): 200-214.
- [13] BINLEY A M, BEVEN K J, CALVER A, et al. Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions [J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(6): 1 253-1 261.
- [14] BARLAGE M J, RICHARDS P L, SOUSOUNIS P J, et al. Impacts of climate change and land use change on runoff from a Great Lakes Watershed [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2002, 28(4): 568-582.
- [15] CALDER I R. Hydrologic effects of land use change [M]// MAIDMENT D R. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [16] LEAVESLEY G H. Modeling the effects of climate change on water resources - A review [J]. *Climate Change*, 1994, 28: 159-177.
- [17] LEAVESLEY G H, MARKSTROM S L, RESTREPO P J, et al. A modular approach to addressing models design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modeling [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(2): 173-187.
- [18] MAZI K, KOUSSIS A D, RESTREPO P J, et al. A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimization method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 290(3-4): 243-258.
- [19] QI S, SUN G, MCNULTY S, et al. Modeling the climate change and climate change sensitivity on water yield in a coast watershed of North Carolina [C]//HU C H, TAN Y. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 2 437-2 441.
- [20] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
LIU S R, WEN Y G, WANG B, et al. *Ecological functions of forest ecosystems in China* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996.
- [21] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
MA X H. *Forest hydrology* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993.
- [22] 李昌哲, 郭卫东. 森林植被的水文效应[J]. 生态学杂志, 1986, 5(5): 17-21.
LI C Z, GUO W D. Hydrological effects of forest vegetation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1986, 5(5): 17-21.
- [23] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models (I): A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.
- [24] RSOENBROCK H H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function [J]. *The Computer Journal*, 1960, 3: 175-184.

(责任编辑 冯秀兰)