

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)5 - 561 - 05

西南山地森林变化对洪水频率影响的模拟

程根伟¹, 石培礼², 田雨¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 森林砍伐和恢复改变了流域洪水形成条件, 将影响河流洪水的总量与洪峰形态, 但是选择合适的技术来进行准确的分析评价仍然是个难题。采用流域分布式水文数学模型 (SWAT) 对四川梭磨河径流过程进行模拟, 得到不同森林覆被率的洪水过程和洪峰的频率分布。针对各种森林情境下的洪水过程模拟, 发现对于中小尺度流域, 良好的森林覆被可以减小洪水大小 30% ~ 40%, 而且其中森林覆被率在 35% ~ 40% 之内具有最显著的滞蓄洪效益, 它与完全的森林覆被对在洪水的影响差异仅在 5% 以内, 这对于我国西南生态保护与恢复工程的实施决策具有重要参考价值。

关键词: 森林水文; 洪水频率; 影响评价

中图分类号: P343

文献标识码: A

森林砍伐和人工造林是一种强烈的流域改造活动, 极大地改变了地表覆盖条件, 并可导致一系列的环境影响, 其中河川径流变化有重要的生态和社会意义。伐木改变了径流的形成条件, 导致年径流量、洪水总量、洪水形态和枯水量的变化, 他们又可能引起其他环境问题, 如泥沙淤积、河岸冲刷、山洪危害以及水质恶化等等, 在这些方面已有较多的研究成果^[1-4]。由于各类研究所涉及的流域位置、大小、气候类型、立地条件、砍伐方式及资料条件等具体情况不一样, 分析的结果很不统一, 甚至还会出现相互矛盾的结论^[5], 因此森林水文效应评价中存在不少疑难问题, 有关研究仍很活跃, 其中森林对洪水特性的影响最受关注, 其反映了森林系统拦蓄洪水的作用和减灾效益。有不少学者运用流域水文数学模型可以对洪水的形成进行模拟, 得到不同森林条件下的洪水量级变化^[6-8], 可弥补原型流域实际观测对比资料的不足。本文采用数学模型方法对西南典型山区流域的洪水过程进行模拟计算, 并分析不同森林植被条件下洪水的频率变化特点, 探索受到植被覆被影响的洪水统计规律。

研究流域为位于四川西北部的梭磨河流域 (图 1), 这是长江上游大渡河的一条支流, 发源于四川省红原县壤口乡文部沟, 全长 182.5 km, 马尔康水文站以上集水面积为 2 536 km²。流域属于高山峡谷地区, 海拔范围变化在 2 700 ~ 5 300 m, 流域平均坡度为 20.6°。从 1999 - 04 的 Landsat TM 影像上获得流域土地覆被现状信息。从该期遥感影像上解译出的梭磨河流域的土地覆被结构为: 有林地 12%、灌木林地 11%、疏林地 8%、草地 67%、其他 (包括居民点、耕地、水域和未利用地) 占 2%。

1 森林植被的拦蓄洪作用

森林的拦蓄洪作用是林冠层、枯落物层和土壤层滞蓄水能力的总和, 是森林生态系统的重要水文功能。根据我们对四川西部山区各种森林类型综合持水能力的研究^[9], 森林的拦蓄洪水作用主要是其中的土壤、凋落物和林冠层所产生的, 可以归结为森林的涵养水源功能。特别是森林区疏松多孔的土壤起到了最主要的拦蓄洪作用, 野外观测结果如图 2。

收稿日期 (Received date): 2011 - 05 - 15。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (31070405) 资助。 [National Nature Science Foundation of China; 31070405.]

作者简介 (Biography): 程根伟, 男, 博士, 研究员, 主要从事水文学与生态环境研究。 [Cheng Genwei (1956 -), male, research professor, engaged in the research on hydrology and ecology.] E-mail: gwcheng@imde.ac.cn

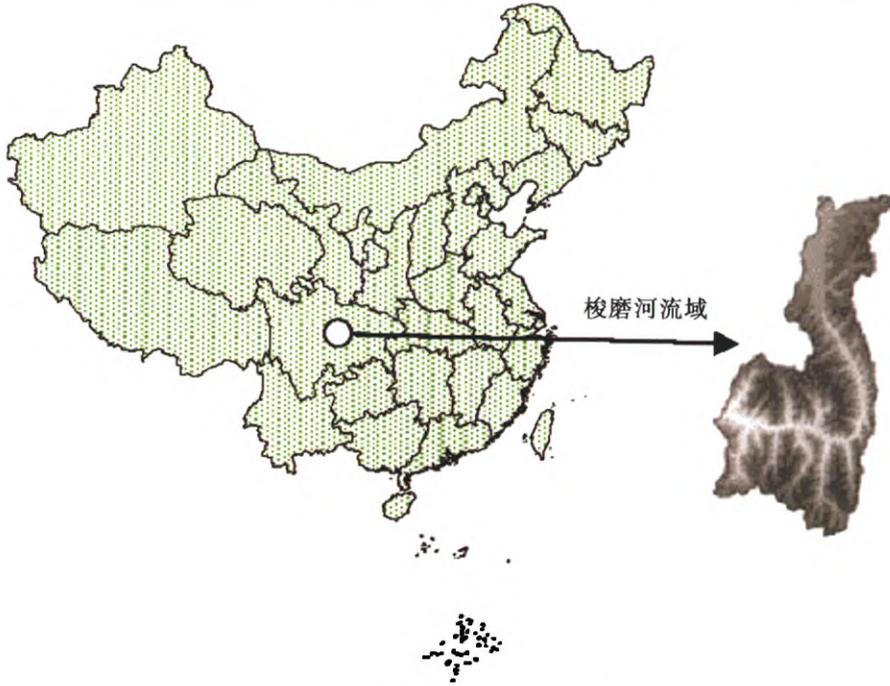
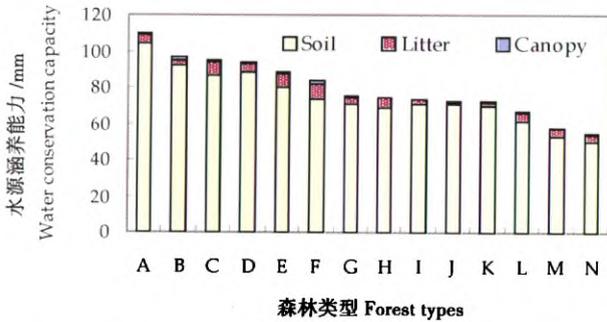


图1 梭磨河流域地理位置

Fig. 1 The location of the Suomo watershed



- A. 亚热带常绿阔叶林; B. 亚热带常绿落叶阔叶林; C. 冷杉林;
- D. 硬叶常绿阔叶林; E. 铁杉、槭、桦林; F. 云杉林; G. 温带落叶
- 栎林; H. 山地杨桦林; I. 亚热带落叶阔叶林; J. 竹林; K. 圆柏
- 林; L. 山地温带针叶林; M. 山地亚热带暖性针叶林; N. 红杉林

图2 长江上游主要森林植被类型的综合水源涵养能力比较

Fig. 2 Comparison of water conservation of typical forest types in upper Yangtze river

野外调查得到的川西山地各种森林植被综合持水能力为:亚热带常绿阔叶林(110.11 mm) > 亚热带常绿落叶阔叶林(96.33 mm) > 冷杉林(95.30 mm) > 常绿硬叶高山栎林(94.24 mm) > 铁杉、槭、桦林(88.84 mm) > 云杉林(83.69 mm) > 温

带落叶栎林(75.30 mm) > 山地杨桦林(74.56 mm) > 亚热带落叶阔叶林(73.90 mm) > 竹林(72.56 mm) > 圆柏林(72.36 mm) > 温带针叶林(66.86 mm) > 亚热带针叶林(57.94 mm) > 红杉林(54.61 mm)。川西山区各种森林的综合持水能力平均值为 79.76 mm, 变化幅度为 54.6 ~ 110.1 mm。林地的枯枝落叶层的持水量与枯落物的现存量密切相关。对长江上游森林枯落物层持水量与枯落物层积累量的相关分析(图3),表明二者也有极显著的线性相关关系($p < 0.001$)。

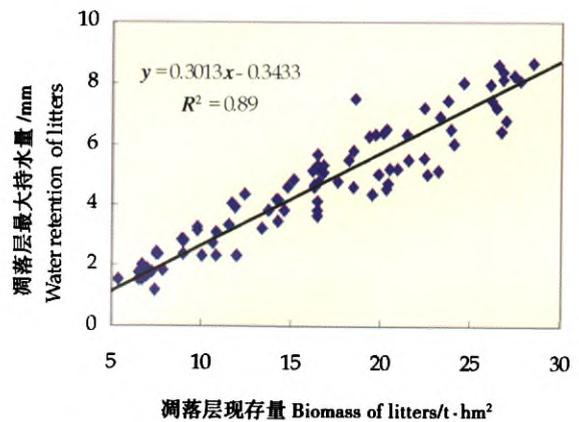


图3 凋落层最大持水量与厚度的关系

Fig. 3 Relationship between litterfall and its water capacity

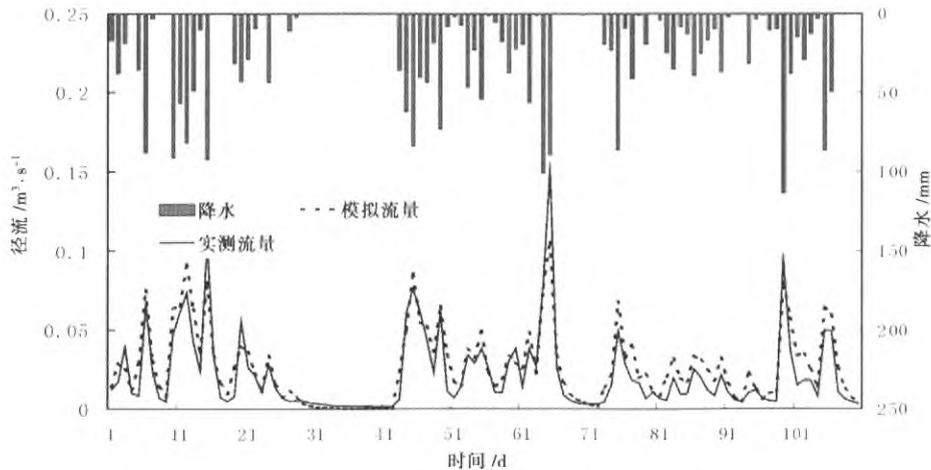


图4 梭磨河观测和模拟径流过程对比(1981)

Fig.4 Comparison of observed and simulated hydrographs for Suomo river (1981)

3 森林变化对洪水频率的影响

洪水频率的研究涉及到多次洪水的统计特征,需要借助于流域水文模型,我们采用了国际上有影响的分式水文模型 SWAT 进行分析^[6]。SWAT 模型中计算的地表径流的方法采用的是美国农业部水土保持局 SCS 模型的方法,该模型引入了反映降水前流域特征的无因次参数 CN (Curve Number, 曲线号码),在总结美国众多不同土地利用类型和土壤类型的小流域降雨-径流关系的基础上得到了降水-径流的经验方程,由于该经验模型在降雨-径流关系上考虑了土地覆被、土壤、坡度等下垫面因素,将径流与流域的土地覆被直接联系起来,因而被用于评估未来土地覆被变化对流域降水-径流关系的可能影响。

根据梭磨河流域的数字高程模型 (DEM),把整个流域划分成了 47 个子流域,模型模拟时需要计算各个子流域的参数,特别是根据土地覆被状况计算子流域的最大冠层截留量 C_{max} 以及根据土地覆被、土壤状况和子流域的坡度计算各个子流域的 CN 值。这里利用 1980—1984 年共 5 a 的实测资料对 SWAT 模型进行了率定并确定了模型的参数。之后,根据率定好的 SWAT 模型模拟了梭磨河流域 1960—2000 年共 40 a 的降水-径流关系,模拟效果较好,确定性系数除了有 7 a 低于 0.7 以外,其余年份都在 0.7 以上。对 1981 年模拟的径流过程与观测过程的对比结果见图 4。

分别根据流域实际情况和未来的变化可能预

测,建立了 4 种土地覆被情景,即理论上的流域无植被和流域全部为林地覆被两种情景,以及介于这两种情况之间的未来可能达到的植被覆盖,另一种是流域植被现状。参见下面情景:

- 情景 1 (S1): 流域地表全裸情况 (覆被率: 0%);
- 情景 2 (S2): 2000 年的现状植被覆盖 (覆被率: 22%);
- 情景 3 (S3): 未来可能的植被覆盖 (覆被率: 40%);
- 情景 4 (S4): 流域地表全部为林地 (覆被率: 90%)。

4 模拟结果

根据这样的假设,再计算各子流域的 CN 值与最大冠层截留量 C_{max} 。运用率定好的 SWAT 模型,分别模拟这 4 种情景下的流域降水-径流关系,以及各次洪水的洪峰流量大小,得到不同情境下的洪峰系列。

从 4 种土地覆被情景模拟的逐日流量中,挑出每年的最大值,进行洪水频率分析,得到各种情境下的河流洪水频率分布曲线 (图 5)。随着土地覆被状况的下降,洪水频率增加,相同的重现期,洪峰流量增加。以 40 a 一遇的洪水为例, S1 下,洪峰流量为 $464.8 \text{ m}^3/\text{s}$; S2 下,洪峰流量为 $370.7 \text{ m}^3/\text{s}$; S3 下,洪峰流量为 $337 \text{ m}^3/\text{s}$; S4 下,洪峰流量为 $320 \text{ m}^3/\text{s}$ 。相同的洪峰流量,重现期减小。以 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右的洪峰流量为例,在 S1 下,重现期为 1 a; S2 下,重现

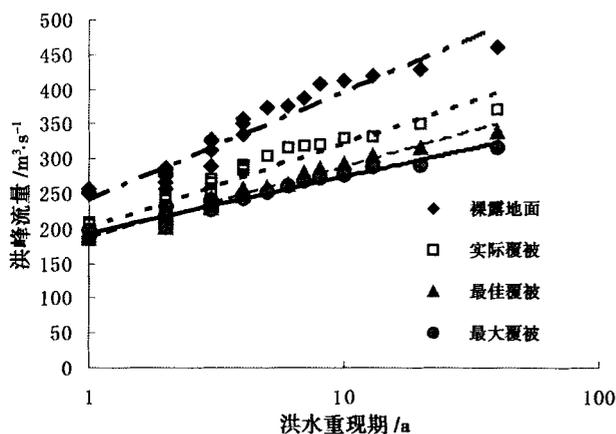


图5 流域不同森林覆被条件下的洪水频率分布曲线

Fig. 5 Flood frequency distributions for different forest coverage of Suomo watershed

期为3 a; S3下, 重现期为4 a; S4下, 重现期为5 a。

从图5还可以看出, 两种最极端的情景S4与S1比较, 相同重现期洪峰流量减小了31.2%。然而, S3与S4之间的差别微乎其微(仅减小了5%)。现状植被(S2)与最佳植被(S3)之间在较大洪水(20 a和40 a重现期)上的差别稍小(分别为6.8%和9%), 在较小洪水(10 a以下重现期)上的差别稍大(10.6%~19.3%)。

S3代表的是未来最佳的土地覆被情景, 也可以认为是代表过去森林未破坏时的情景。因此, 比较S2与S3之间大洪水的洪峰流量(以及总洪量)的差别, 也就是比较土地覆被破坏前后的大洪水的洪峰流量(以及总洪量)的差别。从这个意义上来讲, 土地覆被变化对大洪水的调节作用是有限的, 而对中小洪水调节作用稍大。

分析4种情景下的洪水重现期的变化, 流域全为有林地覆被的情景与全无植被的情景比较, 相同重现期洪峰流量减小了31.2%。全为有林地与未来最佳土地覆被的情景之间仅减小了5%。现状覆被与最佳覆被之间在较大洪水上的差别也不大, 在较小洪水上的差别稍大。

通过对不同植被条件下的削洪作用的研究, 发现森林对洪水的作用主要表现在滞洪和拦蓄两种机制上, 而这两种作用与森林的覆被率和发育成度有关, 从国内外小流域的研究结果表明, 森林植被对洪水的消减作用呈现对数型增长关系(图6)。即这种作用在植被增长的最初阶段作用最为明显, 当植被覆被率达到30%~40%, 这种作用可达到全部贡献的80%以上, 覆被率超过50%以上, 森林的拦蓄洪

作用提高就不太明显了。因此, 如果通过建设人工林带以发挥森林的拦蓄洪效益, 最佳的投入产出的森林植被率可以确定在35%~40%。

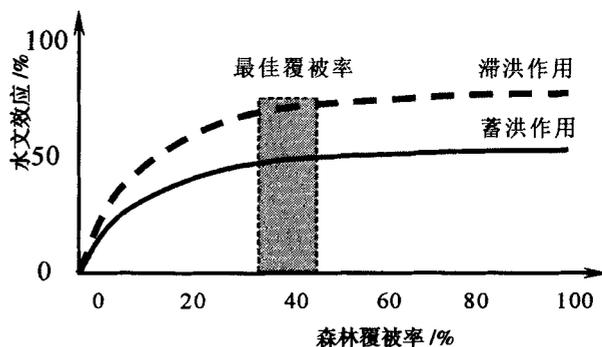


图6 森林覆被的滞蓄洪作用与最佳覆被率

Fig. 6 The flood detention-storage effects of forest ecosystem and the optimal forest coverage

5 结论

森林的拦蓄洪作用是林冠层、枯落物层和土壤层滞蓄水能力的总和, 是森林生态系统的重要水文功能, 特别是森林区疏松多孔的土壤起到了最主要的拦蓄洪作用。对于中小尺度流域(面积500~5000 km²), 良好的森林覆被可以减少同频率洪峰量级35%左右, 或者同样量级洪水出现的频率更低。特别是森林覆被率在30%~40%范围内具有最大的拦蓄洪水作用, 它与全流域森林覆被下(覆盖率100%)的洪水差异在5%以内, 因此一个流域的最佳森林覆被率可以设定在35%~40%, 它在较小的生态系统规模下具有最大的生态系统服务功能, 这对于我国西南生态保护与恢复工程的实施决策具有重要参考价值。

参考文献(References)

- [1] Conway D. Understanding the hydrological impacts of land-cover and land-use change[J]. IHDP Update, No 1, 2001
- [2] Calder I. Land use impacts on water resources[G]//Land - Water Linkages in Rural Watersheds. Electronic Workshop, 18 September - 27 October 2000, Background Paper No. 1. FAO, Rome
- [3] Cheng Genwei. An approach to the relationship between runoff characters and forest in the basin of Sichuan[J]. Acta conservation soli et aquae Sinica, 1991, 5(1): 48 - 52 [程根伟, 四川盆地河川径流特征与森林的关系探讨[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 48 - 52]
- [4] Cheng Genwei. The quantitative indexes of the ecological effects of protective forest system[J]. J. of Soil and water conservation, 1991, 6(3): 79 - 90 [程根伟, 钟祥浩, 防护林生态效益定量指标体系

- [J]. 水土保持学报,1991,6(3):79-90]
- [5] Cheng Genwei, Zhong Xianghao, He Yucheng. The reviews and recent progress in forest hydrology [J]. *Exploration of Nature*, 1996, 15(2):81-85 [程根伟,钟祥浩,何毓成. 森林水文研究中的悖论及最新认识[J]. 大自然探索,1996,15(2):81-85]
- [6] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1):73-89
- [7] Sun G, Riekerk H, Comerford N B. Modeling the Hydrologic Impacts of Forest Harvesting on Florida Flatwoods [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(4):843-854
- [8] Chen Junfeng, Li Xioubing. Simulation of hydrological response to land-cover changes [J]. *J. appl. Ecol*, 2004, 15(5):833-836 [陈军锋,李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. 应用生态学报,2004,15(5):833-836]
- [9] Shi Peili, Wu Bo, Cheng Genwei. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin [J]. *J. of Natural Resources*, 2004, 19(3):351-360 [石培礼,吴波,程根伟等,2004,长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报,2004,19(3):351-360]

Simulation of Forest Impacts to the Flood Frequency Characteristics of Mountainous River in South-western China

CHENG Genwei¹, SHI Peili², TIAN Yu¹

(1. *Institute of Mountain Hazards & Environment, CAS, Chengdu 610041, China;*

2. *Institute of Geography Science and Resources, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract: Forest logging or reforestation will significantly influence the generation condition of hydrographs. The flood peaks and total volume may change with the variation of forest coverage. But it is hard to select a proper method to evaluate this impact quantitatively. In the paper a distributed hydrological mathematical model (SWAT) is used to simulate the hydrographs of the Shuomo River, south-western China. The flood frequency curves are derived from the modeled flood events by this model. Based on the frequency analyses of flood events for different forest coverages, one can find that the reducing rate of flood peak is about 35% at the most advantaged forest condition. The main part of flood reducing effect is come down with forest ratio in 30% - 40%. It has only 5% difference in flood reducing effect comparing with the most possible forest coverage (100%). These results mean that the optimal forest ratio for south-western China is between 30% - 40%. This criterion can be application in the planning of ecological rehabilitation engineering.

Key words: forest change; flood features; impact evaluation

作者: [程根伟](#), [石培礼](#), [田雨](#), [CHENG Genwei](#), [SHI Peili](#), [TIAN Yu](#)
作者单位: [程根伟, 田雨, CHENG Genwei, TIAN Yu \(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都, 610041\)](#),
[石培礼, SHI Peili \(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101\)](#)
刊名: [山地学报](#) 
英文刊名: [Journal of Mountain Science](#)
年, 卷(期): 2011, 29(5)

参考文献(9条)

1. [Conway D Understanding the hydrological impacts of land-cover and land-use change](#) 2001(01)
2. [Calder I Land use impacts on water resources](#) 2000
3. [程根伟 四川盆地河川径流特征与森林的关系探讨](#) 1991(01)
4. [程根伟;钟祥浩 防护林生态效益定量指标体系](#) 1991(03)
5. [程根伟;钟祥浩;何毓成 森林水文研究中的悖论及最新认识](#) 1996(02)
6. [Arnold J G;Srinivasan R;Muttiah R S Large area hydrologic modeling and assessment,Part I:model development](#)[外文期刊] 1998(01)
7. [Sun G;Riekerk H;Comerford N B Modeling the Hydrologic Impacts of Forest Harvesting on Florida Flatwoods](#) 1998(04)
8. [陈军锋;李秀彬 土地覆被变化的水文响应模拟研究](#)[期刊论文]-[应用生态学报](#) 2004(05)
9. [石培礼;吴波;程根伟 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究](#)[期刊论文]-[自然资源学报](#) 2004(03)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdxb201105007.aspx